

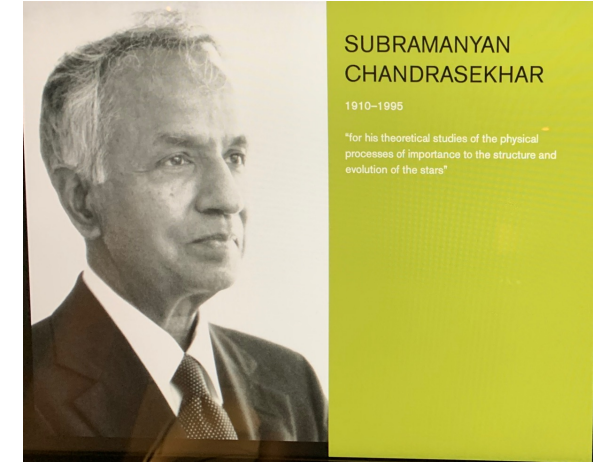
プラズマ温度分布の多様性を決める物理機構 ～チャンドラセカール賞の受賞に至った研究成果～

居田克巳
核融合科学研究所
自然科学研究機構

第31回 自然科学研究機構 川合 眞紀 機構長プレス懇談会
令和5年11月21日
自然科学研究機構事務局会議室

スブラマニアン・チャンドラセカール プラズマ物理学賞とは

チャンドラセカール賞 (Subramanyan Chandrasekhar Prize of Plasma Physics) は、ノーベル物理学賞を受賞したインド生まれのアメリカの天体物理学者であるスブラマニアン・チャンドラセカールの名を冠した、プラズマ物理学の顕著な進歩に貢献した研究者に贈る賞として、アジア・太平洋物理学会連合(AAPPS)プラズマ物理部門が2014年に設立。(ウィキペディア)



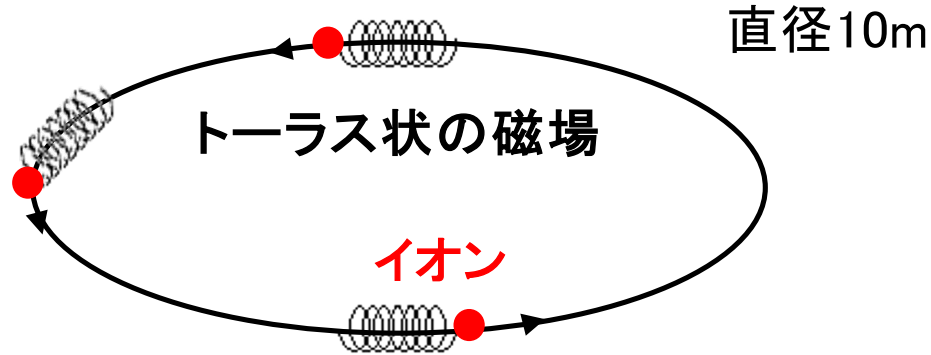
受賞理由:

乱流駆動流、Hモード状態の電場シア、磁気トポロジーと非局所性の輸送への影響など、磁場核融合プラズマの**様々な乱流状態の実験的発見**に対する先駆的な貢献に対して

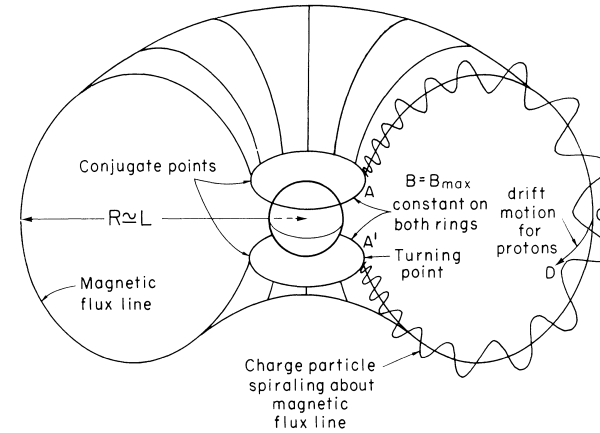
磁場核融合プラズマには様々な乱流状態が存在し、それがプラズマ温度分布の多様性を生み出していることを明らかにした。

磁場閉じ込めプラズマ

核融合装置のプラズマ

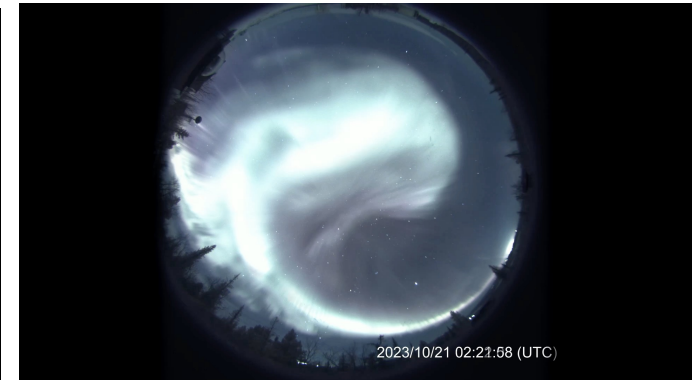
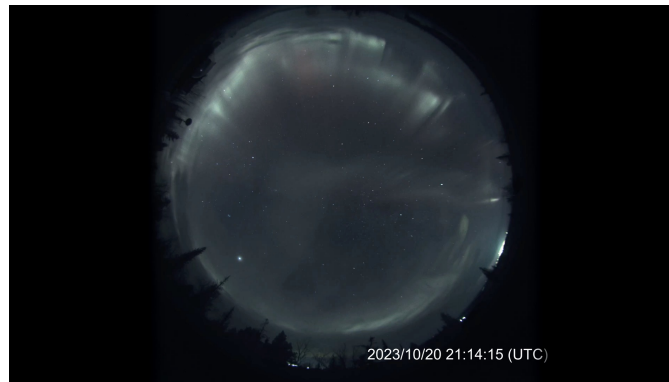
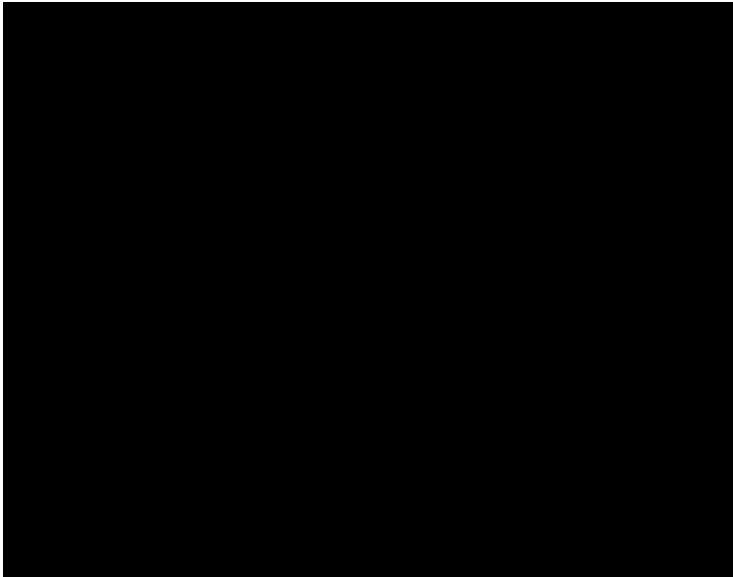


自然界の磁気圏プラズマ



地球半径の
10-100倍

類似性: 1) 磁場の形状: 共にトーラス形状
2) ダイナミックな変化と多様性



磁場閉じ込めプラズマと磁気圏プラズマ(オーロラ)の多様性

磁気圏プラズマ(オーロラ)

- タイプa: 上部が赤く見えるオーロラ
- タイプb: 下部が赤く見えるオーロラ
- タイプc: 緑が卓越しているオーロラ
- タイプd: 上部から下部に至るまで赤く見えるオーロラ
- タイプe: 下部が赤く見える動きがあるオーロラ
- タイプf: 紫または青が卓越した動きがあるオーロラ

色の分布とその動きで分類されている(1963年～)

磁場閉じ込めプラズマ

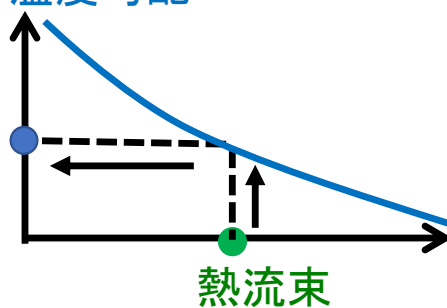
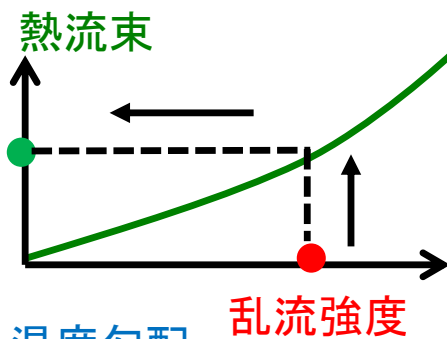
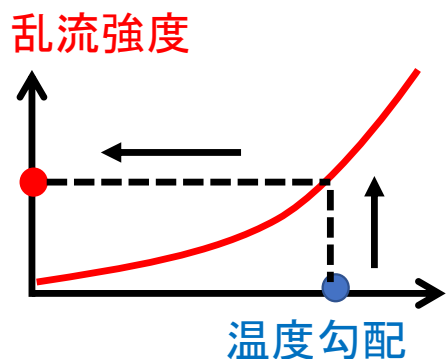
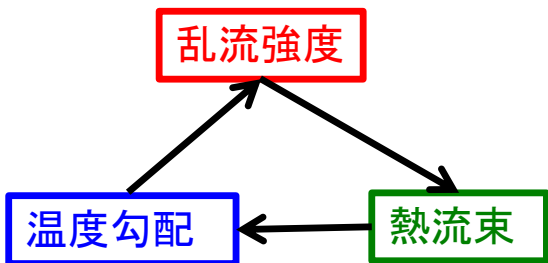
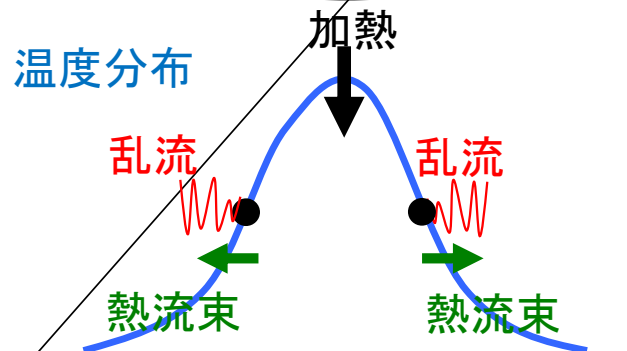
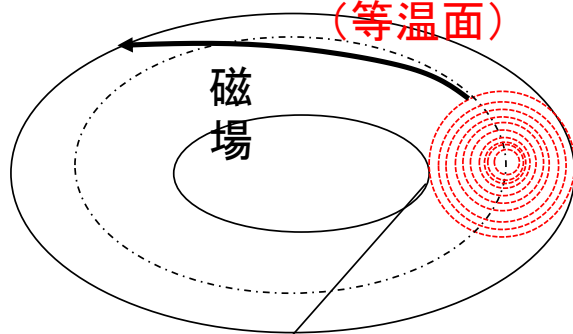
- Lモード: 全体的に温度が低いプラズマ
- Hモード: 周辺部の温度が**突然**高くなったプラズマ
- 電子輸送障壁モード: 中心部の電子温度が**突然**高くなったプラズマ
- イオン輸送障壁モード: 中心部のイオン温度が**突然**高くなったプラズマ

温度分布とその変化で分類されている(1990年～)

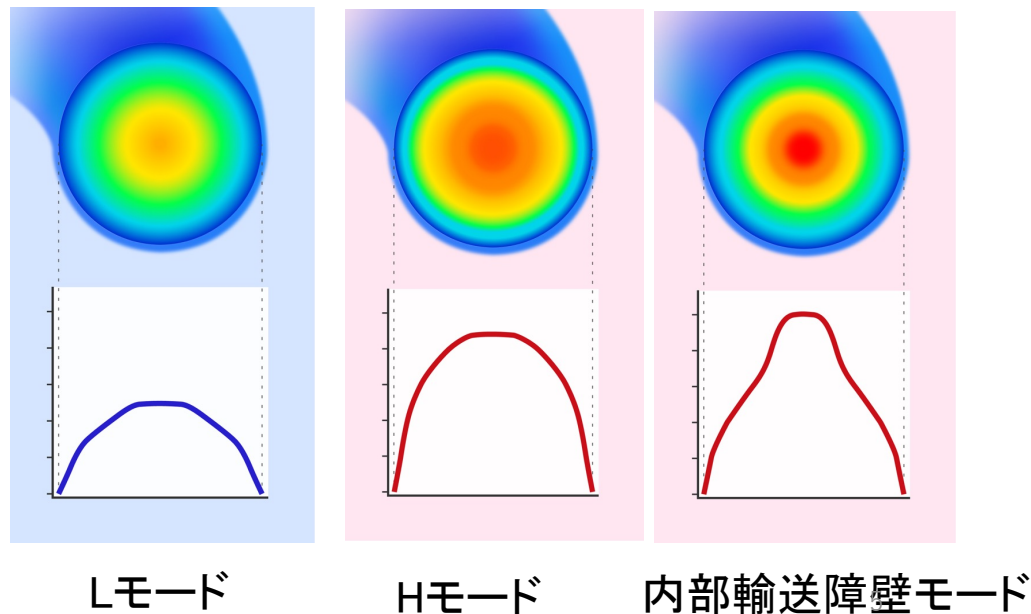
これらのプラズマにおいて多様性を決める物理機構は未解決問題

磁場閉じ込めプラズマの多様性とは？

トーラスプラズマ 磁気面 (等温面)



核融合研究における学術的な問い
 加熱がほぼ同じでも温度分布に多様性がある？ (モードという名前)
 この多様な温度分布を決めているものは何か？

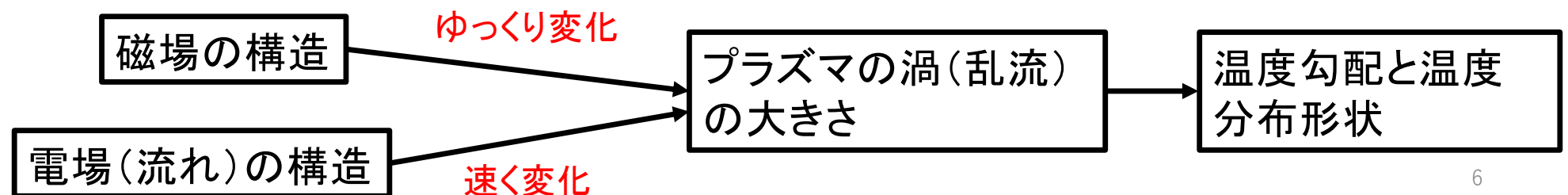


物理機構の候補

温度分布の多様性を決める物理機構として有力視されていたのが、**閉じ込め磁場**による乱流の違いであった。閉じ込め磁場を変化させて、温度分布がどのような形状になるかを調べる研究が、1950年代から行われてきた。

しかしながら、**閉じ込め磁場**の変化は遅く、突然起こる温度上昇を説明できない。

この速い温度上昇を説明する物理パラメータとして、**電場と流速**が多様性の原因として考えられるようになった。



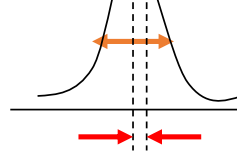
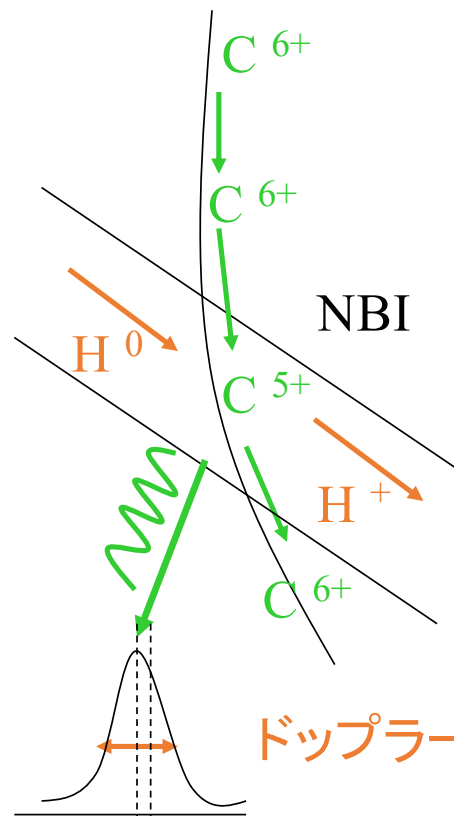
プラズマ流速の計測手法の開発

荷電交換分光法



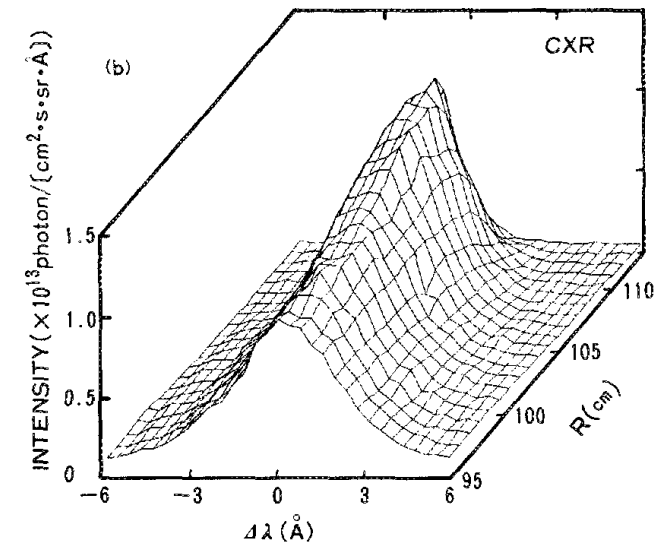
プリンストンプラズマ物理研究所のレイモンド・フォンク博士によって1982年に発明された。

核融合プラズマに中性粒子ビームを入射して、その荷電交換反応を利用し、プラズマのイオン温度と流速を計測する手法



ドップラー幅 $\Delta\lambda \rightarrow$ イオン温度

ドップラーシフト $d\lambda \rightarrow$ プラズマの流速



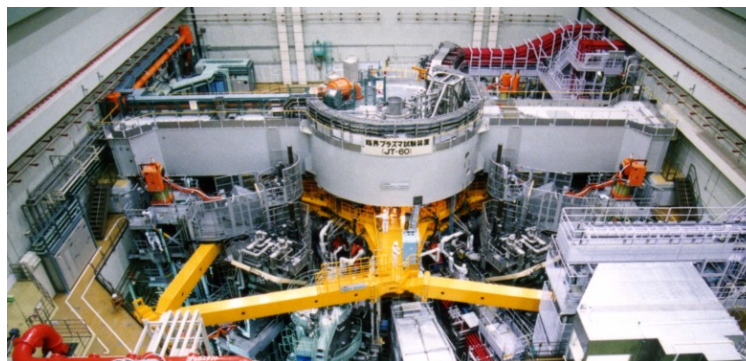
実験プラットフォーム(異なる磁場構造)

JFT-2M(旧原子力研究所)



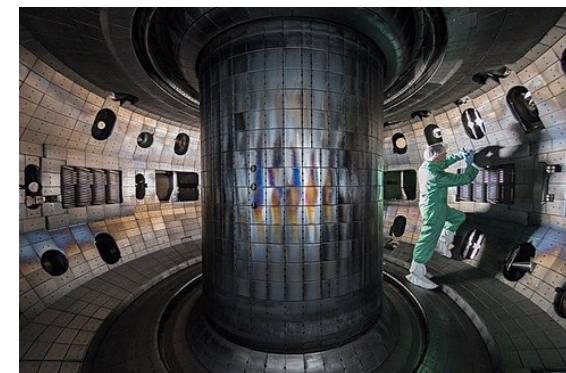
JT-60U

(量子科学技術研究開発機構)

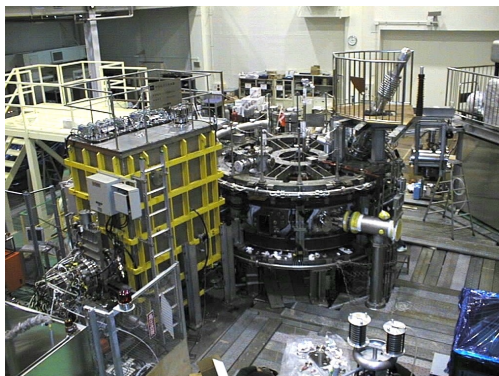


DIII-D

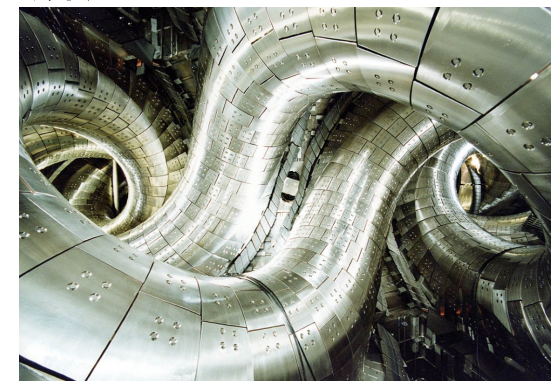
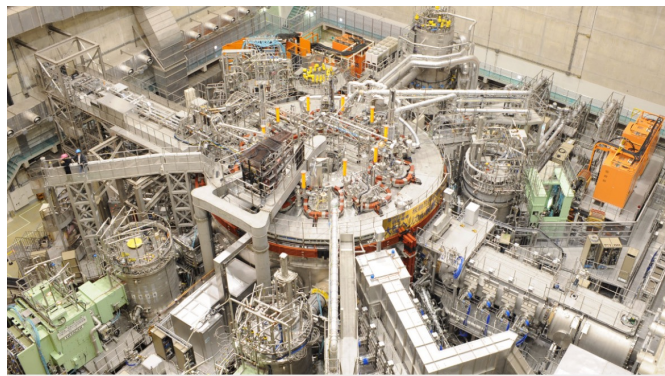
(ジェネラルアトムクス)



CHS(核融合科学研究所)



LHD(核融合科学研究所)

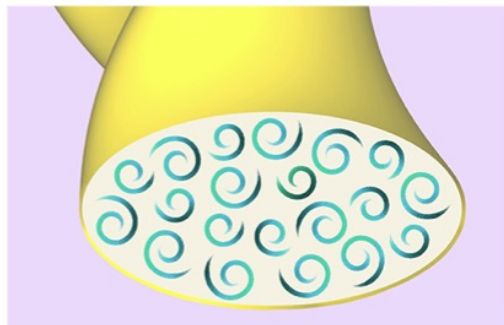
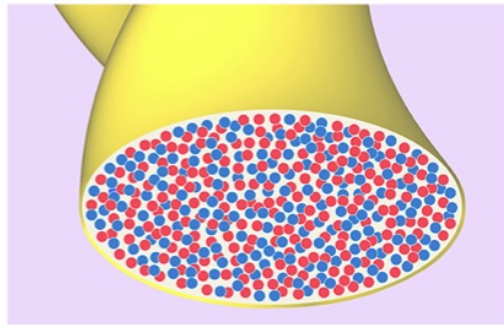


異なる磁場構造を持つ様々な実験装置でプラズマ流を計測

乱流によるプラズマのミキシング効果

同位体混合

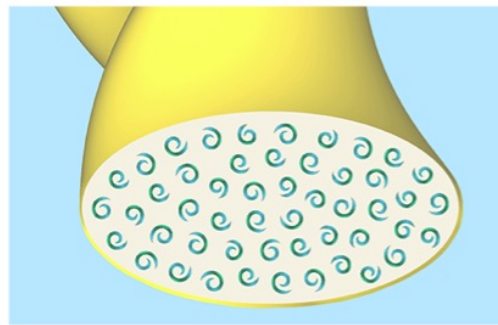
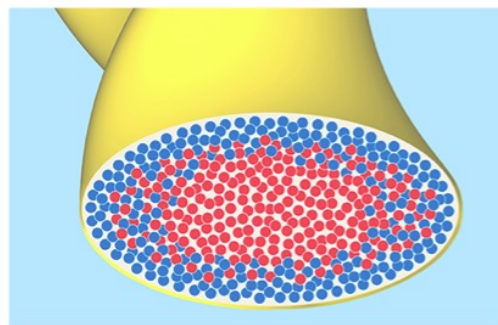
水素(赤)と重水素(青)が混ざる



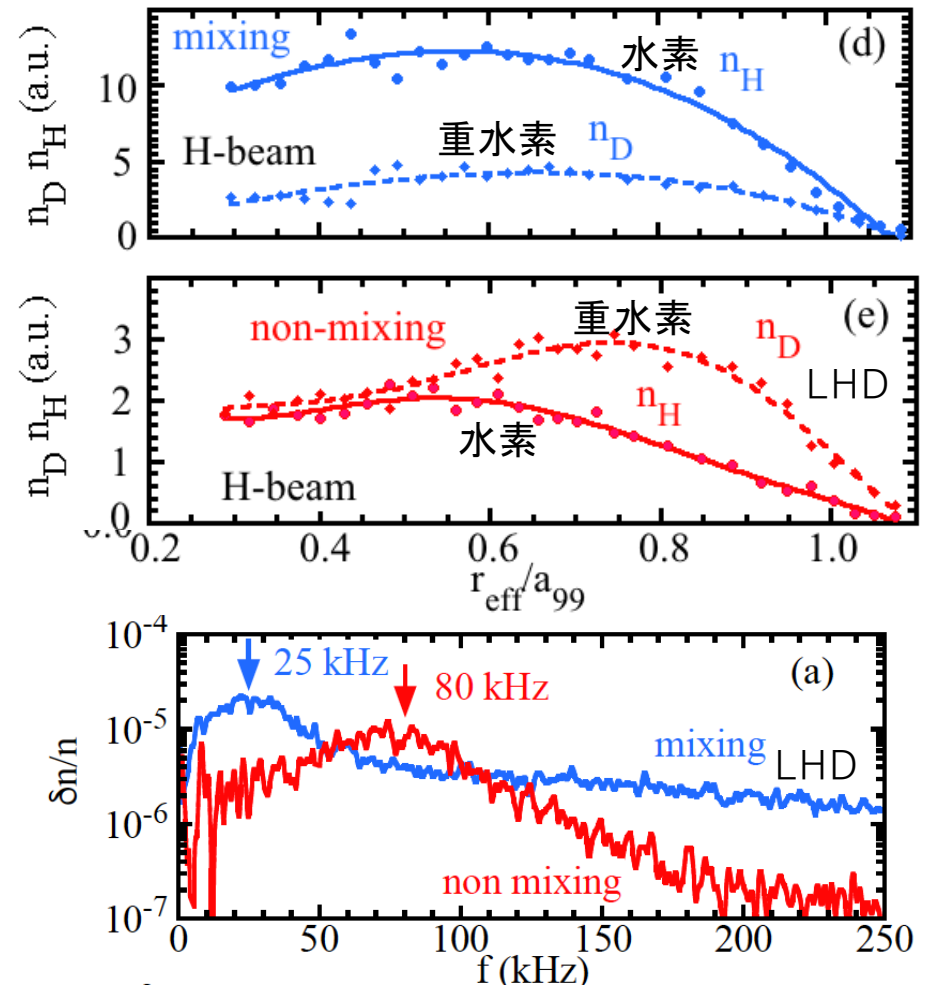
大きい渦

同位体非混合

水素(赤)と重水素(青)が分離



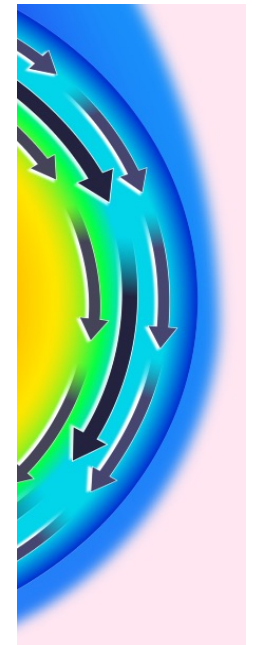
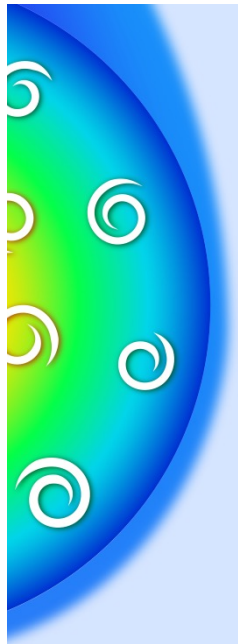
小さい渦



プラズマの流れとその勾配の役割

乱流

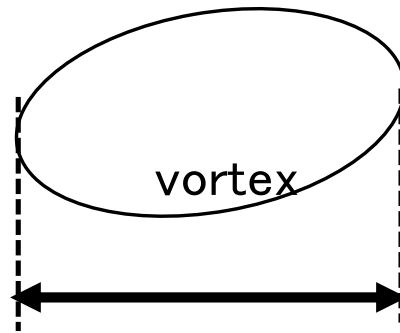
シアー流



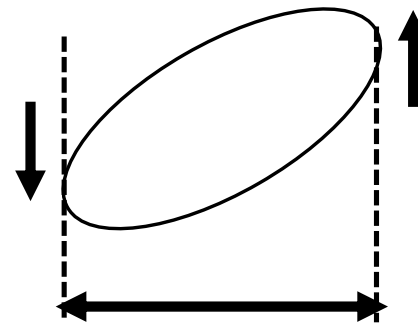
弱い流れの勾配

中程度の勾配

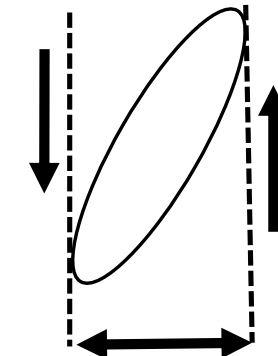
強い流れの勾配



大きい乱流



中間サイズ



小さい乱流

温度勾配小

温度勾配大



乱流はシアー流によって減少

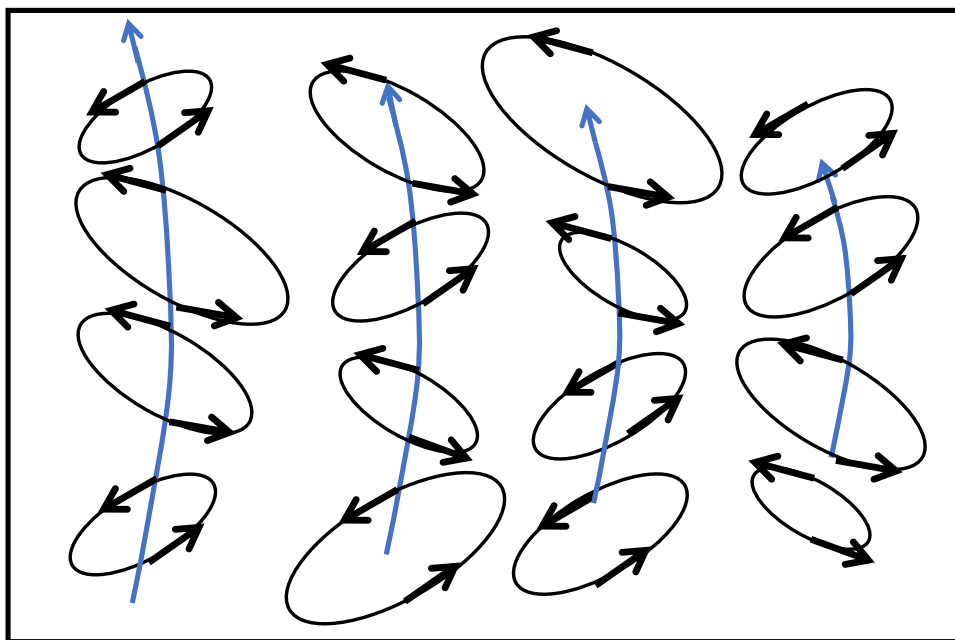
乱流 → 非捕食者

シアー流 → 補食者

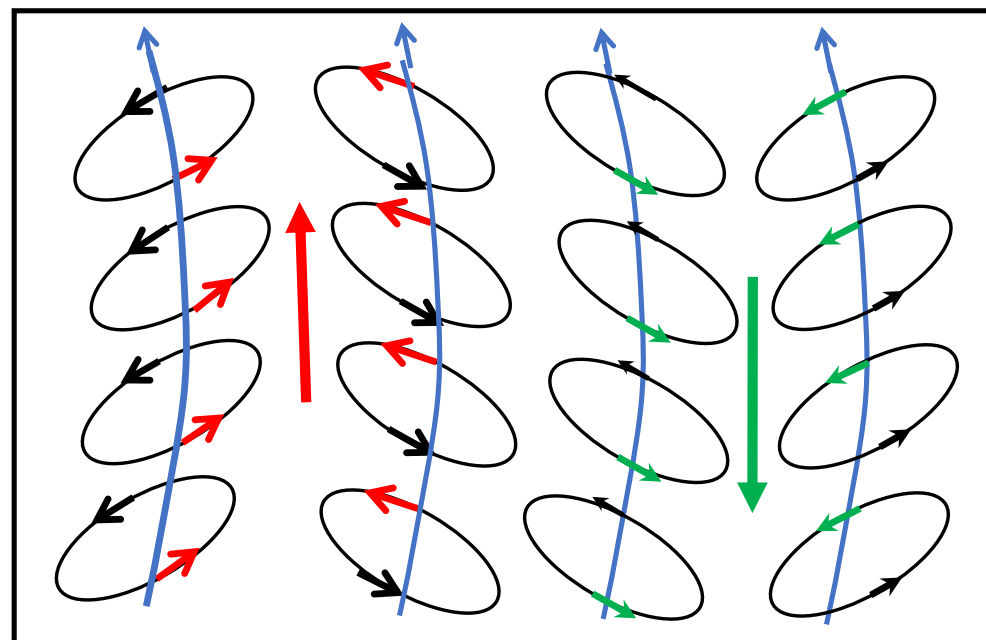


プラズマの流れの発生原因

ランダムな乱流



傾きが揃った乱流



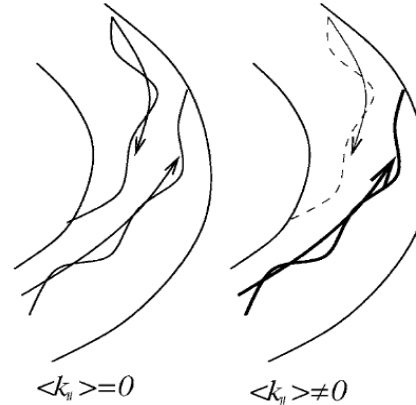
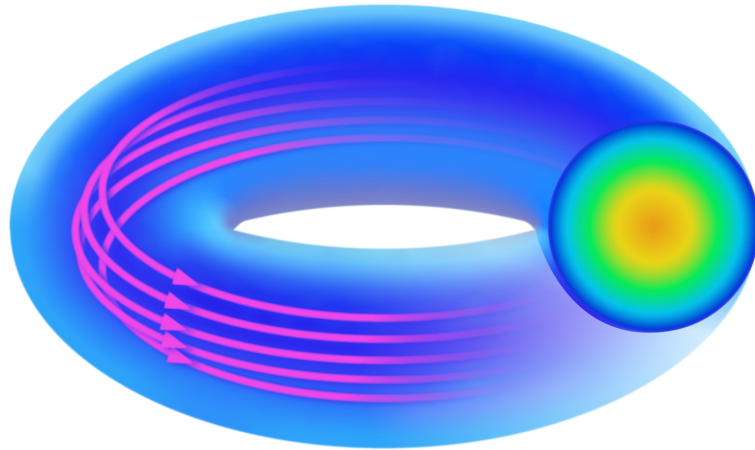
乱流の向きが揃うことで、シアー流が発生する。

→ シアー流(補食者)を支えているのは、乱流(非補食者)であった。

シアー流と乱流は
微妙なバランスを
保って共存している

乱流駆動によるプラズマ流の発見

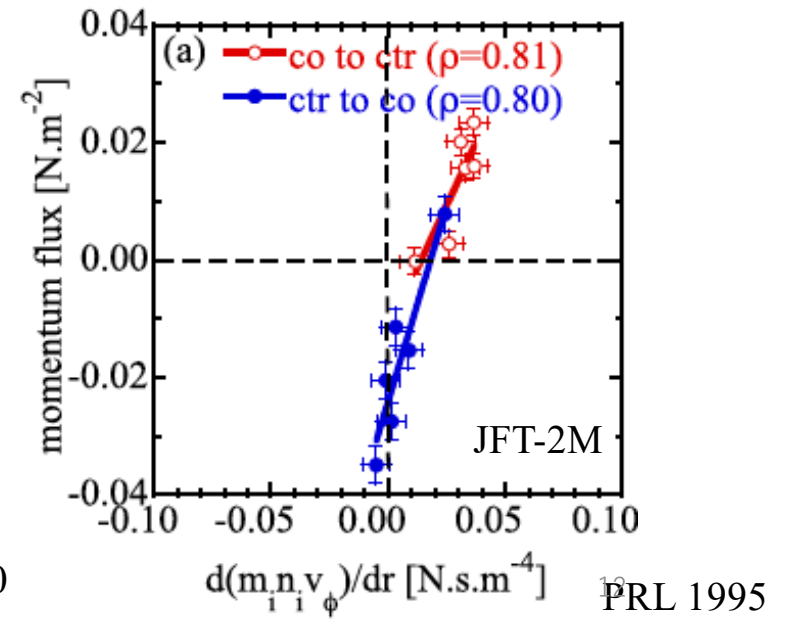
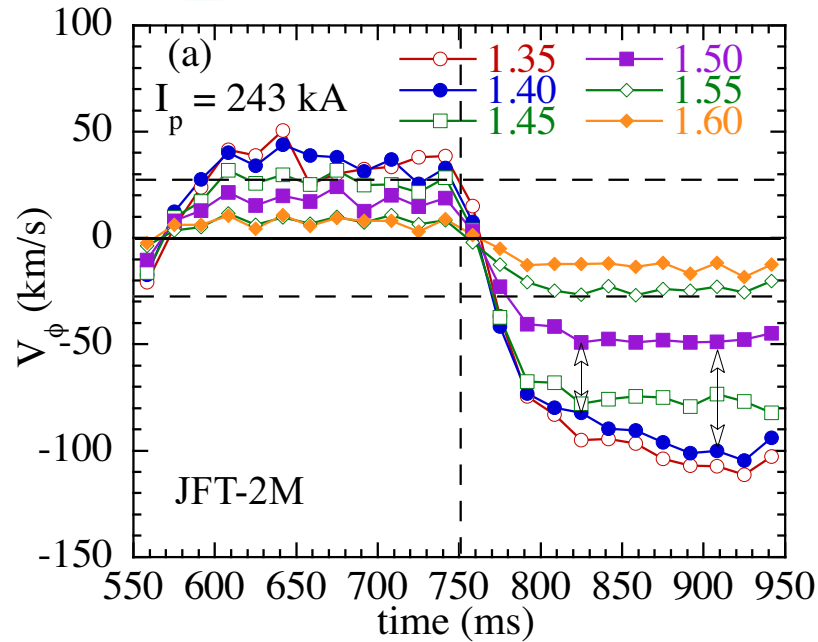
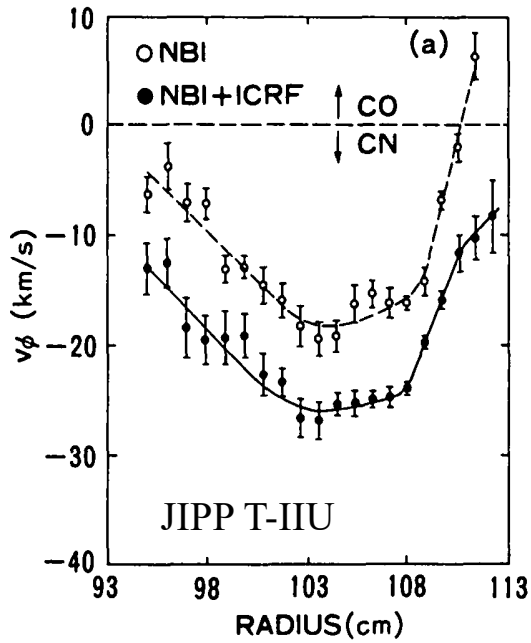
乱流に駆動されたトロイダル流の観測に成功



乱流の対称性の破れ

右回りの乱流と、左回りの乱流の強度に差が生じる

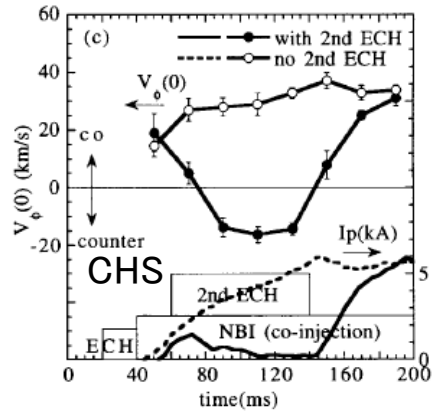
$$k_{\parallel}^{CW} \neq k_{\parallel}^{CCW}$$



PRL 1995

乱流駆動によるプラズマ流の論文の評価

ECH駆動自発回転

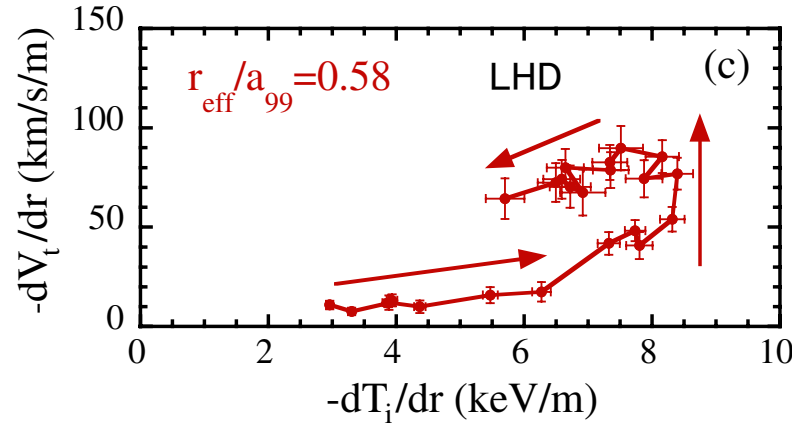


K.Ida Phys Rev Lett 86 (2001) 3040

自発回転の原因となっている運動量輸送の非拡散項を発見し論文を出版

K.Ida Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 1990

自発回転の遷移

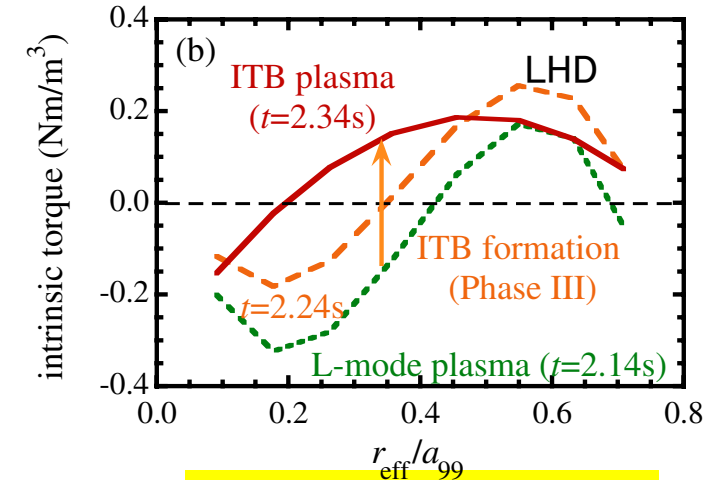


K.Ida Nucl. Fusion 50 (2010) 064007

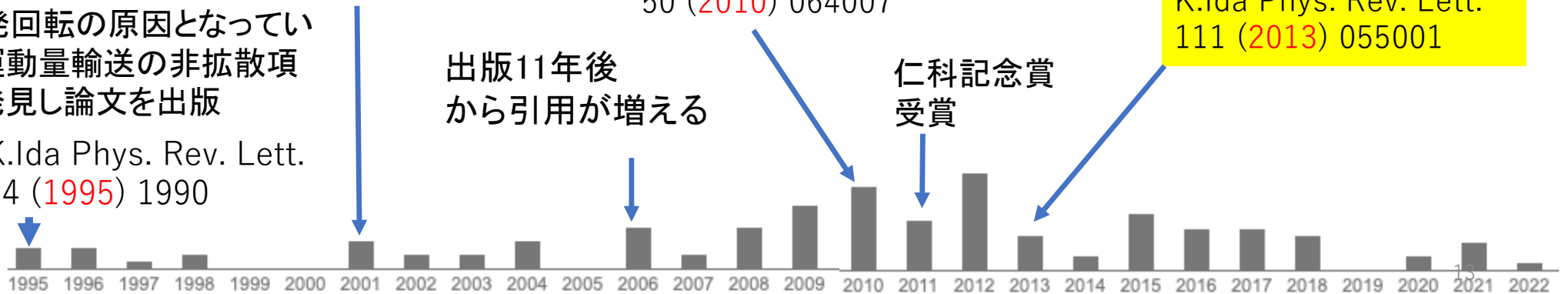
出版11年後から引用が増える

仁科記念賞受賞

内部トルクの反転



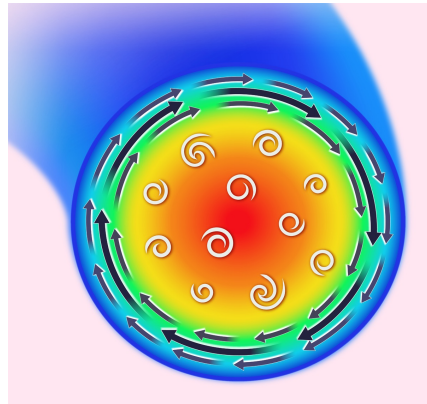
K.Ida Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 055001



乱流駆動によるプラズマ流の論文は、出版後10年以上経ってから評価された

乱流駆動によるプラズマ流の発見 2

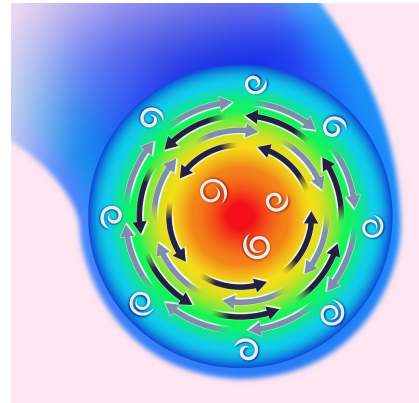
シアー流 (大スケールの非振動流)



$f \sim 0$ (DC)

$\Delta r > 3\text{cm}$

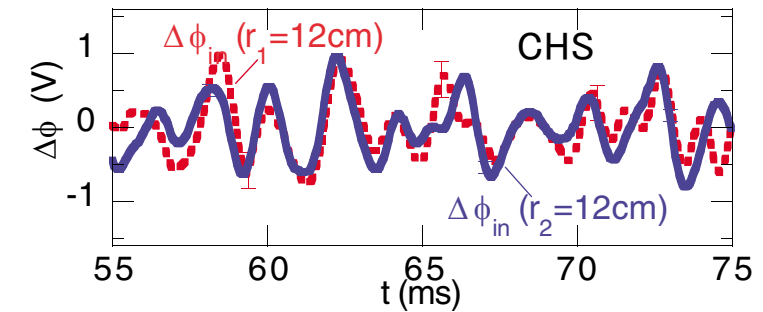
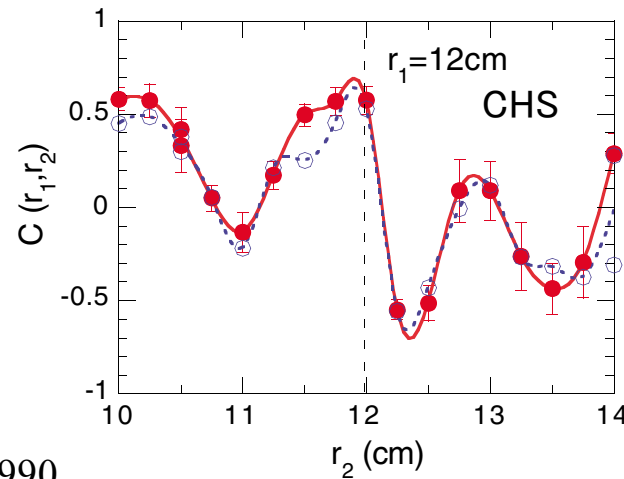
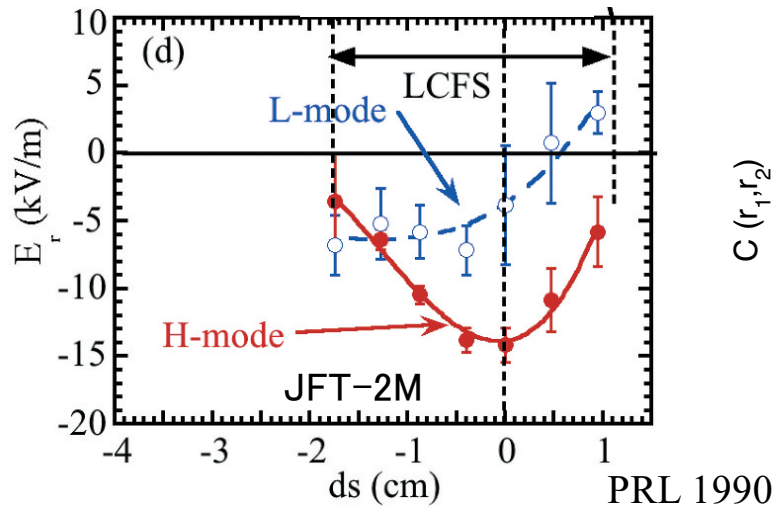
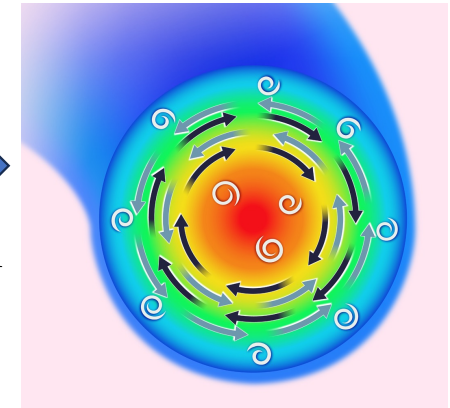
乱流に駆動されたポロイダル流



$f \sim 1\text{kHz}$

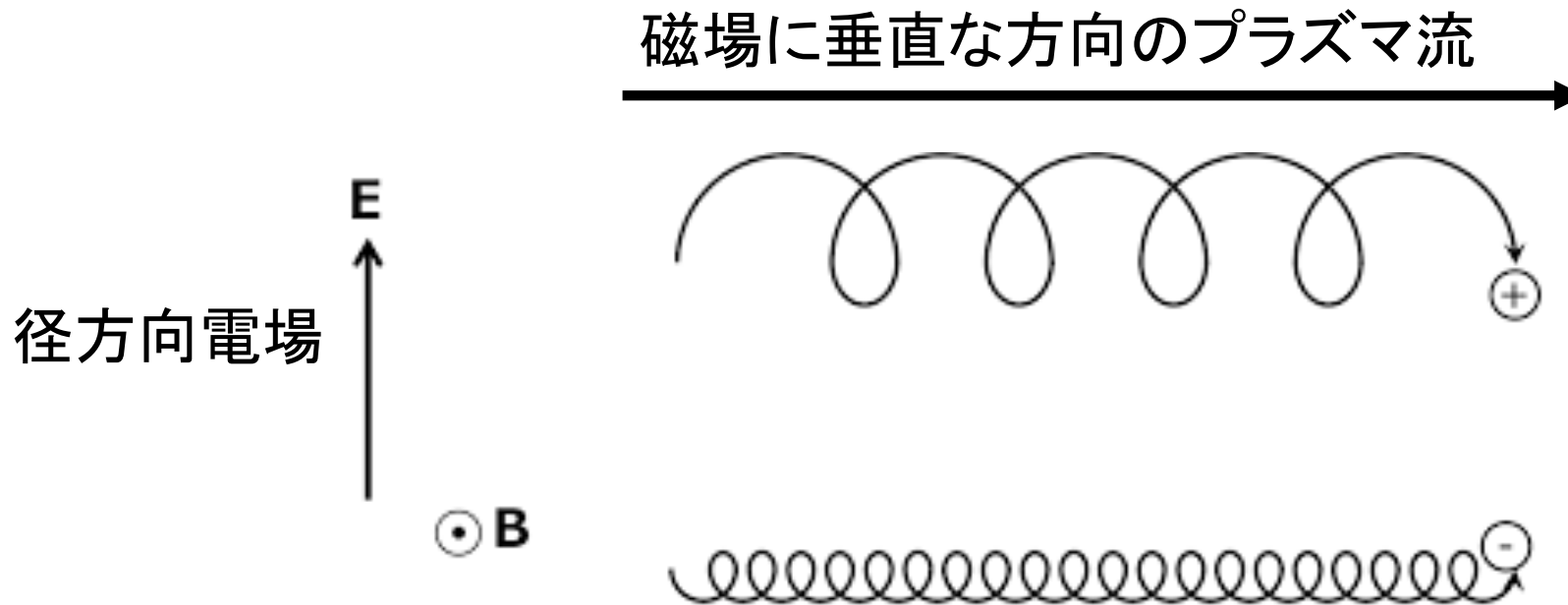
$\Delta r \sim 1 - 2\text{cm}$

帯状流 (小スケールの振動流)



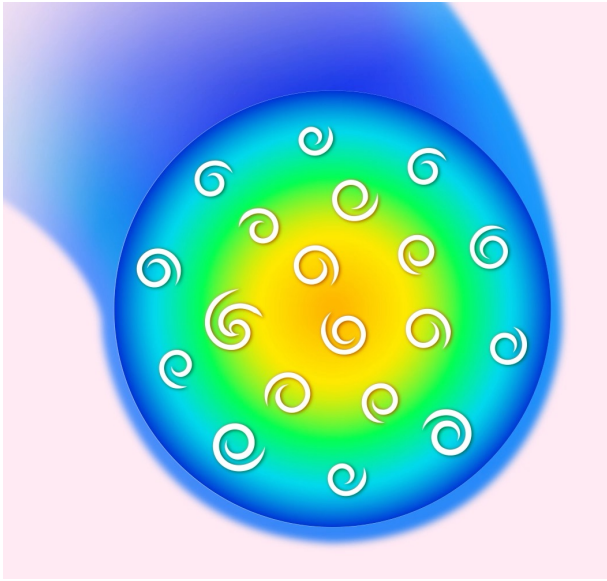
PRL 2004

電場とプラズマ流（イオンの流れ）の関係

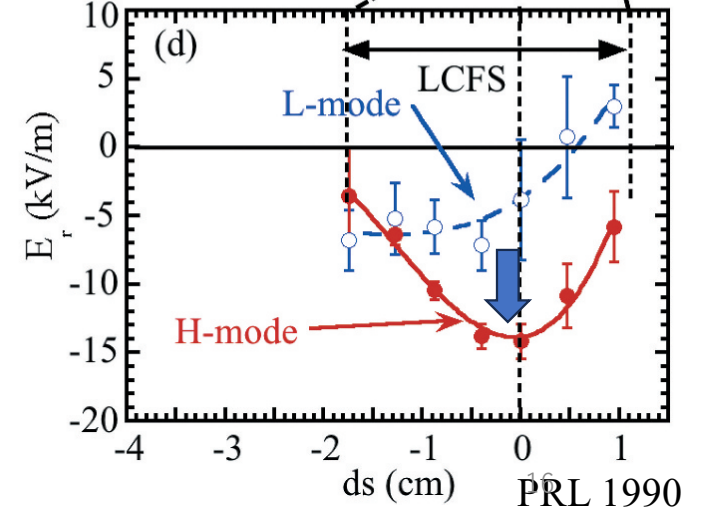
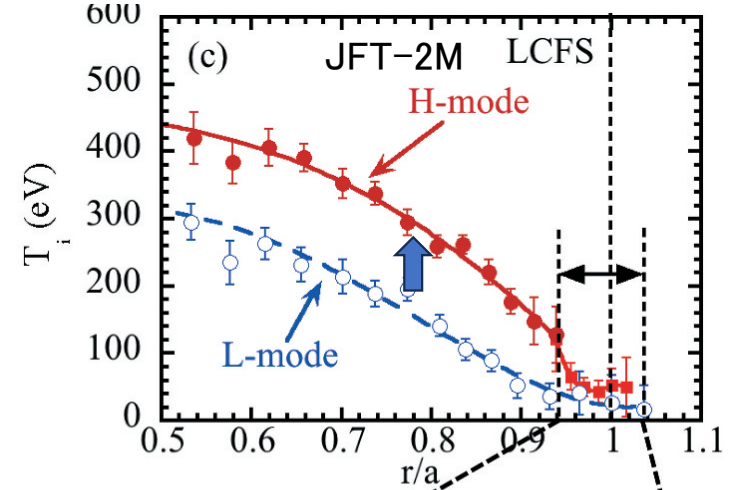
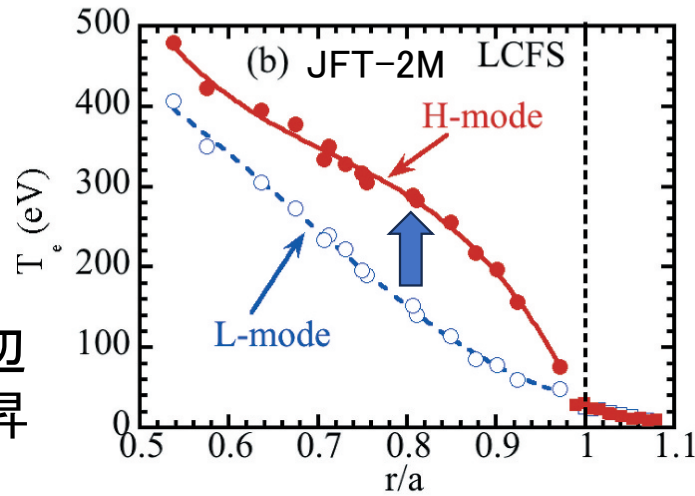
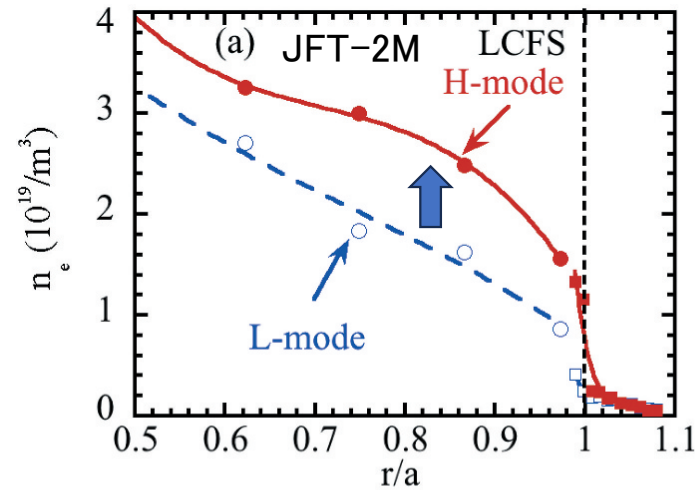


磁場閉じ込めプラズマでは、径方向の電場と磁場に垂直な方向のプラズマ流は直接結びついているので、**電場勾配＝シア一流**となっている

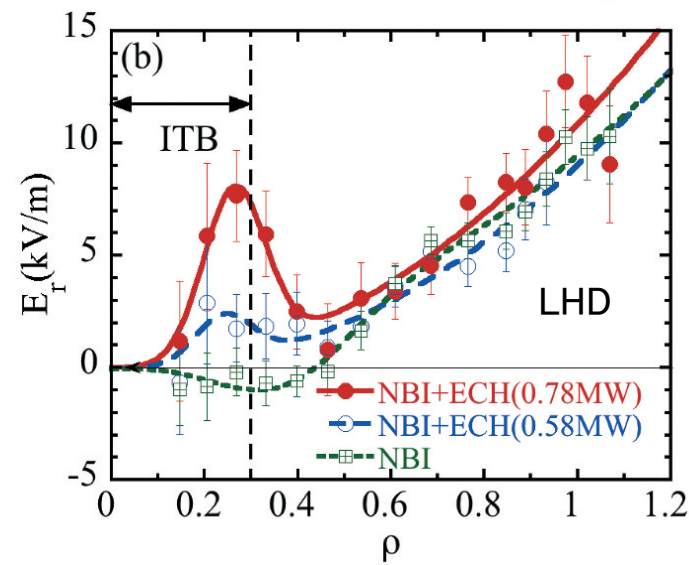
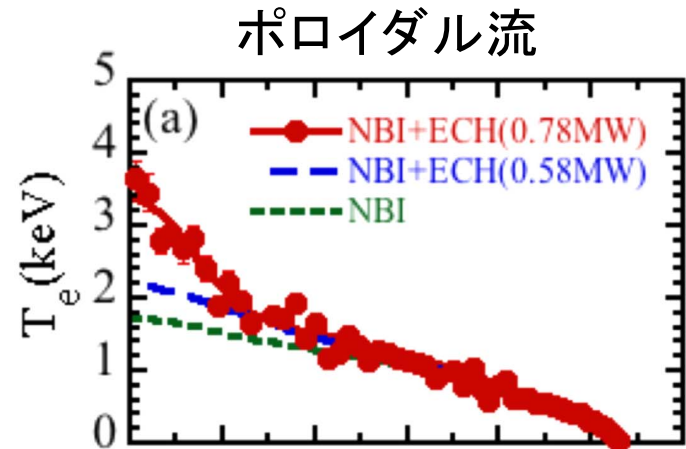
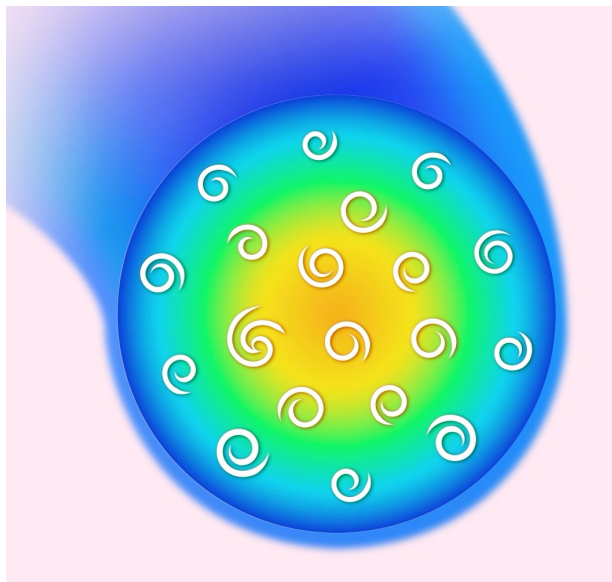
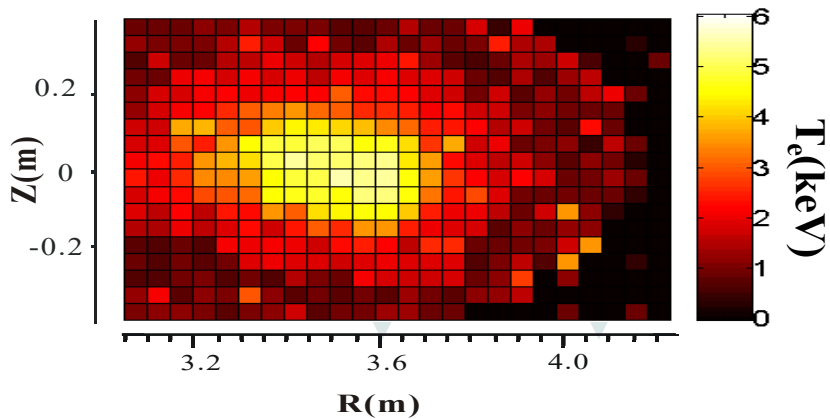
Hモードプラズマで発見された流れと電場勾配



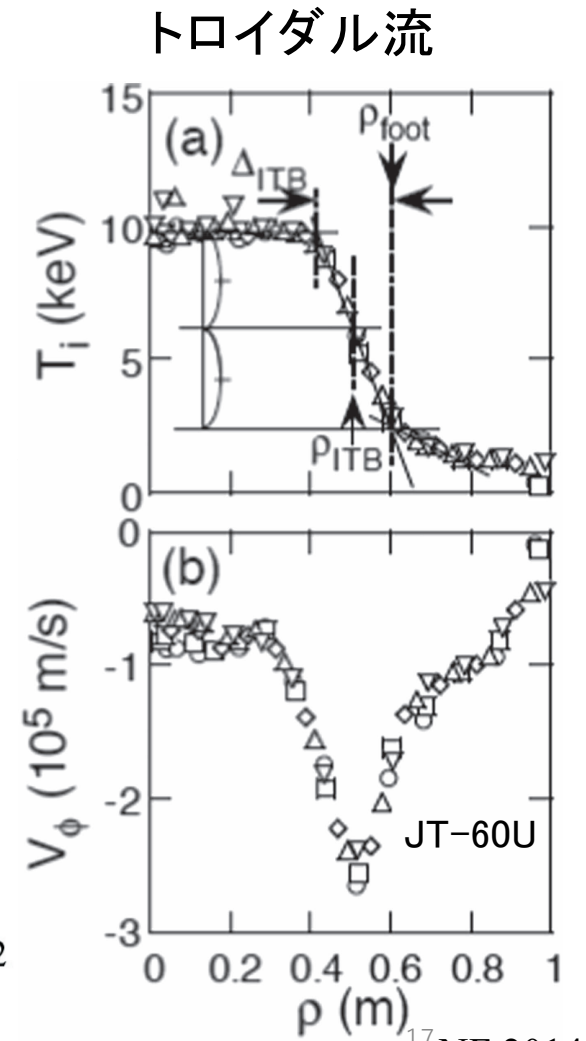
流れのシアーがプラズマ周辺部
に出現し、周辺温度が上昇



内部輸送障壁モードにおけるプラズマのシア一流



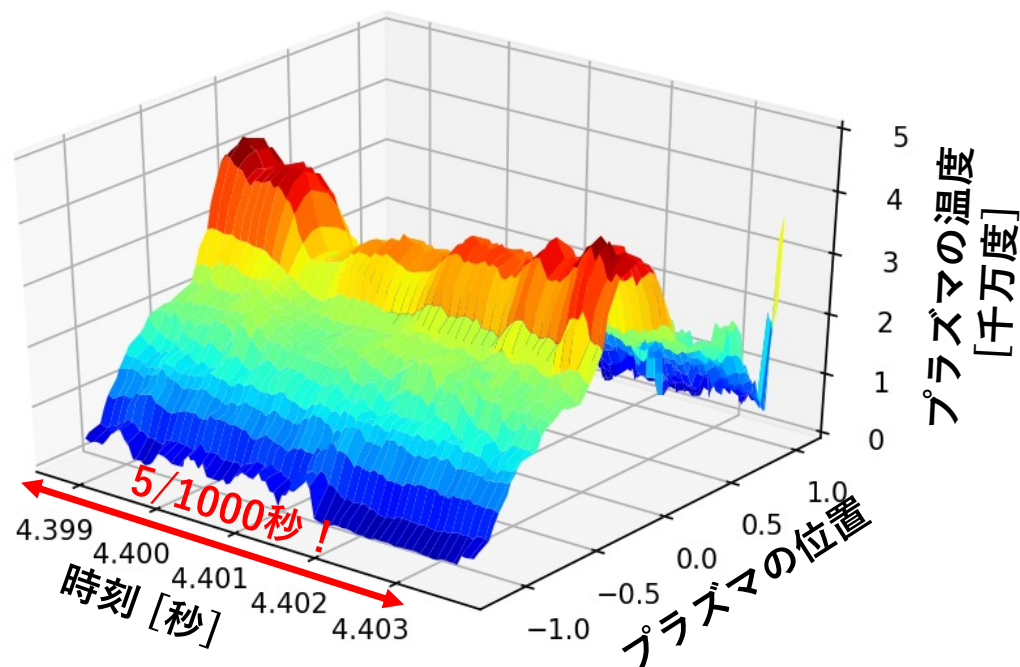
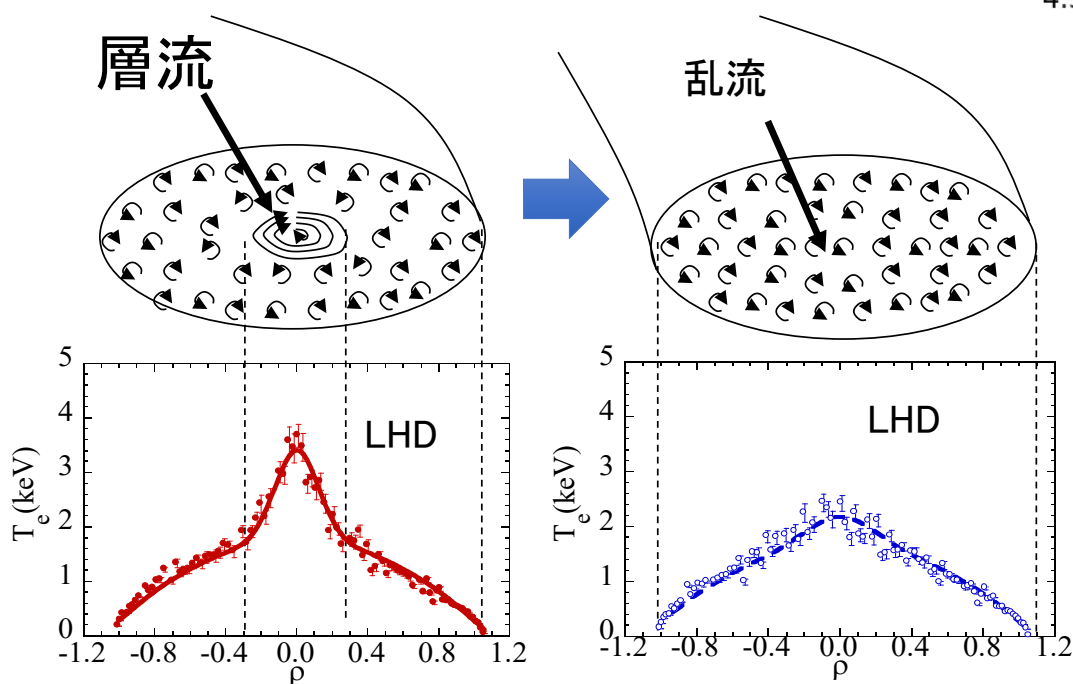
PRL 2003



17 NF 2014

内部輸送障壁の崩壊

プラズマの中心部の高い温度勾配は、プラズマに発生した層流によって支えられている



プラズマの維持時間(2-3秒)に比べて極めて短い時間(1万分の2-3秒)でプラズマの中心部の温度が急激に低下する現象が観測されている

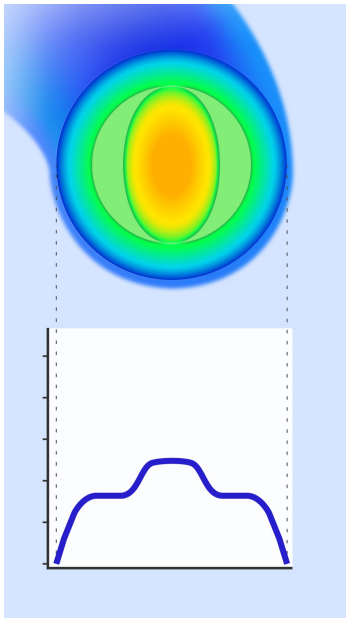
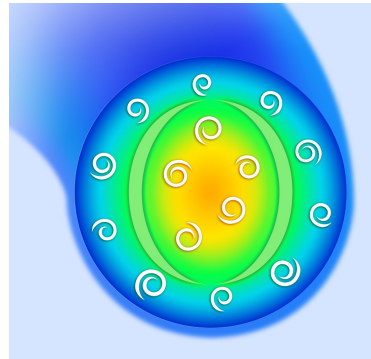
ダイナミックな変化を起こす

磁気島内部に現れるシアー流

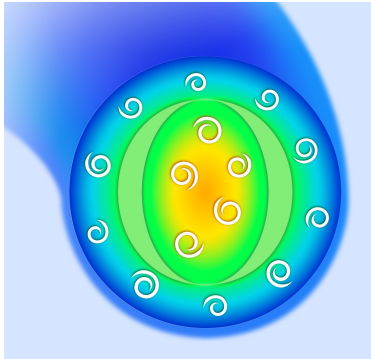
磁気島



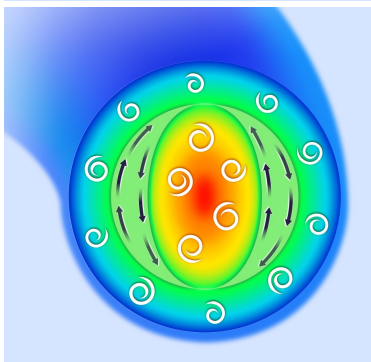
小さい
磁気島



大きい
磁気島

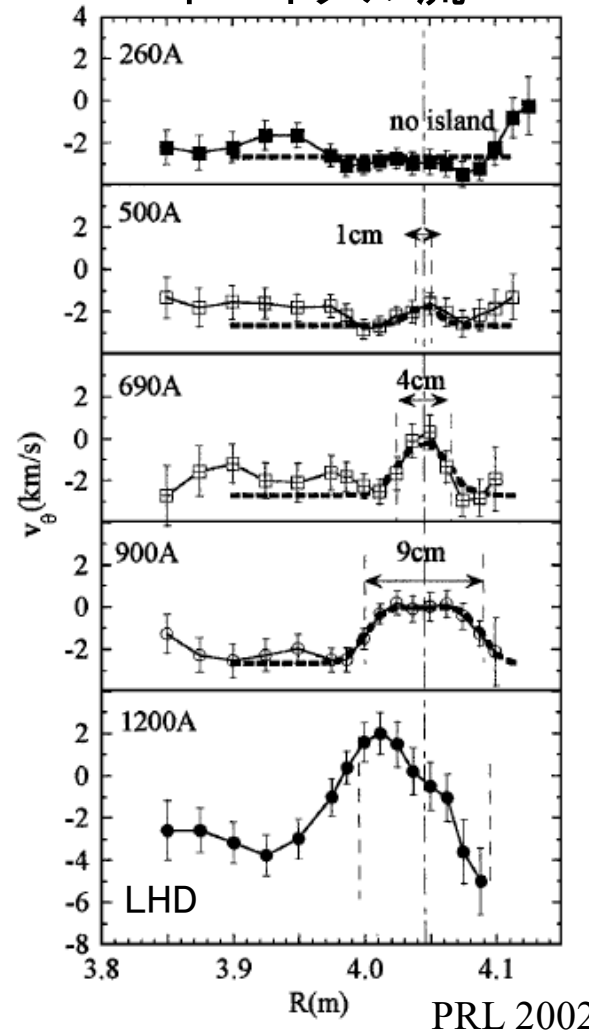


シアー流

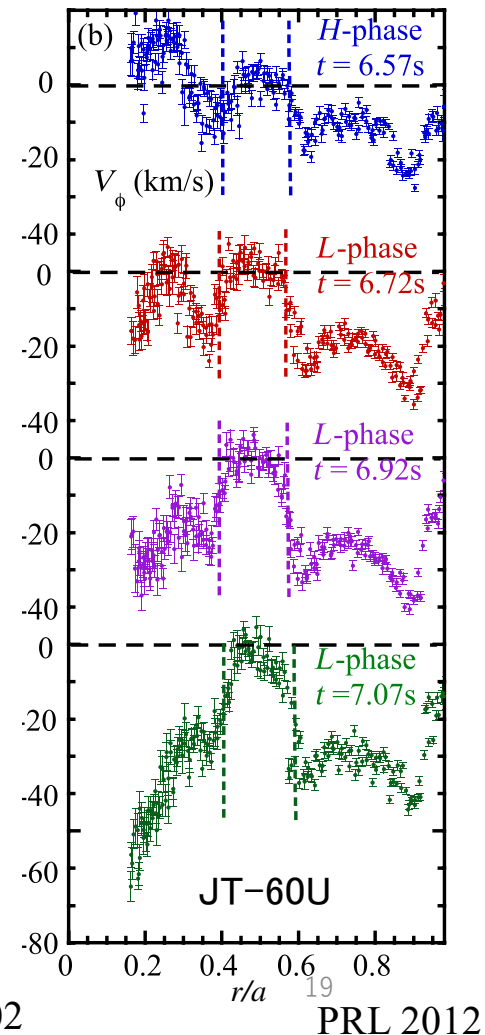


磁気島に温度の平坦化
が現れる

ポロイダル流



トロイダル流



PRL 2002

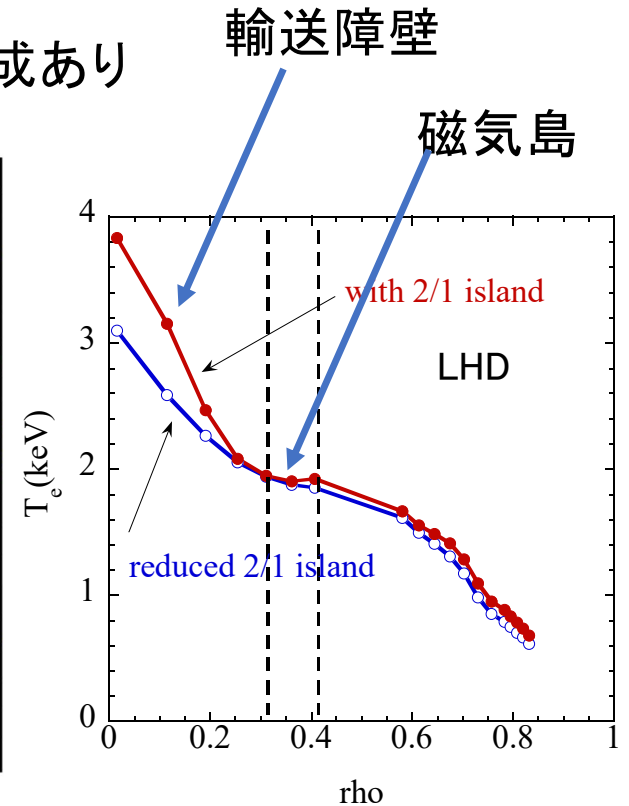
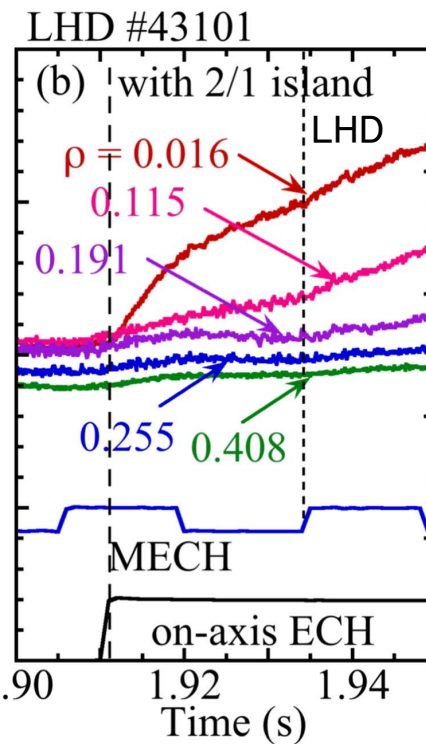
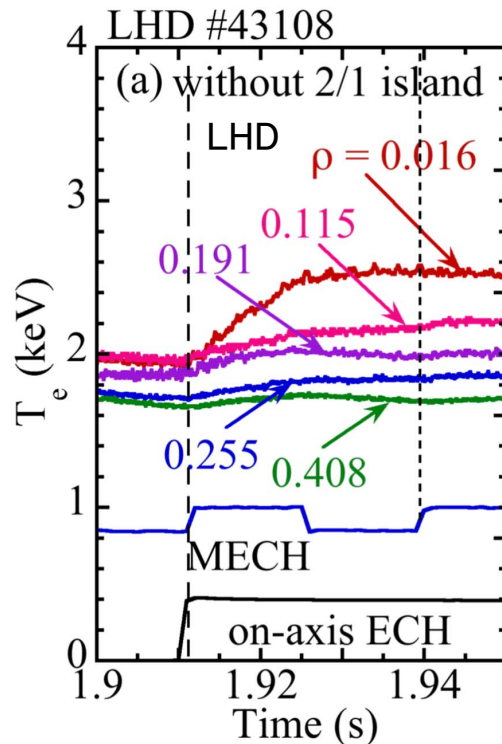
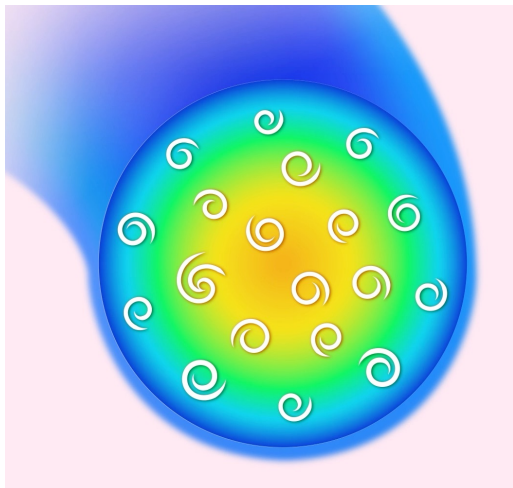
PRL 2012

内部輸送障壁モード形成における磁気島の役割

磁気島の境界に現れるシア一流が内部輸送障壁モードの形成を助ける

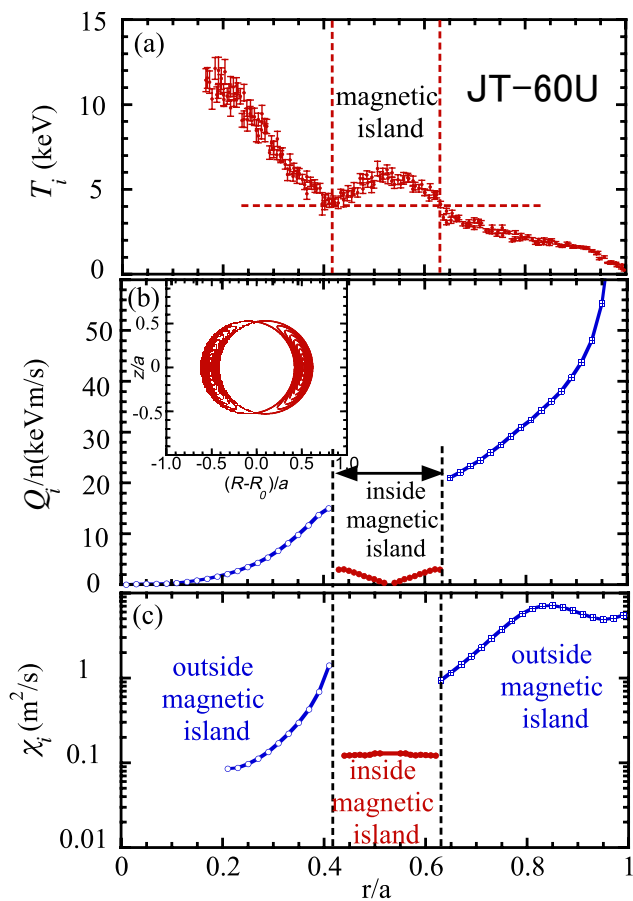
磁気島なし
→ 輸送障壁の形成なし

磁気島あり
→ 輸送障壁の形成あり



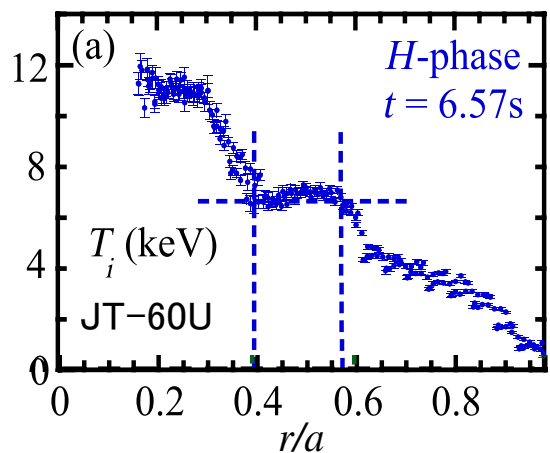
磁気島の内部は乱流が発生していない領域？

磁気島の輸送



磁気島にピークした温度分布が観測される時は閉じ込めが良い(熱拡散係数が小さい)

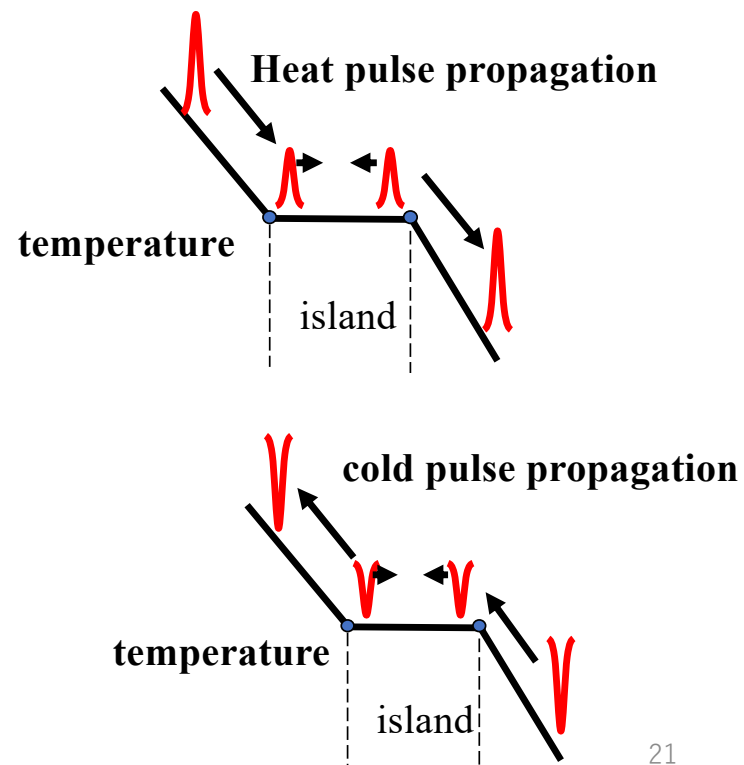
では、磁気島に平坦な温度分布が観測される時は閉じ込めが悪い(熱拡散係数が大きい)?



K.Ida et. al., Phys Rev Lett 109 (2012) 065001

磁気島にパルスを入射して観測

閉じ込めが良い → パルス伝播が遅い
閉じ込めが悪い → パルス伝播が速い

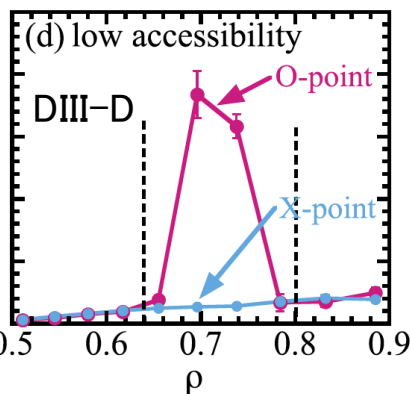
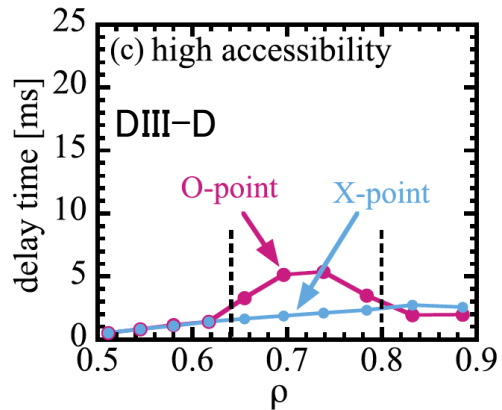
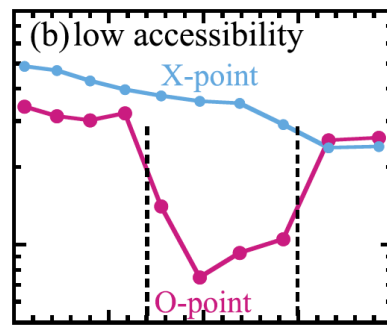
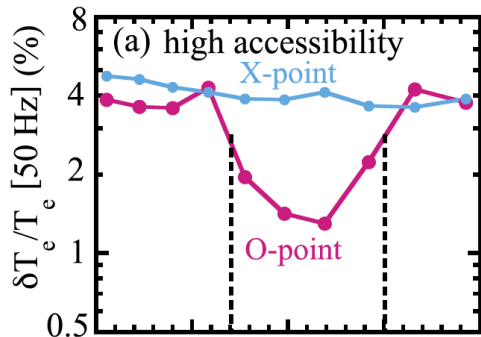


磁気島内部の乱流とヒートパルス伝播の研究

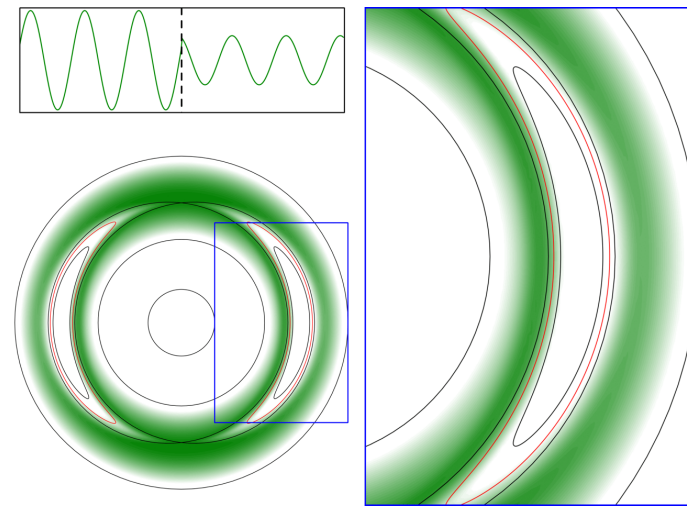
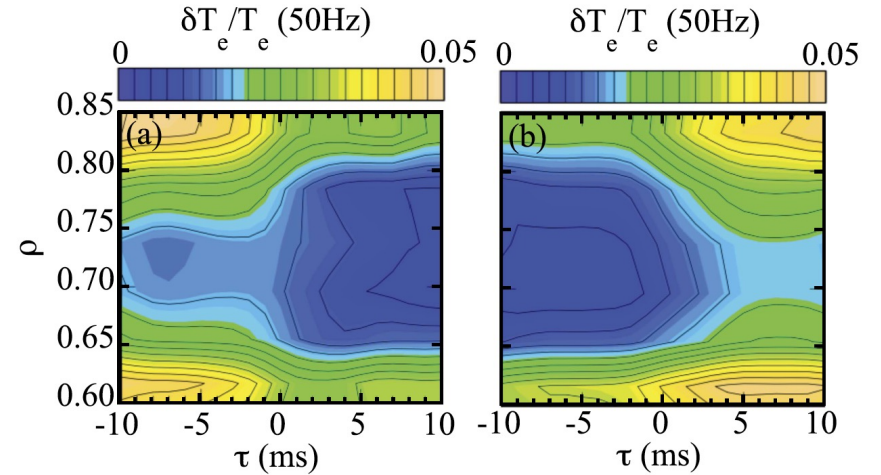
ヒートパルスの伝播は磁気島内部の状態の計測に応用され、DIII-Dの状態遷移の発見へと繋がった

ヒートパルスが侵入しやすい

ヒートパルスが侵入しにくい

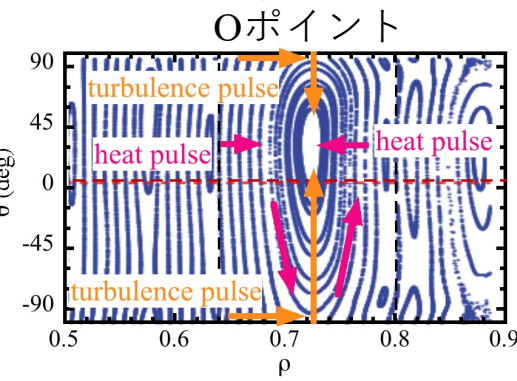
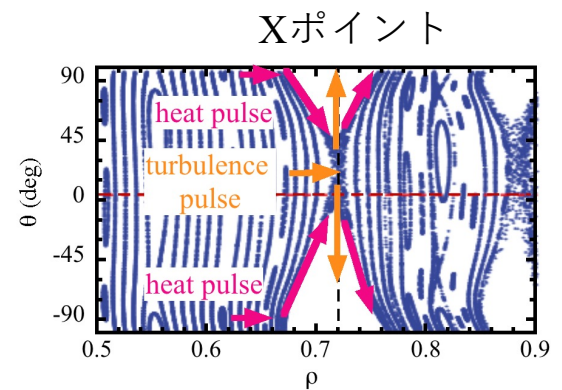
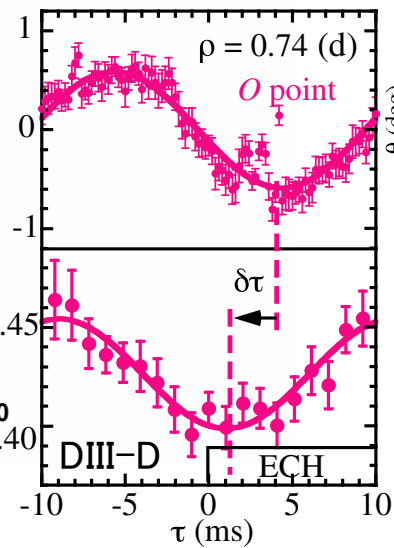
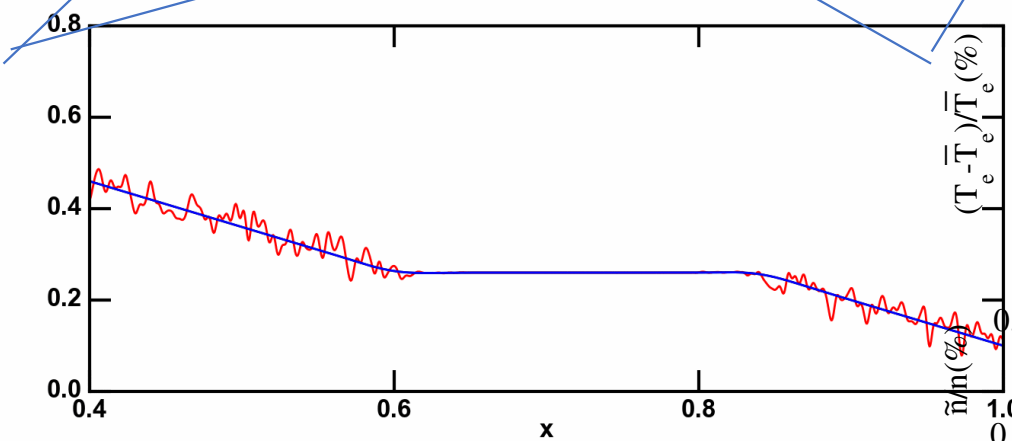
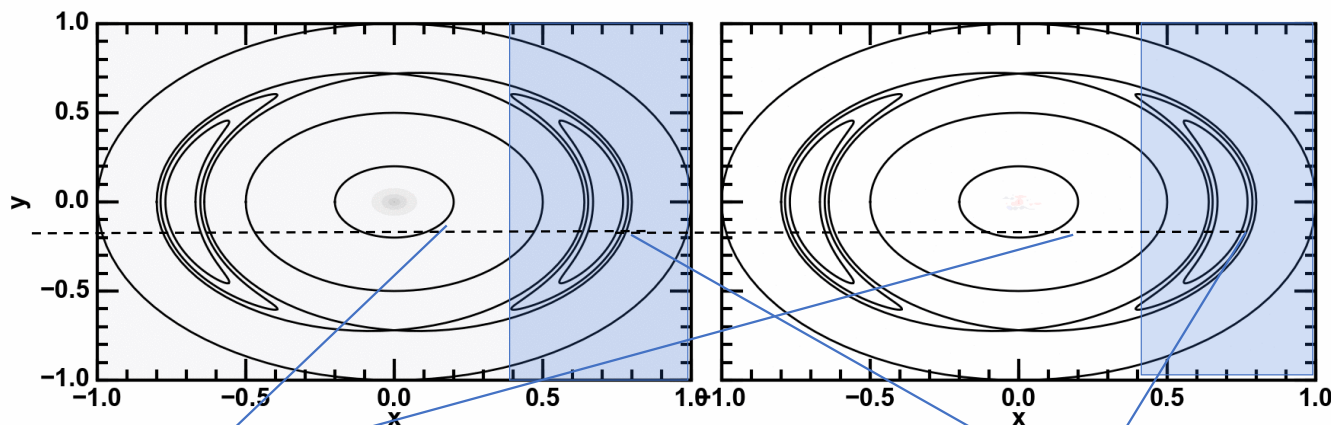


K.Ida et al., Sci. Rep. 5 (2015) 16165



状態遷移
は数ミリ秒

乱流伝播の発見



Sci. Rep. 5 (2015)

乱流はXポイントから侵入

乱流が磁気島の内部に伝播する様子が捉えられた

PRL 2018

乱流伝播発見の意義

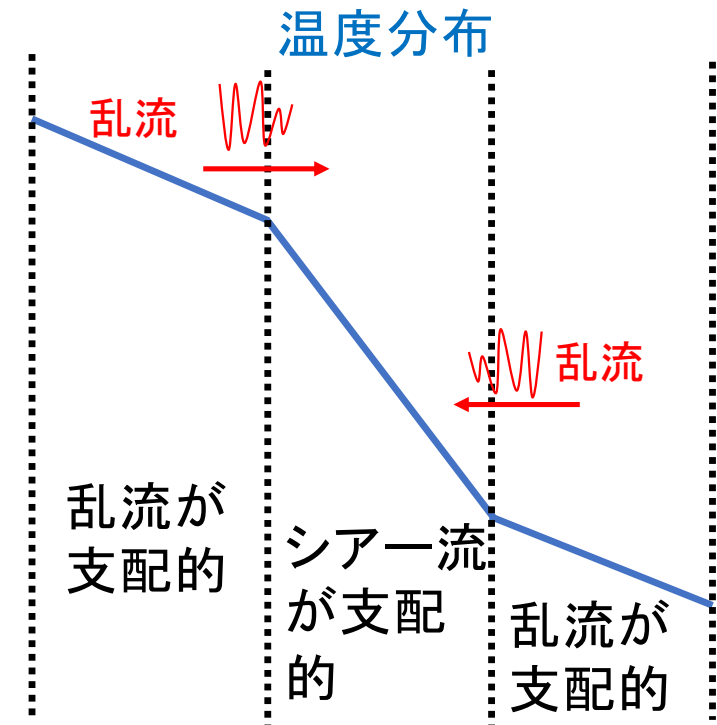
プラズマ中では乱流（非捕食者）が支配的な領域と、シア一流（捕食者）が支配的な領域が共存する。

シア一流が支配的となる場所では温度勾配が大きくなるので、その位置と幅が温度分布を決める。

乱流（非捕食者）がシア一流（捕食者）領域に進出することで、シア一流を支える。

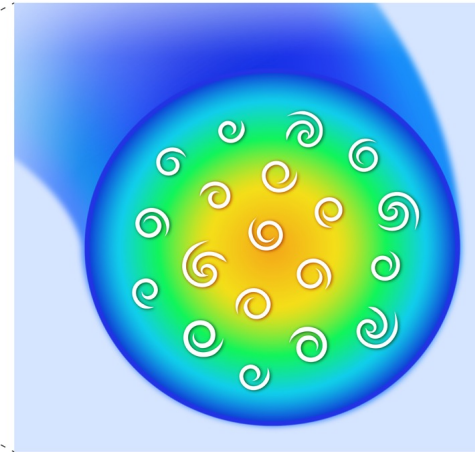
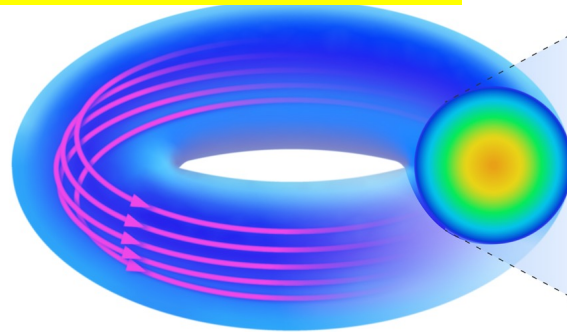


乱流領域とシア一流領域の境界が移動することで、ダイナミックな温度分布の変化が起こる。



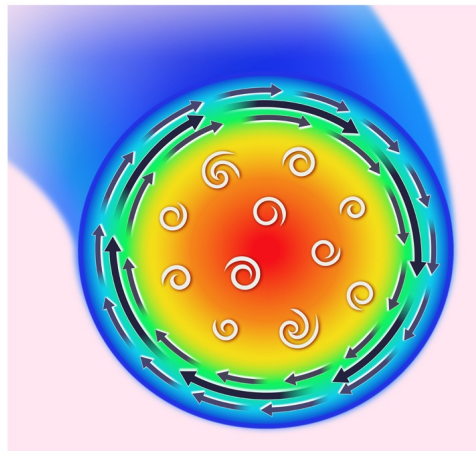
シア一流の違いによる温度分布の多様性

乱流駆動トロイダル流

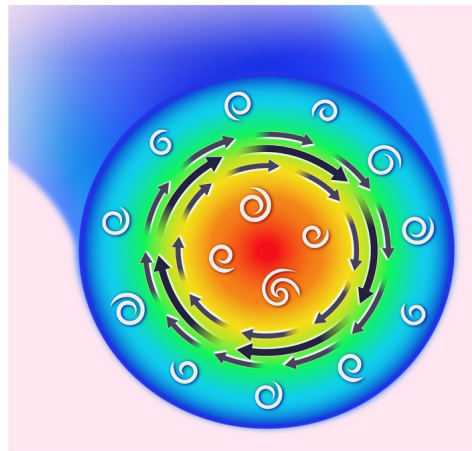


Lモード

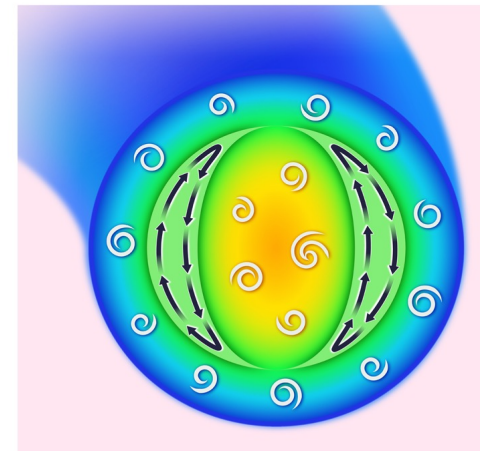
乱流駆動ポロイダル流



Hモード

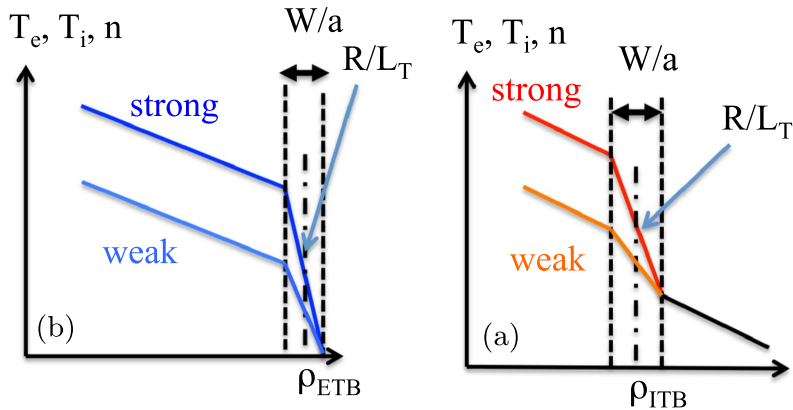


内部輸送障壁



磁気島

温度分布を決定する要素

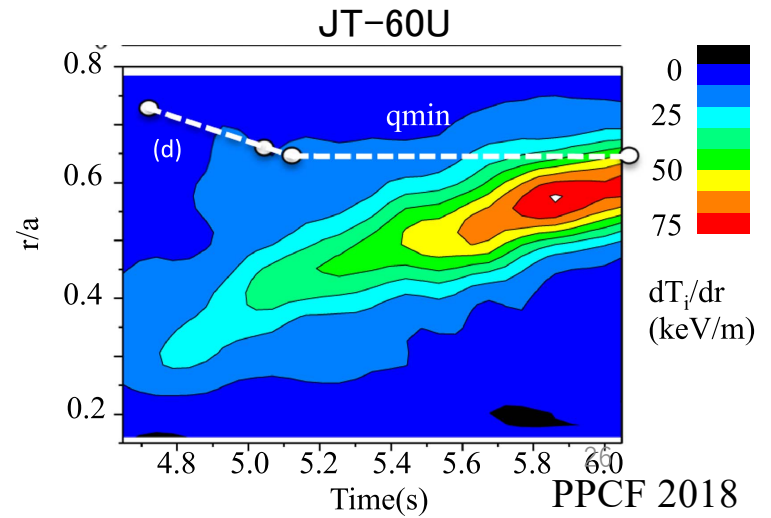
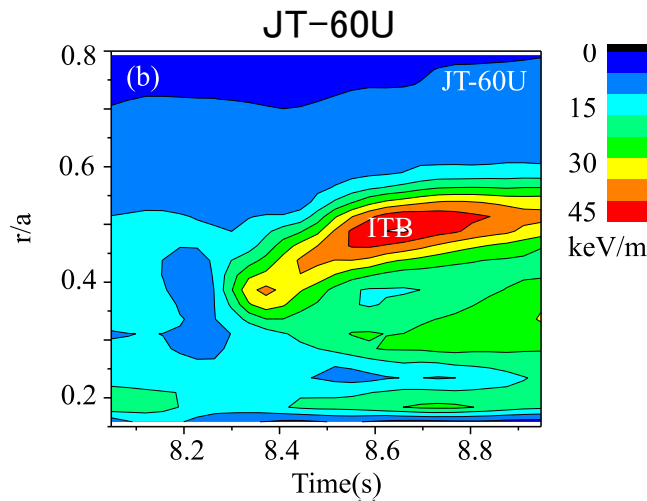
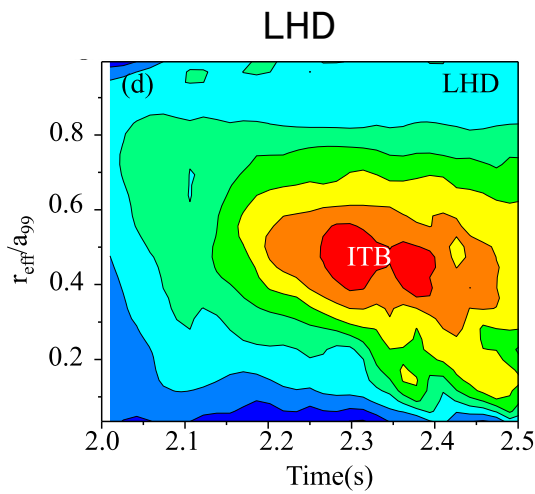


Hモードと内部輸送障壁プラズマを特徴付けるシア一流

- 1) 位置 ρ_{ITB}
- 2) 幅 W/a
- 3) 強さ R/L_T

シア一流を伴う輸送障壁の位置・幅・強さが自発的に変化することで、温度勾配と温度分布の多様性とダイナミックな変化が生まれる

温度勾配の時空間変化



結論

シアー領域の位置、幅、強さの多様性は、捕食者であるシアー流と非捕食者である乱流のせめぎ合いで決まる。

その結果、さまざまな乱流とシアー流の共存状態が生じる

乱流領域



乱流の
進出



境界



シアー流
の拡大



シアー流領域



乱流・シアー流の分布の多様性が、温度勾配・分布の多様性を生み出している

プラズマ全域にシアー流が発生すれば、温度勾配が大きい高温のプラズマが生成できる。しかしながら、乱流のみの状態(捕食者がいない状態)はできるが、シアー流のみの状態(非捕食者がいない状態)は作れない。→ 核融合プラズマの高温達成が困難な原因

本研究の学際的な展開

磁場とプラズマが織りなす多様性と突発性の研究

1) 太陽フレアー

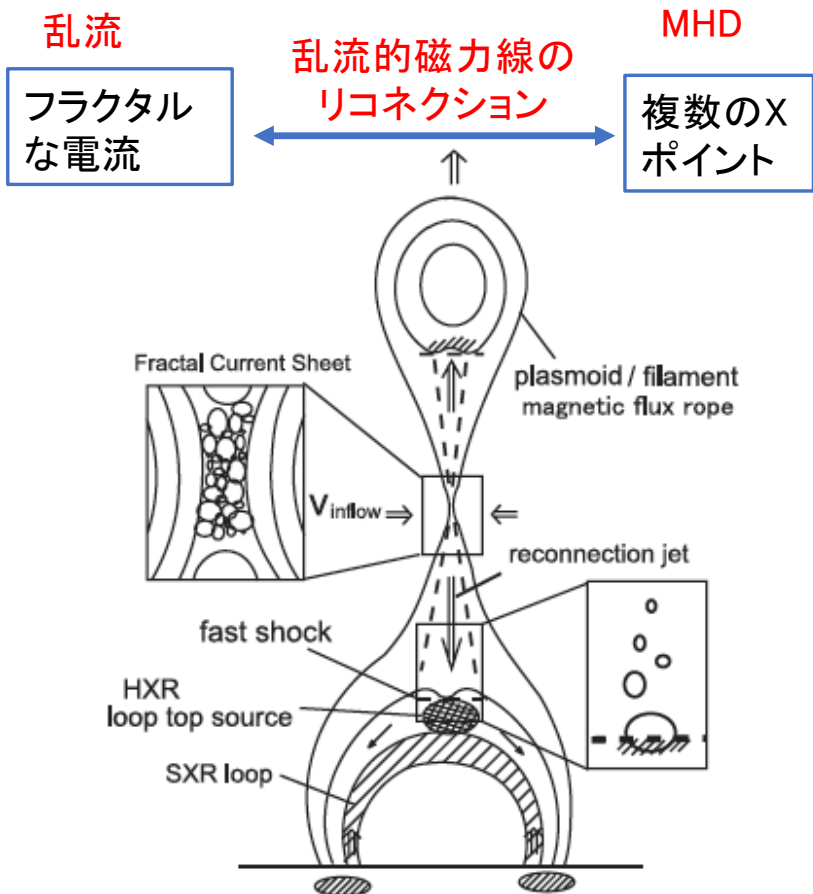
太陽フレアーでは磁力線のリコネクションが起こり、プラズマが放出されて爆発を起こす。リコネクションの時間が理論予想よりも短い。磁場のトポロジーの変化に伴う突発的現象において、核融合プラズマと共通の研究課題がある。**何故突発的に起こるのか？**

2) 磁気圏における電磁波を介したエネルギー輸送

磁気圏では高エネルギープラズマから発生した電磁波で、ヘリウムプラズマが加速されるという現象が観測された。この粒子加速・エネルギー輸送において、核融合プラズマと共通の研究課題がある。**エネルギー輸送に質量依存があるのか？**

トポロジー変化: 入れ子状の磁気面 → 壊れた磁気面

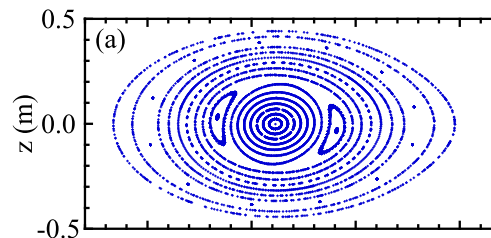
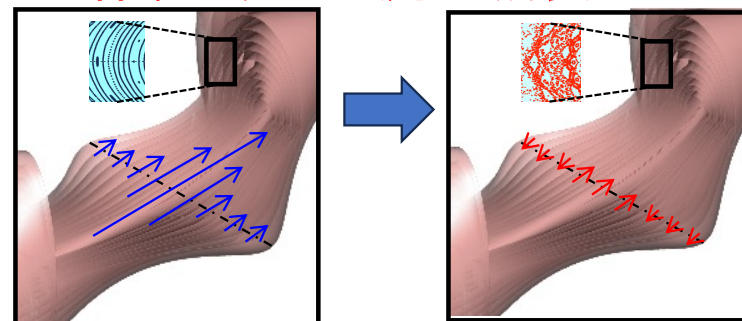
太陽フレア



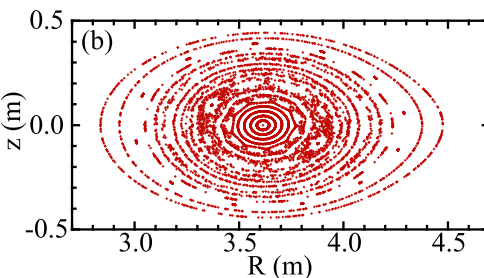
N.Nishizuka and K.Shibata
Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 051101

磁気面の壊れに伴うプラズマ流の減衰

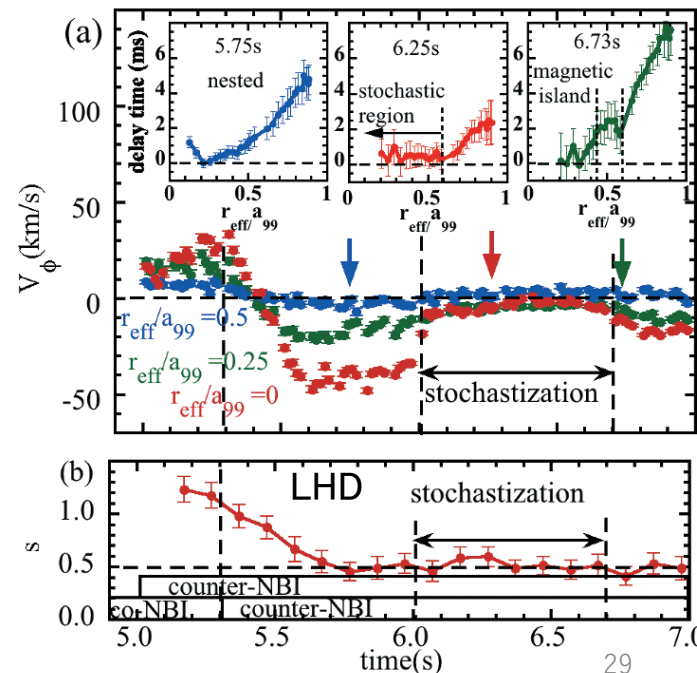
磁場閉じ込め
核融合
入れ子状の磁気面



壊れた磁気面



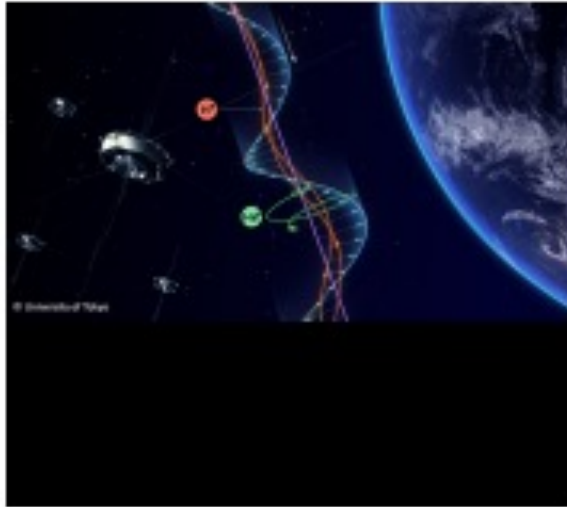
NJP 2013



Nat. Comm. 2015

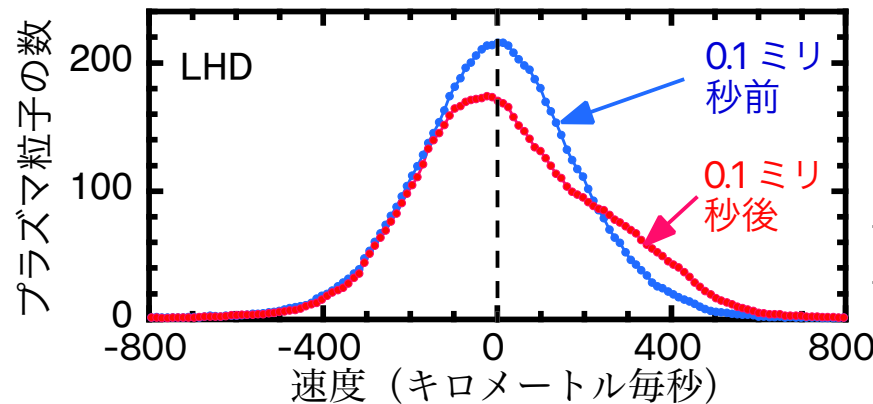
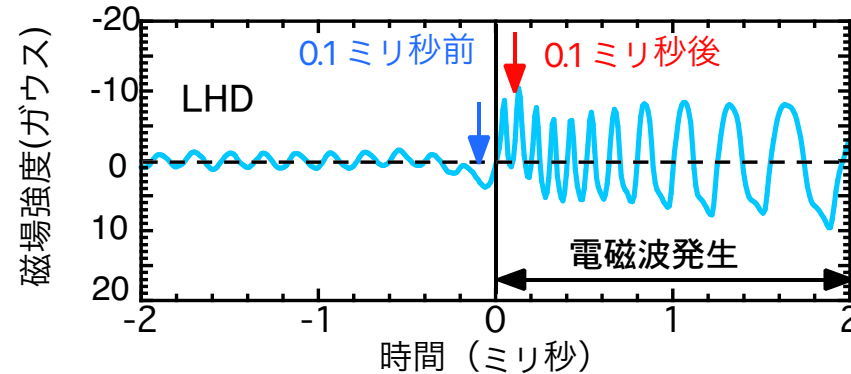
自己発生した波による粒子加速

磁気圏プラズマ



研究成果 2018-09-27

世界で初めて、宇宙空間でプラズマの波を介した粒子のエネルギー輸送を実証



プラズマ中のエネルギーが大きい粒子による不安定性が電磁波を発生

電磁波が発生すると、0.1ミリ秒(1万分の1秒)後に速度分布の変形が発現

核融合プラズマにおいて、プラズマの波を介した粒子のエネルギー輸送を観測

1ミリ秒 = 1000分の1秒
1キロメートル毎秒 ~ マッハ3

無衝突エネルギー移送の質量依存性

- 両極性特徴が炭素とバルク粒子(重水素)で観測された。
- 炭素のエネルギー移送の量(エネルギーゲイン)は重水素の数倍であることが観測された。

