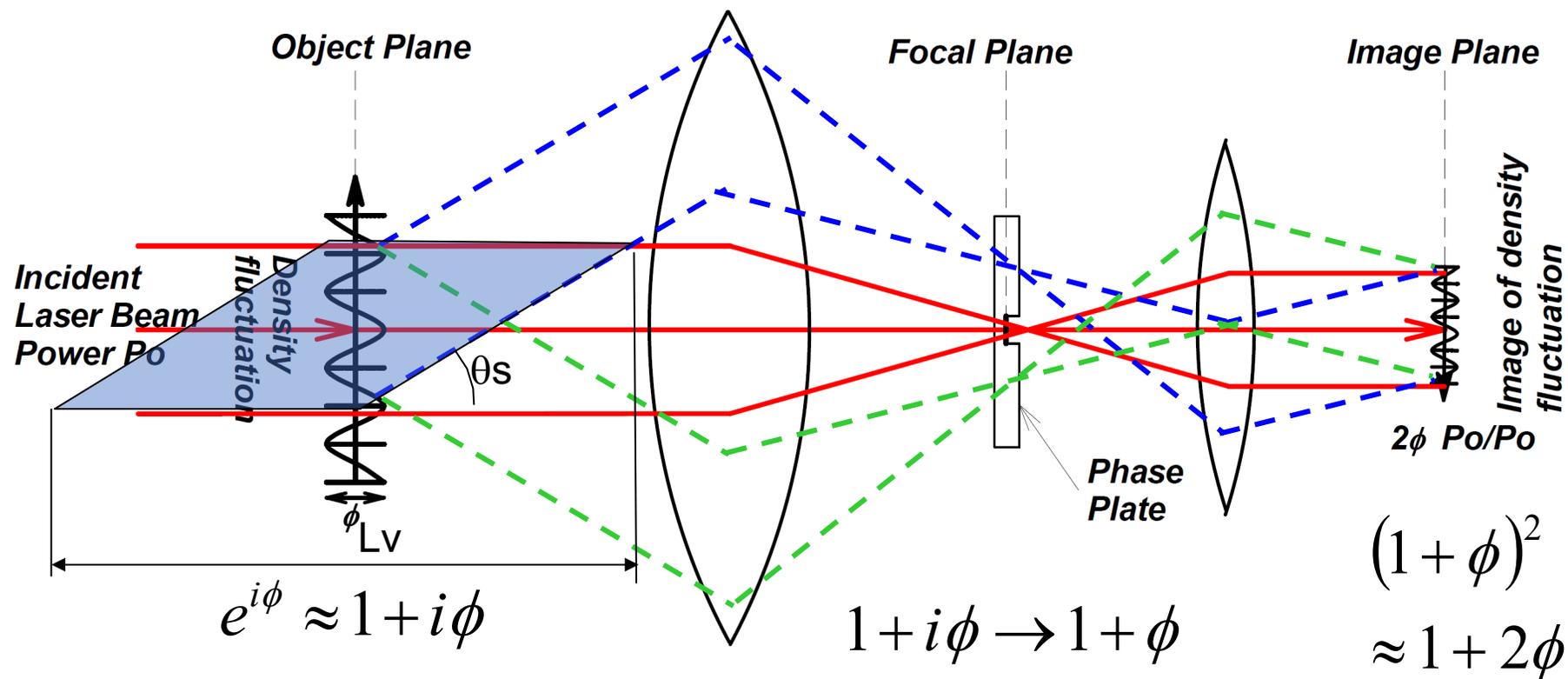




高度な乱流揺動計測の開発とそれを用いた乱流輸送研究

(UT25 トロイダルプラズマの輸送研究による閉じ込め概念の一般化)

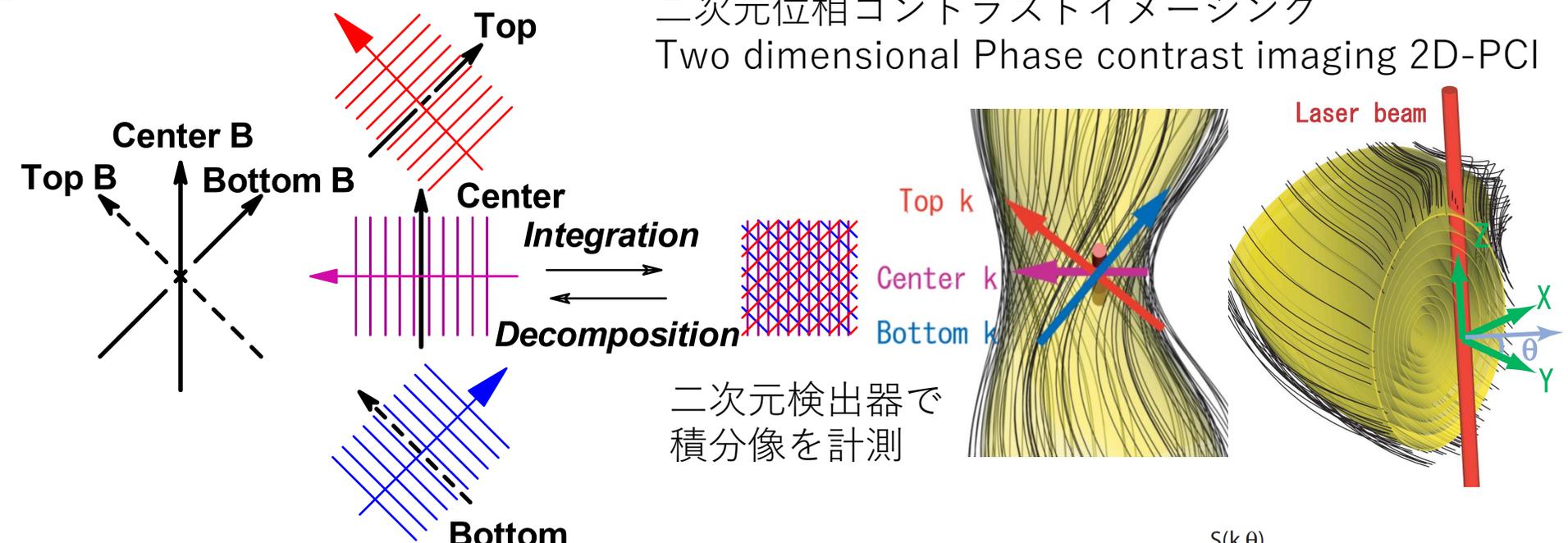
核融合研 田中謙治



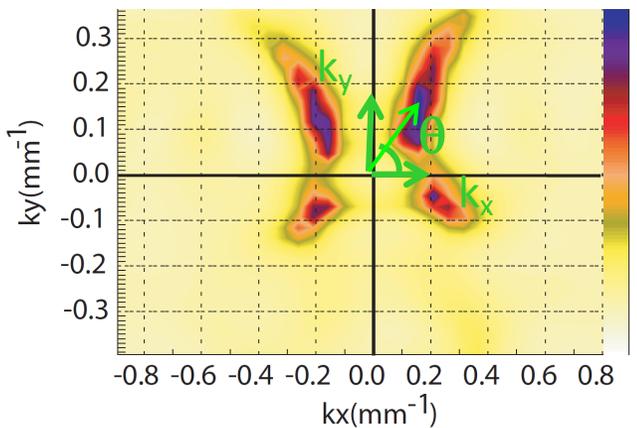
ただし、計測対象となる乱流に対しては散乱体積長が数mになりビーム軸方向の空間分布が得られない。乱流の空間構造を明らかにするにはビーム軸方向の空間分解能を取得することが必要。

二次元位相コントラストイメージング Two dimensional Phase contrast imaging 2D-PCI

(K. Tanaka et al RSI2008)



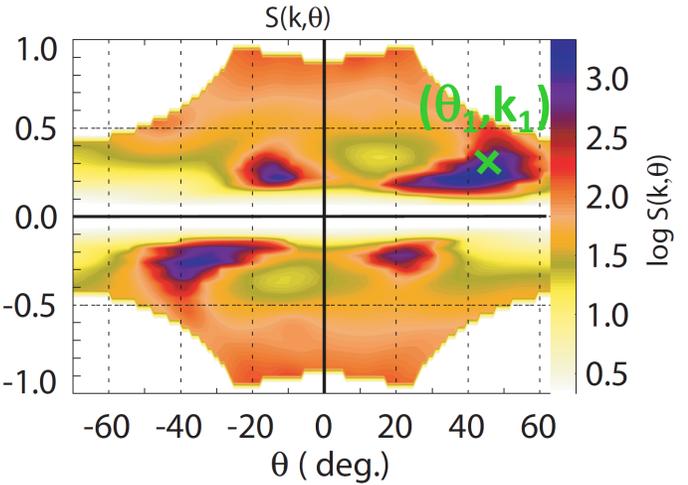
二次元検出器で
積分像を計測



直交座標系 $S(k_x, k_y)$

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{k_y}{k_x}\right)$$

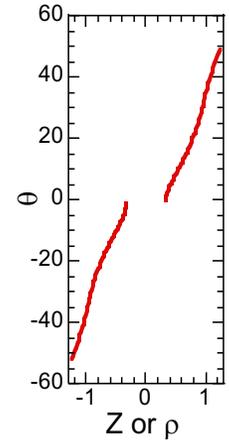


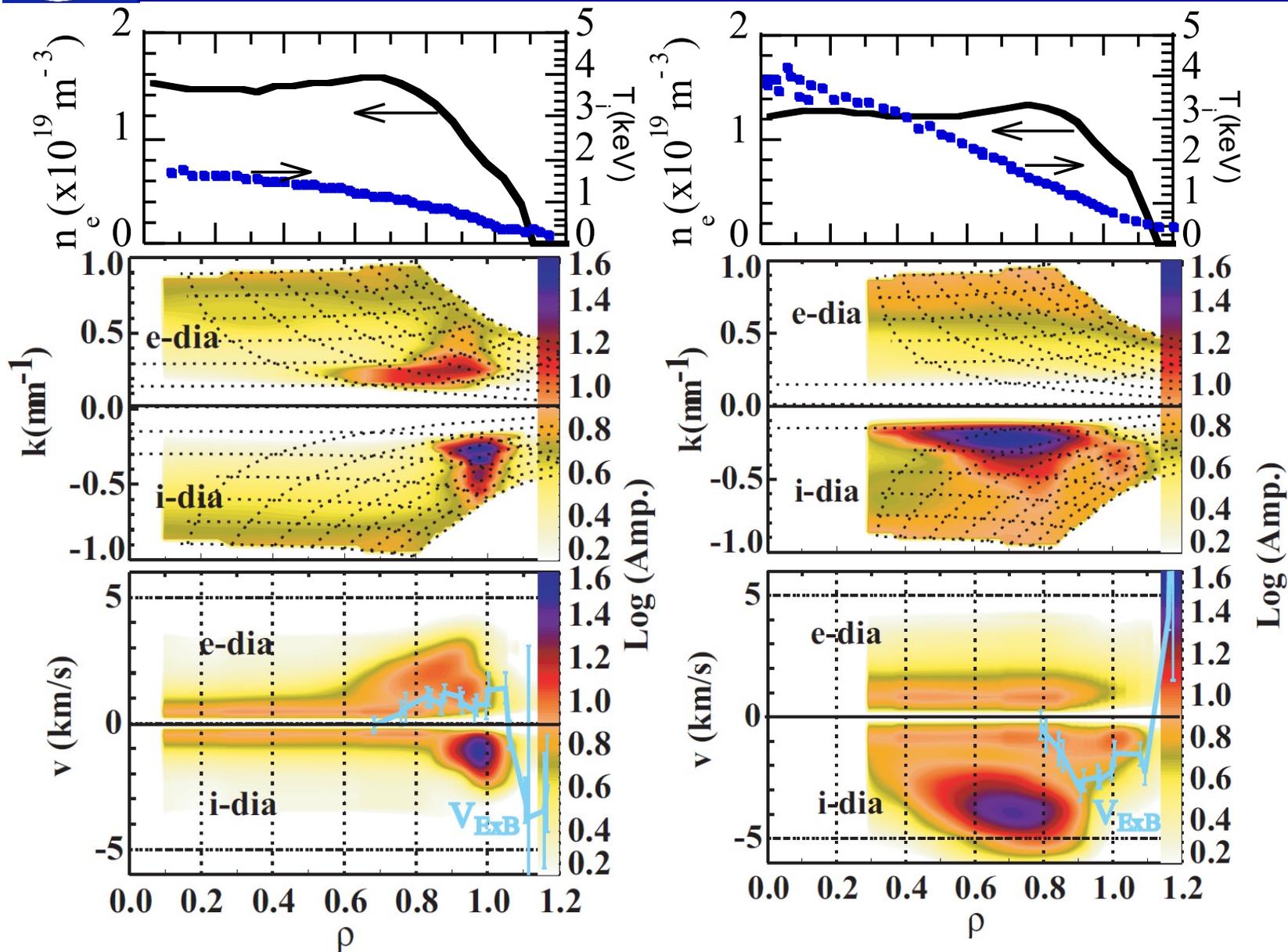
極座標系 $S(k, \theta) \rightarrow S(k, \rho) \rightarrow$

乱流の進行角度 θ は磁力線の方向に垂直。

磁力線の報告はビーム軸にそって空間的にmonotonicに変化する。

乱流の進行方向をビーム軸方向の位置に置き換えることができる。





イオン温度が上昇すると乱流のピークが周辺から内部領域に移った。

この乱流計測(K. Tanaka et al, Plasma Fusion Res. 2010)を契機にシミュレーションの研究が大きく進展した。

Nunami et al, Plasma Fusion Res. 2011

Nunami et al, Phys. of Plasma 2012

Ishizawa et al, Nuclear Fusion 2015

時間連続的計測も可能。
同位体効果、同位体ミキシング、
デタッチプラズマでの乱流
spreading, ボロンパウダーによる
乱流抑制などの理解に貢献

1. JT-60SA

接線視野を用いる（垂直視野では磁力線の角度変化が小さい）
データ解釈が複雑。

すでにEuroFusionとの共同研究を開始している。

科研費基盤A採択済み。

ターゲットは電子加熱下の輸送、高速イオンと乱流の相互作用

2. LHD 0.5T

ターゲットは高速イオンと乱流の相互作用

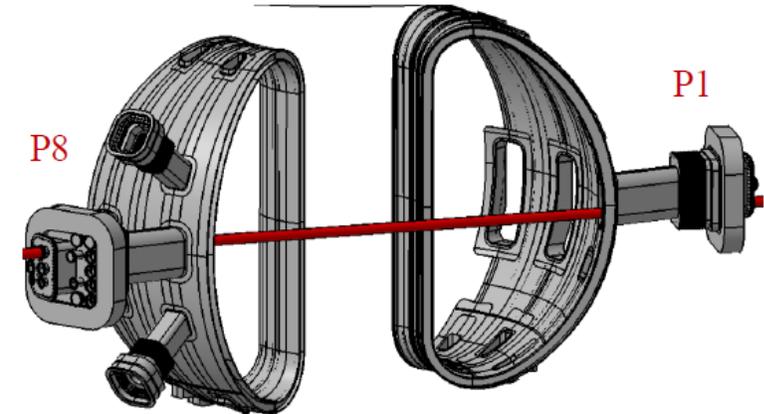
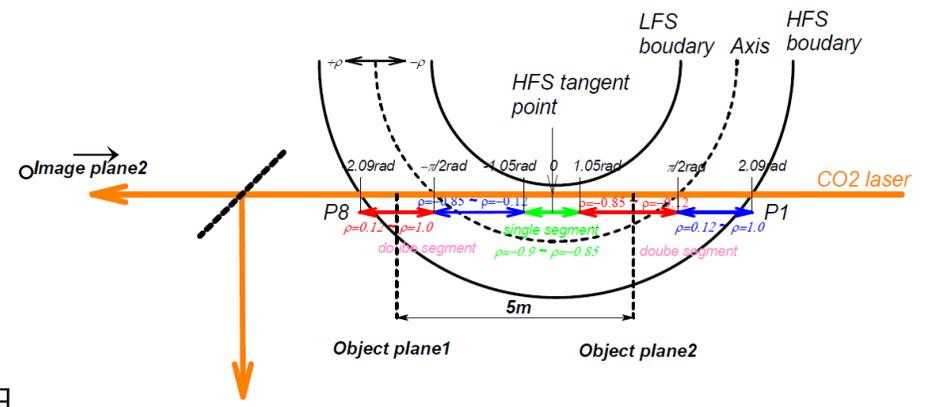
3. W7-Xとの比較

IPPによるPCIが稼働中

→同じ条件下でどちらの揺動が強い？

シミュレーションはW7Xの方がはるかに強いことを示唆（Warmer, Tanaka et al PRL 2021）。

最適化配位のための知見の獲得を目指す。



S. Coda et al, NF2021
JT-60SAでのPCIの視線



信念1 優れた計測があれば、優れた物理結果は確実に得られる。

信念2 乱流計測はシミュレーションの検証をするだけでなく、シミュレーションが予測しない物理現象を見出すべき。

信念1のためには

計測、データ解析の専門家と共同研究を行う。専門家が集結した本ユニットで行うのが最適
JT-60SAでは接線視野による新たな解釈の難しさがある。

磁力線の角度が90度以上変わり角度と空間位置の関係が一価関数でない。

さらには磁気シアの符号が変わる場合のデータの解釈のいついてレーザー計測の専門家だけ Dank、
MHD平衡、データ駆動の専門家との共同研究により計測の高度化を実現

二次元計測1台と1次元計測2台を併用。JT-60SAではパス長が10m程度あり焦点深度の効果を使うことができる。

信念2のためには

乱流駆動物理の理解のために国内外の研究者（理論、実験）および他のユニットと連携。

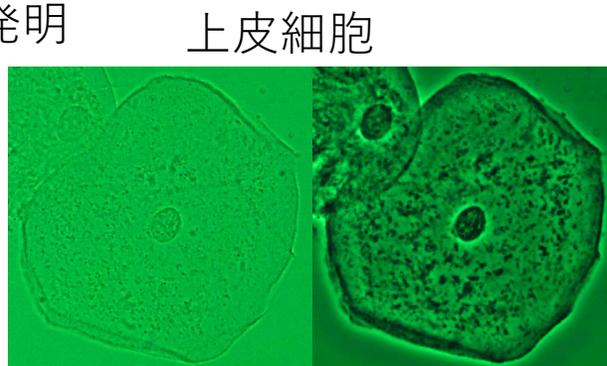
シミュレーションの検証をするとともにシミュレーションの限界を明らかにする。

計測技術をきっかけとして他分野との連携→容易ではない。今後10年間で他分野との共同研究を目指す。

具体例 位相差 (phase contrast) 顕微鏡のプラズマ計測への適用

Zernike(1935)による位相差顕微鏡の発明
(1953年 ノーベル物理学賞)

光学素子により $e^{i\phi} \approx 1 + i\phi$
 $\pi/2$ の初期位相
を与える。
 $1 + \phi$
 $(1 + \phi)^2 \sim 1 + 2\phi$



光学顕微鏡 位相差顕微鏡

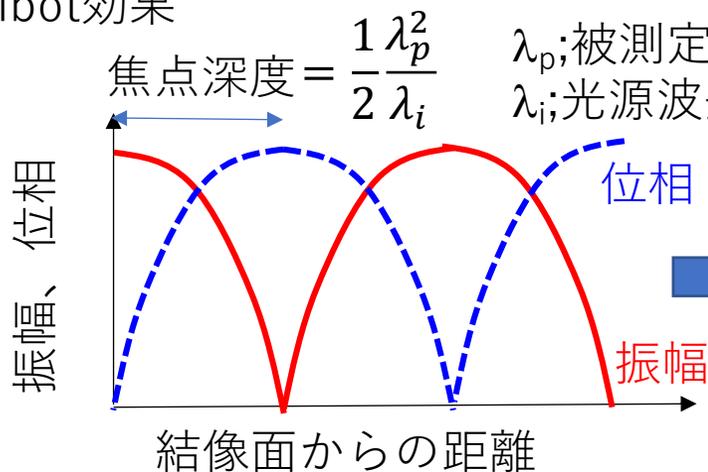
ルビナーによるプラズマの像の計測

CO2レーザーを用いたプラズマ中の乱流計測

Weisen 1986

微小位相変化($i\phi$)を強度変化(2ϕ)に変換

Talbot効果



Talbot効果
波または回折格子などの周期的な物体の強度及び位相は結像面から周期的に表れる。

透過型で軸方向空間分解の取得の可能性→通常
のプラズマの揺動では焦点深度
~mで。十分な分解能を取得できない。

光源の波長、測定対象を変えて他の分野への適用

長いパス長~10mを持つ
JT-60SAへの適用

核融合科学研究所の学術研究の中心テーマは、「トーラスプラズマの総合的理解」であり、創設以来、すでに長く行われ大きな成果が上がってきた。それと比べてどのような（より大きな？）進展をもたらす未踏の研究が展開できるのか説明されていない。

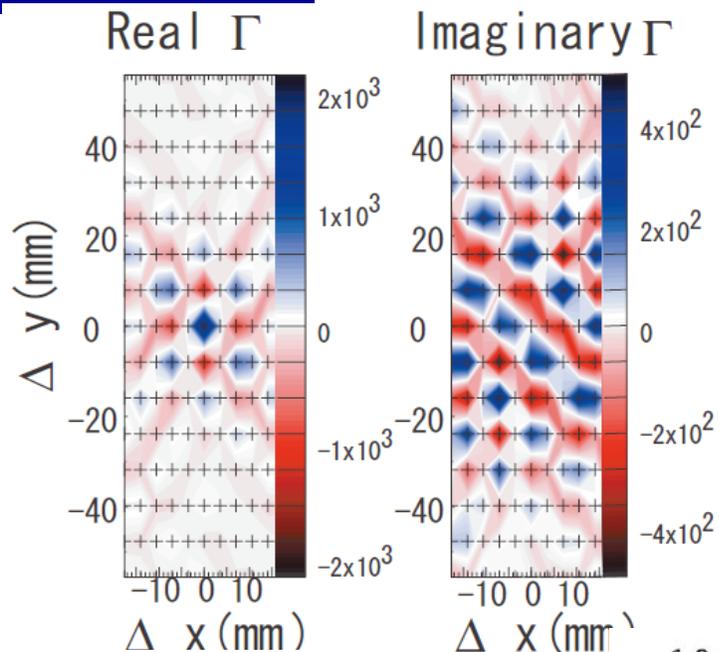
コメントに対する答え

トーラスプラズマの総合理解ということが核融合研の設立時に目標とされているが、これについては提案者は十分な成果を上げていないと考えている。LHDで行われたのはLHDの物理であり、トーラスプラズマの総合理解ということであればLHDだけでなく他の装置でも実験を行い、他の装置とLHDの結果を比較して初めて知見を得ることができる。本提案でトカマクにおける研究、W7Xとの比較を重視しているのは、これまでの核融合研の研究と異なり、他の装置との比較においてトーラスプラズマの総合理解を目指すためである。



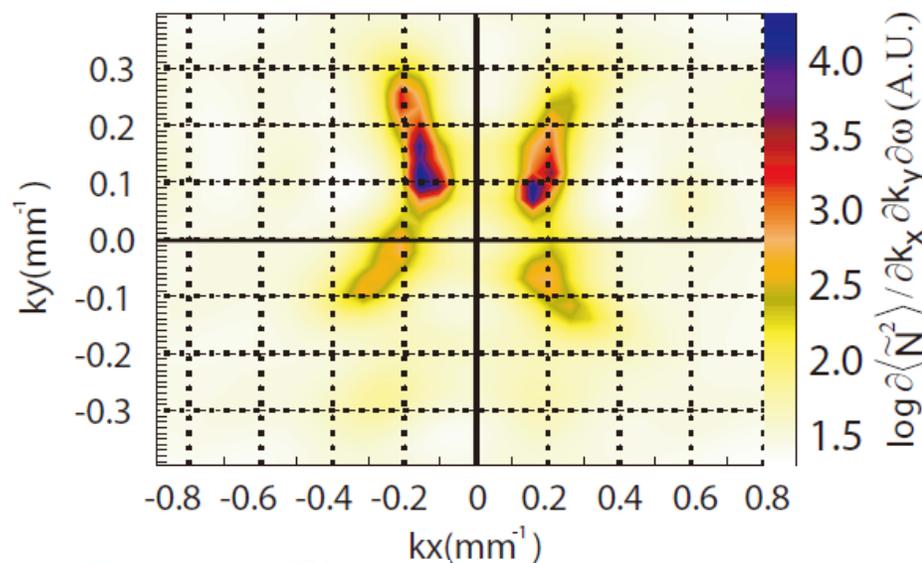
乱流の積分
二次元像

(a)

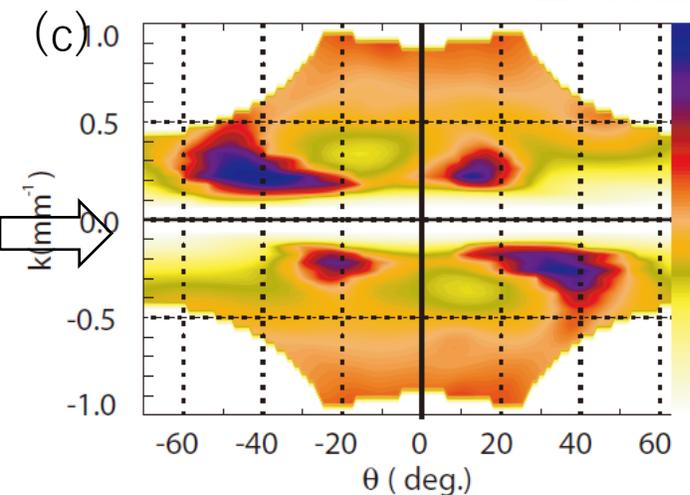


空間的
フーリ
エ変換

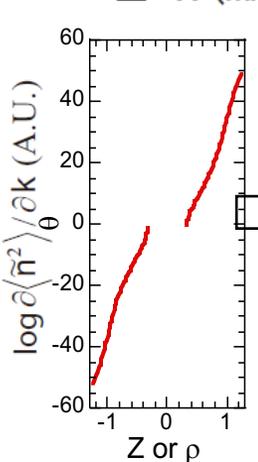
(b) 乱流の二次元波数数スペクトル



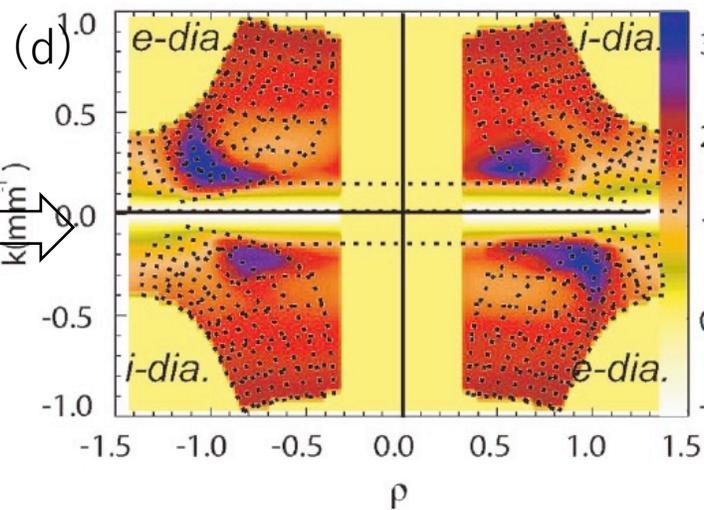
→



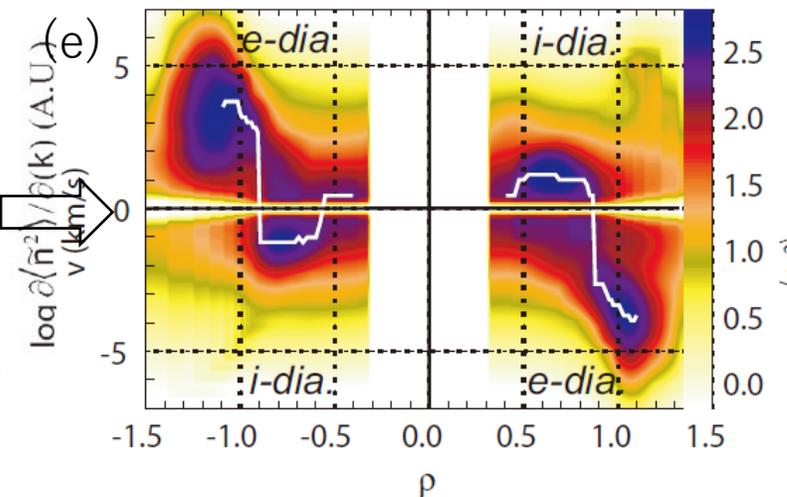
直交座標系二次元波数スペク
トルを極座標波数に変換



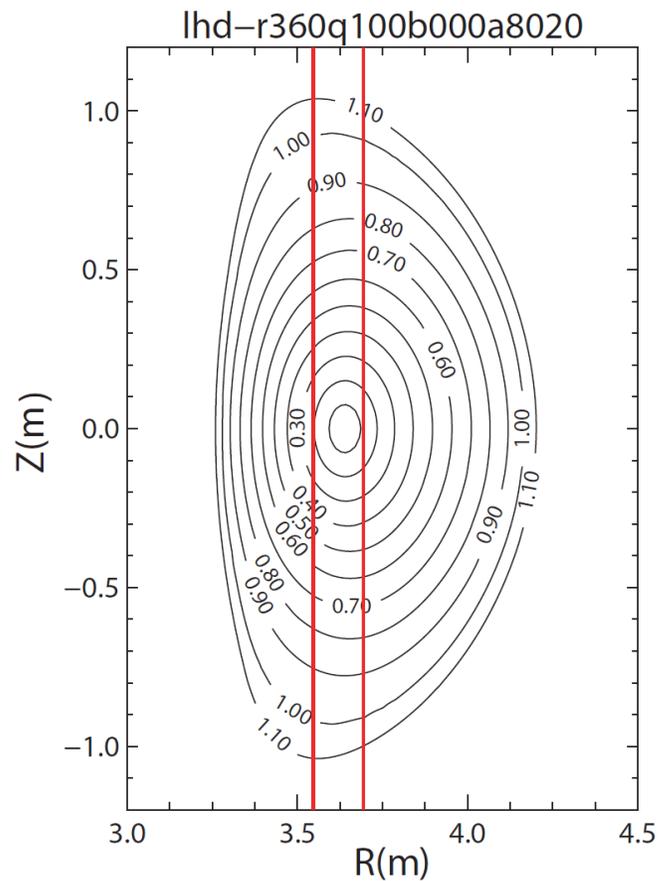
ρ;規格化空
間位置



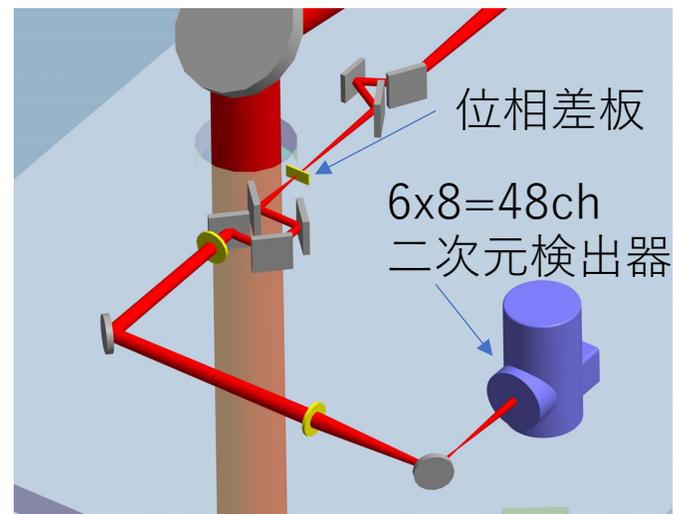
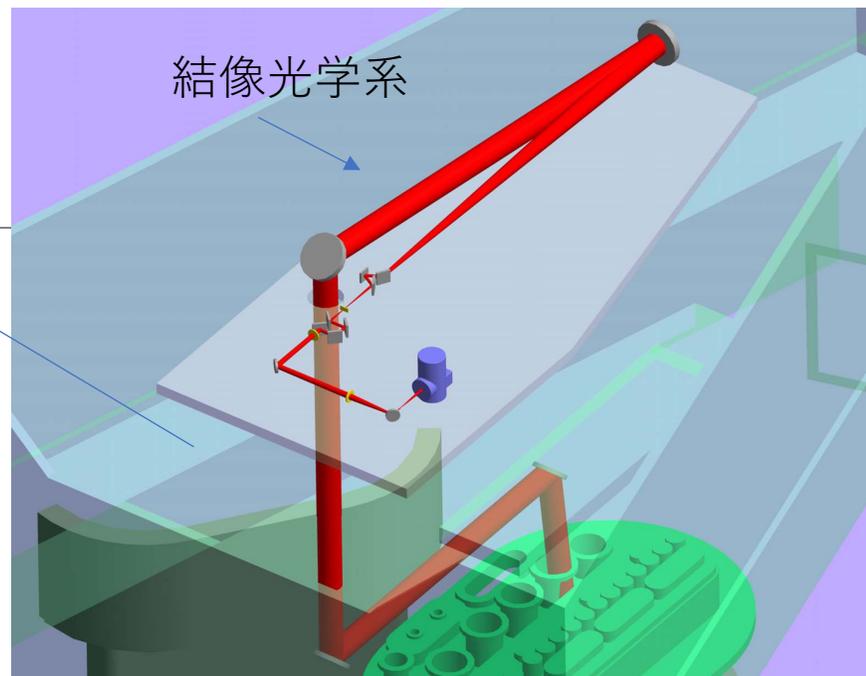
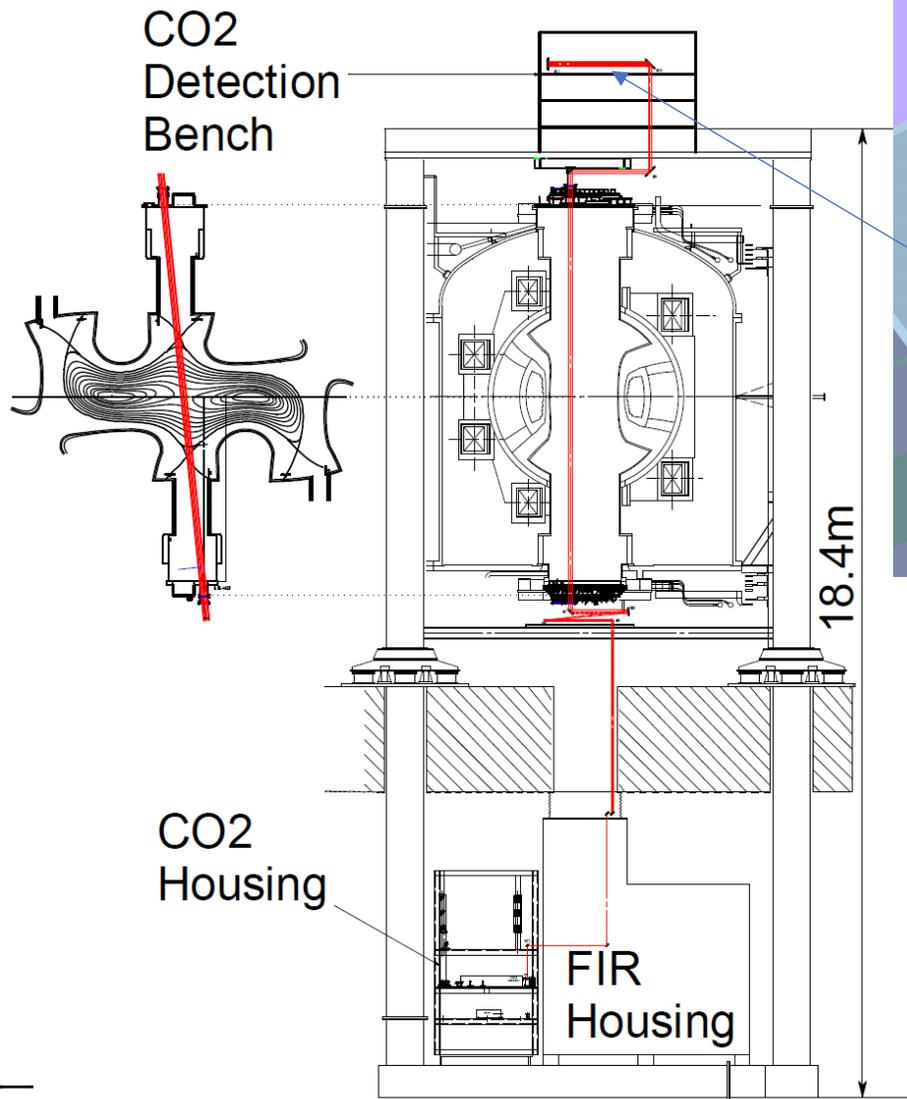
進行方向を空間位置に変換

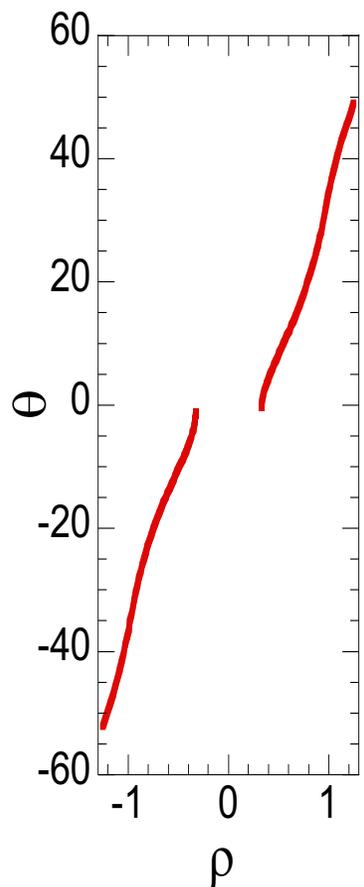


波数を位相速度に変換

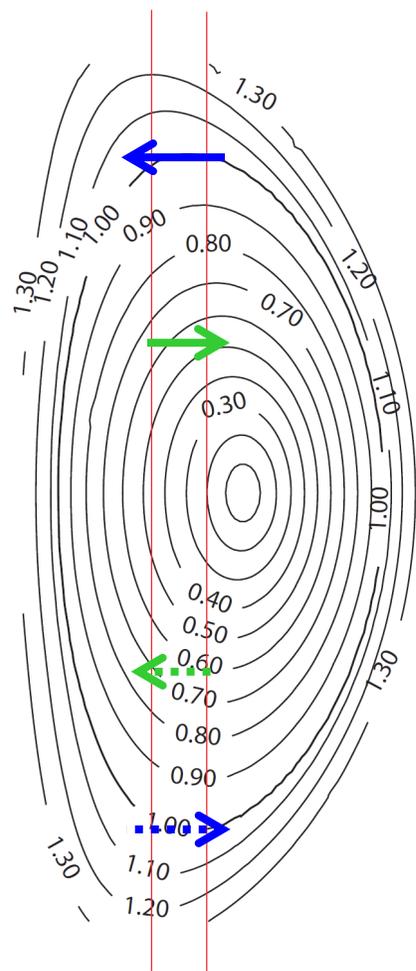


CO₂レーザーは干渉計用のレーザーの
パワーを一部分岐して行う。

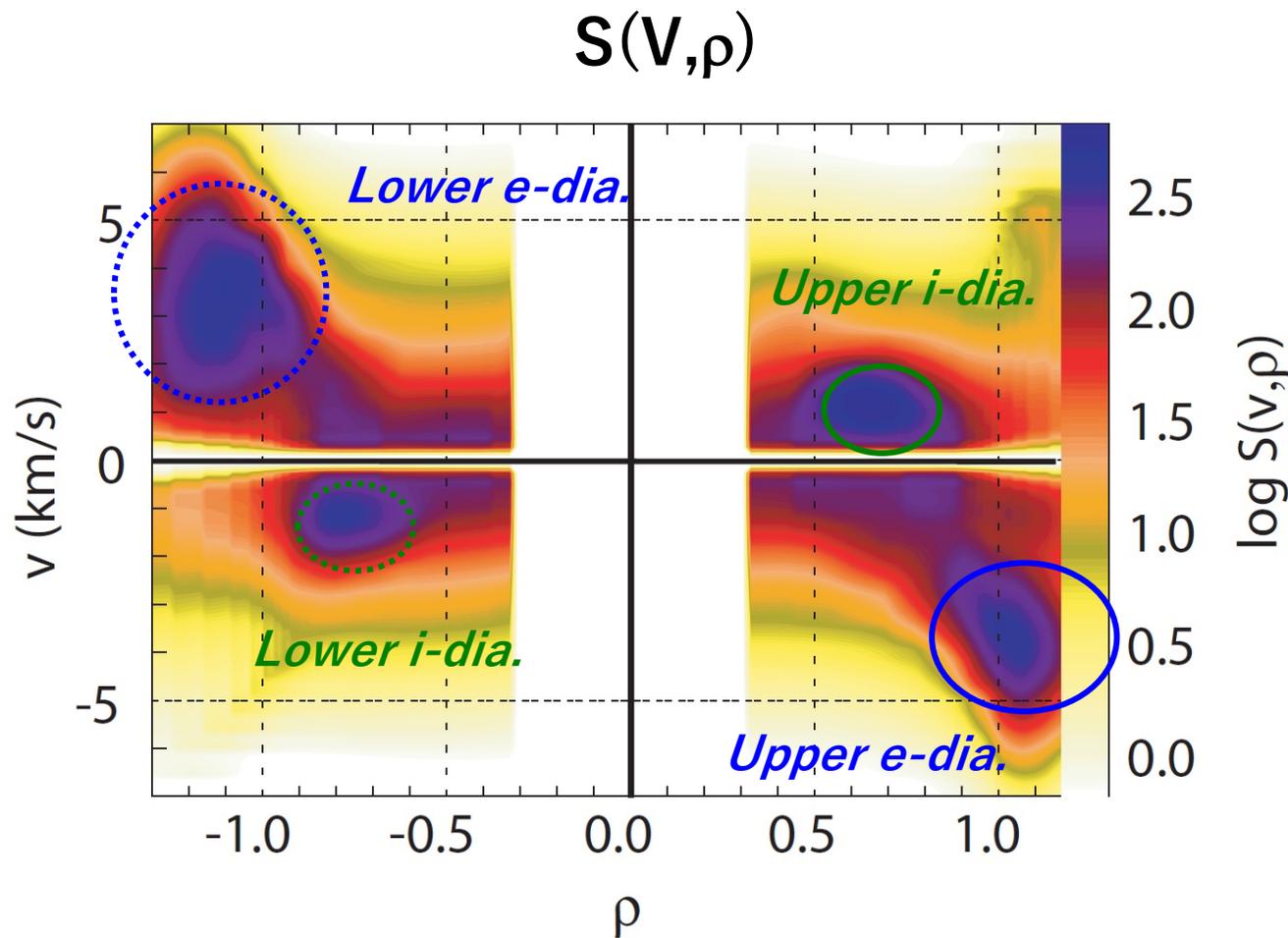




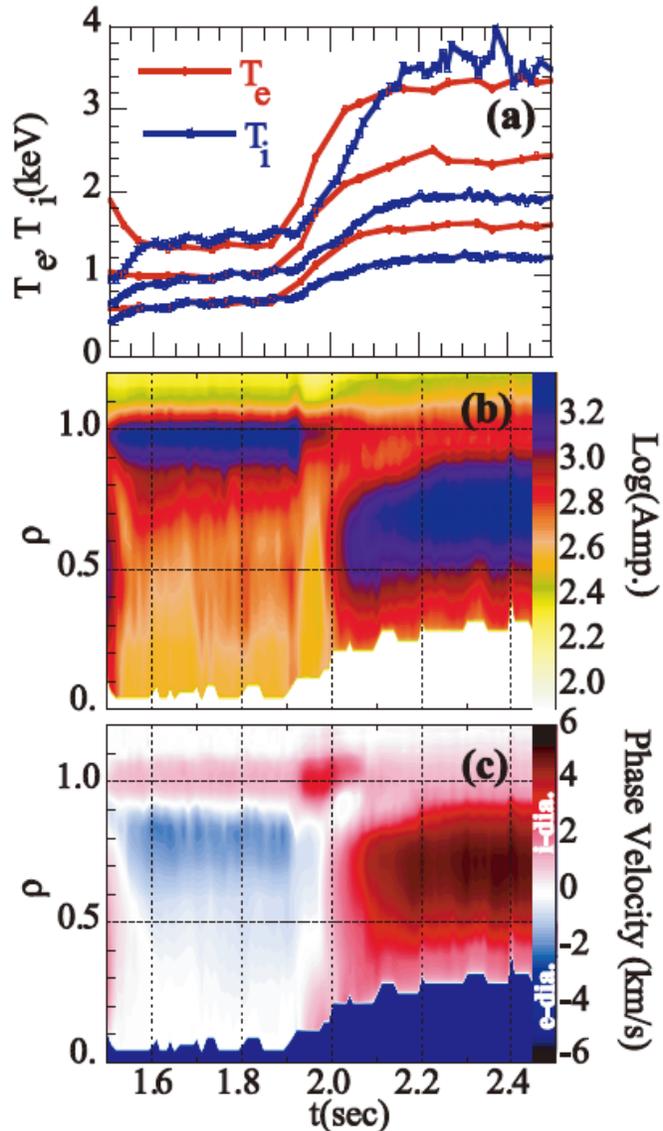
磁力線の角度
の変化



計測断面積



プラズマの内部領域と周辺領域では進行方向が反転している。



乱流揺動振幅、乱流位相速度($\sim E \times B$ ポロイダル回転速度)のほぼい全ての空間領域における時間変化計測が可能。

イオン温度の増加に伴い乱流のピークが移動したというよりは周辺の流れが消失し、内部の乱流が励起されたと考えるべきでは？

K. Tanaka et al PFR2010