

# 乱流・輸送・加熱に関する連携研究の進展と展望

- NINS若手分野連携研究プロジェクト「SoLaBo-X」のダイジェスト紹介 -

仲田 資季<sup>1</sup> (Motoki Nakata),  
勝川 行雄<sup>2</sup> (Yukio Katsukawa),  
今田 晋亮<sup>3</sup> (Shinsuke Imada),  
SoLaBo-X(そらぼえっくす) project

<sup>1</sup>自然科学研究機構 核融合科学研究所

<sup>2</sup>自然科学研究機構 国立天文台

<sup>3</sup>名古屋大学 宇宙地球環境研究所

他、多機関

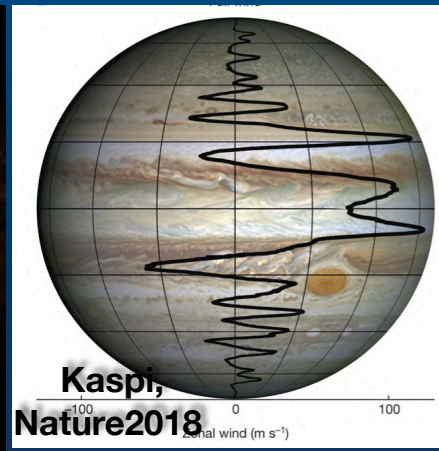
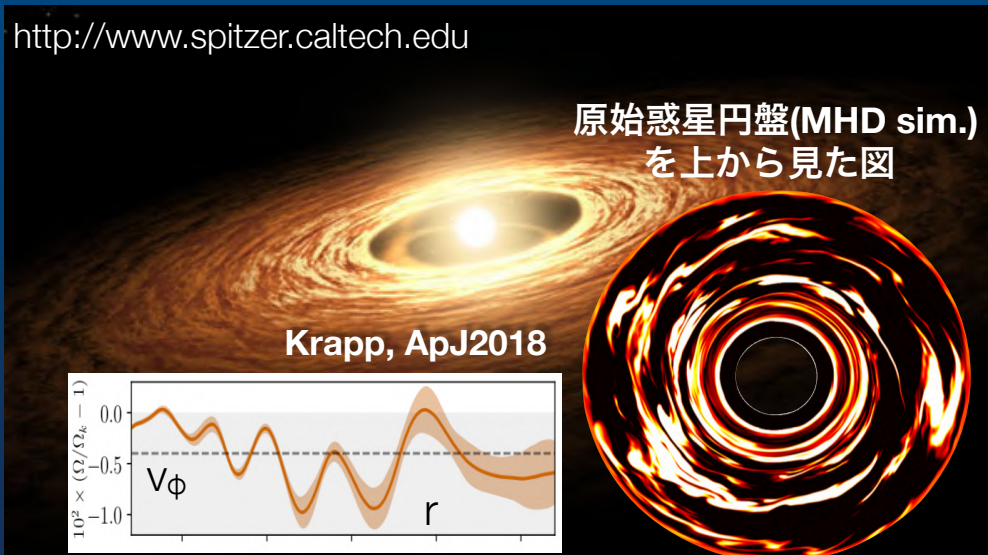
# プラズマの乱流・流れの研究の拡がり

- プラズマの乱れ(非線形性)や流れ(構造形成)で溢れかえった世界

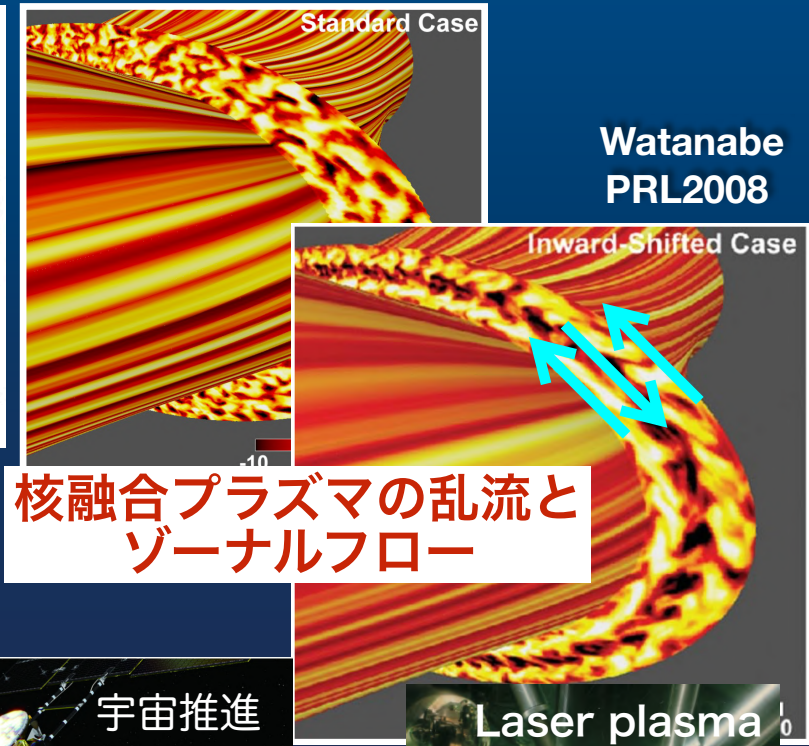
星が生まれる時も

星が生まれた後も

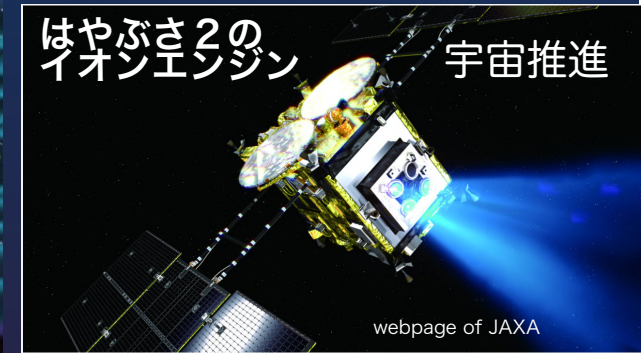
地上の究極のエネルギー源でも



深さ3000kmにおよぶ木星大気のZF構造



ZFシアによるダスト分布の局在(微惑星形成)



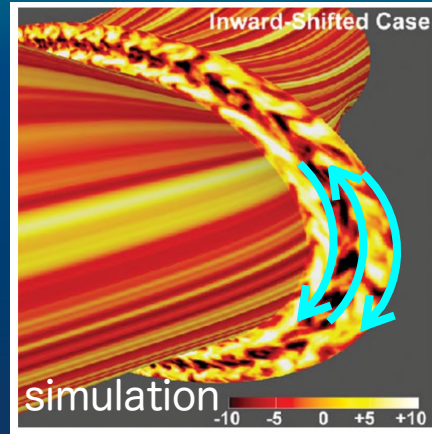
# 連携研究の起点となる共通課題

- 磁場閉じ込めプラズマにおける乱流輸送と自発流の形成
  - 乱流と輸送を抑制する流れ場の自発形成
  - 発現条件や形成機構の解明が課題
- 太陽プラズマにおけるコロナ加熱・太陽風加速問題・ダイナモ機構
  - 6千度表面に対して100万度の外層大気
  - 加熱機構の”定量的な”解明が課題

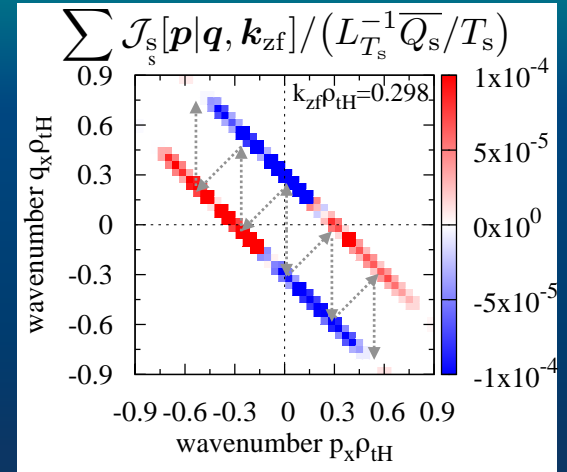


ミクロな揺らぎからマクロな構造の形成過程・エネルギー伝達などの、プラズマに内在する”機能”の解明が両分野にとっての共通課題

LHDにおける自発流形成



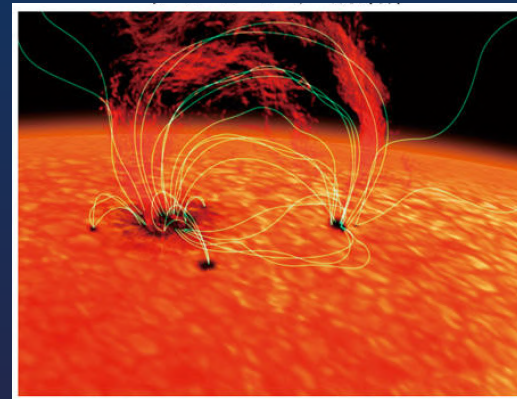
Nakata PRL2017, PoP2012



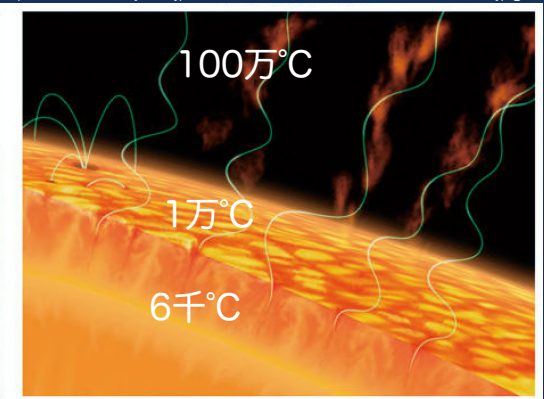
乱流の非線形相互作用の定量化

太陽コロナ加熱問題

[http://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/files/20160307\\_2.jpg](http://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/files/20160307_2.jpg)



ナノフレア加熱



波動加熱

# SoLaBo-X project (2018startup + 2019~)

自然科学研究機構(NINS) 若手分野間連携プロジェクト

「高次相関解析とインフォマティクスが拓く実験室・天体プラズマの加熱・輸送・乱流ダイナミクスの研究」 (SoLaBo-X: Solar + Laboratory + Cross-disciplinary)

閉じ込めプラズマ分野

核融合研: 仲田資季、永岡賢一、小林達哉、横山雅之、沼波政倫、松岡清吉、伊東大志、大栗鷹基

京都大学: 大島慎介 九州大学: 稲垣滋、佐々木真、小菅佑輔、寺坂健一郎、藤澤彰英 北海道大学: 富田健太郎

東北大: 高橋和貴、川面洋平 量研機構: 成田絵美、本多充

天体分野 (太陽+高エネルギー天体)

国立天文台: 勝川行雄、庄田宗人、石川遼太郎、町田真美、滝脇知也 名大ISEE: 今田晋亮、飯島陽久

愛知教育大: 政田洋平 JAXA/ISAS: 鳥海森、大場崇義

大阪大学: 高棹真介、佐野孝好 MPS: Sebastian Duran



多成分の乱流場構造の観測が可能な閉じ込めプラズマ研究と太陽(&天体)研究の連携

- 平均パラメータに依らず普遍的に存在する”乱流”に焦点を当てる
- 実験室プラズマの持つ高い制御性と天体プラズマの持つ広いパラメータレンジを掛け合わせた連携研究

→ 実験室-天体分野の間で手法・知見・視点を循環/融合し、新たな研究展開を開拓

# SoLaBo-Xにおける主要課題

- (1) 実験室・太陽プラズマ乱流データを活用した”多成分場(流れ場や磁場、温度場)”の高次相関特性に着目したエネルギー伝達機構の解析 (揺らぎ × 揺らぎ → 構造/機能)
- (2) 機械学習/データ駆動科学的手法などのインフォマティクスを応用した乱流場の大規模時空間構造解析 (物理知見ベースの高速・大容量データ解析)

太陽観測と大・中・小規模乱流実験の有機的な連携下での集中的な滞在型共同研究

太陽プラズマ乱流の物理的理解の進展

+ 次世代太陽観測 (SUNRISE, DKIST, Solar-C) を見据えた乱流解析の基盤構築

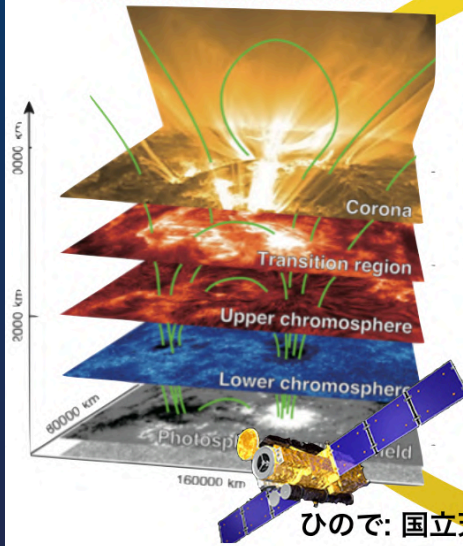
give & take

実験室プラズマ乱流の物理的理解の進展

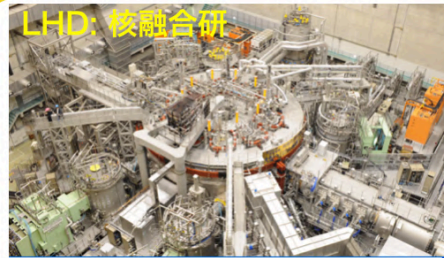
+ 天文分野からの新しい視点での閉じ込め実験の提案・解析手法

## 実験室・天体プラズマの「加熱・輸送・乱流」ダイナミクス

大規模太陽乱流観測



ひので: 国立天文台

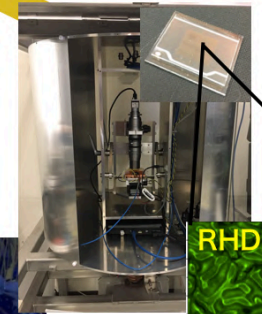


LHD: 核融合研

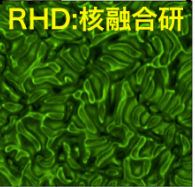
中型直線装置による  
多点相関計測



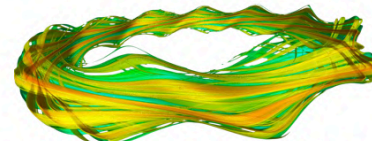
PANTA: 九州大学



小型対流実験装置  
による可視化計測



RHD: 核融合研



大型トラス実験による  
乱流揺動計測

## 高次相関解析・インフォマティクス

図1: 実験室・天体観測の相互連携による新しい研究展開

# SoLaBo-Xで展開中の連携研究トピック

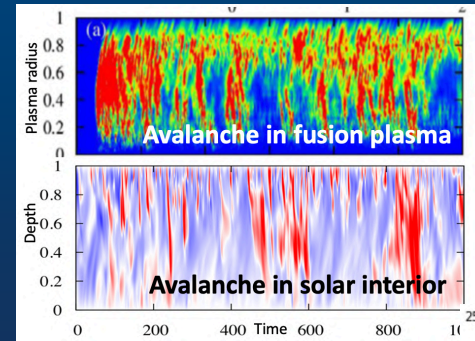
(1) 液晶電気対流の可視化実験による乱対流輸送の素過程解析:  
マルチクロマティック同時可視化+平均流駆動機構で太陽タコクラインを模擬

(Ohguri, Ito, Nagaoka et al. )



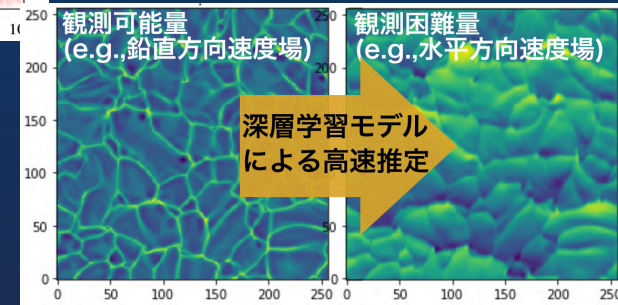
(2) 太陽内部乱対流と閉じ込めプラズマ乱流の比較:  
局所・非局所モデル

(Masada, Nakata, Sasaki et al. )



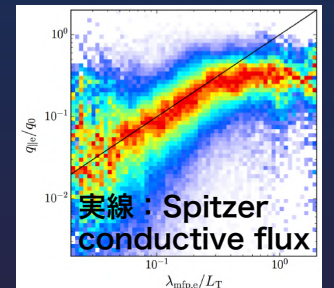
(3) 深層学習を援用した「ひので」乱流データおよび閉じ込め実験データ解析: 観測可能な乱流場から観測困難な乱流場の構造推定

(Ishikawa, Katsukawa, Kobayashi et al. )



(4) コロナループ熱輸送における運動論+乱流の効果: Beyond “Spitzer model”  
(Shoda, Kawazura, Imada, Terasaka et al. ) \*\*直線プラズマ実験とも連携

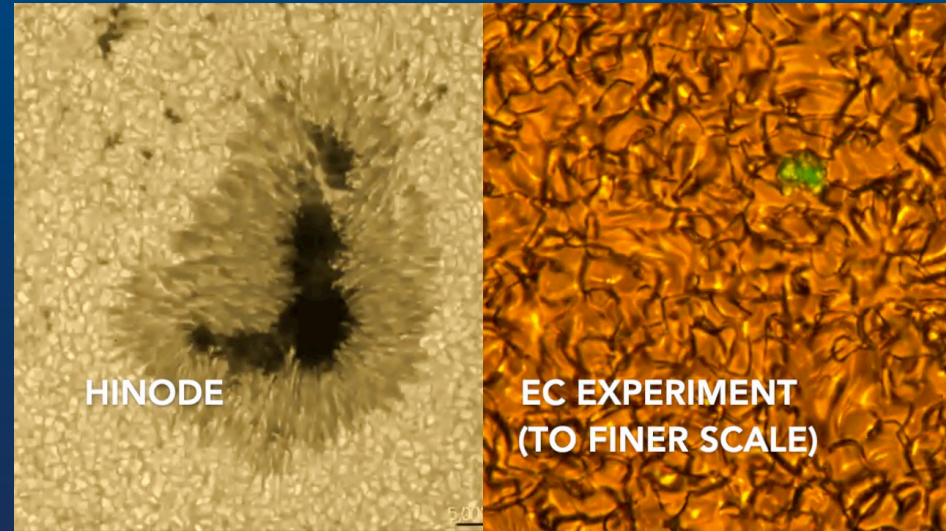
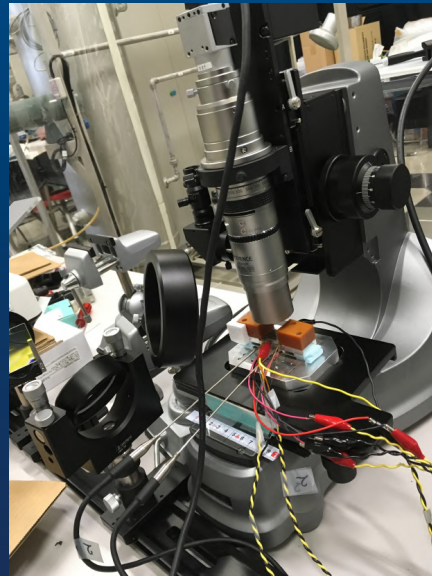
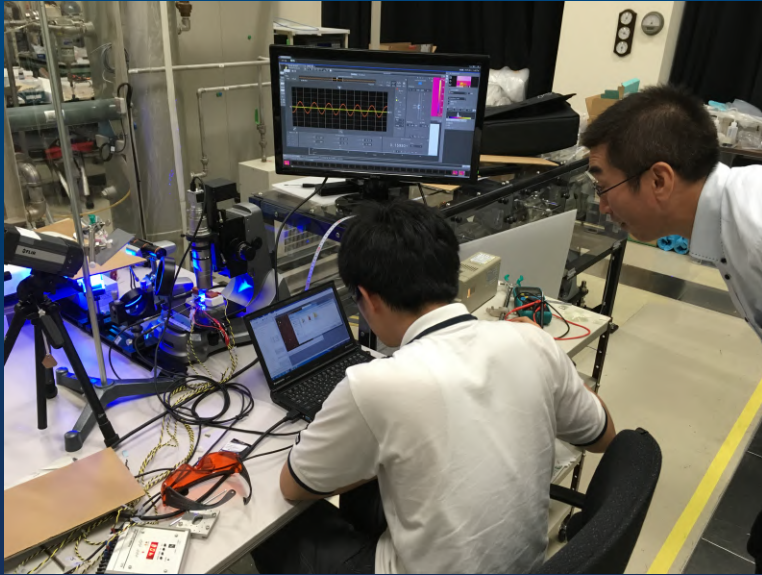
\*\*交流の拡がり: 天文学会、Hinode/IPELS、プラズマ・核融合学会オーガナイズドセッション、太陽研連シンポジウム、JpGUなど



# (1)液晶電気対流の可視化実験による乱流輸送解析

太陽表面や内部対流層に代表されるような乱対流輸送の素過程を調べる研究

→ 液晶セルに交流電場を印加して駆動する電気対流(EC): Ra数など柔軟な制御



・画像解析(PIV/PTV)を用いた対流セルの特性解析

顕微鏡での撮影

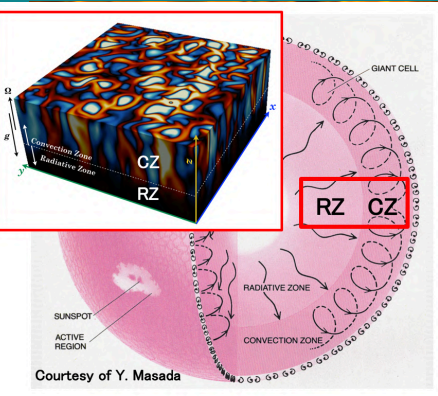
太陽光球面の粒状斑  
(~1Mm)

液晶対流  
(~1 $\mu$ m)

・Tracer粒子の乱流輸送解析  
→複色光源によるマルチクロ  
マティック同時可視化を開発

# 対流不安定/安定領域をシャープに作り出せる

Ito+ 2019

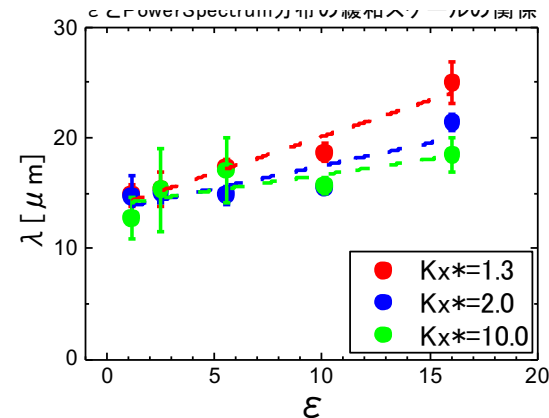
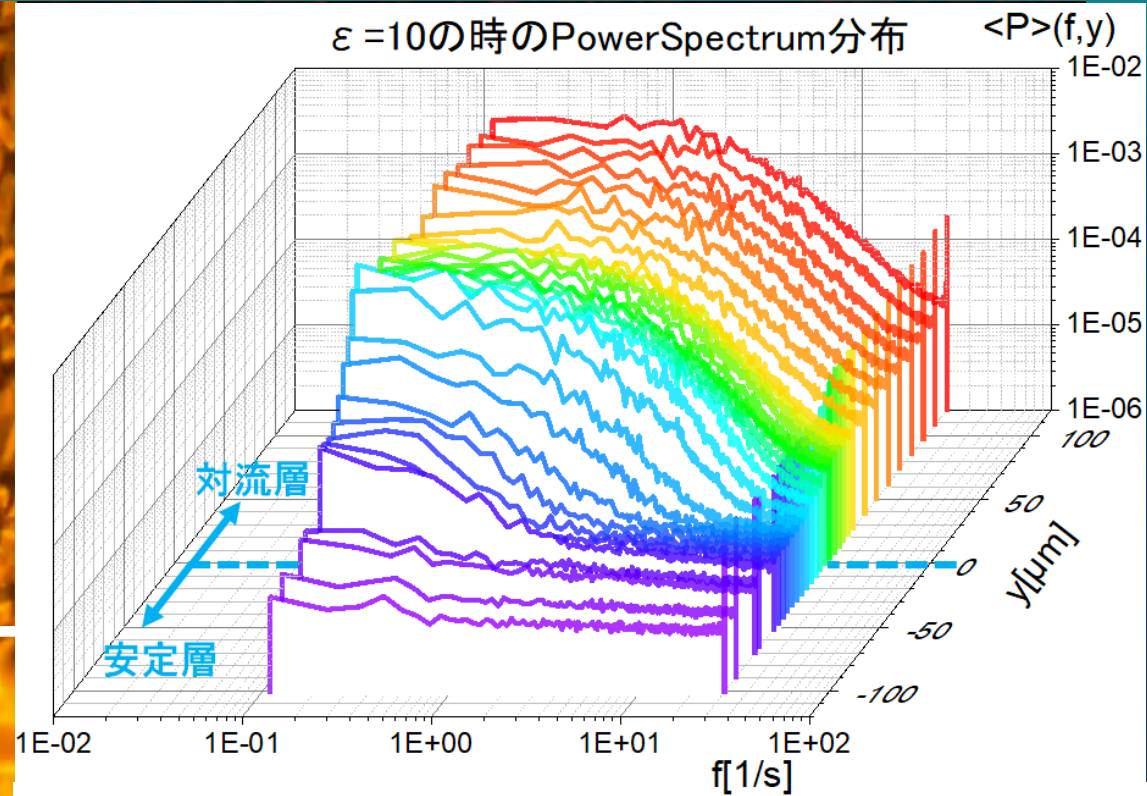


対流不安定領域



対流安定領域

電気対流の可視化実験



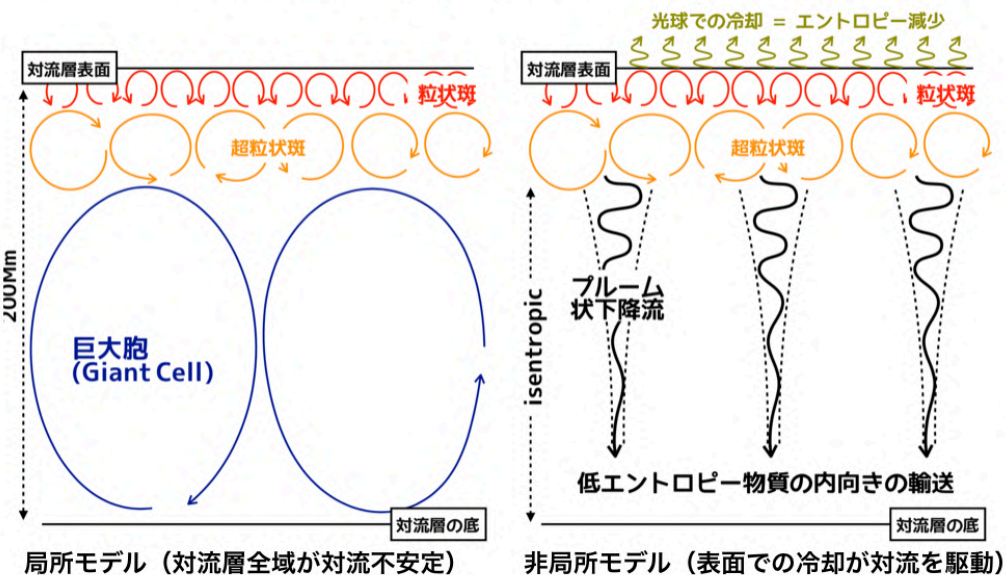
乱流揺らぎは安定領域にどれだけ染み込むか？を実験から定量的に評価



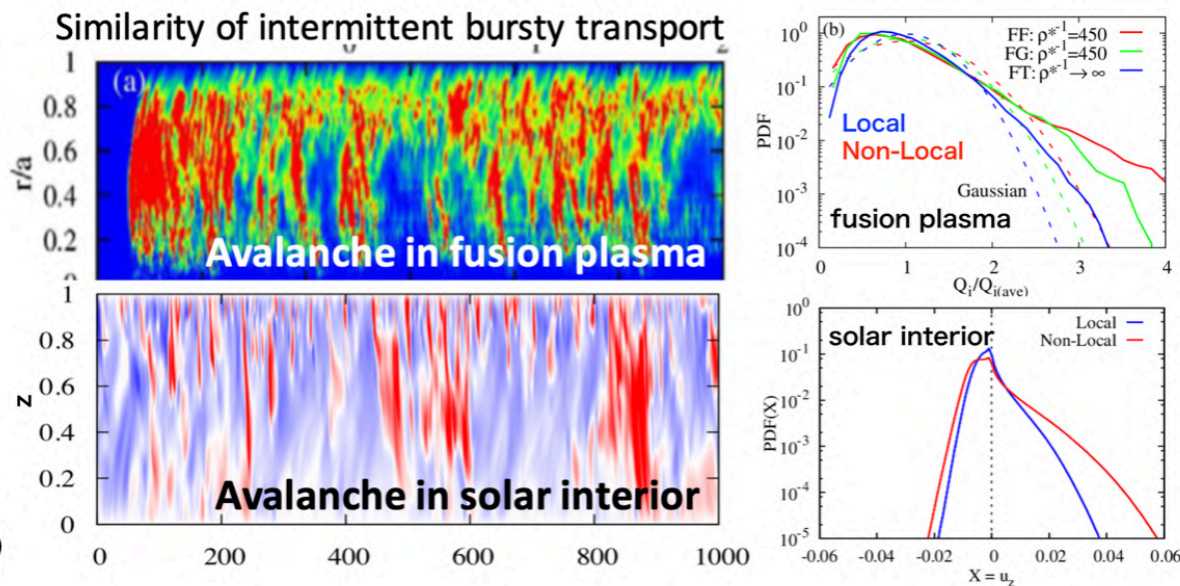
# (2) 太陽内部 & 閉じ込めプラズマの乱流相関解析

太陽表面对流：勾配駆動のLocalモデルと境界冷却駆動のNon-Localモデルの比較  
 (閉じ込めプラズマ乱流輸送における局所・非局所モデルとの類似性)

## 乱対流の描像(局所・非局所)



## 核融合プラズマと太陽内部プラズマの類似性



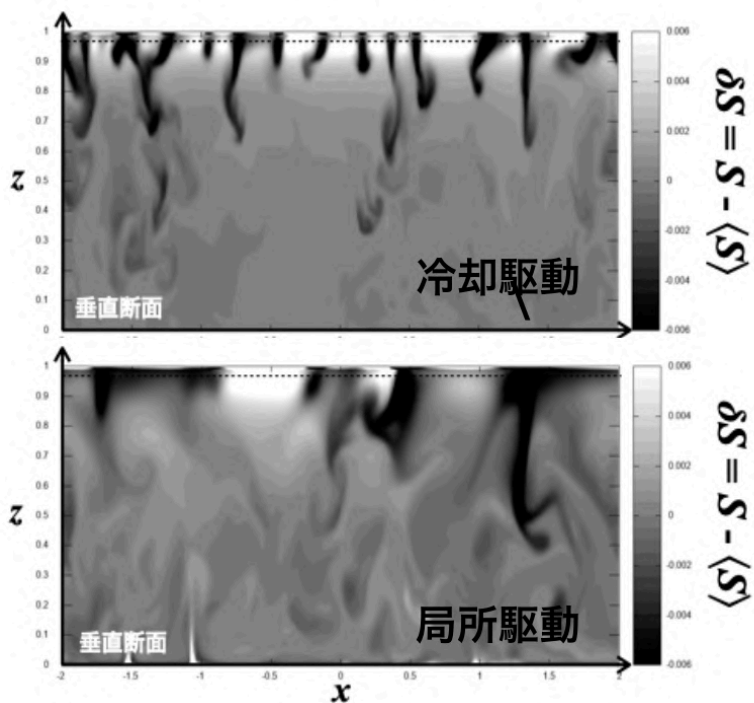
→ 閉じ込めプラズマでの理解：  
 非局所モデルでは乱流揺動がバースト的に長距離伝搬する(雪崩的輸送)  
 強いtail成分を示す非ガウ斯的PDF、SOC-like  $\omega^{-1}$  spectrum

太陽内部乱対流の問題ではどうか？

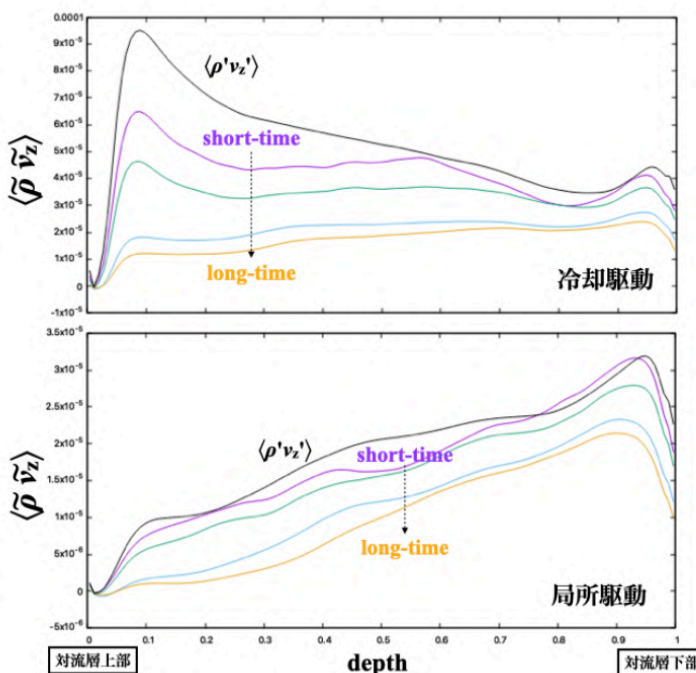
# (2) 太陽内部 & 閉じ込めプラズマの乱流相関解析

太陽表面对流：勾配駆動のLocalモデルと境界冷却駆動のNon-Localモデルの比較  
(閉じ込めプラズマ乱流輸送における局所・非局所モデルとの類似性)

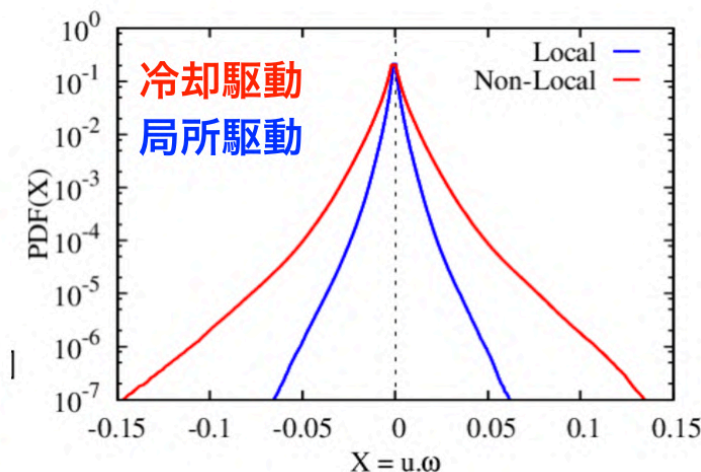
乱対流構造の比較



構造揺らぎに起因する質量流束の比較



運動ヘリシティの比較



Masada & Nakata, JSPF2020

- 時間・空間に関する二重平均の手法を用いて、局所・冷却駆動モデルにおけるコヒーレントな乱流揺動(構造ゆらぎ)の影響を抽出
- 高次相関量(運動ヘリシティなど)に対して核融合プラズマ研究でのモデル化手法を適用

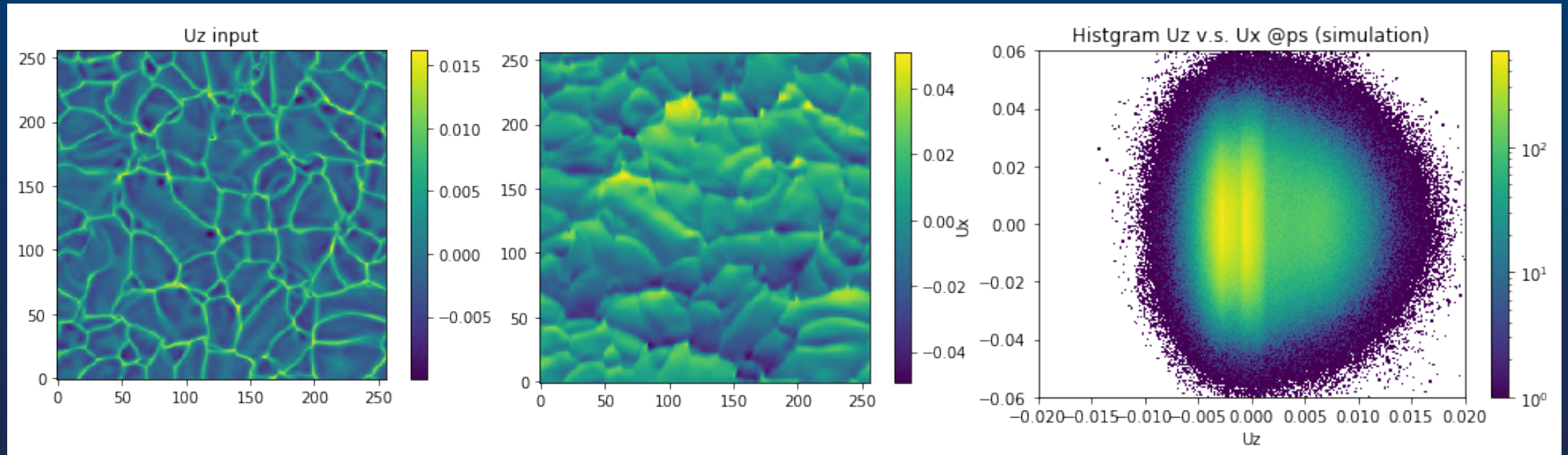
# (3) 深層学習による観測/実験データの高速・大容量解析

観測・実験における観測可能量(e.g., 鉛直成分 $U_z$ ,  $B_z$ )から、  
観測困難量(e.g., 水平成分 $U_h$ ,  $B_h$ )を求めるための  
深層学習モデルを構成する

観測可能量  
( $U_z$ : 太陽鉛直速度場)

観測困難量  
( $U_h$ : 太陽水平速度場)

$U_z$  vs  $U_x$ のヒストグラム



→高解像度の3次元MHDシミュレーションデータ  
の深層学習

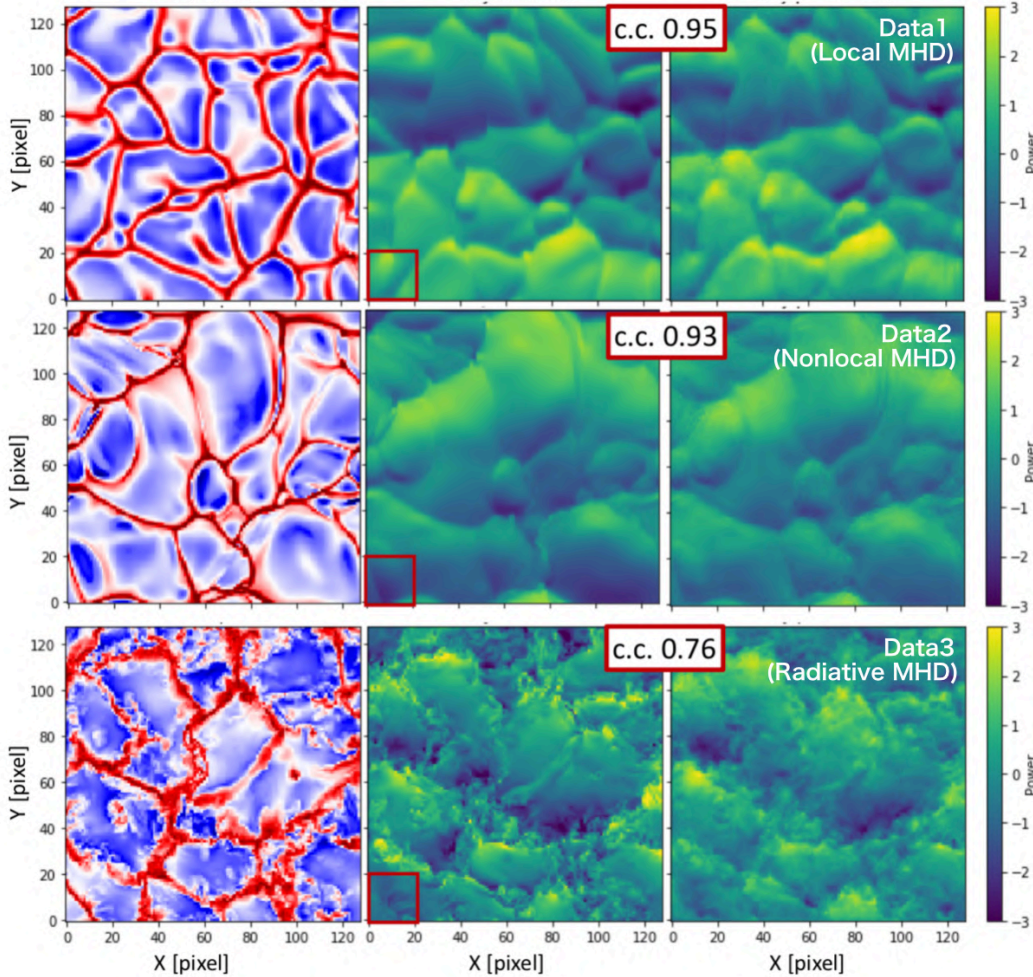
各点どうしの値では相関しない。  
(各点どうしの位置関係が大事)

# (3) 深層学習による観測/実験データの高速・大容量解析

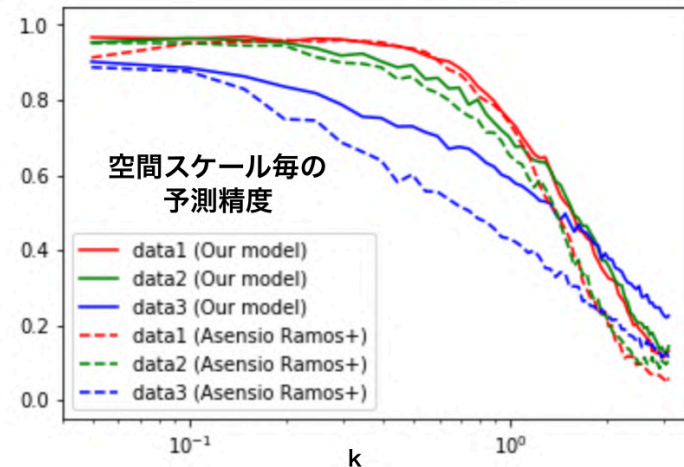
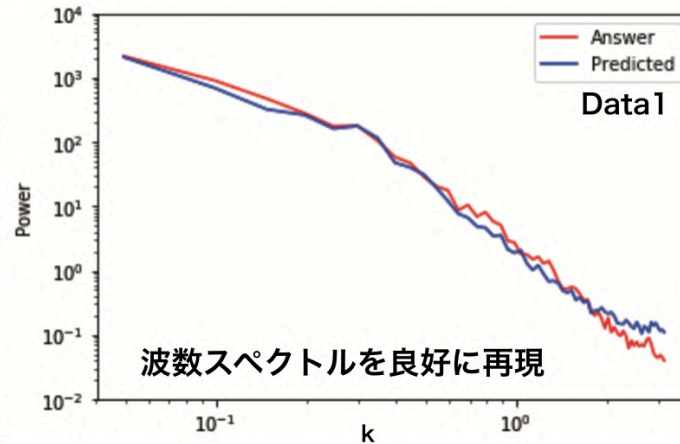
入力データ(観測可能量)  
鉛直方向速度場  $U_z$   
 $U_z$  (Input)

答えデータ(精度検証用)  
水平方向速度場  $U_y$   
 $U_y$  (Answer)

予測データ(観測困難量)  
水平方向速度場  $U_y$   
 $U_y$  (Prediction)



マルチスケールCNNによる  
観測可能量  $\rightarrow$  観測困難量の推定



学習モデルの構築に加え、微細スケールでの性能劣化の要因分析などが進展

Ishikawa, Nakata, et al., in prep.

LHDプラズマ実験での乱流イメージング計測に適用予定

Kobayashi et al.  
PPCF2020

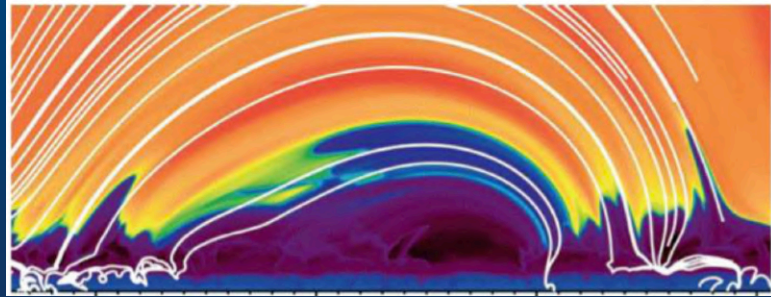
# (4) コロナループ熱輸送における運動論 + 乱流効果

太陽コロナ = 表面より100倍以上温度が高い外層大気 (表面6,000K, コロナ2,000,000K)

→ 表面駆動の非熱的エネルギーが輸送され、上空で散逸/熱化されて高温状態を維持。

(wave turbulence heating & nano-flare heating)

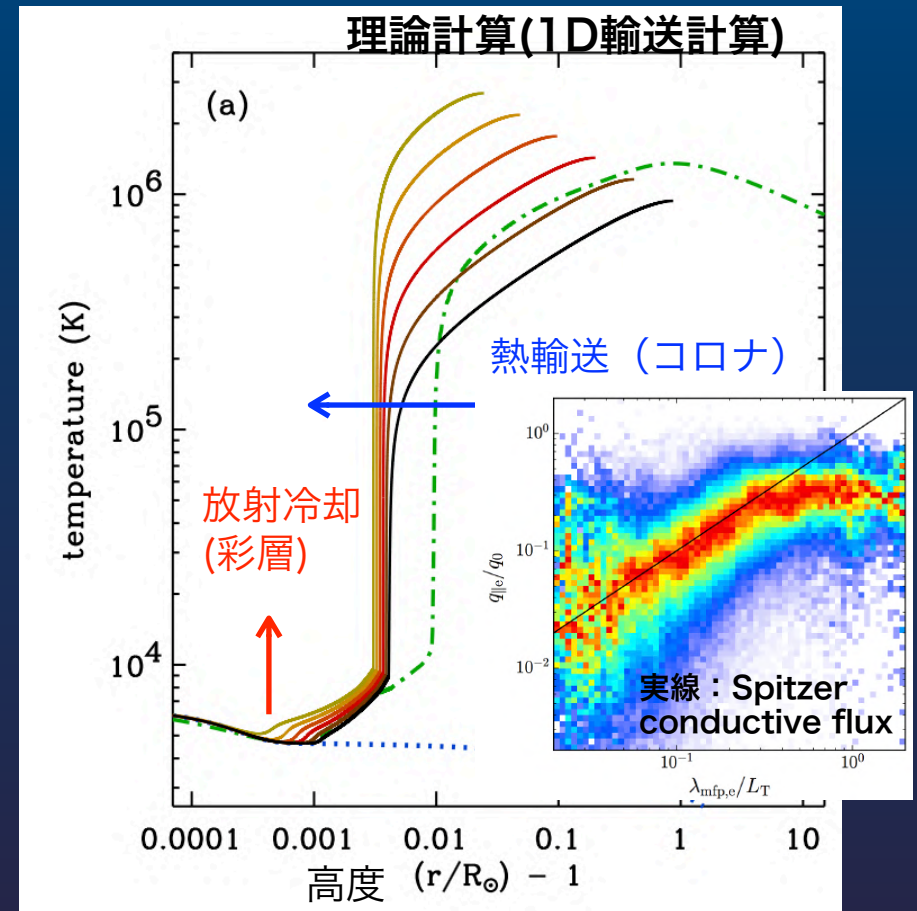
磁場に沿ったコロナループ



→ コロナループに沿って、熱源から準定常分布への緩和はSpitzer conductivity (Spitzer & Hahm 1953) を用いた理論計算

$$Q_{\text{cnd}} \approx \frac{\partial}{\partial r} \left( \kappa_0 T^{5/2} \frac{\partial}{\partial r} T \right)$$
$$Q_{\text{rad}} \approx n_e^2 \lambda(T)$$

近年、Spitzer modelからのズレが観測されており、モデル拡張が求められている。



# (4) コロナループ熱輸送における運動論+乱流効果

コロナループの物理パラメータ

$L \sim 50 - 300 Mm \sim 0.5 R_{\odot}$ ,  $n_e = 10^{16} m^{-3}$  (一様と仮定)

$T_e @ base \sim 10 eV$ ,  $T_e @ apex \sim 200 eV$ ,  $T_e \sim T_i$ ?

$B @ base \sim 200 G$

$B @ apex \sim 10 \sim 200 G$ ?? (観測なし、free param.)

$\delta B_{\perp} / B \sim 0.01 \gg \delta B_{\parallel} / B$  (観測なし)

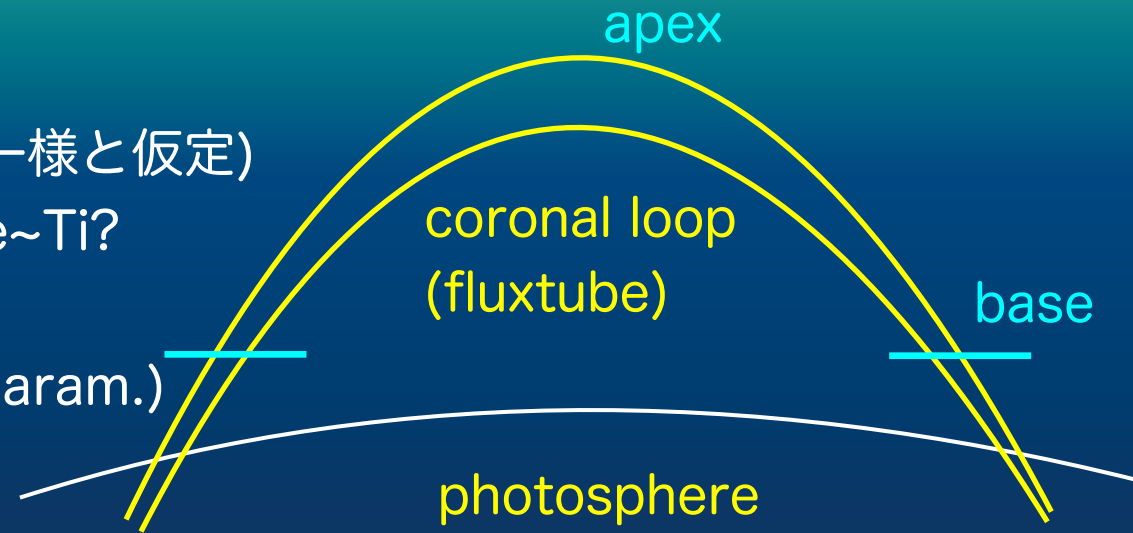
$\lambda_{mfp(e)} \sim 10^5 - 10^6 m$

$\lambda_{\nabla B} \sim 10^7 m$

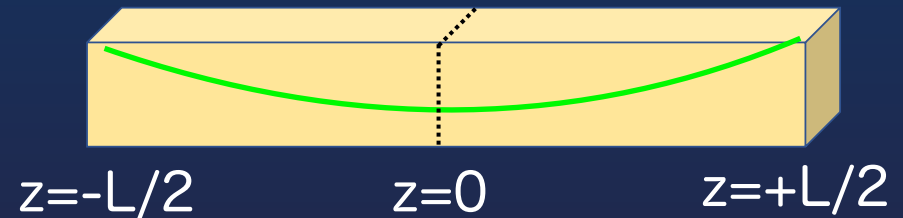
$\rightarrow \lambda_{\nabla B} / \lambda_{mfp(e)} \sim 10 - 100$  (観測なし、free param.)

本研究では、磁場の非一様性や乱流揺動を含んだ運動論計算(閉じ込めプラズマで培われたモデル)に基づいて、Spitzer輸送モデルの拡張を図る。

$\rightarrow$  直線型プラズマ実験装置HYPER-I&II, PANTAで検証実験を準備中

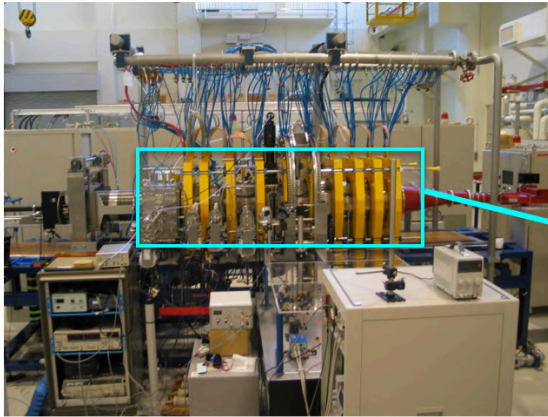


スラブ5Dジャイロ運動論計算



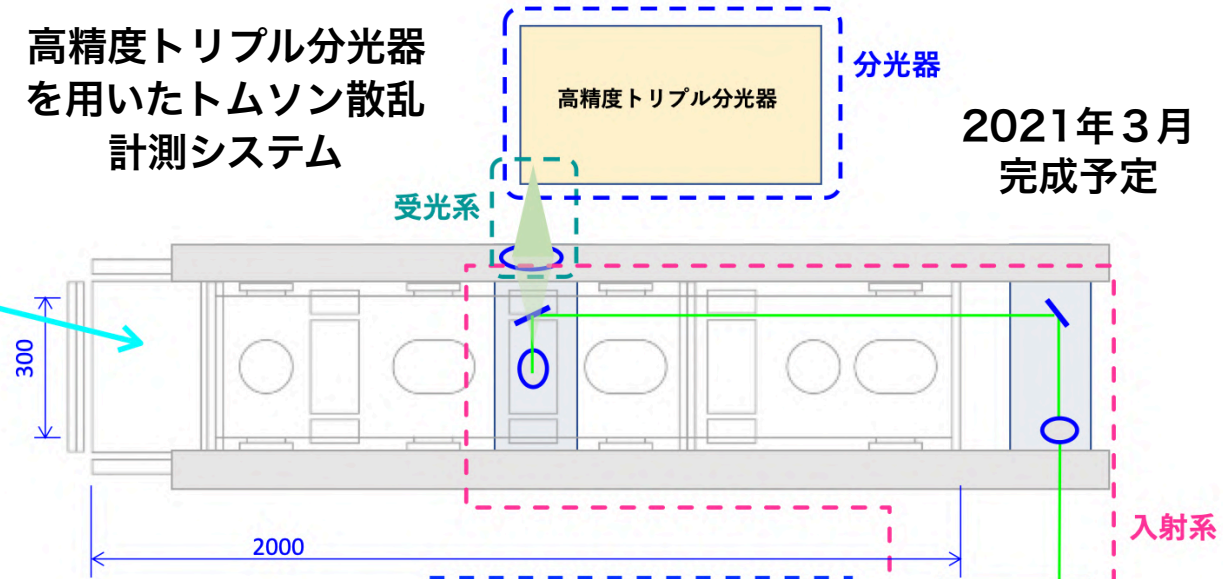
$$B(z) = B_{base} [1 - \varepsilon \cos(2\pi kz/L)],$$
$$\varepsilon = 1 - (B_{apex}/B_{base}) = 1 - (1/R_{mirror})$$

# (4)直線プラズマ実験による粒子分布関数の直接計測



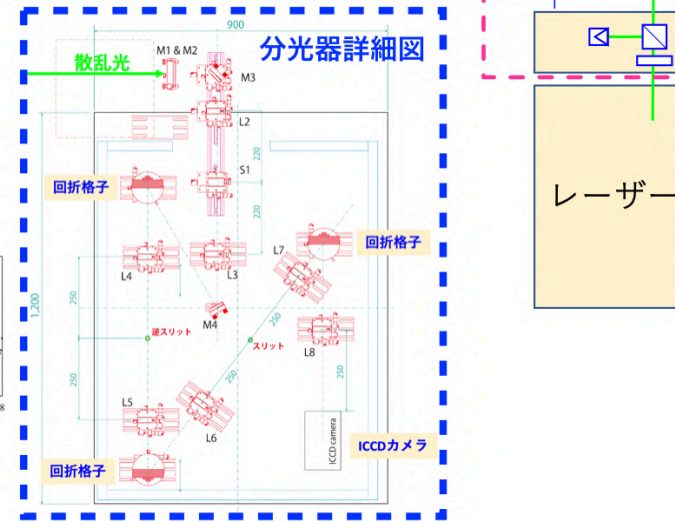
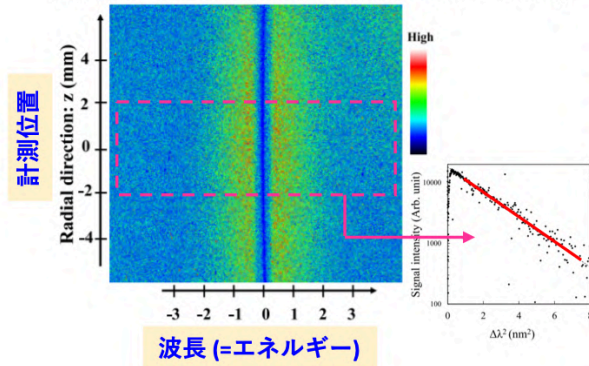
**HYPER-I@NIFS**  
 サイズ：内径 30 cm, 軸長 2m  
 放電：ECR (2.45 GHz)  
 密度： $10^{18} \text{ m}^{-3}$  ( $< 10^{19} \text{ m}^{-3}$ )  
 温度： $< 10 \text{ eV}$  ( $T_e \gg T_i$ )  
 ガス：H, He, Ar, Ne, Xe

高精度トリプル分光器  
 を用いたトムソン散乱  
 計測システム

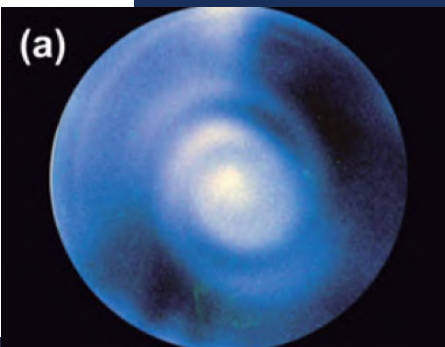


2021年3月  
 完成予定

計測例：電子分布関数 (K. Tomita et al., PFR 2017)



cf. スパイラル構造  
 Yoshimura+,  
 JPP2014



→ 電子分布関数の空間依存性計測を目指した設計(+イオン分布関数・中性ガス分布関数)

# まとめ：今後の天文学との連携の発展性

- (実験室プラズマとしての)核融合プラズマ研究は天文学とどう協働できるか？  
核融合炉たりうるプラズマの生成・制御の確立を目指した研究 (核融合研究発足の動機)  
→ プラズマ乱流と構造形成の解明を通じた水平展開力・様々なモデル・実験検証
- 「乱流・輸送・加熱」ひとつとっても、“モデルの検証”や“新たな物理描像の示唆”、“解析手法の循環・拡張”で協働することが可能 (緊密な対話の成果)
- 2分野のみの連携だけでなく、数理的手法や情報科学的手法なども巻き込むことも重要。

核融合プラズマ研究  
複数イオン・電子の同時多点計測・原子分子過程データベース  
理論モデルのvalidation・運動論効果・非線形相互作用

モデルの定量検証や  
磁場の役割等の素因

超高Re数の多成分乱流場や流れ場の  
高解像度観測とシミュレーション

太陽物理

高解像度の  
乱流ダイナミクス  
\*\*太陽研究は重要な接続  
を与える

広範なパラメータレンジ: 電離度・ $\beta$ ・衝突度・ジャイロ半径  
高エネルギー天体における極限的な現象(ジェットやショック)

一般の天体物理

高エネルギー現象  
(極限パラメータ)