

2002/11/1 京都大学

核燃焼プラズマ統合コード小研究会

階層化物理モデル

九州大学応用力学研究所

矢木雅敏

高温プラズマにおける時間・空間スケールの階層性

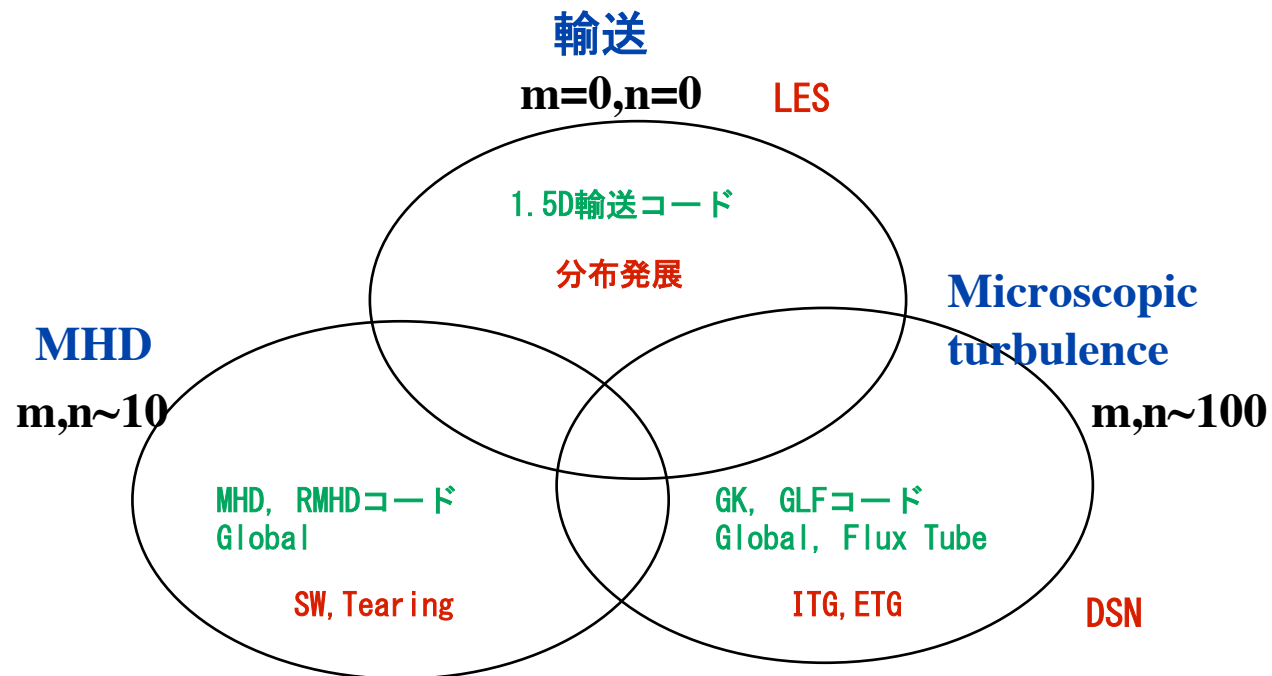
$T_e = T_i = 10 \text{ keV}$, $n = 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $B = 3 \text{ T}$, $a = 1 \text{ m}$, $R = 3 \text{ m}$ に対して

現象	MHD	ドリフト波	抵抗性MHD	輸送
時間スケール	$\sim \tau \text{ sec}$	$\sim 10 \tau \text{ sec}$	$\sim 100 \tau \text{ sec}$	$\sim \text{msec}$
特徴的な周波数	$\omega_A = kv_A$	$\omega_* = k_y v_{Ts} / L_n$	$\nu_{ei}^{1/3} \omega_A^{2/3}$	ω_{ii}
空間スケール	$\sim 10 \text{ cm}$	$\sim 1 \text{ cm}$	$\sim 10 \text{ cm}$	$\sim m$
特徴的な波数	$ka \sim 0.1$	$k \lambda_i \sim 0.1$	$ka \sim 0.1$	$\sim a^{-1}$

空間スケール（波数）による現象の分類

m; ポロイダルモード数

n; トロイダルモード数



磁場閉じ込め核融合

- 平衡配位

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \nabla p \quad \mathbf{B} \cdot \nabla p = 0$$

- 安定性

線形安定性 エネルギー原理 $\delta W \geq 0$

非線形発展 MHDモデル, 2流体モデル

密度、速度、圧力の揺動成分

- 輸送

磁気面平均された密度、圧力分布

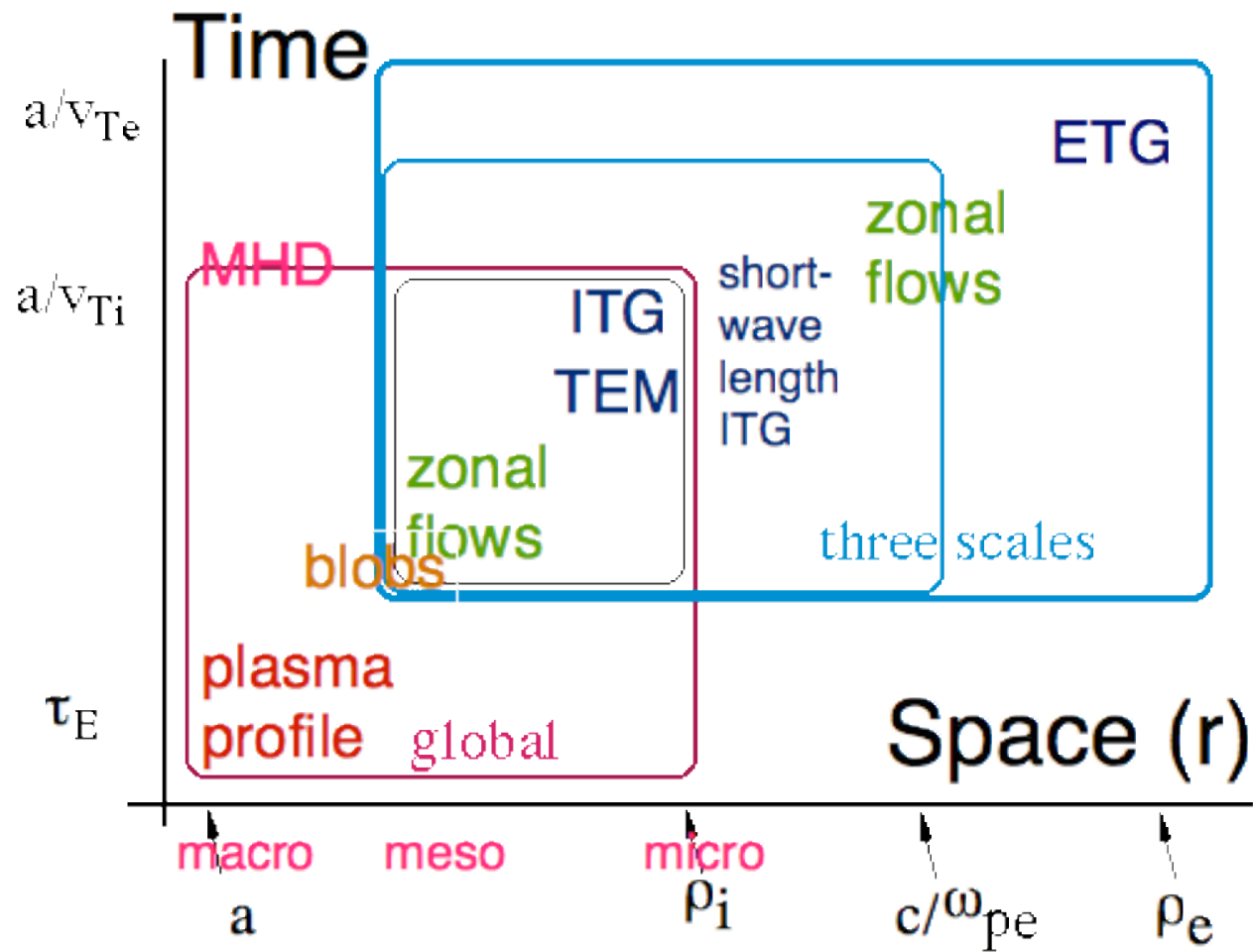
$$\left\langle \frac{\partial n}{\partial t} \right\rangle + \frac{1}{\bar{V}} (\bar{Q} - \bar{Q}') = 0$$

$$\frac{3}{2} \left\langle \frac{\partial p}{\partial t} \right\rangle + \frac{1}{\bar{V}} (\bar{Q} - \bar{Q}') = \langle W \rangle + \langle \mathbf{V} \cdot (\mathbf{F} + en\mathbf{E}) \rangle$$

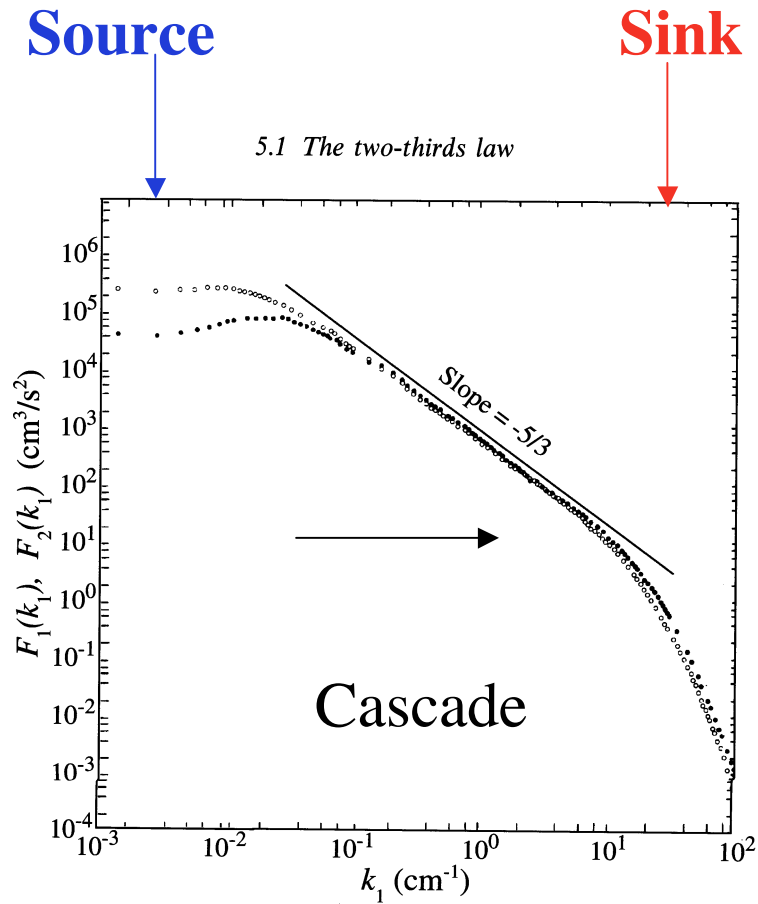
クロージャとして粒子フラックスとエネルギーフラックスの評価

新古典フラックス、乱流駆動フラックス $\bar{Q} \equiv \langle nV^r \rangle, \bar{Q}' \equiv \langle Q^r \rangle$

高温プラズマの多スケール乱流による異常輸送



Navier-Stokes Turbulence



65

Plasma Turbulence

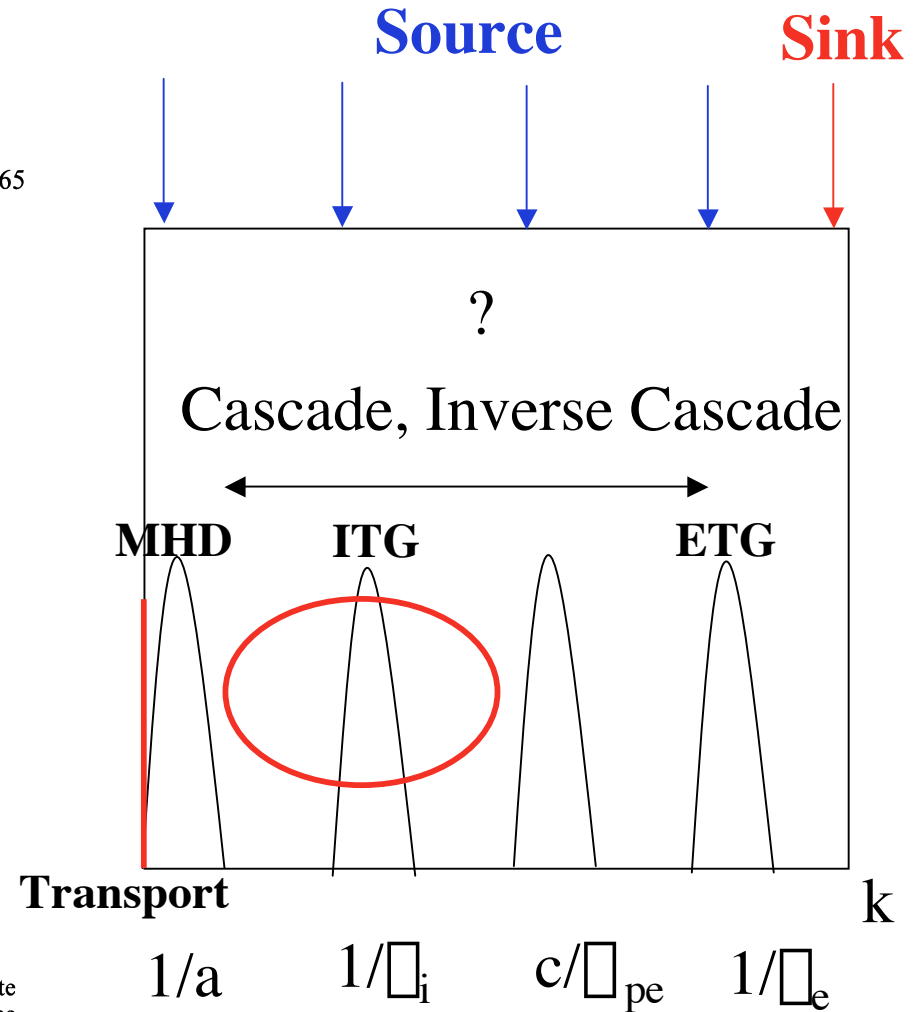


Fig. 5.7. log-log plot of the energy spectra of the streamwise component (white circles) and lateral component (black circles) of the velocity fluctuations in the time domain in a jet with $R_\lambda = 626$ (Champagne 1978).

(cited from 'Turbulence' by U. Frisch)

輸送コードの問題点

クロージャの問題：多スケール乱流に対するクロージャモデルがまだ存在しない。

流れを解いていない。

一方、近年トカマク実験で観測されている。HモードやITBでは大きな流れが存在している。

もし、大きな流れが存在すると平衡量は磁気フラックスのみならず、静電ポテンシャルにも依存してしまう。

また、磁気島が存在する場合の輸送を正確に扱えない。

輸送より早い時間スケールの現象は瞬時に定常に達すると仮定し、源として取り入れるため遷移現象を取り扱うことは困難。

階層モデルの考え方

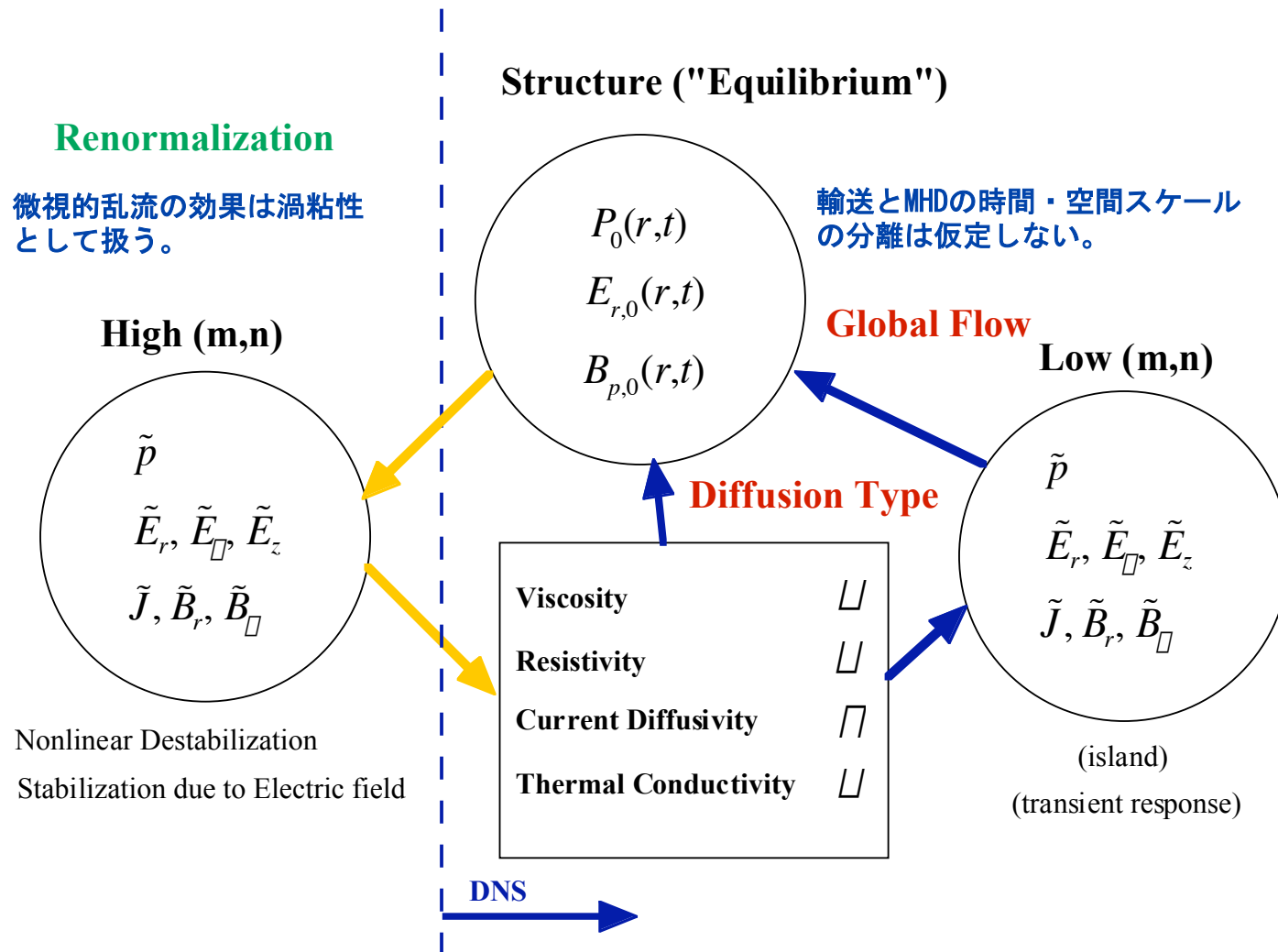
$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t_0} + \epsilon \frac{\partial}{\partial t_1} + \epsilon^2 \frac{\partial}{\partial t_2} + \dots$$

$$\square = \square_0 + \epsilon \square_1 + \epsilon^2 \square_2 + \dots$$

従来の考え方はスケール分離により各オーダーの現象を抽出して解析していたが、階層モデルではあるオーダー近傍のオーダーの項を含める。一種のLESモデル。

2 階層モデル 輸送 + MHD

GLFをベースとした輸送・MHDモデル



応用例：輸送・MHDモデルによる熱伝搬解析

(1) 衝突性プラズマを考え、簡約化MHDモデルを用いてエネルギーの飽和レベルを計算。

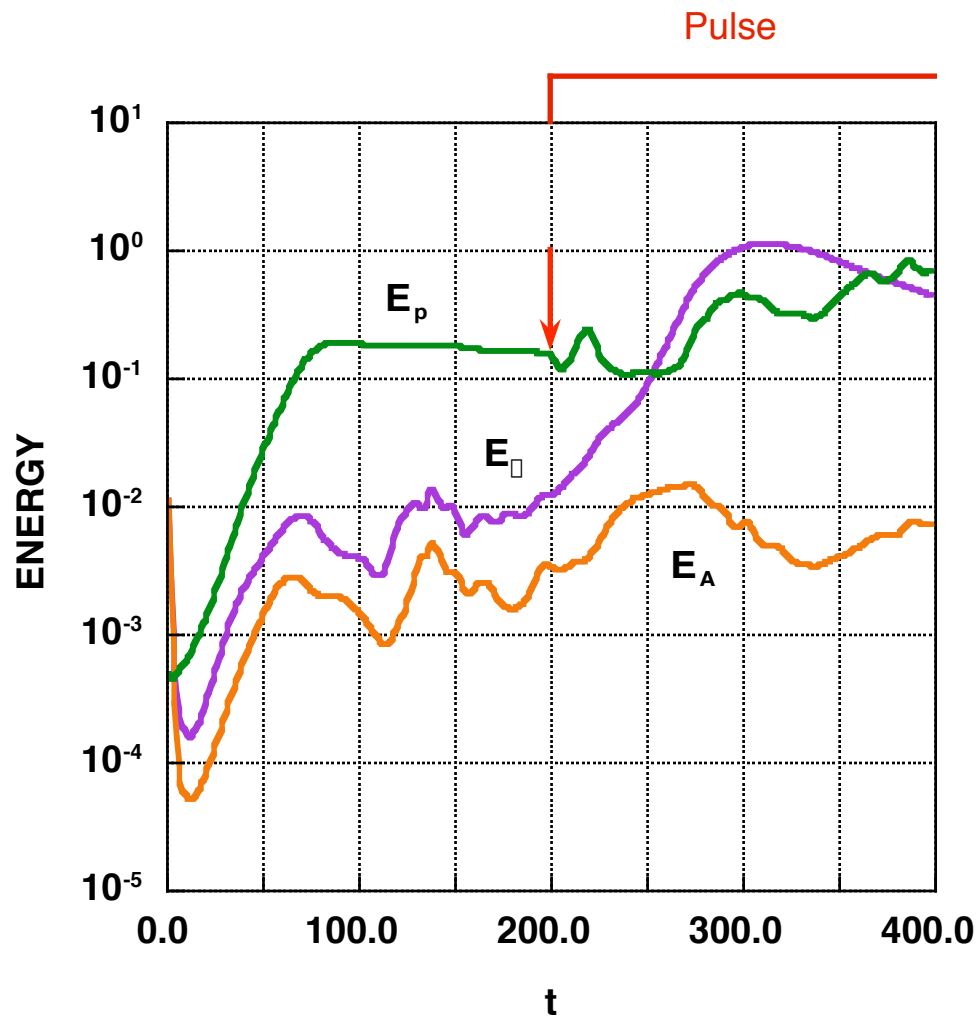


(2) エネルギーの飽和状態においてプラズマ中心に熱パルスを入力し熱伝搬特性を解析する。

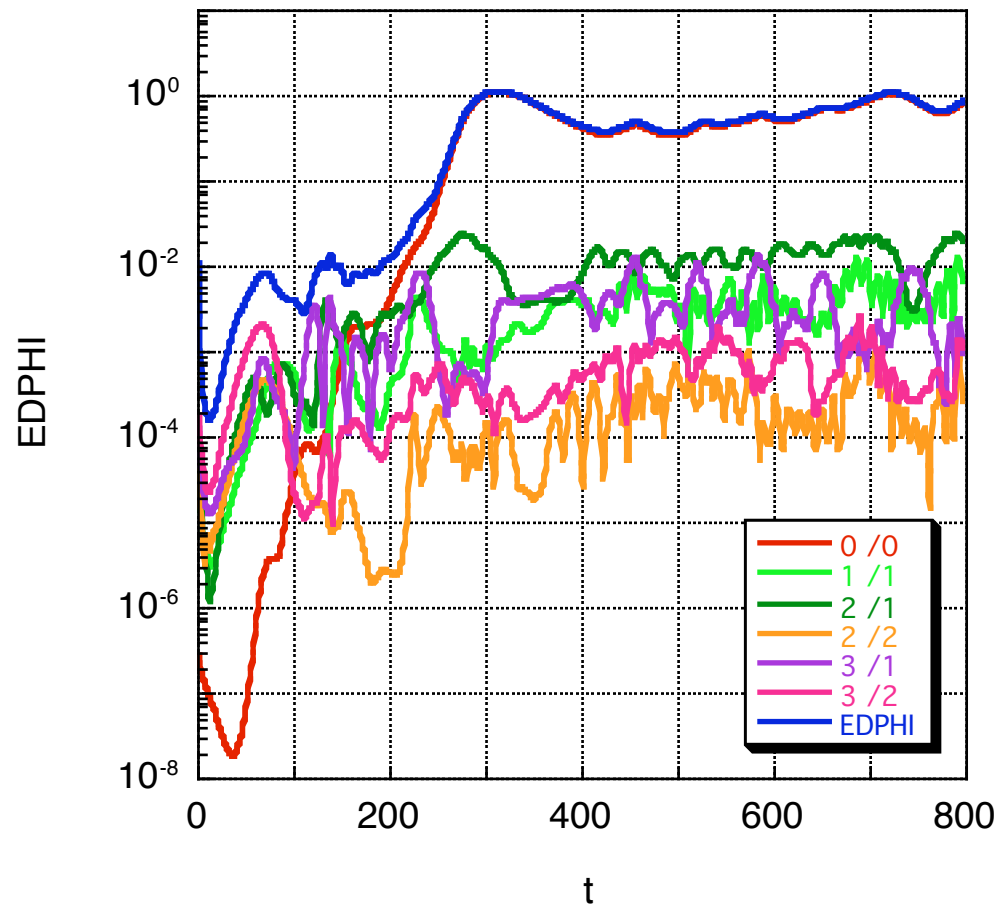
このモデルには1.5D輸送モデルには含まれていない効果
レーリーベナール熱対流効果（ボーム輸送効果）が含まれている。

例：バーガース方程式
$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nu \frac{\partial u}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

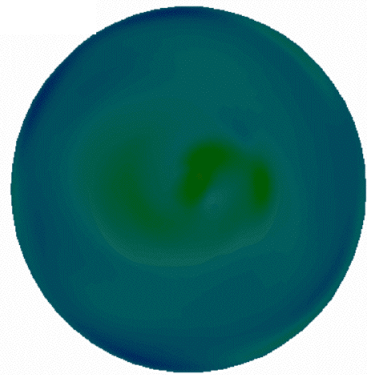
揺動エネルギーの時間発展 (II)



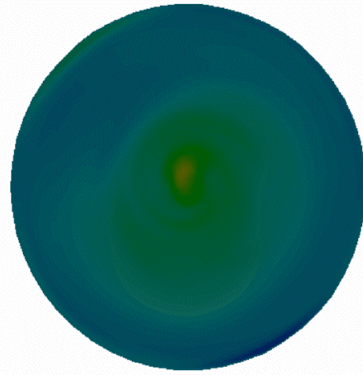
静電エネルギーの時間発展 (DC電場の生成)



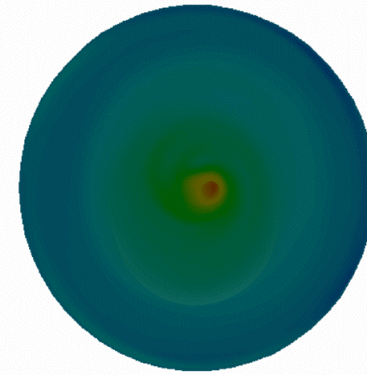
揺動圧力の等高線図（ポロイダル断面）



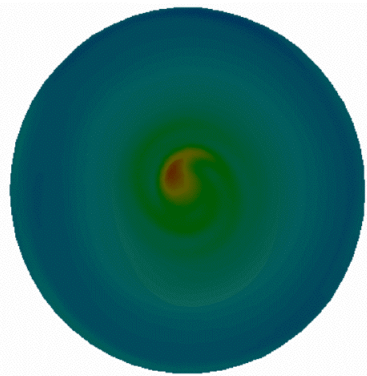
t=250



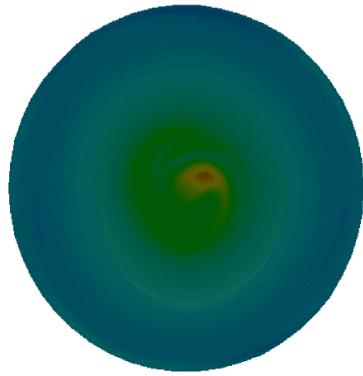
t=280



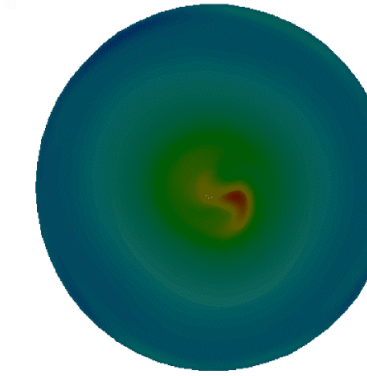
t=300



t=320



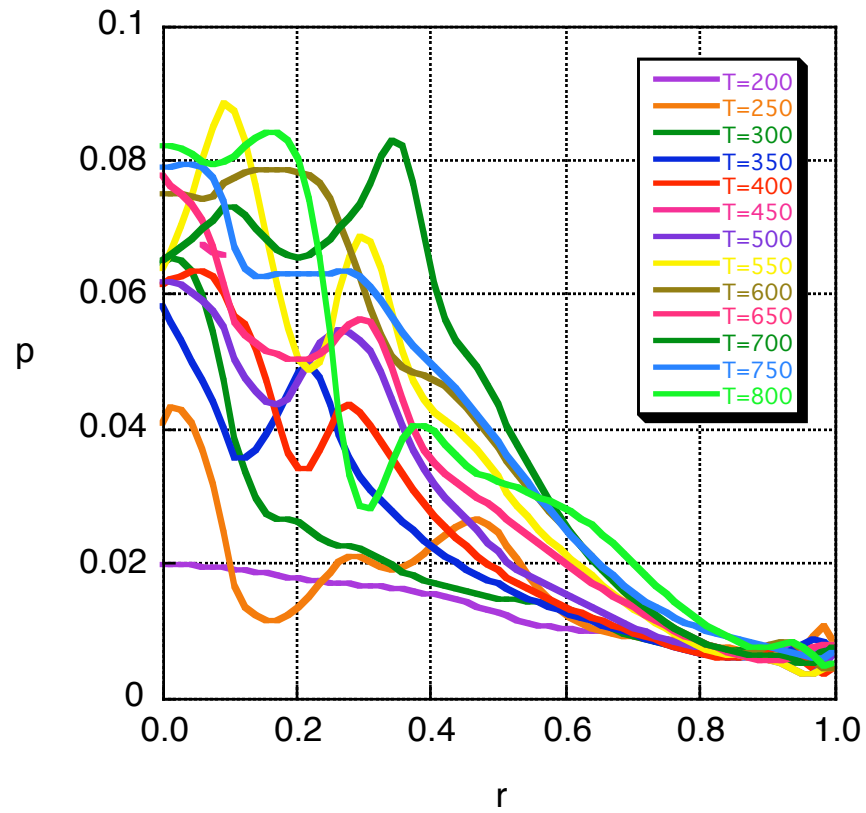
t=340



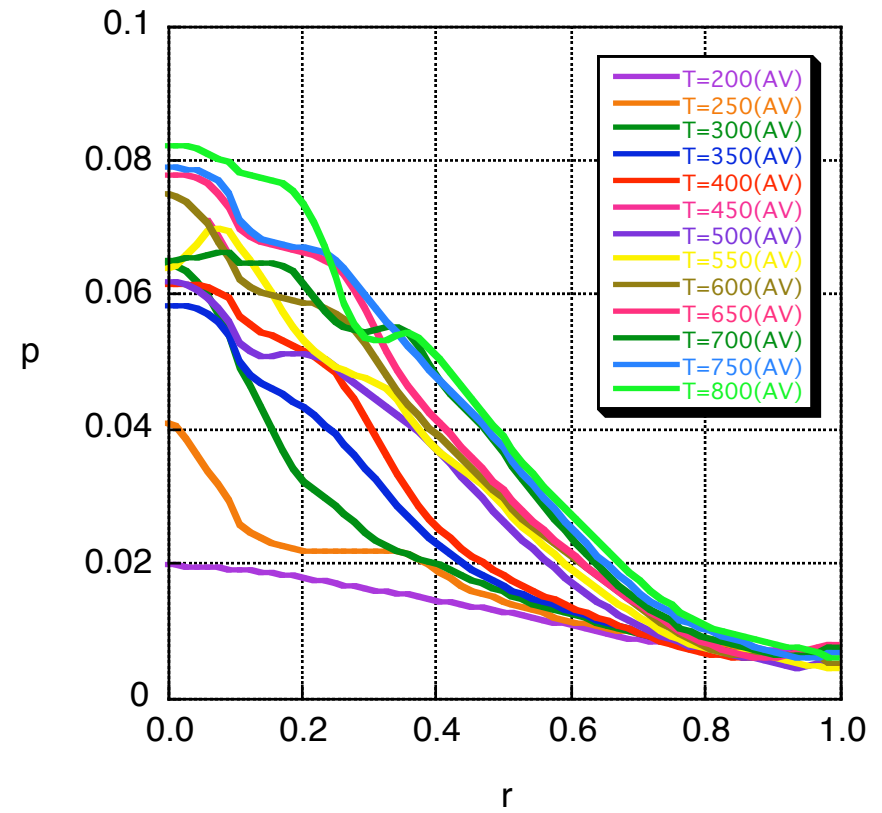
t=380

圧力の時間発展（径分布）

$\theta=0, z=0$ plane



average



まとめ

輸送・MHDモデルを用いて熱パルスの過渡応答を調べた。

- ・熱パルス伝搬において非局所輸送を観測。
- ・熱パルスの伝搬特性はモード数や熱伝導係数のモデルに依存している可能性あり。

計算コードの現状

VPP5000(9.6GFLOPS) VPP FORTRAN 8CPU

グリッドサイズ128x128x8, ステップサイズ100万ステップ(T=400)

CPU時間 800時間, 実時間(ELAPS)約800x2=1600時間=約2ヶ月

高nバルーニングモードをカバーするには少なくとも

グリッドサイズ128x2048x128は必要。1ジョブ約3-5年程度

コードの高速化が必要（スキームの検討）、地球シミュレータの使用？