

散逸性磁気流体 シミュレーション

簗島 敬（海洋研究開発機構）

共同研究者：

廣瀬 重信（海洋研究開発機構），佐野孝好（大阪大学）

三好 隆博（広島大学），今田 晋亮（名古屋大学）

松元先生との出会い

ACT-JST Summer Seminar

天体とスペースプラズマのシミュレーションサマーセミナー

(流体・磁気流体コース、アドバンストコース、プラズマ粒子シミュレーションコース)

期日：平成15年9月8日(月)～12日(金)

会場：千葉大学総合メディア基盤センター

(千葉市稲毛区弥生町1-33)

講義内容

(1) 流体・磁気流体コース (9/8-9/12)

- 第1日(9/8) インTRODクシヨ、差分法の基礎、実習端末の利用説明、差分法の実習
- 第2日(9/9) システム方程式の解法、近似的リーマン解法、
磁気流体1次元基本課題(衝撃波管など)、磁気流体2次元基本課題、応用課題紹介
- 第3日(9/10) 地球磁気圏のMHDシミュレーションと可視化、CIP法、SR8000、VPPの利用説明
応用課題実習
- 第4日(9/11) MPIによる並列化、応用課題実習
- 第5日(9/12) 発表準備、課題発表会

(2) 流体・磁気流体アドバンストコース (9/8-9/12)

シミュレーションコード作成を目的として基本文献の輪読とコード作成実習を行う

(3) プラズマ粒子シミュレーションコース (9/8-9/9)

- 第1日(9/8) プラズマ粒子シミュレーションスクール概説
1次元粒子シミュレーションコードの説明・実習(差分法、PIC、粒子速度更新法)
- 第2日(9/9) 1次元粒子シミュレーションコードの説明・実習(場の解法、時間フローチャート)
基本課題実習、MPIによる並列化の説明

講師

松元亮治、花輪知幸、宮路茂樹(千葉大)、柴田一成、臼井英之(京大)、
富阪幸治(国立天文台)、萩野電樹(名大) 矢部 孝、尾形陽一(東工大)
小出眞路(富山大)、村田 健史(愛媛大)、篠原 育(宇宙研)、
岡田雅樹(極地研)、福田尚也(岡山理科大)、野澤 恵(茨城大)、他

サマースクールの案内と参加申し込みのURL

<http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/netlab/summer-school/>

- 主催：宇宙シミュレーション・ネットラボラトリシステム開発グループ
千葉大学理学部宇宙物理学研究室
- 共催：科学技術振興事業団
国立天文台天文学データ解析計算センター
- 組織委員：松元亮治(千葉大)、松本 敏、臼井英之(京大・RASC)
柴田一成(京大・理)、富阪幸治(国立天文台)、
藤本正樹(東工大・理)、萩野電樹(名大・STE研)
- 実行委員：松元亮治、花輪知幸、宮路茂樹(千葉大)、
富阪幸治、和田桂一(国立天文台)、
横山央明(東大)、福田尚也(岡山理科大)

問い合わせ：千葉大学理学部宇宙物理学研究室

TEL:043-290-2885 E-mail:s-school@astro.s.chiba-u.ac.jp



ACT-JST Summer Seminar

天体とスペースプラズマのシミュレーションサマーセミナー

(流体・磁気流体コース、アドバンストコース、プラズマ粒子シミュレーションコース)

講義テキスト

期日：平成15年9月8日(月)～12日(金)

会場：千葉大学総合メディア基盤センター
(千葉市稲毛区弥生町1-33)

主催：宇宙シミュレーション・ネットラボラトリシステム開発グループ
千葉大学理学部宇宙物理学研究室
共催：科学技術振興事業団
国立天文台天文学データ解析計算センター

組織委員：松元亮治(千葉大)、松本 敏、臼井英之(京大・RASC)
柴田一成(京大・理)、富阪幸治(国立天文台)、
藤本正樹(東工大・理)、萩野電樹(名大・STE研)
実行委員：松元亮治、花輪知幸、宮路茂樹(千葉大)、
富阪幸治、和田桂一(国立天文台)、
横山央明(東大)、福田尚也(岡山理科大)

当時M1
その後紆余曲折を経て
MHDシミュレーション
屋の端くれに

散逸性磁気流体方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \left(P + \frac{B^2}{2} \right) \mathbf{I} - \mathbf{B} \mathbf{B} - \underline{\rho \nu \mathbf{S}} \right] = 0,$$

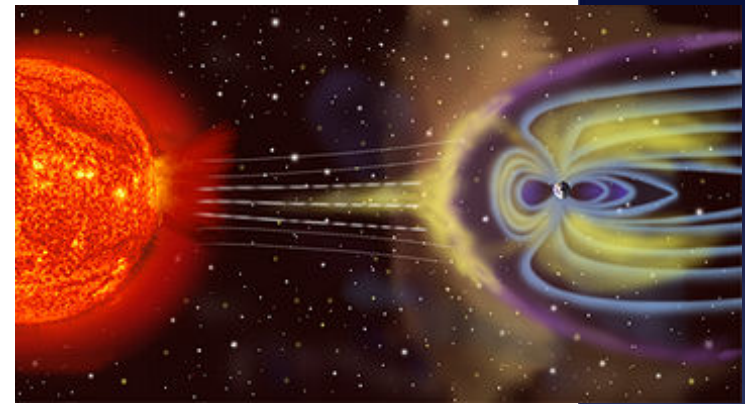
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{E} = 0,$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\rho u^2}{2} + \frac{\gamma P}{\gamma - 1} \right) \mathbf{u} + \mathbf{E} \times \mathbf{B} - \underline{\rho \nu \mathbf{S} \cdot \mathbf{u}} - \underline{\kappa \nabla \frac{P}{\rho}} \right] = 0,$$

$$\mathbf{E} = -\mathbf{u} \times \mathbf{B} + \underline{\eta \mathbf{j}}, \mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{B},$$

$$P = (\gamma - 1) \left(e - \frac{\rho u^2}{2} - \frac{B^2}{2} \right),$$

$$\mathbf{S} = \sum_{i,j} \sigma_{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j, \sigma_{ii} = \frac{2}{3} \left(2 \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right), \sigma_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$



⊙ 電気抵抗 η

⊙ 粘性 ν

⊙ 熱伝導 α

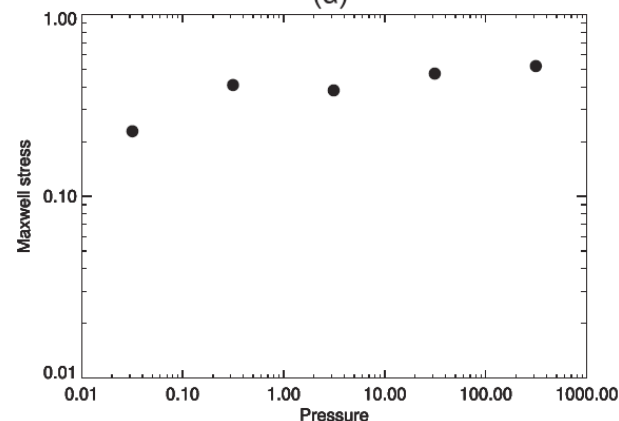
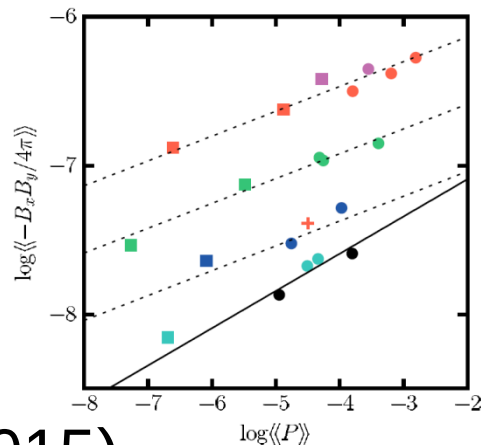
⊙ 磁力線に関して
非等方な場合も

等温MRIの理想MHD計算

- 非線形飽和レベルの圧力依存性
- 成層なし

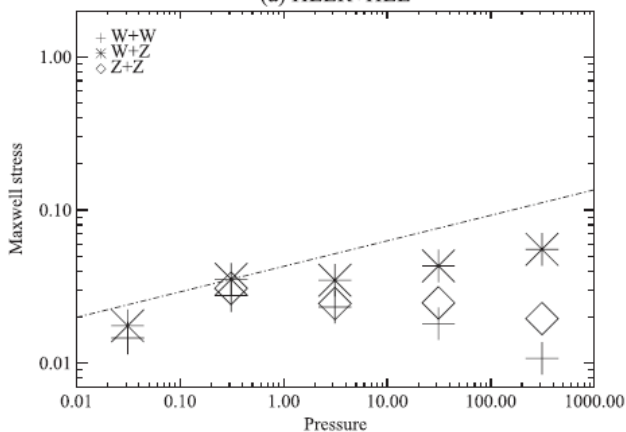
佐野さん (Sano+04)

廣瀬さん (a)

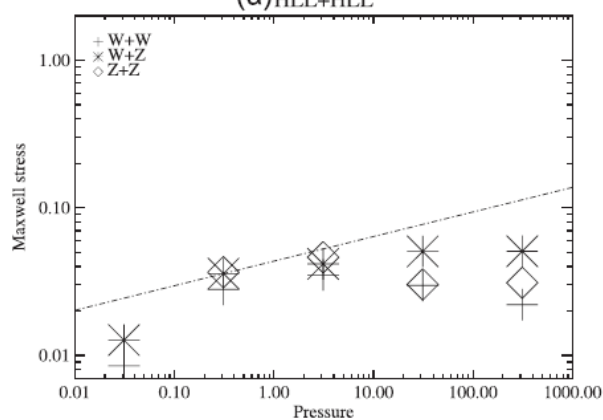


TM, Hirose, Sano (2015)

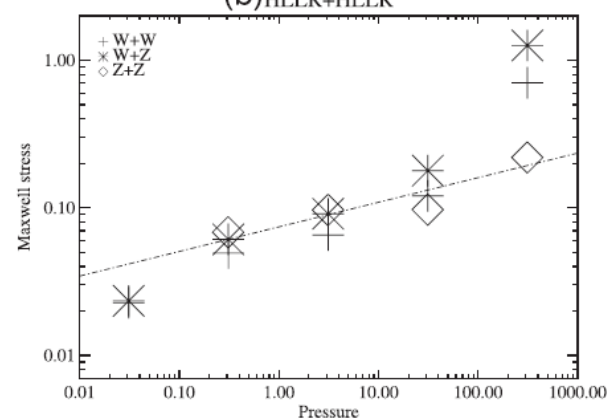
(a) HLLR+HLL



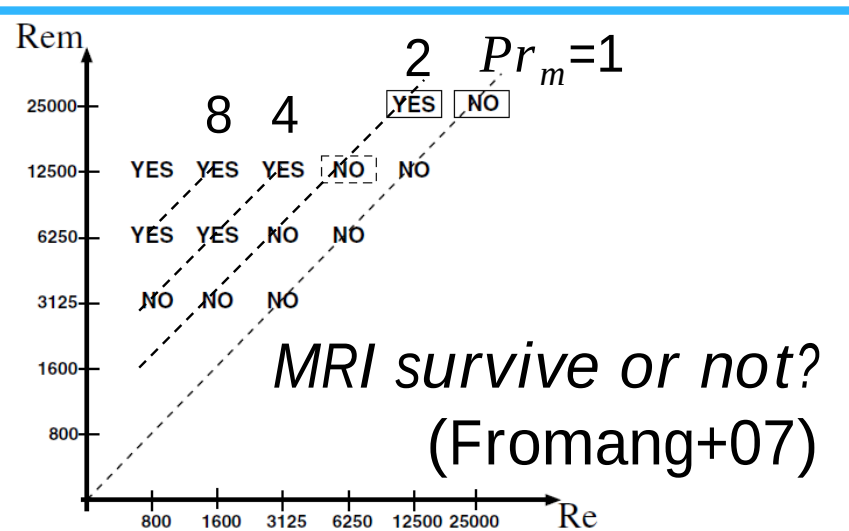
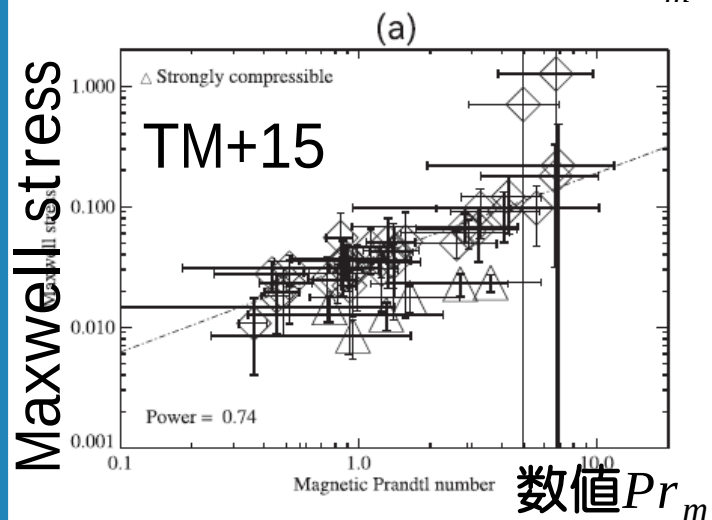
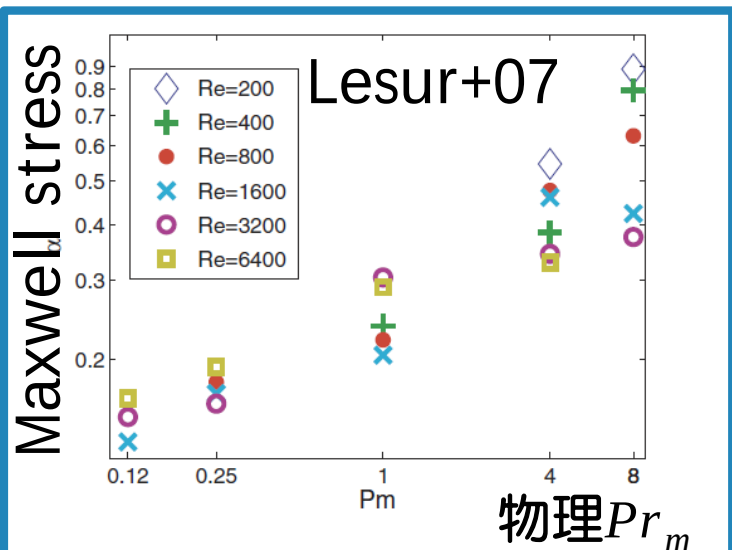
(a) HLL+HLL



(b) HLLR+HLLR



磁気プラントル数 $Pr_m = \nu / \eta$

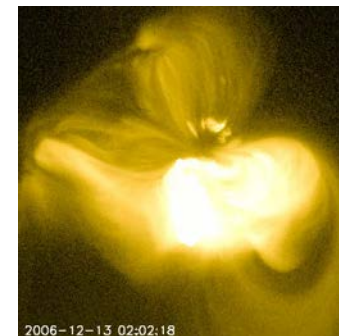


◎ MRIの成長 vs. 2次不安定
による散逸 (Pessah+09)

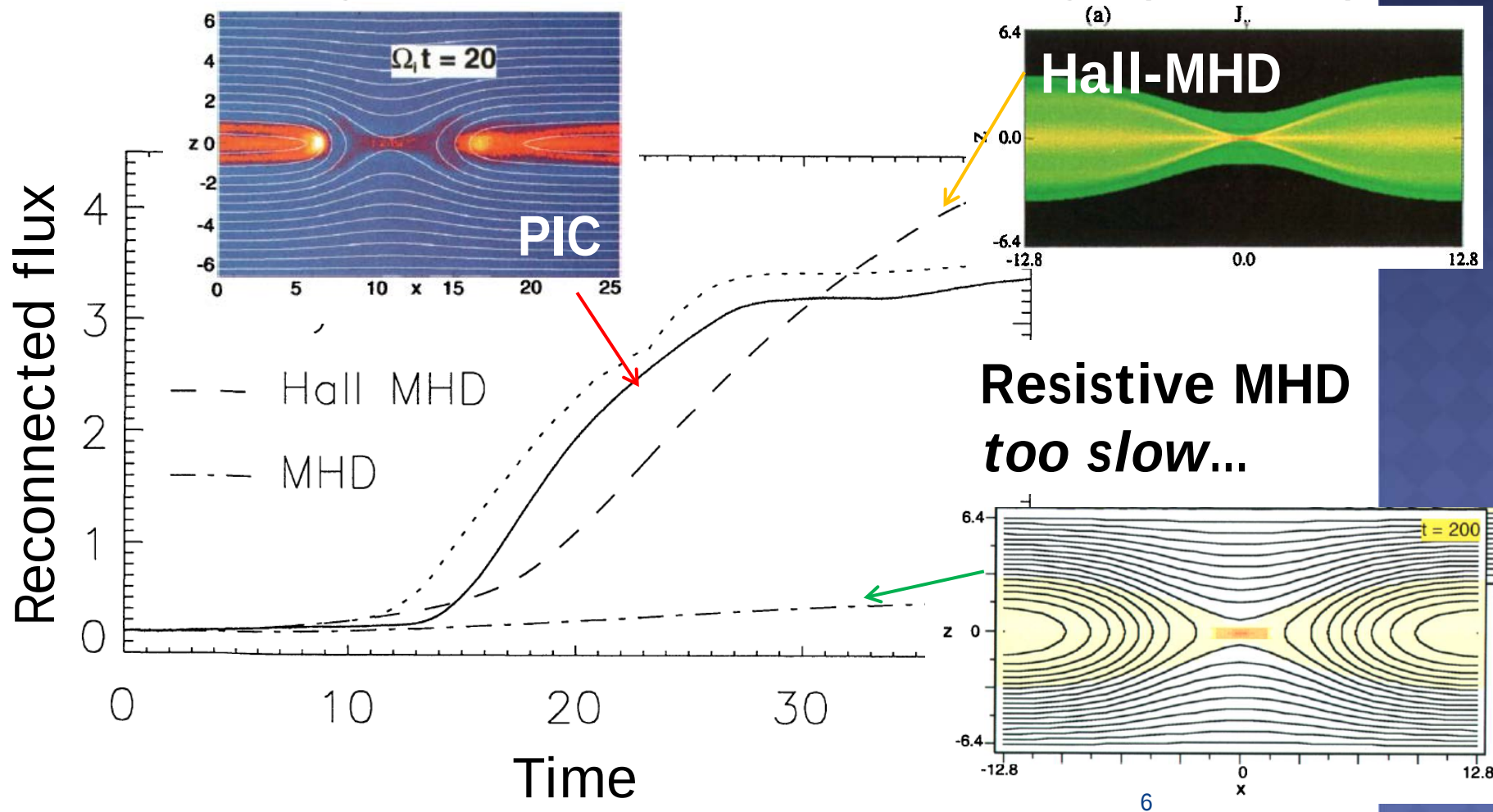
$$\gamma_{\text{tear}} \sim \frac{V_A}{\lambda_{\text{MRI}}} R_m^{-1/2} R_e^{1/4} \sim \gamma_{\text{MRI}}$$

$$\Rightarrow B^2 \propto Pr_m^{1/2} R_m^{1/2}.$$

無衝突磁気リコネクション



● GEM Magnetic Reconnection Challenge (Birn+01)



拡散過程

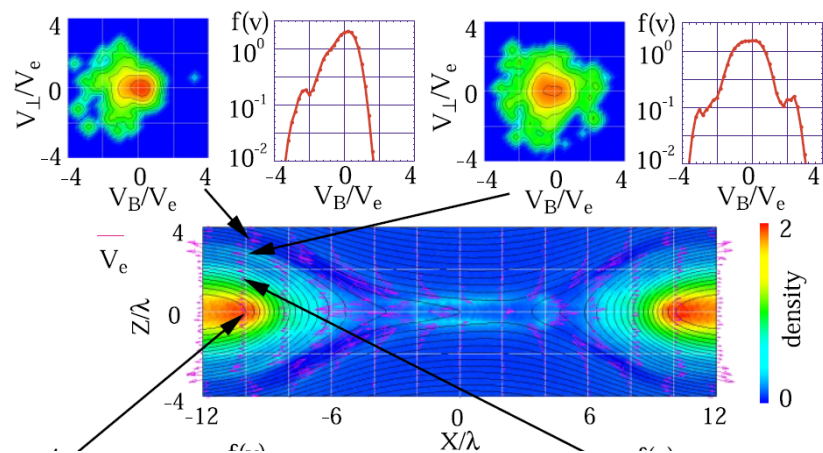
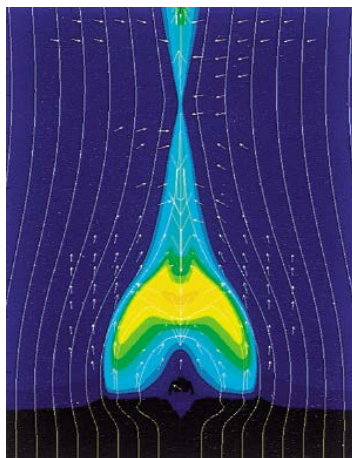
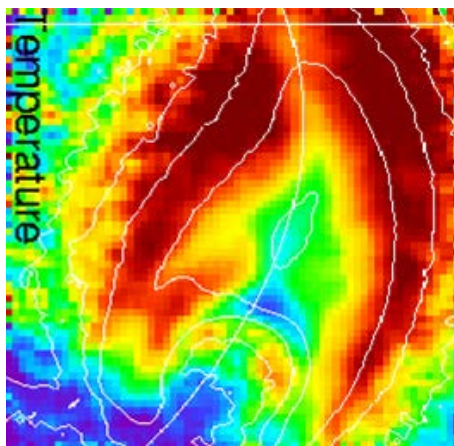
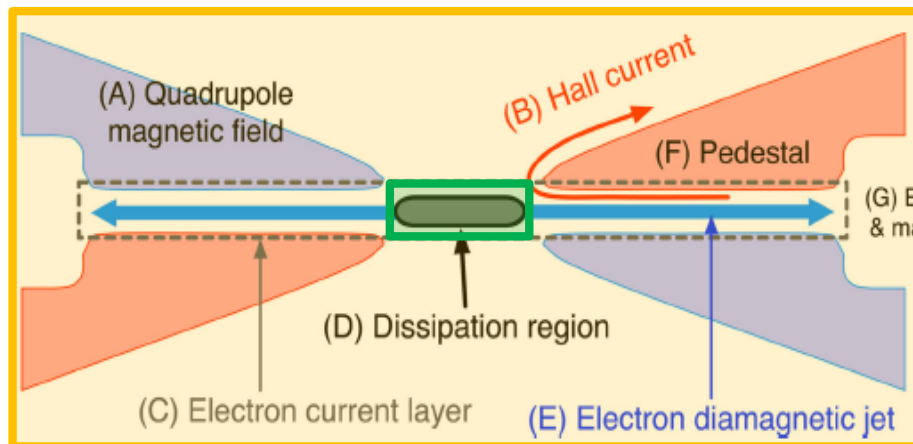
運動量輸送

- 粘性(Baty+09)
- イオン拡散領域+電子拡散領域

(Zenitani+11)

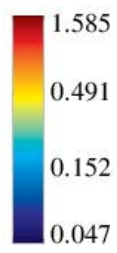
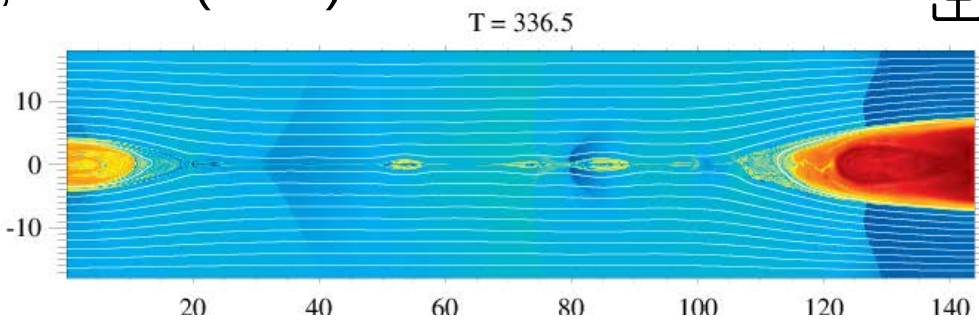
熱輸送

- 非等方熱伝導 (Tsuneta+96; Yokoyama+97; Chen+99)
- 沿磁力線ビーム (Hoshino+01; Fujimoto+06; Imada+07)



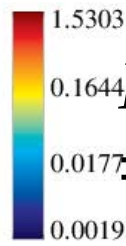
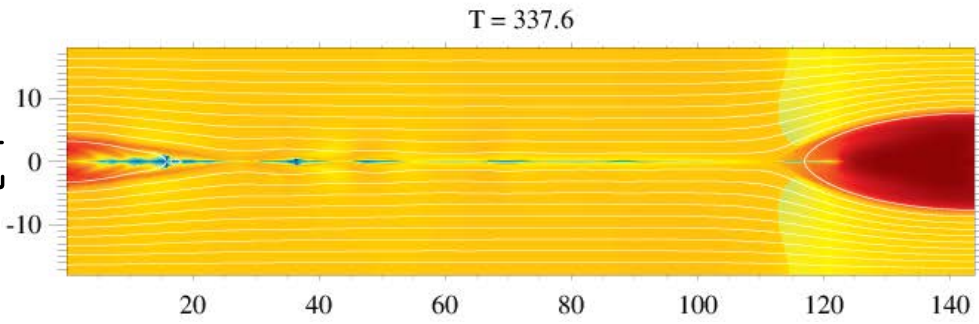
抵抗性

y



$\eta=10^{-3}$

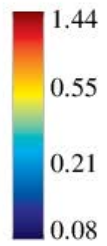
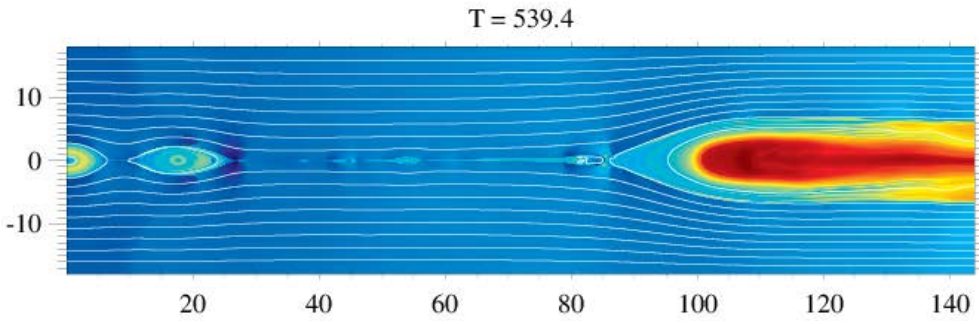
粘性+抵抗



$Pr_m = \nu/\eta = 10$

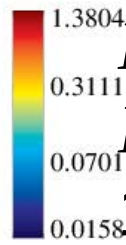
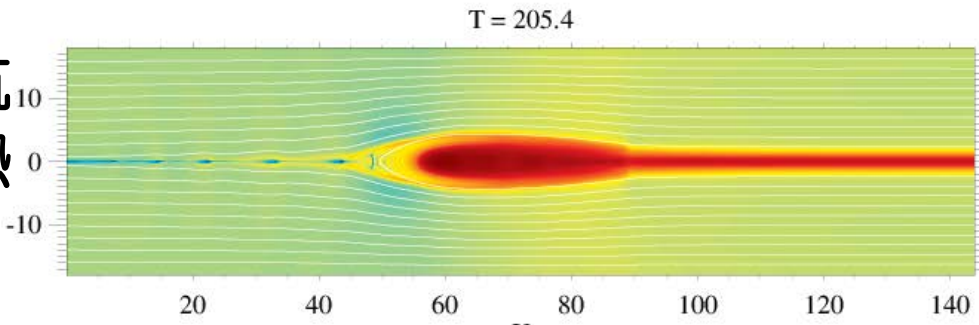
抵抗+非等
方熱伝導

y



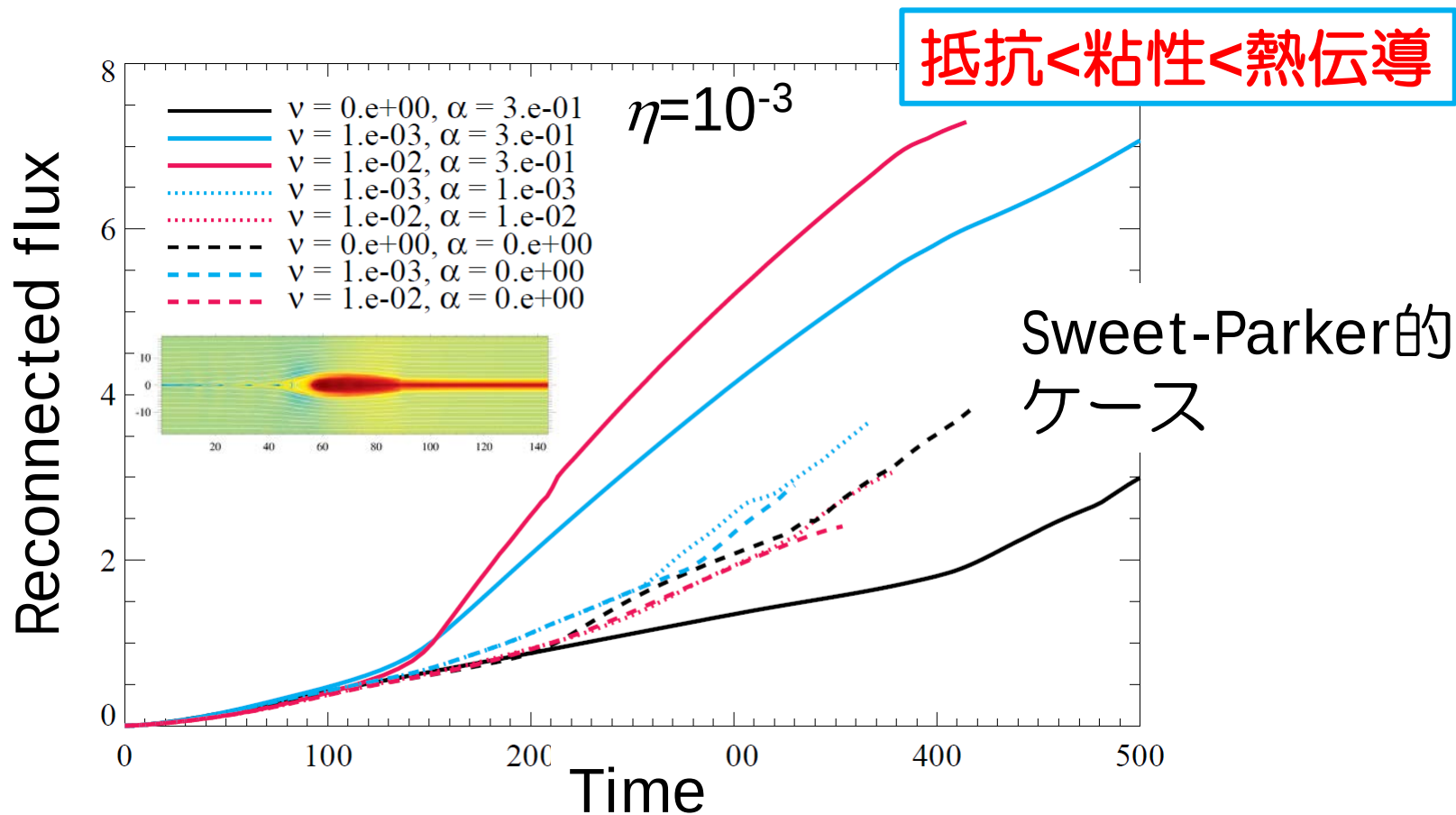
$\alpha=0.3$

粘性+抵抗
+非等方熱
伝導

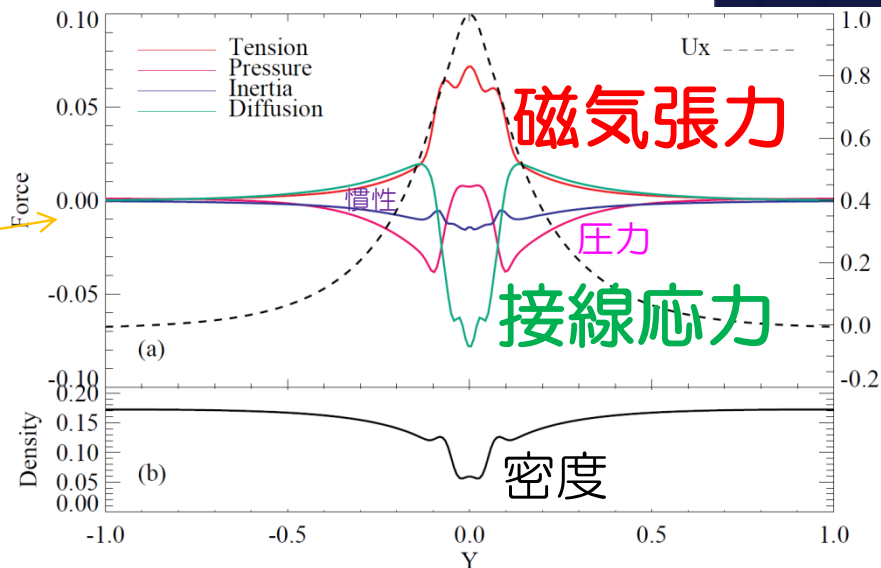
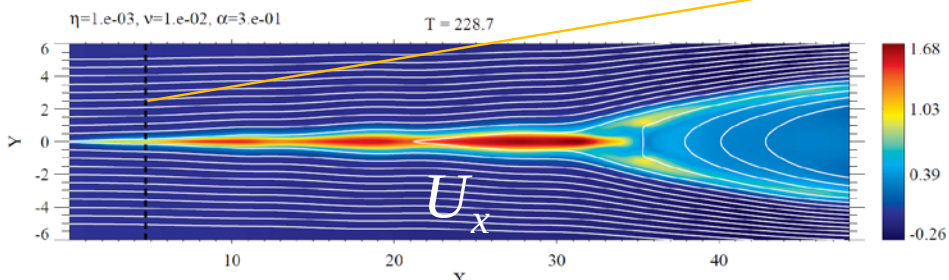


$Pr_m = 10,$
 $Pr = \nu/\alpha = 1/30$

Reconnected Flux @ X-point



Outflow Dynamics



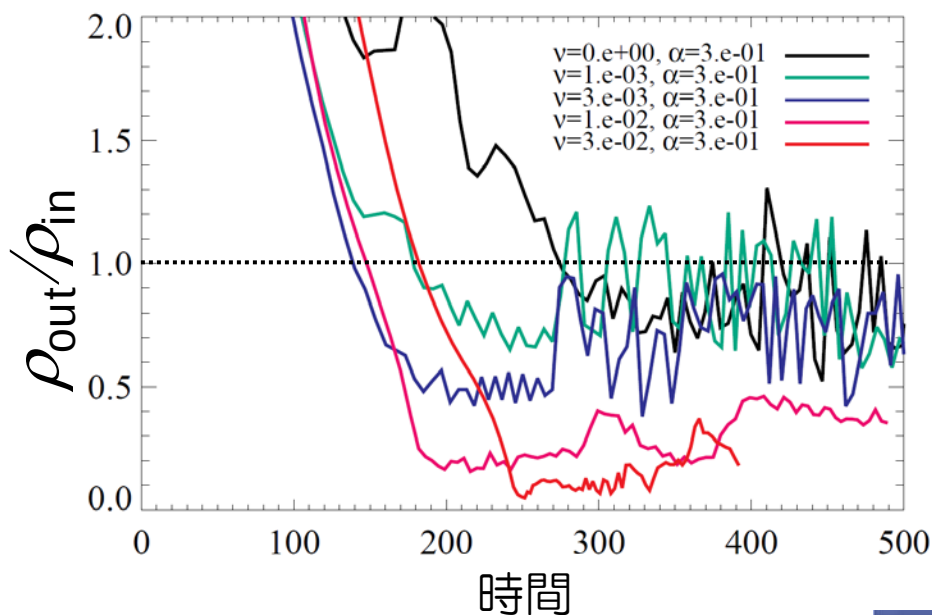
⊙ 磁気張力 = 接線応力

$$B_{in} B_{out} = \nu \rho_{out} u_{out} / \delta,$$

$$u_{in} B_{in} = u_{out} B_{out} = \eta B_{in} / \delta,$$

$$\rho_{in} u_{in} L = \rho_{out} u_{out} \delta,$$

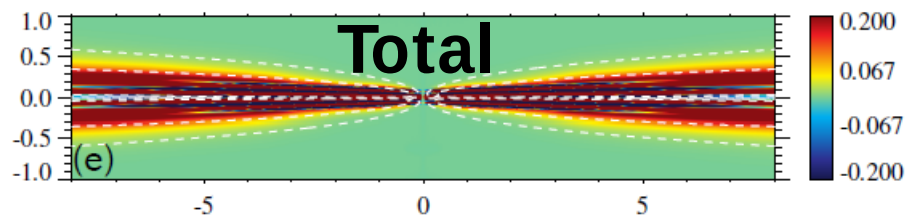
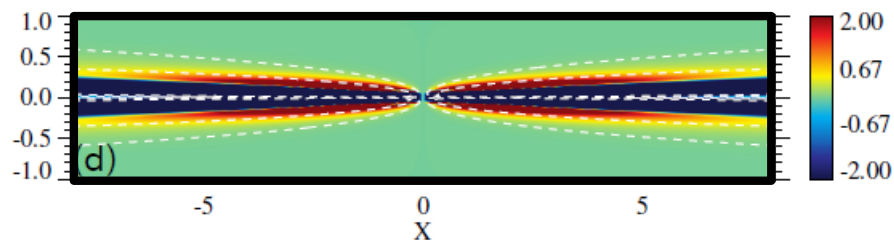
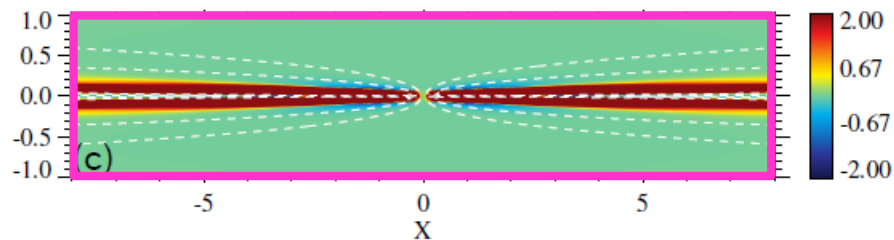
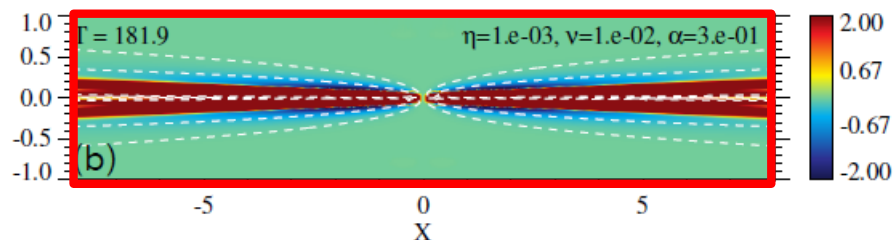
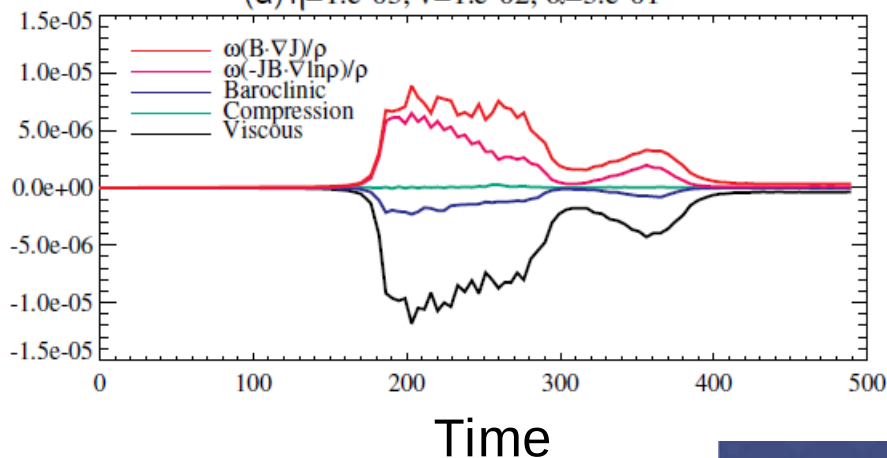
$$\Rightarrow \frac{\rho_{out}}{\rho_{in}} \propto Pr_m^{-1}.$$



Enstrophy

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \underbrace{-[\nabla \cdot (uQ) + Q(\nabla \cdot u)]}_{\text{Baroclinic}} + \underbrace{\left[\frac{\omega}{\rho} \cdot (B \cdot \nabla) j - \frac{(\omega \cdot j)}{\rho^2} (B \cdot \nabla \rho) \right]}_{\text{Viscous}} - \underbrace{\frac{\omega}{\rho^2} \cdot (\nabla P \times \nabla \rho)}_{\text{Compression}} + \underbrace{\omega \cdot \nabla \times \left(\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \rho \nu S \right)}_{\text{Baroclinic}} \cdot (2D, \text{ in-plane } B)$$

(a) $\eta=1.e-03, \nu=1.e-02, \alpha=3.e-01$

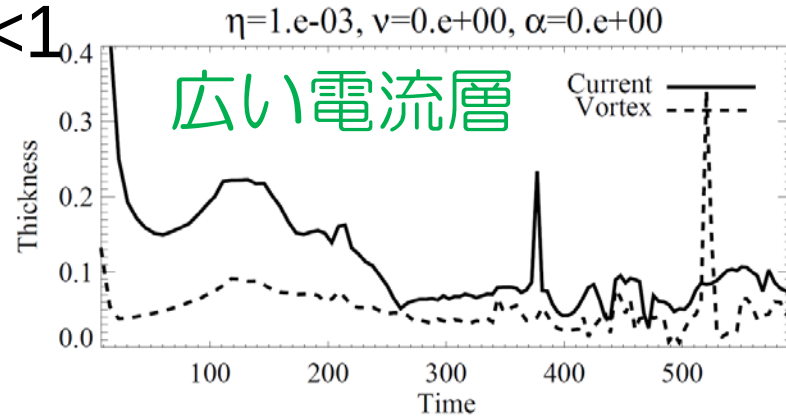
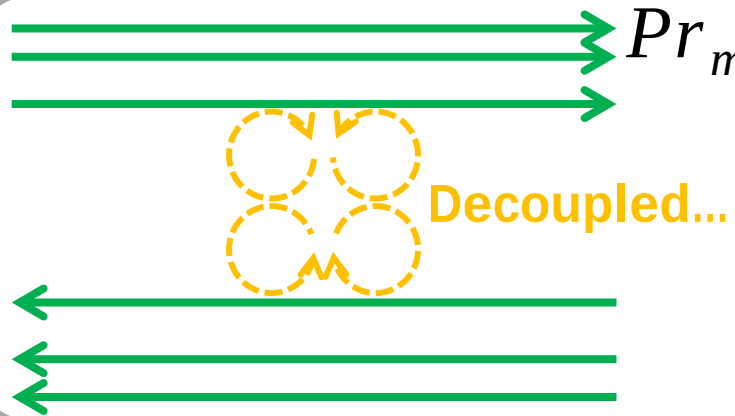


C) 密度減少からの渦
励起

D) 粘性による上流へ
の渦輸送

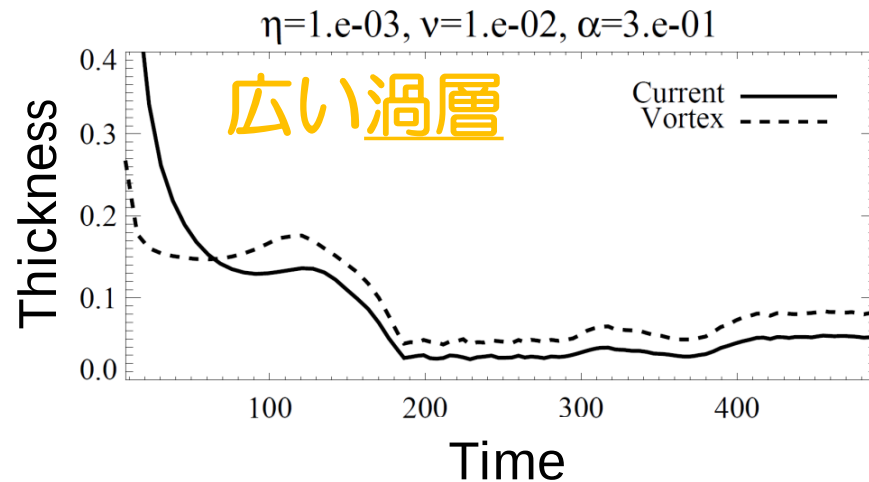
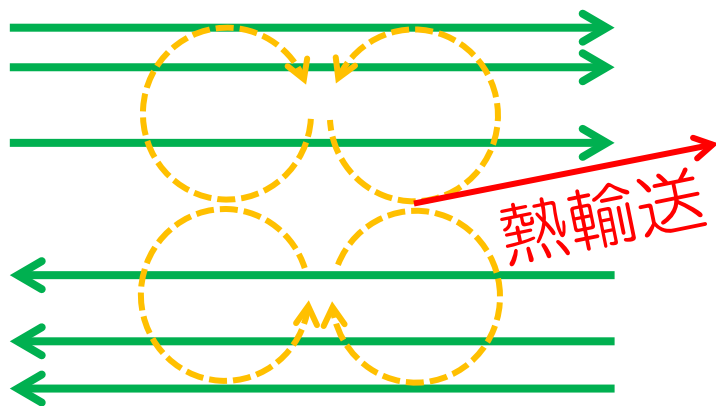
赤が増加、青が減少

電流層と渦層の関係



X点への磁場の
輸送

$Pr_m > 1$ & $Pr < 1$



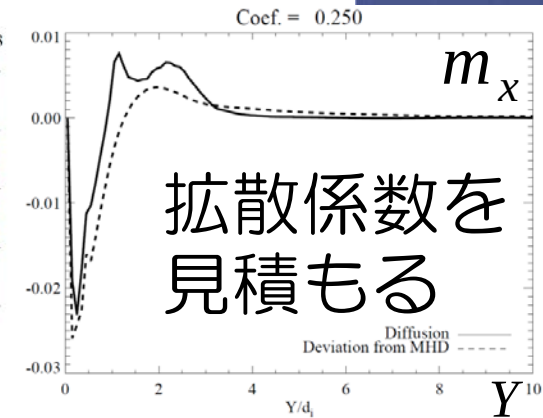
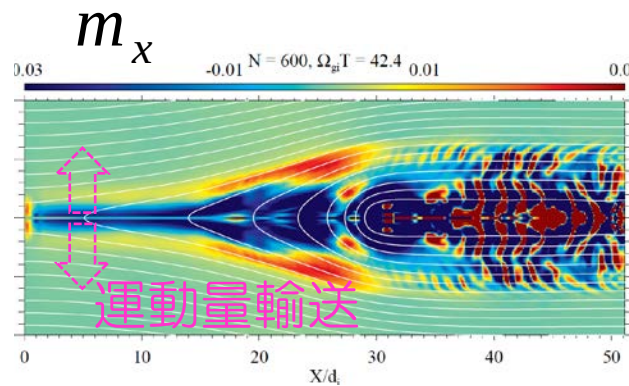
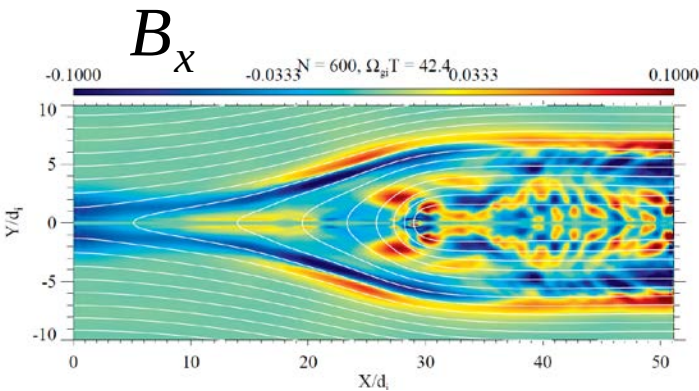
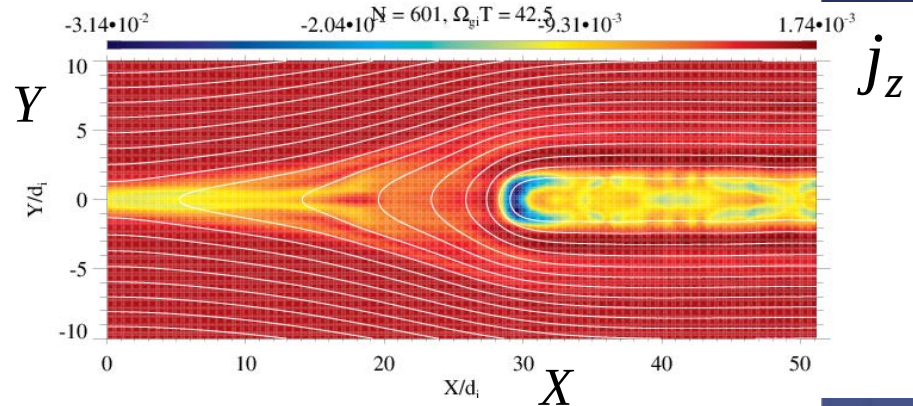
運動論磁気リコネクションと比較

● ブラソフシミュレーションからMHD物理量

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{x}} f_s + \frac{q_s}{m_s} \left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{B}}{c} \right) \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f_s = 0,$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = c \nabla \times \mathbf{B} - 4\pi \sum_s q_s \int \mathbf{v} f_s d\mathbf{v},$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -c \nabla \times \mathbf{E}.$$



MHD方程式のずれ。赤が増加、青が減少

まとめ

- ◎ (磁気) プラントル数 Pr , Pr_m はMHD現象のパラメータとなりうる
- ◎ 抵抗<粘性<熱伝導 ($Pr<1$, $Pr_m>1$) のとき、爆発的な磁気リコネクション
 - 上流への運動量輸送と下流への熱輸送
- ◎ 散逸性MHD磁気リコネクションは運動論磁気リコネクションと整合的かもしれない
- ◎ 運動論シミュレーションから拡散係数を見積もって散逸性MHDへ