



# Solar-Cで挑む 磁気リコネクションの物理

Shinisuke Imada (Nagoya Univ., STEL)

# 今回のコンセプト

## 磁気リコネクションに関して

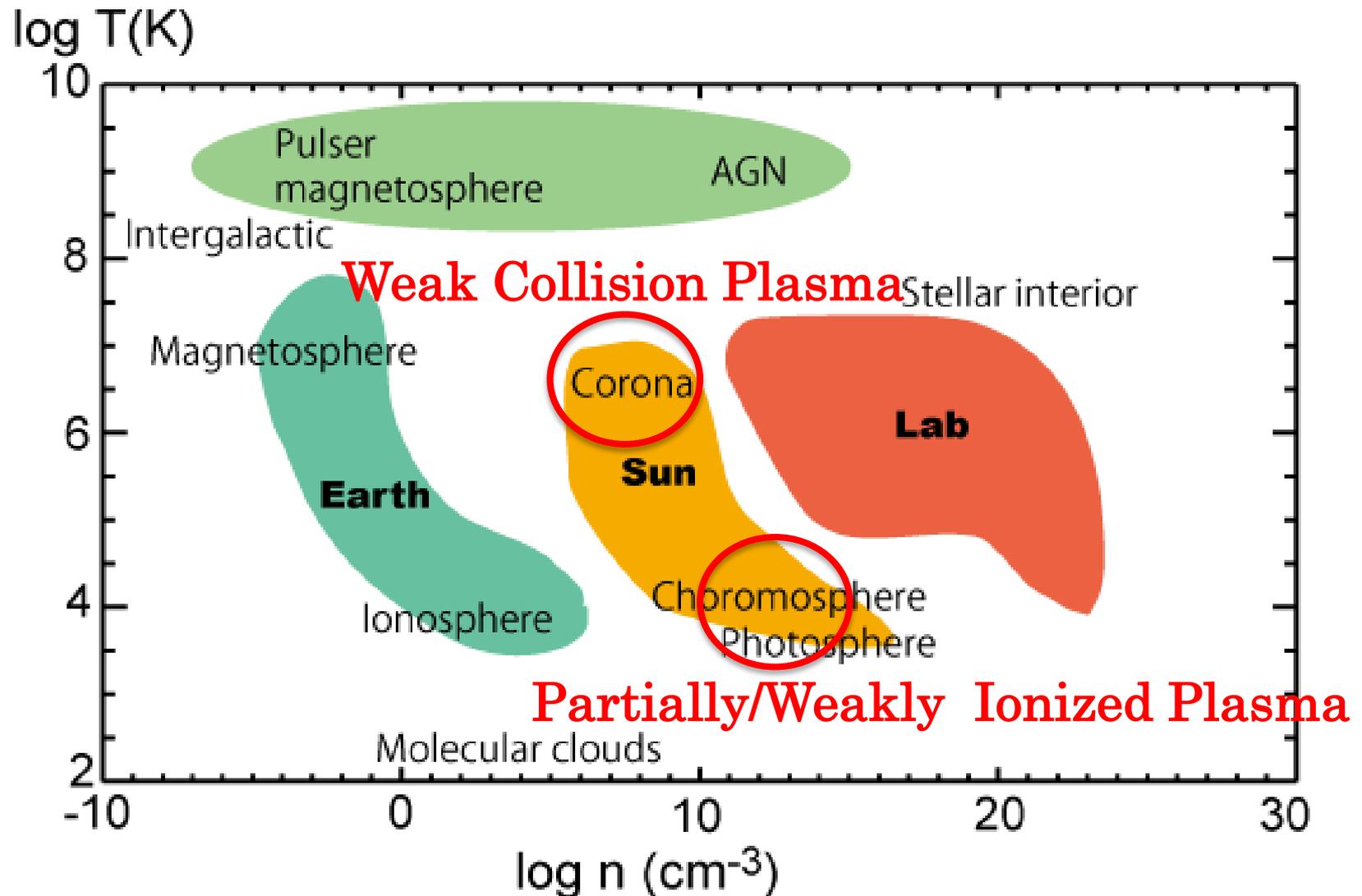
- 1. 非MHD効果をどこまで太陽で考えるべきか
- 2. 他分野へのインパクトを出すには何をあきらかにすれば良いか
- 3. 現在議論されている太陽物理現象論を将来的にどうやって発展させるか

# メンバーに議論いただいた内容

10月6日(台風直撃の日)に13時から20時過ぎまで  
天文台にて議論しました

- 銭谷・・・宇宙プラズマ視点から太陽で議論してほしい事、運動論効果について
- 蓑島・・・粘性効果を考えたリコネクション
- 中村・・・弱電離プラズマでのリコネクション
- 井・・・実験室プラズマの現状と太陽研究への期待
- 長谷川・・・磁気圏物理の現状と太陽研究への期待
- 坂尾・成影・・・Photon counting X-ray telescope
- 高棹・・・太陽物理現象論を将来的にどうやって発展させるか
- 西田・・・フレア観測と数値計算
- 今田・・・熱的非平衡プラズマ

# Plasmas conditions in solar corona



# Coronal plasma

## Difference from collisionless plasma

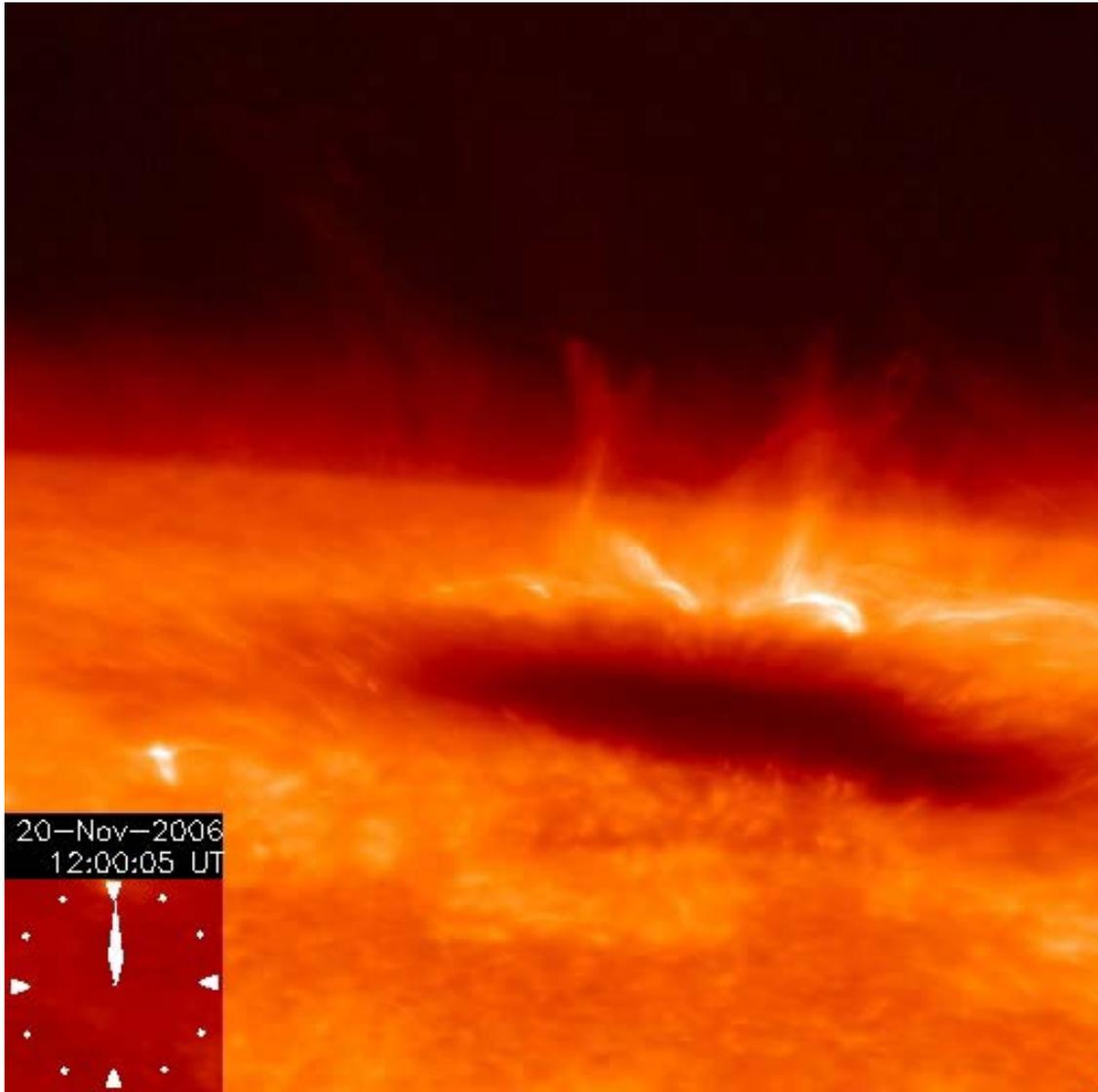
- Momentum transfer by coulomb collision  
衝突による運動量交換
- Thermal conduction along magnetic field  
衝突による熱伝導
- Ionization and recombination  
衝突による電離・再結合
- Radiative energy loss (not synchrotron radiation)  
衝突による輻射

# Thermal Non-Equilibrium Plasma

**Because RX is highly dynamic, plasma may not reach to Equilibrium stage! This is new regime for Solar physics obs.**

- **Non-Gaussian Distribution function**      ガウス分布でない
  - Power-law distribution, beam plasma  
time scale for equilibrium is very short  
(kinetic regime or e-e or i-i collision)
- **Different temperature in different species**
  - $T_i > T_e$   
time scale for equilibrium is relatively long  
(e-i collision)      プラズマ種で平衡でない
- **Ionization non-equilibrium**
  - strong heating or flare  
time scale for equilibrium is long      電離非平衡

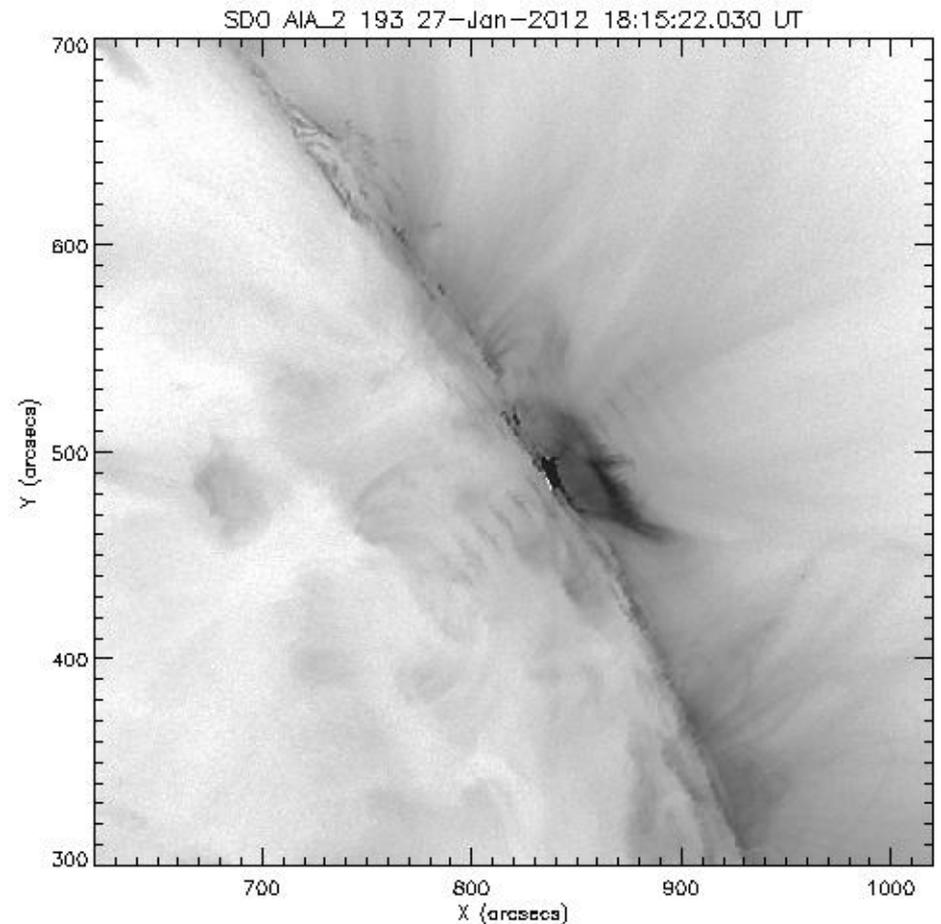
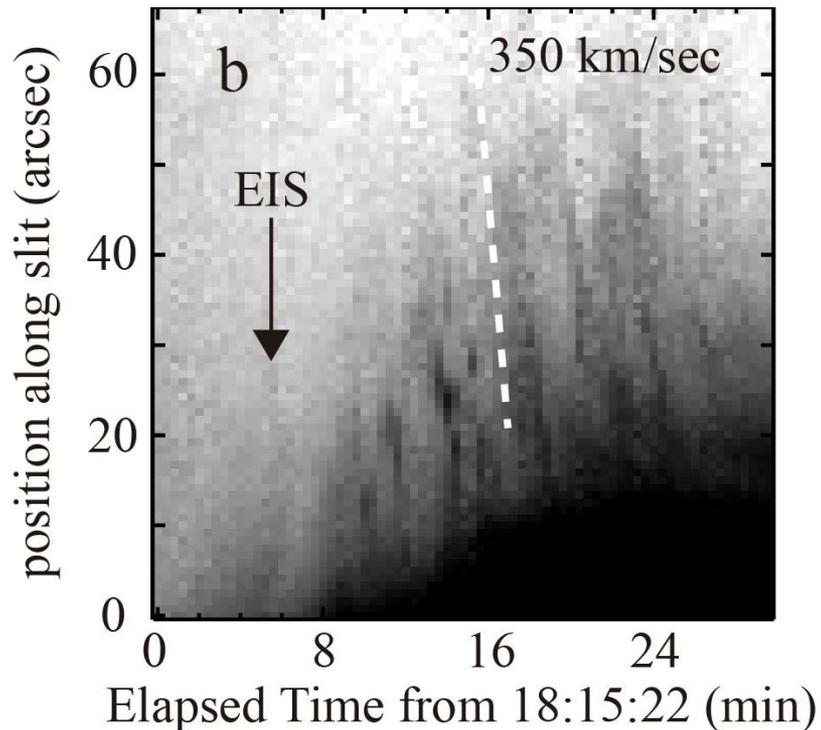
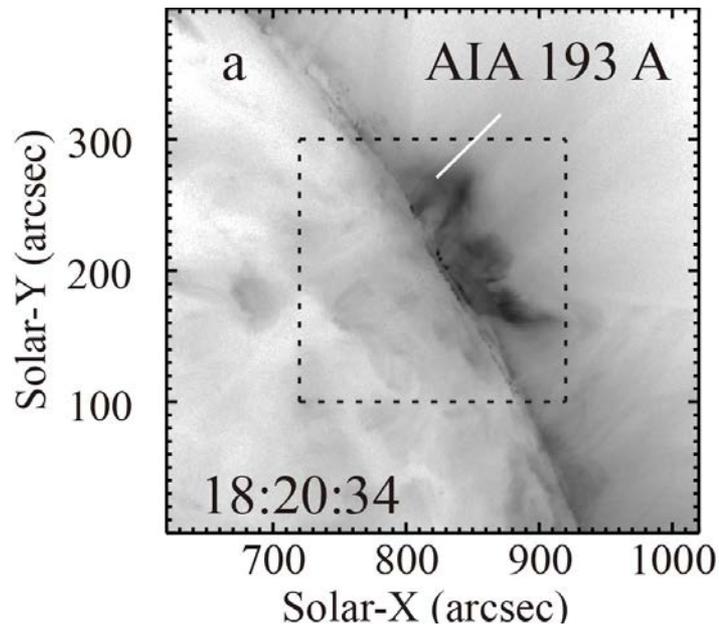
# 磁気リコネクションは太陽の至る所で起っている



Shibata et al. 2007

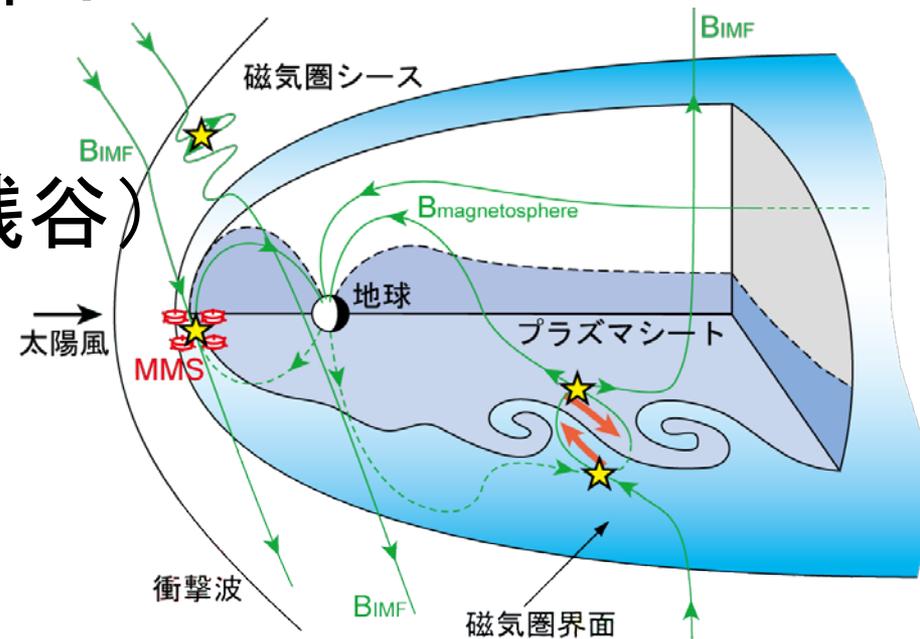
# AIA Observation

193 A (1.5 and 15MK)

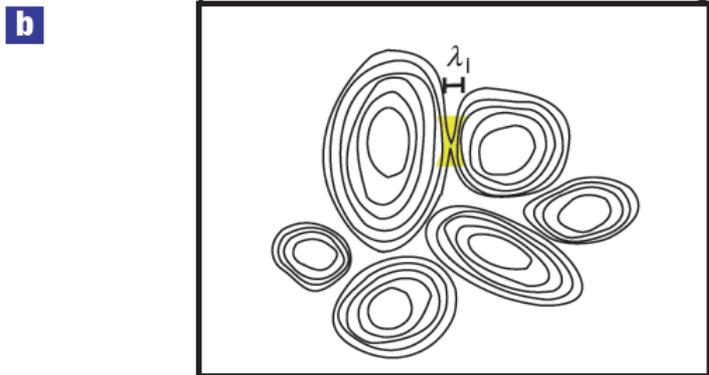
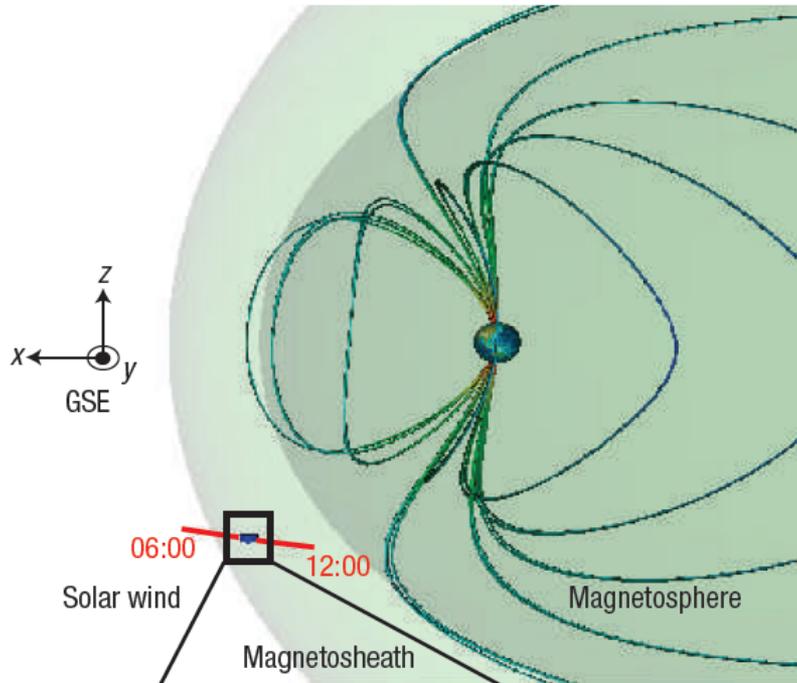


# 磁気リコネクション観測研究の近況

- 様々な場所・条件下でリコネクションが起こりうる
  - 磁気圏尾部、磁気圏界面
  - シース(ショック下流): 衝撃波の影響下
  - ケルビン・ヘルムホルツ渦の端: 乱流の影響下
  - 太陽風中: 乱流の影響下?
- エネルギー分配
- 磁場散逸領域の同定(銭谷)
- 粒子加速(今田)

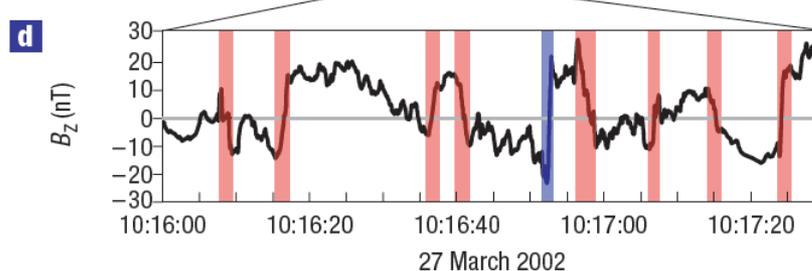
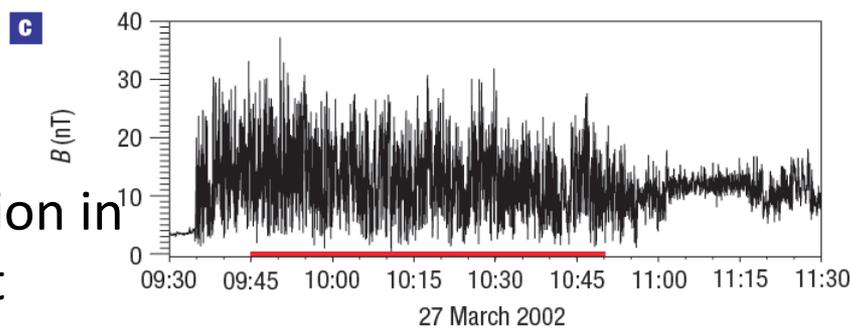
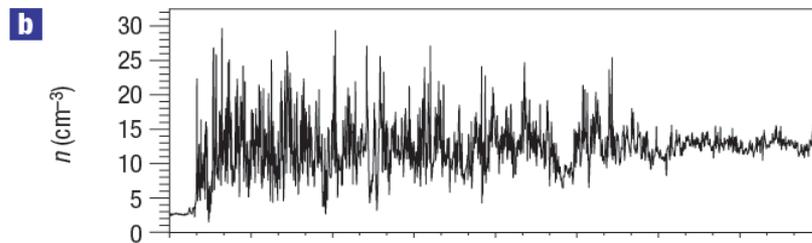
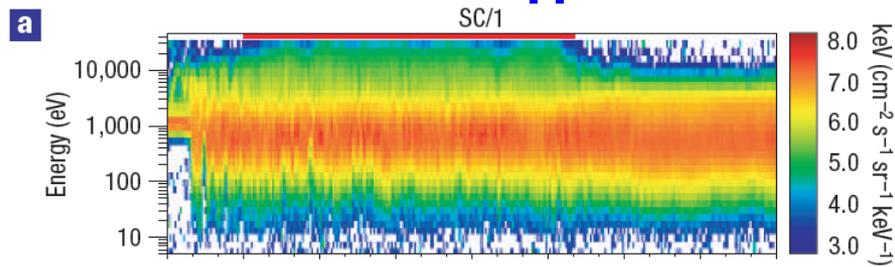


# Reconnection downstream of Q-|| shock



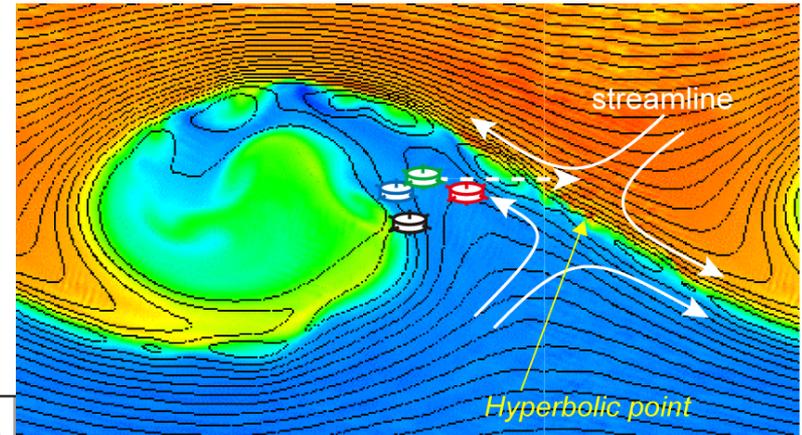
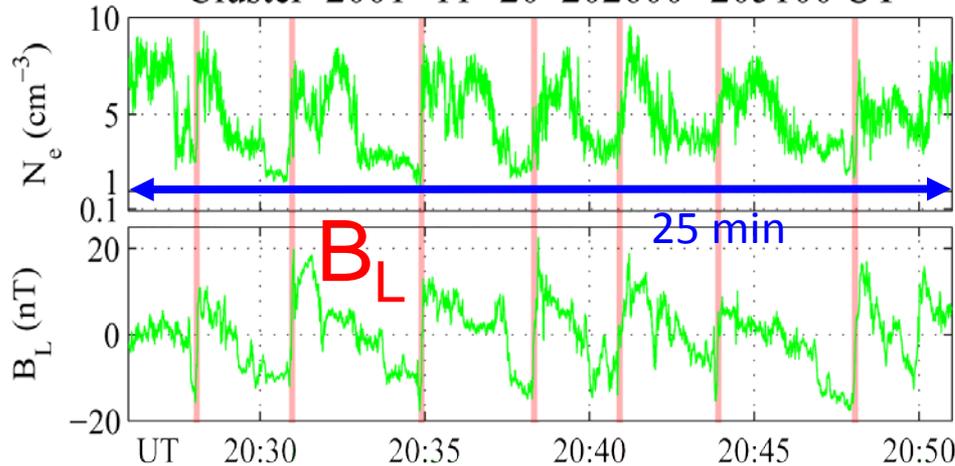
Reconnection in a turbulent magnetosheath plasma

Retino+ (Nature Phys.07)

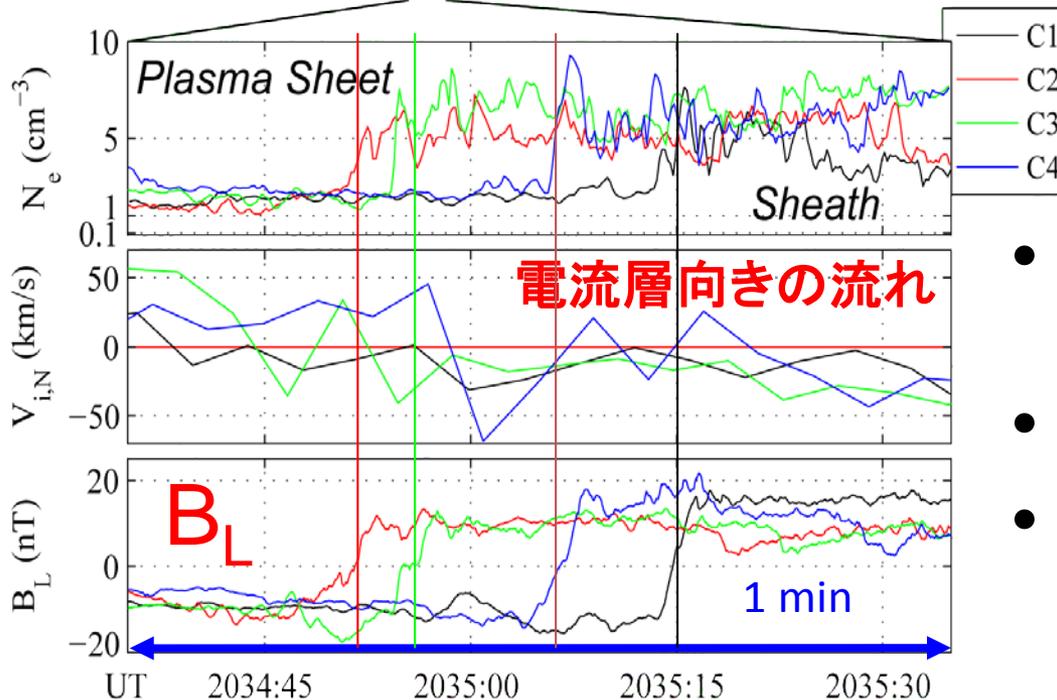


# KH渦の端で薄い電流層の形成

Cluster 2001-11-20 202600-205100 UT

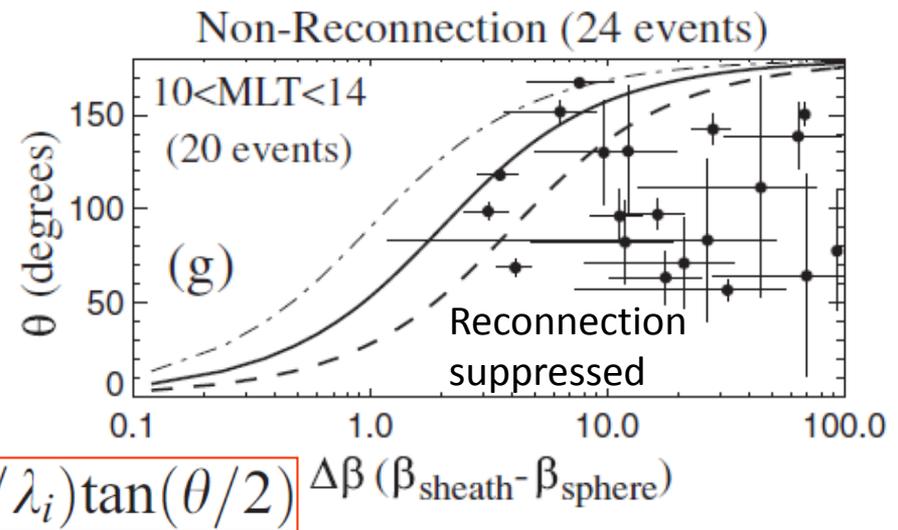
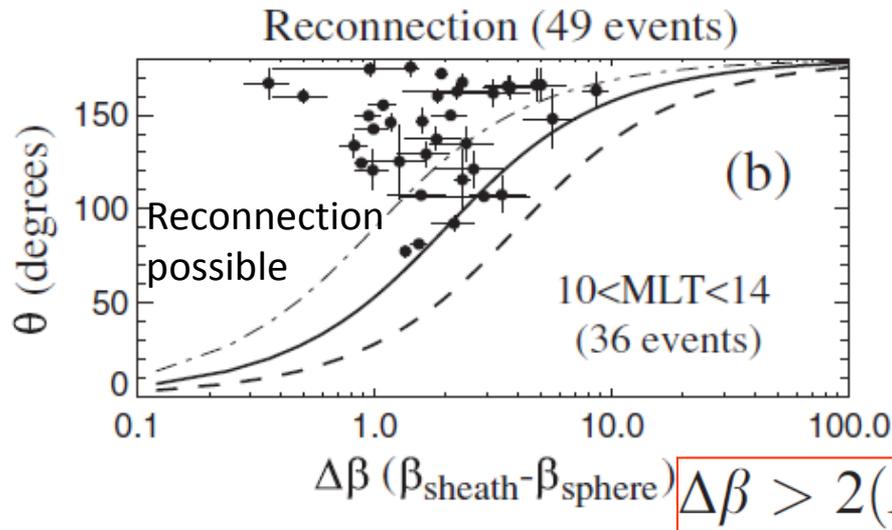


Hasegawa+ (JGR09)

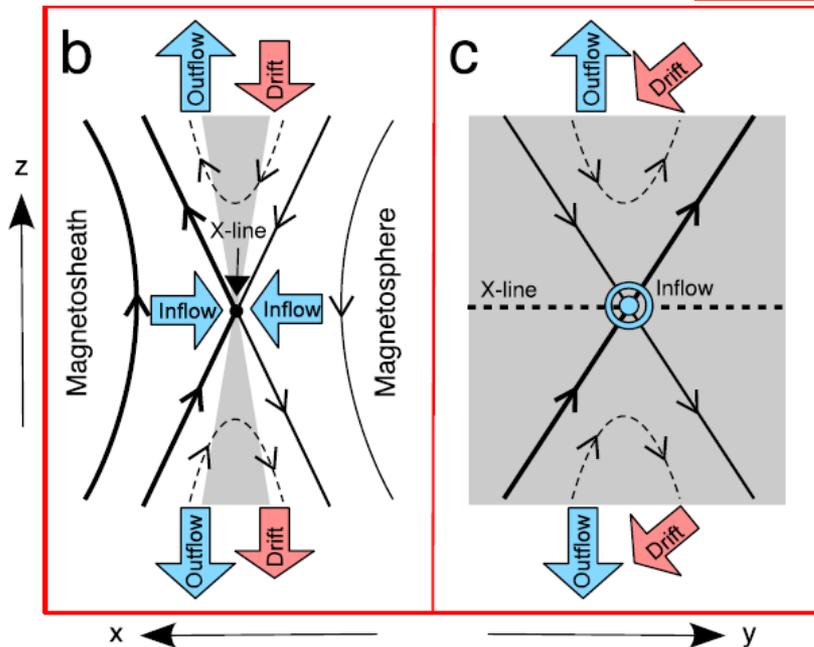


- 電流層の厚み  $\sim 250$  km = イオン慣性長の2、3倍。
- 磁気リコネクションの兆候も。
- 磁気リコネクションの寄与・重要性は未解明。

# Diamag suppression of reconnection



$$\Delta\beta (\beta_{\text{sheath}} - \beta_{\text{sphere}}) \Delta\beta > 2(L/\lambda_i)\tan(\theta/2) \Delta\beta (\beta_{\text{sheath}} - \beta_{\text{sphere}})$$



- **Diamagnetic suppression** of reconnection (Swisdak+, JGR03), first tested in solar wind (Phan+, ApJ10), has been **confirmed for MP** too (Phan+, GRL13).
- **At Saturn, high  $\beta$  sheath** likely suppresses reconnection (Masters+, GRL12).

# MAGNETOSPHERIC MULTISCALE

A SOLAR-TERRESTRIAL PROBE

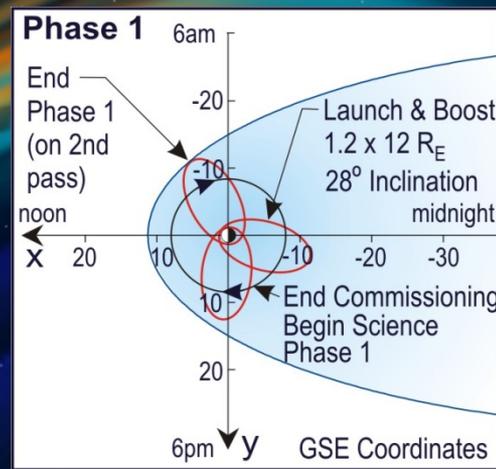
リコネクションのマイクロ物理解明を目指す。

- 高時間分解能のプラズマ・電磁場観測
  - 10 ms ~ 1 s.
- 4衛星による編隊観測
  - 衛星間距離: 10-100 km.

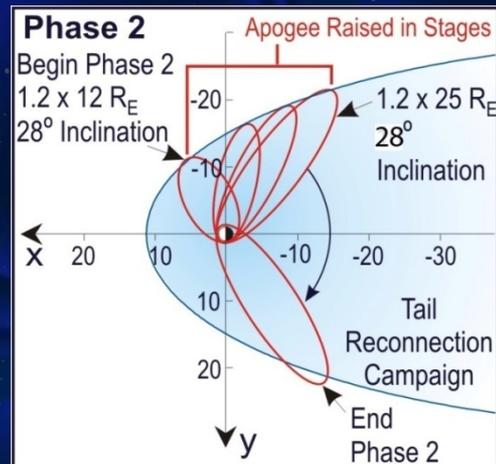
2015年3月打上げ予定

<http://mms.space.swri.edu/>

UNLOCKING THE MYSTERIES OF  
MAGNETIC RECONNECTION



TA005292

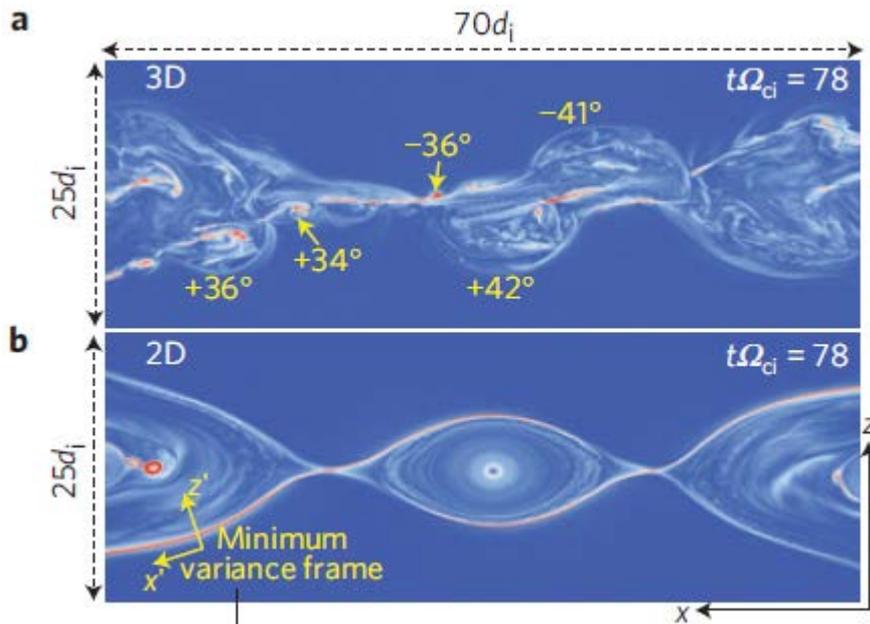


TA005293

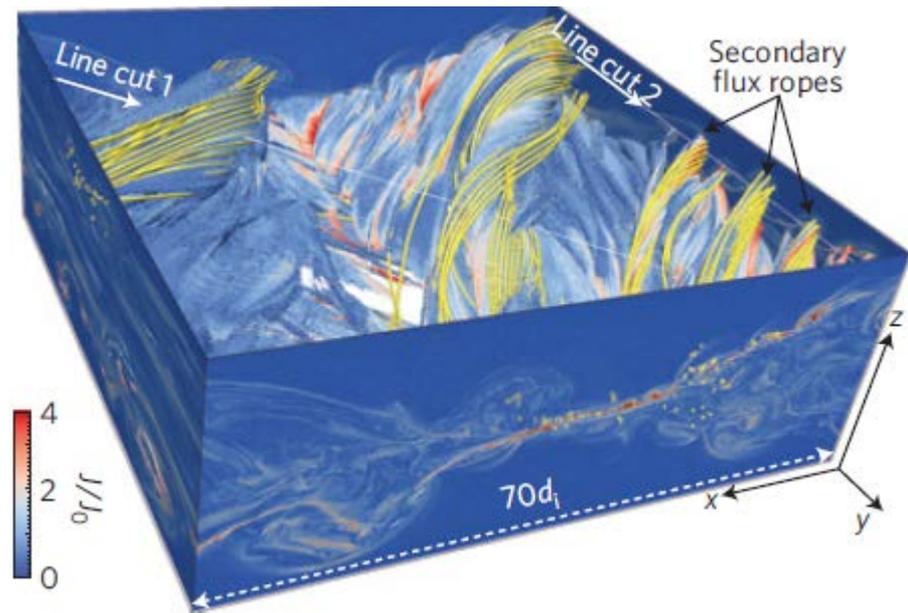
# 今後10年でどこまで理解が深まるか？

- 昔からあった問題
  - トリガー問題、散逸領域の物理、粒子加速、プラズマ加熱、エネルギー変換・分配
- 近年の問題意識： 乱流や衝撃波との結合
  - 乱流中でのリコネクション(乱流エネルギーの散逸)
  - リコネクションによる乱流の生成(エネルギー注入)
- 今後10年で垣間見えてくること
  - リコネクションのミクロ(電子スケール)物理
  - 三次元リコネクションの性質
  - リコネクションジェット(流れ)エネルギーの散逸過程

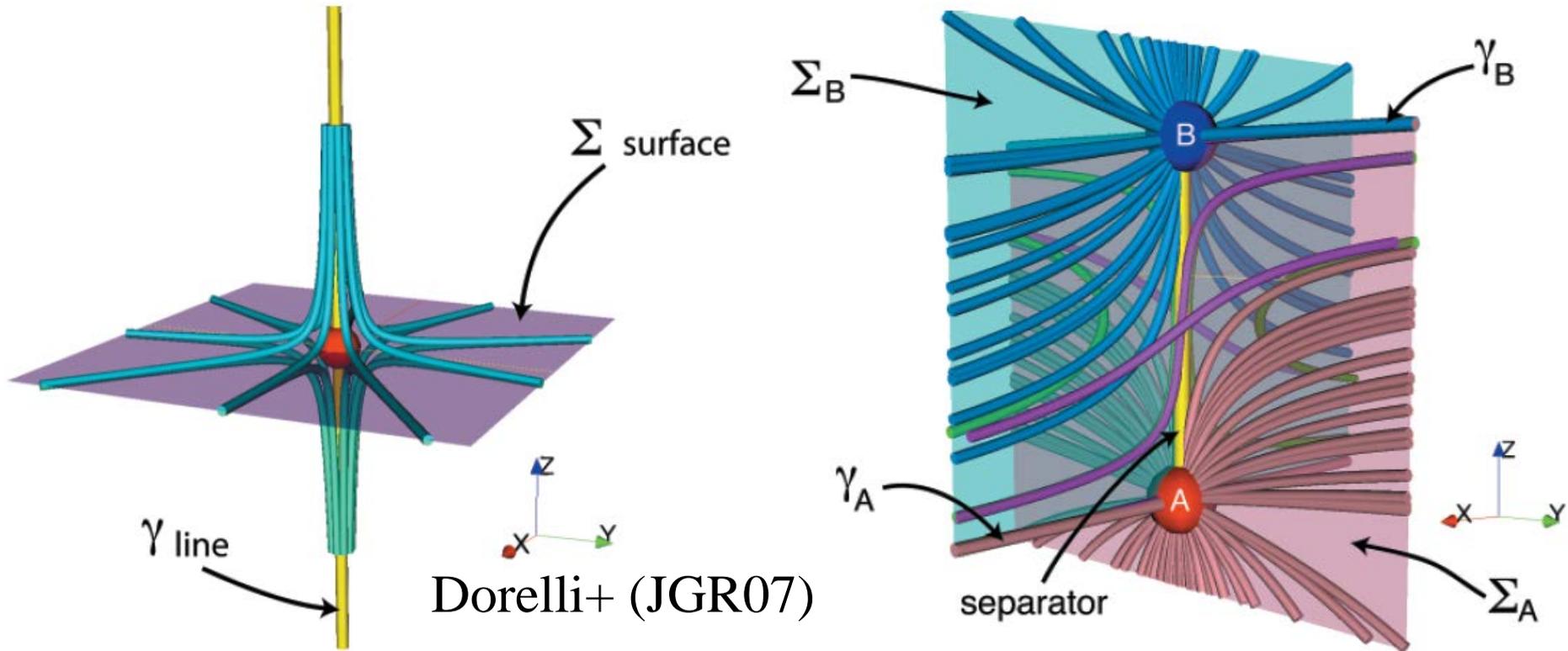
# MMSにより垣間見えてくる事： Turbulence from Reconnection



- 2Dから3Dになることで、より多くの場所でリコネクションが発生し、乱流的に。



# MMSにより垣間見えてくる事： Nulls & separator in 3-D reconnection



Key to identifying the topological boundary in 3-D field.  
→ Estimation of the reconnection  $E$ -field integrated along the separator.

# 磁気圏物理：今後10年の直接観測では 解決できないこと

- スケール間結合： マクロ⇒ミクロ⇒マクロ
  - 「ミクロ⇒マクロ」のフィードバック(大規模現象への影響)
  - ミクロ過程の時空間における分布

## 太陽観測への期待

- 素過程(磁気リコネクション、衝撃波、波の減衰)のリモセンによる弁別 ⇒ 乱流の生成過程、エネルギーの散逸過程に制約

# リコネクション室内実験

- 現状ではLundquist数 $<1000$ 程度であり、真にマクロな現象は包含されない。
- リコネクション自体は非MHD的効果が支配的（MHD的なリコネクションが起きる条件もあり）。
- 局所的なエネルギー変換はともかく、アウトフローの熱化については境界条件が大きく影響していそう。衝突がさらに小さくなるとどうなるか？

熱化のスケール、破れたMHD条件が下流側で回復する条件

# 核融合装置

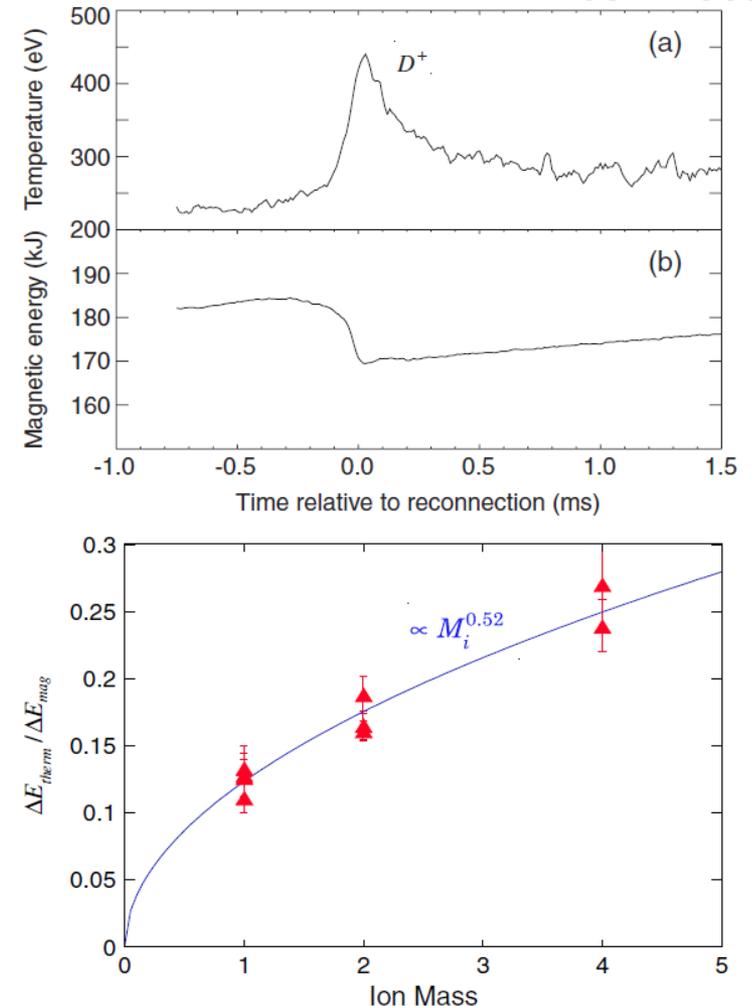
- 核融合プラズマでは、大きく
    - (A) 抑制すべきリコネクション由来不安定
      - テアリングモード
      - 突発的なリコネクションイベント (IRE, disruption)
    - (B) リコネクション加熱応用
      - 高ベータ配位形成
- の面でリコネクションが扱われている。

# 突発的リコネクションイベント

- 磁気エネルギーが解放され、主にイオンの熱エネルギーに転換される現象であり、リコネクションの本質に深く関係してそう。太陽フレアとの類似点もありそう。
- トリガ機構、スレッシュホールド
- どれだけの磁気エネルギーが解放され、どのようなイオン・電子スペクトルが形成されるのか？

フレア発生の条件  
フレア加熱・加速との関連性

Fiksel+ 2009



# 実験室プラズマまとめ

太陽の大きな(実験室では得られない)特徴は、

- 「リコネクション領域サイズに比して真に巨視的な空間スケール」
- 「フレアの自発的なオンセット観測」
- 「高効率エネルギー変換、高エネルギー粒子」

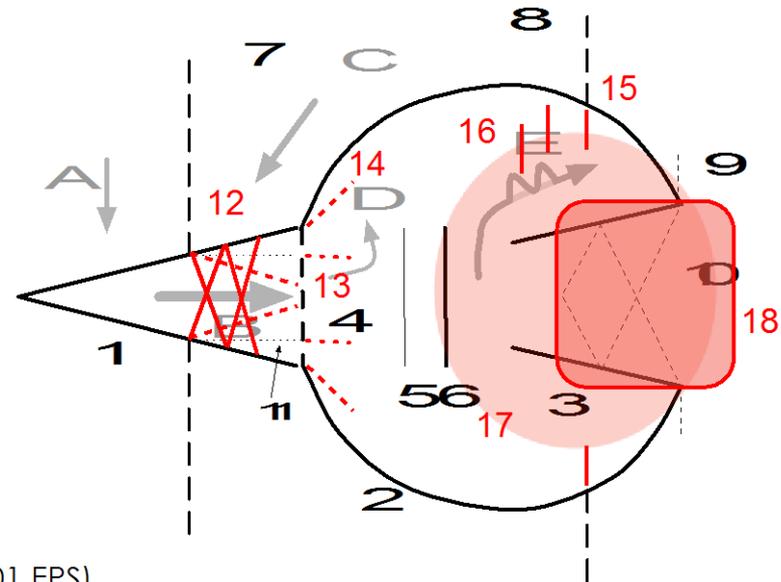
- ・ 熱化(MHD復帰)スケールの評価
- ・ 突発的エネルギー解放イベントのトリガ、スレッシュホールド
- ・ 突発的エネルギー解放によるエネルギースペクトル変化
- ・ 高ベータ平衡への遷移
- ・ 効率的な加速を得る条件

太陽でプラズマパラメータ依存性は評価できるのか？

# 宇宙プラズマからの期待 圧縮性に着目した研究 $\beta < 0.3$

## A complete catalog of plasmoid structure (2014)

- A. reconnection inflow
- B. outflow jet
- C. post-plasmoid backward flow
- D. internal flow
- E. flapping jet (KH instability)



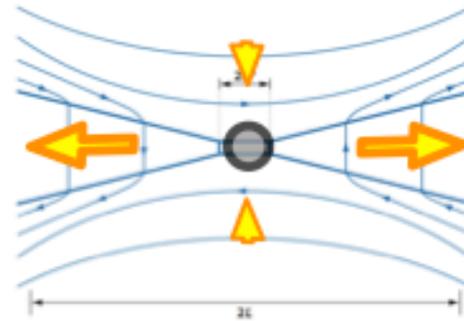
Zenitani & Miyoshi 2011 PoP

1. Petschek slow shock (Petschek 1964)
2. outer shell = slow shock (Ugai 1995 PoP)
3. intermediate shock (Abe & Hoshino 2001 EPS)
4. fast shock (Forbes & Priest 1983 SoP)
5. loop-top front (Ugai 1987 GRL)
6. tangential discontinuity
7. post-plasmoid vertical slow shock (Zenitani+ 2010 ApJ)
8. outer vertical slow shock (Zenitani & Miyoshi 2011 PoP)
9. fast-mode wave front (Saito et al. 1995 JGR)
10. overexpanded shock diamond (Zenitani+ 2010 ApJ)
11. contact discontinuity (Zenitani & Miyoshi 2011 PoP)

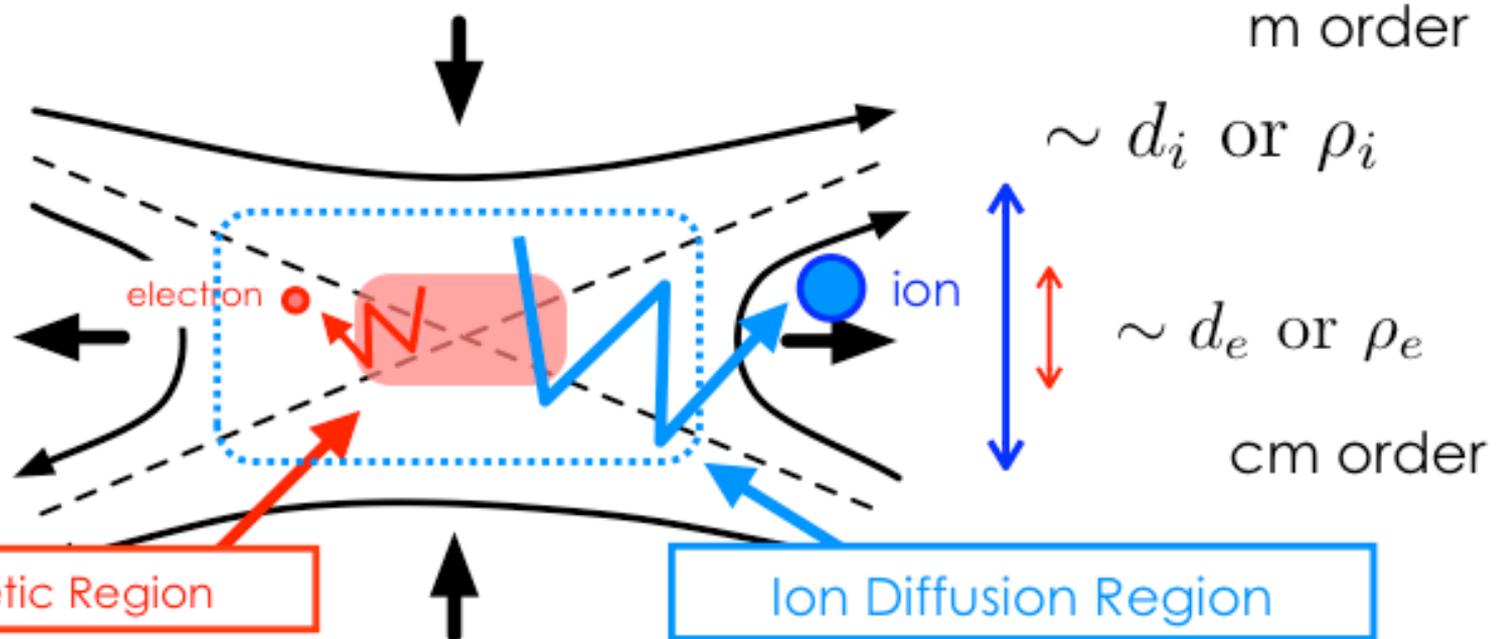
12. underexpanded shock-diamond
13. slow-mode expansion fan?
14. contact discontinuity
15. contact discontinuity
16. vortex-generated shock
17. cocoon
18. pseudo shock

# Kinetic central engine

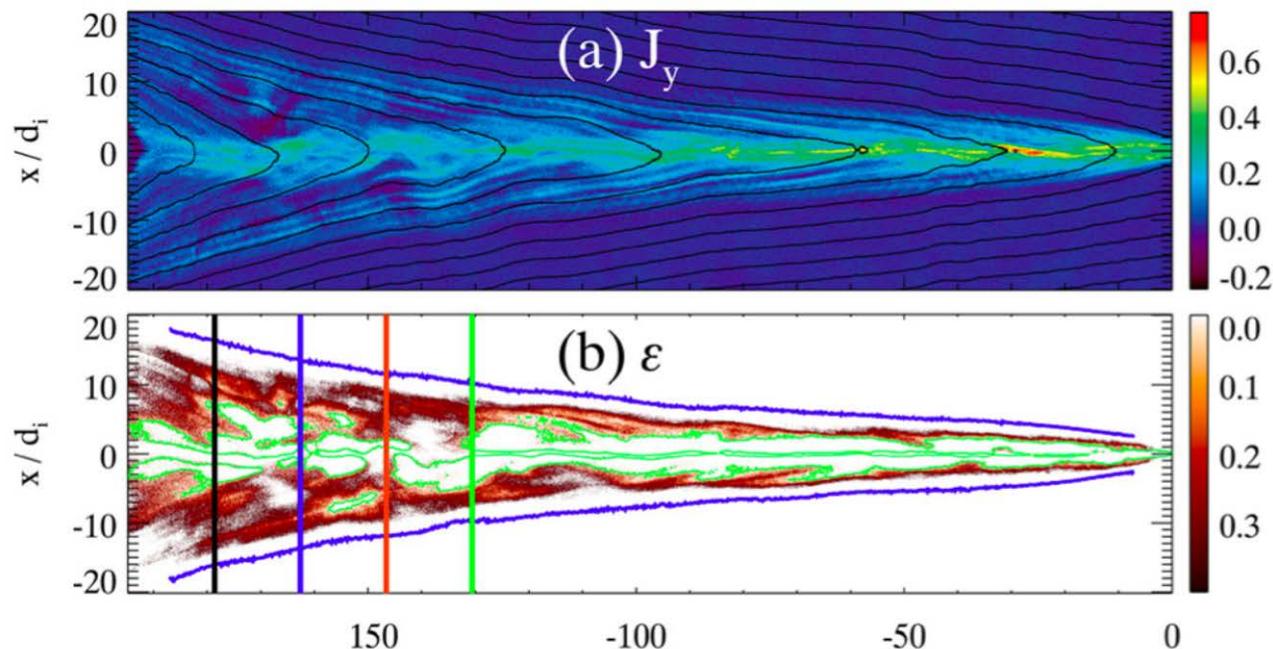
- Central engine of magnetic reconnection



- Kinetic plasma: two-scale diffusion regions



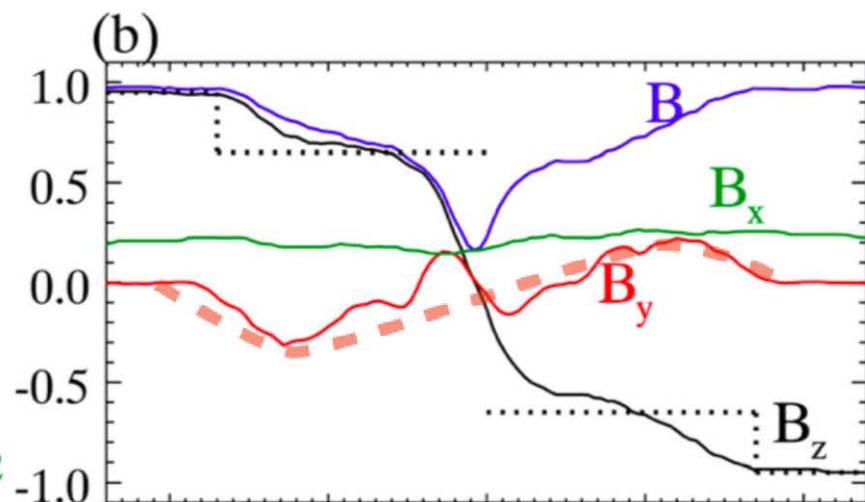
# Hall reconnection



Liu+ 2012 PoP

## • Hall 磁場

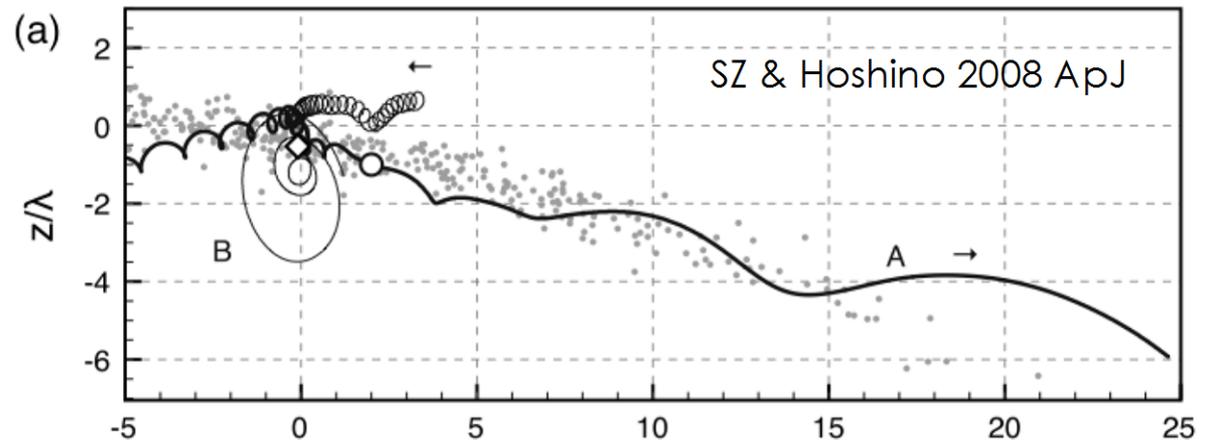
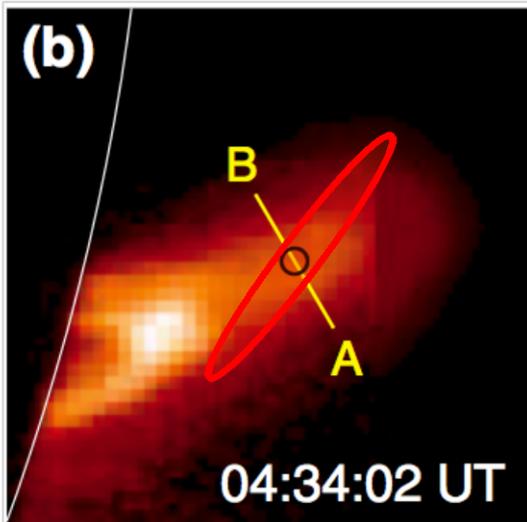
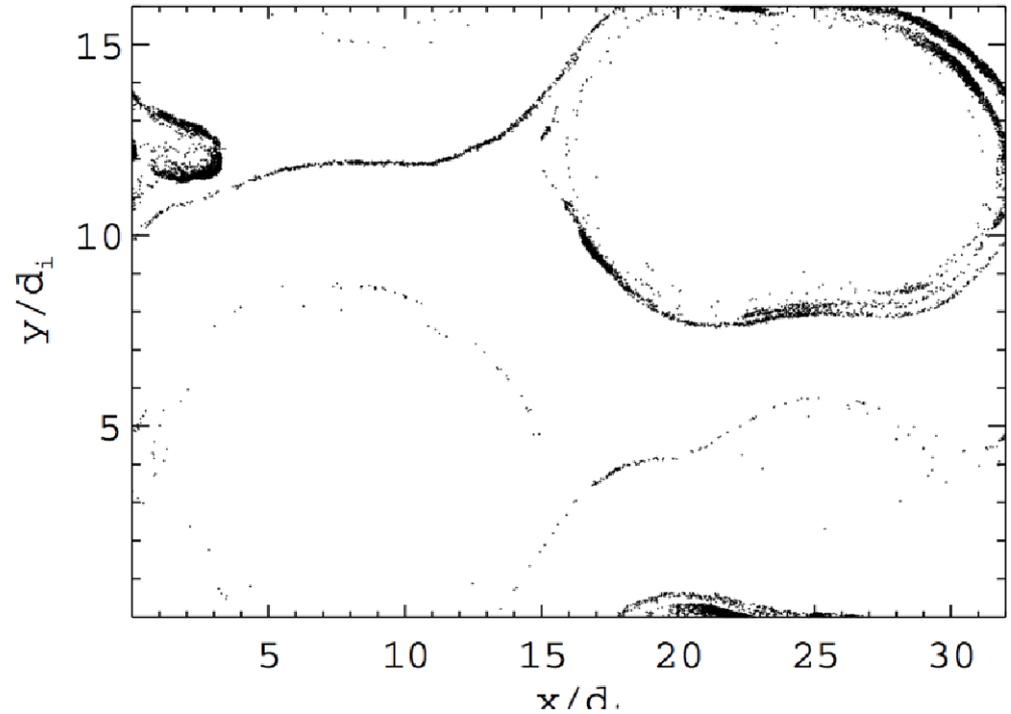
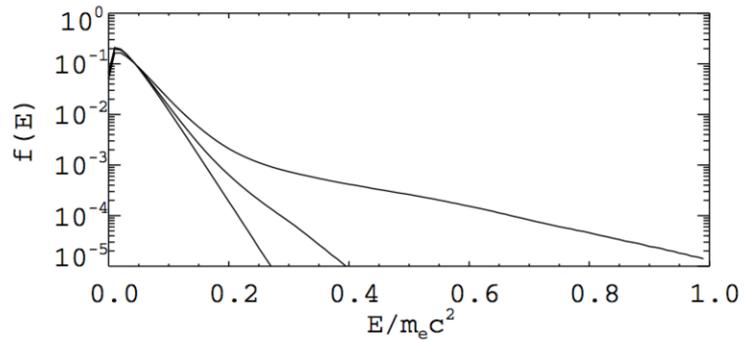
- $> \sim 100 d_i$  スケールでも存在して良い
- $200 d_i$  まではスケール
- $1000 d_i \sim 3$  [km]
- 逆に制約を付けられないか？



# Particle acceleration

- ・ ガイド 磁場型 RX
- ・ 加速粒子の局在化

Drake+ 2005 PRL



# まとめ

- 1. 非MHD効果をどこまで太陽で考えるべきか
  - Hall 磁場がどこまでのびるか？
  - 粒子加速に非対称性はあるか？
  - diamagnetic suppression 効果は？
  - 粘性は？？？
- 2. 他分野へのインパクトを出すには何をあきらかにすれば良いか
  - 真に巨視的なスケール
  - 様々な衝撃類の観測
  - フレアの自発的なオンセット
  - 乱流の生成・影響