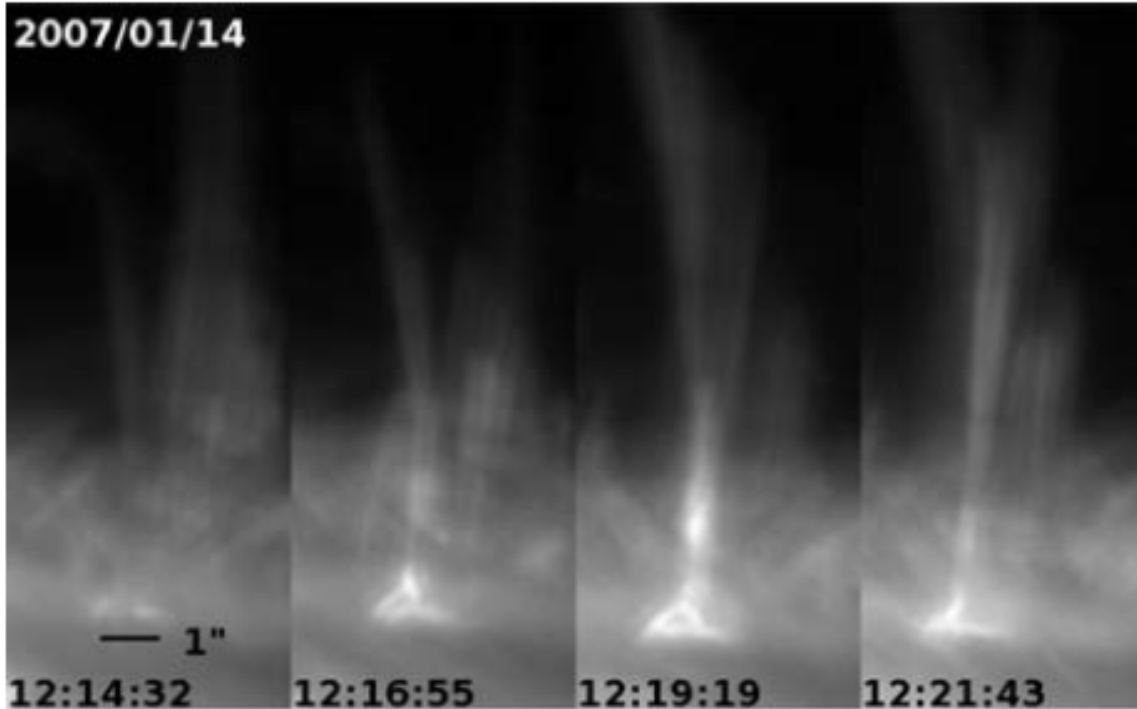


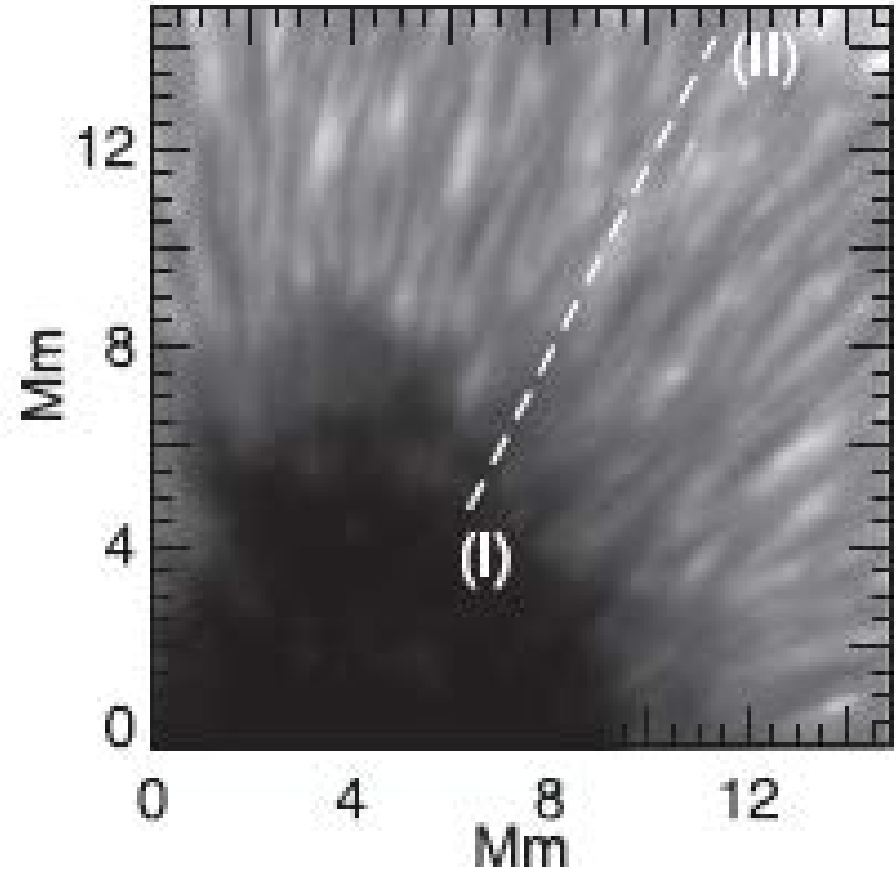
部分電離プラズマにおける 磁気リコネクションと 観測可能性

京都大学
附属天文台
中村 尚樹

活動的な太陽大気



彩層アネモネジェット(Shibata et al. 2007)

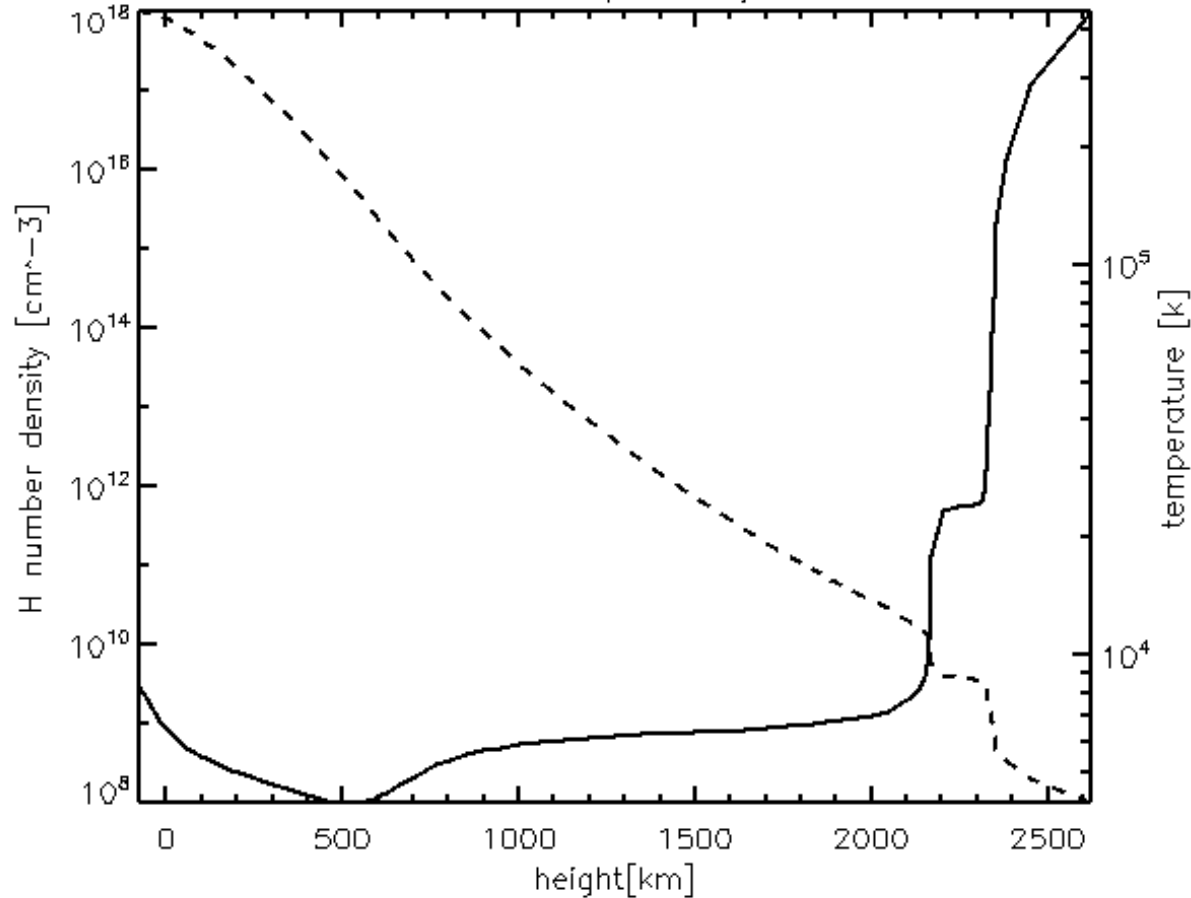


半暗部ジェット(Katsukawa et al. 2007)

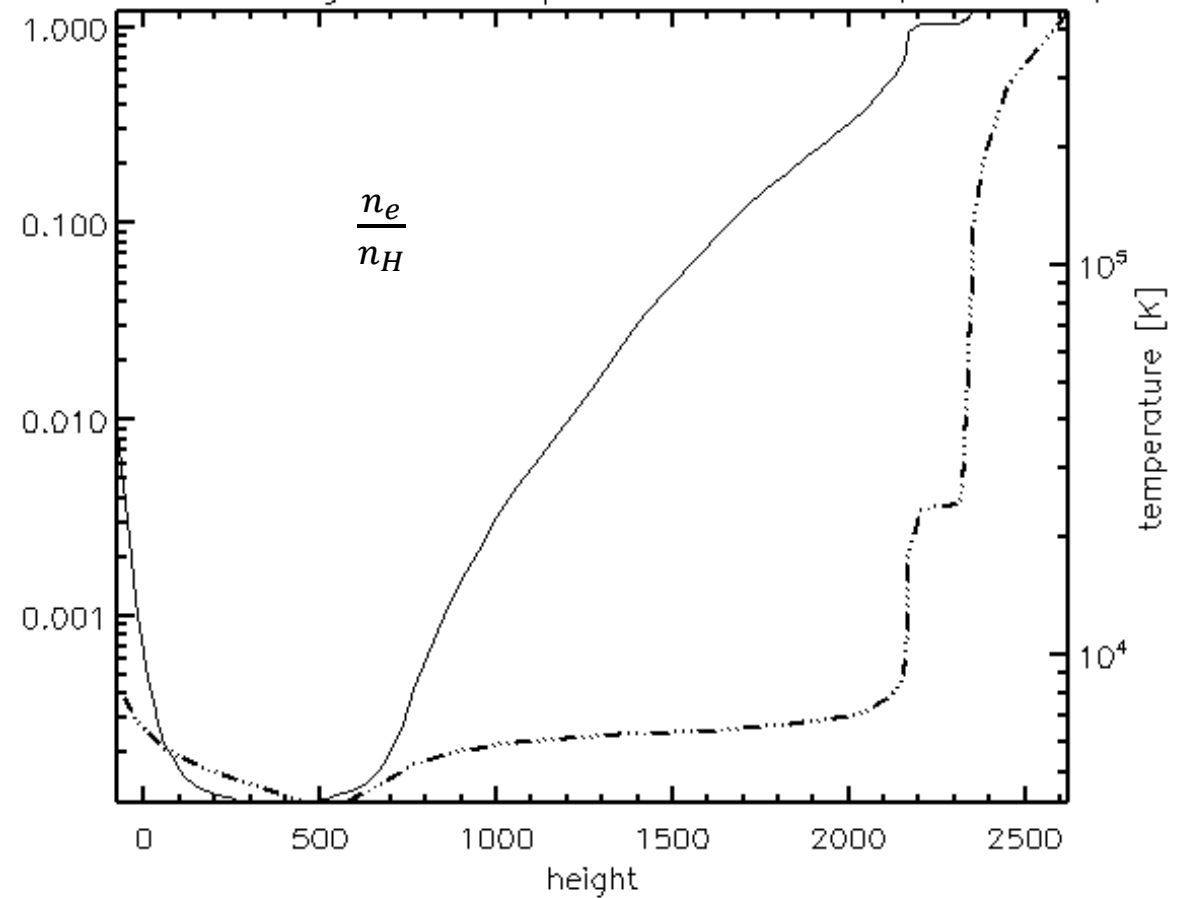
太陽下層大気(光球、彩層)は活動性に満ちている <= 磁気リコネクション?

太陽大気(光球+彩層 VAL3c)

MULTI (Val3C)



ionization degree & temperature in MULTI (H6 VAL3C)



太陽下層大気は重力成層している (非常に広いパラメータレンジ)
太陽下層大気は部分電離プラズマ

リコネクションの特徴は？

古典的リコネクションモデル

Sweet-Parker リコネクション

もっとも古典的な定常リコネクションモデル

リコネクションレート $\propto R_m^{-1/2}$

=> 遅い

Petschek リコネクション

slow shockによりエネルギー解放

リコネクションレート $\propto (\ln R_m)^{-1}$

=> タイムスケールはいいが拡散領域を局所化させる機構は？ (Hall 効果?)

プラズモイド型磁気リコネクション

Sweet-Parker 型の電流シートは磁気レイノルズ数がある臨界値($R_m \sim 10^4$)を超えると不安定になる

=>プラズモイド不安定

=>早い(ほぼ磁気レイノルズ数に依存しない)エネルギー解放

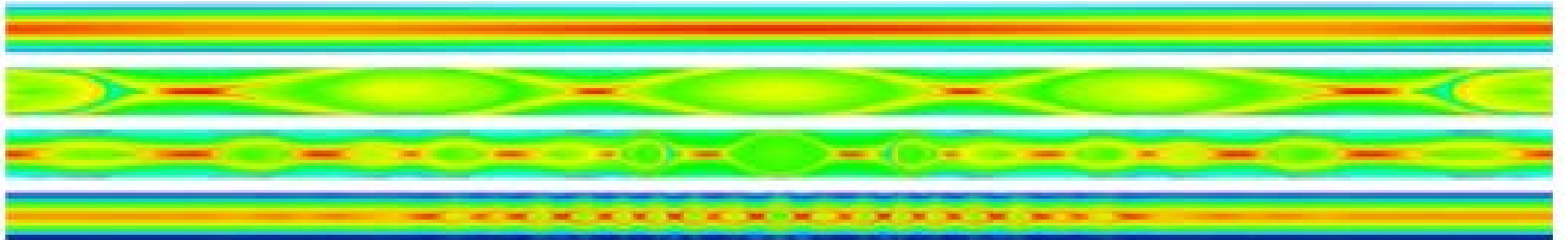


FIG. 2 (color online). Current density for $S = 10^4$, $S = 10^5$, $S = 10^6$ and $S = 10^7$. $S = 10^8$ is shown in Fig. 1.

プラズモイド型リコネクションは実現するか？

太陽彩層(中部)パラメータにおける磁気レイノルズ数

($T \sim 10^4 K$, $n \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $B \sim 100 G$, $L \sim 10^7 \text{ cm}$)

$\Rightarrow R_m \sim 10^6 \Rightarrow$ 電流シートの厚み $\sim 10^4 \text{ cm}$

グローバルスケールの電流シート($L \sim 10^7 \text{ cm}$)を

Sweet-Parker リコネクションの電流シート($\sim 10^4 \text{ cm}$) まで薄くする機構

\Rightarrow Ambipolar diffusion (部分電離プラズマ効果)

部分電離プラズマにおけるMHD

完全電離プラズマにはない部分電離プラズマによるMHD効果

Ambipolar diffusion

中性粒子が存在することにより生じる磁場の拡散

電離・再結合

中性粒子と荷電粒子が入れ替わる

Ambipolar MHD による電流シートの時間発展

Brandenburg
& Zweibel (1994)

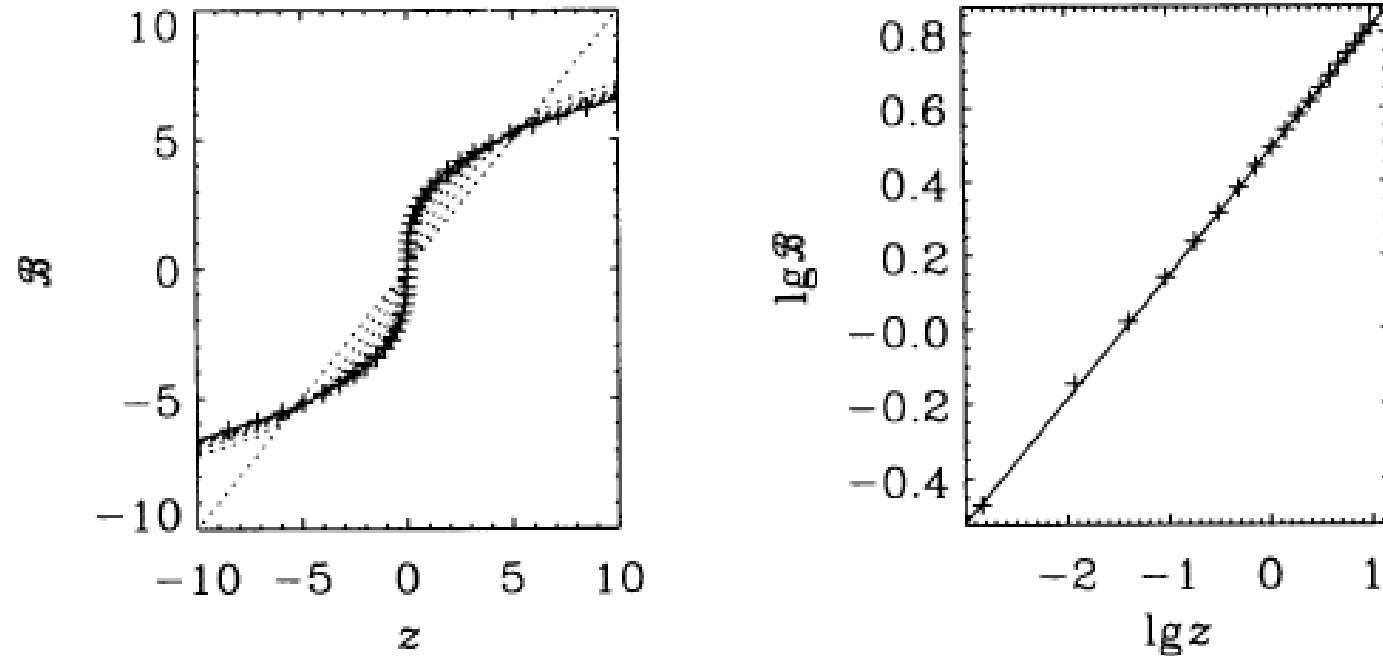


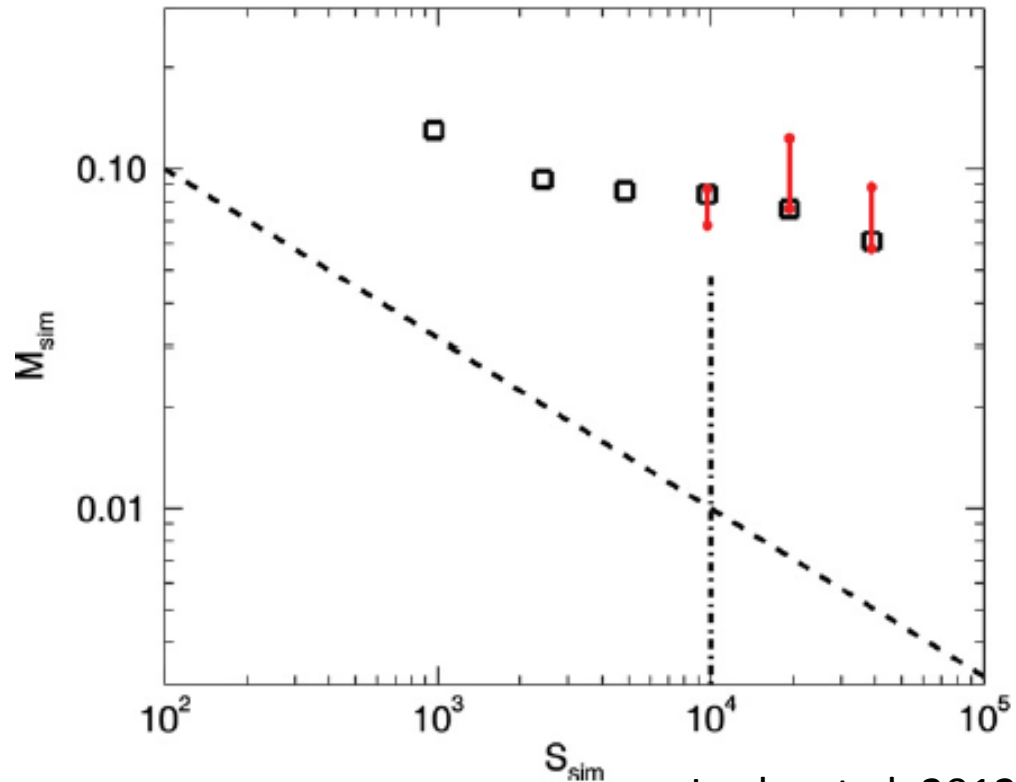
FIG. 1.—*Left*: Evolution of \mathcal{B} (dotted lines) for the initial condition $\mathcal{B} \propto z$ (dashed line). The final solution (solid line) shows a $z^{1/3}$ behavior ($t = 1$). The time between the different lines is 0.1. *Right*: The final solution in a log-log plot.

Ambipolar diffusion が効くとHarris 電流シートは非常に薄くなる
定常状態では電流密度 $J \propto z^{-2/3}$

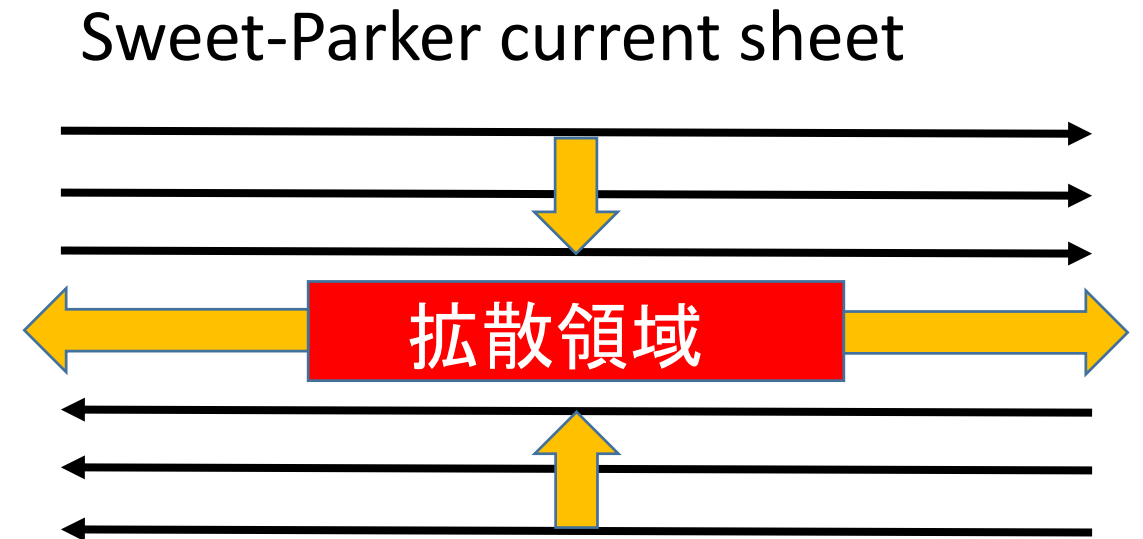
電離・再結合の影響

Vishniac & Lazarian (1997)

電離・再結合のタイムスケールが(アルフベンタイムに対して)十分小さいとき、電離・再結合過程がリコネクションを速める



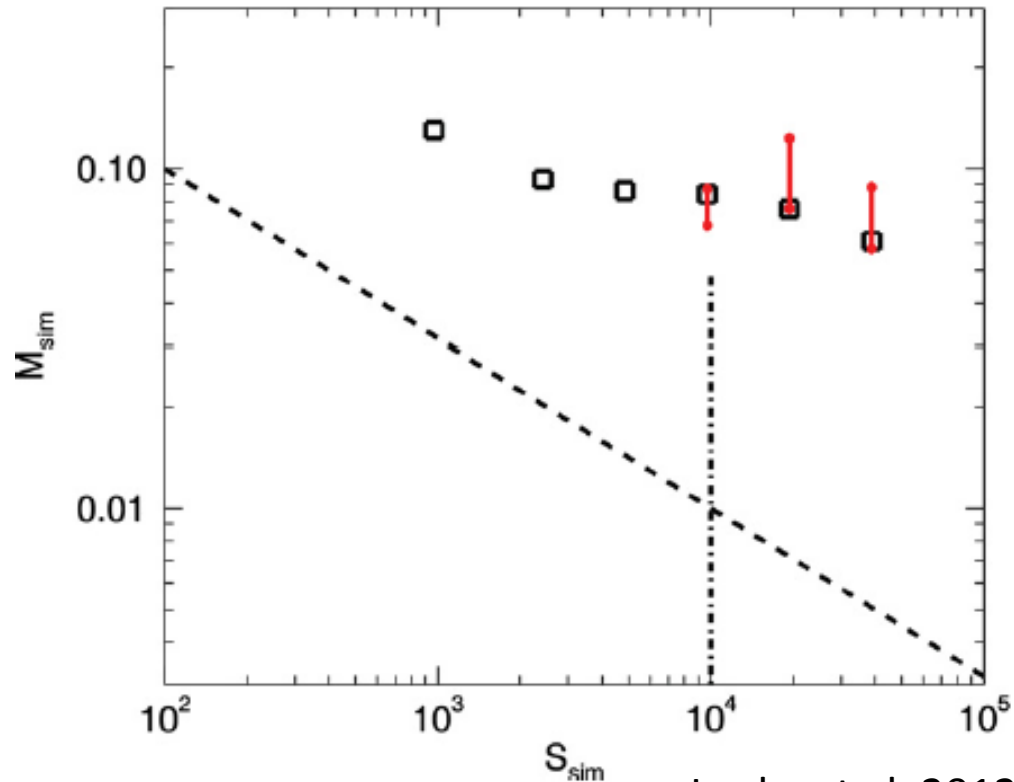
Leake et al. 2012



電離・再結合の影響

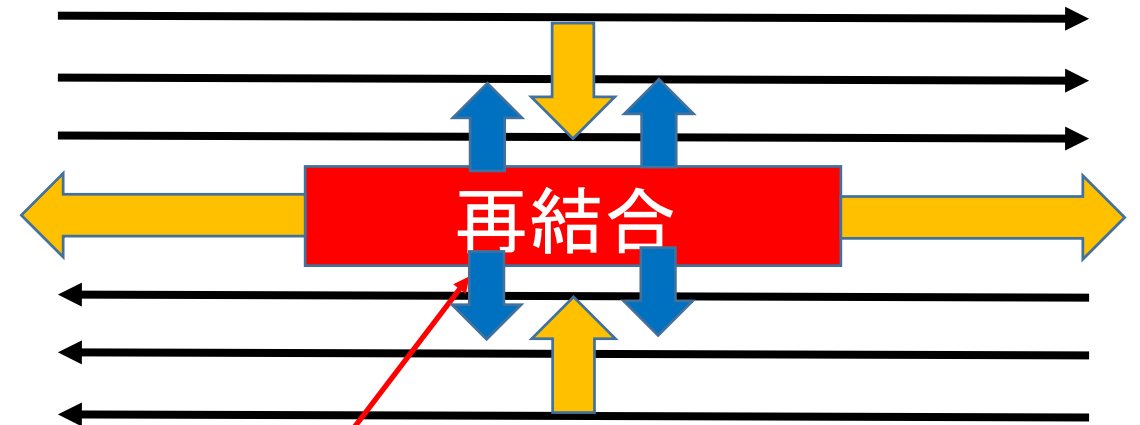
Vishniac & Lazarian (1997)

電離・再結合のタイムスケールが(アルフベントタイムに対して)十分小さいとき、電離・再結合過程がリコネクションを速める



Leake et al. 2012

電離再結合 current sheet



拡散領域でプラズマが再結合
=> 中性流体として逃げていく

シミュレーション設定

プラズマ・中性 二流体シミュレーション

温度分布

白線: 磁力線

一様抵抗

$$R_m = 10^4$$

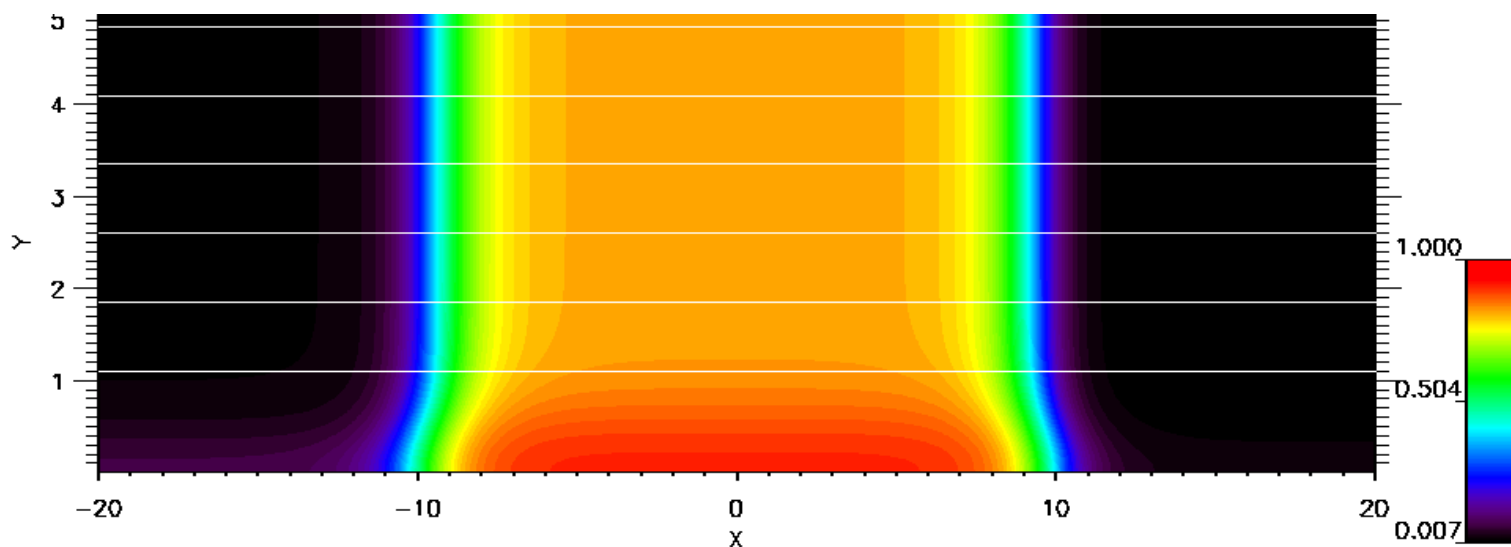
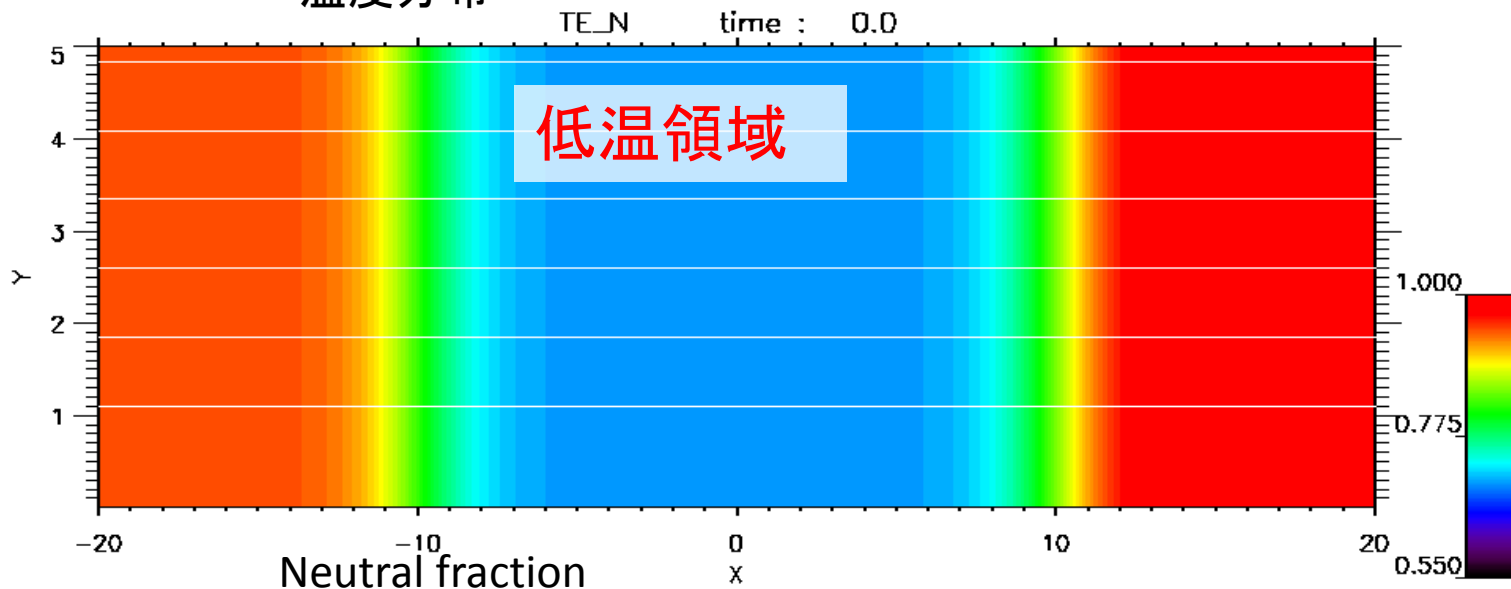
初期に電離平衡

Saha-Boltzman

$$\xi_n \equiv \frac{n_n}{n_n + n_p}$$

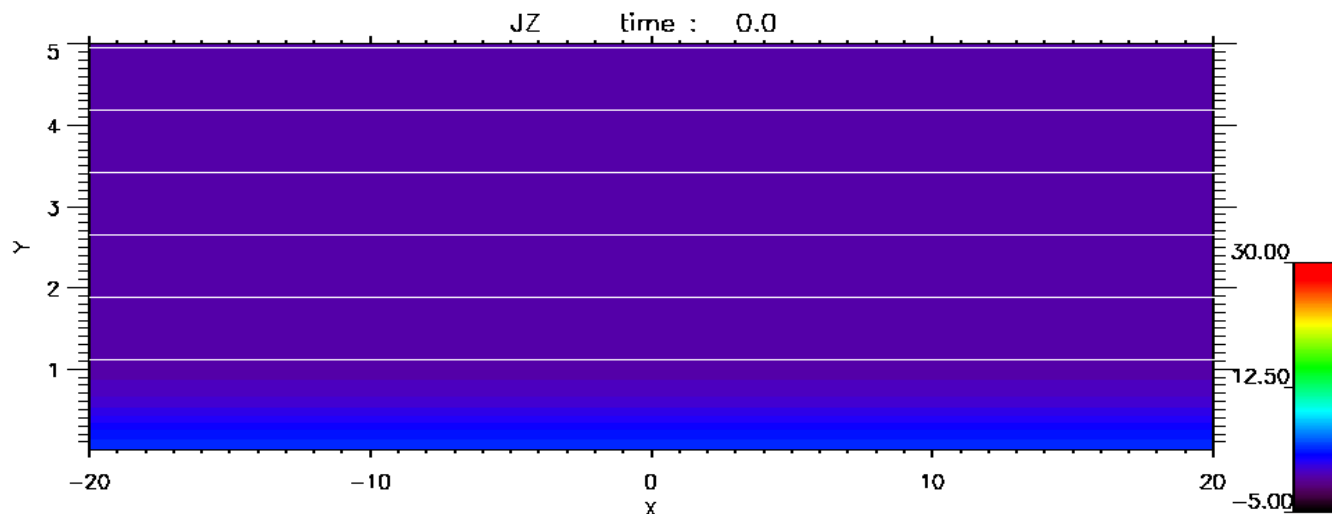
n_n : neutral
density

n_p : plasma
density

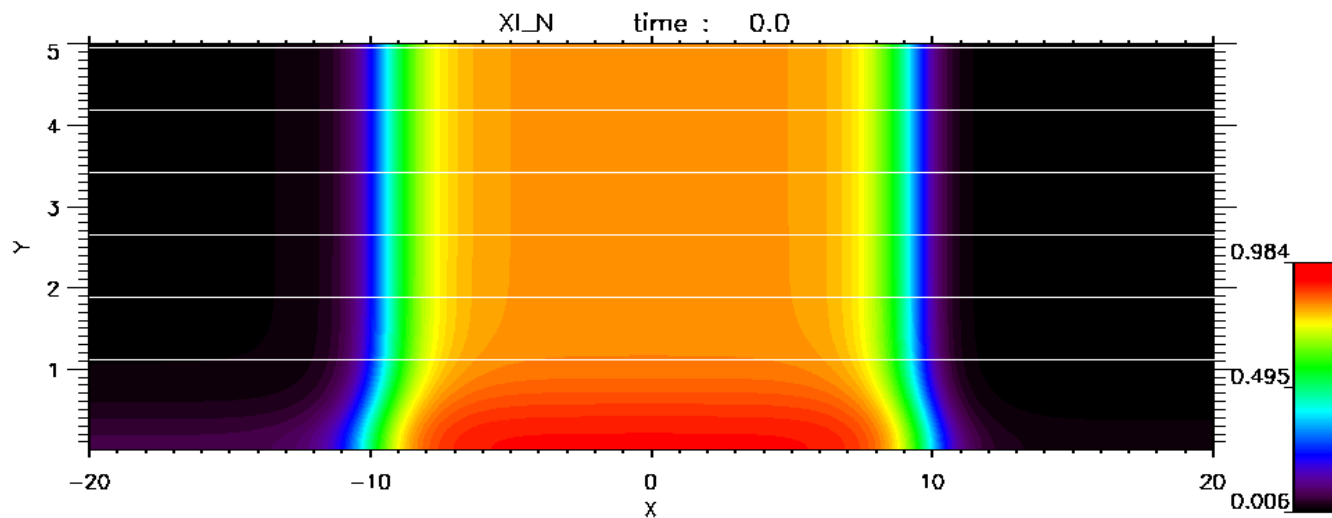


電流シートの時間発展

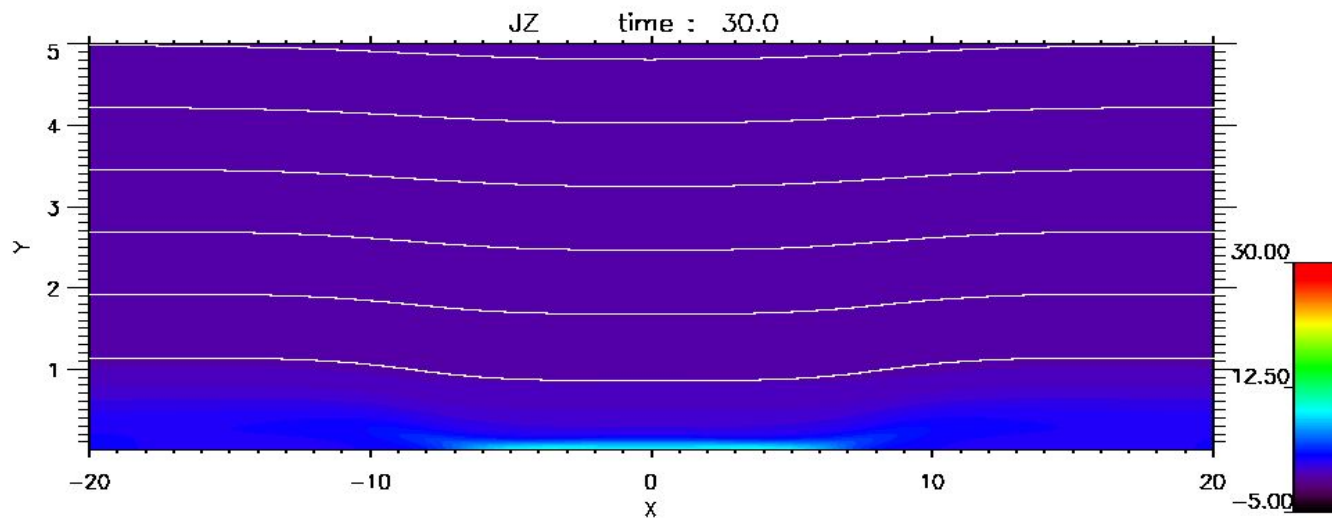
一様抵抗



$\xi_n \equiv \frac{n_n}{n_n + n_p}$
 n_n : neutral density
 n_p : plasma density

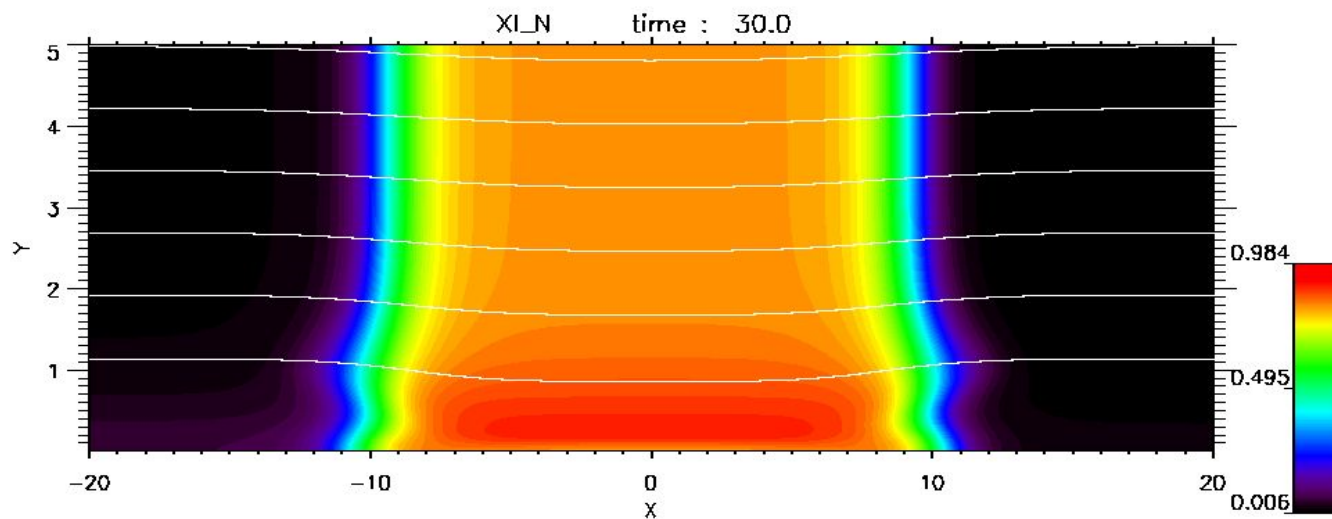


電流シートの時間発展

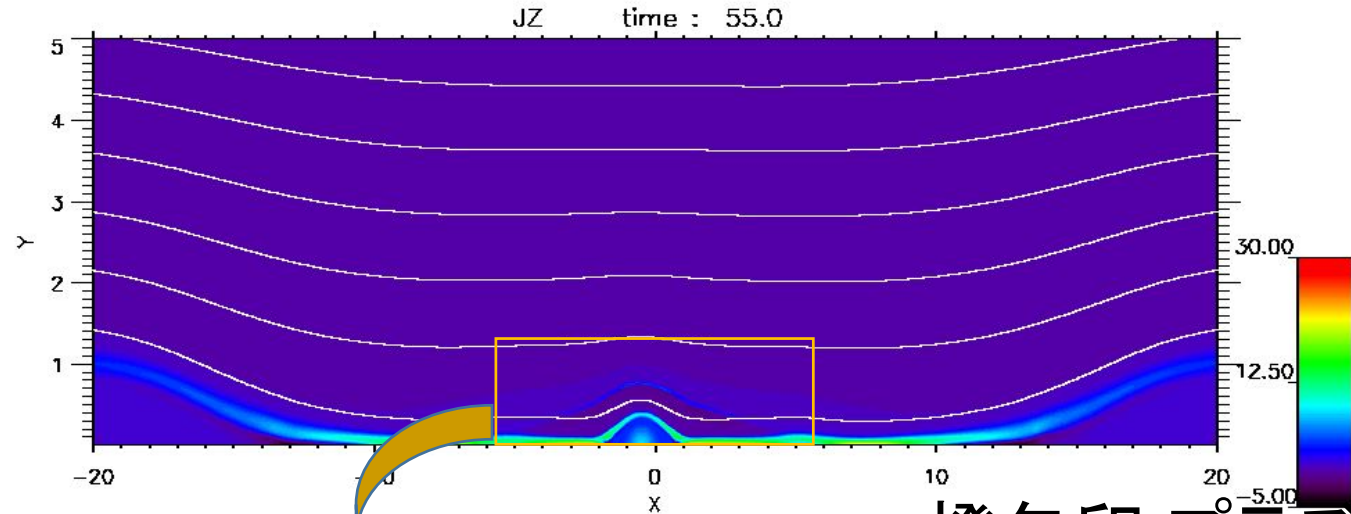


$$\xi_n \equiv \frac{n_n}{n_n + n_p}$$

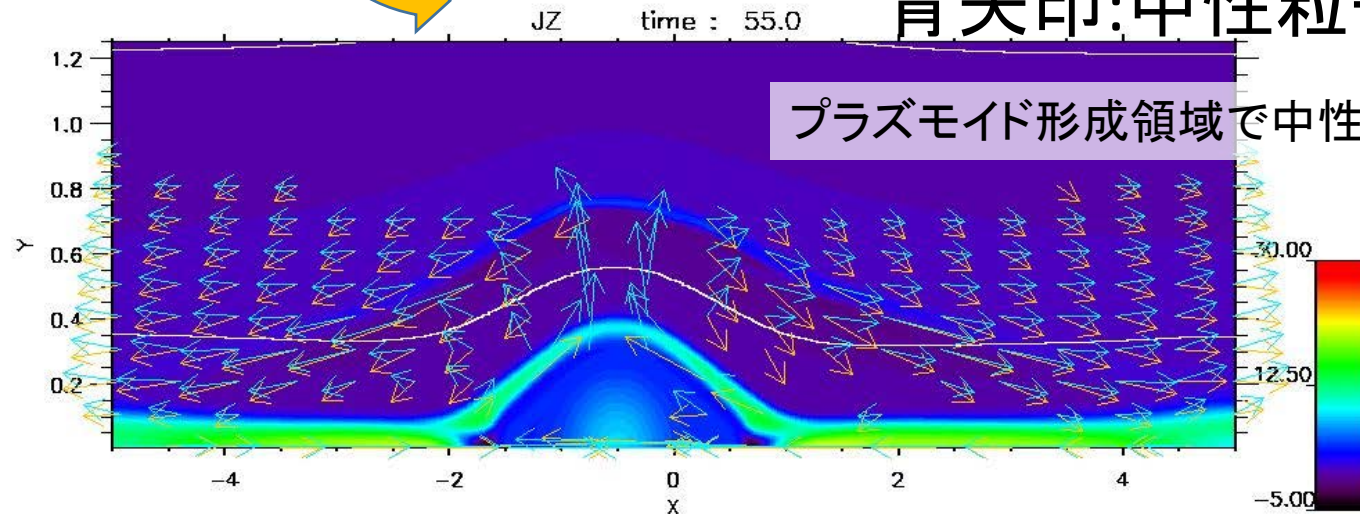
n_n : neutral density
 n_p : plasma density



プラズモイド形成時のドリフト

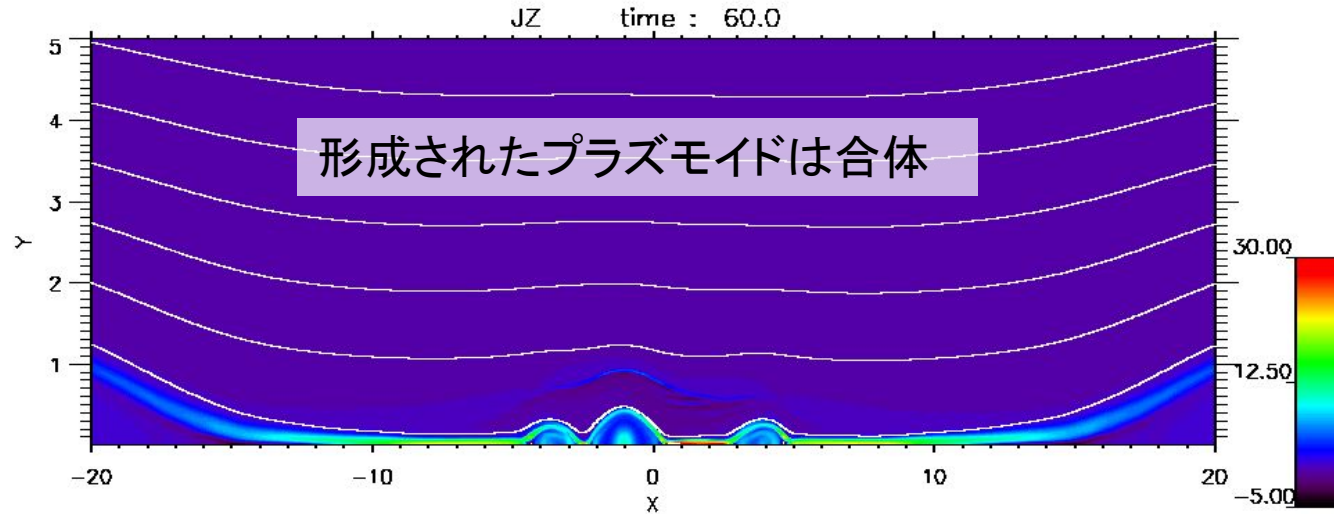


橙矢印: プラズマ速度
青矢印: 中性粒子速度



プラズモイド形成領域で中性粒子が逃げる

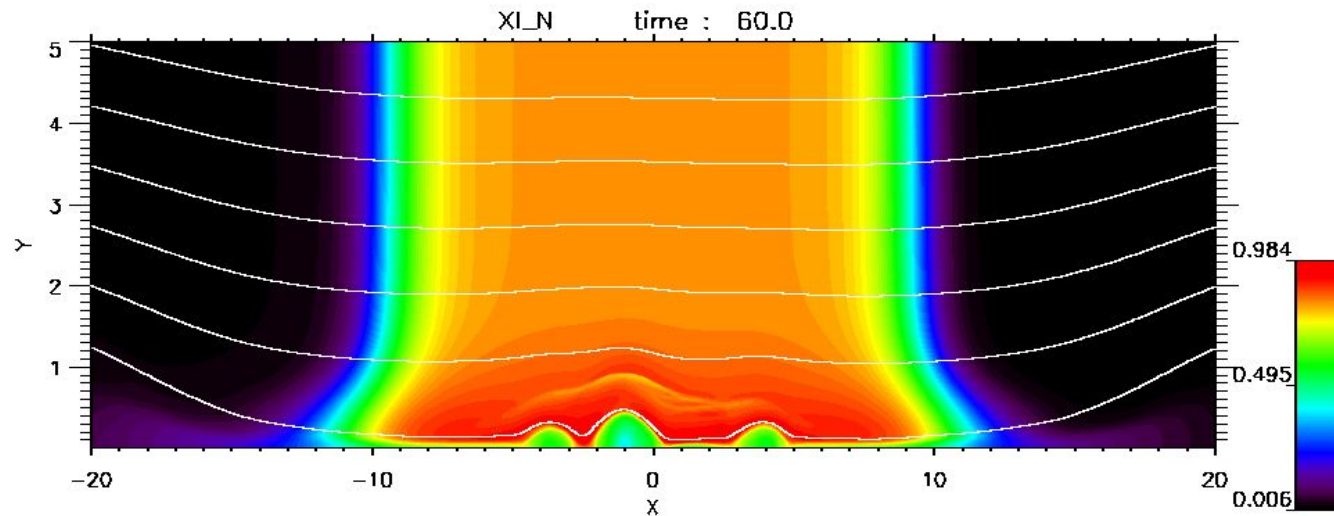
プラズモイド融合と放出



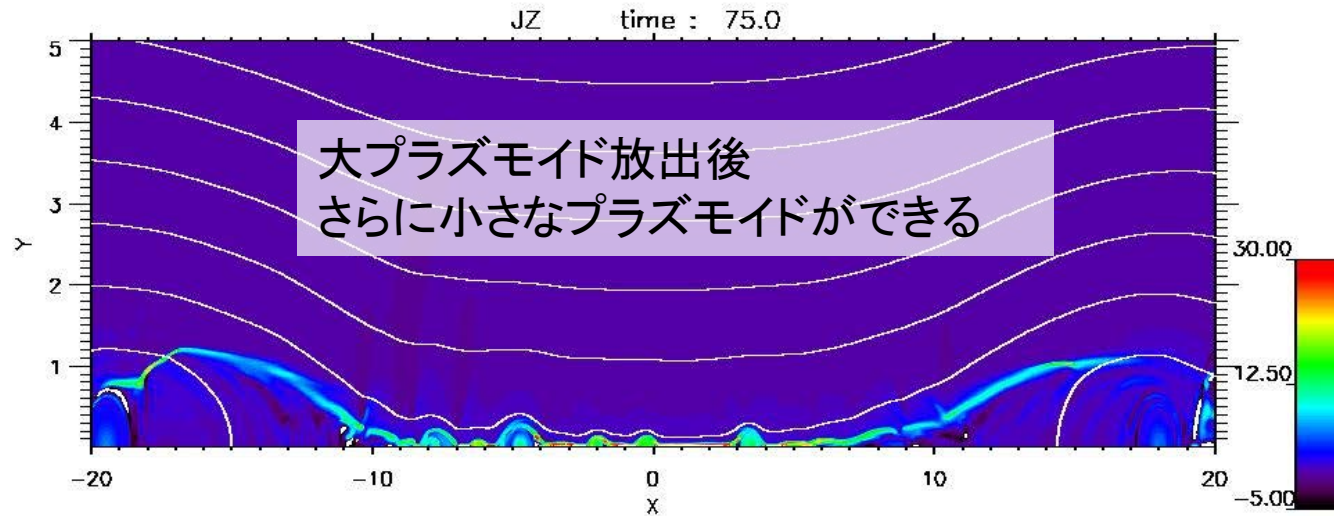
$$\xi_n \equiv \frac{n_n}{n_n + n_p}$$

n_n : neutral
density

n_p : plasma
density



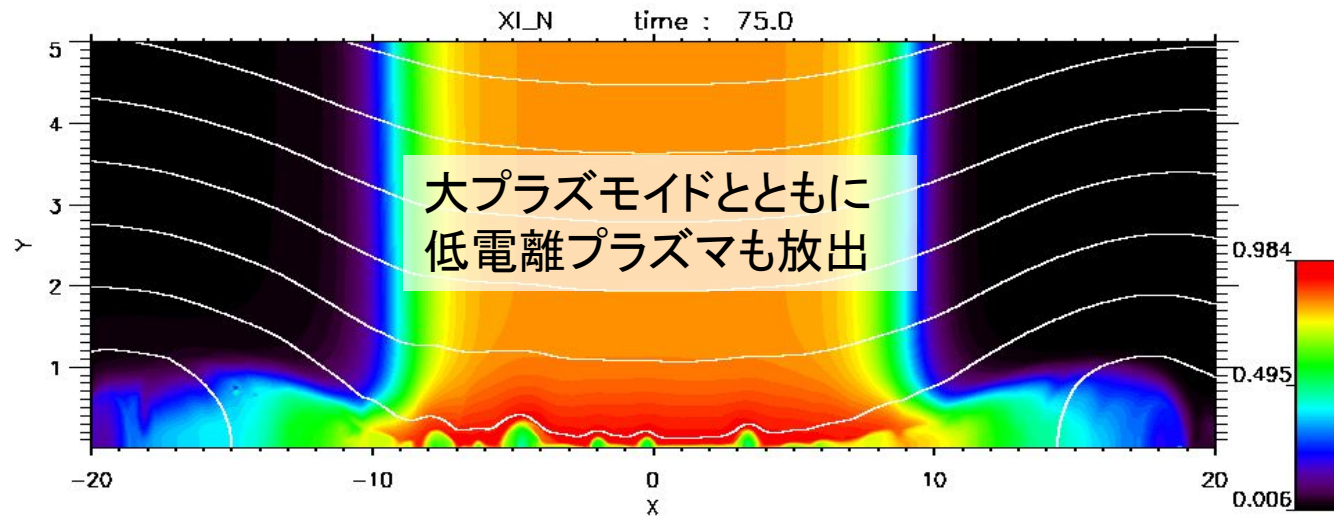
プラズモイド融合と放出



$$\xi_n \equiv \frac{n_n}{n_n + n_p}$$

n_n : neutral
density

n_p : plasma
density



リコネクションの観測可能性 -ドリフト-

中性流体とプラズマはローレンツ力が働くとドリフトする

(Sweet-Parker リコネクションのinflow 領域)

直接中性流体とプラズマの速度差を測定可能か?

ドリフト速度
$$v_D = \frac{J \times B}{a_c \rho_n \rho_p} \sim \frac{V_A^2}{v_{np} \chi_p \Delta} \quad (v_{np}: \text{collisional freq.})$$

$$\chi_p: \text{電離度}$$

$$(J \times B \sim \frac{B^2}{8\pi\Delta}, \Delta \text{は電流シートの厚み})$$

$$\text{彩層上部, } v_{np} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}, \chi_p \sim 0.1$$

$$(V_A, \Delta) = (5 \times 10^6 \text{ cm/s}, 10^7 \text{ cm}) \Rightarrow 2 \times 10^4 \text{ cm/s (0.2 km/s)}$$

$$= (5 \times 10^6 \text{ cm/s}, 10^6 \text{ cm}) \Rightarrow 2 \times 10^5 \text{ cm/s (2 km/s)}$$

リコネクションの観測可能性2

-電離非平衡-

Dynamics time scale $< IR$ -time の領域では電離度が熱平衡のものからずれる

=> 荷電粒子(CaII, MgII..)と中性粒子(H)を同じくらいの高さで観測すればリコネクションポイント(電流シート、プラズモイド)の電離度が周辺と違う？

再結合時間 水素(~ 10-100 s)

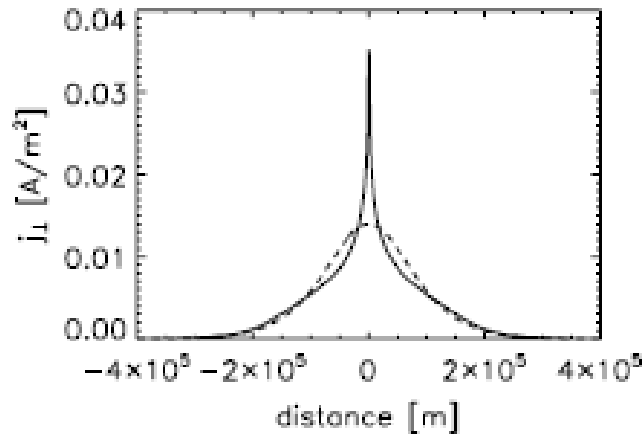
$t_A \sim 0.1 t_{IR}$ とするなら

必要な時間スケールは1-10s

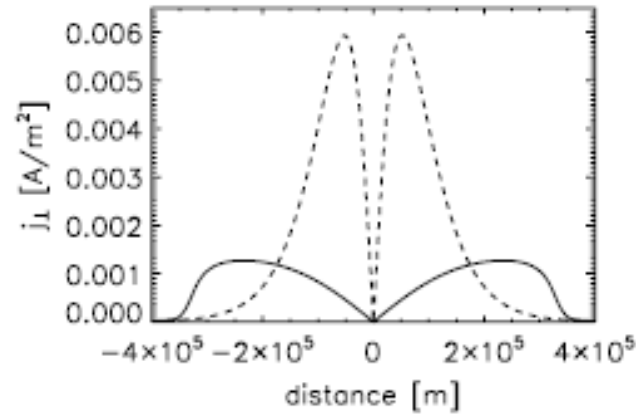
空間スケールは10~100km ($V_A = 10 \text{ km/s}$)の場合

観測可能性3. 彩層磁場構造

Ambipolar diffusion はForce-Free 磁場中では働かない
(ガイド磁場が大きいと働きづらい)

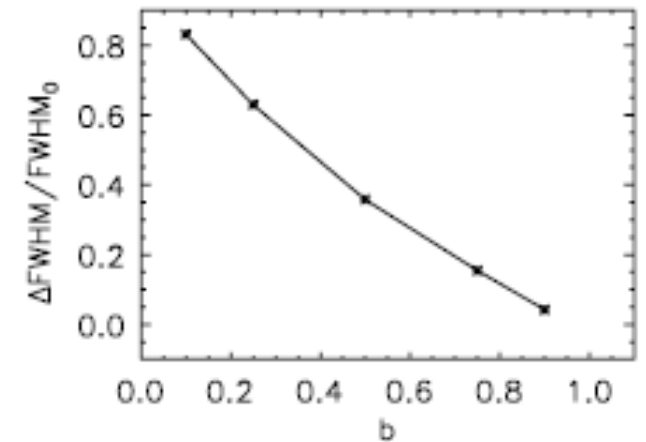


ガイド磁場なし



ガイド磁場あり

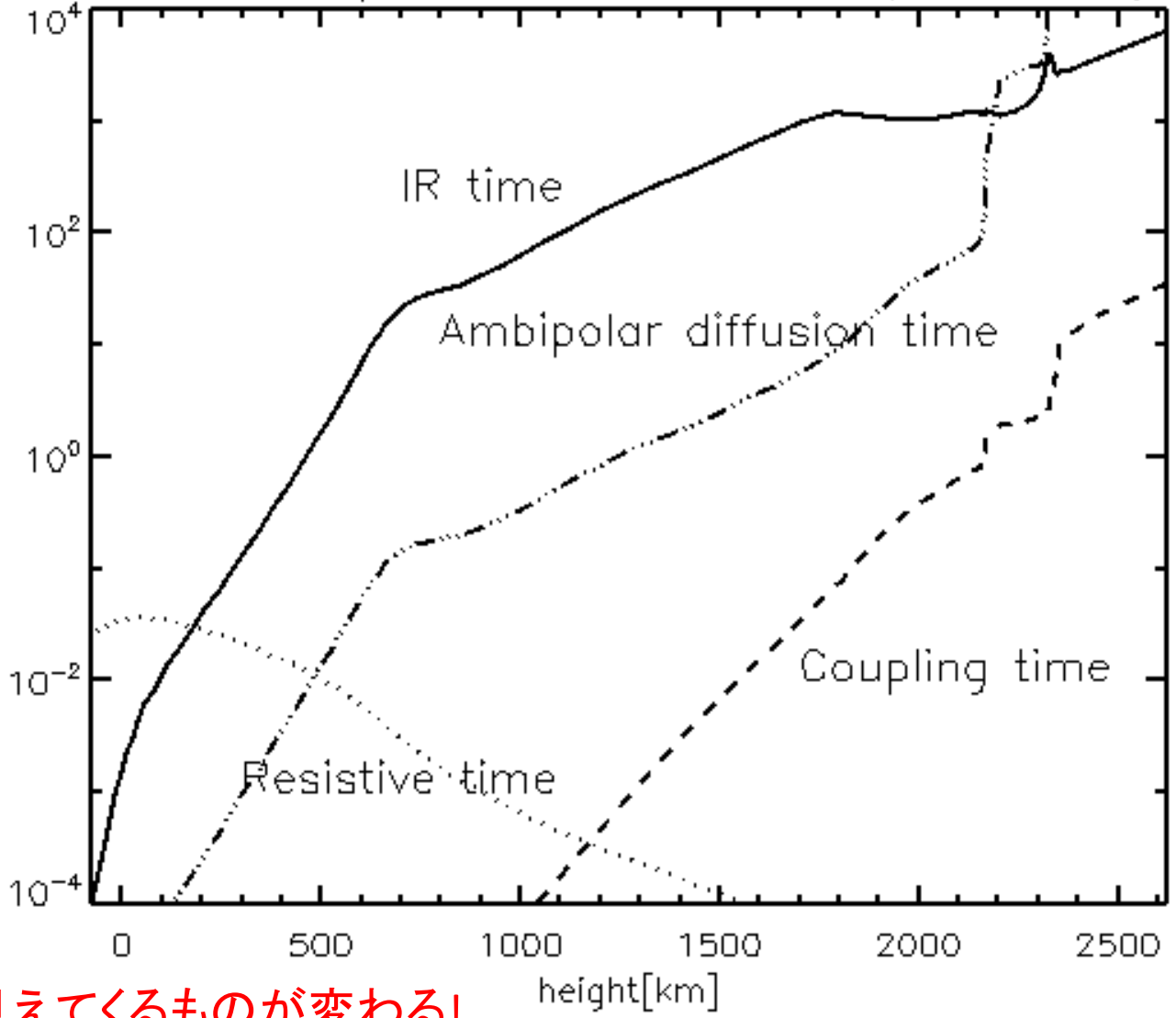
Arber et al. 2009



彩層における3成分磁場(Solar-C)と活動性の関係を見ることでambipolar diffusion が効いているかわかる?

タイムスケール図

Scales comparables to Alfvén time ($B = 10.0G$)



アルフベントイム
と各特徴的時間が等しくなる
空間スケール

Val3c + 一様磁場

空間スケールに依存しない
 t_{IR} : 電離・再結合時間
 t_{col} : 荷電・中性粒子衝突時間

空間スケールに依存する
 $t_{cs} \propto L^{-1}$: 音速時間
 $t_A \propto L^{-1}$: アルフベン時間
 $t_{res} \propto L^{-2}$: 拡散時間
 $t_{amb} \propto L^{-2}$: ambipolar 拡散時間

空間スケールが変わると見えてくるものが変わる!

まとめ

- 彩層は非常にパラメータレンジの大きくプラズマは部分電離プラズマである
- 部分電離効果(ambipolar diffusion)により、電流シートはプラズマモード不安定性を起こしうる程度まで薄くなる
- 彩層でのパラメータ(イオン-中性粒子ドリフト速度, 電離度, 3成分磁場など)を直接観測することで部分電離プラズマにおける磁気リコネクションの特徴をとらえられる可能性がある