

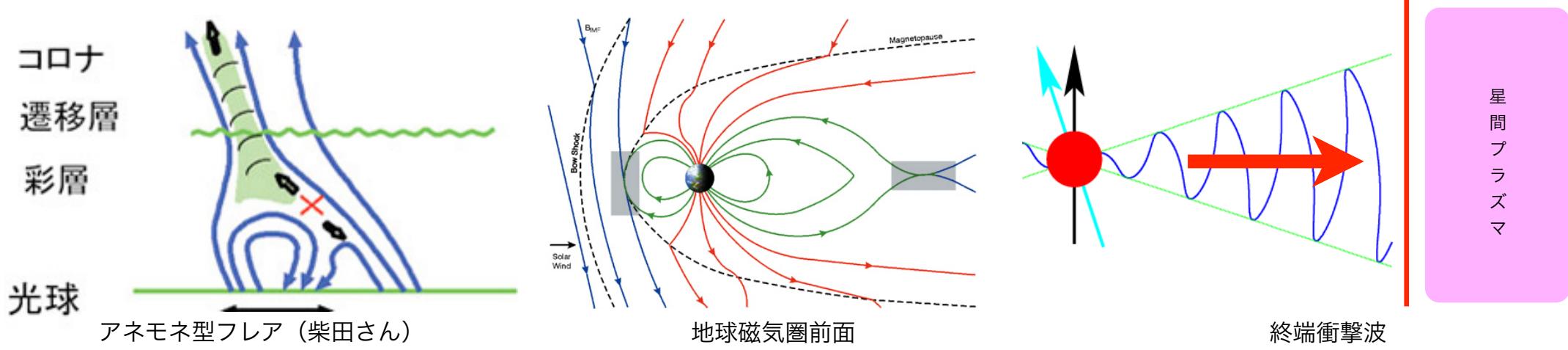
MHDリコネクションの未解決課題への取り組み

新田伸也（筑波技大）、近藤光志（愛媛大）

（三菱財団自然科学研究助成25134による）

起源の異なるプラズマ同士の接触

→ 物理量分布の非対称/シア磁場電流シートを形成



これらでの磁気リコネクションとは？

解析的研究と数値的研究

シミュレーションできないことを解析的には研究できる

例：低beta値、高mag. Reynolds数

Nitta+02, 04, Nitta06, 07 ←前回(2011)紹介

解析的に研究できないことを数値的には研究できる

例：多次元の複雑な構造

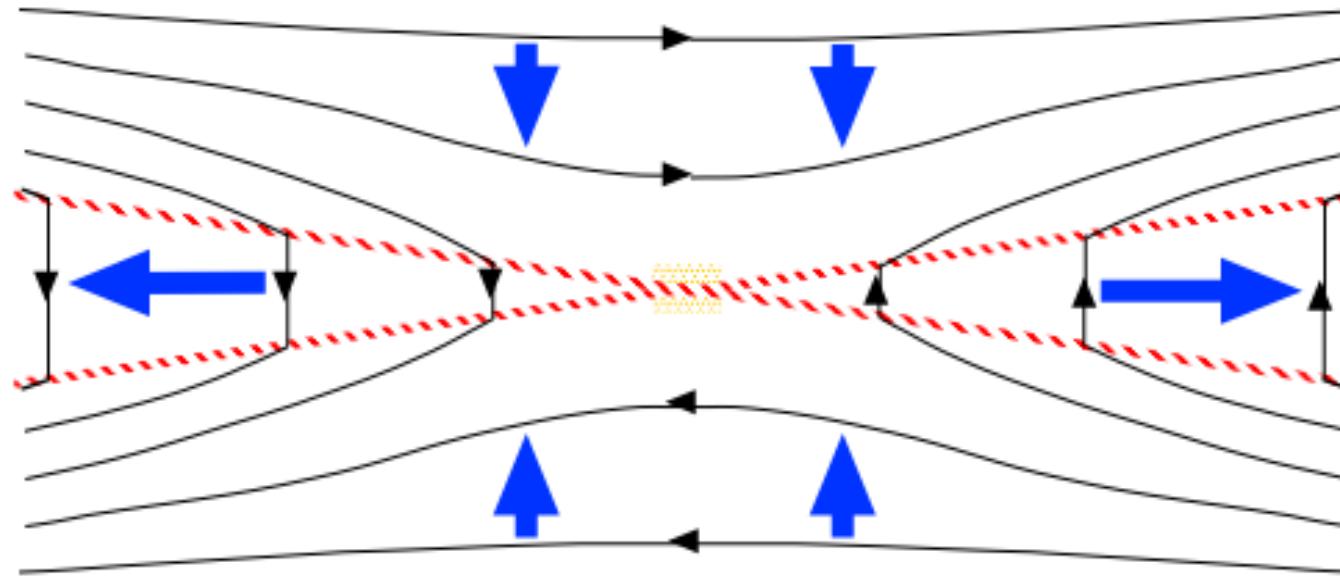
Nitta+01, 16, Nitta & Kondoh19a, 19b ← 今回紹介



解析的研究と数値的研究は相補的！

標準モデルとしてのPetschekモデル

磁気リコネクション=磁力線の再結合（つなぎ替え）



Petschekモデル(1964)

- ・X型slow shockでエネルギー変換
- ・outflowに対して横磁場
- ・リコネクションレイトはほぼ普遍定数 (Rem対数依存)

現象論研究で用いられるMRXモデルはほぼこれ！

天体现象としてのMRXの特徴

例) 太陽フレア

電流シート系の形成に要する時間 $\sim \text{day} \sim 10^5 \text{ sec}$

MRXによるエネルギー解放に要する時間 $\sim 10^1 - 10^2 \text{ sec}$

MRXの間、外部環境はほとんど変化しない

→ 自発的時間発展過程に注目

特性長は2つだけ

電流シート厚みD (固定)

MHD波動の伝播長 $\propto t$

十分に時間が経つと波動伝播長のみ

→ 自己相似的時間発展解 (自己相似モデル)

今回の研究目的

1) 热力学量分布の電流シートに対する非対称

2) シア磁場 (捩れの磁場配位)

の効果を明らかにする

§1 热力学量非対称の影響

Nitta+2016, Nitta & Kondoh2019a

等温平衡電流シート

電流シート両側の物理量分布が非対称

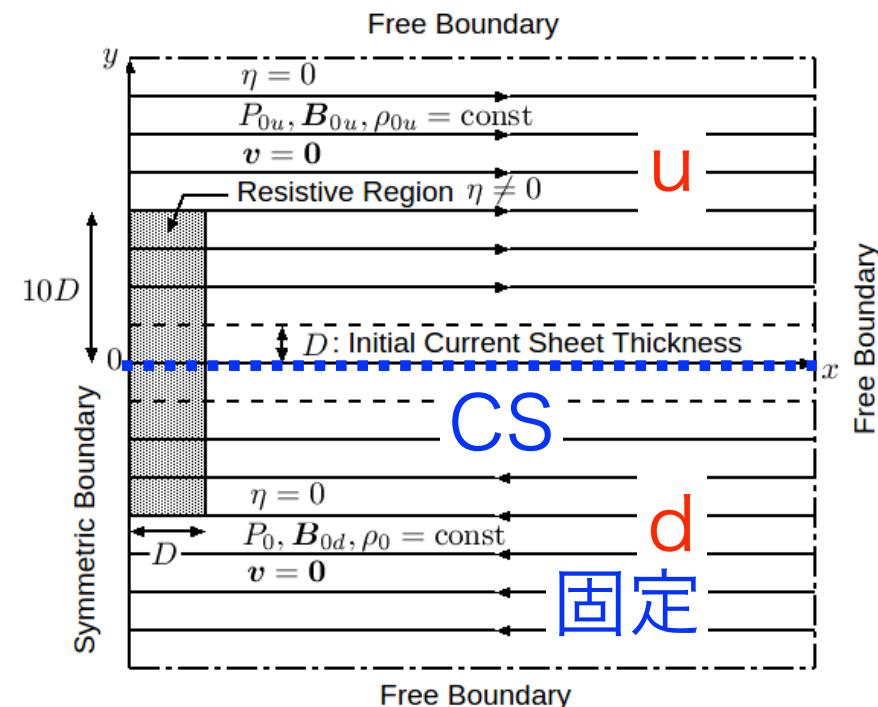
シート両側の磁場強度比 $k = B_{0u}/B_{0d}$

シア磁場なし

従来の標準理論モデルは対称系 ($k=1$)

非対称 ($k>1$) でどのように変化するか?

自発過程に注目: fast-mode waveが
境界に達する前にシミュレーションをやめる



RXシミュレーションは大変

拡散領域を最初から最後まで解像し続けなくてはならない

c.f. 星形成：次第に小さな構造が生まれる

電流シート厚み=D

シミュレーションボックスサイズ

2560Dx5120D (太陽コロナ諸量なら2kmx4km) を

12800x25600 meshesで解像



1 time sliceのデータ=34GB超

これでも拡散領域厚みDを5 meshesで解像するのみ
(必要最小限の解像度)

ちゃんとしたRXシミュレーションは現代のスパコンでも限界的

RXシミュレーションは大変

2560Dx5120D (太陽諸量なら2kmx4km) を
12800x25600 meshesで解像
これでも必要解像度の下限程度



つまり、より広い領域を低解像度で解こうとする
大局的シミュレーションでのMRXは怪しい（と思っている）

MRXが重要な大局的シミュレーションなら
MRXを十分解像して解かなくてはならない！
(現実的には不可能だろう)

なぜ怪しいシミュレーションが罷り通るのか？

Petschekモデル(1964)への妄信

最大の特徴

リコネクションレイト（リコネクションの速さの指標）の
磁気Reynolds数対数依存性
(実質的にrec. rateはほぼ普遍定数 $\sim 10^{-2}$)



- ・ 粗いmeshでもrec. rate $\sim 10^{-2}$ になるよう巨大な抵抗を与えれば良い
- ・ 数値拡散が支配的でもrec. rate $\sim 10^{-2}$ であれば良い

しかし、Petschekモデルの前提是怪しい
「拡散領域はいくらでも薄くなれる」
 \Rightarrow 実際にはイオンLarmor半径程度が下限

非対称性の効果 ($1 < k < 2$)

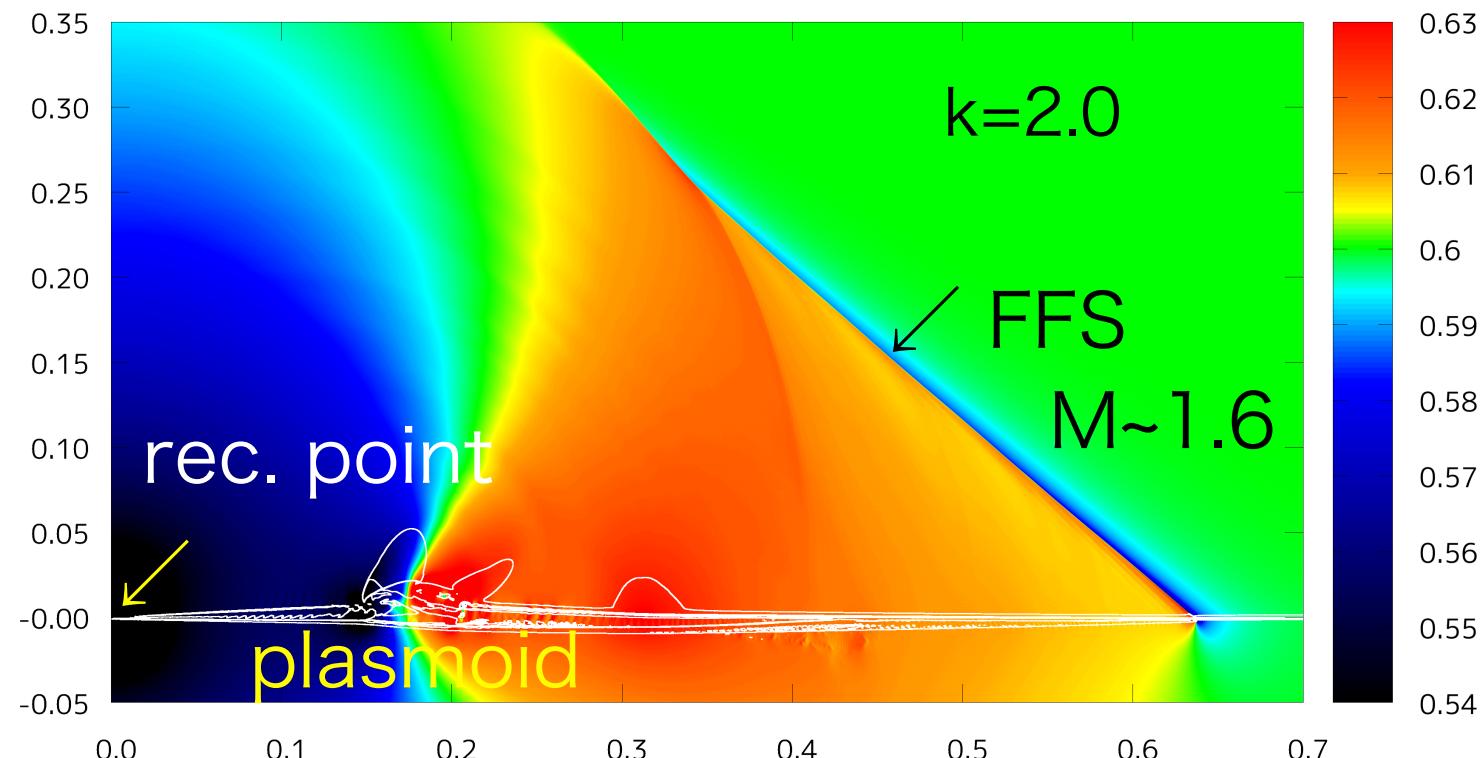
等温平衡のHarris電流シート

非対称度：電流シート両側の磁場強度比 $k=B_{0d}/B_{0u}$

下側量固定、上側磁場を弱める

1) 強くて長大なForward Fast-mode Shock (FFS)形成

全圧分布
+
密度等高線

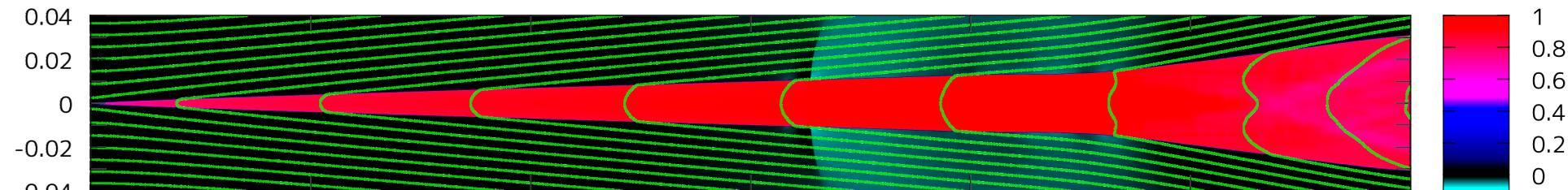


新たな粒子加速サイトの可能性

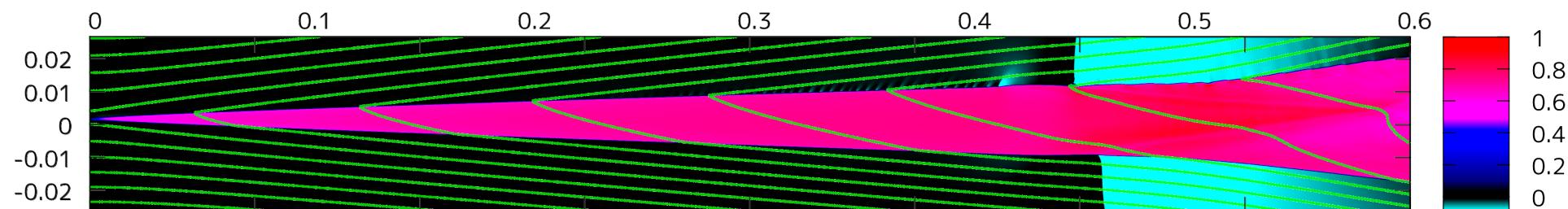
2) ジェット構造激変

vx分布

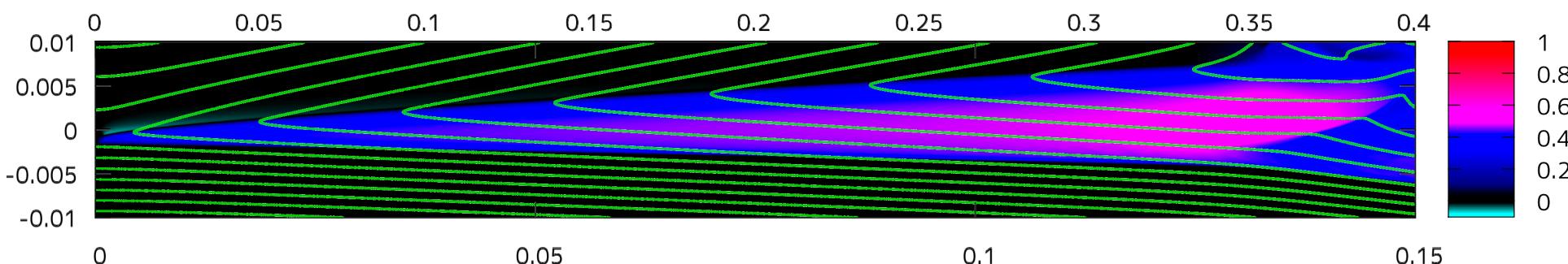
$k=1.0$



$k=1.1$



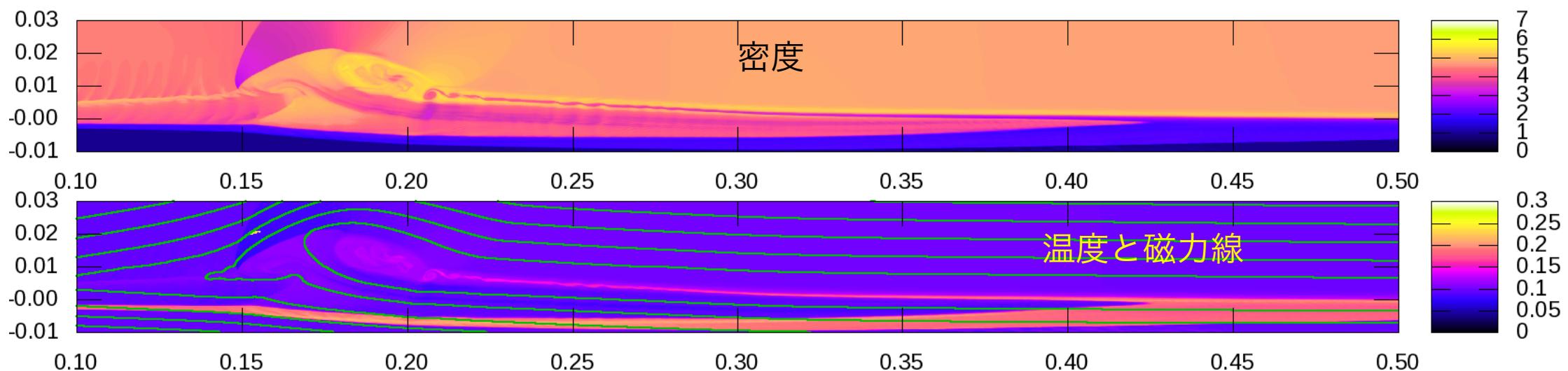
$k=2.0$



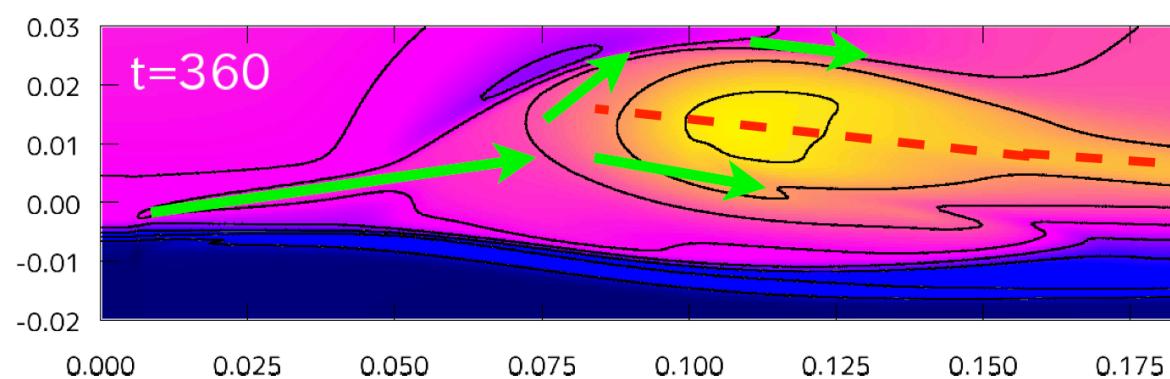
$k \nearrow, vx \searrow,$ ジェット2層化(field aligned)

Petschek的ジェットとはかなり異なる！

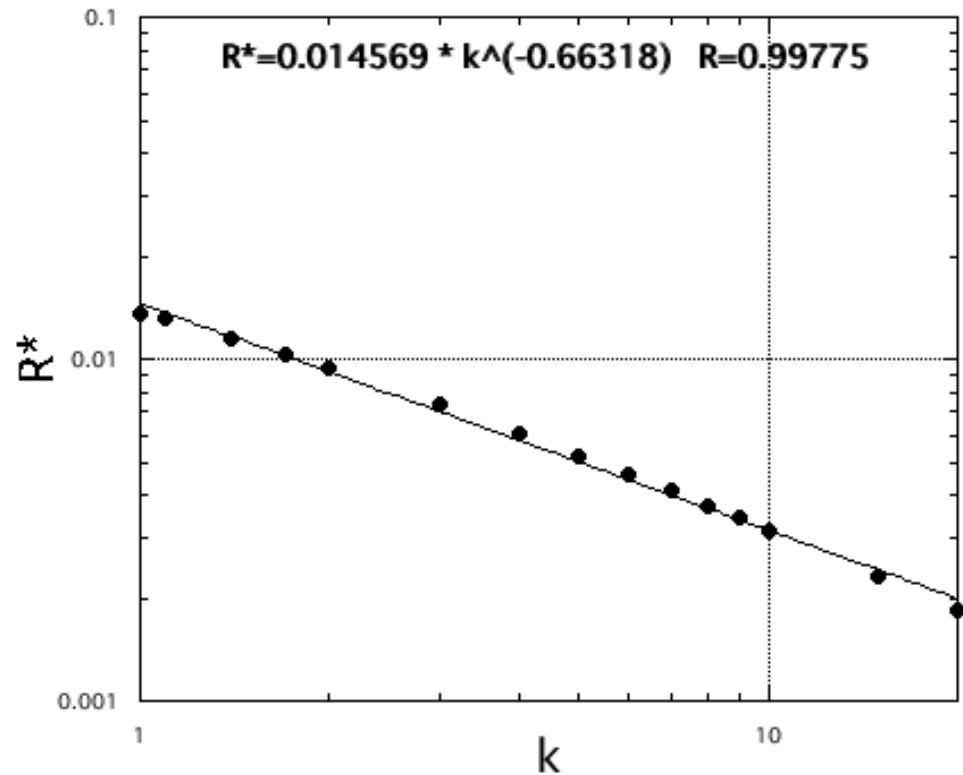
3) 下側プラズモイド内にCD形成



下側プラズモイド内に
上下からのプラズマが共存！
(同一磁力線上に異種プラズマ)
→ 高速プラズマ混合の可能性



リコネクションレイト



べき則に従う変化
非対称MRXのrec. rateは
普遍定数ではない！

Petschekモデルの主張する
普遍的rec. rateではない！

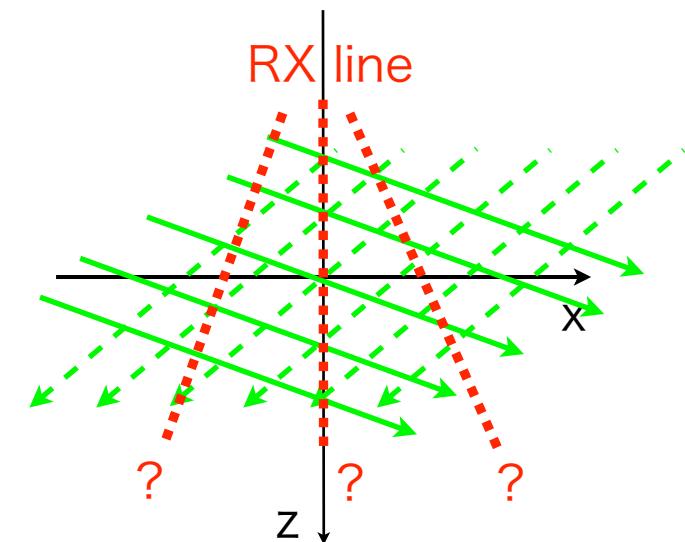
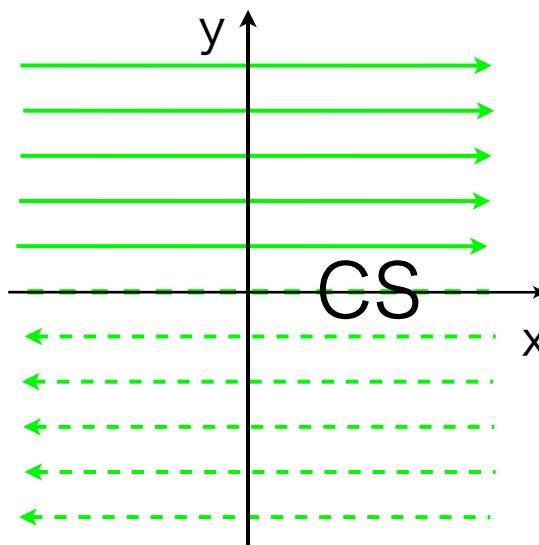
§2 シア磁場の影響

Nitta & Kondoh 2019b (submitted)

§現象論的動機

例) 蓄えられた捩れが解放されるタイプのフレア

ヘリシティ注入で
磁束管が捩じれる
→ 複雑な磁場配位
→ 捣じれて **ガイド磁場** を
生じるはず



RXラインがどのような方向に生じるかは
自明ではない！

シアの影響とは？

RXラインの影響とは？

シア磁場の設定

電流シート両側で
磁場強度は等しい
熱力学量分布は対称

太陽での巨大フレア (e.g., δ-spot)

強烈に捩じれた磁束管の浮上(kink-inst.)

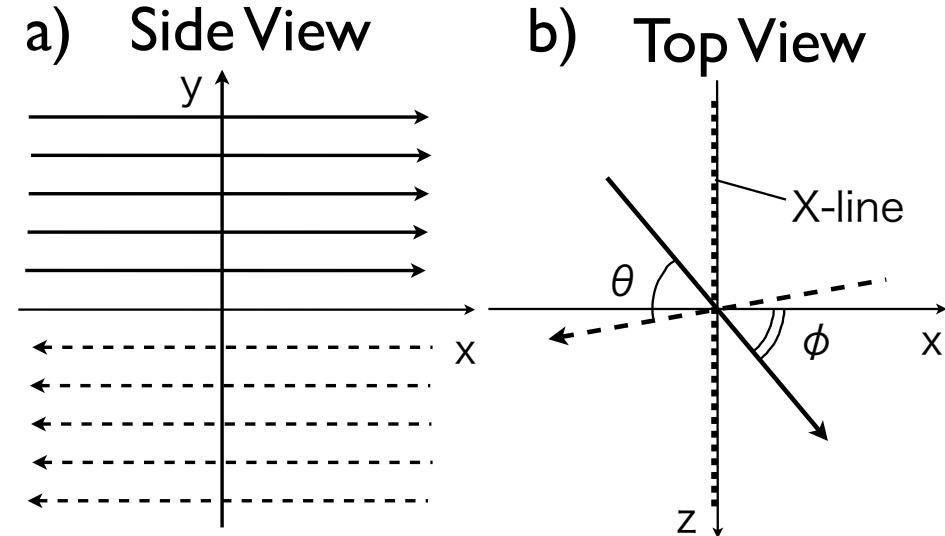
で形成される特徴的磁場配位

(巨大な磁気フリーエネルギー)



このような場所でのRXはどのようなものか？

- ・素過程としてのRXの特徴の理解
- ・自己相似位相 (自発進化の最終状態) に注目



θ : 磁場の相対角 シア

ϕ : X-lineの方位角

$\Phi' = \Phi - \theta/2$ 非対称度

($\Phi' = 0$ で対称)

今後の研究指針

現在の研究の主流

- ・粒子描像での異常抵抗の起源
- ・全局的システム中のMRX



エネルギー解放のほとんどを担うMHD的MRXは重要
MHD的MRXにはまだ未解明点が残されている
→ Petschekモデルに代わる新理論モデルが必要

MRXを正確に解かない全局的シミュレーションには問題がある
(遅いMRXはまともに解けていないはず)



MRXまで解く代わりにMRXの効果を取り入れる現象論モデルが必要