ALMAで探る彩層磁気リコネクションの物理

＝初めて散逸スケールをイメージングで
見ることができるかも

磯部洋明
京都大学宇宙総合学研究ユニット

ALMA太陽観測WS, 2012年10月3日, 京都大学

概要

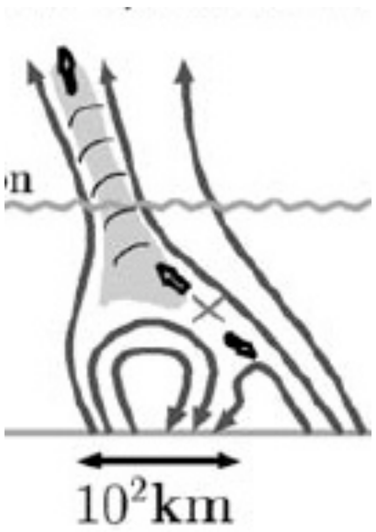
1. 彩層磁気リコネクションの何が面白いか

2. 彩層プラズマのおさらい（中性粒子の効果）

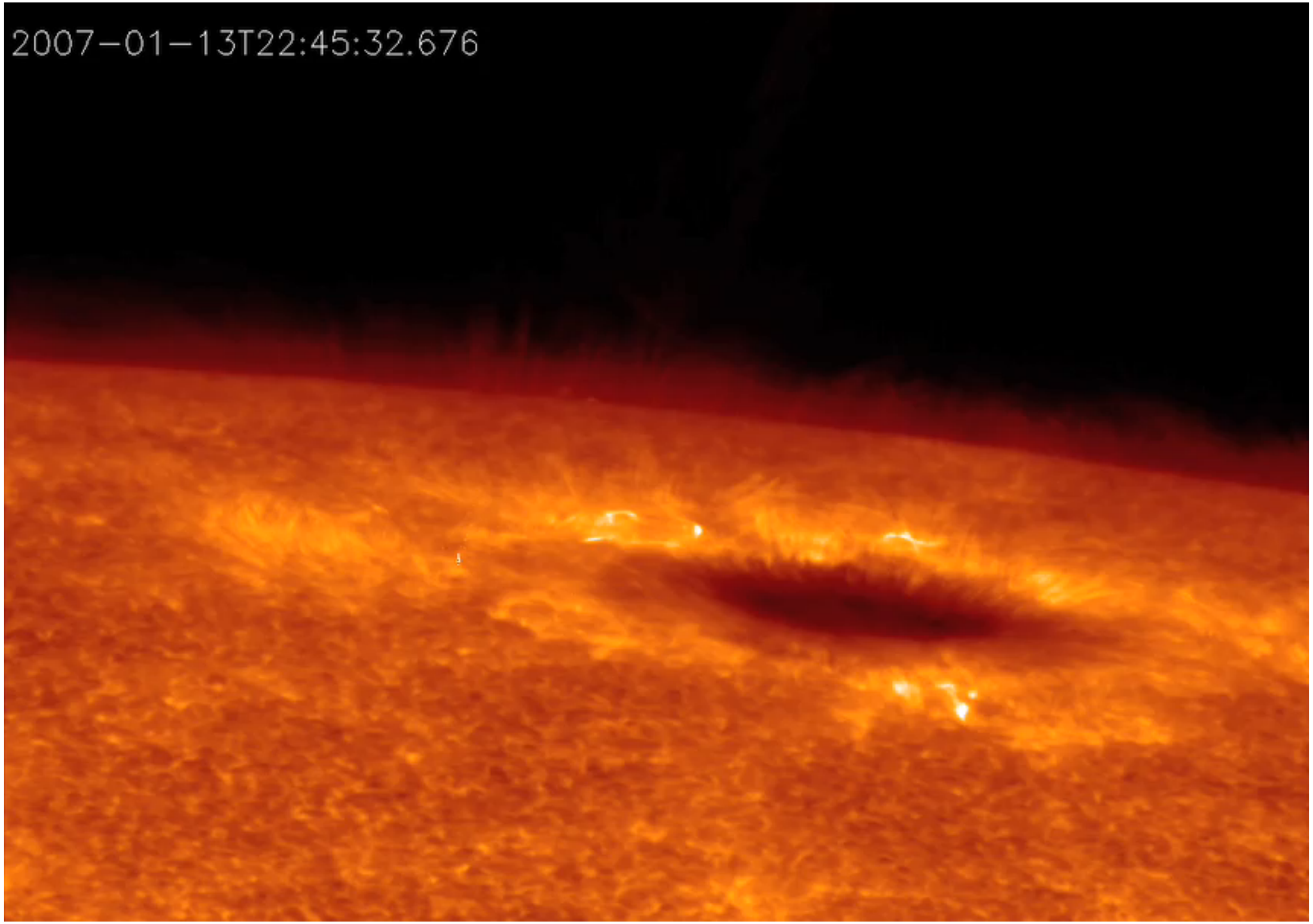
3. 磁気リコネクション研究の最近の進展

4. ALMAで期待されること

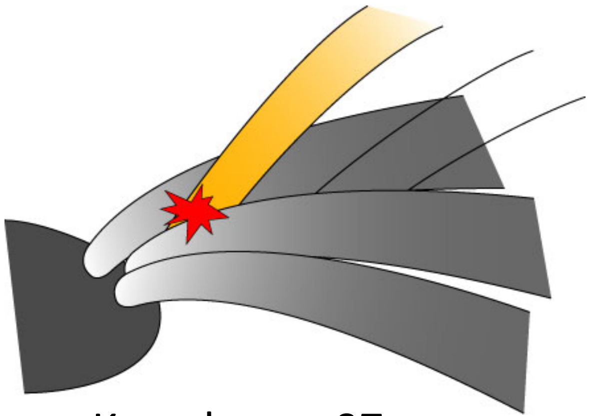
彩層ジェット



Shibata+07

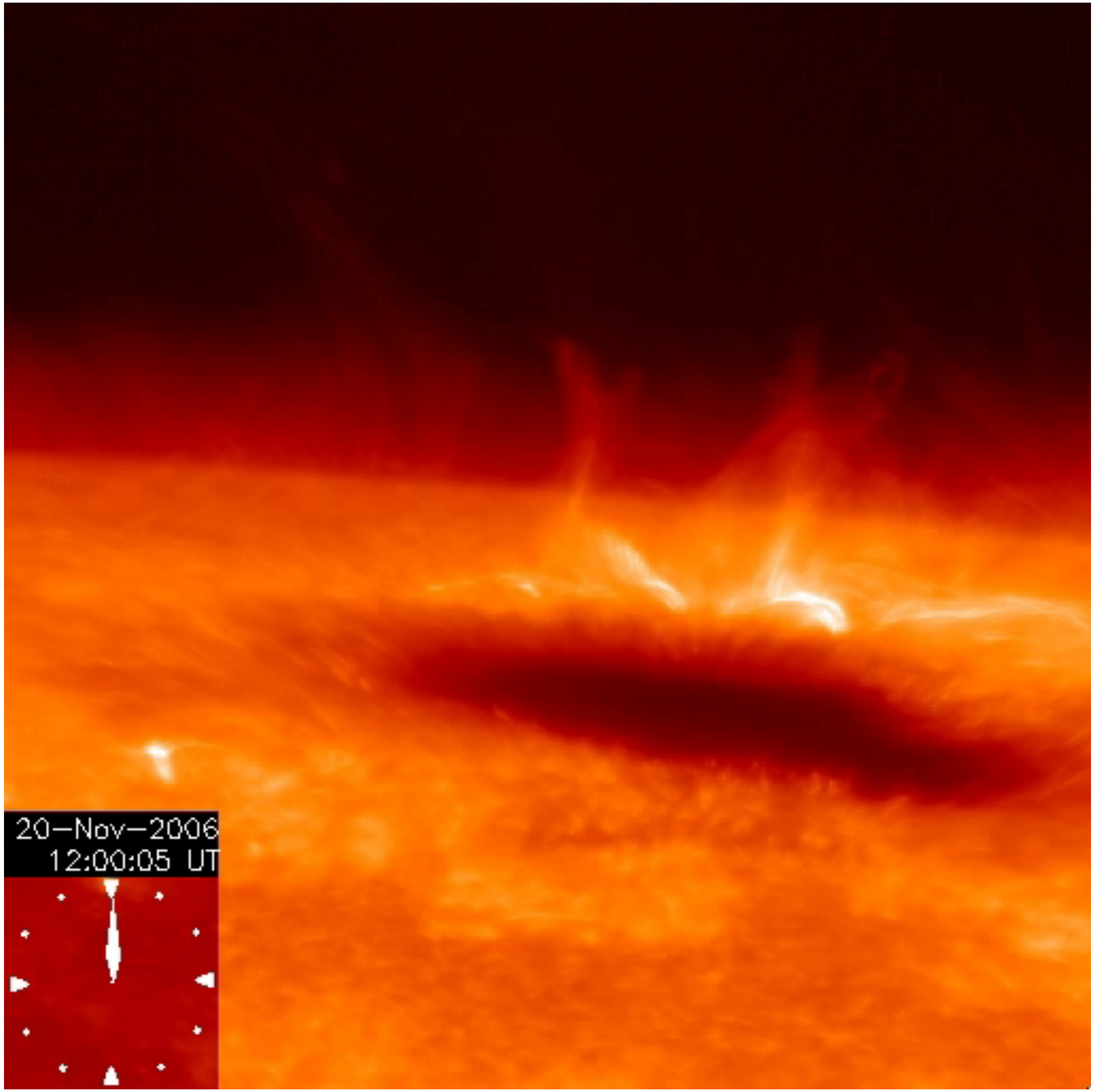


黒点半暗部ジェット



Katsukawa+07

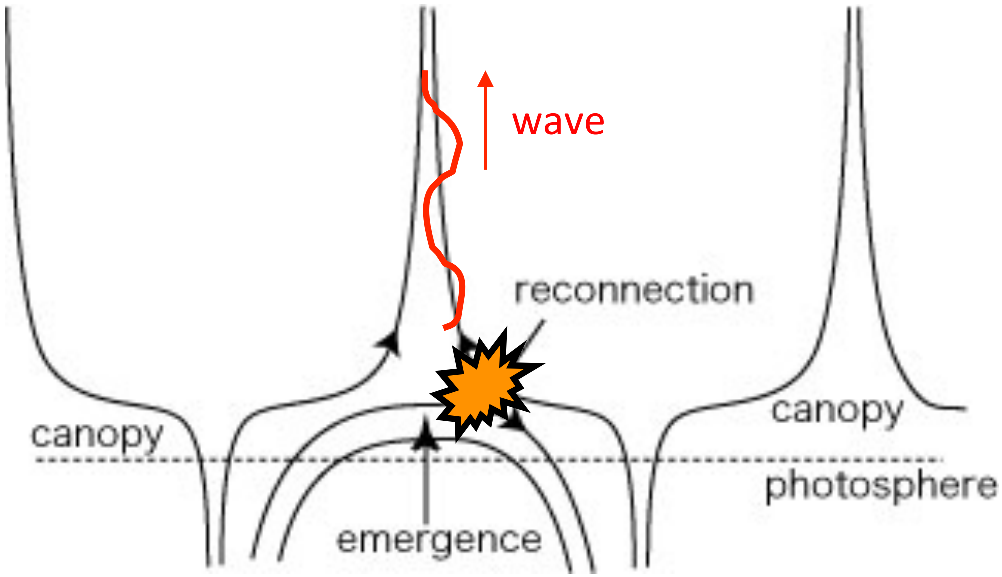
…が、リコネクションの
現場は深すぎてみえな
い？（一本講演）

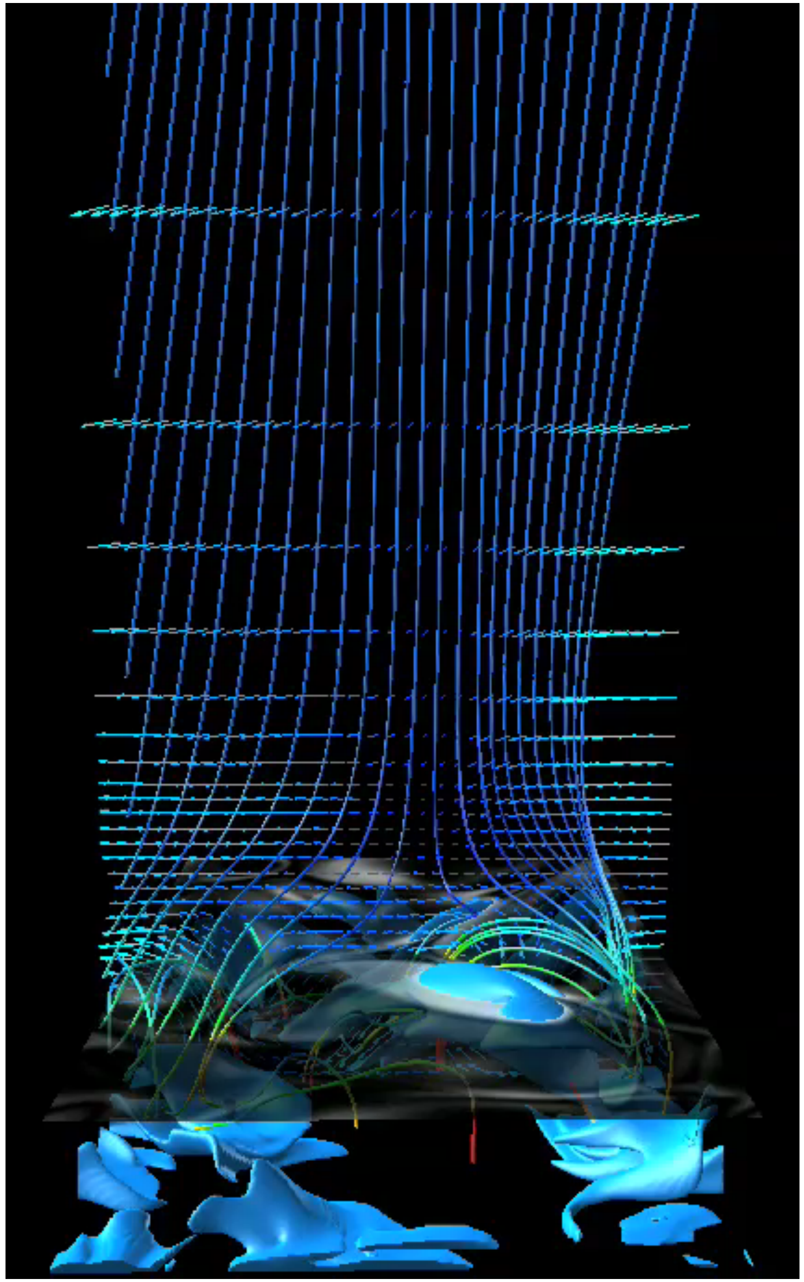


彩層で磁気リコネクション

＝＞コロナへジェットや高周波波動供給

＝＞コロナ加熱、太陽風加速に重要（かも）

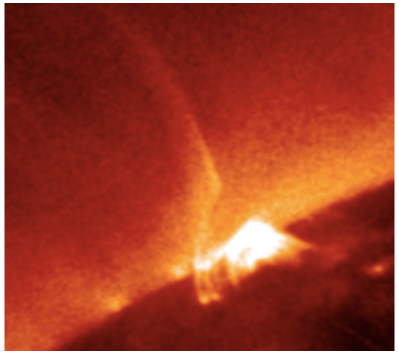




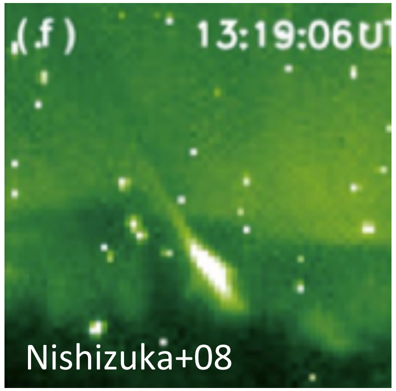
Isobe+08

コロナ～彩層のリコネクション現象
サイズは違うがMHD的には似ている（スケールフリーだから当然）
（ミクロな）プラズマパラメータが全然違う

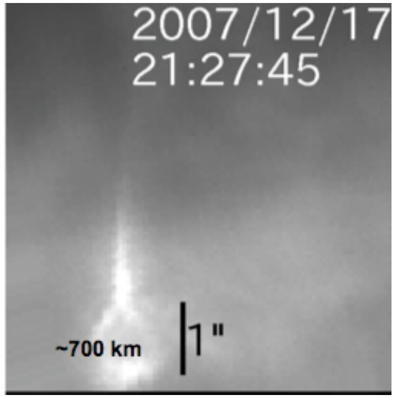
X-ray jet（コロナ）
~100,000km
完全電離、ほぼ無衝突

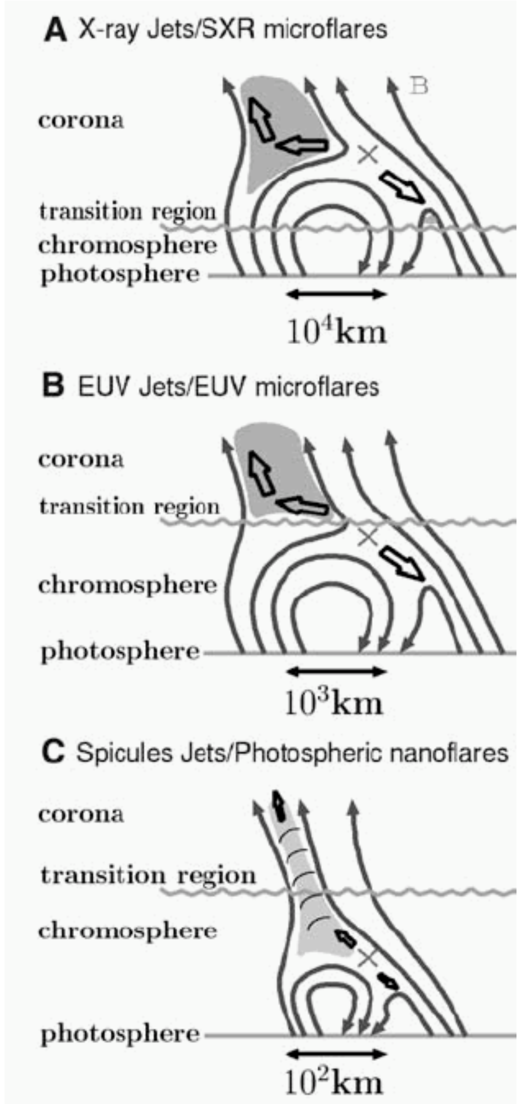


EUV jet（彩層上部~遷移層）
~ 10,000 km
中途半端電離、中途半端衝突



彩層ジェット
~1000km
弱電離、完全衝突





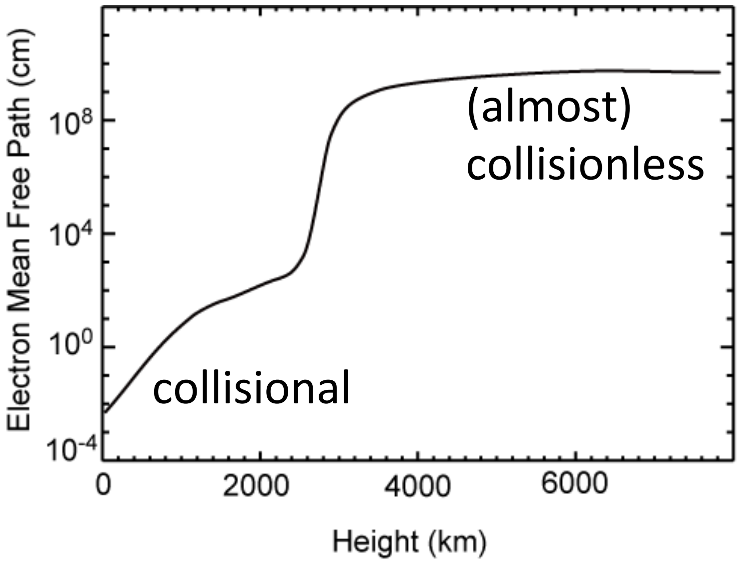
Shibata+07

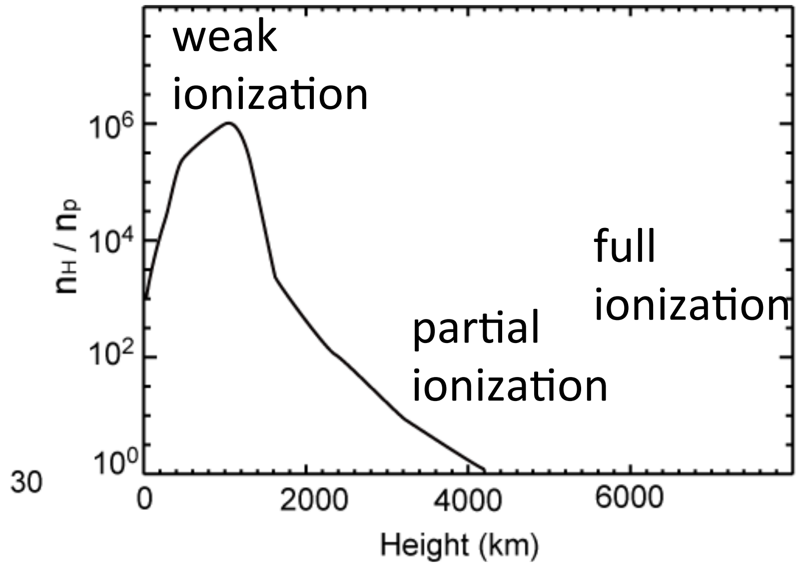
彩層磁気リコネクションの何が面白いか

- 彩層でリコネクションがドライブする多様な現象
- コロナ加熱、太陽風加速への寄与（リコネクションに伴うエネルギー分配。特に波にどれくらいいくか）
- コロナとは違うパラメータ（弱電離、完全衝突）だが大局的（MHD的）な描像が似ている。リコネクションの物理は同じか？
- 他天体で似たようなプラズマ環境での磁場散逸への興味。分子雲、原子惑星系円盤…後述

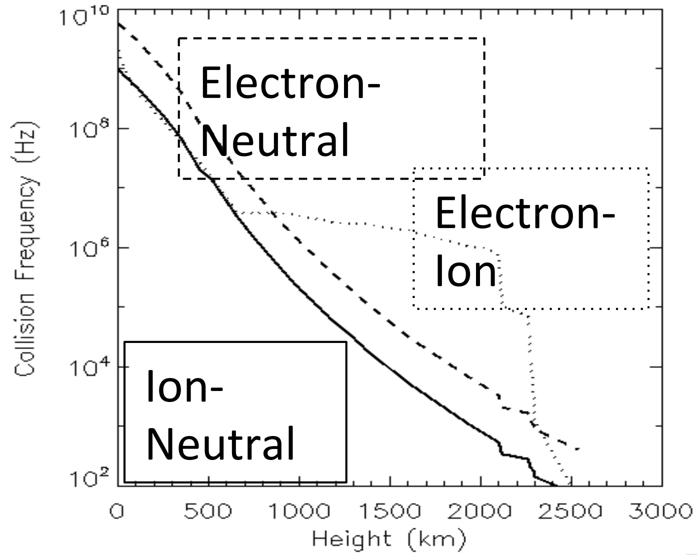
2.彩層プラズマのおさらい

VAL-C model + smooth extrapolation to the corona





- e-n collision dominates in lower chromosphere (=> weak ionization)
- e-i collision dominates in uppper chromosphere (=> partial ionization)



中性粒子の効果

Advection　Hall　Ambipolar　Ohmic

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times [V_n \times B - \frac{J \times B}{en_e} + \frac{(J \times B) \times B}{c\nu_{ni}\rho_n} - \eta J]$$

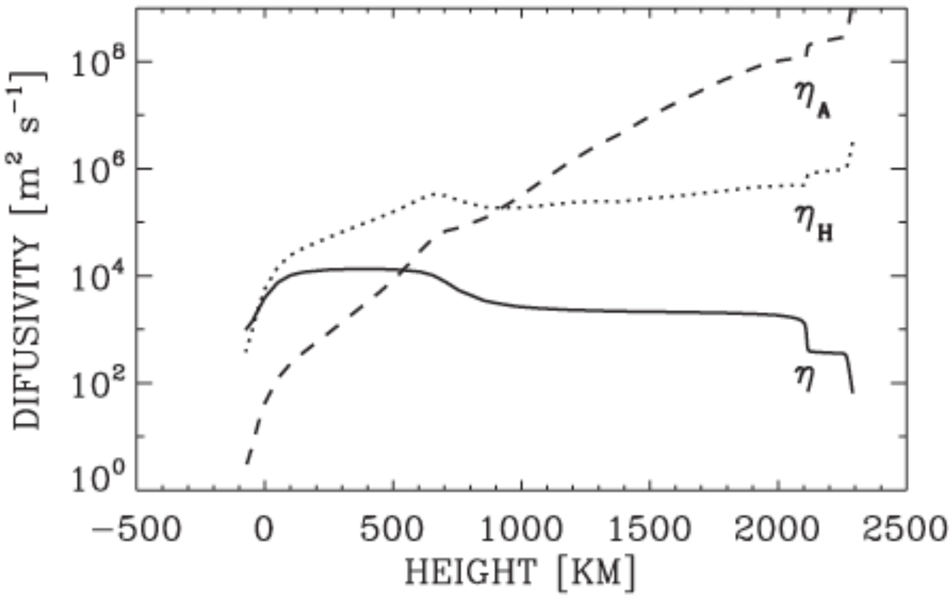
Ambipolar/Hall is important in small scale ... important in reconnection!

$$V_n \times B < \frac{(J \times B) \times B}{c\nu_{ni}\rho_n} \Rightarrow L < \frac{V_{An}\rho_n}{\nu_{in}\rho_i} \approx 1-10km$$

Ambipolar/Hall = $\omega ci/\nu in$

ωci : Ion-cyclotron freq $\propto B$

νin : Ion-neutral collision freq $\propto n$



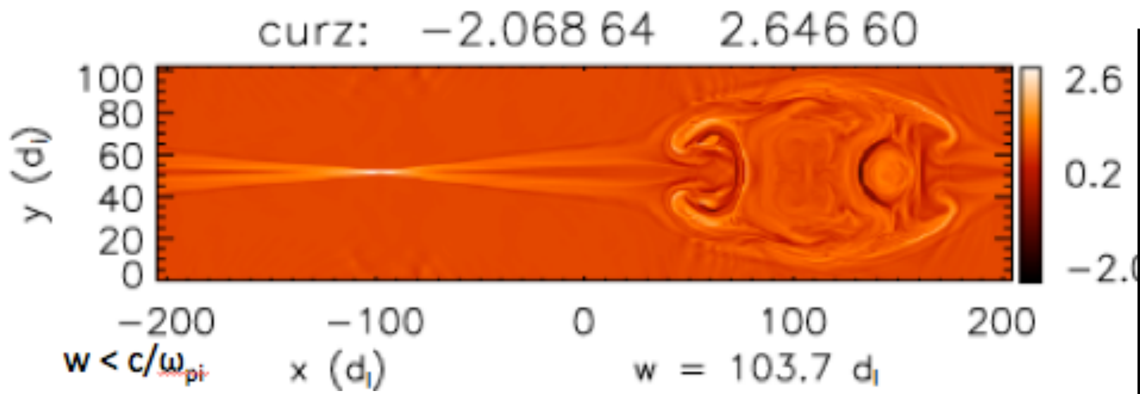
下の方はHall dominant
上の方はambipolar dominant

Khomenko & Collados 2012

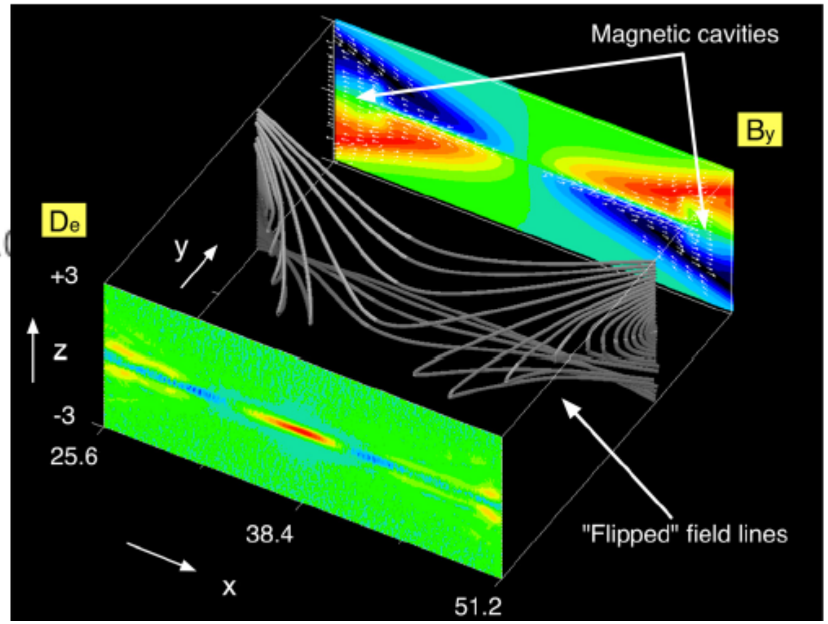
Hall reconnection

- 電流シートがイオン慣性長$d_i=c/\omega_{pi}$より薄くなると起きる
- 磁場の四重極構造と局在化した散逸領域(ペチェック"的"リコネクション)
- 弱電離の場合は実効的なイオン慣性長が$(\rho_n/\rho_i)^{1/2}$倍(光球で1-10km)になる

Zenitani+11

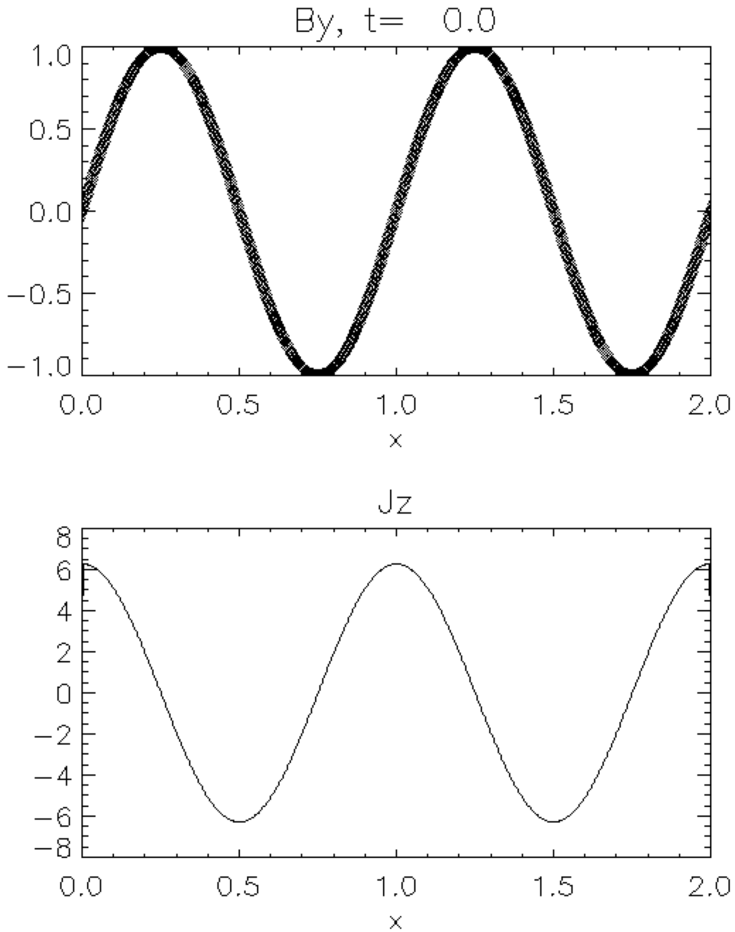


Cassak+05

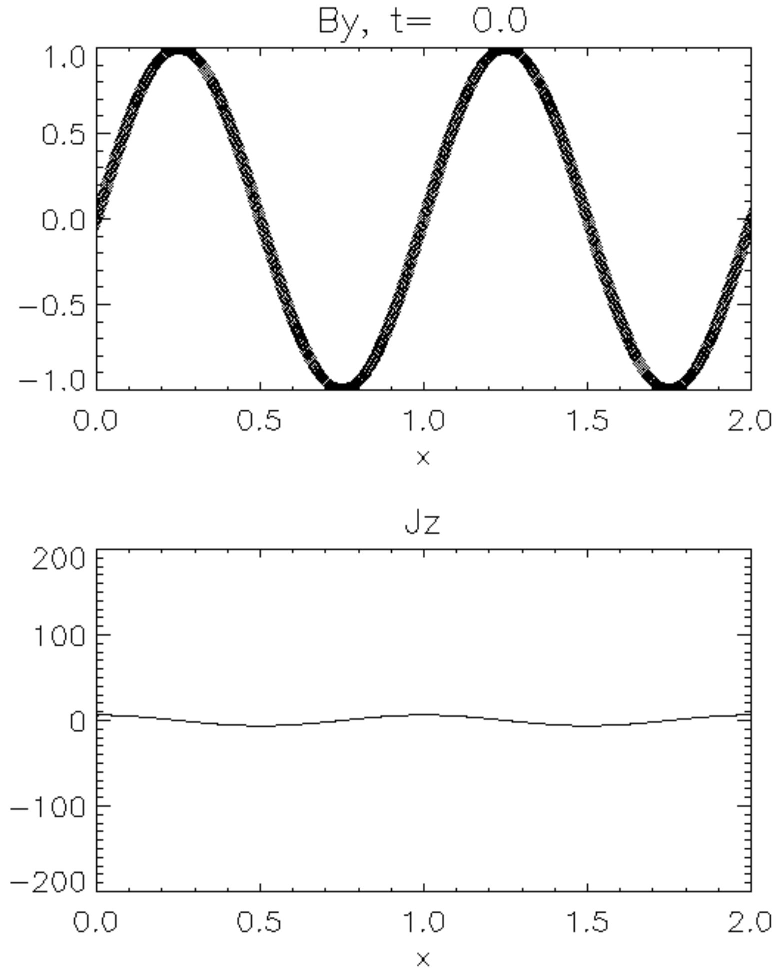


Current sheet thinning by ambipolar diffusion

(Zweibel-san's talk)



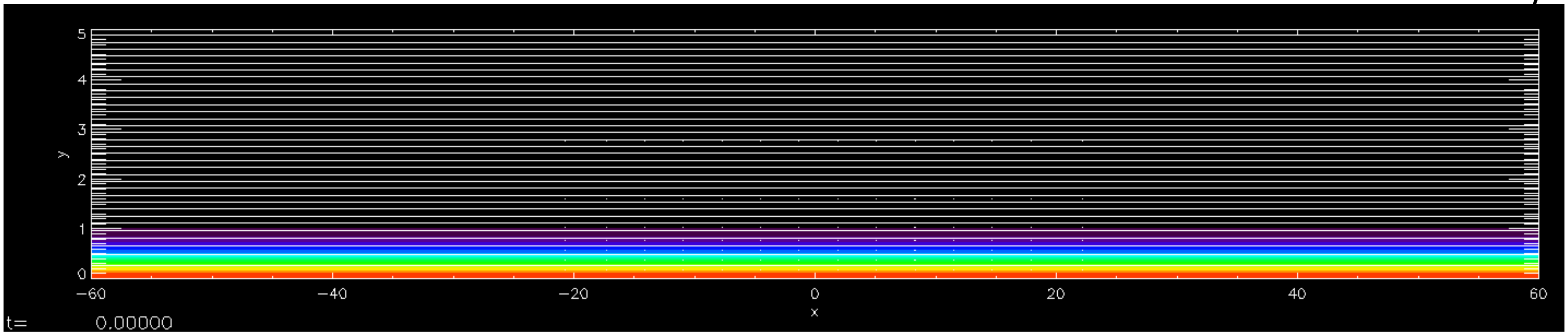
Only resistive diffusion



Only ambipolar diffusion

Effect of non-uniform ambipolar diffusion

color: current density



Ambipolar diffusion ≠ 0

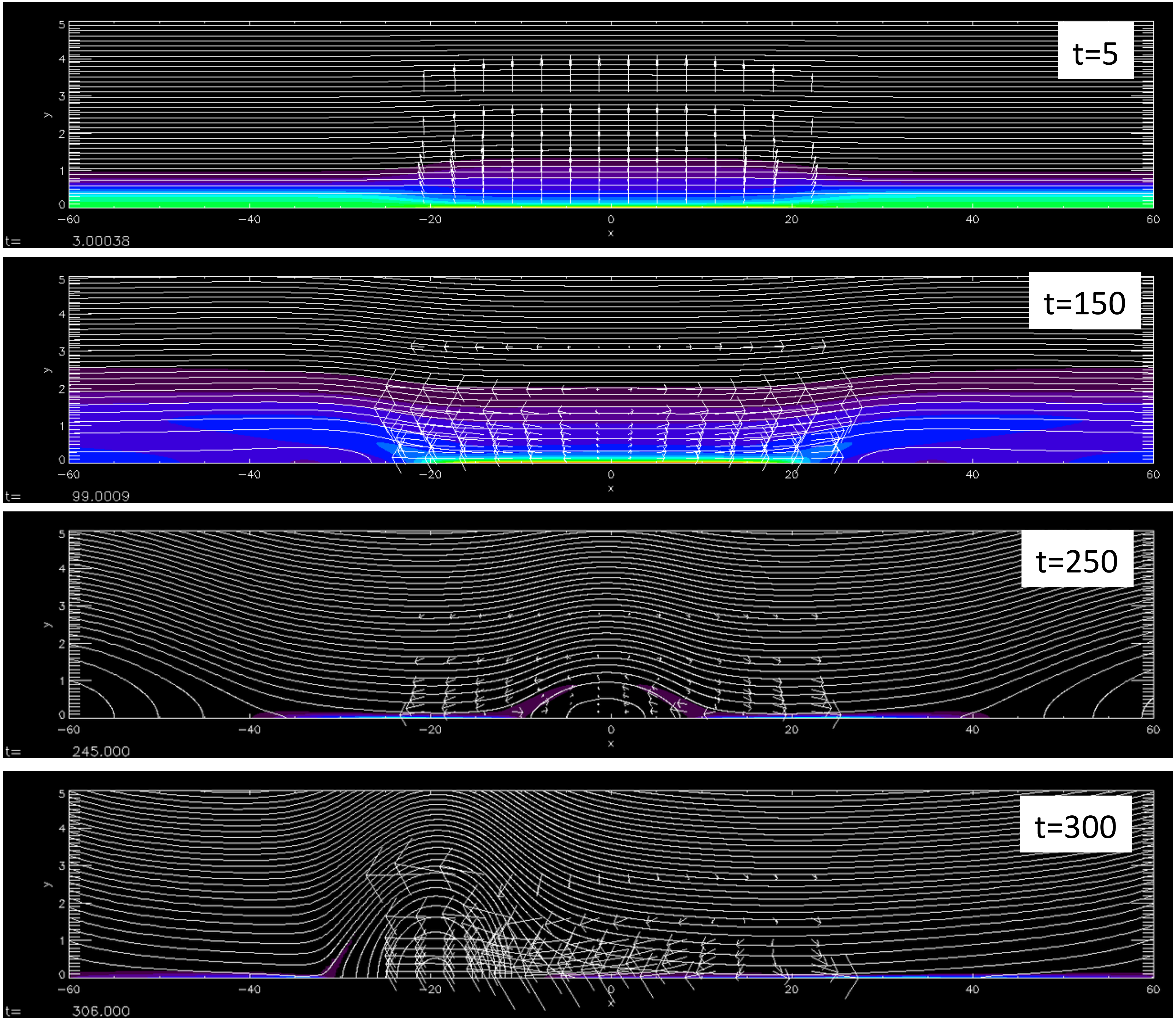
Ambipolar diffusion localized in x < ±20
Ohmic resistivity is uniform

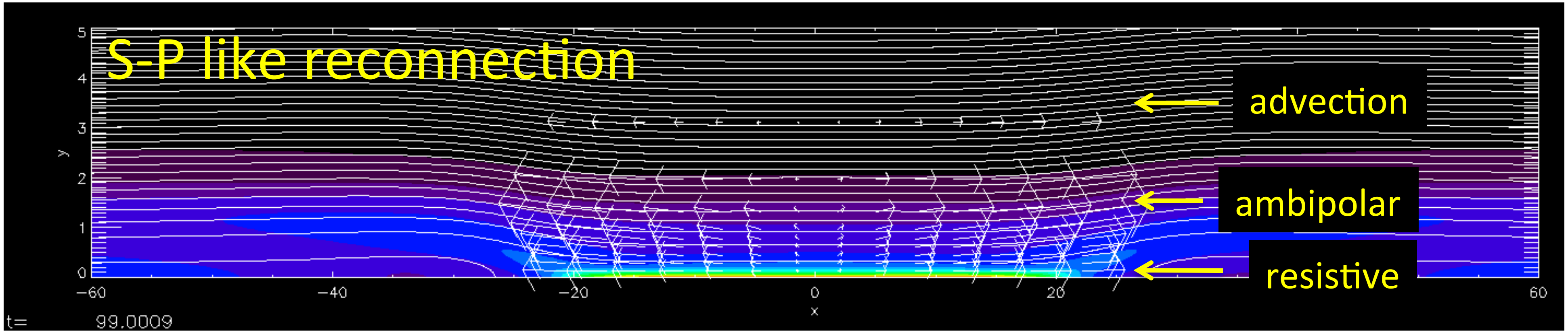
Thinning

Sweet
-Parker
reconnection

Tearing and
island
formation

Island ejection
and time-
dependent fast
reconnection



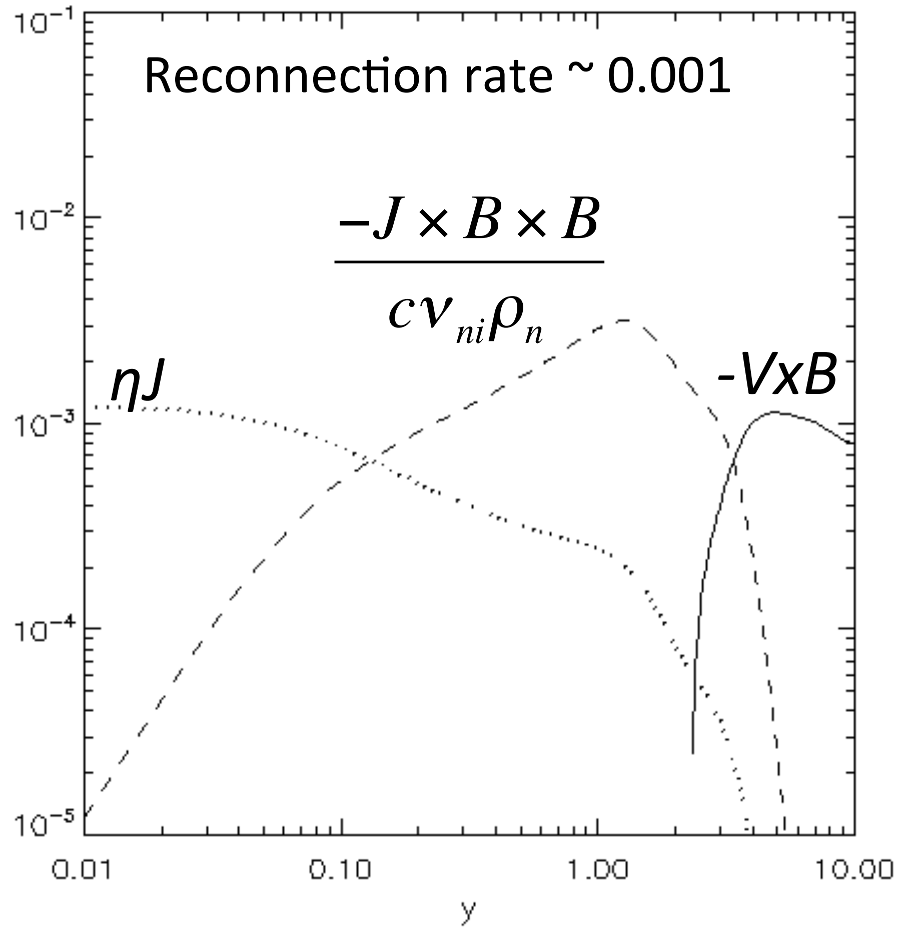


In Sweet-Paker-like stage, the reconnection region consists of 3 layers:
- resistive-dominant inner current sheet
- ambipolar-dominant outer current sheet
- advection-dominant inflow region

Ambipolar diffusion causes plasma heating
⇒outflow driven by gas-pressure gradient from the ambipolar layer

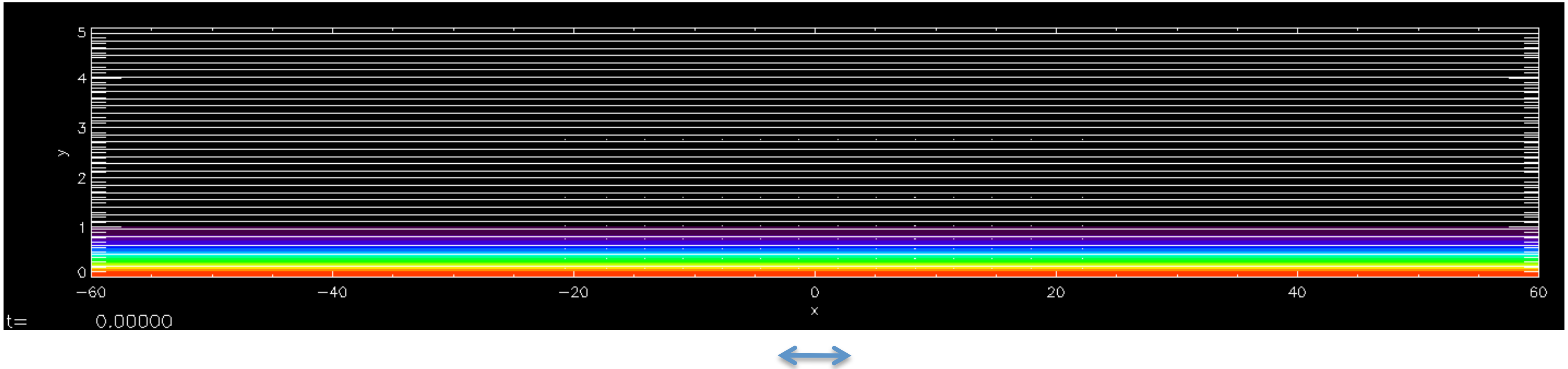
Note: two-fluid treatment is necessary to quantitatively address the (ion-dominant) outflow from resistive layer

Contribution to E

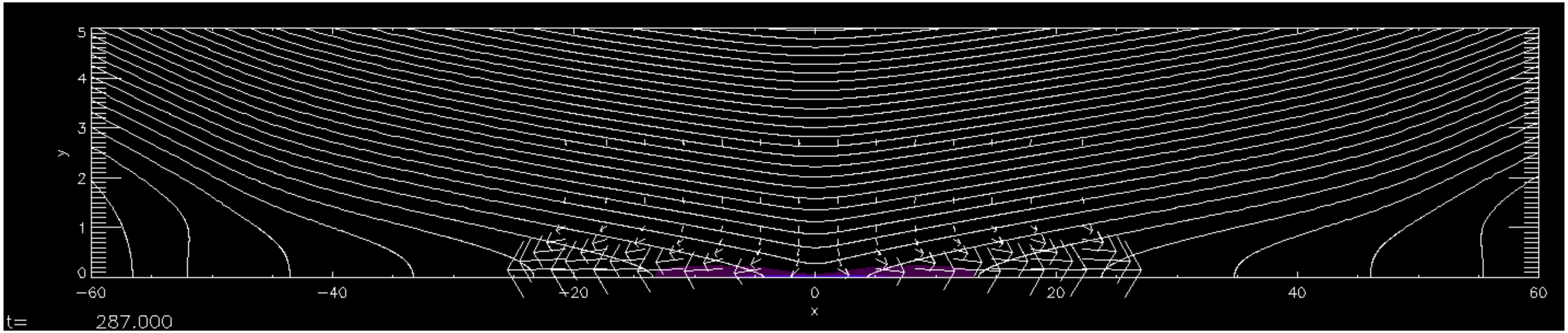


Petschek-like regime

color: current density

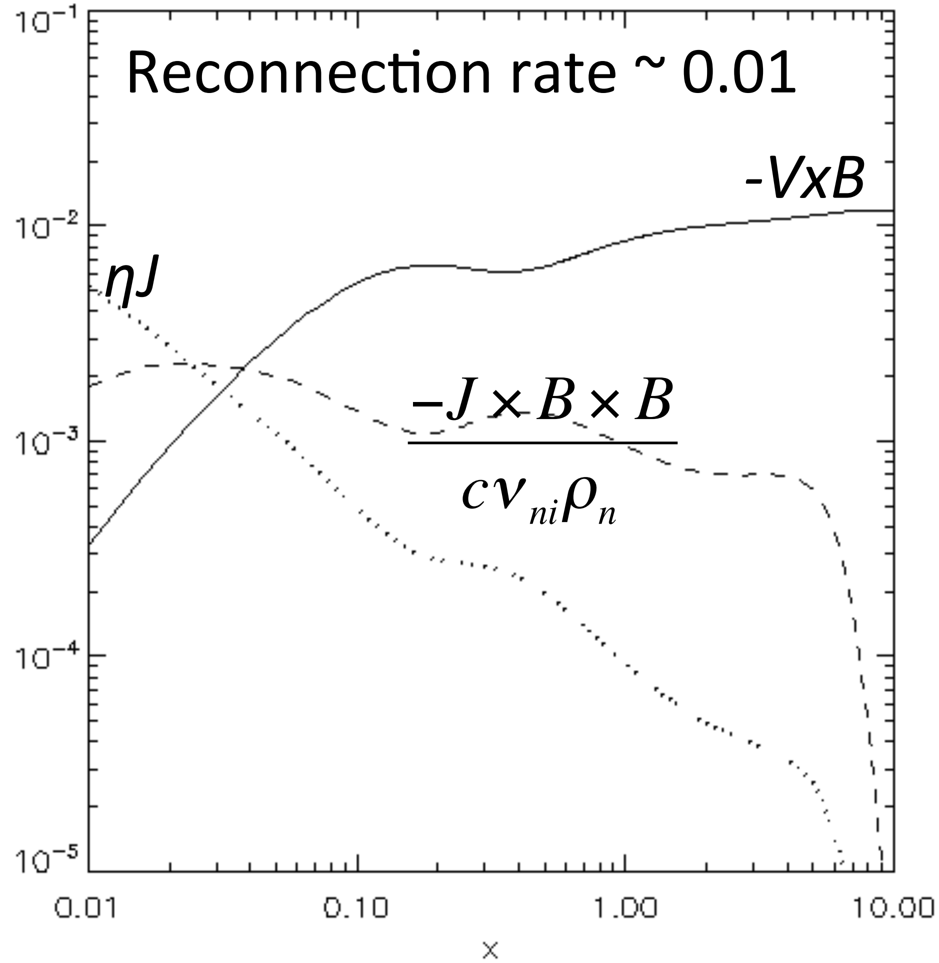


Ambipolar diffusion uniform + enhanced in x < ±2
Uniform resistivity



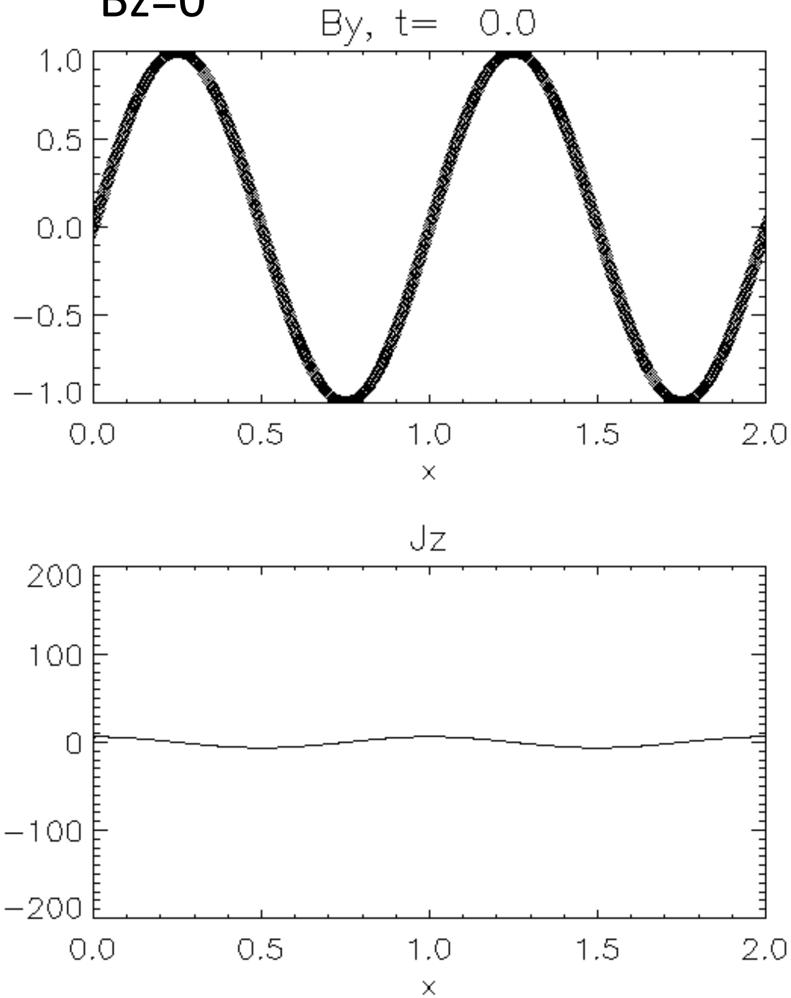
Even though the resistivity is uniform, the localization of ambipolar diffusion causes local thinning of the current sheet, leading to Petschek-like fast reconnection

The “ambipolar layer” almost disappears.

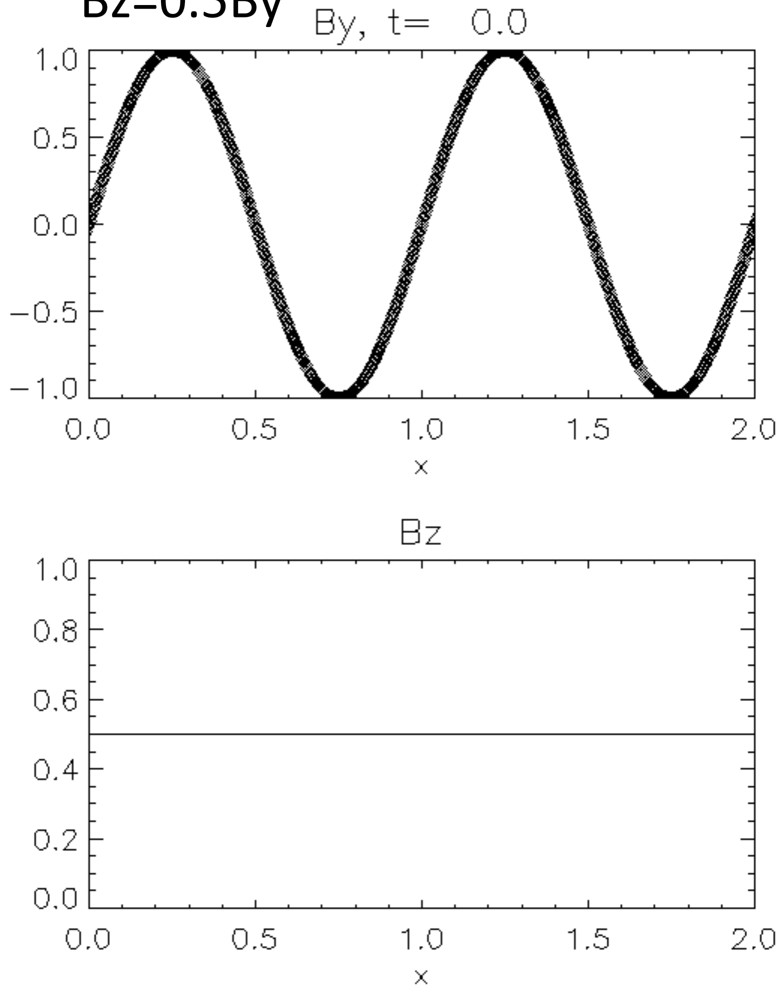


縦磁場の影響

Bz=0

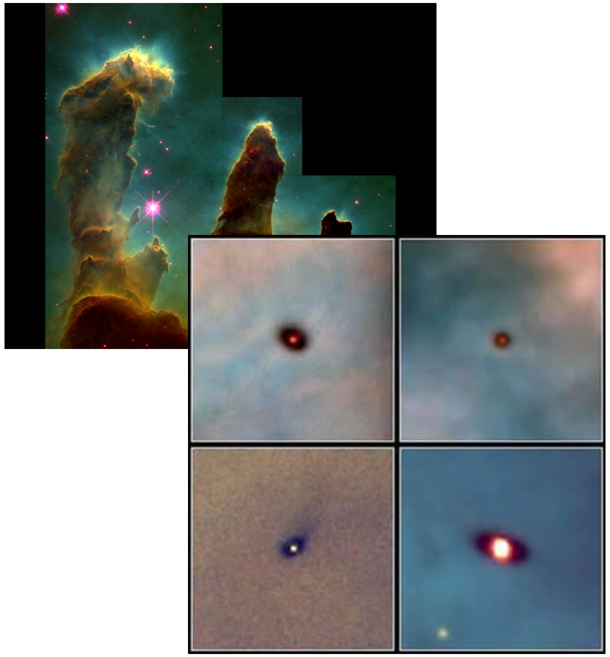


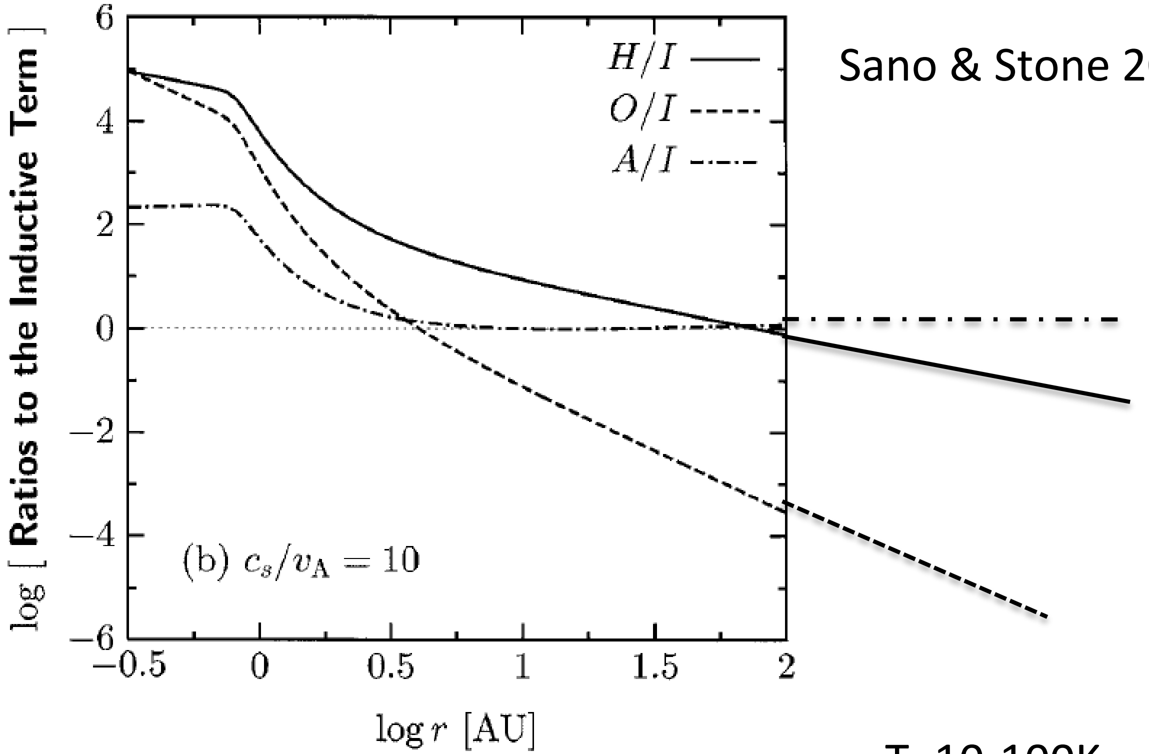
Bz=0.5By



- 縦磁場が強い半暗部やスピキュールの根元などではambipolarは効きにくい
- ただし縦磁場の非一様性が実効的にはambipolar diffusionの局在化と同じ効果を生む…逆に速いリコネクション？

Similar astrophysical plasmas: molecular clouds and protoplanetary disk



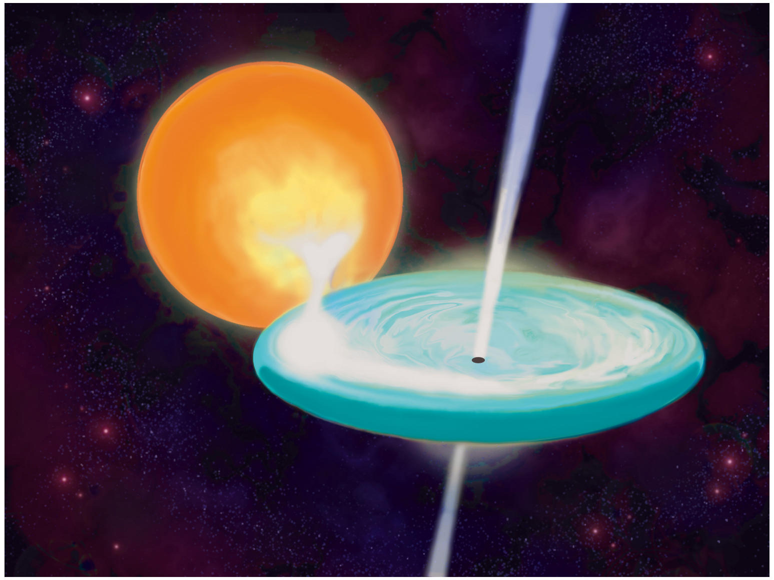


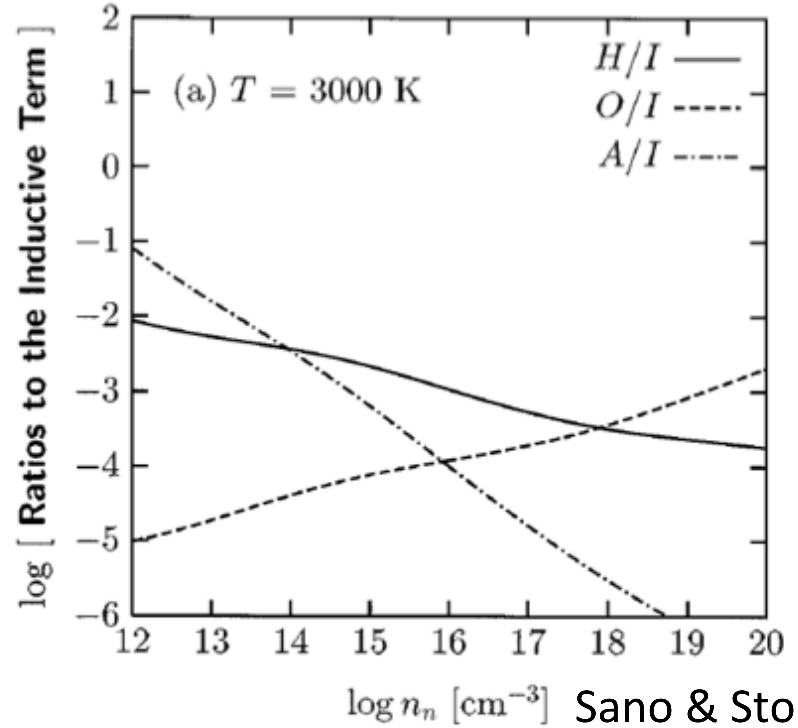
Sano & Stone 2002

T≈10-100K

- Hall dominates in inner disk
- Ambipolar dominates in outer disk and molecular clouds
- Dust particles play significant role … different from sun

Similar astrophysical plasmas: Dwarf nova disk in quiescent phase

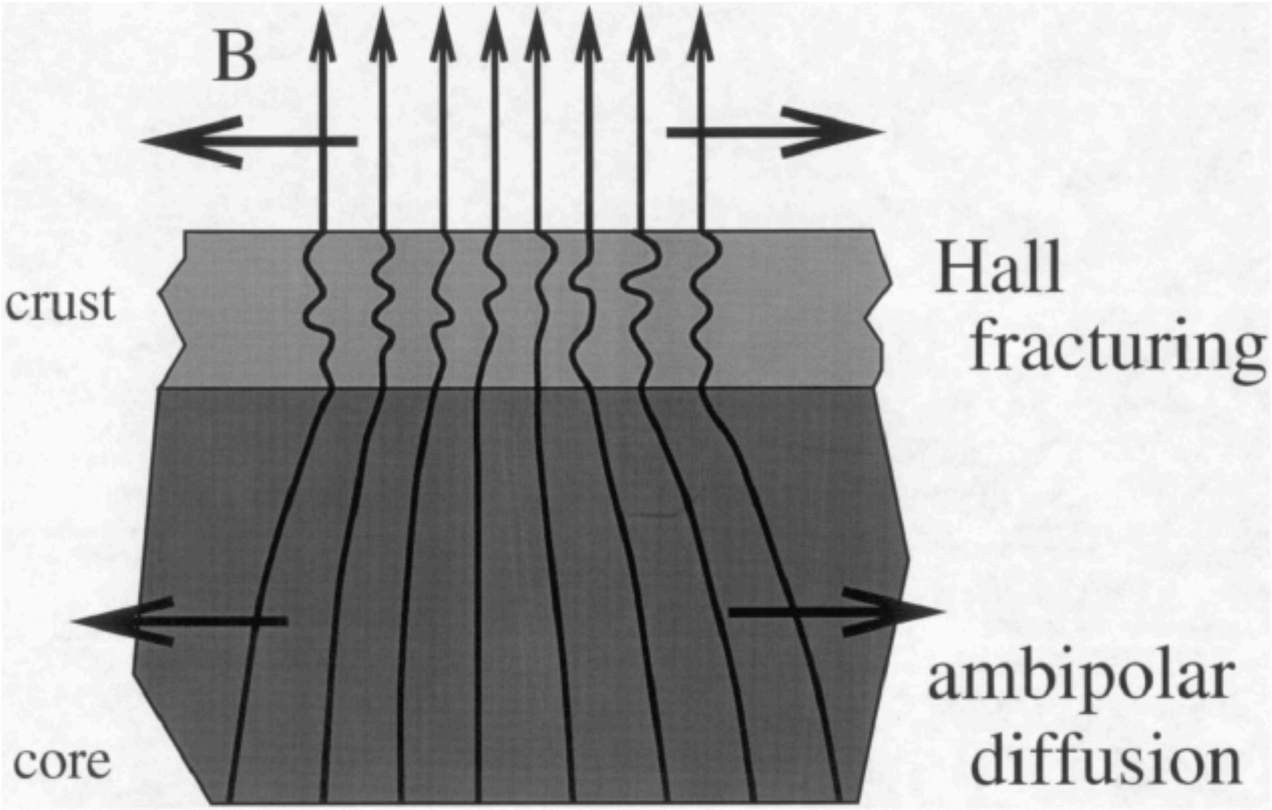




Sano & Stone 2002

- Ambipolar, Hall, and Ohmic terms dominate in inner, middle and outer disk, respectively
- $T>10^{4\text{-}5}$ K in outburst phase => fully ionized

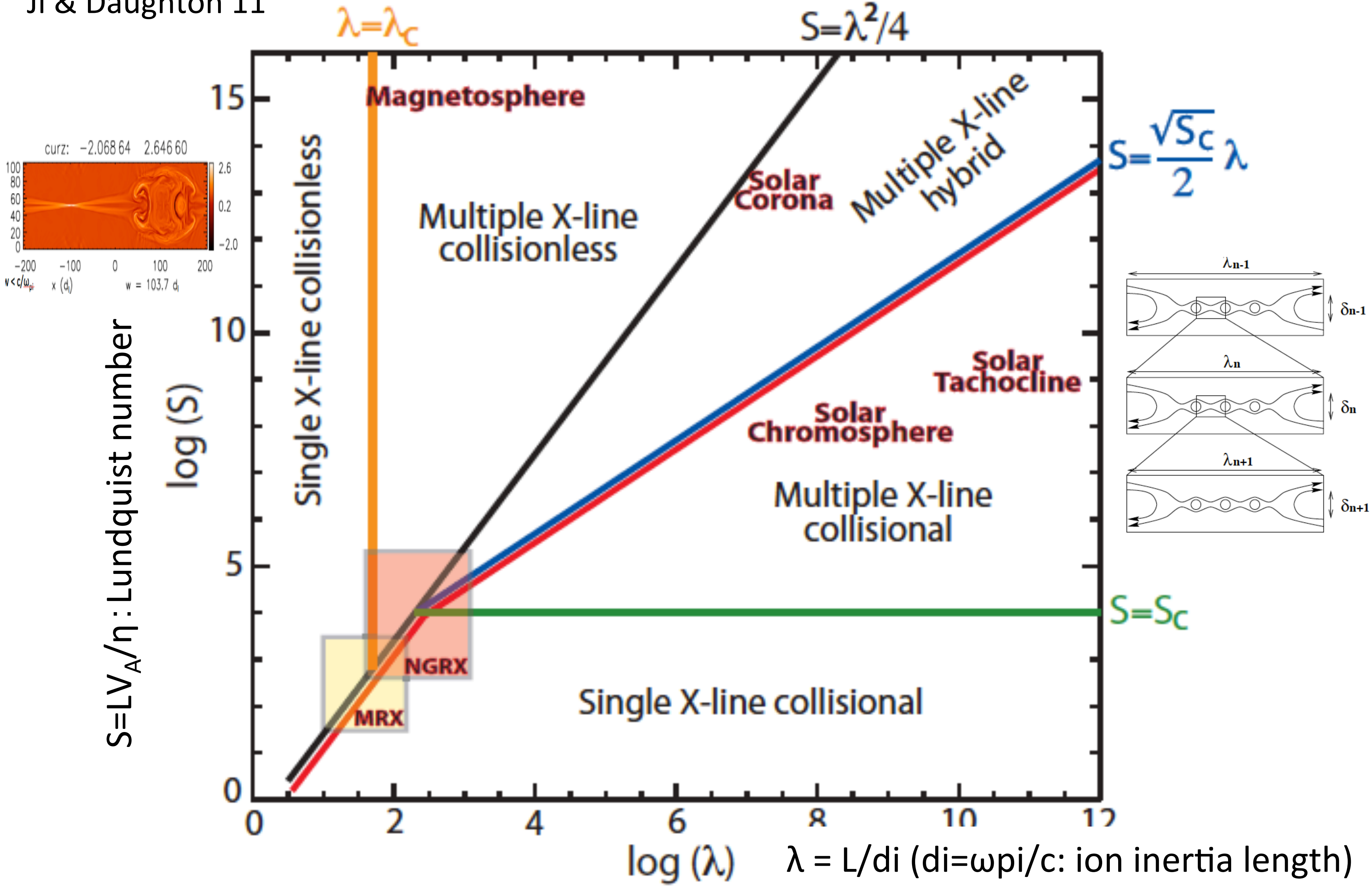
Similar astrophysical plasmas: Interior of neutron star



Thompson & Duncan 96

リコネクション物理の最近の進展（中性の効果はなし）

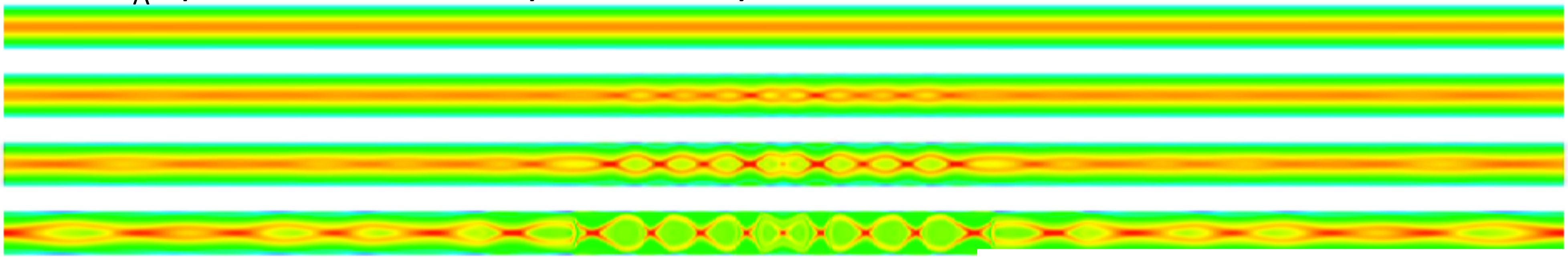
Ji & Daughton 11



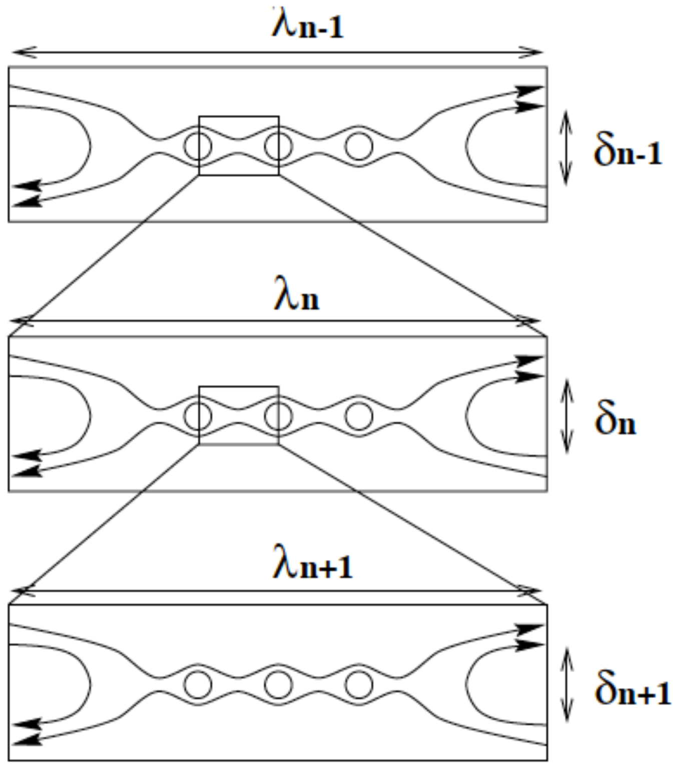
λ = L/di (di=ωpi/c: ion inertia length)

Reconnection with multiple plasmoids/X-lines in High S reconnection

$S = LV_A/\eta = 10^7$ simulation by Samataney+09



- Multiple islands (plasmoids) by tearing
  => effectively reducing L
  => reconnection faster
- Tearing in reconnecting current sheet
  => further thinning
  => connection to kinetic scales?
- Enhanced reconnection rate with ejection => inherently intermittent

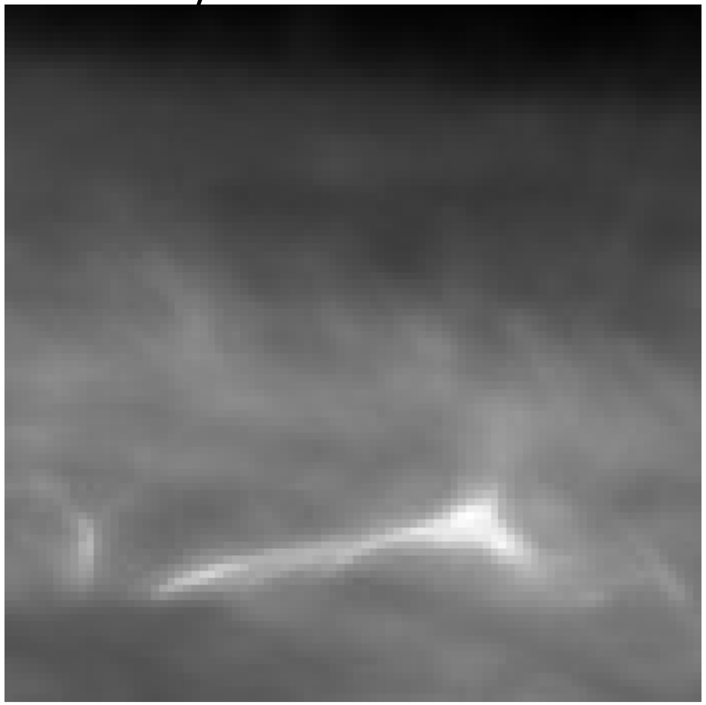


Shibata & Tanuma 01

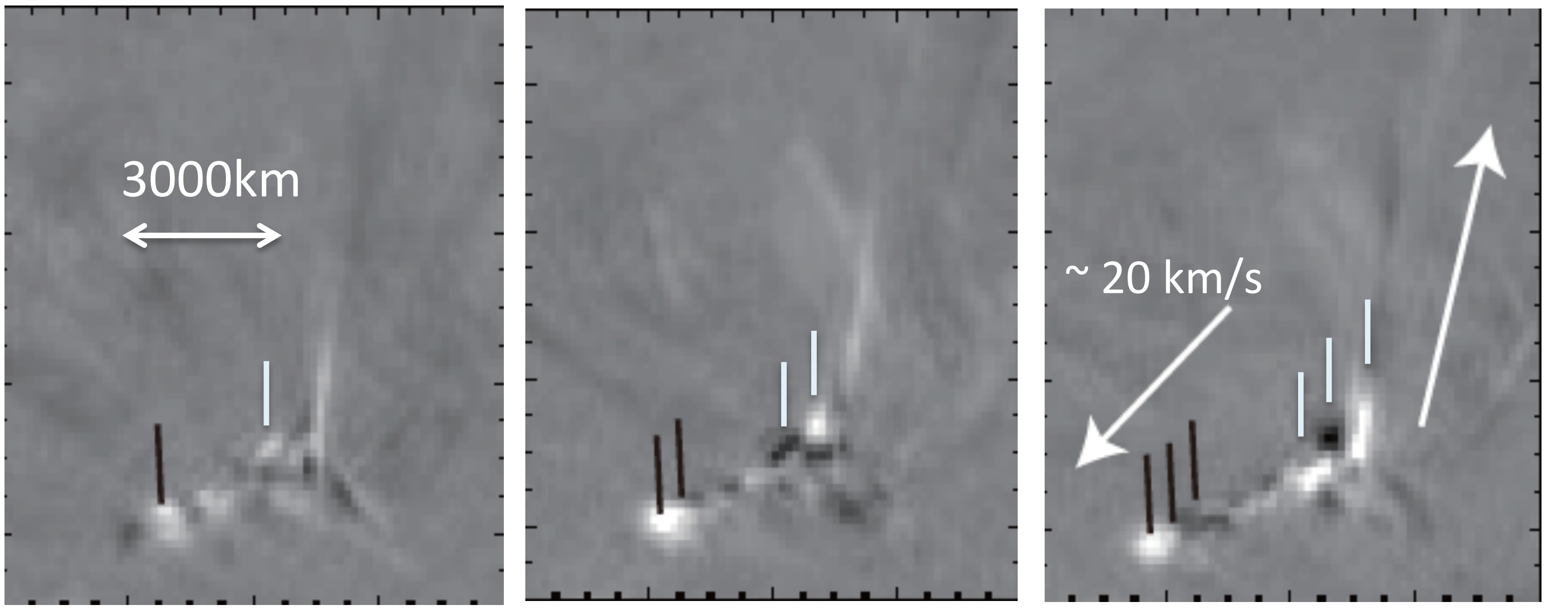
High-resolution imaging by SOT

- Reconnection looks bursty
- Multiple plasmoids?

Hinode/SOT CaH

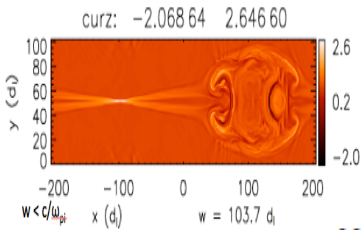


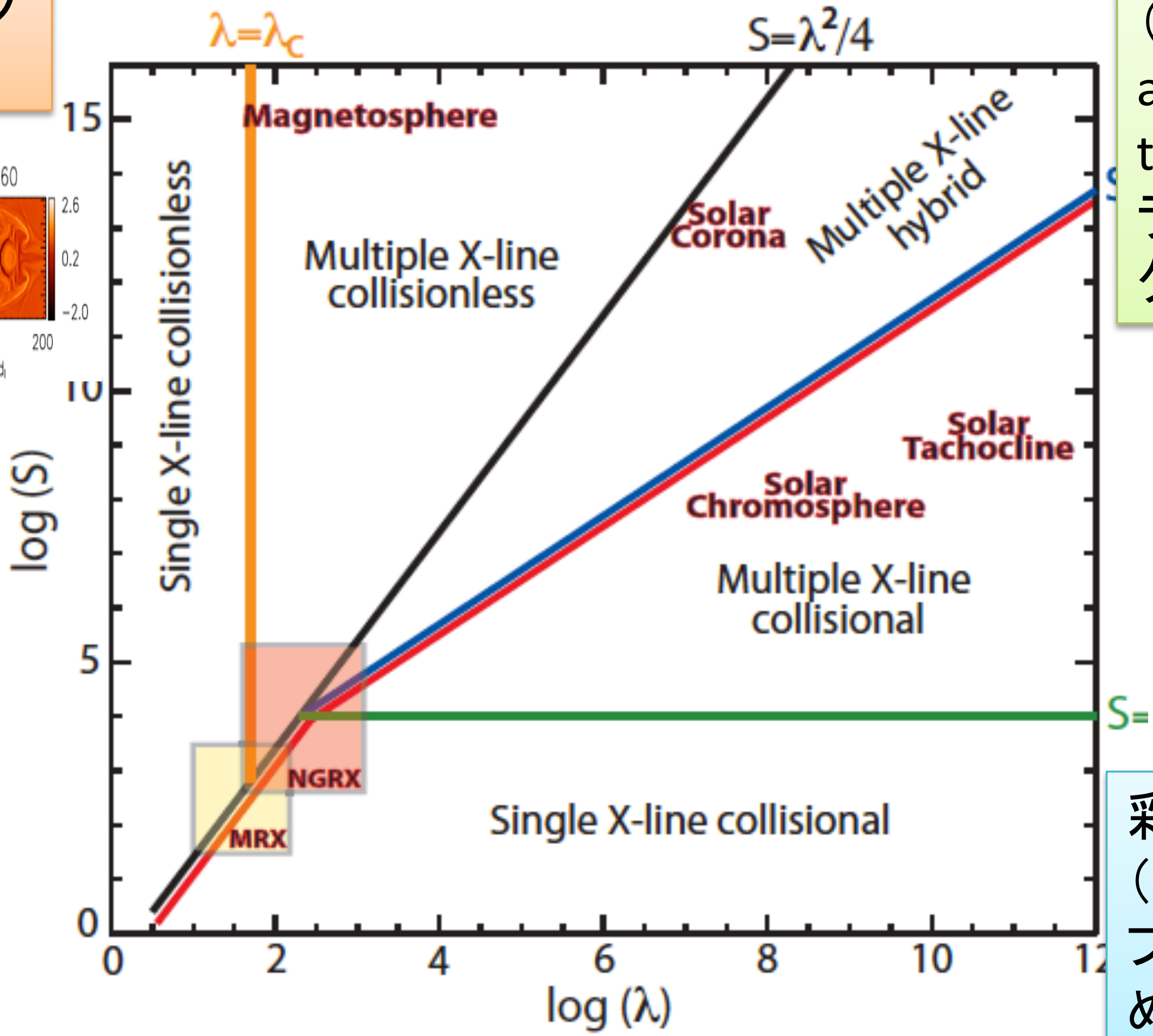
Singh et al. ApJ in press.



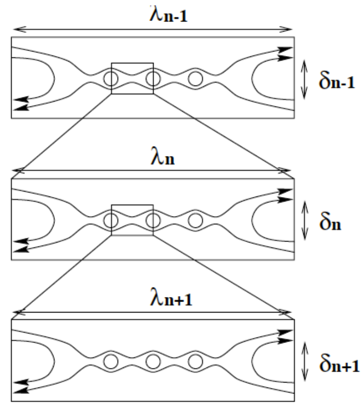
予想

光球近く:
Hallリコネクション





彩層中ー上部（反平行）:
ambipolar thinningを伴うプラズモイドリコネクション



彩層中ー上部（縦磁場強）:
プラズモイド大きめ or Sweet-Parker型

ALMAへの期待

- （0.01”分解能切れば）リコネクションのグローバルスケール(~1000km)と散逸スケール(<10km)が初めて見える可能性がある。リコネクション物理にとって極めて重要な観測

- 磁場形状とプラズマパラメータの関数として散逸領域の構造の変化が分かるとさらにすごい
  - 予想：光球はXポイント的、彩層・半平行は小プラズモイドたくさん、縦磁場が強くなるとプラズモイド大きくなるorS-P的

- 電流シートの薄さが<10kmなので、プラズモイドの大きさはもっと大きくなりうる。プラズモイドの大きさ分布などが分かるとたいへん嬉しい

- とにかく高空間分解能が欲しい(0.2”だとちょっと…）。あと、見てる場所の磁場構造とプラズマパラメータ（Solar-Cとのシナジー大）