

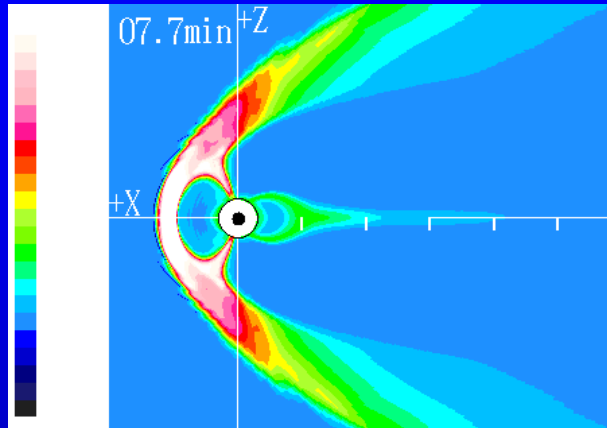
Whistler Waves Associated With Magnetic Reconnection

Keizo Fujimoto^{1,2} and Richard D. Sydora³

1. STE Laboratory, Nagoya University
2. JSPS Research Fellow (PD)
3. Department of Physics, University of Alberta

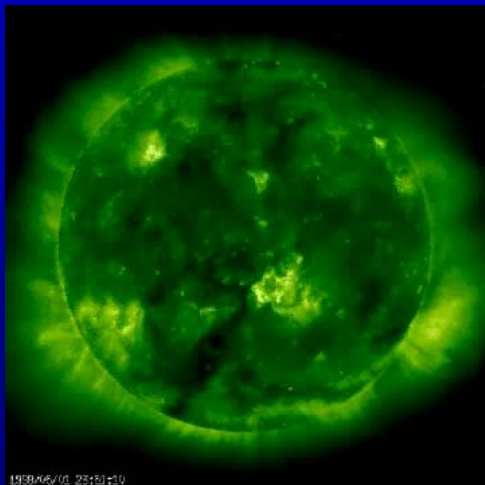
Magnetic Reconnection in Space

[Magnetospheric substorms]



(<http://www2.nict.go.jp/dk/c232/>)

[Solar flares]



1998/06/10 23:51:10

(<http://vestige.lmsal.com/TRACE/>) JpGU Meeting 2008

In order to explain the explosive energy conversion due to magnetic reconnection, a fast reconnection with the reconnection rate (normalized by the upstream values)

$$E_{\text{rec}} \sim 0.1 V_{A0} B_0$$

has to persist for the time scale of the phenomena in space plasmas

a few minutes \sim a few hours.

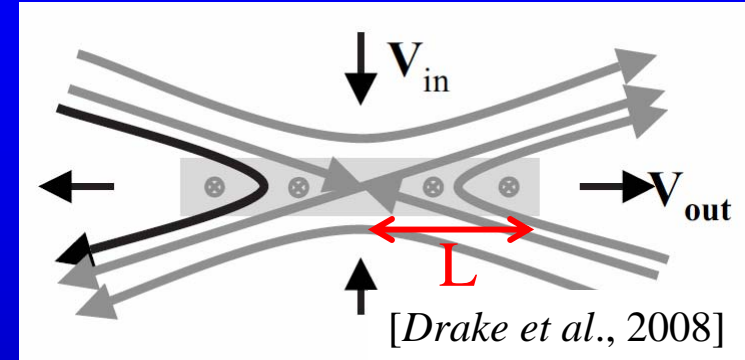
Whistler Mediated Reconnection

Mandt et al. (1994), Biskamp et al.(1997), Shay et al.(1999), ..., Drake et al., (2008)

$$\omega = k^2 \lambda_e V_{Ae}$$

$$V_{e,out} \sim \omega/k \sim V_{Ae}, \quad k \sim 1/\lambda_e$$

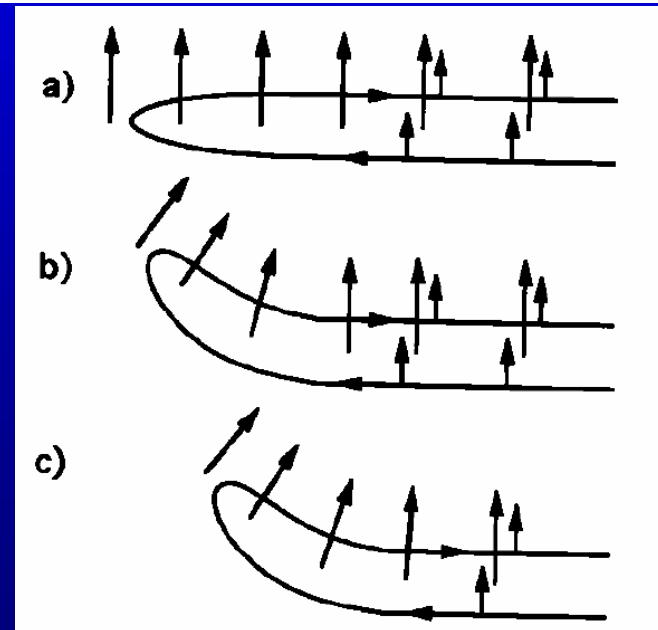
$$E_{rec}/V_{A0}B_0 = \lambda_e/L \sim 0.1$$



➤ 観測的証拠

Deng and Matsumoto (Nature, 2001)

昼側magnetopauseでリコネクションに伴ってホイッスラー波を検出。



Whistler mode: $\lambda \sim \lambda_e \sim 10 \text{ km}$, $T \sim \omega_{ce}^{-1} \sim 10^{-3} \text{ sec}$

➡ 本当に大規模なリコネクション過程($L \sim 10^5 \text{ km}$,
 $\tau \sim 10^2 \text{ sec}$)を制御しているのか？

➤ Whistler physics がなくても fast reconnection が実現される。

Hall-less hybrid simulations [*Karimabadi et al.*, 2004]

Electron-positron reconnection

[*Bessho and Bhattacharjee*, 2005; *Fujimoto*, 2006]

➤ Whistler physics があっても fast reconnection が維持されない。

Large-scale particle-in-cell simulations

[*Daughton et al.*, 2006; *Fujimoto*, 2006]

➤ リコネクションにともなってホイッスラー波が観測された例は少なくない。

Farrell et al. (2002, 2003), *Deng et al.* (2004), *Wei et al.*, (2007)

Purpose of the Present Study

数値シミュレーションを実施することによって、磁気リコネクションとホイッスラー波の因果関係を明らかにする。

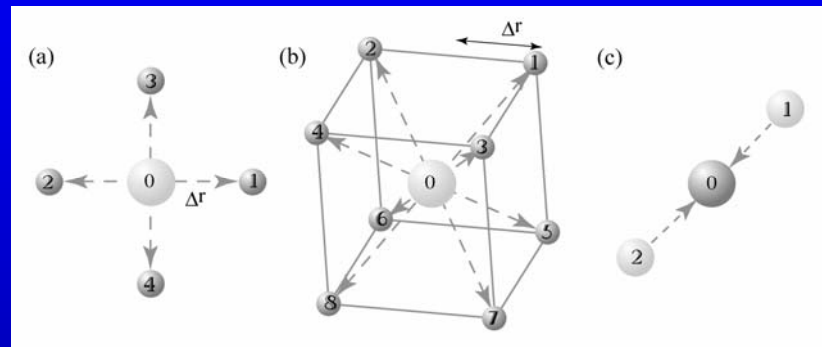
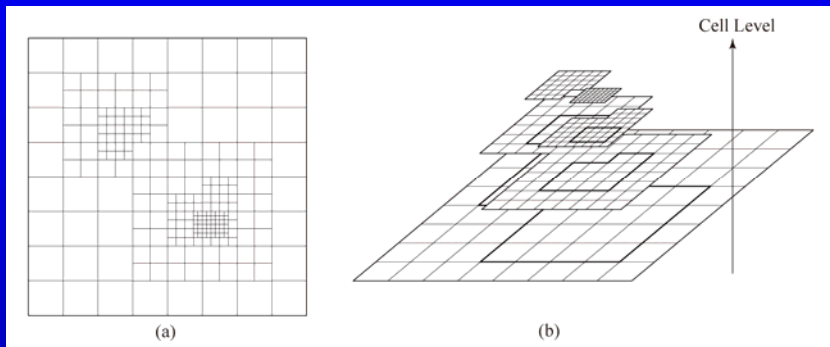
1. ホイッスラー波がリコネクションを制御している？
2. ホイッスラー波はリコネクションの副産物？
3. ホイッスラー波とリコネクションは何の関係もない？

Simulation Model

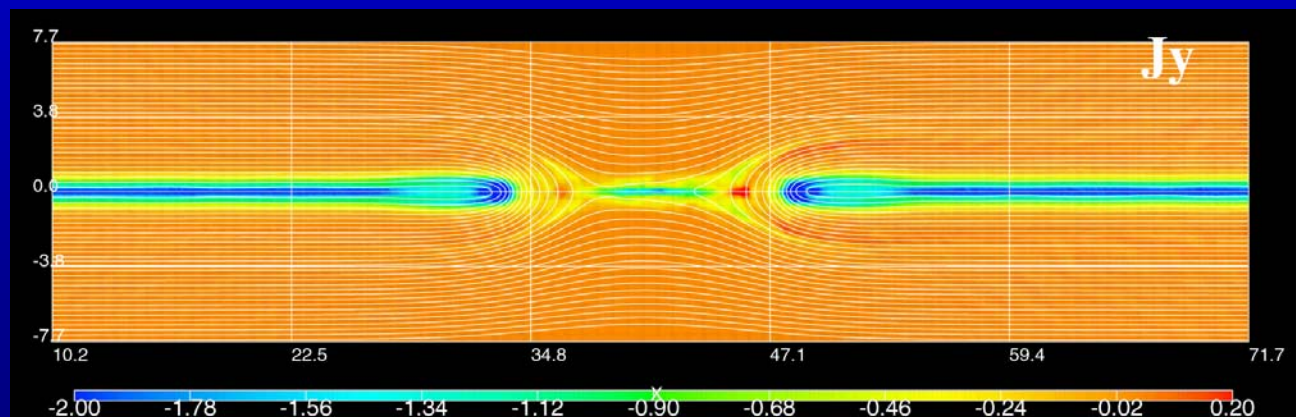
2D-EM-PIC (2次元電磁粒子コード)

+ AMR (適合細分化格子) + 粒子分割法

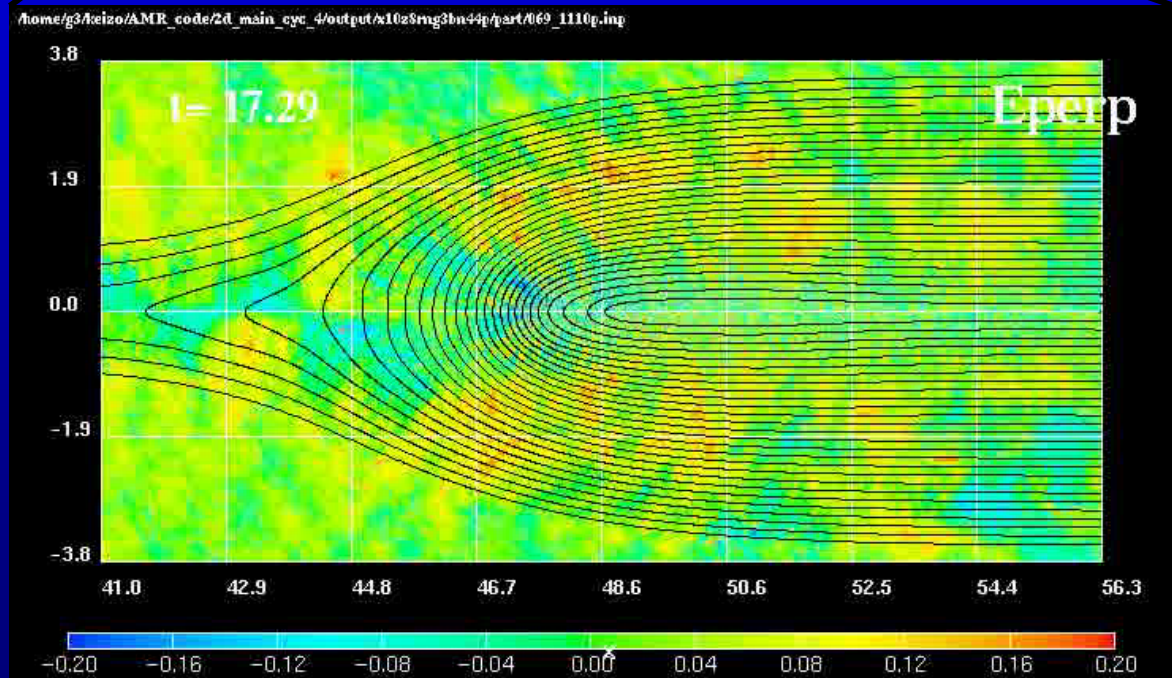
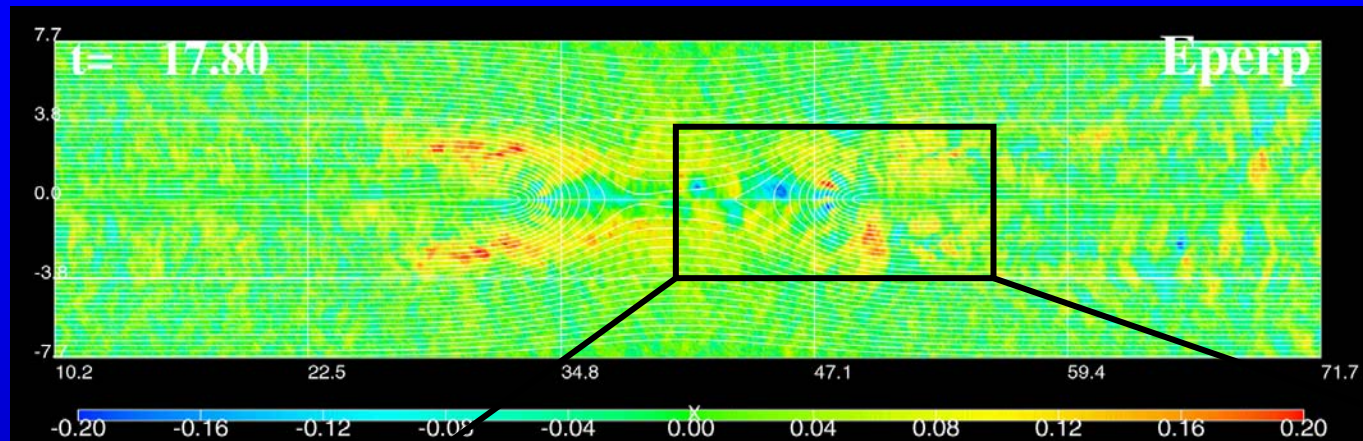
[Fujimoto and Machida, 2006;
Fujimoto and Sydora, 2008]



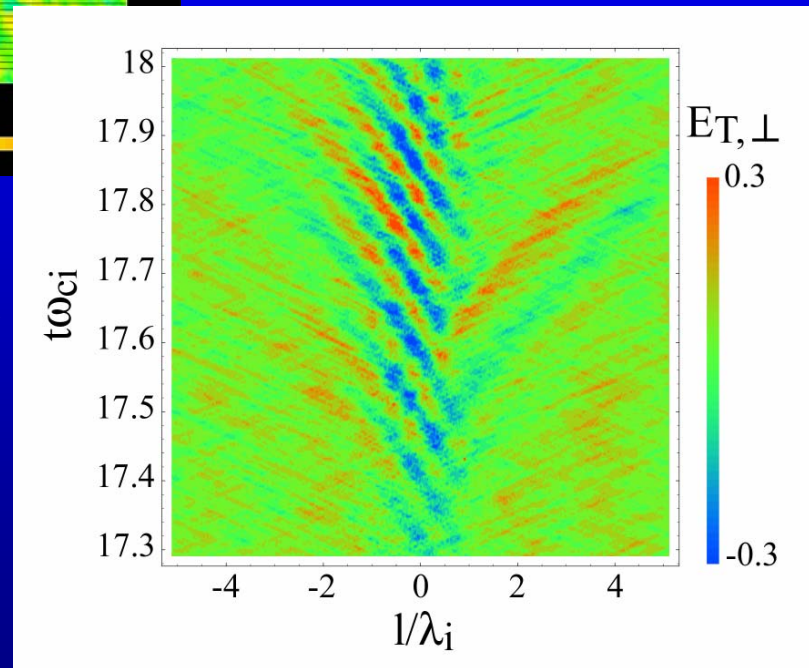
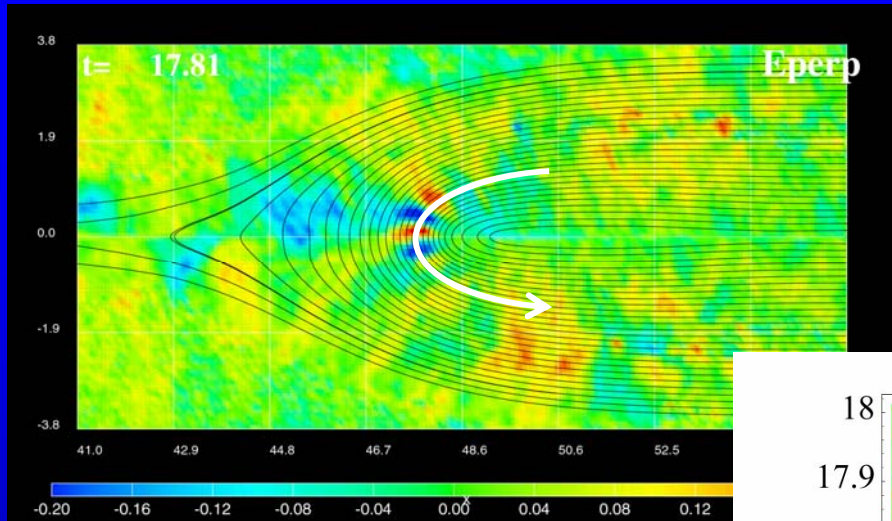
$$m_i/m_e = 100,$$
$$c/V_A = 29,$$
$$L_x \times L_z$$
$$= 82 \lambda_i \times 20 \lambda_i$$



Perpendicular Comp. of the Transverse Field: $E_{T,\perp}$



Electromagnetic Waves at the Downstream Region



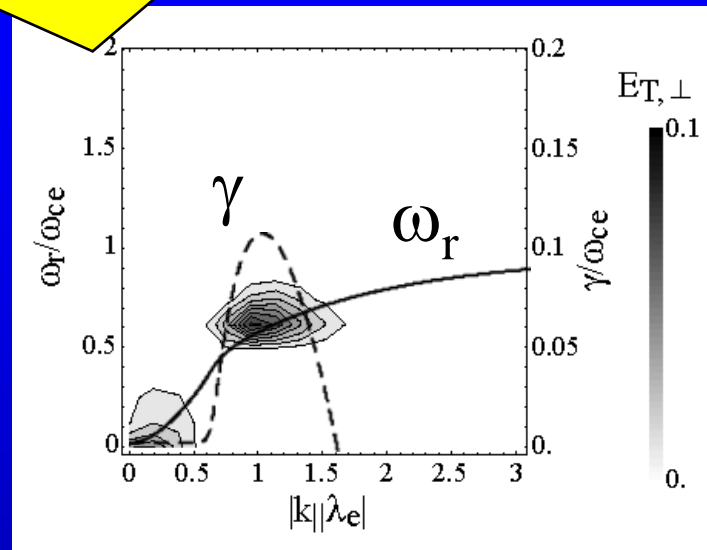
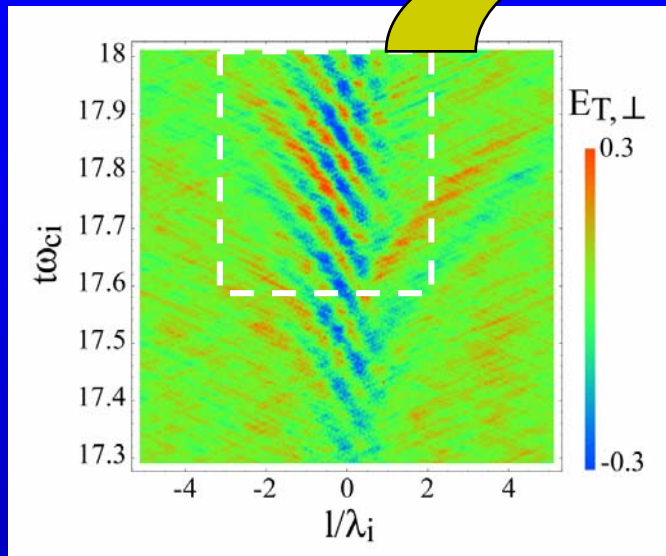
- 赤道面で励起
- 磁力線に沿って伝播

時間 t



磁力線方向 l

Wave Dispersion for the EM Mode



$$k_{\parallel}\lambda_e \sim 1$$

$$\omega \sim \omega_{ce}$$

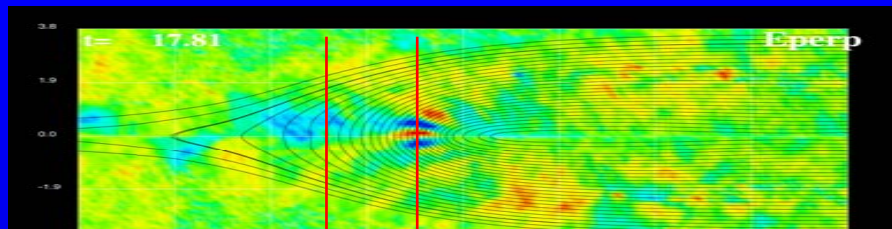
ホイッスラー波の線形分散関係

[Gary, 1993]

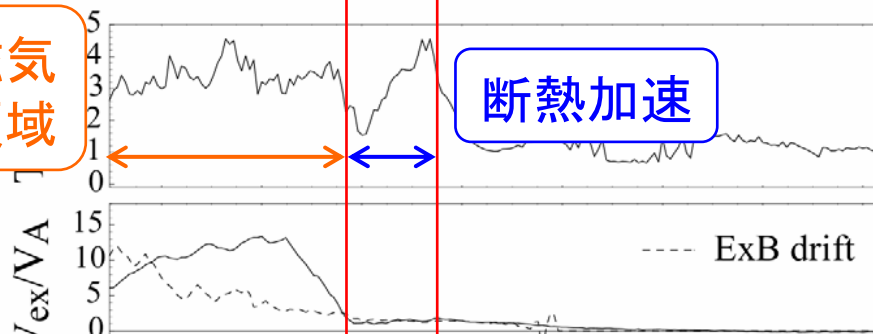
$$X^2 - \frac{1}{(\omega_{pe}/\omega_{ce})^2} Y^2 - \frac{Y}{X\sqrt{\beta_e}} Z(\xi) + \frac{1}{2} \left(\frac{T_{e\perp}}{T_{e\parallel}} - 1 \right) Z'(\xi) = 0$$

$$\xi = \frac{Y - 1}{X\sqrt{\beta_e}}, \quad X = \frac{k_{\parallel}c}{\omega_{pe}}, \quad Y = \frac{\omega_r + i\gamma}{\omega_{ce}}$$

Condition for the Whistler Emission

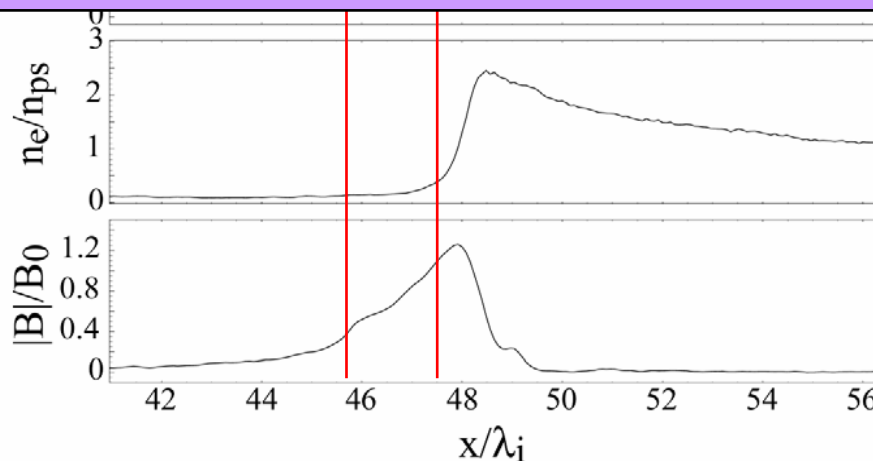


電子磁気
拡散領域



- 大きな温度異方性 ($T_{e\perp} > T_{e\parallel}$)
- 電子が十分磁化されている

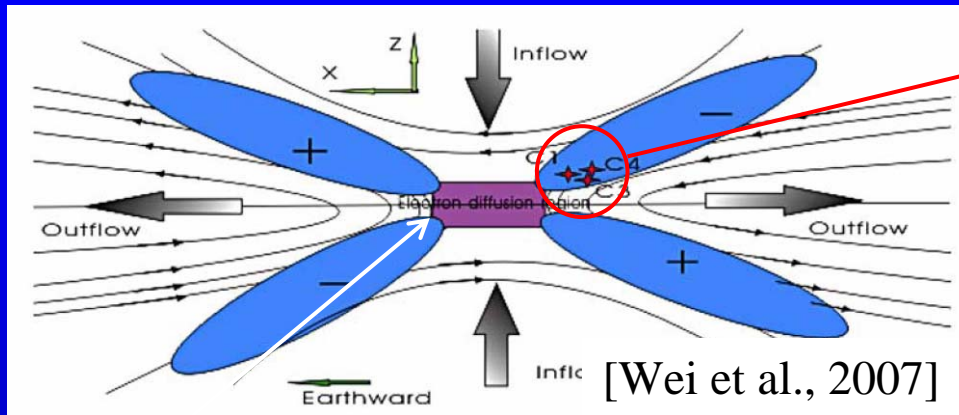
ホイッスラー波が磁気リコネクションを制御しているという証拠は得られていない。



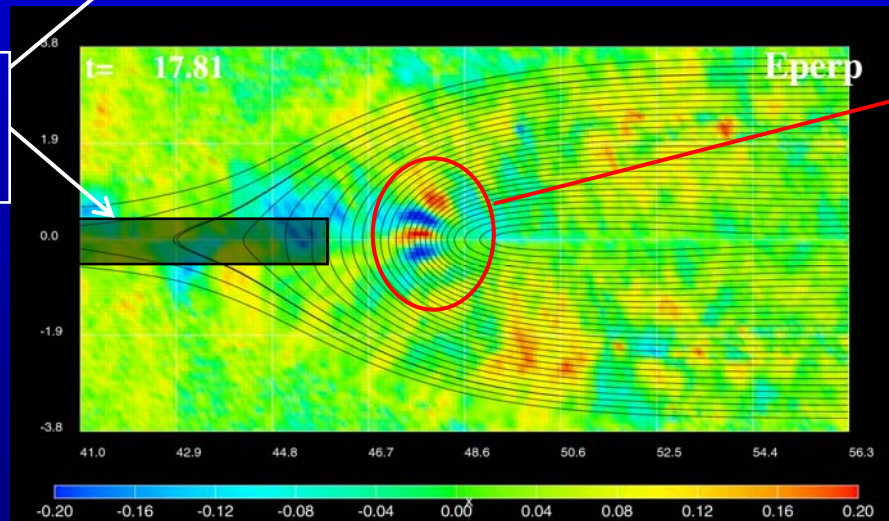
電子磁気拡散領域の
下流

- 磁場がpile-upしているところ ($B_z \sim B_0$)

Comparison with Satellite Observations



Cluster衛星による
ホイッスラー波
観測地点



電子磁気拡散
領域

シミュレーションで
検出されたホイッス
ラー波

Summary and Conclusions

磁気リコネクションにともなってホイッスラー波が励起されることを、初めて数値シミュレーションによって実証した。

- ホイッスラー波はリコネクションを制御するものではなく、リコネクションの結果として励起される。
- エネルギー源は電子の温度非等方性 ($T_{e\perp} > T_{e\parallel}$)。
- 電子磁気拡散領域の下流側、磁場pile-up領域で励起。

今後は、リコネクション過程の中でホイッスラー波によるピッチ角散乱がどれほど有効なのかを調べる。

リコネクションを制御している物理は何か？