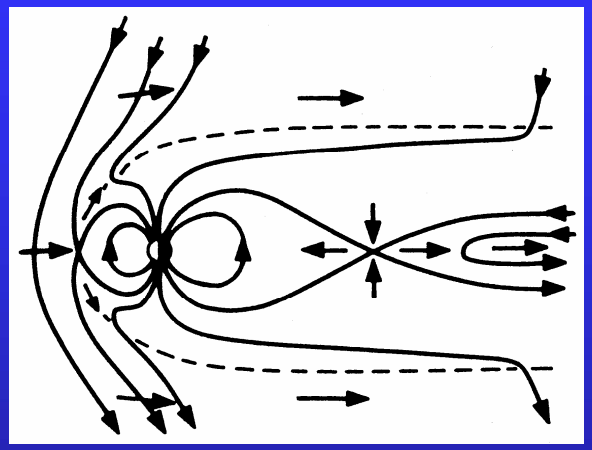
キンクした電流層における磁気リコネクション

藤本　桂三

総合解析・センター合同セミナー

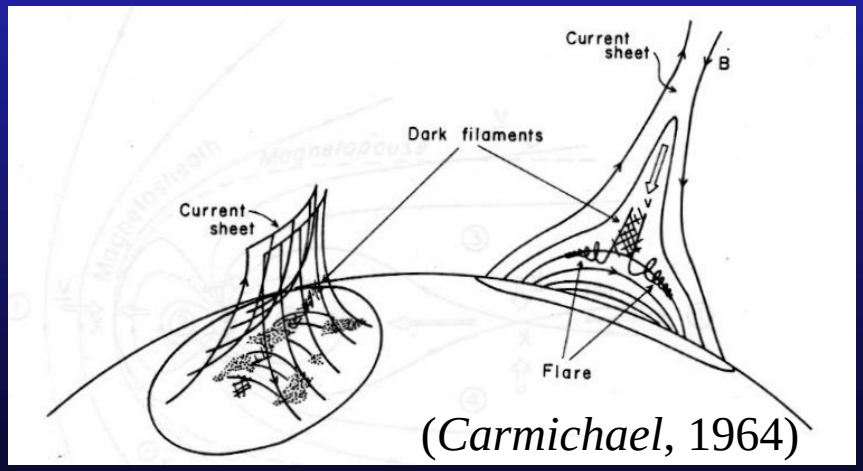
宇宙空間における磁気リコネクション

[Magnetospheric substorms]



(*Cowley*, 1985)

[Solar flares]



(*Carmichael*, 1964)

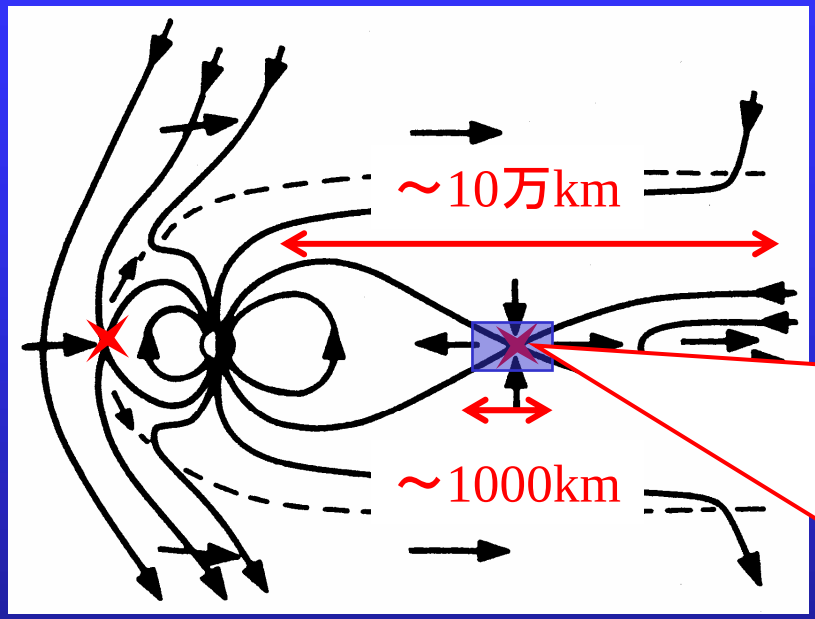
- 爆発的なエネルギー開放を可能にする効率的な磁気リコネクション

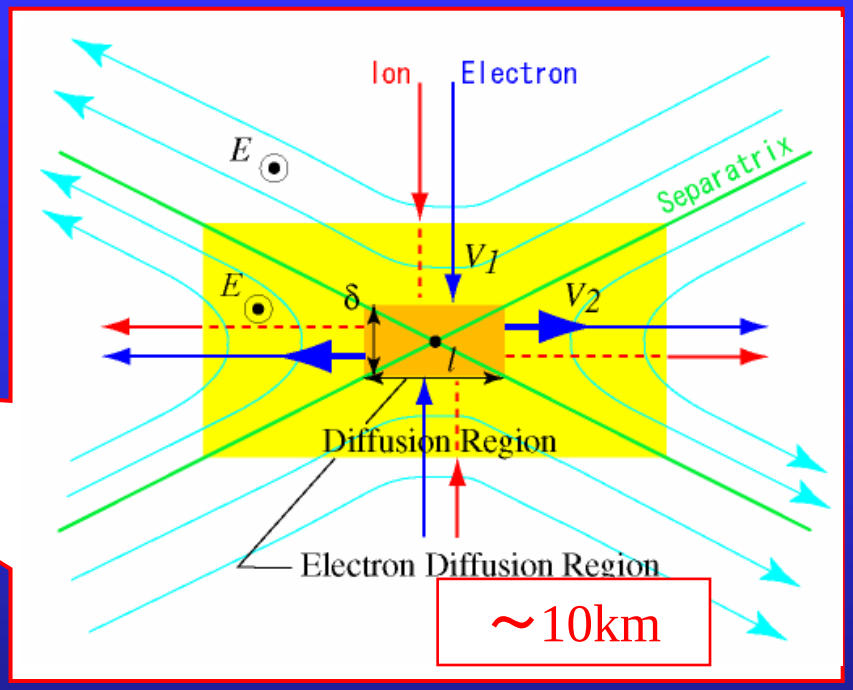
$$E_{rec} \sim 0.1\ V_{A0}B_{0,}$$

- 現象の時間スケールにわたって長時間持続する定常的な磁気リコネクション

数分 ～ 数時間

磁気拡散領域





$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{\eta}{\mu_0}\nabla^2 \vec{B} \quad (\eta\text{: Resistivity, } \vec{E} \neq -\vec{V} \times \vec{B})$$

$$\vec{E} = \eta \vec{j}$$

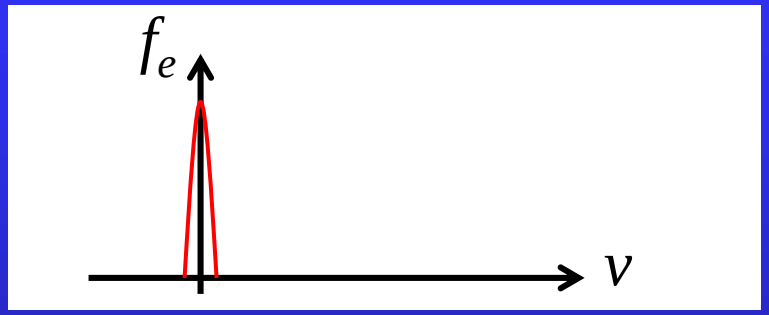
$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{B^2}{2\mu_0} + \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}\right) = -\vec{j}\cdot\vec{E}, \quad \vec{j}\cdot\vec{E} = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{2}\rho V^2 + \frac{1}{\gamma - 1}p\right)$$

電気抵抗率 η

荷電粒子の運動が何らかの“衝突”によって妨げられる必要がある。

他の粒子との衝突

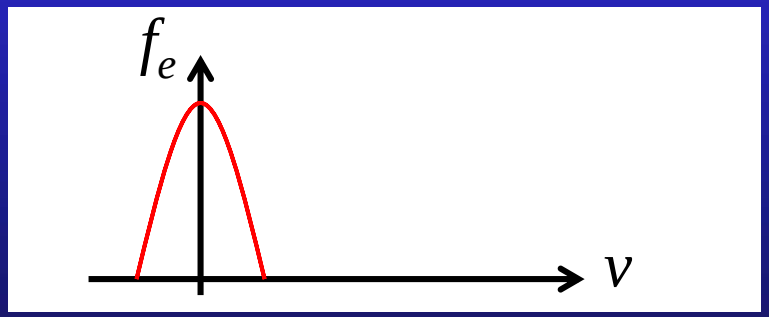
$$\eta = \frac{m_e \nu_c}{n_e e^2}, \qquad \nu_c = \frac{1}{\tau_c}$$



➢ *無衝突プラズマで“衝突”を引き起こすには？*

（電子の）慣性抵抗

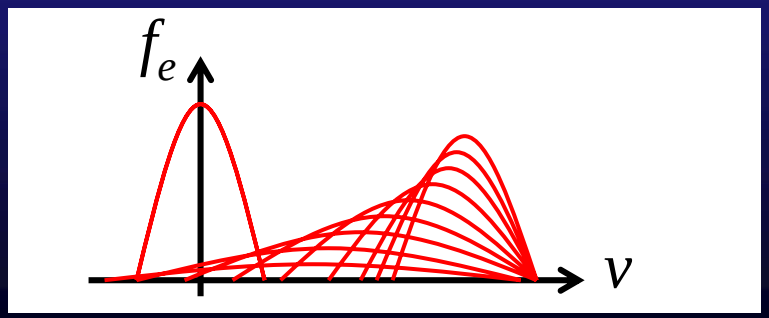
$$\eta = \frac{m_e \nu_T}{n_e e^2}, \qquad \nu_T = \frac{1}{\tau_T} \sim \frac{V}{L}$$



異常抵抗（波動粒子相互作用）

$$\eta = \frac{m_e \nu_w}{n_e e^2}, \qquad \nu_w \approx \frac{R_e^{an}}{n_e m_e V_e}$$

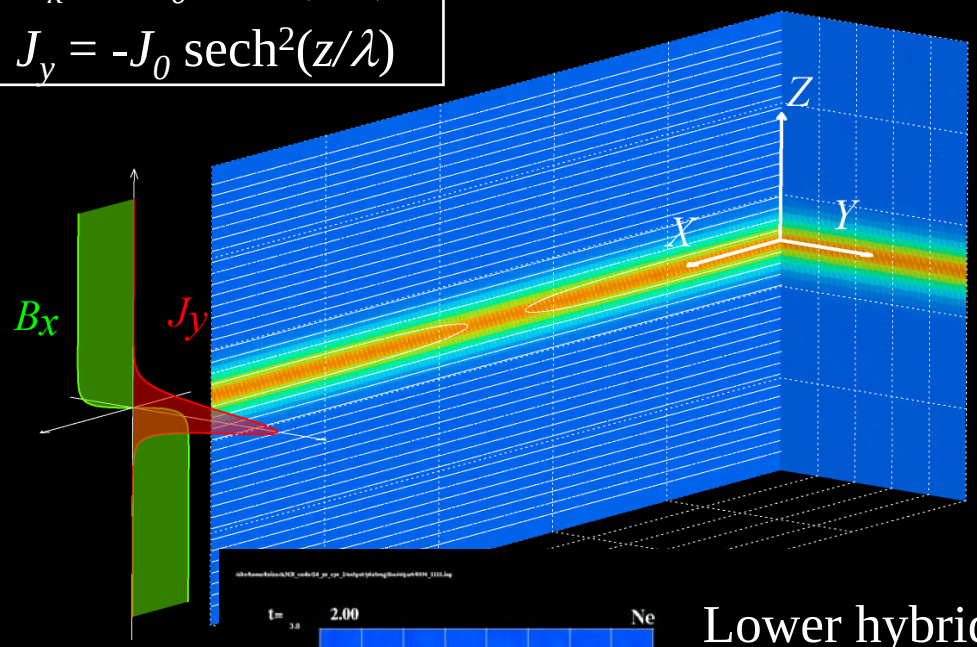
$$R_e^{an} = -e\left(\left\langle \delta n_e \delta \vec{E} \right\rangle + \left\langle \delta(n_e \vec{V}_e) \times \delta \vec{B} \right\rangle\right)$$



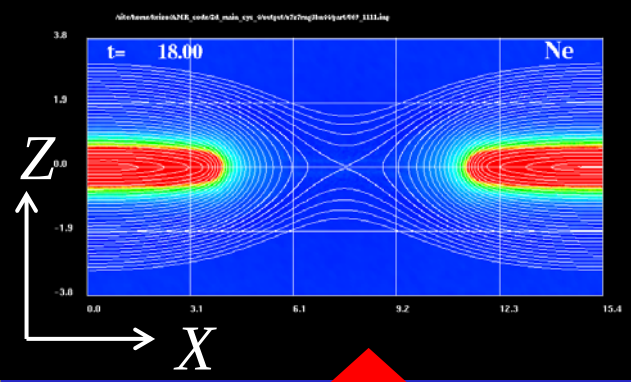
ハリス電流層における不安定モード

$B_x = -B_0 \tanh(z/\lambda)$

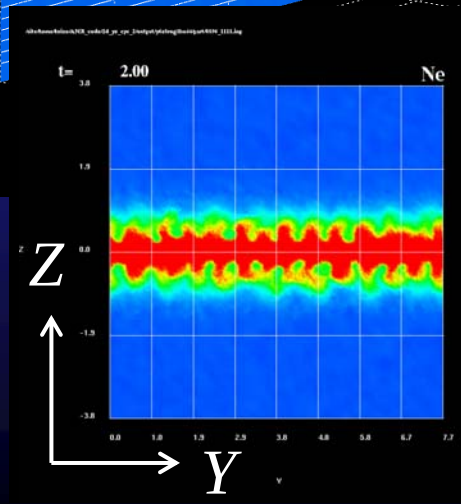
$J_y = -J_0 \operatorname{sech}^2(z/\lambda)$



Tearing instability



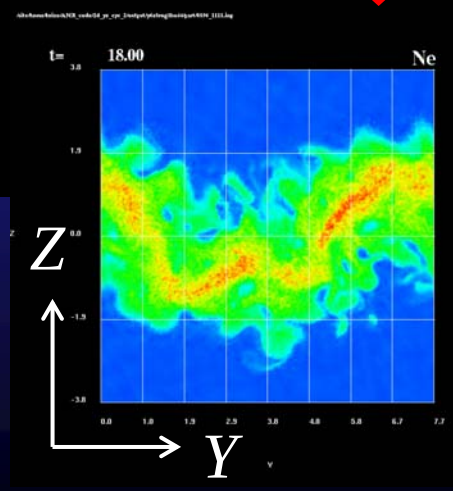
- ✓ 成長率が小さい
- ✓ 小さな磁気島で飽和する
- ✓ 電子スケールの薄い電流層



Lower hybrid drift instability (LHDI)

$k_y r_{Le} \sim 1$

$\gamma \sim \omega_{lh}$



Kink-type instability

$k_y \lambda \sim 1$

Kink-type instabilityと磁気リコネクション

- Drift kink
- Ion-ion kink
- Kelvin-Helmholtz

イオンのドリフトエネルギーを自由エネルギーとして励起される

リコネクションを駆動する ・・・*Horiuchi and Sato* (1999), *Scholer et al.* (2003)

リコネクションには影響を与えない ・・・ *Pritchett and Coroniti* (2001), *Karimabadi et al.* (2003)

ローブのプラズマがX-line近傍に流入するにしたがって、イオンのドリフトエネルギーがなくなるので、Kink instabilityは消える。

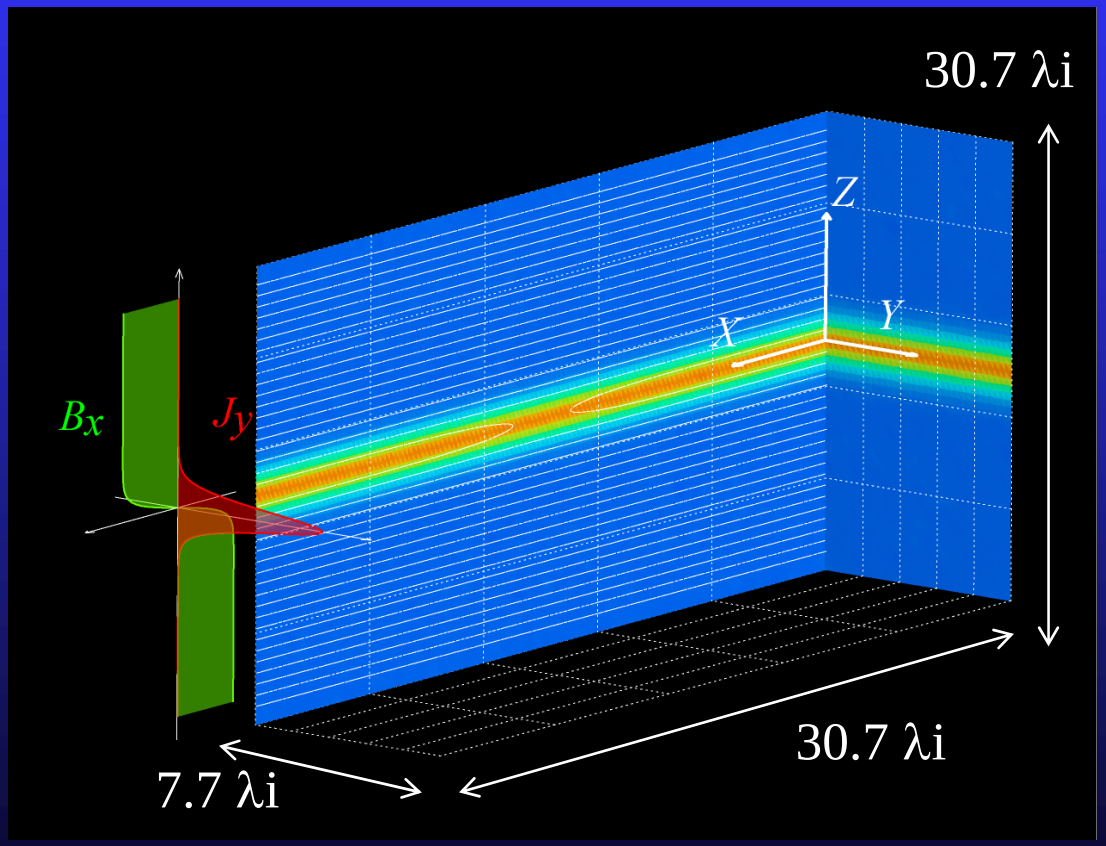
地球磁気圏尾部でキンクした電流層がしばしば観測される。
(*Runov et al.*, 2003; 2005; 2006; *Sergeev et al.*, 2006)

キンクした電流層でリコネクションが観測された例もある。
(*Wygant et al.*, 2005)

計算に用いたシステム

シミュレーションコード:

3次元電磁粒子コード＋適合格子細分化法 (AMR-EMPIC-3D)



$Lx \times Ly \times Lz$

$= 30.7\ \lambda_i \times 7.7\ \lambda_i \times 30.7\ \lambda_i$

$m_i/m_e = 25$

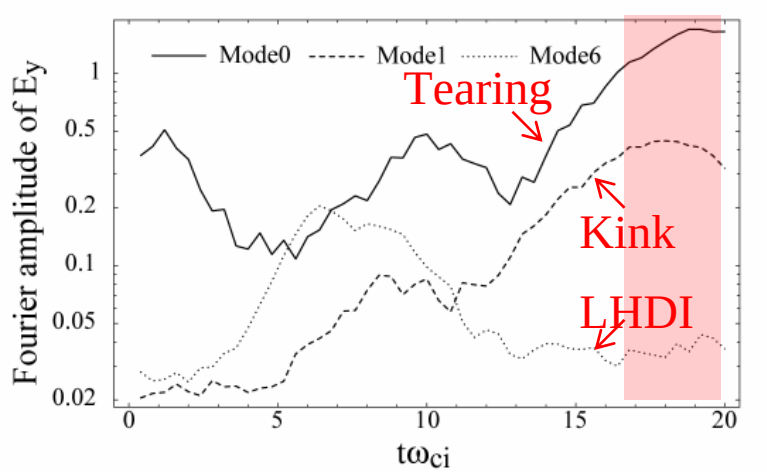
最大解像度:

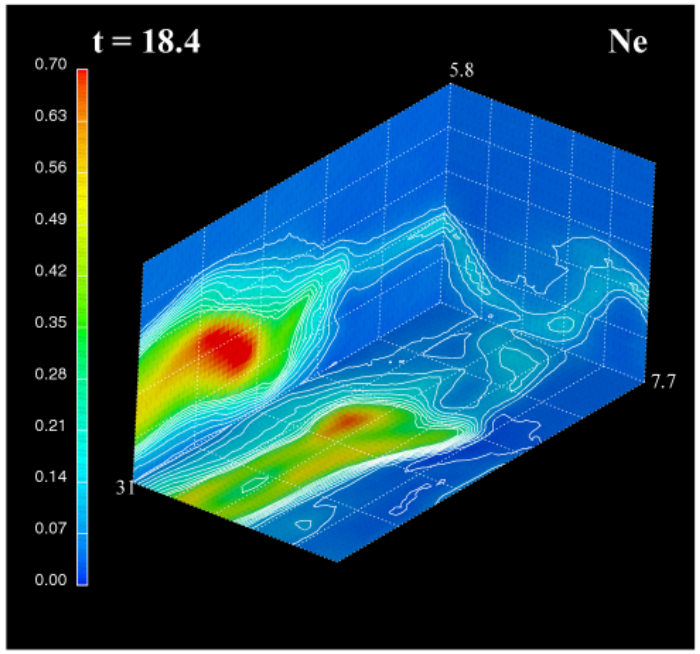
$N_x \times N_y \times N_z = 1024 \times 256 \times 1024$

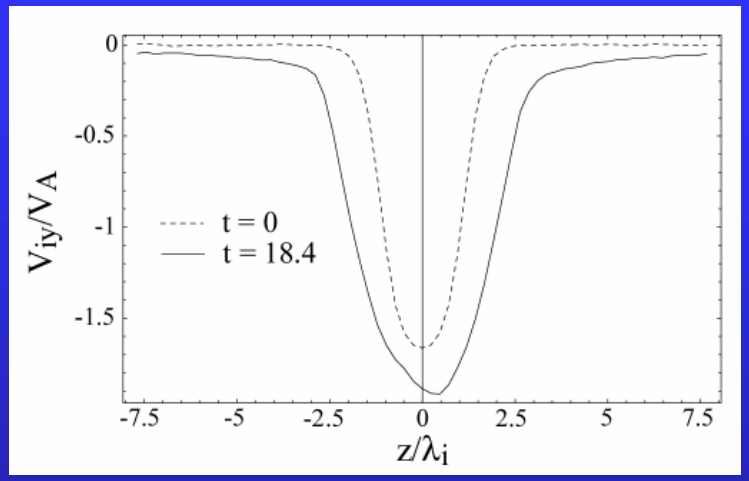
超粒子の数:

$< 1.5 \times 10^9$

電流層の時間発展

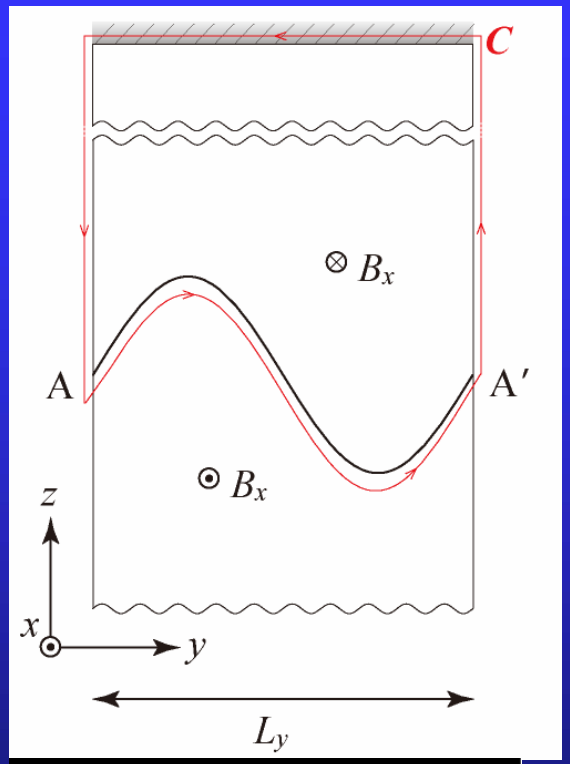






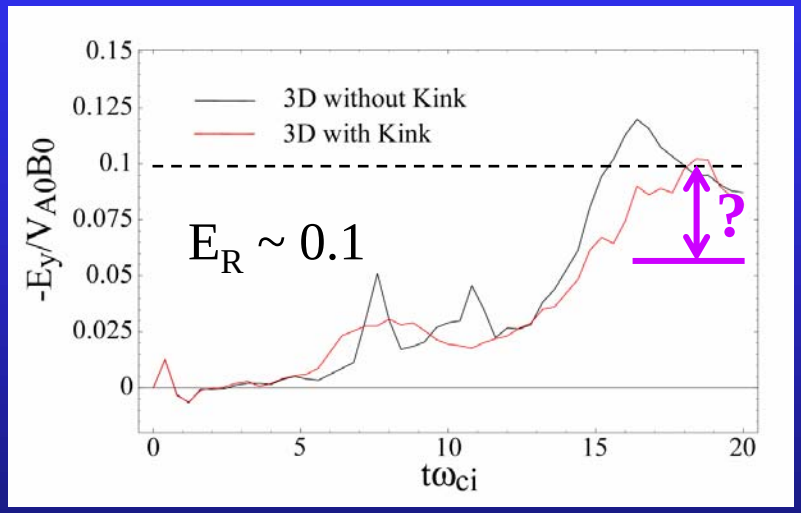
リコネクション電場によってイオンが加速され、キンクモードの成長を維持している。

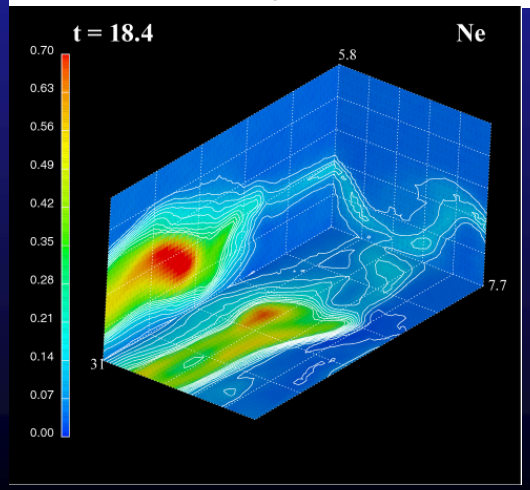
リコネクション効率（reconnection rate）

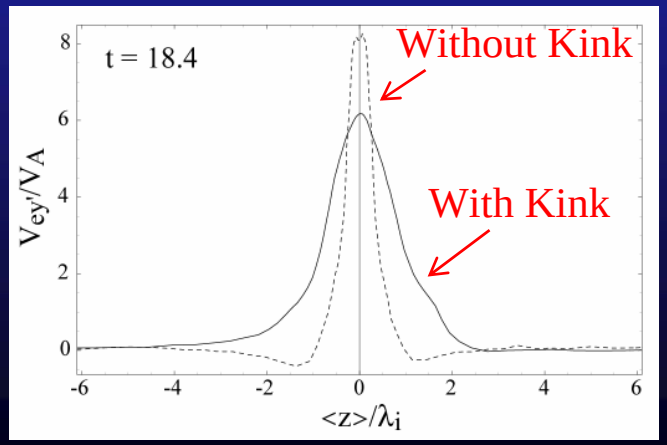


$$E_R \equiv -\frac{1}{L_y}\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{1}{L_y}\oint_C \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{1}{L_y}\int_A^{A'} \vec{E}\cdot d\vec{l}$$

$$\Phi = \int_S |B_x| dS$$







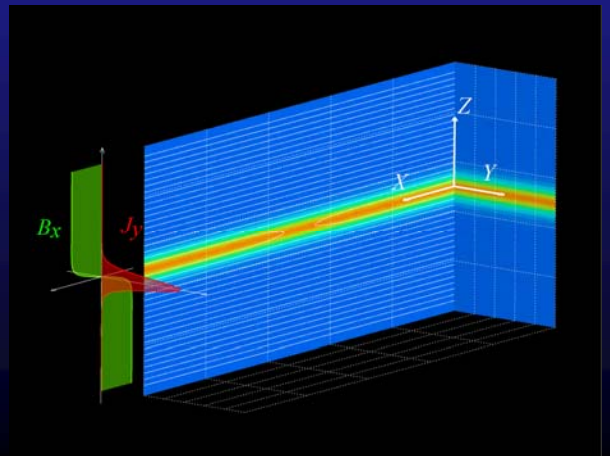
$$E_{R,kink} \approx \left(\frac{V_{e,kink}}{V_{e,nokink}}\right)^2 \times E_{R,nokink}$$

Generalized Ohm's low

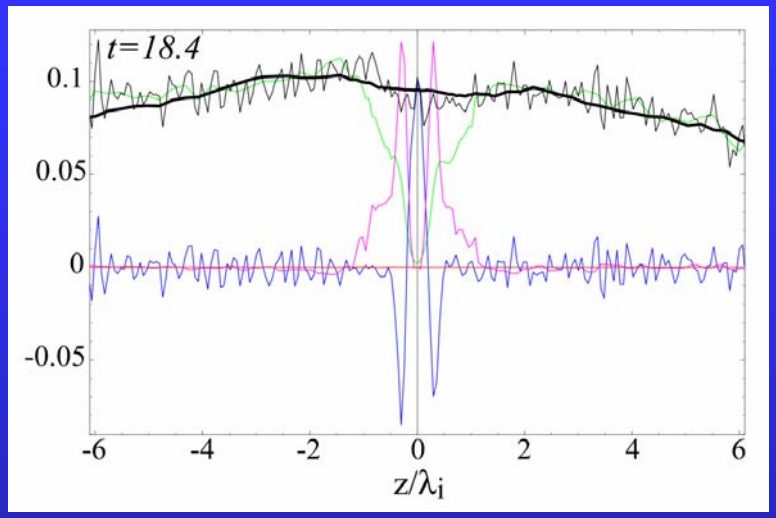
$$
\begin{aligned}
\langle -E_y \rangle = & \frac{1}{\langle n_e \rangle} \left(\left\langle n_e \vec{V}_e \right\rangle \times \left\langle \vec{B} \right\rangle \right)_y \\
& + \frac{1}{e \langle n_e \rangle} \left\langle \left(\nabla \cdot \vec{P}_e \right)_y \right\rangle \\
& + \frac{m_e}{e \langle n_e \rangle} \left\langle \frac{\partial V_{ey}}{\partial t} + \vec{V}_e \cdot \nabla V_{ey} \right\rangle \\
& + \frac{1}{\langle n_e \rangle} \langle \delta n_e \delta E_y \rangle \\
& + \frac{1}{\langle n_e \rangle} \left\langle \left\{ \delta (n_e \vec{V}_e) \times \delta \vec{B} \right\}_y \right\rangle
\end{aligned}
$$

Anomalous effects

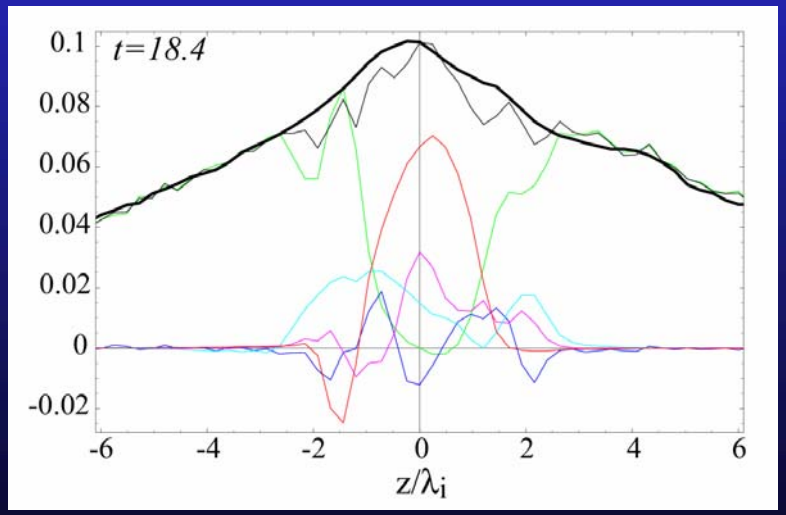
$$
\langle \cdot \rangle = \frac{1}{l_y} \int_0^{l_y} \cdot \, dy
$$



3D without kink



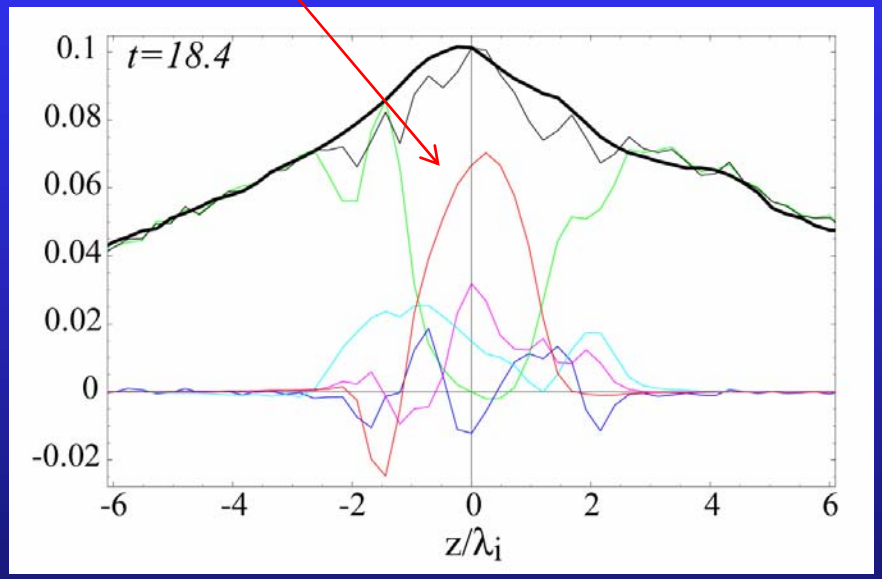
3D with kink

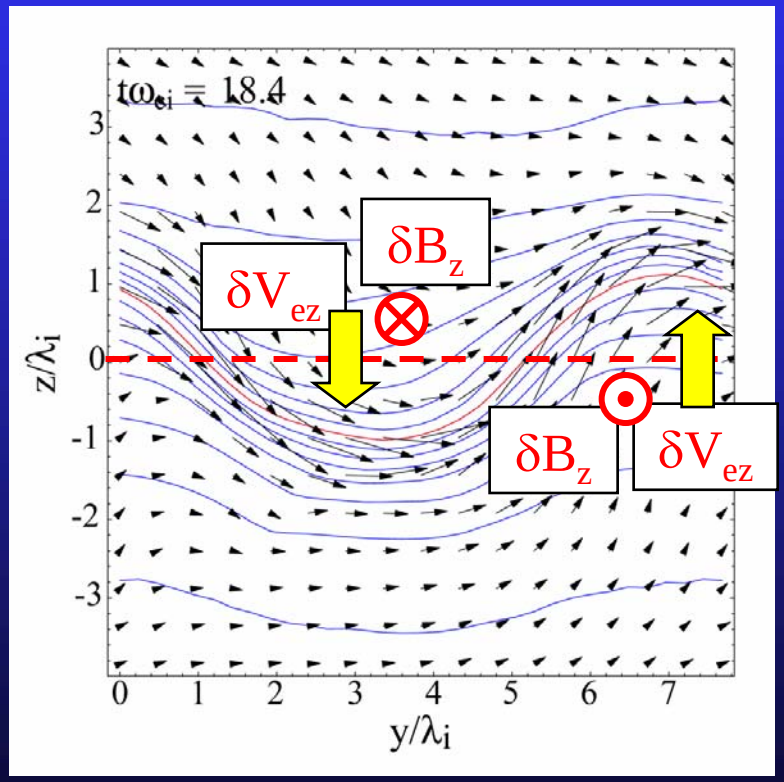


異常抵抗項

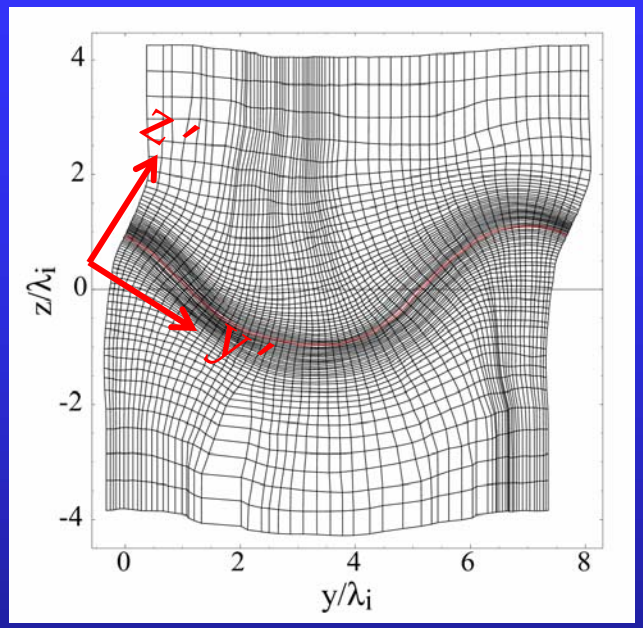
$$\frac{1}{\langle n_e \rangle}\langle \delta(n_e V_{ez})\delta B_x \rangle - \frac{1}{\langle n_e \rangle}\langle \delta(n_e V_{ex})\delta B_z \rangle$$

電流層に向かって電子の流入がある。





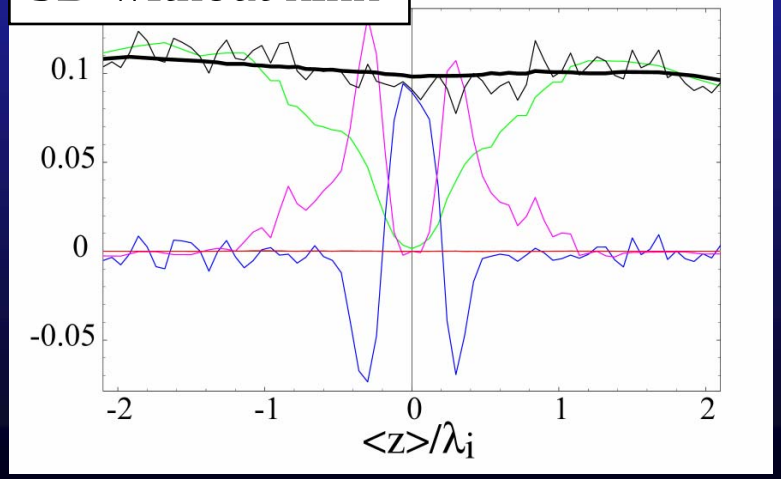
磁場等値線を軸とする座標系

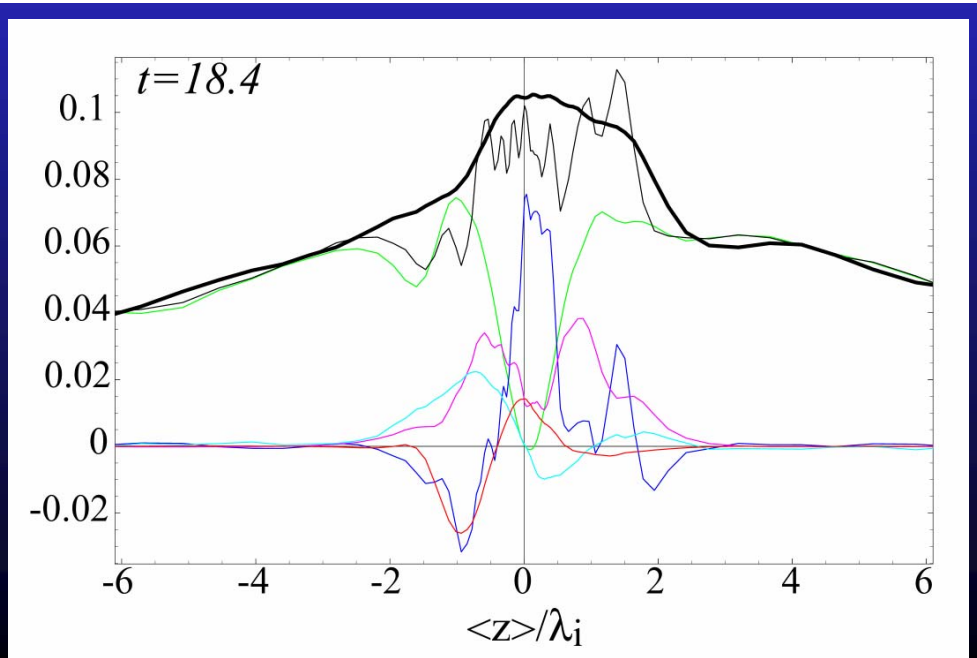


$$\langle -E_{y'} \rangle = \frac{1}{\langle n_e \rangle} \left(\langle n_e \vec{V}_e \rangle \times \langle \vec{B} \rangle \right)_{y'} + \frac{1}{e \langle n_e \rangle} \left\langle \left(\nabla \cdot \vec{P}_e \right)_{y'} \right\rangle + \frac{m_e}{e \langle n_e \rangle} \left\langle \frac{\partial V_{ey'}}{\partial t} + \vec{V}_e \cdot \nabla V_{ey'} \right\rangle + \frac{1}{\langle n_e \rangle} \langle \delta n_e \delta E_{y'} \rangle + \frac{1}{\langle n_e \rangle} \langle -\delta(n_e V_{ex}) \delta B_{z'} \rangle \; (\delta B_x = 0)$$

$$\langle \cdot \rangle = \frac{1}{l_y} \int_0^{l_{y'}} \cdot \, dy'$$

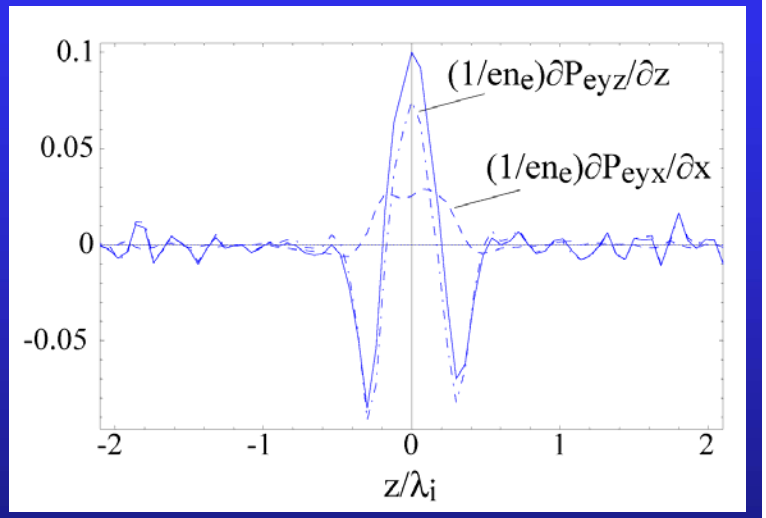
3D without kink

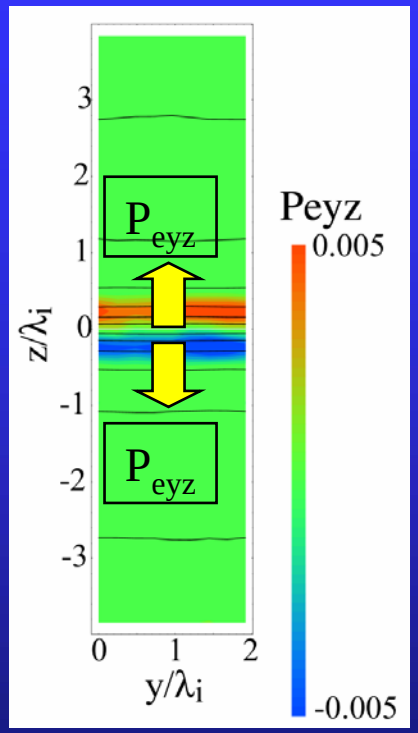


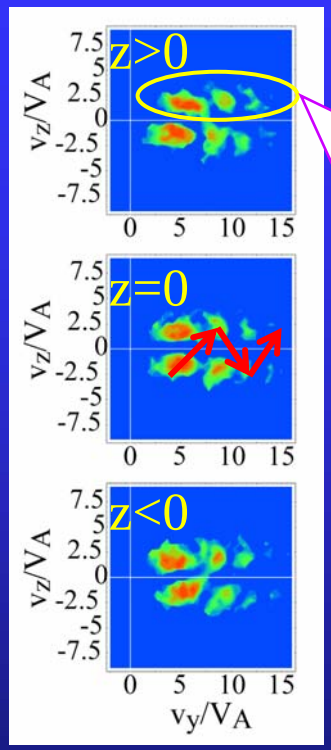


電子の圧力発散項:キンクモードが無い場合

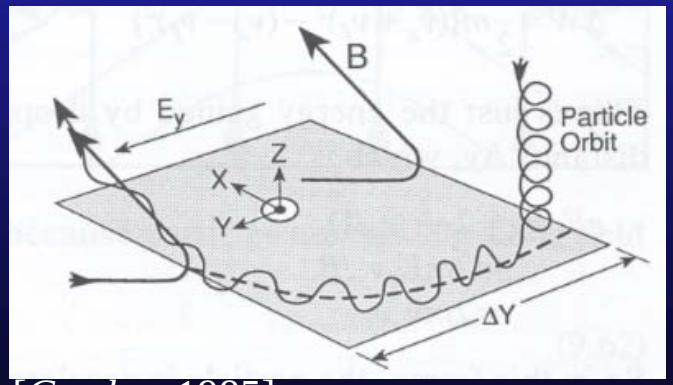
$$(\nabla \cdot \vec{P}_e)_y \approx \frac{\partial P_{eyx}}{\partial x} + \frac{\partial P_{eyz}}{\partial z}$$







加速された粒子が磁気拡散領域から流出する。

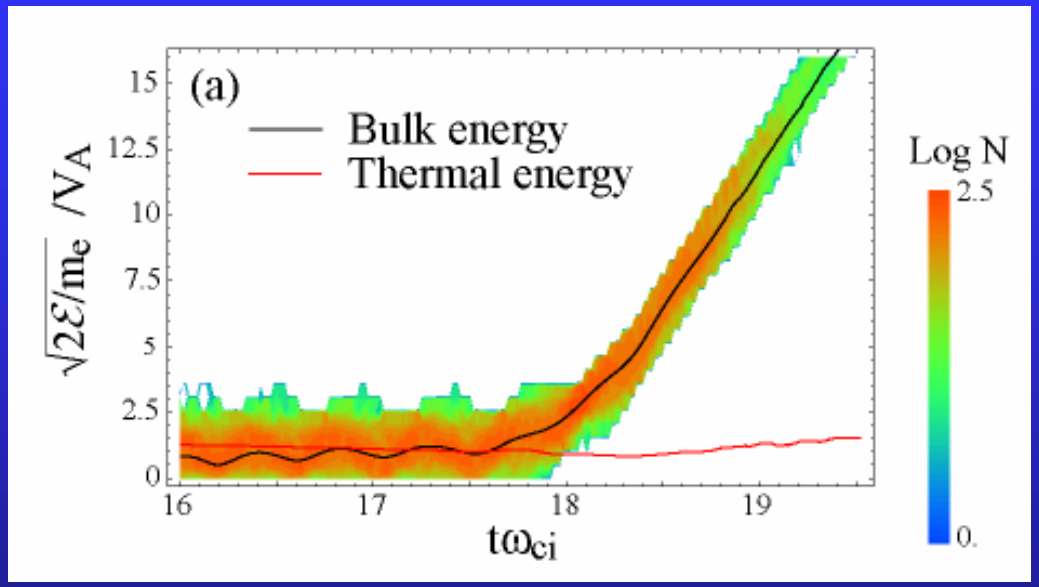


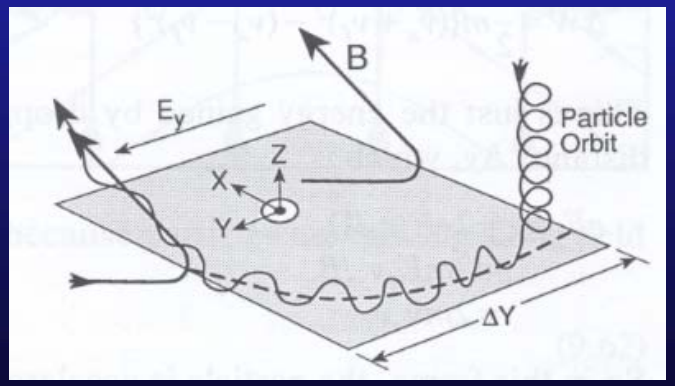
[*Cowley*, 1985]

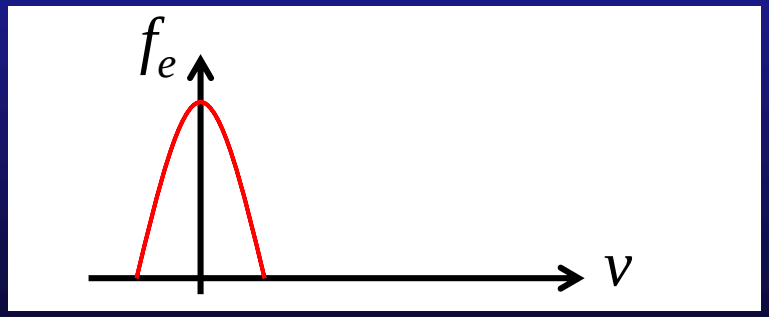
➢ 電子による慣性抵抗 [*Speiser*, 1970]

$$\eta = \frac{m_e}{n_e e^2}\frac{1}{\tau}, \qquad \tau \sim \frac{l}{V_e}$$

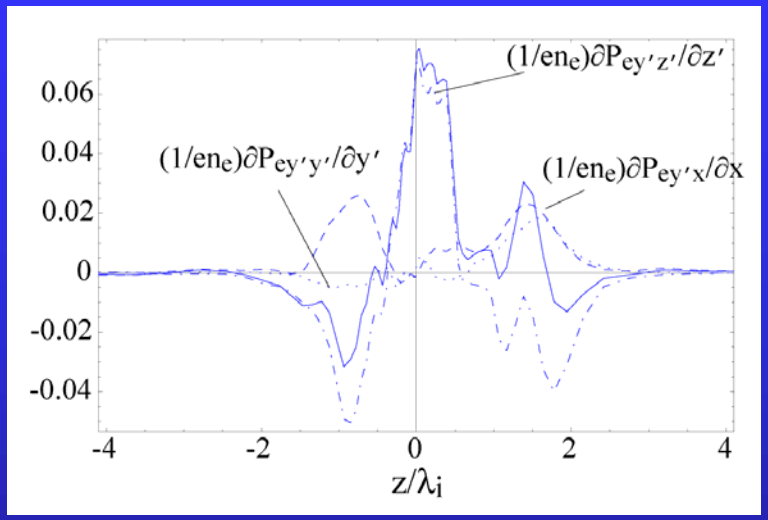
電子加速：キンクモードが無い場合

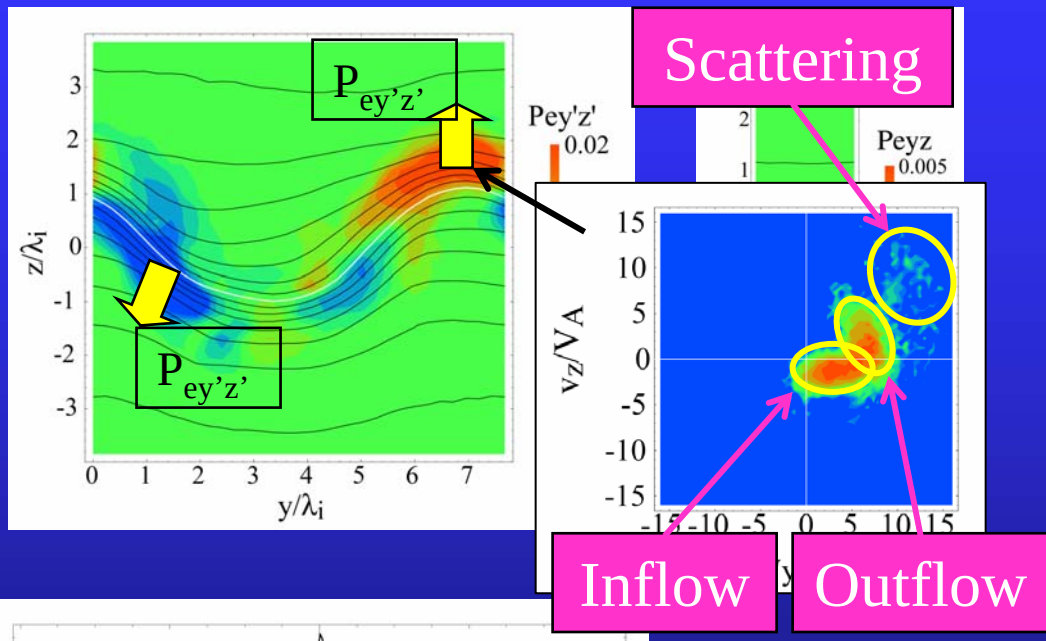


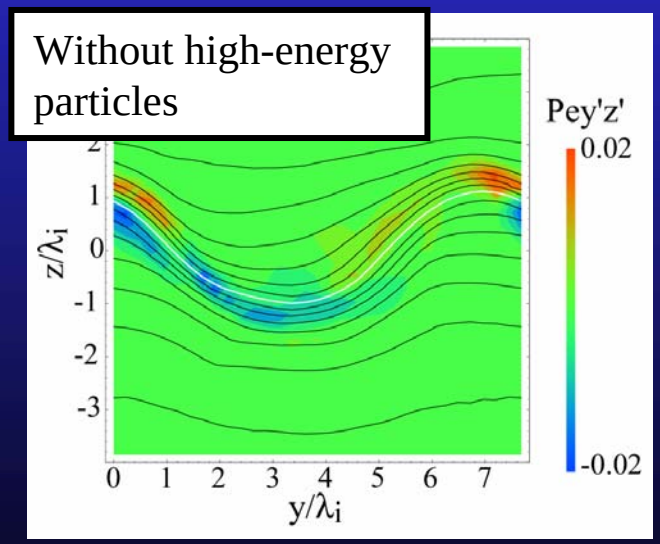


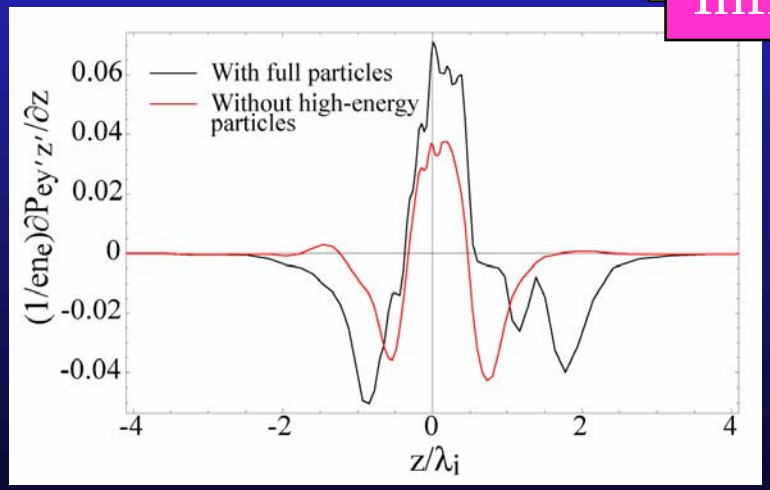


電子の圧力発散項:キンクモードがある場合

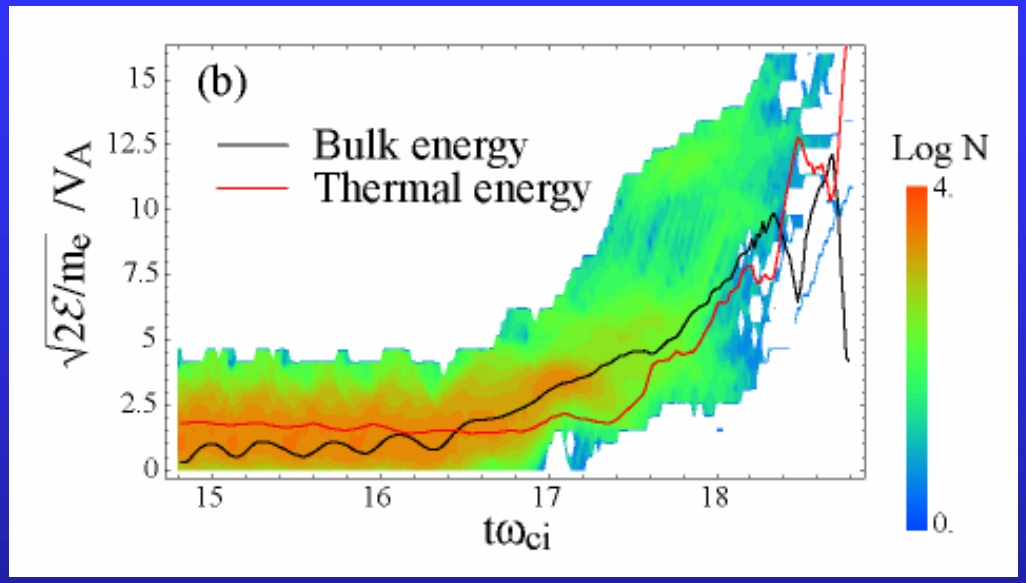


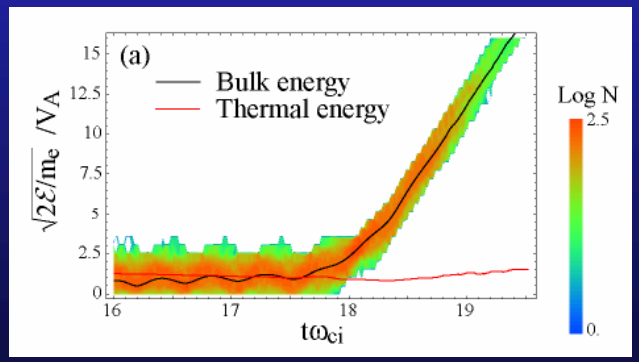




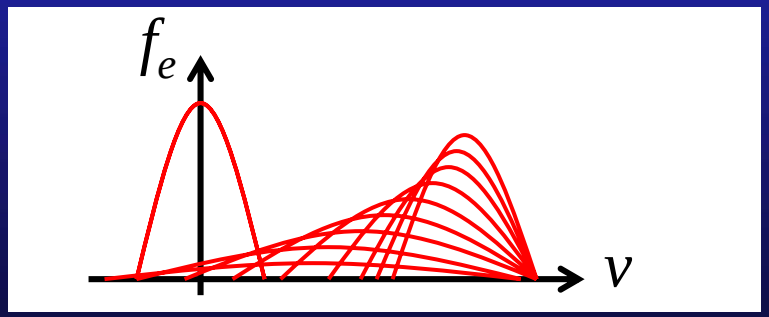


電子加速：キンクモードがある場合

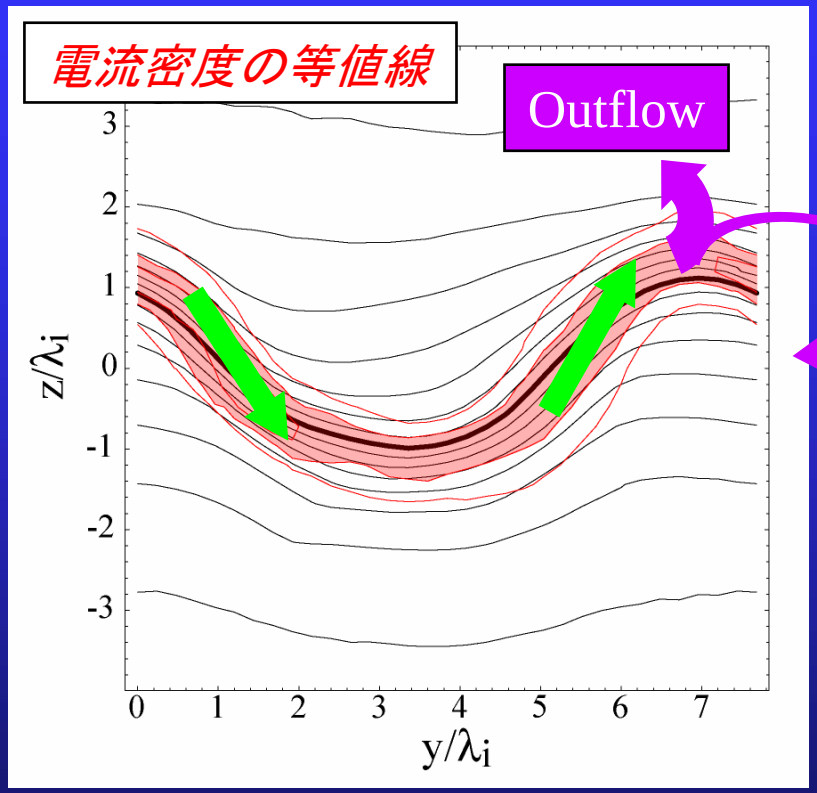


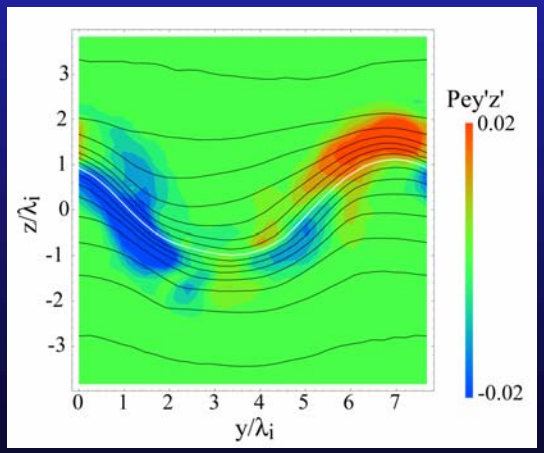


（キンクモードがない場合）

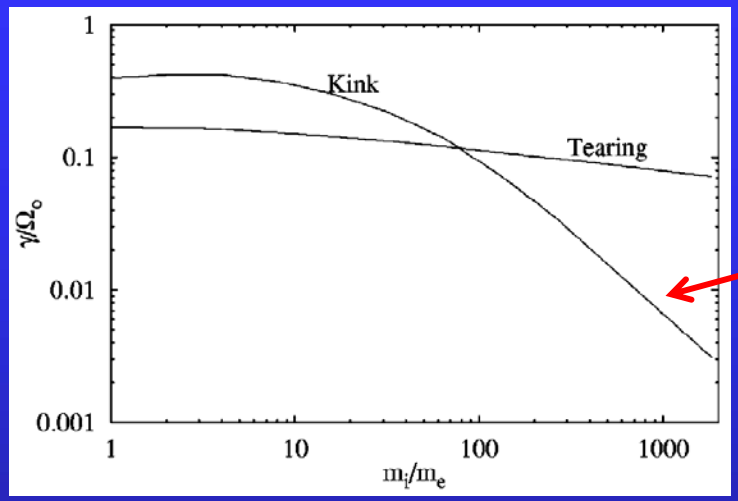


運動量輸送メカニズム


電流密度の等値線
Outflow
Scattering
z/λi
y/λi
3
2
1
0
-1
-2
-3
0
1
2
3
4
5
6
7

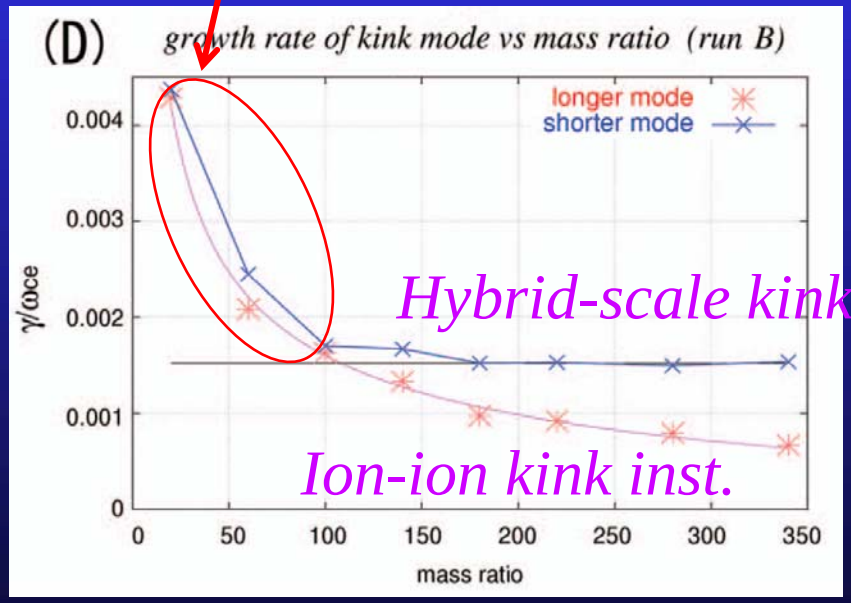

Pey'z'
0.02
-0.02
z/λi
y/λi
3
2
1
0
-1
-2
-3
0
1
2
3
4
5
6
7

キンクモードの質量比依存性



[*Daughton*, 1999]

Drift kink instability (DKI)



[*Moritaka and Horiuchi*, 2008]

Longer mode

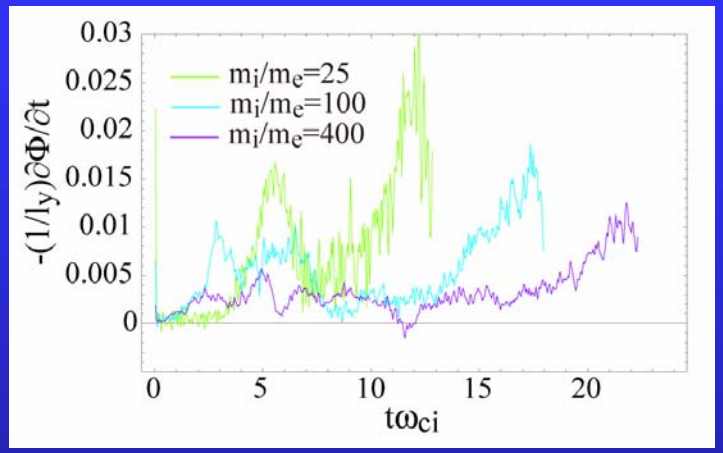
$$k\lambda \sim 1$$

Shorter mode

$$k\sqrt{\lambda_i \lambda_e} \sim 1$$

YZ平面における2Dシミュレーション

[Diffusion Rate]



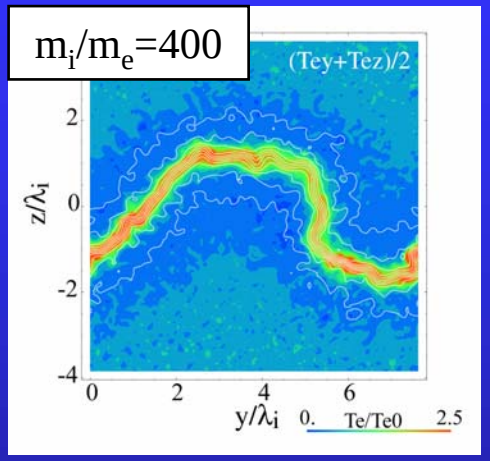
磁気拡散率

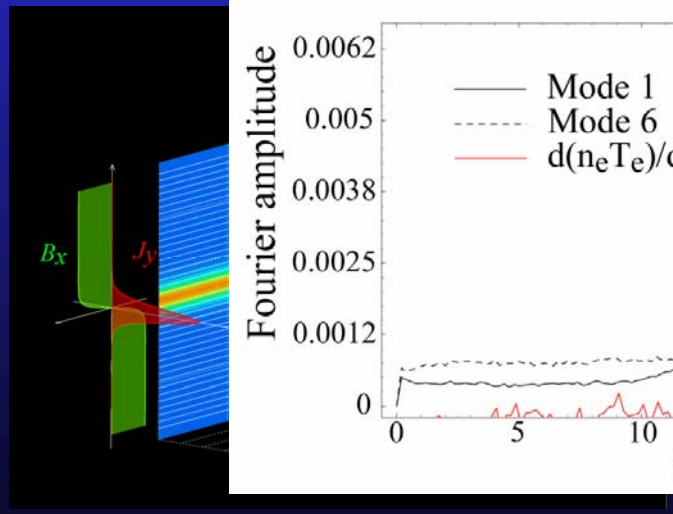
$$\text{Diff. rate} \equiv -\frac{1}{L_y}\frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

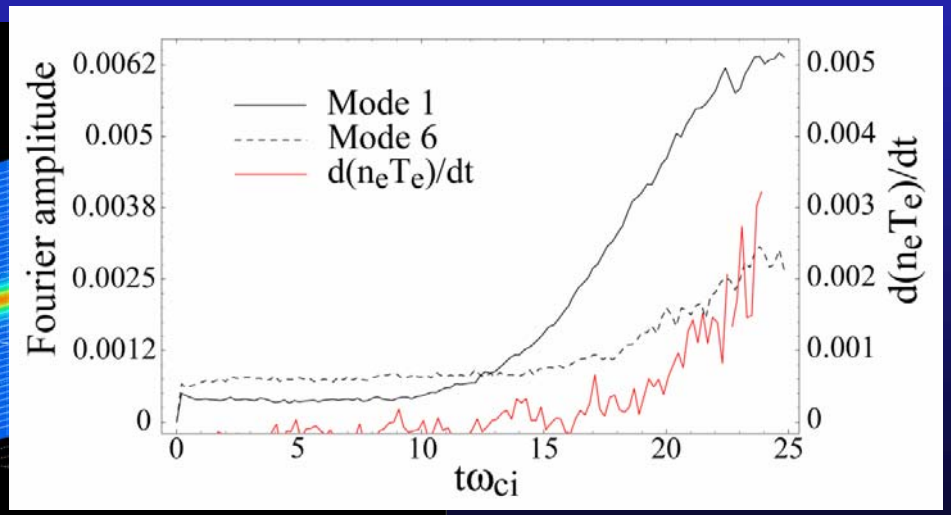
磁気フラックス

$$\Phi = \frac{1}{2}\int_S |B_x| dS$$

[Electron Temperature]







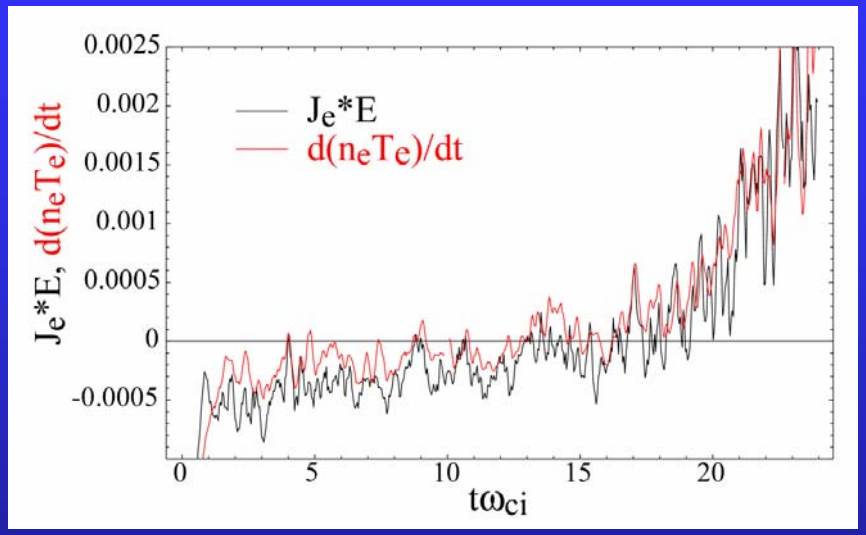
Hybrid-scale kink mode:

$\lambda \sim (\lambda_i \lambda_e)^{1/2}$

⬇

電子加熱

質量比がより大きい場合（m_i/m_e>100、2D-YZ plane）



$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{B^2}{2\mu_0}+\frac{\varepsilon_0 E^2}{2}\right) \approx -\vec{J}_e\cdot\vec{E}$$

$$\approx -\frac{\partial(n_eT_e)}{\partial t}$$

磁気エネルギー

Hybrid-scale kink mode

プラズマ熱エネルギー

まとめ

- キンクモードとリコネクションは共存し得る。リコネクション電場によって加速されたイオンによって維持される。
- キンクモードによって、電流層の幅が広がるにもかかわらず高速磁気リコネクションが実現される。一部の電子が強く加速・散乱されることによって大きな磁気拡散を維持している。
- 質量比が大きい場合には、hybrid-scaleのキンクモードによって電子散乱が起きると考えられる。
- リコネクション効率は、大規模なイオンスケールの構造によって決定され、電子の運動はその構造に合うように調節されているのかもしれない。