

宇宙空間における磁気リコネクション

Magnetic reconnection in space:
PIC simulation and spacecraft observation

銭谷 誠司

2019.7.17 CPSセミナー

目次

- ・ 1. はじめに
- ・ 2. プラズマ粒子シミュレーション研究
- ・ 3. MMS衛星群によるプラズマ観測
- ・ (4. PIC シミュレーションの数値解法研究)

1. はじめに

リコネクションとは？

Google 検索結果

リコネクション - Google 検索

https://www.google.com/search?client=safari&rls=en&ei=MVo...

検索

ログイン

すべて 動画 画像 ショッピング ニュース もっと見る 設定 ツール

約 5,420,000 件 (0.33 秒)

リコネクションとは リコネクション スペース クローバー
www.re333connect.com/reconnection/reconnection02.html

リコネクション®とは。リコネクション® (Reconnection®) とは、一生に一度きりのパワフルなセッションです。本来、私たちに備わっていた宇宙とのつながりが、ある時から切り離されてしましました。その結果、迅速で拡張的な私たちの進化の速度から遠ざかって...。

リコネクション®/リコネクティブ・ヒーリング®なら西川口ミ 東京
nishikawaromi.com/

東京、大阪で提供中。海外および日本のリコネクションセミナーで、Dr. エリック・パールのティーチング・メンバーとして活動実績が豊富。リコネクションの最新情報がわかります。リコネクションは、自分の本当の豊かさと繋がり人生の進化をサポートしてくれます。

リコネクション® リコネクティブ・ヒーリング®
nishikawaromi.com/reconnection-and-reconnective-healing.html

日本では、2006年の日本語版“リコネクション”の出版、そして今もなお、世界的に拡がりをみせています。世界各国で10万人が受講しています。（リコネクティブヒーリング）

リコネクション®ジャパン
reconnecting-japan.jp/

2019/01/23 - エリック・パール 2019年新春・日本向けウエビナー『人生初の神秘体験』（2019年・1月19日収録/ 日本語）

リコネクション 対面セッションのみ おススメ！ 一生に一度のリコネクション 約60分X2回 54, 333円 連続した（もしも）

リコネクション
 ション: 人
 を癒し、
 自分を癒す
 エリック・パールによる本
 この書籍はいかがでしたか?

The Reconnection
人間の精神エネルギー
リコネクション
ERIC RABINOVITCH

• 宇宙とつながり、自分を癒す
スピリチュアルな何からしい
• 『人生初の神秘体験』
『予想外のヒーリング』 ...

“磁気”リコネクション

Google 検索結果 - 約 218,000 件 (0.26 秒)

磁気リコネクション (じきリコネクション、英: Magnetic reconnection) (磁気再結合) は高い伝導性を持つプラズマ中で磁場のトポロジーが再配置され、磁場のエネルギーが運動エネルギーや熱エネルギーに変換される物理過程である。

[磁気リコネクション - Wikipedia](https://ja.wikipedia.org/wiki/磁気リコネクション)
<https://ja.wikipedia.org/wiki/磁気リコネクション>

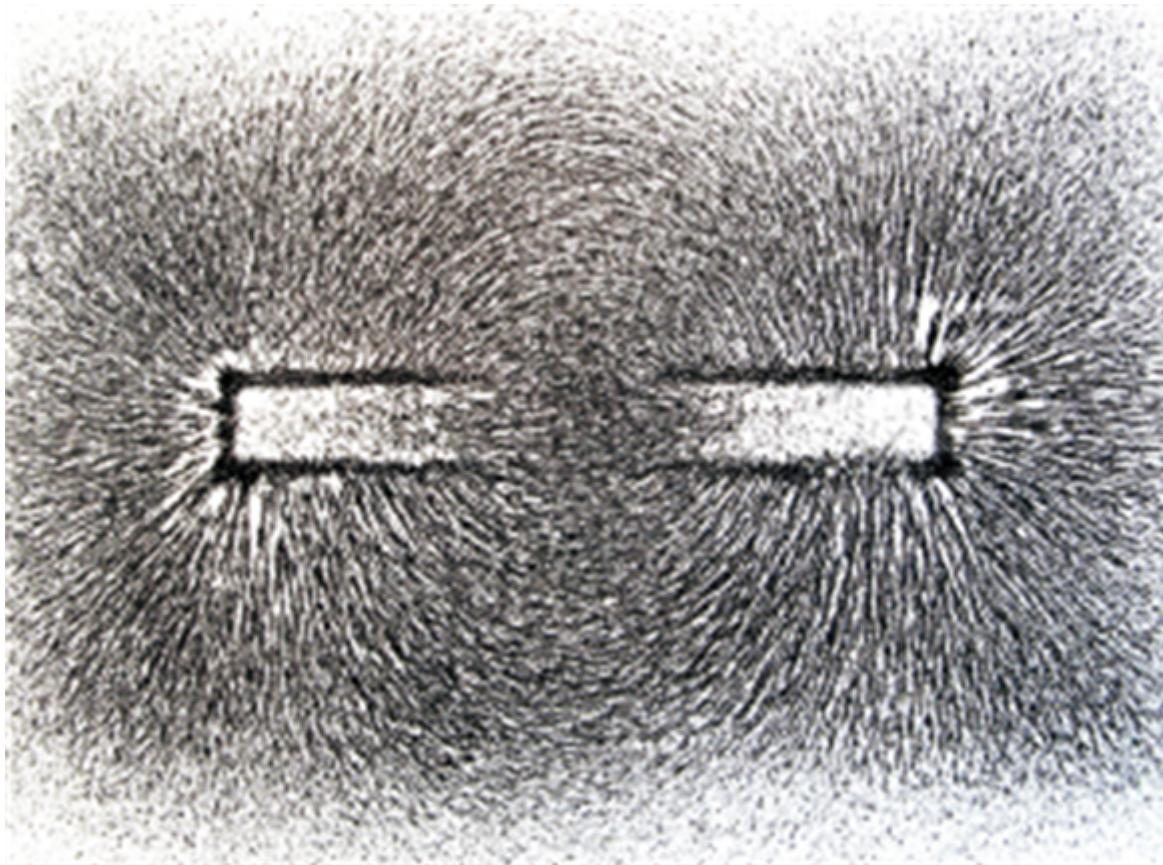
磁気リコネクション (じきリコネクション、英: Magnetic reconnection) (磁気再結合) は高い伝導性を持つプラズマ中で磁場のトポロジーが再配置され、磁場のエネルギーが運動エネルギーや熱エネルギーに変換される物理過程である。磁気リコネクションが起こる時間スケールは磁気拡散の時間とアルヴェーン波の伝搬時間の間である。 [ウィキペディア](#)

[PDF] 教養学部生のための磁気リコネクション入門 - 高瀬・江尻研究室 - 東京大学
fusion.k.u-tokyo.ac.jp/information/MagneticReconnection.pdf

2007/05/11 - 教養学部生のための磁気リコネクション入門. (磁気リコネクション 磁気再結合 Magnetic Reconnection). (磁気リコネクション、磁気再結合、Magnetic Reconnection). 東京大学大学院新領域創成科学研究科. 江尻晶. H19年度全学自由 ...

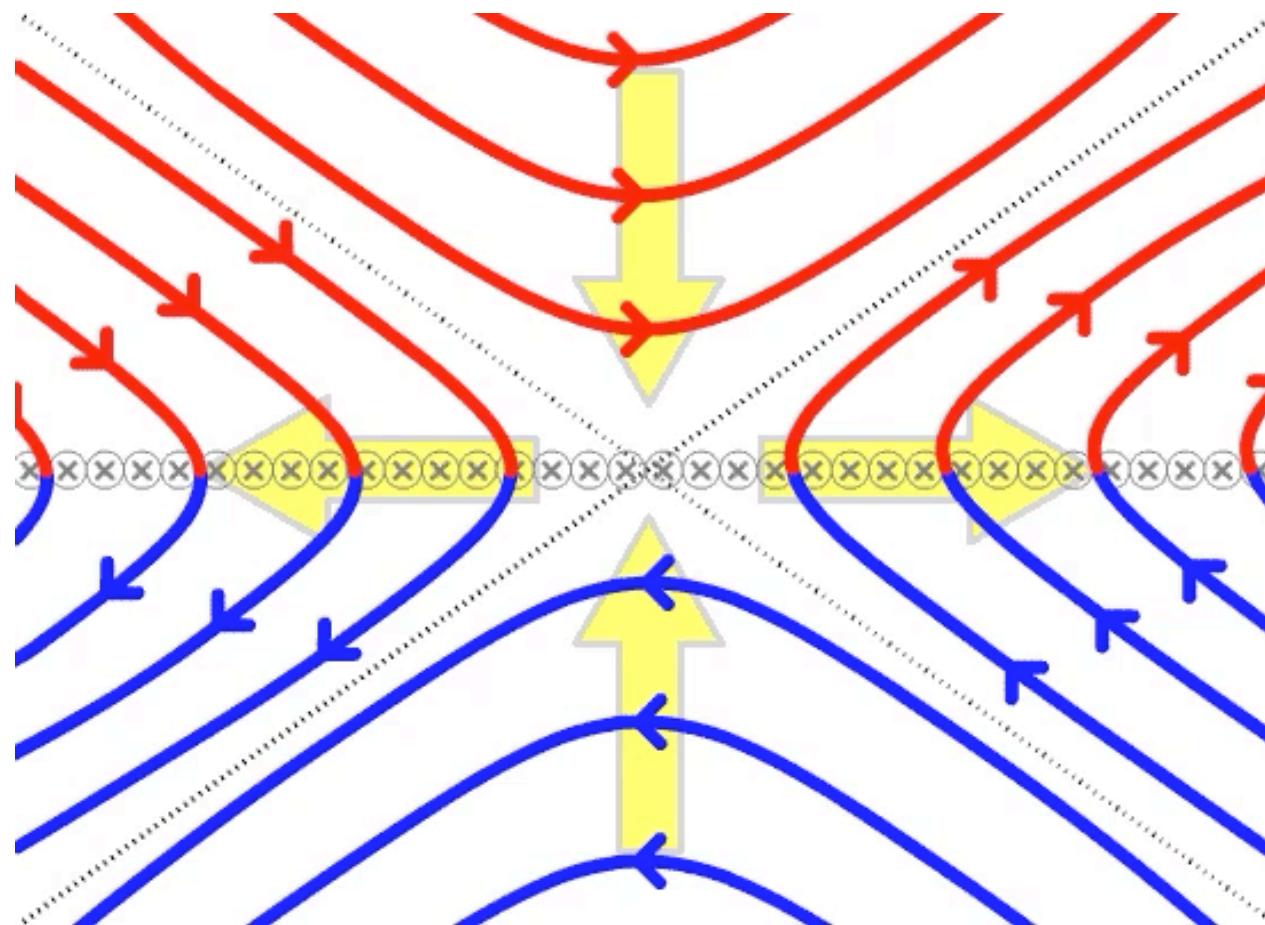
運動論磁気リコネクション — pCANS 1.4 ドキュメント
www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/pCANS_1.4/ ドキュメント、物理課題、2次元課題 ...

磁力線



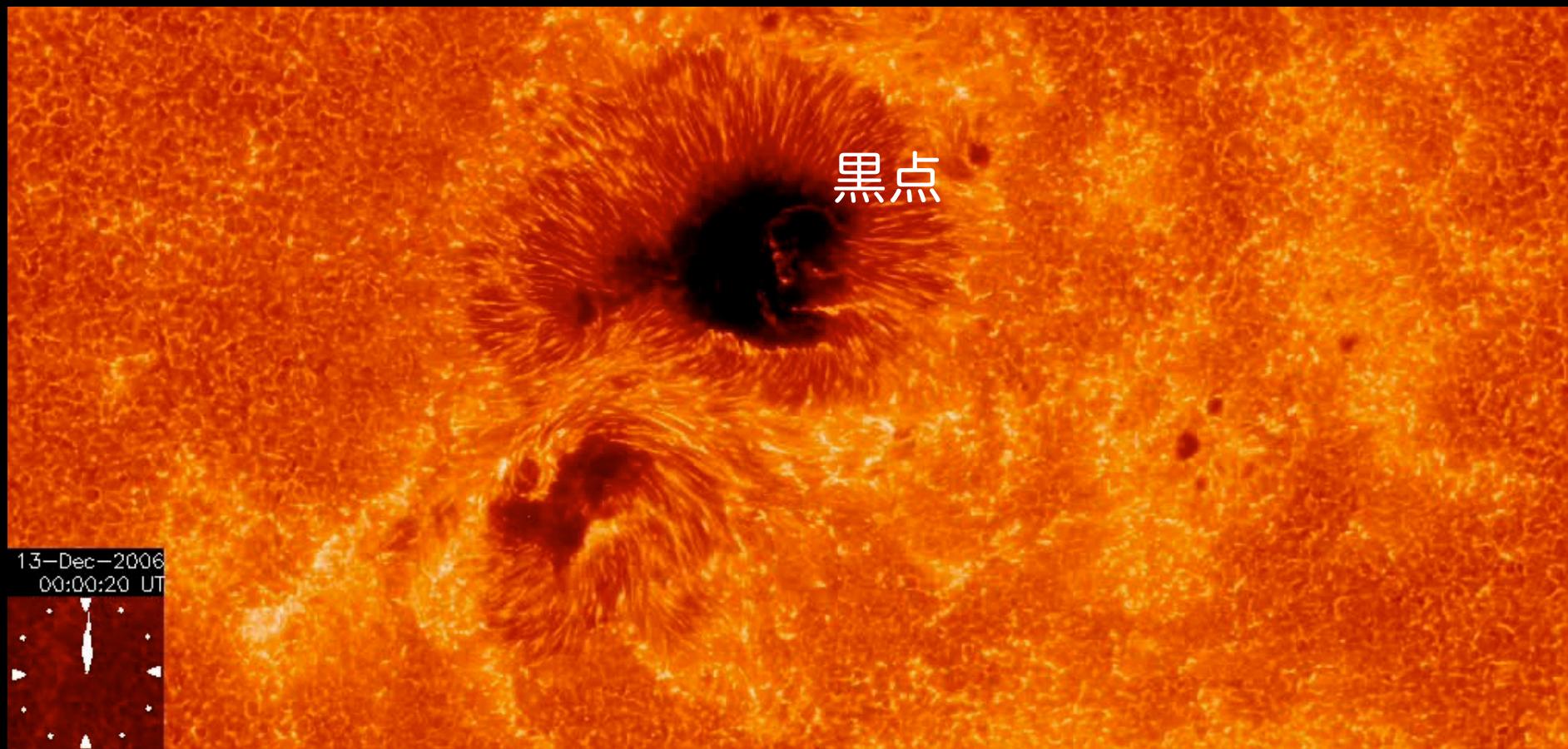
- 磁場をたどった仮想的な線 = 磁力線

磁気リコネクション



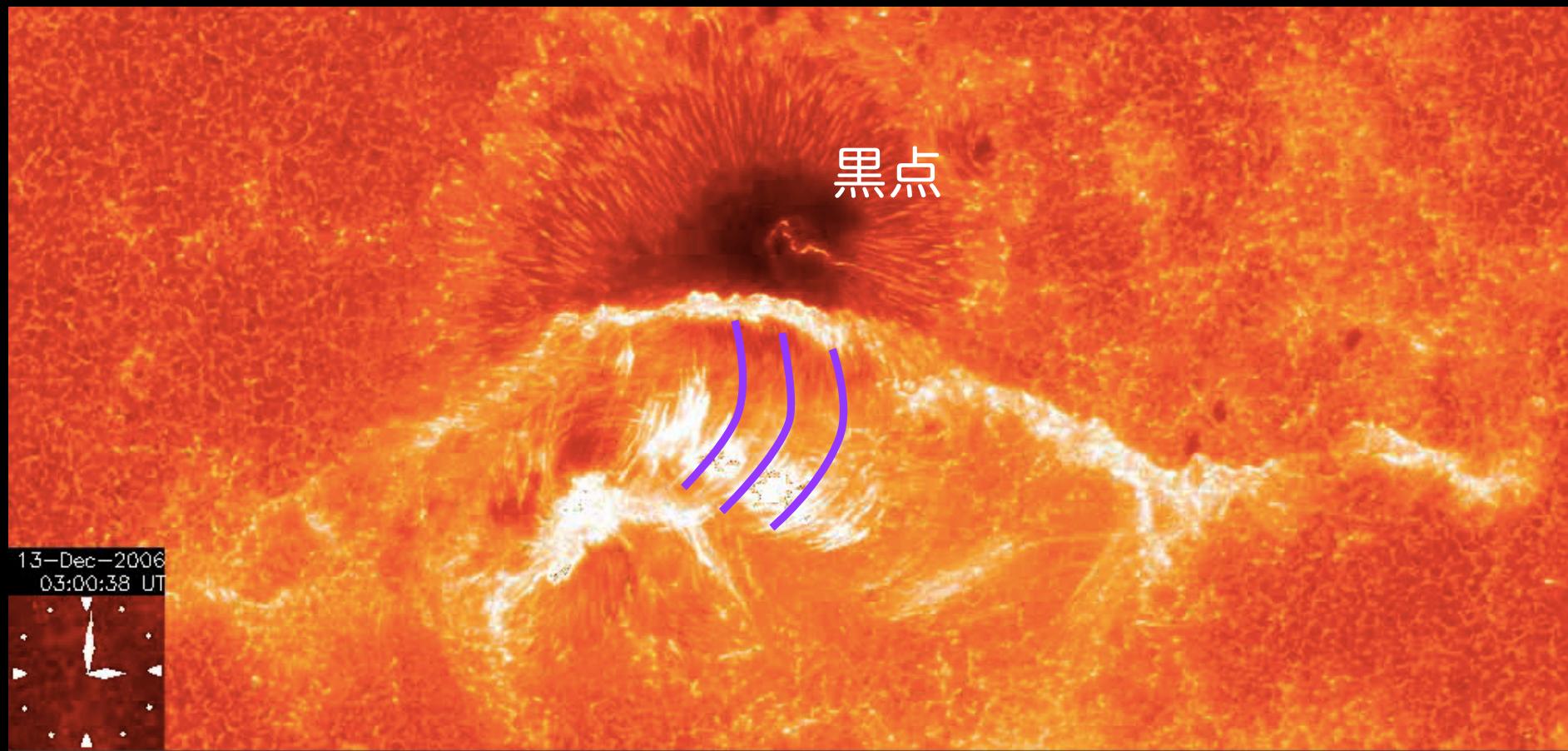
- 磁力線が激しくつなぎ変わる現象

太陽フレア - 「ひので」の観測



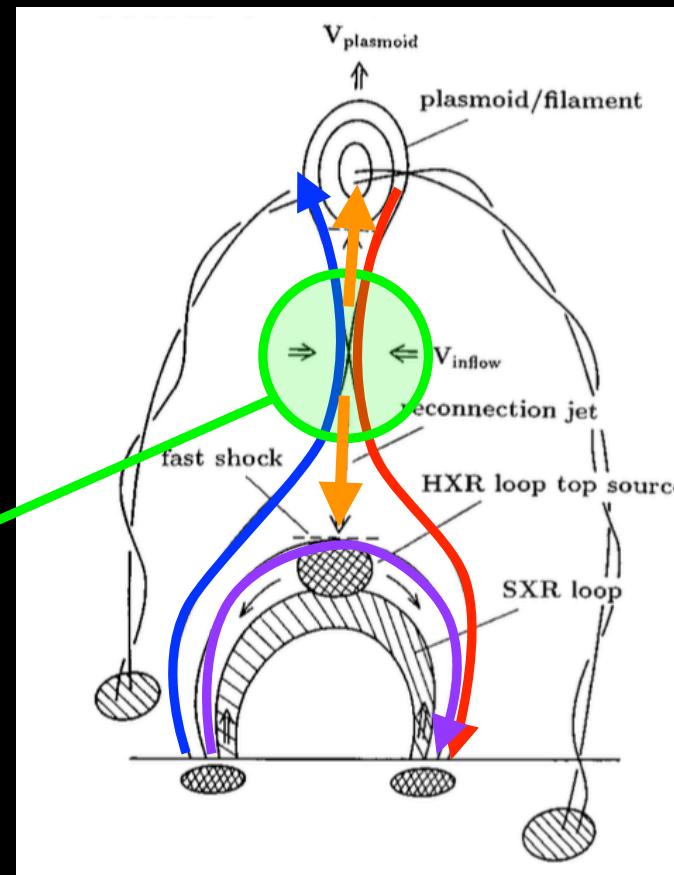
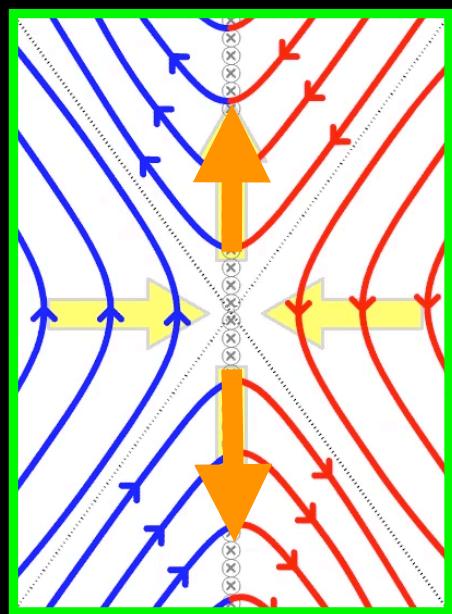
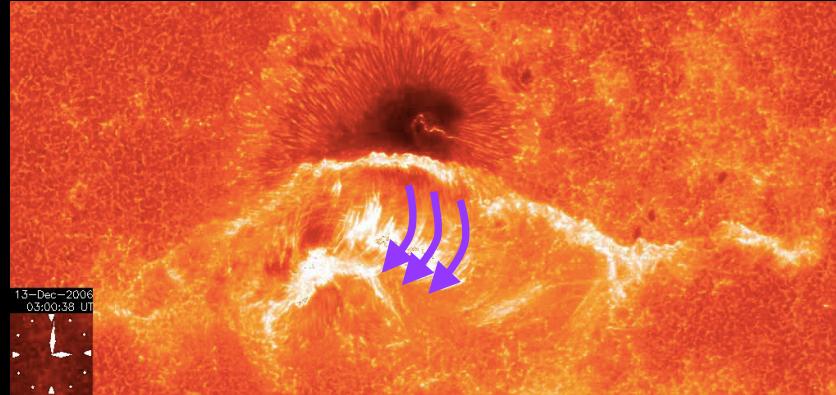
- 磁力線が見えますか？

太陽フレア - 「ひので」の観測



- ループ型構造

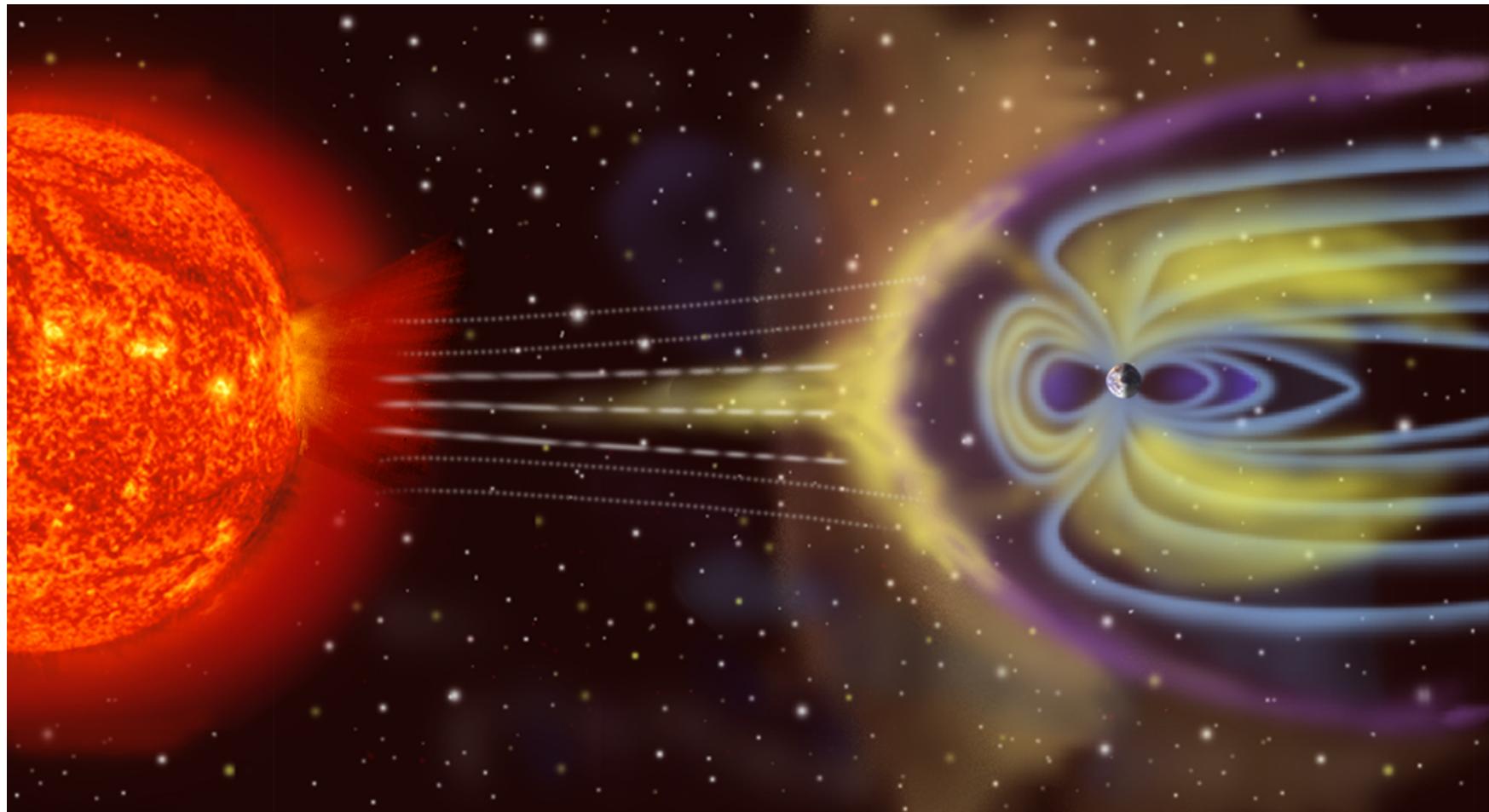
磁気リコネクション



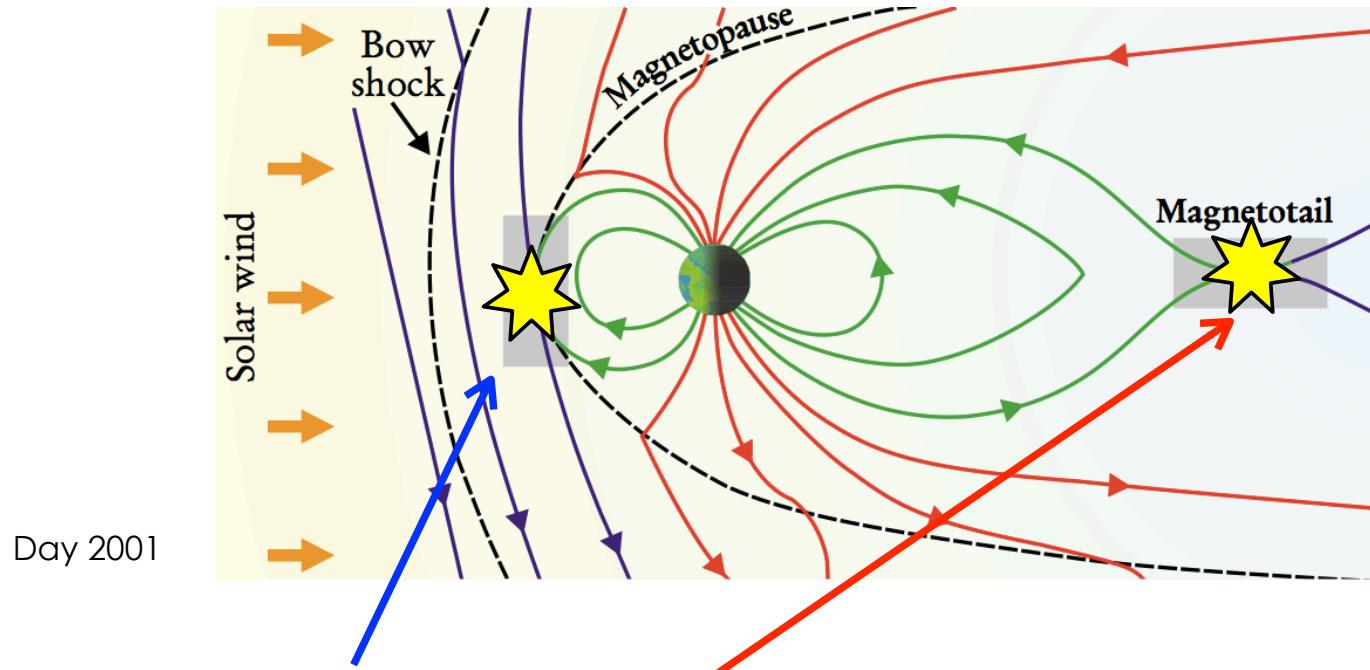
Shibata 1995

太陽風と惑星磁気圏の相互作用

- ・ 太陽風：太陽から吹きつける高速のプラズマ流
- ・ 多くの惑星は固有磁場に守られた「磁気圏」を持っている



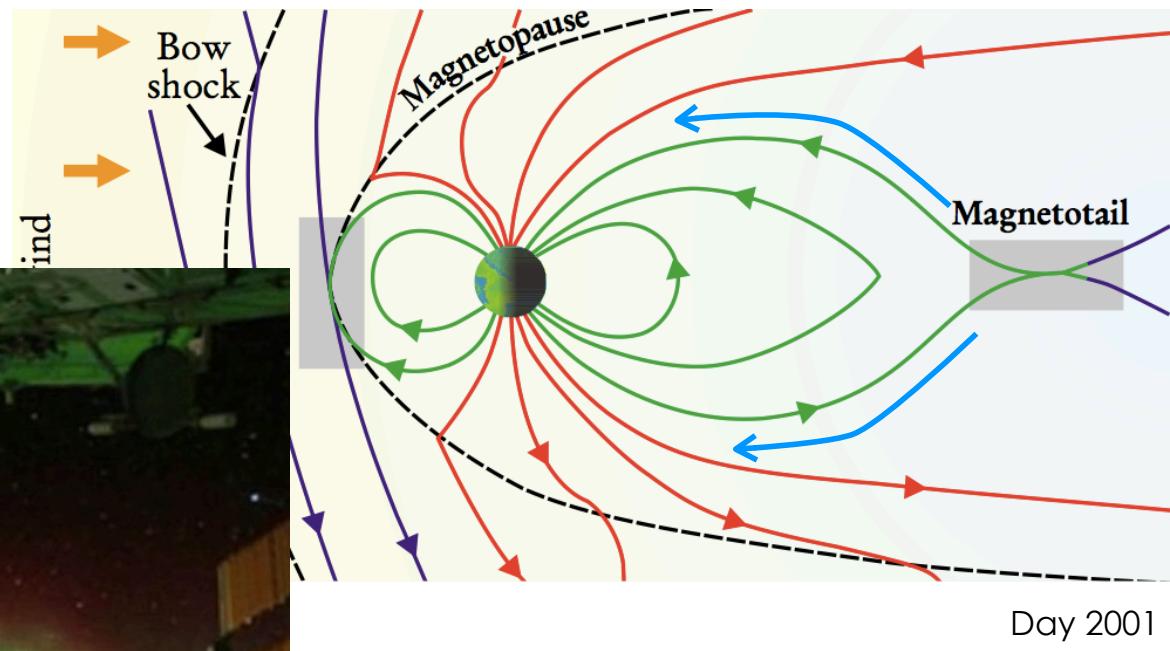
地球磁気圏のリコネクション領域



- 磁気圏昼側
 - 太陽風磁場の向き・強さに依存する変則的なリコネクション
- 磁気圏夜側
 - 磁力線が後ろに引き伸ばされた反平行型のリコネクション

夜側リコネクション → オーロラ

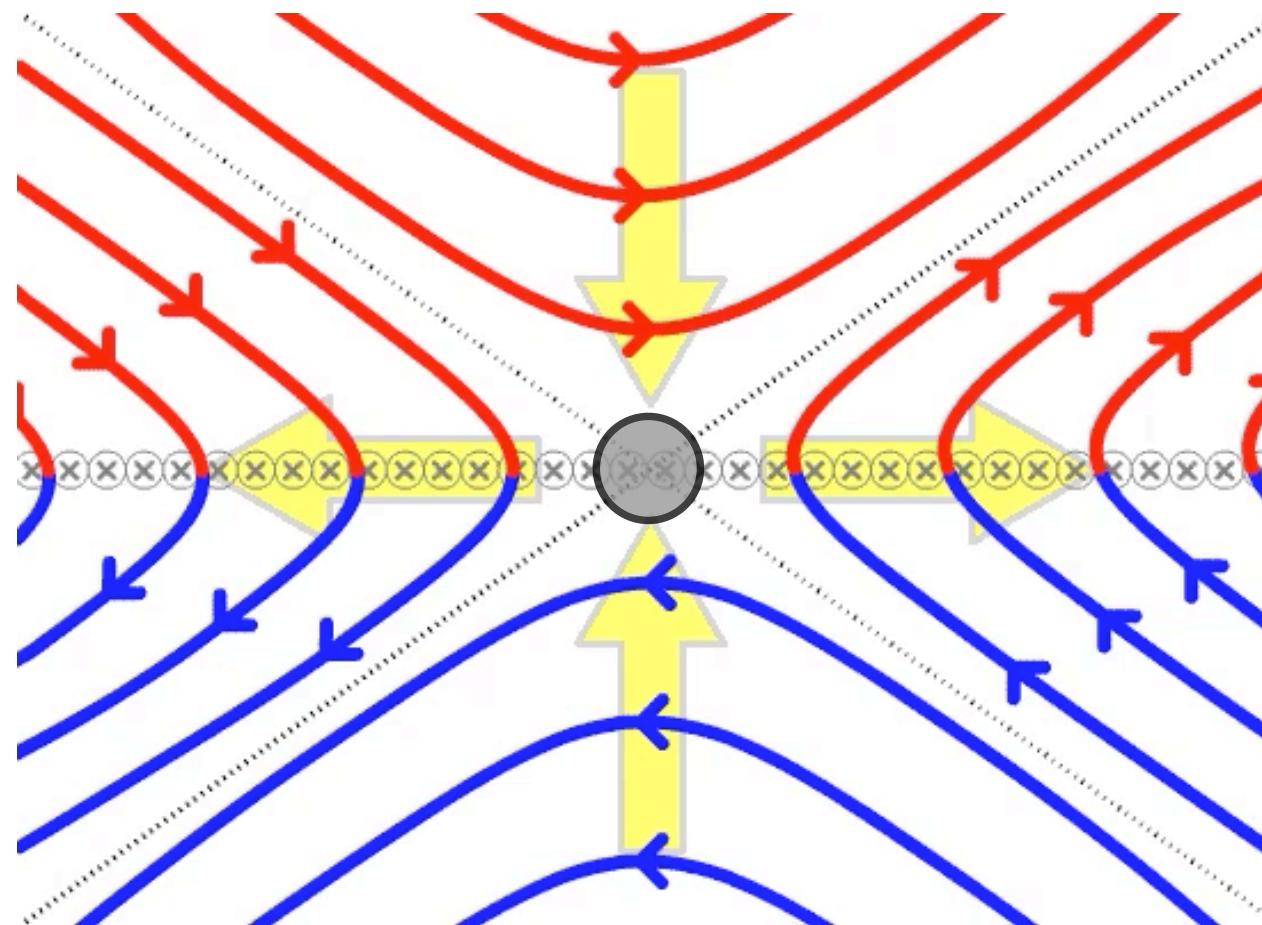
国際宇宙ステーションから
NASA, 2011



Day 2001

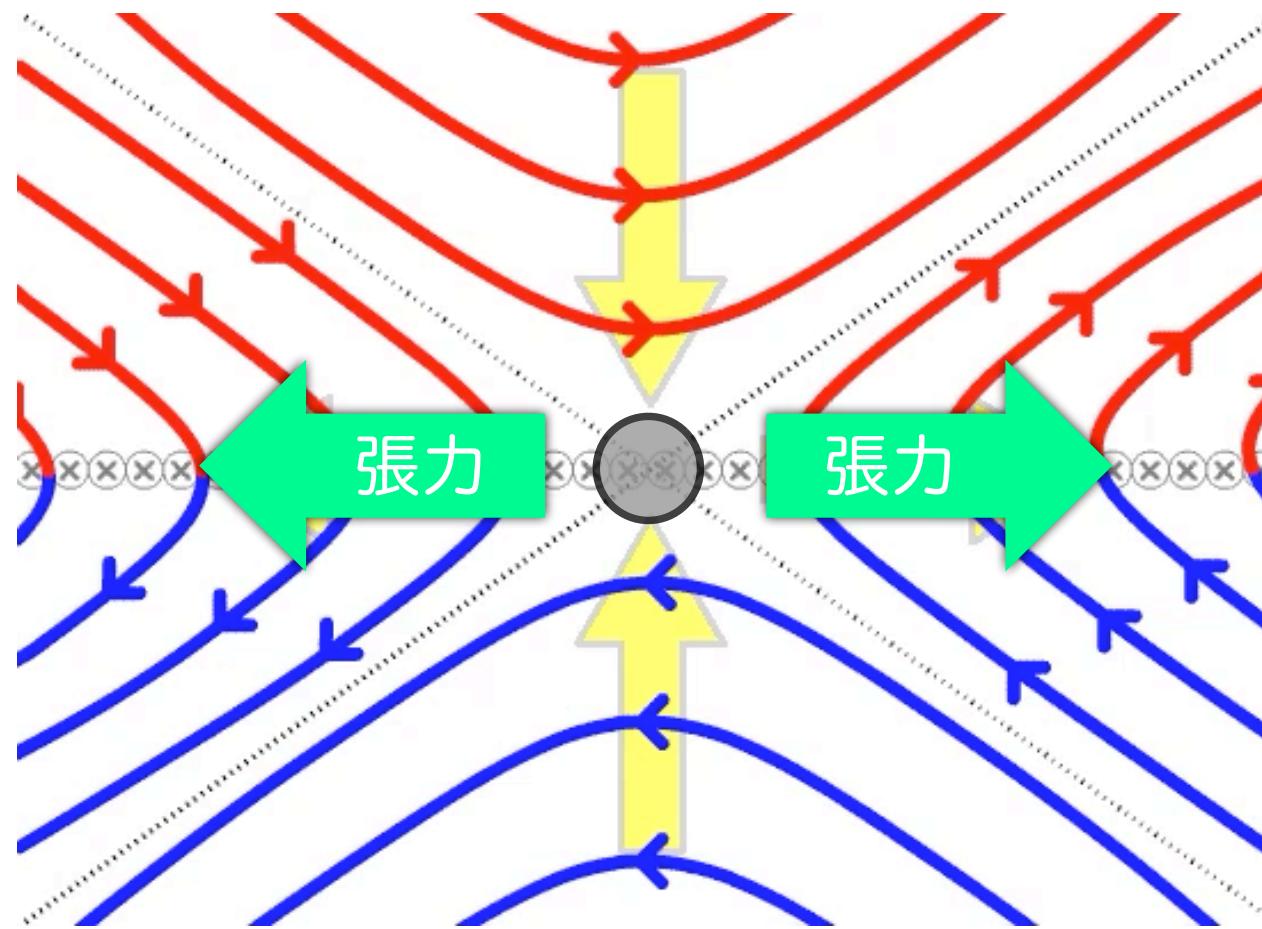
- 磁気リコネクションによって
弾き飛ばされたプラズマ（電子）
が極域に降り注ぐ
- 大気上層の酸素原子と衝突し、
励起状態から戻るときに発光

磁気リコネクション



- 何らかのメカニズムで磁力線がつなぎ変わる

磁気リコネクション

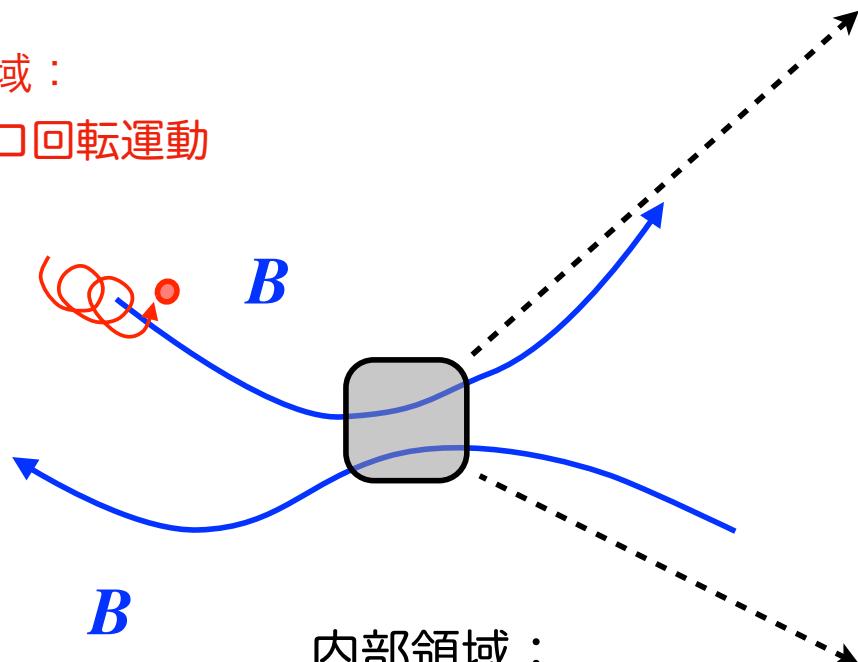


- 磁力線の張力がプラズマをはじき飛ばす → プラズマのジェット

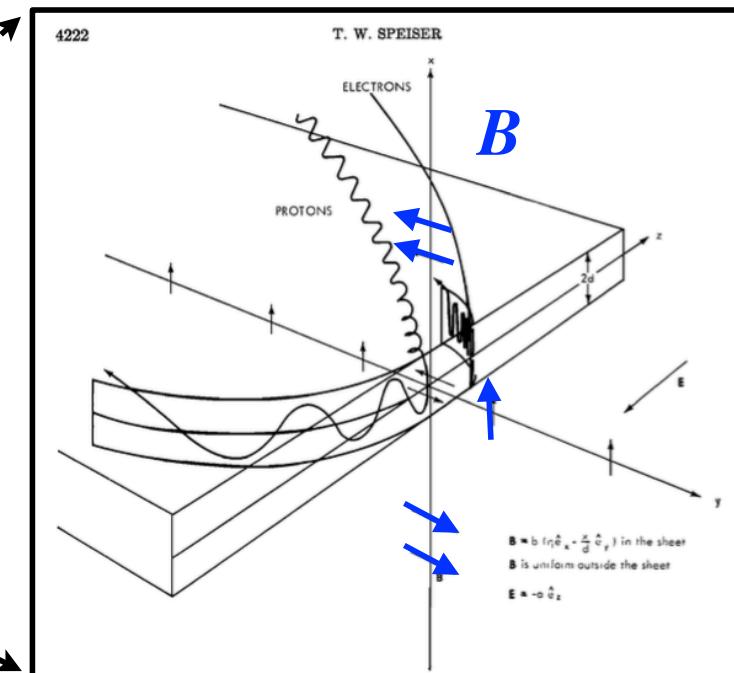
「何らかのメカニズム」

= プラズマの集団運動論効果

外部領域：
ジャイロ回転運動



内部領域：
複雑な粒子軌道 →
シミュレーションによる予想
+ 観測による実証が必須

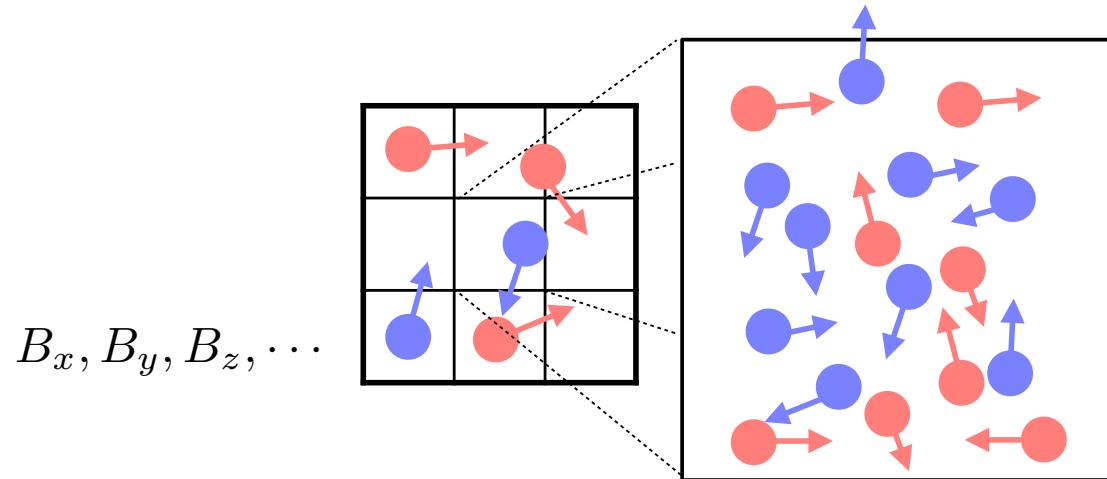


Speiser 1965 JGR

2. プラズマ粒子シミュレーション

Particle-In-Cell

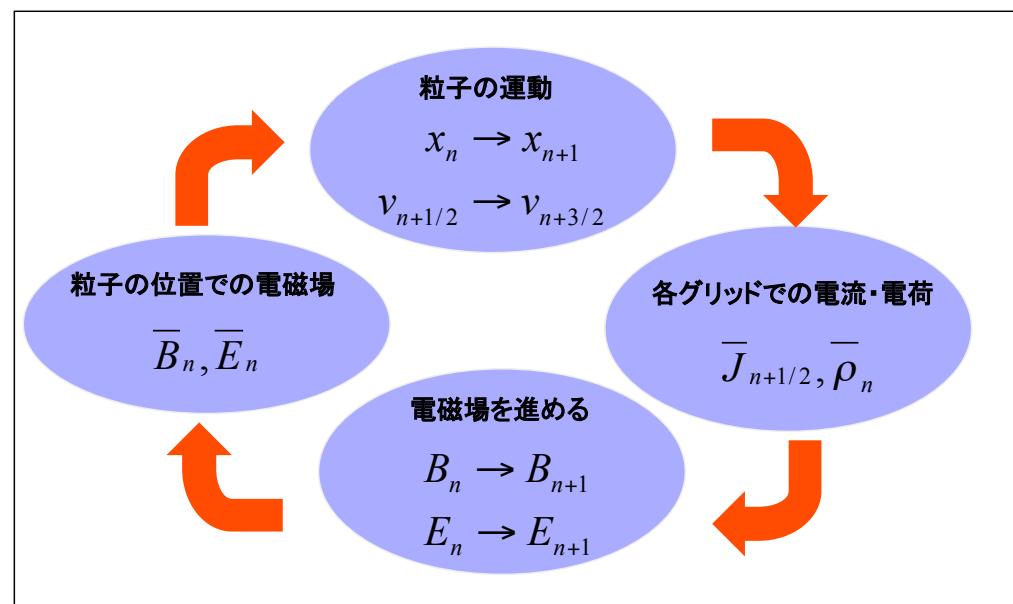
プラズマ粒子 (PIC) シミュレーション



$$B_x, B_y, B_z, \dots$$

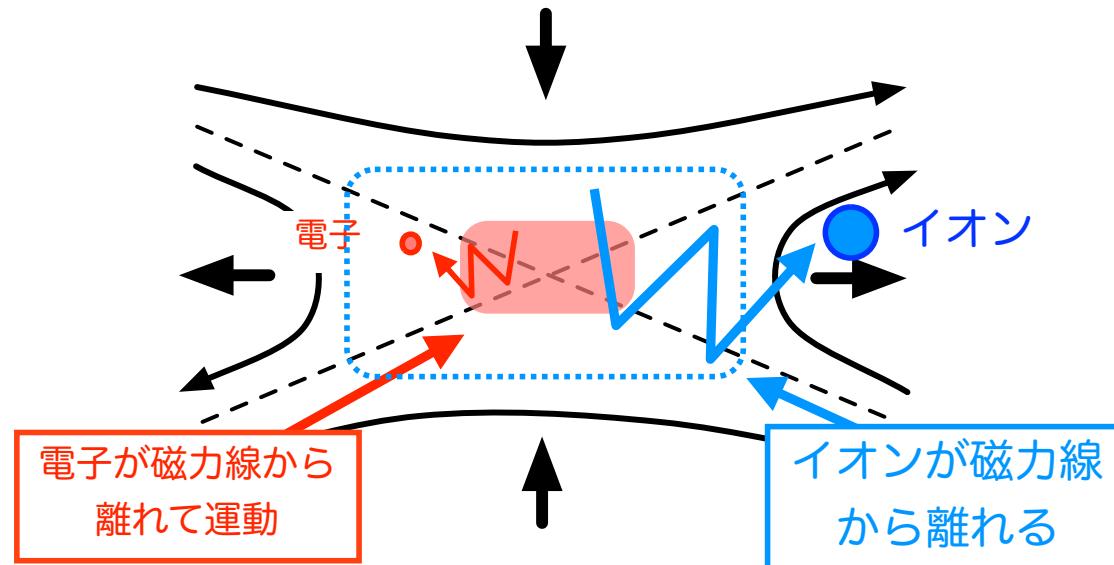
1セルの中に
10²~10³ 個の粒子

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$



磁気リコネクションの基礎研究：中心領域問題

Zenitani et al. 2011 *Phys. Rev. Lett.*



- リコネクション物理にとって、最も奥底の**中心領域**の物理は最も重要
- 中心領域**を特定するには？

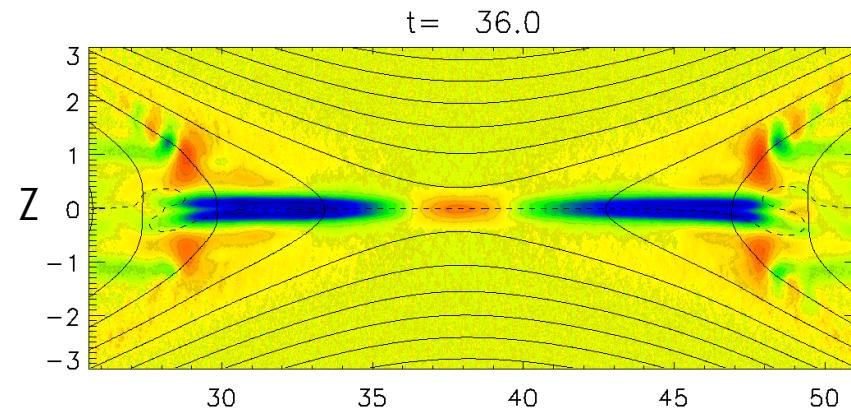
- 旧来の予想：電子が磁力線に巻きつく条件（理想MHD条件）

$$E + v_e \times B \neq 0$$

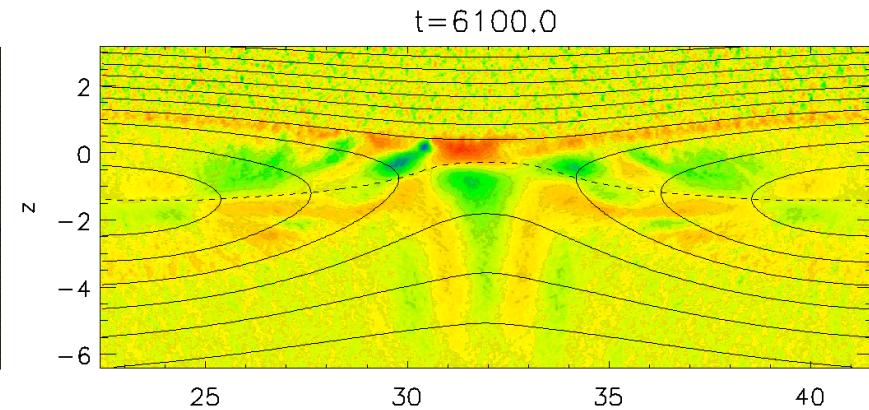
- ⇒ 制約が緩く、実用に耐えない
- もっと良い新しい指標が必要

旧予想

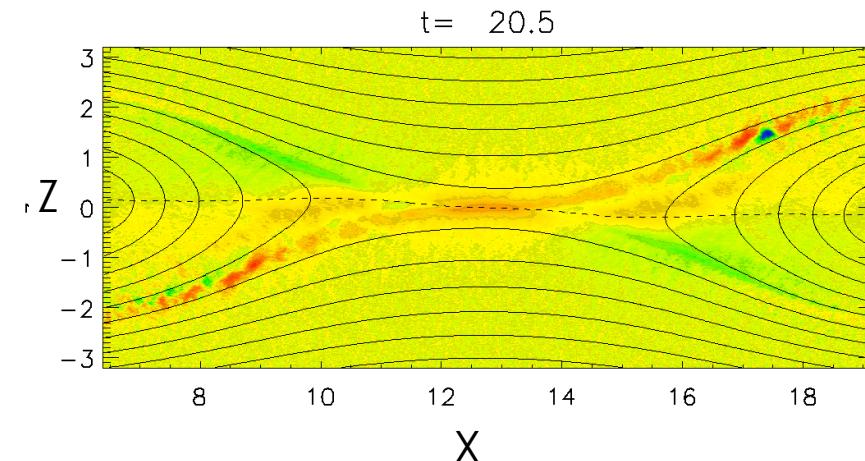
対称



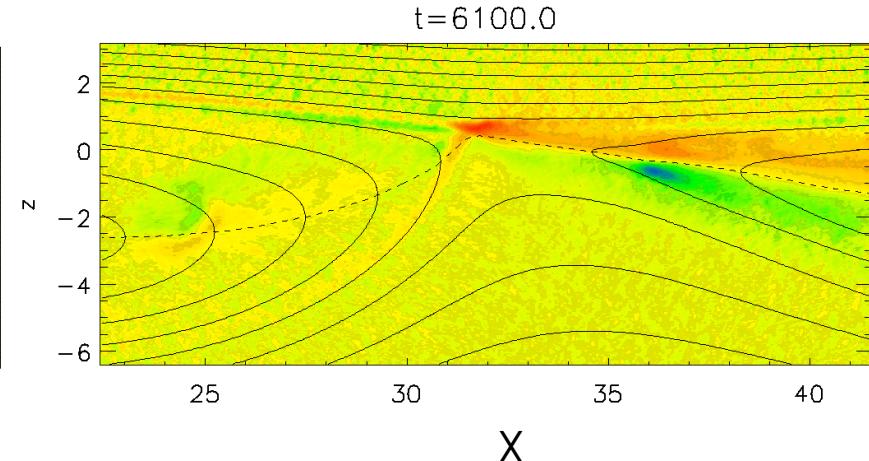
非対称



反平行



捻れ型
⊗



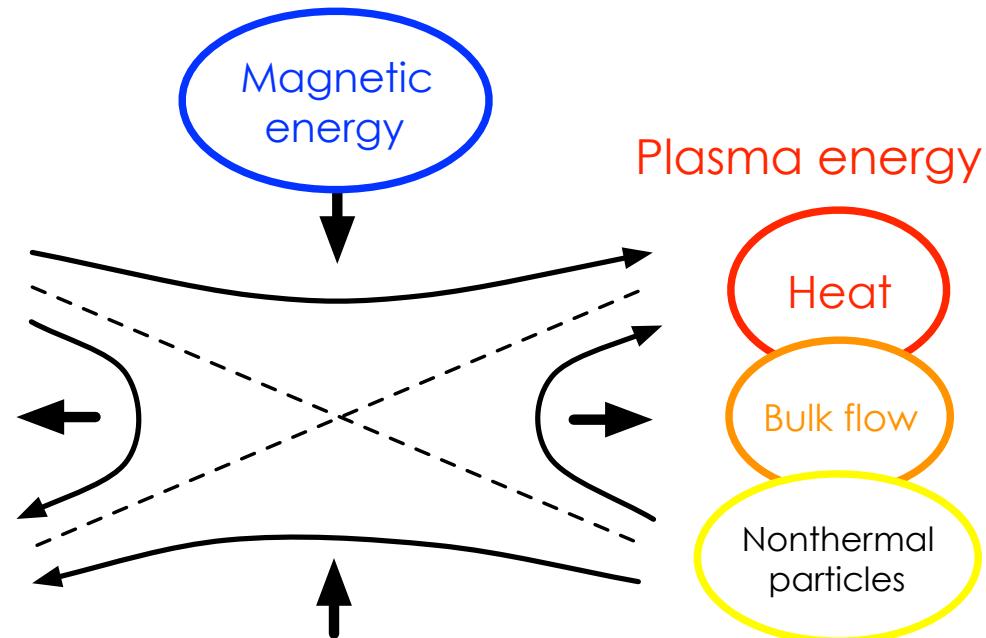
$$(E + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B})_y \neq 0 \quad - \text{blue} \quad + \text{red}$$

0

2次元 PIC シミュレーション

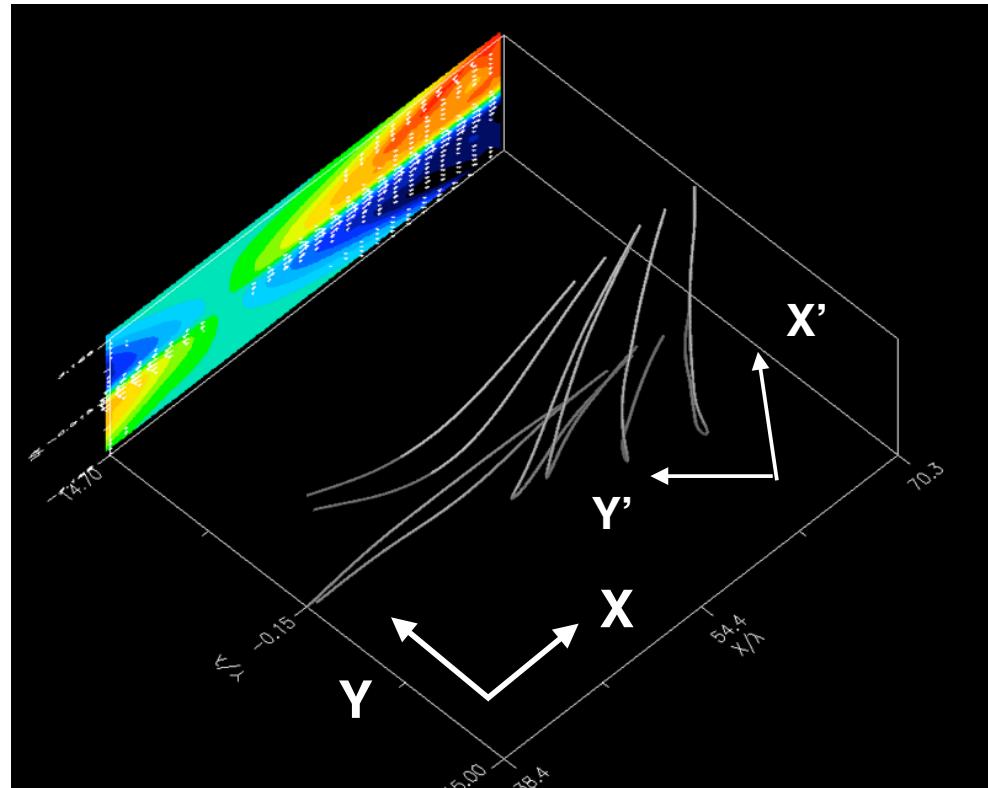
新指標が満たすべき要件 (1/3)

1. エネルギー変換
2. スカラー量
3. 観測者の運動に
左右されない



新指標が満たすべき要件 (2/3)

1. エネルギー変換
2. スカラー量
3. 観測者の運動に
左右されない



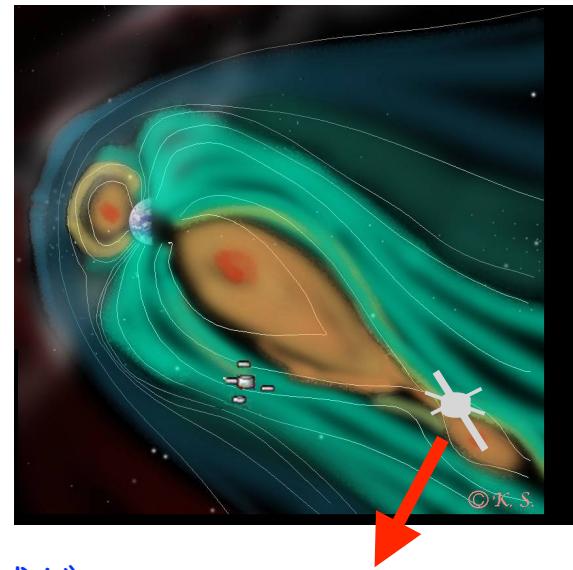
- ・スカラー量であれば、座標系の角度に依存しない

新指標が満たすべき要件 (3/3)

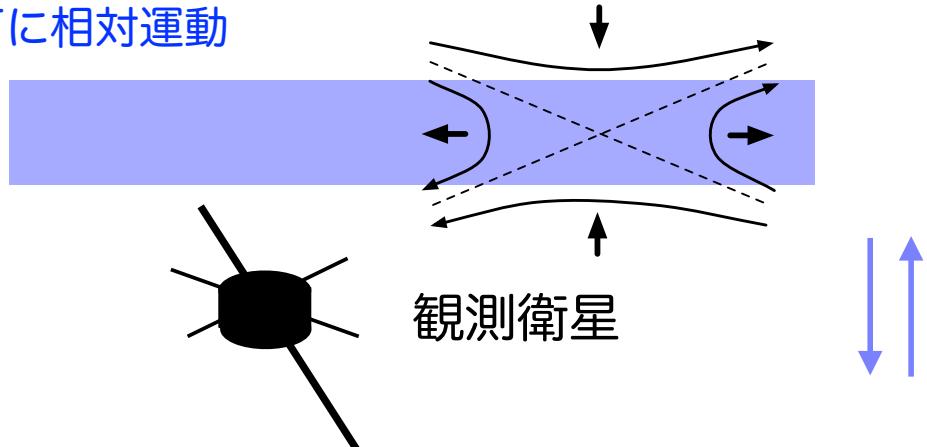
1. エネルギー変換
2. スカラー量
3. 観測者の運動に
左右されない



荒れ狂う
太陽風



リコネクション領域が
上下に相対運動



ローレンツ不变な散逸量

電気素量

$$\begin{aligned} D_e &= j_\mu e^\mu = \gamma_e [\mathbf{j} \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) - \rho_c (\mathbf{v}_e \cdot \mathbf{E})] \\ &\equiv j'_\mu e'^\mu = \mathbf{j}' \cdot \mathbf{E}' \end{aligned}$$

電子流体系で評価した
電磁場からプラズマへのエネルギー散逸

Conduction current

$$j^\mu = J^\mu - c^{-2}(-J^\nu u_{e,\nu}) u_e^\mu$$

4元電流

$$u_e^\mu$$

電子流体速
ローレンツ

Covariant 電場

$$e^\mu = F^{\mu\nu} u_{e,\nu}$$

$$= \left(\frac{\gamma_e \mathbf{v}_e \cdot \mathbf{E}}{c}, \gamma_e (\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) \right)$$

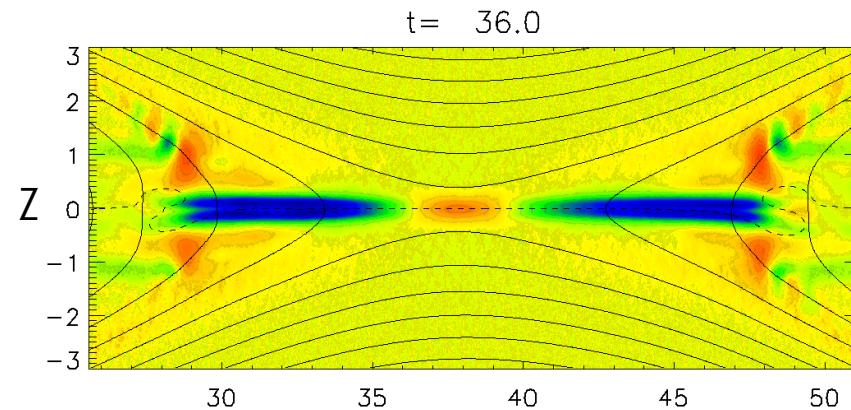
3つの要件



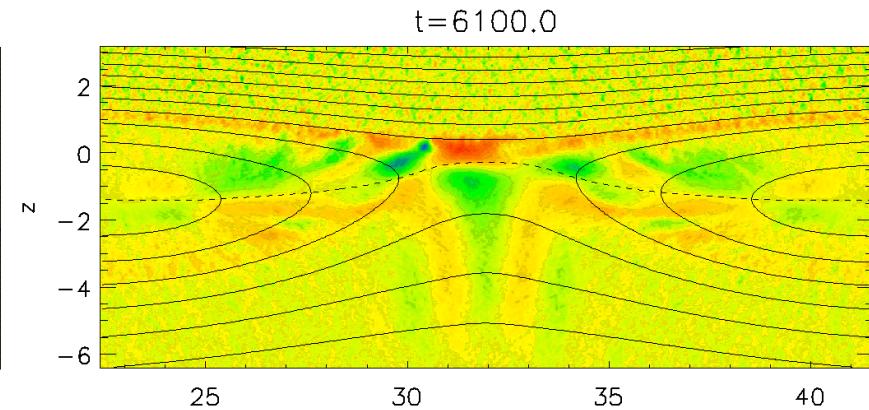
1. エネルギー変換
2. スカラー量
3. 観測者の運動に
左右されない

旧予想

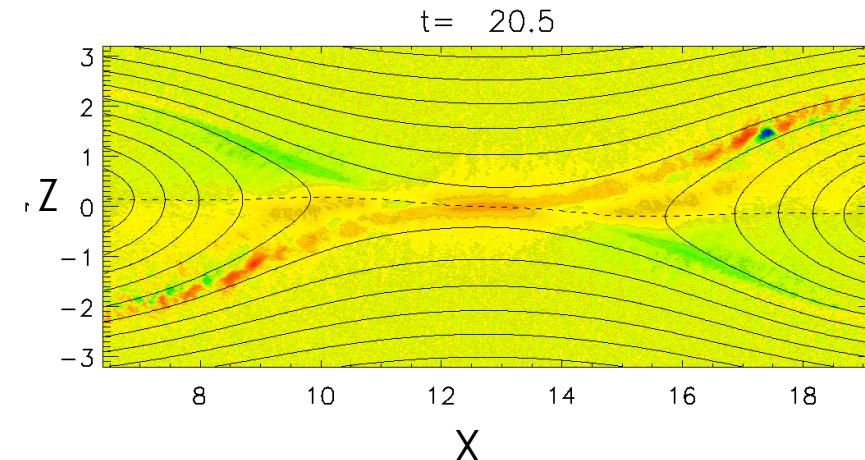
対称



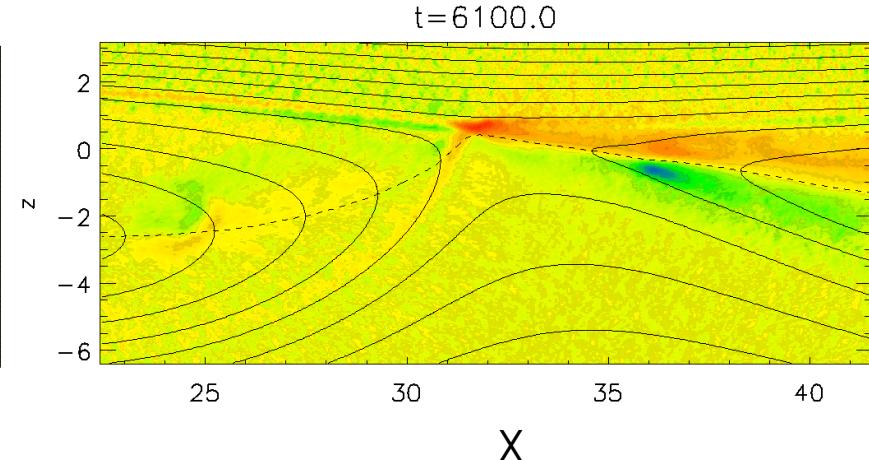
非対称



反平行



捻れ型
⊗



$$(E + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B})_y \neq 0 \quad - \text{---} \textcolor{blue}{\text{---}} \textcolor{red}{+}$$

0

2次元 PIC シミュレーション

ローレンツ不变な散逸量 D_e

時間

反平行

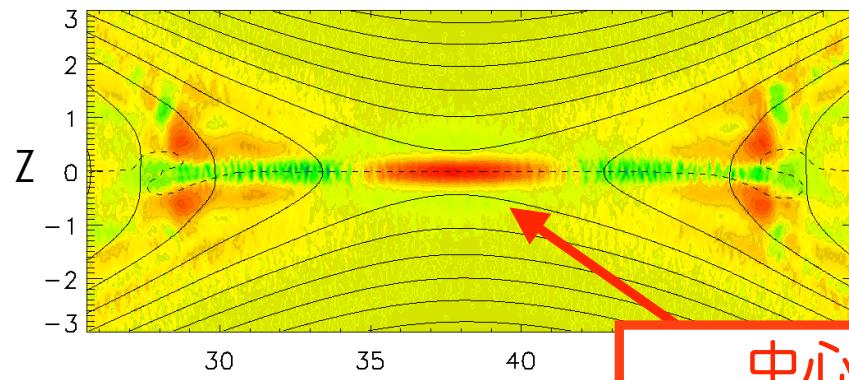
捻れ型

\otimes

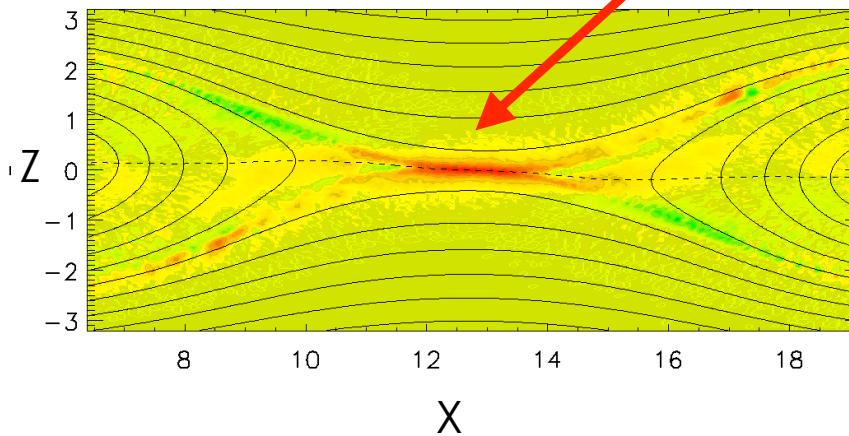
対称

非対称

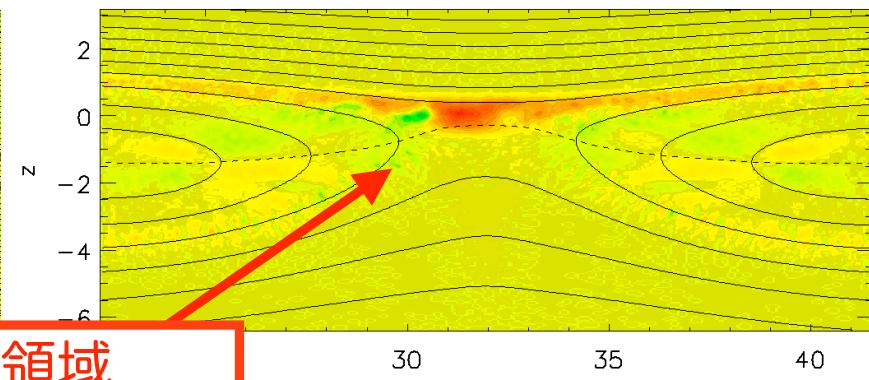
$t = 36.0$



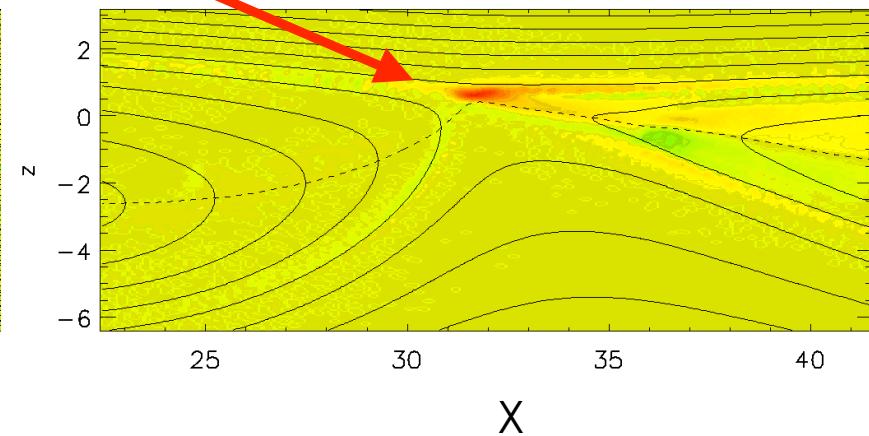
$t = 20.5$



$t = 6100.0$



$t = 6100.0$



中心領域

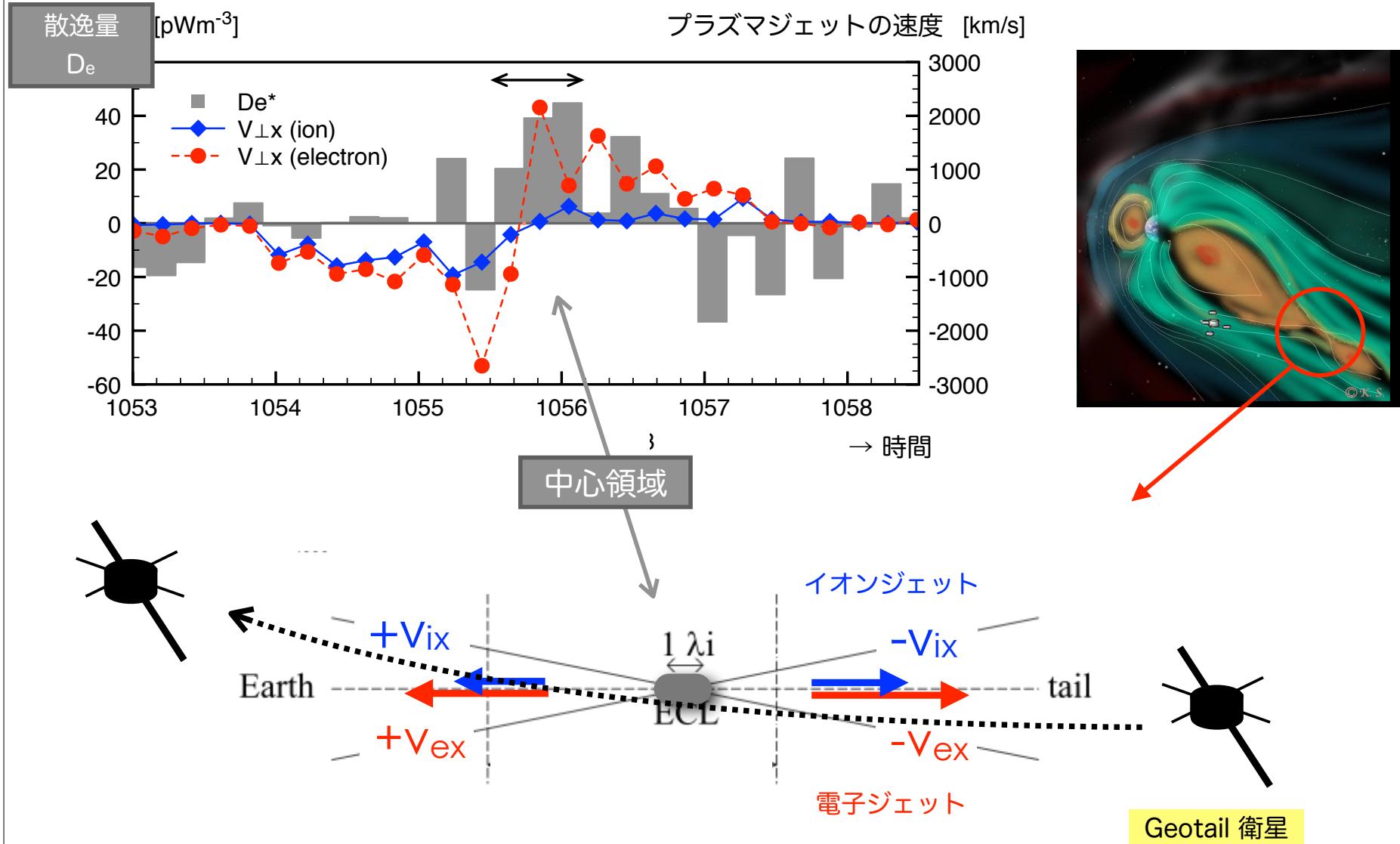
$$D_e = \gamma_e [j \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) - \rho_c (\mathbf{v}_e \cdot \mathbf{E})]$$



0

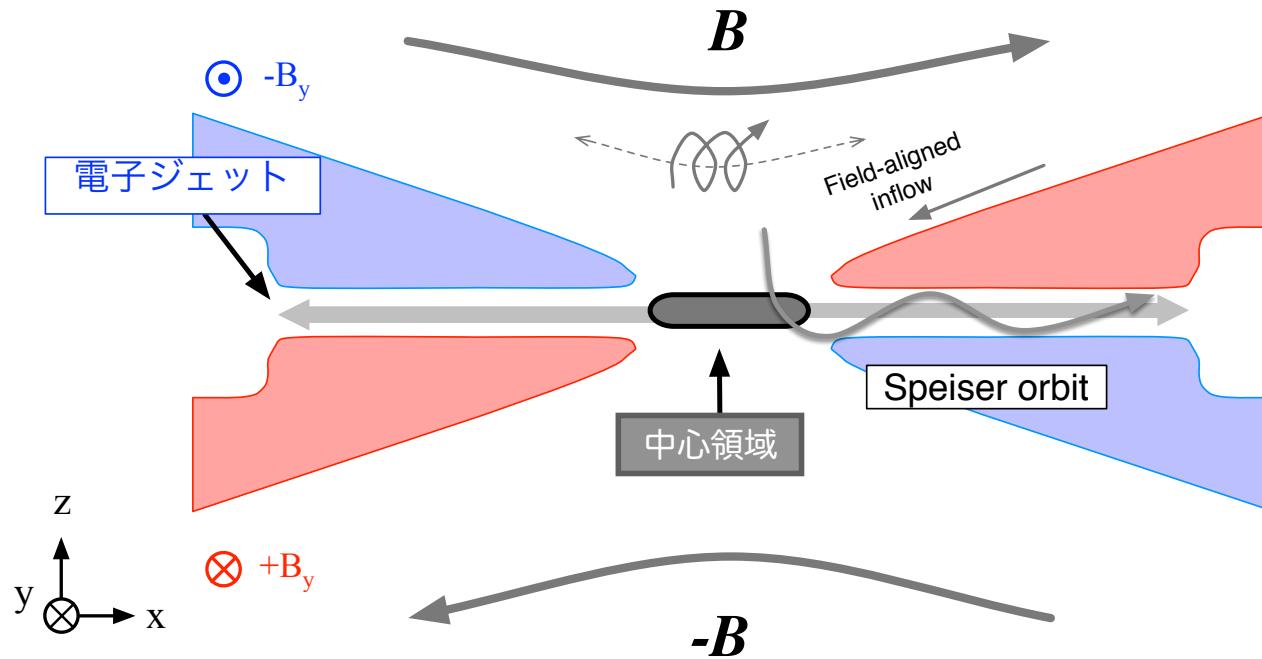
2次元 PIC シミュレーション

ローレンツ不变量 D_e の応用 : Geotail 観測



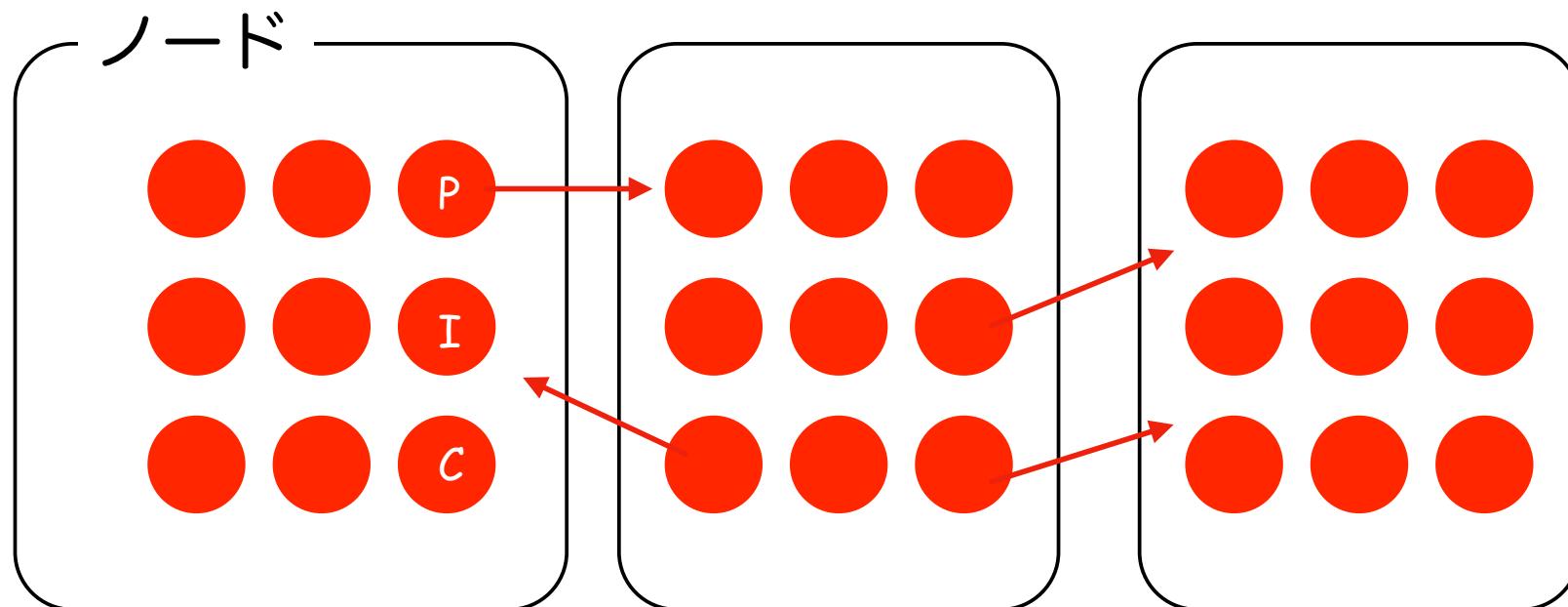
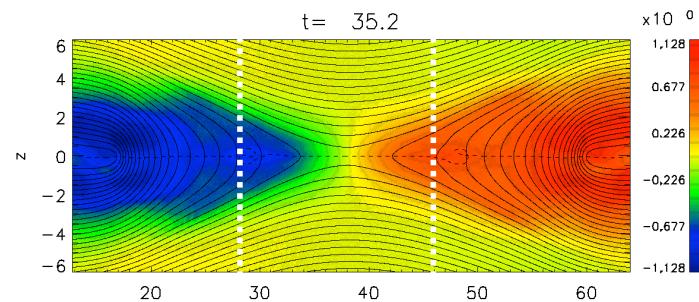
磁気リコネクションの基礎研究：電子軌道問題

Zenitani & Nagai 2016, *Phys. Plasmas*



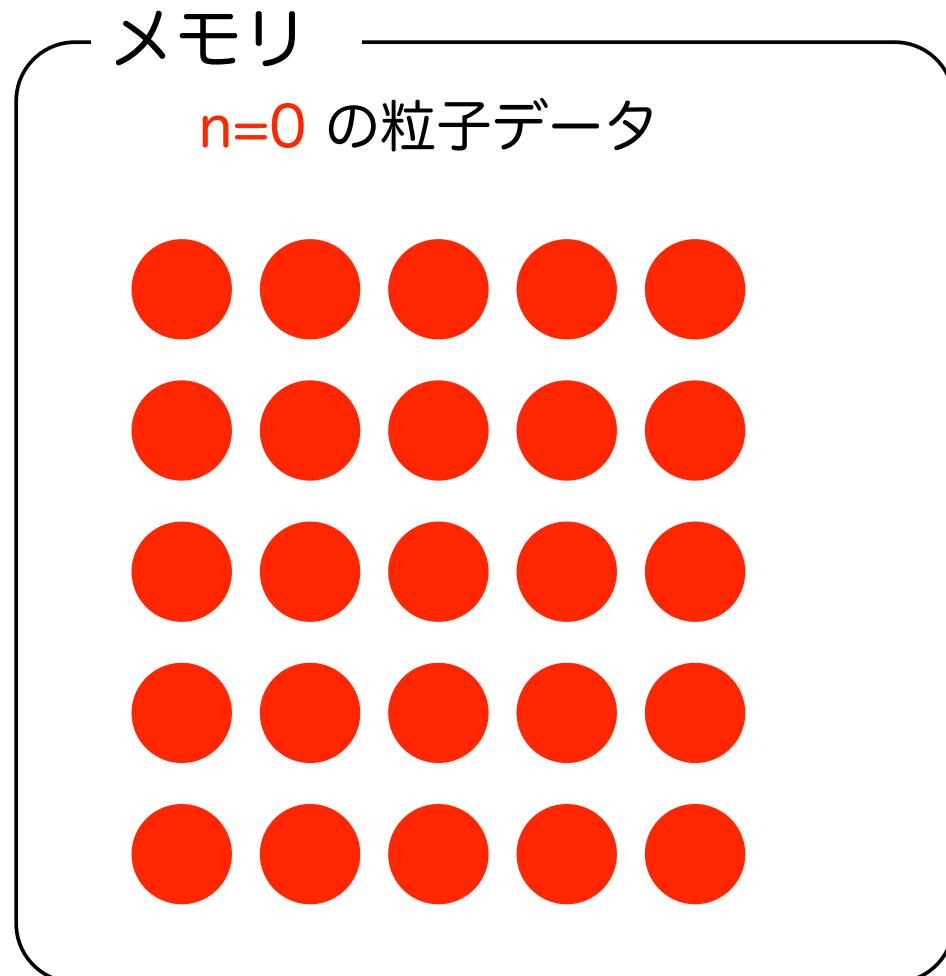
- ・ プラズマ粒子（電子・イオン）の軌道は非常に複雑
- ・ 既知のイオン軌道から電子の軌道パターンを類推 → 要確認

PIC シミュレーション：粒子データの扱い



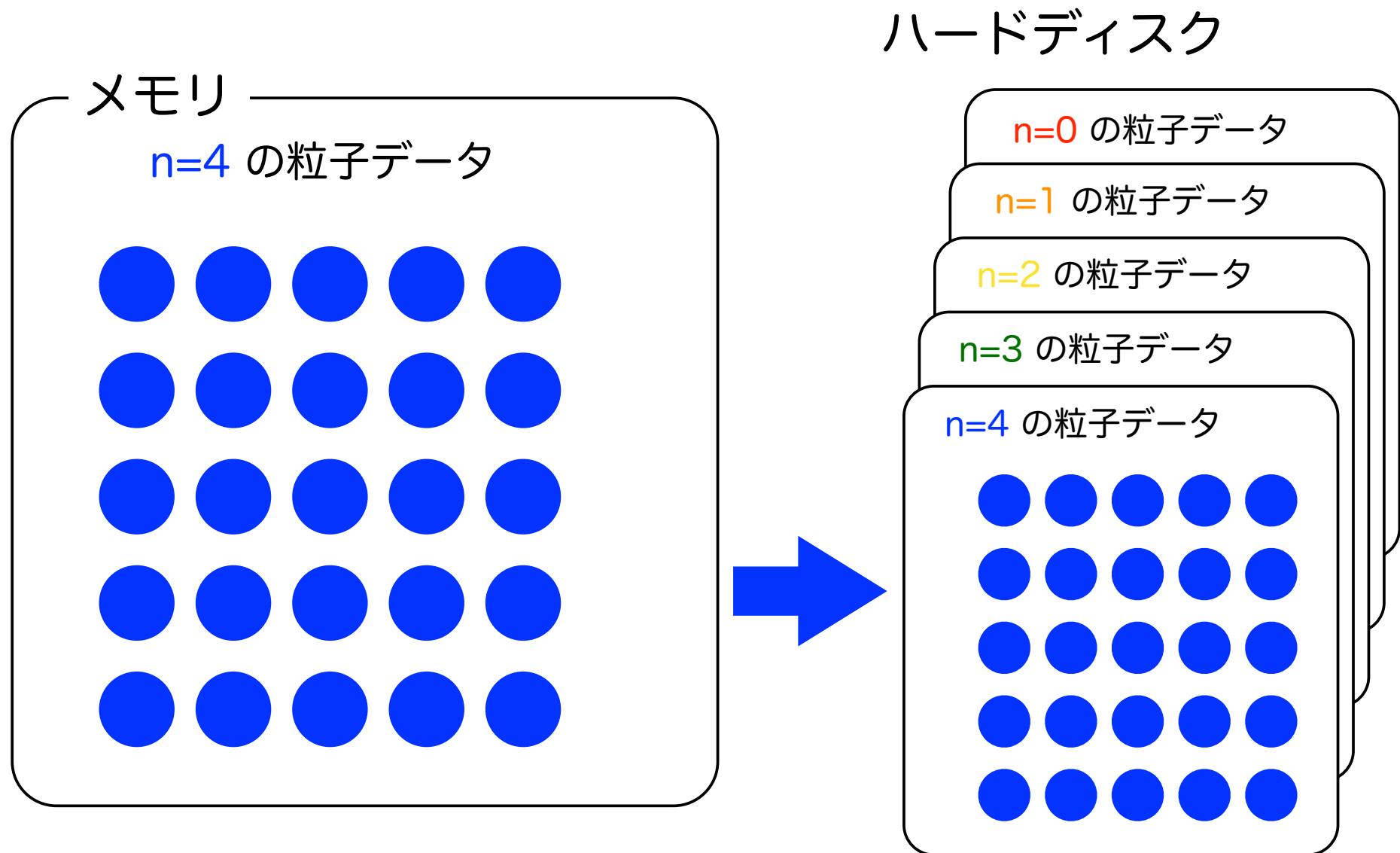
- ・最近の PIC コードでラグランジュ軌道を追跡するのは困難
- ・ノード間：粒子を移動、ノード内：配列をソート

“新”手法：全軌道解析



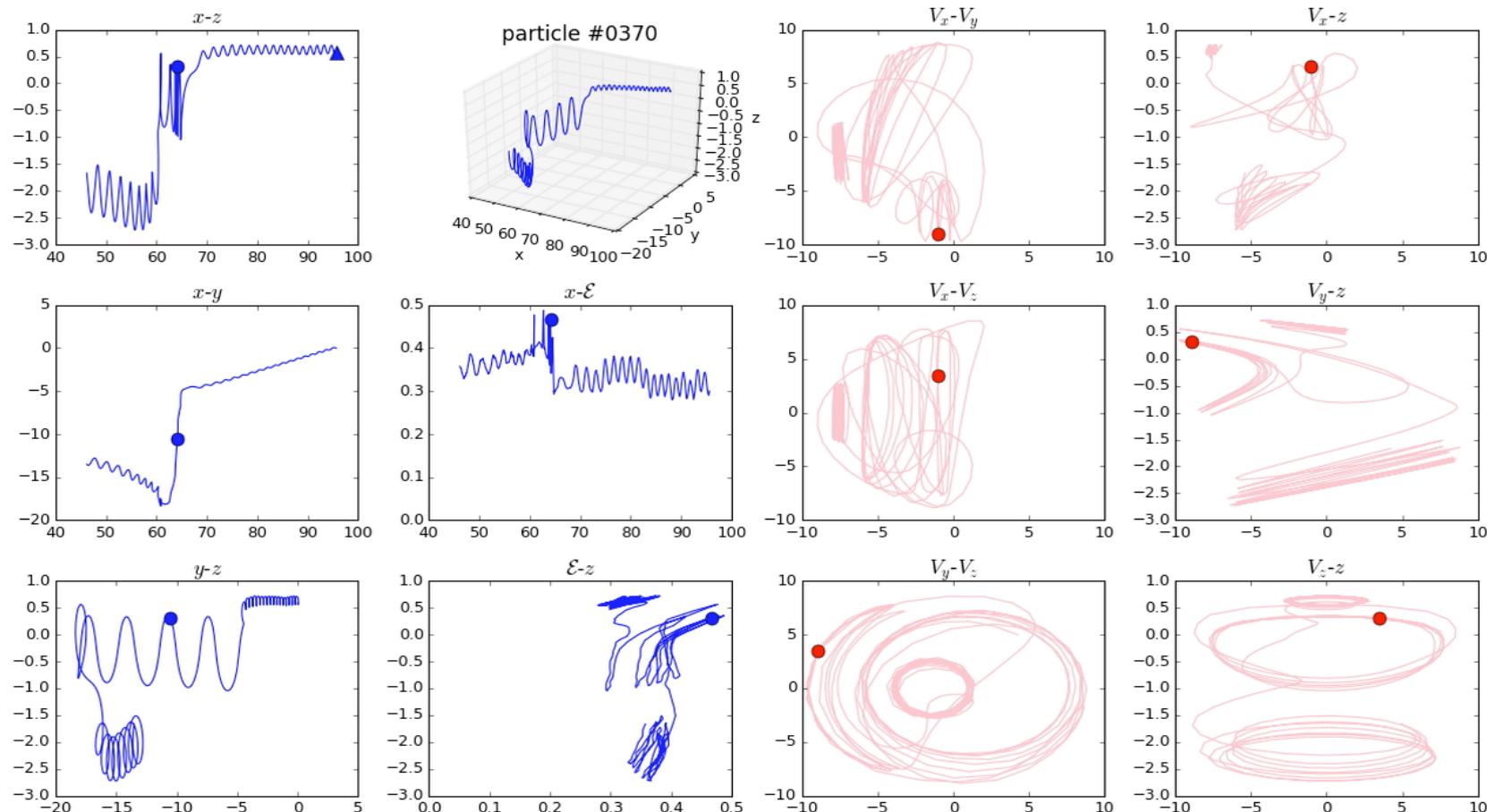
- ・場のデータを共有してノード間移動・粒子ソートをオフに

“新”手法：全軌道解析

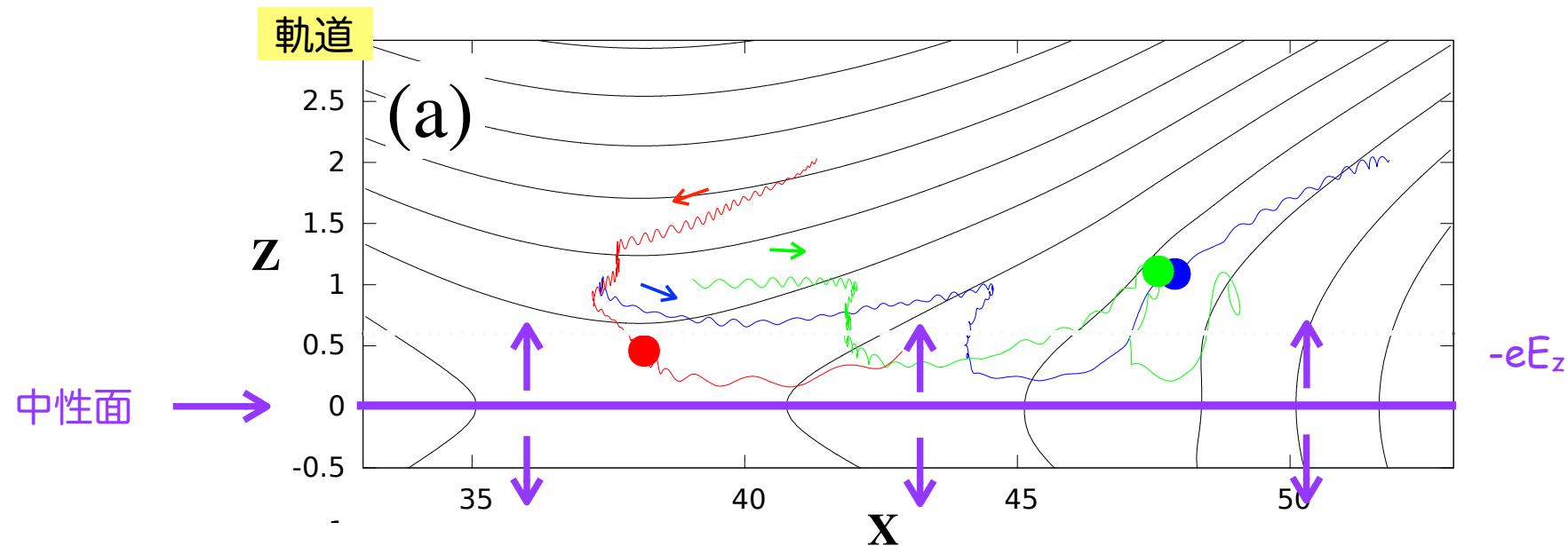


“新”手法：全軌道解析

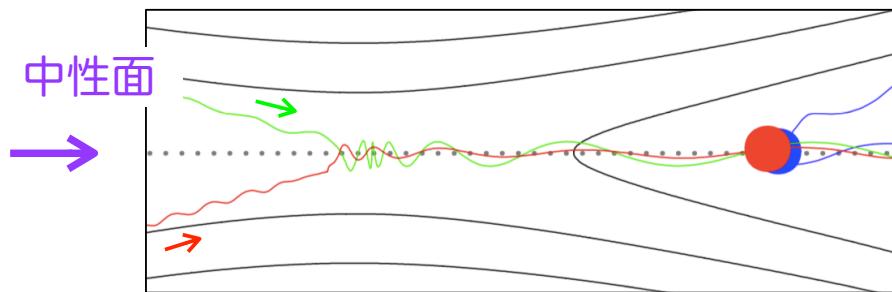
- 1250 スナップショットから 2×10^7 の軌道セットを生成して解析



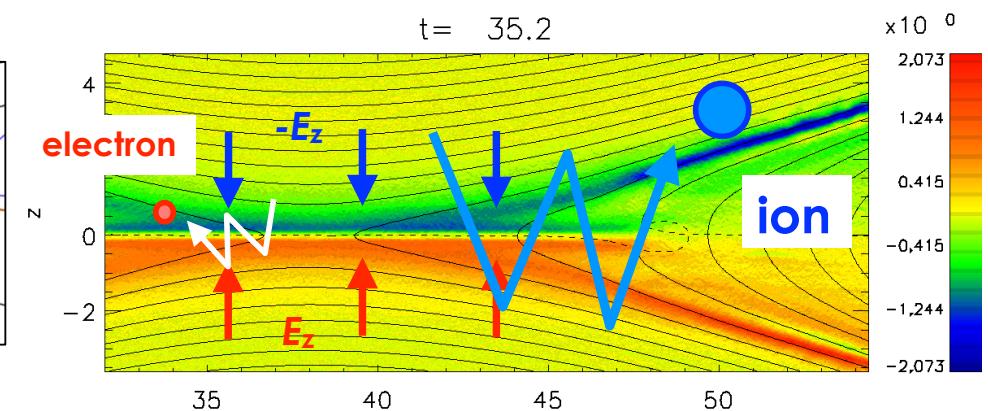
「非交差型」電子軌道の発見



既知の粒子軌道



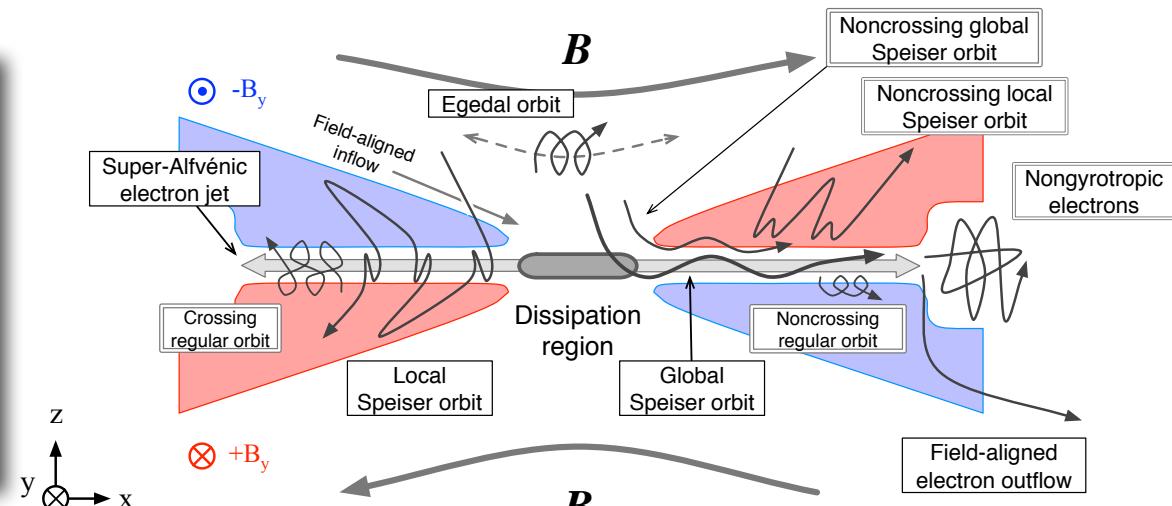
静電場 E_z



電子軌道問題の結果

Zenitani & Nagai 2016, *Phys. Plasmas*

- ・新タイプの電子の軌道を多数発見。数的にも多数派。
- ・全米物理学連合 (AIP) 傘下19誌から週間ハイライト論文に選出



- ・系の最小構成要素である電子軌道が予想と大きく違う
⇒ 関連理論の再構成が必要

3. 衛星觀測

GEOTAIL



NASA MMS 衫星群

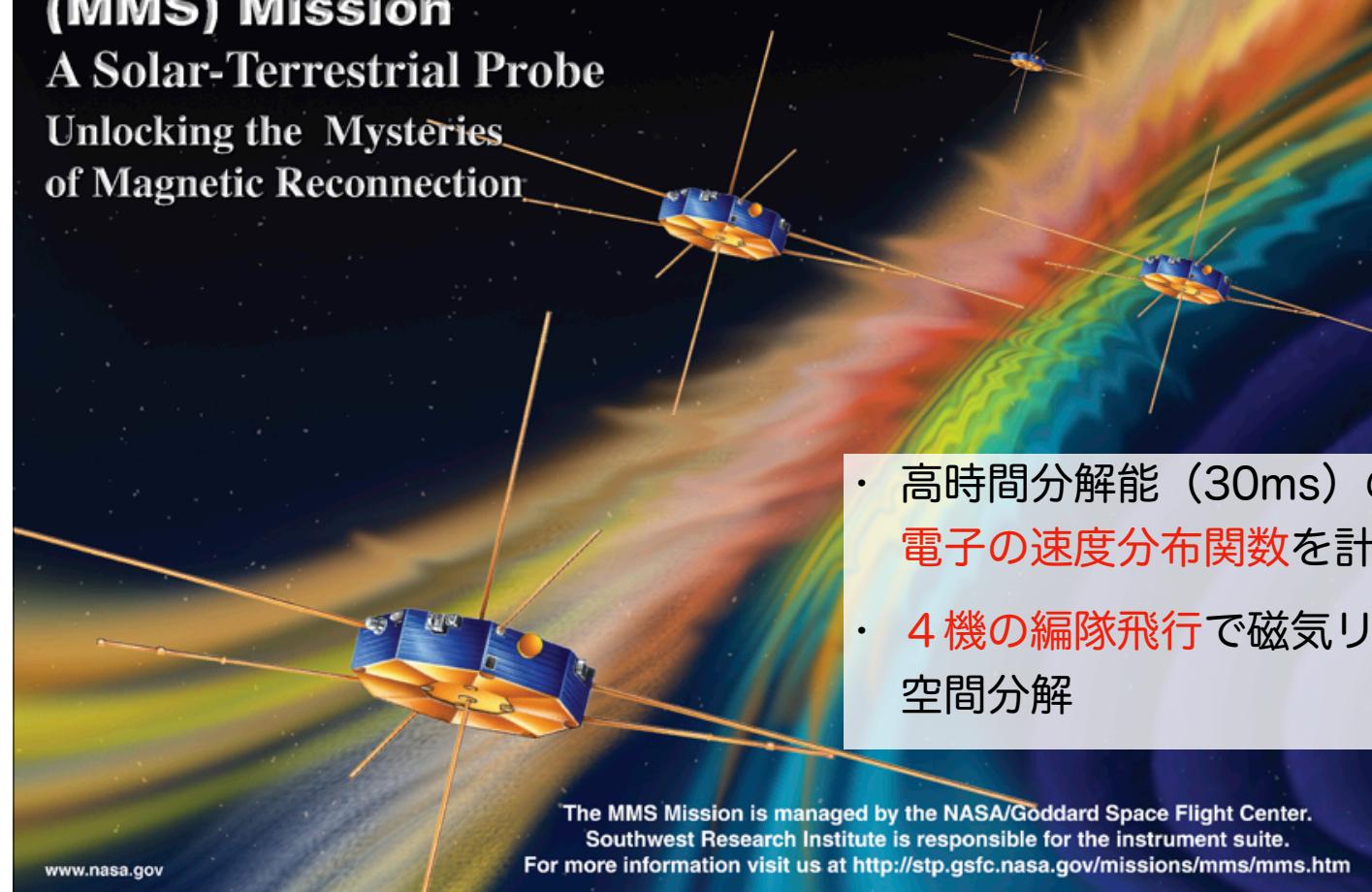


National Aeronautics and Space Administration

MAGNETOSPHERIC MULTISCALE (MMS) Mission

A Solar-Terrestrial Probe

Unlocking the Mysteries
of Magnetic Reconnection



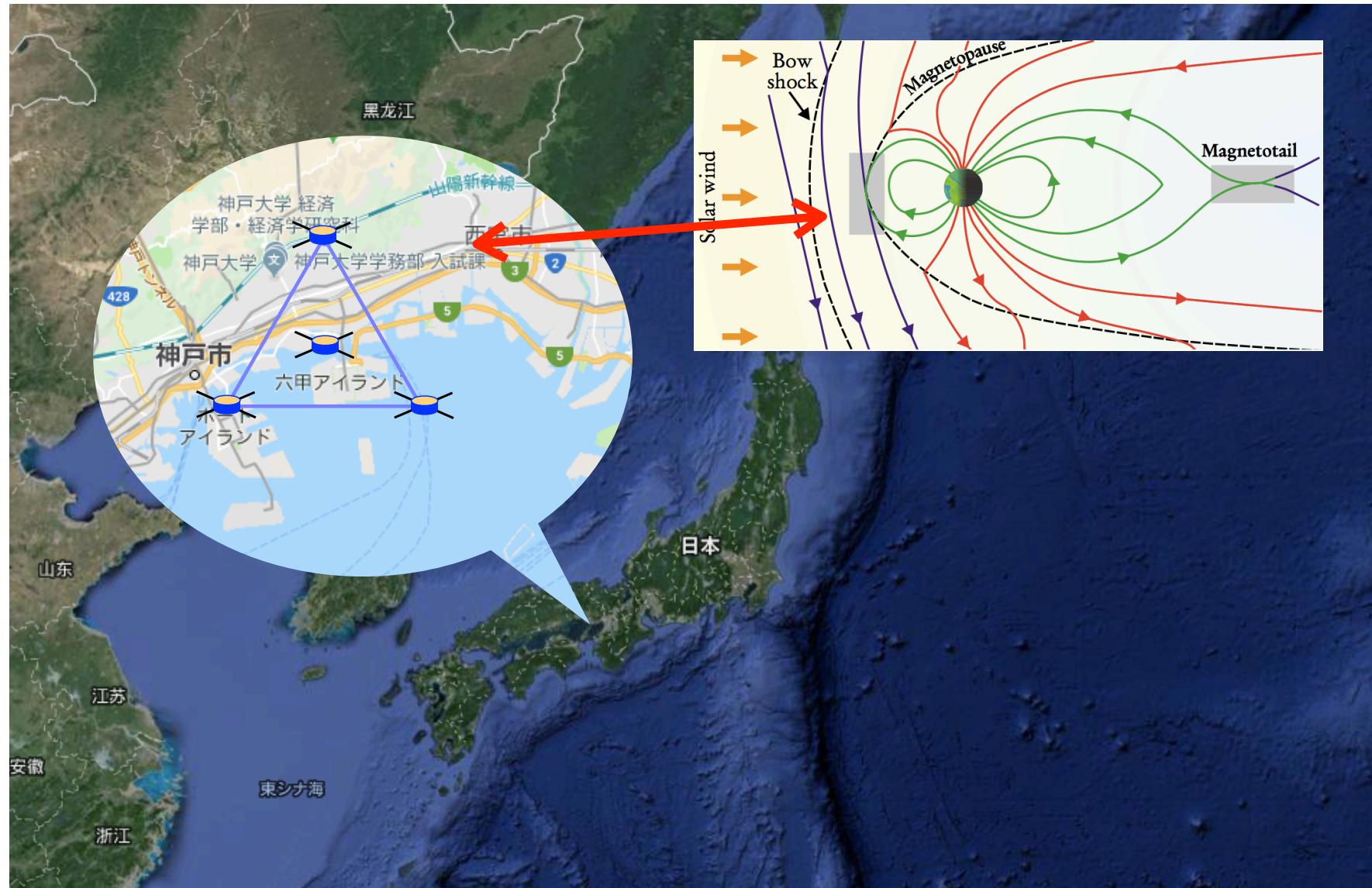
- 高時間分解能 (30ms) のプラズマ計測器で
電子の速度分布関数を計測
- 4機の編隊飛行で磁気リコネクション領域を
空間分解

The MMS Mission is managed by the NASA/Goddard Space Flight Center.
Southwest Research Institute is responsible for the instrument suite.
For more information visit us at <http://stp.gsfc.nasa.gov/missions/mms/mms.htm>

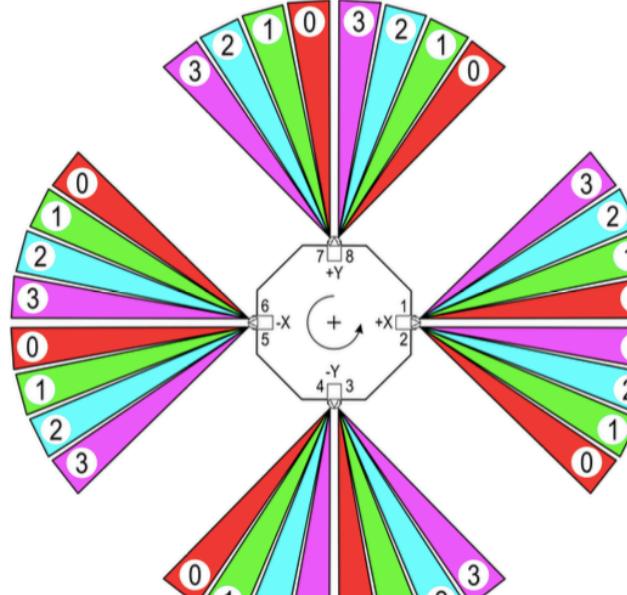
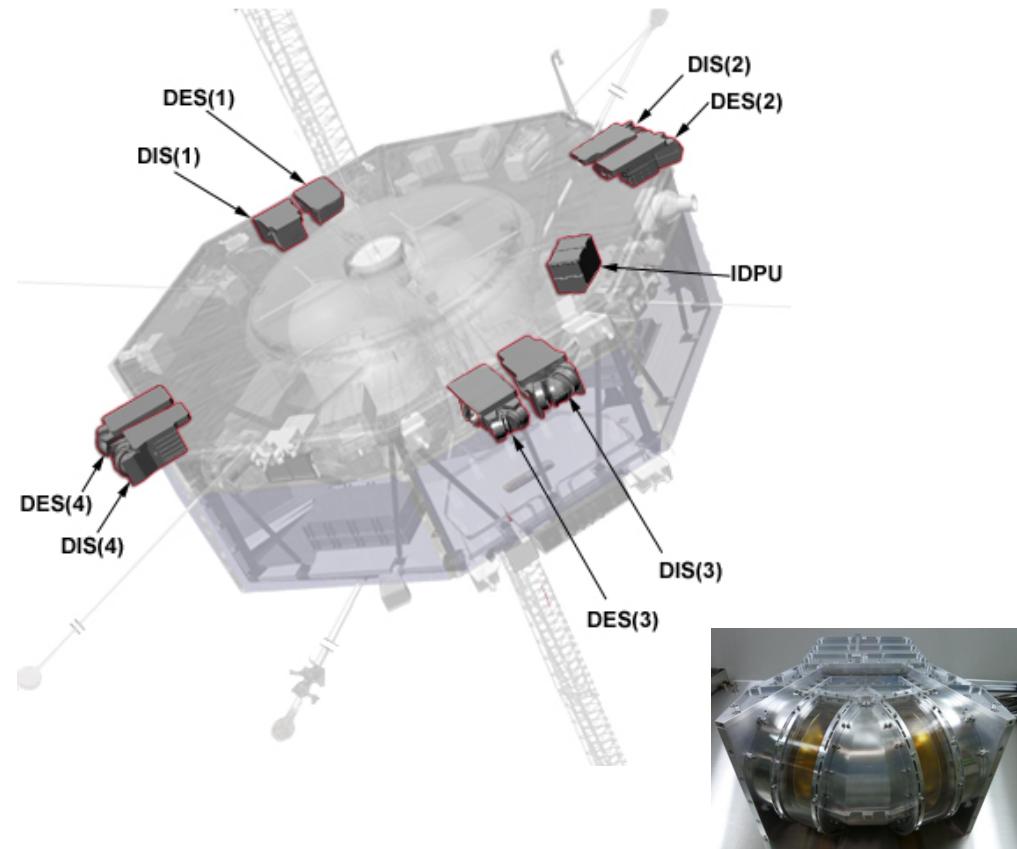
www.nasa.gov



MMS衛星の空間分解能：7km～200km



MMS 衛星の時間分解能：30ms



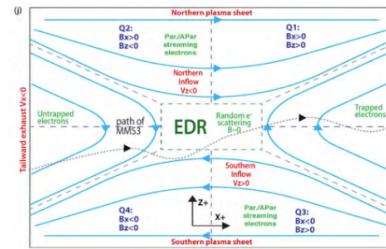
- 各衛星に8個ずつのプラズマ計測器：30 ms (or 7.5 ms) の高時間分解観測を実現
- (イオン計測器は明星電気製)

MMS ミッションの主要観測成果

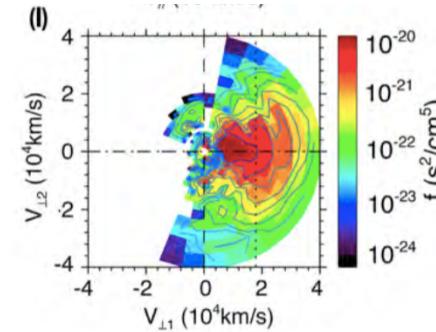
2015-03-12



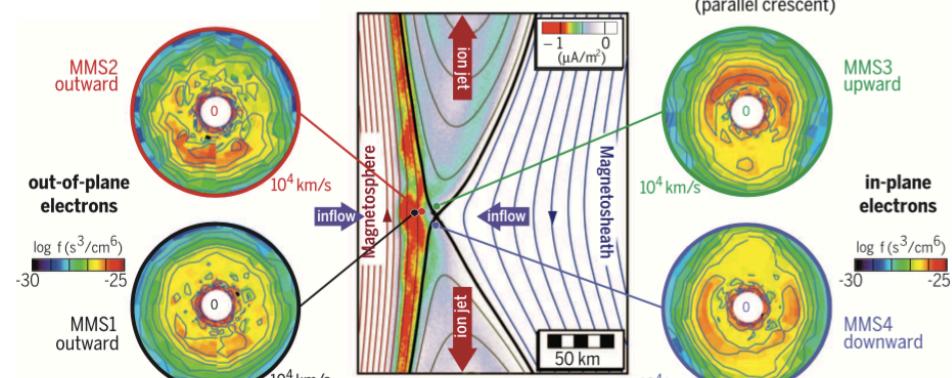
2017-07-11



Torbert+ 2018 Science



2015-10-16



Burch+ 2016 Science

リコネクション領域の検出方法…



ローレンツ不变な散逸量

Burch et al. 2016 *Science*

RESEARCH ARTICLE
PLASMA ASTROPHYSICS
Electron-scale measurements of magnetic reconnection in space

Science Torbert et al. 2018 *Science*

Cite as: R. B. Torbert et al., *Science* 10.1126/science.aat2998 (2018)

magnetic fields occur. Electron-scale kinetic physics in the region around the reconnection site (or the X-line) where field line breaking and reconnection occur has not previously been investigated experimentally in space, owing to insufficiently detailed measurements. Our knowledge of this region at the electron scale has come mainly from computer simulations (9–13) and laboratory experiments (14, 15). The higher resolution of MMS measurements in both time and space relative to previous missions offers an opportunity to determine the cause of reconnection structures and dynamics within

Electron-scale dynamics of the diffusion region during symmetric magnetic reconnection in space

LETTER

Electron magnetic reconnection without ion coupling in Earth's turbulent magnetosheath

T. D. Phan^{1*}, J. P. Eastwood², M. A. Shay³, J. F. Drake⁴, R. U. Ö. Sonnerup⁵, M. Fujimoto⁶, P. A. Cassak⁷, M. Oleroset⁸, J. L. Burch⁸, R. B. Torbert⁹, A. C. Rager^{10,11}, J. C. Dorell¹¹, D. J. Gershman¹¹, C. Pollock¹², P. S. Pyakurel¹³, C. C. Haggerty¹⁴, Y. Khotyaintsev¹⁵, B. Lavraud¹⁶, Y. Saito¹⁶, M. Okai¹⁶, R. E. Ergun¹³, A. Retino¹⁶, O. Le Contel¹⁶, M. R. Argall¹⁶, B. L. Giles¹³, T. E. Moore¹³, F. D. Wilder¹⁶, R. J. Strangeway¹⁷, C. T. Russell¹⁷, P. A. Lindqvist¹⁸ & W. Magnes¹⁹

Magnetic reconnection in current sheets is a magnetic-to-particle energy conversion process that is fundamental to many space and laboratory plasma systems. In the standard model of reconnection, this process occurs in a minuscule electron-scale diffusion region^{1,2}. On larger scales, ions couple to the newly reconnected magnetic field lines and are ejected away from the diffusion region in the form of bi-directional jets at the ion Alfvén speed^{3,4}. Much of the energy conversion occurs in spatially extended ion exhaust downstream of the diffusion region⁵. In turbulent plasmas, which contain a large number of small-scale current sheets, reconnection has long been suggested to have a minor role in the dissipation of turbulent energy at kinetic scales^{6–11}. However, evidence for reconnection plasma jetting in small-scale turbulent plasma has so far been lacking. Here we report observations made in Earth's turbulent magnetosheath region (downstream of the bow shock) of an electron-scale current sheet in which diverging bi-directional super-ion-Alfvénic electron jets, parallel electric fields and enhanced magnetic-to-particle energy conversion were detected. Contrary to the standard model of reconnection, the thin reconnecting current sheet was not embedded in a wider ion-scale current layer and no ion jets were detected. Observations of this and other similar, but unidirectional, electron jet events without signatures of ion reconnection reveal a form of reconnection that can drive turbulent energy transfer and dissipation in electron-scale current sheets without ion coupling.

Phan et al. 2018 *Nature*

Burch et al. 2016 *Science*

RESEARCH

The use of SPEDAS are pace physics-related the data plots in this SPEDAS software applicate MMS database, so cated.

18. S. Zenitani, M. Hesse, A. Klimas, M. Kuznetsova, New measure of the dissipation region in collisionless magnetic reconnection. *Phys. Rev. Lett.* **106**, 195003 (2011). doi: [10.1103/PhysRevLett.106.195003](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.195003)

19. D. M. Willis, Structure of the magnetopause. *Rev. Geophys.* **9**, 953–985 (1971). doi: [10.1029/RG009i004p00953](https://doi.org/10.1029/RG009i004p00953)

20. J. B. Blake et al., The Fly's Eye Energetic Particle Spectrometer (FEPS) sensors for the Magnetospheric Multiscale (MMS) Mission. *Space Sci. Rev.* **199**, 309–329 (2016). doi: [10.1007/s11214-015-0163-x](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0163-x)

21. B. H. Mauk et al., The Energetic Particle Detector (EPD) investigation and the Energetic Ion Spectrometer (EIS) for the Magnetospheric Multiscale (MMS) Mission. *Space Sci. Rev.* **199**, 471–514 (2016). doi: [10.1007/s11214-014-0055-5](https://doi.org/10.1007/s11214-014-0055-5)

22. M. A. Shay et al., Kinetic signatures of the region surrounding the X-line in asymmetric (magnetopause) reconnection. *Geophys. Res. Lett.* **10.1002/2016GL069034** (2016). doi: [10.1002/2016GL069034](https://doi.org/10.1002/2016GL069034)

• MMS衛星の観測論文の多くで、我々のリコネクション中心領域判定法が活躍。（*Science*, *Nature*論文5本のうち3本）

磁気圏尾側のリコネクション観測

磁場 3 成分

電流 plasma

電場 3 成分

$E_{\text{perp}}, V_{\text{exB}}$

E_{\parallel}

$J \cdot (E + V_{\text{exB}}) \sim n J^2$

電子 E-T

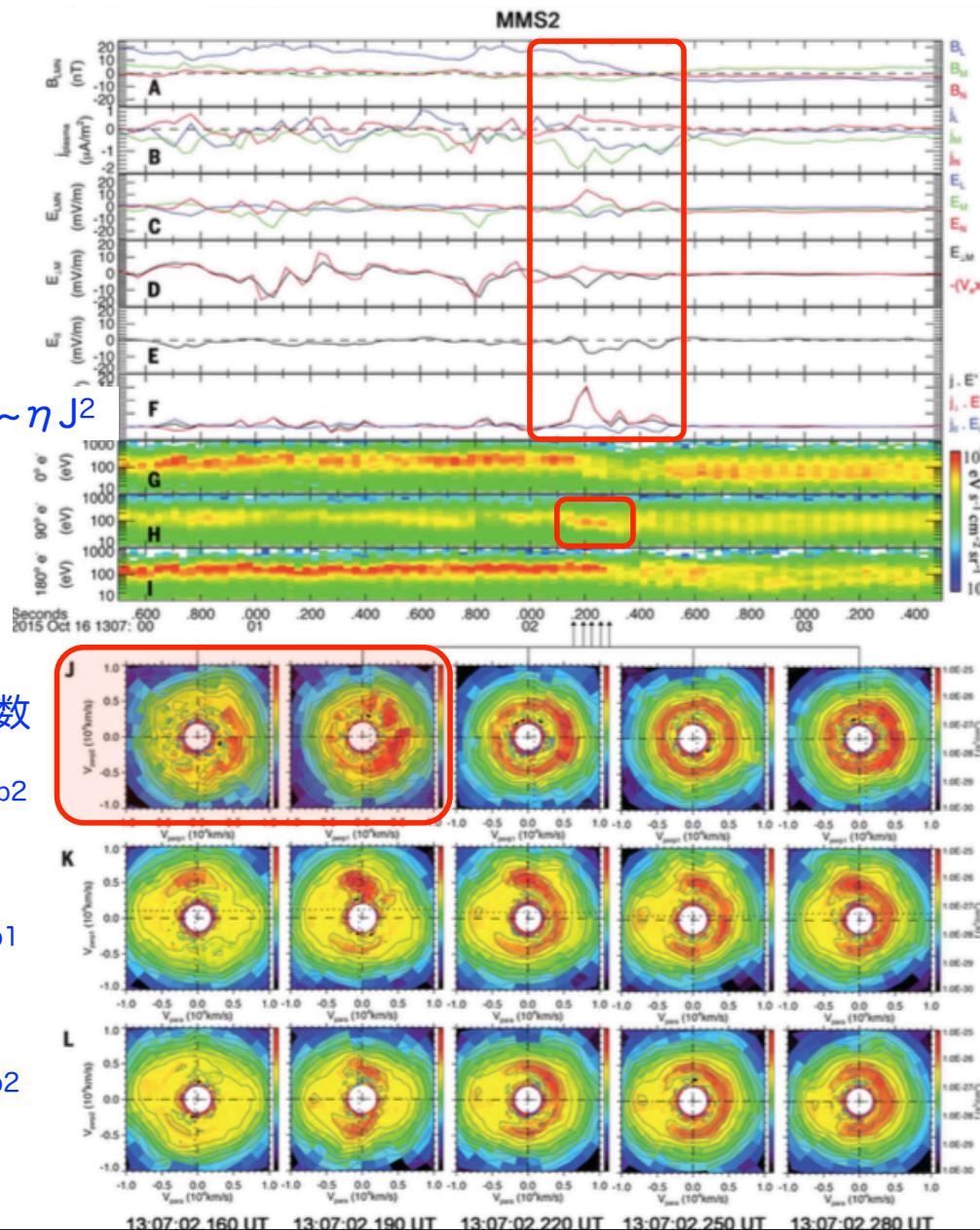
(3 方向)

電子分布関数

$V_{\text{perp1}} - V_{\text{perp2}}$

$V_{\text{para}} - V_{\text{perp1}}$

$V_{\text{para}} - V_{\text{perp2}}$



- X-line の磁気圏側

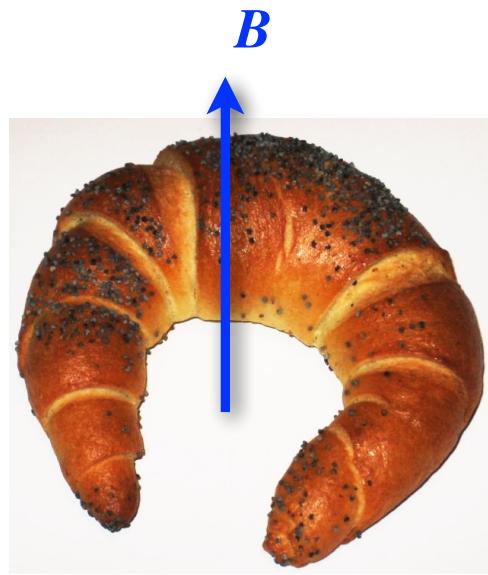
- 磁場に対して垂直な $J_M \cdot E'_M$ によるエネルギー散逸

- 2種類の電子分布関数

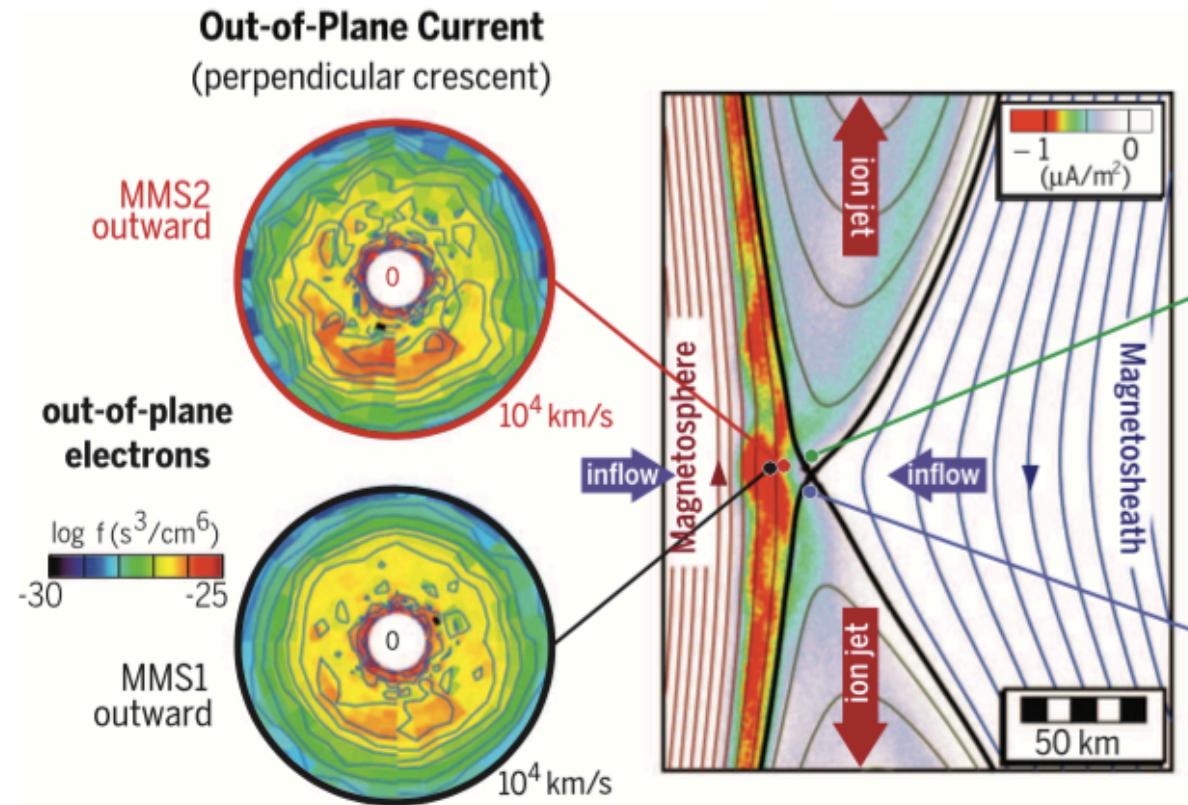
- "(Perpendicular) Crescent" メンダリング電子の FLR

- "(Parallel) Crescent" 片側ロスコーン (Egedal+ 2016 PRL)

電子の速度分布関数：“Crescent” 成分

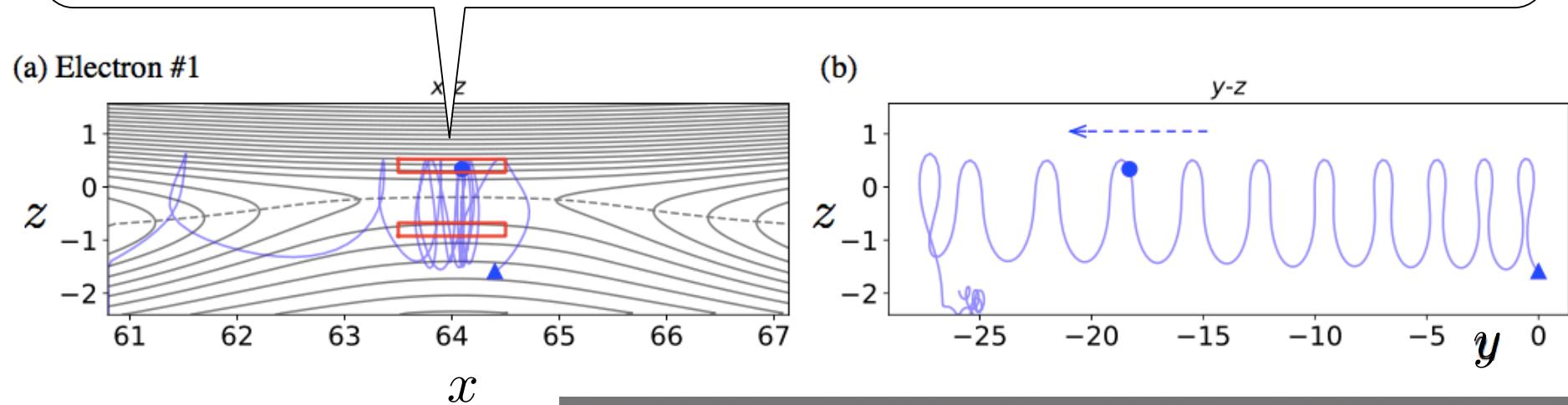
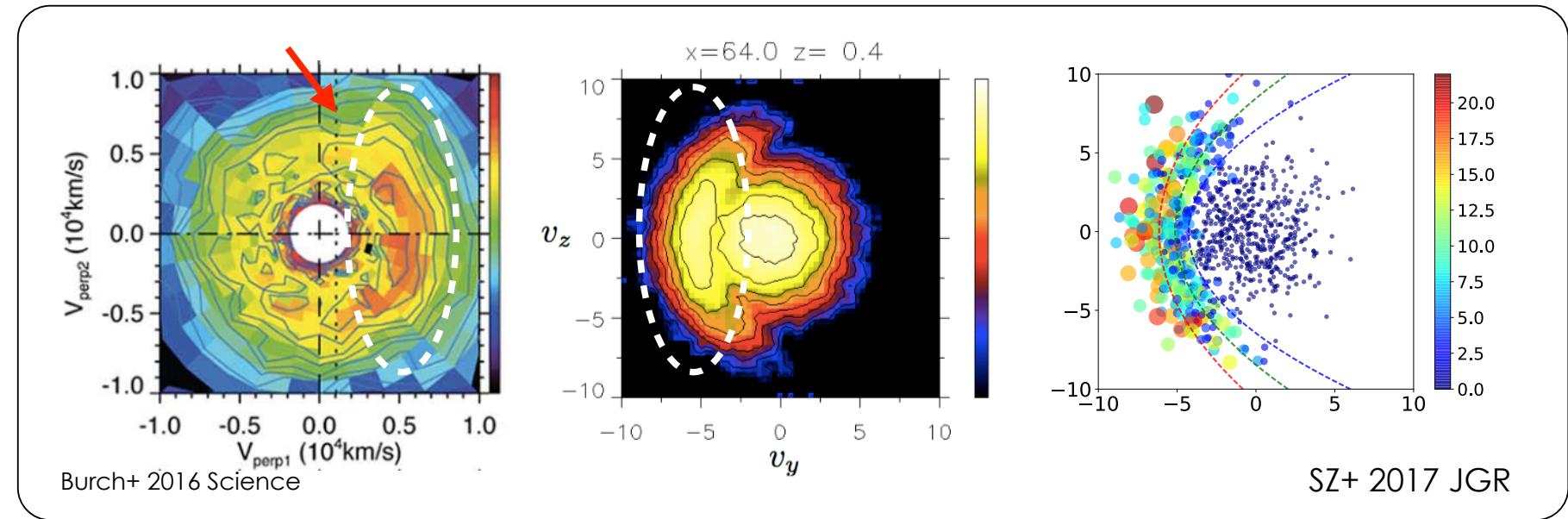


<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rogalik.jpg>



Burch+ 2016 Science

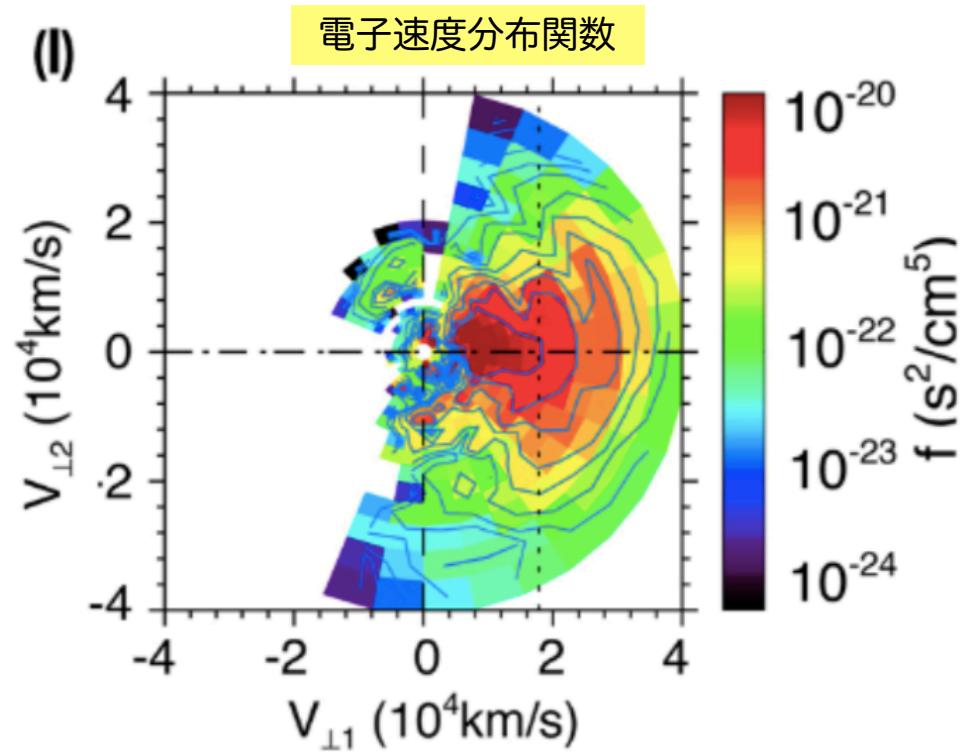
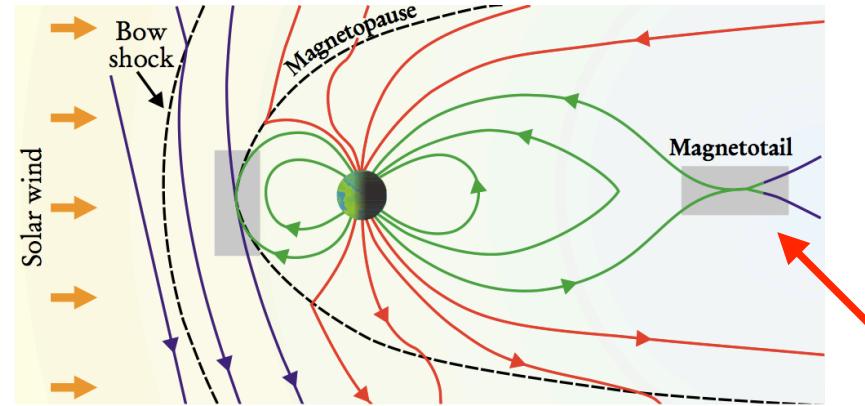
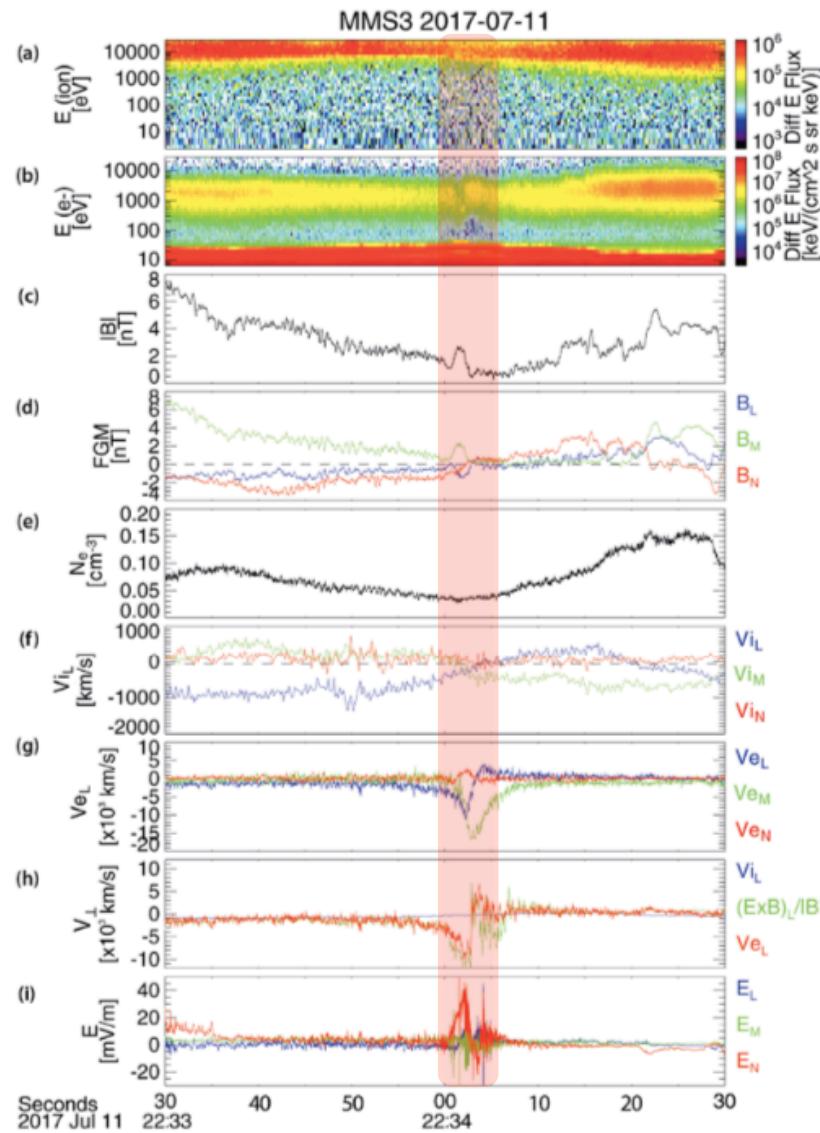
電子の速度分布関数：“Crescent” 成分



PICシミュレーション

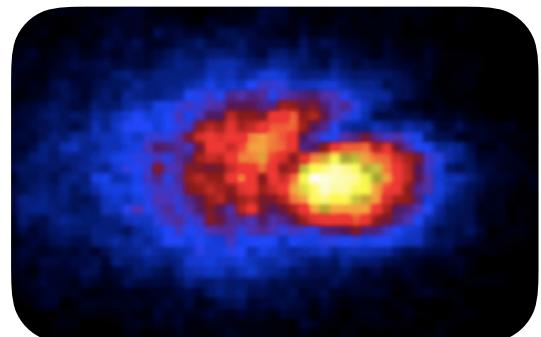
- ・電子の非ジャイロ（蛇行）運動の証拠を捉えた。

磁気圏夜側のリコネクション観測

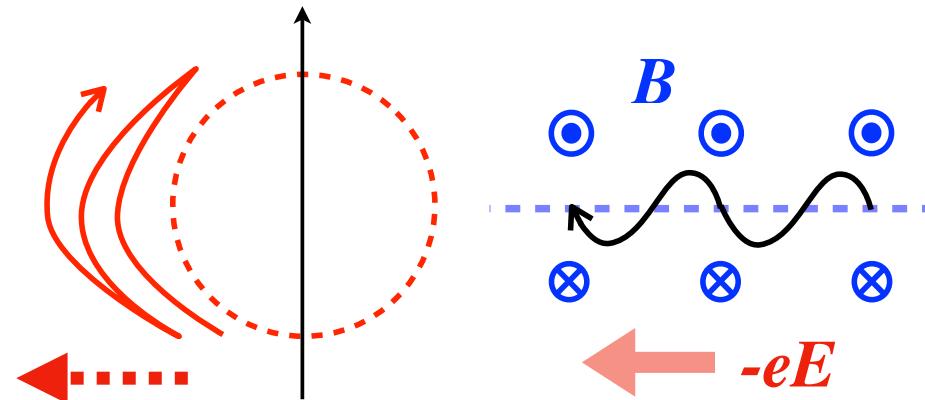


電子速度分布関数の多重 Crescent 成分

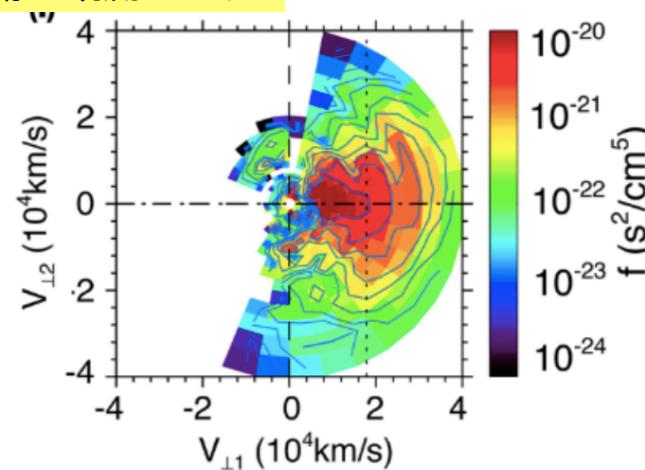
PICシミュレーション



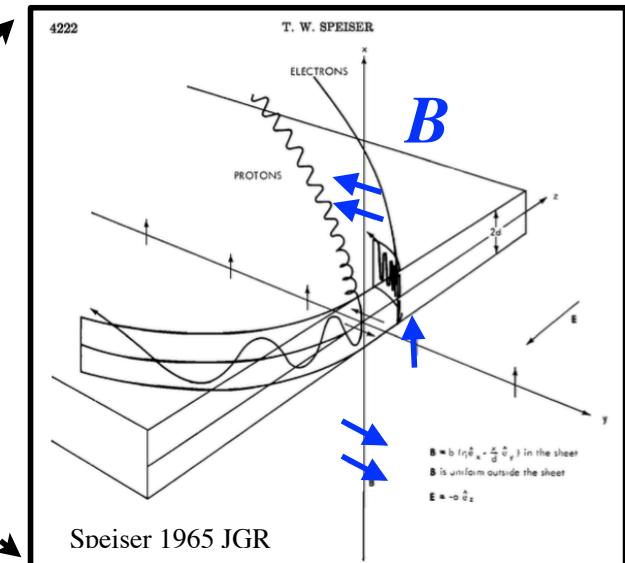
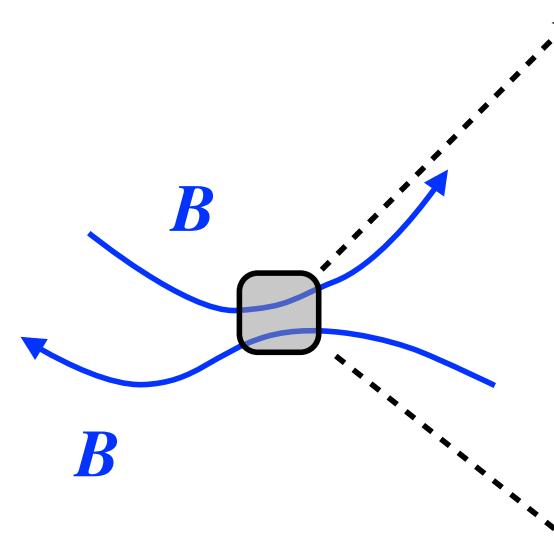
Hesse+ 2018 PoP



衛星観測データ



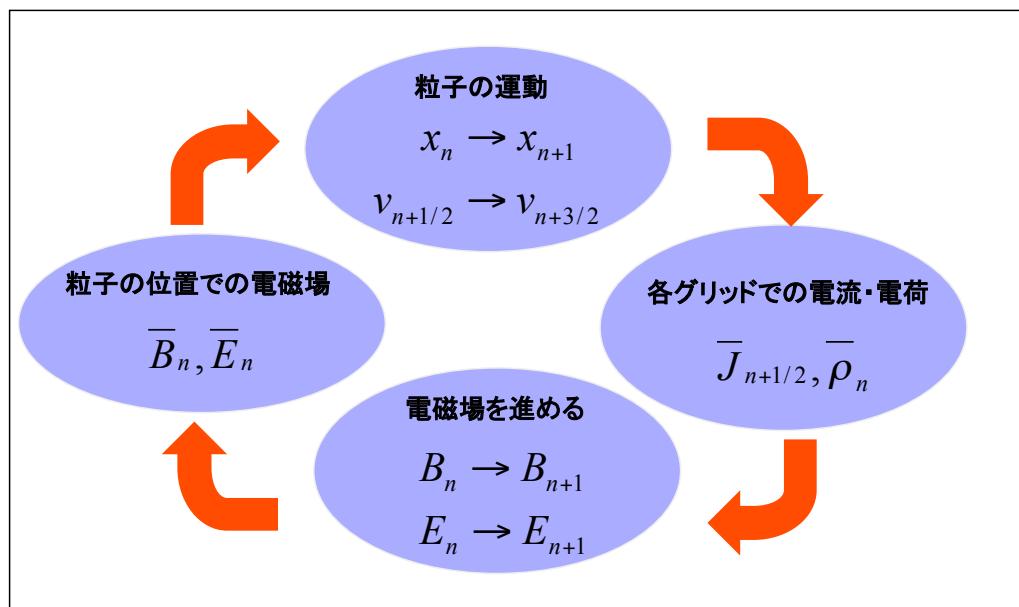
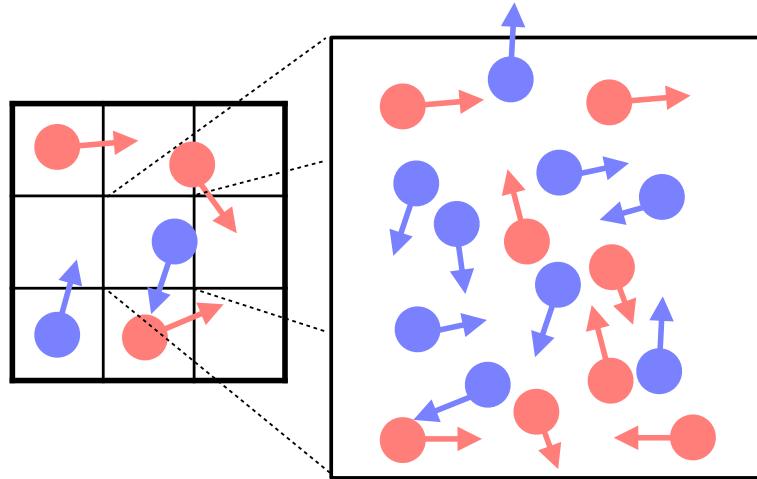
Torbert+ 2018 Science



- 電子の蛇行運動の部分要素を観測で捉えた。

4. プラズマ粒子シミュレーション の数値解法

Particle-in-cell (PIC) simulation



計算の長期・大規模化
⇒ 計算要素の高精度化で
累積誤差を減らす必要

粒子ソルバー

- 粒子ソルバー

$$\frac{\mathbf{x}^{t+\Delta t} - \mathbf{x}^t}{\Delta t} = \frac{\mathbf{u}^{t+\frac{1}{2}\Delta t}}{\gamma^{t+\frac{1}{2}\Delta t}}$$

$$\gamma^2 = 1 + (u/c)^2$$

$$m \frac{\mathbf{u}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} - \mathbf{u}^{t-\frac{1}{2}\Delta t}}{\Delta t} = q \left(\mathbf{E}^t + \frac{\mathbf{u}^t}{\gamma^t} \times \mathbf{B}^t \right)$$

- 時間分割

$$\mathbf{u}^- = \mathbf{u}^{t-\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{q}{m} \mathbf{E}^t \frac{\Delta t}{2}$$

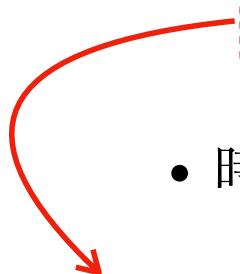
電場 (E) による加速

$$\frac{\mathbf{u}^+ - \mathbf{u}^-}{\Delta t} = \frac{q}{m} (\mathbf{v}^t \times \mathbf{B}^t)$$

磁場 (B) まわりの回転

$$\mathbf{u}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} = \mathbf{u}^+ + \frac{q}{m} \mathbf{E}^t \frac{\Delta t}{2}$$

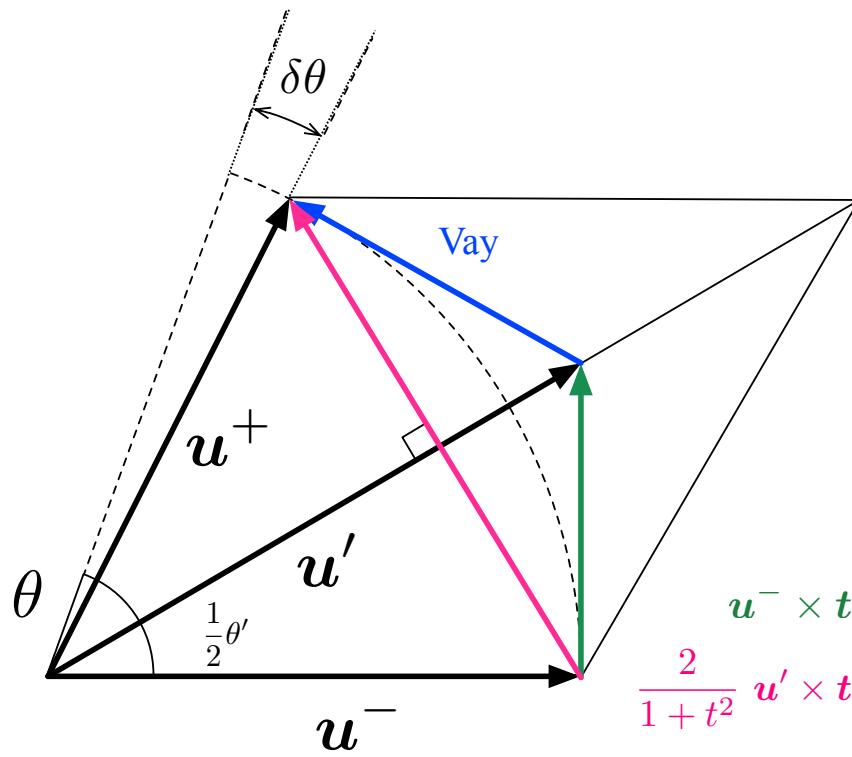
電場 (E) による加速



古典的 Boris solver

$$\delta\theta = \theta \left(\frac{1}{12}\theta^2 - \frac{1}{80}\theta^4 + \dots \right)$$

- PIC業界の標準解法
- 軽量・適度な精度



$$t \equiv \frac{q\Delta t}{2m\gamma^-} \mathbf{B}$$
$$\mathbf{u}' = \mathbf{u}^- + \boxed{\mathbf{u}^- \times \mathbf{t}}$$
$$\mathbf{u}^+ = \mathbf{u}^- + \boxed{\frac{2}{1+t^2} \mathbf{u}' \times \mathbf{t}}$$

Boris 1970
Hockney & Eastwood 1981
Birdsall & Langdon 1985

改良案 (1/2)：多重 Boris 法

(1) n 分割した部分要素を
旧手法 (Boris法) で解く

$$t \equiv \frac{\theta}{2n} \hat{b},$$

(2) 手順を n 回繰り返す。一般形は：

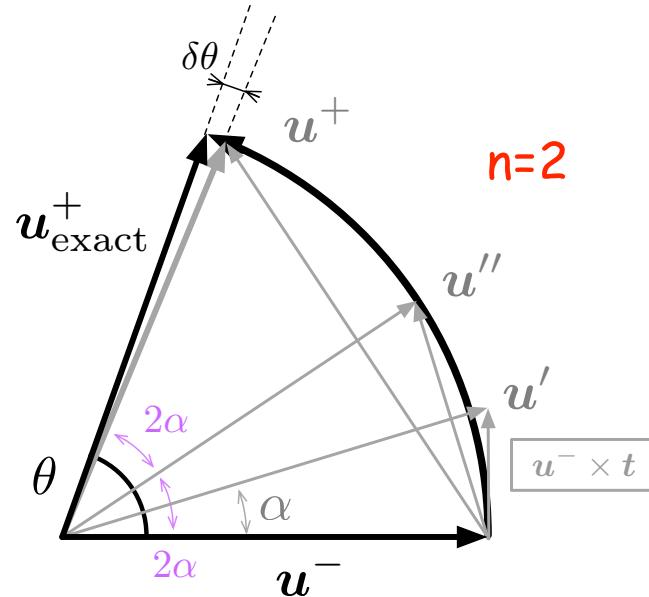
$$\mathbf{u}_n^+ = c_{n1} \mathbf{u}^- + c_{n2} (\mathbf{u}^- \times \mathbf{t}) + c_{n3} (\mathbf{u}^- \cdot \mathbf{t}) \mathbf{t}$$

$$c_{n1} = T_n(p)$$

$$c_{n2} = (1+p)U_{n-1}(p)$$

$$p \equiv \frac{1-t^2}{1+t^2}$$

$$c_{n3} = \begin{cases} 1+p & \text{(for } n=1\text{)} \\ (1+p) \left(U_k(p) + U_{k-1}(p) \right)^2 & \text{(for } n=2k+1\text{)} \\ 2 \left((1+p)U_{k-1}(p) \right)^2 & \text{(for } n=2k\text{)} \end{cases}$$

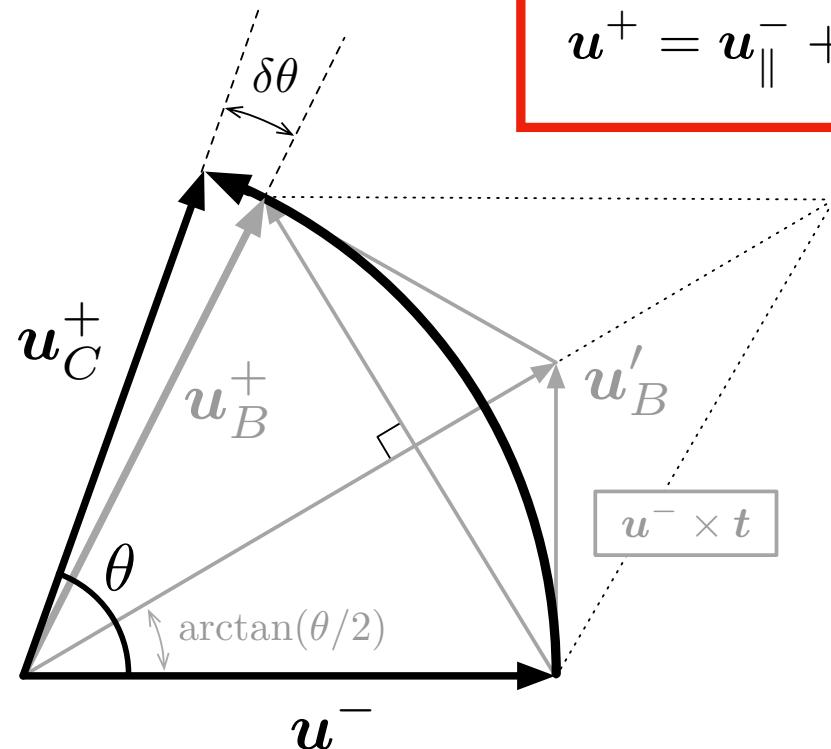


改良案 (2/2) : 厳密解法

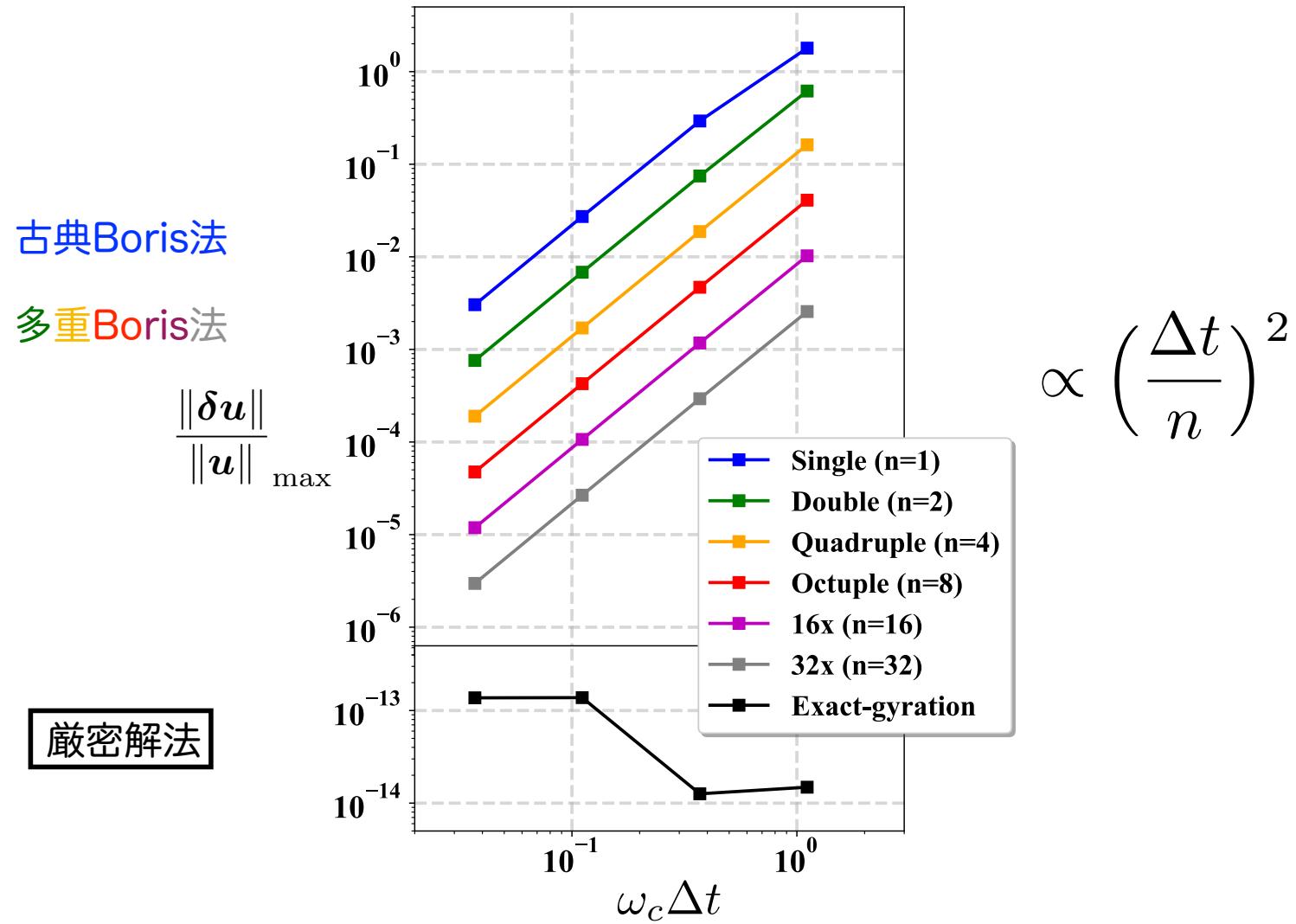
三角関数の計算コストは相対的に下がってきた
→ 回転公式を直接利用する

$$u_{\parallel}^- = \frac{(u^- \cdot B) B}{|B|^2} \quad \theta = \frac{q \Delta t}{m \gamma^-} B$$

$$u^+ = u_{\parallel}^- + (u^- - u_{\parallel}^-) \cos \theta + \frac{u^- \times B}{|B|} \sin \theta$$



ベンチマーク (1/2)：運動量の誤差

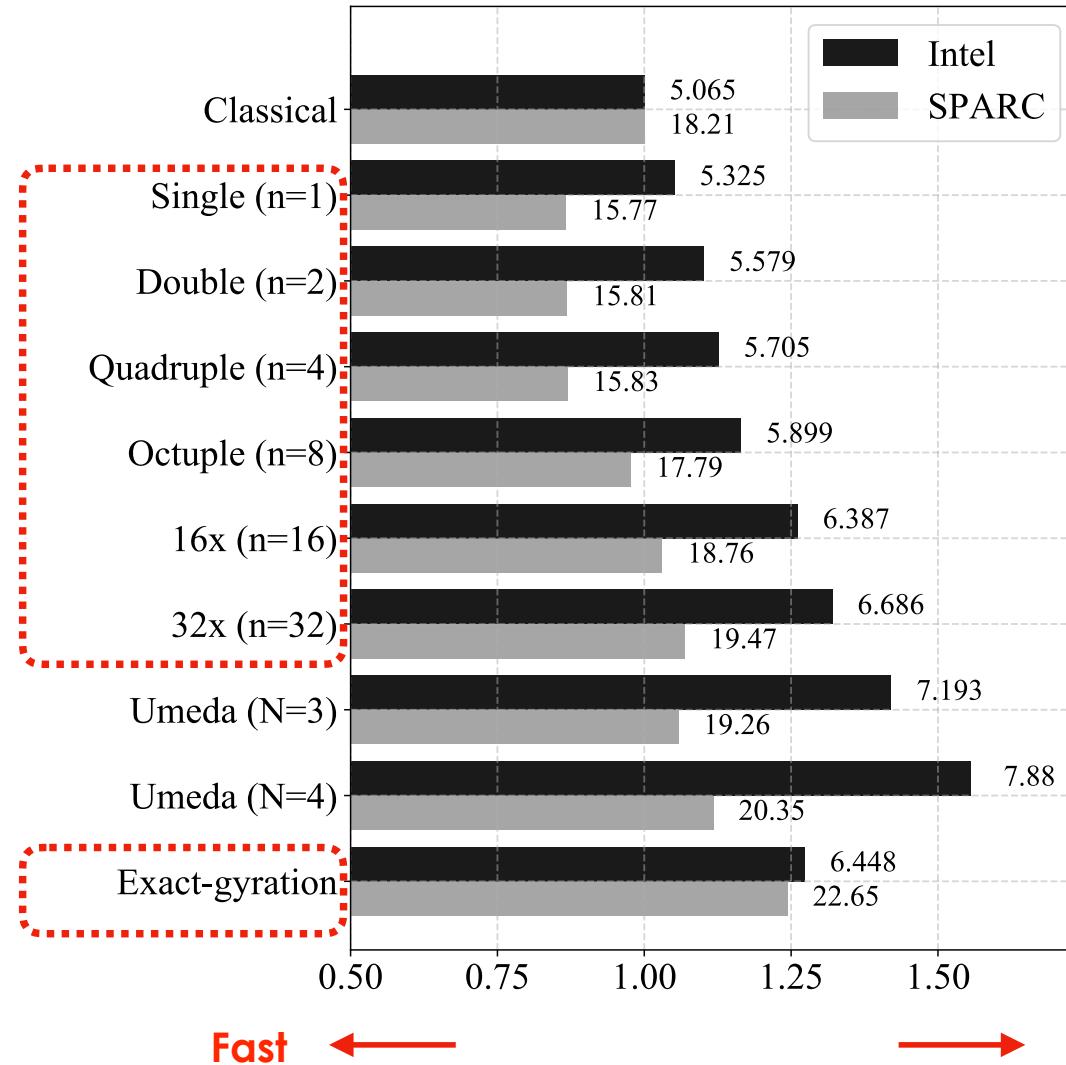


ベンチマーク (2/2) : 計算時間

古典Boris法

多重Boris法

厳密解法



まとめ

- 1. はじめに
- 2. プラズマ粒子 (PIC) シミュレーション
 - ローレンツ不变な散逸量：中心領域を検出
 - 全軌道解析：多くの新軌道の発見
- 3. 衫星観測
 - MMS衛星群の高解像度観測
 - 昼側リコネクションの観測：電子の粒子運動の証拠を捉えた
 - 夜側リコネクションの観測：電子運動の部分要素を捉えた
- 4. PIC シミュレーションの数値解法
 - n^2 倍、高精度な多重 Boris 法
 - 解析解を使う厳密解法

→ シミュレーション・観測の両面から
リコネクションの物理機構の理解へ