

# 複数の X-line を形成する磁気リコネクションでの電子加速

東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻 宇宙惑星科学大講座

藤本研究室 湯村 翼 (yumu@stp.isas.jaxa.jp)

Image by NASA

## 序論

高エネルギー粒子の生成は、宇宙プラズマにおける最大の問題の 1 つである。磁気リコネクションは、地球磁気圏や太陽から高エネルギー天体に至るまであらゆるスケールの宇宙プラズマにおいて高エネルギー粒子の生成源として注目される。人工衛星のその場観測やシミュレーションを用いた研究により、磁気リコネクションでの様々な電子加速メカニズムが提唱されてきた。しかしそれらの先行研究で行われたシミュレーションでは、初期に単一の X-line を形成するモデルを主に用いてきた。磁気圏尾部や惑星間空間の観測から磁気リコネクションにおける複数の X-line の形成が示唆されており、複数の X-line と電子加速の関連性を示唆する観測結果もあるが、これまでのシミュレーションで複数の X-line の効果は考慮されていない。本研究では磁気リコネクションにおいて複数の X-line の形成が電子加速メカニズムに与える効果を解明することを目的とし、初期に任意の数の X-line を形成するモデルを用いてシミュレーションを行った。

## シミュレーション

本研究では PIC (particle-in-cell) 法を用いて 2 次元の粒子シミュレーションを行った。PIC 法は、電磁場は Maxwell 方程式を解き格子点に離散的に割り当てプラズマは粒子として運動方程式を解き、プラズマの運動論的シミュレーションを実現する手法である。座標系は地球磁気圏尾部における GSM 座標系を参考に、電流層に平行な成分を  $x$ 、電流層電流の方向 (2 次元空間の面外成分) を  $y$ 、電流層に垂直な成分を  $z$  とした (図 1)。電流層の初期構造は Harris 平衡解

$$B_x(z) = B_0 \tanh(z/d), \quad n(z) = n_0 / \cosh^2(z/d)$$

に  $z$  方向に任意の数の磁場の擾乱を加えた。

複数の X-line を形成する場合の最も大きな特徴は磁気島の合体である。磁気島は磁力線の構造と電子密度からわかり、その時間変化から合体の様子を知ることができる (図 2)。

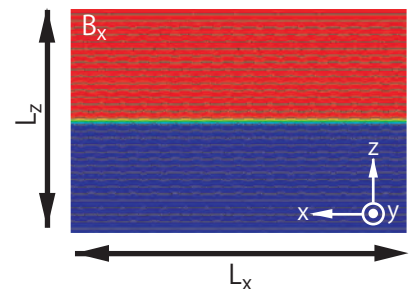


図 1 シミュレーション座標系と初期の Harris 平衡解による電流層構造。

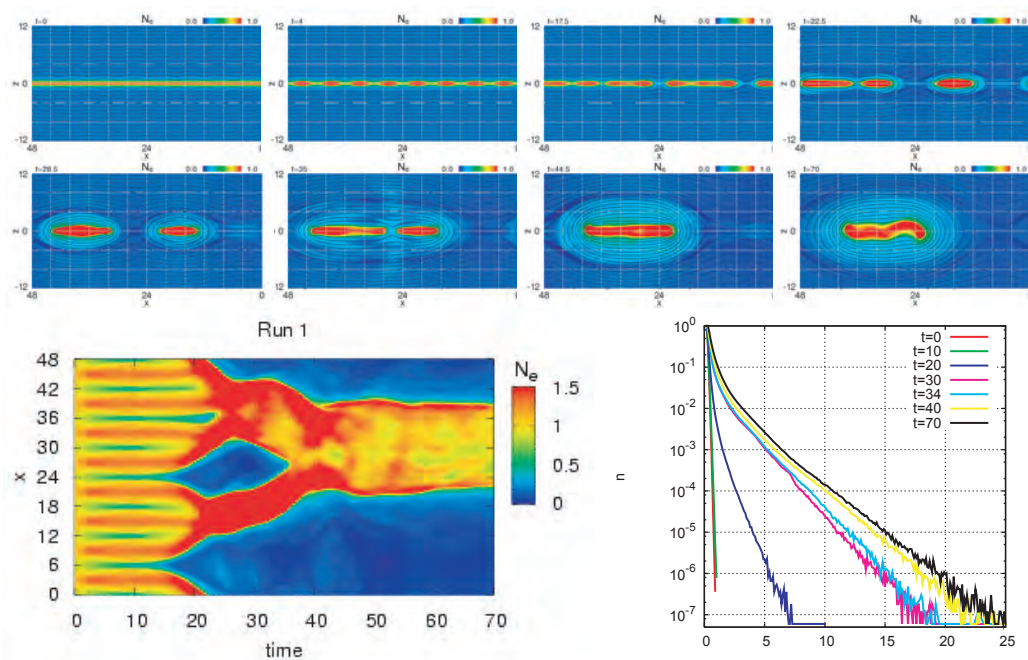


図 2 (上) 電子密度の時間発展でみる磁気島合体の様子。(左下) 磁気中性面における電子密度の時間発展。磁気島合体の様子がわかる。(右下) 電子エネルギースペクトルの時間変化。横軸はエネルギー  $\epsilon = \gamma - 1$ 、縦軸は各エネルギー帯での電子数。ただし全電子数で規格化した。電子加速は磁気島合体と対応する。

## 複数の X-line の効果

電子加速は磁気島合体に対応して起こり ( 図 2), 磁気島合体が多段階に分かれる場合には 電子加速も多段階に分かれて起こった. 多段階の電子加速によって磁気島を取り囲む多重リング状の分布を形成した ( 図 3). 電子加速領域を調べると, X-line, pileup 領域に加え磁気島合体領域でも電子が加速された. 超高エネルギー電子の軌道と加速履歴を調べた結果, 超高エネルギー電子の生成には X-line での加速が不可欠であることがわかった. しかし X-line での加速のみで超高エネルギーに達する電子はごく僅かで, 多くは X-line での加速後に pileup 領域や磁気島合体領域でさらなる加速を受けて超高エネルギーに達した ( 図 4).

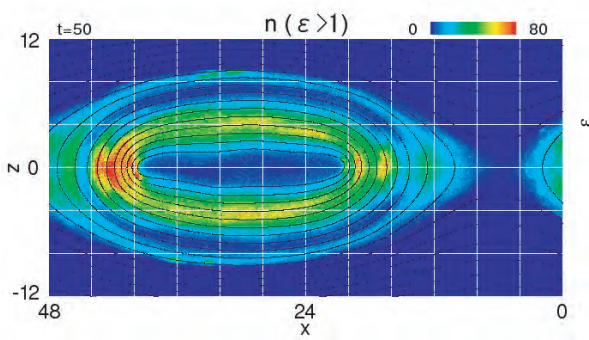


図 3 磁気島の 2 段階合体によって形成される高エネルギー電子の 2 重リング分布.

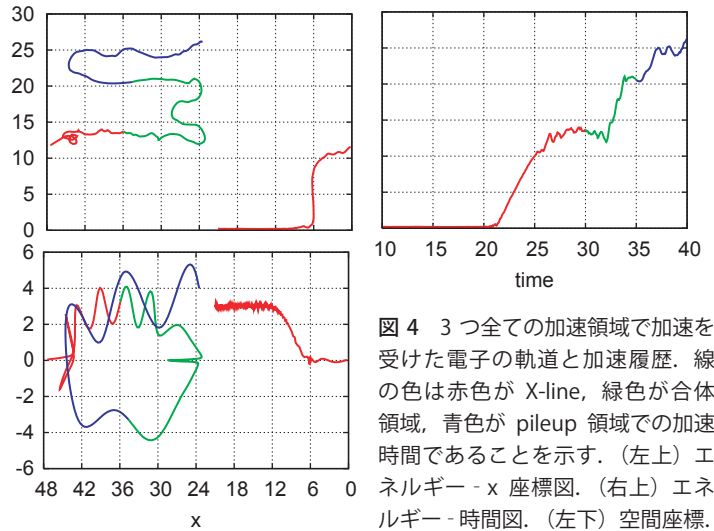


図 4 3 つ全ての加速領域で加速を受けた電子の軌道と加速履歴. 線の色は赤色が X-line, 緑色が合体領域, 青色が pileup 領域での加速時間であることを示す. (左上) エネルギー - x 座標図. (右上) エネルギー - 時間図. (左下) 空間座標.

## パラメータ設定依存性

様々な計算設定の下でシミュレーションを実行し結果を比較した. 計算領域の大きさの異なる計算 1 ( $L_x \times L_z = 48 \lambda_i \times 32 \lambda_i$ ), 計算 2 ( $24 \times 32$ ), 計算 3 ( $96 \times 64$ ) を比較した結果, 計算領域が大きいほど電子の得るエネルギーは増加し高エネルギー電子は多く生成された. エネルギースペクトルは磁気リコネクションのスケールに依存し, 本研究における最大スケールの計算 ( 計算 3) では磁気島合体領域加速の規模が大きくなり ( 図 5) 非熱的電子が多数生成された ( 図 6).

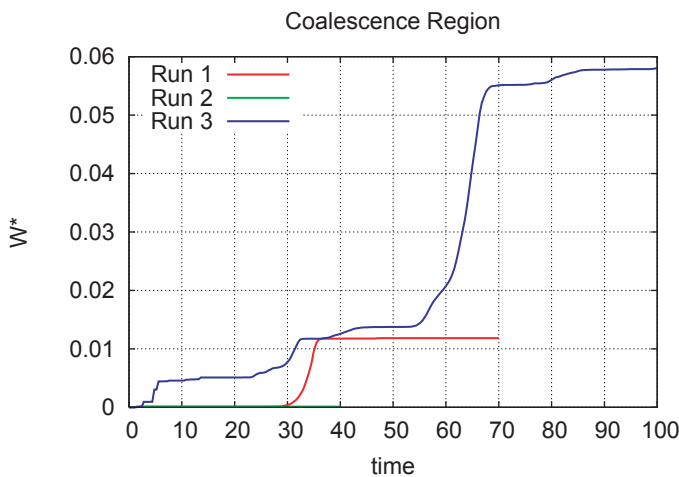


図 5 磁気島合体領域で電子が得るエネルギーの時間変化. 計算 3 では電子は磁気島合体領域は大きな電子加速源となる

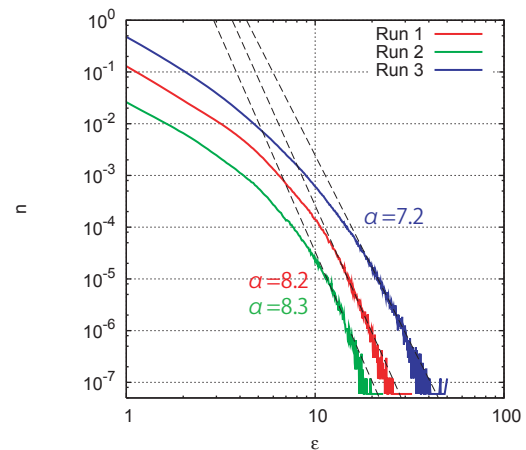


図 6 計算領域の大きさの異なる計算の電子エネルギースペクトル. 波線はスペクトルの裾を冪乗関数  $n \propto \epsilon^{-\alpha}$  でフィッティングしたものである. 計算領域の最も大きい計算 3 はスペクトルの裾が他の計算よりもハードになった.

## 結論

- 複数の X-line を形成する磁気リコネクションにおける電子加速を粒子シミュレーションを行って調べた
- 磁気島の多段階合体によって高エネルギー電子は多重リング状に分布する: 観測への寄与
- X-line と pileup 領域に加え磁気島合体領域も電子加速領域となる: 新たな電子加速メカニズムの発見
- リコネクションのスケール拡大とともに磁気島合体領域での加速は大規模になり多数の非熱的電子をつくる