

人工小型磁気圏と太陽風の相互作用に関する プラズマ粒子シミュレーション

白井 英之、森高 外征雄

(神戸大学大学院システム情報学研究科)、

CRESTマルチスケールプラズマ粒子シミュレーションチーム

JST/CREST



背景

宇宙環境

その場観測、地上観測

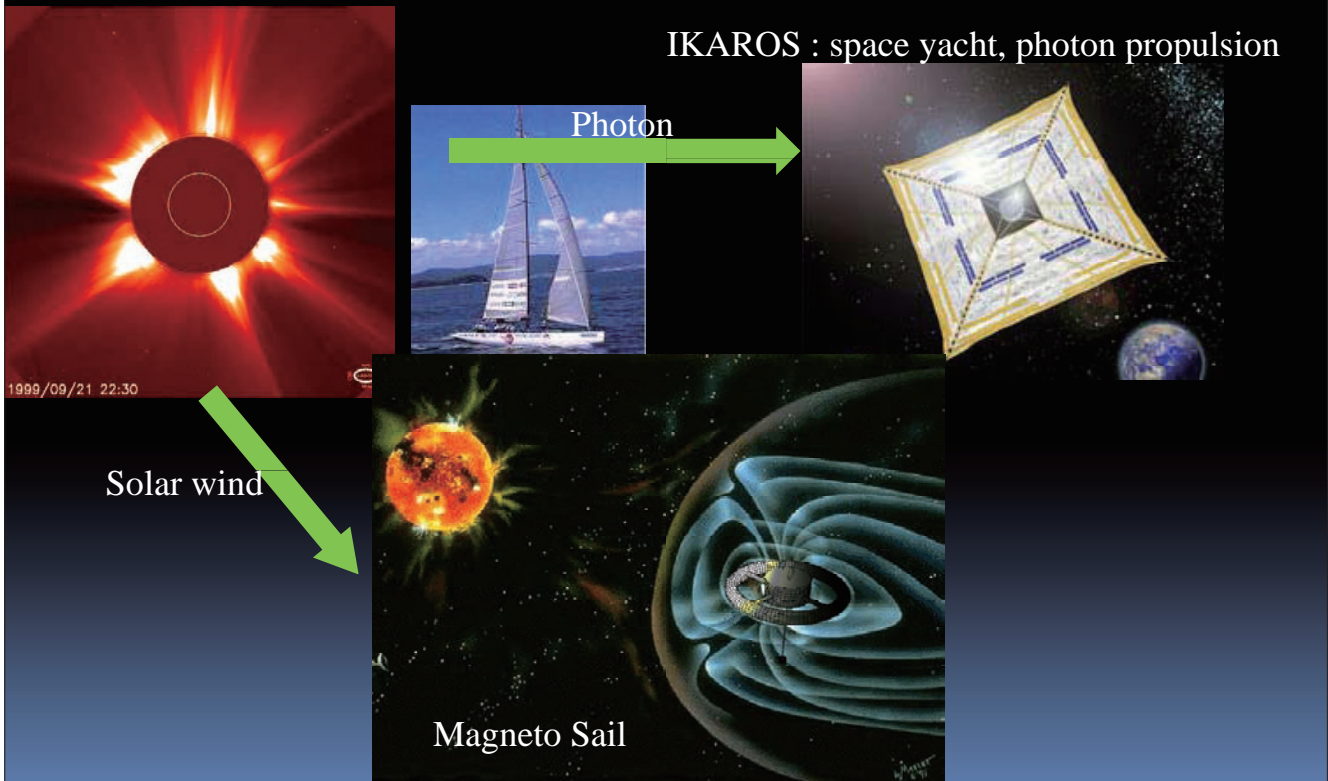
飛翔体、宇宙飛行士への影響

積極的に利用する。

例えば、太陽エネルギーを惑星間航行システムに利用しようとする試み

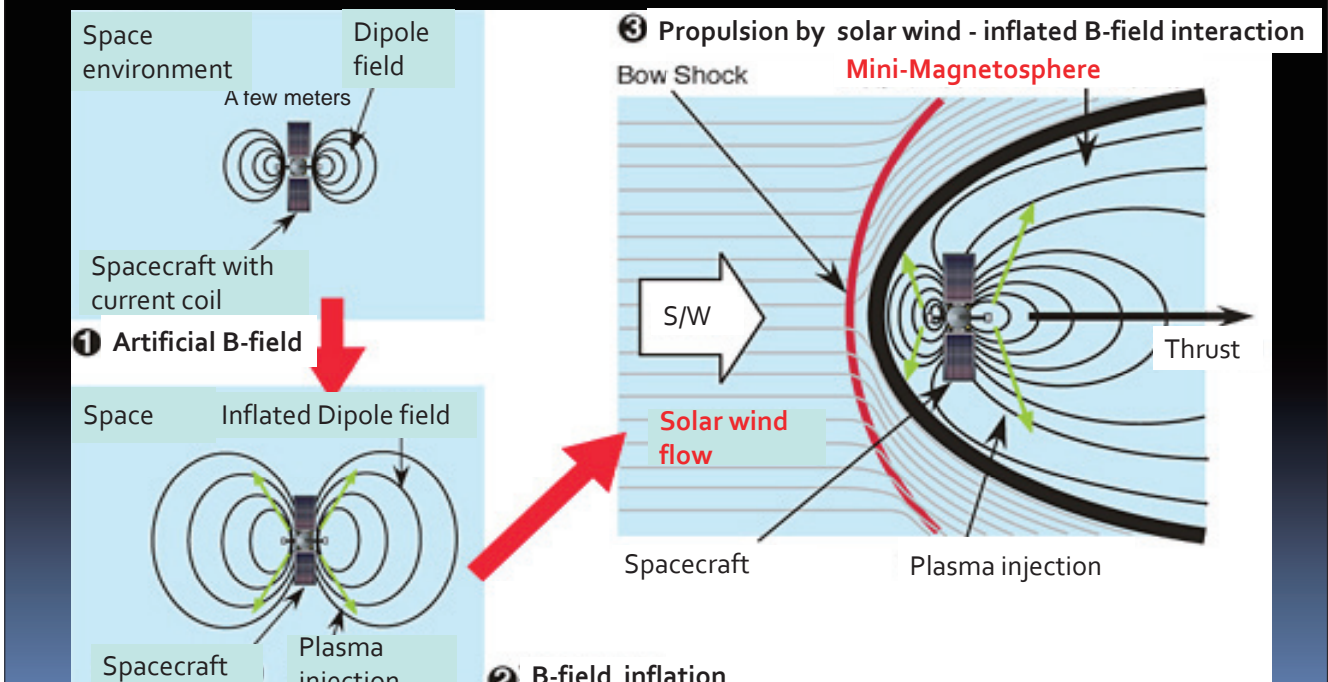
太陽エネルギーを利用した航行システム

The next generation space propulsion system for interplanetary cruise



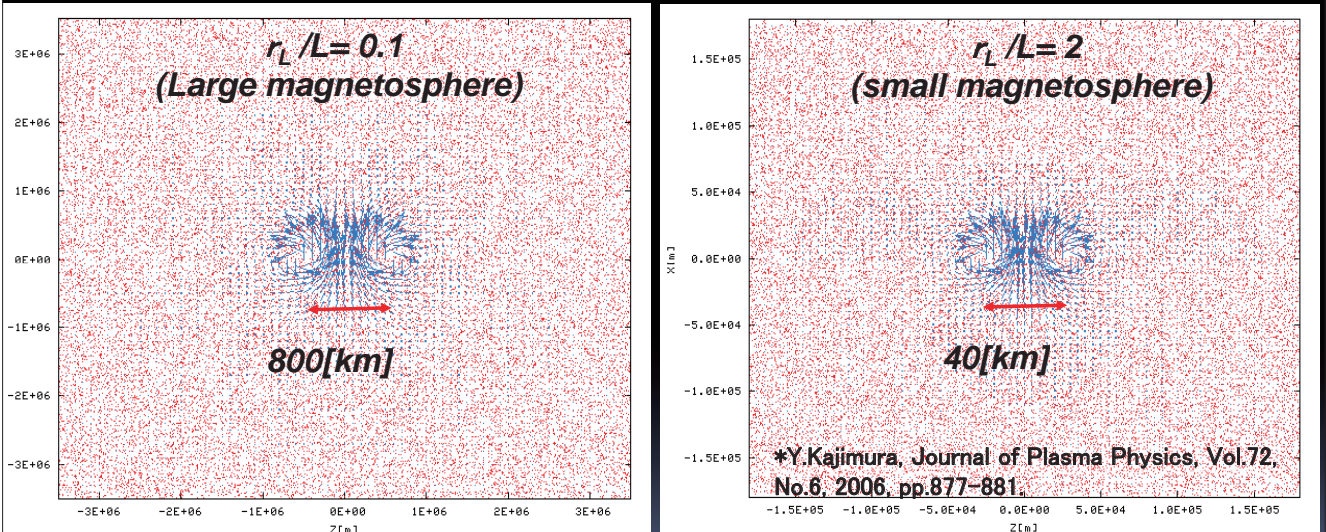
Magneto Plasma Sail (MPS)

- Magneto sail by Zubrin (1991)
- M2P2 (Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion) by Winglee (2000)
- JAXA started the evaluation of the Magneto Plasma Sail (MPS)



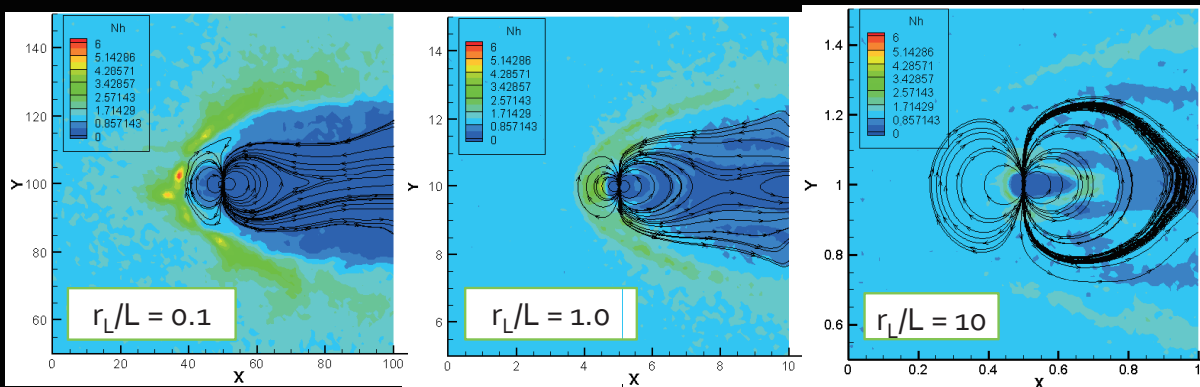
プラズマ流と小規模ダイポールの相互作用

- ハイブリッド粒子モデル (電子は流体、イオンは粒子)
- r_L : イオンラーマ半径 (ダイポール磁気圧とプラズマ流動圧がつりあう場所)
Case 1: $L=800\text{km}$
Case 2: $L=40\text{km}$



当然ながら、case 2では、イオンラーマ半径が相対的に大きいので、相互作用は小さい。(小型磁気圏の形成)

$r_L/L = 0.1 - 10$ における磁場形状(IMF無し) (JAXA 松本)



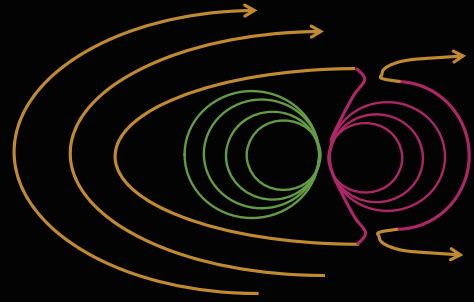
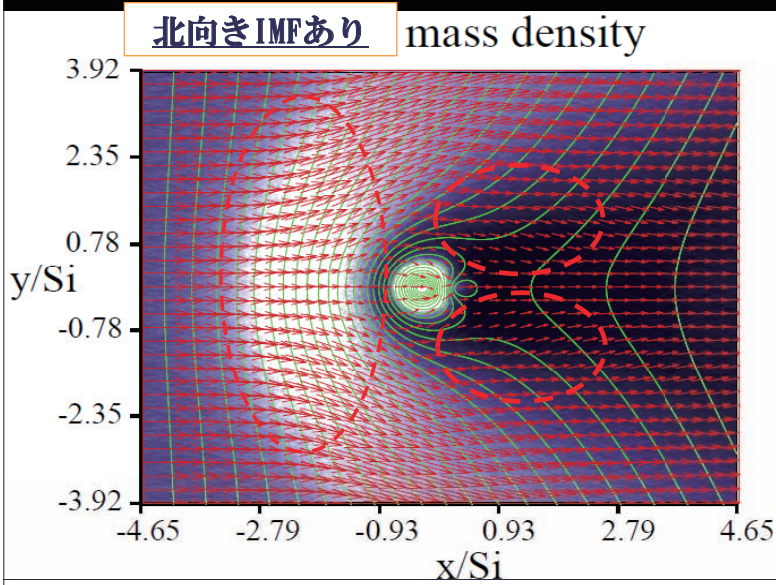
磁場強度を変化。もちろん、磁気圏は小さくなる。



ただ、よく見ると、イオンラーマ半径は十分大きいのに、前面に境界層的構造は見える。

電子 (イオンよりは磁化されている) が関与?

惑星間磁場(IMF)との相互作用 (2次元モデル)



IMFを考慮した場合、
磁気リコネクションにより
磁気圏内部に
磁場が蓄積され、
急峻な電流構造が形成。

バウショックライクな構造も前面に形成
人工磁気圏がイオン慣性長以下の場合、これらの現象がオリジナル磁気圏の構造に大きく影響。

惑星間磁場(IMF)との相互作用 (2次元モデル)

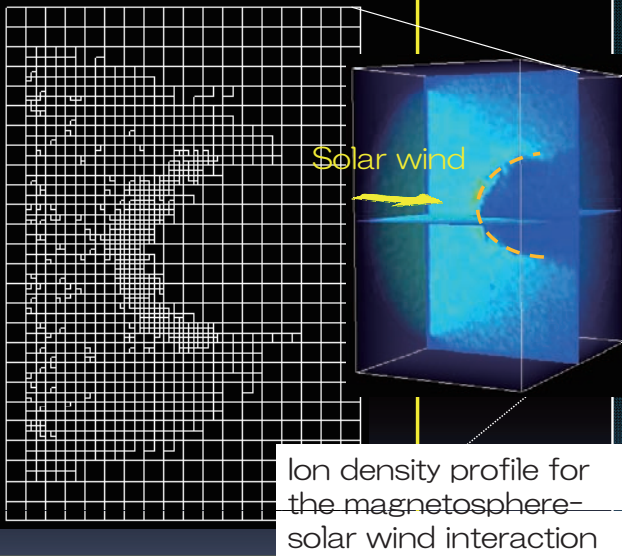
3次元ではどうなる？
電流構造はどう変化する？
推力への影響は？



3Dマルチスケール
シミュレーションで
詳細解析 (現在進行中)

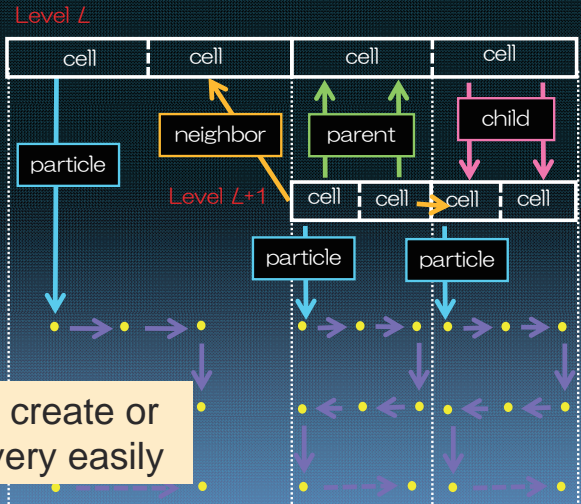
Application of AMR to PIC

Example of AMR grid system



FTT (Fully Threaded Tree) data structure

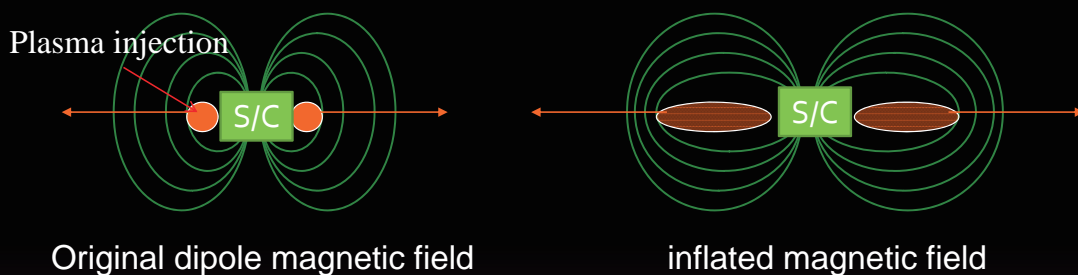
- Hierarchical system of grids is maintained by pointers.
- Each cell is treated as an independent unit organized in a refinement tree structure rather than conventional element of arrays.



FTT structure using pointers enables us to create or destroy the hierarchical structure of grids very easily

小型ダイポール磁場を拡大(1)

- プラズマと磁場の関係を逆に利用して磁場構造を拡大したい。
- 衛星からプラズマ放出してダイポール磁場を外側に引っ張る。
- 雪かき効果的に、磁場密度 (B) の高い領域が外側にできるのでは？
“magnetic cavity” near the injection point.



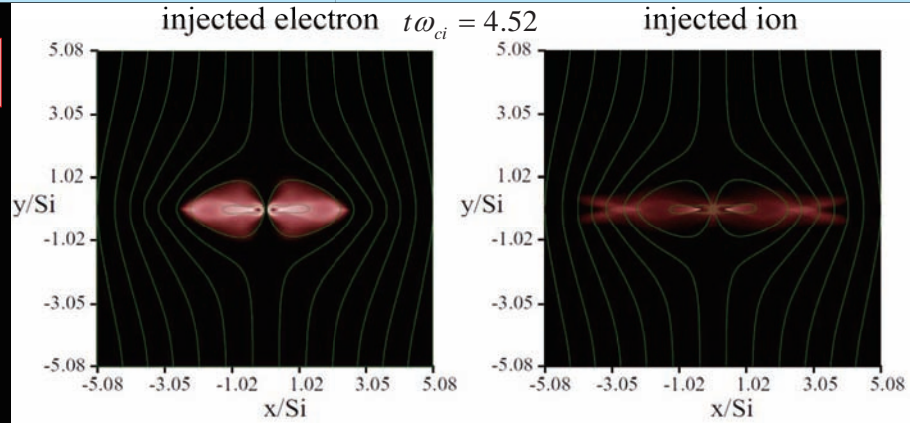
イオンと電子、同時に放出する。
重イオンはラーマ半径大。一方、電子は磁化。
電子、イオンとも粒子として扱う全粒子シミュレーションを実行。

小型ダイポール磁場を拡大(2)

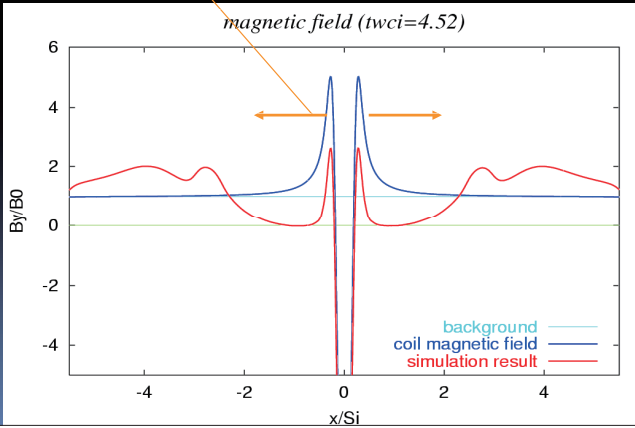
$$\rho_{inject} / L_{\nabla B} = 5.02$$

injected plasma density (color contour)
magnetic field line (green lines)

plasma injection

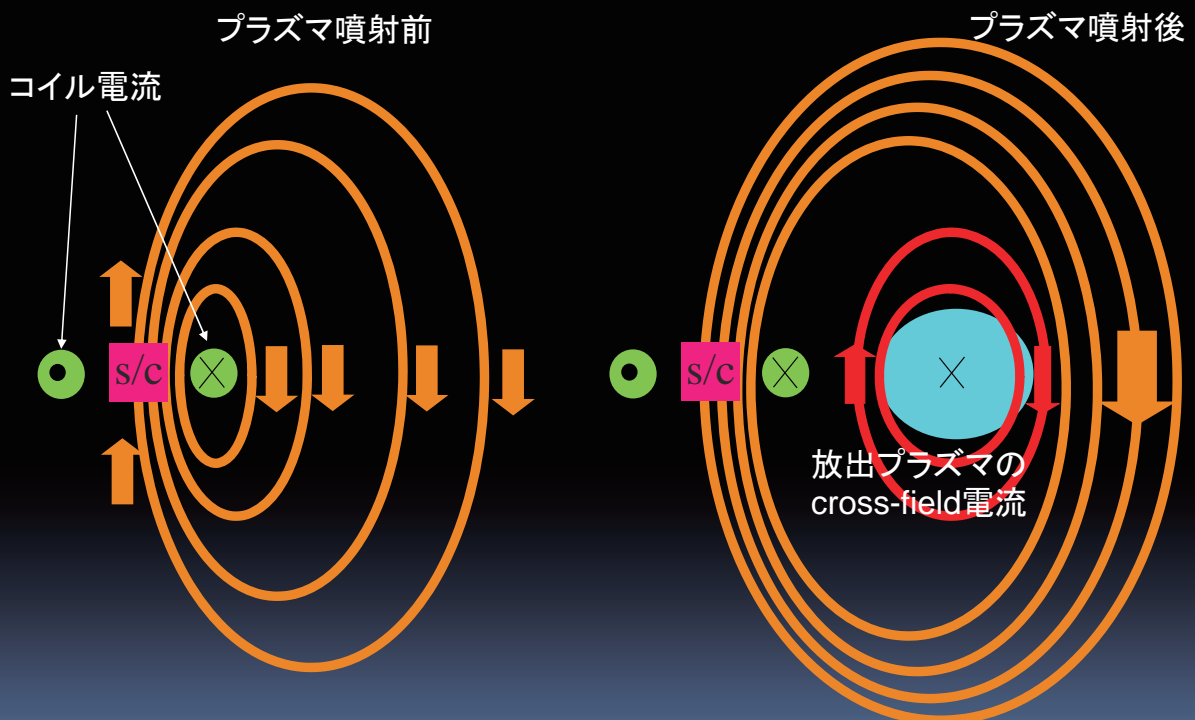


Si : ion inertia length in background plasmas



- 磁場（背景+ダイポール）の空間構造は大きく変化。
- 衛星近傍では磁場がほとんどゼロ
- 電子密度の端より外側で、Bの盛り上がり。

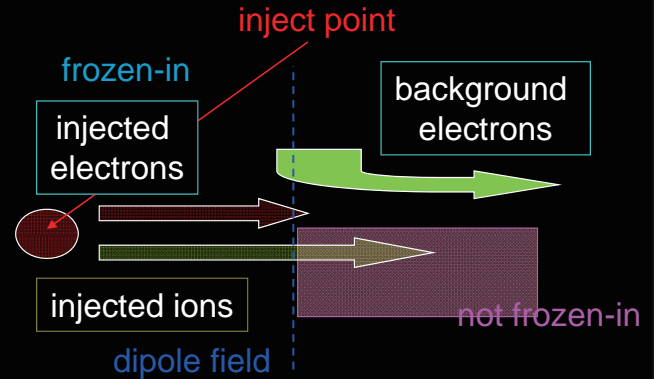
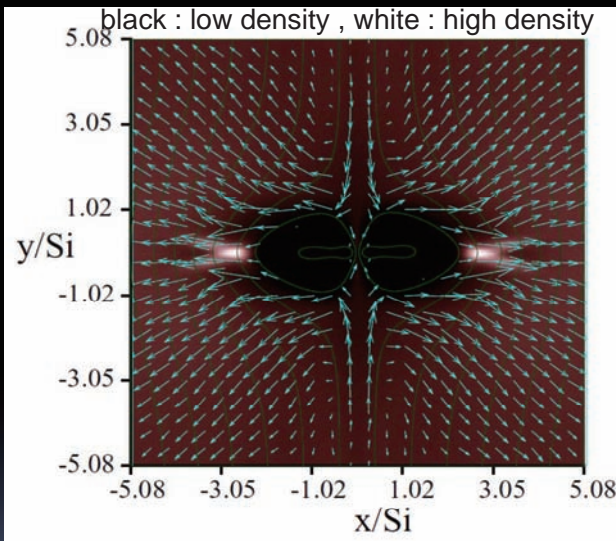
磁場分布の変化



噴射プラズマによるcross-field 電流により、衛星近傍磁場構造が変形

背景電子の役割

background electron flow (blue arrow)
and density (color contour)



- 背景電子は極域からダイポール領域に流れ込んできて
- ダイポール場の表面を流れ、
- 放出電子が中和できないイオン領域に集まる。

背景電子は、オリジナルのダイポール場を拡大するのには貢献していない。単に、背景磁場を押しやっているだけ。

まとめ

- 宇宙環境利用として、太陽風を磁場帆で受けて推力を得る磁気セイル
- 人工小型ダイポール磁場と太陽風の相互作用の理解が必要
- イオンスケール（慣性長） \gg ダイポール磁場スケール \gg 電子スケール という関係
- プラズマの運動論的効果を考慮した粒子シミュレーション解析が有効
- 電子ダイナミクスが小型磁気圏形成や磁場拡大に影響（定量的な解析は現在進行中）
- 月面磁気異常と太陽風の相互作用：MHD近似では無理。
- 水星磁気圏への応用