

# 月面磁気異常上空での 太陽風プラズマ応答に関する プラズマ粒子シミュレーション

---

臼井英之<sup>1</sup>, 松原琢磨<sup>1</sup>, 三宅洋平<sup>1</sup>, 西野真木<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学 大学院システム情報学研究科

<sup>2</sup>名古屋大学 宇宙地球環境研究所



# アウトライン

---

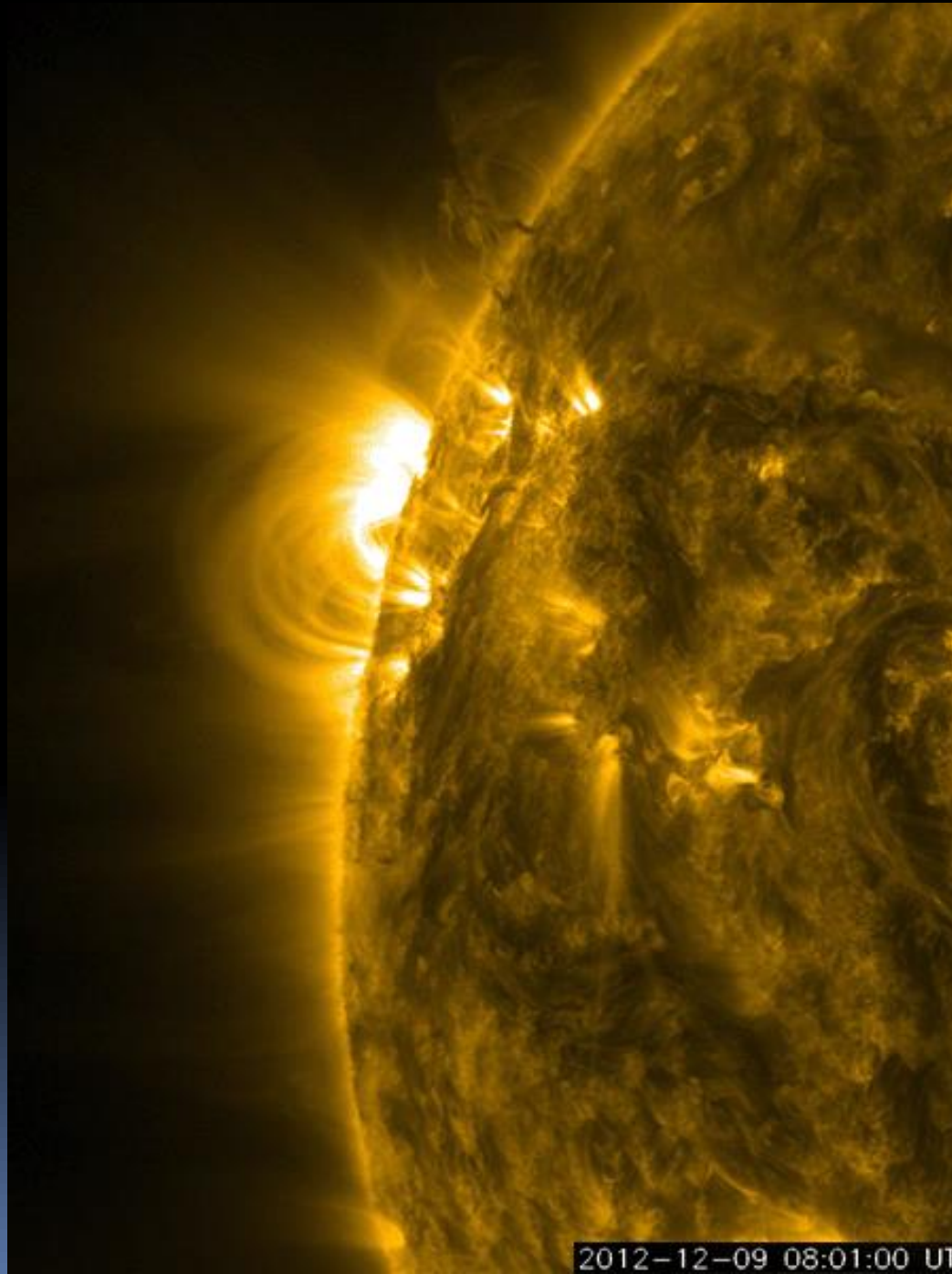
- 宇宙プラズマ環境
- 宇宙プラズマ粒子シミュレーション
- 月面磁気異常と太陽風プラズマの相互作用
- 小型磁気圏境界層
- まとめ

# アウトライン

---

- 宇宙プラズマ環境
- 宇宙プラズマ粒子シミュレーション
- 月面磁気異常と太陽風プラズマの相互作用
- 小型磁気圏境界層
- まとめ

# ダイナミックな太陽活動変動



太陽風プラズマ:

400km/s,

数個/cc,

IMF

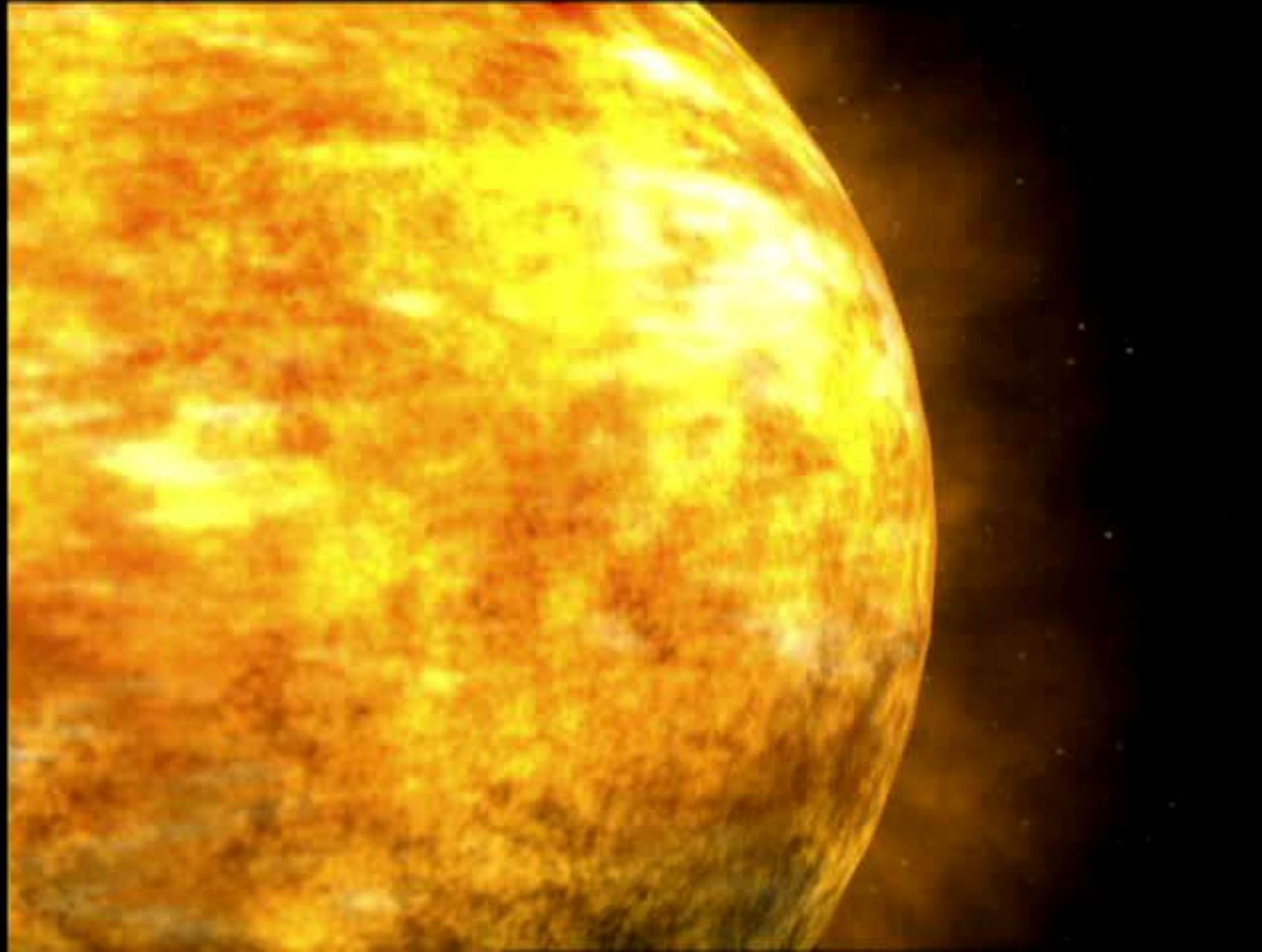
無衝突



惑星磁気圏の形成

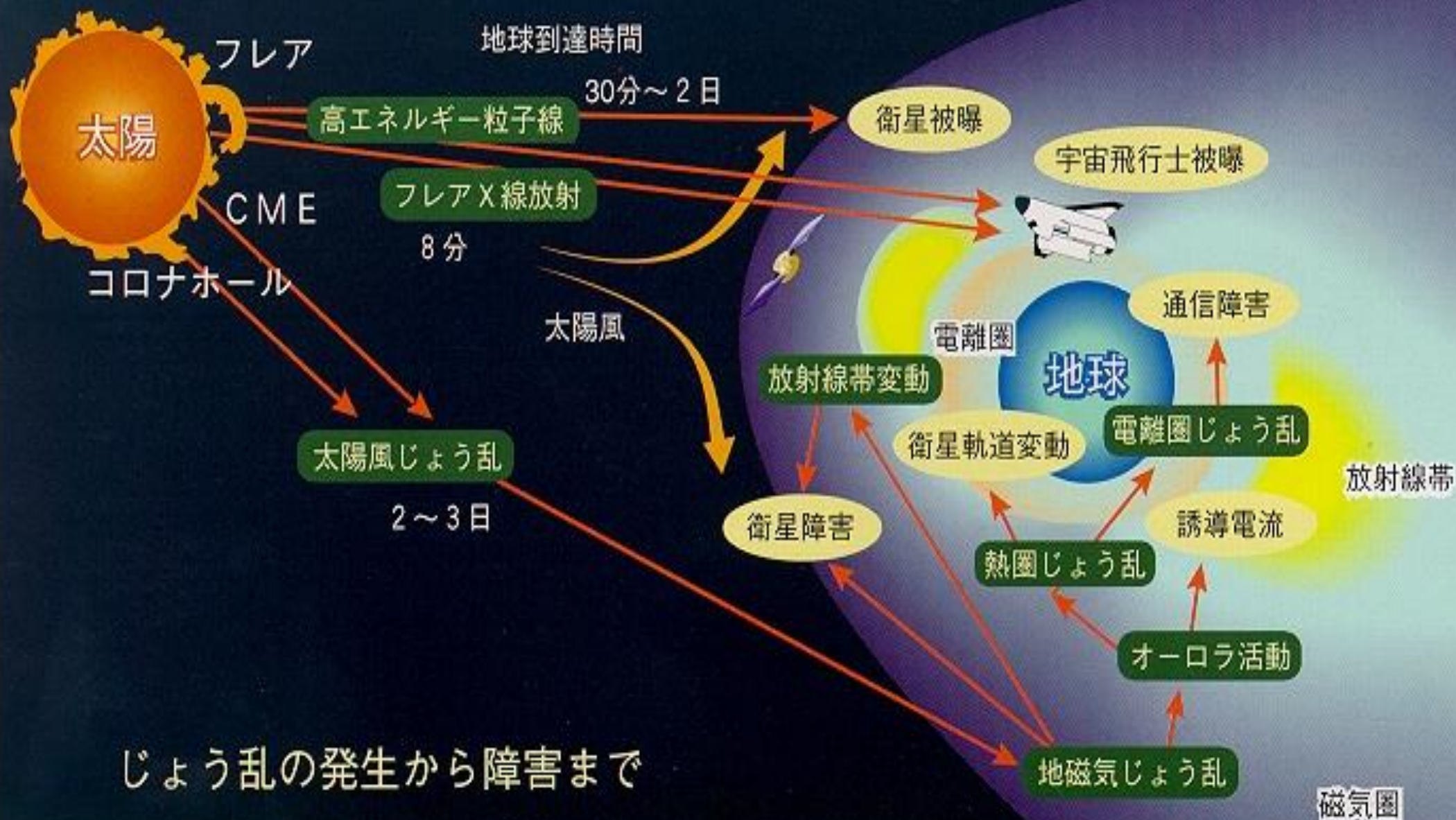
# 太陽活動による地球近傍宇宙環境への影響

---





# 宇宙天気と衛星障害



じょう乱の発生から障害まで

太陽面で発生したじょう乱は、その形態によって8分から数日後に地球に達し、宇宙と地上にさまざまな障害を引き起こします。

# アウトライン

---

- 宇宙プラズマ環境
- 宇宙プラズマ粒子シミュレーション
- 月面磁気異常と太陽風プラズマの相互作用
- 小型磁気圏境界層
- まとめ

# 何を解き進めるのか。

宇宙プラズマの動き(Dynamics)とそれによって生じる電磁場変動(いわゆる電波)。互いに影響しあう。

電波(電界、磁界からなる)を解く方程式  
(Maxwell方程式)

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0\end{aligned}$$

プラズマダイナミクスを解く方程式  
(運動方程式)

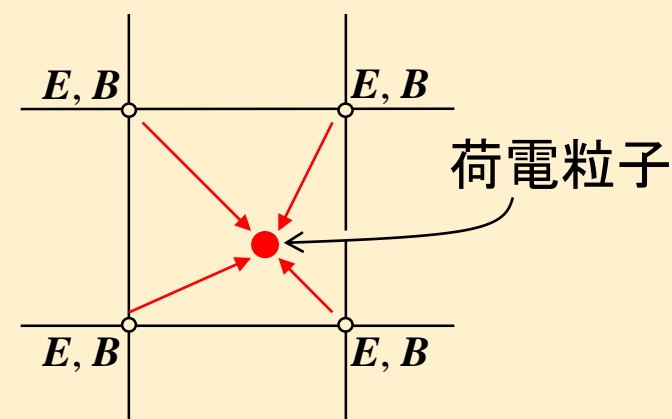
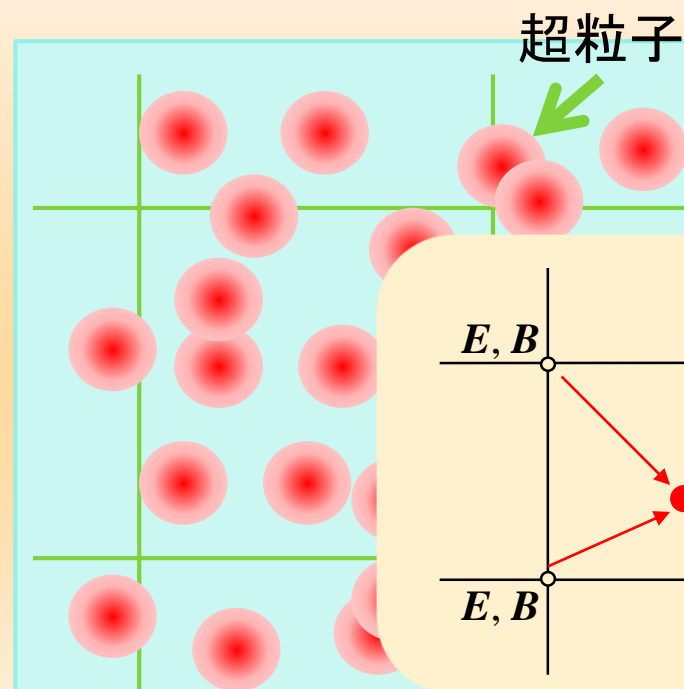
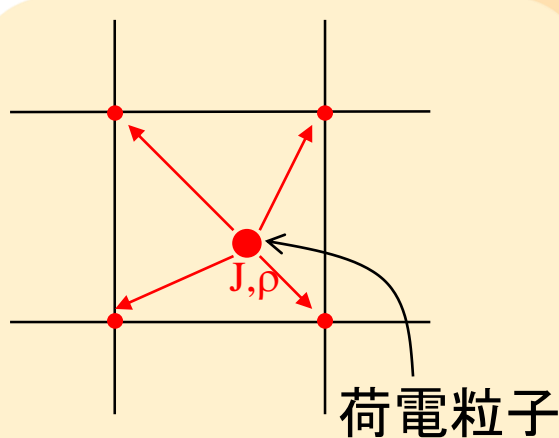
$$\begin{aligned}\frac{dv_i}{dt} &= \frac{q_s}{m_s} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) \\ \frac{dx_i}{dt} &= \mathbf{v}_i\end{aligned}$$

2つの方程式を組み合わせて、電磁場(電波)とプラズマの動きを解き進める。



# Particle-In-Cell method

例えば2次元プラズマ空間



粒子の速度値を近傍格子点に配分し、  
格子点で電流計算

各格子点において  
電流から電磁界更新  
(Maxwell式)

各粒子の速度、位置更新  
(運動方程式)

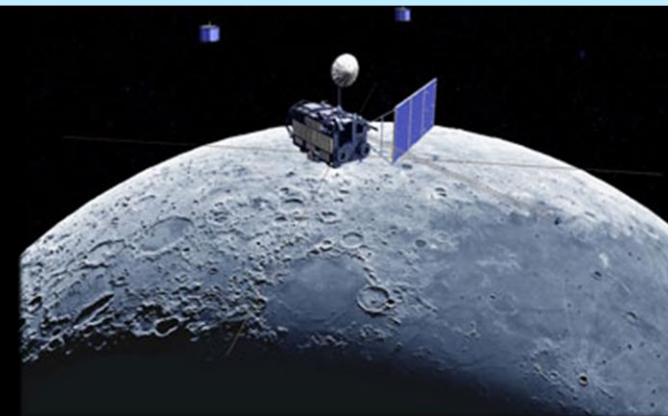
# アウトライン

---

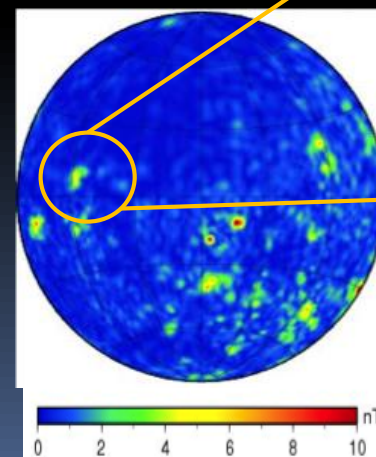
- 宇宙プラズマ環境
- 宇宙プラズマ粒子シミュレーション
- 月面磁気異常と太陽風プラズマの相互作用
- 小型磁気圏境界層
- まとめ

# 月面磁気異常

- 月面で局所的に磁化された地殻「**月磁気異常**」の存在
- 2007年月探査衛星SELENEによる観測結果から**磁気異常と太陽風プラズマの相互作用**が示唆
  - **小型磁気圏**の存在
  - 磁気圏境界層では電流が存在



プラズマ粒子シミュレーションを用いた解析を行う



Cf. Kaguya Magnetometer at 30 km



Albedo(Blewett et al. *GRL* 2007)

# 太陽風プラズマから見た月面磁気異常の特徴

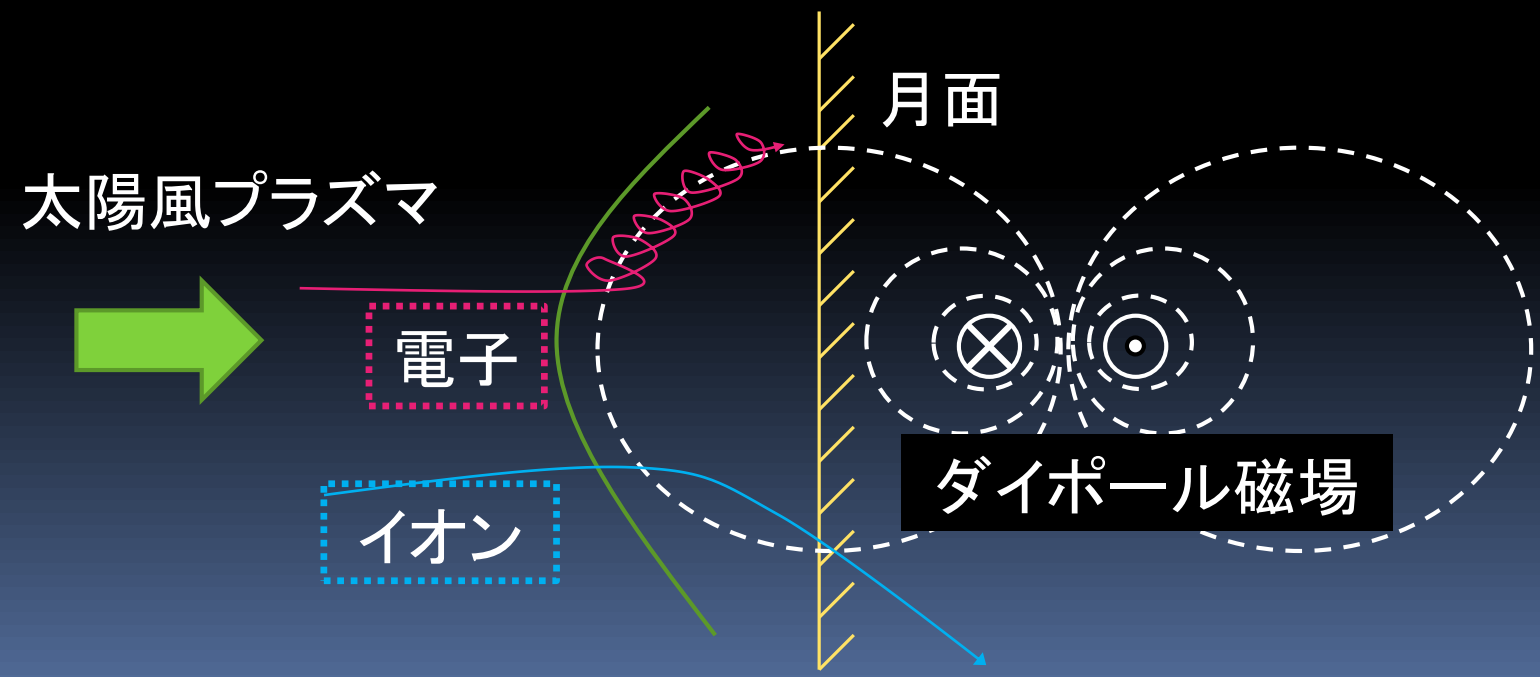
## メソスケール

電子ジャイロ半径  
(熱速度)

磁場構造スケール  $L$

イオンジャイロ半径 (慣性長)  
(太陽風速度)

→ 電子はほぼ磁化されているが、イオンはそれほどでもない。





# 次世代の惑星間航行システムの推進評価

## 磁気セイルシステム

推力に太陽風エネルギーの利用

100km ~ 数10km  
(イオン慣性長より小さい)

太陽風と小型磁気圏の相互作用 ⇒ 推力

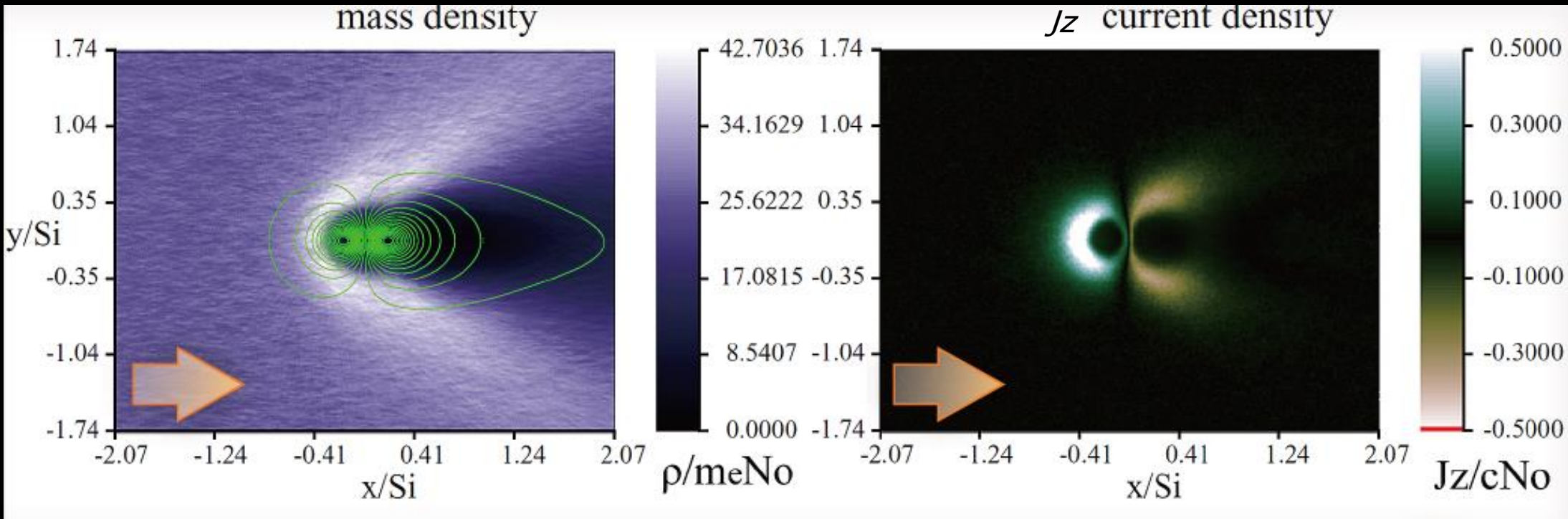
© JAXA

人工磁場の帆で太陽風を受け止められるのか？



# ミニ磁気圏の形成

Si/L=2.5 (磁場構造スケールがイオン慣性長の2.5倍)



↔  
イオンスケール

(慣性長: ion inertia length)

- メソスケールのミニ磁気圏形成
- 磁気圏境界Cross-field電流層

# アウトライン

---

- 宇宙プラズマ環境
- 宇宙プラズマ粒子シミュレーション
- 月面磁気異常と太陽風プラズマの相互作用
- **小型磁気圏境界層**
- まとめ

# 境界層電流と局所磁場圧縮との関係

イオンラーマ半径が無視できない場合 (non-MHD regime) でも、

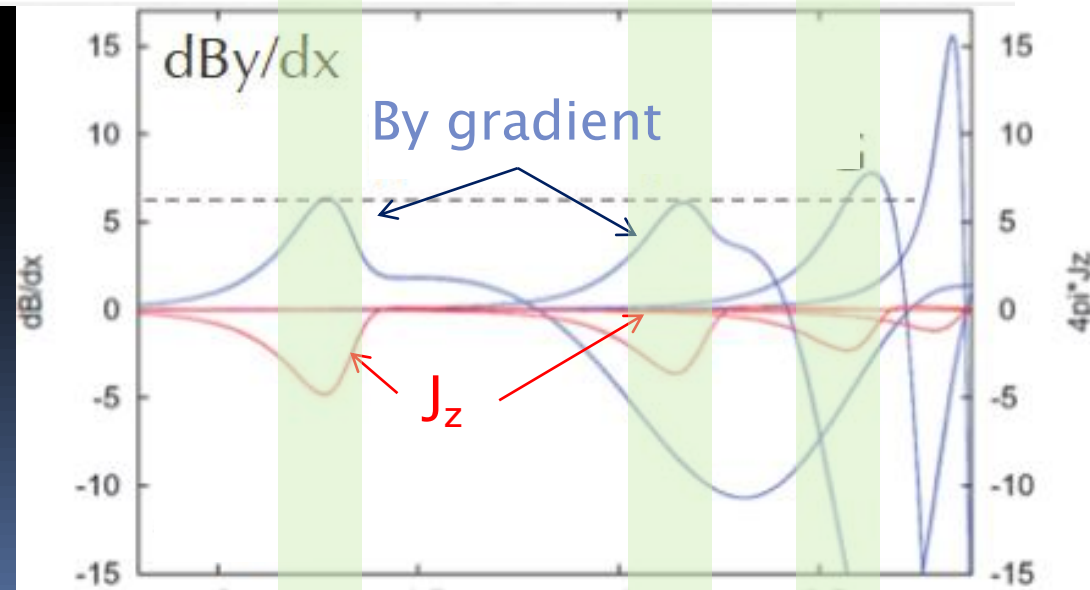
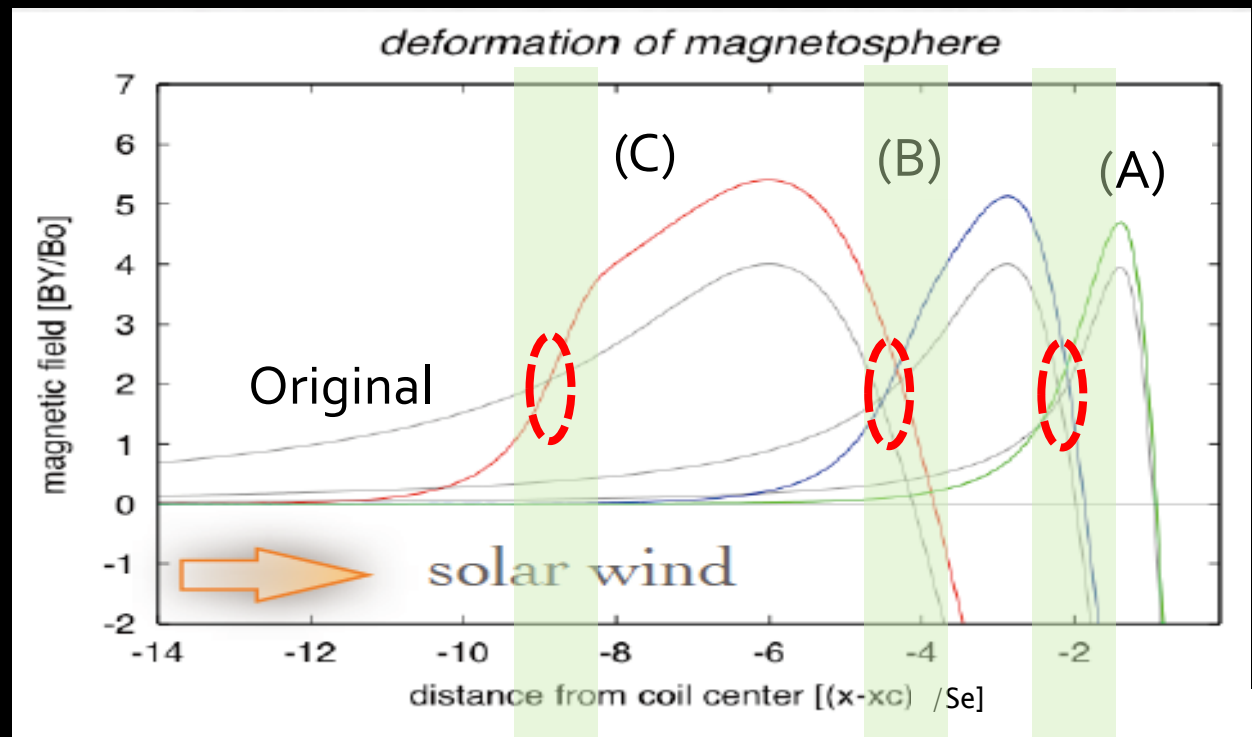


最も磁場が圧縮される領域 (最大勾配) は、ほぼ、ダイポール磁場とイオン流圧力が釣り合う点。

イオンダイナミクスで磁場圧縮位置が決まるにもかかわらず、

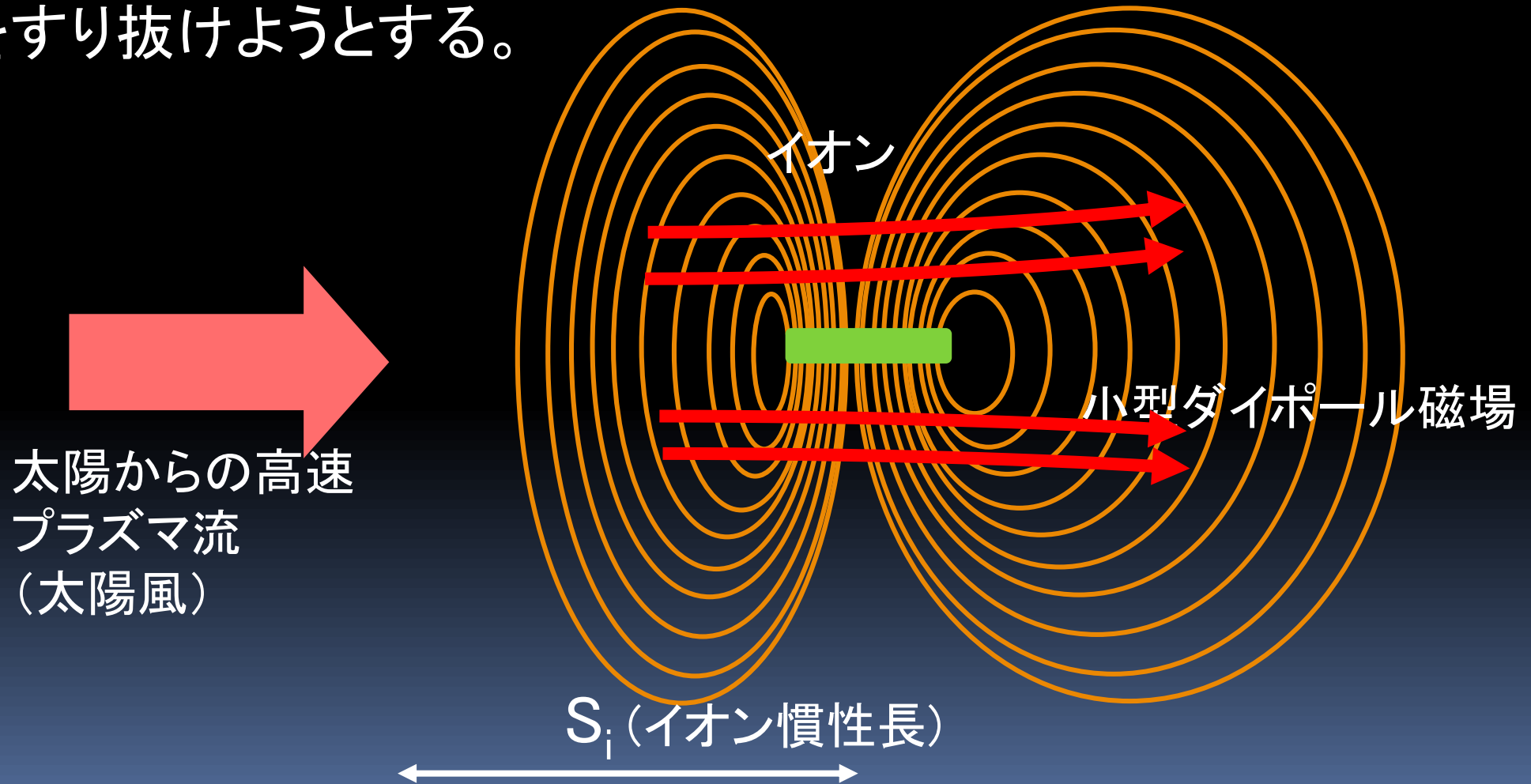


磁場圧縮領域と境界層電流  $J_z$  領域は、伴に、電子のラーマ半径  $S_e$  程度の幅を持っている。



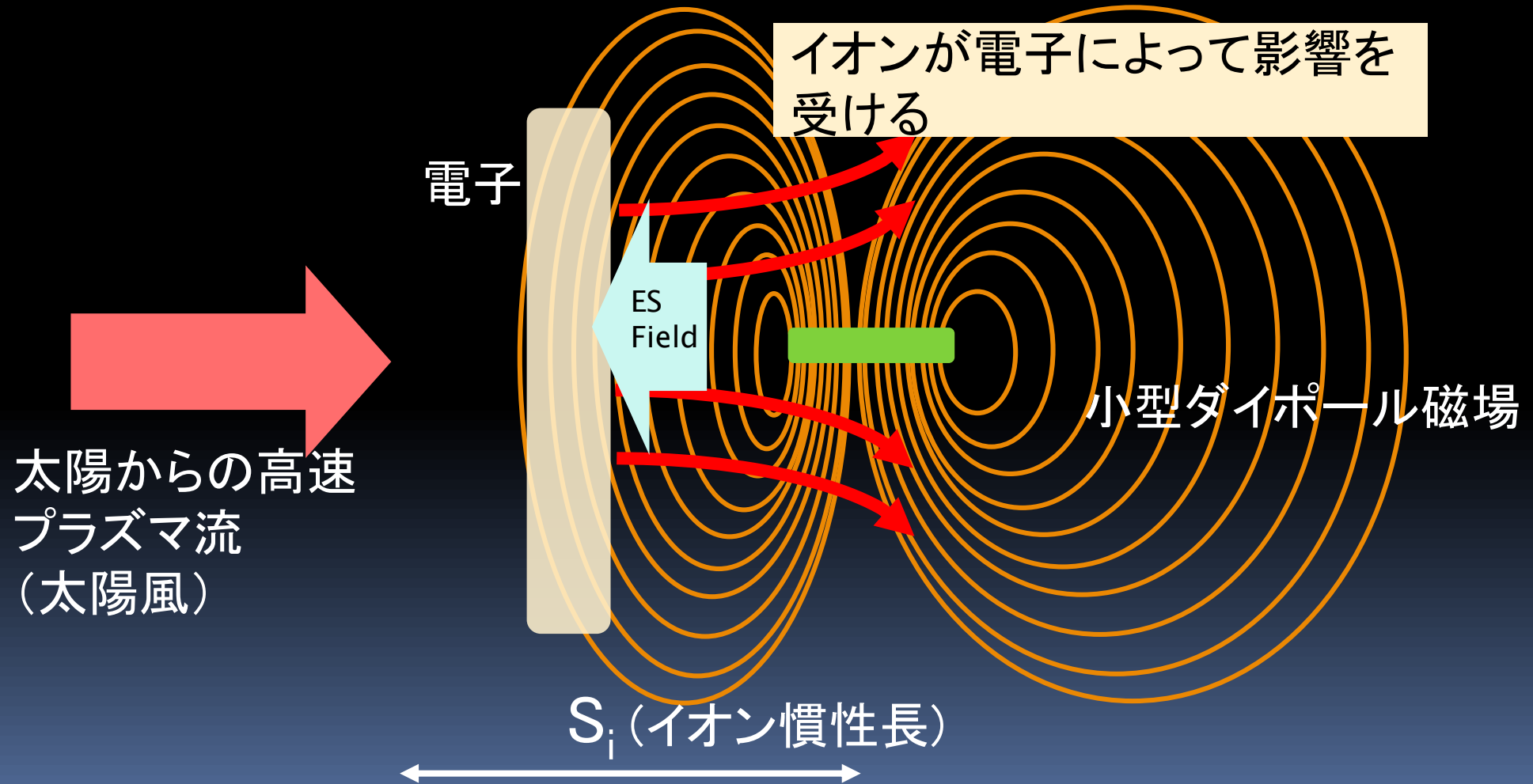
# イオンのみを考慮した場合

- ・現象が、イオン特性長 $S_i$ より大きい場合(地球磁気圏)は、イオンと磁場が一体となって動く電磁流体的に扱える
- ・今回、磁場構造が $S_i$ が小さいため、イオン流はその磁場構造をすり抜けようとする。



# 電子の役割 – 電子は小粒でぴりりと辛い –

- ・軽い電子は磁場に捕捉され、すり抜けようとするイオンを静電的な力で引き留めようとする。
- ・結果として、イオンも間接的に弱い磁力線によって影響を受ける。

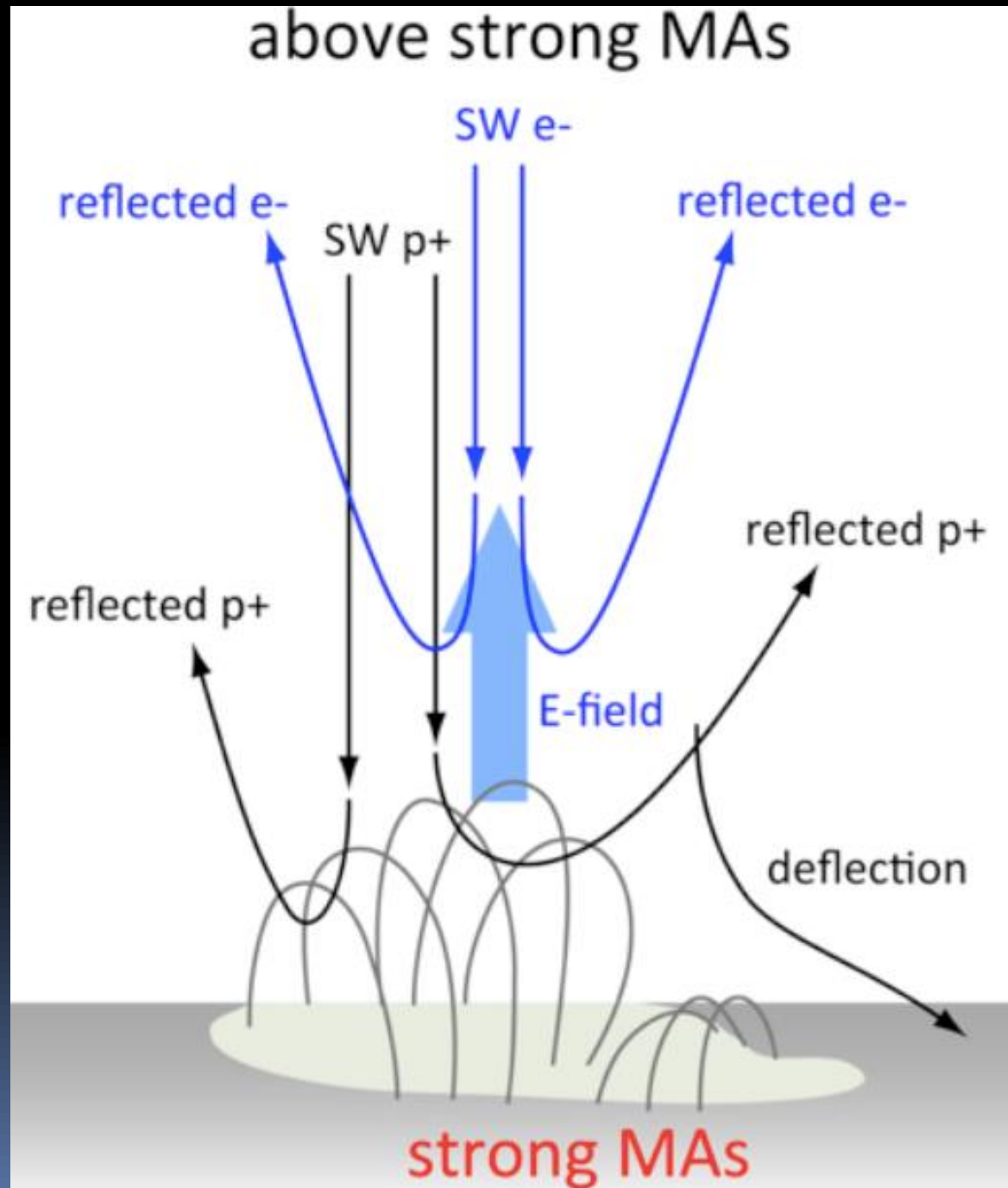




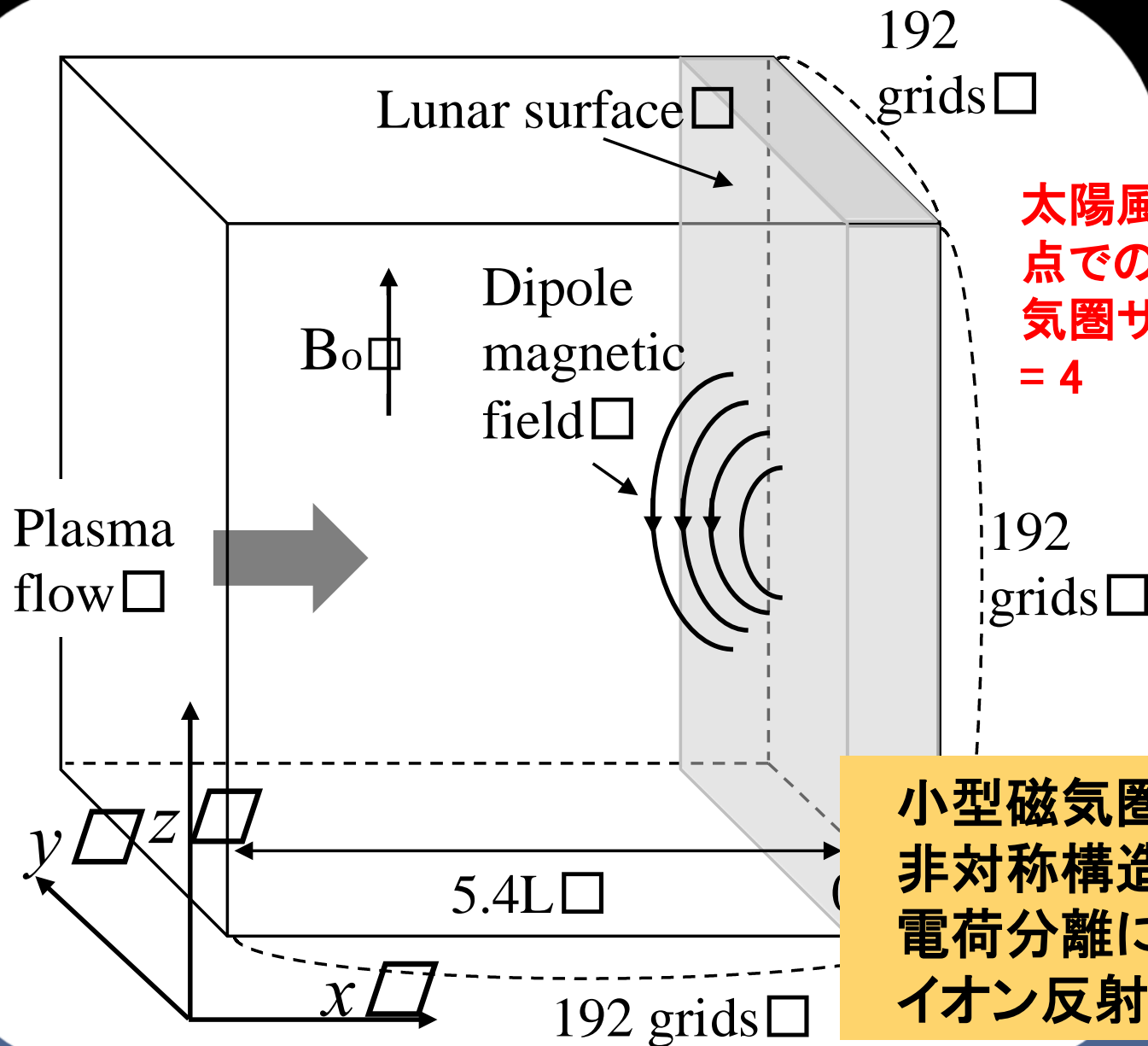


# SELENE観測

磁気異常上空  
プラズマ応答  
模式図  
(西野)



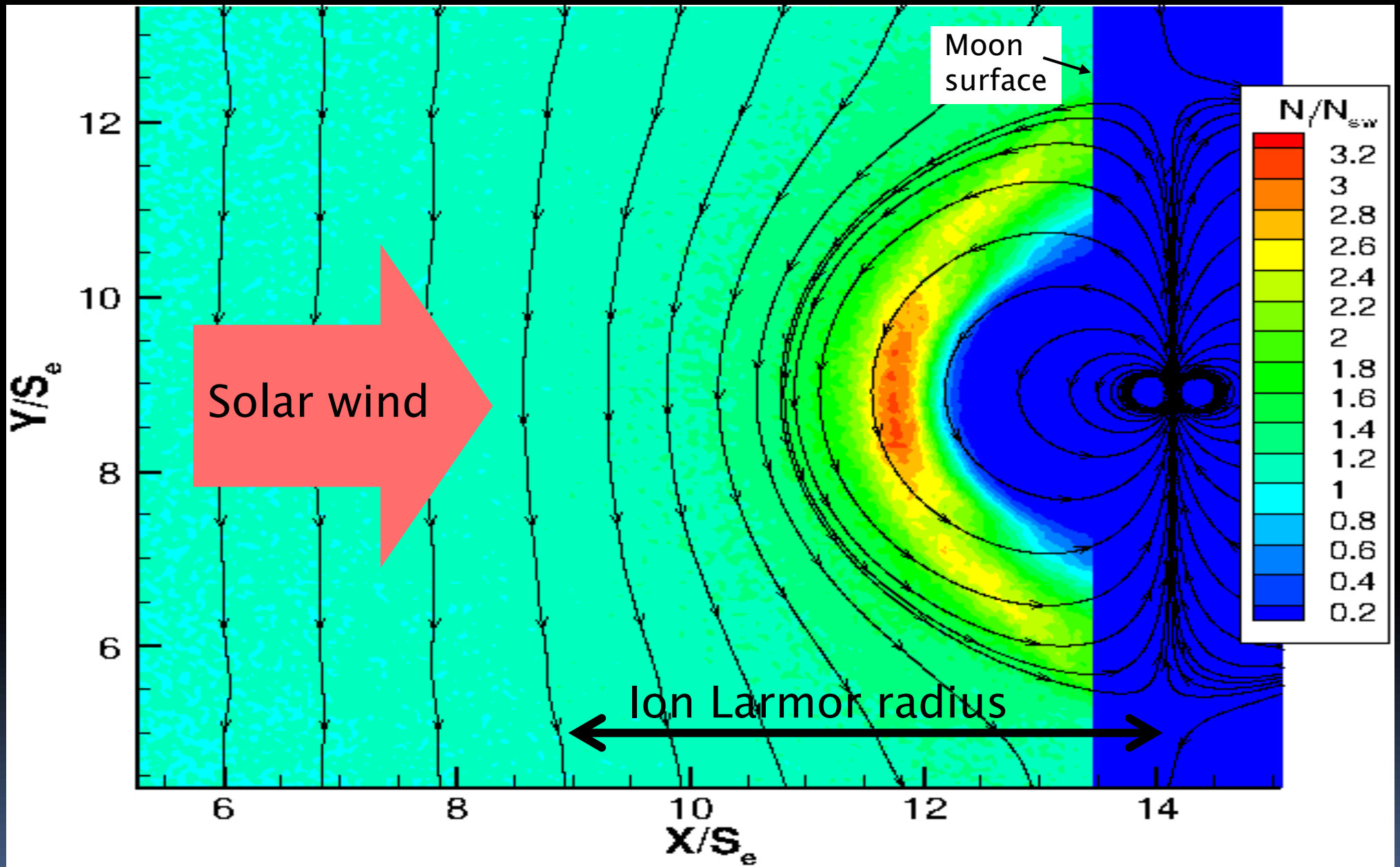
# 3次元全粒子シミュレーションモデル



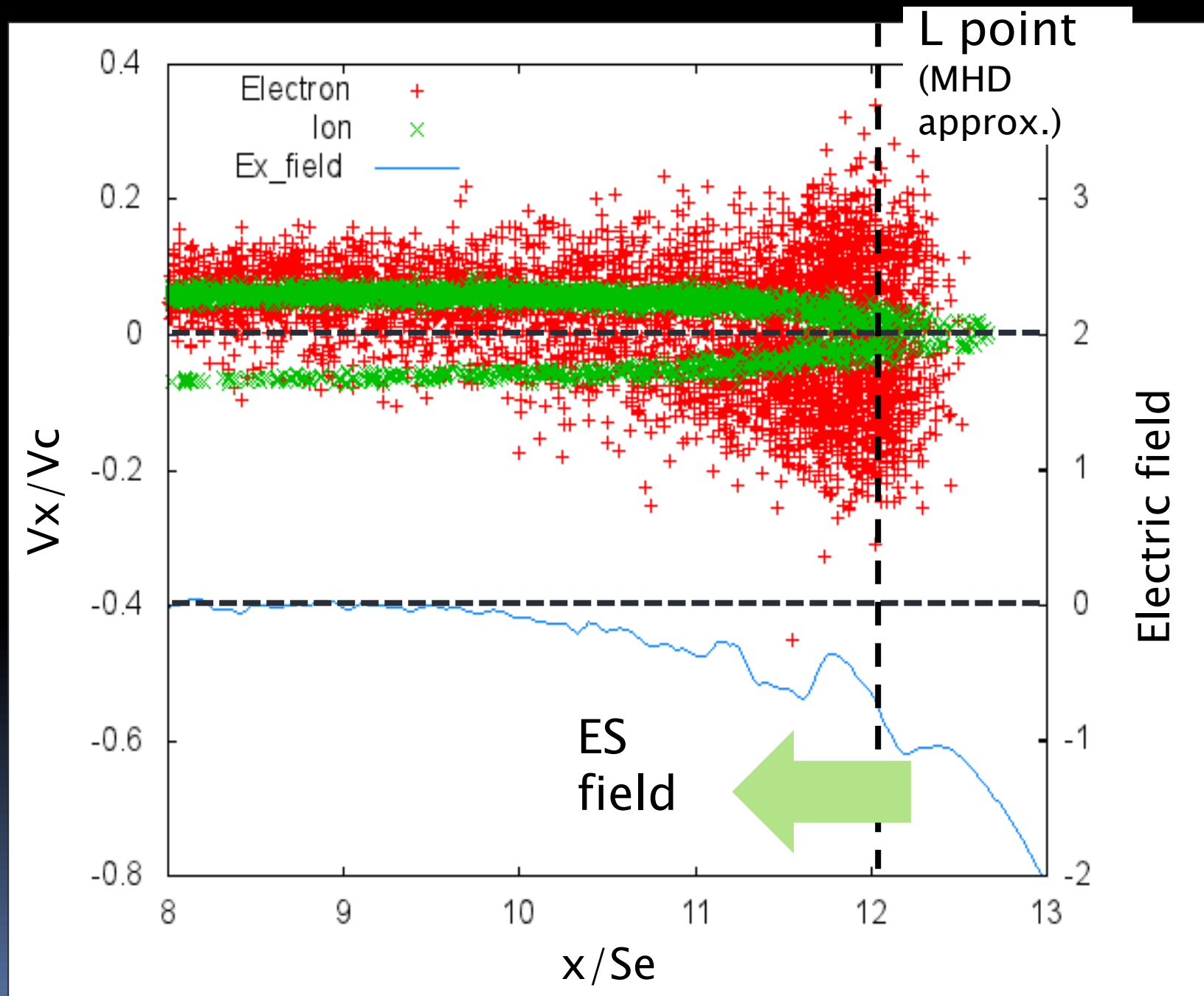
太陽風動圧と磁気圧のバランス  
点でのイオンジャイロ半径/磁  
気圏サイズ  
= 4

小型磁気圏形成  
非対称構造  
電荷分離による境界層での電界  
イオン反射(太陽方向)

# 子午面でのプラズマ応答(イオン密度分布)

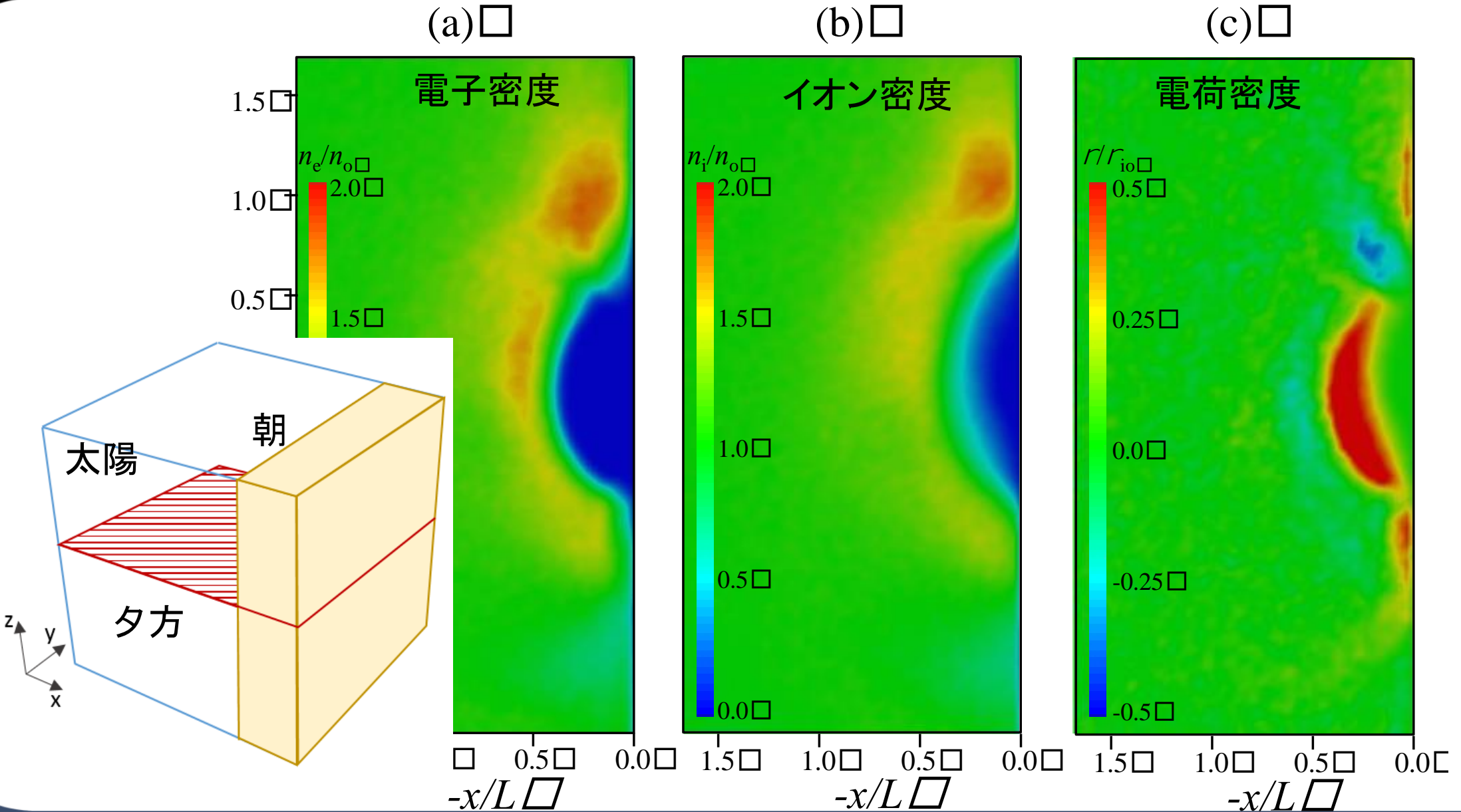


# 小型磁気圏前面での太陽風イオン反射、電子加熱



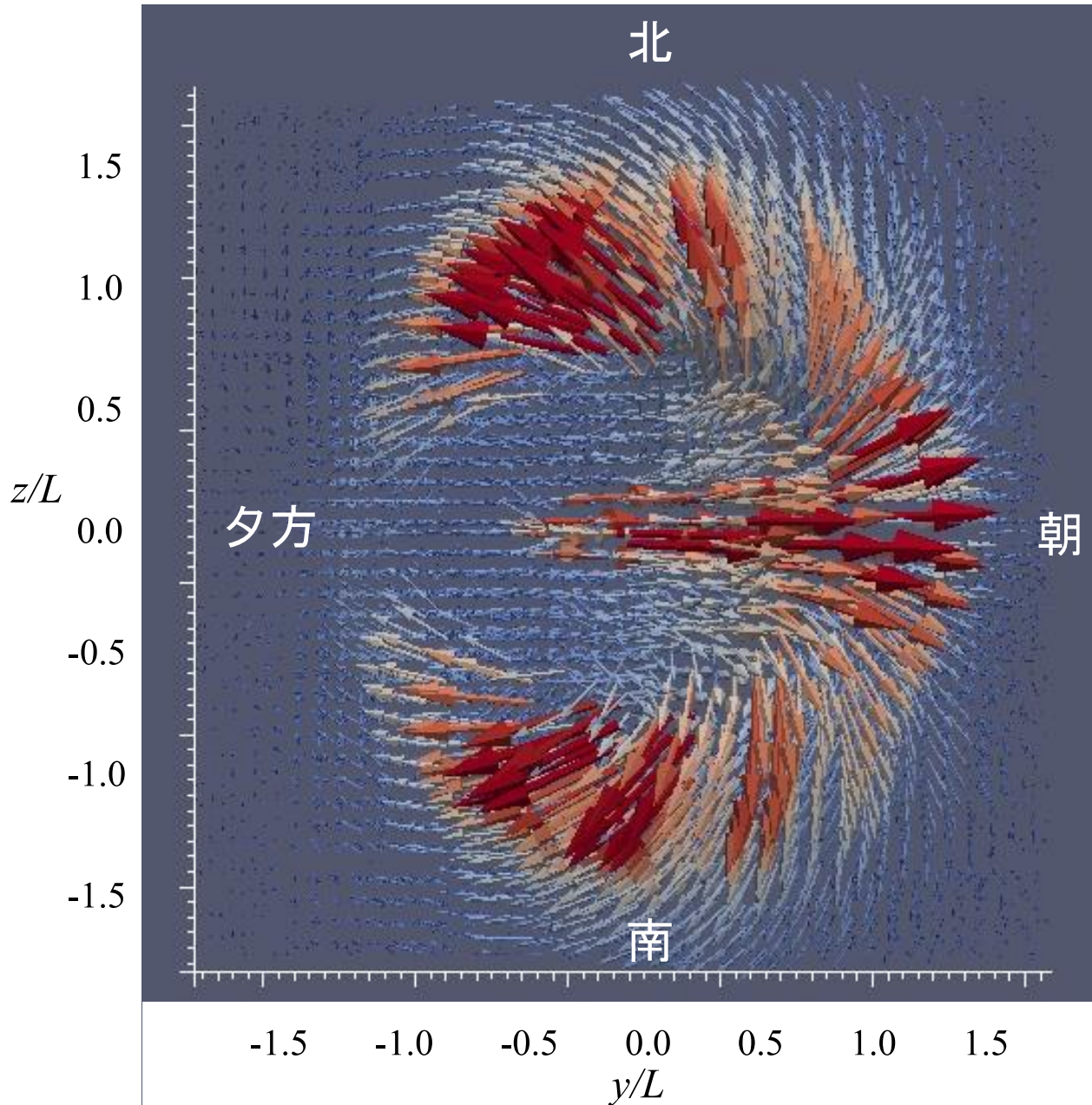


# 密度分布(赤道面内)



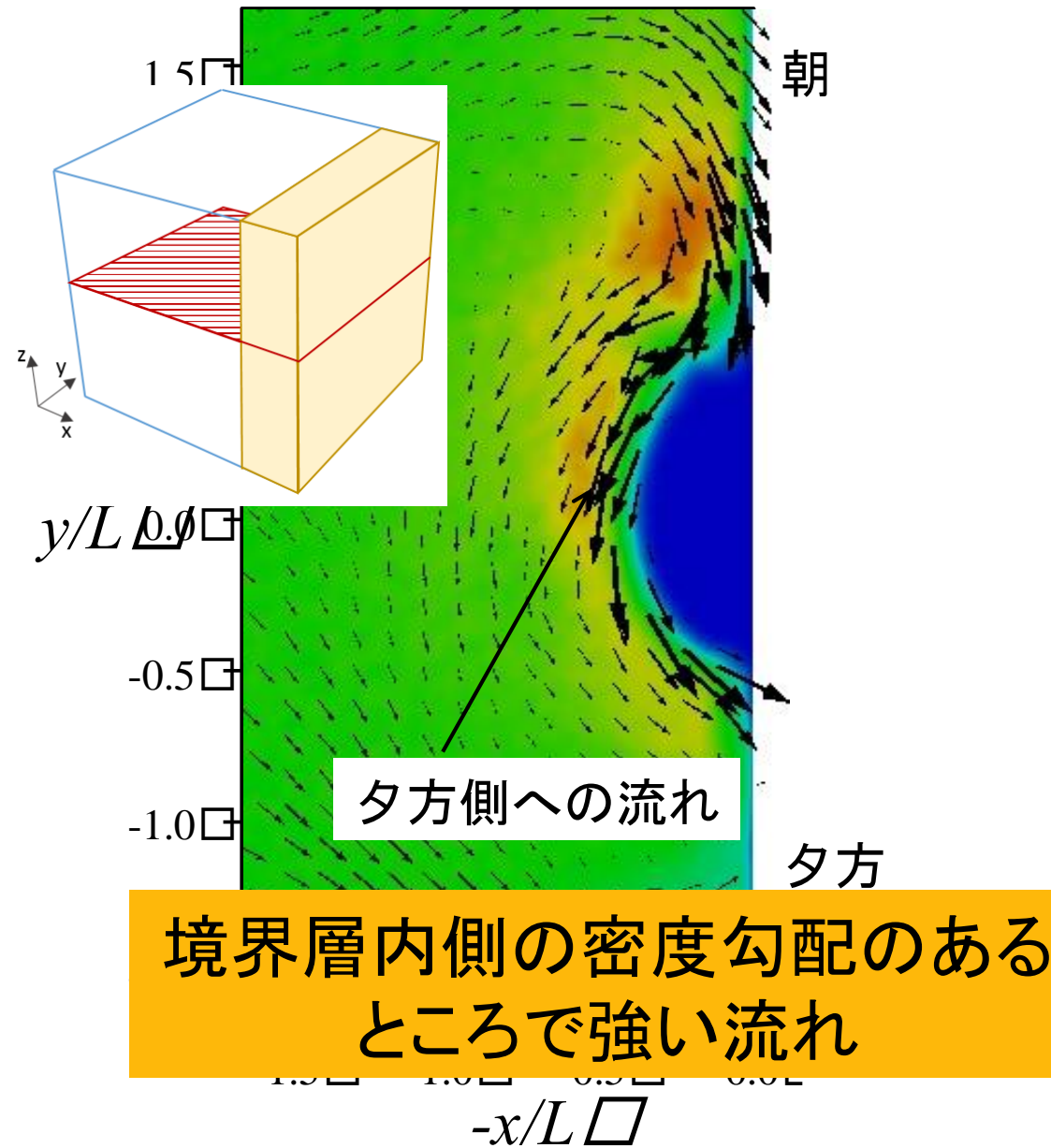
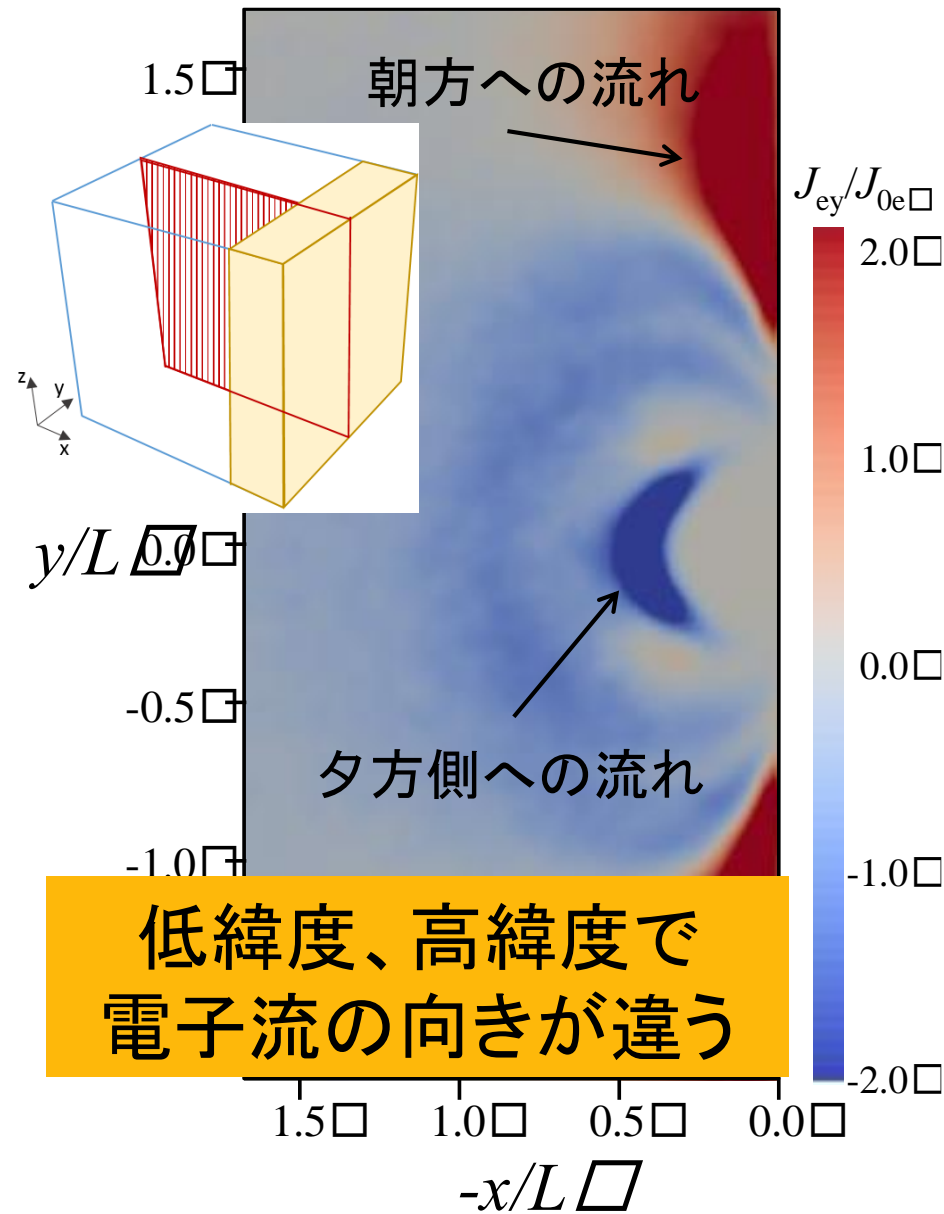
境界層の朝夕非対称、朝側高密度、赤道領域でイオンリッチ

# 電流分布(全天イメージ)



- 赤道面での朝方に向かう電流
- 朝方領域における電流の方向転換
- 高緯度領域ではむしろ夕方側に向かう
- イオンは弱磁化、電流は電子の動きによる

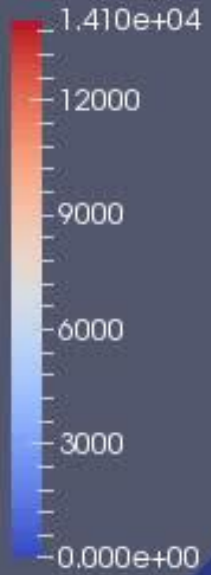
# 電子フラックス分布



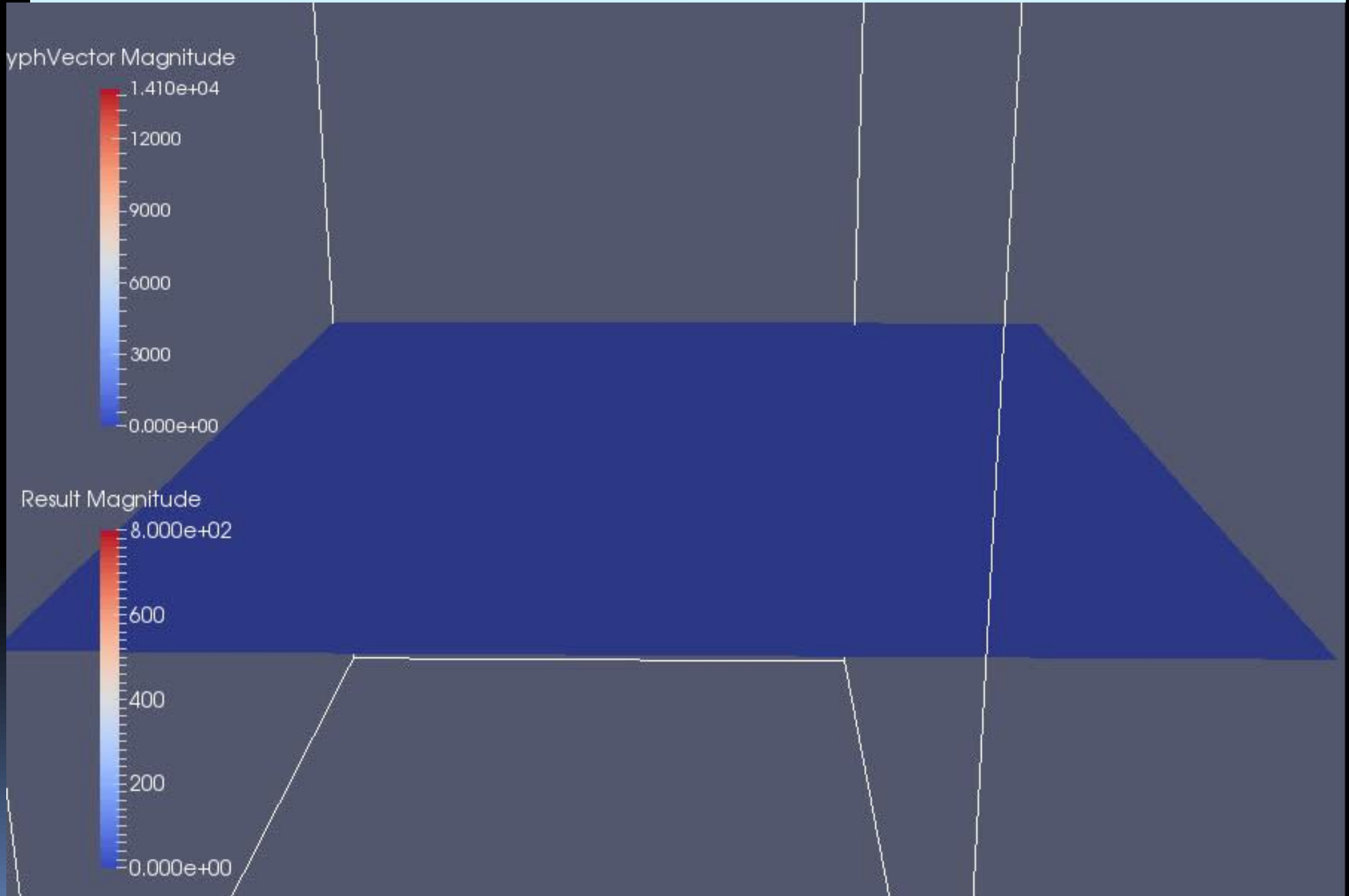


# 電子フラックス ベクトル図 (3次元)

ypVector Magnitude

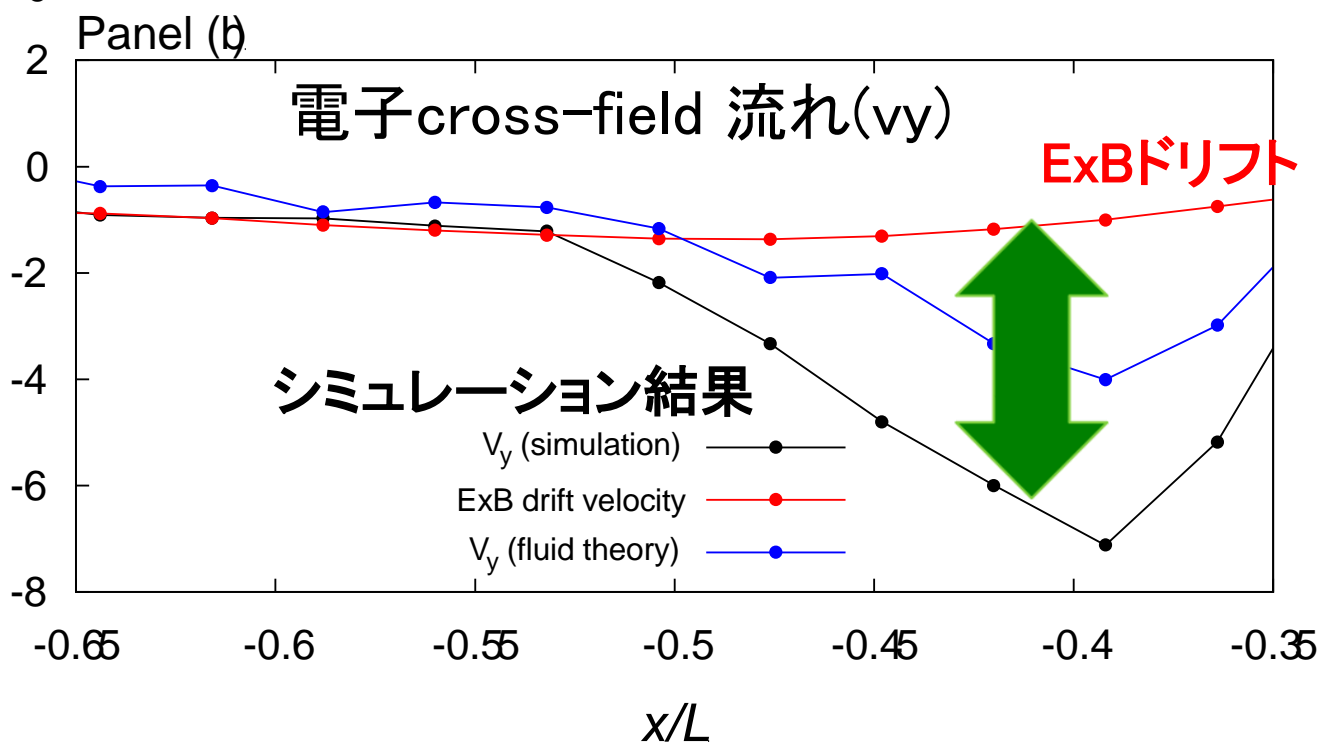
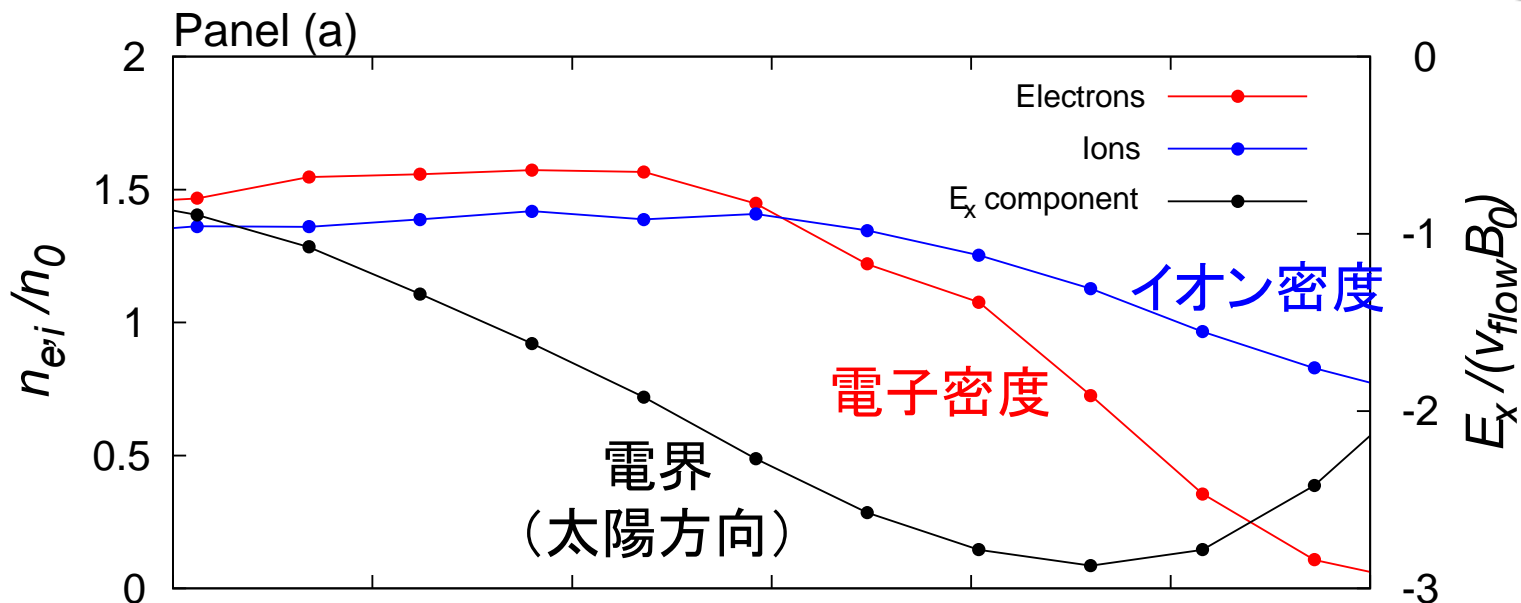
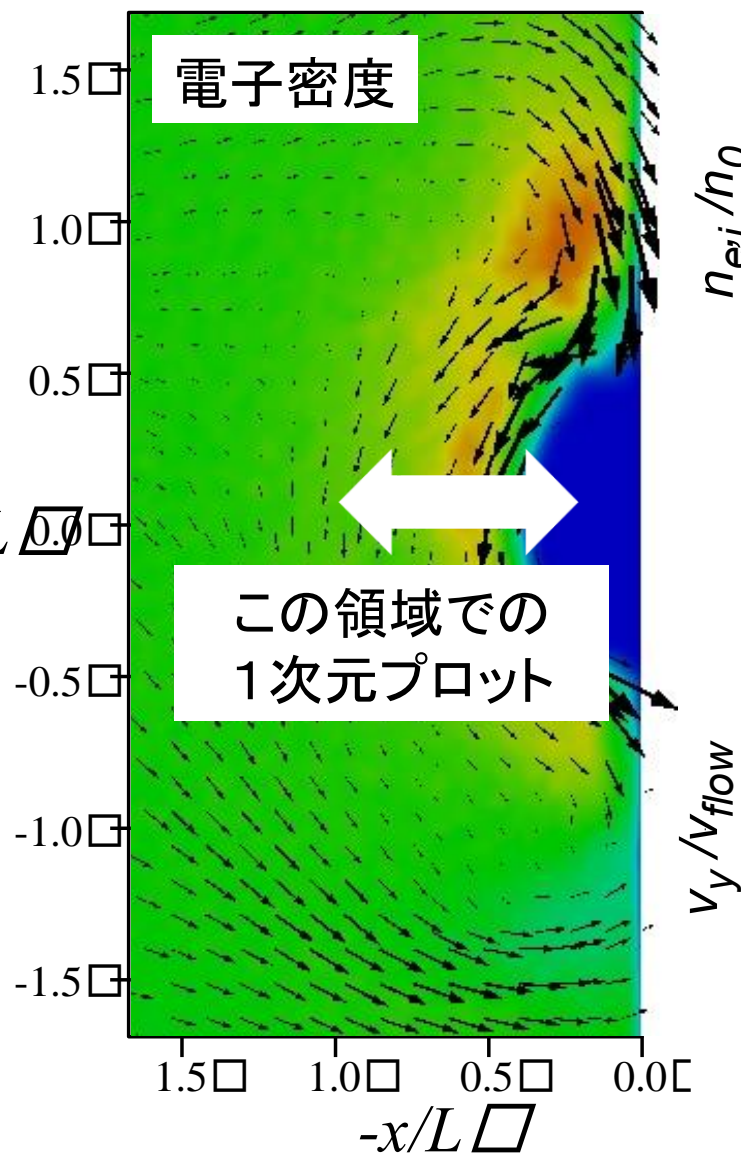


Result Magnitude



# 境界層における物理量

(a) □

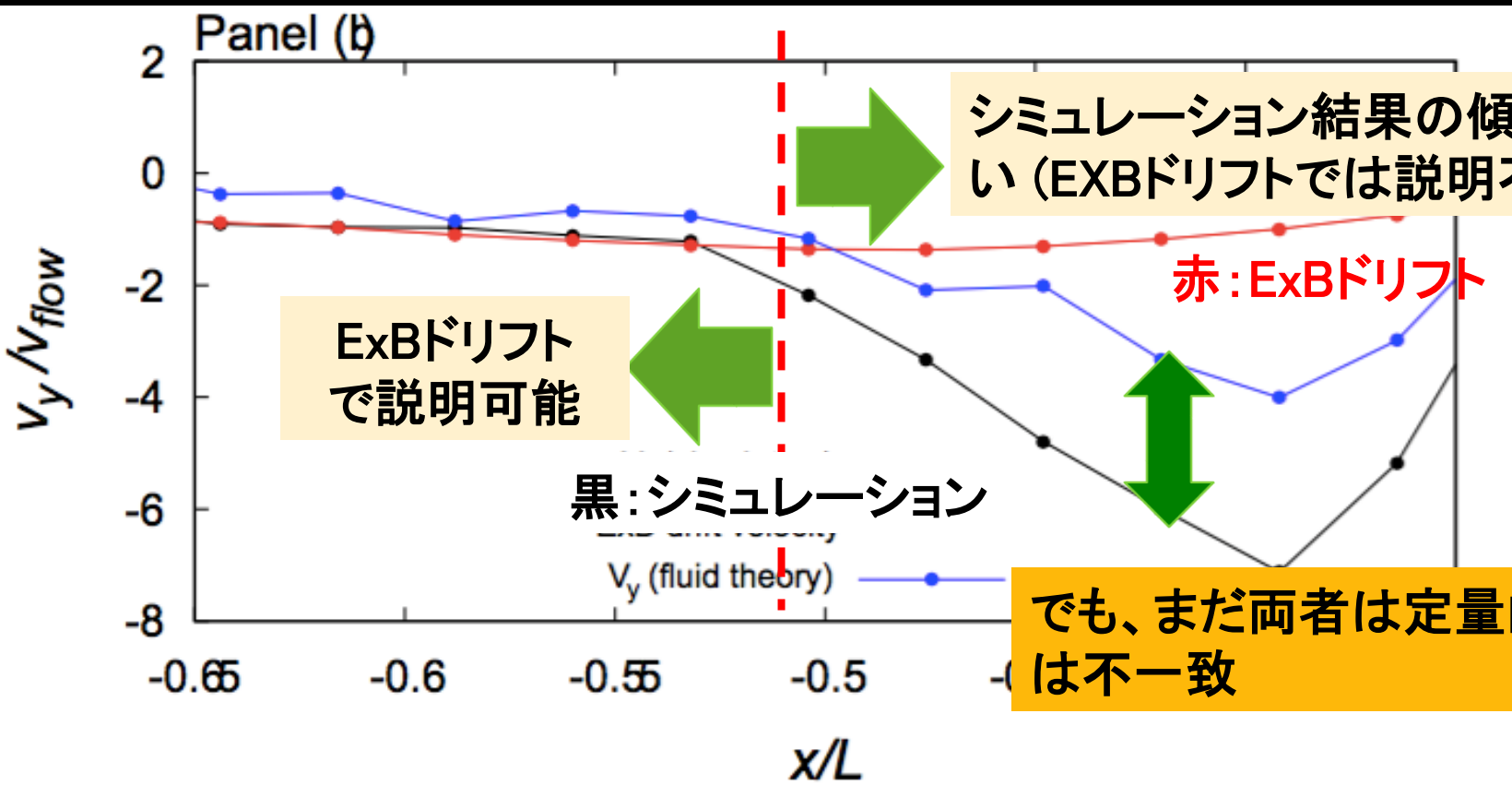


# 境界層における電子フラックスの評価

電子流体系から  
朝夕方向の速度  
(青の線)

$$v_y = \frac{E_x}{B_z} + \frac{m_e}{q_e B_z} v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{1}{q_e n_e B_z} \nabla P_e$$

朝夕方向の速度





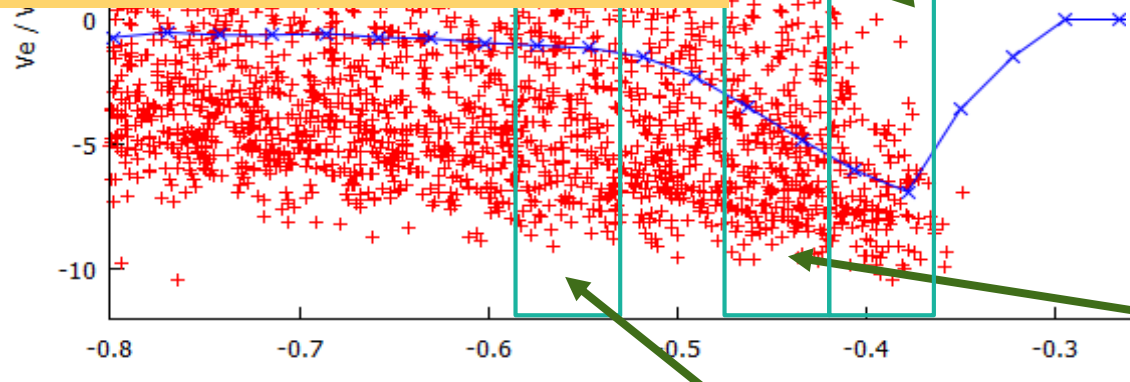
# 境界層における電子ダイナミクスの評価

これまでは平均値としての電流フラックスを見てきた。

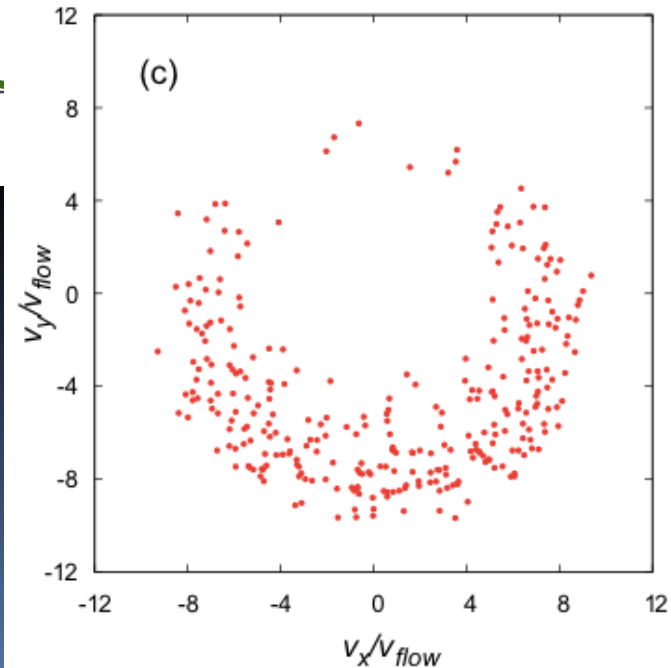
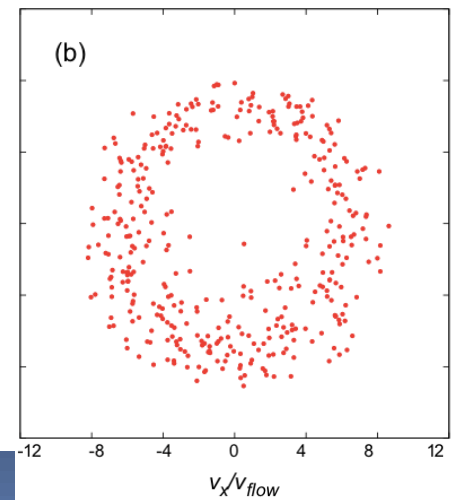
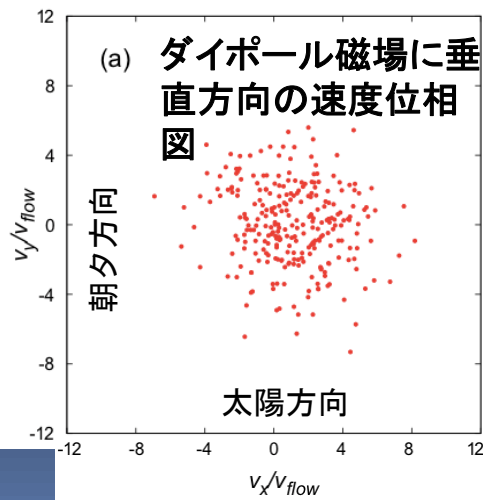
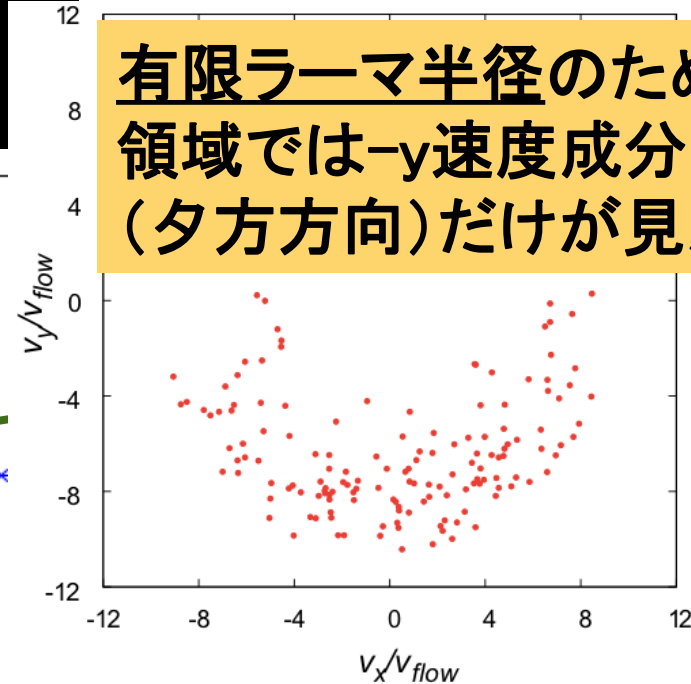
個々の電子運動に着目

朝夕方向の速度

EXB速度からずれる領域 (高速電子流) は電子ラーマ半径分に相当

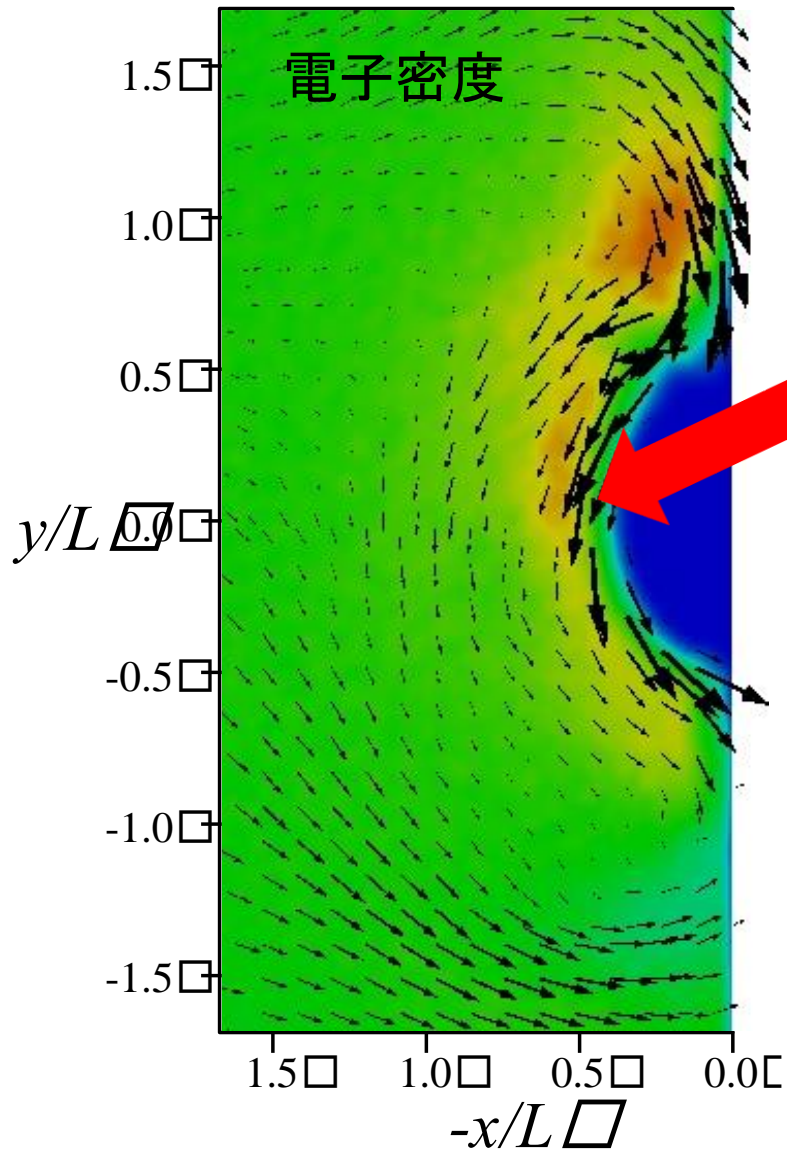


有限ラーマ半径のためこの領域では-y速度成分 (夕方方向) だけが見える



# 境界層における電子ダイナミクスの評価

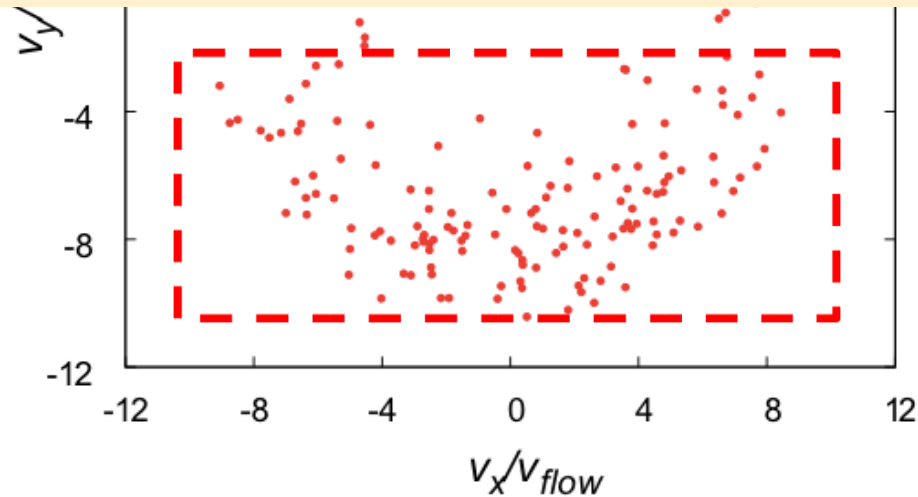
(a) □



境界層におけるイオンと電子の電荷分離

局所電界による電子加速(月面側)

加速電子のサイクロトロン運動の一部



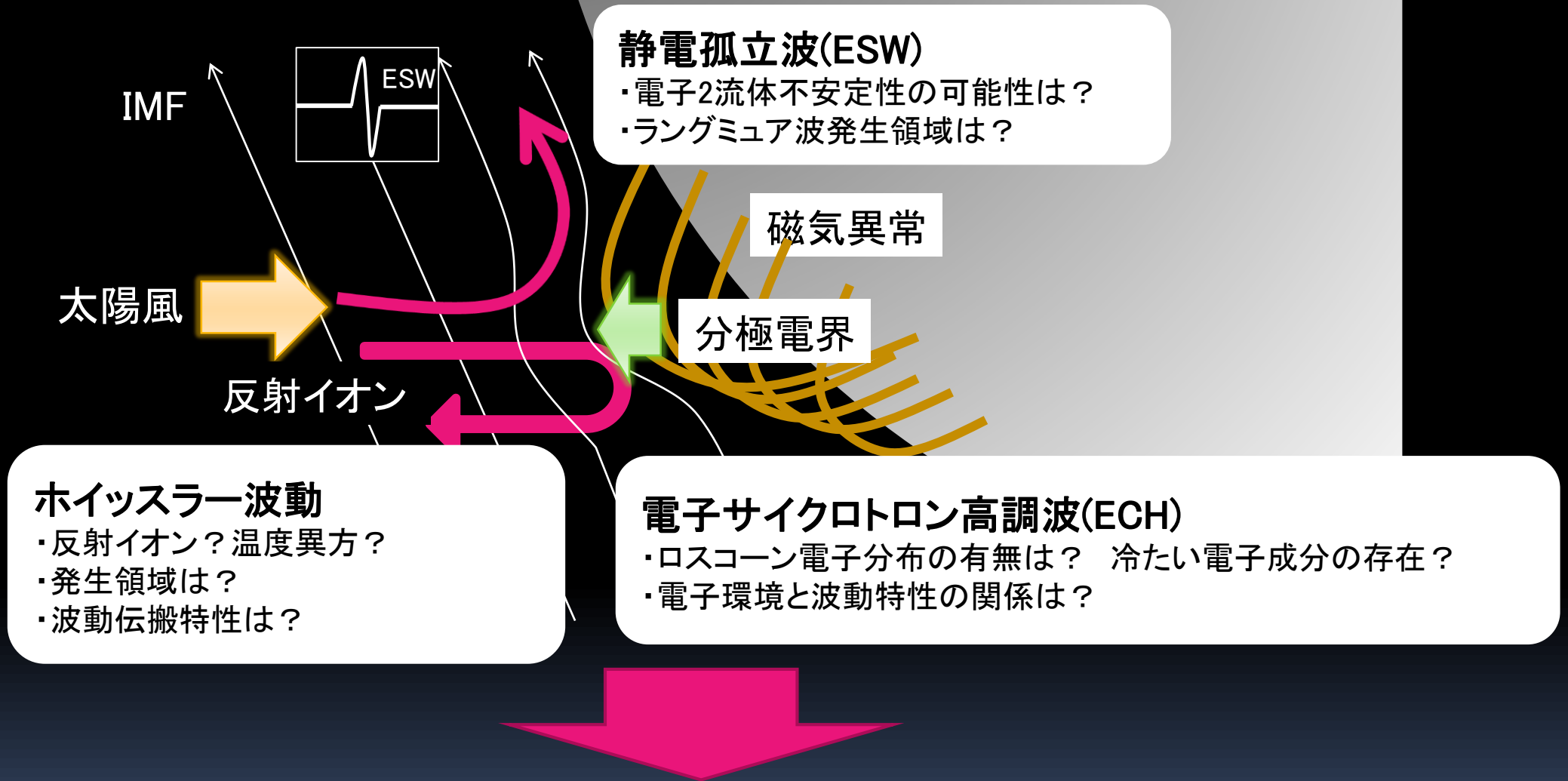
境界層での最大電流は  
電子のドリフト運動  
(旋回中心の磁場に垂直運動)  
ではない。

# まとめ

---

- 月面磁気異常上空における太陽風プラズマの応答に関して、境界層電流、特に電子ダイナミクスに着目
- 両半球昼間側で、閉じた電子電流のturn-around構造
- 赤道面での電子ダイナミクス
  - 平均的には $E \times B$ ドリフト運動
  - 境界層の内側では、電界によって加速された電子のサイクロトロン運動による夕方側への速度
- 高緯度における電子ダイナミクス(課題)
- 波動粒子相互作用によるプラズマ波動励起(課題)

# 磁気異常上空での波動粒子相互作用



## 各波動粒子相互作用の競合過程

結局、競合過程により、どの不安定性がどの領域で卓越するのか？



# 今後の研究対象

太陽風プラズマによる月、惑星環境への影響



今後、  
シミュレーションで現象予測  
→ 衛星ミッションで実証

