

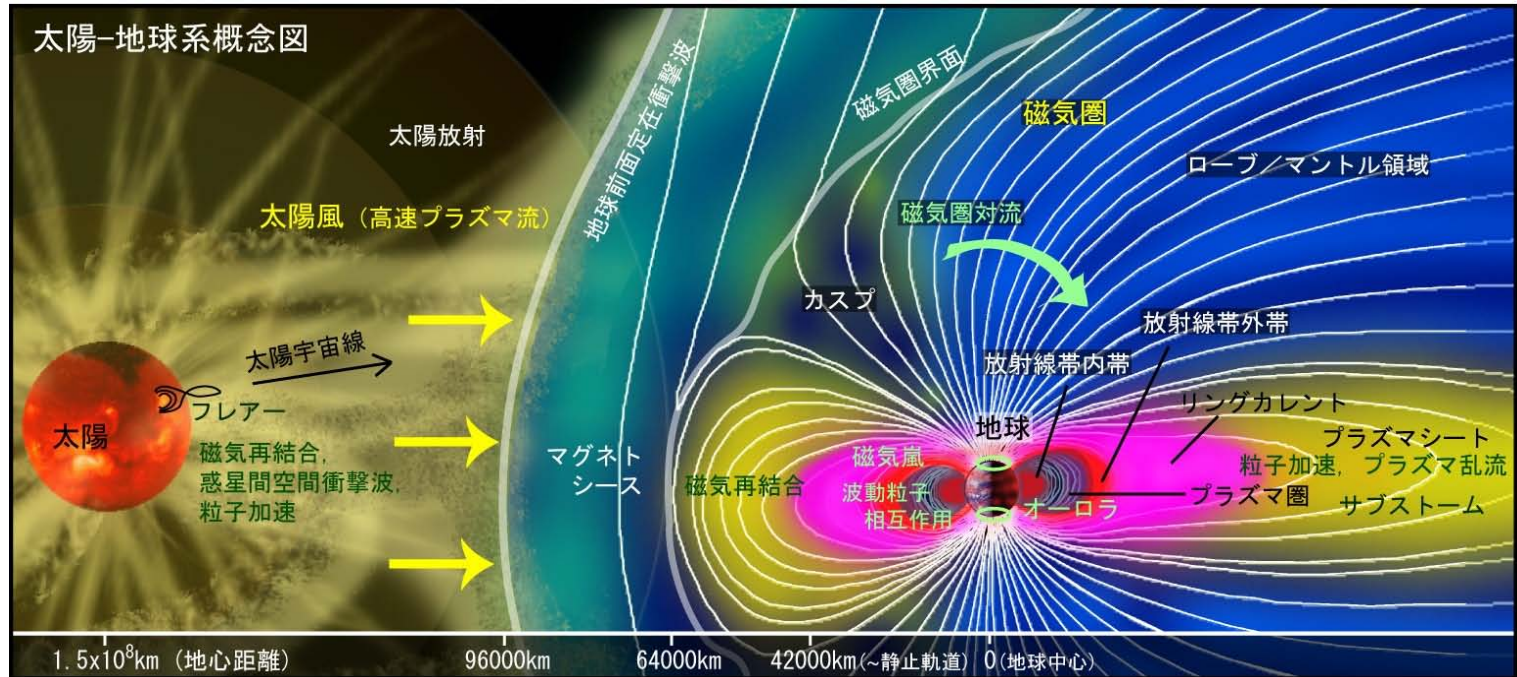
磁気圏・電離圏物理学分野からのコメント  
磁気圏-電離圏結合研究の紹介

名古屋大学太陽地球環境研究所  
三好由純



Acknowledgements:

片岡龍峰、松本洋介、平原聖文、坂野井健



- \* 太陽/太陽風が支配するシステム (外からドライブ)
- \* 異なる領域が存在し、接触している -> 領域間結合 (Multi-Physics)
  - 磁気圏(プラズマシート、内部磁気圏etc)、電離圏
  - 境界で特徴的な現象が発動 → オーロラ粒子加速
- \* スケール間が動的に結合 → スケール間結合
  - リコネクション
- \* 異なるエネルギー粒子が共存 -> エネルギー階層間結合
  - 波動粒子相互作用による放射線帯粒子加速

## 小型科学衛星 **ERG** プロジェクト -2013-2014年打ち上げ予定

衛星:放射線帯中心部でプラズマ総合観測を実現 (エネルギー階層間結合、マイクロ過程)  
連携地上観測、他衛星との共同観測 (マクロな領域、階層間結合)

# ERG

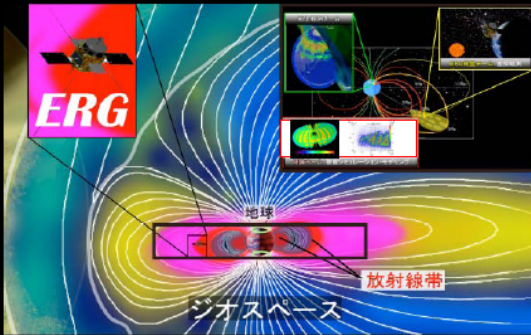
Energization and Radiation in Geospace

## 小型衛星によるジオスペース探査

### ジオスペースにおける最高エネルギー粒子の生成過程に迫る!

- 意義
- ・ ジオスペースにおける相対論的粒子の加速過程の直接観測
  - ・ 宇宙嵐変動メカニズムの探究
  - ・ 強放射線帯下における小型衛星によるプラズマ計測の技術開発

「衛星直接観測」、「連携地上観測ネットワーク」、「モデリング・総合解析」の三位一体のチームで宇宙嵐時のジオスペース変動の物理機構を探る



- ・ 打ち上げ時期: 2013-2014年
- ・ 軌道: 遠地点高度: 4Re/近地点高度: 300km  
軌道傾斜角: 31度以下  
太陽指向スピン衛星
- ・ ミッションライフ: 1年以上
- ・ 搭載理学機器
  - PPE (プラズマ粒子観測器ユニット)  
低・中・高・超高エネルギー電子計測 (12eV-20MeV)
  - 低・中エネルギーイオン計測器 (10eV-180keV: 質量分解)
  - PWE (プラズマ波動・電場観測器)  
DC/AC電場、AC磁場計測
  - MGF (磁場観測器)  
DC磁場計測
  - S-WPIA (ソフトウェア型波動粒子相互作用解析装置)
- ・ RBSP, ORBITALSなど海外関連計画との共同

ERG ワーキンググループ事務局

ERG\_adm@st4a.stelab.nagoya-u.ac.jp

### PPE

電子: 12 eV – 20 MeV

イオン: 10eV/q – 180keV/q

### PWE/MGF

電場: DC – 10 MHz

磁場: DC - 1 MHz

### S-WPIA

波動と粒子の相関解析

# Outline

1. 宇宙天気的な視点から
2. 磁気圏-電離圏結合
  - ・衝突の支配する電離圏
  - ・電離圏-磁気圏結合、沿磁力線電流
  - ・沿磁力線加速
  - ・電離圏が沿磁力線加速に及ぼす影響
  - ・小スケールオーロラとAlfven wave
  - ・Alfven waveの閉じ込めとフィラメント化するオーロラ
3. 磁気圏-電離圏結合のポイント
4. むすびにかえて

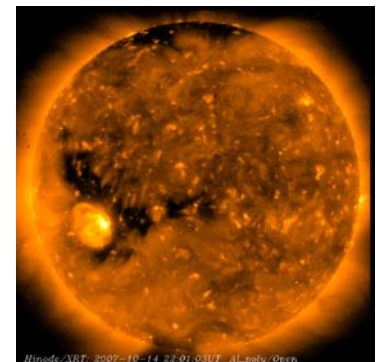
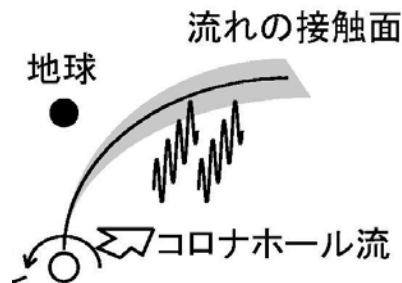
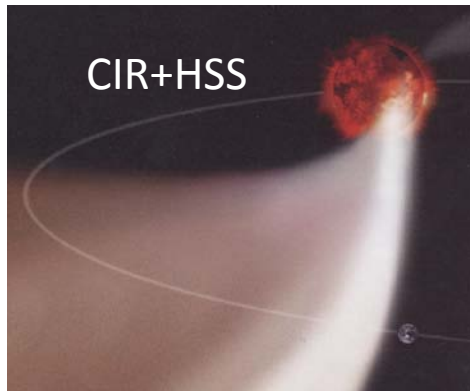
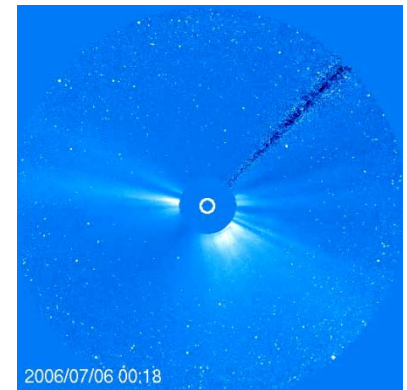
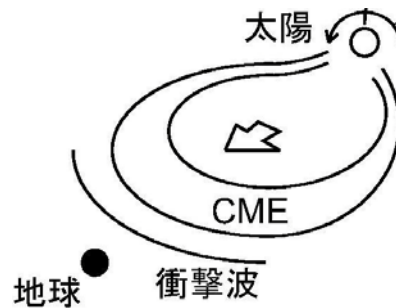
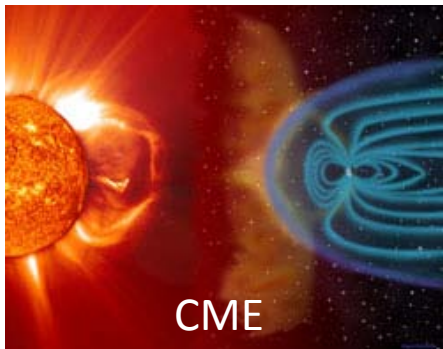
電離圏 — 彩層  
磁気圏 — コロナ  
磁気圏-電離圏結合領域 — 遷移層



# 1. 宇宙天気のポイントから (磁気圏物理/電離圏物理から)

システム(磁気圏・電離圏)の発達を決定づける要因として、太陽/太陽風が本質的  
(Living With A Star)

いま見ている太陽風は何か? ..一点観測なので、全体の構造がわからない。



大きな構造の中で、理解することが重要。  
大きな構造(CME/CIR)の多点観測による3次元可視化は重要。

# 1. 宇宙天気の点から (磁気圏/電離圏物理から)

\* 宇宙天気予報/気候ということを知りたいこと

-これからどのような太陽風やX線がやってくるかを知りたい(短期)  
＜サブストーム(オーロラ爆発)、磁気嵐＞

-これから1年間の傾向を知りたい。  
＜地磁気の半年周期＞

-次の活動周期の様子を知りたい。  
＜11年＞

-(もっと長い時間スケールで)  
このあと、太陽がどうなるのかを知りたい。

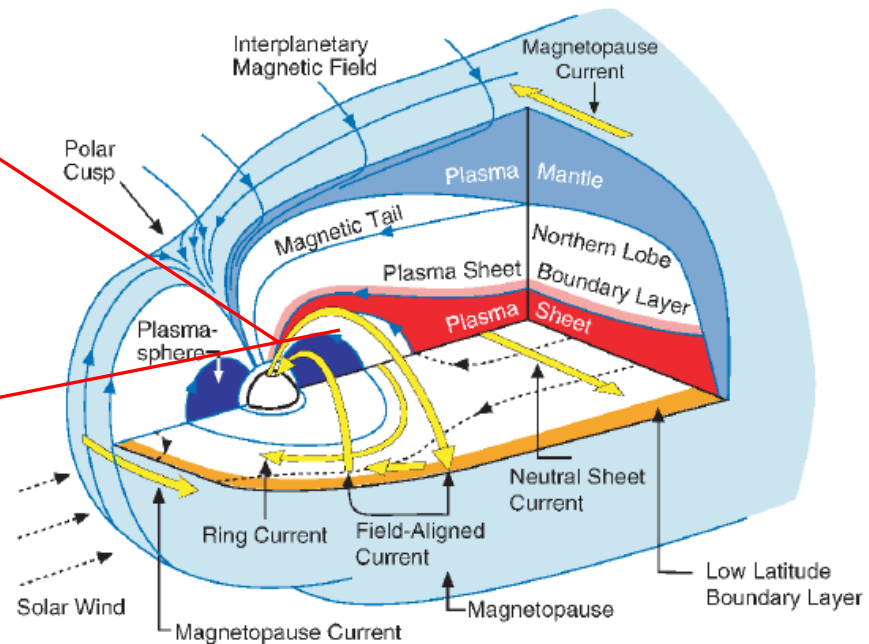
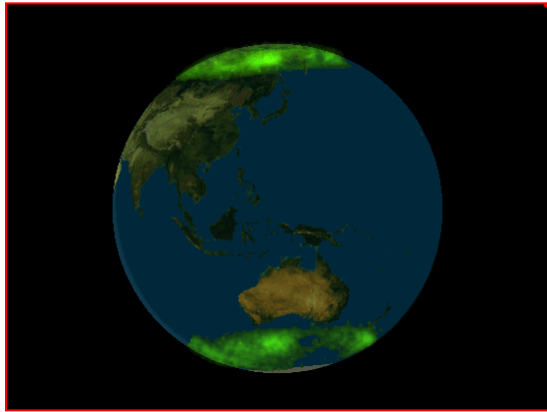
宇宙天気/宇宙気候



星の物理 (天文)



## 2. 磁気圏と電離圏 (コロナと彩層?)



Russell (1995)

磁気圏 (プラズマシート) : 高温 ( $> 1 \text{ keV}$ )・希薄 ( $< 1/\text{cc}$ )のプラズマ  
 $\beta > 1$

~ 磁気圏-電離圏結合領域 (磁場/プラズマ密度が急激に変化) ~

電離圏 : 低温 ( $\sim < 1 \text{ eV}$ )・高密度 ( $> 10^6/\text{cc}$ )のプラズマ  
 $\beta \sim 10^{-7}$ 、非圧縮

[電磁気的な結合] [物質的な結合]

## 2 電離圏 (衝突の支配する世界-彩層?)

### ● 中性大気と電離大気の相互作用

中性: 
$$NM \frac{d\mathbf{v}_n}{dt} = -\nabla p + nM\mathbf{v}_{in}(\underline{\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_n}) + nm\mathbf{v}_{en}(\underline{\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_n}) + N\mathbf{f}_n$$

イオン: 
$$nM \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -\nabla p_i + ne(\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) - nM\mathbf{v}_{in}(\underline{\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_n}) - nm\mathbf{v}_{ie}(\underline{\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_e}) + n\mathbf{f}_i$$

電子: 
$$nm \frac{d\mathbf{v}_e}{dt} = -\nabla p_e - ne(\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) - nm\mathbf{v}_{en}(\underline{\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_n}) + nm\mathbf{v}_{ie}(\underline{\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_e}) + n\mathbf{f}_e$$

電場がかかっているとき → プラズマが中性を動かす。  
中性風がプラズマを動かす(中性風ダイナモ)

### ● オームの法則 Conductivity

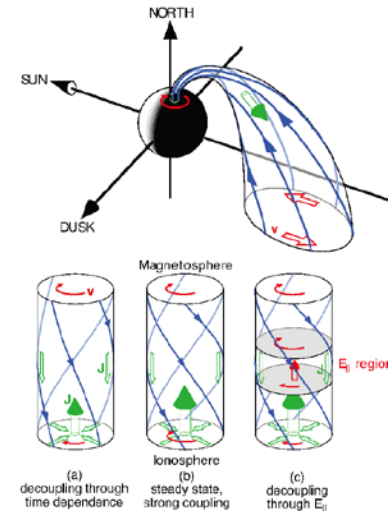
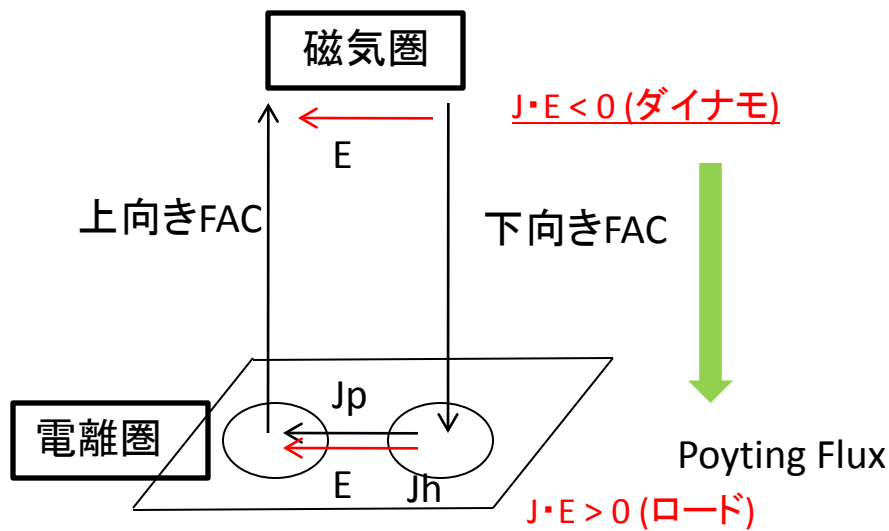
$$\mathbf{j} = \sigma_P \mathbf{E}_\perp - \sigma_H (\mathbf{E}_\perp \times \mathbf{b}) + \sigma_o \mathbf{E}_\parallel$$

$$\sigma_\parallel = \sum_s \frac{n_s q_s^2}{m_s \nu_s}, \quad \sigma_P = \sum_s \frac{n_s q_s^2}{m_s} \frac{\nu_s}{\nu_s^2 + \omega_{cs}^2}, \quad \sigma_H = - \sum_s \frac{n_s q_s^2}{m_s} \frac{\omega_{cs}}{\nu_s^2 + \omega_{cs}^2}$$

磁気圏から(オーロラ)降下電子 → 中性大気を電離 → conductivityが変化



## 2. 磁気圏-電離圏結合 (FACが重要)



電離圏から見たFAC (沿磁力線電流)

$$j_{\parallel} = -\sum_P \nabla \cdot \mathbf{E}_{\perp}$$

• Pedersen電流が接続

磁気圏から見たFAC

$$\nabla \cdot \mathbf{j}_{\parallel} = \mathbf{B} \cdot \nabla \frac{j_{\parallel}}{B} = -\nabla \cdot \left[ \frac{\mathbf{B}}{B^2} \times \left( \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \nabla p \right) \right]$$

(B, P, Pがconstant → inertial term dominant)

$$B \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{j_{\parallel}}{B} \right) = \frac{\rho \mathbf{B}}{B^2} \cdot \nabla \times \left( \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right) = \frac{\rho}{B} \frac{d\Omega_{\parallel}}{dt}$$

• plasmaのシアー運動がFACを駆動

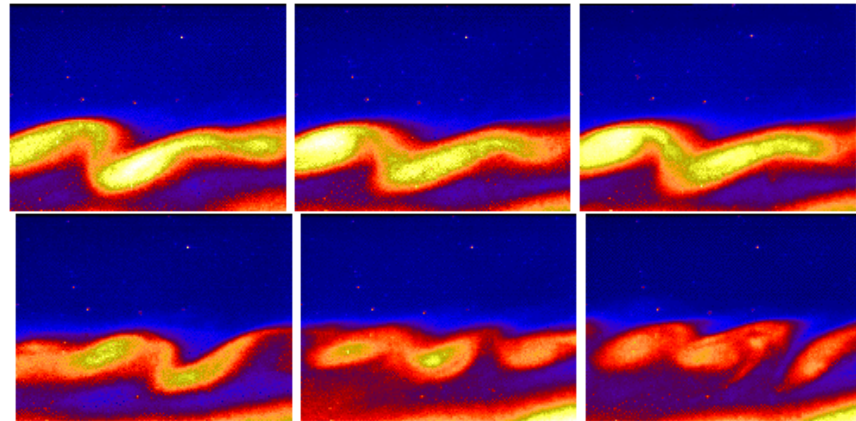
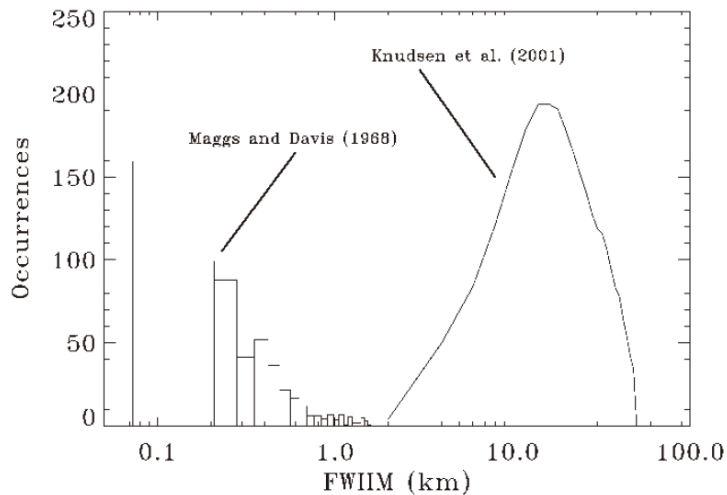
- Conductivityが変化。磁気圏-電離圏結合の強さも変化 (動的に変化)
- 通常、地球では磁気圏側がダイナモ。木星では、電離圏側がダイナモになる。太陽では、彩層がダイナモ？

## 2. 磁気圏-電離圏結合とオーロラスケール

静的結合

$$\Delta\Phi_{\perp\text{ion}} = \left(1 + \frac{\Sigma_P}{K} \frac{1}{w_{\perp\text{ion}}^2}\right)^{-1} \Delta\Phi_{\perp\text{mag}}$$

典型的な電離圏-磁気圏結合のスケールは、100km



100m-1kmのオーロラ [Trondsen]

100km以下のもっと細かいスケールのオーロラがある -> このスケールでFACが入ってきている。

・・・静的ではなく、動的に結合している

何が薄いオーロラを作り出しているか？ (オーロラ物理の最大の問題)

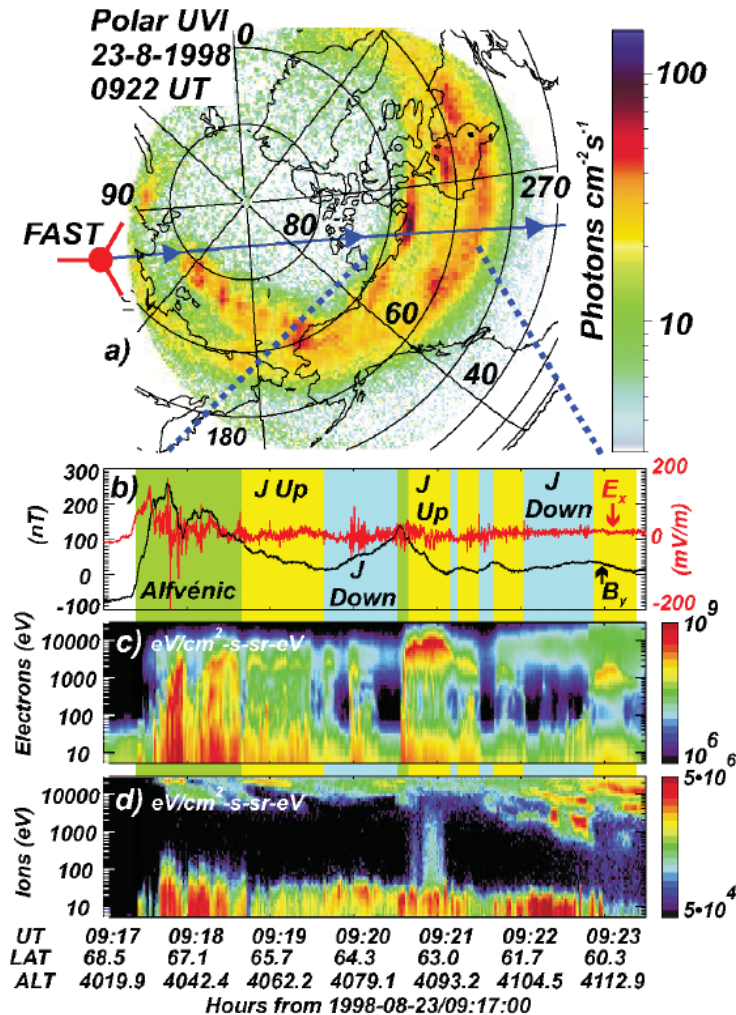
- ・電離圏のオーロラの空間スケール・・・磁気圏-電離圏結合メカニズムを反映  
彩層に同様の構造はあるか？

## 2. 動的な結合 - Alfvén wave

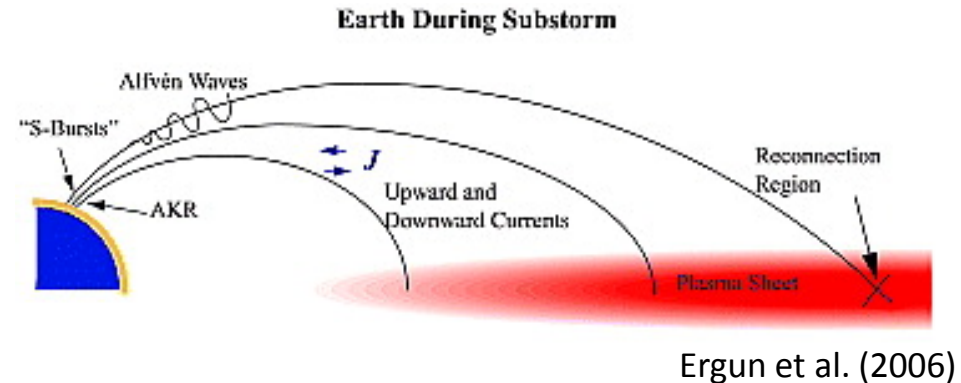
### ▪ Dispersive Alfvén Wave

斜め伝搬するAlfvén wave

- 先端に平行電場 -> オーロラ電子加速



Chaston et al.(2008)

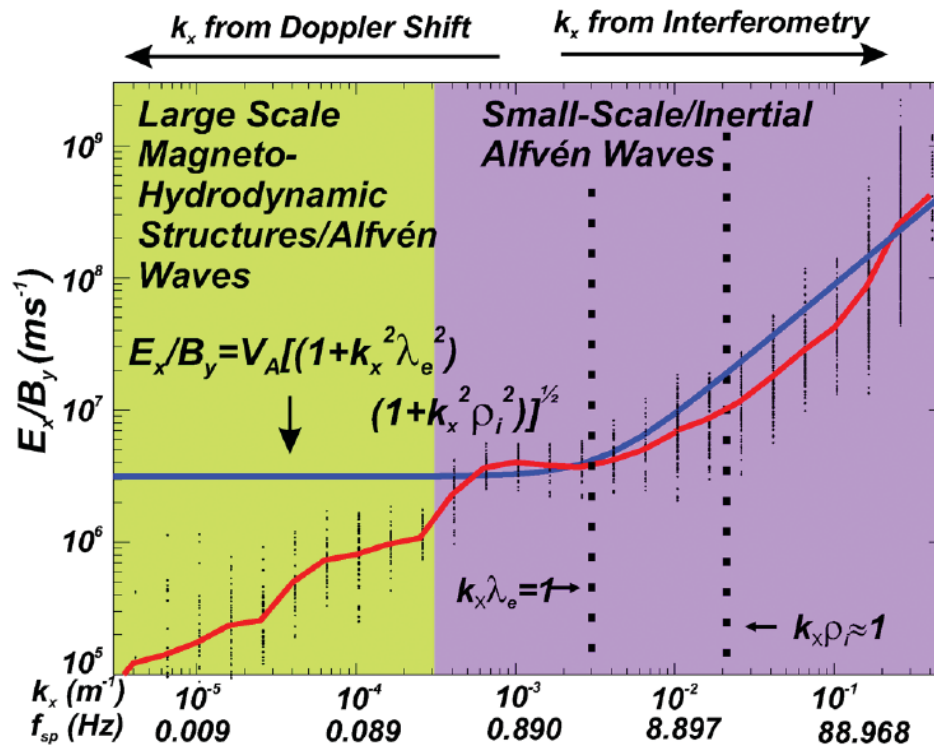


▪ Alfvén waveの起源 --- 磁気圏

▪ 磁気圏-電離圏結合領域で、急速に背景プラズマの構造が変化 -> dispersionが変化 -> dispersive Alfvén waveに

## 2. 動的な結合 - Alfvén wave

### ▪ Dispersive Alfvén Wave

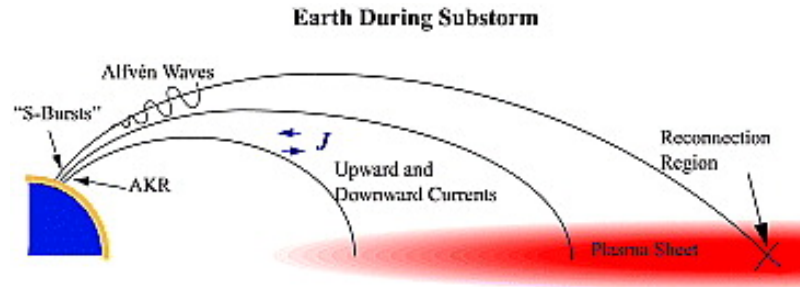


Chaston et al.(2008)

電子慣性長程度のスケールを持つオーロラはある？

- ・遷移領域の磁場、背景密度変化がdispersiveの起源として重要。
- ・太陽の場合のAlfvén waveの起源は彩層？

## 2. 遷移領域におけるAlfven波動の反射

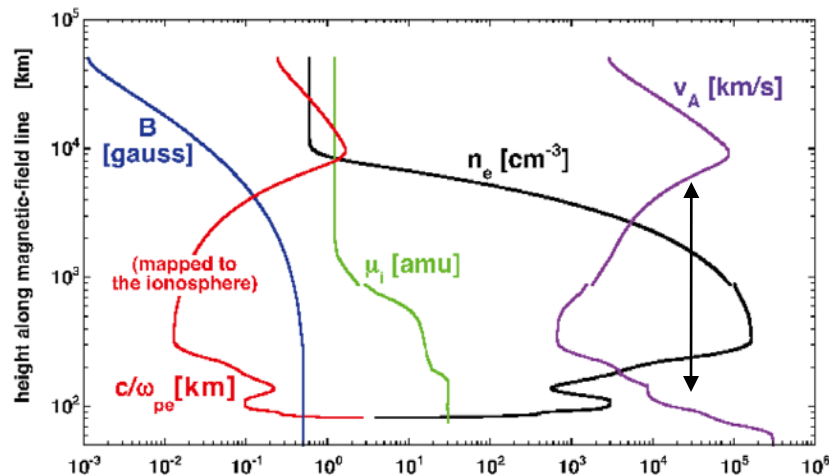


通常:

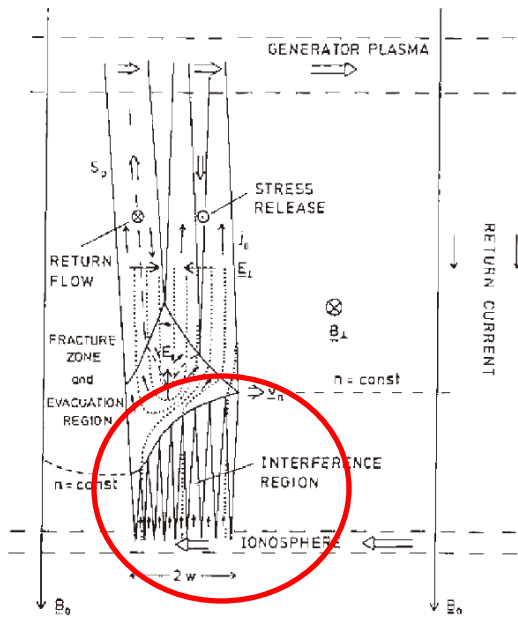
- ・Alfven conductanceと電離圏conductanceの不整合  
-> インピーダンスミスマッチによるAlfven波動の反射
- ・磁気圏と電離圏の双方向communication

加速域がある場合:

- ・電離圏上端と加速域でAlfven speedが急速に変化 – Alfven 波動のtrapping  
Ionospheric Alfven resonator



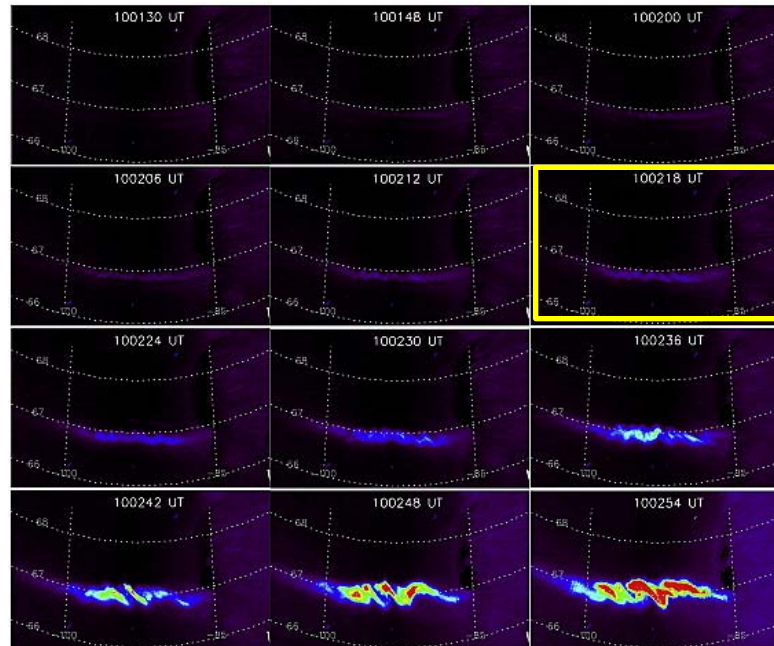
## 2. 遷移領域におけるAlfven波動の反射



Harendel (1994)

Ionospheric Feedback Instability –  
 電離圏と加速域の間にAlfven waveが捕捉  
 narrow scaleの構造を作り出す。  
 ( $\Sigma p / \Sigma A \gg 1$ ,  $\Sigma A$ の勾配)

- FACが強くなるにつれ、オーロラ(=FAC)がfilament化する  
 オーロラ爆発を促進する

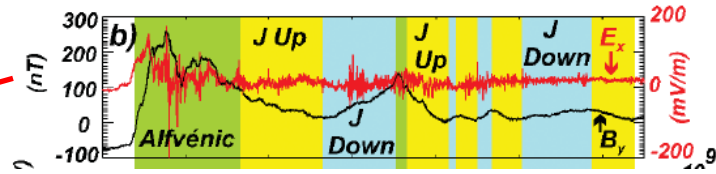
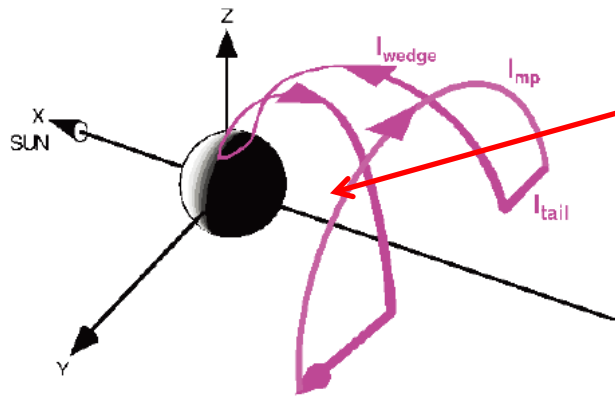


Liang et al.(2008)

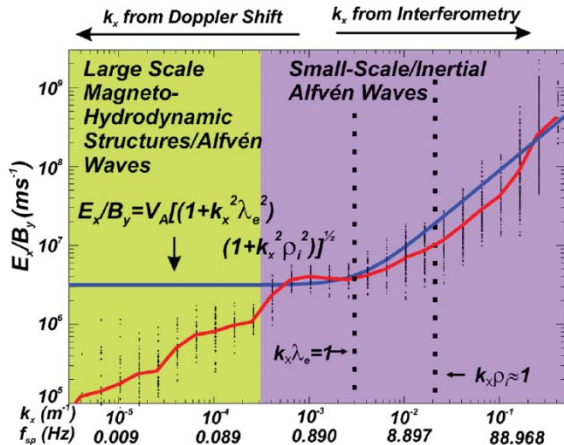
Filament化するオーロラ -- Ionospheric Feedback Instabilityの証拠?

# 3. M-I研究から : 大きなスケールの中の小さな構造

- ・ネットとして、Upward/Downward 電流系の中に、  
 小スケールのupward/downward電流が埋め込まれている。  
 マクロとしての電流の連続性とメソスケール/ミクロスケールでの電流の連続性。



Chaston et al. (2008)



- ・小スケールの構造が大きな構造を作り出す可能性はあるか？  
 inverse-カスケード？

Chaston et al. (2008)


### 3. M-I研究から : 能動的な電離圏

・電離圏は Poynting fluxをうみださない(地球では)

しかし、能動的にシステムに影響を及ぼす

- ・ conductivityの変化を介して、電離圏・磁気圏結合(電流/加速域)を制御
- ・ 磁気圏からの電子の降り込み等によって、conductivityが変化
- ・ Flywheel 効果

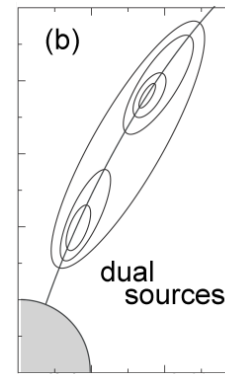
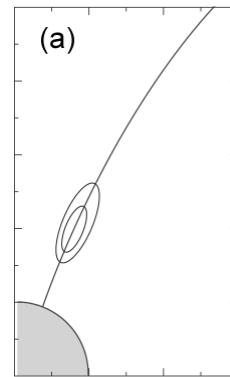
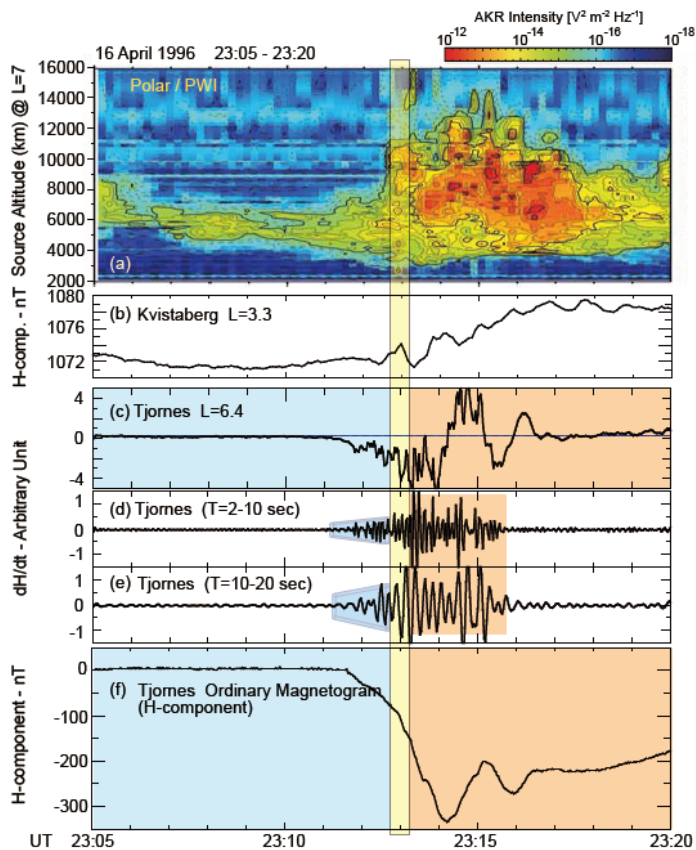
#### Flywheel効果 - 中性大気が電場を作り出す

1. 電場増加(磁気圏) : 電場増加(電離圏) : 電離圏プラズマ運動 -> 中性大気運動
  2. 電場減少(磁気圏) -> 電場減少(電離圏) -> 電離圏プラズマ減速 -> 中性大気は慣性運動を続ける
  3. <- 電場増大(電離圏) <- 電離圏プラズマ運動
- 



# 3. M-I研究から : 過渡応答の重要性

- ・遷移領域のダイナミクスは過渡的(短い時間で発達し、終了)
  - ・・オーロラ爆発の開始時に、新しい加速域が形成。5分ほどで終了
  - ・・強いFACを引きこんでいる可能性。
  - ・・Transientな現象を見逃さないことが重要。

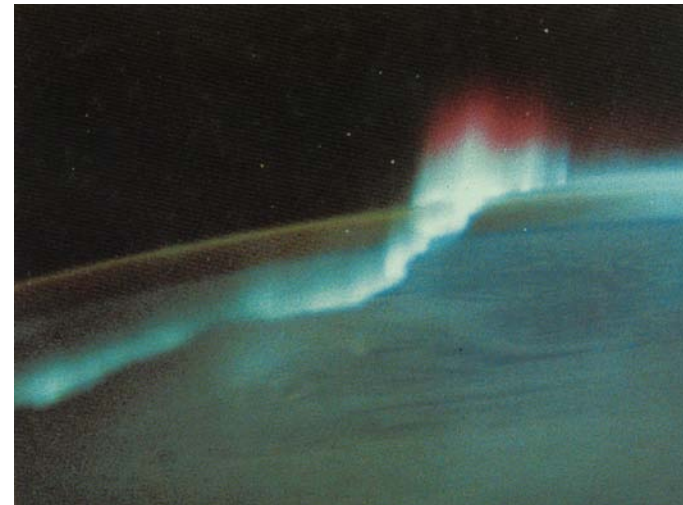
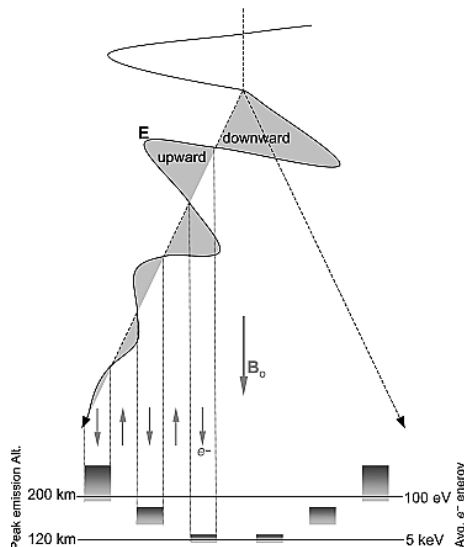


### 3. M-I研究から : 現在の地球の研究でできないこと

- ・磁力線に沿った
    - ・・構造(空間スケール、時間発展)
    - ・・伝搬(波動、粒子)
- などが、磁気圏-電離圏結合に重要

しかし・・・、

磁気圏のその場観測では、磁力線方向の変化は同時には追跡できない。  
磁力線方向の波長構造などは不明。



オーロラを横から観測すれば見える？

## 4. むすびにかえて

- ・太陽の周期活動の起源、これからどうなっていくのか、というのは、自然な疑問。
- ・違うプラズマの系が結び付いた領域は、現象として多様性に富み、また系全体のダイナミクスを能動的に制御する重要な領域

乱暴な意見ですが・・・

- ・彩層 <-> 電離圏
  - ・彩層 - コロナ結合 <-> 磁気圏-電離圏結合
- のアナロジーが成り立つ可能性も。

地球(磁気圏-電離圏結合領域)と太陽(彩層-コロナ結合領域)

- ・パラメータが異なる。
- ・観測手法(その場観測/リモートセンシング)が異なる。

結合領域の物理を「相補的に」理解を深化させる可能性が十分。