

論文紹介：

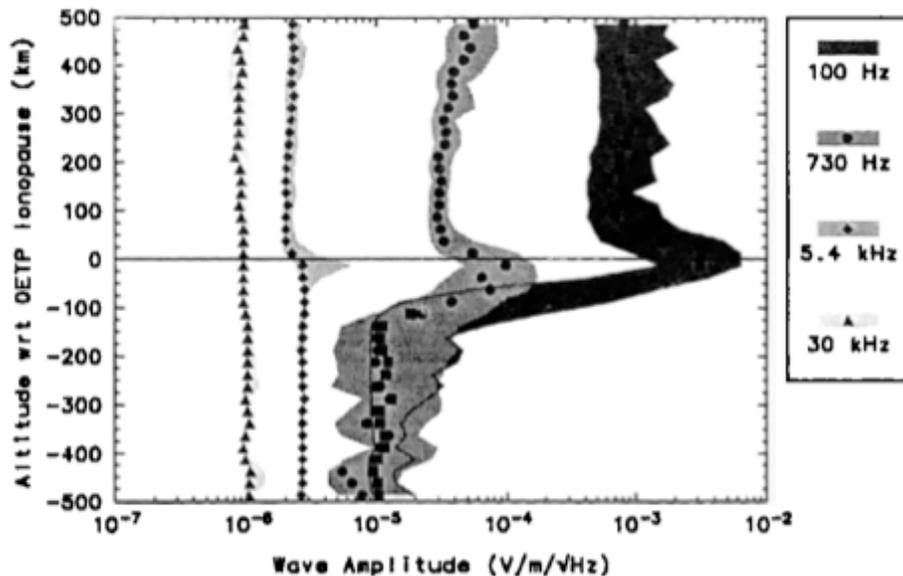
Microphysics of the Venusian
and Martian mantles

Quest et al., GRL, vol. 24, pp.301-304, 1997

担当者 寺田直樹(東北大)

補足情報1

- 金星プラズマ波動観測



PVOによる金星イオノポーズ周辺の波動観測 [Strangeway and Russell, 1996]

- 波動強度はOETP ionopause ($n_e=100 \text{ cm}^{-3}$) でピーク
 - 候補メカニズム
 - 沿磁力線電流・速度シアー
⇒ standing Alfvén wave [Strangeway and Russell, 1996]
 - イオンピックアップ
⇒ MTSI [Szego et al., 1991; Shapiro et al., 1995; Quest et al., 1997]
⇒ イオン音波不安定 [Huba, 1993]
 - 密度勾配
⇒ ドリフト不安定 [cf. Huba, 1992]
- 何れが支配的かは解っていない

補足情報1

Modified two-stream instability (ほぼ静電):

- 太陽風イオンと電子、惑星起源イオンと電子を考慮すると2つのブランチが現れる
 - Kinetic branch
(Quest論文ではMTSIと呼んでいる)
 - Hydrodynamic (or lower hybrid) branch
(Quest論文ではLHSIと呼んでいる)
- 群速度は両者とも主に磁力線沿いなので、電離圏に大量のエネルギーを運べない
- 前者は、 $\omega \ll \Omega_e$ の仮定は正しくない
[Strangeway and Russell, 1996]

イオン音波不安定 (静電):

- 惑星起源の冷たい電子により安定化される
[Shapiro et al., 1995]
- 同じ電場の振幅では、電磁ホイッスラーと比べてエネルギー密度が小さい、群速度が小さい \Rightarrow 大量のエネルギーを運べない
[Strangeway and Russell, 1996]

皮動強度

$n_e = 100 c$

補メカニズム

沿磁力線電流に関する異常抵抗?

沿磁力線電流・速度シア
 \Rightarrow standing Alfvén wave
[Strangeway and Russell, 1996]

イオンピックアップ

\Rightarrow MTSI [Szego et al., 1991; Shapiro et al., 1995; Quest et al., 1997]

イオン音波不安定 [Huba, 1993]

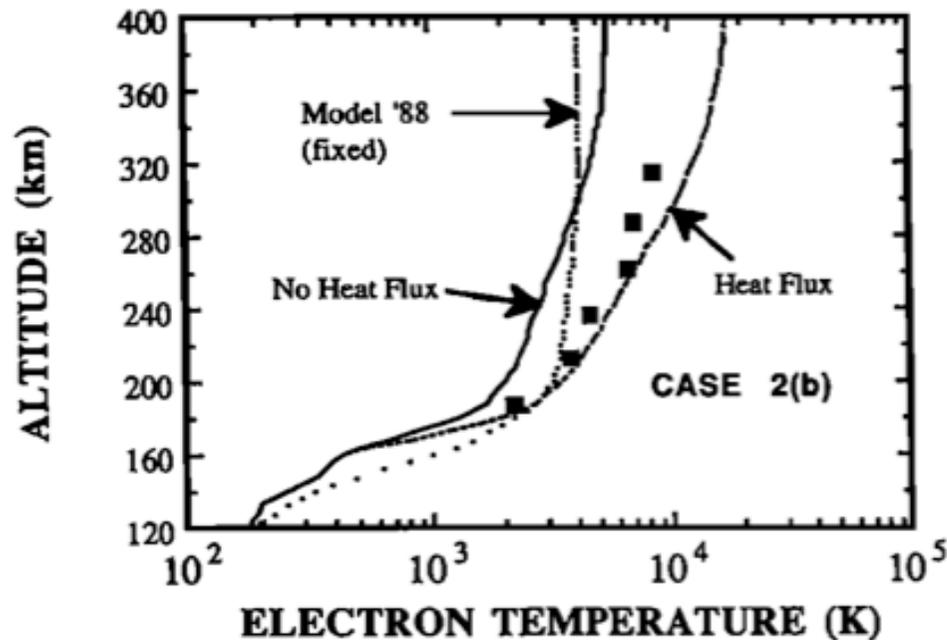
密度勾配

\Rightarrow ドリフト不安定 [cf. Huba, 1992]

何れが支配的かは解っていない

補足情報2

- 金星電離圏のenergetics

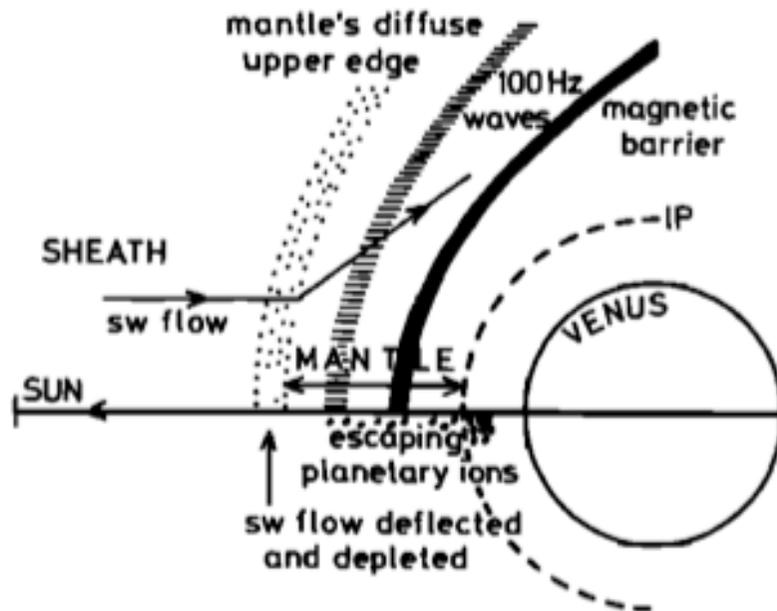


- 上側から加熱源を入れなければ、金星電離圏の温度構造を再現できない
- Unknown heat flux
 - $\Phi_e = 3 \times 10^{10} \text{ eV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - $\Phi_i = 5 \times 10^7 \text{ eV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$を上側境界から与えて計算した結果が観測と良く一致

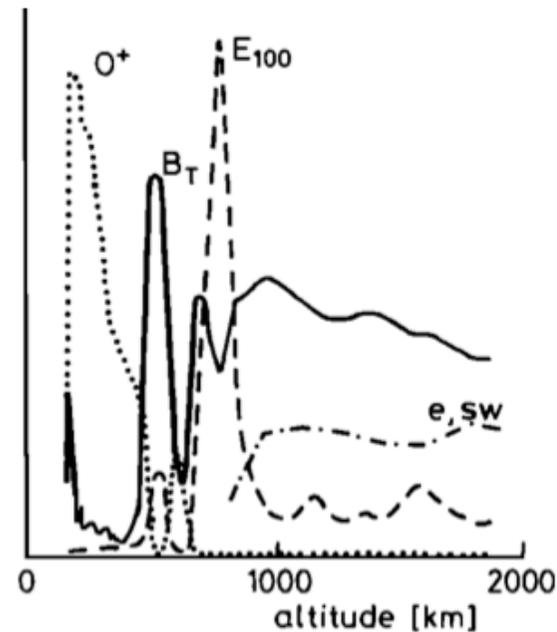
金星電離圏モデリングによる電子温度構造。■は観測値を表す
[Shinagawa et al., 1991]

補足情報3

- Shapiro et al. [1995]
 - 金星マントルにおけるマイクロ不安定の線形および非線形理論
 - 100 Hz波動の成因と、電離圏へのエネルギー輸送を議論



金星マントルの模式図



PVOの観測例 (orbit 173)

補足情報3

- Shapiro et al. [1995]

$$\left\{ \frac{\omega_{pe}^{c2}}{\Omega_{ce}^2} - \frac{\omega_{pe}^{c2} k_{\parallel}^2}{\omega^2 k^2} - \frac{\omega_{pi}^2}{\omega^2} + \frac{1}{k^2 D_p^2} [1 + w_p Z(w_p)] + \frac{1}{k^2 D_e^2} (1 - G_1) \right\}$$

$$\cdot \left[\left(1 + \frac{\omega_{pe}^2}{k^2 c^2} 2x G_2 \right) \left(1 + \frac{\omega_{pe}^{c2}}{k^2 c^2} + \frac{\omega_{pe}^2}{k^2 c^2} G_3 \right) \right.$$

$$\left. - \frac{\omega_{pe}^4}{k^4 c^4} \frac{\omega^2 k^2}{\Omega_{ce}^2 k_{\parallel}^2} G_4^2 \right] + \frac{\omega_{pe}^{c4}}{\Omega_{ce}^2 k^2 c^2} \left(1 + \frac{n_e^h}{n_e^c} G_2 \right)$$

$$\cdot \left[1 + \frac{\omega_{pe}^{c2}}{k^2 c^2} \left(1 + \frac{n_e^h}{n_e^c} G_3 \right) \right] + 2 \frac{\omega_{pe}^2 \omega_{pe}^{c4}}{\Omega_{ce}^2 k^4 c^4} G_4$$

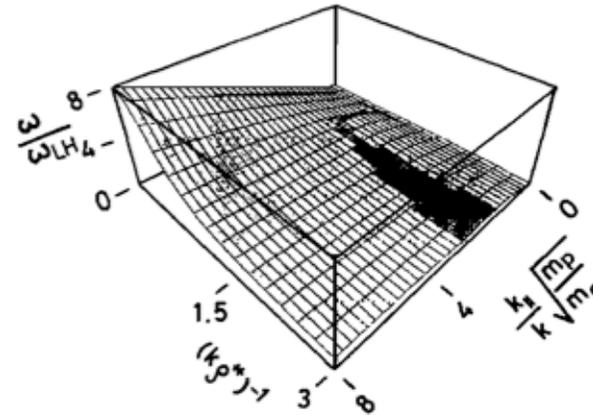
$$\cdot \left(1 + \frac{n_e^h}{n_e^c} G_2 \right) \left(1 + \frac{n_e^h}{n_e^c} G_3 \right) + \left(1 + 2x G_2 \frac{\omega_{pe}^2}{c^2 k^2} \right)$$

$$\cdot \left(1 + \frac{n_p}{n_i} G_3 \right)^2 \frac{k_{\parallel}^2}{k^2} \frac{\omega_{pe}^{c4}}{\omega^2 c^2 k^2} = 0$$

分散関係式:

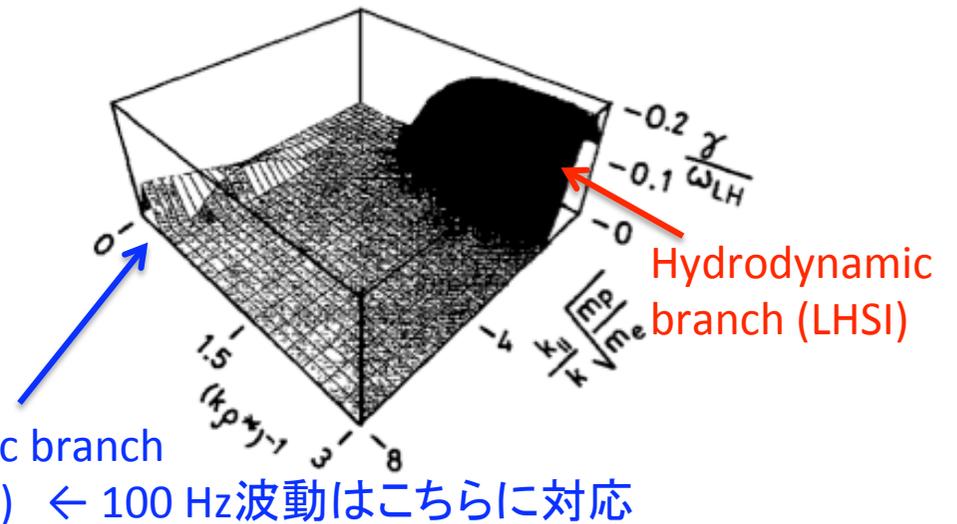
冷たい重イオン、冷たい電子、熱い電子、ドリフトする熱いプロトンの4つのコンポーネントを考慮

分散関係式の数値解(実部:周波数)



分散関係式の数値解(虚部:成長率)

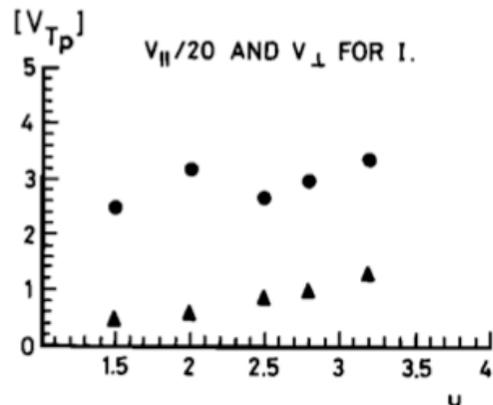
(1)



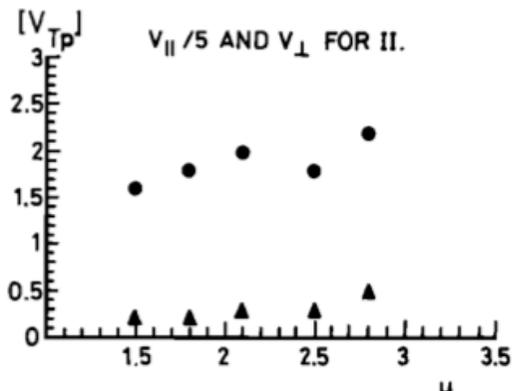
補足情報3

- Shapiro et al. [1995]: **MTSI**のエネルギーフラックス

Hydrodynamic branch (LHSI)



Kinetic branch (MTSI)



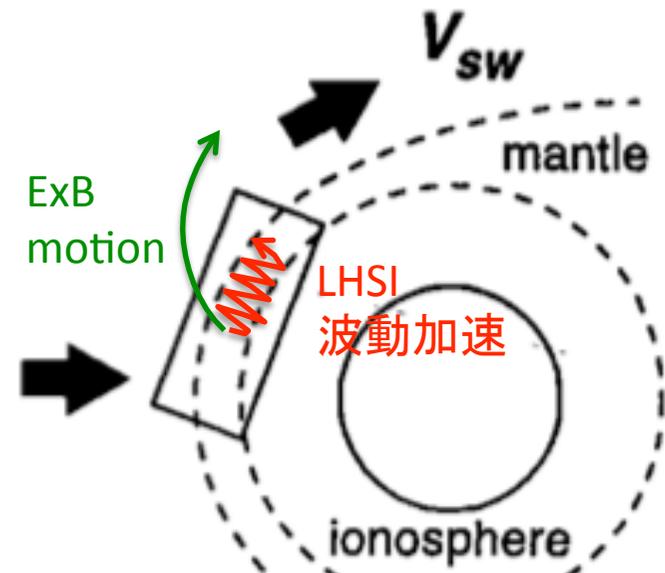
平行(●)と垂直(▲)方向の群速度

- Shocked solar windのエネルギーフラックス ($n \sim 100 \text{ cm}^{-3}$, $u \sim 100 \text{ km/s}$)
 - $\Phi_{sw} \sim 10^{11} \text{ eV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - 100 Hz波動のエネルギーフラックス ($E \sim 10 \text{ mV/m}$, $v_{g//} \sim 10u$)
 - $\Phi_{100} \sim 10^{10} \text{ eV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - 電離圏へのエネルギーフラックス ($v_{g\perp}/v_{g//}$ の上限は ~ 0.1)
 - $\Phi_{IS} \sim 10^9 \text{ eV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- ⇒ 電離圏へのエネルギーフラックスを説明するには足りない

Quest et al. [1997]の紹介

概要

- プラズママントル: 太陽風と惑星起源イオンが相互作用する乱流領域 (より詳しい定義はSpenner et al. [1980]などを参照。昔は「磁気バリア」とともによく使われた用語だったが、最近はあまり見かけない)
- 本論文では、電子慣性項を考慮した一次元の電磁ハイブリッドコードを用いて、金星や火星の昼側マントルにおけるマイクロ不安定を調査。特にhydrodynamic branch (lower hybrid streaming instability (LHSI)) の非線形発展を調査
- 磁力線に垂直に太陽風が流れるジオメトリにおいて、酸素イオンピックアップの(初期)加速には、ExB motionよりも波動加速の効果が支配的



イントロ

- 金星や火星の昼側マントルで観測される波動-粒子加速機構の候補：
 - Modified two-stream instability (MTSI): Kinetic branch
 - Lower hybrid streaming instability (LHSI): Hydrodynamic branch
[Sagdeev et al., 1990; Szego et al., 1991; Shapiro et al., 1995]
 - 他、イオン音波不安定など
- 両者ともに主に静電的で、惑星起源重イオンに対して相対速度を持つ太陽風プロトンのCherenkov共鳴(波の位相速度を超える速度を持つ粒子と波の共鳴)によって励起される
- MTSIとLHSIは同じ分散関係式から導かれる2つの極限
(注: 太陽風イオン・電子、惑星起源イオン・電子の4つのコンポーネントを含めた場合に2つのブランチが現れる)

イントロ

- **MTSI**と**LHSI**の分散関係式の数値解 [Shapiro et al., 1995]:
 - **MTSI**
 - 最大成長は、 Ω_{ih} の数倍の周波数域で起こる ($\Omega_{ih} = (\Omega_i \Omega_e)^{1/2}$)
 - 伝播方向は、背景磁場に垂直方向より少し斜め ($\theta \sim (m_e/m_i)^{1/2}$)
 - MTSIによって励起された波は、 Ω_i と Ω_e の間の周波数を持ち、磁力線沿いの位相速度は、磁力線垂直方向の位相速度よりも遥かに大きくなる
 - 太陽風プロトンと電子が共鳴可能。電子を加速
 - **LHSI**
 - 本論文で議論
 - 最大成長は、 Ω_{ih} 以下の周波数域で起こる
 - 電子とは共鳴しない
 - 太陽風プロトン流と惑星起源イオンが直接カップル

イントロ

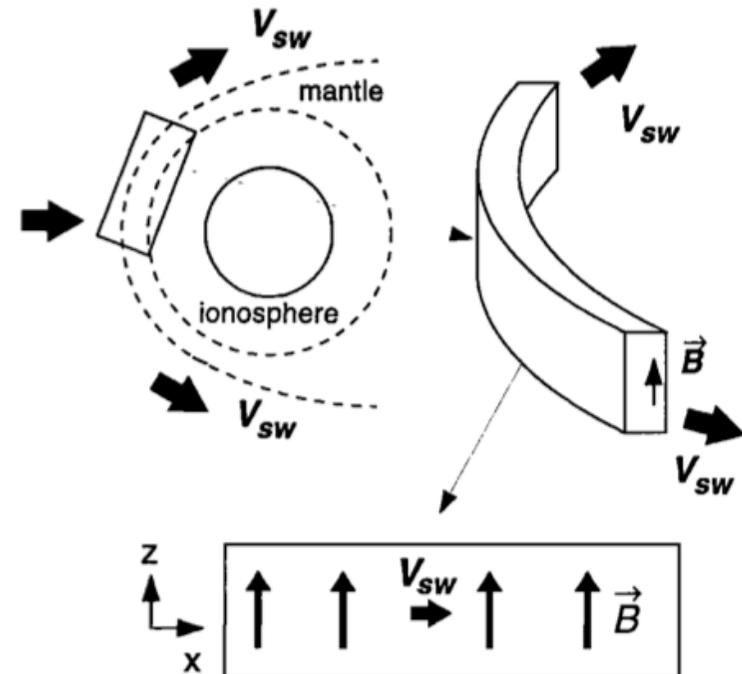
- PVO観測
 - 金星電離圏より上側で、100 Hzチャンネルで強い波動電場を観測 [Szego et al., 1991]
 - 100 Hzは Ω_{lh} の数倍。観測チャンネルの中で最も低い周波数帯
 - MTSIが有力な励起機構
- Phobos-2観測
 - より低周波数帯(～数Hz)まで観測 [Grard et al., 1989]
 - マントルでの波動のアクティビティのピークは $\sim \Omega_{lh}$
 - LHSIが有力な励起機構

イントロ

- **MTSI**と**LHSI**は、共に太陽風流から惑星起源重イオンへのエネルギーと運動量の輸送を担う
 - PVOの超熱的惑星イオンの観測 [Taylor et al., 1980]
 - Phobos-2の加速電子の観測 [Shutte et al., 1989]
 - Phobos-2の尾部方向流出イオンの観測 [Rosenbauer et al., 1989]
- **MTSI**によるカップリングは、非線形理論も含めて Shapiro et al. [1995]で詳細に議論
 - **MTSI**の非線形飽和は冷たい惑星イオンによる波の散逸によって起こる(非線形ランダウ減衰)
- 本論文では、**LHSI**の非線形発展を取り扱う

シミュレーションモデル

- LHSI(の垂直伝播極限)の数値計算の初期結果を示すことが本論文の目的
- シミュレーションモデル
 - 1次元電磁ハイブリッド(粒子イオン、流体電子)コード
 - 空間1次元。速度と電磁場は3成分
 - 電子慣性効果を保持(通常のハイブリッドコード[e.g., Winske and Omid, 1992]とは異なる)
 - シミュレーションのジオメトリ(右図)
 - Shocked solar windがx軸方向に V_{sw} の速度で流れる
 - 磁力線はz軸方向
 - 惑星起源重イオンは $t=0$ でバルク速度を持たない



シミュレーションモデル

- 初期条件

- $t=0$ で全ての変数は空間一様(熱ノイズ除く)
- $V_{sw}=3.4v_{tp}$ ($v_{tp}=(T_p/m_p)^{1/2}$)はプロトンの熱速度)
- $V_o=0$ (添字oは惑星起源の酸素イオンを表す)
- $n_p=n_o$ (添字pは太陽風プロトンを表す)
- $\beta_p=0.025$
- $\beta_o=0.005$
- $\beta_e=0.016$
- $m_o/m_p=16$
- $m_p/m_e=1836$

シミュレーションモデル

- 初期条件(続き)

- これらの初期条件は、電子密度 $n_e = 100 \text{ cm}^{-3}$ と仮定したとき、以下の条件に対応:

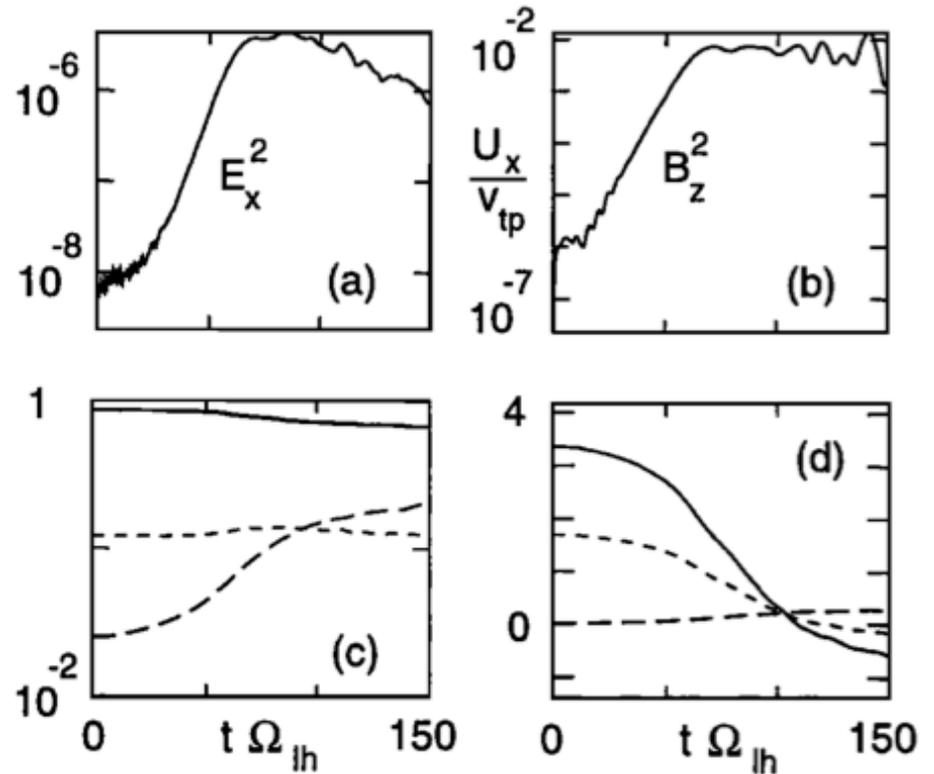
- $T_e \sim 1 \text{ eV}$
 - $T_p \sim 3 \text{ eV}$
 - $T_o \sim 0.6 \text{ eV}$
 - $V_{sw} \sim 60 \text{ km/s}$
 - $B \sim 50 \text{ nT}$

- これらの初期条件は、金星マントルの観測値と同程度。ただし β_p を除く(プロトン温度が低過ぎる。この要請は、磁力線垂直方向の伝播を仮定していることから来ている。Shapiro et al. [1995]によると、高 β_p ケースと低 β_p ケースは伝播角度が若干異なる以外は、分散関係(と成長率)は似ている?!)

- 電子温度は電離圏のものを仮定。太陽風起源のより高いエネルギーのものは含まず(流体電子モデルでは取り扱い困難)

シミュレーション結果

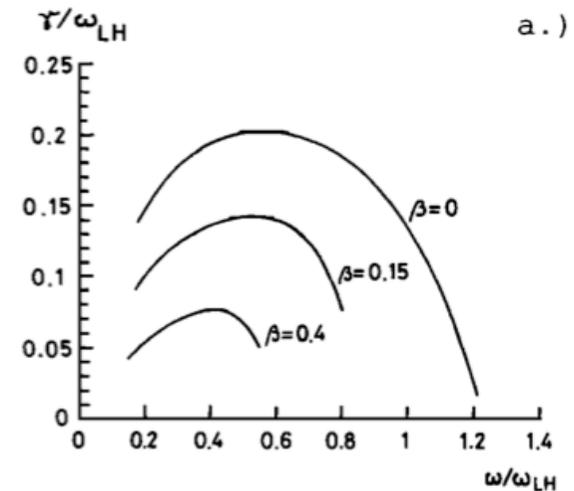
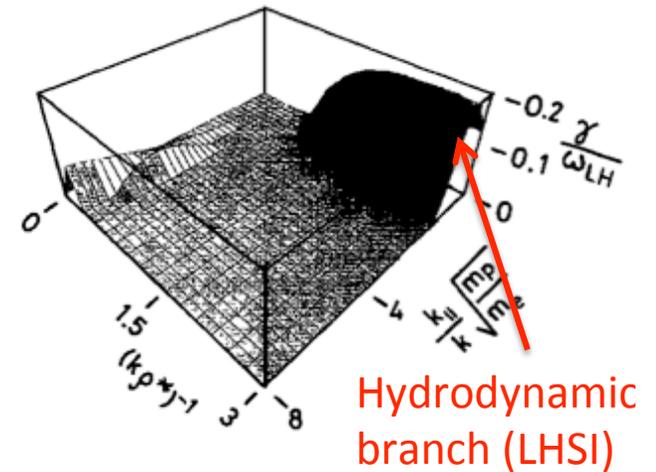
- 成長率は $\gamma \sim 0.09 \Omega_{lh}$
- 飽和時の静電場のRMSは13mV/m (PVOやPhobos-2の観測値より若干大きいが一貫)
- 静電波のエネルギー密度 $(\omega_{pe}/\omega_{ce})^2 E_x^2/8\pi$ (粒子の運動エネルギーと電場エネルギーの和) は初期全エネルギーの約2%
- 磁場のエネルギーも同程度 (右図b)。これは、最大成長波長が電子慣性長よりも長いから ($kc/\omega_{pe} < 1$)
- プロトンのエネルギーは少し減少し、酸素イオンのエネルギーは増加 (右図c)
- プロトンの u_x は0を超えて符号が変化、酸素イオンは増加、電子は両者の平均 (右図d)



エネルギーの時間発展。(a)は静電場、(b)は磁場、(c)はプラズマのエネルギー。(d)はx方向のバルク速度。
(c),(d)で実線はプロトン、short-dashed lineは電子、long-dashed lineは酸素イオンを表す。

線形理論との比較

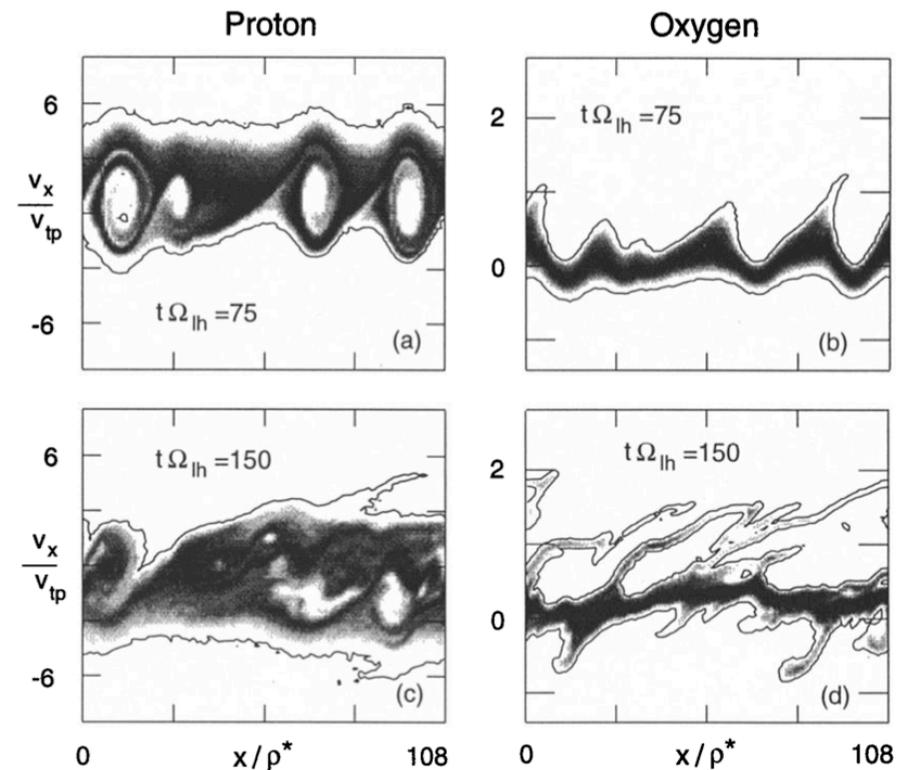
- LHSIの線形分散関係
 - 前述のパラメータでは、最大成長率 $\gamma \sim \omega \sim 0.1\Omega_{lh}$ 、最大成長波長 $k \sim 0.2/\rho^*$ (ここで、 $\rho^* = v_{tp}/\Omega_{lh}$ はプロトンの温度を用いて計算した電子の回旋半径)
 - 不安定領域の k 方向の幅は広い
 - プロトンのサイクロトロン運動よりも十分に速く成長
- これらの成長率や成長波長は、 $\beta_p = 0.4$ で計算したShapiro et al. [1995]の線形解析結果と同程度
- また、シミュレーション初期の電磁場スペクトルの成長率は、線形理論と良く一致



LHSIの成長率
[Shapiro et al., 1995]

シミュレーション結果

- プロトンの位相空間で発達した渦(右図a)、静電捕捉の飽和を示唆
- 捕捉条件:
 $\alpha_p m_p (V_{sw} - v_{ph})^2 \sim |2eE_x/k|$
- $\alpha_p \sim 0.43$
- 後期には非線形効果とサイクロトロン運動により混合。ビームエネルギーが熱エネルギーに(右図c)
- 酸素イオンの強い変調(右図b)、これは波の位相速度が遅い為に生じる
- 捕捉条件:
 $\alpha_o m_o v_{ph}^2 \sim |2eE_x/k|$
- $\alpha_o \sim 0.37$
- 金星コンディションでは、飽和時のイオン振動エネルギーは $\sim 70\text{eV}$ (観測と一致)



プロトンと酸素イオンの v_x - x 位相空間

波動加速 vs. $E \times B$ motion

- 静電捕捉による加速は、効果的に太陽風と惑星起源重イオンの運動量とエネルギーを結合する
- 波動加速と、 $E \times B$ motionの重要性比較テスト
 - 波動成分をフーリエ変換によって排除して、残りの場の中で粒子運動を追跡
 - 10%以下の加速が得られた
 - (これは計算時間が短い事と、 E_y が時間変化すること起因)
- よって、惑星起源イオンの太陽風との初期の結合は、波動効果に支配される可能性が高い

今後の課題

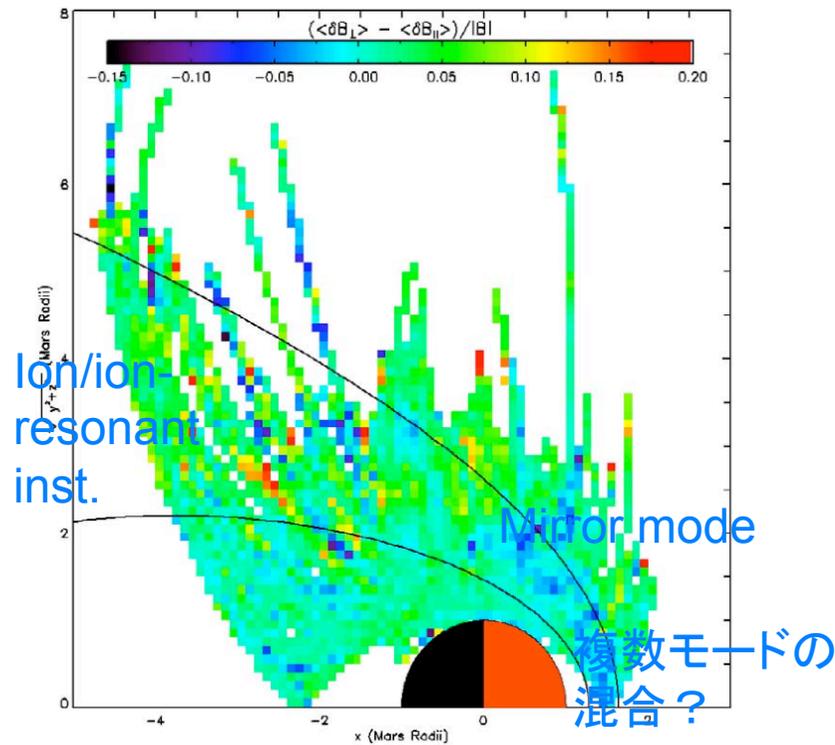
- インジェクション(本研究では、初期値問題を取り扱った)
- MTSI, LHSI, イオン音波モード[Crawford et al., 1993; Huba, 1993]の相対的重要性の評価
- 磁気シアーの重要性
- 電子の運動論的効果が波の安定性に果たす役割
- 多次元化
- 非周期境界条件

まとめ

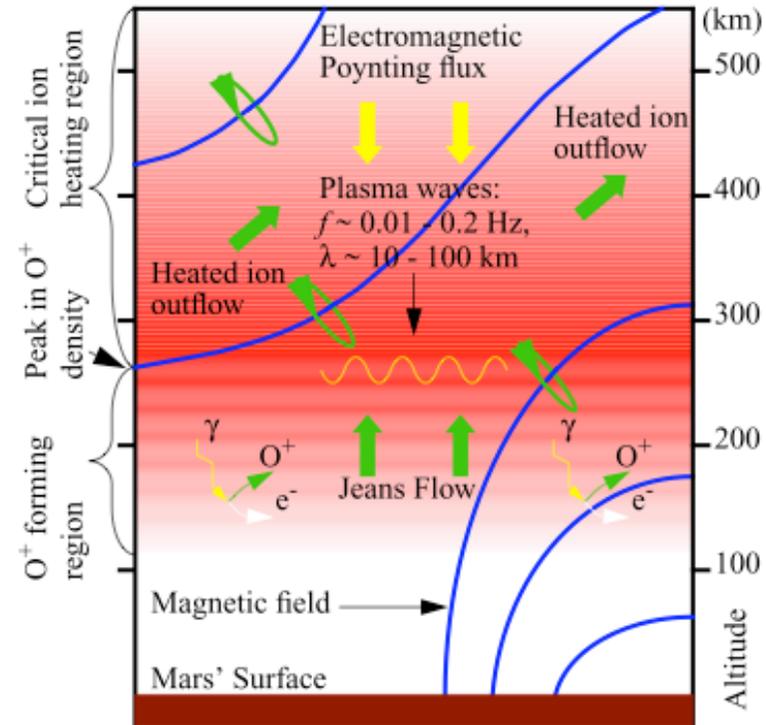
- 電子慣性効果を含めた1次元電磁ハイブリッドシミュレーション
 - 金星や火星マントルにおいて、惑星起源重イオンと太陽風プロトンの相対ドリフトによってLHSIが不安定化
 - プロトンの位相空間で渦を形成、静電捕捉により飽和、酸素イオンの強い変調と加速を生じる
 - 典型的なパラメータ下では、波動電場は $\sim 13\text{mV/m}$ (PVOやPhobos-2の観測値より若干大きい)が一致)
 - イオン加速は $\sim 70\text{eV}$ (Phobos-2観測と一致)
- ⇒ LHSIは太陽風流と惑星起源重イオンの初期の結合を担っている可能性が高い

Backup chart

参考：MGS観測



MGS MAG/ER観測
[Espley et al., 2004]



MGSのMAG/ER低周波波動観測から、沿磁力線電流に伴う波動 \Rightarrow 電離圏 O^+ サイクロトロン加熱 \Rightarrow 大量のイオン流出、を示唆 [Ergun et al., 2006]