

第26回火星勉強会 (2012/08/22)

Disappearing induced magnetosphere at Venus:
Implications for close-in exoplanets

Zhang et al., 2009, Geophys. Res. Lett., vol36,
L20203



名古屋大学 太陽地球環境研究所 (STEL)

M1 松永 和成

概要

- 惑星がグローバルな固有磁場を持っているかに関わらず、恒星風と惑星の大気との相互作用で、惑星の近くに magnetosphere-like な構造ができる
- グローバルな固有磁場のない金星と火星では、恒常的に誘導磁気圏 (induced magnetosphere) がある
- Venus Expressが金星の誘導磁気圏(昼側)の欠如を観測
 - この時の惑星間空間磁場(IMF)は太陽風の流れの向きと**ほぼ平行**であった
- 前述のIMFの特殊な場合についてのMHDシミュレーション
 - ◆ 金星の大気と太陽風との相互作用
 - ◆ 金星の大気散逸
 - ◆ “hot Jupiters”の大気進化
 - ◆ close-in “terrestrial” planetsの大気進化



概要

- 惑星がグローバルな固有磁場を持っているかに関わらず、恒星風と惑星の大気との相互作用で、惑星の近くに magnetosphere-like な構造ができる

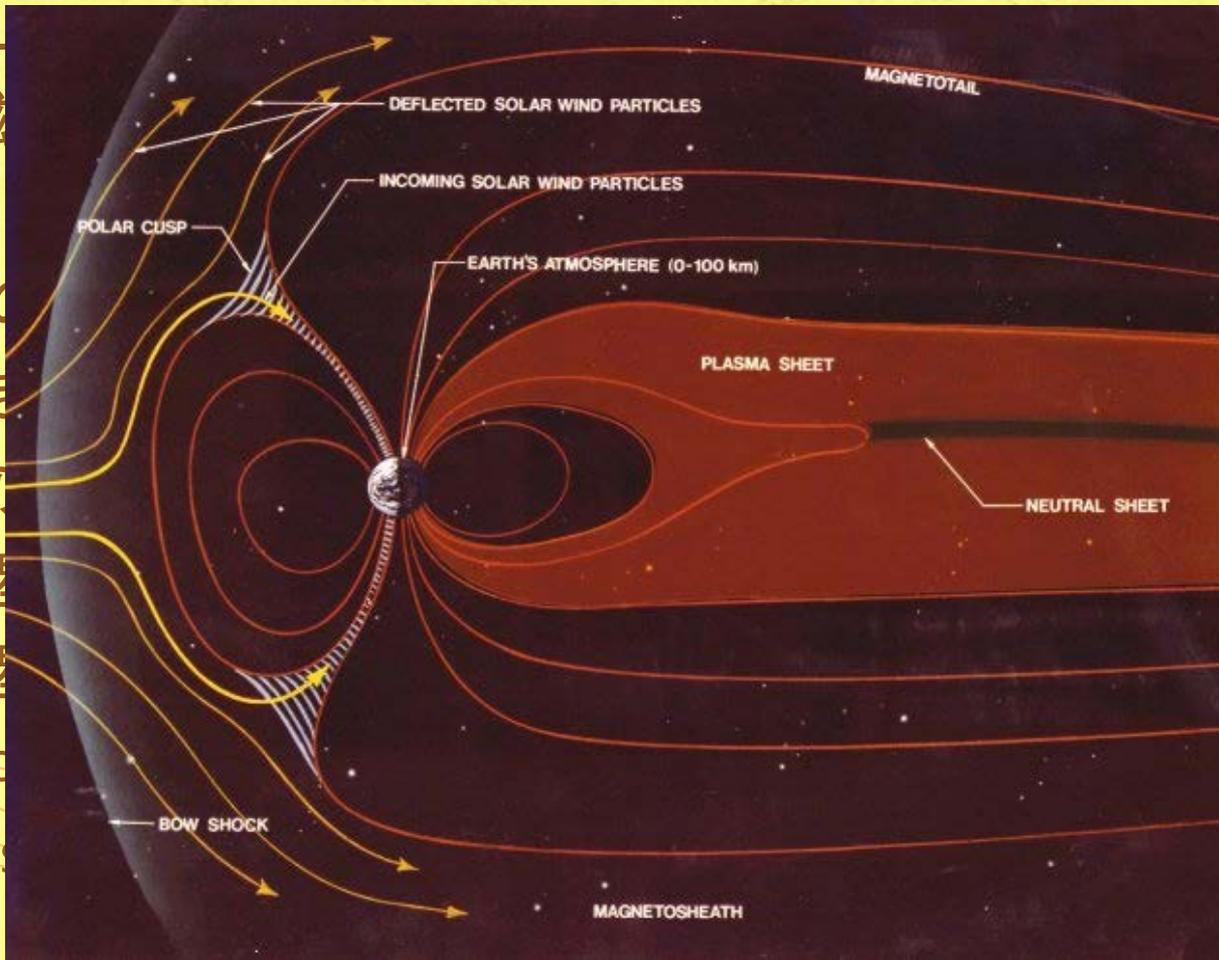
- グローバルな固有磁場を誘導磁場

- Venus

- この惑星は太陽風から地球の方向に

- 前述の

- ◆ 金星は固有磁場を持っていない
- ◆ 金星は固有磁場を持っていない
- ◆ “hot spot”
- ◆ close to the surface



通常的に

観測
の

ーション

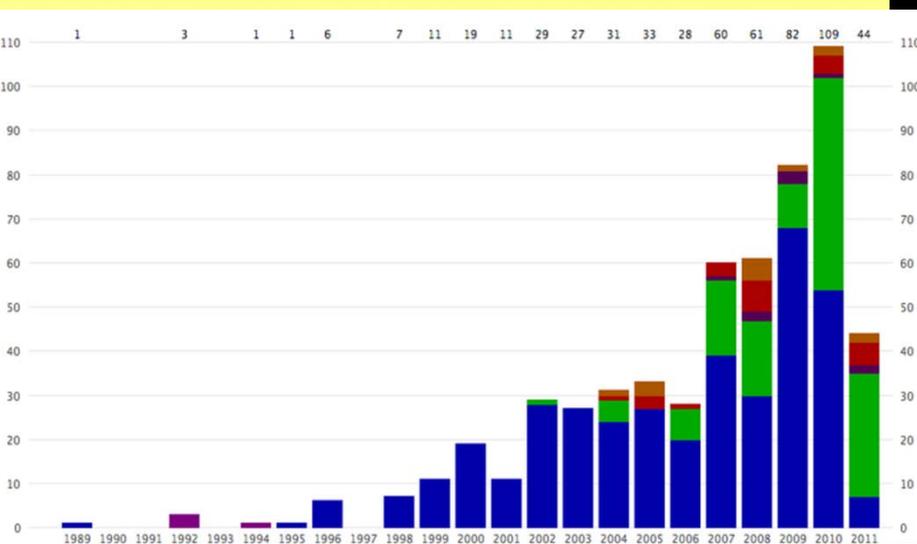


1. Introduction: Exoplanets

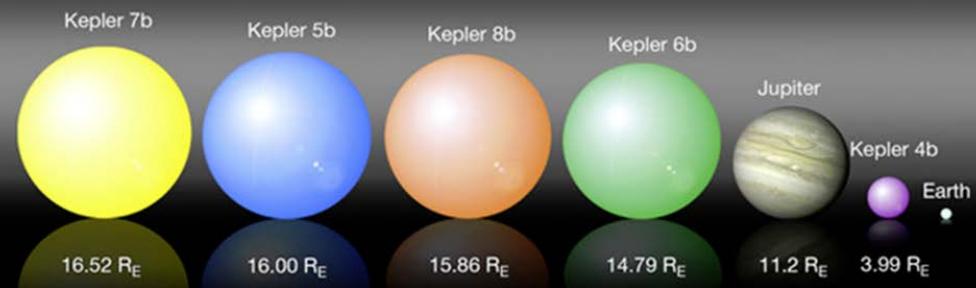
- 1990年代中盤に最初の系外惑星の発見
- The Extrasolar Planets Encyclopaedia
Last update: Aug. 17, 2012 (777 planets)
- 大部分が木星に似ている巨大なガス惑星
- Hot exoplanets (主星から0.01~0.1AU)

- ゆっくりとした周期的な回転
- 固有磁気モーメントが弱い

[Grießmeier et al., 2004, 2005], [Khodachenko et al., 2007a, 2007b]



Planet Size



1. Introduction: The solar wind interaction

- 多くの系外惑星で . . .
- 主星のスペクトルタイプと軌道位置に依存するが、高エネルギーEUVの放射にさらされるため、熱圏の拡大が起きやすい

[Yelle, 2004; Lammer, 2007; Lammer et al., 2007a, 2007b; Yelle et al., 2008]

また、

- ① 高い非熱的散逸率の可能性
- ② 金星や火星のような非磁化または弱磁化の惑星と太陽風との相互作用に類似したものの発生

<原因>高エネルギーのEUVの放射

濃い星間プラズマと上層大気との相互作用

系外惑星に周期的に固定された弱い磁気モーメント

[Khodachenko et al., 2007a, 2007b; Lammer et al., 2007, 2009]

星間プラズマと金星のような星の大気の相互作用の類似点の研究からホットジュピターの進化を探る！



1. Introduction: The solar wind interaction

● 多くの系外惑星で . . .

□ 主星のスペクトル型がF型以上で、高エネルギー放射が強い

[Yelle, 2004;

また、

① 高い非熱的放射線放射

② 金星や火星

相互作用の

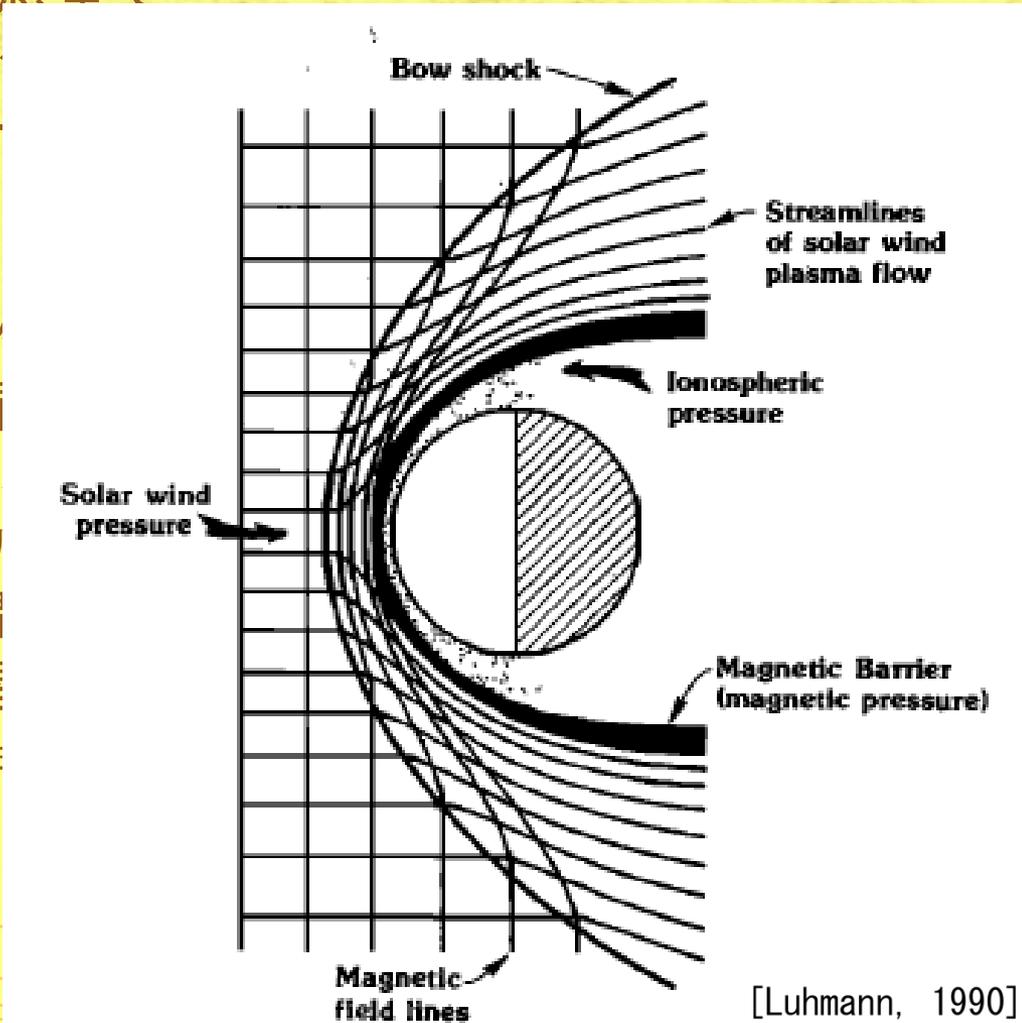
<原因>高エネルギー放射

濃い星間

系外惑星

[Khodachenko et al., 2008]

星
研



拡大が起きやすい

[Luhmann et al., 2008]

太陽風との

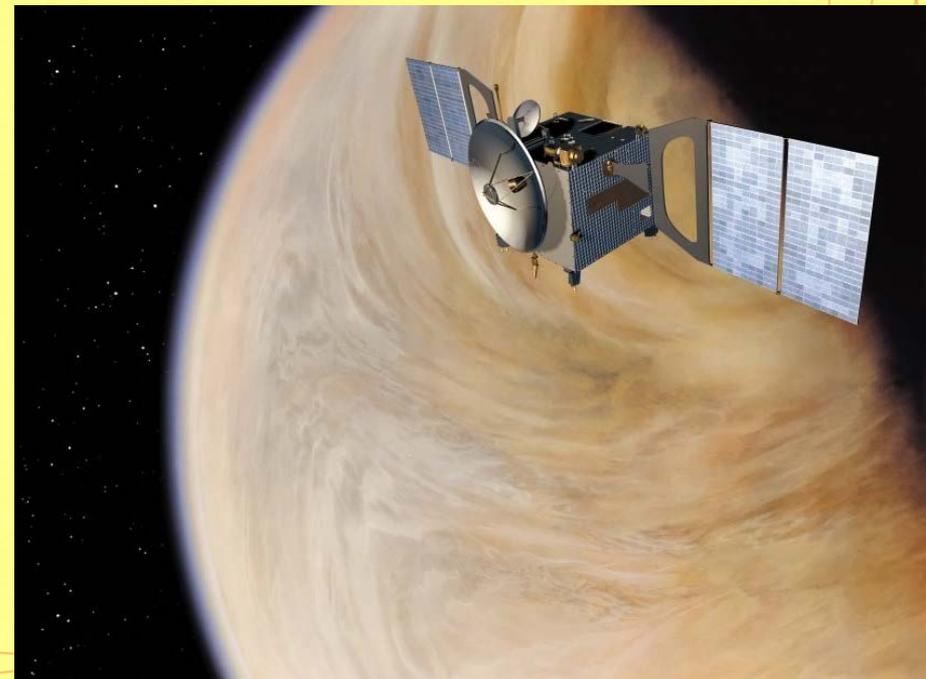
ント

作用の類似点の



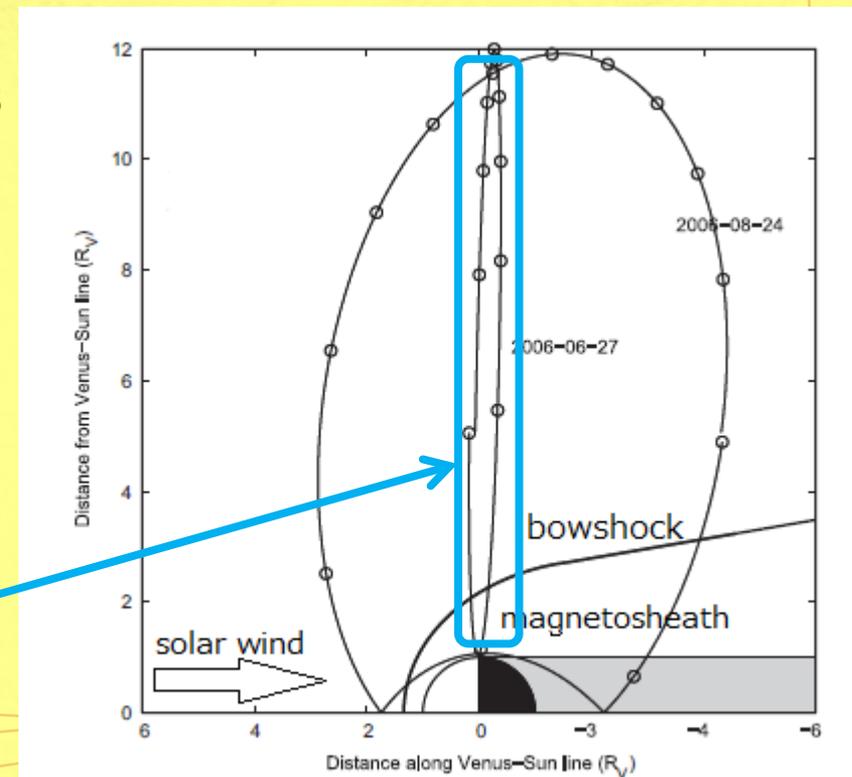
1. Introduction: Venus Express

- 打ち上げ日：2005/11/09
→2006/04に金星周回軌道(極軌道)に投入
- 周期24時間の金星極周回楕円軌道
- 近金点250キロメートル
- 遠金点66000キロメートル
- 近金点は北緯80~90度付近
- プラズマ/高速中性粒子
分析器(ASPERA-4)、
磁力計(MAG)を搭載



1. Introduction: Venus Express

- 主な成果：太陽風との相互作用でできる**誘導磁気圏**の重要性への理解
 - プラズマシートと誘導磁気圏の位置によってできるプラズマ wakeの境界層を経て、大気損失が多く起こる [Barabash et al., 2007].
- Venus Solar Orbital (VSO) coordinates
 - 金星から太陽：x軸
 - 金星の軌道の動きと反対：y軸
 - 北向き：z軸
- Two typical orbits of the Venus Express spacecraft [Zhang et al., 2008a]
- 本論文で取り上げた観測時の軌道 2006/06/26-27

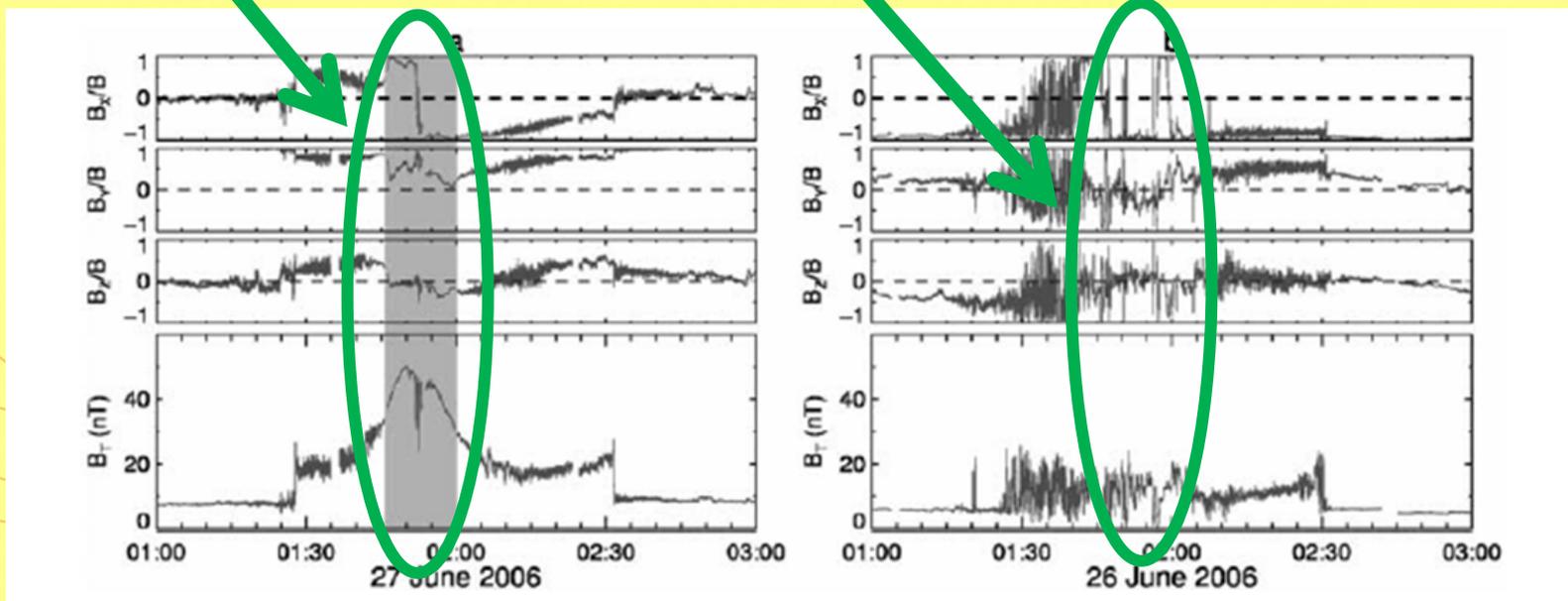


2. Disappearing of the Magnetic Barrier Observed by Venus Express

- Venus Expressによるmagnetosheathの内部領域の磁気強度の測定
→磁気バリアーの存在の確認

左図（2006年6月27日）：01:46-02:00の影の部分で典型的な**磁気バリアー**

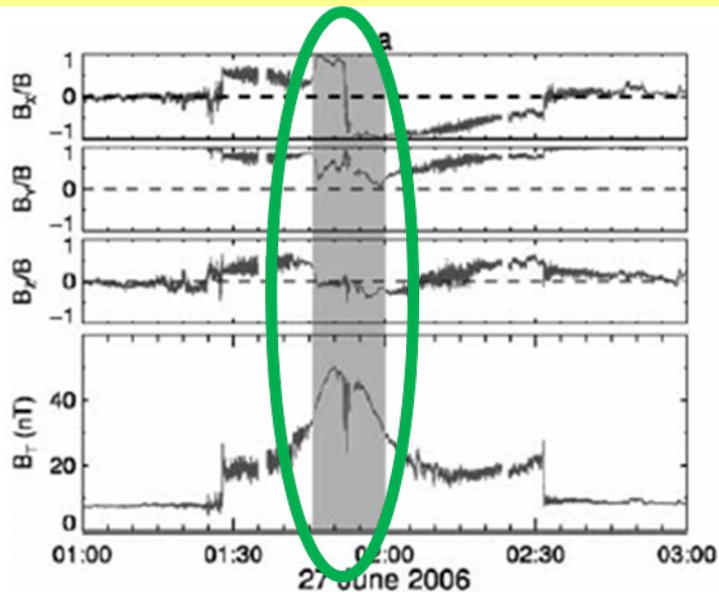
右図（2006年6月26日）：27日と同じ軌道での観測だが、磁気バリアーの変化がみられない→**磁気バリアーの消失？**



詳しく見ると . . .

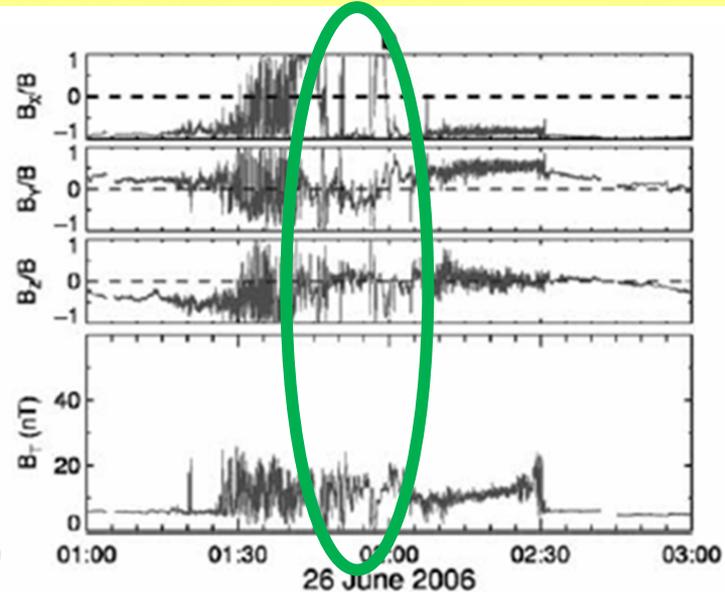
◇ケース 1

- 2006年6月27日のイベント
 - 磁気バリアーあり
 - 磁気バリアーをでたあと、磁場強度は増加
 - IMF強度は安定
 - IMFは太陽風の向きに対して垂直



◇ケース 2

- 2006年6月26日のイベント
 - 磁気バリアーなし
 - そのかわり、磁場が大きく振動、磁場強度の増加はなし
 - IMF強度は安定
 - IMFは太陽風の向きに対してほぼ平行



3. MHD Simulation of the Disappearing Induced Magnetosphere

- 目的：太陽風と特殊なIMFの状況の金星との相互作用の全球的な外観を知るため
- 使用したもの：最近の金星のMHDモデル
火星[Ma et al., 2002, 2004a; Ma and Nagy, 2007]と
タイタン[Ma et al., 2004b, 2006, 2007]の
global multi-species MHDモデルに似たもの
高いradial resolutionのadaptive spherical coordinate
金星の電離圏の中を $\sim 0.0025R_v$ \sim 約15kmとして、
金星の電離圏を再現
- 太陽風のプロトン密度と金星の電離圏の主要な
イオン O_2^+ 、 O^+ 、 CO_2^+ の密度は、多流体モデルと
して計算



MHD Simulation parameters

① ケース 1 (2006/06/27)

$B = (0.3, 8.1, 0.0)$ nT (磁場観測からのIMF強度)

太陽風パラメーター (適当な値を選択)

密度 : $N = 25\text{cm}^{-3}$, 温度 : $T_p = 1.0 \times 10^5\text{K}$,

速度 : $U = (-420, 35, 0)$ km/s

② ケース 2 (2006/06/26)

$B = (-5.3, 1.1, -0.9)$ nT

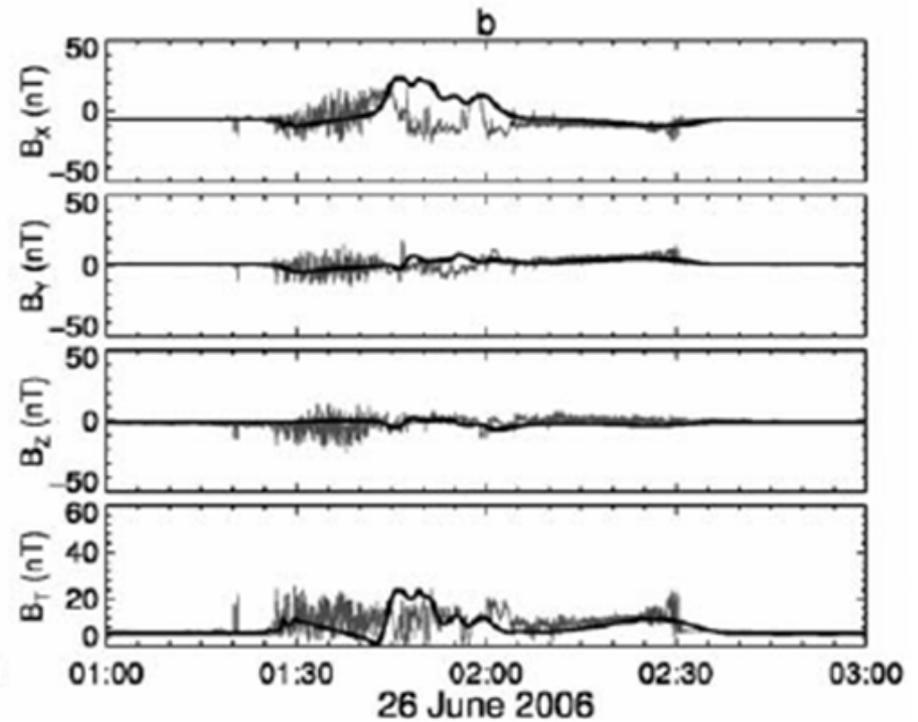
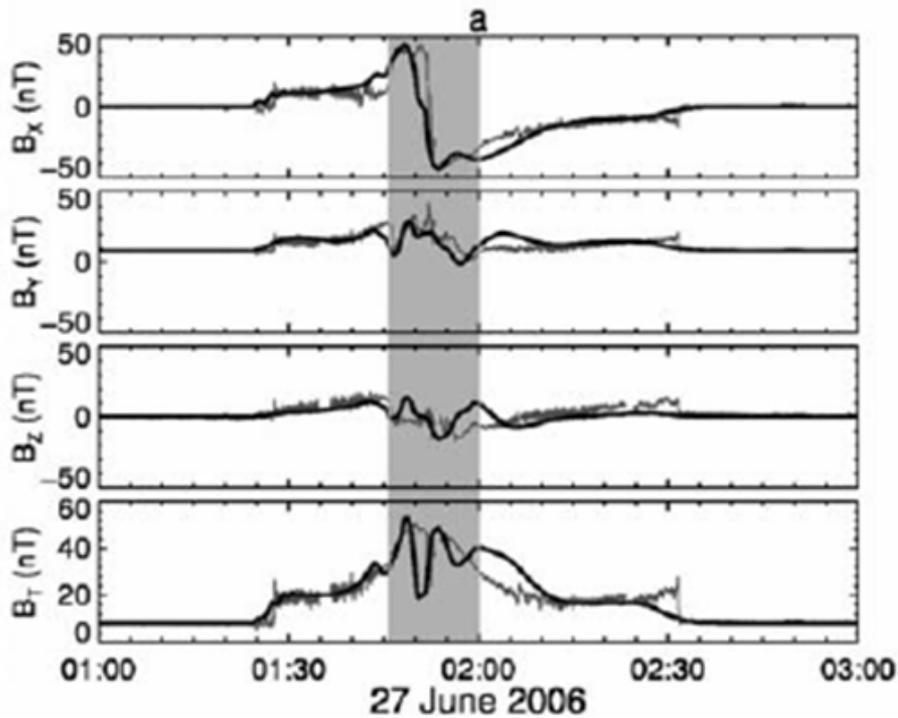
密度 : $N = 15\text{cm}^{-3}$, 温度 : $T_p = 1.5 \times 10^5\text{K}$,

速度 : $U = (-350, 35, 0)$ km/s



Comparison

- 太い黒い線：シミュレーションからの磁場
- 薄い線：Venus Expressの磁場計測

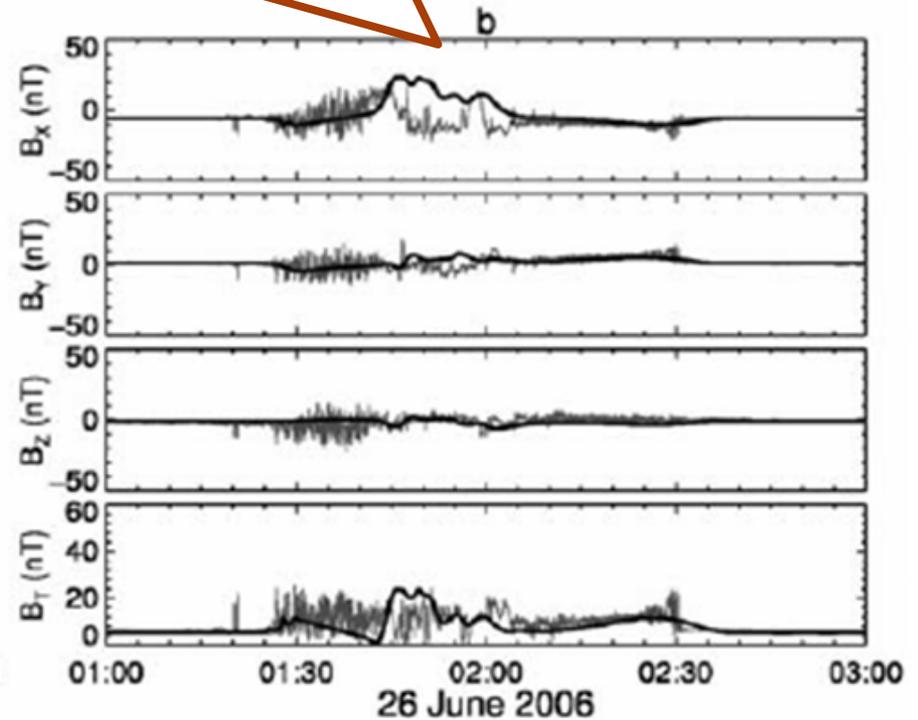
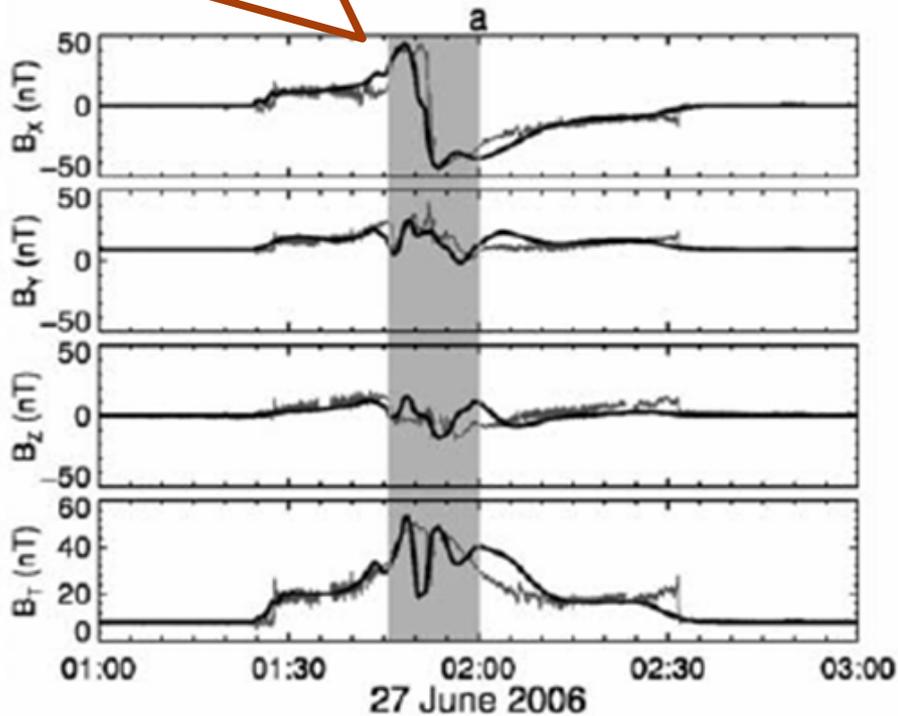


Comparison

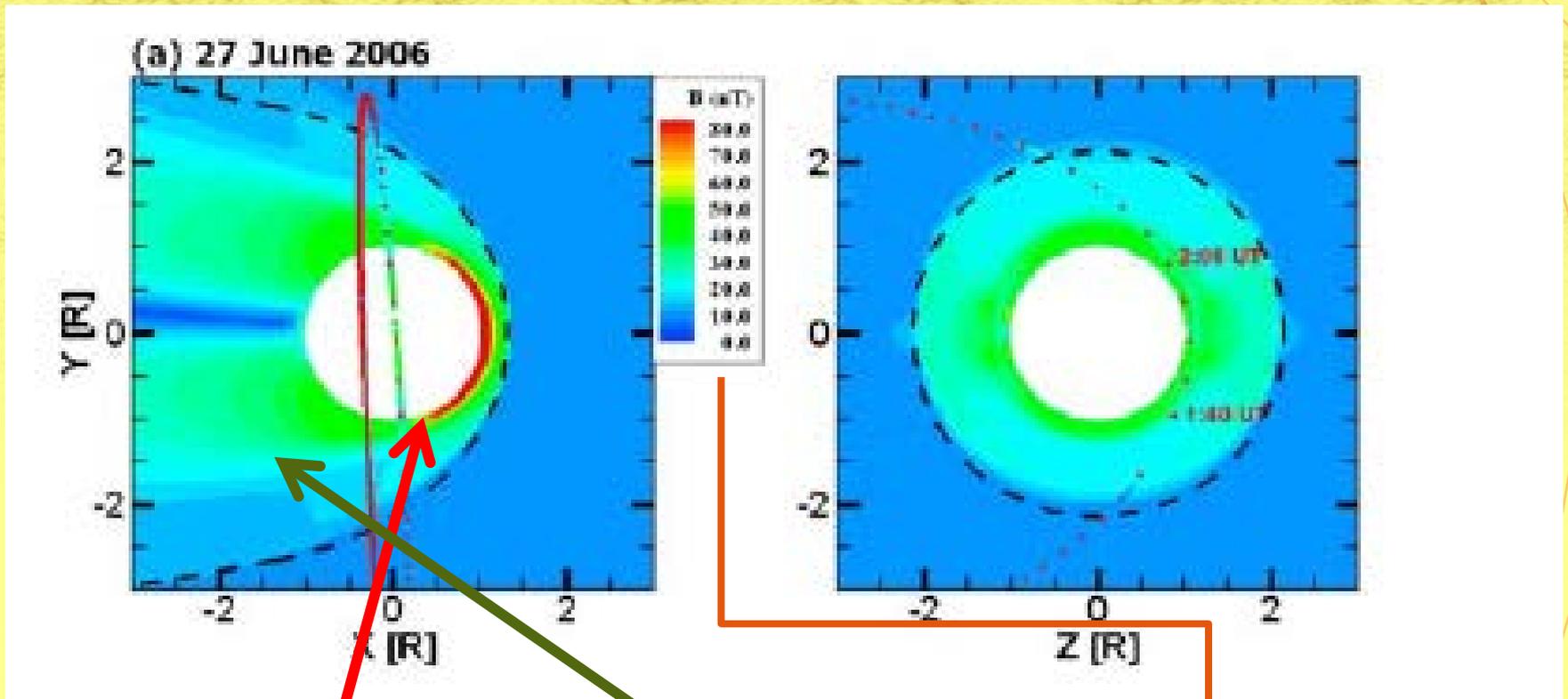
シュミレーションとVenus Expressの磁場計測がほとんど一致している。

シュミレーションとVenus Expressの磁場計測

シュミレーションとVenus Expressの磁場計測がほとんど一致している。



The calculated magnetic field : ケース 1

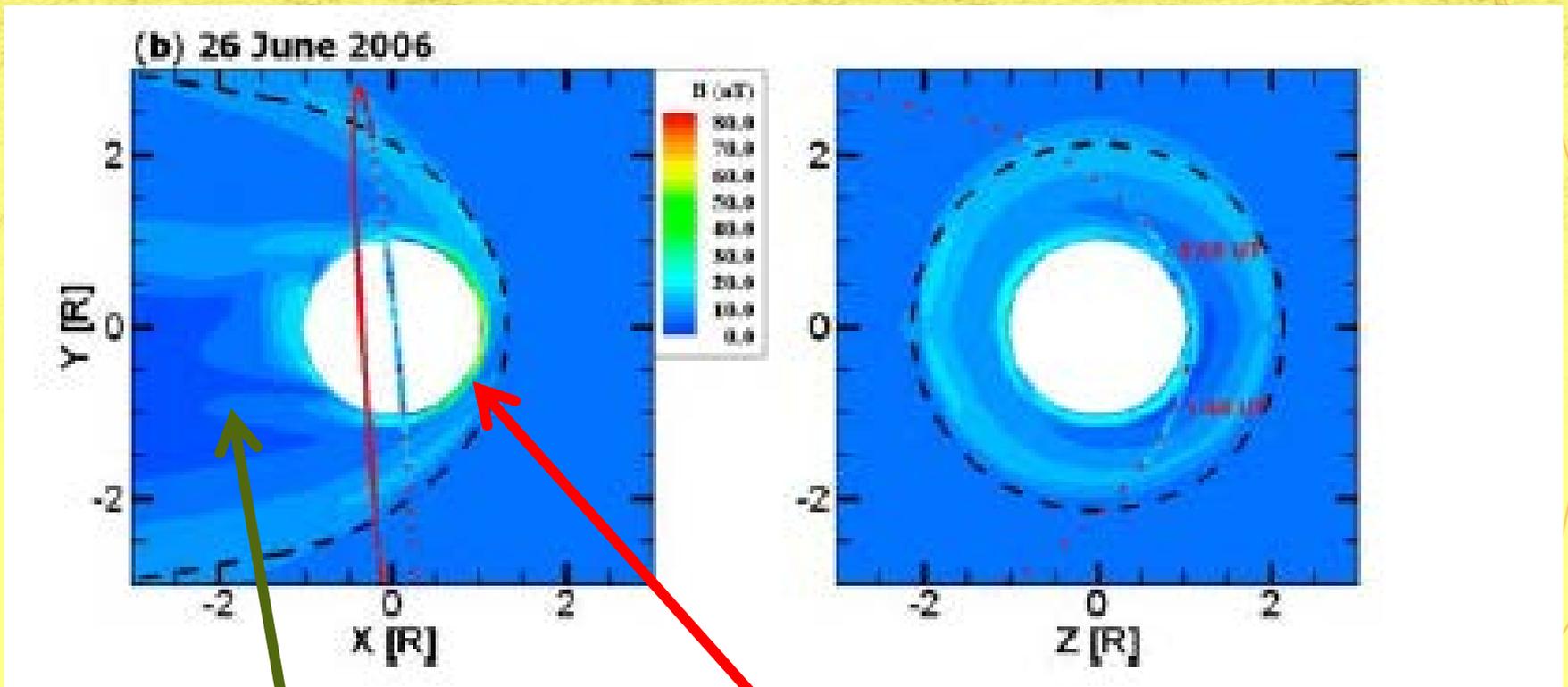


赤い線はVenus Expressの軌道

- 典型的な誘導磁気圏
- 昼側の**磁気バリアー**、夜側のmagnetotail
- 金星の周りを覆う強い磁場
- 境界層やプラズマシートのような細かな特徴

0から80nTまで10nT
刻みのcolor plot

The calculated magnetic field : ケース2



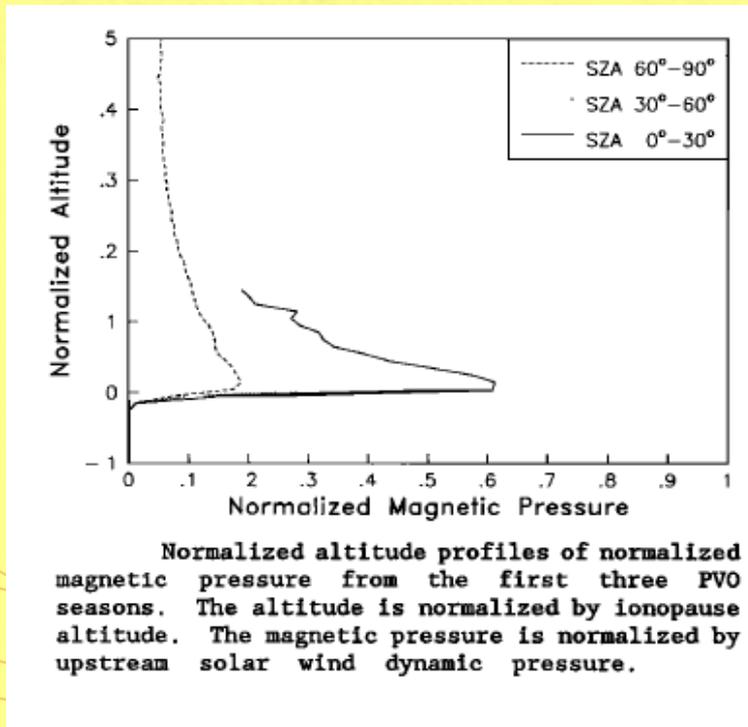
赤い線はVenus Expressの軌道

- 誘導磁気圏なし
- 昼側のinner magnetosheathにpileupされたとても薄い領域
- 夜側のmagnetotailなし

The altitude profiles of the magnetic pressure

- シミュレーションの結果に基づいた solar wind dynamic pressure によって規格化した磁気圧の高度プロファイル
- ケース1のプロファイルは、[Zhang et al., 1991] の

統計的観測と一致



- ケース2のプロファイルは、最大圧力がかなり小さく、pileup regionが薄い
- 磁気圧が太陽風の障害物として効率的に役割を果たすことができない
→ 磁気バリアーと呼べない

IMF orientation conditions

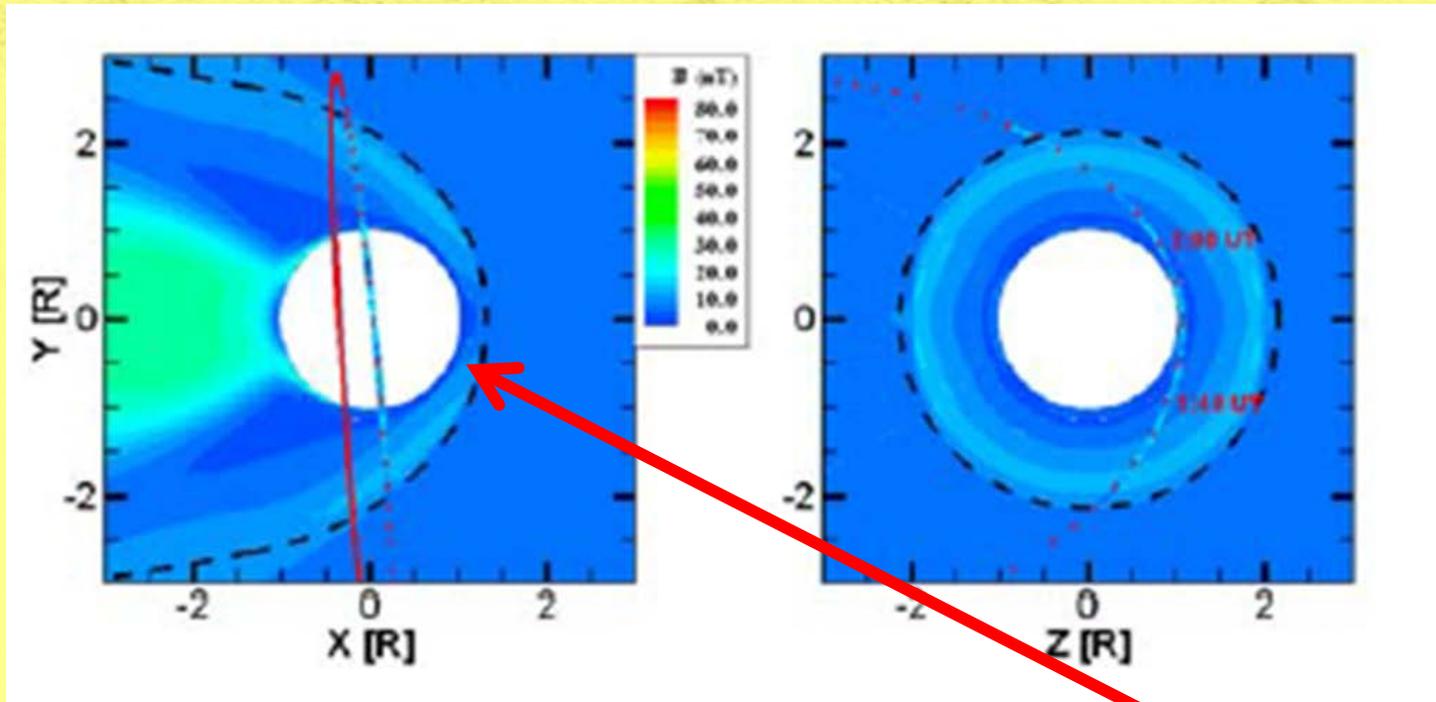
- MHDシミュレーションにおいて . . .
- ケース 1 : IMFは、太陽風の向きに対して垂直
- ケース 2 : IMFは、太陽風向きに対して **ほぼ** 平行

完全に平行ではなく **約11度** の IMF cone angle

- IMFが完全に太陽風に平行のときはどうなるか？

The IMF is perfectly aligned with the solar wind

- IMFが完全に太陽風の向きと平行のときのシミュレーション（パラメーターはケース2と同じ）



- 誘導磁気圏は完全に消えていて、昼側のpileupもない。
- 磁気圧で規格化された高度プロファイルを検証
→zero pileup fieldを確認

4. Atmospheric Escape Rates

- 大気損失率へのIMFの影響

- ケース2のモデルとケース3のモデルの比較

同じ太陽風のパラメーター、わずかに異なるIMFの方向

結果

- ケース2：IMFのcone angleが11度

散逸率は、 $\sim 5.4 \times 10^{25} \text{ s}^{-1}$

- ケース3：IMFは完全に太陽風の向きと平行

散逸率は、 $\sim 9.5 \times 10^{25} \text{ s}^{-1}$

異なる

IMFの方向は、イオン散逸率に影響を与える

4. Atmospheric Escape Rates

- 大気損失率へのIMFの影響

- ケース2のモデルとケース3のモデルの比較
同じ太陽風のパラメーター、わずかに異なる

結果

- ケース2： IMFのcone angleが11度

散逸率は、 $\sim 5.4 \times 10^{25} \text{ s}^{-1}$

- ケース3： IMFは完全に太陽風の向きと平行

散逸率は、 $\sim 9.5 \times 10^{25} \text{ s}^{-1}$

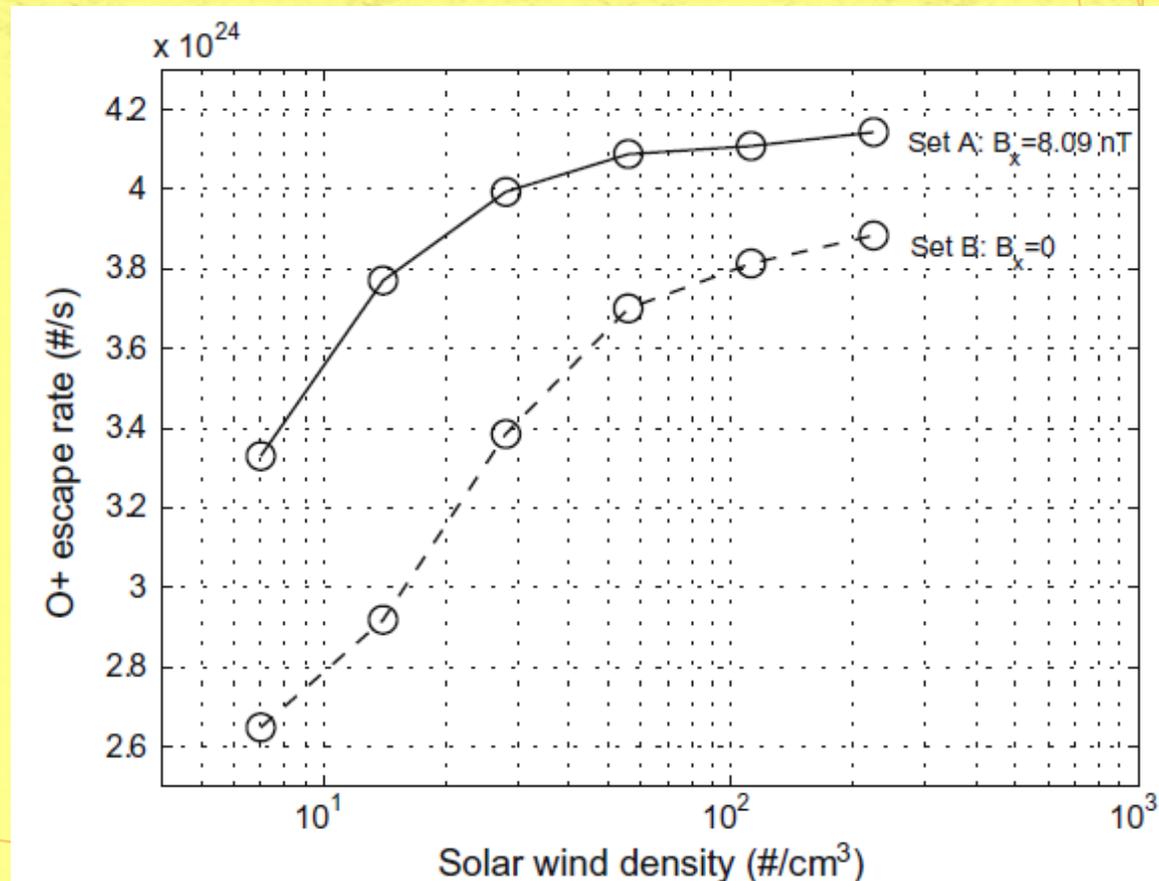
スパッタリングの
効果もあると
本論文では主張

異なる

IMFの方向は、イオン散逸率に
影響を与える

The recent hybrid simulation by [Liu et al.2009]

- O^+ イオンの散逸率への太陽風密度とIMF x componentの影響を3次元準中性ハイブリッドモデル (HYB-Venus) で計算
 - 太陽風密度: 7, 14, 28, 56, 112, 224 [cm^{-3}], 太陽風速度: $[-430, 0, 0]$ km/s, 太陽風温度: 10^5 K
 - IMF
 - x component
 - Set A: $B_x = 8.09 \text{ nT}$
 - Set B: $B_x = 0 \text{ nT}$
 - y component: $B_y = 5.88 \text{ nT}$
 - z component: $B_z = 0 \text{ nT}$
 - O^+ イオンの散逸率は、
 - 太陽風密度の増加に伴い増加
 - 100 [cm^{-3}] 以上で飽和
 - IMF x componentの増加に伴い増加
 - 本研究の結果と同じ
- IMFの方向は、イオン散逸率に影響を与える



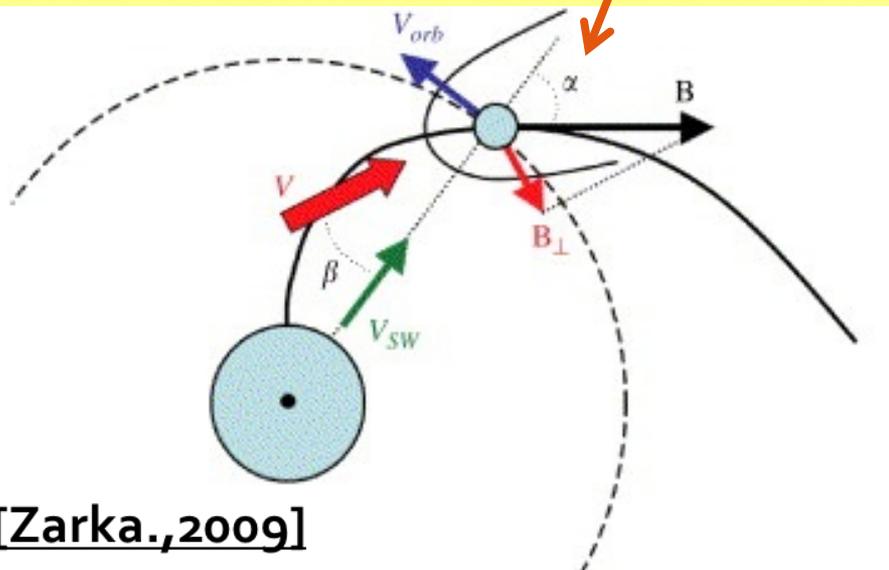
5. Discussion and Conclusions

- 本研究で、Venus Express magnetometerによる2006年6月26日の**磁気バリアーの消失**という特殊な観測結果を、MHDシミュレーションで示した
- 結果：IMFが太陽風の流れに平行に近い状態のときに起こる。
IMFの特殊なコンディション下では、全誘導磁気圏が基本的に消失する
- 疑問：誘導磁気圏が消えるという特別な状況は惑星の大気進化にどのような影響を与えるか？



5. Discussion and Conclusions

- 惑星の大気進化への影響
 - 金星と火星におけるIMFの方向の考察
- IMF Parker spiral angle (現在の典型的な値)
 - 金星：37度、火星：57度



太陽風に平行なIMFは、火星では**不可能に近く**、金星ではとても**珍しい**

If we go back to the early young Sun period...

- 現在の太陽風の速度よりも4–5倍速い

[Newkirk, 1980]

太陽の回転は10倍くらい速い

[Ribas et al., 2005]

つまり . . .

金星と火星の古代IMF Parker spiral angleはより大きい

→金星での誘導磁気圏の消失は、過去ではより起きにくい

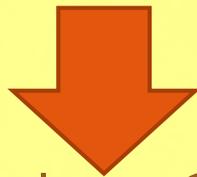
この特殊なケースは、太陽系の惑星大気進化に影響を与えていない

If we look beyond our Solar System...

誘導磁気圏の消失の観測が . . .

- 恒星風とホットジュピターの相互作用の理解
- 非磁化または弱い磁化を持っているであろう dwarf stars、特にハビタブルゾーンに近くにいる地球型系外惑星の理解
- ホットジュピターの軌道は、主星にとっても近い (0.01-0.1AU)

Parker spiral angleは基本的に0で、IMFは完全に恒星風に平行



- 恒星風と close-in exoplanet の大気との相互作用は、2006年6月26日の太陽風と金星の相互作用に似ているといえる

5. Discussion and Conclusions

- [Lammer et al. 2007]では、
 - CO_2 の多い系外惑星（金星型系外惑星）で、M型星のハビタブルゾーンの内側を回っているものは、濃い星間プラズマとの相互作用によって、それらの大気ガスの数barから数10barが失われる
 - 誘導磁気圏についての言及はない
- 本研究では、
 - 金星への誘導磁気圏の影響を調べた
 - 誘導磁気圏は、高い大気の散逸率をもたらし、大気の進化や金星型惑星のハビタビリティに対して大きな影響を与える。
- Close-in exoplanetの大気を観測する方法には限界がある
→人工衛星を送ることができる金星の観測
- 金星のIMFが太陽風に平行に近いとき、その観測は系外惑星の大気の進化についての研究に役立つ