

CPS研究会「火星研究の現状と将来展望」

大気散逸セッション:

- 非磁化惑星からの大気散逸機構: 研究の現状と課題 (30+15分) --- 関
- 大気散逸の測定方法の概要と今後の発展性 (20+10分) --- 阿部さん
- 大気散逸と気候変動: 理論研究の現状と発展性 (30+15分) --- 寺田さん

火星大気散逸探査(のぞみ後継機)検討ワーキンググループ

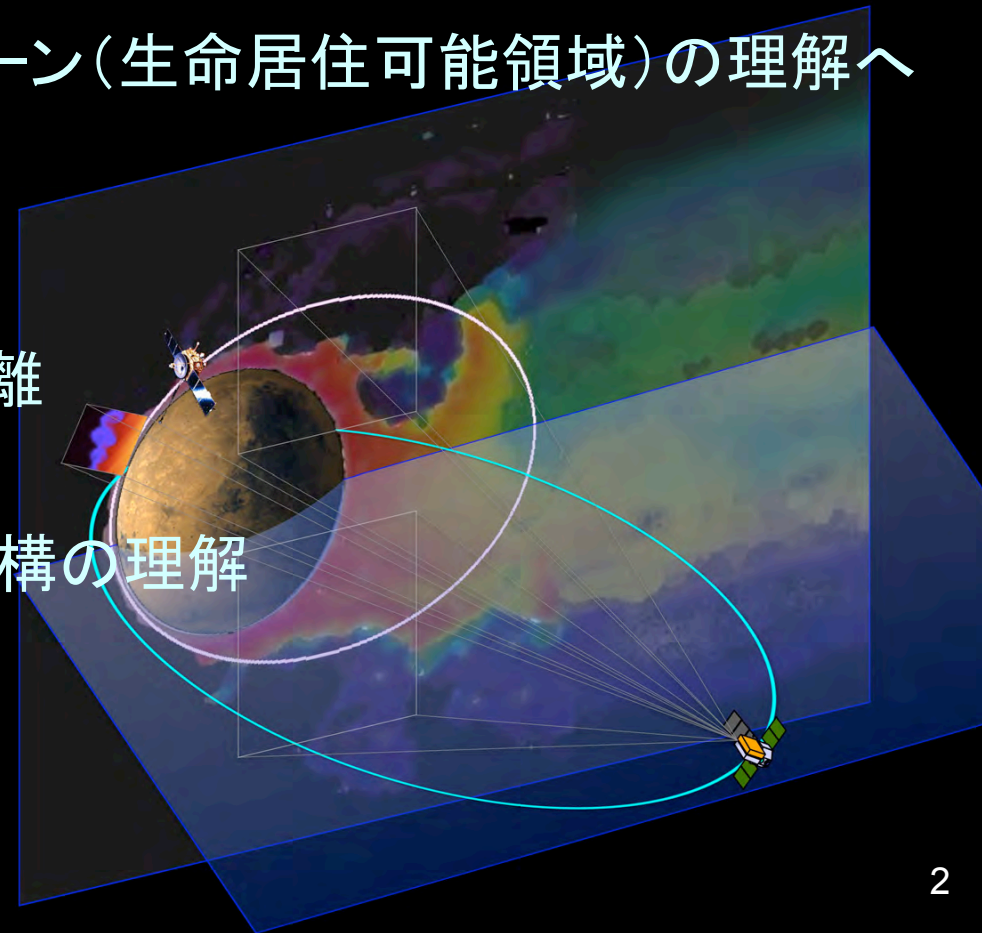
Mission target:

「火星の二酸化炭素と水の行方を探る」

大気散逸機構の太陽変動への応答の解明

非磁化惑星のハビタブルゾーン(生命居住可能領域)の理解へ

- 科学目標1:
二酸化炭素と水の散逸の分離
- 科学目標2:
謎を解く鍵となる大気散逸機構の理解
- 科学目標3:
太陽変動への応答の理解
(過去への演繹)



発展性：太陽系外惑星の理解へ

火星大気散逸(大気進化) 機構の解明

イオンピックアップ 電離圏イオン流出

スパッタリング 太陽風ボンバードメント

光化学反応 ジーンズ流出

他惑星の大気進化と多様性、
ハビタブル惑星の理解へ

検証

火星：～40億年の表層環境 進化の歴史が残る惑星

弱い風化作用

地形

鉱物

クレータ年代学

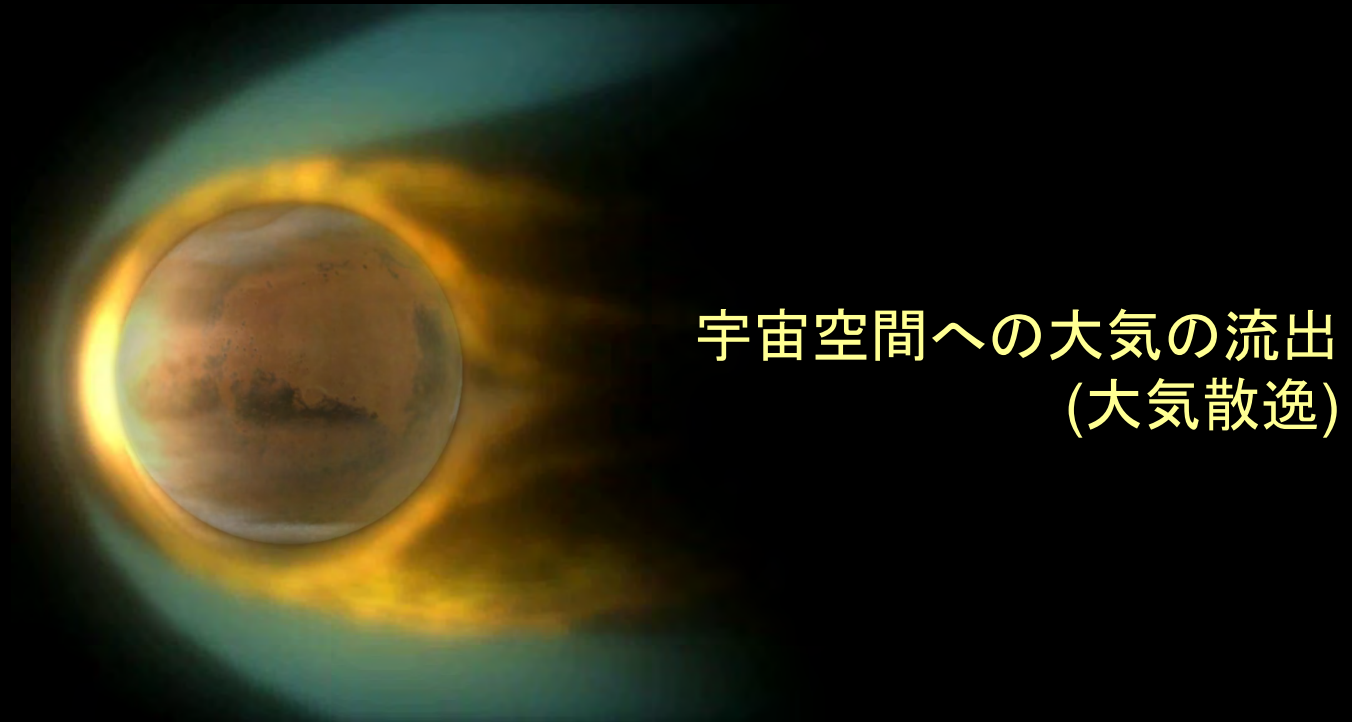
火星隕石

火星サンプル(同位体比)

太陽系惑星
太陽系外惑星

大気を保有する条件は？
生命惑星成立の条件は？

非磁化惑星からの大気散逸機構： 研究の現状と課題



関 華奈子 (名古屋大学太陽地球環境研究所)

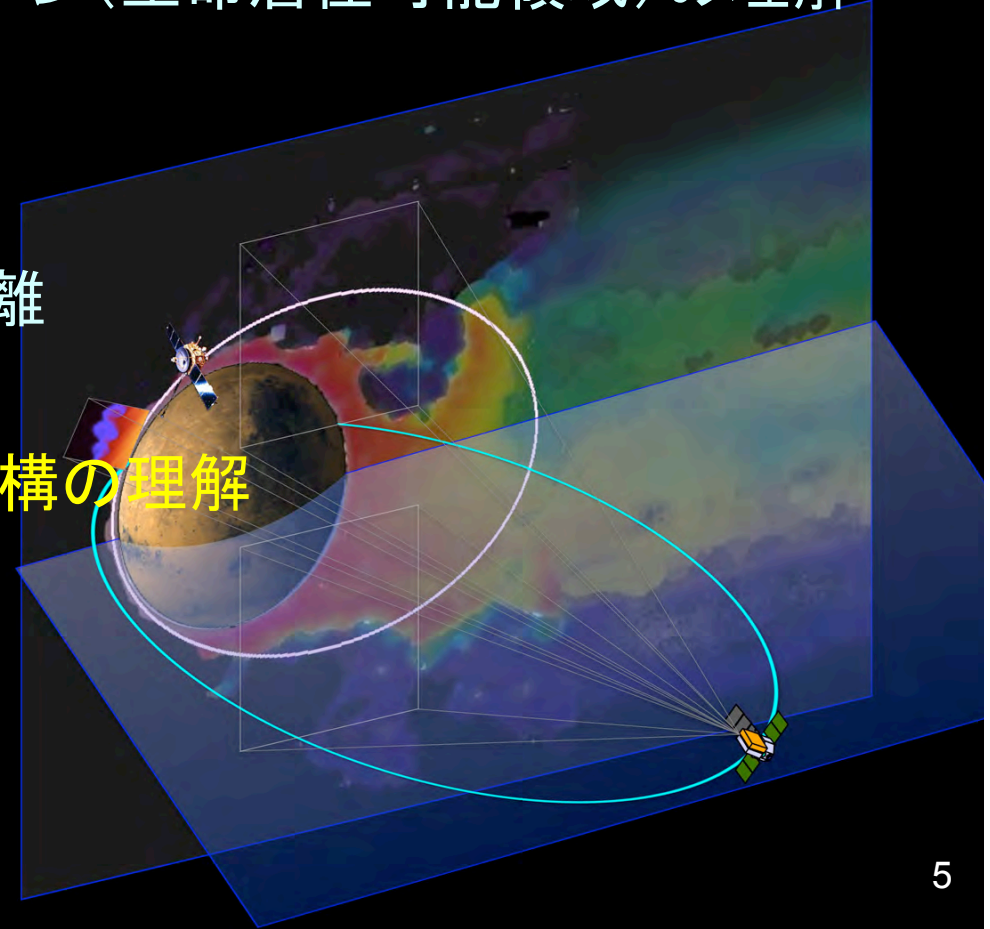
Mission target:

「火星の二酸化炭素と水の行方を探る」

大気散逸機構の太陽変動への応答の解明

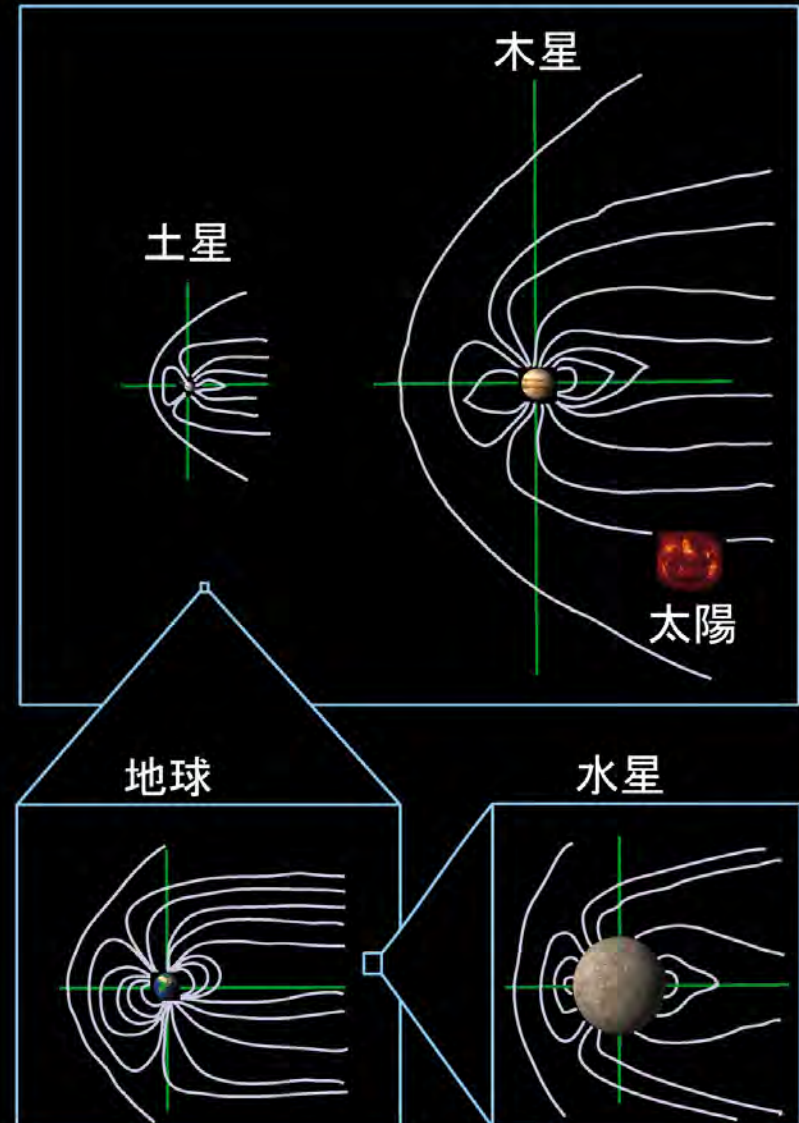
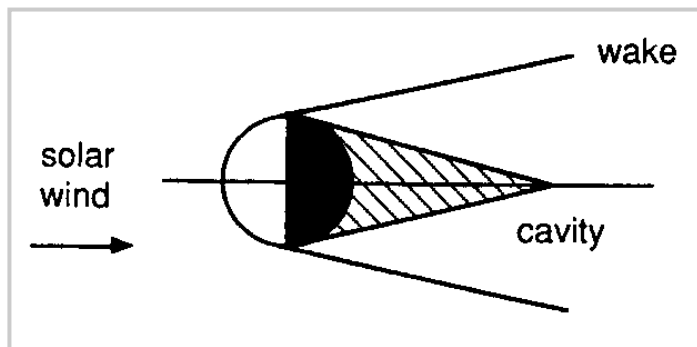
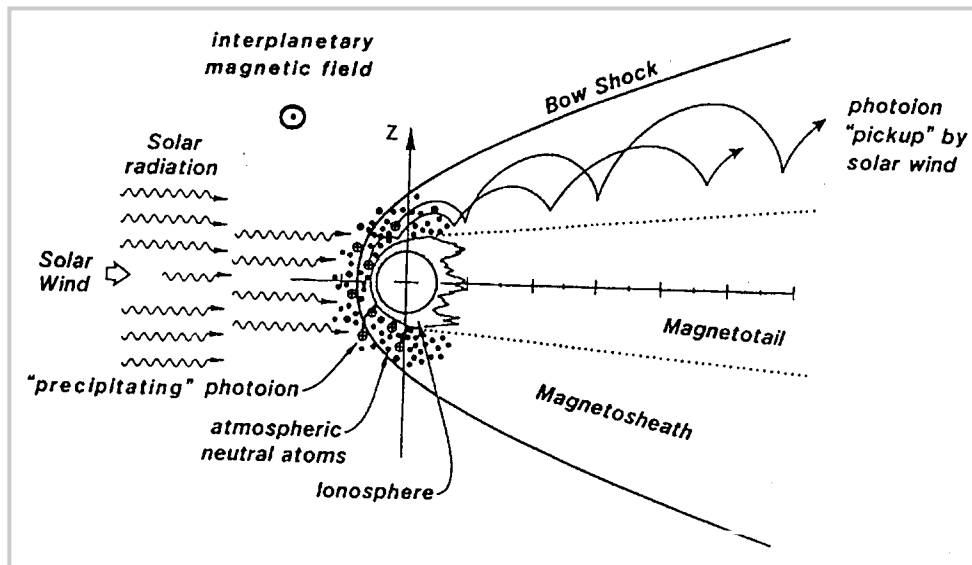
非磁化惑星のハビタブルゾーン(生命居住可能領域)の理解へ

- 科学目標1:
二酸化炭素と水の散逸の分離
- 科学目標2:
謎を解く鍵となる大気散逸機構の理解
- 科学目標3:
太陽変動への応答の理解
(過去への演繹)

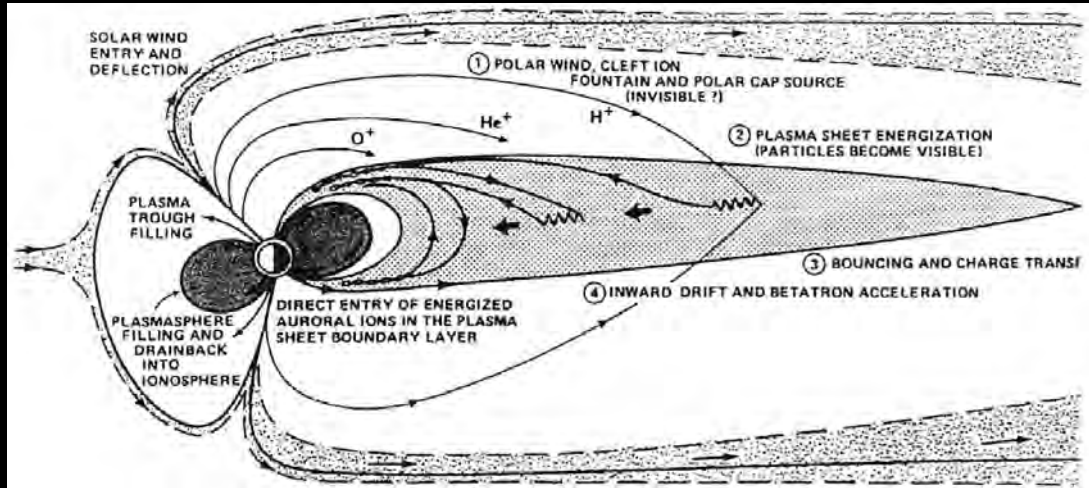


惑星の勢力圏と固有磁場強度

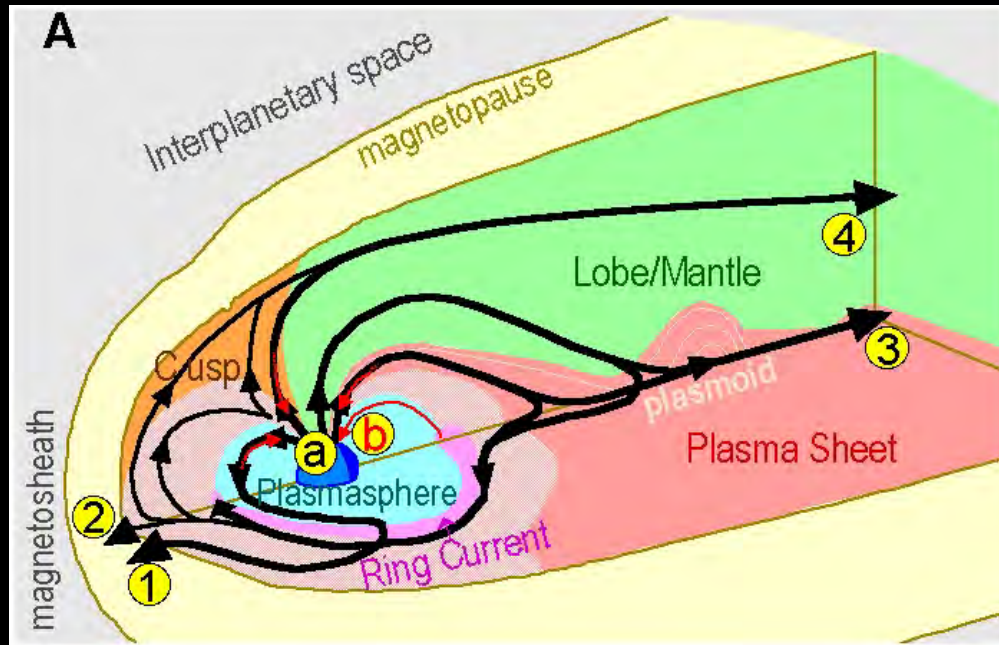
太陽風との相互作用によって形成される惑星の勢力圏(磁気圏)は固有磁場強度と太陽風強度によって大きく異なる。



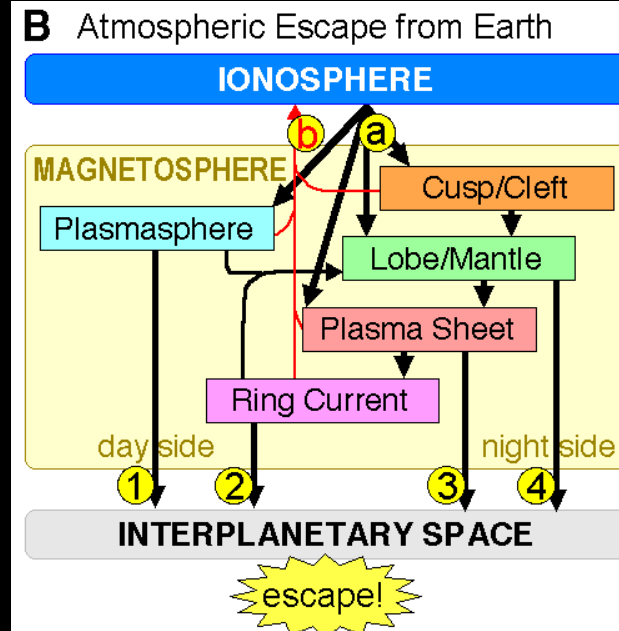
磁化惑星からの大気流出



[Chappell, *JGR*, 1987]



[Seki et al, *Science*, 2001]



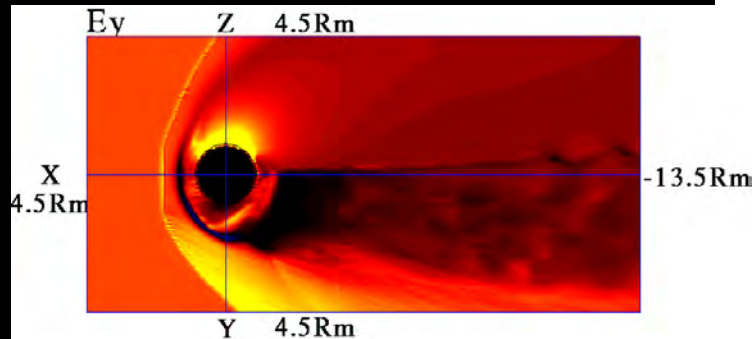
固有磁場が減少すると(磁気圏の縮小)

磁場が弱くなると、太陽風がより地球の近くまで侵入するようになり、磁気圏は縮小し、オーロラ帯は中低緯度へと拡大する。

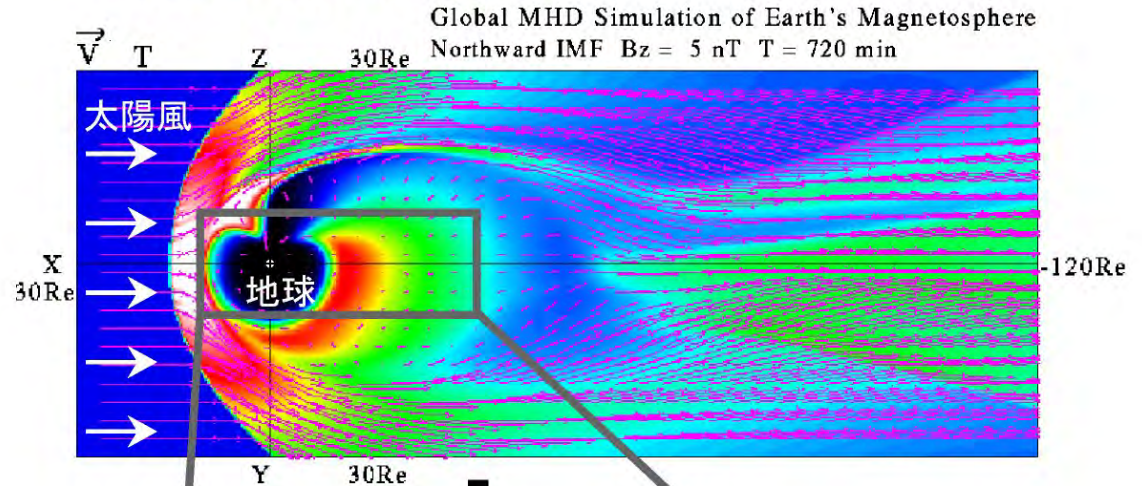
3次元電磁流体シミュレーションの結果

[Courtesy of T. Ogino]

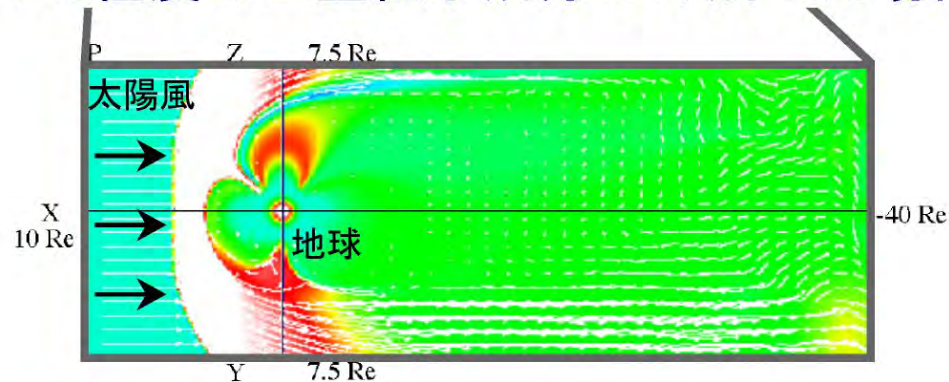
水星磁気圏



現在の地球磁気圏



地球磁場の双極子成分がなくなった場合
(10%程度の四重極子成分のみ残った場合)

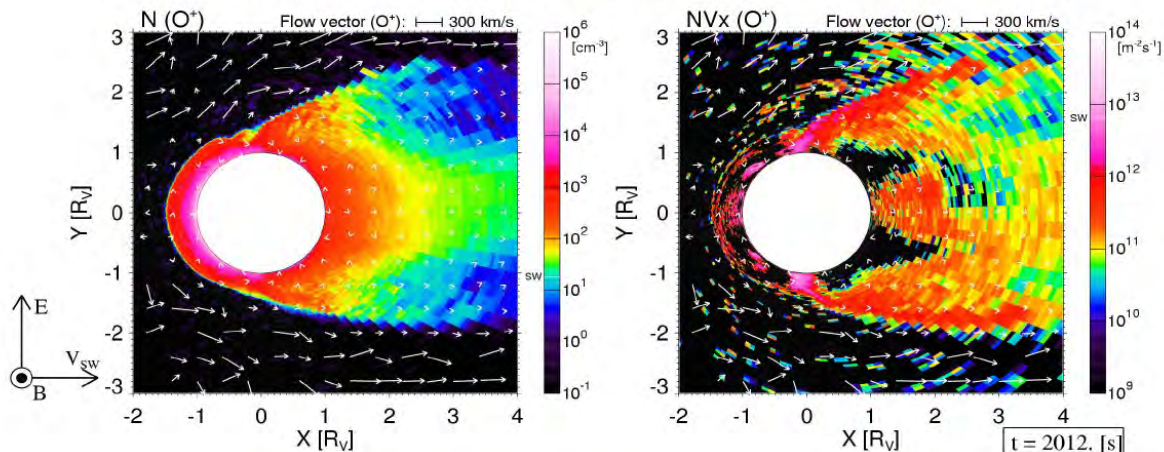


固有磁場が更に減少すると（大気流出形態の変化）

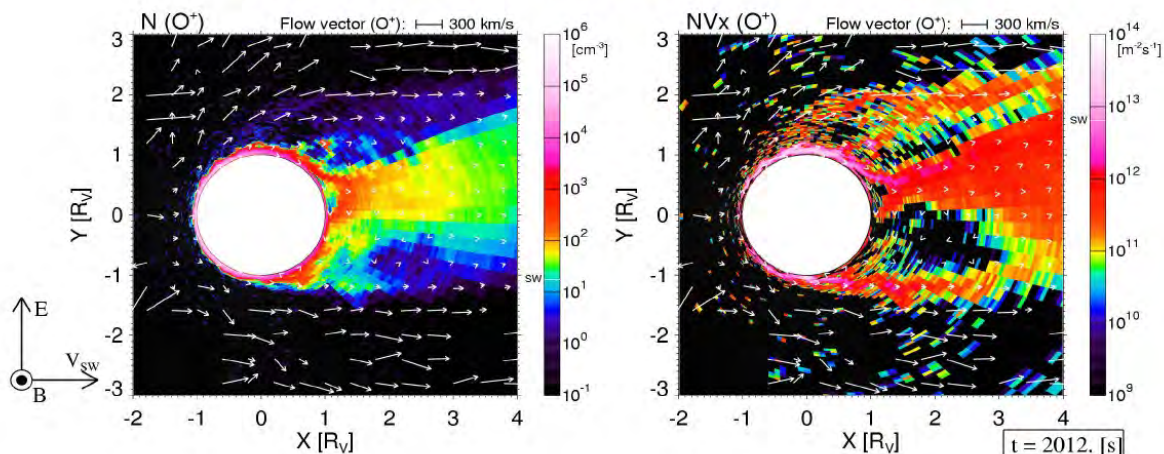
磁場が更に弱くなると、太陽風が地球の上層大気に直接吹きつけるようになり、大気流出のメカニズムは、磁化惑星とは異なってくる。

2次元ハイブリッド →
シミュレーションの結果

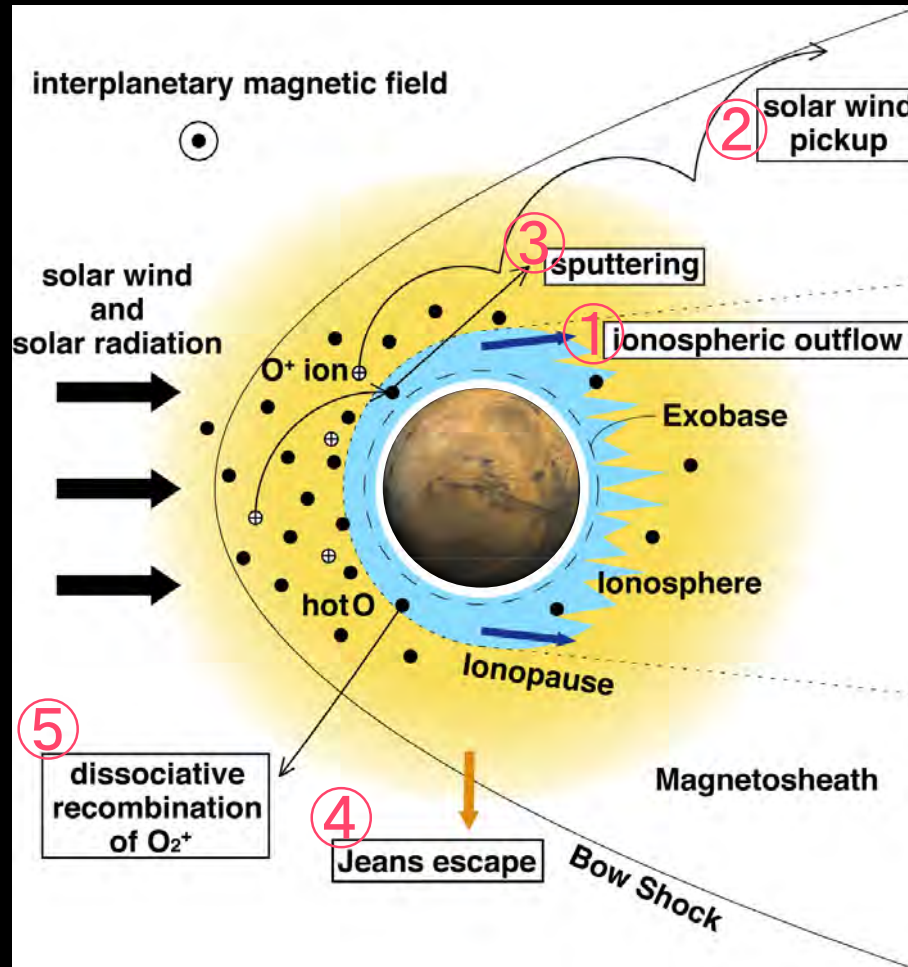
酸素の流出（地球磁場が現在の500分の1の場合）



酸素の流出（固有磁場がない場合）

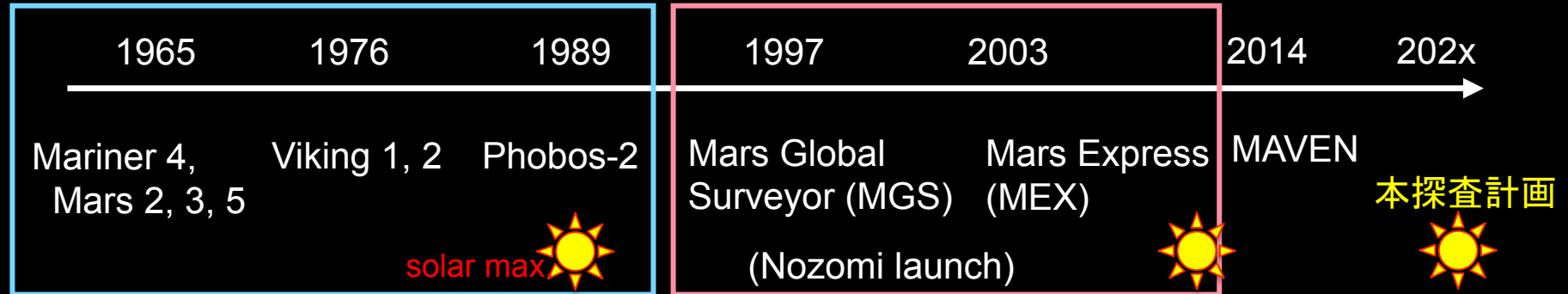


非磁化惑星からの大気散逸機構



1. 電離圏イオン流出
2. イオンピックアップ
3. スパッタリング
4. ジーンズ流出
5. 光化学反応による流出
6. その他の散逸機構

火星周辺宇宙探査の歴史



- Era of the “first” exploration (1965~1989)
 - Ionospheric profiles (Viking landers) → Intrinsic magnetic field exists?
 - Magnetospheric structures above 850 km alt.
 - Atmospheric escape (Mars series, Phobos-2)

基本構造の発見、新たな謎の提示
- Era of new findings about current state (1997~201?)
 - No planetary-scale magnetic field detected (MGS)
 - Magnetic anomalies (MGS)
 - Aurora (MEX), Plasma cloud ejections, Flux ropes (MGS)
 - Escape of CO₂ (MEX)

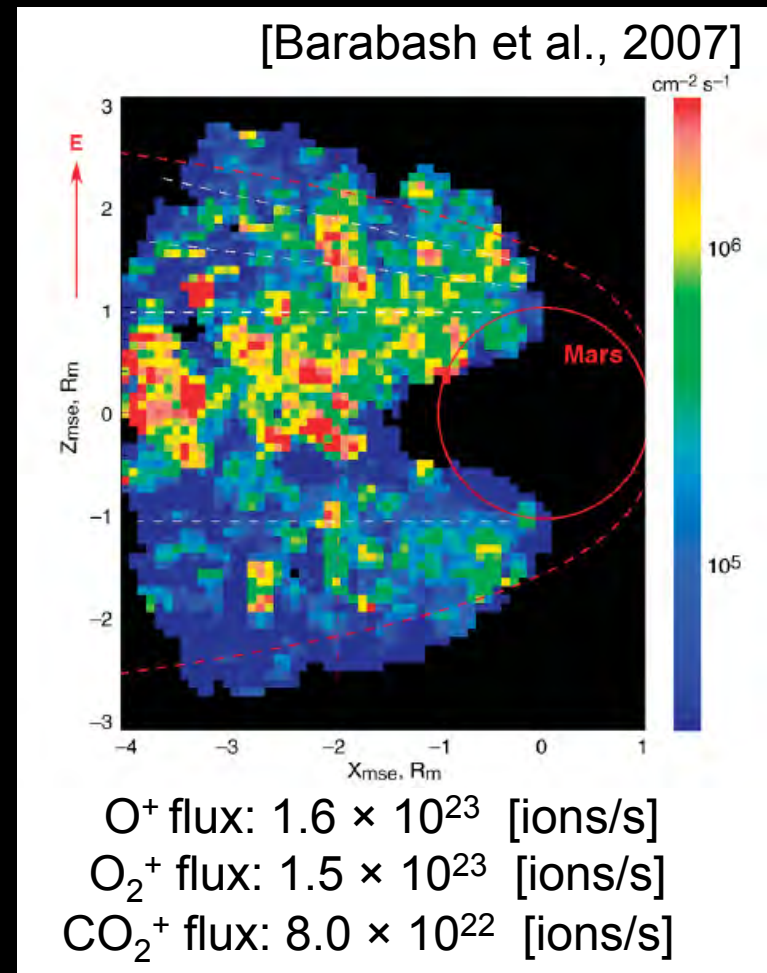
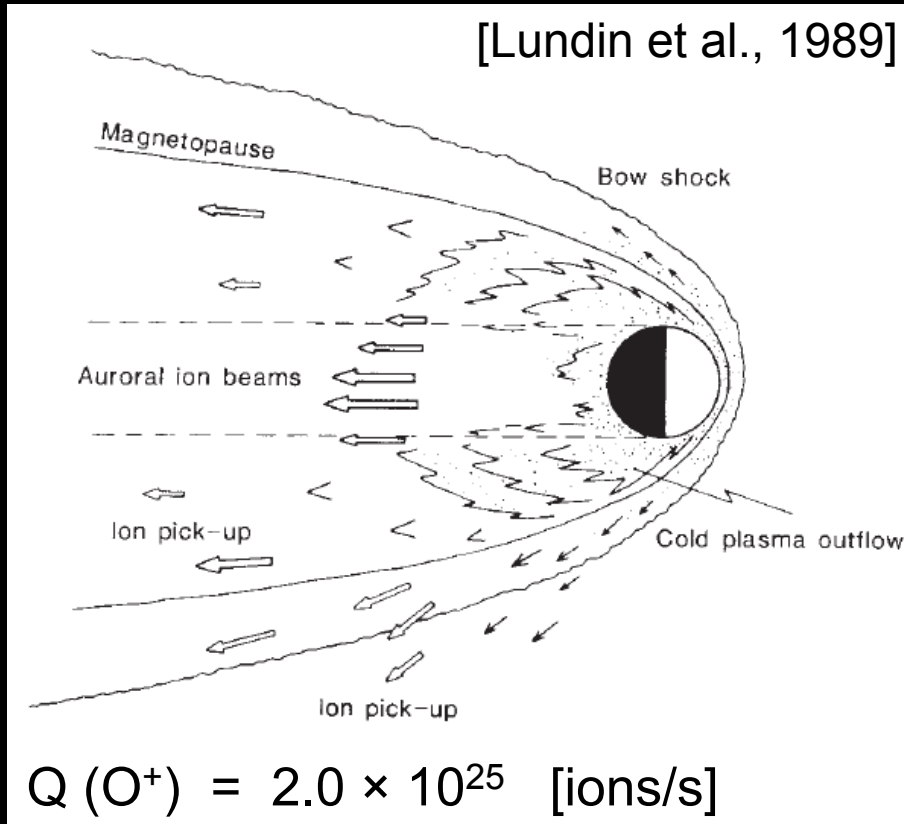
初期探査で示された謎のフォローアップ観測
- Era of elucidation (2014~)
 - Elucidate the mechanisms and their effects to evolution.

物理メカニズムを理解する時代へ

先行ミッションによる火星大気散逸観測

太陽活動極大期(Phobos-2)

太陽活動極小期(MEX)

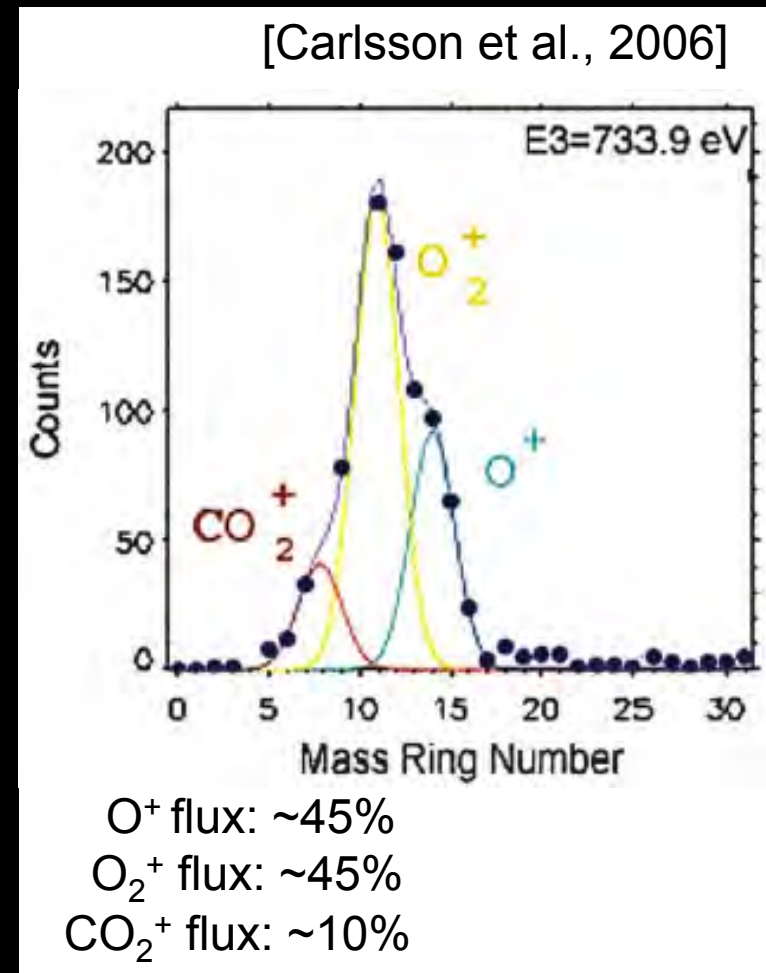
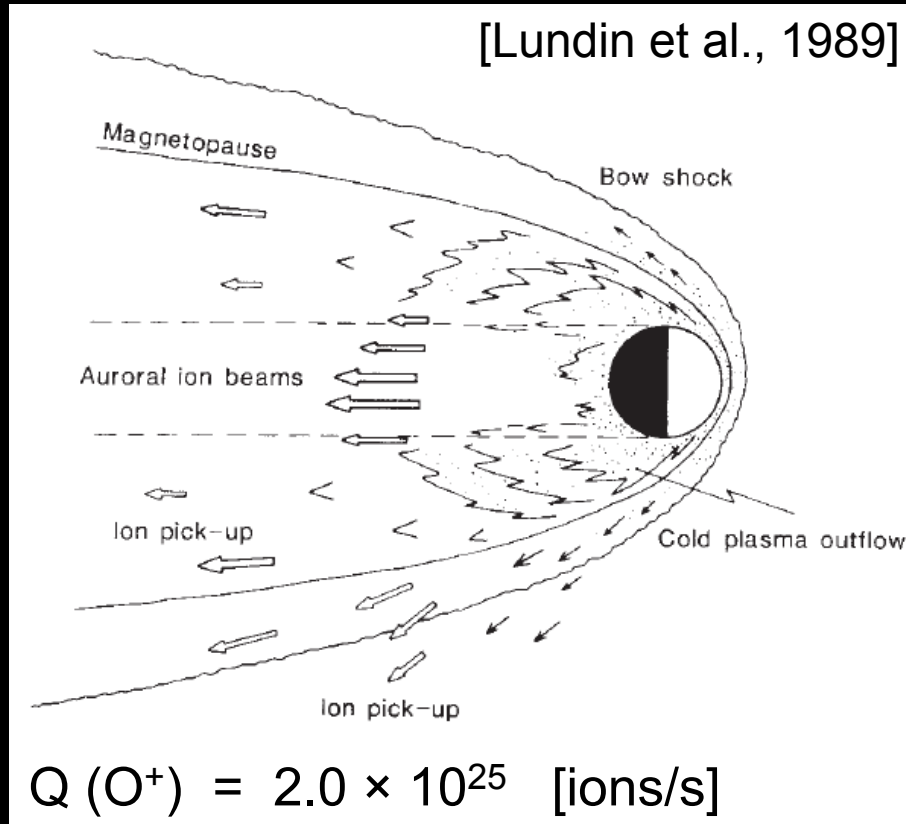


両ミッションで観測された散逸率の違いは、太陽風および太陽放射変動の影響の大きさを示唆。

先行ミッションによる火星大気散逸観測

太陽活動極大期(Phobos-2)

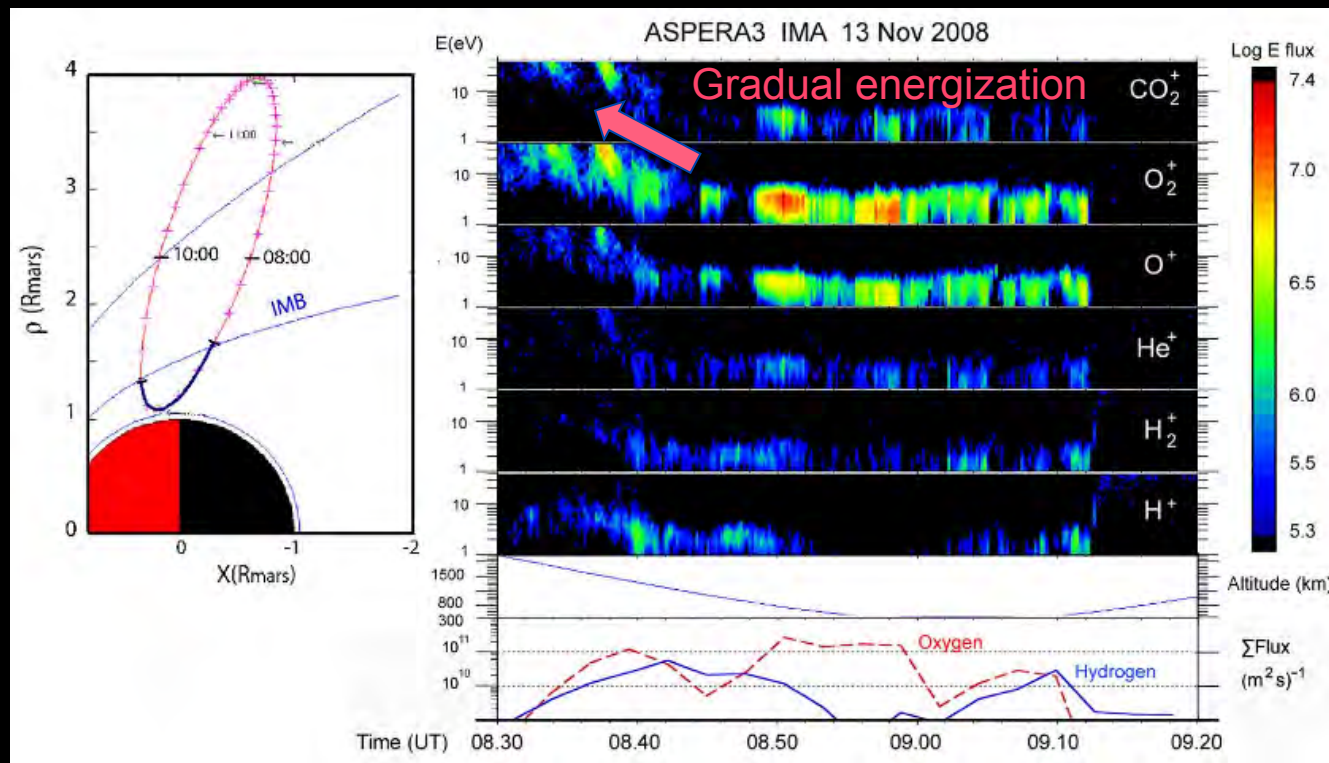
太陽活動極小期(MEX)



観測された大量の分子イオン散逸は、既存の大気散逸理論では説明できない。

先行ミッションによる火星大気散逸観測

電離圏イオン流出



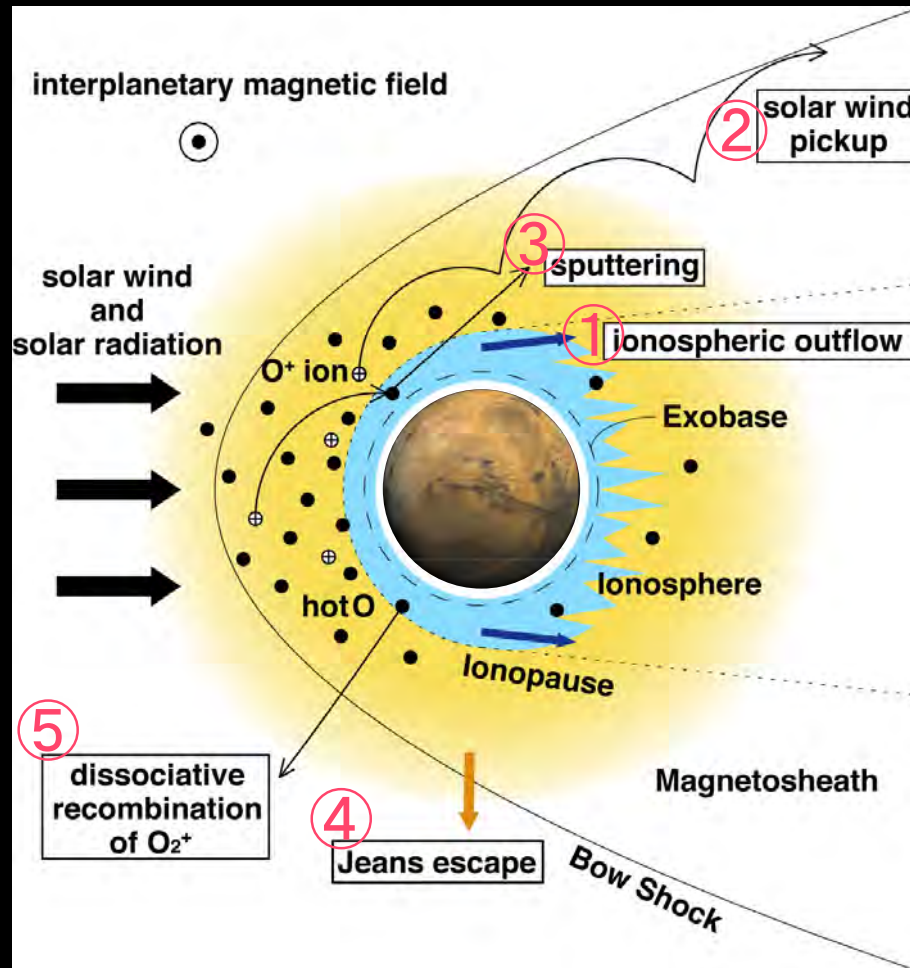
Assuming an "average" spacecraft potential of -9 V [Lundin et al., 2009]

火星からの O^+ の脱出エネルギーは約2 eV

- Cold ion outflow dominates plasma escape? - Still controversial
- Escape rates (an order of uncertainty)

低エネルギーイオンの散逸は、太陽風から電離圏イオンへの運動量輸送の重要性を示唆している。

非磁化惑星からの大気散逸機構と先行観測

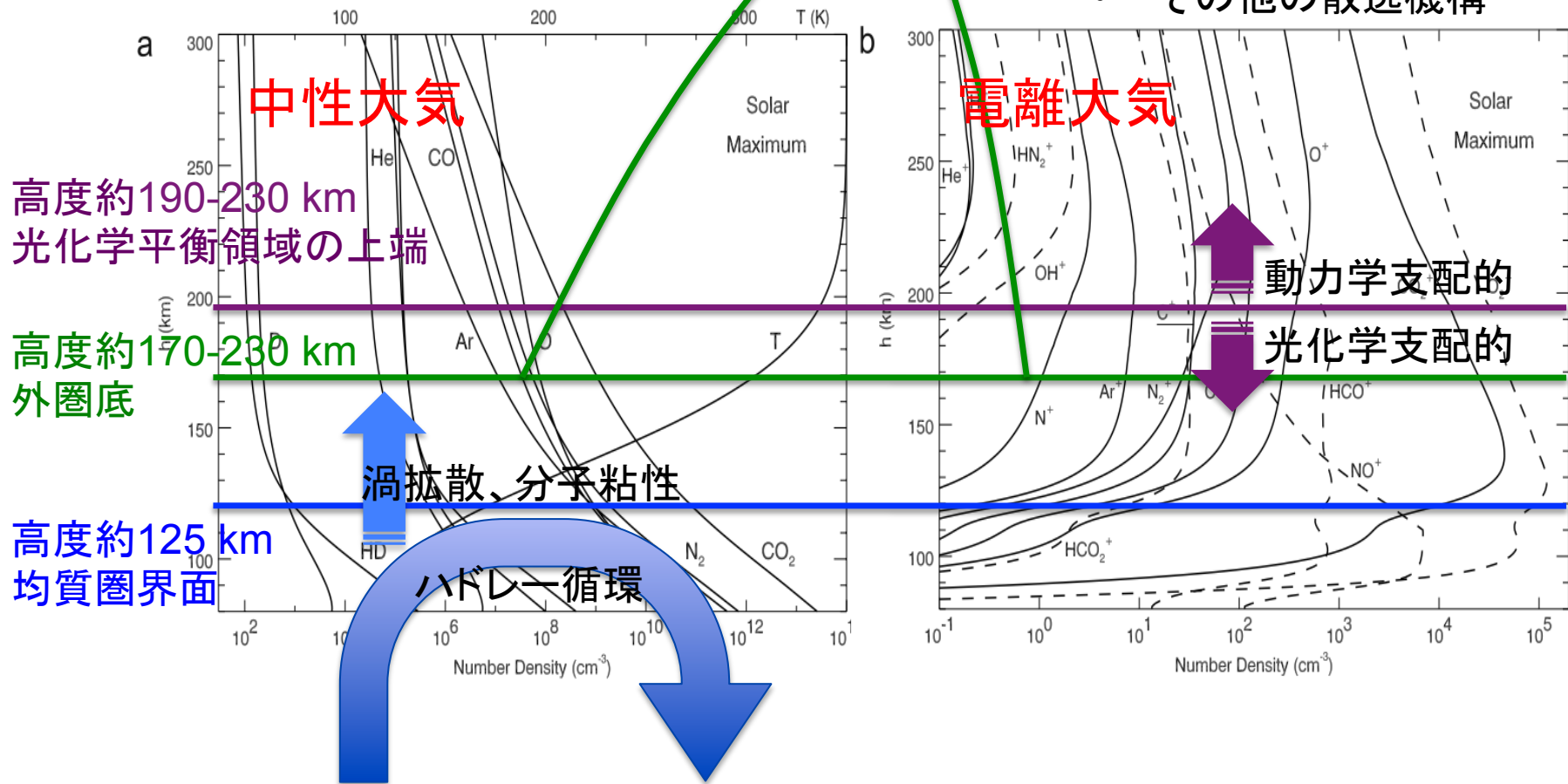


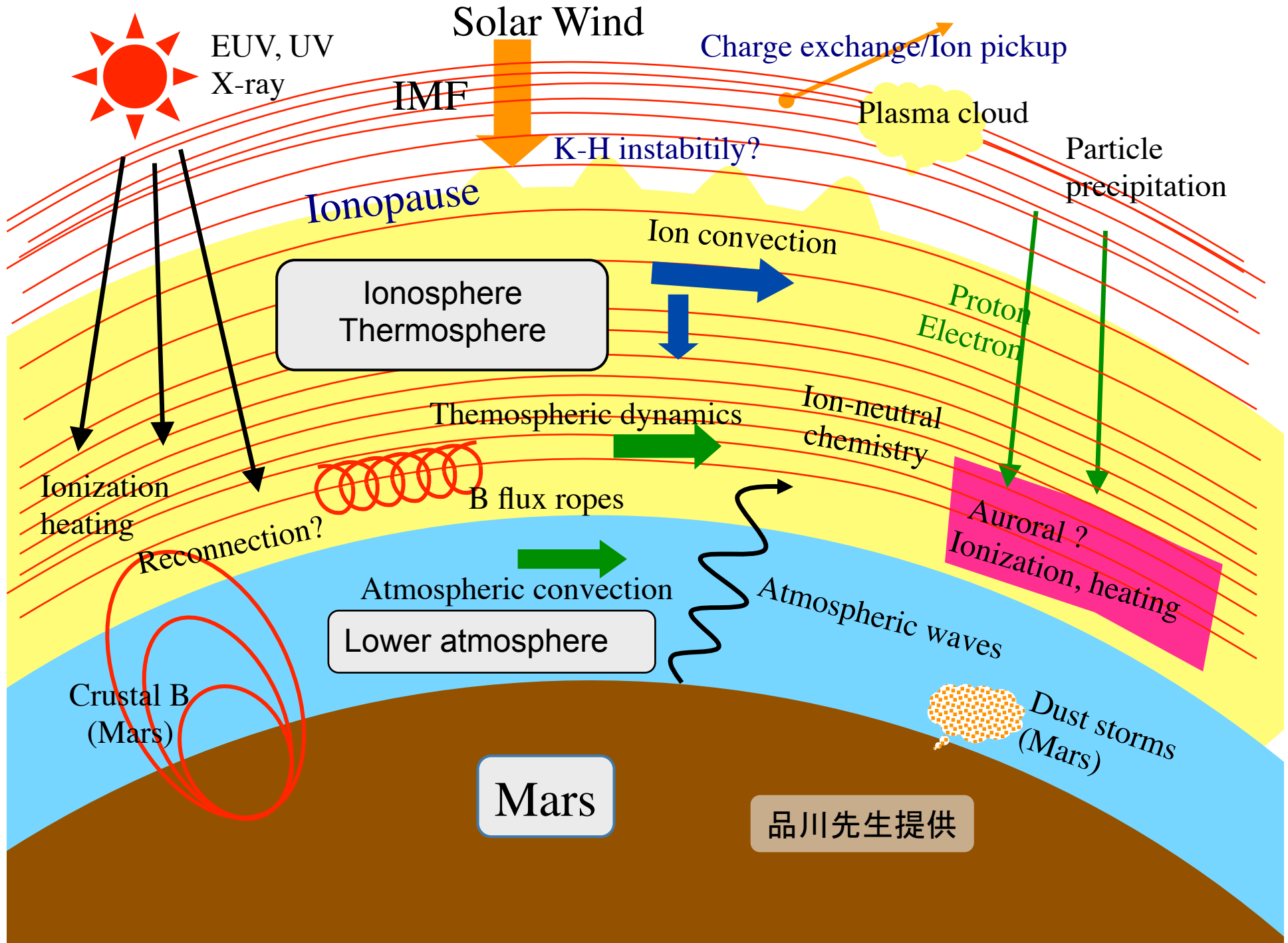
1. 電離圏イオン流出
2. イオンピックアップ
3. スパッタリング
4. ジーンズ流出
5. 光化学反応による流出
6. その他の散逸機構

超高層大気の構造

hot C, O, N,
H, H₂ 流出

- 電離圏イオン流出
- イオンピックアップ
- スパッタリング
- ジーンズ流出
- 光化学反応による流出
- その他の散逸機構



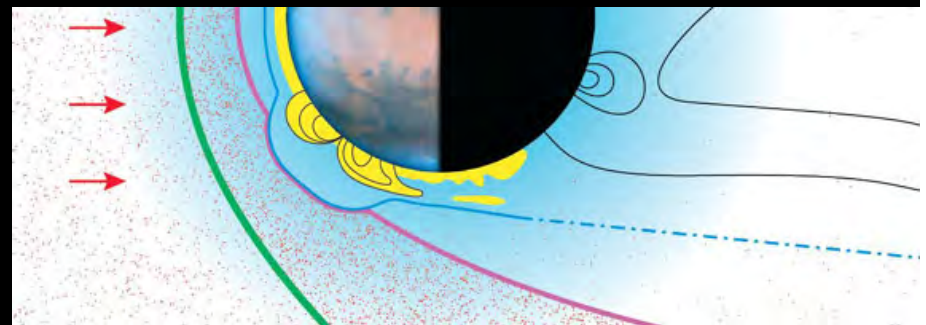
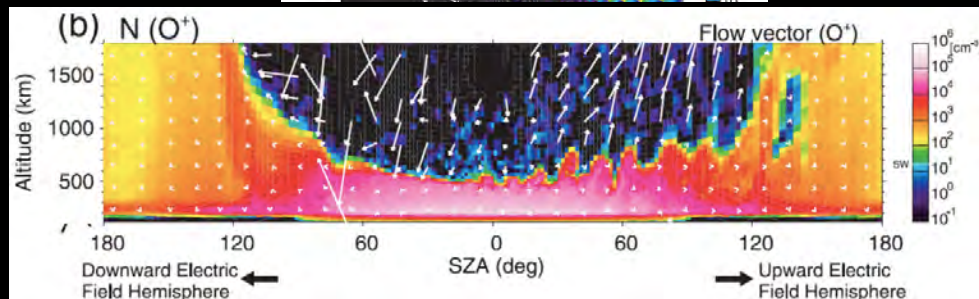
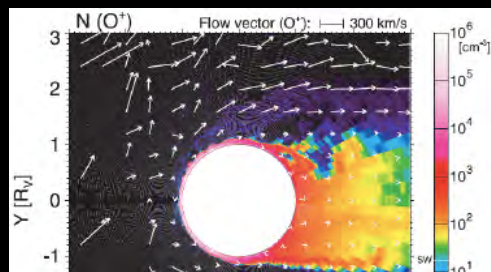


Mars

品川先生提供

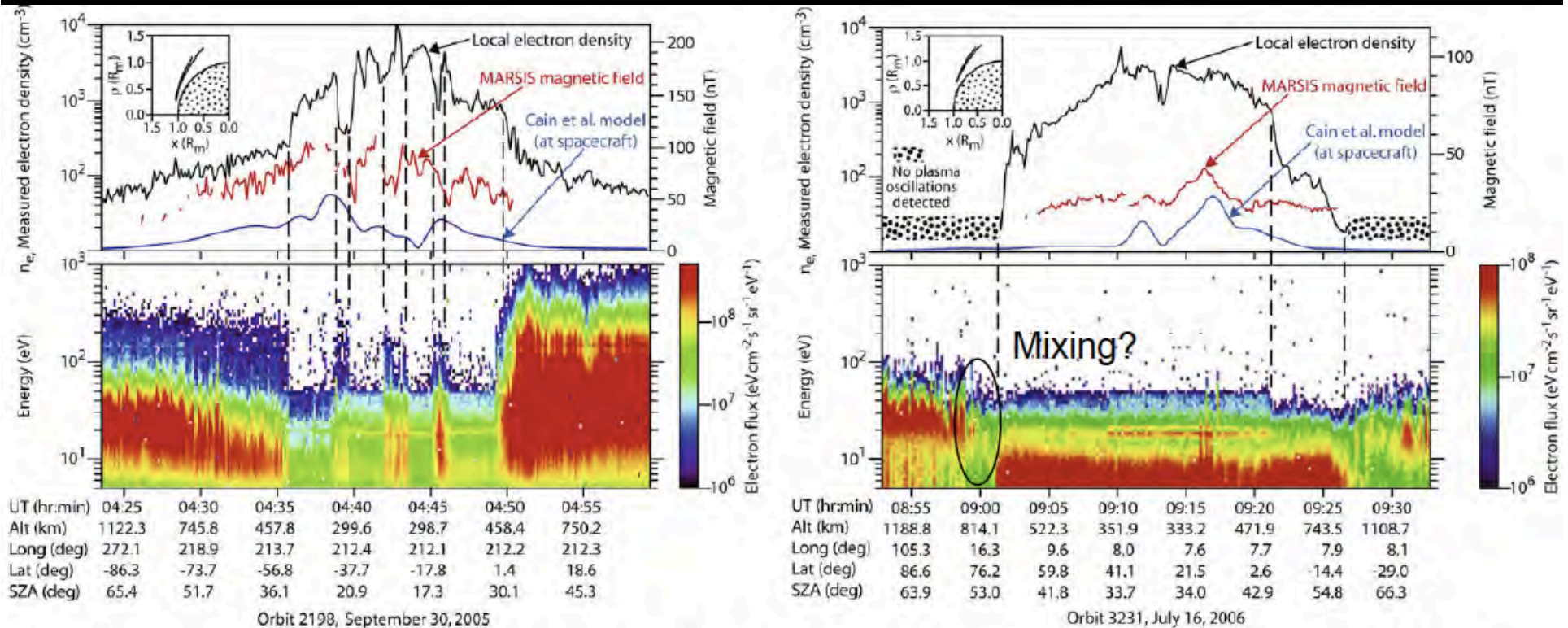
物理メカニズムの候補

- (a) Kelvin Helmholtz不安定 (flux rope, cloud他)
- (b) Kinetic Alfvén Waves (KAWs)
- (c) 磁気再結合 (flux rope他)
- (d) 磁気異常 + ミニ磁気圏
- (e) ドレーピング (電場侵入), ...



Kelvin Helmholtz不安定

MEX/MARSISの発見: イオノポーズ付近での密度擾乱

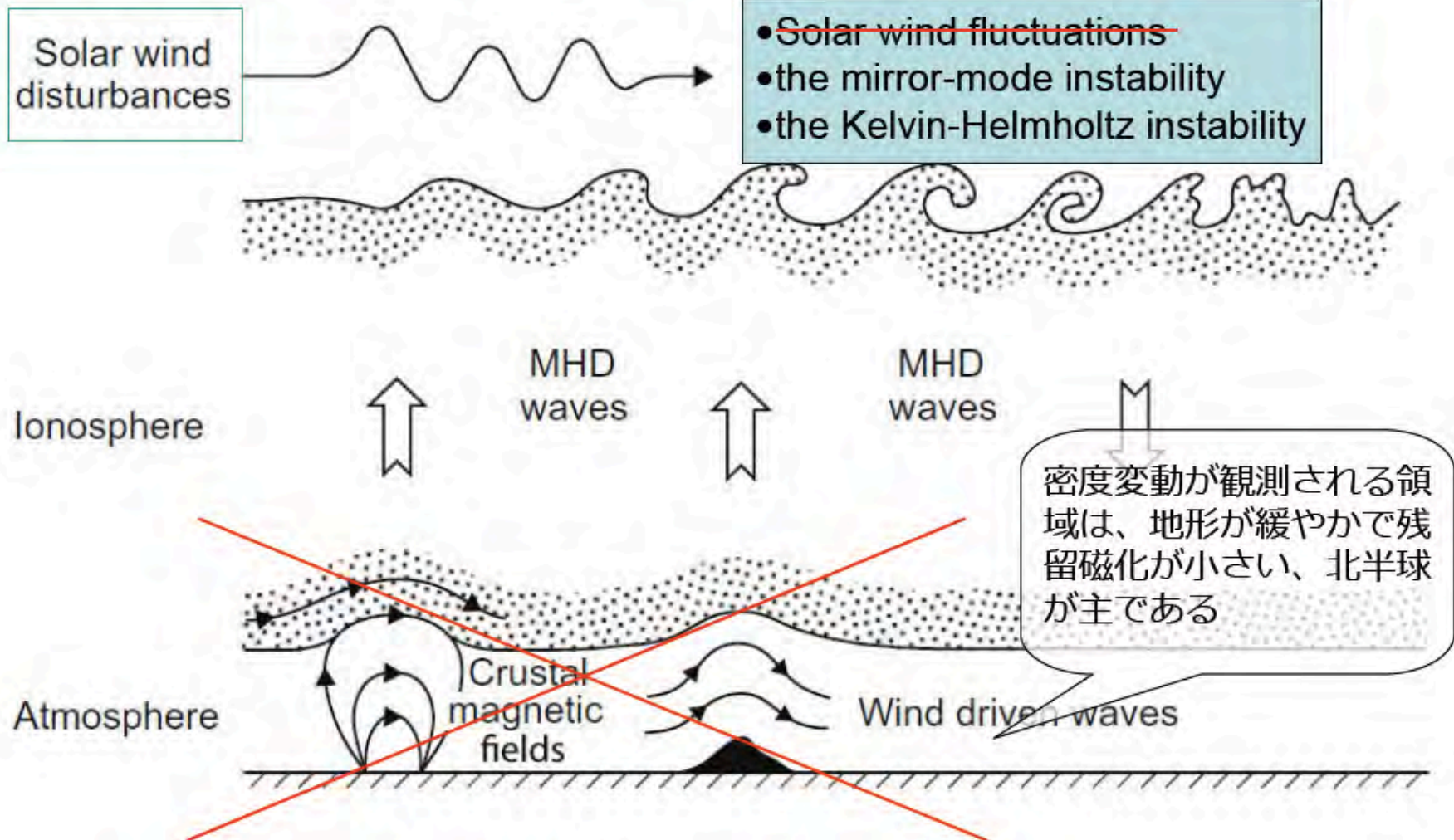


- Orbit 3231 09:01UT付近のようなクリアな電子密度のジャンプによる、きれいなionopause crossingはまれ
- Orbit 2198 04:35~04:50に代表されるように、ionopause付近では大きな密度変動が伴う。
- 磁場は、大まかなトレンドはモデルに沿うが、密度同様に変動成分が乗る。Offsetはモデルには含まれない、昼間側の太陽風による圧縮の効果。

Kelvin Helmholtz不安定

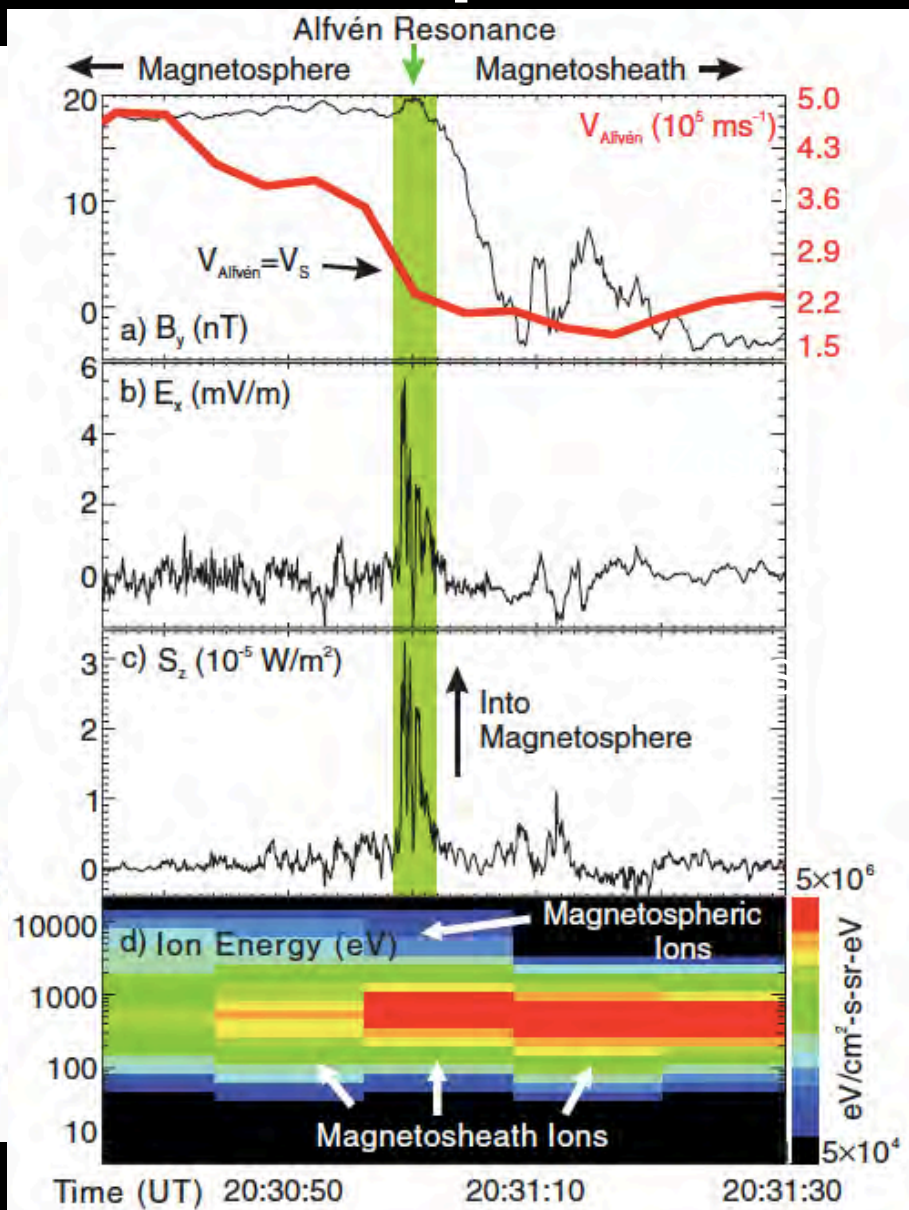
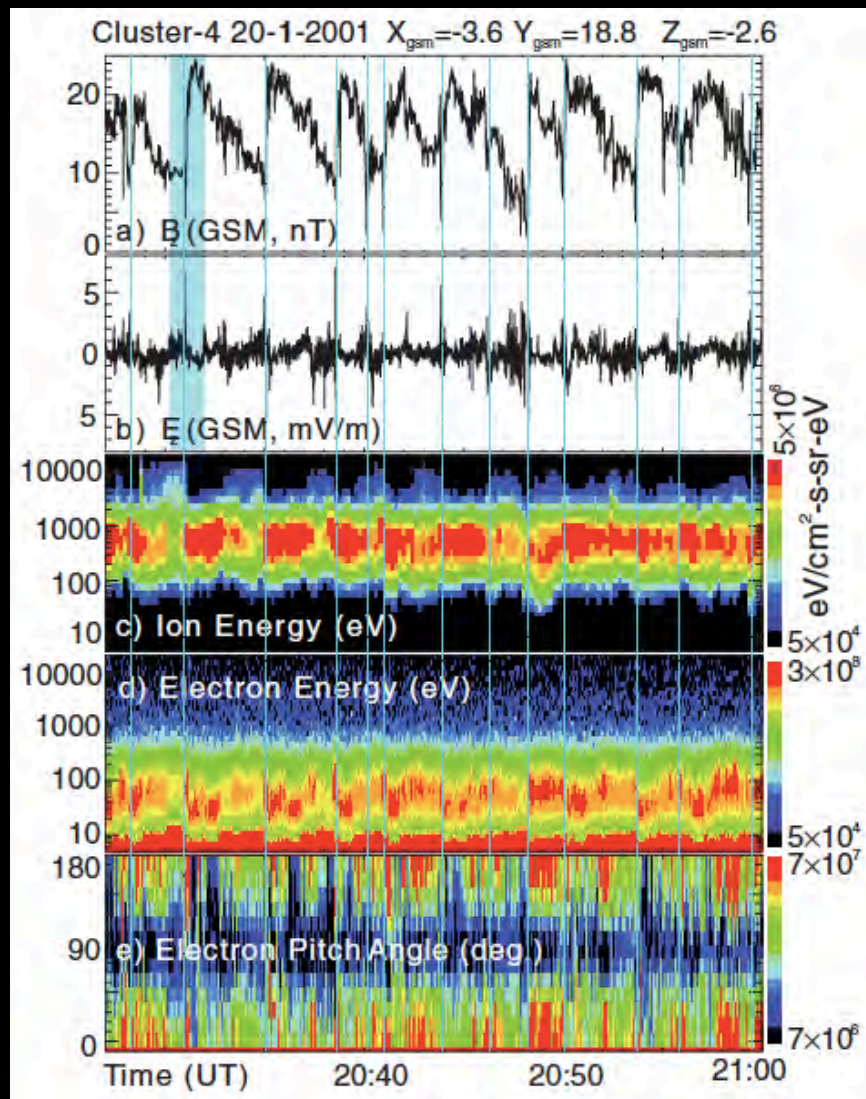
MEXは北半球で密度擾乱を頻繁に観測

密度擾乱の成因は？



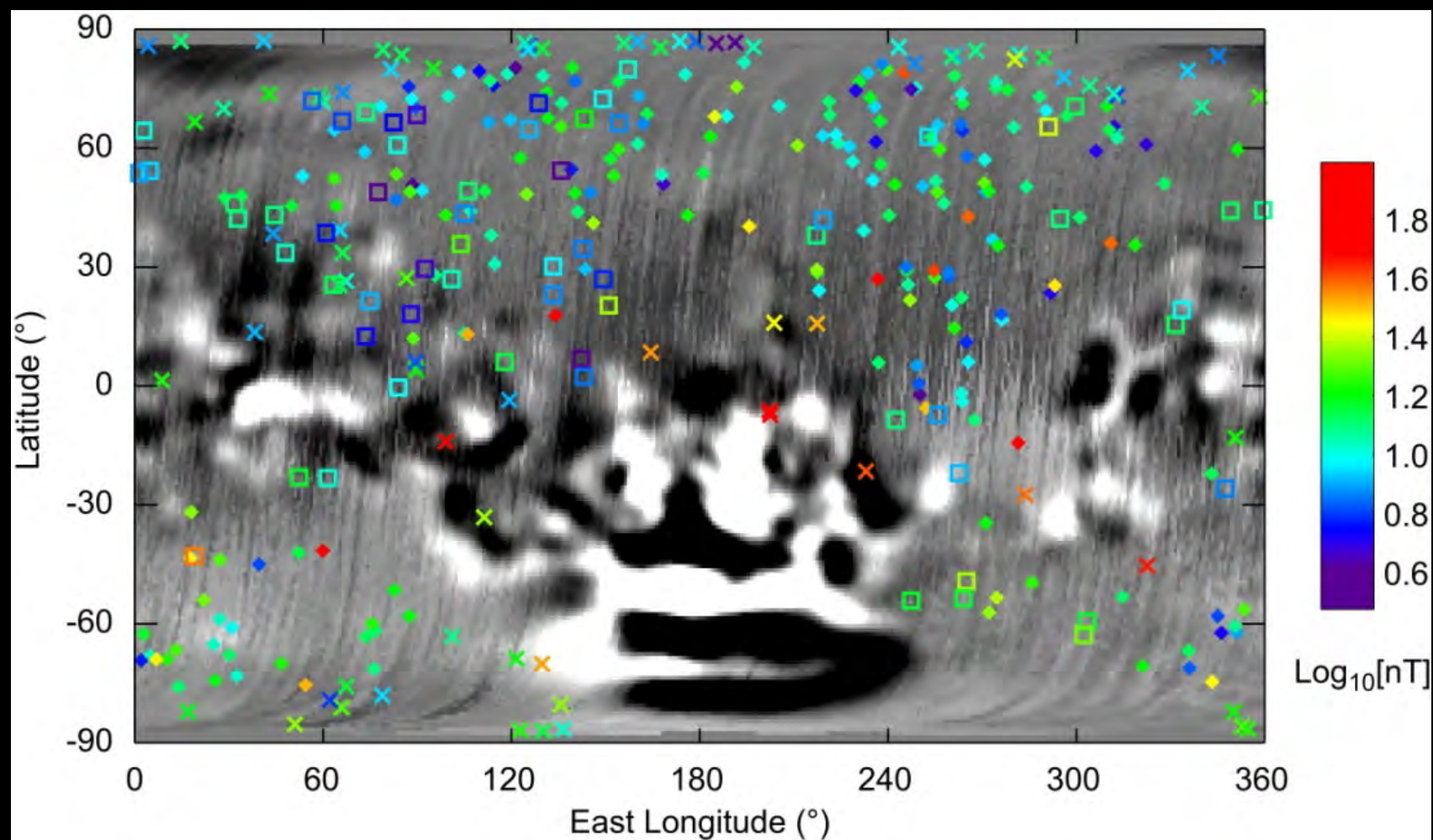
KAW (運動論的Alfvén波)

地球での観測例 [Chaston et al., PRL, 2007]



磁気再結合 (flux rope)

Mapping orbitのMGS衛星が観測したflux rope
[Briggs et al., PSS, 2011]



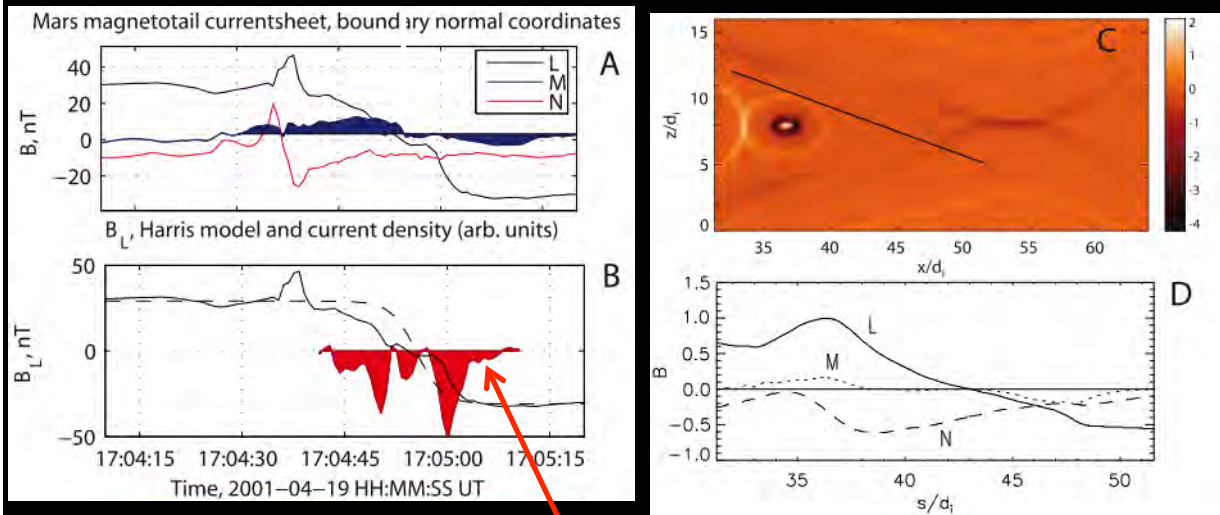
◆: 磁気異常帯から離れた昼側、 ×: 磁気異常帯近傍の昼側、 □: 夜側

磁気再結合 (diffusion region)

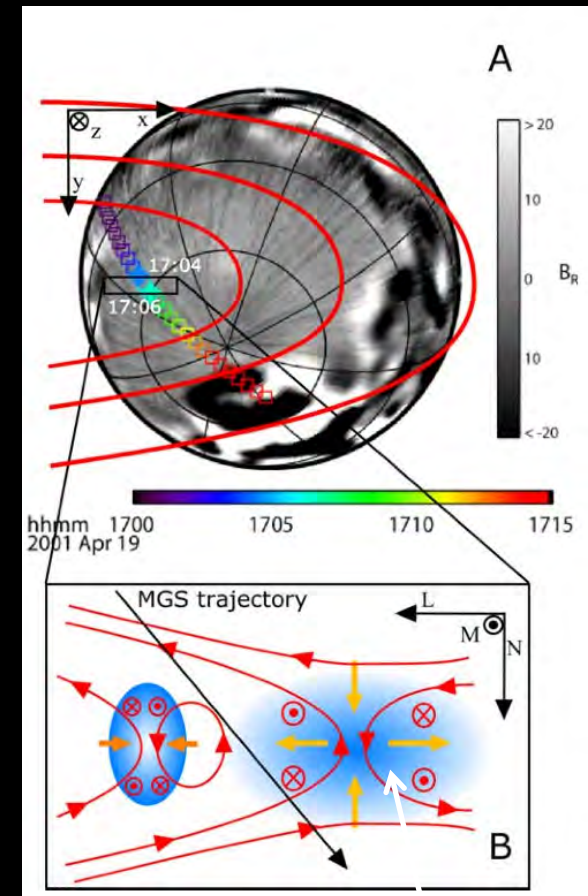
MGSによるdiffusion regionの観測と粒子シミュレーションとの比較 [Eastwood et al., 2008]

Hall磁場構造(B_M 成分)

(イオンと電子が慣性長スケールでdecouple)



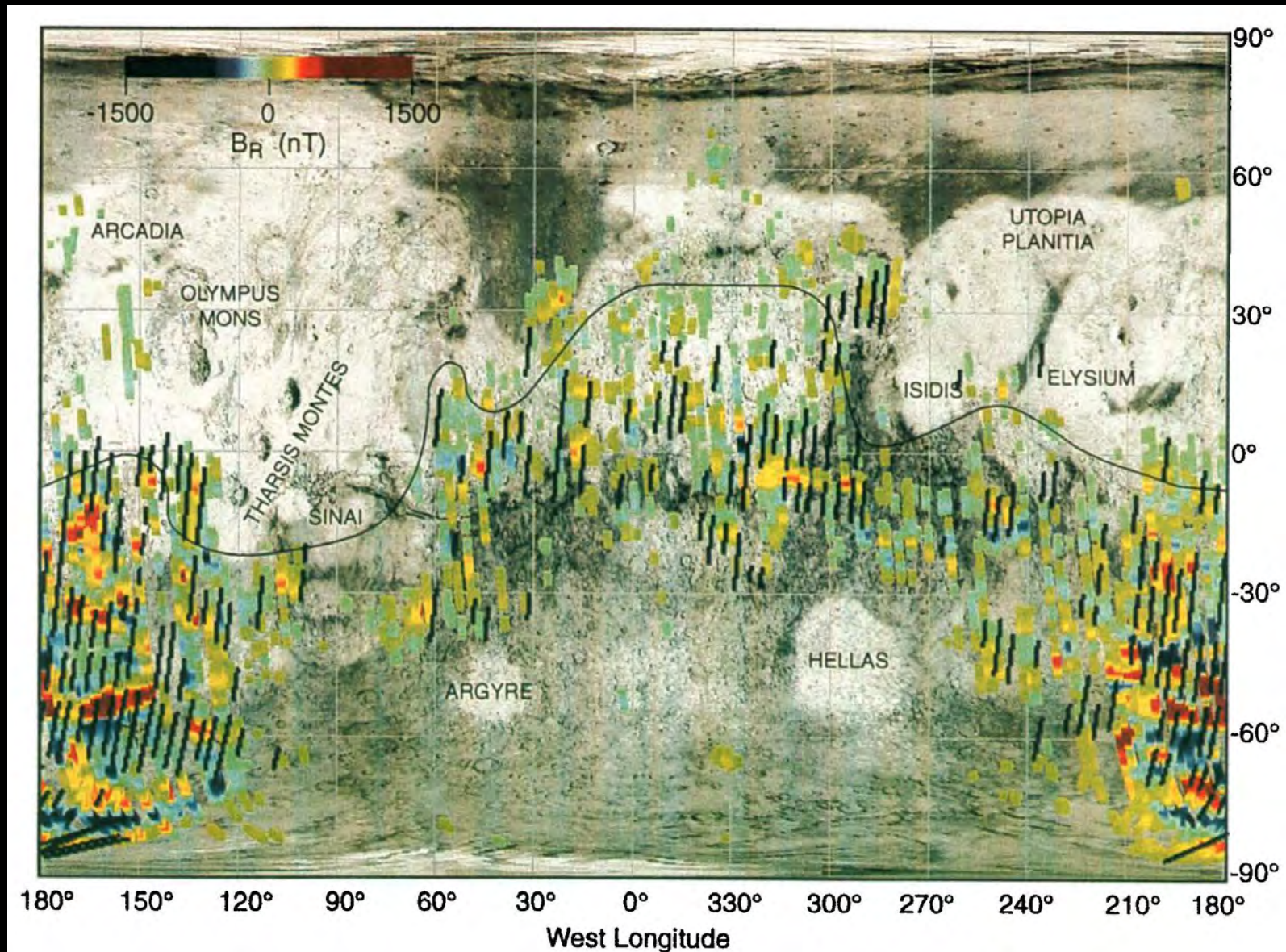
current sheet bifurcation
(Harris sheetからのズレ)



10-数100kmのスケール

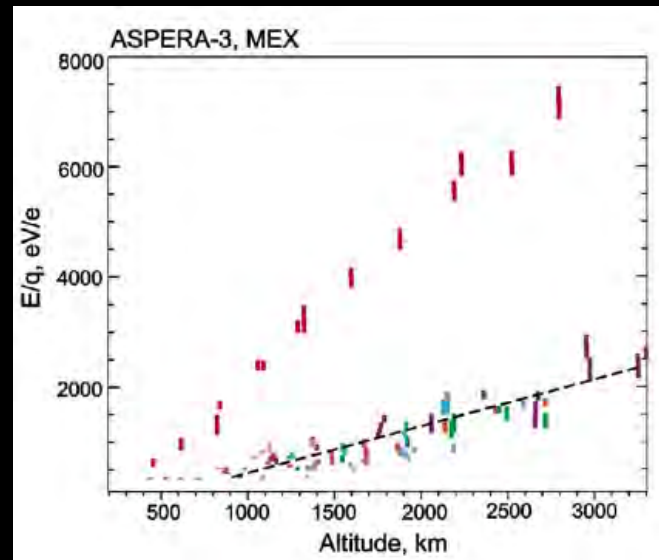
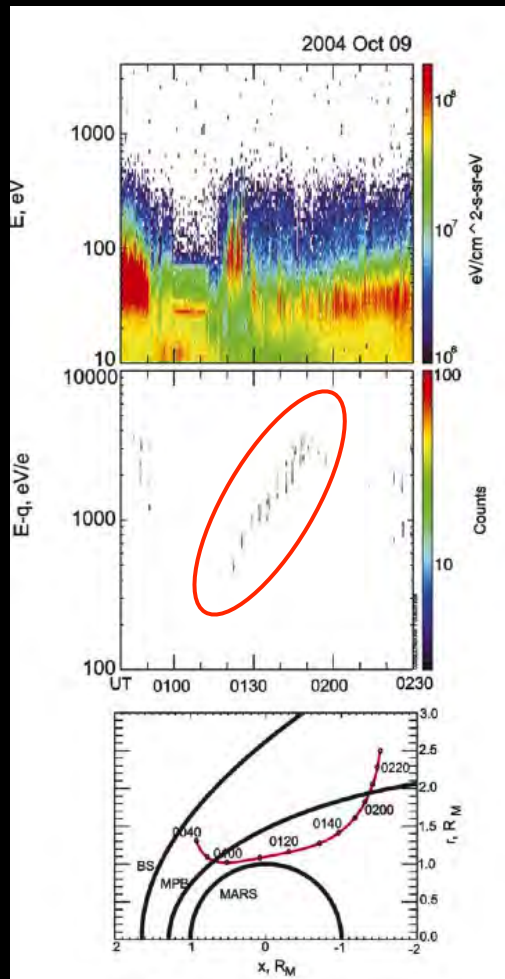
mini-magnetosphere

MGSによる電子の観測例 [Mitchell et al., JGR, 2001]



ドレーピング・電場侵入

MEX観測で、エネルギーが距離に比例したイオン加速が度々見られる。電場加速？ [Dubinin et al., 2006]



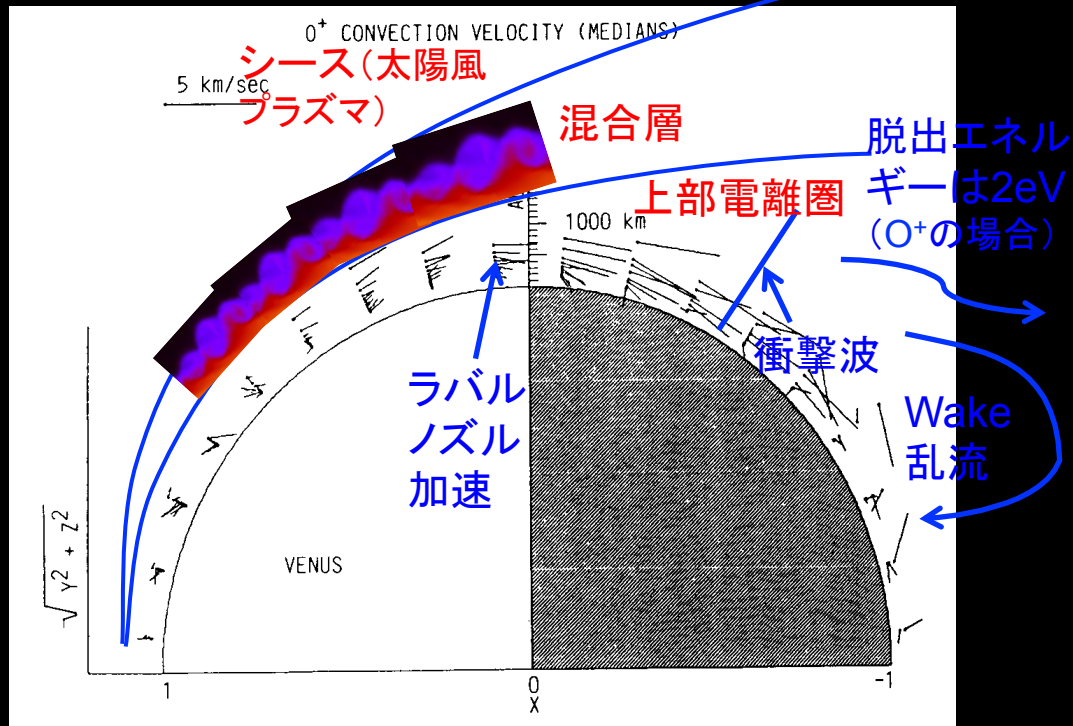
加速メカニズム候補：

- ・カuspから繋がるオーロラ加速 ($\parallel B$)
イオンと電子は逆方向に加速
- ・イオンピックアップ ($\perp B$)
イオンと電子はdecouple
- ・ドレープ磁場の張力 ($\perp B$)
イオンと電子は両極性電場を介して結合

必要とされる観測

電離圏イオン流出機構の切り分けには、プラズマ総合観測が必要、かつ空間構造の撮像が有効

~keVの太陽風イオンと、eV以下の電離圏イオンの混合を捉える観測が必要



観測対象

シース(太陽風プラズマ):

密度 $10^0-10^1/cc$ (主にH⁺)
 速度 数10-数100km/s
 温度 ~100eV-数keV

混合層:

密度 $10^1-10^3/cc$
 速度 数-数10km/s
 温度 ~0.3-100eV
 空間スケール 20-1000km

上部電離圏:

密度 $10^3-10^4/cc$ (主にO₂⁺, O⁺)
 速度 数-10km/s
 温度 ~0.3eV

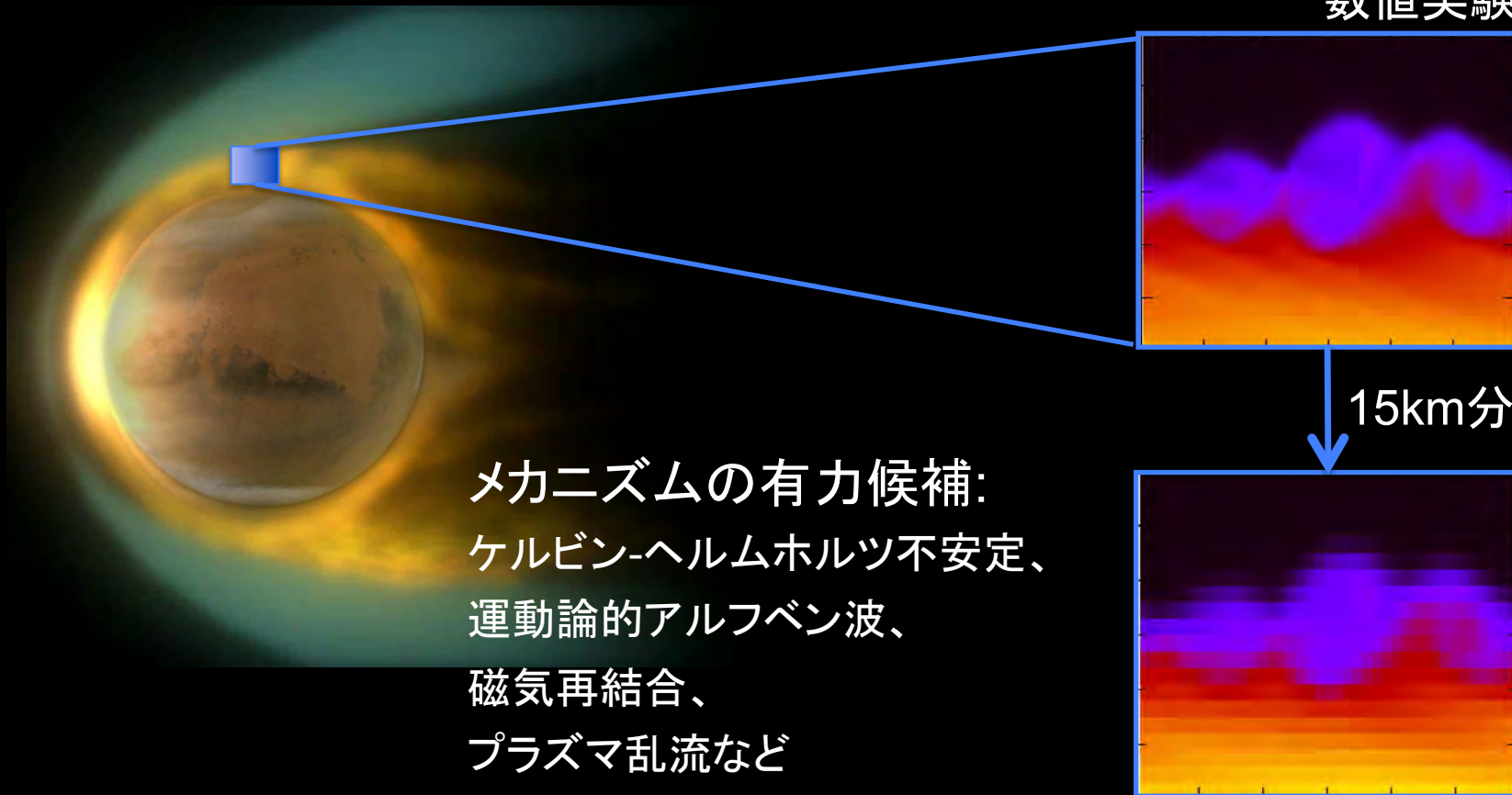
PVO/RPAによる
金星電離圏対流観測

科学目標2:

謎を解く鍵となる大気散逸機構の理解

電離圏イオン流出 - 太陽風から電離圏への運動量輸送

数値実験予測



観測項目と要求精度

- 例：成功基準II-1
電離圏イオン流出

~keVの太陽風イオンと、
eV以下の電離圏イオンの
混合を捉える観測が必要

観測項目と要求精度

低エネルギー流出イオン

- 組成：6の質量グループに分離 (H^+ , H_2^+ - He^{++} , He^+ , C^+ - N^+ - O^+ , CO^+ - O_2^+ , CO_2^+)
- 密度域： 10^0 - $10^5/cc$
- エネルギー帯域：0.3-100eV-数keV(速度分布関数あり)
- 角度分解能：22.5度以下
- 時間分解能：4-20秒以下
- ポテンシャルコントロール要
- 観測領域：イオノポーズ付近、電離圏、近尾部

イオノポーズ付近での電離大気の 空間構造

- 空間分解能：20km以下
- 時間分解能：40秒以下

磁場

- 絶対値の精度：1nT以下
- 角度決定精度：3度以下
- 時間分解能：1秒以下

観測対象

シース(太陽風プラズマ)：

- 密度 10^0 - $10^1/cc$ (主に H^+)
- 速度 数10-数100km/s
- 温度 ~100eV-数keV

混合層：

- 密度 10^1 - $10^3/cc$
- 速度 数-数10km/s
- 温度 ~0.3-100eV
- 空間スケール 20-1000km

上部電離圏：

- 密度 10^3 - $10^4/cc$ (主に O_2^+ , O^+)
- 速度 数-10km/s
- 温度 ~0.3eV

観測項目と要求精度

- 例：成功基準II-1
電離圏イオン流出

観測項目と要求精度

低エネルギー流出イオン

- 組成：6の質量グループに分離 (H^+ , H_2^+ - He^{++} , He^+ , C^+ - N^+ - O^+ , CO^+ - O_2^+ , CO_2^+)
- 密度域： 10^0 - $10^5/cc$
- エネルギー帯域：0.3-100eV-数keV(速度分布関数あり)
- 角度分解能：22.5度以下
- 時間分解能：4-20秒以下
- ポテンシャルコントロール要
- 観測領域：イオノポーズ付近、電離圏、近尾部

イオノポーズ付近での電離大気の空間構造

- 空間分解能：20km以下
- 時間分解能：40秒以下

磁場

- 絶対値の精度：1nT以下
- 角度決定精度：3度以下
- 時間分解能：1秒以下

観測器

IMVS

- 質量分解能：TBD(低)
- 時間分解能：16秒
- 密度域： 10^2 - $10^4/cc$
- エネルギー帯域：0.01-数eV

STIMS

- 質量分解能：TBD(高)
- 時間分解能：16秒
- 密度域： 10^1 - $10^3/cc$
- エネルギー帯域：1-100eV

MSA

- 質量分解能：40
- 時間分解能：4秒
- エネルギー帯域：1eV-40keV

ポテンシャルコントロール

LP(or インピーダンスプローブ)

- 電子密度と温度
- 密度域： $>10^3/cc$

EUV/UV撮像器

サウンダ・プラズマ波動計測器

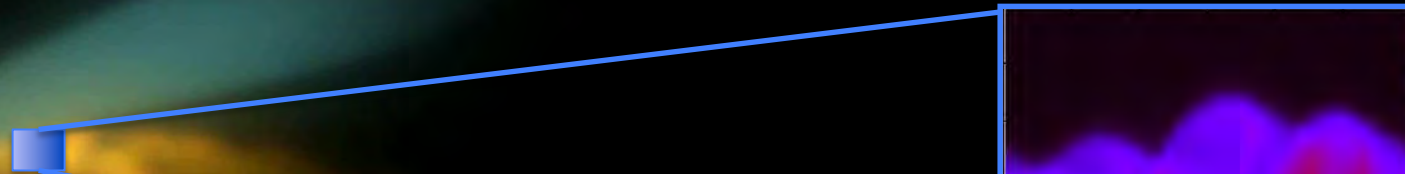
磁場(DC)計測器

科学目標2:

謎を解く鍵となる大気散逸機構の理解

電離圏イオン流出 - 太陽風から電離圏への運動量輸送

数値実験予測



→ 成功基準 II :

大気散逸の全体像と詳細特性を同時に捉えることによって、惑星起源の低エネルギー粒子の散逸機構を明らかにする

本ミッションの特徴:

世界初の撮像とその場観測の組み合わせにより、時空間変動を分離し、散逸メカニズムを同定。運動論的アルフベン波、磁気再結合、プラズマ乱流など、宇宙で普遍的に生起すると考えられている物理機構の理解の深化にも貢献。

ミッション構成

- 撮像で全体像を把握しながら、その場観測で物理機構を解明する軌道設計
- 太陽風・太陽放射変動と大気散逸機構を同時に観測し、太陽変動応答を把握

衛星A
(大気散逸の直接観測)

2衛星の軌道面を互いに直交化

衛星B
(大気散逸撮像と
太陽風・太陽放射モニター)

まとめ

- 非磁化惑星の大気散逸機構は、地球での詳細観測からの類推や理論面から数多く提案されている。
- 提案されている大気散逸機構のうち、大気進化に重要な役割を果たす可能性があるがよくわかっていないものに、太陽風に誘導される**電離圏イオン流出**、**スパッタリング**と、**光化学反応**による大気散逸がある。
- 太陽風誘導散逸機構の同定には、関連する粒子、電磁場、プラズマ波動の同時観測（**プラズマ総合観測**）が**必須**であるが、火星においては、断片的な観測しか行われておらず、MAVENからメカニズムを同定できる時代に入ると期待されている。
- 候補となる大気散逸機構には、**特徴的な空間構造を持つものが多く**、**大気散逸機構の同定には空間構造の把握が重要**。
- 一機によるその場観測では時間と空間変動の分離が困難であり、撮像等で空間構造を同時に把握することでブレークスルーが期待されるが、そのためには**新観測手法の開拓が必要**。