

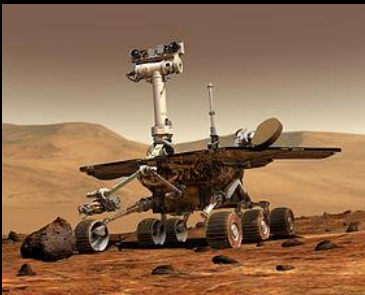
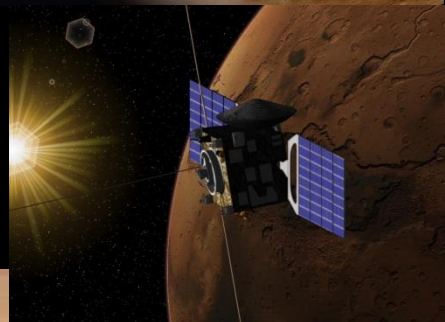
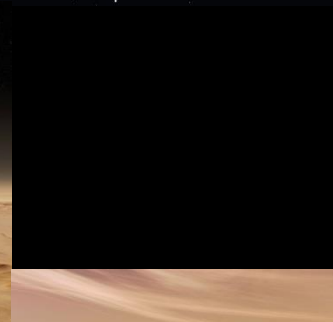
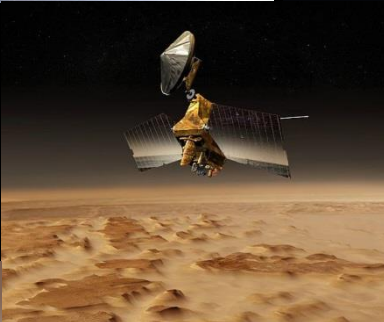
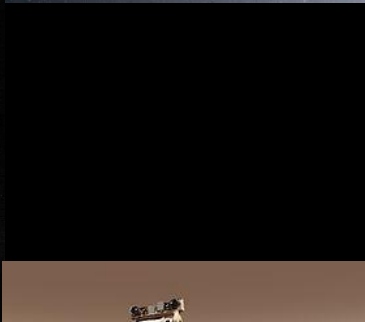
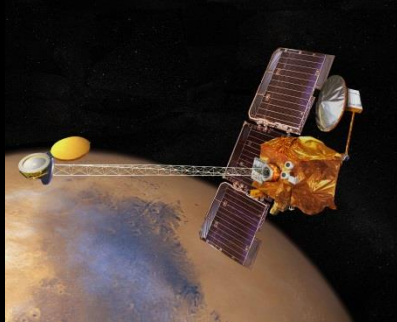
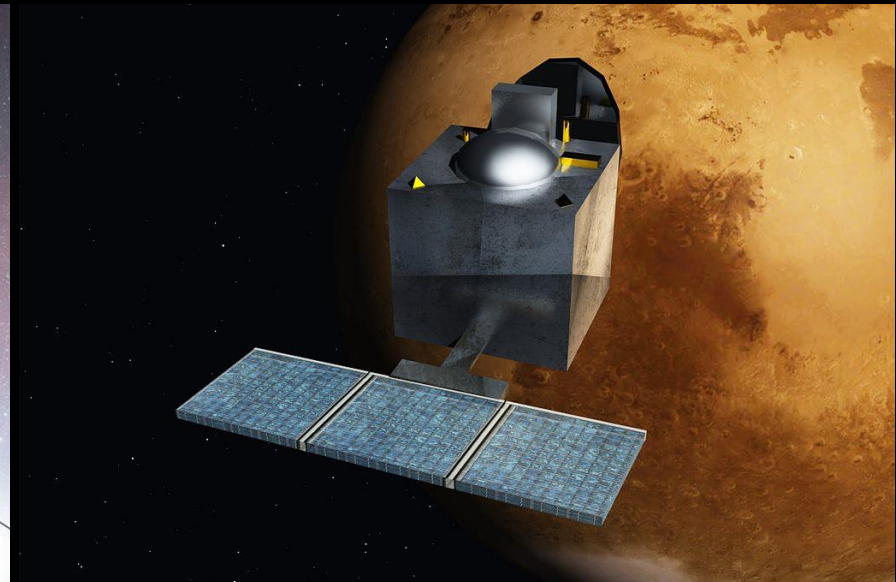
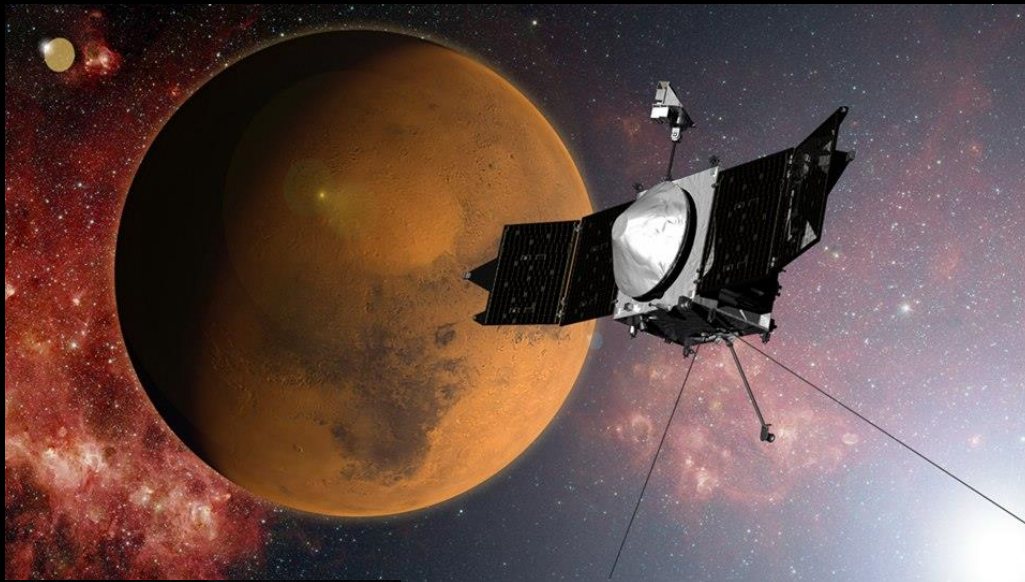
第38回 火星勉強会 (2014/10/07)

Large-amplitude compressive
“sawtooth” magnetic field
oscillations in the Martian
magnetosphere

Halekas et al., 2010, JGR

名古屋大学 太陽地球環境研究所
松永和成

CONGRATULATION !! MAVEN & Mangalyaan (MOM)!!



Abstract

- Mars Global Surveyor (MGS) の観測において、誘導磁気圏内で“sawtooth＝のこぎり歯”のような大振幅の磁場変動が観測された。
- これらの圧縮、偏光された、準周期的な特徴は、火星の昼側で、かつmagnetosheathの下側、photoelectron-dominated regionより外側で起こった。
- Sawtoothが観測された時間と高度400kmの場所での、solar zenith angleと太陽風動圧の推定値の間には相関関係がある。この関係は電離圏界面と関連があることが示唆される。
- 磁気リコネクション、電離圏の不安定性または不規則性、残留磁場が影響していると思われる。これらのプロセスはそれぞれ、磁気圏ダイナミクスと火星の非熱的イオン散逸にも影響している。

1. Introduction

衝撃波面

マグネトシース

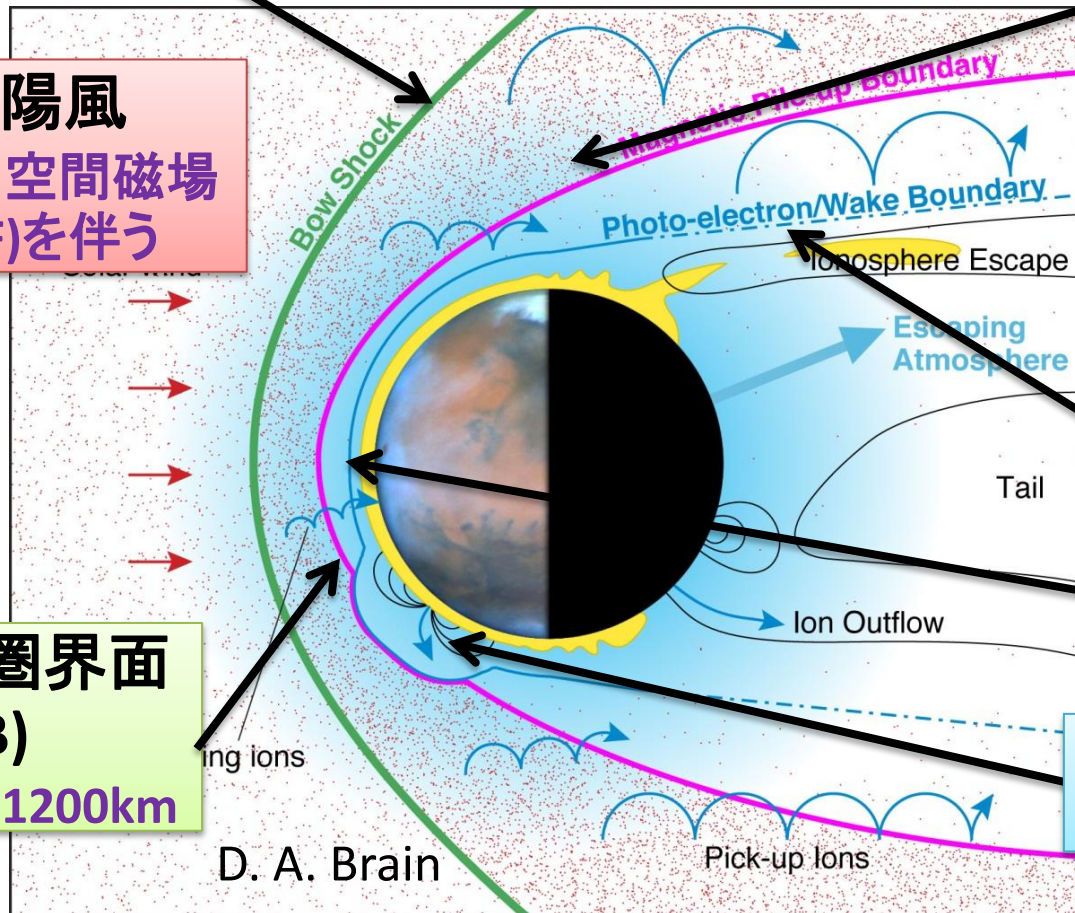
太陽風
惑星間空間磁場
(IMF)を伴う

誘導磁気圏界面
(MPB)
昼側: 約800-1200km

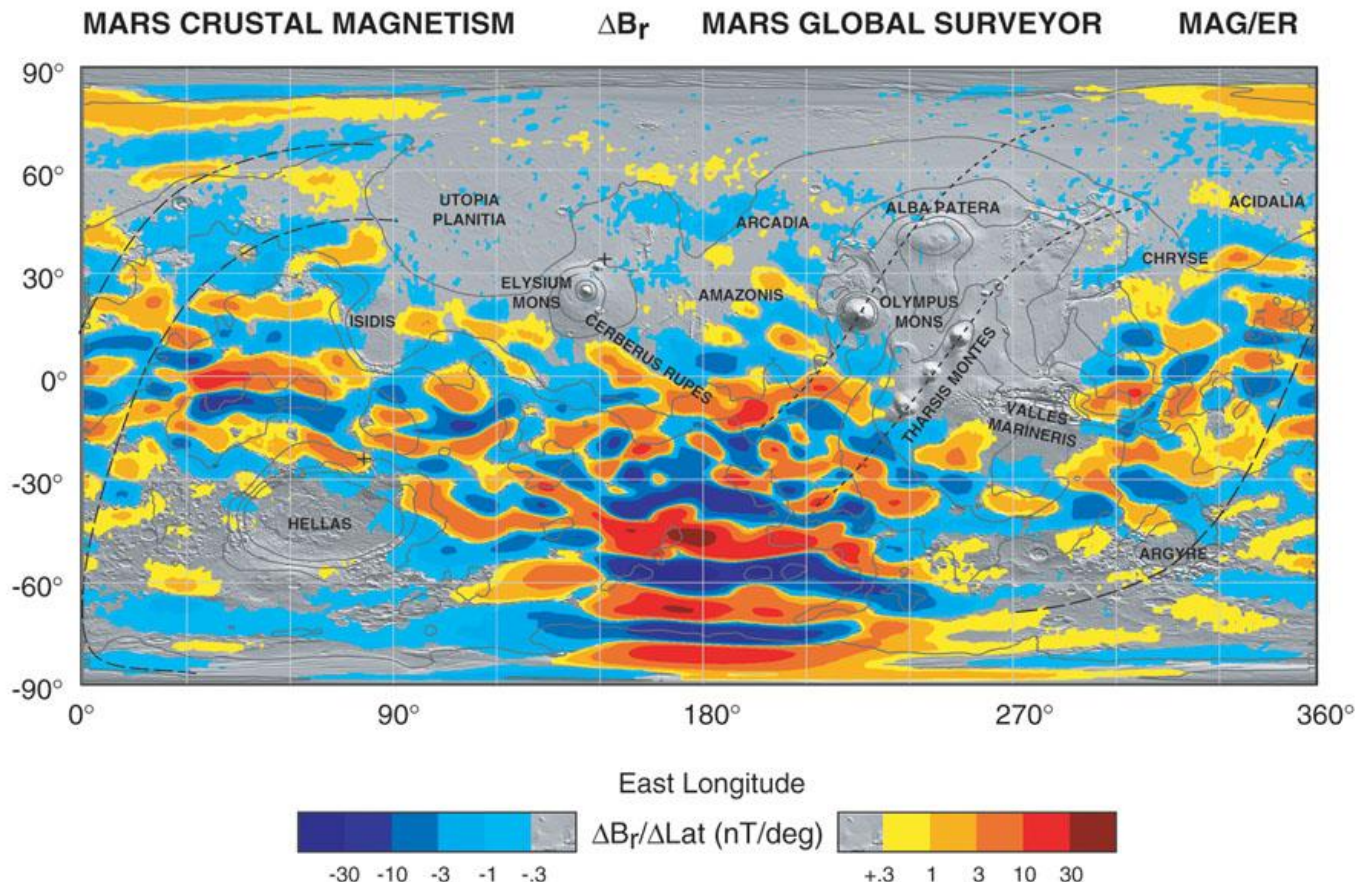
Photoelectron
boundary (PEB)

誘導磁気圏

残留磁場
主に南半球に局在



D. A. Brain



Connerney, J. E. P. et al., (2005) Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 102, No. 42, 14970-14975.

R1599_1pub

- 強度は数百nTまで達する(MGSの観測高度~400km)
- 外部からのプラズマを防ぐ閉じた磁場や、プラズマの侵入、散逸経路として働く開いた磁場(カスプ)を作る。
- 残留磁場の磁力線とIMFがリコネクションしていると考えられている。

動的な火星環境の結果起こるwave-like and/or phenomena・・・

- ✓ 低周波のmagnetic wave [Brain et al., 2002; Espley et al., 2004]
- ✓ ミラーモードとmagnetosonic waves [Bertucci et al., 2004]
- ✓ 超熱的、熱的なプラズマ量のどちらにもおける原因不明の準周期的変動[Winningham et al., 2006; Gunell et al., 2008; Gurnett et al., 2009]

- 地球と水星との場合と同様に、**ケルビンヘルムホルツ不安定性** (KHI)が発見されることが期待される。[Amerstorfer et al., 2009; Penz et al., 2004](しかし、観測事実はなく、重要性もわかっていない)
- KHIが重要な役割を果たしているなら、惑星起源プラズマと太陽風プラズマの混合を促進するだろう。
→惑星起源イオンの散逸経路[Penz et al., 2004]

- **無衝突リコネクション**はMGSによって観測されており[Eastwood et al., 2008; Halekas et al., 2009]、それはプラズマ混合の他のメカニズムである。
→IMFと残留磁場によってできるフラックスロープは重要なイオンの散逸経路の可能性 [Brain et al., 2010]

2. Observations of Large-Amplitude Compressive “Sawtooth” Oscillations

2.1. Data set



- Mars Global Surveyor (MGS)
- 打ち上げ日 1996年11月
Mapping orbit phase:
1999/04/01-2006/11/02
- 火星上空を円軌道で周回
(local time 2am/pm)
- 軌道周期は約2時間
- 軌道高度は 約 400 ± 30 km
- 3軸衛星
- Magnetometer (MAG) and
Electron Reflectometer (ER)

❑ Magnetometer (MAG)

- 2台のfluxgate magnetometer (最大で32sample/秒)

❑ Electron Reflectometer (ER)

- 半球対称な“top hat” electrostatic analyzer
- 5 eV から20 keV の電子を、30対数エネルギーチャンネル、 $16(22.5^\circ \times 14^\circ)$ 角度セクター、視野角 $360^\circ \times 14^\circ$ で観測

✓ 一定の高度と地方時のため、MGSは多くのプラズマ領域と境界を観測した。(マグネトシース、マグネティックパイルアップリージョン、電離圏)

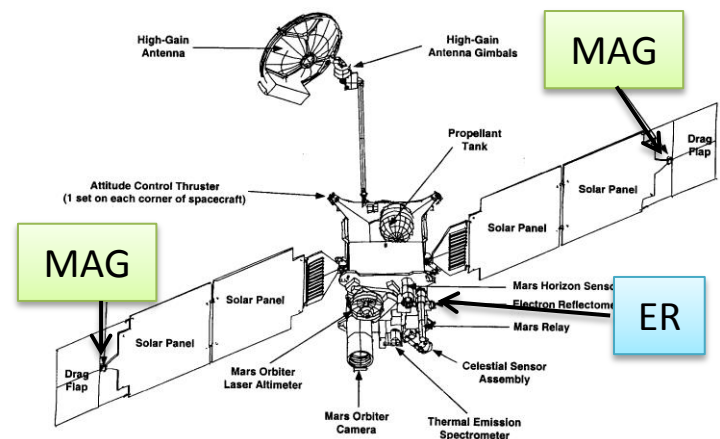
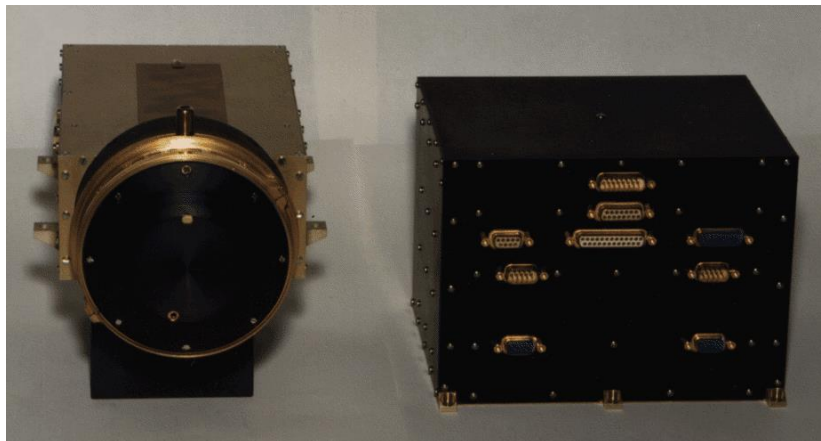


図1

2.2. Selected Observations

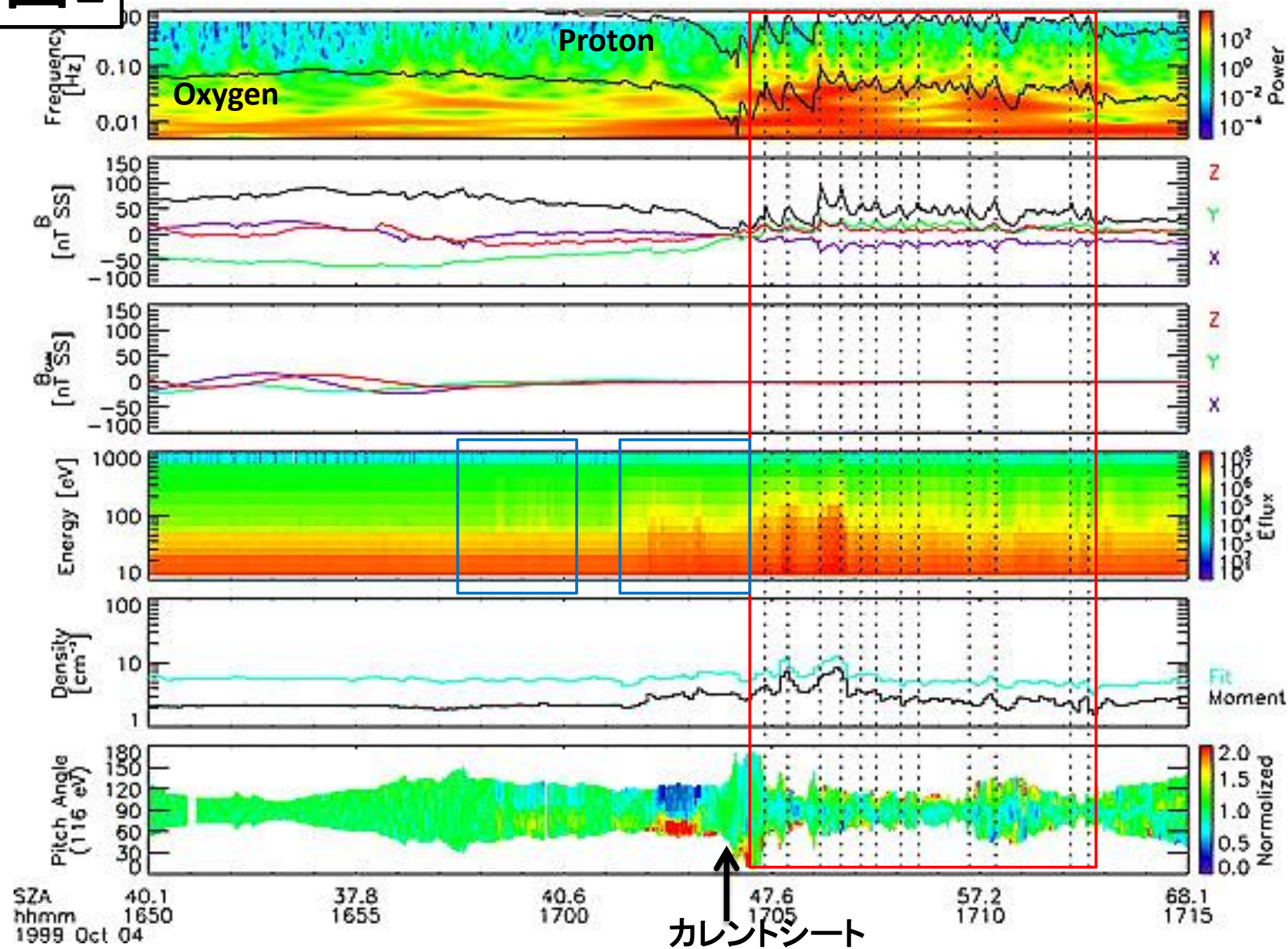


図2

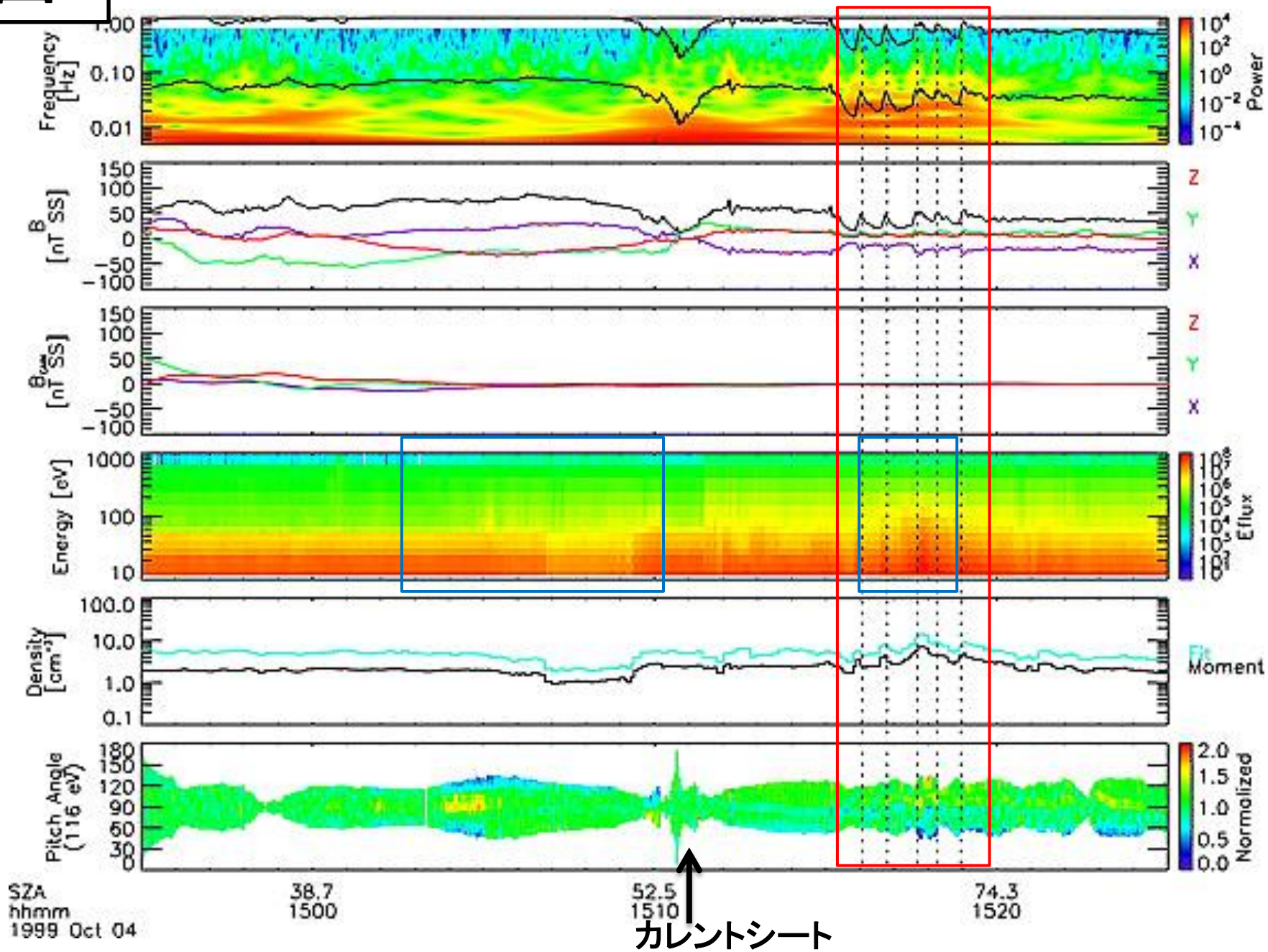


図1と図2のまとめ その1

- 磁場強度の大振幅の準周期的な変動 (sawtooth) である。
- 磁場の振幅の大きな変動は、x、y、z成分ともに関連している。そして高く圧縮され、偏光している。
- 振動周波数は、酸素のジャイロ周波数に沿っている。
- 火星の昼側、強い残留磁場から離れた場所でかつ、下流側の領域のものを選択した。
- カレントシートを通過した~17:04と~15:11は、残留磁場領域とsawtoothイベントから除外する。(IMFと残留磁場とのリコネクションについて後で議論する)

図1と図2のまとめ その2

- 磁場の圧縮とともに、超熱的電子のフラックスも上昇した。
- 部分的な電子密度の計算を行った(電子のエネルギーカバレッジと衛星電位の欠如のため、誤差がある。正確な熱電子の寄与を示さないし、電離圏では特に大きな誤差を持つ。)
- フィッティングとモーメント計算による電子密度は、強度は一致しないが、トレンドは一致した。磁場の圧縮は密度上昇と関連しており、磁気圧縮の特徴を示唆している。
- プラズマ密度がMGSの搭載機器の測定範囲より低ければ、このような解釈は成り立たない。

図1と図2のまとめ その3

- どちらのイベントの前も、主に光電子の等方的な超熱的電子の分布である。(PEBの下、おそらく閉じた磁力線上)
- 図1では、16:58から異方的な電子が見え始め、超熱的異方性と電子フラックスが上昇する。17:02、17:04 (sawtoothイベント開始時)にも同じ現象が起きている。
- 図2では、15:03~15:10の間に光電子と太陽風/シース電子との混合が見える。(電離圏と残留磁場とので磁気リコネクションが起きやすいことが示唆される) 15:10以降では、sawtoothのピークがある15:17分ぐらいで異方性が見られる。
- どちらのイベントも電子フラックスと超熱的電子の異方性がsawtoothイベントの間に上昇し、その量は磁気圧縮と相関がある。

图3

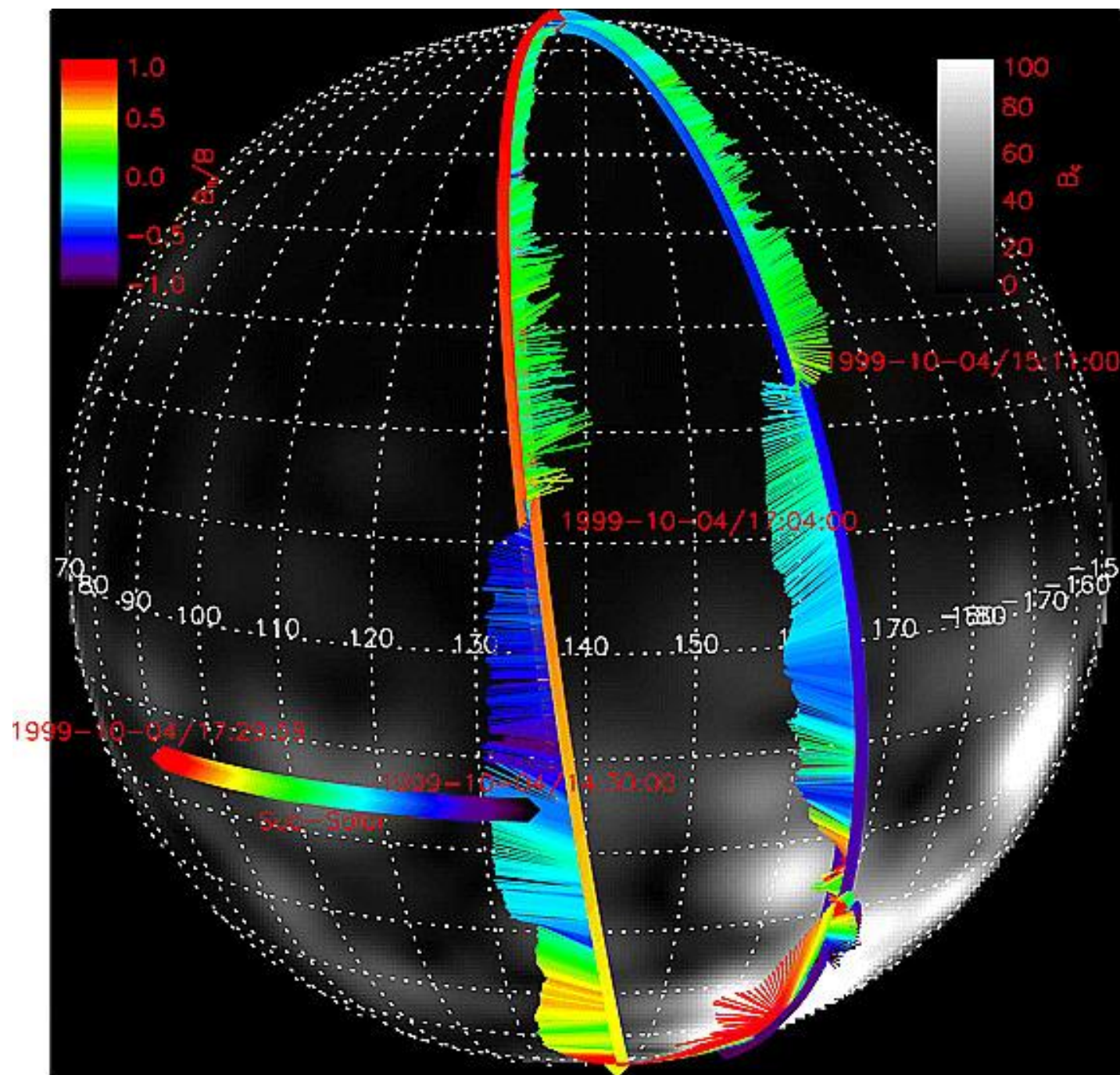
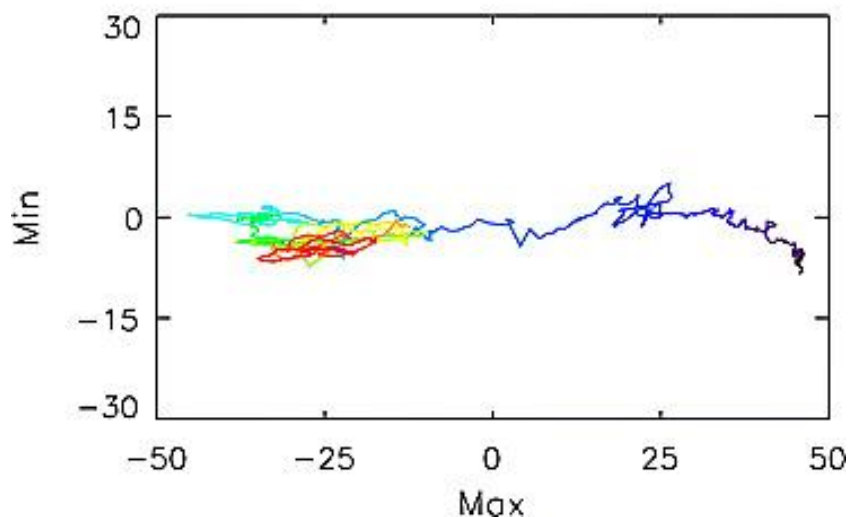
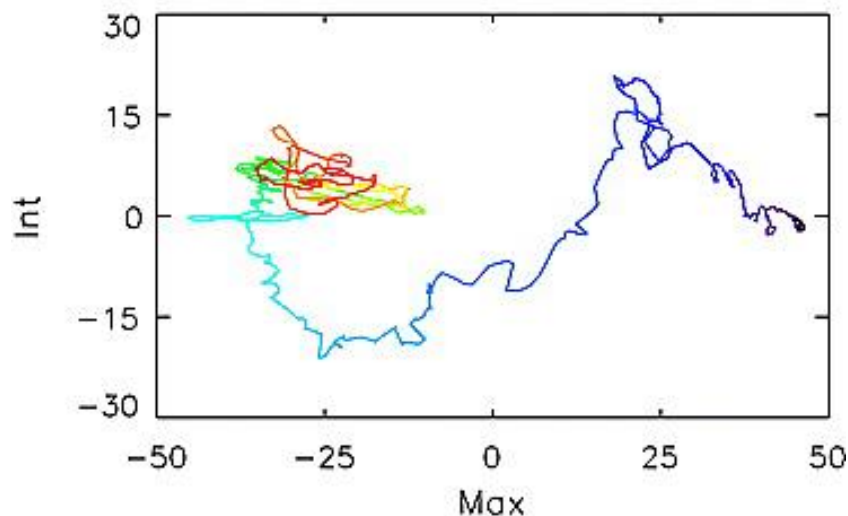


図1と図2と図3のまとめ

- どちらのイベントも、磁場の向きが西向きにドレイプしているときはカレントシートの南側を向いており、東向きのときはカレントシートの北側に対して接線方向である。
- カレントシートは二つのイベントの間で緯度的に 15° 移動することになったが、経度的にも 30° 回転している。
- カレントシートの南側を向く大規模な磁場の成分は、残留磁場との結びつきと関連している。
- カレントシートの北側に対して接線方向の磁場は、IMFが黄道面に沿っているなら、IMFの磁力線を表すドレイピングパターンとなる。

図4

15:07–15:20



紫15:07、赤15:20

- 図2において、カレントシートの近くに重要な面外の磁場を発見した。最小分散座標でこの場所を表した。
- カレントシートの近くで(~15:11)、Hall磁場の面外の特徴を発見した。→MGSがリコネクション拡散領域を通ったことと一致
- 偏光し、圧縮されたsawtoothの振動は、カレントシートの主要成分と同じ面で観測された。そこから回転して面から少し外れた。
- 最小分散の向きは、表面から半径方向外向きである。
- MGSは、カレントシートと平行に移動し、それを接線方向に横切った。

図5

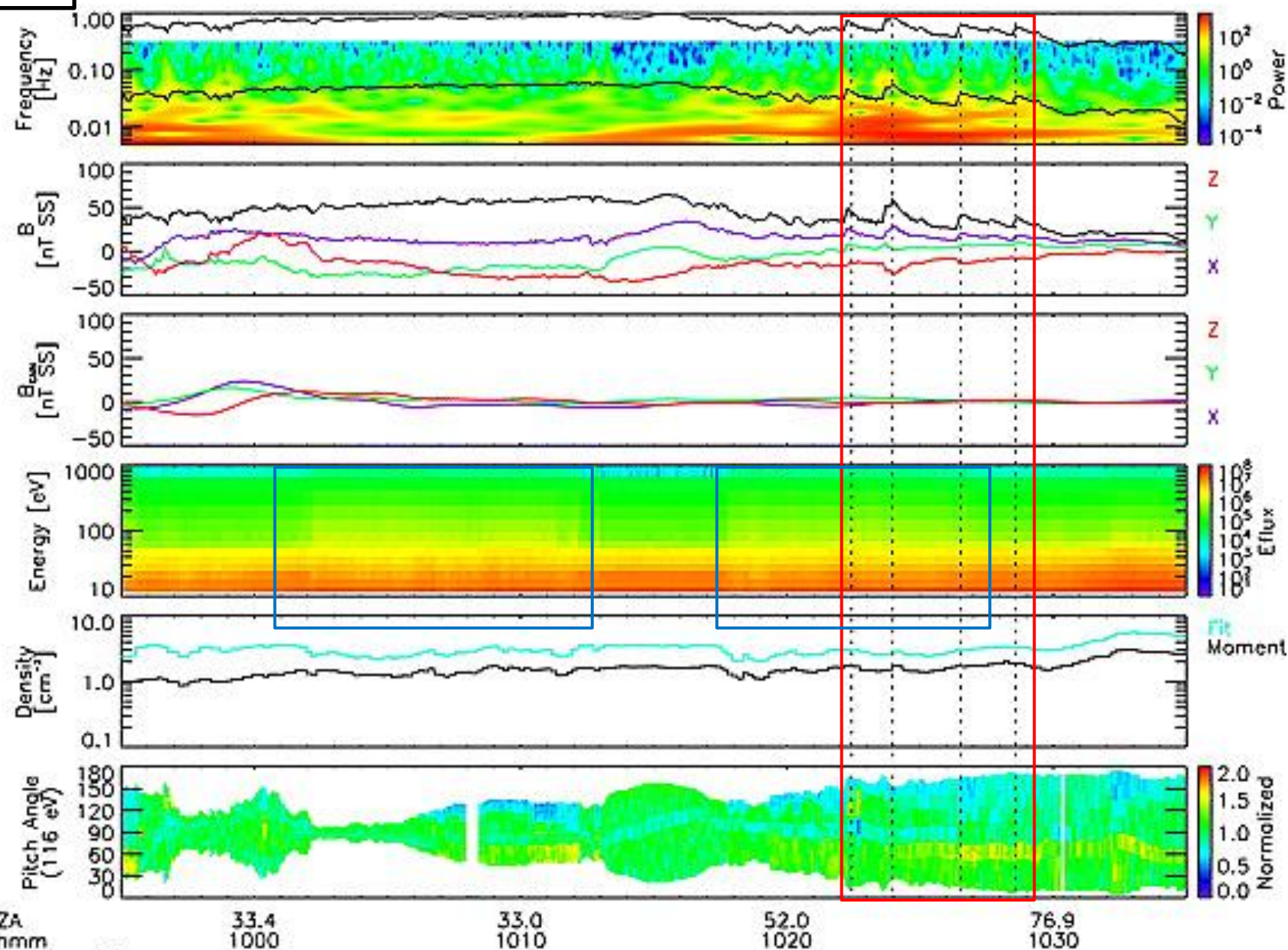


图6

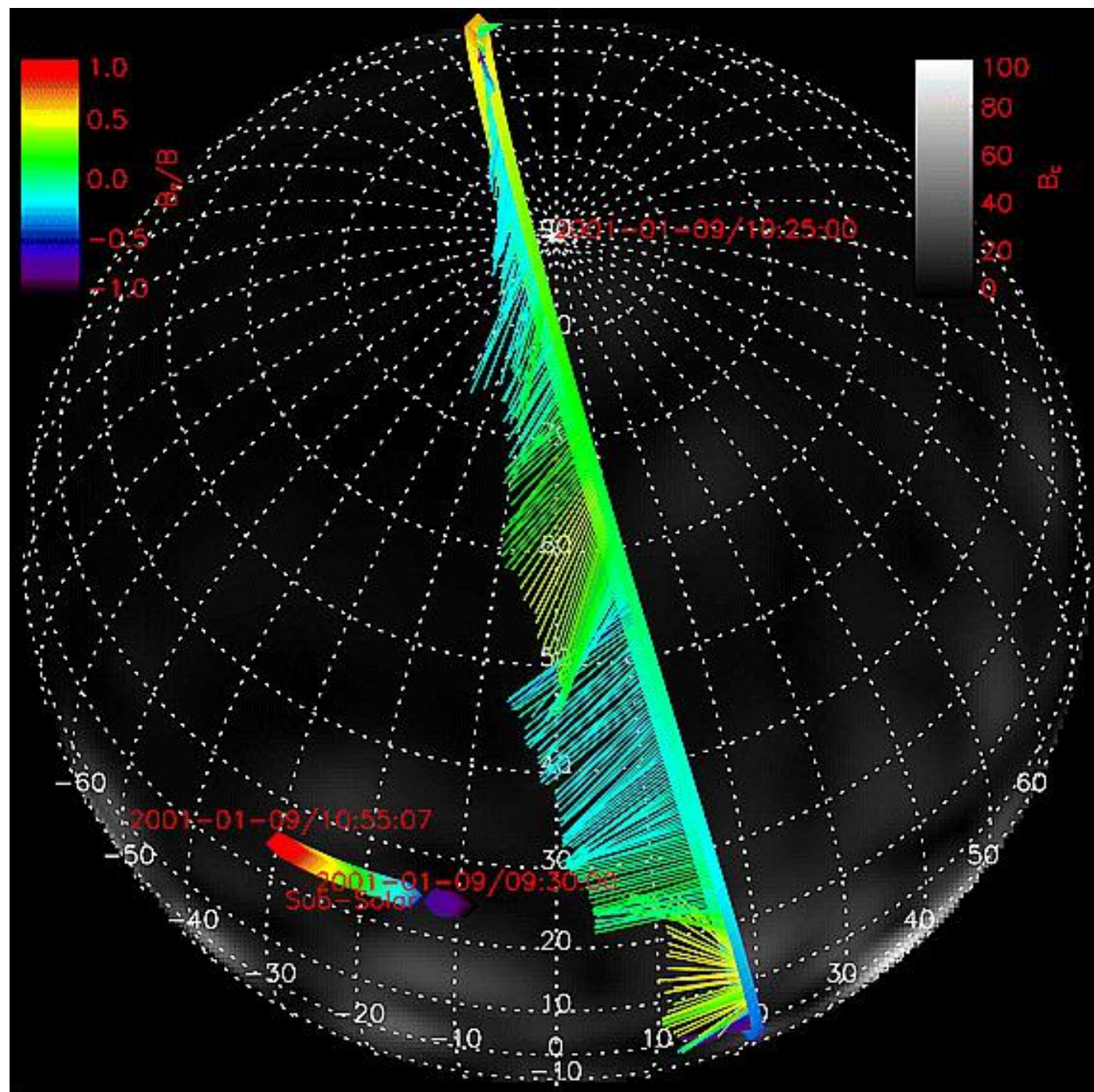
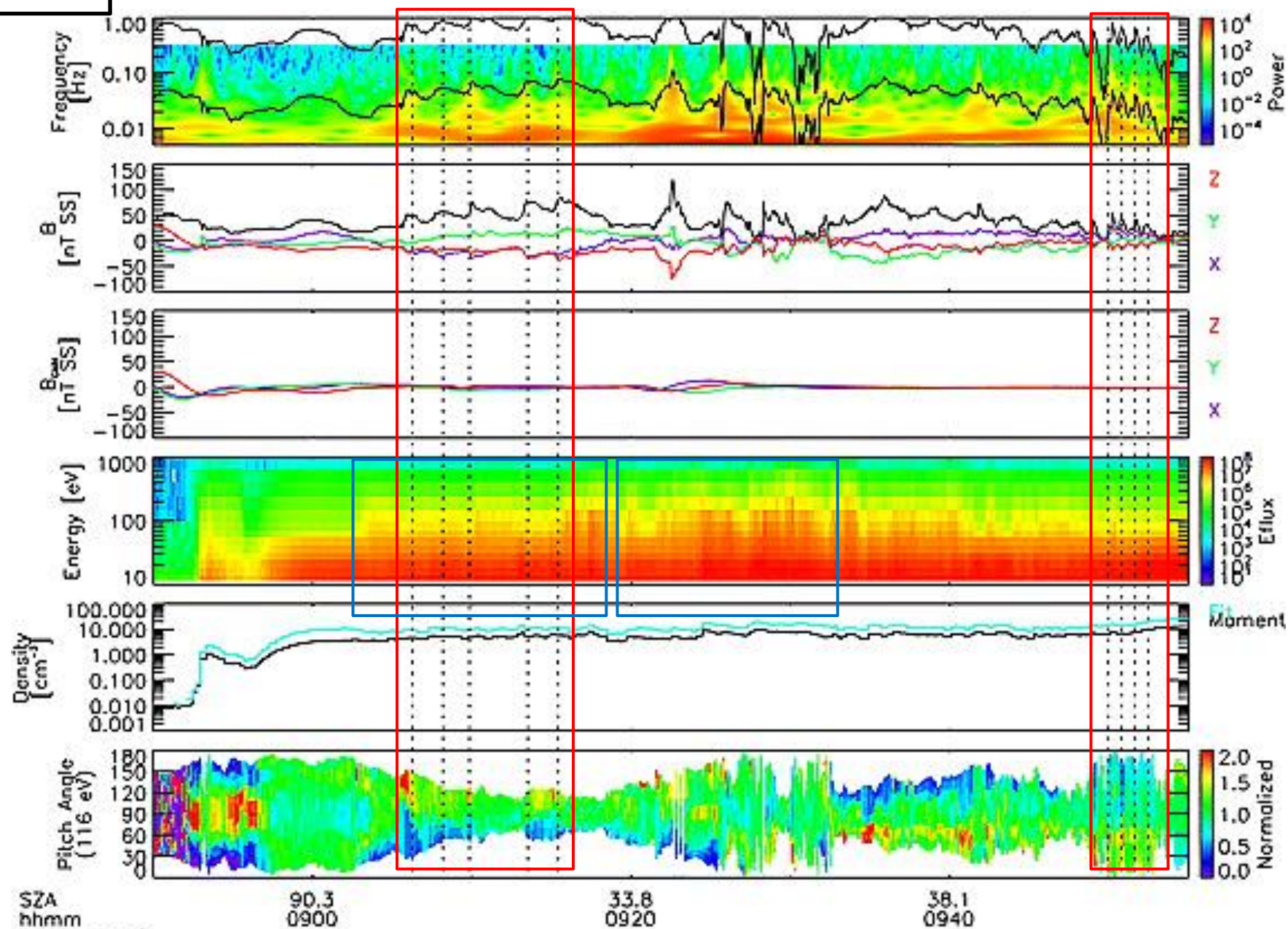


図5と図6のまとめ

- 図1と図2のイベントに似ている。超熱的な電子の観測に違いが見られる。
- ~10:02までは、光電子が支配的な分布が見られる。
- ~10:02から~10:12までは、少しだけ異方的な分布が見られる。エネルギー Spektrum も光電子と太陽風/シース電子が混ざった様子である。
- ~10:02から~10:18では、MGSが等方的な光電子が支配的な領域に再び侵入したと見られる(PEBの下に相当)。
- ~10:18以降では、sawtoothイベントが起きていた期間も含め、混合した特徴は見られず、異方的な超熱的な電子のフラックスも少しであった。
- 図6では、sawtoothイベントの前にPEBの下を通過したことに関連する磁気的回転が見られる。これは不規則な電離圏境界を示唆しており、電離圏不安定性の及ぼす影響も示唆している。



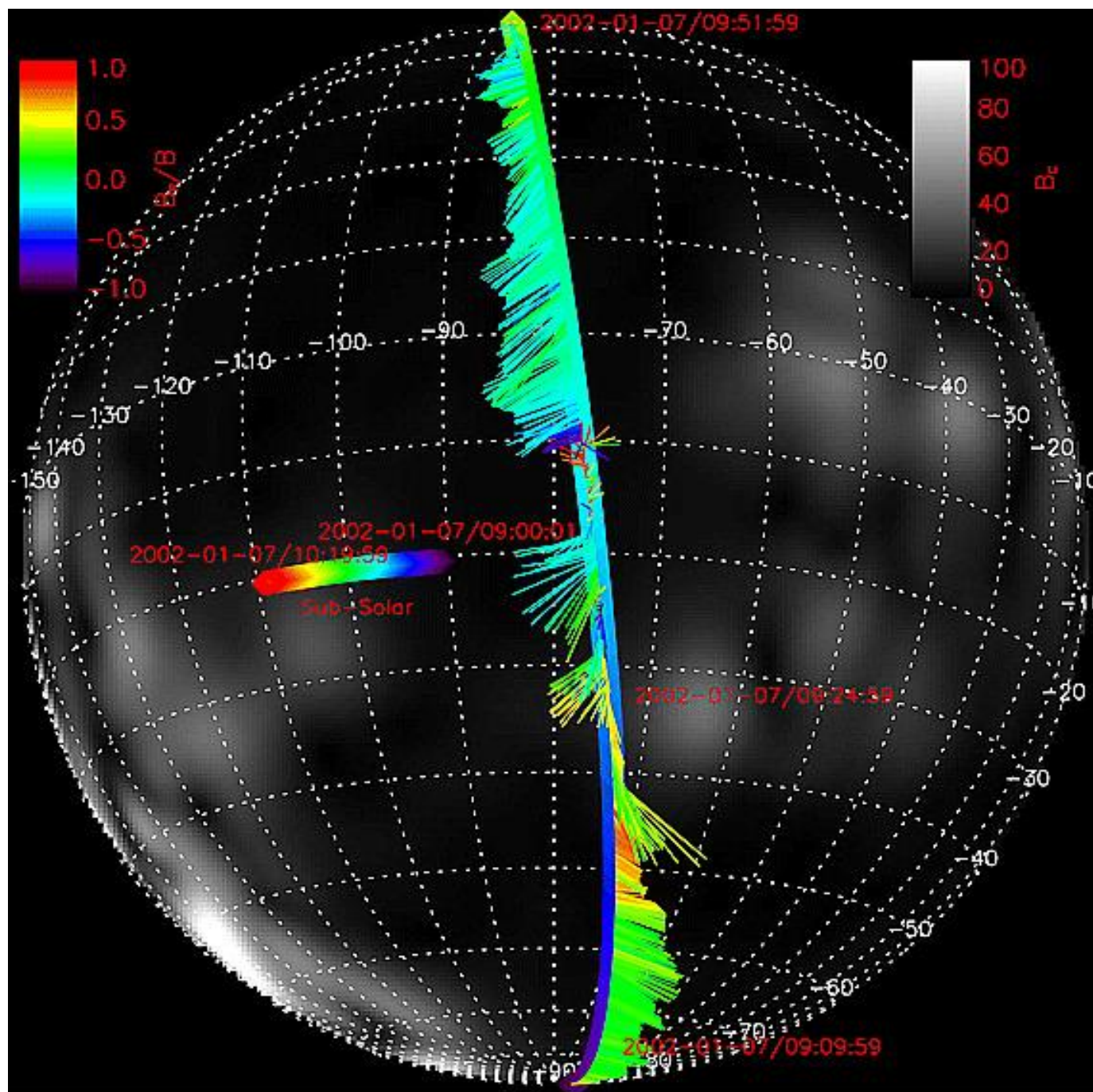


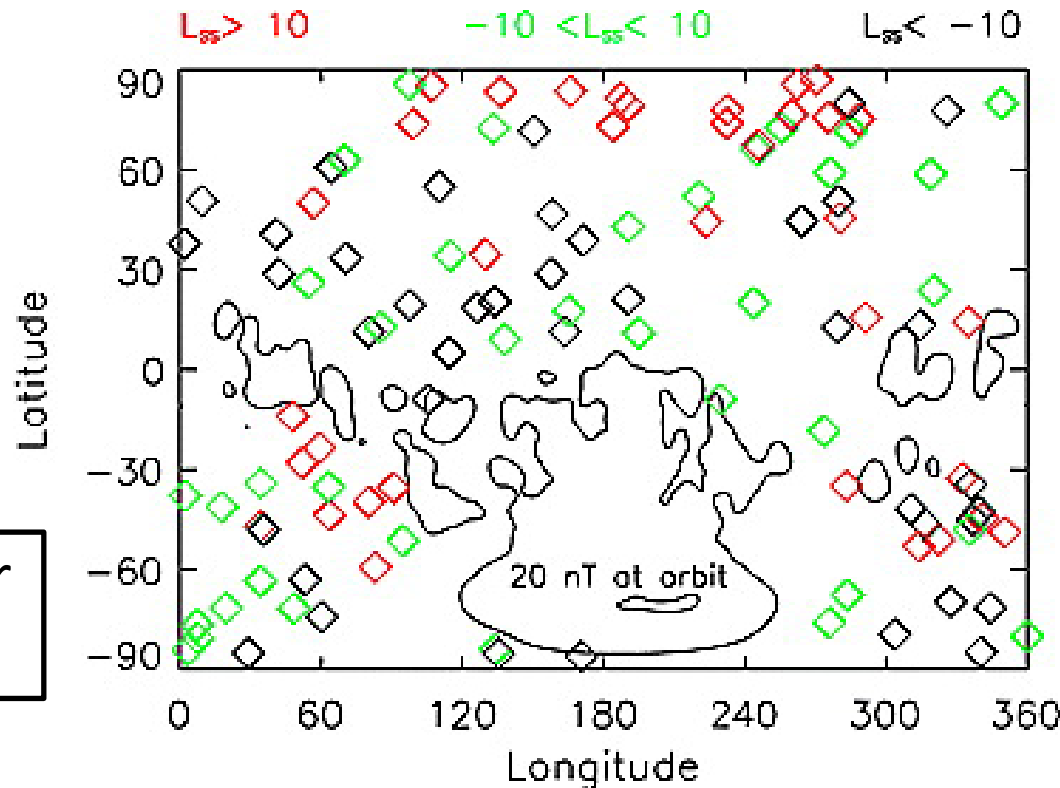
図7と図8のまとめ

- 8:57から9:03に南半球の昼側で、等方的な光電子の支配的なプラズマ領域を通過した。
- 9:03から9:18には、エネルギーの高い異方的なプラズマ電子と同時にsawtoothイベントが観測され、超熱的電子密度と磁氣的な圧力による異方性の上昇も確認された。
- 9:18から9:31には、磁氣的圧縮と回転の特徴が見られた。この特徴は、フォースフリーなフラックスロープではなく、形成途中のまたは平衡が崩れたフラックスロープであるかもしれない。
- 9:50から9:53 には、北極近くで、もう一つのsawtoothイベントを発見した。
- 接線方向にドレイプした磁力線は、サブソーラー点の近くの強い残留磁場領域へ向かうか、または離れている。この接線方向にドレイプした磁力線は、北から南向きの上流のIMFが引き起こしそうな結果である。このIMFは、サブソーラー点近くでの残留磁場と相互作用し、火星電離圏の横側のプラズマ流れにも影響を及ぼす。
- サブソーラー点近くのIMFと残留磁場の相互作用の結果、9:18から9:31のフラックスロープのような特徴が見えたのかもしれない。南北半球両方でのsawtoothイベントも引き起こしたかもしれない。

2.3. Statistical Distribution

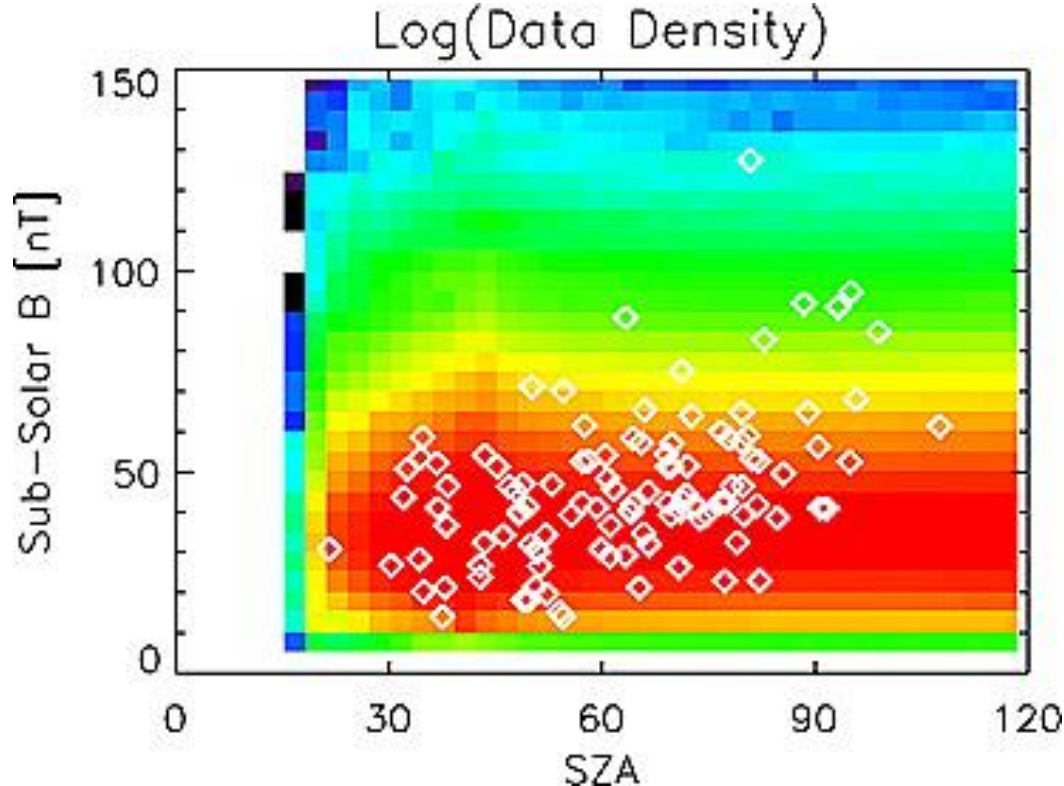
- 約10個のsawtoothイベントを偶然発見した。
- MGSの2時間の軌道のうち、ランダムな1000軌道についてシステムティックな判別を行った結果、60個以上のsawtoothイベントを発見した。これら約70個に対して±2軌道を調べた結果、より多くのイベントが見つかった。
- イベントのうち、約40%が連続した軌道のなかで、sawtoothの特徴が繰り返されていた。
- 最終的に112個のsawtoothイベントを発見した。
- Sawtoothの観測の頻度は約5%である。(高度400km、地方時2時)
- イベントのデータセットと時間と場所を調べた結果、MPB/IMBより下で、PEBより上の場所を示唆していた。
- 衝撃波の上流や外側ではない。

図9



L_{ss} : sub solar latitude

- 112個のイベントの中心場所を地形図にプロットしたもの。
- イベントは地形的な緯度と関連がある。
- 季節的な変化を明らかにするため、データを三つの範囲でビンニングした。
- Sawtoothイベントは、強い残留磁場以外の場所ならどこでも起きている。
- L_{ss} が赤道より北のときは、北極または赤道付近にある残留磁場の下流の南側に多い。
- L_{ss} が赤道より南のときは、南極または赤道付近にある残留磁場の下流の北側に多い。
- サブソーラ点と関連した残留磁場の場所は、sawtoothイベントの観測可能性に影響している。
- 残留磁場は、ドレイプした磁場トポロジーに影響し、境界層における振動を高めることで、400km高度におけるsawtooth振動の観測可能性を高めることが示唆される。

図10

- サブソーラーにおける磁場強度(プロキシ[Brain et al.,2005])と太陽天頂角(SZA)の分布をデータ密度の上にプロットしたもの。
- 高いSZAのときには、サブソーラーにおける磁場強度とSZAには正の相関がある。
- 火星磁気圏における全ての境界層はSZAと関連がある。例えば、電離圏界面の平均高度は、約400～500kmだが、高いSZAでは、約600kmである[Duru et al.,2009]。
- Sawtoothイベントが電離圏境界の不安定性から起きるものということが示唆される。

その他のパラメータ...

- ✓ IMF draping direction
- ✓ 軌道毎のIMF draping directionの変化
- ✓ 太陽紫外線
- Sawtoothイベントが起こったときに観測されるこれらのパラメータの明確な違いはわからない。
- 現在の観測ではこれらの量を直接的に測ることはできないので、外挿やプロキシーを使用する。
- これらの要因は他の現象とも結びつくので、sawtooth形成過程に及ぼす影響を決めることが難しい。例えば、IMFの向きはリコネクションに影響している。
- IMFと残留磁場のリコネクションは重要であることが示唆されている。

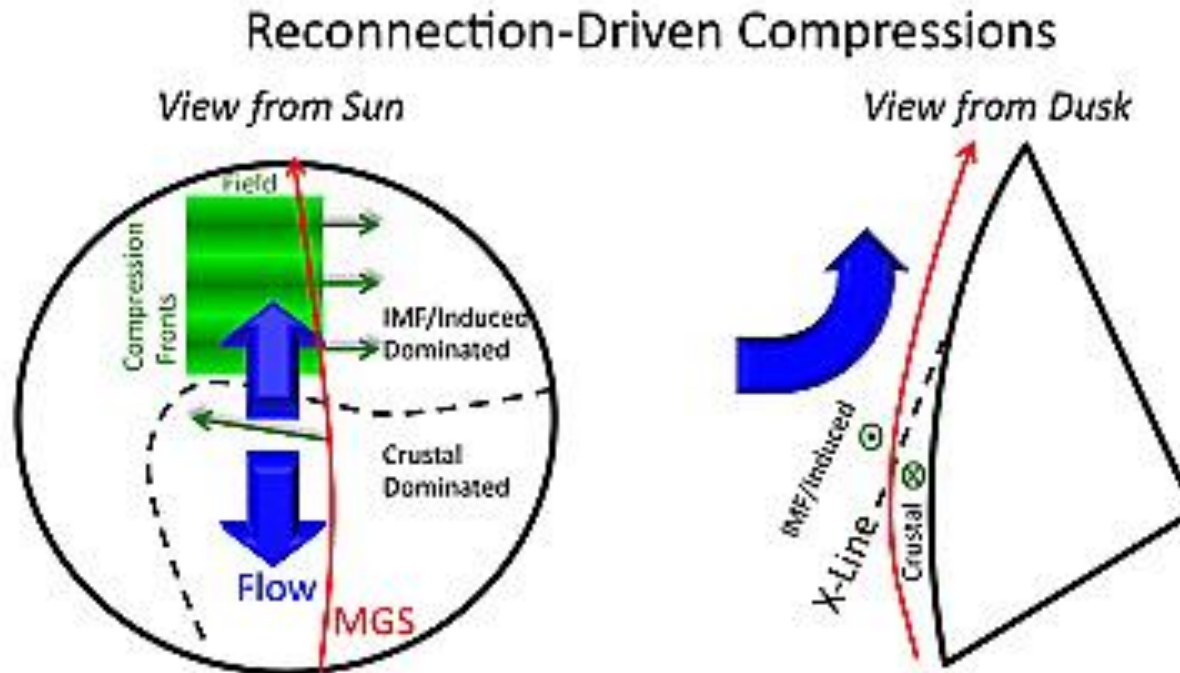
3. Discussion

3.1. Overview of Mechanisms for Sawtooth Formation

- 単一の衛星の測定には、固有の時空間的な曖昧さがある。
- Sawtooth構造は、一時的な振動、衛星が通過する静的な小スケールプラズマ構造、速い速度で衛星を超えていく大規模なプラズマ構造を含む異なる種類の現象とし表される。
- 大規模な構造が衛星を通過するときに、sawtoothの振動が観測される可能性がある。
- Sawtooth構造が衛星を通過するときの速度は10-50km/sで、一時的な継続時間は30-60sなので、空間的には~300-3000km (0.1-1火星半径) 移動する。

- Magnetosonic wavesが sawtooth振動の波のモードを生み出していると思われるが、観測装置の欠如で仮説でしかない。
- どのようなプロセスが振動を起こしているか？
- なぜ急勾配の波が衛星にあらわれるのか？
- それぞれの観測を簡単に説明する推測されるシナリオはない。
- 複合したプロセスが sawtooth振動を起こしているのだろう。
- ピックアップイオンが引き起こす波は、酸素のジャイロ周波数との関係を支持するかもしれない。(彗星での観測 [Tsurutani et al., 1987]、ホイッスラーモードも)
- 磁力線の共鳴、bi-ion shockletsなども考えられる。

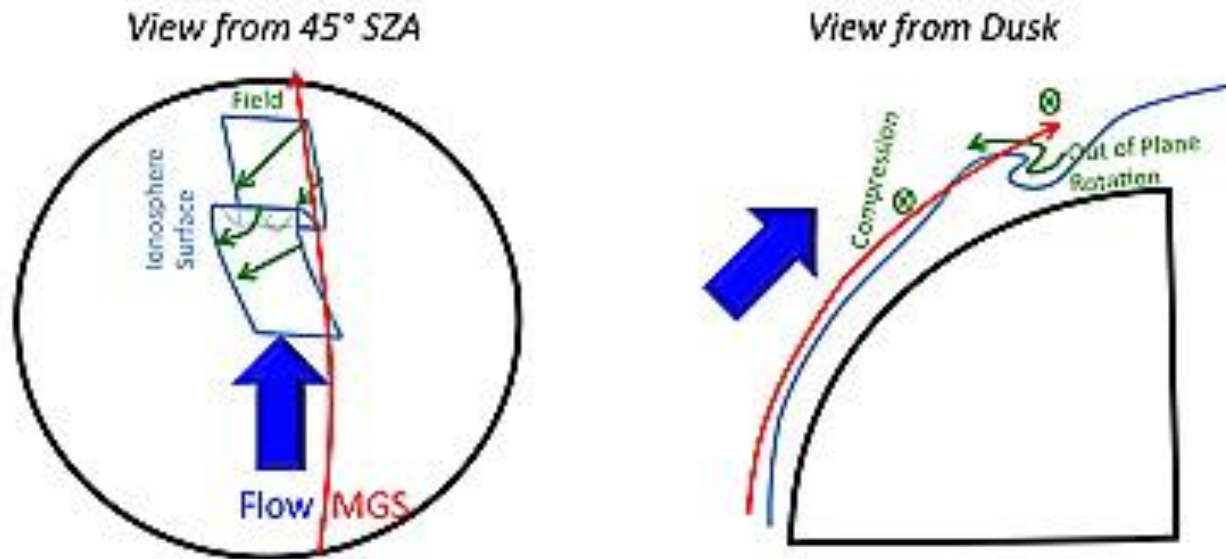
3.2. The Role of Reconnection



- MGSが火星磁気圏の中でたくさんリコネクションを観測した。[Eastwood et al., 2008; Halekas et al., 2009] (フラックスロープ形成も示唆 [Brain et al., 2010])
- 太陽風カレントシートや、互いに反対向きのドレイプしたIMFによるカレントシートも関係している。
- リコネクションが起こっている付近では、異方的な電子の特徴も見られている。[Halekas et al., 2009]

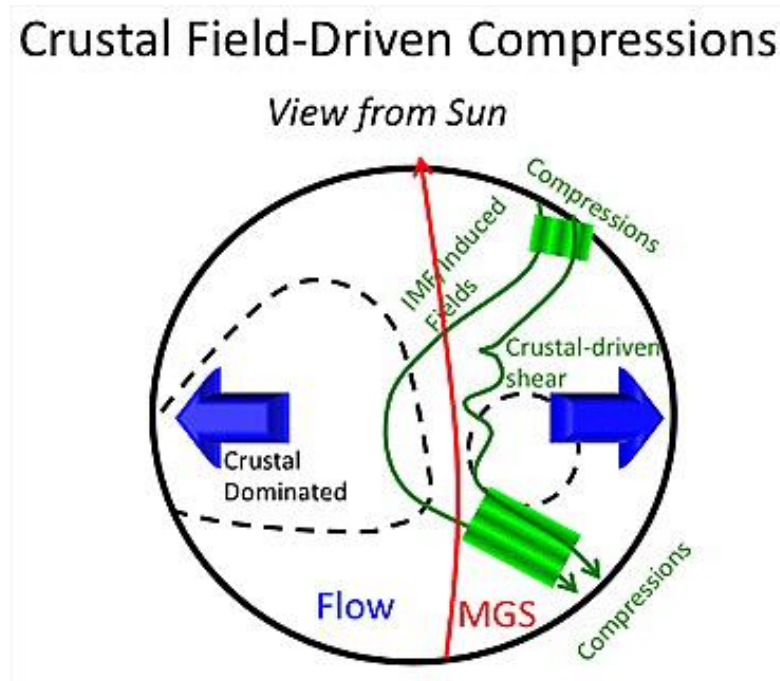
3.3. The Role of Ionospheric Instabilities

Shear-Driven Compressions



- 電離圏不安定性が電離圏の低高度で大きな動的な影響を発生し、高高度でそれが影響を及ぼす。[Gurnett et al., 2009]
- KHIも起こっているかもしれない。火星においてKHIが重要な役割を果たしていた場合、電離圏境界に近い高SZAの場所で起きているであろう。
- 準周期的/一時的な変化のプロセスは、プラズマフローの変調や、IMFを積み重ならせ、sawtooth振動を引き起こしているかもしれない。

3.4. The Role of Crustal Fields



- 残留磁場は、境界の位置を変動させることによって、惑星の周りのプラズマフローに影響を与える。磁場のドレイピングパターンも変える。
- 惑星空間磁場または誘導磁場を積み重ね、magenetosonic wavesを発生させる。
- IMFと残留磁場でリコネクションが起こる。
- 3.2と3.3においても残留磁場は重要な役割を果たし、sawtooth振動を生み出す。

4. Implications

- Sawtoothの起源はまだよくわからない。
- MGS、MEX、MAVENを使って惑星イオンの散逸や非熱的散逸のメカニズムを理解することが主な科学的ゴールである。
- リコネクションや電離圏振動がsawtooth振動を起こしているならば、それは太陽風プラズマと惑星プラズマの混合や惑星電離ガスの散逸に関連していることであろう。
- 惑星の回転や残留磁場、太陽風の変動、IMFのドレイプする向き、火星電離圏の季節変化などは火星-太陽風相互作用を生み出している。

