

Do Intrinsic Magnetic Fields Protect Planetary Atmospheres from Stellar Winds?

Lessons from Ion Measurements at Mars, Venus, and Earth

Robin Ramstad¹  · Stas Barabash²

¹ Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado, Boulder, USA

² Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden

Space Sci Rev (2021) 217:36

<https://doi.org/10.1007/s11214-021-00791-1>

Contents

- 3. Measurements of Ion Escape from Earth, Mars and Venus**
 - 3.4 Influence of SolarWind Conditions**
 - 3.5 Influence of Solar Extreme Ultraviolet (EUV) Radiation**

- 4. A Generalized Understanding of Ion Escape**
 - 4.1 Energy- and Supply-Limited Escape**
 - 4.2 SolarWind Coupling and Energization**
 - 4.3 Bound and Escaping Populations, Return Flows**

- 5. Discussion, Conclusions, and Implications**
 - 5.1 The Roles of Gravity, Energy Transfer, and Ion Supply**
 - 5.2 SolarWind Driven Ion Escape Is Not Necessary to Explain the Loss of Mars' Atmosphere**
 - 5.3 The Magnetosphere Does Not Protect the Earth's Atmosphere**
 - 5.4 Are Planetary Dynamos Necessary for the Long-Term Stability of Planetary Atmospheres?**

3.4 Influence of Solar Wind Conditions

3.4.1 地球

- 地球からの O^+ の外向きアウトフロー(と散逸率)には、
地磁気活動度指数(K_p, D_{st})との強い相関がある
(Yau et al., 1985, 1988 : DE-1衛星観測, Cully et al. 2003; Slapak et al. 2017 : あけぼの、Cluster衛星観測)
→低 K_p : 10^{24} s^{-1} 、高 K_p : 10^{26} s^{-1} (Cully et al. 2003; Slapak et al. 2017)
- 地磁気がどのようにイオン散逸に影響しているのかを理解するためには、
金星や火星の地球に類似した傾向と地球の依存性を比較する必要がある
→誘導磁気圏には地球の地磁気活動度指数と比較できるような指数が存在しない
→上流での各パラメータ($p_{\text{dyn}}, \text{EUV}, \text{IMF}$ など)とイオン散逸率の関係を惑星同士で
比較したい
- 地球では、Cully et al., 2003; Lennartsson and Collin, 2004; Schillings et al., 2019などで
上流パラメータに対するイオン散逸率依存性が報告されている
→太陽風の密度、速度、動圧、電場、運動エネルギーフラックス、
ポインティングフラックス、IMFのクロック角などと相関がある

3.4 Influence of Solar Wind Conditions

3.4.2 火星

- 初期の研究では、MEXの観測データ解析から、 p_{dyn} の増加に伴いイオン散逸率も増加することが示唆されていた
Lundin et al., 2008a; Nilsson et al., 2010; Edberg et al., 2010;
Wei et al., 2012; Nilsson et al., 2011
→しかし、EUVの変動に対する影響を分離することができていなかったため、それによる効果も含まれている可能性があった(Lundin et al., 2008a)
- Ramstad et al., 2015によって、太陽風パラメータとEUV強度によるイオン散逸率への影響を分離する解析が行われた
→太陽風密度の上昇に伴い、イオン散逸率は弱く減少する
太陽風速度の上昇にたいしては、はっきりとした相関が認められなかった
- MAVENの観測データ解析によって、 p_{dyn} の上昇に伴い、
流出する O^+ の平均フラックスが減少するという結果が報告された(Dubinin et al., 2017)
→後のRamstad et al., 2018による、MEXの観測データに基づいたイオン散逸率の
 p_{dyn} 依存性の研究でも、弱い負の相関が確認された

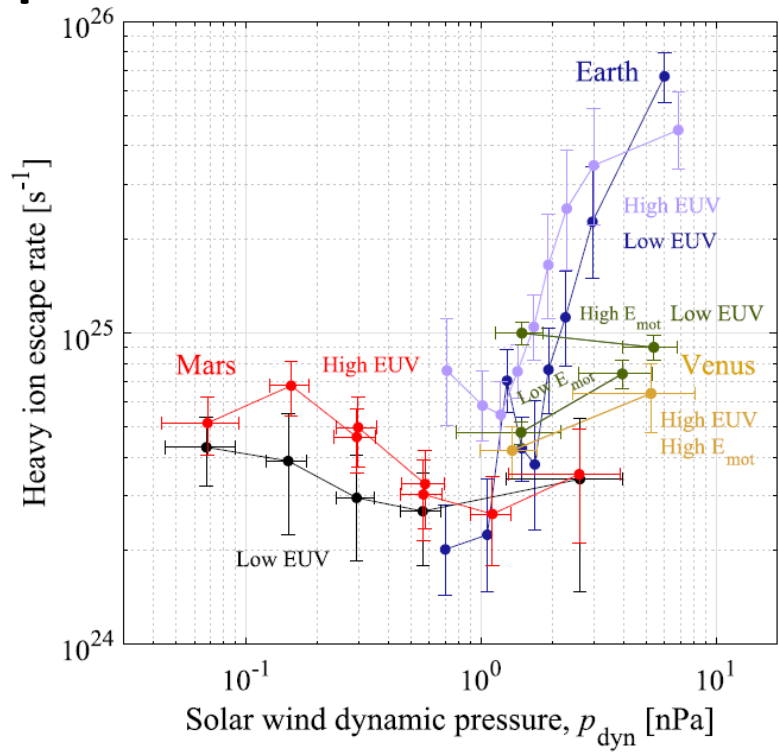
3.4 Influence of Solar Wind Conditions

3.4.3 金星

- 金星は火星と同様に誘導磁気圏を持つことから、イオン散逸率の上流パラメータ依存性も火星と傾向が似ていると予想されていた
- Venus Expressの観測データを静穏な期間と宇宙天気イベント(CME,CIR)の期間に分けて解析することで、 **O^+ の散逸率が宇宙天気イベントの時に約2倍になる**ことが確認されている(Edberg et al., 2010; Edberg et al., 2011)
- Masunaga et al., はVEX/IMAの観測データを解析し、 p_{dyn} , E_{mot} , EUV強度の大小で分けてイオン散逸率を検討した
→EUV強度が一定の場合、 **p_{dyn} の増加に伴いイオン散逸率が約50%増加する**
- Persson et al., 2020によって、VEXで観測された太陽風エネルギーフラックスの範囲内で **O^+ の散逸率がおよそ5倍になる**ことが報告された
→上流での太陽風エネルギーフラックスが金星のイオン散逸の直接的な駆動源であることを示唆している

3.4 Influence of Solar Wind Conditions

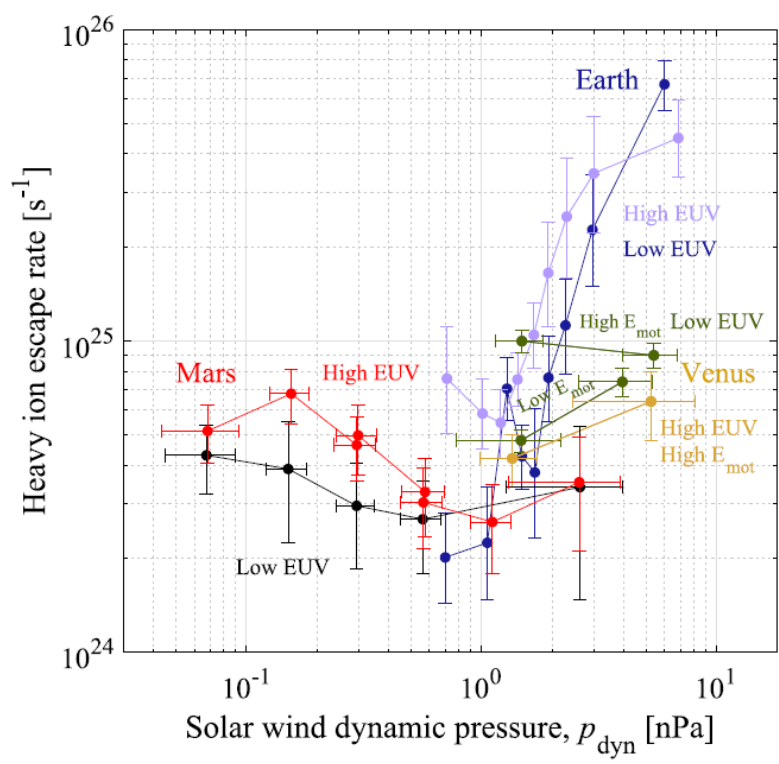
3.4.4 Comparative Rates and Trends



観測データ
金星：VEX(Masunaga et al., 2019)
火星：MEX(Ramstad et al., 2018)
地球：Cluster(Scilling et al., 2019)

- 先行研究の結果をまとめることで、イオン散逸率の太陽風パラメーターへの依存性を各惑星で比較することができる
 - 1 – 2 nPaの範囲ではどの惑星も同程度のイオン散逸率を持つ($10^{24} s^{-1}$ のオーダー)
 - 金星のイオン散逸率は p_{dyn} の増加に伴い弱く増加する
 - 火星のイオン散逸率は p_{dyn} の増加に伴い減少する(もしくは変化しない)
 - 地球のイオン散逸率は p_{dyn} の増加に伴い大きく増加する
 - 地球のイオン散逸率は火星、金星に比べて p_{dyn} に対する感度が高い

3.5 Influence of Solar Extreme Ultraviolet (EUV) Radiation



観測データ
金星：VEX(Masunaga et al., 2019)
火星：MEX(Ramstad et al., 2018)
地球：Cluster(Scilling et al., 2019)

- 各惑星のイオン散逸率がEUV放射強度に依存し、その傾向が異なることも読み取れる
 - 金星のイオン散逸率はEUV放射の増加に伴い減少する
 - 火星のイオン散逸率はEUV放射の増加に伴い増加する
 - 地球のイオン散逸率はEUV放射の増加に伴い増加する

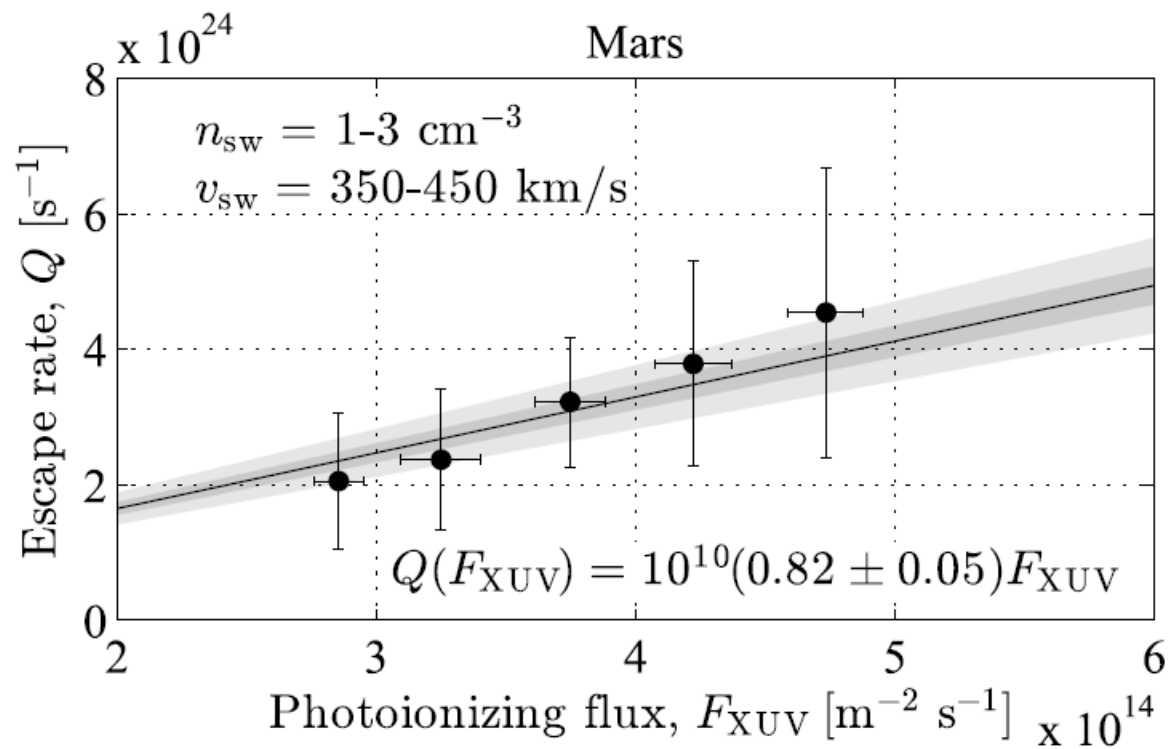
3.5 Influence of Solar Extreme Ultraviolet (EUV) Radiation

3.5.1 地球

- EUV強度のプロキシとなるF10.7とイオン散逸率に正の相関があることが初期の研究で報告された(他の上流パラメータへの制約はなかった)
(Cully et al., 2003; Yau et al., 1988)
- Cluster衛星のプラズママントル、高高度極冠での観測に基づいた研究で、他の上流パラメータを固定しながらイオンアウトフローのEUV依存性が検討された
(Schillings et al., 2019; schillings, 2019)
→はじめイオン散逸率のEUV強度依存性は認められなかったが(Schillings et al., 2019)
この結果が観測データのコンタミネーションによるものであることが判明し、
再解析の結果、**EUV強度の増加に伴いアウトフローも増加する**ことが確認された
(schillings, 2019)

3.5 Influence of Solar Extreme Ultraviolet (EUV) Radiation

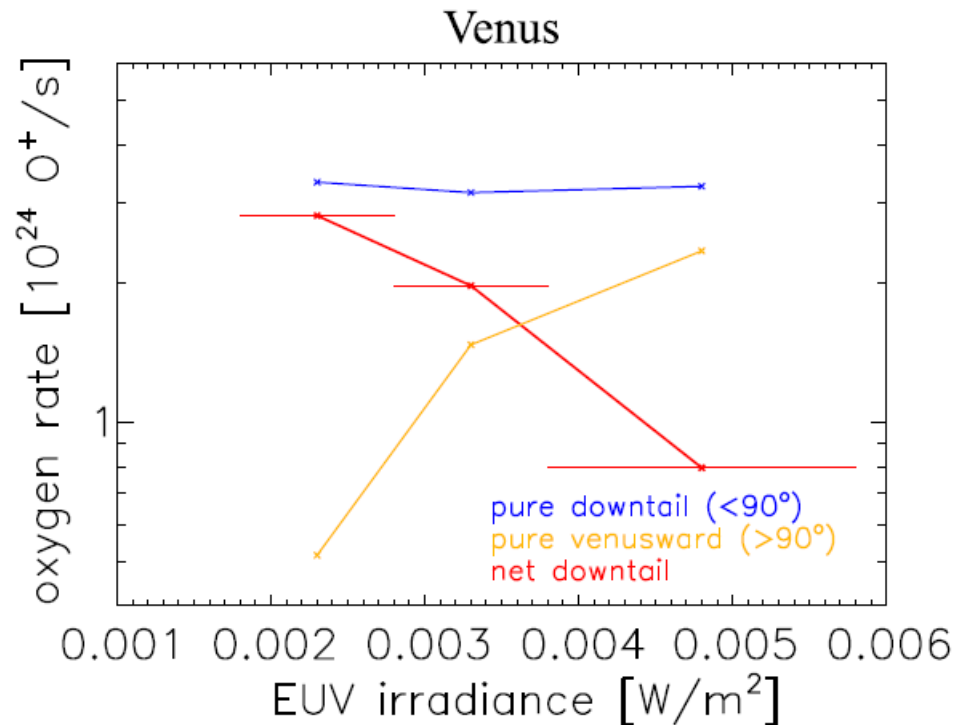
3.5.2 火星



- 火星では、**EUV強度の増加に伴ってイオン散逸率が上昇すること**が、MEX, MAVEN(, Phobos-2)の観測データの解析によって報告されている
Lundin et al., 2008a; Lundin et al., 2013; Ramstad et al., 2015; Ramstad et al., 2017b; Dubinin et al., 2017; Dong et al., 2017; Ramstad et al., 2018
- Ramstad et al., 2017bでは、イオンの散逸率は、EUV(XUV)のエネルギーフラックスよりも、フォトンフラックスの方により強い正の相関が見いだせることが報告されている

3.5 Influence of Solar Extreme Ultraviolet (EUV) Radiation

3.5.4 金星

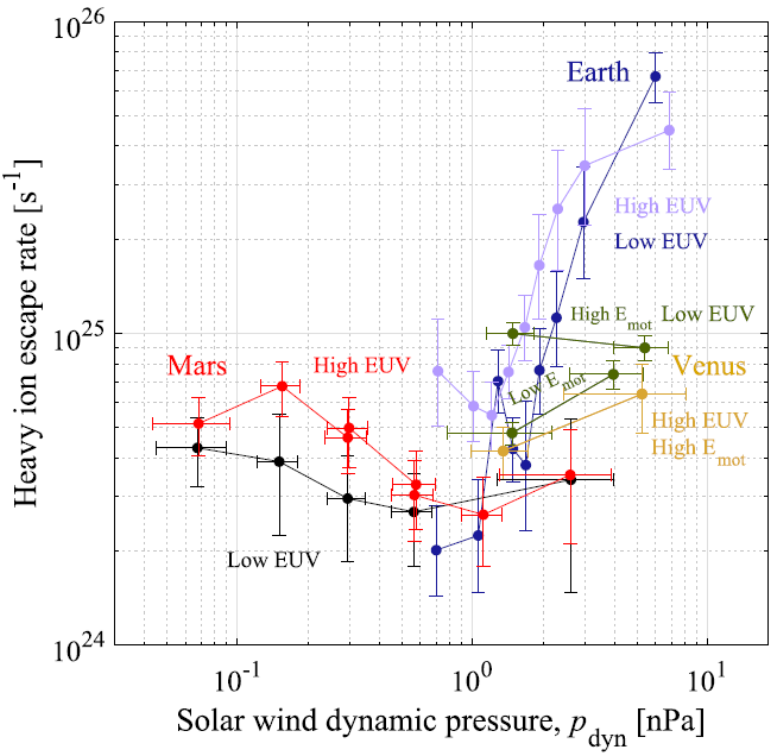


- 金星では、EUV強度の増加に伴ってイオン散逸率が減少することが、VEX ASPERA-4/IMAの観測データの解析によって報告されている (Kollmann et al., 2016)
 - EUVによって増加する誘導磁気圏尾部の金星方向のイオンのフラックスの増加が、正味の脱出率を減少させたため
- Persson et al., 2018; Masunaga et al., 2019によってもイオン散逸率のEUV依存性が調べられている
 - EUVの増加とともにイオン散逸率が減少する傾向が確認されている

4 A Generalized Understanding of Ion Escape

4 A Generalized Understanding of Ion Escape

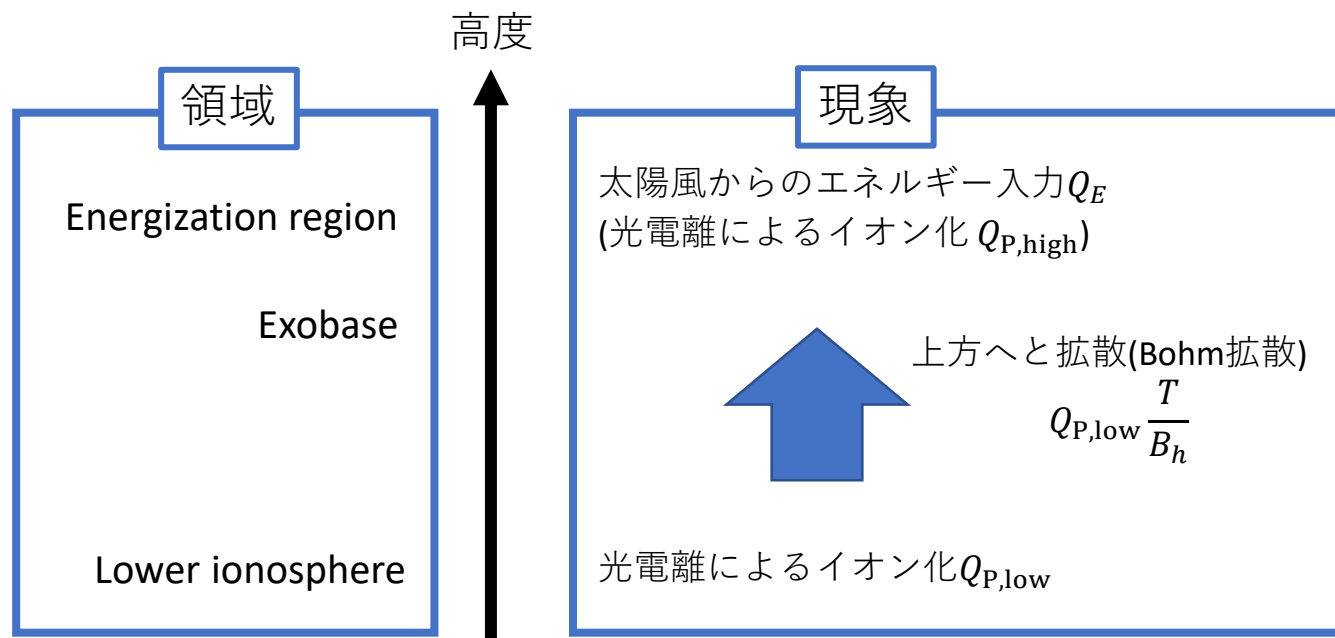
	EUV依存性	太陽風動圧依存性
火星	正	負
金星	負	正orなし
地球	正	正



似た性質を持つ惑星同士であってもイオン散逸率のEUV/ p_{dyn} 依存性は異なる

- イオン散逸率の傾向の違いを説明するためには、惑星の特性をより詳細に検討する必要がある

4.1 Energy- and Supply-Limited Escape

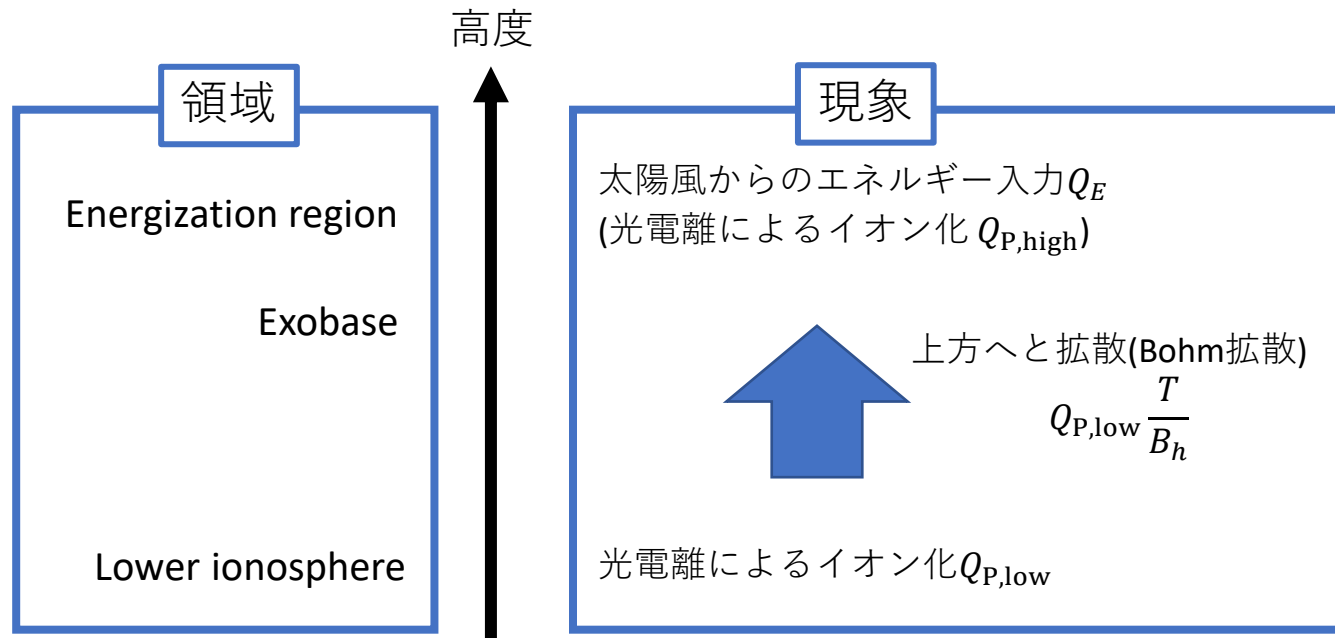


- 太陽系内でのイオンの生成メカニズムは、光電離によるものが支配的
- 火星、地球、金星では主に昼側電離圏低高度でイオン化が起きる
- 太陽風から輸送されるエネルギー量が最も大きい領域(Energization region)は、典型的にはExobaseより上方に存在

→ イオンの非熱的散逸のためには、種々のプロセスで中性粒子に戻る前に上方に拡散する必要がある

→ Energization regionへの全イオン供給量 Q_s と、Energization regionに供給されるエネルギーによって、流出することができるエネルギーを持つにいたるイオンの量 Q_E を見積もる

4.1 Energy- and Supply-Limited Escape

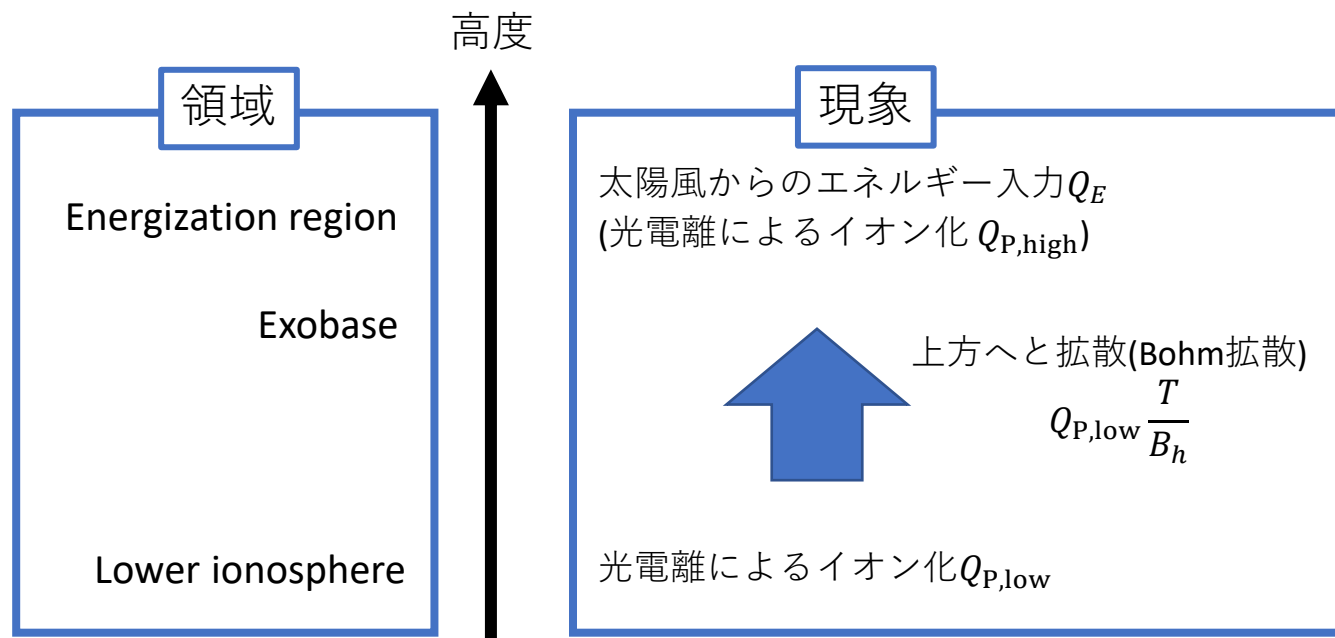


Energization regionへの全イオン供給量 Q_s :

$$Q_s \propto Q_{P,low} \frac{T}{B_h} + Q_{P,high}$$

- $Q_{P,low}$: 電離圏でのイオン生成率
- T : 熱圏での温度
- B_h : 磁場の水平成分
- $Q_{P,high}$: Energization regionでのイオン生成率

4.1 Energy- and Supply-Limited Escape



Energization regionに供給されるエネルギーによって、流出することができるエネルギーを持つにいたるイオンの量 Q_E :

$$Q_E = f_{esc} k_c \frac{P_{SW}}{E_{esc}}$$

- P_{SW} : 相互作用領域全体で積分した太陽風のエネルギー輸送率
- k_c : energization regionとのカップリング係数
- f_{esc} : イオンに受け渡されたエネルギーのうち、実際に散逸に寄与する量の割合
- E_{esc} : イオンの散逸に必要なエネルギー

4.1 Energy- and Supply-Limited Escape

イオン散逸プロセス

- E_{esc} を超えるエネルギーを持ったイオンがすべて宇宙空間に散逸するわけではない
→イオンがどの程度効率よく宇宙空間への散逸プロセスを辿るのかは、
様々な条件によって左右される複雑な問題（イオンが光電離する場所、
エネルギー輸送のタイプ(加熱or加速)、系のサイズ、磁場のトポロジー、
上流の太陽風・EUV・IMFの状態など）

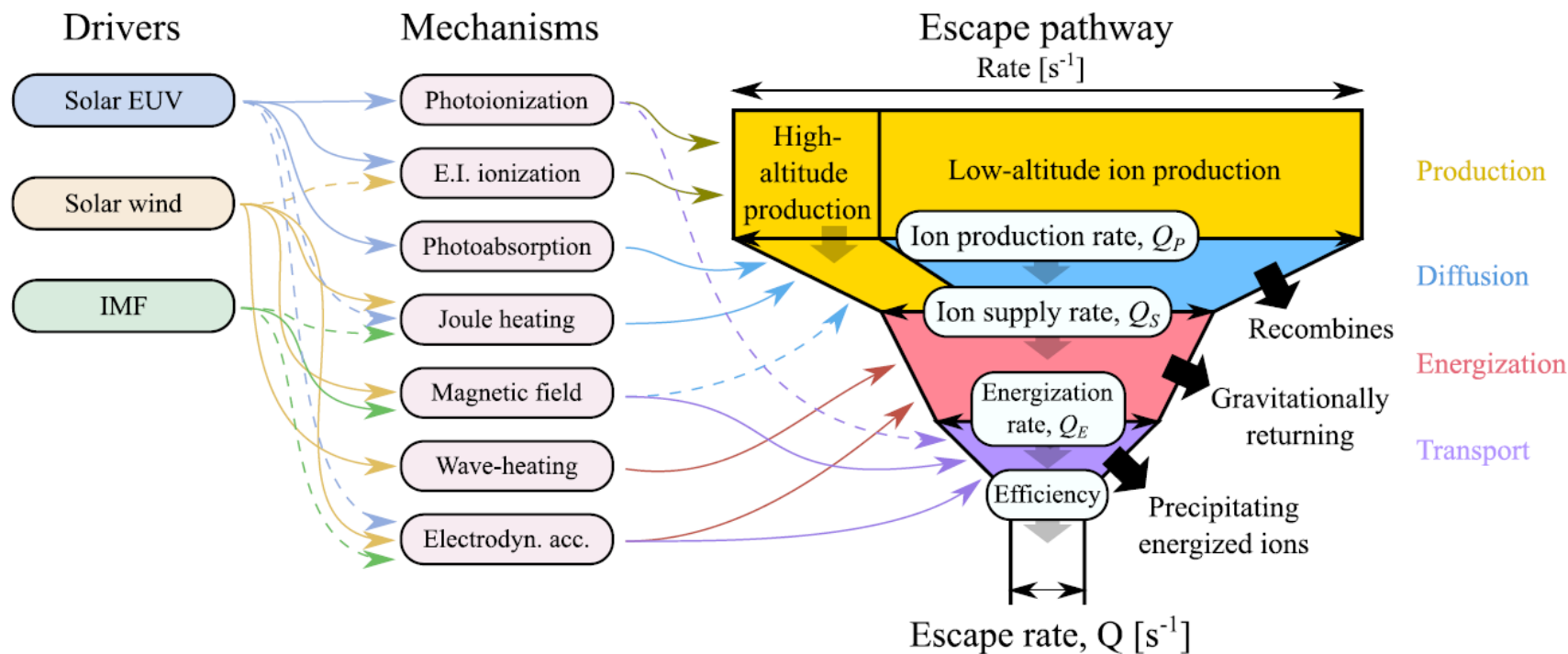
例：

- 閉じた磁力線上の磁化されたイオンは、十分なエネルギーを得て消磁するか、
プラズモイドとしてまとめて放出されない限り、散逸できない
- 低高度で生成された開いた磁力線上のイオンでも、
位相空間における損失領域が特に狭く、効率が低くなることがある
- 火星や金星では、外気圏のコロナが太陽風領域にまで広がっており、ここで生成
されたイオンは太陽風電場($-\mathbf{v} \times \mathbf{B}$)によってピックアップされる。この散逸過程
で粒子は10 keVのオーダーを持ち、ほとんどが効率よく散逸する

→ Q_s 、 Q_E のバランスなどによって系のイオン散逸が“Supply-limited”か“Energy-limited”
なのかが決定され、
上記の様々な条件によって定まる脱出効率によって最終的なイオン散逸率が決まる

4.1 Energy- and Supply-Limited Escape

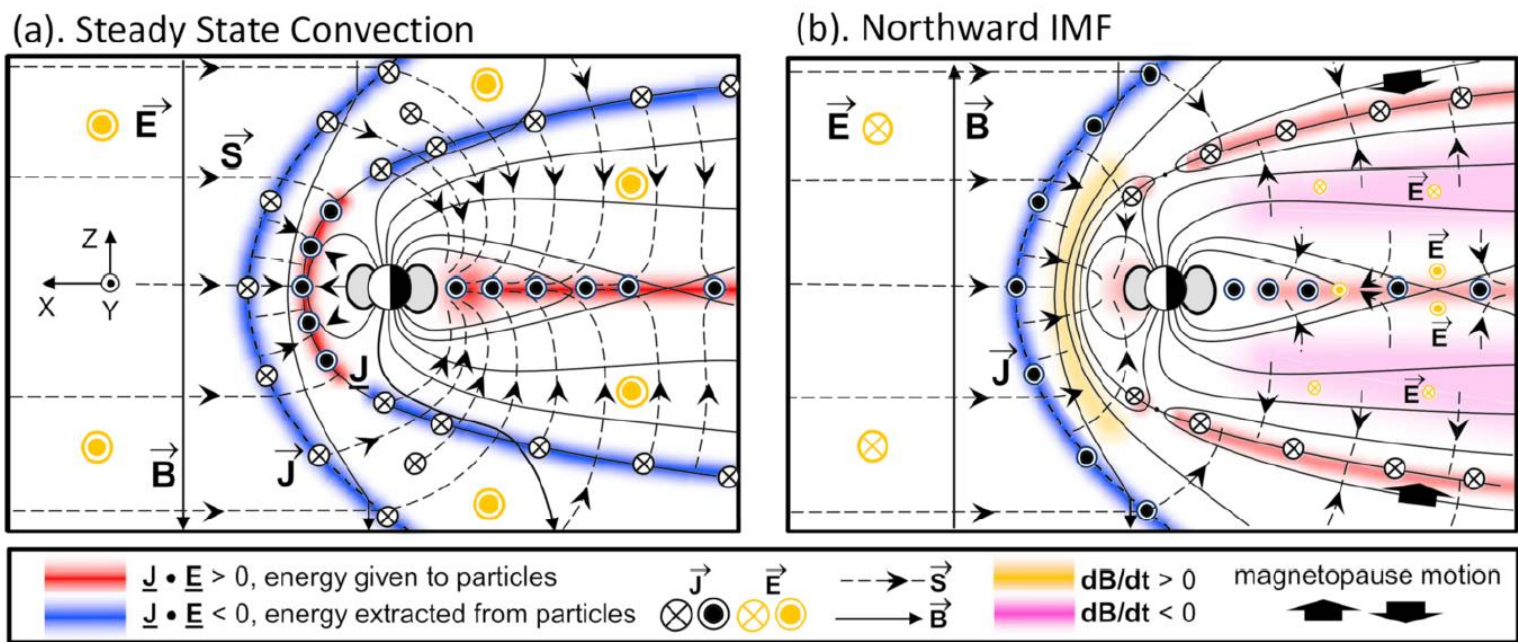
“Energy limited”な系でのイオン散逸プロセス



- $Q_S > Q_E$ を満たし、“Energy limited”な系である
- Q_S, Q_E および脱出効率には上流でのドライバー(EUV,太陽風,IMF)が影響している
→その影響を考慮する必要がある

4.2 Solar Wind Coupling and Energization

太陽風-惑星相互作用によるエネルギー輸送(固有磁気圏)



太陽風のポインティングフラックス：

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0}$$

誘導電流 $\mathbf{J}$ と太陽風電場 $\mathbf{E}$ の相互作用：

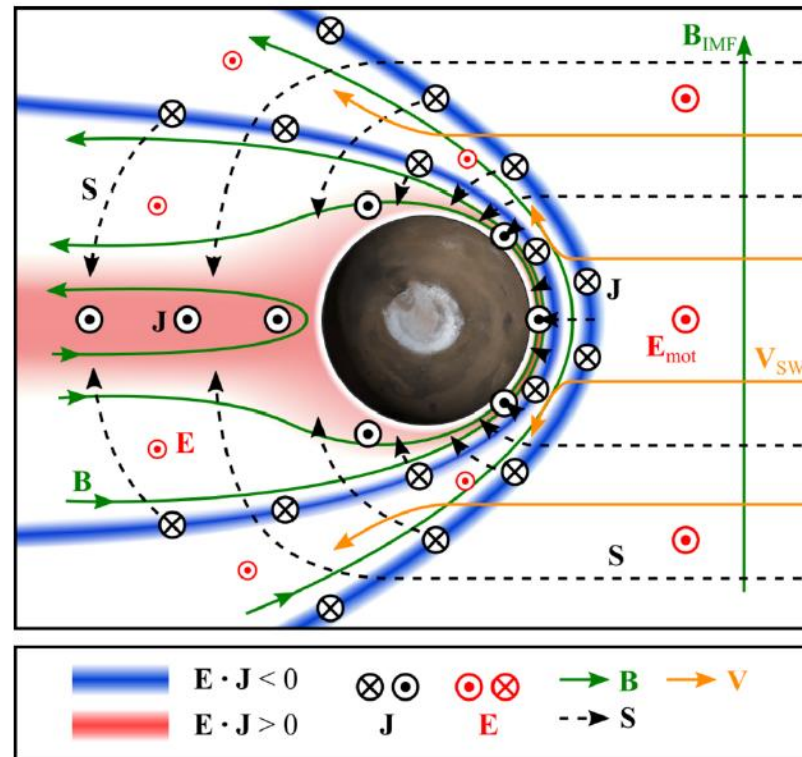
$$P = \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}$$

$P < 0$ となる場合にプラズマから電磁場にエネルギー輸送が起きる

惑星固有の磁気圏においては、磁気圏界面のどの領域でも P の符号がIMFのクロック角に依存し、それがマグネトシースでの E_{mot} の方向を制御する

4.2 Solar Wind Coupling and Energization

太陽風-惑星相互作用によるエネルギー輸送(誘導磁気圏)



誘導磁気圏では、ドレープしたIMFの向きに合わせて電流系が変化するので、常に誘導磁気圏内の電流 J が E_{mot} と反対方向に流れる (Ramstad et al.2020)
→IMBとBSの領域では常に $P < 0$

4.2 Solar Wind Coupling and Energization

太陽風から地球磁気圏へのエネルギー伝達

- Vasyliunas結合関数(Vasyliunas et al., 1982)を簡略化したもので見積もることができる：

$$P_{\text{in}} = \rho_{\text{SW}} v_{\text{SW}}^3 A_{\text{eff}} (p_{\text{dyn}}, M_A) k(M_A, \theta_{\text{CA}})$$

- A_{eff} ： v_{SW} に垂直な平面への、磁気圏界面の正射影の面積? ($P_{\text{SW}} = 0.5 \rho_{\text{SW}} v_{\text{SW}}^3 A_{\text{eff}}$ が成り立つ)
- k ：カップリング係数
- θ_{CA} ：クロック角
- M_A ：惑星の磁気モーメント

さらに、スケール因子 a を用いることで以下のように書き直せる：

$$P_{\text{in}} = B_T^{2a} \rho_{\text{SW}}^{2/3-a} v_{\text{SW}}^{7/3-2a} G(\theta_{\text{CA}}) M_A^{2/3} \mu_0^{1/3-a}$$

- B_T ： v_{SW} に垂直な平面でのIMFの強度
- G ：クロック角に対するカップリング依存度

- スケール因子 a は先行研究によって推定されており、最近の結果は
 $a = 0.3$ (Finch and Lockwood 2007) から
 $a = 0.5$ (Tenfjord and Østgaard 2013) の範囲におさまる
- MHDシミュレーションによって得られた

$a = 0.43$, $G(\theta_{\text{CA}}) = \sin^{2.70} \left(\frac{\theta}{2} \right) + 0.25$ という結果 (Wang et al., 2014) と
 O^+ 散逸に強い相関があることが主張されている (Schilling et al., 2019)

- $a, G(\theta)$ を仮定すれば上流での太陽風、IMF観測によって $P_{\text{in}}, k (= P_{\text{in}}/P_{\text{SW}})$ を推定できる

4.2 Solar Wind Coupling and Energization

太陽風と誘導磁気圏のカップリング

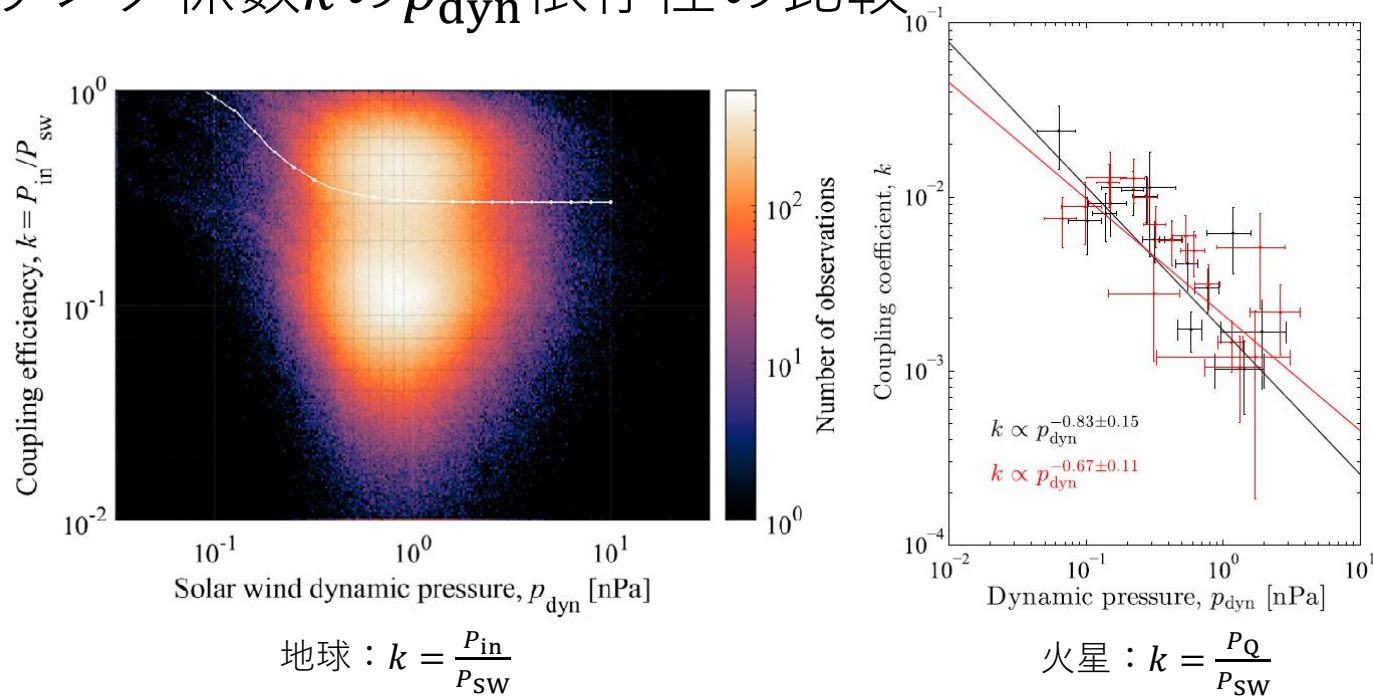
誘導磁気圏に対しても、同様にカップリング係数 k が観測値を用いて推定されている (Ramstad et al., 2017b) :

$$k = \frac{P_Q}{P_{SW}}$$

- P_Q : 散逸率 Q での、(散逸している)イオンの総エネルギー
- $P_{SW} = 0.5\rho_{SW}v_{SW}^3A_{\text{eff}}$

4.2 Solar Wind Coupling and Energization

カップリング係数 k の p_{dyn} 依存性の比較

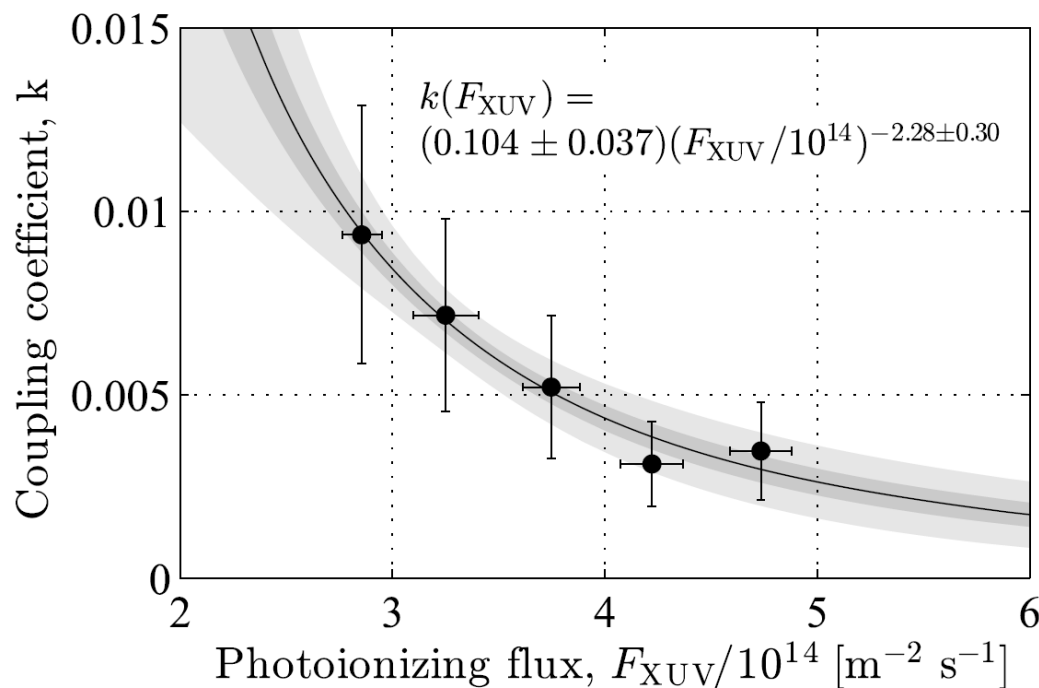


地球： p_{dyn} がある程度大きいと k は一定に
火星： p_{dyn} が大きくなると k は小さくなる

どちらの惑星も p_{dyn} の増加に伴い、(誘導)磁気圏に輸送されるエネルギーは大きくなるが
火星の方がより p_{dyn} の変化に応答し辛い

4.2 Solar Wind Coupling and Energization

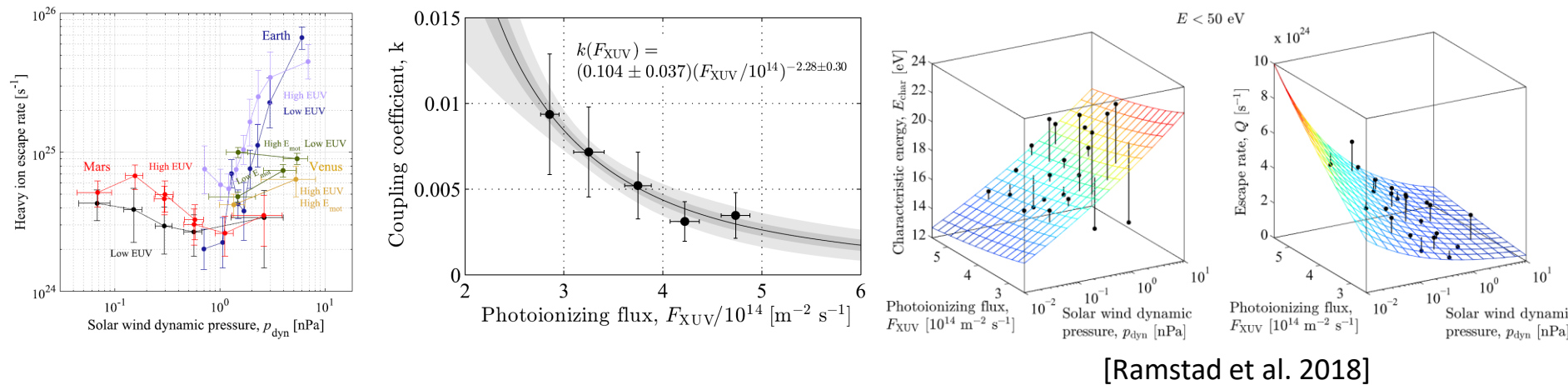
k に対するEUVの影響



- EUVフラックスの変動が太陽風-(誘導)磁気圏カップリングに影響し、結果としてイオン散逸率に影響を与える
 - 火星では、EUVフラックスの増加は、誘導磁気圏内部で太陽風と脱出するイオンのカップリングを減少させる(Ramstad et al., 2017b)
 - (火星の地殻磁場の影響が強ければ、金星の誘導磁気圏のような本当に純粋な誘導系と比較して大きな違いがある可能性もある)

4.3 Bound and Escaping Populations, Return Flows

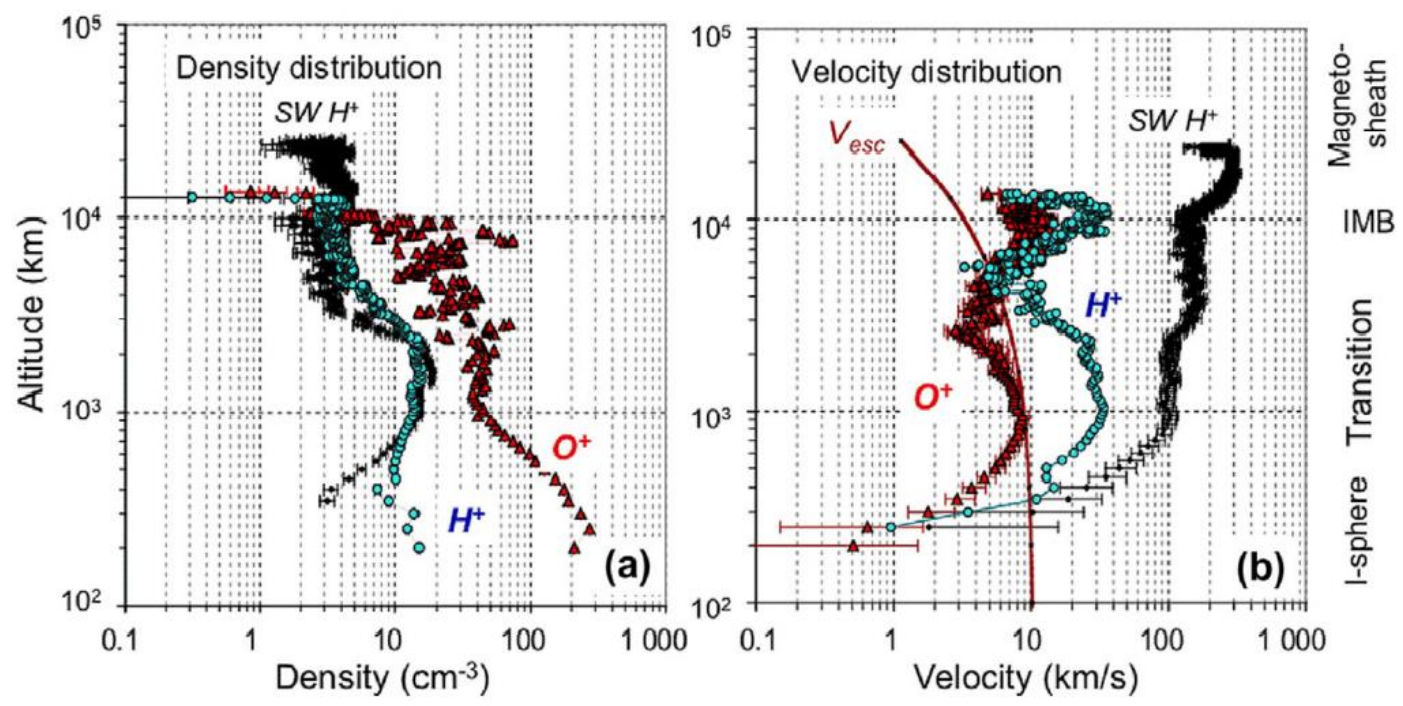
火星での k に対するEUVの影響



火星

- EUV/XUVフラックスの増加→ k の減少、イオン散逸率の増加
- k の減少←主に加速されたイオン(> 50 eV)の減少によると考えられる
- 散逸率の増加←冷たいイオンの散逸量の増加によると考えられる
- EUVフラックスの増加
 - 散逸する冷たいイオンの特性エネルギー(分布のピーク)が低下(Ramstad et al. 2018)
 - EUVがさらに増加し、特性エネルギーが脱出エネルギーを下回ると、イオンは重力を振り切れず引き戻されうる
 - 重力によって引き戻されるイオンはほとんど観測されない
 - 静穏なEUVフラックスの範囲では、冷たいイオンは十分に脱出エネルギーを超えていることを示唆

4.3 Bound and Escaping Populations, Return Flows



金星

- 火星に比べてイオンの脱出エネルギーが高く、誘導磁気圏尾部では高度数千kmまで $V_{\text{esc}} > V_{\text{O}^+}$ を満たす (Lundin et al., 2011)
- 火星での k の性質が一般的な誘導磁気圏のものを代表していると仮定すれば、金星の O^+ 流出率は、Kollmann et al. (2016)、Masunaga et al. (2019) が報告した結果と矛盾しない (弱い正の p_{dyn} 依存性、負の EUV 依存性が期待できる)

5 Discussion, Conclusions, and Implications

5.1 The Roles of Gravity, Energy Transfer, and Ion Supply

火星：supply-limited

- 重力が弱く、必要な脱出エネルギーも小さい
→ 太陽風から受け取るエネルギー量 Q_E に関わらず、イオンは脱出速度を維持できる (彗星とのアナロジー)
- 観測的な証拠はほとんどなかったが、波動加熱に駆動されるイオン散逸モデルとの関連で、この概念(supply-limited)が以前から示唆されていた (Ergun et al. 2006; Andersson et al. 2010)

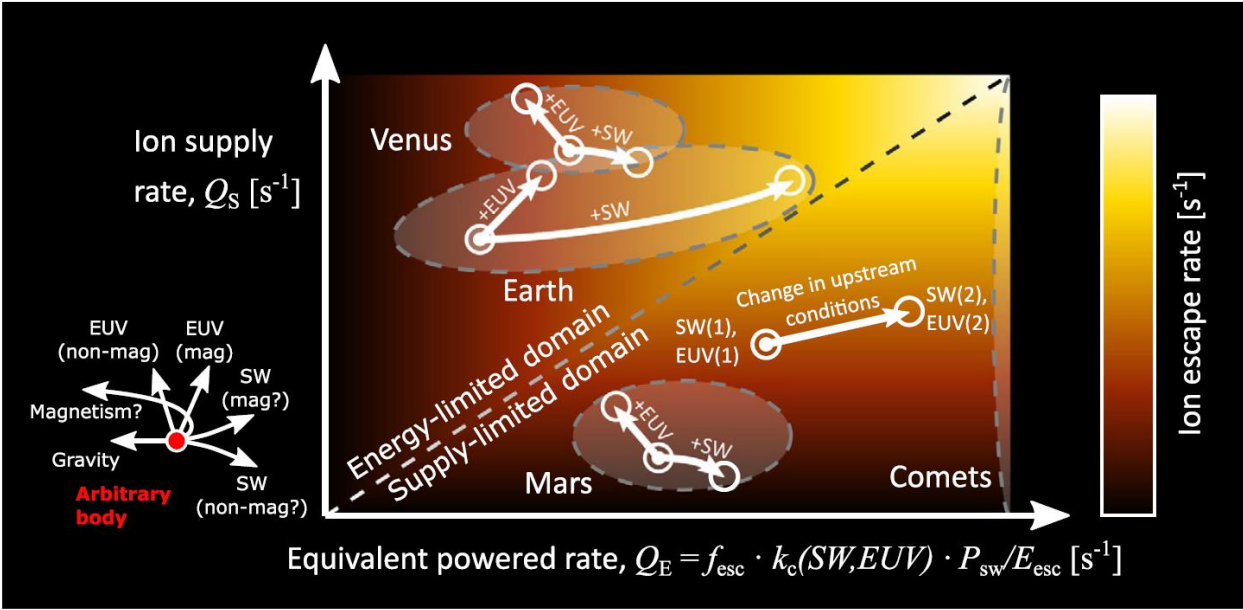
地球：energy-limited

- 内向きポインティングフラックス($\rightarrow Q_E$)が増加すると、それに応じてイオン散逸率が増加することが観測されている (Strangeway et al. 2005)

金星：energy-limited

- 地球に比べて太陽風変動に対する感度が低いのは、カップリング係数 k が p_{dyn} の増加に応じて減少するため?(火星での観測からの推測)

5.1 The Roles of Gravity, Energy Transfer, and Ion Supply



EUVフラックスの増加：

- より多くのイオンを光電離によって生成し、熱圏の温度を上げ、高エネルギー光電子を生成して両極性電場を作ることでイオンの上昇を促進し、これらすべての要因が Q_S を増加させる
- 地球では k が増加する (Ohtani et al., 2014) ので、 Q_E も増加する
- 火星(非磁化惑星)では k が減少するので、結果的に Q_E は減少する

太陽風動圧の上昇：

- 系に多くのエネルギーを与え、脱出エネルギーに達するほどのエネルギーを受け取るイオンの数 (Q_E) を増加させる
- 地球では、その過程で系への内向きポインティングフラックスが上層大気でのジュール加熱を促進し、温度を上昇させてイオン拡散率 ($\rightarrow Q_S$) を上昇させる可能性がある
- 非磁性惑星の場合、太陽風の動圧と釣り合うために必要な磁気圧が増加し、電離層プラズマの圧力を上回ると電離層を磁化してしまい (e.g., Dubinin et al., 2008)、式(10)から Q_S が減少する可能性がある

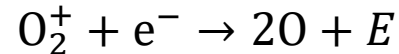
5.2 Solar Wind Driven Ion Escape Is Not Necessary to Explain the Loss of Mars' Atmosphere

火星の大気は薄く乾燥しており、全球規模の固有磁場も持っていないので、太陽風との相互作用が初期の大気を散逸させた大きな原因であると考えられてきた

➤ しかし、太陽風ではない駆動源も散逸に大きく寄与することが主張されている：

- 火星の重力は、水素の熱的散逸や、酸素の発熱反応による散逸が起こりうるほど小さい

- 太陽のEUV放射に駆動される解離性再結合反応：



によって生じる酸素原子はおよそ5 eVまでの運動エネルギーを持つ(Fox and Hac 2009; Futaana et al., 2011)

- 解離性再結合によって生まれる酸素原子の散逸率は 10^{25} から $10^{26}[\text{s}^{-1}]$ の範囲であると観測から見積もられている(Lillis et al., 2017; Rahmati et al., 2018)
- 35億年まで外挿して現在までの正味の散逸量を推定すると、最大1 barの大気が散逸していることを示唆(Lillis et al., 2017)

➤ 初期火星の大気散逸の主要な駆動源が太陽風-火星相互作用ではないシナリオも考える

5.2 Solar Wind Driven Ion Escape Is Not Necessary to Explain the Loss of Mars' Atmosphere

太陽風-火星相互作用によるイオン散逸の寄与は40億年前から正味で0.01 bar未満と見積もられている(Ramstad et al., 2018)

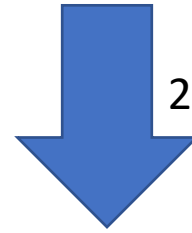
- 火星の現在の状態をそのまま過去に外挿している
- 37億年前頃まで火星のダイナモが活発であったという主張(Mittelholz et al. 2020)が有効であれば、再考の余地がある

初期火星における固有磁場の存在と重力の弱さは、中性粒子の脱出にも二次的な影響を与えた可能性がある

- 磁気圏が広がっていると、太陽風のピックアップを防ぐことができるため、少なくともある程度のスパッタリングも阻害する

5.3 The Magnetosphere Does Not Protect the Earth's Atmosphere

地球の持つ性質(磁気圏)は大気散逸を防いでいるのか？



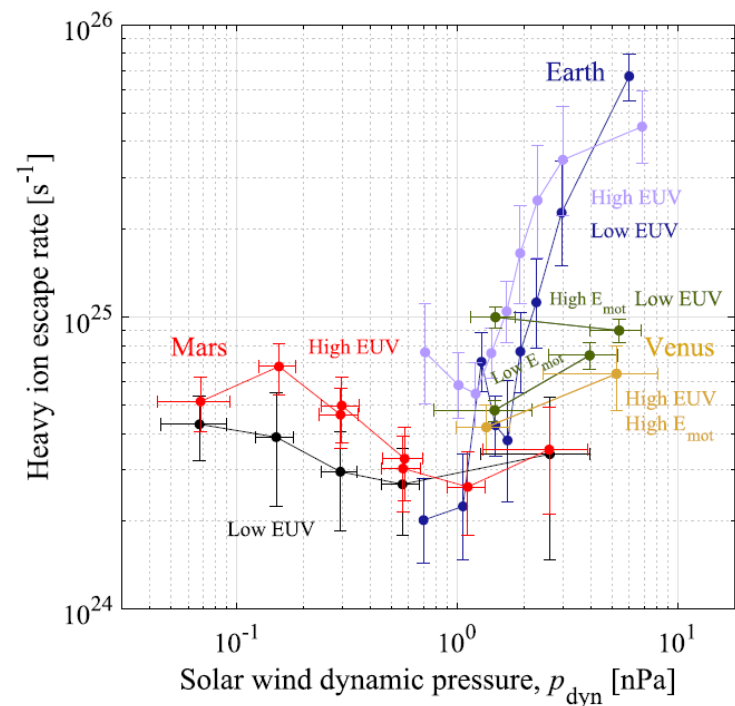
2つの問題に分割できる

1. その性質によって地球からの大気散逸率は低下するか?(太陽風条件は一定)
2. その性質は外部要因 (太陽風,EUV,IMF) の変動に対する惑星の感度を低下させるか?

イオンの脱出エネルギーがおおよそ等しい金星と比較することによって知見が得られる

5.3 The Magnetosphere Does Not Protect the Earth's Atmosphere

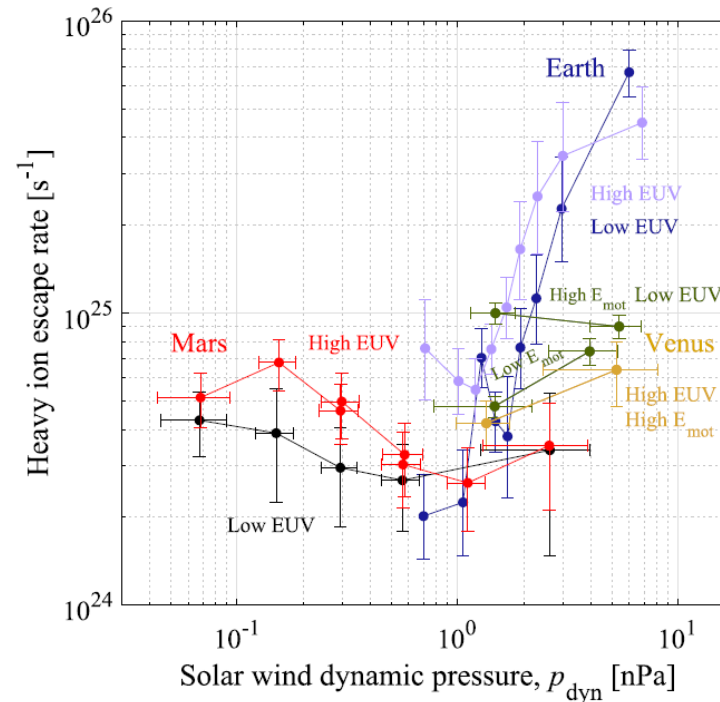
1. その性質によって地球からの大気散逸率は低下するか?(太陽風条件は一定)



- p_{dyn} を固定し、金星でのLow EUVが地球のHigh EUVに対応すると仮定
→地球の磁気双極子はイオン散逸率に影響しない/増加させる
($p_{\text{dyn}} \sim 1$ nPaの場合は金星の E_{mot} の状態による)
→地球と金星がどちらも“energy-limited”であれば、地球の双極子磁場が
太陽風から地球のイオンへのエネルギー輸送を促進しているというシナリオが考えられる
(金星の誘導磁気圏よりも地球の磁気圏の太陽風に対する断面積がはるかに大きいため?)

5.3 The Magnetosphere Does Not Protect the Earth's Atmosphere

2. その性質は外部要因 (太陽風, EUV, IMF) の変動に対する惑星の感度を低下させるか?



- p_{dyn} , EUV双方の変動に対して地球のイオン散逸率は金星に比べて強い正の相関を持つ
→ 初期太陽系のEUV放射強度が現在よりも強かったこと
(Ribas et al., 2005; Tu et al., 2015; Wood 2006)を加味すると、磁気双極子は進化の過程で地球の大気を守ってこなかったことを示唆している

5.4 Are Planetary Dynamos Necessary for the Long-Term Stability of Planetary Atmospheres?

- 惑星のダイナモが大気散逸を防いでいるかどうかは、惑星の磁気モーメントと上流パラメータの相対的な関係によって決まる
- 様々な磁気モーメントを持つ惑星と太陽風との相互作用を、モデルを用いて検証した研究がある

Cnossen et al.,2012

- MHDモデルを用いて、5種類の磁気モーメント、3種類のEUVフラックス強度の組み合わせで太陽風-地球磁気圏相互作用をシミュレーション
- 弱い磁気モーメント強度で電離圏カップリングが強くなりピークを持ち、磁気モーメント強度が強くなるとカップリングが弱まる結果を得た

	Low EUV	High EUV
ピークでの 磁気モーメント(Am ²)	4×10^{22}	6×10^{22}

現在の地球の磁気モーメント： 8×10^{22} Am²

5.4 Are Planetary Dynamos Necessary for the Long-Term Stability of Planetary Atmospheres?

Sakai et al., 2018

火星-太陽風相互作用のMHDモデルに弱い双極子モーメント($4 \times 10^{19} \text{ Am}^2$)を導入
→ O_2^+ フラックスの上昇によって大気散逸率が25%増加した

Egan et al., 2019

ハイブリッドモデル(イオン：運動粒子、電子：磁化流体)を用いた

火星でのシミュレーション

火星が完全に非磁化な状態から $6 \times 10^{19} \text{ Am}^2$ の双極子モーメントをもつ状態までを計算

→大気散逸率は $2 \times 10^{19} \text{ Am}^2$ にピークを持ち、さらに強い双極子磁場では散逸率が低下する

これらのシミュレーション結果は観測と整合性を持つ

→固有磁気圏は大気散逸を防ぐ惑星のシールドとして必ずしも機能せず、
上流パラメーターや惑星の重力に対して十分に強い磁場がなければ
磁気双極子の存在によってイオン散逸が促進されると考えられる

Backup

5.1.4 Contamination of the data - Cross-talk

Ion outflow is usually observed in the cusp, plasma mantle and polar cap regions, however the cusp and plasma mantle often contain magnetosheath origin plasma (see Chapter 2, Fig. 2.5). Therefore, in the cusp and plasma mantle CODIF O^+ data might be contaminated by intense proton (H^+) flux from the magnetosheath. This contamination is produced by chance start-stop coincidences in the TOF section. These chance coincidences may cause significant background counts (false O^+ counts). This phenomena is called cross-talk. To avoid such data, Nilsson et al. (2006) used a method based on the $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift. The $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift should be the dominant perpendicular drift and should be the same for O^+ and H^+ because it is nor mass neither charge dependent. When H^+ counts are interpreted as O^+ counts at some given energy channel, O^+ velocity moments are underestimated compared to H^+ , whereas the counts are overestimated. This can be explained with the perpendicular component of the kinetic energy