

Atmospheric Escape Processes and Planetary Atmospheric Evolution Section 2.3 – 2.6

Gronoff et al., 2020

Journal of Geophysical Research: Space Physics, 125(8), e2019JA027639.24

2021/07/19

東京大学地球惑星科学専攻 M1

西岡 知輝

- **2.3**

pickup, sputtering, charge exchangeによる大気散逸過程のレビュー

- **2.4**

ionospheric outflowによる大気散逸過程のレビュー

- **2.5**

他のイオンの流出プロセスのレビュー

- **2.6**

磁気圏にトラップされたイオンが返ってくる影響

2.3. Ion Loss

Ion pickup

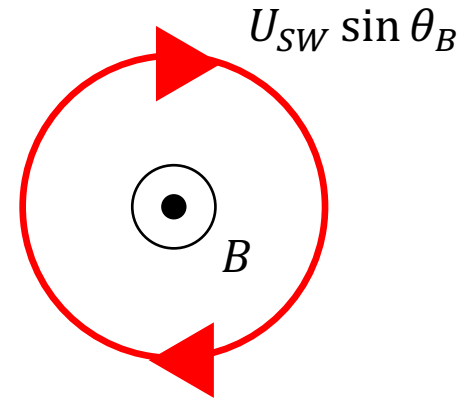
- 中世種がイオン化するとピックアップされる

$$r_c = \frac{mv}{qB} \sim R_p$$

$$E_{max} = 2mU_{SW}^2 \sin^2 \theta_B$$

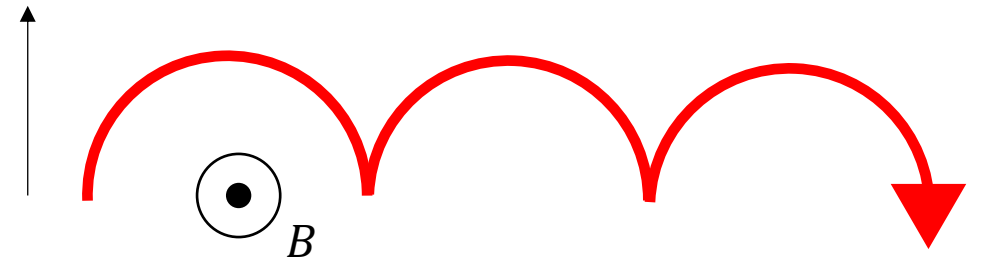
- ピックアップイオンが大気に再突入すると、スパッタリングが発生

太陽風静止系



惑星静止系

$$\mathbf{E} = -\mathbf{U}_{SW} \times \mathbf{B}_{SW}$$



2.3. Ion Loss

Ion pickup

- イオン生成率 (Rahmati+, 2015, 2017)

$$P_I = n_O \left(\int \sigma_{PI}(\lambda) \Phi_{EUV}(\lambda) d\lambda + \sigma_{CX} n_{SW} U_{SW} \right)$$

ここで σ_{CX} は太陽風と酸素間の平均電荷交換断面積、

$\sigma_{PI}(\lambda)$ は光イオン化断面積

- ピックアップイオンが従う方程式 (Hartle+, 2011)

$$\mathbf{E}_{SW} = -\mathbf{U}_{SW} \times \mathbf{B}_{SW}$$

$$\mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} + \frac{e}{m} (\mathbf{E}_{SW} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}_{SW}) \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = P_I(\mathbf{v})$$

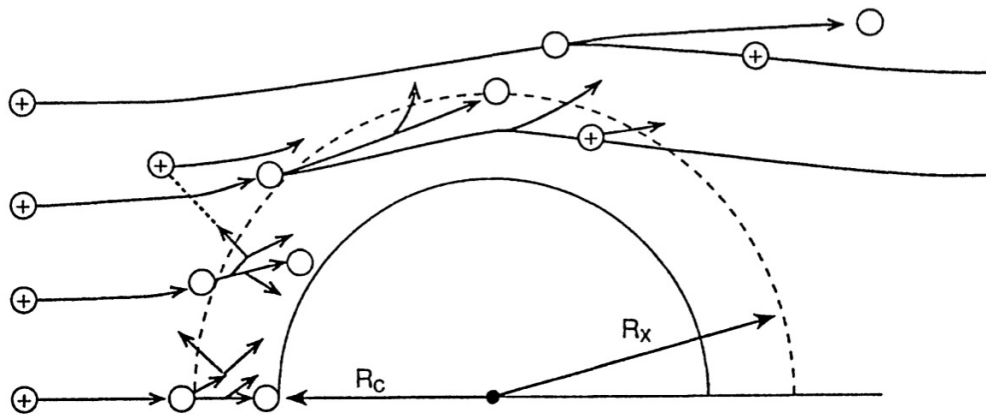
$$\Phi(\mathbf{x}) = \int v f d\mathbf{v}$$

2.3. Ion Loss

Sputtering

- 中性粒子が太陽風中の高速なイオンとの衝突によりエネルギーを得て散逸
- スパッタリング効率 γ

$$\gamma = \frac{\text{散逸する粒子数}}{\text{入射する粒子数}}$$



Sputteringの様子 (Johnson+, 1994)

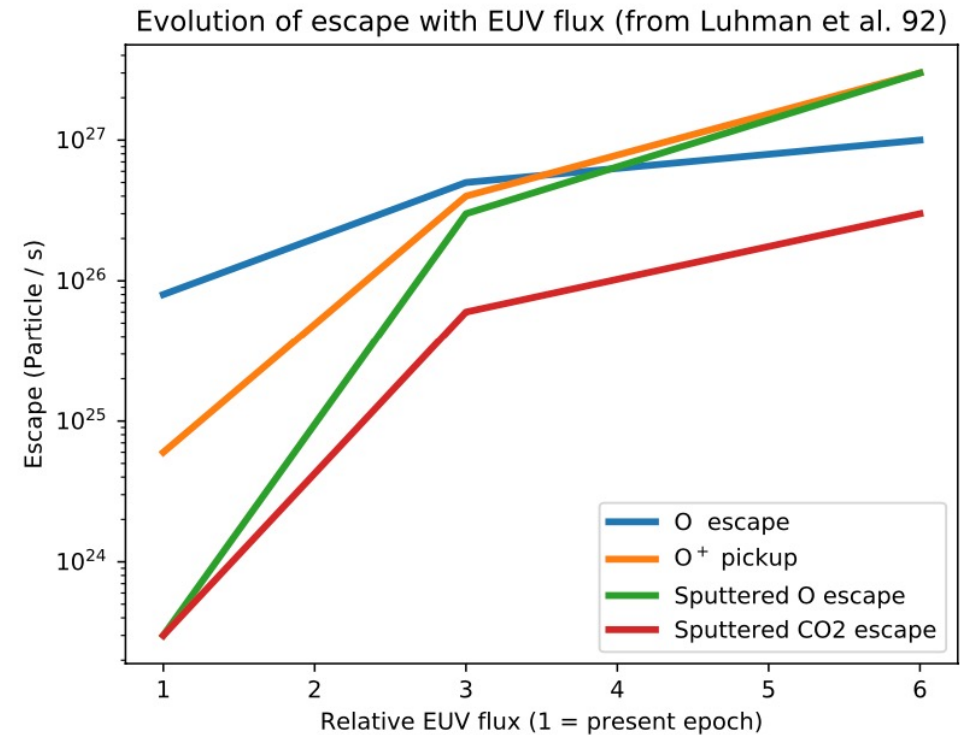


Figure 3. 各大気散逸プロセスのEUV依存性

2.3. Ion Loss

Sputtering

- スパッタリング方程式 (Johnson+, 1994)

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} \approx 2\pi R_{\text{exo}}^2 \langle \Phi_a Y_j \rangle$$
$$Y(\theta, E) \approx \frac{\alpha \beta S_n(E)}{2U_{es} \sigma_d(\overline{E}_{es}) \cos^p \theta}$$

ここで、 S_n はmomentum transfer stopping cross section、 σ_d は弾性散乱断面積、 θ は入射角、 U_{es} は外圏底での重力エネルギー、 $\overline{E}_{es}$ は散逸粒子の平均エネルギー、 α 、 β 、 p は衝突粒子に依存する定数

- 有効スパッタリング効率 Y_{eff} (Johnson+, 1994)

$$Y_{eff} = Y / (1 - p_i(Y_a - 1))$$

ここで、 p_i は戻ってくる粒子、 Y_a はその粒子のスパッタリング効率

2.3. Ion Loss

Charge Exchange

- 磁気トラップされたイオンが電荷交換によりENAとなり散逸する
- イオンがMaxwell分布をしており、電荷交換により同程度のエネルギーを持ったENAが散逸すると仮定 (Yung+, 1989)

$$\alpha_i(R) = B_{CX} \left[1 + \frac{v_{esc}^2}{u_j(R)^2} \right] e^{-\frac{v_{esc}^2}{u_j(R)^2}}$$
$$\phi = \int_{R_{exo}}^{R_{pp}} \left(\frac{R}{R_{exo}} \right)^2 \alpha_i(R) \sum_j k_{i+-j} [i^+][j] dR$$

→ 電荷交換フラックスは外気圏の温度とともに増加するが
これは観測と不整合

2.3. Ion Loss

Charge Exchange

- 電荷交換効率の温度依存性を考慮したモデル (Shizgal+, 1982)

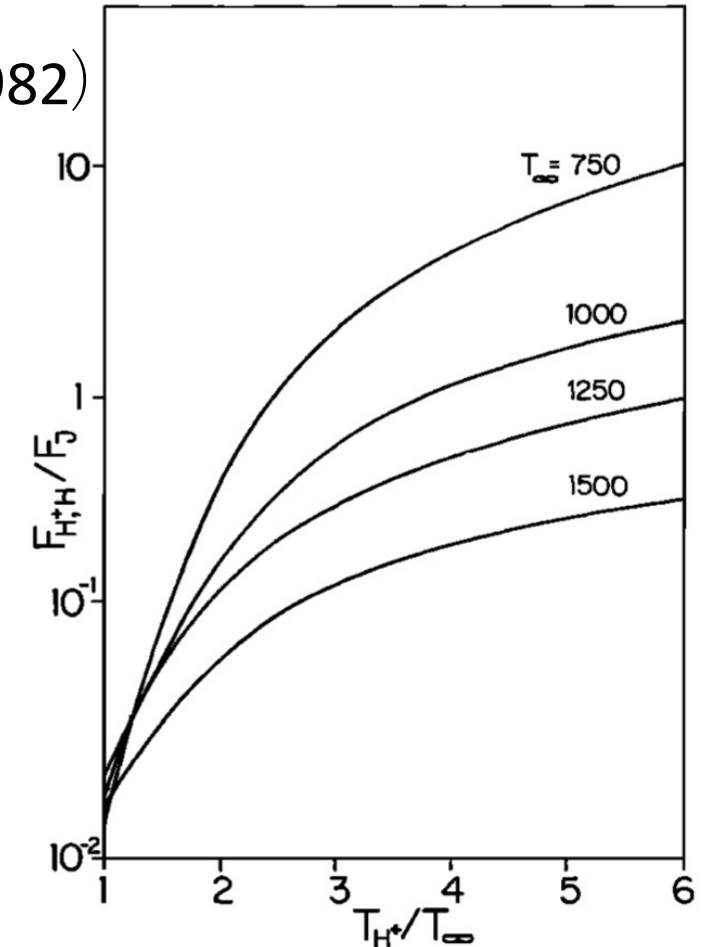
$$\lambda_{CX} = \frac{m_H v_{esc}^2}{2kT_{ion}}$$

$$\hat{n} = \frac{\sigma_{H^+,A}}{\sigma_{H,O}} \left[\frac{\bar{n}_H + \bar{n}_A}{\bar{n}_O} \right] \frac{\Gamma(a)}{1+a}$$

$$\tau_{CX} = \frac{T_{exo}}{T_{H^+}} - 1$$

$$\Phi_{CX}(\text{escape}) = \hat{n} \sqrt{\frac{2kT_{exo}}{\pi m_H}} \frac{e^{-\lambda_{CX}}}{\tau_{CX}} \\ \times [(1 + \tau_{CX}) - \sqrt{1 + \tau_{CX}} e^{-\lambda_{CX} \tau_{CX}}]$$

ここで、A は中性大気種 O と H、 $a = \frac{m_A}{m_O}$

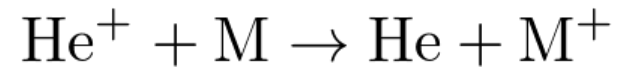
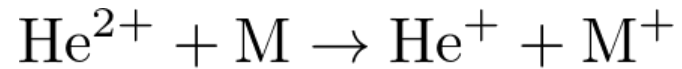


Jeans Fluxに対するCharge Exchange Flux
(Shizgal+, 1982)

2.3. Ion Loss

Charge Exchange

- 彗星と太陽風との相互作用は電荷交換反応を引き起こす



- 太陽風中のHeavy ionsは電荷交換の際にX線を放射する
- 彗星は様々な環境における電荷交換プロセスを研究できる

2.3. Ion Loss

Charge Exchange

- 惑星大気に降り注ぐ粒子が電荷交換を通してENAを生成する（電子捕獲）

ENA は電子剥ぎ取りによりイオン化し、E 層上空では ENA とイオンが共存する

- 大気中の (H^+, H) beam のエネルギーロス (Galand+, 1997, 1998)

$$\mu \frac{\partial I_X}{\partial \tau} = -I_X + \frac{\mathcal{P}_X + \mathcal{Q}_X + \mathcal{R}_{X^+ \rightarrow X}^{CX}}{\sum_k \sigma_{k, \text{elas}}(E) n_k(z)}$$
$$\mu \frac{\partial I_{X^+}}{\partial \tau} = -I_{X^+} + \frac{\mathcal{P}_{X^+} + \mathcal{Q}_{X^+} + \mathcal{R}_{X \rightarrow X^+}^{CX}}{\sum_k \sigma_{k, \text{elas}}(E) n_k(z)}$$

ここで強度 I 、運動量輸送 $\mathcal{P}$ 、電荷輸送 $\mathcal{R}^{CX}$ 、局所生成 $\mathcal{Q}$ はそれぞれ (τ, E, μ) に依存する

2.3. Ion Loss

Key parameters

- 太陽風、イオン化断面積、散乱断面積 (pickup/sputtering)
- 粒子降下、太陽風、大気組成、大気温度 (charge exchange)

Questions

- 太陽風密度、速度、向きがどの程度影響するか
- 誘導磁場は電荷交換にどのように影響するか

Observables

- 組成の変化
- 同位体分別 (Rayleigh distillation)

2.4. Ionospheric outflow

- 電離層プラズマが磁気圏のダイナミクスの影響を受けて惑星間空間に散逸したり磁気圏にトラップされる
- 文脈により名称が異なる

ion outflow, polar wind, bulk ion escape, polar outflow, ...

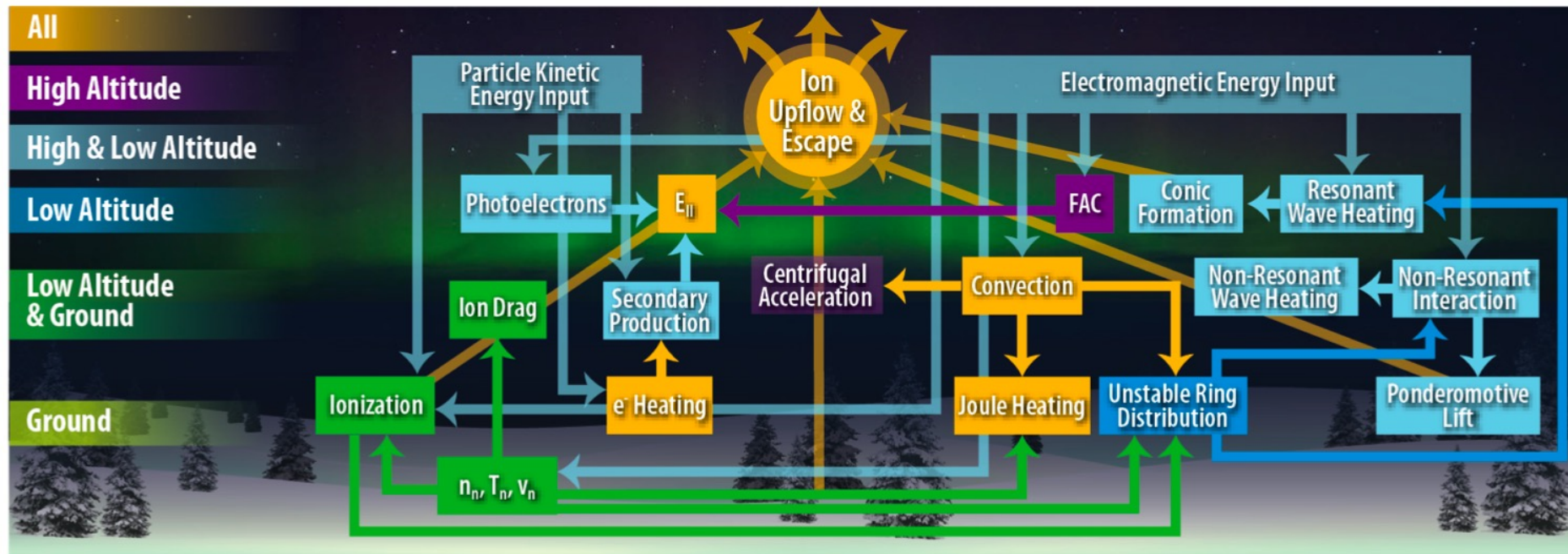


Figure 4. ion outflowを引き起こすプロセス

2.4. Ionospheric outflow

- 粒子によるエネルギー供給

Suprathermal electrons が両極性電場を強化

- 電磁力によるエネルギー供給

波動粒子相互作用による横方向の加熱、
アルヴェーン波によるポンデロモーティブ力、
 $E_{\parallel}$ を駆動する沿磁力線電流、
上昇気流を駆動する低高度の摩擦加熱、
電磁場の対流や曲率の変化、
磁場と惑星の共回転による力、
...

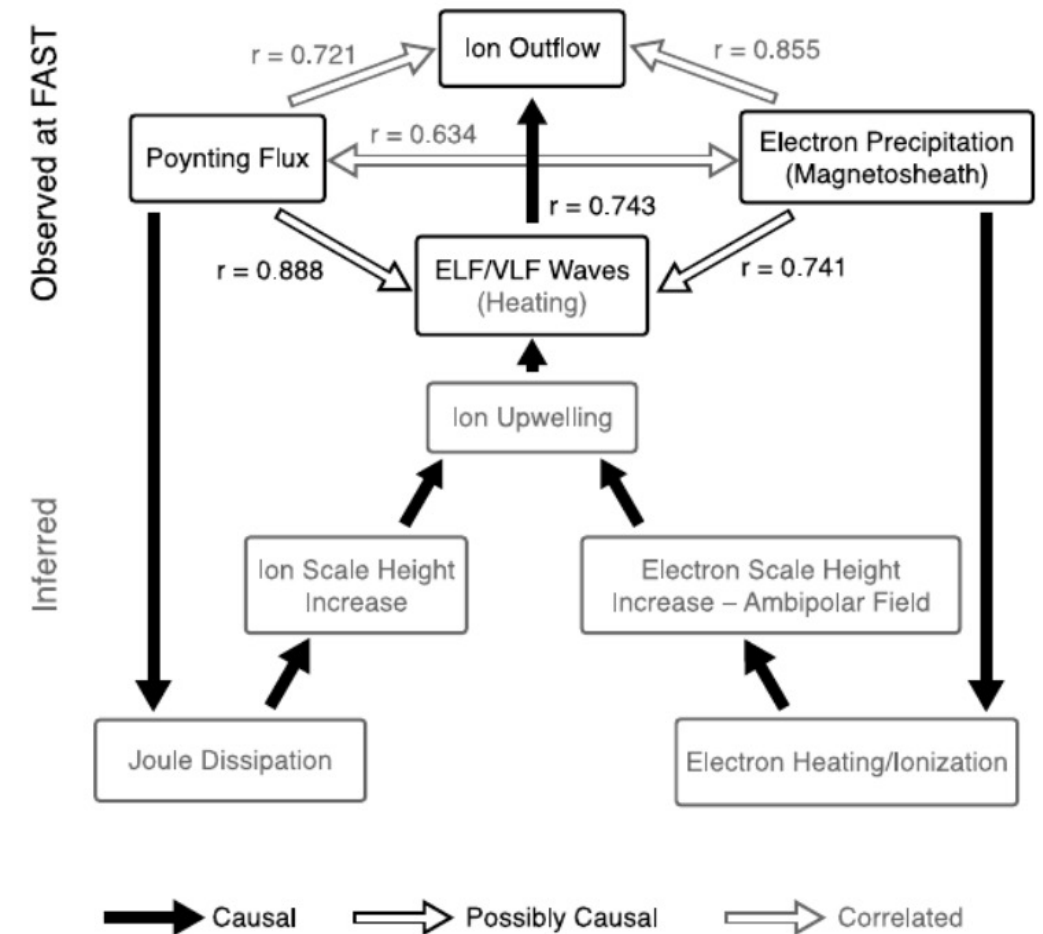


Figure 5. ion outflowの相関関係と因果関係

2.4. Ionospheric outflow

Suprathermal Electron Effect

- XUV による光電離または中性大気での衝突電離で生じる。
以下の二つの主要なプロセスを通してイオン流出に影響を与える
 - 両極性電場の形成
 - 電子温度を上昇させる電子間のクーロン衝突

2.4. Ionospheric outflow

Electrodynamic Energy Input

- ポンデロモーティブ力 (Lundin+, 2006)

$$F_{\parallel} = -\frac{mc^2}{2B^2} \left[\frac{E^2}{B} \frac{\partial B}{\partial z} - \frac{1}{2} \frac{\partial E^2}{\partial z} \pm \frac{1}{c_A} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \nu \right) E^2 \right]$$

ここで m は質量、 c_A はアルヴェーン速度、 ν は衝突周波数である

2.4. Ionospheric outflow

Electrodynamic Energy Input

- 波動加熱 (Crew+, 1985, 1990)

$$\frac{1}{v_{\perp}} \frac{\partial}{\partial v_{\perp}} \left(v_{\perp} D_{\perp} \frac{\partial f}{\partial v_{\perp}} \right)$$

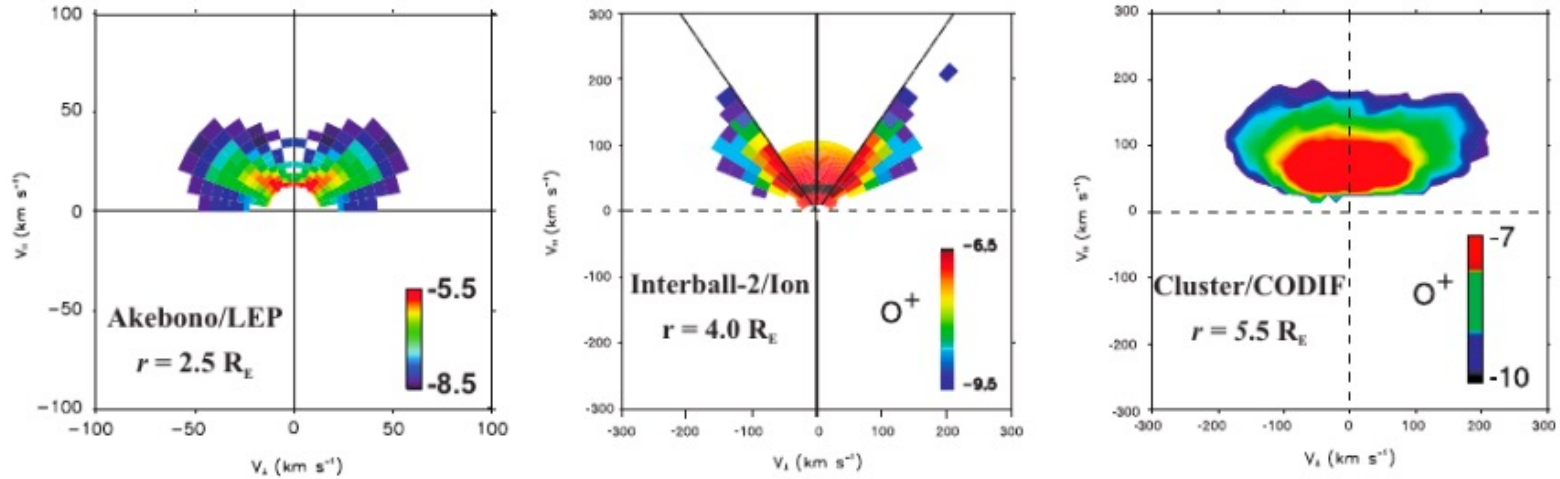


Figure 6. イオンの分布関数の高度依存性

$$D_{\perp} = (\pi q^2 / 2m^2) |E_L|^2 (\Omega(l))$$

ここで $|E_L|^2$ はL波のスペクトル密度、
 $\Omega(l)$ は磁場に沿った位置 l におけるサイクロトロン周波数

2.4. Ionospheric outflow

- 沿磁力線電流 (Glocer, 2016)

恒星風と惑星磁場との相互作用によって生じる

$$n_e u_e + n_{se} u_{se} - \sum_i n_i u_i = -\frac{j}{en}$$

- ジュール熱 (Burgers, 1969)

中性大気中を引きずられるイオンの運動によって引き起こされる摩擦加熱

$$\sum_j \frac{\rho_i \nu_{ij}}{m_i + m_j} [m_j (u_i - u_j)^2]$$

2.4. Ionospheric outflow

Escape Equations

- 流体モデル (Gombosi & Nagy, 1989)

$$\frac{\partial}{\partial t}(A\rho_i) + \frac{\partial}{\partial r}(A\rho_i u_i) = AS_i$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(A\rho_i u_i) + \frac{\partial}{\partial r}(A\rho_i u_i^2) + A\frac{\partial p_i}{\partial r} = A\rho_i \left(\frac{e}{m_i} E_{\parallel} - g \right) + A\frac{\delta M_i}{\delta t} + Au_i S_i$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} A\rho_i u_i^2 + \frac{1}{\gamma_i - 1} A p_i \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{2} A\rho_i u_i^3 + \frac{\gamma_i}{\gamma_i - 1} A u_i p_i \right) \\ &= A\rho_i u_i \left(\frac{e}{m_i} E_{\parallel} - g \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(A\kappa_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + A\frac{\delta E_i}{\delta t} + Au_i \frac{\delta M_i}{\delta t} + \frac{1}{2} A u_i^2 S_i \end{aligned}$$

$$E_{\parallel} = -\frac{1}{en_e} \left[\frac{\partial}{\partial r}(p_e + \rho_e u_e^2) + \frac{A'}{A} \rho_e u_e^2 \right] + \frac{1}{en_e} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sum_i \frac{m_e}{m_i} \left[(u_e - u_i) S_i - \frac{\delta M_i}{\delta t} \right] + \frac{\delta M_e}{\delta t} \right)$$

2.4. Ionospheric outflow

Escape Equations

- 運動論モデル (Khazanov+, 1997)

$$\mu \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial t} + \mu v \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial r} - \frac{1 - \mu^2}{2B} \frac{\partial B}{\partial r} v \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial \mu} = - \left(\frac{e}{m_e} E_{\parallel} - g \right) \left(\mu \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial v} + \frac{1 - \mu^2}{v} \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial \mu} \right)$$

2.4. Ionospheric outflow

Questions

- 固有磁場のない場合にどう影響するか
- 二重荷電イオンが散逸にどの程度影響するか

Observables

- Polar windの直接観測
- 同位体分別 (Gravitational distillation)

2.5. Other ion escape

- 他のイオン流出としては“bulk” ion escape (Halekas+, 2016) など

Fluid Processes: Kelvin-Helmholtz and Other Instabilities

- レイリー・テイラー不安定性、イオン-イオン不安定性、電子-イオン不安定性、…

Pickup Processes: The Ion Plume

- 太陽風の運動電場による加速で生じる極付近で見られるイオンの流れ
- 火星の場合、 O^+ の散逸の約23%を占める

2.5. Other ion escape

Ambipolar Fluxes/Outflow Anomalies/Snowplow

- 電離層からプラズマ圏へ冷たいイオンが両極性電場により輸送される
- プラズマ雲が $E \times B$ ドリフトにより散逸する

Plasmaspheric Ion Losses/Substorm Losses/Plasmoids/Flux Rope

- 磁気リコネクションが起こることで磁気圏の一部が惑星にリンクされないプラズモイドを形成し宇宙空間に散逸する
- 電離層に存在するフラックスロープによって下部電離圏から上部電離圏へとプラズマが輸送される

Questions

- プロセスごとのイオン損失の量が恒星活動とともにどう進化するか

2.6. Ion Return and Net Escape Rates

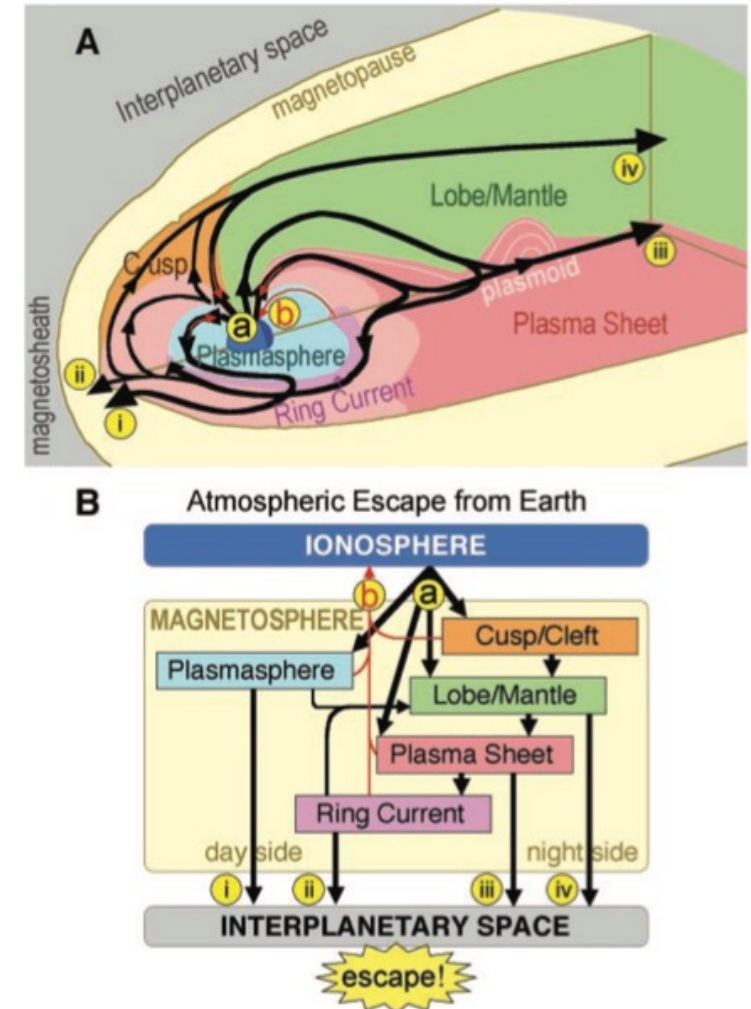
- 電離層流出したプラズマはその大部分が磁気圏にトラップされる
- 太陽活動が少ない期間中では電離層流出の1/10 が宇宙空間に失われる (Seki+, 2001)



- 磁気圏ローブ・マントルを通して散逸する粒子は惑星間空間に損失される確率が高い (Slapak+, 2017)
- DMSP衛星で測定された沈降フラックスはかなり小さい (Newell+, 2010)

→電離層から流出したイオンの多くが失われる？

Fig. 1. Atmospheric escape from Earth is illustrated schematically in two ways. (A) Three-dimensional cutaway of Earth's magnetosphere. (B) A flow chart of plasma for each plasma regime in the magnetosphere. In (A) and (B), colors represent different plasma regimes, black arrows display escape routes of terrestrial particles, and red arrows indicate returning particles as precipitation into the ionosphere. Escape rate can be obtained by $a - b$ or by $i + ii + iii + iv$. Route iv was discovered by GEOTAIL observations.



地球の電離層からの散逸経路
(Seki+, 2001)

References

- Rahmati, A., Larson, D. E., Cravens, T. E., Lillis, R. J., Dunn, P. A., Halekas, J. S., ... & Jakosky, B. M. (2015). MAVEN insights into oxygen pickup ions at Mars. *Geophysical Research Letters*, 42(21), 8870-8876.
- Rahmati, A., Larson, D. E., Cravens, T. E., Lillis, R. J., Halekas, J. S., McFadden, J. P., ... & Jakosky, B. M. (2017). MAVEN measured oxygen and hydrogen pickup ions: Probing the Martian exosphere and neutral escape. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(3), 3689-3706.
- Hartle, R. E., Sarantos, M., & Sittler Jr, E. C. (2011). Pickup ion distributions from three-dimensional neutral exospheres. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116(A10).
- Johnson, R. E. (1994). Plasma-induced sputtering of an atmosphere. *Space Science Reviews*, 69(3), 215-253.
- Luhmann, J. G., Johnson, R. E., & Zhang, M. H. G. (1992). Evolutionary impact of sputtering of the Martian atmosphere by O⁺ pickup ions. *Geophysical research letters*, 19(21), 2151-2154.
- Yung, Y. L., Wen, J. S., Moses, J. I., Landry, B. M., Allen, M., & Hsu, K. J. (1989). Hydrogen and deuterium loss from the terrestrial atmosphere: A quantitative assessment of nonthermal escape fluxes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 94(D12), 14971-14989.

References

- Galand, M., Lilensten, J., Kofman, W., & Lummerzheim, D. (1998, October). Proton transport model in the ionosphere. 2. Influence of magnetic mirroring and collisions on the angular redistribution in a proton beam. In *Annales Geophysicae* (Vol. 16, No. 10, pp. 1308-1321). Copernicus GmbH.
- Strangeway, R. J., Ergun, R. E., Su, Y. J., Carlson, C. W., & Elphic, R. C. (2005). Factors controlling ionospheric outflows as observed at intermediate altitudes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A3).
- Khazanov, G. V., Liemohn, M. W., & Moore, T. E. (1997). Photoelectron effects on the self-consistent potential in the collisionless polar wind. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 102(A4), 7509-7521.
- Crew, G. B., Chang, T., Retterer, J. M., Peterson, W. K., Gurnett, D. A., & Huff, R. L. (1990). Ion cyclotron resonance heated conics: Theory and observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 95(A4), 3959-3985.
- Lundin, R., & Guglielmi, A. (2006). Ponderomotive forces in cosmos. *Space Science Reviews*, 127(1-4), 1-116.
- Crew, G. B., & Chang, T. S. (1985). Asymptotic theory of ion conic distributions. *The Physics of fluids*, 28(8), 2382-2394.
- Bouhram, M., Klecker, B., Miyake, W., Reme, H., Sauvaud, J. A., Malingre, M., ... & Blăgău, A. (2004, April). On the altitude dependence of transversely heated O⁺ distributions in the cusp/cleft. In *Annales Geophysicae* (Vol. 22, No. 5, pp. 1787-1798). Copernicus GmbH.

References

- Gombosi, T. I., & Nagy, A. F. (1989). Time-dependent modeling of field-aligned current-generated ion transients in the polar wind. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 94(A1), 359-369.
- Johnson, J. R., Wing, S., & Delamere, P. A. (2014). Kelvin Helmholtz instability in planetary magnetospheres. *Space Science Reviews*, 184(1-4), 1-31.
- Seki, K., Elphic, R. C., Hirahara, M., Terasawa, T., & Mukai, T. (2001). On atmospheric loss of oxygen ions from Earth through magnetospheric processes. *Science*, 291(5510), 1939-1941.
- Gloer, A. (2016). Coupling ionospheric outflow into magnetospheric models: Transverse heating from wave-particle interactions. *Magnetosphere-Ionosphere Coupling in the Solar System*, 222, 195.
- Burgers, J. M. (1969). *Flow equations for composite gases*. MARYLAND UNIV COLLEGE PARK INST FOR FLUID DYNAMICS AND APPLIED MATHEMATICS.
- Halekas, J. S., Brain, D. A., Ruhunusiri, S., McFadden, J. P., Mitchell, D. L., Mazelle, C., ... & Jakosky, B. M. (2016). Plasma clouds and snowplows: Bulk plasma escape from Mars observed by MAVEN. *Geophysical Research Letters*, 43(4), 1426-1434.

References

- Dong, Y., Fang, X., Brain, D. A., McFadden, J. P., Halekas, J. S., Connerney, J. E., ... & Jakosky, B. M. (2015). Strong plume fluxes at Mars observed by MAVEN: An important planetary ion escape channel. *Geophysical Research Letters*, 42(21), 8942-8950.
- Slapak, R., Schillings, A., Nilsson, H., Yamauchi, M., Westerberg, L. G., & Dandouras, I. (2017, June). Atmospheric loss from the dayside open polar region and its dependence on geomagnetic activity: implications for atmospheric escape on evolutionary timescales. In *Annales Geophysicae* (Vol. 35, No. 3, pp. 721-731). Copernicus GmbH.
- Newell, P. T., Sotirelis, T., & Wing, S. (2010). Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A3).