

Do Intrinsic Magnetic Fields Protect Planetary Atmospheres from Stellar Winds?

Ramstad, R., & Barabash, S. (2021).

Space Sci. Rev., 271, 36

2022/09/01

長内大河 (東北大)

0. Contents

1. Introduction

2. Ion Escape in Induced and Intrinsic Magnetospheres

2.1 General Physics of Ion Escape

2.2 In Induced Magnetospheres

2.3 In Intrinsic Magnetospheres

3. Measurements of Ion Escape from Earth, Mars and Venus

3.1 How Global Ion Escape Rates Are Measured

3.2 Comparative Escape Rates

3.3 Influence of Upstream Conditions

1. Introduction

✓ 金星、火星、地球は同じような初期大気で形成されたと考えられているが、どのように変化してきたのか？

火星の初期大気

- CO_2 が支配的で、温室効果の崩壊を防ぐために0.5-3.0 bar の表面圧力を必要とした
- 大気中のD/Hの上昇か水層が取り除かれた
- 水素が火星上層大気からH, H_2 として熱的に放出される \leftrightarrow O, CO_2 は火星に重力的に結合したまま

➡ 別の超熱的脱出メカニズムが必要(推定値から12 mbar に相当とすると、現在の残圧 6 mbarをもたらす)

➡ 火星全体に磁気双極子が存在しないために、太陽風が火星の電離層と密接に相互作用し、その過程でエネルギーと運動量が効果的に伝達されて、大気中のイオンが大量に放出された

1. Introduction

仮説：火星大気が希薄である理由は、火星全体の磁気双極子が存在しないことで説明できる

➡ 地球大気は地磁気によって守られた。
(かつて太陽風は何倍ものエネルギーを持っており、それは大気の安定性にとって重要)

↓ 矛盾

金星は固有磁場がなく、太陽に近い軌道を回っているにもかかわらず、CO₂主体の92 barの大気を保つ
(地球の約2倍の太陽風と太陽電離放射線)



惑星間の本質的な違い、特に金星や地球と比べて火星の重力が弱いことを考慮した説明が必要であることを示唆

✓ 本研究では

それぞれの惑星で観測された結果を比較し、観測された脱出率や上流条件への様々な依存性から、固有磁力や重力などが太陽風との相互作用やそれに伴う大気損失に対してどのような影響を与えるかを議論する

2.1 General Physics of Ion Escape

太陽風

太陽コロナが惑星間空間に膨張する際に発生する高電離プラズマの流れ。太陽近傍のコロナプラズマは、太陽内部から発生する強い磁場と、太陽と他の太陽系を結ぶ電流により、強く磁化されている。

➡ 磁場はこのように膨張するプラズマの中で”frozen in “し、惑星間磁場 (IMF) を形成

$$\mathbf{E}_{mot} = -\mathbf{v}_{sw} \times \mathbf{B}_{IMF}$$

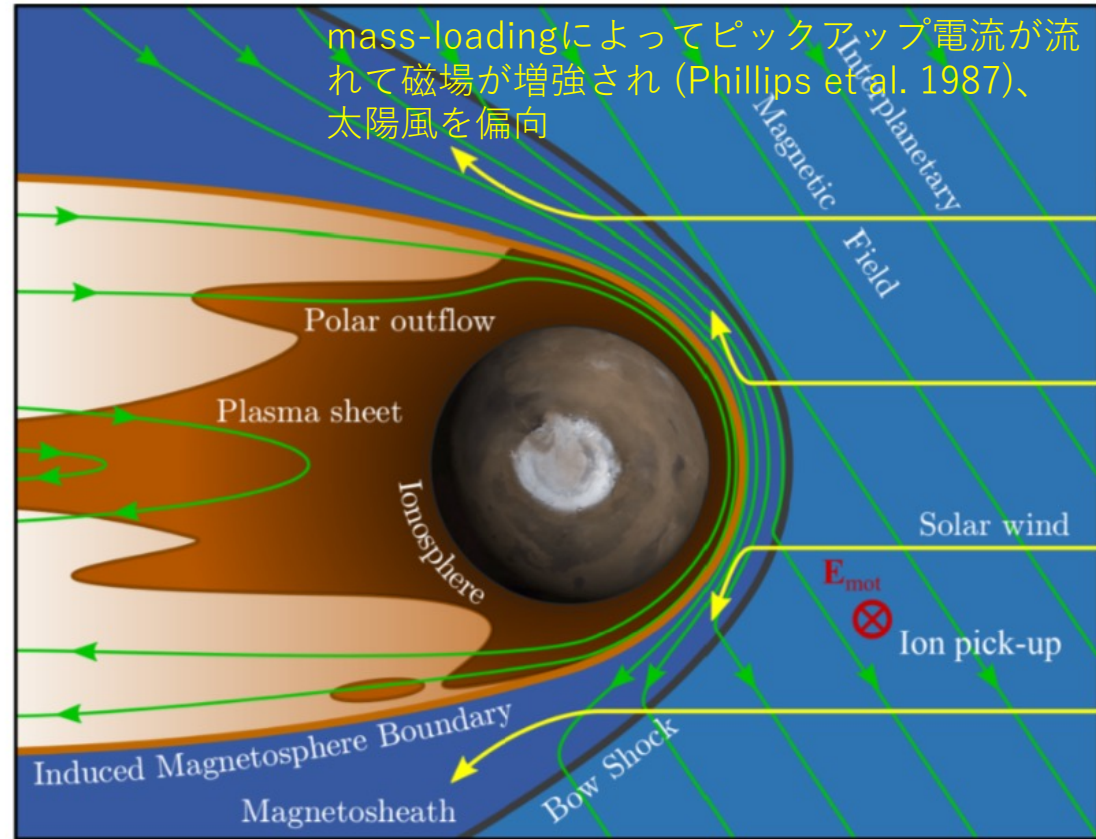
イオンは惑星の重力から逃れるために、惑星の脱出速度よりも高い速度を得る必要あり。
→質量に依存する最小脱出エネルギーに相当する。

$$E_{esc} = m \frac{GM_p}{r_0}$$

中性粒子の脱出が外縁部付近の性質にのみ依存するのは対照的に、イオンは高高度に到達するにつれて連続的にエネルギーを得ることができるようになる(式(5))

Planet	Escape velocity	Escape energy		
		H ⁺	O ⁺	O ₂ ⁺
Venus	10.2 km/s	0.54 eV	8.6 eV	17.2 eV
Earth	10.6 km/s	0.59 eV	9.3 eV	18.7 eV
Mars	4.9 km/s	0.12 eV	2.0 eV	4.0 eV

2.2 In Induced Magnetospheres



誘導磁気圏

電離圏は太陽風の障害となり、誘導磁気圧によって太陽風を減速・偏向させる。太陽風が運ぶIMFが、高い電気伝導度をもつ惑星電離圏の周りに巻きつく
→誘導磁気圏の形成

Pick-up ion

大気プラズマは太陽風によるピックアップから遮蔽されている。

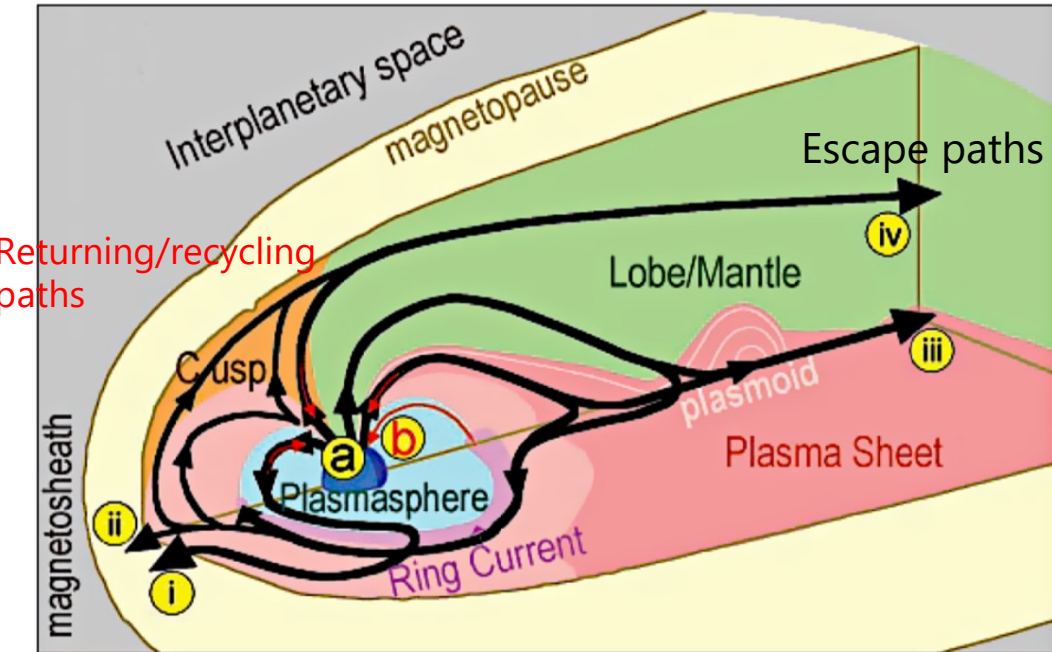
→しかし、太陽風のエネルギーが磁気バリアに輸送される
(誘導電離圏直流などで)
太陽風によってエネルギーを与えられた惑星のピックアップイオンが沈殿する

イオン脱出経路 → テールとピックアップ

- 電離圏につながる磁力線上の電荷勾配(∇p_e)…極域のイオン流出
- 中性プラズマシートを維持する電流… $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 力によりイオンを
- 太陽風で生成された外気圏イオン…太陽風の電場 ($-\mathbf{v} \times \mathbf{B}$) によりピックアップ

場所により異なるイオンエネルギー経路が支配的になっている。

2.3 In Intrinsic Magnetospheres



- 極域の電離圏で発生したイオンは、
- 磁気圏界面を通過してプラズマ圏に戻る
 - Ring Currentから離れる
 - プラズマシートで下降加速する
 - ローブを通過して直接下降する

固有磁気圏

強い固有磁場の存在から相互作用に関わる力の配置が変わり
太陽風との結合も変化する
磁場の圧力が誘導磁場の圧力だけで決まらず、磁場が太陽風
を遠ざける

太陽風と惑星磁場の相互作用

太陽風のエネルギーの一部を電離層に伝達して大気イオンへのエネルギーを与えるプロセス (polarization electric fields etc..)を引き起こす

極域カスプ

- 垂直磁力線は太陽風と電離圏の間の電気力学的エネルギー移動の導管となり、オーロラオーバルを形成する (Cowley 2000; Keiling et al.2003)。
- 電界線はエネルギーを持った粒子を極域の上層大気へと導き、より多くのエネルギーを蓄積するとともに、電子衝突電離によるイオン生成プロセスを与え、電場によるエネルギー付与にsensitiveな大気粒子をより多く生み出す (Strangeway et al.2005)。

3.1 How Global Ion Escape Rates Are Measured(解析方法について)

目的

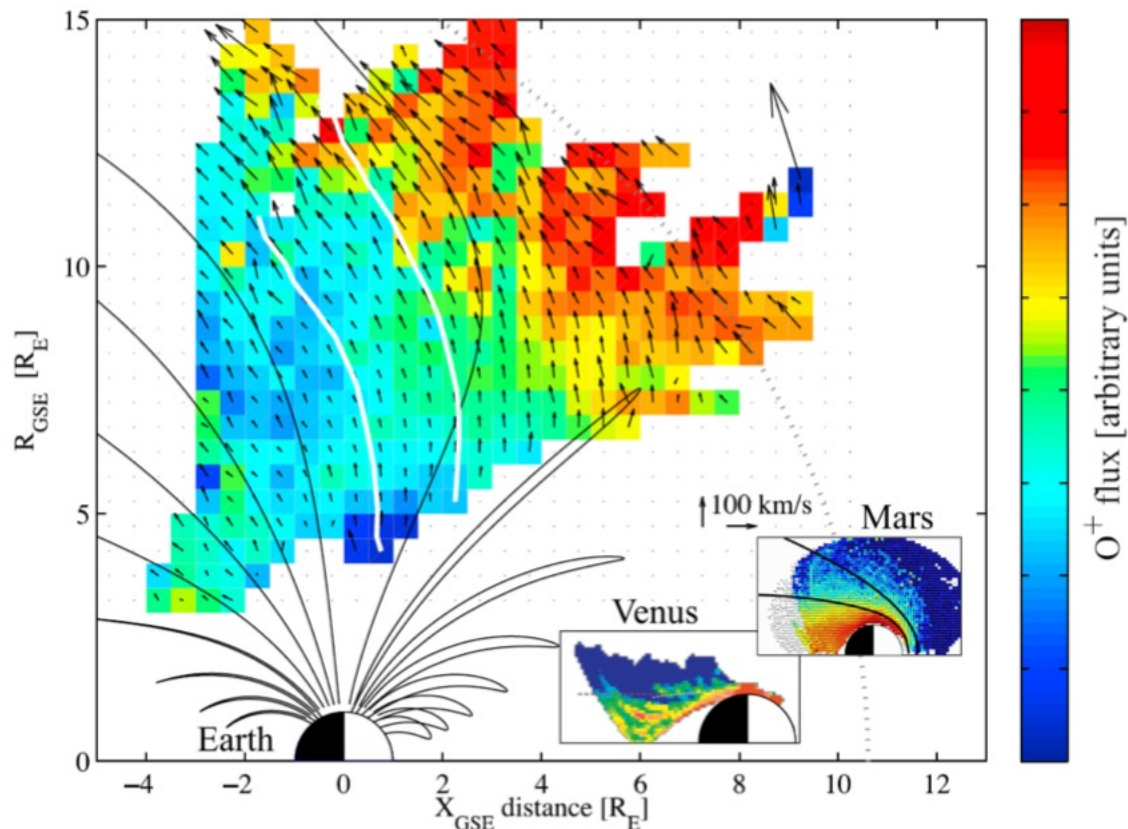
全流動領域にわたる粒子の正味フラックスの積分、すなわち大気の損失率を得る。
軌道上の宇宙船に搭載されたプラズマ粒子計測器は、静電エネルギー分析器（ESA）を用いて微分フラックス j を測定し、局所速度空間のある領域をカバーする。

$$j(\mathbf{r}, \Omega, E) = \frac{2E}{m_p^2} f(\mathbf{r}, \mathbf{v})$$

- ➡ 宇宙船のポテンシャルと宇宙船のラム速度によって影響を受ける可能性がある
- ➡ Liouvilleの定理を考慮し、それに応じて微分フラックスを修正する必要がある。

測定された微分フラックスを積分して全脱出速度にする
(1. 測定した分布を瞬間的に平均化 2. 平均分布関数として平均化)

3.1 地球



図：地球,火星,金星からの O^+ 流出量と太陽風との相互作用領域と誘導磁気圏との対比

- ✓ フラックスをマッピングするための基準フレームや座標系の選択は容易ではなく、観測装置や軌道範囲によって制限される
- ✓ イオンは主に極冠とオーロラオーバルから磁気圏や惑星間空間へ流出
 - 上流の太陽風やIMFの状況によって面積が変化 (Milan 2009) するため、計算する際に考慮が必要。
- ✓ 誘導磁気圏の脱出率
 - 電離圏イオンの範囲と誘導磁気圏の断面積の両方をフラックスとして統合する

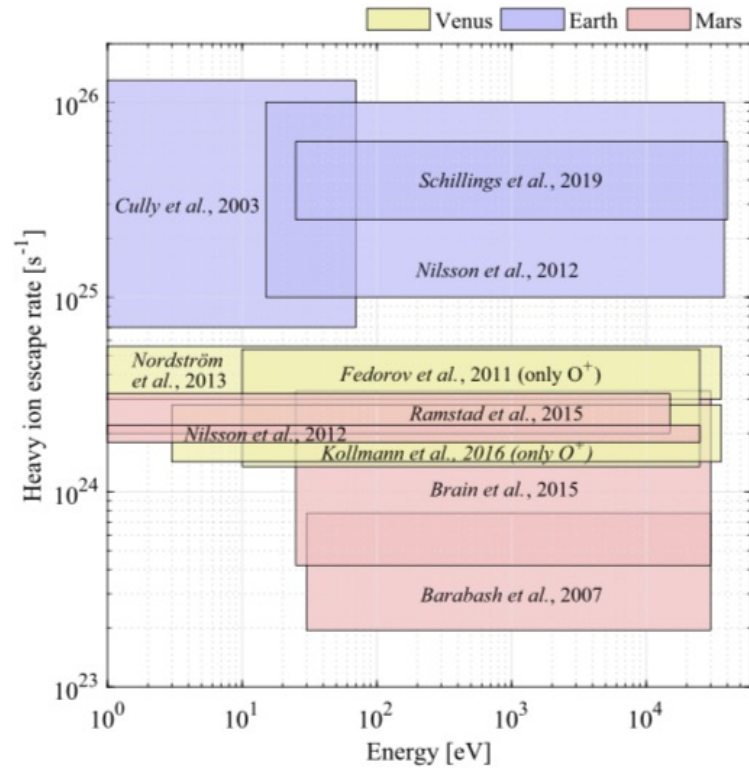
3.2 Comparative Escape Rates

- イオン流出
- ・ 惑星からイオンが流出する速度(リターンする可能性あり)
 - ・ 脱出率と等価となる速度

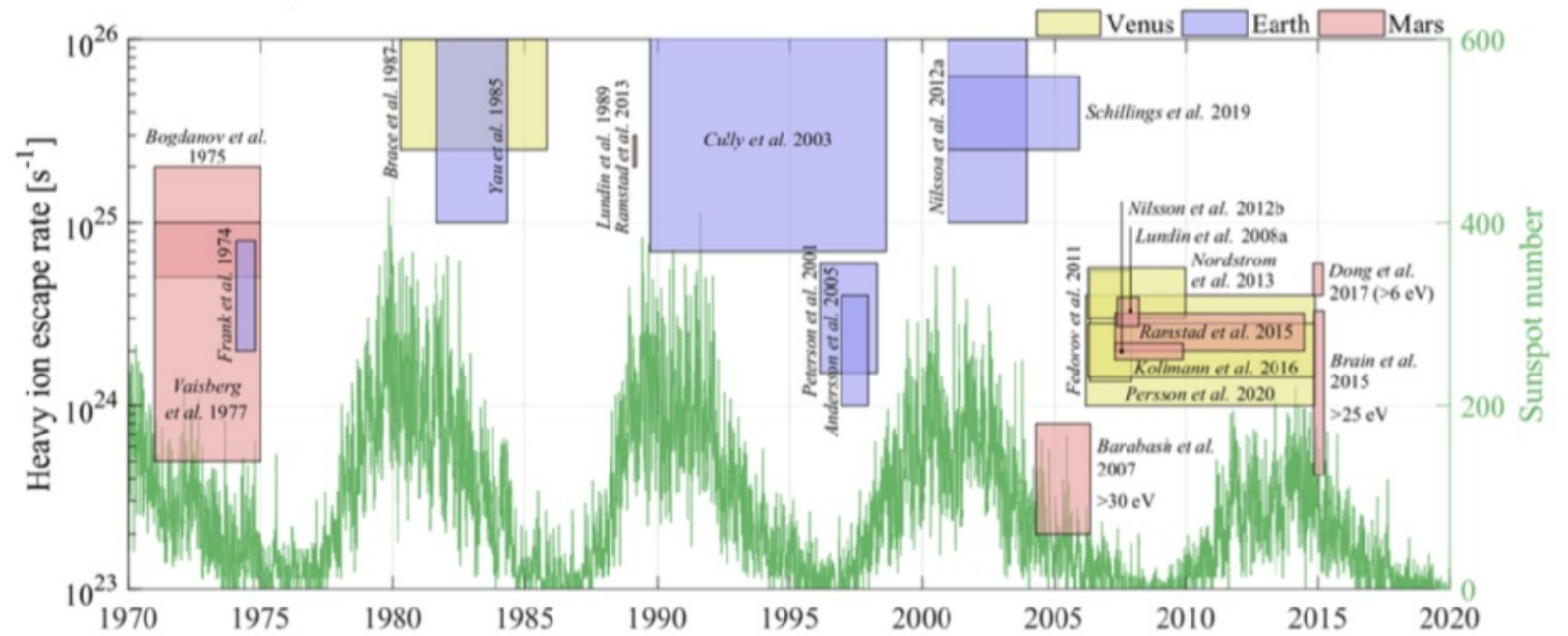


流出したイオンがすべて宇宙空間に逃げるわけではなく、流出したイオンが閉じた磁力線や惑星の重力場に捕捉されてリターンする場合もある

3.2 Comparative Escape Rates



金星,地球,火星の重イオン脱出率



金星、地球、火星からの重イオン脱出速度の経時変化と太陽サイクルとの関係

Appendix

2.2 補足

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{1}{n_e e} \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \frac{1}{n_e e} \nabla p_e + \mathbf{J} / \sigma, \quad (1)$$

磁気圏電場によって駆動される電流は、対応するホール力（式（1）の $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 項）を与え、これは、導電性が磁気化粒子種のジャイロ導電性によって定義される薄い磁気中性シートにおいて、荷電粒子の加速に特に有効である（Lyons and Speiser 1985）。誘導磁気圏では、中性シートは導電性の障害物の周りにIMFが垂れることによって形作られる（Riedler et al.1989）。

式(1)の右端の ∇p_e (両極)項は、磁力線に沿った荷電粒子の分布によって決定される。イオンと電子の質量差が大きいと、それに比例して速度分布も大きくなり、惑星の重力場における2つの粒子種の広がりも磁力線に沿って大きくなる。イオンと電子の分離は準中性を逸脱し、電界整列した偏光電場を設定する。非磁性惑星の電離層は、火星での典型的なケース（Dubinin et al. 2008）や、金星での高い太陽風動圧への応答（Russell et al. 1989）のように磁気化することがあります。金星の両極性電位は、検出可能な軌道では $9.9 \pm 1.1\text{V}$ と見積もられている（Collinson et al.2016）。一方、火星の電離層アンバイポーラ電位はせいぜい0.8Vである（Akbari et al.2019；Xu et al.2018）。

2.2 補足

- ✓ ピックアップは比較的能量の高い加速機構で、太陽系内におけるEmotの典型的な大きさは、金星で5 mV/m、火星で0.7 mV/mである。
- ✓ 乱れのない太陽風で生成された1価の光子は、数km以内に火星で数eV、金星で数十eVのエネルギーに達し、 O^+ などの重イオンでも脱出エネルギーをはるかに超える。1/4周すると、初期静止状態でのピックアップイオンの速度は太陽風の2倍まで上がり、その時点で重いピックアップイオンは数万eVのエネルギーに達することができる。
- ✓ しかし、Emotの大きさは v_{sw} とBIMFの角度に強く支配されており、必ずしも垂直ではないため 特に、偏向した太陽風の流れが磁場とほぼ平行になるような惑星の近くでは、イオンピックアップが広いエネルギー範囲を担当する可能性がある。

3.1 List of missions

Table 2 List of missions with suitable instrumentation to measure ion escape from Earth, Mars, and Venus, considered here

Mission	Plasma particle instrumentation	Spinner/stabilized	Planet	Duration
Phobos-2	Automatic Space Plasma Experiment with a Rotating Analyzer (ASPERA)	Spinner	Mars	Jan. – Mar. 1989
Akebono	Suprathermal ion Mass Spectrometer (SMS)	Spinner	Earth	1989-2015
Fast Auroral Snapshot Explorer (FAST)	Time-of-flight Energy Angle Mass Spectrograph (TEAMS)	Spinner	Earth	1996–2009
Cluster (×4)	Cluster Ion Spectrometry/COmposition and Distribution Function Analyzer (CIS/CODIF)	Spinners	Earth	2001–present
Mars Express (MEX)	Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms/Ion Mass Analyzer (ASPERA-3/IMA)	3-axis stabilized	Mars	2004–present
Venus Express (VEX)	Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms/Ion Mass Analyzer (ASPERA-4/IMA)	3-axis stabilized	Venus	2006–2014
Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN)	SupraThermal and Thermal Ion Composition (STATIC)	3-axis stabilized	Mars	2014–present

Equations

3.1 methods of integrating the measured differential fluxes into a total escape rate

方法1

瞬間的に測定された各分布を空間角とエネルギー（すなわち速度空間）で瞬間的に積分して、巨視的密度（ n ）、バルク速度（ v ）、温度（ T ）を求め、そこから純フラックスを $F = nv$ として簡単に計算することができる。計算されたフラックスは、適切な離散化された座標系で場所ごとに平均化され、イオンフラックスのほとんどの領域で積分することができる。

デメリット

いったんモーメントが生成されると、ほとんどの宇宙プラズマは熱平衡状態ではないため、この過程でいくつかの情報が失われます。また、モーメントは、イオン分布が測定器の視野とエネルギー範囲に完全に収まっている場合にのみ有効ですが、事前に知ることは不可能です。さらに、宇宙船のポテンシャルが正の場合、低エネルギーのイオンが測定器に入る前に反射してしまい、負の場合、測定器が分解できないほど高エネルギーの分布にシフトしてしまうことがある。

方法2

測定した分布を離散化した位相空間座標系で直接平均し、得られた平均分布関数（ADF）を速度空間上で積分して、ADFのモーメントや平均ネットフラックスを直接求めることもある。この方法は計算コストがかかるが、モーメント法に比べていくつかの利点がある。特に、速度空間のカバーされていない部分が同じ空間位置の後または前の測定でカバーされている限り、瞬時測定のFOVまたはS/C-potentialの制限はあまり気にならない。また、イオン分布も完全に保存されるため、流出の平均エネルギーを正確に導出することができる。

デメリット

平均化した場合、バルク速度の自然な変動によって平均分布が広がってしまい、脱出を制御する物理機構を解釈するための情報が制限されるため、平均温度を導出することができないという欠点がある。

3.3 Influence of Upstream Conditions