

2012年度 第42回 天文天体物理若手 夏の学校

2012年8月2日(木) starplanet_14a

「非磁化惑星(火星)からの大気散逸機構に関するレビュー」

名古屋大学 太陽地球環境研究所総合解析部門

博士前期課程1年 松永和成

○概要

本発表では、Chassefière and Leblanc [2004] という論文のレビューである。太陽風と非磁化惑星である火星の上層大気の相互作用によって、火星の大気が宇宙空間に流出することが知られている。

本論文では、この大気散逸についてのメカニズムについて述べている。

大気散逸の進化を知ることは、惑星の環境の進化を知るうえで重要である。地球型惑星である火星での環境の進化を調べれば、地球大気の過去・現在・未来を知る手がかりとなる。また、どのような環境であれば、生物が生存できるかを知ることにもできる。さらに、火星の環境進化を系外の非磁化惑星にも適用できる可能性がある。

○イントロダクション

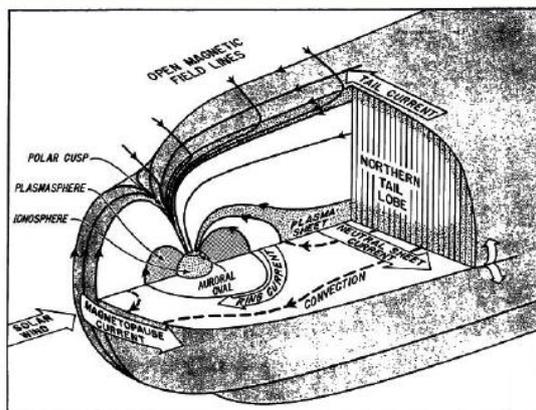
現在の火星は、冷たく、乾燥している星であり、薄い二酸化炭素でおおわれている。液体の水はなく、氷の存在が確認されている。

しかし、火星ができて初期 5 億年間には水があったという地質学的証拠が発見されている。(Carr and Head [2003]) 水があるためには、水を保持するために濃い二酸化炭素が必要となるが、現在の火星にはない。この劇的な変化は、大気散逸によって引き起こされたと考えられている。

また、火星には地球と違ってグローバルな固有磁場は存在していない。磁場は、37 億年前ごろに消失した (Acuña et al[1998]) と考えられていて、残留磁場の存在が確認されている。

火星の上層大気と相互作用する太陽風というものは、太陽からの恒常的な超音速のプラズマの風で、惑星空間を満たしている。

○地球と火星の磁場の有無

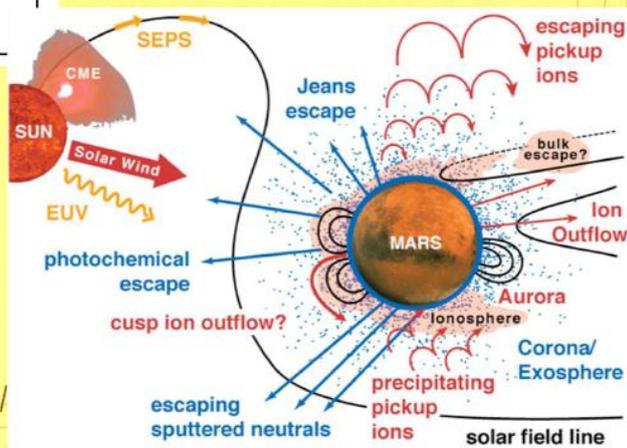


地球(双極子磁場あり)
 上層大気と太陽風との直接的な
 相互作用なし

Lopez and Baker,[1994]

火星(磁場なし)
 上層大気と太陽風が直接相互作用し
 大気流出が起きる
 磁場がなくなったことで大気流出
 しやすくなった

<http://maven2mars.blogspot.jp/>



地球には、双極子磁場があり、上層大気と太陽風との相互作用はない。一方、火星には磁場がないので、上層大気と太陽風の相互作用の影響で、大気が流出している。磁場がなくなったことで、火星では大気散逸が起こりやすくなった。

○火星の大気散逸

大きく分けて、Thermal escape と Non-thermal escape という散逸の理論が考えられている。

非磁化惑星(火星)における 大気散逸

- Thermal escape
 - Jeans escape
 - Hydrodynamic escape
- Non-thermal escape
 - Dissociative recombination
 - Ion escape and ionospheric outflow
 - Ion sputtering

○Thermal escape

過去の火星では、Thermal escape が主流だったと考えられている。Thermal escape には2種類の考えがある。

○Jeans escape

一つ目は、Jeans escape という考えである。

上層大気では、下層大気と違い密度が低いいため、粒子が他の粒子と衝突せずに、確率的に惑星から脱出する。これを Jeans escape と言う。

Jeans escape は、軽いものほど逃げやすいという理論であるため、主に水素原子(最も軽い大気成分)が逃げだす散逸過程と考えられている。

○Hydrodynamic escape

二つ目は、Hydrodynamic escape という考えである。

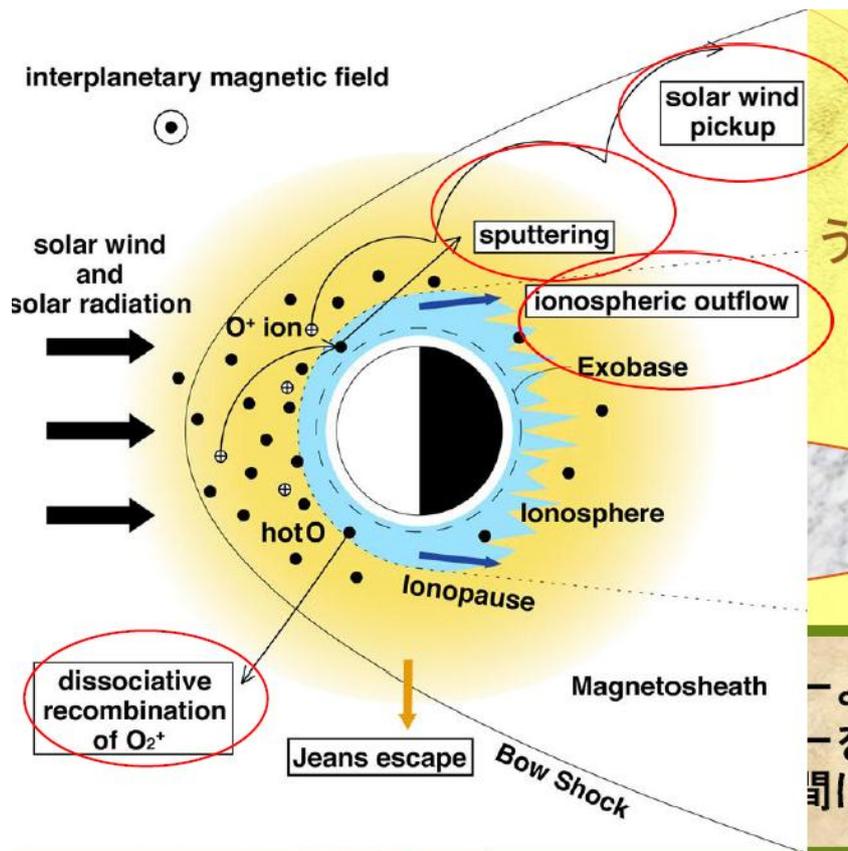
流体のもつ熱エネルギーが天体の重力による束縛エネルギーを超えると、静水圧平衡が破れて、散逸が起きる。

原因は、太陽(形成初期)からの強い極紫外線が水素へ熱エネルギーを供給することである。熱エネルギーの高くなった水素は、火星の脱出エネルギーを超えて脱出する。そのときに、Jeans escape では散逸しにくかった重い原子や分子が水素に引きずられて同時に散逸する、これを Hydrodynamic escape と言う。

○Non-thermal escape

現在の火星では、こちらの大気流出の理論が支配的であると考えられているが、よくわからない部分も多い。

Non-thermal escape は、Thermal escape では散逸しにくい重い元素(酸素や窒素など)の散逸過程として提唱されている。これは、火星大気中の粒子が太陽風からの紫外線や高エネルギー電子からエネルギーを供給され、火星の脱出エネルギーを超えるために引き起こされる。Non-thermal escape には3種類の考えがある。



上図は、Non-thermal escape を表した概念図である。真ん中の円が火星である。左半分の白い部分が昼側、黒い部分が夜側である。左からの太陽風と火星の上層大気の相互作用が表されている。今回は、この図の赤い丸をつけた散逸を紹介する。

○Dissociative recombination

イオンの Dissociative recombination (解離性再結合) によって、散逸が起こるという考えである。

太陽からの極紫外線による光電離でイオンと電子ができる。その二つが再結合し、エネルギーの高い中性粒子が生成され、それが散逸する。

脱出エネルギーが火星の場合低いので、散逸が起こる。地球の場合は脱出エネルギーが大きいため、散逸は起こらない。

Dissociative recombination

- 解離性再結合
イオン+光電離で作られた電子
=エネルギーの高い中性粒子

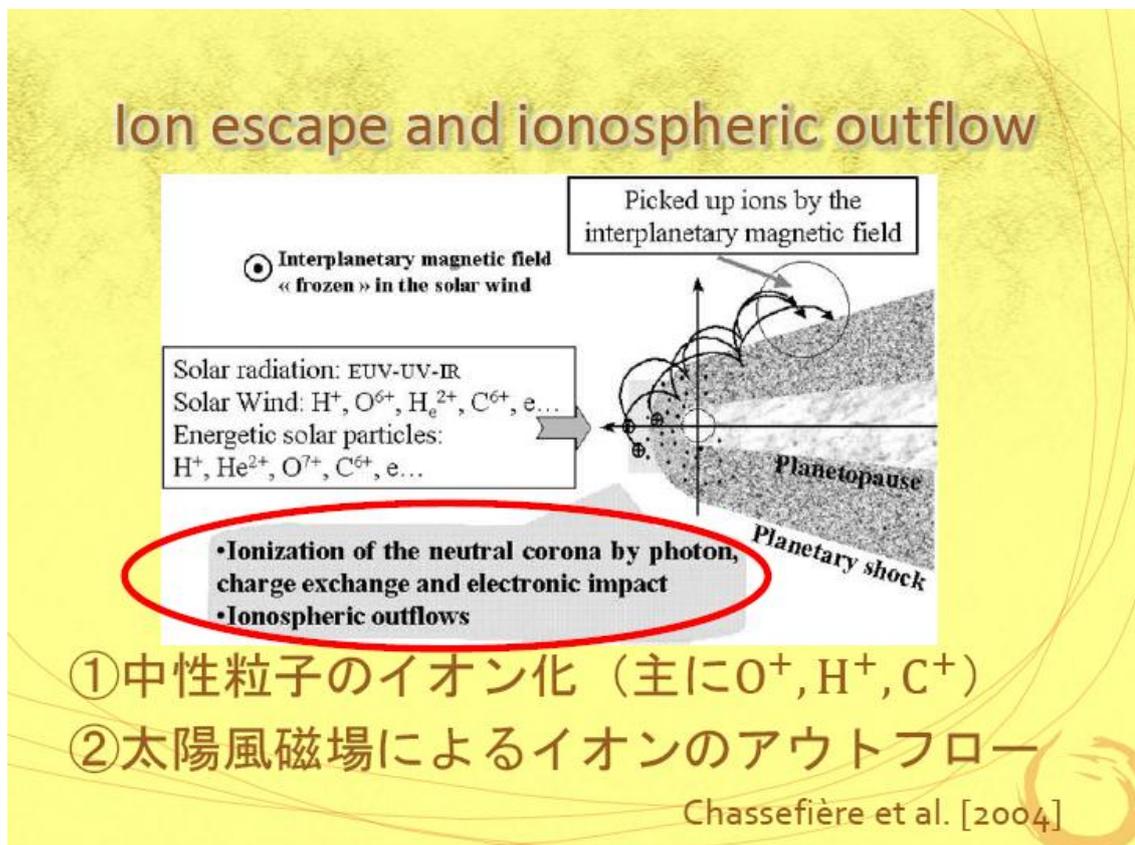
$$\text{O}_2^+ + e^- \rightarrow \text{O}^* + \text{O}^* (\Delta E = 0.84 - 6.99\text{eV})$$
$$\text{N}_2^+ + e^- \rightarrow \text{N}^* + \text{N}^* (\Delta E = 1.06 - 3.44\text{eV})$$
$$\text{CO}^+ + e^- \rightarrow \text{C}^* + \text{O}^* (\Delta E = -0.33 - 2.9\text{eV})$$

- 火星の高度250kmにおける脱出エネルギー
O:1.9eV、N:1.72eV、C:1.48eV
地球、金星の場合 O:10eV

この中性粒子が散逸する

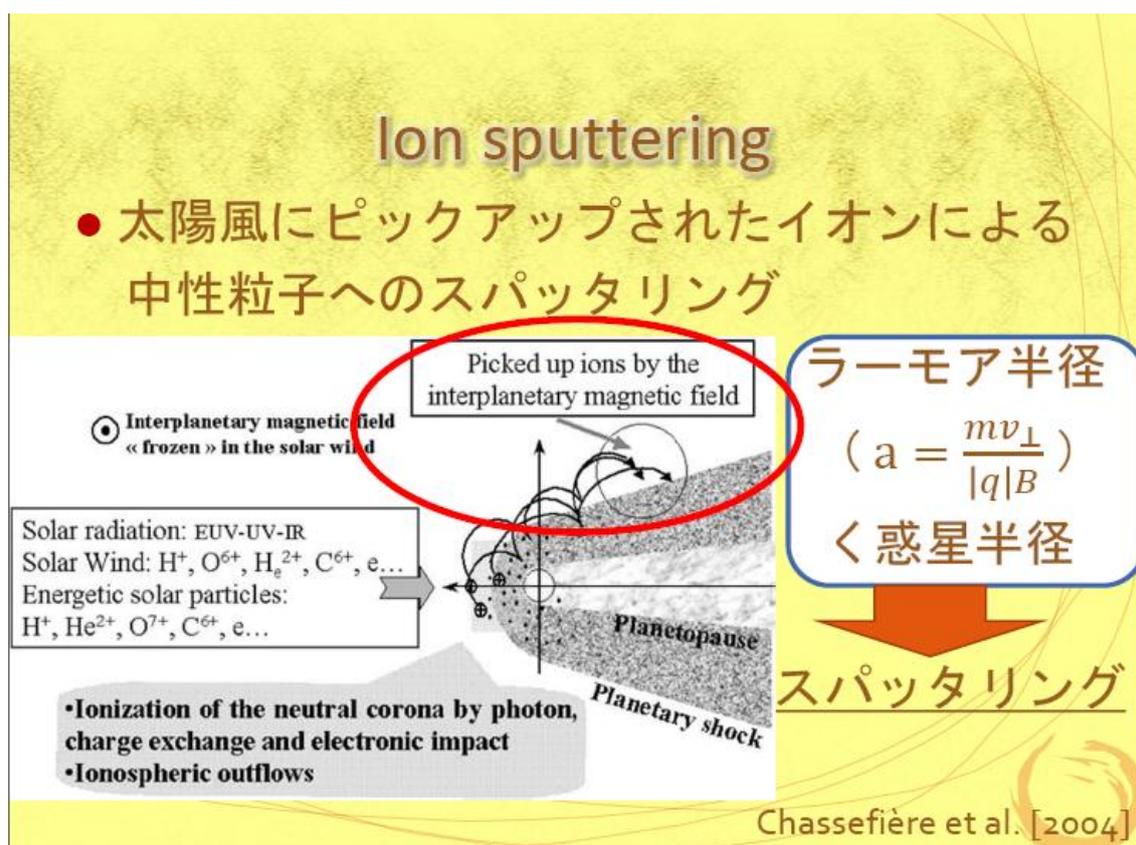
○Ion escape and ionospheric outflow

火星の昼側で、火星上層大気中の中性粒子のイオン化が起こる。それらが磁場を伴っている太陽風によってアウトフローされると考えられている。



○Ion sputtering

太陽風にピックアップされたイオンはサイクロトロン運動をする。サイクロトロン運動しているイオンのラーモア半径が火星の半径より小さいため、ピックアップイオンが火星上層大気に再突入し、sputtering が起きるとされている。この散逸過程では、再突入するイオンのエネルギーが高いため、元素の重さに関係なく sputtering される。



以上が火星における大気散逸として考えられているメカニズムである。

○火星における大気散逸の観測現状

フォボス 2 (ロシア) は、ピックアップイオンの存在を発見した。(Lundin et al. [1989])

フォボス 2 により見積もられた火星の全球的散逸率は、~毎秒 10^{25} であった。これは、火星の大気を約 1 億年ではぎ取られる速さとなるため、当時は衝撃的な結果であった。しかし、マーズエクスプレス(ESA)からの見積もりは、~毎秒 10^{23} であった。これは、それぞれの人工衛星が観測を行ったときの太陽活動の活発さに関係があることが示唆されている。フォボス 2 の観測時は、マーズエクスプレスの観測時より太陽活動は活発であった。

Phoenix (NASA) は、火星に着陸したランダーで、氷を発見した。これは、火星における水素散逸の考えへ大きな影響与えた。それまでの考えでは、水素を惑星空間に逃がすことが重要であったが、氷の発見により、水素が火星表層に凍結する効果・量も水素消失の謎への重要なカギとなった。

MAVEN (NASA) は、火星の高度 200~250km の同位体比を測るために 2013 年の打ち上げが予定されている。現在は、今まで紹介してきた流出メカニズムがどの程度の割合で起こっているかがわからない。MAVEN の観測により、その割合への新たな発見が期待される。

○系外惑星へのアプローチ

近年、系外惑星の発見が増えているが、系外惑星に直接行って観測が行える人工衛星は存在しない。人工衛星が直接行ける火星での観測により得られた知見をもとに系外惑星の物理の解明が期待される。

例えば、火星における大気散逸のプロセスを理解することで、系外惑星での大気を維持する要件、系外惑星と主星からの影響による大気散逸などである。

特に、生物にとって重要な二酸化炭素、水素の火星での大気散逸を調べることは、系外惑星での大気進化とハビタブル惑星への理解へとつながっていく。

○まとめ

□火星の大気散逸のメカニズムには、大別して Thermal escape と Non-thermal escape という考えがある。

□火星の大気散逸は、グローバルな固有磁場がないことでの太陽風と上層大気の相互作用が重要な要素となっている。

□大気散逸は元素の重さ・惑星からの脱出エネルギーと関係している。

□人工衛星からの直接観測で得た知見を、系外惑星への理解につなげられる。