

火星大気の宇宙空間への散逸

MAVEN観測による現在の散逸率と過去から現在までの散逸量

Jakosky et al. (2018), Loss of the Martian atmosphere to space:
Present-day loss rates determined from MAVEN observations
and integrated loss through time

京都大学 B4 田中 秀

背景

かつて火星には液体の水が豊富にあったが、現在は液体それを維持できない

(Carr, 1986, 2007; Jacosky and Philips 2001)

現在の気や火星の表面、表面下には温室効果を保つほどのCO₂が存在しない

(Edwards and Ehlmann, 2015)

⇒地形や鉱物学から推測される火星の気候変動において
宇宙への大気散逸が果たす役割が大きいと考えられる。

目的

- ① MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution) による観測から現代での火星大気の散逸率の議論
- ② 時間の経過に伴う大気の損失割合とその合計を議論

目的

① MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution) による観測から
現代での火星大気の散逸率の議論

② 時間の経過に伴う大気の損失割合とその合計を議論

目的①

MAVENによる観測から現代での火星大気の散逸率の議論

⇒散逸過程として考えるもの

気候に関係する H_2O と CO_2 の散逸を反映するHとOに関する重要な散逸過程4つに注目

(i)Hの熱的散逸(Jeans ' escape)

(ii)イオンが電場により加速され脱出速度を超過

(iii)高エネルギーO原子の光化学過程による散逸

(iv)ピックアップイオンによるスパッタリング

MAVENによる観測

- 2014/9/21~ 2016/10/3の
1火星年でのデータを使用

遠下点高度 6200km

近下点高度 150km

deep dip ~125km

(Jakosky et al, 2015)

(右図: 9つの観測機器

Jacosky et al. 2018)

Table 1

Science instruments on the MAVEN spacecraft.

Instrument Acronym	Name	Reference
NGIMS	Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer	Mahaffy et al., 2015
IUVS	Imaging Ultraviolet Spectrograph	McClintock et al., 2015
EUVM	Extreme Ultraviolet Solar Monitor	Eparvier et al., 2015
STATIC	Suprathermal and Thermal Ion Composition	McFadden et al., 2015
SWIA	Solar Wind Ion Analyzer	Halekas et al., 2015
SWEA	Solar Wind Electron Analyzer	Mitchell et al., 2016
SEP	Solar Energetic Particle	Larson et al., 2015
LPW	Langmuir Probe and Waves	Andersson et al., 2015
MAG	Magnetometer	Connerney et al., 2015

(i)Hの熱的散逸(Jeans' escape)

- ・衝突の少ない熱圏で高エネルギーH原子が脱出速度を超える散逸
脱出するH原子と脱出まではしないが高高度へ移動するH原子
⇒火星の周囲にコロナを形成

観測方法

- ①IUVSによるH原子のLyman- α 線散乱光の観測(McClintock et al, 2015)
- ②SWIAとSTATICによるHイオンの観測 (Rahmati et al, 2017)
- ③MAGによるHピックアップイオンに関するプラズマ波の観測 (Romanelli et al, 2016)
- ④SWIAのバウショック上流のHの円柱密度観測(Halekas et al, 2015)

(i) Hの熱的散逸(Jeans' escape)

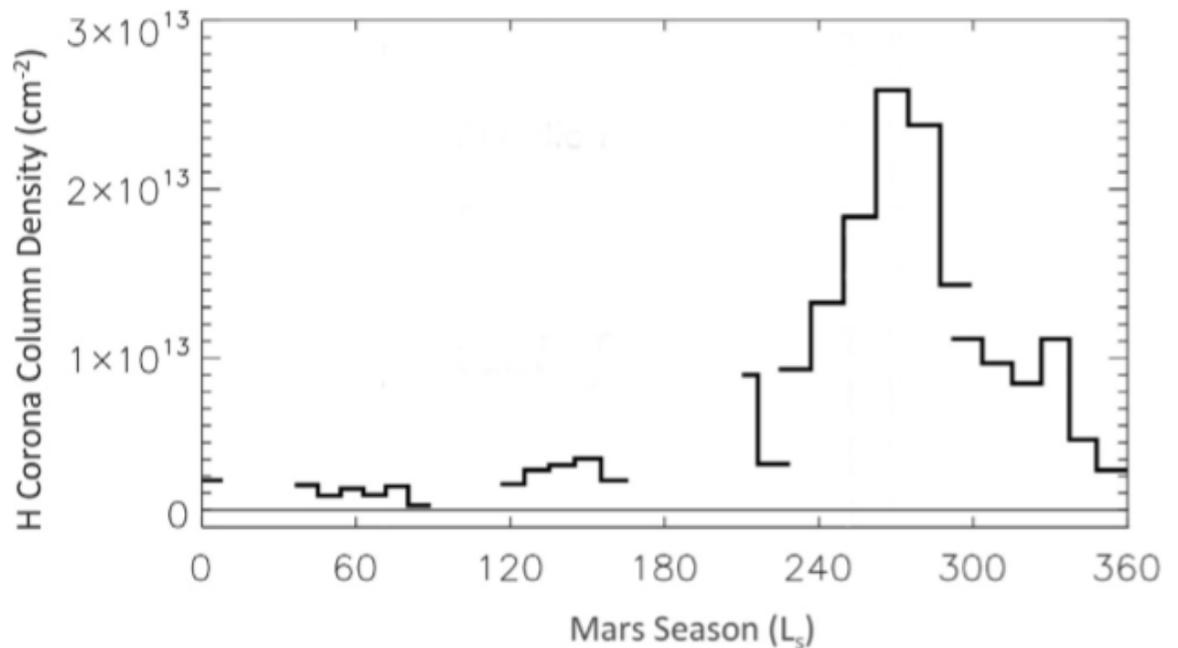
- SWIAによる円柱H密度の年変化

⇒1火星年の季節変化を
観測

コロナの温度を仮定し導出したHの密度からHの散逸率を計算

➡一年の間で

~1-11×10²⁶個/sの幅で流出率が変化



Hの円柱密度の年変化(Jakosky et al, 2018)

(i) Hの熱的散逸(Jeans' escape)

	H Jeans	O ion	O Dissoc Recomb	O sputtering	Total loss thru time
Present-day loss rate from MVN (s^{-1})	1.6-11 $\times 10^{26}$	5×10^{24}	5×10^{25}	3×10^{24}	
4.2 b.y. at present rate, H ₂ O	3.6-25.2 m	0.2 m	2.2 m	0.14 m	
4.2 b.y. at present rate, CO ₂		6 mbar	68 mbar	4 mbar	

Table 2 (Jakosky et al, 2018)

(ii) 電場によるイオン加速での脱出速度の超過

電場の生成過程

- ① 太陽風電場 (Luhmann and Kozyra., 1991)
- ② 電離圏でのプラズマ圧勾配 (Collinson et al., 2015)
- ③ 地殻磁場付近でのプラズマ流シアー (Dubinin et al., 2008)
- ④ cusp内磁場付近でのイオン・電子の運動 (Ergun et al., 2016)
- ⑤ ドレイプしたIMF、または磁気リコネクションによる磁気張力による加速 (Ma et al., 2017)

(ii) 電場によるイオン加速での脱出速度の超過

MAVENではSTATICによりイオンの組成と速度を観測

右図: MSE系で外向きフラックスをマッピング

マップのフラックスを積分してOイオンの散逸率を導出

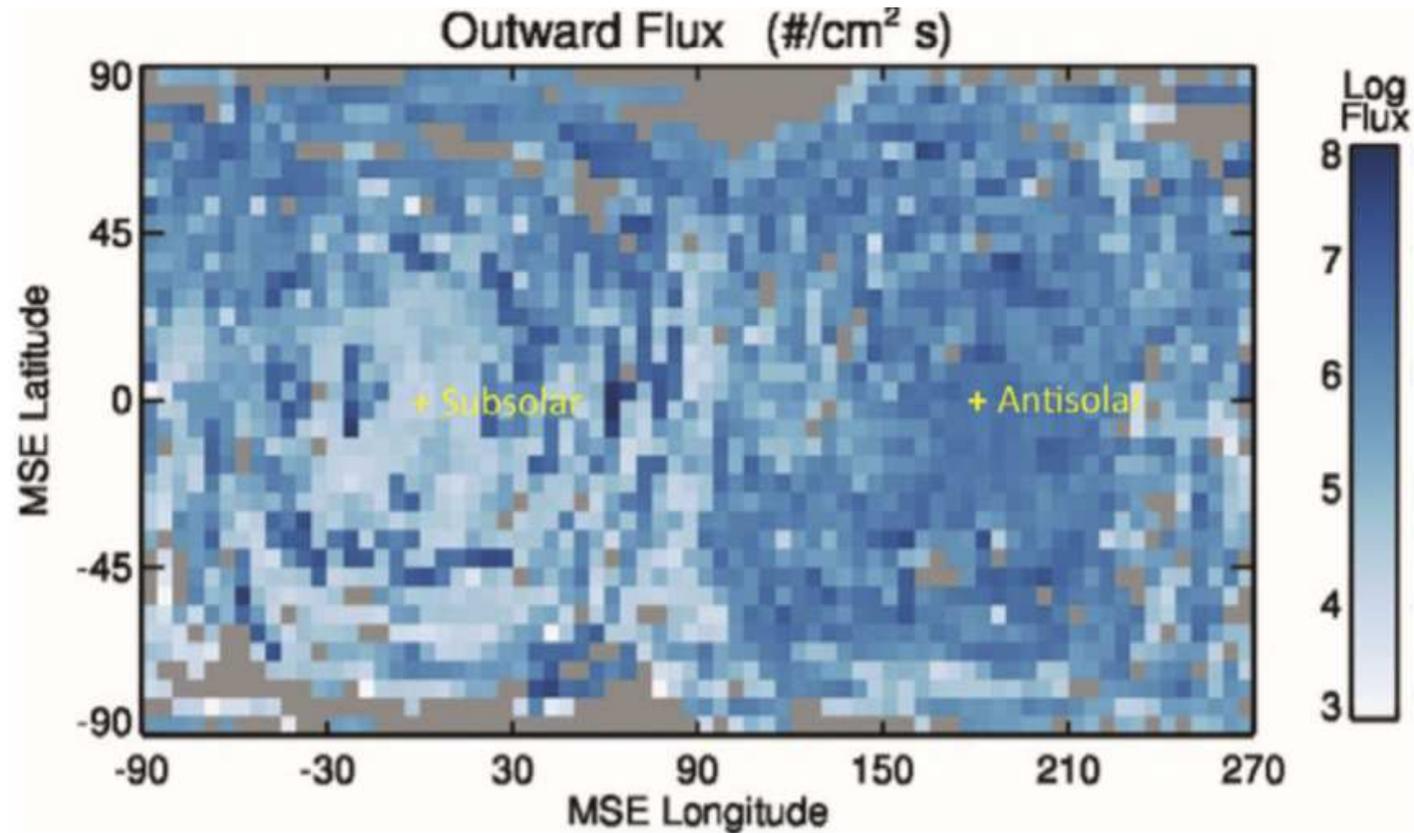


Fig2 火星から外向きに出るOイオン (Brain et al. 2017)

(ii) 電場によるイオン加速での脱出速度の超過

→ 正味の散逸率 $\sim 5 \times 10^{24}$ 乗個 /s

	H Jeans	O ion	O Dissoc Recomb	O sputtering	Total loss thru time
Present-day loss rate from MVN (s^{-1})	$1.6-11 \times 10^{26}$	5×10^{24}	5×10^{25}	3×10^{24}	
4.2 b.y. at present rate, H ₂ O	3.6-25.2 m	0.2 m	2.2 m	0.14 m	
4.2 b.y. at present rate, CO ₂		6 mbar	68 mbar	4 mbar	

Table 2 (Jakosky et al, 2018)

(iii) 高エネルギーO原子の光化学的散逸

- 熱圏において太陽極紫外線の光子を吸収することで起こる化学過程

⇒エネルギーの高くなった中性原子が散逸する。

エネルギーが高く脱出するOの主な源となるのがO₂⁺イオンと周囲の電子との解離再結合である。

⇒再結合の74%が生じた酸素原子を脱出させるのに十分なエネルギーを持つ。

右表: おもな4つの
化学過程と起こり
やすさ
(Lillis et al, 2017)

Table 1. The Four Non-Negligible Branches of the O₂⁺ Dissociative Recombination Reaction and Their Likelihoods (i.e., Branching Ratios)

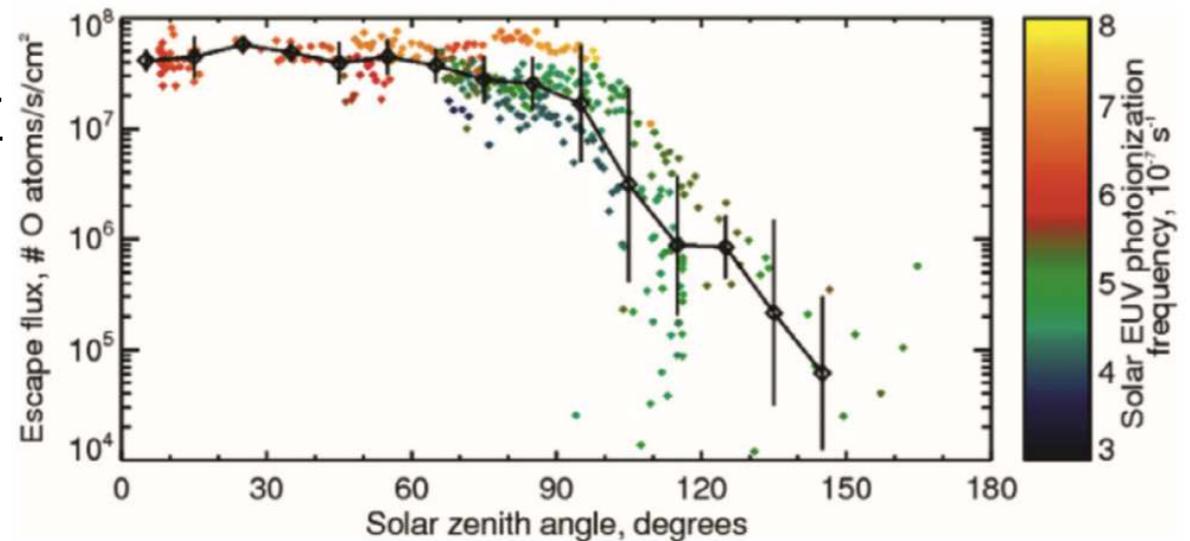
Initial State	Final State	Likelihood
O ₂ ⁺ + e →	O(³ P) + O(³ P) + 6.99 eV	26.5%
	O(¹ D) + O(³ P) + 5.02 eV	47.3%
	O(¹ D) + O(¹ D) + 3.06 eV	20.4%
	O(¹ D) + O(¹ S) + 0.83 eV	5.8%

(iii) 高エネルギーO原子の光化学的散逸

- MAVENはO原子を直接観測できない。
- 上層大気のイオンの組成と密度
⇒ 解離再結合の割合の計算が可能
- 中性粒子の組成と量
⇒ 脱出確率が計算可能

これら2つの高度プロファイルから散逸率が計算可能となる
(Lillis et al., 2017)

各軌道において散逸率を計算
計算結果の値⇒ Fig 3
(Jacosky et al. 2018)



(iii) 高エネルギーO原子の光化学的散逸

MAVEN軌道の歳差運動により散逸率は大きく変化

*散逸率は夜側より昼側が大きい

←夜側は電離圏が希薄でイオン化を左右するEUV光子が少ないため。

→散逸率: 5×10^{25} 乗個 /s

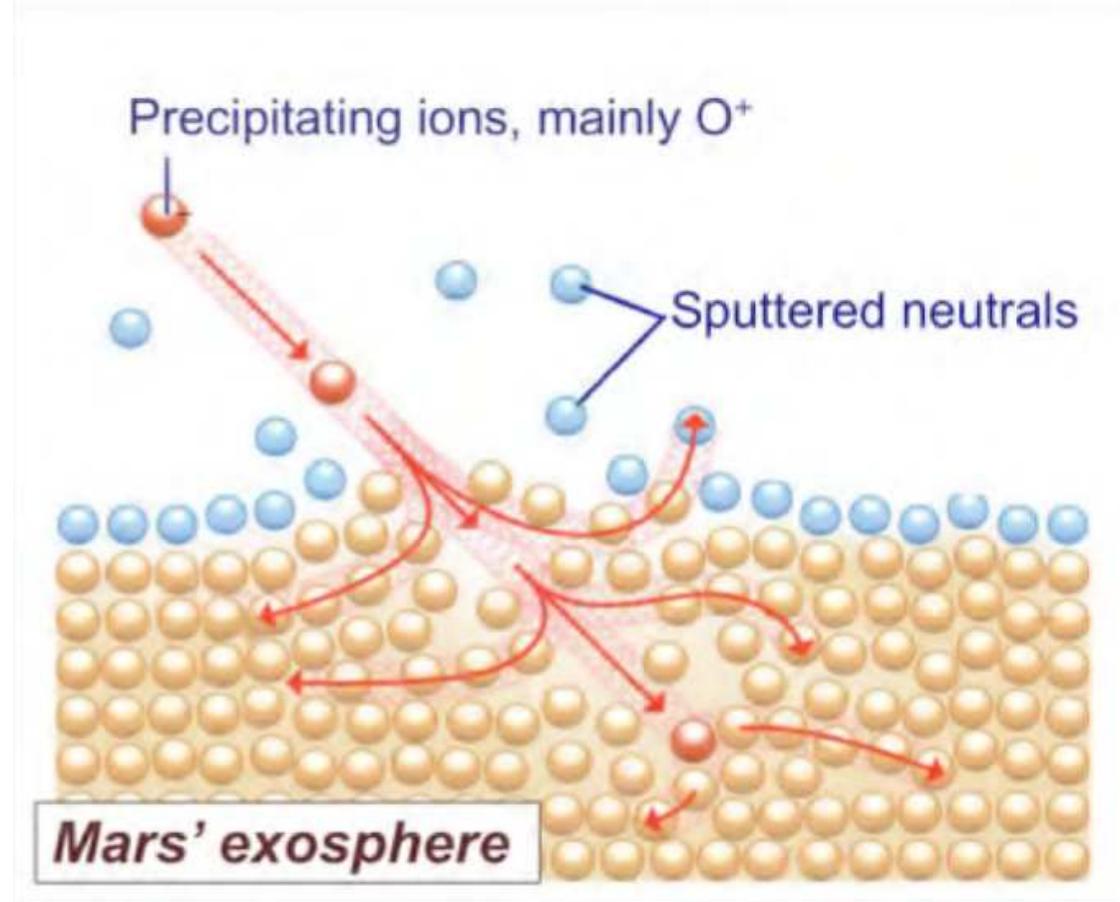
	H Jeans	O ion	O Dissoc Recomb	O sputtering	Total loss thru time
Present-day loss rate from MVN (s^{-1})	$1.6-11 \times 10^{26}$	5×10^{24}	5×10^{25}	3×10^{24}	
4.2 b.y. at present rate, H ₂ O	3.6-25.2 m	0.2 m	2.2 m	0.14 m	
4.2 b.y. at present rate, CO ₂		6 mbar	68 mbar	4 mbar	

(iv) ピックアップイオンによるスパッタリング

電離圏やコロナから加速されたイオンは半球で火星から離れていきそのまま脱出する

もう半球で火星の方向へ加速され、上層大気で粒子と衝突する

⇒運動量の交換により衝突した原子を脱出させる



(iv) ピックアップイオンによるスパッタリング

- 流出する中性O原子は直接観測できないため衝突を引き起こす降下イオンを観測 (Leblanc et al, 2015)
- 衝突が起こる外気圏界面付近である近下点付近の観測結果を利用
- Monte-Carloシミュレーション (Leblanc et al, 2015) に基づいた定式 (Wang et al, 2015) を用いてスパッタリングの散逸率を推定

降下O⁺イオンの観測により、推定される中性O原子の散逸率は

~ 3×10^{24} 乗個 /s

	H Jeans	O ion	O Dissoc Recomb	O sputtering	Total loss thru time
Present-day loss rate from MVN (s^{-1})	$1.6-11 \times 10^{26}$	5×10^{24}	5×10^{25}	3×10^{24}	
4.2 b.y. at present rate, H ₂ O	3.6-25.2 m	0.2 m	2.2 m	0.14 m	
4.2 b.y. at present rate, CO ₂		6 mbar	68 mbar	4 mbar	

現在の合計散逸率

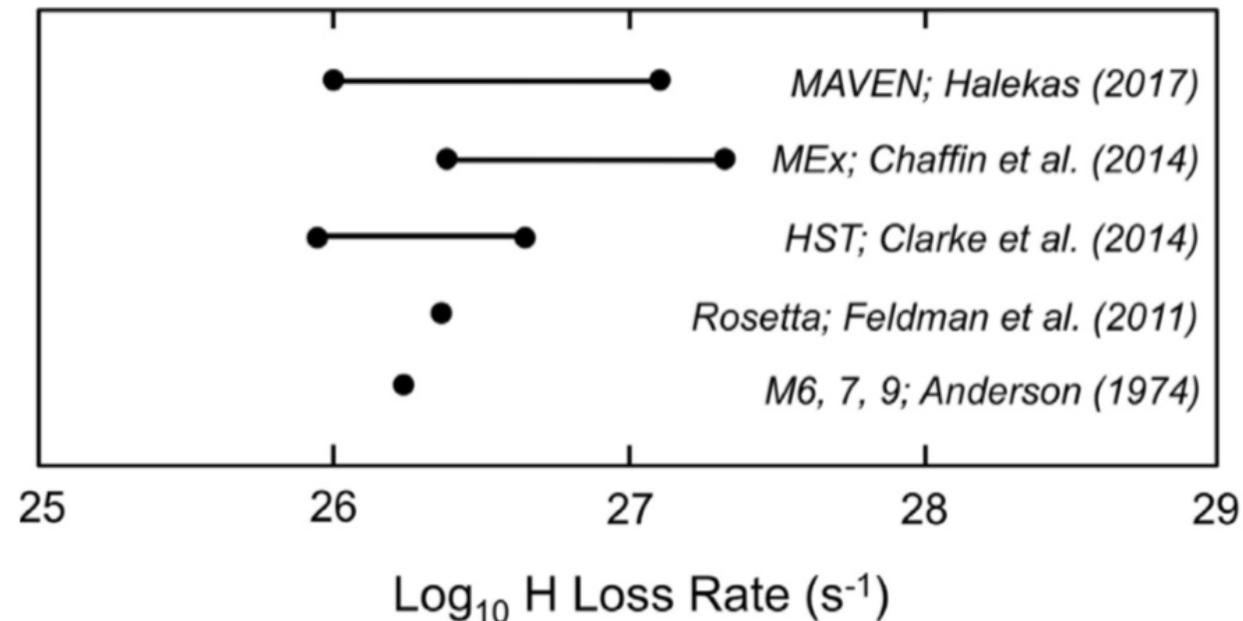
HのJeans' escape

- $\sim 1-11 \times 10^{26}$ 乗個 /sの季節変化

⇐Mariner6,7,9やMars Express、Hubble天体望遠鏡、Rossettaの観測と似ている。

ただし季節変化や年毎の変化を左右する要因については理解が不十分のまま計算している。

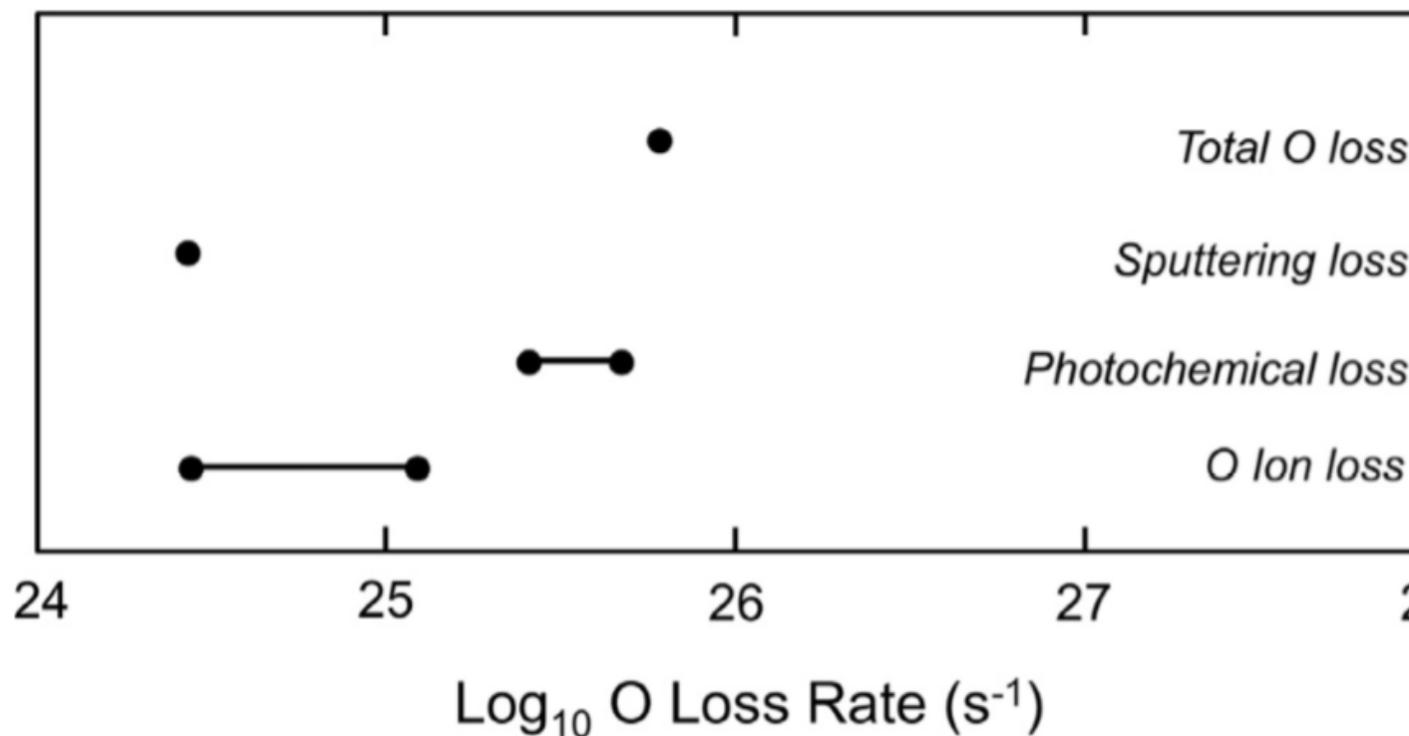
右図：各衛星観測によるH流出率(jakosky et al,2018)



現在の合計散逸率

Oの合計散逸率

- 異なる流出過程の散逸率を合計すると
 $\sim 6 \times 10^{25}$ 乗個 /s
- 最も多いのは解離再結合による流出



各過程によるO散逸率 (Jakosky et al. 2018)

現在の合計散逸率

- HとOの散逸率の比はおおよそ2:1となっており、一見H₂Oの流出と考えて適切のように思える。
- ただし、OとHが平衡状態に達すると予想される10の3-5乗年よりも短いタイムスケールでの時間変化が存在。
 - (i)十倍の季節変化からdust cycleやdust-storm cycleに合わせた年毎の変化が存在する可能性
 - (ii)大気の水蒸気量が年々変化
 - (iii)大気の水分量の変化は軌道要素での変化の時間スケールで起こりやすい。
 - (iv)その他の消失過程
 - ⇒HとOの散逸が水の2:1の割合で起きてるとは断定できない。

現在の合計散逸率

- Hの現在の散逸率は質量換算で160–1800g H/s
- 観測されたOの散逸率は質量換算で~1500g O/s
⇒合計散逸率は~2-3kg /s

42億年間で積分した値でも、想定されている過去からの大気流出の総散逸量には達しない。

	H Jeans	O ion	O Dissoc Recomb	O sputtering	Total loss thru time
Present-day loss rate from MVN (s^{-1})	$1.6-11 \times 10^{26}$	5×10^{24}	5×10^{25}	3×10^{24}	
4.2 b.y. at present rate, H ₂ O	3.6-25.2 m	0.2 m	2.2 m	0.14 m	
4.2 b.y. at present rate, CO ₂		6 mbar	68 mbar	4 mbar	

現在の合計散逸率

これは現在の大気散逸を完全に描写しているわけではない。

・その他の影響として考えられるもの

解離再結合でのNの存在と流出(Fox, 1993)、Cの光化学的流出
(Groller et al., 2014; Amerstorfer et al., 2017)

Jeans' escapeによる重水素(D)の流出(Yung et al., 1998)、上層大気に入る重力波などの大気の力学現象(Yigit et al., 2015)の影響

太陽活動による影響

- 太陽の活動により気体の流出量に変化があると考えられる。

太陽フレアやSEP(Solar energetic particle)イベント、CMEs(Coronal mass ejections)により、イオン化光子フラックスの増加、大気での電離の促進、惑星間プラズマの擾乱などが起こる。

2015/5/8のICMEイベントでのMAVEN観測結果から太陽天頂角 $\sim 40^\circ$ では散逸率が10 \sim 20倍であった (Jakosky et al, 2015b)

しかし下流の太陽天頂角 $\sim 135^\circ$ では大きな増加は見られなかった。

太陽活動による影響

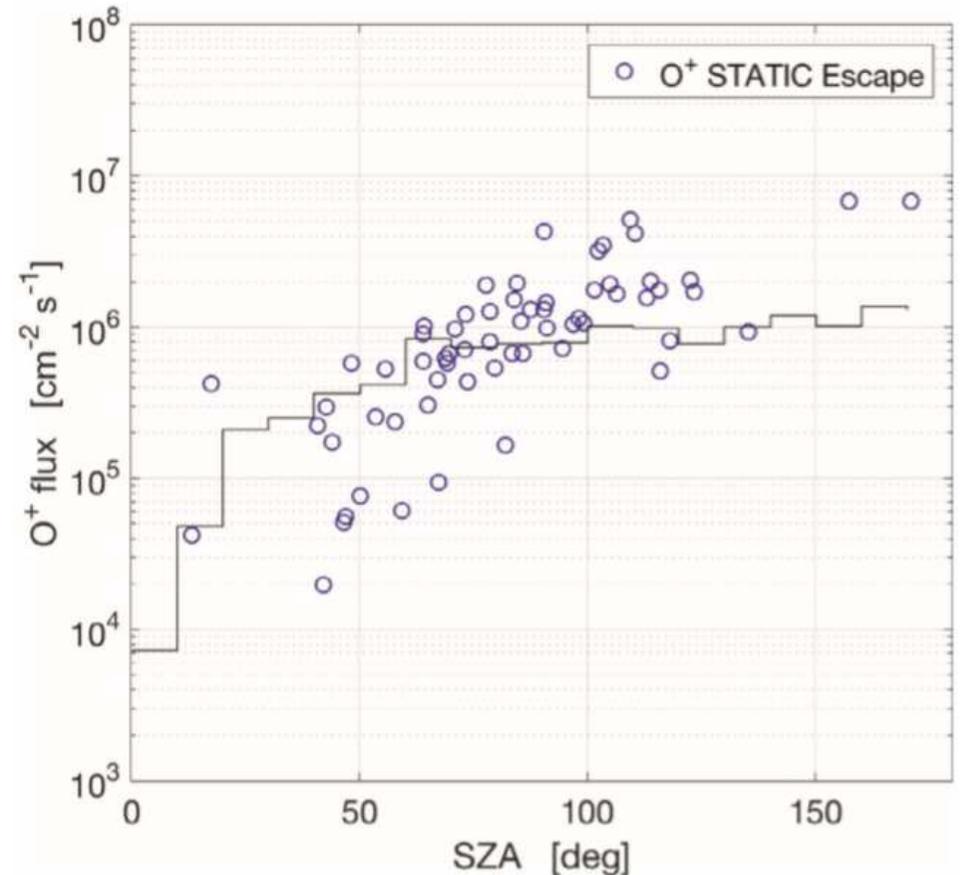
- ICMEイベントの統計的分析
(Curry et al, 2018)

太陽風における速度、密度、磁場の変化に関係した事前に決定した基準を用いてICMEを特定。

外向きのO⁺イオンを観測

→散逸率はでは低SZAでは一般的に減少、高SZAでは一般的に増加

Curry et al, 2018



ICMEイベント時のO⁺イオンの外向きフラックスと平均値との比較

目的

① MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution) による観測から
現代での火星大気の散逸率の議論

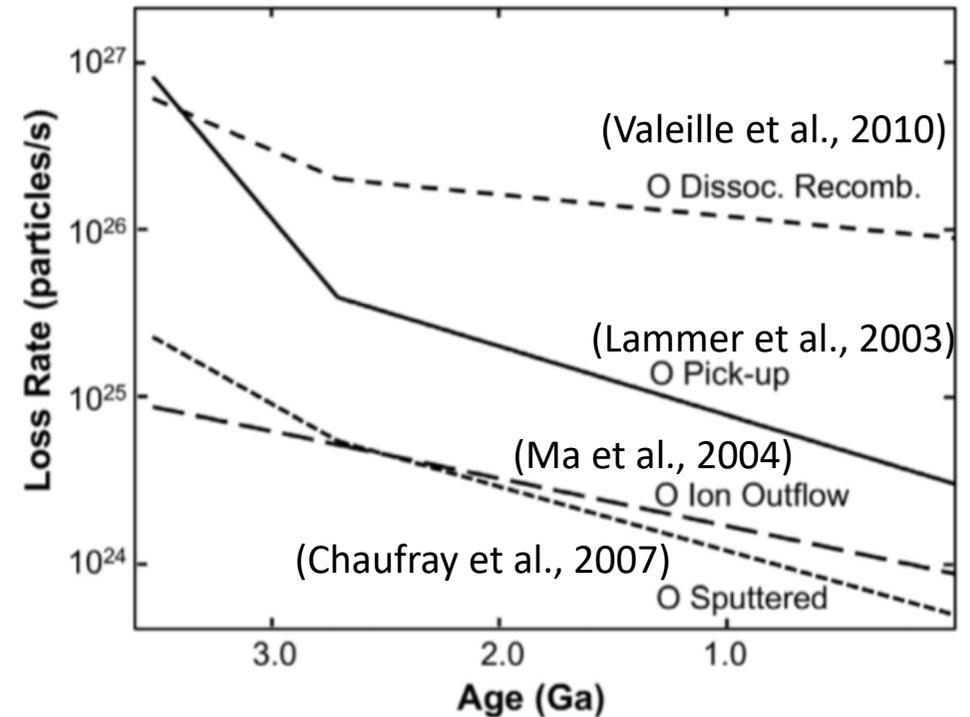
② 時間の経過に伴う大気の損失割合とその合計を議論

過去の散逸率

- 過去と現在の過程で異なる大気散逸に与える重要な要因は太陽からのEUVフラックスであると考えられる。

- Oの散逸率の推定のためChassefiere et al. 2013のモデルを利用

関数の形で散逸率の時間変化を仮定し、MAVEN観測で得られた現在の散逸率に合うように定数をかけて利用。



各過程の散逸率の時間変化
(Chassefiere et al., 2013)

過去の散逸率

- 42億年から35億年前からの総散逸量を計算するためこのモデルを基準として利用
 - ←この時期は地学的に気候変動が見られる証拠があり(Carr, 2007)散逸の役割を決定付けるのに有効であると考えられるため。

過去の散逸率

極端紫外線 (EUV) フラックスに注目したモデルの利用

0について、Chassefiere et al, 2013に加えて解離再結合による散逸に関してLillis et al, 2017を用いて推定

観測の分散、観測値への指数関数のフィッティングとそれから観測値幅外のEUVフラックス値への推定の難しさから大きな不確実性がある。

過去の推定値との比較として(Luhmann et al, 1992)を使用。

過去から現在までの合計散逸量

Chassefiere et al, 2013 , Lillis et al, 2017, Luhmann et al, 1992による
過去から現在までの散逸量

- 現在の散逸量を積分したものと、モデルを利用し計算した散逸量で大きな差がある。

4.2 b.y. at present rate, H ₂ O	3.6-25.2 m	0.2 m	2.2 m	0.14 m	
4.2 b.y. at present rate, CO ₂		6 mbar	68 mbar	4 mbar	
CO ₂ loss, extrap. from L1992		630 mbar	113 mbar	7 bar	7.7 bar
CO ₂ loss, extrap. from C2013		525 mbar	227 mbar	42 mbar	0.79 bar
CO ₂ loss, extrap. from L2017			460 mbar		0.46 bar
H ₂ O loss, extrap. from L1992		22.1 m	3.6 m	227 m	253 m
H ₂ O loss, extrap. from C2013		18.8 m	2.9 m	1.4 m	23 m
H ₂ O loss, extrap. from L2017			16 m		16 m

過去の散逸率

- Hの過去の流出量推定の問題点
- 南側の夏季にダストが大気温を上昇させ、大気内のH₂Oを浮上させるのが最もらしいとはいえ、終始すべてをきちんと説明できるわけではない。
 - MAVEN観測の1火星年での値が現在の散逸率で代表的なものであるとは断定できない。
 - 極度に高いあるいは低いHの散逸率がより代表的であるかもしれない

推定に影響を与える要因

- ① MAVENは1火星年しか観測していないこと
- ② 火星の軌道要素における変化への散逸率の応答を調査していないこと
- ③ 組成の点で過去の大気を現在の大気と同じとして仮定して推定していること
- ④ 過去の境界条件がどうあるべきか定かでないこと
- ⑤ 火星初期の太陽との相互作用に関する様々なモデルでは大気散逸率に幅があること

←推定に不確実性が多いものの、現在よりも過去のほうが散逸率が大きく、総散逸量が多いことは明らかに見える。

結論

- MAVEN観測により得られた火星大気成分の現在の散逸率は、これまで一定だったとしても水、CO₂両方の量に大きな変化をもたらすと考えられる。しかし時間に対して一定ではなく過去のほうが大きかったと考えられる。
- 流出の時間積分の直接の指標としてMAVENの上層大気でのAr同位体観測を用いると70%近くのArが流出したと考えられ火星大気の大部分が流出したと考えられる。
- スパッタリングによる流出に加えて、CO₂はCとOの光化学的流出にも依存する。表面付近のCO₂蓄積の証拠不足と合わせても、想定される初期の厚い大気を宇宙空間への散逸によってとり除くことができた結論付ける。