

The interaction of Venus-like, M-dwarf planets with the stellar wind of their host star

Cohen, O., Ma, Y., Drake, J. J., Gloer, A., Garraffo, C.,
Bell, J. M., & Gombosi, T. I.

Astrophys. J., 806:41.

<https://doi.org/10.1088/0004-637X/806/1/41>

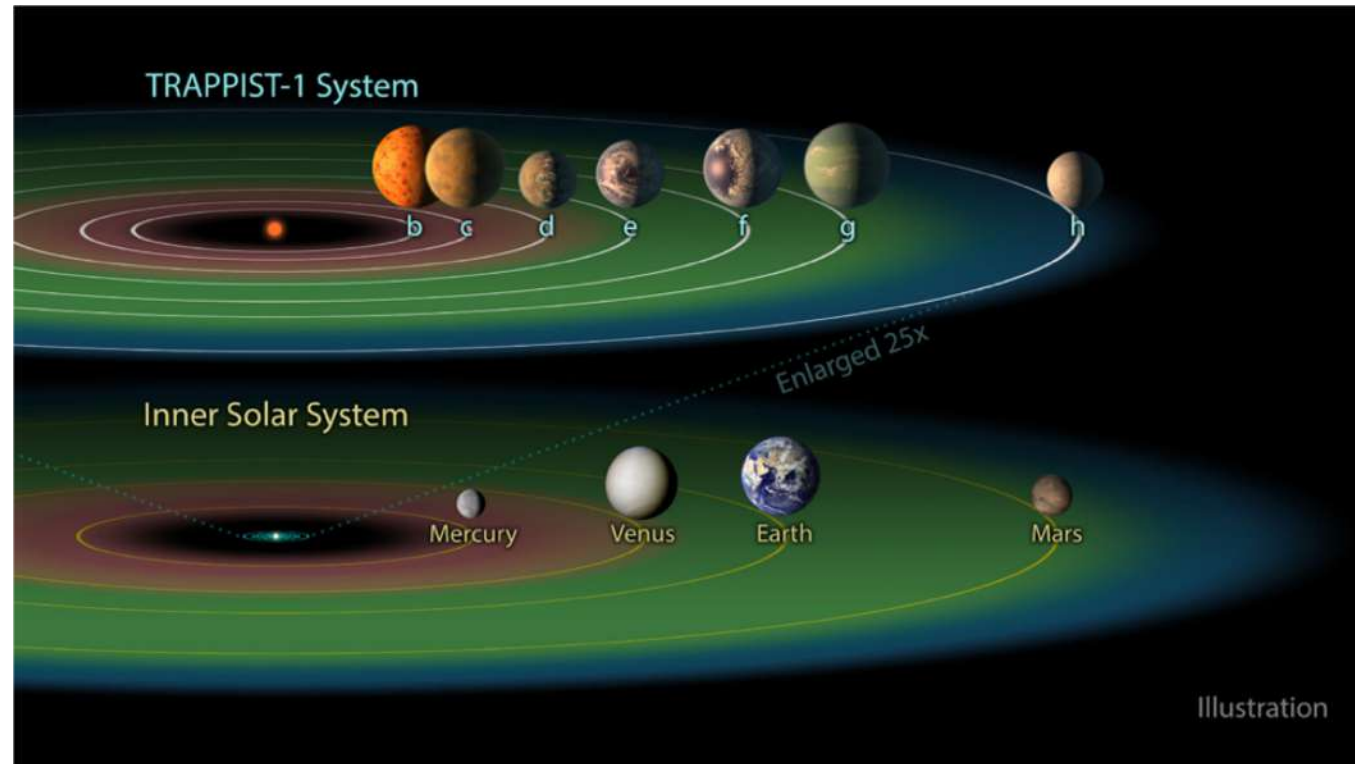
Presented by S. Sakai (U. Tokyo)

Abstract

- M型星を周回する金星型非磁化惑星の大気と恒星風の相互作用を多成分MHDモデルを用いて研究
 - 恒星からの距離が小さくなる時に、増大する恒星風及びEUVフラックスの影響について調査
 - サブアルヴェニック、スーパーアルヴェニック条件下で調査を行うことで、惑星が周回中に経験する、大気へのエネルギー付与を明らかにすることにつながる
- 恒星風は高度数百 km まで侵入
- 大気流出率の下限値を推定 → 惑星の一生を考えると重要でない
- しかし、イオン大気の加速を考慮すると、大気の大部分は10億年程で剥ぎ取られるかもしれない

Introduction

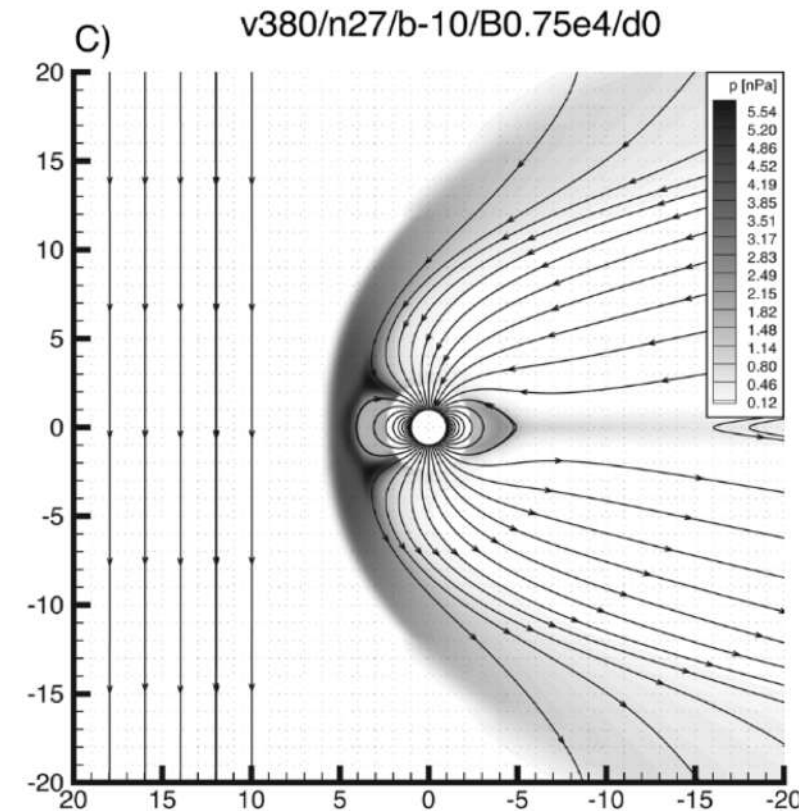
- M型星を周回する惑星にはハビタブル・ゾーン (HZ) に存在するものがある
- HZを決定する重要なパラメター
 - 大気上部での放射強制
 - 強XUVによる大気流出
 - 雲量やアルベド
 - 温室効果ガス
 - 大気循環
- 中心星に近い惑星では大気を保つことができるのか？
 - 火星はその大部分が失われた (e.g., Lammer et al., 2013, with references therein)



Credit: NASA/JPL-Caltech

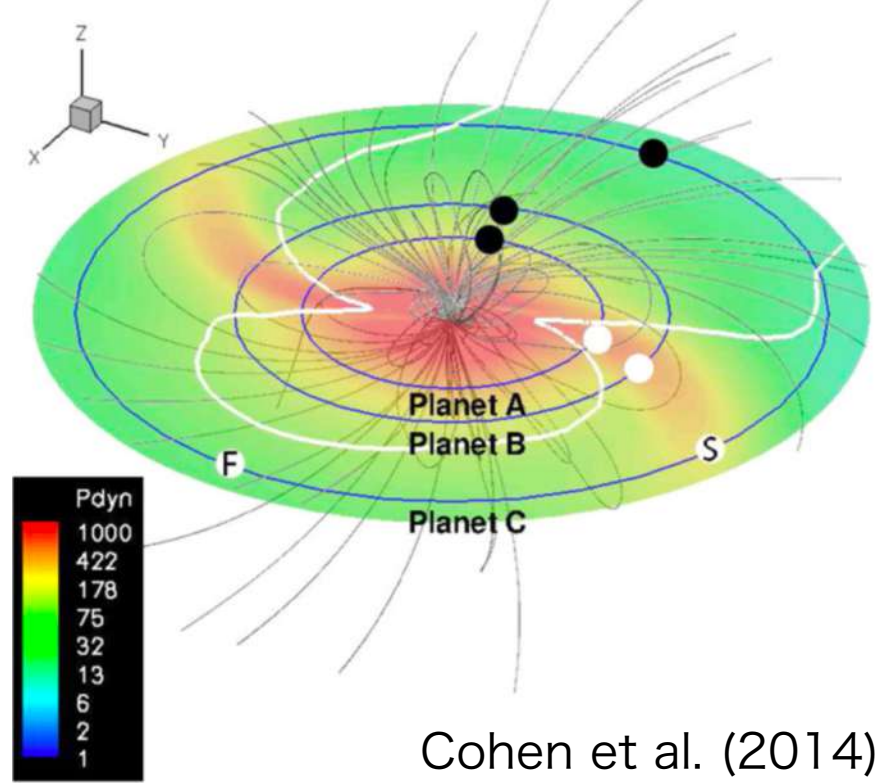
Introduction

- 中心星に近い惑星大気と周囲のプラズマとの相互作用に関連した多くの研究が存在
 - 粒子モデル or 流体モデル (Erkaev et al., 2005; Kilyakova et al., 2013, 2014)
 - CMEの影響 (Khodachenko et al., 2007; Lammer et al., 2007)
 - いずれの研究も強いEUV放射によって高流出率
- Sterenborg et al. (2011)
 - MHDモデル
 - 若い活動的な太陽環境下における, 太古代地球の磁気圏界面までの距離を計算
 - $\sim 4.25 R_E$
 - 現在は $10.7 R_E$
 - 磁気圏の圧縮は, 磁気活動の高い恒星環境下でも起こり得る



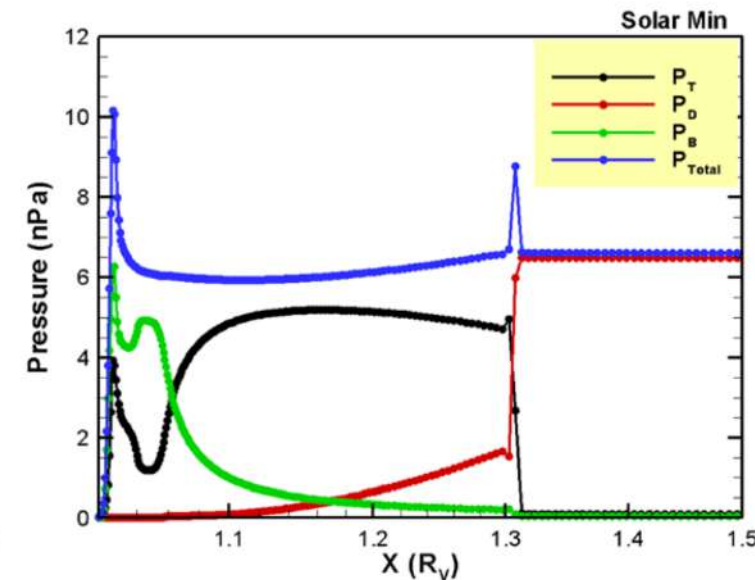
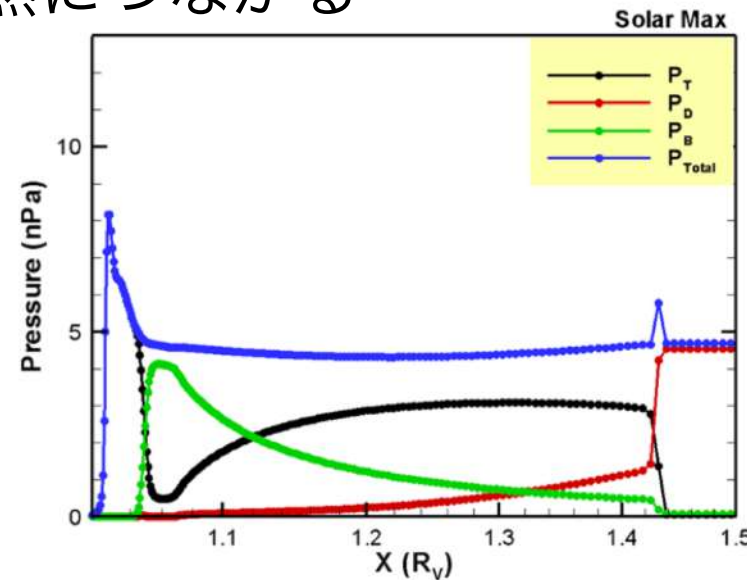
Introduction

- Cohen et al. (2014) → Co14
 - M型星を周回するHZ内にある地球型磁化惑星と恒星風との相互作用について研究
 - 中心星に近い惑星は周回中にサブアルヴェニック領域とスーパーアルヴェニック領域を行き来する
 - この領域移動は惑星大気加熱につながる



Cohen et al. (2014)

- Ma et al. (2013) → Ma13
 - 三次元多成分MHDモデル
 - 金星大気と太陽風の相互作用をSolarmin. & Solarmax.下で惑星全面のショック位置を比較



Ma et al. (2013)

Introduction & Numerical model

- 本論文
 - Ma13 モデルを用いて, M型星を周回する金星型系外惑星と恒星風との相互作用について研究
 - 不明なパラメータについては Ma13 のものを用いる
- 数値モデル
 - BATS-R-US MHDコード (Powell et al., 1999; Tóth et al., 2012)
 - Simulation domain
 - $-40 R_V < X, Y, Z < 40 R_V$
 - X: 恒星方向, Z: 黄道面に対して鉛直方向, Y: 右手系
 - グリッドサイズ
 - 高度600 km以下で 60 km

Numerical model

- 連続の式 $\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \mathbf{u}) = S_i - L_i,$

$$S_i = m_i N_i \left(\nu_{\text{ph},i} + \nu_{\text{imp},i} + \sum_s k_{si} n_s \right),$$

$$L_i = m_i n_i \left(\alpha_{R,i} n_e + \sum_t k_{it} n_t \right),$$

4イオン種：H⁺, O⁺, O₂⁺, CO₂⁺
各種反応率は Table 1

- 運動量の式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \mathbf{u} \mathbf{u} + p \mathbf{I} + \frac{B^2}{2\mu_0} \mathbf{I} - \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} \mathbf{B} \right) \\ &= \rho \mathbf{G} - \sum_i \rho_i \sum_t \nu_{it} \mathbf{u} - \sum_i L_i \mathbf{u}. \end{aligned}$$

- 誘導方程式

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \mathbf{B} - \mathbf{B} \mathbf{u}) = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \sigma_0} \nabla \times \mathbf{B} \right).$$

Numerical model

- エネルギー方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\mathbf{u} \left(\varepsilon + p + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \right) - \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{u}) \mathbf{B} \right. \\ & \left. + \mathbf{B} \times \frac{\nabla \times \mathbf{B}}{\mu_0 \sigma_0} \right] \\ & = \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{G} - \sum_i \sum_t \frac{\rho_i \nu_{it}}{m_i + m_t} \left[3k(T_n - T_i) - m_i u^2 \right] \\ & - \frac{1}{2} \sum_i L_i u^2 + \frac{k}{\gamma - 1} \sum_i \left(\frac{S_i T_n - L_i T_i}{m_i} \right. \\ & \left. - \frac{\rho_i}{m_i} \alpha_{R,i} n_e T_e \right), \end{aligned}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \rho u^2 + \frac{1}{\gamma - 1} p + \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

-
- $T_e = T_i$ を仮定
 - $T_n = 1500$ K

Stellar wind & Simulation settings

- EV Lac (EV Lacertae): M3.5 V
 - 恒星風とコロナをMHDシミュレーションすることでモデル化 (Morin et al., 2008; Co14)
- Kepler-Kepler Object of Interest (KOI) によって観測されたHZにある惑星を利用
 - KOI2626.01 → 0.06 AU
 - KOI1422.02 → 0.085 AU
 - KOI854.01 → 0.15 AU
- リファレンスとして
 - 金星軌道 → 0.72 AU
 - 水星軌道 → 0.39 AU

も使う

Case Study

1. サブアルヴェニック

Table 2
Sub-Alfvénic Stellar Wind Parameters

r (AU)	n (cm ⁻³)	T (K)	u_x (km s ⁻¹)	u_y (km s ⁻¹)	u_z (km s ⁻¹)	B_x (nT)	B_y (nT)	B_z (nT)	M_a	F_{EUV} (F_{\odot})
0.06 (KOI 2626.01)	450	1,000,000	-600	0	0	0	0	2,000	0.29	144
0.085 (KOI 1414.02)	160	750,000	-700	0	0	0	0	800	0.5	72
0.15 (KOI 854.01)	45	500,000	-700	0	0	0	0	250	0.86	23
^a 0.39 (Mercury)	15	300,000	-700	0	0	0	0	50	2.5	3.4
^a 0.72 (Venus)	10	250,000	-700	0	0	0	0	10	10.1	1

Note.

^a The cases labeled “Venus” and “Mercury” are super-Alfvénic.

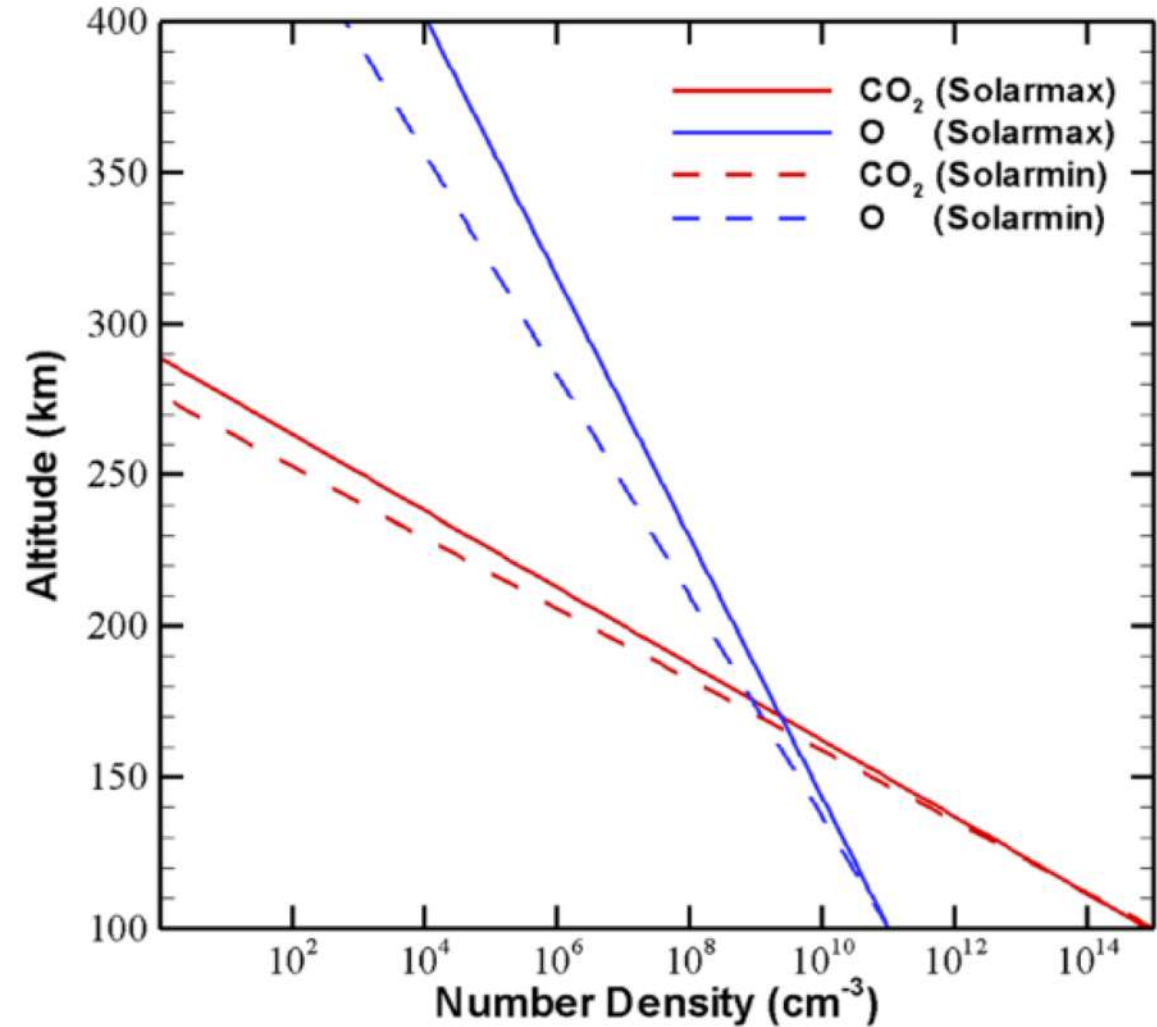
2. スーパーアルヴェニック

Table 3
Super-Alfvénic Stellar Wind Parameters

r (AU)	n (cm ⁻³)	T (K)	u_x (km s ⁻¹)	u_y (km s ⁻¹)	u_z (km s ⁻¹)	B_x (nT)	B_y (nT)	B_z (nT)	M_a	F_{EUV} (F_{\odot})
0.06 (KOI 2626.01)	35,000	800,000	-200	0	0	0	0	500	3.4	144
0.085 (KOI 1414.02)	12,500	450,000	-250	0	0	0	0	250	5.1	72
0.15 (KOI 854.01)	3,000	200,000	-300	0	0	0	0	100	7.5	23
0.39 (Mercury)	50	300,000	-450	0	0	0	0	50	2.9	3.4
0.72 (Venus)	10	250,000	-450	0	0	0	0	10	6.5	1

Neutral atmosphere

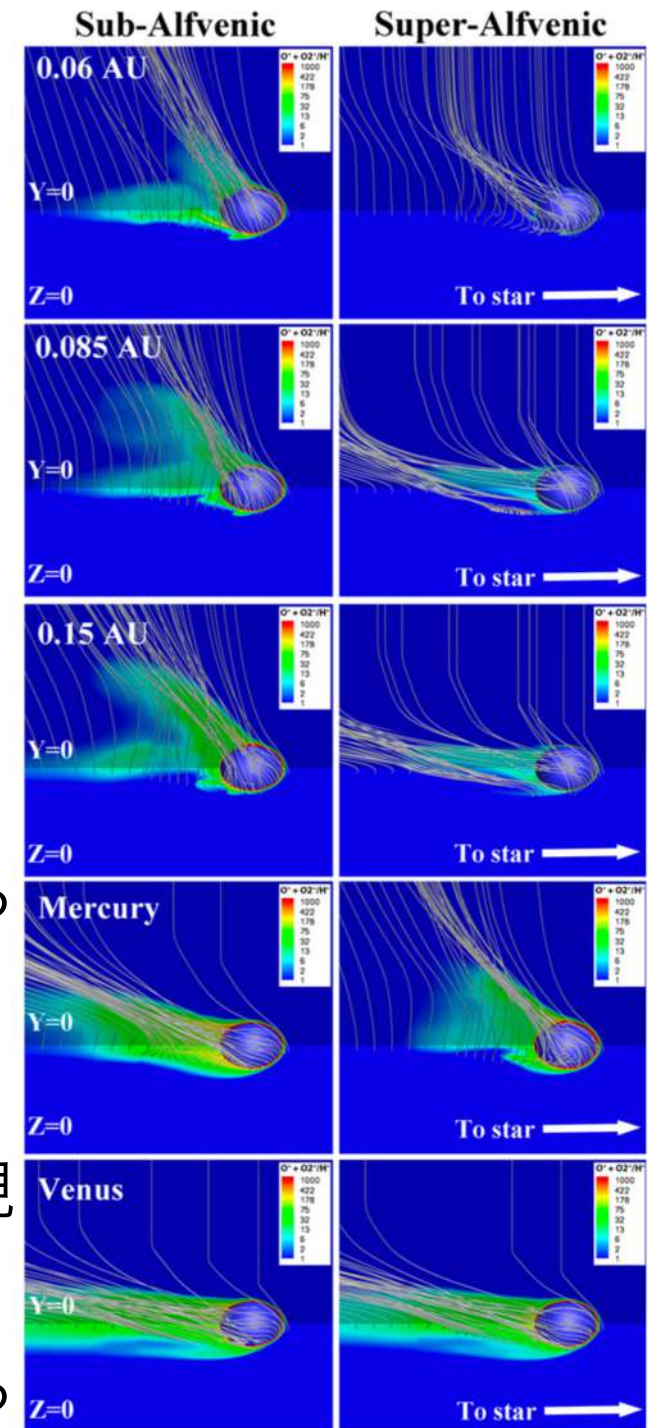
- 中性大気分布
 - Ma13 の Solarmax を使用
 - これらが光電離, 衝突電離, 電化交換, 再結合を経験し, 電離圏を形成



Ma et al. (2013)

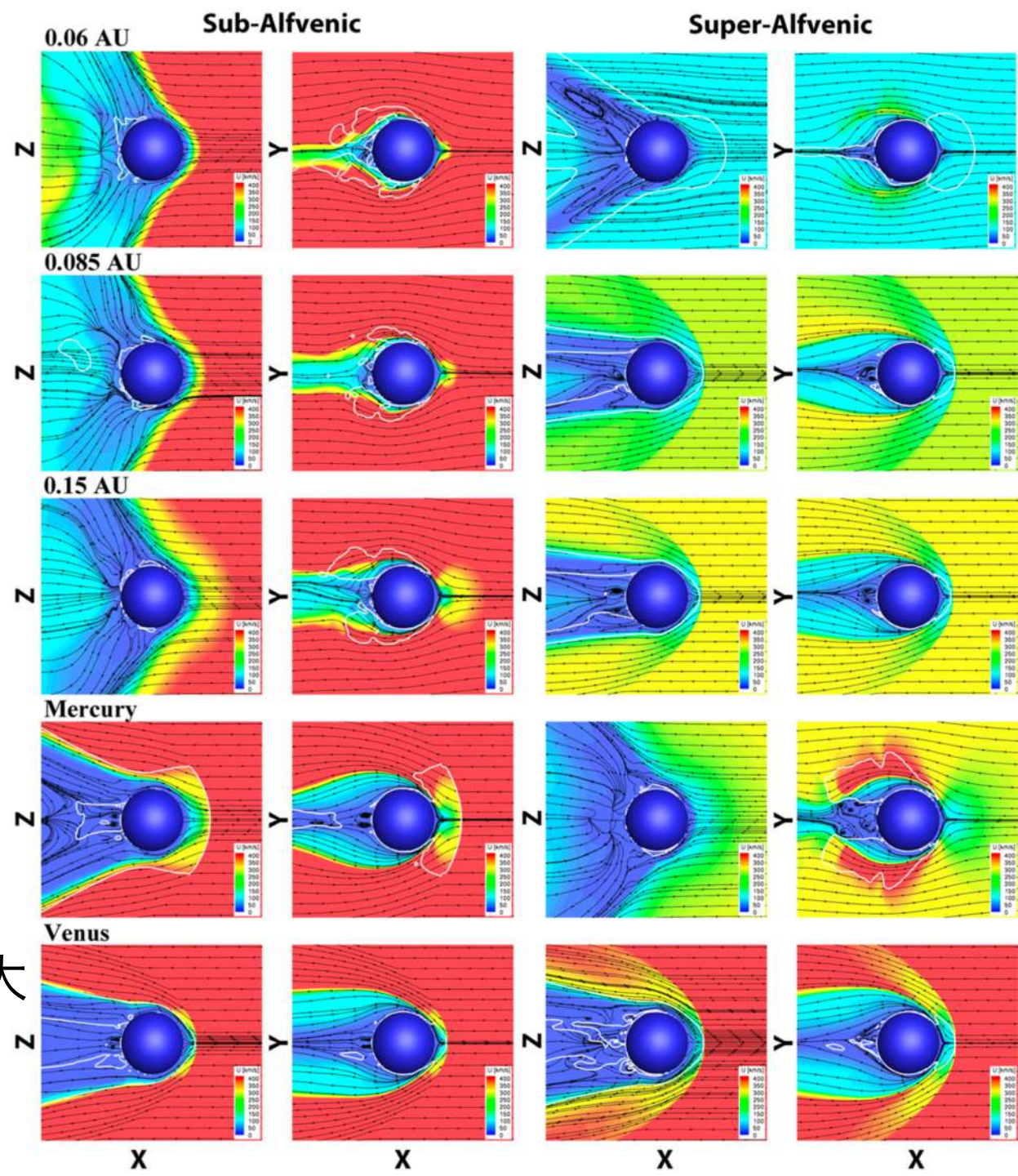
Results: Ion species

- 酸素イオンが惑星近傍で支配的
 - プロトンの10倍以上
 - 0.06 AU スーパーアルヴェニック：恒星風プロトンが支配的
- 大気下部とウェイク領域で酸素が支配的
- スーパーアルヴェニック
 - 酸素イオンが支配的な領域は赤道面に制限
 - 水星は小マッハ数なため、酸素がローブ領域に達する
- サブアルヴェニック
 - 酸素イオンが支配的な領域はローブ領域まで達する
 - この構造はプラズマ中を移動する天体では典型的な現象
 - ローブ領域は惑星起源の酸素イオンで満たされている

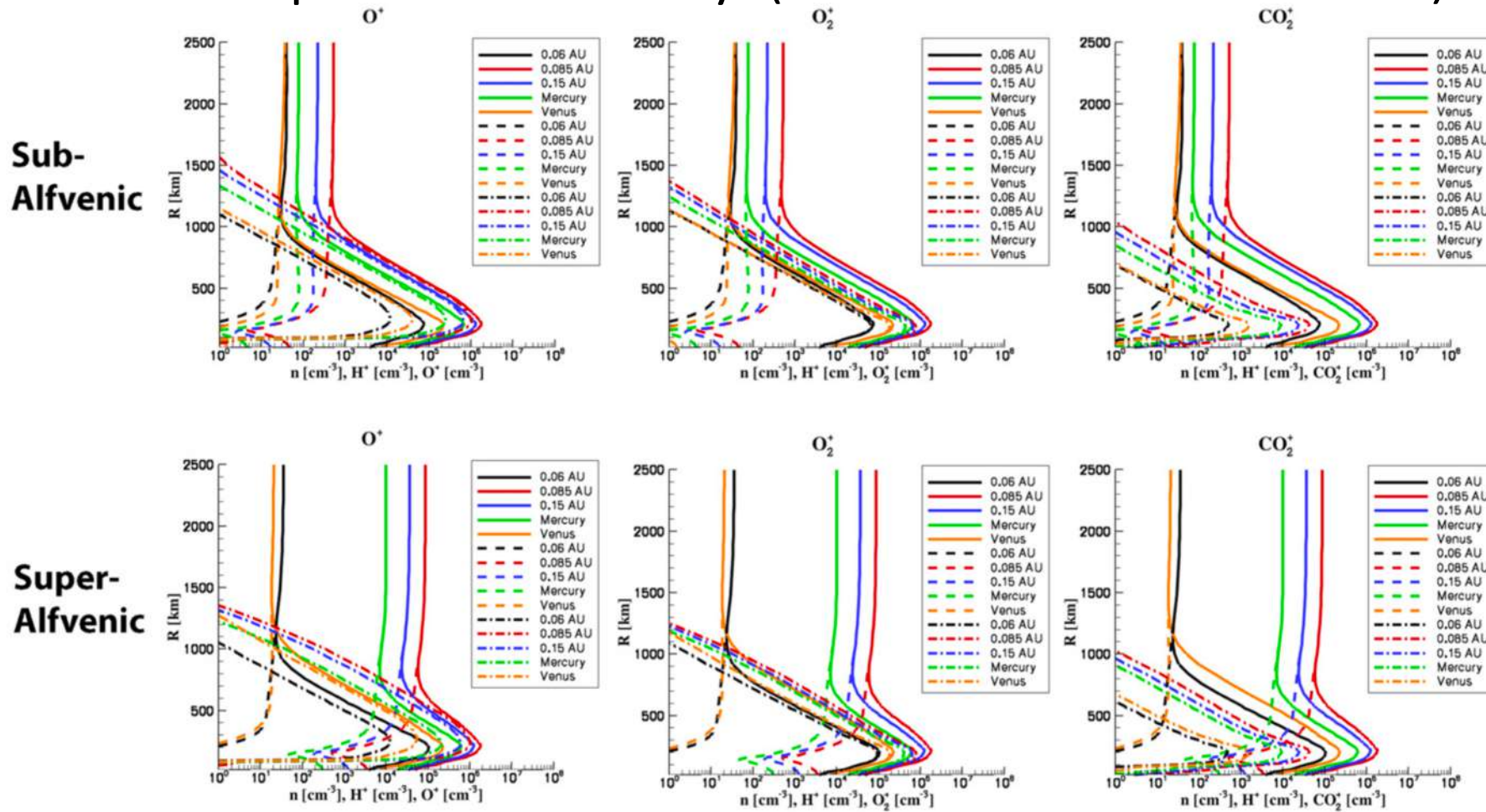


Results: Flow pattern

- サブアルヴェニック
 - バウショックがない
 - 高度600-800 kmで100 km/s以下に減速
 - ローブの影響で流れが大きく曲がる
- スーパーアルヴェニック
 - ショックが形成
 - 低高度で高い速度が維持
 - 惑星に向かう単純な流れ
 - 低マッハ数 (0.06 AU, 水星)
 - 低速なウェイク領域が南北方向に増大
 - 高マッハ数
 - 低速なウェイク領域は赤道面周辺



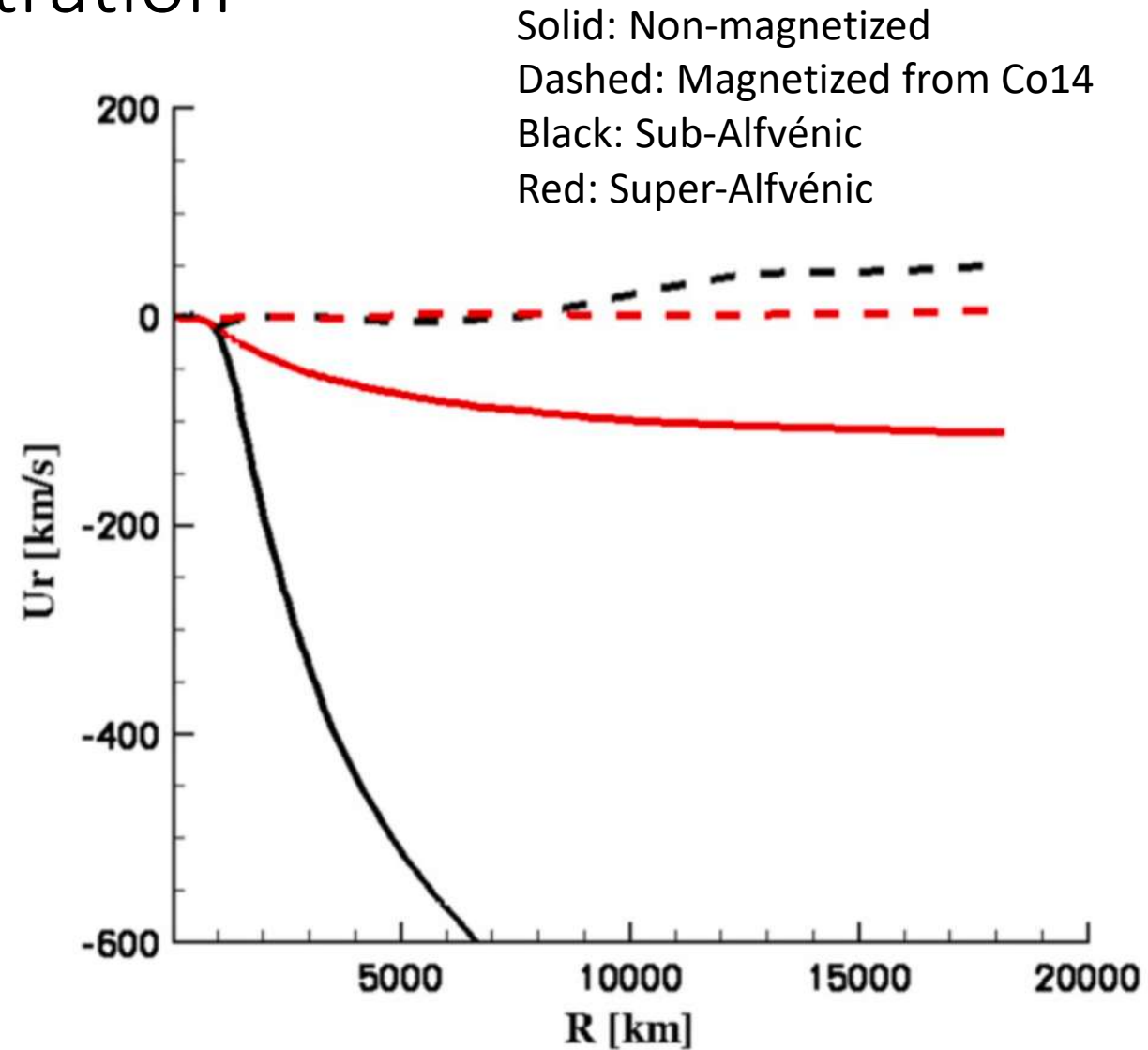
Results: Ionospheric density (sub-stellar direction)



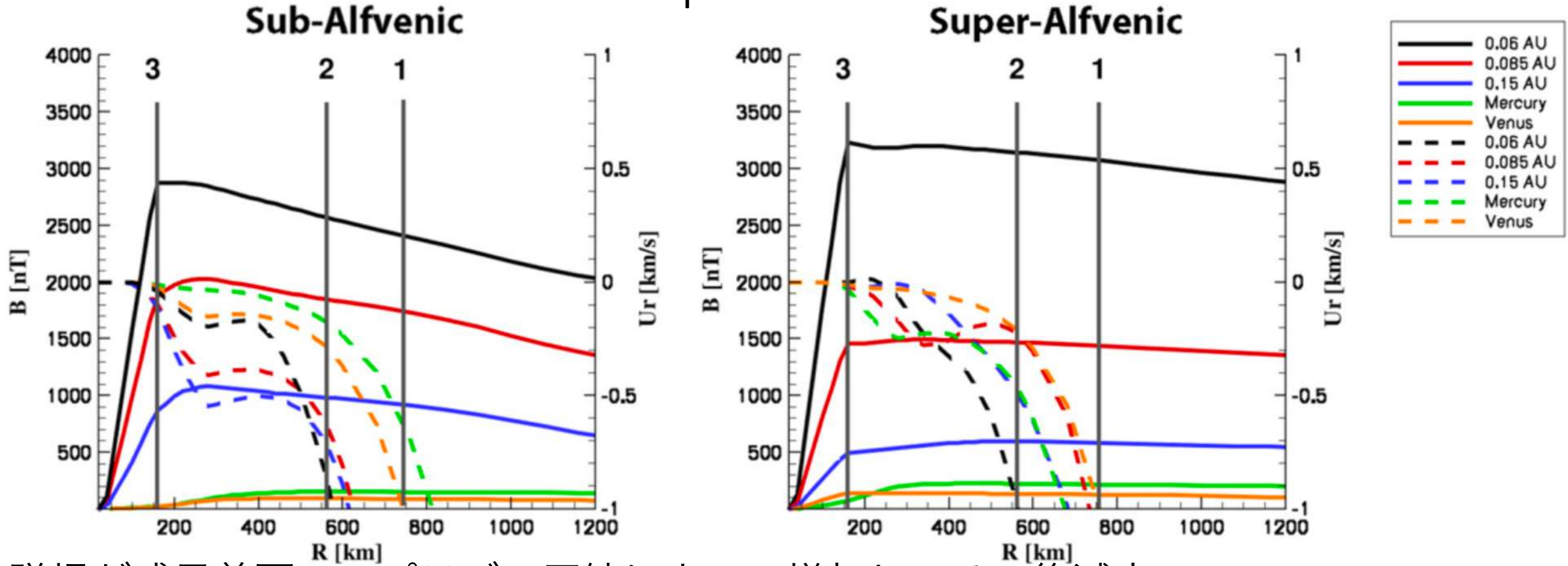
- 高度1000-1500 km以上でプロトンが支配的
- イオン密度は高度300 km付近でピークを持つ
- EUVフラックスの増加はイオン密度を増大
- イオン密度とプロトンが同じ密度になる高度はスーパーアルヴェニックでより低い

Discussion: Stellar wind penetration

- 磁化惑星 (Co14)
 - アウトフローが卓越
 - サブアルヴェニックでもアウトフロー
- 非磁化惑星
 - インフローが卓越
 - スーパーアルヴェニックで弱いインフロー

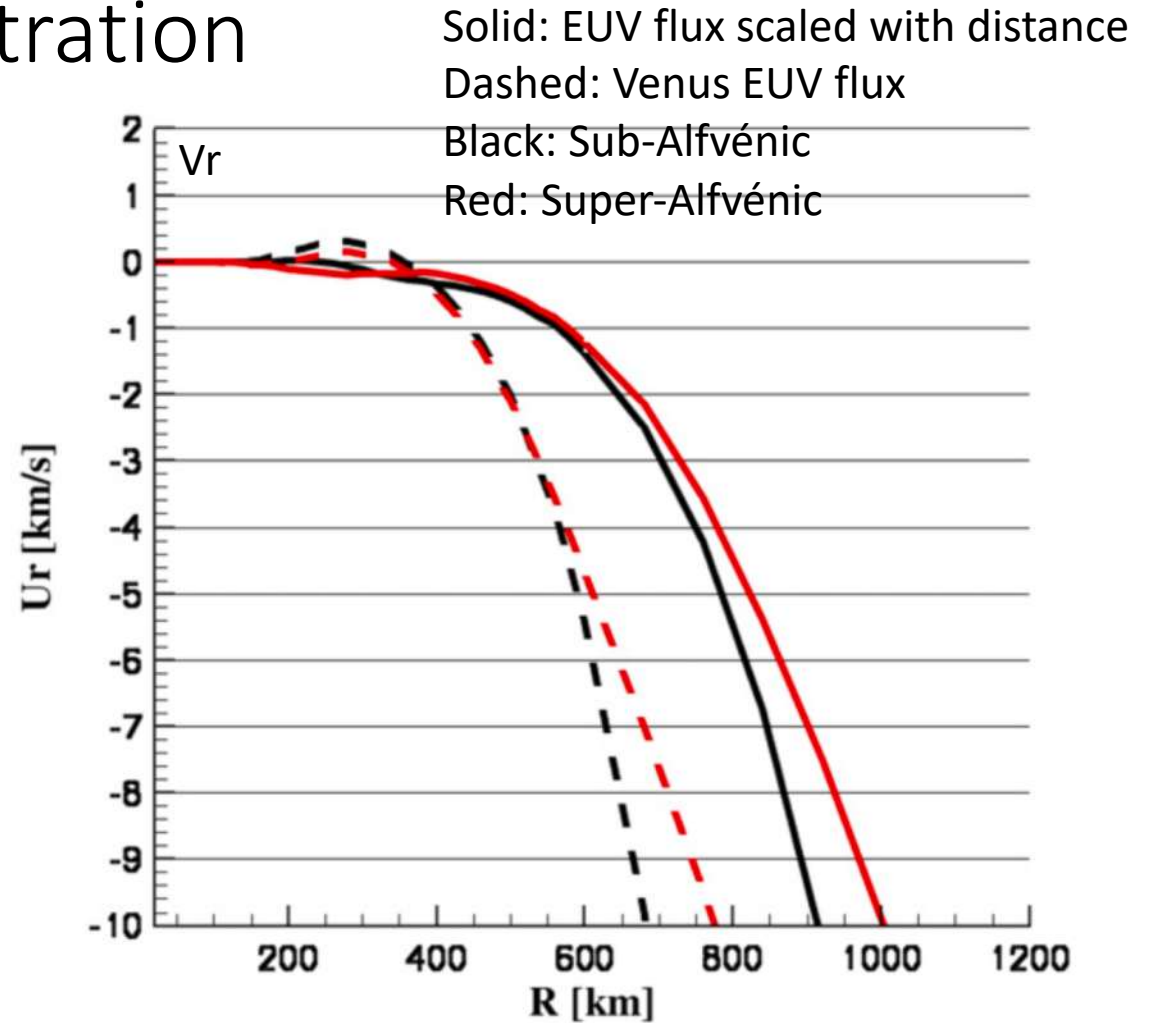
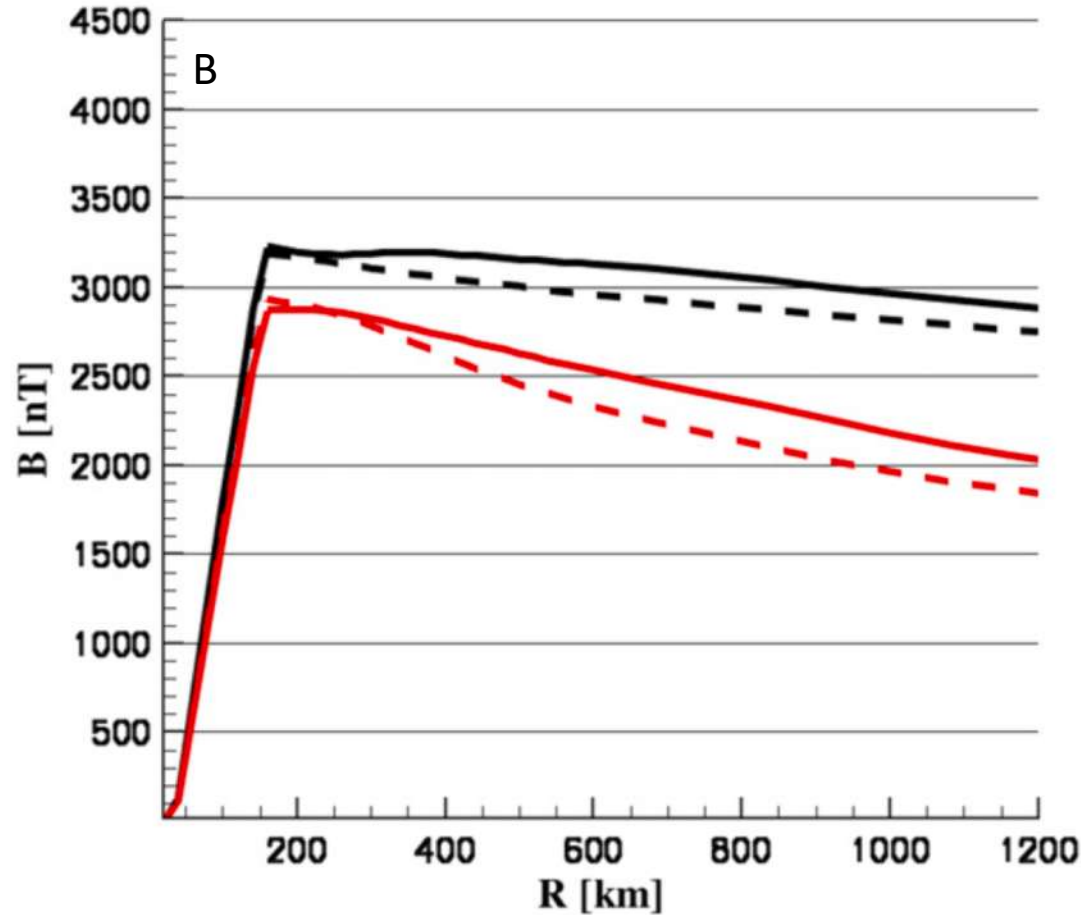


Discussion: Stellar wind penetration



- 磁場が惑星前面でのプラズマ圧縮によって増加し，その後減少
 - スーパーアルヴェニックでは，line3 が同じ高度
 - サブアルヴェニックでは，line3 は恒星の距離と共に上昇
- サブアルヴェニックではスーパーアルヴェニックより恒星風密度が少ないため，酸素アウトフローの影響を受けやすくなる

Discussion: Stellar wind penetration

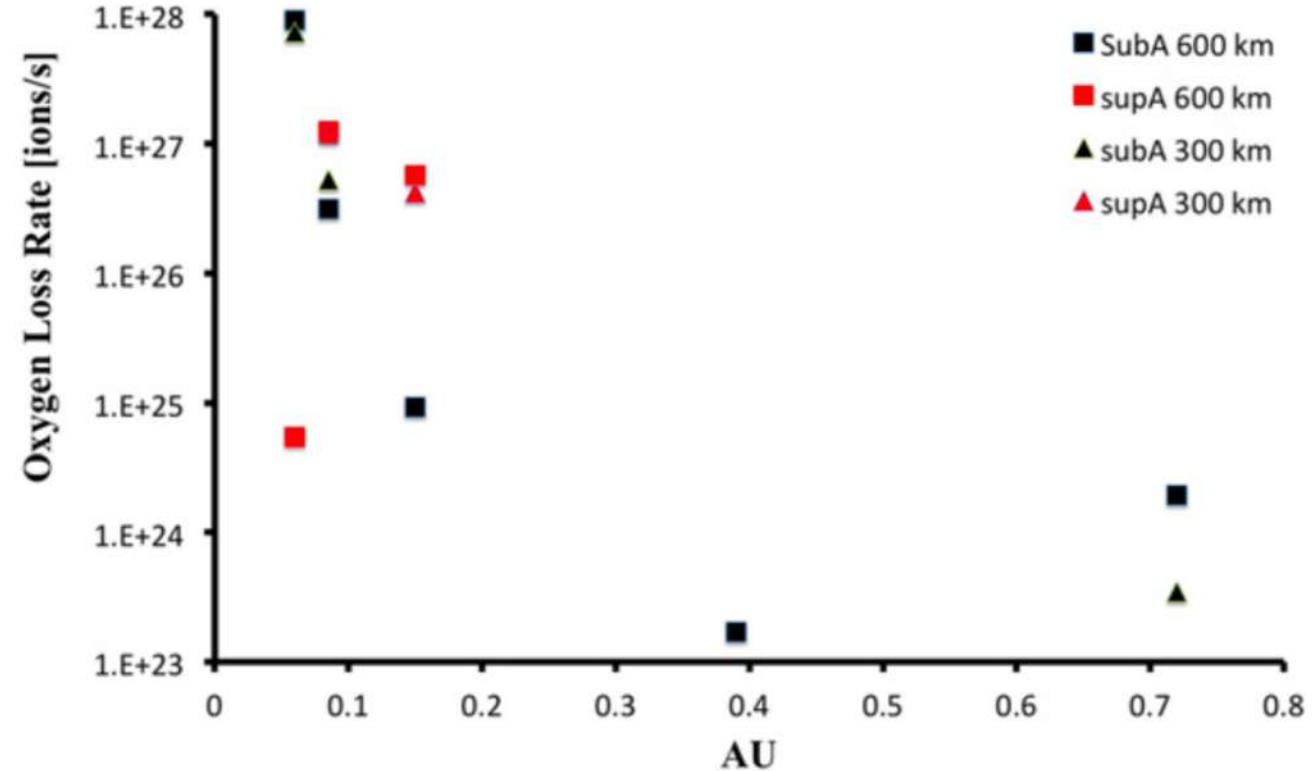


Solid: EUV flux scaled with distance
Dashed: Venus EUV flux
Black: Sub-Alfvénic
Red: Super-Alfvénic

- 高EUVではイオンを多く生成するので、恒星風の侵入高度を制限させる
 - Scaled EUV では約200 km高い高度で抑制
- 高イオンフラックスは磁場の更なる圧縮にも関係するはず

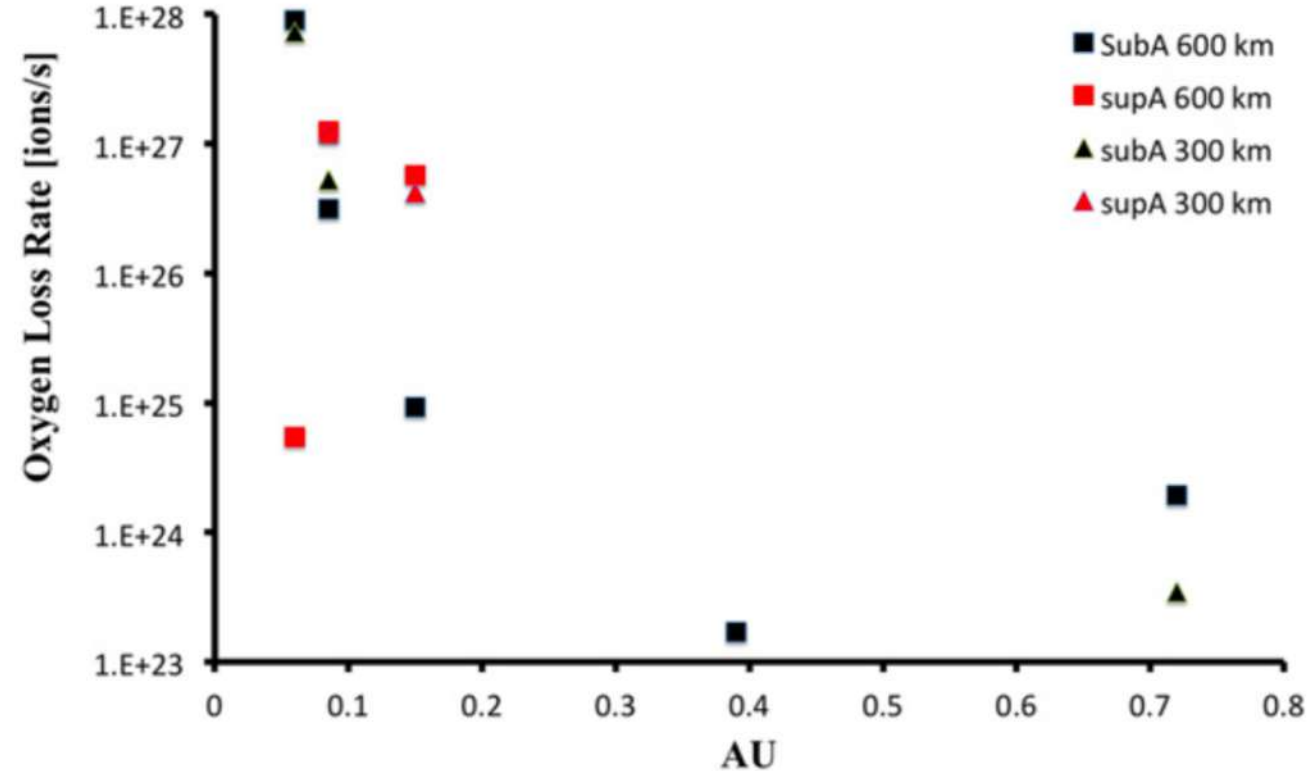
Discussion: Atmospheric escape rate

- 金星のO⁺流出率： $\sim 10^{24} \text{ s}^{-1}$
- 恒星近傍では $10^{27} - 10^{28} \text{ s}^{-1}$
 - 強EUVのため
- Mass-loss rate
 - $10^{-15} - 10^{-11} M_{\text{Va}} \text{ yr}^{-1}$
 - 金星の40億年前のMass-loss rateと似ている (Kulikov et al., 2006)
 - このレートはホットジュピターにおける流体力学的散逸計算より低い
 - 水素リッチは大気ではCO₂大気と比べて膨らみやすく，圧力バランスが変わる



Discussion: Atmospheric escape rate

- 0.06 AUにある惑星では、サブアルヴェニックの流出率がスーパーアルヴェニックよりも顕著に高い
 - 密度の高い太陽風が、強EUV下で生成された酸素流出を抑制
- 基本的に恒星風密度の低いサブアルヴェニックの時が高い流出率
 - 0.085 AU & 0.15 AU は例外
 - 惑星のショック前面での恒星風の減速のため



Discussion: Atmospheric escape rate

- M型星を周回する金星型系外惑星のわずかな大気だけが10億年かけて失われる
- シミュレーションから、このタイプの惑星は大気を維持することができる
- 実際の流出率はもっと多いかもしれない
 - 強EUV下でのイオン密度の増大
 - 極風に関連した高高度でのイオン加速に伴うイオン速度の増大
→ 10億年程度かけてほとんどの大気を失うかもしれない
- より正確な流出率の推定は、高層大気中のイオン加速や温度のEUV依存性、電気伝導度、自己無頓着な光電離モデルを現モデルと結合させる必要があるだろう

Summary & Conclusion

- 三次元多成分MHDモデルを用いて, M型星を周回する金星型非磁化惑星 大気と恒星風相互作用について研究
 - 0.06, 0.085, 0.15 AU にある 3 つのHZ内の惑星
- サブアルヴェニックでは南北方向に伸びたウェイク or ロープ, スーパーアルヴェニックでは赤道面に制限されたウェイクを形成
 - 惑星が公転中に, 両方の恒星風条件を通過することで, 加熱や重力波の形で惑星大気にエネルギー付加し得る
- 非磁化惑星への恒星風の大気への侵入はCo14で示された磁化惑星よりも深い
 - 強EUVにより多くのイオンが作られるため, よどみ点を200 km程押し上げる
 - 惑星前面での恒星風磁場による圧縮を増大させる

Summary & Conclusion

- O⁺流出率の下限値を推定
 - 大気は惑星の一生を通じて保持できる可能性
 - しかし、他の加速機構などを考慮すると、流出率は増加
 - Future work