

Atmospheric Escape processes and Planetary Atmospheric Evolution

Gronoff et al. (2020). Journal of Geophysical Research: Space Physics, 125(8), e2019JA027639.

5章~ 担当: 中山陽史(東大)

5. Escape at Exoplanets

6. Developments Needed in Measurements and Modeling
of Atmospheric Escape

7. Discussion and Conclusion

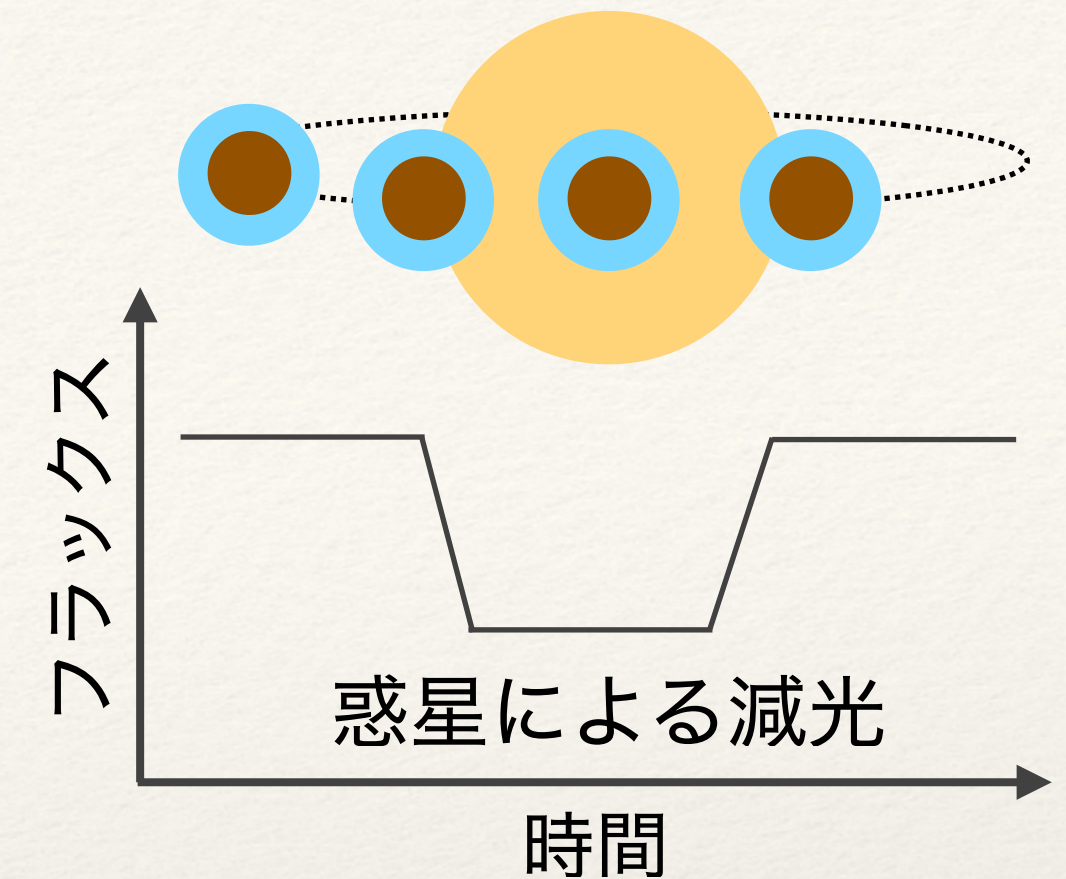
5.1.1 Close-in Giants (ホットジュピター)

輝線観測を用いた流出する大気の観測

HD299458b (他数惑星)では惑星トランジット中の

水素や金属輝線(e.g., O)の吸収観測によって流出大気の性質を制約

→ 大気は惑星ヒル半径まで広がり, 脱出速度 $\sim 100\text{km/s}$, 流出率 $\sim 10^7\text{ kg/s}$



数値モデルを用いた観測の解釈

- 熱的散逸モデル(Yelle+2004)

強いUV加熱による大気の広がりと流体力学的散逸を示す

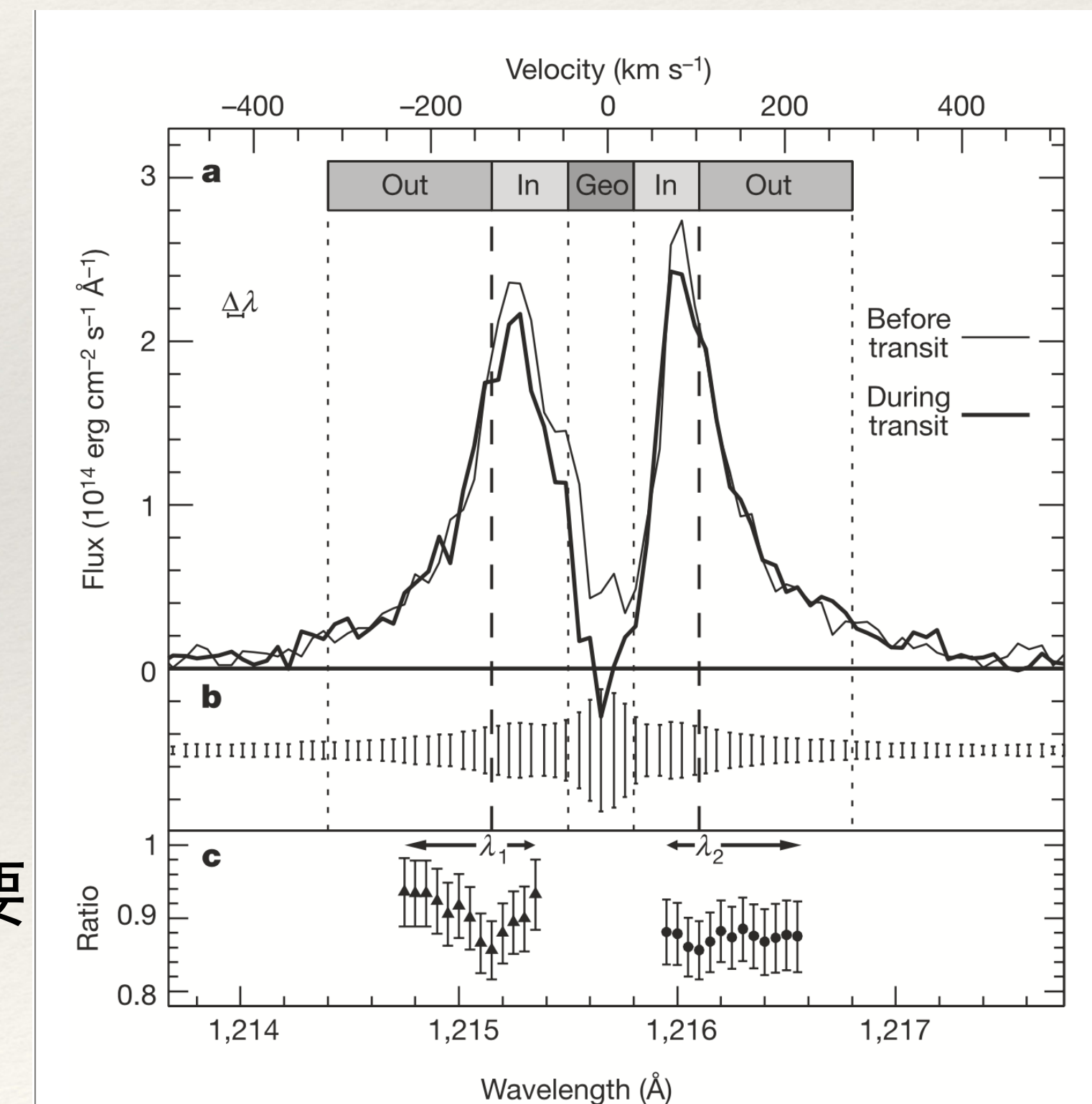
UV加熱と断熱膨張の釣り合いで温度 10^4K まで大気は加熱

熱速度 10km/s (観測と矛盾)

- 非熱的散逸モデル(Holmstrom+2008)

恒星風との電荷交換で高速度の水素原子生成(観測と調和的)

恒星風とよく相互作用するためには大きい断面積(大気の広がり)が必要



吸収特徴を説明するには熱的・非熱的両方が重要

[Vidal-Madjar+2003]

5.1.2 岩石型惑星

現状の観測的理解

- ・ 観測の困難さ(半径小, 公転周期大)からまだ流出大気の観測例はない
- ・ 唯一短周期スーパーアース(KIC12557548b)で可視吸収が観測(Rappaport+2012)

数値モデルによる強い大気散逸の示唆

HZ内に地球サイズ惑星が存在する低温度星(Proxima, TRAPPIST-1)に対して様々な検討がなされている

- ・ 非熱的散逸モデル(Garcia-sage+2017)からは地球海洋水量がGyrスケールで散逸
- ・ 熱的散逸モデル(Johnstone+2019)からはEarth-like 大気は容易に散逸

➡ Gyrスケールで大気/海を持つためには揮発性成分を多く獲得して惑星が作られた？

大気存在は吸収+放射光に特徴として現れるため、次世代の宇宙望遠鏡(JWST)を用いて、
理解が進むと期待される

5.2 The stellar wind and the Alfven surface

M型星においては惑星は恒星の影響を強く受ける

- M型星は磁場が強く、HZは恒星に近い($<0.1\text{AU}$)

→ 惑星がAlfven surface より内側に存在し、恒星コロナの影響を受ける

Alfven surface: 恒星風がアルフベン速度まで加速される軌道
(恒星コロナと星間の境界)

- Alfven surface 内における恒星風の影響

恒星風密度, 磁場強度は地球に比べて2-4桁強い[Garraffo+2016b]

→ 強い動圧+磁気圧で惑星磁気圏はオープンに(Io-like Alfven wings)

惑星磁気圏と強い相互作用が期待される

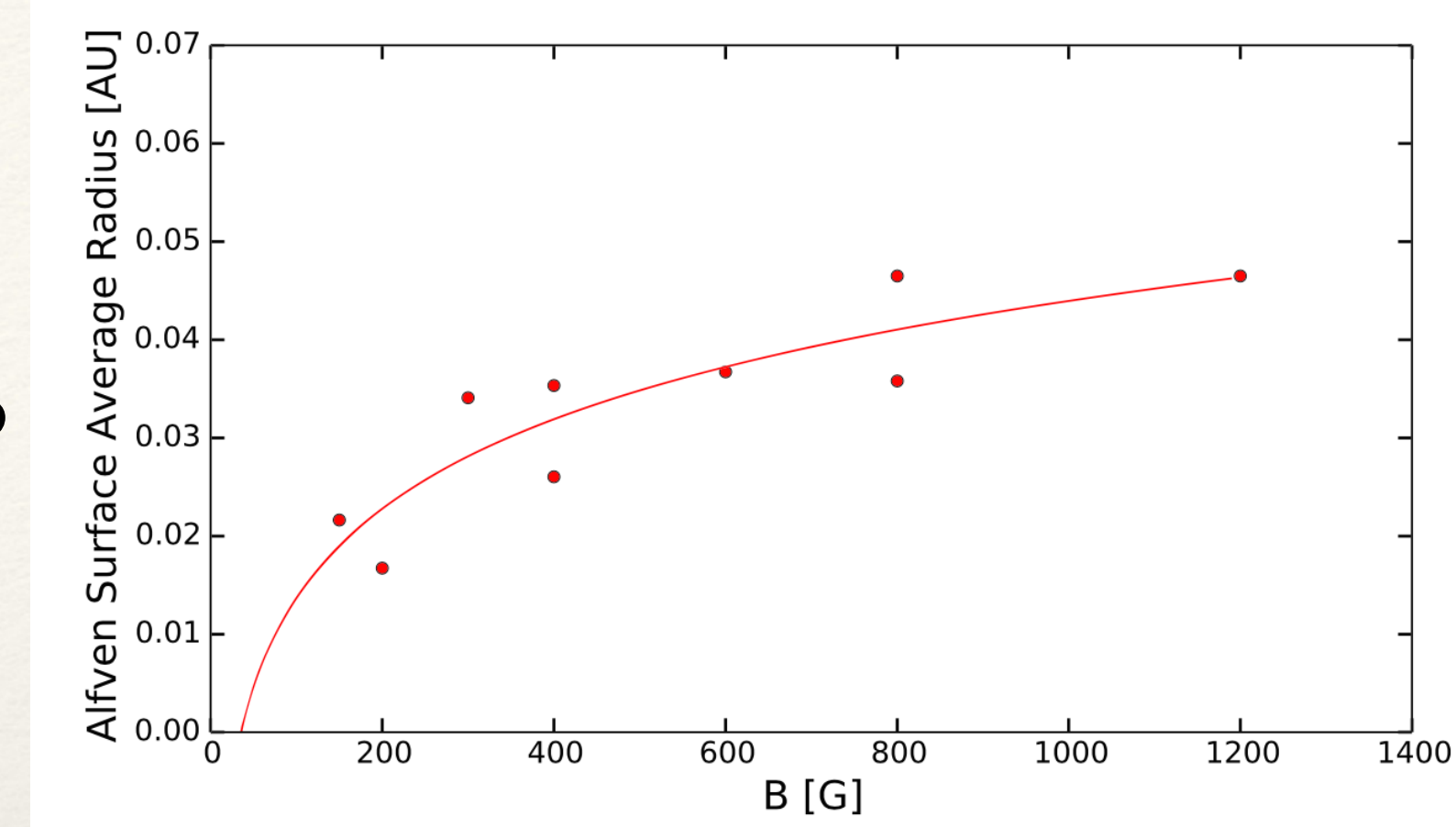
- Alfven wave heating

Sub-alfven 速度のAlfven surface内に惑星が存在した場合、

恒星コロナと同様に惑星磁気圏でもAlfven wave heating が起きる

まだ検討が必要だが、**Alfven surface** は惑星大気の保持に対して内側境界になり得る

Alfven surface の磁場強度依存性



5. Escape at Exoplanets

**6. Developments Needed in Measurements and Modeling
of Atmospheric Escape**

7. Discussion and Conclusion

観測装置の現状＋将来計画

- ・惑星発見を目的とした宇宙望遠鏡が現在観測中
- ・今後、高精度な宇宙望遠鏡+地上望遠鏡の建設が進められており、大気の特徴づけが期待される
- ・赤外觀測(比較的下層をターゲット)からUV観測(中間圏, 熱圏)まで、様々な高度の観測が期待される

6.1.1 Solar and Stellar Measurements

- ・今後の観測ターゲットであるM型星は大気散逸の影響を受けやすい

ハッブル宇宙望遠鏡を用いた活動度や



UVスペクトルの観測的理解が進められている(e.g., France+2016)

電荷交換反応速度(衝突断面積)の整備

- ・ 粒子間衝突効率(衝突断面積)は大気散逸プロセスにとって重要なパラメータ
- ・ しかし、電荷交換反応で重要な<10keV の衝突断面積の多くは高エネルギー推定の外挿
 - 彗星や惑星大気を想定した衝突断面積推定がされつつある(e.g., Debberl. 2010)
 - - オンラインカタログも整備されつつある(e.g., Lindsay & Stebbings, 2005)
 - さらなる検討として、以下の系統的理解が重要
 - ・ 様々な気体種における衝突断面積
 - ・ 多価反応や衝突電離などのそれぞれの反応毎の理解
 - ・ エネルギーに依存した衝突効率の理解
- ・ 電荷交換反応で起きる特性X線放射観測も大気組成検討に役立つかも

系外惑星に対する惑星磁場の観測

- ・ 間接的な観測(星の観測)

惑星-星間相互作用(彩層活動, コロナラジオ放射の変動) (e.g, Cauley+2019, Cohen+2018)

- ・ 直接的な観測(惑星の観測)

惑星磁場の観測として電子サイクロトロン運動由来のラジオ放射(Zarka2007)

→ 実際にM型星周りでも検出され、実用性が示されつつある(Vedantham+2020)

他にも流出大気のトランジット吸収特徴に磁場の影響として観測されるかも(Kislyakova+2014)

数密度分布/速度分布を反映

6.2 Modeling

数値モデルの検証として観測との比較が重要となる

不定性の検証はインプットパラメータ、観測、不足する物理プロセスに由来し、現在検討されつつある

6.2.1 Modeling of Solar and Stellar Environments

- ・ 全球的な星コロナのモデリングは1960s から始まり、近年よりセルフコンシステントなモデルが提案
(e.g, Downs+2016)
→ 観測を元にしたパラメタライズ(large-scale 加熱)を含むが太陽コロナ+太陽風をよく再現
- ・ 太陽アナログの星に対して星磁場観測(Zeeman-Doppler Imaging)が行われている (Cohen+2010)
- ・ さらなるモデル改善のためには、
他のスペクトルタイプも含む恒星風/コロナ構造などの観測が必要

6.2.2 Modeling Atmospheric Escape From Exoplanets

系外惑星系で重要な要素

- ・ 数値モデルの大部分は太陽系惑星で検証されているが、系外惑星系では異なる環境が予測される
- ・ 惑星が星に近い影響
 - 強い恒星風による散逸 → 恒星風と惑星大気のエネルギー交換率のさらなる検討が必要
 - ジュール加熱 → 大気組成等によらず一定の伝導率が仮定されている
セルフコンシステントな伝導率が必要
 - Alfvén surface 内の影響 (5.2章)
- ・ Particle-in-cell を用いた全球的な数値モデル(e.g., IAPIC)が開発されている
 - 運動量/エネルギーをセルフコンシステントに解くことが可能
 - 高エネルギー粒子の振り込み等は比較的下層な領域でも重要

6.2.3 Modeling Exoplanetary Magnetic Field Observations

- ・ 星-惑星間相互作用を検討する上では背景磁場(星磁場)のさらなるモデリングが必要
- ・ 惑星オーロララジオ放射の検出はまだないかつ難しいが、
惑星による星ラジオ放射の変動に期待できそう(Cohen+2018)

5. Escape at Exoplanets

6. Developments Needed in Measurements and Modeling
of Atmospheric Escape

7. Discussion and Conclusion

7.1.1 The Faint Young Sun paradox

過去の太陽が30%暗いことと地質学的な温暖な証拠(海洋の存在)は矛盾する

→ 過去の地球では温暖気候をもたらす要因があったはず

熱帯巻雲による温室効果

- ・ 高層の巻雲はアルベドより赤外吸収の影響の方が強い
- ・ 表面温度が下がるほど、巻雲量は多くなる可能性がある(Randanelli & Lindzen 2010)
 - 現在地球の観測と矛盾するため、まだ議論が必要(Cahambers+2012)
- ・ 古火星に対して検討もされているが、温暖環境のために全球の70% が巻雲で覆われる必要あり
(Ramires & Kasting 2017)
- ・ 銀河宇宙線量の変動による雲形成効率への影響も示唆されているが、直接的な影響は弱そう
(e.g., Dunne+2017)
- ・ 銀河宇宙線はエアロゾルの生成率にも影響はあるが、温暖/寒冷の両方に働く可能性あり
(e.g., Traniner+2006b)

重い太陽

初期に強い質量損失の影響を経験した可能性があり、過去の太陽が10%程度重い可能性が示唆

7.1.2 Impact of Planetary Magnetic Field

惑星固有磁場によるイオン散逸への影響

- ・ 太陽系岩石型惑星に対して磁気モーメントを変えた経験的な数値モデル結果をコンパイル(Gunell+2018)
磁気モーメントによらずほぼ一定。
→ 中途半端な磁気モーメントにおけるPaler cap とCusp 散逸に対応した散逸量の2-5倍増大のみ
- ・ 固有磁場がなくても誘導磁気圏によるプロテクトはあるし、
固有磁場があった場合は恒星風との相互断面積が大きくなるため、
固有磁場が惑星大気の保持に対して重要なのかは議論の余地あり

大気組成や地磁気逆転による影響

- ・ CO₂大気の金星/火星熱圏は地球に比べてかなり冷たく、膨らんでいない
→ 大気の膨らみは非熱的散逸にも影響を与えるため、磁場のない地球であれば散逸大
- ・ 実際に、過去の地球を想定した地磁気逆転イベント時(固有磁場なし)に
O⁺フラックスの3-4桁増大を示唆(Wei+2014)

7.1.3 Impacts of Stellar Dynamics

- ・ EUV-XUVフラックスは大気散逸にとって重要なパラメータ
- ・ MAVEN観測から、フレアイベント時に外圏底温度増加→散逸率20%増加を観測 (e.g., Jakosky+2018)

7.2 The Role of Nonatmospheric/Stellar Processes

- ・ 惑星質量(+密度)は惑星が大気を保持できるかを決めるfirst factor
- ・ 恒星からの距離(エネルギー量)はsecond factor

質量、半径、公転距離が観測が進めば、

惑星が現在どの程度揮発性物質を持っているのか？



どのような進化を辿っているのか？

等の系統的理解が進むと期待される

7.3 The Future Research of Escape Processes

1. 散逸モデリング

- ・ 単一プロセスではなく、プロセス同士の相互作用の検討
 - 条件ごとに重要なパラメータや物理プロセスを洗い出す
- ・ 恒星進化だけでなく、気候モデルとのカップリングによる気候/大気組成の進化

2. 室内実験

- ・ 化学反応速度や衝突断面積は重要なインプットパラメータ
 - 精度の向上や温度/圧力条件での適用性の向上が必要

3. 観測

- ・ 次世代では、惑星のbulk組成だけでなく、大気組成や大気の安定性についての観測が可能となるだろう
- ・ 惑星だけでなく、星についての観測も散逸モデリング/進化を理解する上で重要

7.4 Effects of Escape on Biosignatures

生命活動の偽検出

- ・ 生命の兆候として、Oやヘイズなどの有機物、非平衡によって生じる気体種などが考えられている
 - H₂O の光分解+H散逸はOの大気蓄積をもたらす可能性あり
 - - NOやヘイズなどは光化学による非平衡条件でも形成される

恒星起源のエネルギーは散逸によるGyrの進化だけでなく、
生命の偽検出をもたらす可能性あり

7.5 Final Thoughts

- ・ これまでに議論してきた散逸プロセスは右図にまとめられている
- ・ 現在にわかっている物理プロセスのさらなる理解や
新しいプロセスの検討は重要となる
- ・ 私たちの理解は惑星の歴史を理解する上ではまだ不十分：
大気組成、恒星進化、脱ガスなどのプロセス/時間進化が絡みあう

