

# The Contribution of M-dwarf Flares to the Thermal Escape of Potentially Habitable Planet Atmospheres

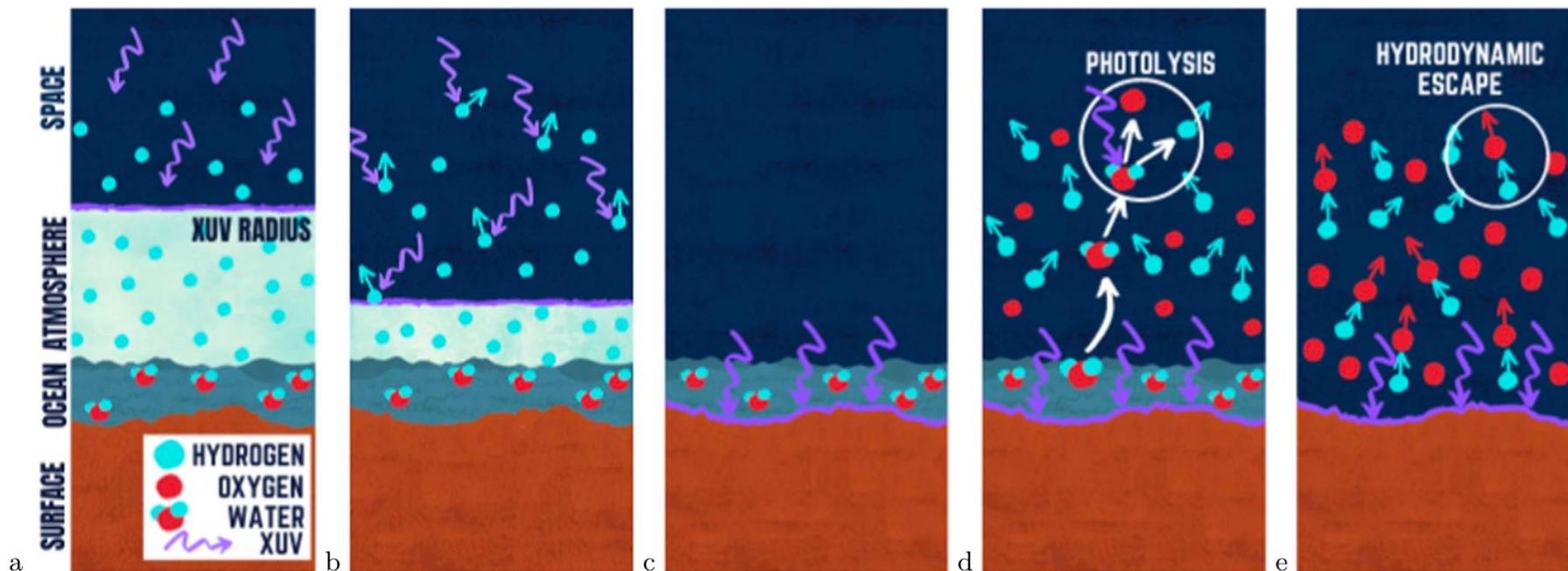
Do Amaral, L. N., Barnes, R., Segura, A., & Luger, R

The Astrophysical Journal, 2022, 928.1: 12

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac53af>

2024/02/08 火星勉強会

東京大学 西岡知輝

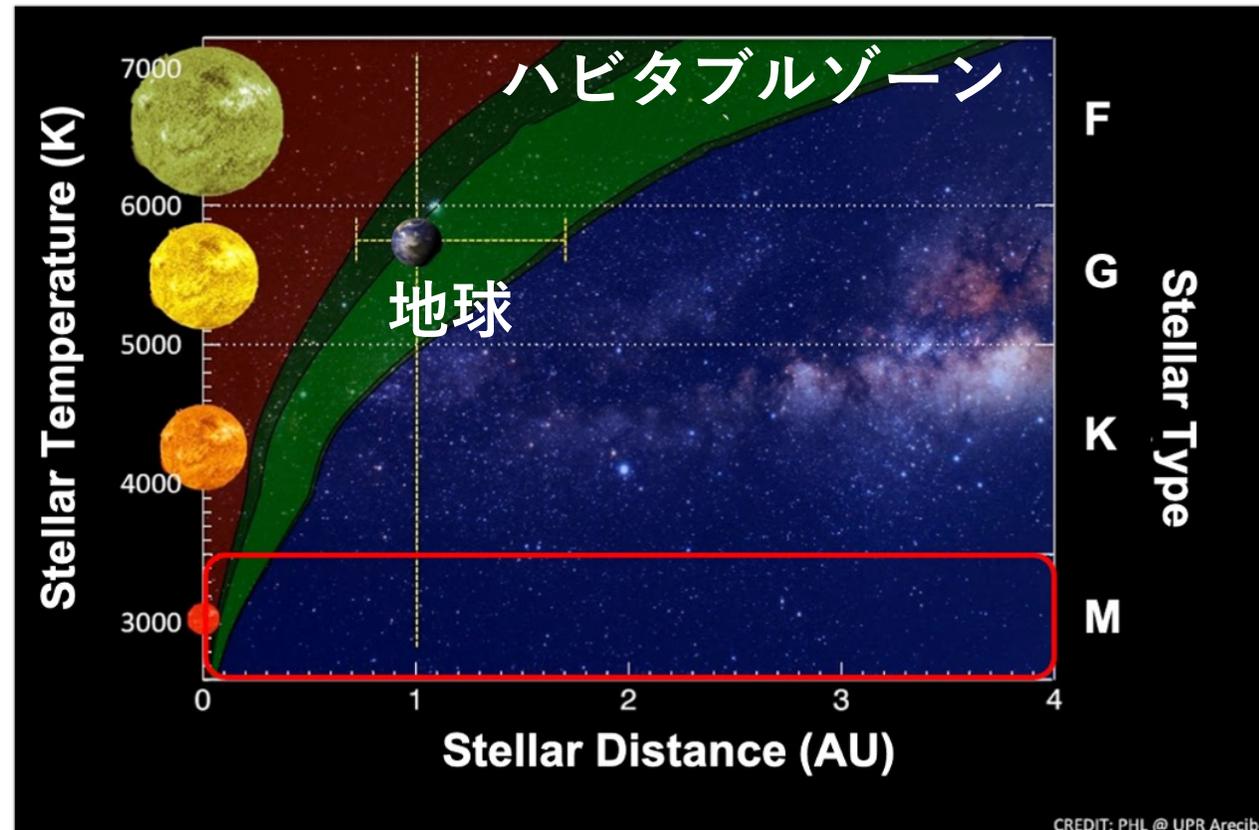


# 0. 概要

- M型星周りの惑星は、フレアによって恒星のX-rays + extreme UV (XUV)が時に2桁以上上昇し、大気散逸が促進される。
- 大気散逸に対するM型星のフレアの寄与を数値シミュレーションを用いて検証した。
  - Hypothetical planets  
 $M_* = 0.2 - 0.6 M_{\odot}$ ,  $M_p = 0.5 - 5 M_{\oplus}$ , 初期水量=1-10 TO (terrestrial ocean)
  - Known planets  
Kepler-1229 b, K2-72 e, TOI-700 d, Kepler-1649 c
- 恒星フレアは、水損失量を2倍にする可能性がある。
- 恒星フレアにより、酸素の分圧が数百 bar上昇する可能性がある。

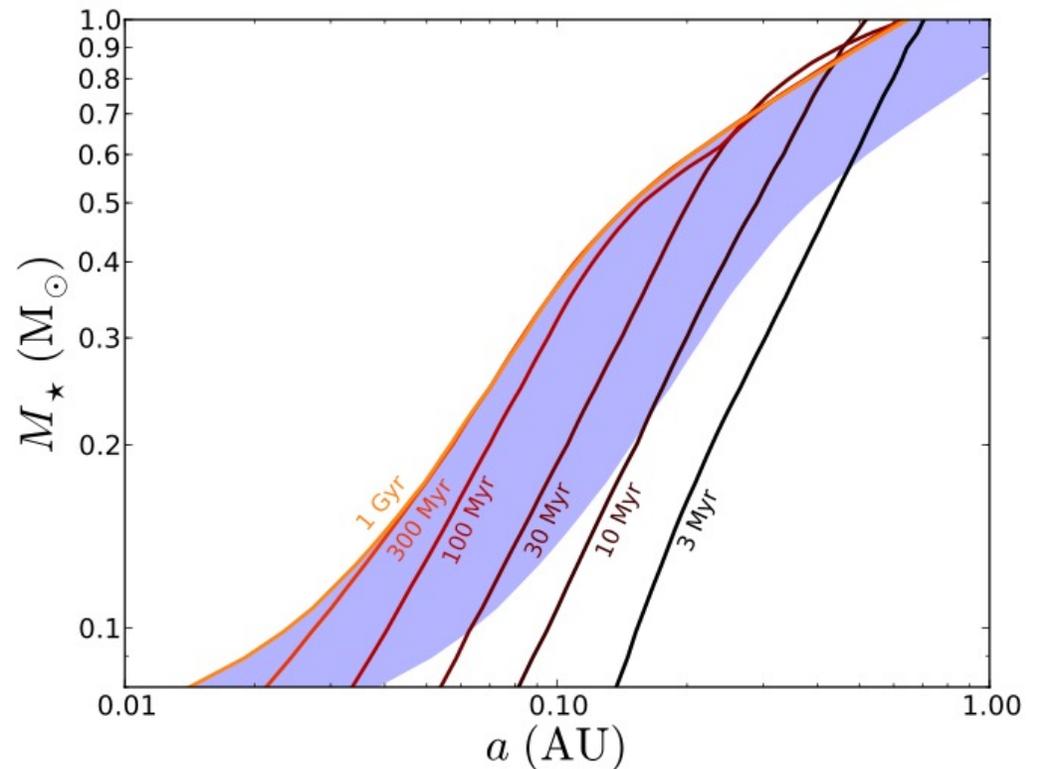
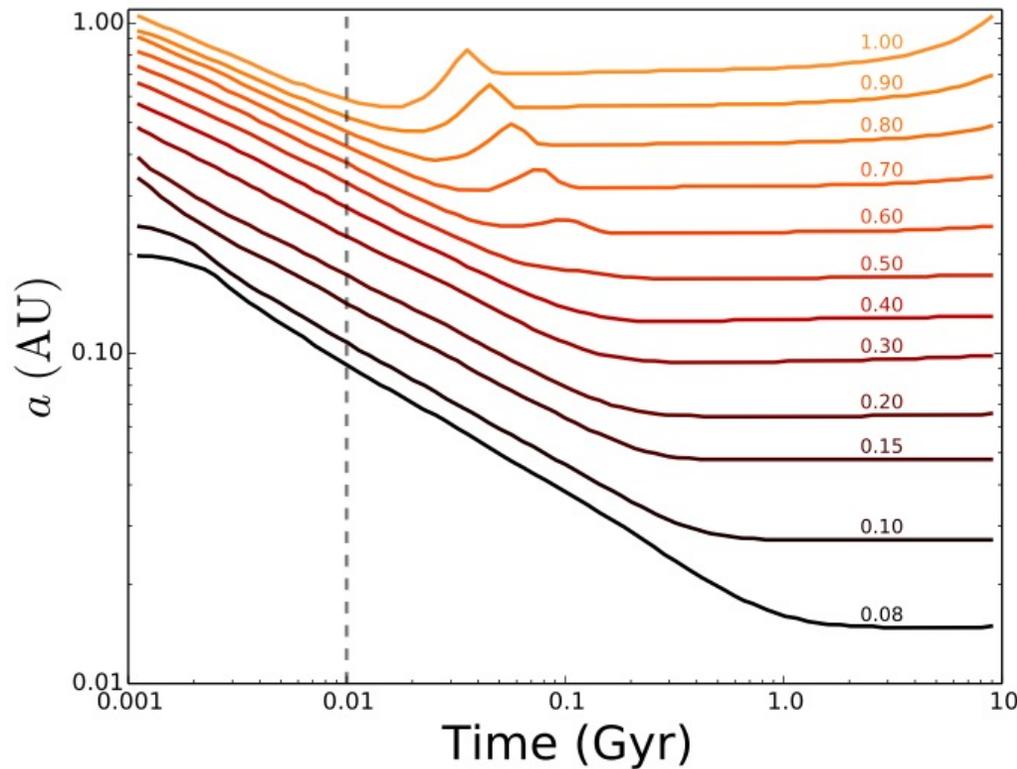
# 1. Introduction - 主系列星のハビタブルゾーン(HZ)

- 水は生化学反応を促進するため、水の除去プロセスは生命探査と関連する。
- M型星は低温であるため、そのHZは主星に近くなる。
- M型星は地球型太陽系外惑星を探査し、その特徴を明らかにするための最も観測しやすいターゲットである。



# 1. Introduction - 恒星の進化

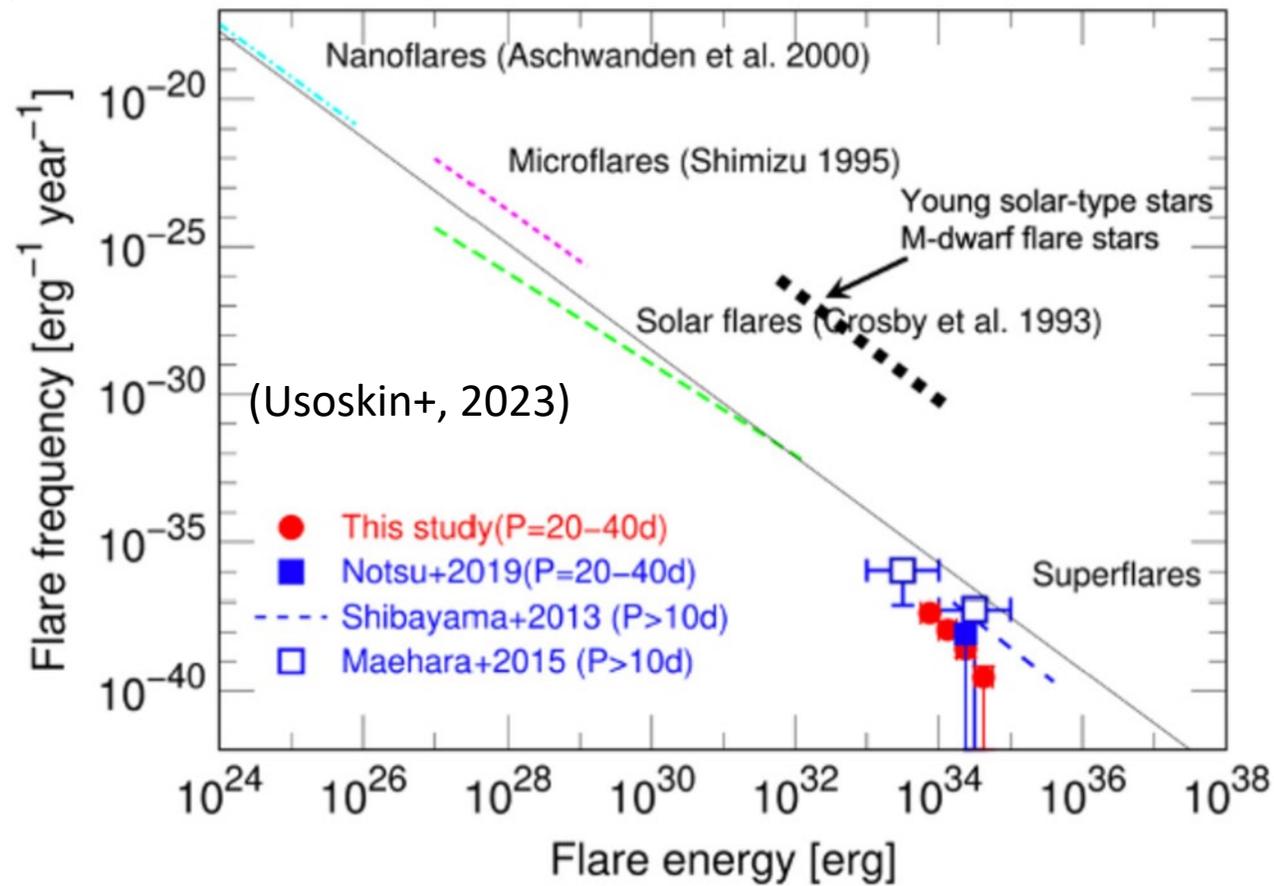
- M型星は完全に収縮して主系列に達するまで（前主系列）、数億年を要する。
- この期間、実効温度は一定で半径が縮小するので恒星の光度が1-2桁低下する。
- この変化は水素核融合が開始するZAMSに到達するまでHZを内側へ移動させる。



(Luger & Barnes, 2015)

# 1. Introduction - フレアによるXUV放射の上昇

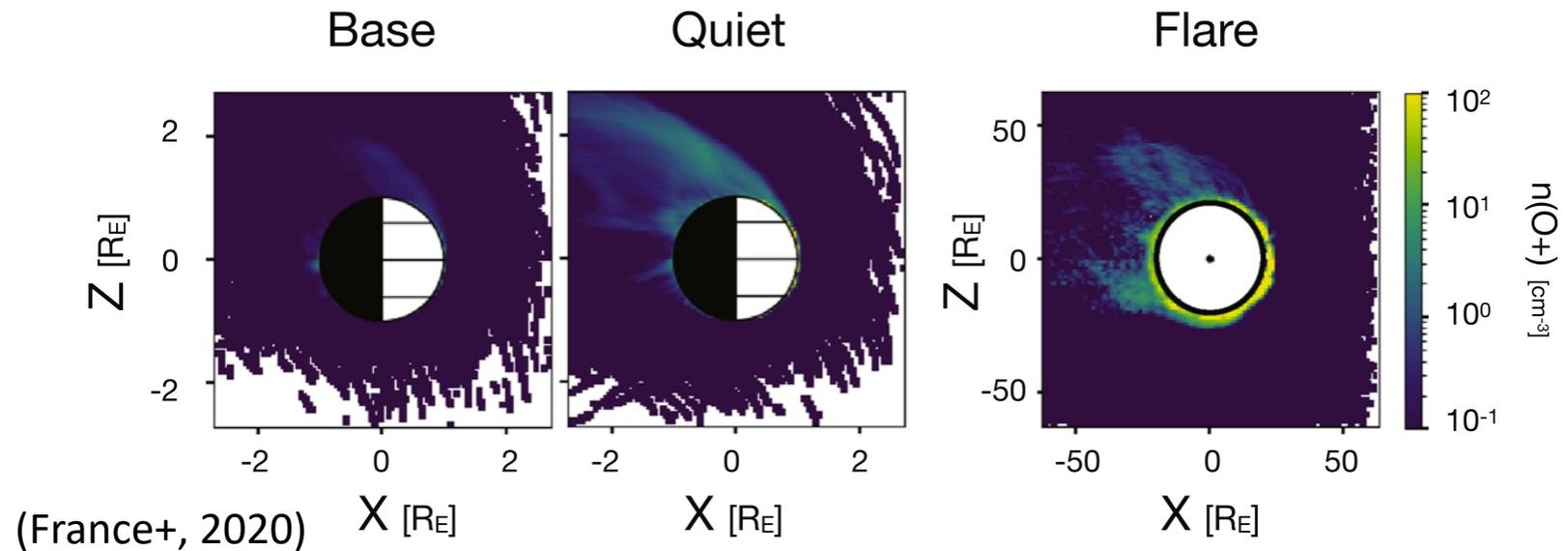
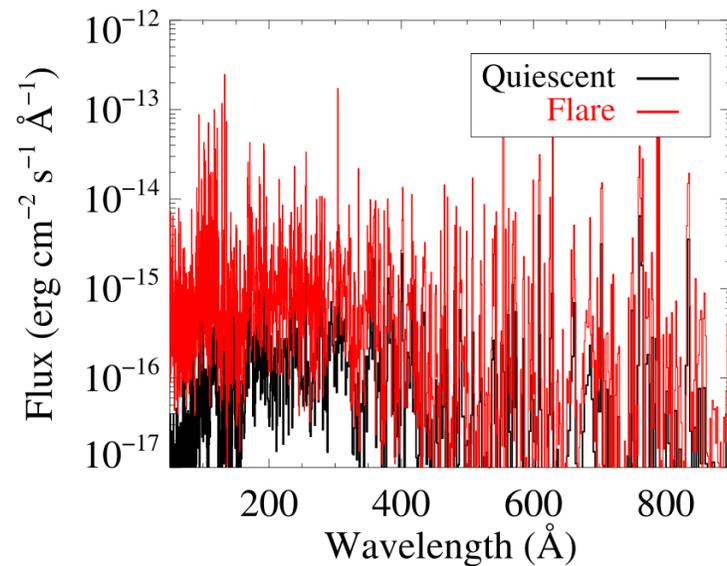
- 太陽と比べると、M矮星のフレアは高頻度、高エネルギーである。
- 太陽では高エネルギーなフレア( $\sim 10^{32}$  erg)は、太陽周期に1回程度発生する (Youngblood+, 2017)が、いくつかのM型星は同規模のフレアが毎日発生する (Hawley+, 2014)。



# 1. Introduction - フレアの大気散逸への影響 & 研究目的

- XUV放射は惑星大気をイオン化・加熱し、大気散逸を促進する。
- M型星のBarnard starのフレアは、1Gyrの間に非磁化惑星から地球大気約90個分を失わせる(France+, 2020)。
- M型星周辺の惑星からの水損失へのXUV放射の影響を評価した研究はまだない。

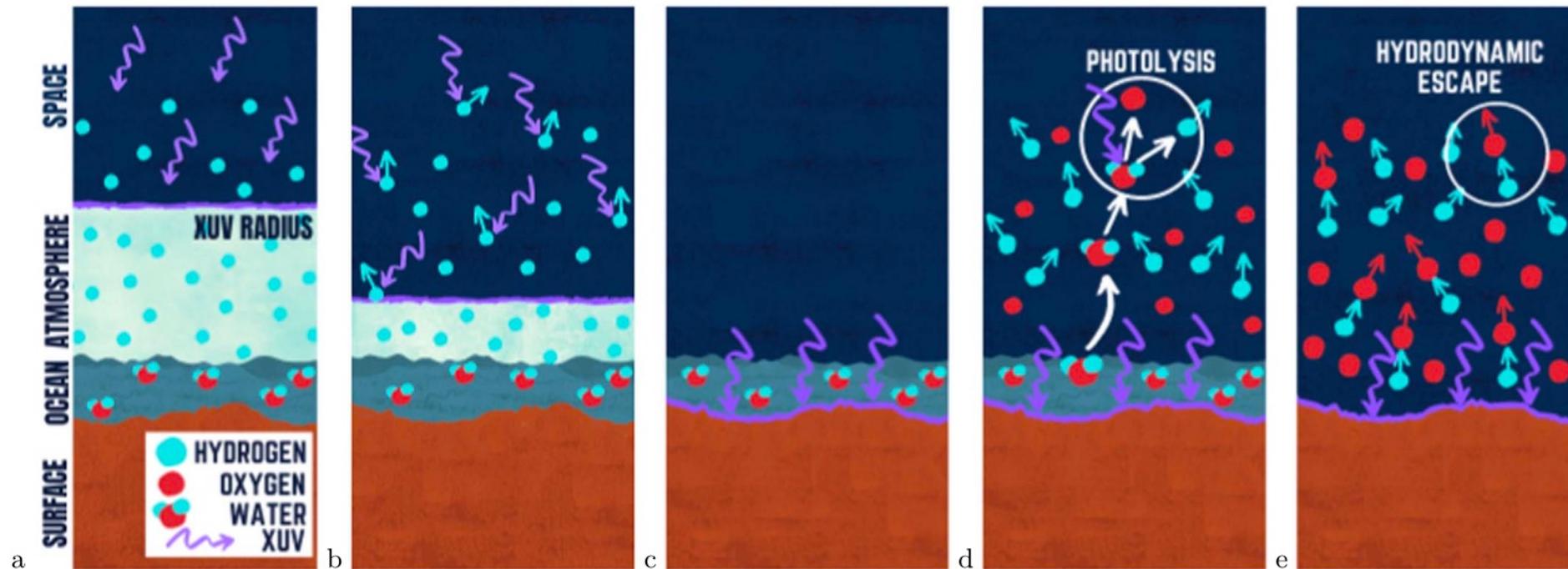
➡ 数値計算コード [VPLanet](#) (Barnes et al. 2020) に新しいモジュールを追加し、フレアの影響を考慮して、水の光分解、水素の散逸、酸素の蓄積を計算する。



## 2. Method - モデル概要

惑星進化を推定する半解析的モデルを組み合わせる ([VPLanet](#))。

- *AtmEsc*  
原始水素大気の散逸、水の光分解、水素と酸素の散逸
- *STELLAR*  
恒星の実効温度、半径、光度の時間発展
- *FLARE*  
フレアの寄与も含めた時間平均のXUV luminosity



## 2. Method - モデル概要 - AtmEsc - Envelope loss

3つの原始水素大気散逸の'レジーム'を考慮。

- Energy-limited  
高エネルギーフラックスが散逸のボトルネックとなる。  
 $K_{\text{tide}}$  は主星の重力による脱出速度の減少効果 (Erkaev+, 2007)。M型星は  $K_{\text{tide}} \approx 0.9$ 。  
惑星半径は Lopez et al. (2012) より質量-半径の関係を用いて計算される。
- Radiation/recombination(RR)-limited  
 $F_{\text{XUV}} > F_{\text{crit}}$  で発生。惑星の半径が Roche limit より小さく、XUV強度が水素電離を起こすのに十分なエネルギーを持っている場合に起こる。  
散逸を促すエネルギーの一部が電離に回るため、散逸率が低下する。
- Bondi-limited (Owen & Wu 2016)  
恒星の重力によって大気が直接剥ぎ取られる。

$$\dot{M}_{\text{EL}} = \frac{\epsilon_H F_{\text{XUV}} R_{\text{XUV}}}{4GM_{\text{XUV}} K_{\text{tide}} m_H},$$

$$\dot{M}_{\text{RR}} = 2.248 \times 10^6 \left( \frac{F_{\text{EUUV}}}{\text{W m}^{-2}} \right)^{1/2} \left( \frac{R_p}{R_{\oplus}} \right)^{3/2} \text{ kg s}^{-1},$$

$$\dot{M}_{\text{Bondi}} \approx 1.9 \times 10^{15} \left( \frac{M_p}{10M_{\oplus}} \right) \left( \frac{T_{\text{eff}}}{5800\text{K}} \right)^{1/2} \\ \times \left( \frac{a}{0.1\text{au}} \right)^{1/4} \left( \frac{R_{\odot}}{R_*} \right)^{1/4} \text{ kg s}^{-1},$$

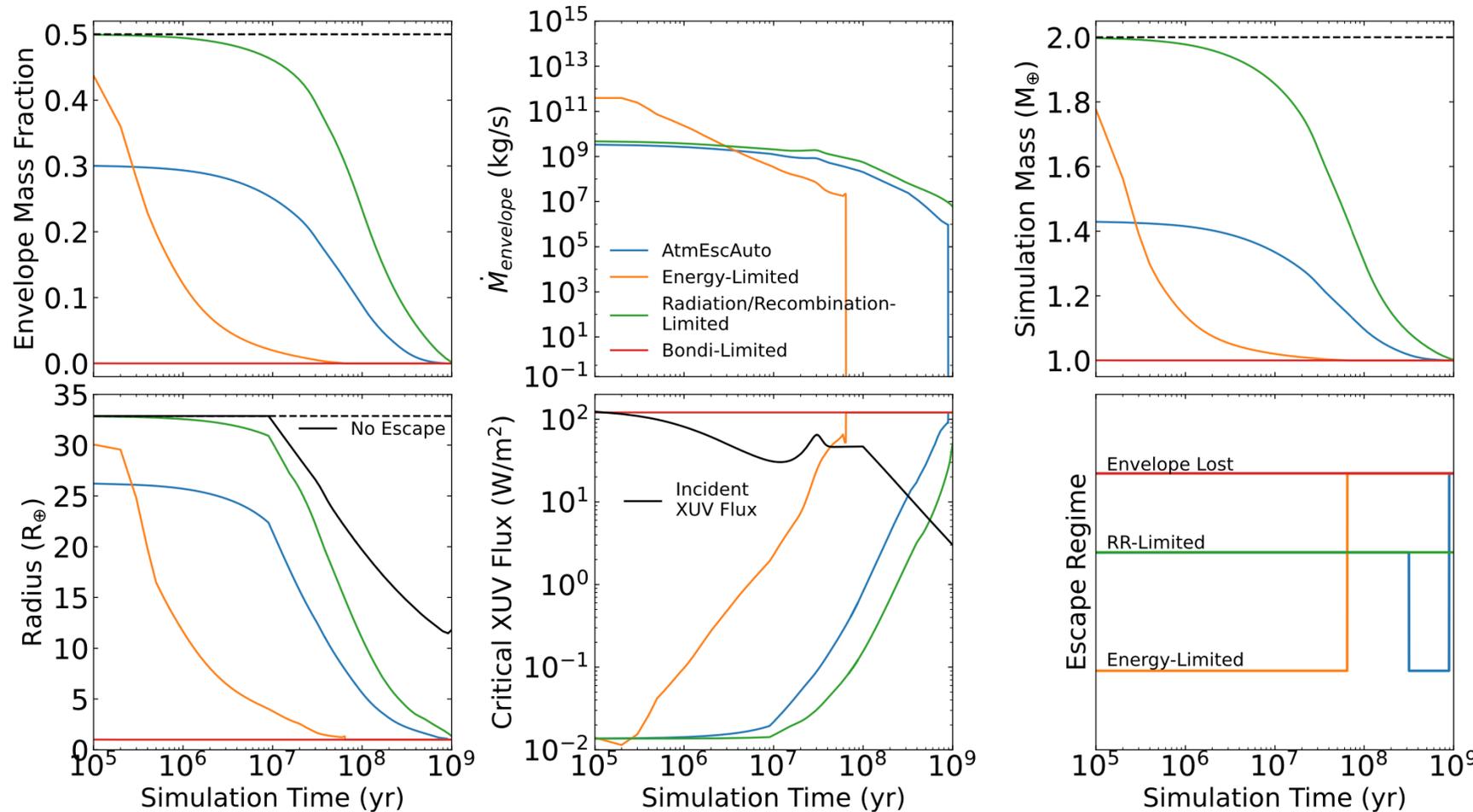
$$F_{\text{crit}} = \left( \frac{B}{A} \right)^2, \quad A = \frac{\pi \epsilon_H R_{\text{XUV}}^3}{GM_p K_{\text{tide}}}$$

$$B = 2.248 \times 10^6 \left( \frac{R_p}{R_{\oplus}} \right)^{3/2} \text{ kg}^{1/2} \text{ s}^{1/2}.$$

# 2. Method - モデル概要 - AtmEsc - Envelope loss

状況に応じて散逸'レジーム'を変更する (*AtmEscAuto*)。

例)  $M_* = M_\odot$ ,  $M_p = 2 M_\oplus$ , half rock/half hydrogen,  $a = 0.1$  au,  $\epsilon_H = 0.1$

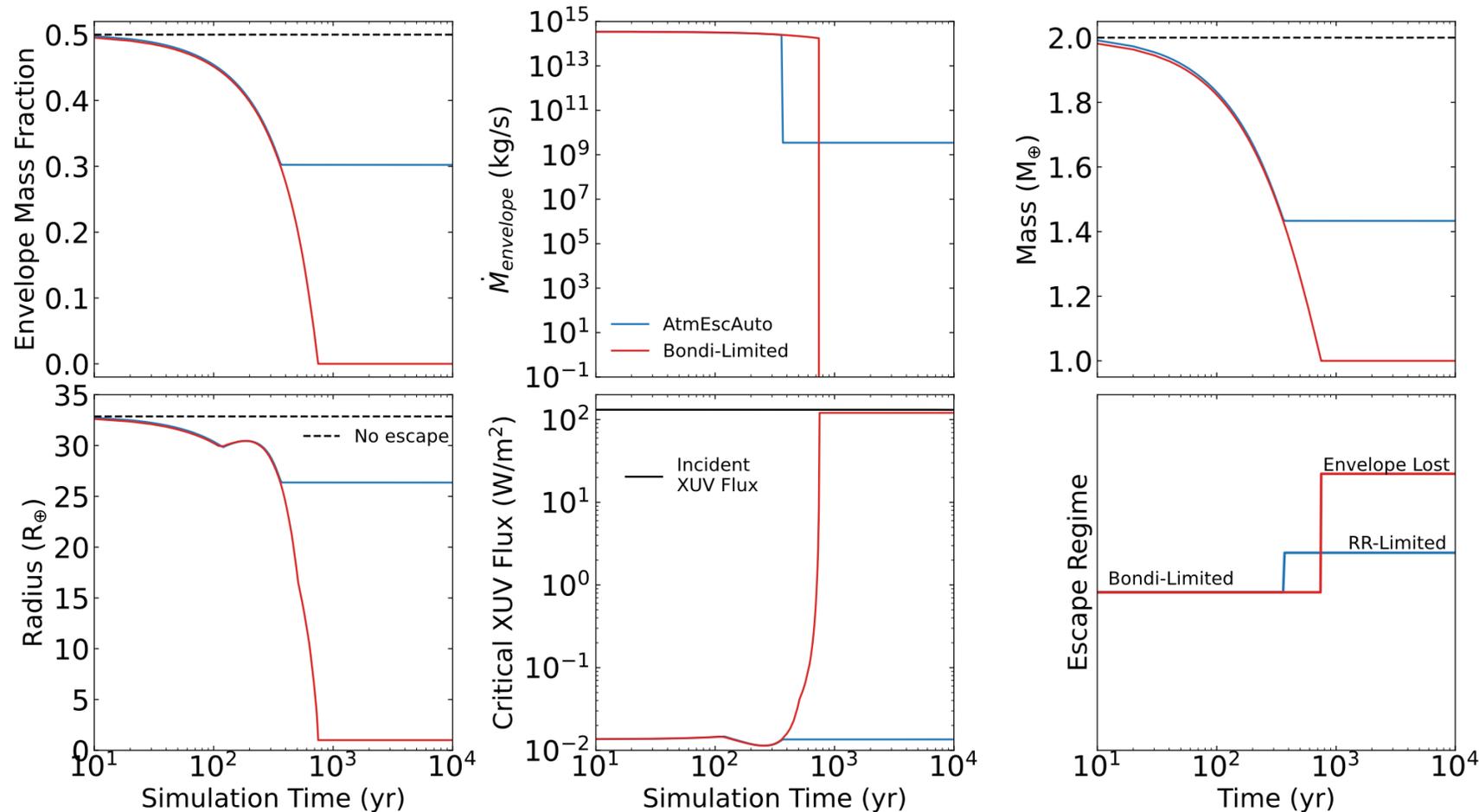


$10^5$ - $10^9$  yr

# 2. Method - モデル概要 - AtmEsc - Envelope loss

状況に応じて散逸'レジーム'を変更する (*AtmEscAuto*)。

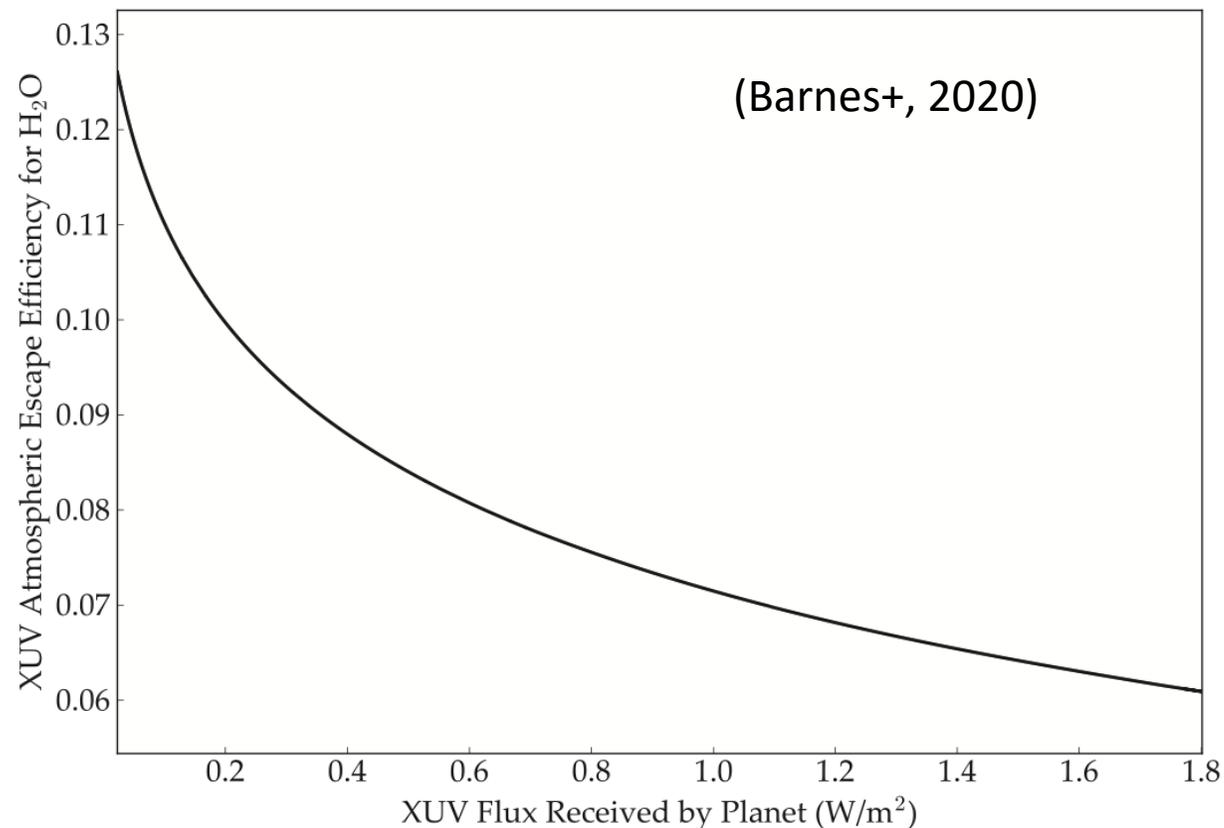
例)  $M_* = M_\odot$ ,  $M_p = 2 M_\oplus$ , half rock/half hydrogen,  $a = 0.1$  au,  $\epsilon_H = 0.1$



$10^1$ - $10^4$  yr

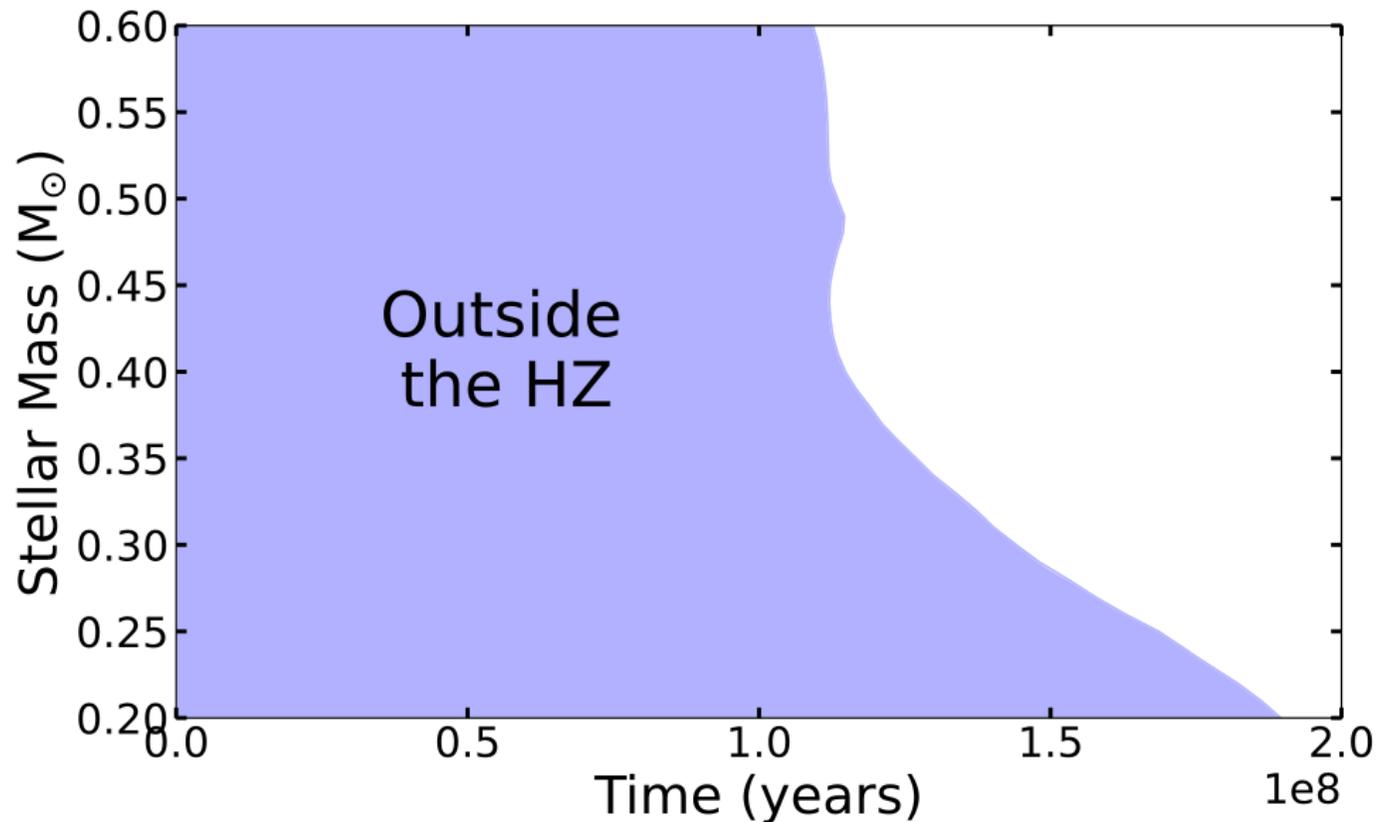
## 2. Method - モデル概要 - AtmEsc - Water and Oxygen Loss

原始水素大気散逸後、地表の海が完全に蒸発し上層大気は水蒸気によって支配されると仮定。水蒸気が紫外線により光分解され、水素が流体力学的に散逸する (energy-limited)。ここでは、Bolmont et al. (2017)のモデルを用いて $F_{XUV}$ の関数として散逸を計算する。



## 2. Method - モデル概要 - STELLAR

- 太陽型星での経験則をM型星へ適用し、恒星パラメータの時間発展を計算する。
- Kopparapu et al. (2014)のoptimistic HZの内側境界より内側で惑星が過ごす時間は低質量の恒星ほど長くなる。低質量星周りの惑星は、より多くの水を失い、酸素に富む大気が形成されると予想される。

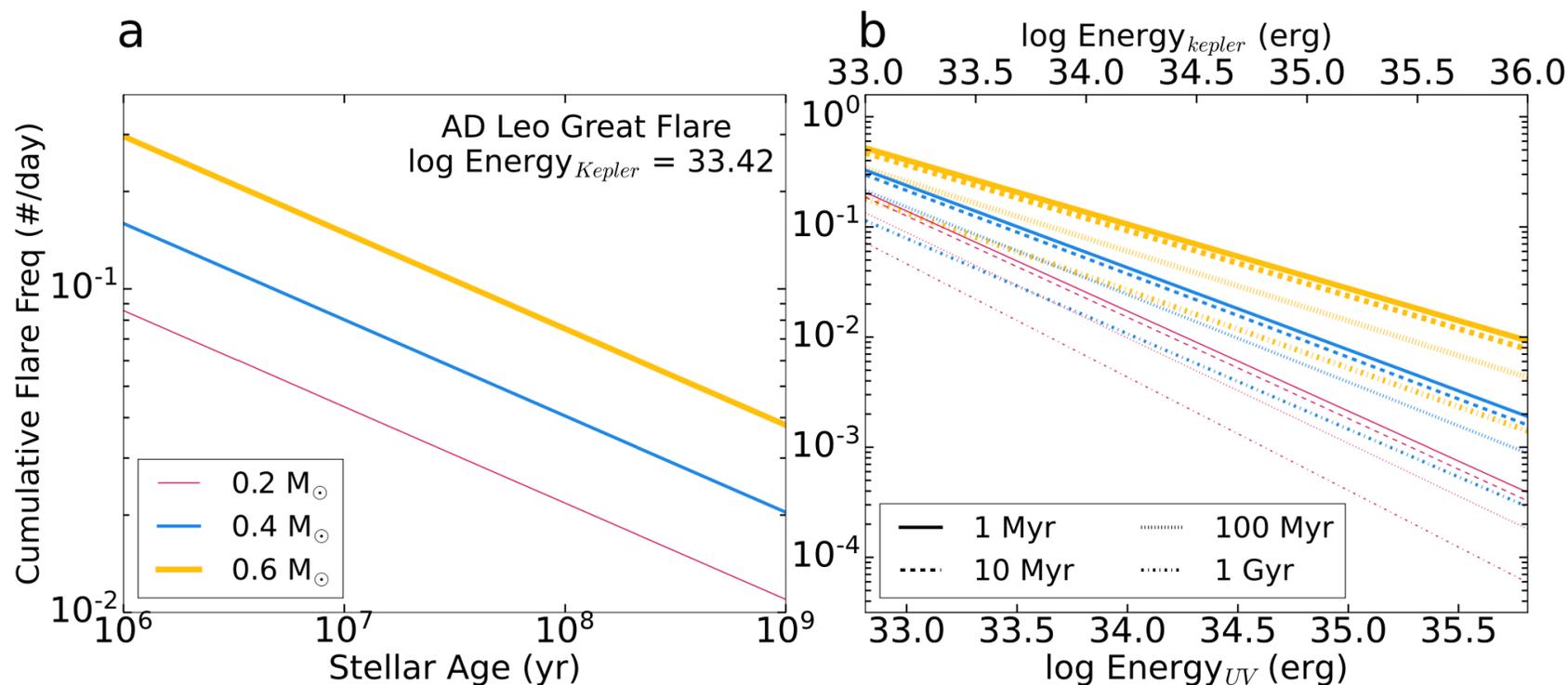


## 2. Method - モデル概要 - FLARE

- フレアの寄与も含めた時間平均のXUV luminosityを経験則により基づき推定  
フレア発生頻度 $\nu$ から計算する (Davenport +, 2019)。

$$L_{XUV,f} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \nu(E_{XUV,f}) dE,$$

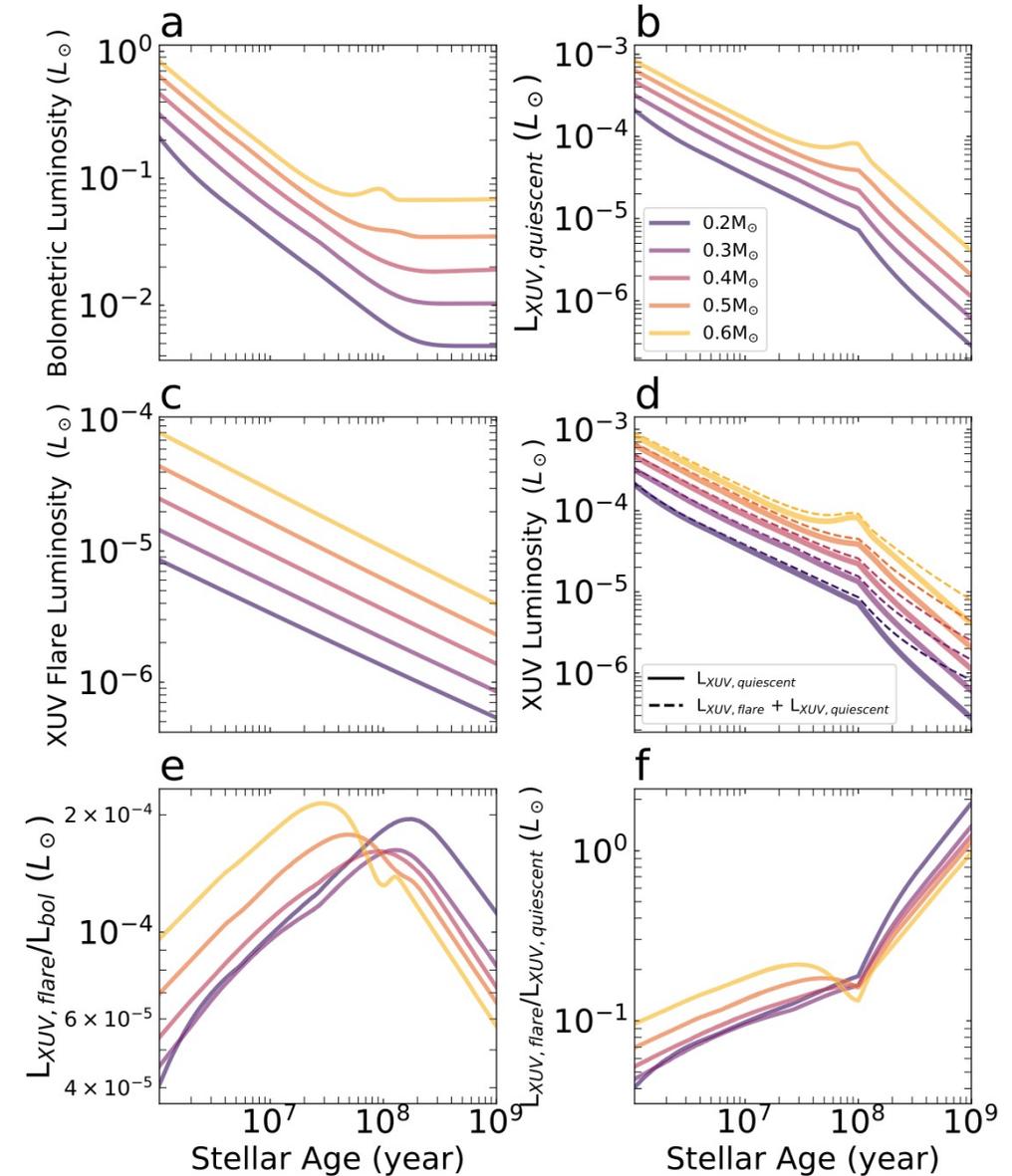
- 低質量星ほどフレア発生頻度が小さくなっており、他の研究と矛盾。  
用いたサンプルが少なかったことが原因と考えられる。



# 2. Method - モデル概要 - STELLAR & FLARE

STELLARとFLAREモジュールにより計算した光度の時間発展。

- フレアにより10%程度、XUV強度が上昇する(d)。
- 恒星質量が小さいほど、主系列後のフレアによるXUV強度が大きい(e)。
- 静穏時のXUV強度は時間とともに減少し(b)、フレアの重要性は恒星年齢が上がるほど大きくなる(f)。



## 2. Method - 計算設定

二つのグループで大気と水の時間発展を計算する。

大気質量( $M = 0.001 M_{\oplus}$ )、熱圏温度( $T = 400 \text{ K}$ )、水素によるXUV吸収効率( $\epsilon_{\text{H}}=0.1$ )は固定する。

- Group1: Hypothetical planets(25,160 scenarios)  
 $M_* = 0.2 - 0.6 M_{\odot}$ ,  $M_p = 0.5 - 5 M_{\oplus}$ , 初期水量=1-10 TO (terrestrial ocean)

軌道長半径は恒星年齢が1 Gyrのときに、HZの内側境界に位置するように設定。

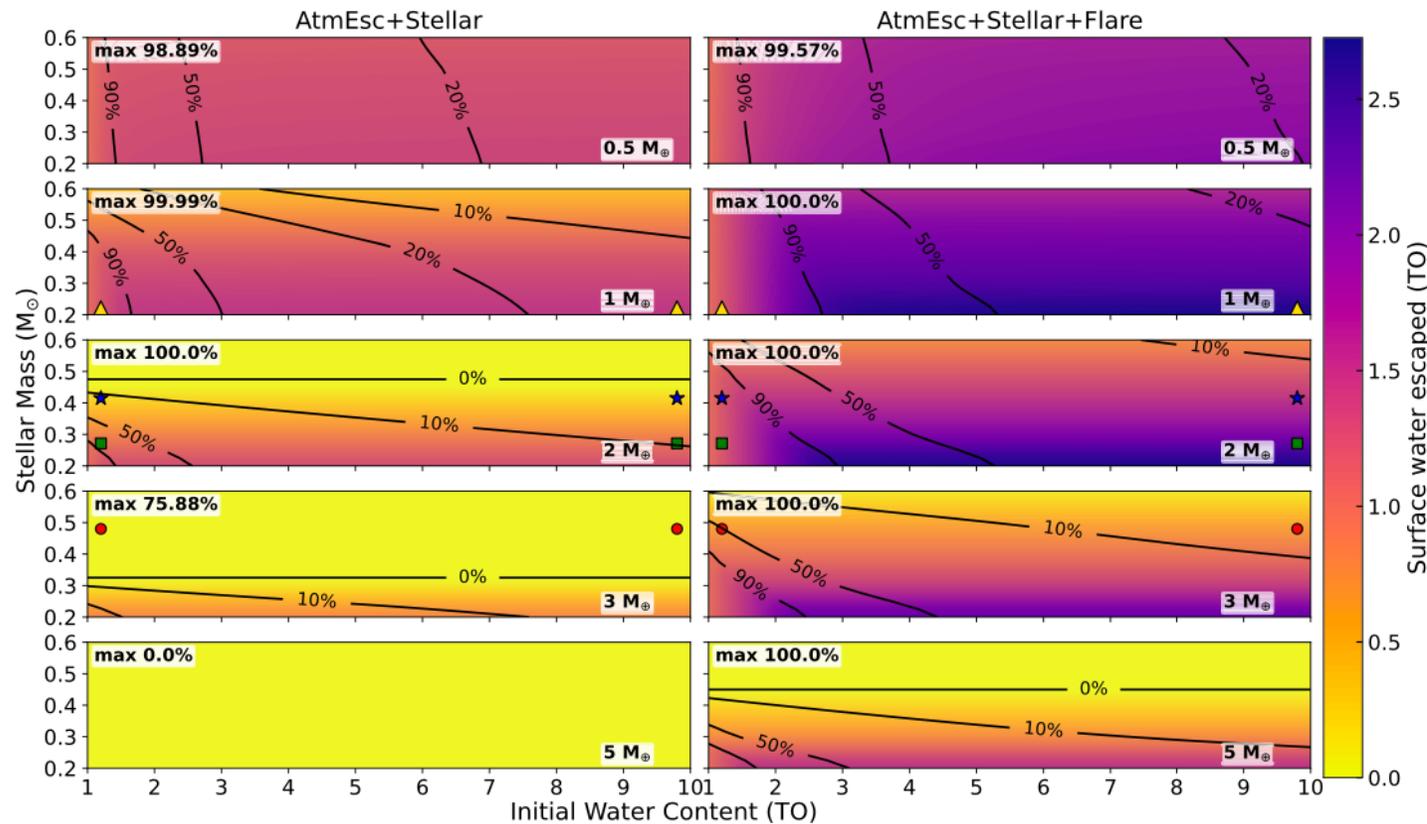
- Group2: Known planet (Kepler-1229 b, K2-72 e, TOI-700 d, Kepler-1649 c)  
初期水量=1-10 TO (terrestrial ocean)

惑星と恒星の質量、惑星半径は、観測値に固定。

軌道長半径は観測値と、Group1と同様の手順で決めた値の2通りで計算。

# 3. Results - Hypothetical planets

- 水損失量は、恒星と惑星質量に反比例する。
- 質量が大きい( $M_p = 5 M_{\oplus}$ )場合、フレアを含む場合のみ水損失が発生する。
- 水損失量は初期水量に依存しない。

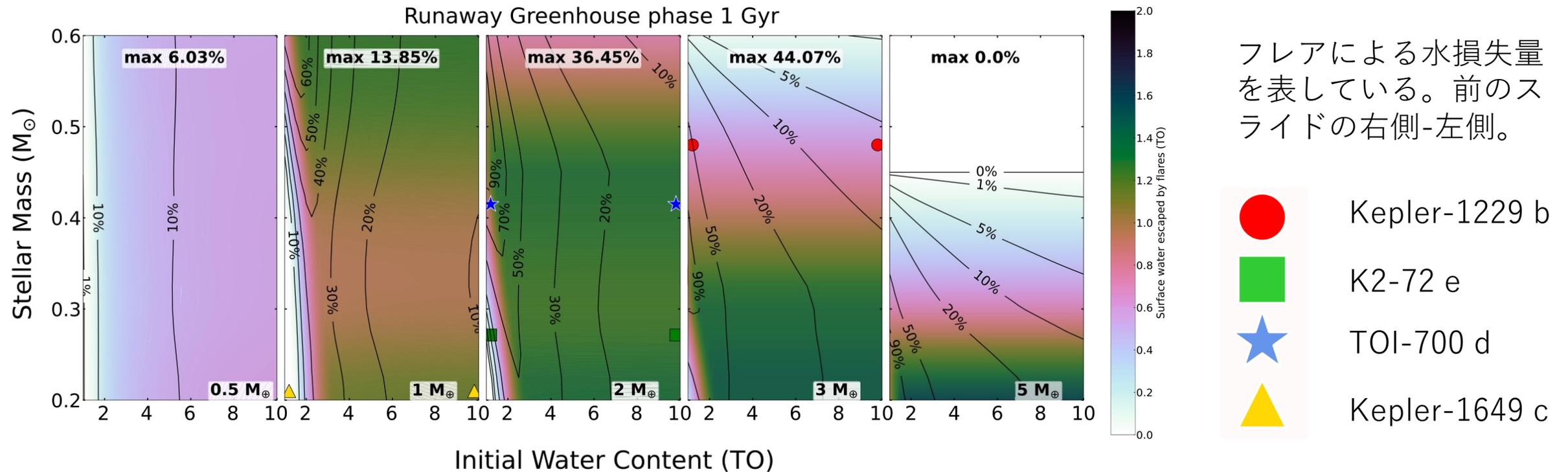


各恒星質量、初期水量における水損失量を表している。線は割合、色は絶対量。上から惑星質量  $M_p = 0.5 - 5 M_{\oplus}$  の5ケース。左は静穏時、右はフレアあり。

- Kepler-1229 b
- K2-72 e
- ★ TOI-700 d
- ▲ Kepler-1649 c

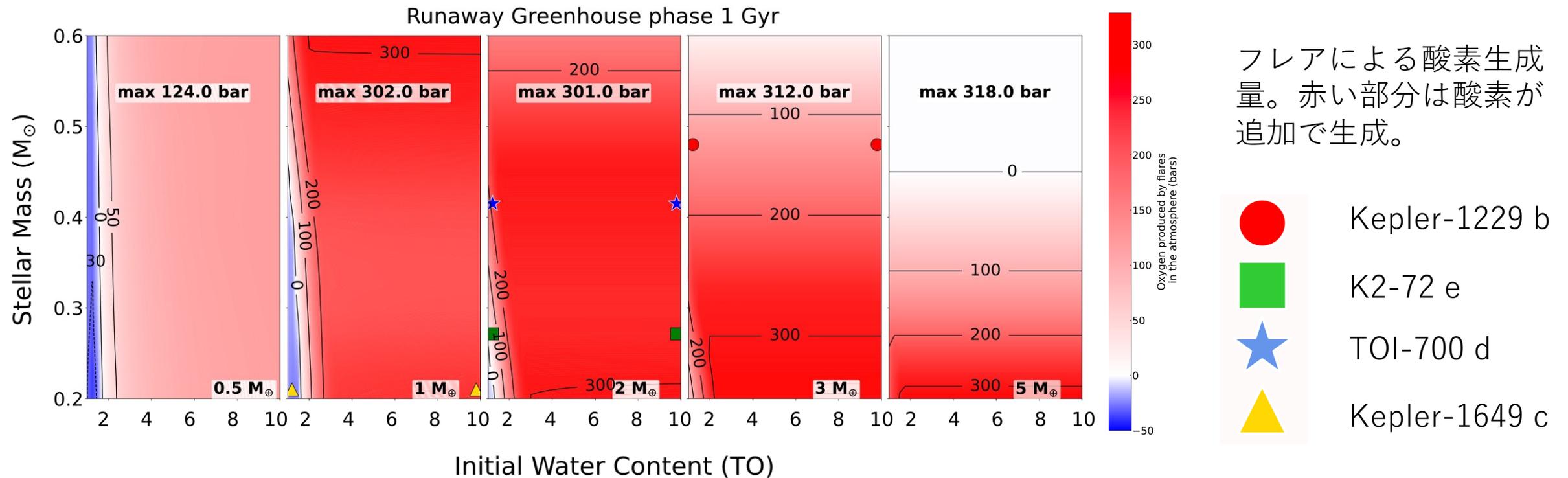
# 3. Results - Hypothetical planets

- フレアありの場合、水損失量は最大2 TO (terrestrial ocean)ほど増加。
- 水損失量が少ない場合、静穏時のXUV強度で十分水が除去されるので、フレアの影響はない（下図の低惑星質量ケースの白い部分）。



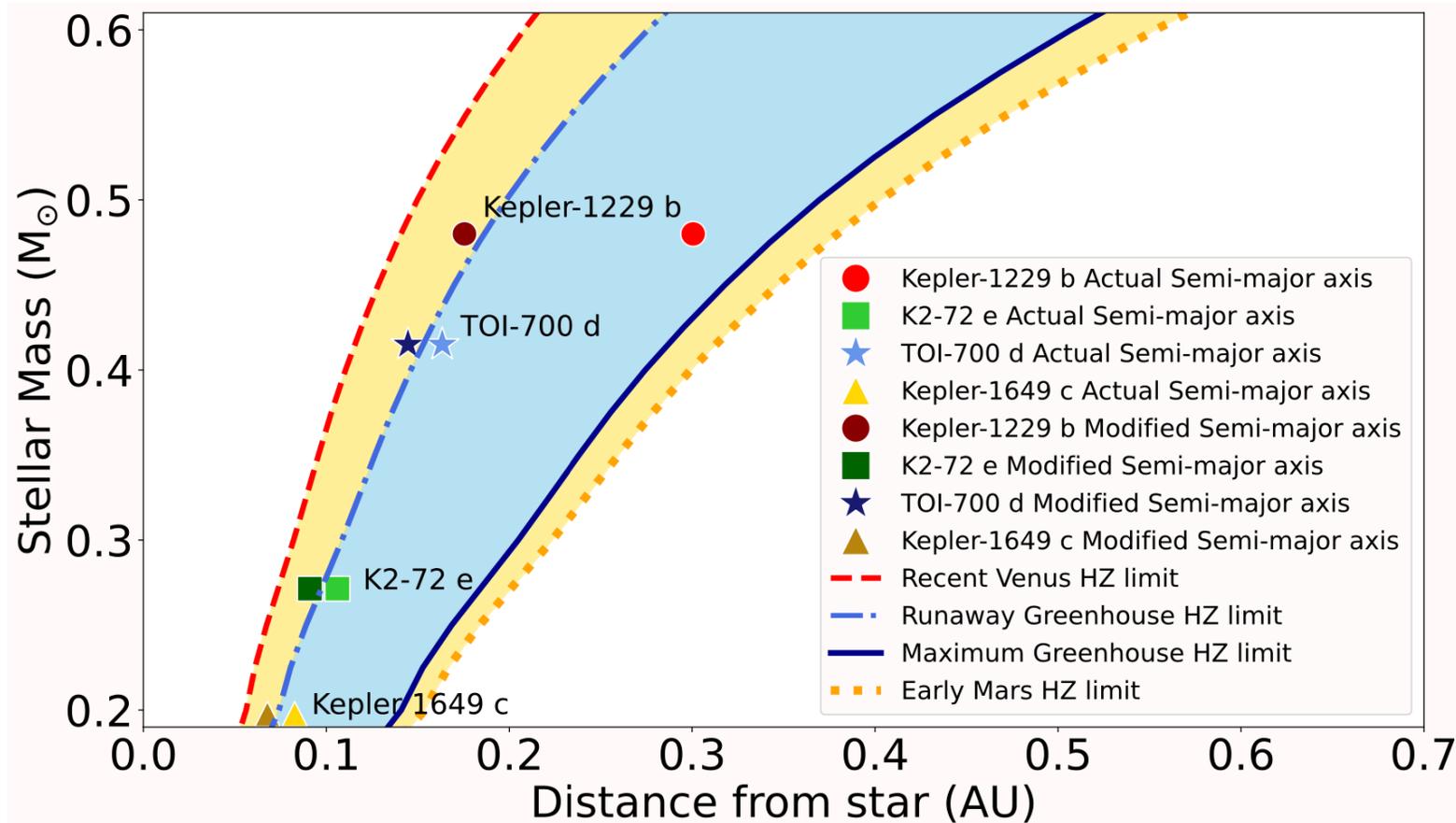
# 3. Results - Hypothetical planets

- フレアにより最大318 barの酸素が生成される。
- 下図の青い部分は酸素が少なくなったのではなく、フレアにより水素の高エネルギーの流れにドラッグされて流出したことを示唆している。
- しかし、酸素シンクを考慮しておらず、酸素大気は除去される可能性がある(風化、火山活動など)。



# 3. Results - Known planets

- 実際のHZ内に位置する系外惑星へ適用する。
- 軌道長半径は観測値と、Group1と同様の手順で決めた値の2通りで計算する。
- HZへ到達すると水の損失は停止すると仮定する。

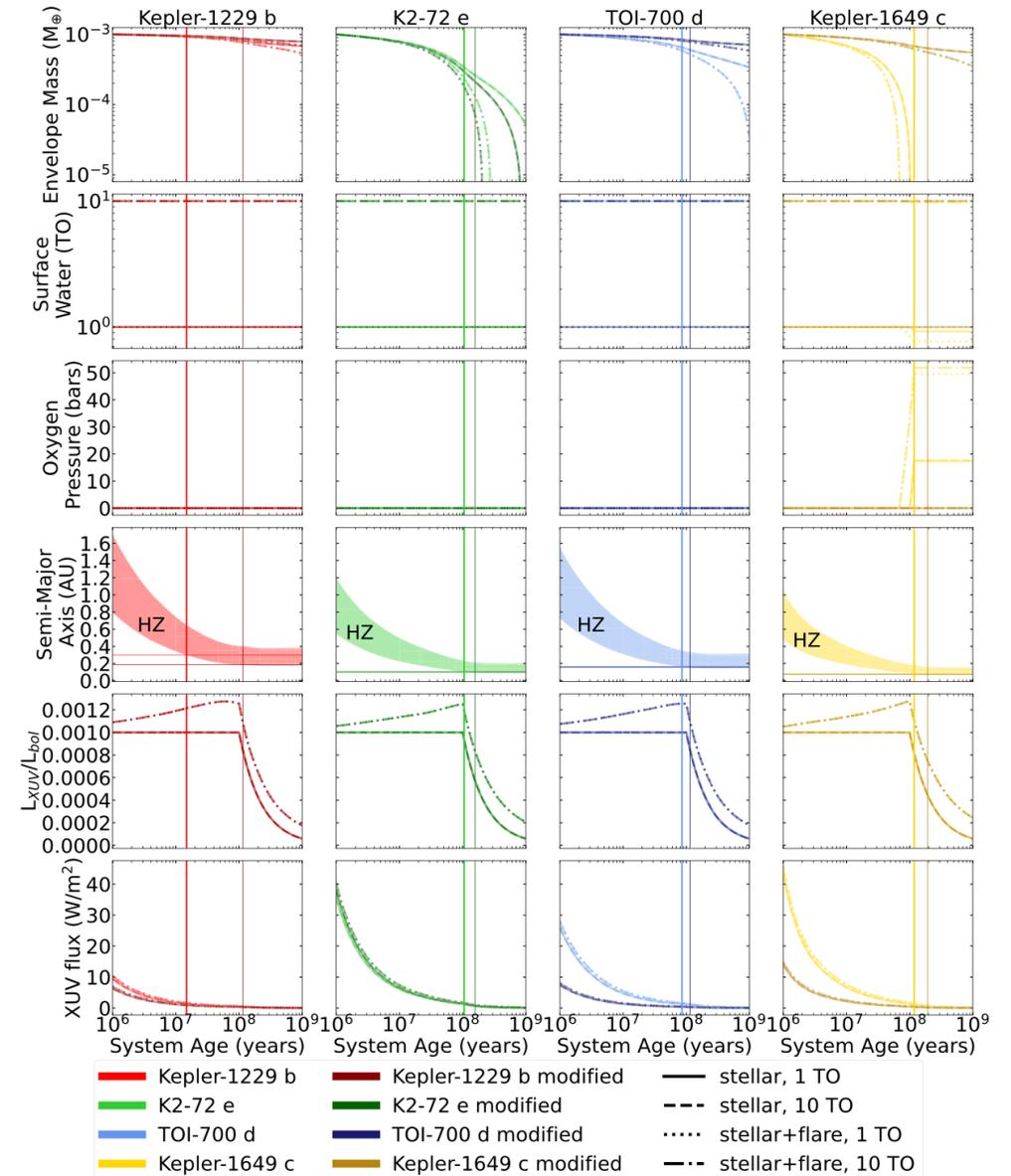


- Kepler-1229 b  
 $M_* = 0.48 M_{\odot}$ ,  $M_p = 2.93 M_{\oplus}$ ,  
 $a = 0.3$  au
- TOI-700 d  
 $M_* = 0.41 M_{\odot}$ ,  $M_p = 1.64 M_{\oplus}$ ,  
 $a = 0.16$  au
- K2-72 e  
 $M_* = 0.27 M_{\odot}$ ,  $M_p = 2.55 M_{\oplus}$ ,  
 $a = 0.10$  au
- Kepler-1649 c  
 $M_* = 0.19 M_{\odot}$ ,  $M_p = 1.23 M_{\oplus}$ ,  
 $a = 0.08$  au

# 3. Results - Known planets

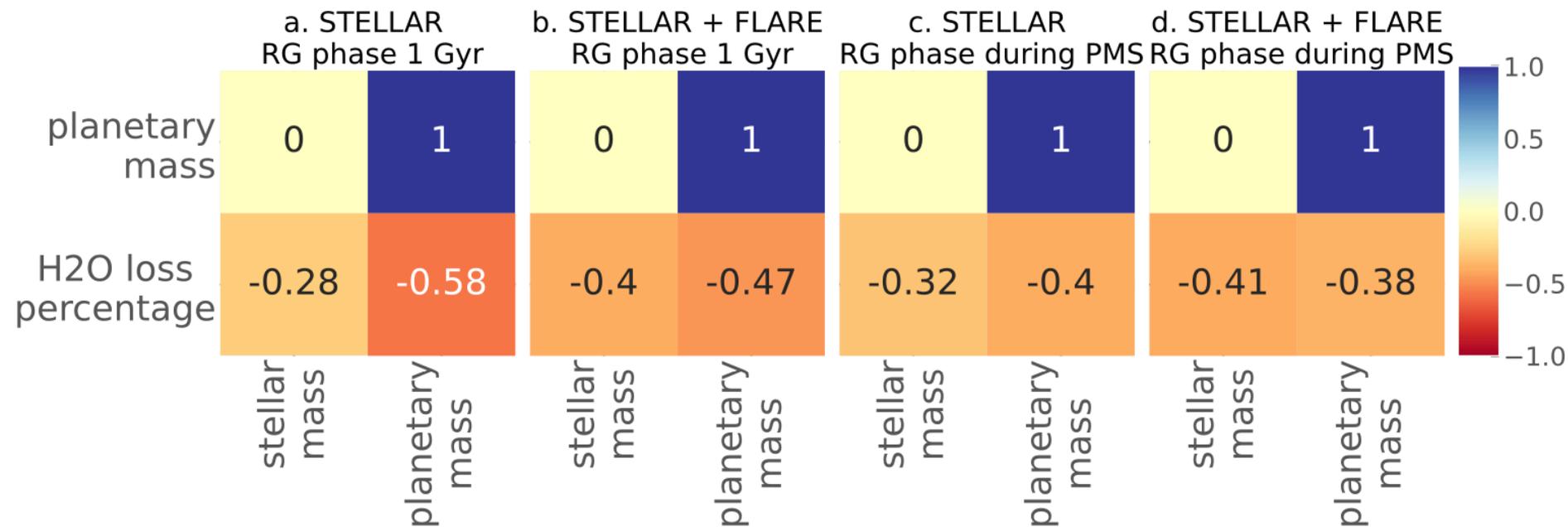
上から原始水素大気の質量、表面水量、大気中の酸素量、optimistic HZの位置と軌道長半径、XUVとボロメトリック光度の比、XUV強度の時間発展。

- Kepler-1229 bは、大きな惑星質量によりフレアを入れても原始水素大気が保持される。
- TOI-700 dは、軌道長半径が大きいため原始水素大気が保持される。
- K2-72 eは原始水素大気を失うが、その前にHZへ入るため水の損失はない。
- Kepler-1649 cは唯一水を失う。



# 4. Discussion - 恒星と惑星の質量の水貯蔵量への依存性

- 恒星と惑星質量と水の損失量の間的相关を求めた。
- 恒星や惑星の質量と水の損失量には逆相関がある。
- 恒星質量が大きい場合、全主系列段階が短くなるため、水の損失は少なくなる。
- フレアを考慮すると、恒星質量との間的相关が大きくなる。
- フレアの少ない活動的なM型星に限られているため、フレアのモデルに不確実性があることに留意が必要である。



## 4. Discussion - フレアによる既知惑星への影響

- 活動的な恒星周りの系外惑星を仮定しているが、多くの惑星はそうでない可能性がある。TOI-700は低速回転体( $P=54$  days; Rodriguez+, 2020)で活動的でない。他の3惑星もフレア観測が報告されていない。

→現在は非活動的でも恒星活動は時間と共に減少するため、シミュレーションは、これらの初期進化の段階を代表している可能性はある。

- TOI-700 dは地球と比べて極端な環境ではなく(Cohen+, 2020)、非磁化惑星であれば1 Gyr以内に大気が失われる(Dong+, 2020)。

→外挿するとTOI-700 dの大気は、1 Gyr以降すぐに失われる可能性がある。

- Kepler-1649 cは、軌道長半径が小さく惑星がHZの内側にいる時間が長いいため、唯一水を失う。フレアのケースは静穏時より0.16 TO多く損失する。

# 5. Conclusions

- M型星は地球型太陽系外惑星を探查し、その特徴を明らかにするための最も観測しやすいターゲットである。
- 太陽と比べると、M矮星のフレアは高頻度、高エネルギーである。
- XUV放射は惑星大気をイオン化・加熱し、大気散逸を促進する。



M型星のXUV放射シミュレーションを行い、フレアの影響を考慮して、水の光分解、水素の散逸、酸素の蓄積を計算した。

- 恒星フレアは、水損失量を2倍にする可能性がある。
- 恒星フレアにより、酸素の分圧が数百 bar上昇する可能性がある。
- ❖ この結果は、潮汐力、惑星磁場、CME、放射冷却などを考慮しておらず、今後の研究により探究する必要がある。

# Backup Slides

## 惑星パラメータ

Parameter	Kepler-1229 b	K2-72 e	TOI-700 d	Kepler-1649 c
Planet mass <sup>a</sup> ( $M_{\oplus}$ )	2.93	2.55	1.63984	1.2389
Planet radius ( $R_{\oplus}$ )	1.34	1.29	1.144	1.06
Planet density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	6.69	6.52	6.018	5.715
Envelope mass ( $M_{\oplus}$ )	1.0E-3	1.0E-3	1.0E-3	1.0E-3
Surface water (TO)	1,10	1,10	1,10	1,10
XUV water escape efficiency	(Bolmont et al. 2017)	(Bolmont et al. 2017)	(Bolmont et al. 2017)	(Bolmont et al. 2017)
XUV hydrogen escape efficiency	0.15	0.15	0.15	0.15
Thermosphere temperature (K)	400	400	400	400
Actual semimajor axis (AU)	0.3006	0.106	0.1633	0.0827
Modified semimajor axis <sup>b</sup> (AU)	0.19685	0.102468	0.16247	0.07643
Eccentricity	0.11	0	0.111	0
Stellar mass ( $M_{\odot}$ )	0.480	0.271365	0.415	0.1977
Saturated XUV luminosity fraction	1.0E-3	1.0E-3	1.0E-3	1.0E-3
XUV saturation time (Myr)	100	100	100	100
Initial stellar age (Myr)	1	1	1	1
Flare energy (ergs)	11.0E33-1.0E36	1.0E33-1.0E36	1.0E33-1.0E36	1.0E33-1.0E36
Simulation time (Myr)	1.0E3	1.0E3	1.0E3	1.0E3
Time step <sup>c</sup> (yr)	~4.8E-2-1.0E4	~6E-2-1.0E4	~5E-2-1.0E4	~6E-2-1.0E4
VPLanet modules	AtmEsc, STELLAR, FLARE	AtmEsc, STELLAR, FLARE	AtmEsc, STELLAR, FLARE	AtmEsc, STELLAR, FLARE
Source (planetary radius, stellar mass and semimajor axis)	Torres et al.(2017)	Dressing et al.(2017)	Rodriguez et al.(2020)	Vanderburg et al. (2020)