

2022/07/25 火星勉強会

坂東日菜

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS

How Hospitable Are Space Weather Affected Habitable Zones? The Role of Ion Escape

Vladimir S. Airapetian¹ , Alex Gloer¹, George V. Khazanov¹, R. O. P. Loyd² , Kevin France² ,
Jan Sojka³, William C. Danchi¹, and Michael W. Liemohn⁴

Published 2017 February 6 • © 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

doi:10.3847/2041-8213/836/1/L3

Abstract

Atmospheres of exoplanets in the habitable zones around active young G-K-M stars are subject to extreme X-ray and EUV (XUV) fluxes from their host stars that can initiate atmospheric erosion. Atmospheric loss affects exoplanetary habitability in terms of surface water inventory, atmospheric pressure, the efficiency of greenhouse warming, and the dosage of the UV surface irradiation. Thermal escape models suggest that exoplanetary atmospheres around active K-M stars should undergo massive hydrogen escape, while heavier species including oxygen will accumulate forming an oxidizing atmosphere. Here, we show that non-thermal oxygen ion escape could be as important as thermal, hydrodynamic H escape in removing the constituents of water from exoplanetary atmospheres under supersolar XUV irradiation. Our models suggest that the atmospheres of a significant fraction of Earth-like exoplanets around M dwarfs and active K stars exposed to high XUV fluxes will incur a significant atmospheric loss rate of oxygen and nitrogen, which will make them uninhabitable within a few tens to hundreds of Myr, given a low replenishment rate from volcanism or cometary bombardment. Our non-thermal escape models have important implications for the habitability of the Proxima Centauri's terrestrial planet.

Key words: hydrodynamics – planets and satellites: atmospheres – planets and satellites: magnetic fields – radiation mechanisms: general – stars: activity – stars: late-type

- ・ 熱的散逸モデル→活動的なK-M型星周りの系外惑星では水素が大量に脱出し、Oを含む重い大気種が残る
- ・ この論文では、**非熱的な酸素イオンの散逸**が「系外惑星大気から水の成分を奪う」プロセスとして、流体力学的な水素の散逸と同じくらい重要であると示す
- ・ モデルから、M型矮星やActiveなK型星の周りの地球型系外惑星は、高いXUVに曝されることでOやNを失い、数千万年～数億年以内に居住不可能になる可能性があることがわかった

系外惑星のハビタブルゾーンの定義を見直す必要がある(?)

1. イントロダクション

イントロダクション

- **CHZ(Climate Habitable Zone)**

惑星が受け取る恒星光球から放出される熱エネルギーの総量から求められる

← **非熱放射**と**磁気エネルギー**が惑星に与える影響は無視

- 太陽は比較的穏やかな磁場を持つが、地球大気への影響は太陽活動周期の間で変化する [Schrijver et al, (2015)]

- 太陽フレアは、電磁放射・高エネルギー粒子・CMEを介して地球電磁気圏に影響を与える

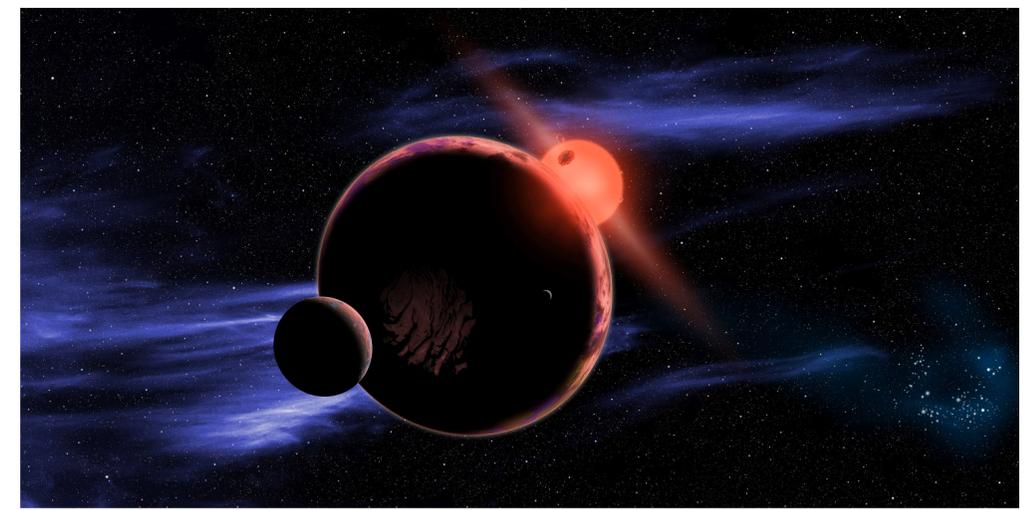
- 太陽フレア時：X線紫外線(XUV,20-300 Å)は1000倍、極紫外線(EUV,300-1215 Å)は20倍に増加 [Wood & Rottman,(2005)]

- 高いXUV・EUV放射と磁気圏からの降下粒子は、高度200km以上でガスを電離

- 光電子や二次電子を生成

- 荷電大気粒子の流出に寄与 @火、金、地

イントロダクション

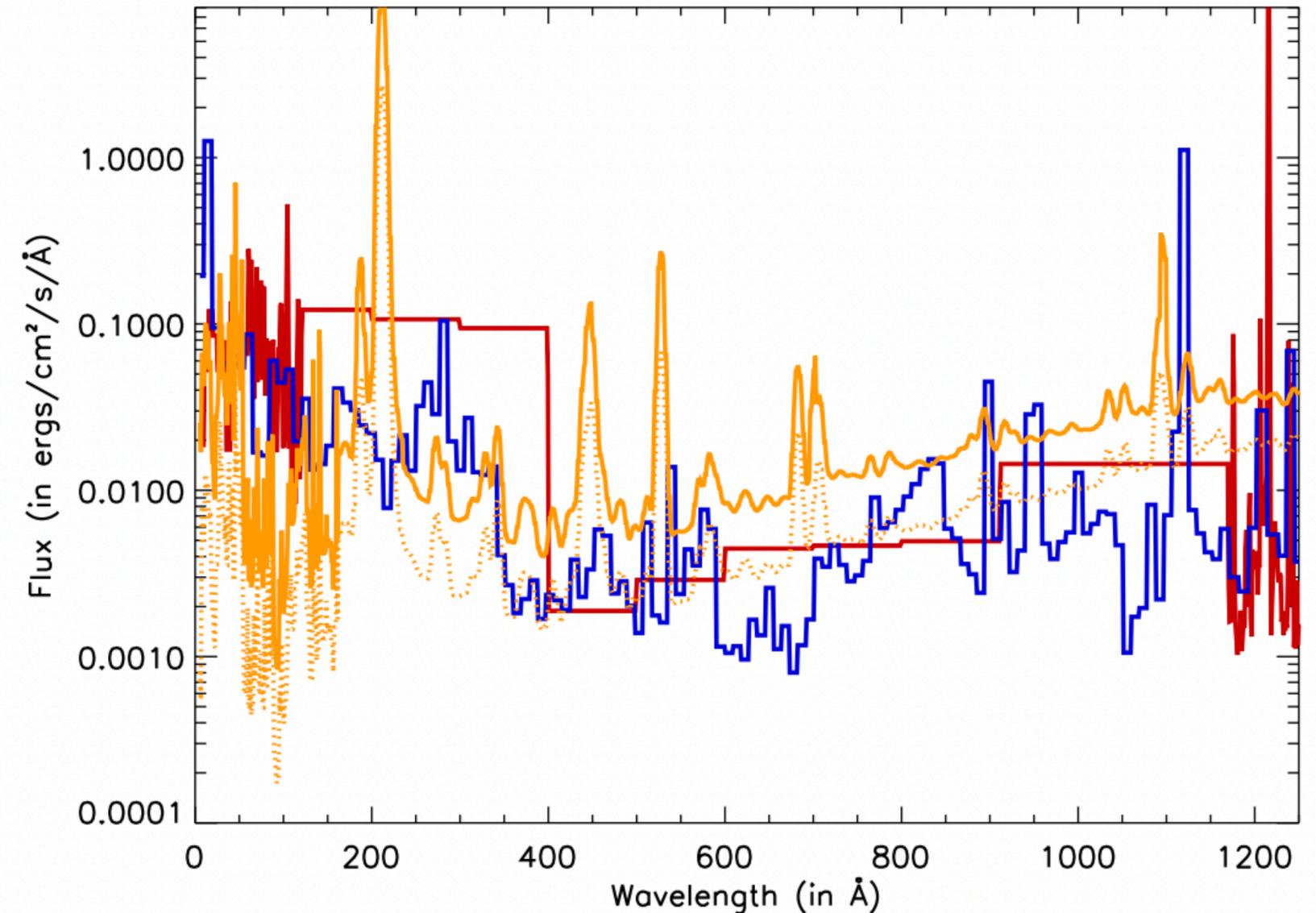


- G型、K型、M型矮星のXUVフラックスから、恒星のコロナと遷移領域で強力な非熱放射が生成されていることを示唆している [Lloyd et al., 2016]
- 若く (~1 億年) 活発なM型矮星では、
 - X線光度は現在の太陽より2桁以上大きい
 - 明るさが小さい → コンパクトなCHZ 0.05~0.16au [Kopparapu et al., (2016)]
 - 赤色矮星周りの系外惑星は、太陽型星(G,K)周りと比べて最大で2桁以上も大きなXUVフラックスに曝されている

XUVフラックス

- 全XUV (・ EUV) フラックスは、若い太陽では $8.3F_0$ 、GJ832では $7.7F_0$ 。
短波長側での大きさと形が似ている
- 若い太陽とM型矮星では、
 - X線タイプのフレア活動フラックスの寄与が支配的であることを示唆
 - Xタイプフレアが盛んで、CMEや高エネルギー粒子イベントが頻繁に発生

➡ CMEによる動圧は惑星磁場を大きく変化させ、極域でのエネルギー散逸を引き起こす [Airapetian et al., (2015)]



- 現在の平均的な活動度の太陽 (点線)
(Total Flux : $F_0(5-1216 \text{ \AA}) = 5.6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- 若い(7億年)太陽 (実線)
- 不活発なM1.5赤色矮星 GJ832
(0.16auでの値にスケールリング)
- 2012年3月7日に発生したX5.5クラスフレア

2. O⁺質量損失を駆動するXUV・EUVによる影響

XUV放射による大気散逸

XUV放射は、光吸収と光電離による非熱的加熱を起こし、外圏の温度を上昇、スケールハイトを増加させる

→ 高いXUVフラックスの場合、中性分子種が流体力学的に散逸
散逸率は大気種の分子量に依存 → **水素**は早く散逸 [Lammer+2008]

これにより、活動的な太陽型星やM型矮星の環境下では
系の初期段階で多くの水素が失われ、**NやOなどの重い成分**に富んだ大気が残る。

高速・高密度な恒星風や光化学散逸
プロセスがないと出ていかない

- NやOに富む大気の進化の予測
- 水H₂Oの大気散逸効率の予測

のために **非熱的メカニズムによる
大気の電離と散逸のモデル** が不可欠

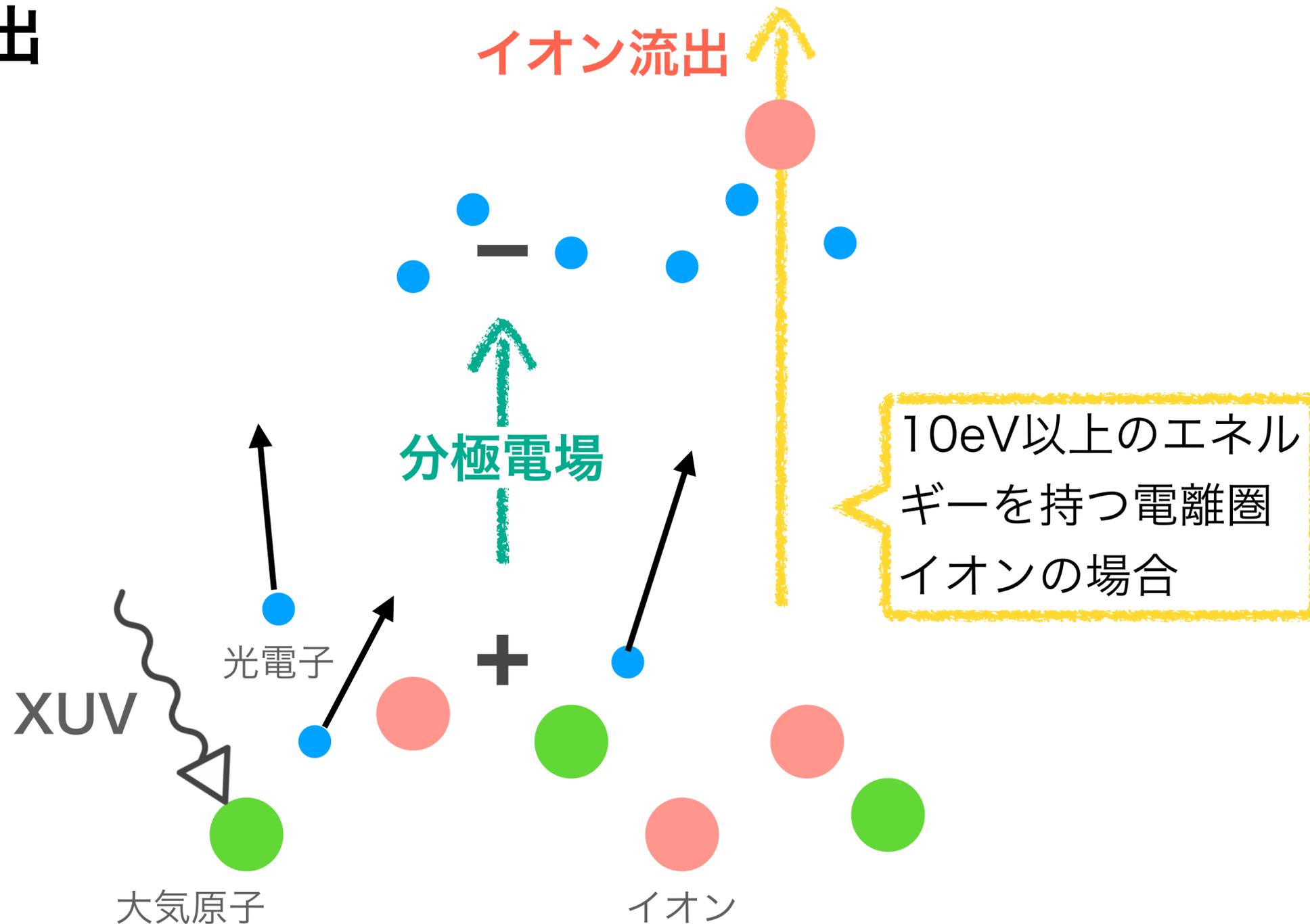
非熱的メカニズムによる散逸

分極電場によるイオン流出

地球サイズ惑星の外圏より上では

動径方向の分極電場の形成により
エネルギーを持ったイオンは
地球の重力を振り切って流出する

↓
電離圏流出



非熱的散逸のモデル

- この過程をモデリングするには、流体力学的イオンと超熱的電子の運動方程式を、分極電場とカップリングさせることが必要。

極風流出モデル (Polar Wind Outflow Model : PWOM) のイオン流体力学

+

超熱電子輸送モデル (Super Thermal Electron Transport : STET) コード

を結合したモデルを作った

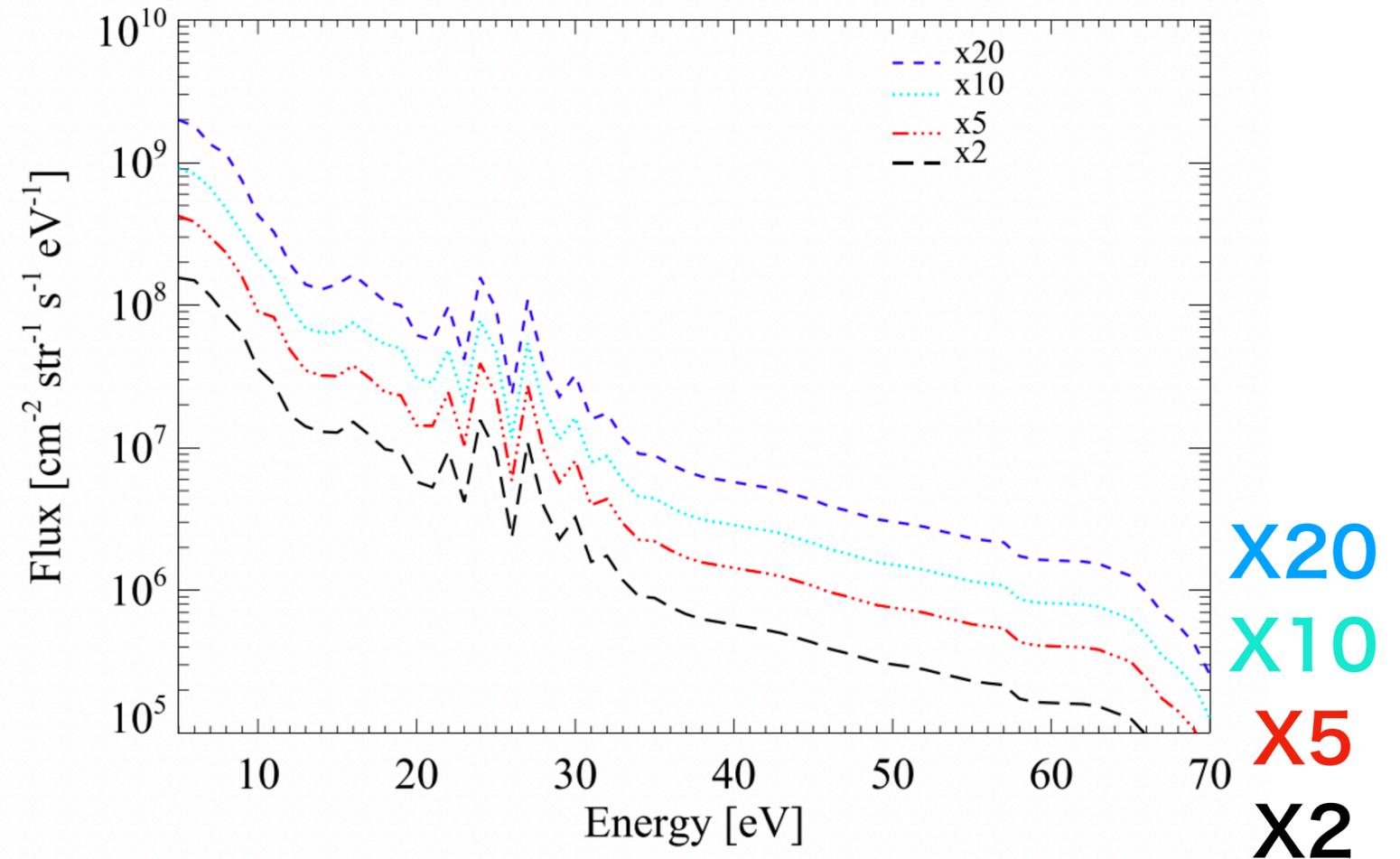
- 光電離によって生成される超熱電子集団の計算と、それらと中性大気の衝突カップリングの計算にSTETを適用
- O, O₂, N₂などの中性温度を求めるために地球大気用に開発されたMSIS-90経験モデル使用
- 下層大気中の水分子はシミュレーション領域である上層に到達するまでにH, O, O₂に光分解されていると仮定
- XUVインプット幅 5~1750 Å
 - O⁺イオン：波長300~600 Åの光子または光電子との衝突による光電離で生成

非熱的散逸のモデル

XUV放射によって生成する超熱的電子

右図は、XUV/EUV放射によって生成する70eVまでの超熱電子フラックスを示している

- 星のXUVフラックスを F_0 で表現した4つのモデル(x2,5,10,20)
- 20-30eVの光電子にみられるスパイクは、前のXUVスペクトルで顕著な発光していたHe II 304 Å 共鳴発光線によって生成される
- 生成する光電子フラックスは、入力XUVフラックスに対して線形に増加



非熱的散逸のモデル

散逸率のモデル化

次に、PWOMにより、STETが再現する超熱電子フラックスを利用して電離大気の散逸率をモデル化する。

- ・ 極域の光度200-600kmで1本の磁力線沿いに地球型系外惑星大気のH⁺とO⁺の質量流出率を計算
- ・ 極域範囲の推定：初期地球の全球磁気圏MHDシミュレーションの結果を使用
- ・ 10F₀のXUVフラックス → キャリントンタイプのCMEイベントに相当
 - ・ 高い動圧と大きなIMFを伴う
 - ・ IMFの向きと昼側磁気圏の向きが反対向きの場合、惑星磁場の~70%がオープンに [Airapetian+2016]

非熱的散逸のモデル

散逸率のモデル化

- ・ 入力XUVフラックスと200kmの**外圏底で指定した中性温度**の値によって駆動されるO⁺イオンの流出率を計算した
 - ・ モデルでは中性温度を固定しているが、実際には増強されたXUVの吸収によって**温度は上昇**する
 - ・ このモデルでは、計算コストの問題から外圏底の中性温度の上昇が流出率に与える影響を自己矛盾なく取り扱うことはできない
- ➡ 影響の評価のため、10F₀のXUVフラックスで2種類の外圏底温度に対する流出モデルを計算
[結果] ベース中性**温度を2倍**にすると、**O⁺散逸率は10倍**になった

モデル計算

地球と同じ大気組成・質量を持つ系外惑星 (T_{base} = 2000 K) に、2,5,10,20 F₀のXUVフラックスを照射した場合の4つのモデルを計算した。

h=1000kmでのO⁺全損失率は、次の値を極域の全領域Sで積分することで得られる

$$\dot{M} = \rho VS$$

ρ : その高度での酸素イオン密度

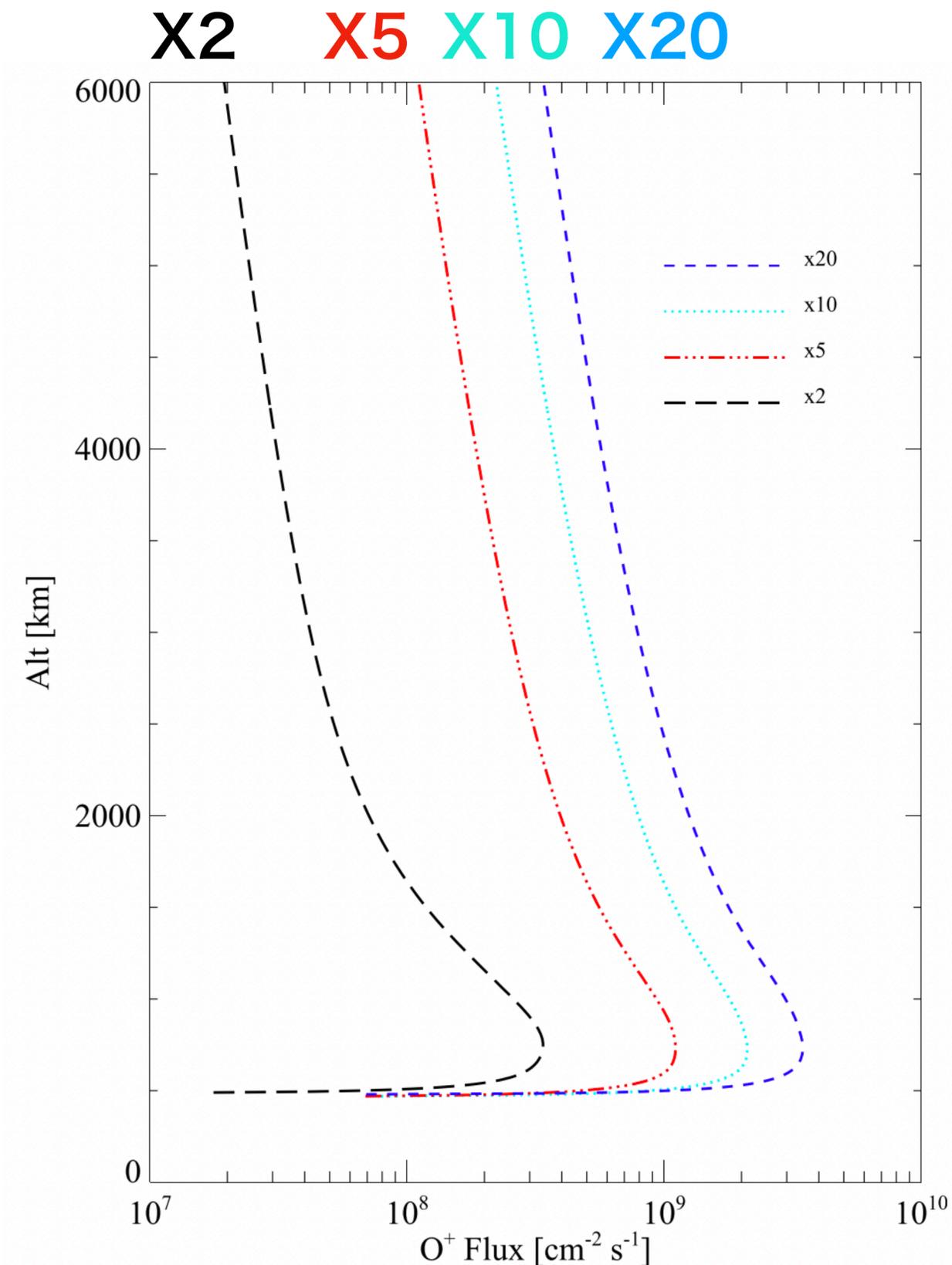
V : 酸素イオンのバルク速度

非熱的散逸のモデル

酸素イオンの質量損失率

若い太陽からのXUV-EUV放射による
地球大気からのO⁺イオン質量損失率

- 太陽フラックスに対してO⁺イオン損失率はほぼ線形的に増加
- 20F₀では**~400 kg s⁻¹**
- XUVフラックスが20F₀のとき、基底温度→3000K
 - 基底温度の上昇も加味すると、推定される質量損失率は、T_{base} = 2000 Kでのモデル出力の約4倍に増加、すなわち~1600kg s⁻¹



非熱的散逸のモデル

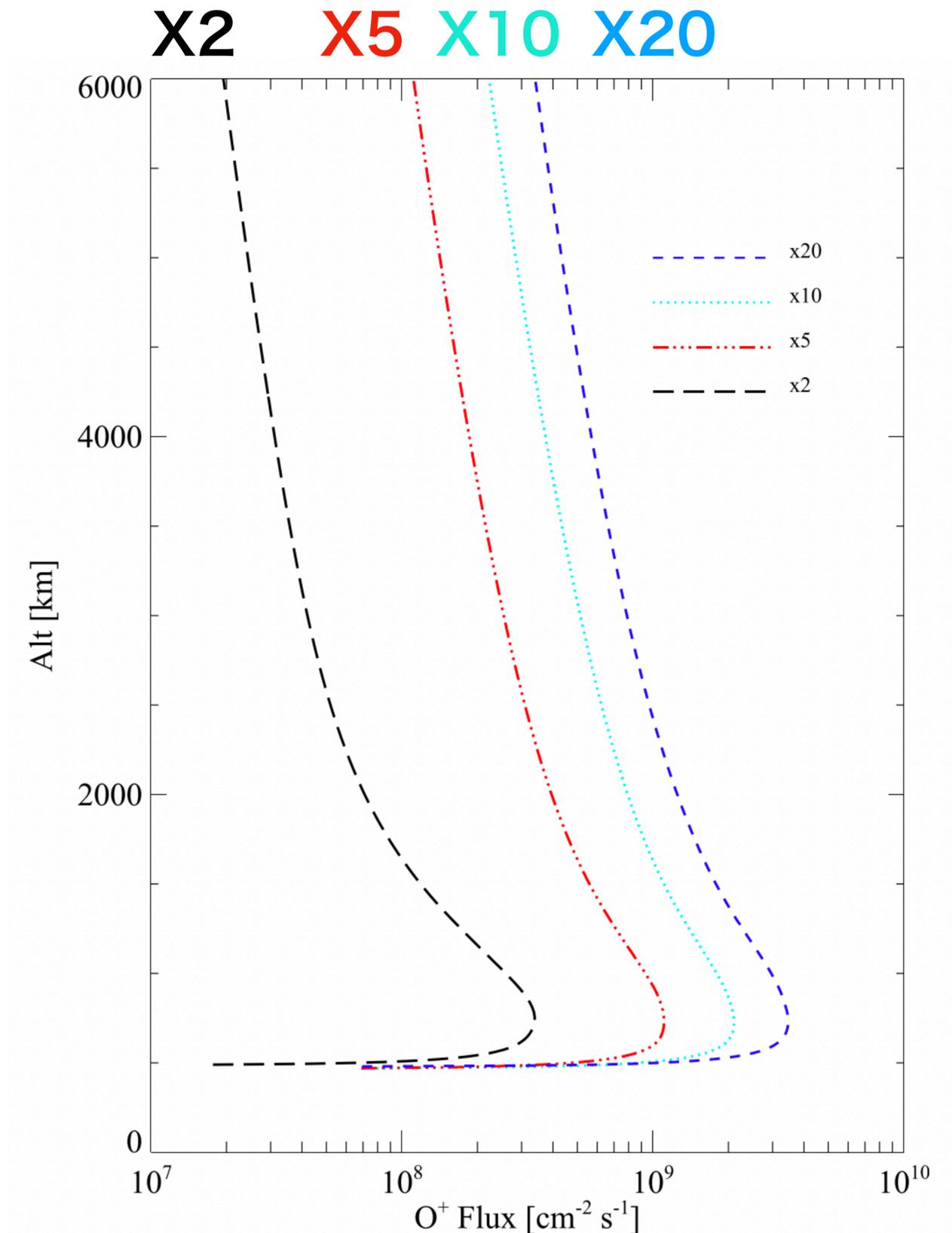
したがって損失率は、

$$\dot{M}[\text{gs}^{-1}] \sim 1.6 \times 10^4 F_{\text{XUV}}[\text{ergcm}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

として入力フラックスでスケーリングできる。

この損失率は、CHZ内縁、XUVフラックス $\sim 20F_0$ 以下の地球質量惑星での**Hの熱散逸と同程度**

さらに H^+ についても、分極電場による非熱的散逸の過程はHやHeの除去に重要になってくる



赤色矮星GJ832への適用

- 不活性な赤色矮星GJ832の系で、0.16auで $10F_0$ のXUVを浴びるスーパーアースに先ほどの損失率の式を適用すると、
 - 1気圧の地球と同じ大気組成の惑星は、**5千万年で酸素イオンが失われる**ことが示唆された
 - M型矮星は数十億年の時間スケールで磁気活動を続けるため、CHZの内縁では高レベル ($>10F_0$)のXUVフラックスになると考えられる



- CHZの定義は中年齢のK-G主系列星にのみ有用で、そこでのCHZ内でのXUVフラックス ($<5F_0$)は、大気進化の時間スケールでの大気散逸にそこまで影響を与えない
- しかし、より高いXUVフラックスの環境では、大気散逸率は大気進化に影響を与えるほどに大きくなり、CHZの定義を**宇宙天気影響下のハビタブルゾーン(SWAHZ)**に拡張することが有用

3. 結論

地球型系外惑星Proxima Cen b のハビタビリティ

- 地球型系外惑星 **Proxima Cen b** [Anglada-Escude+2016]
恒星のCHZに位置し、表面で水を保持できる可能性があるとされている
- Proxima Cenは太陽活動極大期の太陽に匹敵するX線フラックス
- Proxima bの位置0.05auではXUVフラックスは $60F_0$ まで増強
- 惑星質量は 地球と同程度 or 1-5倍のスーパーアース型

Proxima bが地球サイズ惑星の場合

Proxima bが遅い自転速度でも、磁場の発生に大きな影響は与えないと考えられ、**双極子磁場を持つ**ことが予想される[Christensen & Aubert 2006]

←磁場の発生はダイナモよりもマントル対流を制御する内部熱流速に影響を受けるため

スーパーアースサイズの場合

マントル対流の**効率**が悪くなり、惑星深部の熱は対流ではなく伝導で伝えられるように。

巨大地球型惑星における火山活動や磁気ダイナモの効率を低下させる[Stamenkovic+2012]

地球型系外惑星Proxima Cen b のハビタビリティ

- Proxima Cen b に F_{XUV} による損失率のスケーリング則を適用

➡ 1気圧の酸素に富んだ大気が流出するまでにかかる時間は**約1千万年**と予想

- さらに、Proxima Cen恒星環境のMHDモデルから、地球の1000倍の恒星風に晒され、**磁気圏は1/3に圧縮**されると予想されている

- 磁気圏圧縮 → 電離層電流発生 → 極冠でのジュール加熱により $\sim 10^4 \text{ erg s}^{-1}$ でエネルギー散逸
- 温度上昇により圧力スケールハイト増加 → さらに電離層加熱源が生まれ、静穏な磁気圏より3-5倍重いイオンの散逸が増加 [Strangeway+2005, Yau+2007]

- 高密度・高速な**恒星風による電荷交換**もイオン散逸を引き起こす

結論 Proxima Cen bはでもどちらのサイズでも(地球型惑星であっても)**居住不可能**

- SWAHZ内の地球サイズ惑星は、高いXUVフラックスに弱く、火山噴出物や彗星による水の補給が少ない場合、数億年以内にM型矮星周辺的环境は居住不可能になると予想される

結論

- 若い太陽型惑星やM型矮星周辺などXUVフラックスが高い環境下では、XUV放射が大気散逸に与える影響を考慮した、CHZよりもSpace Weather Affected Habitable Zone (**SWAHZ**) が有用
- O+の質量損失率とXUVフラックスのスケーリング則から、地球型惑星が0.3au以上またはCHZの外縁に位置している場合は、ハビタブルな可能性がある
- 恒星のXUVフラックスが惑星大気に与える影響を考えると、**ハビタブルな地球型惑星の最有力候補は中年 (~10億歳以上) の中型K-G矮星周りのCHZで、穏やかな宇宙天気環境にある惑星**
- 将来の宇宙望遠鏡 (JWST, HabEx, LUVOIR) による観測によって、これらの惑星のハビタビリティの答えに近づくだらう