

# 大気散逸を考慮したM型星 周りのハビタブルゾーンの 再定義とそのカタログ化へ の試み

山敷庸亮(京都大学大学院総合生存学館)

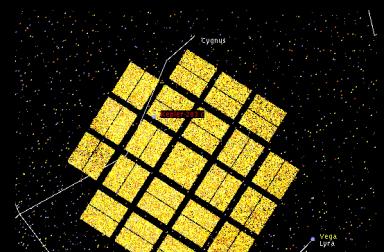
前原裕之(国立天文台), V. Airapetian (NASA/GSFC), 野津湧太(University of Colorado), 栗田光樹夫(京都大学), 佐藤達彦(JAEA), 野津翔太(Leiden Observatory), 黒木龍介(みずほHD), Tom Scott (University of Bristol) 村佐々木貴教, 佐藤啓明, 村嶋慶哉, 坂東日菜, 梨元昴, 高木風香, 木村なみ, 清水里香, 行方宏介, C.Ling, 野上大作, 柴田一成(京都大学),

# M型星

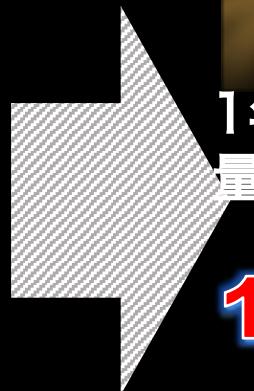
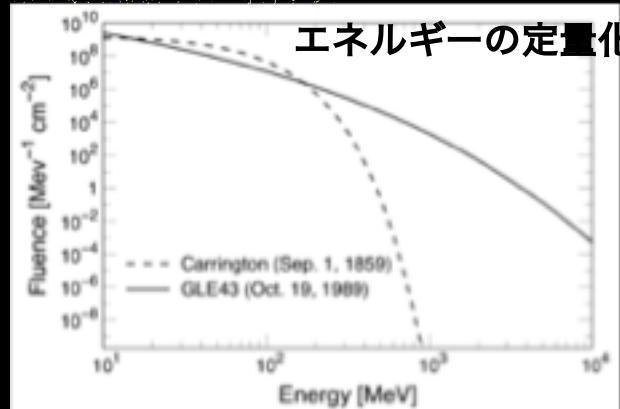
- Luminosity =  $(0.2\text{---}5 \times 10^{-4})L_{\odot}$
  - $T_{\text{eff}} = \sim 3800\text{K (M0)} - \sim 2300\text{K (M9)}$
  - Radius =  $(0.6 - 0.1) R_{\odot}$
  - Mass =  $(0.6 - 0.1) M_{\odot}$
- 対流層が発達(<0.35Msunで、fully convective)  
→ 磁気活動が活発
  - 強い彩X層線・X線放射, 強い磁場強度
  - 高いフレア発生頻度
- Habitable zoneが中心星近傍(0.05-0.1au)**
- 系外惑星探査の有力な候補  
(TESS, IRD, etc)
  - 惑星へのフレア等の影響が大きい?  
(Proxima CenやTRAPPIST-1などもフレア星)  
→定量的評価が重要

# 生命が居住可能な系外惑星への スーパーflareの影響を算出

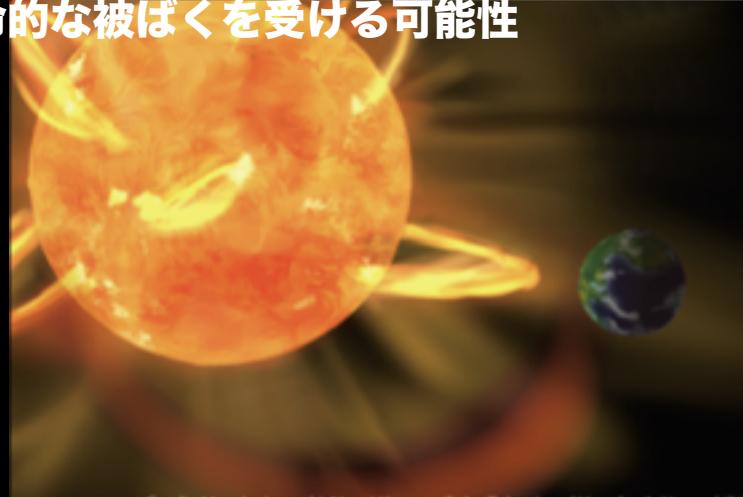
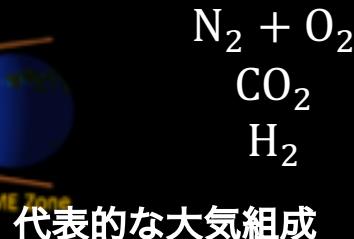
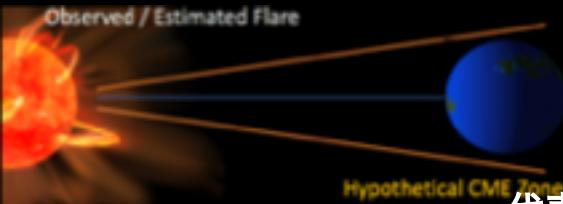
ハビタブル惑星でも致命的な被ばくを受ける可能性



観測史上最大規模のフレアを想定

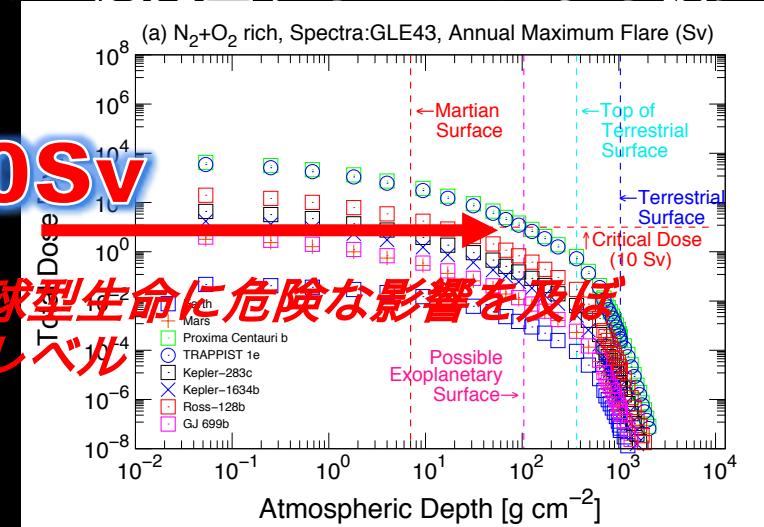


放出される陽子の密度を定式化



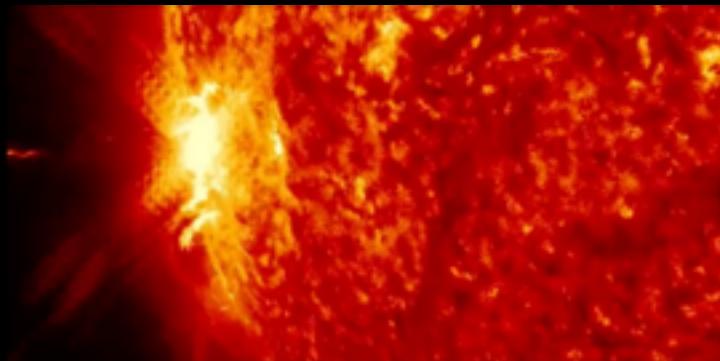
Credit: Haruka Inagaki, Nami Kimura, Fuka Takagi and Yosuke A. Yamashiki

1年に1度発生するCMEによる被ばく

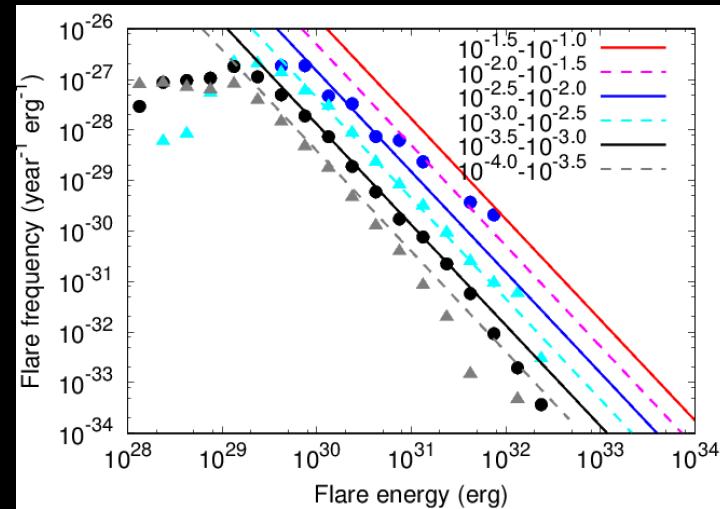


地球型生命に危険な影響を及ぼすレベル

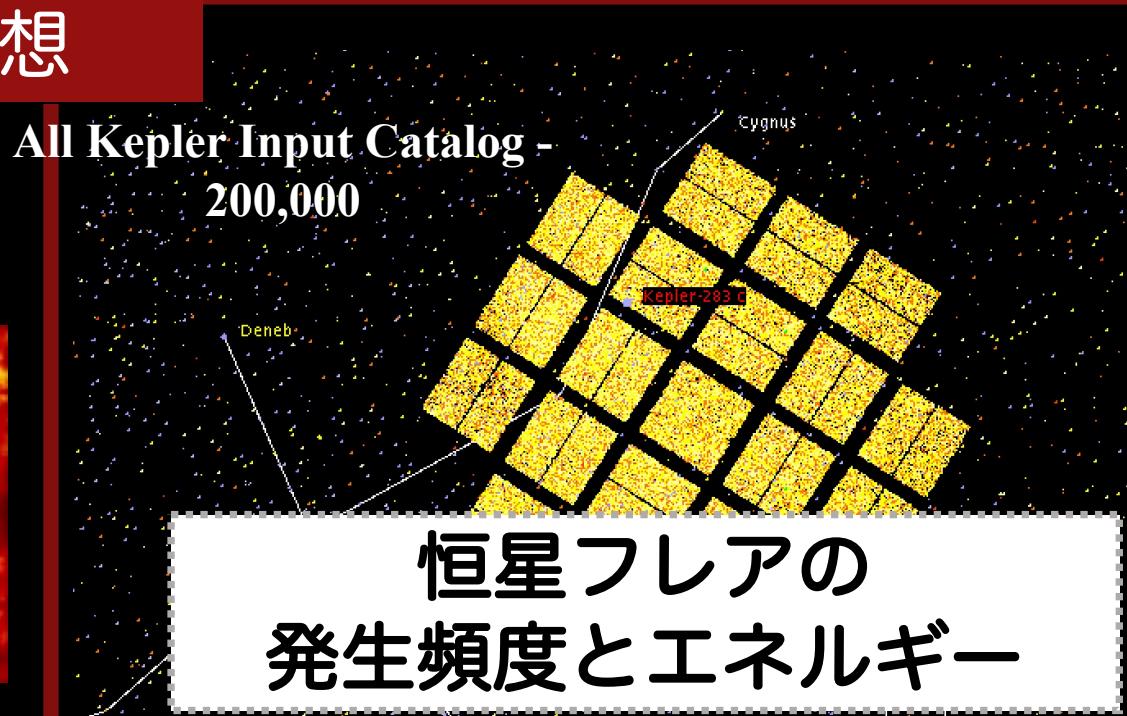
# 発生頻度・規模を予想



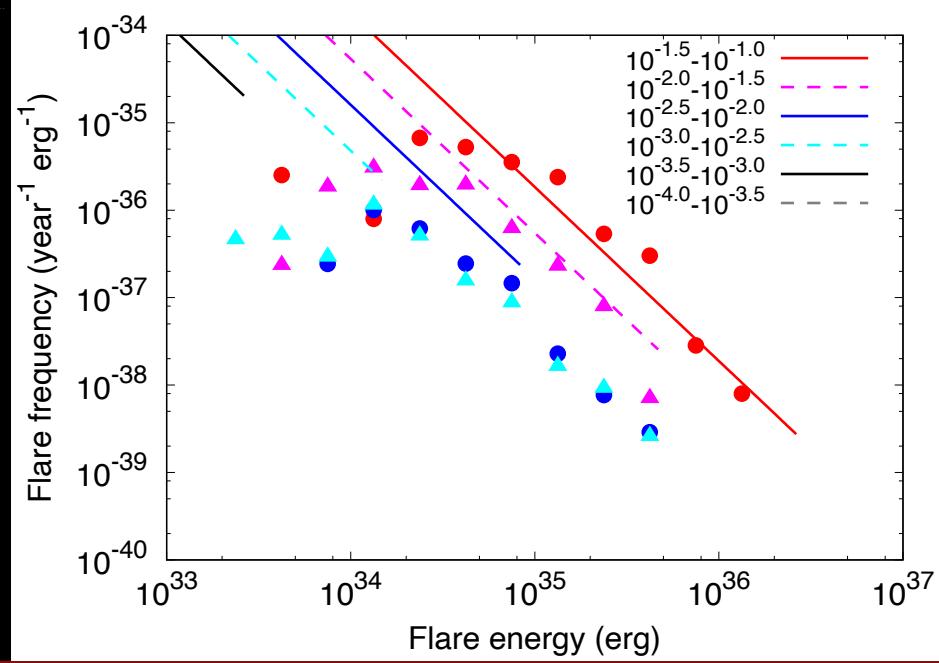
## 太陽フレアの 発生頻度とエネルギー



## All Kepler Input Catalog - 200,000



## 恒星フレアの 発生頻度とエネルギー



山敷庸亮

2019年

## 地球外で生命を探す 水以外の条件も、見直し始まる

コラム(テクノロジー) 科学&新技術 2019年10月5日

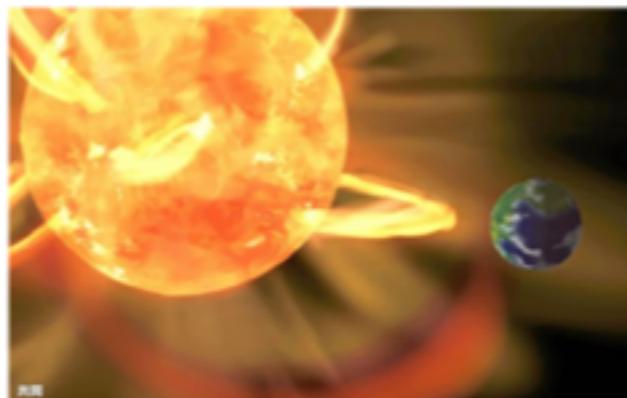
太陽系以外で地球と似た惑星が続々と見つかり、生命が存在するのではないかと期待が高まっている。水があれば有望だが、見つかった惑星の環境が地球と大きく違うこともわかってきた。放射線の強さや生物を形作るために必要な元素の比率なども重要なようだ。太陽系を基準に生命...



## 地球似惑星に致死的放射線 生命存在に過酷な環境

2019年7月17日

太陽以外の恒星の周囲にある惑星「系外惑星」には、地球にいるような生物にとって致死的な強さの宇宙放射線が届く可能性があると、京都大や日本原子力研究開発機構などのチームが発表した。恒星から一定の距離にある系外惑星には液体の水が存在し、地球と同様に生命が存在する...



# Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability



## Annual Maximum Flare

年最大フレア: 1回の頻度のフレアのエネルギーを推定

$$E_{\text{AMF}} = C_0^{-\frac{1}{1+a}} \left[ \frac{A_0}{A} \right]^{\frac{b}{1+a}} E_0^{\frac{a}{1+a}},$$

EAMF: 年最大フレアエネルギー-一年の想定期間のうちに発生する最大フレアエネルギー(erg yr<sup>-1</sup>)

a: -1.99

B: 1.05

## Spot Maximum Flare

スポット最大フレア: フレアエネルギーの上限

$$E_{\text{SMF}} = 7 \times 10^{32} (\text{erg}) \left( \frac{f}{0.1} \right) \left( \frac{B_0}{10^3 \text{ G}} \right)^2 \left[ \frac{A_{\text{spot}} / (2\pi R_\odot^2)}{0.001} \right]^{3/2}$$

f : フレアエネルギーとして放出される磁気エネルギーの割合

B : 磁場強度

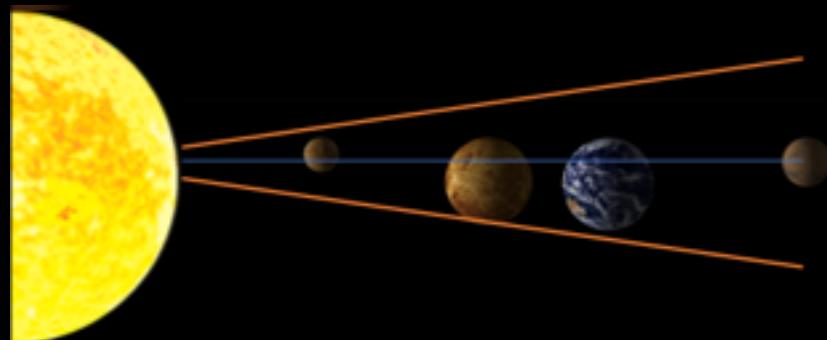
ESMF : スポット最大フレアエネルギー- ある黒点面積を有する恒星が出しうる最大のフレアエネルギー (erg)

R<sub>e</sub>: 太陽半径 (7x 10<sup>10</sup> cm)

# CMEの照射角を仮定



# 入射スペクトル GLE43,Carrington

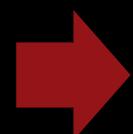
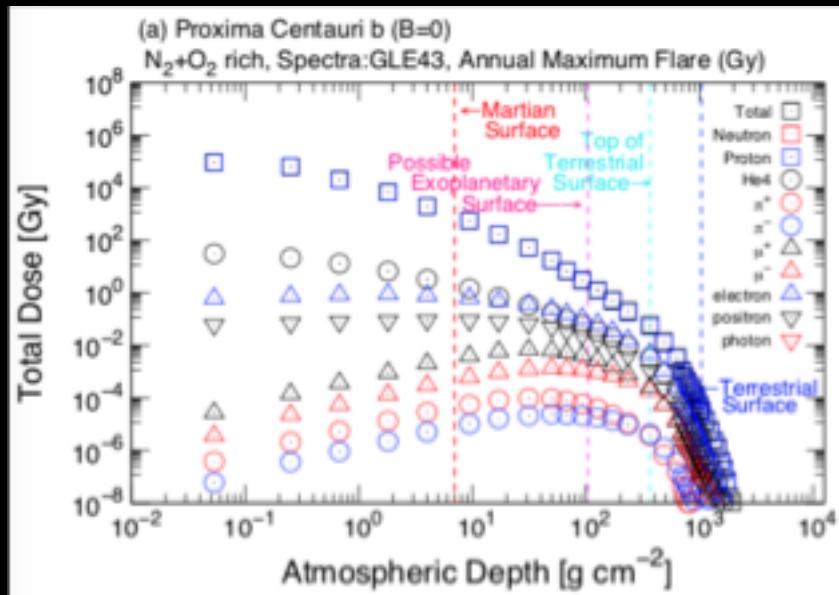
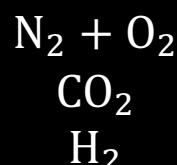


## 想定被ばく量の定量化

想定される系外惑星の大気

**PHITS**

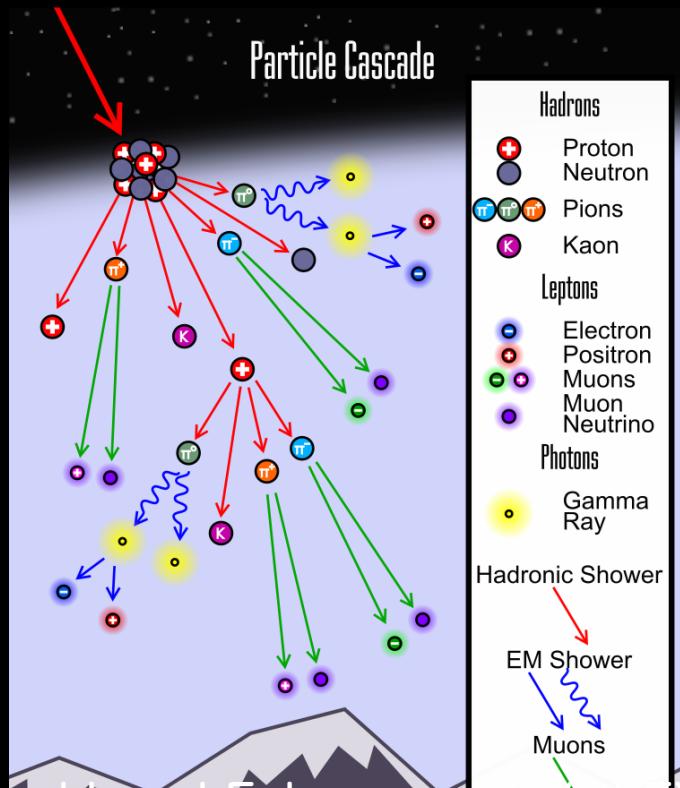
磁場の有無



EXOKyotoによる  
統合モデル化・太陽系外惑星データベースとの融合

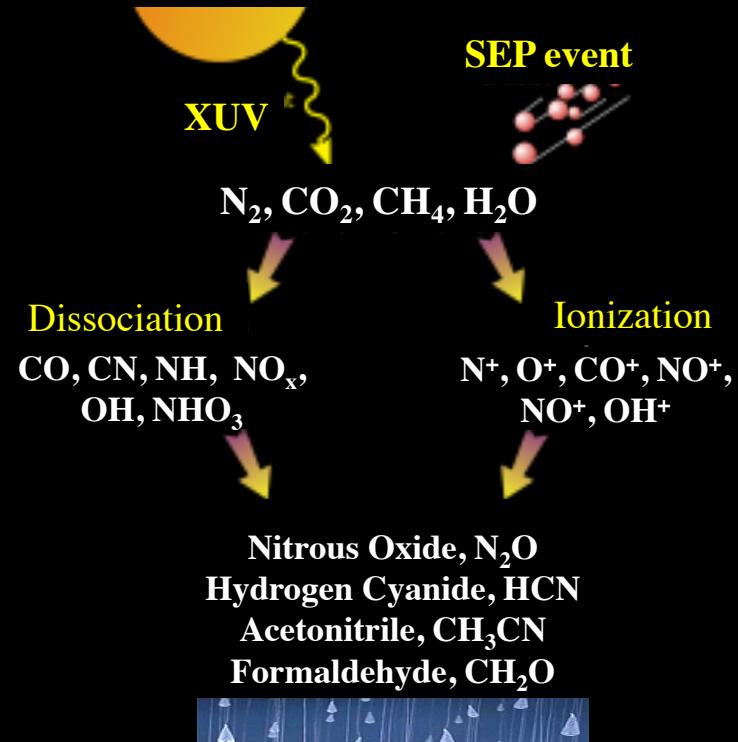
# SEPs in Planetary Atmosphere

## 恒星粒子イベントによる大気シャワー



Ground Level Enhancement  
neutron detected by the sensor on  
the ground

Airapetian+2016; 2019:  
Yamashiki+2019



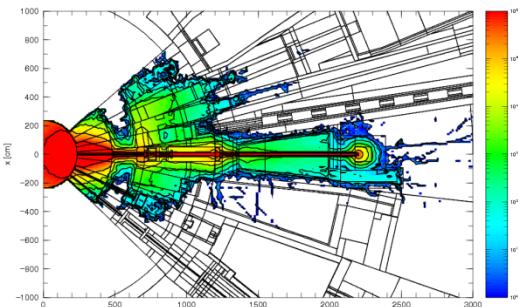
# PHITS JAEA developed by T. Sato

Particle and Heavy Ion Transport code System

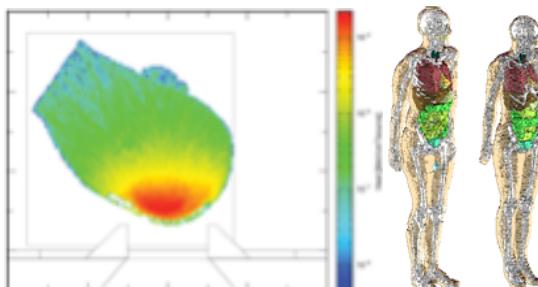
## PHITS

PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) is a general purpose Monte Carlo particle transport simulation code developed under collaboration between JAEA, RIST, KEK and several other institutes.

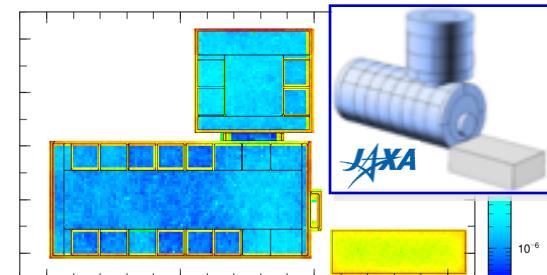
## Application Examples



Facility design  
(acceleration shield)

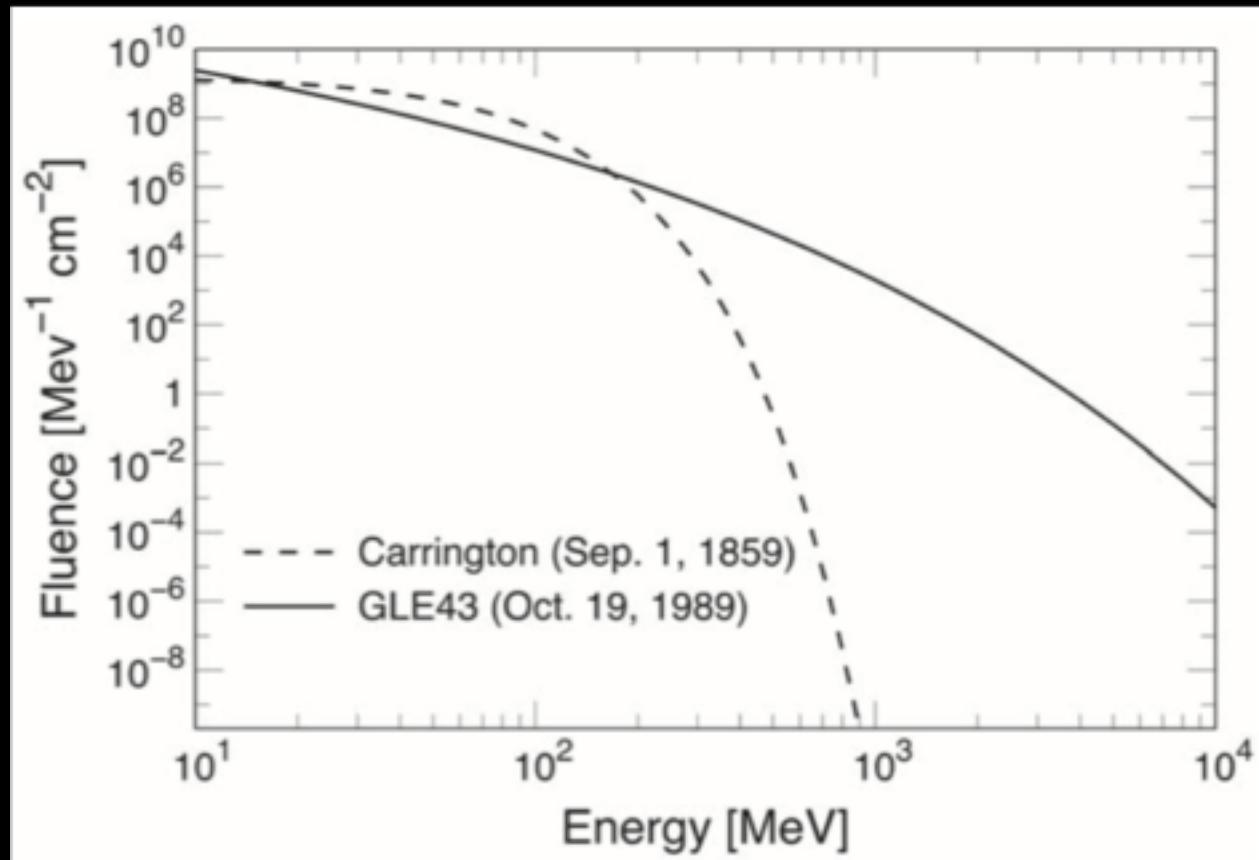


Medical physics



Space / Geoscience

スーパーフレア発生→伝播するプラズマ噴出前面  
のshockでProton加速→惑星大気へ入射  
SEPによる硬いスペクトル(GLE43, 198, 10/Sun))  
と軟らかいスペクトル (Carrington Sep.1, 1859)  
•



# Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability



**Table 1.** Basic parameters of target planets and their host stars, including their projected flare energy

Exoplanet name	Planet			Host star						Flare energy [erg]	
	Radius [ $R_{\text{Earth}}$ ]	Size class	Mass [ $M_{\text{Earth}}$ ]	Spectra	$T_{\text{eff}}$	Radius [ $R_{\odot}$ ]	$P_{\text{rot}}$	$A_{\text{spot,p}}/(2\pi R_{\odot})$	Flare energy [erg]	Annual	Spot Maximum
GJ 699 b	1.37	super-Earth-size	3.23	M4V	3278	0.18	140.0	0.0003	6.26E+31	1.15E+32	
Kepler-283 c	1.82	super-Earth-size	4.59	K5	4141	0.64	18.2	0.0021	4.93E+32	2.13E+33	
Kepler-1634 b	3.19	Neptune-size	7.77	G7	5637	0.82	19.8	0.0066	1.65E+33	1.18E+34	
Proxima Cen b	1.07	Earth-size	1.27	M5.5V	3050	0.14	82.6	0.0040	9.7E+32	5.55E+33	
Ross-128 b	1.10	Earth-size	1.40	M4	3192	0.20	121.0	0.0002	4.72E+31	7.72E+31	
TRAPPIST-1 b	1.09	Earth-size	0.86	M8	2550	0.12	3.3	0.0012	2.70E+32	9.09E+32	
TRAPPIST-1 c	1.06	Earth-size	1.38	M8	2550	0.12	3.3	0.0012	2.70E+32	9.09E+32	
TRAPPIST-1 d	0.77	Earth-size	0.41	M8	2550	0.12	3.3	0.0012	2.70E+32	9.09E+32	
TRAPPIST-1 e	0.92	Earth-size	0.64	M8	2550	0.12	3.3	0.0012	2.70E+32	9.09E+32	
TRAPPIST-1 f	1.05	Earth-size	0.67	M8	2550	0.12	3.3	0.0012	2.70E+32	9.09E+32	
TRAPPIST-1 g	1.13	Earth-size	1.34	M8	2550	0.12	3.3	0.0012	2.70E+32	9.09E+32	
TRAPPIST-1 h	0.76	Earth-size	0.36	M8	2550	0.12	3.3	0.0012	2.70E+32	9.09E+32	
Sol d (Earth)	1.00	Earth-size	1.00	G2V	5778	1.00	25.0	0.0030	7.20E+32	3.64E+33	
Sol e (Mars)	0.53	Mars-size	0.11	G2V	5778	1.00	25.0	0.0030	7.2E+32	3.64E+33	

4363個の確認された太陽系外惑星を表示(2020.8.20)  
複数の定義によるハビタブルゾーンを独自計算  
惑星の想像図を挿入  
日本語での解説

MAC OS darwin

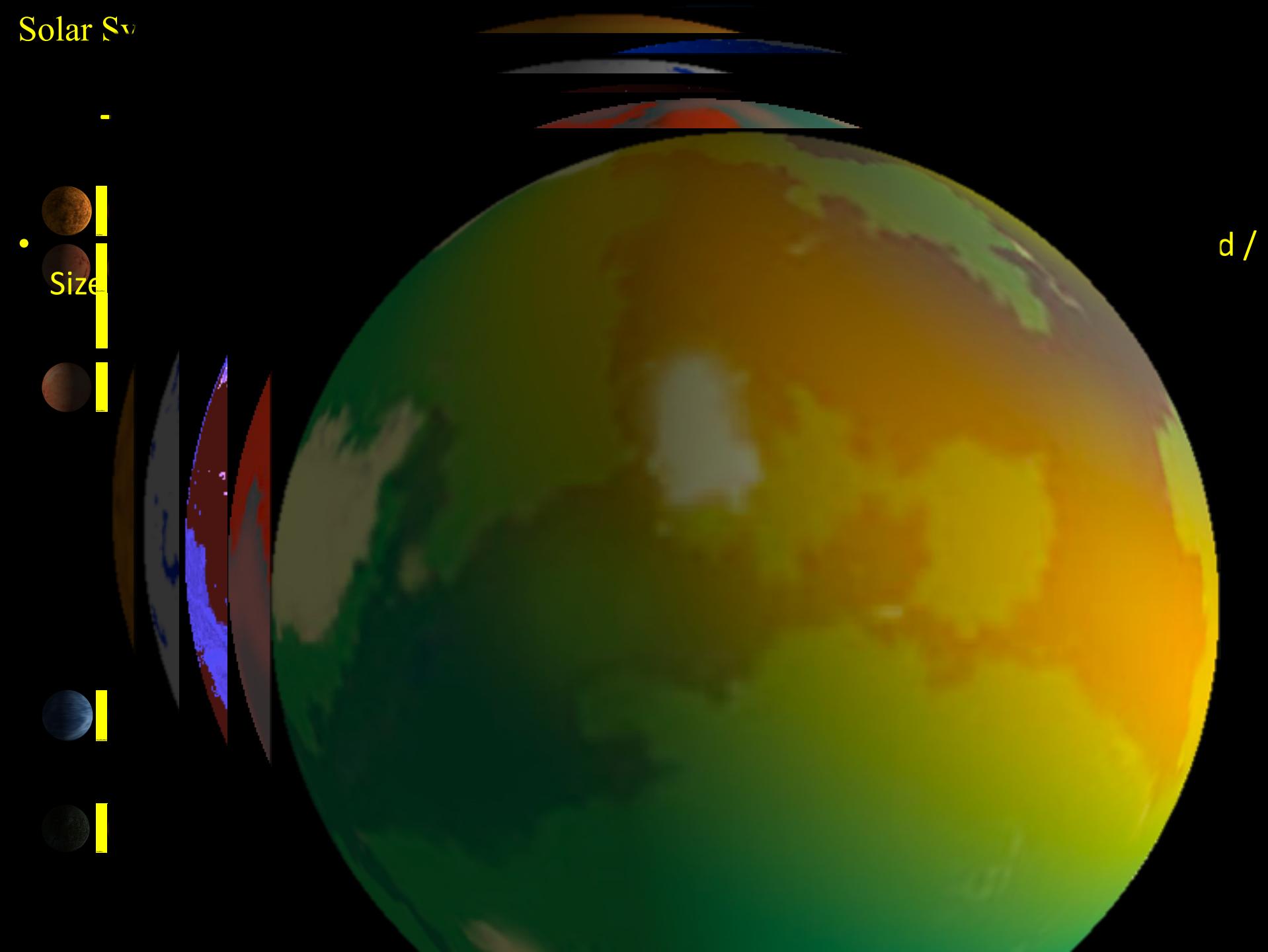
# EXOKyoto

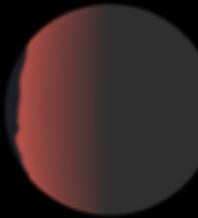
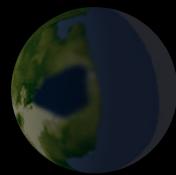
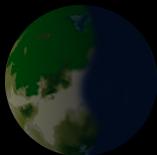
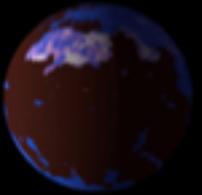
Extrasolar Planet's Catalogue produced by Kyoto University

WASP 41 c

51 Peg b

# Solar System





Tidal Locking

ExoKyoto

b

c

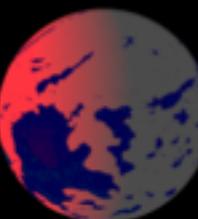
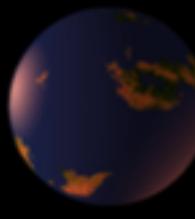
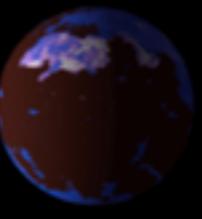
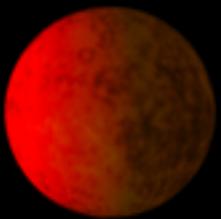
d

e

f

g

h



Normal

ExoKyoto

b

c

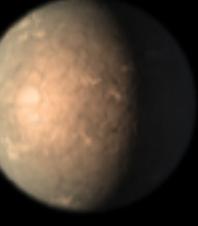
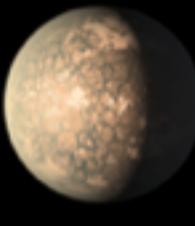
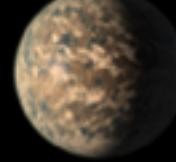
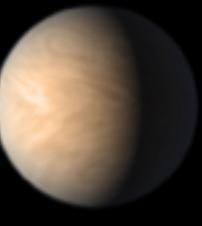
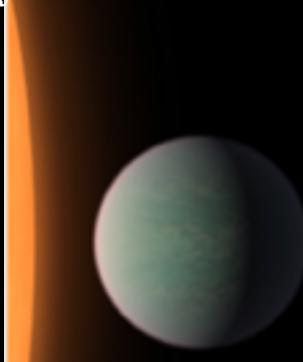
d

e

f

g

h



NASA-JPL

b

c

d

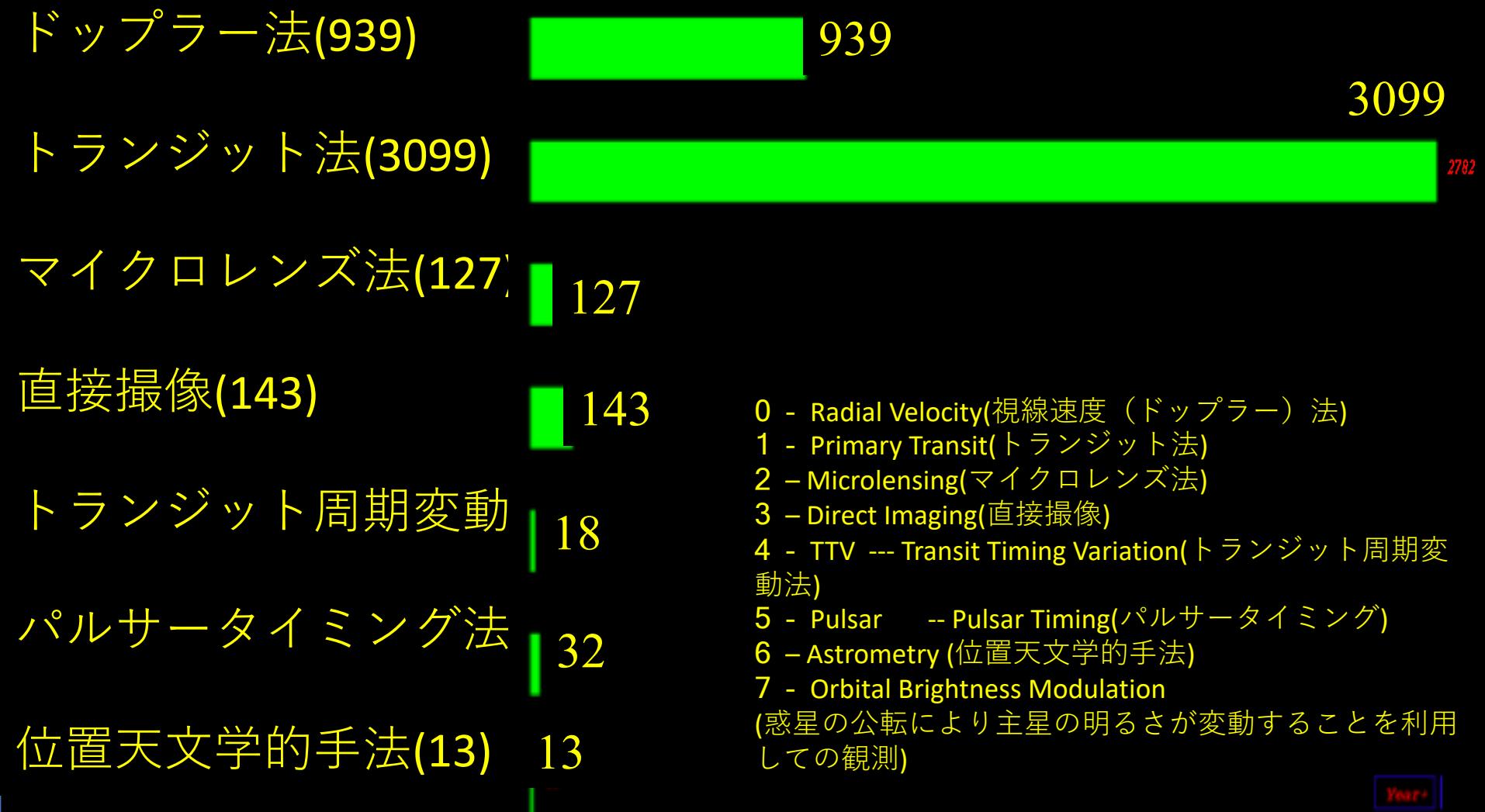
e

f

g

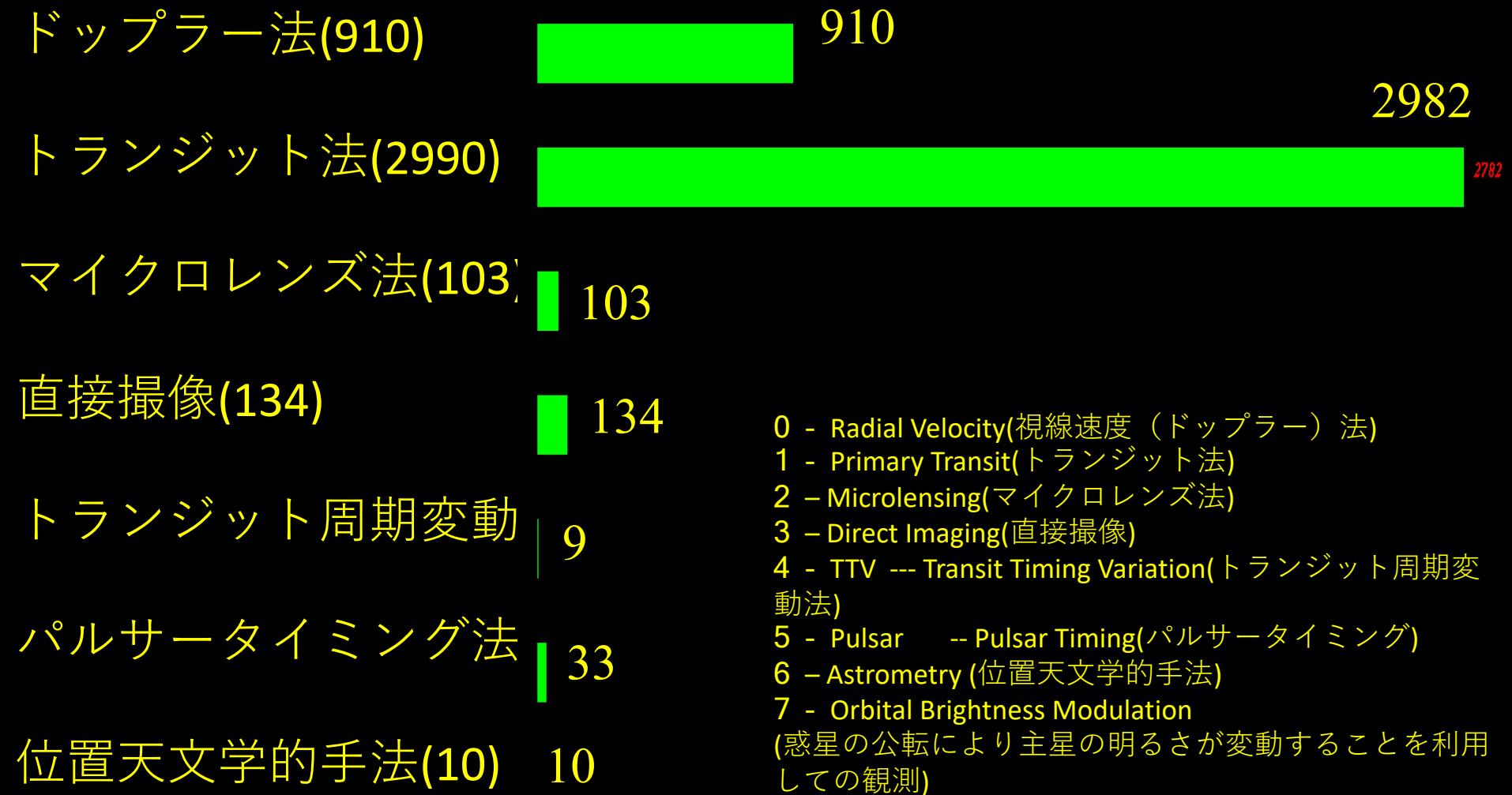
h



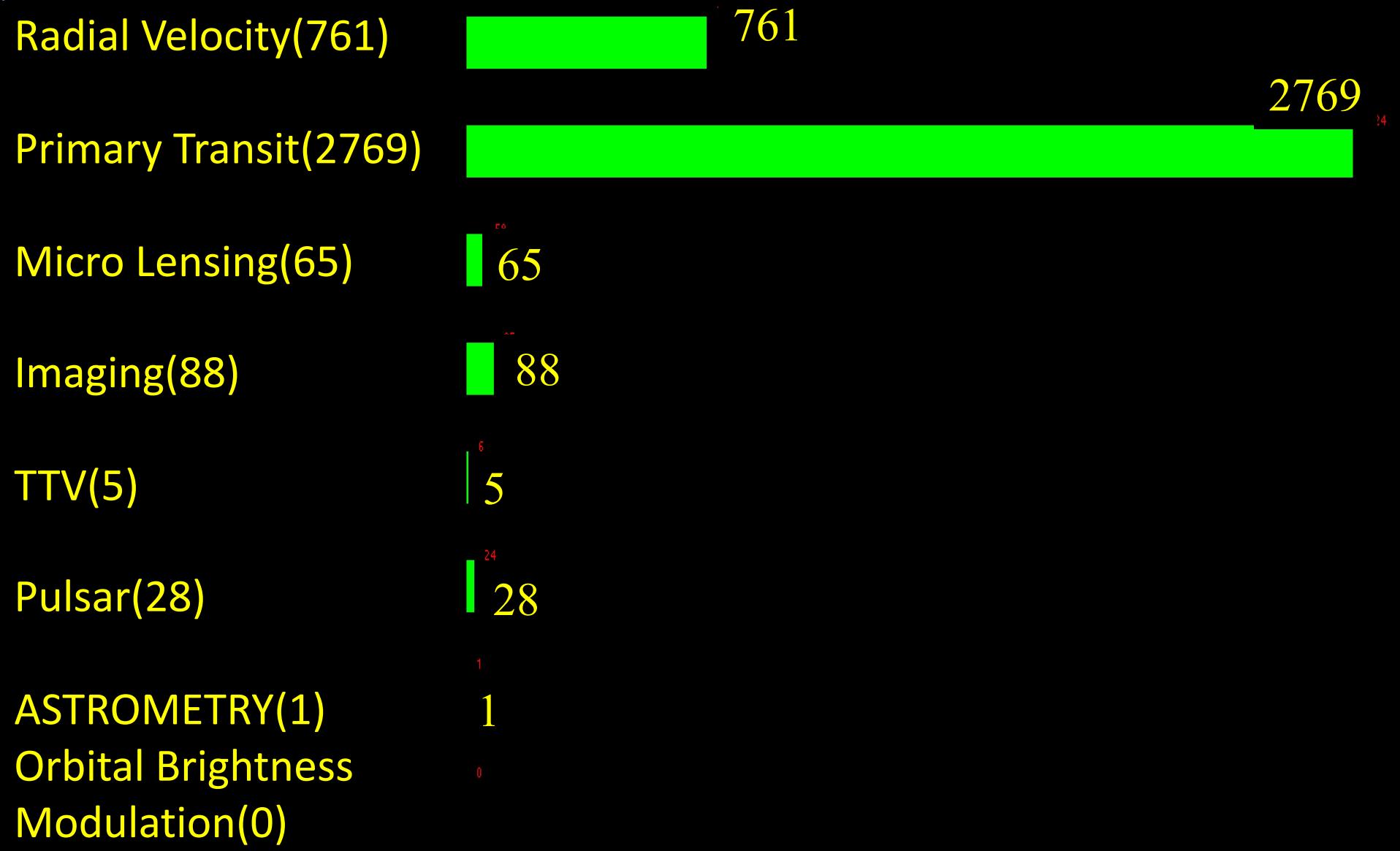


2020.8.20までに確認された太陽系外惑星の検出方法分類。現在はケプラー宇宙望遠鏡を用いたトランジット法による発見が一番多い。

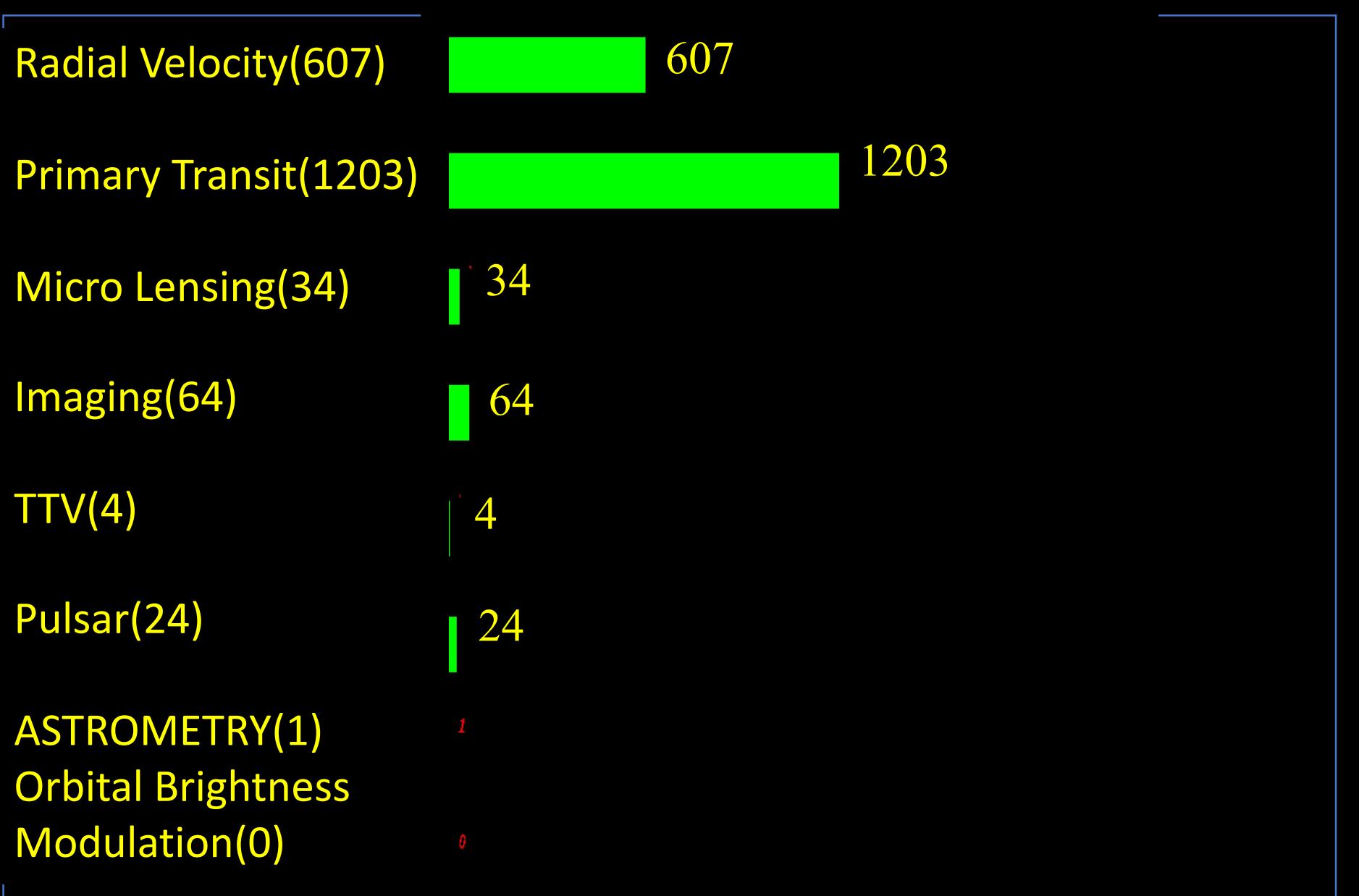
- 0 - Radial Velocity(視線速度 (ドップラー) 法)
- 1 - Primary Transit(トランジット法)
- 2 – Microlensing(マイクロレンズ法)
- 3 – Direct Imaging(直接撮像)
- 4 - TTV --- Transit Timing Variation(トランジット周期変動法)
- 5 - Pulsar -- Pulsar Timing(パルサーテイミング)
- 6 – Astrometry (位置天文学的手法)
- 7 - Orbital Brightness Modulation  
(惑星の公転により主星の明るさが変動することを利用しての観測)



2019.11.15までに確認された太陽系外惑星の検出方法分類。現在はケプラー宇宙望遠鏡を用いたトランジット法による発見が一番多い。



2017.11 までに確認された太陽系外惑星の検出方法分類  
Detection Method (2017.11. exoplanet.eu)



2014年までに確認された太陽系外惑星の検出方法分類  
Detection Method (2014. exoplanet.eu)

Radial Velocity(325)



Primary Transit(64)



Micro Lensing(10)



Imaging(22)



TTV(0)



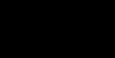
Pulsar(11)



ASTROMETRY(0)



Orbital Brightness



Modulation(0)



2009年までに確認された太陽系外惑星の検出方法分類

Detection Method (2009. exoplanet.eu)

## 現在の金星位置条件の内側 Inside Recent Venus

## 暴走温室限界 Recent Venus – Runaway Greenhouse

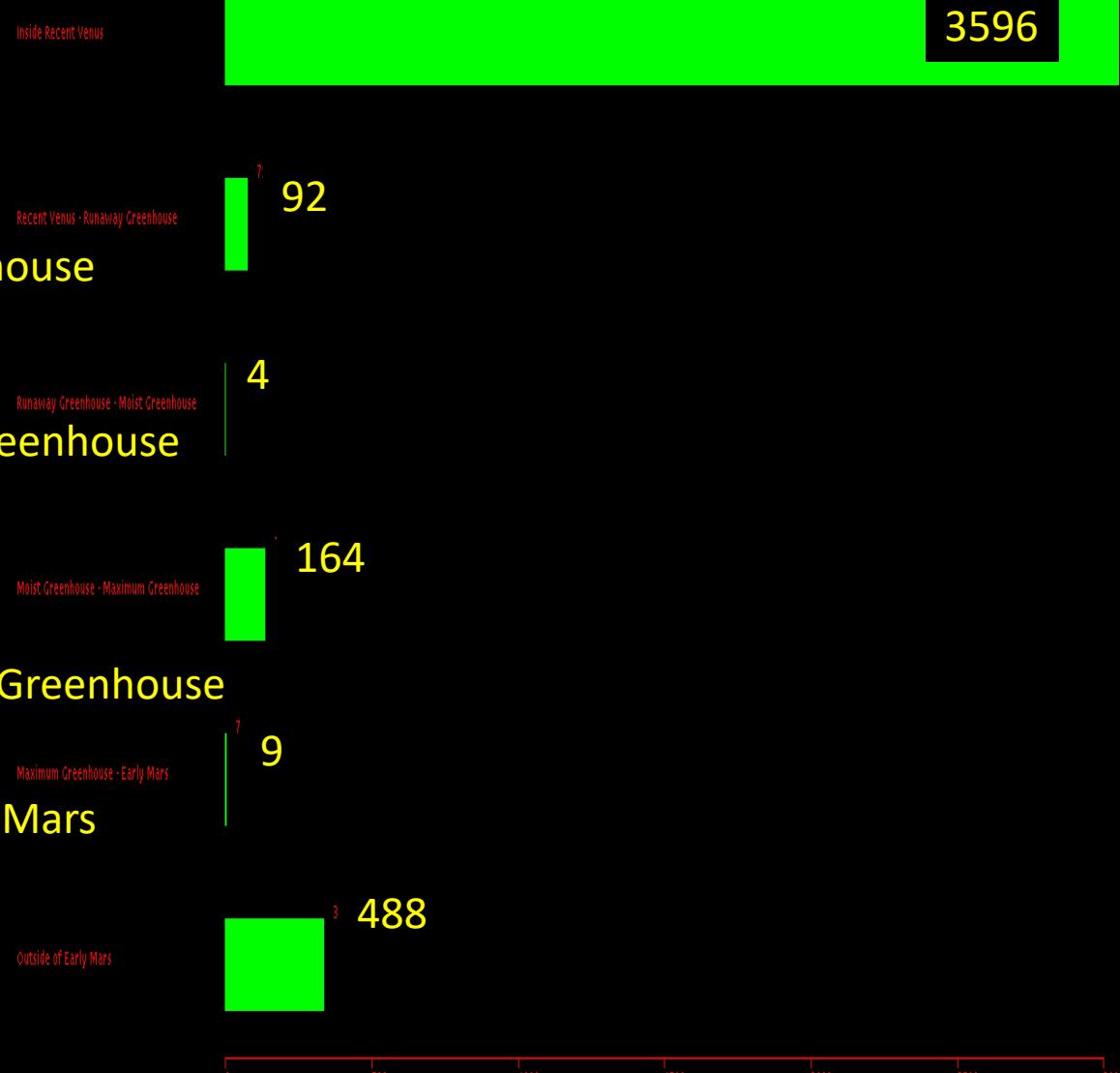
## 湿潤温室限界 Runaway Greenhouse – Moist Greenhouse

## (火星相当惑星の) 最大温室限界

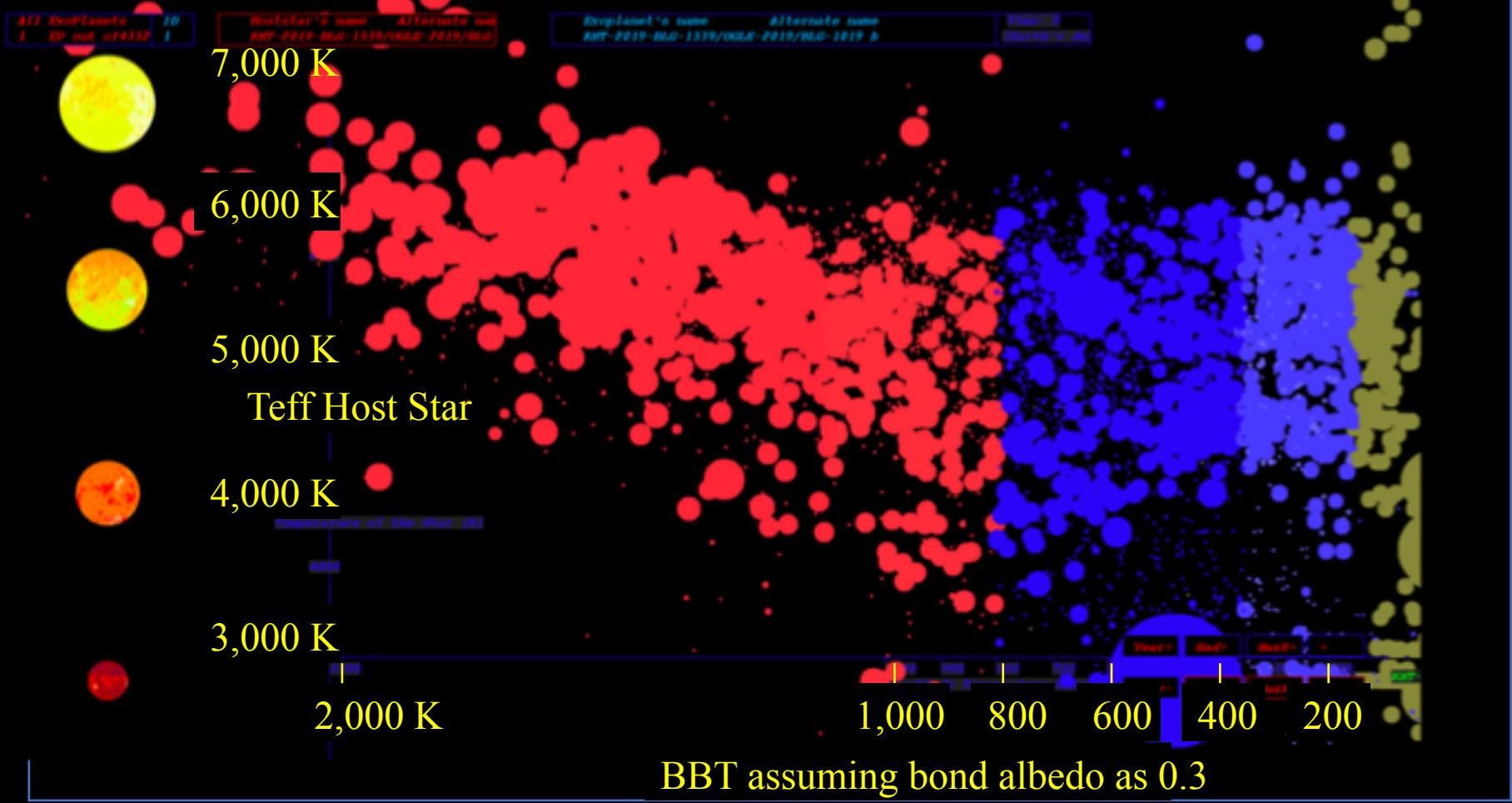
## Moist Greenhouse – Maximum Greenhouse

## 太古の火星条件 Maximum Greenhouse – Early Mars

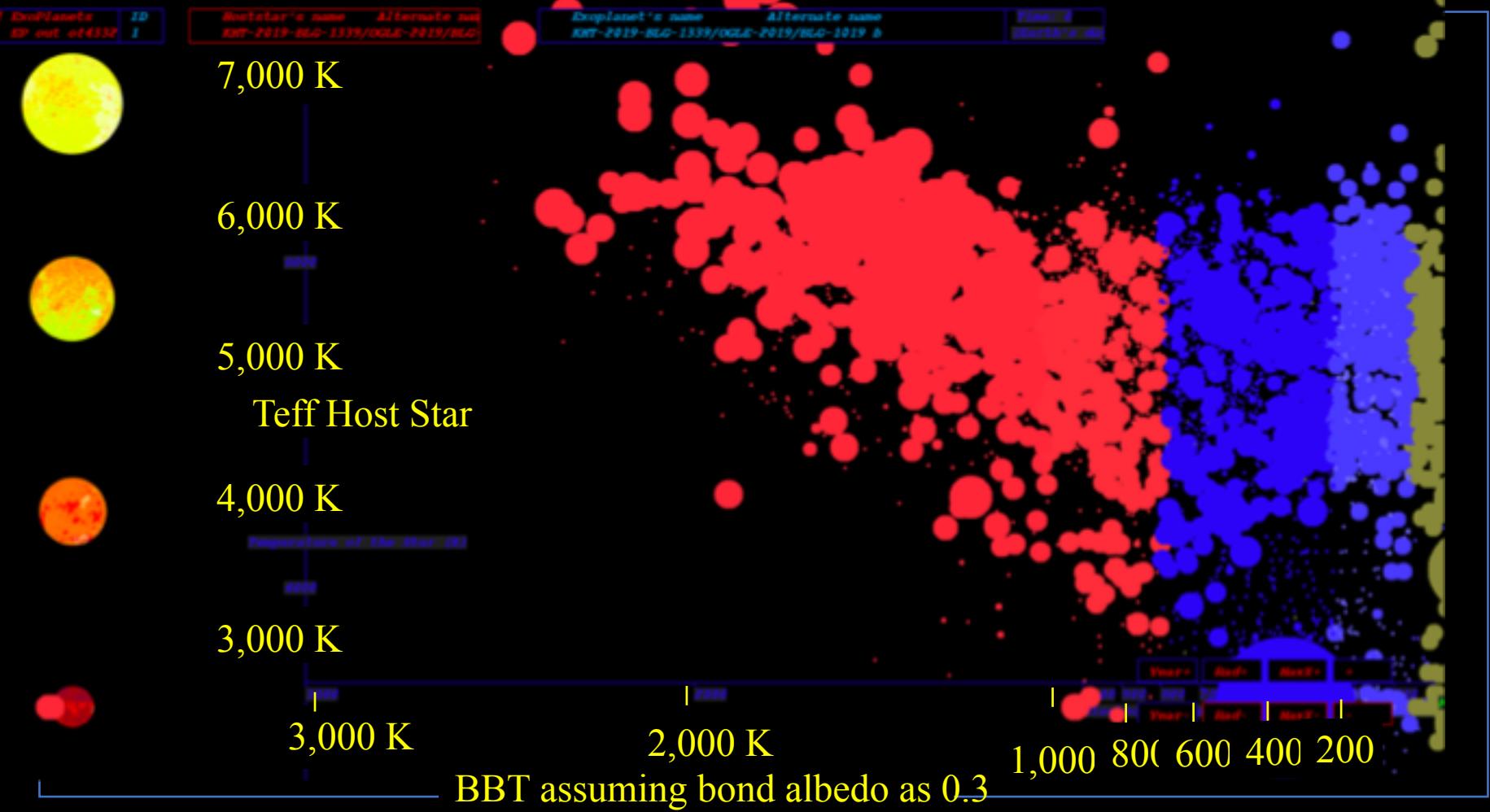
## 太古の火星条件 Outside of Early Mars



今までに確認された太陽系外惑星の位置分類 (Kopparapu et al. 2013の手法を用いて ExoKyotoにて分類.太陽系内惑星を含む(2020.8.18))。これによると、ハビタブル・ゾーンにある惑星の数(サイズは問わない)は164 個となる。



2020.6までに確認された太陽系外惑星の黒体温度 (K) (ExoKyotoにて分類.太陽系内惑星を含む。アルベドを0.3と仮定)



2020.3.14までに確認された太陽系外惑星の黒体温度 (K) (ExoKyotoにて分類.太陽系内惑星を含む。アルベドを0.3と仮定)

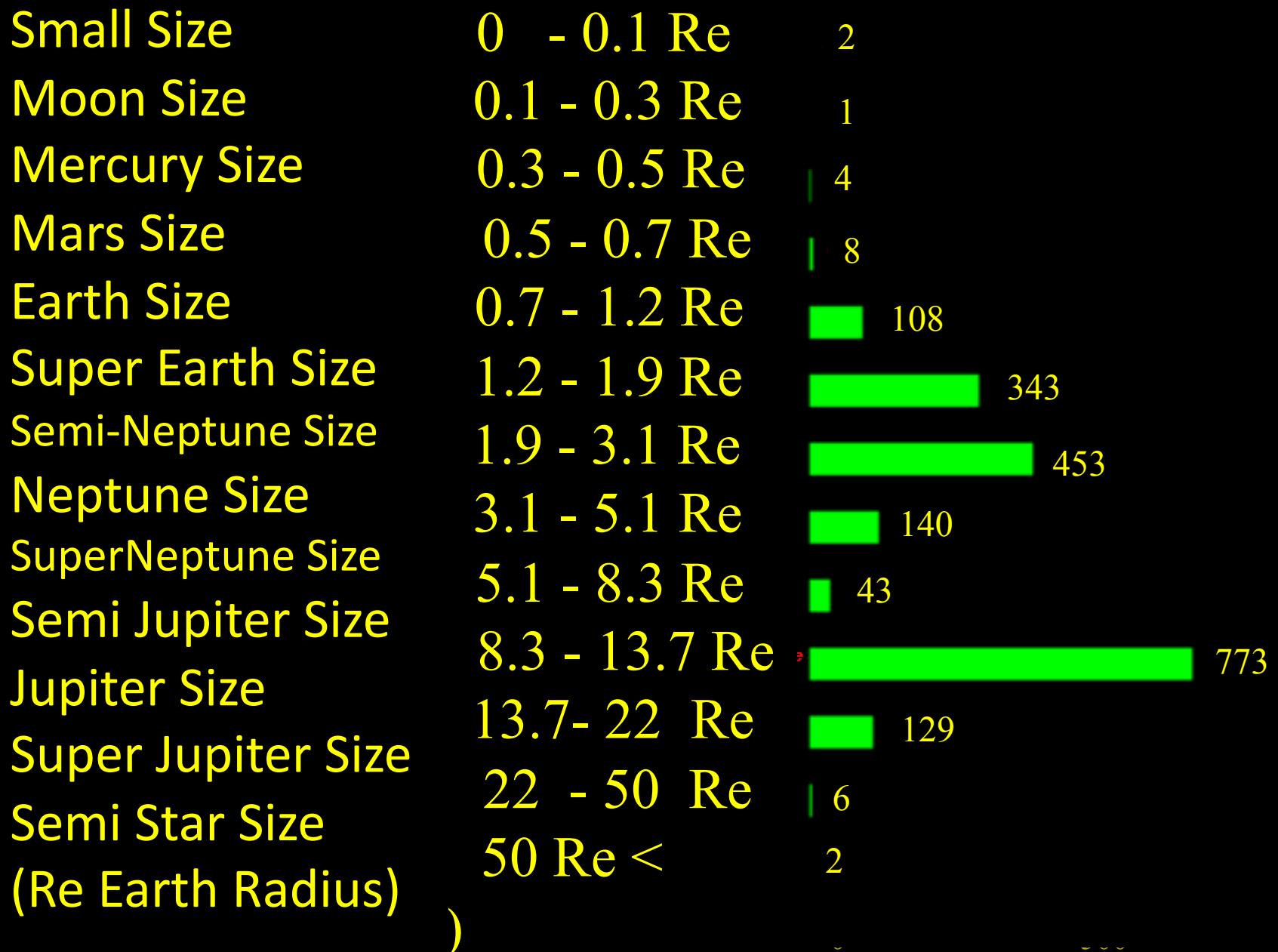
# 現在までに確認された太陽系外惑星のサイズ分類(2020.8)

( 2020.8.18. ExoKyotoを用いて分類.)



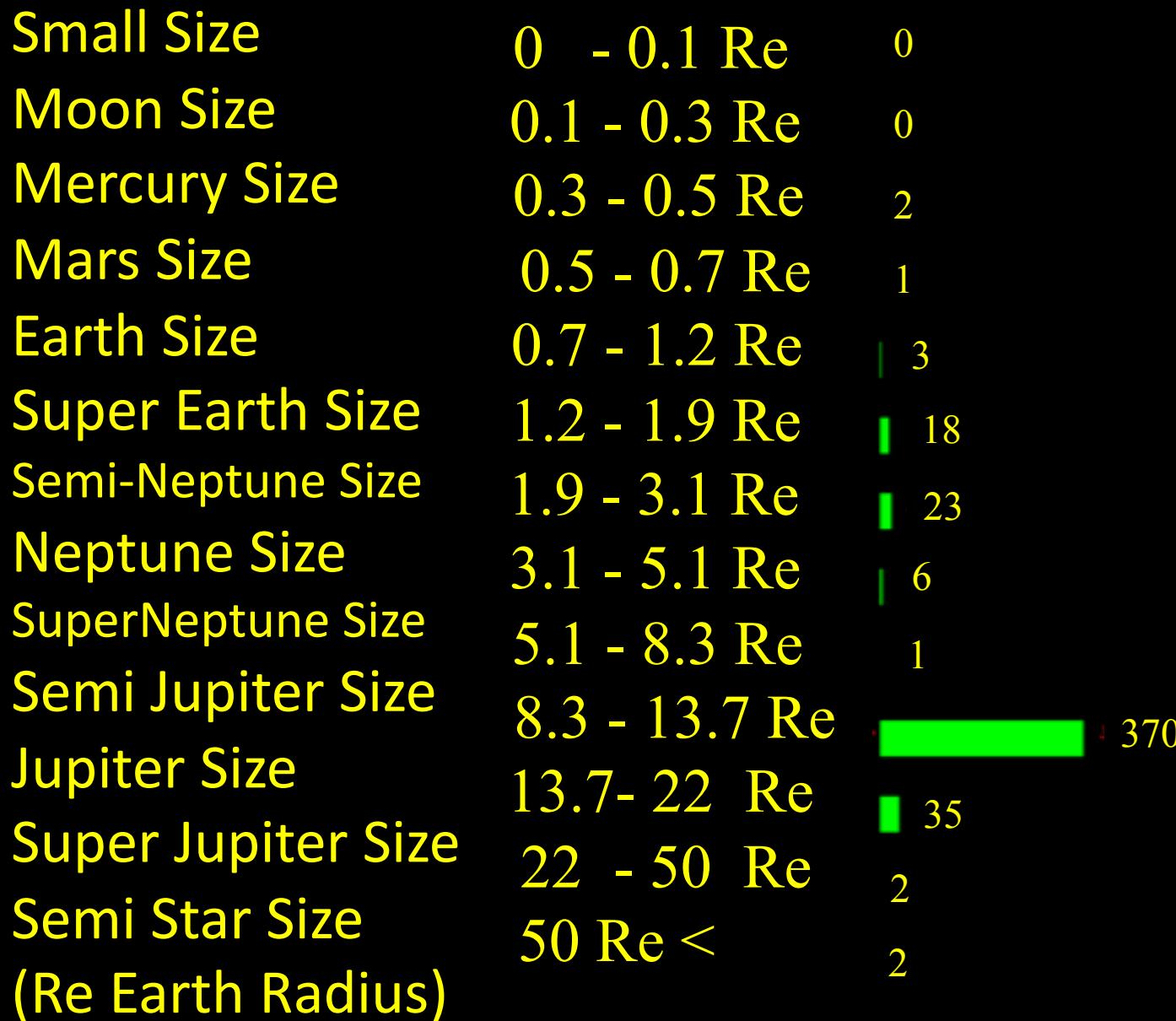
# 2014年までに確認された太陽系外惑星のサイズ分類

( 2014年発見まで. ExoKyotoを用いて分類.太陽系内惑星を含む)



# 2009年までに確認された太陽系外惑星のサイズ分類

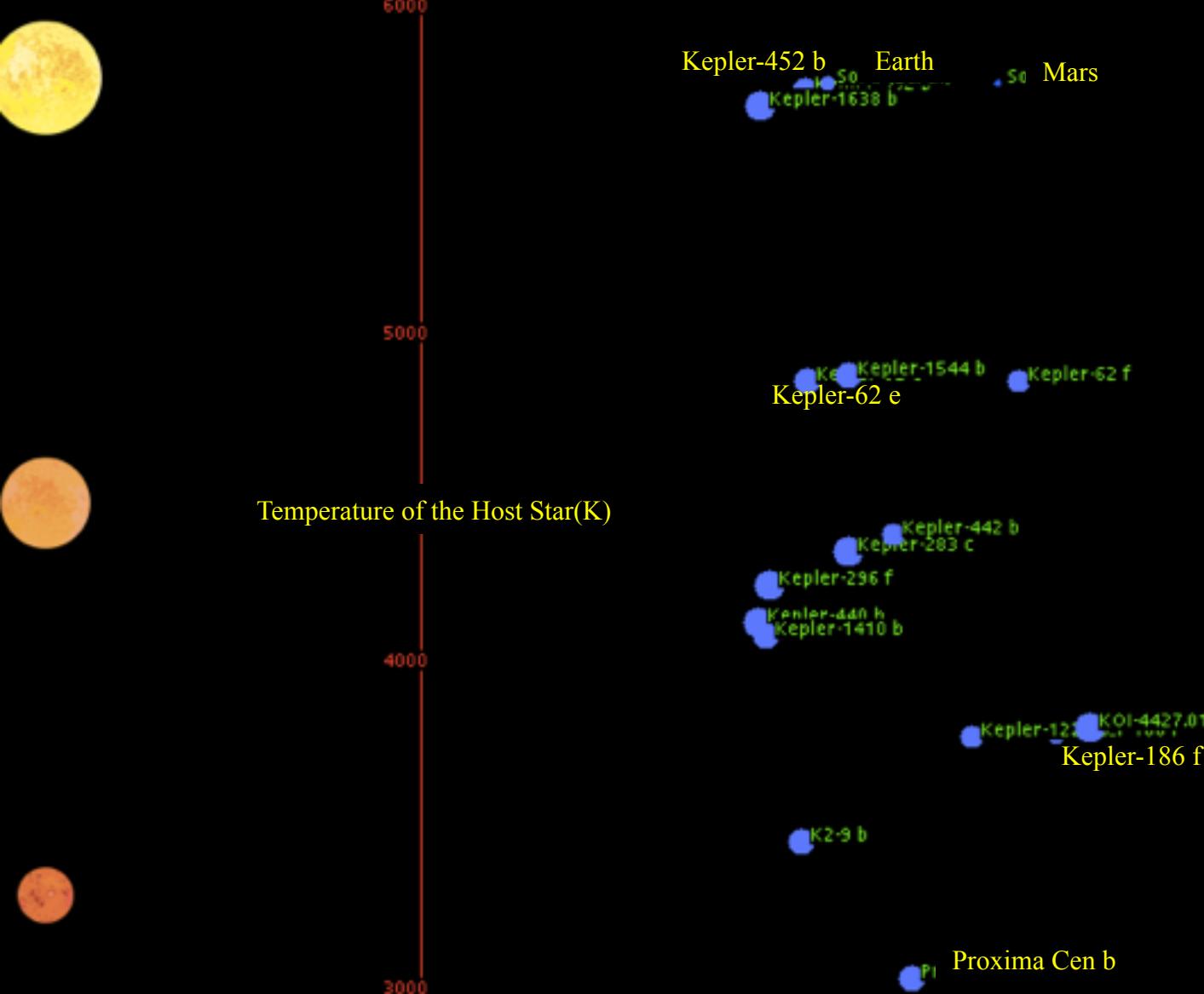
( 2009年発見まで. ExoKyotoを用いて分類. 太陽系内惑星を含む)



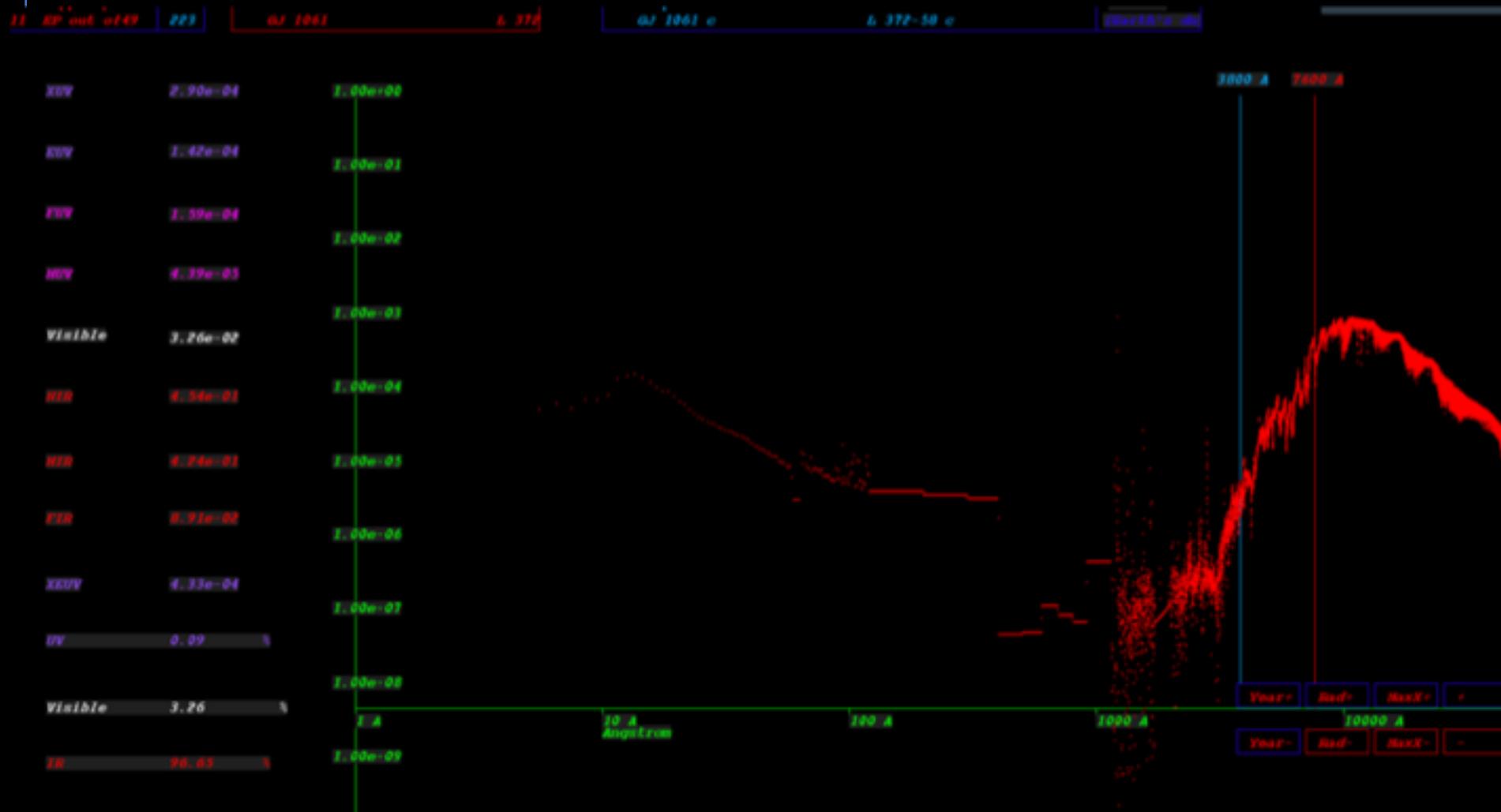
# Habitable Planets located in Goldilocks Zone

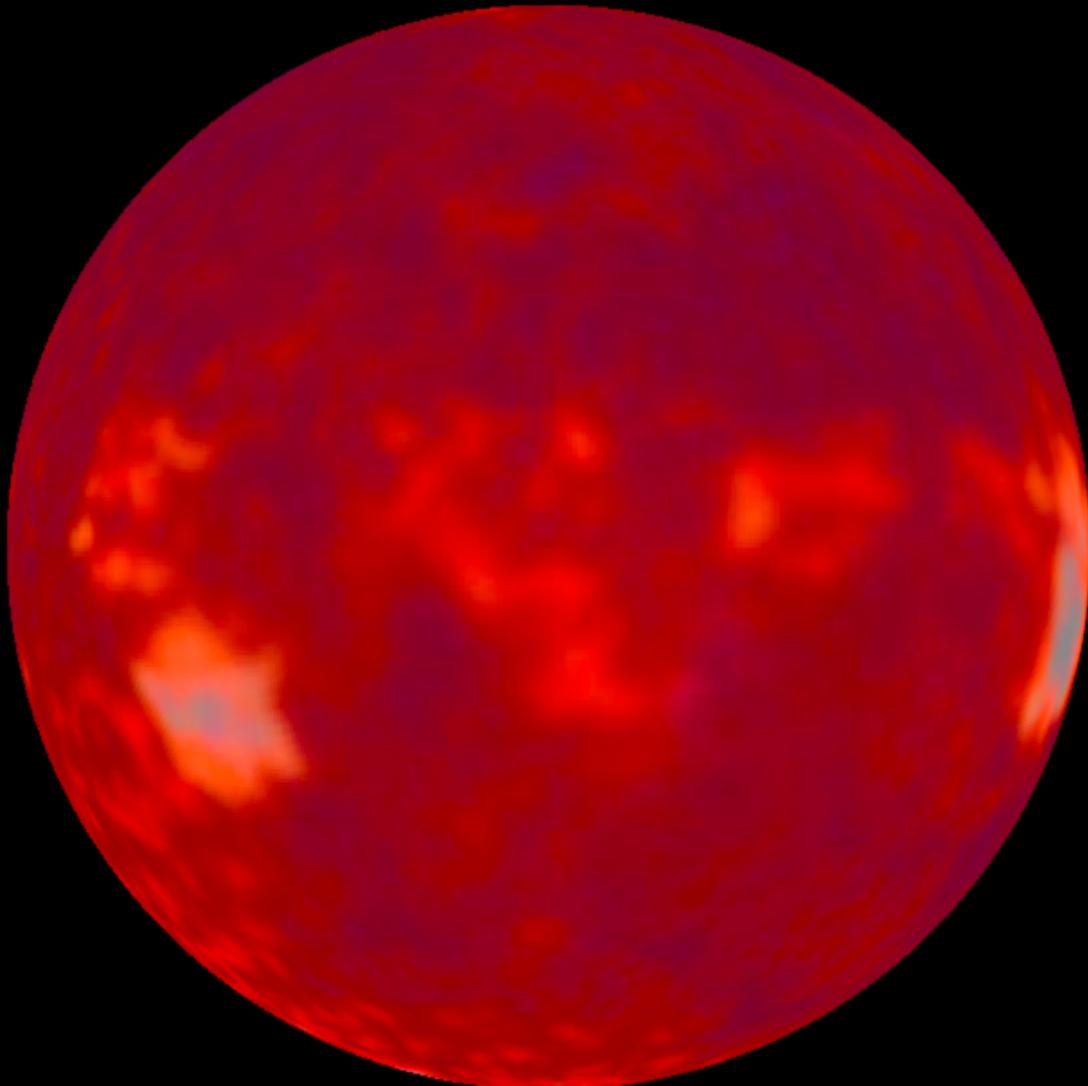
## Determined by Kopparapu et al. 2013

### And their Estimated Radiation from the Host star

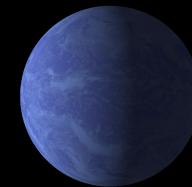


# SPECTRA MODULE – GJ 1061 c



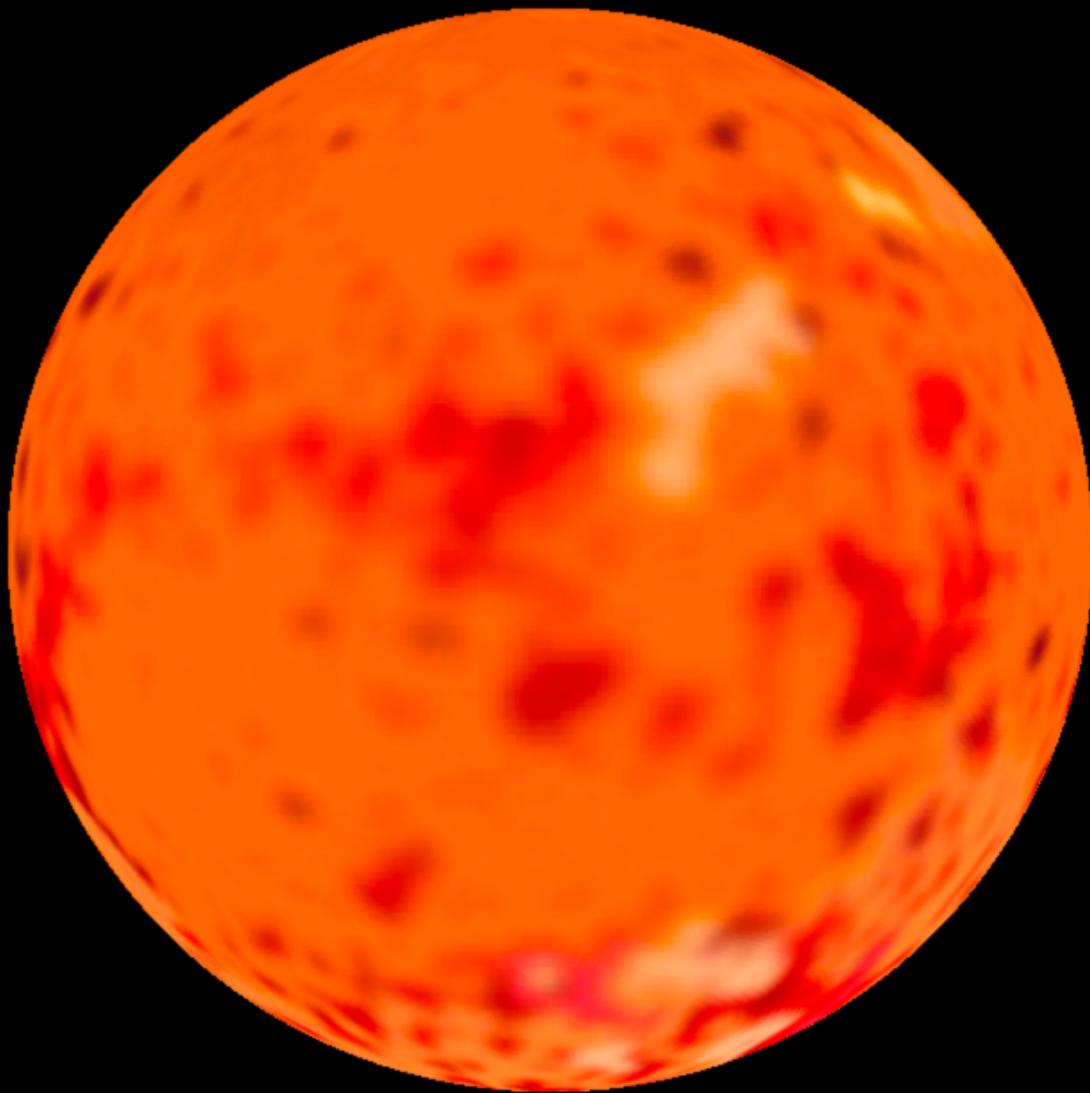


GJ 699  
Barnard's Star  
Spectra: M4V  
Distance: 5.96 LY (1.83 pc)  
Teff: 3278 K  
Rsun: 0.18  
Prot 140  
Aspot: 0.0003  
Annual Flare 6.26E+31  
Spot Max. 1.15E+32



GJ 699 b  
Barnard's Star b  
Rearth 1.37  
Mearth 3.23  
Semi Major Axis 0.4AU

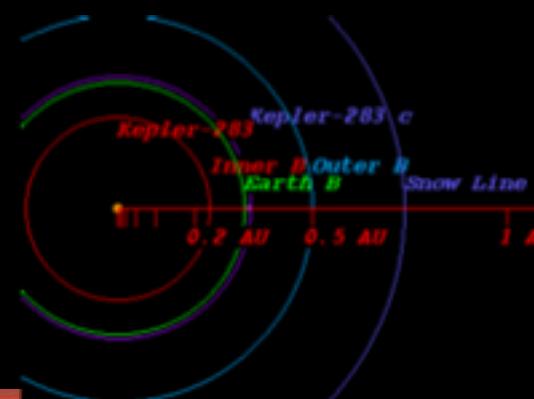


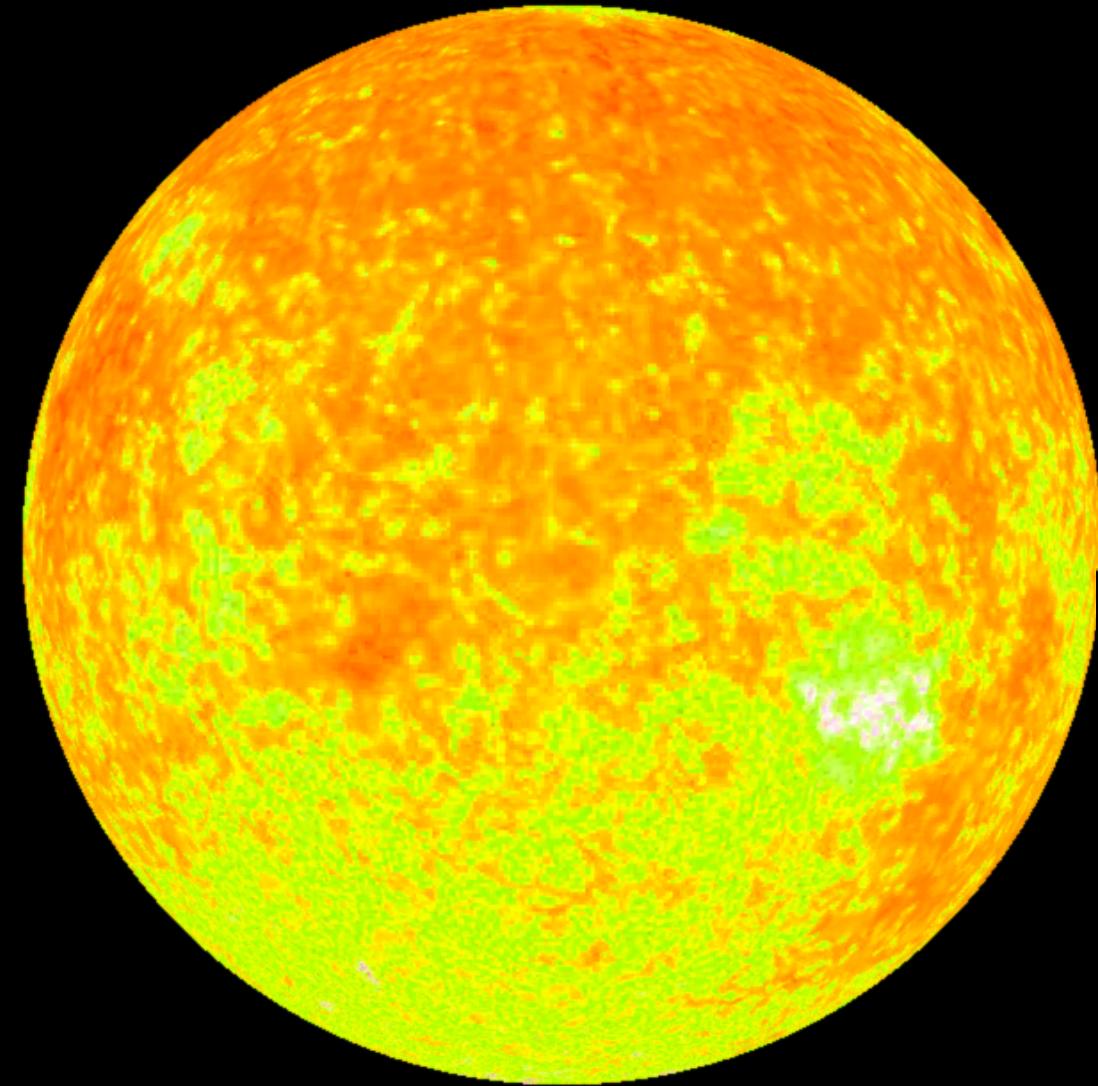


Kepler-283  
Spectra: K5  
Distance: 1527 LY (468pc)  
Teff: 4141 K  
Rsun: 0.64  
Prot 18.2  
Aspot: 0.0021  
Annual Flare 4.93E+32  
Spot Max. 2.13E+33



Kepler-283 c  
Rearth 1.82  
Mearth 4.59  
Semi Major Axis 0.34AU

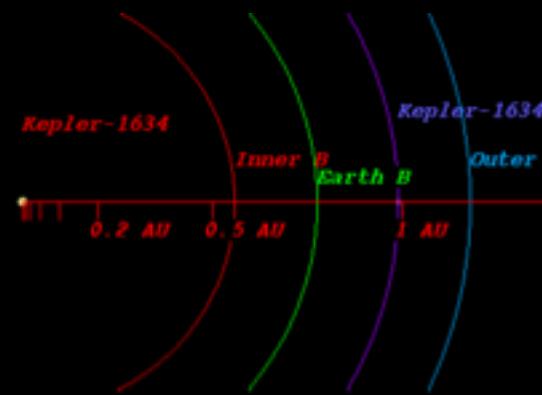


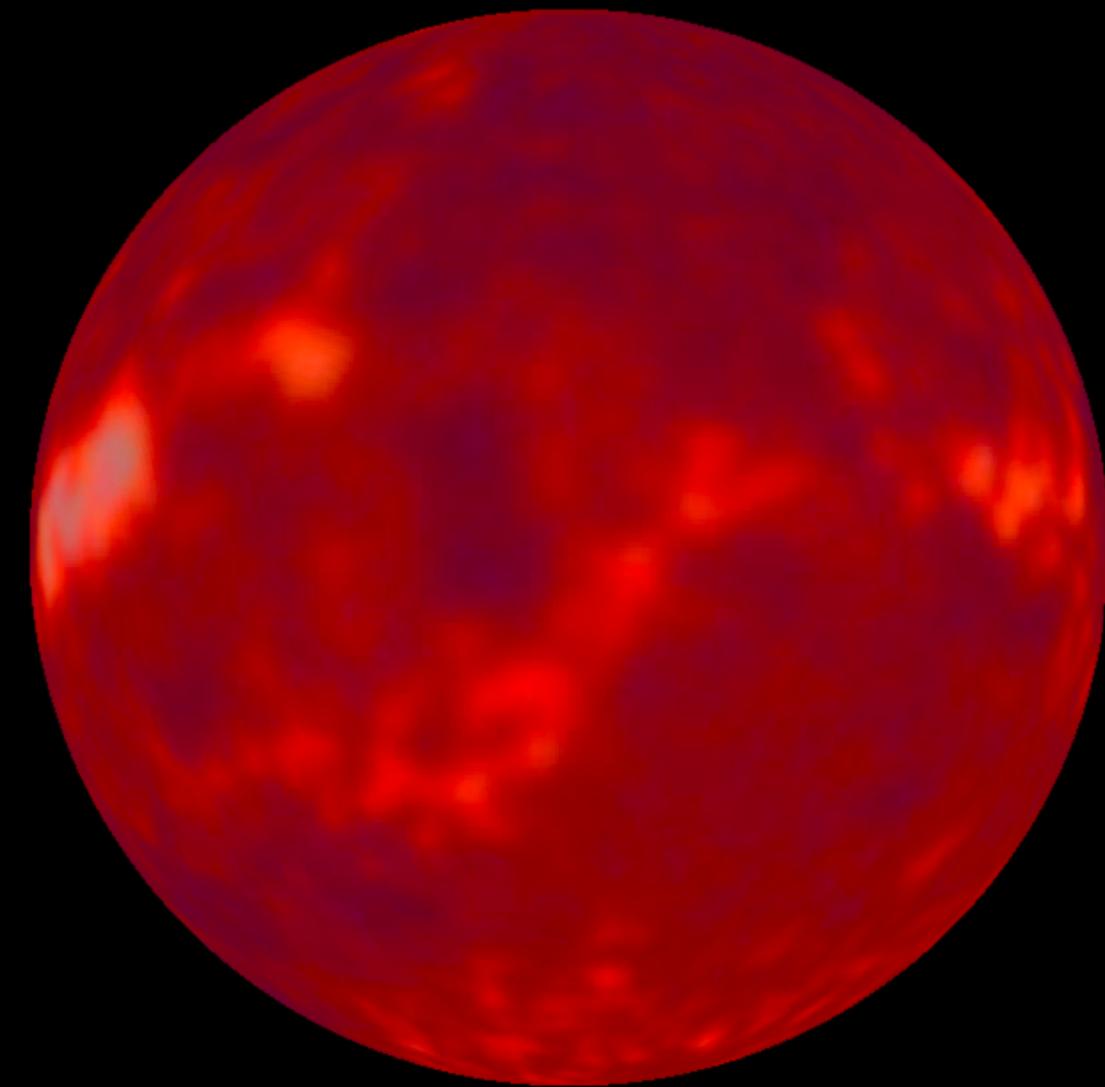


Kepler-1634  
Spectra: G7  
Distance: 2013 LY (654pc)  
Teff: 5637 K  
Rsun: 0.82  
Prot 19.8  
Aspot: 0.0066  
Annual Flare 1.65E+33  
Spot Max. 1.18E+34



Kepler-1634 b  
Rearth 3.19  
Mearth 7.77  
Semi Major Axis 0.34AU



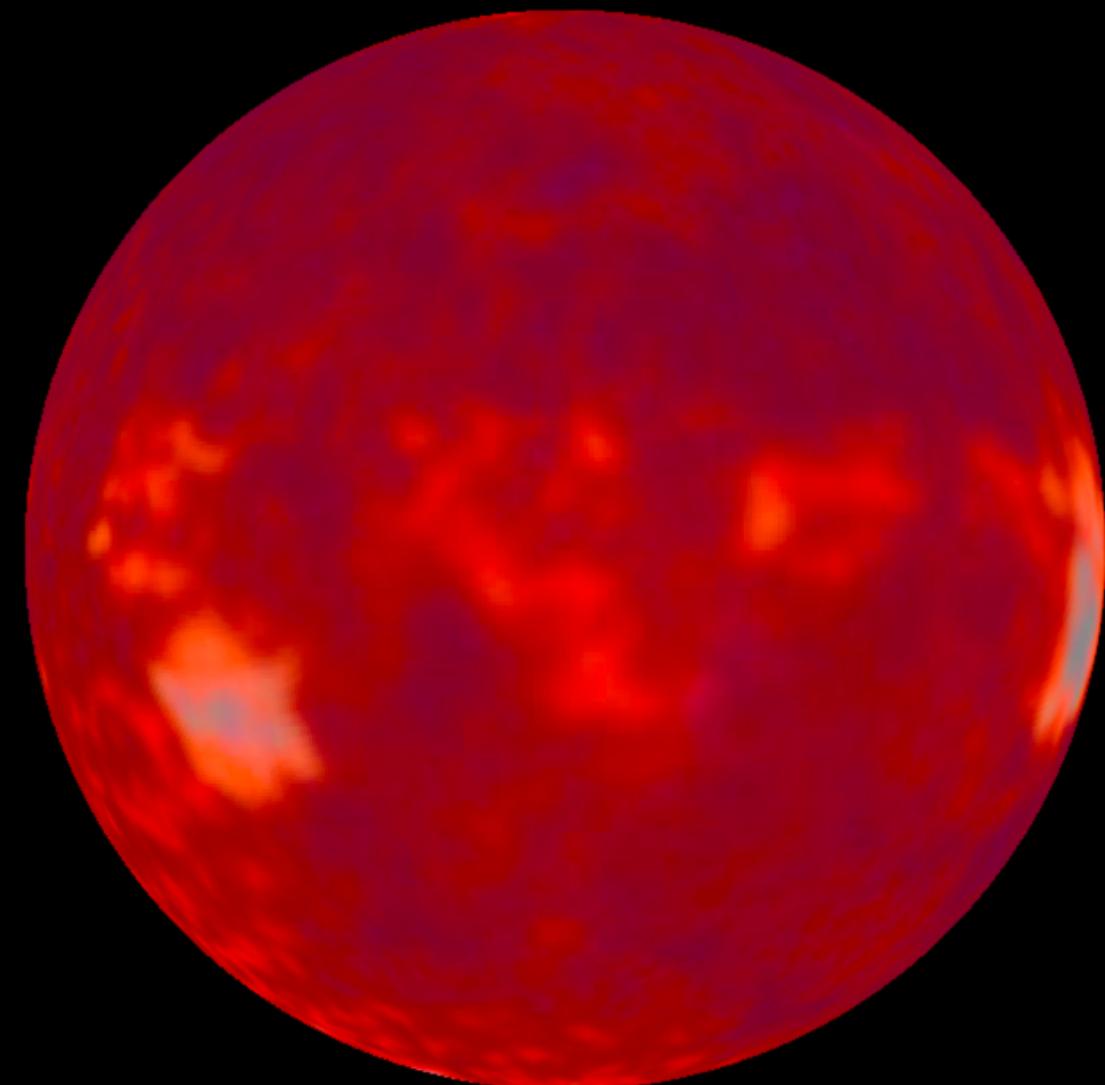


Proxima Centauri  
Spectra: M5.5V  
Distance: 4.22 LY (1.295pc)  
Teff: 3050 K  
Rsun: 0.14  
Prot 82.6  
Aspot: 0.004  
Annual Flare 9.7E+32  
Spot Max. 5.55E+33



Proxima Centauri b  
Rearth 1.07  
Mearth 1.27  
Semi Major Axis 0.0485AU





Ross-128

Spectra: M4

Distance: 11.03 LY (3.38pc)

Teff: 3192 K

Rsun: 0.20

Prot 121

Aspot: 0.0002

Annual Flare 4.72E+31

Spot Max. 7.72E+31



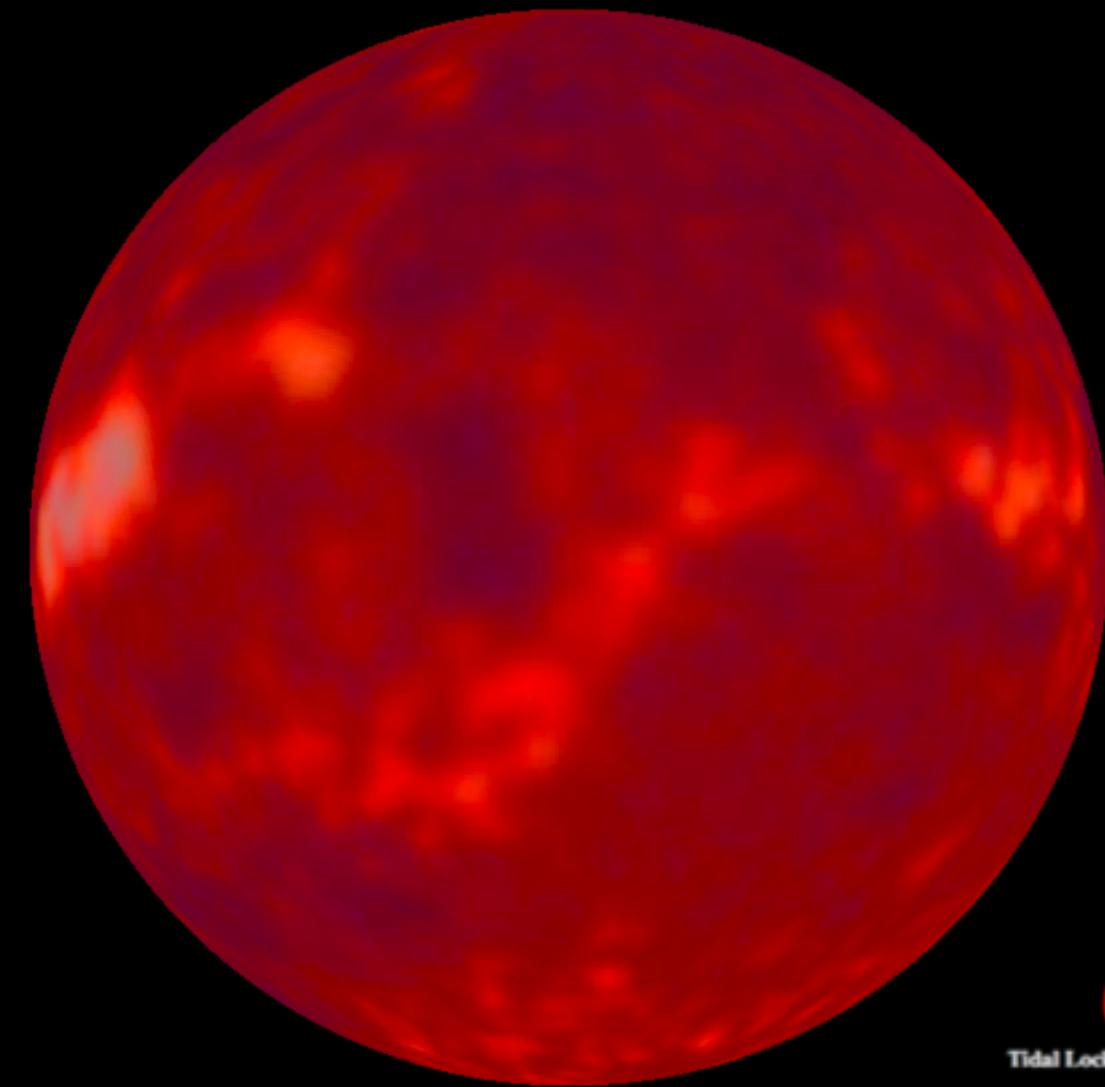
Ross-128 b

Rearth 1.10

Mearth 1.40

Semi Major Axis 0.0496AU





TRAPPIST-1

Spectra: M8

Distance: 39.46 LY (12.10 pc)

Teff: 2550 K

Rsun: 0.12

Prot 3.3

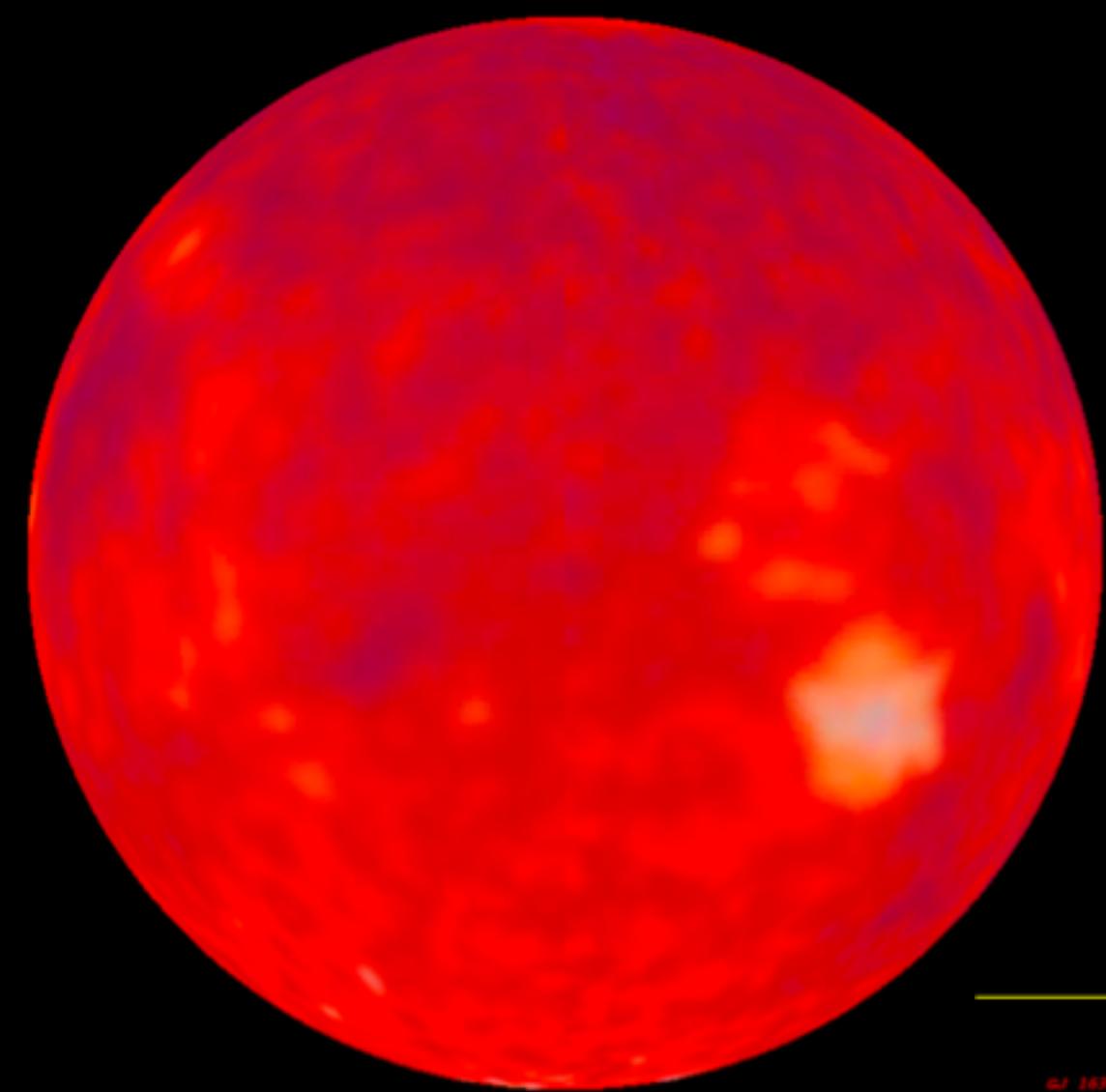
Aspot: 0.0012

Annual Flare 2.7 E+32

Spot Max. 9.09 E+32

TRAPPIST-1 b, c, d, e, f, g,





GJ 163

Spectra: M3.5

Distance: 49.30 LY (15.11pc)

Teff: 3500 K

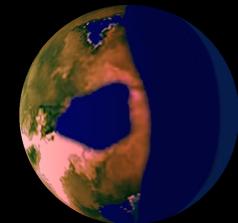
Rsun: 0.399

Prot ?

Aspot: ?

Annual Flare

Snot Max. 9

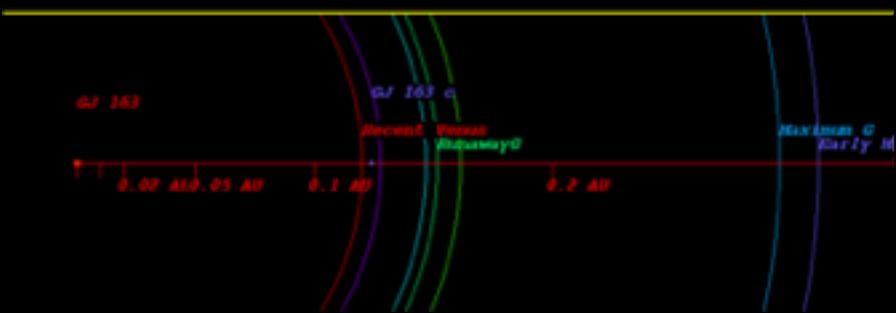


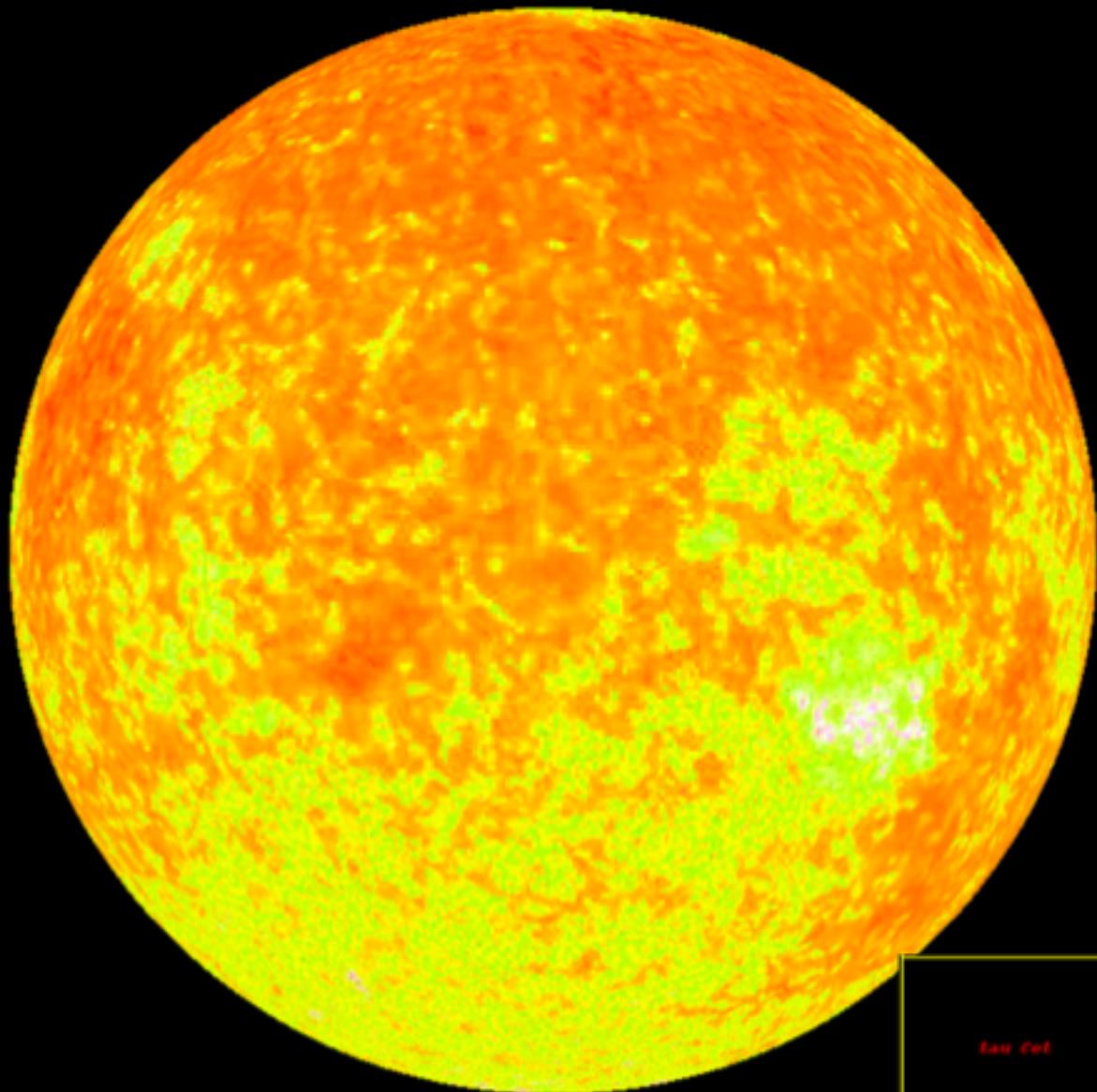
GJ 163 c

Rearth 1.70

Mearth 7.59

Semi Major Axis 0.124 AU

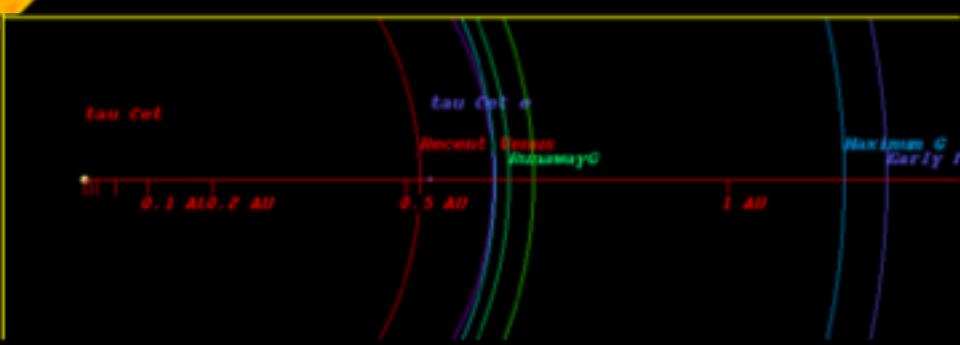




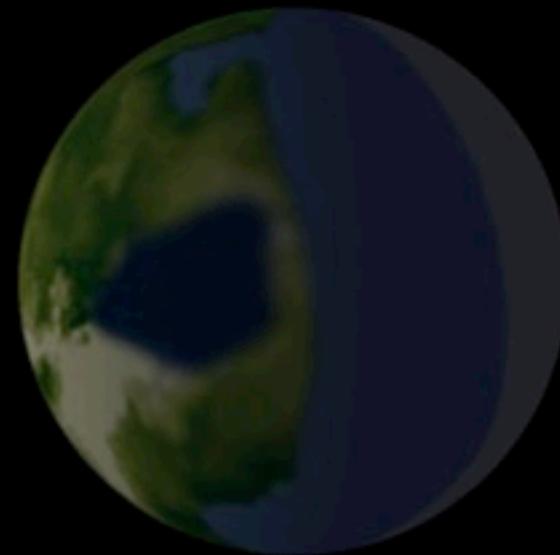
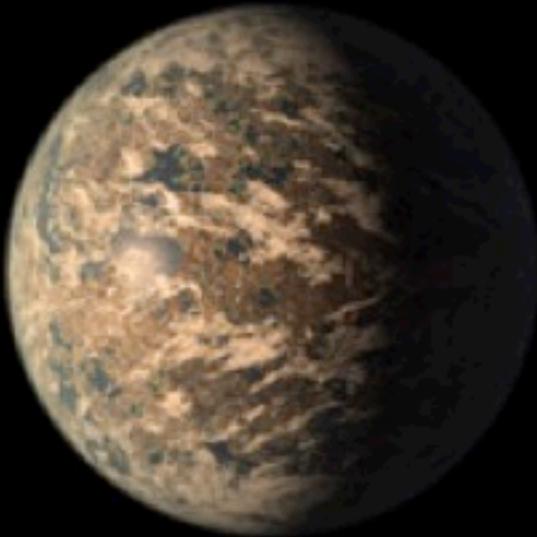
Tau Cet  
Spectra: G8.5 V  
Distance: 11.90 LY (3.65 pc)  
Teff: 5344 K  
Rsun: 0.79  
Prot ?  
Aspot: ?  
Annual Flare



Tau Cet e  
Rearth 1.43  
Mearth 3.94  
Semi Major Axis 0.538 AU



# TRAPPIST-1 e



## NASA-JPL vs EXOKyoto

Orbital period 6.10 days

Distance to Star 0.0282 AU

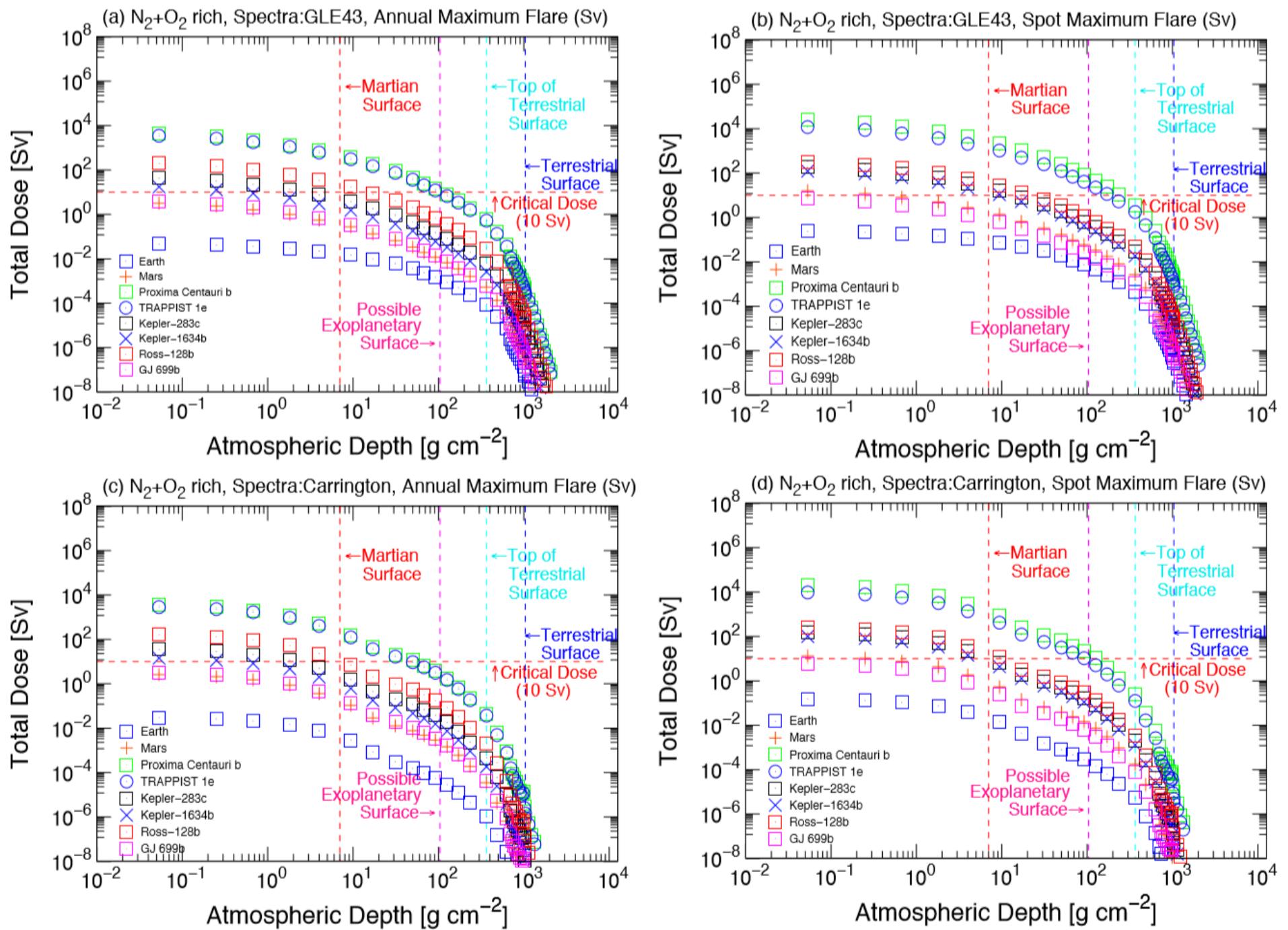
Blackbody Temp. 229.22 K (albedo 0.3)

Planet Radius 0.92 Rearth

Planet Mass 0.64 Mearth

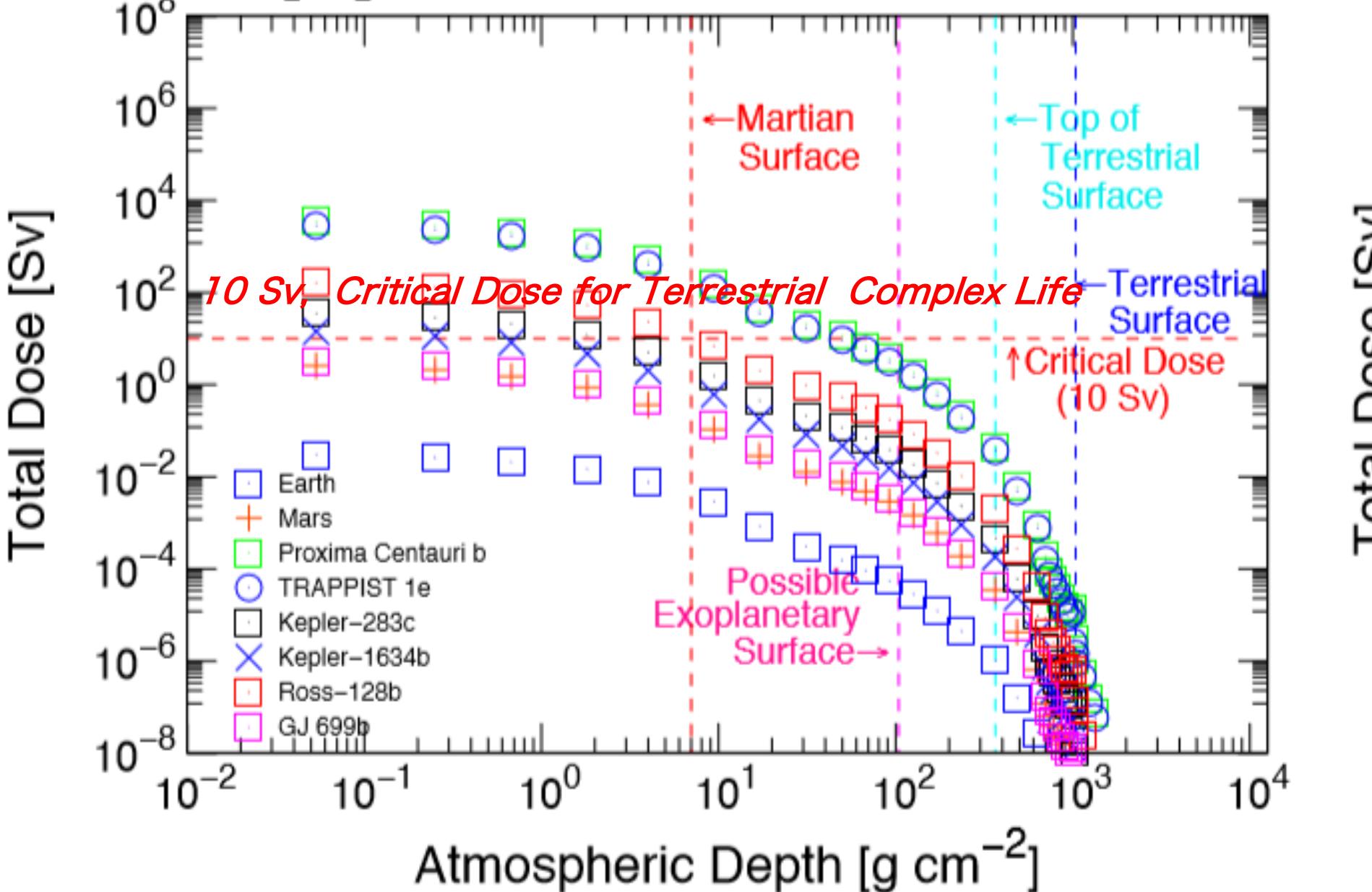
Planet Density 4.83 g/cm<sup>3</sup> 0.88 ρearth

Planet Gravity 0.93 g



# Atmospheric Depth [ $\text{g cm}^{-2}$ ]

(c)  $\text{N}_2+\text{O}_2$  rich, Spectra:Carrington, Annual Maximum Flare (Sv)



# Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability



Proxima Centauri bの想定被ばく量

もし地球と同じ大気圧があれば、生命にはほとんど影響はない  
年に一度発生しうるフレアでの地表での被ばく量は推定0.430 mSv



# Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability



# Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability



ID	3758
Hoststar's name	Ross 128
Alternate name	"Prok"



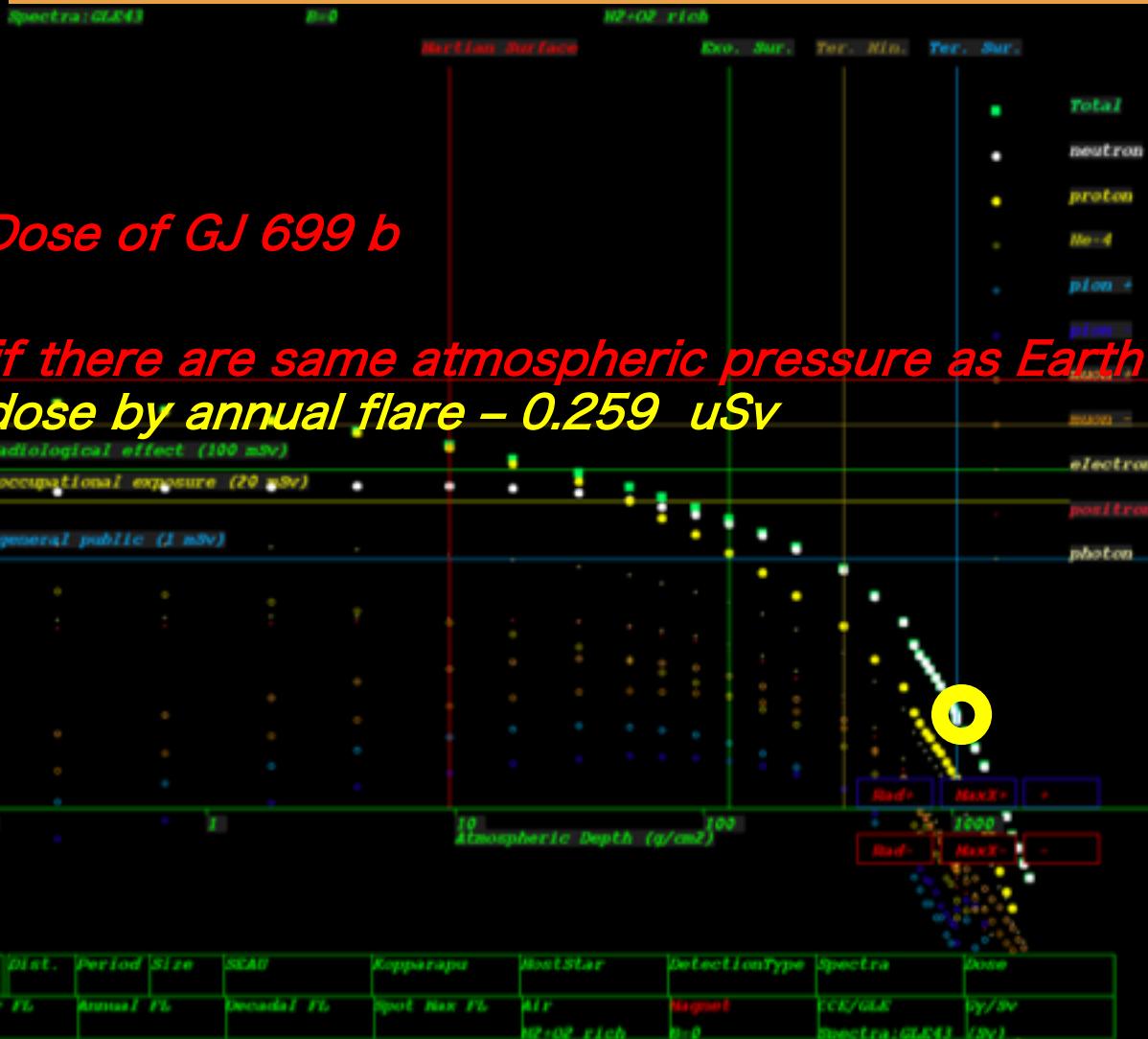
# Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability



lectEP	ID
EP out off	202
Hoststar's name	Barnard's star
Alternate name	GJ 699
Total Dose	(Sv)
TDE (Gy)	8.72e+01
	1.00e+20
	1.00e+27
TDE (Sv)	3.95e+00
	1.00e+06
Mars Sur. (Gy)	5.20e-01
	1.00e+05
Mars Sur. (Sv)	3.46e-01
	1.00e+03
Exo. Sur. (Gy)	1.23e-03
	10.00
Exo. Sur. (Sv)	7.53e-03
	1.00
Avg. Alt(Gy)	1.99e-04
	0.01
Avg. Alt(Sv)	1.78e-03
	1.00e-04
Ter. Min (Gy)	5.82e-05
	1.00e-05
Ter. Min (Sv)	5.91e-04
	1.00e-07
Ter. Sur. (Gy)	2.31e-08
	1.00e-08
Ter. Sur. (Sv)	2.59e-07
	1.00e-10

*Estimated Dose of GJ 699 b*

*No impact if there are same atmospheric pressure as Earth*  
*Estimated dose by annual flare - 0.259 uSv*



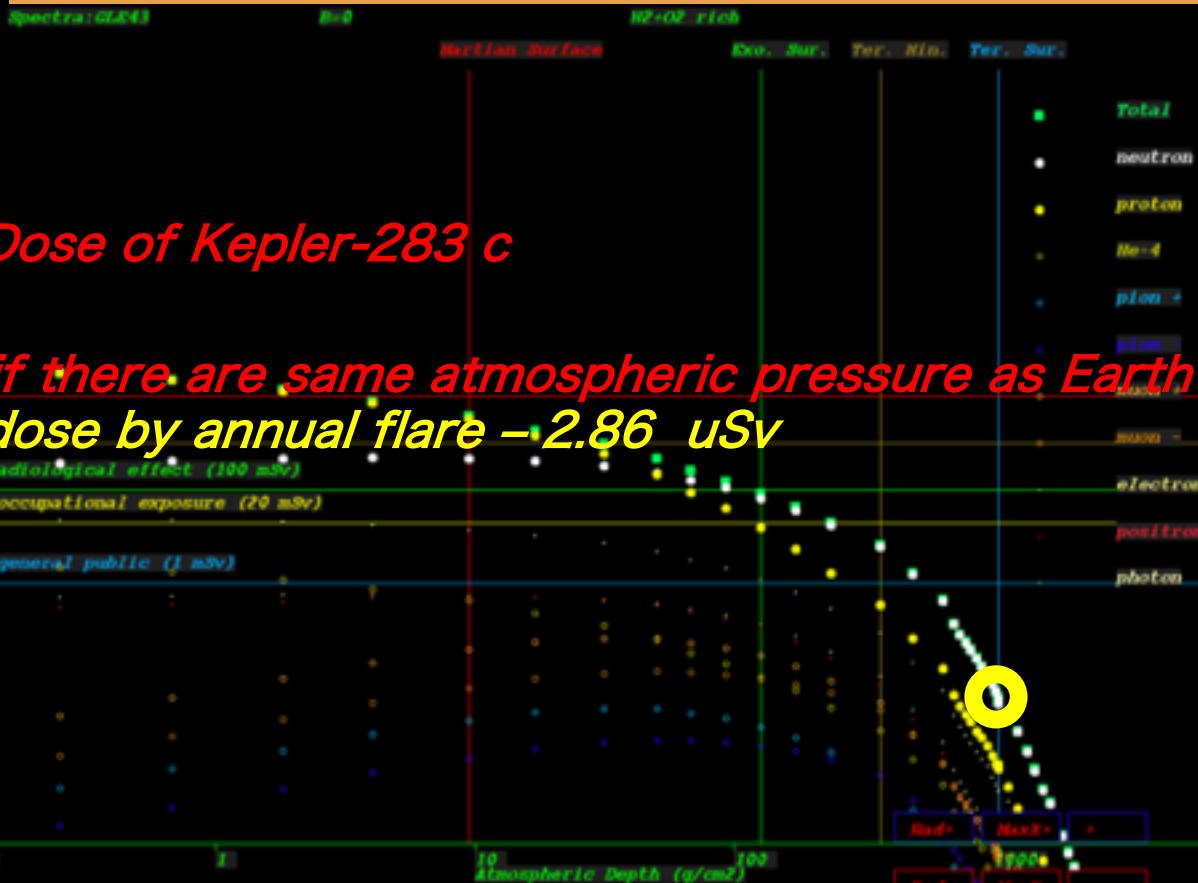
# Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability



Object ID	ID	Hoststar's name	Alternate name
Kepler-283	1825	Kepler-283	
		Total Dose	(Sv)
TDE (Gy)	9.64e+02	1.00e+00	
TDE (Sv)		1.00e+27	
Ter. Sur. (Gy)	5.75e+00	1.00e+06	
Ter. Sur. (Sv)	3.83e+00	1.00e+23	
Exo. Sur. (Gy)	1.36e-02	10.00	
Exo. Sur. (Sv)	8.32e-02	1.00	
Avg. Alt(Gy)	2.20e-03	0.01	
Avg. Alt(Sv)	1.97e-02	1.00e-04	
Ter. Min (Gy)	6.44e-04	1.00e-05	
Ter. Min (Sv)	6.54e-03	1.00e-07	
Ter. Sur. (Gy)	2.56e-07	1.00e-08	
Ter. Sur. (Sv)	2.86e-06	1.00e-10	

*Estimated Dose of Kepler-283 c*

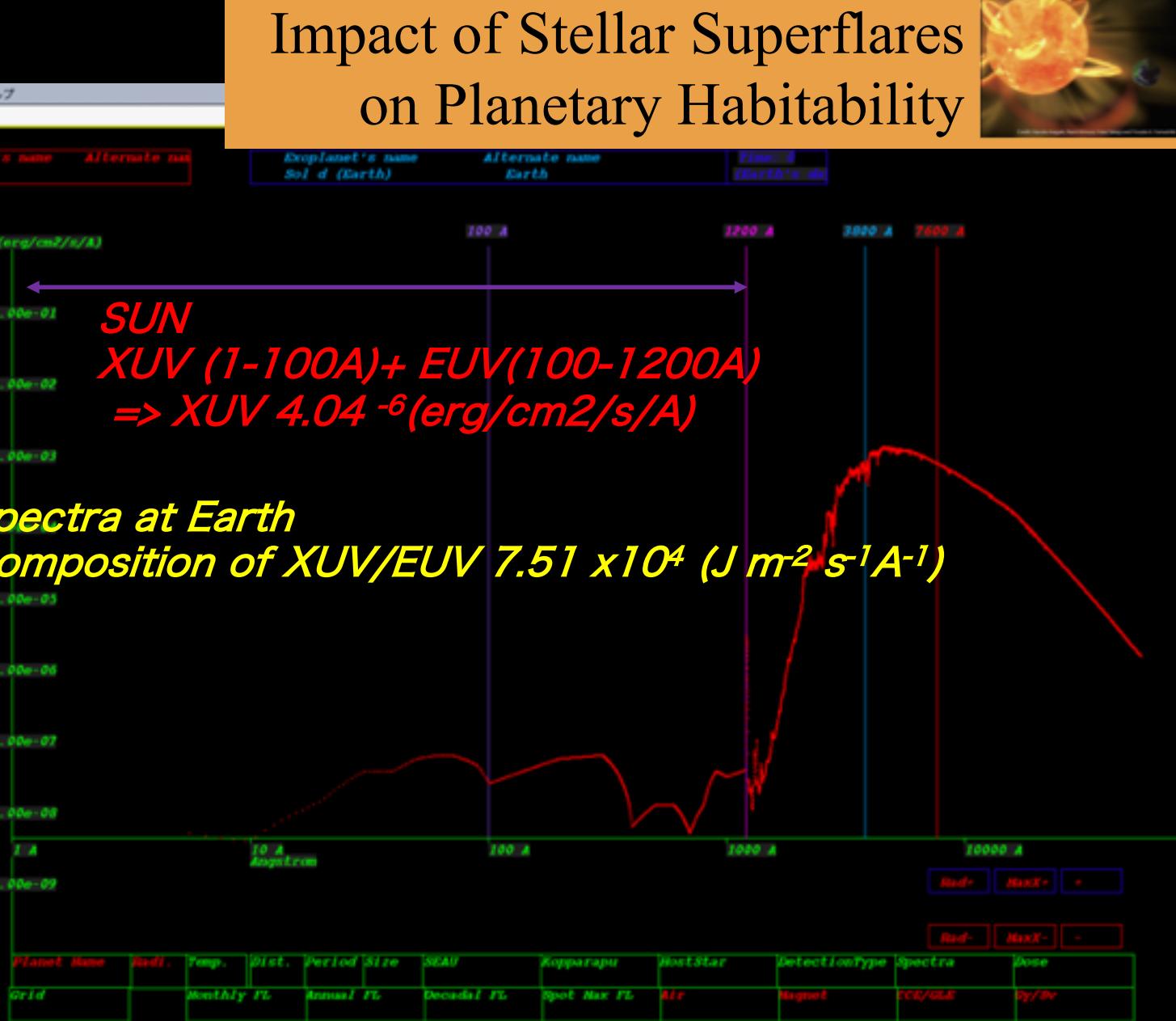
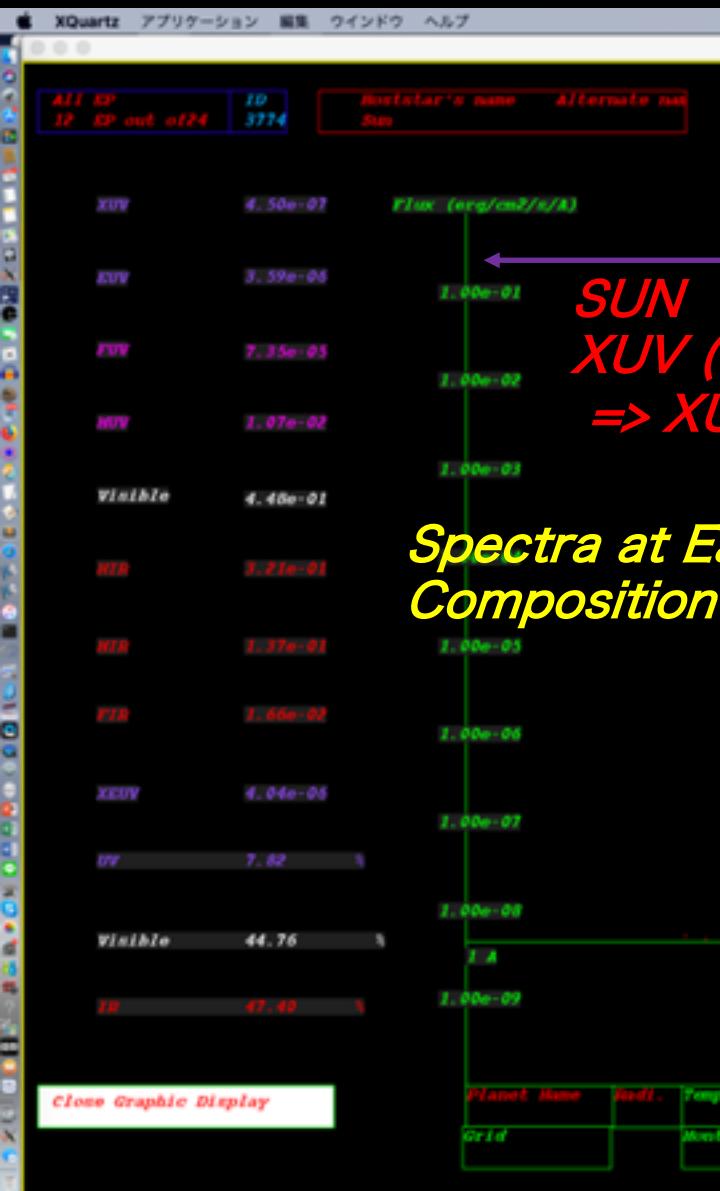
*No impact if there are same atmospheric pressure as Earth*  
*Estimated dose by annual flare - 2.86 uSv*

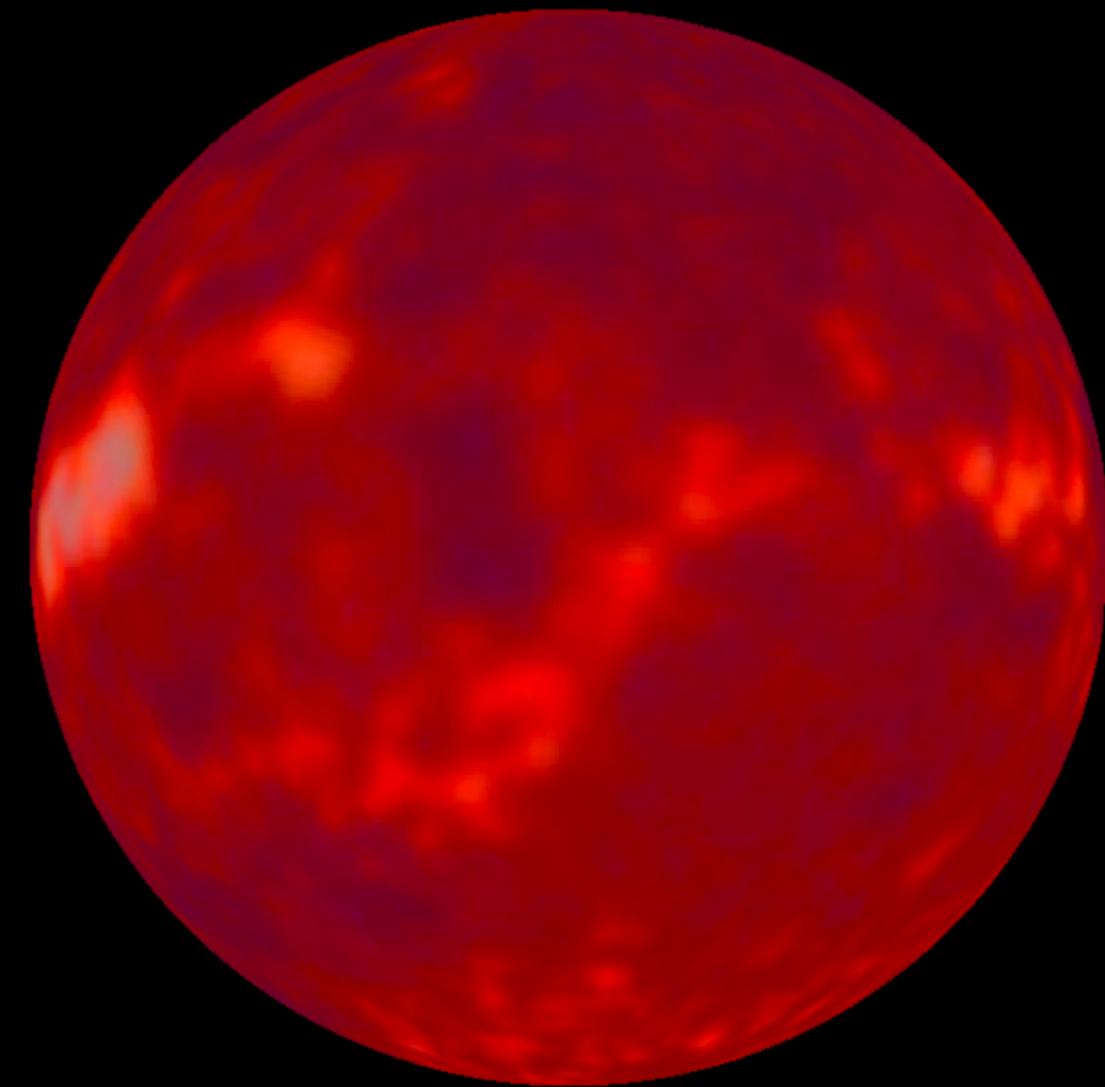


use Graphic Display

Planet Name	Rad.	Temp.	Dist.	Period	Size	SEAU	Kopparapu	HostStar	Detection	Type	Spectra	Dose
Kepler-283 c	Medium	Monthly fl.	Annual fl.	Decadal fl.	Spot fl.	N/A	N/A	HostStar	MagNet	TESS/GAK	Spectra GLADE3	2.86e-06

# Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability





Proxima Centauri

Spectra: M5.5V

Teff: 3050 K

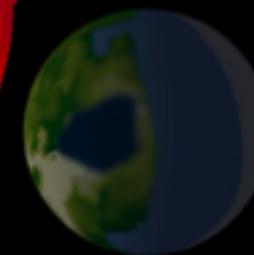
Rsun: 0.14

Prot 82.6

Aspot: 0.004

Annual Flare 9.7E+32

Spot Max. 5.55E+33



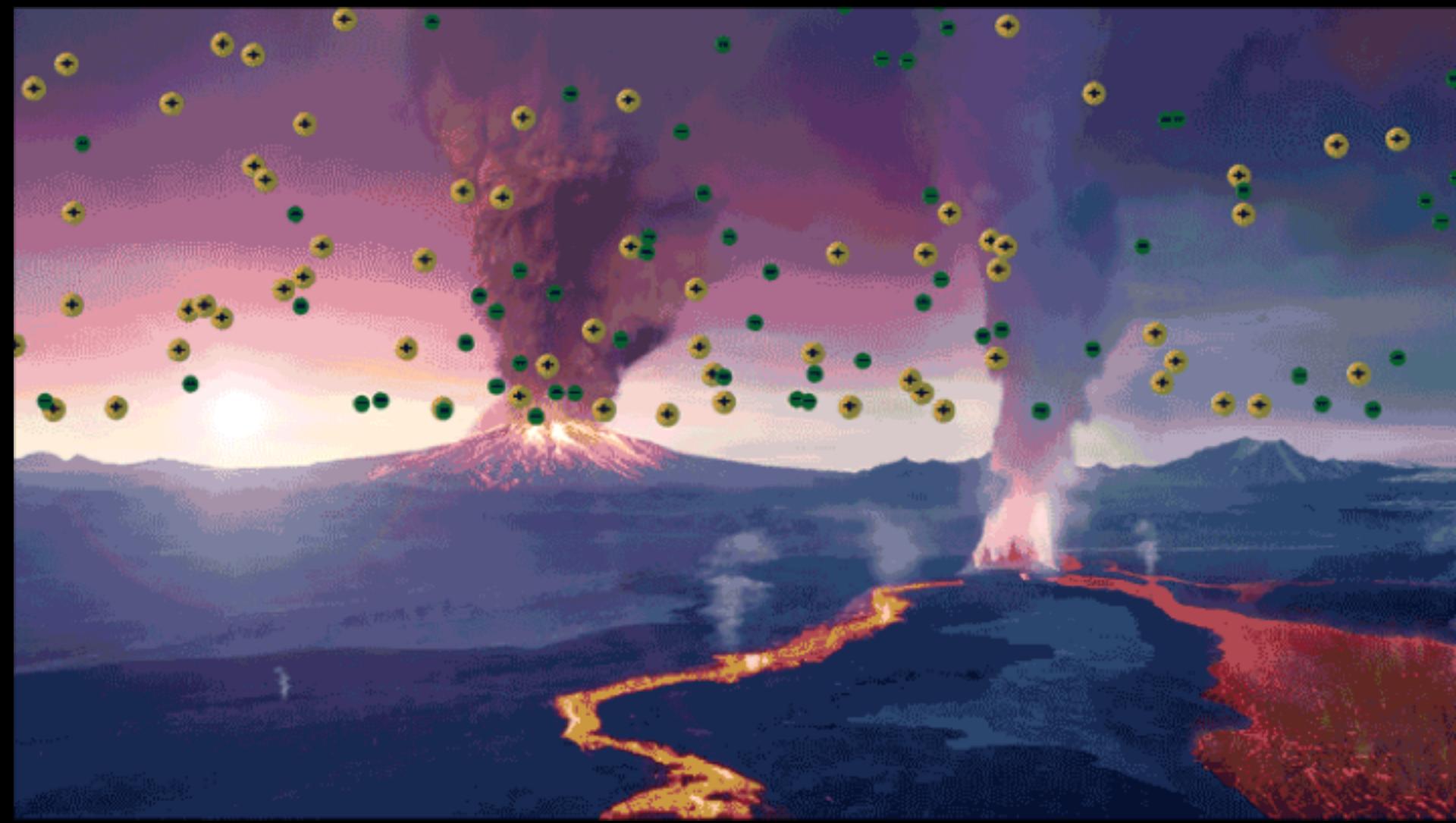
Proxima Centauri b

Rearth 1.07

Mearth 1.27

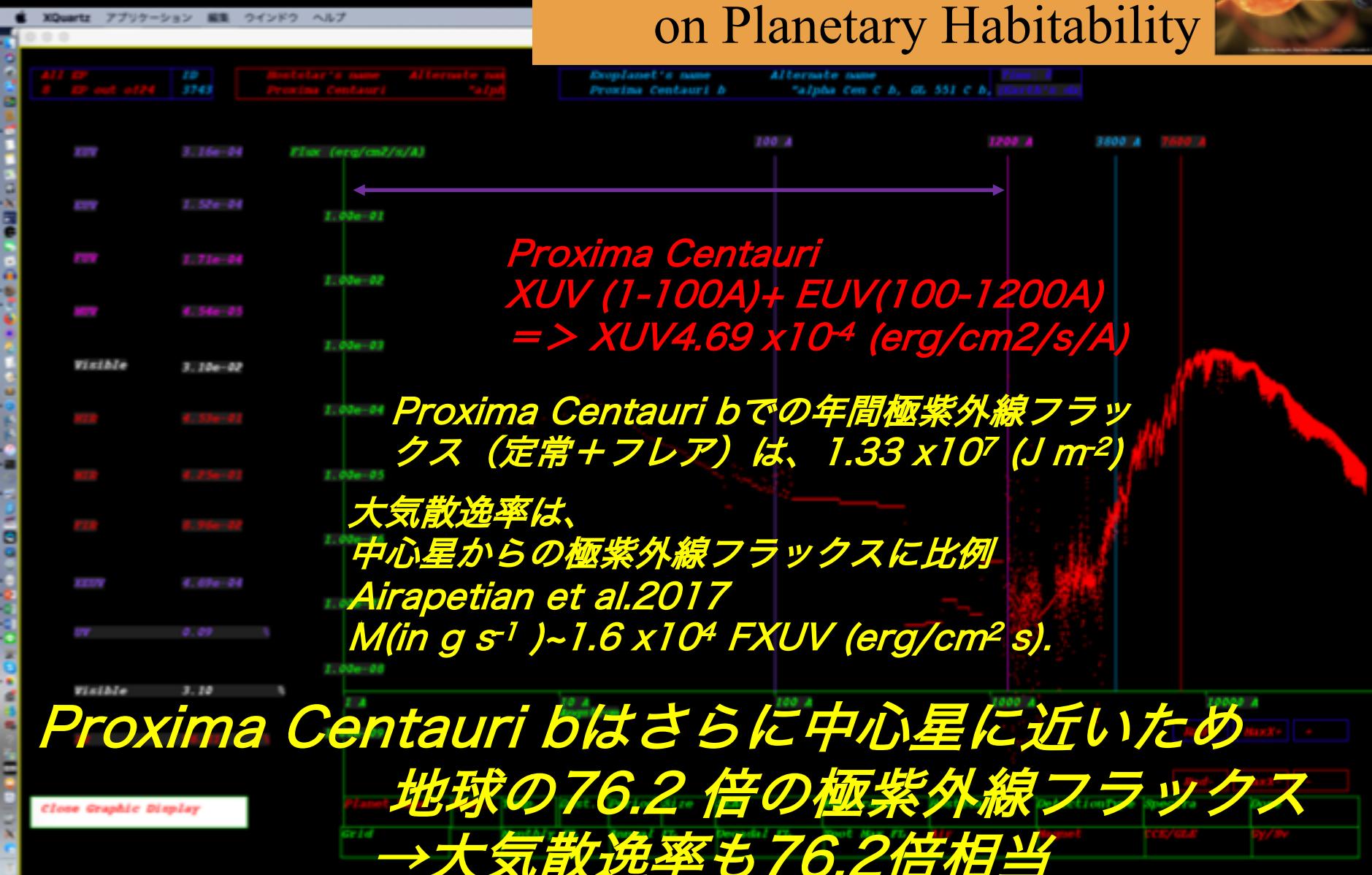
Semi Major Axis 0.0485AU





**EXOKyoto** Extrasolar Planet's Catalogue produced by Kyoto University

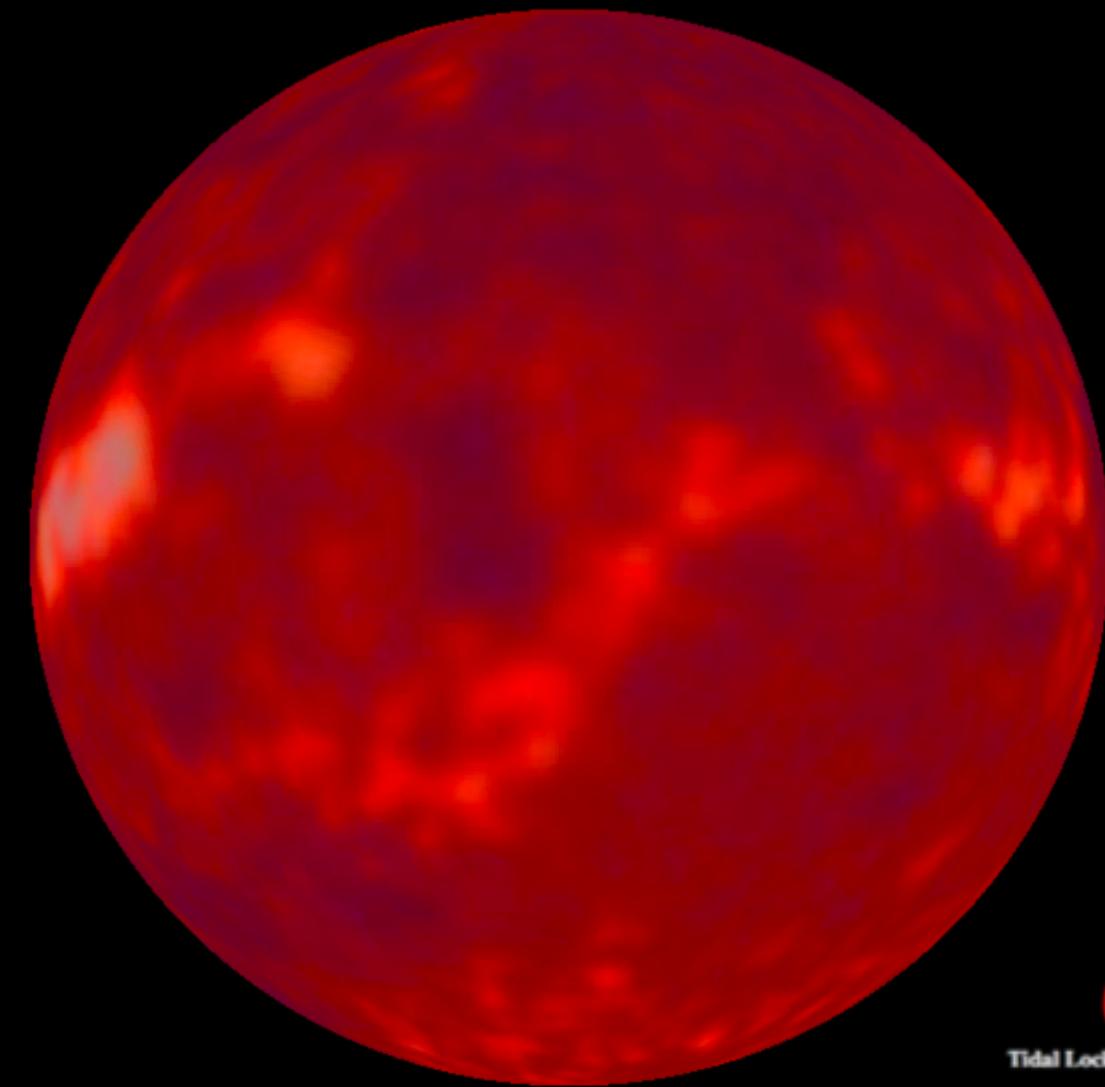
# Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability



# Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability



Planet Name	Rad.	Temp.	Dist.	Period (days)	SEAD	Kopparapu	HostStar	Detection Type	Spectra	Dose
grid	Monthly PL	Annual PL	Decadal PL	Spot Box PL	AIR	Magnet	Proxima	CCF/GER	Py/IR	



TRAPPIST-1

Spectra: M8

Teff: 2550 K

Rsun: 0.12

Prot 3.3

Aspot: 0.0012

Annual Flare 2.7 E+32

Spot Max. 9.09 E+32

TRAPPIST-1 b, c, d, e, f, g,



# Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability



# Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability



# 今までの研究での結論

- ・十分な大気圧(1気圧)がある場合、年最大フレアによる高エネルギー粒子線による5つ(Proxima Cen b, Ross-128 b, TRAPPIST-1 e, Kepler-283 c, GJ699b)の太陽系外惑星の地表面での推定被ばく量は、地球上の多細胞生物にとっての危険なレベルに達することはない。
- ・MUSCLESなどを用いて極紫外線による定常+フレアにともなうフラックスをAirapetian et al.2017により評価すると、大気散逸率が地球の78倍(Proxima Centauri b)、65倍(TRAPPIST-1 e)に達すると考えられる。
- ・長期間にわたる大気散逸の結果地球の1/10気圧になつたと想定すると、これらの惑星表面での年最大フレアにともなう被ばく量は8.6 Sv(Proxima Cen b)と6.9 Svに達するが、これはほとんど想定された致死量(10 Sv)に近い。

# 今後の計画

- すべてのハビタブル惑星での恒星影響評価  
→恒星の活動性（黒点面積）の評価  
→自転周期の観測・H $\alpha$ 線・X ray  
→惑星側の情報（大気圧・磁場等←観測困難(!?)）
- 太陽一地球・火星システムにおける様々な年代における太陽粒子線による被ばく量の推定
- 大きなエネルギーのスーパーフレアにおけるより硬いスペクトルの利用。
- 他のハビタブル惑星をともなう惑星系へのPHITSの応用

# 恒星による惑星のハビタビリティーを明らかにするために

- 恒星スーパーフレアでのSEPのエネルギースペクトルの推定 – よりエネルギーの高い粒子 – Mass Ejection観測結果(Namekata et al. 2020)の解釈 • MHDによるYoung Sun Analogue
- 惑星からの大気散逸の推定 – XUV観測 – XMM, Mega MUSCLES – 合成 SEPの影響
  - V993 tau HST& XMM & SEIMEI (2020.Sep.3)
- 惑星大気へのフレア(SEP)の直接影響 – ハビタブル惑星では困難、AU Mic bなどを対象？

# 惑星からの大気散逸の評価

Airapetian et al.2017

$M(\text{in g s}^{-1}) \sim 1.6 \times 10^4 F_{\text{XUV}} (\text{erg/cm}^2 \text{ s})$  と仮定

他に

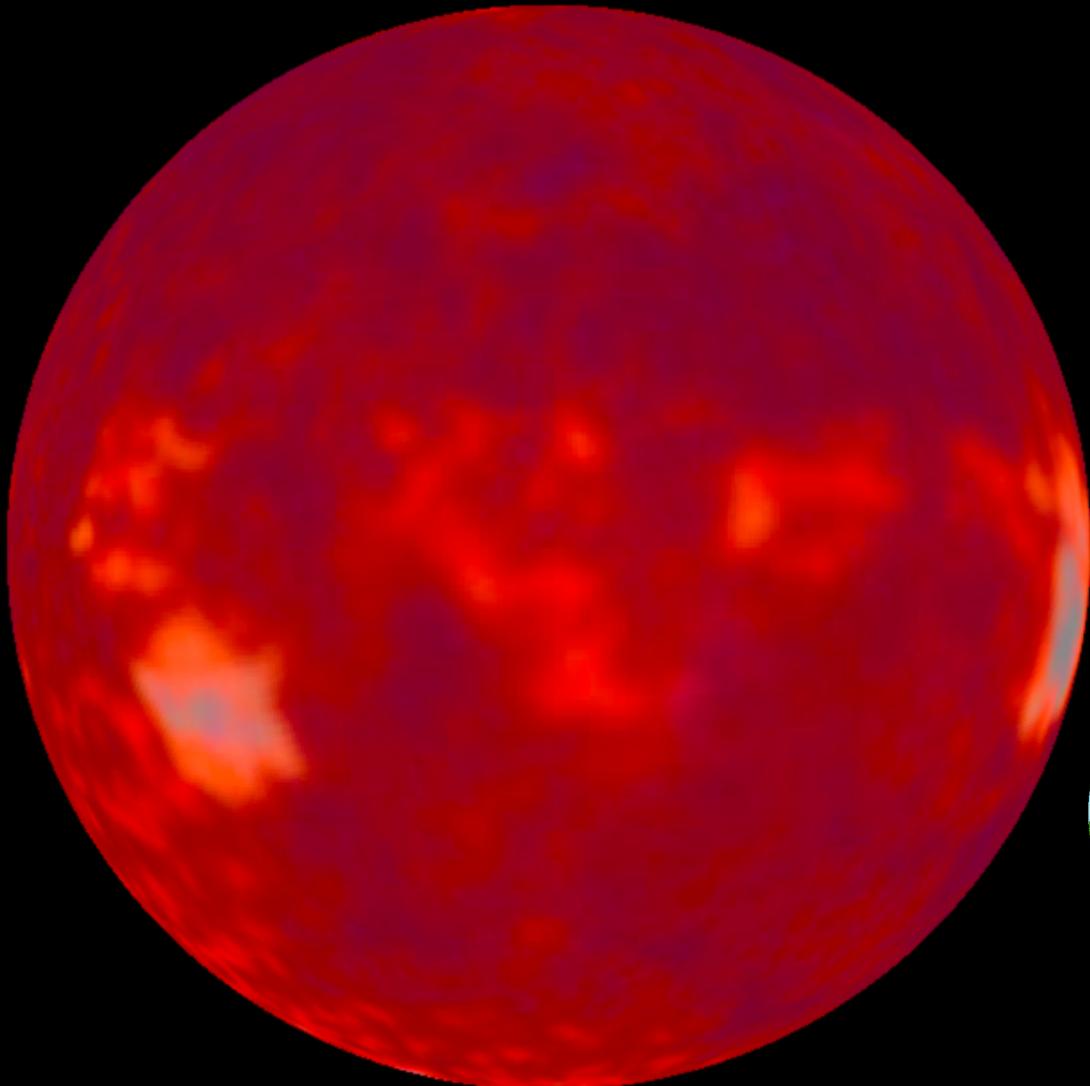
Superflare with SEP 通常時の 10 倍の大気散逸

— 惑星の表面大気圧に影響を与える要素

- 挿発性物質の生産—惑星依存
- 磁場の存在—（観測が非常に困難なため、0, 0.1B, 1B, 10Bを仮定）

# 惑星からの大気散逸 by XUV

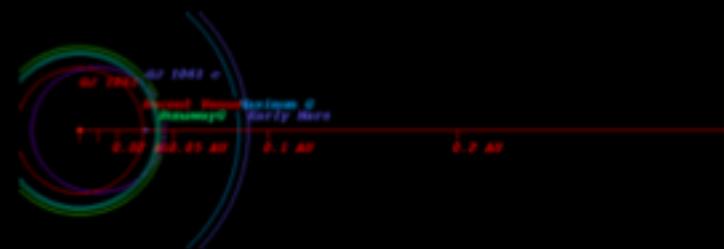
- XUVが地球(XUVe)に比較して非常に大きい惑星(>50 XUVe)
  - GJ 1061 c (146 XUVe) (TESS Camera 3 (&Seimei – too low)), GJ 682 b (116 XUVe), TRAPPIST-Id (94 XUVe),
  - Proxima Centauri b (74 XUVe), GJ 1061 d (66 XUVe) (TESS(&Seimei – too low)Camera 3), TRAPPIST-Ie(54 XUVe)
  - XUVが地球に比較して大きい惑星(>10 XUVe)
  - TRAPPIST-I f (31 XUVe) Wolf 1061 c (22 XUVe), TRAPPIST-I g(21 XUVe),
  - Tau Cet e (16 XUVe) (TESS&Seimei Oct 3), GJ 180 c(16 XUVe) GJ 163 c(15 XUVe) GJ 667 Cf(14 XUVe)
  - K2-9b (13 XUVe)



GJ 1061  
Teff 2953 K  
M5.5V  
Mv 15.17  
mv 13.0



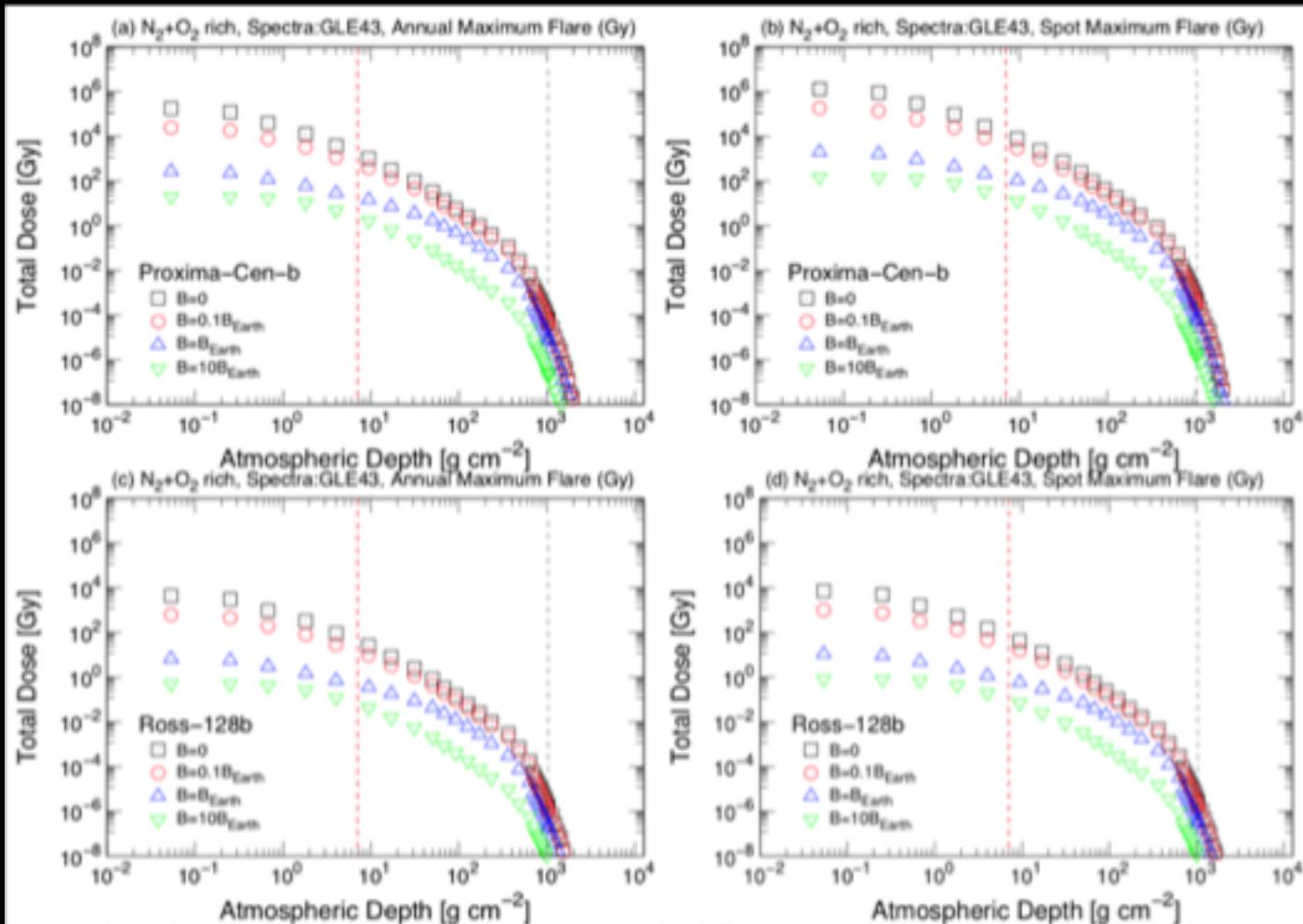
GJ 1061 c  
Rearth 1.16  
Mearth 1.73  
Semi Major Axis 0.04AU



# 磁場の効果

地球磁場程度の  
磁場があると  
さらに強度が  
低下

Proxima  
Centauriの場合  
 $B=B_{\text{Earth}}$ で、  
Doseは1/10に



# Evaluation of Young Sun – Earth & MARS

## Ionizing Radiation in the Martian Atmosphere during Young Sun

京都大学 大学院 総合生体学際  
思修館

Yosuke A. Yamashiki, Hiroyuki Maehara, Yuta Notsu, Tatsuhiro Sato, Vladimir Airapetian, Shota Notsu, Ryusuke Kuroki, Keiya Murashima, Hiroaki Sato, Kosuke Namekata, Takanori Sasaki, Thomas B. Scott, Daisaku Nogami, & Kazunari Shibata

**BACKGROUND:**

- Estimation of CME release angle
- Observed / Estimated Flare
- Hypothetical CME Zone
- Quantification of estimated dose
- Three types of atmospheric composition
- PHITS
- Planetary Magnetic Field

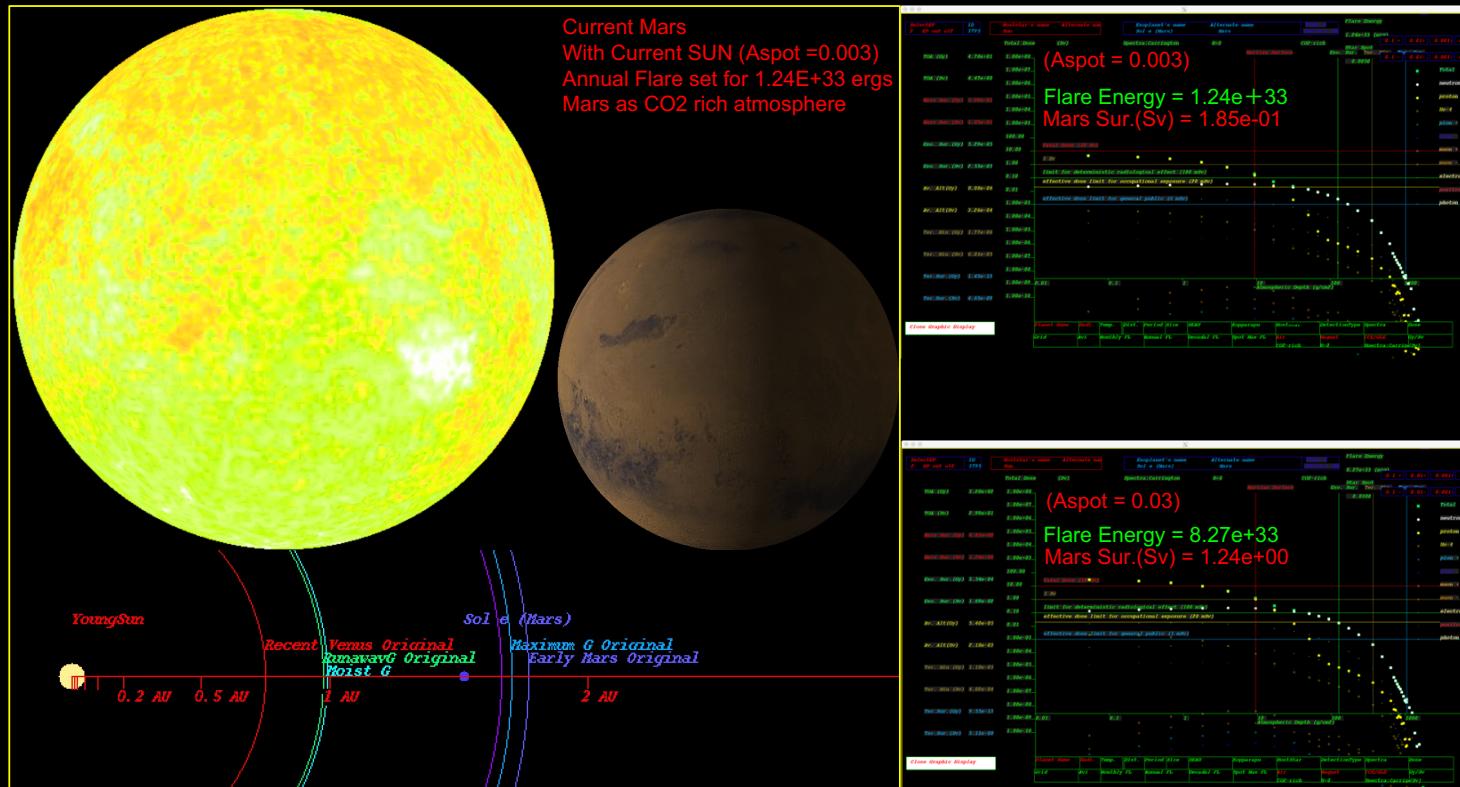
Energy spectra GLE43, Carrington

Integration using EXOKyoto

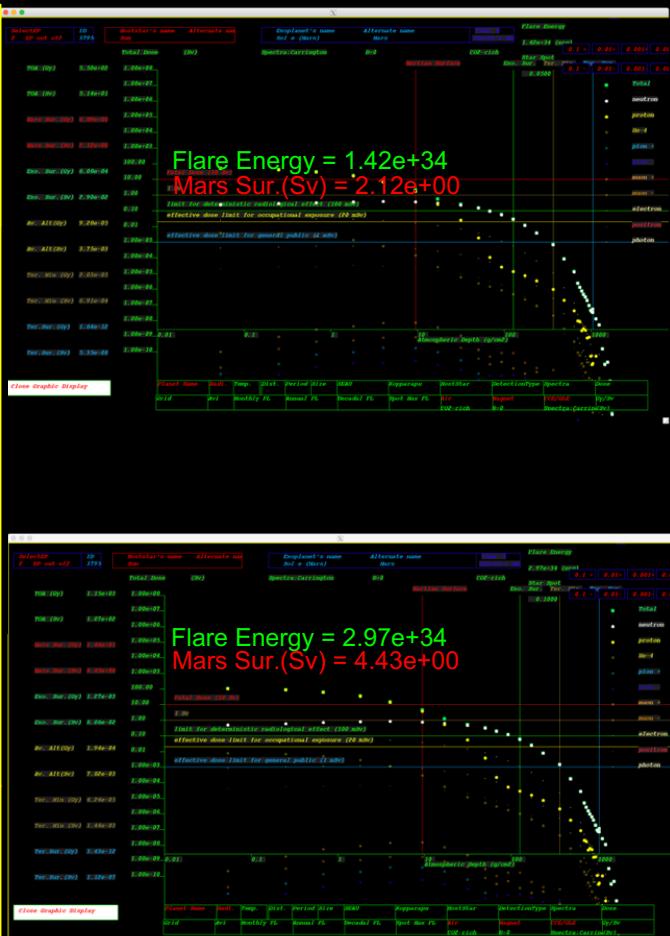
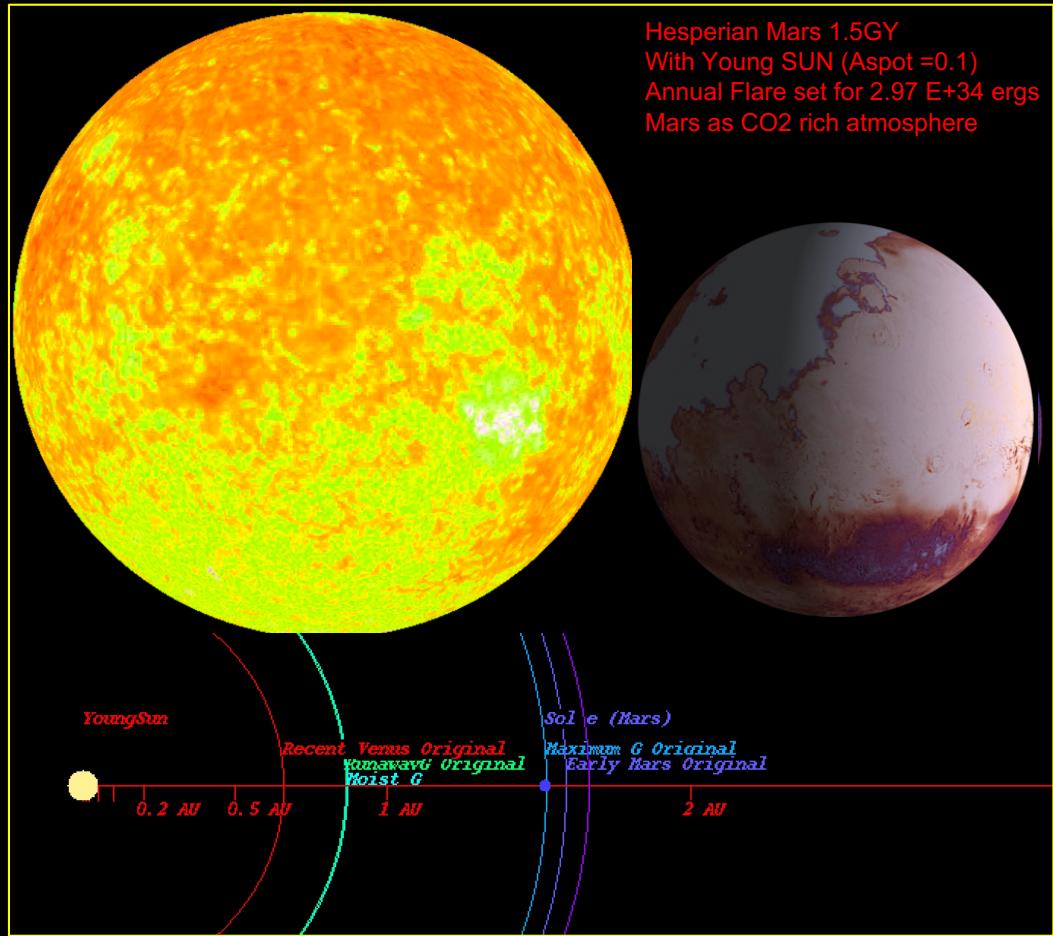
EXOKyoto Extrasolar Planet Catalogue produced by Kyoto University

**INTRODUCTION:**

The enhanced magnetic activity of the young sun was an important in the atmospheric evolution and dynamics of the early solar system. Lower solar luminosity associated provided planets a cooler atmospheric and surface environment on the early Earth and Martian surfaces and required production of potent greenhouse gasses in their atmospheres. Within these environments, the dose of ionizing radiation from solar energetic particles (SEPs) from the young Sun could have played an important role in the early phases of planetary habitability. Here, we present a theoretical model of the exposure of the early Mars to high fluence and hard spectra SEPs from the young sun by evaluating the possible magnitude and frequency of solar flares by using possible star spot area, derived from their rotational period. We evaluated annual and maximum flare energy in different cases of sunspot areas for 3 %, 5 % and 10 % of their surfaces. The maximum dose at the Martian top of the atmosphere reaches  $5.86 \times 10^3$  Gy ( $2.65 \times 10^2$  Sv) at the time when the sunspot area is ~10 % of the solar surface.

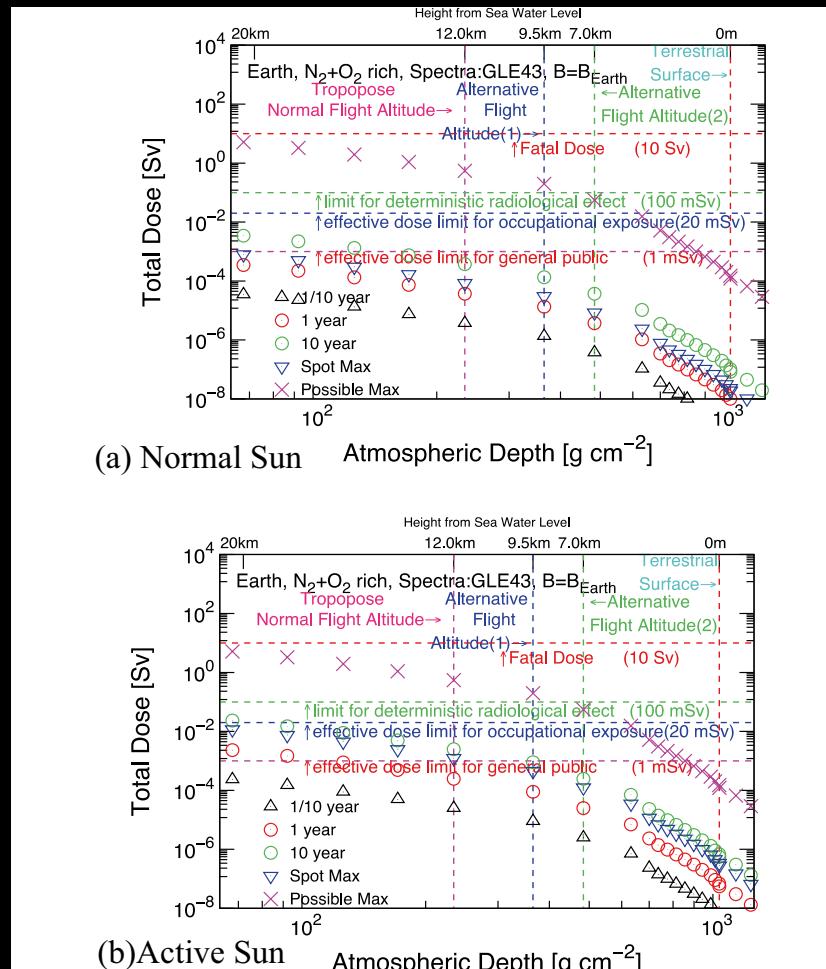


# Evaluation of Young Sun – Earth & MARS



# Estimation of flight route doses during GLE

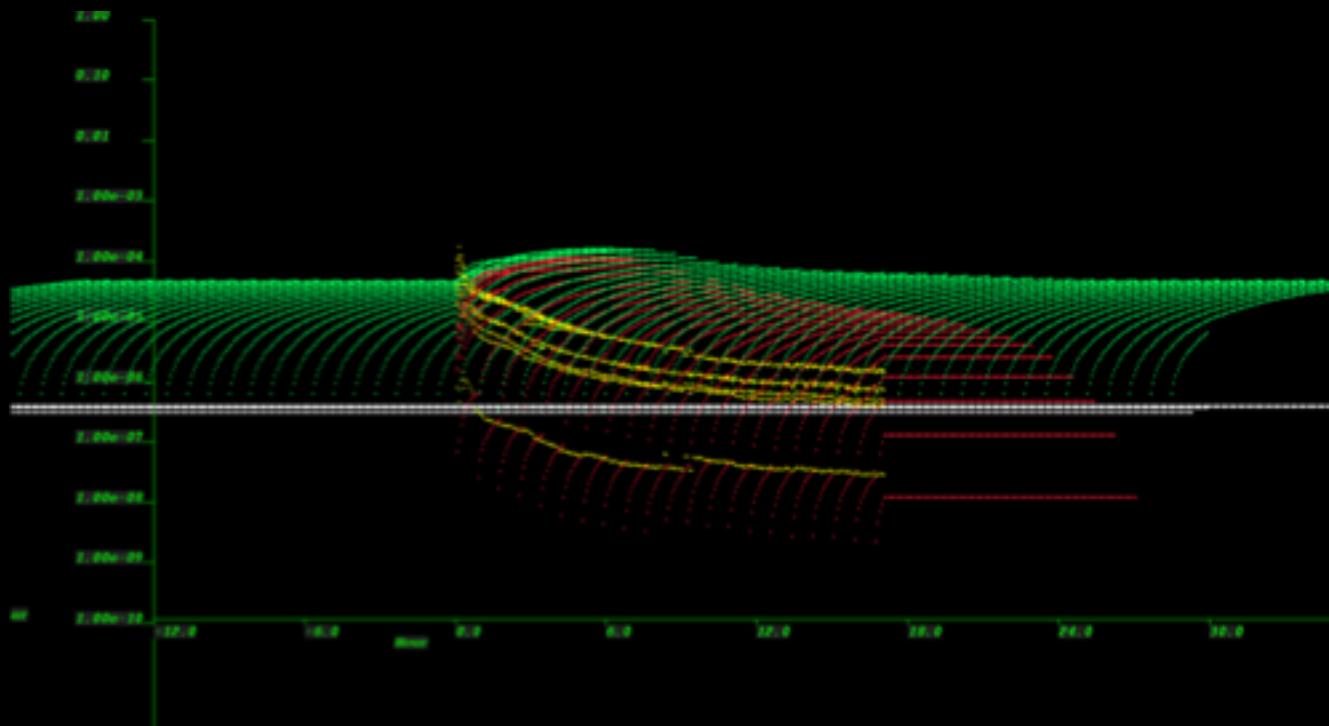
太陽陽子イベント (SPE) 発生時の航空機の被ばくリスクの定量化を行い、経済コストと被ばくによる人体への健康被害を最小限に抑えるための代替飛行高度を提案した(9)。PHITS-EXOKyoto放射線量推定モジュールとの組み合わせにより、フレアの規模と磁場の影響を考慮した様々な惑星上での被ばくリスクの定量化が可能となった。SEPの発生確率はGOESの観測によるX線強度によるXスケールを使用し、現在までに地上での中性子の増加が確認されている地上観測レベル上昇事象(GLE)の回数を基準とした。本論文ではさらに、活動期と非活動期における黒点面積を仮定し、各場合におけるフレアの発生確率を比例関係から算出(5)する事で、フレアによる粒子イベントの強度を仮定、それぞれの場合での通常飛行航路と低空飛行航路における推定被曝量および燃料コスト上昇を評価した。スーパーフレア発生時に航空機を運航する場合、許容放射線量(今回は20mSvとした)を超えるため、フライトはキャンセルを余儀なくされ、経済的損失も大きくなる。そこで、航空機の飛行高度を12kmから9.5km程度に下げるだけで被ばく量を減少させる事ができ、経済的損失もそれほど大きくないことが推定された。この解析は、もちろん同じモデルを用いているためにシンプルなものであるが、現在行なっているさらに高度な解析と大きさの比較検討を用いても、その値はほぼ妥当であることがわかっている。



Yosuke A. Yamashiki, Moe Fujita, Tatsuhiko Sato, Hiroyuki Maehara, Yuta Notsu, Kazunari Shibata (2020). Cost estimation for alternative aviation plans against potential radiation exposure associated with solar proton events for the airline industry. Evolutionary and Institutional Economics Review.

# 地球でのフレアによる航空機被ばく影響評価について Estimation of flight route doses during GLE

- Four-dimensional (Three-dimensional spatial and one temporal dimension) dose rate data for 5 different GLE (GLE60, 69-72) were prepared using WASAVIES.
- Figure 1 shows the temporal and spatial changes in dose for the flight route of Sydney to Rio de Janeiro (SYD-GIG) before, during, and after the occurrence of GLE 69.



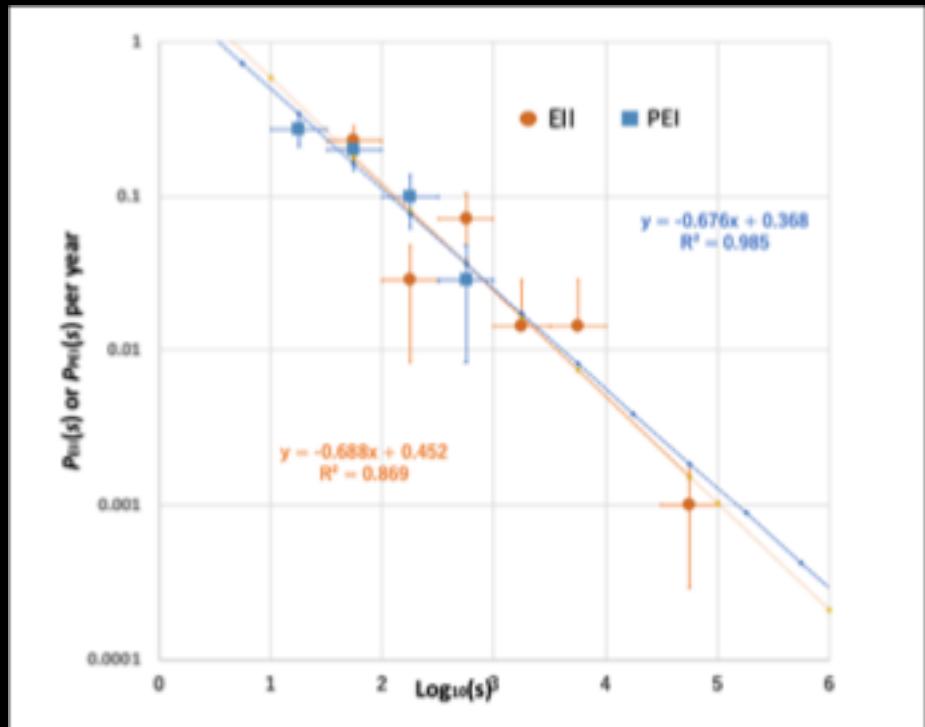
Moe Fujita, Tatsuhiko Sato, Yosuke A. Yamashiki. Probabilistic Risk Assessment of Solar Particle Events Considering the Cost of Counter Measures to Reduce the Aviation Exposure Dose. Under review, submitted to Scientific Reports (under review)

# Probability of past GLE

- EII: Event-integrated intensity
- PEI: Peak-event intensity
- The probability of the occurrence of SPE having a certain EII of  $s_{EII}$  per year,  $P_{EII}(s_{EII})$ , is assumed to follow the power-law function of  $s_{EII}$ , as written by:

$$P_{EII}(s_{EII}) = 10^{\{A_{EII} \log_{10}(s_{EII}) + B_{EII}\}}$$

- where  $A_{EII}$  and  $B_{EII}$  are the fitting parameters obtained from the scatter plot shown in Fig. 1.
- The annual probability that the maximum flight route dose exceeds the threshold dose,  $D_{\text{thre}}$ , for a certain flight route  $i$  estimated from  $j^{\text{th}}$  GLE can be calculated by  $P_{EII}(s_{EII,j} D_{\text{thre}} / D_{i,j})$ , where  $s_{EII,j}$  is the EII value for  $j^{\text{th}}$  GLE and  $D_{i,j}$  is the maximum SEP dose for a flight route  $i$  during  $j^{\text{th}}$  GLE



Moe Fujita, Tatsuhiko Sato, Yosuke A. Yamashiki. Probabilistic Risk Assessment of Solar Particle Events Considering the Cost of Counter Measures to Reduce the Aviation Exposure Dose. Under review, submitted to Scientific Reports (under review)

# THE ASTROPHYSICAL JOURNAL

**Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability**

Published 2019 August 20 • © 2019. The American  
Astronomical Society. All rights reserved.

The Astrophysical Journal, Volume 881, Number 2

- Yosuke A. Yamashiki<sup>1,2</sup>, Hiroyuki Maehara<sup>3,4</sup>, Vladimir Airapetian<sup>5,6</sup>, Yuta Notsu<sup>7,8,9</sup>, Tatsuhiro Sato<sup>10</sup>, Shota Notsu<sup>9,11</sup>, Ryusuke Kuroki<sup>1</sup>, Keiya Murashima<sup>12</sup>, Hiroaki Sato<sup>13</sup>, Kosuke

# THE ASTROPHYSICAL JOURNAL

**Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability**

Published 2019 August 20 • © 2019. The American  
Astronomical Society. All rights reserved.

The Astrophysical Journal, Volume 881, Number 2

- Yosuke A. Yamashiki<sup>1,2</sup>, Hiroyuki Maehara<sup>3,4</sup>, Vladimir Airapetian<sup>5,6</sup>, Yuta Notsu<sup>7,8,9</sup>, Tatsuhiro Sato<sup>10</sup>, Shota Notsu<sup>9,11</sup>, Ryusuke Kuroki<sup>1</sup>, Keiya Murashima<sup>12</sup>, Hiroaki Sato<sup>13</sup>, Kosuke