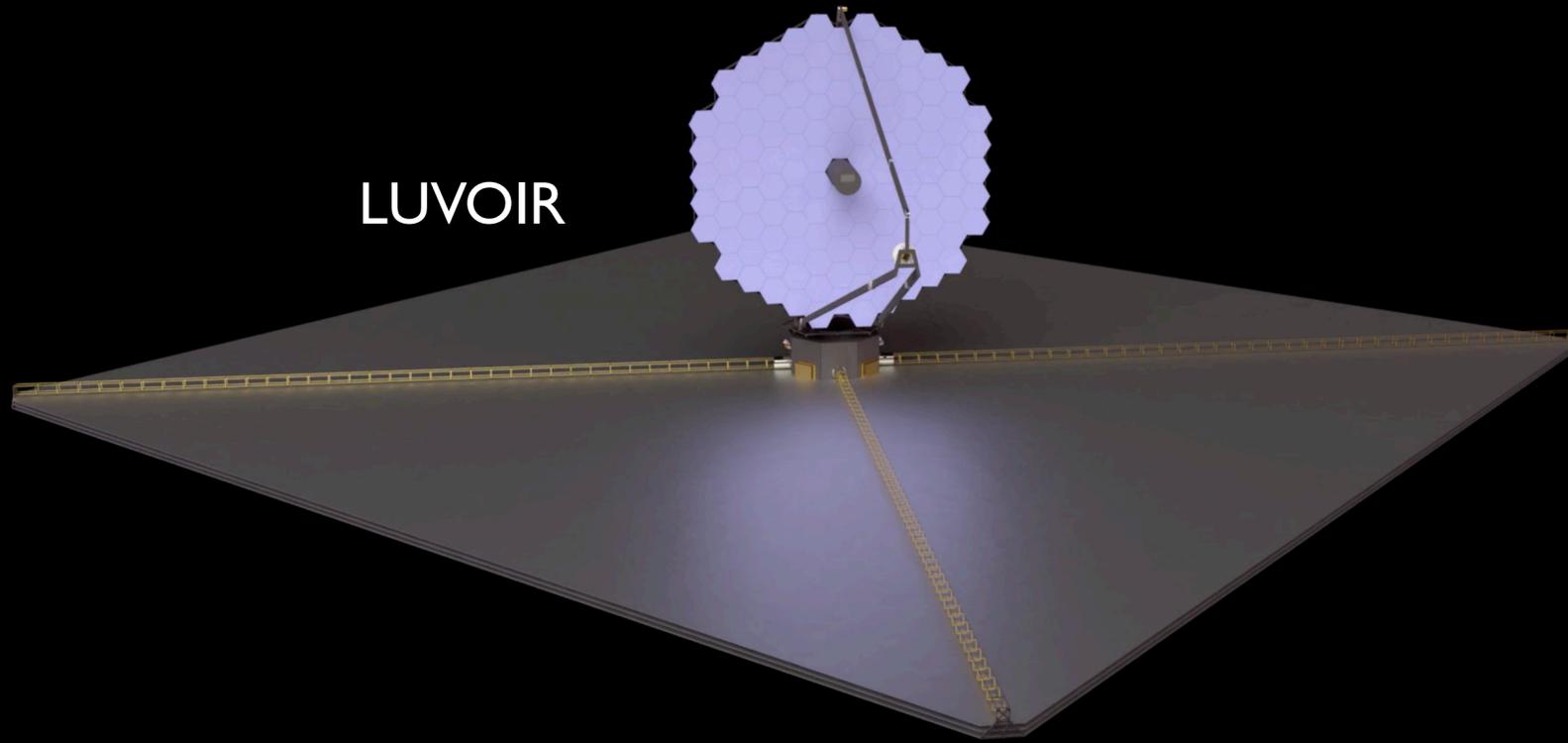
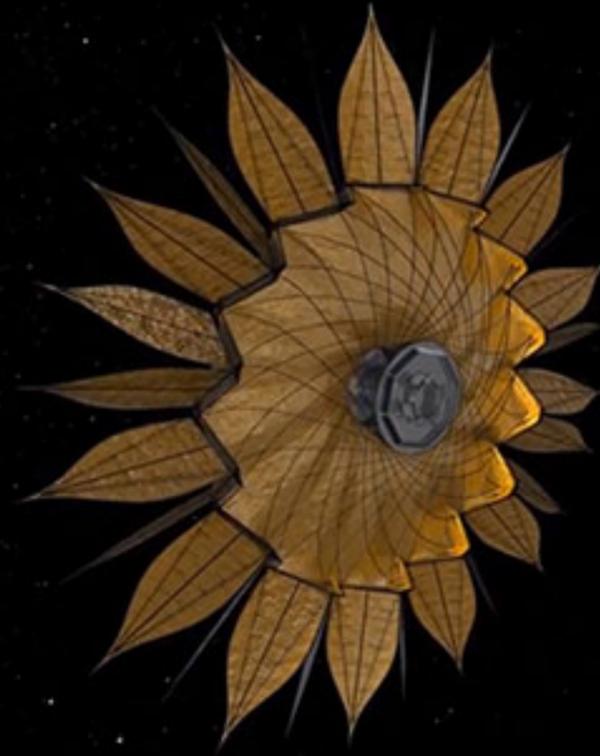


太陽系外惑星とアストロバイオロジー研究の来し方行く末

LUVOIR



HabEx



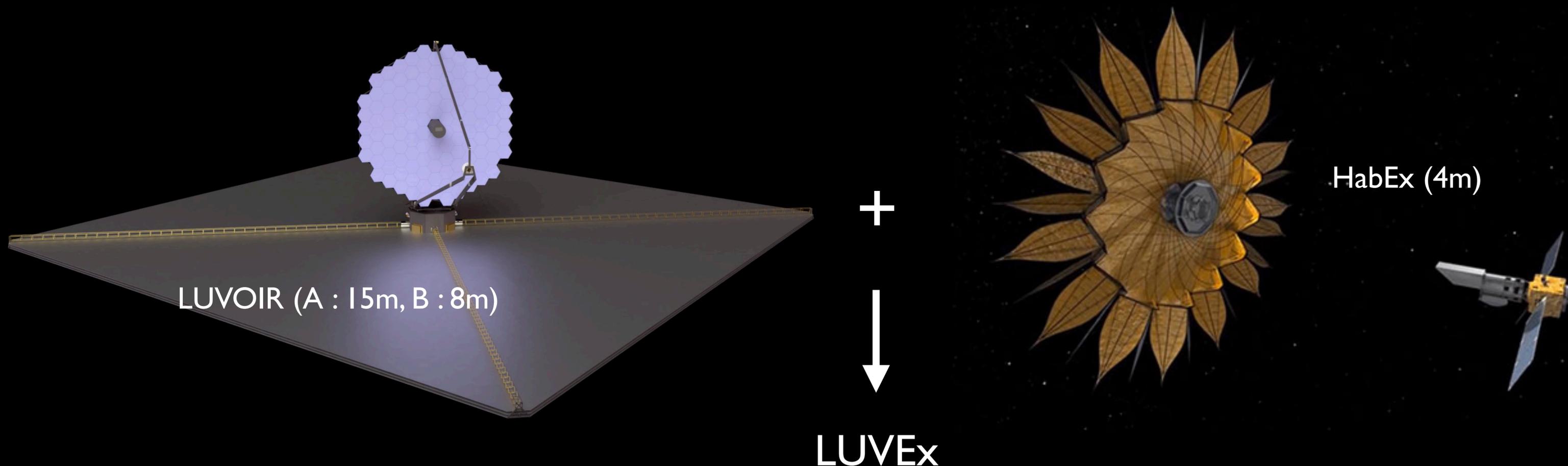
堀 安範

アストロバイオロジーセンター
国立天文台 ハワイ観測所

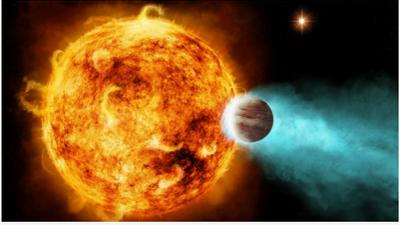
Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s

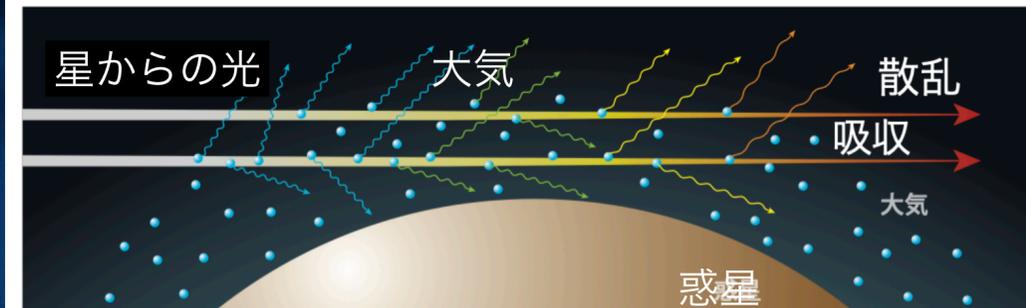
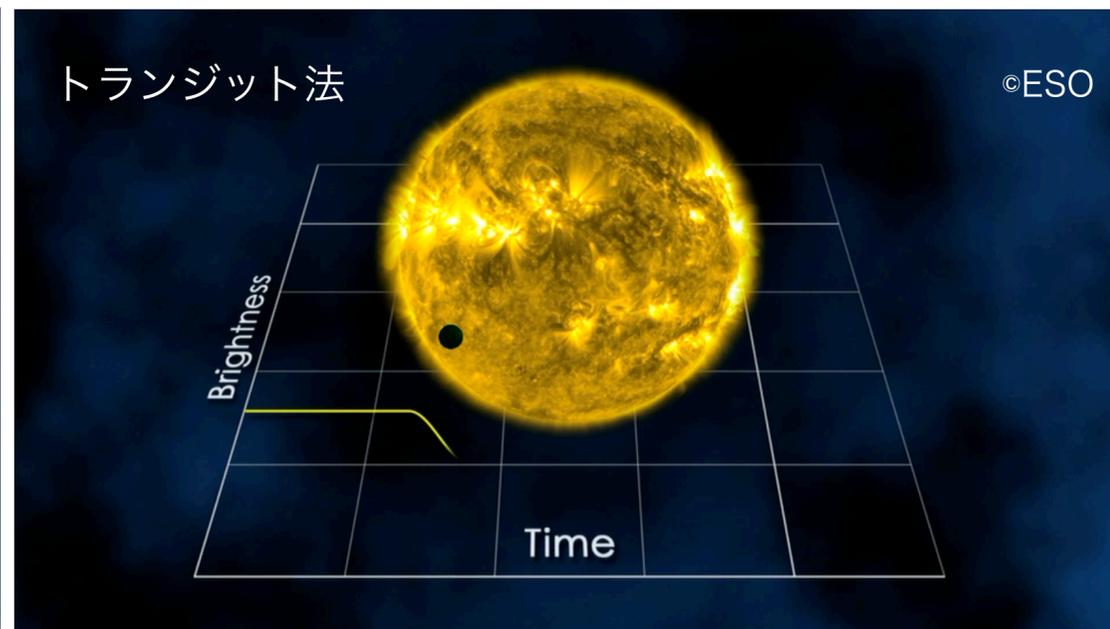
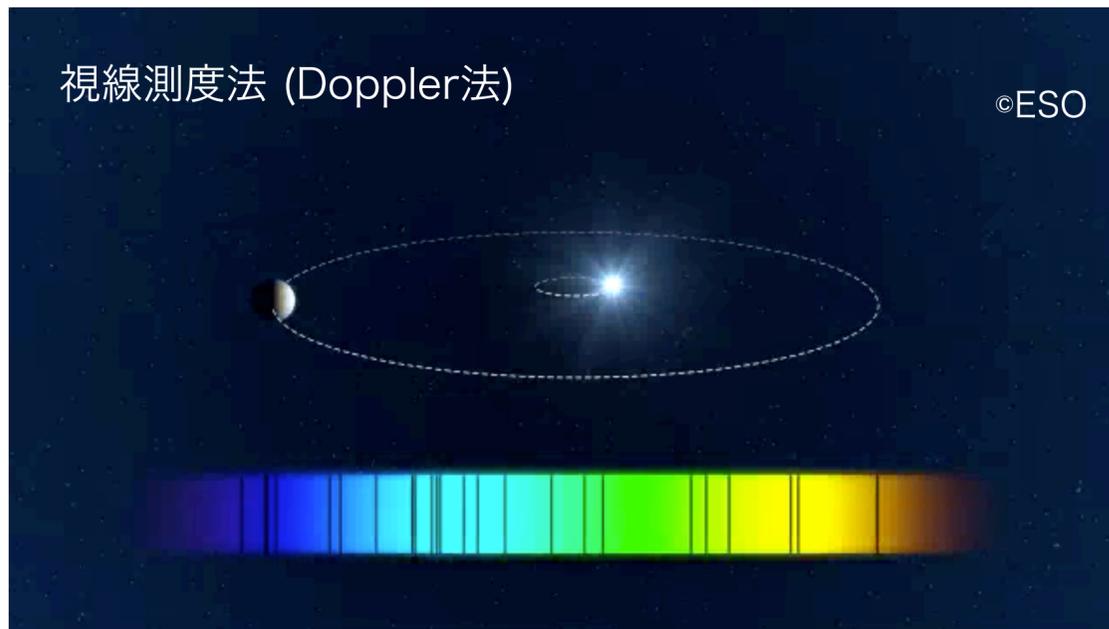
The Great Observatories Mission and Technology Maturation Program

太陽系外の惑星で生命の兆候の探索を目指す、技術的な変革をもたらすミッションとして、口径 6m級の赤外／可視／UVの宇宙望遠鏡によるサーベイを推薦



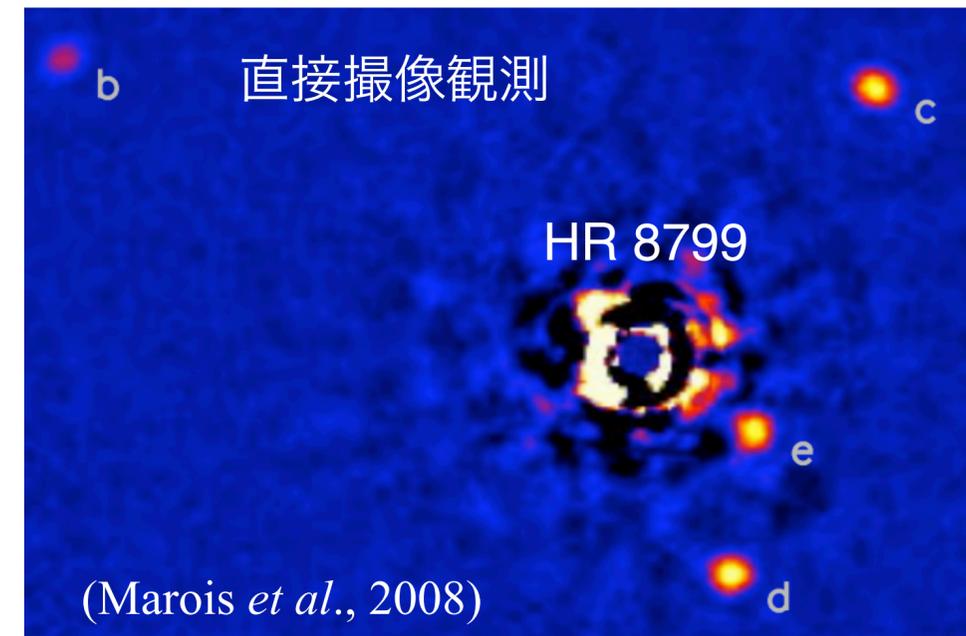
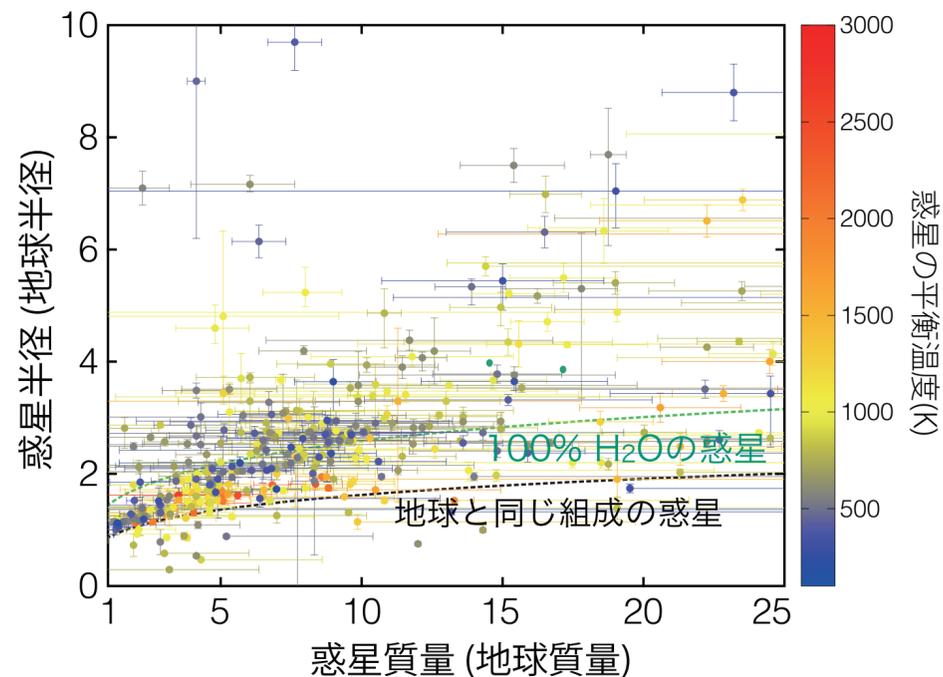
太陽系外惑星・アストロバイオロジー研究の変遷

	太陽系外惑星	アストロバイオロジー	対象
1992年-	<p>太陽系外惑星の時代の幕開け (主に視線速度法)</p> <p>中性子星 PSR B1257+12 で最初の太陽系外惑星 (Wolszczan & Frail, 1992) 主系列星 51 Pegasi で最初の太陽系外惑星 (Mayor & Queloz, 1995)</p>		巨大ガス惑星
2000年-	<p>系外ガス惑星のトランジット測光と大気検出, 大気流失</p> <p>HD 209458b大気Na (Charbonneau <i>et al.</i>, 1999; 2002) HD 209458bの大気流失 (Vidal-Madjar <i>et al.</i> 2003)</p> <p>2003年 Spitzer打ち上げ</p> 		

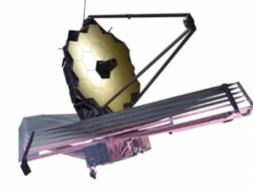


太陽系外惑星・アストロバイオロジー研究の変遷

	太陽系外惑星	アストロバイオロジー	対象
2005年-	<p>重力 μ レンズで惑星検出 OGLE(MOA) 2003-BLG-235(53) (Bond <i>et al.</i>, 2005)</p> <p>宇宙望遠鏡によるトランジット観測</p> <p>2006年 CoRoT打ち上げ 2009年 Kepler打ち上げ</p> <p>太陽系外惑星の直接撮像観測 (e.g.) HR 8799</p> 	<p>Super-Earthの発見</p> <p>GJ 876d (Rivera <i>et al.</i>, 2005) CoRoT-7b (Leger <i>et al.</i>, 2009) GJ 1214b (Charbonneau <i>et al.</i>, 2009)</p>	海王星サイズから Super-Earth
2010年-	<p>惑星の質量 - 半径の関係 (内部組成)の時代</p> <p>惑星発見数は指数関数的に増加 中心星近傍では地球サイズの惑星発見可能</p>	<p>ハビタブル惑星候補の発見</p> <p>GJ 581d? (Vogt <i>et al.</i>, 2010) Kepler-186 f (Quintana <i>et al.</i>, 2014)</p>	地球サイズ



太陽系外惑星・アストロバイオロジー研究の変遷

	太陽系外惑星	アストロバイオロジー	対象
2010年-	<p>(短周期)惑星の大気の特徴付けの時代 (e.g.) GJ 1214b (Bean <i>et al.</i>, 2010)</p> <p>FGK型星からM型星周りの惑星探査へ</p> <p>2018年 TESS 打上げ (全天惑星探査衛星)</p> 	<p>惑星大気でH₂O検出 海王星サイズのHAT-P-11b (Fraine <i>et al.</i>, 2014)</p> <p>Proxima Centauriで super-Earth発見 (Anglada-Escude <i>et al.</i>, 2016)</p> <p>TRAPPIST-1周りで7個の地球サイズ惑星発見 (Gillon <i>et al.</i>, 2017)</p>	ハビタブル惑星
2020年-	<p>2021年 JWST 打上げ</p> <p>2026年 ESA/PLATO</p> <p>2027年 Roman宇宙望遠鏡</p> <p>2029年 ESA/Ariel</p> 	<p>(近傍星周りの)地球サイズ惑星の大気組成</p> <p>太陽型星周りのハビタブル地球サイズ惑星の発見</p> <p>遠方領域 (> 1au) の低質量惑星の発見</p>	

これまでの太陽系外惑星の研究は、

- ・ 0.1-1au以内の惑星分布 (質量, 半径, 軌道要素)
- ・ 短周期惑星の大気組成および大気散逸
- ・ 遠方の巨大惑星の発見 (直接撮像, 重力 μ レンズ)



惑星形成論, 軌道進化, 惑星の大気・熱進化

これまでのアストロバイオロジー研究は、

- ・ ハビタブル惑星候補の発見 (super-Earth, 地球サイズ)
- ・ 短周期低質量惑星の大気組成

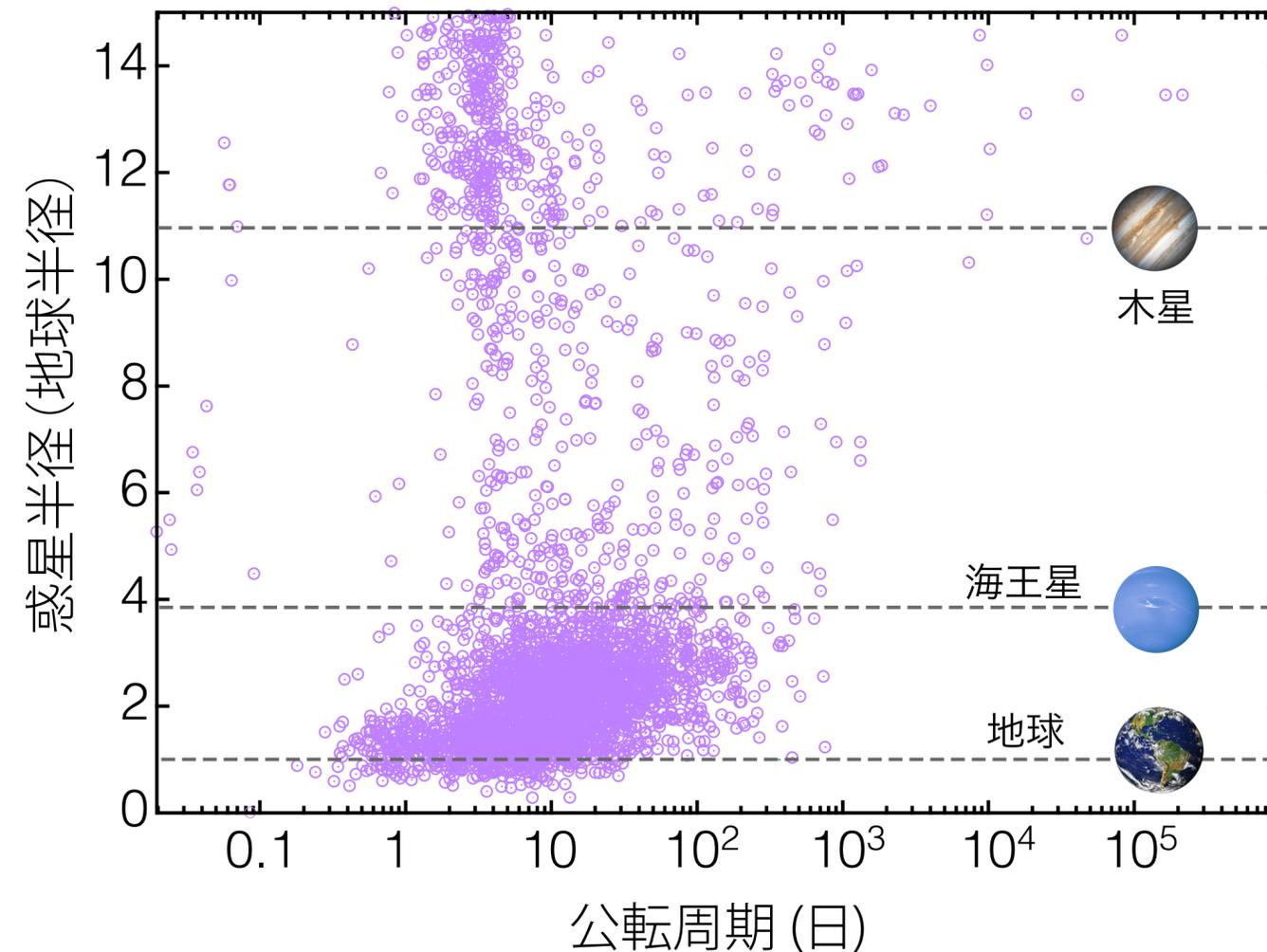
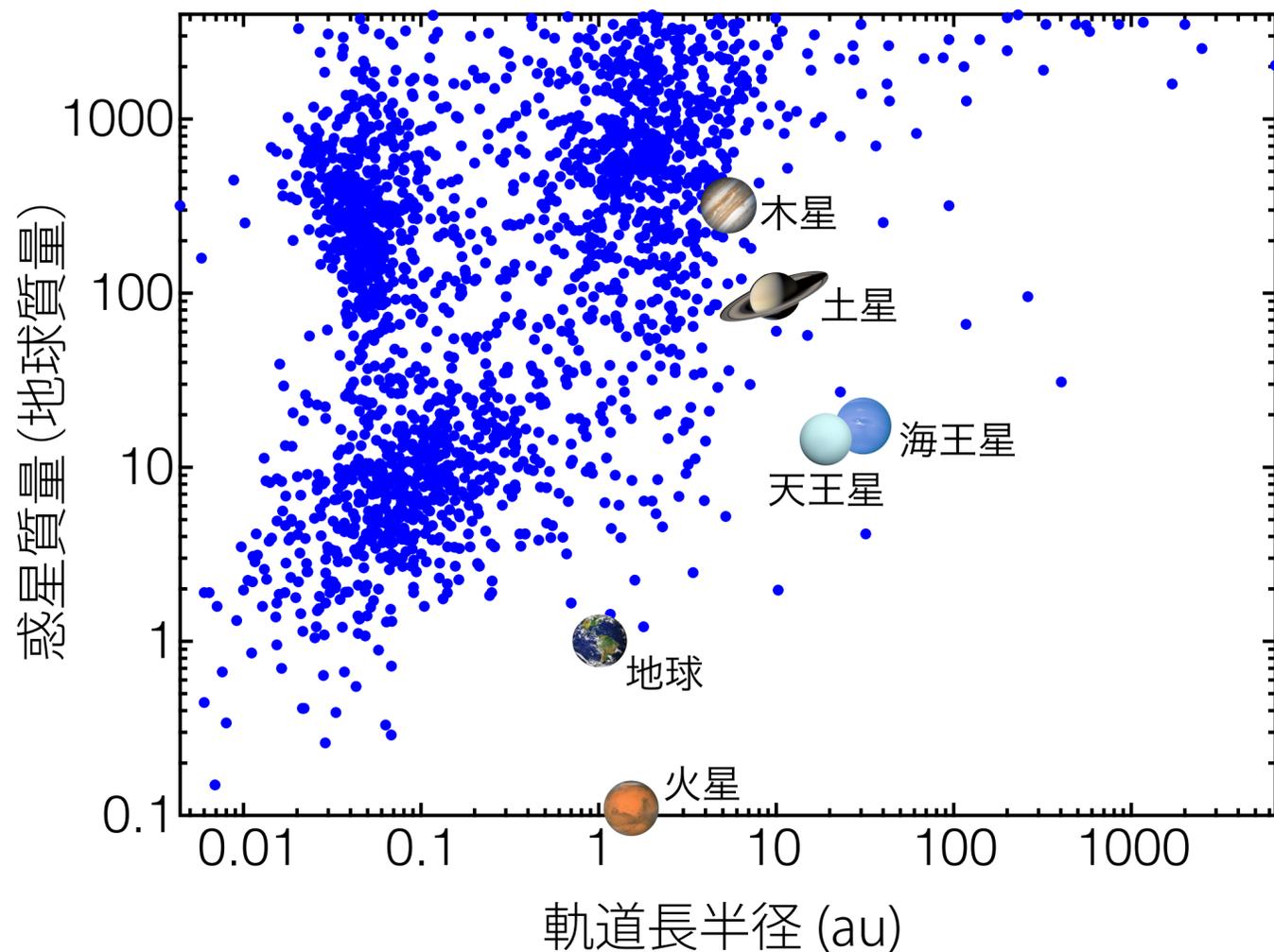


惑星の大気循環・気候

惑星表面での液体の水の存在可能性

太陽系外惑星探査は、より低質量、より遠方への時代

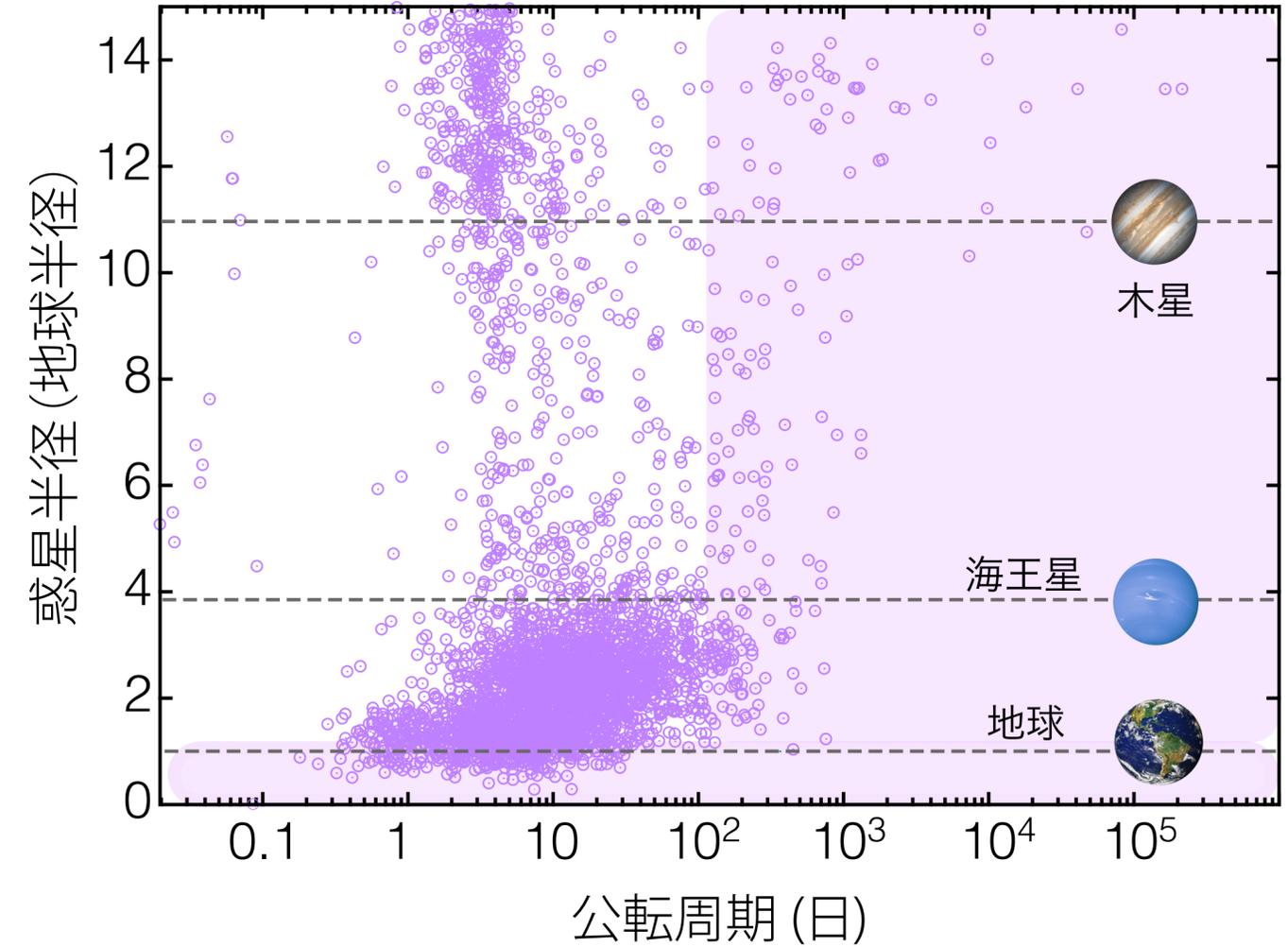
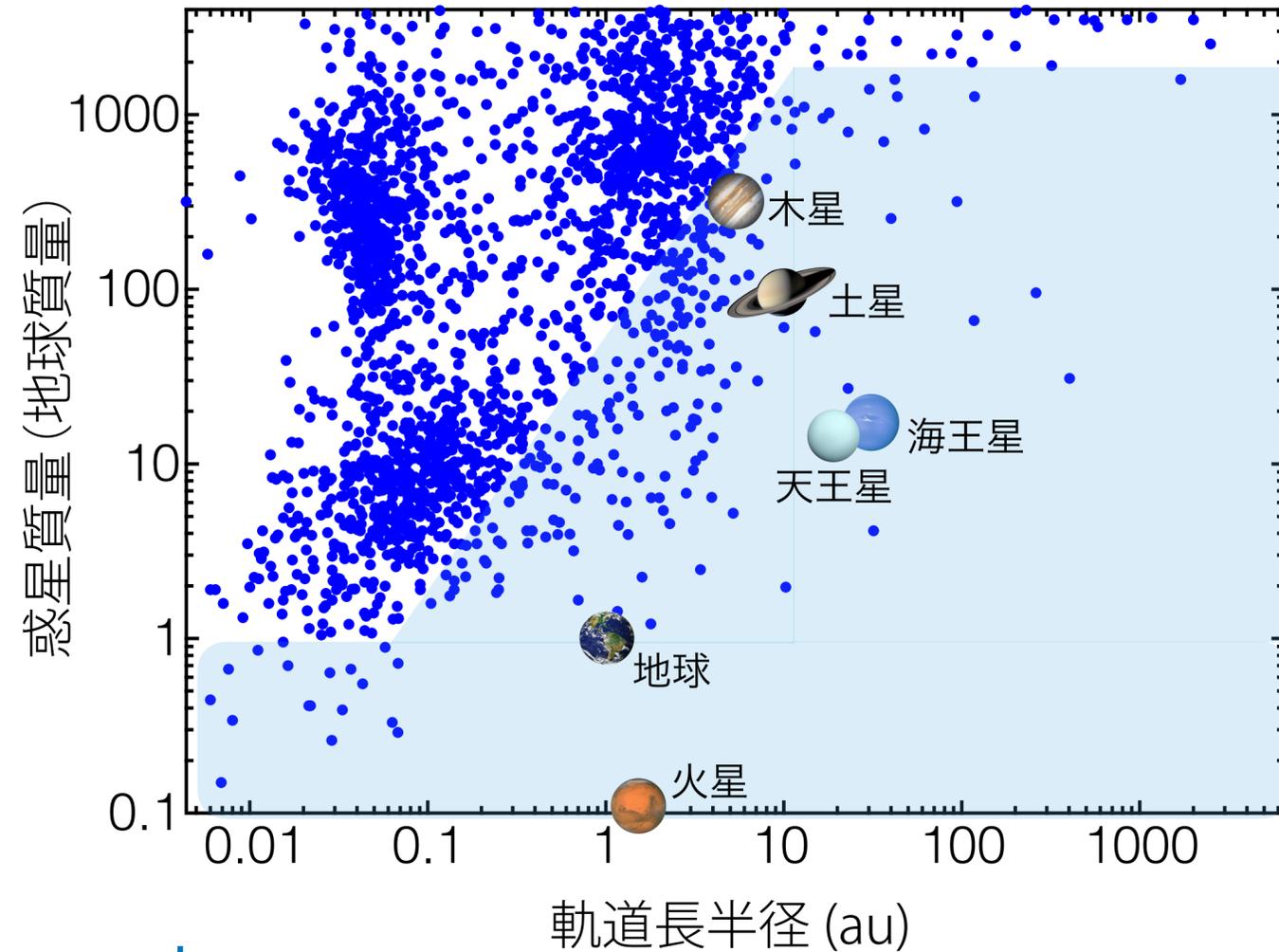
これまでに 5,200個近くの太陽系外惑星候補が発見されている



- (cf) Super-Earth (地球質量の約1-10倍 or 地球半径の約1-2倍)
Sub (mini)-Neptune (地球質量の約10-15倍 or 地球半径の約2-4倍)

太陽系外惑星探査は、より低質量、より遠方への時代

これまでに 5,200個近くの太陽系外惑星候補が発見されている

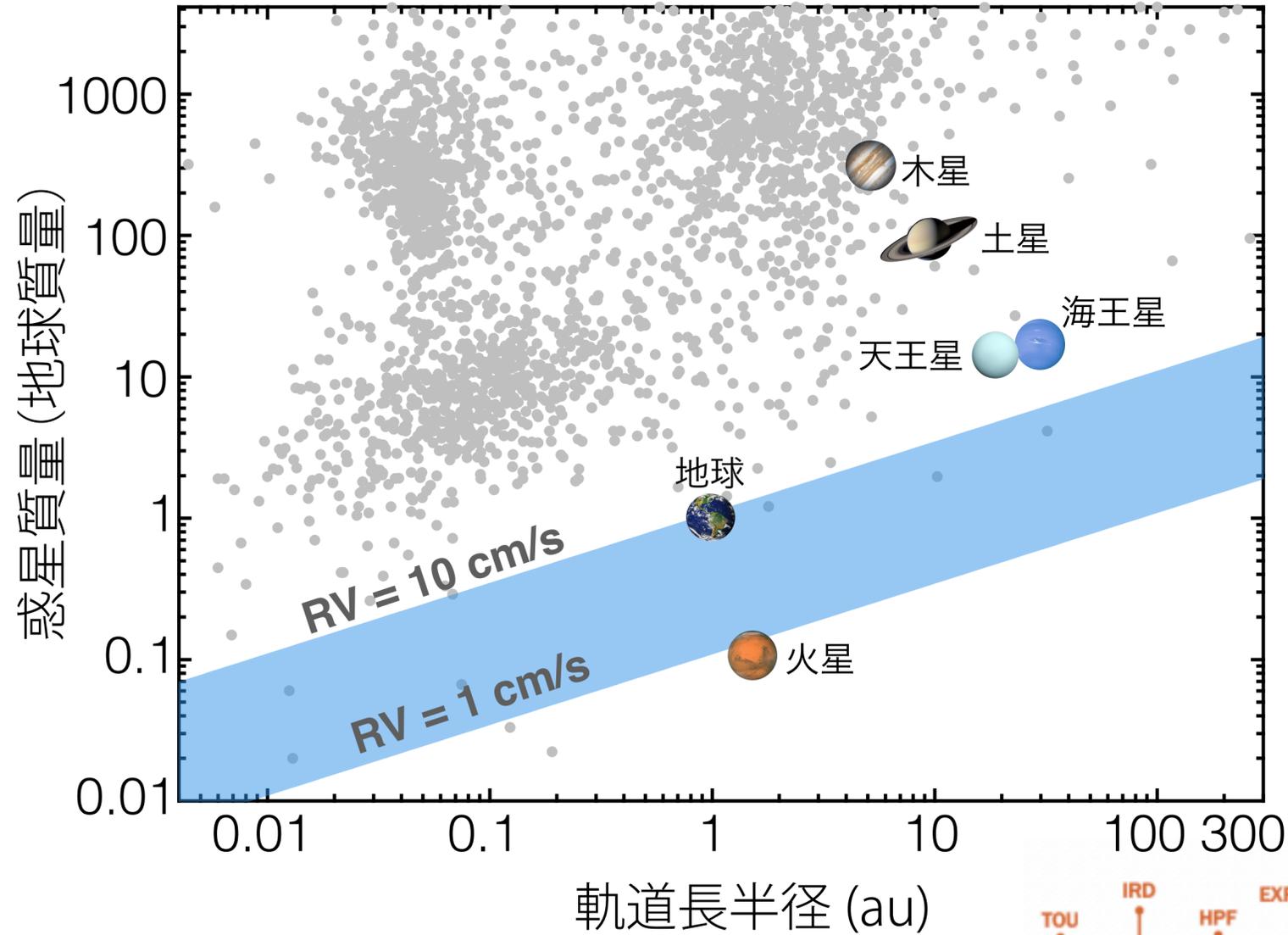


惑星 8個	1	Kepler-90
惑星 7個	1	TRAPPIST-1
惑星 6個	8	
惑星 5個	28	
惑星 4個	65	
惑星 3個	191	
惑星 2個	572	
惑星 1個	3,017	

(cf) Super-Earth (地球質量の約1-10倍 or 地球半径の約1-2倍)
 Sub (mini)-Neptune (地球質量の約10-15倍 or 地球半径の約2-4倍)

惑星形成論の観点では、惑星が1つしか形成されない状況は稀有
 未検出の惑星が存在？ (例) 低質量惑星, 遠方の惑星

これからの惑星探査：第2の地球探し（2025-2030）

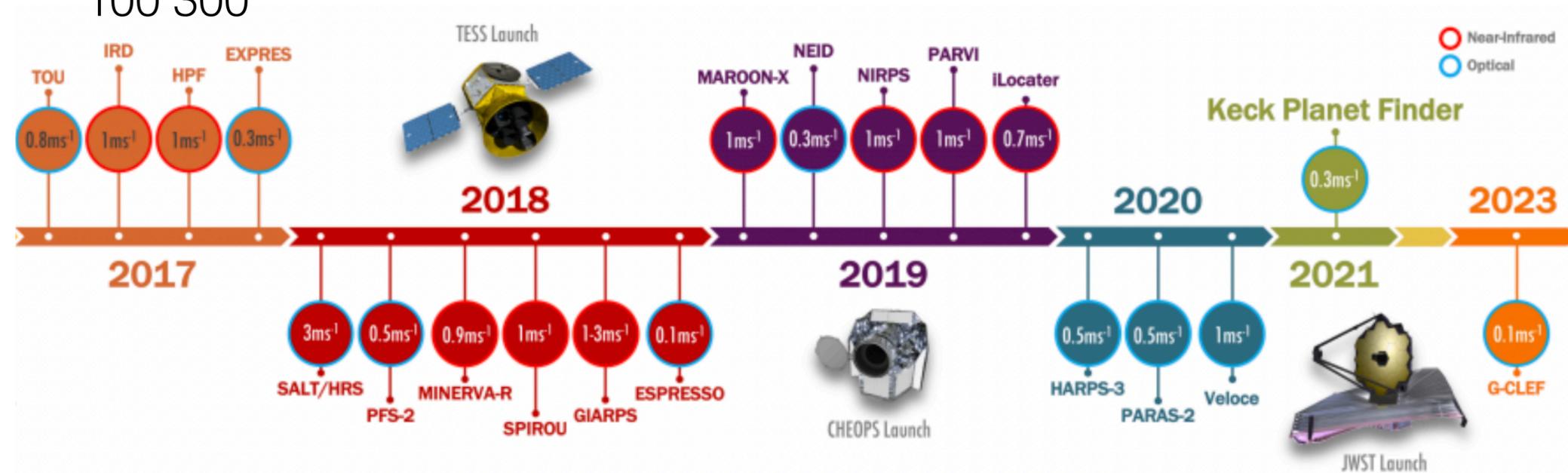
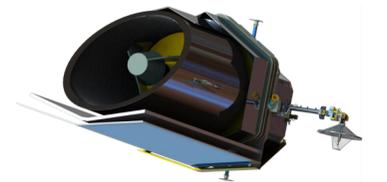


① Ground-based Extreme Precision RV (~ 10 cm/s) (e.g. Crass *et al.* 2021)

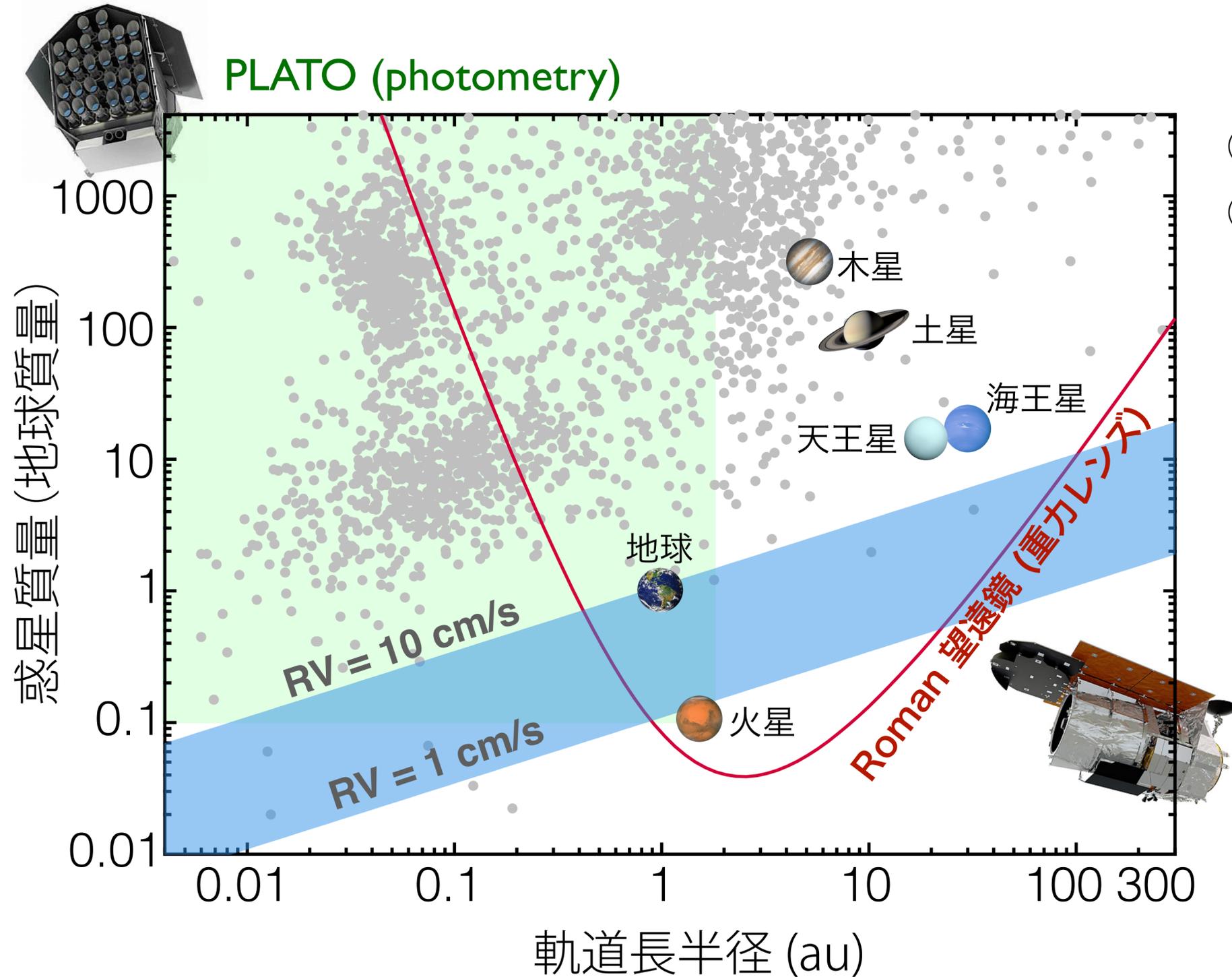
(cf) stellar jitter : activity, granulation, oscillation
地球の大気吸収 (tellurics), 光子ノイズ

- HARPS
- ESPRESSO (VLT) (Pepe *et al.* 2013)
- EXPRES (LDT) (Jurgenson *et al.* 2016)
- NEID (WIYN) (Schwab *et al.* 2016)
- Keck Planet Finder (Gibson *et al.* 2016)

→ EarthFinder (\sim cm/s, 2032?)
(Plavchan *et al.* 2019)



これからの惑星探査：第2の地球探し（2025-2030）

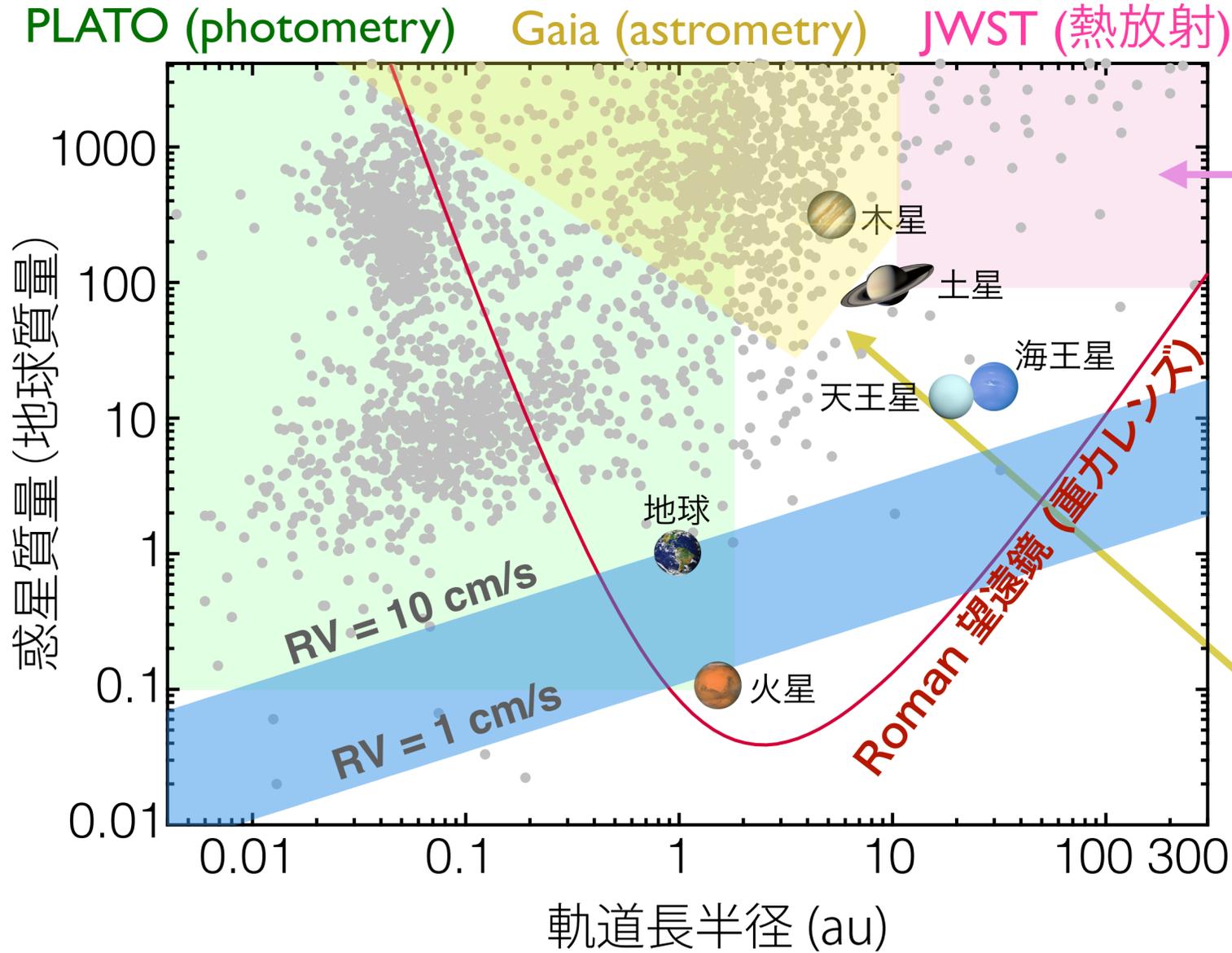


- ② 重力マイクロレンズ (Nancy Roman Telescope) (e.g. Penny *et al.* 2019)
- ③ PLATO計画 (Rauer *et al.* 2014)

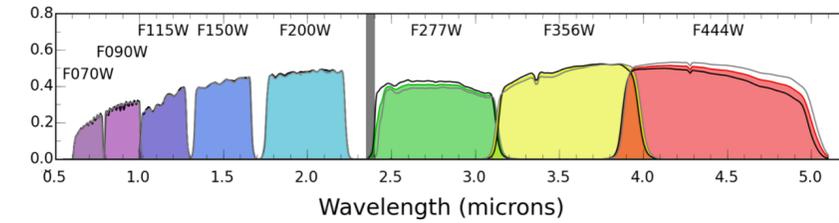
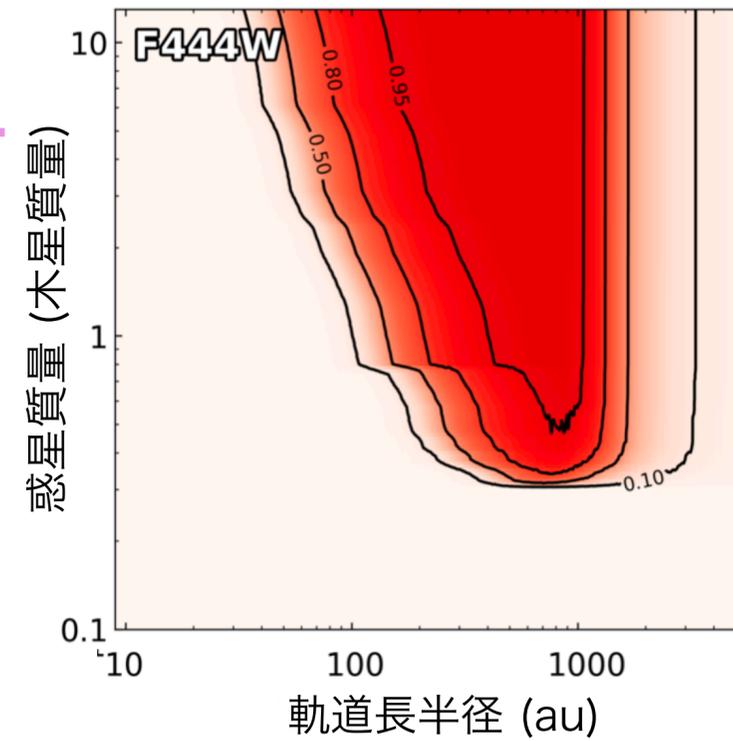


地球サイズの惑星は 最大~100程度発見が期待される

これからの惑星探査：遠方の惑星分布



JWST NIRCам (~4 - 4.5 μm)



A型星 HIP65425 ($1.96M_{\odot}$, 107pc)
(Carter *et al.* 2022)

Gaia 10yr astrometry : $\sigma = 20 \mu\text{as}$ ($1M_{\odot}$, 200pc)

(Sozzetti & de Bruijne, 2018)

現在のEDR3 : G等級 < 13では典型的には $\sigma = 50 - 60 \mu\text{as}$ を達成
(Lindgren *et al.* 2021)

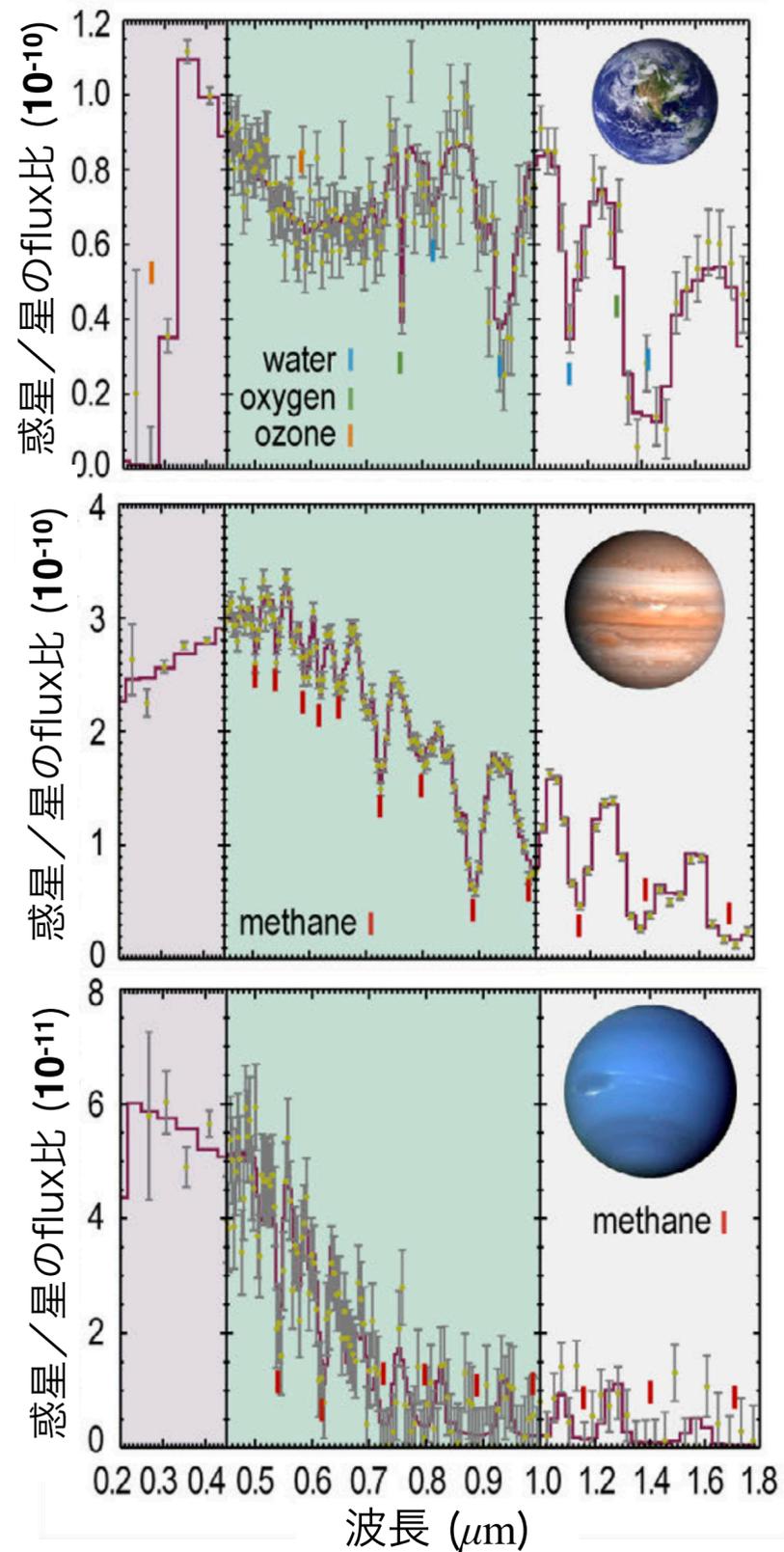
太陽型星周りの天王星・海王星領域が惑星分布解明の残されるピース？

- ・視線速度測定での惑星検出には、数10年-数100年間のモニタリングが必要
- ・重力マイクロレンズでは、M型星のような低質量星周りでの惑星検出の確率が高い
- ・若い天王星・海王星からの熱放射観測が鍵？

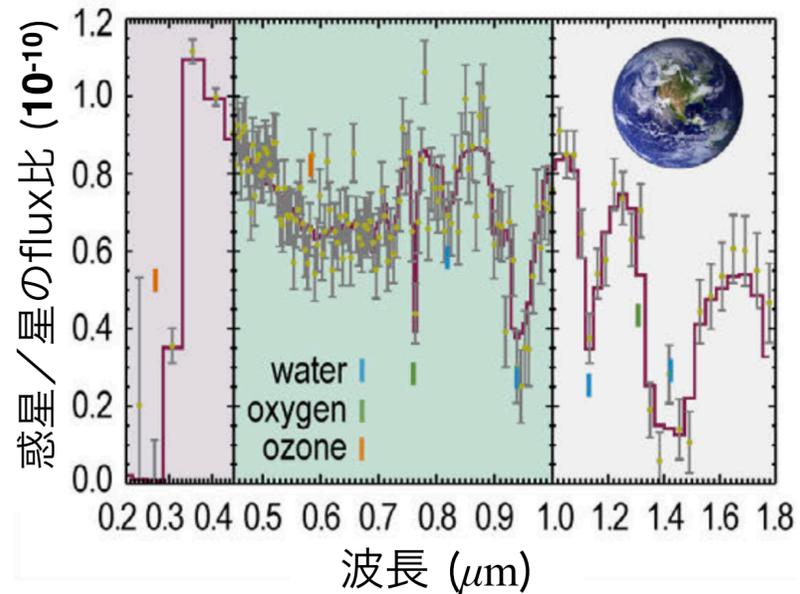
(cf) 2025-2030s : 天王星・海王星への探査計画の機運が高まっている

太陽系外惑星からの反射光：“地球”の撮像

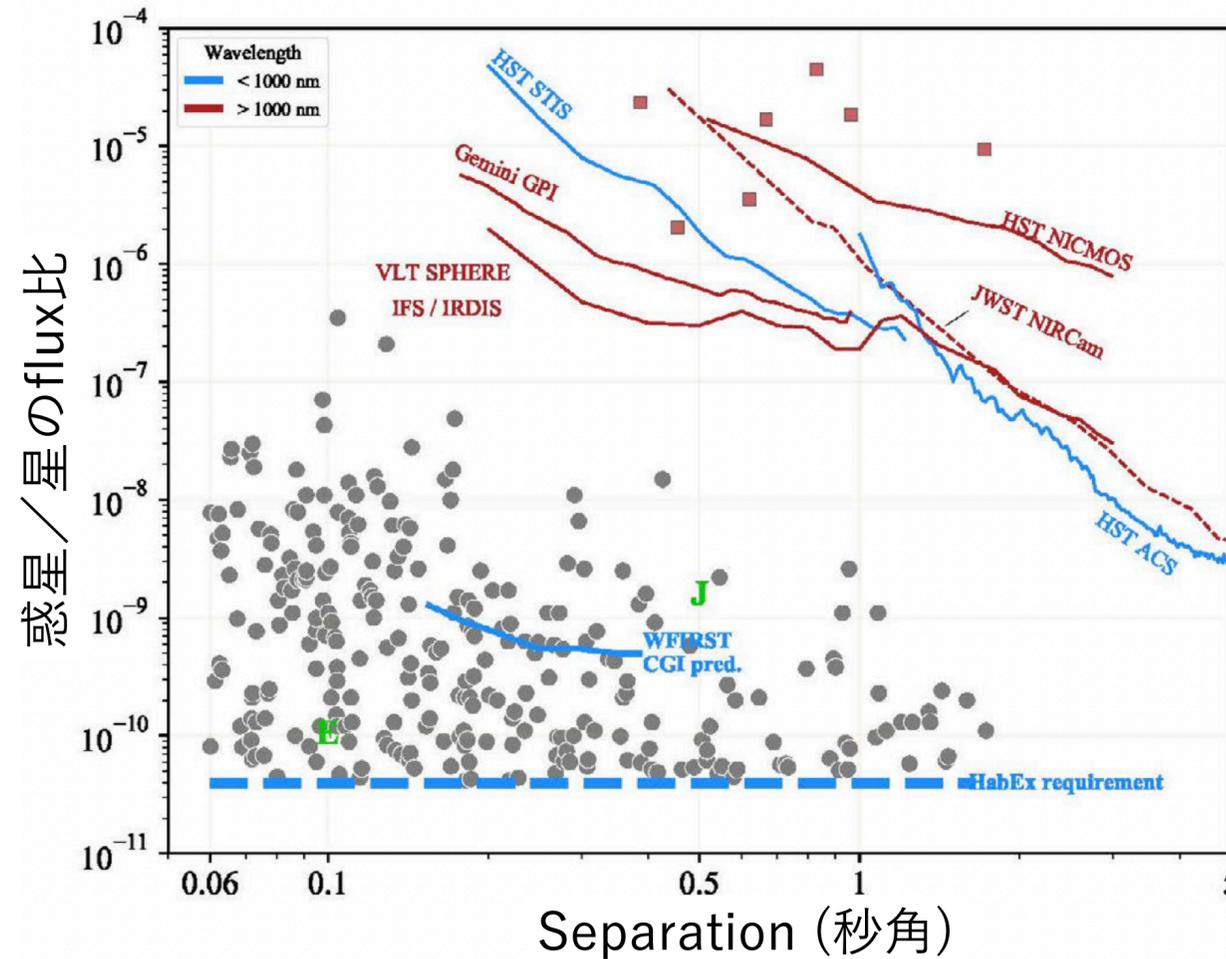
太陽型星 (~10pc) 周りの地球、木星、海王星からの反射光は、恒星 flux に対して 10^{-10} (0.1秒角), 10^{-9} (0.5秒角), 10^{-11} (3秒角)



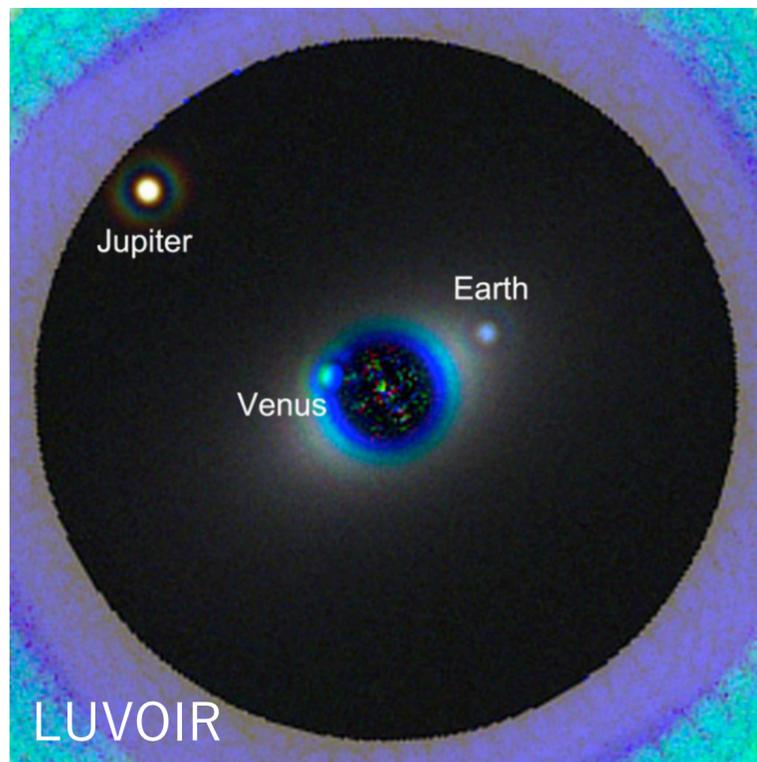
2030年代の太陽系外惑星からの反射光観測



太陽型星 (~10pc) 周りの地球、木星、海王星からの反射光は、恒星 flux に対して 10^{-10} (0.1秒角), 10^{-9} (0.5秒角), 10^{-11} (3秒角)



- 現在の10m級望遠鏡 + 極限補償光学 (SCEXAO/Subaru, SPHERE/VLT, GPI/Gemini) 検出性能 $\sim 10^{-6}$ (0.2秒角)
- Roman宇宙望遠鏡 (CGI) 目指す性能 $\sim 10^{-9}$ (~ 0.2 秒角)
- HabEx & LUVOIR 目指す性能 $\sim 10^{-10}$ ($\lesssim 0.1$ 秒角)
- TMT/PSI (Planets System Imager) 目指す性能 $\sim 10^{-8}$ (~ 0.01 秒角)



宇宙望遠鏡 — 口径(小), IWA (大), コントラスト性能(高)
太陽型星周りのHabitable planet (HZ惑星) : $\sim 20-50$ 個

30m望遠鏡 — 口径(大), IWA (小), コントラスト性能(中)
M型星周りのHZ惑星 ~ 20 個 (cf) M型星 (5pc)周りのHZ惑星 : 10^{-8} (0.01秒角)

反射光を利用した exo-Earthの解剖

反射光に内在する情報

- 表層環境 (陸, 海, 雲分布)
- 大気 (組成, T-P分布)
- 惑星の自転運動
- 植生の存在

Earth-likeな光合成生物

- Chl a, b: 680nm - 730nm (BChl b : 1-1.1 μ m)付近の反射率上昇 (i.e., **red edge**)
- 生物蛍光 (biofluorescence)

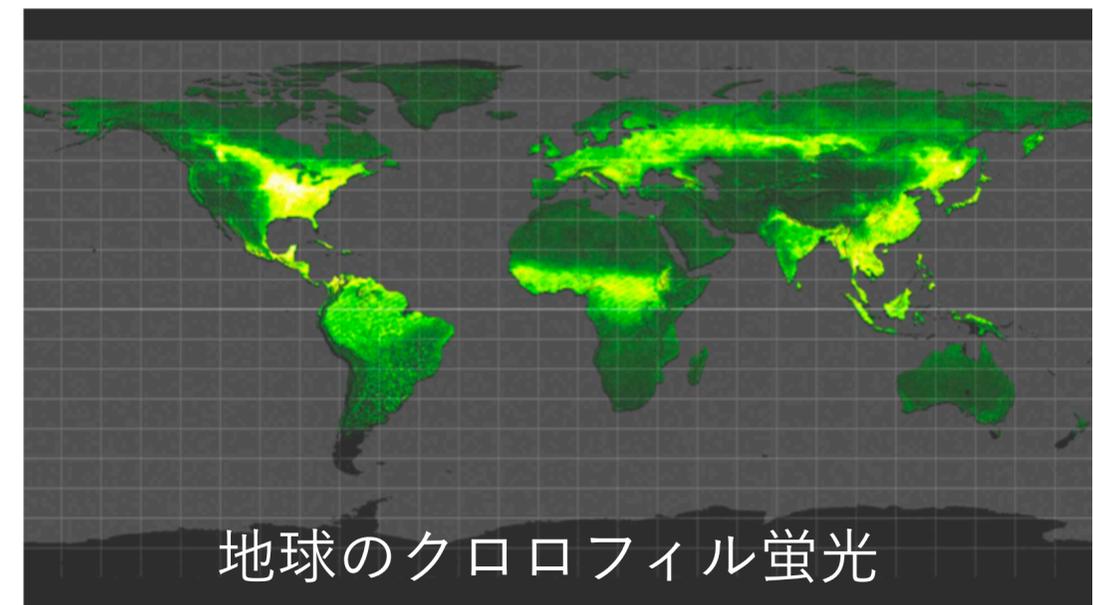
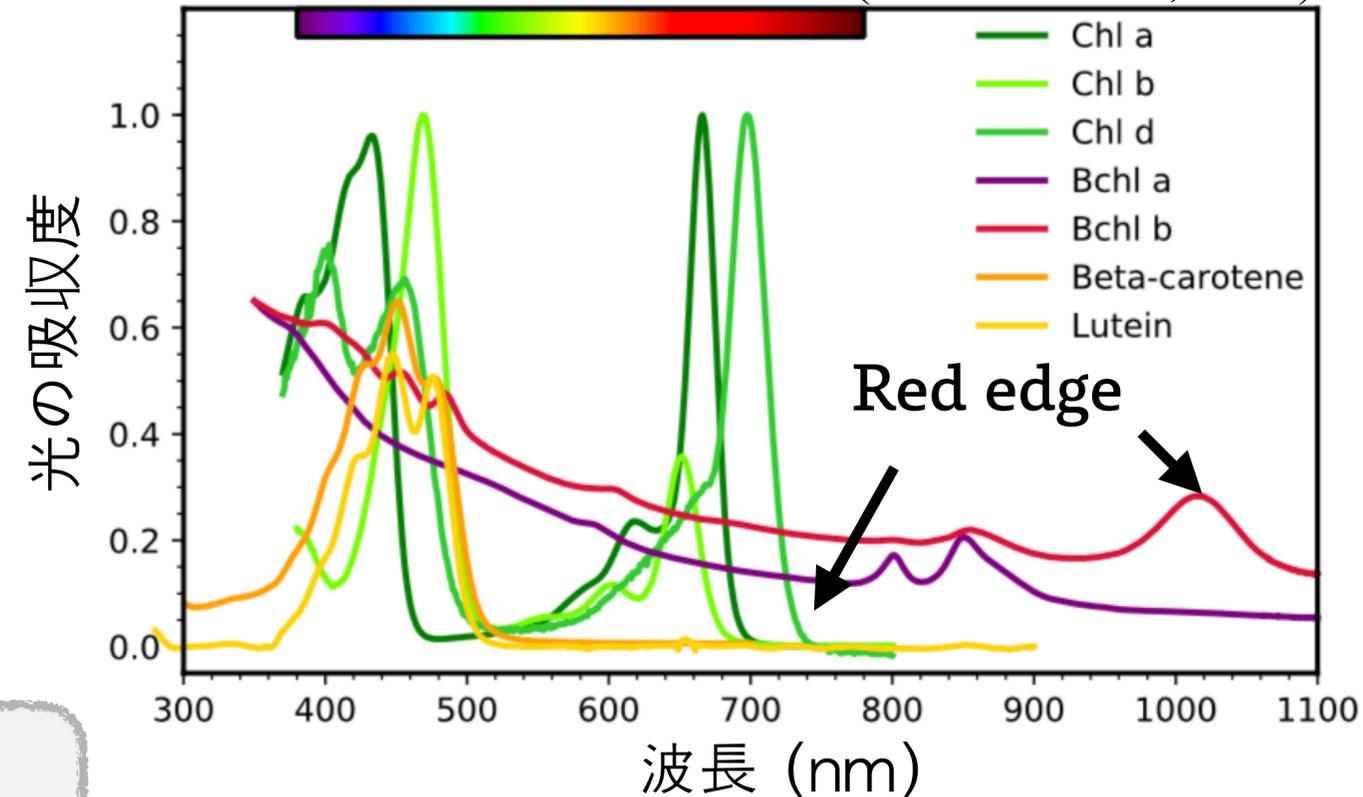
(O'Malley-James & Kaltenecker, 2016; 2018)

太陽型星周りの地球からの生物蛍光は、LUVOIRでも困難 (TRAPPIST-1のようなultracool red dwarfなら可能性あり)

(Komatsu, YH *et al.* submitted to *ApJ*)

(cf) 酸素発生型光合成生物 (Chlorophyll) (e.g.) シアノバクテリア
酸素非発生型光合成生物 (Bacteriochlorophyll) (e.g.) 紅色細菌, 緑色硫黄細菌 (CO₂+H₂S利用)

地上の光合成生物 (Schwieterman, 2018)



(O'Malley-James & Kaltenecker, 2018)

太陽系外惑星の大気の特徴付け

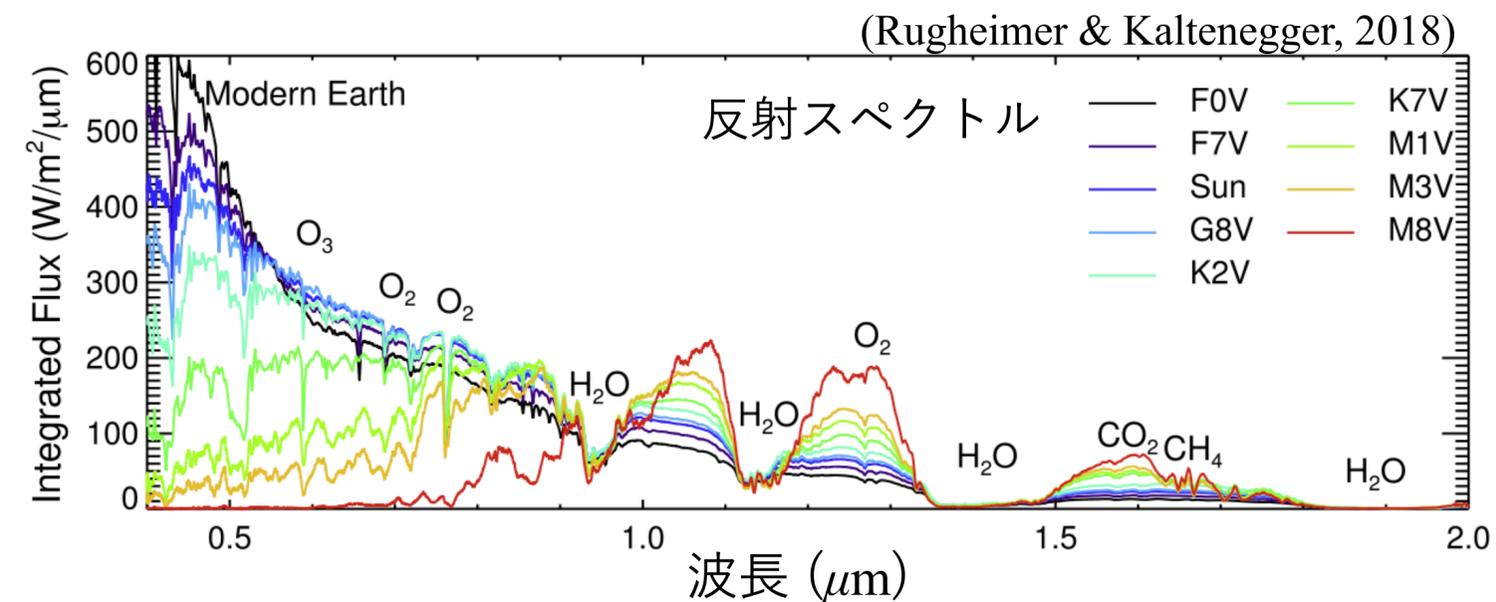
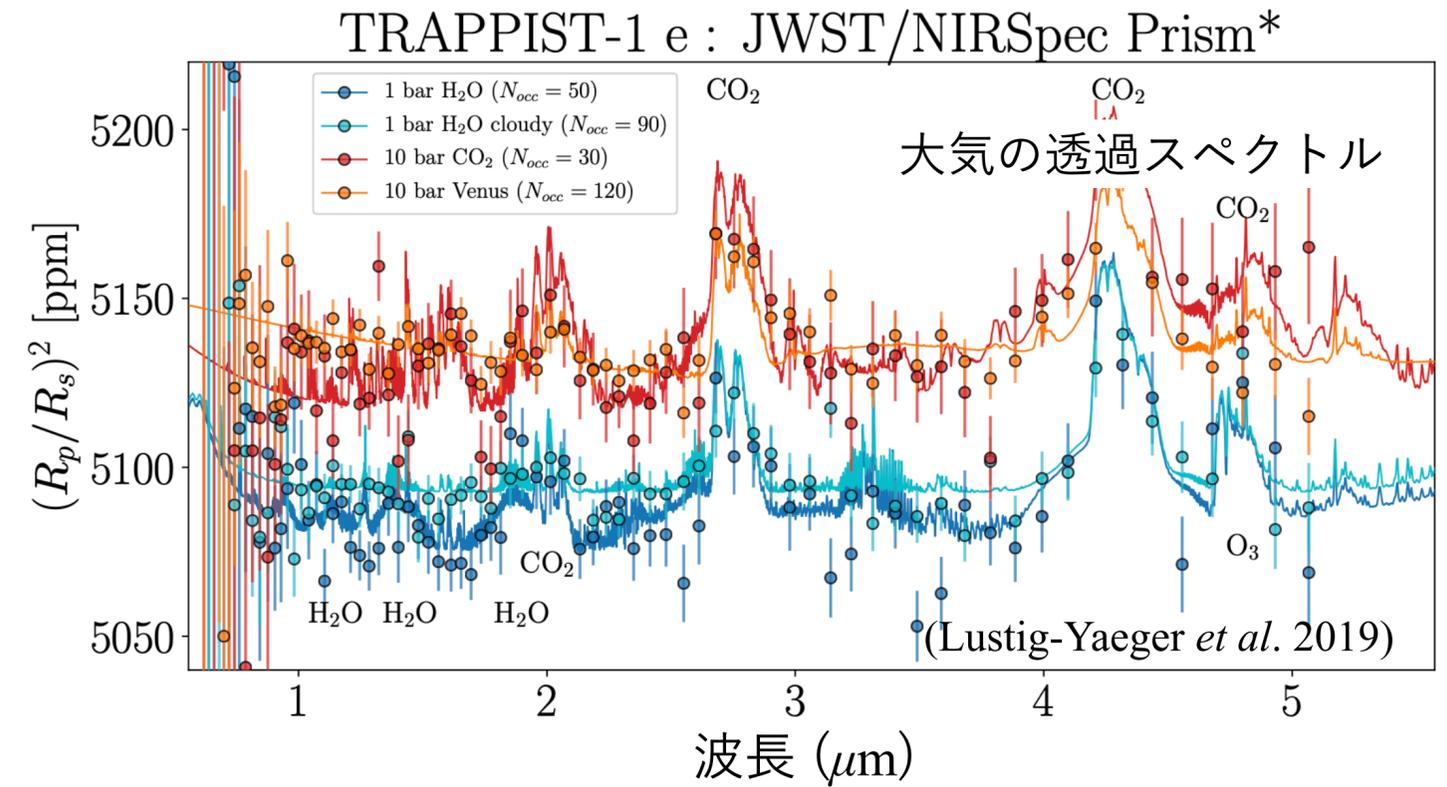
Kepler, TESS(全天惑星探査衛星)そしてPLATO衛星で発見されるトランジット惑星の
(地球型惑星から巨大惑星まで)の大気組成の解明

2020s	JWST (e.g. NIR Spec, MIRI)
2030s	ESA/Ariel
	30m級の超大型望遠鏡 (TMT) (e.g. 赤外分光IRIS, 高分散分光MODHIS)
	6m級宇宙望遠鏡 (e.g. LUVOIR)



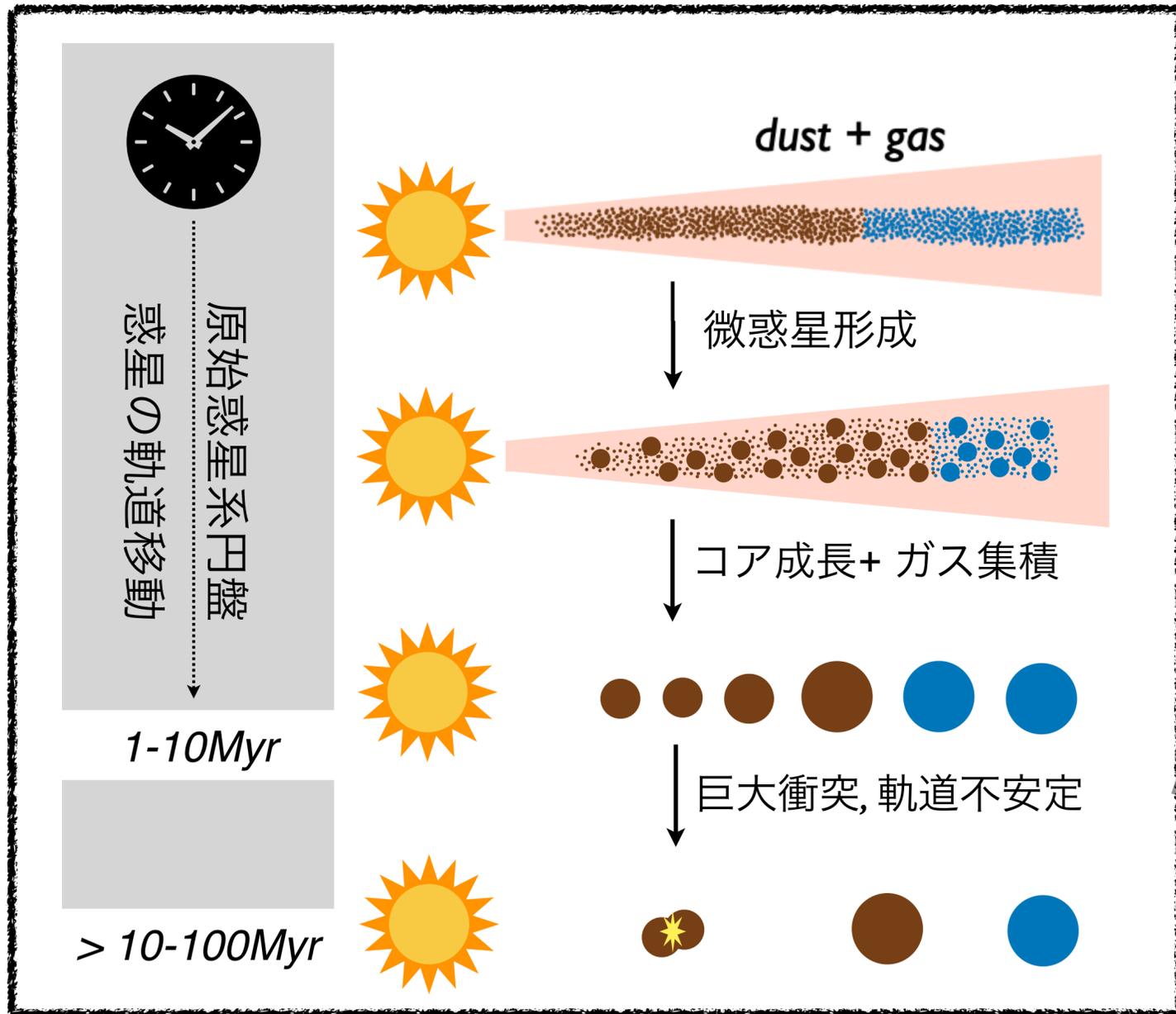
H ₂ O	表面のliquid waterの可能性	
O ₂ , O ₃ CH ₄ N ₂ O	biosignature	abioticなO ₂ (false positive) H ₂ O, COの光解離 (cf) 過剰なO ₂ : O ₂ -O ₂ CIA
H ₂ S, SO ₂ , CO ₂	火山活動	光化学反応で H ₂ SO ₄ , S ₈

(Kaltenegger *et al.* 2010; Hu *et al.* 2013; Misra *et al.* 2015; Hu *et al.* 2013; Loftus *et al.* 2019)

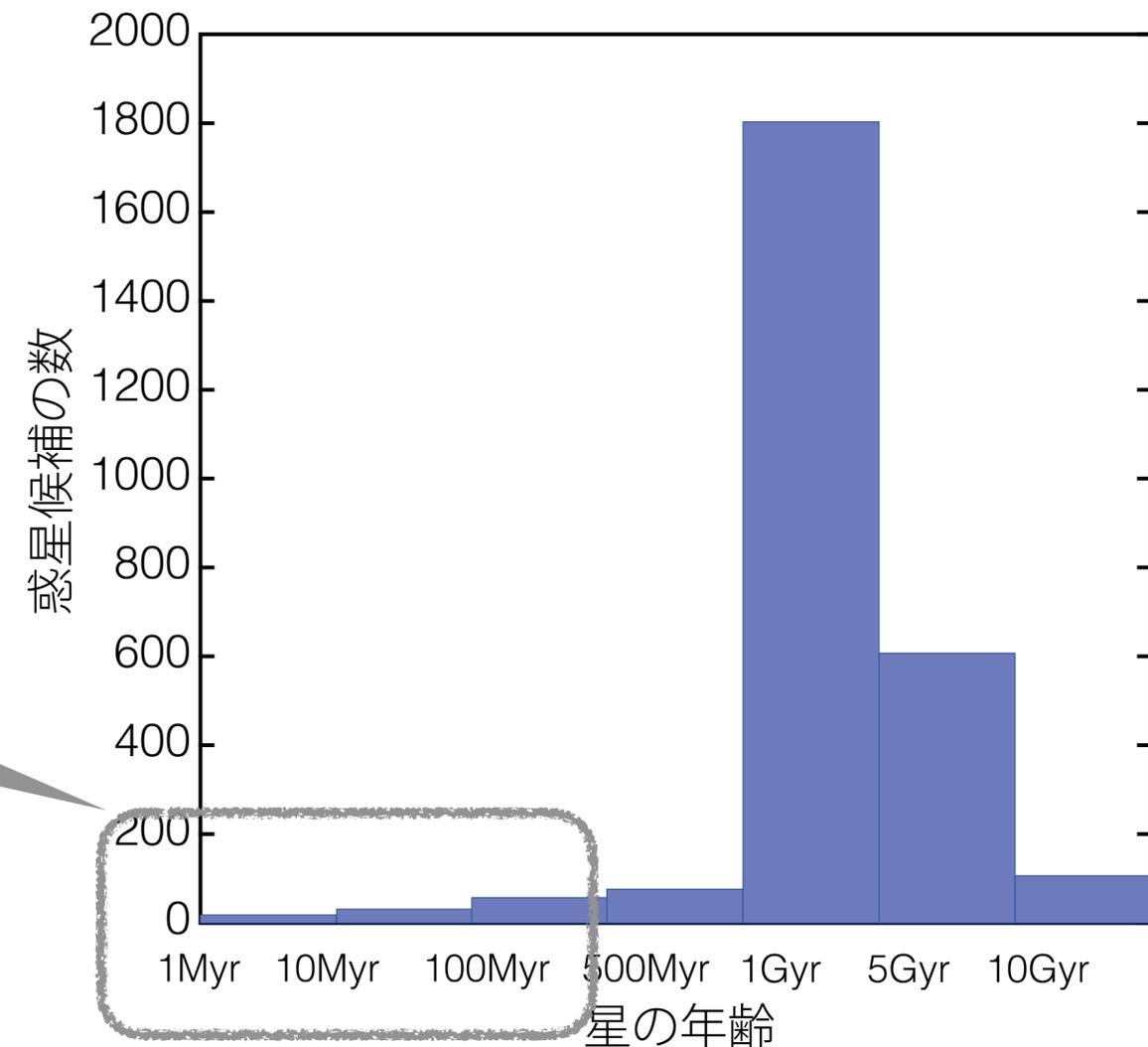


若い星周りの惑星系から汎惑星形成論へ

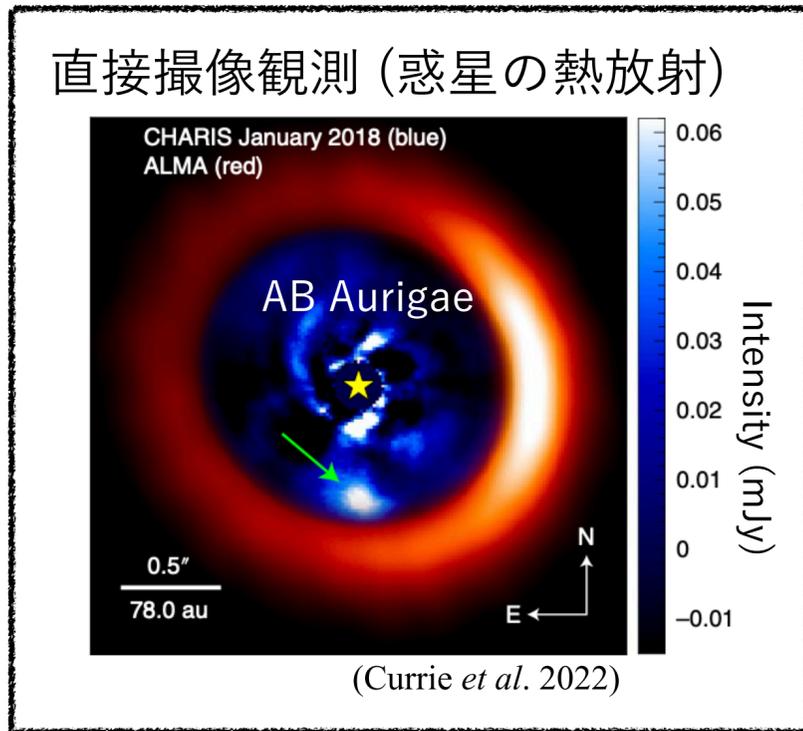
現在、発見されている太陽系外惑星系のほぼすべては 1Gyrより年老いた系
 しかし、惑星の形成および軌道進化のタイムスケール ~ 1-100Myr



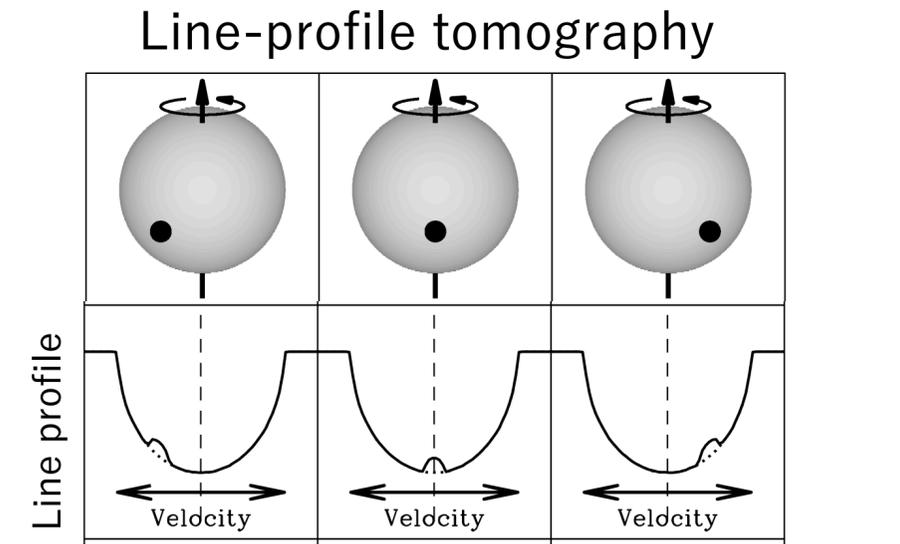
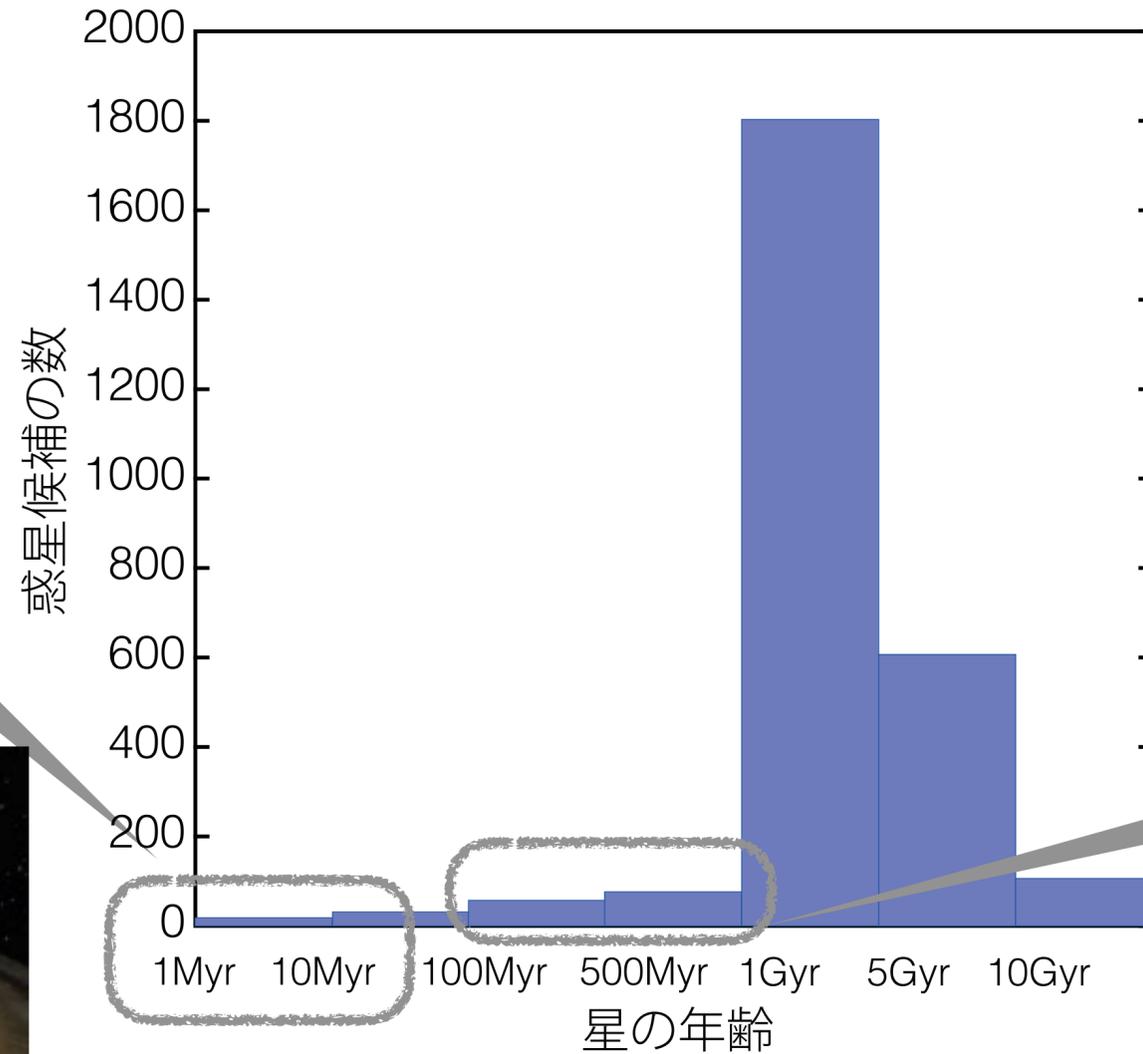
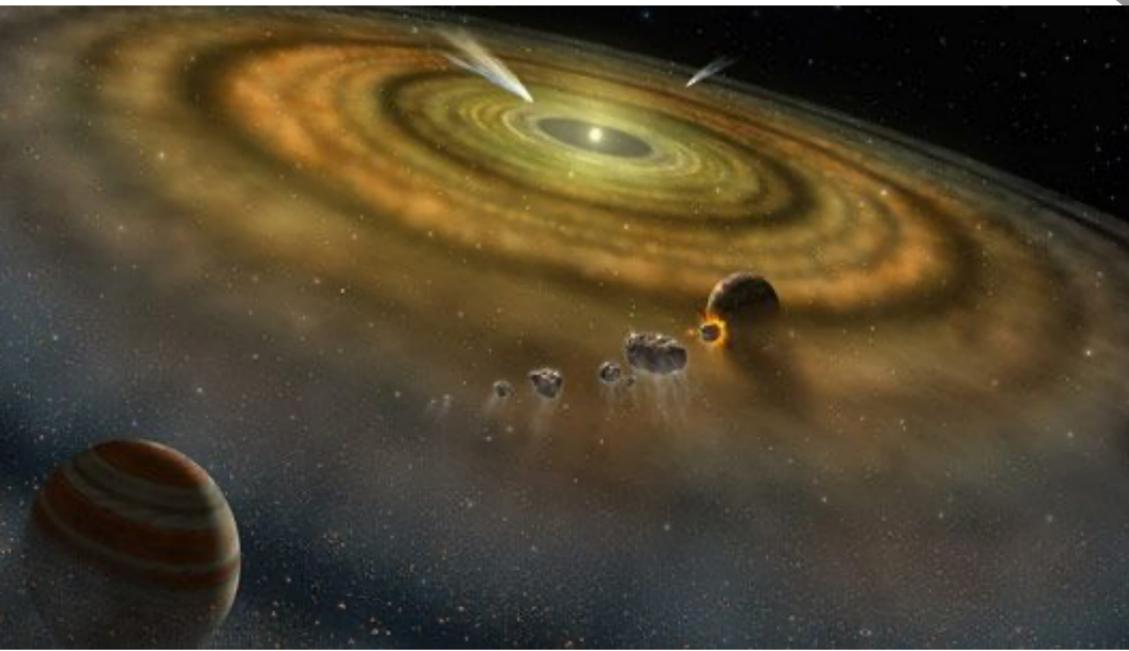
惑星の固体・ガス集積：1-10Myr
 円盤ガスとの相互作用による軌道進化：1-10Myr
 天体の巨大衝突, 惑星同士の重力散乱：10-100Myr



若い星周りの太陽系外惑星探索の現状



これまでに確認された惑星は
遠方のガス惑星



(e.g. Gaudi & Winn, 2007; Collier Cameron *et al.* 2010)

高速自転星や高温星に適用

近赤外視線速度測定

- CFHT/SPIRou
- Calar Alto/CARMENES
- HET/HPF
- Subaru/IRD

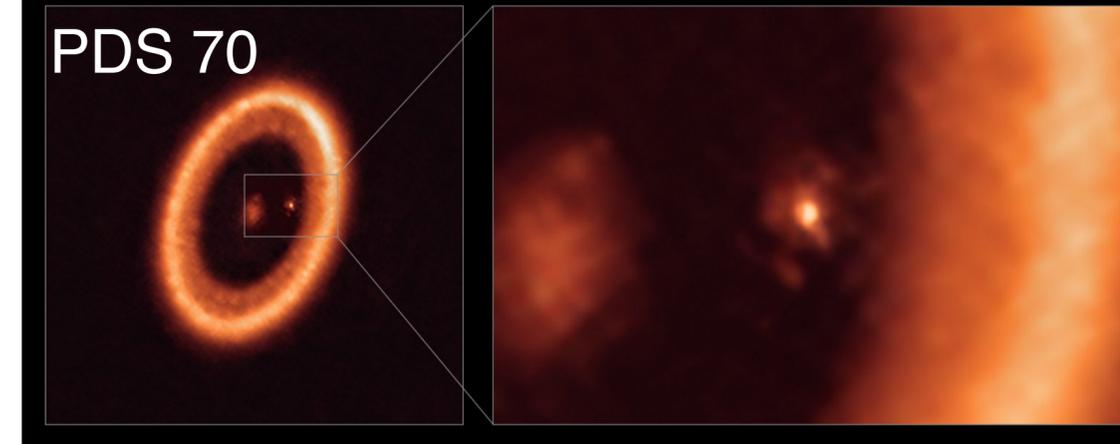


可視光RVと比較して、近赤外RVではstellar jitterの影響を見かけ上、軽減される

太陽系外衛星と惑星形成の関係

太陽系では、地球と火星、すべての巨大惑星に衛星が存在

木星と土星	周惑星系円盤とガス集積(後期段階)
地球, 火星 天王星, 海王星	巨大衝突 and/or 天体捕獲



(e.g. Wagner *et al.* 2018; Haffert *et al.* 2019; Isella *et al.* 2019; Benisty *et al.* 2021)

巨大衝突起源の衛星系：

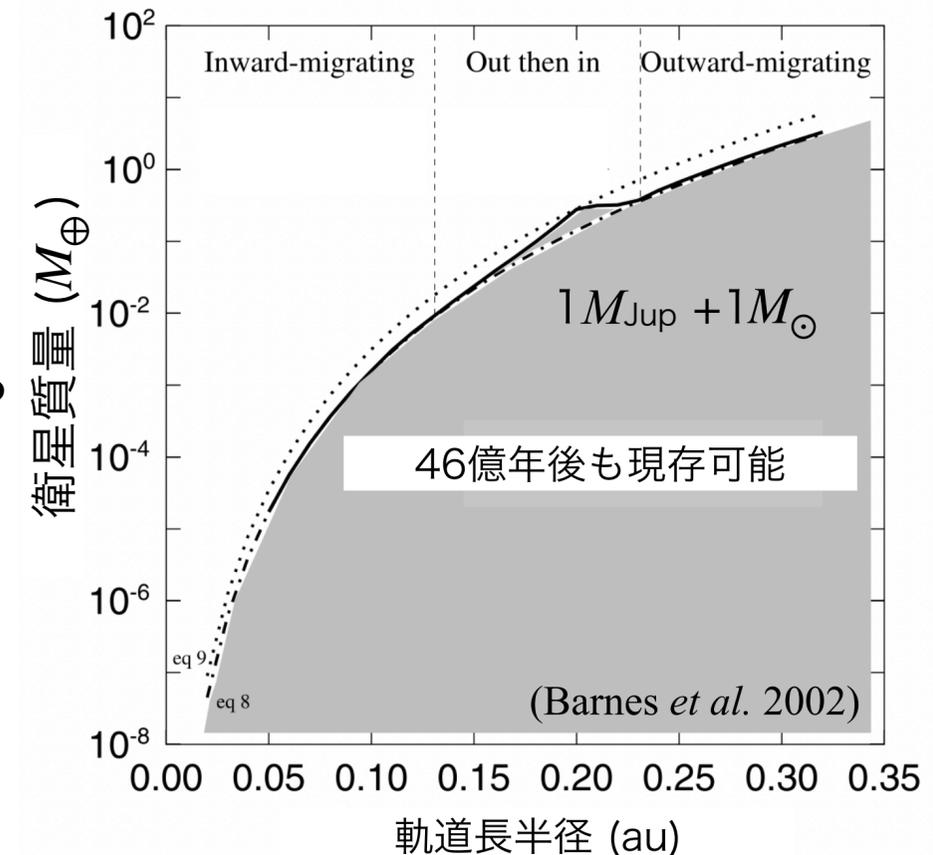
岩石惑星 (< 地球質量の6倍), 氷惑星 (< 地球質量) 周りでは形成される (Nakajima *et al.* 2022)

周惑星系円盤で形成される衛星系：

(遠方の) **ガス惑星** では、質量が大きな惑星は複数の大きな衛星を持つ？
(Fujii, Ogihara, & YH, *submitted*)

(cf) 衛星の潮汐軌道進化の観点では、
短周期ガス惑星 (< 0.1 au) では月より大きな衛星は数10億間、存在できない？
(e.g. Barnes *et al.* 2002)

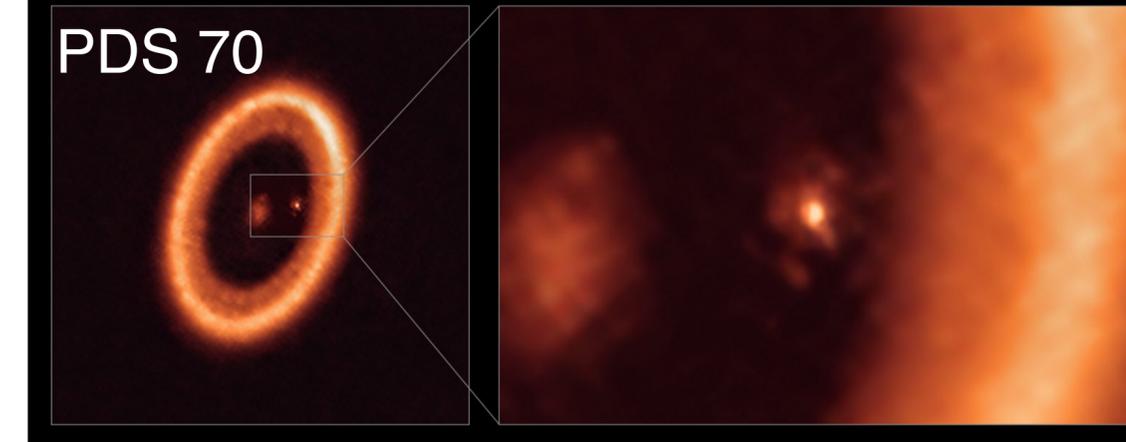
低質量なスーパーアース周り or 遠方の巨大ガス惑星周りでは、
衛星系の存在が理論的には期待される



太陽系外衛星と惑星形成の関係

太陽系では、地球と火星、すべての巨大惑星に衛星が存在

木星と土星	周惑星系円盤とガス集積(後期段階)
地球, 火星 天王星, 海王星	巨大衝突 and/or 天体捕獲



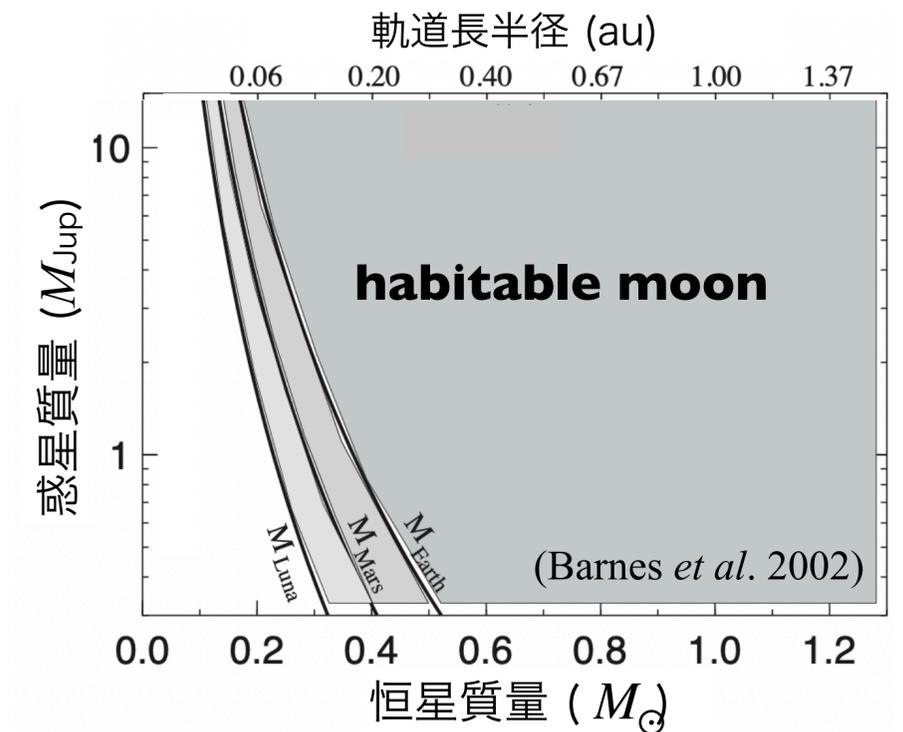
(e.g. Wagner *et al.* 2018; Haffert *et al.* 2019; Isella *et al.* 2019; Benisty *et al.* 2021)

巨大衝突起源の衛星系：

岩石惑星 (< 地球質量の6倍), 氷惑星 (< 地球質量)周りでは形成される (Nakajima *et al.* 2022)

周惑星系円盤で形成される衛星系：

(遠方の)ガス惑星では、質量が大きな惑星は複数の大きな衛星を持つ？
(Fujii, Ogihara, & YH, *submitted*)



太陽系外衛星の検出に向けて

太陽系外衛星の兆候として、

- 1) 惑星のトランジット周期の変動 (TTV : Transit Timing Variation)
- 2) 惑星のトランジット継続時間の変動 (TDV : Transit Duration Variation)

(Sartoretti & Schneider, 1999; Szabo *et al.* 2006; Simon *et al.* 2007; Kipping, 2009)

$$\Delta t_{\text{TTV}} \sim 36 \chi \left(\frac{M_{\text{moon}}}{M_{\oplus}} \right) \left(\frac{M_{\text{P}}}{M_{\text{Jup}}} \right)^{-2/3} \left(\frac{M_{\star}}{M_{\odot}} \right)^{-1/3} \left(\frac{P_{\text{p}}}{1 \text{ yr}} \right) f(e_{\text{p}}, e_{\text{moon}}, \bar{\omega}_{\text{p}}, \bar{\omega}_{\text{p}}) \text{ mins}$$

ここで、衛星の軌道長半径 $a_{\text{moon}} = \chi r_{\text{Hill}}$, $\frac{\Delta t_{\text{TDV}}}{\Delta t_{\text{TTV}}} \sim \frac{2\pi\sqrt{3}}{\chi^{3/2}} \frac{T_{\text{transit}}}{P_{\text{p}}}$

Kepler宇宙望遠鏡が発見した惑星候補に対しての衛星探索はnull

(Kipping *et al.* 2013a; 2013b; 2014; 2015)

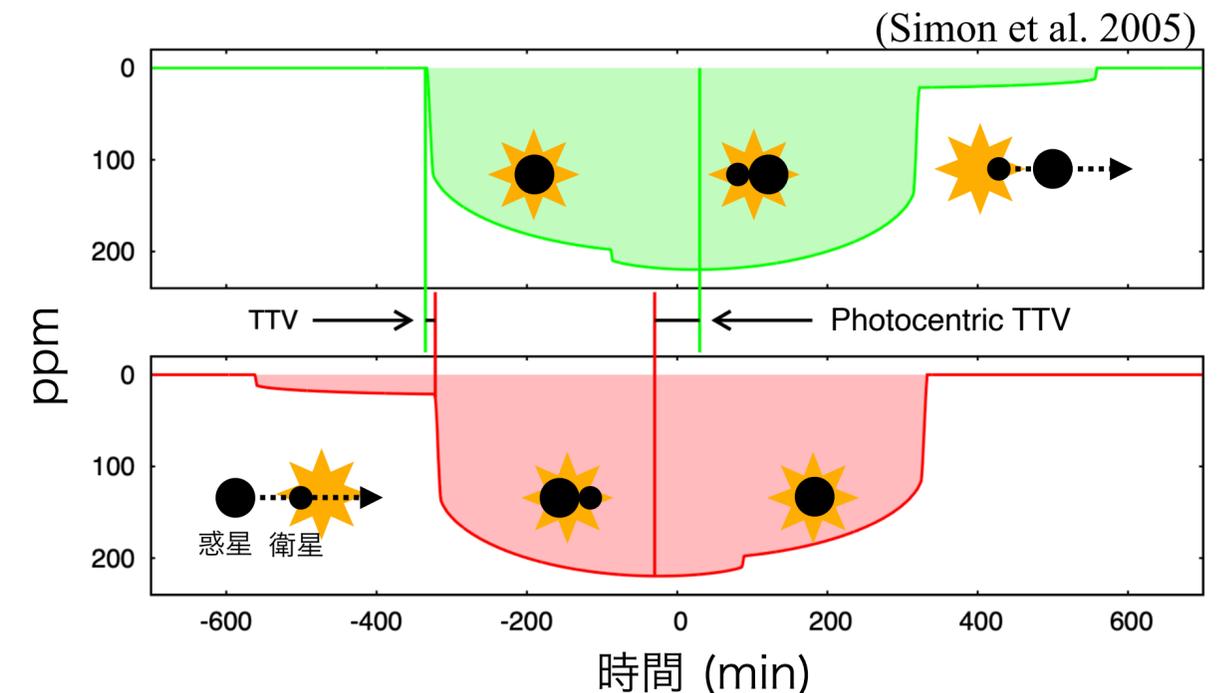
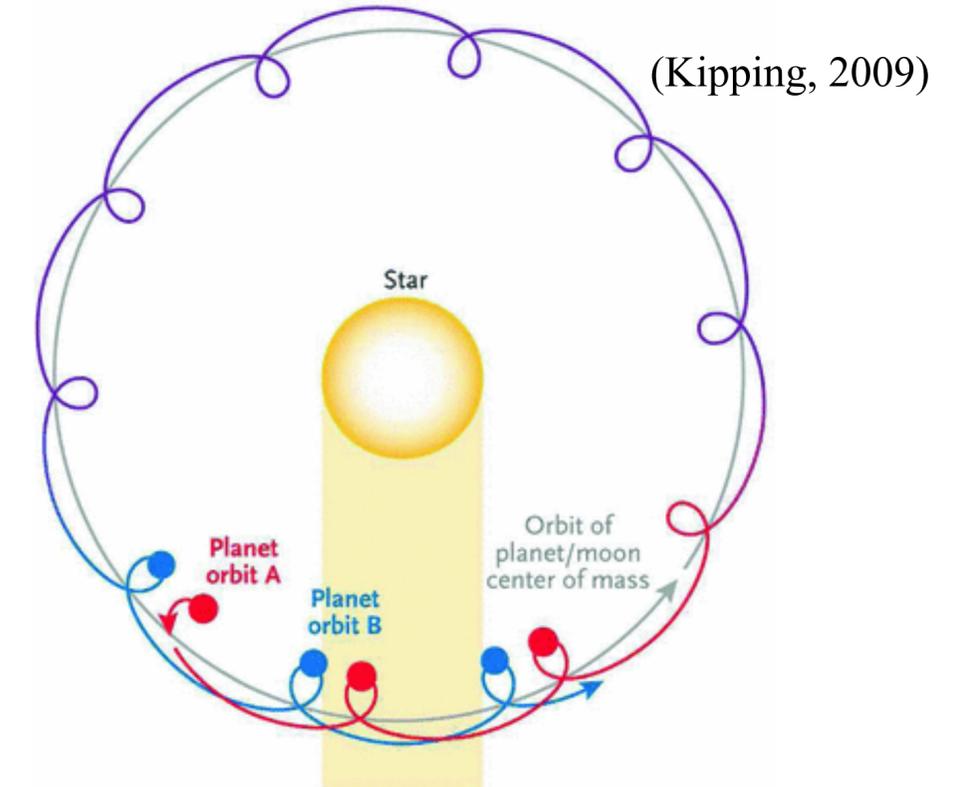
~~Kepler-1708b-i (Kipping *et al.*, 2022)
(Super-Earth + Jupiter@1.64 au)~~

衛星よりも**連惑星?**

(cf) Kepler-1625b-i (Teachey & Kipping, 2018; Kipping, 2020)

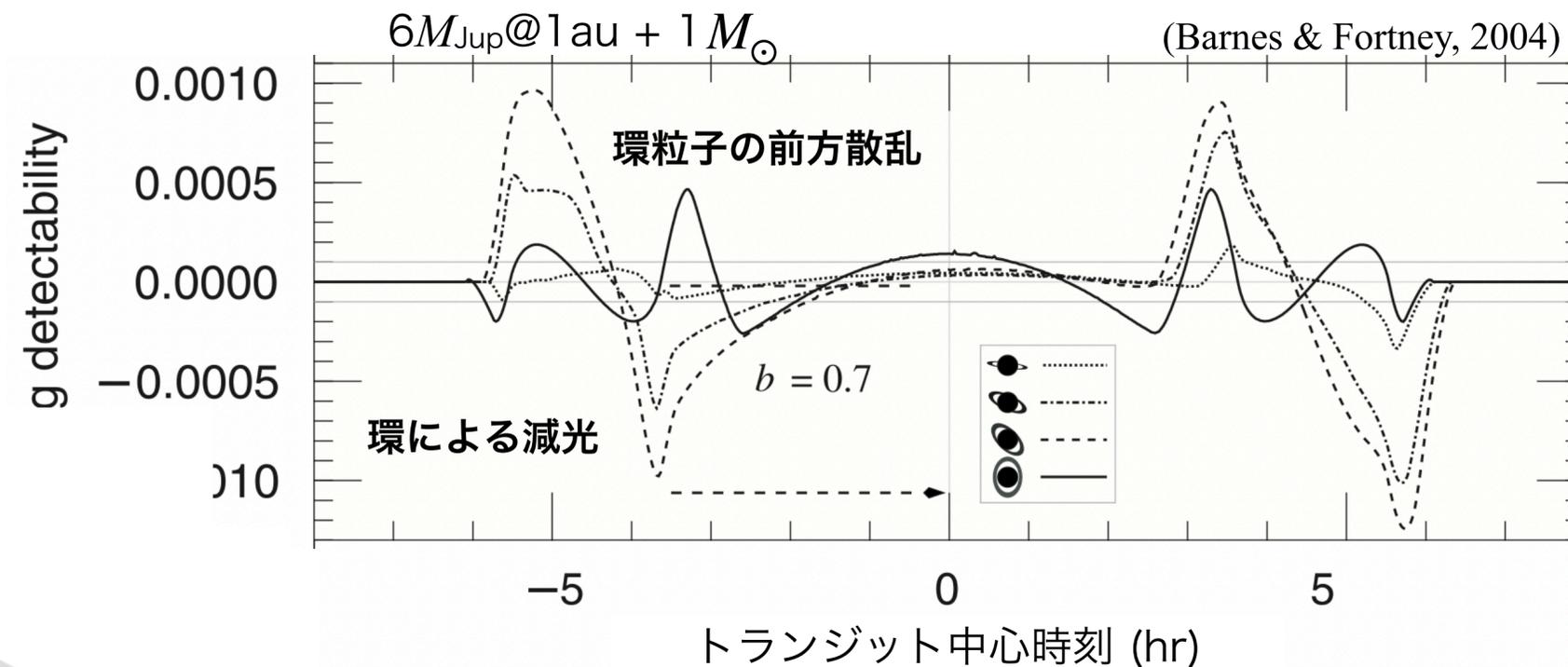
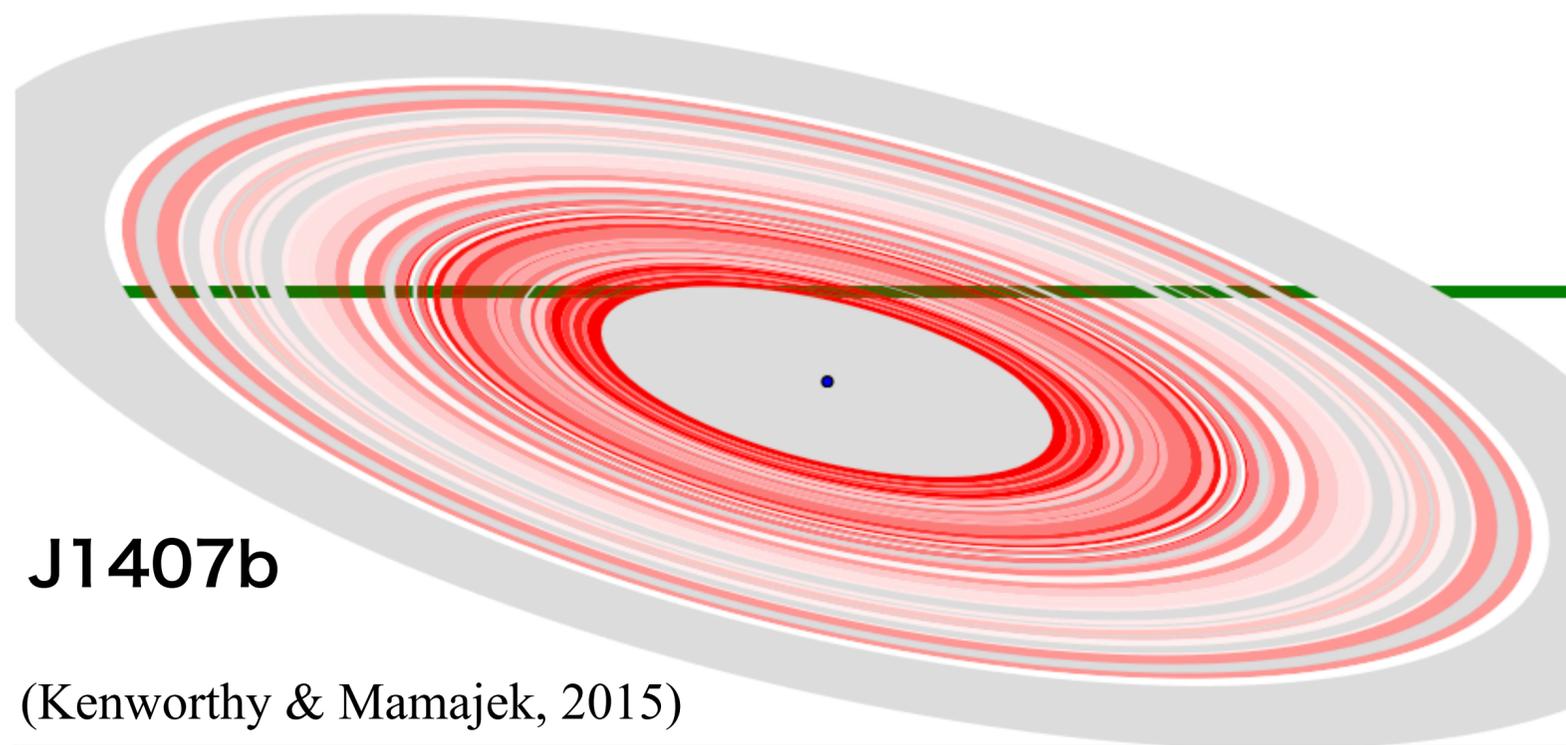
(Neptune + Jupiter-sized@0.98 au)

But no evidence? (Heller *et al.* 2019; Kreidberg *et al.* 2019)



太陽系外惑星のリング検出に向けて

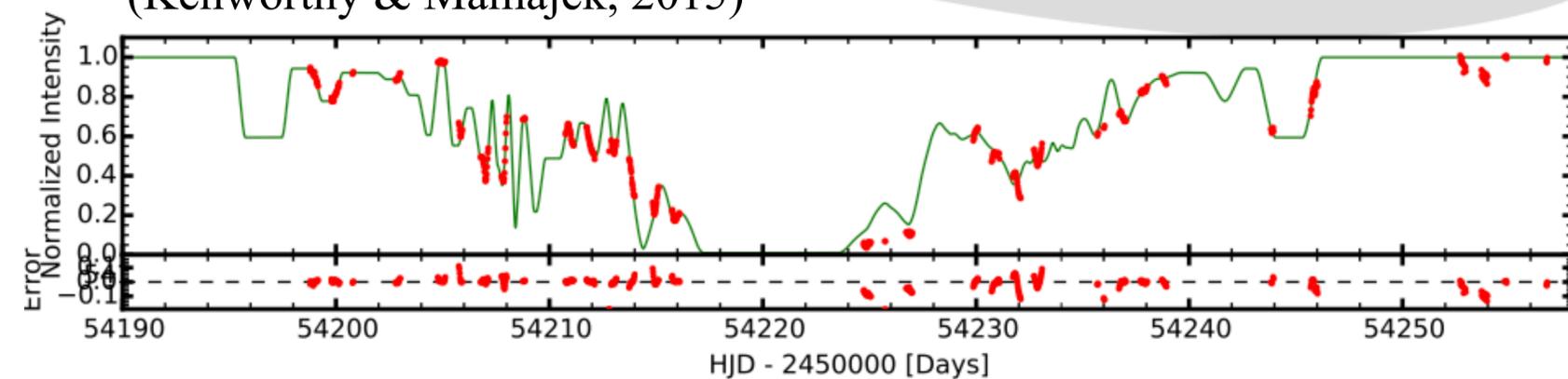
太陽系外惑星のリングの兆候として、
非軸対称で不規則な減光現象



1SWASP J140747 (J1407)

0.9倍の太陽質量, 16Myr, Sco-Cen OB association

37 ring モデル (~100倍の月質量, 0.6au)



太陽系外惑星の磁場の存在

導電性流体中の対流および回転運動で生じる電流によって、惑星の磁場生成 (ダイナモ機構)



(cf) 太陽系で固有磁場を持つ天体：水星、地球、木星、土星、天王星、海王星、(恐らく、ガニメデ)

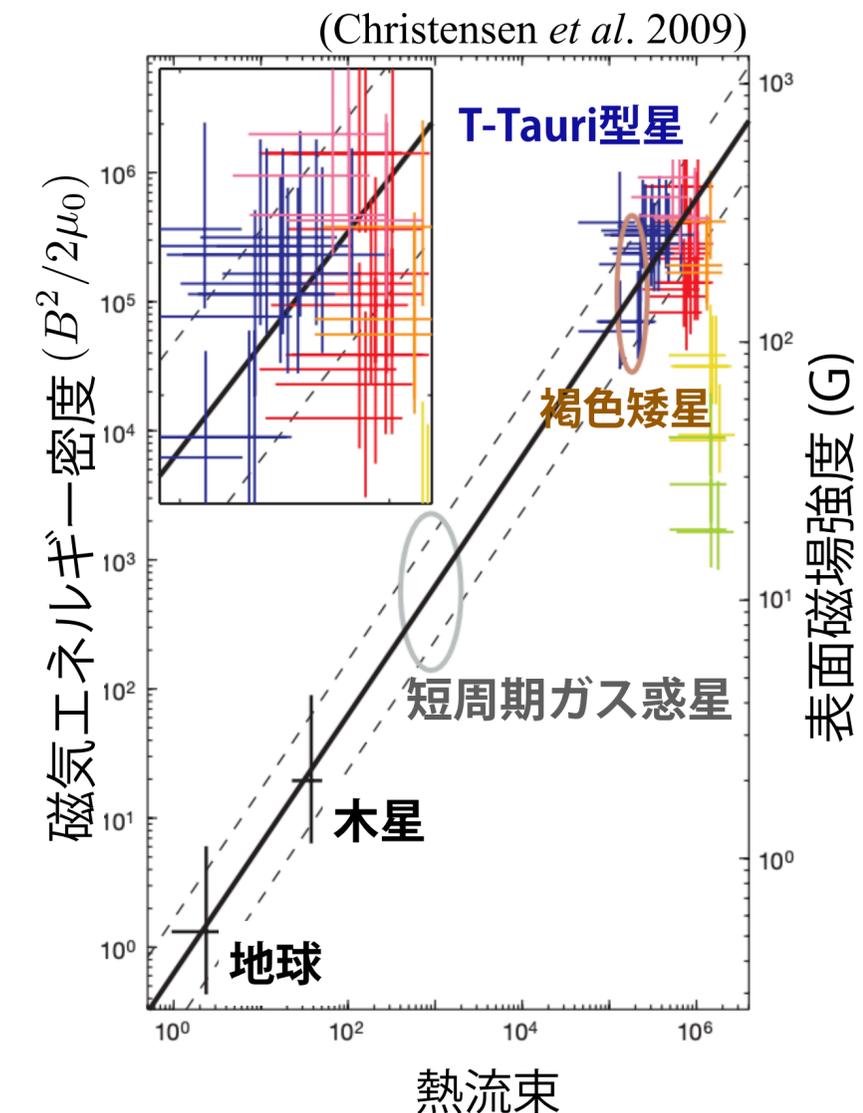
「惑星の磁場検出および強度は、惑星の内部構造や熱史、そして生命居住可能性に対する情報」

太陽系外惑星でも固有磁場の存在は理論的には期待される

ガス惑星：質量の大きな惑星ほど表面磁場強度 (大) (Yadav & Thorgren, 2017; YH, 2021)

氷惑星：H₂/He大気量が少ない (< 1wt%) 場合は、
軽い惑星 (地球質量の数倍程度)のみ磁場生成? (Tian & Stanley, 2013)

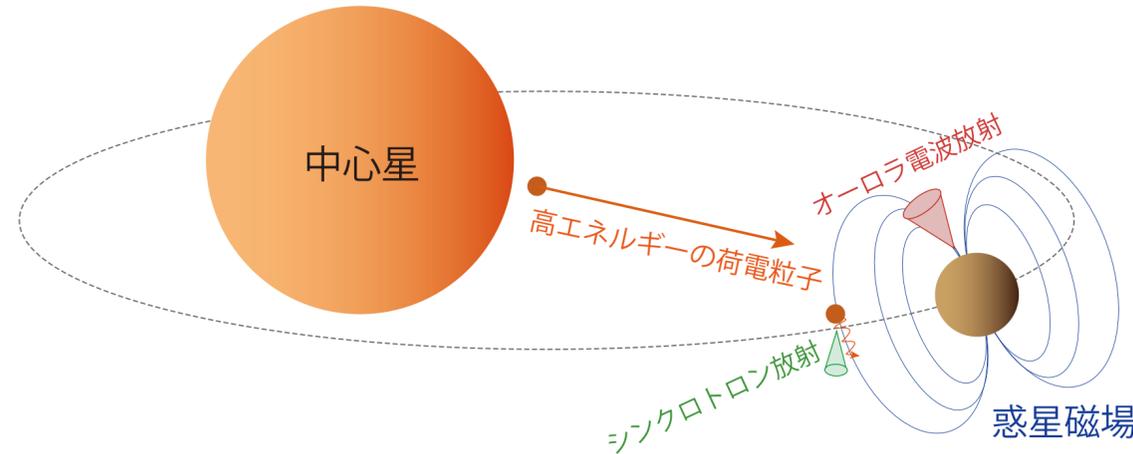
岩石惑星：super-Earthでは質量が軽く (< 数倍の地球質量)、表面温度の高い、
自転周期が短い (< 数日) 方が磁場保持の可能性が高い
(e.g. Gaidos *et al.* 2011; Tachinami *et al.* 2011; Zuluaga *et al.* 2011)



太陽系外惑星の磁場の検出に向けて

① 惑星磁場と恒星風・コロナ質量放出に伴う高エネルギーの荷電粒子と惑星磁場の相互作用

(e.g. Grißmeier *et al.* 2005; 2007)



(a) シンクロトロン放射

磁場中の電子の加速運動による放射光

(b) オーロラ電波放射

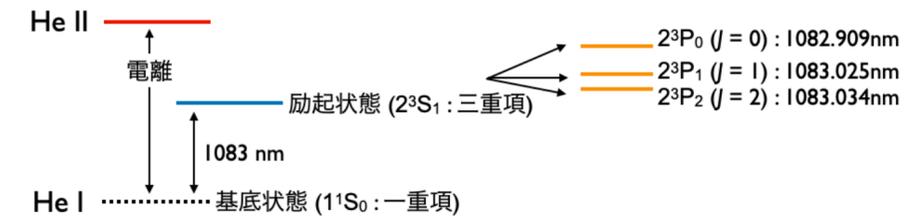
電子サイクロトン・メーザー不安定 (CMI) によって、進行方向の前方に円錐形にビーミングされて放射される電波

② Zeeman効果による原子のスペクトル線の分裂, (磁場の方向に応じて) 直線偏光 or 円偏光

< 1G では、磁場中での原子の整列

< 1 kGでは、Hanle効果で原子レベルの直線偏光の方向や偏光度が変調

Paschen-Back 効果による原子のスペクトル線の分裂



(e.g.) He三重項 (Oklopčić & Hirata, 2018; Oklopčić *et al.* 2020)

③ 恒星と短周期惑星の磁氣的相互作用 (SPI) → 恒星の彩層活動の変動 (e.g. Shkolnik *et al.* 2003; 2005)

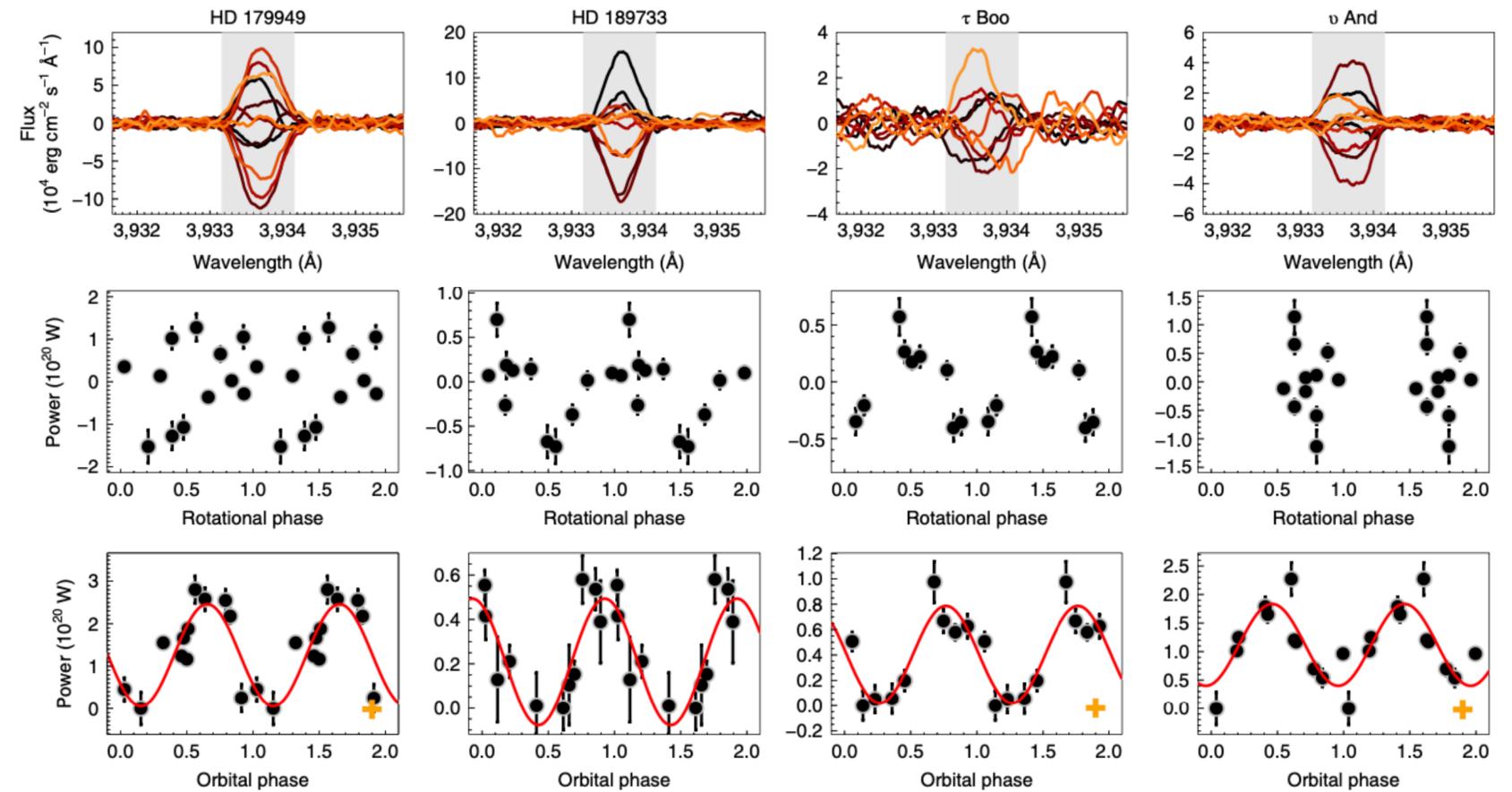
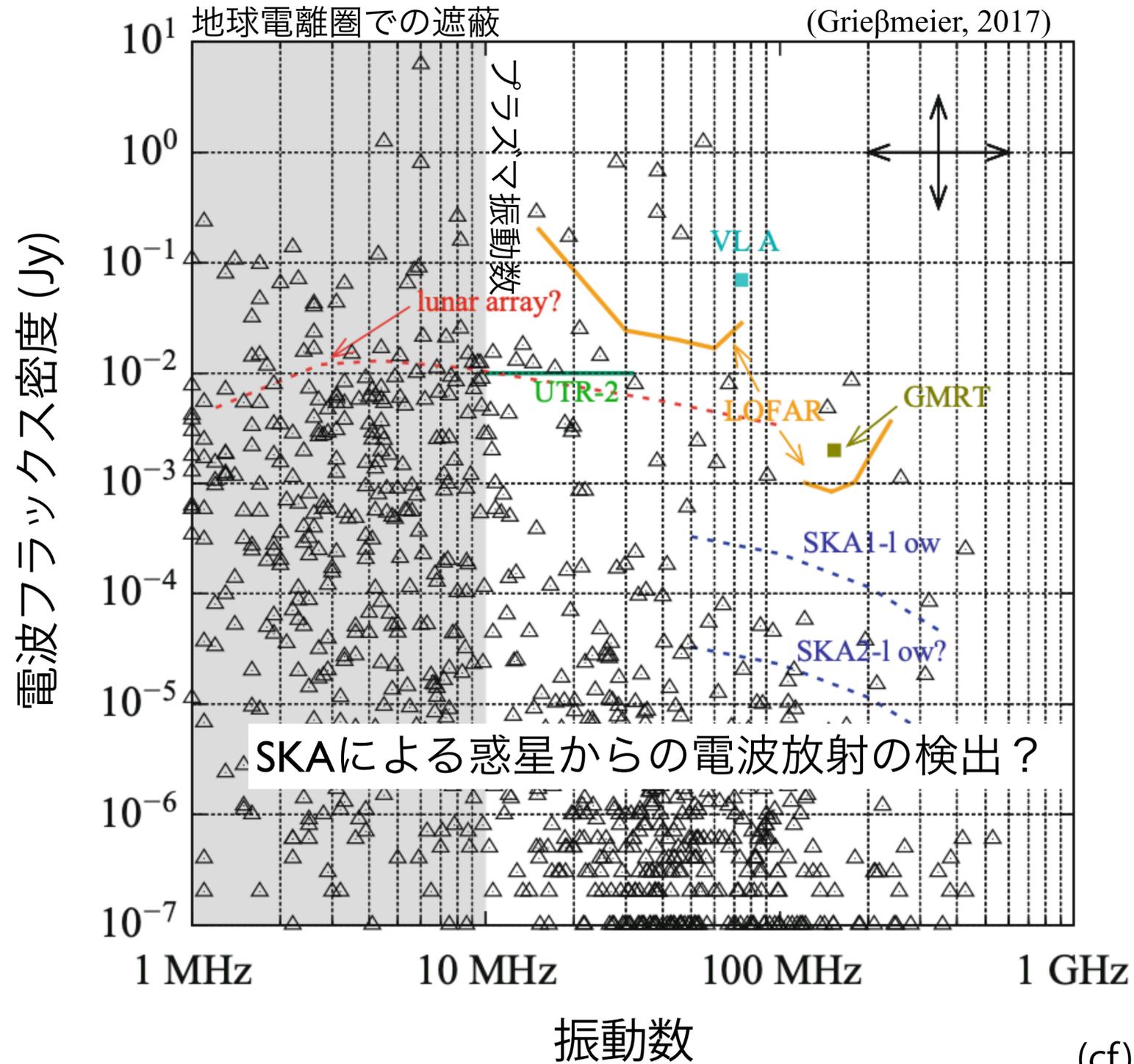
(e.g.) 磁気リコネクション (Cuntz *et al.* 2000), Alfvén波の伝播 (e.g. Saur *et al.* 2013), 磁気ループ (Lanza, 2013)

④ 惑星から流失する大気の挙動 (e.g. tail) → magnetotailの推定

HAT-P-11b からの流出する HI および CIIから、1-5G程度の磁場を有する? (Ben-Jaffel *et al.* 2022)



太陽系外惑星の電波観測の現状



短周期ガス惑星を持つ星 (HD 179949, HD189733, τ Boötis, ν Andromedae)のCa II K (3933.66Å) flux強度変動と惑星の公転周期の相関 (Cauley *et al.* 2019)

(cf) LOFAR (14-21MHz)で τ Boötisから円偏光放射 (~890mJy)を検出?? (惑星由来?) (Turner *et al.* 2021)

2030sの太陽系外惑星・アストロバイオロジー研究

2020年代後半から2030年代の ground- and space-based 太陽系外探査

太陽型星周りのHZに位置する地球サイズの惑星の存在：超高精度視線速度測定, PLATO

低質量星周りでの地球サイズから巨大惑星の分布：Roman宇宙望遠鏡

1 au以遠での土星質量以上のガス惑星の分布：Gaia (-NIR), JWST

若い星 (< 数億年)周りの惑星分布：近赤外視線速度測定, 極限補償光学/30m級大型望遠鏡



汎惑星形成論 (e.g. 惑星の軌道進化, 遠方惑星の形成過程) の確立
太陽型星周りの“地球”の存在頻度の推定

2030年代の6m級宇宙望遠鏡および30m級の大型望遠鏡の登場

近傍の太陽型星およびM型星周りの“地球”や“木星”の高コントラスト撮像

“地球”の大気組成, 表層環境などの情報

太陽系外衛星の発見



ハビタブル惑星の大気でのbiosignatureの探査

衛星系形成を含めた包括的な惑星形成の理解の深化