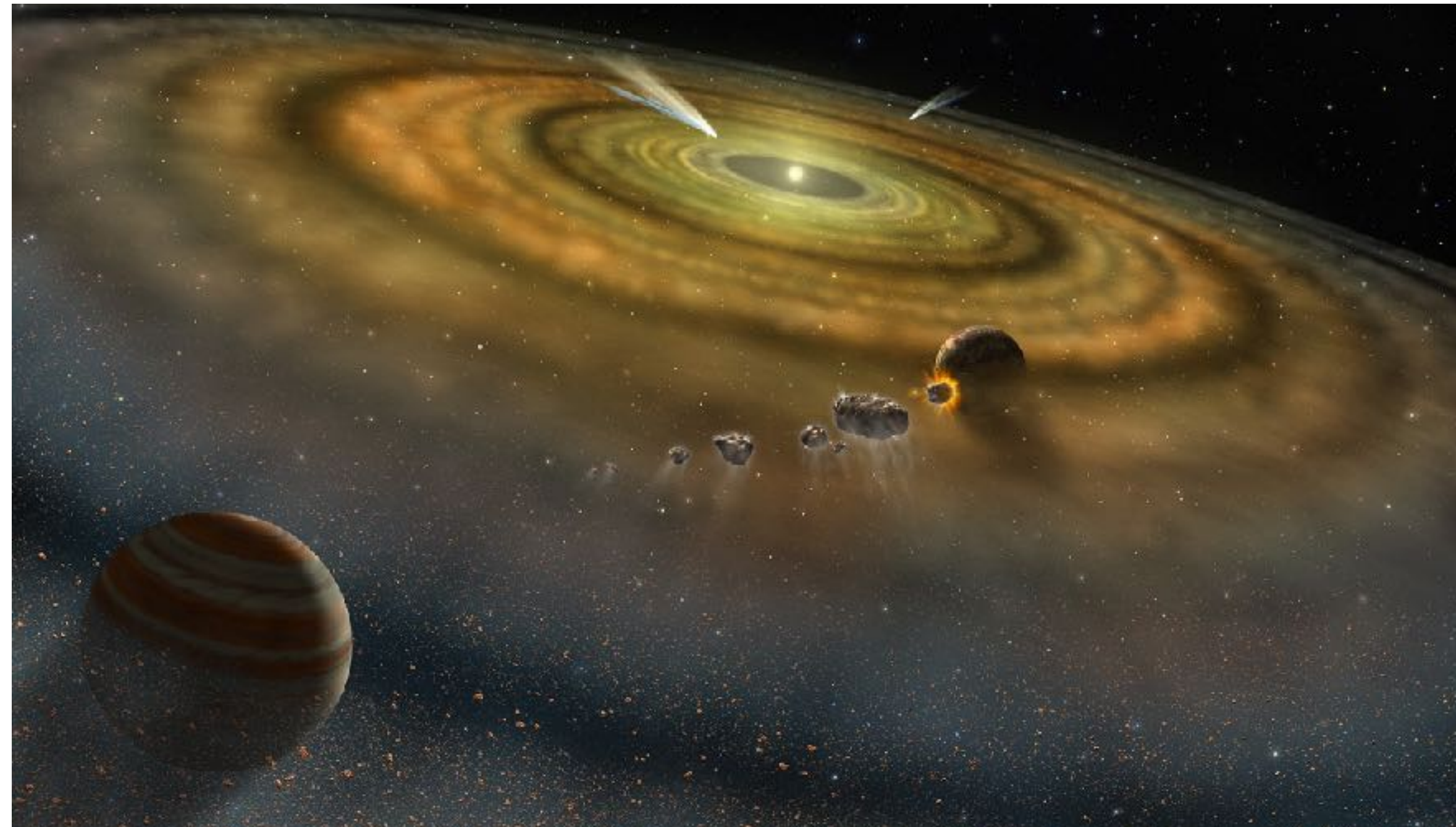


地球惑星圏物理学

第2回：原始惑星系円盤・太陽系外惑星



黒川 宏之

東京工業大学 地球生命研究所

hiro.kurokawa@elsi.jp

小レポート課題(4/15 17時締切)

地球の表面は7割が海に覆われており，その平均深さは約4kmである．海水の総質量をkgの単位で求めよ．また地球総質量に占める海水の割合を求めよ(答えは有効数字1桁の精度とする)．地球の質量・半径、水の密度は講義資料中の値を用いてよい．

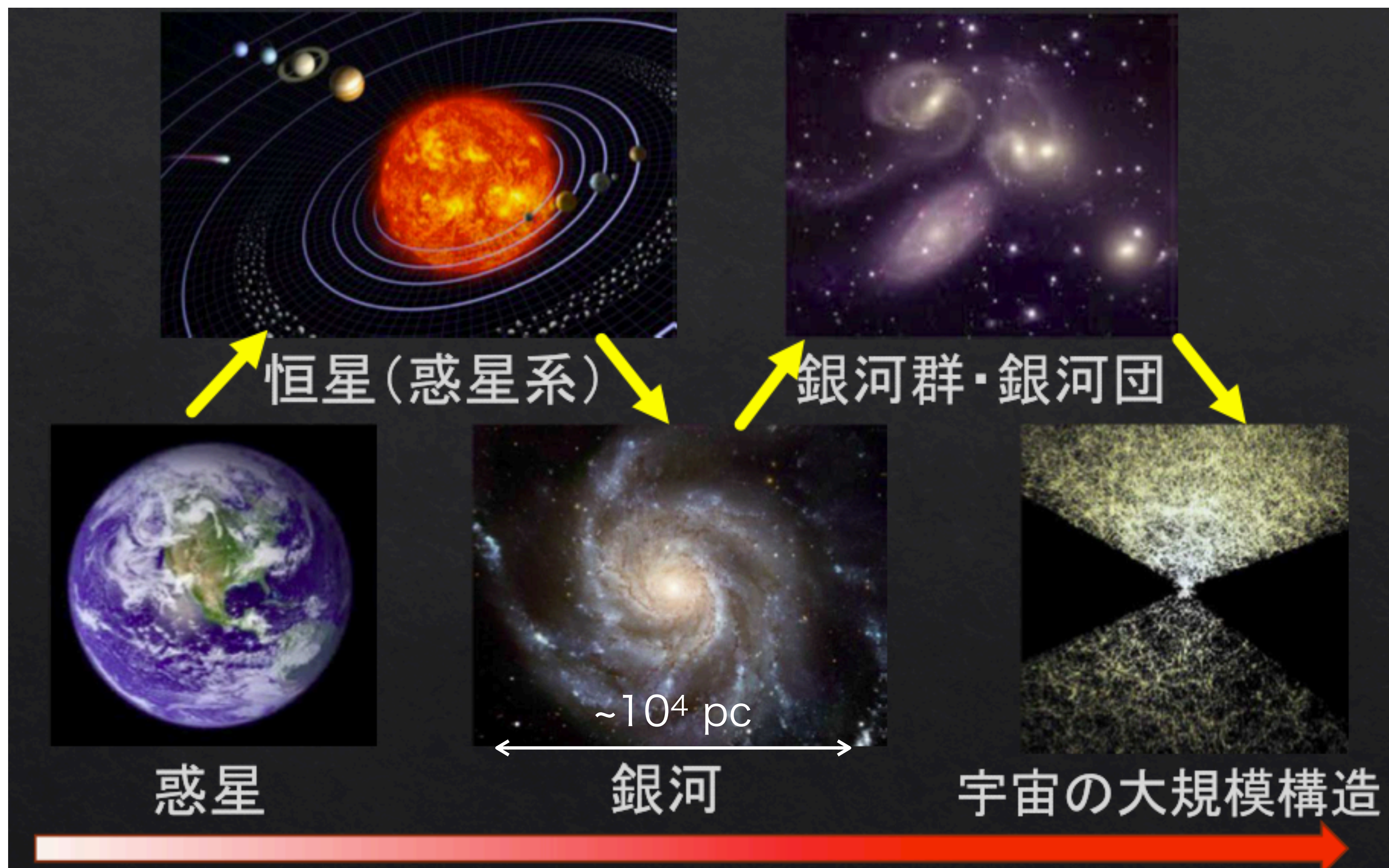
地球半径を R_E ，海の深さを h ，密度を ρ とすると，
海水の総質量 M_{ocean} および地球質量に占める割合 f_{ocean} は

$$M_{\text{ocean}} \sim 0.7 \times 4\pi R_E^2 \times h \times \rho$$

$$f_{\text{ocean}} \equiv \frac{M_{\text{ocean}}}{M_E}$$

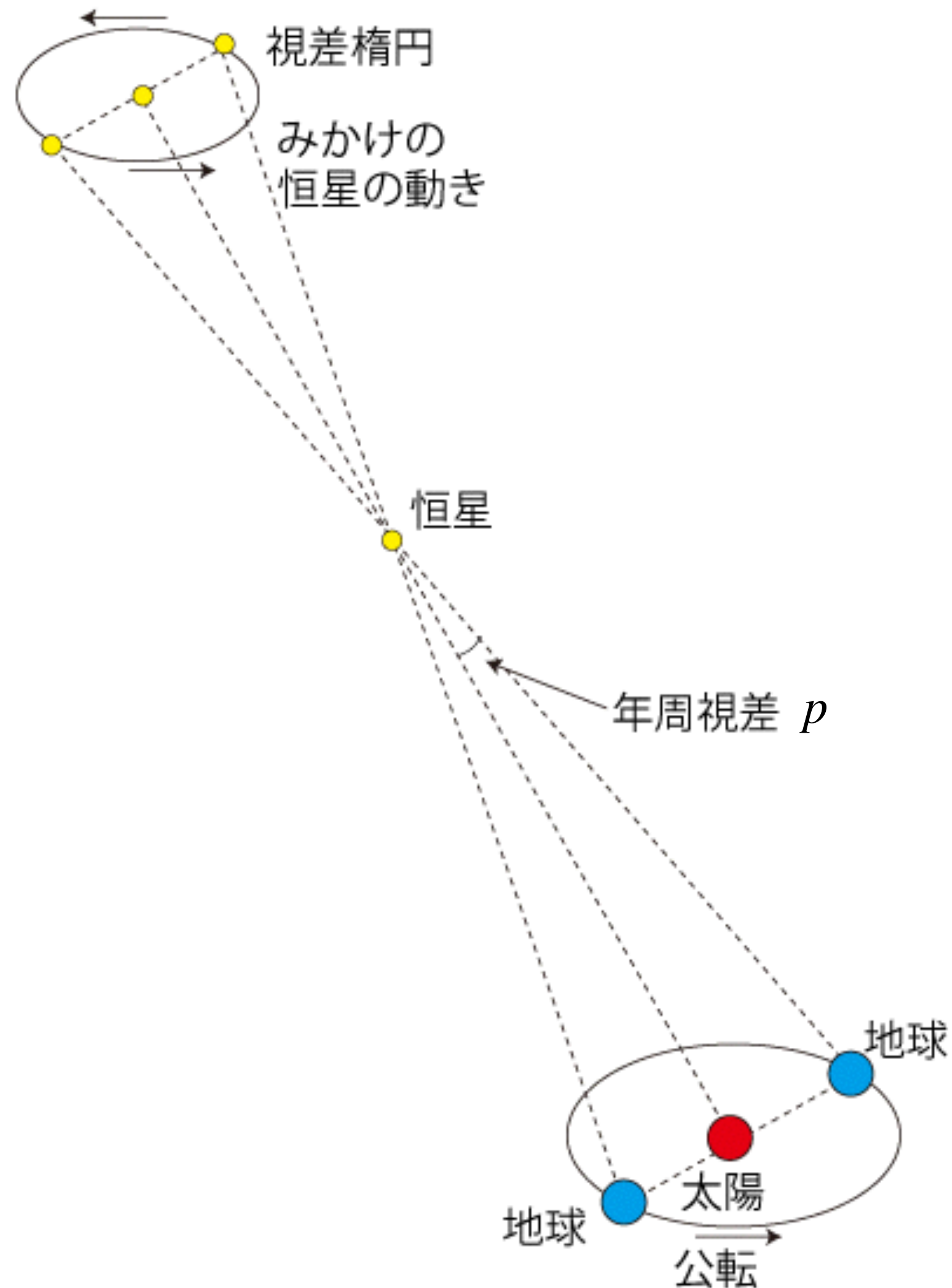
海水の総質量 1×10^{21} kg
地球総質量に占める割合 0.02%

宇宙の構造



$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ 光年} = 2.06 \times 10^5 \text{ au}$

補足：au と pc



年周視差 (annual parallax) p ,

恒星までの距離 d , 太陽と地球の距離 $d_{1 \text{ au}}$ とすると,

$$p \simeq \tan p = \frac{d_{1 \text{ au}}}{d} \quad \text{--- (1)}$$

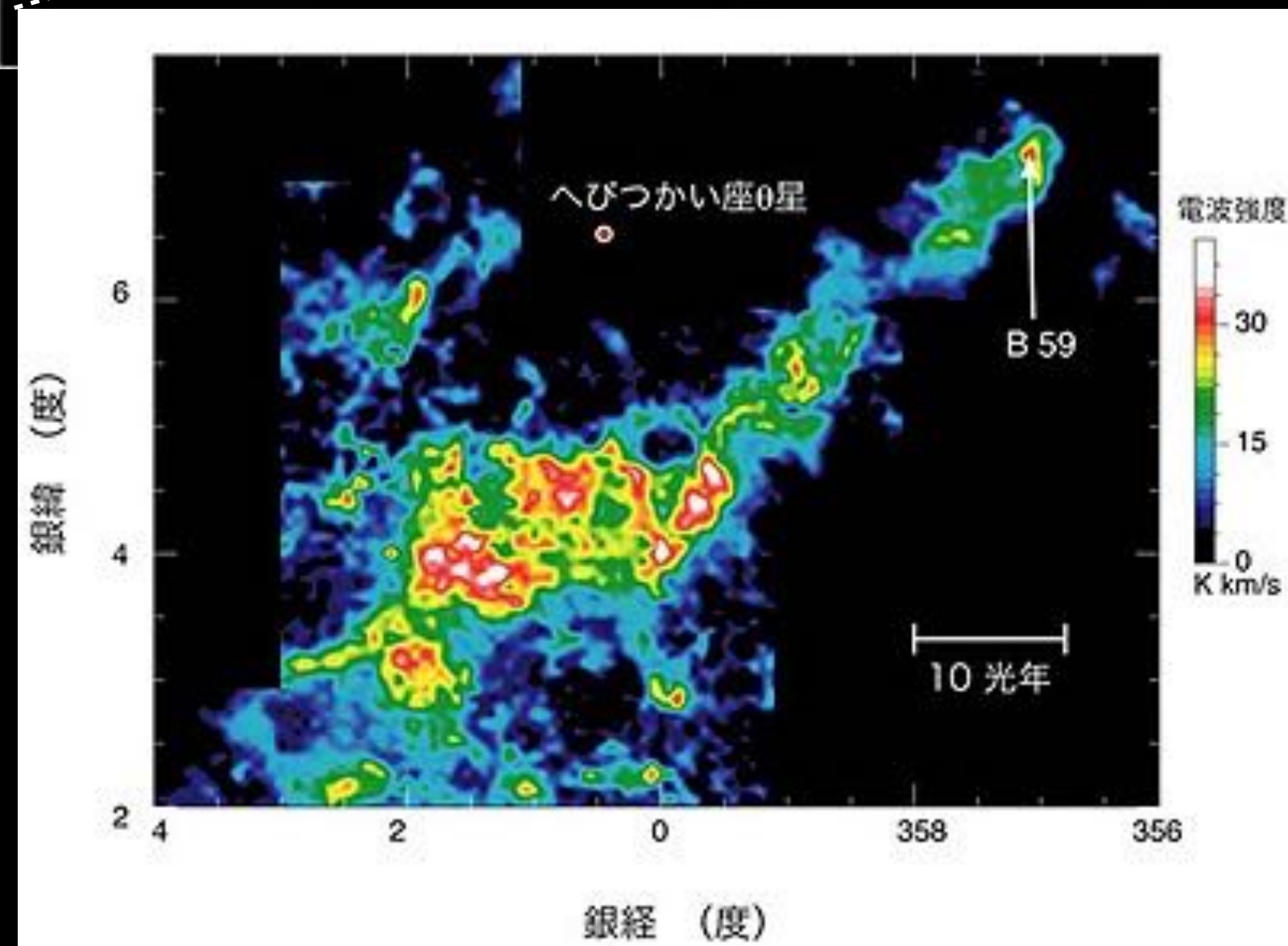
ここで $p = 1'' = \left(\frac{2\pi}{360 \cdot 60 \cdot 60} \right) \text{ rad}$ に対応する距離を

$d \equiv 1 \text{ pc}$ (parsec) と定義する.

$$\therefore 1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ au}}{1''} \simeq 2.06 \times 10^5 \text{ au}$$

天文観測において便利な単位！

星間分子雲

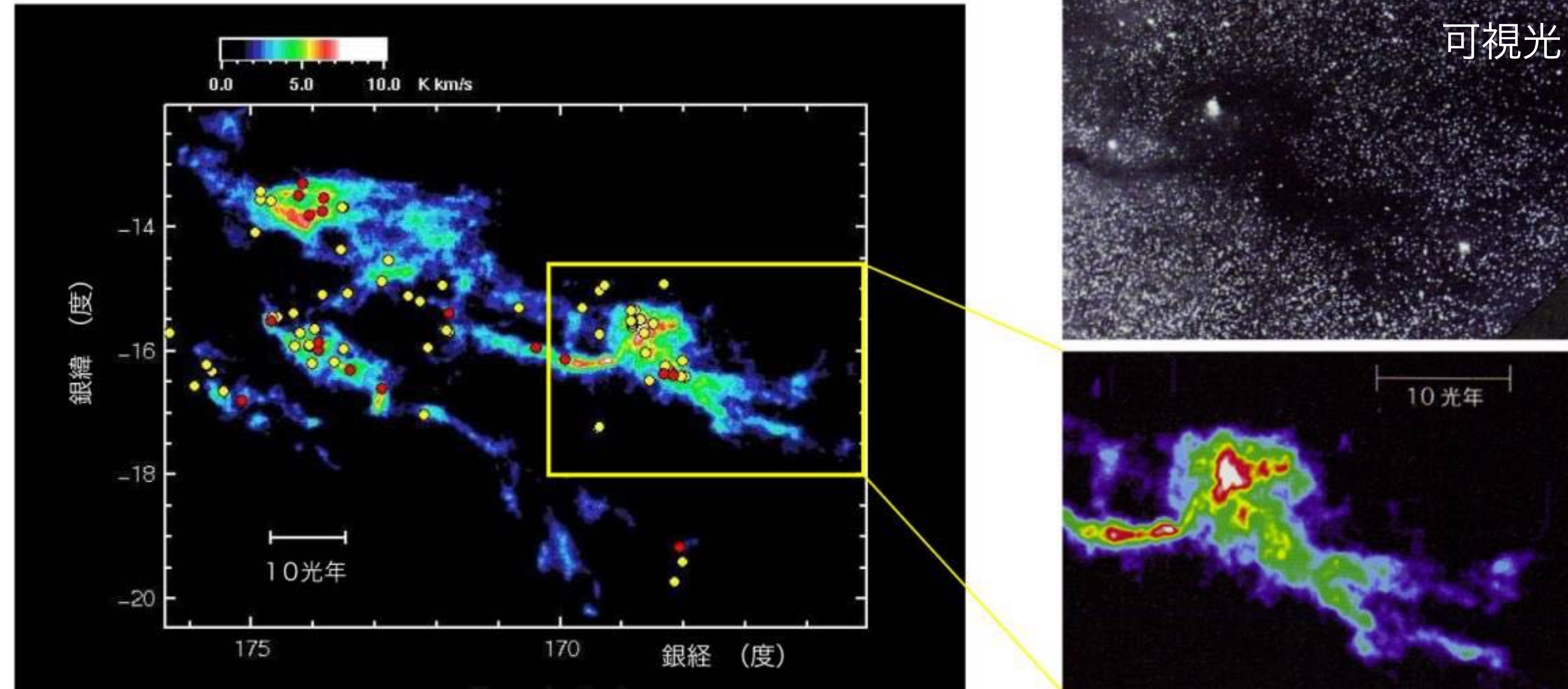


- 星間物質の中でも密度が高い (10^{2-3} 個/cc)
- 低温 (10 K) でガスは分子として存在
- サイズ 10-100 pc

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ 光年} = 2.06 \times 10^5 \text{ au}$$

原始星の誕生

おうし座分子雲



電波放射マップ+

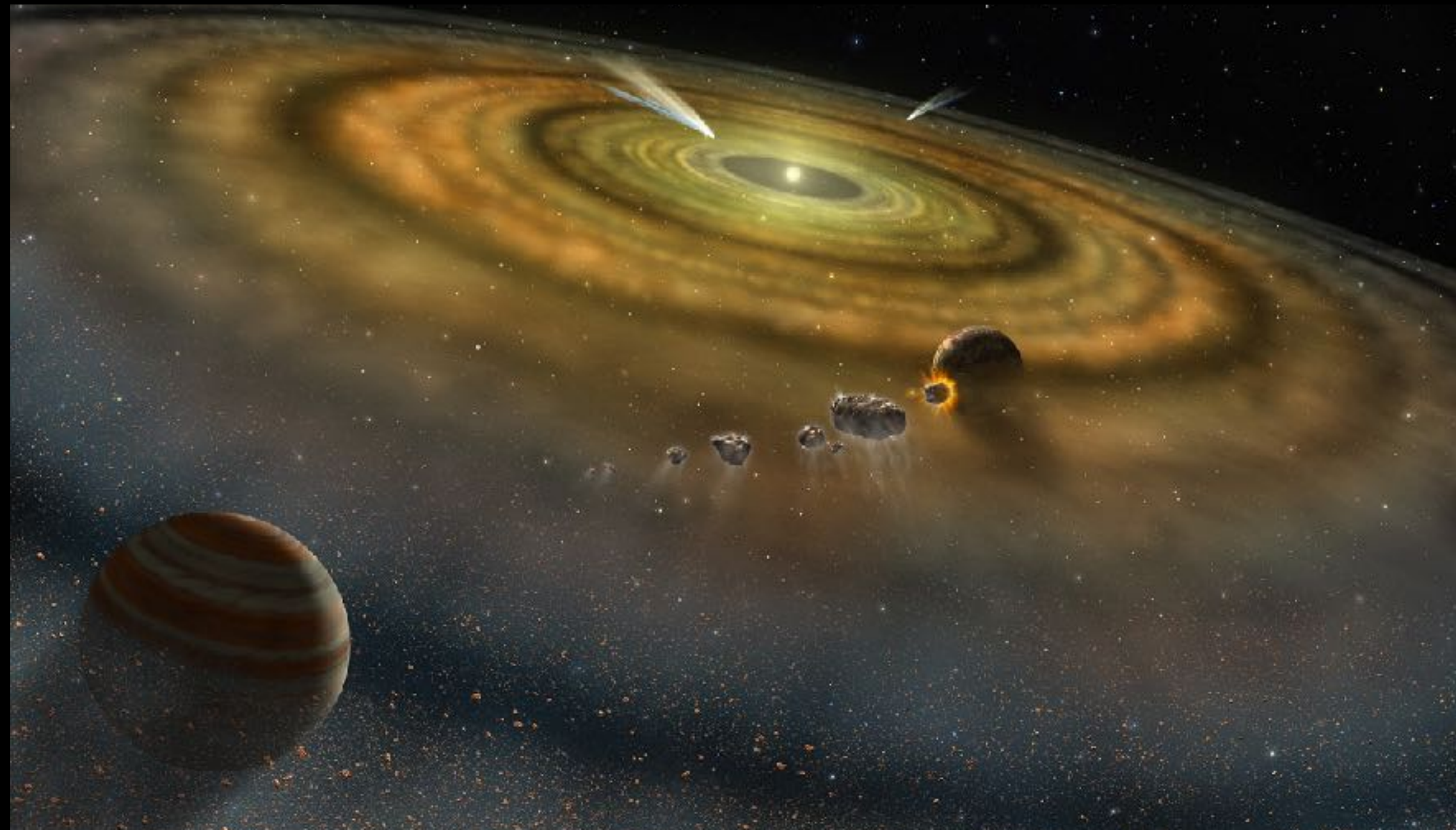
理科年表オフィシャルサイト

原始星・前主系列星の位置

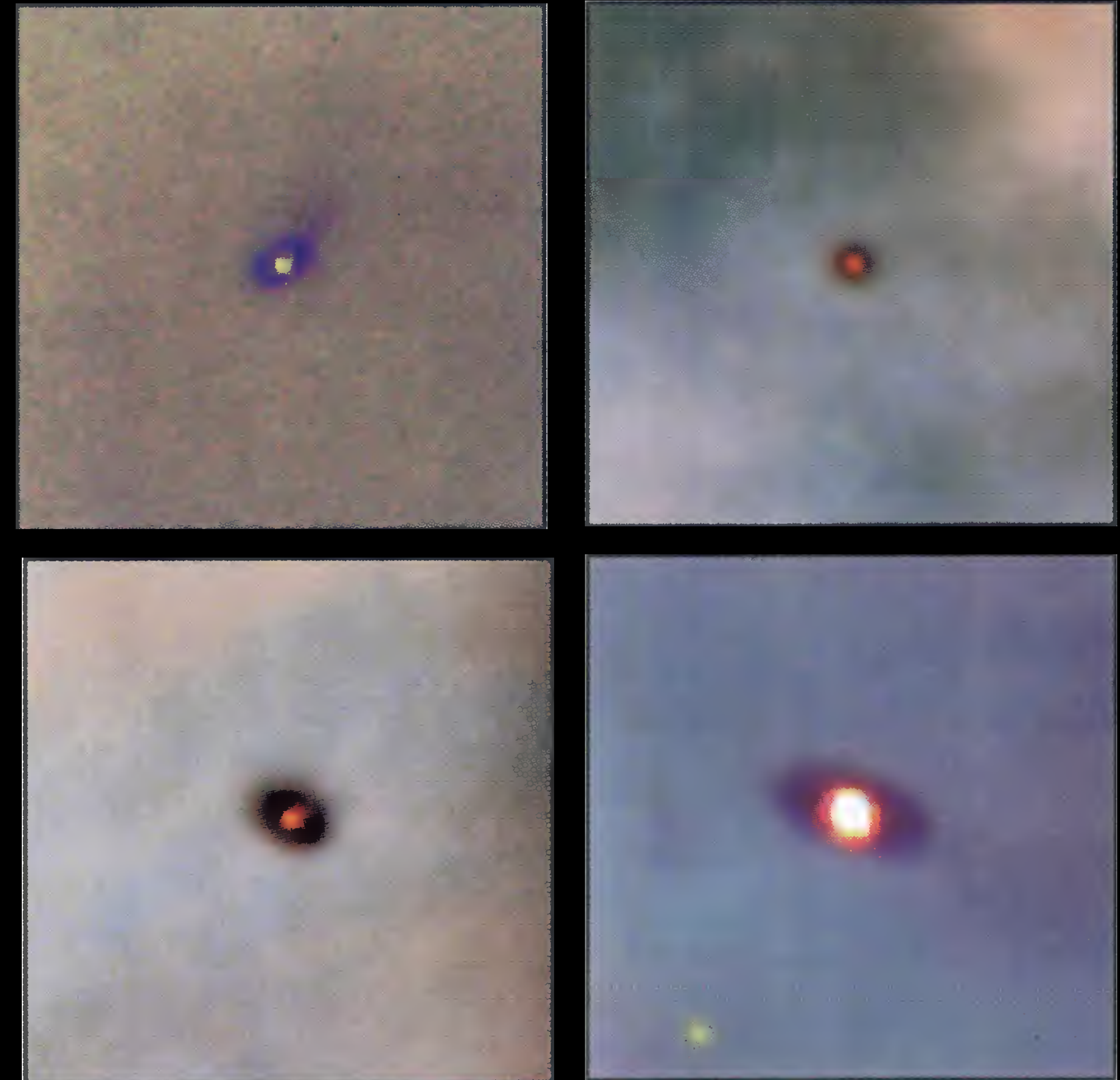
- 高密度の分子雲コア (~0.1 pc) が自己重力で収縮し、原始星が誕生
- 1つの分子雲から多くの原始星が誕生

惑星系誕生の場：原始惑星系円盤

オリオン大星雲に存在する原始惑星系円盤

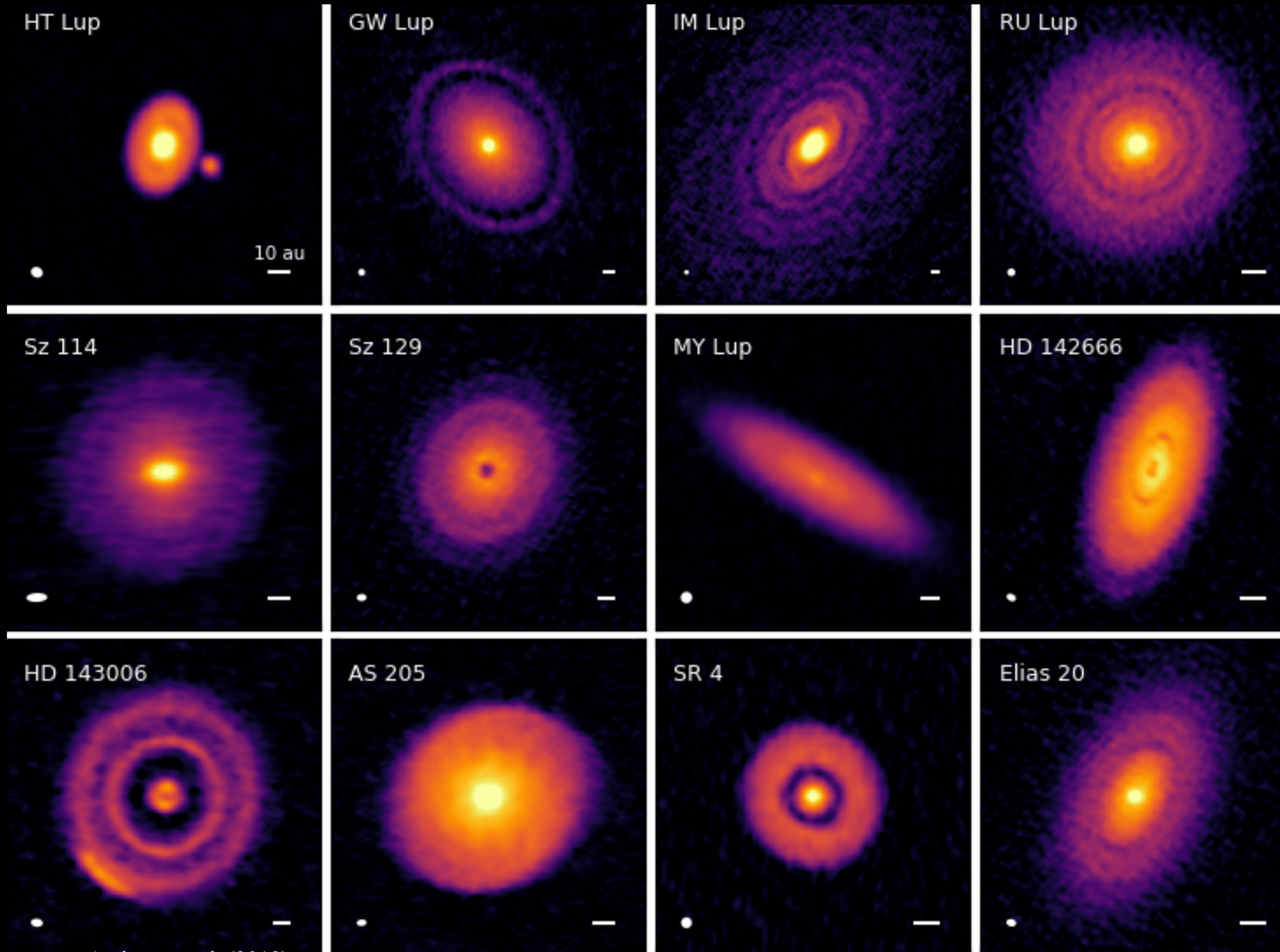


- 誕生したばかりの恒星を取り巻く円盤構造
- 全体としては恒星と同じ組成
- ~1%程度の固体物質を含む



McCaughrean & O'Dell (1996) *Astrophys. J.*

最新の原始惑星系円盤観測



アルマ(ALMA)望遠鏡

- 電波干渉計
- チリ・アタカマ砂漠
- 最大分解能 0.01秒角 (~ 数 AU)
- 2011年稼働

惑星の集積

原始惑星系円盤

ダスト(塵) $\sim \mu\text{m}$

微惑星の形成

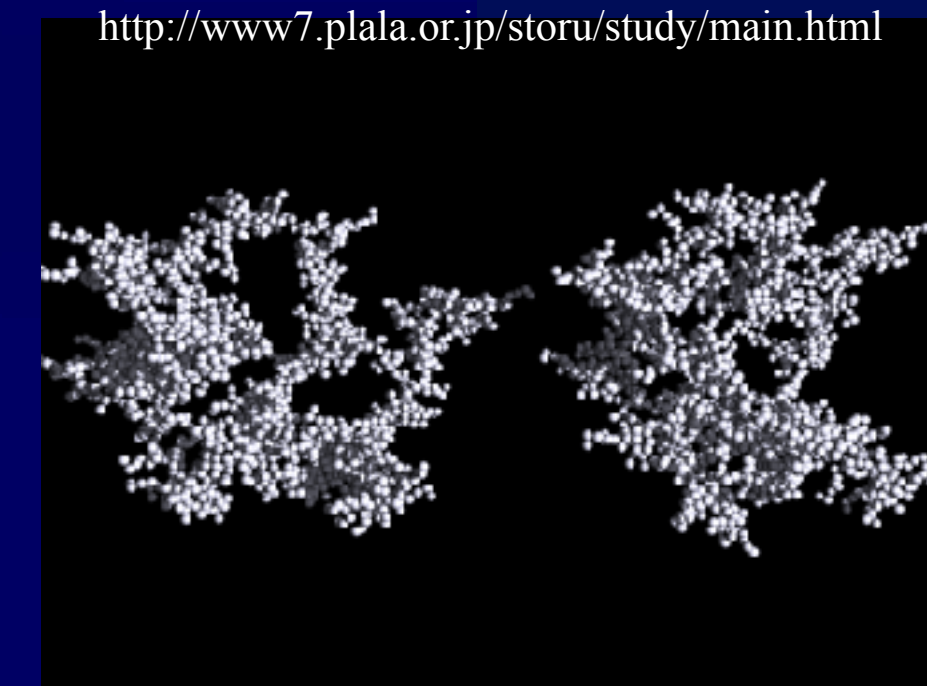
微惑星 $\sim \text{km}$

原始惑星の形成

原始惑星 $\sim 10^3 \text{ km}$

木星型惑星形成

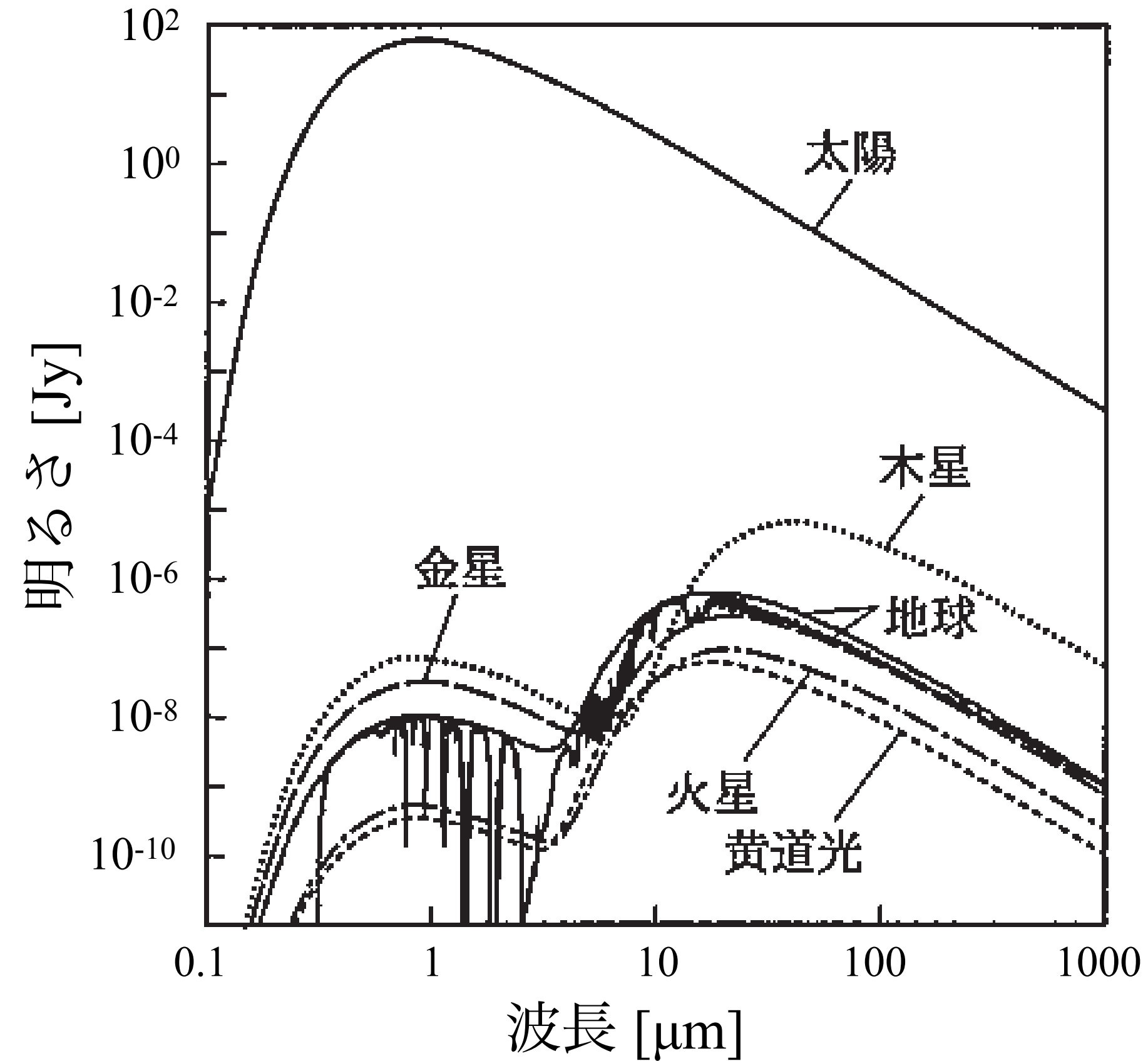
地球型惑星形成



<http://www7.plala.or.jp/storu/study/main.html>

“見えない”系外惑星

10 pc (約33光年) から観測した太陽系のスペクトル



$1\text{Jy} = 10^{-26} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$



恒星と比較して惑星が暗すぎる

→ 系外惑星の光を直接捉えることは困難

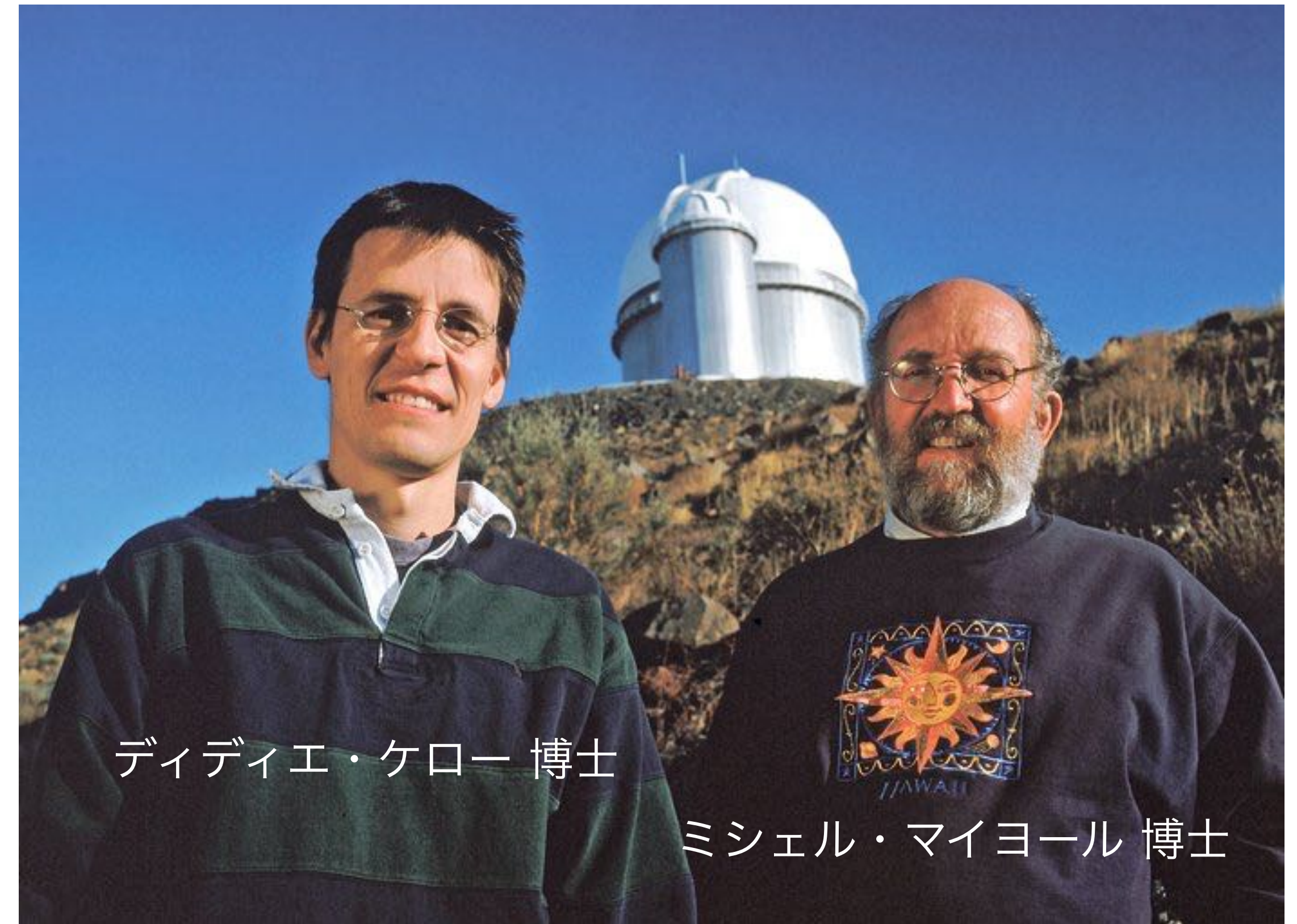
→ 惑星が恒星へ及ぼす影響を利用して間接的に検出

渡部他 編 日本評論社 『太陽系と惑星』

系外惑星研究のはじまり



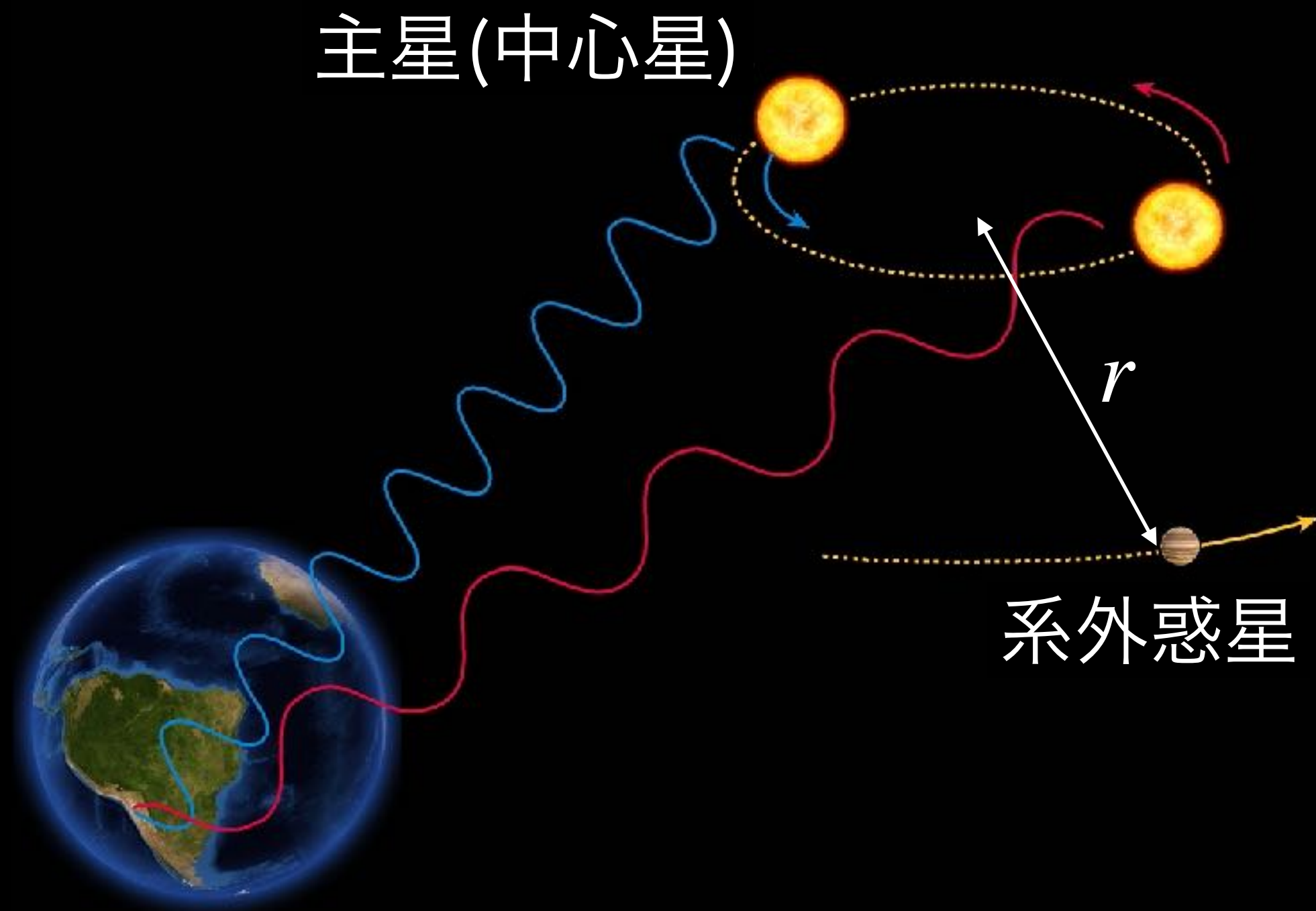
Credit: NASA/JPL-Caltech



Credit: L. Weinstein/Ciel et Espace Photos

1995年、太陽型星を公転する惑星をはじめて検出
→ 2019年ノーベル物理学賞

ドップラー法



惑星の公転速度

$$v_{\text{planet}} = \left(\frac{GM_{\text{star}}}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{--- (1)}$$

運動量保存則より

$$M_{\text{star}}v_{\text{star}} = M_{\text{planet}}v_{\text{planet}} \quad \text{--- (2)}$$

$$\rightarrow v_{\text{star}} = M_{\text{planet}}v_{\text{planet}}/M_{\text{star}} \quad \text{--- (3)}$$

ドップラー偏移の大きさ

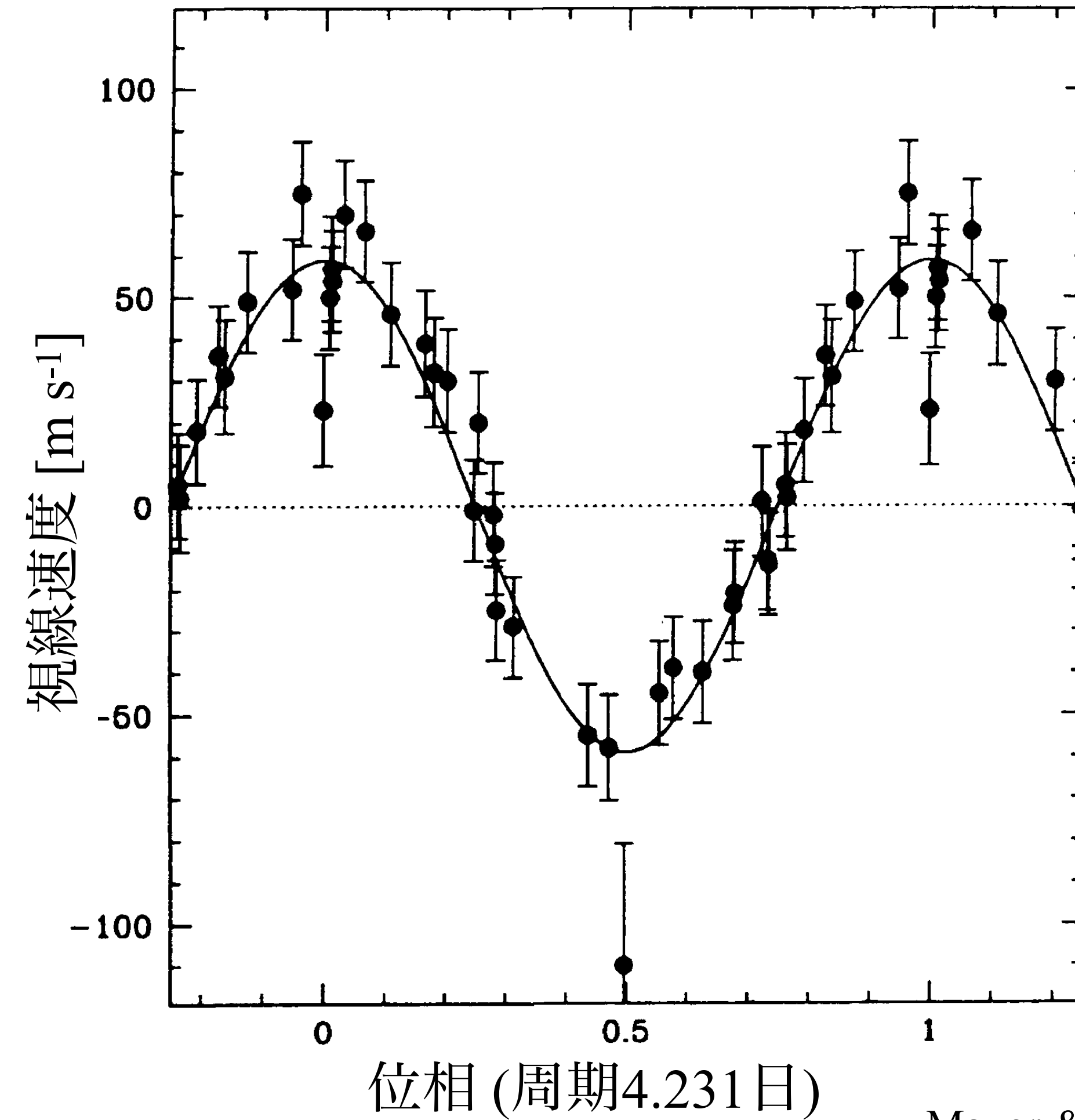
$$\Delta\lambda/\lambda \sim v_{\text{star}}/c \quad \text{--- (4)}$$

- 惑星重力による恒星運動で光がドップラー偏移
- 惑星の軌道・質量(下限値)がわかる
- 軌道半径が小さく, 重い惑星ほど検出しやすい

ペガサス座51番星 (51 Peg) の視線速度変化

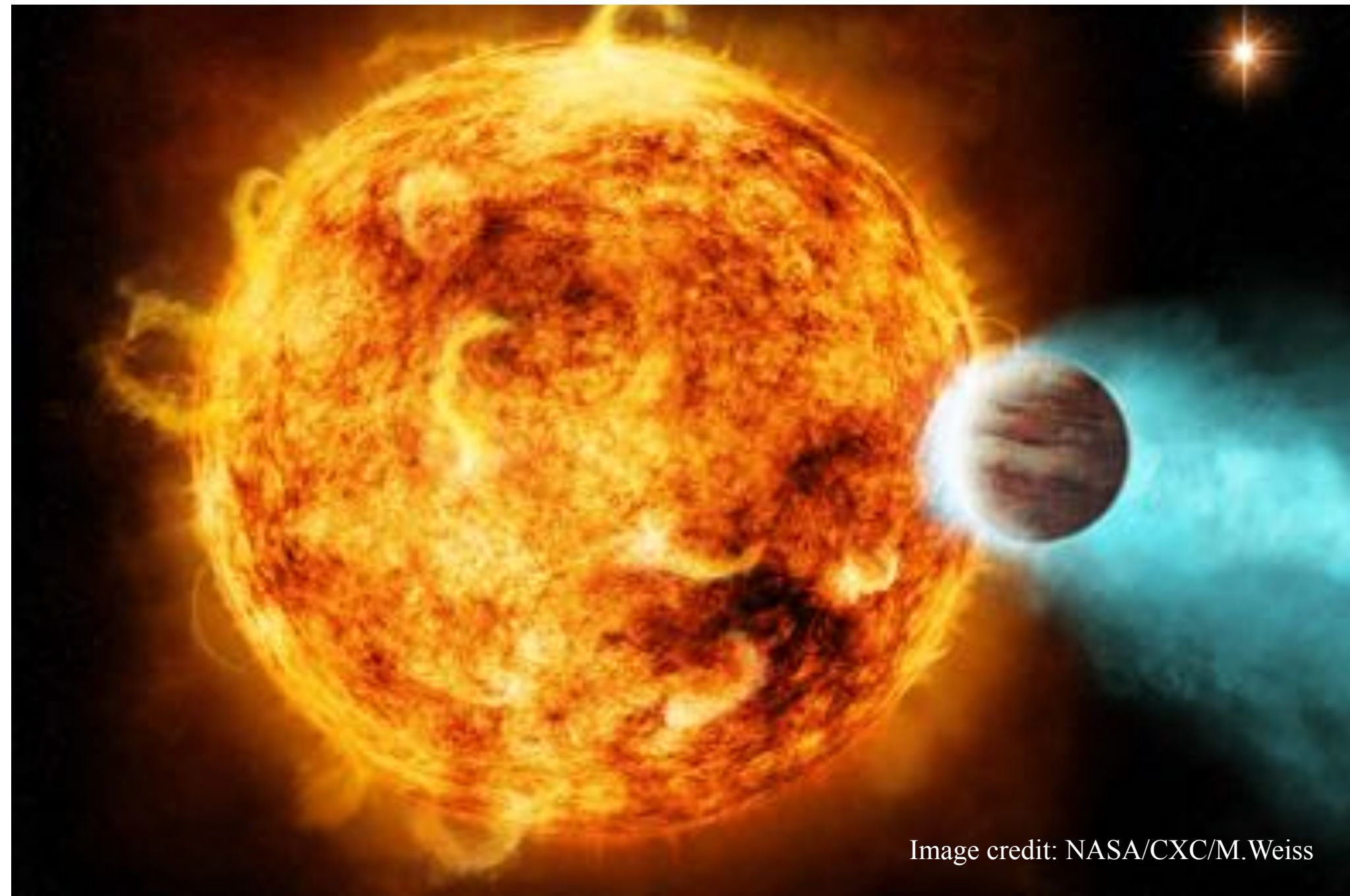


Credit: NASA/JPL-Caltech



Mayor & Queloz (1995) *Nature*

太陽系には存在しない様々な惑星



ホット・ジュピター

- 恒星の近傍を公転する巨大ガス惑星
- 約 1000 K の高温環境
- 大気の流出(大気散逸)



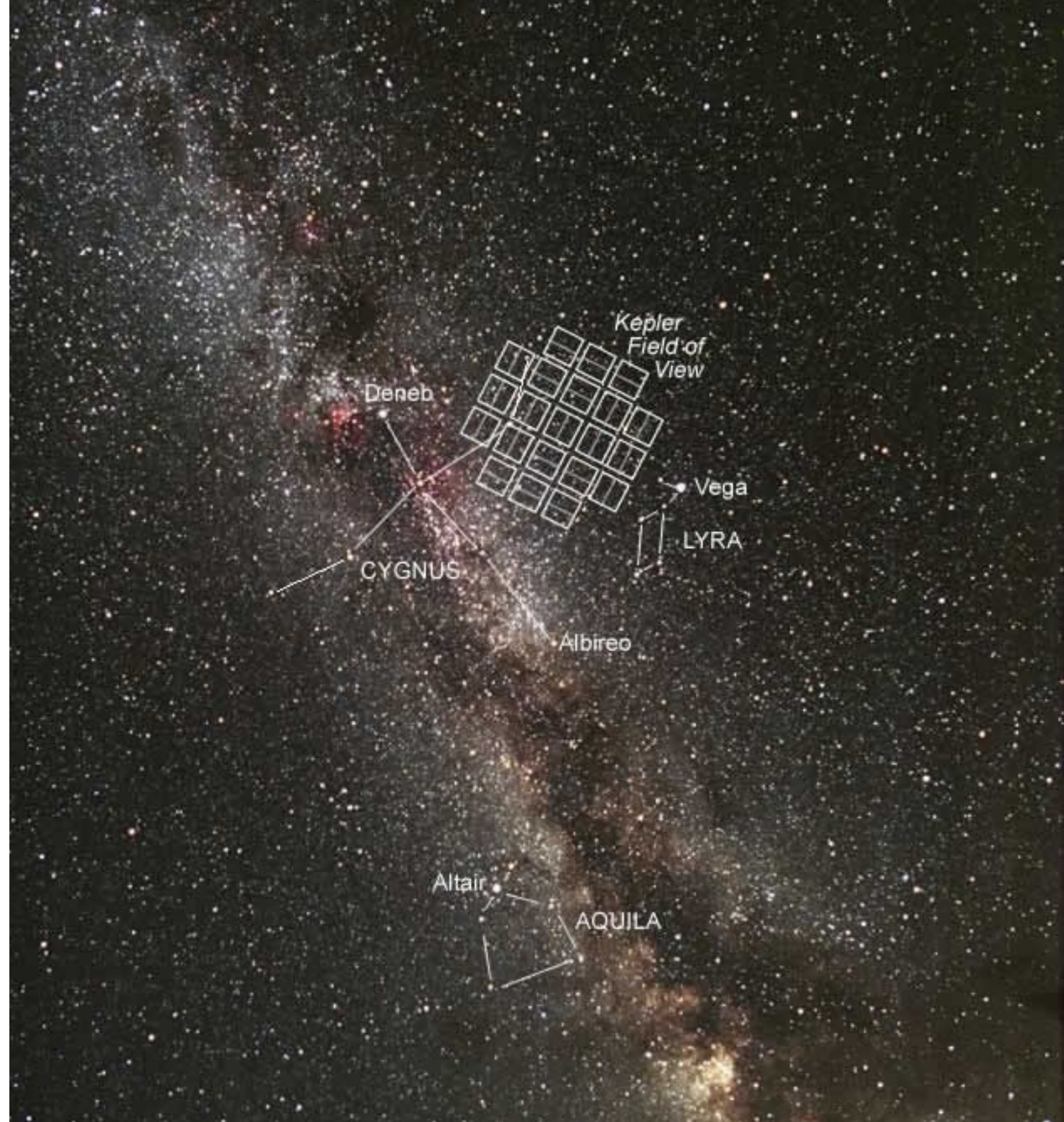
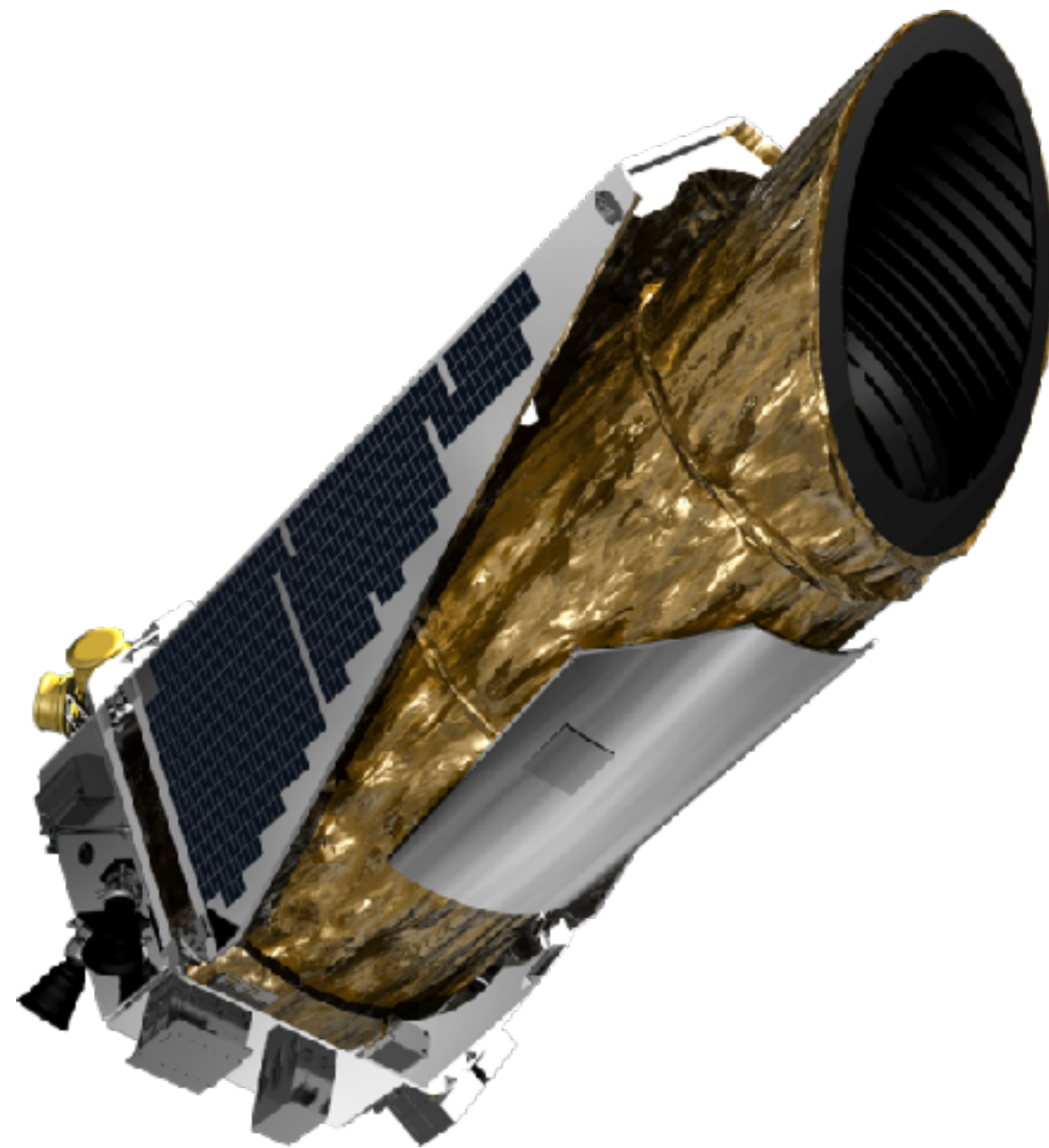
M型星まわりの系外惑星

- 太陽より暗く低温の恒星
- 将来の地球外生命探しのターゲット

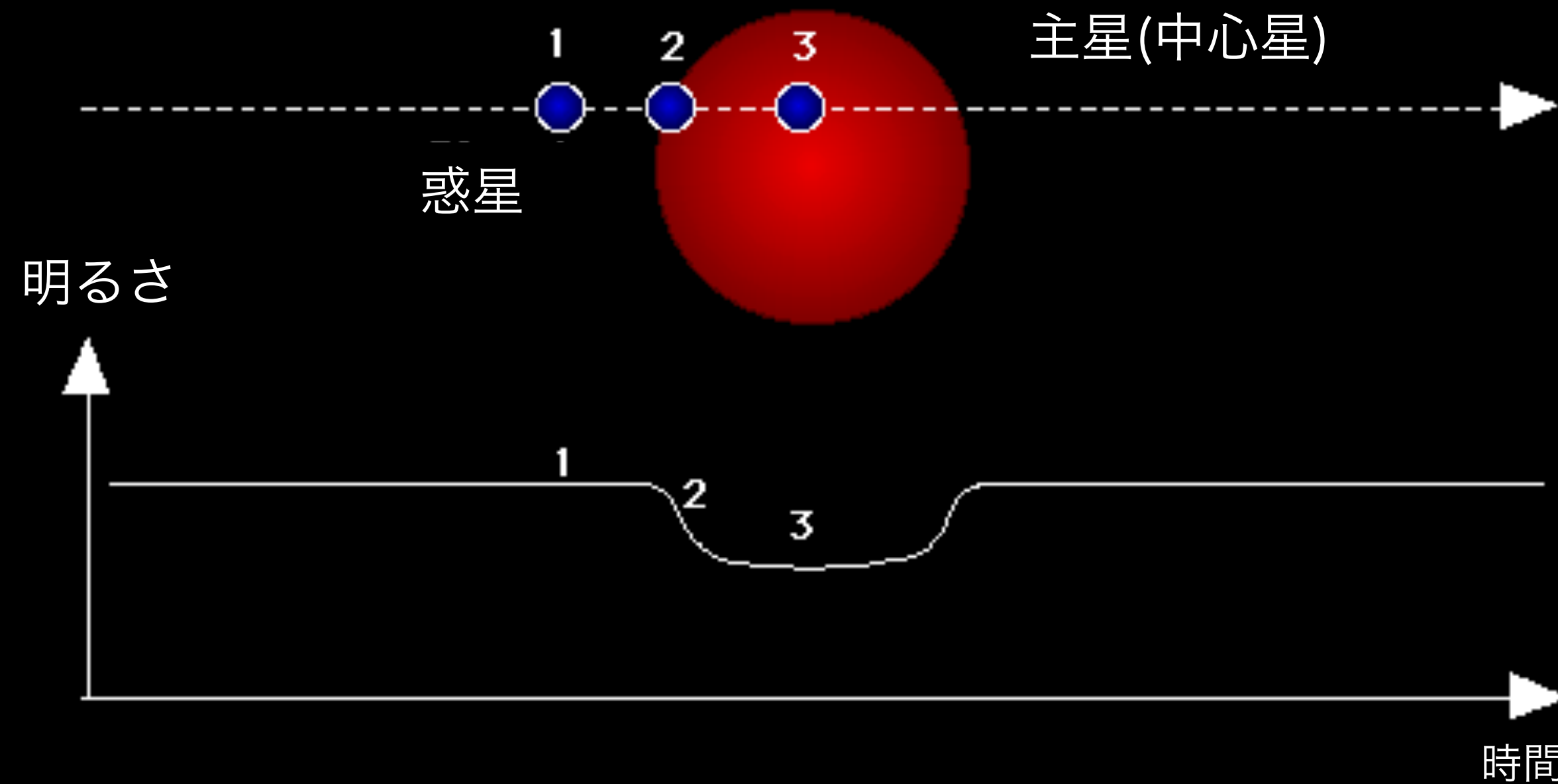
発見から統計の時代へ

ケプラー宇宙望遠鏡

- ミッション期間 2009-2018年
- トランジット観測 (次ページ)
- 2662個の系外惑星を発見
(これまでの全発見の大部分)



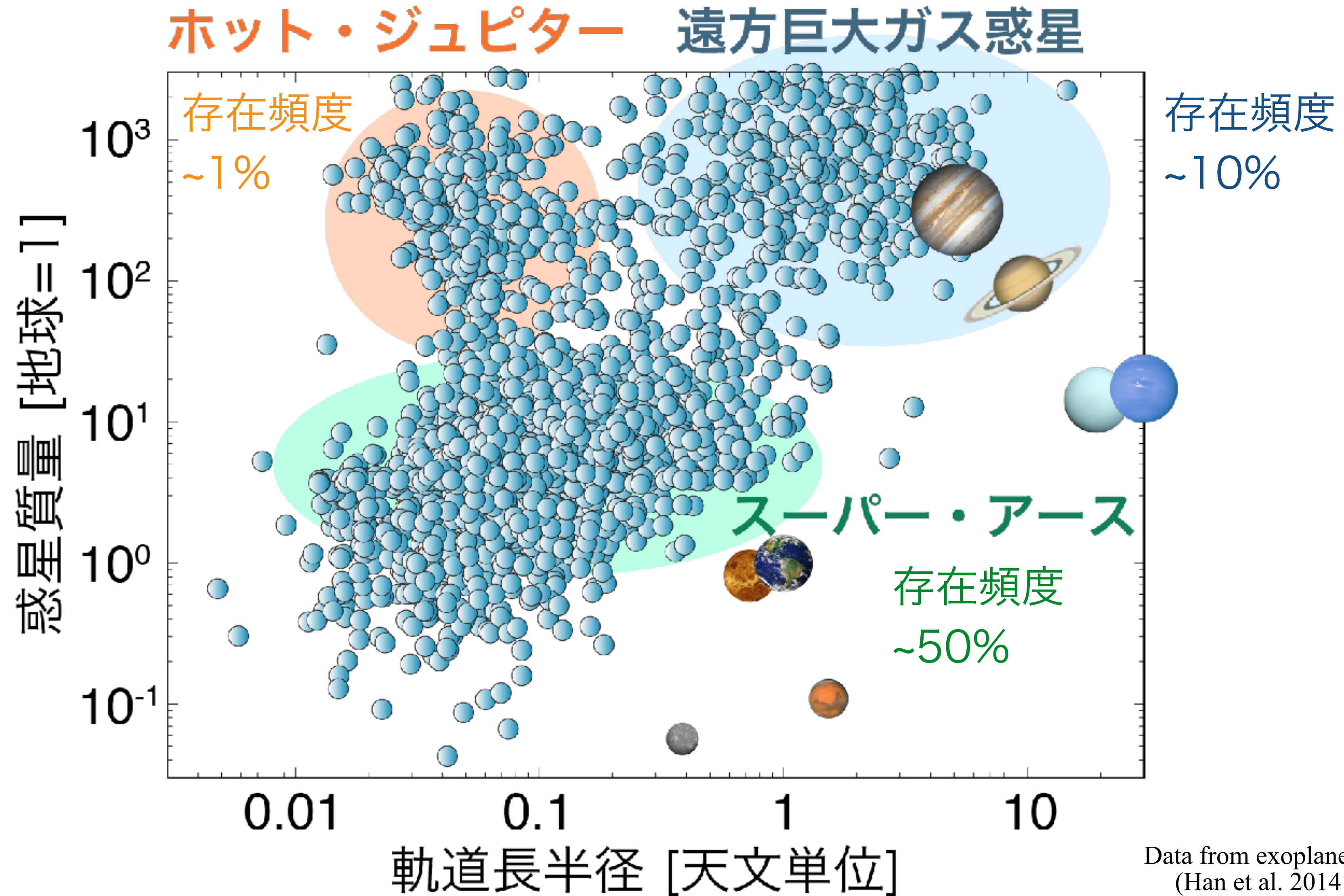
トランジット法



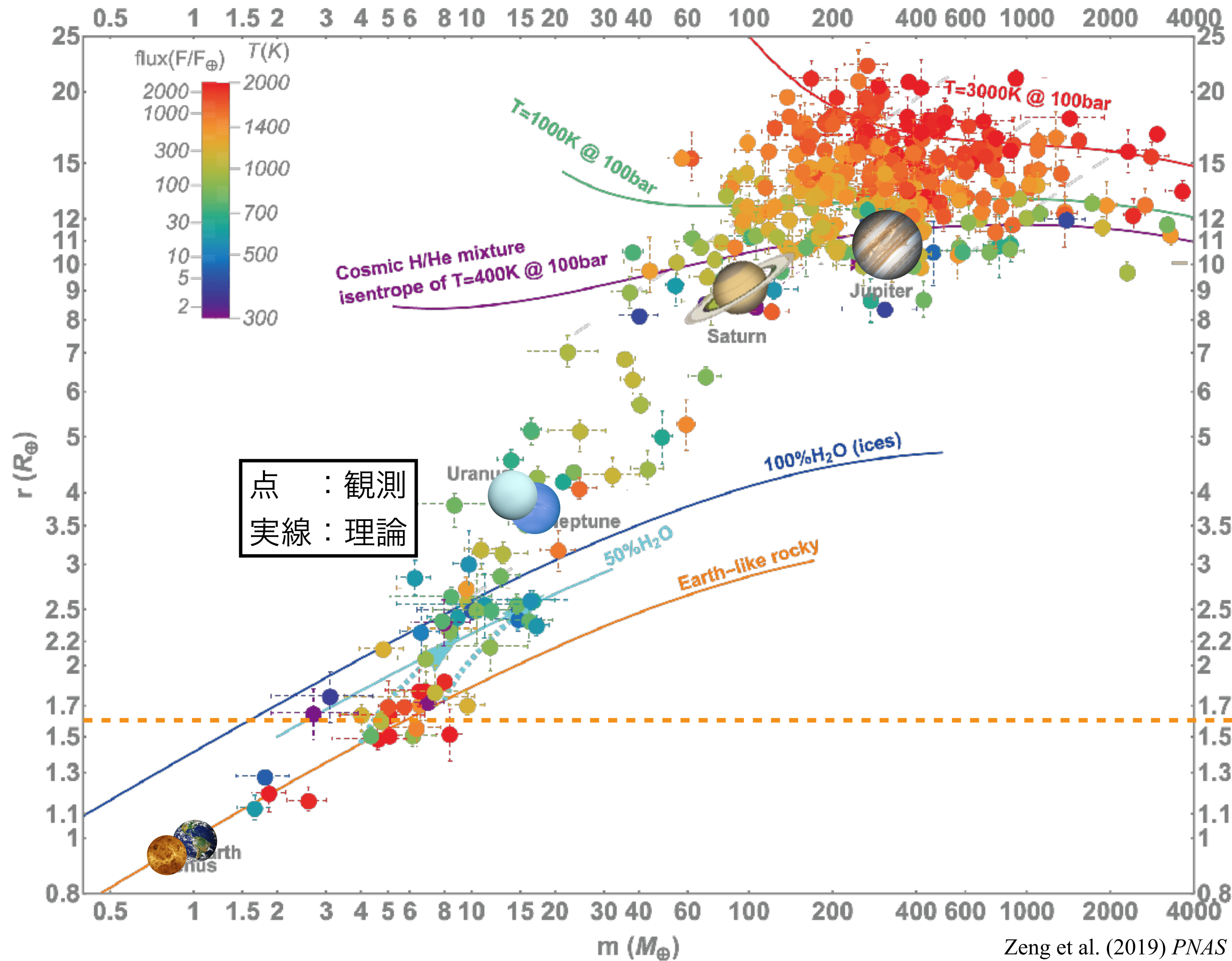
- 惑星が中心星の前を通過する時の恒星の減光
- **減光率 = (惑星半径/恒星半径)²**
- 惑星の軌道・惑星半径)がわかる
- 中心星に近く大きい惑星ほど発見しやすい

© Hans Deeg

多様な太陽系外惑星

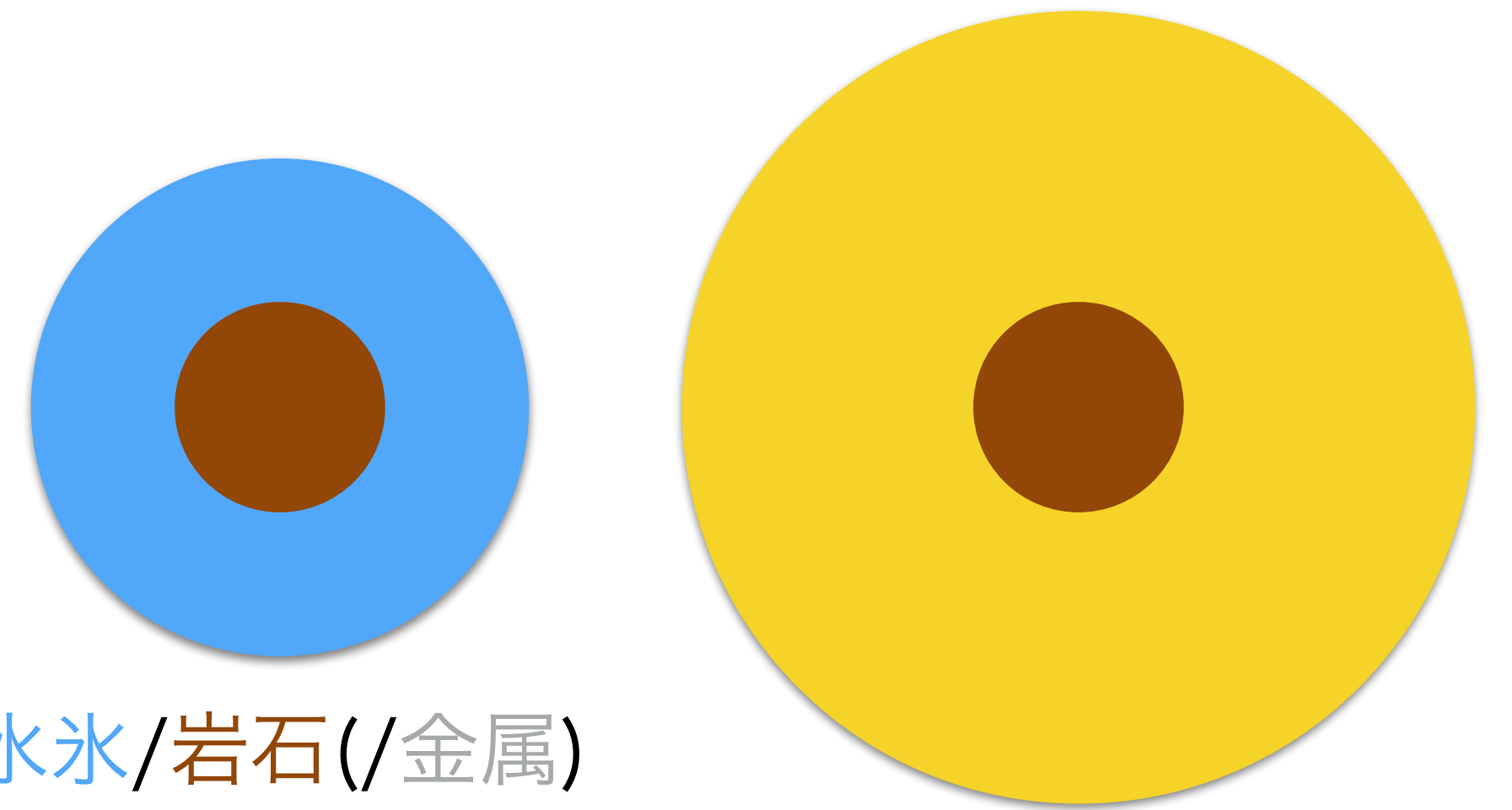


系外惑星の質量と半径の分布 (精度の良いものだけプロット)



$r > 1.6 R_{\oplus}$: 氷や H/Heガスをまとう

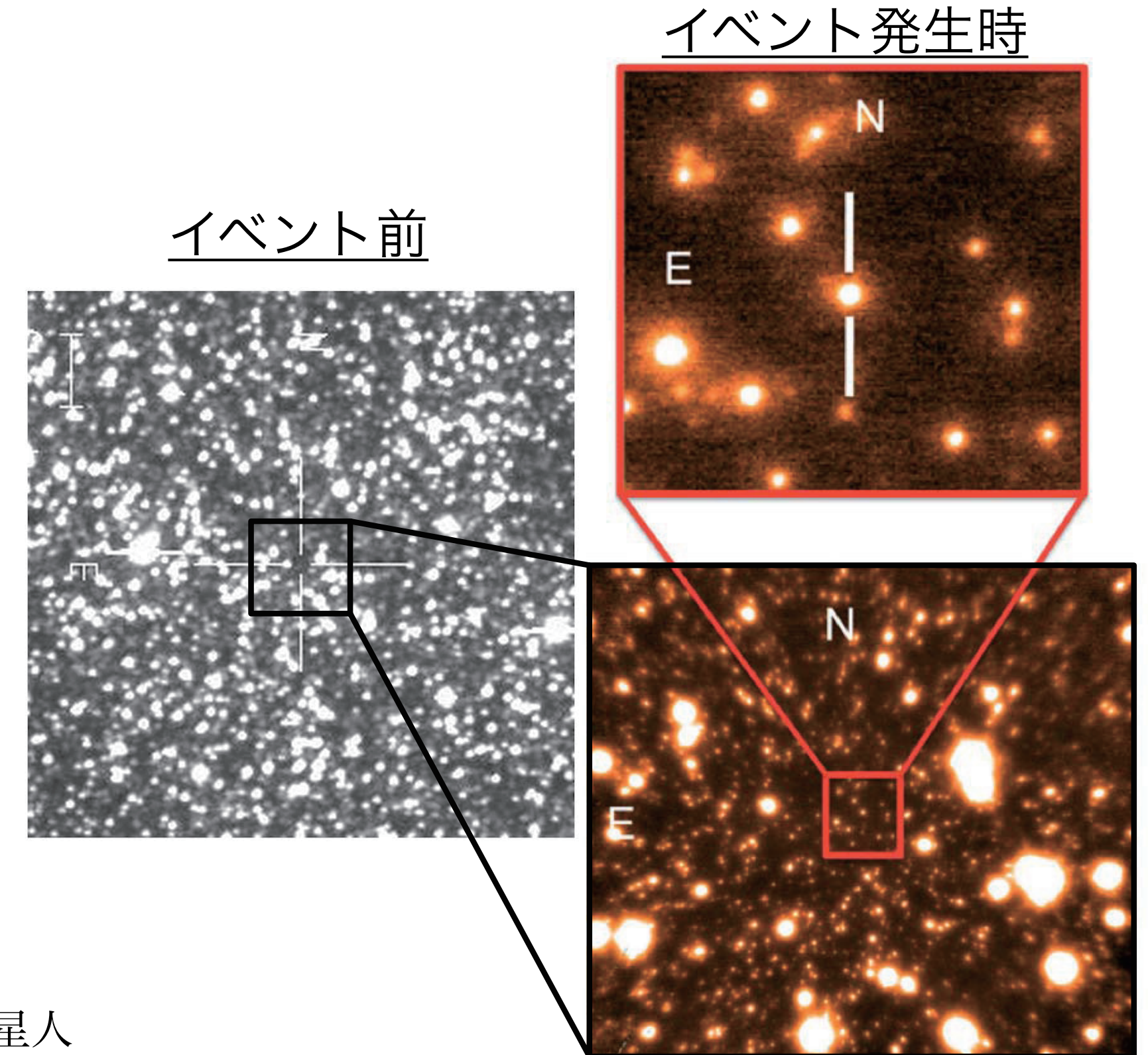
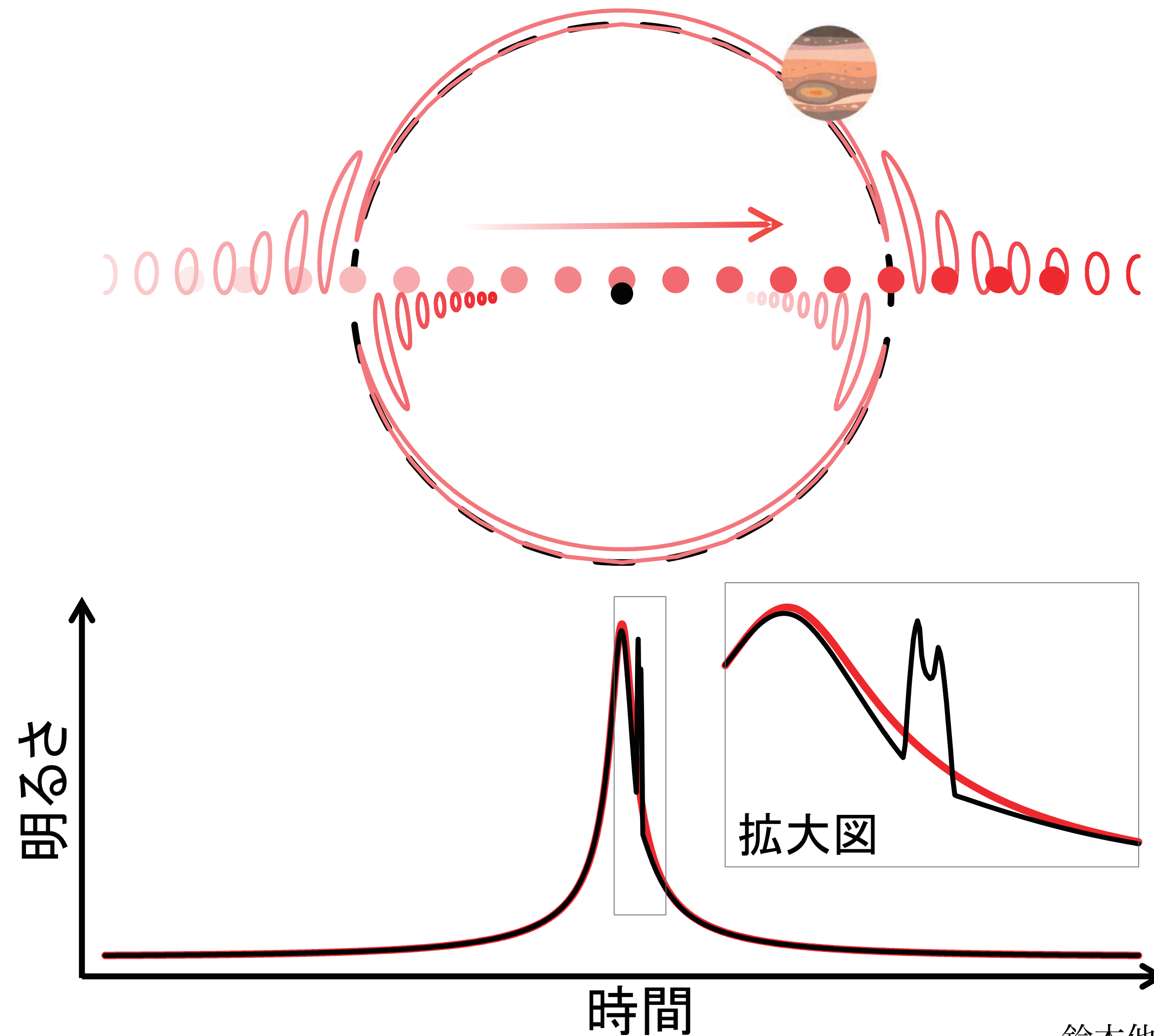
水素ヘリウム/(水氷)/岩石(/金属)



$r < 1.6 R_{\oplus}$: 岩石惑星?

重力マイクロレンズ法

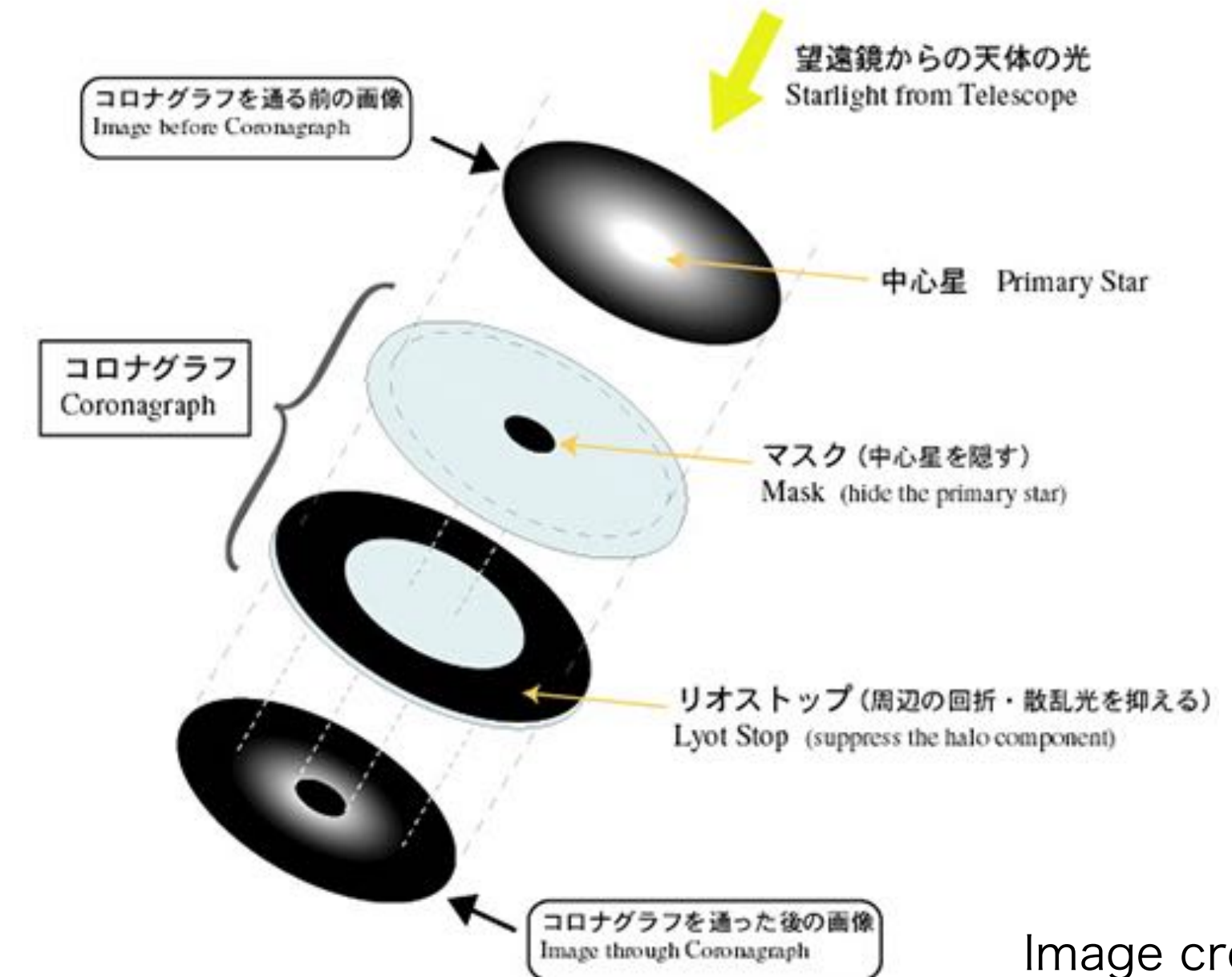
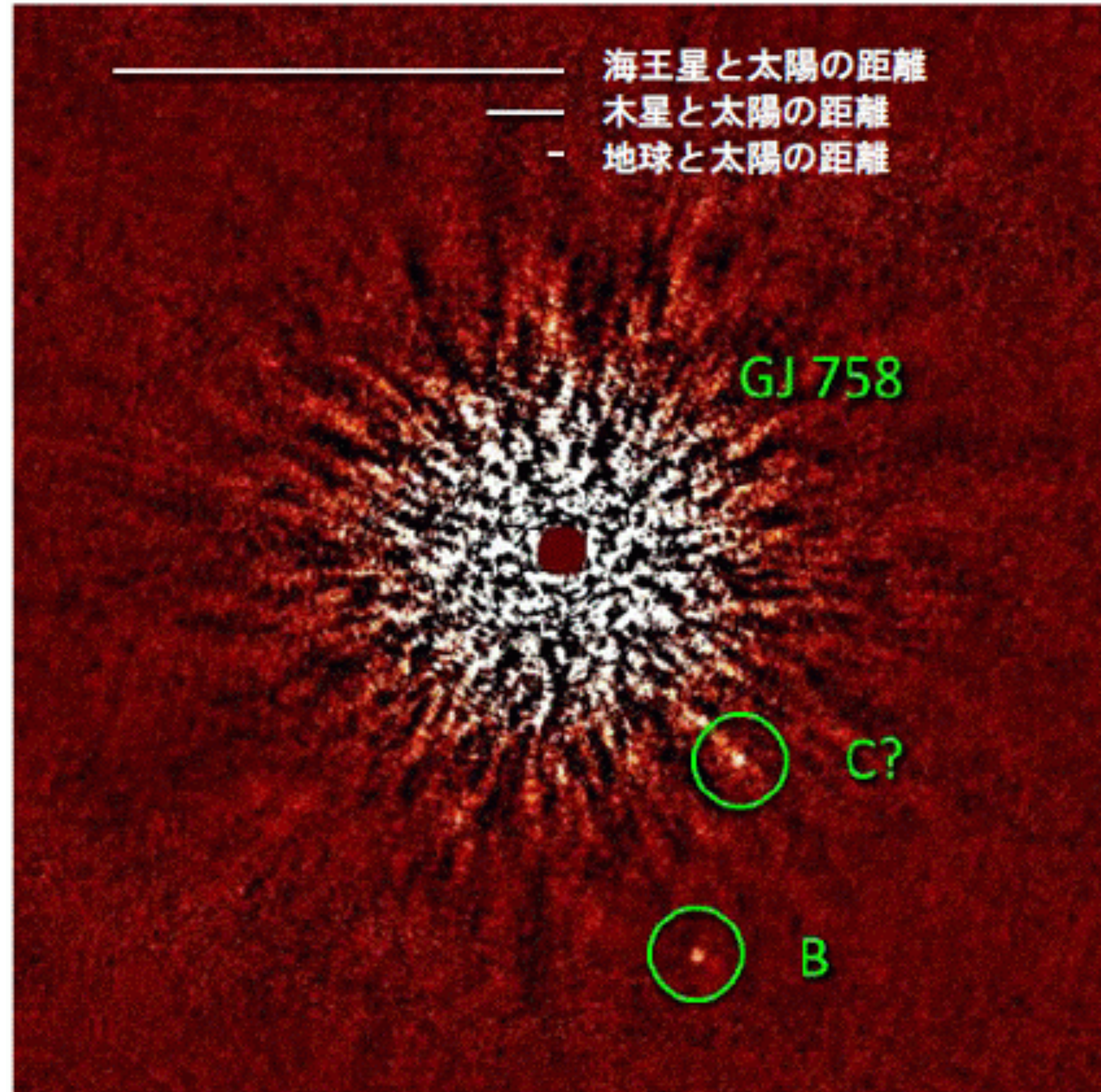
惑星系重力のレンズ効果による光源天体の増光を検出
→ 恒星と惑星の距離・質量比



鈴木他 (2015) 遊星人

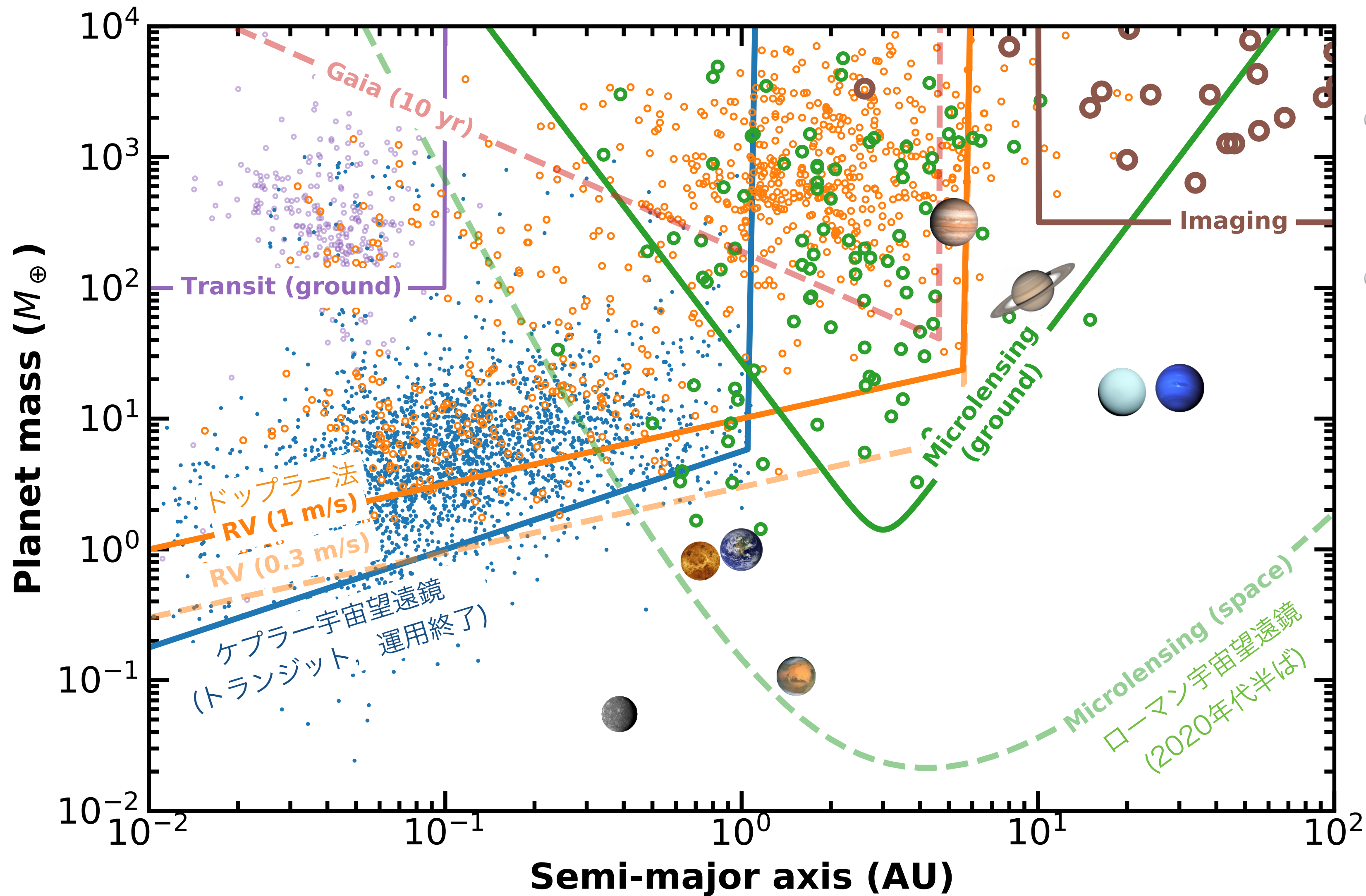
直接撮像

すばる望遠鏡で直接撮像された系外惑星候補 GJ758b (Image credit: 国立天文台)



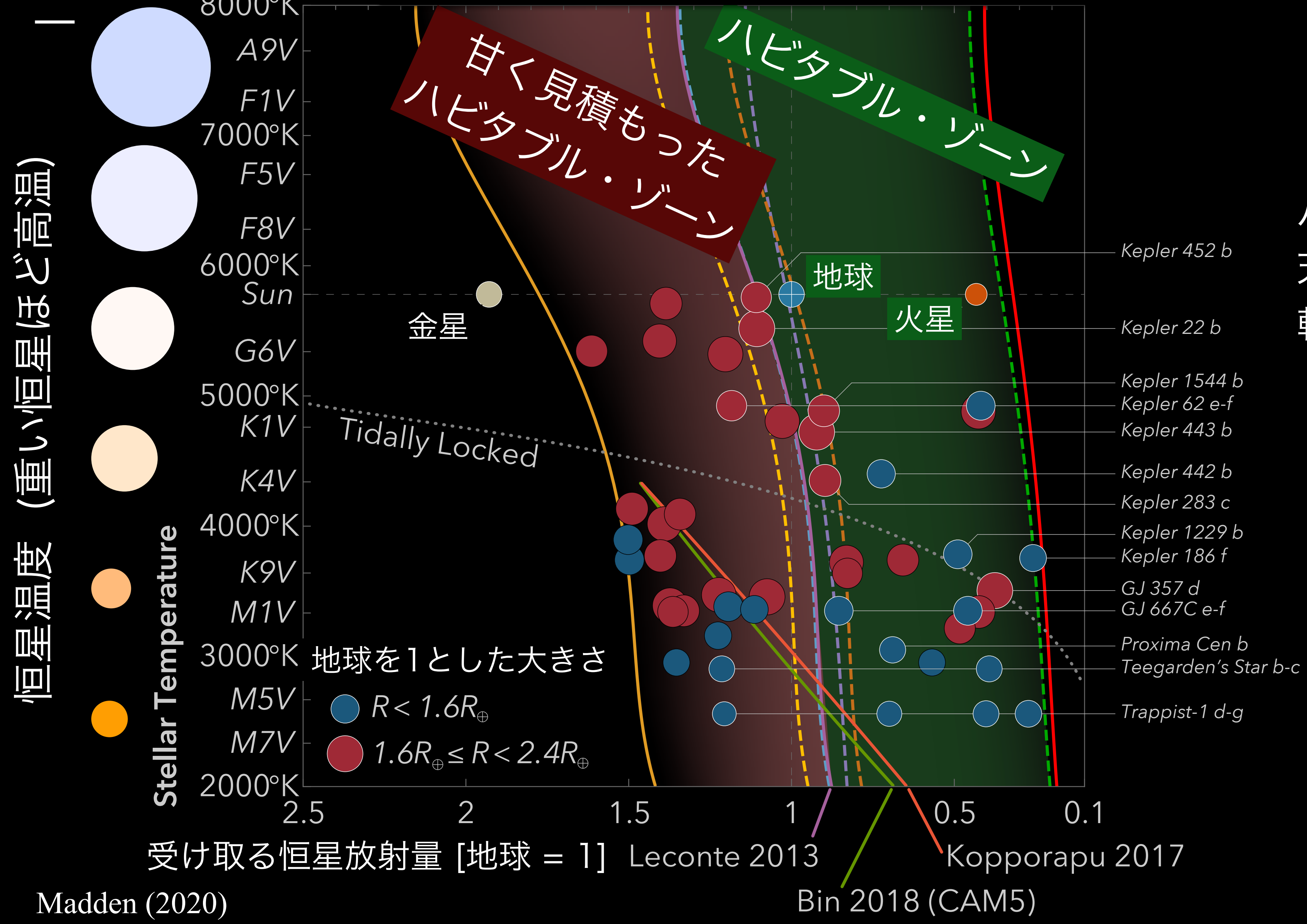
- コロナグラフ(中心星の光を隠す)によって可能となった
- 現状, 軌道半径が大きく明るい惑星(誕生直後の巨大ガス惑星)を検出できる

検出可能/不可能なサイズ・軌道領域



- 恒星に近い, 大きい惑星が選択的に発見されてきた
- 太陽系と似た惑星系があれば木星と土星のみ発見

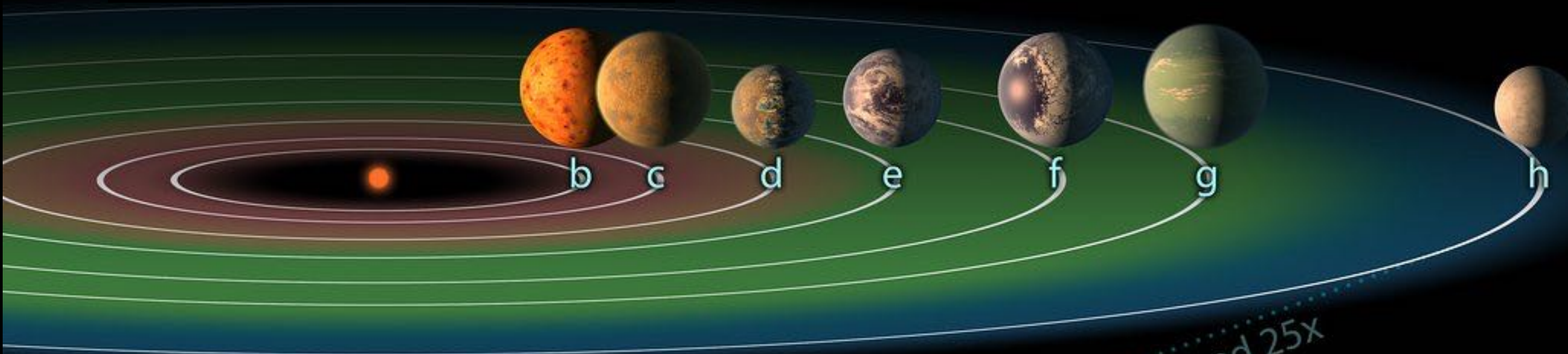
ハビタブル・ゾーンの惑星



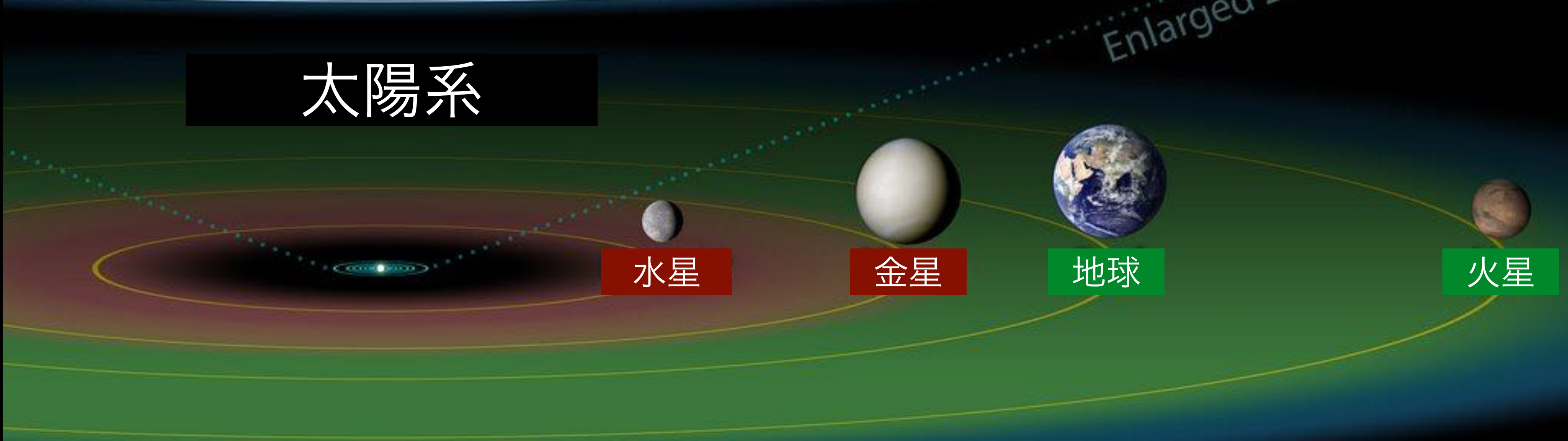
ハビタブル・ゾーン：
天体表面に液体の水を保持できる
軌道の範囲

赤色矮星 (M型星) 周りの惑星系

TRAPPIST-1 惑星系



太陽系



大気スペクトル(波長分解した光)

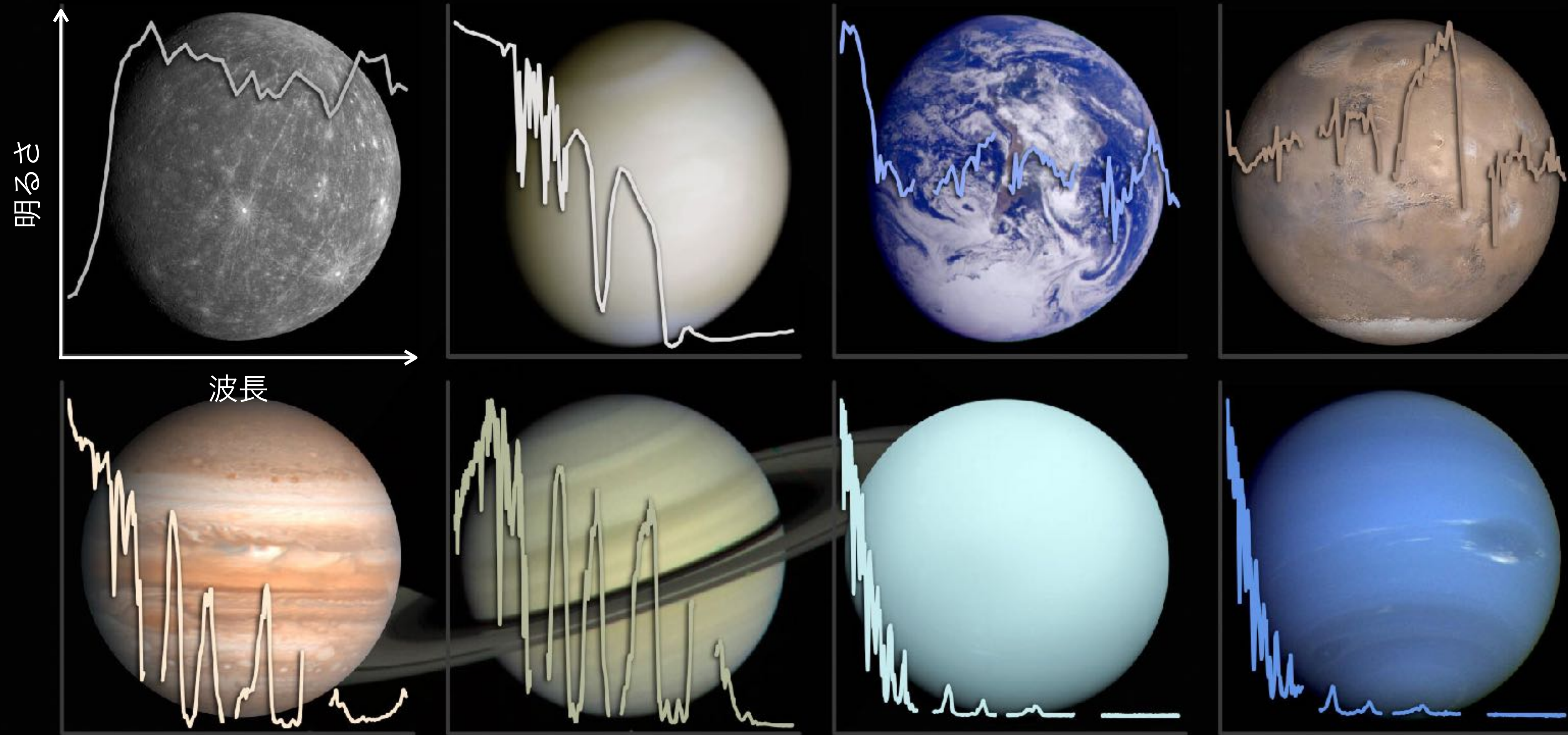
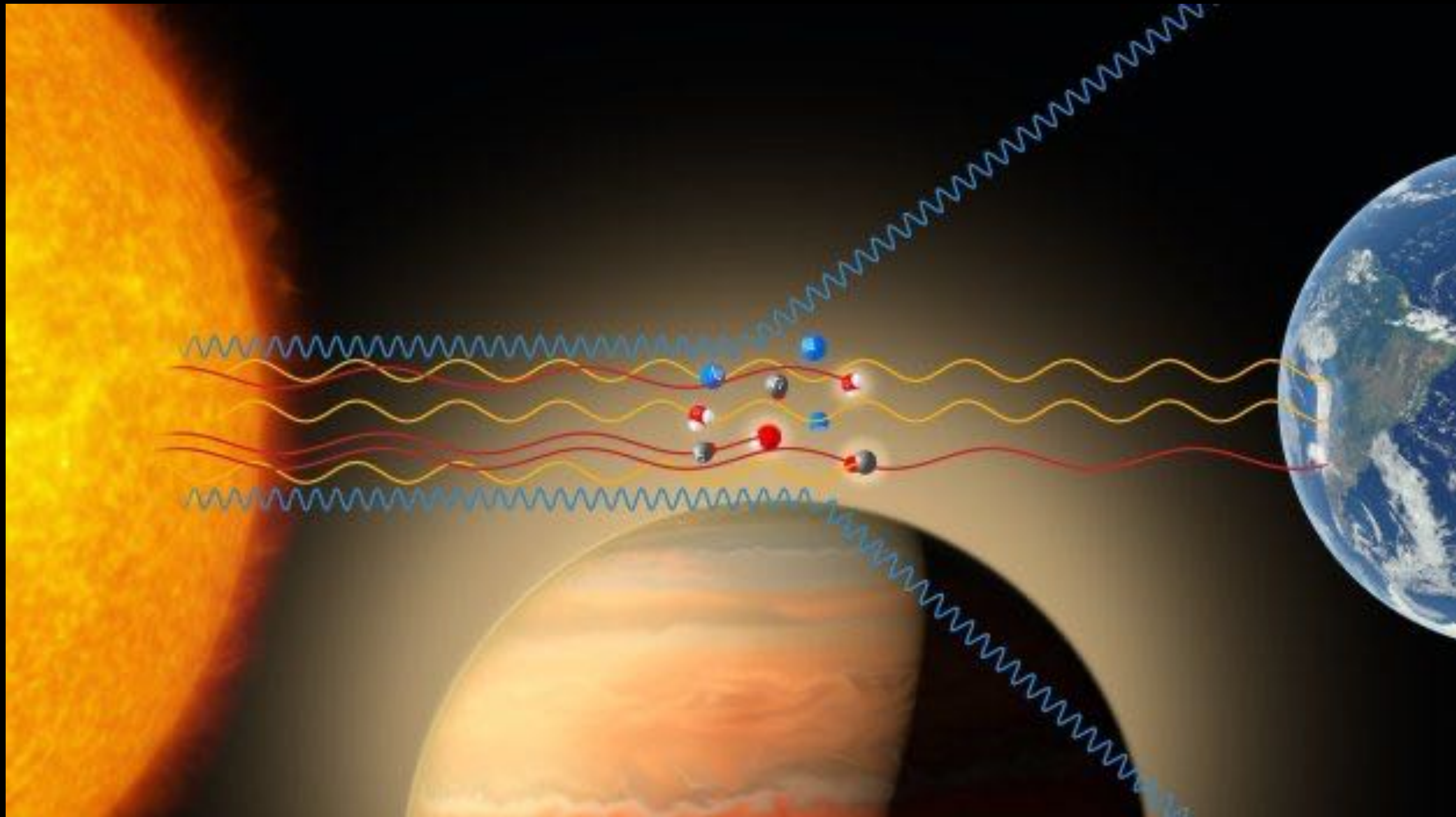
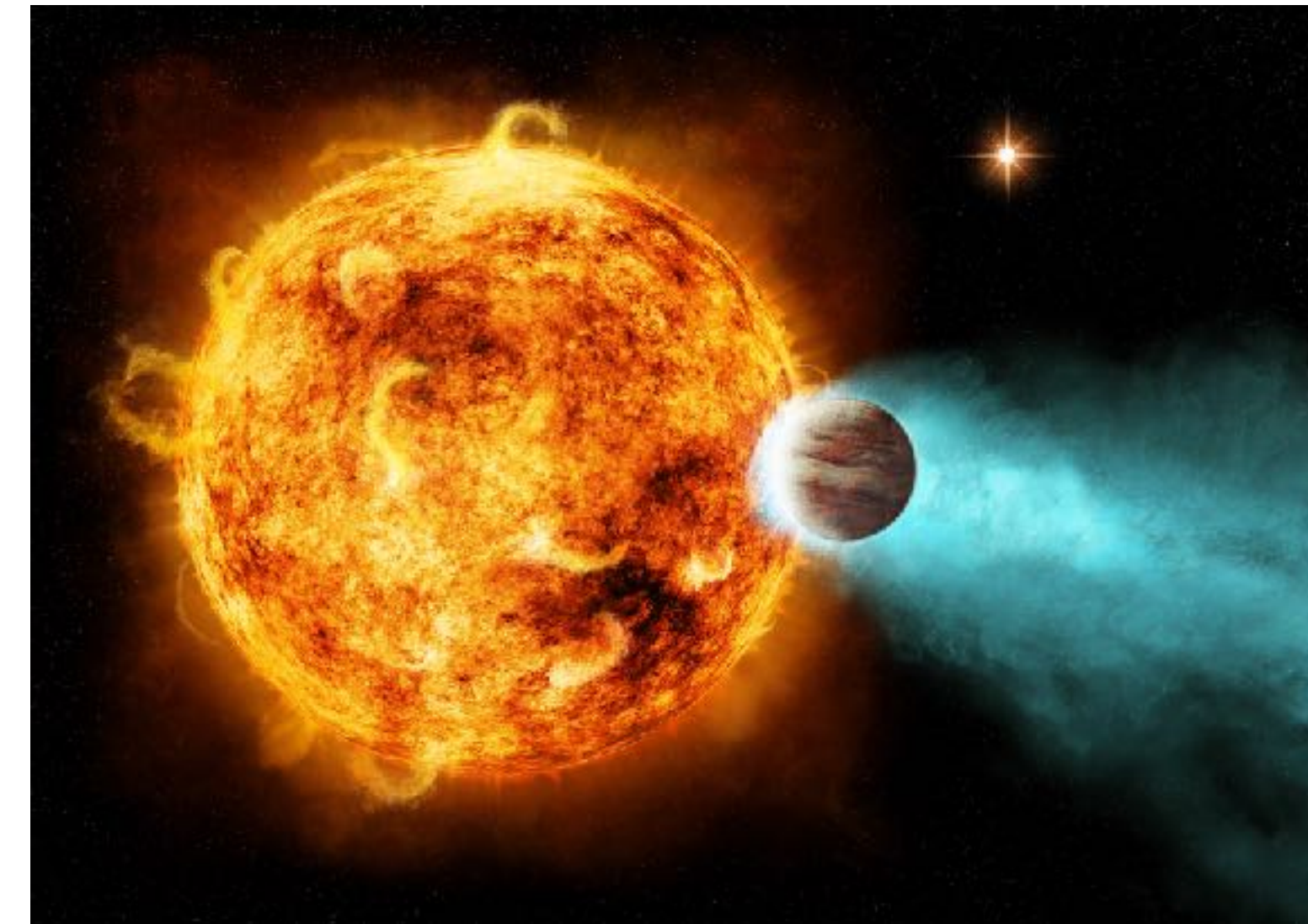
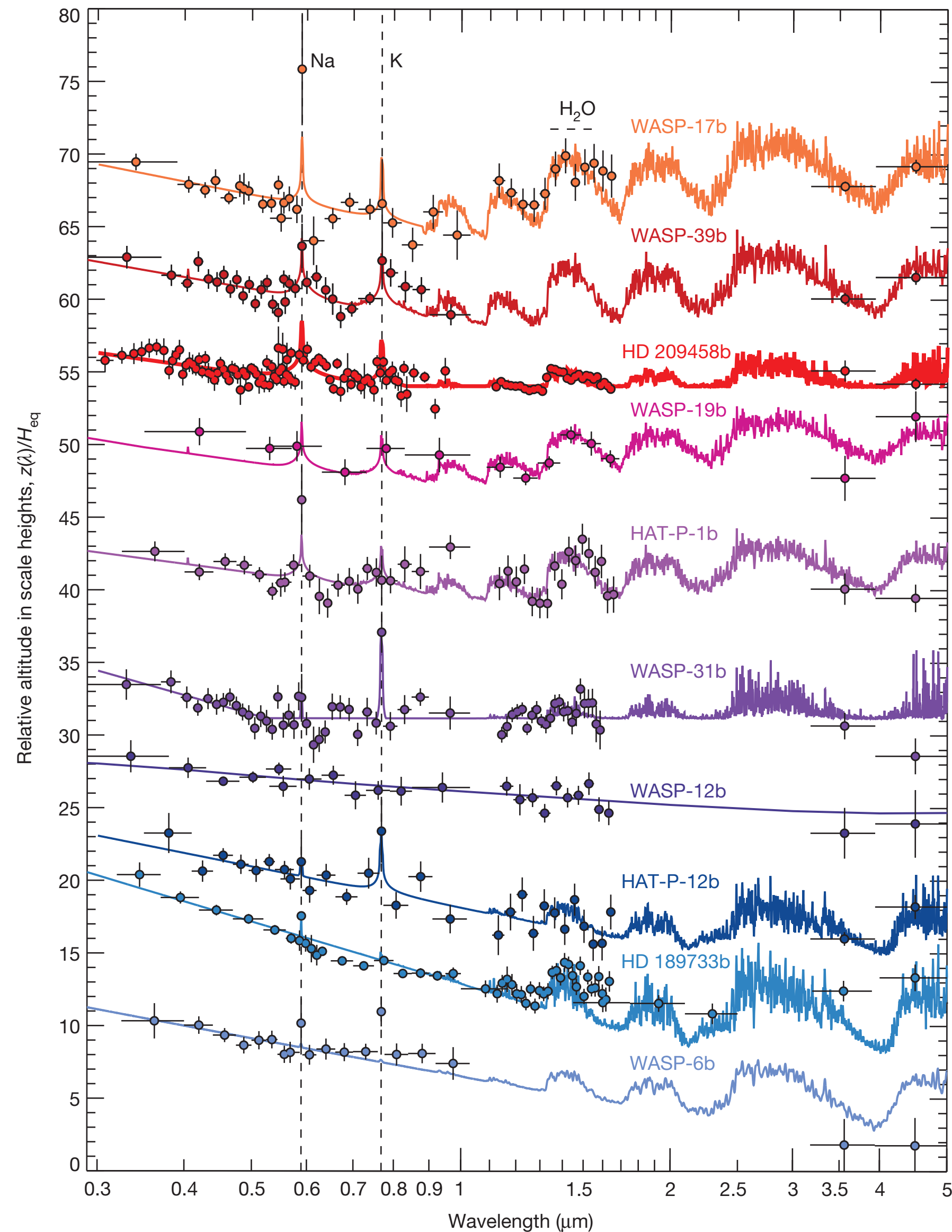


Image credit: Jack Madden & Lisa Kaltenegger / Carl Sagan Institute, Cornell University.

系外惑星の透過光スペクトル



ホット・ジュピターの透過光スペクトル

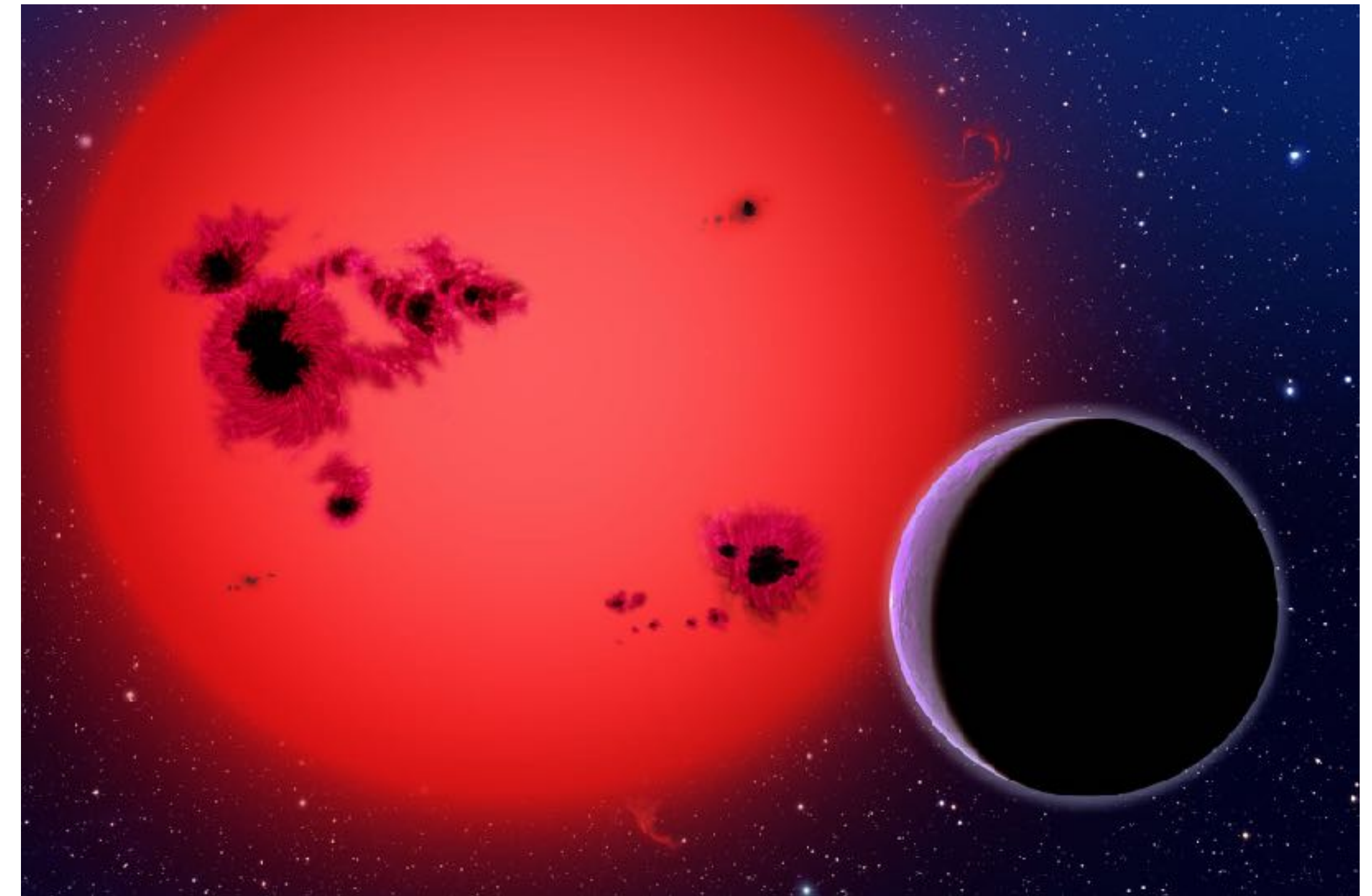
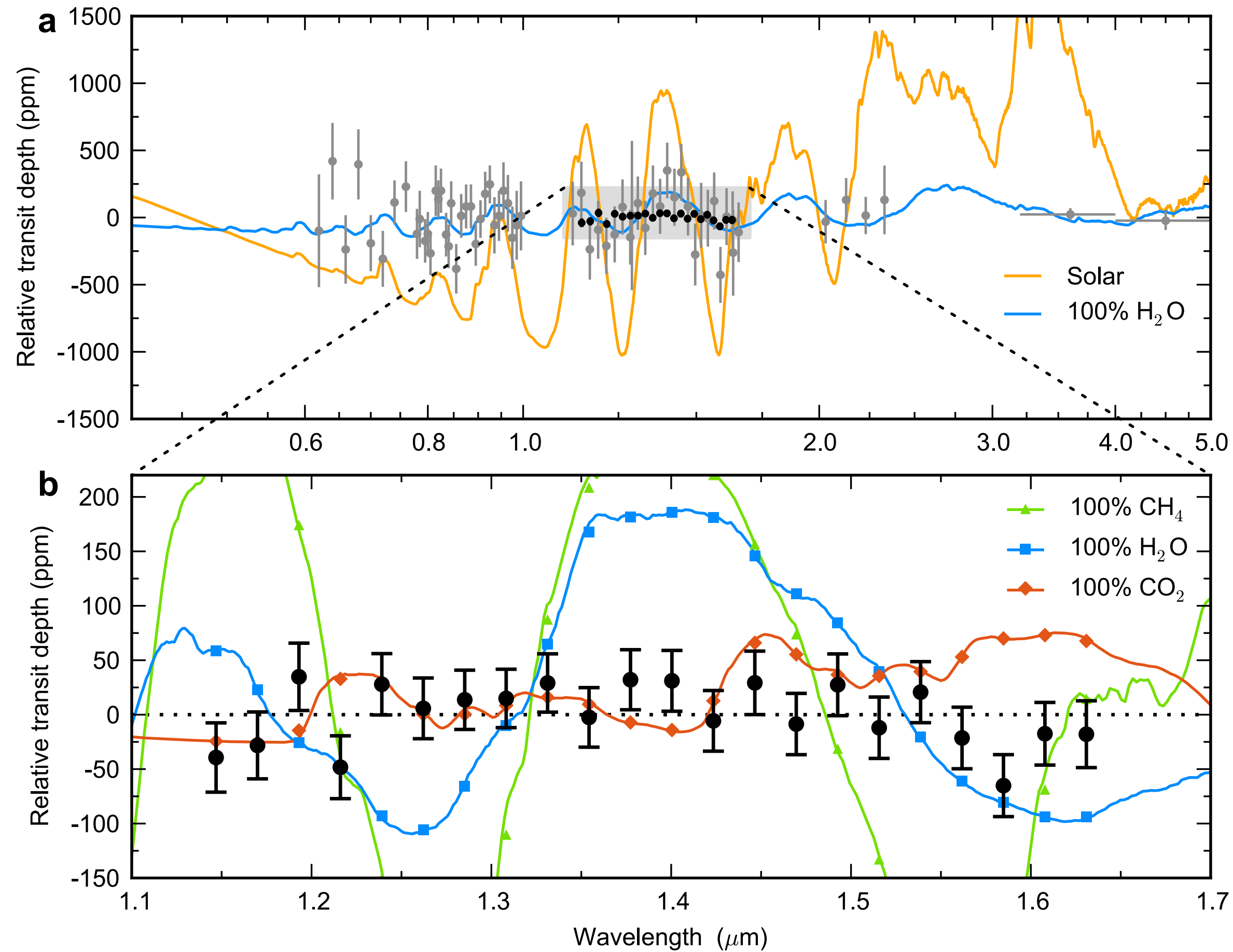


- 天体サイズから太陽系の巨大ガス惑星と同様 H_2 , He ガスを纏っていると考えられる
- Na , K といった高温の惑星特有の分子も

Sing et al. (2015)

ホット・ネプチューンの透過光スペクトル

M型星まわりの系外惑星GJ1214b ($6.3 M_{\oplus}$) の透過光スペクトル (Kreidberg et al. 2014)



フラットなスペクトル → 高分子量 or 雲？

まとめ

原始惑星系円盤・太陽系外惑星

- 原始星をとりまく原始惑星系円盤で惑星が形成
- 系外惑星観測：ドップラー法，トランジット法など間接的手法がメイン
- 太陽系に存在しない惑星：ホット・ジュピター，スーパー・アース，中心星の違い
- 大気スペクトル(透過光など) → 大気・表層の情報

レポート課題(4/22 17時締切)

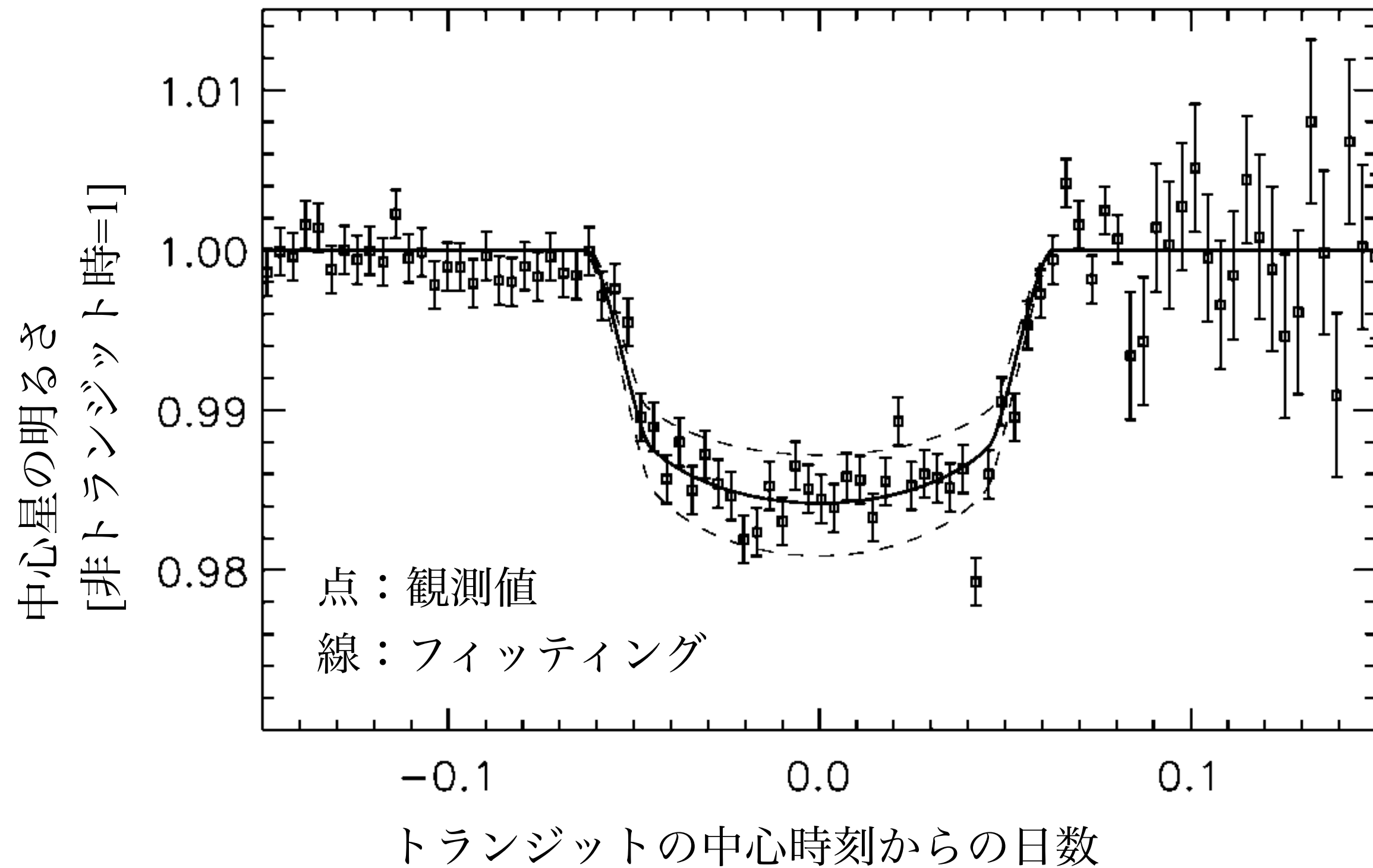


Figure 1. 惑星を持つ HD209458 の光度曲線

表1: 地球半径 6.371×10^6 m に対する太陽系惑星半径

	半径 (地球半径 = 1)
水星	0.38
金星	0.95
地球	1
火星	0.53
木星	10.97
土星	9.14
天王星	3.98
海王星	3.86

Figure 1 から恒星 HD209458 のトランジット減光率を読み取り，系外惑星 HD209458b の惑星半径を計算せよ (有効数字1桁). 計算には恒星半径 8.4×10^8 m を用いてよい. 計算結果を太陽系の惑星の半径と比較することで，惑星が岩石惑星・巨大ガス惑星・巨大氷惑星のうちのいずれかであるか推論せよ.