

2011年8月8日
北軽井沢駿台天文講座

第4回 物質進化のなかの惑星・生命

第4回 物質進化のなかの惑星・生命

1. 星の観測による惑星探査
星の運動の観測から
星の明るさの観測から
2. 惑星の表面・大気
3. 惑星をもつ星の特徴は？

太陽系の惑星たち

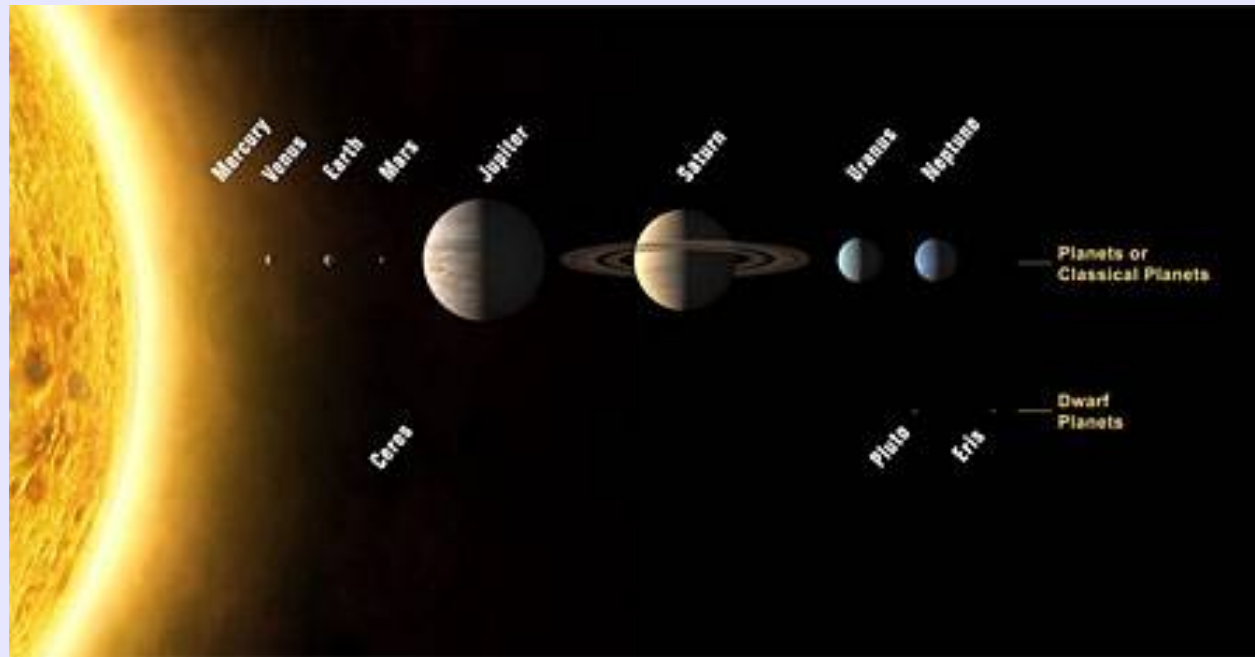
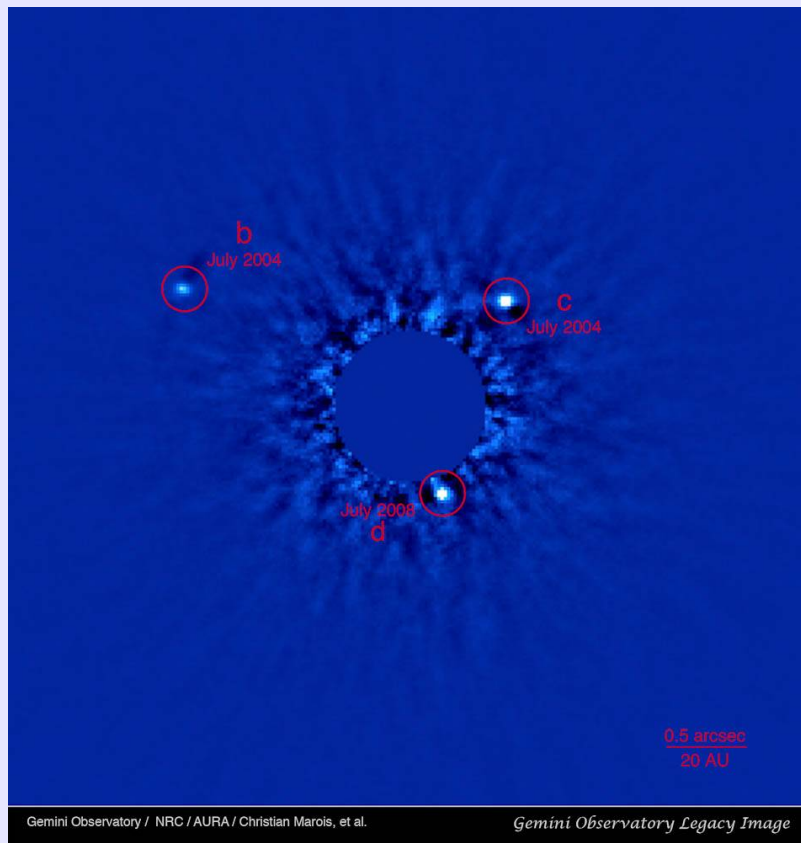


図: 国際天文連合 (IAU)

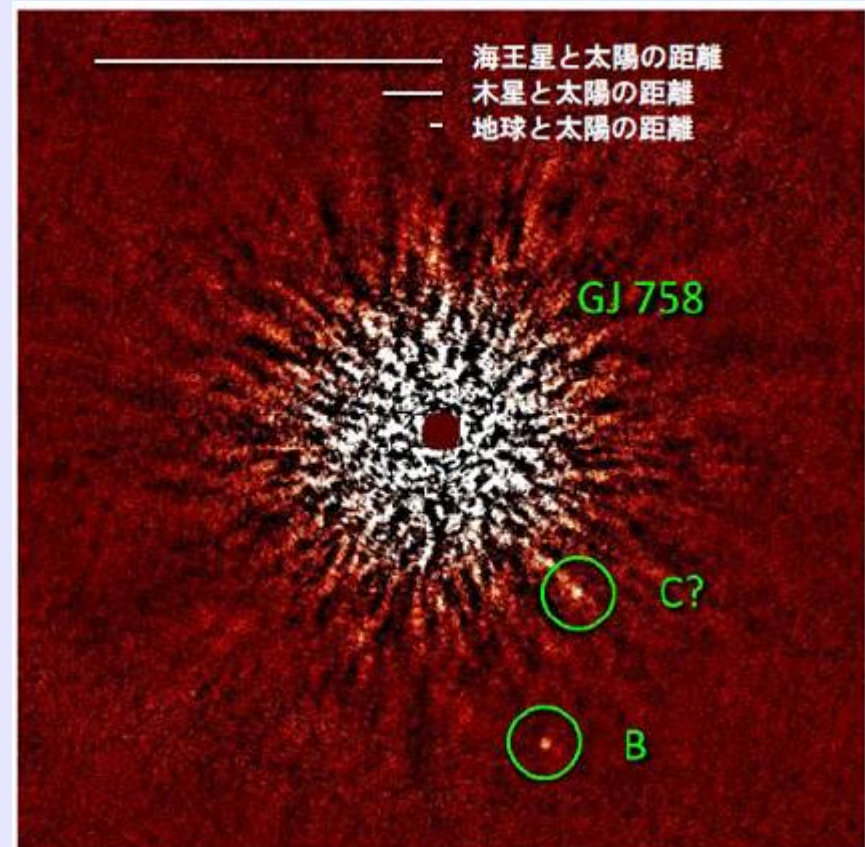
	質量	半径	軌道長半径	離心率
水星	0.055	0.38	0.38	0.206
地球	1	1	1	0.017
木星	317	11.2	5.2	0.049
太陽	33万	109	-	-

直接撮像による系外惑星の発見

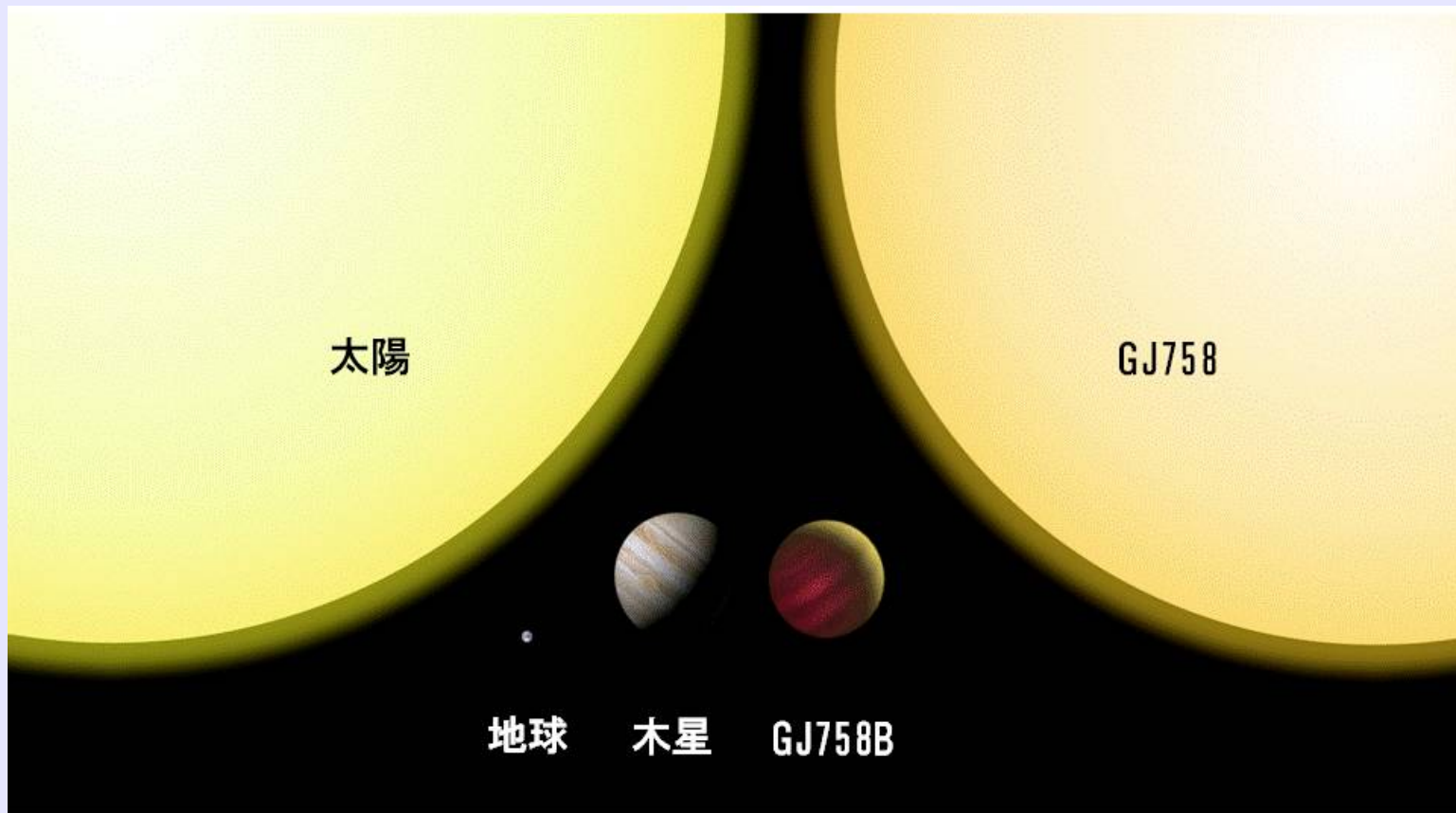
太陽よりやや重い星の
まわりの惑星候補天体
(Gemini 望遠鏡など、2008年)



太陽型星のまわりの
惑星候補天体
(すばる望遠鏡、2009年)



太陽型星のまわりの惑星候補天体 (すばる望遠鏡、2009年)



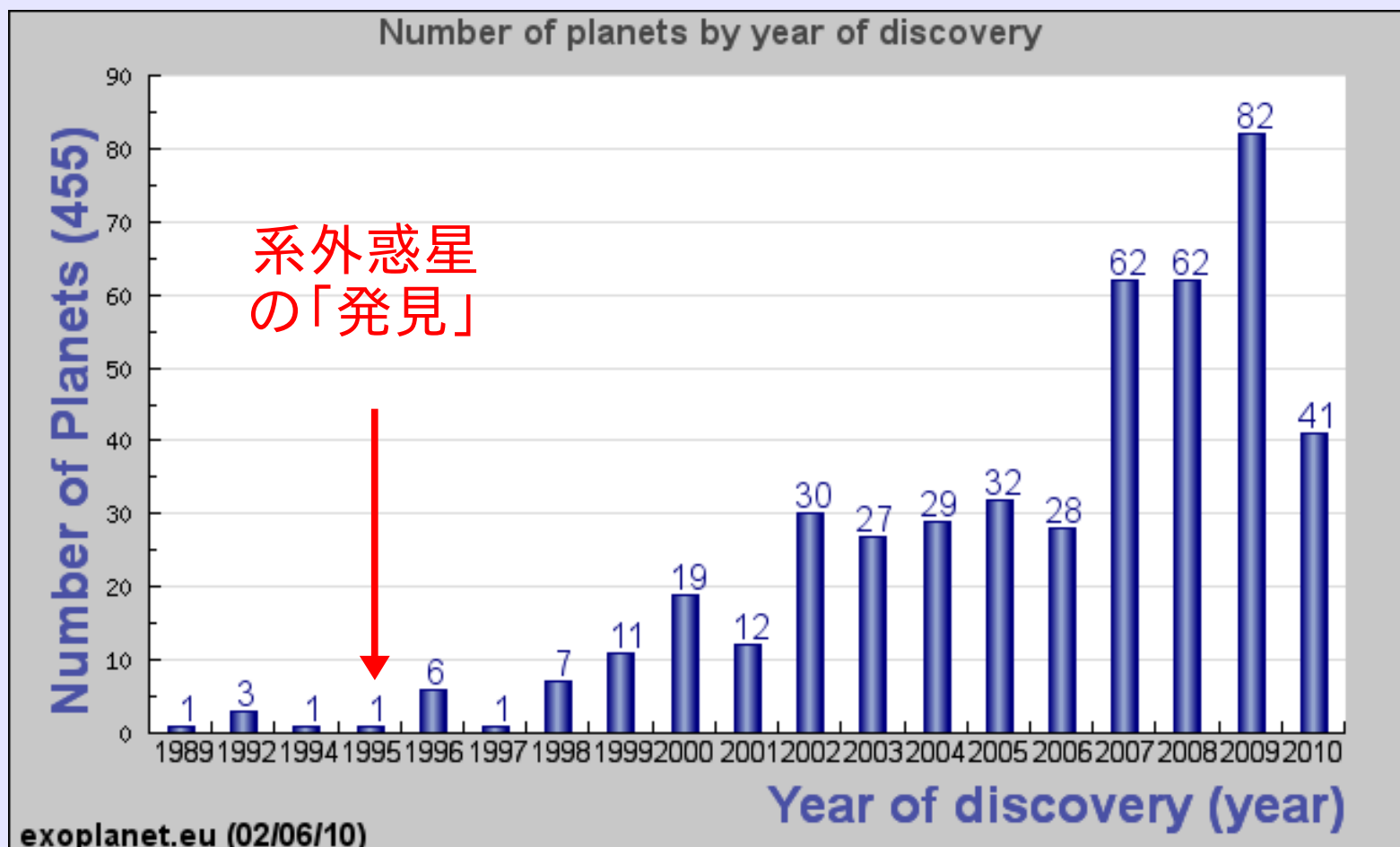
1.星の観測による惑星探査

今日のテーマは、
「星(惑星系の母星)の観測による惑星の
研究」

→現時点では系外惑星研究の主流

太陽系外惑星発見数

惑星発見数



1995

西暦(年)

2010

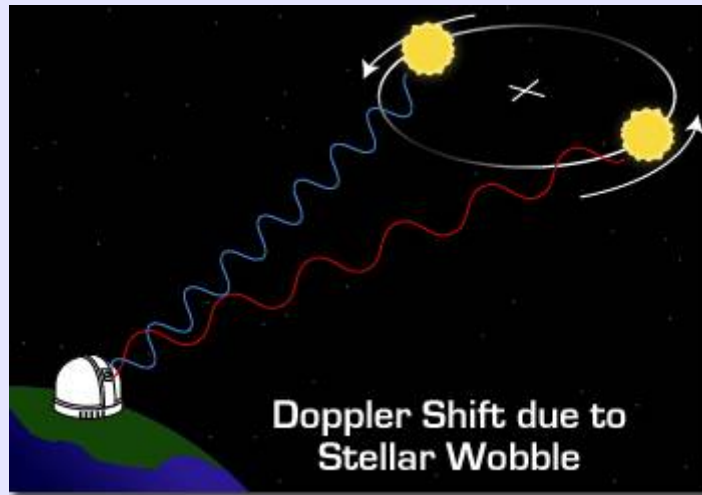
星の観測による系外惑星の探査

- 惑星によってゆさぶられる中心星の観測
星の位置の変化 (→ 測定困難)
星の運動 (視線速度) の変化: 「ドップラー法」
- 惑星が星の全面を通過することによる星の減光の観測
「トランジット法」
- 星 + 惑星による重力レンズ効果の観測

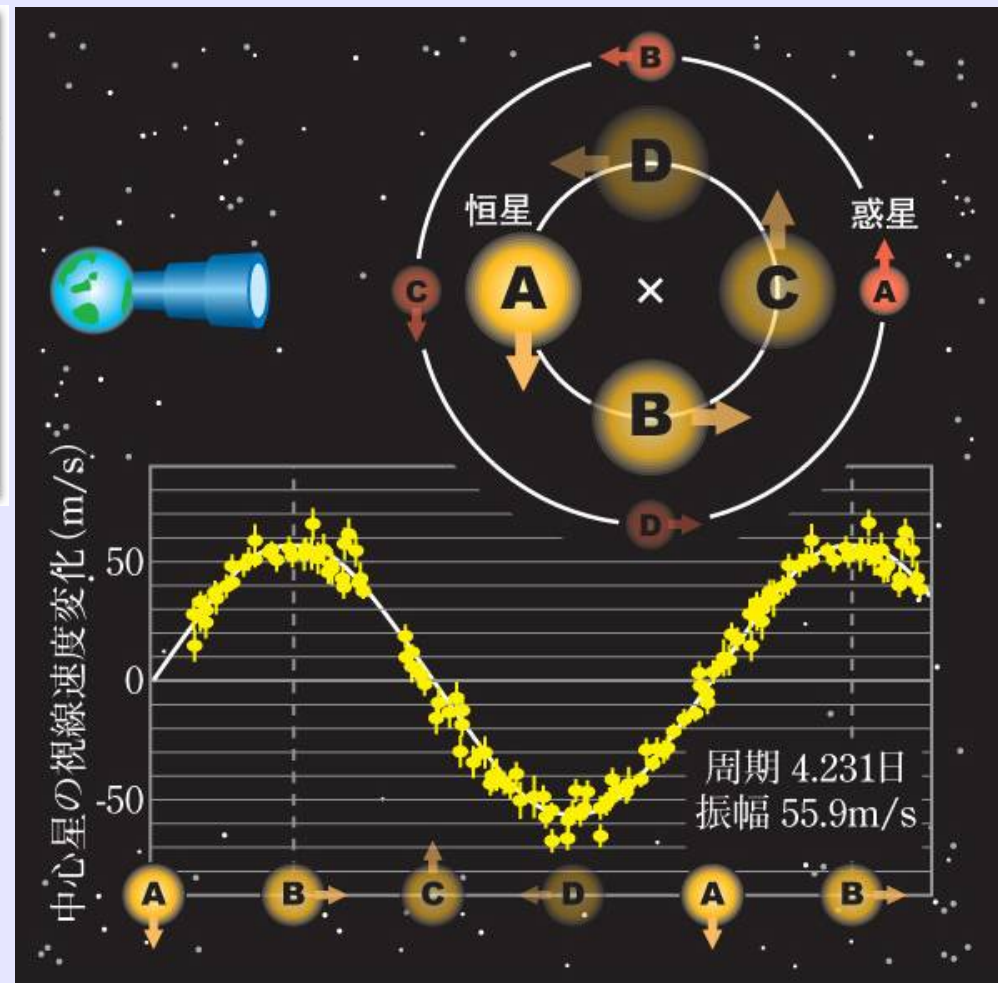
惑星探査(1)ドップラー法

惑星によってゆさぶられる中心星の運動を測定

→惑星の質量(下限値)、軌道周期などがわかる



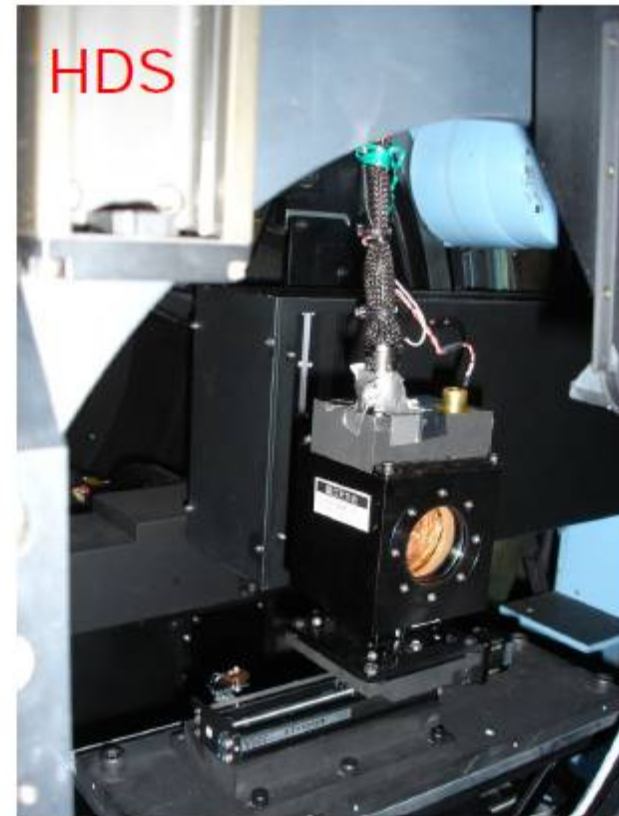
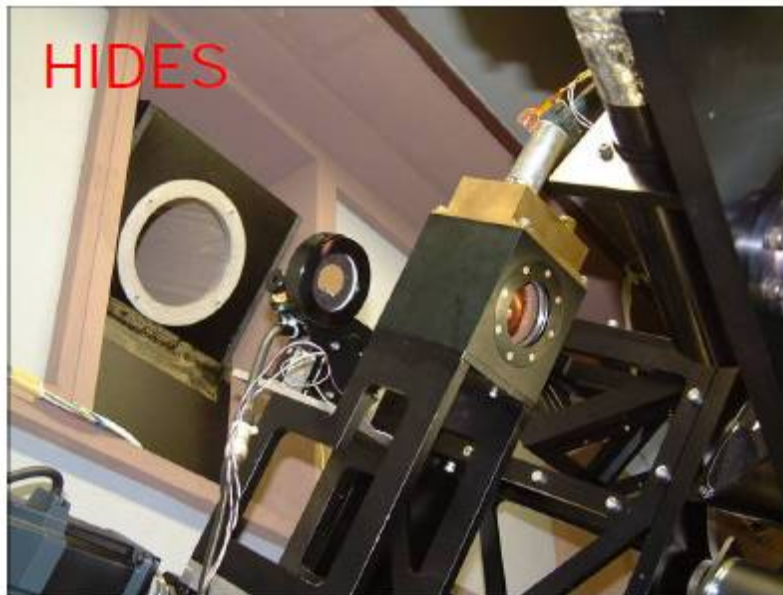
星のドップラー偏移
の測定は星の観測
の基本中の基本



(理科年表オフィシャルサイトより)

視線速度の精密測定：沃素ガス(12)のスペクトル線で波長スケールを刻み込む

沃素ガスを封入した容器(→)を分光器に装着



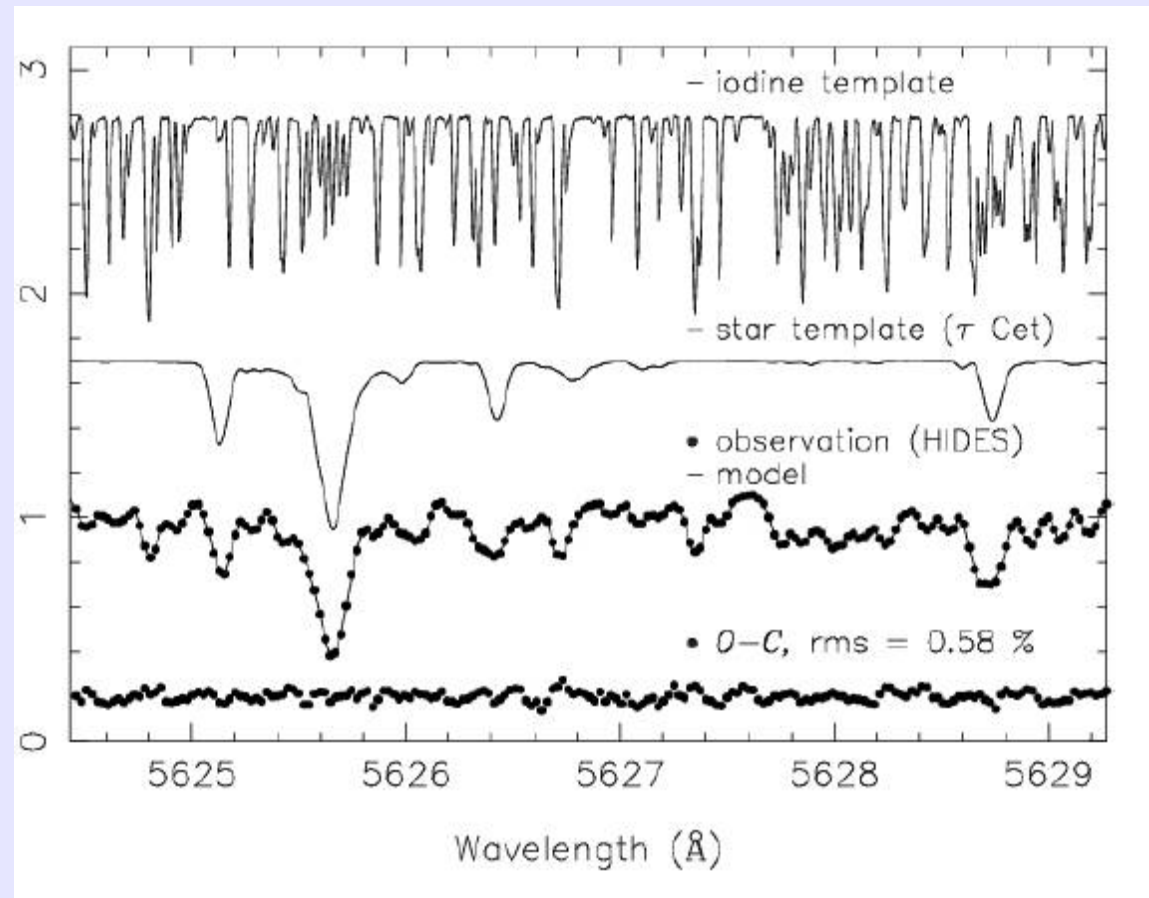
画像：佐藤氏(東工大)提供

視線速度の精密測定：沃素ガス(I2)のスペクトル線で波長の「目盛」を刻み込む

沃素ガスの吸収
スペクトル線

星のスペクトル

星+沃素ガス
のスペクトル



国立天文台岡山観測所での観測成果

太陽より2-3倍重い星(赤色巨星)のまわりの惑星探査でリード

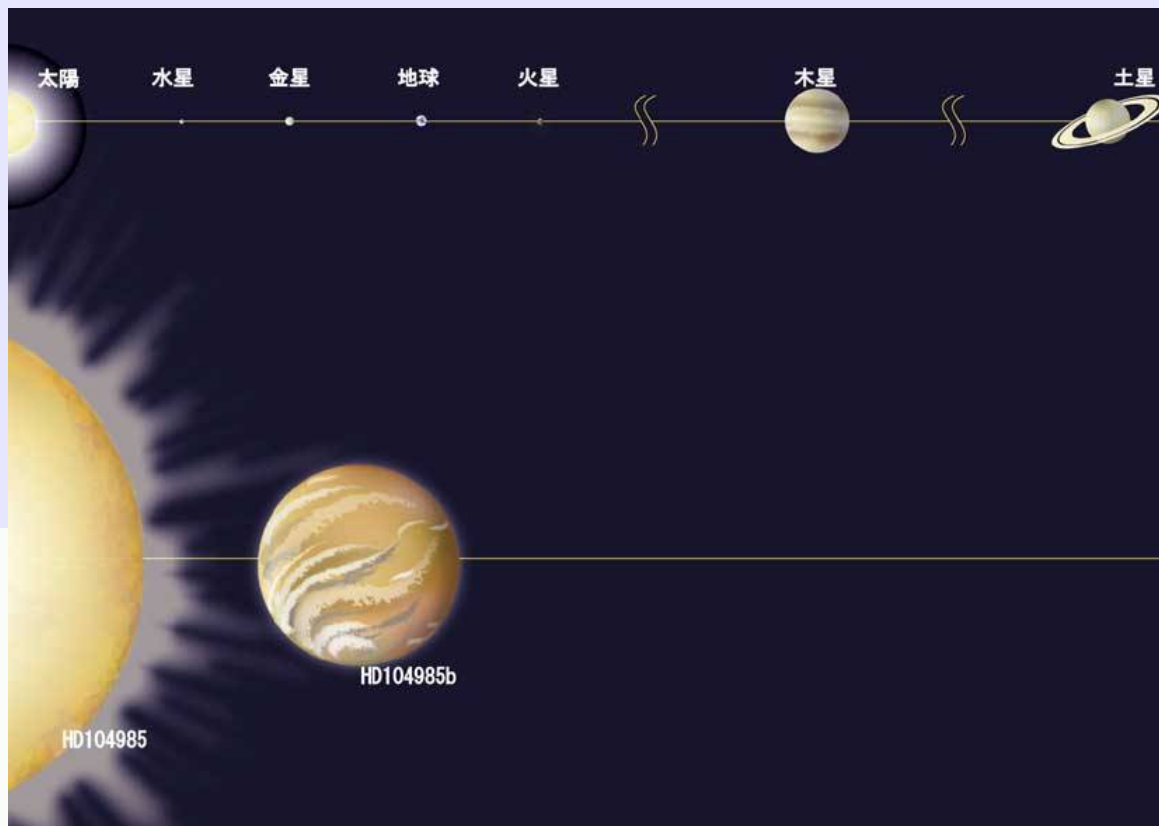
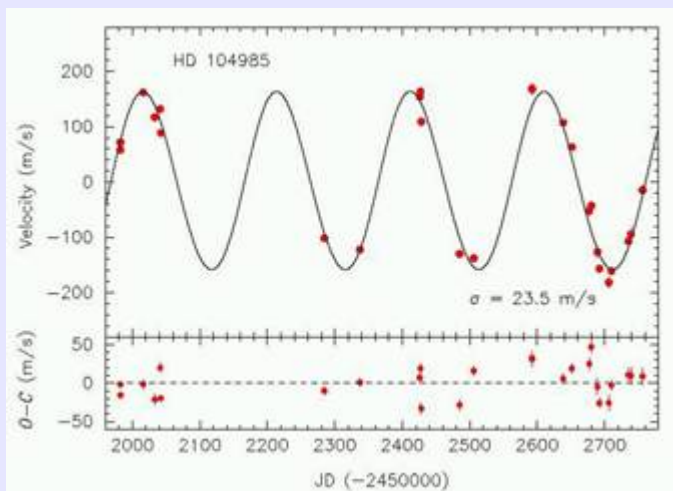
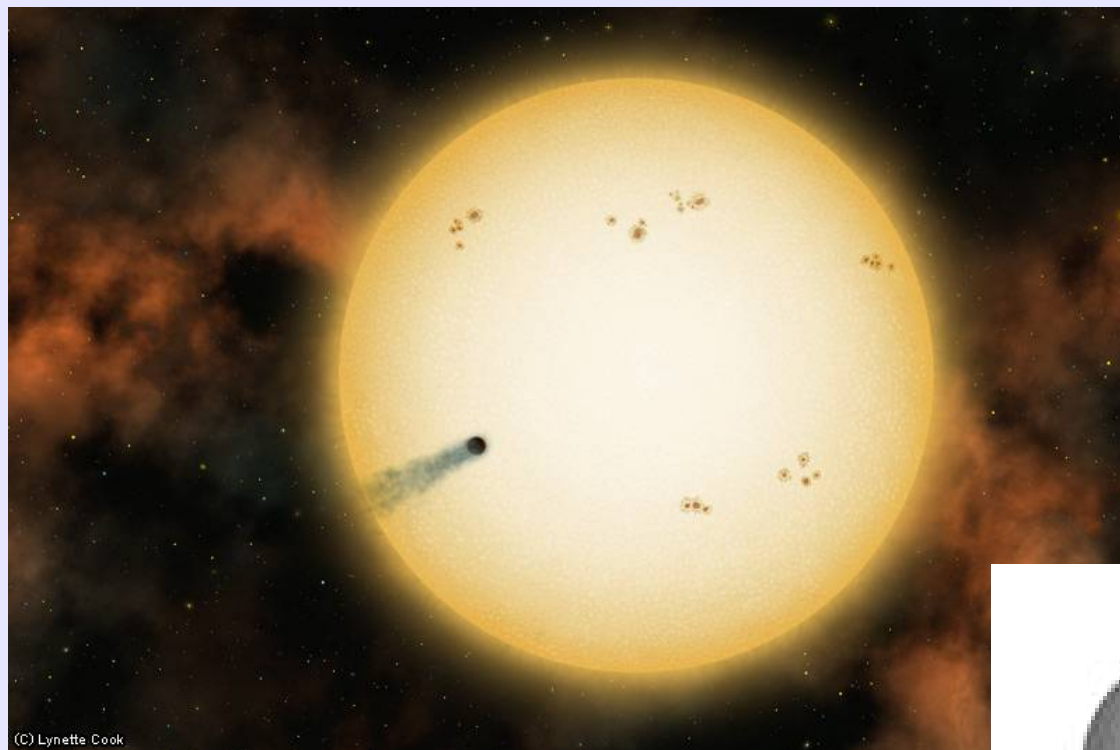


図:岡山天体物理観測所

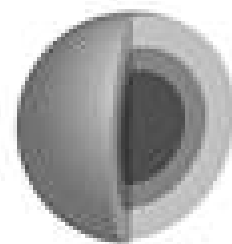
すばる望遠鏡の成果～巨大コアをもつ惑星



ドップラー法でみつかった星がトランジットを起こすことが判明

→意外とサイズの小さい
=密度の高い惑星であることが判明

図：すばる望遠鏡



HD 149026 b

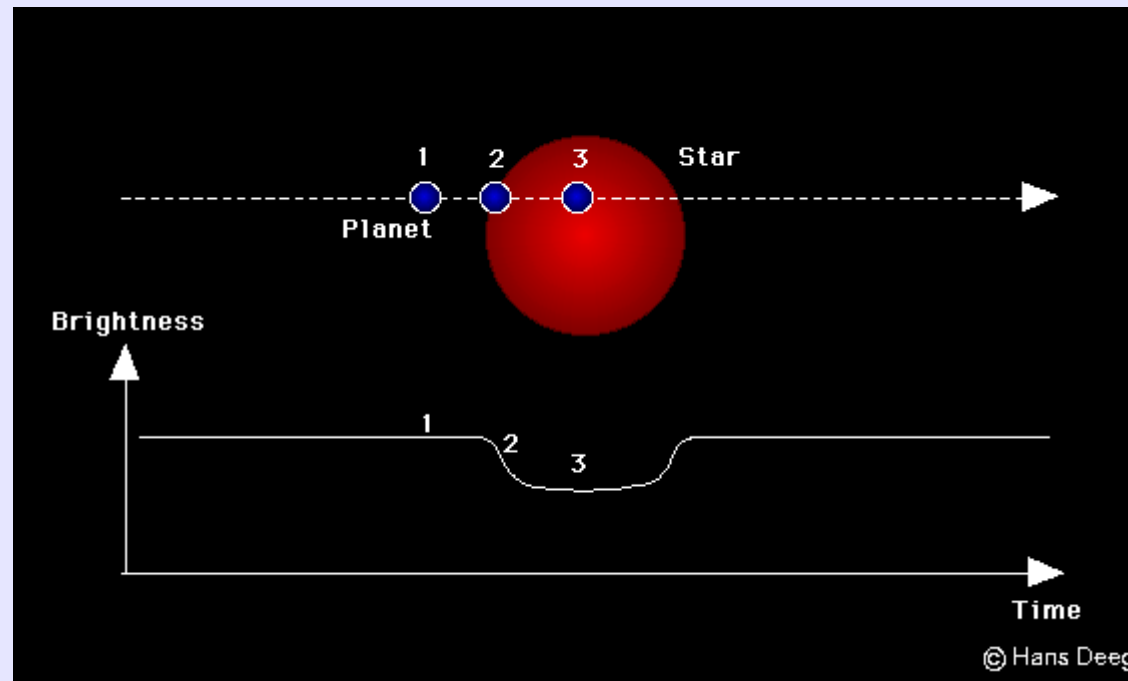


Jupiter

(C) Greg Laughlin

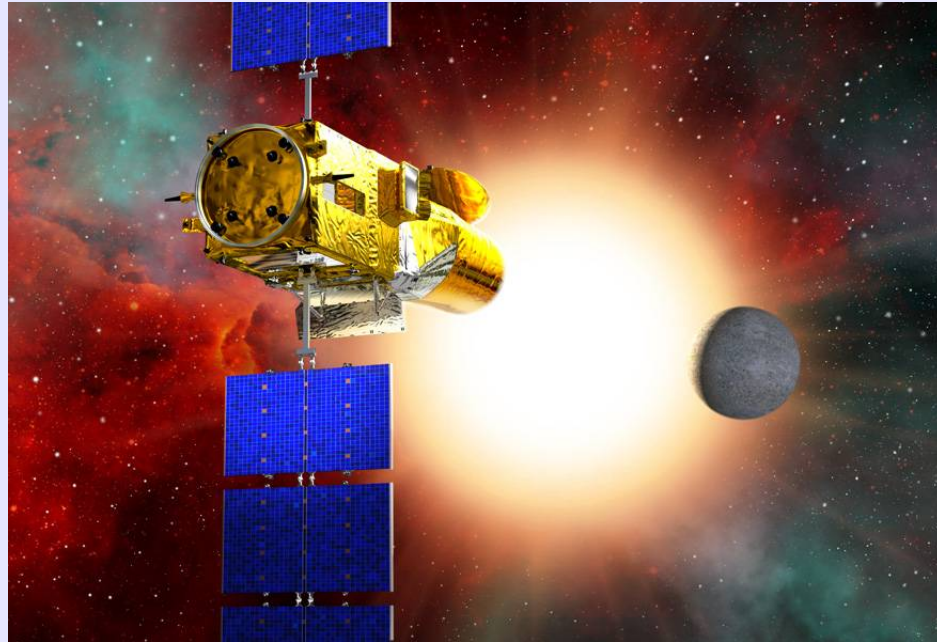
惑星探査(2)トランジット法

惑星が前面通過する星の減光を観測
→惑星のサイズがわかる

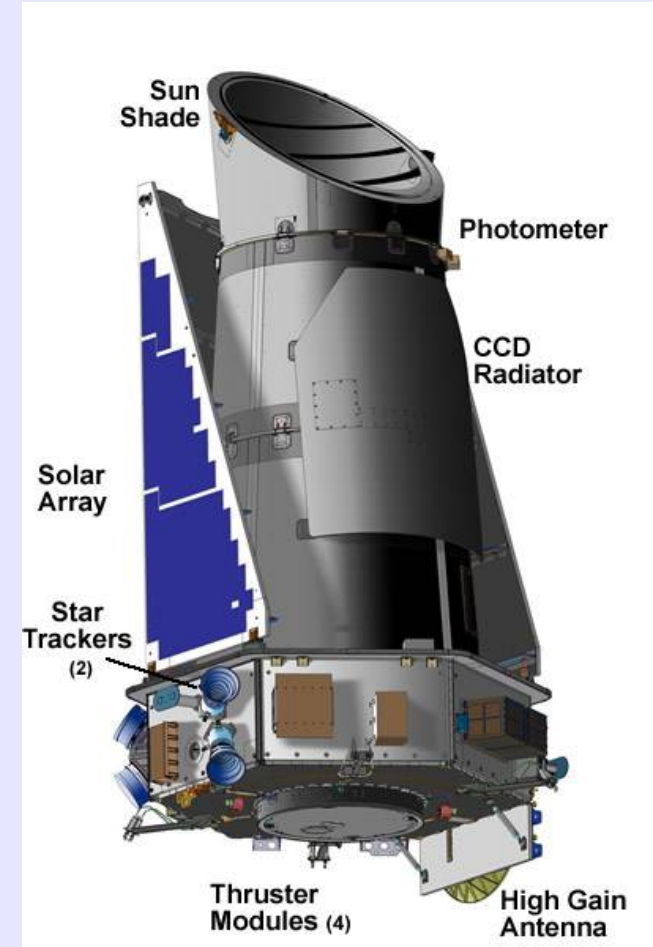


トランジット法による惑星検出をすすめる衛星望遠鏡

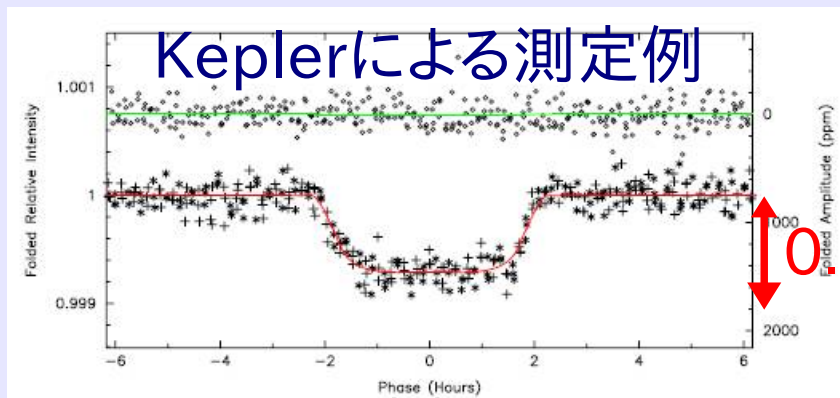
CoRoT (ESA)



Kepler (NASA)



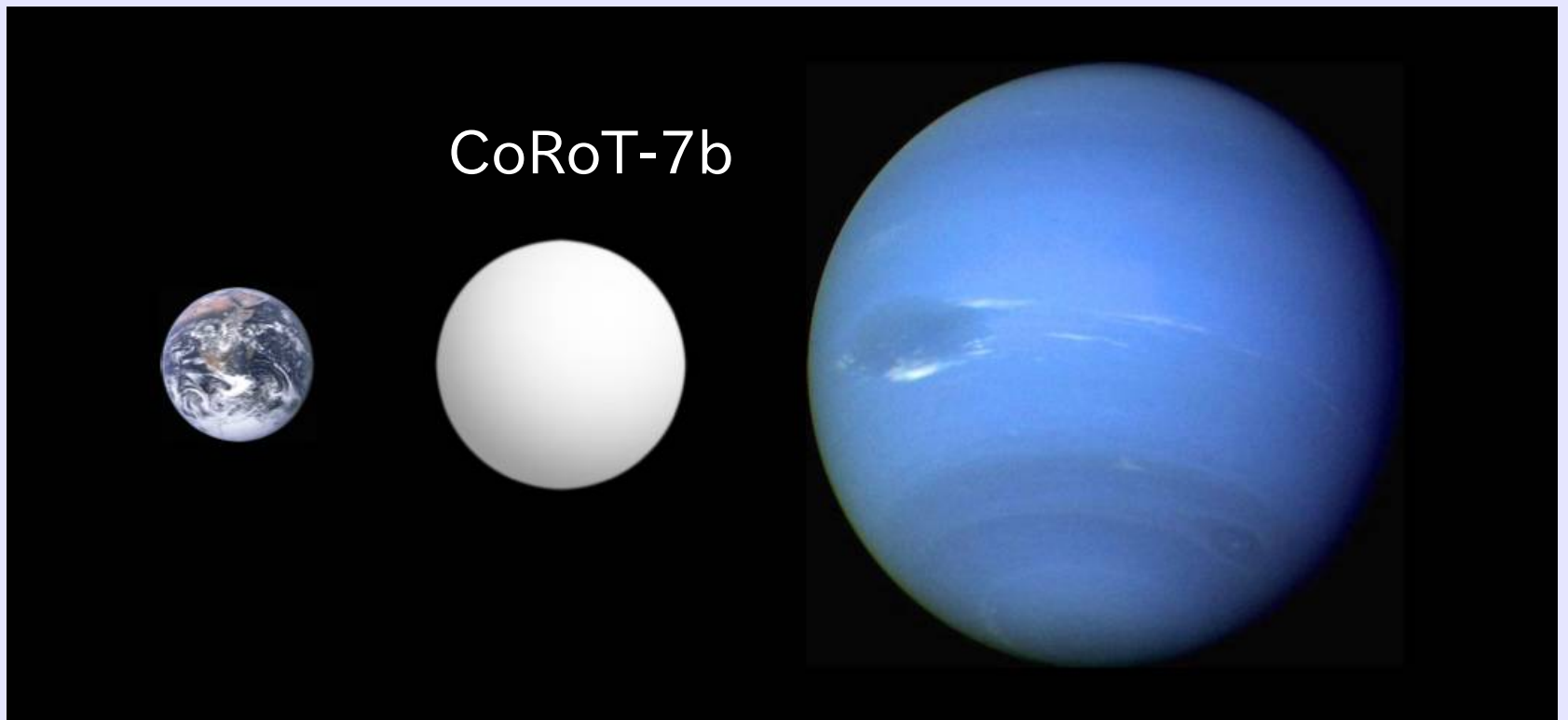
星の明るさ



地球型惑星：“Super Earth”

例: CoRoT-7b
地球質量の5倍の惑星
地球半径の1.7倍
公転周期は1日以下

海王星



(画像: Wikimedia Commons より)

「間接法」で見つかった多様な惑星系 ～太陽系は典型的な惑星系ではない？

- ホットジュピター～星の近くの灼熱の巨大惑星
- 極端な楕円軌道をもつ惑星
- 星の自転に逆行して公転する惑星

2. 惑星の軌道進化

- 「ホットジュピター」や長楕円軌道の惑星は、惑星系形成理論でまったく説明できない

惑星は星形成時に周囲にできるガス・塵の円盤のなかから生まれる。
巨大惑星ができるのは星からある程度離れた場所。
その軌道は円に近い

- 巨大惑星は誕生後に軌道が大きく変化？
 - 惑星が内側（星の近くに）に移動する
 - 惑星どうしの「散乱」
 - 伴星による軌道変化

太陽系のような惑星系の形成シナリオ （「コア集積モデル」）

岩石微惑星が種となる



水が固体になるところで巨大惑星に成長

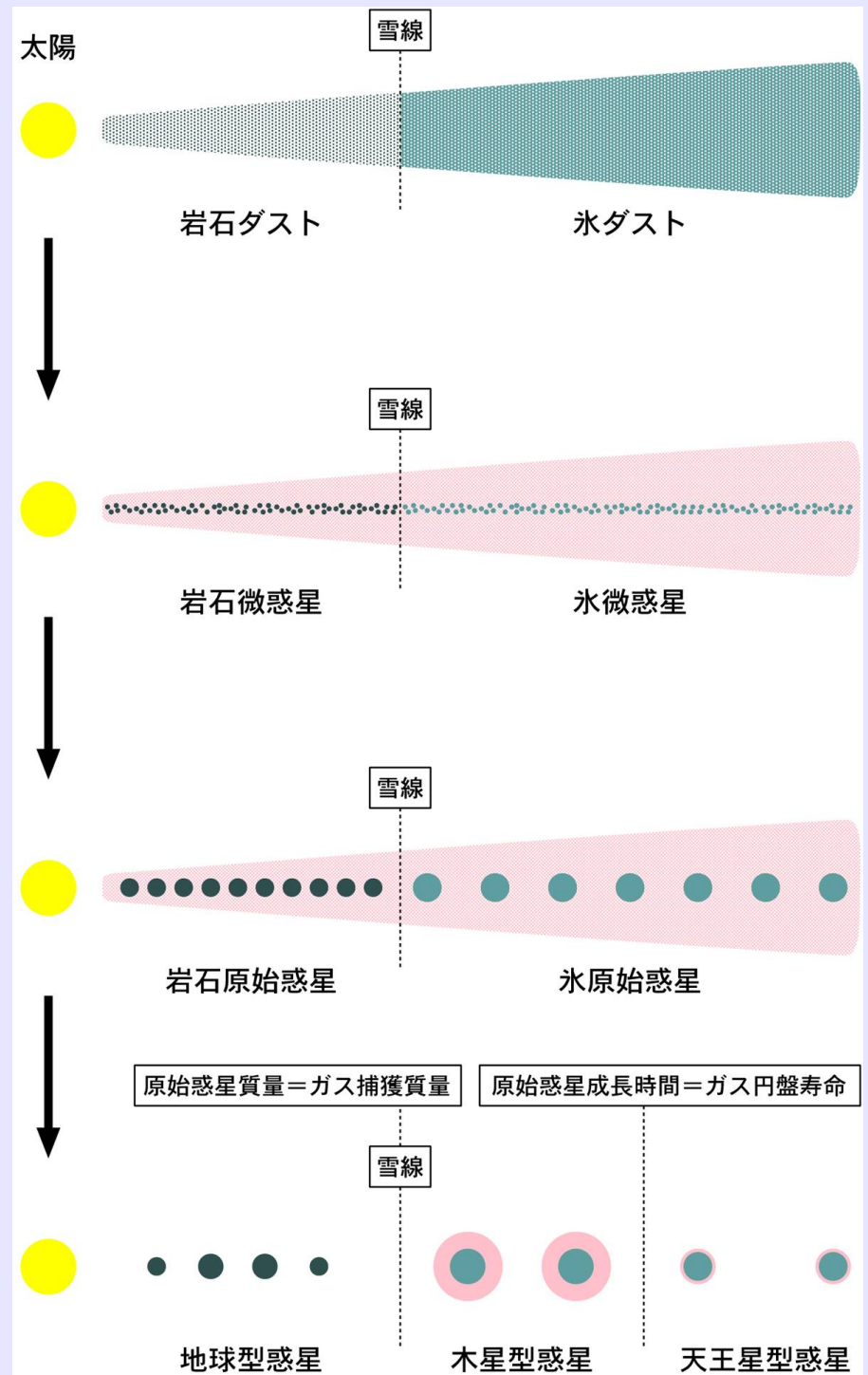


図:理科年表オフィシャルサイト

星の自転と惑星の公転の関係を調べる

トランジット(惑星が星の前面を横切る)を起こす星が自転している場合

↓
惑星が星を隠す場所により、
星の視線速度が変化するように見える

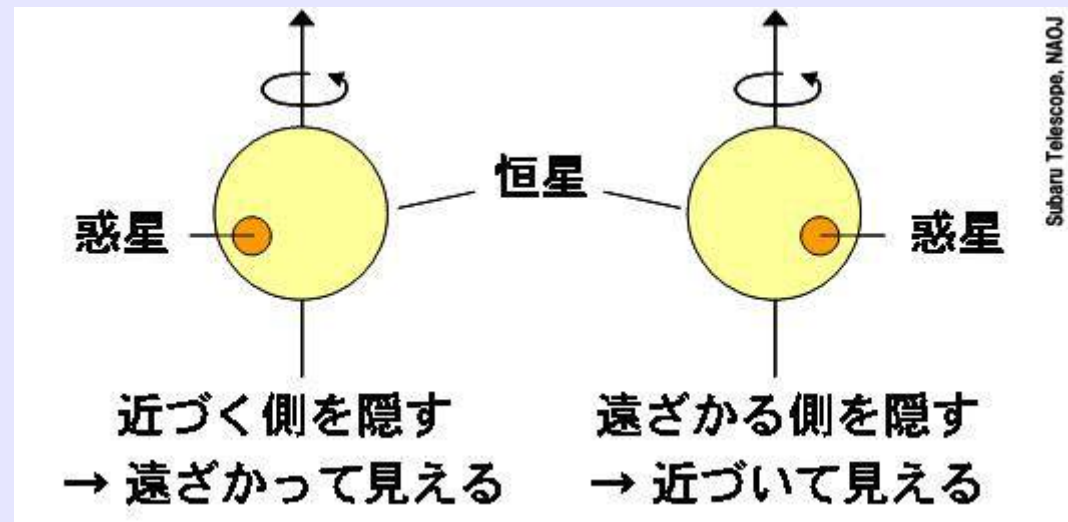
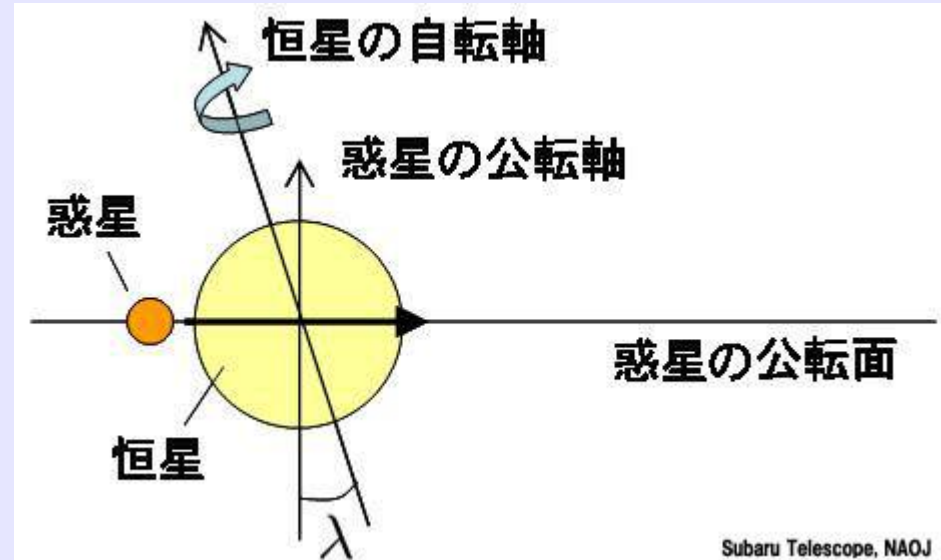


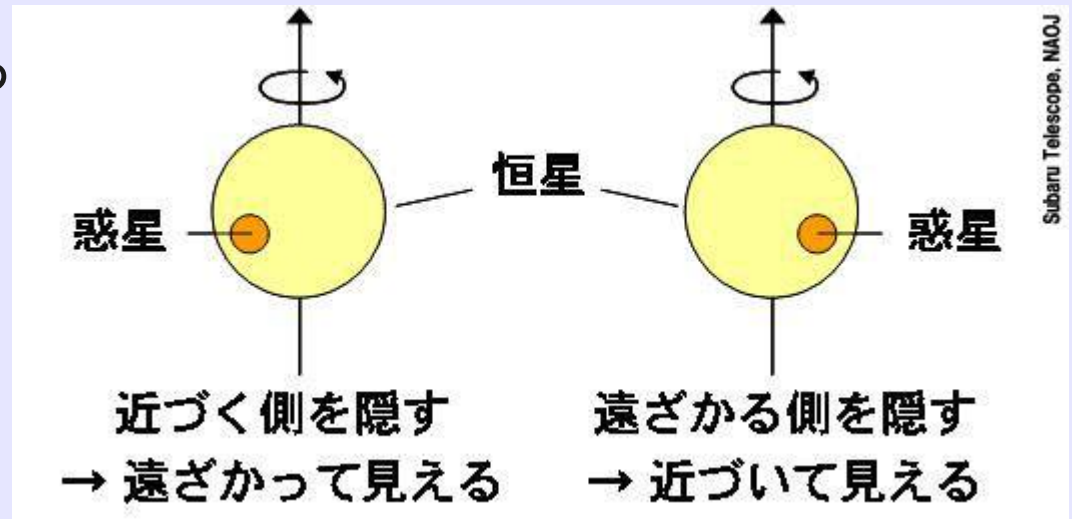
図:すばる望遠鏡

星の自転に逆行する惑星系の発見

自転と同じ向きに惑星が回っている(順行の)場合



見かけ上、「遠ざかる」
→「近づく」



昨年発見された「逆行惑星」
→巨大惑星の形成後に、軌道が大きく変化した確かな証拠

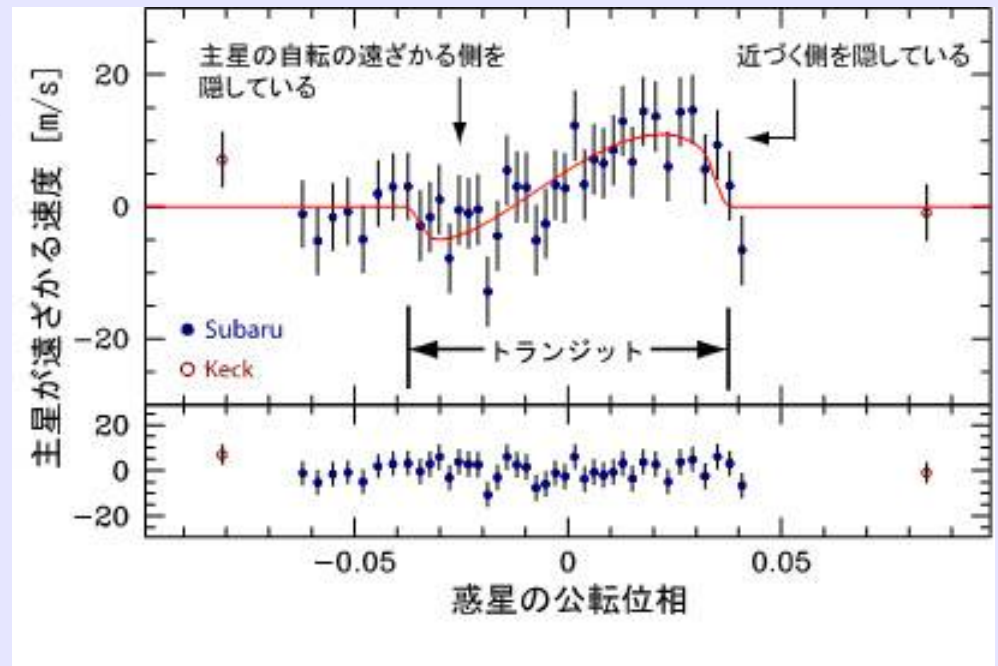


図:すばる望遠鏡

3. 惑星の表面・大気を探る

惑星の光は、

- 中心星の光の反射:主に可視光
- 惑星自身の放射:主に赤外線

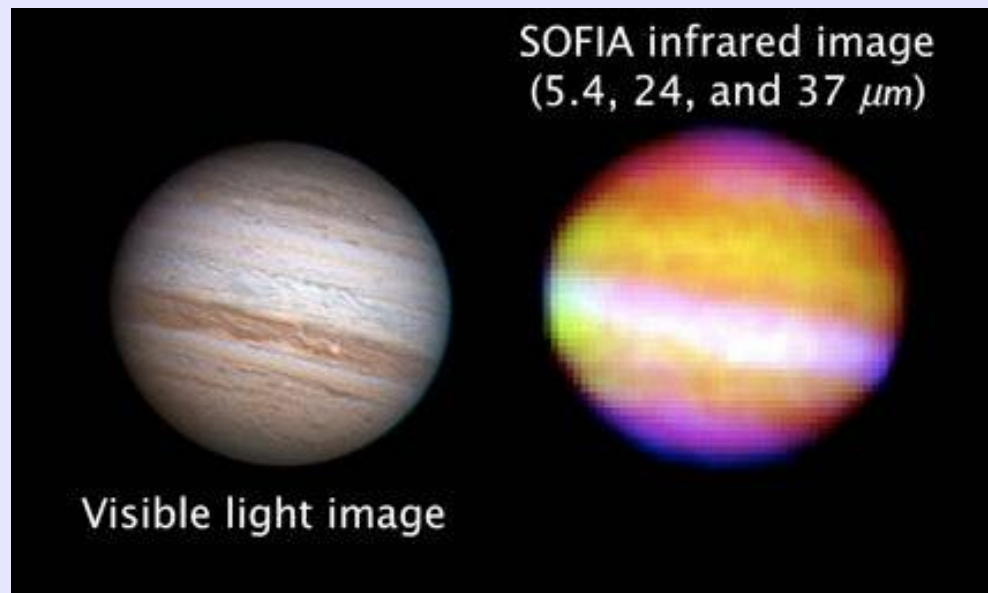
木星の画像

可視光

赤外線



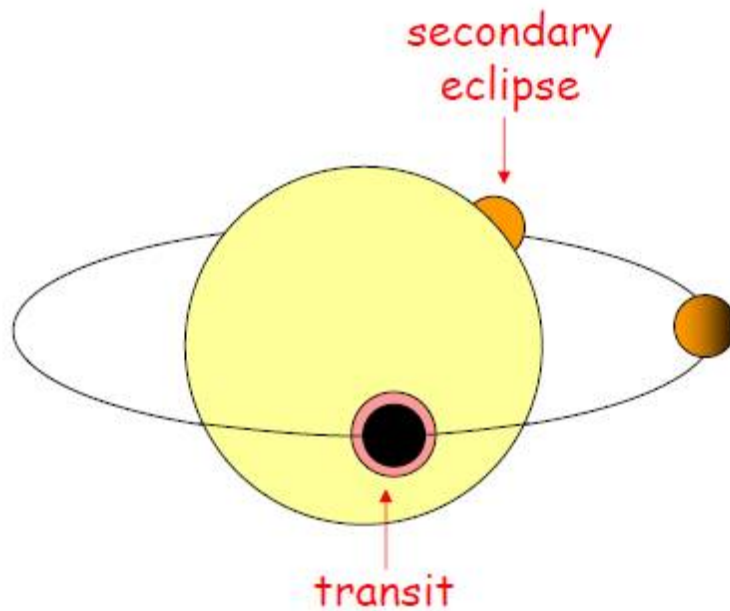
図: NASA/SOFIA



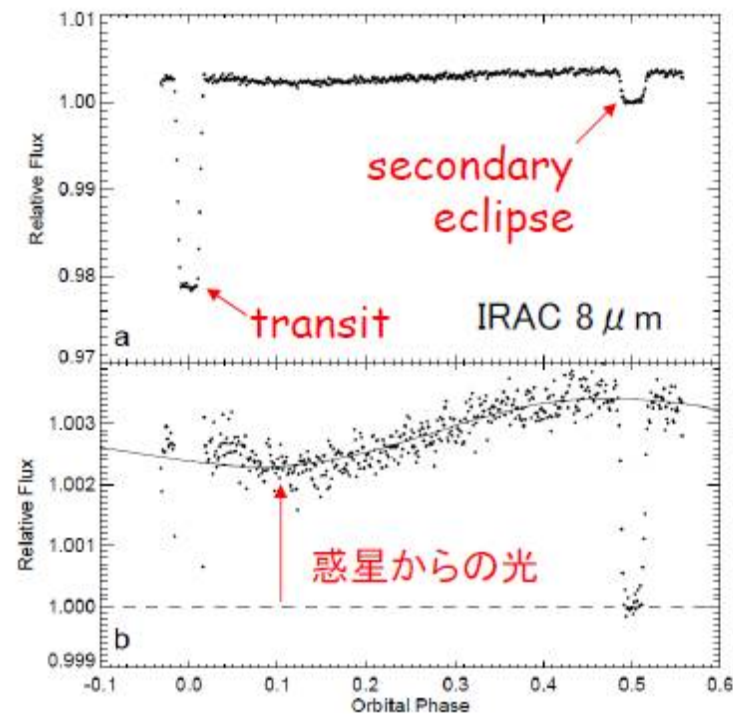
惑星からの光を（星と分離せずに）とらえる

トランジット惑星系から来る光

赤外線による観測



恒星と惑星の光が混じってくる



Knutson et al. (2007)

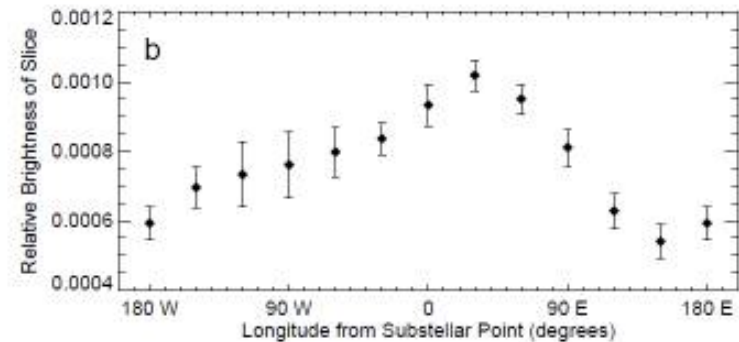
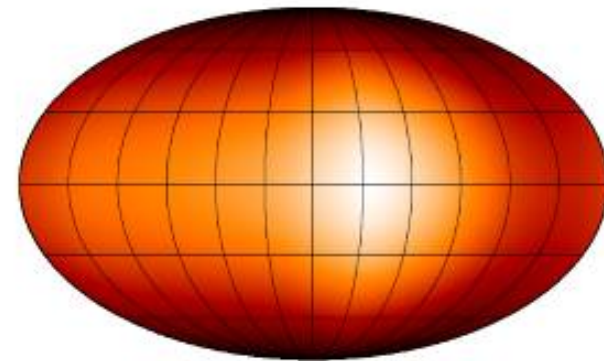
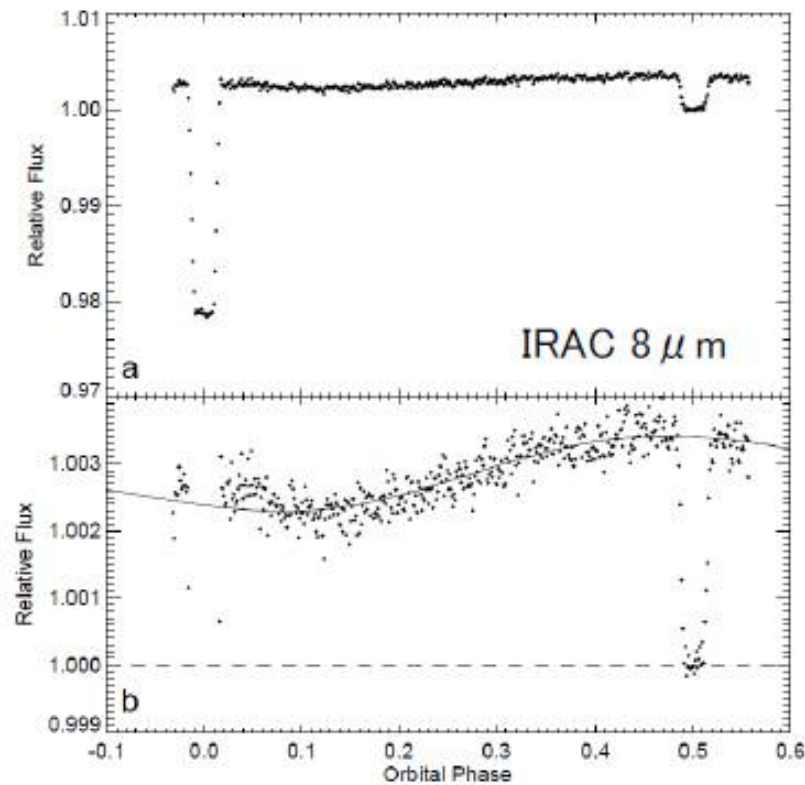
成田氏(国立天文台)のスライドより

惑星の温度マップの研究

HD189733bのトランジット前からsecondary eclipse後まで

赤外線による観測

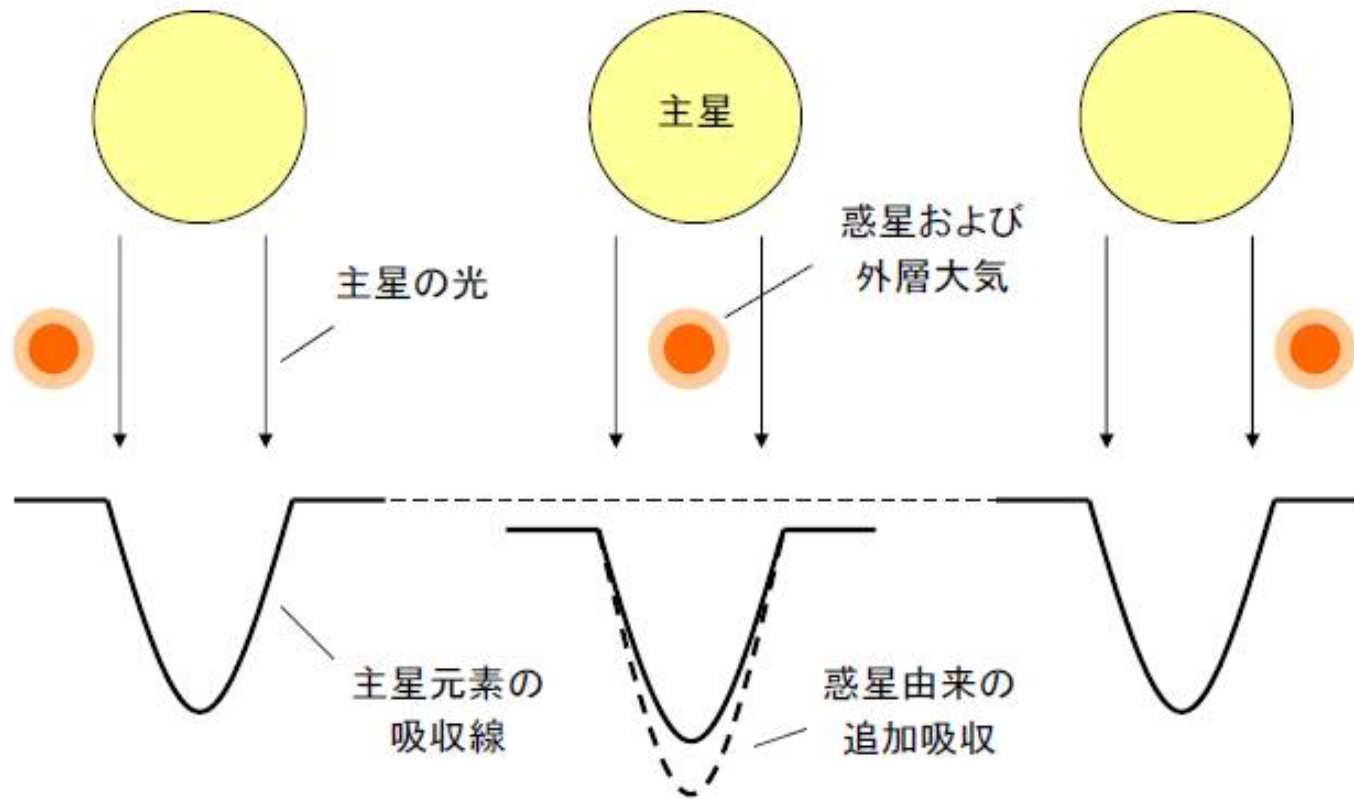
連続測光観測した結果



Knutson et al. (2007)

成田氏(国立天文台)のスライドより

トランジット惑星大気の透過分光

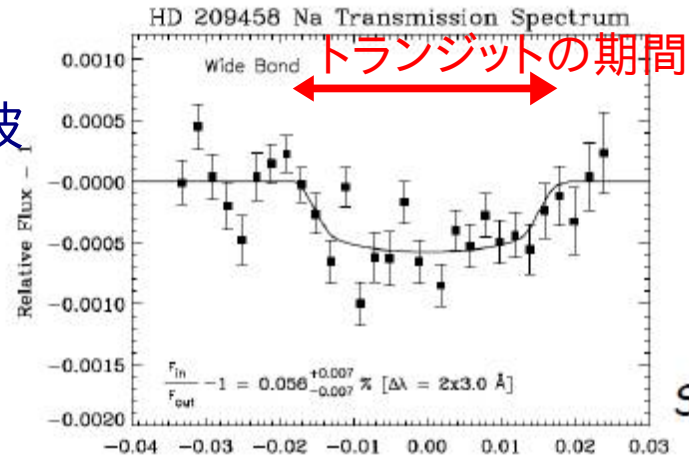


惑星の昼と夜の境目の部分を透過した光を分光し
惑星大気による吸収を調べることができる

惑星大気中のナトリウムによる星の光の吸収

地上望遠鏡でのナトリウムの検出

ナトリウムの吸収線を含む波長域の光の強さの変動

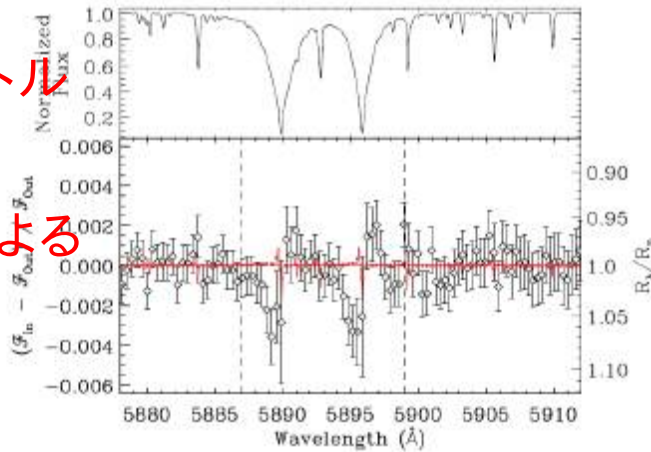


Snellen et al. 2008

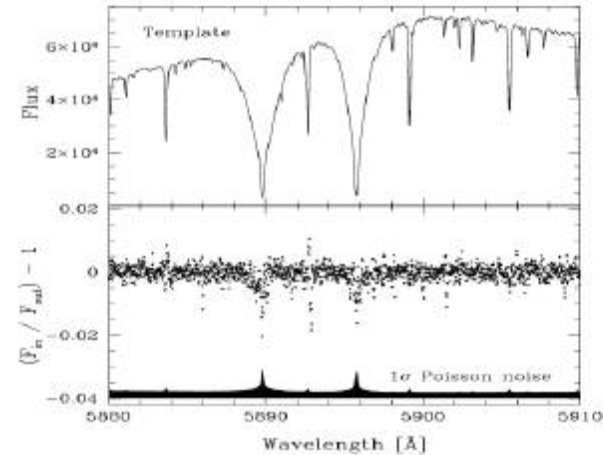
ナトリウムの吸収線

星のスペクトル

惑星大気による「追加吸収」



Redfield et al. (2008)

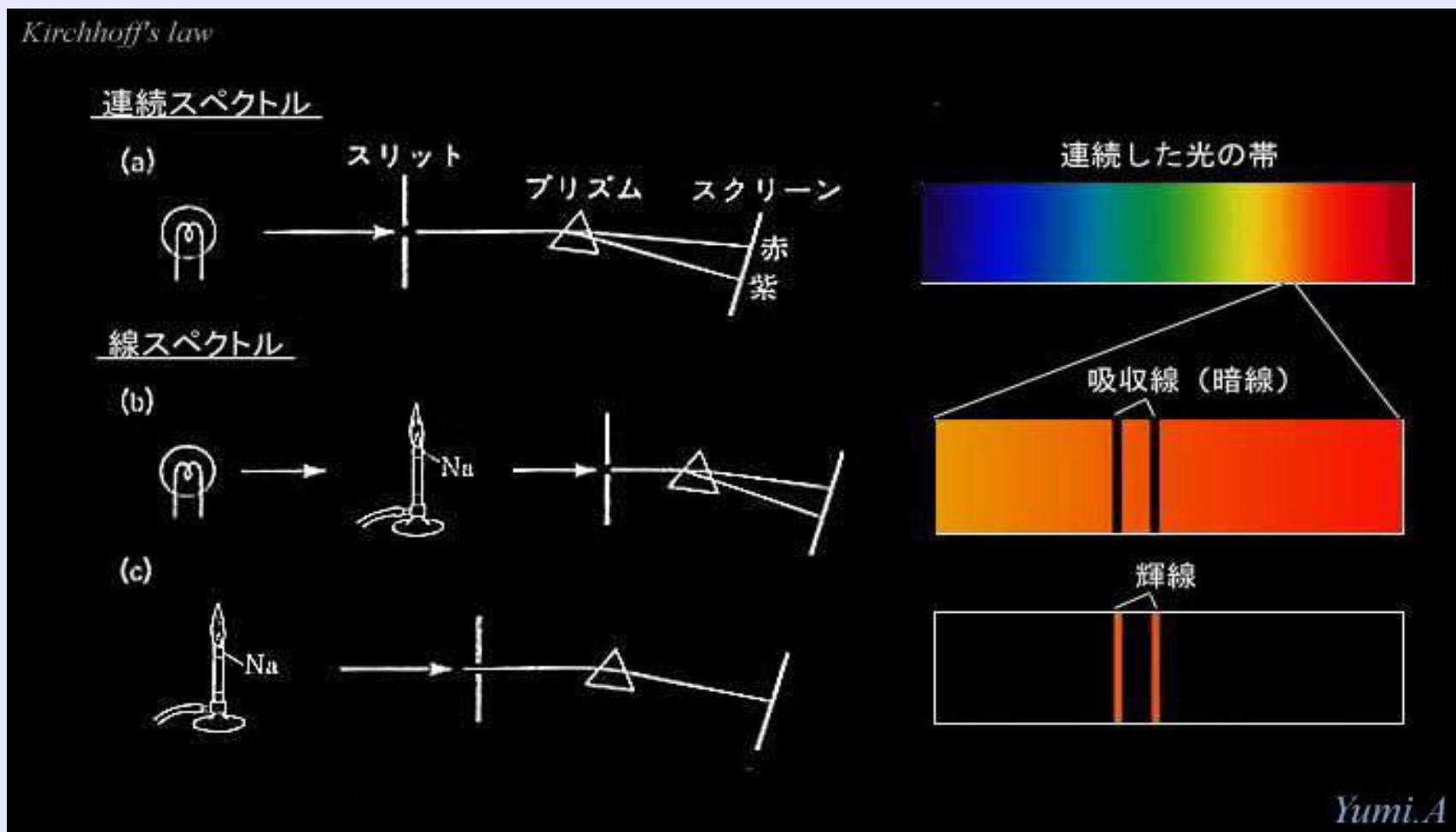


NN et al. in prep.

光の放射と吸収

連続スペクトルと線スペクトル

薄いガス雲からは輝線、濃いガス雲からは吸収線が観測される。

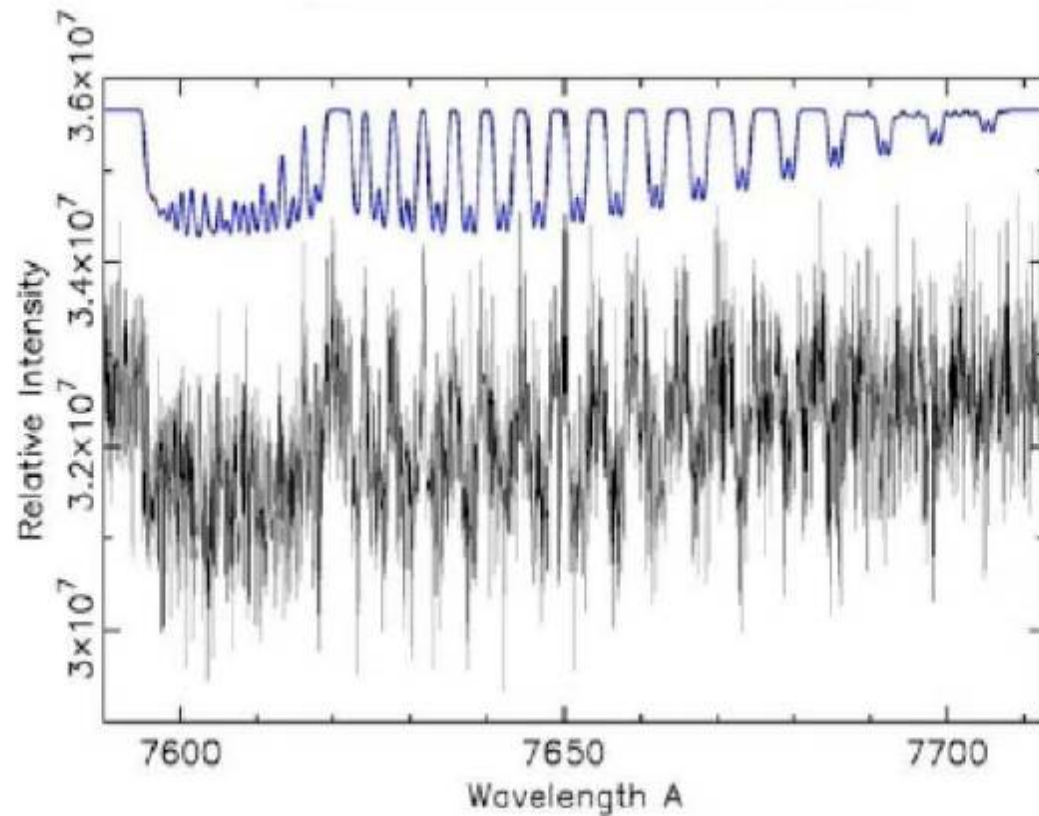


「宇宙スペクトル博物館(可視光編)」より

将来の可能性 地球型惑星の大気→生命の兆候をさぐる

模擬計算による
酸素の吸収スペクトルの予想

酸素A線の場合



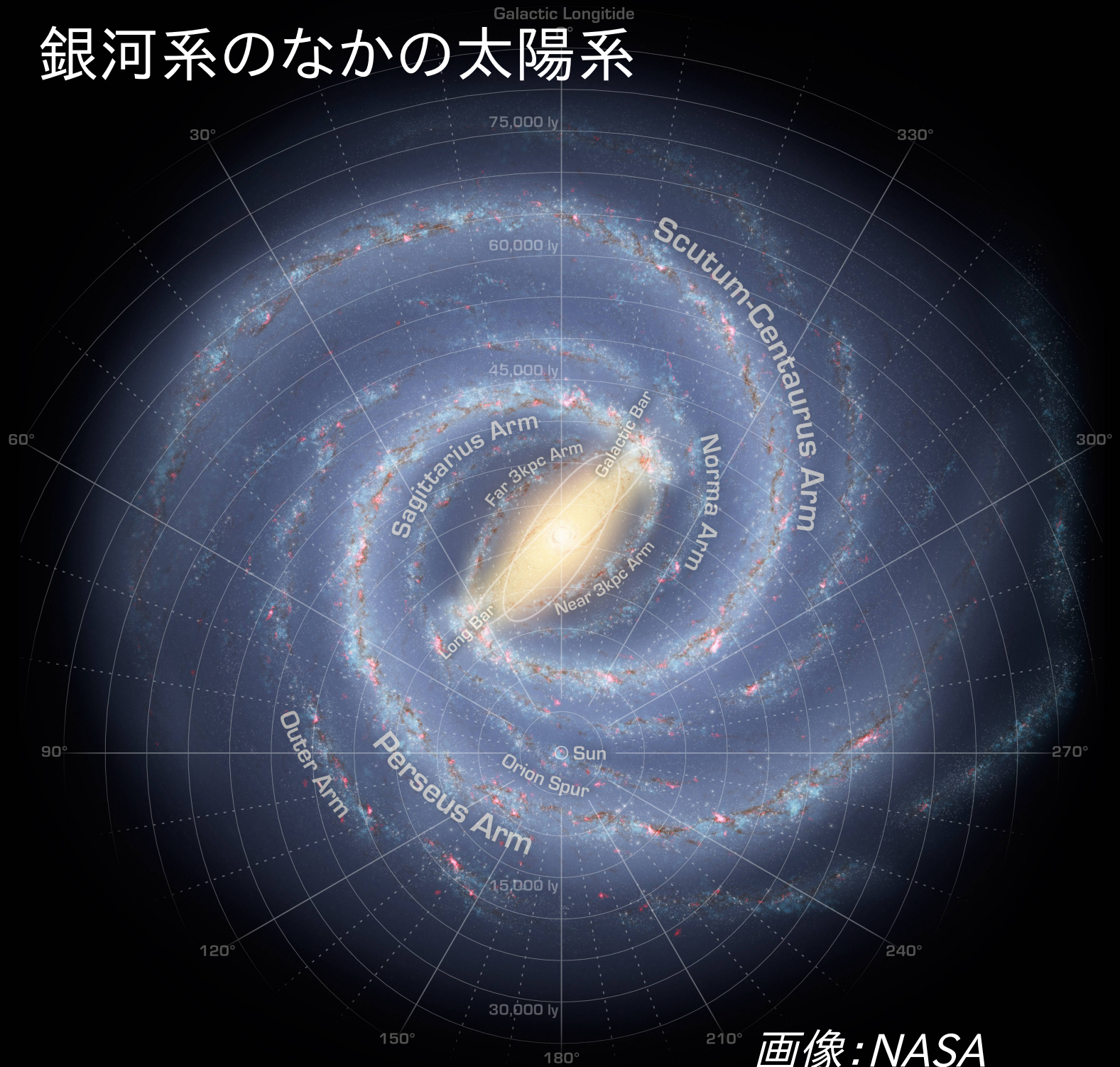
星から調べる太陽系外惑星(まとめ)

1. これまでにみつかった惑星系の大半は星の運動(視線速度)の観測によるものだった。星の明るさの変化の観測からの発見も急激に増えている。
→ 惑星の質量やサイズ、軌道の詳細が明らかになる
2. 中心星に極端に近い惑星や、極端な楕円軌道をもつ惑星は、形成後の軌道進化によるものと思われる。中心星の自転に逆行する惑星はその証拠のひとつ。
3. 赤外線での星の明るさの変化や、惑星大気による星の光の吸収によって、惑星の表面・大気の調査が始まっている。惑星の大気組成や「天候」なども調べられる可能性がある。

物質の歴史における惑星・生命

- 我々の存在も物質進化の到達点のひとつ
- 惑星が形成され、生命が誕生するのも宇宙のある段階だけ？

銀河系のなかの太陽系



画像: NASA

銀河系の化学進化上の太陽系の位置

化学進化: 元素合成の結果が形成される星々に反映されるプロセス

← 星形成史、形成される星の質量分布による

→ 金属量分布
年齢・金属量関係
化学組成比

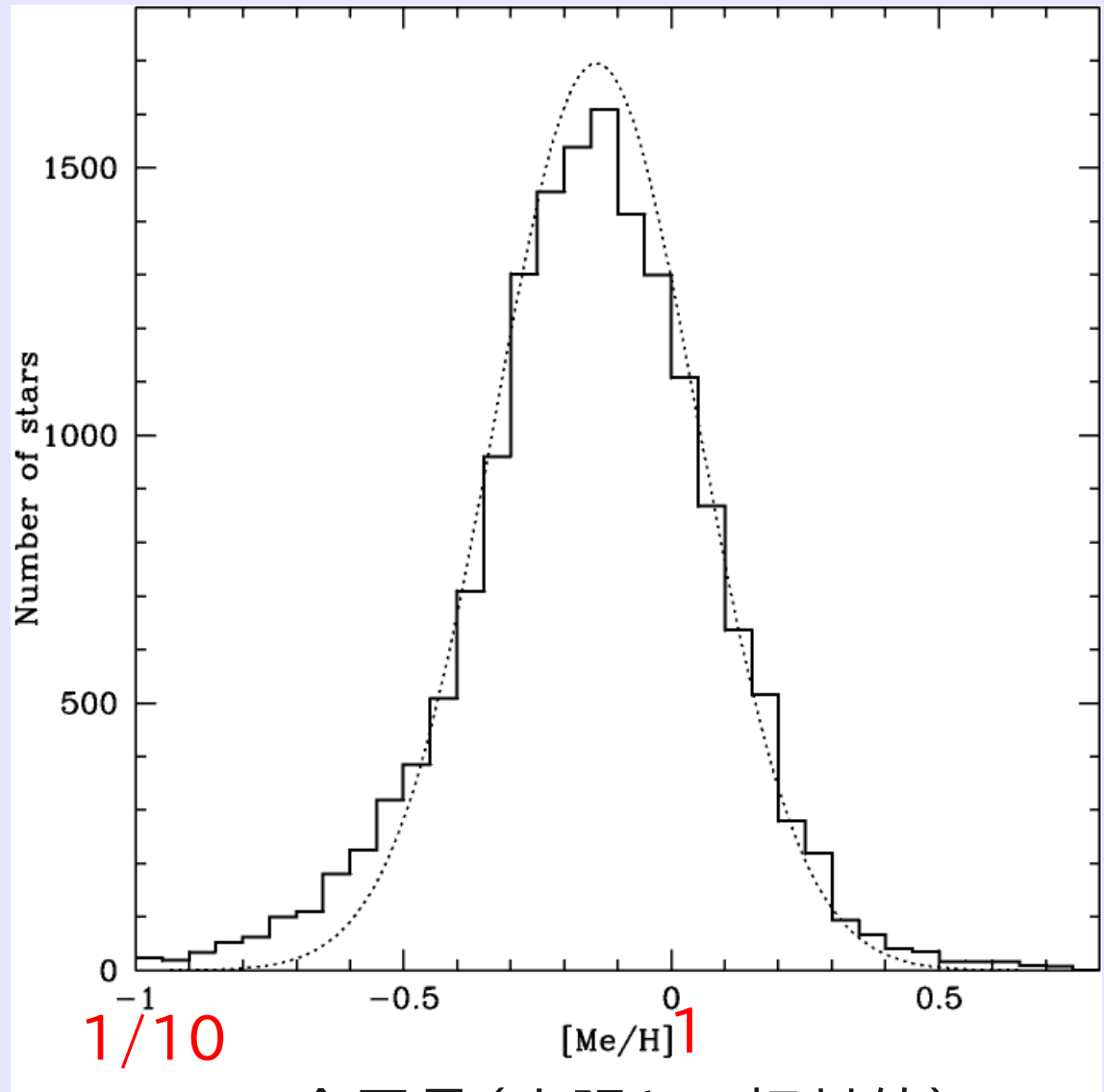
太陽の近くの星の金属量分布

金属量：
水素とヘリウム以外の
元素の含有量

ほとんどの星は太陽
と同程度の金属量をもつ
(ピークは太陽より
やや低いところにある)

金属量の低い星(太陽の
1/10以下)が非常に少ない

星の数の

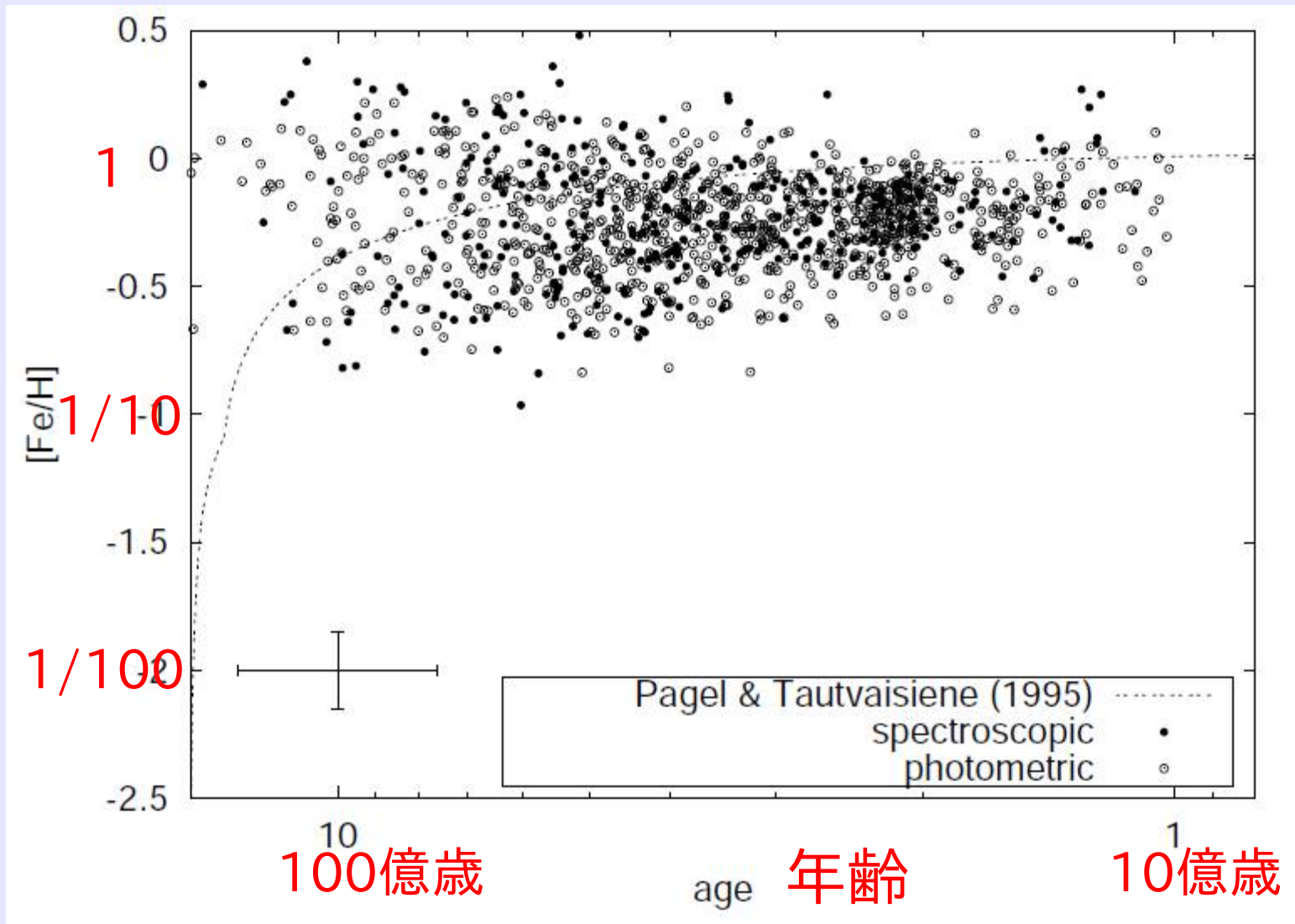


金属量(太陽との相対値)

太陽の近くの星の年齢・金属量関係

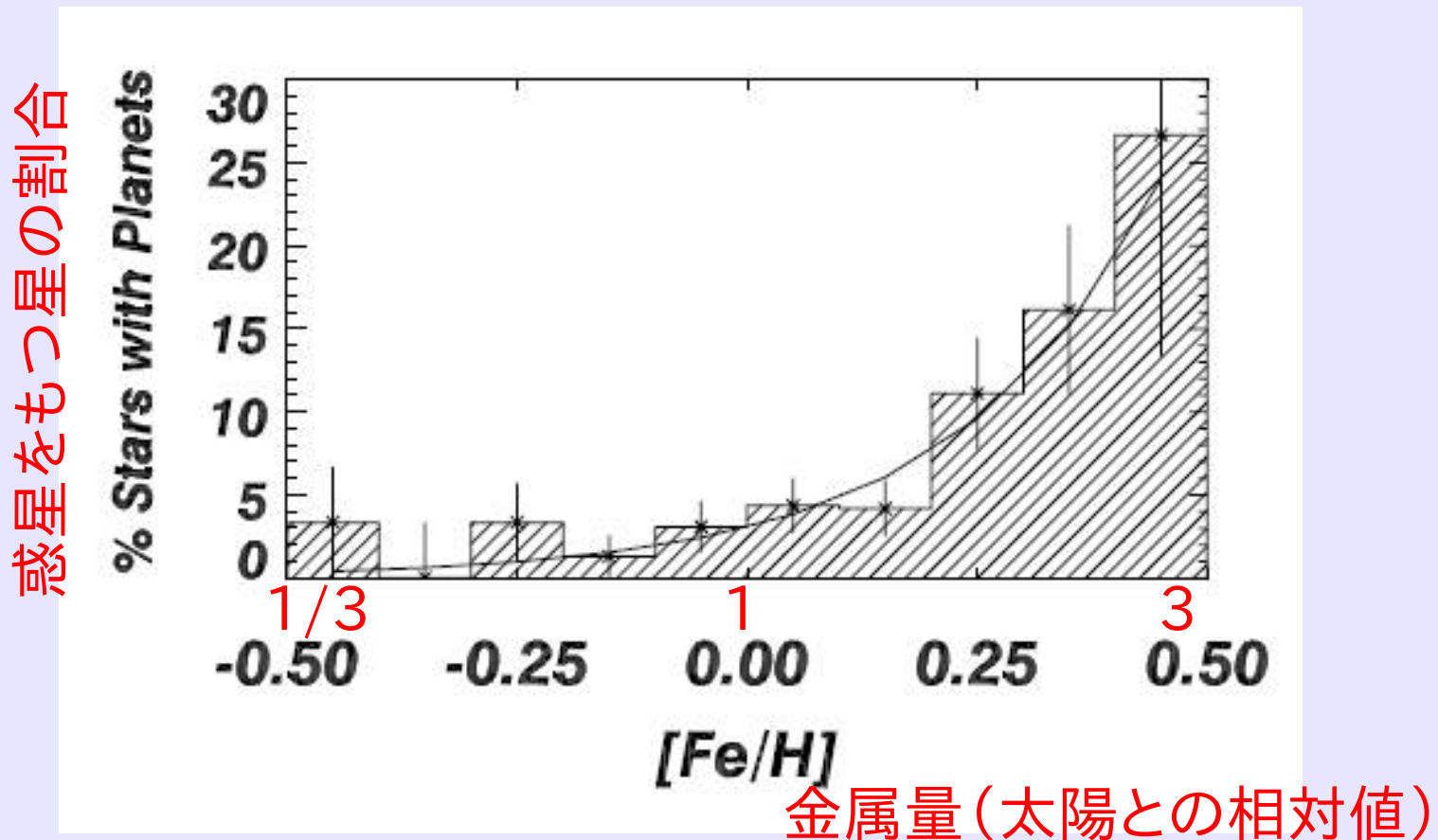
平均的には若い星ほど金属量が高いが、
古い星にはばらつきが大きい

金属量(鉄組成)
太陽との相対値



惑星を持つ星と金属量・組成

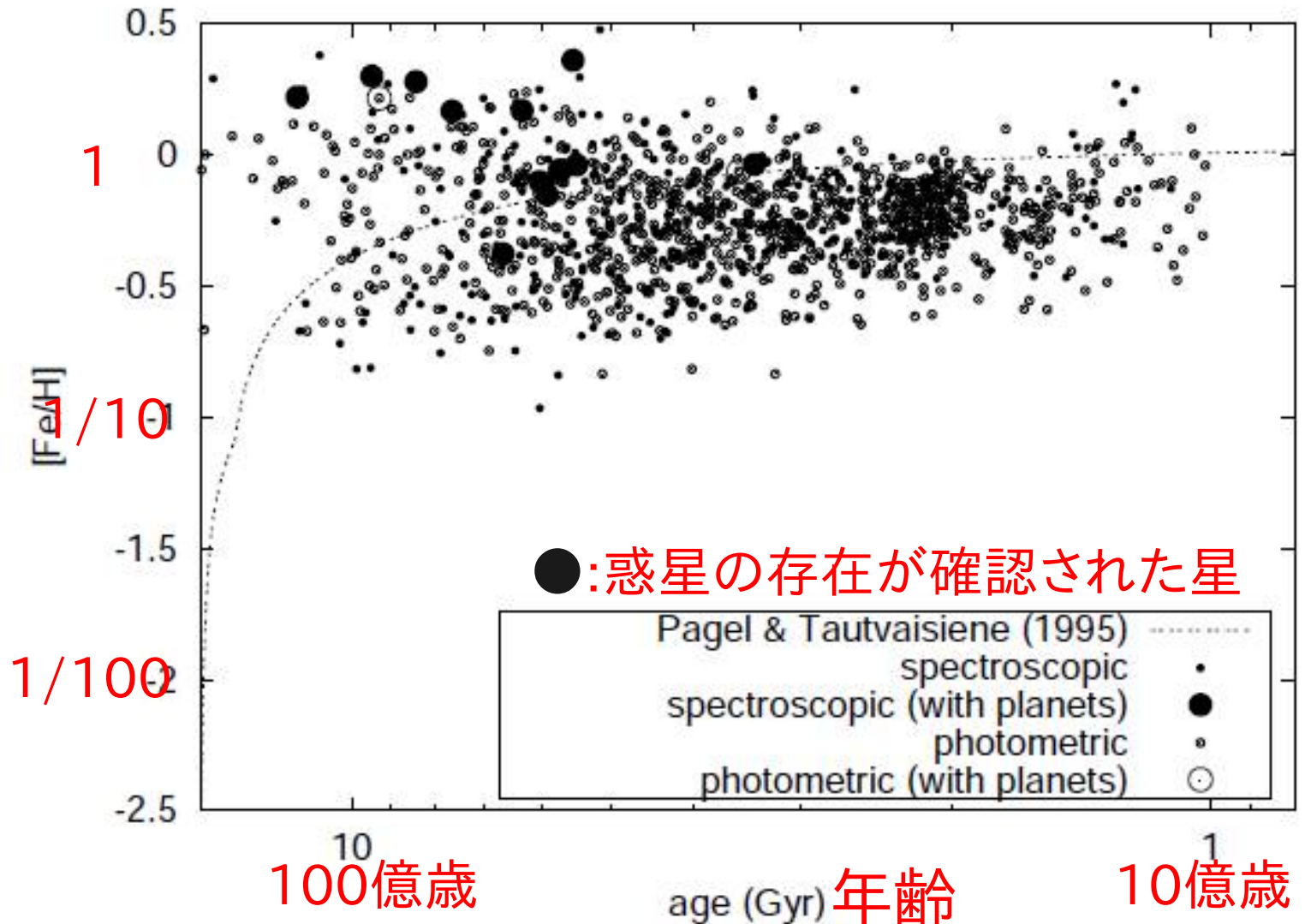
惑星をもつ星には金属量の高い星が多い
(金属量の高い星には惑星をもつものが多い)
→因果関係か？



惑星をもつ星と化学進化

金属量の高い星は必ずしも若くない...

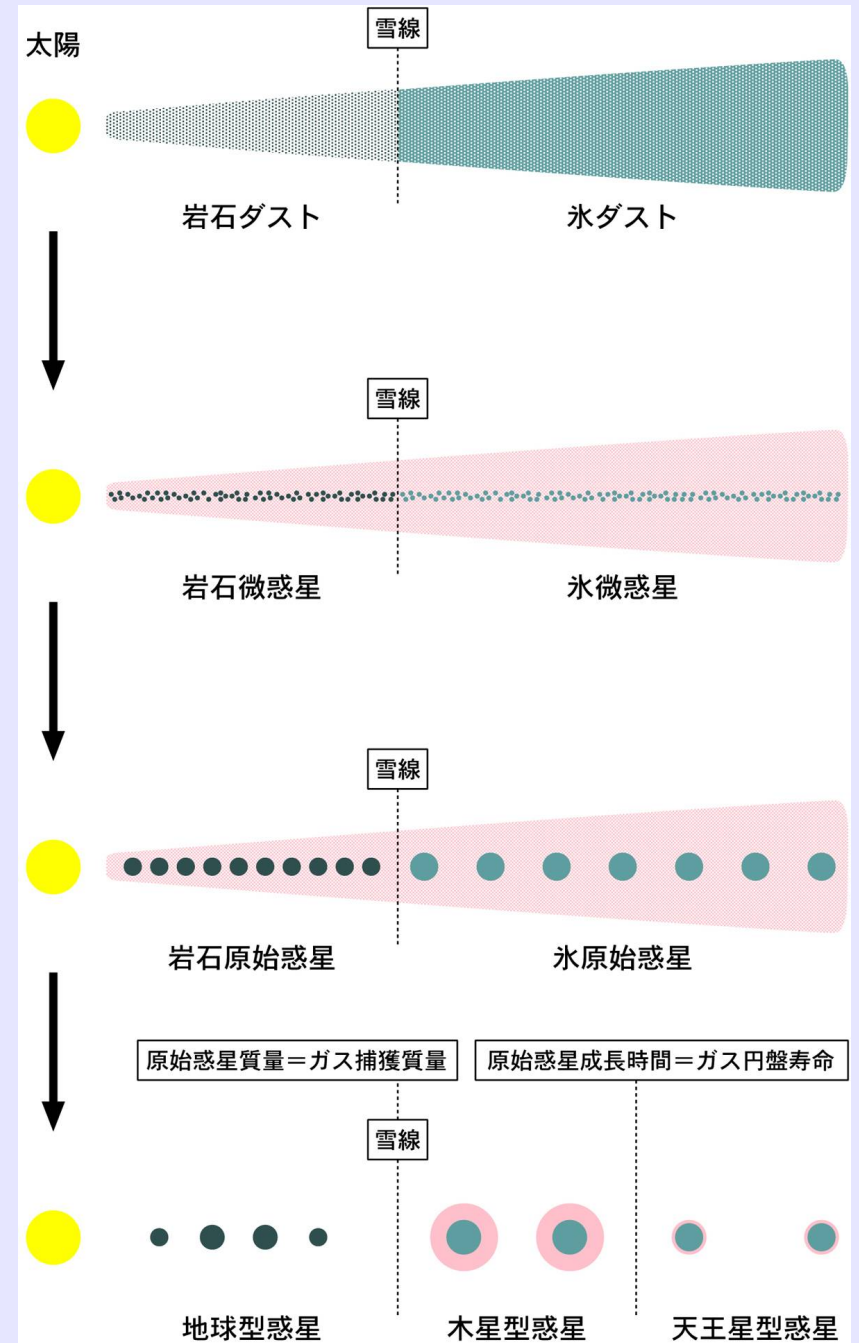
金属量(鉄組成)
太陽との相対値



金属量の高い星のまわりには巨大惑星ができやすい？

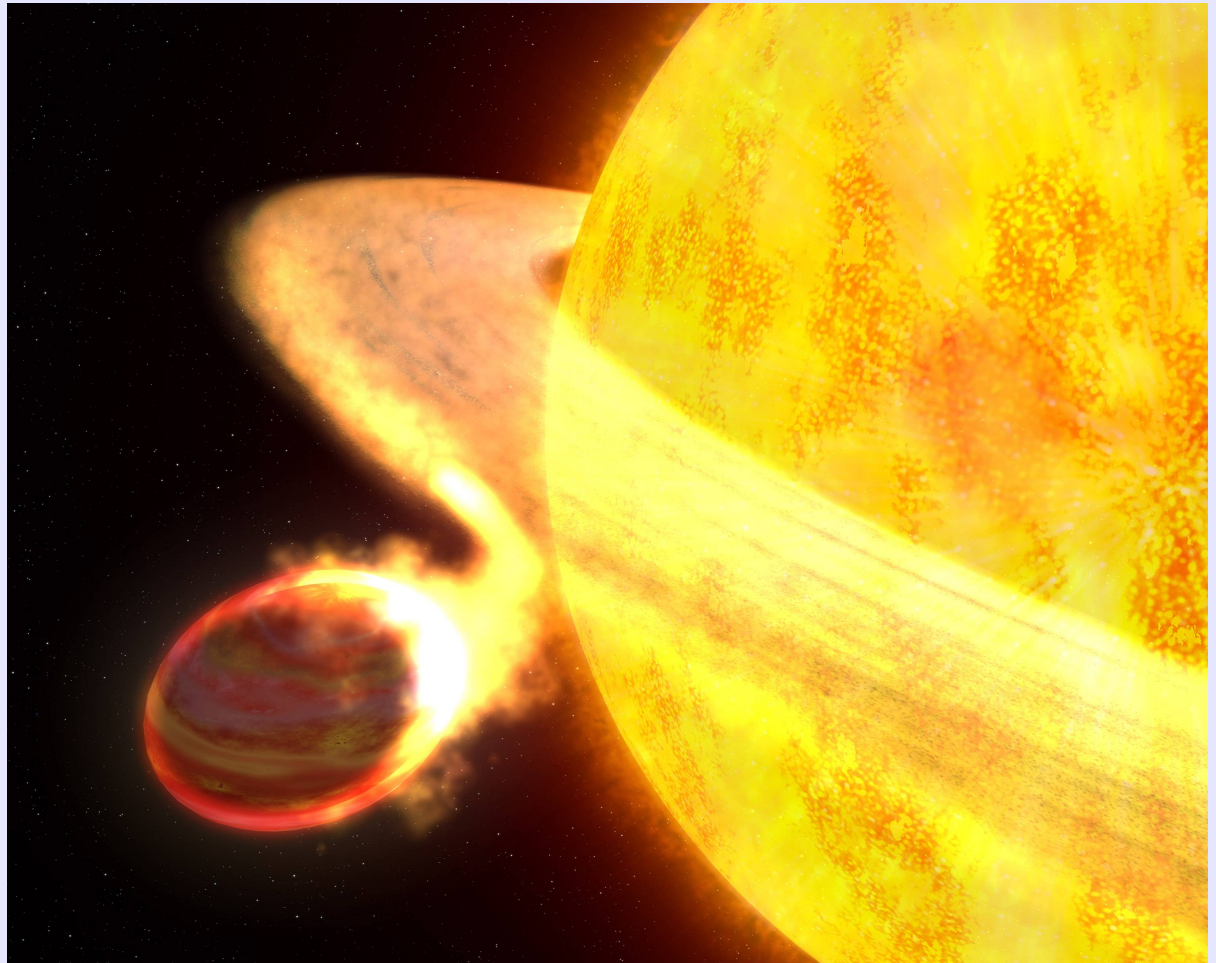
惑星系形成シナリオ
(京都モデル)

理科年表オフィシャルサイトより

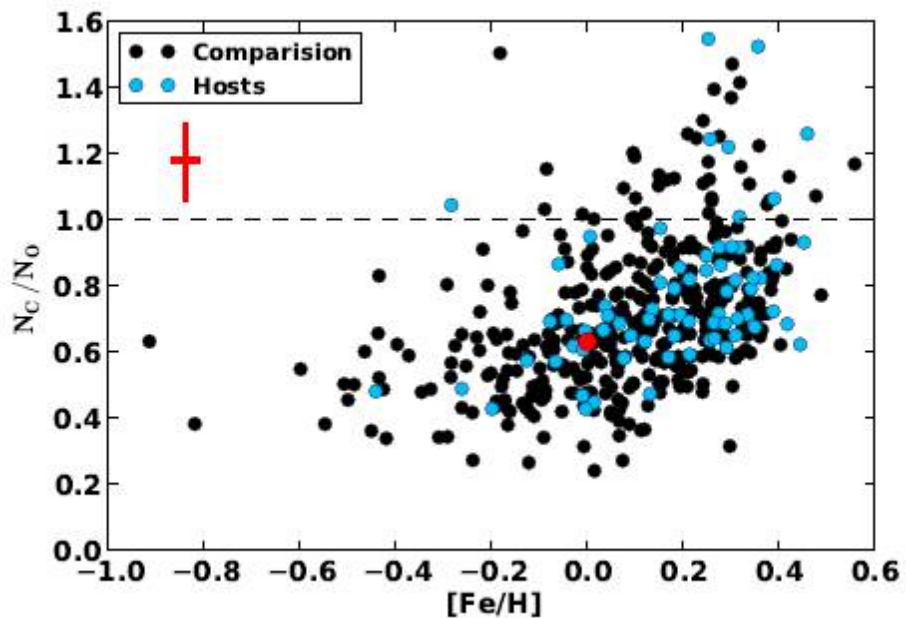


惑星の存在によって星の組成が変化？

系外惑星WASP-12b
についてのNASAの
発表より(イラスト)



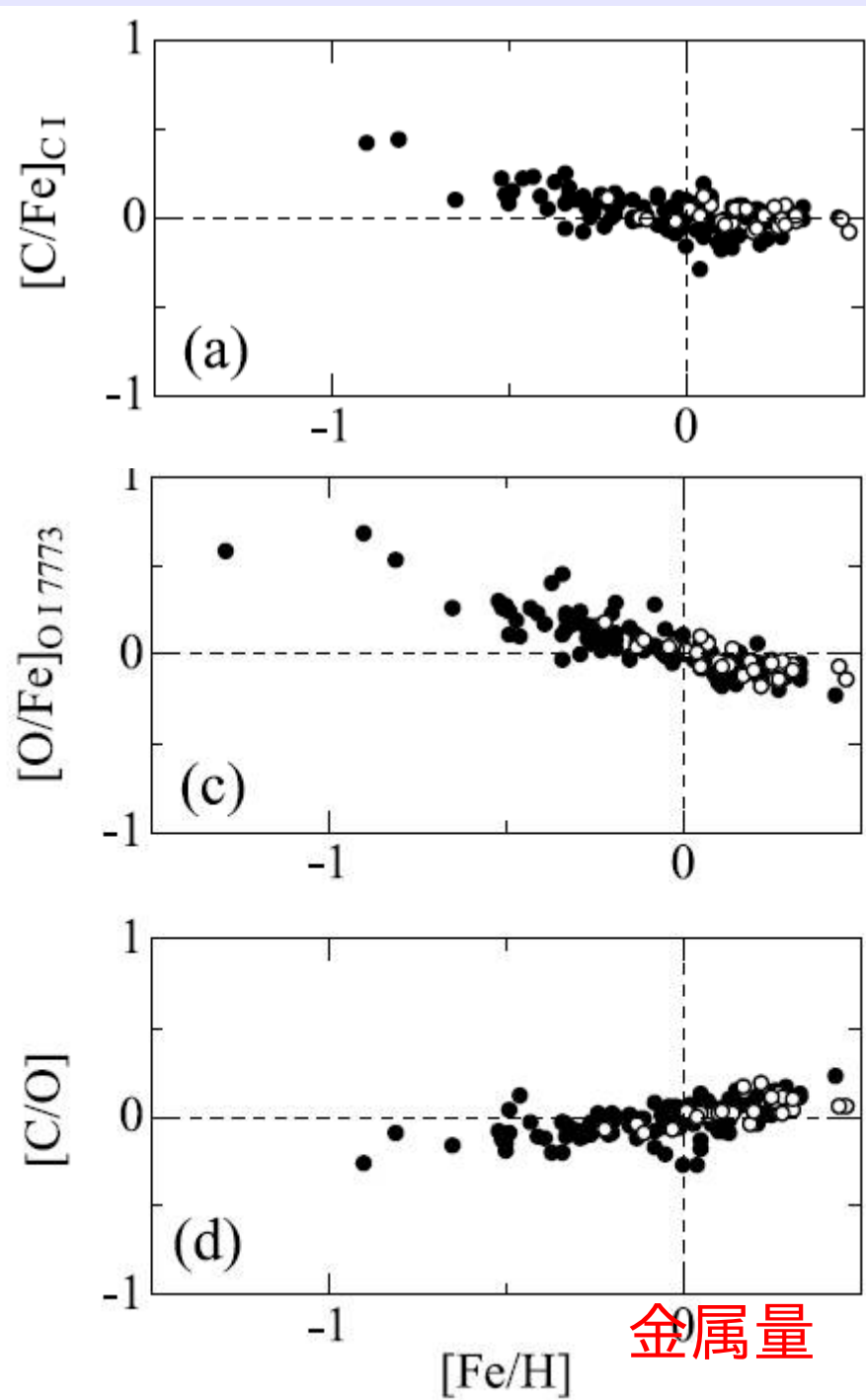
炭素・酸素の化学進化



灰系は酸素系に比べて
最近の増加が速い

炭素/酸素比

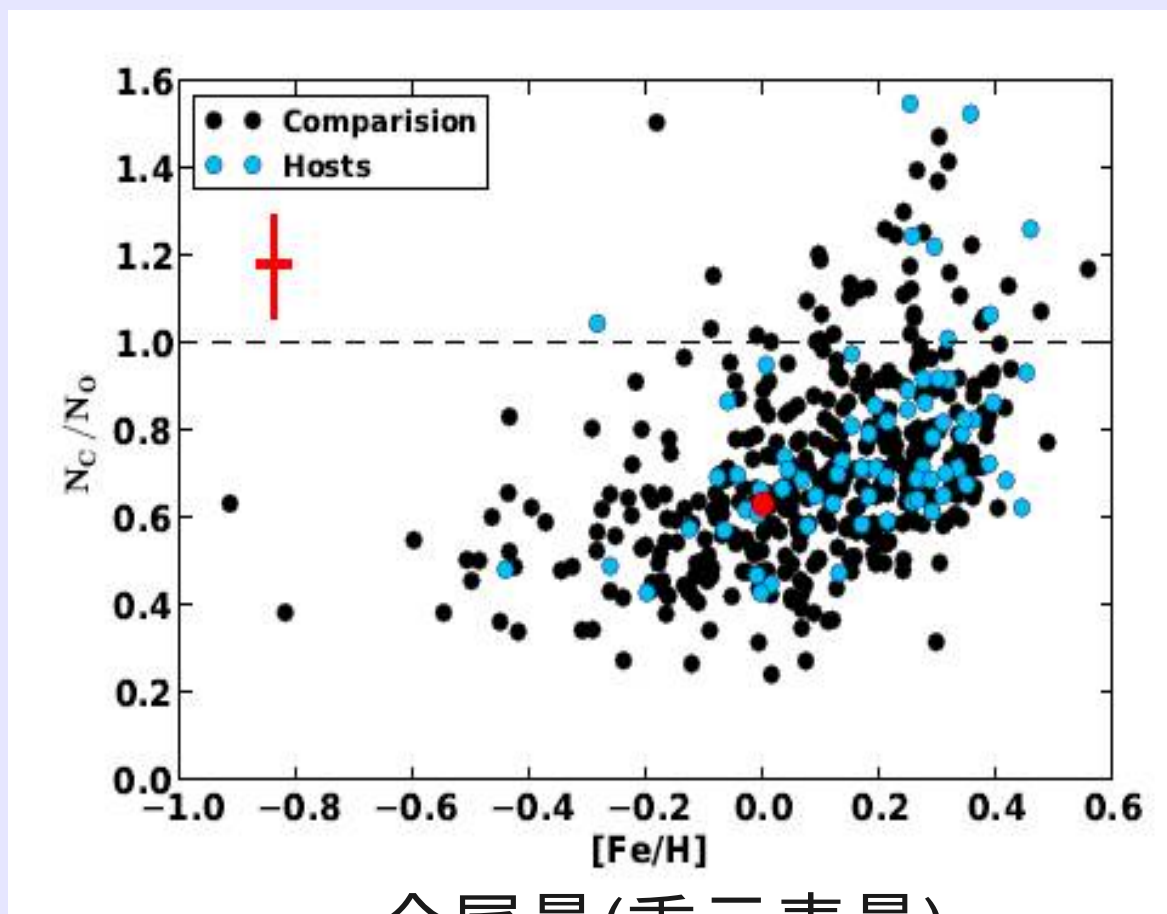
横軸の金属量は太陽との相
対値(対数スケール)



物質の歴史が進むとともに、炭素・酸素比も変化？

太陽系では $C/O \sim 0.5$ (酸素が多い \rightarrow 水ができやすい)
重元素の多い星では、炭素のほうが多い星もある？
(軽い星でつくられた炭素の影響?)

炭素/酸素比

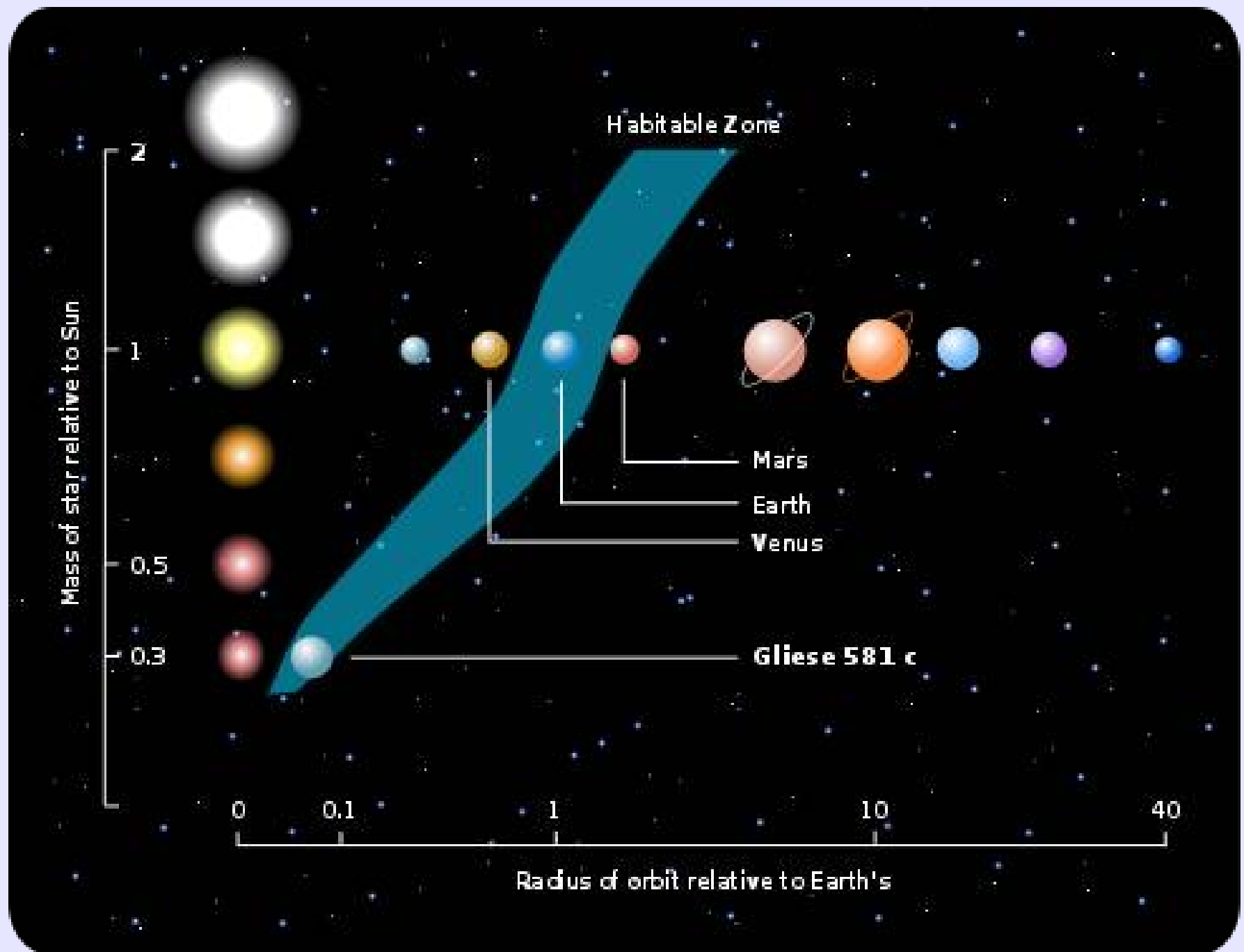


金属量(重元素量)

惑星形成・生命誕生の条件とは？

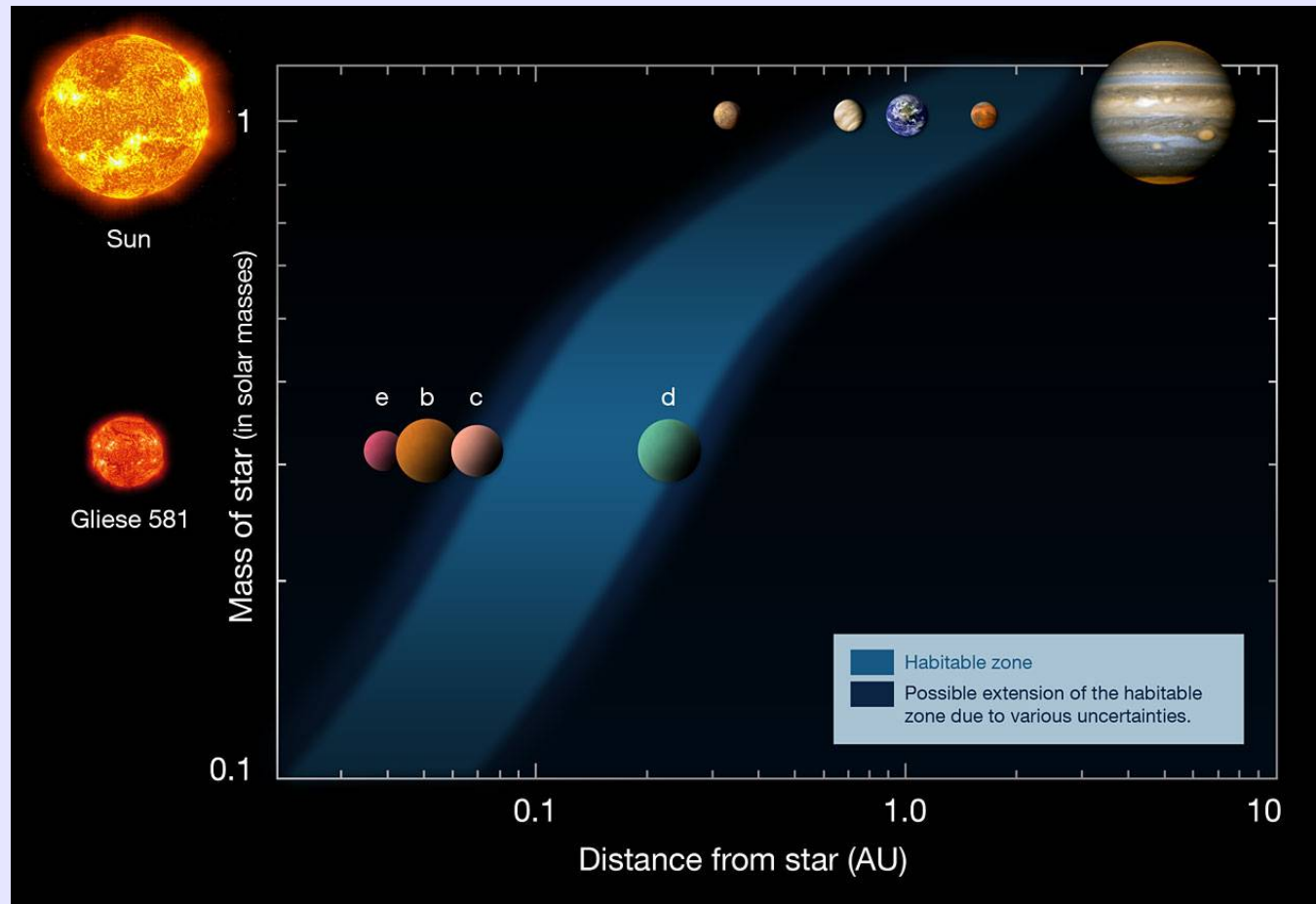
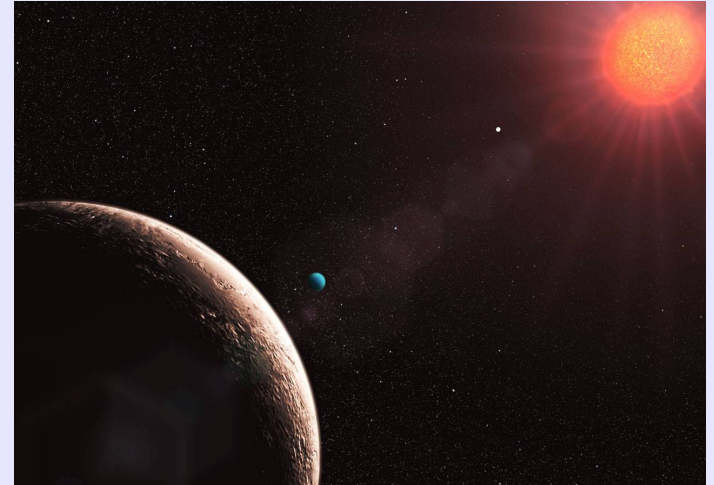
- 惑星形成には金属量が関係しているらしい
→ 銀河の進化のなかで惑星のできやすい時期がある？
- 生命誕生には、化学組成（とくに炭素/酸素比）が重要？
炭素/酸素比も銀河の進化のなかで変化している。
→ 生命誕生も銀河の進化段階と関係がある？
- 生命に適した環境（水が液体で存在する温度）の惑星探しが活発化
→ 太陽型星の地球のような惑星が見つかる日も遠くない？

生命誕生の可能性のある惑星をさがす



太陽より低温の星の まわりの惑星さがし

低温度の星なら、星の近くの惑星が
生命に適した温度になる(だろう)



ESOの発表
より

第4回 物質進化のなかの惑星・生命

1. 星の観測による惑星探査
星の運動の観測から
星の明るさの観測から
2. 惑星の表面・大気
3. 惑星をもつ星の特徴は？