

2020年代の系外惑星研究

松尾太郎（京都大学）

本田充彦（神奈川大）

佐藤文衛（東工大）

河原創（首都大）

内容

1. これまで

- これまでの系外惑星研究

2. 2020年代の系外惑星研究として次の二つに関連するトピックを扱う。

2.1 木星型惑星

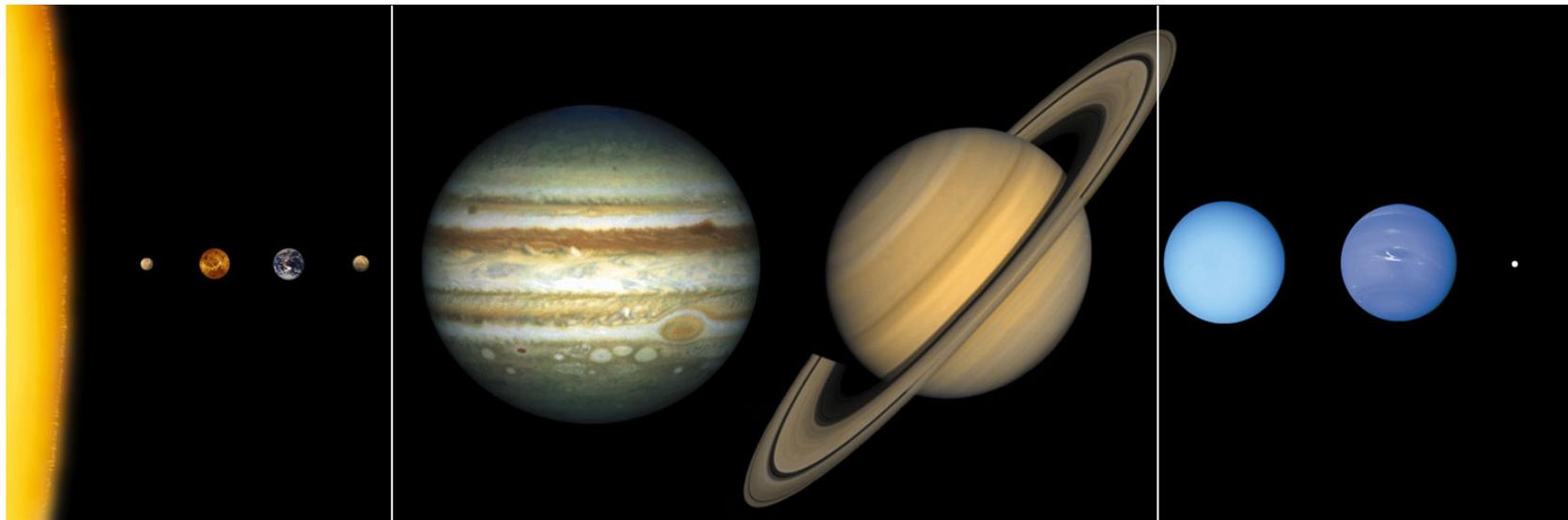
2.2 地球型惑星

太陽系の惑星

○分類：地球型惑星、木星型惑星、氷型惑星

（多くの場合、氷型惑星は木星型惑星に含まれることが多い）

- 地球型惑星：水、金、地、火
- 木星型惑星：木、土（木：地球質量の320倍）
- 氷型惑星：天、海（天：地球質量の20倍）



地球型惑星

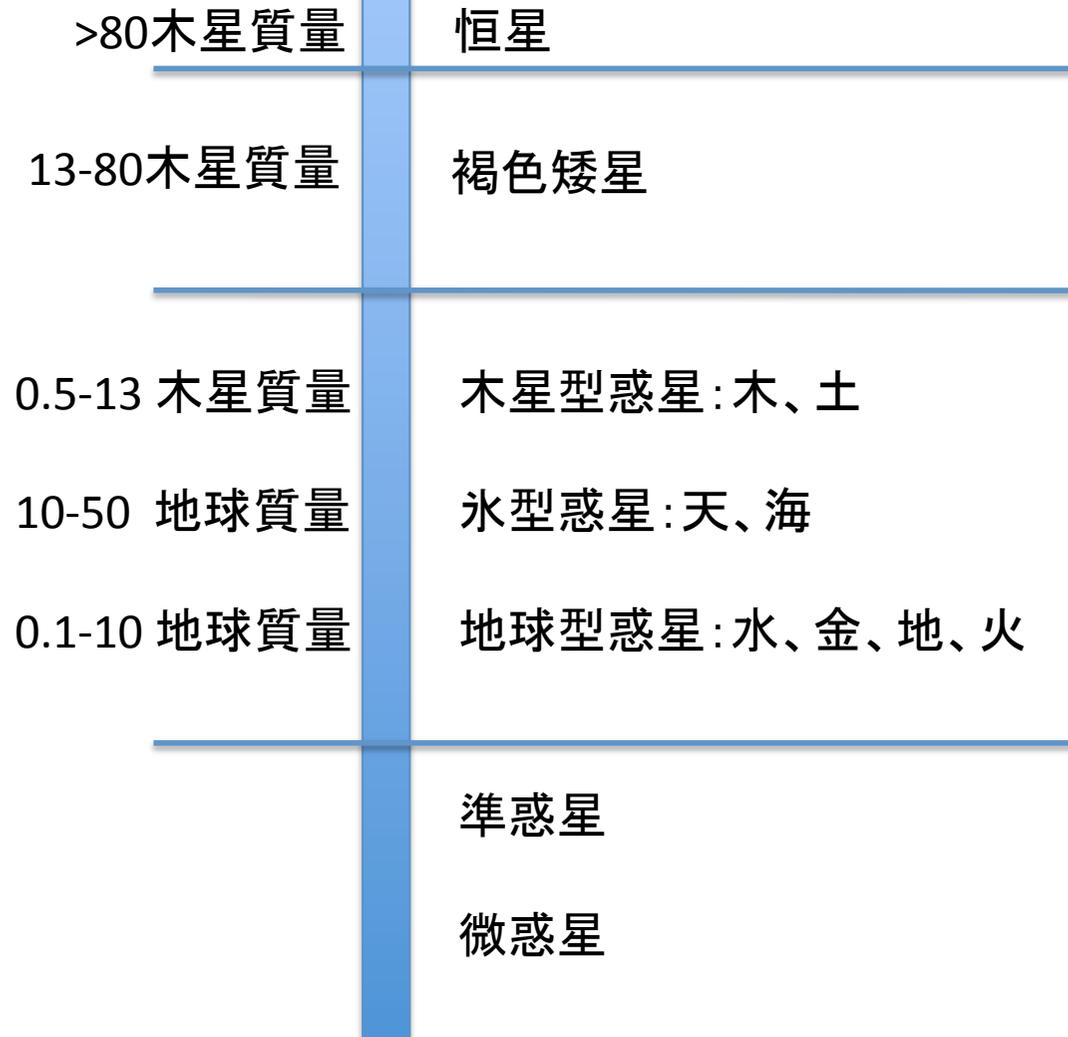
木星型惑星

氷型惑星

分類

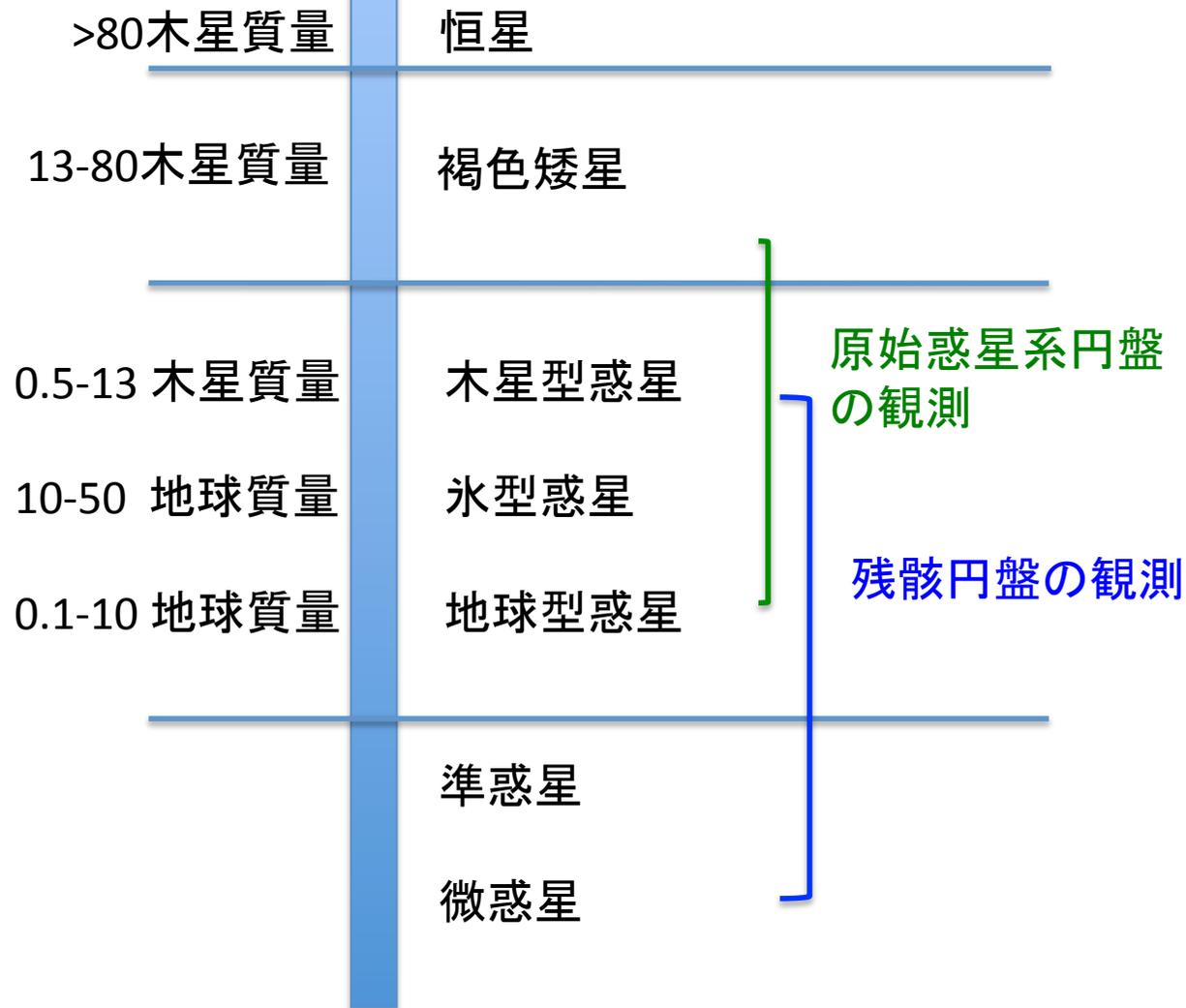
(あくまでも目安)

天体の質量



分類

天体の質量



分類

天体の質量



原始惑星系円盤
の観測

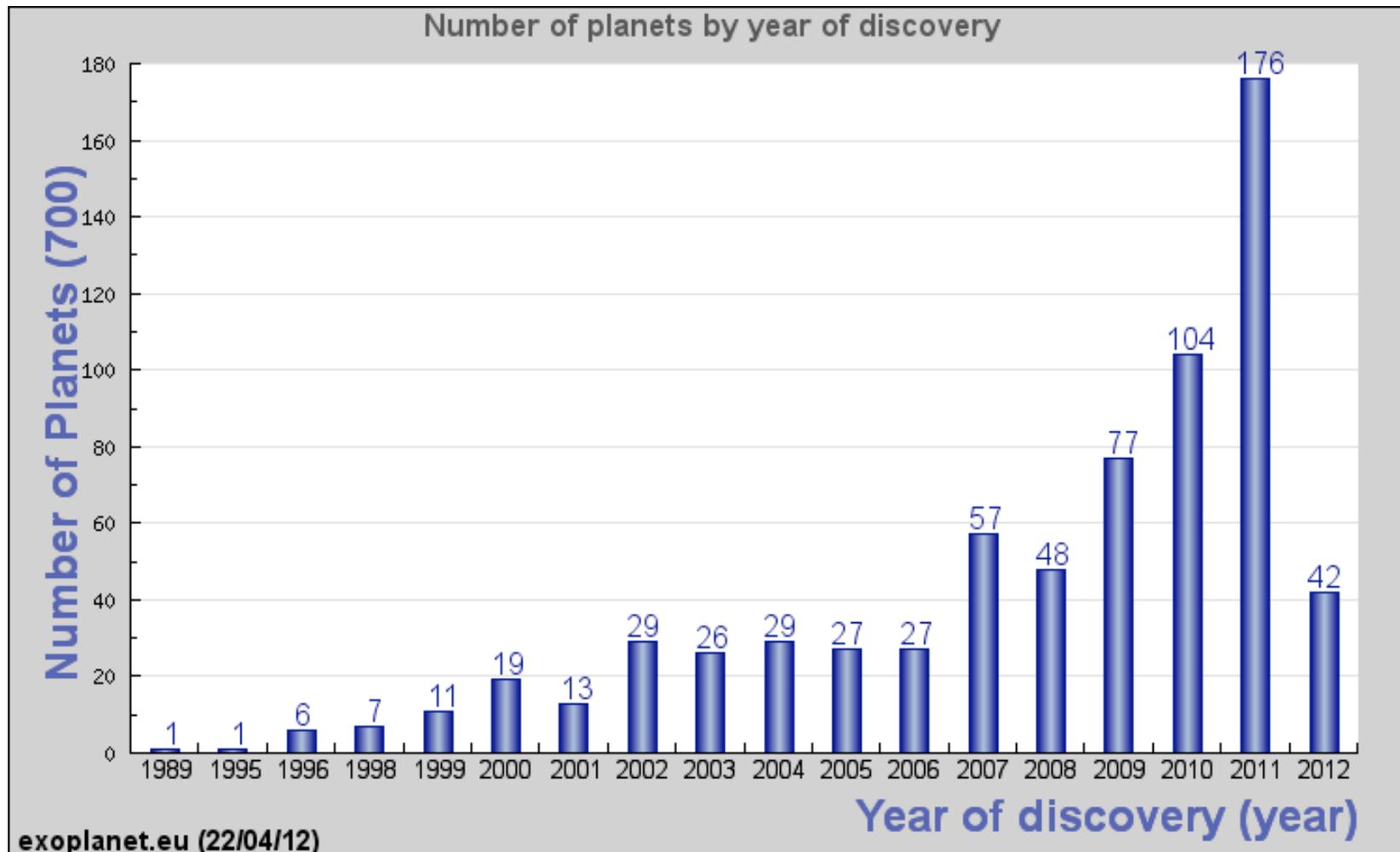
残骸円盤の観測

今回取り扱う範囲

木星型惑星から地球型惑星
(褐色矮星については、ごめんなさい)

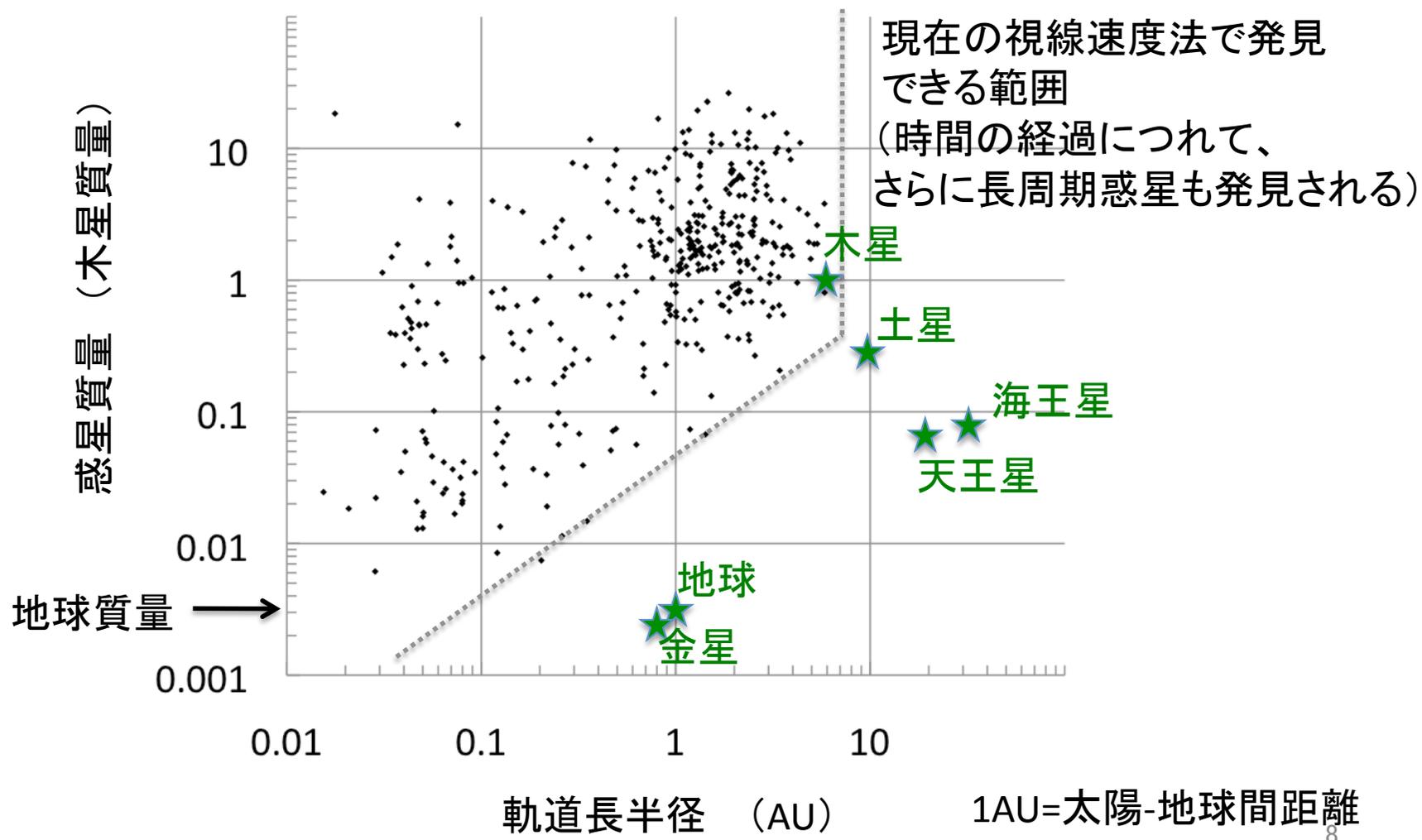
1995年から2012年

- 視線速度法を中心とした、間接法により700を超える惑星が発見される。



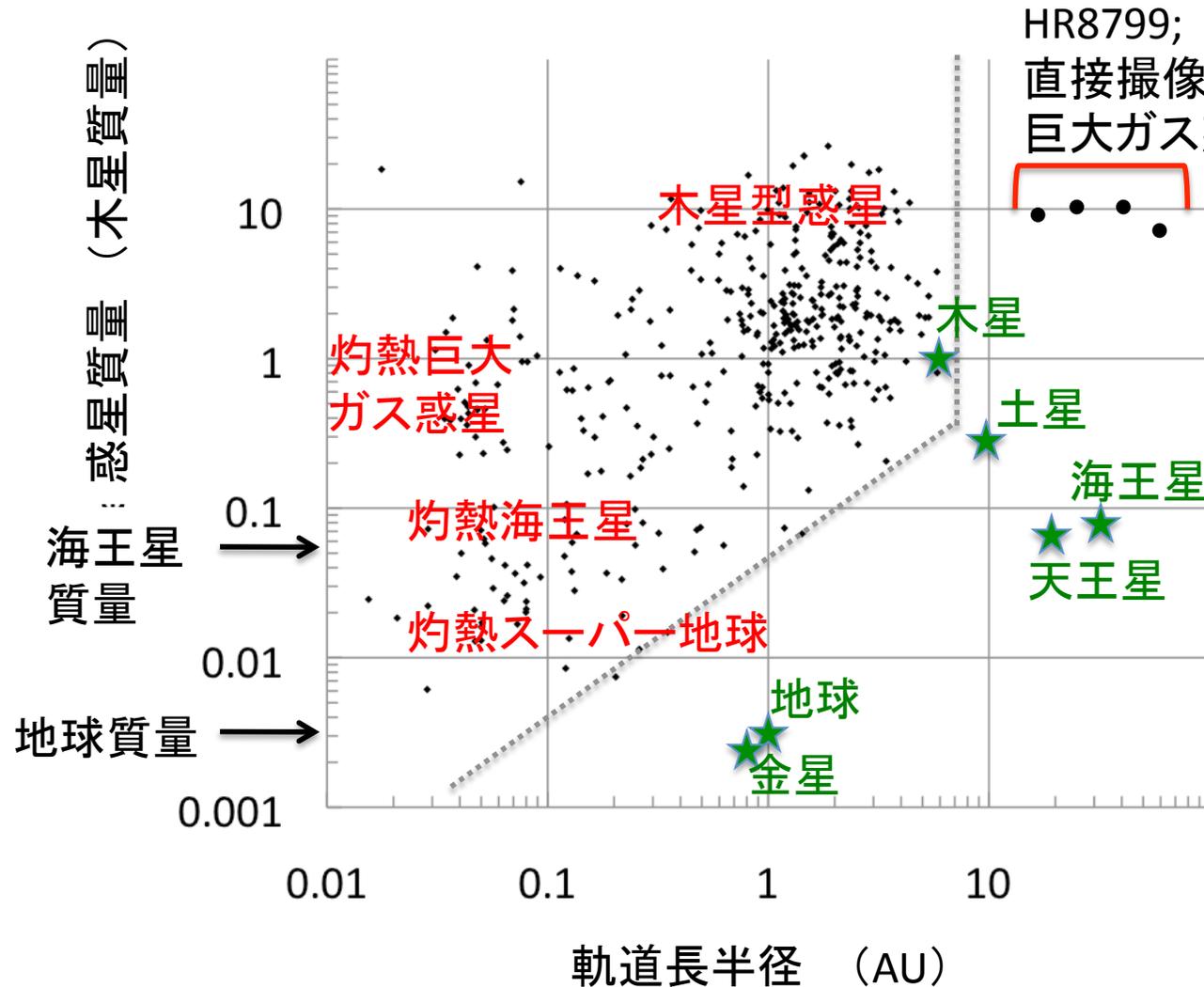
多様な惑星

これまでに視線速度法で発見されている惑星(黒)と太陽系惑星(緑)



多様な惑星

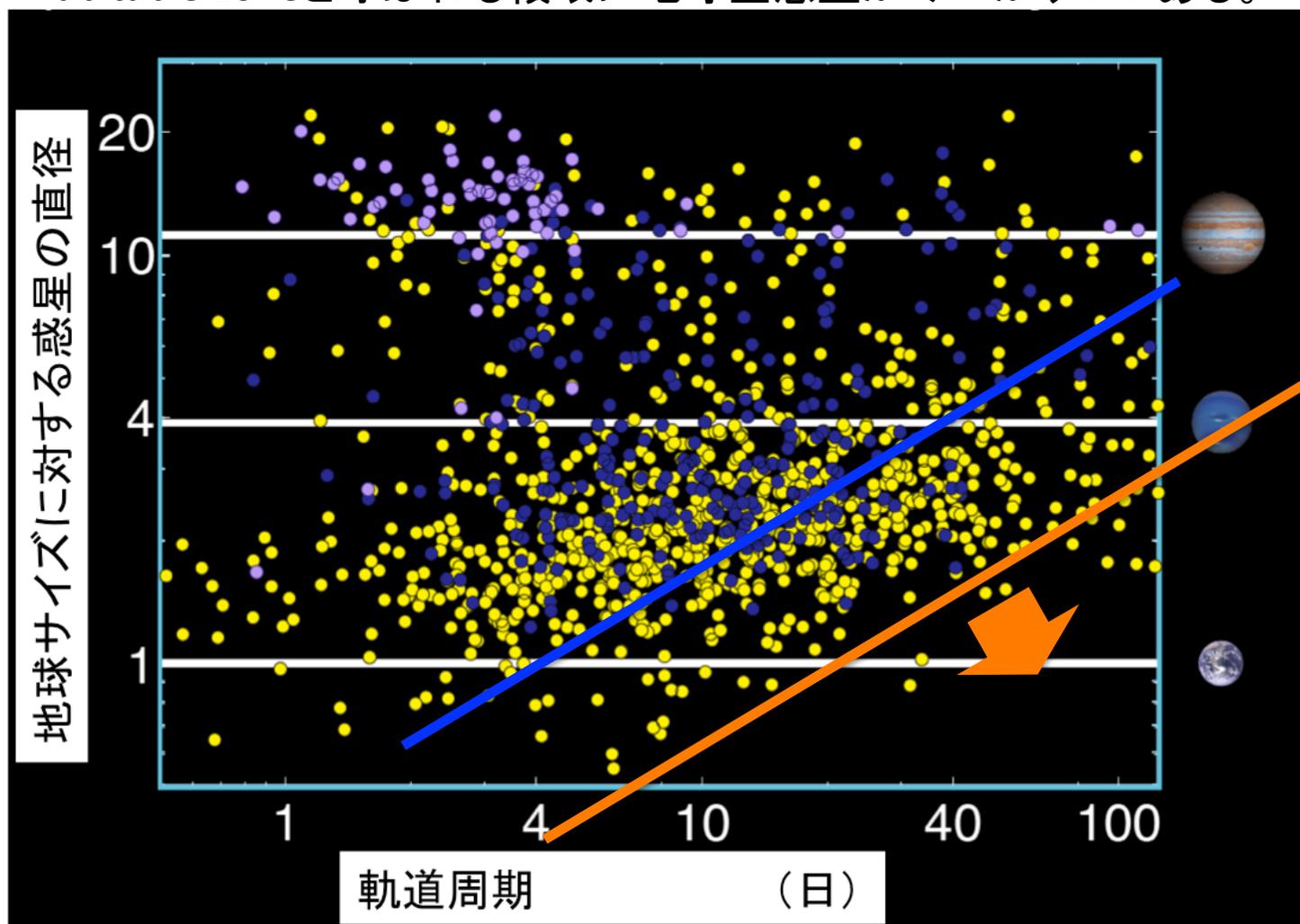
これまでに視線速度法で発見されている惑星(黒)と太陽系惑星(緑)



* スーパー地球:
2倍程度の半径までの岩石
でできた大きな地球型惑星

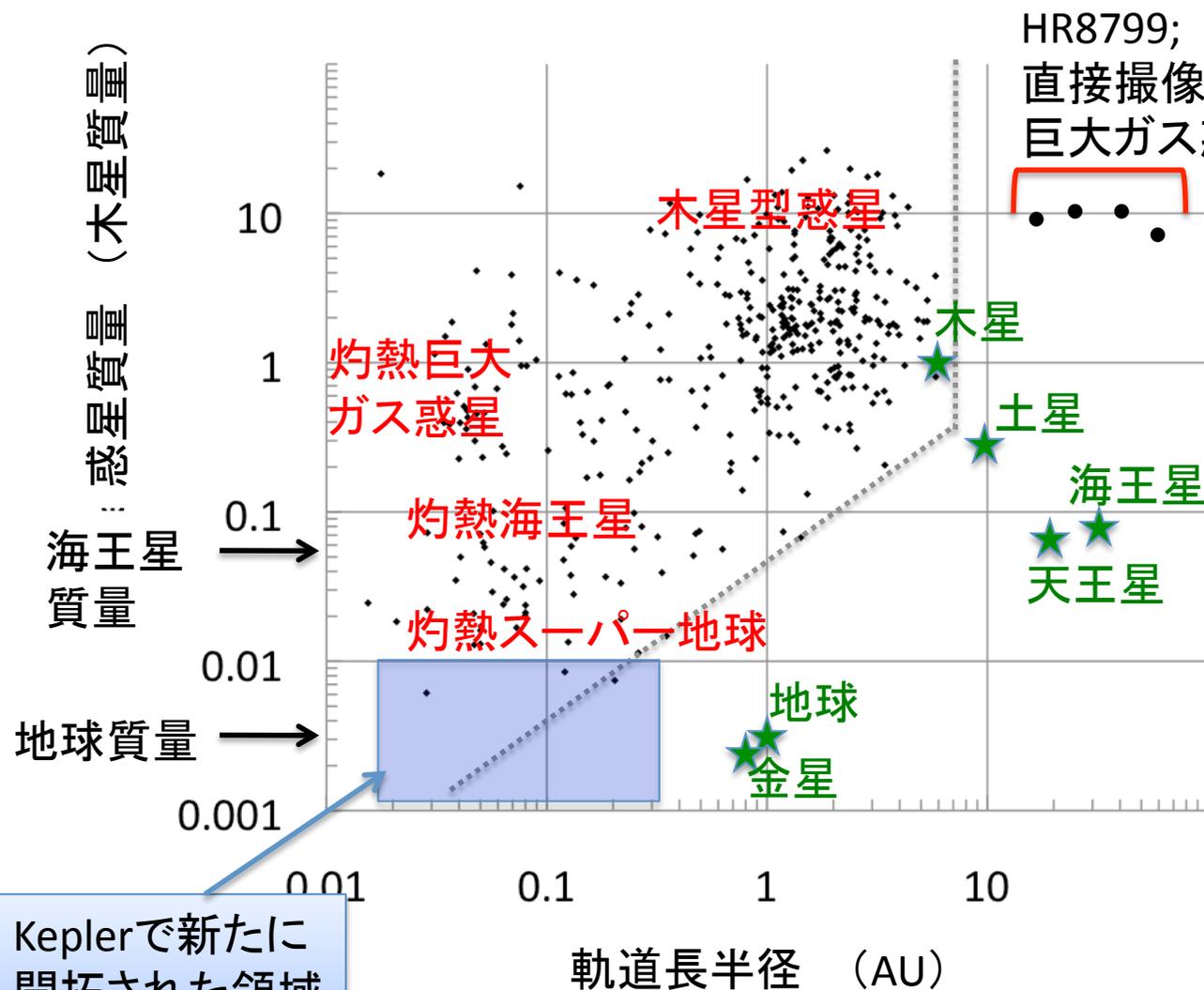
Kepler衛星の初期成果

地上望遠鏡で発見されたトランジット惑星(紫)、
Kepler衛星で発見されたトランジット惑星候補(青、黄色)
→ Habitable Zoneと呼ばれる領域に地球型惑星がみつかっている。



多様な惑星

これまでに視線速度法で発見されている惑星(黒)と太陽系惑星(緑)



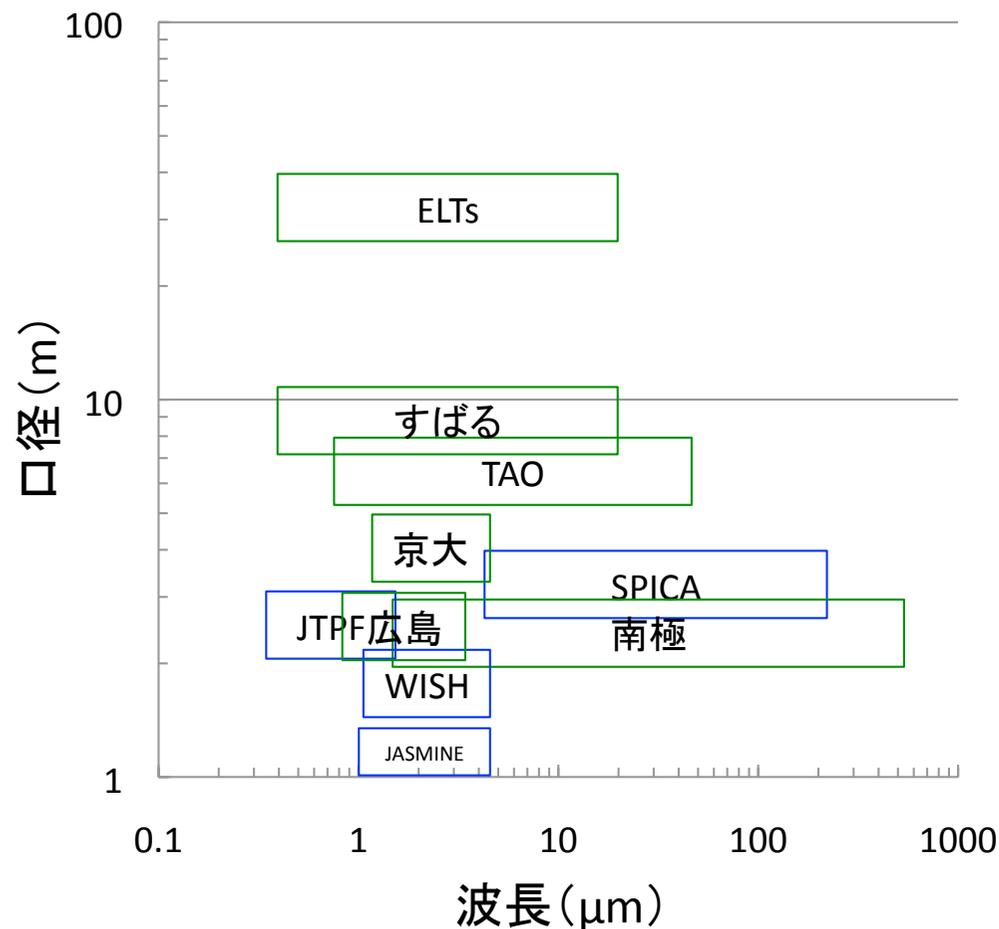
* スーパー地球:
2倍程度の半径までの岩石
でできた大きな地球型惑星

2020年代の望遠鏡たち

- 2020年代の望遠鏡 (日本)

地上: TMT、すばる、京大、TAO、広島、南極...

宇宙: SPICA、JASMINE、WISH、JTPF...

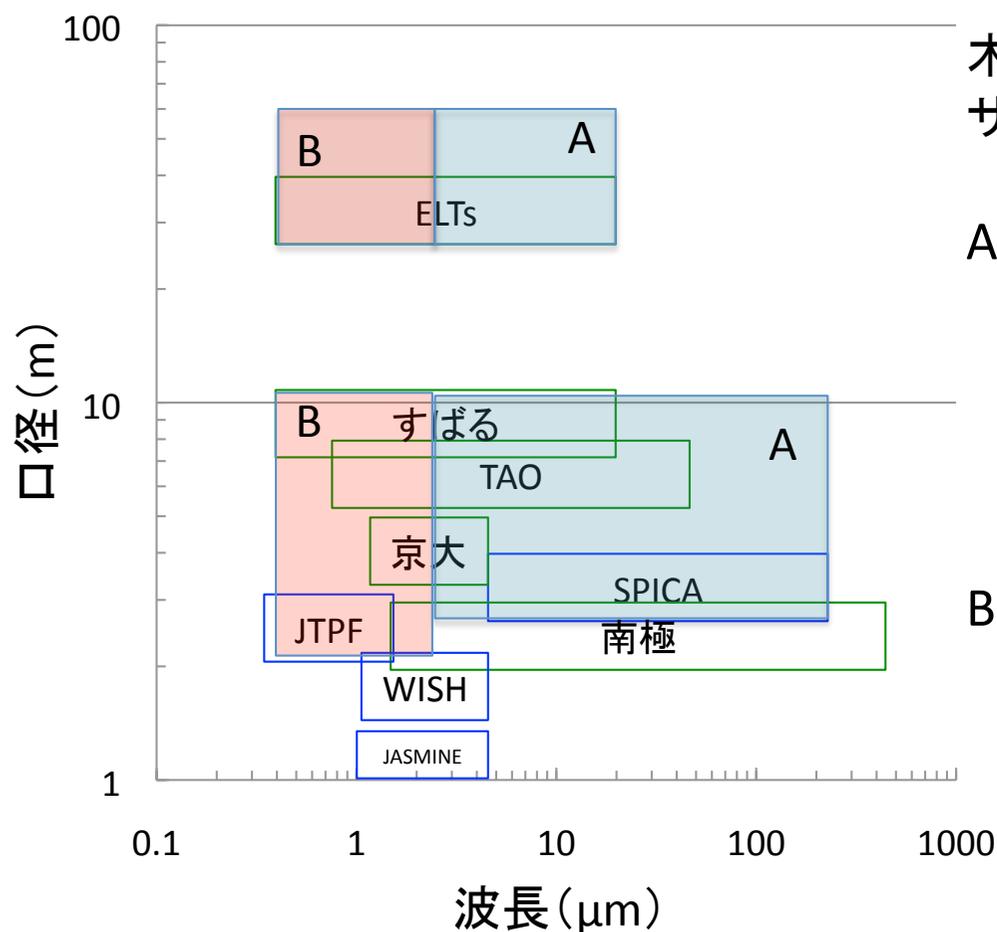


2020年代の望遠鏡たち

- 2020年代の望遠鏡 (日本)

地上: TMT、すばる、京大、TAO、広島、南極...

宇宙: SPICA、JASMINE、WISH、JTPF...



木星型惑星・地球型惑星に関するサイエンスについて議論する。

A. 木星型惑星の形成・進化の理解

A1. スノーライン(雪線)の観測

望遠鏡: SPICA、TMT、遠赤外線干渉計

A2. 木星型惑星の大気分光

望遠鏡: TMT、SPICA、すばる、TAO、京大

B. 地球型惑星探査と特徴づけ

B1. 近傍の地球型惑星探査

望遠鏡: すばる、TAO、京大、(TMT)

B2. 近傍の地球型惑星の特徴づけ

望遠鏡: TMT、JTPF

A. 木星型惑星の形成・進化過程の理解:

A1. スノーライン(雪線)

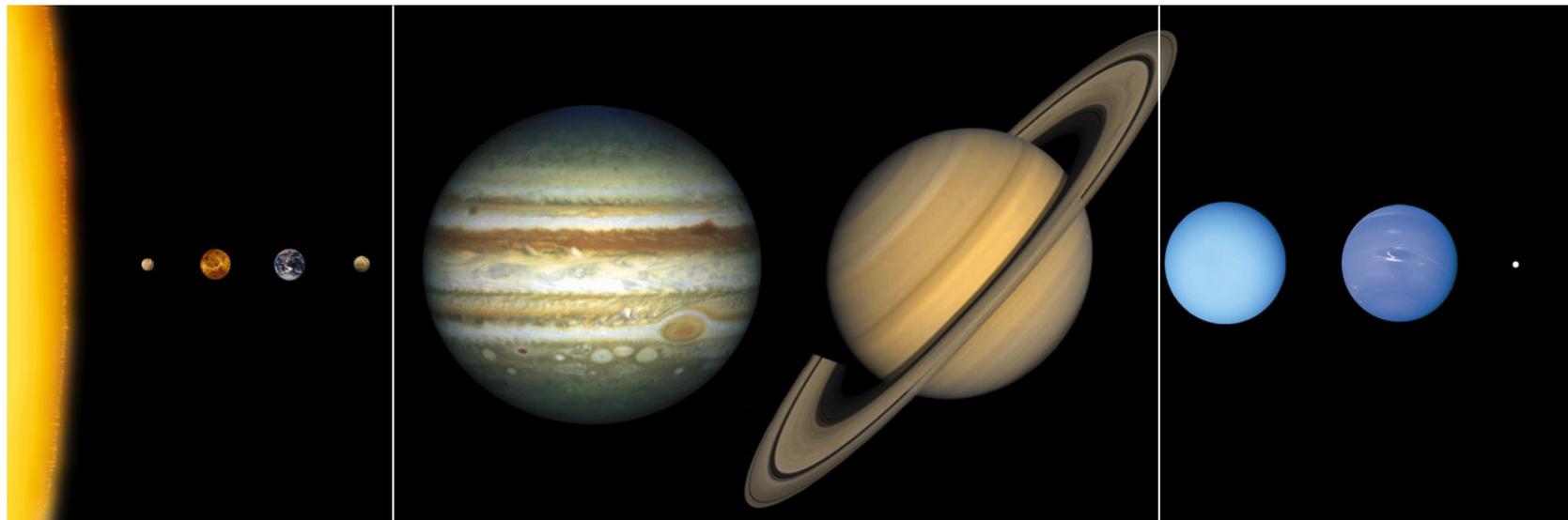
A2. 木星型惑星の分光

太陽系の惑星

○惑星形成論は太陽系とともに発展してきた。

- コア集積論と円盤不安定論

○1995年に太陽系外惑星が発見され、その形成論が拡張した。



地球型惑星

木星型惑星

氷型惑星

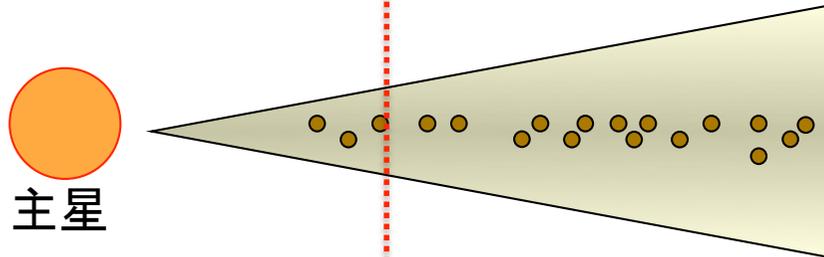
惑星形成過程

コア集積過程

(e.g. Safronov 1969; Hayashi et al. 1985; Pollack et al. 1996)

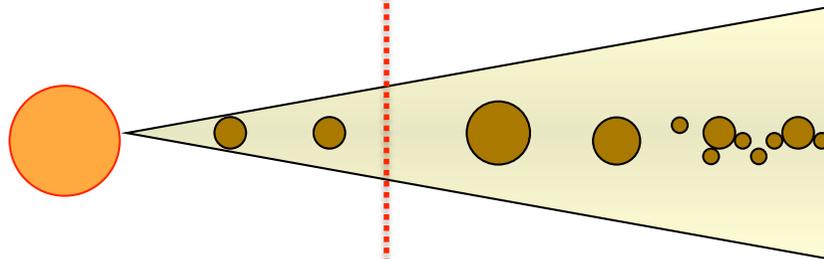
雪線

1. 微惑星集積と惑星コアの形成

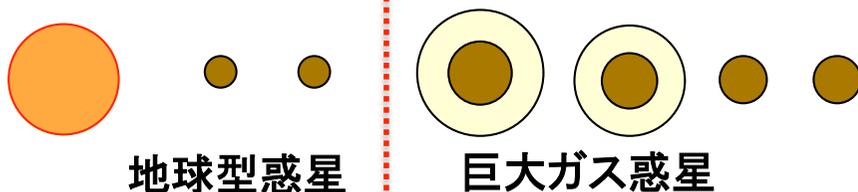


主星

2. コアへの急速なガス降着.



3. 円盤からガスが散逸 (~10⁷ yr)



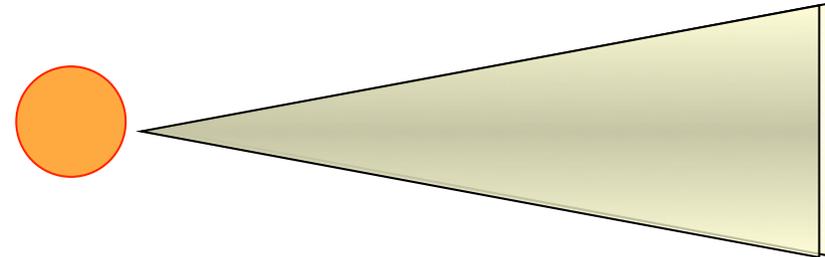
地球型惑星

巨大ガス惑星

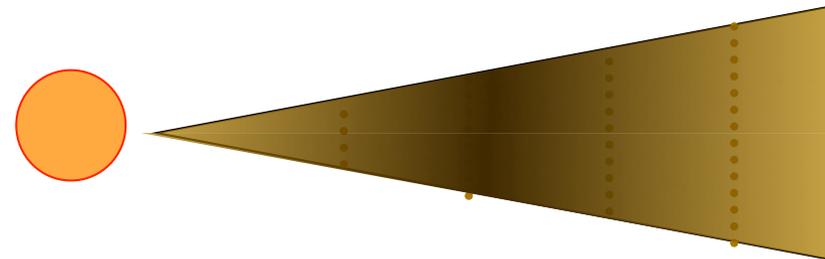
円盤不安定過程

(e.g., Kuiper 1951; Cameron 1978; Boss 1997)
(* 円盤不安定後の過程は分かっていない)

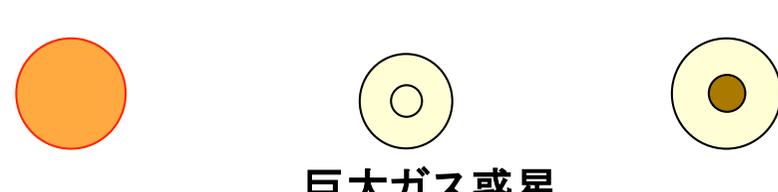
1. 十分に重いガス円盤を想定



2. 円盤全体が不安定。局所的にクランプが形成。



3. クランプが収縮し、巨大ガス惑星が形成。



巨大ガス惑星

二つの観測量

- 次の二つの量を調べることで、どこで木星型惑星が形成され得るかを理解できる。
 - 円盤のダスト面密度分布(微惑星) → ALMA
 - 円盤の温度分布(雪線) → SPICA、TMT、遠赤外線干渉計
- ALMAは最近接の星形成にある**原始惑星系円盤の面密度を数AUで決定**できる(2010年代のサイエンス)。
- 高空間分解能の遠赤外線観測では、**円盤の温度分布を反映する雪線を直接調べる**ことができる(2020年代のサイエンス)。

雪線の探査

本田充彦さん(神奈川大)

- (惑星形成において重要な)

円盤深層の雪線の検出

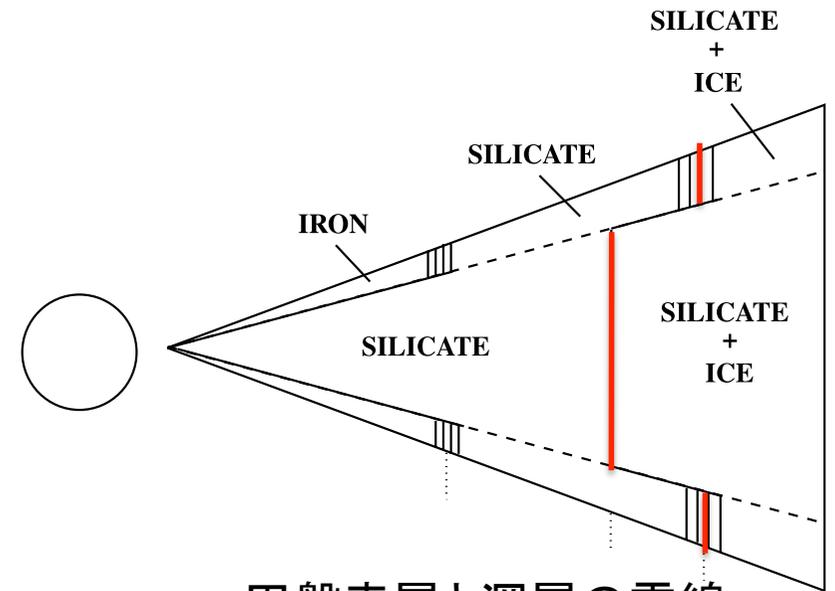
- SPICAで初めて44umの氷の放射分布を分解できる。(空間分解能(~3")から近傍の円盤に限られる。)

- 円盤表層の雪線からの予想

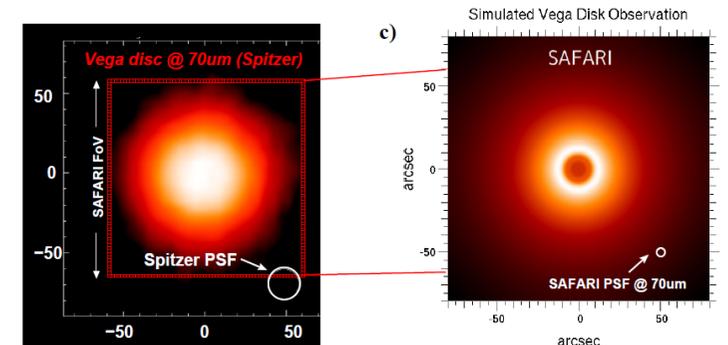
- 3.1um、12umの氷の吸収については、SPICAやTMTのMIR装置により表層の雪線の位置を特定し、表層から深層の雪線を推定する(Oka et al. 2011)。

- (将来的には)惑星形成現場の**原始惑星系円盤での温度分布**の測定が必要。

- 再近接の星形成を空間的に分解できる飛翔体遠赤外線干渉計(B~20m)が必要。



円盤表層と深層の雪線
雪線の予想 (Chiang et al. 2001)

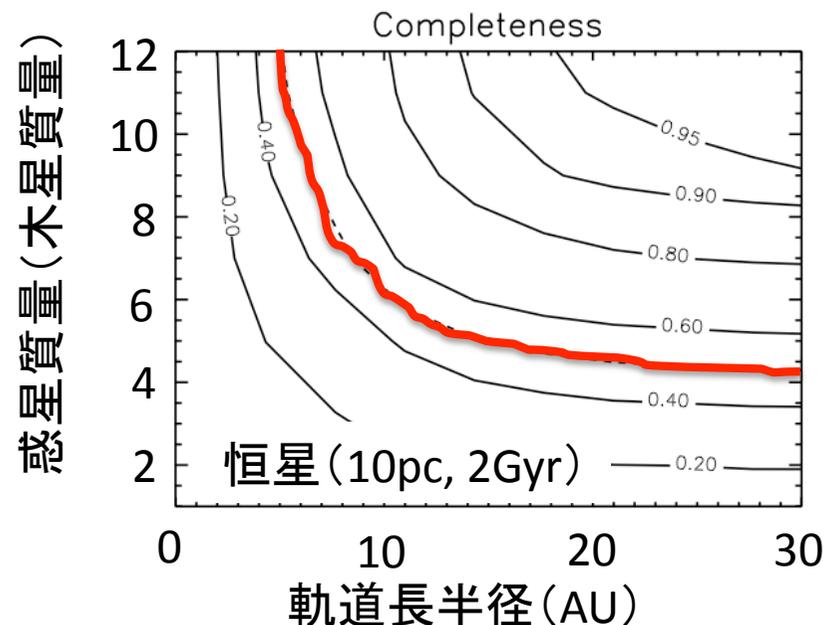


SpitzerによるVegaの観測(左、Su et al. 2005)
SPICA/SAFARIによる観測可能性(右)

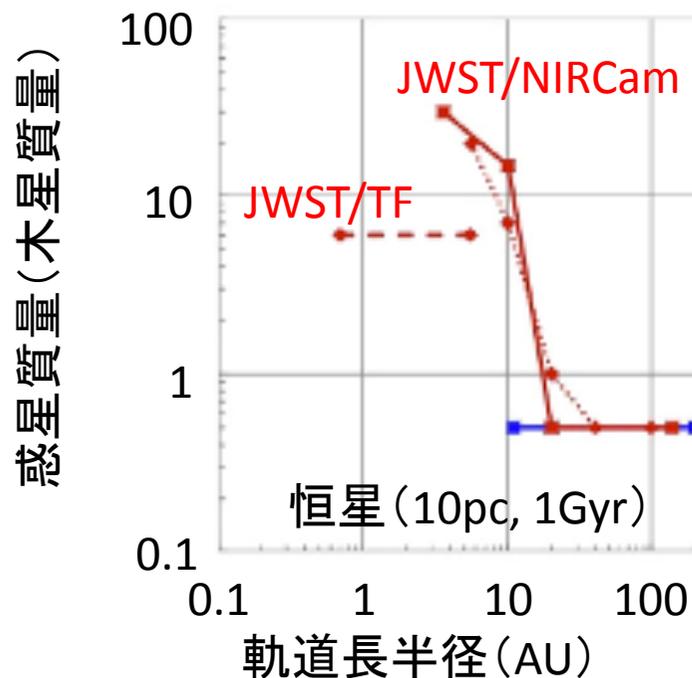
(2010年代メインのサイエンス)

木星型惑星の検出

- 2010年代には、地上及び宇宙から直接観測により木星型惑星の探査が行なわれる。
- 地上からは近赤外線での極限補償光学を用いた非常に高いコントラスト観測、宇宙からは中間赤外線での観測により、比較的古い惑星系 (~2Gyr) の周りで発見が予想される。
- 主な高コントラスト装置は検出に重点を置いているため、特徴づけは2020年代以降へ。



GPIでの惑星探査 (Macintosh+ 2007)



JWST4.6 μ mでの惑星探査 (Matsuo+ 2011)

検出から分光へ

(TMT, SPICA, TAO, 京大)

- 検出の次のステップとして、惑星の大気分光から大気組成を調べる。

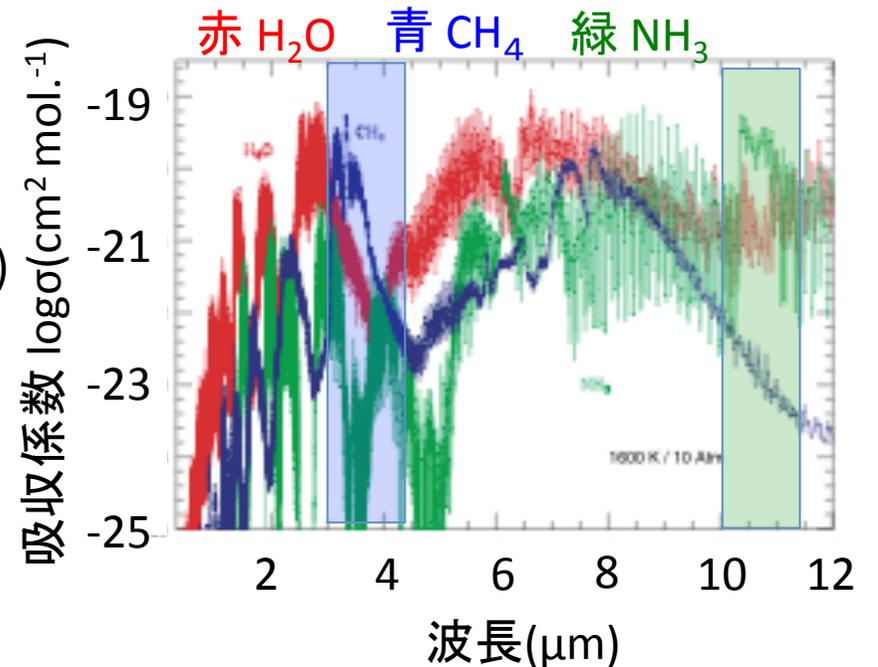
分子: H_2 , H_2O , CH_4 , CO , N_2 , NH_3

原子: Na, K

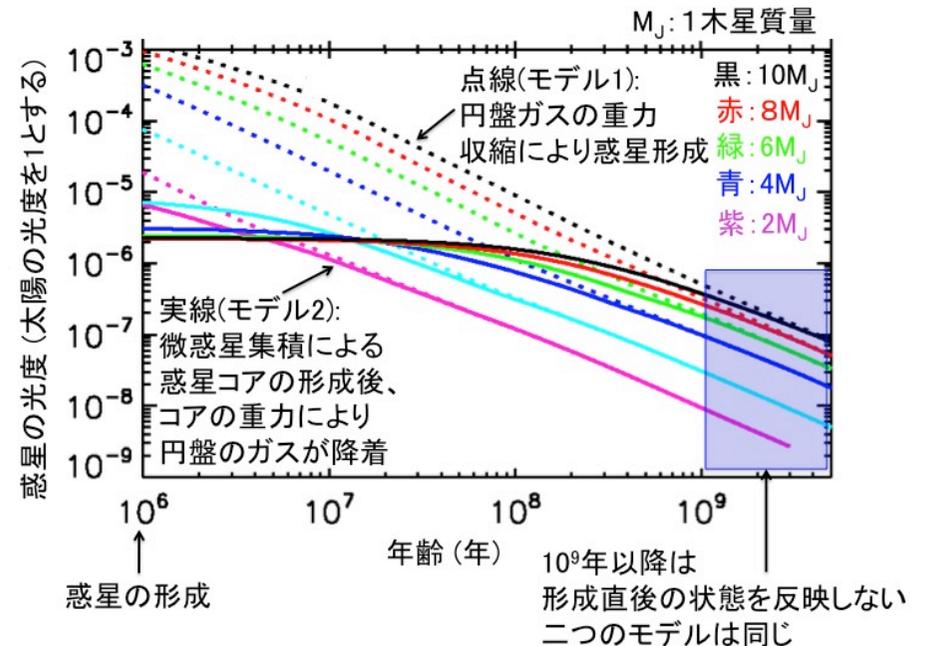
- 例えば、 CH_4 、 NH_3 は温度の指標として重要な分子。

- $CH_4 \sim 1000K$, $NH_3 \sim 200K$

- 大気温度を制約することにより、惑星がどのように形成され、進化するかを解く手掛かりになる。



吸収係数 (Sharp & Burrows et al. 2003)

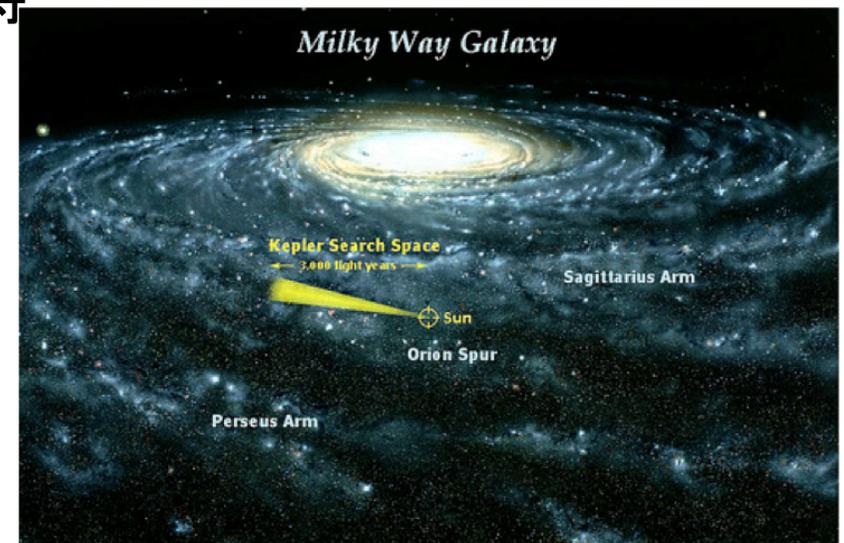
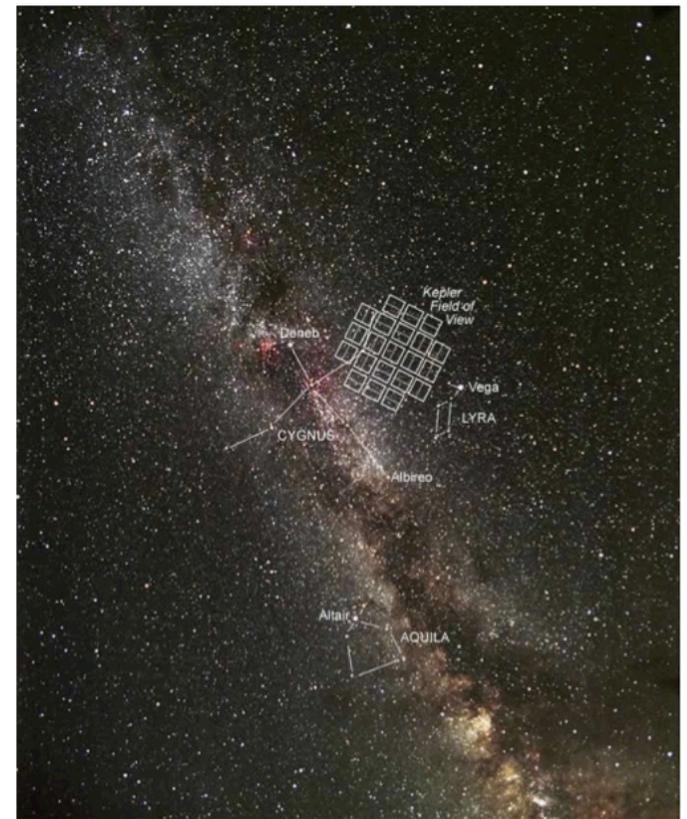


惑星進化モデルの比較 (Marley et al. 2007の図を改変)

地球型惑星： 探査と特徴づけ

Kepler衛星で充分か？

- Kepler衛星によって100を超える地球サイズの惑星が発見された。
- Kepler衛星は白鳥座方向の3000光年の範囲 (15万6千の星を見続けている)
 - ➔ 統計的性質を調べるためには良いが、遠方ばかりの恒星なので、将来的に特徴づけを行なう事ができない。
 - ➔ 近傍の地球型惑星の探査が必要。



2020年代の望遠鏡たち

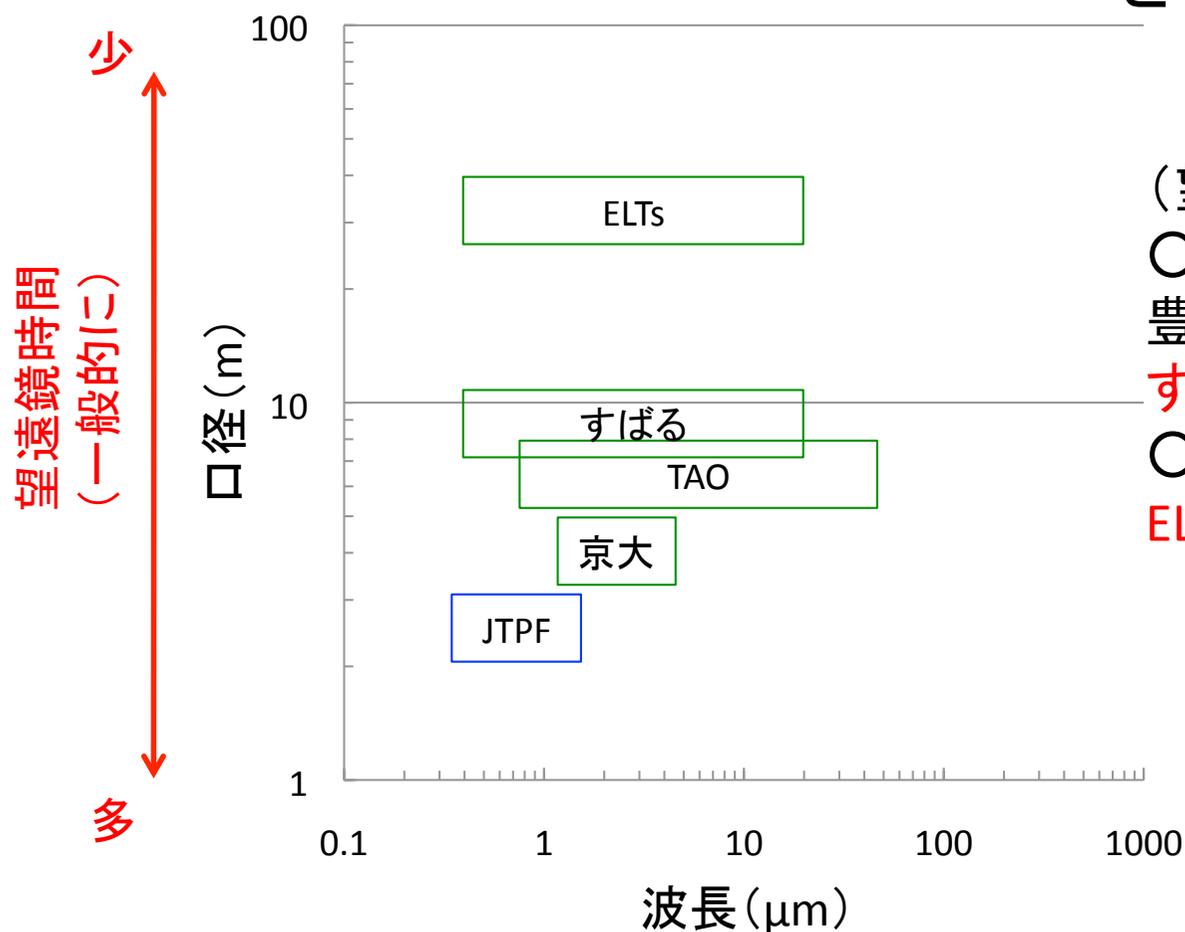
- 2020年代の望遠鏡 (日本)

地上: TMT、すばる、京大、TAO...

宇宙: JTPF...

トピック:

地球型惑星に**複数の**望遠鏡で
どのようにアプローチするか？

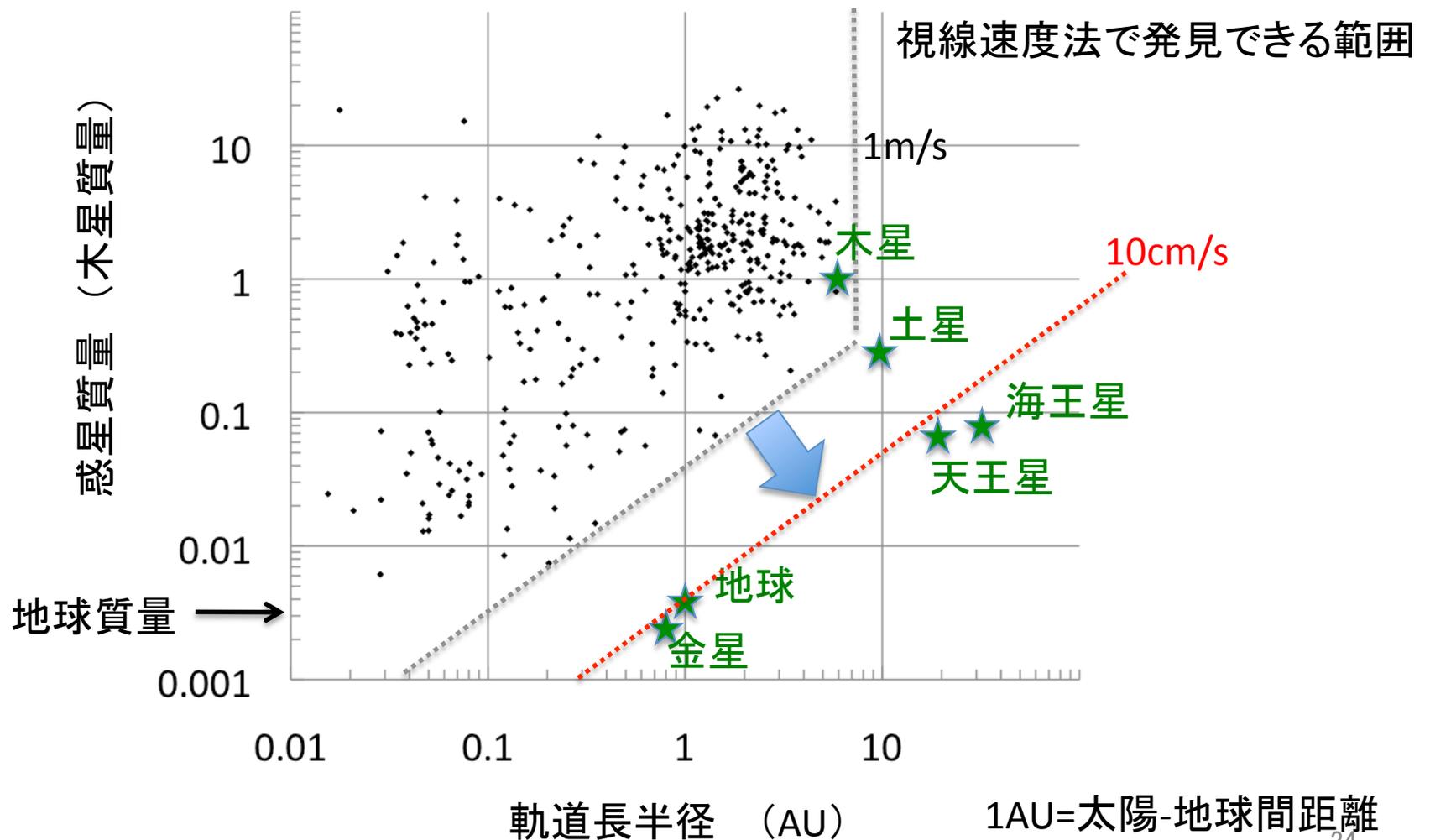


(望ましいアプローチは)
○2020年代に望遠鏡時間が比較的豊富な
すばる、TAO、京大 → 「探査」
○望遠鏡時間が限られている
ELTs → 「特徴づけ」

中口径望遠鏡で地球型
惑星の検出が可能か？

多様な惑星

これまでに視線速度法で発見されている惑星(黒)と太陽系惑星(緑)

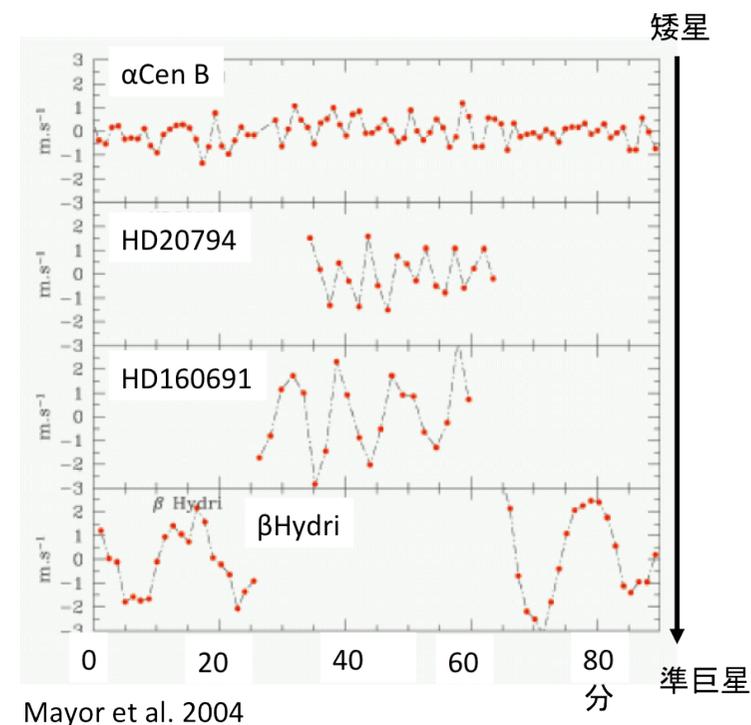


視線速度法の現状

佐藤文衛さん(東工大)

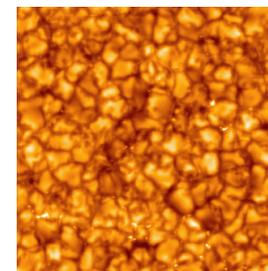
- 現在の望遠鏡 (ESO3.6m+HARPS, Subaru+HDS)の視線速度精度: $\sim 1\text{m/s}$
- K、G型星周りの地球型惑星検出に必要な精度: $K \sim 10\text{cm/s}$
- 10cm/s を達成するには、恒星表面の様々な現象に起因するノイズ ($\sigma \sim 10\text{cm/s}$)をキャンセルの必要がある:
 - 恒星振動 (p-mode) (Mayor+2004)
 - Granulation (表面の粒状) (Kjeldsen et al. 2005)
 - 長期変動 (黒点や11年周期)

→ 観測対象に付随するものであり、口径に依存しない問題



Mayor et al. 2004

恒星振動p-mode (Mayor et al. 2004)



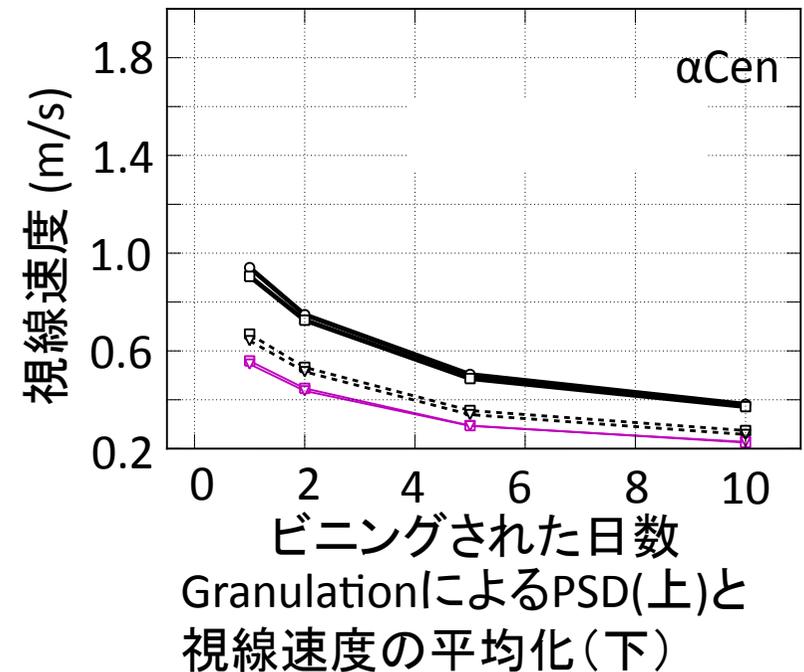
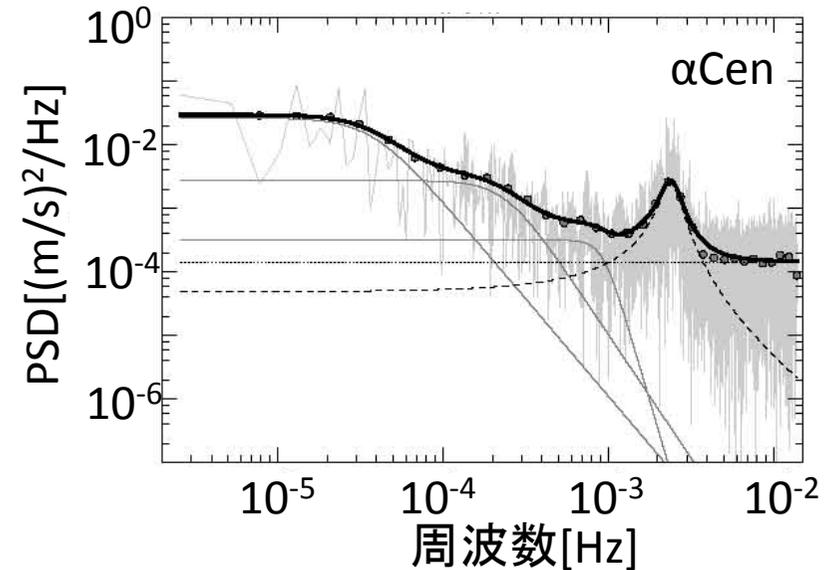
Granulation (ひのでの観測)

戦略

1. 恒星表面のノイズのタイムスケールを理解し、そのノイズをキャンセルするように平均化する。
2. “静かな”恒星を選んで観測する。

○ノイズキャンセルについて:

- 恒星振動 (p-mode) は周期5-10分程度
→ 30分程度の露出で平均化し、10cm/sのレベルまで低減 (Mayor & Udry 2008)
- Granulationは1時間のオーダーで見かけの視線速度が変化。
→ 数時間に渡って数回の観測を平均化することで20cm/sまで低減 (Dumusque et al. 2011)



- どのような口径でもある一定の露出時間が必要
- 地球型惑星探査には豊富な望遠鏡時間が必要

観測対象

- 口径が大きい程、限界等級は深くなる:

例: $T_{\text{exp}}=1800\text{s}$, $\sigma=0.1\text{m/s}$ を達成できる恒星の明るさ

- ESO(3.6m)+HARPS-type → $m_v \sim 5-6$
- VLT(8m)+HARPS-type → $m_v \sim 7.5$
- E-ELT(42m)+HARPS-type → $m_v \sim 11$

問題提起:

- より暗い(遠方、晩期型)星の周りについても探査が必要か？
- 直接観測で特徴づけが可能な近傍の恒星の明るさは $m_v < 6$
→ 4~8m級望遠鏡の口径で可能!
- 晩期型星周りは2010年代のメインサイエンスであろう、赤外線ドップラーによって探査しつくされる。

→ 4~8m級望遠鏡での探査を行なえないか？

特徴づけ

- 検出の次のステップは、惑星の特徴付け。
- 大別して二つの方法
 1. 周期変動による表層環境の調査
 2. 分光観測から惑星の大気組成の調査
- ➔ 今回は生命探査の観点から「2番目」について議論する。

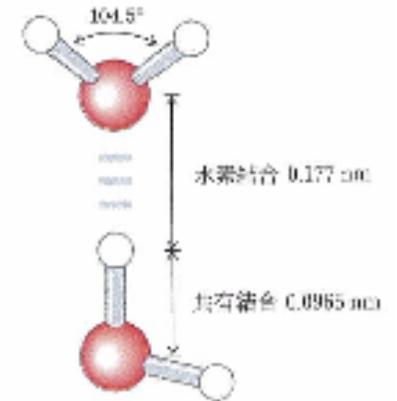
出発点：

- どのような宇宙生命を探せばよいか分からない。
- ➔ 地球生命と同じ仕組みの生命を想定する。

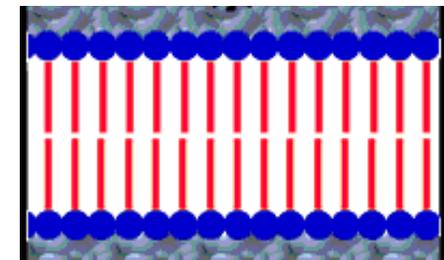
(あくまでも地球生命に基づいた話)

水の重要性

- 液体の水が**生命進化・維持**において重要な役割を果たしている。
- 生命の進化・維持 → 「**化学反応**」
- 水の特殊性(**水素結合**):
 - 液体として存在できる範囲が広い
→ 沸点が有機物質が存在できる温度とほぼ等しく、他の溶媒に比べて化学反応速度が早い(e.g., メタン、アンモニアは-33度を超えると液体でいられない。)
 - 水の極性
→ 極性分子の溶融、無極性分子(細胞膜)の非溶融。生命に必須の細胞膜の形成により、内と外を分離する役割を果たす。
 - 水の密度 > 固体の密度
→ 地球が冷えて海が部分的に氷になっても、氷が浮くために温められ、表面温度が一定に保たれる(フィードバック)



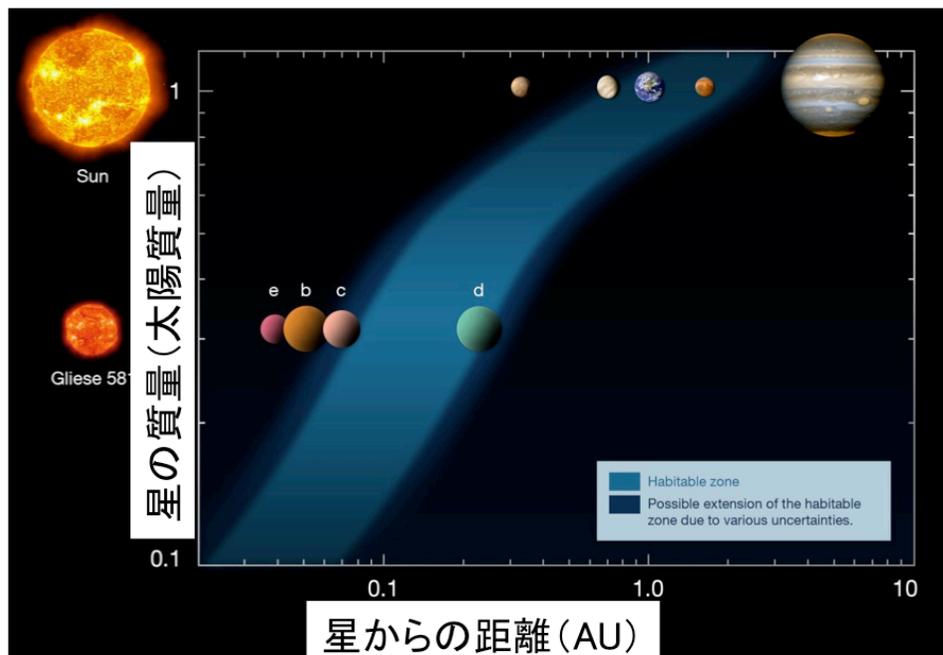
水素結合
(酸素原子と別の水素原子の静電引力)



膜構造(青が親水性・赤が疎水性)

Habitable Zone (HZ)

- Habitability (生命居住可能性)を決める最重要な要素:
“**液体の水**”が惑星表層に存在すること
- Habitable Zone → その条件を満たす理論的空間



星からの距離 (AU)

Habitable Zone

太陽系 : 0.97-1.39 AU

Gliese 581 (M3V): 0.10-0.17 AU

HZにある惑星についてどのようにアプローチするか？

地上とスペースの棲み分け

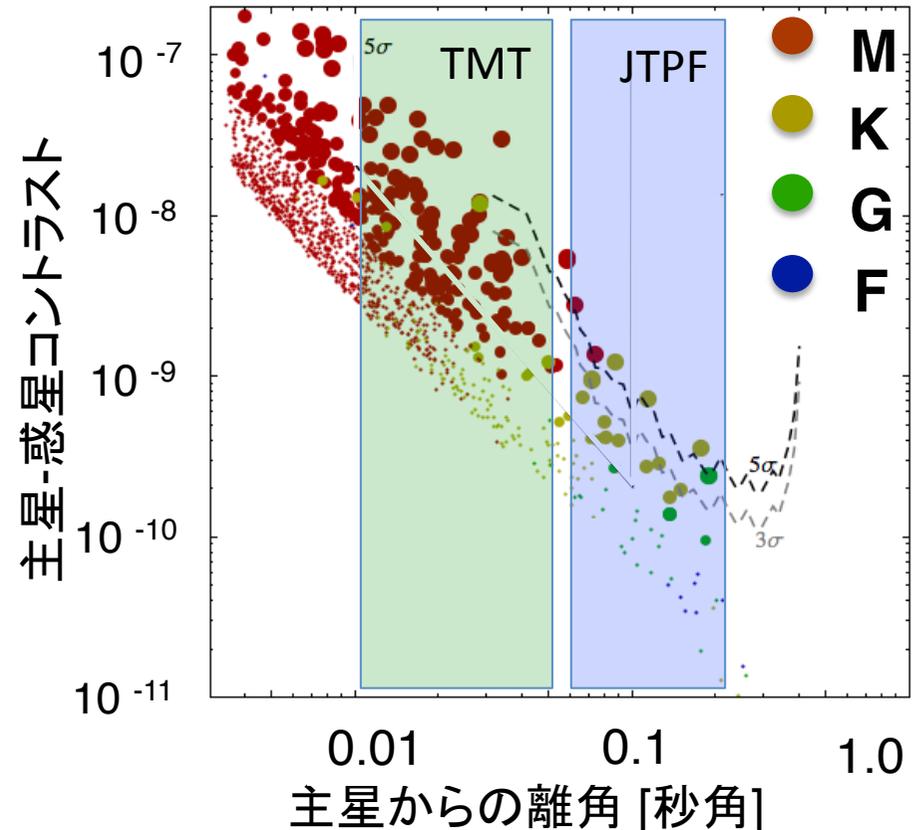
二つの手段:

JTPF: 小口径ではあるが、スペース
(安定した環境)からの観測

→ 主星から遠い ($>0''.5$)、高いコントラストの惑星 (K, G型星)

TMT: 安定した環境ではない(大気擾乱)が、地上からの大口径の観測

→ 主星に近い、比較的低いコントラストの惑星 (M型星)



近傍星のHZに惑星が一つあることを想定し、その主星-惑星のコントラストと離角

惑星大気

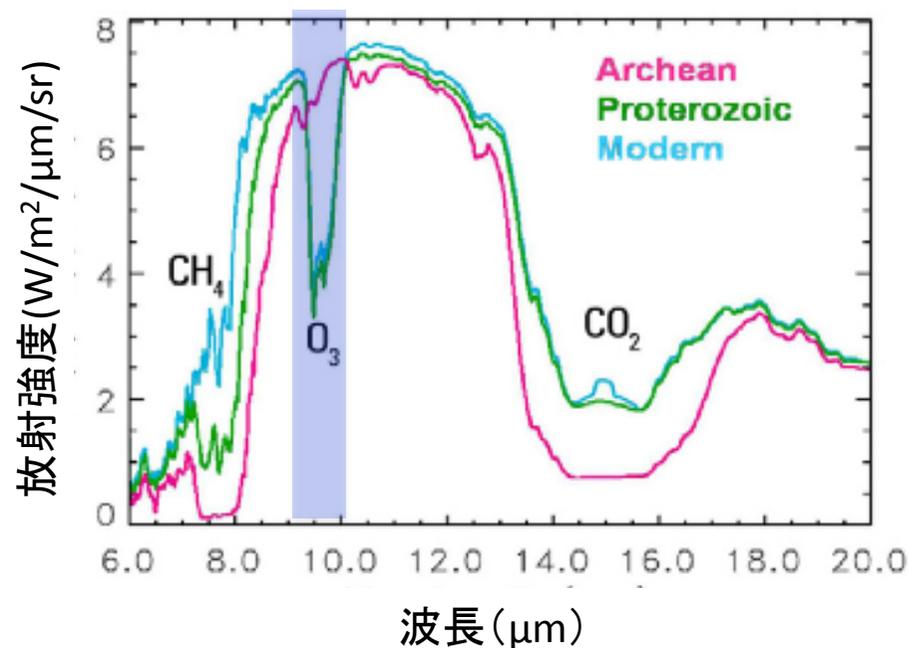
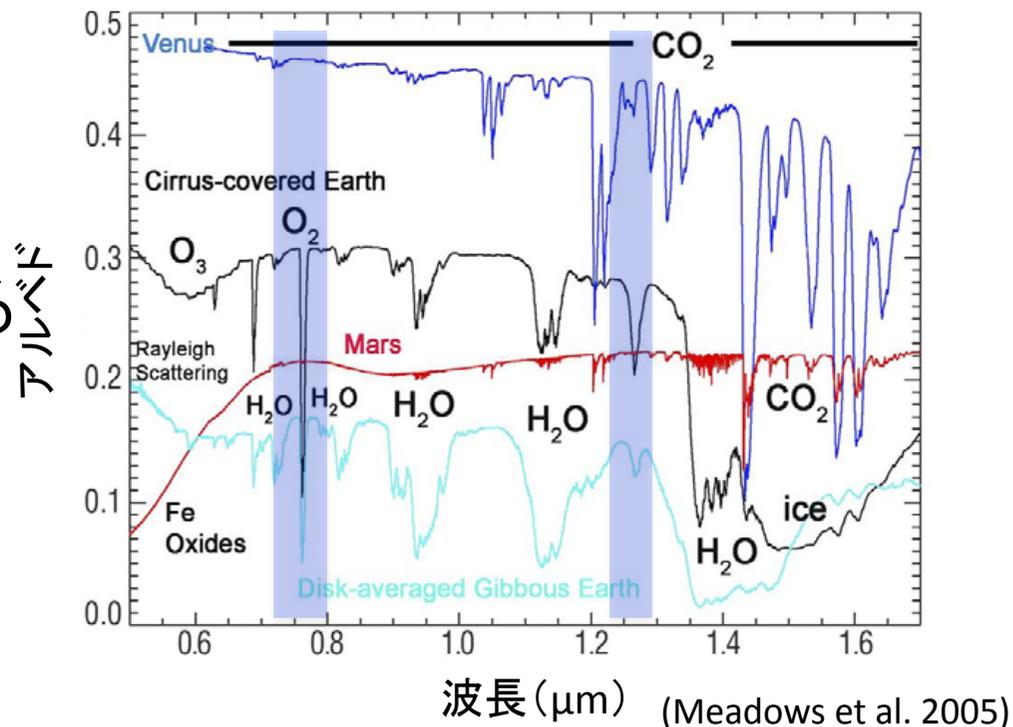
惑星探査計画でアプローチできる
分子吸収線:

- H_2O (広範囲に存在)
- O_2 ($0.76\mu\text{m}$, $1.27\mu\text{m}$)
- O_3 ($9.6\mu\text{m}$)
- CO_2 ($1.5\text{-}1.6\mu\text{m}$, $14\text{-}16\mu\text{m}$)
- CH_4 ($1.7\text{-}1.8\mu\text{m}$, $7.8\mu\text{m}$)
- NH_3 ($\sim 11\mu\text{m}$)
- N_2O (7.8 , $17\mu\text{m}$)

他には、

- レイリー散乱 ($< 0.6\mu\text{m}$)

→ 大気存在証拠



可視・近赤外線(上)と中間赤外線(下)のスペクトル

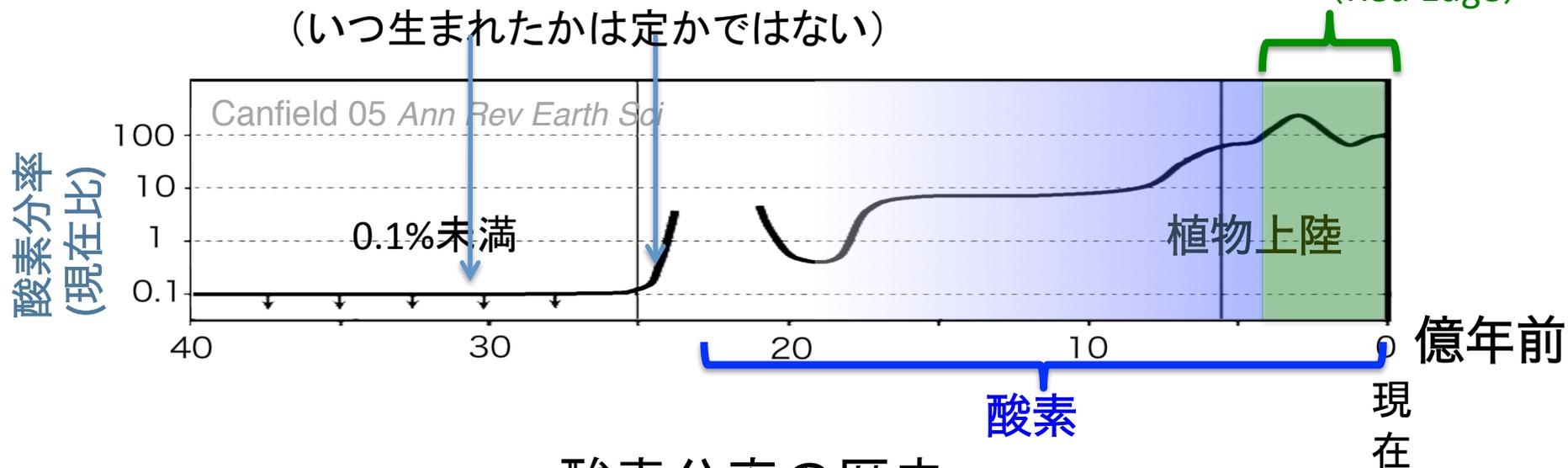
酸素分率の歴史

- 23億年以前は、水の紫外線分解により酸素は微量に発生
- 23億年を境に急激に酸素分率が上昇。
- (一説に)シアノバクテリア(最初の酸素発生型光合成)の発生に伴うものと考えられている。



シアノバクテリア

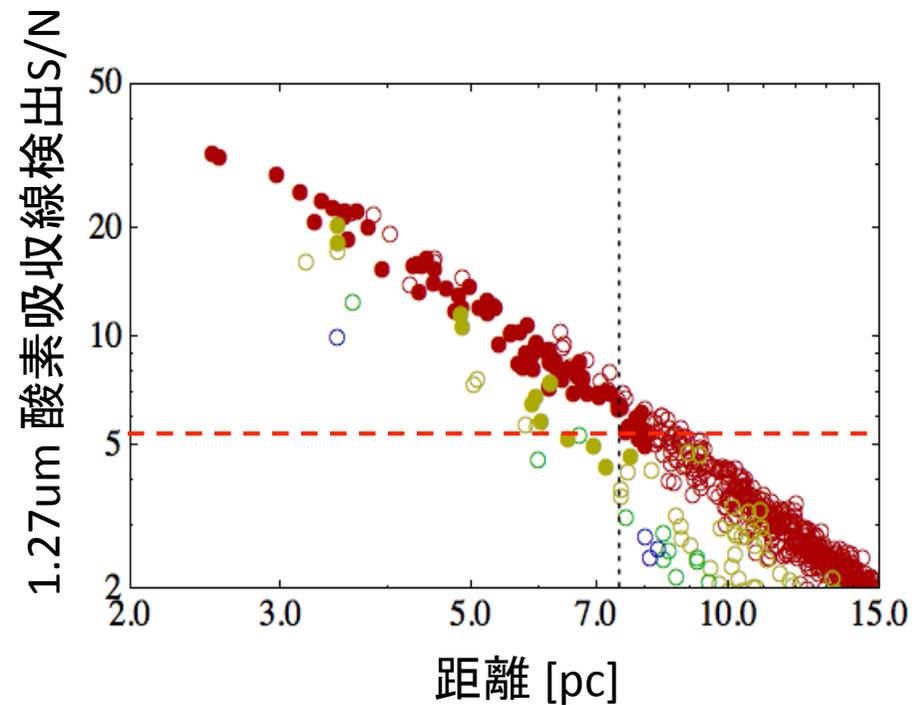
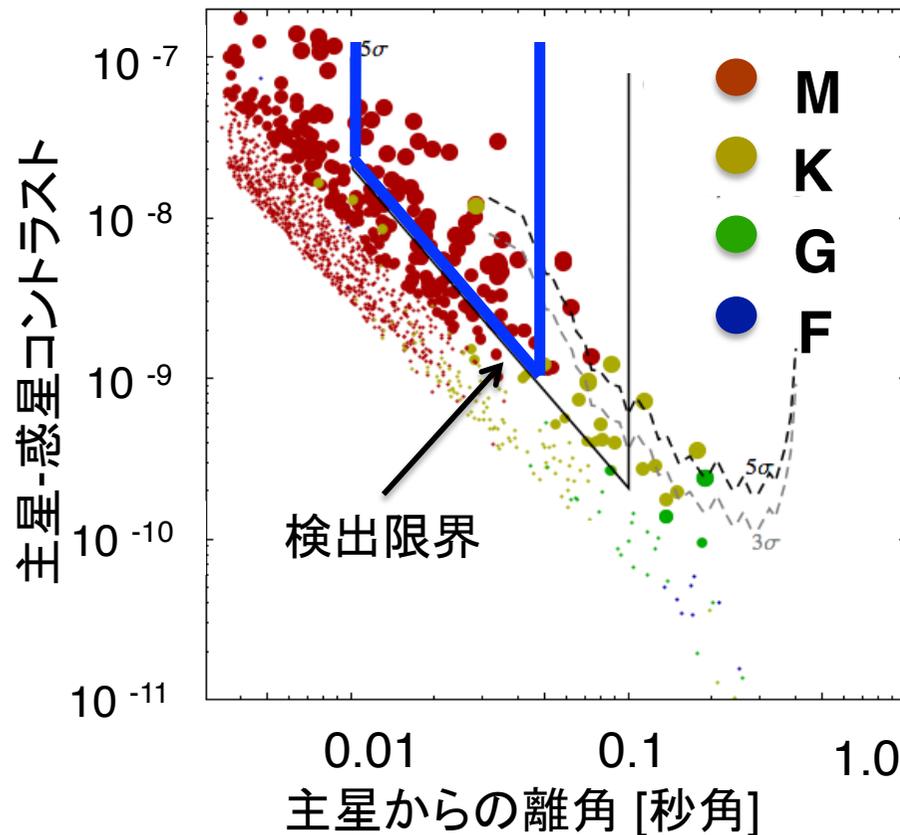
シアノバクテリア(最初の酸素発生型光合成生物)の発生
(いつ生まれたかは定かではない)



酸素分率の歴史

TMTで地球型惑星を狙えるか？

- 2021年にすばる望遠鏡に続く次世代の大型望遠鏡TMTはファーストライトを迎える。地球型惑星探査ができる最初の機会である。
- TMTに理想的な高コントラスト装置を搭載すれば、M型星の周りの**100の地球サイズ**の惑星を直接観測し、大気分光から**酸素の吸収線**を検出できる。



5時間積分での1.27um酸素吸収線検出のS/N

まとめ

- 2020年代のサイエンスとして木星型惑星と地球型惑星に関する話題を挙げた:

A. 木星型惑星:

A1. 中間・遠赤外線での雪線の観測(温度分布)により惑星形成論の発展が期待される。

A2. 分光観測から木星型惑星の進化過程の理解が期待される。

B. 地球型惑星:

B1. 地球型惑星探査は4~8m級望遠鏡で実現できる可能性がある。今後検討が必要。

B2. 地球型惑星の特徴づけは地上の大型望遠鏡、(小口径でも)スペースの両面からの観測が必要。TMTはその最初の機会を提供できる可能性がある。