系外惑星班の中間報告

松尾太郎 (京都大学)

メンバー

あいうえお順

- 計8名 (1名は星惑星形成班とのかけもち)
- ・ 2名の惑星科学の出身(青)
- ・ 理論/観測/装置がバランス良く
- 河原創(東京大学)
- 小玉貴則(東京大学)
- 佐々木貴教(京都大学)
- 住貴宏(大阪大学)
- 成田憲保(NAOJ)
- · 福井暁彦(NAOJ)
- 武藤恭之(工学院大) ← 星惑星形成班とのかけもち
- 松尾太郎(京都大学)

会議現状

• 5回のSkype会議

3/10: 計画書趣旨説明

4/15: キーワード選定

5/21: 章と節の構成

6/19: 担当者の決定

8/5: 進捗の確認

・ 顔合わせ会議はなし。明日が最初のF2F。

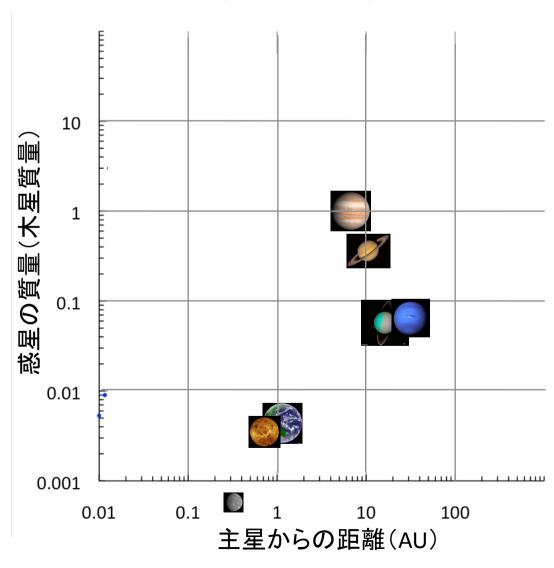
内容

- 太陽系外惑星の科学的意義
 - → 2020年代の3つのサイエンステーマ

- 章と節の構成内容
- 各節のハイライト

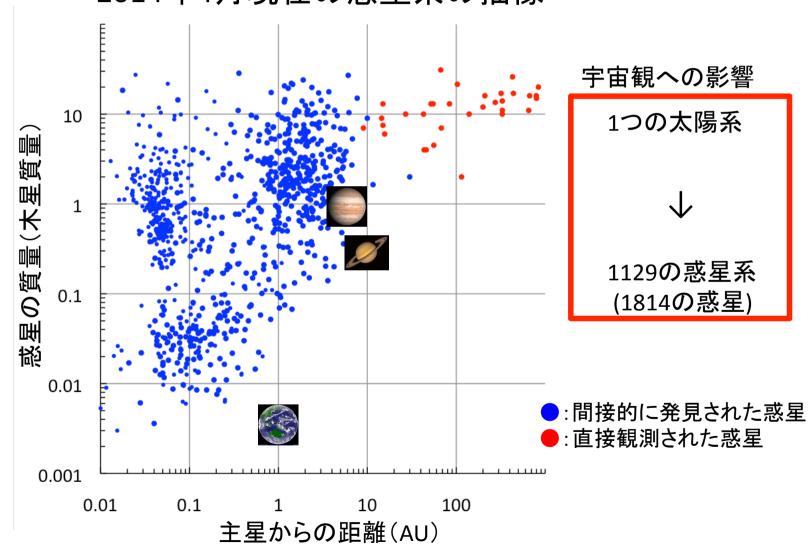
太陽系外惑星の科学的意義

1995年以前の惑星系の描像

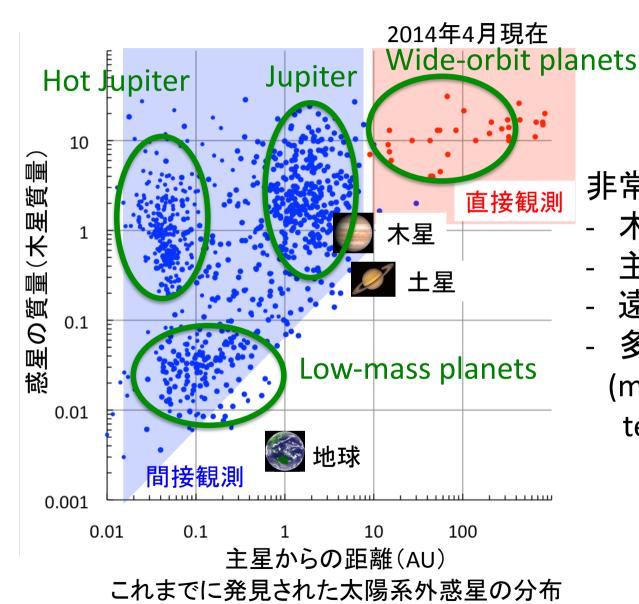


太陽系外惑星の科学的意義

2014年4月現在の惑星系の描像



太陽系外惑星の科学的意義



非常に多様な惑星系の発見

- 木星型惑星
- 主星極近傍のガス惑星
- 遠方のガス惑星
- 多様な低質量惑星 (mini-Neptune, super-Earth, terrestrial planet)

●:間接的に発見された惑星

●:直接観測された惑星

2020年代系外惑星科学の3本の柱

- 1. 太陽系を含めた多様な惑星系の起源·進化 の理解
- 2. 惑星で起こる物理・化学現象の包括的な理 解
- 3. 地球生命の居住可能性の理解と宇宙における生命現象の探査

2020年代系外惑星科学の3本の柱

1. 太陽系を含めた多様な惑星系の起源·進化の 理解

太陽系惑星形成論 → 汎惑星形成論

- 2. 惑星で起こる物理・化学現象の包括的な理解 太陽系惑星科学 → 系外惑星科学
- 3. 地球生命の居住可能性の理解と宇宙における生命現象の探査

地球生命 → 地球生命の相対化

(生命観の変革)

2020年代系外惑星科学の3本の柱

光赤外

電波

- 1. 太陽系を含めた多様な惑星系の起源·進化の 理解
 - 太陽系惑星形成論 → 汎惑星形成論
- 2. 惑星で起こる物理・化学現象の包括的な理解 太陽系惑星科学 → 系外惑星科学
- 3. 地球生命の居住可能性の理解と宇宙における生命現象の探査
 - 地球生命 → 地球生命の相対化

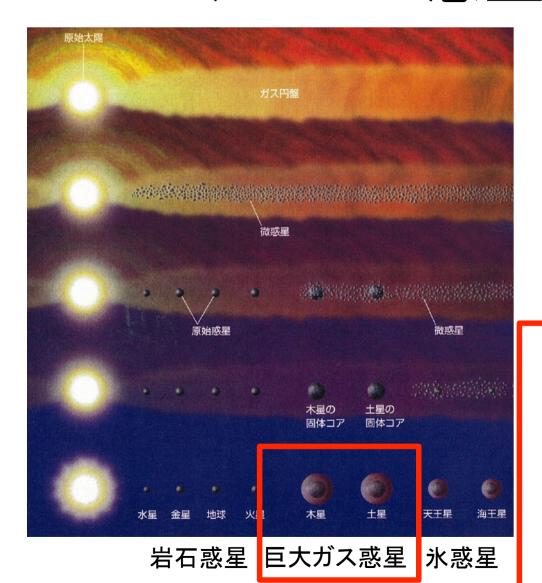
(生命観の変革)

これらのテーマの観測的な足掛かりは欧米が築いてきた

節と章の構成案

- 導入 (松尾)
 - 科学的意義
 - 2020年代までの展望
- 惑星の形成・進化 (テーマ1)
 - 形成初期の惑星の観測的研究 (武藤、松尾)
 - 惑星分布の統計的研究(成田、住、佐々木)
- 系外惑星科学 (テーマ2)
 - ガス型惑星(佐々木、福井)
 - 岩石型惑星(河原)
- ハビタブル惑星 (テーマ3)
 - Habitability (小玉)
 - Biomarker (河原)

Hayashi et al. 1985



円盤初期状態

← 電波/光赤外

+ 初期環境の多様性

微惑星形成

原始惑星(コア成長)

ガス降着

(1995年以降の議論)

- + 軌道進化
- +惑星進化

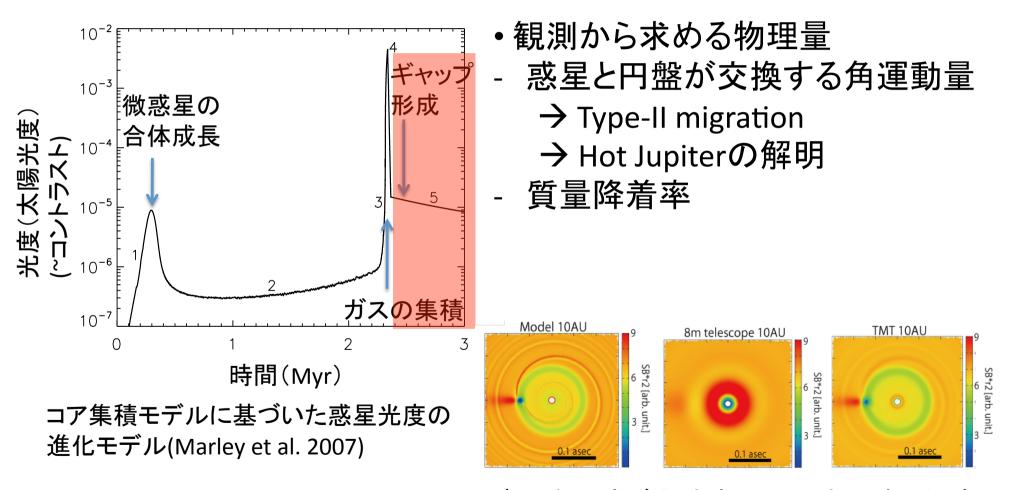
終状態

光赤外観測

・形成から進化を ひとつのピクチャ ーに!

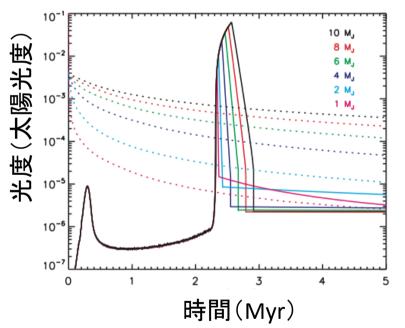
(現状:断片的な研究)

太陽系形成論の概要(Newton 2011年別冊)



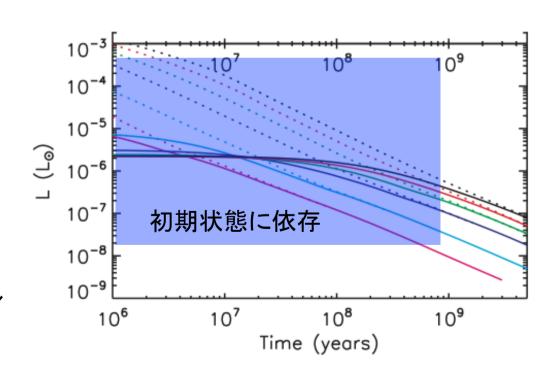
モデル(左)、すばる(中央)、TMT(右)の観測予想 武藤さんのシミュレーション

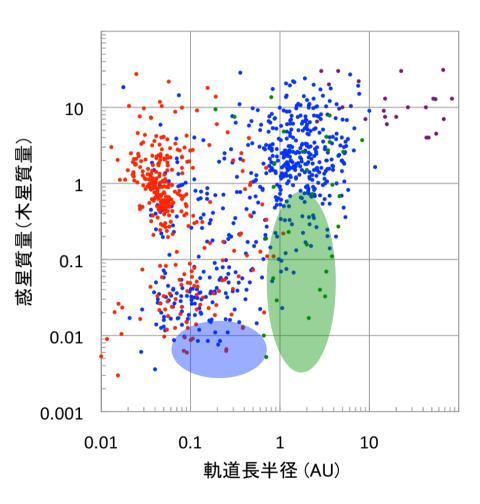
Cold start model → コア集積? Hot start model → 円盤不安定?



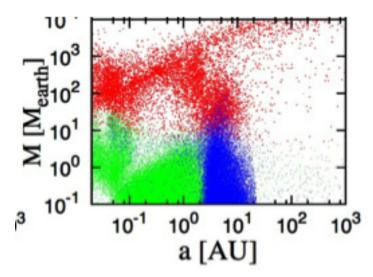
Cold Start model (実線)とHot start model (点線)に基づいた惑星光度の進化モデル (Marlay et al. 2007)

- 観測:
- 形成から1Gyrまでの惑星系を観測
- 惑星の明るさ、温度の推定





- 惑星のアバンダンス 調査:
- GAIA衛星: アストロメトリ法
- WFIRST-AFTA: マイクロレンズ
- 地上/高分散: 視線速度法

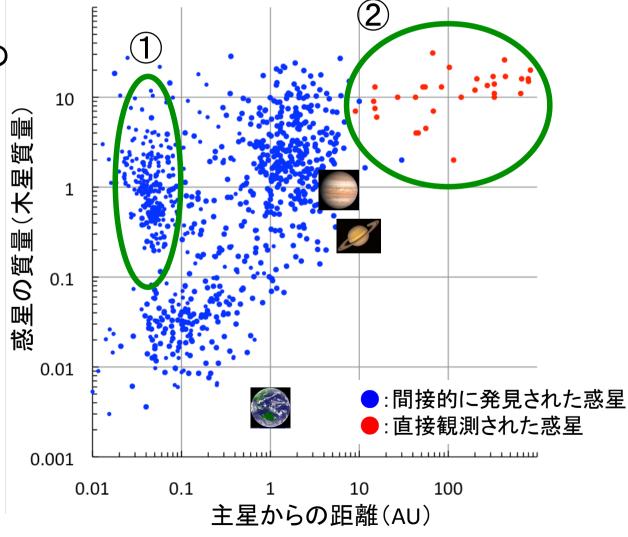


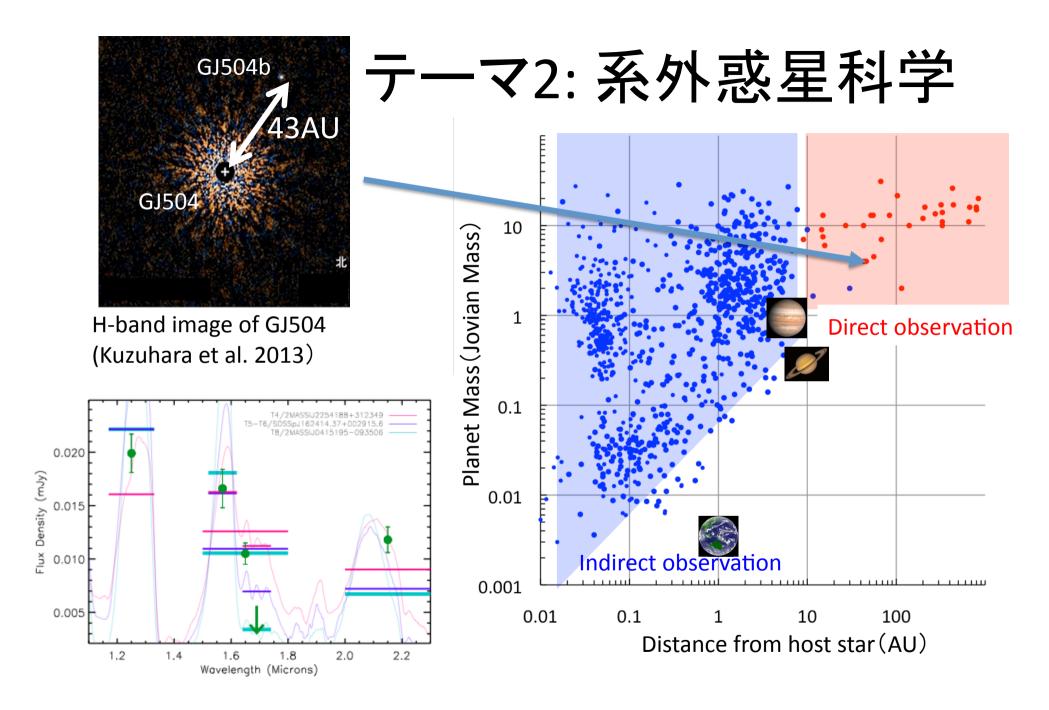
惑星のアバンダンス予想 (Ida & Lin 2013)

テーマ2: 系外惑星科学

- 惑星で起こっている 物理現象を理解するため の詳細なリモート観測。
- ①主星極近傍の惑星 (②遠方の惑星) ← これから

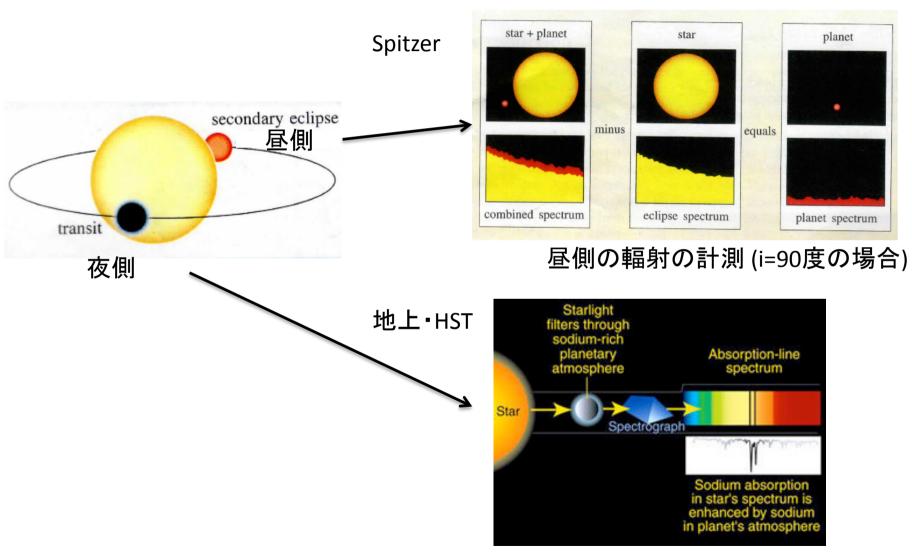
2014年4月現在の惑星系の描像





Spectroscopy of GJ504 (Janson et al. 2013)

テーマ3: 系外惑星の理解

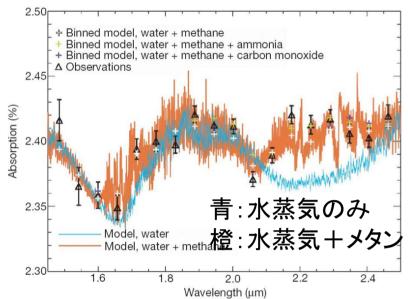


大気の透過光分光

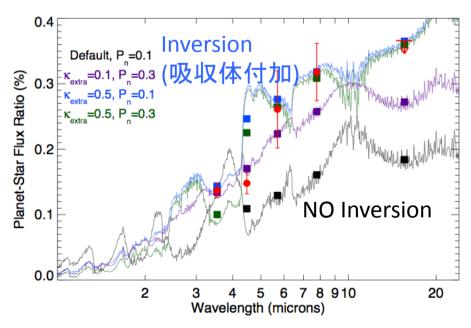
テーマ2: 系外惑星科 学

(この節はまとめきれていません。)

- 現状までに分かったこと:
- ガス惑星
 - -- ガス惑星における多様な重元素量
 - -- 大気分子(水、メタン)の検出
 - -- 雲/ヘイズの検出
 - -- 温度構造やC/O比の多様性
- (生命を宿さない)岩石惑星
 - -- マグマオーシャンの長期継続 (~1000万年)
 - -- 岩石惑星の蒸発
 - --ミネラル大気の可能性



透過光分光の例(Swain et al. 2008)



TrES4における2次食の計測. (Knutson et al. 2008)

テーマ2: 系外惑星科学

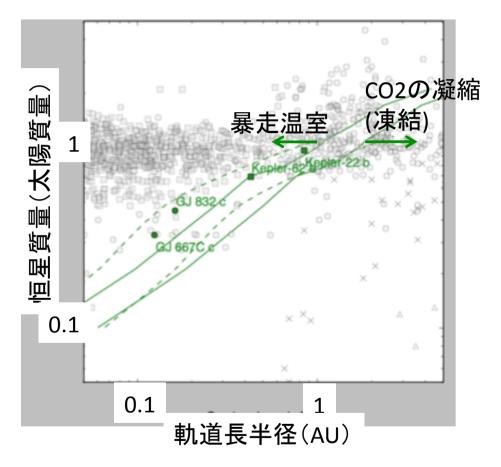
(この節はまとめきれていません。)

- 現状までに分かったこと:
- ガス惑星

 - -- 大気分子(水、メタン)の検出
 - -- 温度構造やC/O比の多様性
 - -- 大気の運動
 - -- 雲/ヘイズの検出
- 岩石惑星
 - -- マグマオーシャンの長期継続 (~1000万年)
 - -- 岩石惑星の蒸発
 - --ミネラル大気の可能性

- ・2020年代の解明すべき課題:
- -- ガス惑星における多様な重元素量 →主星の重元素量との相関、形成論への発展
 - → 主星と併せた木星型惑星の理解
 - →雲/ヘイズの生成条件、主星との関係
 - → マグマオーシャンの直接検出
 - → 岩石惑星のトランジット分光による岩石の 組成や内部情報

テーマ3: ハビタビリティの理解

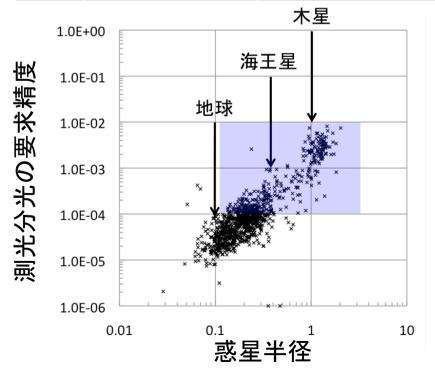


系外惑星と恒星質量を関数とした ハビタブルゾーン(Kasting et al. 1993; Kopparapu et al. 2013)

- 主星から受け取るFluxに基づいて、 地球をベースに液体の水が表層 に存在する「理論的領域」を計算。 全球の平均的な気候の再現。
- 系外惑星系の多様性:
 - 惑星質量、大気、自転速度、潮 汐ロック、恒星活動
- 今後の発展:
 - 「点」ではなく、「空間的な天体」 として捉える。
 - 3次元的な大気循環水の輸送 (例、Leconte et al. 2013)

テーマ3: ハビタビリティの理解

	中心波長(μm)	波長範囲(μm)
H ₂ O	6.2	5.7-8.0
CH ₄	7.7	6.3-8.3
CO ₂	15.0	13.5-16
NH_3	10.5	9.3-11
O ₃	9.6	9.3-9.8



- 観測的アプローチ: 海洋の検出(直接的な検証)
 - Glintの検出(Segan et al. 1993)
 - 水蒸気量の変動 (Fujii et al. 2013)
 - → 可視光での直接観測・高精度測 光

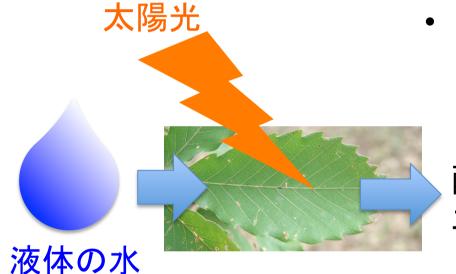
水蒸気・温室効果ガスの検出

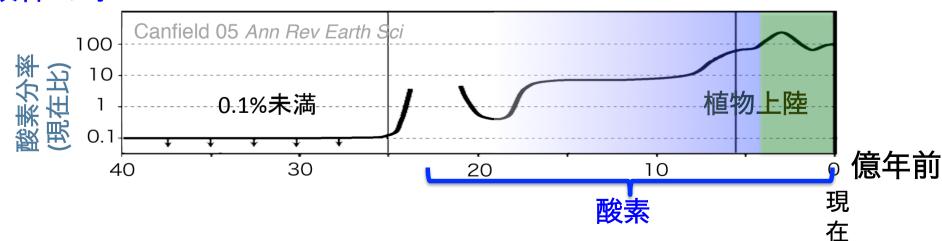
- トランジット系の分光
- スペースからの直接観測
- 地上での高分散分光

テーマ3:宇宙における生命の探査

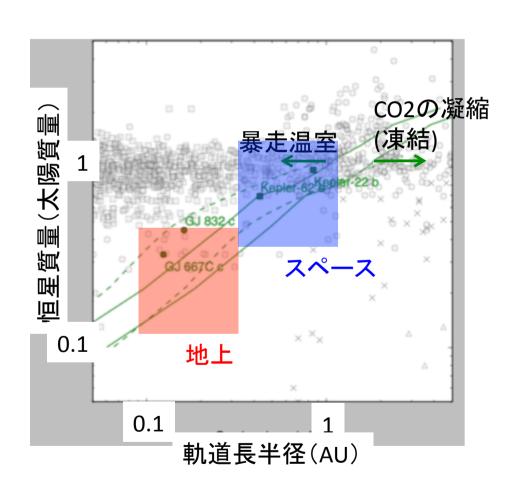
- ・ 宇宙における生命
- → 地球生命を想定。
- 生命探査 → 酸素発生型光合成(高 効率な酸素発生機構)の探査 (非生物的には、酸素蓄積が困難。)

酸素 エネルギー(糖)





テーマ3:宇宙における生命の探査



手法:

- スペース/地上での直接観測 による低分散分光

(TPF, Darwin, TMT)

- 地上からの高分散分光 (Snellen et al. 2013)
- スペースからのトランジット 分光 (要検討)
- False positiveの検討:
 - 生命が存在しない環境下でも 高効率な酸素発生機構の可 能性(e.g., Wordsworth+ 2014)

まとめ:2020年代の系外惑星研究において鍵となる望遠鏡/装置

(注意:チーム内で議論が出来ていない)

テーマ1. 太陽系を含めた多様な惑星系の起源・進化の理解

テーマ2. 惑星で起こる物理・化学現象の包括的な理解

テーマ3. 地球生命の居住可能性の理解と宇宙における生命現象 の探査

青:スペース、赤:地上

望遠鏡/装置	予想される主要な科学テーマ
超高精度トランジット分光	テーマ2、テーマ3
超高コントラスト(~1010)	テーマ3
超高解像/高コントラスト (~108-9)	テーマ1、テーマ3
超高解像/高分散分光 (R~10万)	テーマ2、テーマ3
中口径/広帯域トランジット測光分光	テーマ2