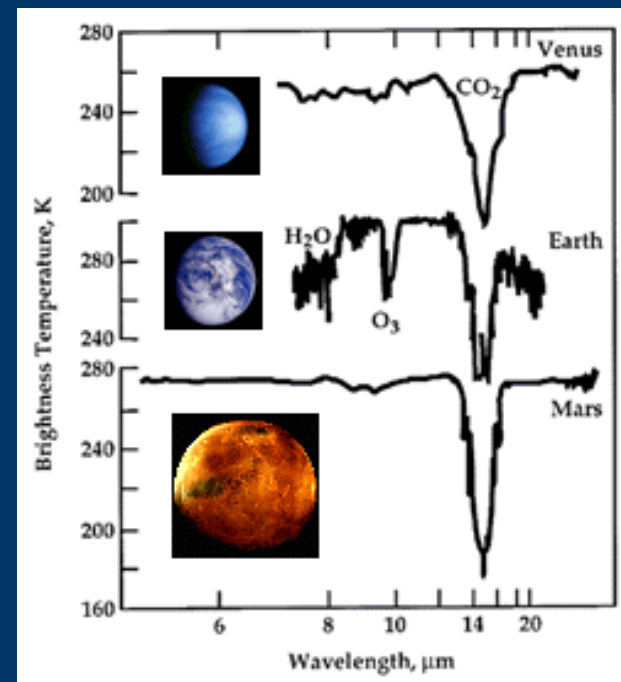
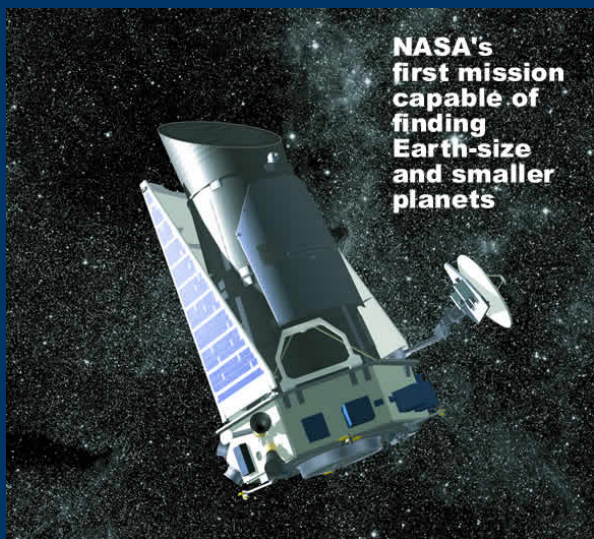


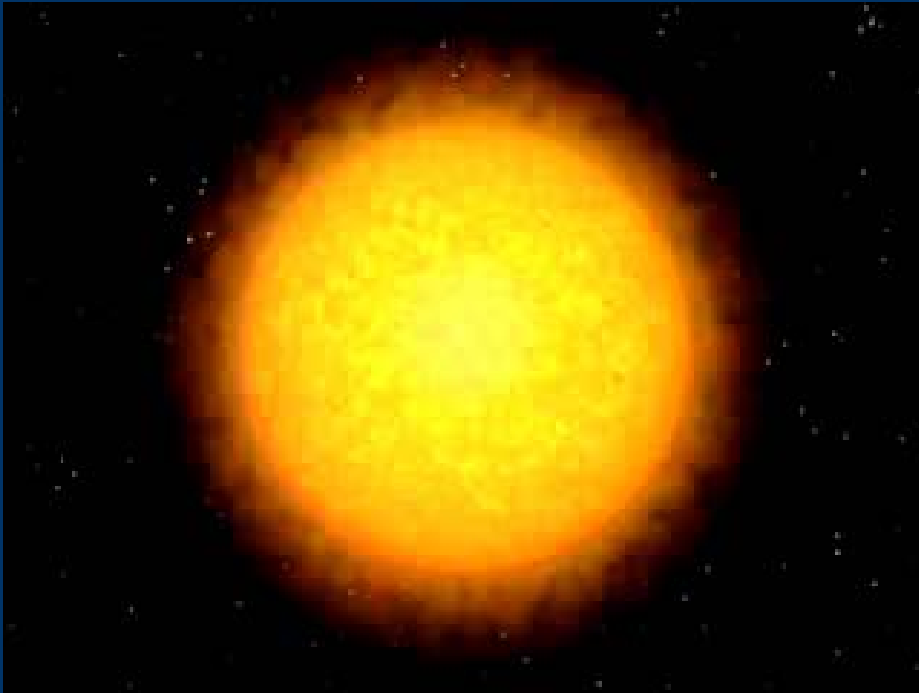
V 太陽系外惑星と生命

～ 第二の地球を探す～



もうひとつの宇宙の果て： 銀河系のどこかに生命を宿した惑星はあるのか？

■ 宇宙の果てと系外惑星



- 大望遠鏡は「暗い」天体を観測できる
 - 本当は明るいのだが遠く
にあり暗く見える天体
⇒ 宇宙の果てにある銀河
 - すぐ近くにあるのだが本
当に暗い天体
⇒ 銀河内にある系外惑星

第二の地球はあるか？



- 生命が誕生するには
 - 適度な温度
 - 大気存在
 - 液体の水(居住可能)
 - +偶然？
- 恒星の周りの地球型惑星を探せ！

Terra衛星のMODIS検出器のデータ

<http://modarch.gsfc.nasa.gov/>

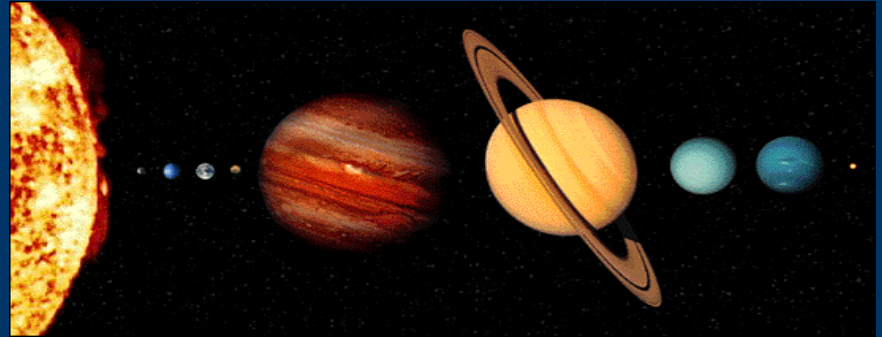
<http://www.nasa.gov/home/index.html>

太陽系外惑星とは何か

■ 水金地火木土(天海冥)のその先？

■ わが太陽系の拡大

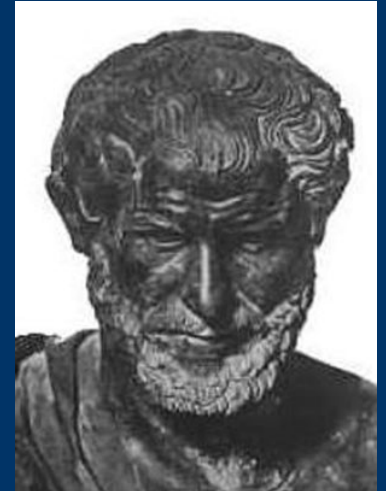
- 1781年：天王星の発見
- 1846年：海王星の発見
- 1930年：冥王星の発見



■ 1995年：初めての太陽系外惑星の発見

■ 哲学から科学へ

- この宇宙とよく似た宇宙も
全く異なる宇宙も無限に存在する
 - エピキュロス（紀元前341年～270年）
- 我々以外の宇宙は存在し得ない
 - アリストテレス（紀元前384年～322年）





太陽系外惑星発見の歴史

- 1995年: 主系列星周りの系外惑星の発見 (51Peg)
- 1999年: 系外惑星のトランジット発見(HD209458)
- 2001年: トランジット惑星大気初の検出(ナトリウム)
- 2003年: トランジット惑星から蒸発する水素大気発見
- 2003年: 公転周期1.2日のトランジット惑星発見(OGLE)
- 2004年1月: トランジット惑星大気中に炭素と酸素を検出
- 2004年4月: 公転周期1.4日、1.7日のトランジット惑星発見
- 2005年6月: 6~8倍地球質量の惑星発見(地球型?)
- 2005年7月: 超巨大コアを持つ灼熱惑星の発見(佐藤文衛ほか)
- 2005年10月: 惑星公転軸の傾きの発見
- 2006年5月25日時点で165個の系外惑星系(計193個の惑星)

太陽系外惑星探査の方法

- 直接撮像：高角度分解能
- 主星の速度変動：高精度分光
- 主星の位置変動：高精度位置決定精度
- 主星の光度変動：高精度測光
- パルサーの信号到着時刻変動：
高時間分解能

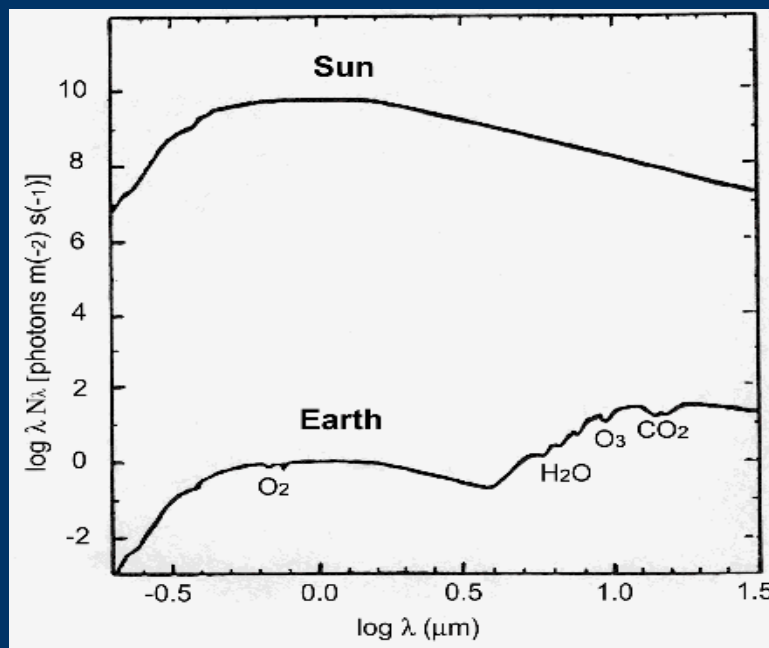
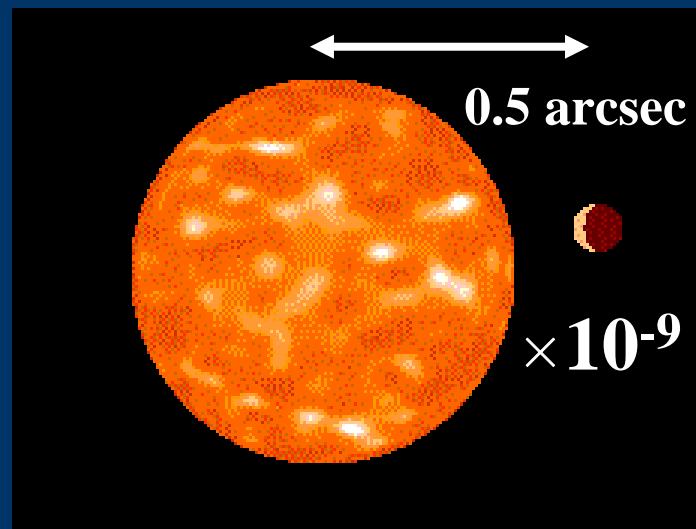
⇒ いずれも最先端の観測技術を要する

惑星は直接見えるか？

10pcから観測した木星

明るさ: 27等級(可視域)

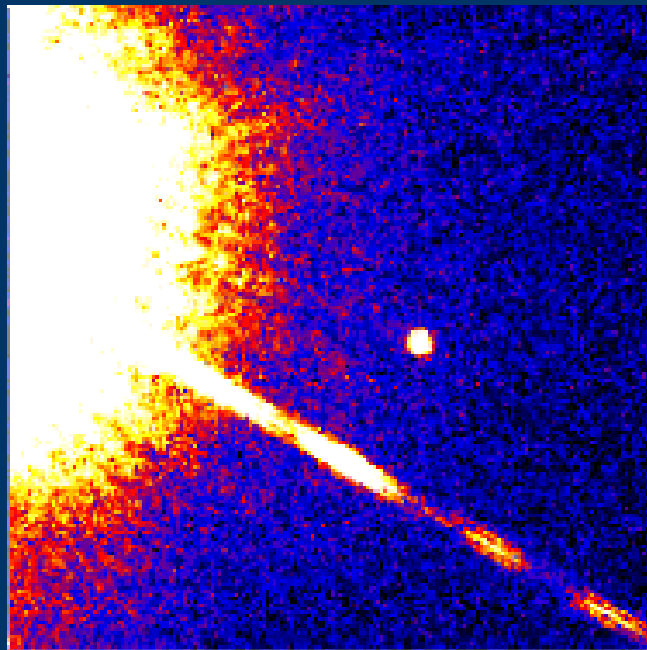
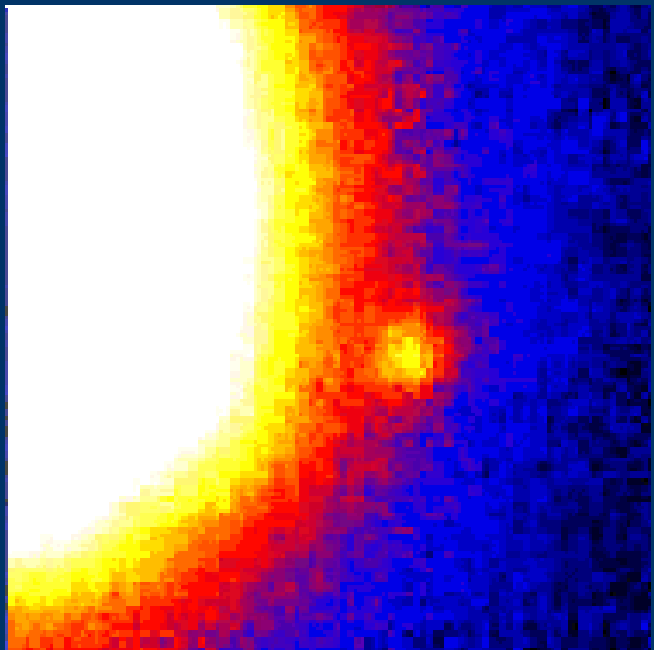
主星との角距離: 0.5秒角



地上観測の典型的な角度分解能の大きさ内で、9桁程度も明るい主星のすぐ隣にある27等級の暗い天体を観測する

⇒ ほとんど不可能！

褐色矮星の直接撮像例



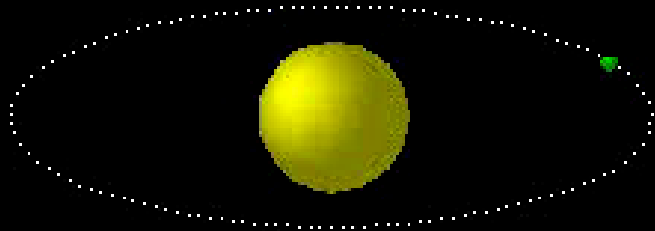
Gliese229 b:
角距離 7arcsec
光度比 5000

左: Palomar
右: HST
(国立天文台:
中島紀氏)

- 木星が10pcの距離にあるとすれば、これよりも14倍主星に近く、20万分の1暗くなる！

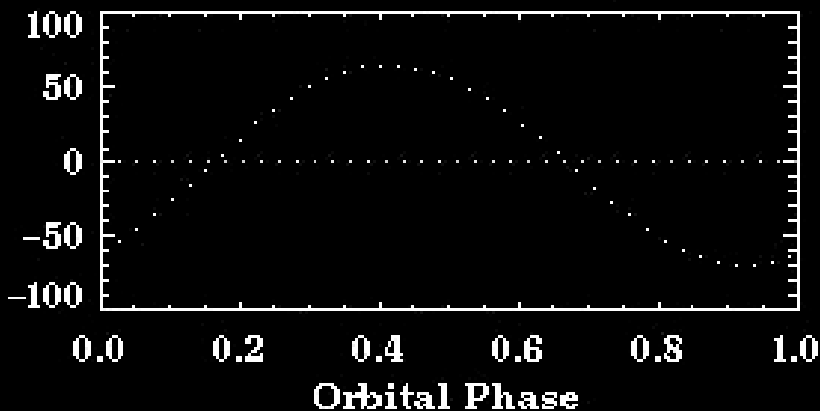
どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



$K = 67.4 \text{ m/s}$ $e = 0.03$
 $\omega = 210.0 \text{ deg.}$ $\sin(i) = 0.3$ (*)

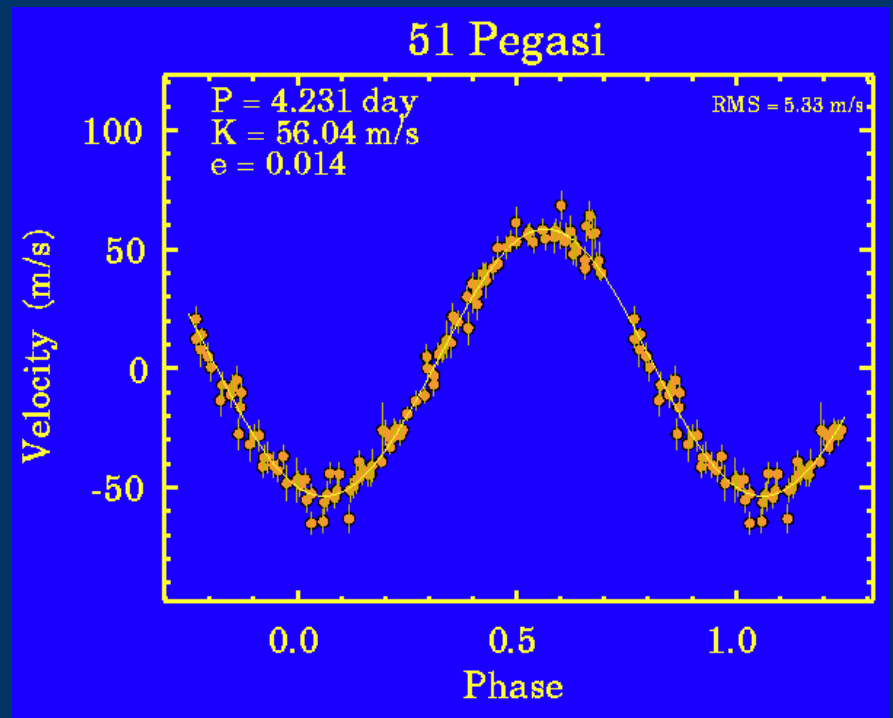
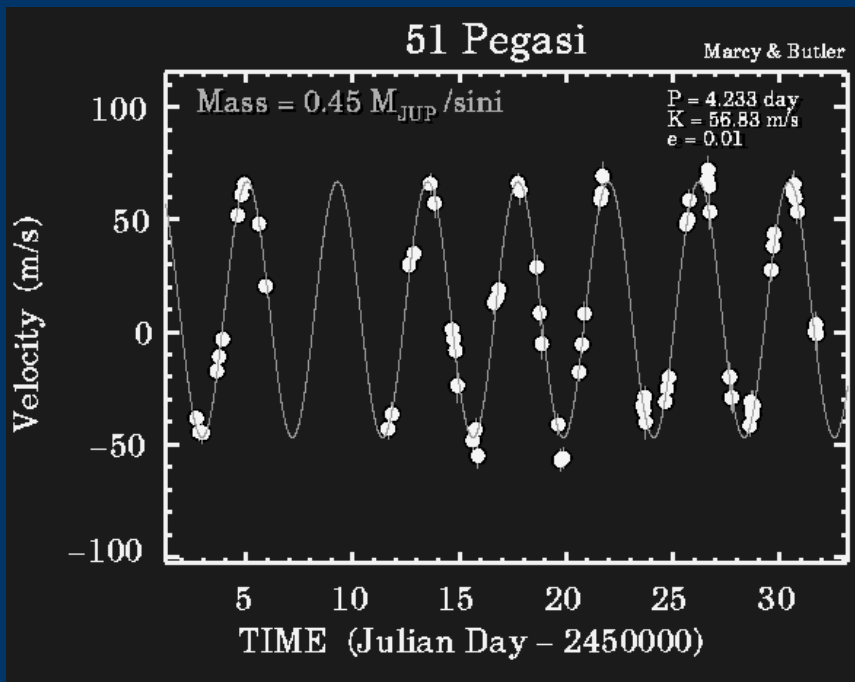
Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



- 中心星の運動を精密に観測すれば惑星があるかどうか分かる
 - 中心星の速度が我々に対して毎秒数十メートルだけ周期的に変動
- さらに運がよければ、中心星の前を惑星が横切ること
で星の明るさがほんの少しだけ暗くなる場合もある
 - 公転周期を4日間とすると、2時間程度の間、1パーセントだけ暗くなる

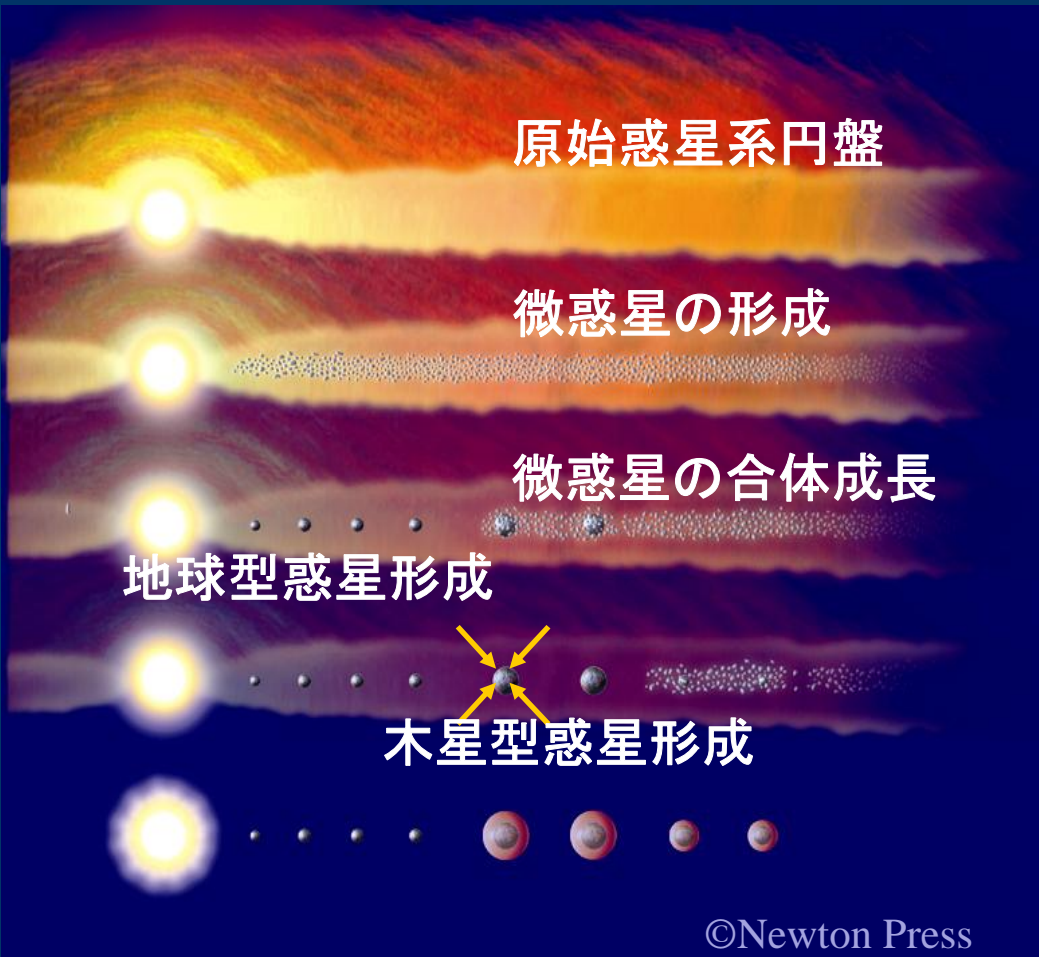
ペガサス座51番星 ～初めての太陽系外 惑星の発見～

- メイヨール & ケロス (1995年)



周期がわずか4.2日！

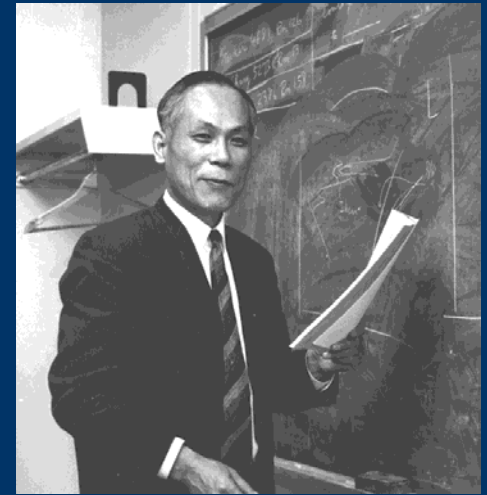
太陽系形成標準理論



- **京都モデル**
 - 林忠四郎@京都大学
天体核研究室
- **原始惑星系円盤**
 - H, Heガス: 99%質量
 - 固体成分: 1%の質量
- **微惑星仮説**
 - 固体成分がまず凝集
 - その後ガス成分が降着

©ニュートンプレス、井田茂@東工大

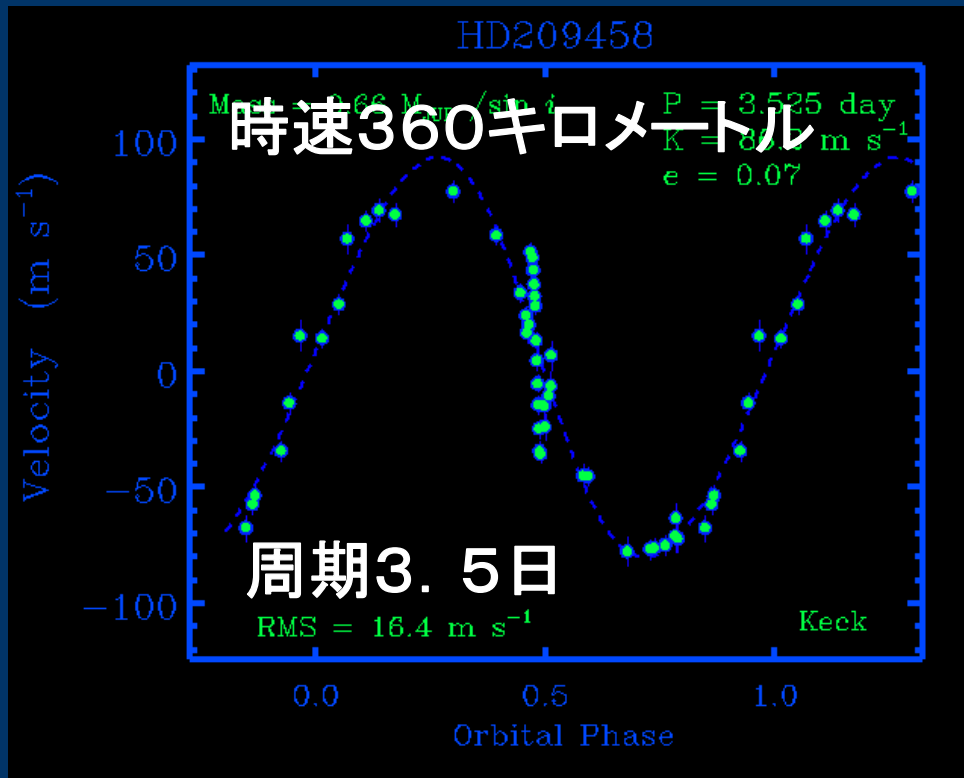
林忠四郎先生



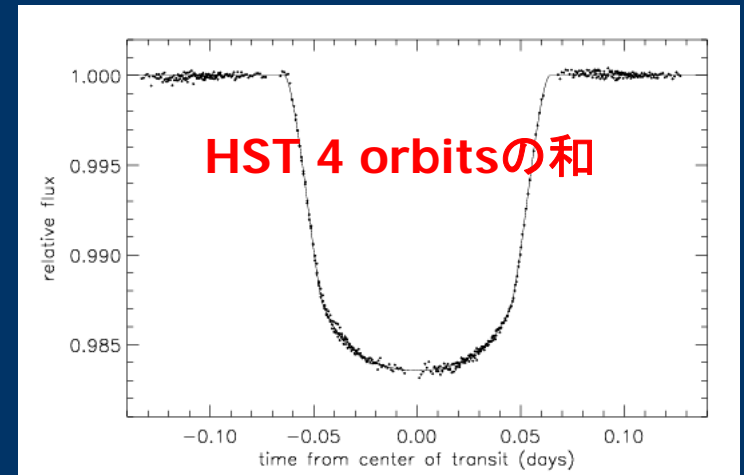
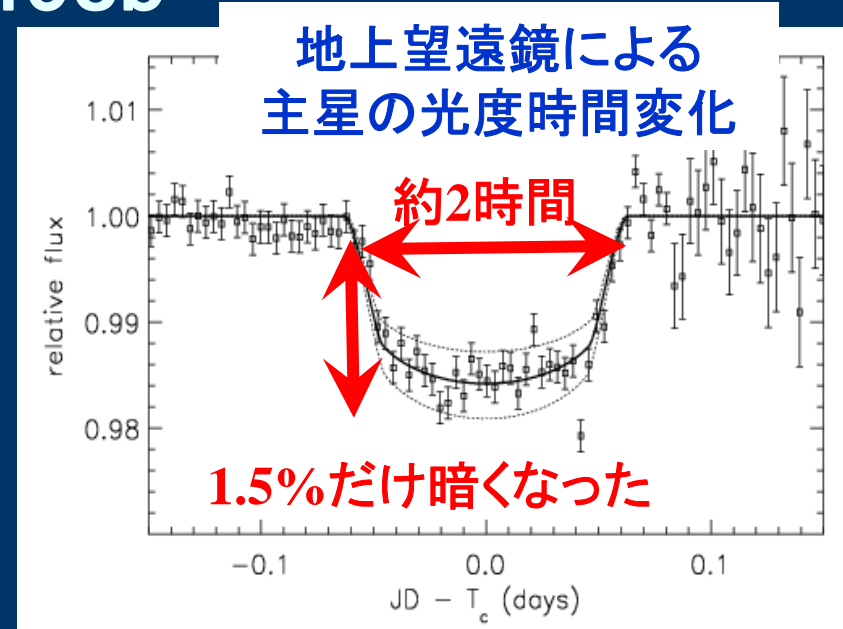
- 日本の理論宇宙物理学の父
- 1940年 東大物理学科卒業
- 京都大学大学院で素粒子論を学ぶ
- その後、ミクロな物理学をマクロな宇宙に応用し、宇宙論、星の進化論、太陽系形成論においていずれも偉大な業績を成し遂げられた
 - ガモフのビッグバンモデルを修正しヘリウムまでは宇宙誕生後3分間、それより重い元素は10億年以上後の第一世代の星の中心で形成されることを示した
 - 誕生直後の星は活動が非常に激しく光度が主系列に達した後の数十倍以上明るくなる時期(林フェイズ)があることを発見
 - 太陽系形成標準理論(林モデル、京都モデル)を提唱
- 私 ⇒ 佐藤勝彦 ⇒ 林忠四郎 ⇒ 湯川秀樹

初めての太陽系外トランジット(食)惑星 HD209458b

- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出



地上望遠鏡による
主星の速度時間変化



Brown et al. (2001)

トランジット惑星とは

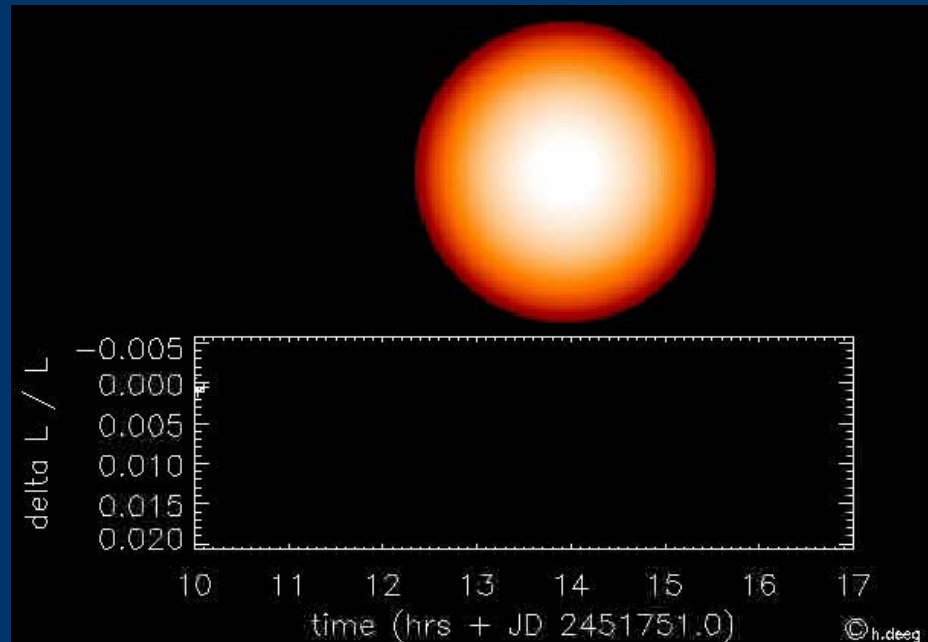
- **惑星系をより深く理解する手がかり**
 - 惑星の公転面がたまたま観測者の視線面と同じで、惑星が恒星の前を横切るもの
 - 2006年5月時点で、10個が知られている
 - 中心星の光度変化の観測⇒惑星のサイズ
 - 精密分光観測データ解析⇒惑星大気組成
 - **中心星の自転速度と中心星自転軸と惑星公転軸のなす角度がわかる**



最初に発見されたトランジット惑星系:

HD209458

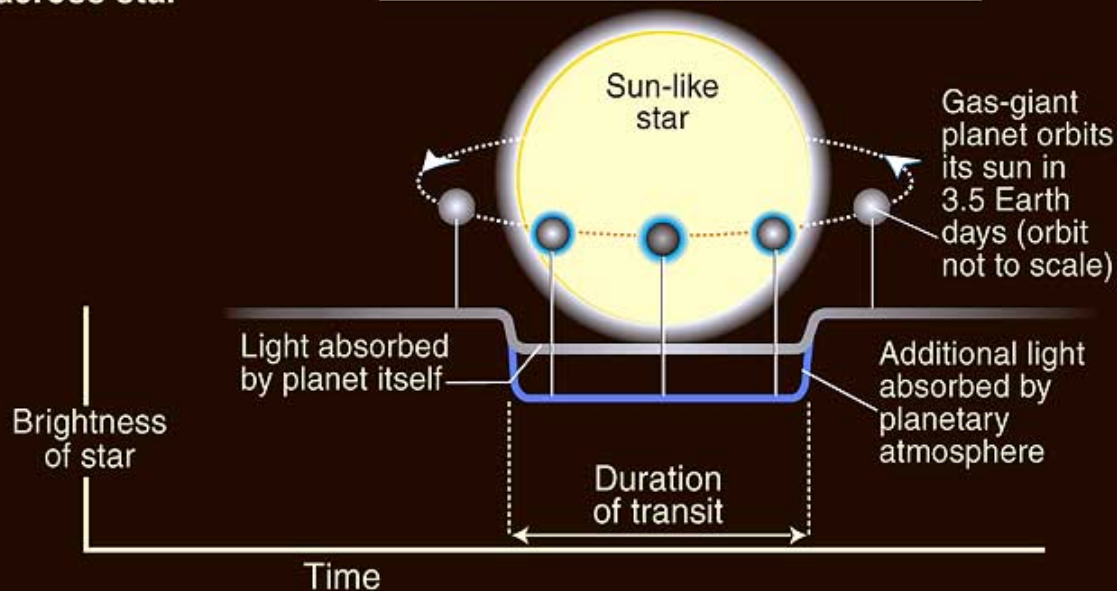
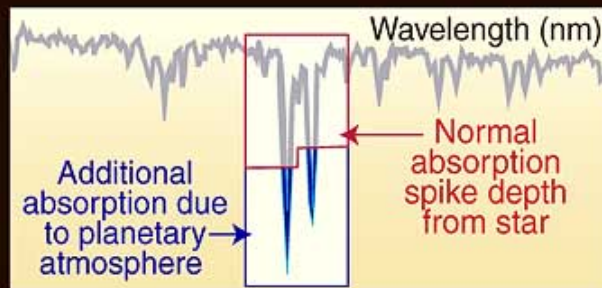
- 距離: 約150光年
- 公転周期: 3.5日
- 質量: 0.63木星質量
- 半径: 1.4木星半径
- 密度: 0.4g/cc



HD209458b 惑星大気の 初検出


[http://hubblesite.org/
newscenter/archive/
2001/38/](http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/)

HST detects additional sodium absorption due to light passing through planetary atmosphere as planet transits across star



- 2000年 系外惑星の食を初検出
 - 惑星の大きさがわかる
 - 質量の観測データとあわせて密度を0.4g/ccと推定
 - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムを発見

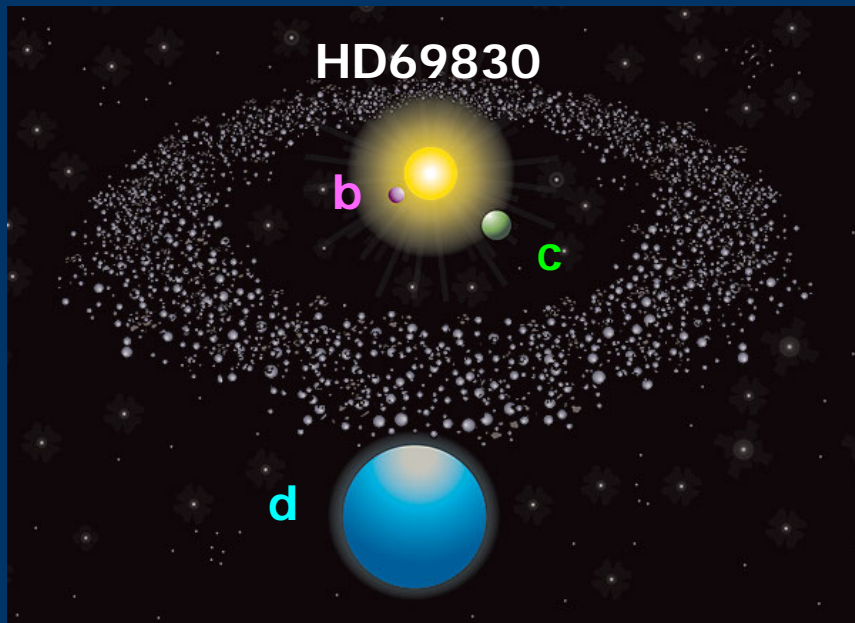
今後の系外惑星研究ロードマップ

- 
- 巨大ガス惑星発見の時代
 - 惑星大気の見
 - 惑星大気の精密分光観測による組成決定

 - 惑星反射光の検出

 - **地球型惑星の見**
 - **居住可能惑星(水が液体として存在)の見**
 - **バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定**
 - **地球外生命の見**

居住可能領域にある惑星の発見?



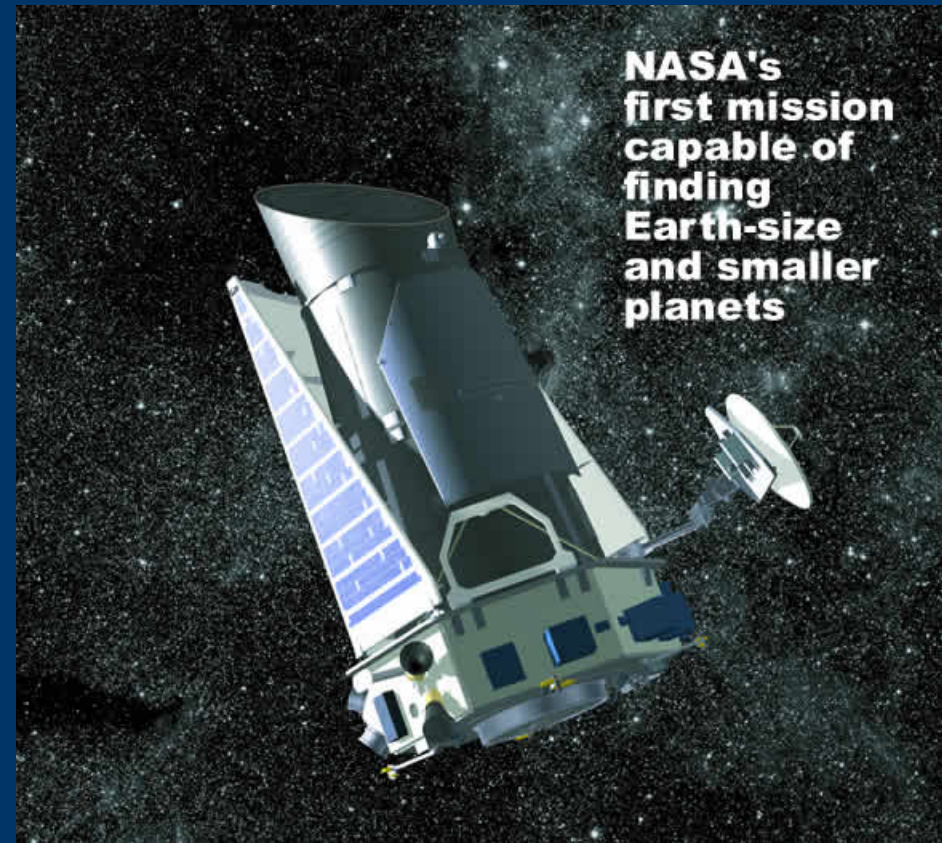
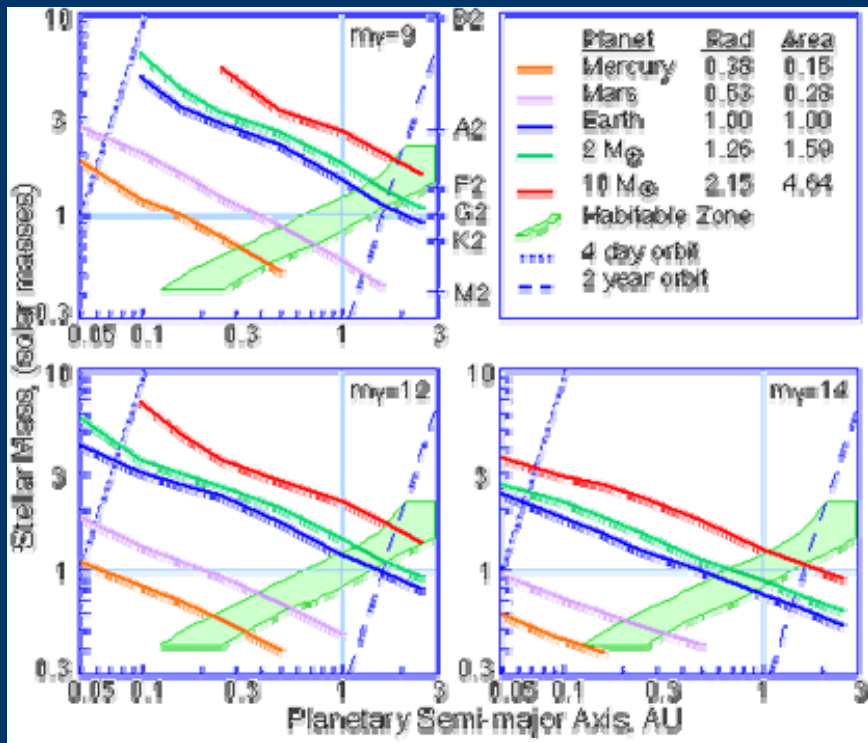
- HD69830: 約40光年先のK型星(0.86太陽質量)の周りに3つの惑星 (Lovis et al. Nature 2006年5月18日 441巻305ページ)
 - b. 10地球質量、0.08天文単位、8.7日公転周期
 - c. 12地球質量、0.19天文単位、32日公転周期
 - d. 18地球質量、0.63天文単位、197日公転周期 (居住可能惑星? ただし地球型ではなく表面はガスでおおわれているであろう)

地球型系外惑星の見つかる可能性について

- 現在見つかっている188個の系外惑星はいずれも地球型(岩石惑星)ではない
 - 今まで見つかっているなかで最も軽い惑星は地球の約14倍(天王星は地球の14倍、海王星は17倍)
 - 食を起こしている惑星数例から考えておそらくすべてガス惑星(木星型)
- 2008年ごろ打ち上げが予定されているアメリカの系外惑星探査衛星ケプラーでは、4年間で50個以上の地球型系外惑星を発見する計画

ケプラー衛星 (米国2008年6月予定)

トランジット惑星の測光サーベイ:
4年間で50個以上の地球型惑星を発見することをめざす



<http://kepler.nasa.gov/>

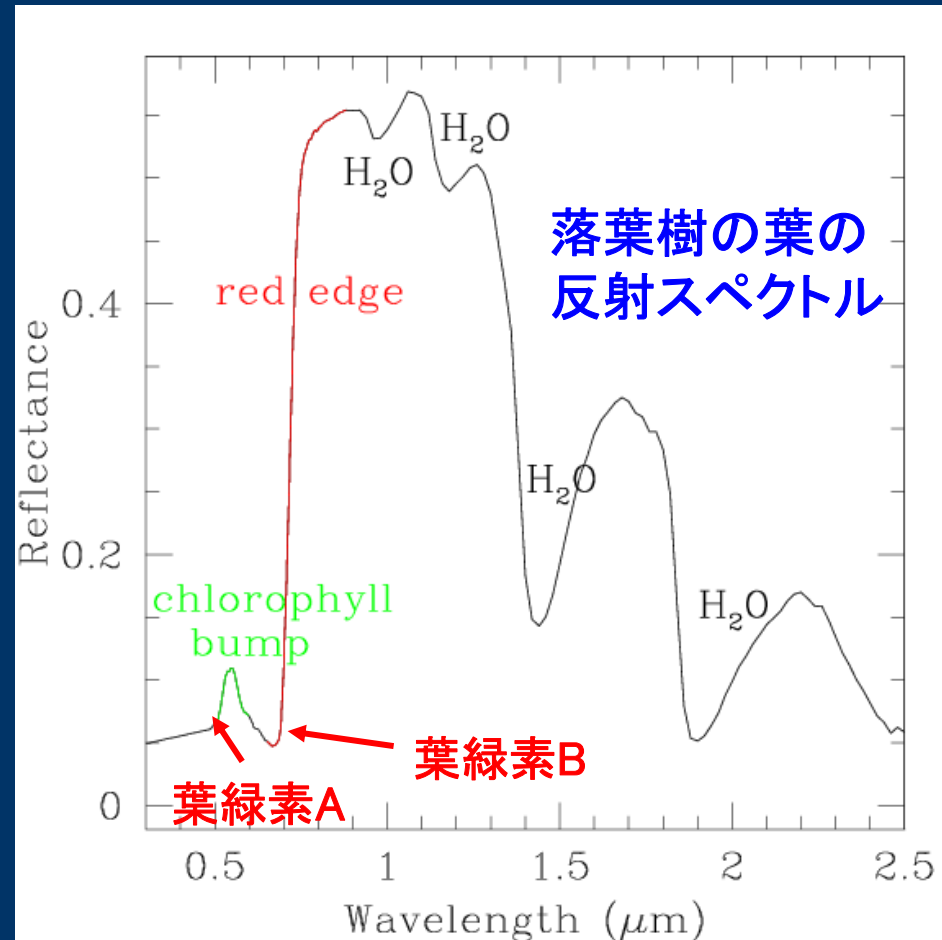
Biomarkerと地球照：我が地球を用いて「第2の地球」がどのように見えるかを予測

- (居住可能)地球型惑星を発見するだけでは、そこに生命があるかどうかはわからない
- **Biomarker** の探求
 - 植物の反射スペクトルに見られる**red edge**
- 遠くに我々の地球をおいたとき、分光観測からその特徴を同定できるか？
 - **地球照(将来に向けた模擬観測)**
- 衛星による分光・測光観測の可能性を探る

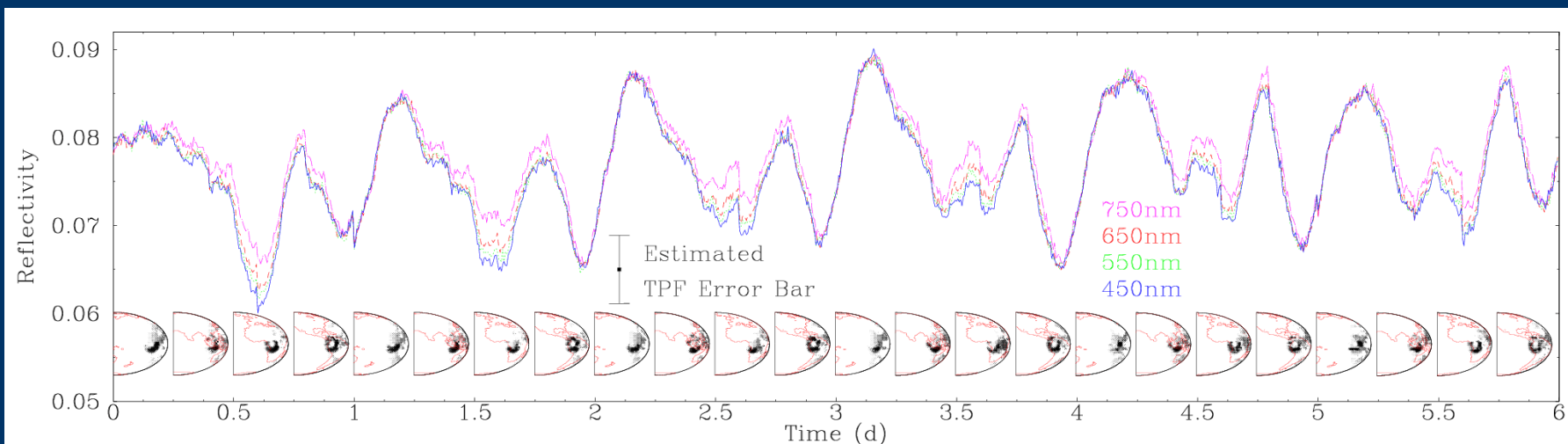
植物の反射率とバイオマーカー

■ 植物のレッドエッジ

- (地上の)植物は赤外線に近い波長でまばゆく輝いている(反射率が急激に増大)
- これを太陽系外惑星に生命(植物)があるかどうかの判定に利用できるか？



地球が30光年先にあるとして何がどこまでわかるか？



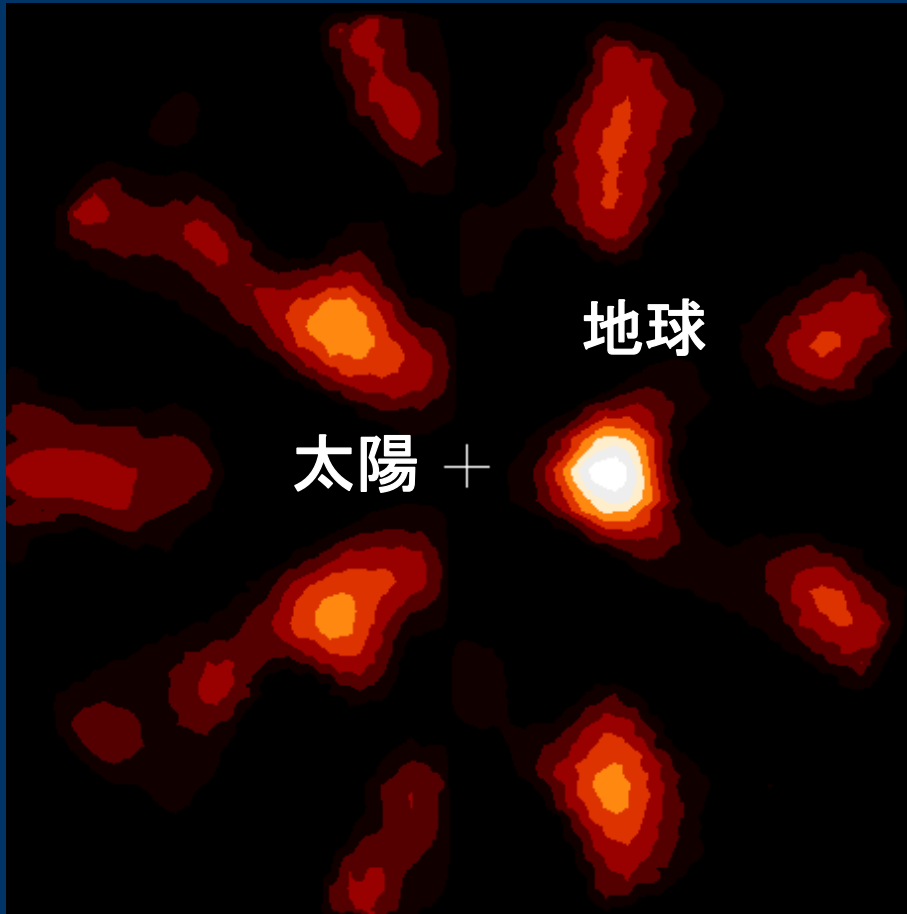
Ford, Seager & Turner: Nature 412 (2001) 885

- **10%レベルの日変化は検出可能**
 - 大陸、海洋、森林などの反射特性の違いを用いる
- **雲の存在が鍵**
 - 太陽系外地球型惑星の天気予報の精度が本質的！

ダーウィン衛星

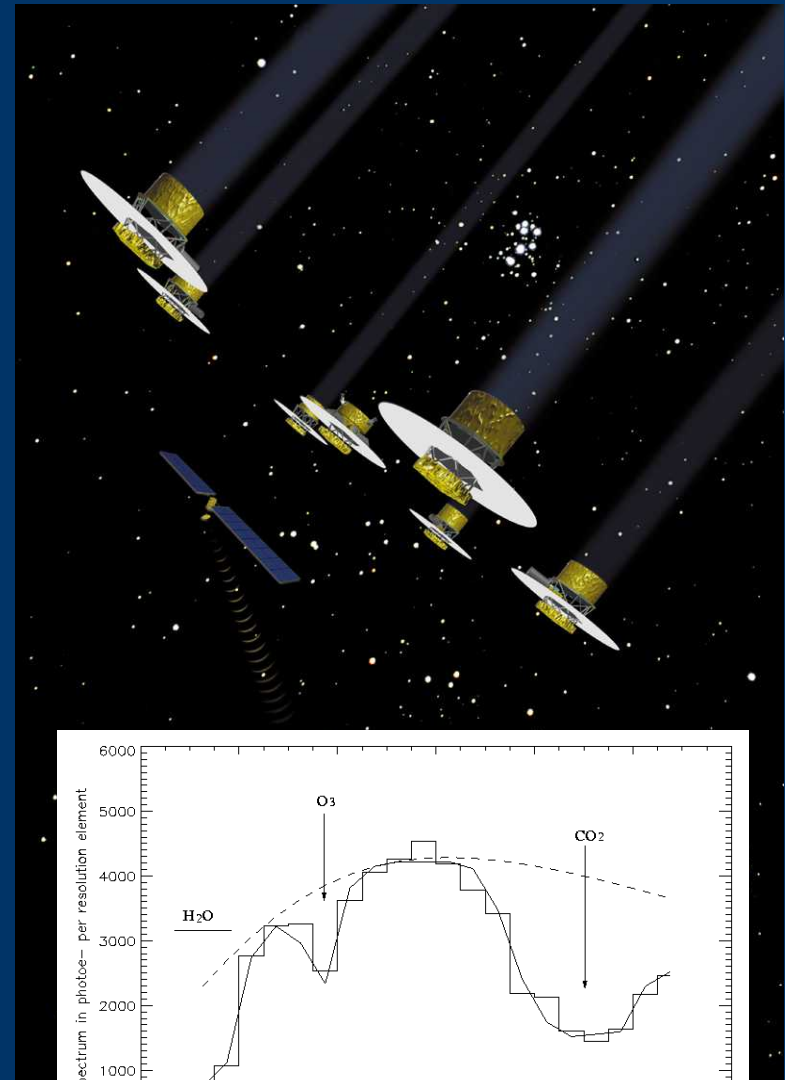
(欧州：2020年頃？打ち上げ)

赤外線での惑星の直接撮像を目指す



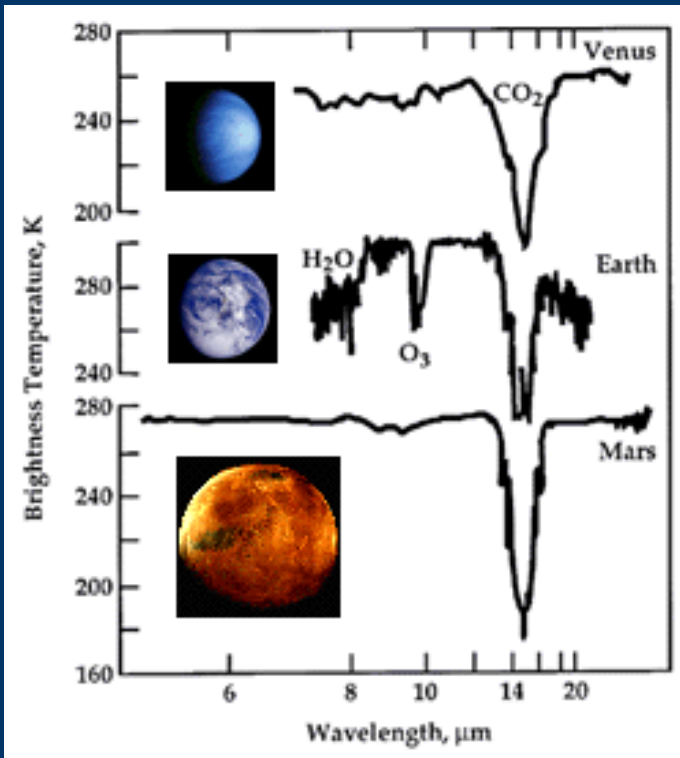
30光年先においた太陽と地球の観測予想図

<http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/>



宇宙赤外線干渉計群
測光分光観測₂₅

太陽系外惑星研究： 今後の10年 “天文学から宇宙生物学へ”



- 木星型ガス惑星： 発見の時代から
“characterization” の時代へ
 - 起源、形成、進化の基礎モデル構築
- 地球型惑星の発見へ
- 居住可能惑星の発見へ
 - 水が液体として存在する地球型惑星
- 超精密分光観測の成否が鍵！
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを
中心星から分離する

直接見てくることができない距離にある惑星に
生物が存在するかどうかを天文観測だけで検証
できるか？ Biomarker を特定できるか？