

太陽系外惑星探查最前線

東京大学大学院理学系研究科

須藤 靖

2005年6月11日 19:00-20:30@杉並区立科学館

天の世界と 地の世界

■ 古代ギリシャの4元説

- 地上: 空気、土、火、水
- 天空: エーテル(第5元素)
- アリストテレスの2世界観

■ 中国の五行説

- (木、火、土、金、水) × (陽、陰)
- 甲乙 丙丁 戊己 庚辛 壬癸

■ 昔の中国では惑星の名前は物質の 起源にちなんでいる

- 中国では、地上と天空の世界の組成が
同じと信じられていた? より近代的!

■ 宇宙の起源 ⇔ 物質の起源 という考え 方は、現在の素粒子的宇宙論における もっとも基本的な出発点

- 長岡半太郎: 原子の土星モデル



日月火水木金土



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
 - + 偶然？
- 恒星のまわりの惑星を探せ！

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

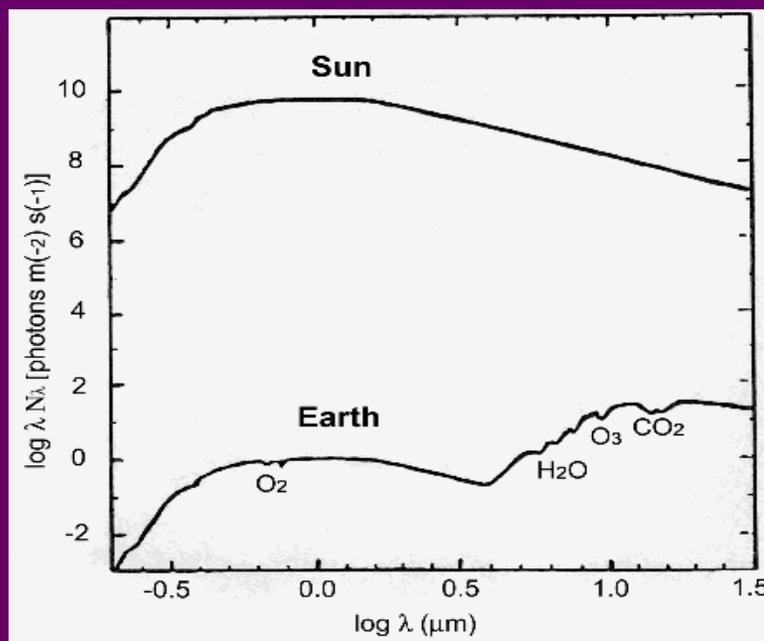
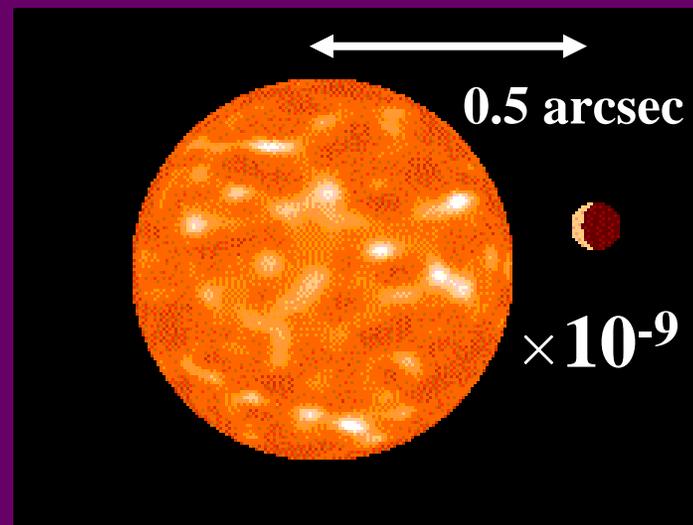
- 水金地火木土(天海冥)のその先？
- わが太陽系の拡大
 - 1781年:天王星の発見
 - 1846年:海王星の発見
 - 1930年:冥王星の発見
- 1995年:初めての太陽系外惑星の発見
- 哲学から科学へ
 - この宇宙とよく似た宇宙も全く異なる宇宙も無限に存在する
 - エピキュラス(紀元前341年~270年)
 - 我々以外の宇宙は存在し得ない
 - アリストテレス(紀元前384年~322年)

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)

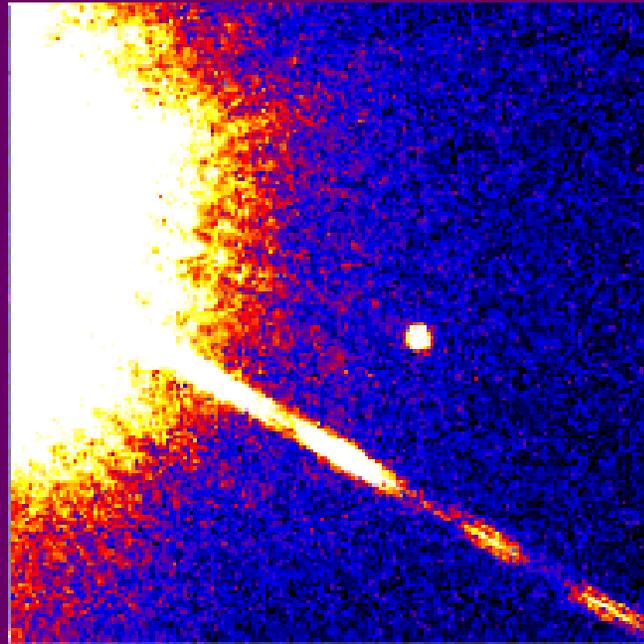
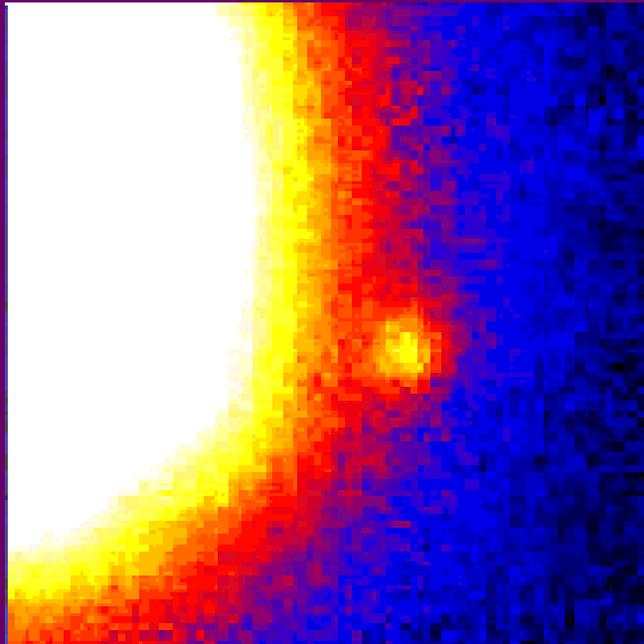
主星との角距離: 0.5秒角



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



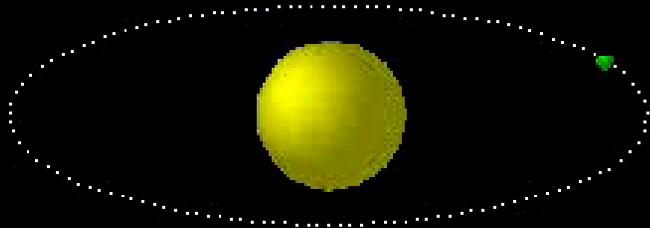
Gliese229 b:
角距離 7arcsec
光度比 5000

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！

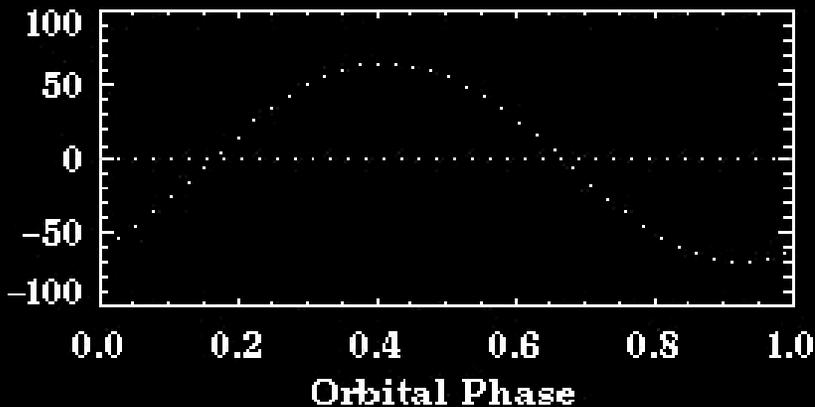
どうやって見つけたのか？

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]

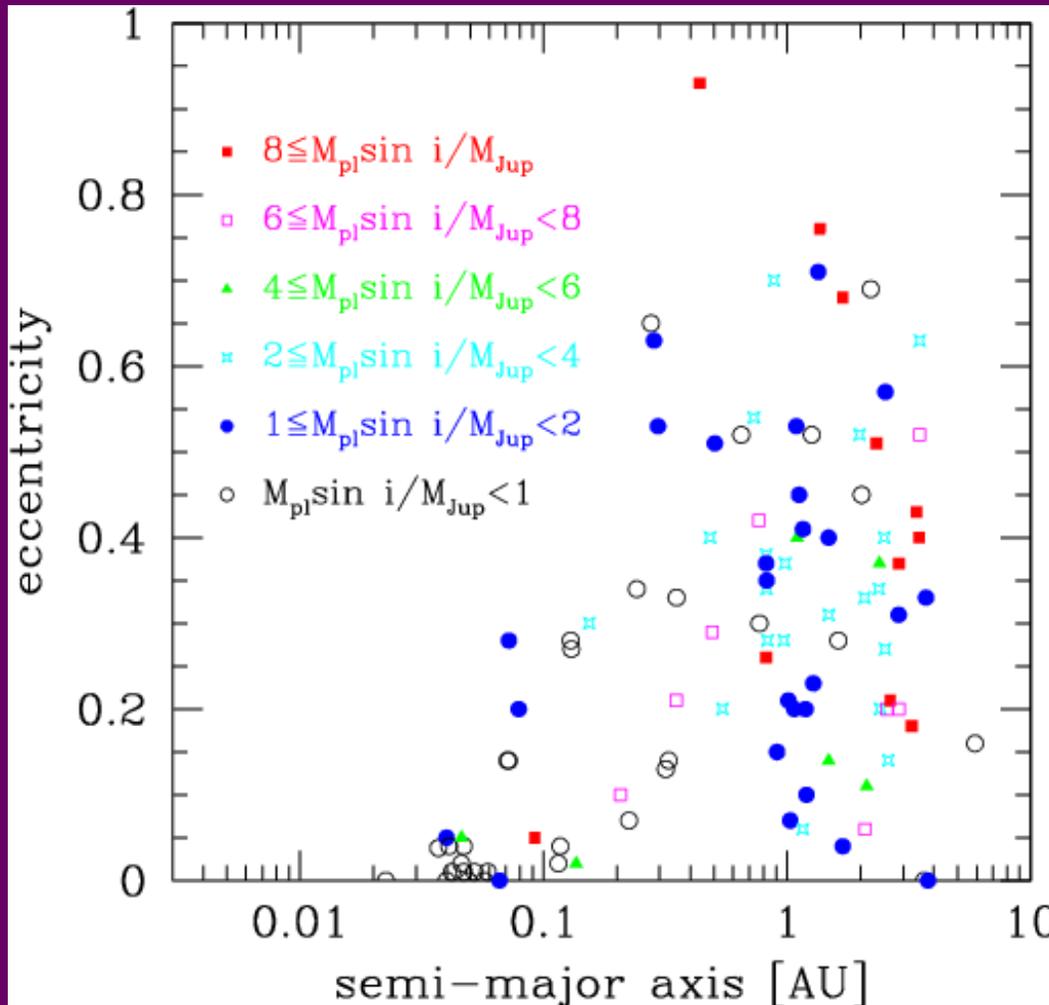


- 中心星の運動を精密に観測すれば惑星があるかどうか分かる
 - 中心星の速度が我々に対して毎秒数十メートルだけ周期的に変動
- さらに運がよければ、中心星の前を惑星が横切ること
で星の明るさがほんの少しだけ暗くなる場合もある
 - 公転周期を4日間とすると、2時間程度の間、1パーセントだけ暗くなる

どんな系外惑星がみつかっているのか

- 2005年6月10日までに154個の系外惑星
- 1995年：初めての太陽系外惑星
 - 約50光年先のペガサス座51番星の周り
 - 一年(公転周期)がわずか4.2日
 - 質量は木星の1/2(地球の150倍)
- 1999年：食をおこす系外惑星の初発見
 - 約150光年先のHD209458という星の周り
 - 3.5日で公転、質量は木星の0.7倍(地球の200倍)
 - 惑星の大きさがわかる(半径が木星の1.3倍、地球の15倍)
 - 地球のような岩石惑星ではなく、木星のようなガス惑星
 - ホットジュピター
- 太陽系惑星とは全く異なる姿：すべてが予想外

太陽系外惑星の軌道分布関数

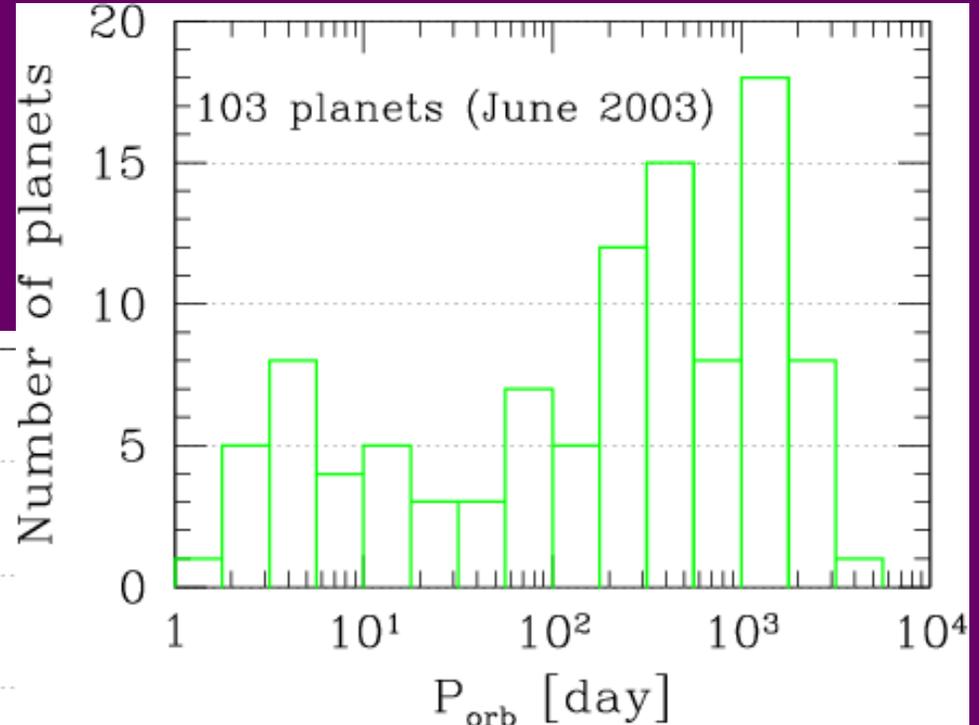
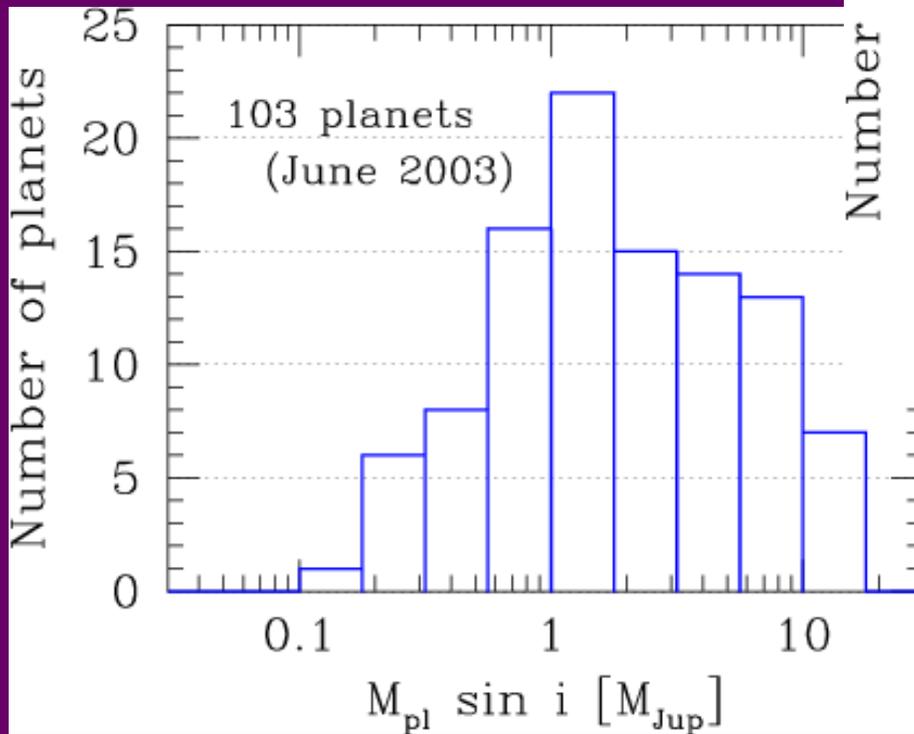


- 円軌道から大きくずれた軌道が多い (ただし、0.1天文単位以下の半径では円軌道に近い)
- 1天文単位以下の半径をもつ木星質量の惑星が大量に存在 (食の観測例から考えるとこれらはガス惑星であろう Hot Jupiter)

我々の太陽系とは全く異なる: 惑星系の多様性

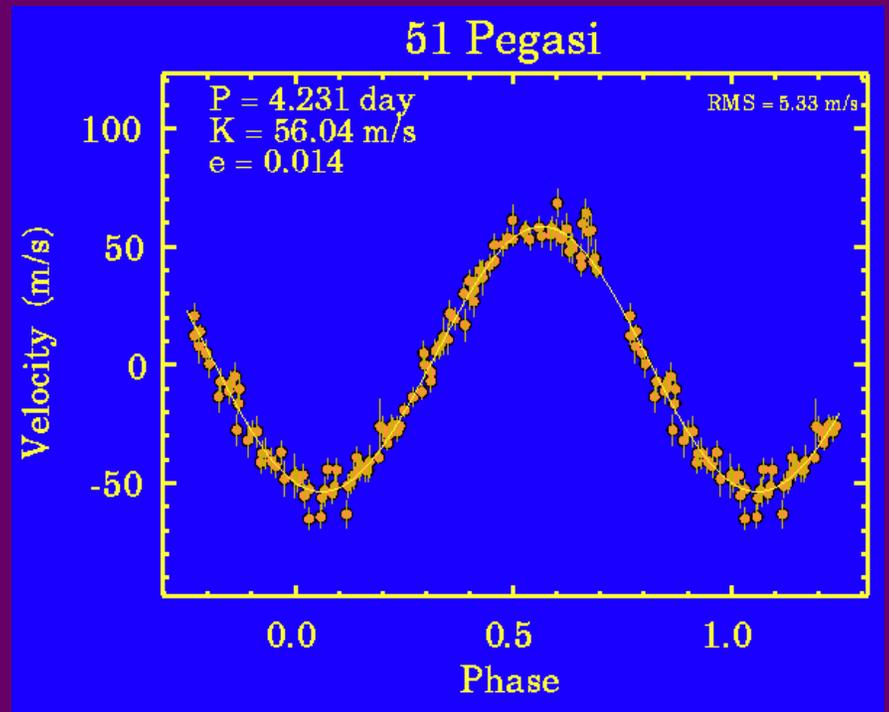
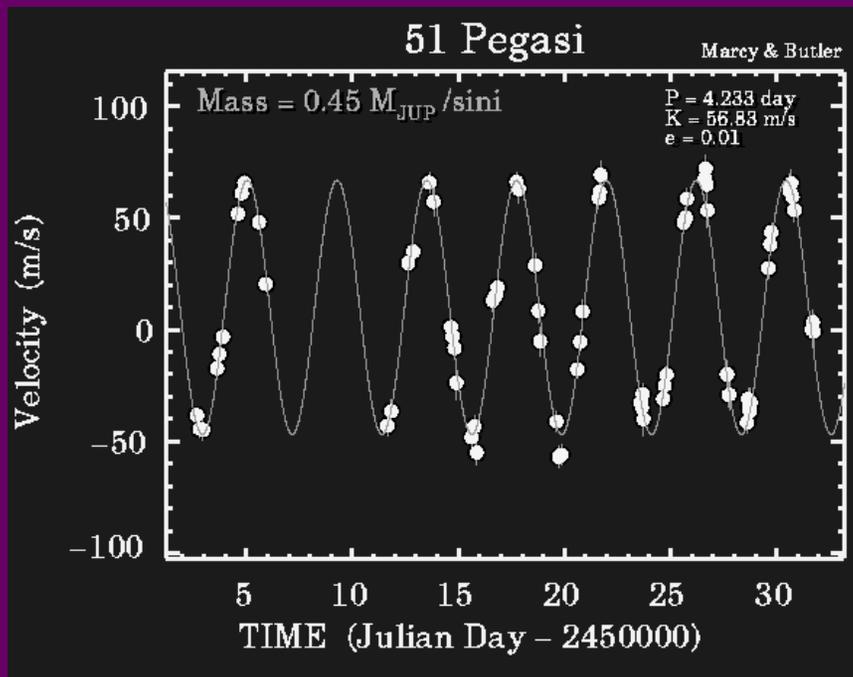
太陽系外惑星の質量・周期分布関数

これらはまだ観測の選
択効果を受けており、真
の分布とは異なる



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)

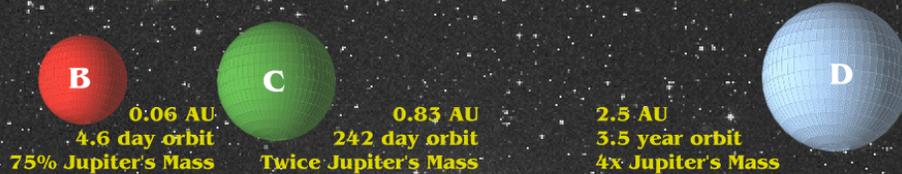


周期がわずか4.2日！

ウプシロンアンドロメダ星 ～3つの惑星をもつ星～

<http://cfa-www.harvard.edu/cfa/hotimage/latest.html>

The Upsilon Andromedae System

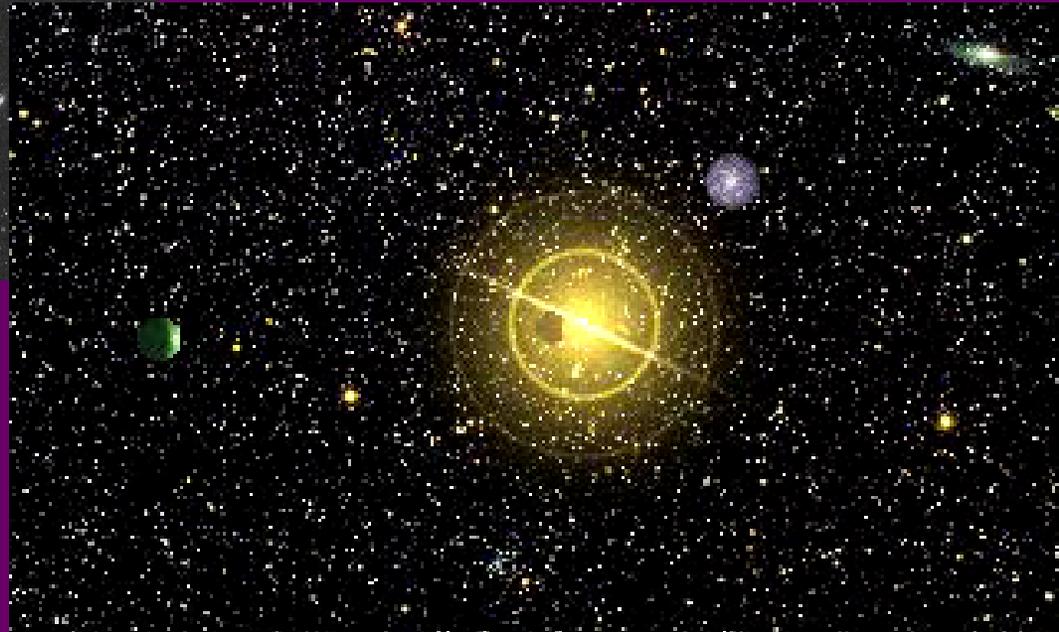


<http://cfa-www.harvard.edu/afoe/simulation.html>

Our Inner Solar System

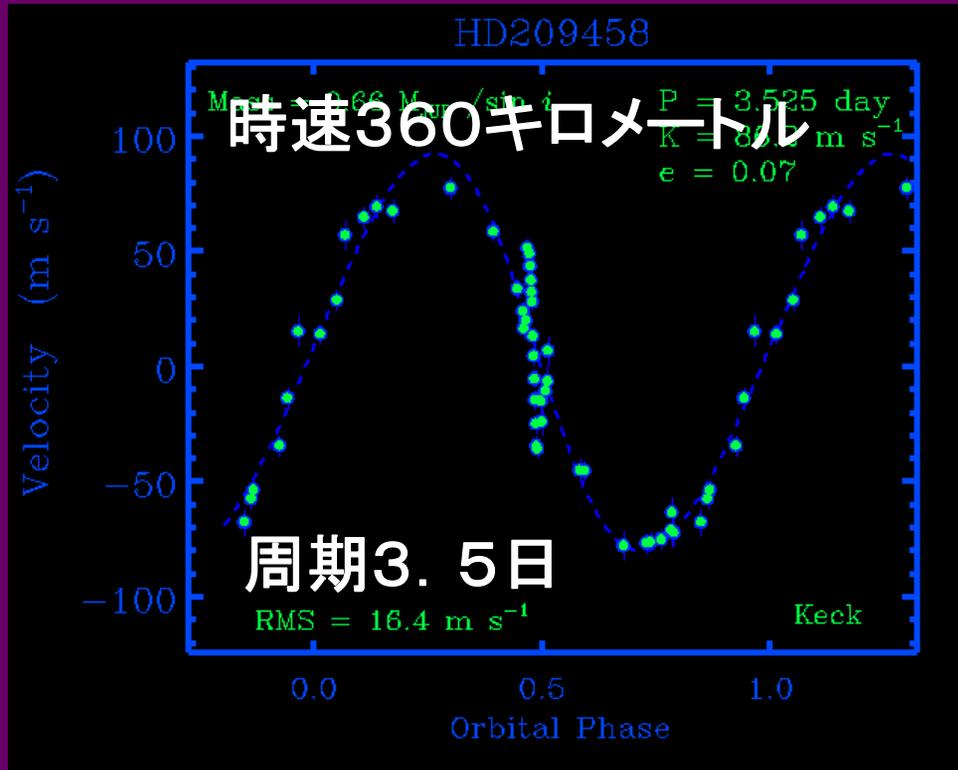


© Harvard-Smithsonian CfA (A. Conlos), 1999

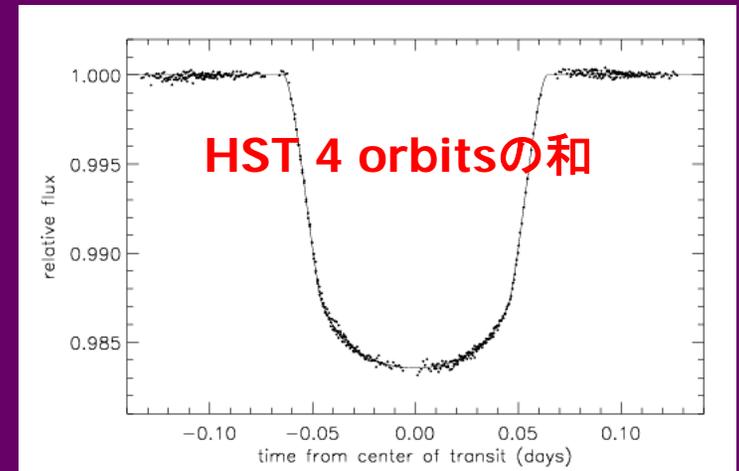
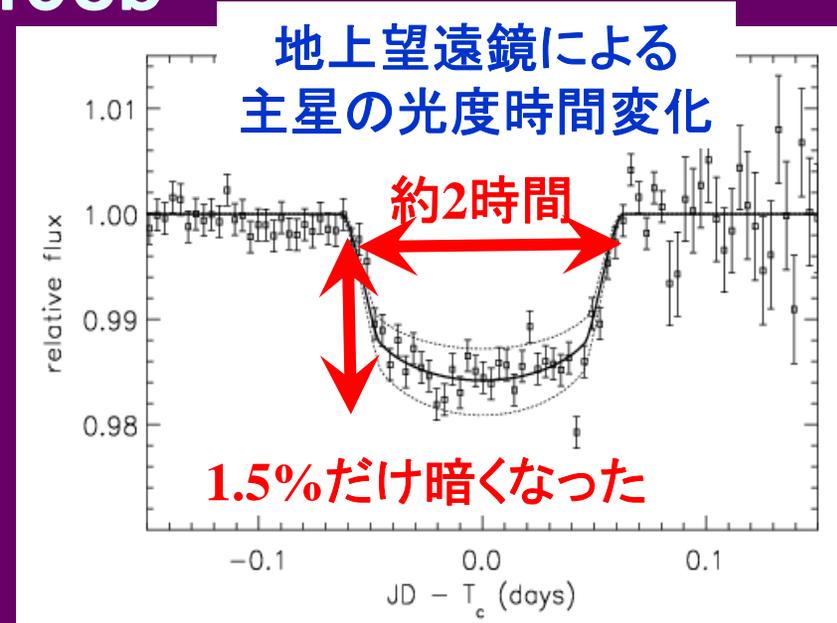


初めての太陽系外トランジット(食)惑星 HD209458b

- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出

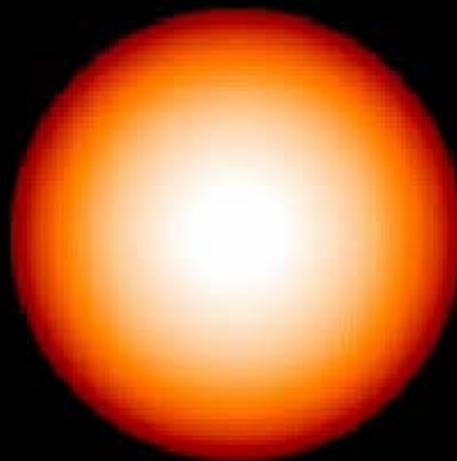


地上望遠鏡による
主星の速度時間変化

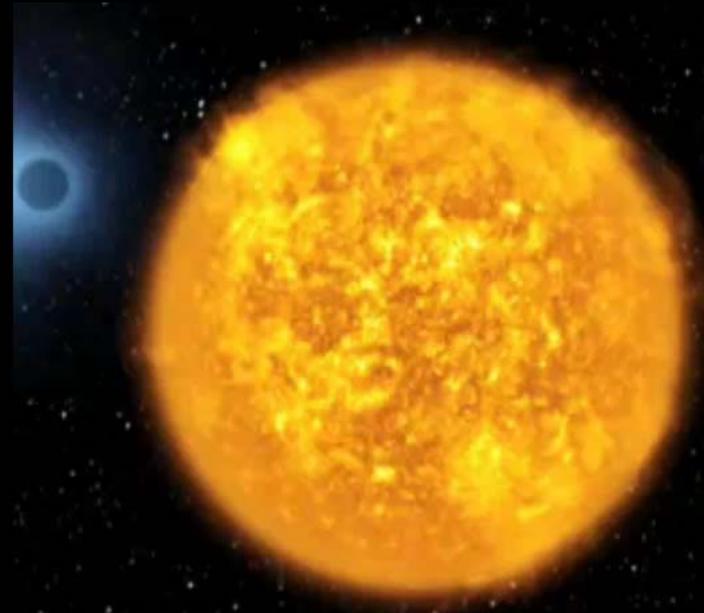


Brown et al. (2001)

可視光でみるHD209458の 惑星による主星の食

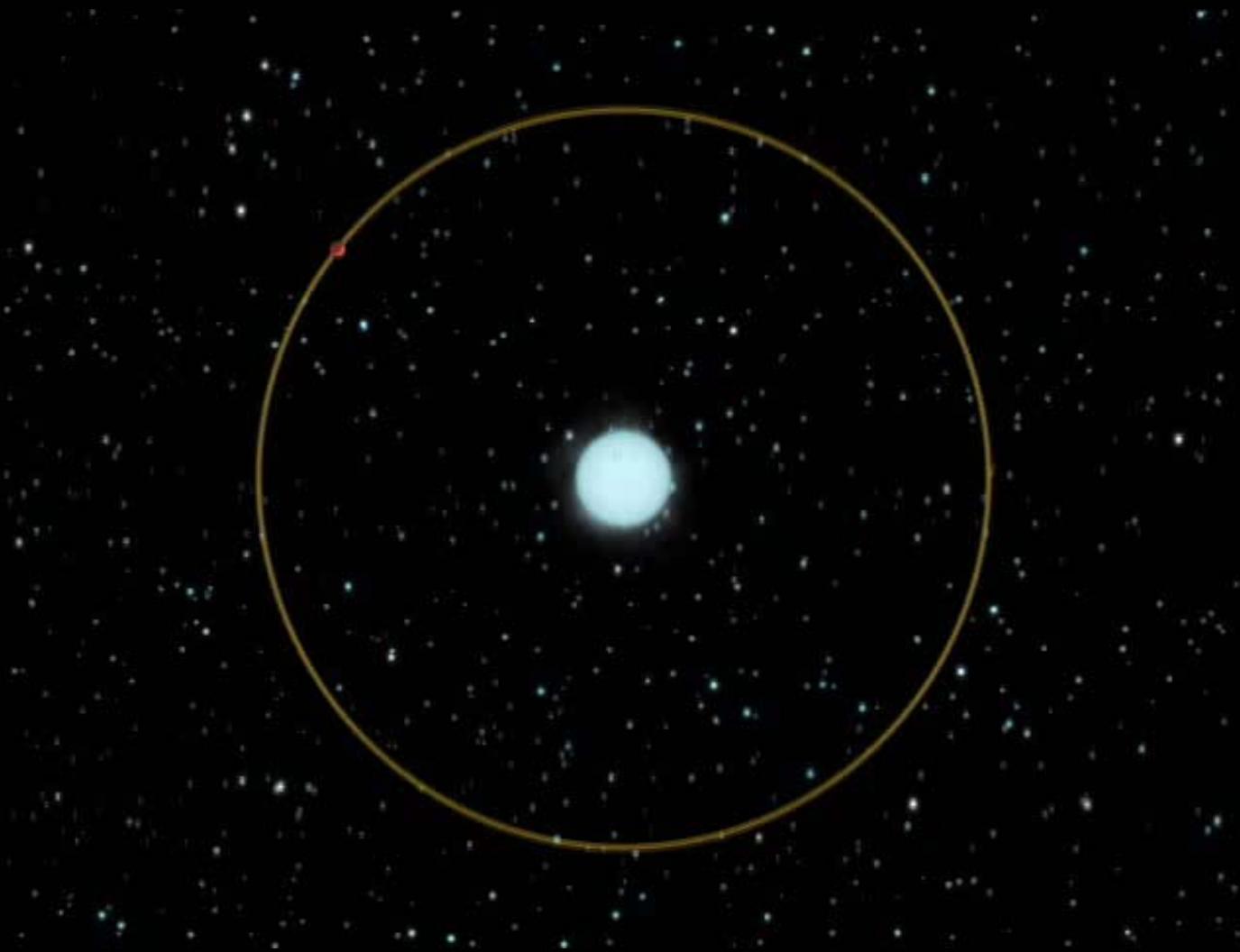


HD209458b : 蒸発しつつある惑星？



<http://hubblesite.org/newscenter/archive/2003/08/>

赤外線(スピッツァー衛星)で見る 主星による惑星の食



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154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

今後の系外惑星研究方向

- 
- 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

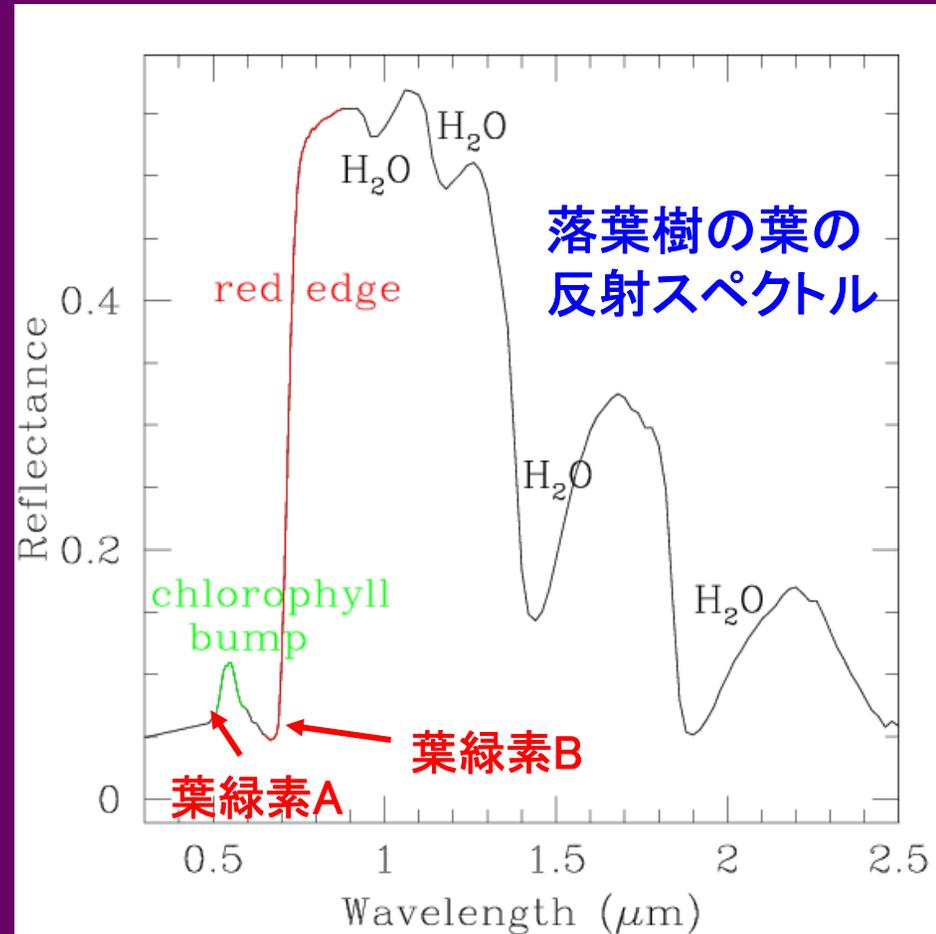
 - 惑星反射光の検出

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

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ないか？



Seager, Ford & Turner
astro-ph/0210277

Vesto Melvin Slipher (1875-1969)



レッドエッジをバイオマーカーとして使う先駆的な試み

- “spiral nebulae”（今で言う銀河）の赤方偏移を発見
- ハッブルによる宇宙膨張の発見に本質的寄与

“Observations of Mars in 1924 made
at the Lowell Observatory: II
spectrum observations of Mars”

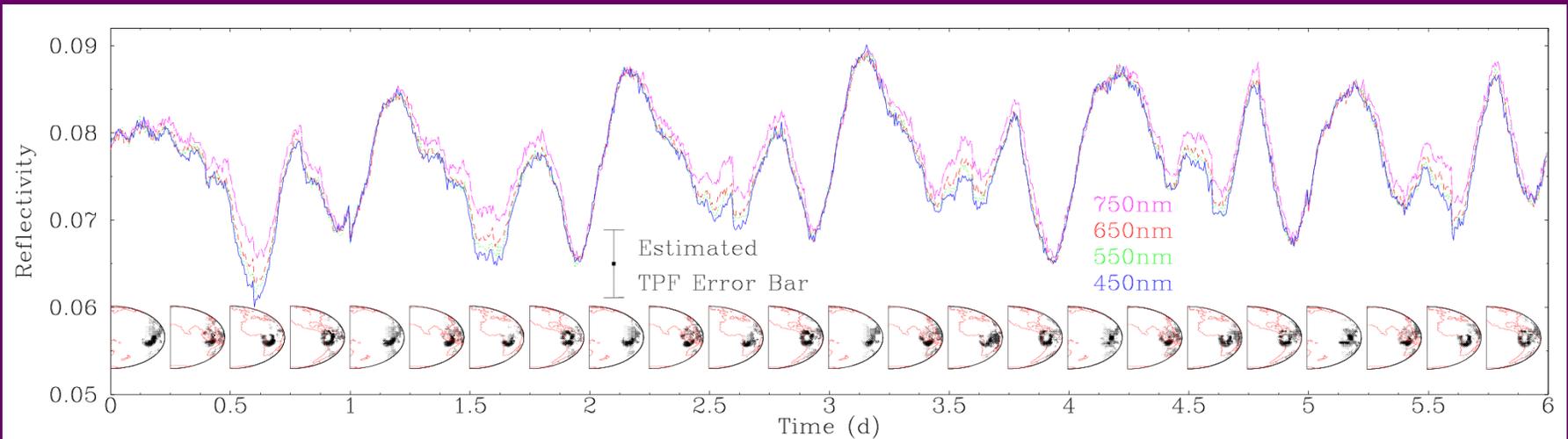
PASP 36(1924)261



reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

1924年にすでに宇宙生物学は存在

地球が30光年先にあるとして何がどこまでわかるか？



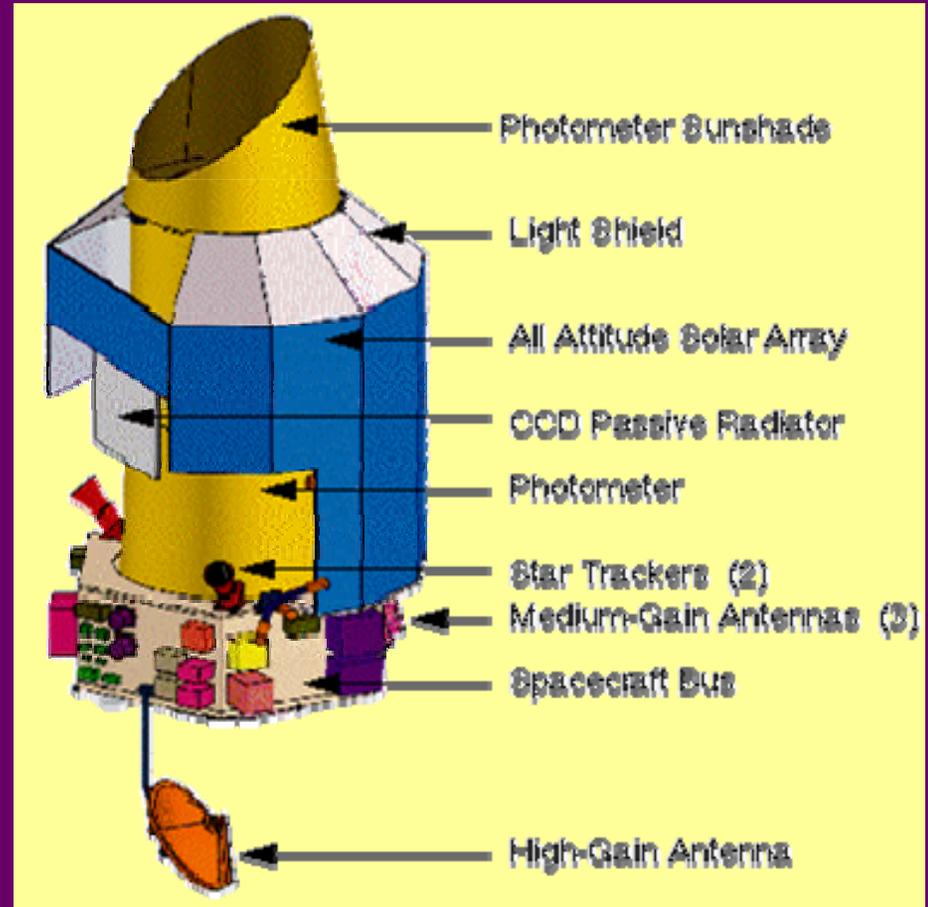
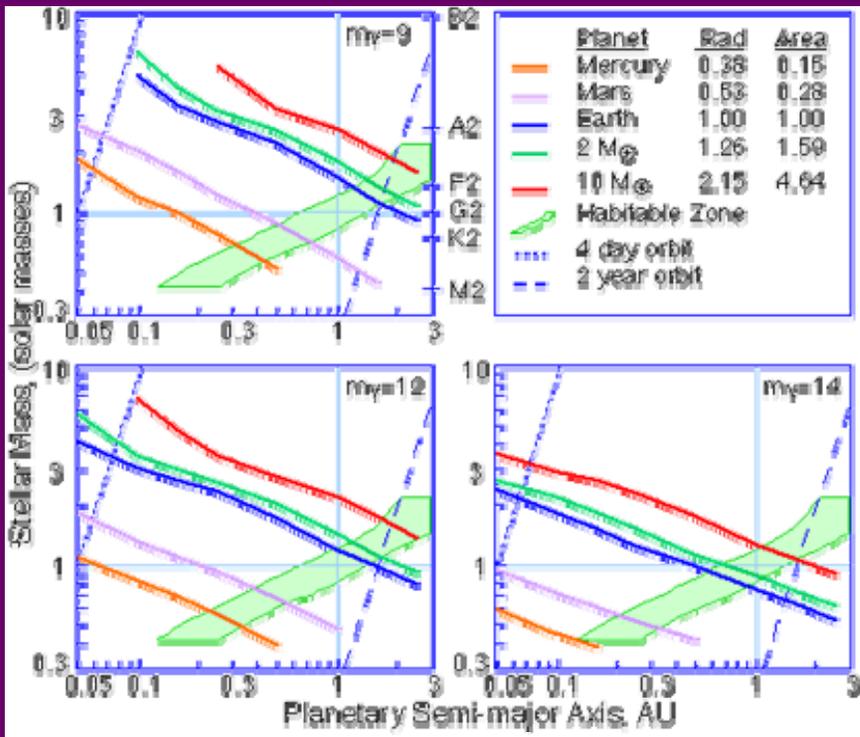
Ford, Seager & Turner: Nature 412 (2001) 885

- **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！

ケプラー衛星 (米国2008年打ち上げ予定)

食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

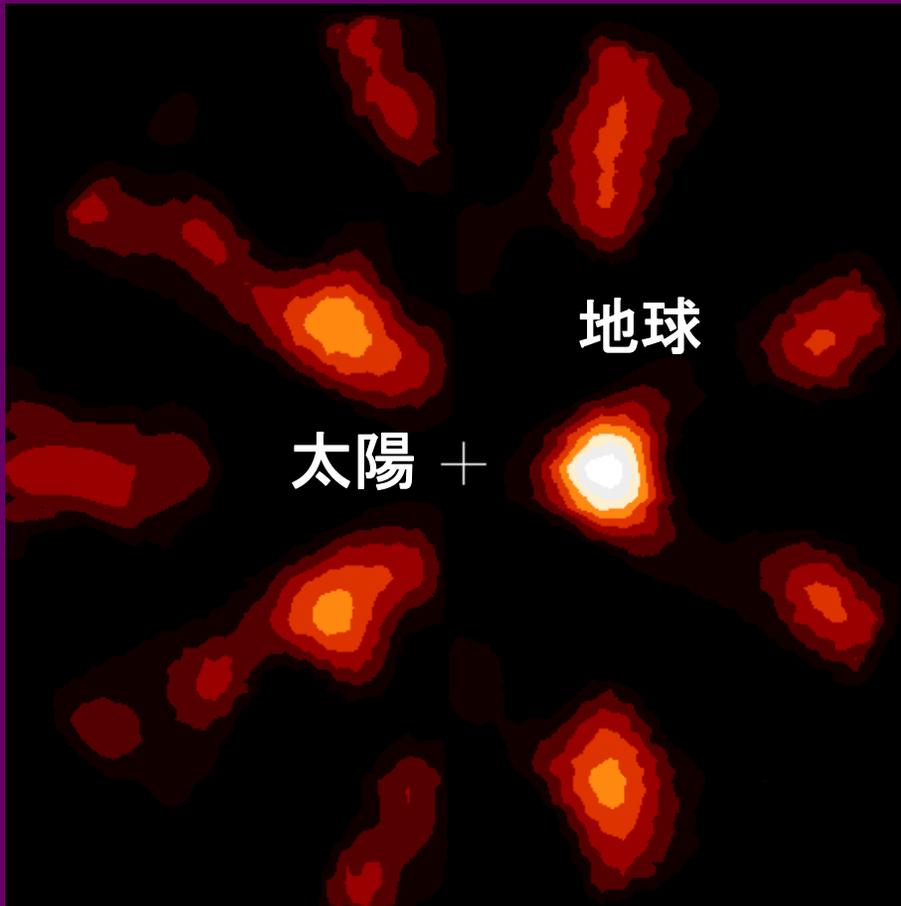


<http://www.kepler.arc.nasa.gov/>

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

地球外知的生命はいるか？：ドレイクの式

$$N = (N_s / L_s) \times f_p \times n_e \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

銀河系内に
ある交信可
能な知的文
明の数

銀河系内の（生命に適した）恒星の数

その恒星の寿命

その恒星が惑星を伴っている確率

その惑星の中で、生物が存在可能な
環境にある地球型惑星の期待値

その惑星に生物が発生する確率

その生物が知的生命に進化する確率

その知的生命が他の文明と交信を行う確率

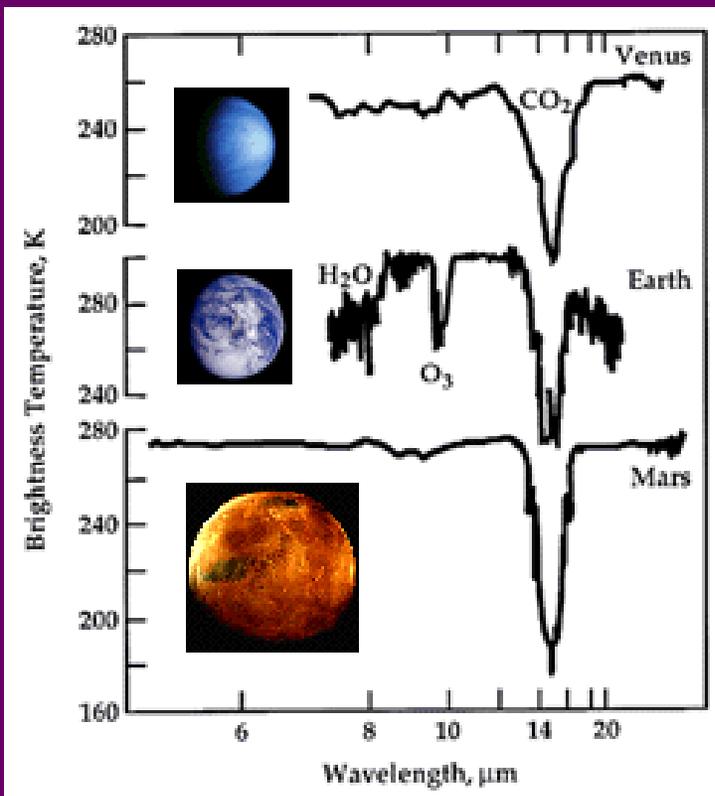
その文明の継続時間



Frank Drake博士

Nの値は良くわかっていない。0.003個（つまり、我々の地球以外には存在し得ない！）と推定する研究者から200万個と推定する研究者までいる。ドレイク博士自身は1万個程度であると考えた。

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： 発見の時代から統計的理解の時代へ
 - 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？ バイオマーカーを特定できるか？