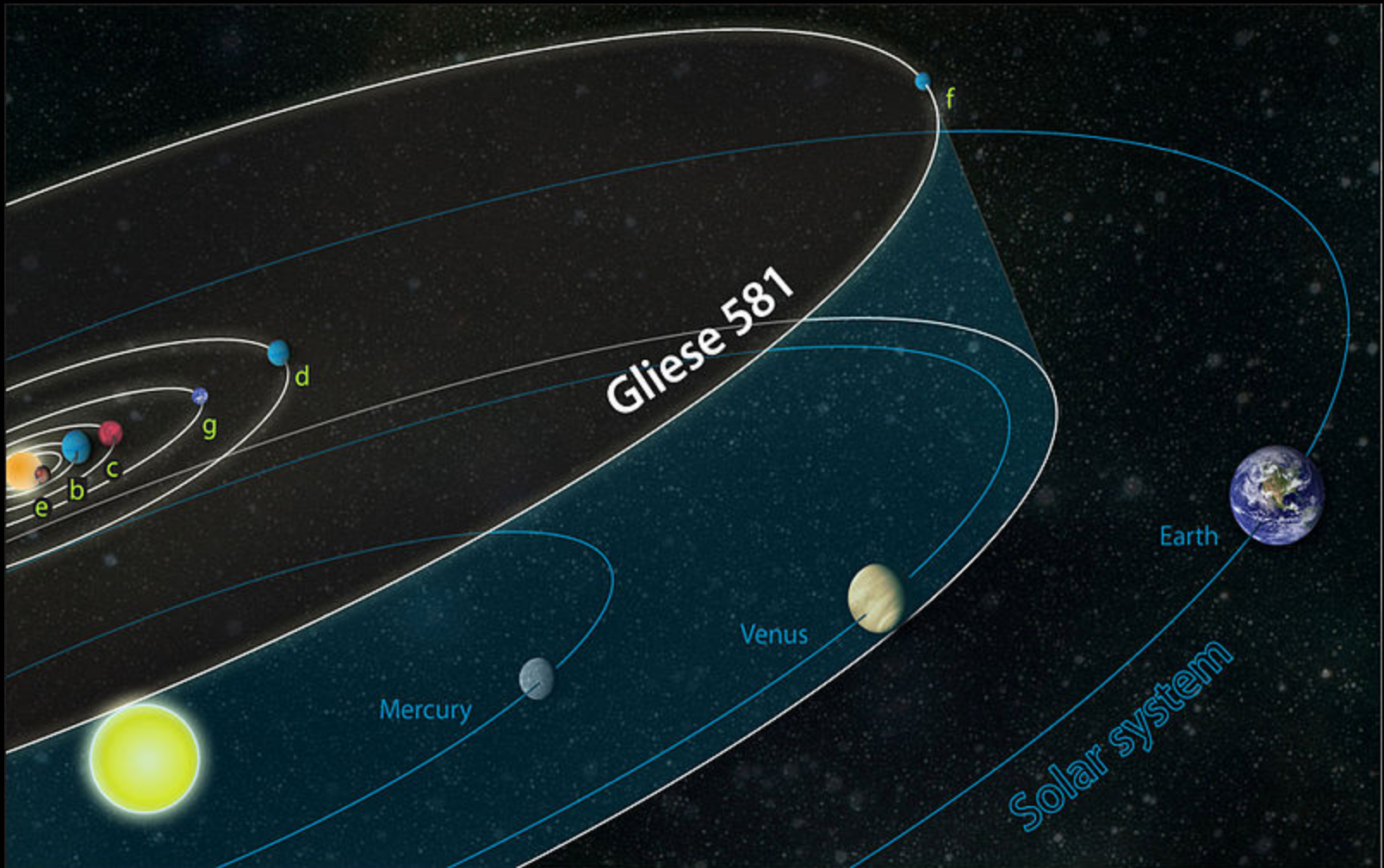


④ 太陽系外惑星の世界



(Credit: Zina Deretsky, [アメリカ国立科学財団](#))

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？

■ 宇宙の果てと太陽系外惑星

■ 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

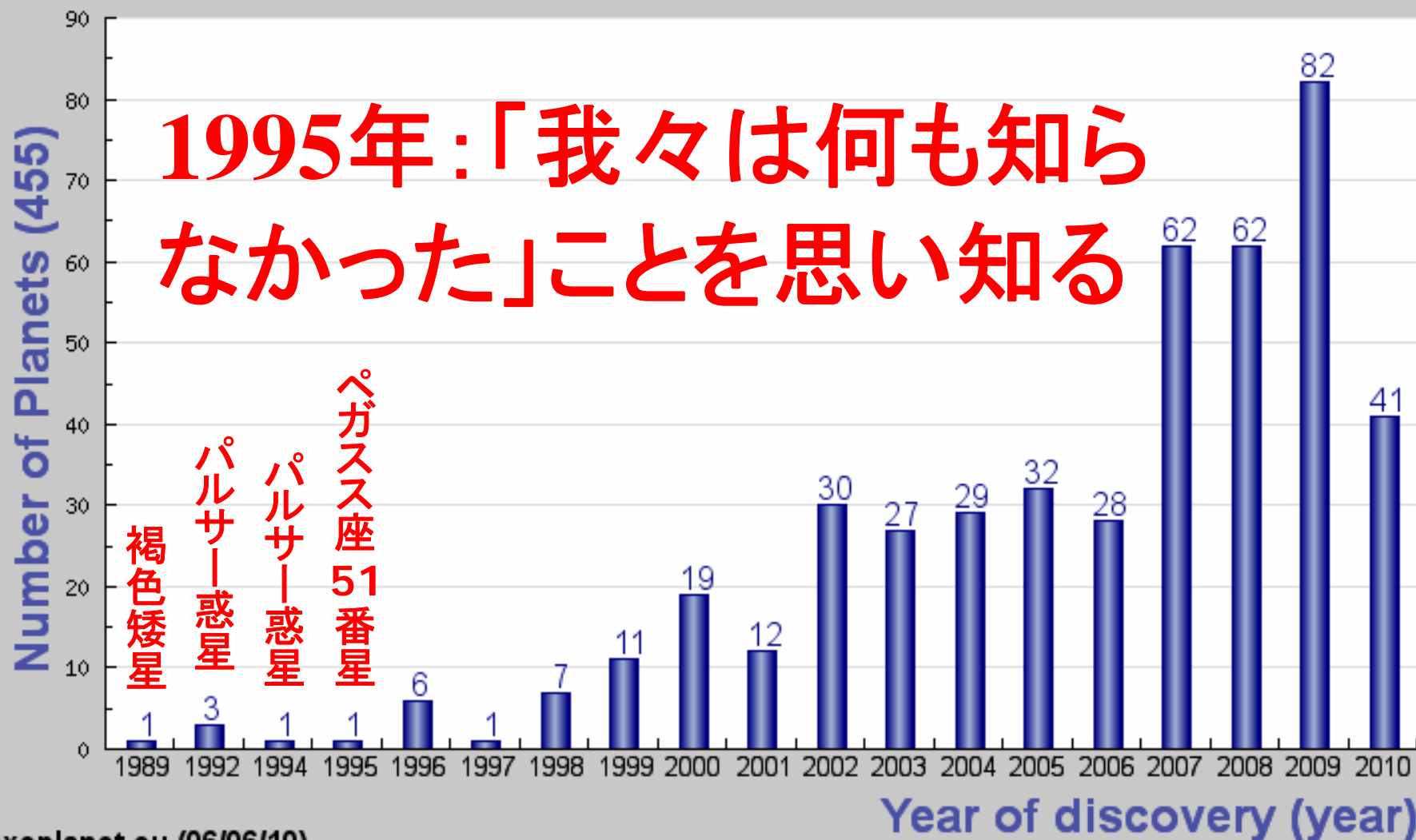


太陽系外惑星とは？

- 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）

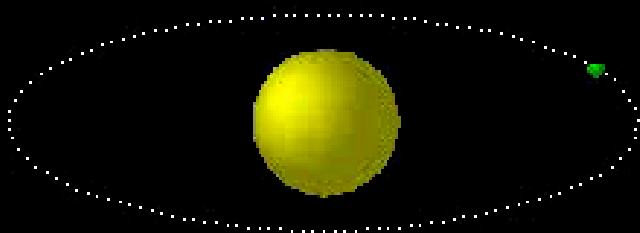
太陽系外惑星（候補）の発見年表

Number of planets by year of discovery



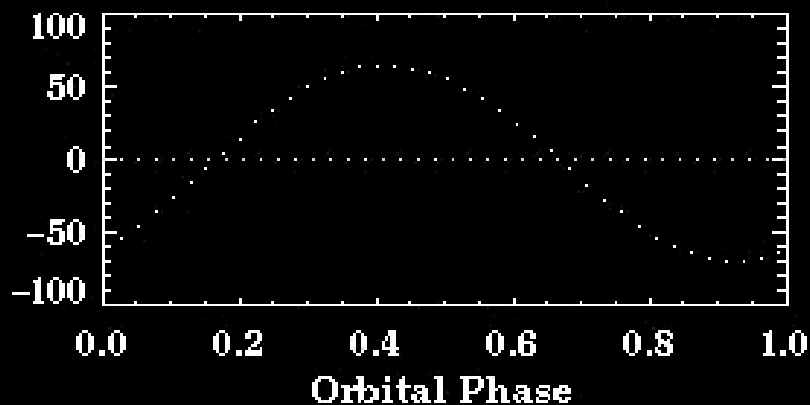
どうやって見つけたのか？

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]



S.G. Korzennik (CBA, © 1997)

■ ドップラー法

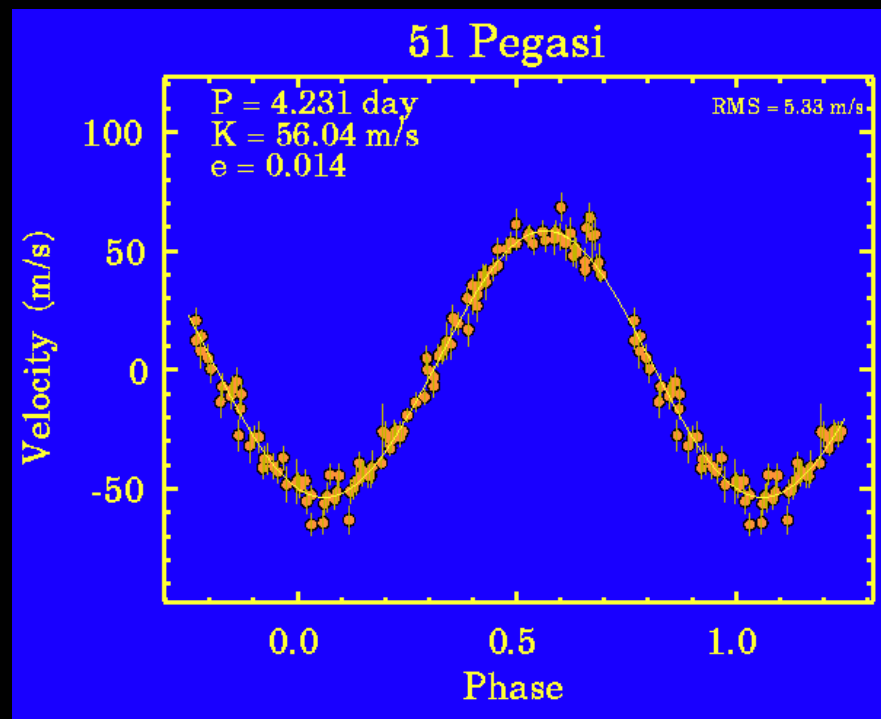
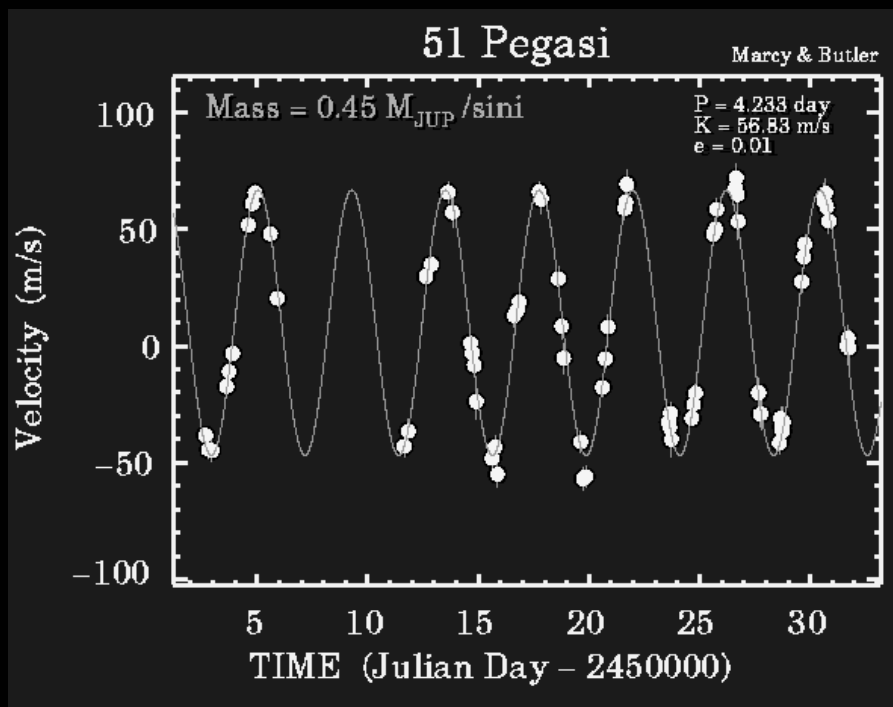
- 中心星の速度が毎秒数十メートル周期的に変動

■ トランジット法

- (運がよければ) 中心星の正面を惑星が横切ることで星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

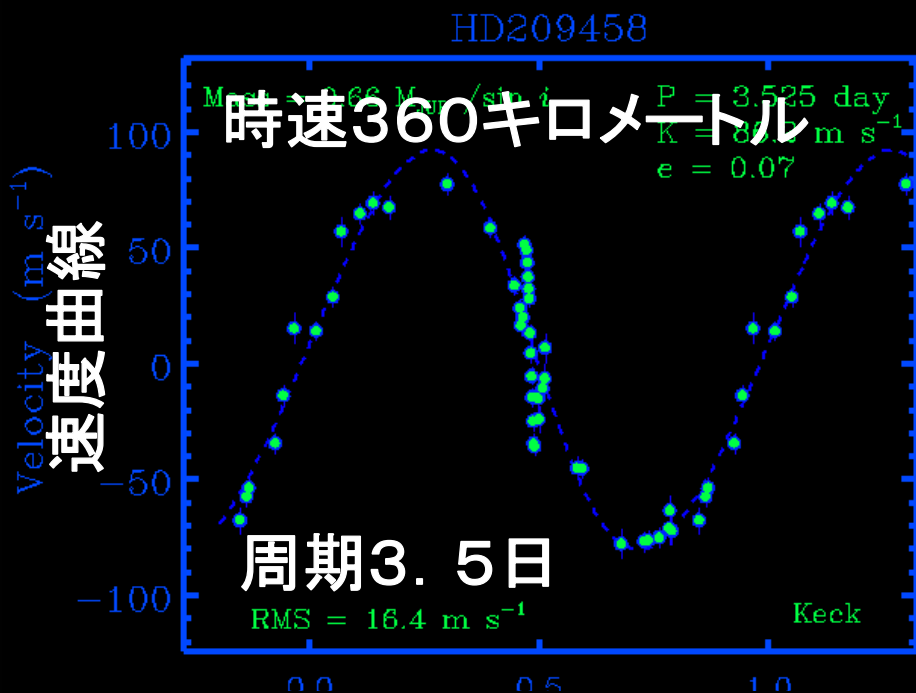
ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！

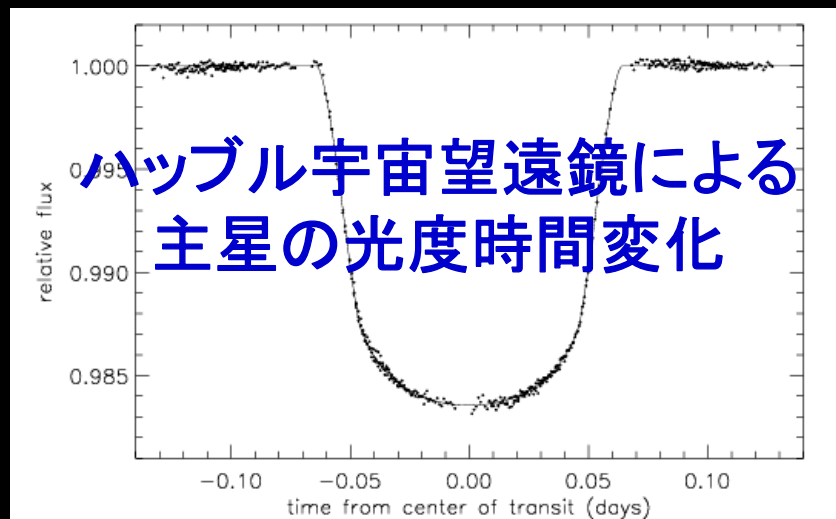
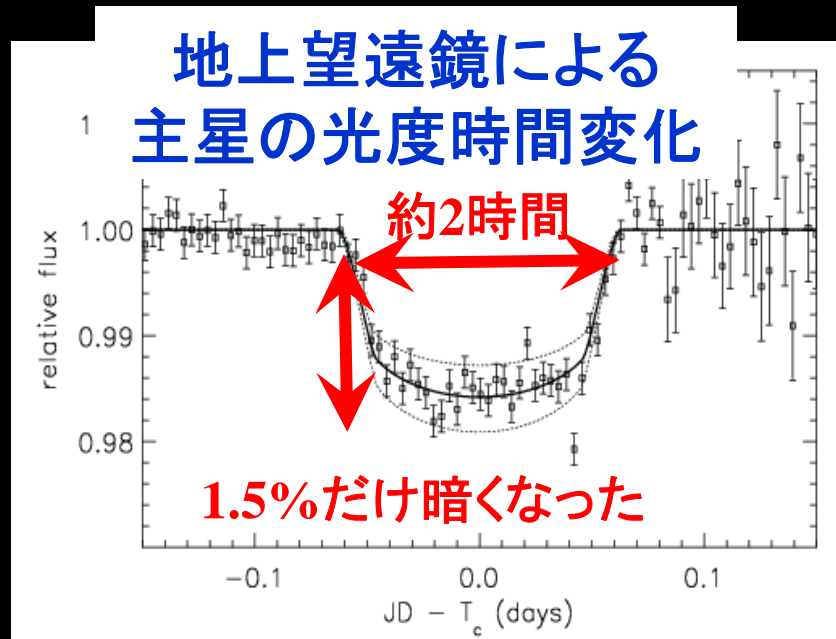


初めてのトランジット惑星HD209458b (2000年発表)

- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出



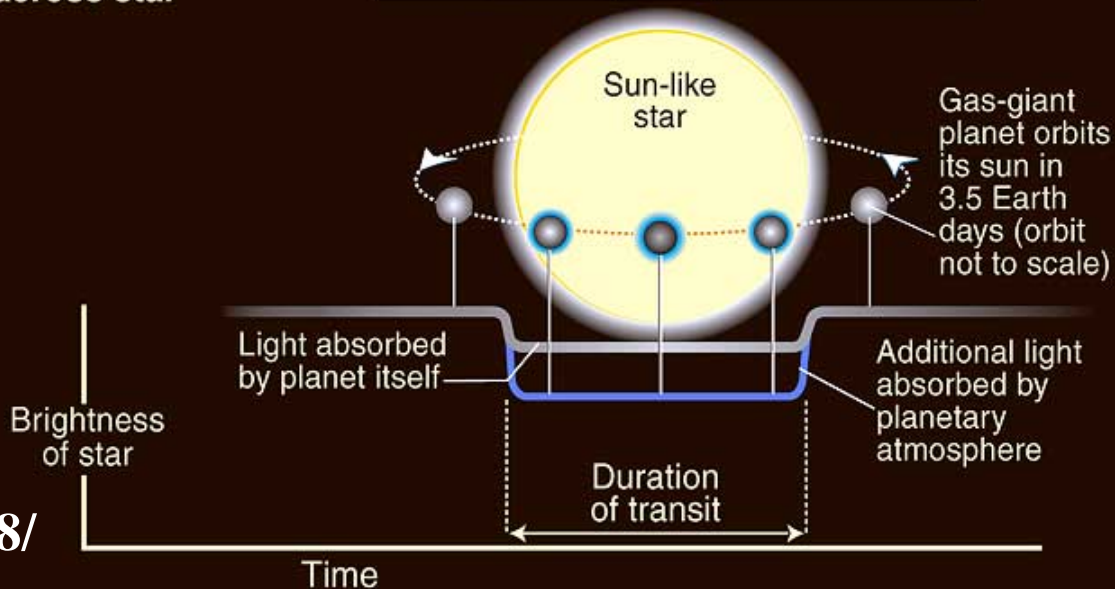
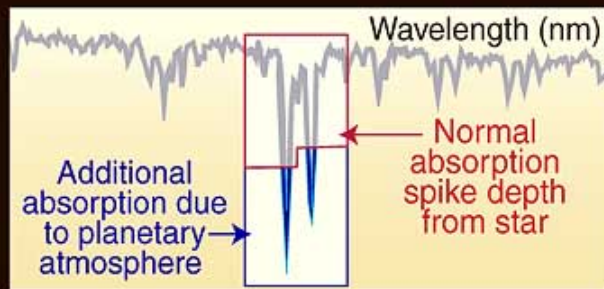
地上望遠鏡による
主星の速度時間変化



HD209458bの 惑星大気初検出 (2001年)

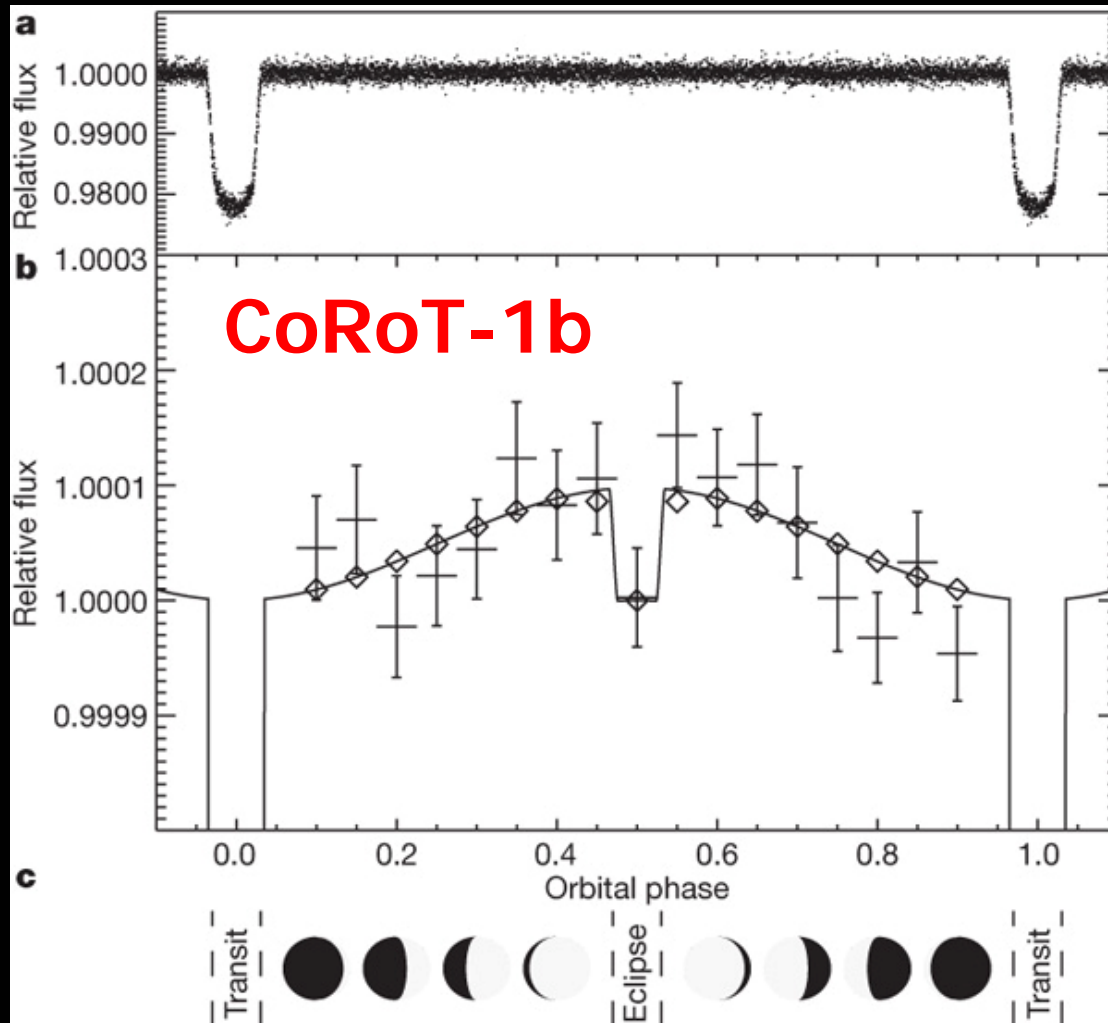
[http://hubblesite.org/
newscenter/archive/2001/38/](http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/)

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



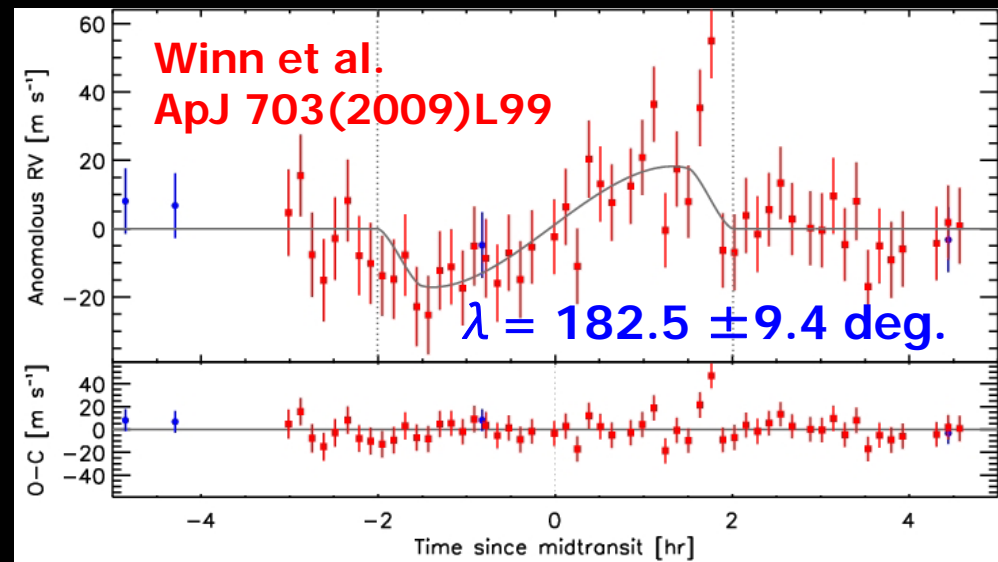
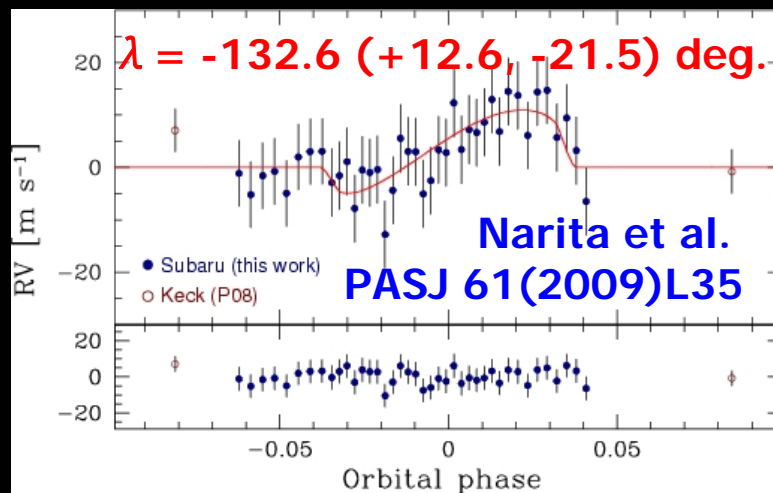
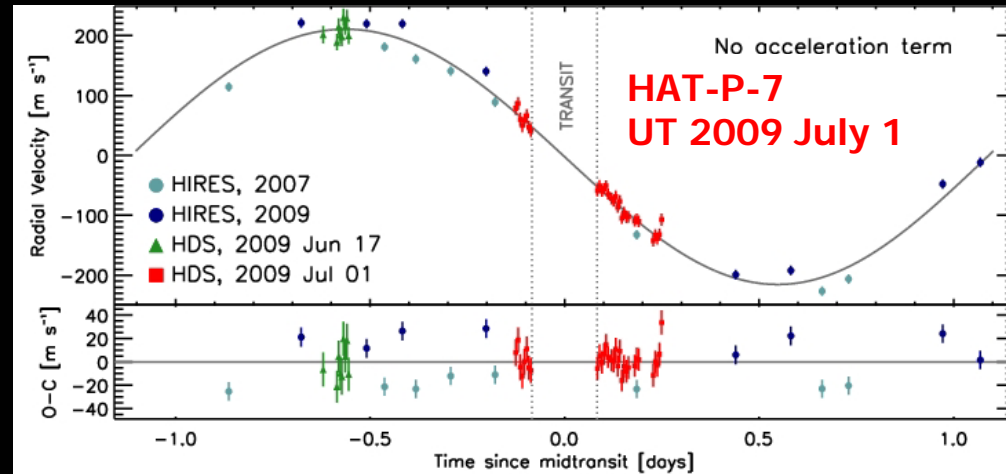
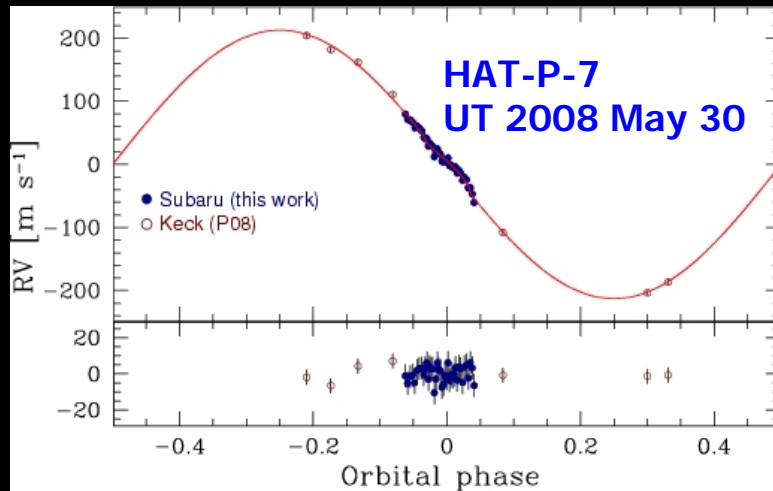
- 2000年 系外惑星の食を検出
 - 惑星の大きさがわかる
 - 質量の観測データとあわせて密度を 0.4g/cc と推定
 - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムを発見 (Charbonneau et al.)

トランジット惑星CoRoT-1bからの 反射光の検出



- CoRoT-1b: トランジット惑星(周期=1.5日)
- Convection, Rotation and planetary Transit (2006年12月27日打ち上げ)
- 55日間測光モニター
 - 反射光(7100 Å)検出
 - 表面温度 2430K
 - $0.02 < \text{albedo} < 0.2$

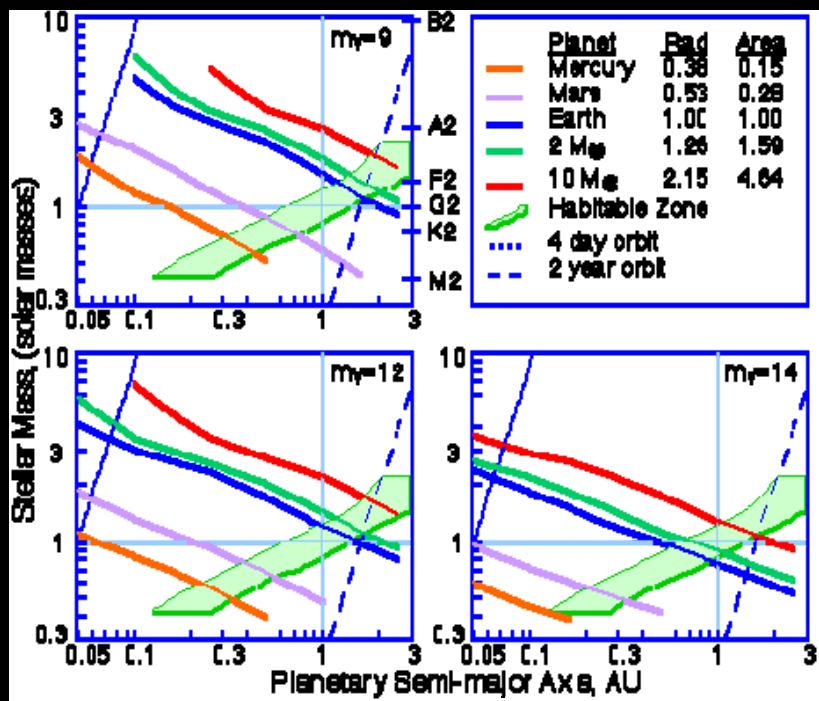
逆行(?)系外惑星(HAT-P-7)の発見



- すばる望遠鏡の成果
- 惑星形成・進化モデルに大きなインパクト

ケプラー衛星 (米国2009年3月6日打ち上げ)

トランジット惑星の測光サーベイ:
地球型(±ハビタブル)惑星の発見をめざす



第一回公開データ
706個のトランジット惑星候補
(Borucki et al. arXiv:1006.2799)

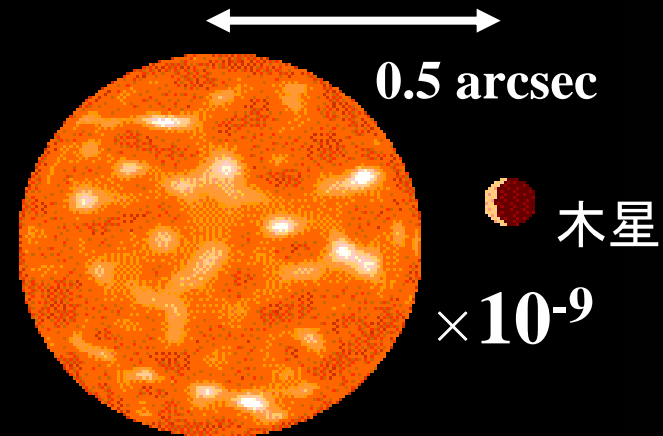
<http://kepler.nasa.gov/>

惑星は直接見えるか？

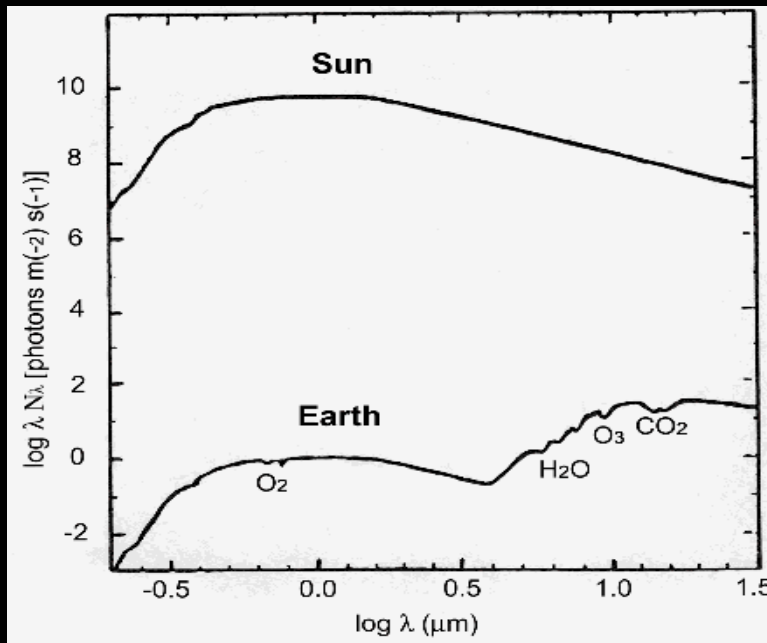
30光年先から観測した木星

明るさ: 27等級 (可視域)

主星との角距離: 0.5秒角



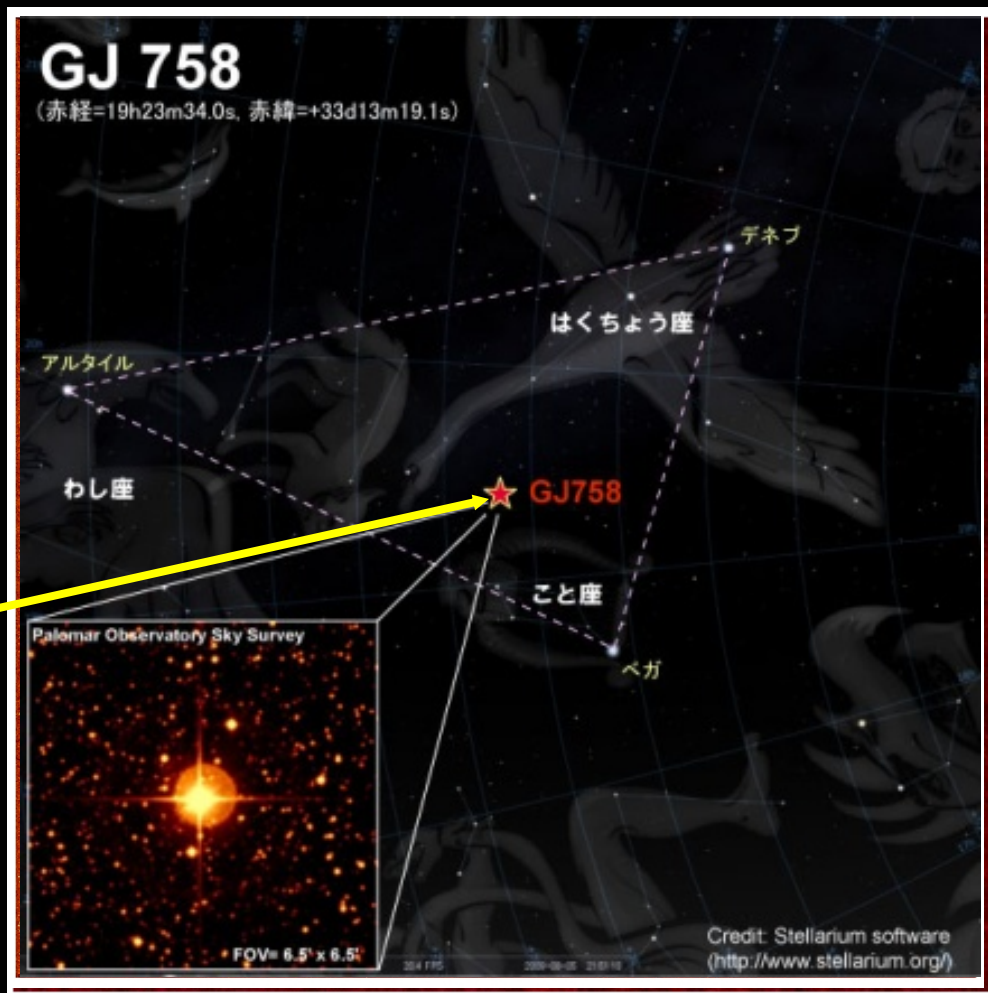
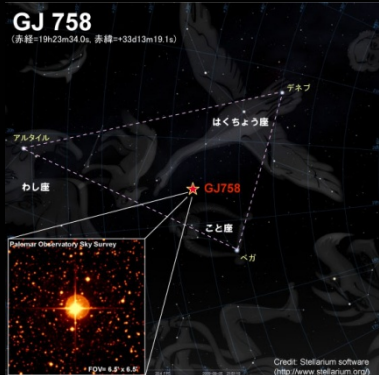
太陽



地上から観測できる分解能の大きさ内で、9桁も明るい主星の隣にある27等級の暗い天体を検出する

⇒ ほとんど不可能
(だった)

世界初、太陽型の星をめぐる惑星を撮像 (国立天文台、田村元秀氏のグループ)



- こと座の方向
- 距離: 50光年
- G9型恒星
 - 可視光で6等星
 - 質量: 0.97太陽質量
- 明るい中心星の影響を抑える観測およびデータ解析法を駆使

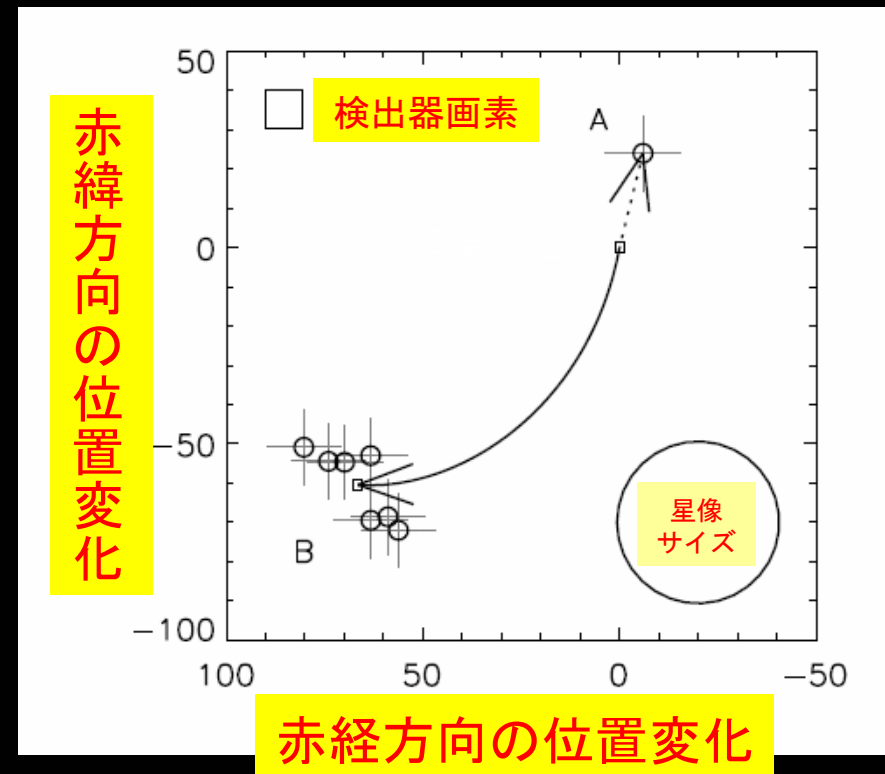
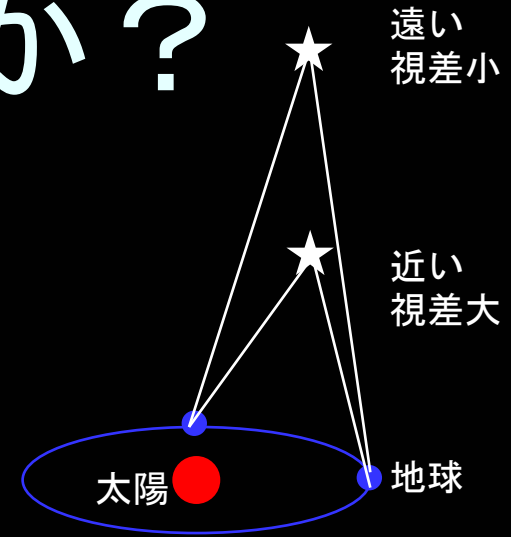
中心付近の白黒の斑点は除去しきれないノイズ
(スペックルノイズ)

惑星の放つ熱が波長1.6ミクロンの
赤外線として見えている (反射光ではない)
また、白が明るく、黒が暗い意味の色 (実際の色ではない)

なぜ惑星と言えるか？

- 背景星ではない
 - 3ヶ月間の2回の観測で視差を検出(約0.1秒角)
 - 富士山頂にあるテニスボール一個分のズレを東京から検出
 - 視野内の7個の背景星と明確に異なる位置変動
 - 主星と同じ位置関係

(国立天文台、田村元秀氏提供)

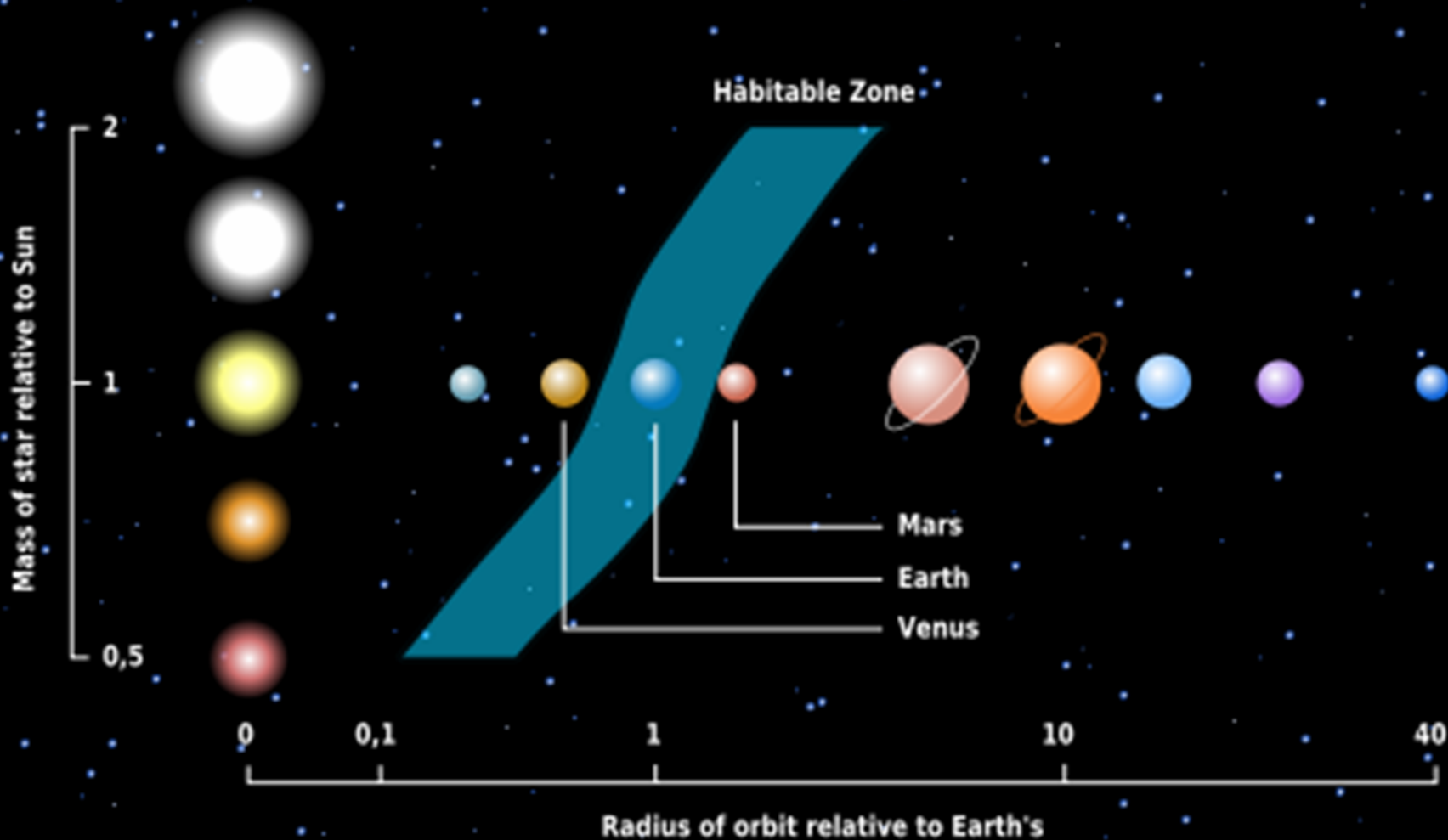


Gliese 581

- 地球から約20光年離れたM型星
 - 0.31x太陽質量、0.29x太陽半径、表面温度3500K
- 現時点で6つの惑星の存在が知られている
 - 581e : 1.9x地球質量、公転周期 3.1日
 - 581b : 15.7x地球質量、公転周期 5.4日
 - 581c : 5.4x地球質量、公転周期 12.9日
 - 581g : 3.1x地球質量、公転周期 36.6日
 - 581d : 7.1x地球質量、公転周期 66.8日
 - 581f : 7.0x地球質量、公転周期 433日
- 2010年9月29日 Gliese 581gがハビタブル惑星(水が液体として存在できる温度の領域)ではないかという報告がなされた

ハビタブル惑星(居住可能惑星)?

- Gliese581g: 3.1x地球質量、公転周期 36.6日



すでに学んだこと

- 惑星(系)は稀なものではなく普遍的存在
 - 太陽に似た恒星の10パーセント程度は惑星を持つ
- 惑星系の性質は多種多様
 - 太陽系と似た系もかけ離れた系も存在する
 - 惑星大気の発見
 - 惑星反射光の検出
 - 主星自転軸と惑星軌道軸とのずれ: 逆行惑星
- 様々な観測手法での相補的アプローチ
 - ドップラー法(精密分光)、トランジット法(精密測光)、重カレンズ(高時間分解能測光)、直接撮像

では次はどうする?

第二の地球はあるか？



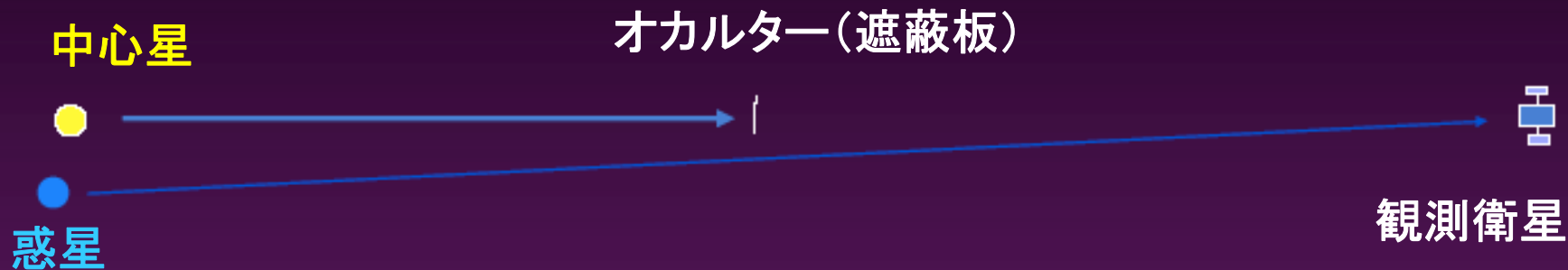
- 生命が誕生するには
 - 適度な温度
 - 大気存在
 - 液体の水(ハビタブル:居住可能性条件)
 - +偶然？
- 恒星の周りの地球型惑星を探せ！

Terra衛星のMODIS検出器のデータ

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

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

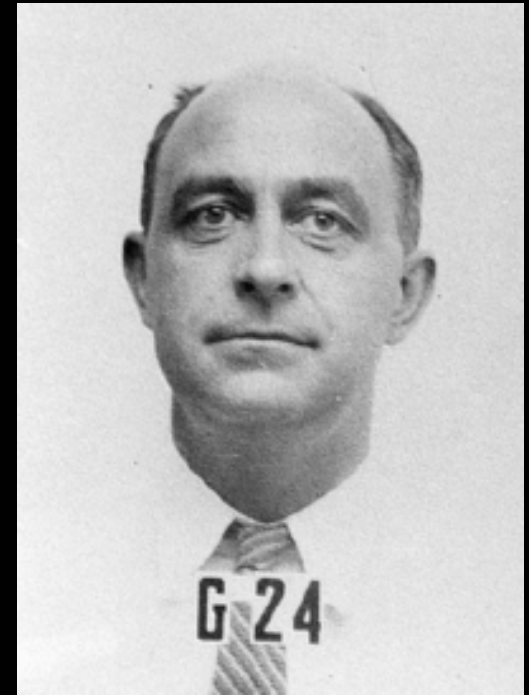
地球型惑星探査プロポーザル: *The New Worlds Mission*



<http://newworlds.colorado.edu/>

- 口径(2-4)mの可視光望遠鏡@L2点
 - 7万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおく
 - 望遠鏡にはその星の周りの惑星から光のみが届く
 - 惑星の分光・測光モニターからのバイオマーカー検出
 - コロラド大学を中心とした米国と英国の共同計画
 - 同様の計画はプリンストン大学でも検討中(O₃)

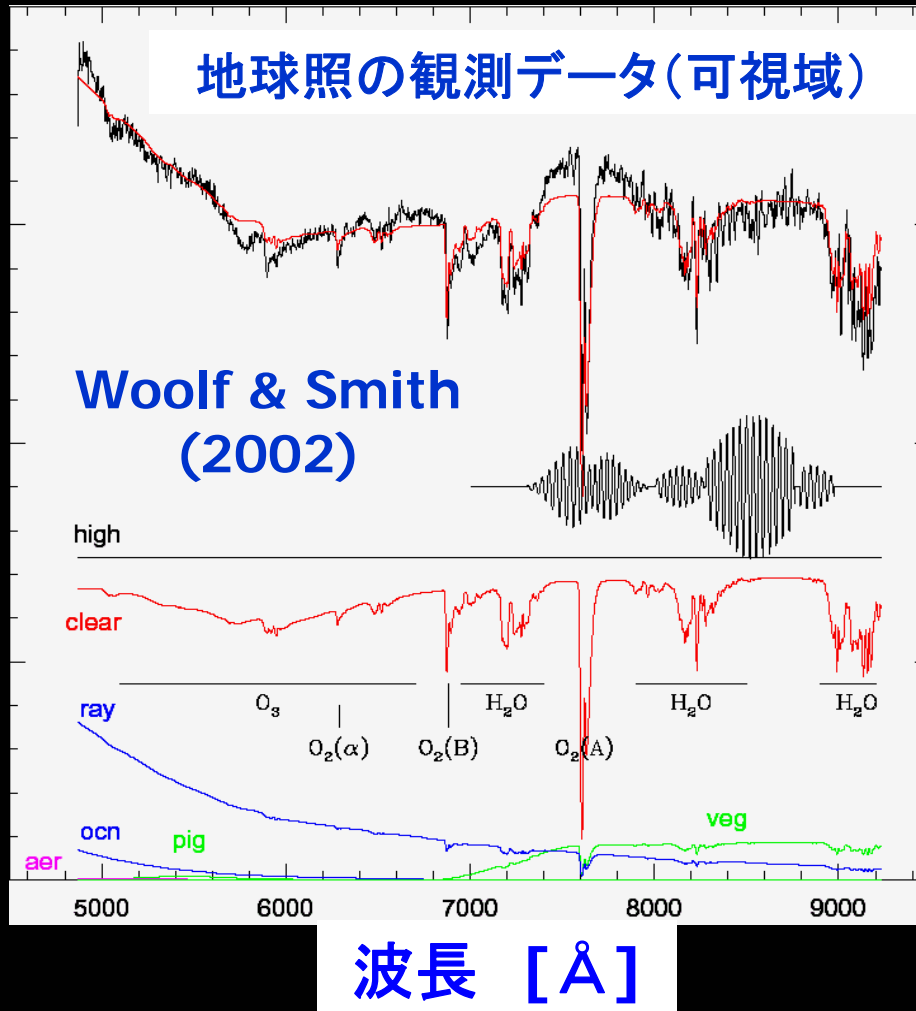
フェルミの疑問 (フェルミのパラドクス)



■ Where are *they*?

- 1950年、ロスアラモス研究所の
昼食時にエンリコ・フェルミが問い
かけたとされている

常識的バイオマーカー（生物存在の証拠）



■ 酸素

- Aバンド@ $0.76 \mu\text{m}$
- Bバンド@ $0.69 \mu\text{m}$

■ 水

- $0.72, 0.82, 0.94 \mu\text{m}$

■ オゾン

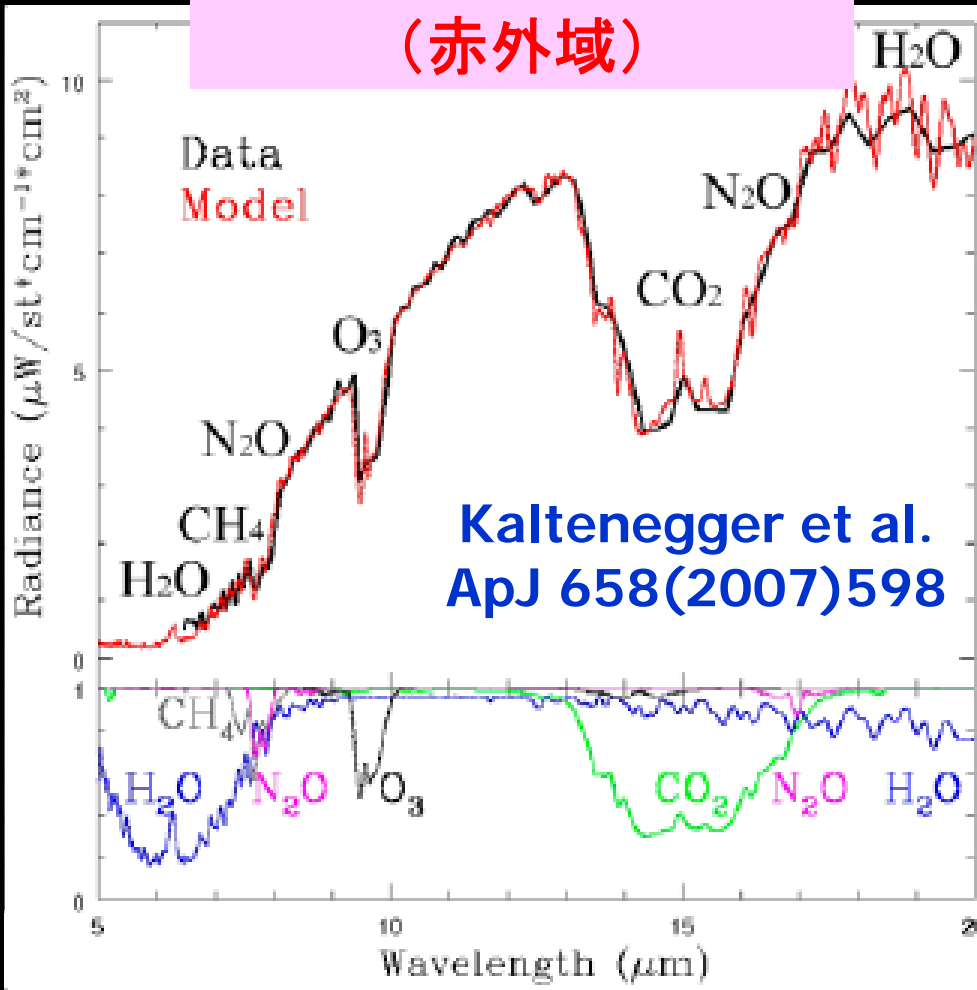
- Chappuis バンド
@ $(0.5-0.7) \mu\text{m}$
- Hartley バンド
@ $(0.2-0.3) \mu\text{m}$

Kasting et al. arXiv:0911.2936

“Exoplanet characterization and the search for life”

地球の赤外スペクトルとバイオマーカー

地球観測衛星データ
(赤外域)



- オゾン: @9.6 μm
 - 仮に酸素が少量であっても検出可能なので、酸素の良いトレーサー
- 水: <8 μm , >17 μm
- メタン@7.7 μm
 - 24億年以上前の地球にはまだほとんど酸素がなかったはず
 - メタン生成細菌由来?

Kasting et al. arXiv:0911.2936

“Exoplanet characterization and the search for life”

より過激(保守的?)なバイオマーカー

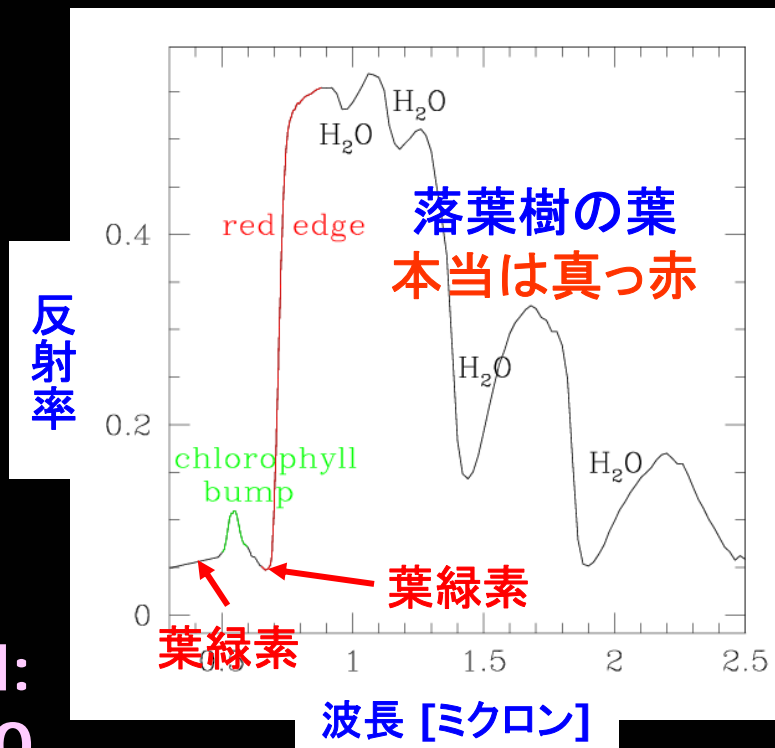
Extrasolar plants on extrasolar planets

- (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

- 酸素、オゾン、水の吸収線
- 植物のred edge
- 地球のリモートセンシング
ではすでに確立

Seager, Turner, Schafer & Ford:
astro-ph/050330



Vesto Melvin Slipher (1875-1969)

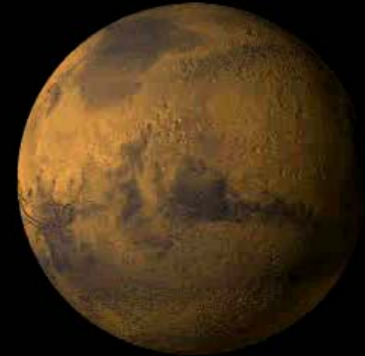


レッドエッジをバイオマーカーとして使う先駆的な試み

- “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.

第二の地球の色から、海、陸、植生の占める面積の割合を推定する

- 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
 - 藤井友香、河原創、樽家篤史、須藤 靖
- 東京大学気候システム研究センター
 - 福田悟、中島映至
- プリンストン大学
 - Edwin Turner

Fujii et al. *Astrophys. J* 715(2010)866, arXiv:0911.5621

<http://www.space.com/scienceastronomy/color-changing-planets-alien-life-100513.html>

地球は青かった？

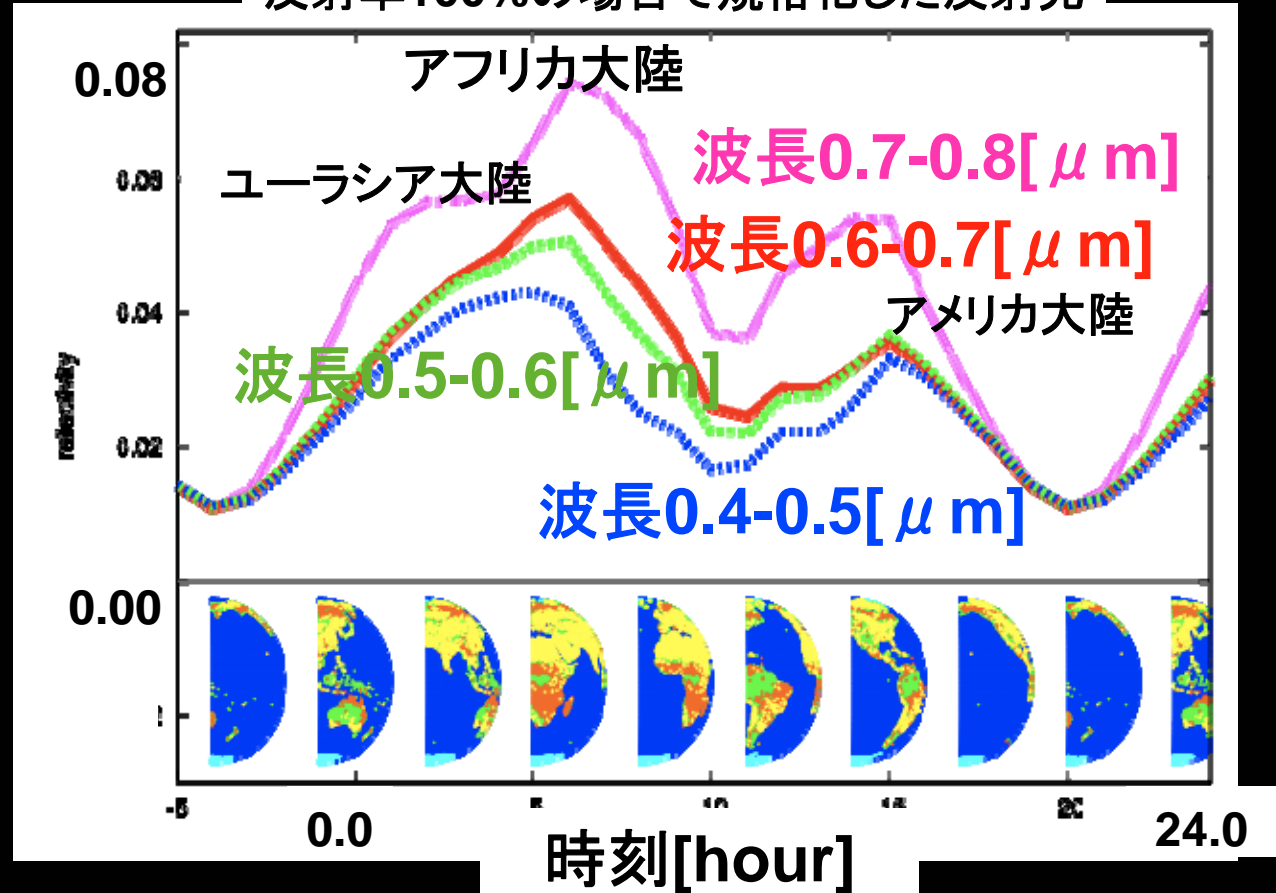
A pale blue dot



自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

- 春分(3月)
- 自転軸に垂直な方向から観測
- 地球観測衛星のデータを用いて計算

反射率100%の場合で規格化した反射光

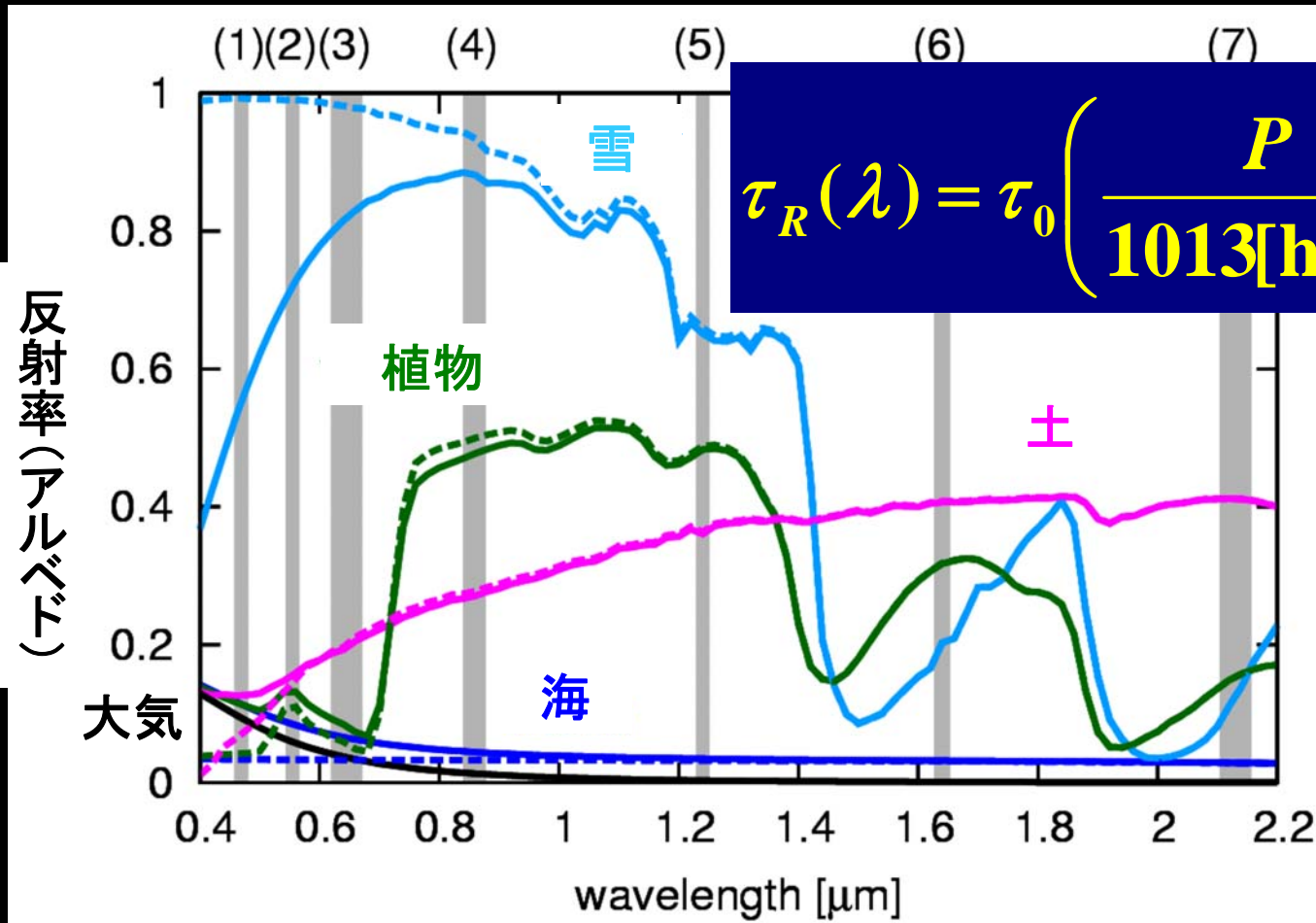


Fujii et al. (2010)

第二の地球の色：表面積の推定

- 得られた5バンドの模擬光度曲線を、等方散乱を仮定した4成分(海、土、植物、雪)だけでフィットして、それらの表面積の割合を推定する
 - 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測(各位相で1時間露出×7回)
 - 中心星の光がブロックされた理想的観測
 - 光子のポワソンノイズだけを考慮
 - 1週間の観測期間での公転の効果は無視
 - 1時間露出中の自転の効果も無視
 - 雲の存在も無視

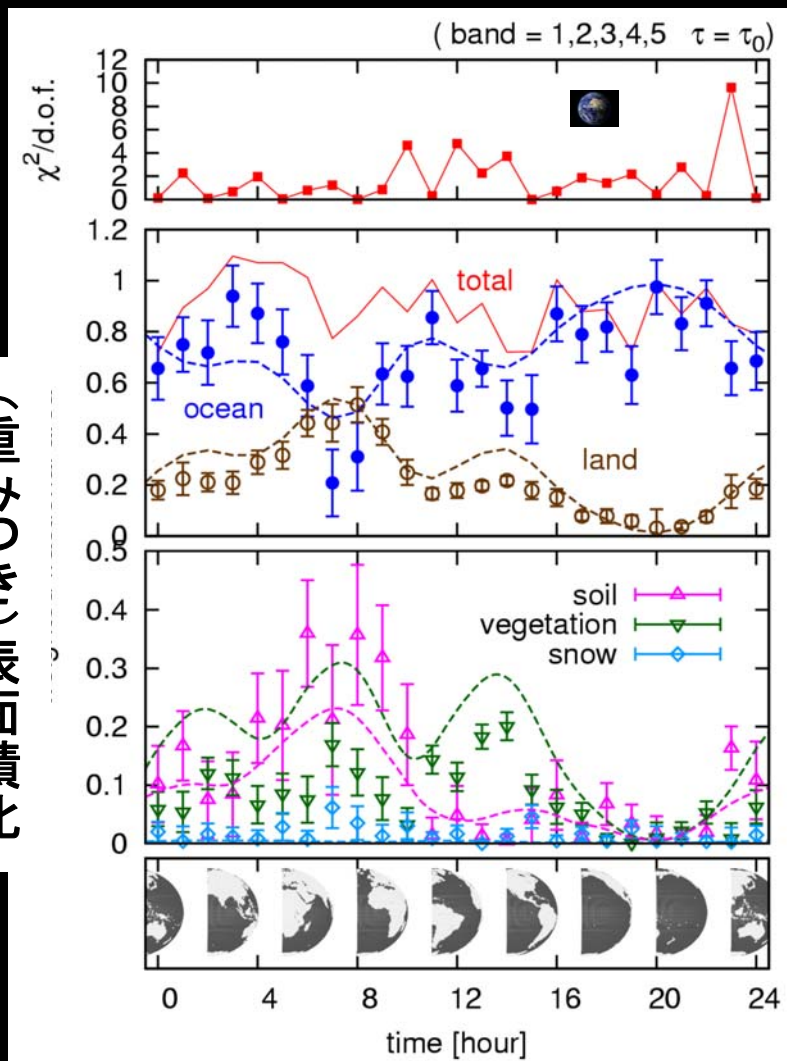
4成分の反射率と大気の効果



- 「空の青、海をあをにも染まずただよふ」
- 大気によるアルベドの波長依存性が重要

第二の地球の色から表面積を推定

(重みつき)表面積比

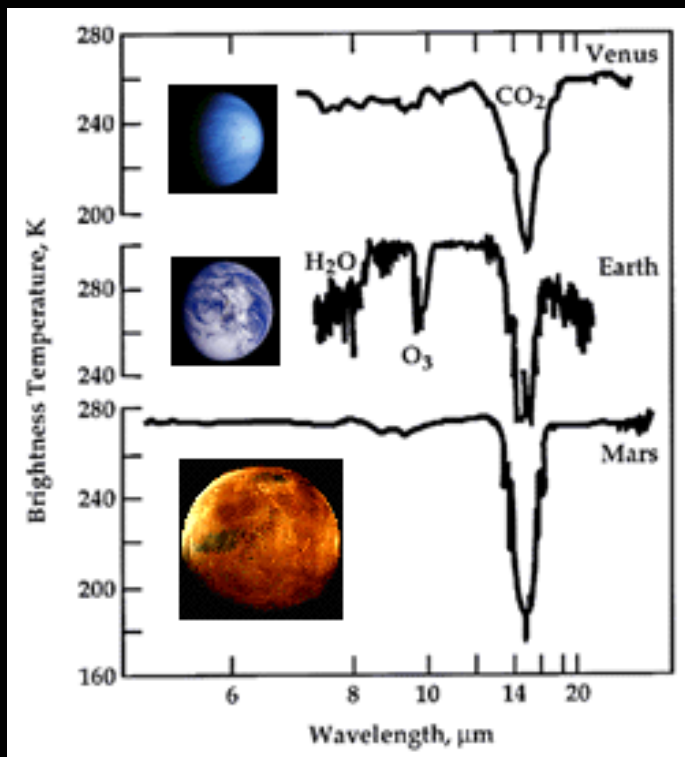


系外惑星リモートセンシング

- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測
- 光子のポワソンノイズだけを考慮(雲を無視)
- レイリー散乱の一次近似
- 海、土、植物、雪の4つの成分の面積比を推定
- 結構イケテル!

Fujii et al. (2010)

太陽系外惑星： そのさきにあるもの “天文学から宇宙生物学へ”



- 地球型惑星の発見
- 居住可能(ハビタブル)惑星の発見
 - 水が液体として存在する地球型惑星
- バイオマーカーの提案と検出
 - 酸素、水、オゾン、核爆発、、
- 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説得
できるか？ Biomarker を特定できるか？

予想もできない展開が待っているはず

■ 最初にかかるのはどれだろう

- 地球外生物の痕跡の天文学的検出
- 実験室での人工生物の誕生
- 地球外文明からの交信の検出
- 地球文明の破滅（いったん発達した文明は、疫病、核戦争、資源の枯渇などの要因で不安定）

■ 交信できるレベルまで安定に持続した地球外文明の有無を知ることは、我々の未来を知ることに等しい

地球外比較文明論

- 毎日あたりまえであると考えていたことも、実は奇妙な習慣なのかもしれない
 - なぜお箸で食べるのか、なぜ納豆を食べるのか
 - 外国人との交流を通じて初めて不思議であることに気づく
- いくつかの例
 - 言語は存在するか、また音を用いてコミュニケーションするか
 - π という概念はあるか、その数値を知っているか
 - 男女の違いはあるか
 - 芸術が存在するか、それらに感動するか
 - 生きていて楽しいか
 - 「死」が存在するか
- 交信は非現実的(片道100年?)であるにしても、考えてみるのは面白い