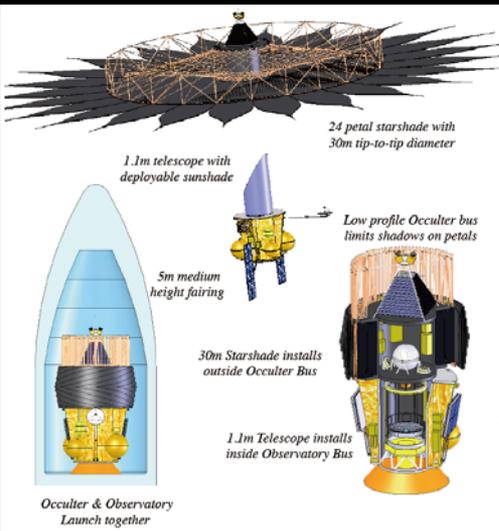
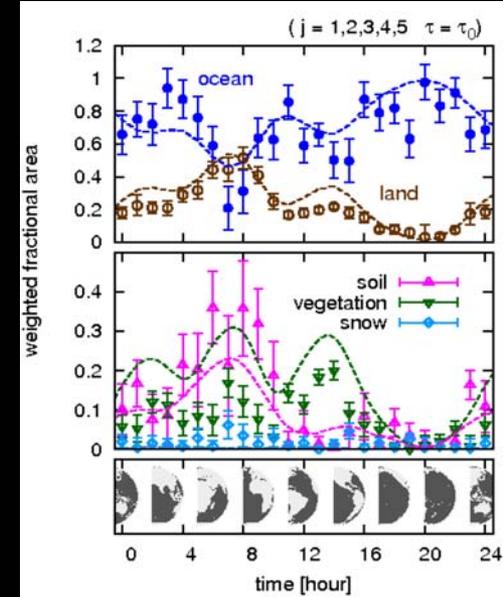


太陽系外惑星とバイオマーカー



物理学教室 金曜ランチトーク 2010年6月11日

須藤 靖

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2010j.html

アイザック・アシモフ著 「夜来る」



イラスト：羽馬有紗

- 2000年に一度しか夜が来ない“地球”の人たち
- 自分たちの“地球”と宇宙との関係は？

太陽系外惑星（候補）の発見年表

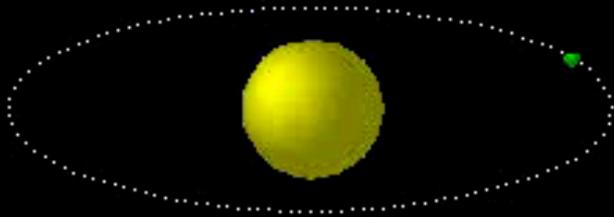
Number of planets by year of discovery

1995年:「我々は何も知らなかった」ことを思い知る



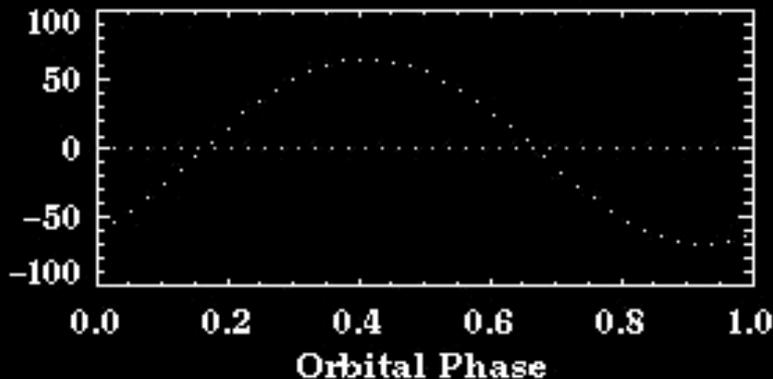
どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



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

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



■ ドップラー法

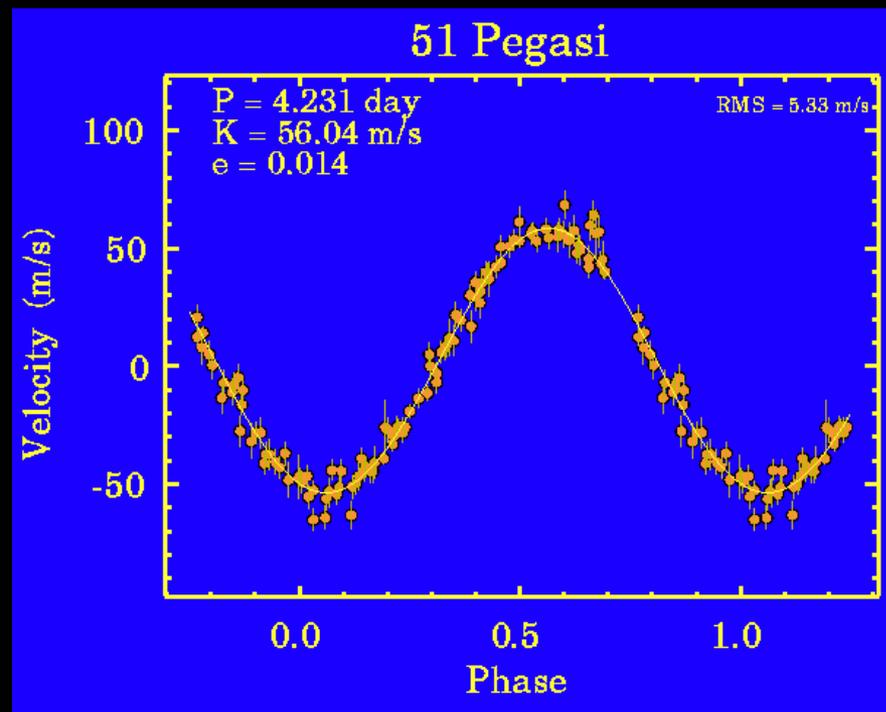
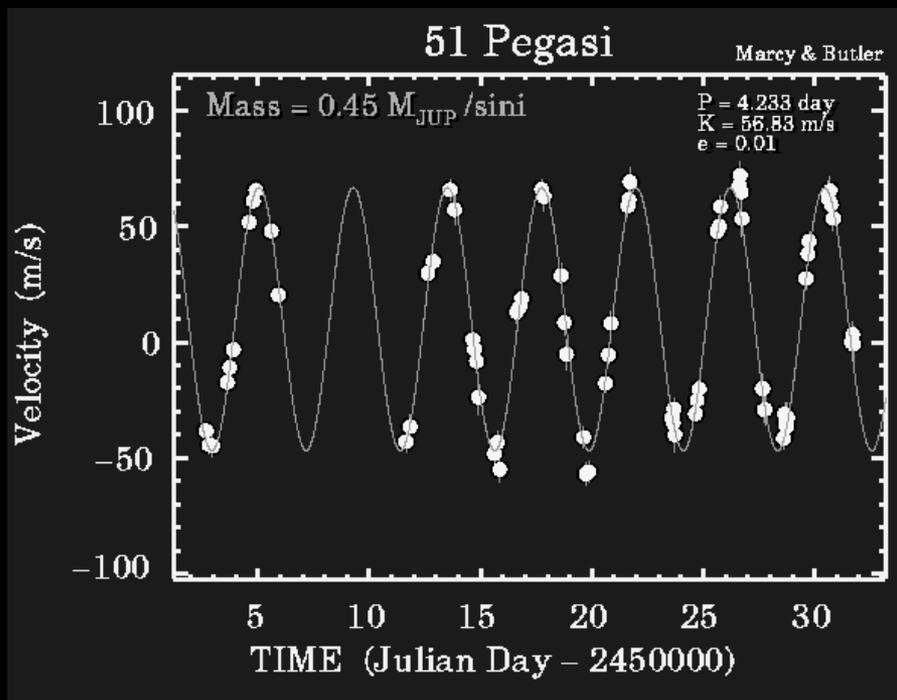
- 中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動

■ 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！

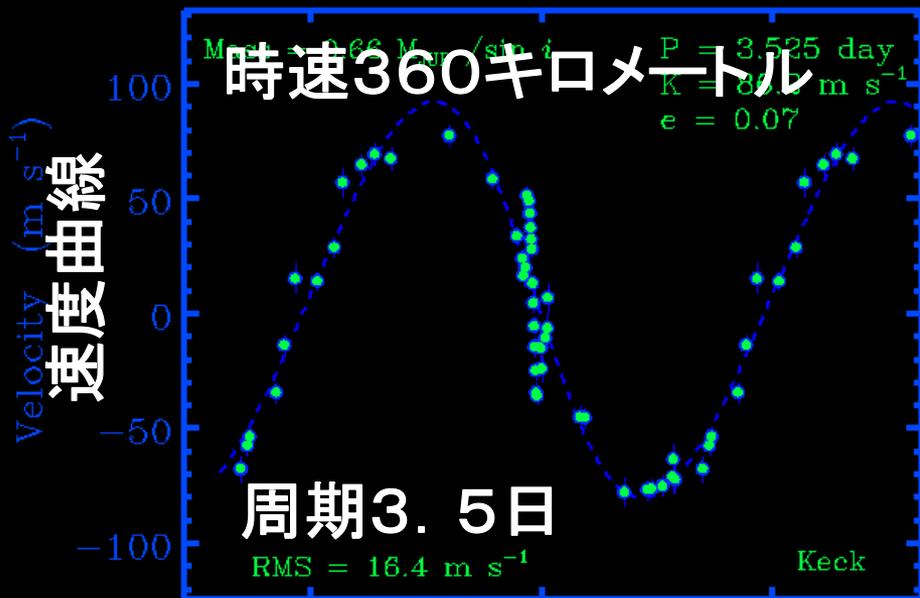


初めてのトランジット惑星HD209458b

- 速度変動のデータに合わせた惑星による主星の掩蔽(可視光)の初検出

HD209458

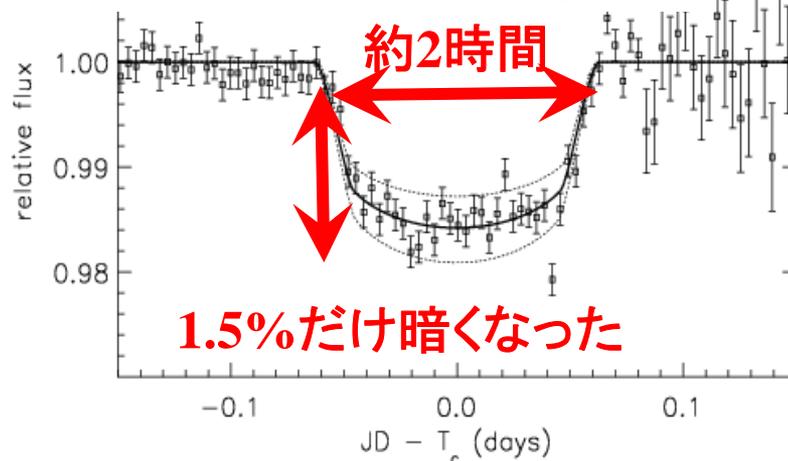
時速360キロメートル



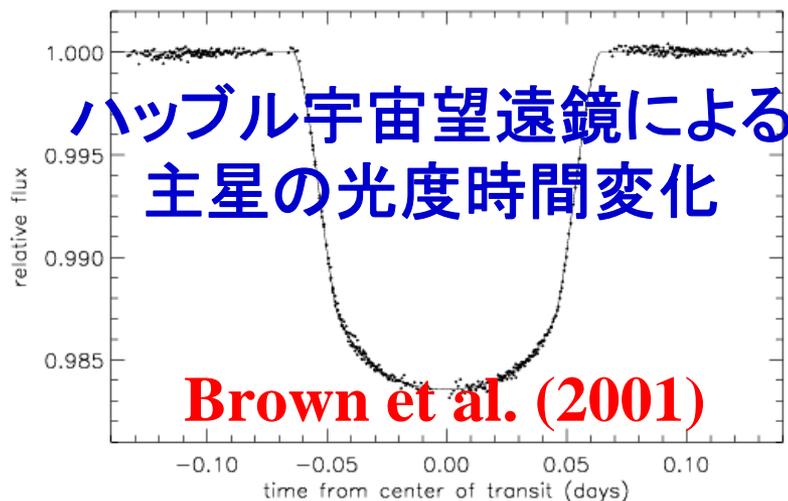
地上望遠鏡による
主星の速度時間変化

Henry et al. (1999), Charbonneau et al (2000)

地上望遠鏡による
主星の光度時間変化



ハッブル宇宙望遠鏡による
主星の光度時間変化



Ohta, Taruya & Suto: ApJ 622(2005)1118

THE ROSSITER-McLAUGHLIN EFFECT AND ANALYTIC RADIAL VELOCITY CURVES FOR TRANSITING EXTRASOLAR PLANETARY SYSTEMS

YASUHIRO OHTA, ATSUSHI TARUYA,¹ AND YASUSHI SUTO¹

Department of Physics, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan; ohta@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp,
ataruya@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp, suto@phys.s.u-tokyo.ac.jp

Received 2004 October 13; accepted 2004 December 10

Among the recently discovered transiting extrasolar planetary systems, i.e., TrES-1 by the Trans-Atlantic Exoplanet Survey (Alonso et al. 2004) and OGLE-TR 10, 56, 111, 113, 132 by the Optically Gravitational Lens Event survey (e.g., Udalski et al. 2002c, 2002b, 2002a, 2003; Konacki et al. 2003; Bouchy et al. 2004; Pont et al. 2004), TrES-1 has similar orbital period and mass to those of HD 209458b, but its radius is smaller. Thus, it is an interesting target to determine the spin parameters via the RM effect; if its planetary orbit and the stellar rotation share the same direction as discovered for the HD 209458 system, it would be an important confirmation of the current view of planet formation out of the protoplanetary disk surrounding the protostar. If not, the result would be more exciting and even challenge the standard view, depending on the value of the misalignment angle λ .

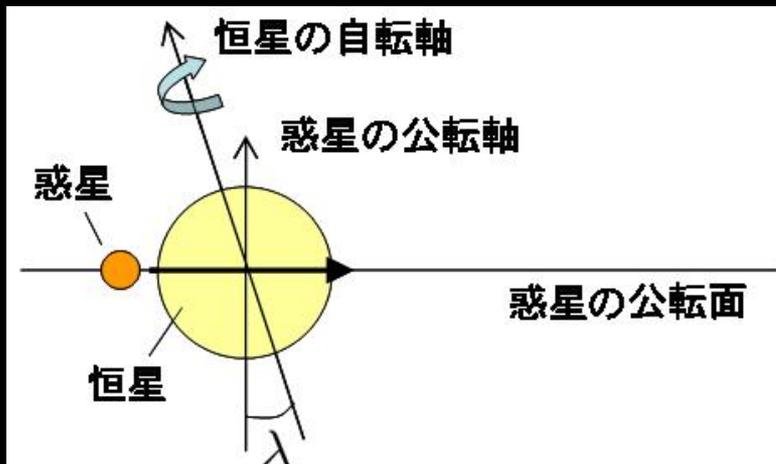
We also note that the future satellites *COROT* and *Kepler* will detect numerous transiting planetary systems, most of which will be important targets for the RM effect in 8–10 m class ground-based telescopes. We hope that our analytic formulae presented here will be a useful template in estimating parameters for those stellar and planetary systems.

In conclusion, we have demonstrated that the radial velocity anomaly due to the RM effect provides a reliable estimation of spin parameters. Combining data with the analytic formulae for radial velocity shift Δv_r , this methodology becomes a powerful tool in extracting information on the formation and the evolution of extrasolar planetary systems, especially the origin of their angular momentum. Although it is unlikely, we may even speculate that a future RM observation may discover an extrasolar planetary system in which the stellar spin and the planetary orbital axes are antiparallel or orthogonal. This would have a great impact on the planetary formation scenario, which would have to invoke an additional effect from possible other planets in the system during the migration or the capture of a free-floating planet. While it is premature to discuss such extreme possibilities at this point, the observational exploration of transiting systems using the RM effect is one of the most important probes for a better understanding of the origin of extrasolar planets.

ロシター効果による速度変動の摂動論的解析表式の導出

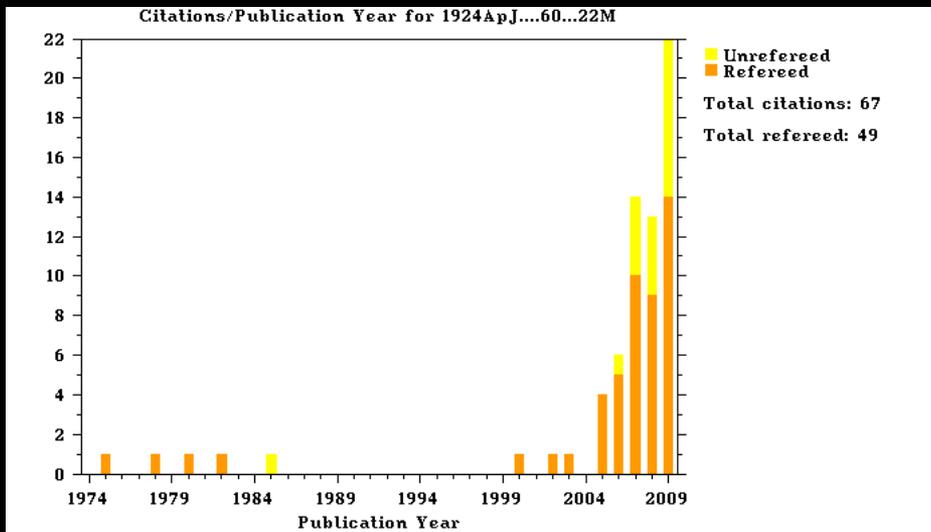
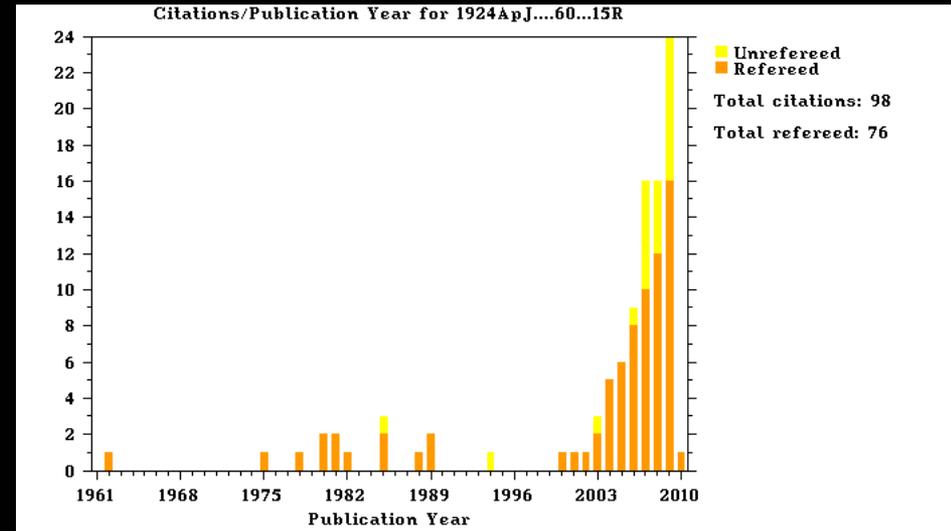
Measurement of Spin-Orbit Alignment in an Extrasolar Planetary System (太陽系外惑星系における自転軸と公転軸の向き の測定)

- Joshua N. Winn¹, Robert W. Noyes¹, Matthew J. Holman¹, David B. Charbonneau¹, 太田泰弘²、樽家篤史²、須藤靖²、成田憲保², Edwin L. Turner^{2,3}, John A. Johnson⁴, Geoffrey W. Marcy⁴, R. Paul Butler⁵, & Steven S. Vogt⁶
 - 1ハーバード大学、2東京大学、3プリンストン大学、4カリフォルニア大学バークレー校、5ワシントン カーネギー研究所、6カリフォルニア大学サンタクルス校
- The Astrophysical Journal 631(2005)1215 (10月1日号)



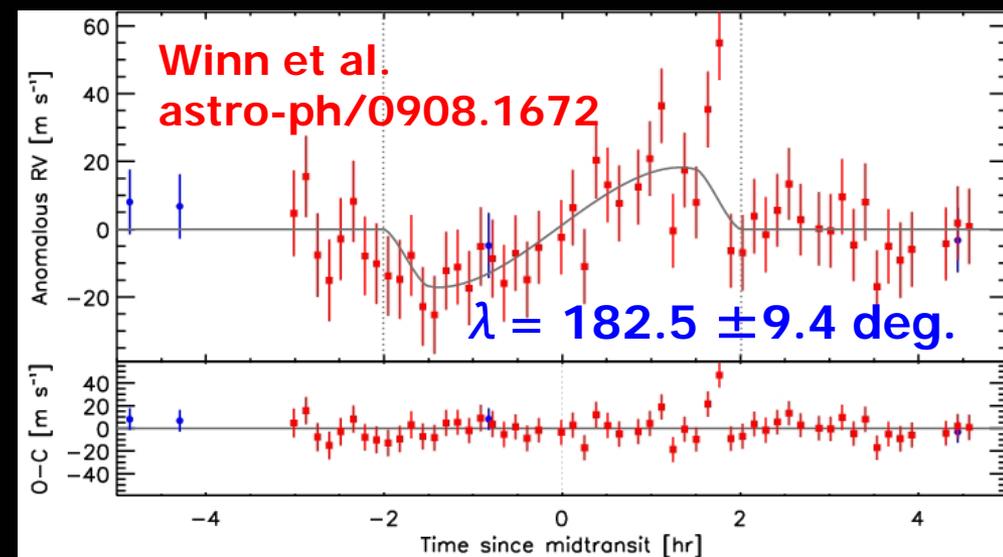
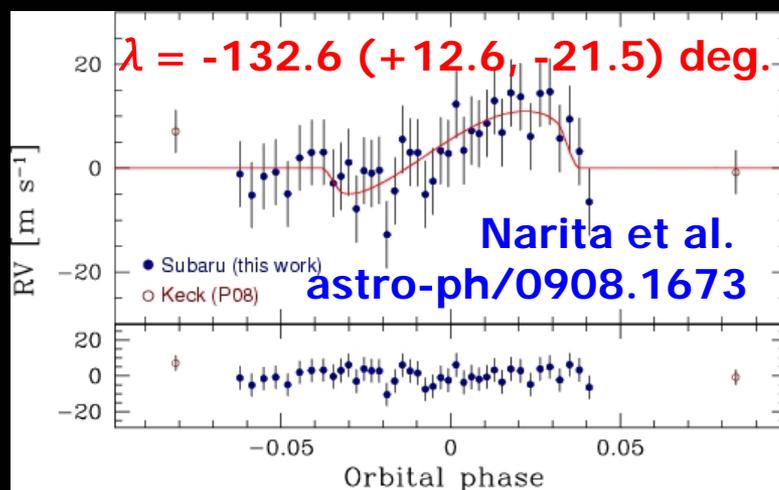
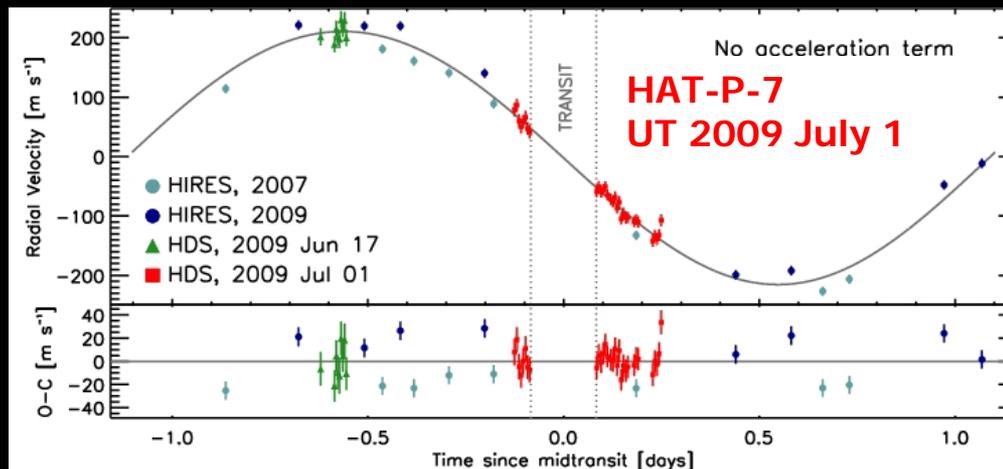
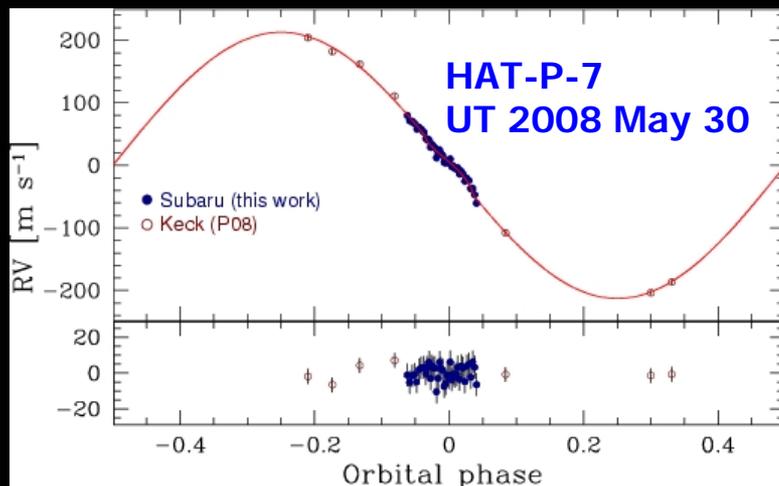
ロシター・マクローリン効果の引用史

R.A. Rossiter
ApJ 60(1924)15



D.B. McLaughlin
ApJ 60(1924)22

逆行する系外惑星(HAT-P-7)の発見



- とともにすばる望遠鏡の成果
- 起源は謎、惑星形成・進化モデルに大きなインパクト

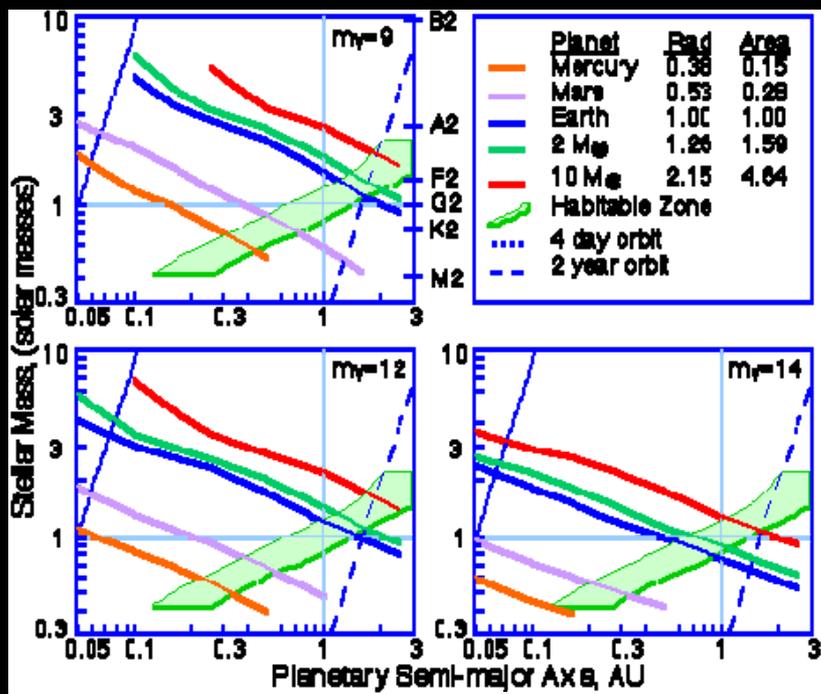
すでに学んだこと

- 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
 - 主星スピン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?

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



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

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

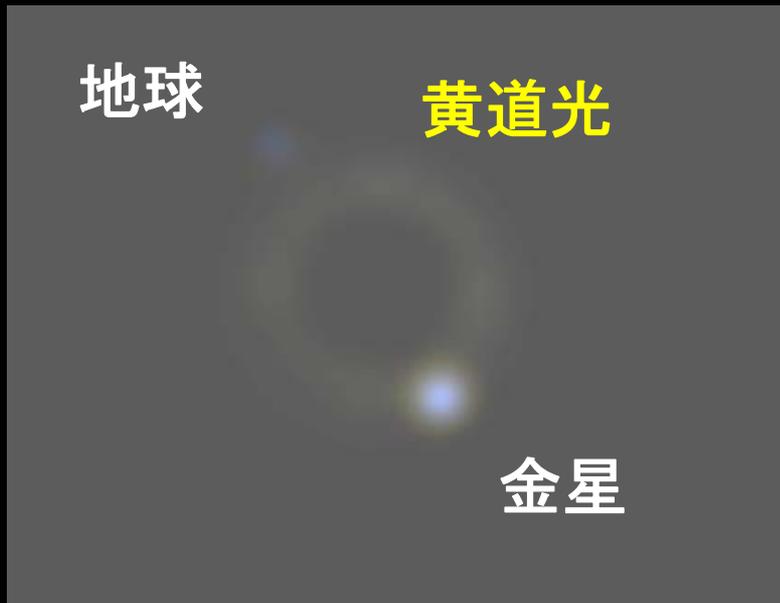


<http://newworlds.colorado.edu/>

- 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)

New Worlds Mission: simulated image

軌道面傾斜角=0°



軌道面傾斜角=60°

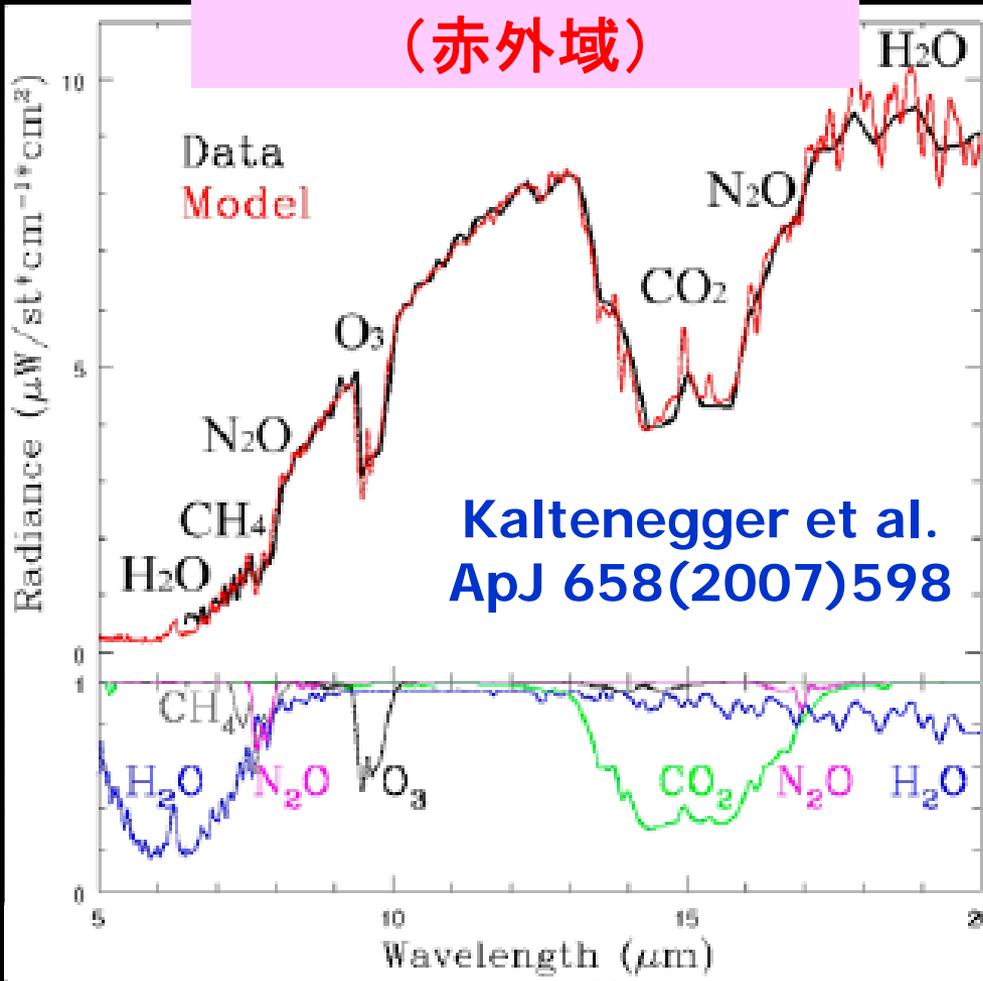


- 我々の太陽系の内惑星を(4m宇宙望遠鏡+オカルター)を用いて30光年先から観測した場合に予想される画像
- このようなミッションが実現した場合、一体何がどこまで分かるのだろうか?

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

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

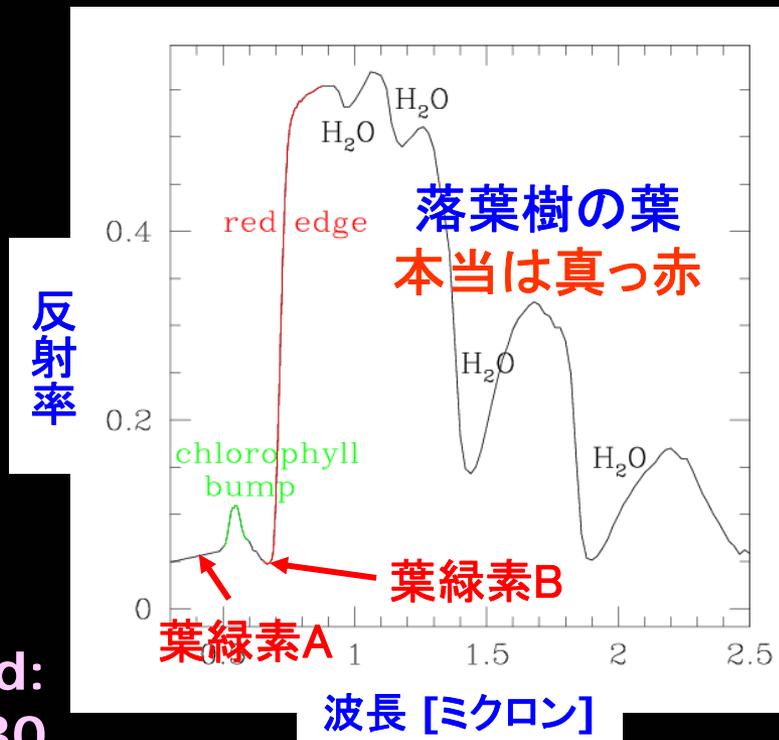
“Exoplanet characterization and the search for life”

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



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>

第二の地球の色：反射光計算の概略

- 地球観測衛星TerraのMODIS検出器の実際のデータを利用して5バンドの模擬光度曲線を作成
 - 陸地： $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ のピクセル毎に決められた反射特性のパラメータ (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) を用いて足し合わせる
 - 海：MODISデータにない海に対してはNakajima & Tanaka (1983)のBRDFモデルを用いて計算
 - 大気の効果としてレイリー散乱の1次までを考慮
 - 24時間周期で自転させる

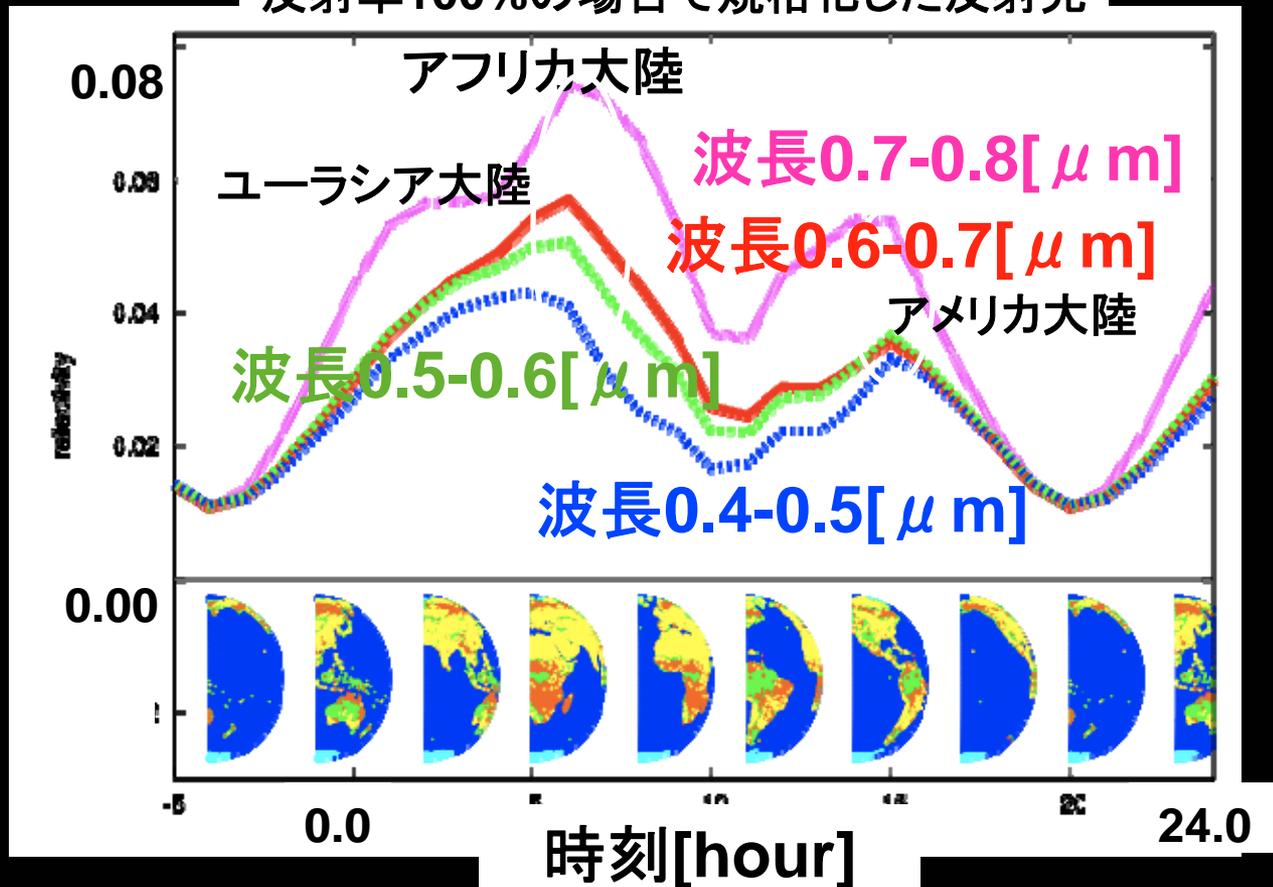
A pale blue dot

地球は青かった？



自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

反射率100%の場合で規格化した反射光



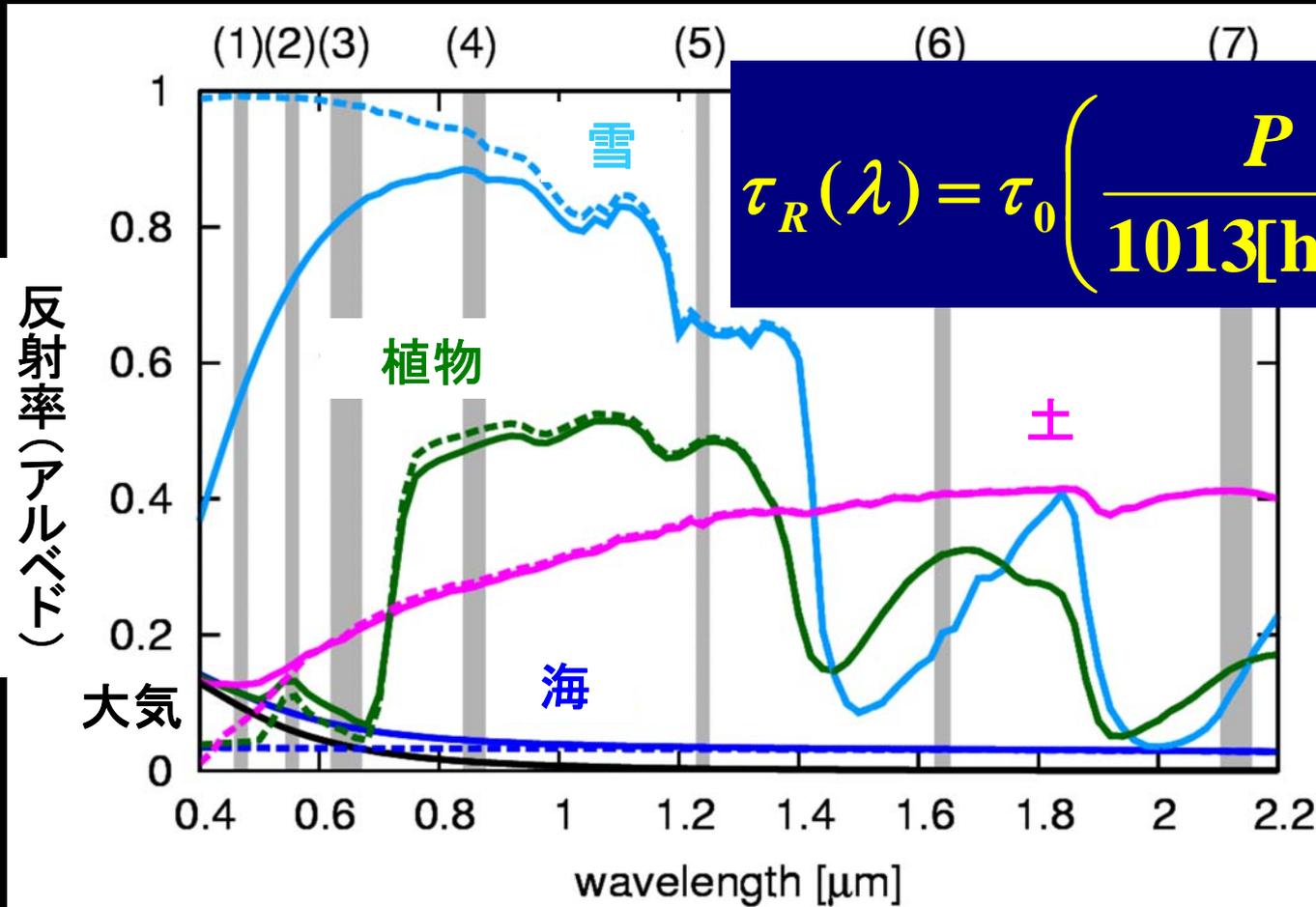
- 春分(3月)
- 自転軸に垂直な方向から観測
- 地球観測衛星のデータを用いて計算

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

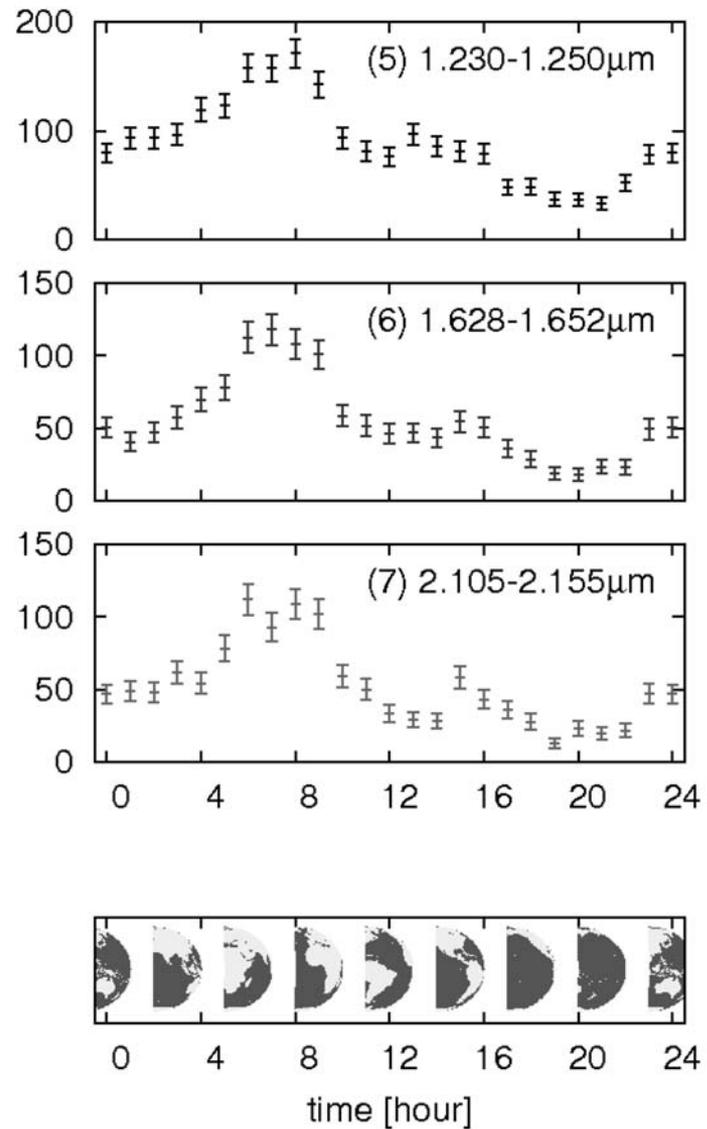
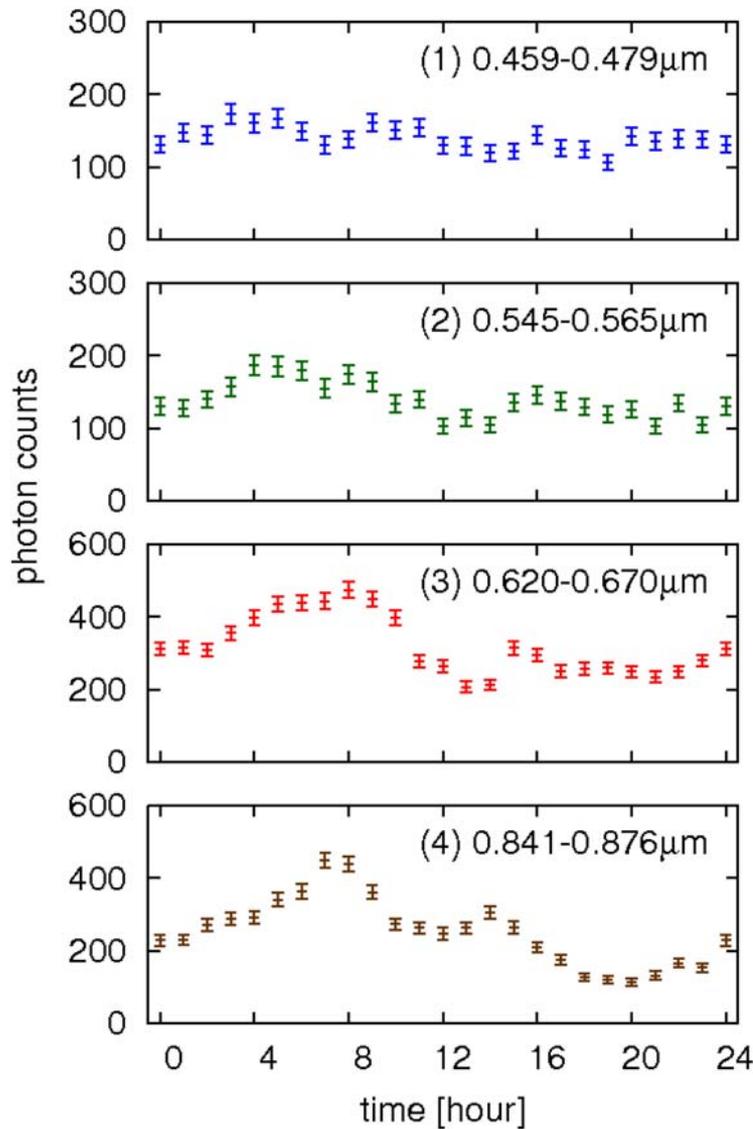
4成分の反射率と大気の効果



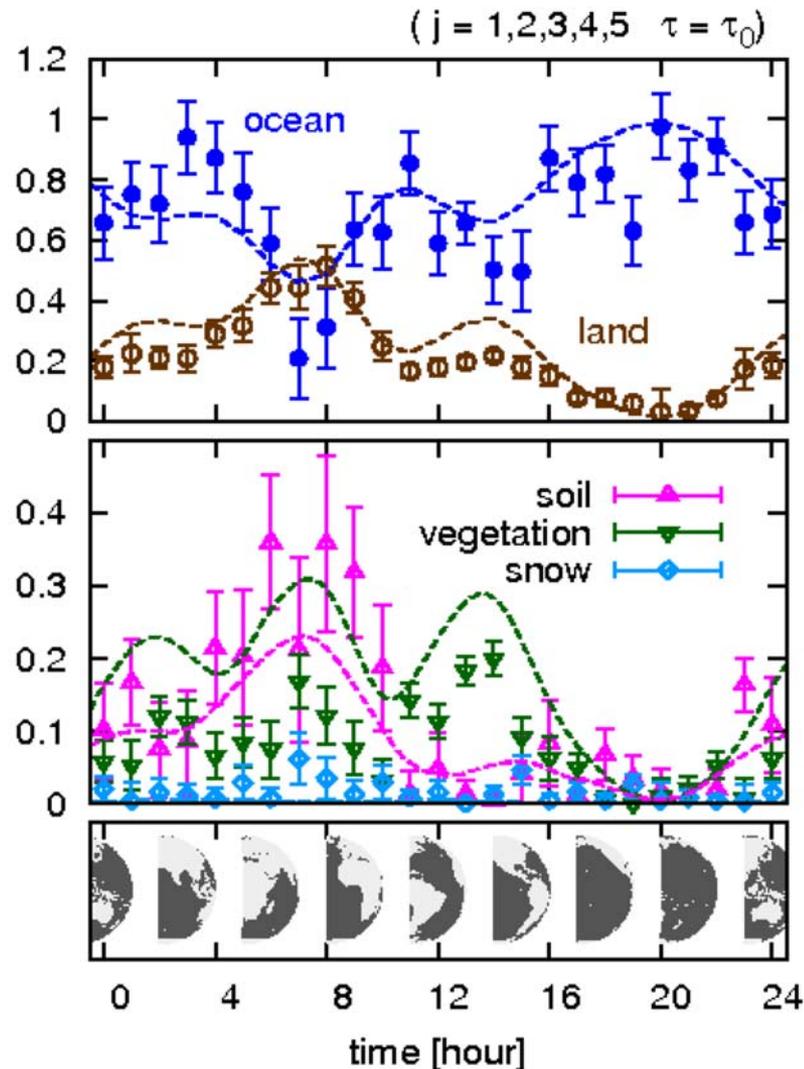
$$\tau_R(\lambda) = \tau_0 \left(\frac{P}{1013[\text{hPa}]} \right) \left(\frac{\lambda}{1[\mu\text{m}]} \right)^{-4}$$

- 大気によるアルベドの波長依存性が重要

模擬光度曲線



第二の地球の色から表面積を推定



- 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!**
- space.comでとりあげられる
- 実は宇宙論と同じ思想!

Fujii et al. (2010)

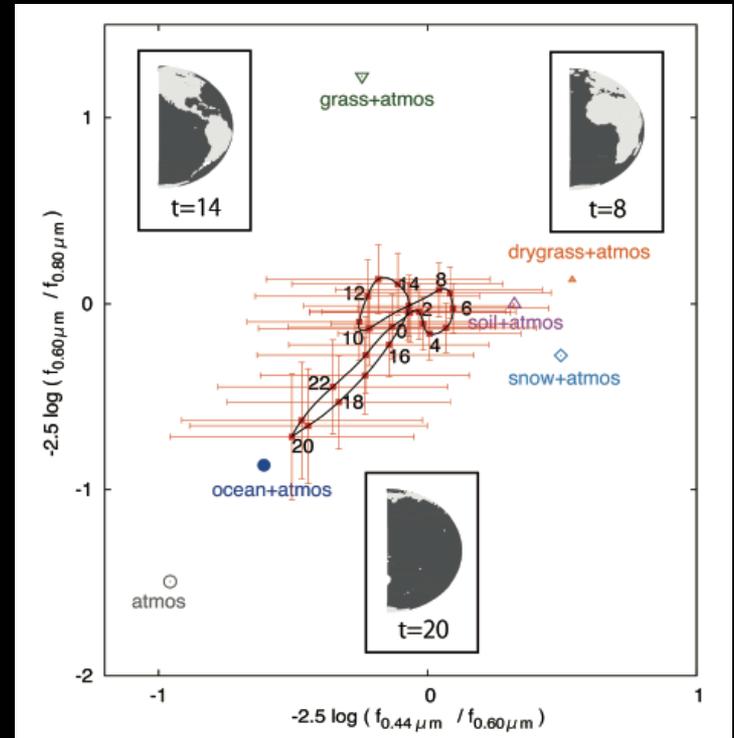
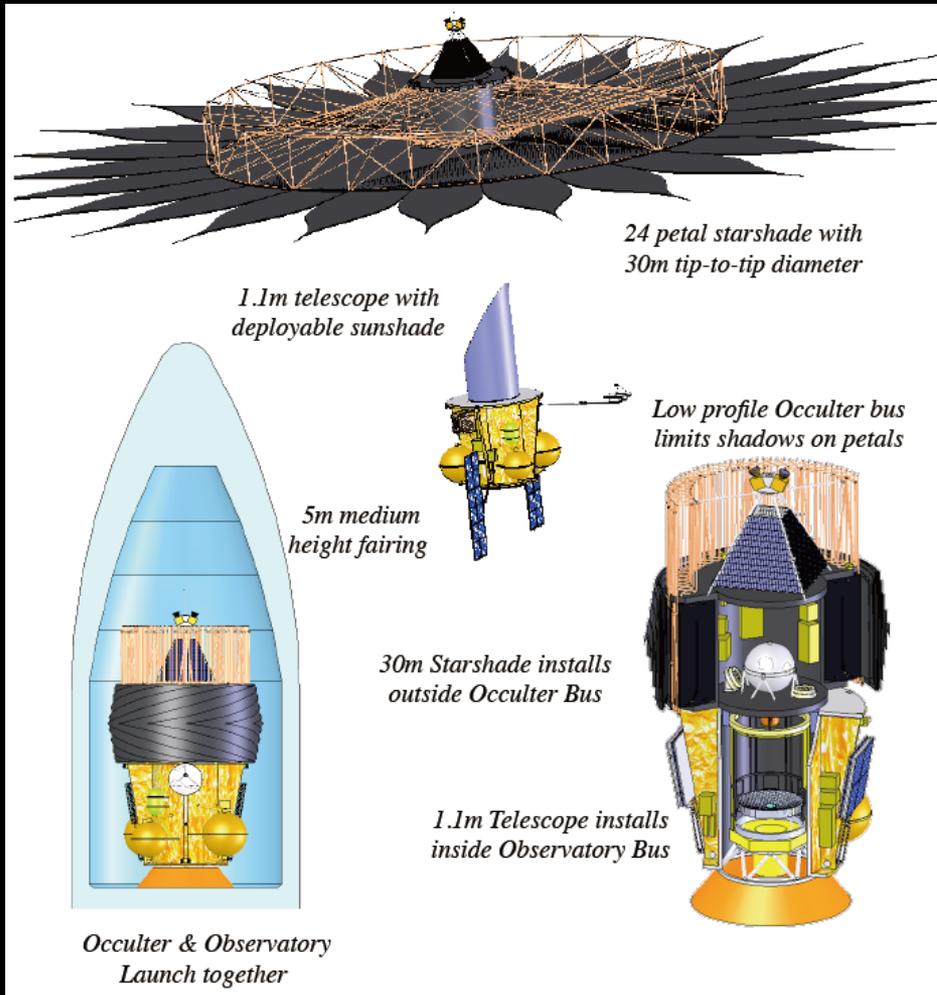
O₃: The Occulting Ozone Observatory



O₃: The Occulting Ozone Observatory

N. Jeremy Kasdin¹, David N. Spergel¹, P. Doug Lisman², Stuart B. Shaklan², Dmitry Savransky¹, Eric Cady¹, Edwin L. Turner¹, Robert Vanderbei¹, Mark W. Thomson², Stefan R. Martin², K. Balasubramanian², Steven H. Pravdo², Yuka Fujii³, Yasushi Suto³

¹Princeton University, ²Jet Propulsion Laboratory, ³University of Tokyo



■ プリンストン大学で検討中の衛星計画

改善・応用すべき問題が山積！

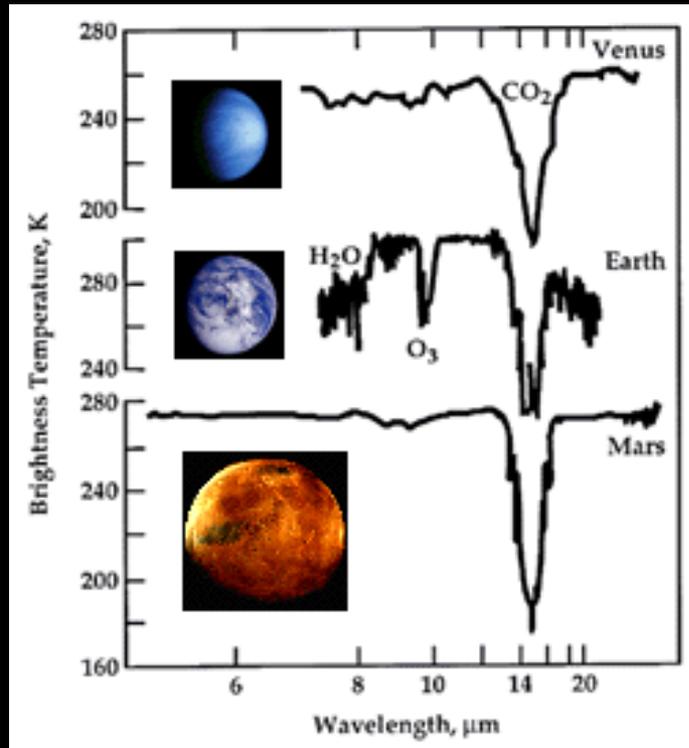
■ シミュレーションモデルの改善

- 雲の効果
- レイリー散乱の高次効果
- 大気中の分子の吸収線
- 波長域を赤外まで拡張

■ 観測対象・目的の拡大

- 実際の地球や太陽系惑星の観測データに適用
- 季節変動や自転周期の精密解析から自転軸傾斜角を推定
- 過去の地球のシミュレーションデータ
- スノーボールアース・海惑星・陸惑星は検出できるか
- 中心星のスペクトル型や公転半径に対する植物のレッドエッジの波長依存性を検出できるか

太陽系外惑星から宇宙生物学へ: (トンデモ・SFから真面目な科学へ)



- 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、植物、、
- 超精密測光・分光観測が鍵！
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを
中心星から分離する
- もはやトンデモでもSFでもない！

今まで知らなかった世界をやがて発見してしまうのか？
「やはり我々は何も知らなかった」とつぶやくことになるか？