

第2の地球の色



金沢大学
理工研究域数物科学系
物理学科
宇宙物理学研究室セミナー
2009年8月27日

Terra衛星MODIS検出器のデータより
<http://modarch.gsfc.nasa.gov/>
<http://www.nasa.gov/home/index.html>

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻
須藤 靖

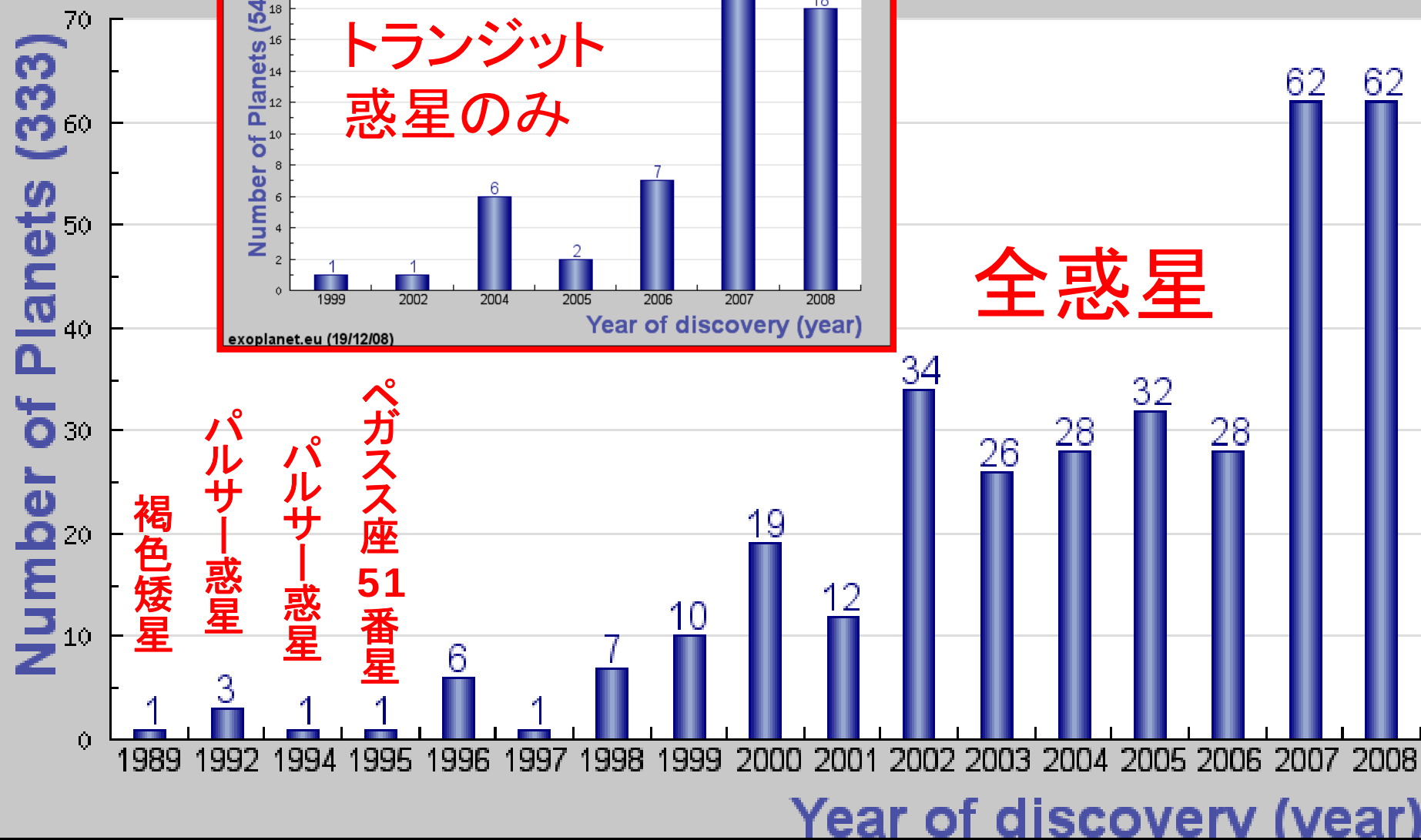
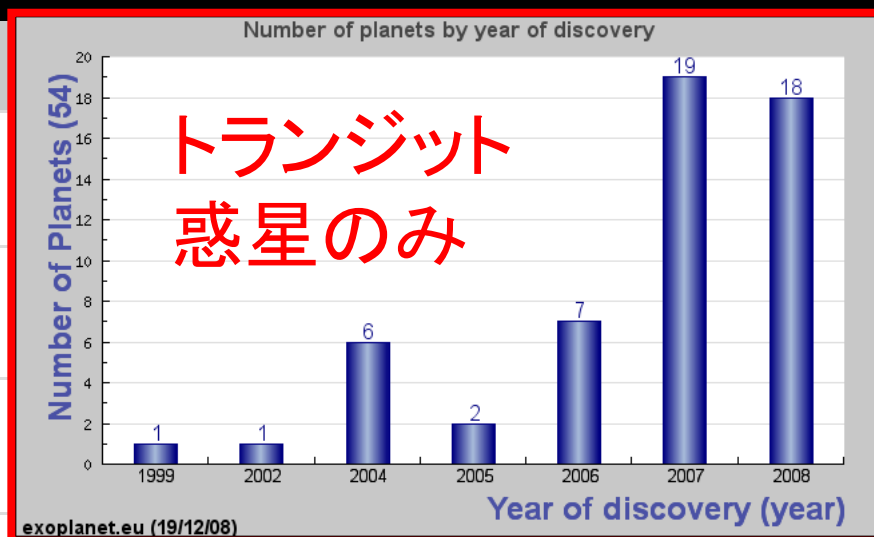
第2の地球？



- 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MODIS検出器のデータより
<http://modarch.gsfc.nasa.gov/>
<http://www.nasa.gov/home/index.html>

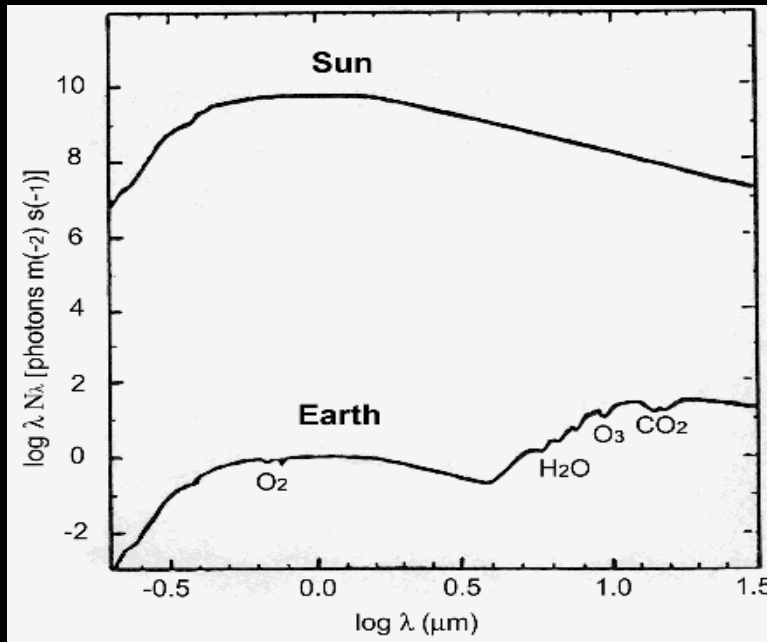
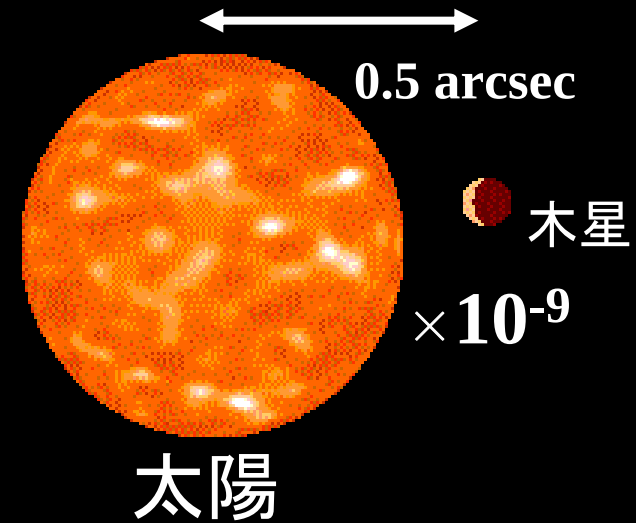
太陽系外惑星（候補）の発見年表



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

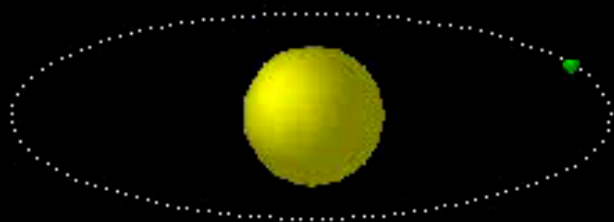


地上から観測できる分解能の大きさ内で、9桁も明るい主星の隣にある27等級の暗い天体を検出する

⇒ ほとんど不可能！

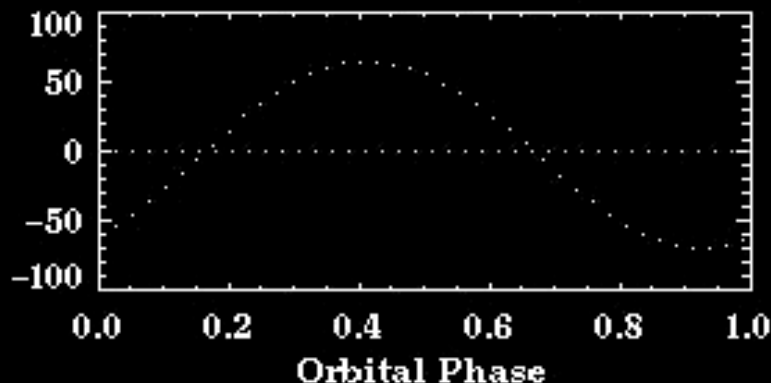
どうやって見つけたのか？

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]



S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

■ ドップラー法

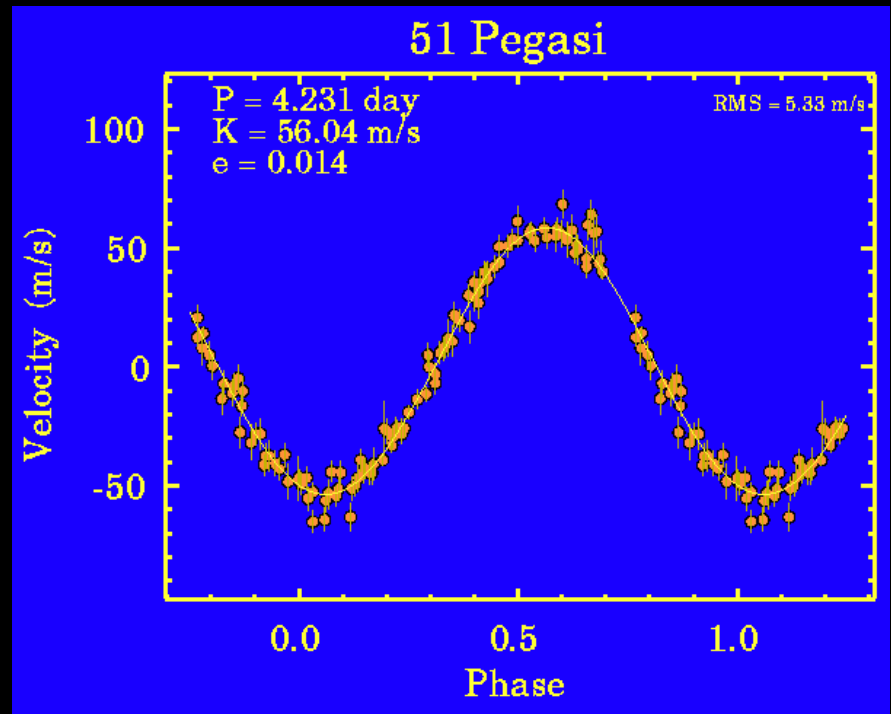
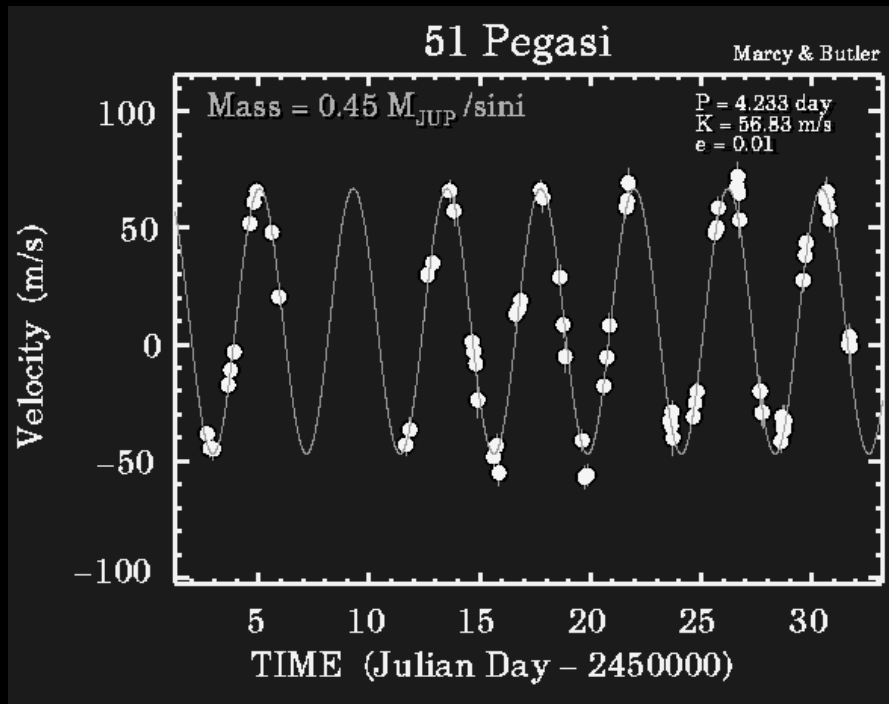
- 中心星の速度が毎秒数十メートル周期的に変動

■ 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によって星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

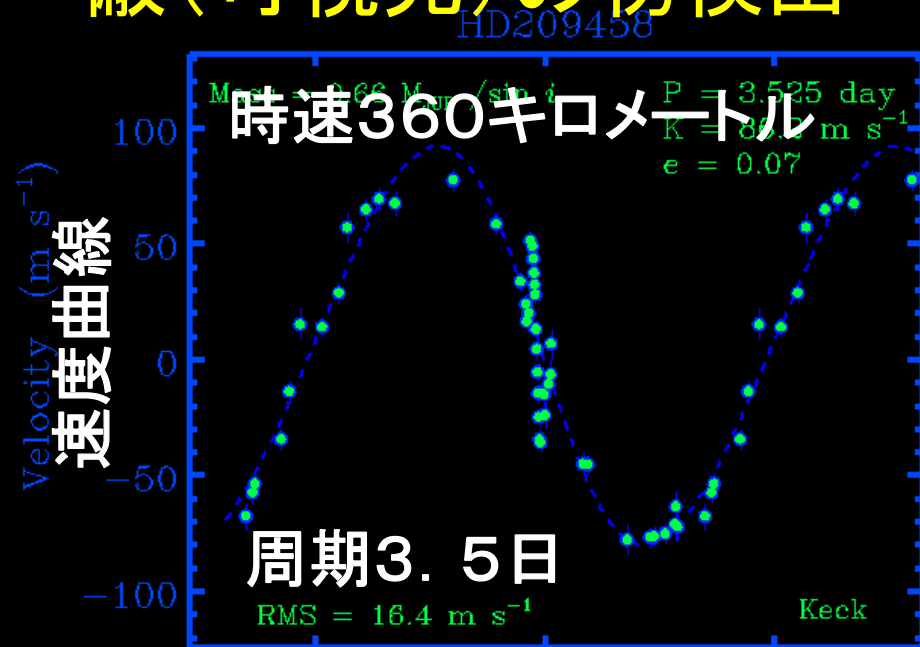
ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！



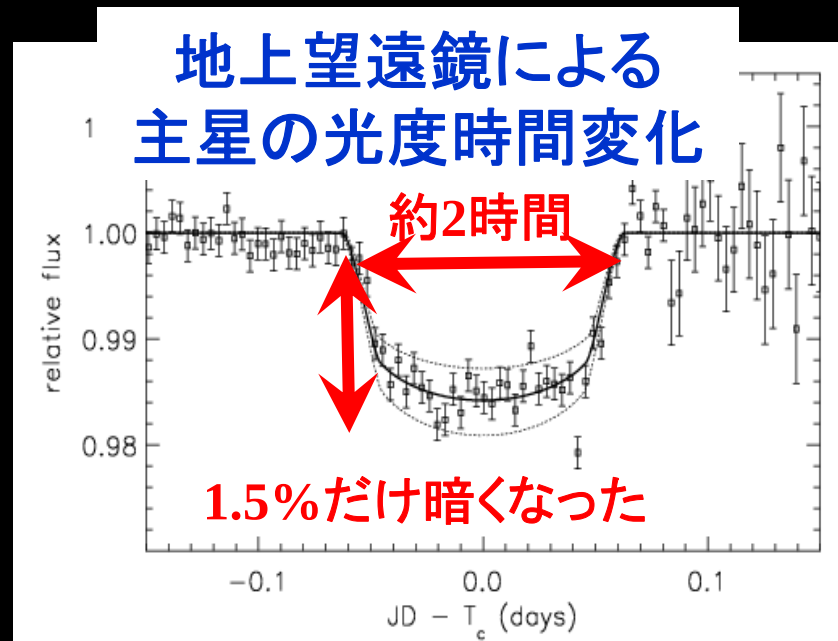
初めてのトランジット惑星HD209458b

- 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



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)

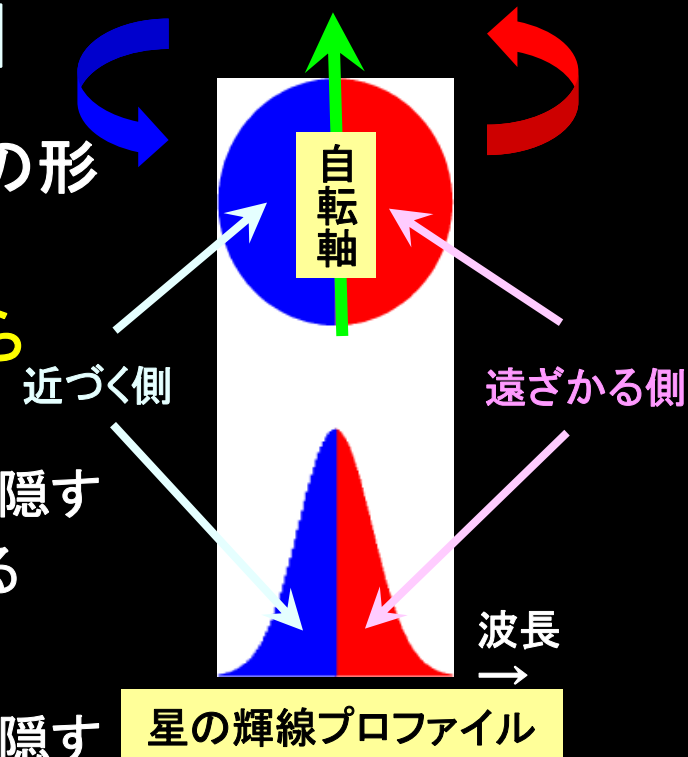


すでに学んだこと

- 惑星(系)は稀なものでなく普遍的存在
 - G型星の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
- 様々な間接的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)、重力レンズ(高時間分解能測光)

ロシター効果と惑星公転軸

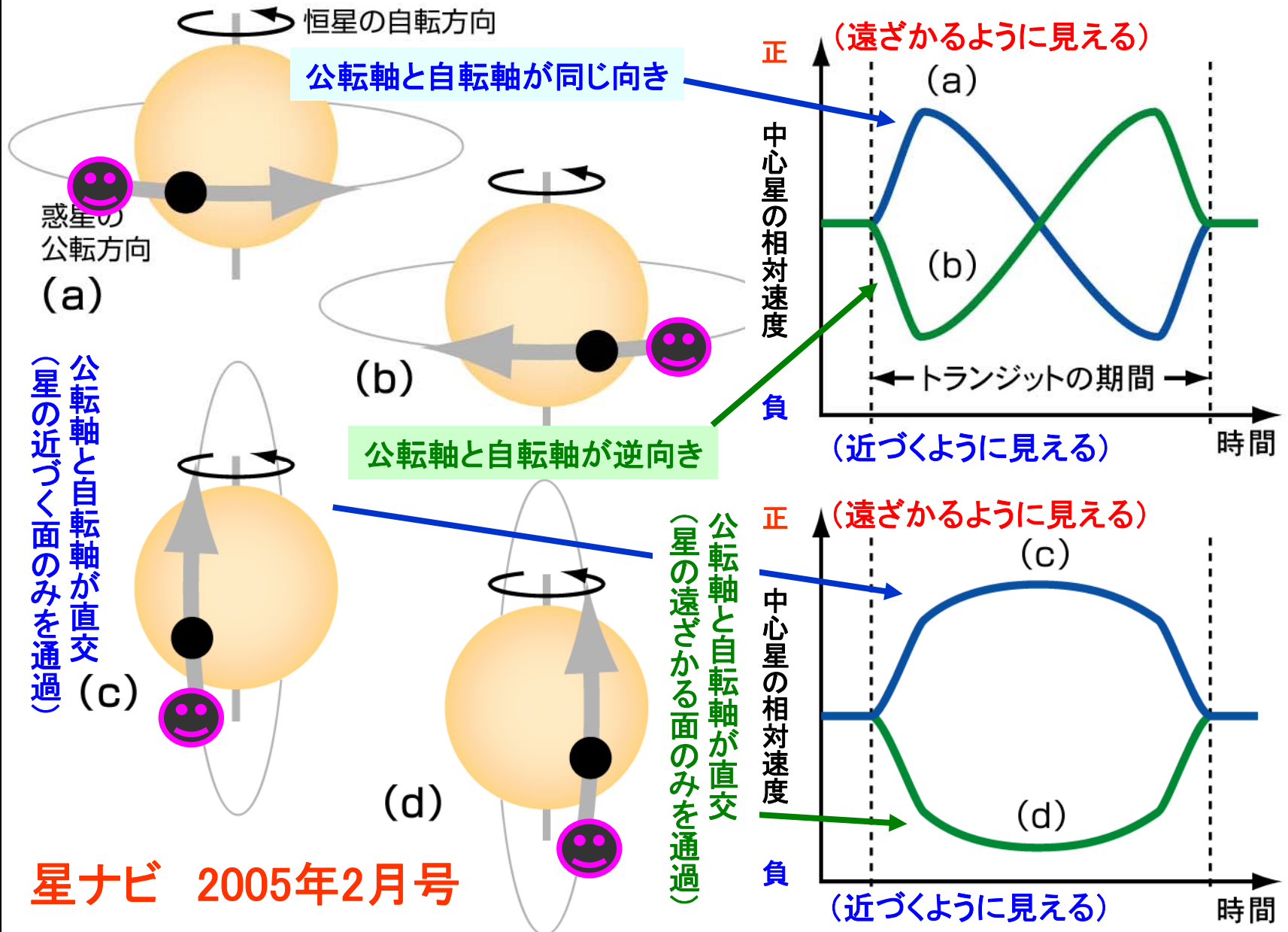
- 中心星の自転のため、星の線スペクトルの形は波長に関して左右対称に広がっている
- しかし、**トランジット惑星が同じ向き(左から右)に通過すると**
 - 中心星の近づく面を隠してから遠ざかる面を隠す
 - 星は、まず遠ざかりその後近づくように見える
- 一方、**逆周り(右から左)の場合には**
 - 中心星の遠ざかる面を隠してから近づく面を隠す
 - 星は、まず近づきその後遠ざかるように見える
- **この結果、線スペクトルの形に非対称性が生まれる**
 - この波長のズレを精密に観測すれば、惑星が右回りか左回りかがわかる
 - さらに詳しく解析すると、惑星の公転面の傾きの角度までわかる！



1924年、食連星　こと座ベータ星の速度データの解析に際してロシターが発見した

R.A. Rossiter:
ApJ 60(1924)15

惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図



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

周縁減光則

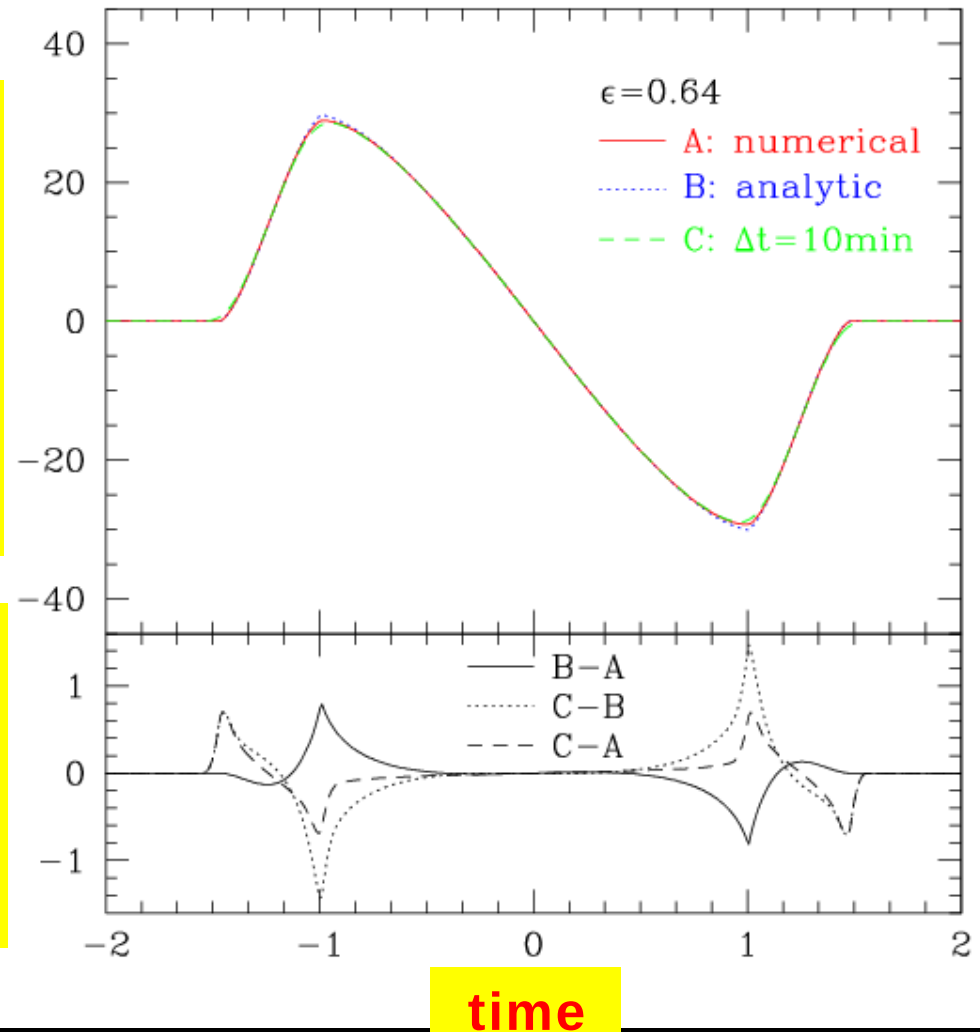
$$B = 1 - \epsilon (1 - \cos \theta)$$

を仮定

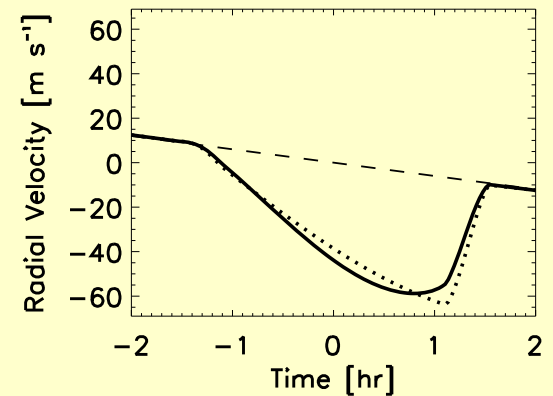
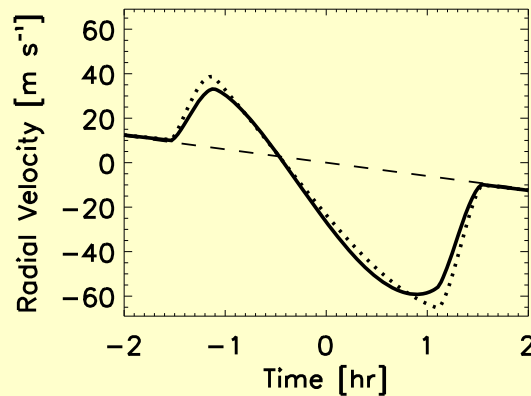
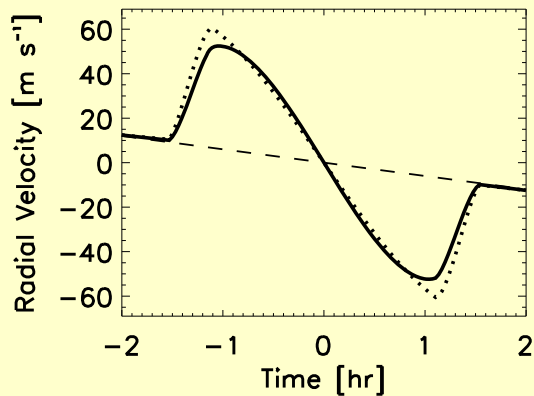
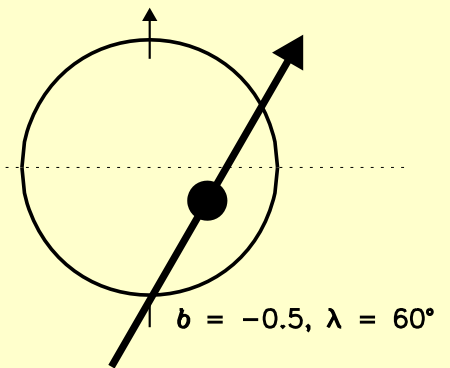
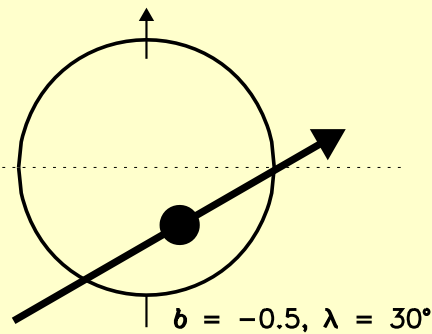
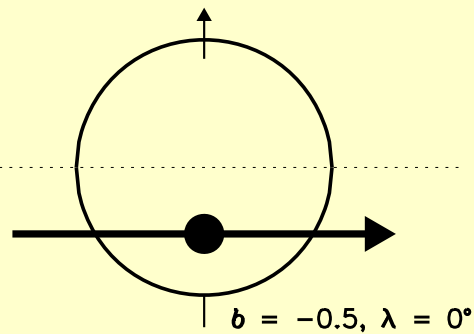
Ohta, Taruya & Suto:
ApJ 622(2005)1118

速度変動 [m/s]

残差 [m/s]



ロシター効果と λ の関係



Gaudi & Winn (2007)

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

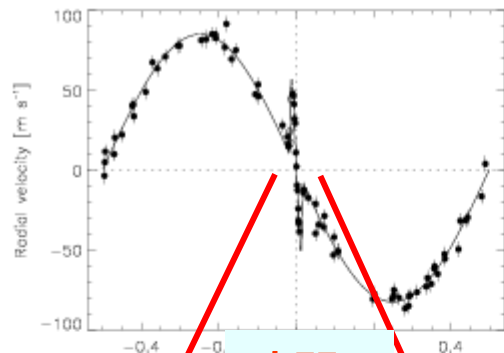
Received 2004 October 13; accepted 2004 December 10

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 .

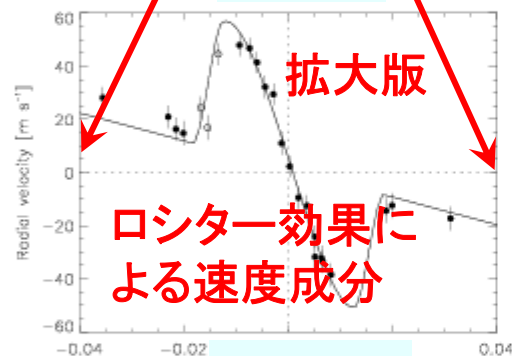
We also note that the future satellites *COROT* and *Kepler* will detect numerous transiting planetary systems, most of which will be important targets for the RM effect in 8–10 m class ground-based telescopes. We hope that our analytic formulae presented here will be a useful template in estimating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

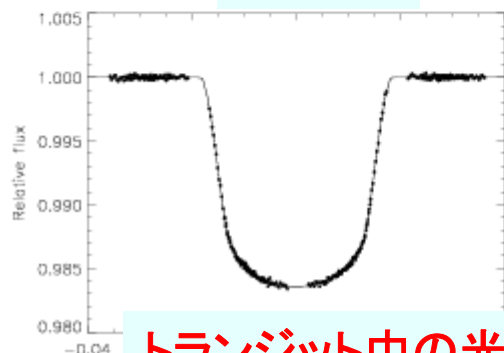
中心星の視線速度



時間

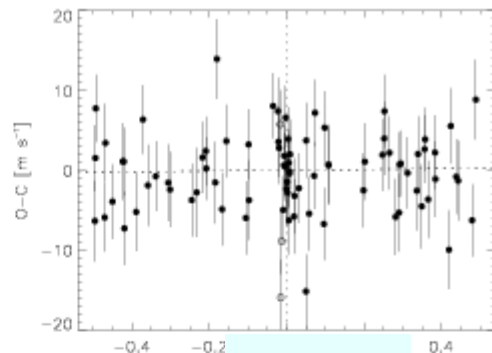


時間

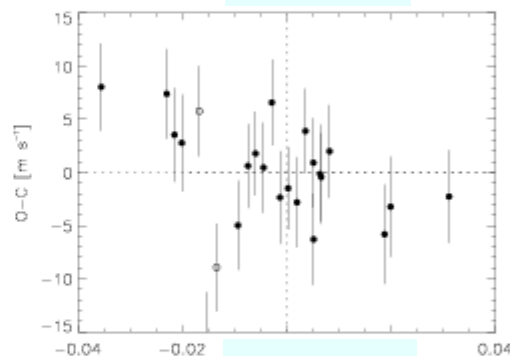


トランジット中の光度曲線 (ハッブル望遠鏡)

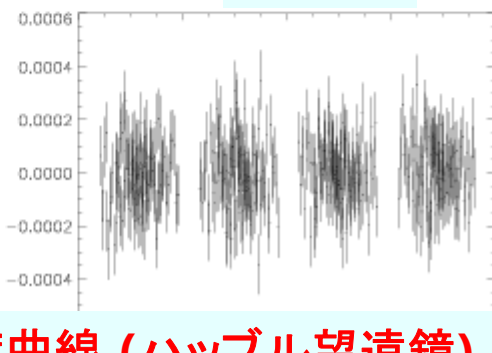
データとベストフィットの残差



時間

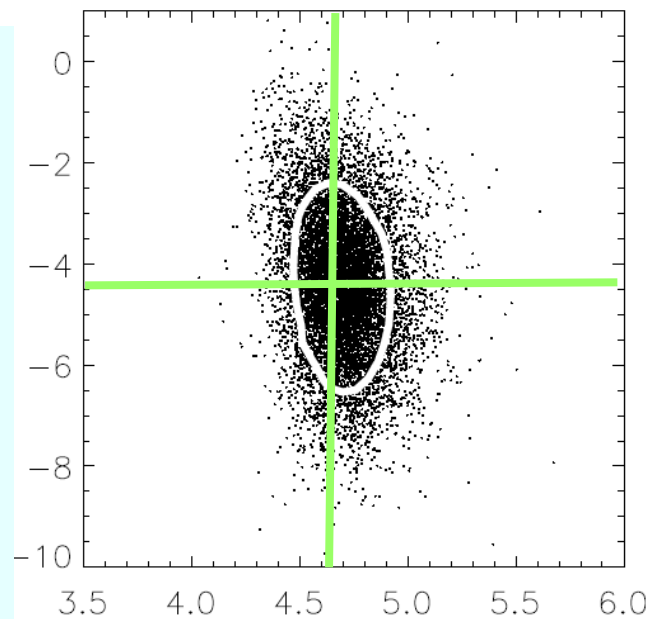


時間



解析結果

自転軸と公転軸のなす角 [度]



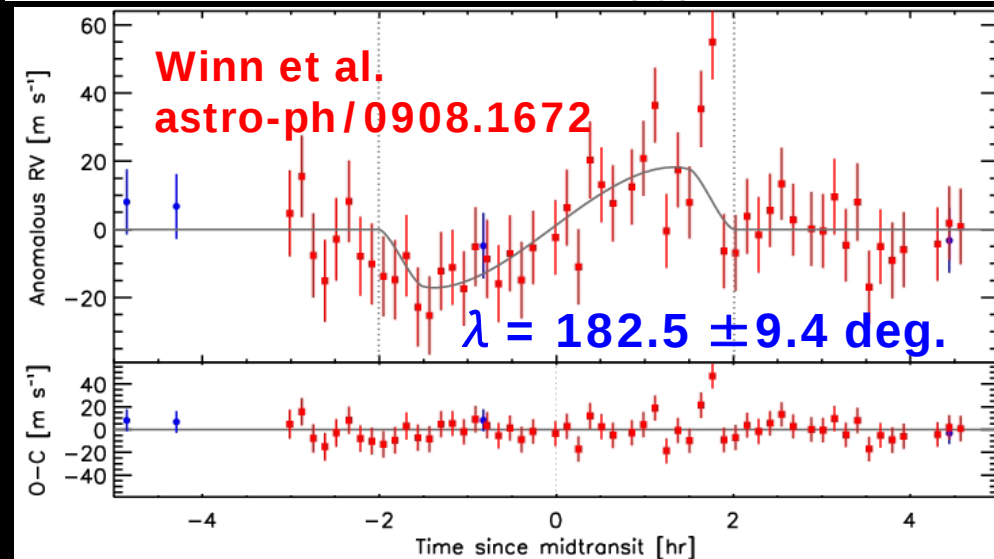
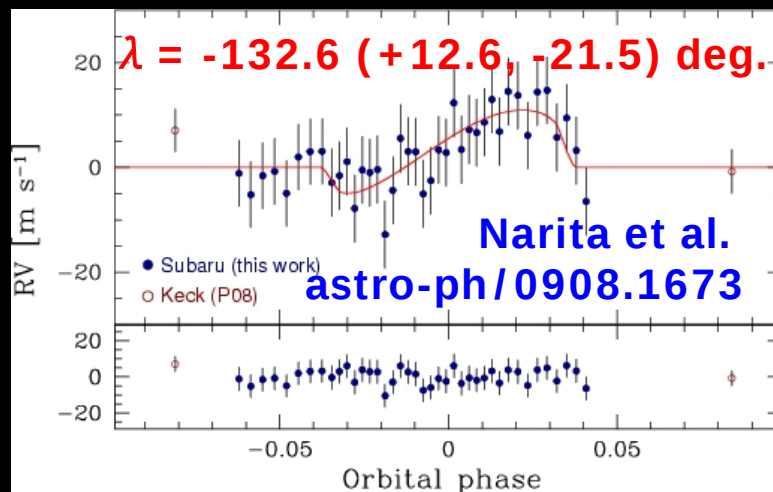
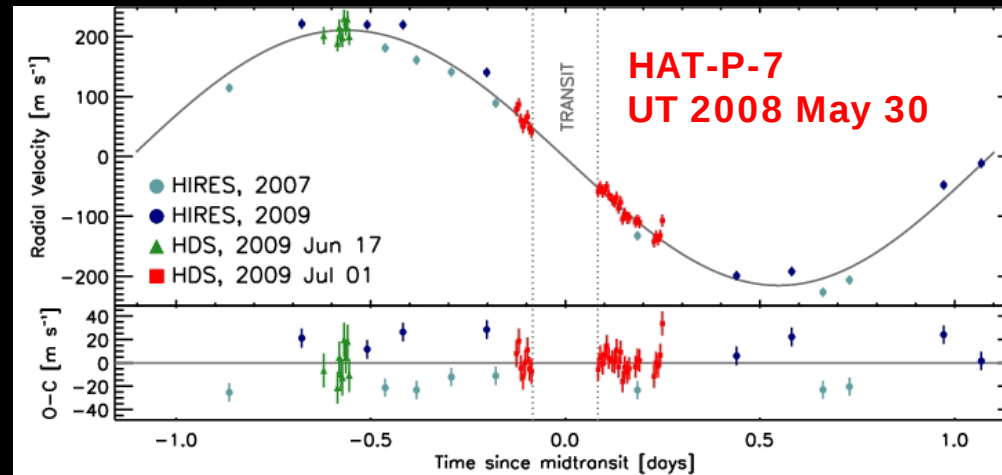
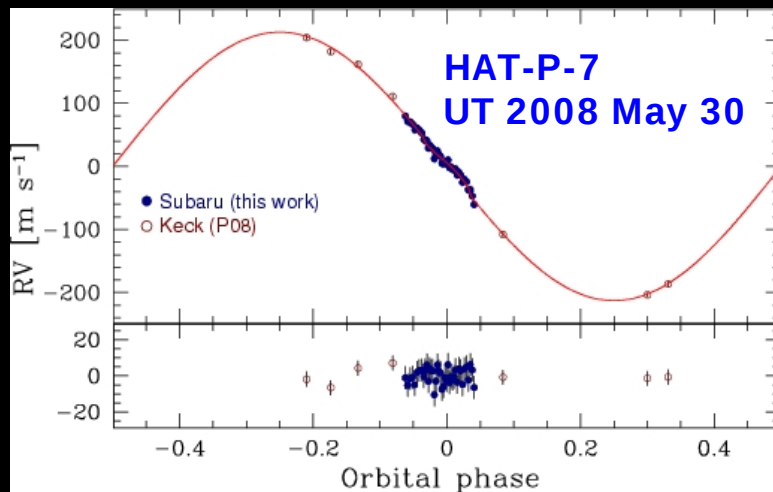
中心星の自転速度 [km/s]

$$\lambda = -4.4 \pm 1.4$$

わずかではあるが有意に0からずれている！

Winn et al. astro-ph/0504555 ApJ 631(2005)1215

逆行する系外惑星(HAT-P-7)の発見

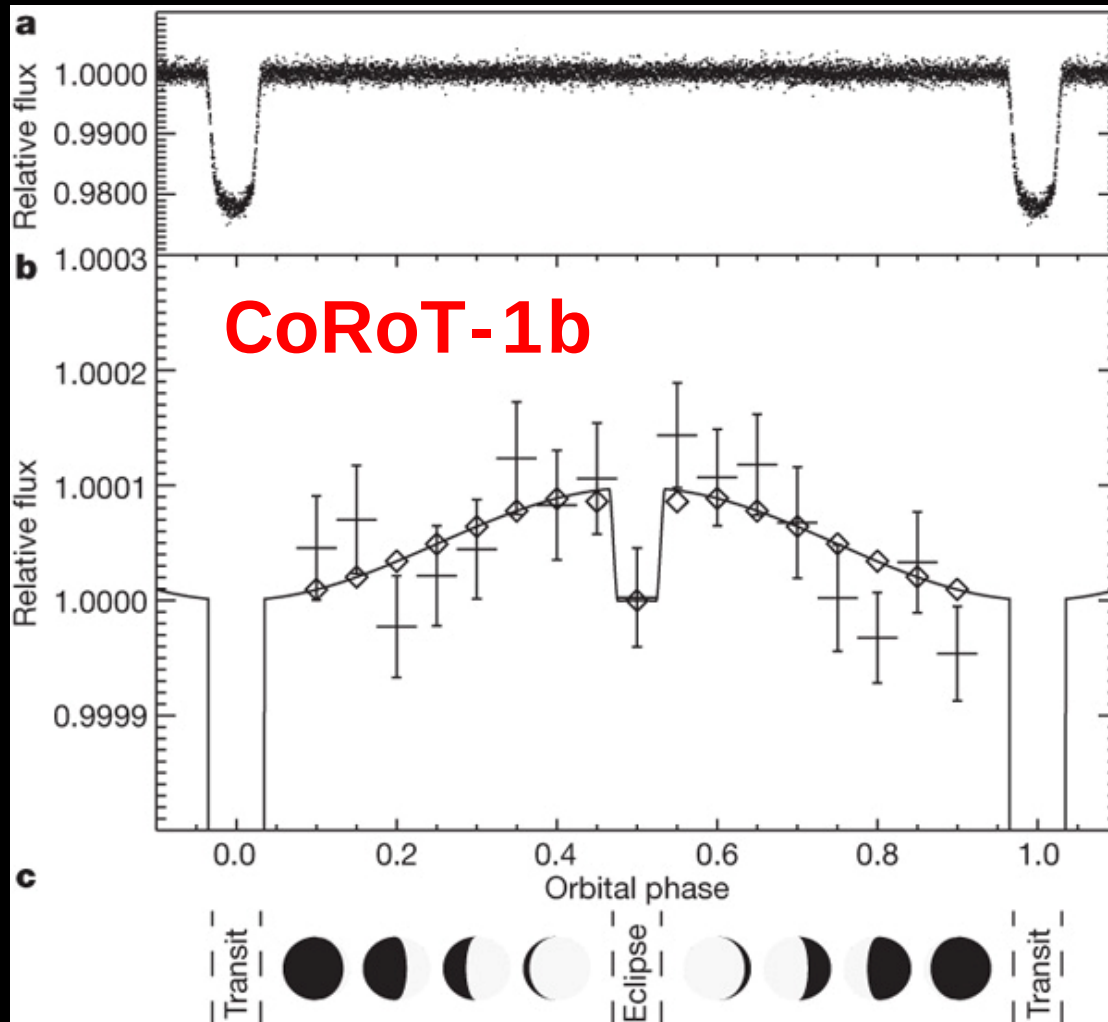


- すばる望遠鏡の成果
- 起源は謎、惑星形成・進化モデルに大きなインパクト

近い将来の観測的マイルストーン

- 地球型惑星の発見(精密測光・分光)
- ハビタブルゾーンにある惑星の発見
- 複数の惑星がトランジットする惑星系の発見
- 系外惑星の衛星の発見(トランジット時刻の残差)
- 系外惑星のリングの発見(トランジット時の精密測光・分光)

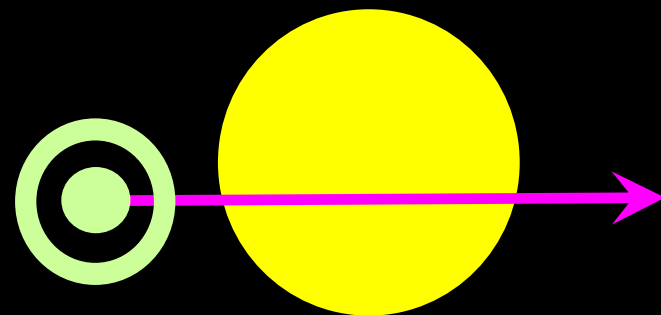
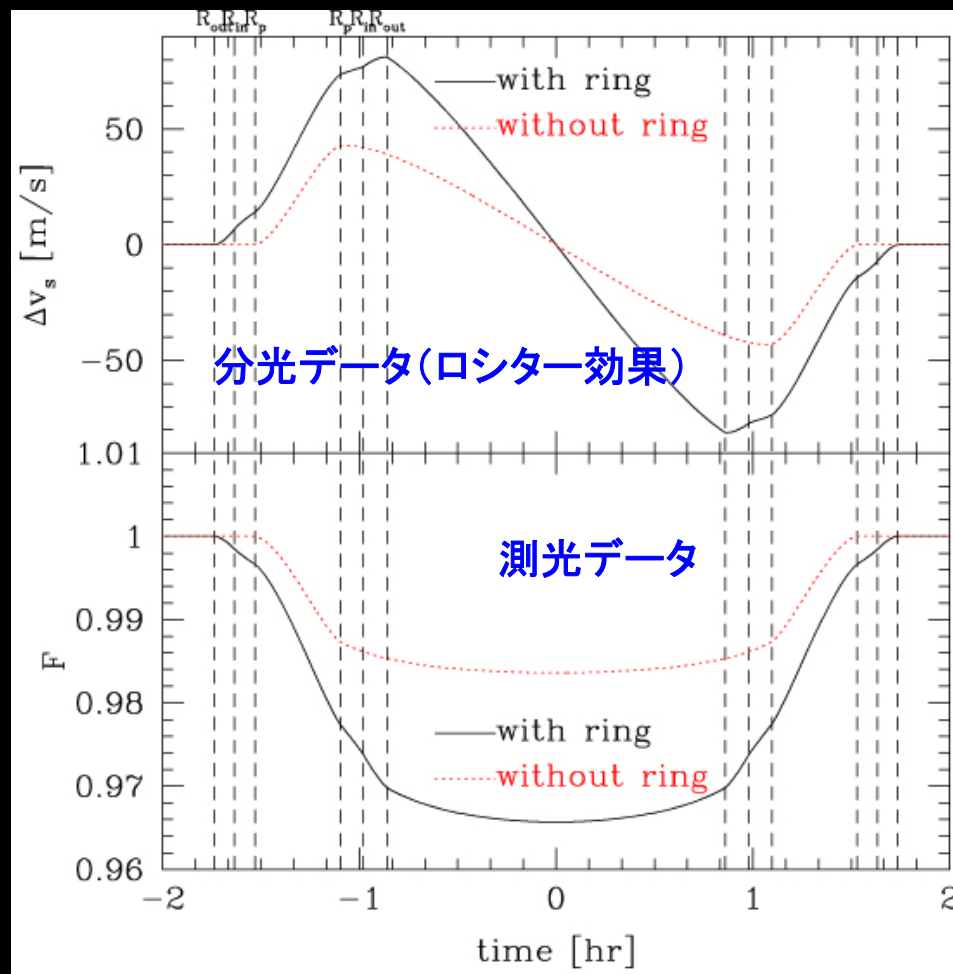
CoRoT-1bの反射光の検出



- 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
 - $0.02 < \text{albedo} < 0.2$

Snellen, de Mooij & Albrecht: Nature 459(2009)543

惑星リング存在の兆候を探れるか？



- リングの外径・内径、間隙、惑星本体の通過時に不連続な変化
- リングなしでフィットしたモデルとの残差を統計解析

Ohta, Taruya & Suto ApJ 690(2009)1

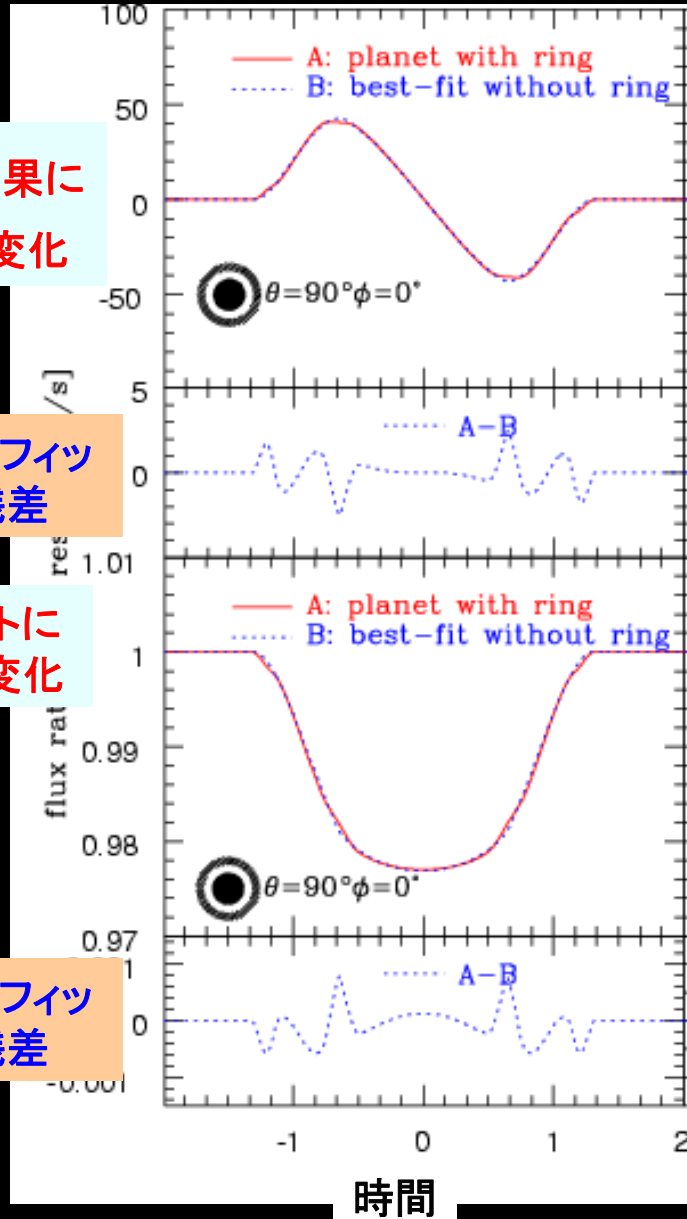
系外惑星リングの検出可能性

ロスター効果による速度変化

リングなしフィットとの残差

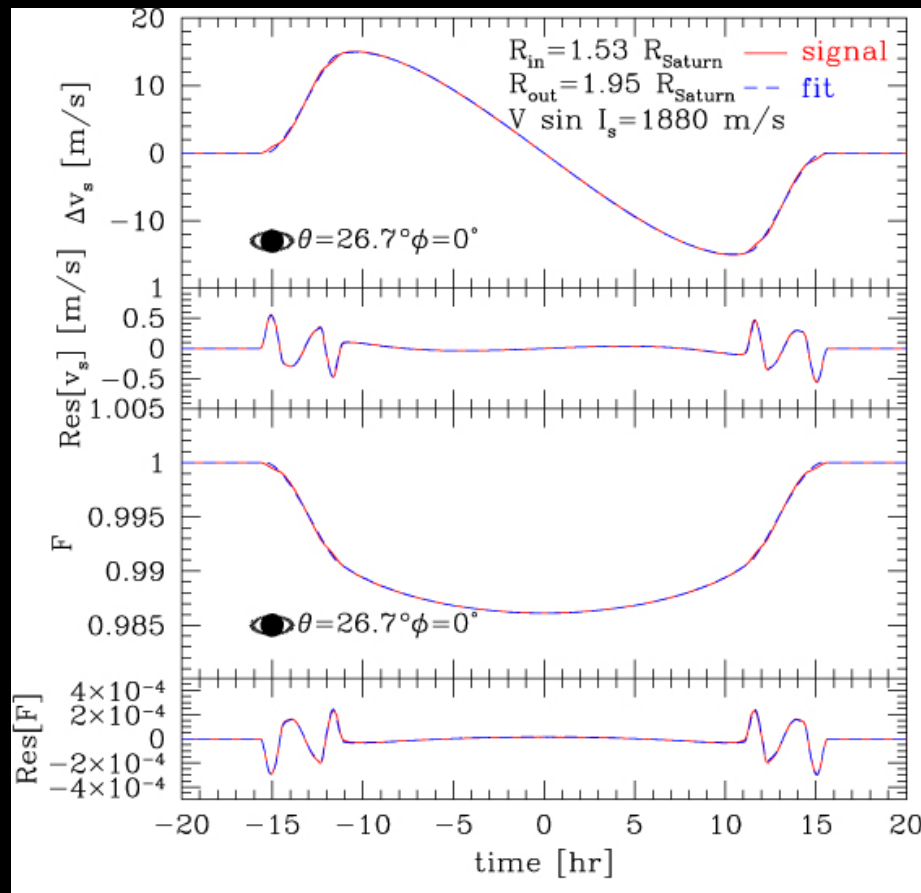
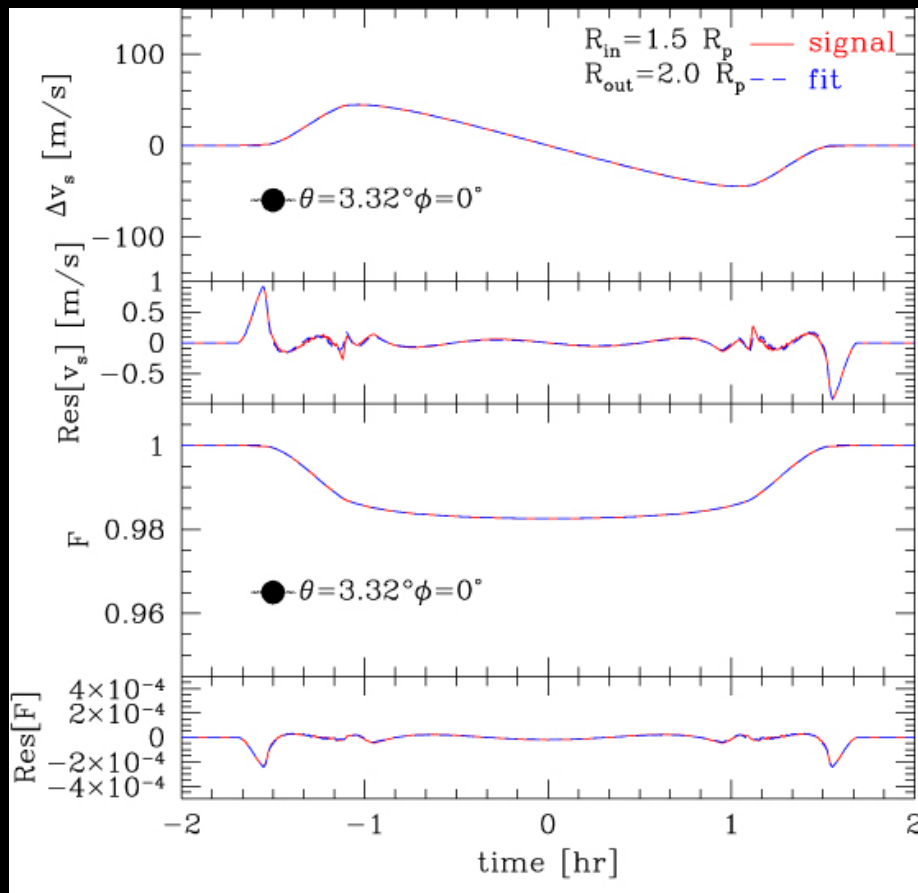
トランジットによる光度変化

リングなしフィットとの残差



- トランジット惑星系HD209458がリングを持つと仮定
 - 惑星半径: $R_{\text{惑星}}$
 - リング内径: $1.5R_{\text{惑星}}$
 - リング外径: $2R_{\text{惑星}}$
- リングがないモデルとのズレ
 - 速度: 数m/s程度
 - 光度変化: 0.1パーセント程度
- ほとんど現在の測定精度のレベル！
- もし本当に存在していれば近い将来検出できるかも

HD209458bと土星の場合どう見える？

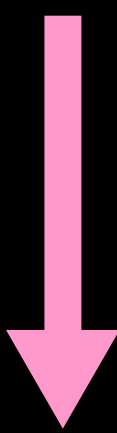


■ 「もしリングがあれば」何とか検出可能 (S/N=3)

Ohta, Taruya & Suto ApJ 690(2009)1

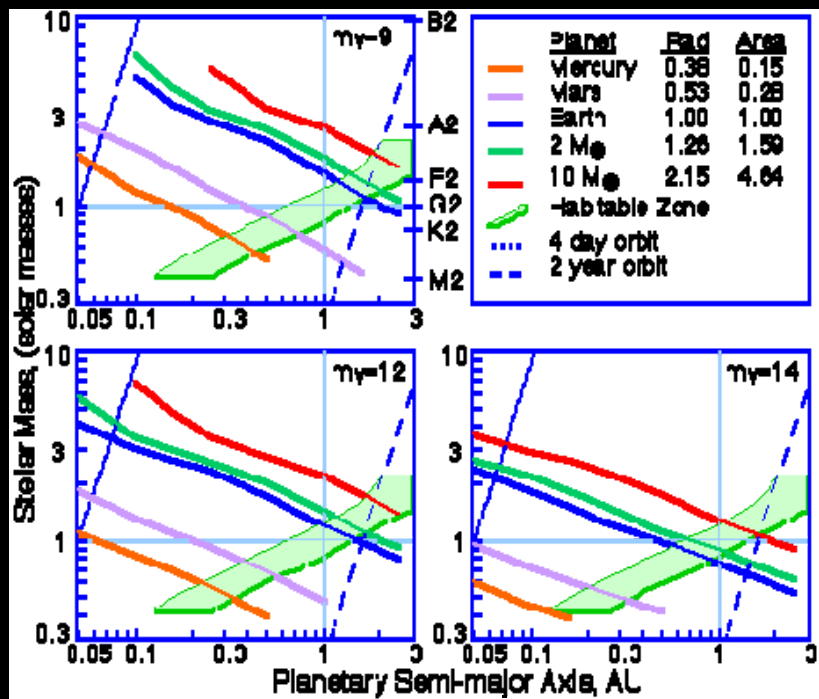
系外惑星研究: その次

- 巨大ガス惑星発見の時代 (1995)
 - 惑星大気の見 (2002)
 - 惑星赤外線輻射の検出 (2005)
 - 惑星可視域反射光の検出 (2009)
-

- 
- 系外惑星リング、衛星の見
 - 地球型惑星、居住可能惑星の見
 - 惑星の直接検出(測光 & 分光)
 - バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定
 - 地球外生命の見
-

ケプラー衛星 (米国2009年3月6日打ち上げ)

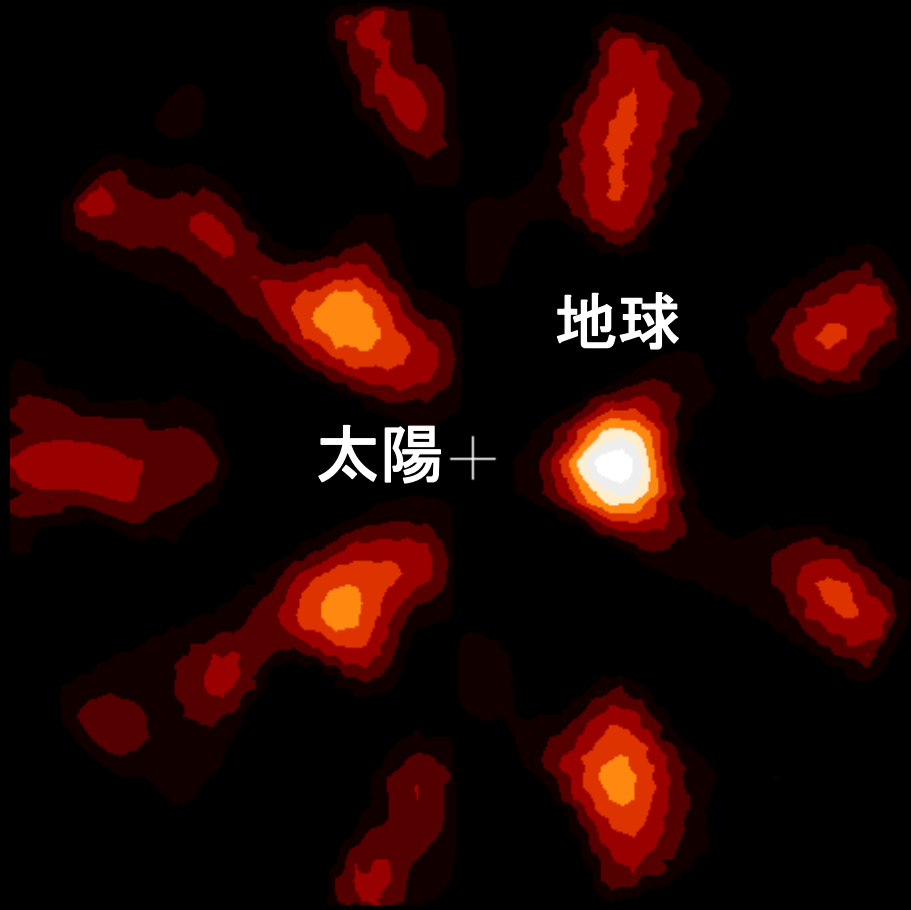
トランジット惑星の測光サーベイ:
3.5年かけて地球型(±ハビタブル)惑星の発見をめざす



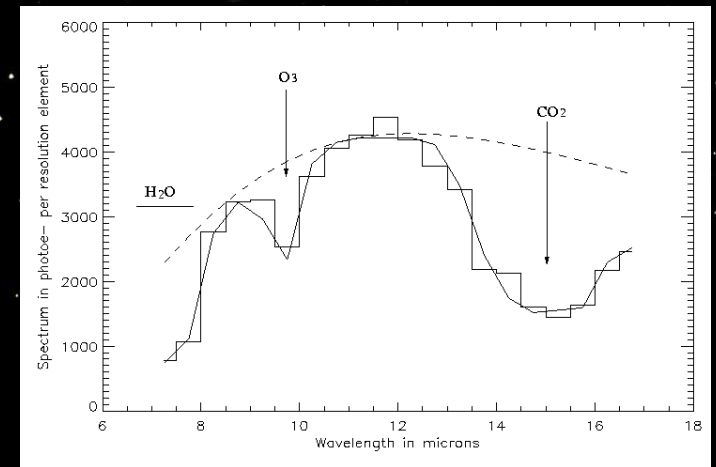
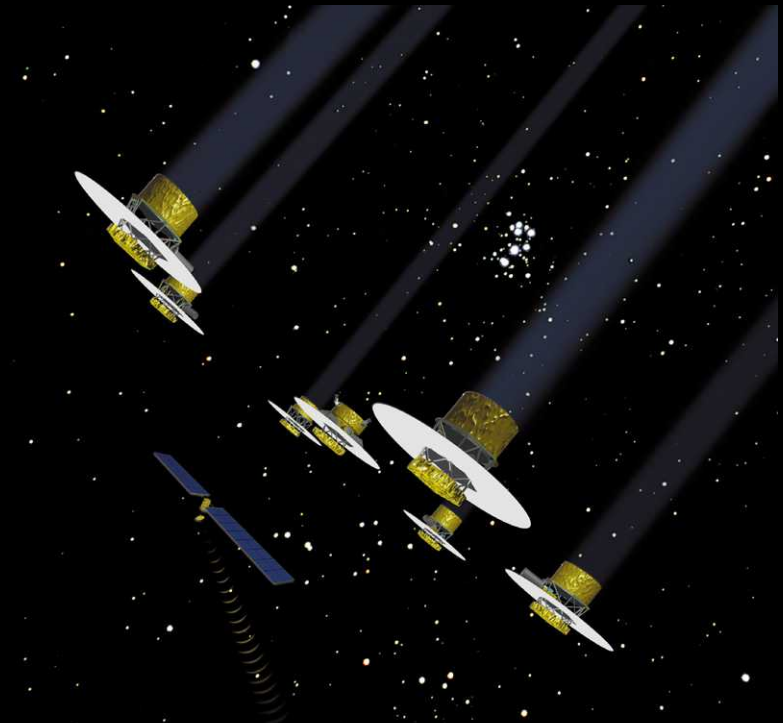
<http://kepler.nasa.gov/>

ダーウィン衛星

(欧州：キャンセルされた)
赤外線での惑星の直接撮像を目指す

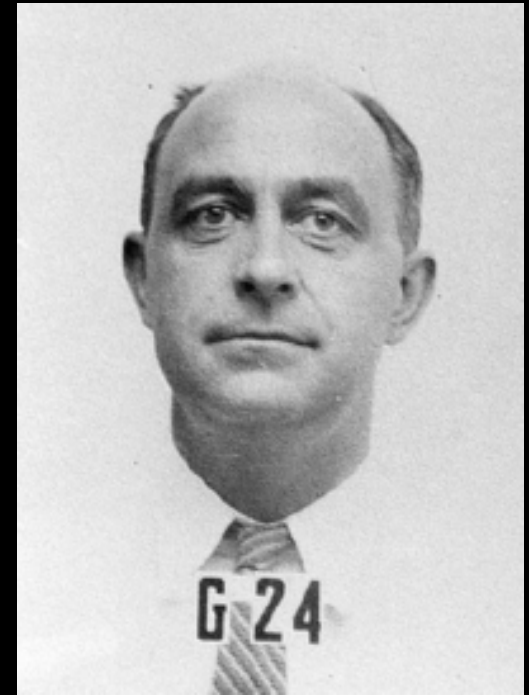


10pc先においた太陽と地球の観測予想図
<http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/>



宇宙赤外線干渉計群
測光・分光観測

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

バイオマーカー（生物存在の証拠）の同定

■（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

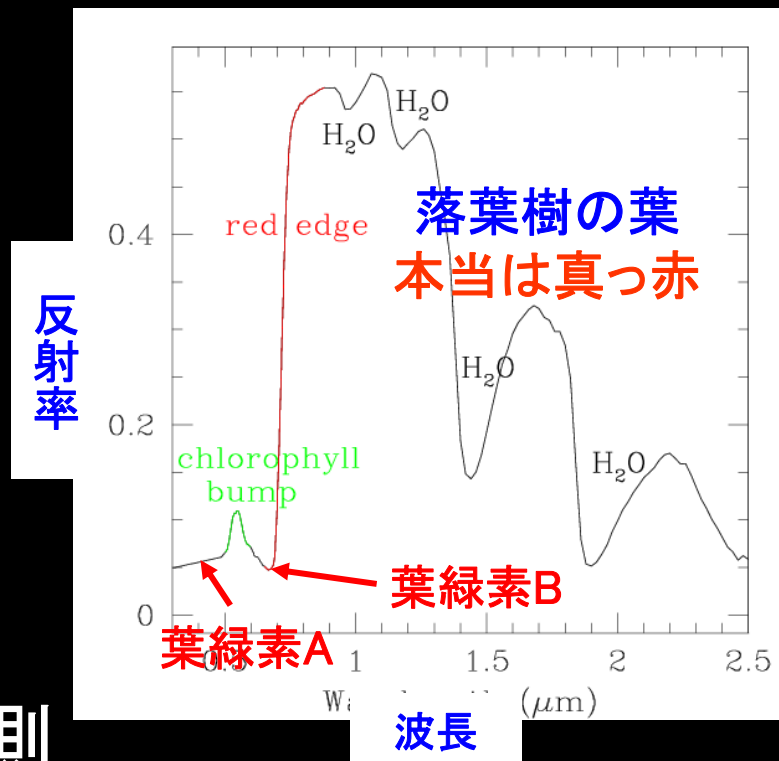
■ Biomarker の探求

■ 酸素、オゾン、水の吸収線

■ 植物の **red edge**

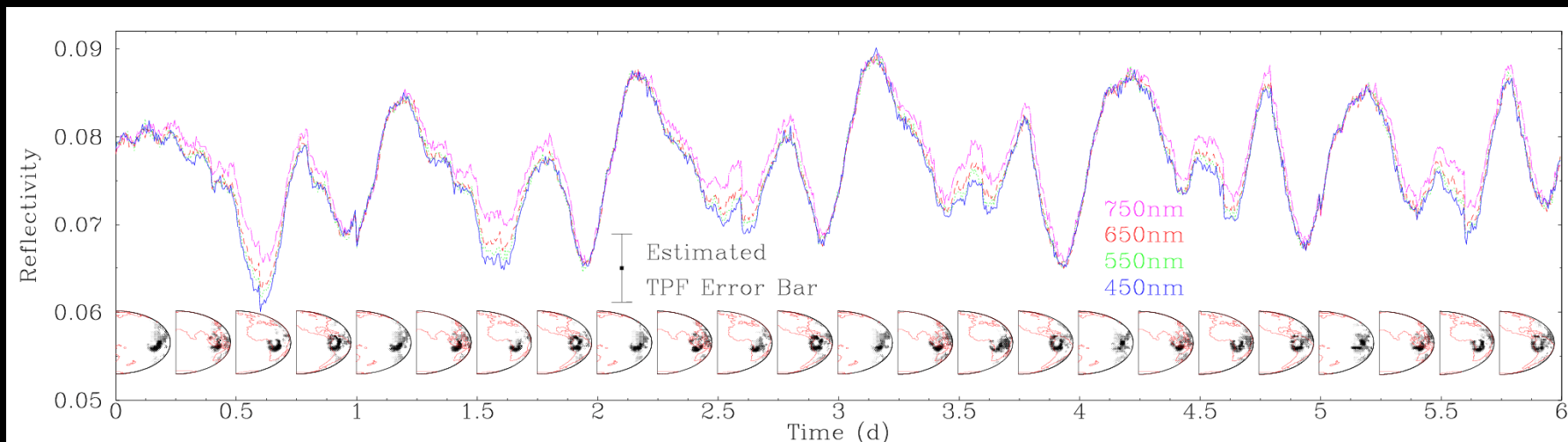
■ *Extrasolar planets from extrasolar plants*

■ とにかく精密測光・分光観測



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

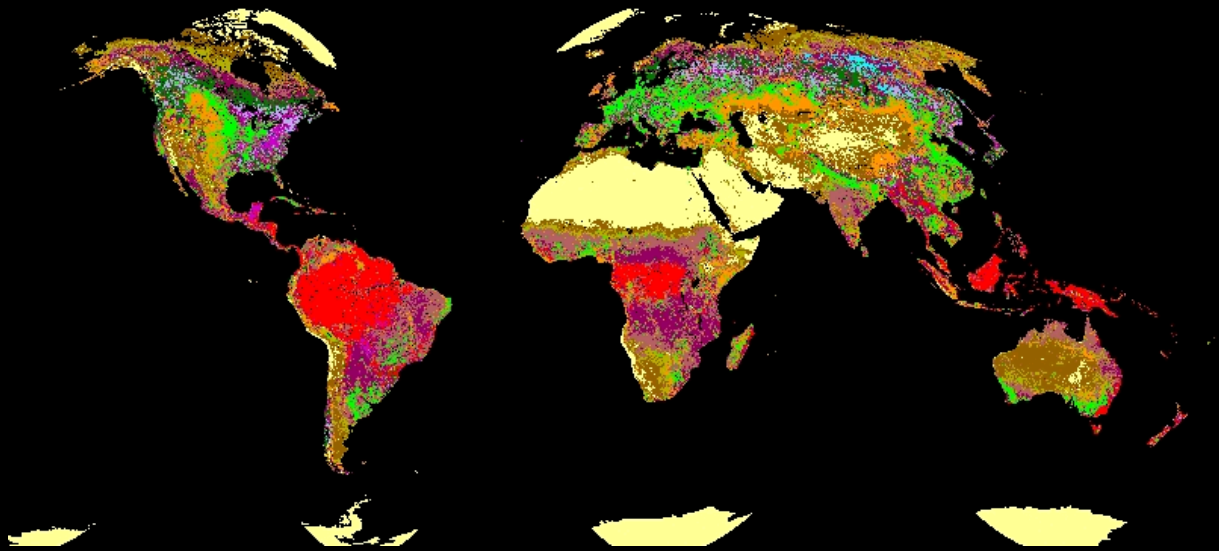
地球が10pc先にあるとして 何がどこまでわかるか？



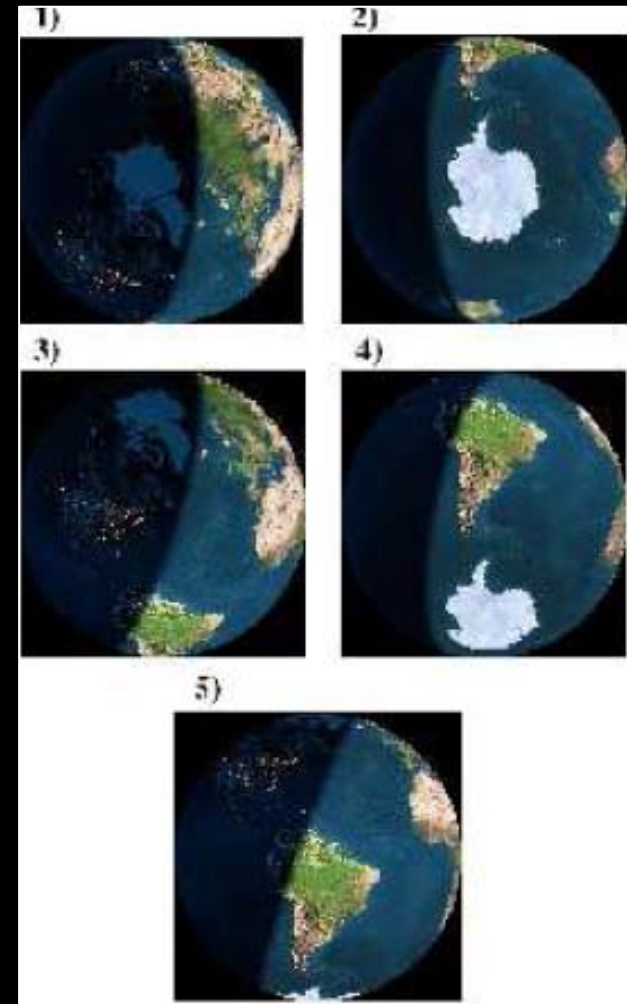
Ford, Seager & Turner : Nature 412 (2001) 885

- **10 %レベルの日変化は検出可能**
 - 大陸、海、植生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！

地球(型惑星)の測光観測シミュレーション



- 実際の地球の表面データを用いた模擬測光観測データを作成
- 時間変動から何を読み取れるかを検討



Palle et al. arXiv:0802.1836

第2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

A pale blue dot

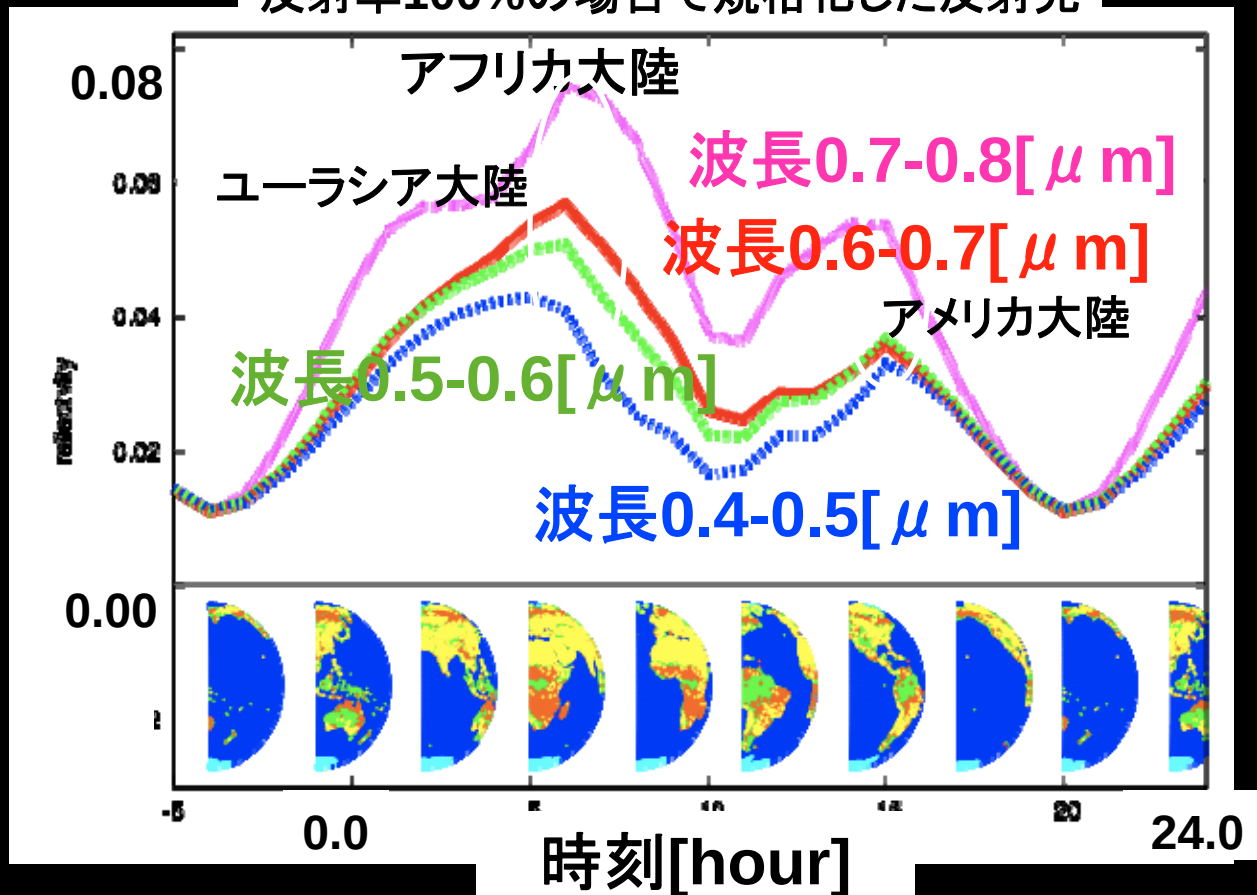


自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

- 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

地球は青かった？

反射率100%の場合で規格化した反射光



Fujii et al. (2009)

第二の地球の色：反射光計算の概略

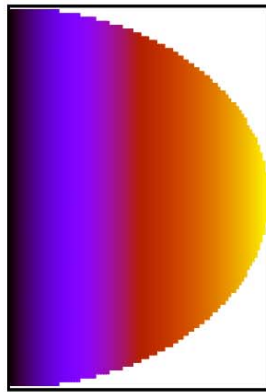
- 地球観測衛星TerraのMODIS検出器の実際のデータを利用して5バンドの模擬光度曲線を作成
 - 陸地： $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ のピクセル毎に決められた反射特性のパラメータ (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) を用いて足し合わせる
 - 海： MODISデータにない海に対してはNakajima & Tanaka (1983)のBRDFモデルを用いて計算
 - 大気の効果としてレイリー散乱の1次までを考慮
 - 24時間周期で自転させる

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、氷)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2mの宇宙望遠鏡で2週間観測(各位相で1時間露出x14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
 - 2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

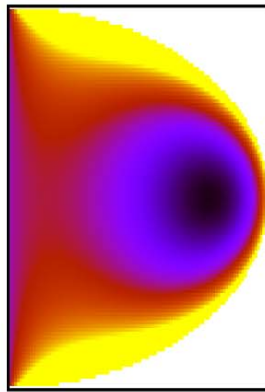
BRDFの反射特性

isotropic



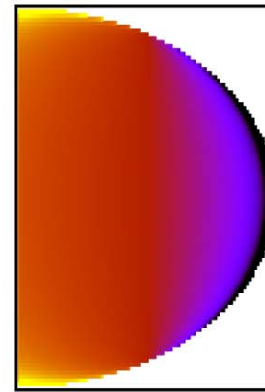
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0

volume



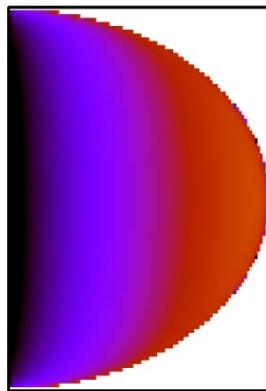
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
-0.02
-0.04
-0.06

geometric



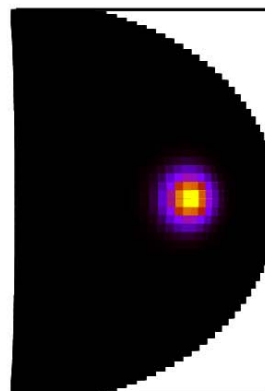
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
-2
-2.5

Rossi-Li



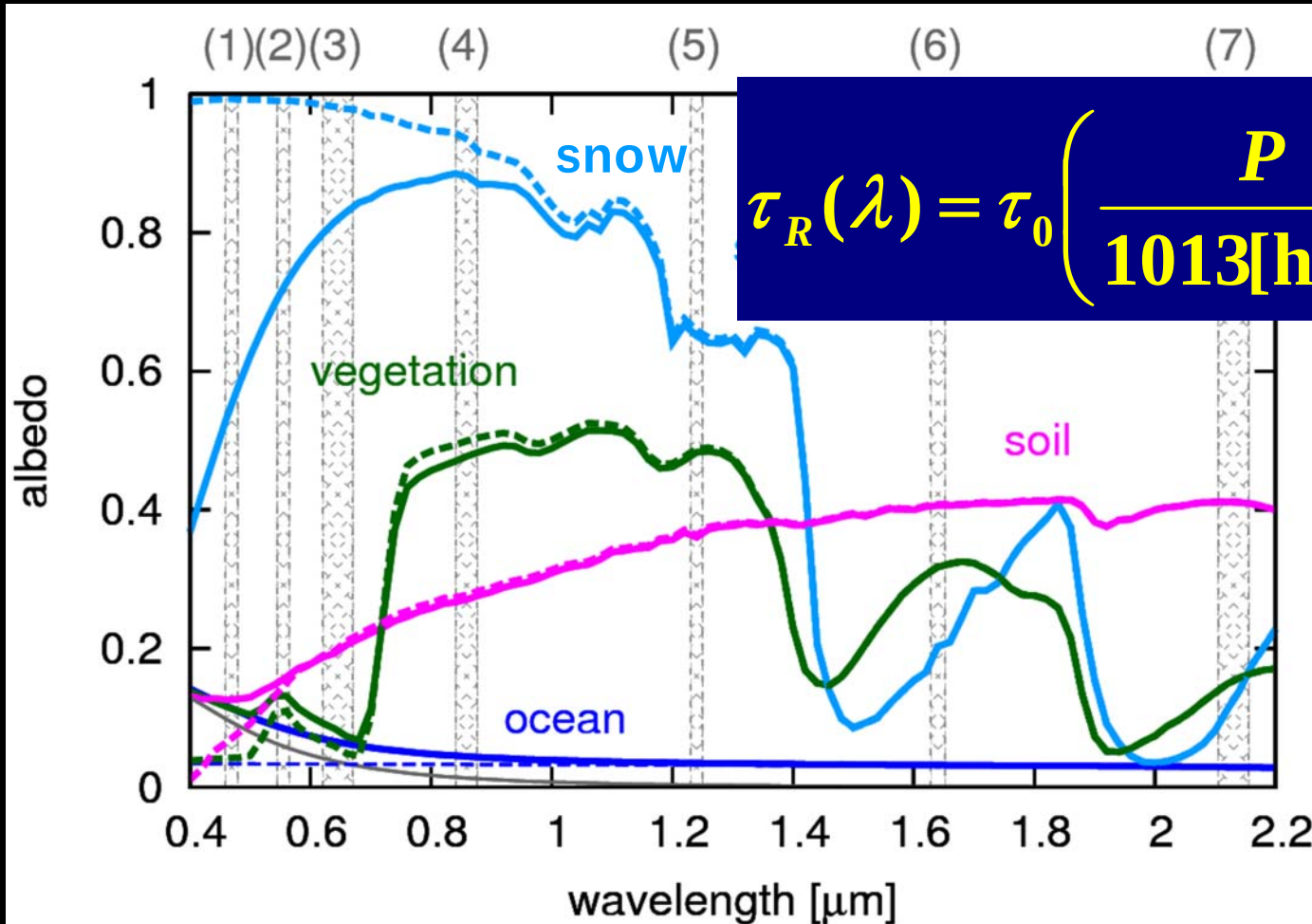
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0

ocean



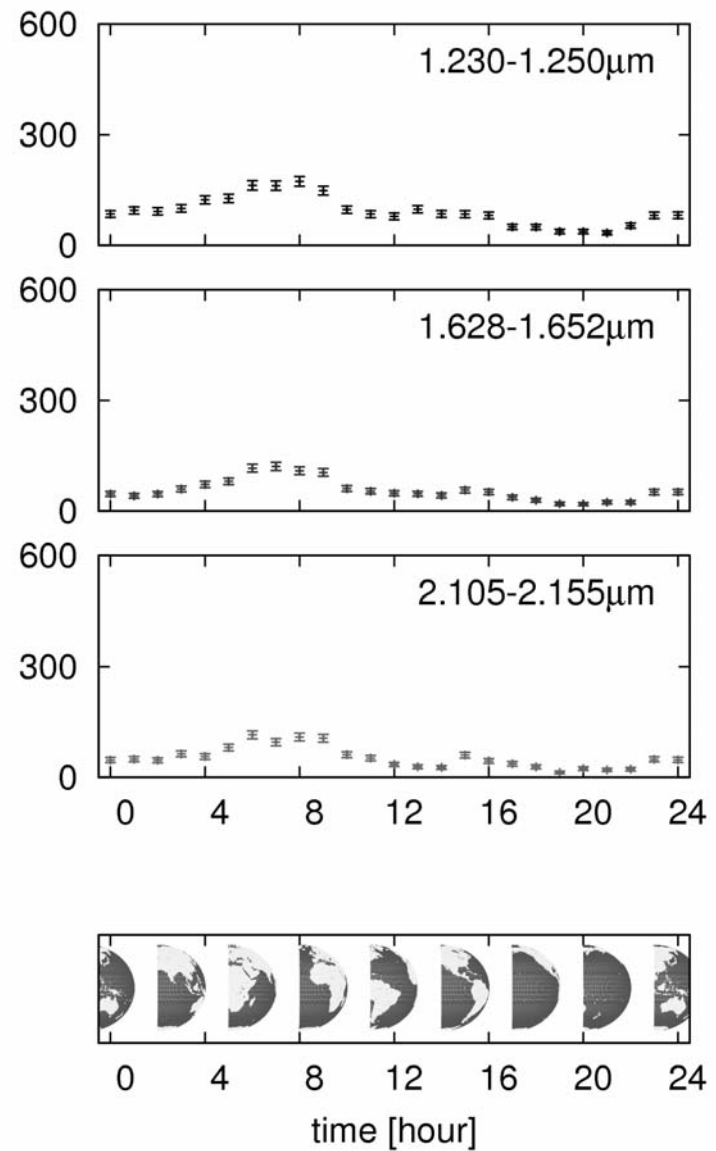
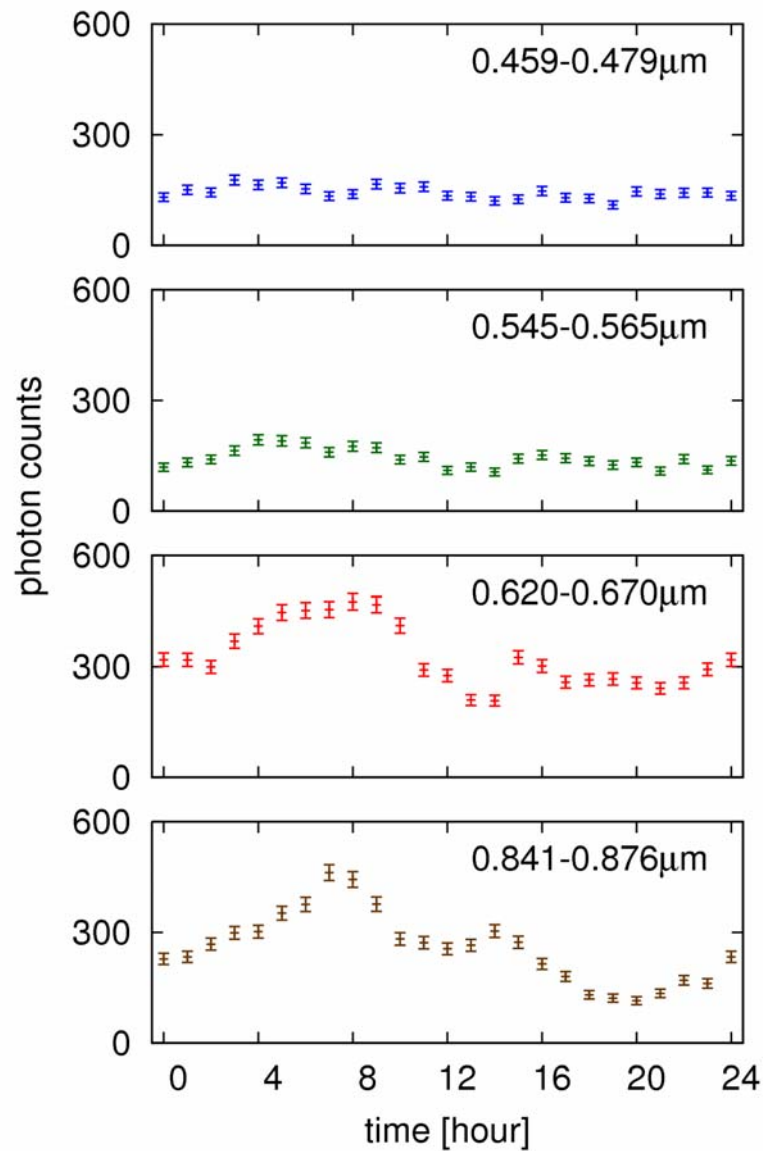
14
12
10
8
6
4
2
0

4成分の反射率と大気の効果

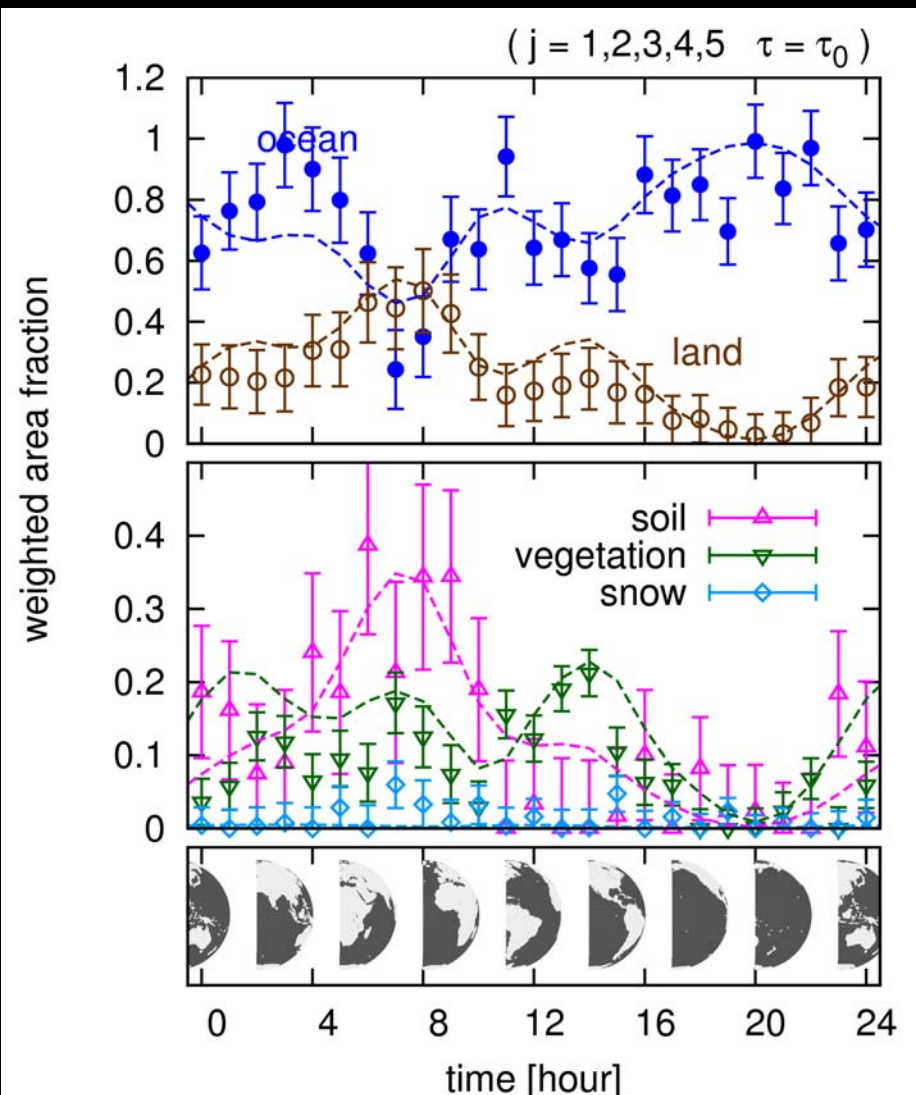


- 空の青、海のをあをにも染まずただよふ
- 大気によるアルベドの波長依存性が重要

模擬光度曲線



第2の地球の色から表面積を推定

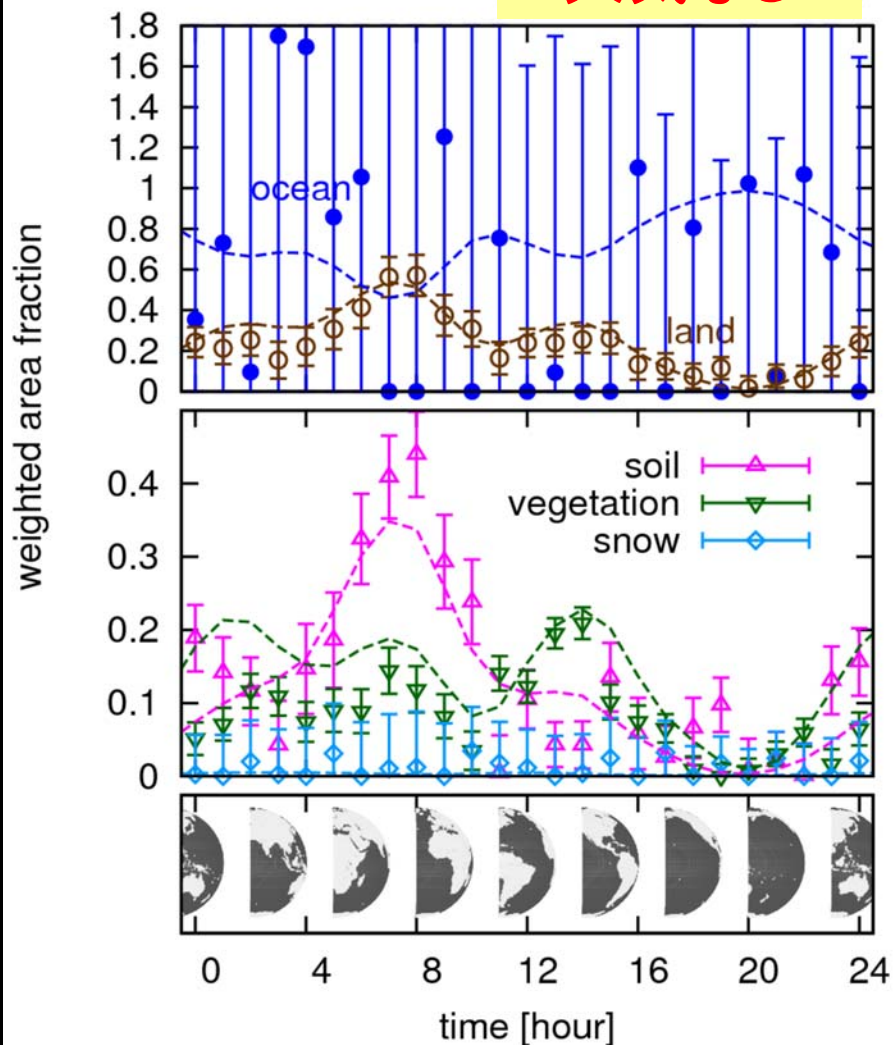


- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 10pc先の地球を口径2mの宇宙望遠鏡で2週間観測
- 光子のポワソンノイズだけを考慮(雲を無視)
- レイリー散乱の一次近似
 - 我が地球、悲しからずや空の青、海のをあをにも染まずただよふ
- 海、土、植物、雪の4つの成分の面積比を推定
- 結構イケテル！

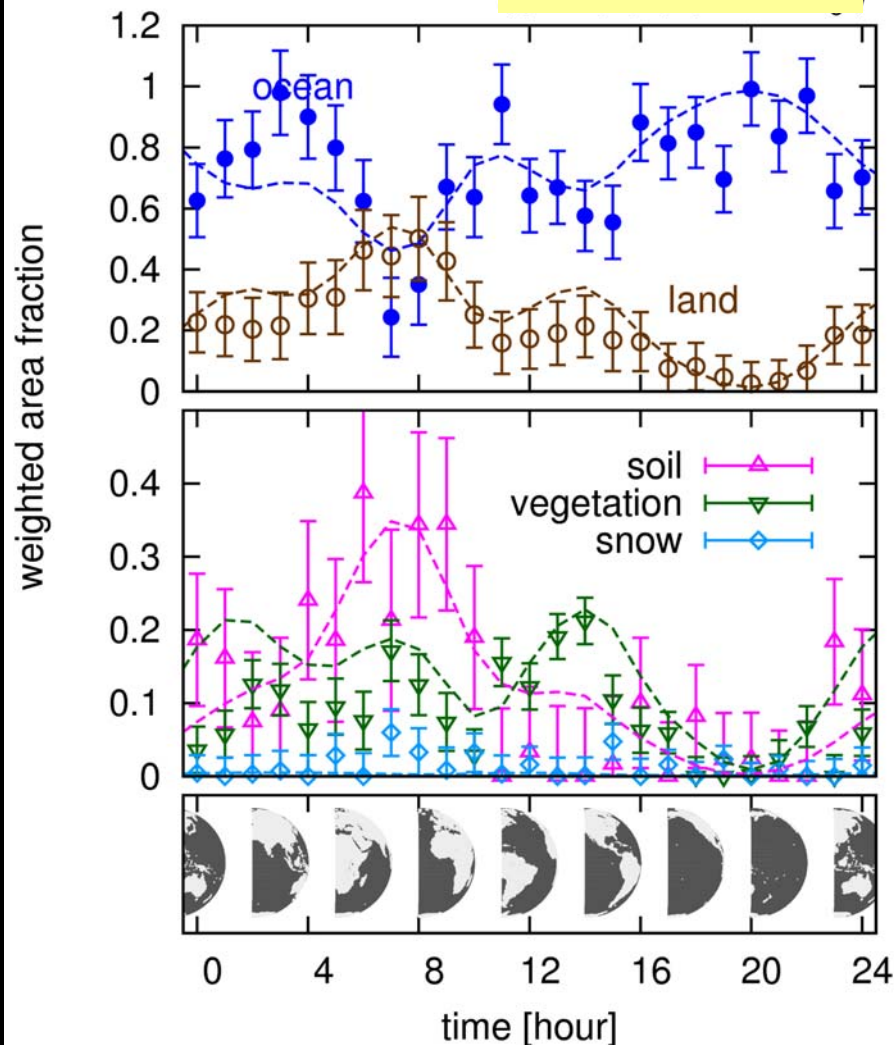
Fujii et al. (2009)

海と陸の推定： 大気がないと絶望的

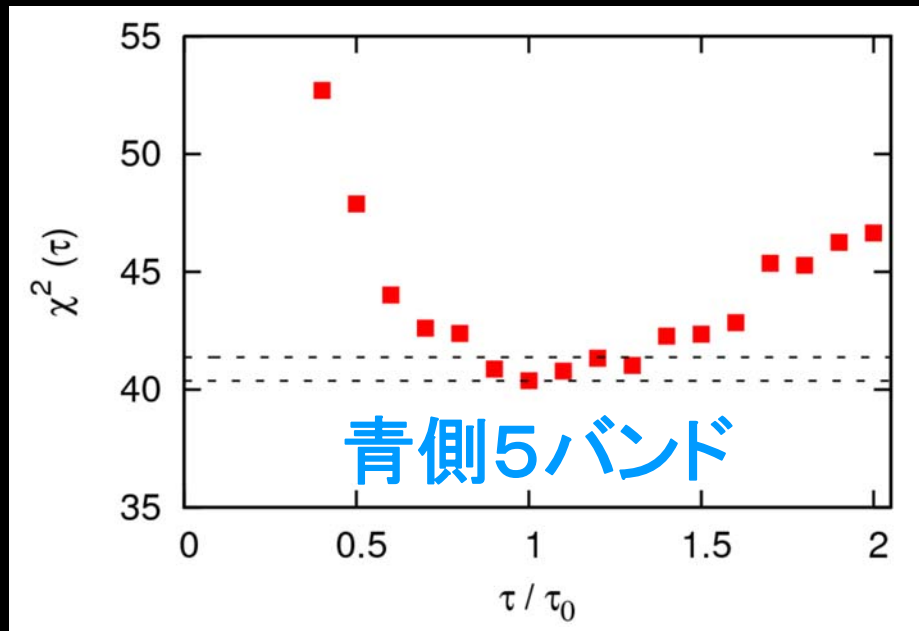
大気なし



標準大気



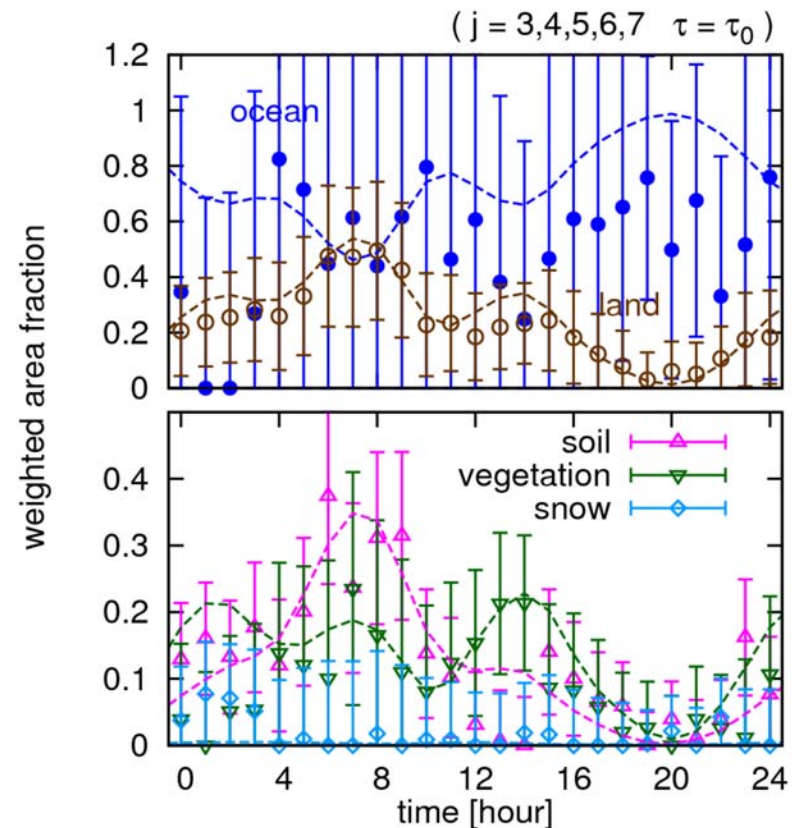
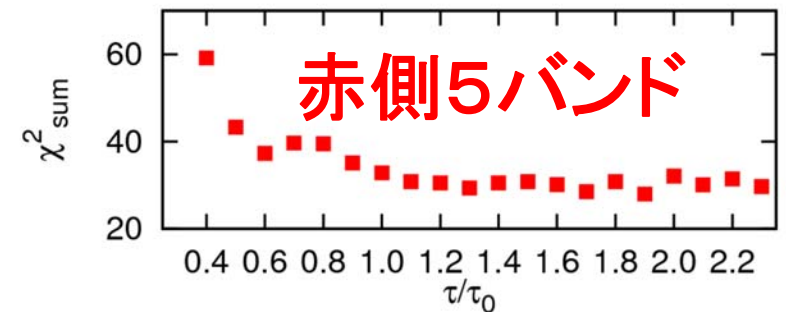
バンド選択と大気量の推定



■ A Pale Blue Dot

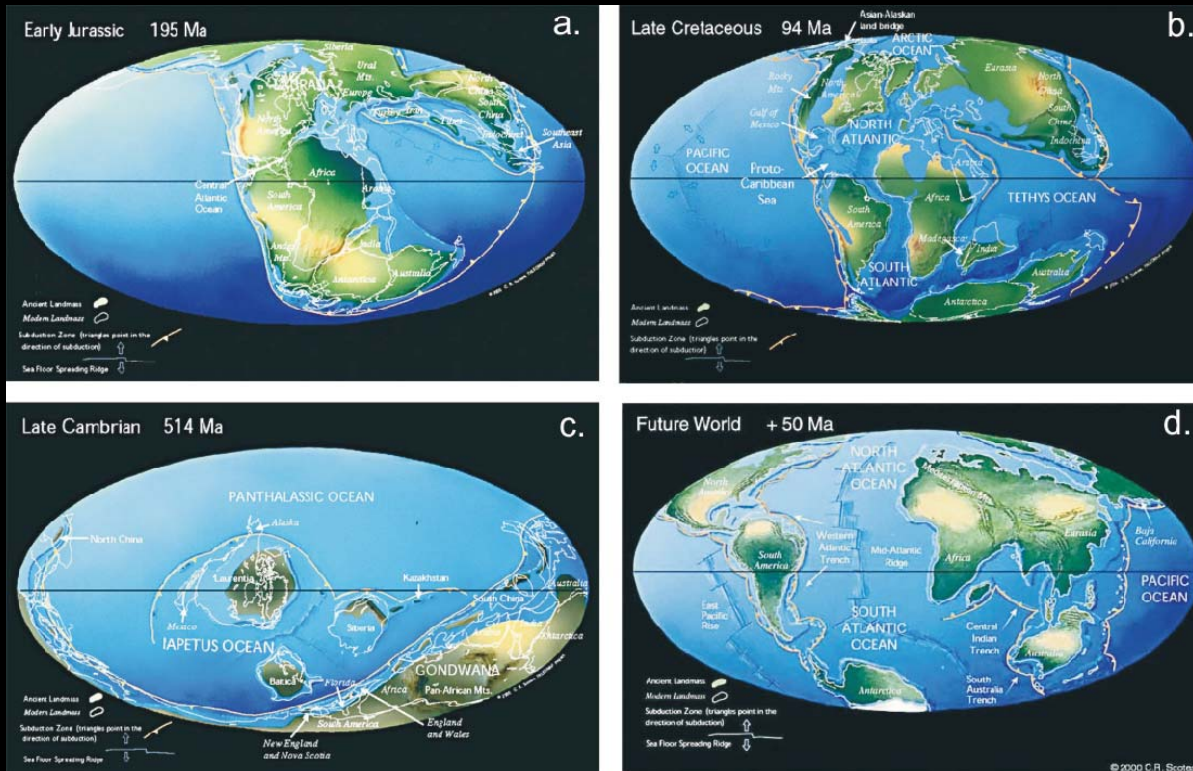
■ 我が地球、悲しからずや空の青、海のをにも染まずただよふ

■ 大気のレイリー散乱によるアルベドの波長依存性が重要



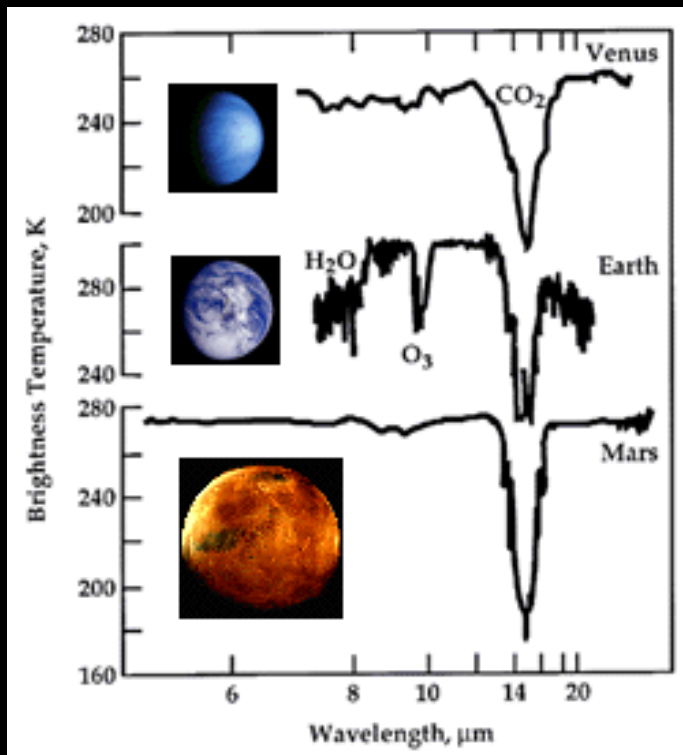
異なる地球環境下での 測光観測シミュレーション

- 系外地球型惑星が、「現在」の地球と全く同じ環境にあるわけではない
- 地球のパラメータを変化させた模擬観測



例えば、左の
Paleomap project
(Scotese 2002)の
ようなデータを用い
て、過去の地球の
模擬観測を行う

系外惑星から宇宙生物学へ



- 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、植物、、、
- 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？ バイオマーカーを特定できるか？

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

文学部と理学部

- 「文学部か、いいなあ」
- 「え、どうしてです」
- 「思い残すことがないでしょう」

私は《文学部しかない》と決めていて、それが何のためとは思わなかった。しかし、勉強が、それ自体のためというより、ステップであるということも当然あるわけだ。いや大学という存在の《機能》を考えたら、そちらの方が自然なのかもしれない。

北村薫『六の宮の姫君』(東京創元社)

文学部と天^{ぶん}文学

- 「天文学か、いいなあ」
- 「え、どうしてです」
- 「思い残すことがないでしょう」

私は《天文学しかない》と決めていて、それが何のためとは思わなかった。しかし、勉強が、それ自体のためというより、ステップであるということも当然あるわけだ。いや大学という存在の《機能》を考えたら、そちらの方が自然なのかもしれない。