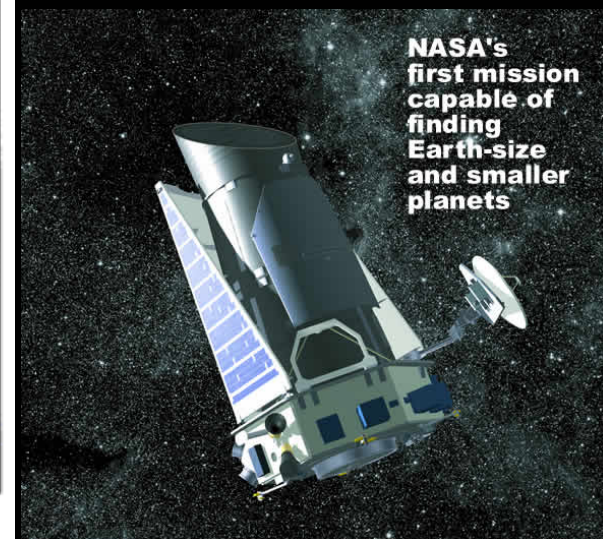
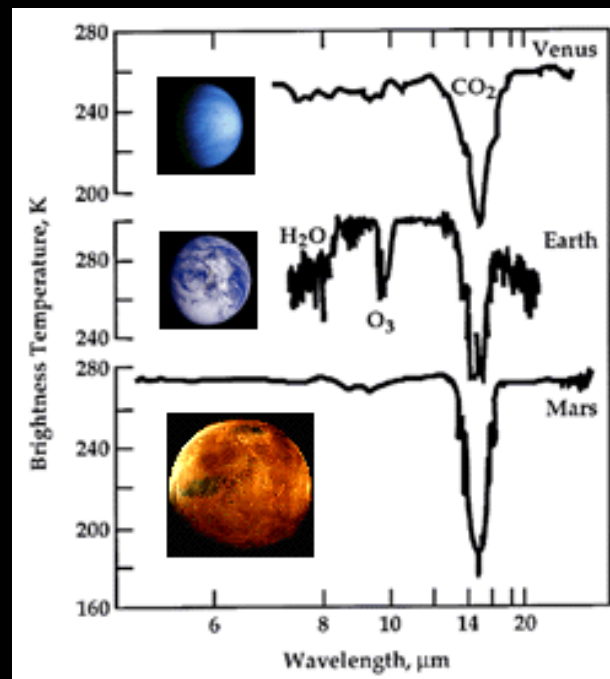


系外惑星から宇宙生物学へ



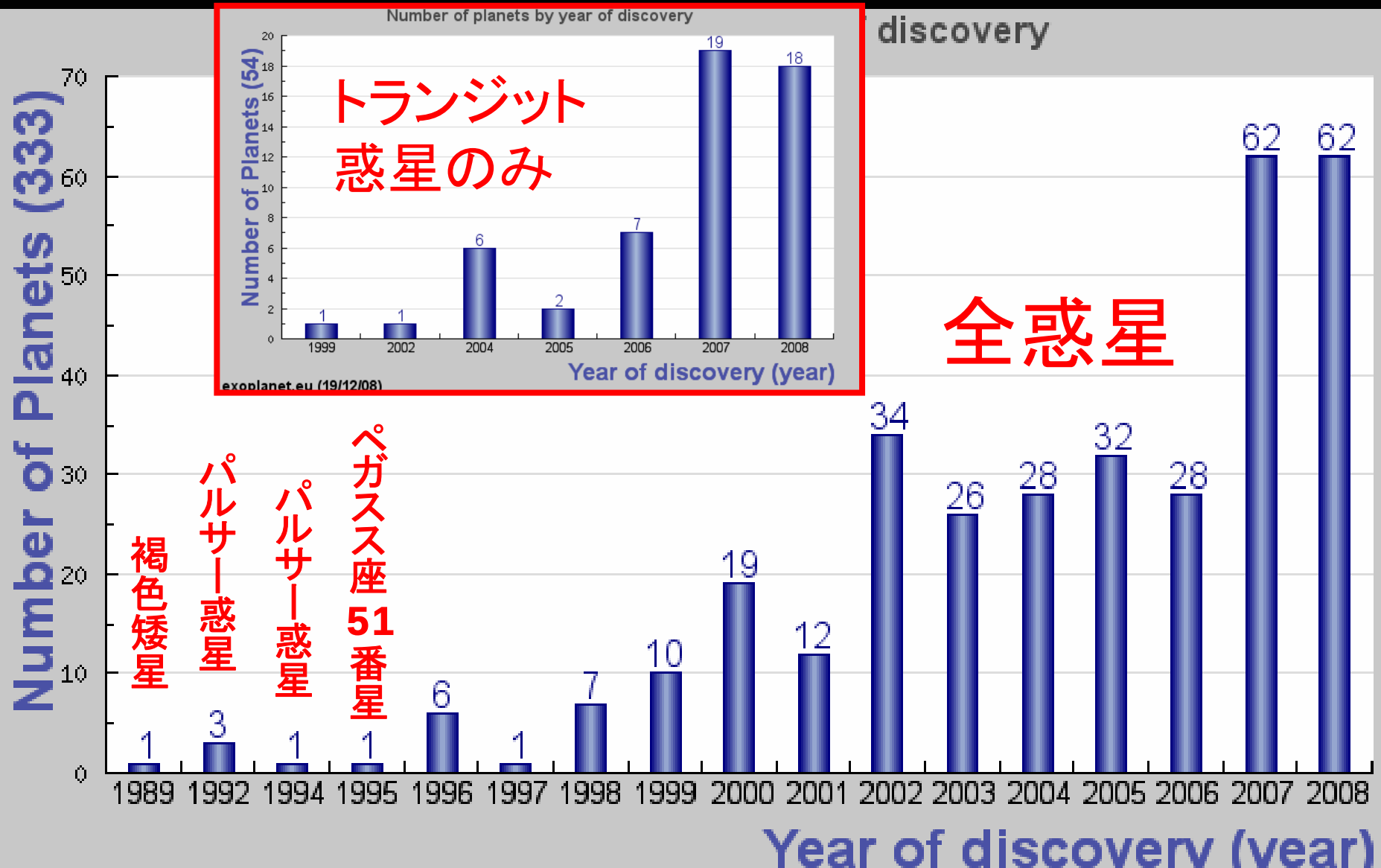
須藤靖、藤井友香、樽家篤史(東大理物理)、
Edwin L. Turner(プリンストン大)

アストロバイオロジーワークショップ2008
12月20日@湘南国際村

太陽系外惑星発見の歴史

- 1995年：初めての太陽系外惑星
- 1999年：トランジット惑星（影：可視光）
- 2001年：惑星大気の新検出（ナトリウム）
- 2005年：トランジット惑星（光：赤外線）
- 2005年：惑星公転軸の傾きの発見
- 2008年12月18日時点で333個の系外惑星
（複数の惑星を持つ系が31個）

太陽系外惑星(候補)の発見年表

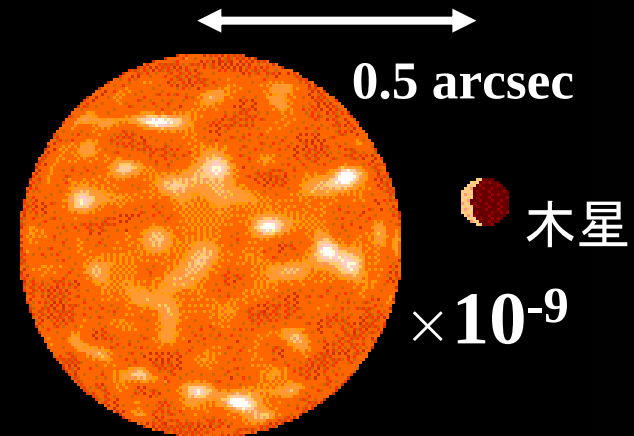


惑星は直接見えるか？

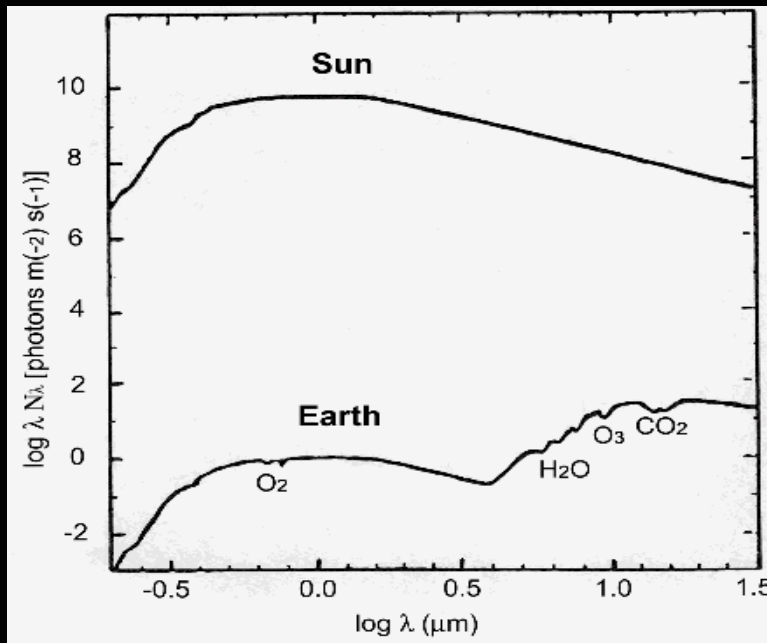
30光年先から観測した木星

明るさ: 27等級(可視域)

主星との角距離: 0.5秒角



太陽

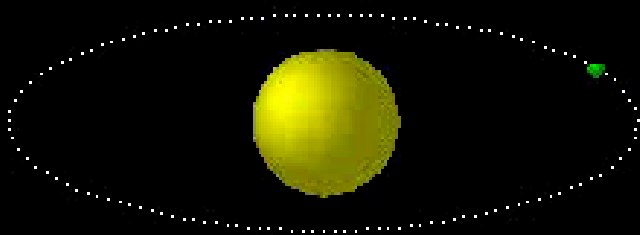


地上から観測できる分解能の大きさ内で、9桁も明るい主星の隣にある27等級の暗い天体を検出する

⇒ ほとんど不可能！

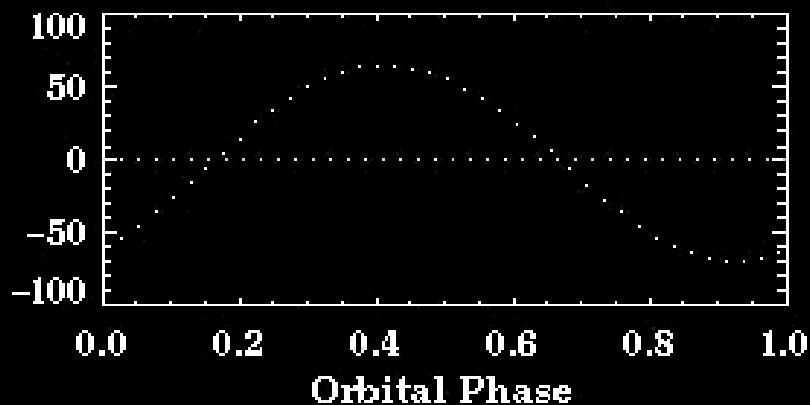
どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



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

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

■ ドップラー法

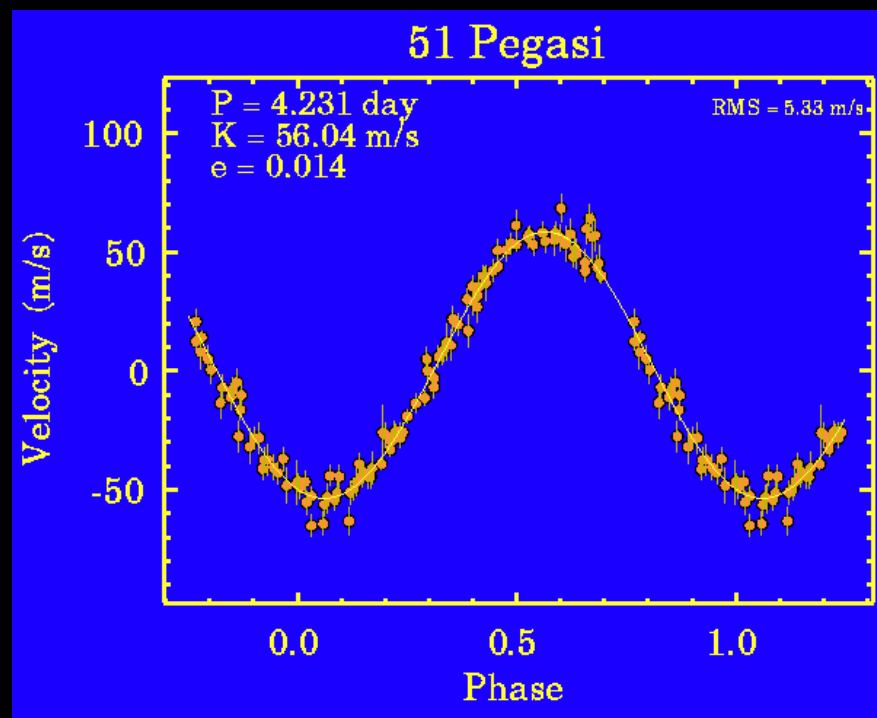
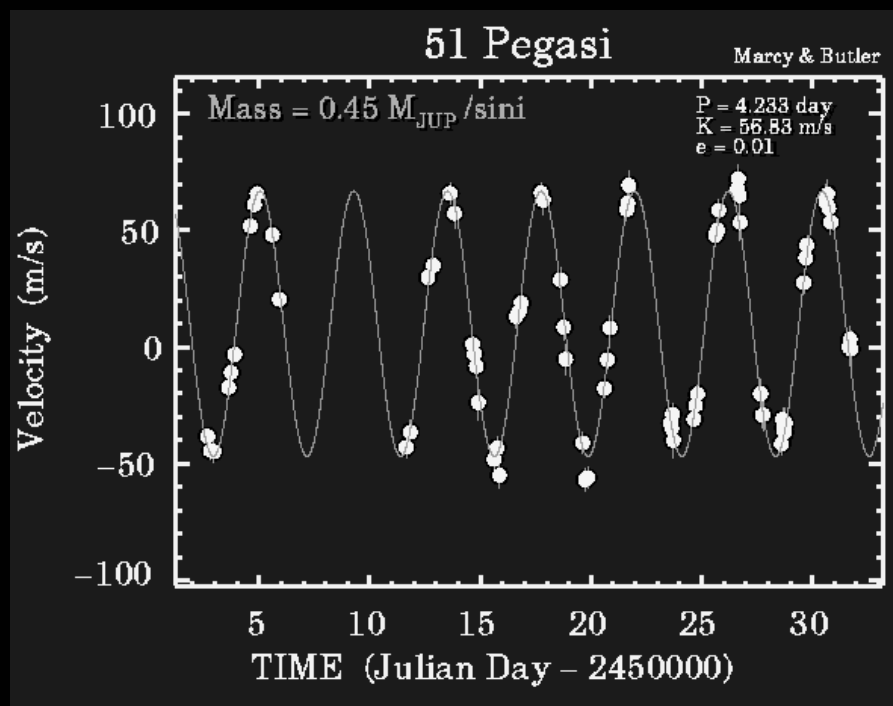
- 中心星の速度が毎秒数十メートル周期的に変動

■ 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

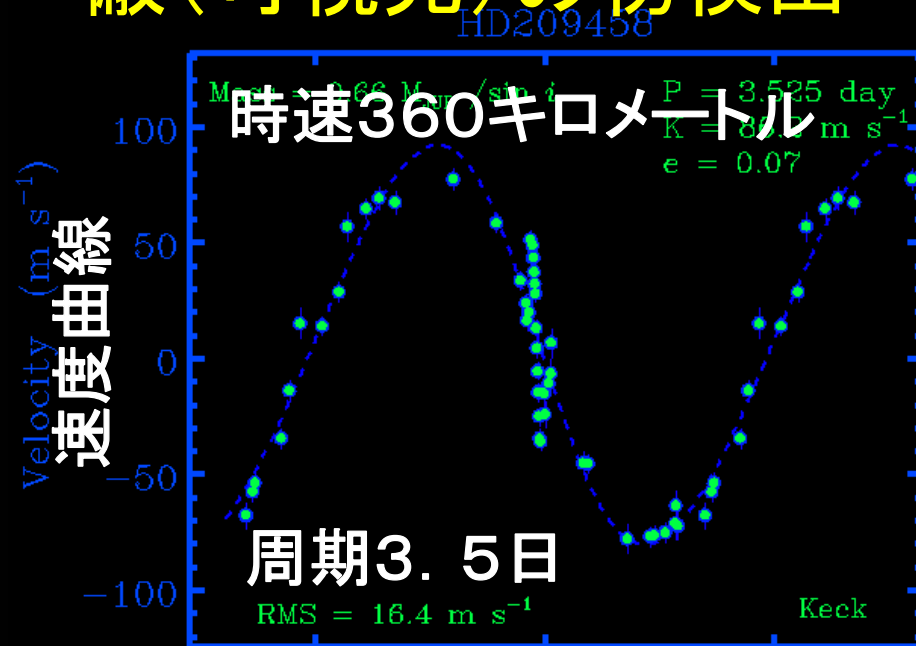
ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！



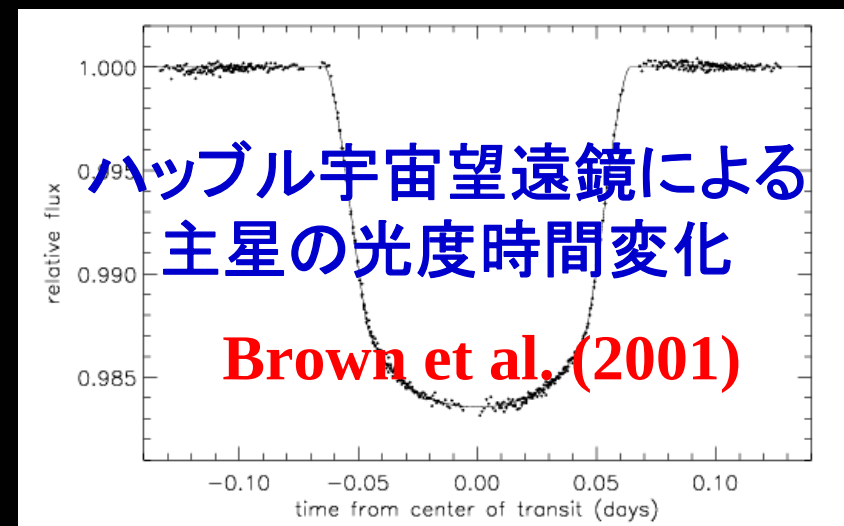
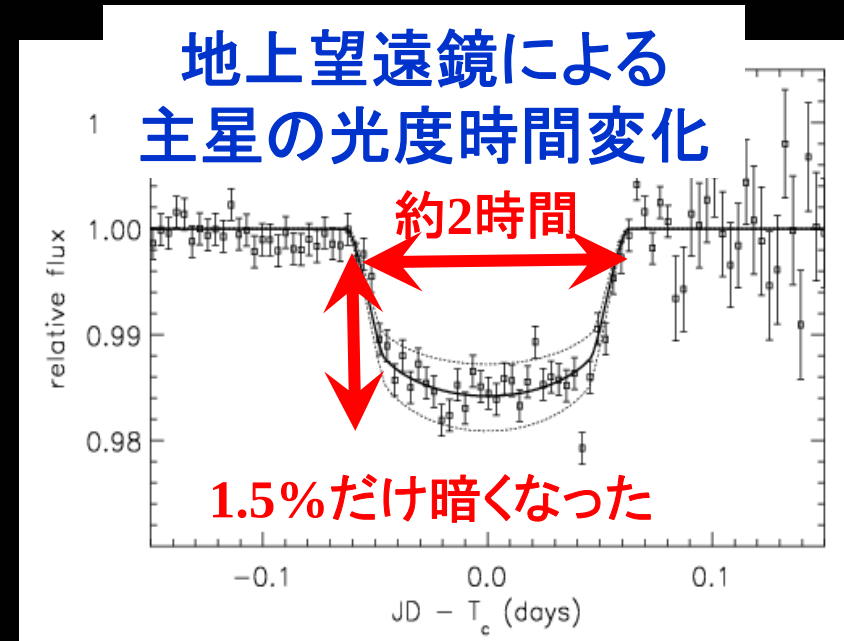
初めてのトランジット惑星HD209458b

- 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

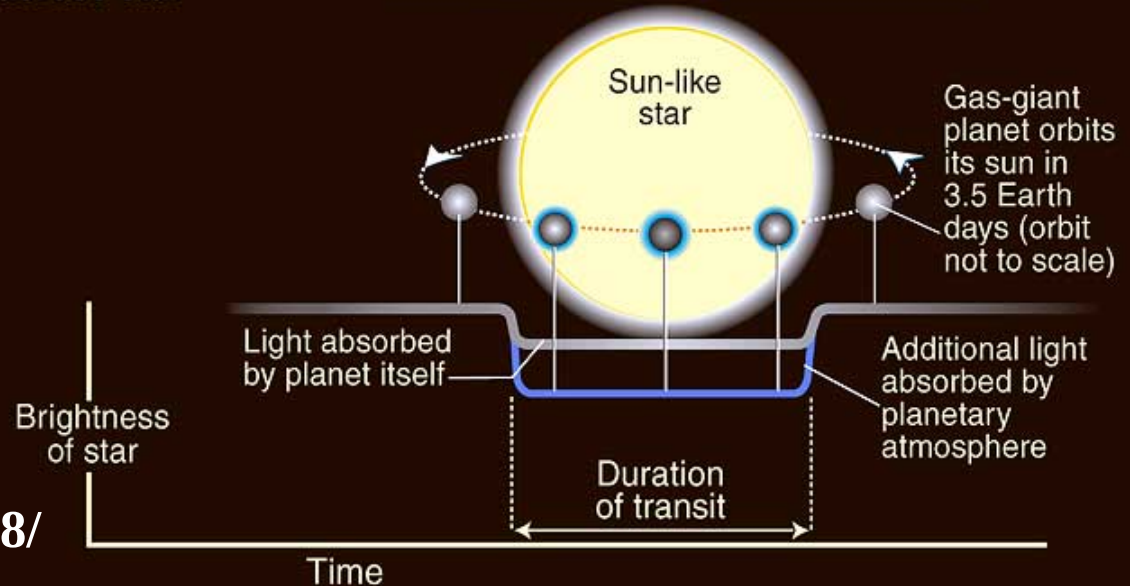
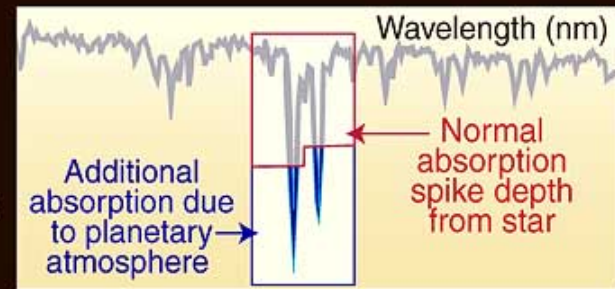
Henry et al. (1999), Charbonneau et al (2000)



HD209458bの 惑星大気初検出 (2001年)

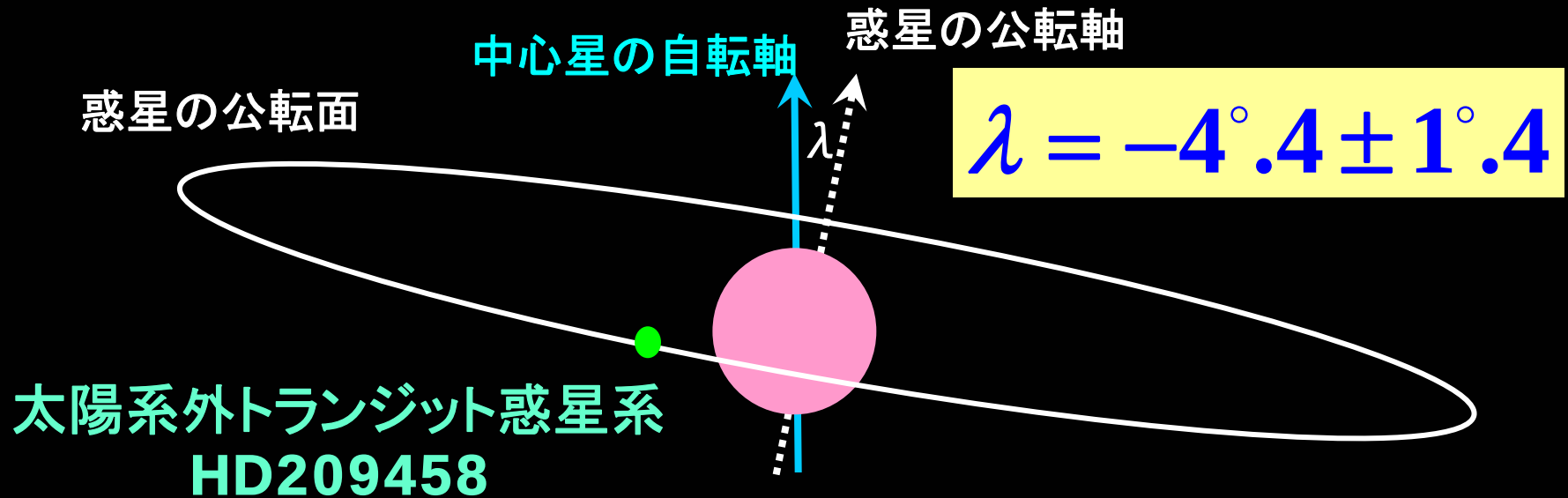
[http://hubblesite.org/
newscenter/archive/2001/38/](http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/)

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.)

ロシター・マクローリン効果を利用した HD209458の中心星自転軸と 惑星公転軸のずれの発見

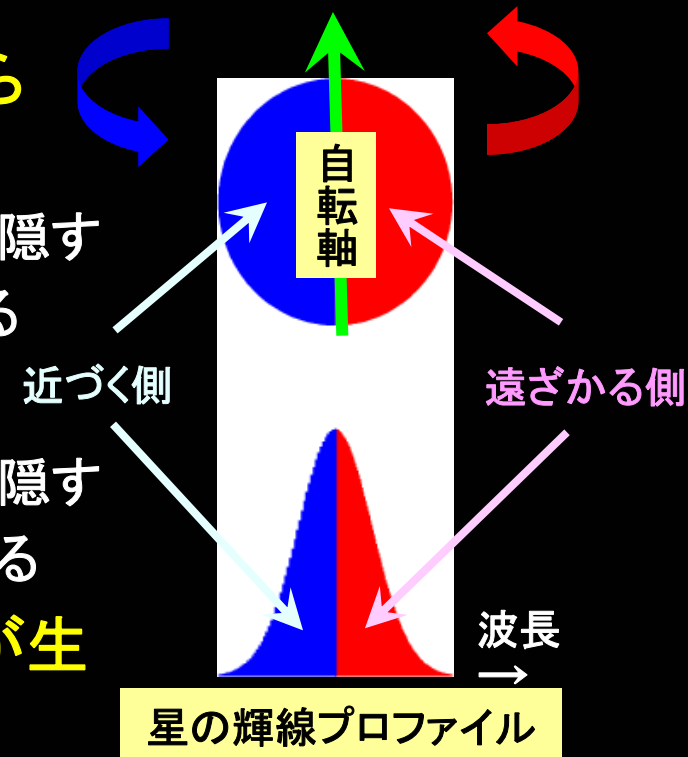


Ohta, Taruya & Suto ApJ 622(2005)1118

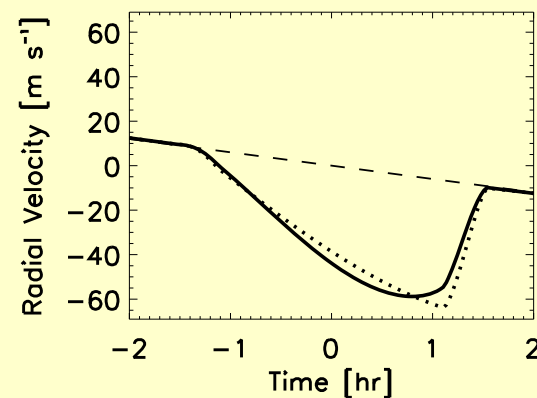
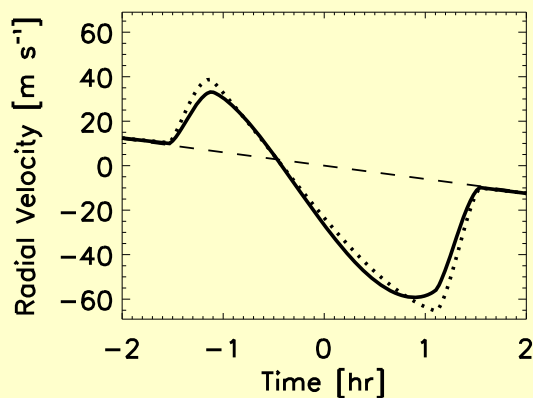
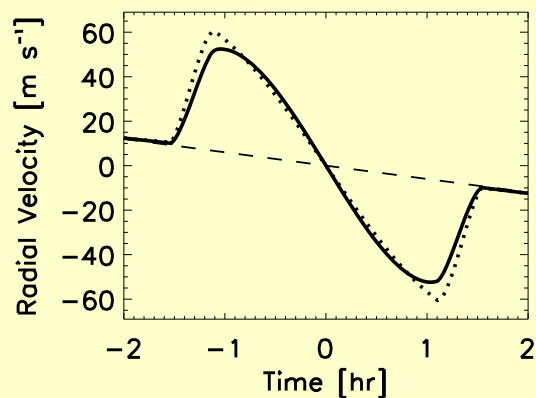
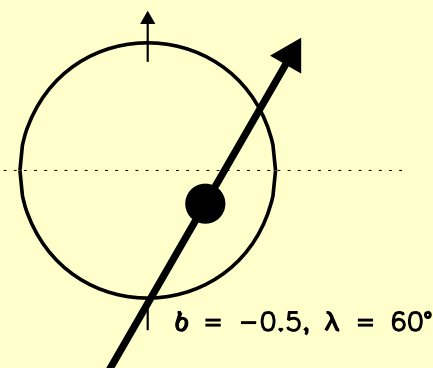
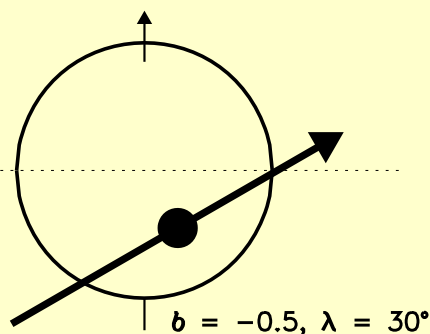
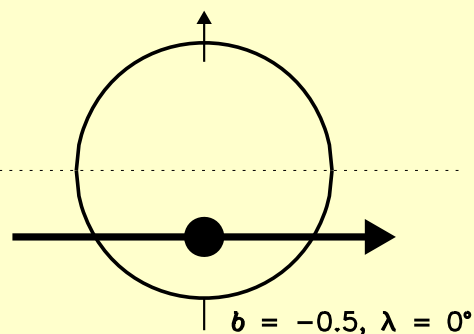
Winn et al. ApJ 631(2005)1215

ロシター効果とは

- 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！

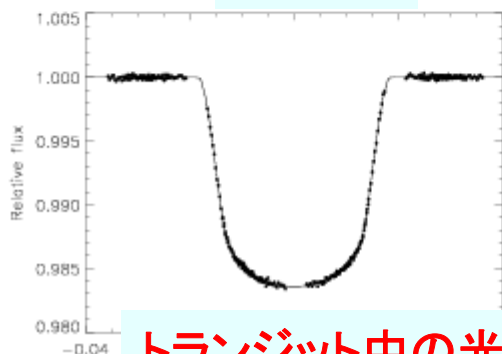
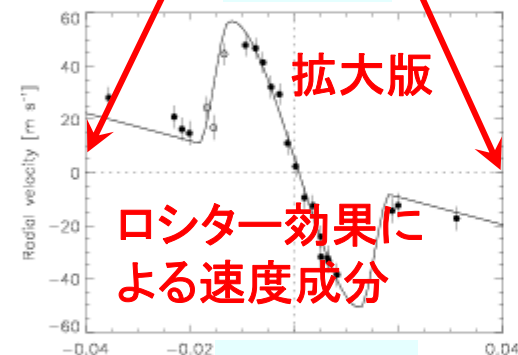
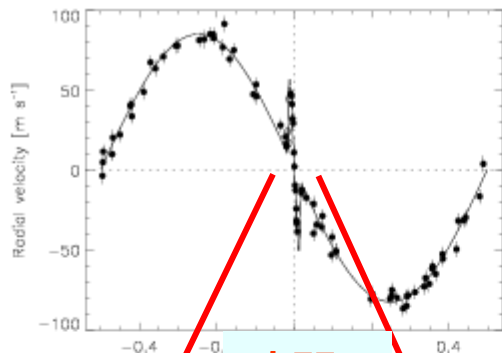


ロシター効果と λ の関係



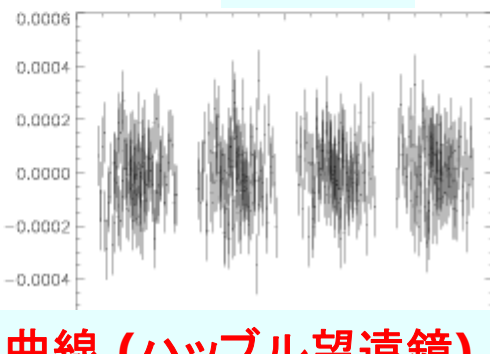
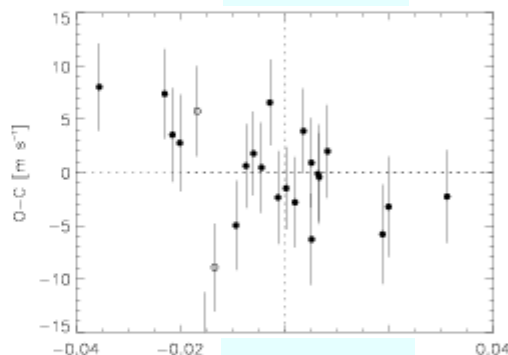
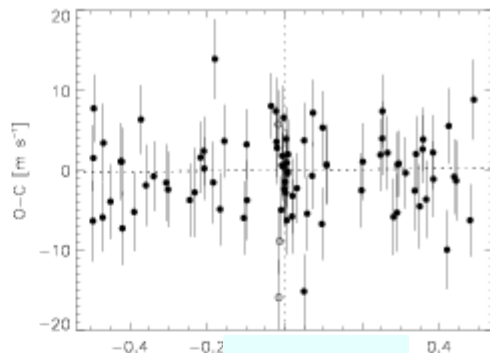
Gaudi & Winn ApJ 655(2007)550

中心星の視線速度



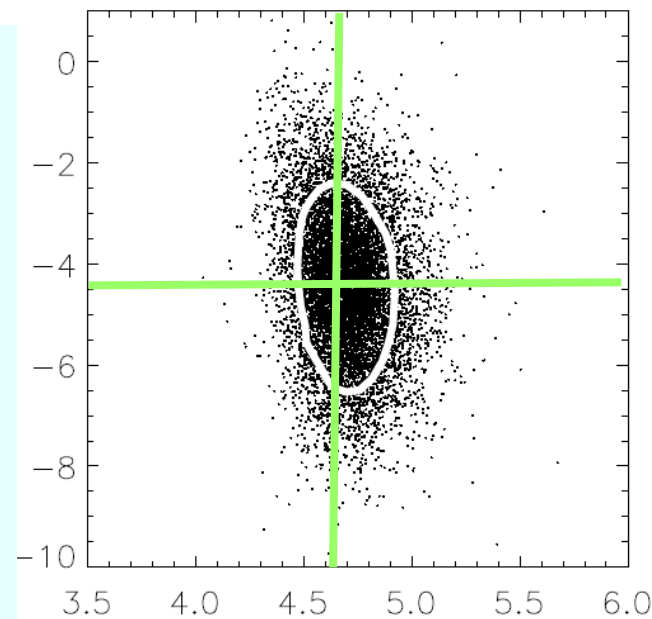
トランジット中の光度曲線 (ハッブル望遠鏡)

データとベストフィットの残差



HD209458 解析結果

自転軸と公転軸のなす角 [度]



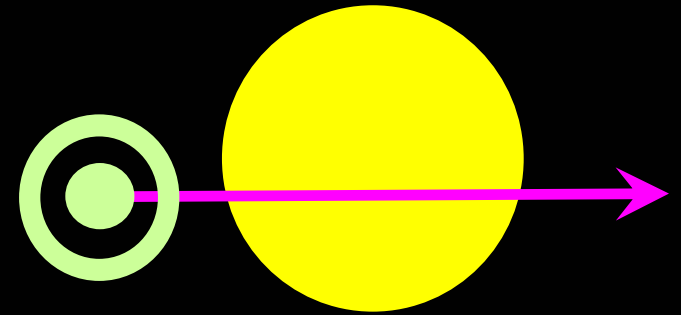
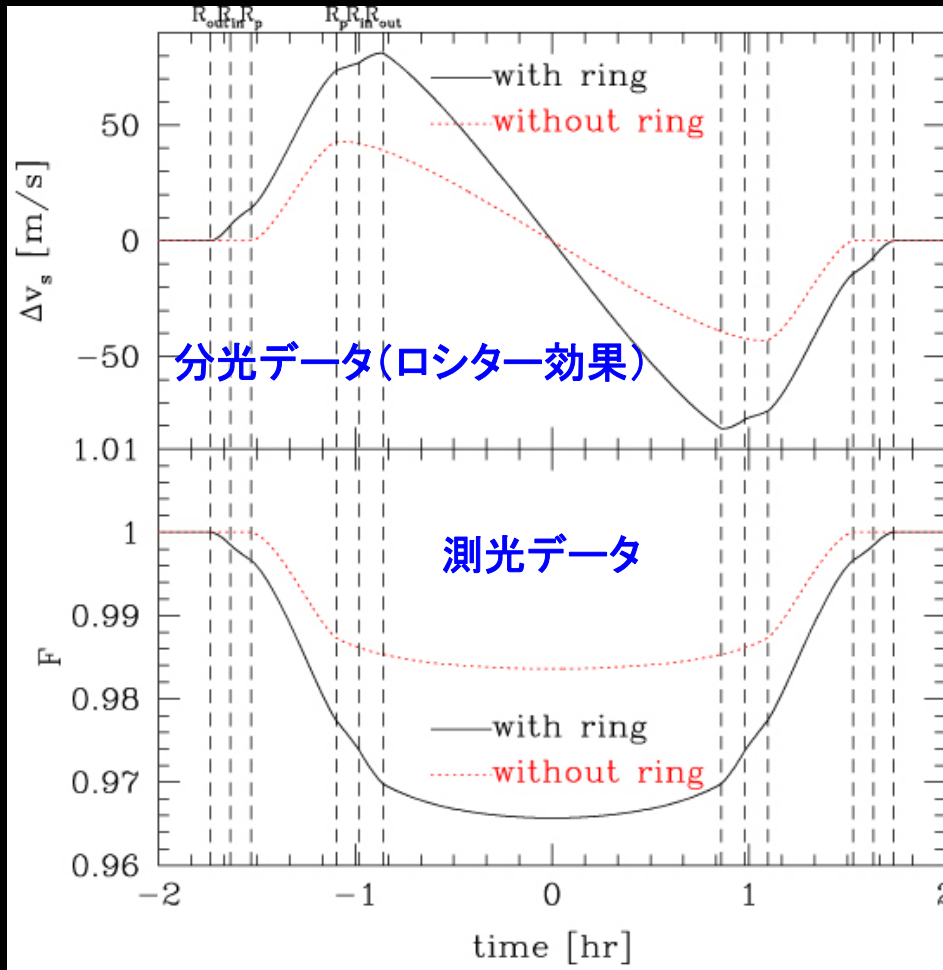
中心星の自転速度 [km/s]

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

わずかではあるが0からずれている！

Winn et al. ApJ 631(2005)1215

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

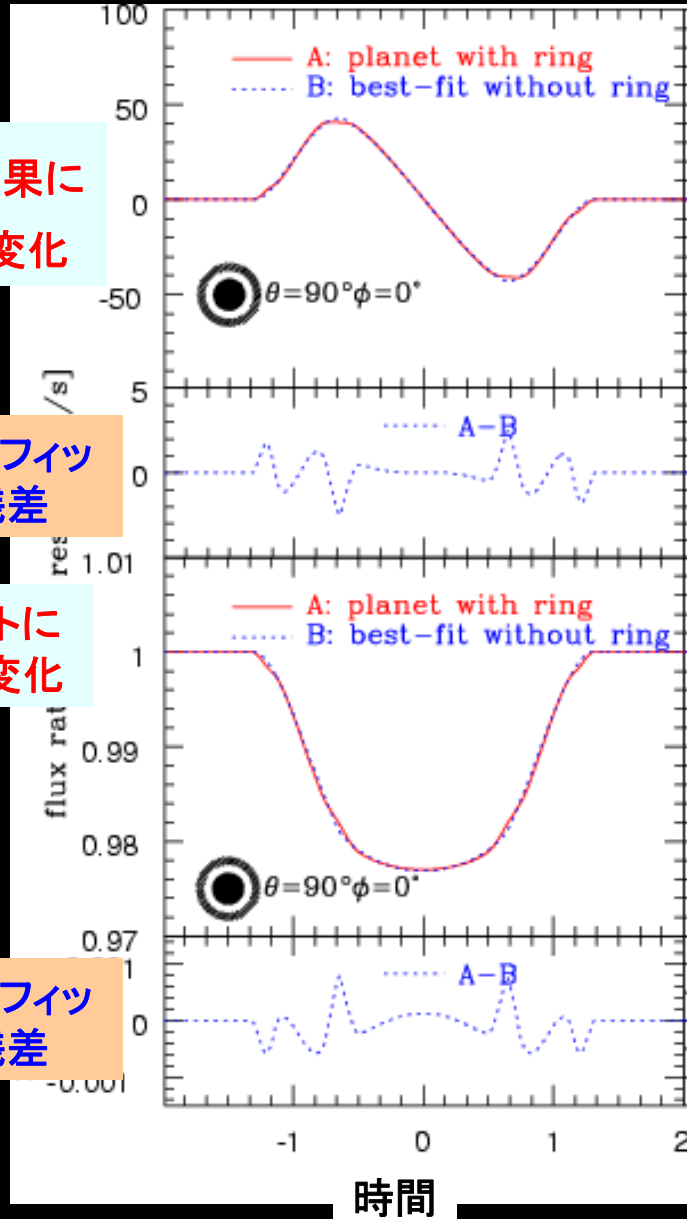
系外惑星リングの検出可能性

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

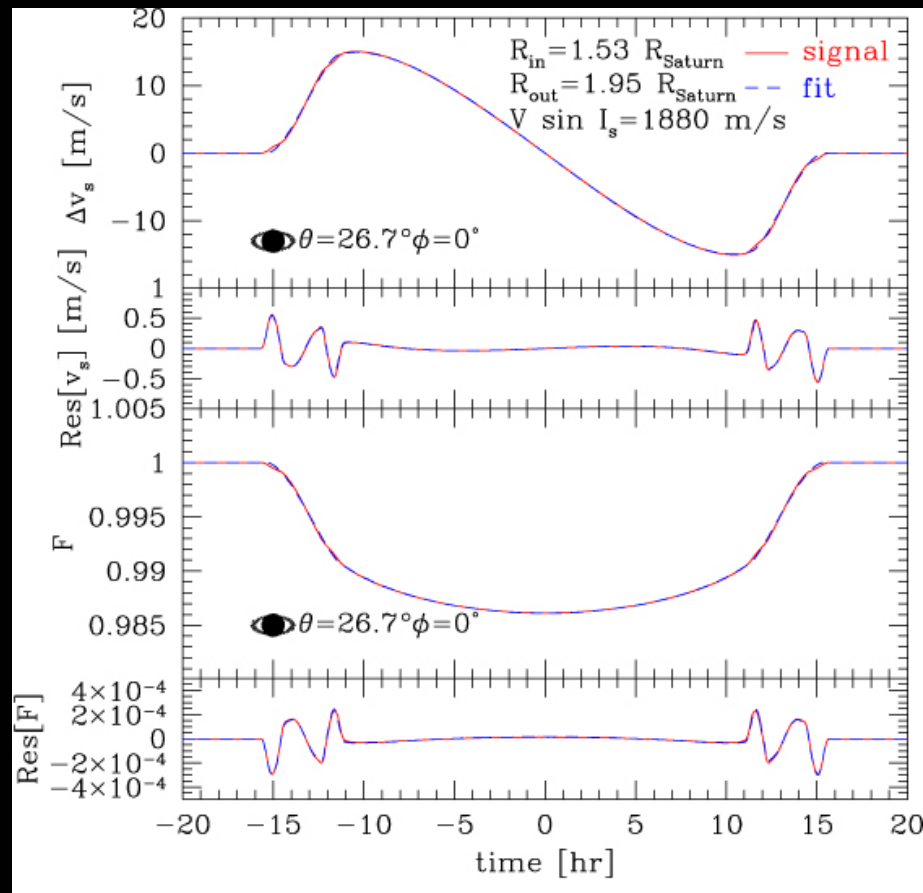
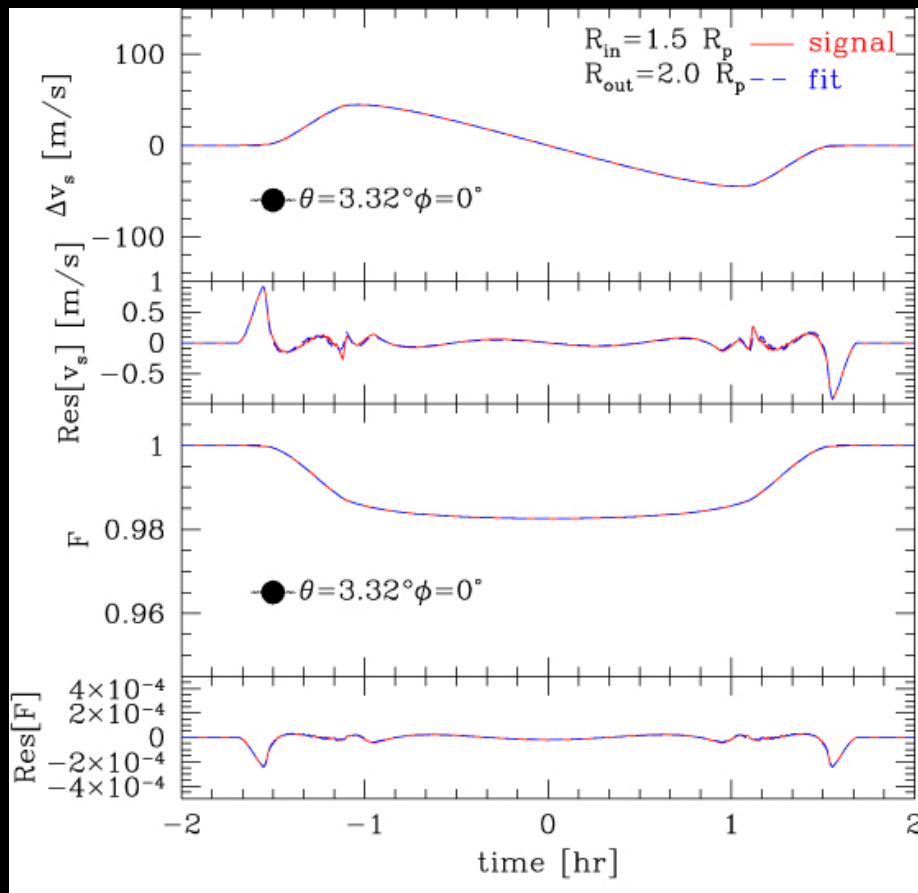
トランジットに
よる光度変化

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？



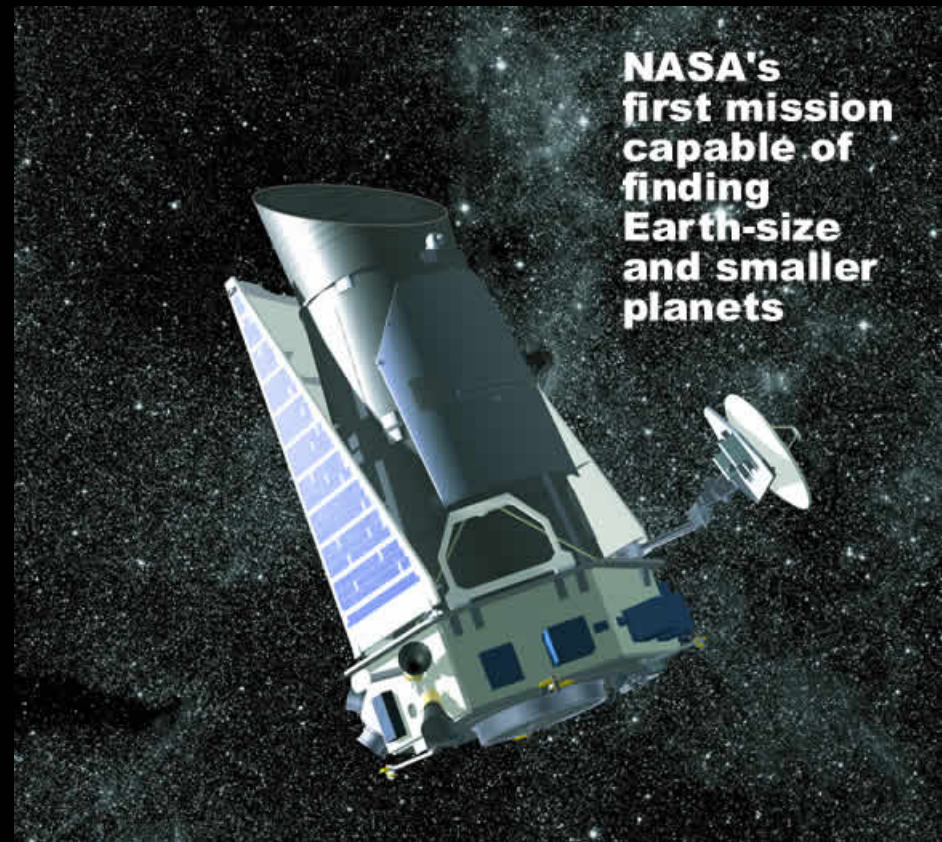
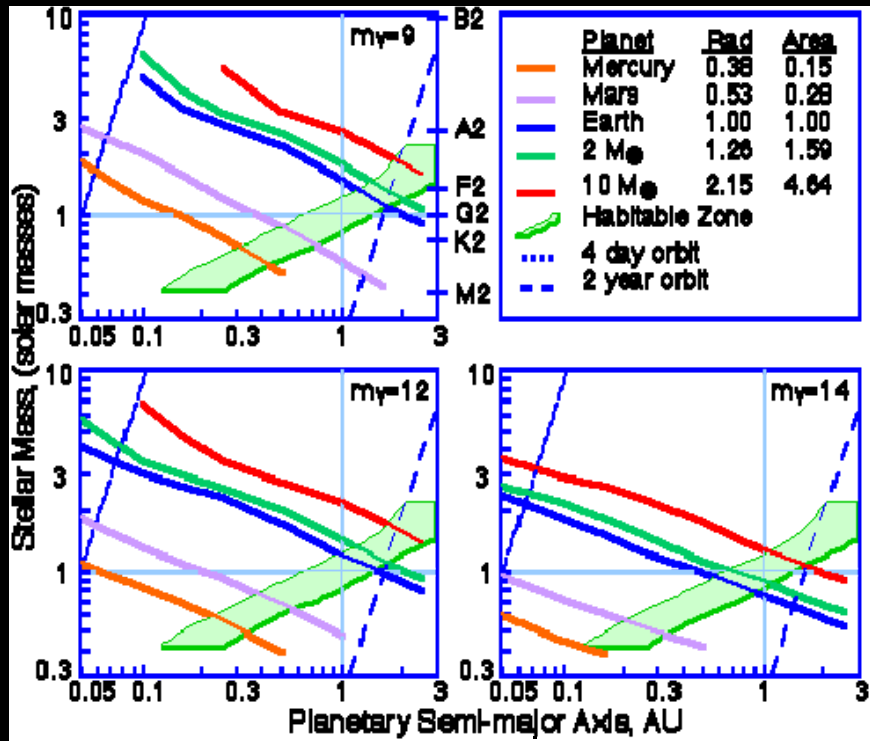
- もしリングがあれば何とか検出可能 (S/N=1)

Ohta, Taruya & Suto ApJ 690(2009)1

ケプラー衛星 (米国2009年？打ち上げ予定)

トランジット惑星の測光サーベイ:

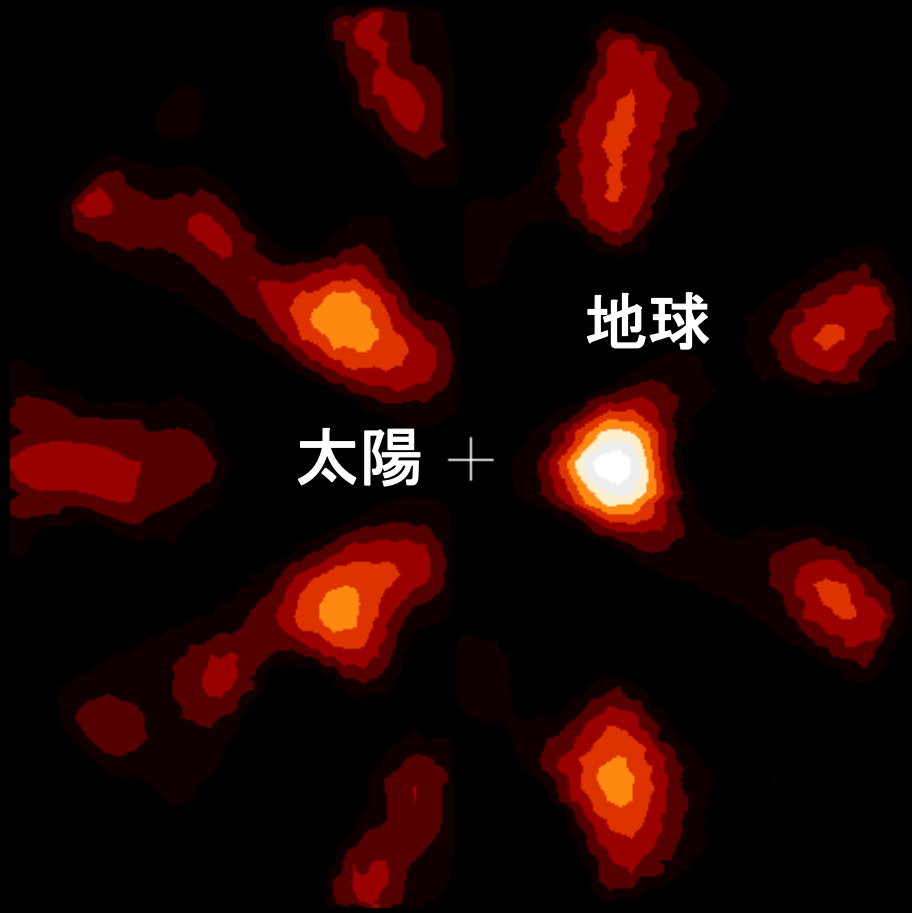
4年間で50個？以上の地球型惑星を発見することをめざす



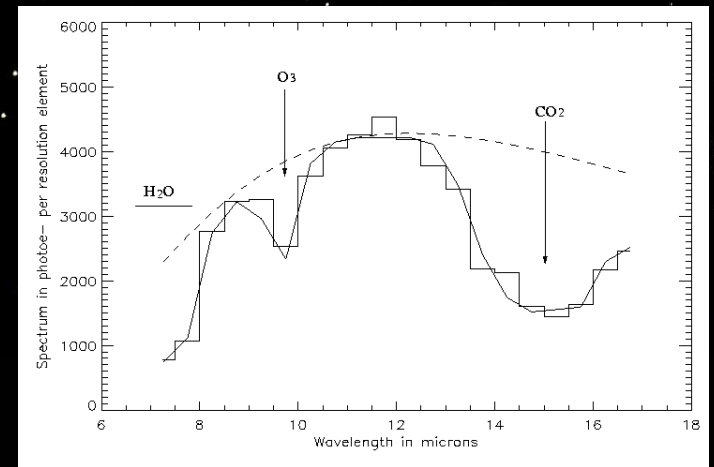
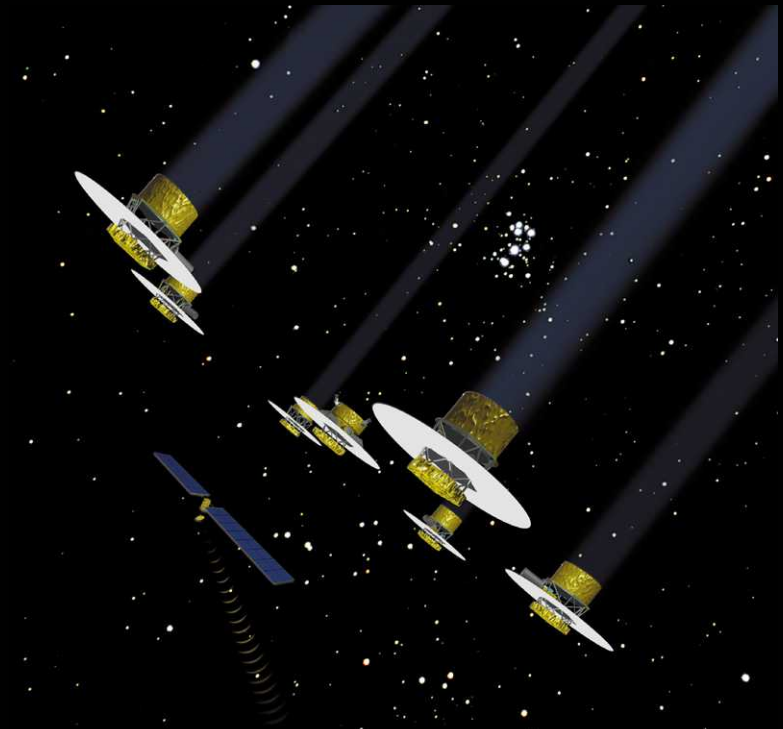
<http://kepler.nasa.gov/>

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



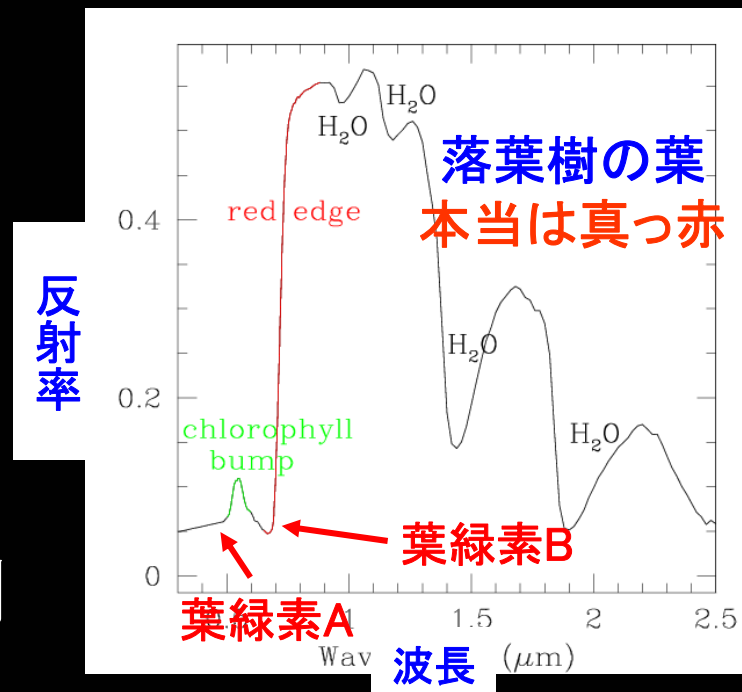
30光年先においた太陽と地球の観測予想図
<http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/>



宇宙赤外線干渉計群
測光分光観測

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

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”

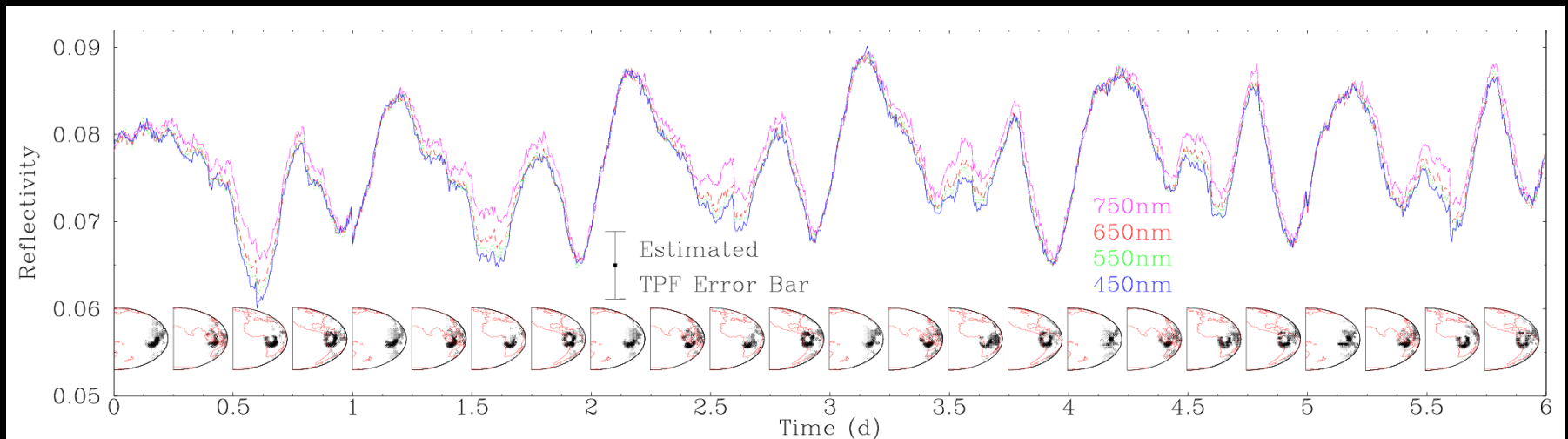
PASP 36(1924)261



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の試み

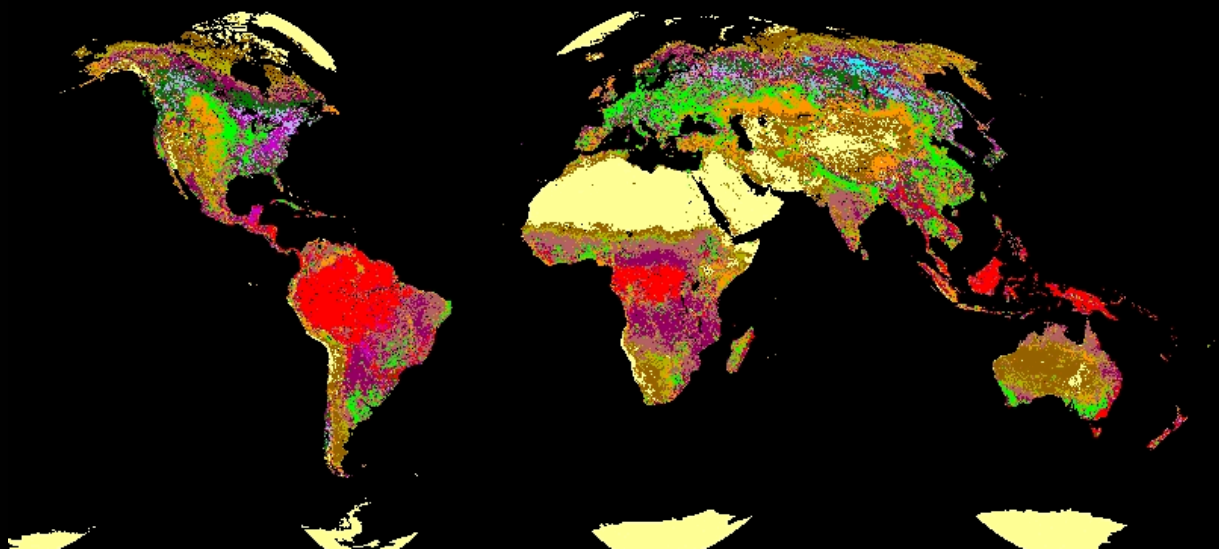
地球が30光年先にあるとして何がどこまでわかるか？



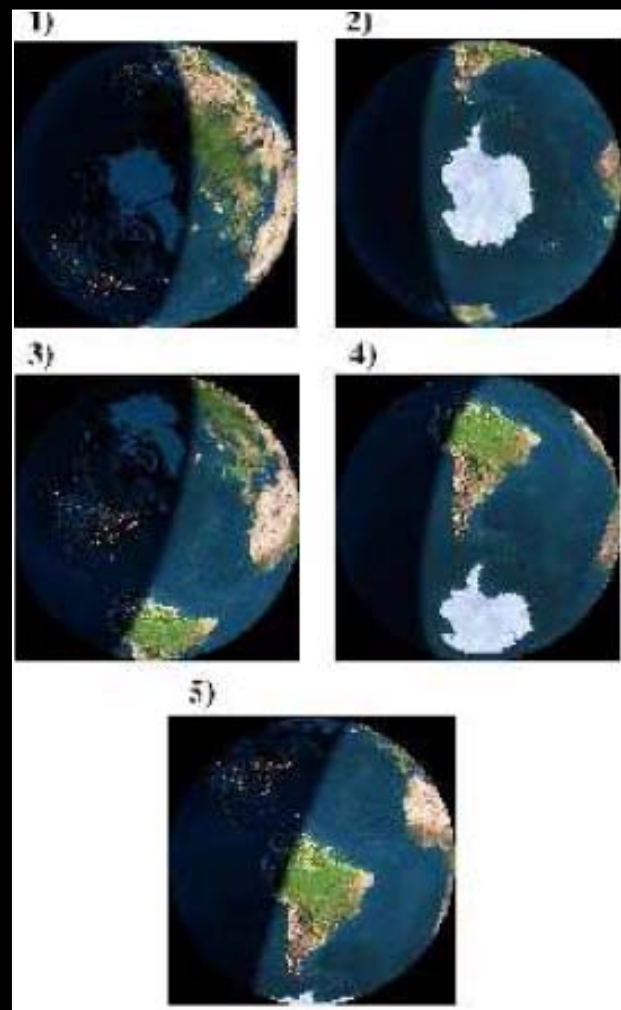
Ford, Seager & Turner : Nature 412 (2001) 885

- **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！

地球(型惑星)の測光観測シミュレーション



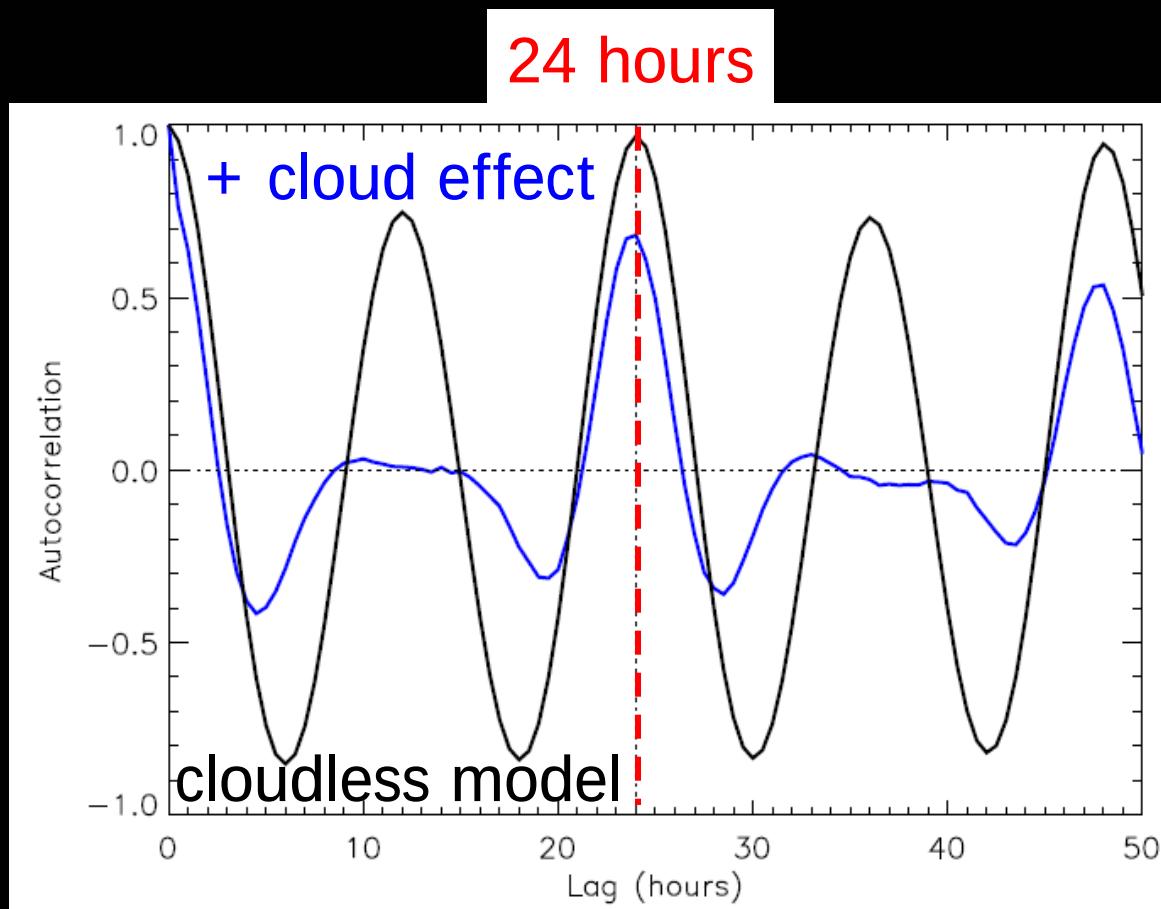
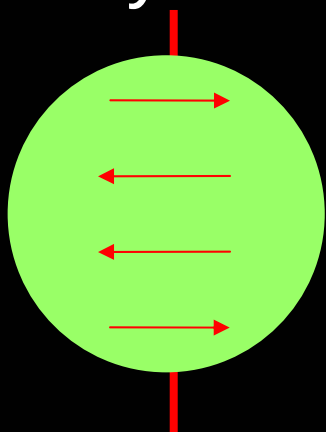
- 実際の地球の表面データを用いた模擬測光観測データを作成
- 時間変動から何を読み取れるかを検討



Palle et al. arXiv:0802.1836

自己相関関数を用いた自転周期の推定結果

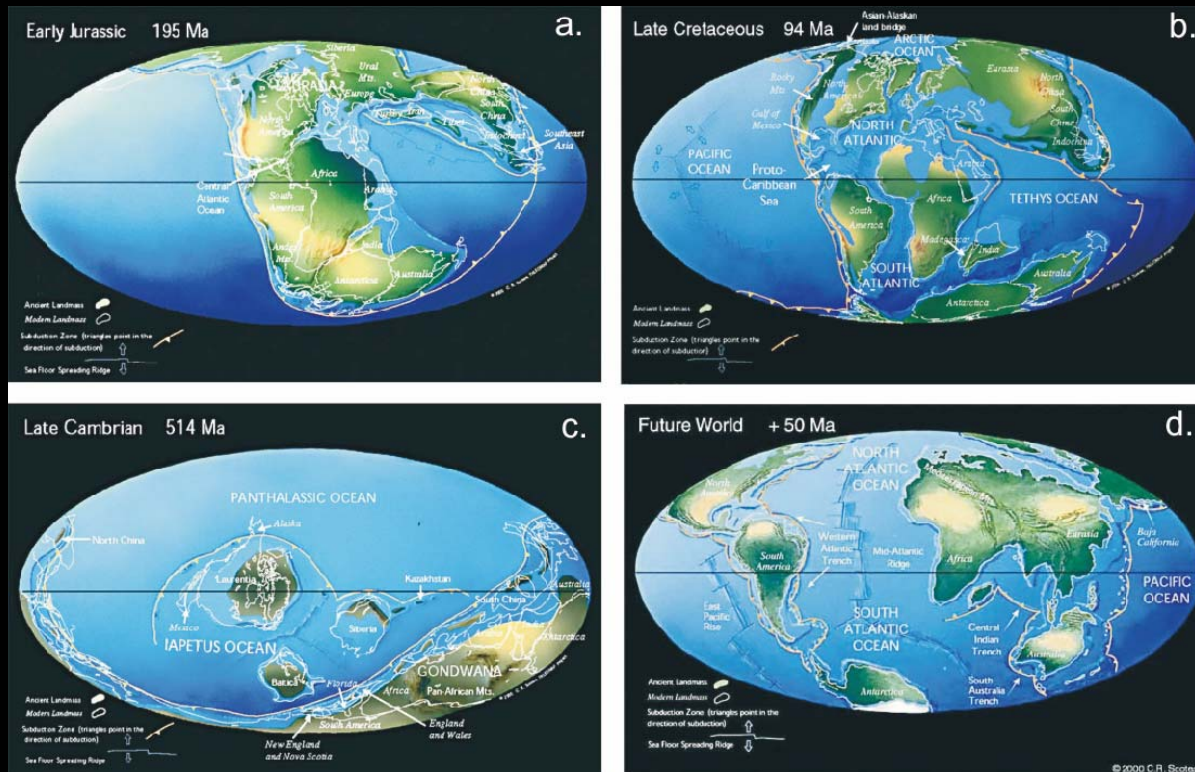
- inclination: 90°
- S/N: 40
- exposure time: 0.1 hour
- Earth's actual cloud data selected randomly in 1985



Palle et al. arXiv:0802.1836

異なる地球環境下での 測光観測シミュレーション

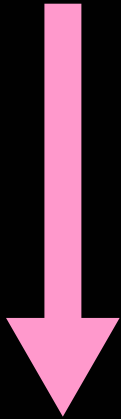
- 系外地球型惑星が、現在の地球と全く同じ環境にあるはずはない
- 地球のパラメータを変化させた模擬観測



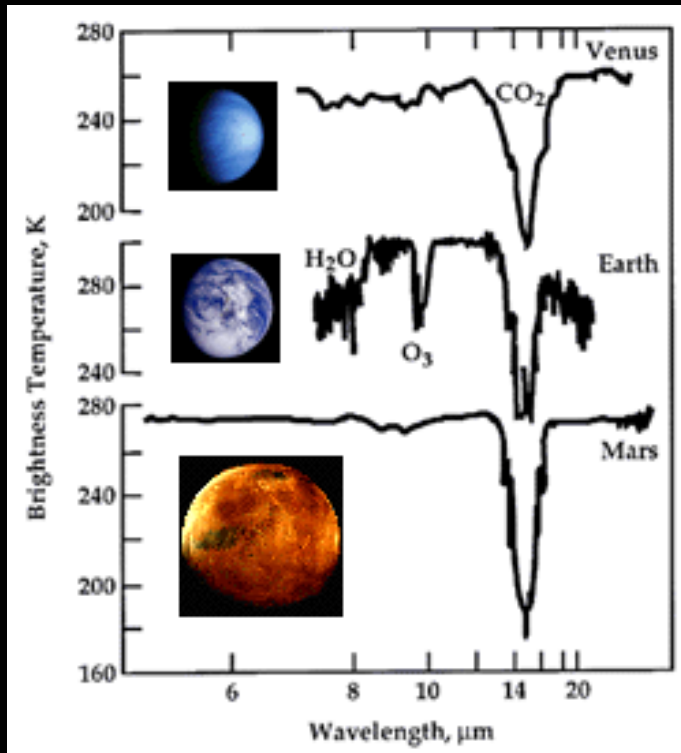
例えば、左の
Paleomap project
(Scotese 2002)の
ようなデータを用い
て、過去の地球の
模擬観測を行う
データをお持ちの
方はぜひともお知
らせください

今後の展望

- 巨大ガス惑星発見の時代 (1995～)
 - 惑星大気の実見 (2002)
 - 惑星大気の高精密分光観測による組成決定
 - 惑星赤外線輻射の実出 (2005)
-
- 惑星可視域反射光の実出
 - 系外惑星リング、衛星の実見
 - 地球型惑星、居住可能惑星の実見
-
- 惑星の直接実出(測光&分光)
 - バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定
 - 地球外生命の実見



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？ Biomarker を特定できるか？