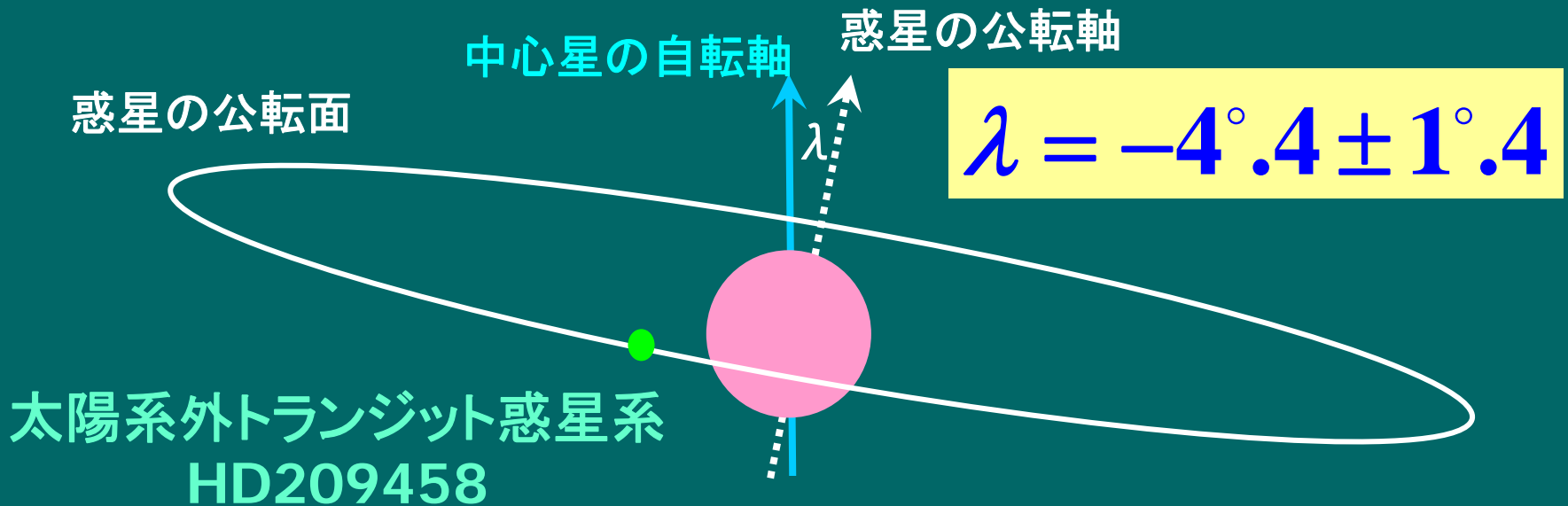


# 太陽系外惑星系 HD209458 におけるロシター効果の観測



東京大学 大学院理学系研究科  
物理学専攻 須藤靖

連星・変光星ワークショップ2005  
2005年10月30日、国立科学博物館新宿分館

# 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)

# 太陽系外惑星発見の歴史

- 1995年: 主系列星周りの系外惑星の発見 (51Peg)
- 1999年: 系外惑星のトランジット発見(HD209458)
- 2001年: トランジット惑星大気の新検出(ナトリウム)
- 2003年: トランジット惑星から蒸発する水素大気の新発見
- 2003年: 公転周期1.2日のトランジット惑星発見(OGLE)
- 2004年1月: トランジット惑星大気中に炭素と酸素を検出
- 2004年4月: 公転周期1.4日、1.7日のトランジット惑星発見
- 2005年6月: 6~8倍地球質量の惑星発見(地球型?)
- 2005年7月: 超巨大コアを持つ灼熱惑星の新発見(佐藤文衛ほか)
- 2005年10月: 惑星公転軸の傾きの発見
- 2005年10月20日時点で145個の系外惑星系(計169個の惑星)

# 太陽系外惑星探査の方法

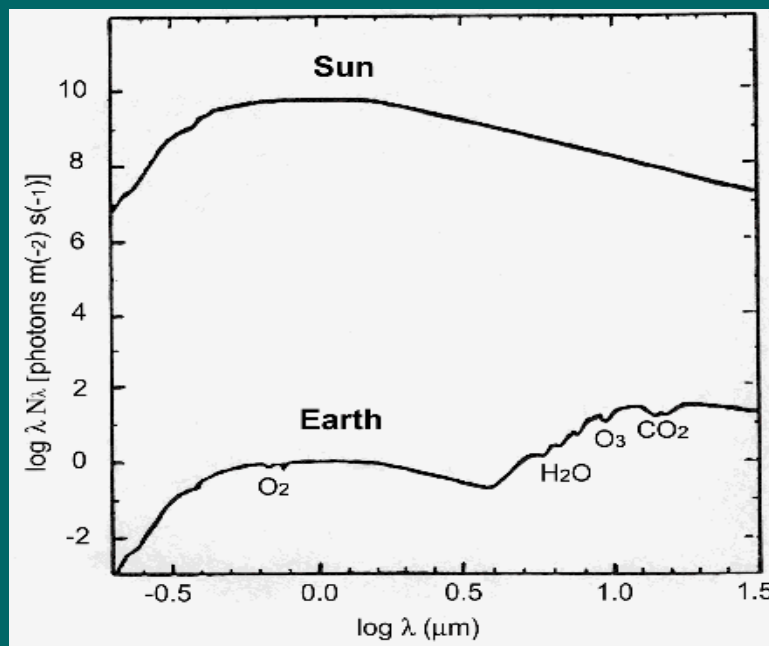
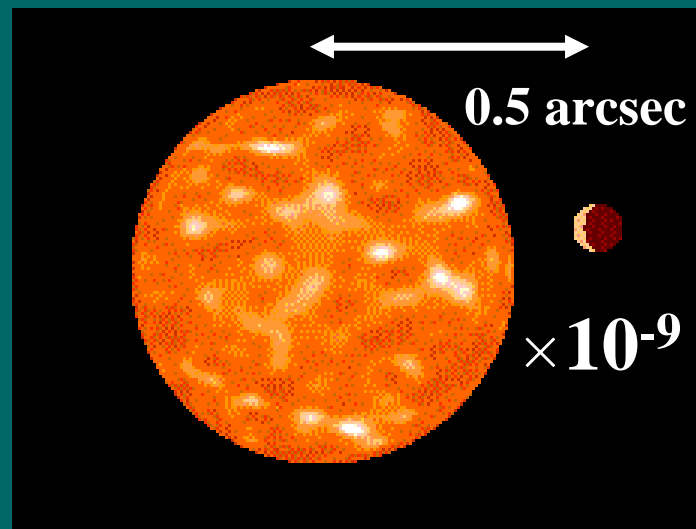
- 直接撮像：高角度分解能
- 主星の速度変動：高精度分光
- 主星の位置変動：高精度位置決定精度
- 主星の光度変動：高精度測光
- パルサーの信号到着時刻変動：  
高時間分解能

⇒ いずれも最先端の観測技術を要する

# 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

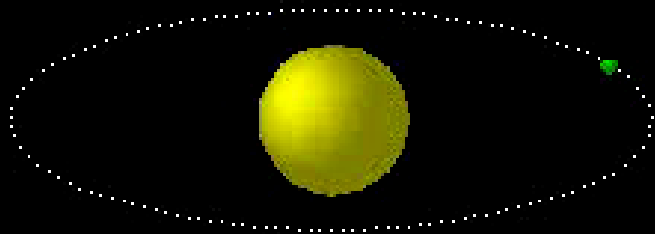


地上観測の典型的な角度分解能の大きさ内で、9桁程度も明るい主星のすぐ隣にある27等級の暗い天体を観測する

⇒ ほとんど不可能！

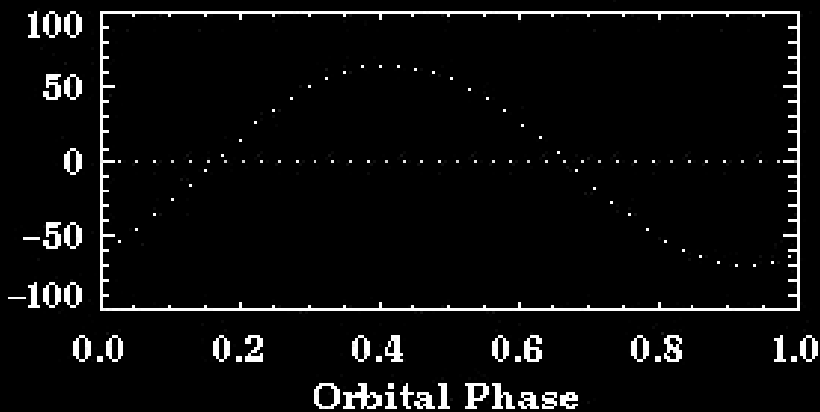
# どうやって見つけたのか？

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]

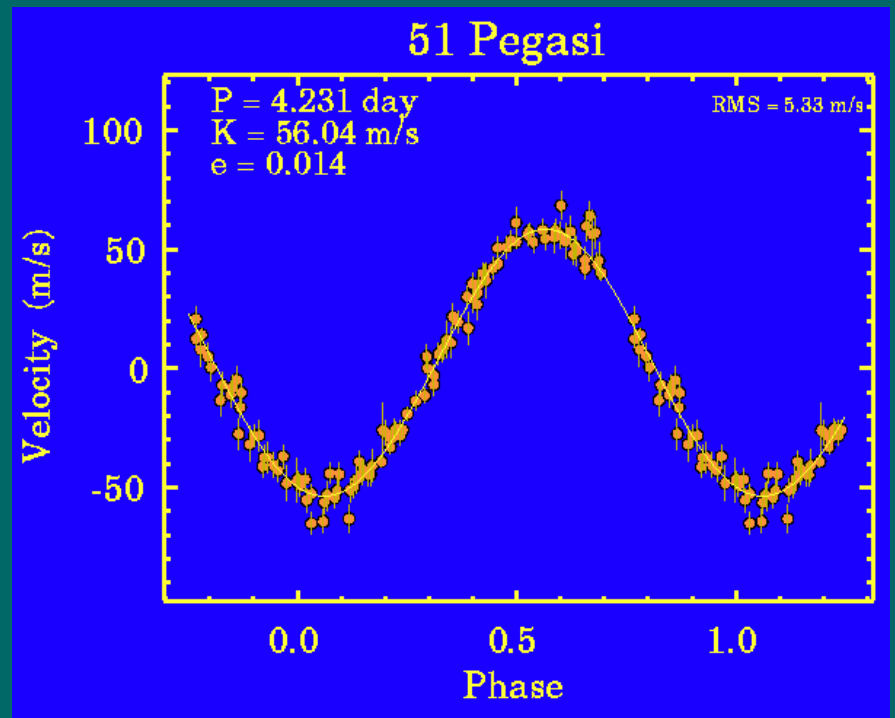
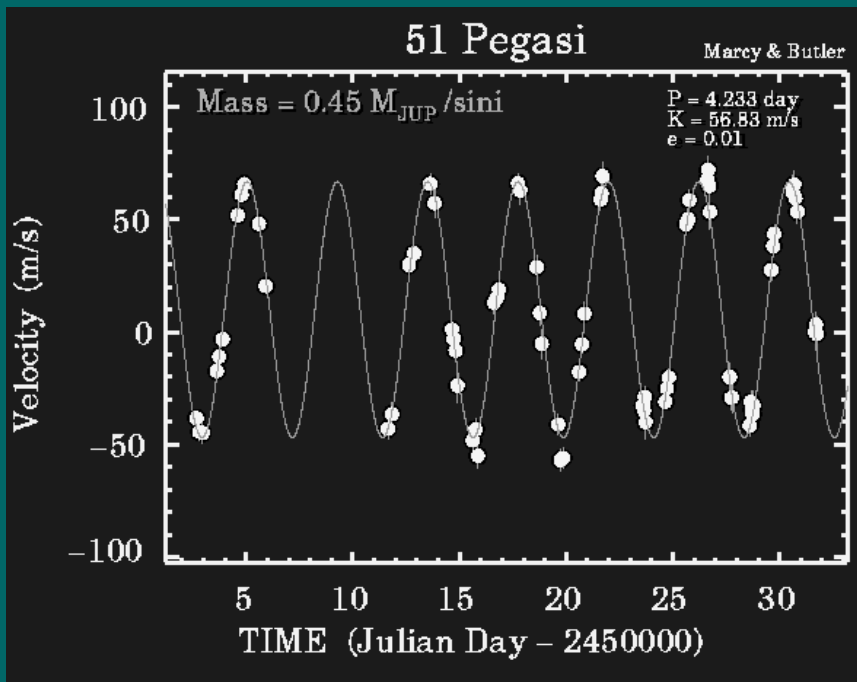


S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

- 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

# 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！

# トランジット惑星とは

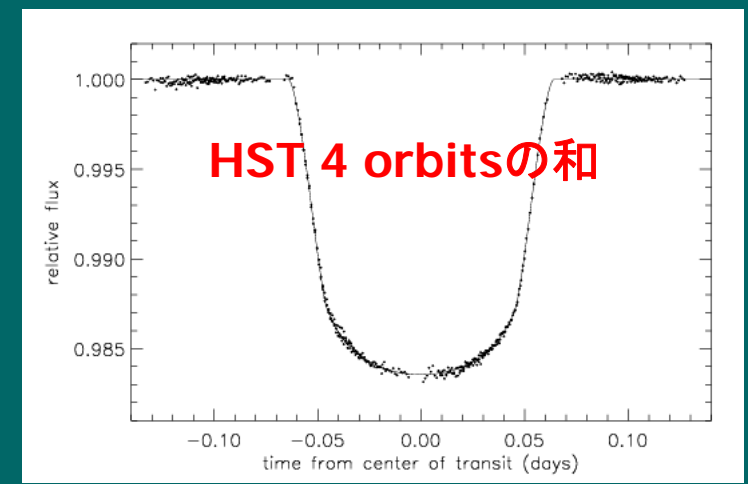
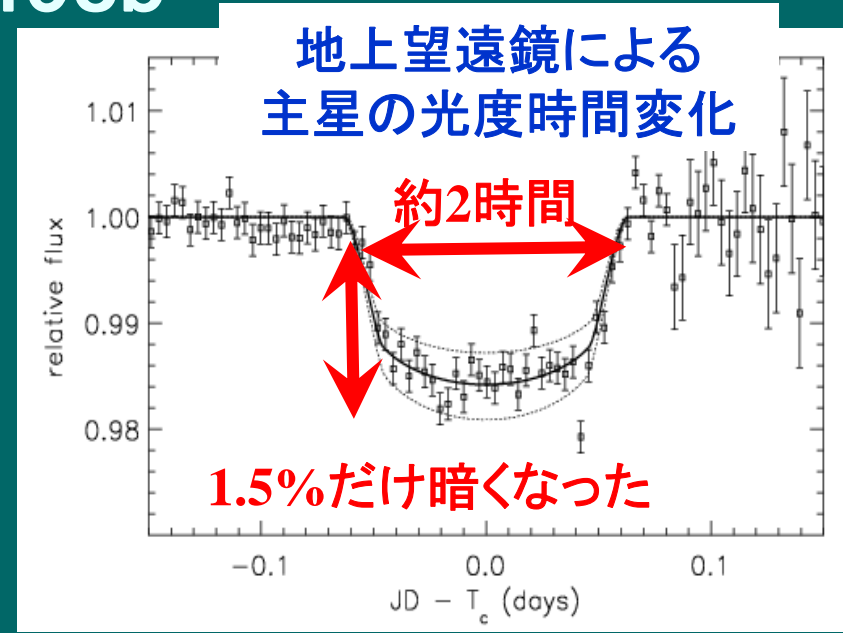
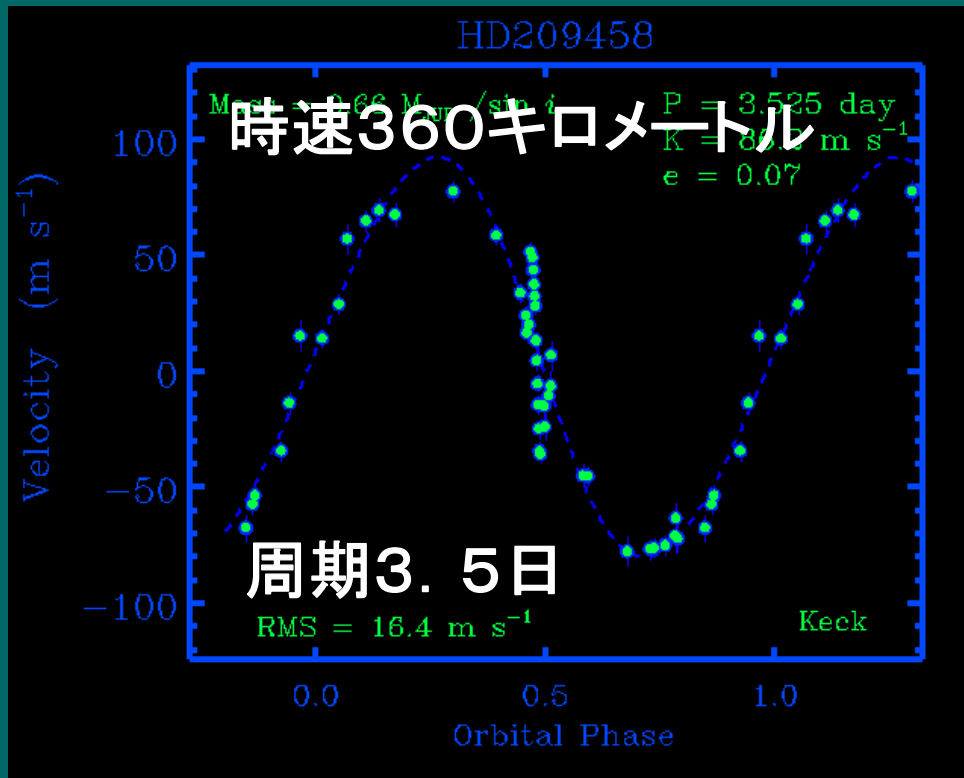
- **惑星系をより深く理解する手がかり**
  - 惑星の公転面がたまたま観測者の視線面と同じで、惑星が恒星の前を横切るもの
  - 2005年9月時点で、8個が知られている
  - 中心星の光度変化の観測⇒惑星のサイズ
  - 精密分光観測データ解析⇒惑星大気組成
  - **中心星の自転速度と中心星自転軸と惑星公転軸のなす角度がわかる(今回の結果)**





# 初めての太陽系外トランジット(食)惑星 HD209458b

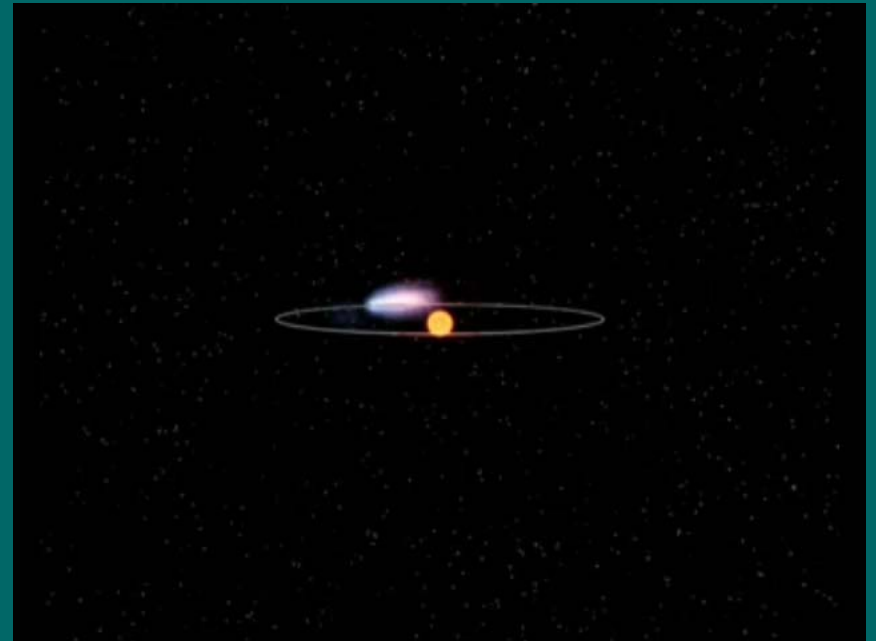
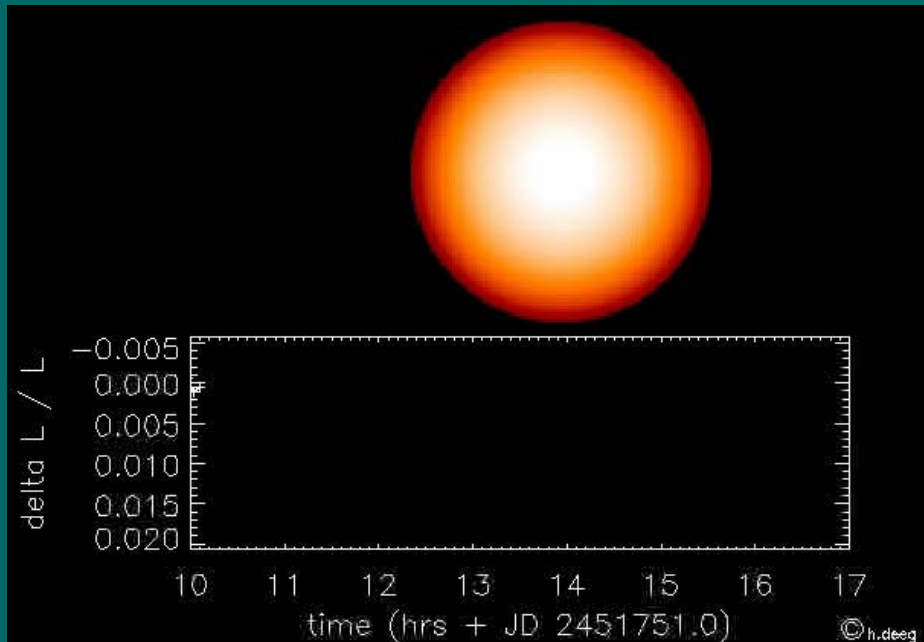
- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出



地上望遠鏡による  
主星の速度時間変化

# 最初に発見されたトランジット惑星系: HD209458

- 距離: 約150光年
- 公転周期: 3.5日
- 質量: 0.63木星質量
- 半径: 1.4木星半径
- 密度: 0.4g/cc



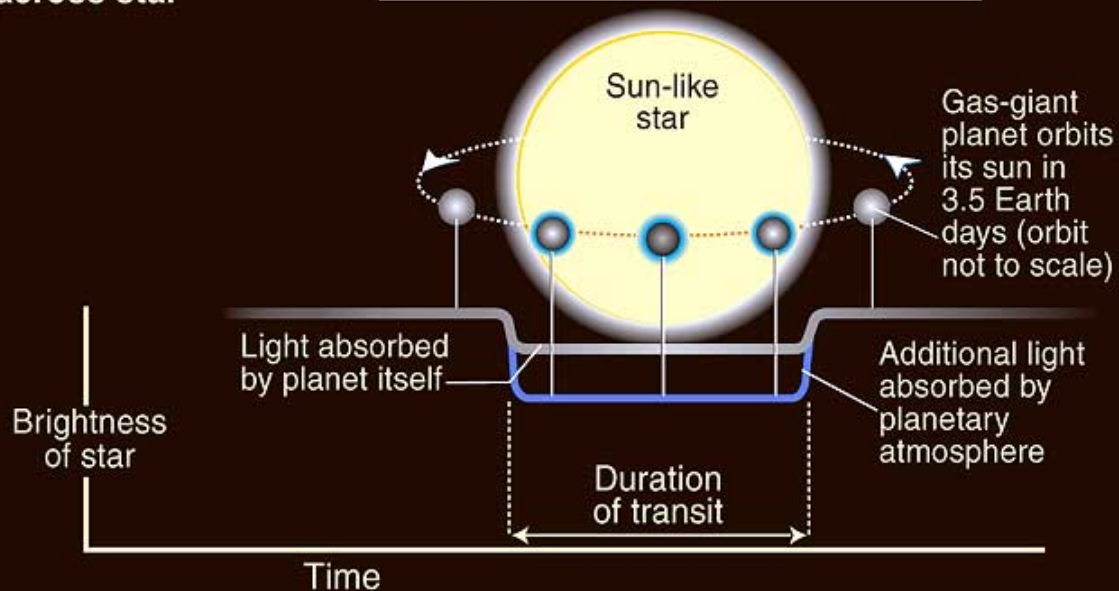
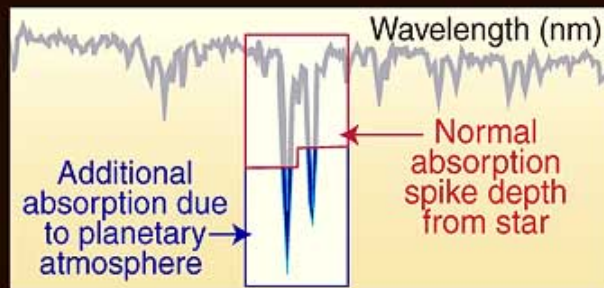
# トランジット惑星の重要性

- 速度変動の惑星による**解釈の正当性**
- 食の光度曲線より**惑星のサイズ**がわかる
  - 速度変動データとあわせて惑星の密度がわかる
  - ガス惑星？ 地球型？
- 惑星大気による吸収より**大気組成**がわかる
- 主星の自転軸と惑星の公転軸の関係がわかる  
(角運動量の起源): **ロシター効果**
- **測光観測だけで系外惑星候補を選ぶことが可能**
  - 今後(より遠方)の惑星探査の有効な手段
  - 速度変動は分光観測を要するため効率が低い
  - アマチュアだからこそ可能な長期継続モニター観測によって、より外側の惑星の発見につながる可能性も

# HD209458b 惑星大気の 初検出

[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



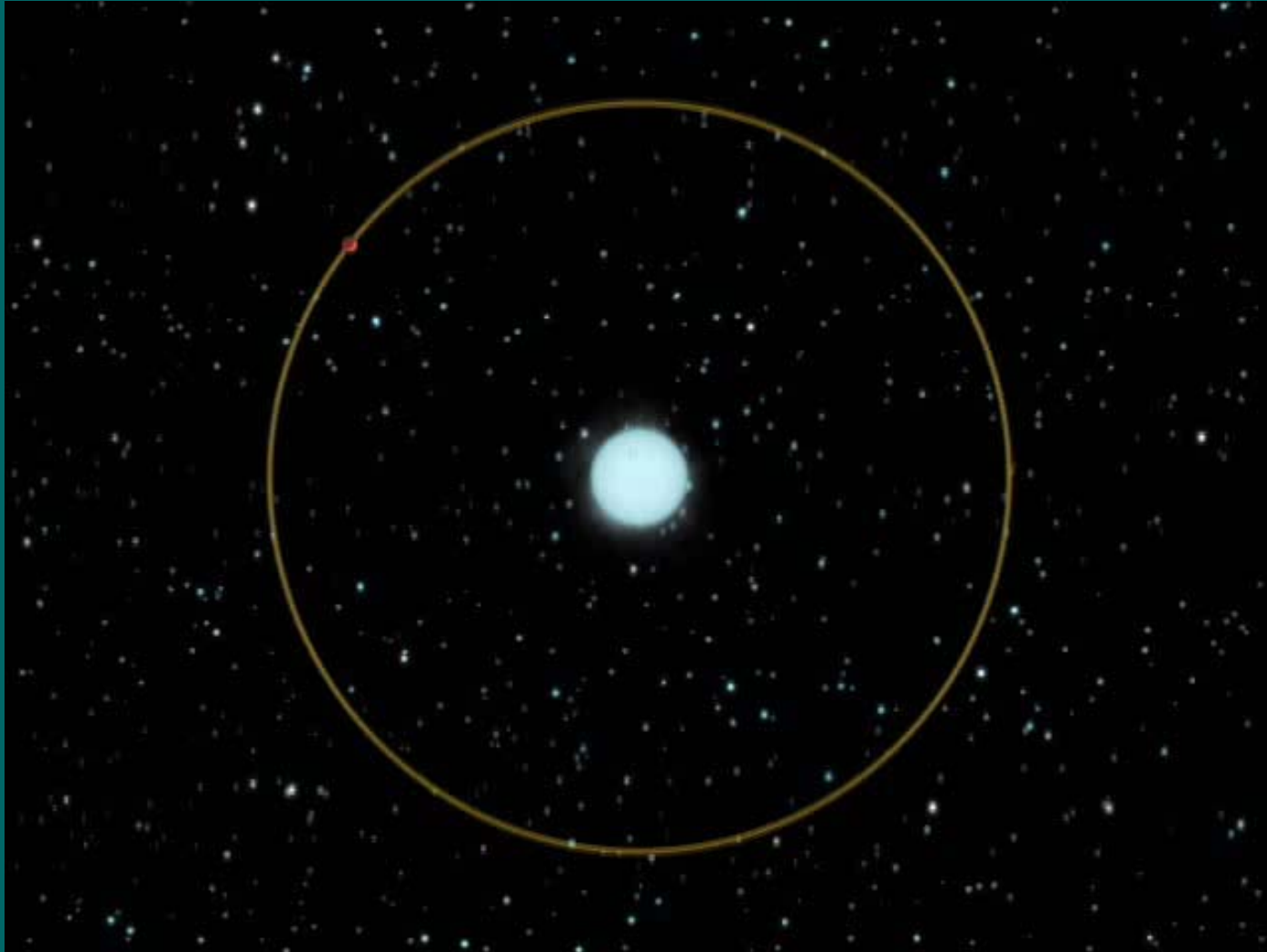
- 2000年 系外惑星の食を初検出
  - 惑星の大きさがわかる
  - 質量の観測データとあわせて密度を0.4g/ccと推定
  - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムを発見

# HD209458惑星系のパラメータ推定値

Radial velocity データ + *transit* データ

HD209458 (主星)	スペクトル型	G0V
	Vバンド等級	7.58 (距離=47pc)
	表面温度	6000度
HD209458b (惑星)	公転周期	3.52474 ± 0.00004 日
	軌道面傾斜角	86.68 ± 0.14 度
	質量	0.63 木星質量
	半径	1.347 ± 0.060 木星半径
	密度	0.4g/cc (< 土星密度)
	有効温度	1400度
	大気組成	ナトリウム、水素、炭素、酸素の存在が報告

# 赤外線(スピッツァー衛星)で見る 主星による惑星の食



# すばる望遠鏡 による挑戦



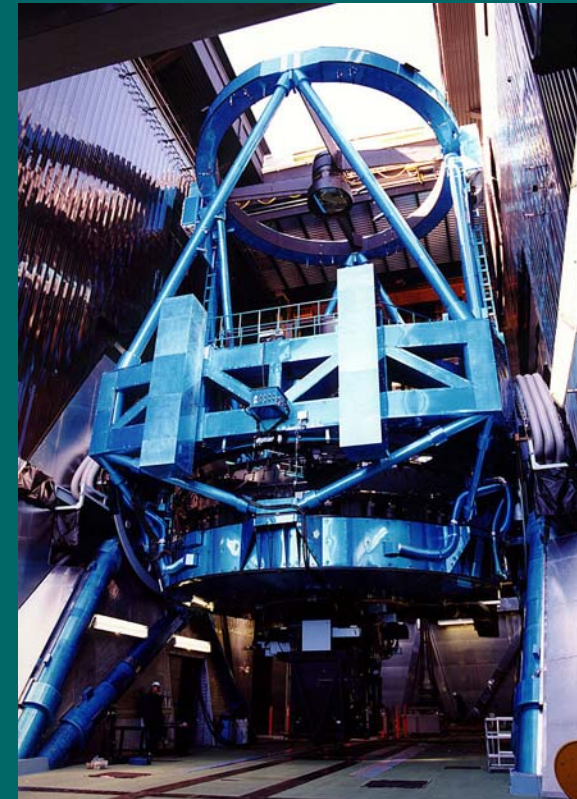
太陽系外食惑星HD209458bからの  
反射光の超高分散分光観測  
2002年10月、2003年7月、8月

須藤 靖、成田憲保 (東京大学)

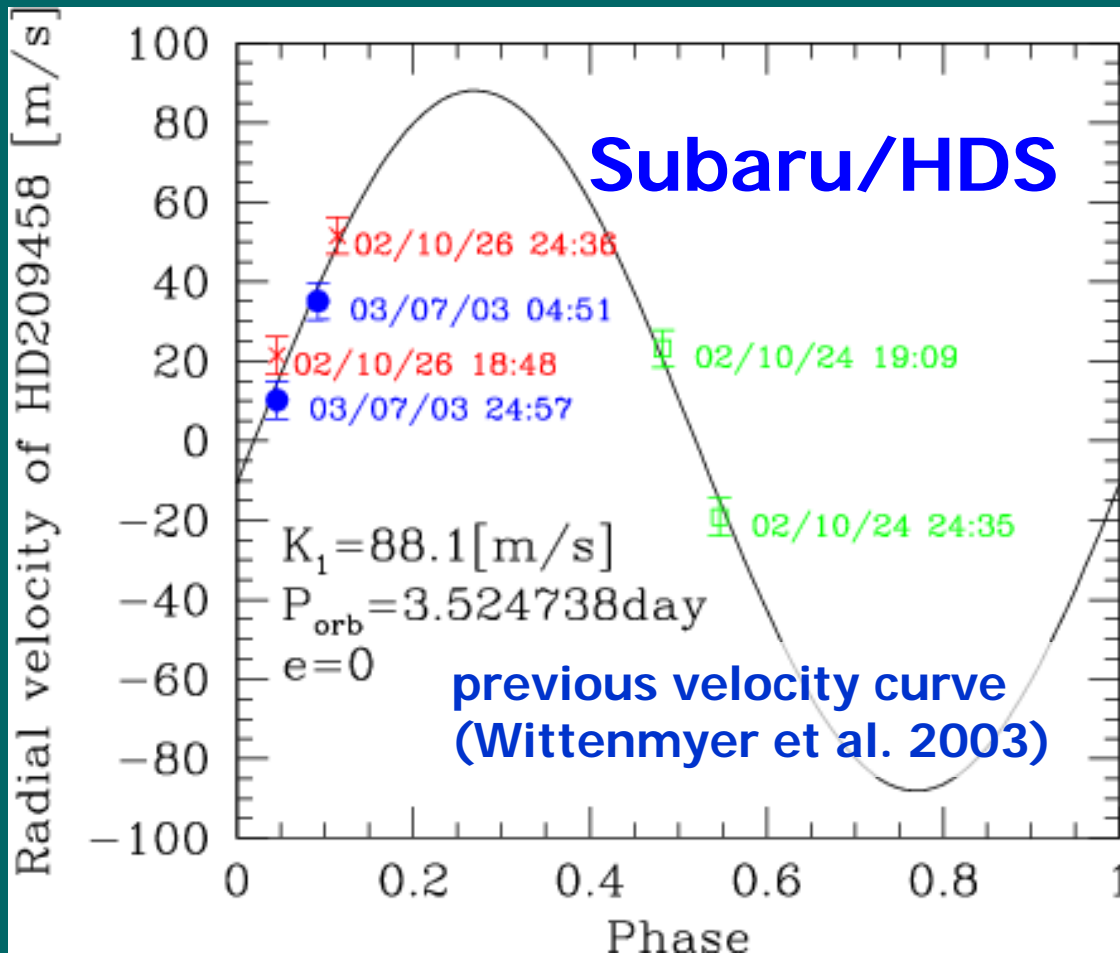
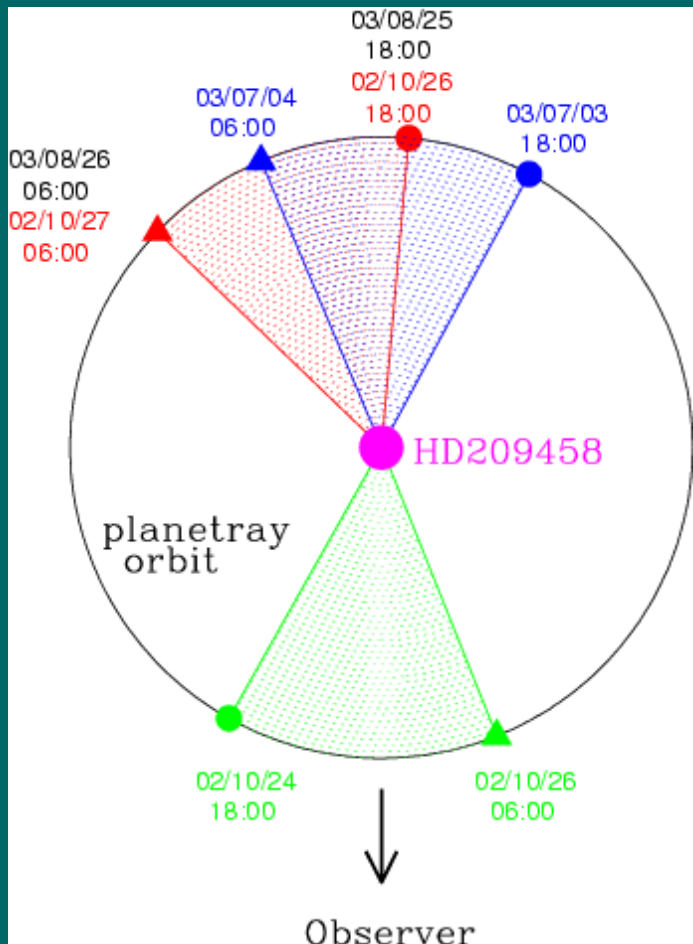
青木和光、山田亨 (国立天文台)

佐藤文衛 (神戸大学)、Josh Winn (Harvard Univ.)

Edwin Turner, Brenda Frye (Princeton Univ.)



# HD209458bの位相とradial velocity



Winn et al. PASJ 56(2004) 655, astro-ph/0404469

Narita et al. PASJ 57(2005)471, astro-ph/0504450

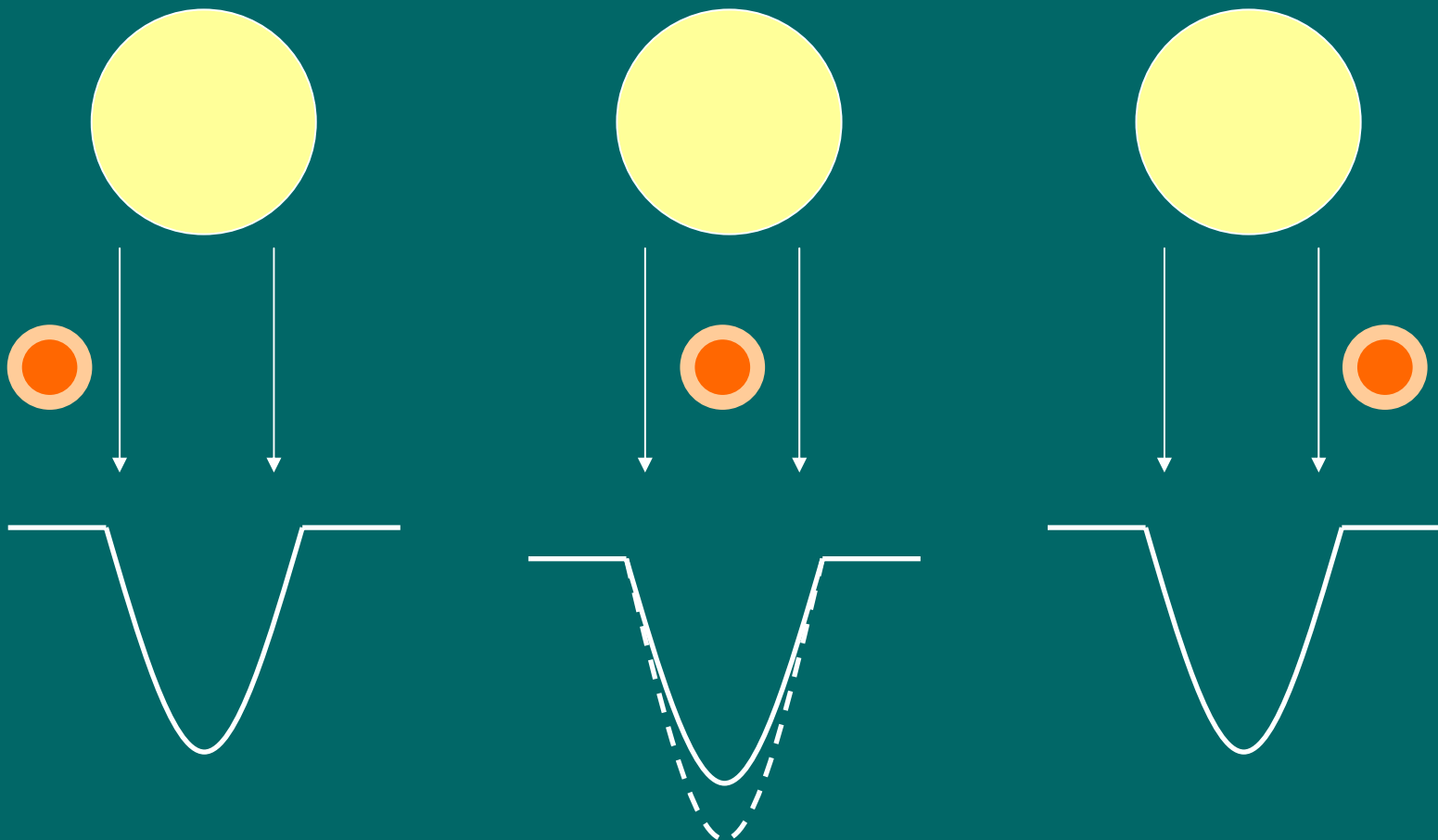


# 現在進行中の3つのHDSプロジェクト

1. 地上からの太陽系外惑星大気初検出を目指す
  - $H\alpha$  吸収の解析は終了、現時点では上限値のみ
  - Winn et al. PASJ 56(2004)655
  - 他の吸収線の解析 (成田 修士論文)
2. Transit中の星のradial velocity高精度観測による星の自転パラメータと惑星軌道パラメータの制限 (Rossiter-McLaughlin 効果)
  - 解析的テンプレート公式の導出 (Ohta, Taruya & Suto 2004; astro-ph/0410499)
  - すばる望遠鏡観測提案
3. 太陽系外惑星反射光の初検出を目指す
  - St. Andrews大学のグループと共同で解析中

# 惑星大気の違いを分光解析

Transitをそれぞれの吸収線で見ると



惑星大気中の元素の存在量を探れる

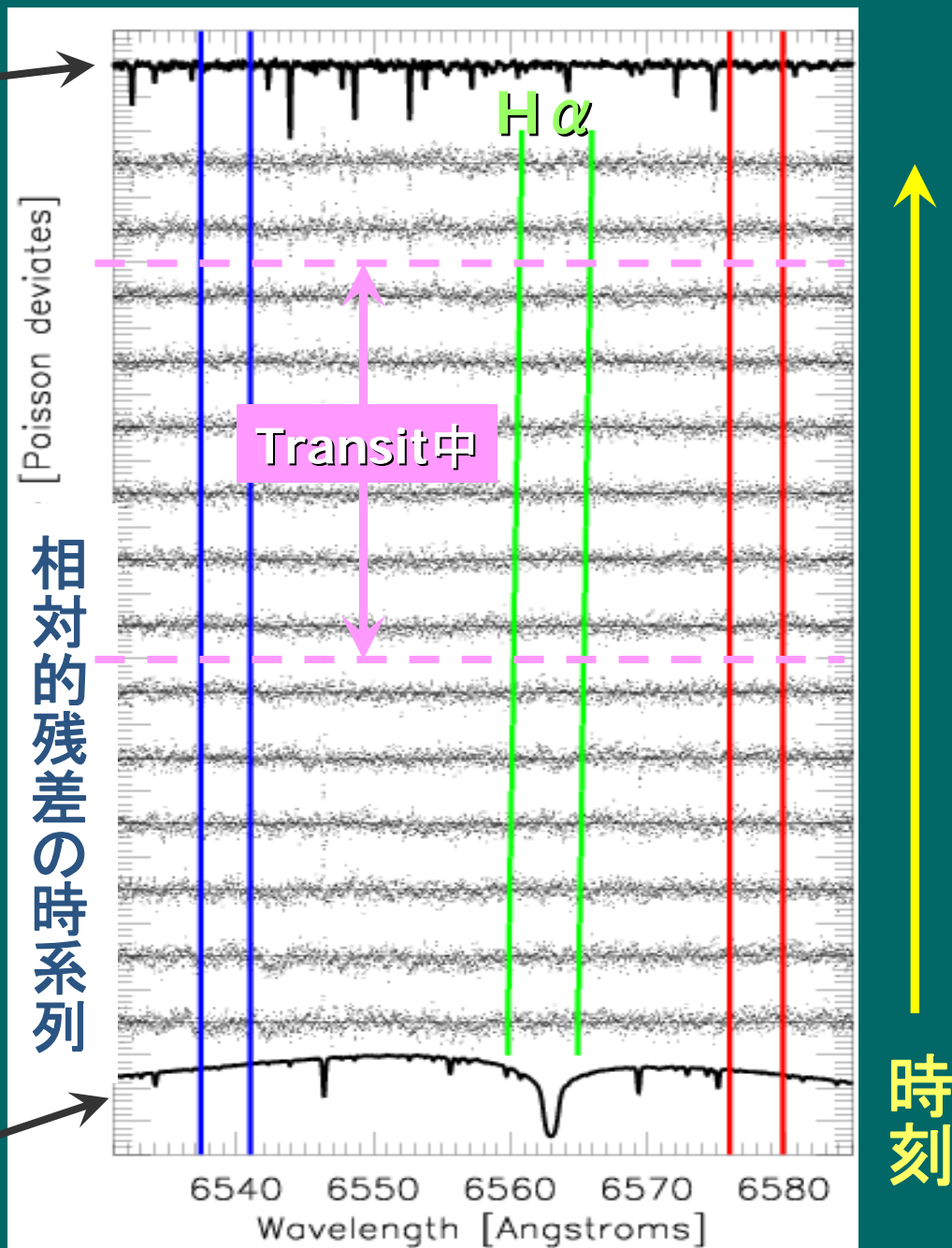
# HD209458b 惑星大気による 吸収の探査

H $\alpha$  付近の  
地球大気スペクトル

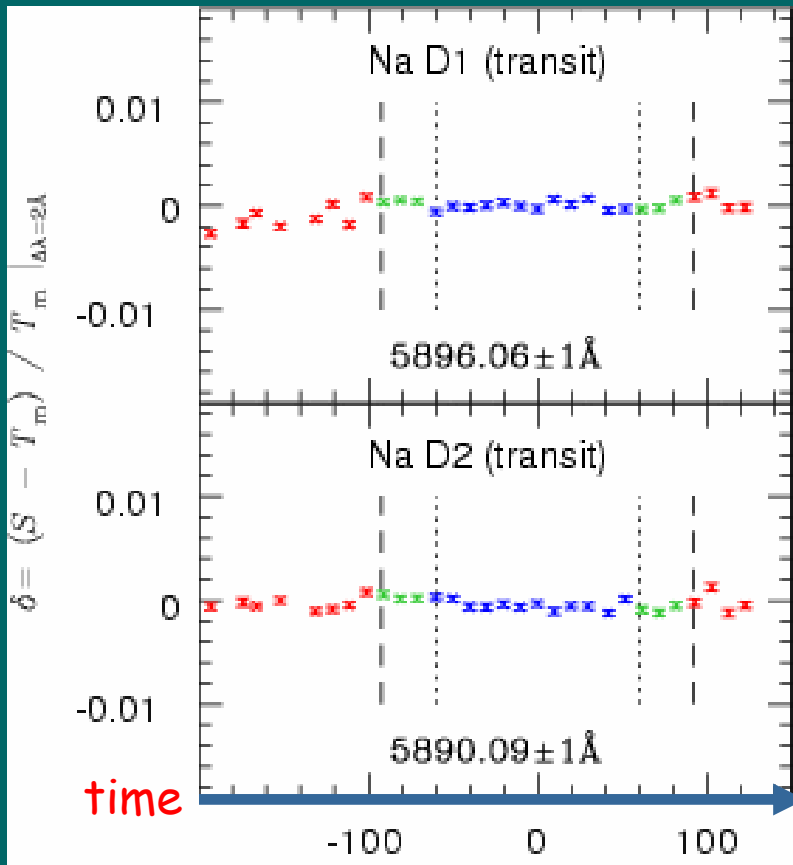
Na I (D2)	5889.97 Å
Na I (D1)	5895.94 Å
<b>H<math>\alpha</math></b>	<b>6562.81 Å</b>
H $\beta$	4861.34 Å
H $\gamma$	4340.48 Å

Transit でない時期の  
H $\alpha$  付近のスペクトル

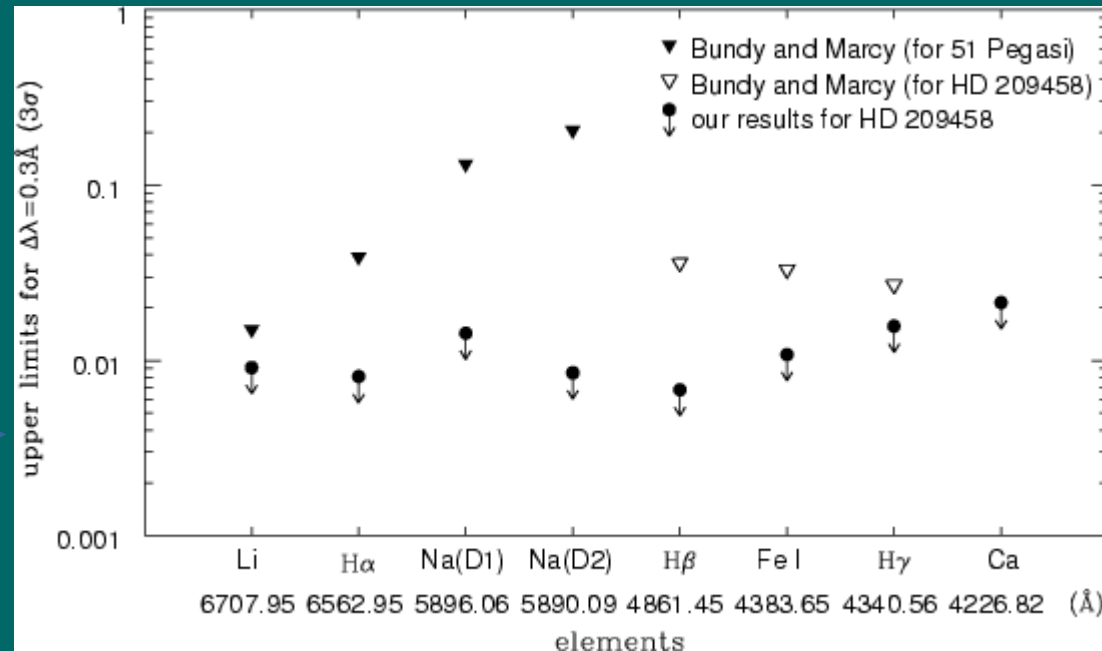
(Winn et al. 2004)



# 地上観測による惑星大気組成の上限値

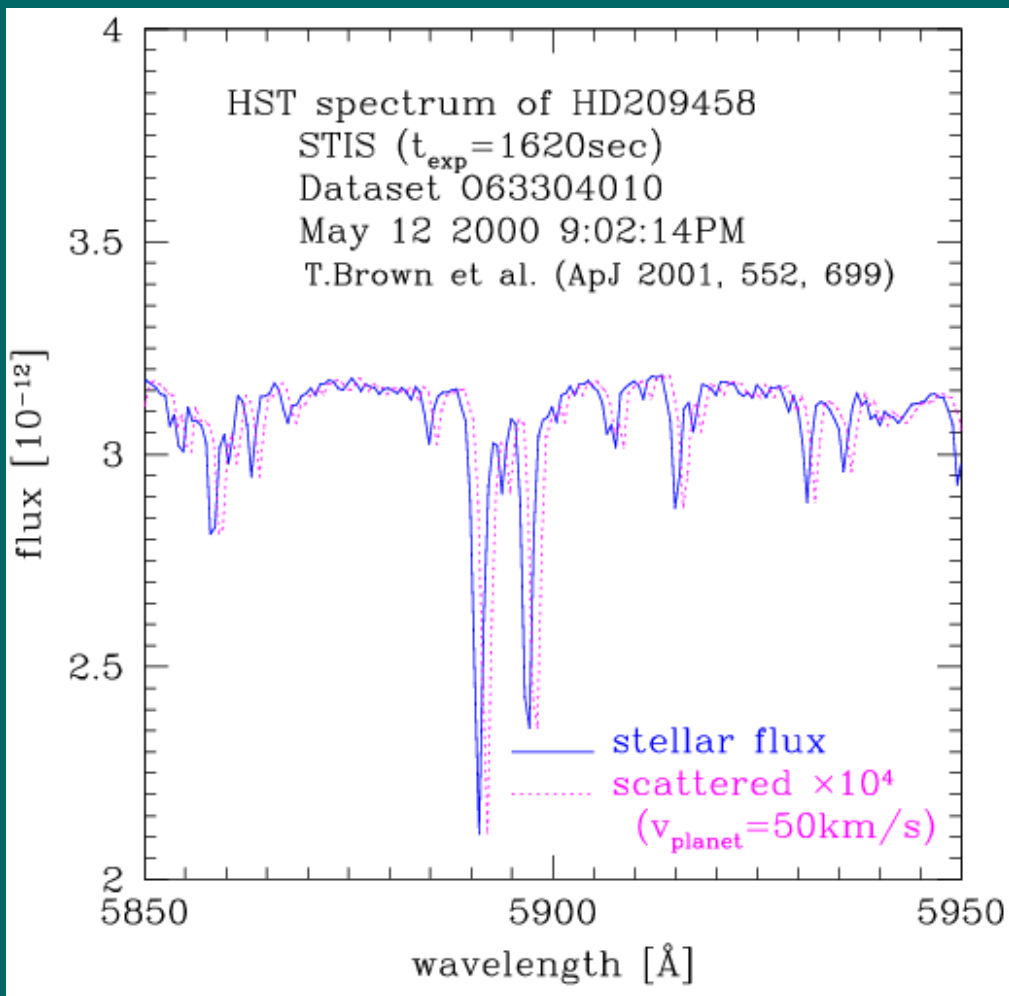


## 過去の結果との比較 (Bundy and Marcy 2000)



Narita et al. (2005)

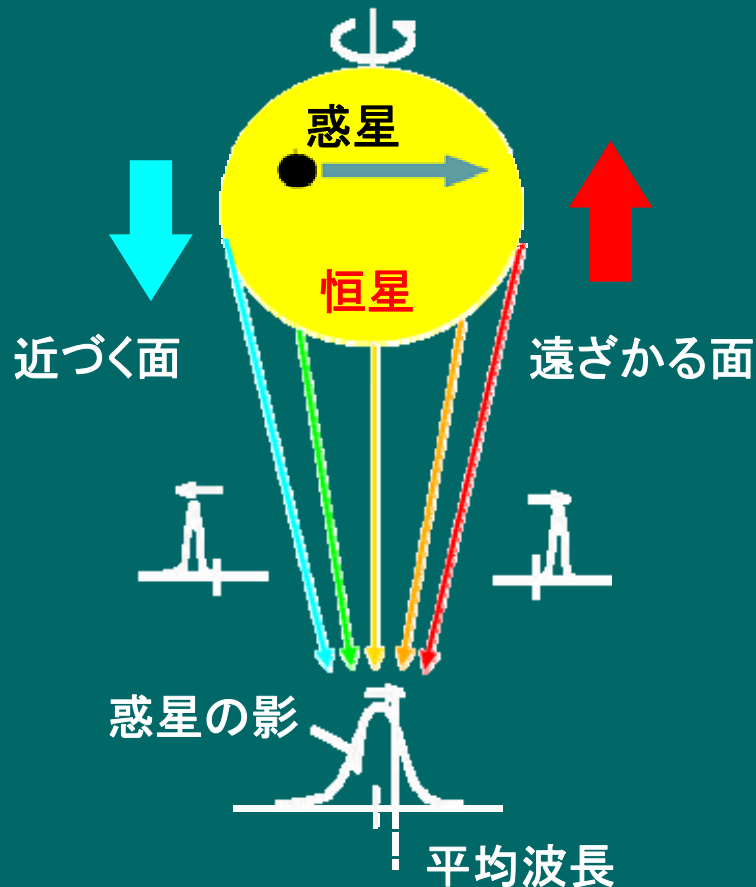
# トランジット惑星からの反射光探索



- 惑星の反射光スペクトルは主星のコピー
- ただし、公転速度のために、吸収線の位置が  $50\text{km/s}$  程度だけずれたところにする
- この反射吸収線の強度はわずか  $0.01\%$
- 数百本の吸収線を同時に使って反射光の存在を検出したい
- すばるの高分散分光器 HDSの波長分解能  $50000$ を最大限活用

# ロシター効果とはなにか

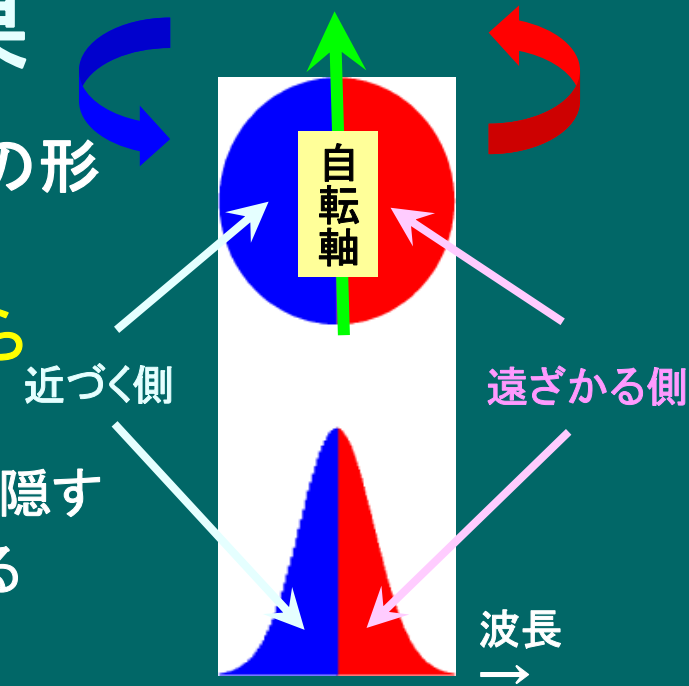
食連星において、一方の星が他方の星の一部を掩蔽することで、星の自転速度の一部が見かけ上、その星と観測者の相対速度のように見えてしまう現象  
(Rossiter 1924)



1. 恒星の自転によるドップラー効果によって、スペクトル線が広がる
2. 惑星が恒星の一部を隠すと、スペクトル線の対応する部分が欠ける
3. スペクトル線の平均的な波長がずれる

# 検出原理： ロシター効果

- 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！



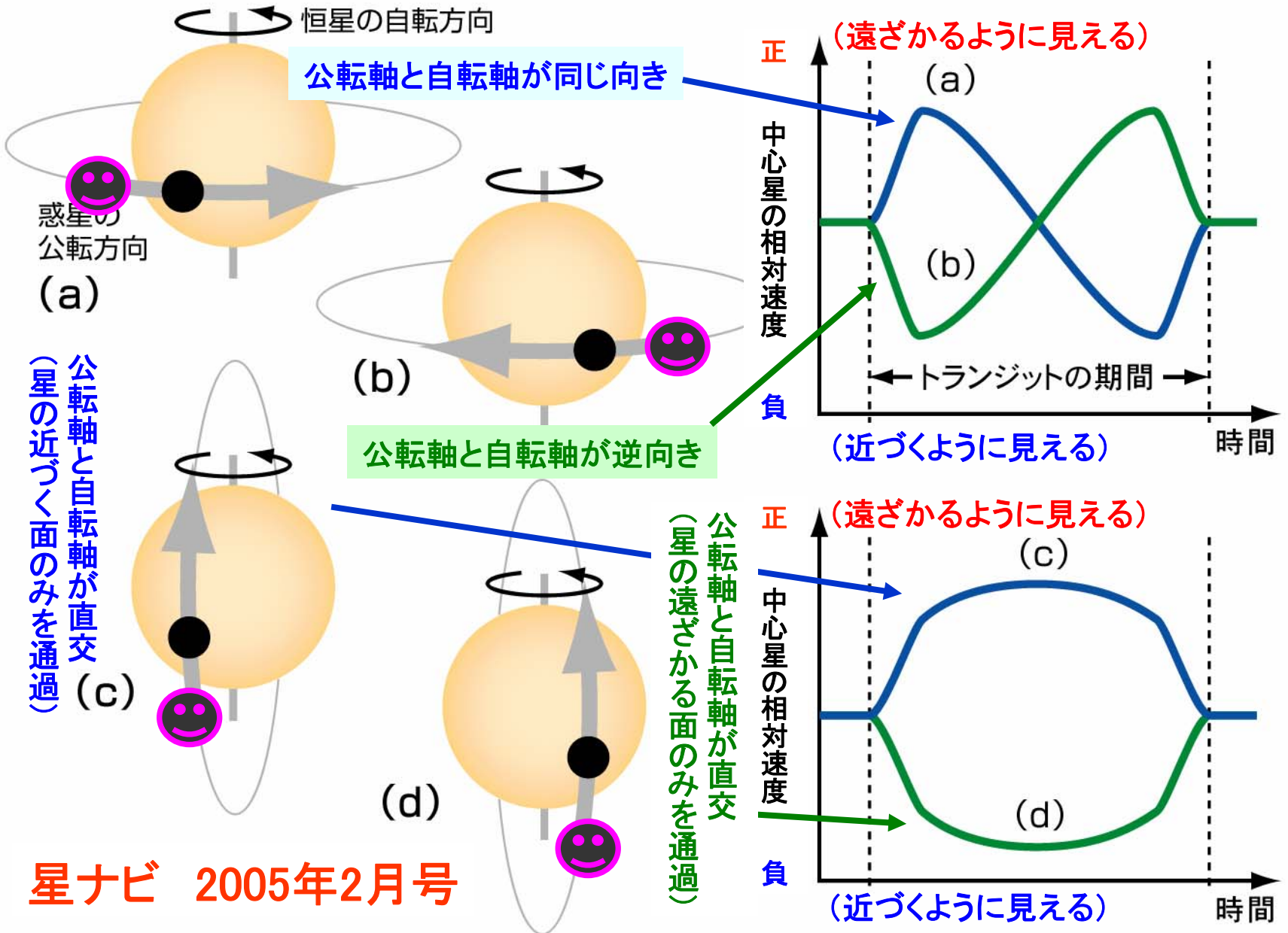
星の輝線プロフィール

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:**

**The Astrophysical Journal 60(1924)15**

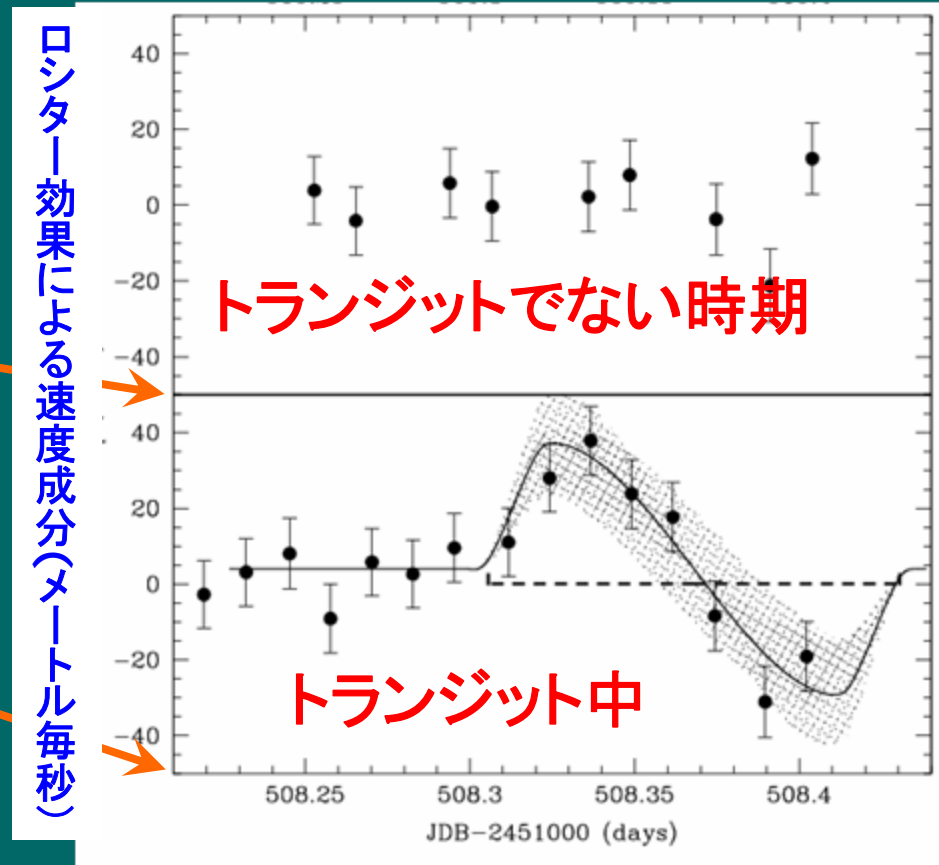
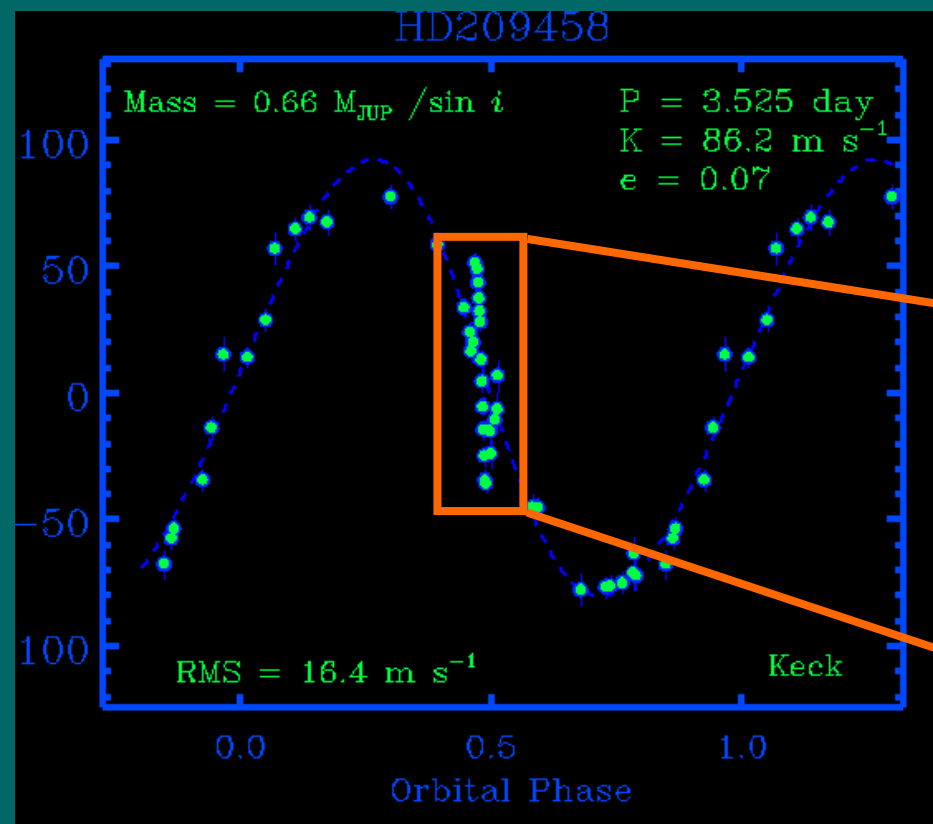
# 惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図





# 過去の研究

- 太陽系外惑星系におけるロシター効果の初検出
- 自転軸と公転軸が $\pm 20^\circ$ の精度で同じ向きであることを発見



HD209458 の速度変動  
<http://exoplanets.org/>

Queloz et al. (2000) A&A 359, L13

# 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)

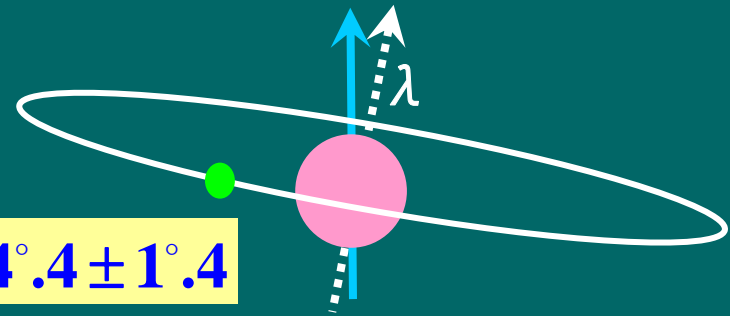
- Joshua N. Winn<sup>1</sup>, Robert W. Noyes<sup>1</sup>, Matthew J. Holman<sup>1</sup>, David B. Charbonneau<sup>1</sup>, 太田泰弘<sup>2</sup>、樽家篤史<sup>2</sup>、須藤靖<sup>2</sup>、成田憲保<sup>2</sup>, Edwin L. Turner<sup>2,3</sup>, John A. Johnson<sup>4</sup>, Geoffrey W. Marcy<sup>4</sup>, R. Paul Butler<sup>5</sup>, & Steven S. Vogt<sup>6</sup>
  - <sup>1</sup>ハーバード大学、<sup>2</sup>東京大学、<sup>3</sup>プリンストン大学、<sup>4</sup>カリフォルニア大学バークレー校、<sup>5</sup>ワシントン カーネギー研究所、<sup>6</sup>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)
- [astro-ph/0504555](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0504555)



# わずかなズレの初検出！



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



- 私の研究室の大学院生太田泰弘君の理論的研究が、共同研究者であるハーバード大学のJosh Winn氏を刺激した結果
- トランジット惑星 HD209458 のベストデータフィット
  - ケック天文台(ハワイの10m望遠鏡)による可視光での分光観測
  - ハッブル宇宙望遠鏡による可視光強度変動モニター
  - スピッツァー望遠鏡による赤外線強度変動モニター
- 主星の自転軸と惑星の公転軸が、(射影された)角度  $\lambda$  にして  $(-4.4 \pm 1.4)$  度だけずれていることを発見
  - Queloz et al.(2000)の精度(約20度)を一桁以上向上
  - 太陽の場合、自転軸は系内惑星の全角運動量軸(不変面の法線方向)に対して約6度傾いている

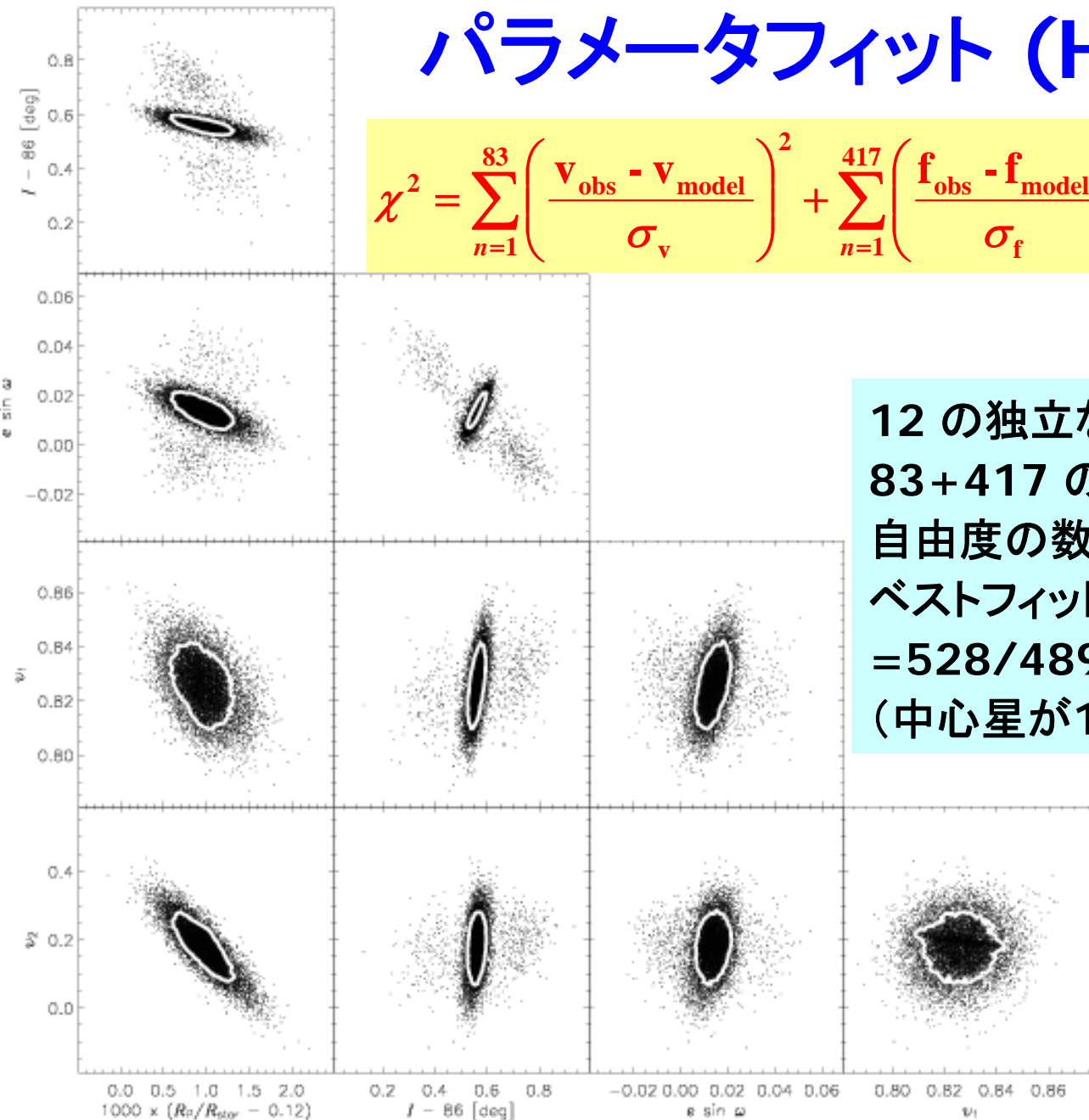


# パラメータフィット (HD209458)

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^{83} \left( \frac{V_{\text{obs}} - V_{\text{model}}}{\sigma_v} \right)^2 + \sum_{n=1}^{417} \left( \frac{f_{\text{obs}} - f_{\text{model}}}{\sigma_f} \right)^2 + \left( \frac{t_{2nd,obs} - t_{2nd,model}}{\sigma_t} \right)^2$$

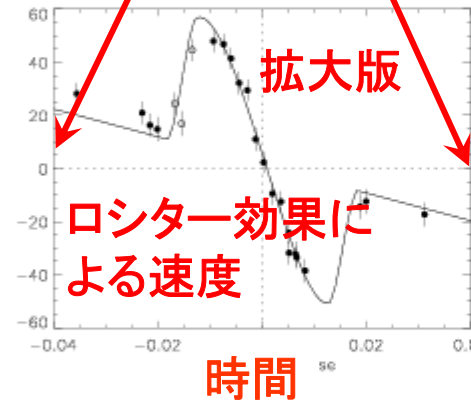
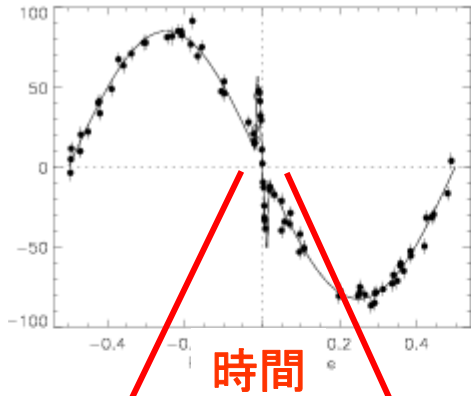
12 の独立なパラメータ  
83+417 のデータ点  
自由度の数 = 83+417-12=489  
ベストフィット:  $\chi^2/\text{自由度}$   
=528/489=1.08  
(中心星が1.06太陽質量を仮定)

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

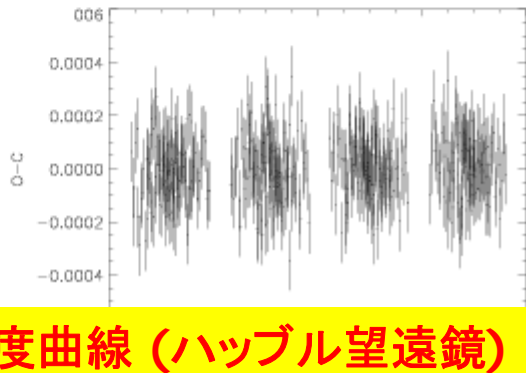
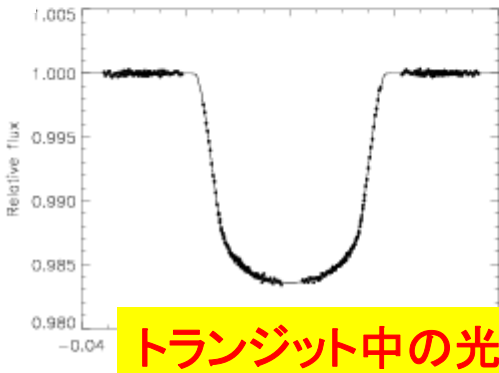
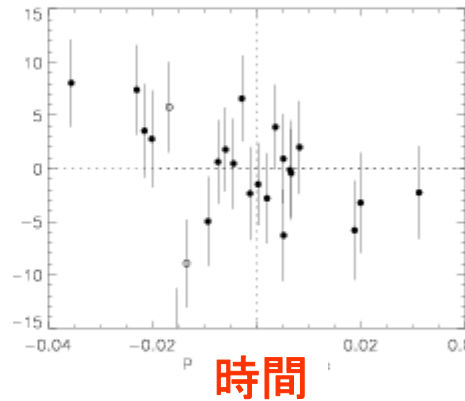
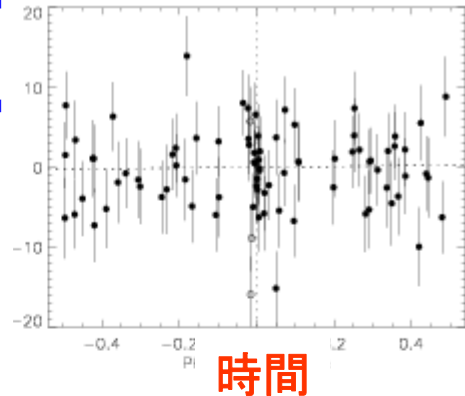


# 相対速度 (ケック天文台)

中心星の視線速度 [m/s]



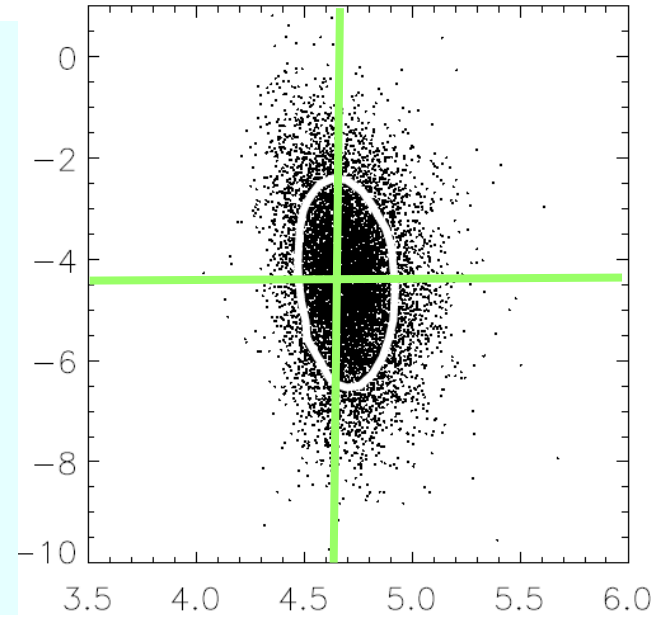
(観測データ) - (ベストフィットモデル) [m/s]



トランジット中の光度曲線 (ハッブル望遠鏡)

# 解析結果

自転軸と公転軸のなす角 [度]

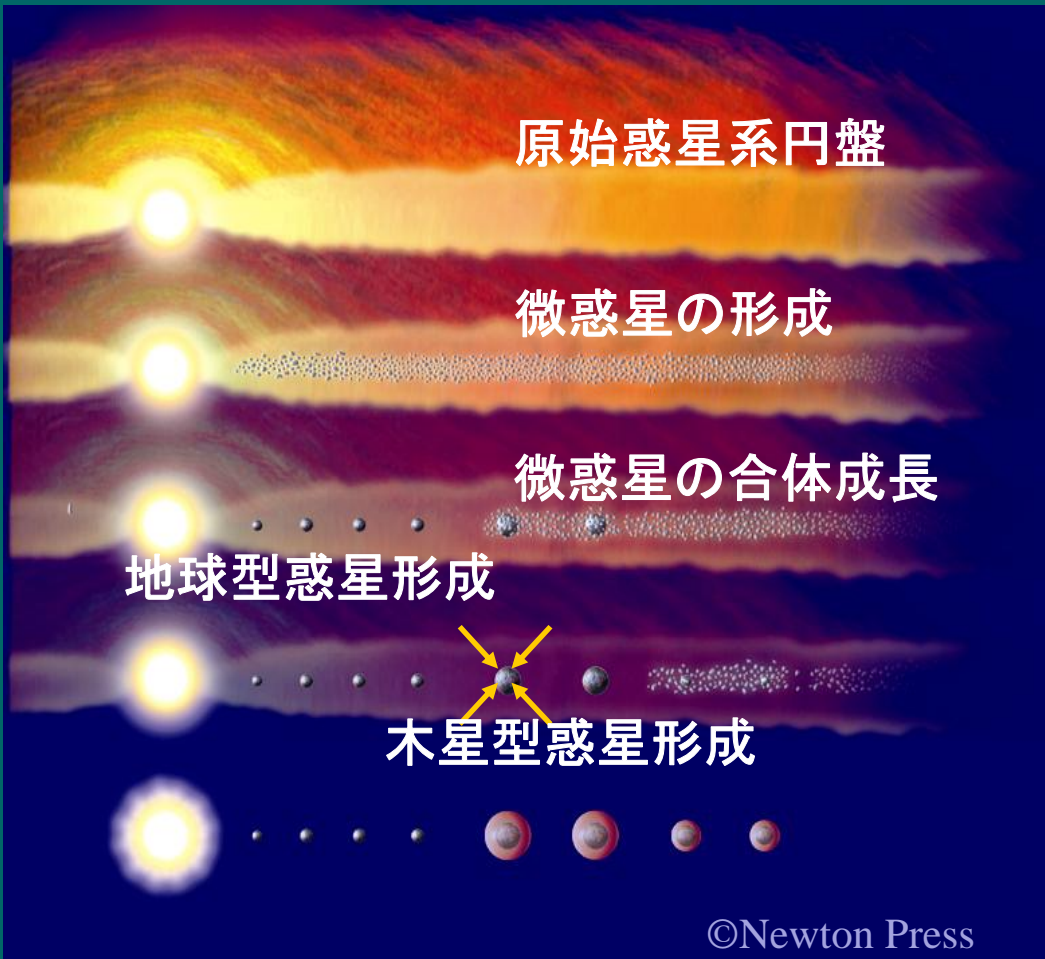


中心星の自転速度 [km/s]

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

わずかではあるが有意に0からずれている!

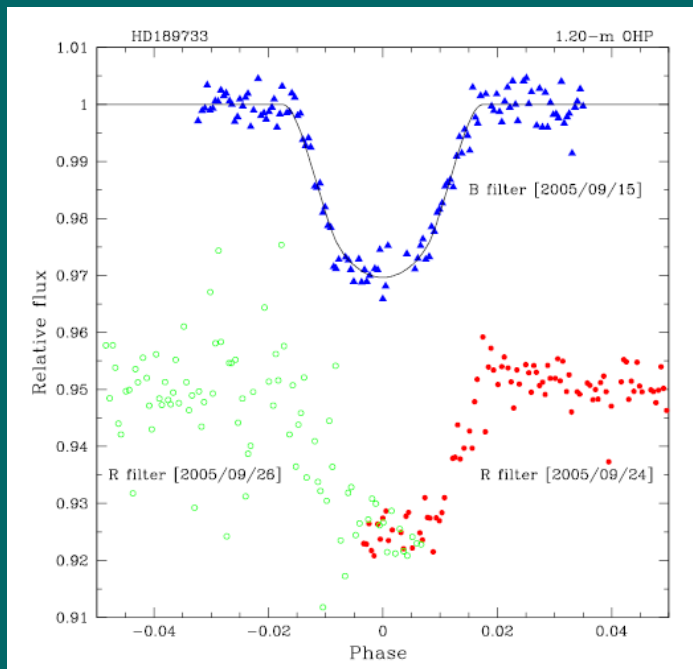
# 太陽系形成標準理論



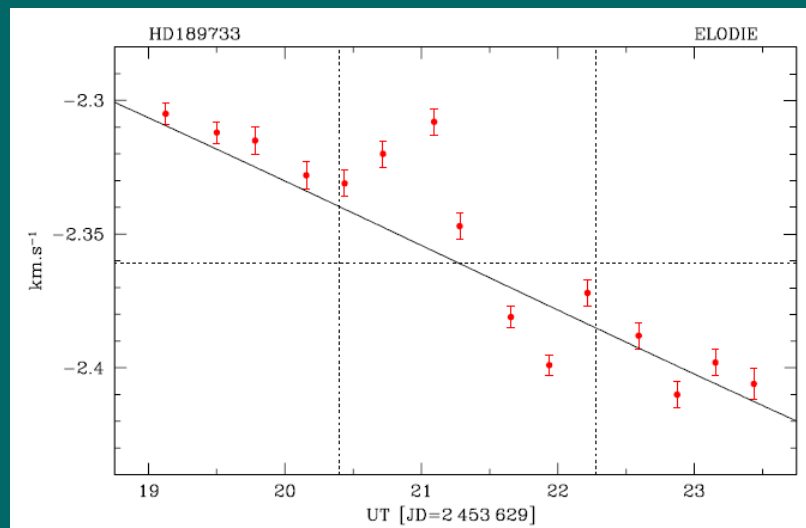
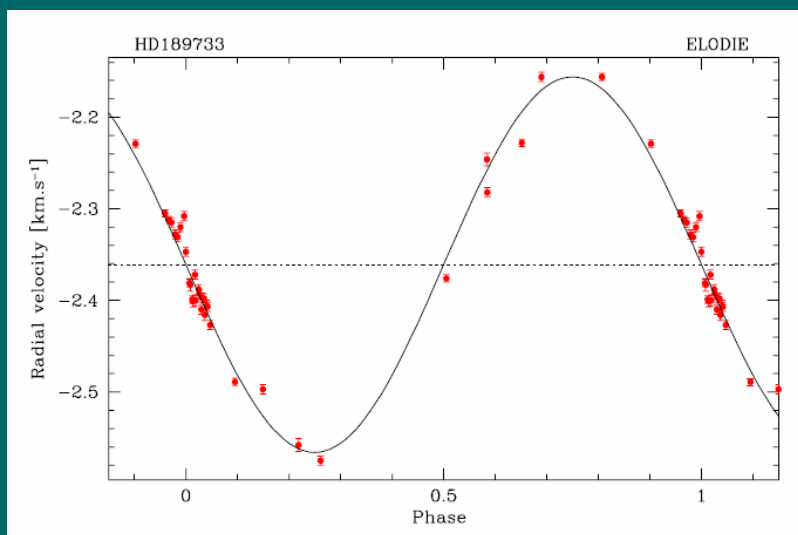
- 京都モデル
  - 林忠四郎@京都大学  
天体核研究室
- 原始惑星系円盤
  - H, Heガス: 99%質量
  - 固体成分: 1%の質量
- 微惑星仮説
  - 固体成分がまず凝集
  - その後ガス成分が降着

©ニュートンプレス、井田茂@東工大

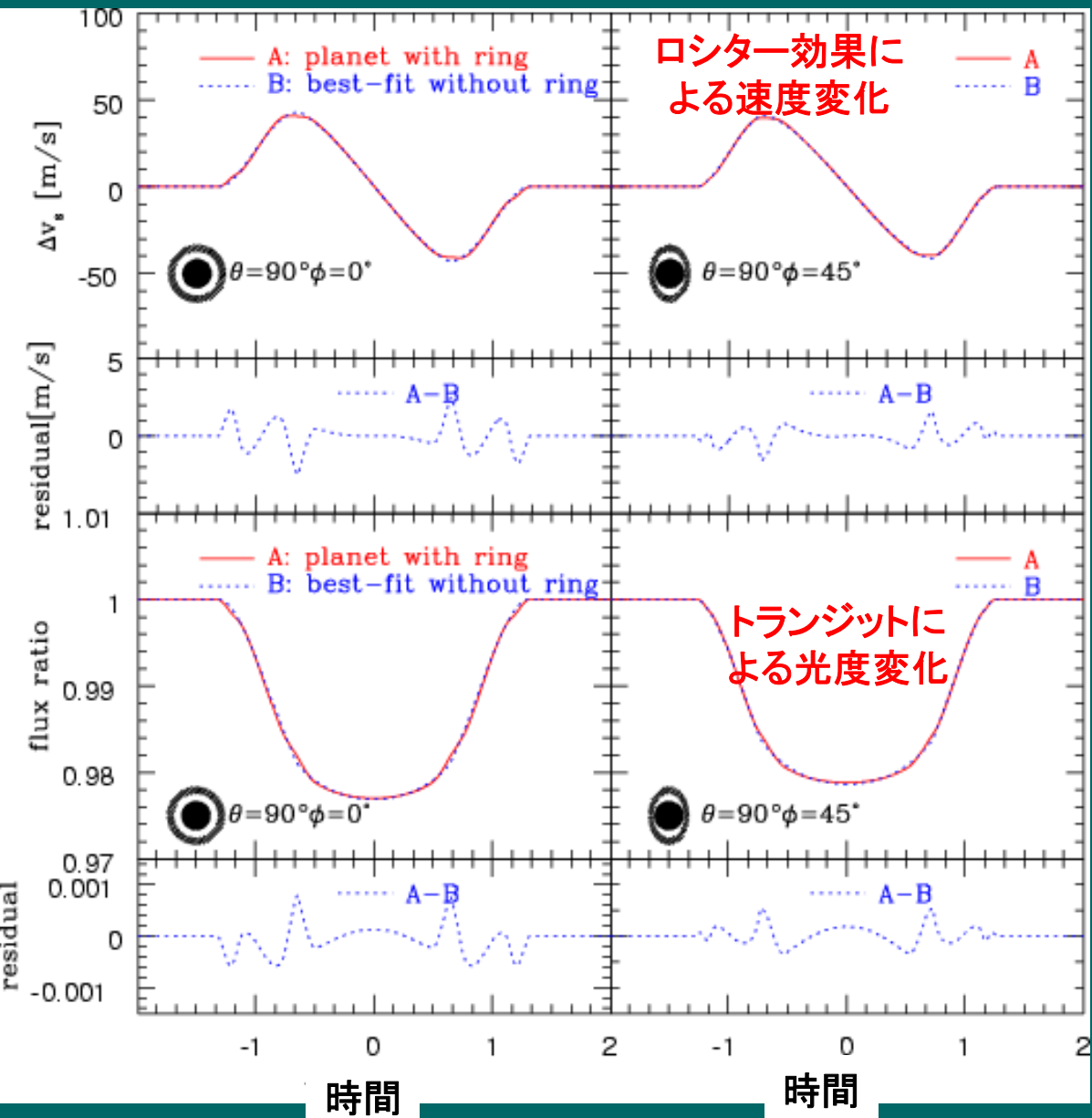
# ロシター効果が観測されている惑星系は後2つ



- **HD189733  $V=7.67$  K1-K2**
  - $P=2.2$  day,  $M=1.15M_J$ ,  $R=1.26R_J$
  - Bouchy et al. astro-ph/0510119
- **HD149026,  $V=8.15$  G0IV**
  - $P=2.9$ day,  $M=0.36M_J$ ,  $R=0.73R_J$
  - Sato et al. astro-ph/0507009



# 系外惑星リングの検出可能性




- HD209458に似たトランジット惑星系がリングを持つと仮定
  - 惑星半径:  $R_{\text{木星}}$
  - リング内径:  $1.5R_{\text{木星}}$
  - リング外径:  $2R_{\text{木星}}$
- リングがない場合の予想とのズレ
  - 速度: 1m/s程度
  - 光度変化: 数ミリパーセント程度
- ほとんど現在の測定精度のレベル!
- もし存在すれば近い将来検出可能



# 系外惑星の初期条件と進化

- 太陽系外惑星系HD209458の観測データの解析から、中心星の自転軸と惑星の公転軸がわずかに4.4度だけ傾いていることを発見した
  - 1) **「史上初」** 観測精度の飛躍的進歩による成果
  - 2) **「標準モデルの検証」** 惑星は中心星の誕生とともに形成される原始惑星系円盤を起源とする
  - 3) **「新たな謎の提供」** 公転軸のわずかな傾きを説明するモデルが必要
  - 4) **「将来性」** 多くの惑星系に対して測定されれば、原始惑星系円盤内の密度分布や角運動量分布などの手がかり

# 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**

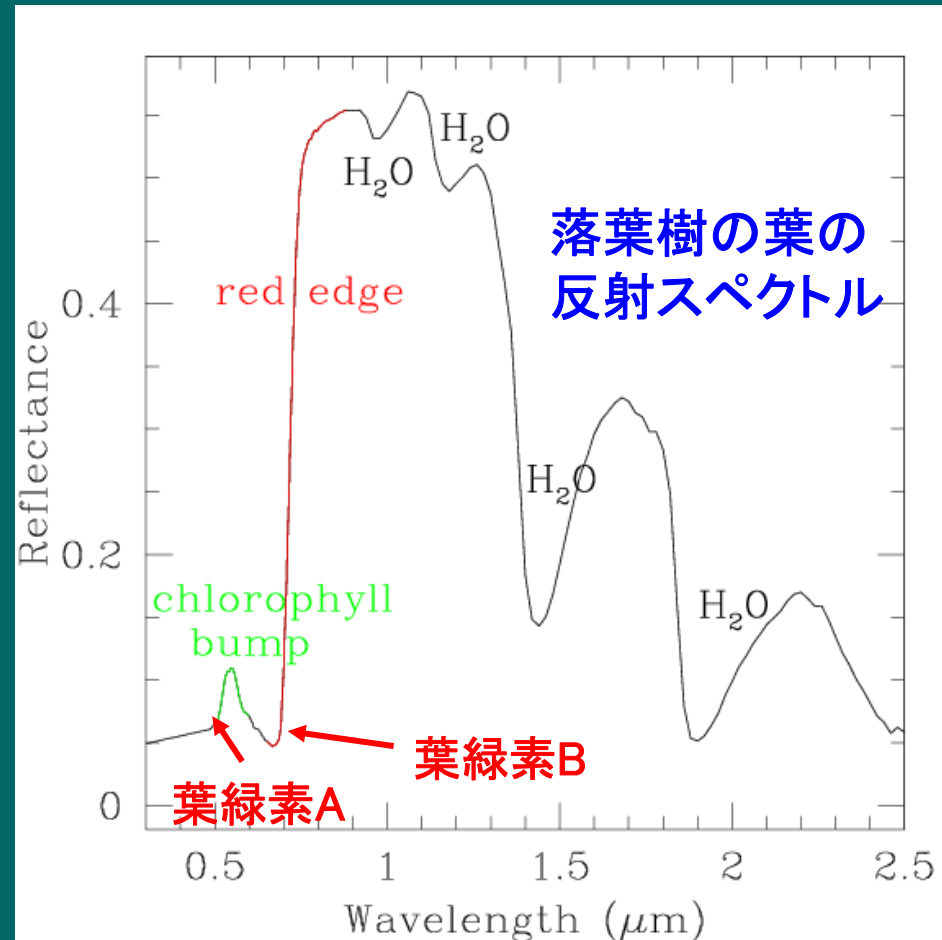
# Biomarkerと地球照：我が地球を用いて「第2の地球」がどのように見えるかを予測

- 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
  - 植物の反射スペクトルに見られる**red edge**
- 遠くに我々の地球をおいたとき、分光観測からその特徴を同定できるか？
  - **地球照**
- 衛星による分光測光観測の可能性を探る

# 植物の反射率とバイオマーカー

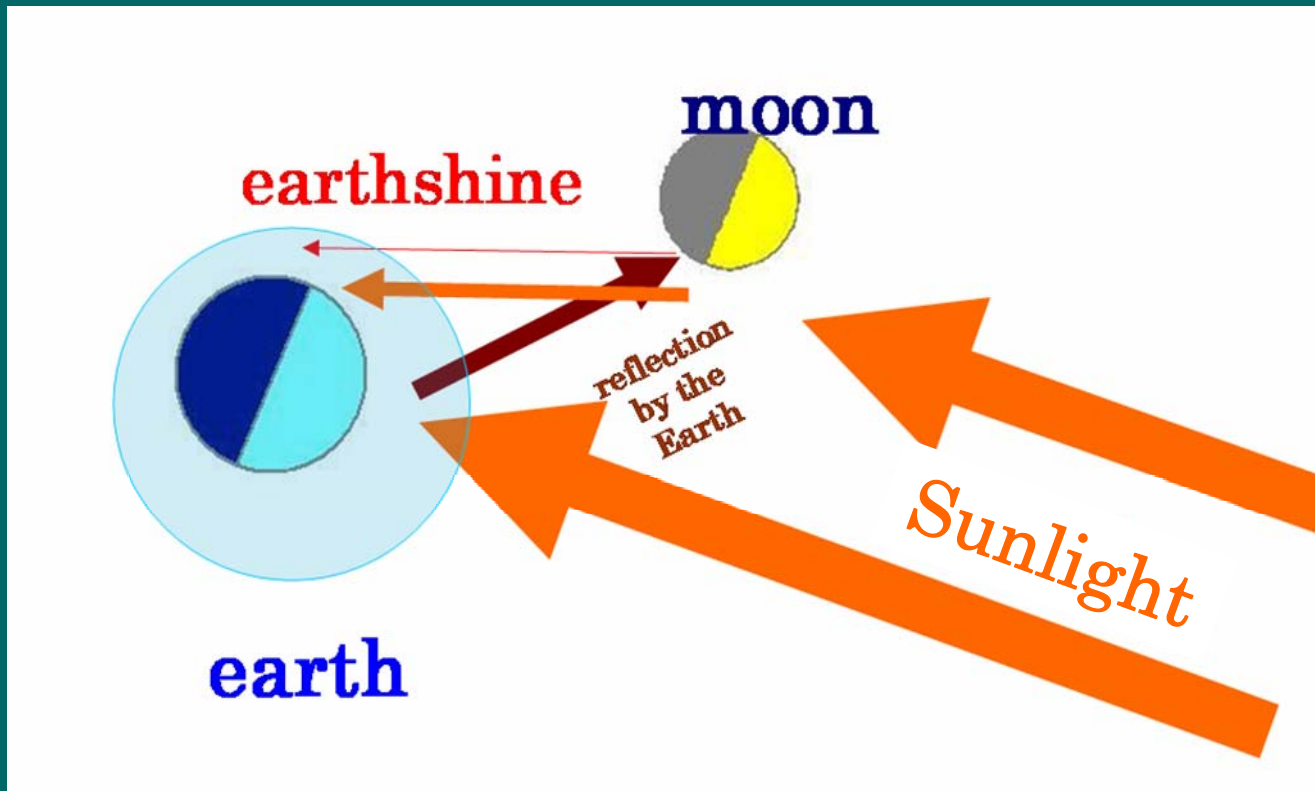
## ■ 植物のレッドエッジ

- (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？



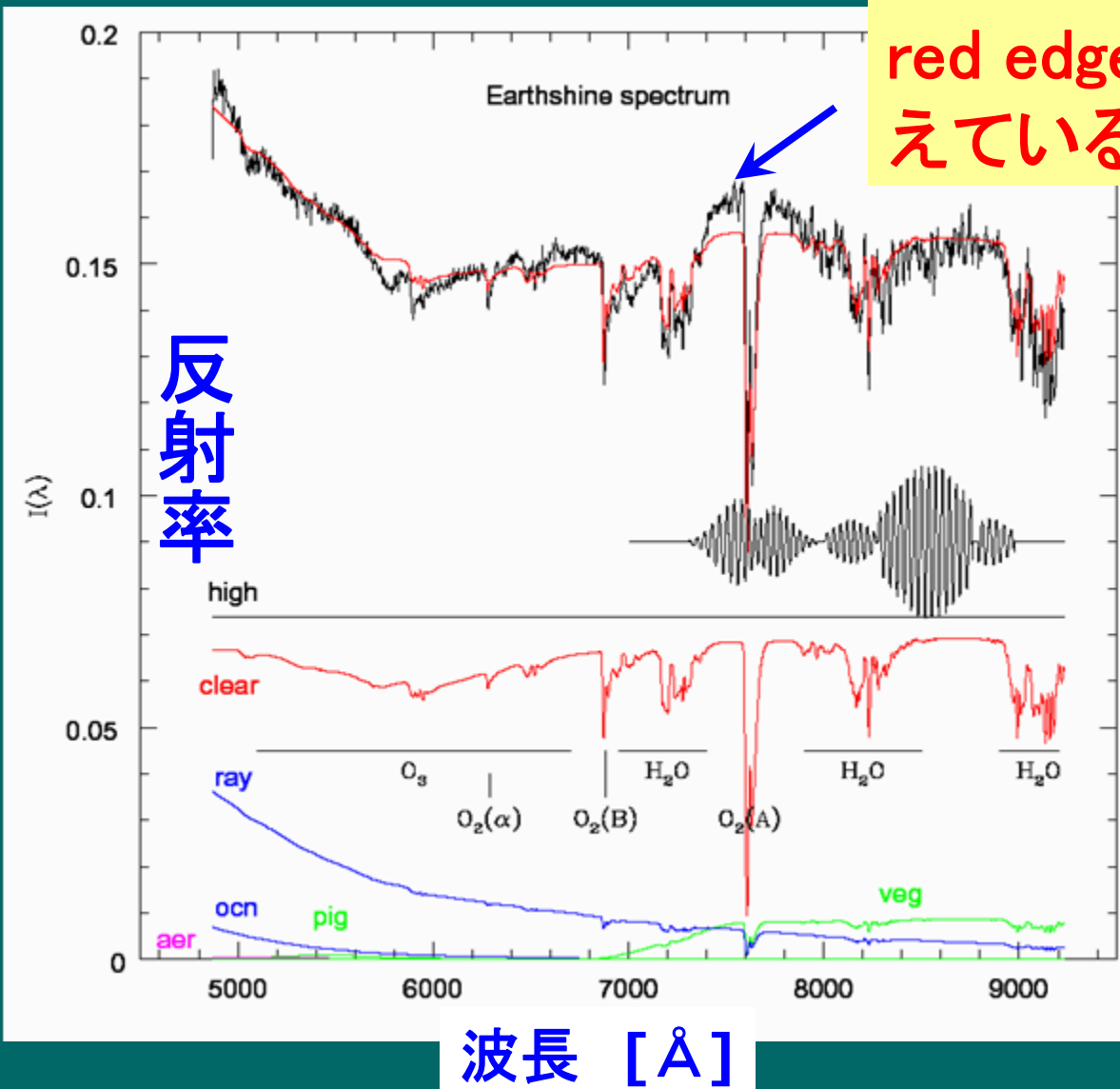
# 地球照観測

- 月の暗い部分の分光観測をして、地球からの反射光中のred edgeが検出できるか？
- 遠方の、第2の地球の分光観測の模擬実験



# 地球照分光観測の例

*red-edge in a pale blue dot ?*



red edge が見えている???



Woolf & Smith  
ApJ 574 (2002) 430  
"The spectrum of earthshine:  
A Pale Blue Dot Observed from the Ground"

# Vesto Melvin Slipher (1875-1969)

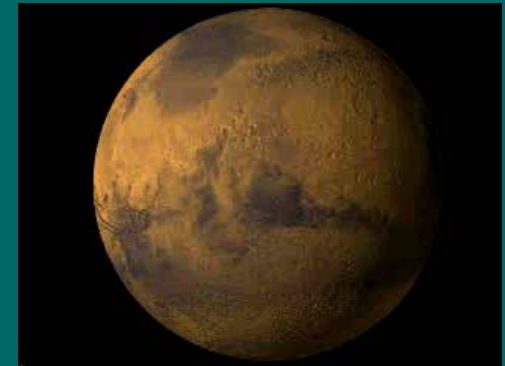


レッドエッジをバイオマーカーとして使う先駆的な試み

- “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”

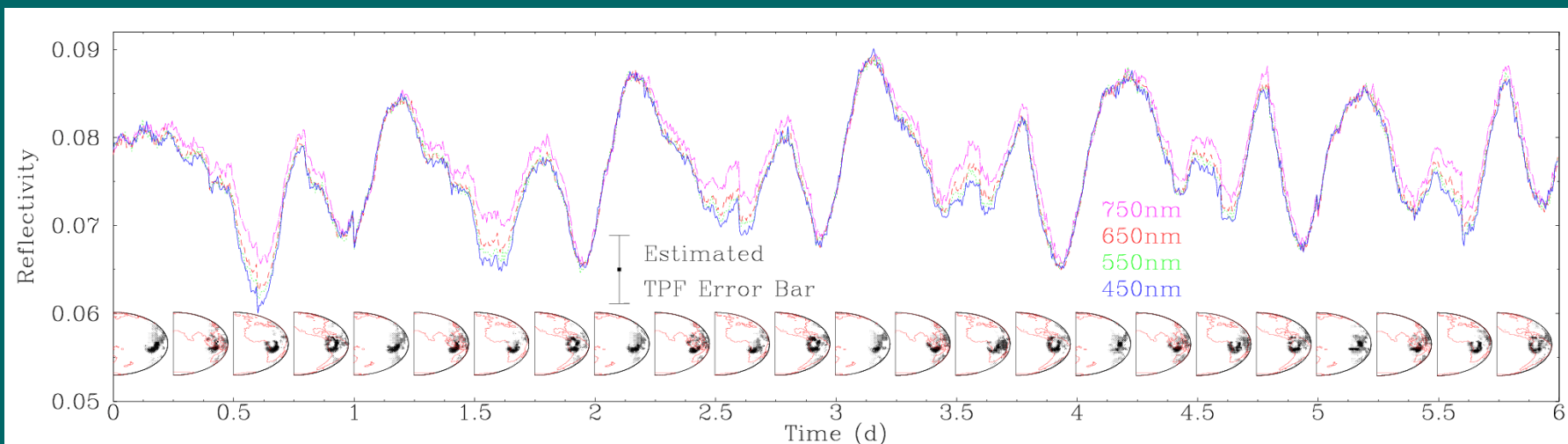
PASP 36(1924)261



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？



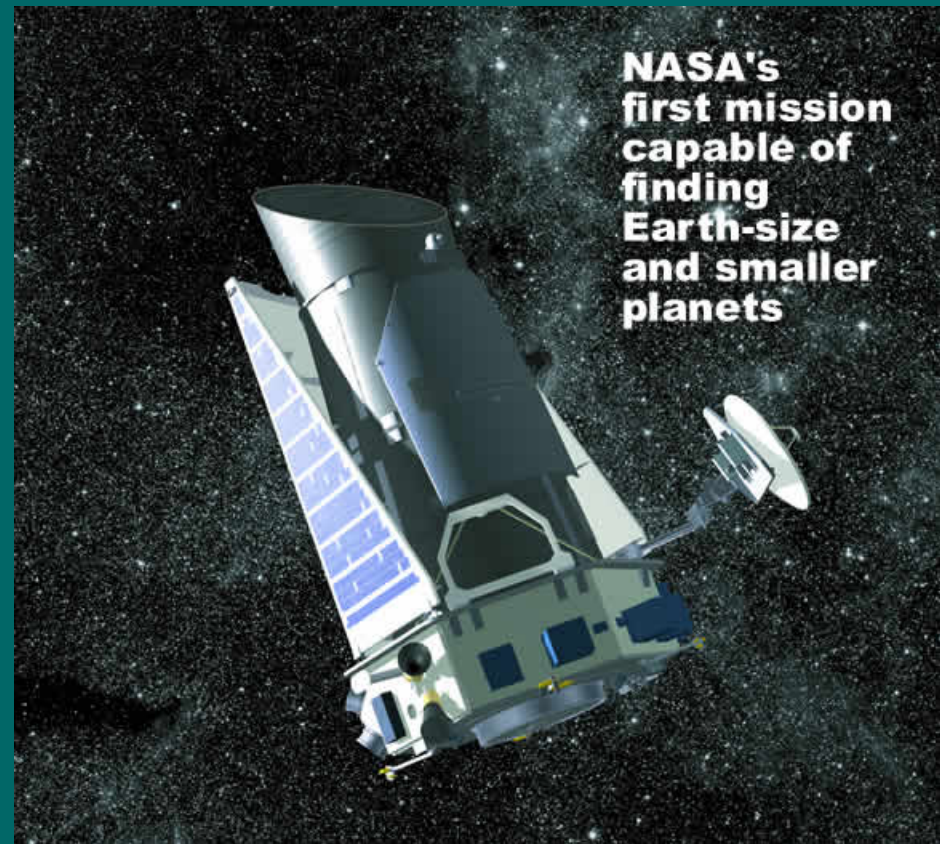
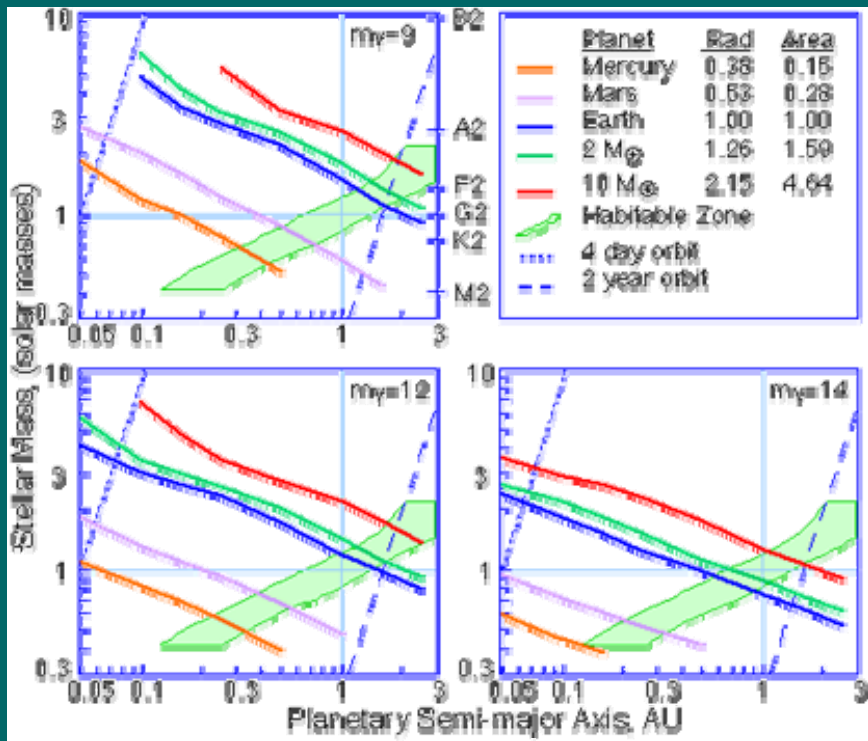
Ford, Seager & Turner: Nature 412 (2001) 885

- **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6月予定)

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/>

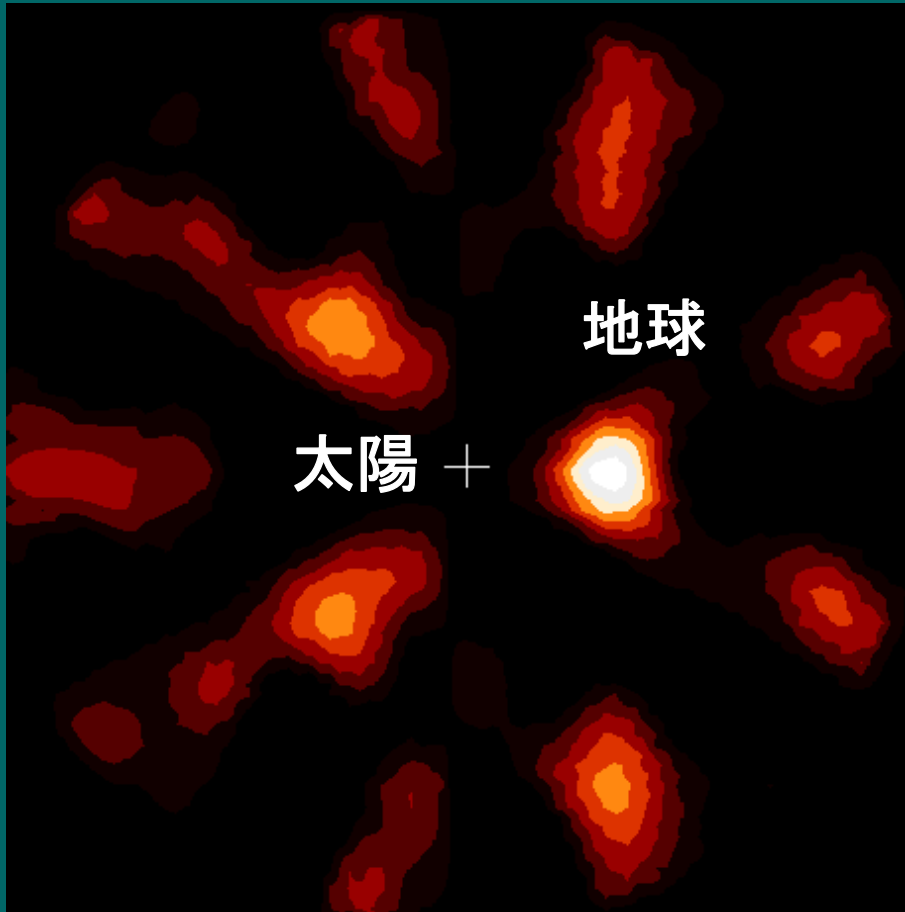
# ケプラー衛星が何を見るか



# ダーウィン衛星

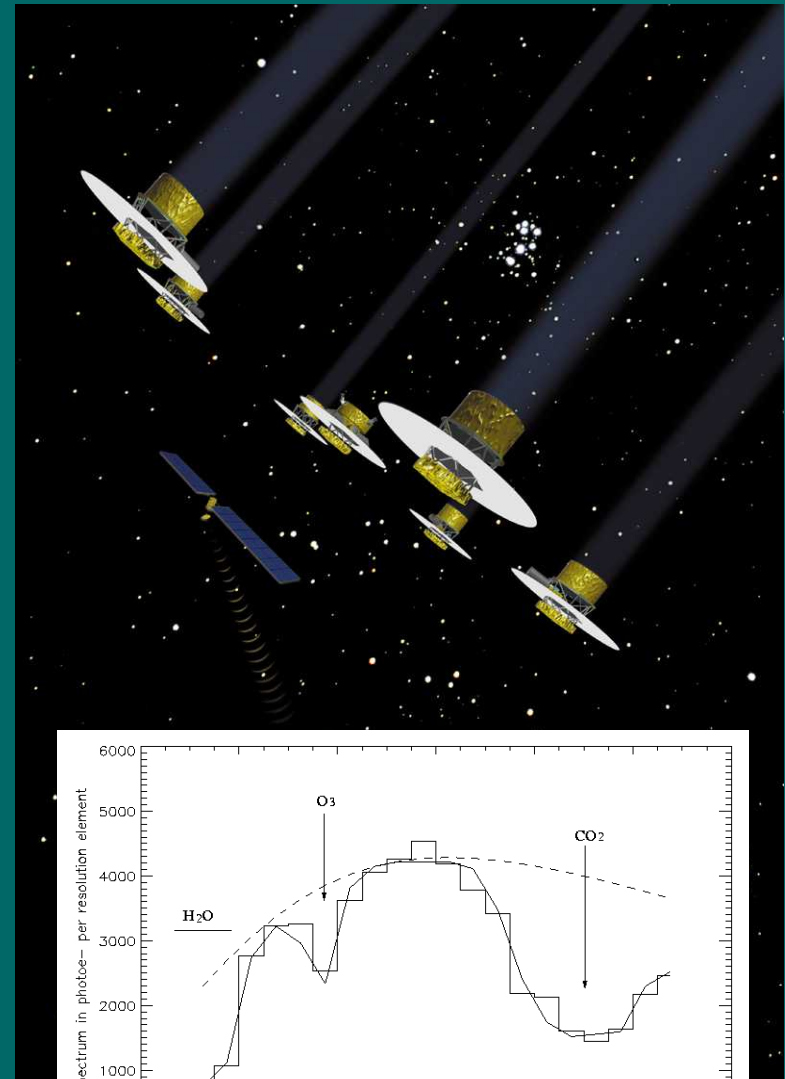
(欧州：2020年頃？打ち上げ)

赤外線での惑星の直接撮像を目指す



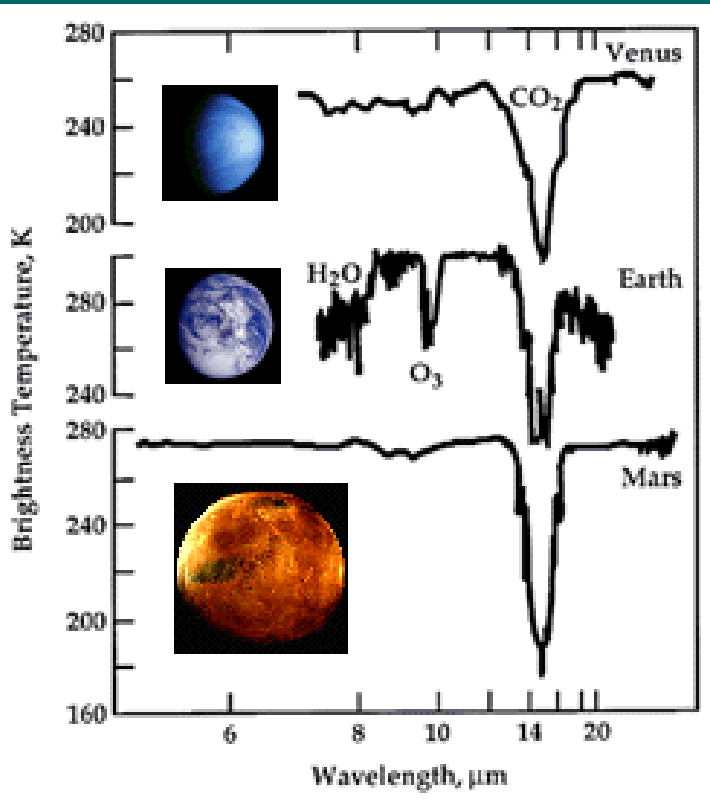
30光年先においた太陽と地球の観測予想図

<http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/>



宇宙赤外線干渉計群  
測光分光観測<sub>43</sub>

# 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“characterization”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？ Biomarker を特定できるか？