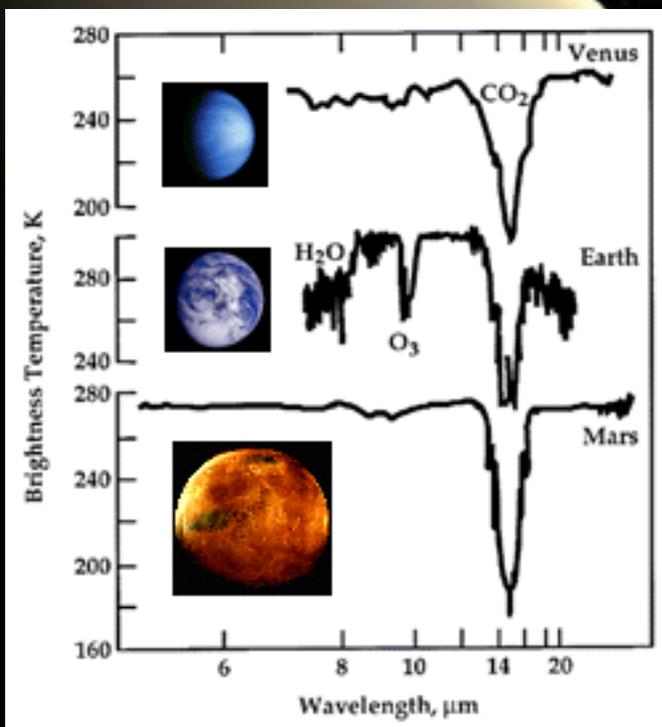


# 太陽系外惑星： そのさきにあるもの



須藤 靖  
2007年10月12日  
東京大学理学部  
物理学教室コロキウム

# とある会話@2007年7月

- H田先生： 須藤さん、後期の教室コロキウムで宇宙生物学の話をやってくれませんか？
- 私： んんん、宇宙生物学はまだまだ先のことですが、系外惑星研究の話がメインでもよろしいですか
- H田先生：もちろんそれで結構ですからお願いします

## — 数日後 —

- Yぎ田先生： 須藤さん、コロキウム引き受けてくれてありがとう、宇宙人探査の話楽しみにしています。
- 私： …… あの一、私がやっているのは系外惑星研究なのですが、、
- Yぎ田先生： えー！ 系外惑星の研究と宇宙人探査の研究って同じじゃないの???

これはまずい！

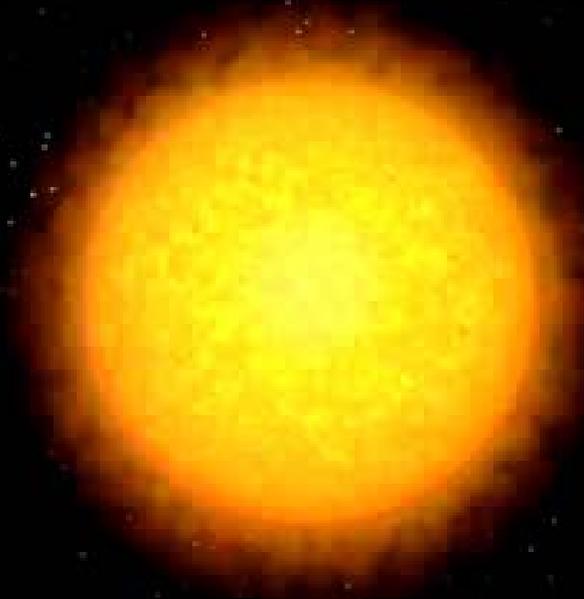
# 今回のコロキウムの目的

- 太陽系外惑星研究は、今や**極めてまっとうな科学**であることを納得してもらおう
- 系外惑星研究の**現状の要約**
- 自分自身の**試行錯誤の紹介**
- 近い将来、**数多くの魅力ある発見**が待ちかまえていることを伝える
- 「地球外生命の痕跡を探る」が将来の大目標であることは確かだが、これを省略して「**宇宙人探し**」と呼んではいけない事を教え込む

# 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



# 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(居住可能)
  - +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>

# 太陽系外惑星発見の歴史

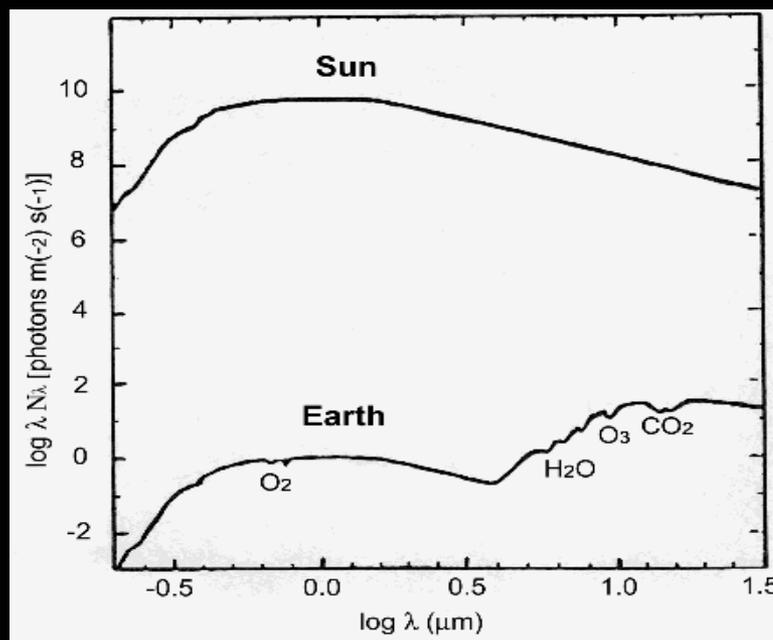
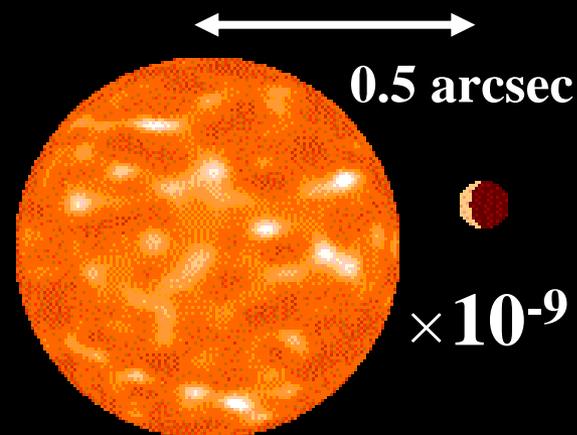
- **1995年**： 主系列星周りの系外惑星の発見 (51Peg)
- **1999年**： 系外惑星のトランジット発見(HD209458)
- **2001年**： トランジット惑星大気初の検出(ナトリウム)
- **2005年7月**： 超巨大コアを持つ灼熱惑星の発見  
(佐藤文衛ほか)
- **2005年10月**： 惑星公転軸の傾きの発見 (Winn ほか)
- **2007年4月**： 居住可能領域にある地球型惑星 ( $5M_{\text{地球}}$  および  $8M_{\text{地球}}$ ) の発見？
- **2007年10月9日時点**で**253個の系外惑星 (27個の多重惑星系)** <http://exoplanet.eu/>、 <http://exoplanets.org/>

# 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

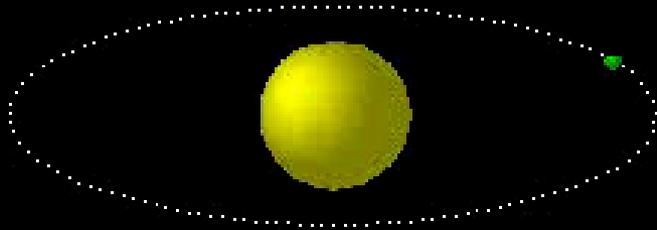


地上観測の典型的な角度分解能の大きさ内で、9桁程度も明るい主星のすぐ隣にある27等級の暗い天体を観測する

⇒ ほとんど不可能！

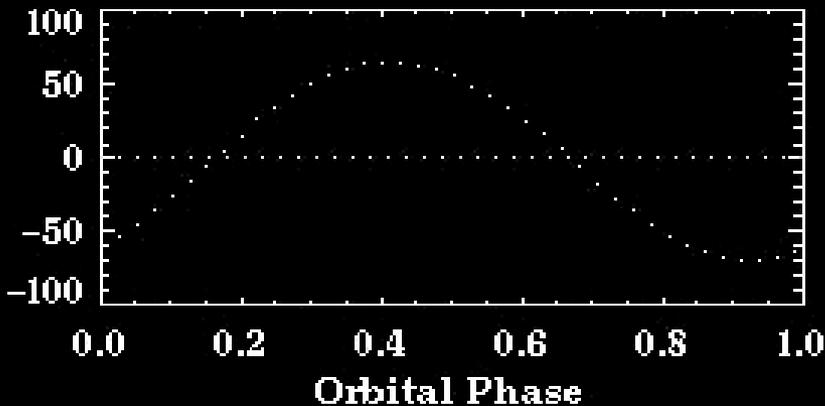
# どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



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

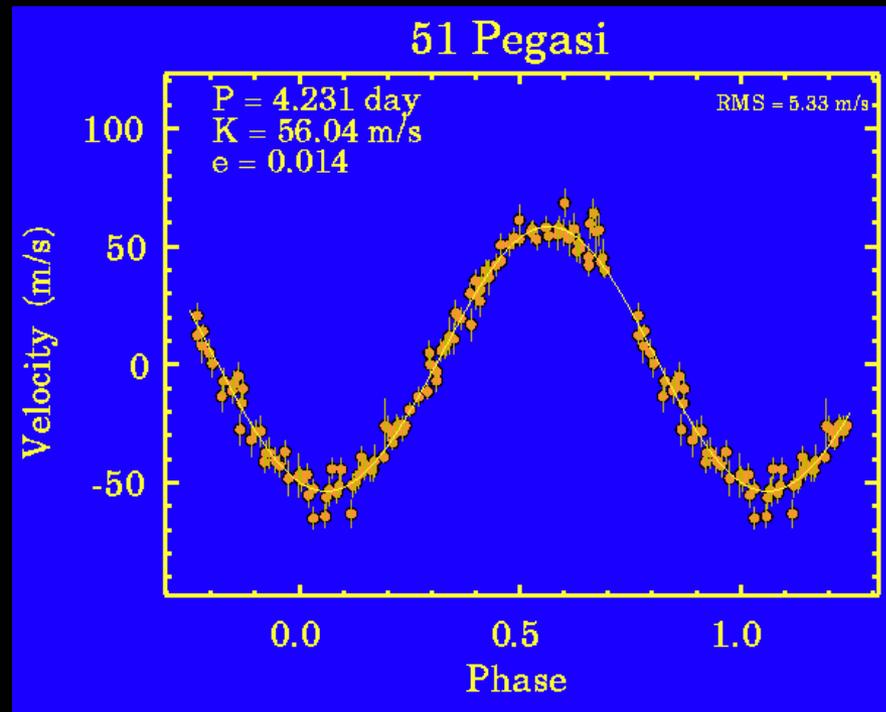
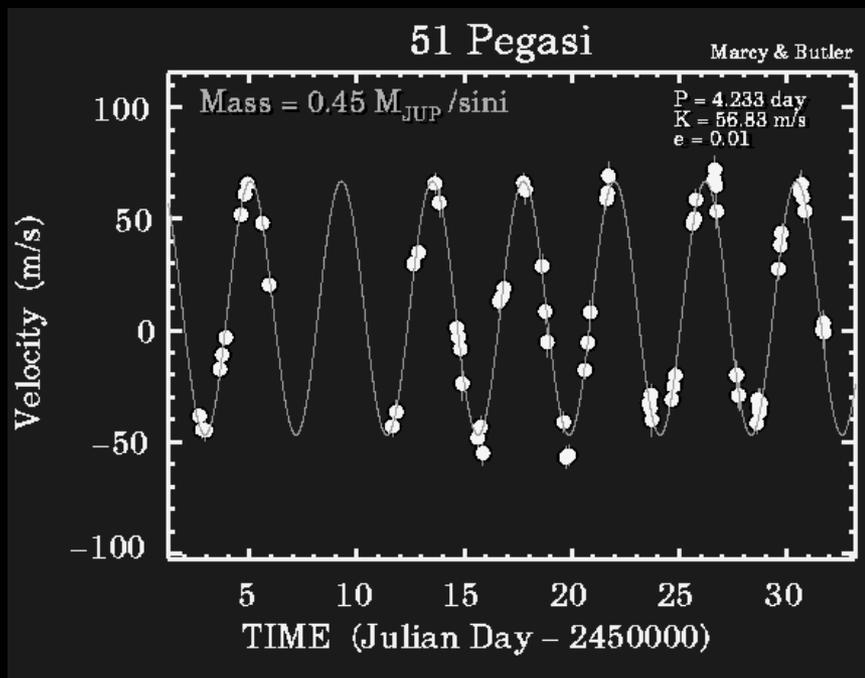
Radial Velocity Curve  
of the Star [m/s]



- 中心星の運動を精密に観測すれば惑星があるかがわかる
  - 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

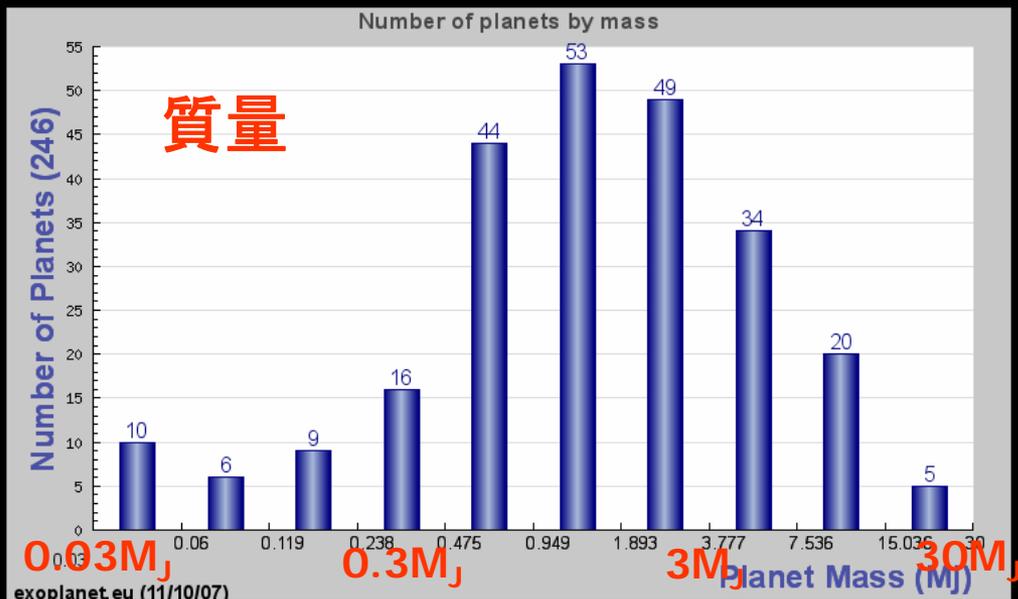
# ペガサス座51番星 ～初めての太陽系外 惑星の発見～

- メイヨール & ケロス (1995年)

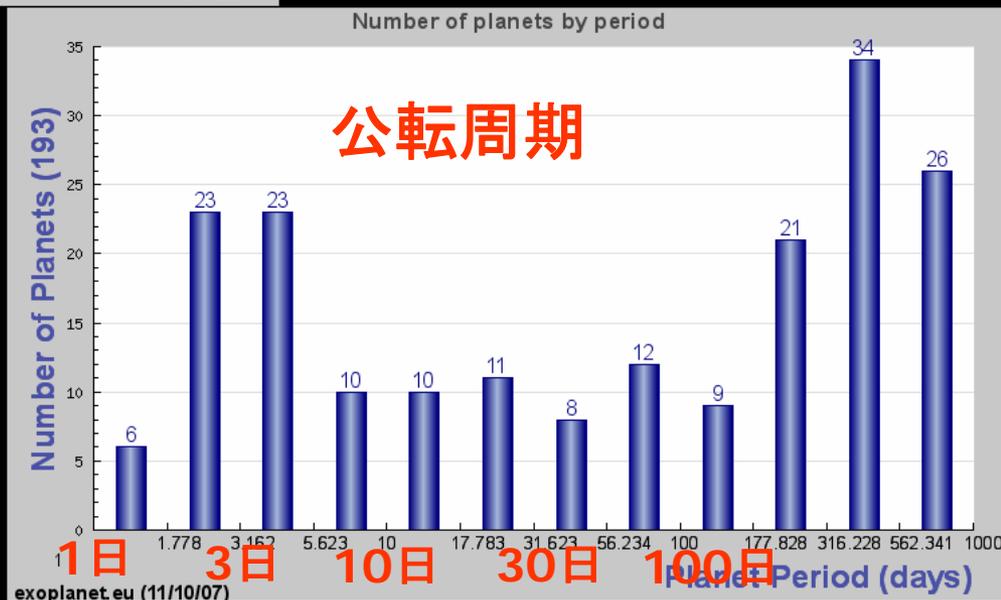


周期がわずか4.2日！

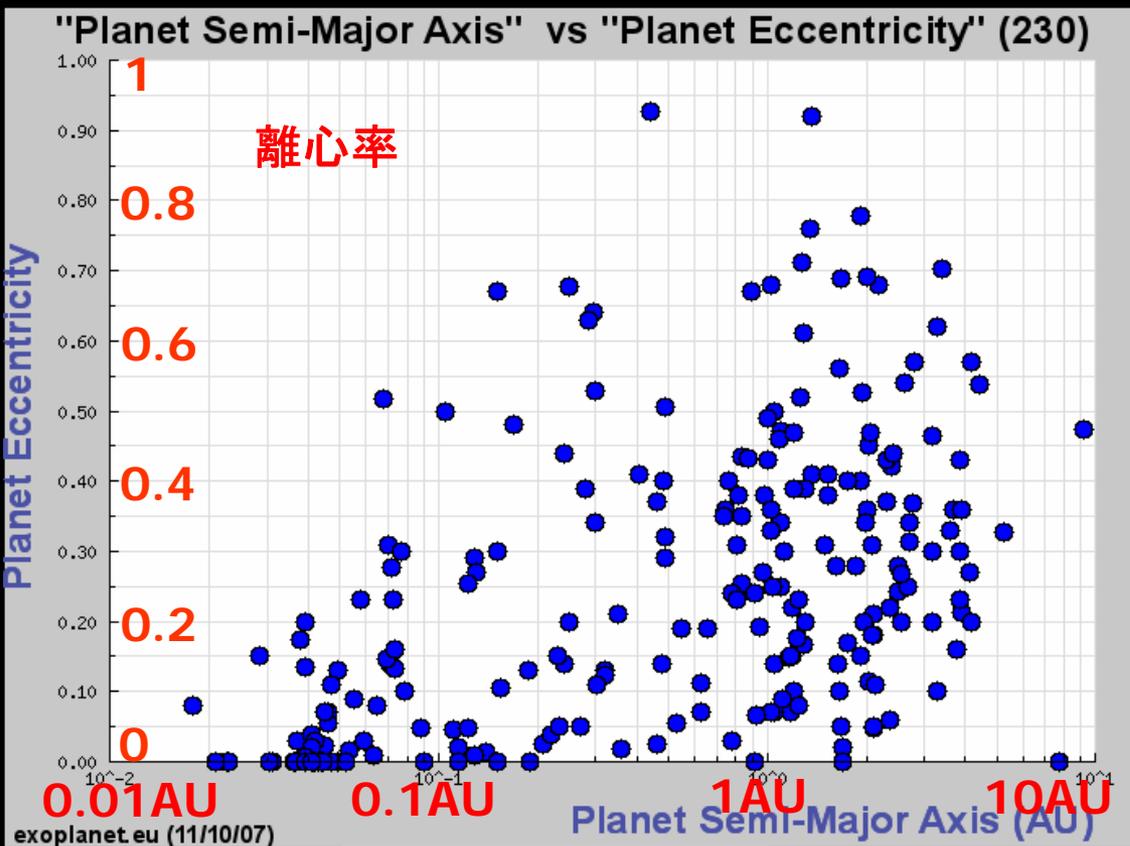
# 系外惑星の質量・周期分布関数



観測の選択効果のため必ずしも真の分布ではないことに注意



# 系外惑星の軌道長半径と離心率

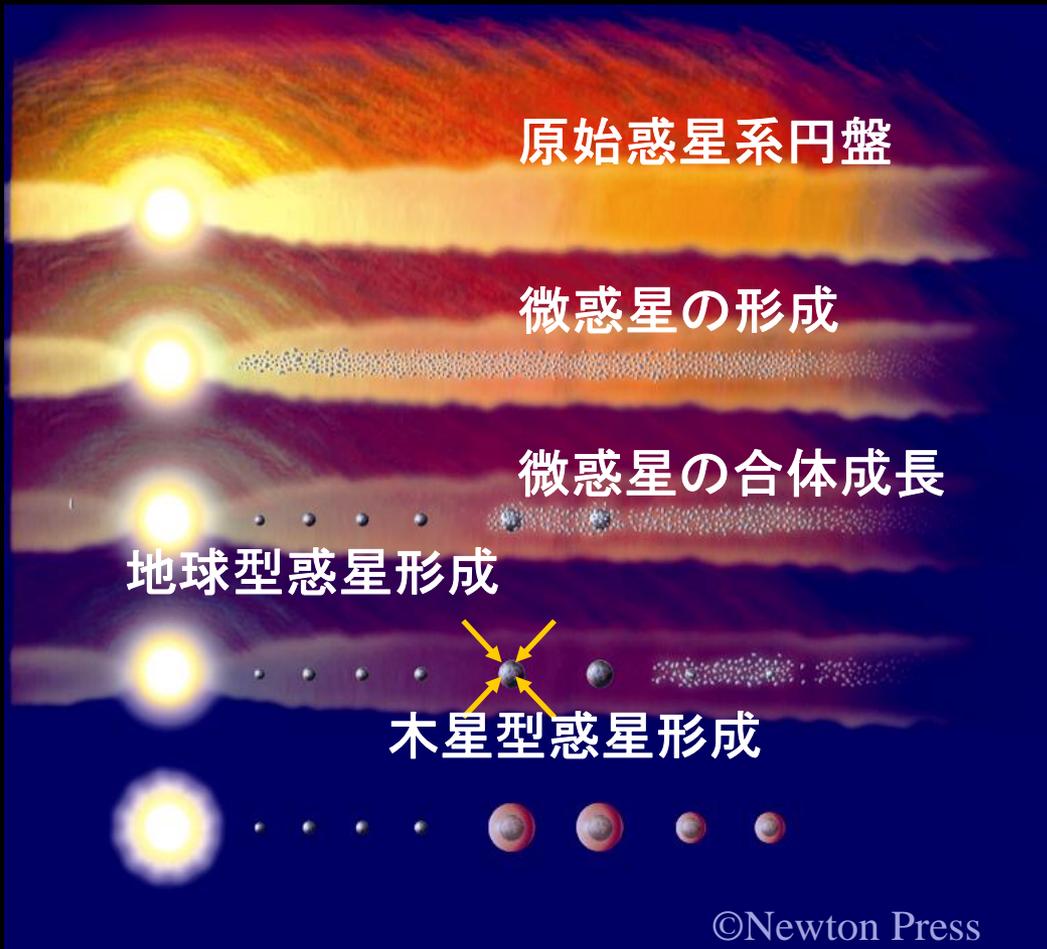


惑星の軌道長半径

- 円軌道から大きくずれた軌道が多い (ただし、0.1天文単位以下の半径では円軌道に近い)
- 1天文単位以下の半径をもつ木星質量の惑星が大量に存在 (食の観測例から考えるとおそらくガス惑星)

太陽系とは全く異なる系も存在する: 惑星系の多様性

# 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

- 塵成分(ダスト)の沈殿
- 凝集成長して微惑星へ
- その後ガス成分が降着

©ニュートンプレス、井田茂@東工大

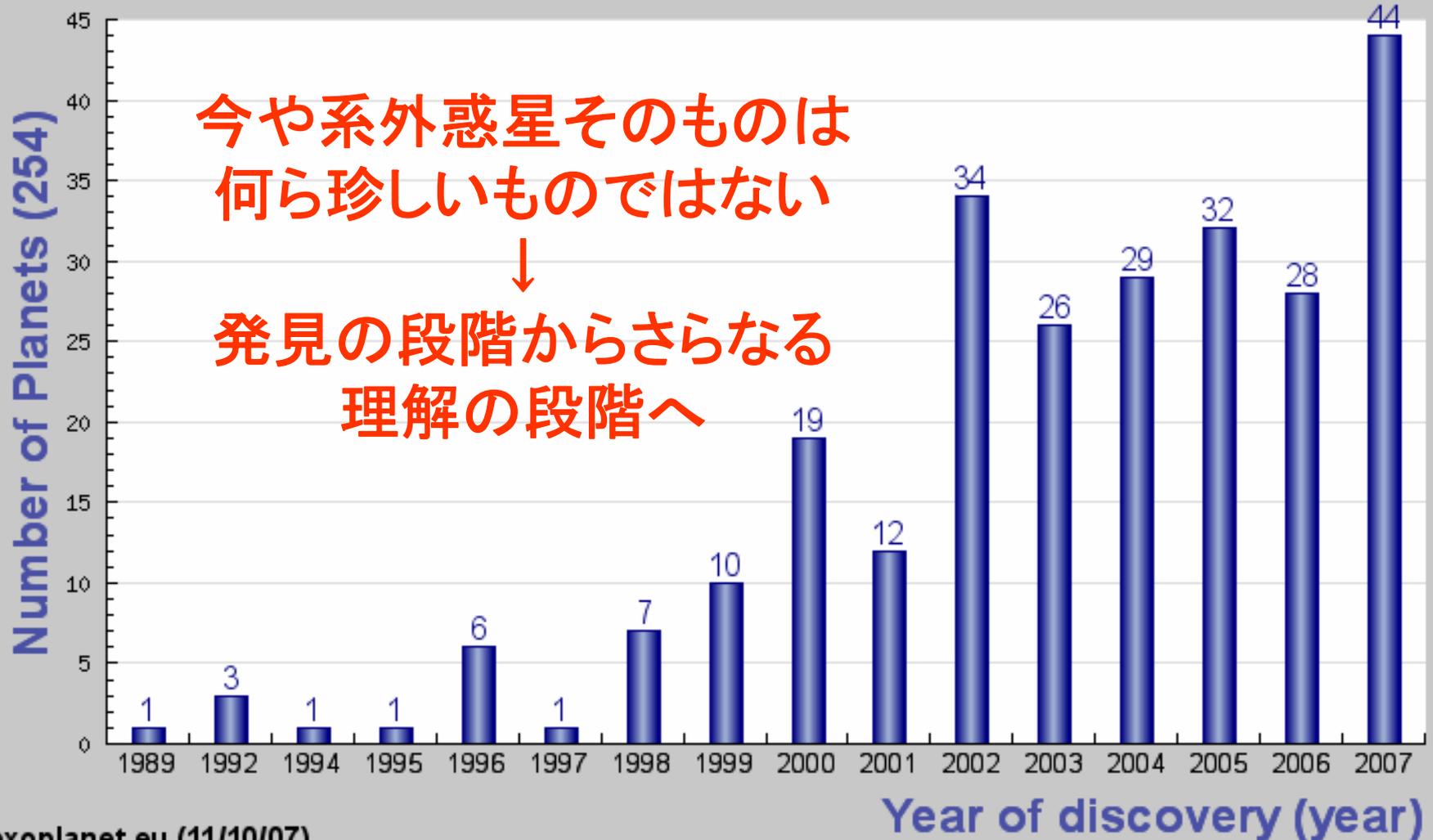
# 林忠四郎先生



- 日本の理論宇宙物理学の父
- 1940年 東大物理学科卒業
- 京都大学大学院で素粒子論を学ぶ
- その後、ミクロな物理学をマクロな宇宙に応用し、宇宙論、星の進化論、太陽系形成論においていずれも偉大な業績を成し遂げられた
  - ガモフのビッグバンモデルを修正しヘリウムまでは宇宙誕生後3分間、それより重い元素は10億年以上後の第一世代の星の中心で形成されることを示した
  - 誕生直後の星は活動が非常に激しく光度が主系列に達した後の数十倍以上明るくなる時期(林フェイズ)があることを発見
  - 太陽系形成標準理論(林モデル、京都モデル)を提唱
- 私⇒佐藤勝彦⇒林忠四郎⇒湯川秀樹(「3世代前はノーベル賞」則)

# 太陽系外惑星の発見数

Number of planets by year of discovery



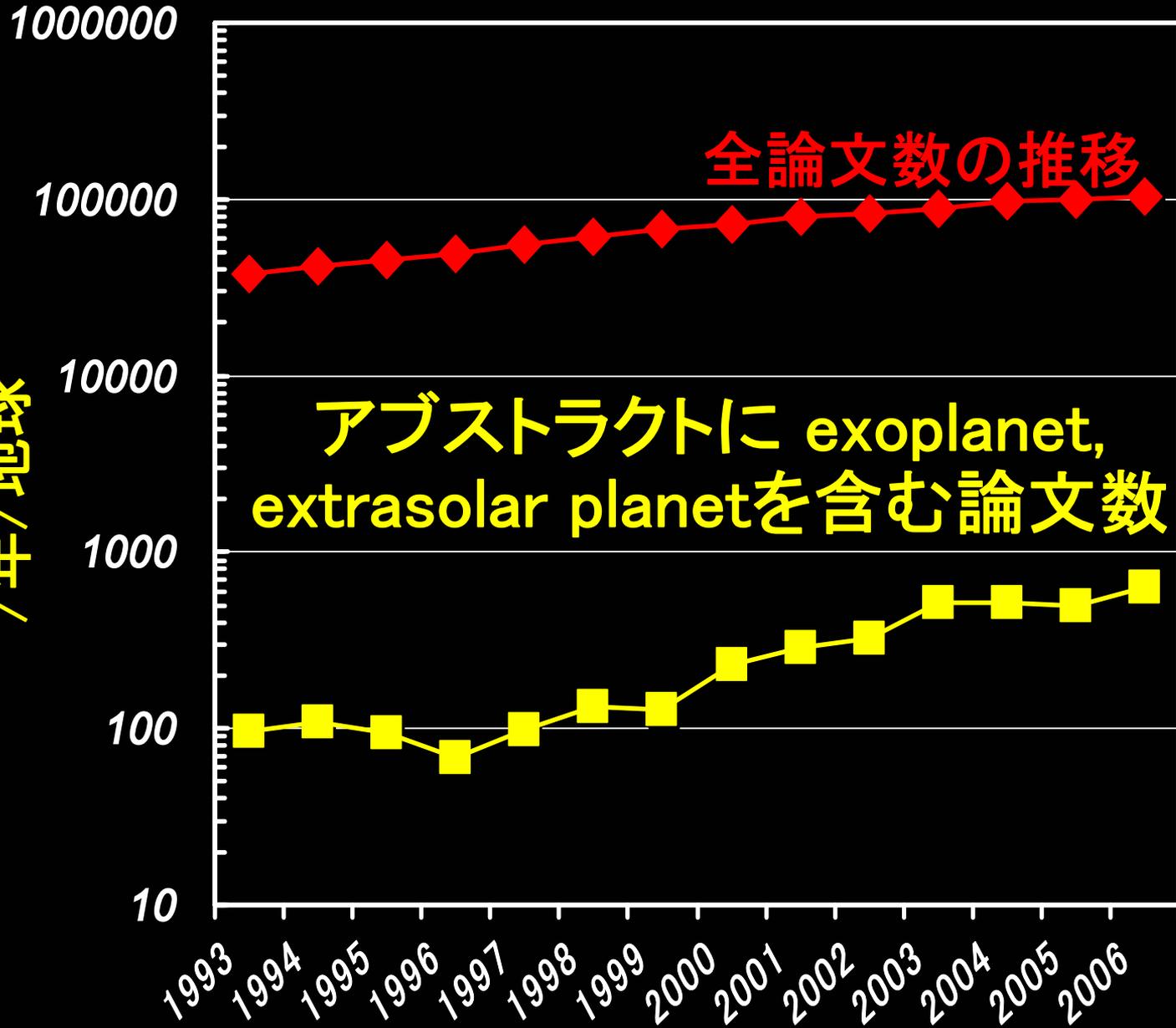
今や系外惑星そのものは  
何ら珍しいものではない



発見の段階からさらなる  
理解の段階へ

# 系外惑星研究の興隆

天体物理学データベース登録論文数  
/年/地球



2000年11月10日物理教室談話会

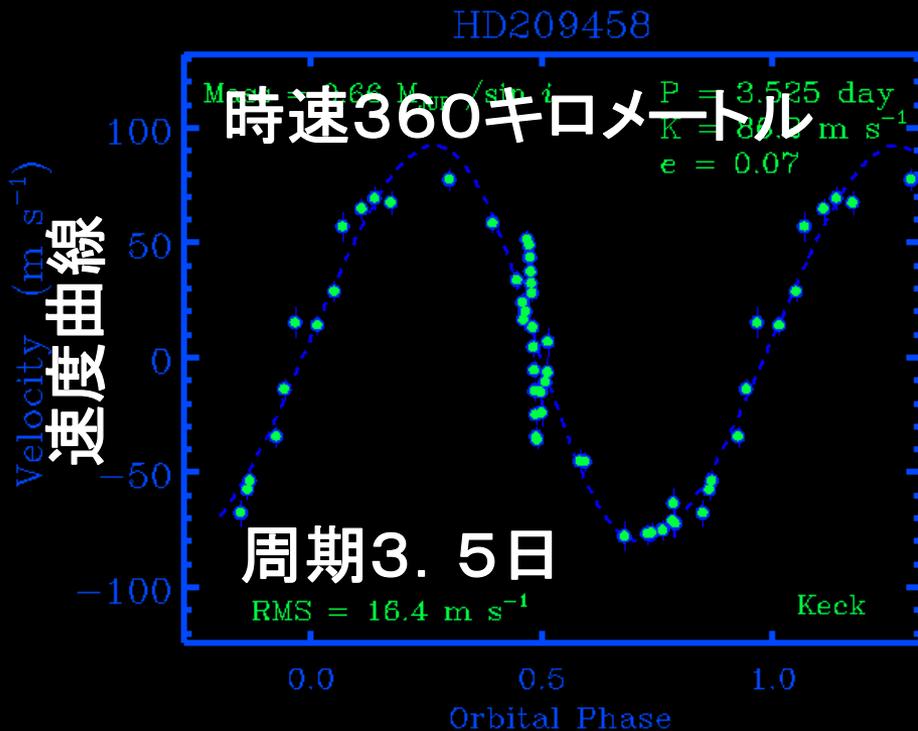
**THE DETECTION AND  
CHARACTERIZATION OF EXTRASOLAR  
PLANETS**

Ed Turner

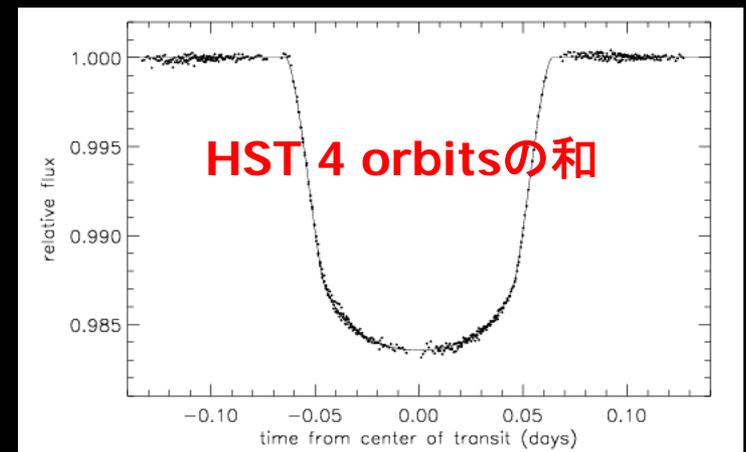
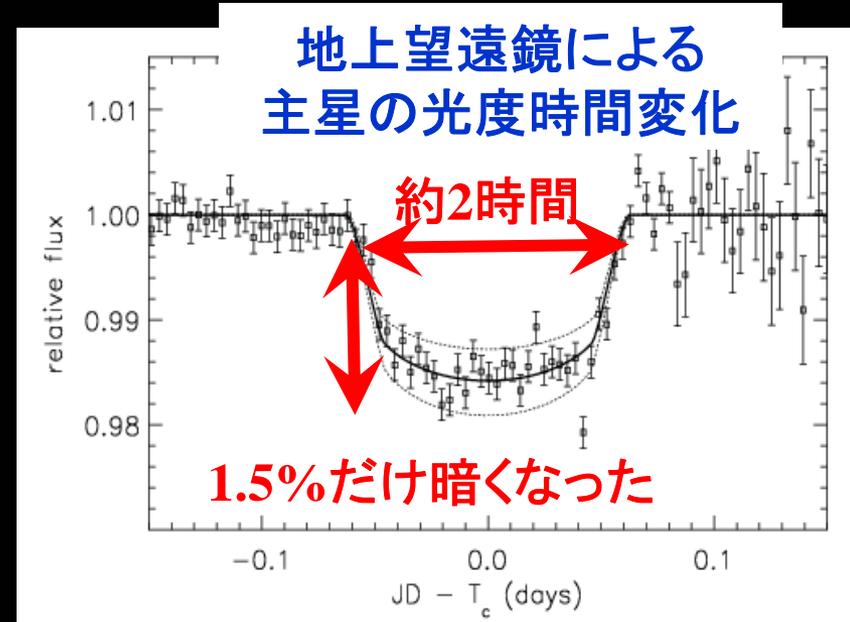
Princeton University Observatory

# 最初の太陽系外トランジット(食)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



Brown et al. (2001)

# これはすばらしい！

## 何か自分でもできないだろうか？

- **私が考えたこと**:トランジット発見は惑星の「影を見た」、つまり新月の観測に対応。では、違う位相での三日月や満月は観測できないものか(**可視域での反射光**)？また、その際に差分分光観測をして、**惑星大気の吸収**を検出できないか？
- エド・ターナー氏(プリンストン大学)と山田亨氏(当時、国立天文台、現在東北大学)に相談を持ちかけて、すばるに観測プロポーザルを提案
- 我々は**3人とも本業は宇宙論で惑星は素人**、初めての惑星観測プロジェクトの提案だった

# トランジット惑星の重要性

- 速度変動データを惑星の存在とする解釈の正当性
- 食の光度曲線による惑星半径の決定
- 惑星大気吸収による大気組成の決定
- 主星の自転軸と惑星の公転軸の関係(角運動量の起源): ロシター効果
- 系外惑星のリングや衛星を発見する最大の可能性を提供: 惑星の自転軸の決定
- 測光観測による系外惑星サーベイ
  - 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

# 苦難の道の始まり

- すばる2001年後期観測プロポーザル
  - A spectrophotometric search for scattered light from the transiting planet HD209458b
  - 不採択
- すばる2002年前期観測プロポーザル
  - A spectrophotometric search for scattered light from the transiting planet HD209458b
  - 不採択
- 学術振興会科学研究費 萌芽研究申請
  - 精密測光および分光観測を用いた太陽系外惑星探査

研究種目名 萌芽研究  
細目名 4201 天文学  
研究課題名 精密測光および分光観測を用いた太陽系外惑星探査

上記の申請課題は、審査の結果、採択されませんでした。

採択された課題を含めた全申請課題のうち、あなたの申請された細目での研究課題の第1段審査評点（総合評点）でのおよその順位は次のとおりでした。

○総合評点に基づくおよその順位

-A-(採択課題に準ずる程度)-

B (中位程度以内の課題で「A以外」)

-C-(中位程度未満の課題)-

また、第1段審査における上記の申請課題の各評定要素毎の結果は以下のとおりでした。

○「研究内容」の評定 4.33 (5段階の評定結果の平均点)

○「研究計画」の評定 4.33 (5段階の評定結果の平均点)

○「研究種目としての適切性」の評定 -有-  
(萌芽研究について、「萌芽研究としてややふさわしくない点がある」又は「萌芽研究としてふさわしくない」と評定した審査委員がいる場合に「有」と表示。)

○「申請研究経費の妥当性」の評定 -有-  
(「他の研究課題より更に減額可能である又は減額すべきである」又は「研究計画と申請研究経費との整合性を欠く」と評定した審査委員がいる場合に「有」と表示。)

本年度、萌芽研究の申請課題は14,001件、採択課題は1,478件でした。

基盤研究等は二段審査制をとっていることから、第1段審査の評点が良くても採択にならない場合がありますので、ご承知おきください。

なお、本件についてのご質問、ご照会には応じかねますので、ご了承ください。

日本学術振興会科学研究費委員会

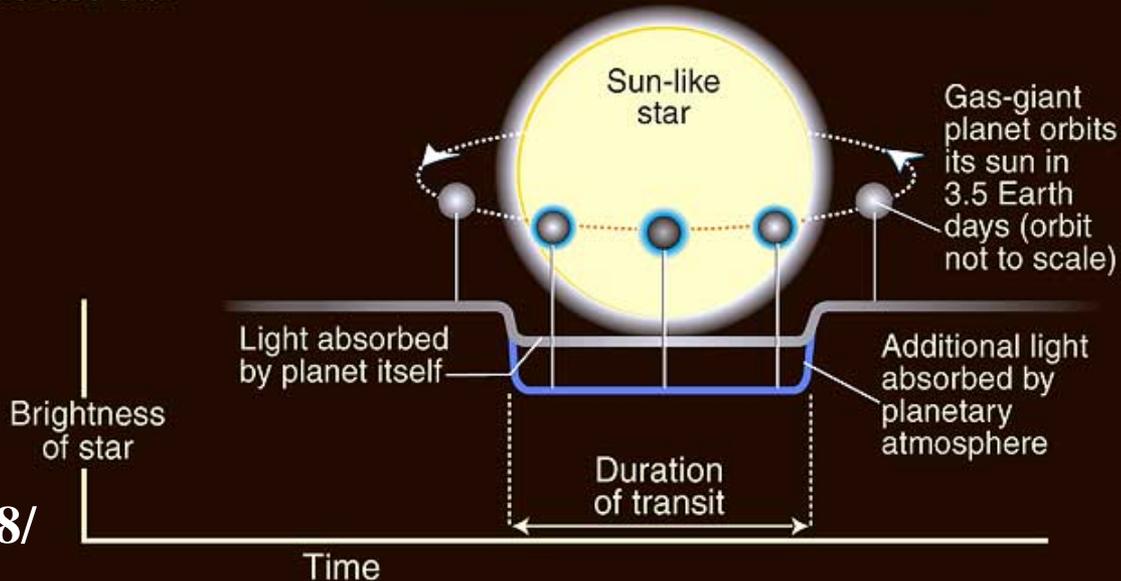
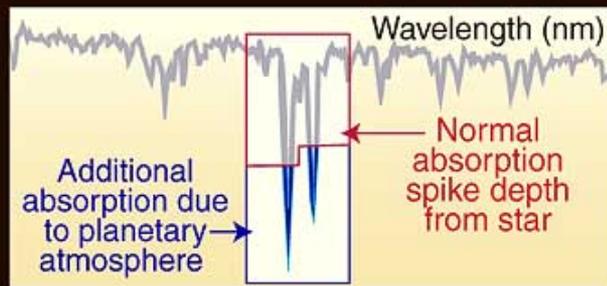
【日本学術振興会からのお知らせ】

臥薪嘗胆

# そうこうしている うちに、、、 HD209458b 惑星大気が初 検出される (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.)



# 三度目の正直： すばる2002年 後期観測提案採択

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)

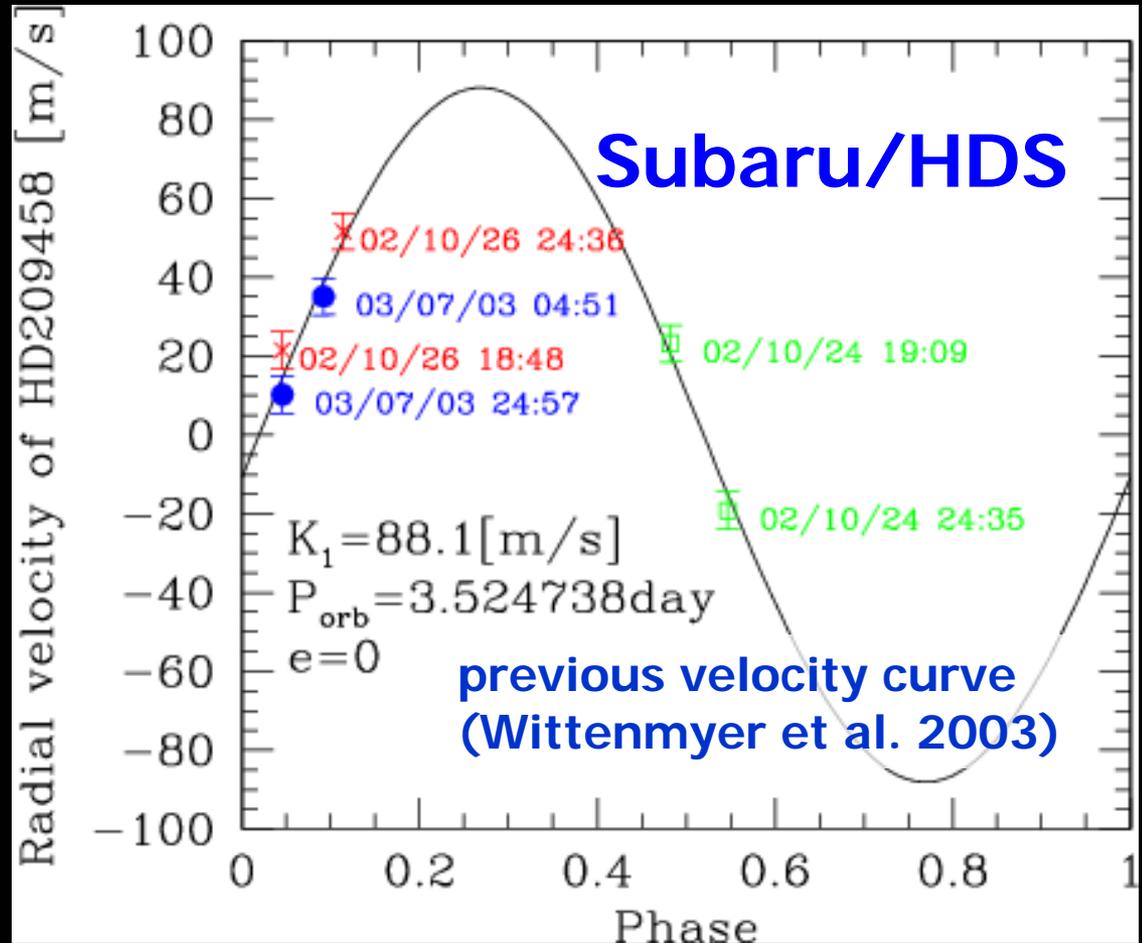
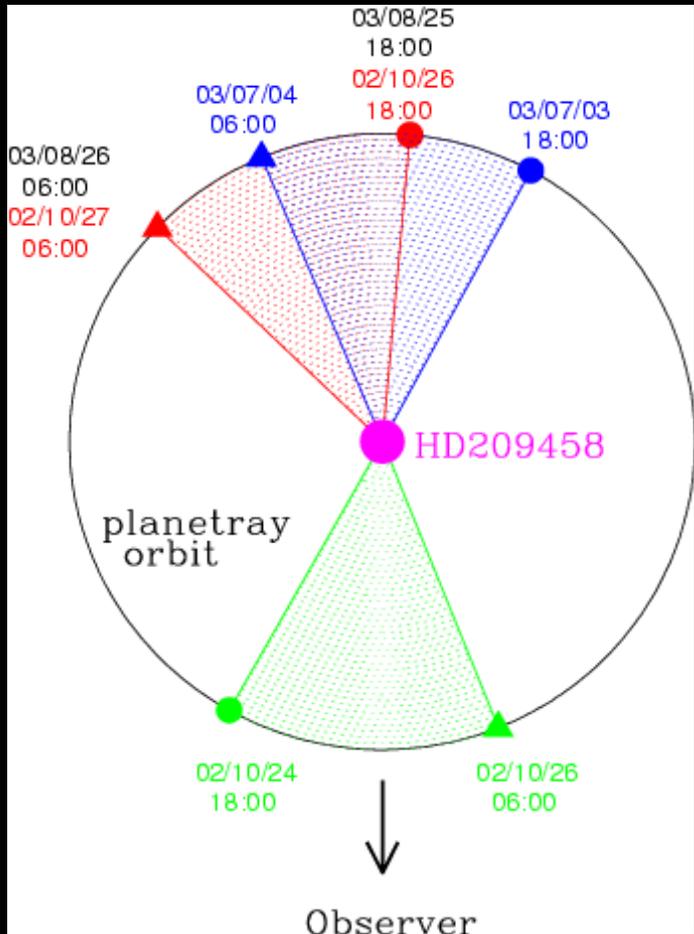
青木和光、山田亨 (国立天文台)

佐藤文衛 (神戸大学)、Josh Winn (Harvard Univ.)

Edwin Turner (Princeton Univ.)



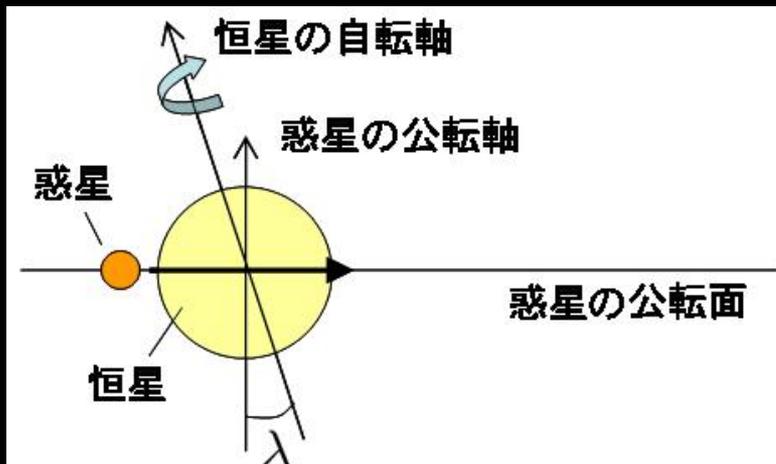
# HD209458bの位相とradial velocity



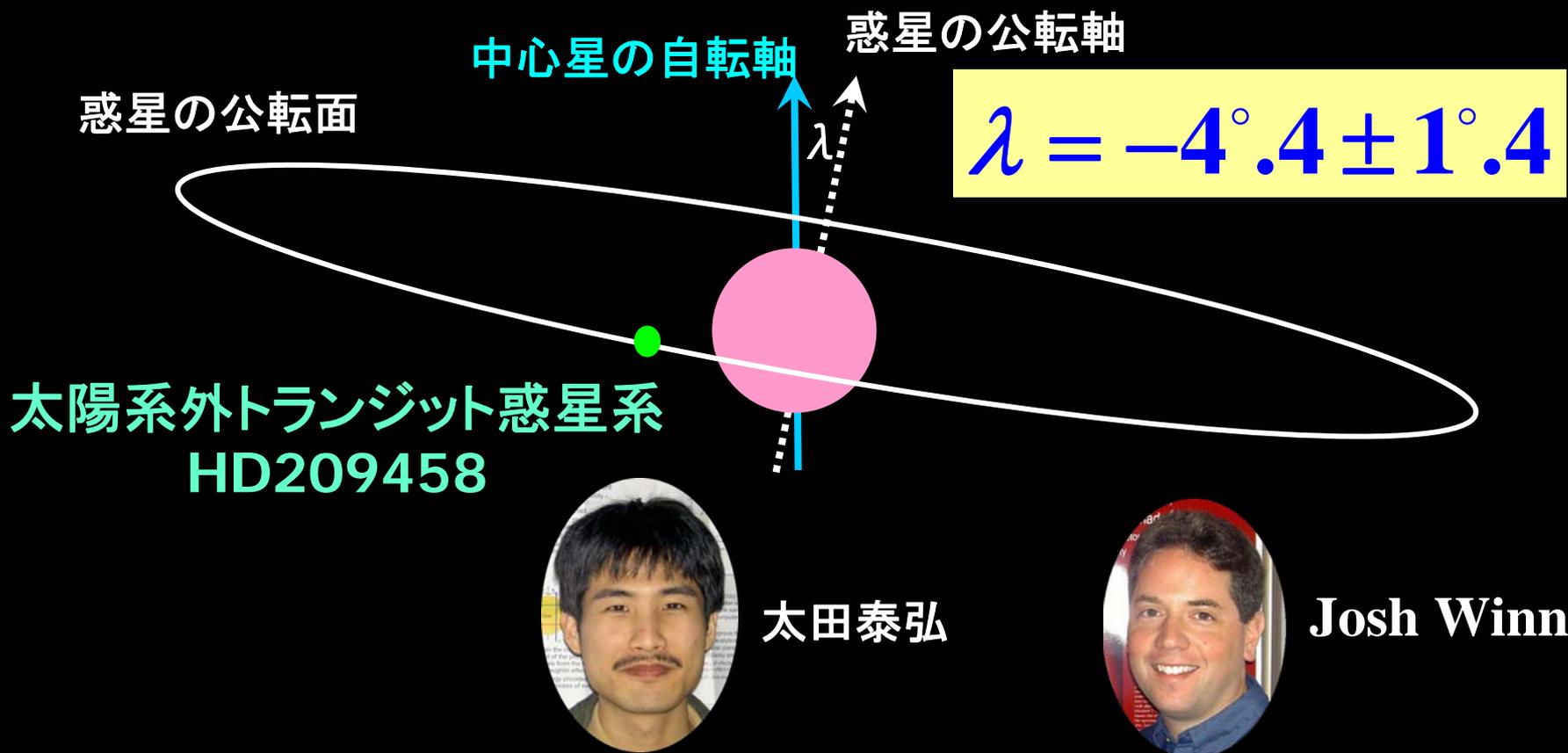
Winn et al. PASJ 56 (2004) 655

# 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>
  - 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)



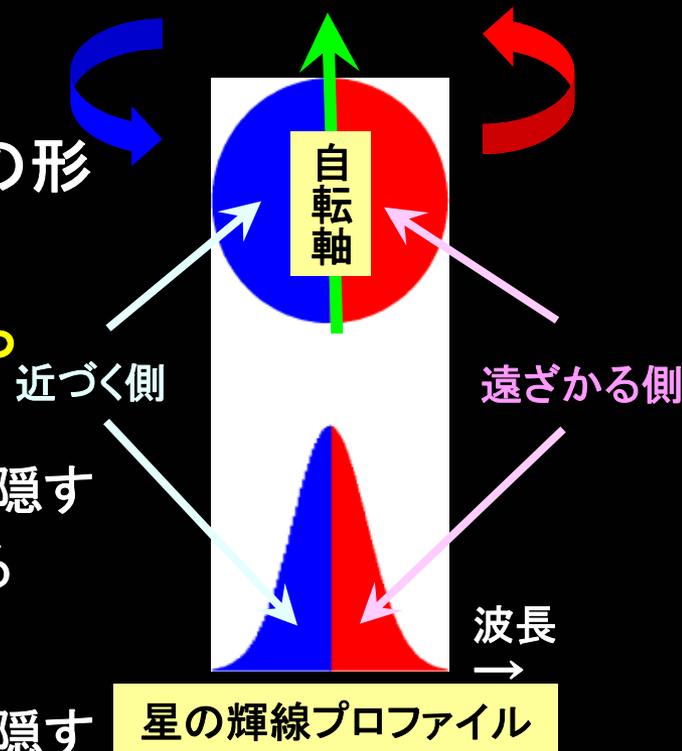
# ロシター効果を利用したHD209458の中心星 自転軸と惑星公転軸のずれの発見



太陽系外惑星の公転軸はちょっぴり傾いていた<sub>27</sub>

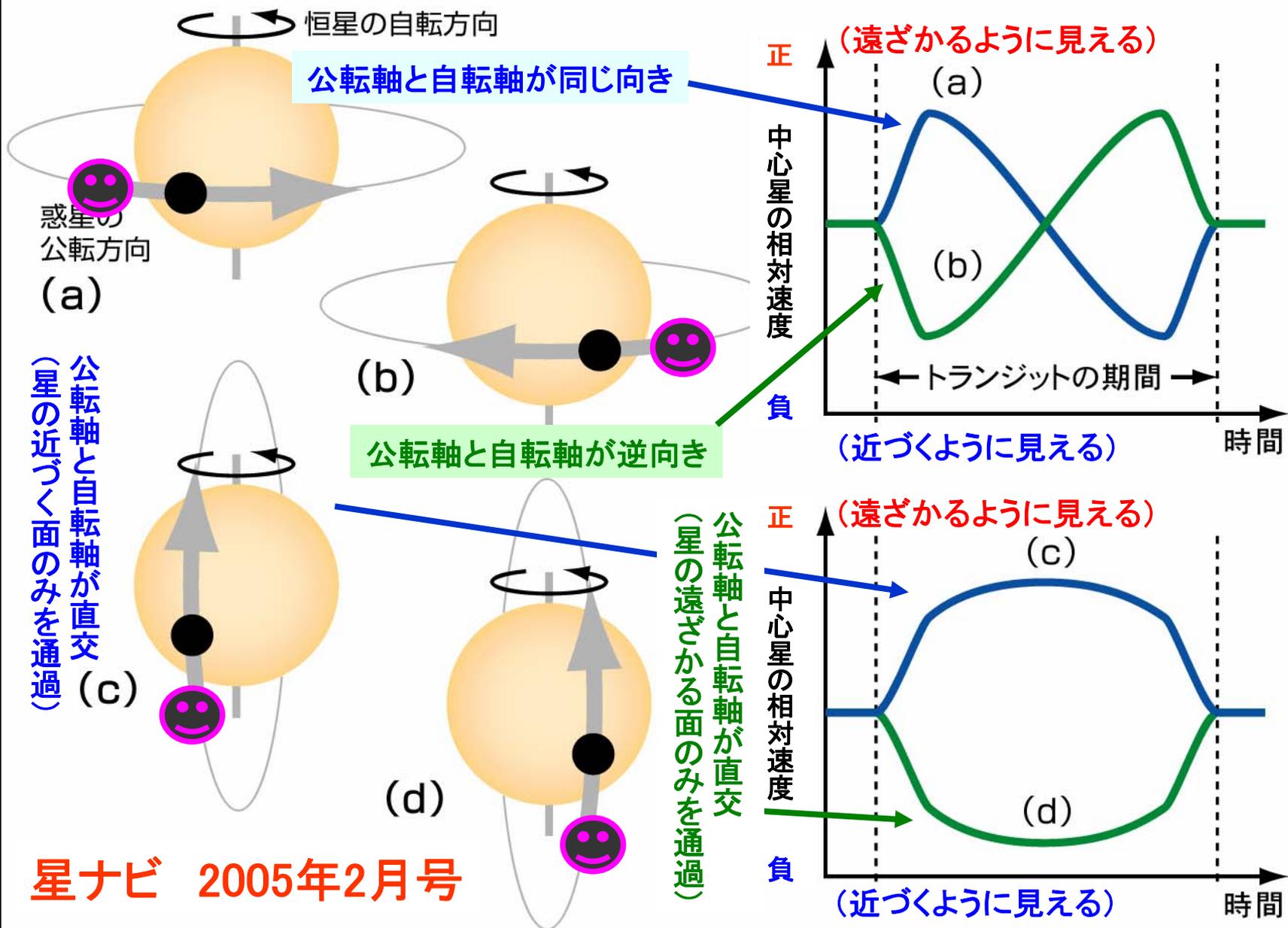
# ロシター効果とは

- 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！



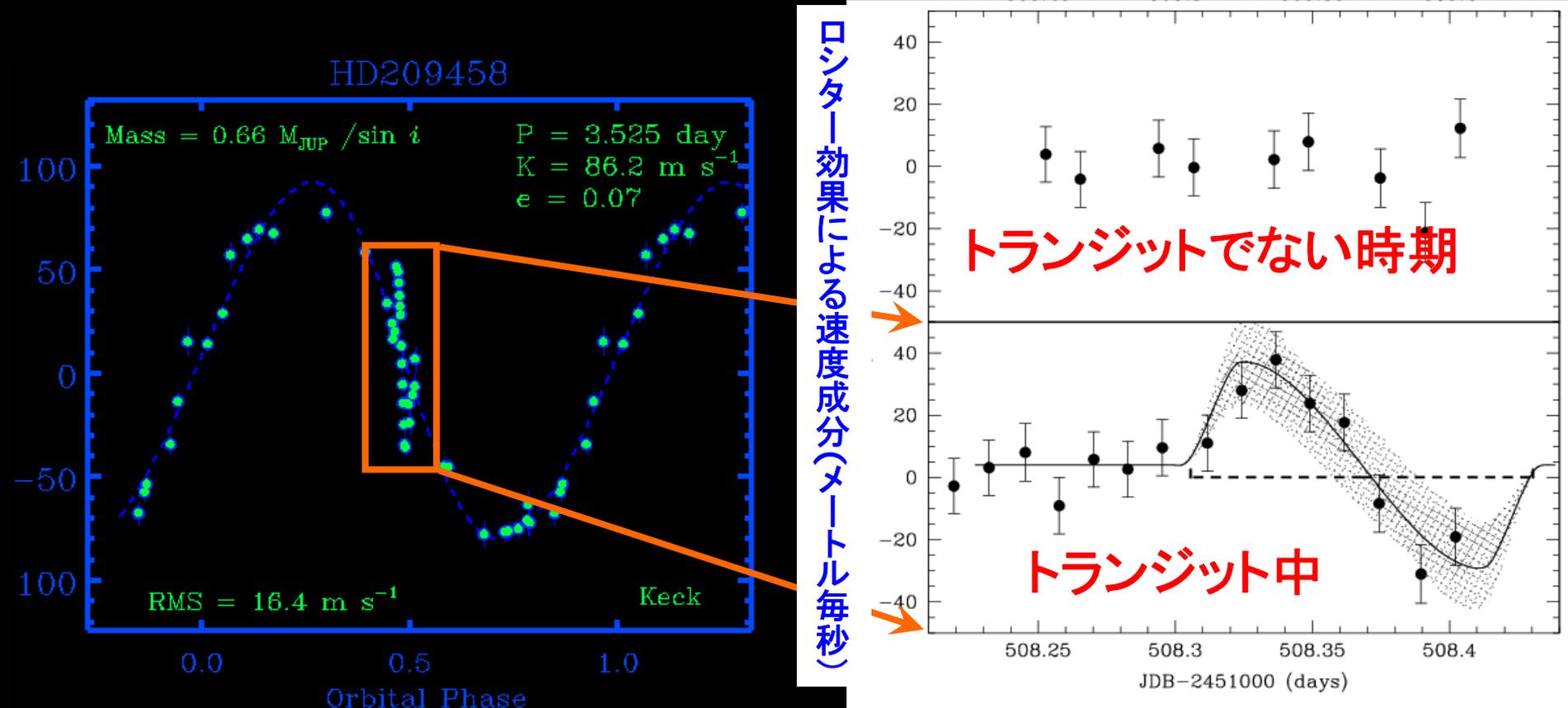
1924年、食連星 こと座ベータ星の速度データの解析に際してロシターが発見した  
**R.A. Rossiter:**  
**ApJ 60(1924)15**

# 惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図



# 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



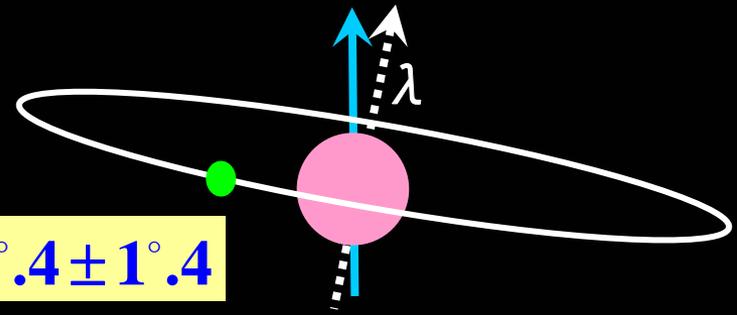
HD209458 の速度変動  
<http://exoplanets.org/>

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

# わずかなズレの初検出！



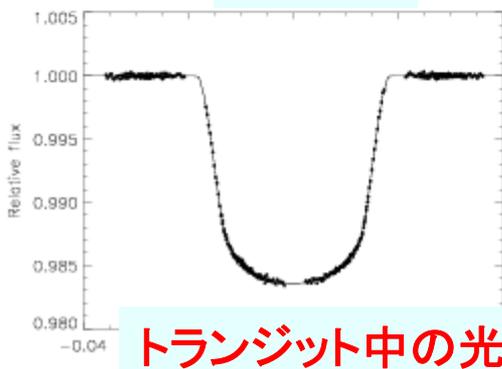
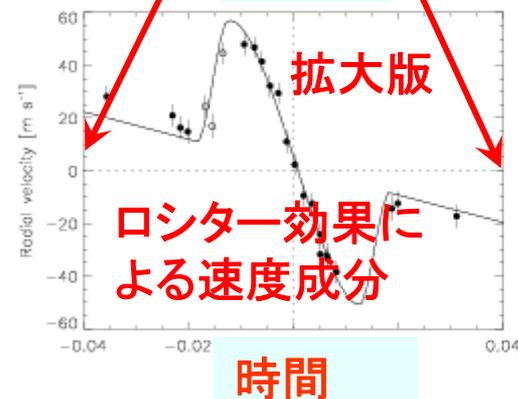
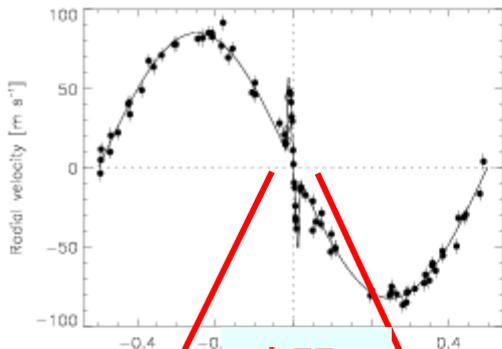
$$\lambda = 4.4 \pm 1.4$$



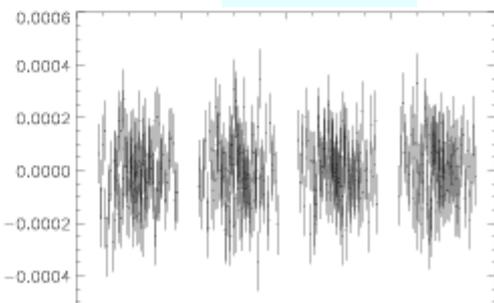
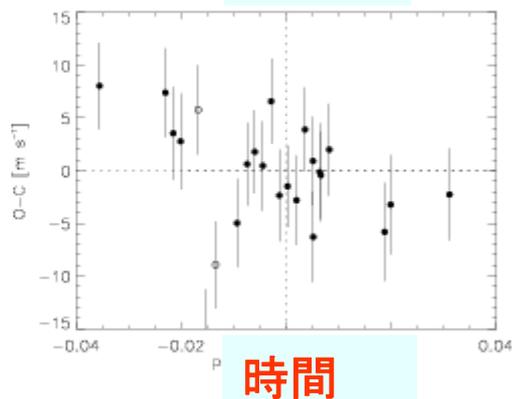
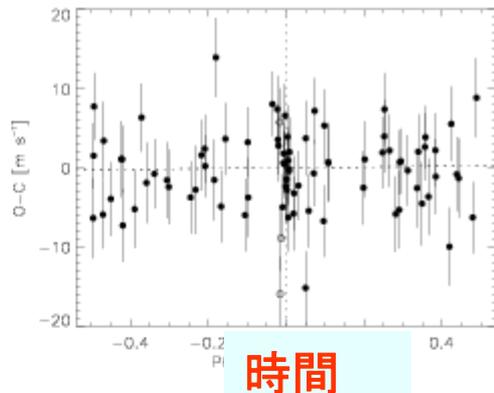
- 太田泰弘君の理論的研究が、共同研究者であるハーバード大学のJosh Winn氏(現MIT)を刺激した
- トランジット惑星 HD209458 のベストデータフィット
  - ケック天文台(ハワイの10m望遠鏡)による可視光での分光観測
  - ハッブル宇宙望遠鏡による可視光強度変動モニター
  - スピッツァー望遠鏡による赤外線強度変動モニター
- 主星の自転軸と惑星の公転軸が、(射影された)角度 $\lambda$ にして $(-4.4 \pm 1.4)$ 度だけずれていることを発見
  - Queloz et al.(2000)の精度(約20度)を一桁以上向上
  - 太陽の場合、自転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



## 中心星の視線速度

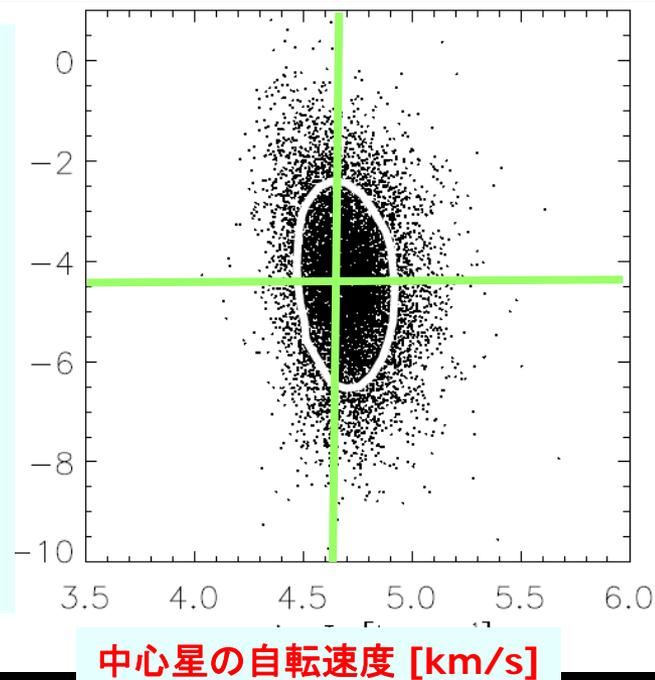


## データとベストフィットの残差



# 解析結果

自転軸と公転軸のなす角 [度]



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

わずかではあるが有意  
に0からずれている！

# 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同時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？
  - 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 惑星リング・衛星の検出可能性

# 現在さらに発展中

- 日本天文学会2005年秋季年会記者発表
- その後採択された惑星観測プロポーザル
  - S03A-72(PI:Suto), S06A-029(PI:Narita),  
S06B-049(PI:Leigh), S07A-007(PI:Narita),  
S07B-078(PI:Leigh), S07B-091(PI:Narita)
  - HD209458b (Winn et al. 2005)  $\lambda = -4.4 \pm 1.4 \text{deg}$
  - HD189733b (Winn et al. 2006)  $\lambda = -1.4 \pm 1.1 \text{deg}$
  - TrES-1b (Narita et al. 2006)  $\lambda = 30 \pm 21 \text{deg}$
  - HAT-P-2b (Winn et al. 2007)  $\lambda = 0.3 \pm 9.8 \text{deg}$
- 2007年すばる望遠鏡ウェブリリース
  - [http://subarutelescope.org/Pressrelease/2007/08/23/j\\_index.html](http://subarutelescope.org/Pressrelease/2007/08/23/j_index.html)

# 天王星リングの発見の歴史から学ぶ

## ■ 天王星

- 1781年3月13日 ウィリアム・ハーシェルが発見

## ■ 天王星リング

- 1977年3月10日 天王星が背景星を掩蔽する際の測光観測から偶然発見  
(Elliot et al. 1977)
- 1986年 ボイジャー2号が新たに2本の環を発見、現在11本の環が知られている



# 天王星リングの教え

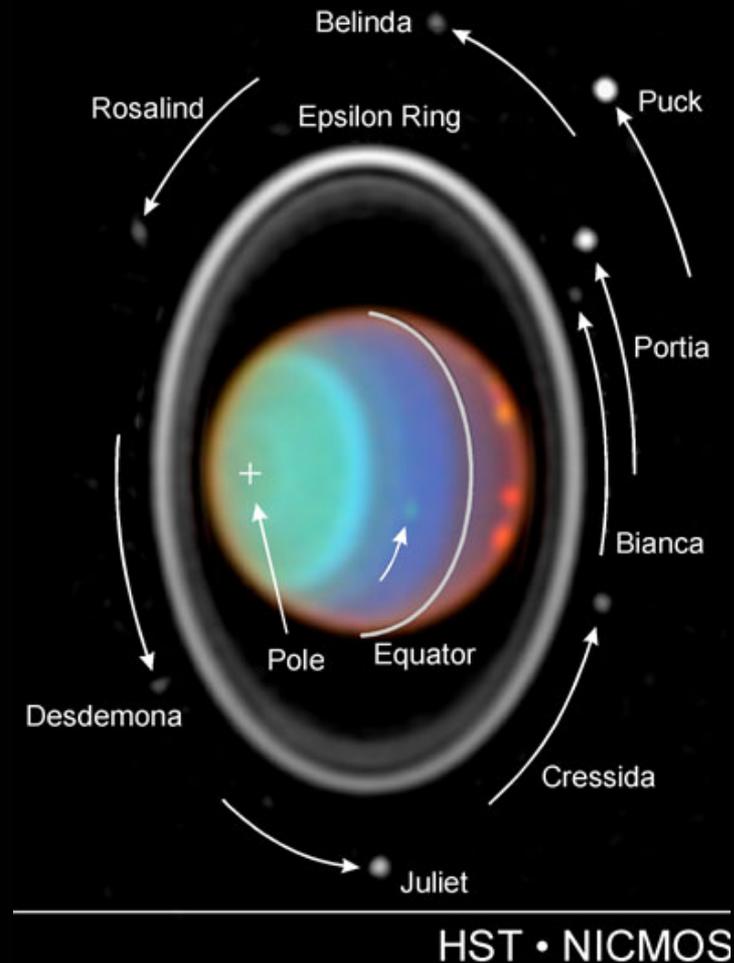
## ■ 天王星リング

- 半径: 3.8万~5.1万kmの範囲
- 最大の環の幅は2500km
- 天王星半径約2.5万km
- リングの向き⇒惑星の自転軸

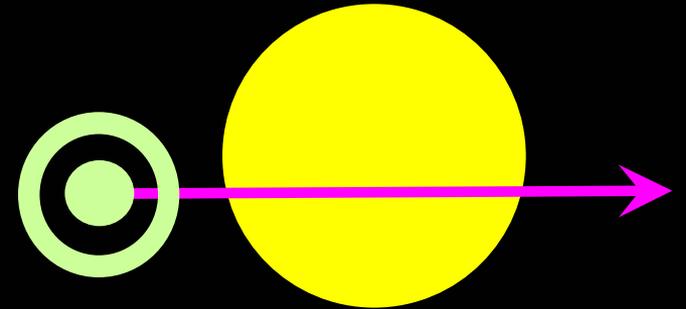
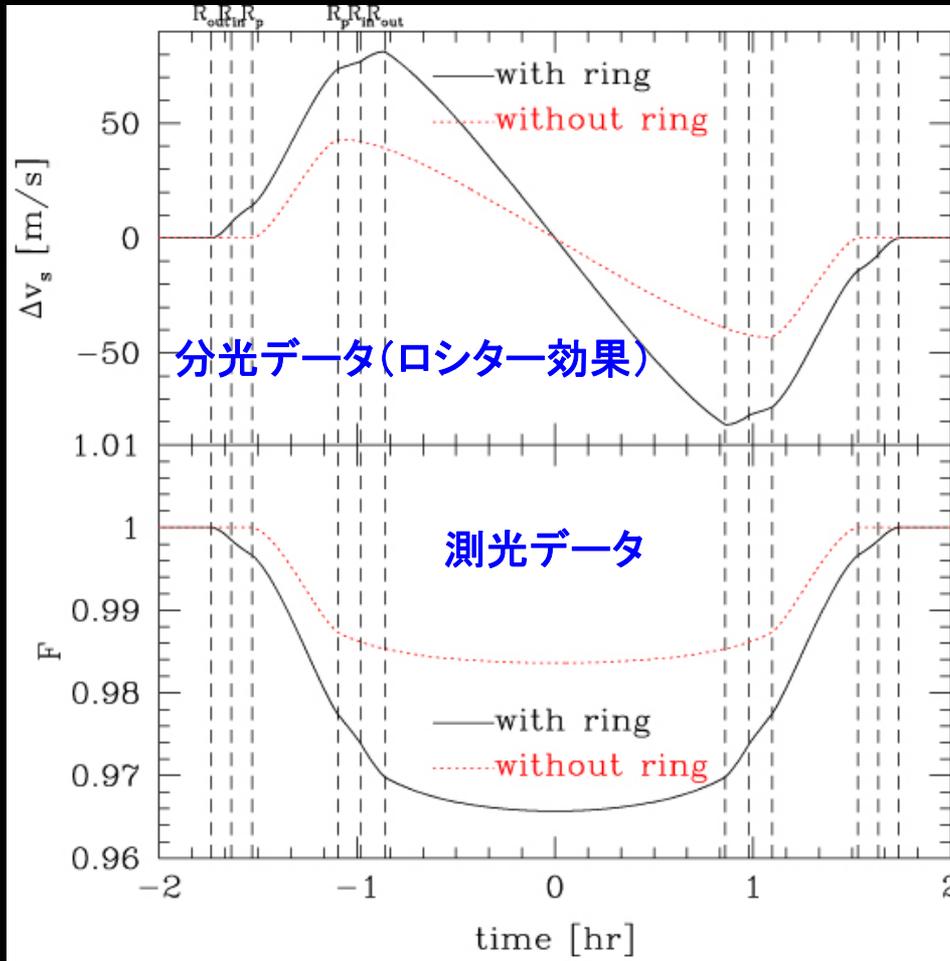
## ■ リングは土星だけではない

- ガス惑星に一般的?
- 木星(3本、1979年:ボイジャー)
- 土星(9本、1610年:ガリレオ)
- 天王星(11本、1977年:トランジット)
- 海王星(4本、1986年:トランジット)

## ■ トランジットはリング発見に貢献

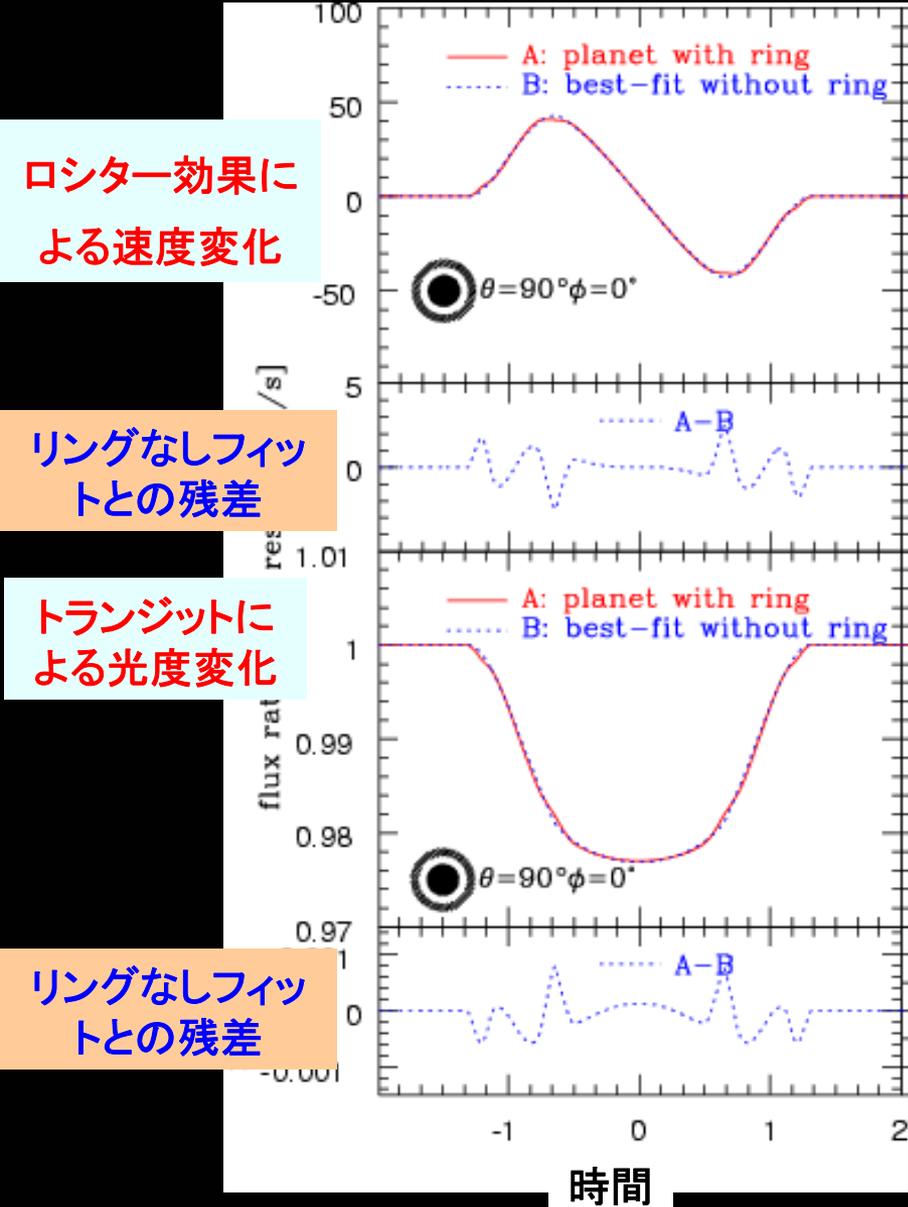


# 惑星リング存在の兆候を探れるか？



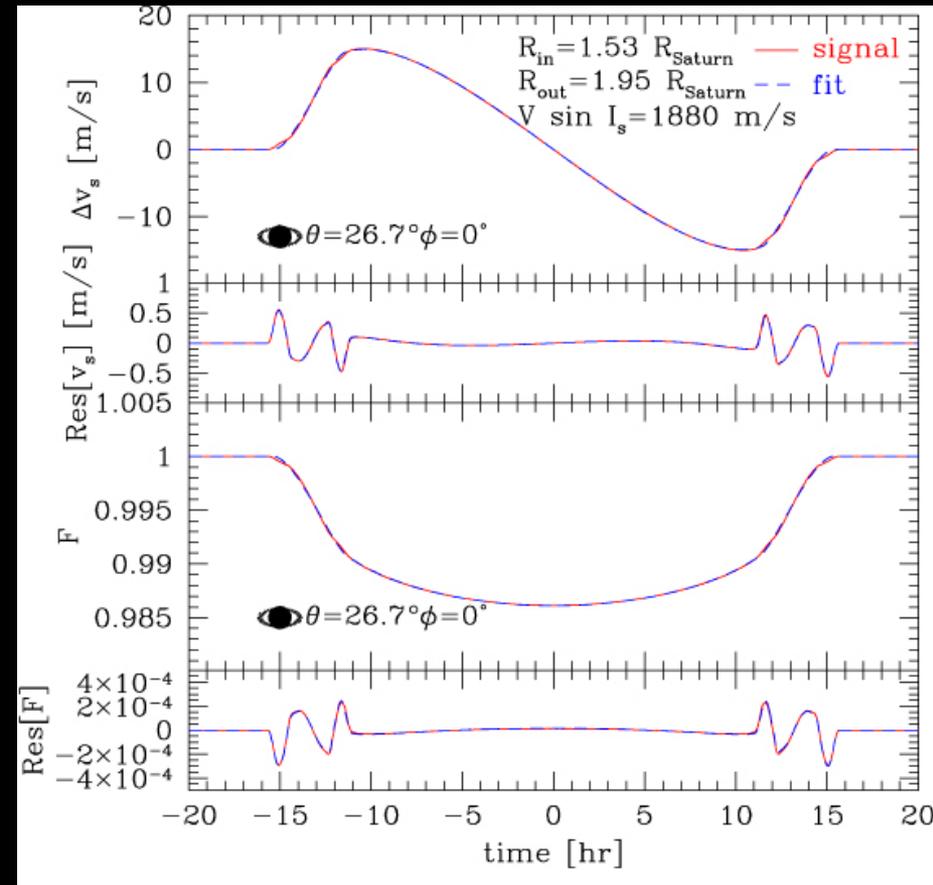
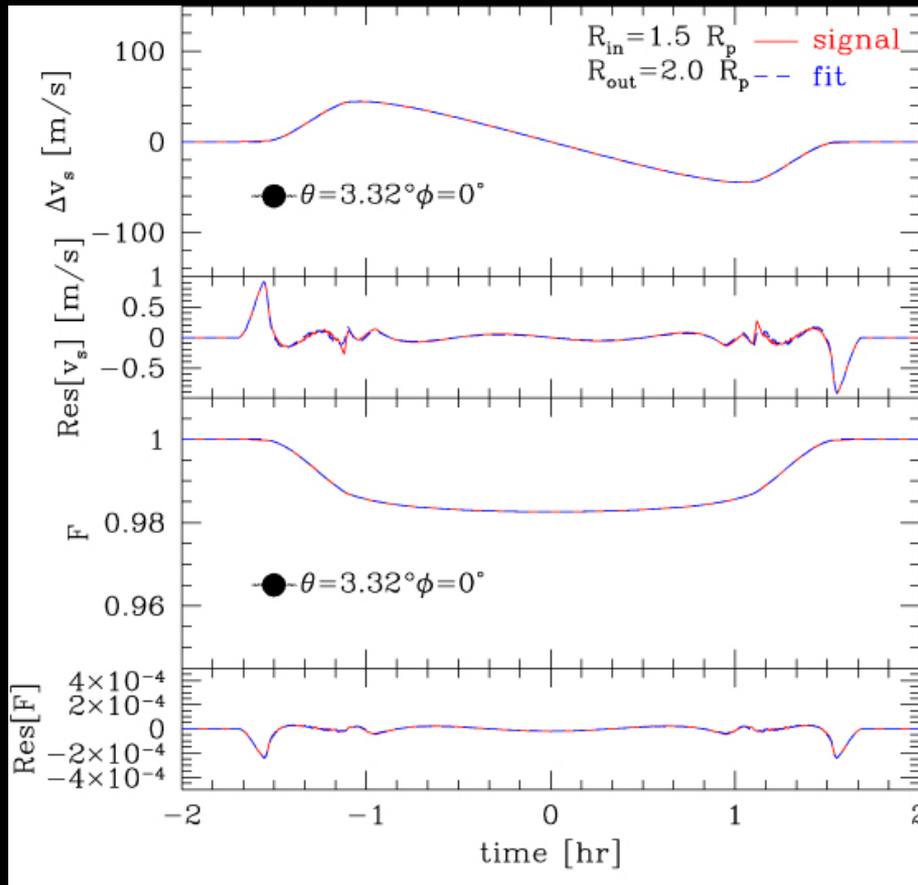
- リングの外径・内径、間隙、惑星本体の通過時に不連続な変化
- リングなしでフィットしたモデルとの残差を統計解析

# 系外惑星リングの検出可能性(太田泰弘D論)



- 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

# ホットジュピターと土星の場合どう見える？



- ホットジュピター: tidal lockのためedge-onに近い
- 土星: 30度程度傾いているが太陽の自転が小さい
- いずれも不利なパラメータだが、検出可能範囲(S/N=1)ではある

# トランジット惑星研究の今後 “長岡半太郎に学べ”



## ■ 長岡の土星型原子モデル

- Nagaoka, H. : Phil. Mag. 7(1904) 445
- 量子論の先駆け

## ■ トランジット惑星

- 惑星の軌道角運動量 ( $L$ ): 視線速度
- 主星のスピン ( $S$ ): ロシター効果
- 惑星のスピン ( $s$ ): リング、衛星

## ■ 惑星系から原子物理学へ

## ■ 原子物理(分光)学から惑星系へ



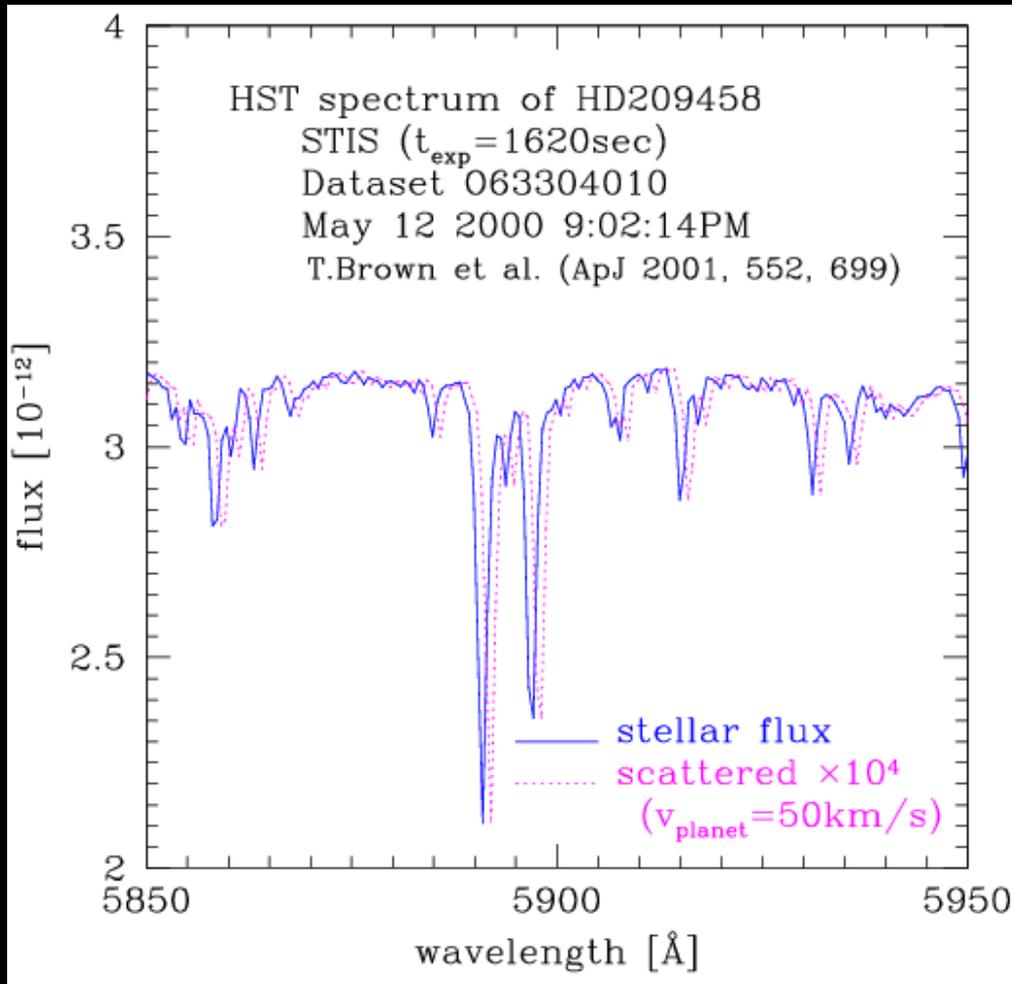
写真 2: 長岡半太郎 (1865-1950)

# 今後の系外惑星研究

- 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見 (2005)
- 
- 惑星可視域反射光の実見
  - 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**
- 
- **惑星の直接実見(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**



# トランジット惑星からの反射光の検出原理

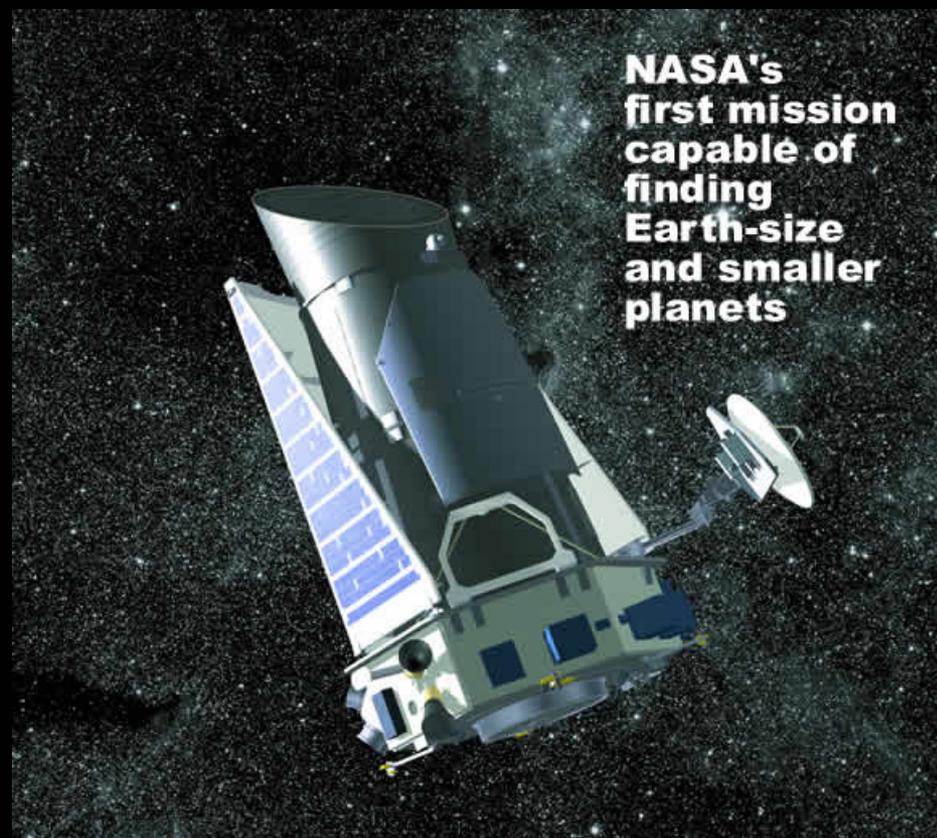
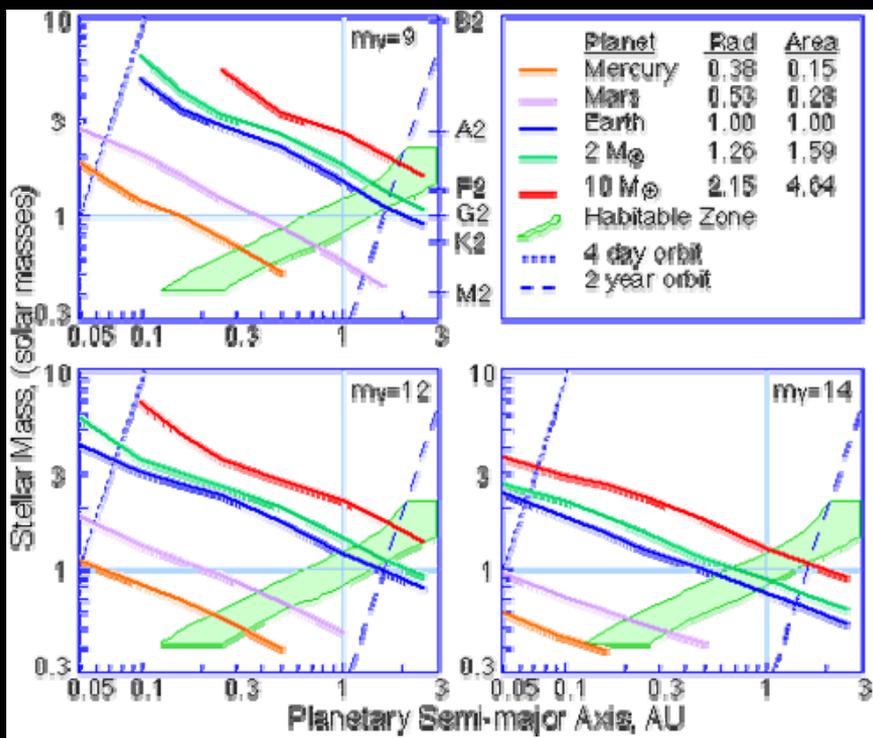


- 惑星の反射光スペクトルは主星のコピー
- ただし、公転速度のために、吸収線の位置が  $50\text{km/s}$ 程度だけずれたところになる
- この反射吸収線の強度はわずか0.01%
- 百本ほどの吸収線を同時に使って反射光の存在を検出したい

実はこれがもともとのプロポーザルの目的だったりする、、、

# 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/>

# バイオマーカー（生物存在の証拠）の同定

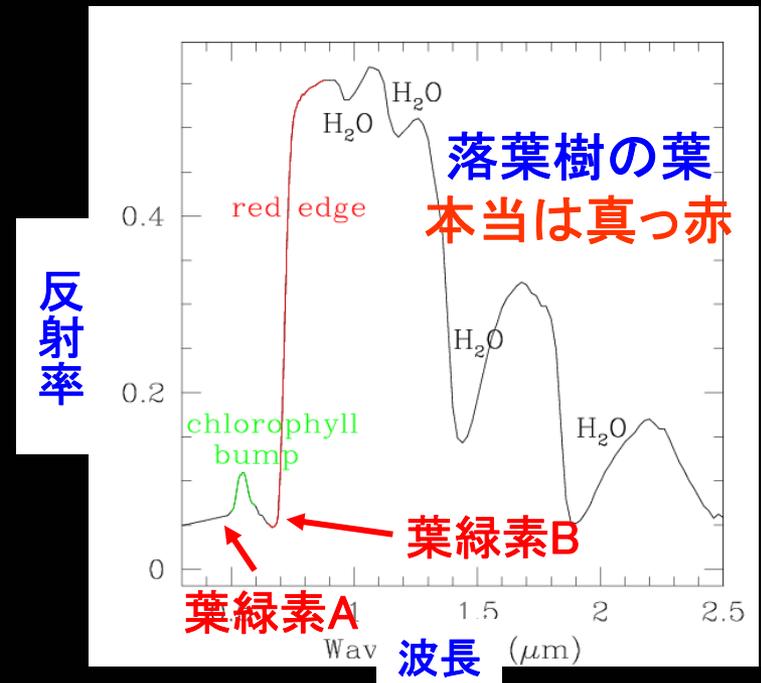
- （居住可能）地球型惑星を発見するだけでは、そこに生命があるかどうかはわからない

## ■ Biomarker の探求

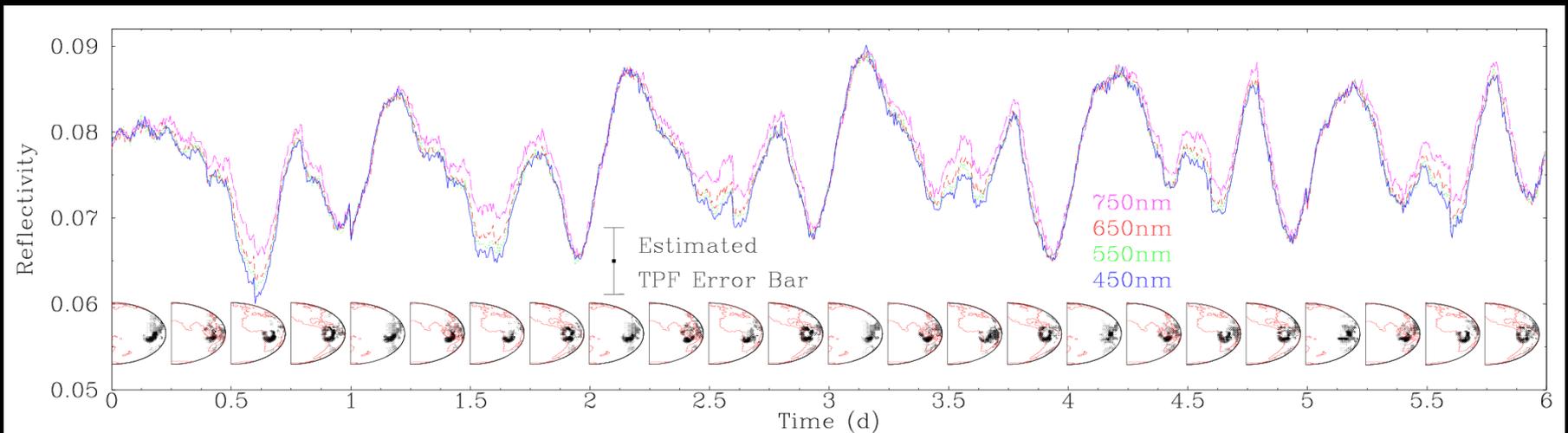
- 酸素、オゾン、水の吸収線
- 植物のred edge
- *Extrasolar planets from extrasolar plants (E. Turner)*
- とにかく超精密分光観測

## ■ やっぱりSETIか？

- 可能性は低くともこれ以上に確実なものはない
- まっとうなバイオマーカーではやはり隔靴搔痒



# 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！

# 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



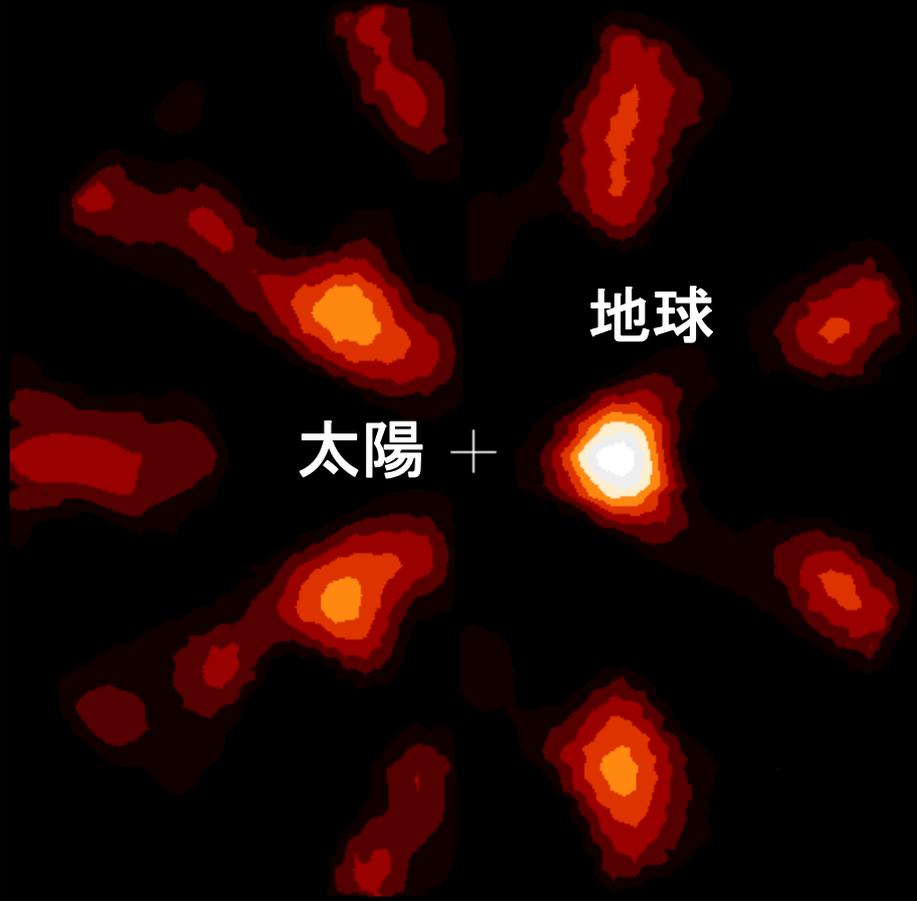
reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

1924年にすでに宇宙生物学の芽生え

# ダーウィン衛星

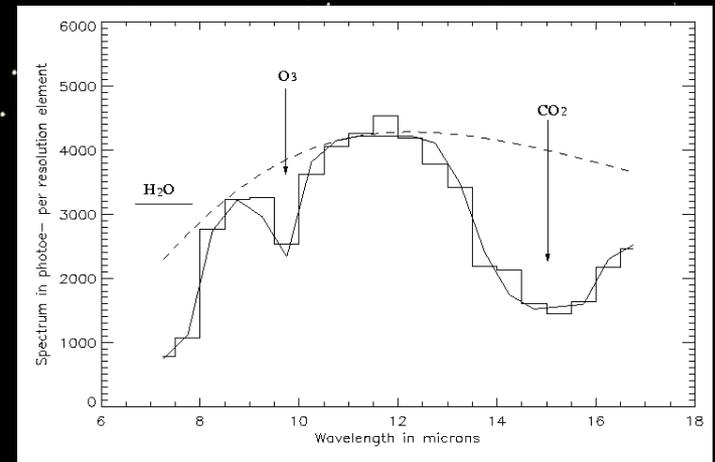
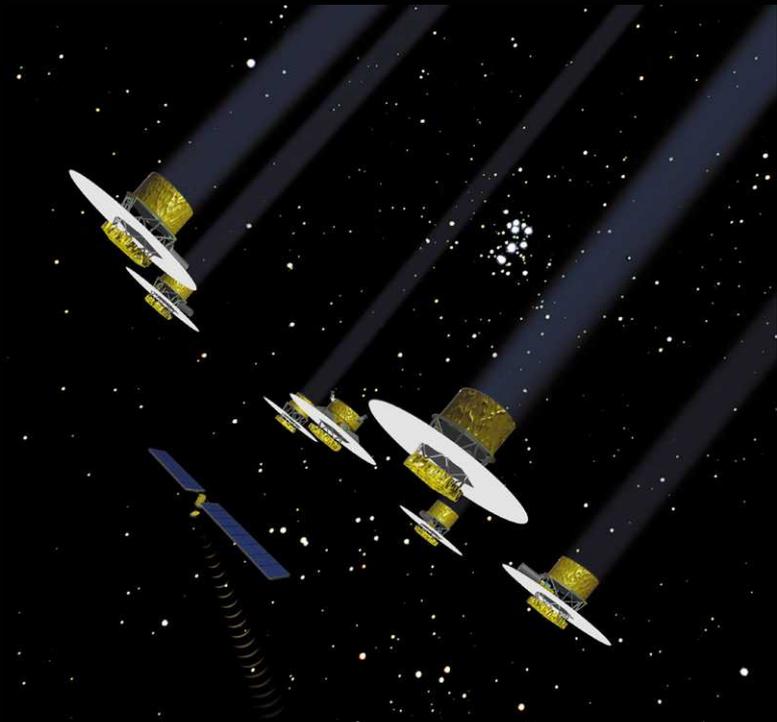
(欧州：2020年頃？打ち上げ)

赤外線での惑星の直接撮像を目指す



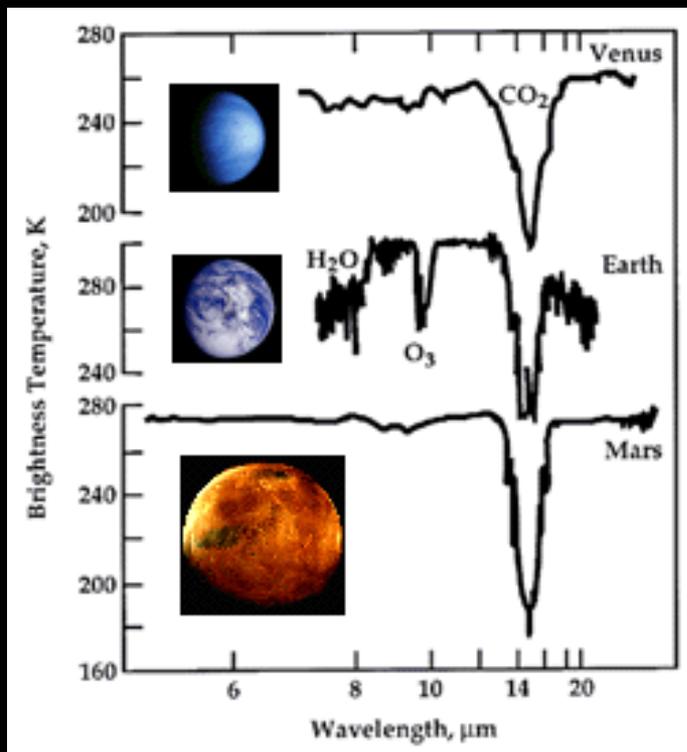
30光年先においた太陽と地球の観測予想図

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



宇宙赤外線干渉計群  
測光分光観測

# 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？

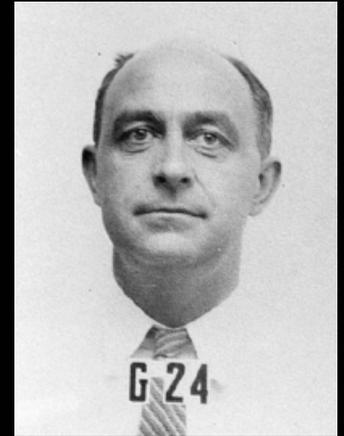
やっぱりSETIか？

# 他人の気持ちになれ！ トランジット惑星のSETI

- トランジット惑星はめったにない (~10/200、5%程度)
- 見つければ、長時間モニターする(される)のは当然
- 他の文明がその存在を知らせたいならば、トランジットが観測できる天体に向かって選択的に信号を発しているはず
  - トランジット惑星を電波(21cm)を含む全波長で観測する
  - 我々も地球がトランジット惑星として観測される方向の天体に向かって常に信号を発するのがマナー？
- **性善説**: 他の文明と知り合うことで、互いに心が豊かになり、地球が平和になる
- **性悪説**: 圧倒的に強大な他の文明の餌食となり破滅
  - SETIの信号は邪悪な文明からのspam-mailかも
  - 決して返信してはいけない。ましてや、自らのアドレス(存在)を無防備に知らせまくるのは愚の骨頂か？

# Fermi's question or paradox ?

- 「地球外生命の痕跡を探るまじめな科学」を省略して「宇宙人探し」と呼んではいけない
- “Where are *they*?”
  - by Enrico Fermi during a luncheon conversation at Los Alamos (1950)



フェルミのロスアラモスIDバッジ

