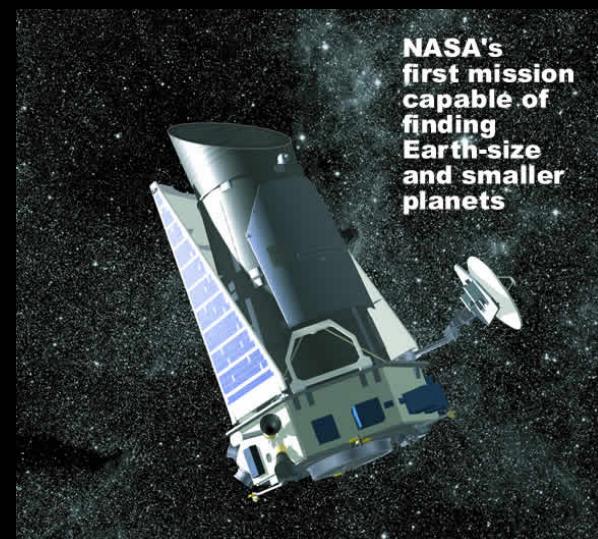
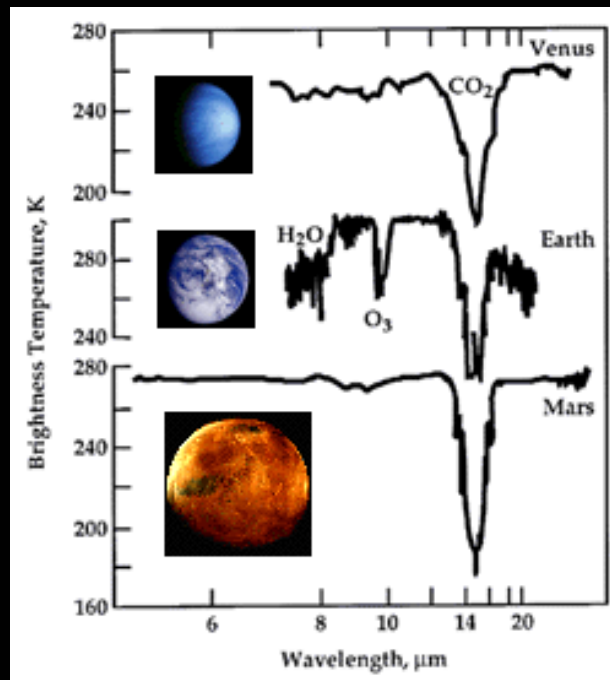


# 太陽系外惑星と生命 ～第二の地球を探す～



東京大学大学院理学系研究科物理学専攻  
須藤 靖

2006年10月27日早稲田大学  
自己組織系物理学特論

# 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/>

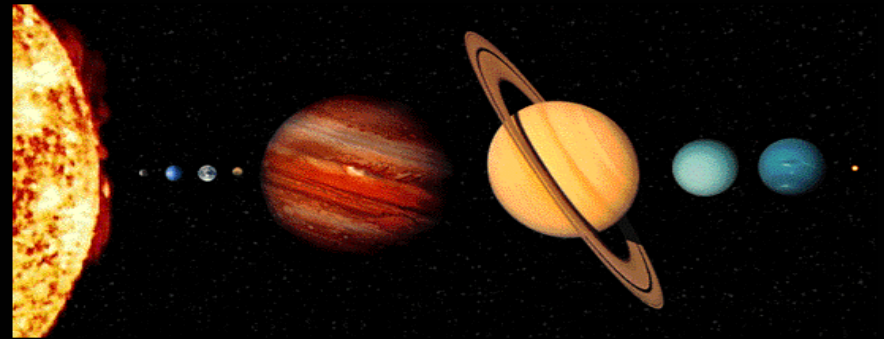
<http://www.nasa.gov/home/index.html>

# 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

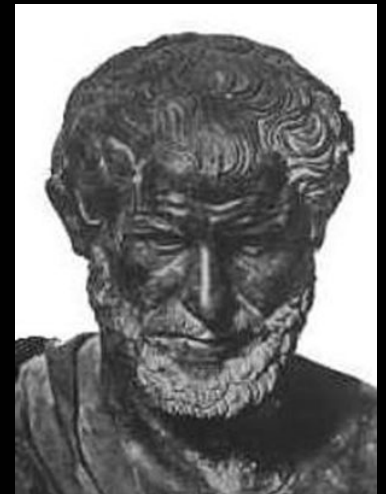
- 1781年：天王星の発見
- 1846年：海王星の発見
- 1930年：冥王星の発見



■ 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
  - エピキュロス（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
- 2006年10月19日時点で210個の系外惑星(21の多重惑星系)

# 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

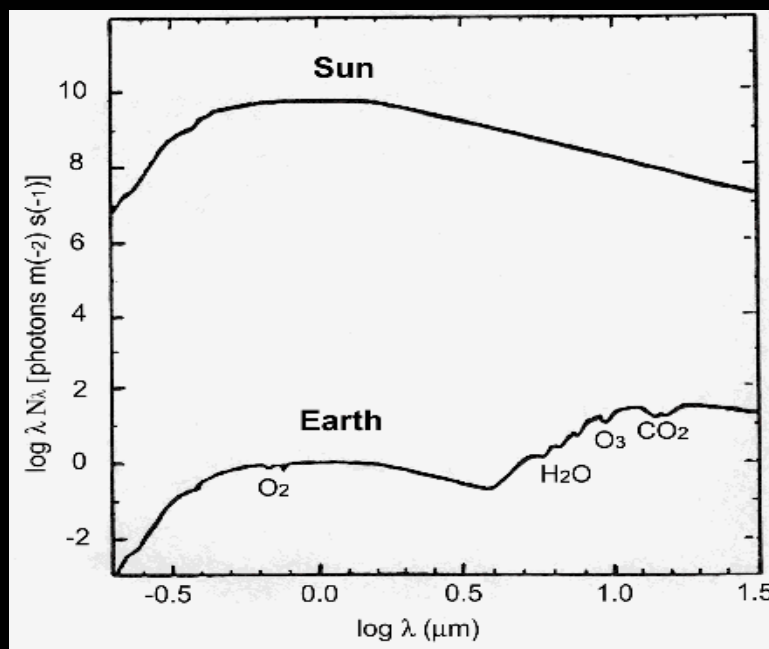
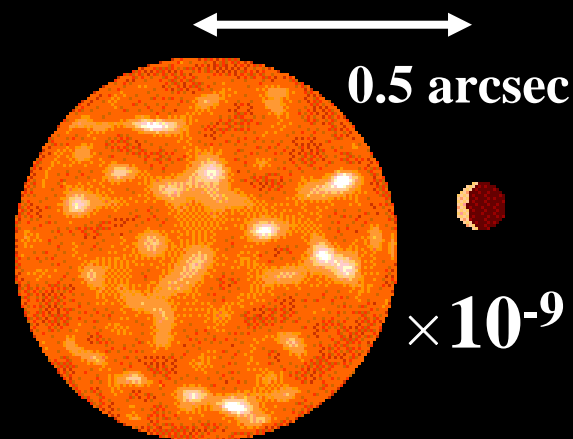
⇒ いずれも最先端の観測技術を要する

# 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)

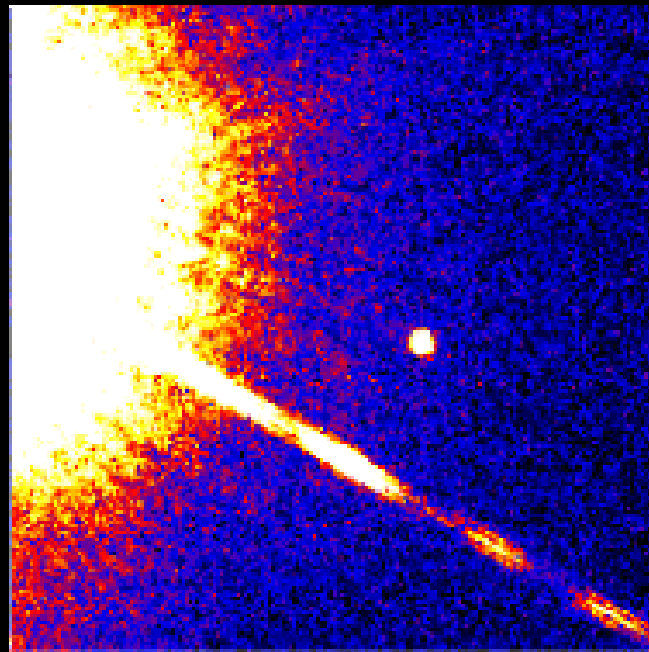
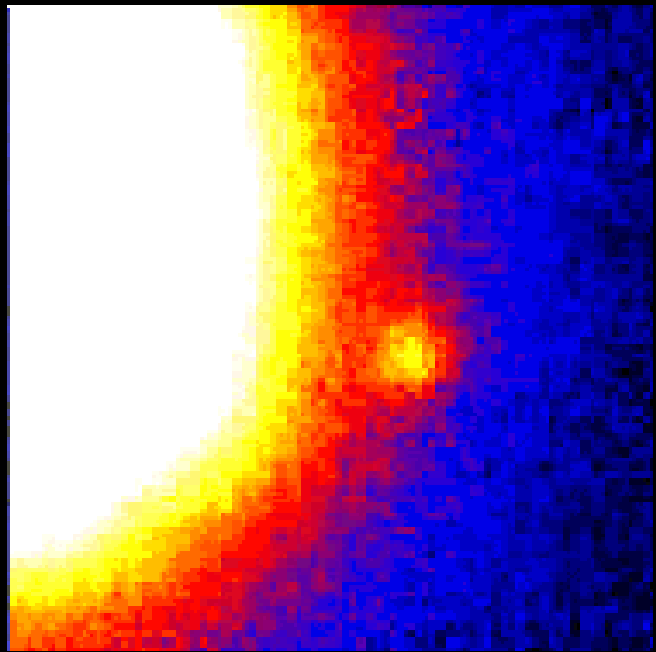
主星との角距離: 0.5秒角



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！

# 褐色矮星の直接撮像例



Gliese229 b:  
角距離 7arcsec  
光度比 5000

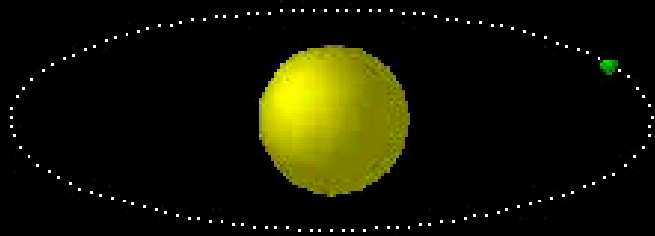
左: Palomar  
右: HST  
(国立天文台:  
中島紀氏)

- 木星が10pcの距離にあるとすれば、これよりも14倍主星に近く、20万分の1暗くなる！



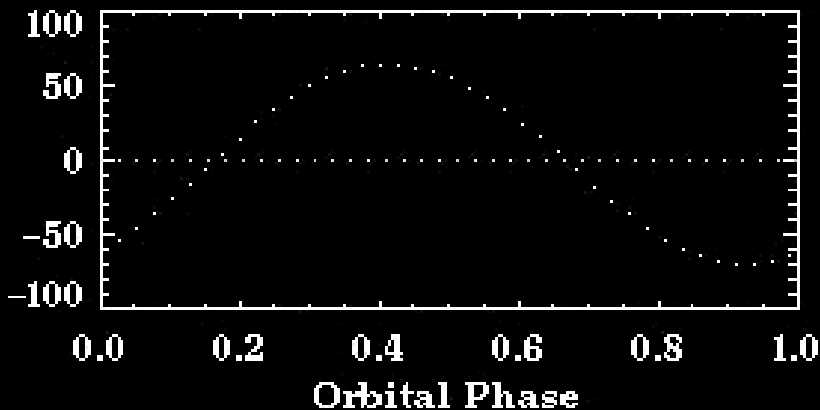
# どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



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

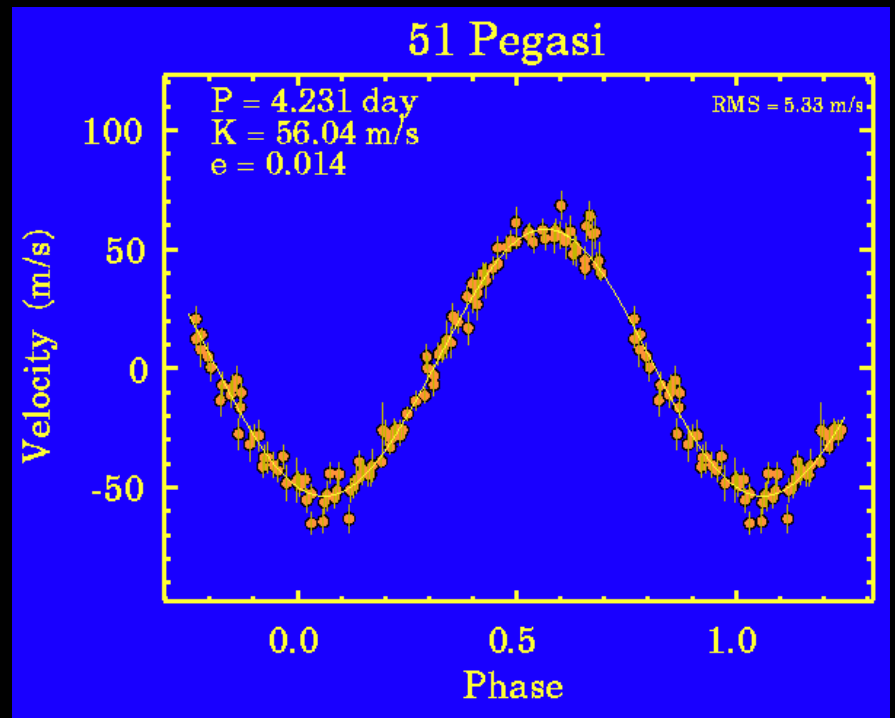
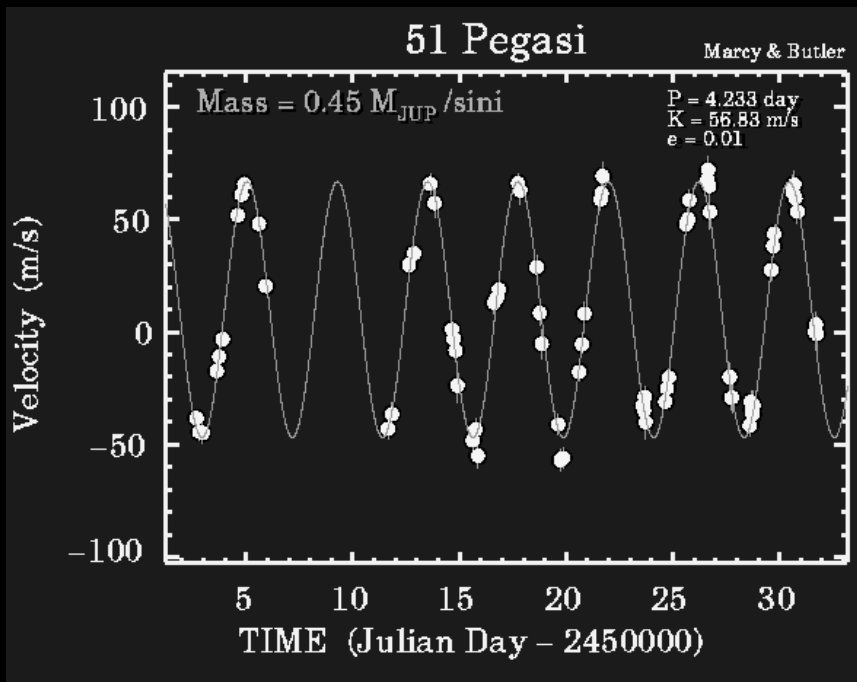
Radial Velocity Curve  
of the Star [m/s]



- 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)

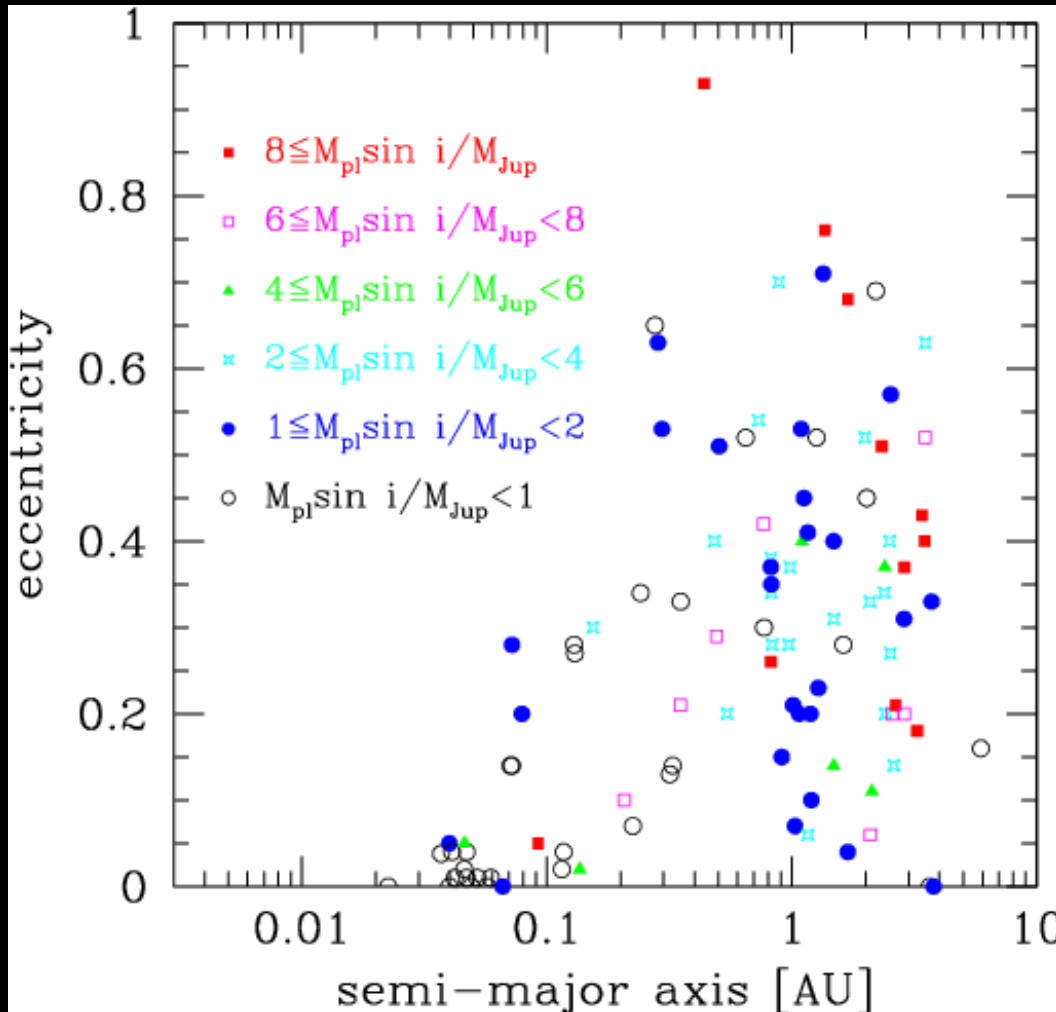


周期がわずか4.2日！

# どんな系外惑星がみつかっているのか

- 2006年10月19日までに210個の系外惑星
- 1995年:初めての太陽系外惑星
  - 約50光年先のペガサス座51番星の周り
  - 一年(公転周期)がわずか4.2日
  - 質量は木星の1/2(地球の150倍)
- 1999年:食をおこす系外惑星の初発見
  - 約150光年先のHD209458という星の周り
  - 3.5日で公転、質量は木星の0.7倍(地球の200倍)
  - 惑星の大きさがわかる(半径が木星の1.3倍、地球の15倍)
  - 地球のような岩石惑星ではなく、木星のようなガス惑星
  - ホットジュピター
- 太陽系惑星とは全く異なる姿:すべてが予想外

# 太陽系外惑星の軌道分布関数

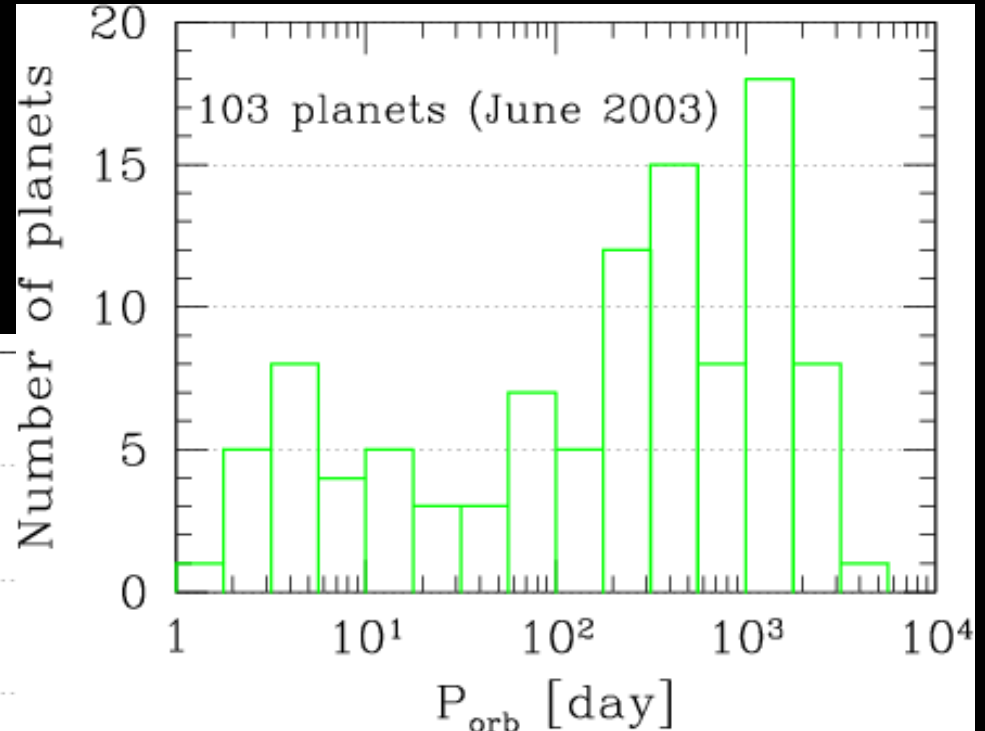
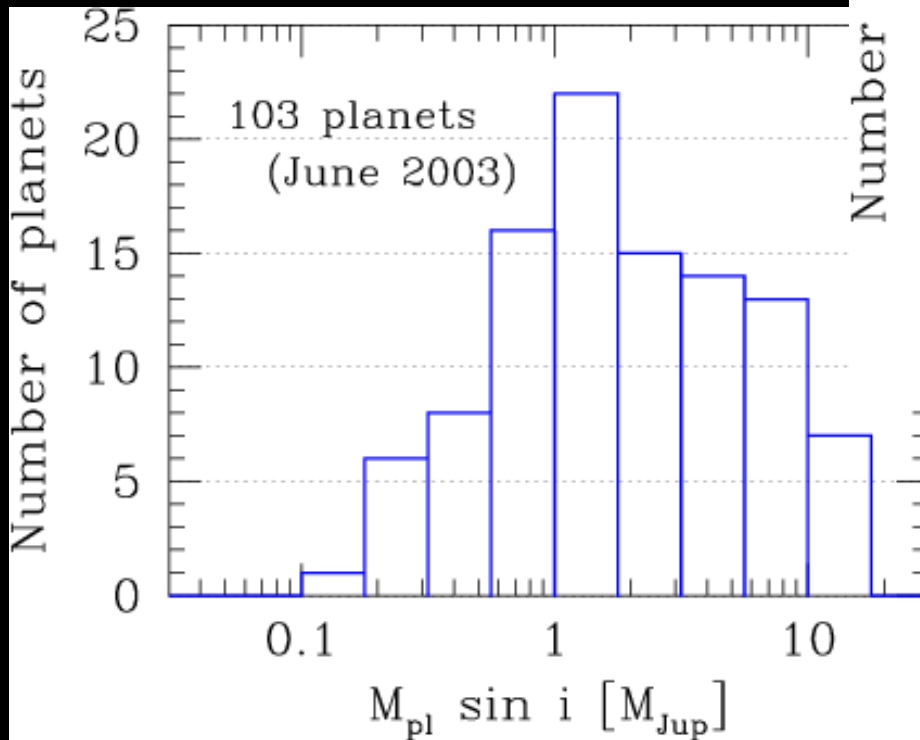


- 円軌道から大きくずれた軌道が多い (ただし、0.1天文単位以下の半径では円軌道に近い)
- 1天文単位以下の半径をもつ木星質量の惑星が大量に存在 (食の観測例から考えるとこれらはガス惑星であろう Hot Jupiter)

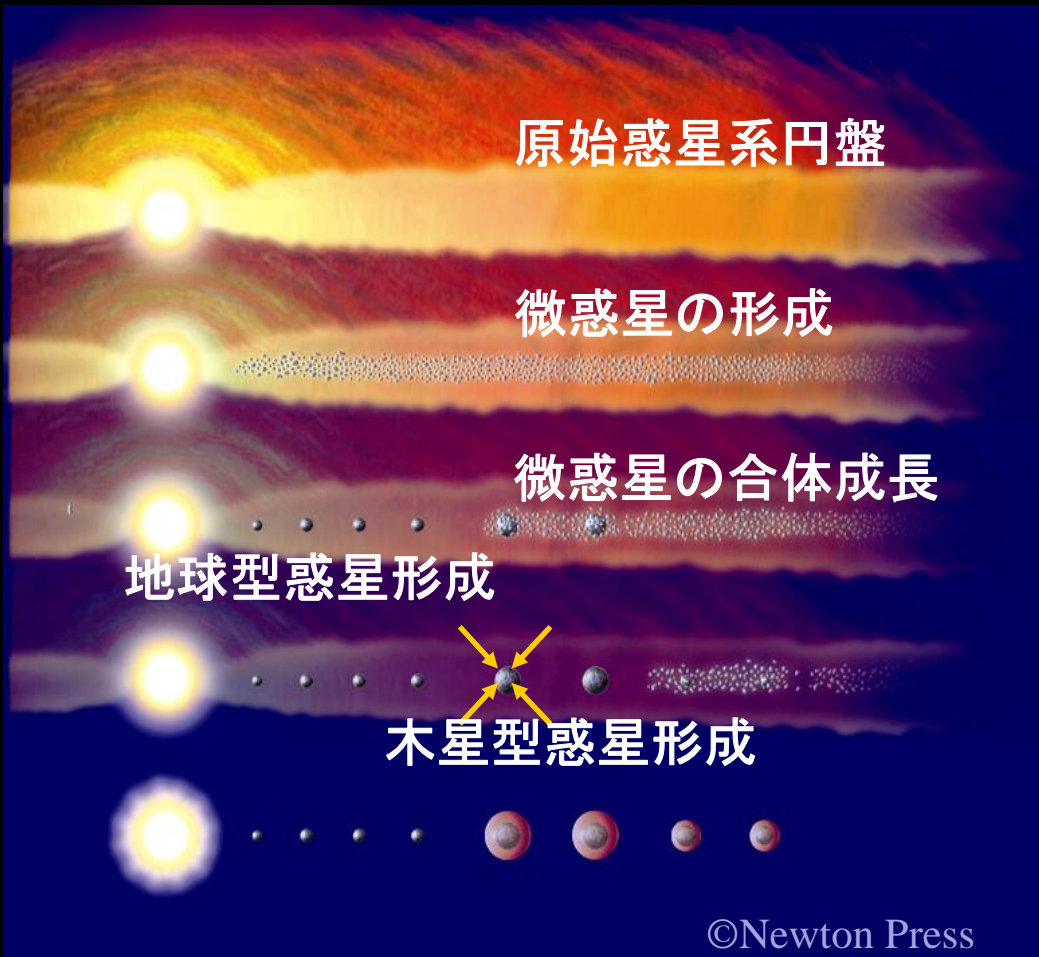
我々の太陽系とは全く異なる: 惑星系の多様性

# 太陽系外惑星の質量・周期分布関数

これらはまだ観測の選  
択効果を受けており、真  
の分布とは異なる



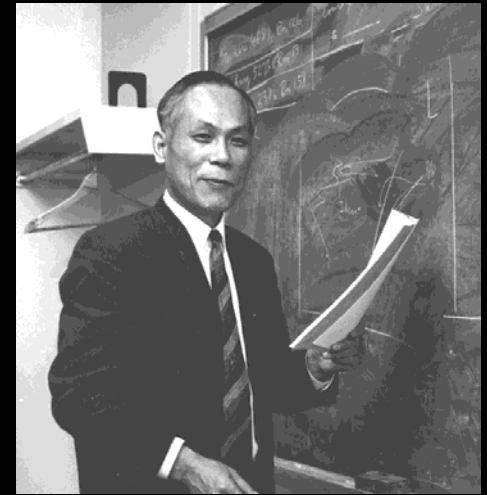
# 太陽系形成標準理論



- **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

# 林忠四郎先生

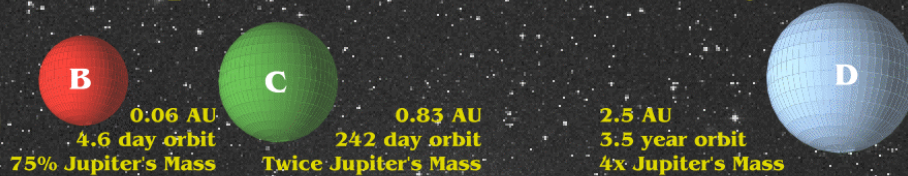


- 日本の理論宇宙物理学の父
- 1940年 東大物理学科卒業
- 京都大学大学院で素粒子論を学ぶ
- その後、ミクロな物理学をマクロな宇宙に応用し、宇宙論、星の進化論、太陽系形成論においていずれも偉大な業績を成し遂げられた
  - ガモフのビッグバンモデルを修正しヘリウムまでは宇宙誕生後3分間、それより重い元素は10億年以上後の第一世代の星の中心で形成されることを示した
  - 誕生直後の星は活動が非常に激しく光度が主系列に達した後の数十倍以上明るくなる時期(林フェイズ)があることを発見
  - 太陽系形成標準理論(林モデル、京都モデル)を提唱
- 山田章一 ⇒ 佐藤勝彦、前田恵一 ⇒ 林忠四郎 ⇒ 湯川秀樹

# ウプシロンアンドロメダ星 ～3つの惑星をもつ星～

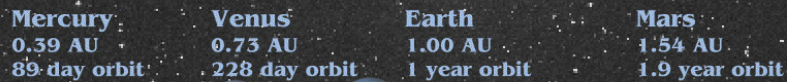
<http://cfa-www.harvard.edu/cfa/hotimage/latest.html>

## The Upsilon Andromedae System



<http://cfa-www.harvard.edu/afoe/simulation.html>

## Our Inner Solar System



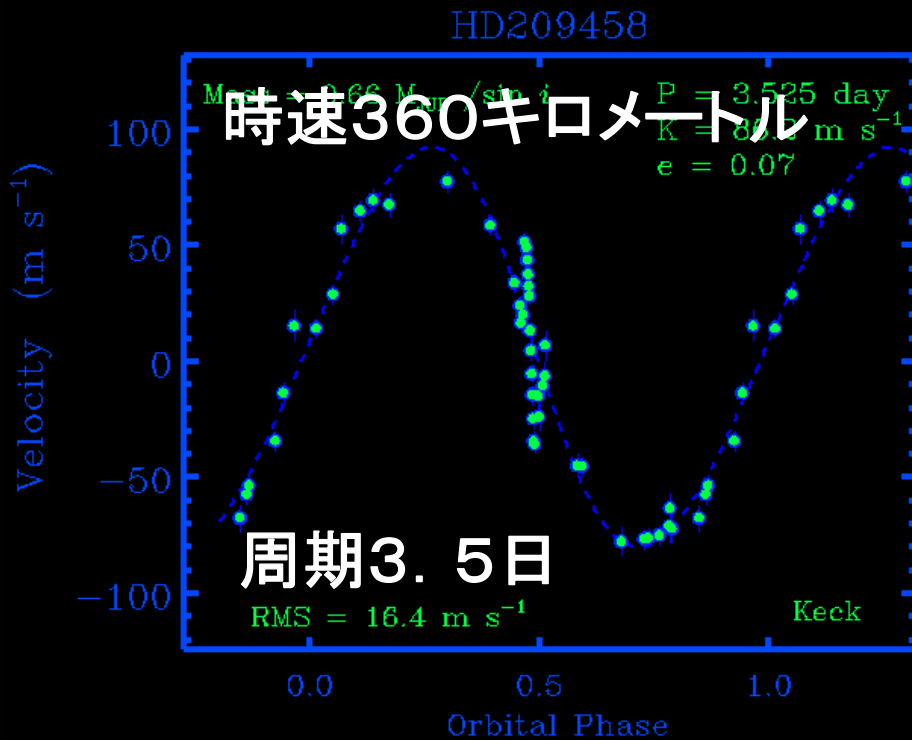
© Harvard-Smithsonian CfA (A. Condos), 1999



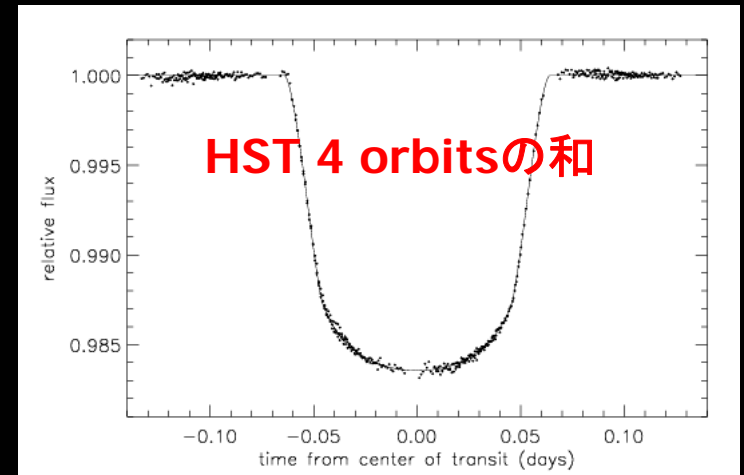
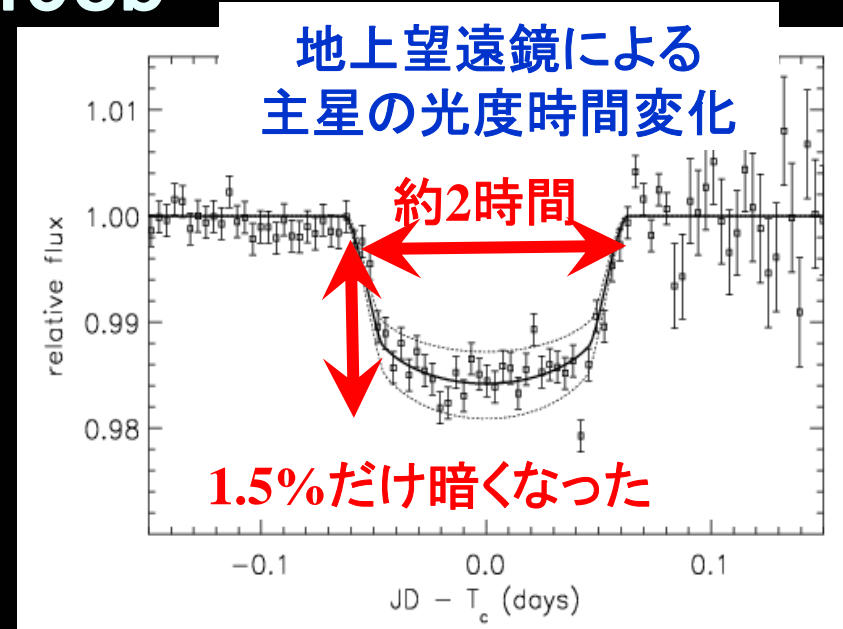


# 初めての太陽系外トランジット(食)惑星 HD209458b

- 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



Brown et al. (2001)

# 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

# 最初に発見されたトランジット惑星系: HD209458

- 距離: 約150光年 (ペガサス座)
- 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: 0.3g/cc

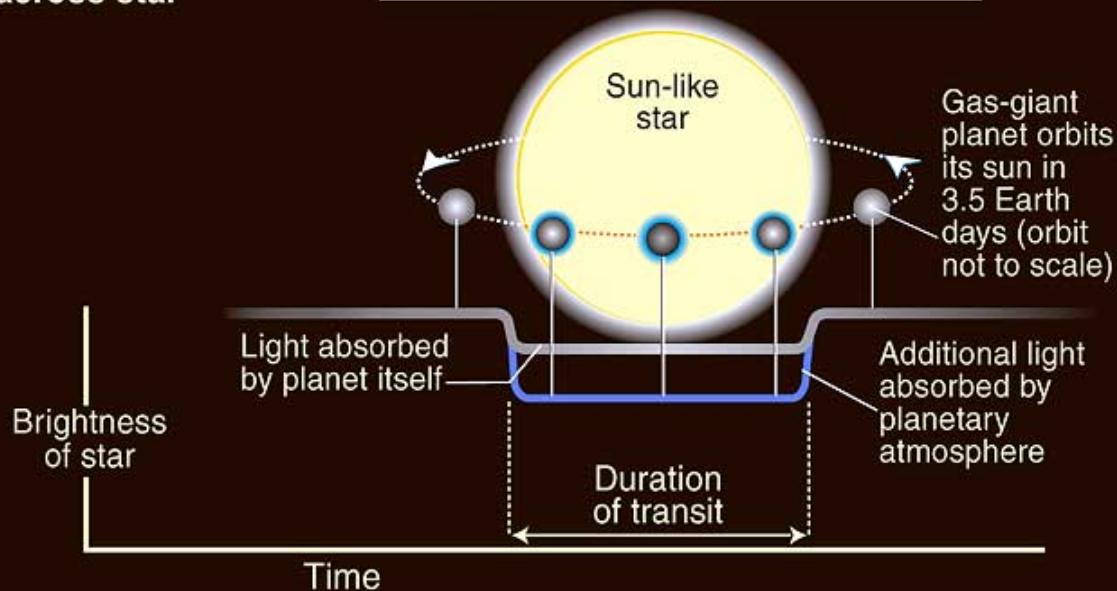
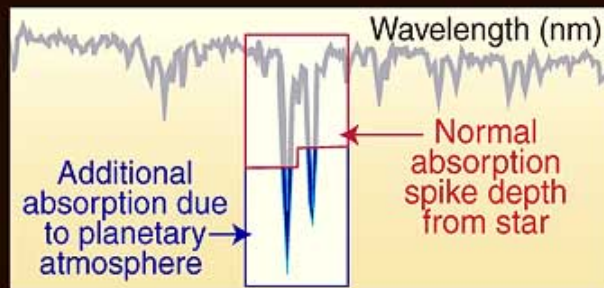
HD: Henry Draper カタログ  
1918年から1924年にかけて  
出版された、9等級までの約  
22万5千個の星のカタログ



# 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

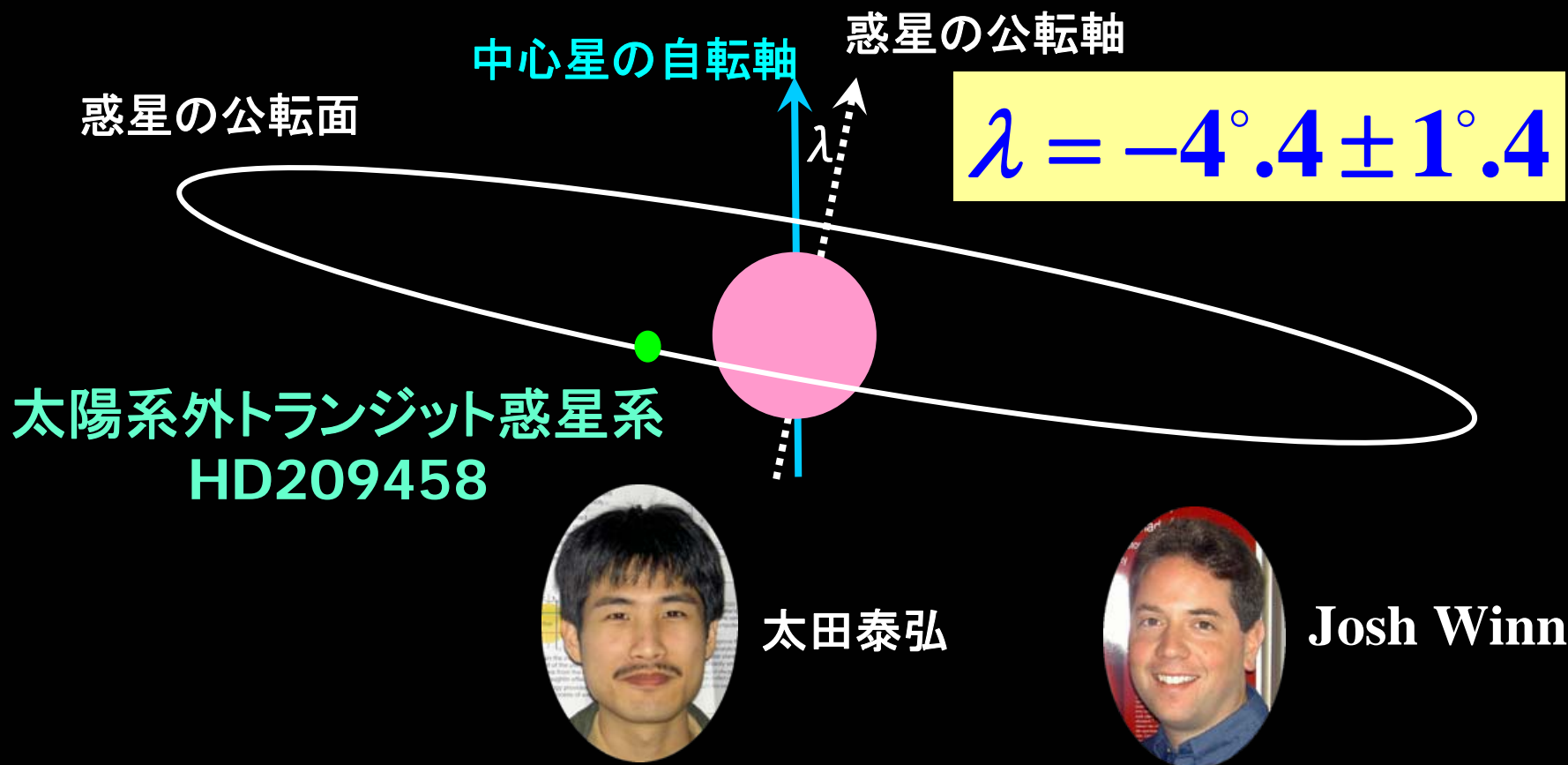


- 2000年 系外惑星の食を初検出
  - 惑星の大きさがわかる
  - 質量の観測データとあわせて密度を0.4g/ccと推定
  - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムを発見

# 赤外線(スピッツァー衛星)で見る 主星による惑星の食



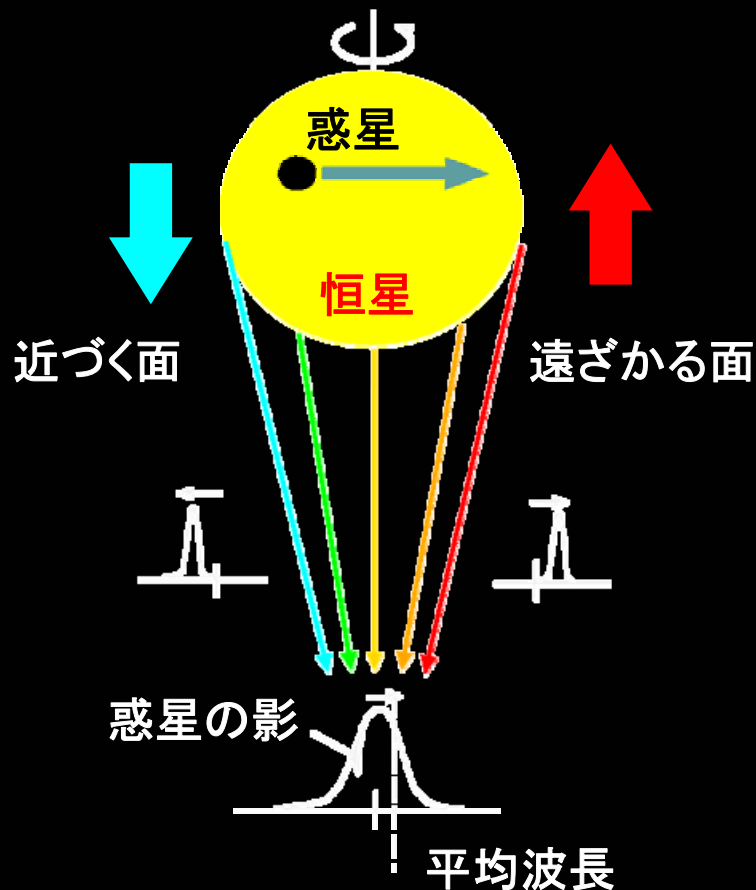
# ロシター効果を利用したHD209458の中心星 自転軸と惑星公転軸のずれの発見



太陽系外惑星の公転軸はちょっぴり傾いていた<sub>22</sub>

# ロシター・マクローリン効果

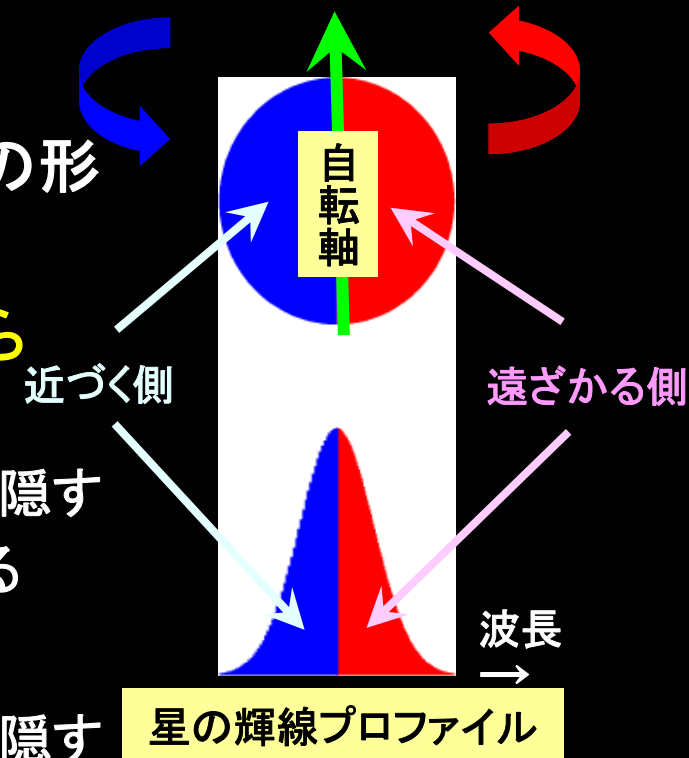
食連星において、一方の星が他方の星の一部を掩蔽することで、星の自転速度の一部が見かけ上、その星と観測者の相対速度のように見えてしまう現象  
(Rossiter 1924; McLaughlin 1924)



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

# ロシター効果とは

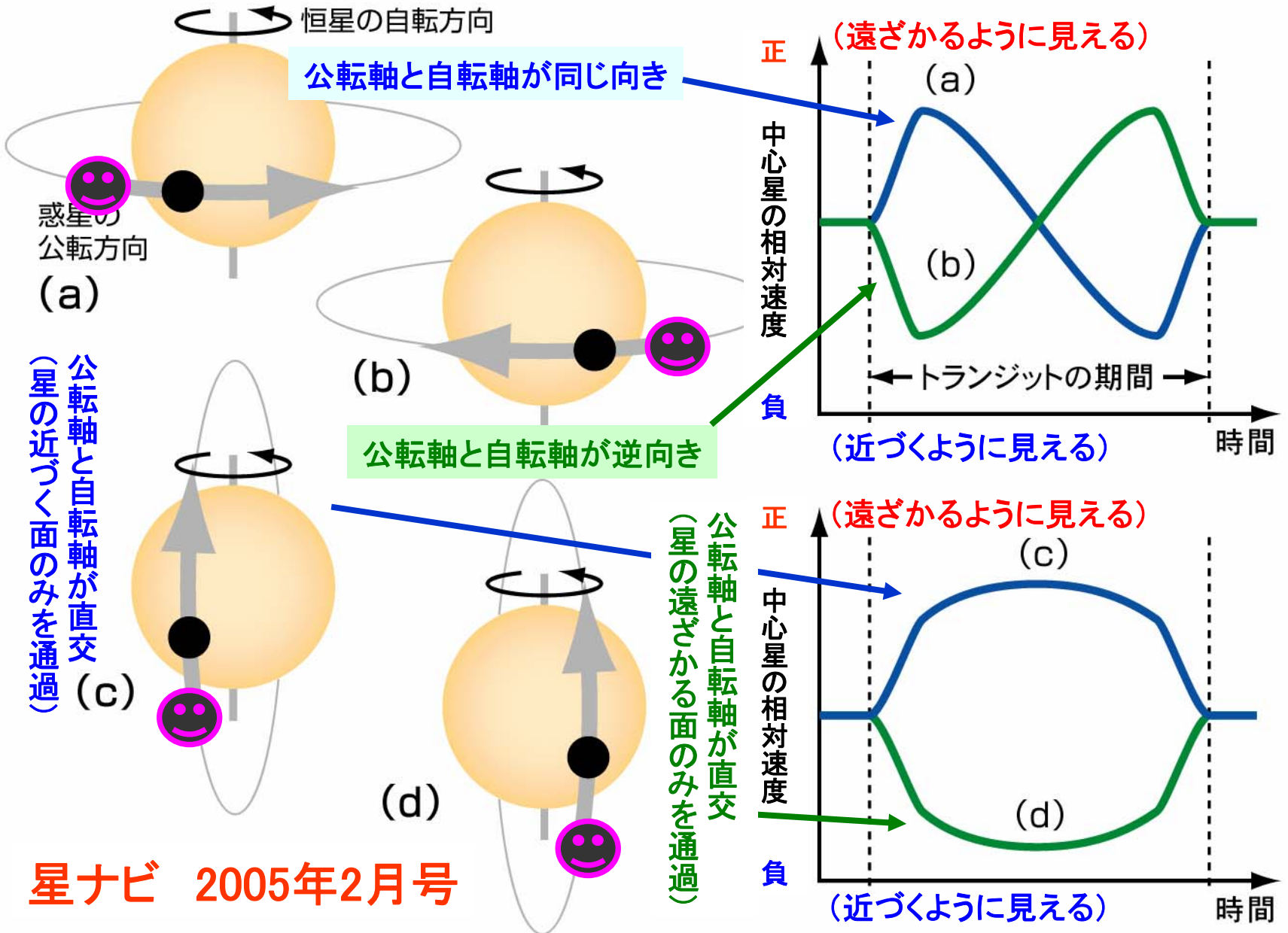
- 中心星の自転のため、星の線スペクトルの形は波長に関して左右対称に広がっている
- しかし、トランジット惑星が同じ向き(左から右)に通過すると
  - 中心星の近づく面を隠してから遠ざかる面を隠す
  - 星は、まず遠ざかりその後近づくように見える
- 一方、逆周り(右から左)の場合には
  - 中心星の遠ざかる面を隠してから近づく面を隠す
  - 星は、まず近づきその後遠ざかるように見える
- この結果、線スペクトルの形に非対称性が生まれる
  - この波長のズレを精密に観測すれば、惑星が右回りか左回りかがわかる
  - さらに詳しく解析すると、惑星の公転面の傾きの角度までわかる！



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**

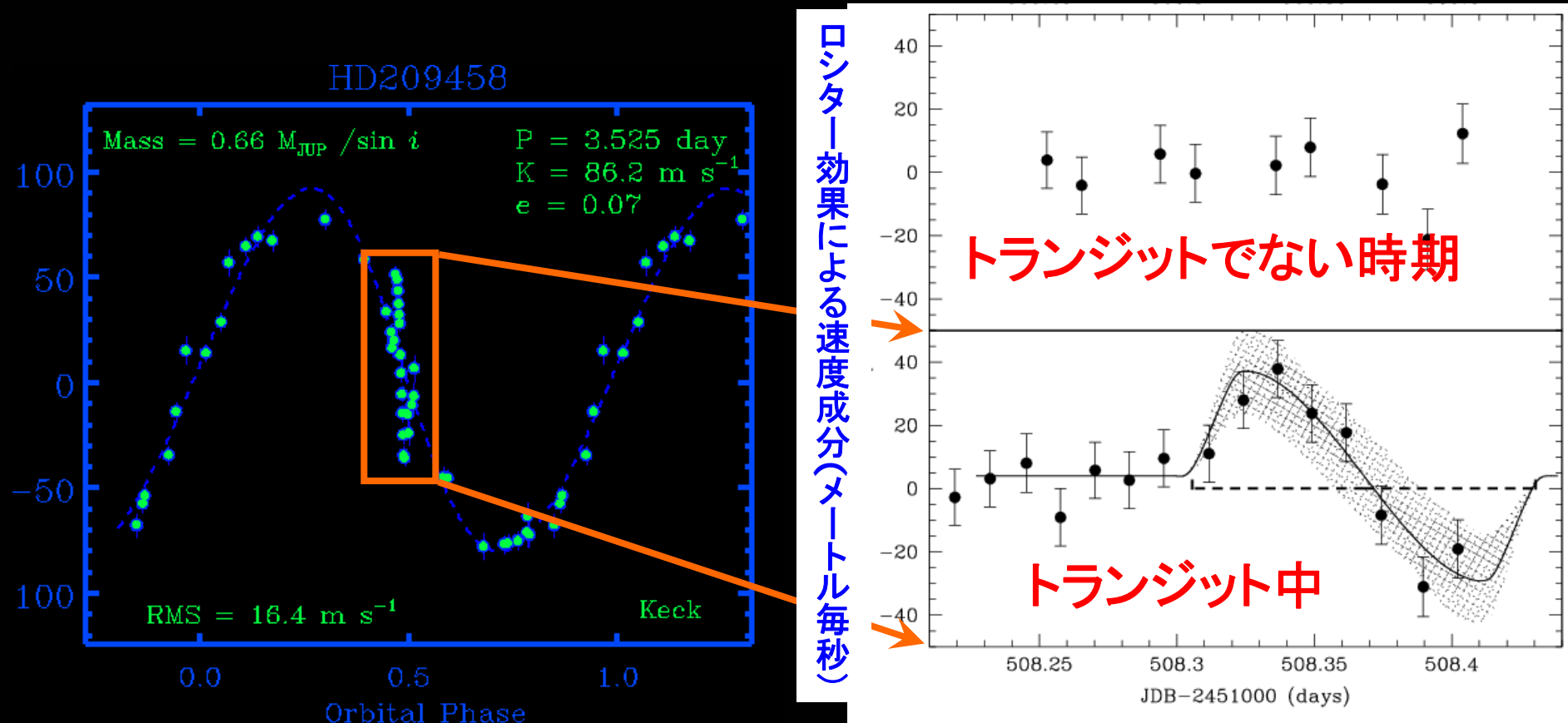


# 惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図



# 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



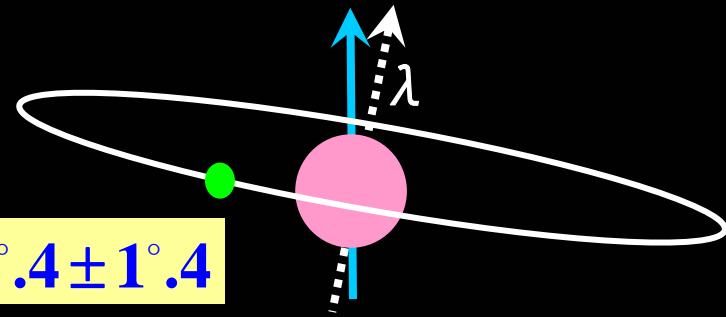
HD209458 の速度変動  
<http://exoplanets.org/>

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

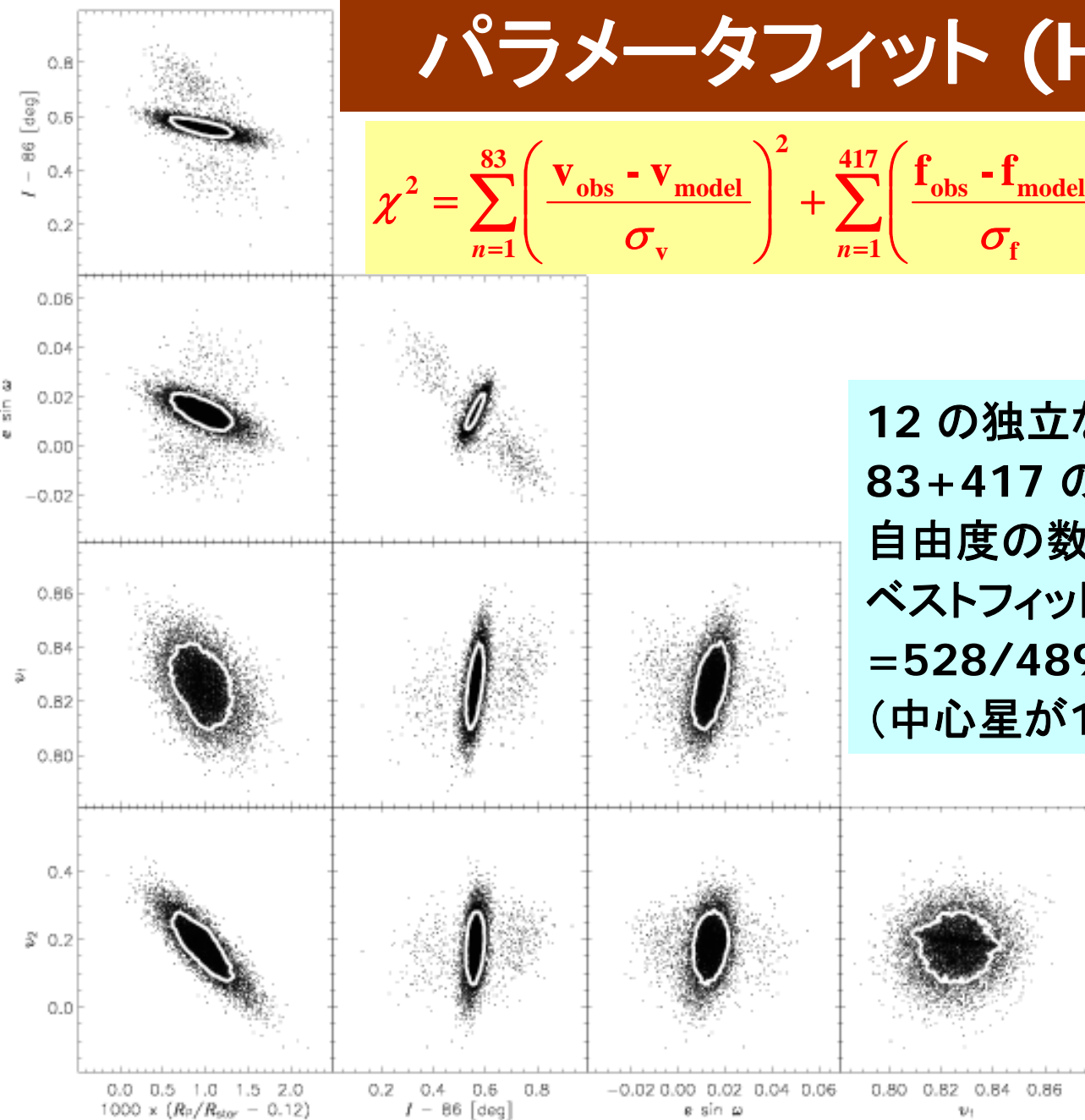


# パラメータフィット (HD209458)

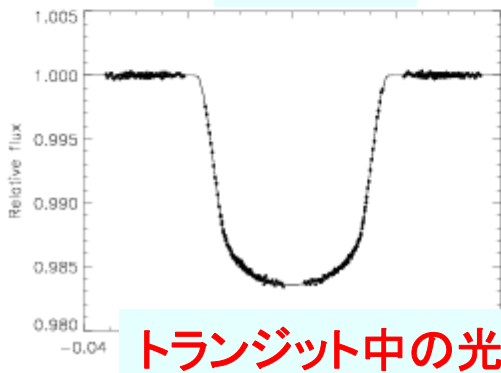
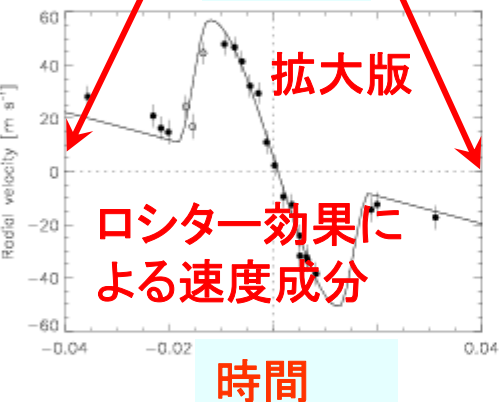
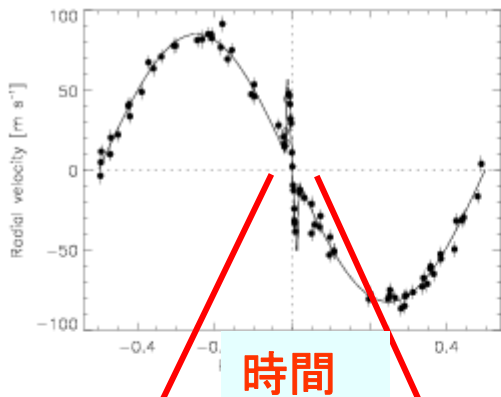
$$\chi^2 = \sum_{n=1}^{83} \left( \frac{V_{\text{obs}} - V_{\text{model}}}{\sigma_v} \right)^2 + \sum_{n=1}^{417} \left( \frac{f_{\text{obs}} - f_{\text{model}}}{\sigma_f} \right)^2 + \left( \frac{t_{2nd, \text{obs}} - t_{2nd, \text{model}}}{\sigma_t} \right)^2$$

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)

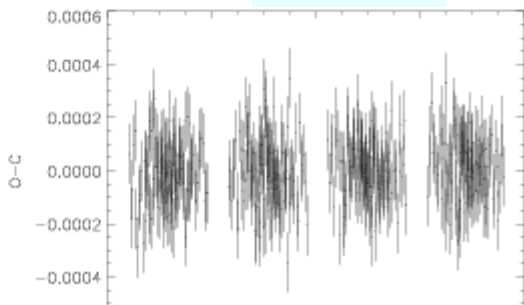
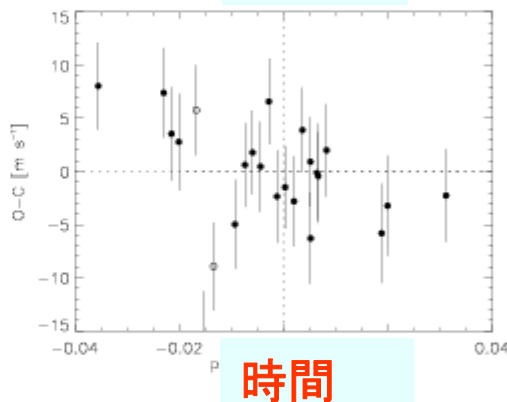
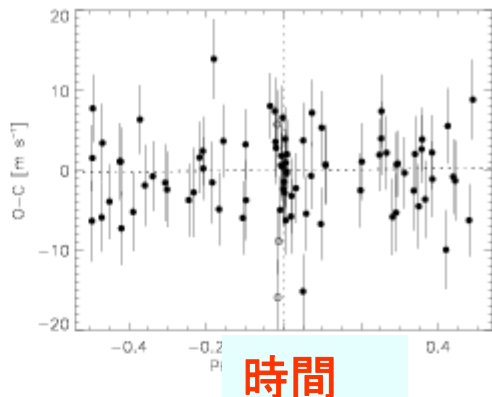
Winn et al.  
astro-ph/0504555  
ApJ 631(2005)1215



## 中心星の視線速度

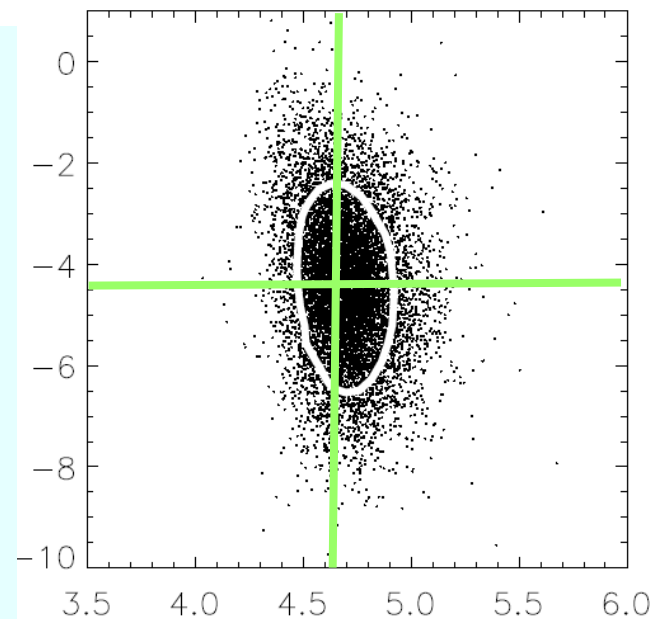


## データとベストフィットの残差



# 解析結果

自転軸と公転軸のなす角 [度]



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!

# 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。惑星リング・衛星の検出可能性。

# 天王星リングの発見

## ■ 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

Titania

Umbriel

Miranda

Portia →

← Puck

Ariel

Oberon

VLT@2.2  $\mu\text{m}$

5分間露光(2002年11月)

20 arcsec

# 天王星リングから学ぶこと

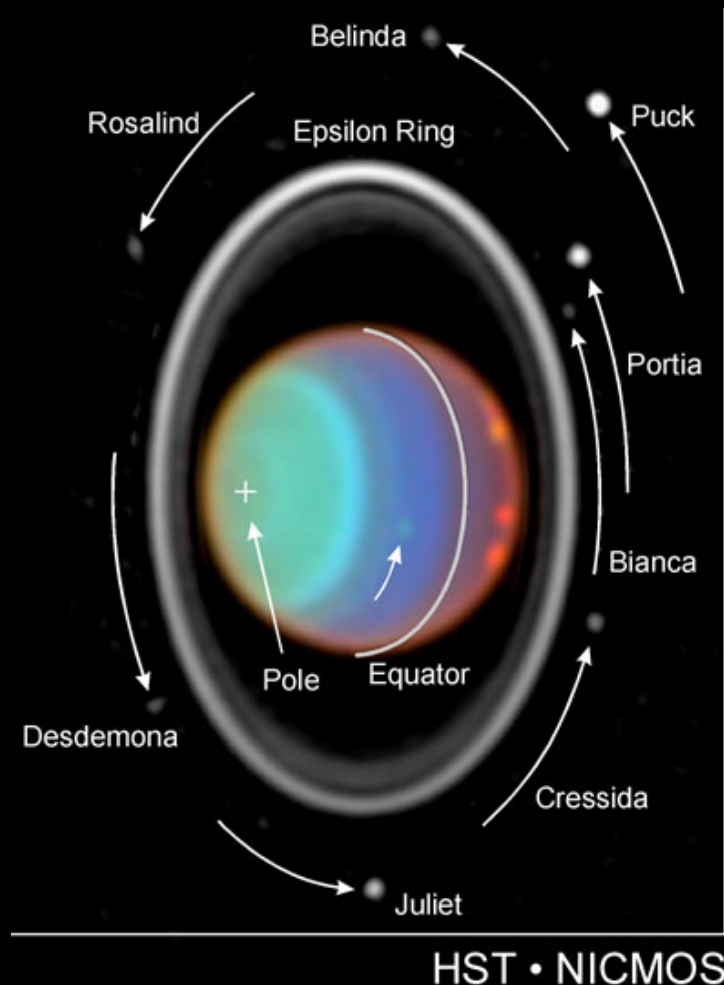
## ■ 天王星リング

- 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

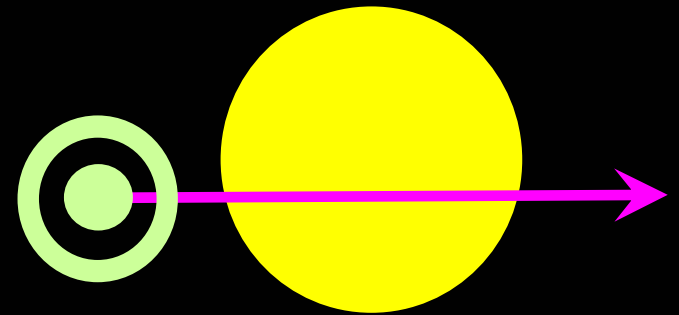
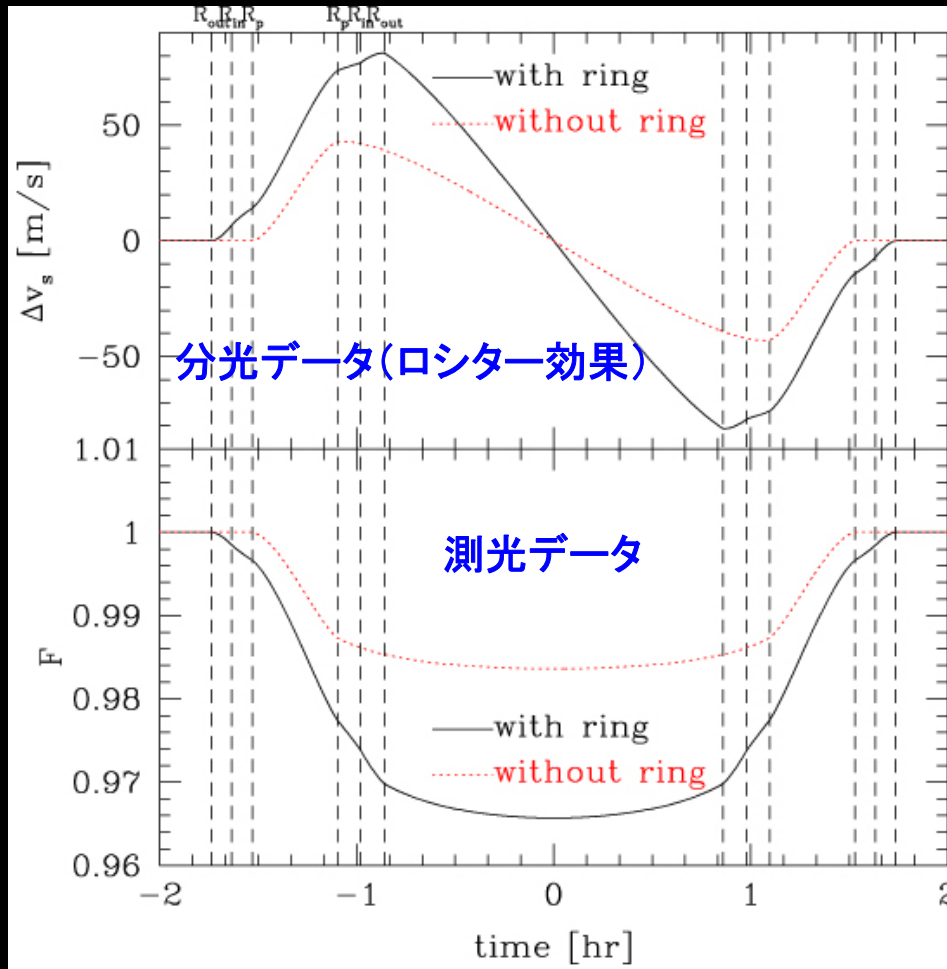
- ガス惑星に一般的?
- 木星(3本、1979年:ボイジャー)
- 土星(9本、1610年:ガリレオ)
- 天王星(11本、1977年:トランジット)
- 海王星(4本、1986年:トランジット)

## ■ 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



- 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

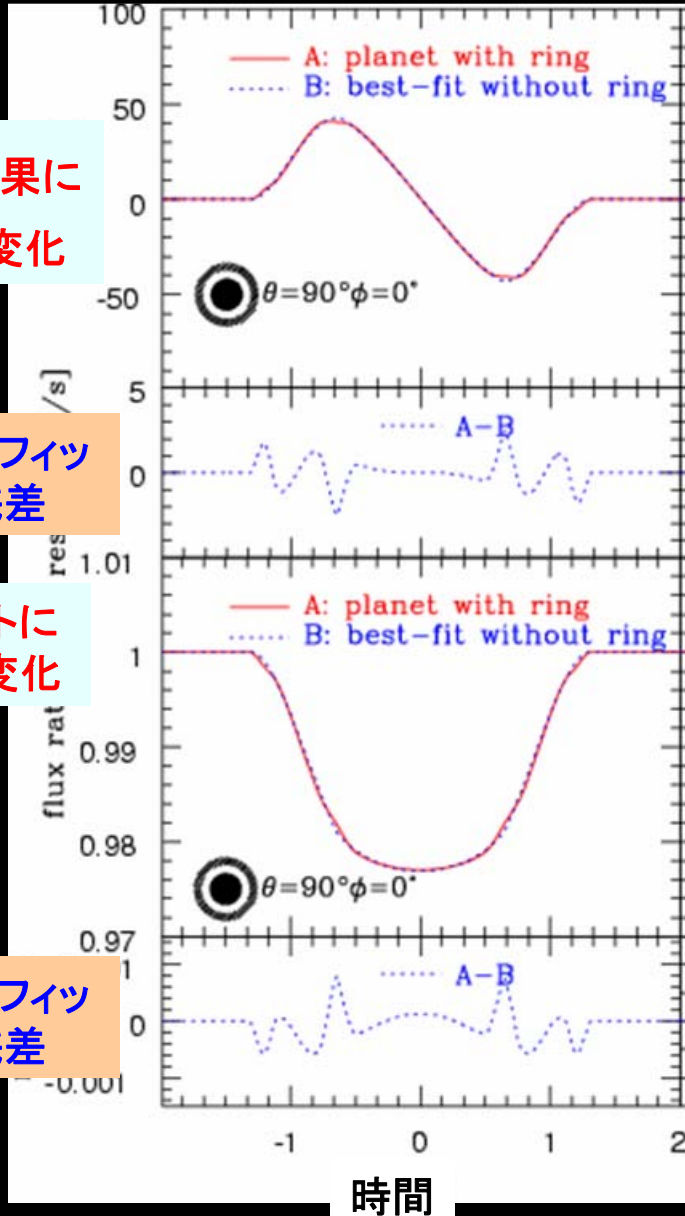
# 系外惑星リングの検出可能性(太田泰弘D論)

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

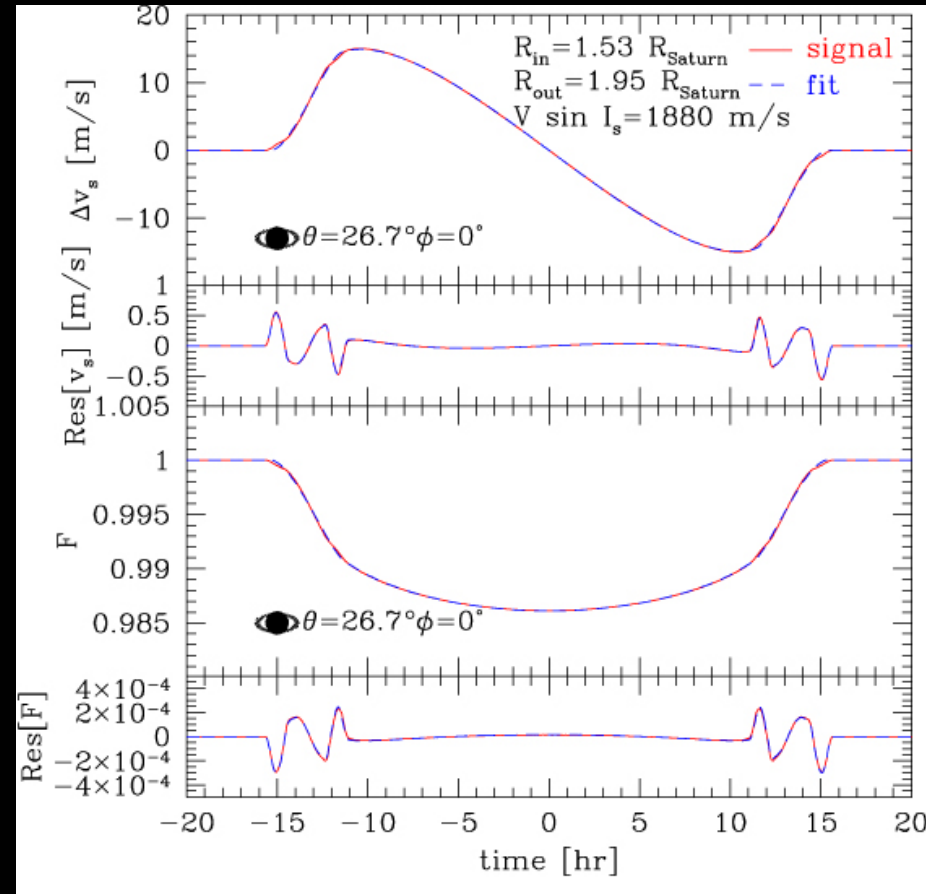
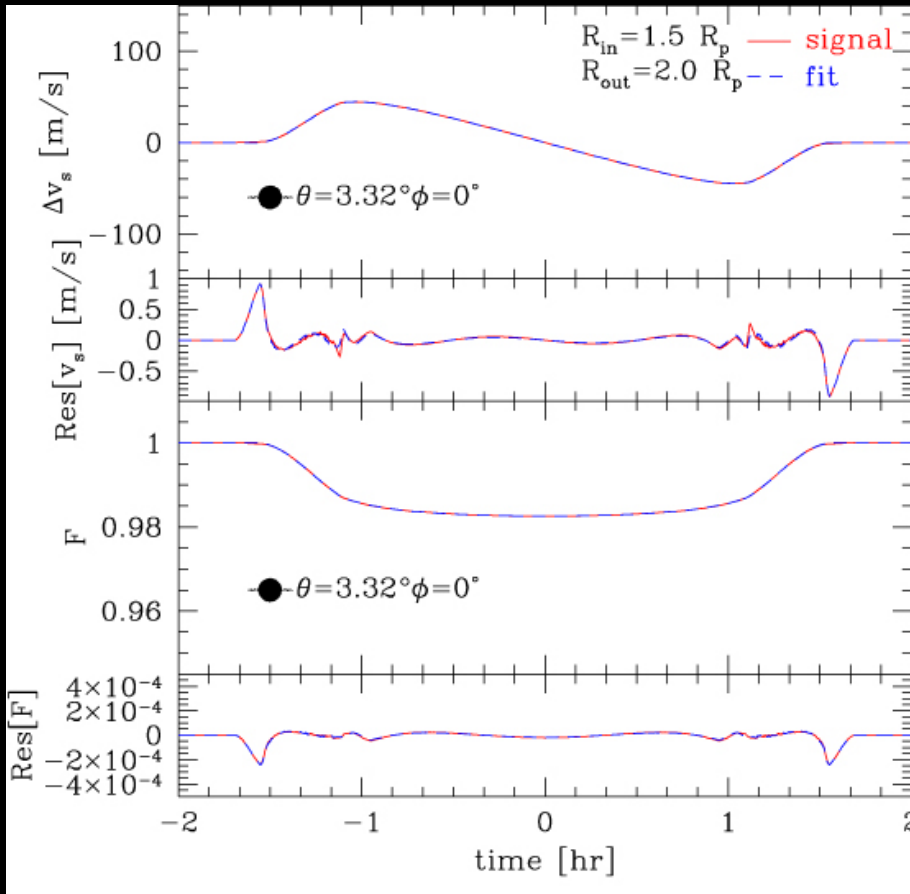
トランジットによる光度変化

リングなしフィットとの残差



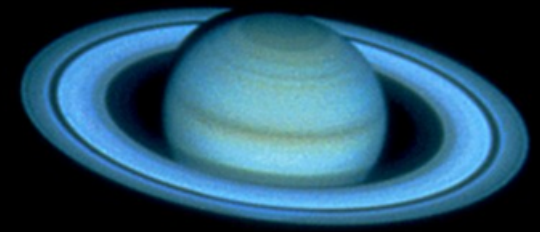
- トランジット惑星系HD209458がリングを持つと仮定
  - 惑星半径:  $R_{\text{惑星}}$
  - リング内径:  $1.5R_{\text{惑星}}$
  - リング外径:  $2R_{\text{惑星}}$
- リングがないモデルとのズレ
  - 速度: 数m/s程度
  - 光度変化: 0.1パーセント程度
- ほとんど現在の測定精度のレベル!
- もし本当に存在していれば近い将来検出できるかも

# 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)

# 系外惑星にリングはあるか？

## ■ 長岡論文の最終章より

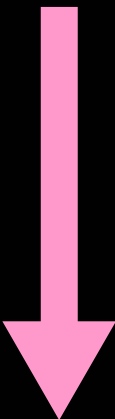
- There are various problems which will possibly be capable of being attacked on the hypothesis of a Saturnian system
- The rough calculation and rather unpolished exposition of various phenomena above sketched may serve as a hint to a more complete solution of atomic structure



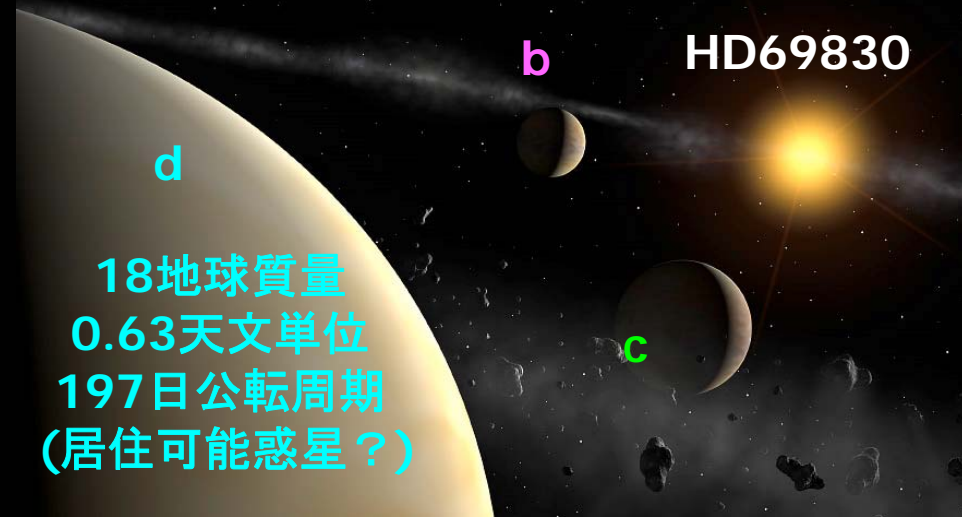
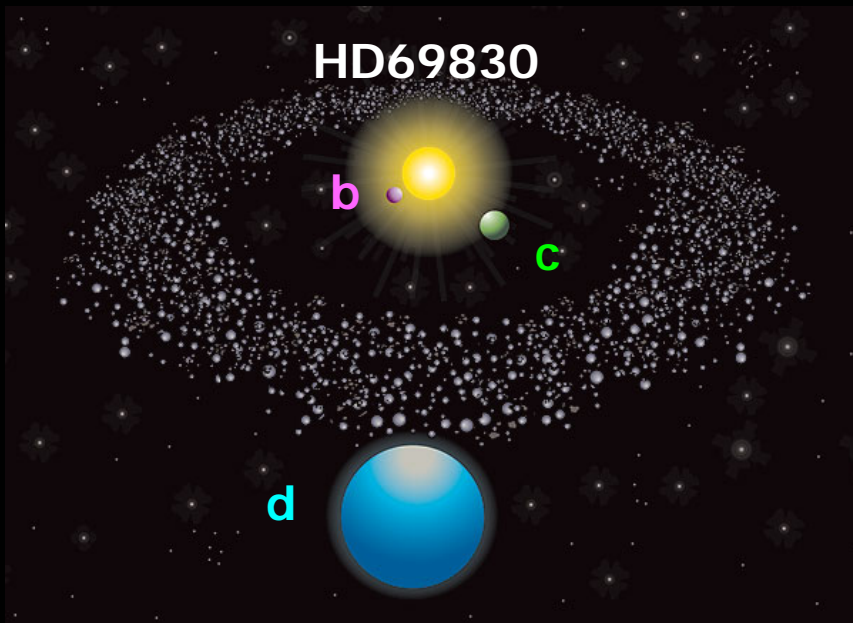
写真 2: 長岡半太郎 (1865-1950)

# 今後の系外惑星研究方向

- 巨大ガス惑星発見の時代 (1995~)
  - 惑星大気の実見 (2002)
  - 惑星大気の実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
  - リングの実見
  - 衛星の実見
  - **地球型惑星の実見**
- 
- **居住可能惑星の実見**
  - **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**



# 居住可能領域にある惑星の発見?



- HD69830: 約40光年先のK型星(0.86太陽質量)の周りに3つの惑星 (Lovis et al. Nature 2006年5月18日 441巻305ページ)
  - b. 10地球質量、0.08天文単位、8.7日公転周期
  - c. 12地球質量、0.19天文単位、32日公転周期
  - d. 18地球質量、0.63天文単位、197日公転周期 (居住可能惑星? ただし地球型ではなく表面はガスでおおわれているであろう)

<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2006/phot-18-06.html>

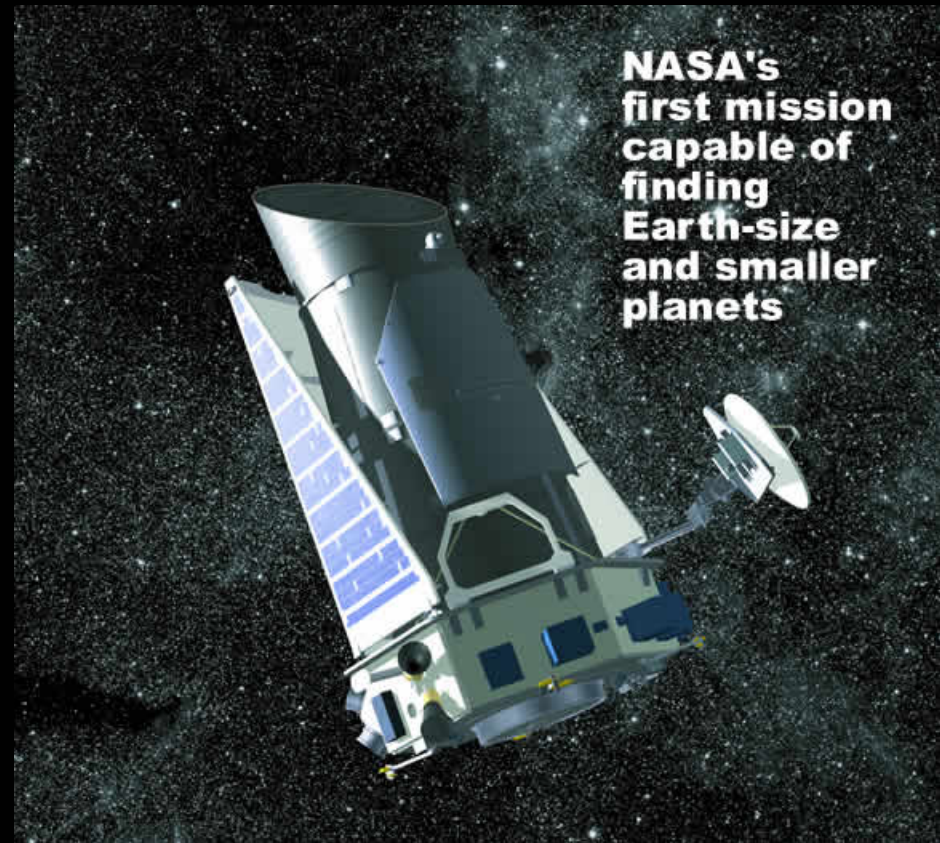
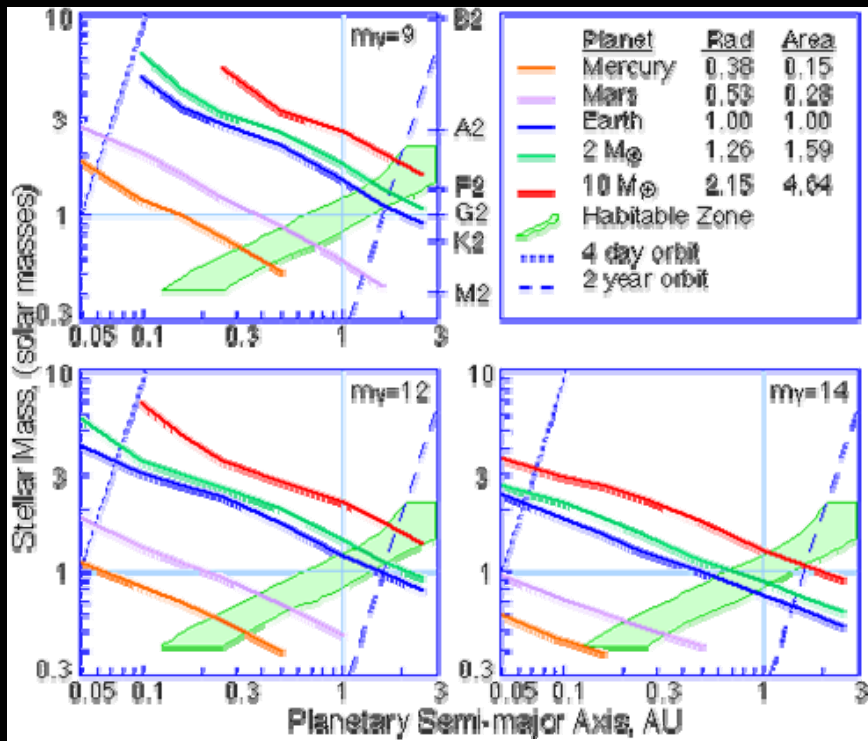
# 地球型系外惑星の見つかる可能性について

- 現在見つかっている210個の系外惑星はいずれも地球型(岩石惑星)ではない
  - 今まで見つかっているなかで最も軽い惑星は地球の約14倍(天王星は地球の14倍、海王星は17倍)
  - 食を起こしている惑星数例から考えておそらくすべてガス惑星(木星型)
- 2008年ごろ打ち上げが予定されているアメリカの系外惑星探査衛星ケプラーでは、4年間で50個以上の地球型系外惑星を発見する計画



# 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

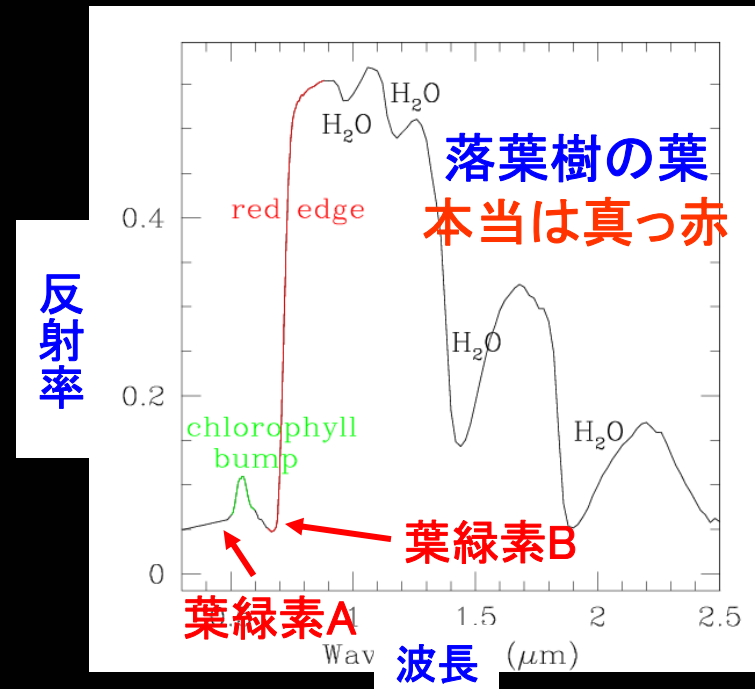
- （居住可能）地球型惑星を発見するだけでは、そこに生命があるかどうかはわからない

## ■ Biomarker の探求

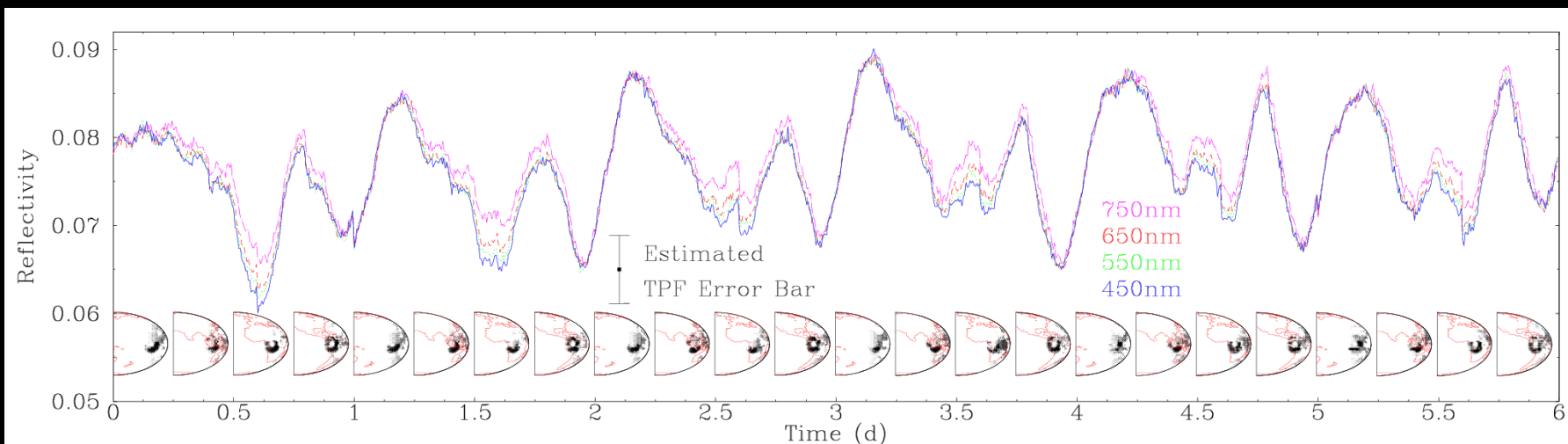
- 酸素、オゾン、水の吸収線
- 植物のred edge
- とにかく超精密分光観測

## ■ 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



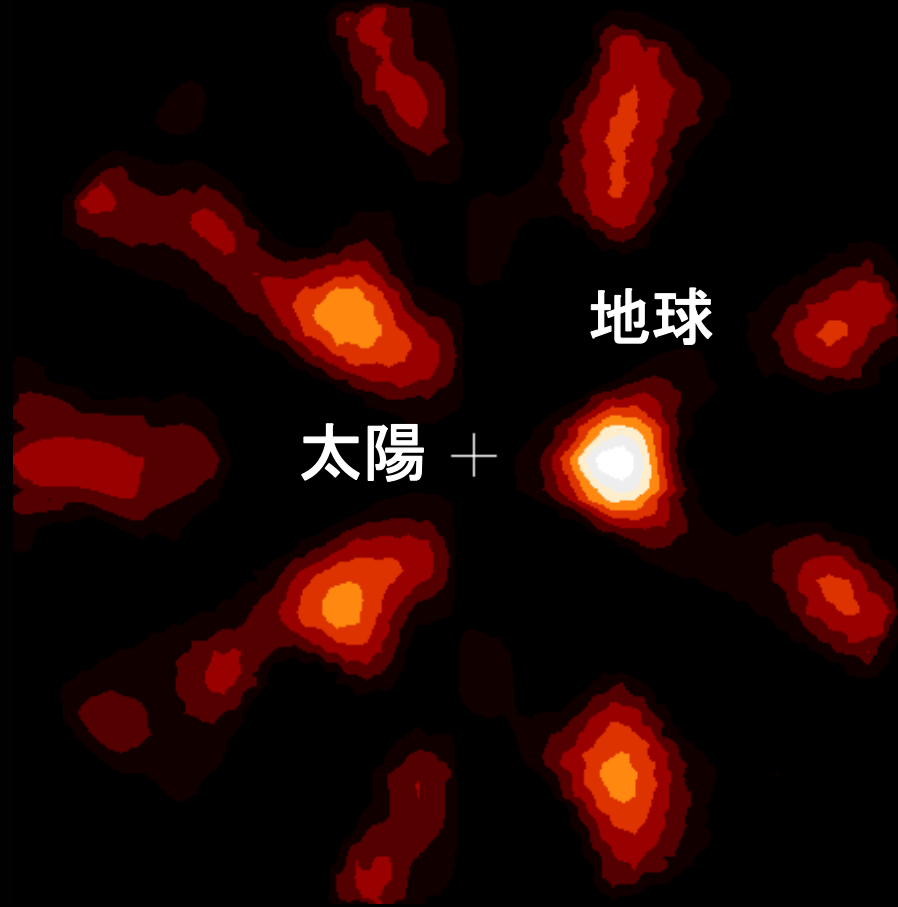
reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

1924年にすでに宇宙生物学は存在

# 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

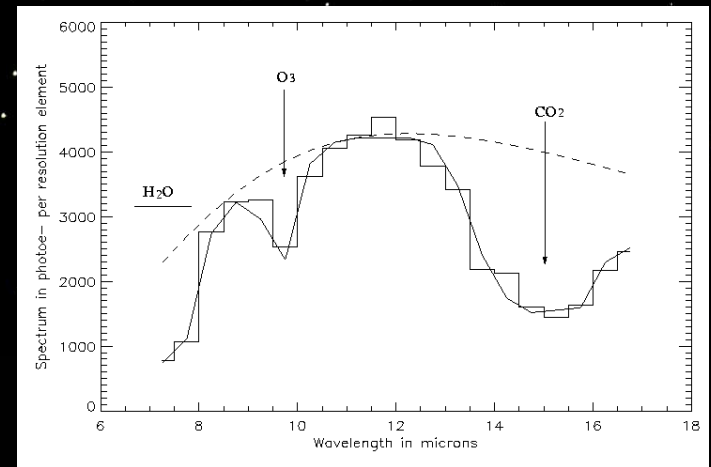
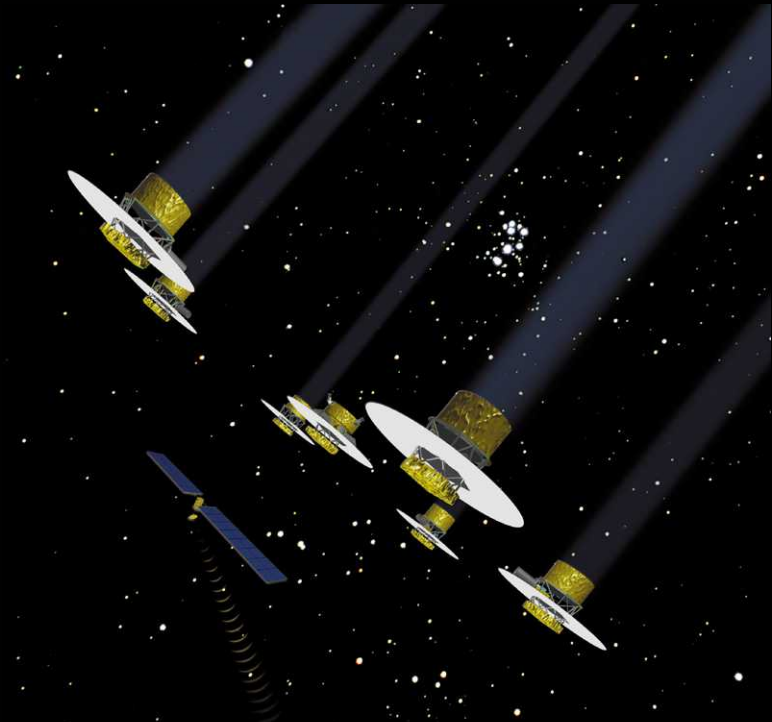


地球

太陽 +

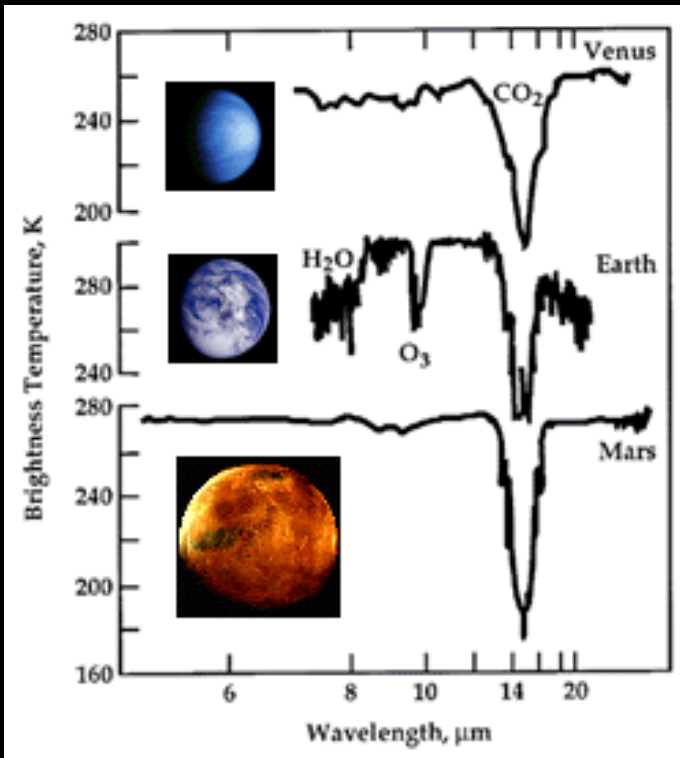
30光年先においた太陽と地球の観測予想図

<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地球型惑星
- 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？

# 地球外知的生命はいるか？：ドレイクの式

$$N = (N_s / L_s) \times f_p \times n_e \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

銀河系内に  
ある交信可  
能な知的文  
明の数

銀河系内の（生命に適した）恒星の数

その恒星の寿命

その恒星が惑星を伴っている確率

その惑星の中で、生物が存在可能な  
環境にある地球型惑星の期待値

その惑星に生物が発生する確率

その生物が知的生命に進化する確率

その知的生命が他の文明と交信を行う確率

その文明の継続時間



Frank Drake博士

Nの値は良くわかっていない。0.003個（つまり、我々の地球以外には存在し得ない！）と推定する研究者から200万個と推定する研究者までいる。ドレイク博士自身は1万個程度であると考えた。

# 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)で観測してほしい
  - 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る。これを通じて地球が平和になる。
- **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、自らのアドレスを無防備に知らせまくるのは愚の骨頂か？