

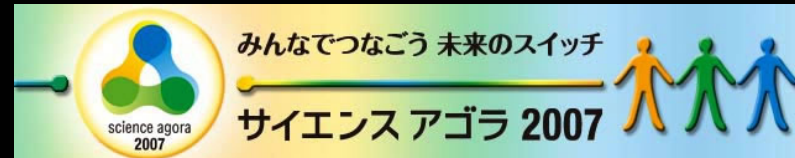
# 太陽系外惑星の光と影： 今日までそして明日から



東京大学大学院理学系研究科 須藤 靖  
2007年11月24日@東京国際交流館

第6回国立天文台公開講演会

みんなで探そう 第二の地球



青空しか知らないと我々だけが  
唯一の存在のように思ってしまう

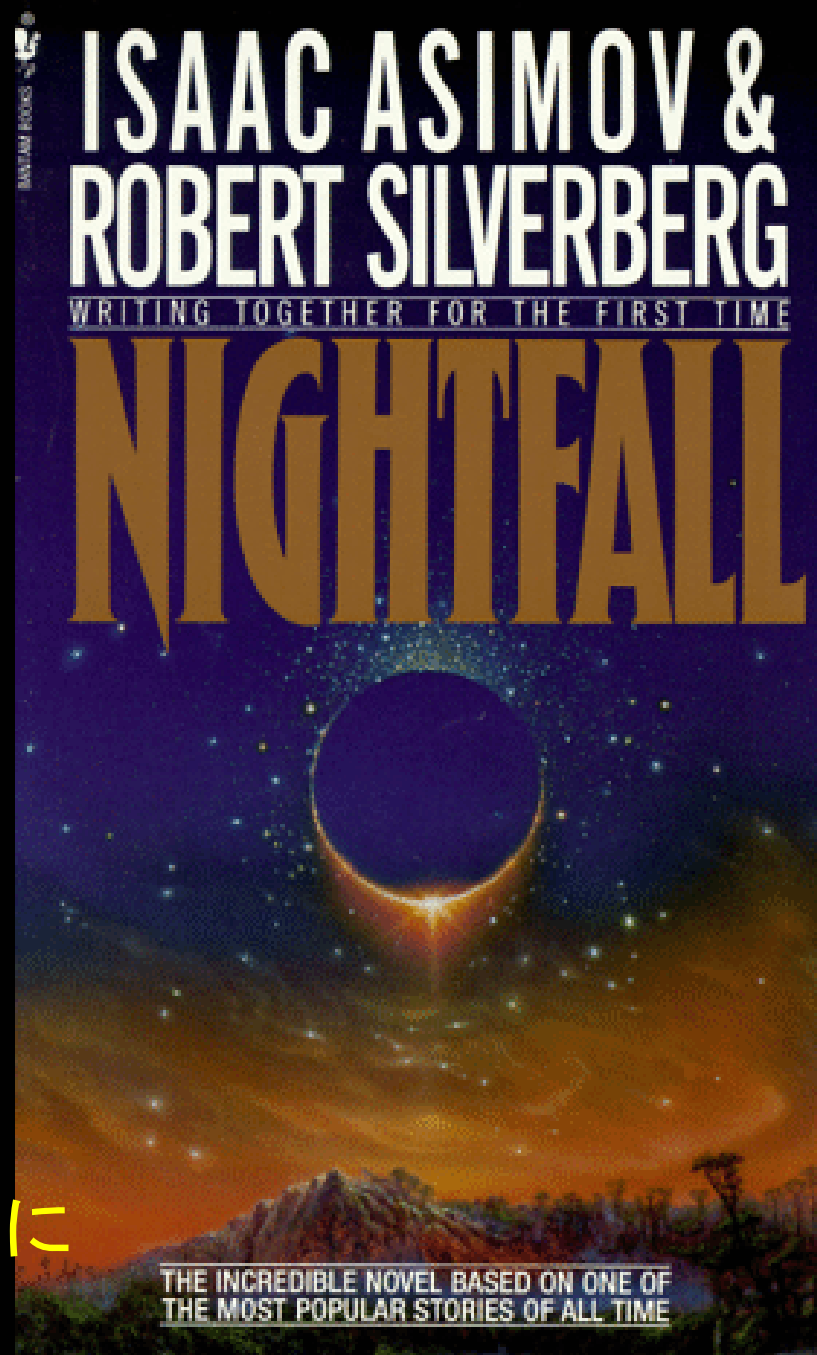


(すばる観測所、田中壱氏撮影)

# 夜来たる



6つの太陽をもつ惑星ラガッシュに  
二千年に一度の夜が訪れる





「我々は何も知らなかった」

満天の星空を見上げれば、

我々以外の世界がないほうが不自然

(すばる観測所、田中壱氏撮影)

# 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、幸運？
- 恒星の周りの地球型惑星を探せ！

第6回国立天文台公開講演会

みんなで探そう 第二の地球



THE UNIVERSE  
YOURS TO DISCOVER

INTERNATIONAL YEAR OF  
ASTRONOMY  
2009

# 今日まで:

## 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: 惑星大気初の検出(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
- 2007年11月21日時点で265個の系外惑星  
(複数の惑星を持つ系が25個)

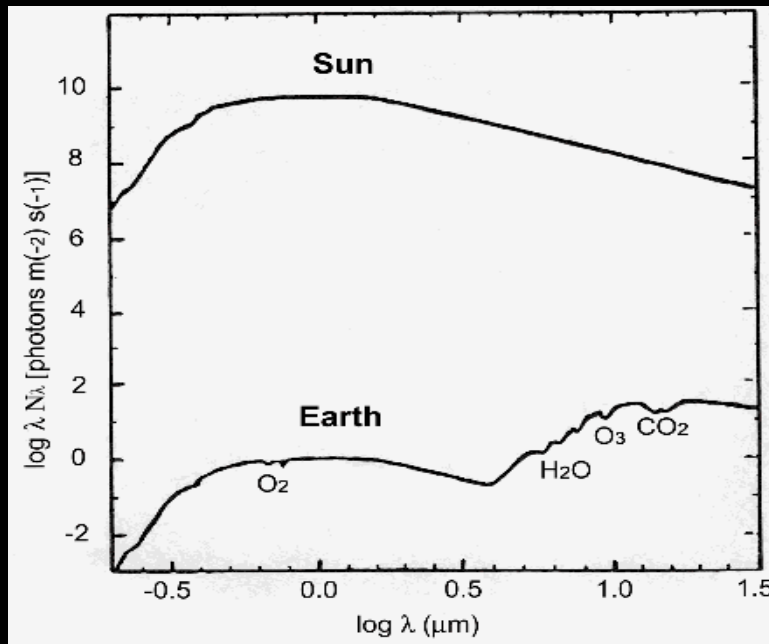
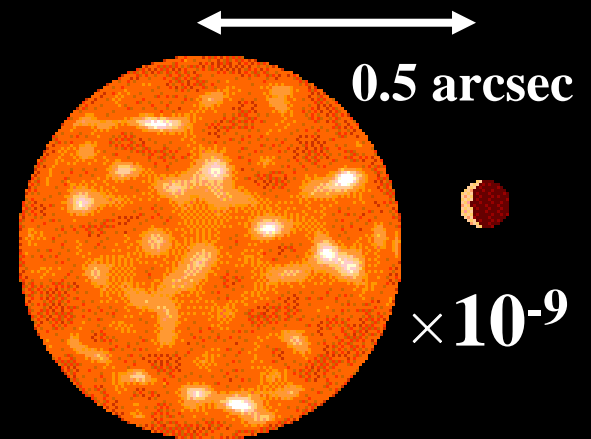


# 惑星は直接見えるか？

## 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

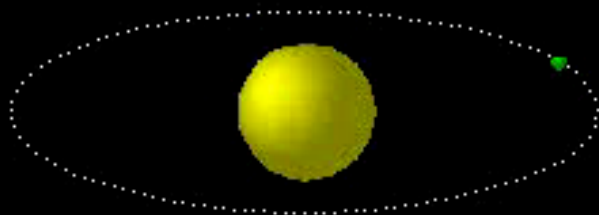


地上から観測できる分解能の大きさ内で、9桁も明るい主星の隣にある27等級の暗い天体を検出する

⇒ ほとんど不可能！

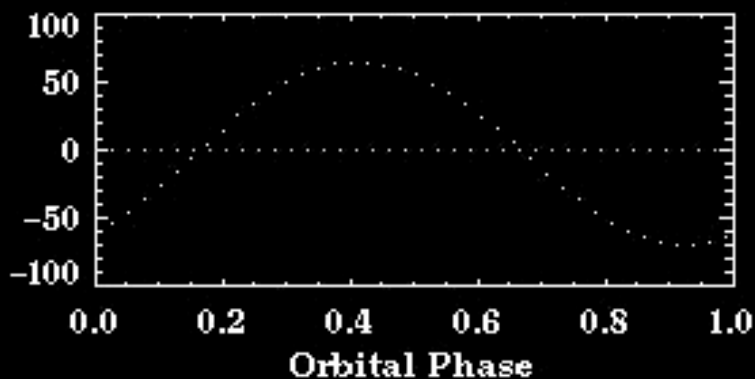
# どうやって見つけたのか？

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

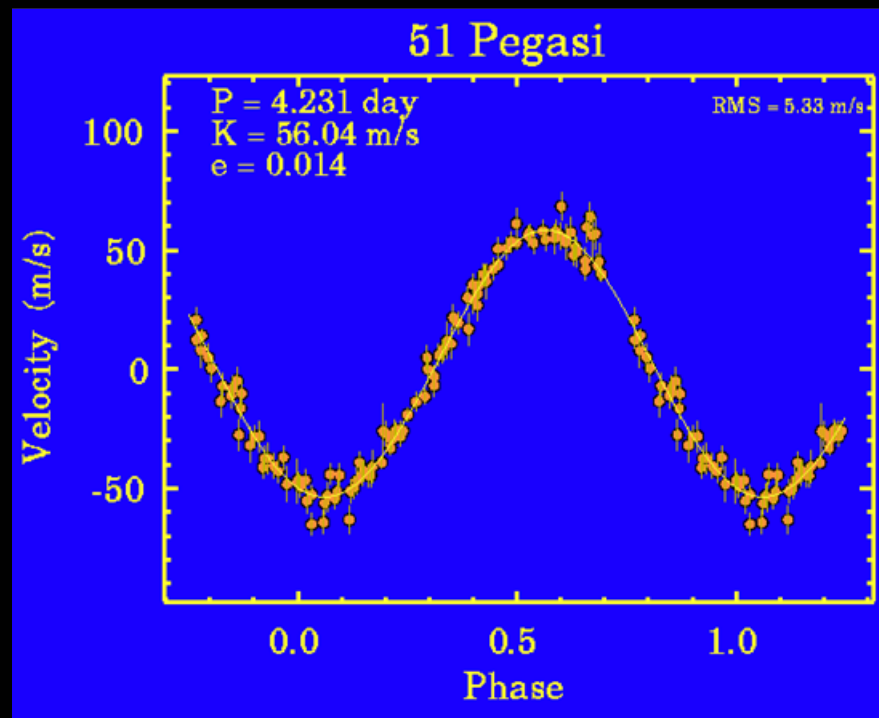
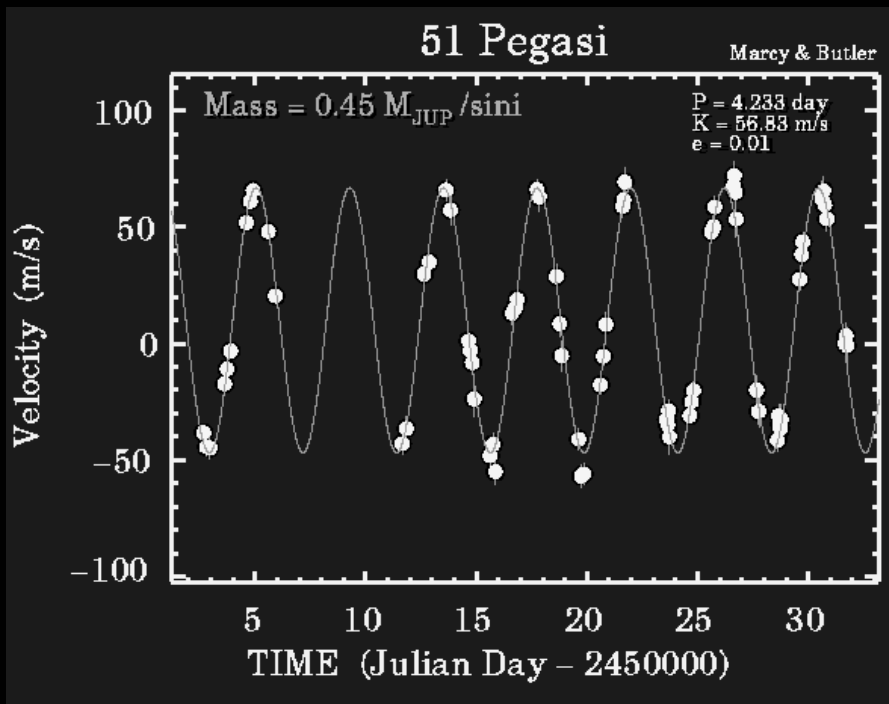
## ■ トランジット法

- (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



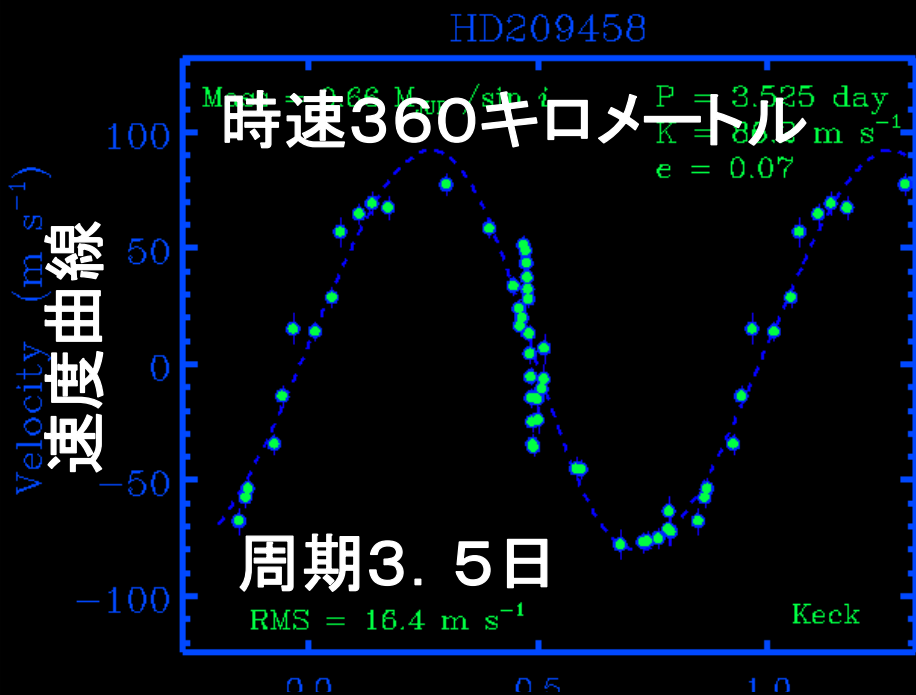
# ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！

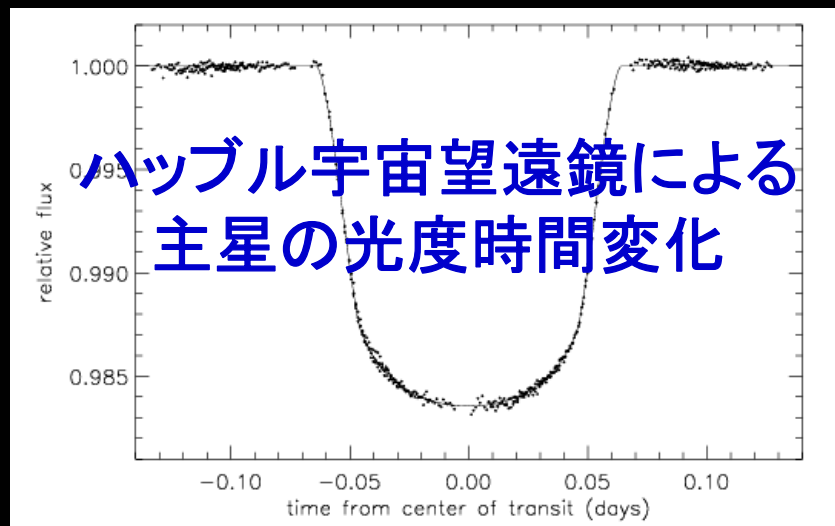
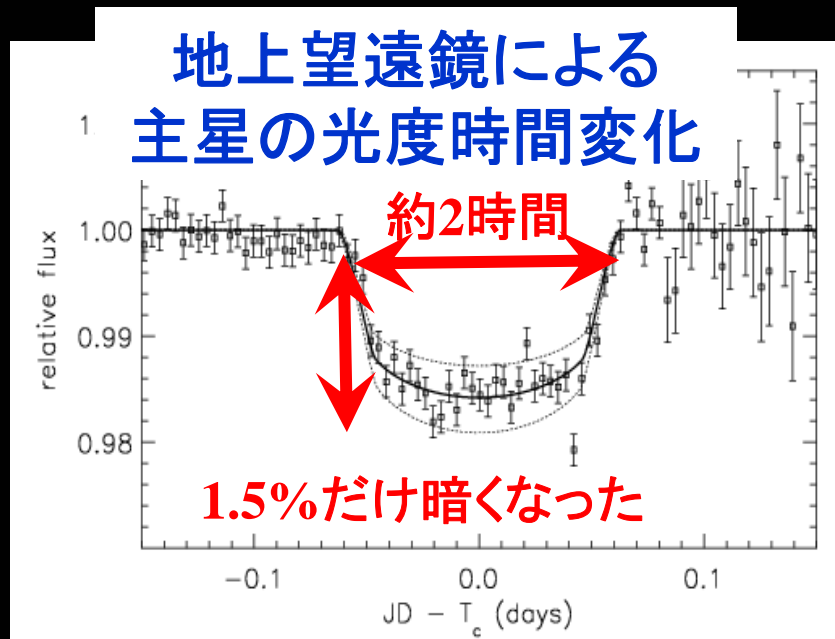


# 初めてのトランジット惑星HD209458b (2000年発表)

- 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



# 系外惑星の影:

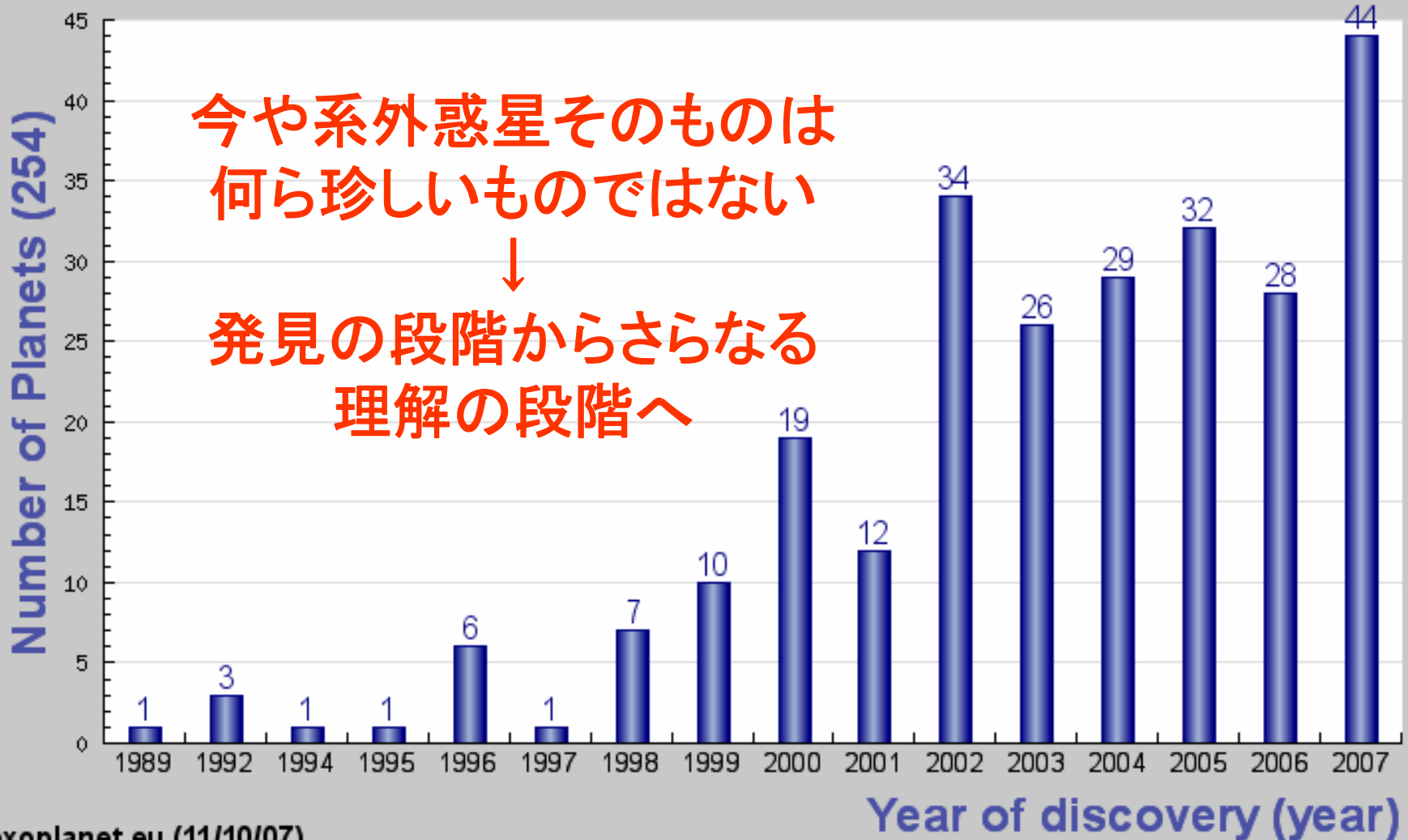
## 可視光でみる惑星による主星の食

- 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: 0.4 g/cc
- **ガス惑星であることの実証**



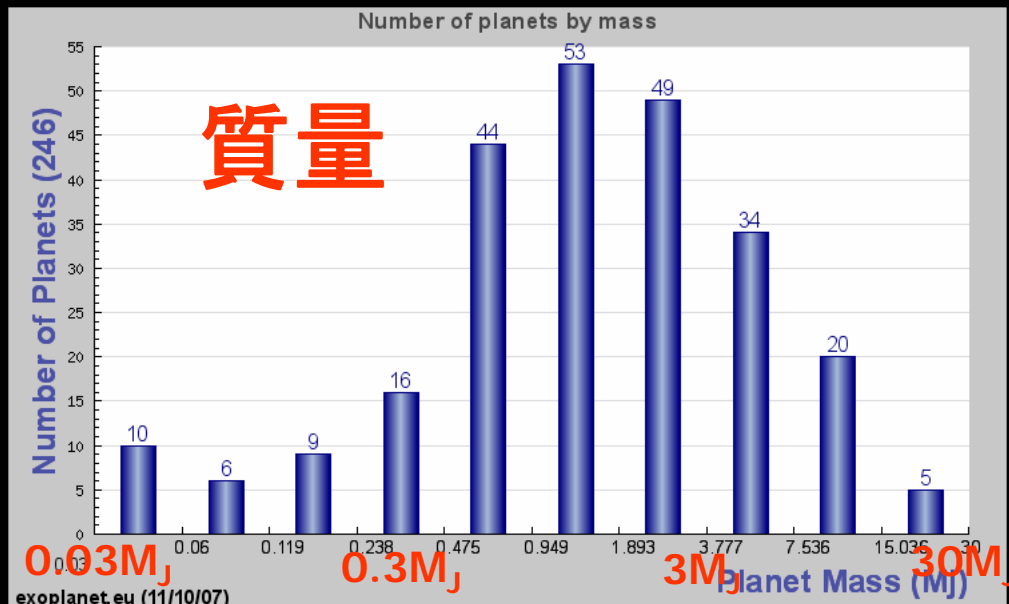
# 太陽系外惑星の発見数

Number of planets by year of discovery

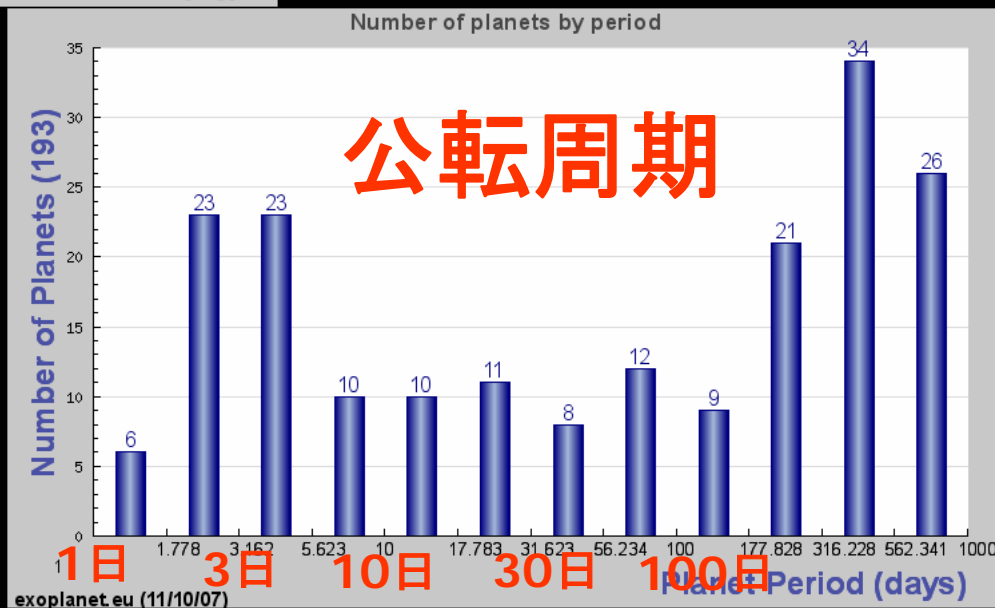




# 系外惑星の質量・周期分布関数

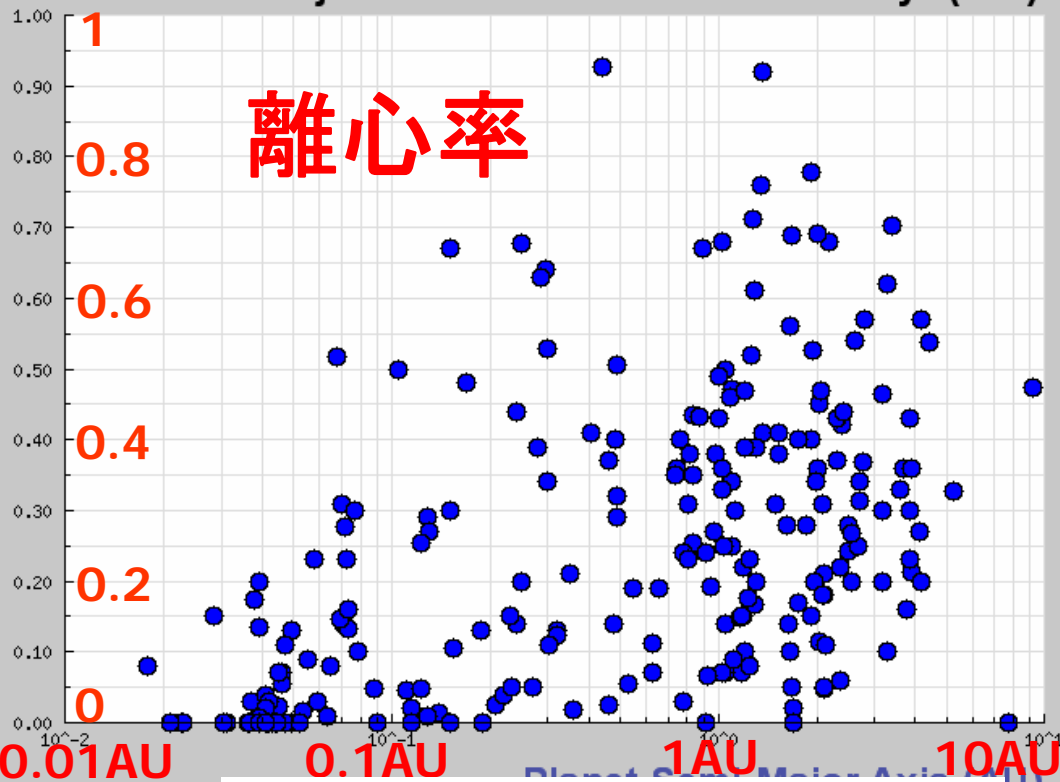


観測の選択効果のため必ずしも真の分布というわけではない



# 系外惑星の軌道長半径と離心率

"Planet Semi-Major Axis" vs "Planet Eccentricity" (230)



惑星の軌道長半径

- 円軌道から大きく離れた軌道が多い (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

# これはすばらしい！

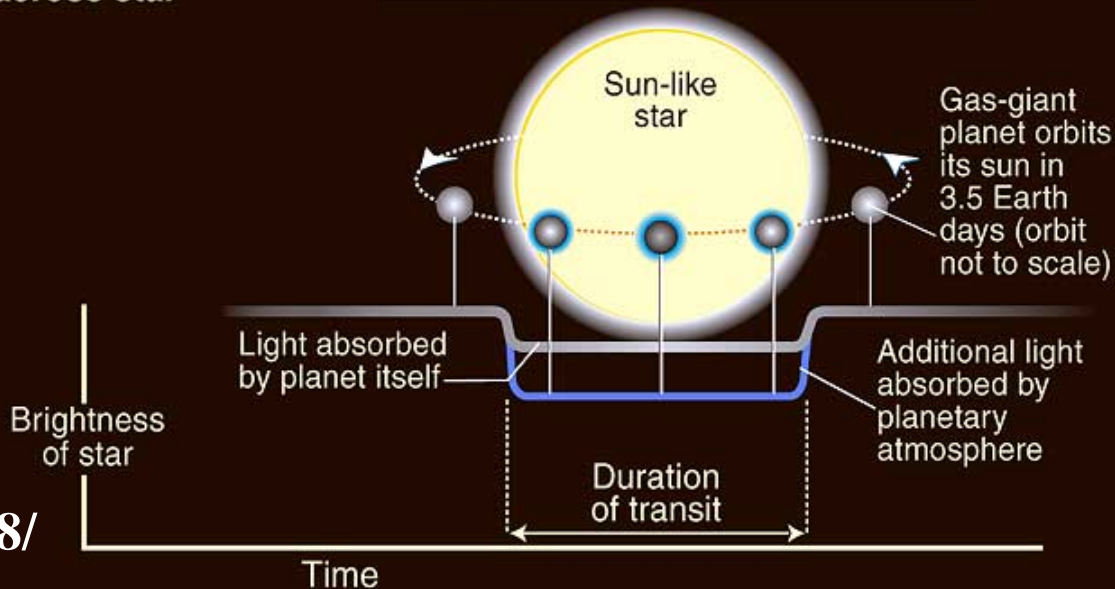
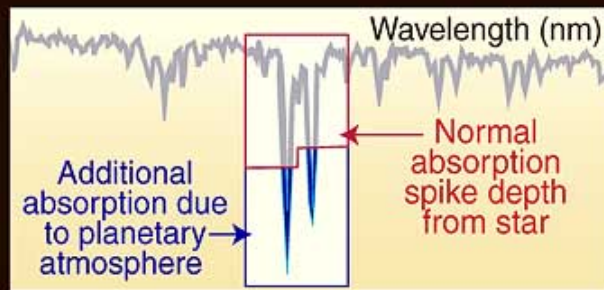
## 何か自分でもできないだろうか？

- トランジット観測は惑星の「影」、つまり新月の観測に対応。では、三日月や満月は観測できないものか（惑星の「光」を見たい：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（現在東北大学）に相談し、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提案
- 2回不採択、3度目にやっと採択

# そうこうしているうちに、、、 HD209458bの惑星大気が初検出されてしまう (2001年)

<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.)



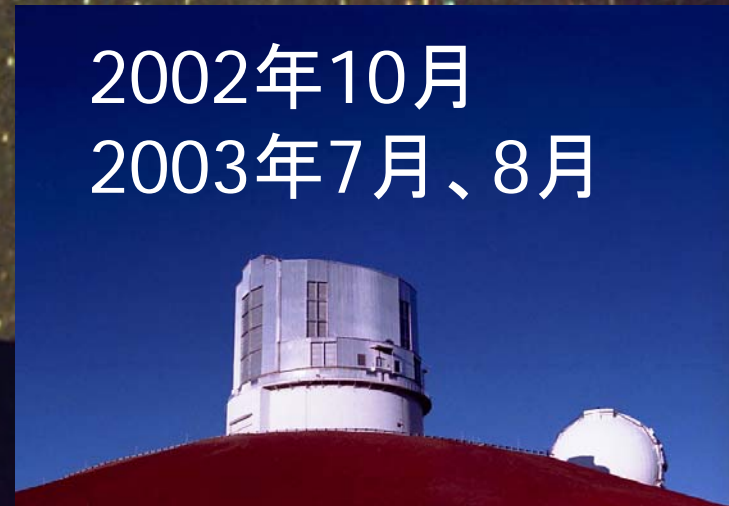
# 系外惑星の光： 赤外線で見える主星による惑星の食



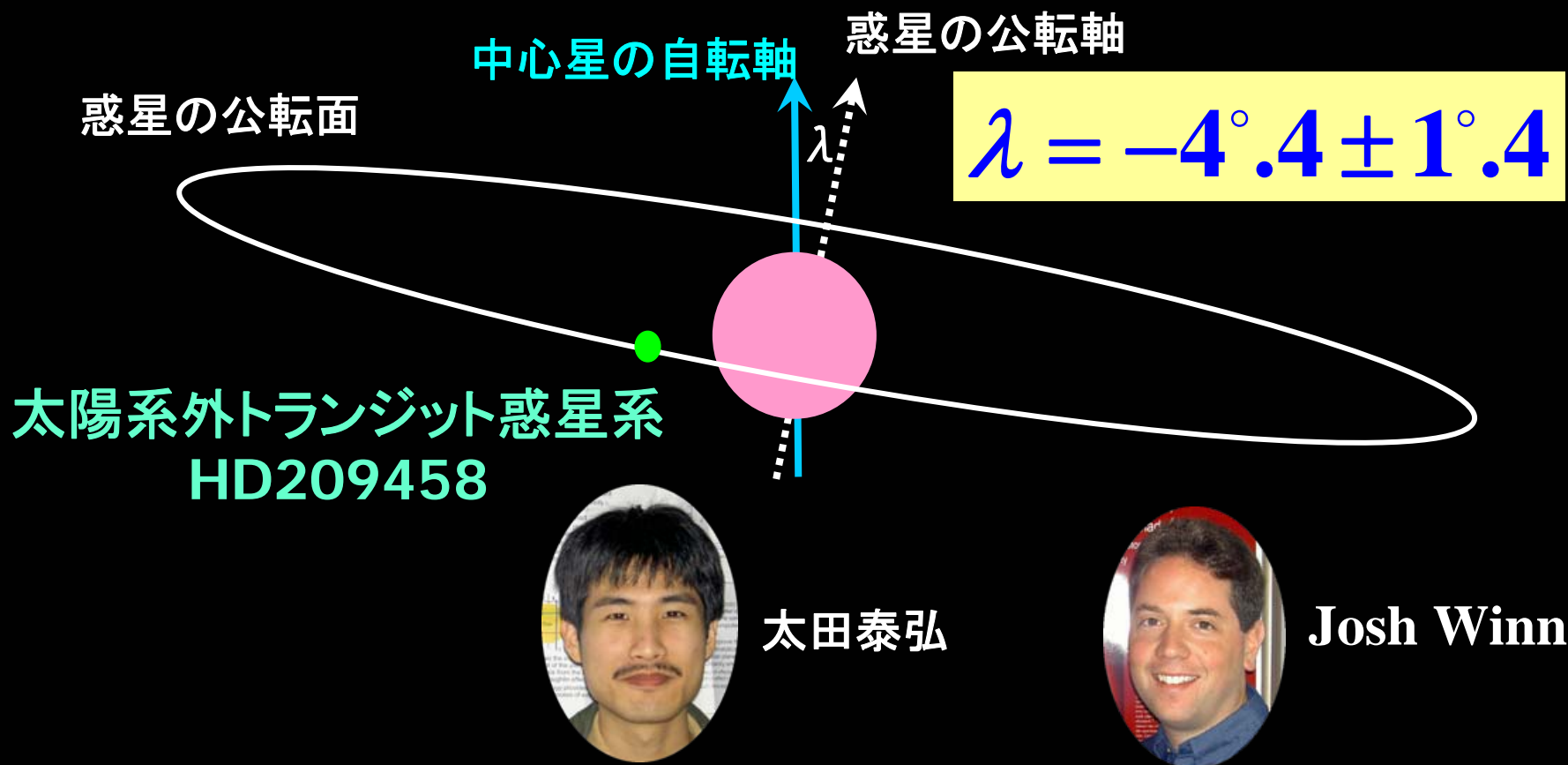
# すばる望遠鏡によるトランジット惑星の観測

須藤 靖、成田憲保 (東京大学)  
青木和光 (国立天文台)  
山田亨 (国立天文台→東北大学)  
佐藤文衛 (神戸大学→東工大)  
Josh Winn (ハーバード大→MIT)  
Edwin Turner (プリンストン大)

2002年10月  
2003年7月、8月



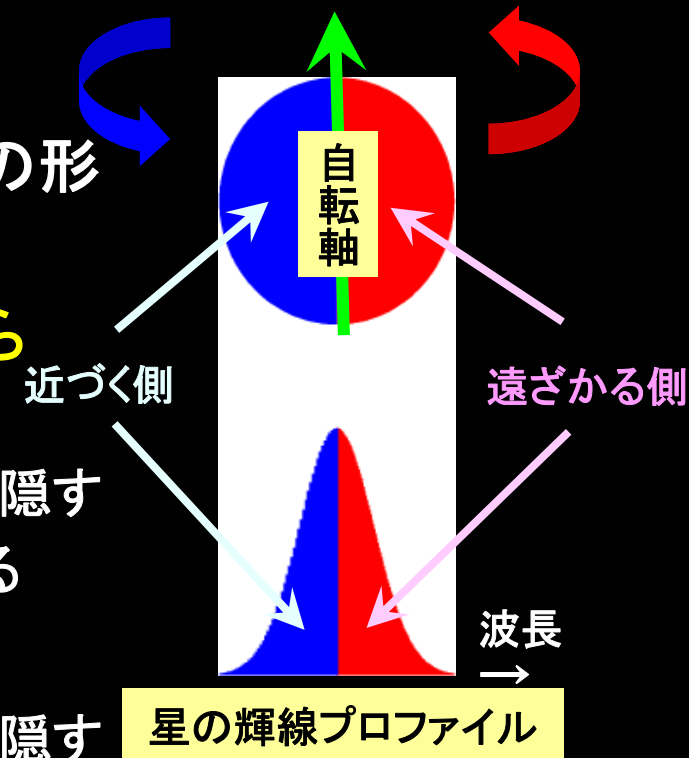
# ロシター効果を利用したHD209458の中心星 自転軸と惑星公転軸のずれの発見



太陽系外惑星の公転軸はちょっぴり傾いていた

# ロシター効果とは

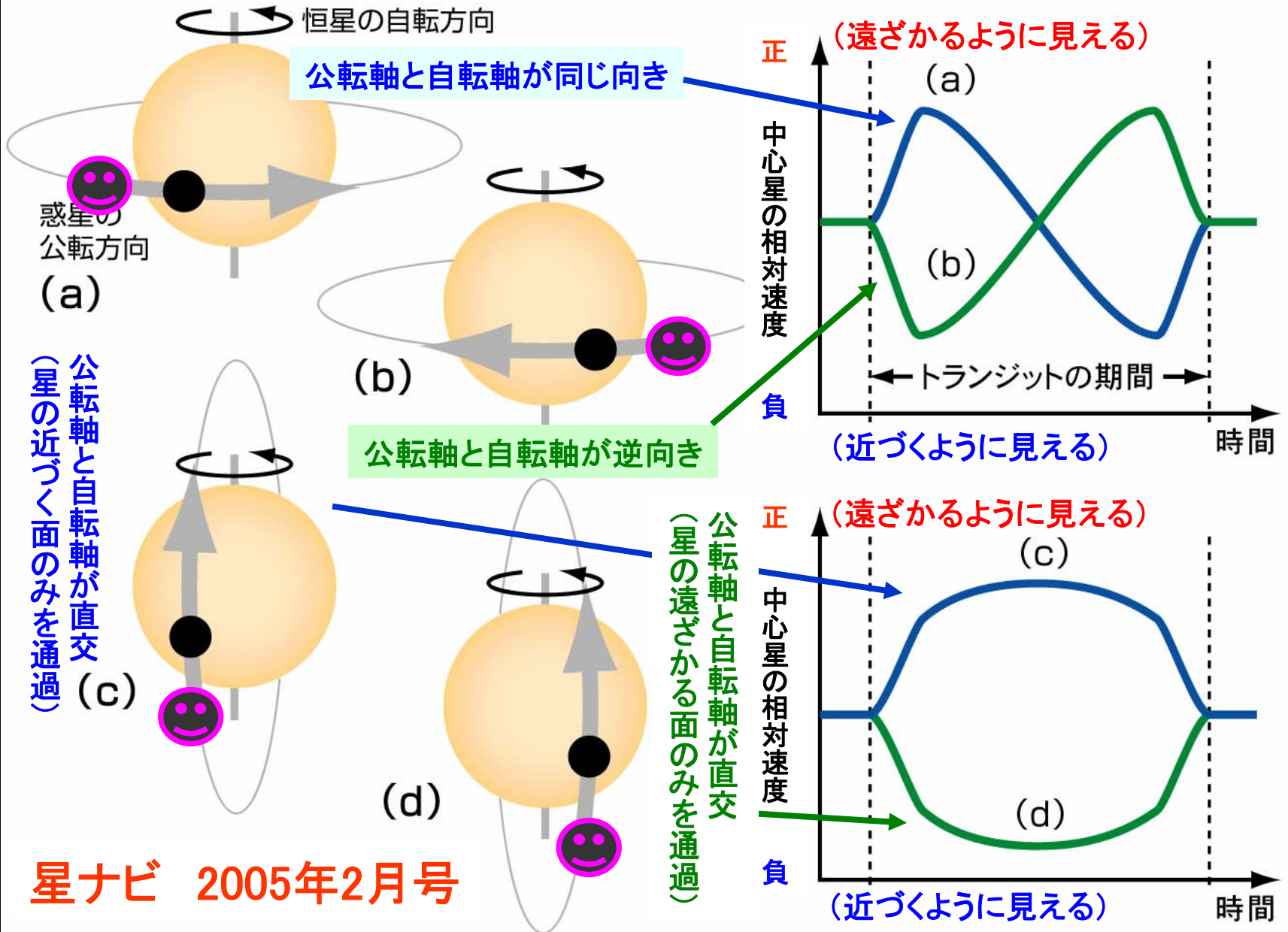
- 中心星の自転のため、星の線スペクトルの形は波長に関して左右対称に広がっている
- しかし、トランジット惑星が同じ向き(左から右)に通過すると
  - 中心星の近づく面を隠してから遠ざかる面を隠す
  - 星は、まず遠ざかりその後近づくように見える
- 一方、逆周り(右から左)の場合には
  - 中心星の遠ざかる面を隠してから近づく面を隠す
  - 星は、まず近づきその後遠ざかるように見える
- この結果、線スペクトルの形に非対称性が生まれる
  - この波長のズレを精密に観測すれば、惑星が右回りか左回りかがわかる
  - さらに詳しく解析すると、惑星の公転面の傾きの角度までわかる！



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**



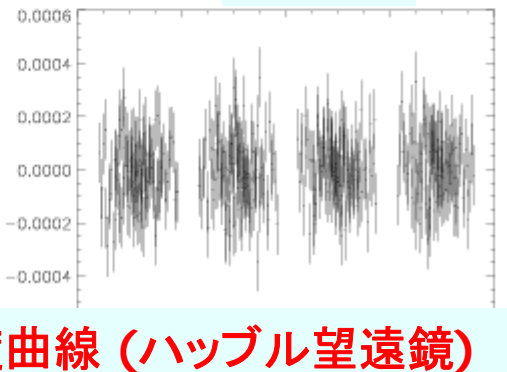
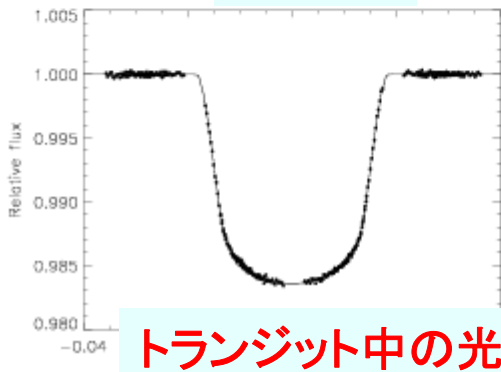
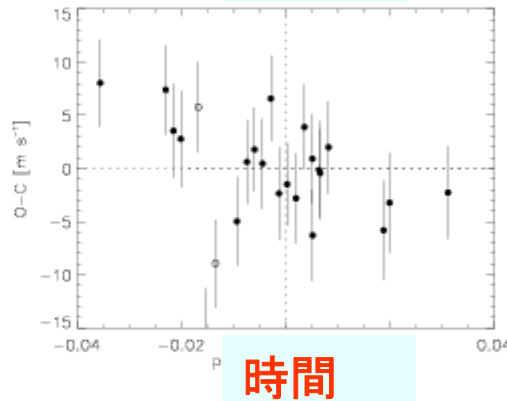
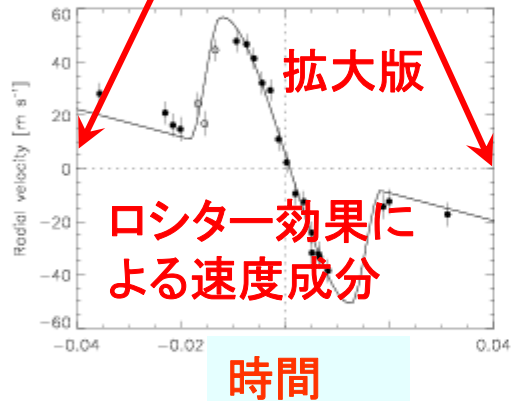
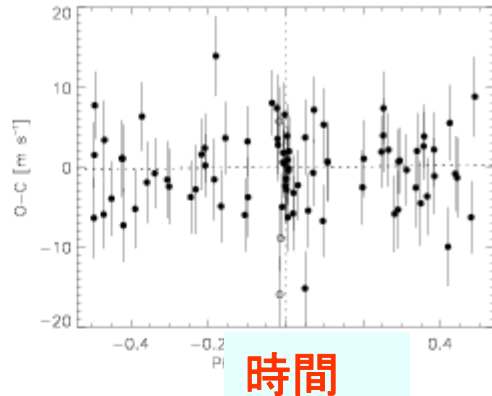
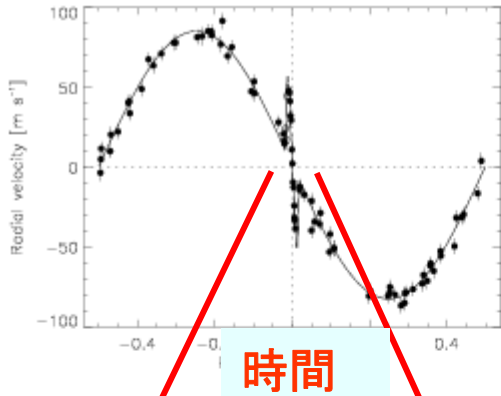
# 惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図



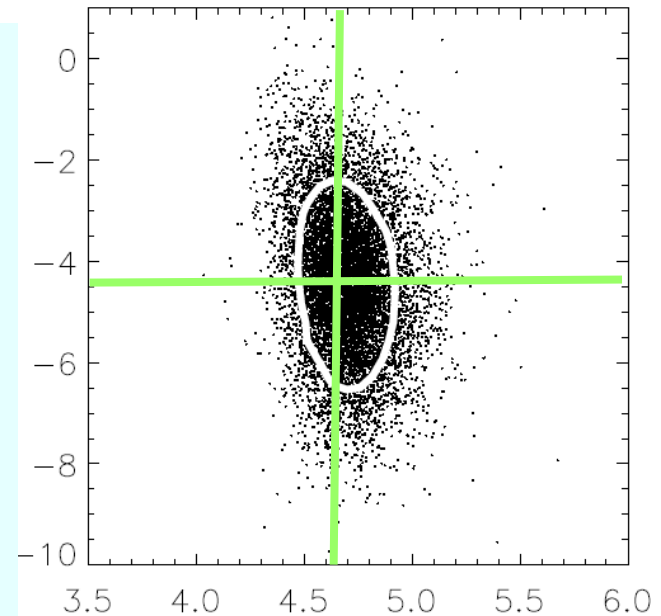
## 中心星の視線速度

## 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

# 天王星リングの発見の歴史から学ぶ



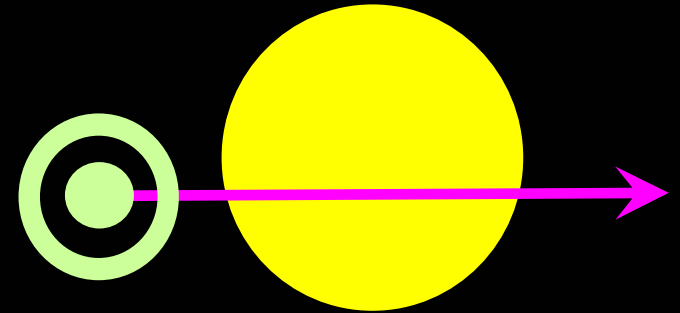
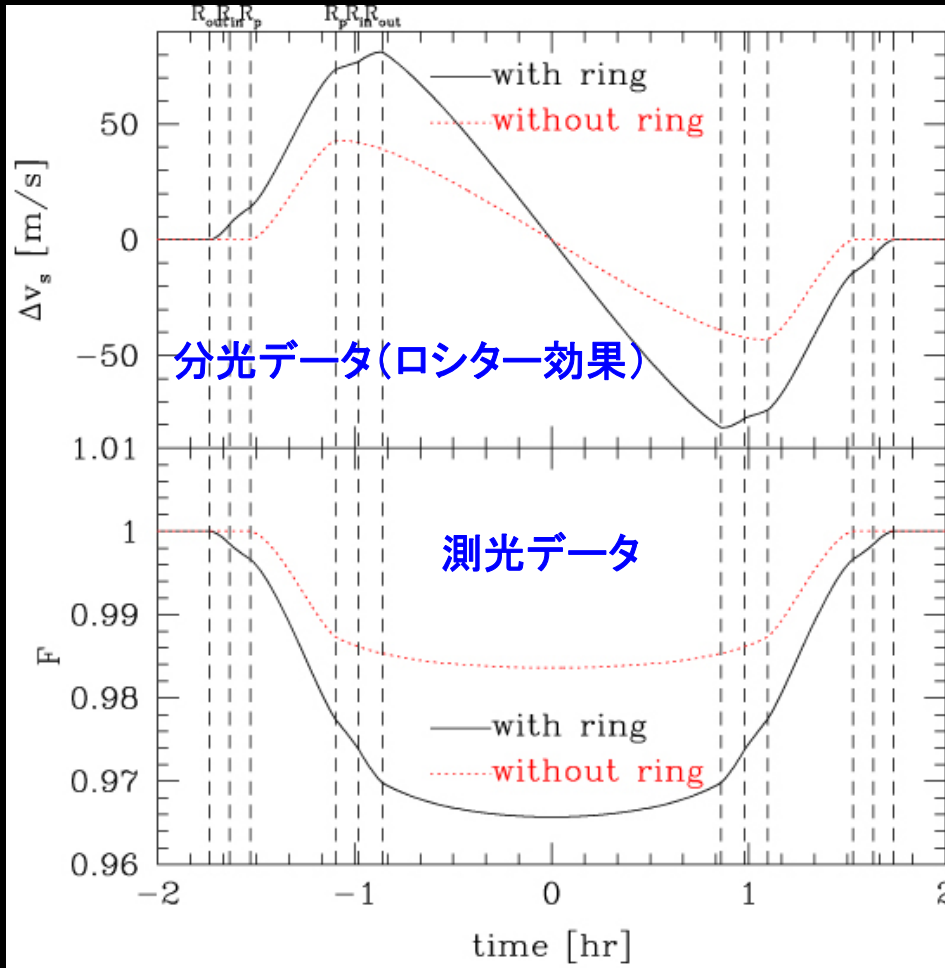
## ■ 天王星

- 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

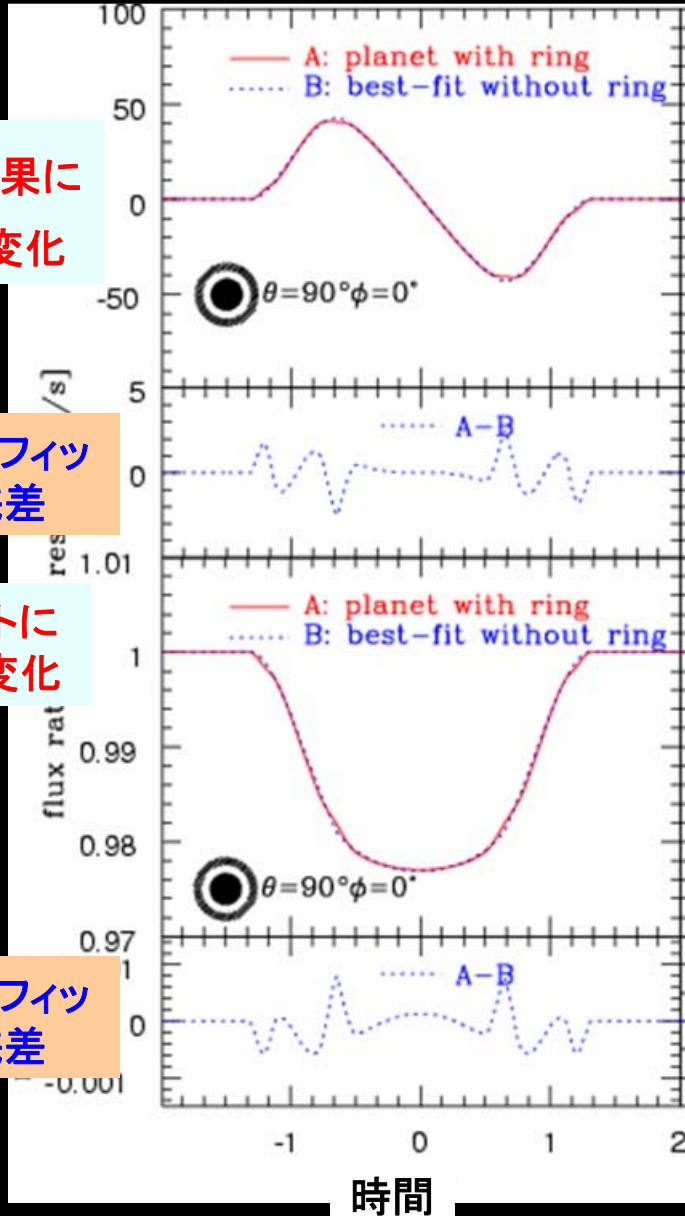
# 惑星リング存在の兆候を探れるか？



- 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



ロスター効果による速度変化

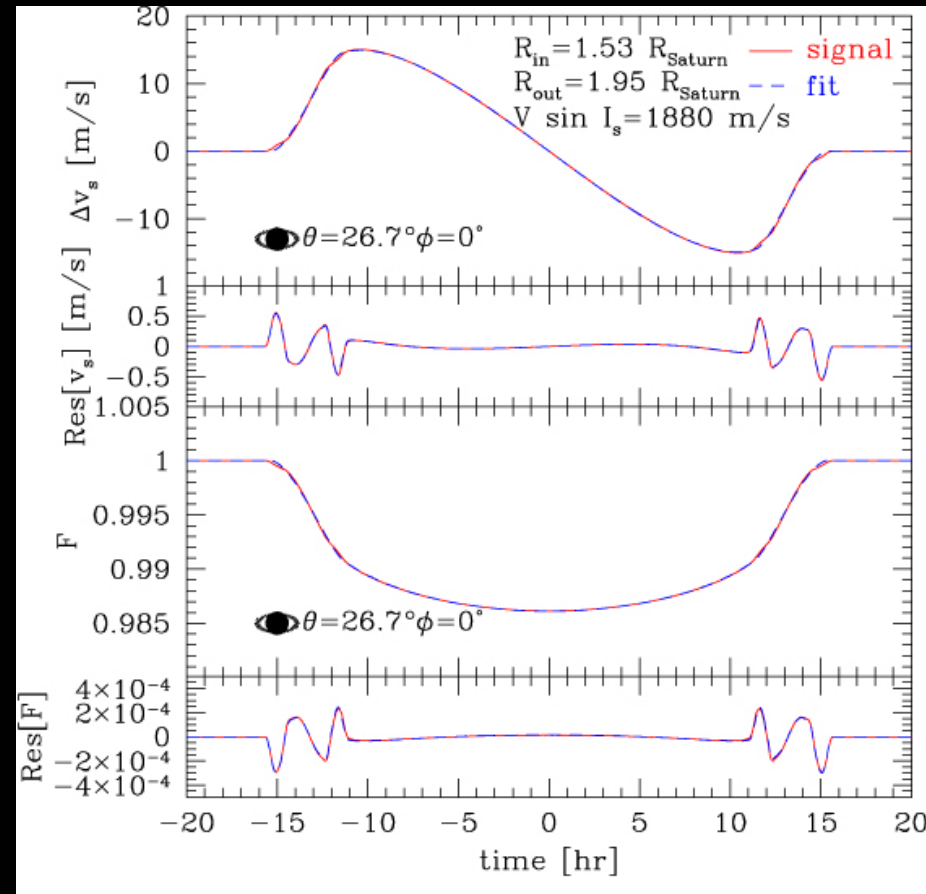
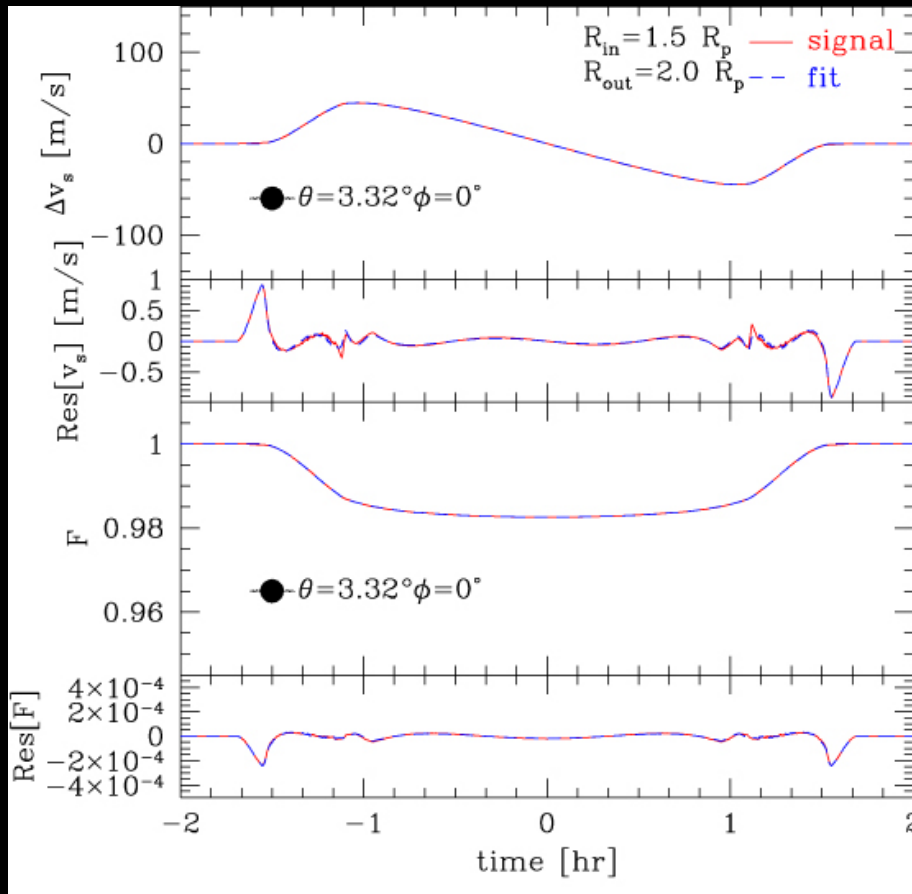
リングなしフィットとの残差

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

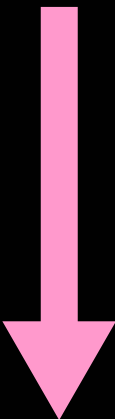
# HD209458bと土星の場合どう見える？



- HD209458b: 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
- いずれも何とか検出可能範囲(S/N=1)にある

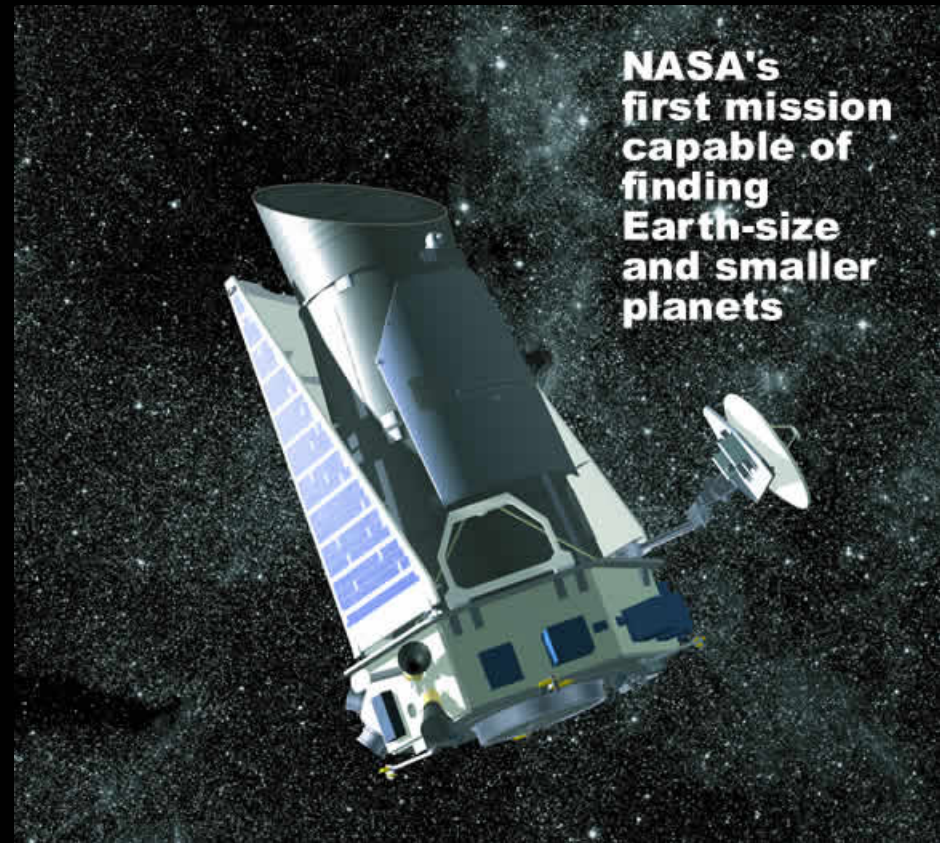
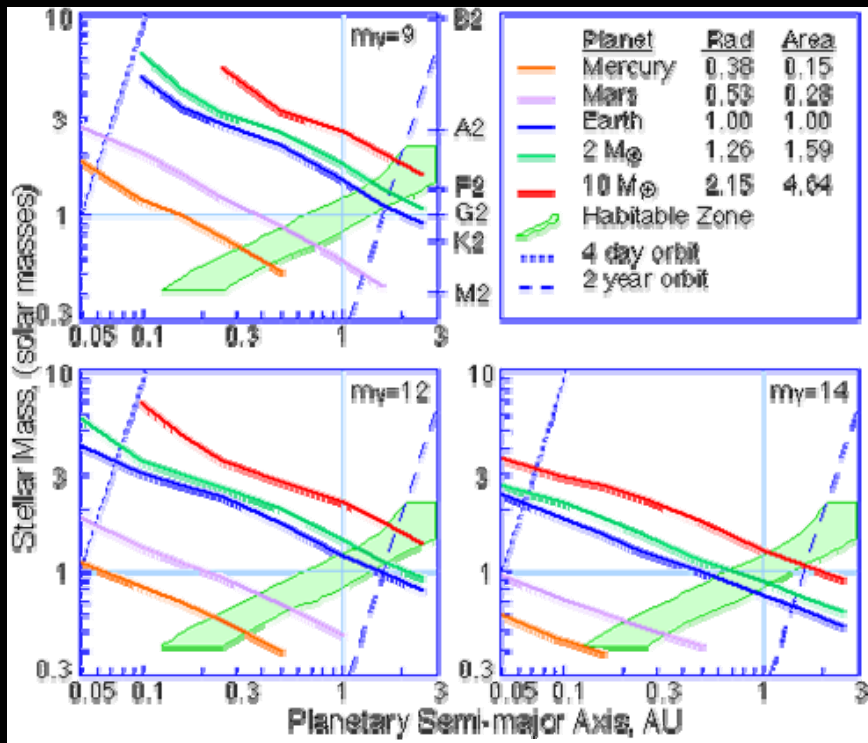
# そして明日から：今後の展望

- 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**



# ケプラー衛星 (米国2009年2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

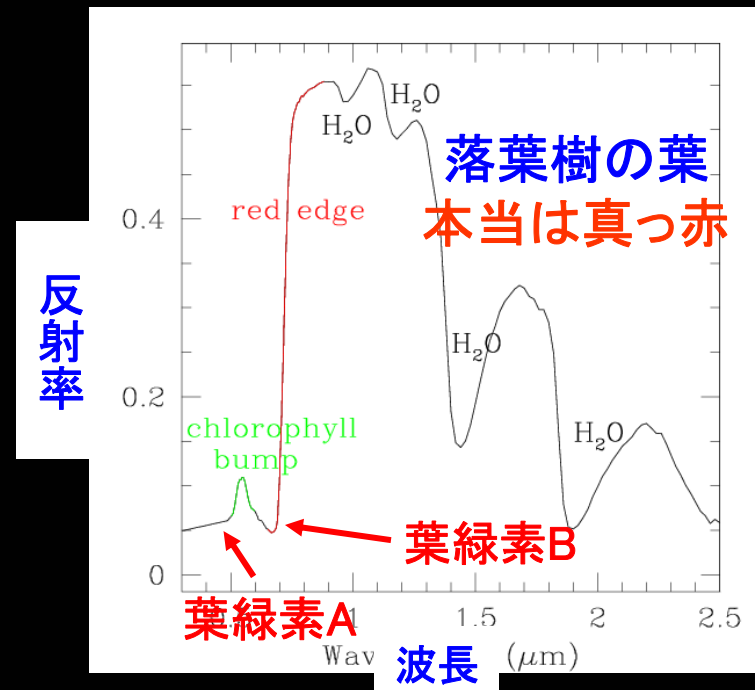
- 植物の red edge

- *Extrasolar planets from extrasolar plants*

- とにかく超精密分光観測

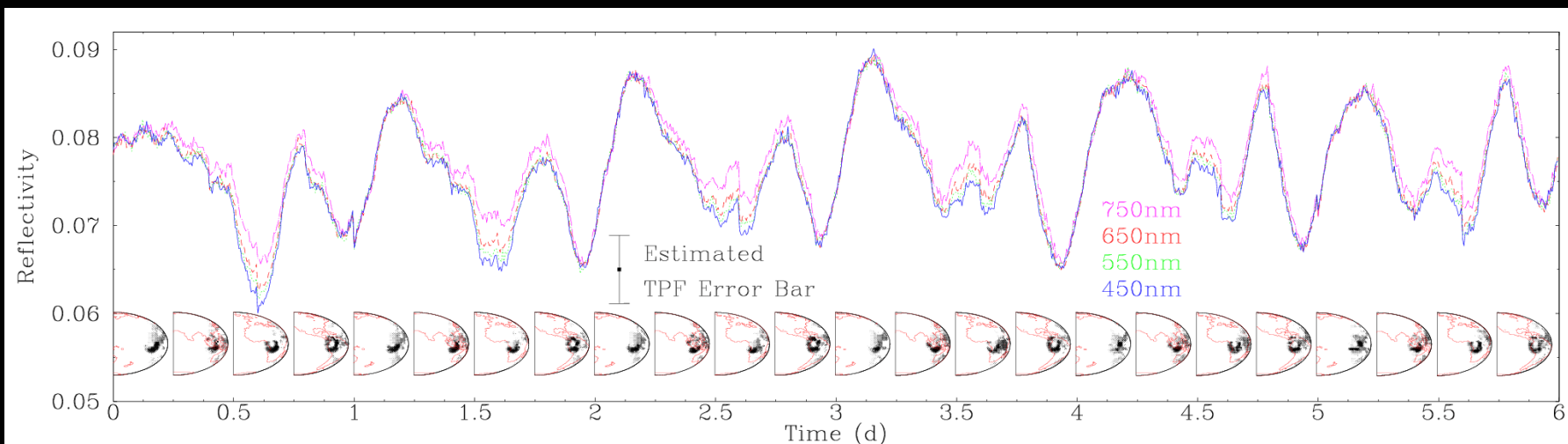
## ■ やっぱりSETIか？

- 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





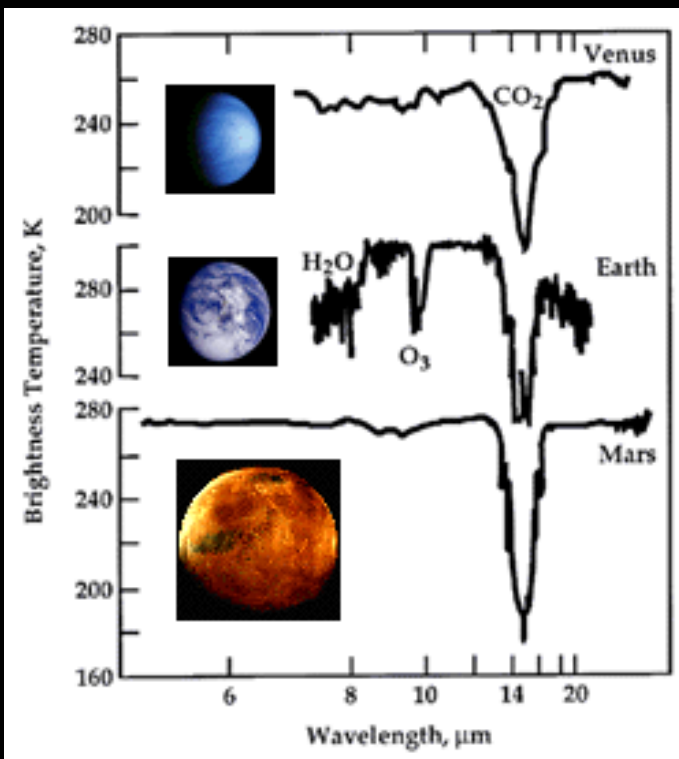
# 地球が30光年先にあるとして何がどこまでわかるか？



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！

# 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？

# 地球外文明はあるのか？：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。

# 予想もできない展開が待っている

## ■ 最初に起こるのはどれだろう

- 地球外生物の痕跡の天文学的検出
- 地球外文明からの交信の検出
- 実験室での人工生物の誕生
- 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と等しい




今日まで:

この青空の先のどこかにきっと  
我々と同じ世界があるはず

2007年10月30日撮影 イギリスノッチンガムの青空



A night sky filled with a dense field of stars, ranging from bright white and yellow to faint blue and red. In the lower-left foreground, a dark, cylindrical structure, possibly a telescope or observatory component, is visible against the starry background.

そして明日から： これらの星の  
どれかにきつと第二の地球があるはず