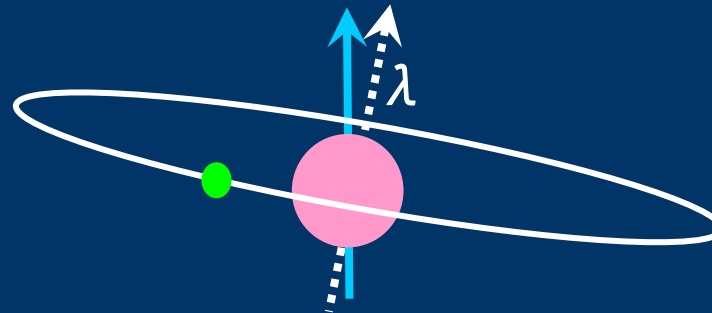
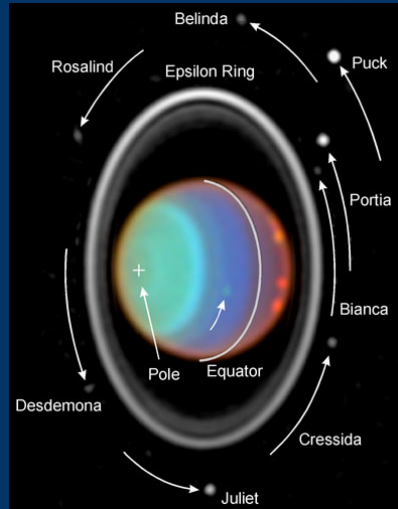
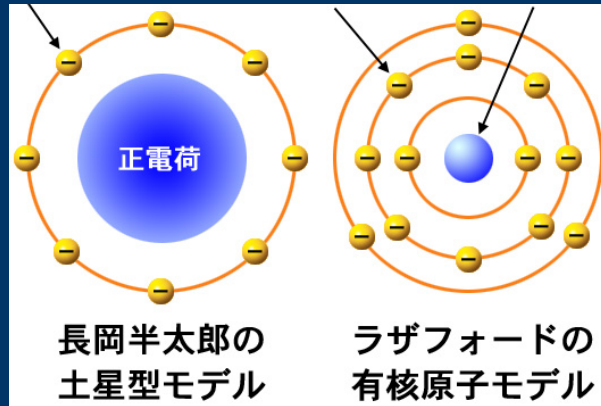


# トランジット系外惑星研究の魅力



東京大学 大学院理学系研究科  
物理学専攻 須藤靖



2006年度天文・天体物理若手の会 夏の学校  
2006年8月2日@パノラマランド木島平

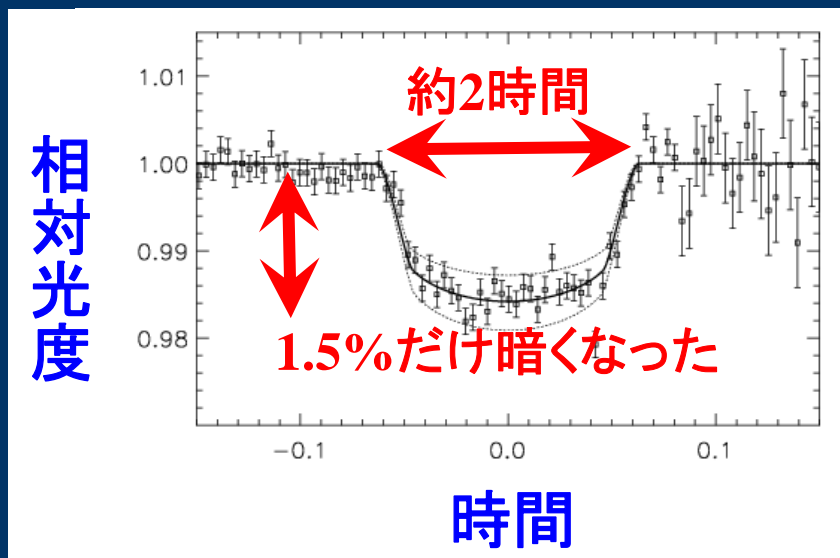
# トランジット惑星とは



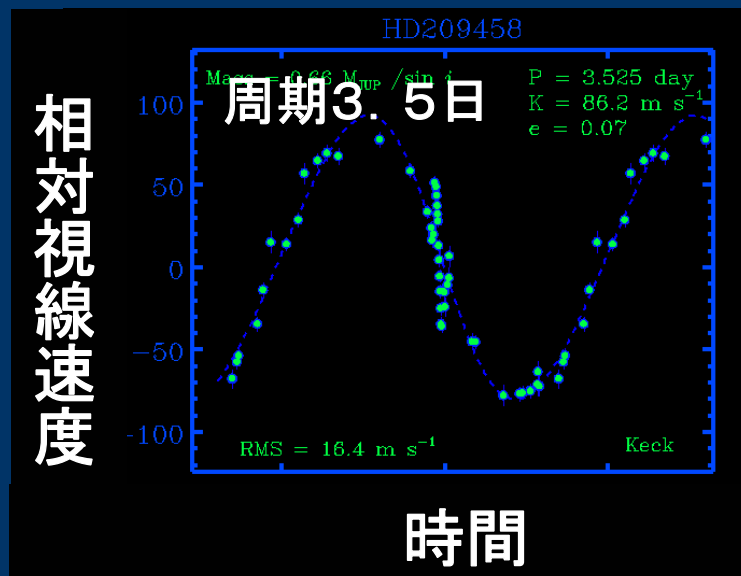
## ■ 惑星のシルエット観測

- 惑星軌道がたまたま恒星の前面を横切る
- 惑星系をより深く理解する重要な手段
- 2006年8月時点で、10個が知られている

地上望遠鏡による  
HD209458の光度曲線



地上望遠鏡による  
HD209458の速度時間変化



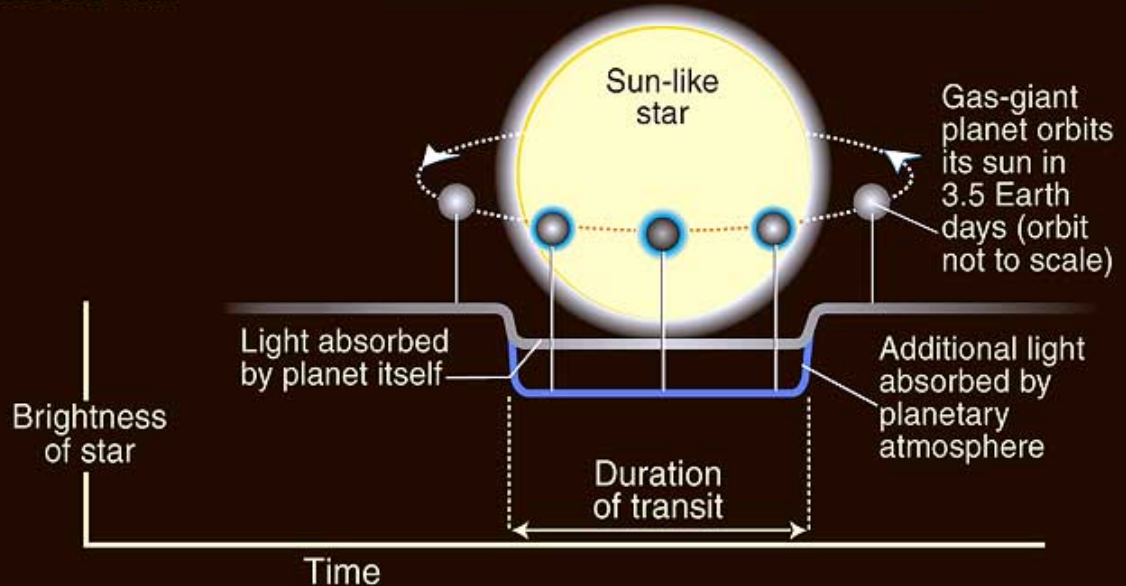
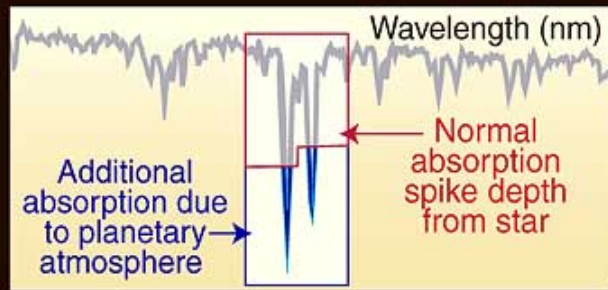
# トランジット惑星の重要性

- 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

# 最初のトランジット惑星 HD209458b

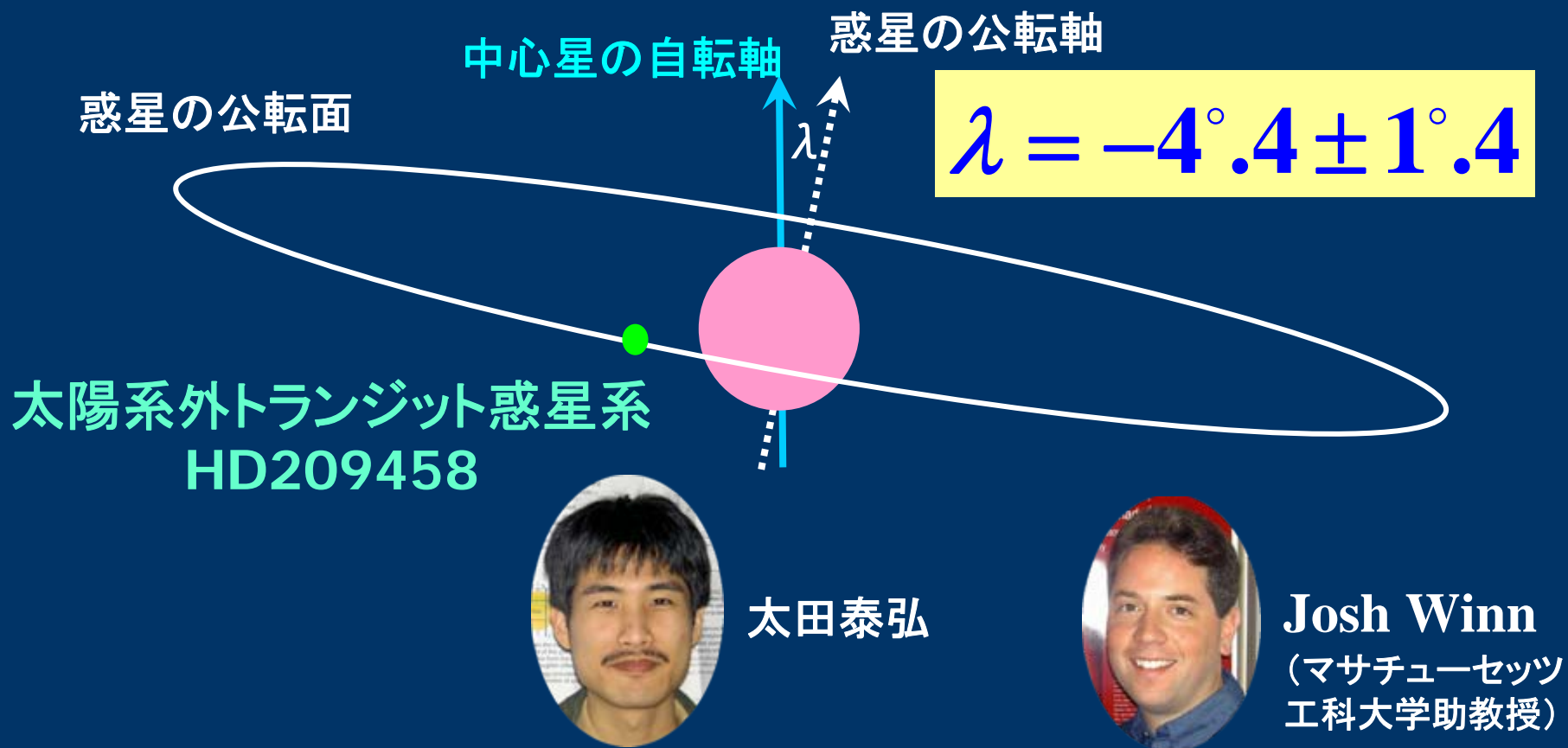
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/>

HST detects additional sodium absorption due to light passing through planetary atmosphere as planet transits across star



- 2000年 系外惑星のトランジットを初検出
  - 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 $0.4\text{g/cc}$ 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

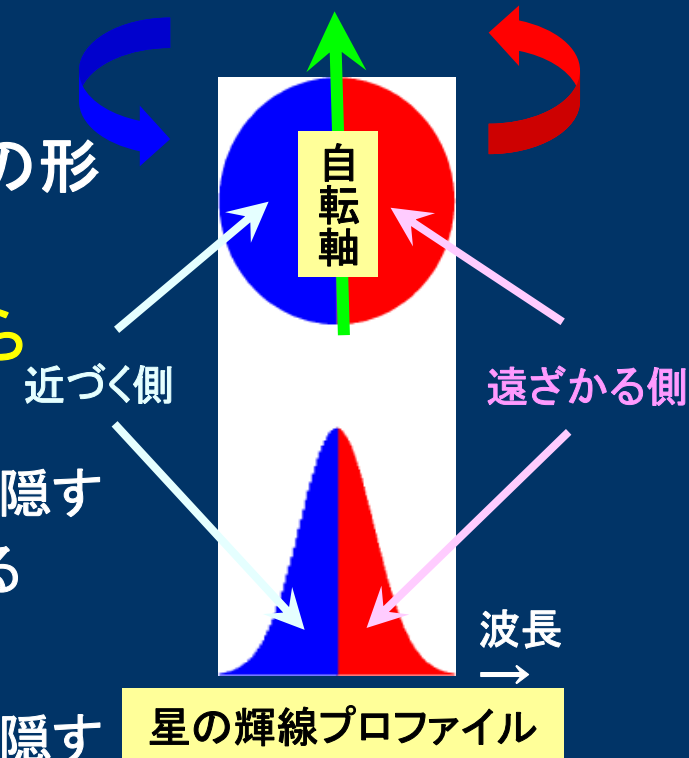
# ロシター効果を利用したHD209458の中心星 自転軸と惑星公転軸のずれの発見



太陽系外惑星の公転軸はちょっぴり傾いていた

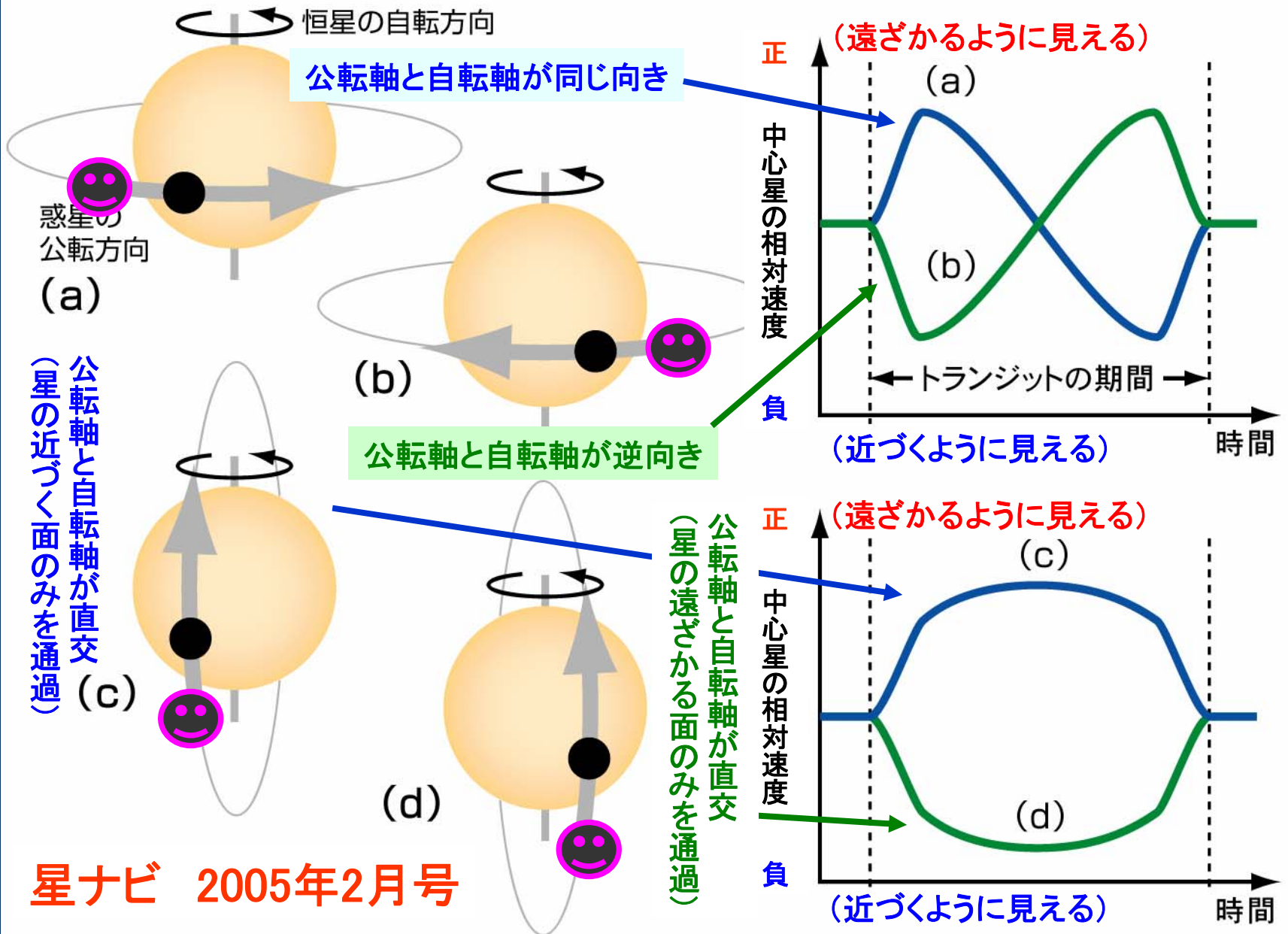
# ロシター効果とは

- 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**

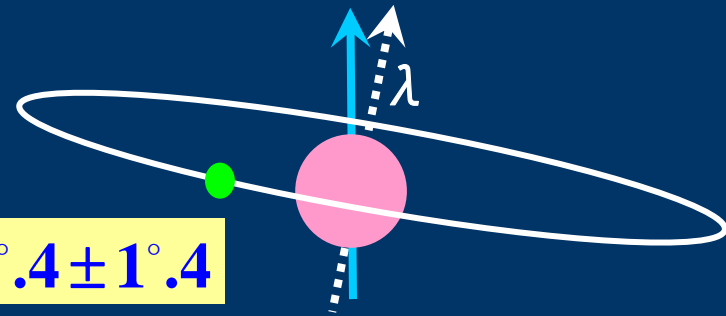
# 惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図



# 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

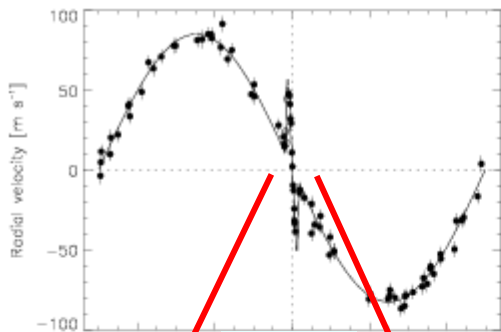




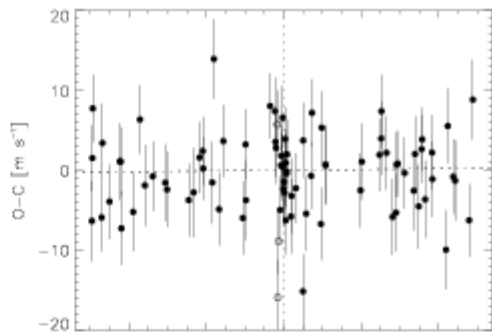
## 中心星の視線速度

## データとベストフィットの残差

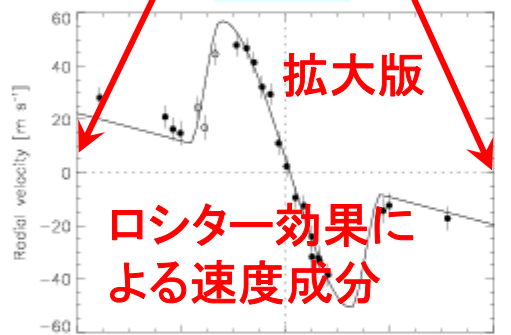
# 解析結果



時間

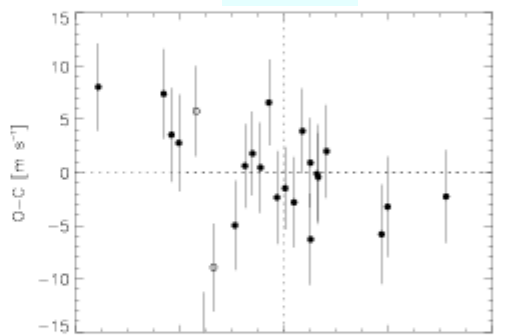


時間

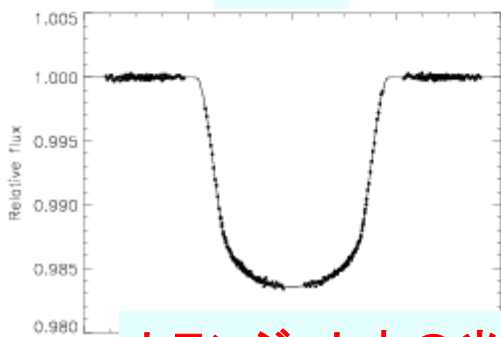


拡大版

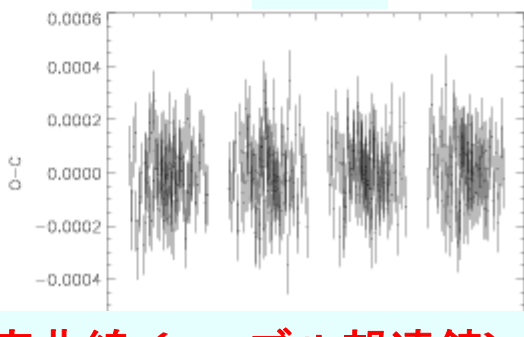
時間



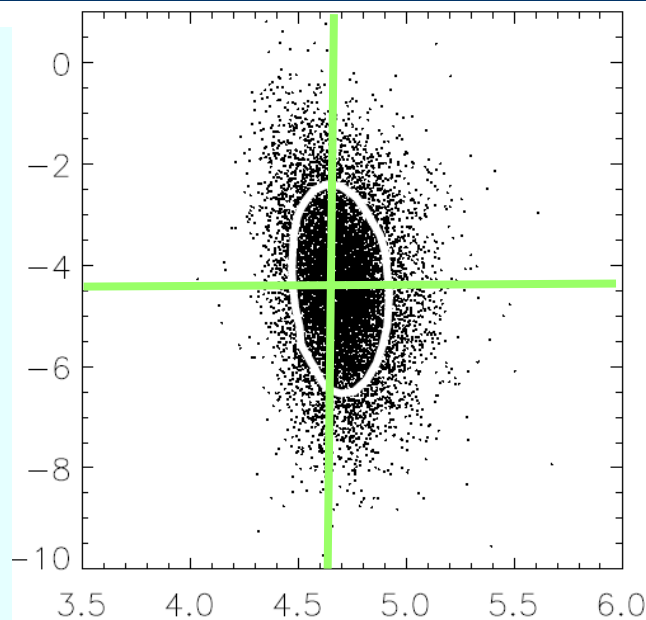
時間



トランジット中の光度曲線 (ハッブル望遠鏡)



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



# 天王星リングから学ぶこと

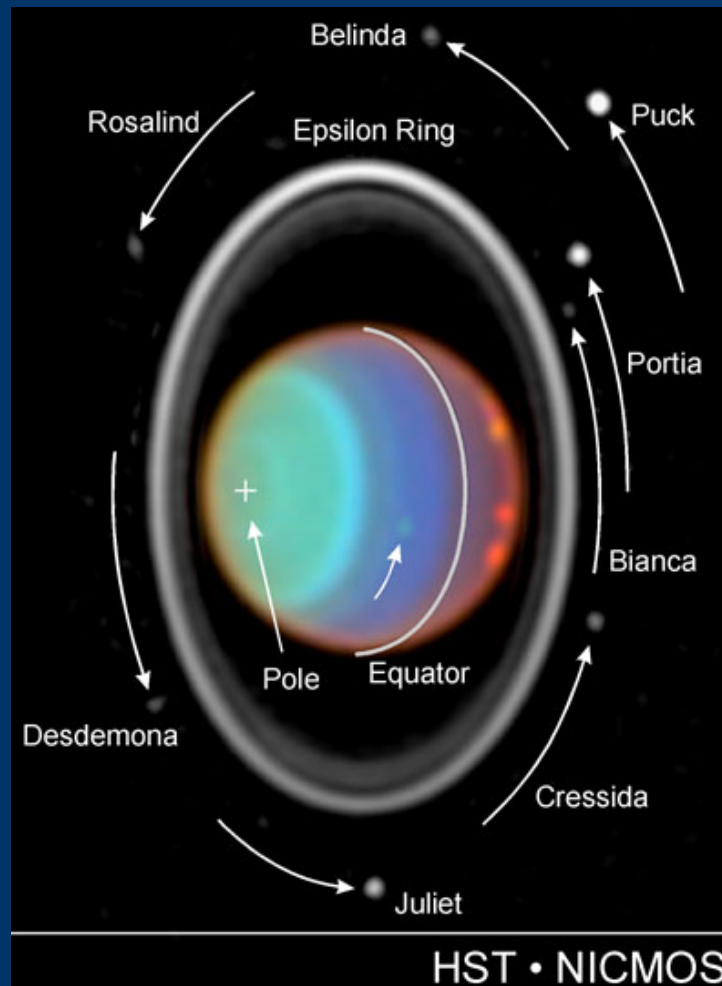
## ■ 天王星リング

- 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



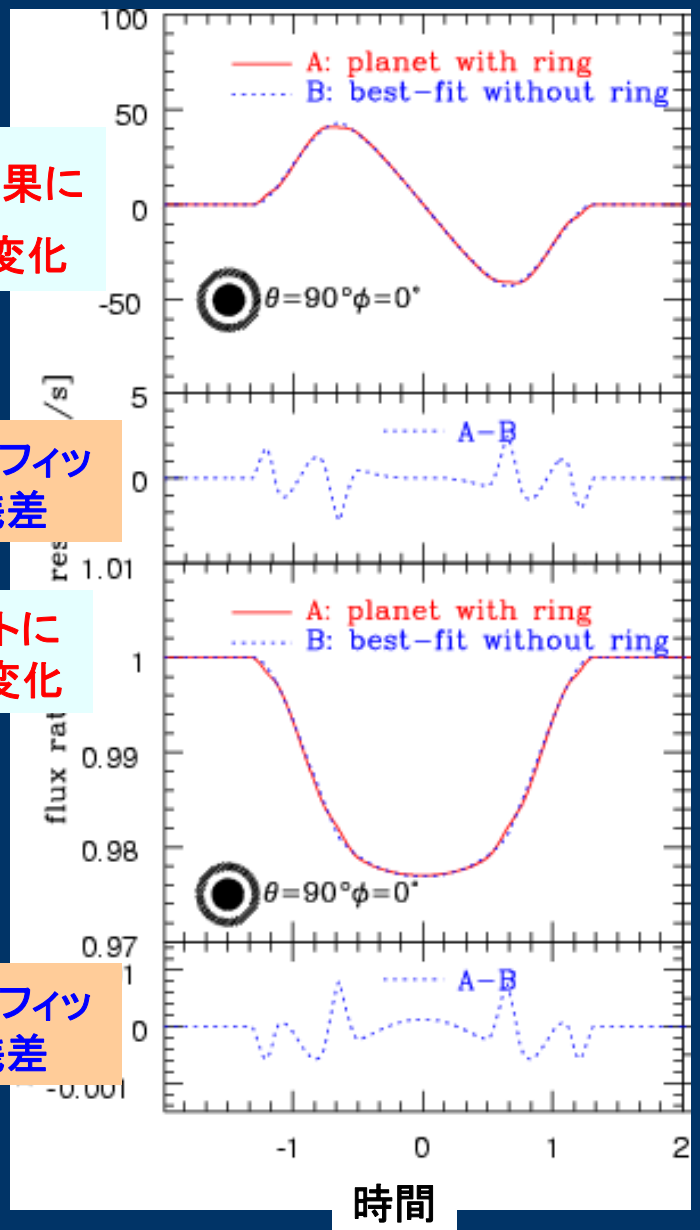
# 系外惑星リングの検出可能性(太田泰弘D論)

ロシ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:  $R_{\text{木星}}$
  - リング内径:  $1.5R_{\text{木星}}$
  - リング外径:  $2R_{\text{木星}}$
- **リングがないモデルとのズレ**
  - 速度: 1m/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**

# 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

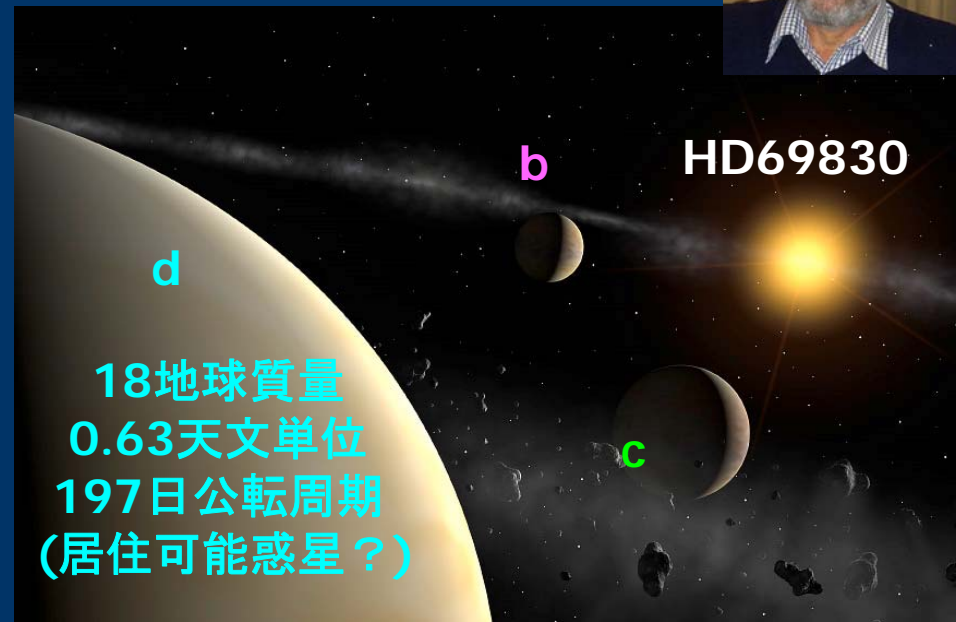
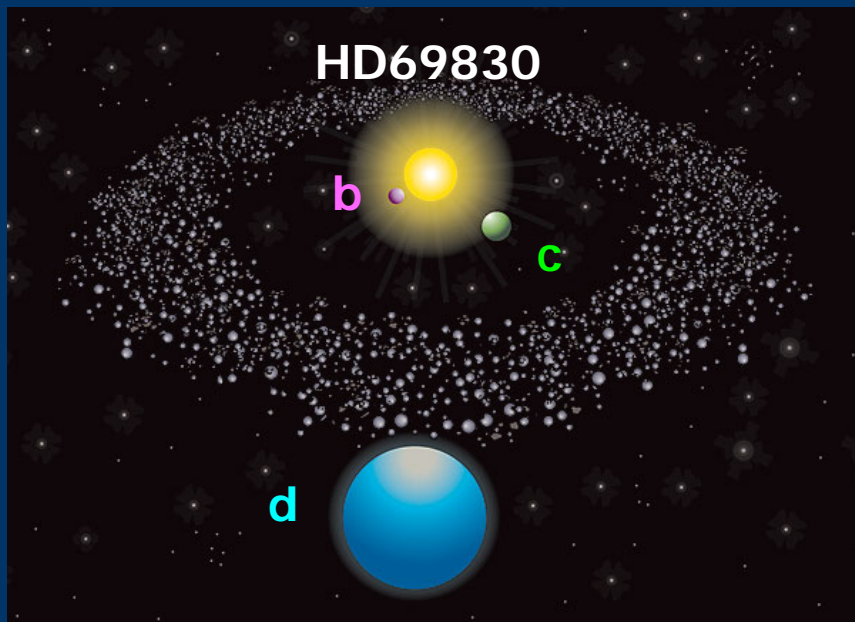
---

  - 惑星反射光の検出

---

  - **地球型惑星の見**
  - **居住可能惑星の見**
  - **バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定**
  - **地球外生命の見**

# 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)

# バイオマーカー（生物存在の証拠）の同定

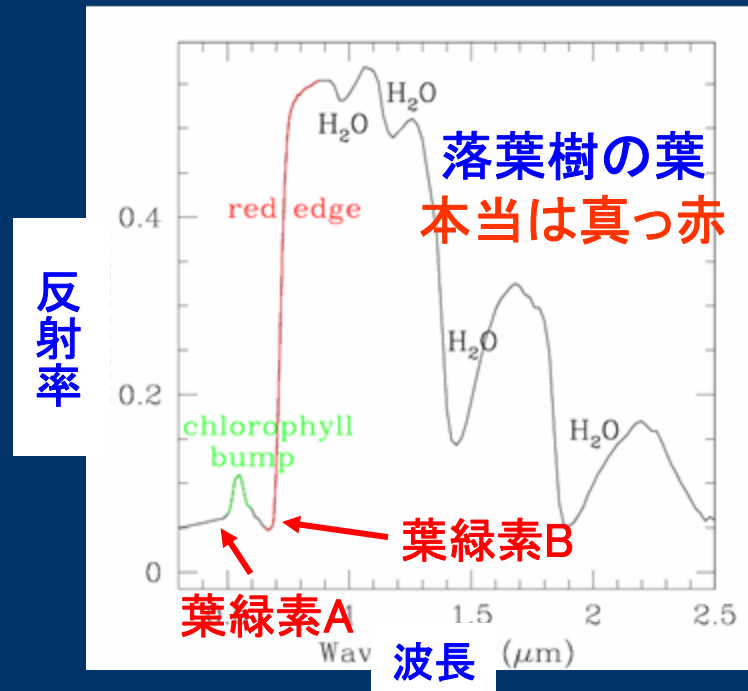
- （居住可能）地球型惑星を発見するだけでは、そこに生命があるかどうかはわからない

## ■ 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

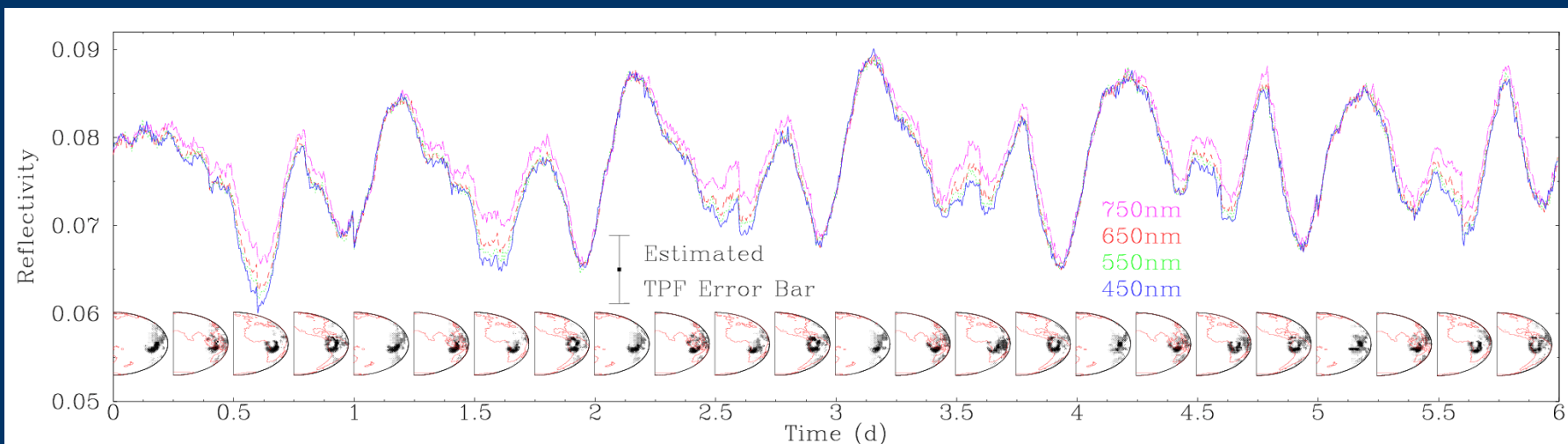
## ■ やっぱりSETIか？

- 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？

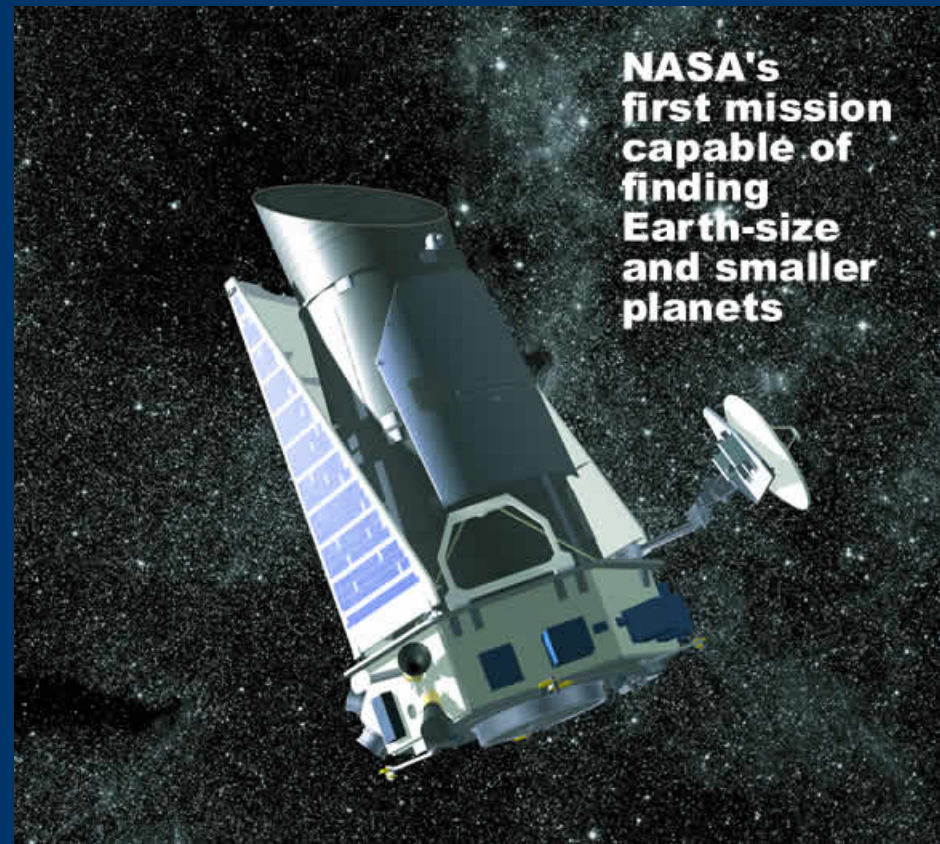
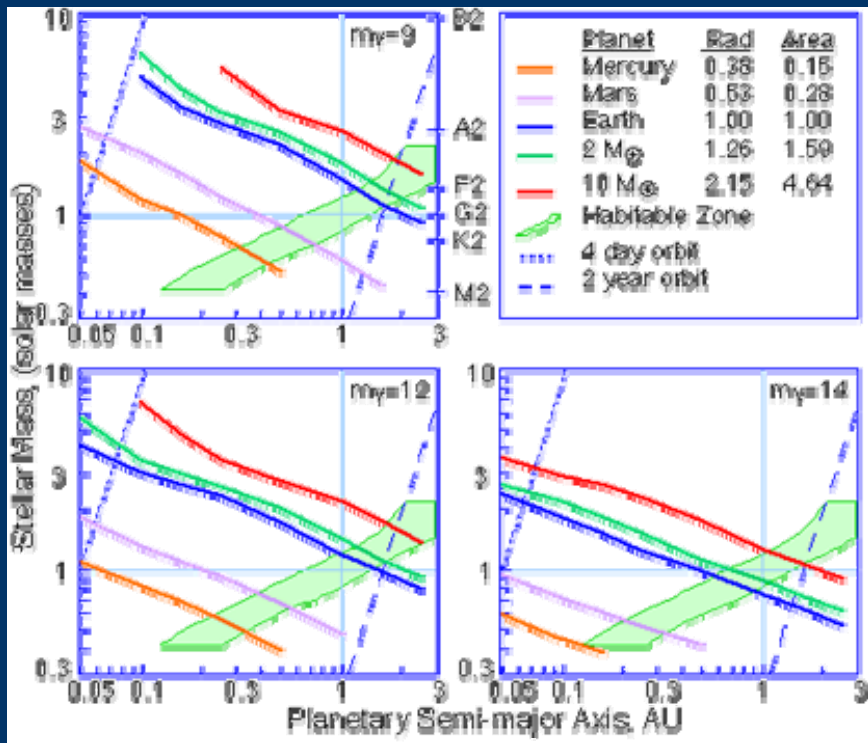


Ford, Seager & Turner: Nature 412 (2001) 885

- **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！

# 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/>

# 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)

# 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？