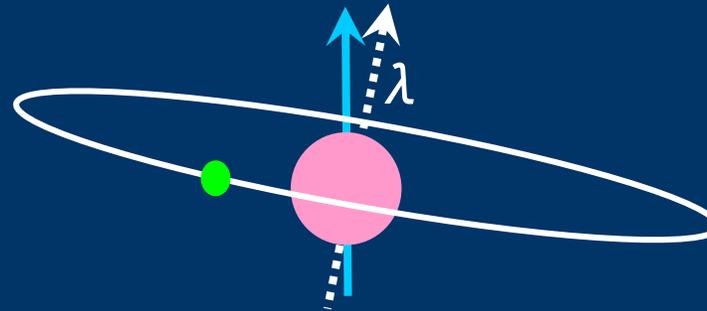
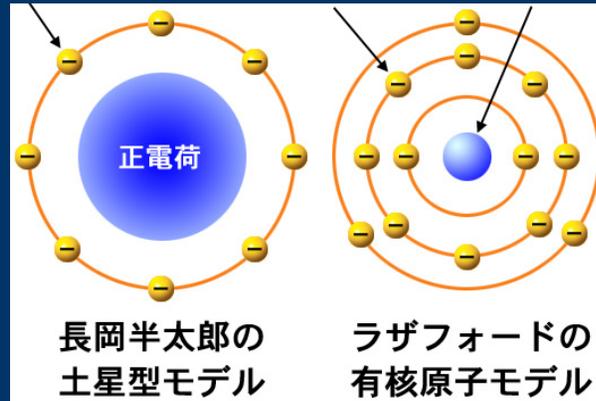
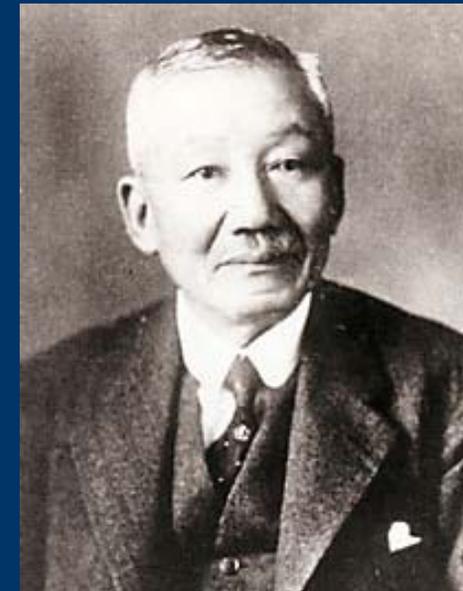


# 太陽系外惑星のロシター効果



須藤 靖



第5回 RESCEU夏の学校  
「宇宙における時空・物質・構造の進化」  
2006年9月4日@鬼怒川温泉ホテル

# 現在進行中の研究プロジェクト

## 1. SDSSと観測的宇宙論

1. 銀河個数分布を用いた銀河系ダスト地図の検証 (矢幡、米原、Turner, Broadhurst, Finkbeiner)
2. 銀河3点統計とバイアス (西道、加用、日影、矢幡、樽家、Jing, Sheth)
3. 宇宙論スケールでの重力逆二乗則の検証 (白田、吉田、日影、白水)

## 2. バリオン振動と宇宙の暗黒エネルギー

1. 摂動的重力非線形性の考察 (大室、西道、白田、樽家、矢幡、斎藤、山本)
2. Modified フリードマン方程式の制限 (山本、矢幡、Nichol, Bassett)
3. Hyper Suprime-Cam 特定領域 (唐牛、相原、宮崎、浜名、高田 他)
4. WFMOS計画の検討 (Ellis, Peacock, Lahav、高田、有本 他)

## 3. 銀河団プラズマ、WHIMと宇宙の暗黒バリオン

1. 銀河団内プラズマの温度構造と分光学的温度推定の系統誤差 (河原、北山、佐々木、清水、Rasia, Dolag)
2. WHIM検出における非平衡電離過程 (吉川、佐々木)

## 4. 太陽系外トランジット惑星

1. Tres-1 すばる・MAGNUM同時観測 (成田、塩谷、吉井、Turner, Winn 他)
2. 惑星リング検出可能性の理論的考察 (太田、樽家)

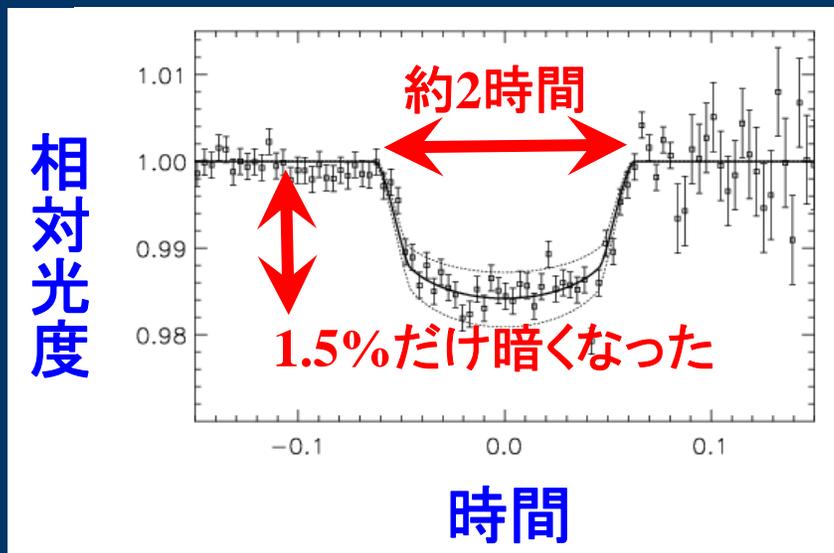
# トランジット惑星とは



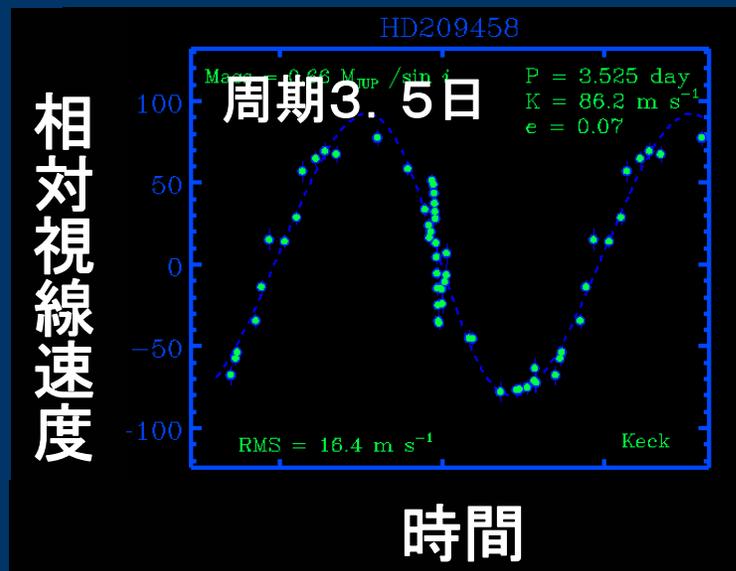
## ■ 惑星のシルエット観測

- 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



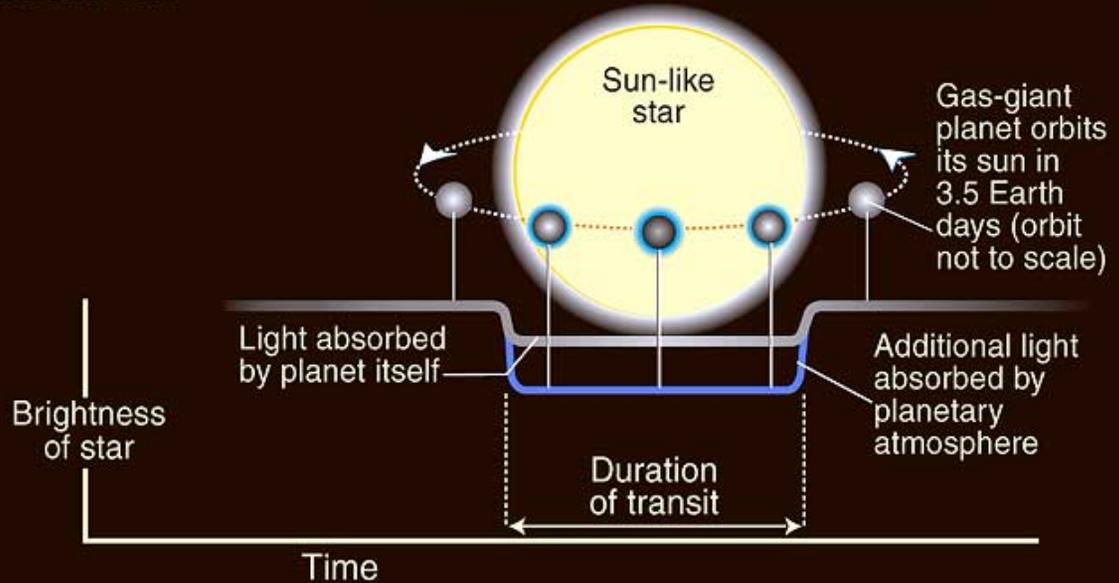
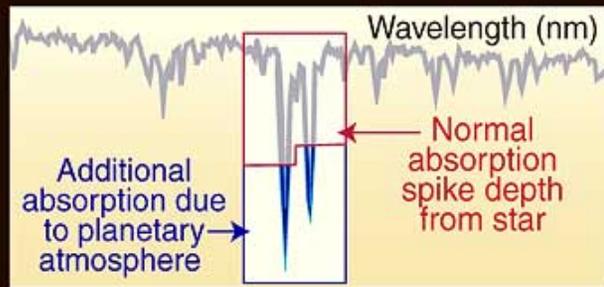
# トランジット惑星の重要性

- 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

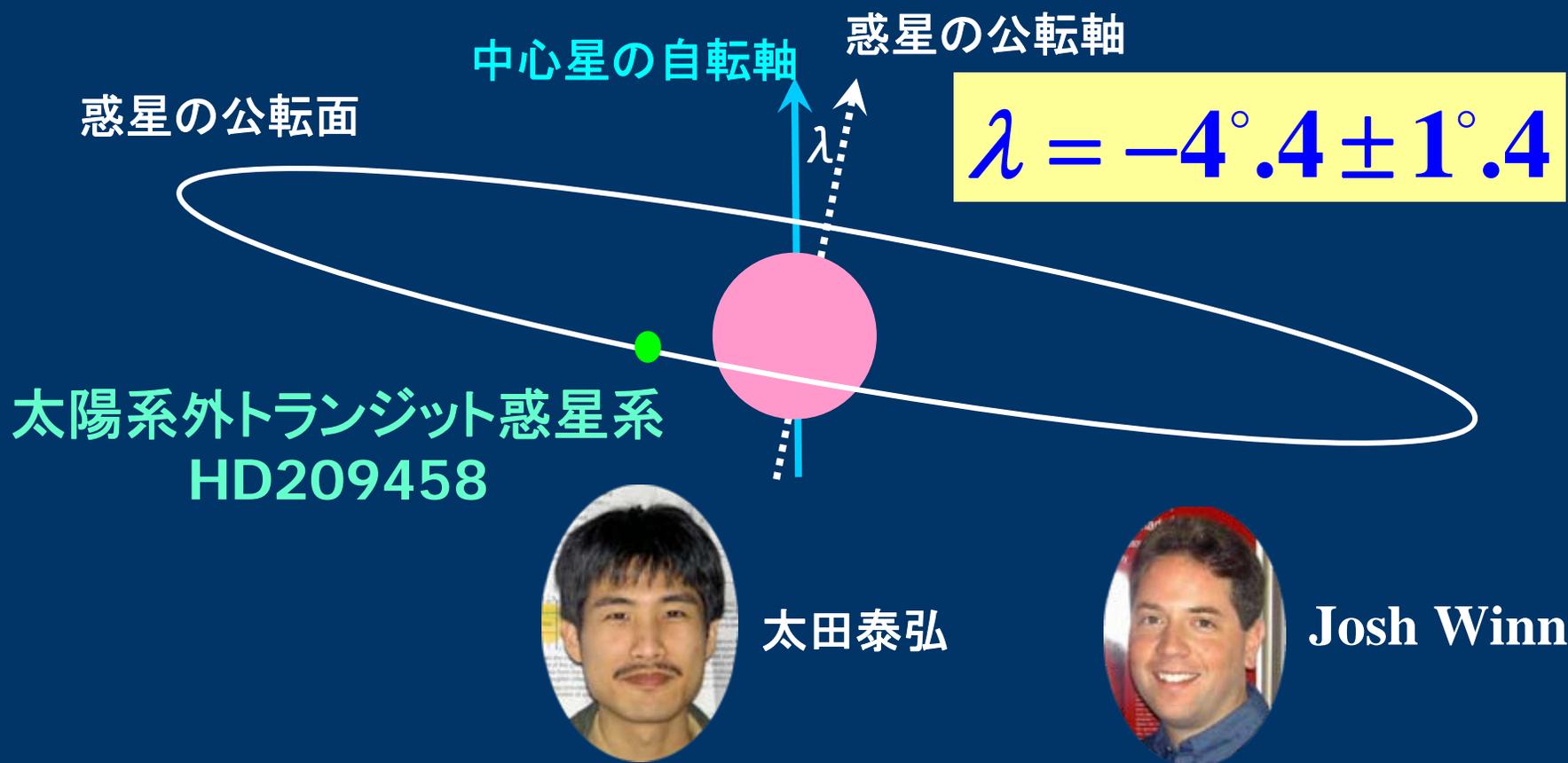
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/>

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

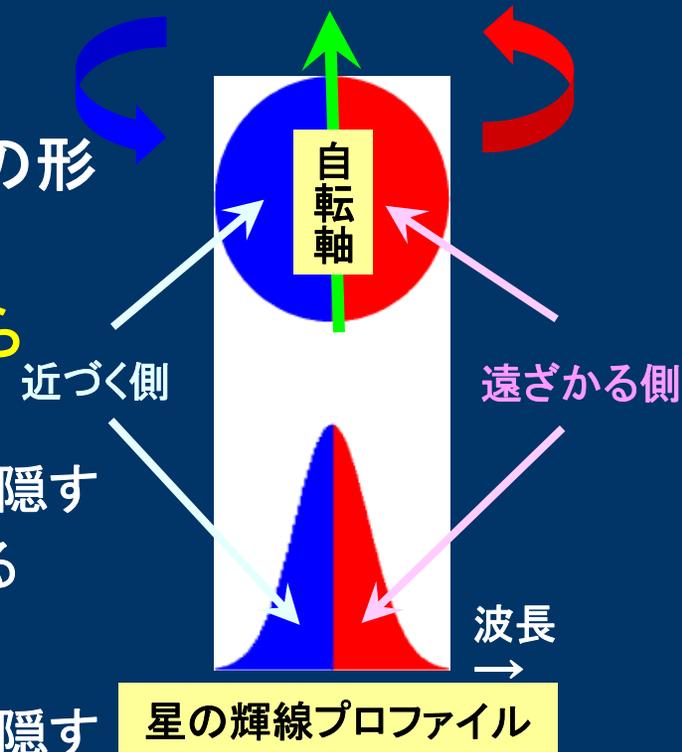
# ロシター効果を利用したHD209458の中心星 自転軸と惑星公転軸のずれの発見



太陽系外惑星の公転軸はちょっぴり傾いていた

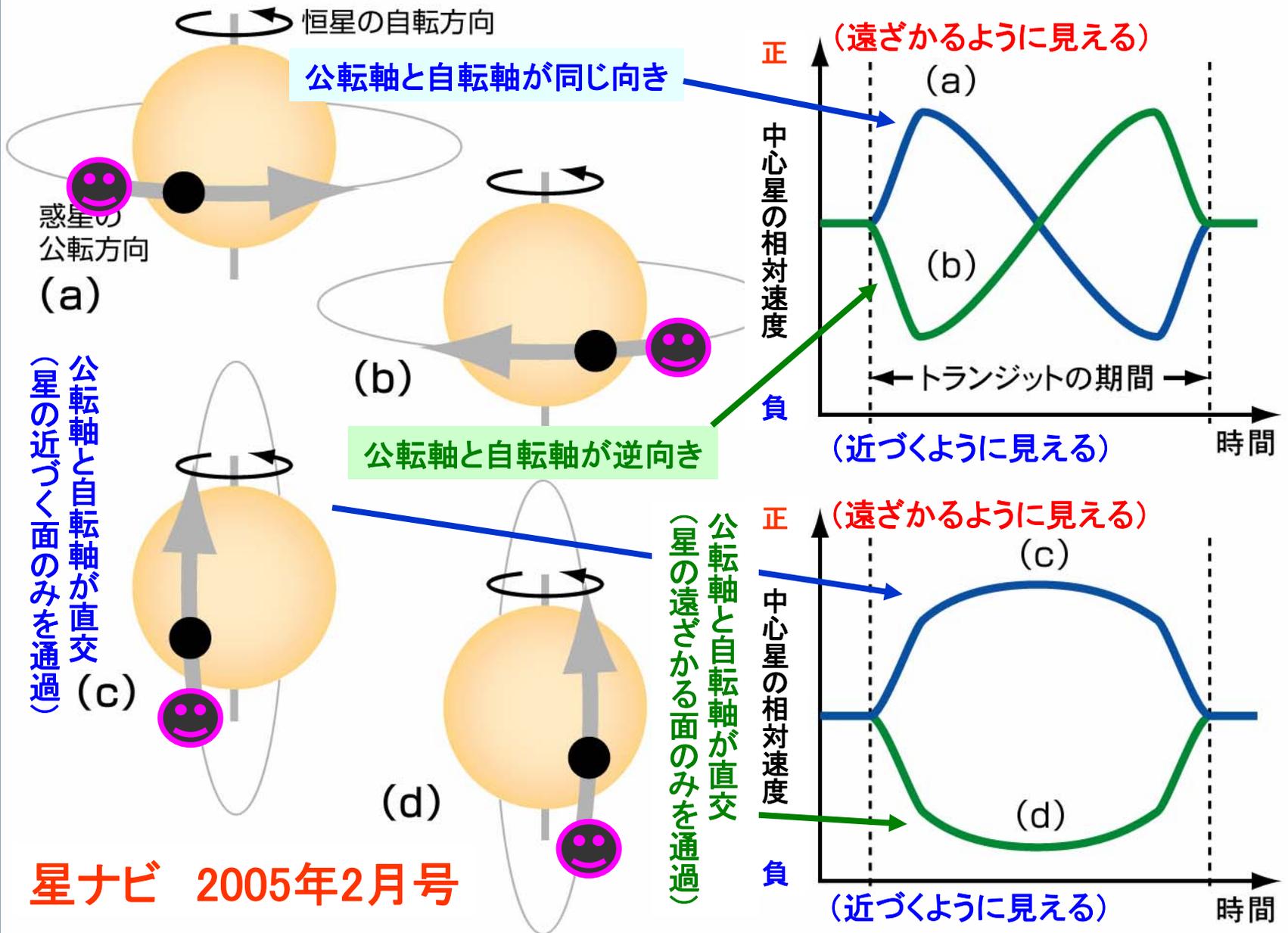
# ロシター効果とは

- 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**

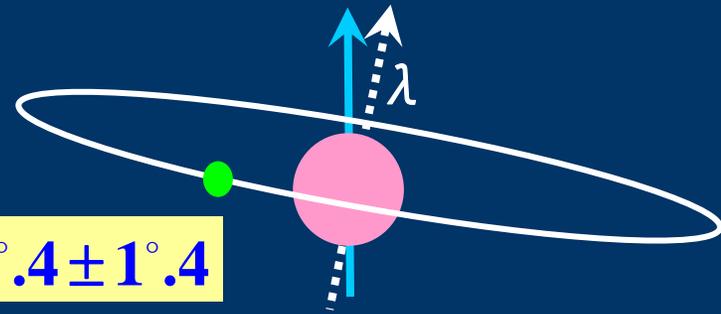
# 惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図



# わずかなズレの初検出！



$$\lambda = 4.4 \pm 1.4$$



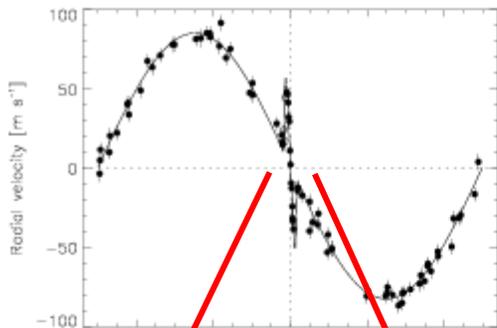
- 太田泰弘君の理論的研究が、共同研究者であるハーバード大学のJosh Winn氏を刺激した
- トランジット惑星 HD209458 のベストデータフィット
  - ケック天文台(ハワイの10m望遠鏡)による可視光での分光観測
  - ハッブル宇宙望遠鏡による可視光強度変動モニター
  - スピッツァー望遠鏡による赤外線強度変動モニター
- 主星の自転軸と惑星の公転軸が、(射影された)角度 $\lambda$ にして $(-4.4 \pm 1.4)$ 度だけずれていることを発見
  - Queloz et al.(2000)の精度(約20度)を一桁以上向上
  - 太陽の場合、自転軸は系内惑星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



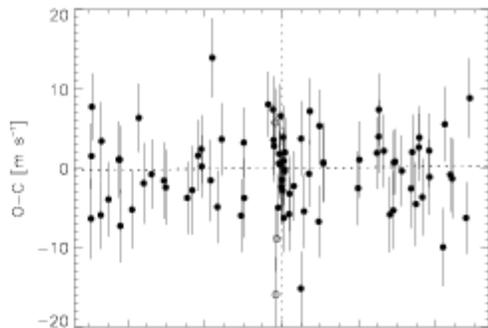
## 中心星の視線速度

## データとベストフィットの残差

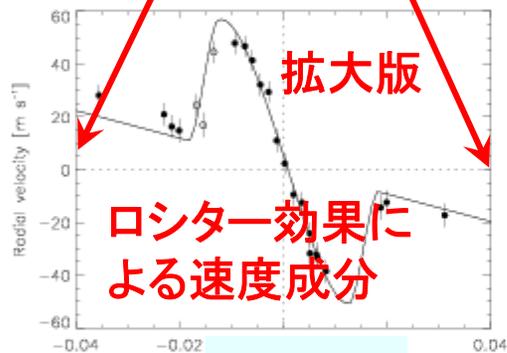
# 解析結果



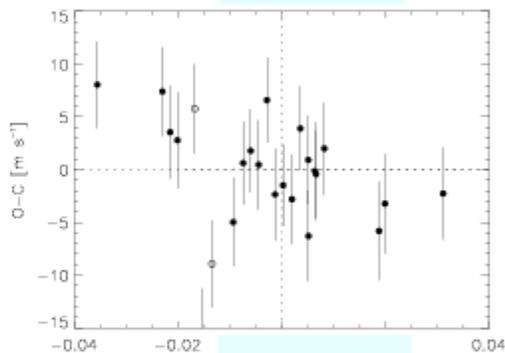
時間



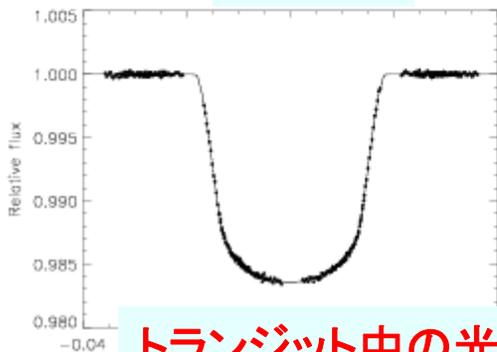
時間



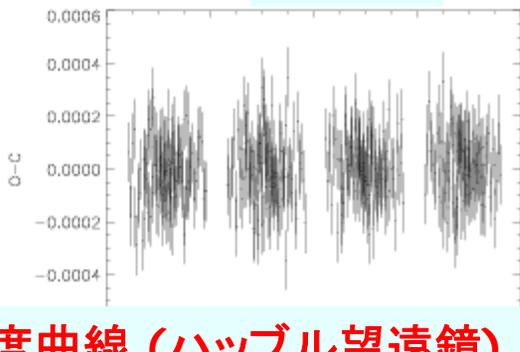
時間



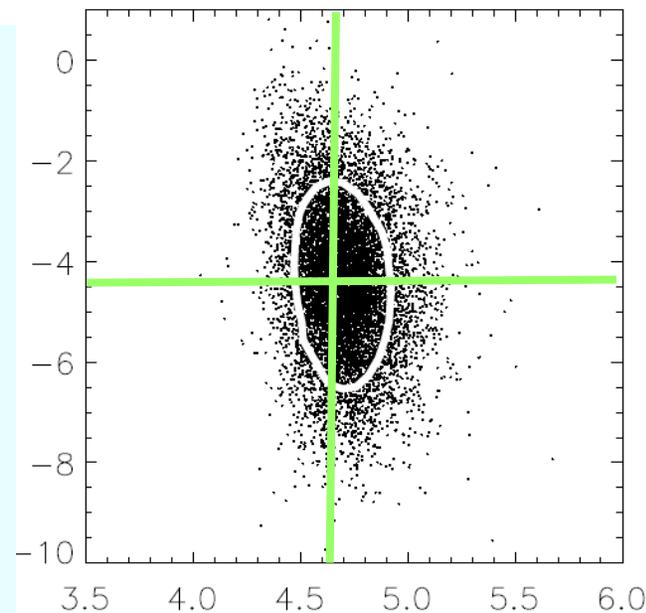
時間



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！

# 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

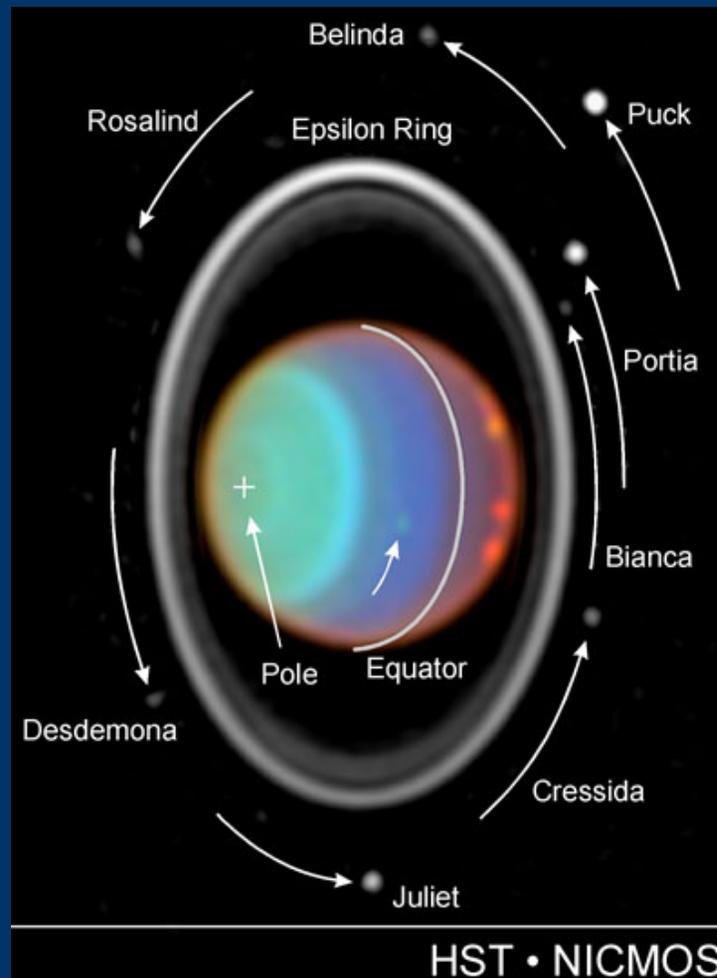
## ■ 天王星リング

- 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

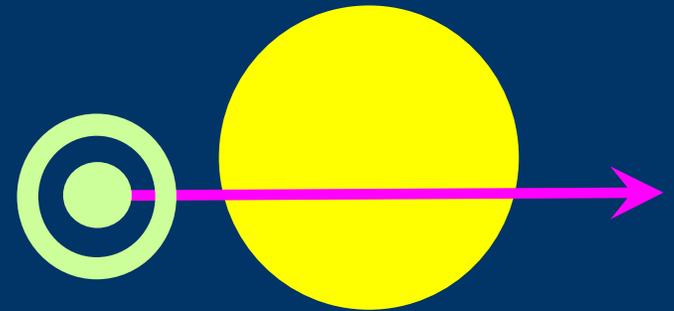
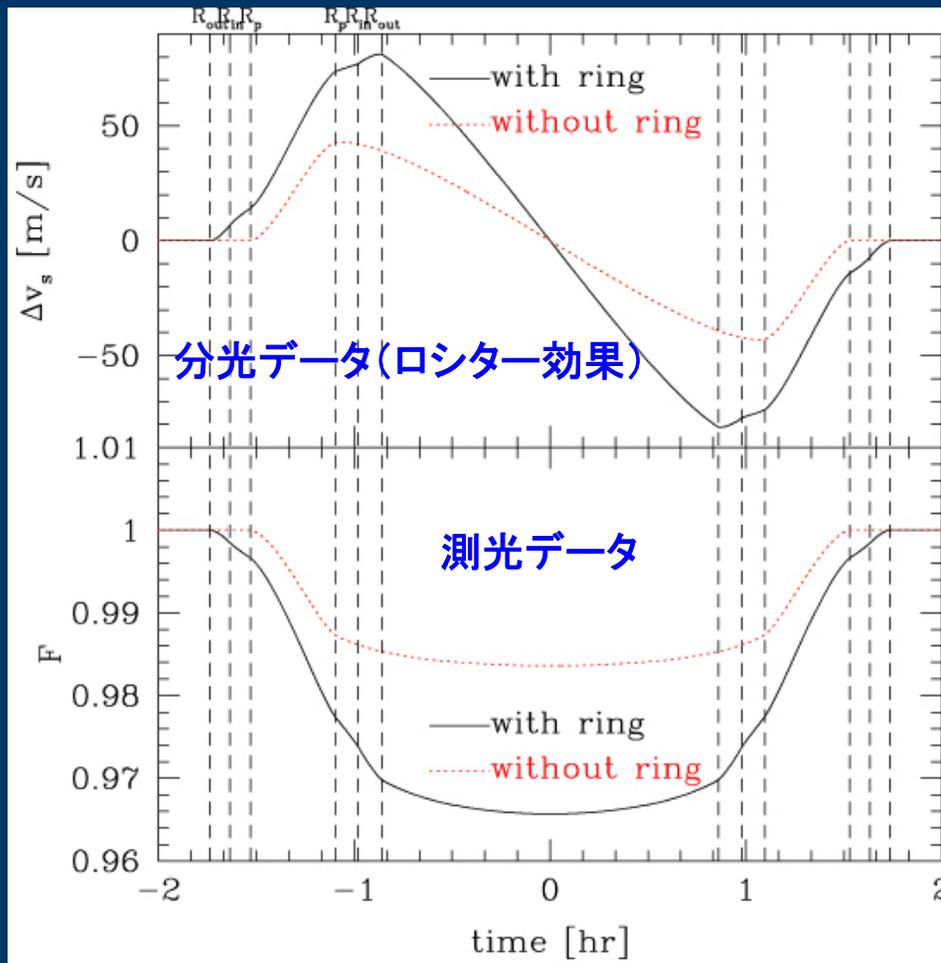
## ■ リングは土星だけではない

- 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

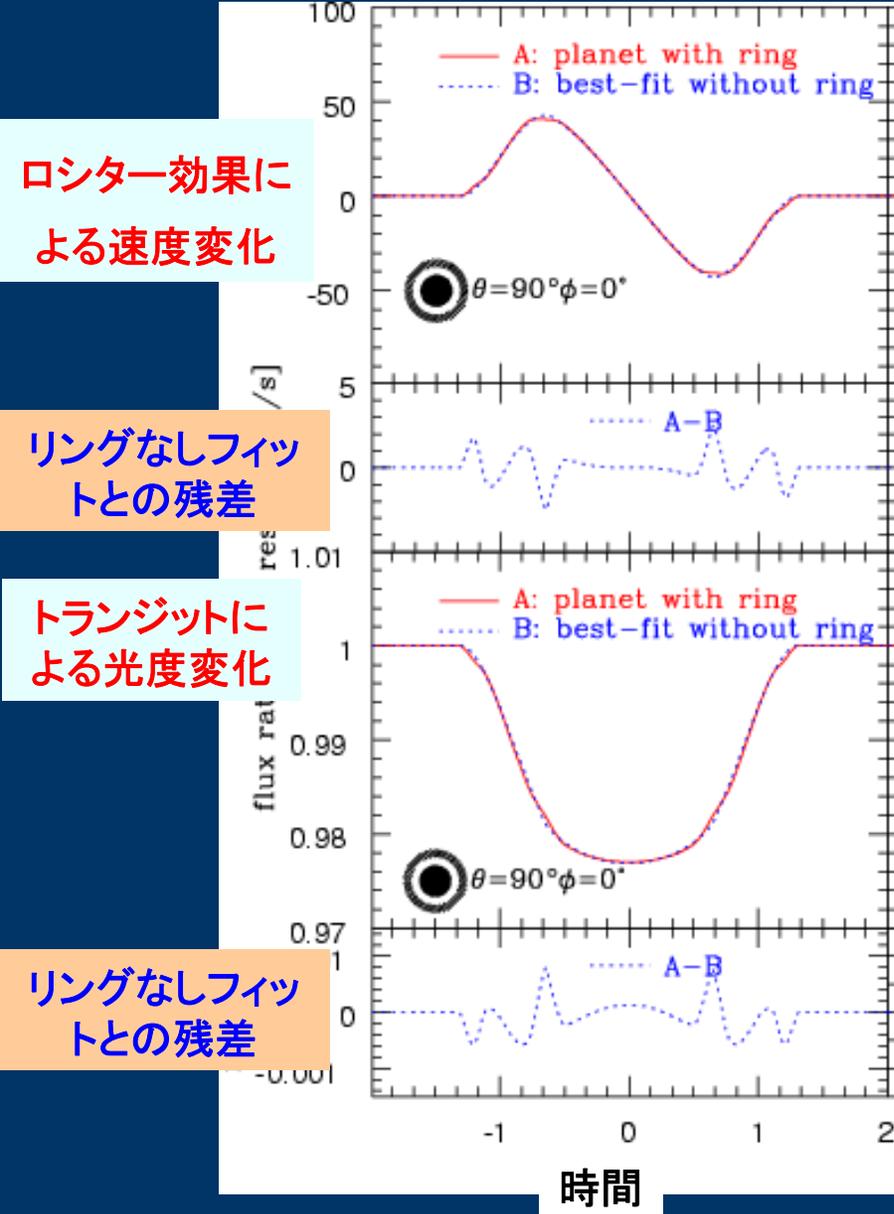


# 惑星リング存在の兆候



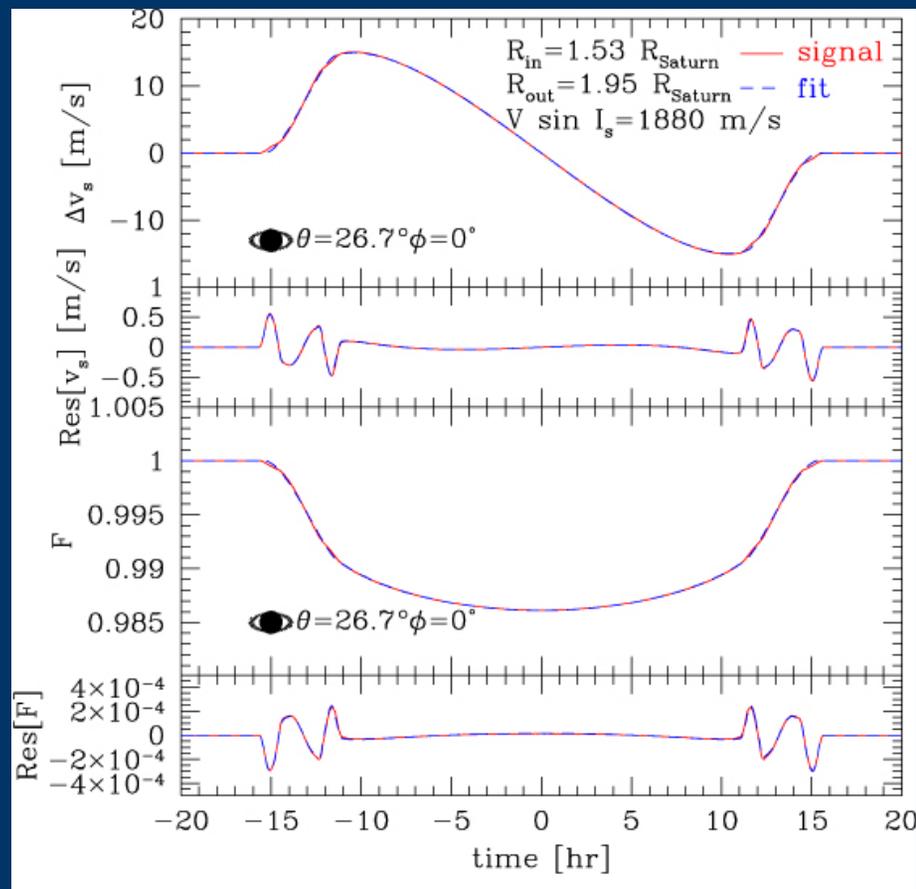
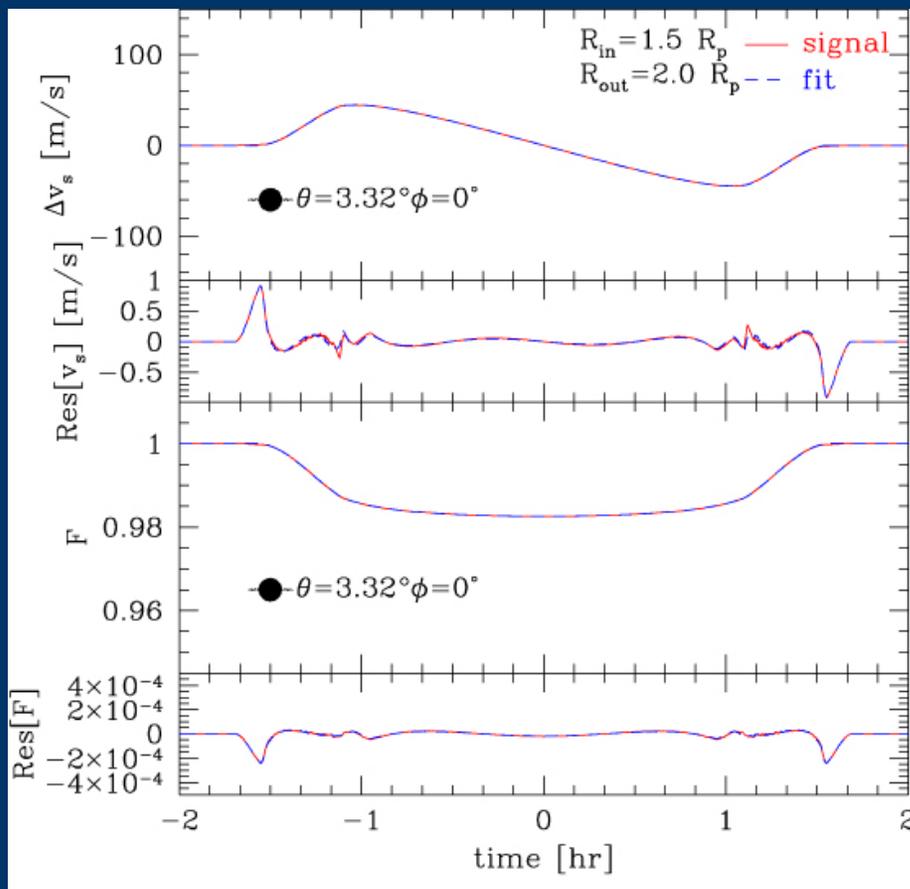
- リングの外径・内径、間隙、惑星本体の通過時に不連続な変化
- リングなしでフィットしたモデルとの残差を統計解析

# 系外惑星リングの検出可能性(太田泰弘D論)



- 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: 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

# ホットジュピターと土星の場合どう見える？

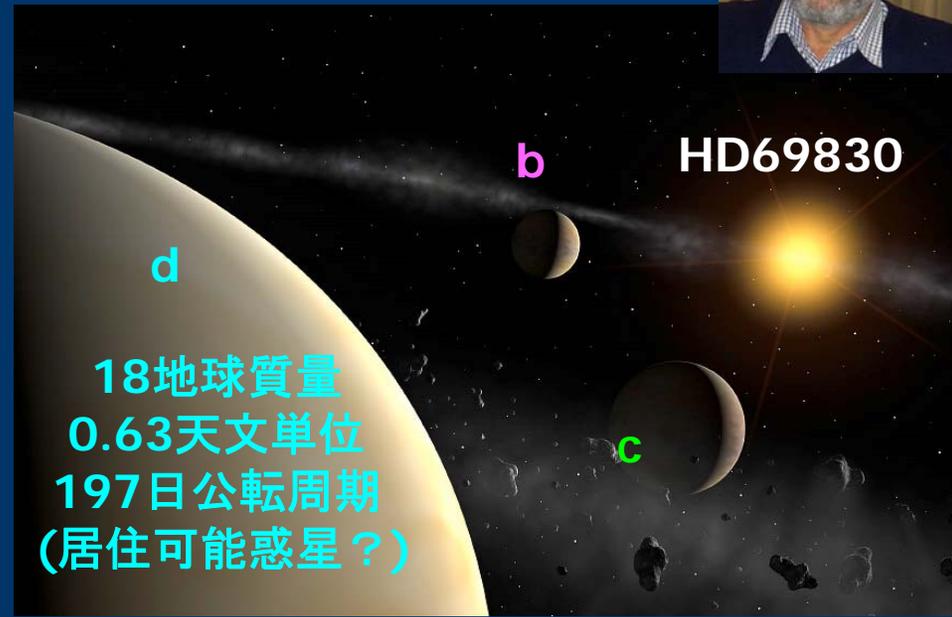
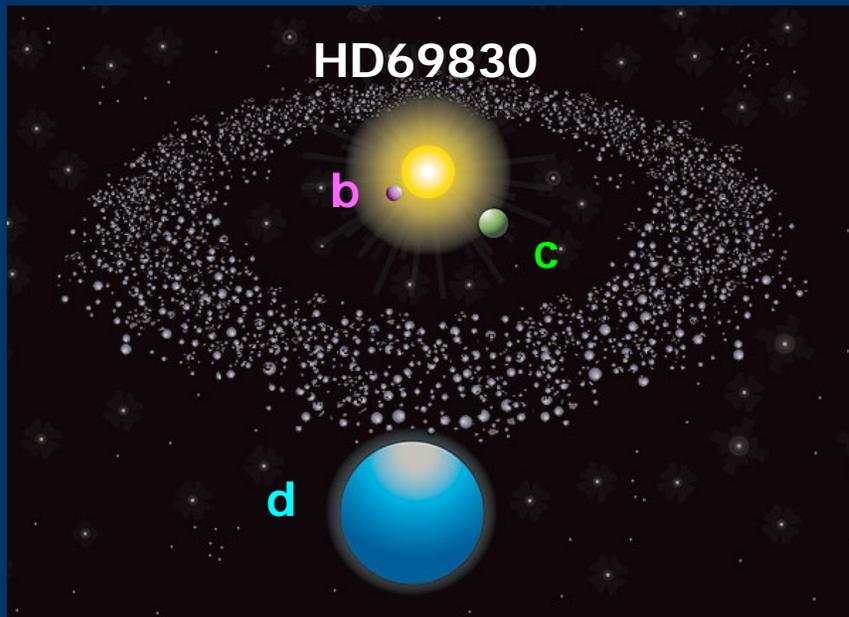


- ホットジュピター: tidal lockのためedge-onに近い
- 土星: 30度程度傾いているが太陽の自転が小さい
- いずれも不利なパラメータだが、検出可能範囲(S/N=1)ではある

# 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**

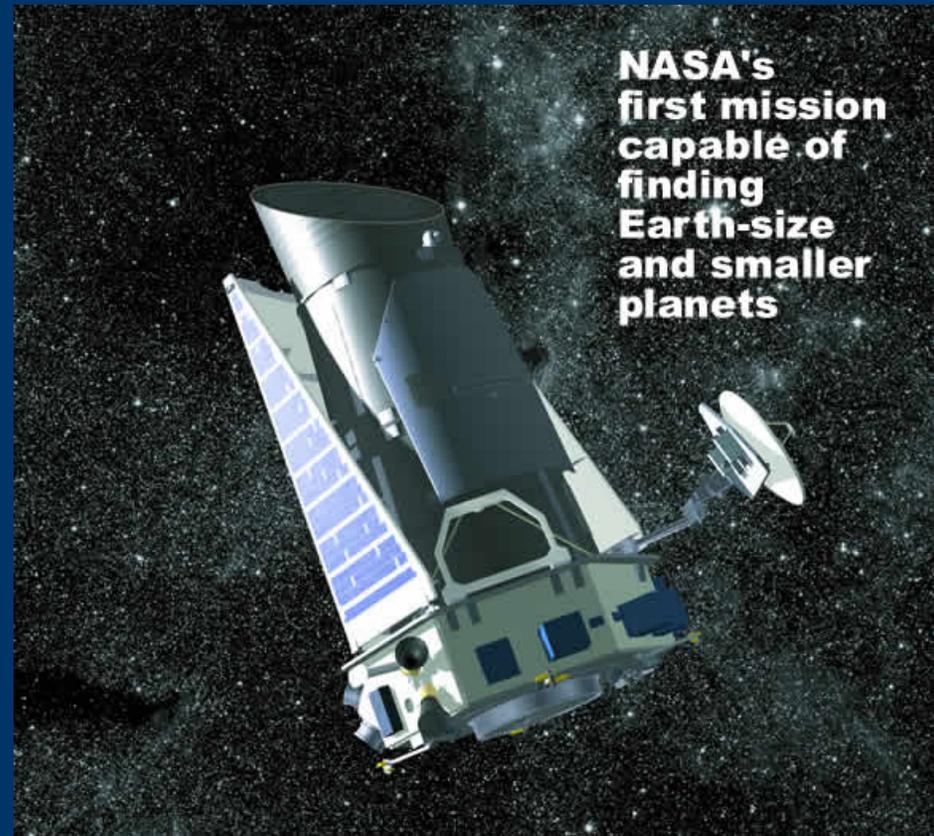
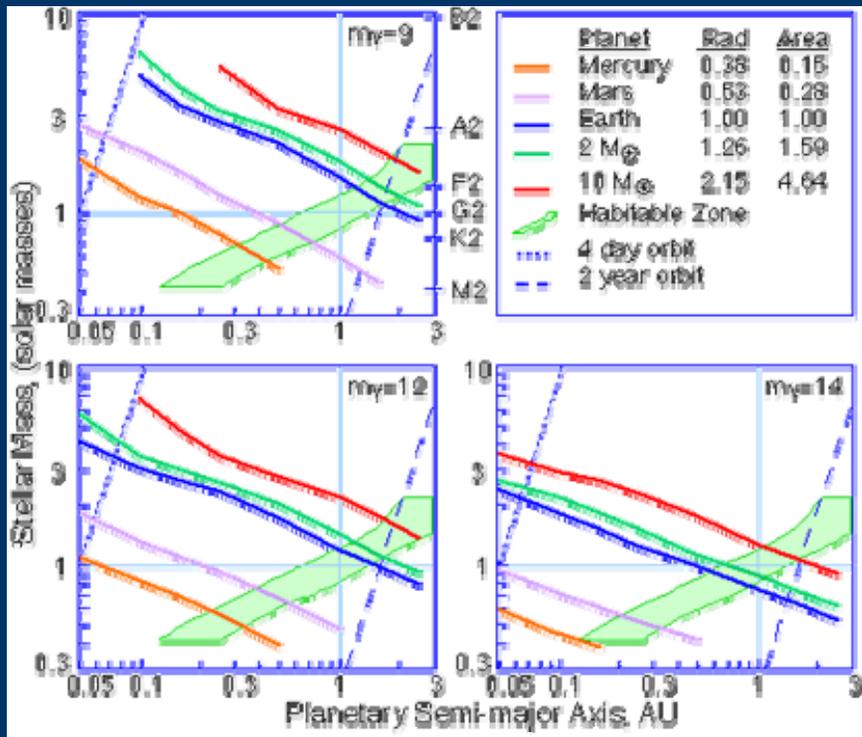
# 居住可能領域にある惑星の発見?



- 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)

# 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

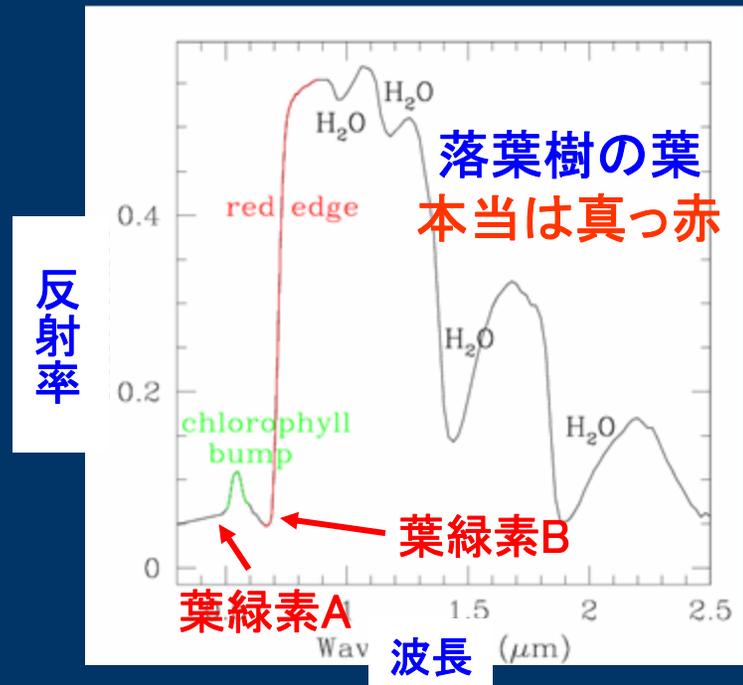
- （居住可能）地球型惑星を発見するだけでは、そこに生命があるかどうかはわからない

## ■ 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？

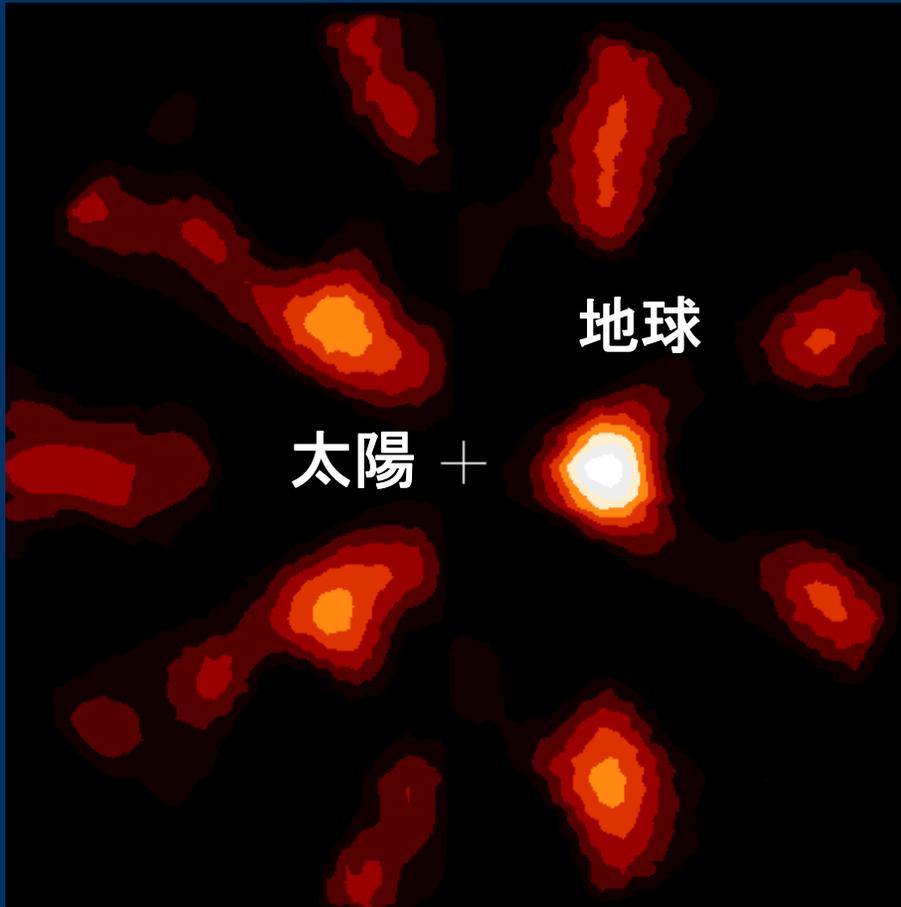
- 可能性は低くともこれ以上に確実なものはない
- まっとうなバイオマーカーではやはり隔靴搔痒



# ダーウィン衛星

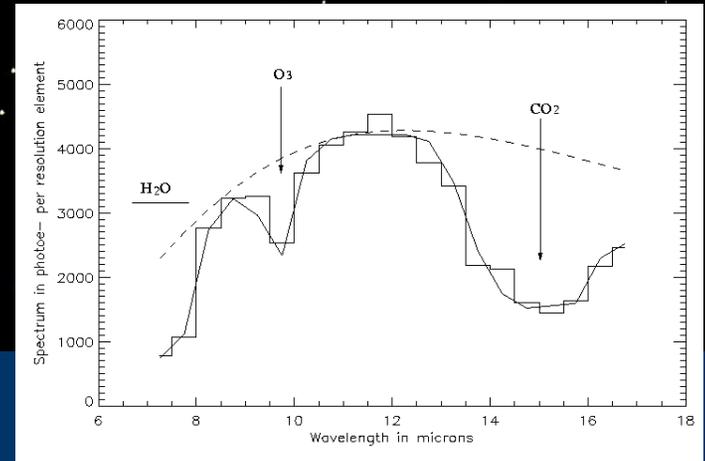
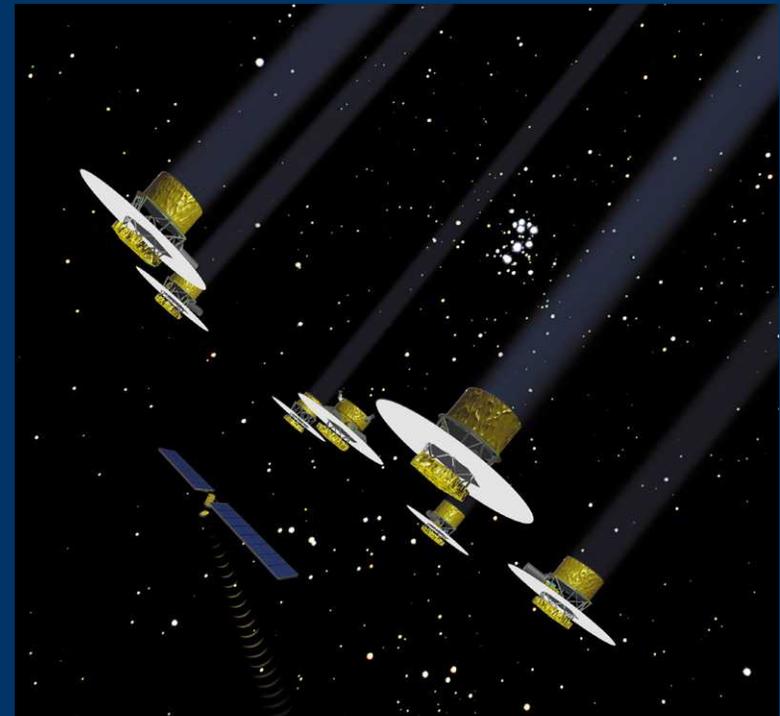
(欧州：2020年頃？打ち上げ)

赤外線での惑星の直接撮像を目指す



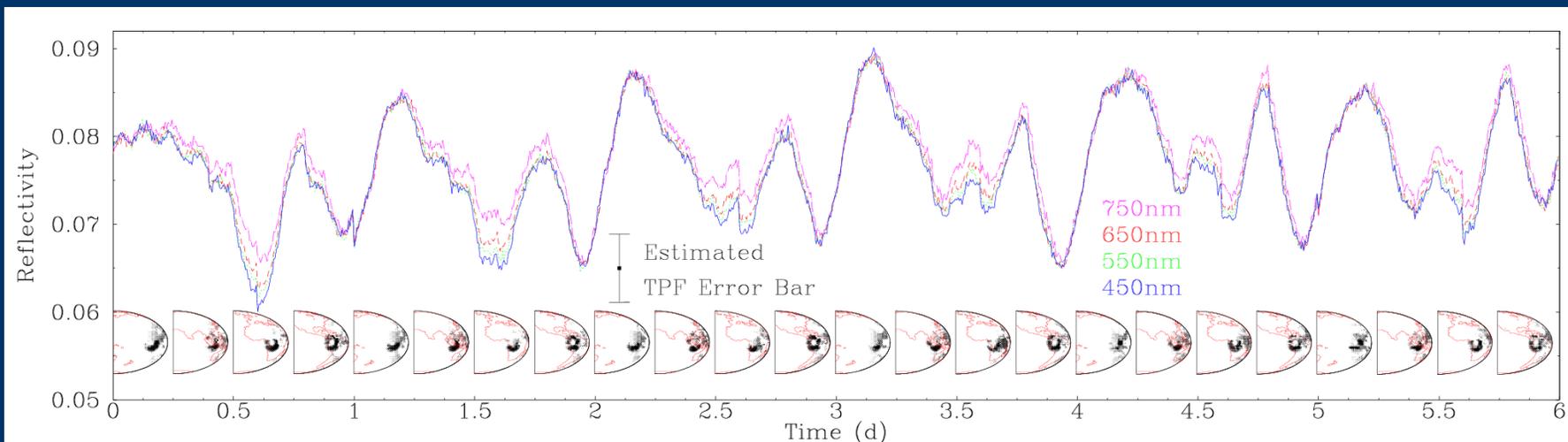
30光年先においた太陽と地球の観測予想図

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



宇宙赤外線干渉計群  
測光分光観測<sub>20</sub>

# 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！

# 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

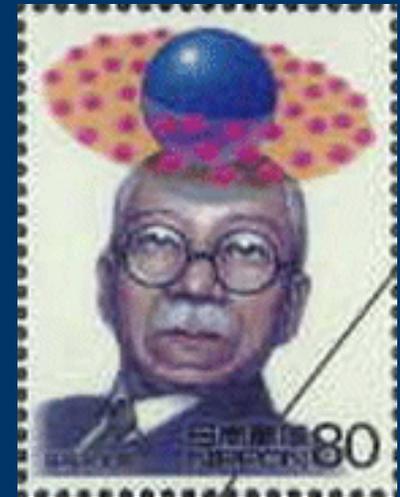


写真 2: 長岡半太郎 (1865-1950)

# 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？