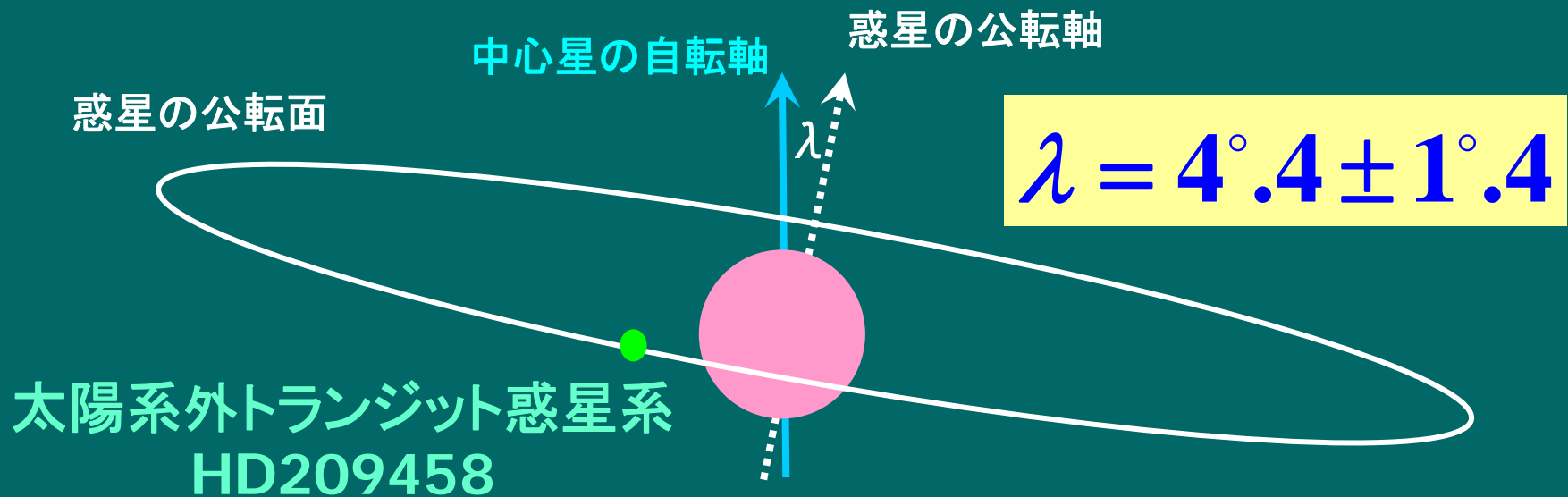


太陽系外惑星の公転軸は ちょっぴり傾いていた



東京大学 大学院理学系研究科
物理学専攻 須藤靖

2005年10月5日 日本天文学会秋季年会
記者発表プレゼンテーション@札幌 かでの2・7

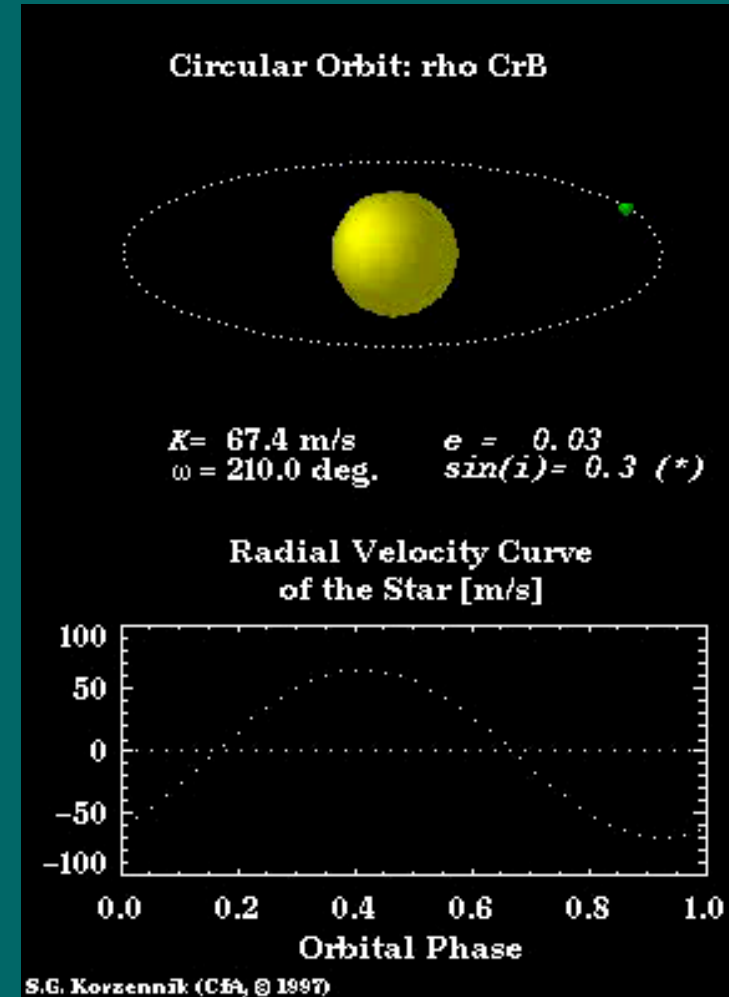
今回の結果の要約

- 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。この方法で系外惑星リング探査も有望！

太陽系外惑星観測の現状

- 1995年に初めて発見された
- 2005年9月時点で、138個の系外惑星系(うち、18個は複数の惑星をもつ)、惑星総数162個
- 中心星の速度変動(スペクトルの周期成分)の解析から惑星の存在(主として質量)が推測できる
- 発見の時代から性質の統計的理解の時代へ



トランジット(主星面通過)惑星とは

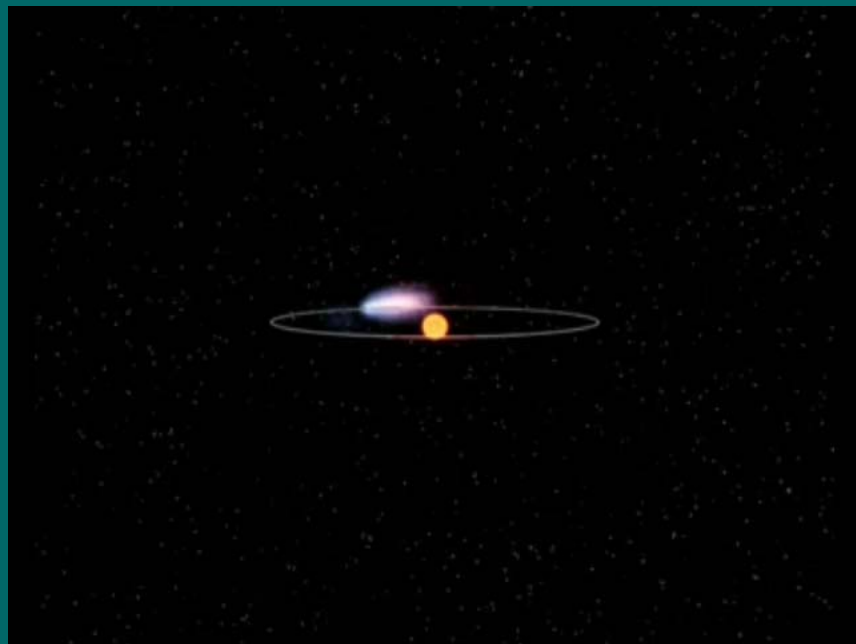
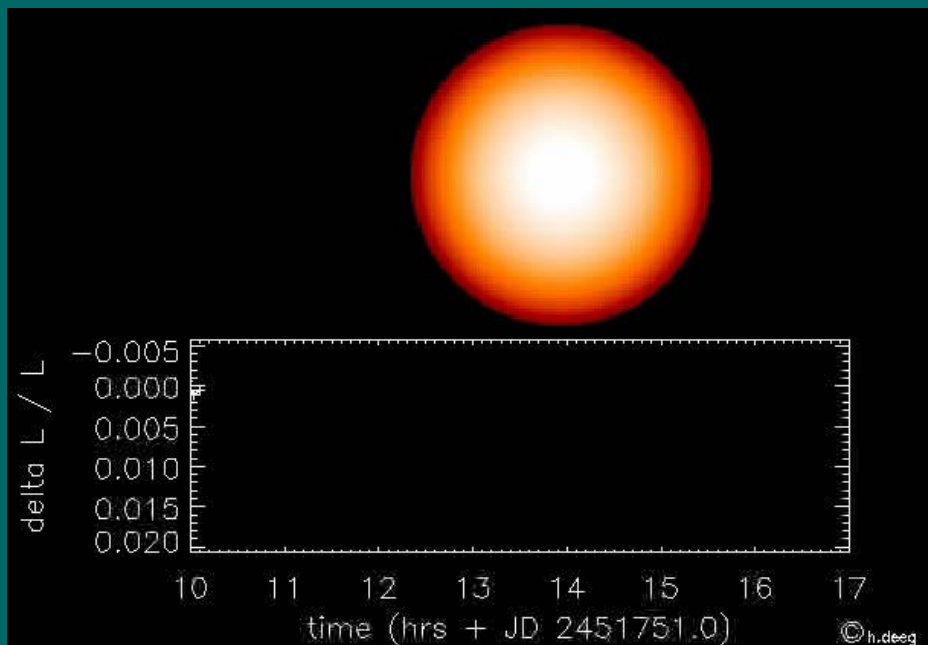
- **惑星系をより深く理解する手がかり**
 - 惑星が主星の前を通過する軌道にあり、主星の光の一部を隠すもの
 - 2005年9月時点で、8個が知られている
 - 中心星の光度変化の観測⇒惑星のサイズ
 - 精密分光観測データ解析⇒惑星大気組成
 - **中心星の自転速度、及び中心星自転軸と惑星公転軸のなす角度がわかる(今回の結果)**



最初に発見されたトランジット惑星系: HD209458

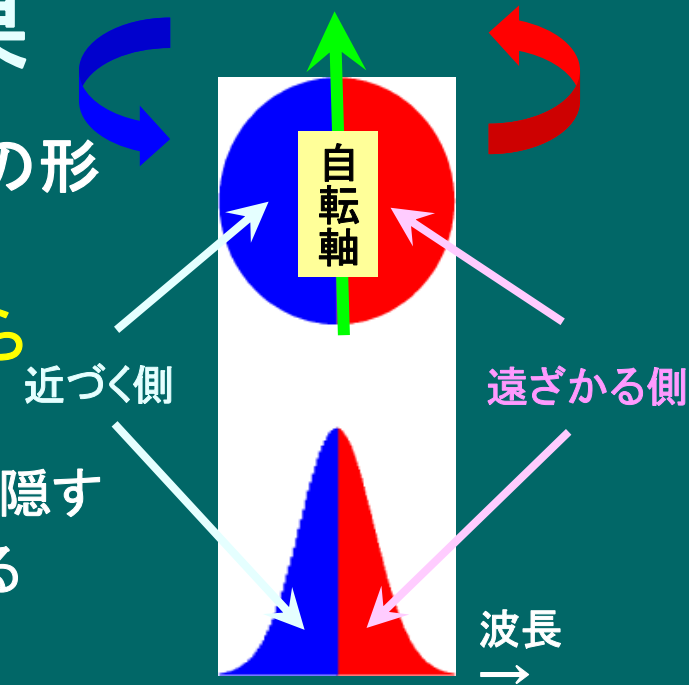
- 距離: 約150光年 (ペガサス座)
- 公転周期: 3.5日
- 質量: 0.63木星質量
- 半径: 1.4木星半径
- 密度: 0.4g/cc

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



検出原理： ロシター効果

- 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！



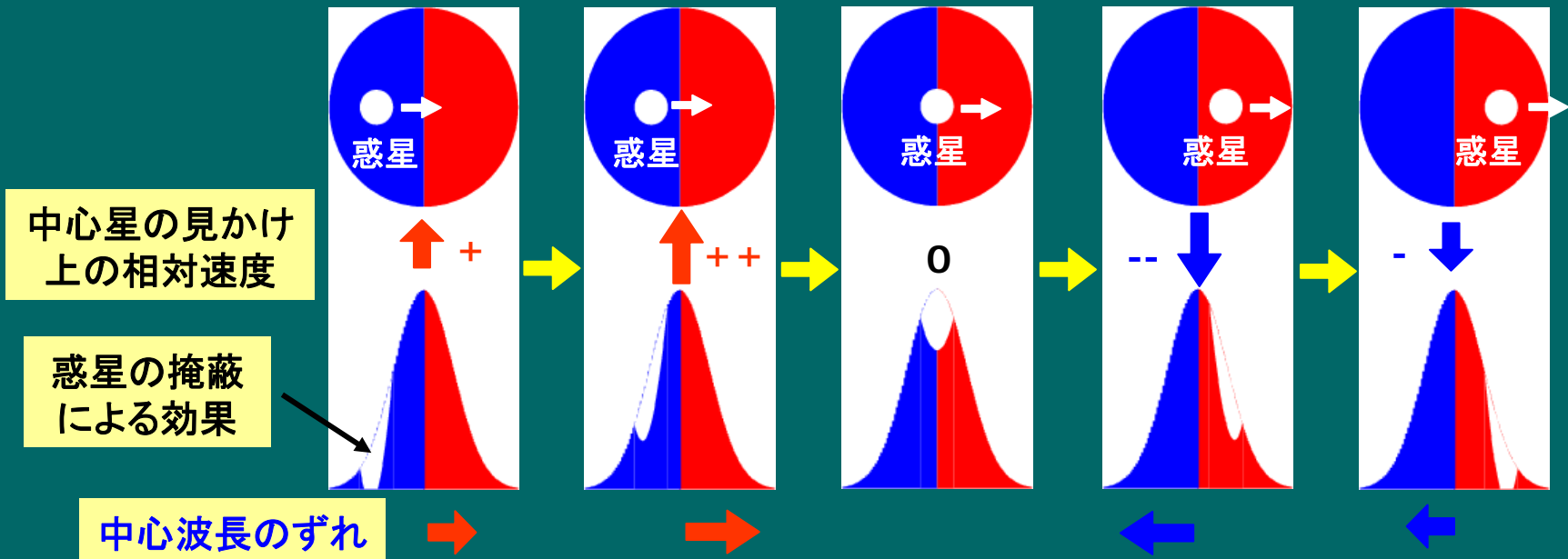
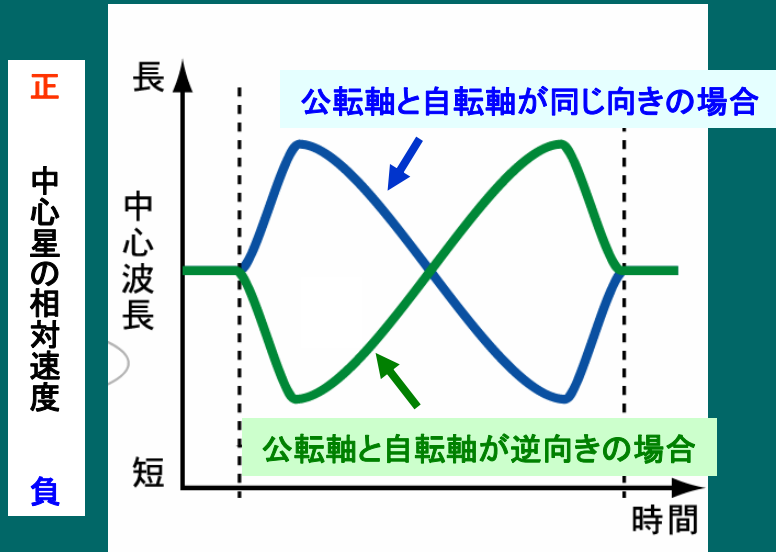
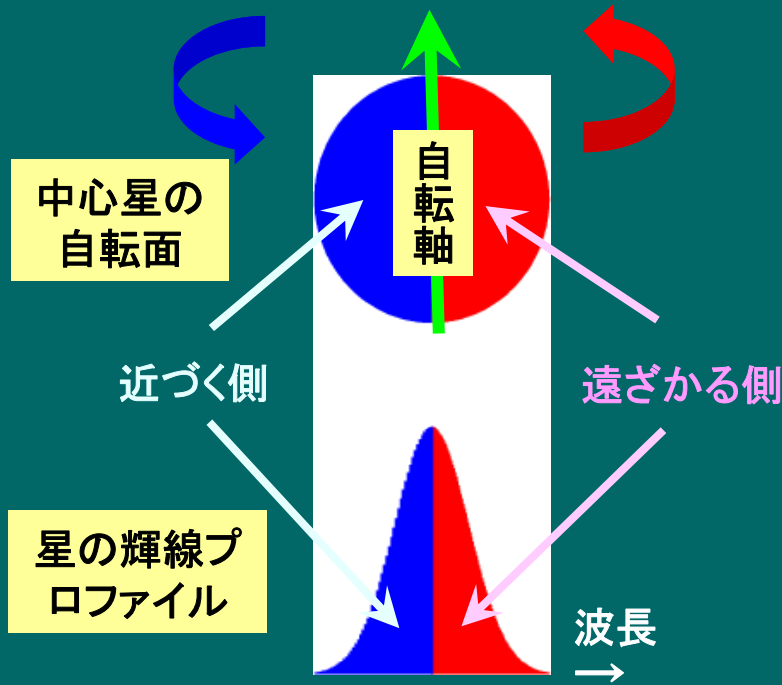
星の輝線プロフィール

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

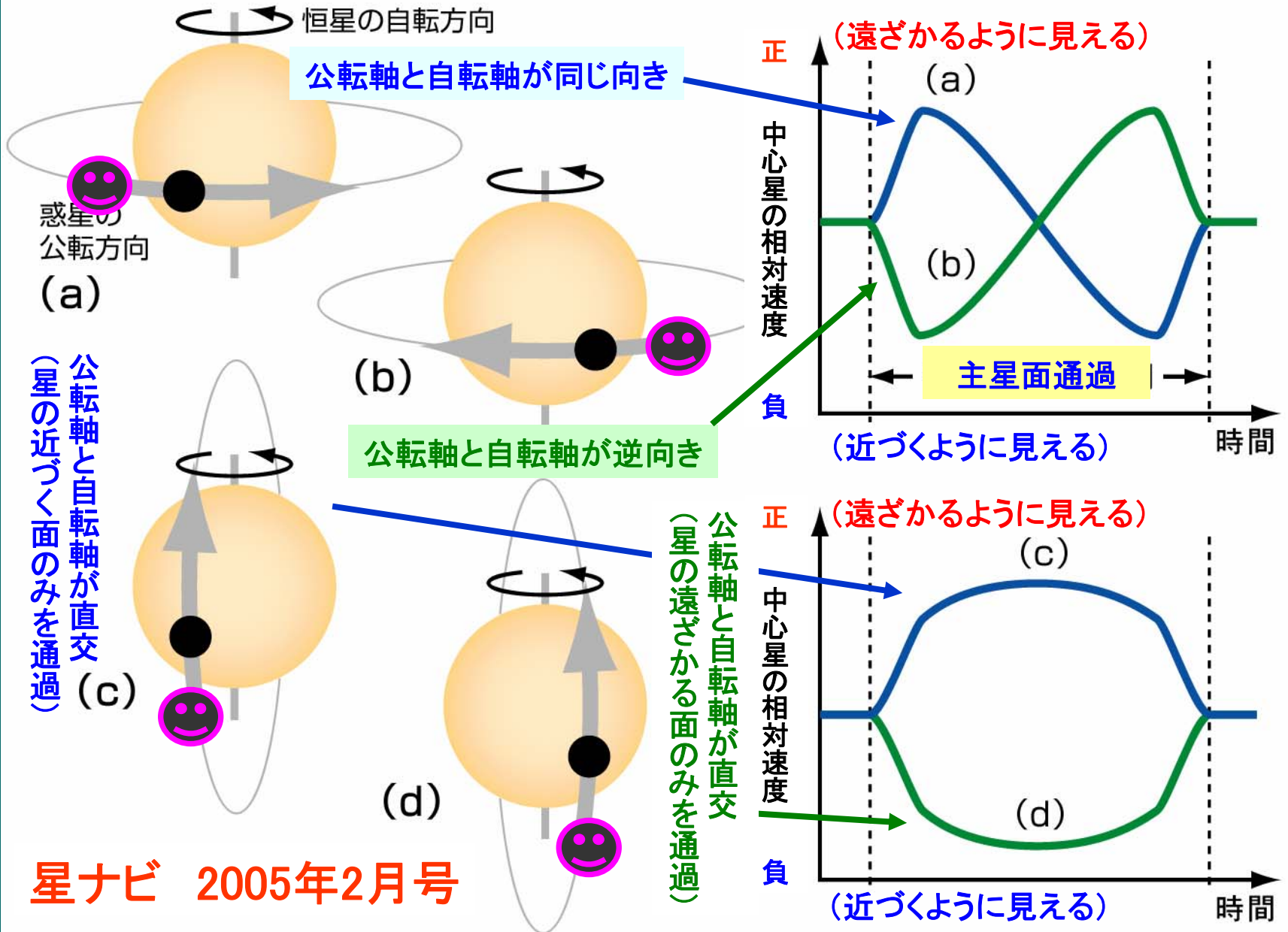
R.A. Rossiter:

The Astrophysical Journal 60(1924)15

ロシター効果の観測



惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図



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)

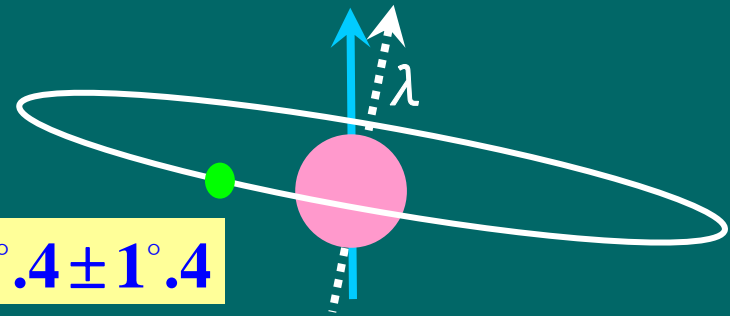
- Joshua N. Winn¹, Robert W. Noyes¹, Matthew J. Holman¹, David B. Charbonneau¹, 太田泰弘²、樽家篤史²、須藤靖²、成田憲保², Edwin L. Turner^{2,3}, John A. Johnson⁴, Geoffrey W. Marcy⁴, R. Paul Butler⁵, & Steven S. Vogt⁶
 - ¹ハーバード大学、²東京大学、³プリンストン大学、⁴カリフォルニア大学バークレー校、⁵ワシントン カーネギー研究所、⁶カリフォルニア大学サンタクルス校
- The Astrophysical Journal 631(2005)1215, 10月1日号掲載
- [astro-ph/0504555](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0504555)



わずかなズレの初検出！



$$\lambda = 4.4 \pm 1.4$$

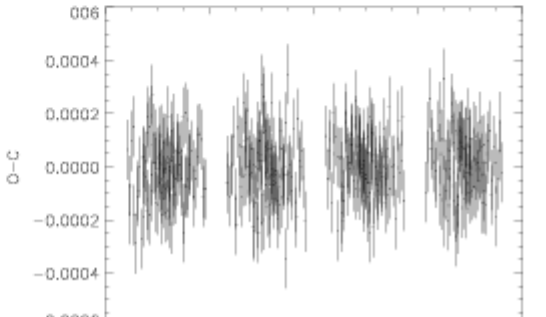
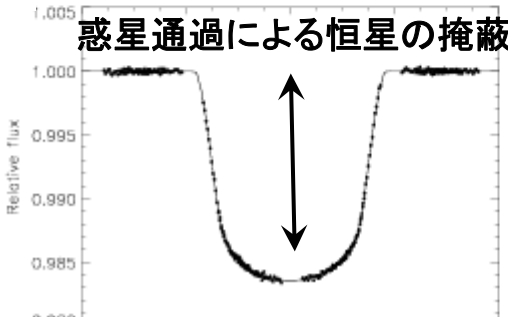
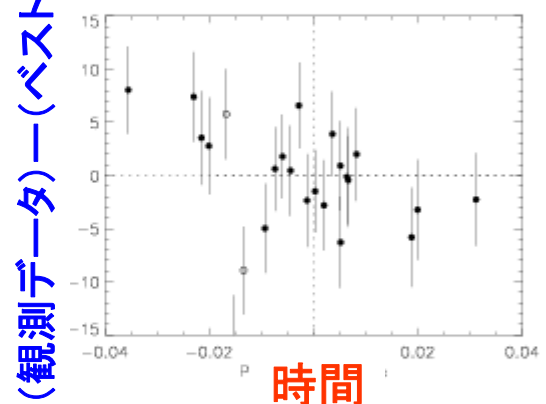
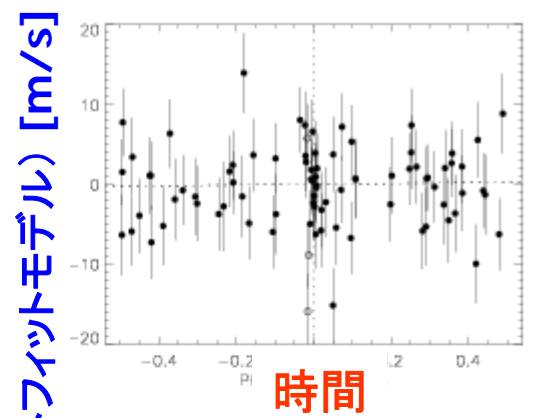
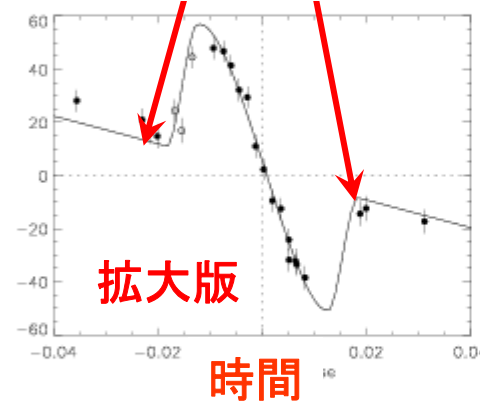
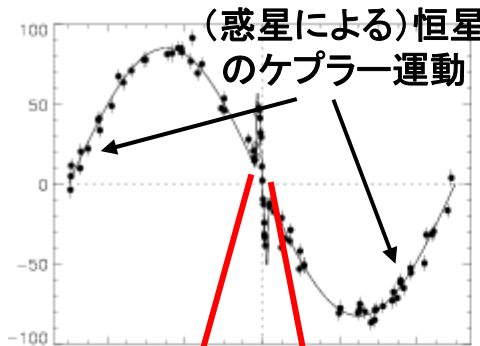


- 私の研究室の大学院生太田泰弘君の理論的研究が、共同研究者であるハーバード大学のJosh Winn氏を刺激した結果
- トランジット惑星 HD209458 のベストデータフィット
 - ケック天文台(ハワイの10m望遠鏡)による可視光での分光観測
 - ハッブル宇宙望遠鏡による可視光強度変動モニター
 - スピッツァー望遠鏡による赤外線強度変動モニター
- 主星の自転軸と惑星の公転軸が、(射影された)角度 λ にして 4.4 ± 1.4 度だけずれていることを発見
 - Queloz et al.(2000)の精度(約20度)を一桁以上向上
 - 太陽の場合、自転軸は系内惑星の全角運動量軸(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



恒星の相対速度 (ケック天文台)

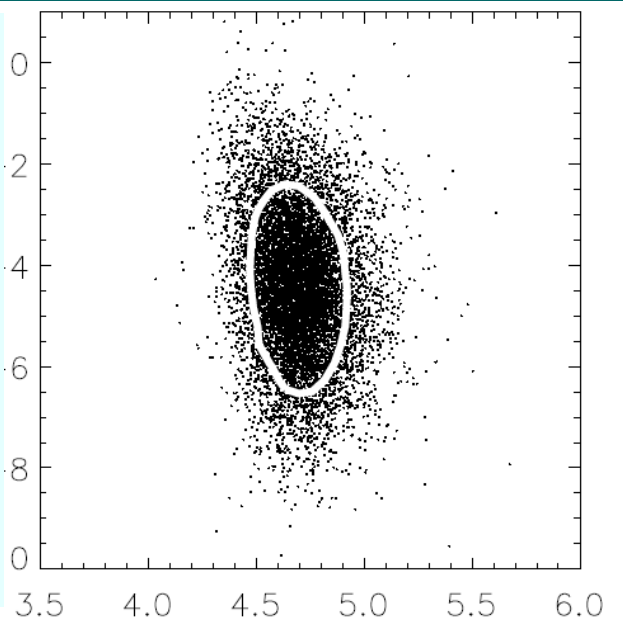
中心星の視線速度 [m/s]



トランジット中の恒星の光度曲線 (ハッブル望遠鏡)

解析結果

自転軸と公転軸のなす角 [度]



$$\lambda = 4^\circ.4 \pm 1^\circ.4$$

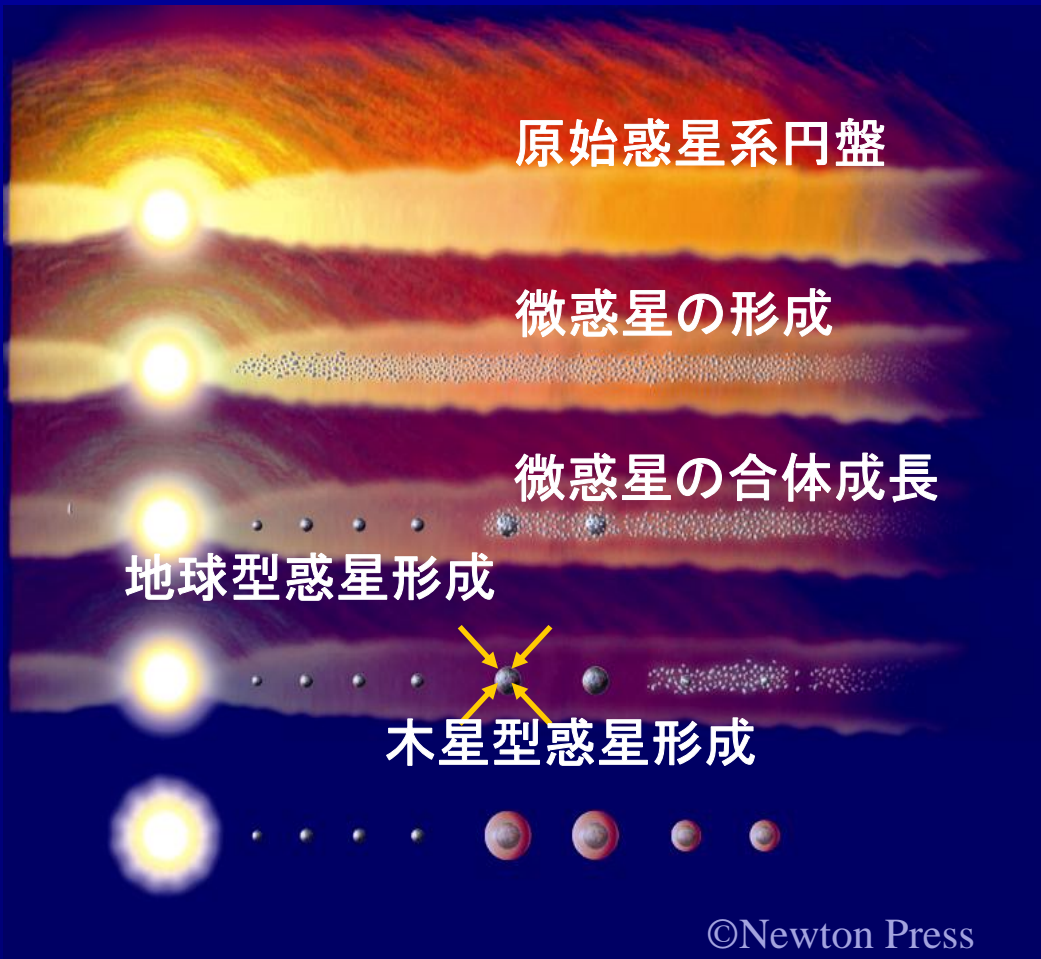
わずかではあるが有意に0からずれている!

まとめ

- 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に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。この方法で系外惑星リング探査も！

補足説明資料

(参考) 太陽系形成標準理論

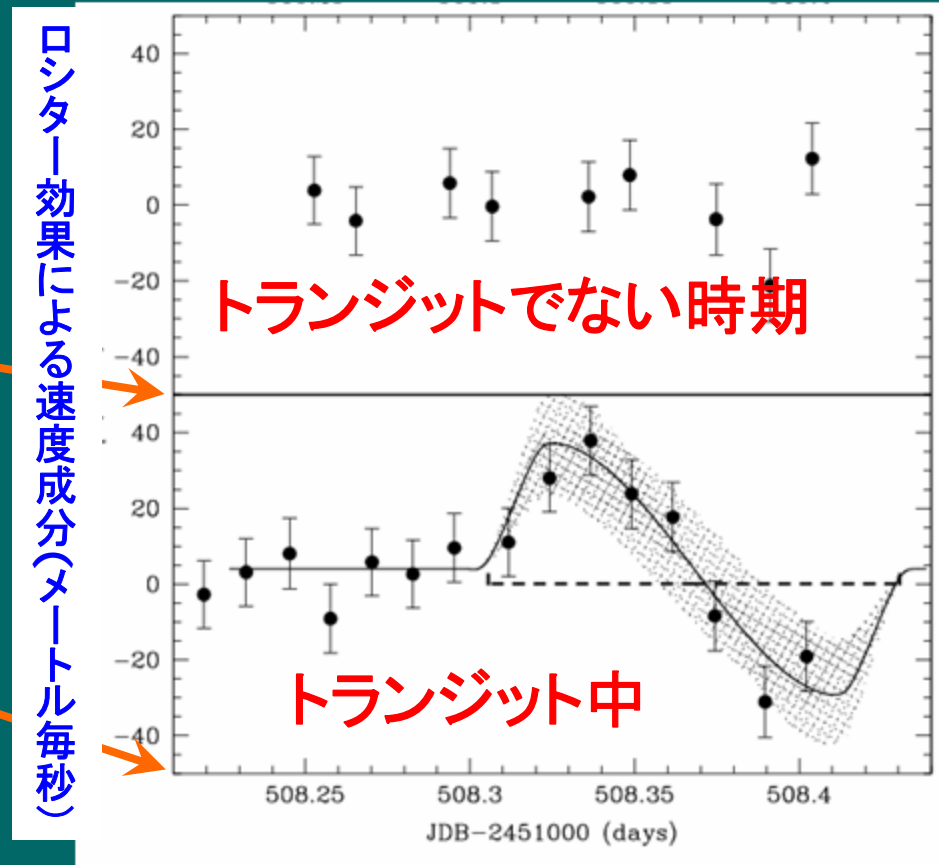
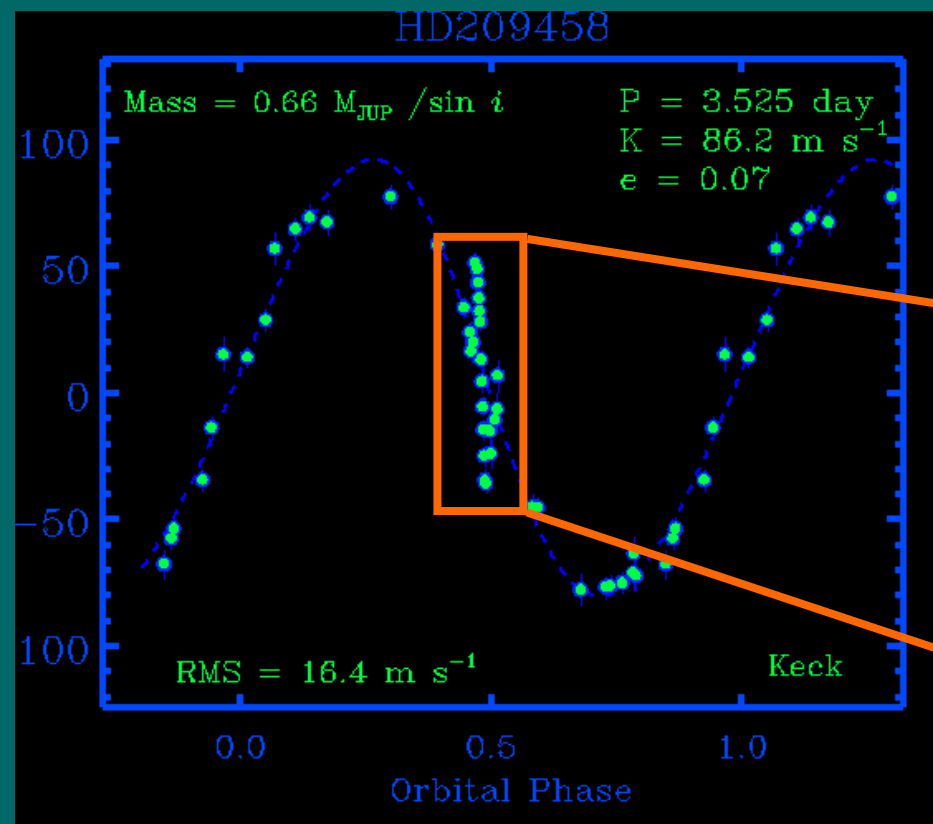


- **京都モデル**
 - 林忠四郎@京都大学
天体核研究室
- **原始惑星系円盤**
 - H, Heガス: 99%質量
 - 固体成分: 1%の質量
- **微惑星仮説**
 - 固体成分がまず凝集
 - その後ガス成分が降着

©ニュートンプレス、井田茂@東工大

(参考)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

(参考) パラメータフィット

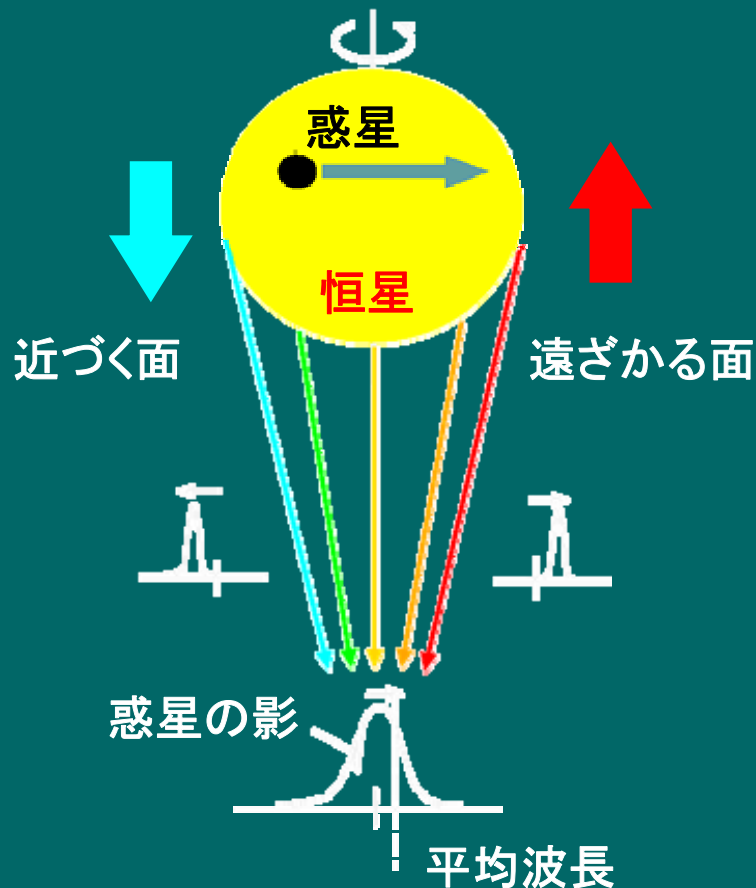
$$\chi^2 = \sum_{n=1}^{83} \left(\frac{v_{\text{obs}} - v_{\text{model}}}{\sigma_v} \right)^2 + \sum_{n=1}^{417} \left(\frac{f_{\text{obs}} - f_{\text{model}}}{\sigma_f} \right)^2 + \left(\frac{t_{2nd,obs} - t_{2nd,model}}{\sigma_t} \right)^2$$

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

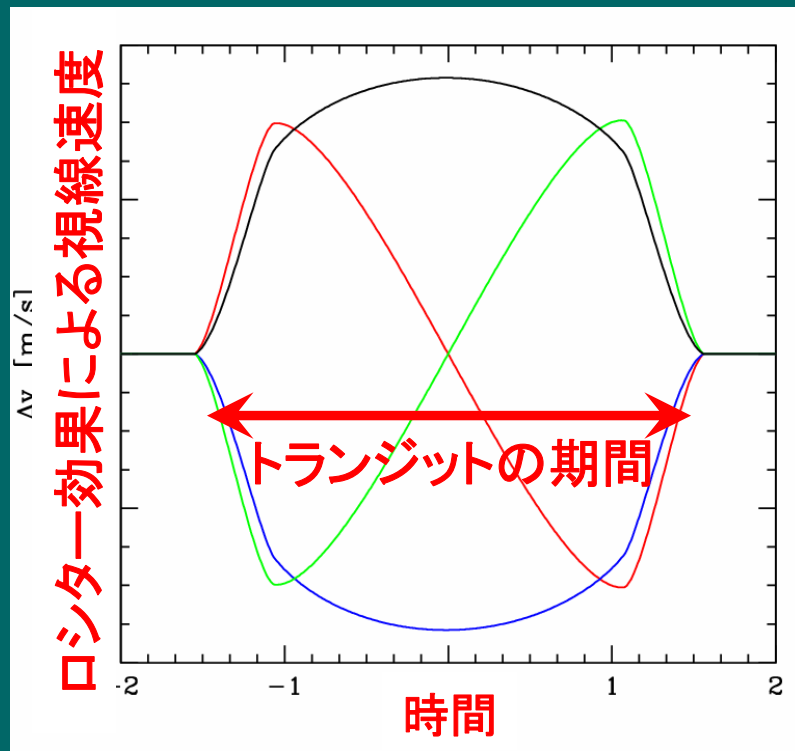
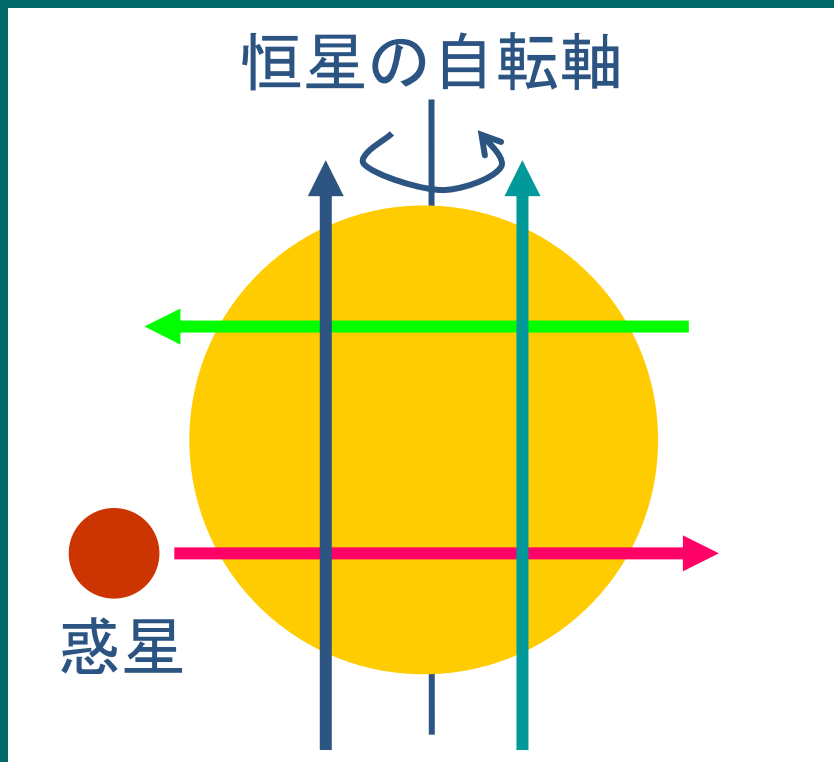
(補足) ロシター効果とは？

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)



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

(補足) 惑星の公転軸と主星の自転軸の関係



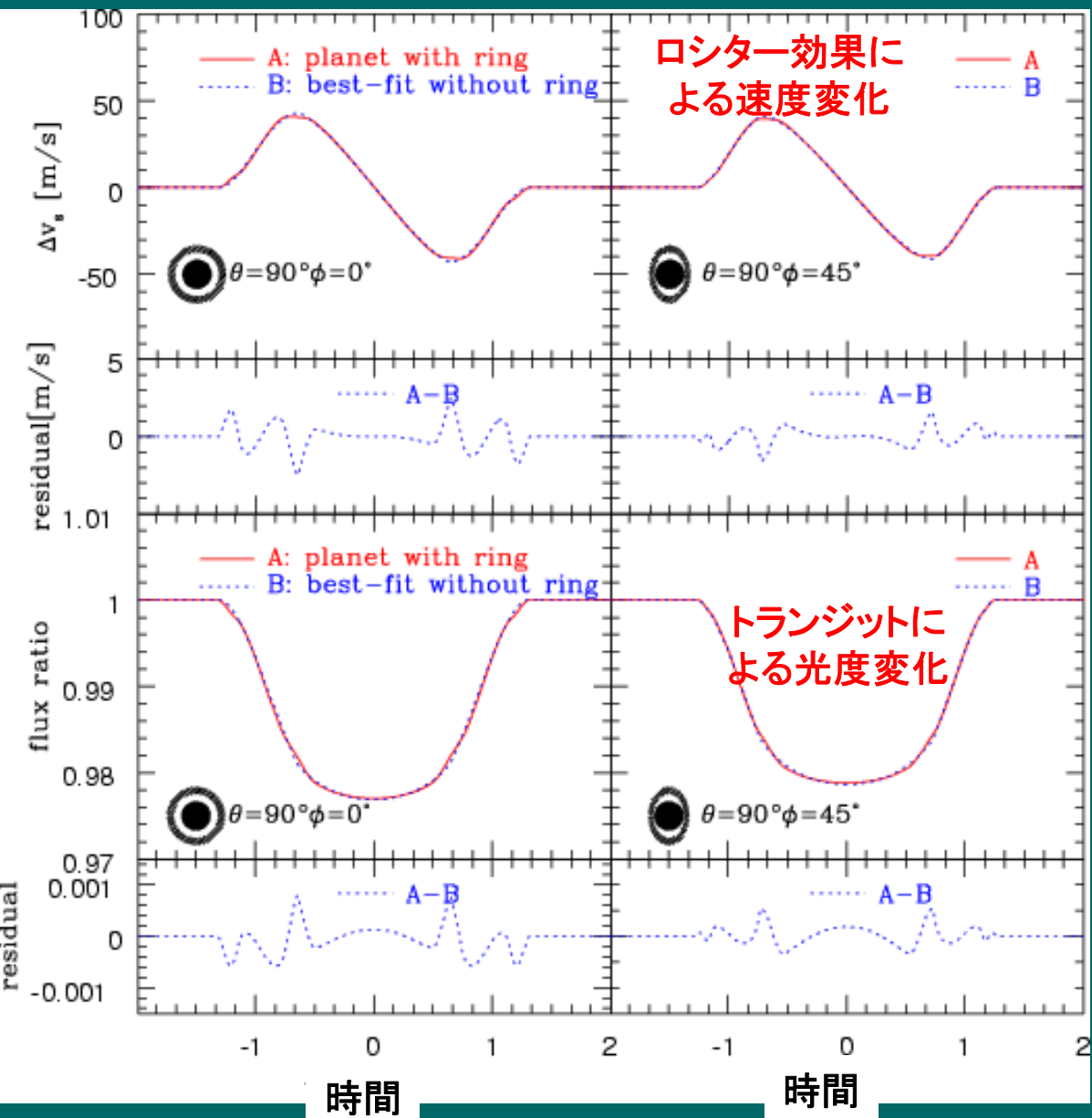
恒星の自転軸に対して惑星が横切った方向がわかる

⇒ 惑星の公転軸と恒星の自転軸の向きの関係

(HD209458系の場合はほぼ揃っている)

⇒ 惑星系の形成、進化に関する重要な情報

(参考) 系外惑星リングの検出可能性



- HD209458に似たトランジット惑星系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: $2R_{\text{木星}}$
- リングがない場合の予想とのズレ
 - 速度: 1m/s程度
 - 光度変化: 数ミリパーセント程度
- ほとんど現在の測定精度と同じ! もし存在すれば近い将来検出可能