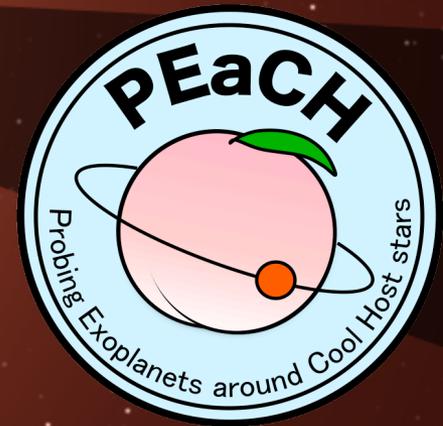


# 長期継続観測によるトランジット 惑星の歳差運動の直接測定

鬼塚昌宏(総研大・国立天文台D2)

共同研究者

成田憲保、福井暁彦(国立天文台)、平野照幸(東工大)、  
ほかPEaCHグループ

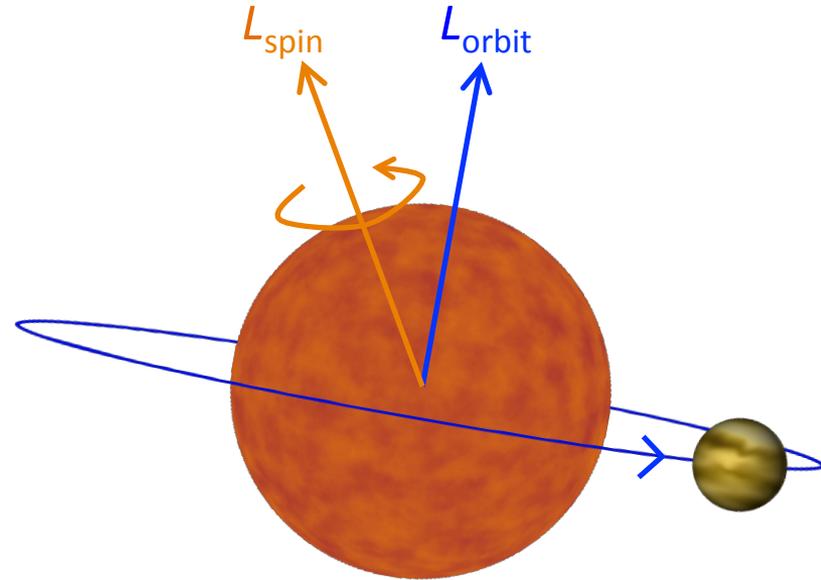


2015/8/17-18 岡山ユーザーズミーティング

# Introduction

惑星公転軸と主星自転軸のなす角  
(spin-orbit misalignment)

- 連星系における重力摂動(古在効果)や惑星同士での散乱などによって傾斜角が変化
- 惑星形成や軌道進化の議論



太陽系では $3^{\circ}$ - $7^{\circ}$ の範囲で揃っているが、系外惑星では揃っているものといないもの両方が存在 → 連星や巨大惑星の存在を示唆

- HD189733b ( $1.4 \pm 1.1^{\circ}$ )
- HAT-P-1b ( $3.7 \pm 2.1^{\circ}$ )
- HAT-P-30b ( $74 \pm 9^{\circ}$ )
- WASP-17b ( $-147^{\circ} \begin{smallmatrix} +49 \\ -11 \end{smallmatrix}$ )

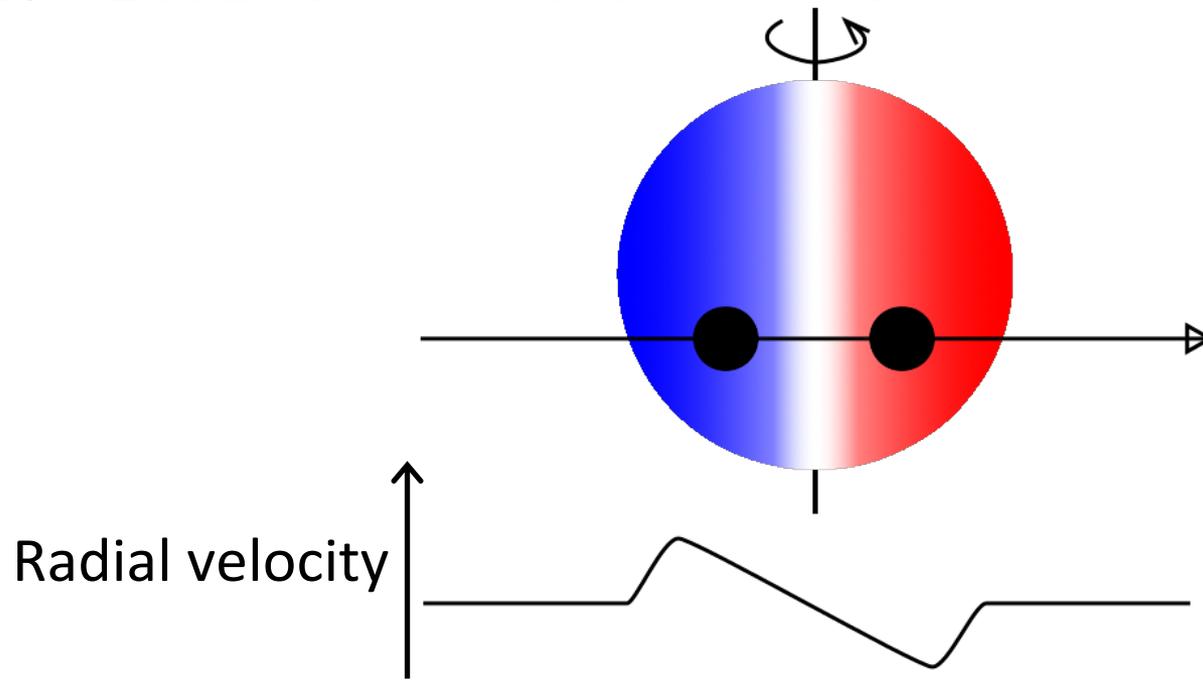
# Introduction

- トランジット時に視線速度測定をしたとき、惑星が主星のどの部分を覆っているかにより見かけの視線速度が変化

## Rossiter-McLaughlin効果

- 視線速度変化の形状により、spin-orbit misalignmentを測定することが可能

ただし、**高速自転星**ではスペクトル線が広がってしまうため、**視線速度を利用した観測は難しくなる**



# Introduction

通常のトランジットモデル：星の表面輝度は周辺減光を除き均一



重力減光モデル：

高速自転星では遠心力によって赤道付近が膨張

赤道のガスの圧力・温度が下がるため輝度は極に対して暗くなる

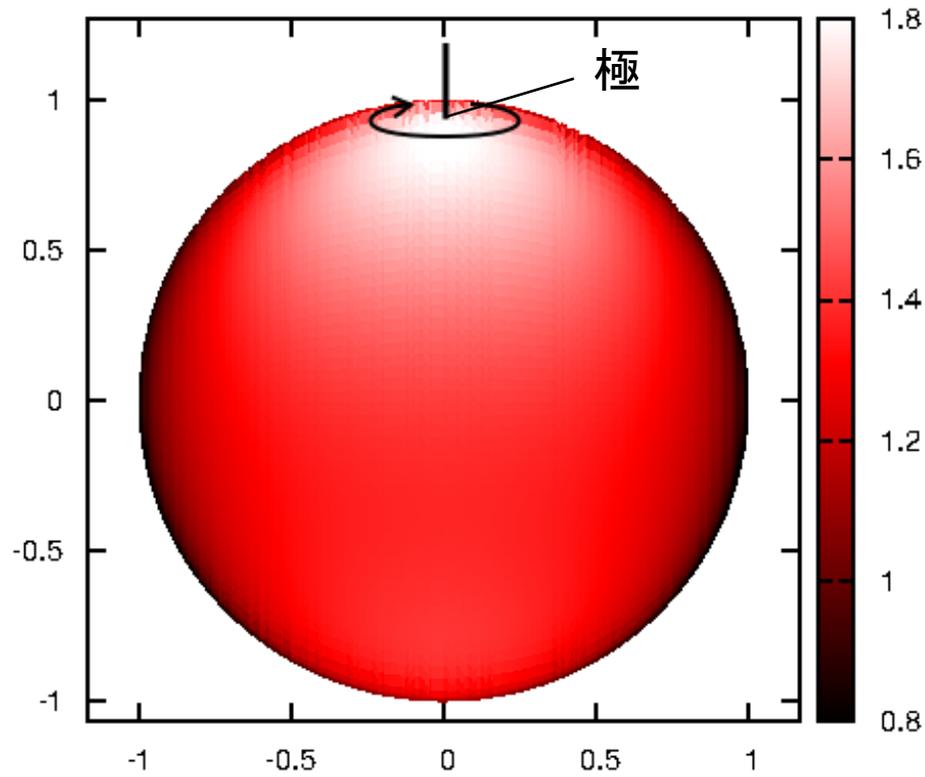
$$g(x, z) = \left| -\frac{GM_s}{R^2} \hat{\mathbf{r}} + \Omega^2 R_{\perp} \hat{\mathbf{r}}_{\perp} \right|$$
$$= \frac{GM_s}{R_s^2} - \Omega^2 R_s \cos \phi_L$$

$$T = T_{\text{pole}} \frac{g^{\beta}}{g_{\text{pole}}^{\beta}} \quad \beta : \text{gravity darkening parameter} \sim 0.25$$

→ 表面輝度は緯度に依存

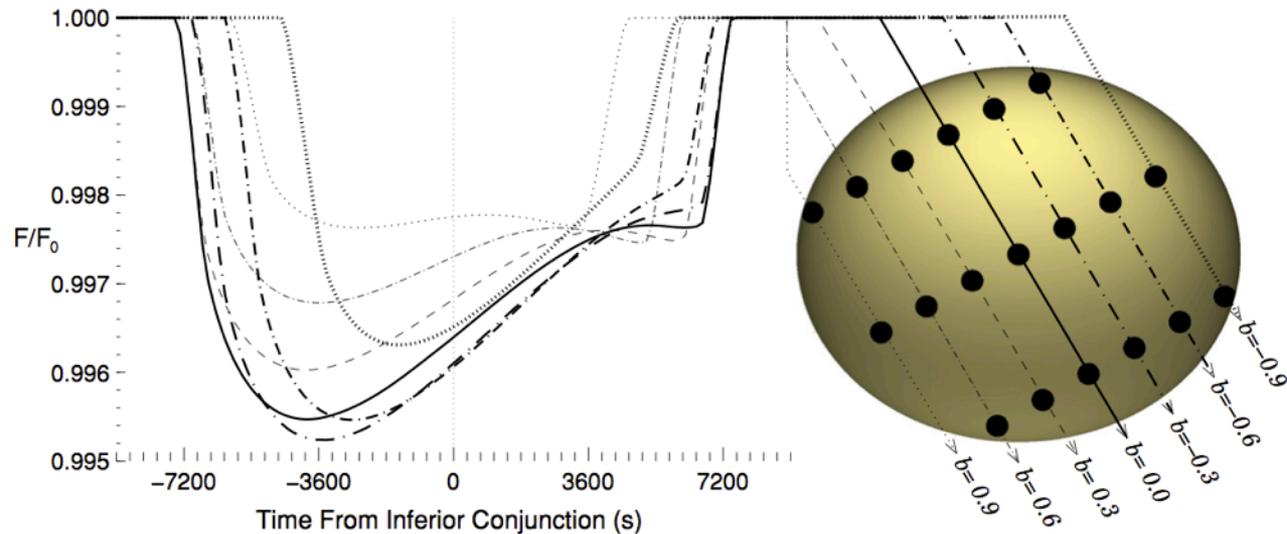
Gravity darkening

(von Zeipel, 1924)



# Introduction

トランジットの減光量は、惑星が隠した位置の表面輝度を反映するため、重力減光によってライトカーブの形状が変化する



重力減光を受けたトランジットライトカーブのシミュレーション  
(Obliquity  $30^\circ$ , spin-orbit misalignment  $60^\circ$  のとき)

Barnes (2009)

重力減光モデルを用いるとライトカーブ形状から  
spin-orbit misalignmentを測定することが可能となる

# Introduction

トランジット惑星のSpin-orbit misalignment測定方法のまとめ

## 重力減光

測光観測

高速自転星に向く

## Rossiter-McLaughlin効果

分光観測

低速自転星に向く

重力減光とRM効果は主星自転速度について相補的な関係

- これまでのトランジット観測による重力減光の観測例

Kepler-13 – Barnes et al. (2011)

PTFO 8-8695 (CVSO30) – Barnes et al. (2013)

KOI-368 – Ahlers et al. (2014)

本研究で観測

# トランジットホットジュピターCVSO 30b

主星(Briceño et al. 2005より)

➤M3型Weak-lined T-Tauri star

➤半径 :  $1.07 \pm 0.10 R_{\odot}$

➤質量 :  $0.34 M_{\odot}$  Siess et al. (2000) Model,  $0.44 M_{\odot}$  Baraffe et al. (1998) Model

➤有効温度 : 3470 K

➤射影自転速度 :  $80.6 \pm 8.1$  km/s **高速自転星**

惑星(van Eyken et al. (2012) により発見)

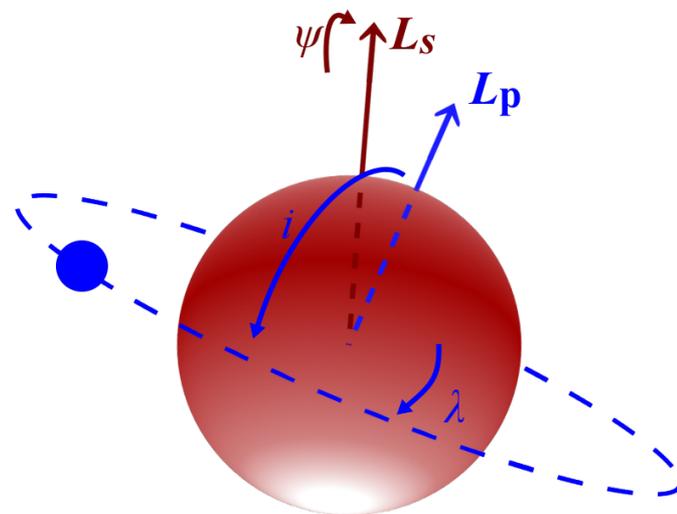
➤軌道周期  $P = 0.448413 \pm 0.000040$  days

➤軌道長半径  $0.00838 \pm 0.00072$  AU

➤軌道傾斜角  **$61.8 \pm 3.7^{\circ}$**

➤半径 :  $1.91 \pm 0.21 R_{\text{Jup}}$

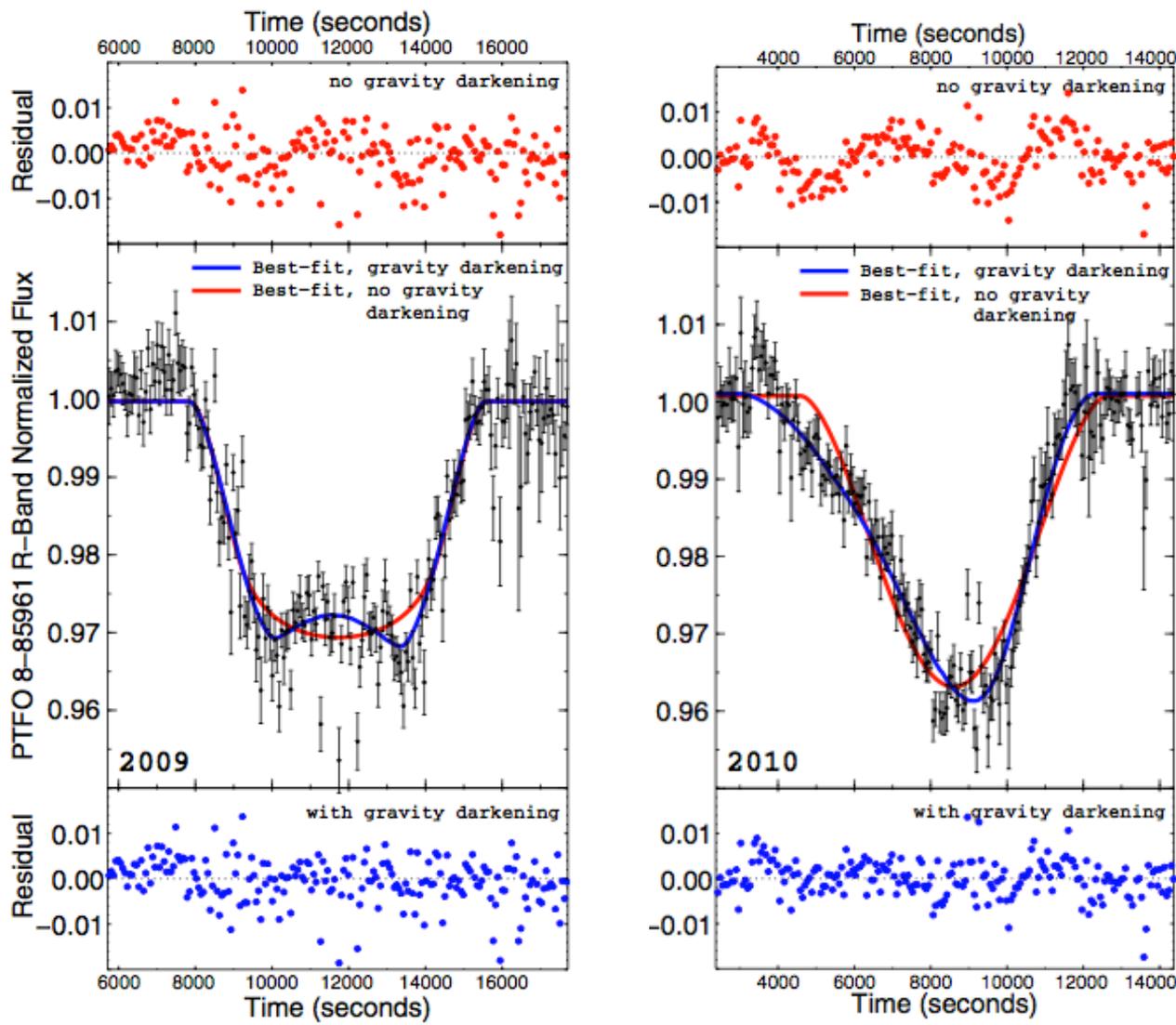
➤質量  $< 5.5 \pm 1.4 M_{\text{Jup}}$  (視線速度測定より。高速自転星のため、上限のみ)



数百日周期の歳差運動によって天球面上に投影したspin-orbit misalignmentや軌道傾斜角が変化していることが指摘される(Barnes et al., 2013)

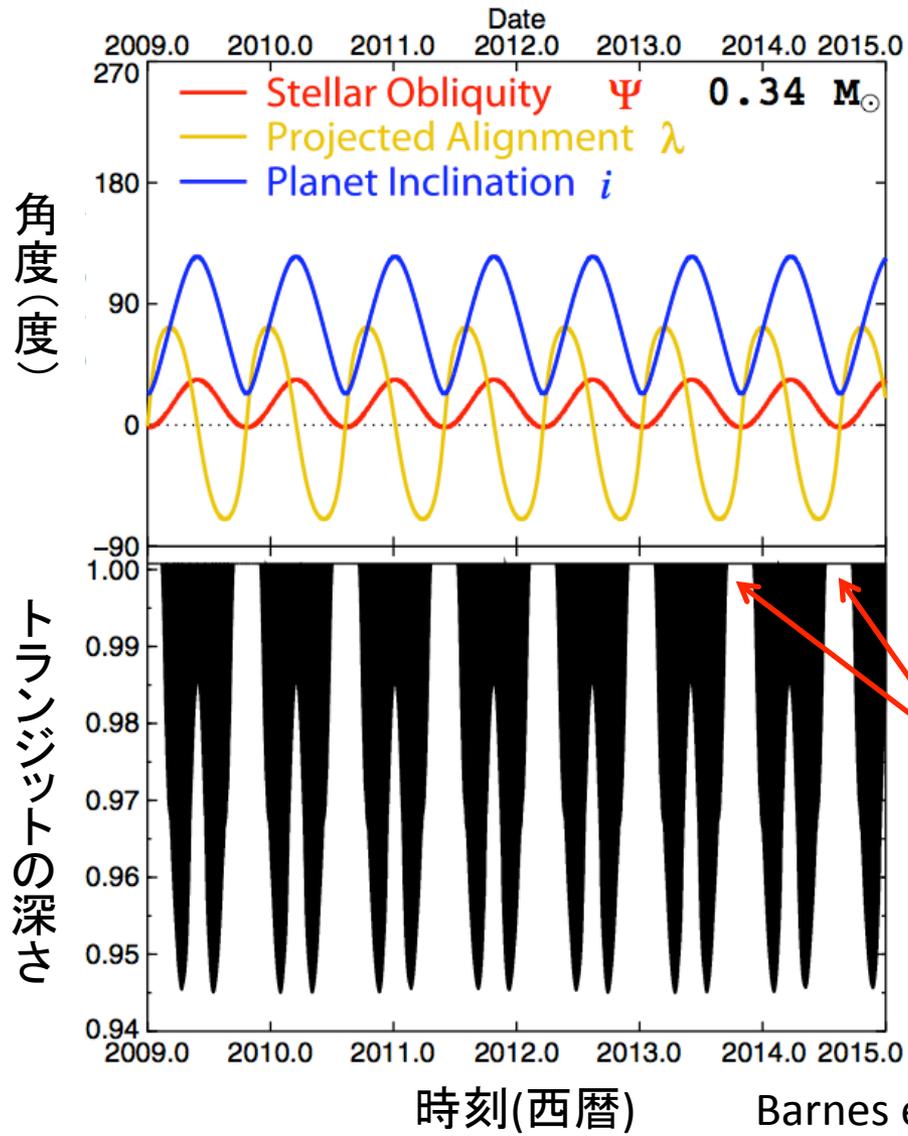
# CVSO30のトランジットライトカーブ

- ライトカーブが重力減光モデルでよくフィット(Barnes et al., 2013)
- 1年でライトカーブの形状が大きく変化



- 重力減光なし
- 重力減光あり

# 歳差運動がトランジットに及ぼす影響



重力減光トランジットモデルから得られた惑星の軌道パラメータから、主星自転軸と惑星公転軸の歳差運動を計算。

歳差の周期は  
293日 or 581日 (Barnes et al. 2013)  
199日 or 475日 (Kamiaka et al. 2015)

歳差運動に伴ってトランジット深さが周期的に変動

深さゼロ=トランジットを起こさない

Barnes et al. (2013)

# 本研究のモチベーション

## 先行研究

- 観測が可視光(Rバンド)で行われており、黒点などの主星の変動に大きく影響を受けるため、トランジットライトカーブ形状の変化は歳差ではなく黒点によるものである可能性もある
- 歳差の周期は正確に求められていない(100日のオーダー)

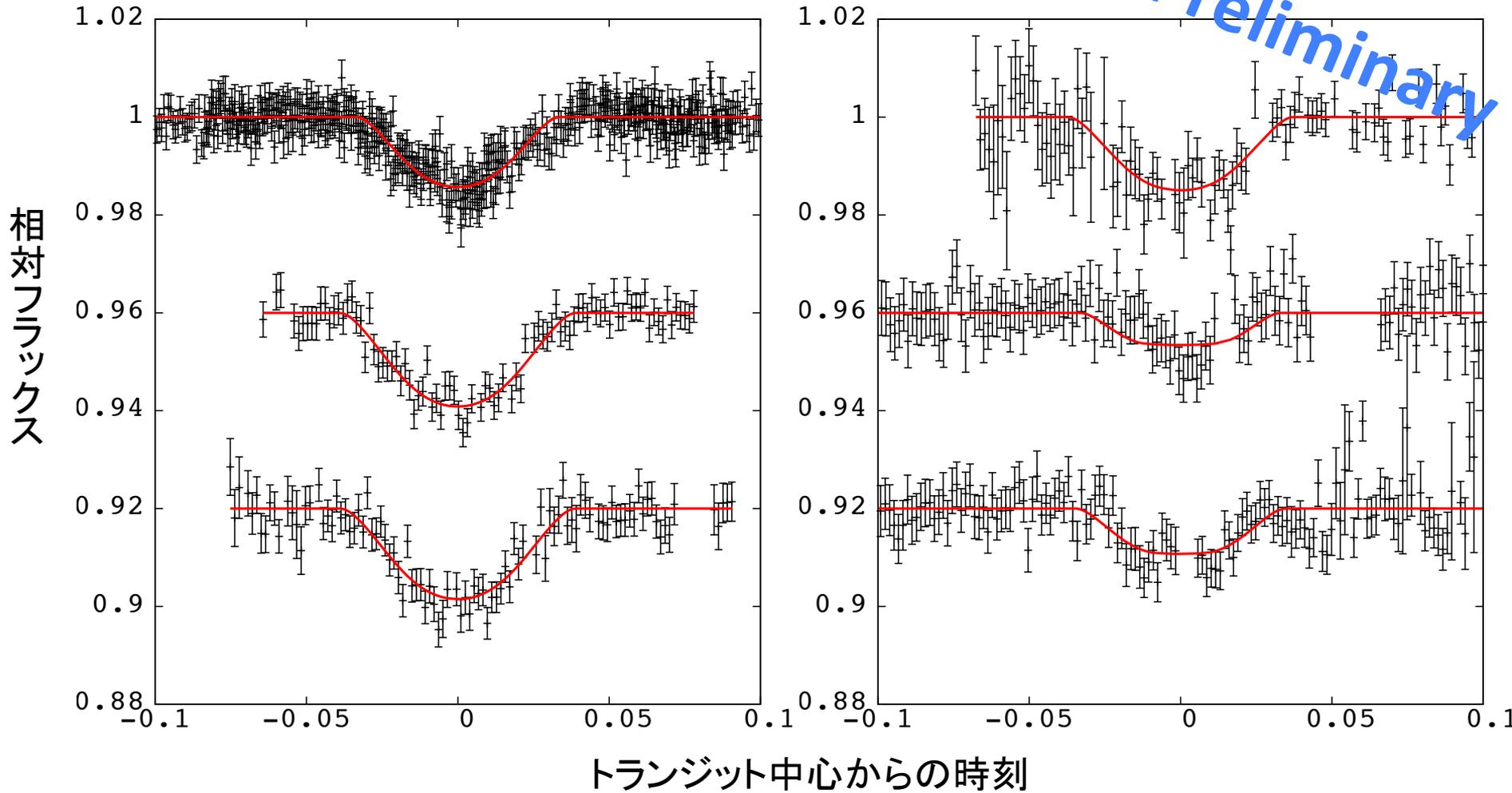
## 本研究では

- ISLEを用いて近赤外領域(Jバンド)で観測することにより、黒点による変動の影響を最小限におさえ、黒点ではなく歳差運動のみでライトカーブ変動を説明できることを確認する
- 長期観測により歳差の周期を

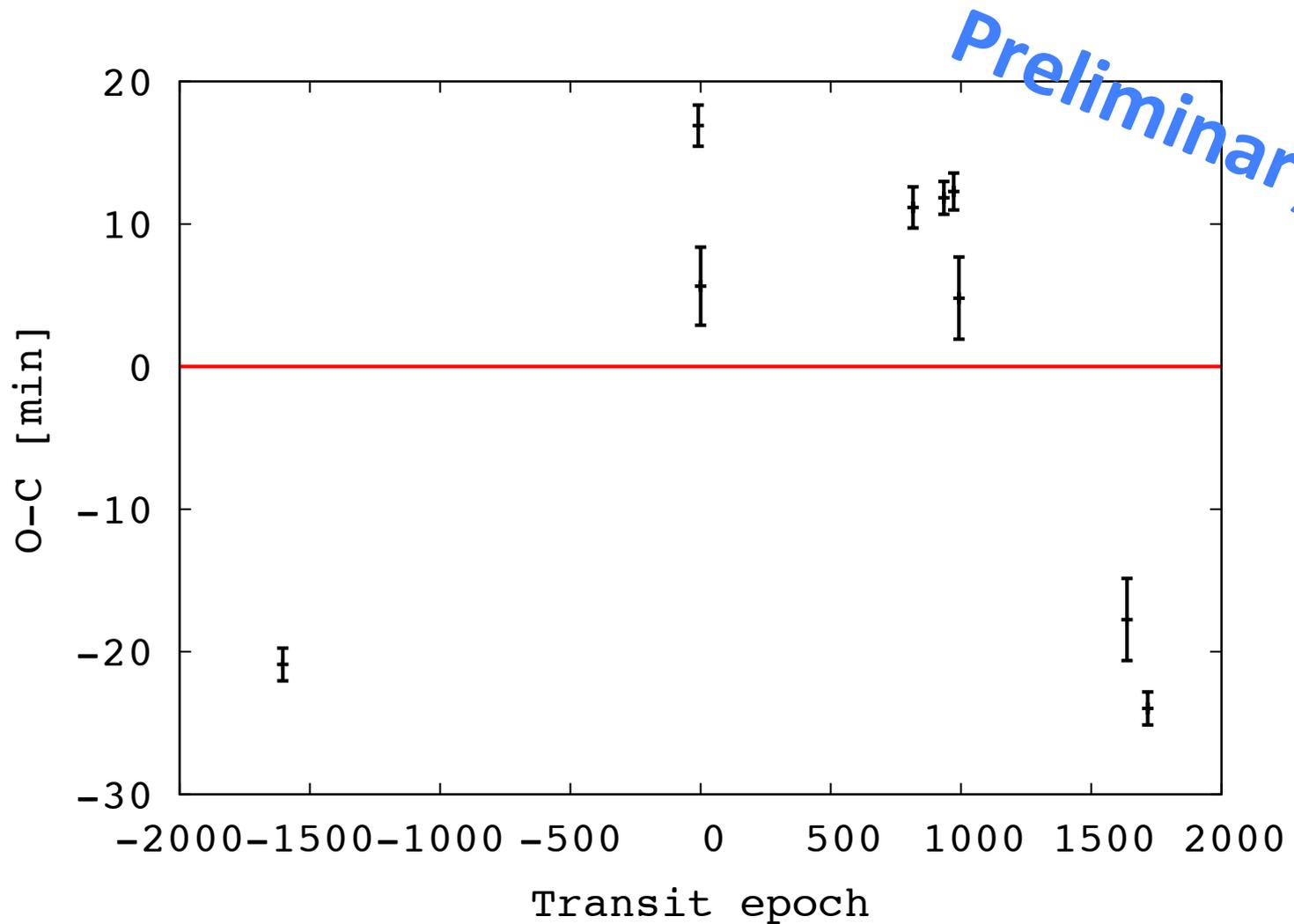
学位論文支援プログラムにより継続観測を実施中(2014A-2015B)

# トランジットライトカーブの形状変化

2012-2015年の観測によりトランジット形状の変化が近赤外においても実際に観測された



# トランジット時刻変動(TTV)



➡ 惑星の軌道変動により、TTVが発生?

# まとめ

- 年齢～2.6 Myr のTタウリ星CVSO 30を回るホットジュピター候補天体は歳差運動により数百日周期で軌道変化を起こしている可能性が指摘されている
- 黒点の影響が小さくなる近赤外波長(Jバンド)でのトランジット継続観測を実施中
- 観測時期によるトランジット形状変化とトランジット時刻変動を近赤外でも実際に観測
  - 惑星の軌道変動によるもの？

 引き続き今後の継続観測が必要