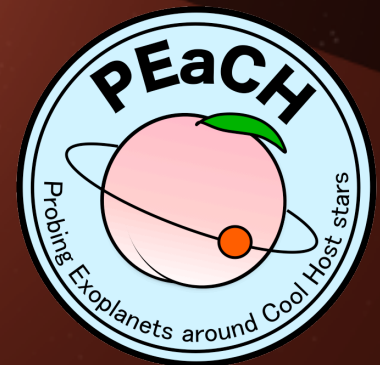


重力減光を用いたトランジット ホットジュピターの歳差運動解析

鬼塚昌宏(総研大・国立天文台D1)

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

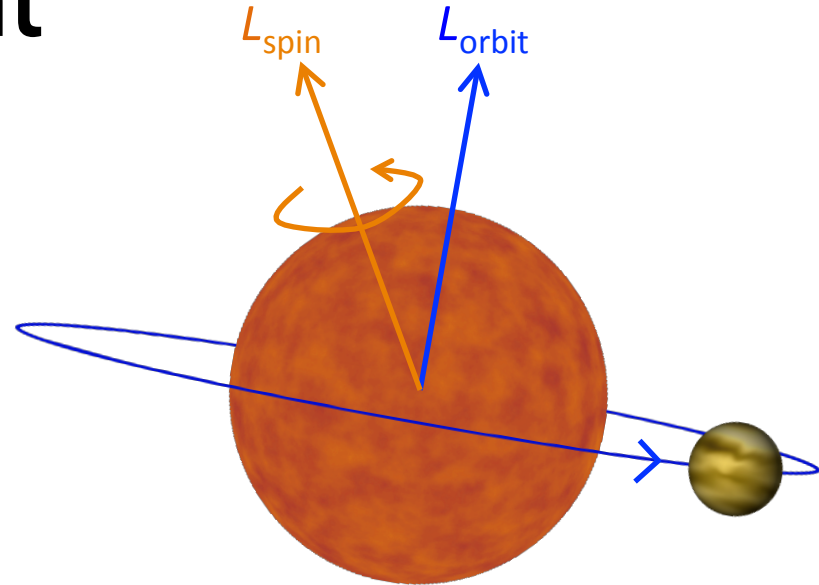


2014/8/11 岡山ユーザーズミーティング

Spin-orbit misalignment

惑星公転軸と主星自転軸のなす角

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



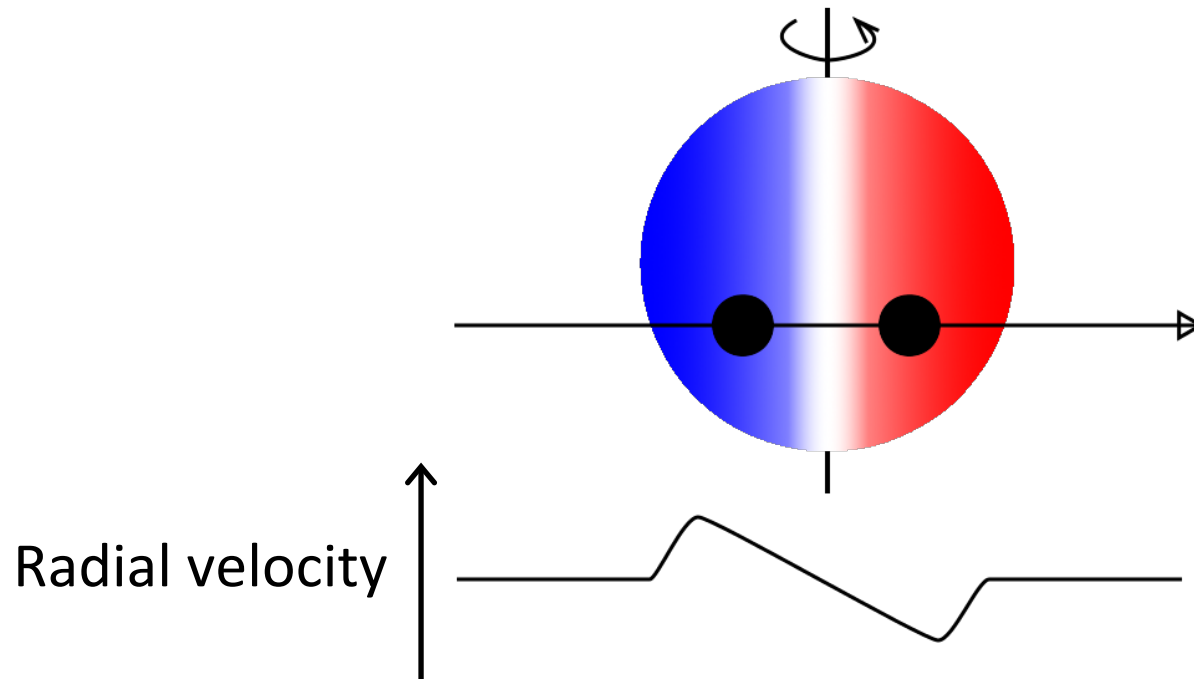
太陽系では 3° - 7° の範囲で揃っているが、系外惑星では揃っているものといないもの両方が存在

- 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 ($-147^{\circ} {}^{+49}_{-11}$)

Rossiter-McLaughlin効果

- ▶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
- ▶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**



トランジットホットジュピターCVSO 30b

主星

- 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)
- 有効温度 : 3470 K
- 射影自転速度 : 80.6 ± 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 **主星と共回転**
- 軌道長半径 0.00838 ± 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)

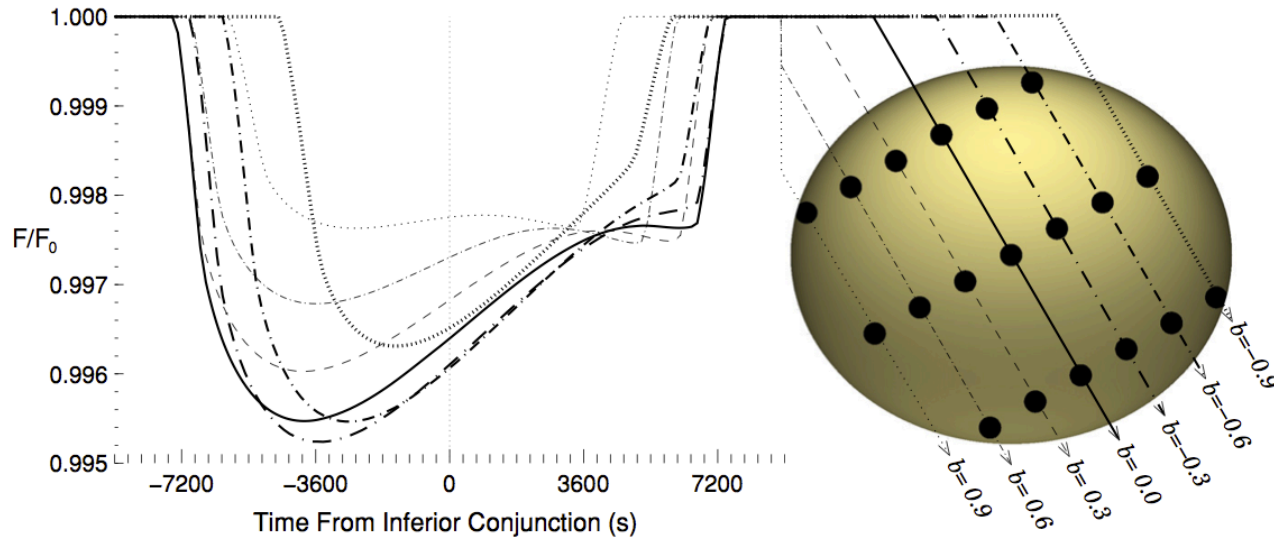
重力減光

高速自転星では、遠心力によって星の形が楕円体となる。
赤道では極に対して圧力が低く、有効温度も極より低くなるため、暗くなる

→ 重力減光 (gravity darkening)

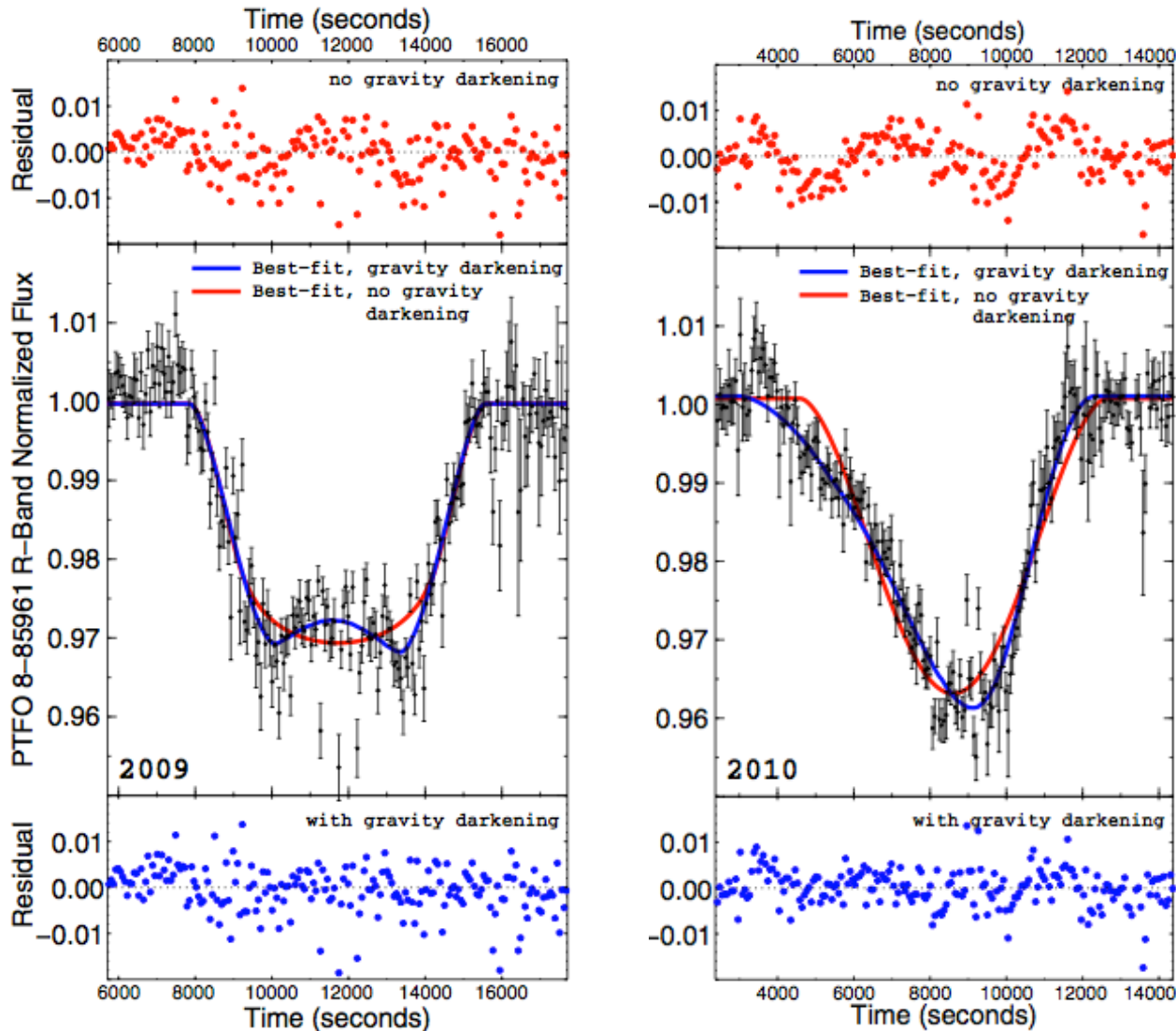
$$\frac{F_{\text{equator}}}{F_{\text{pole}}} = \frac{g_{\text{equator}}}{g_{\text{pole}}} = \frac{g - R_s \omega^2}{g}$$

トランジット時の惑星の経路が変化すると、光度曲線も変化



CVSO30のトランジットライトカーブ

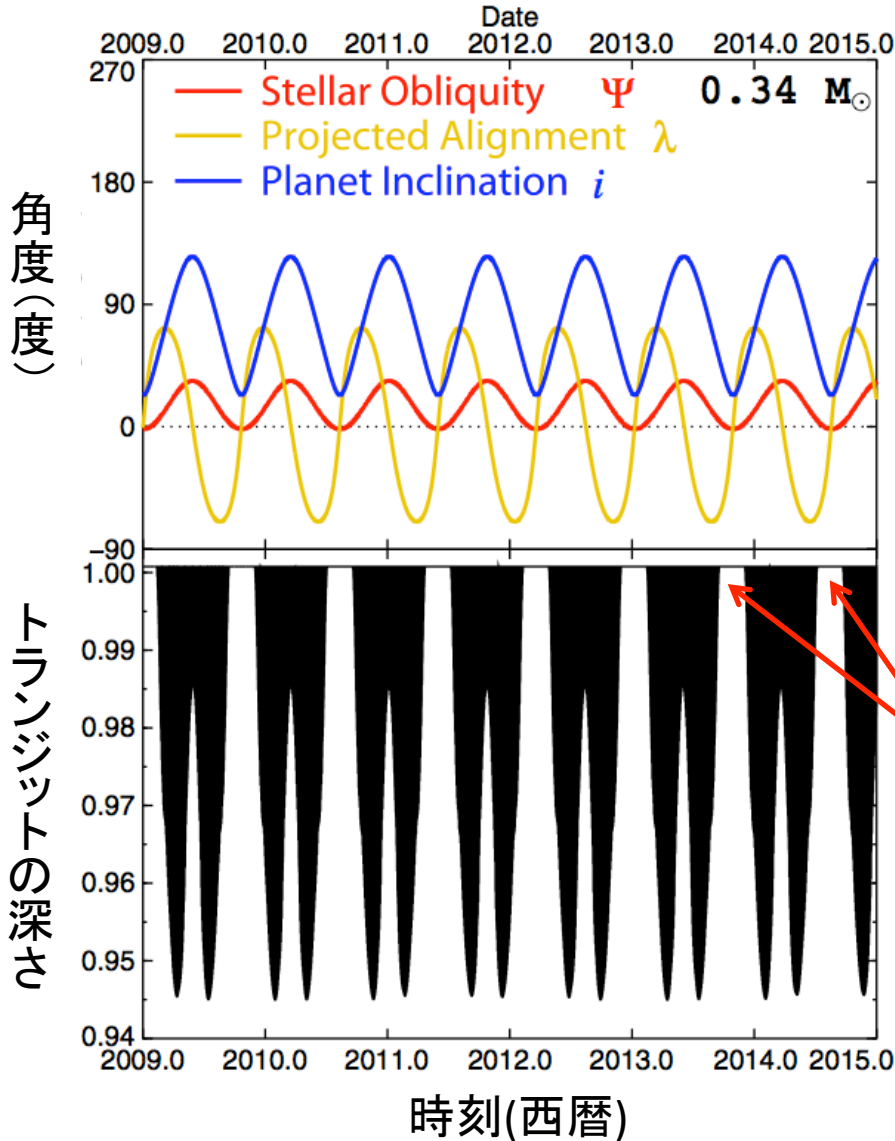
- ライトカーブが重力減光モデルでよりよくフィットされる
- 1年でライトカーブの形状が大きく変化



- 重力減光なし
- 重力減光あり

歳差運動の予測

292.6日周期の歳差運動、Barnes et al. (2013)より



トランジットの深さが歳差運動によって周期的に変動
深さゼロ=トランジットを起こさない

本研究のモチベーション

先行研究の問題点

- 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

本研究では

- 近赤外領域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

ただし、波長が長くなると重力減光の効果は小さくなるため、まずは重力減光なしのトランジットフィッティングで軌道傾斜角が変化することを確認する

観測

岡山188cm望遠鏡/観測装置ISLE

視野 $4.4 \times 4.4 \text{ arcmin}^2$

ピクセルスケール $0.254 \text{ arcsec/pixel}$

➤Jバンドで比較星と相対測光

➤オートガイダーを使用して検出器上の一点に星像を固定し、デフォーカスして星像をぼかす

- バッドピクセルを避け、フラットの非均一性に起因する変動を抑える
- 検出器が飽和するまでに受け取れるフォトンの総数も多くなる

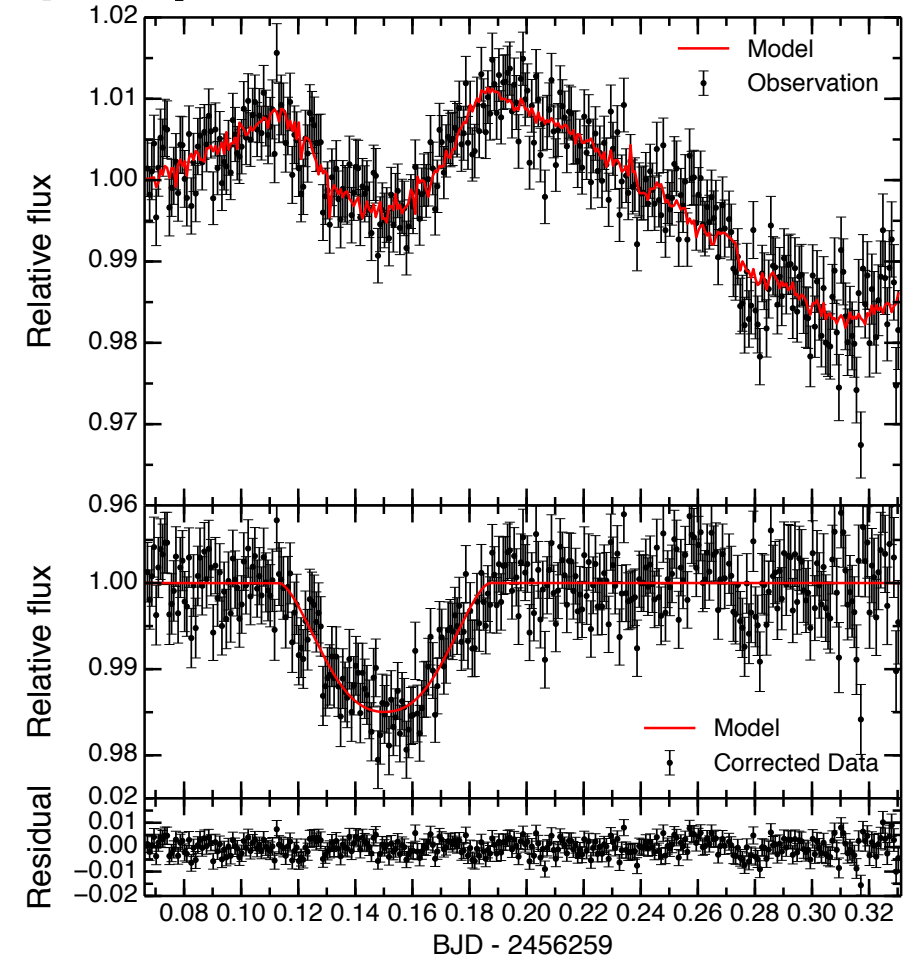
観測日 2012/11/27 と 2012/12/1 (2013-2014でも観測は実施)

露光時間 60 s

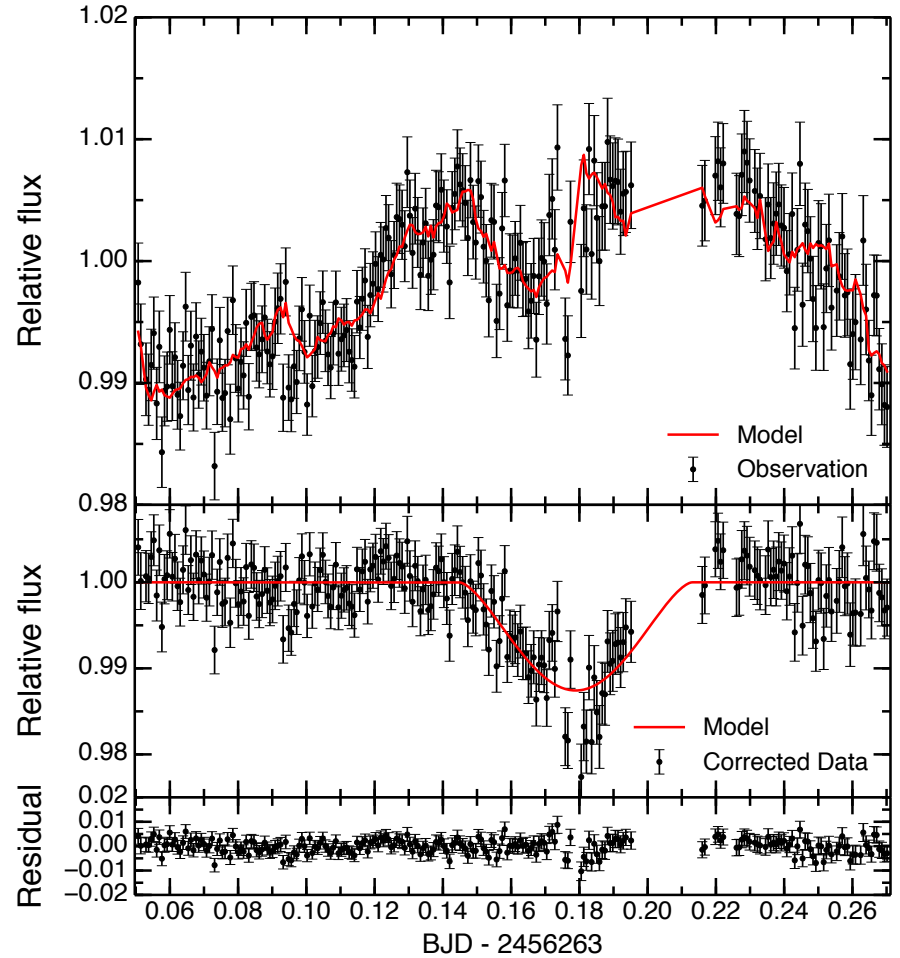
12/1の観測ではトランジット時に雲が通過



結果



2012/11/27のライトカーブ



2012/12/1のライトカーブ

上: ベースライン補正前
中: ベースライン補正後
下: フィッティングとの残差

結果

ベストフィットパラメータ

	2012/11/27		2012/12/01		van Eyken et al.(2012)	
R_p/R_s	0.345	+0.039 -0.077	0.26	+0.12 -0.14	0.1838	± 0.0097
a/R_s	1.680	+0.047 -0.051	1.666	+0.040 -0.050	1.685	± 0.064
i [deg]	45.3	+4.9 -2.2	48.9	+8.3 -6.5	61.8	± 3.7
P [days]	0.44840637 ± 0.00000075			0.448413 ± 0.000040		

周期は2つの観測点とvan Eyken et al. (2012)のデータを用いて最小二乗法により求めた。

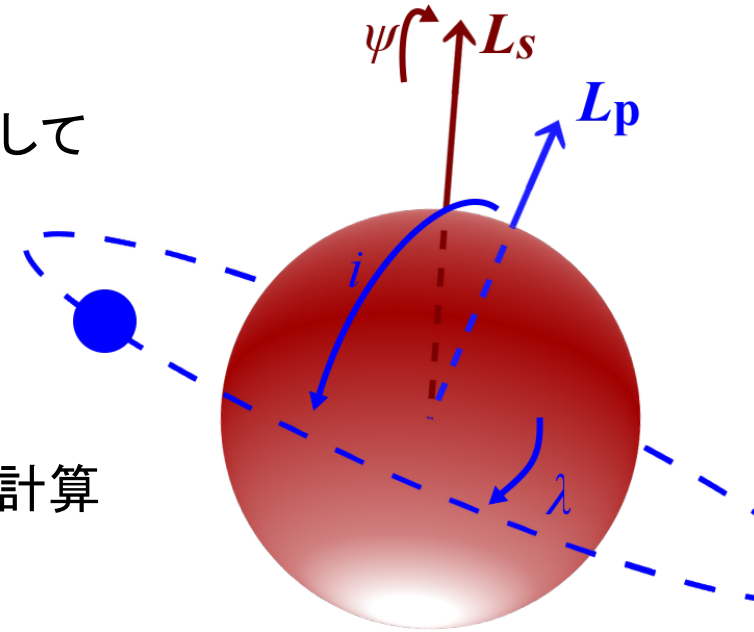
※ a/R_s と i は同時に収束しなかったため、van Eyken et al. (2012)で得られた a/R_s の値と誤差から制約条件を課した

歳差運動

軌道傾斜角の不一致について、Barnes et al. (2013)の歳差運動による説明を試みる。

1. van Eyken et al. (2012)の観測を基準時刻として
 - 主星自転軸の天球面に対する傾き ψ
 - 主星の自転軸と惑星の公転軸の天球面上でのなす角 λ
 - 惑星の軌道傾斜角 iから主星の自転と惑星の公転の角運動量を計算

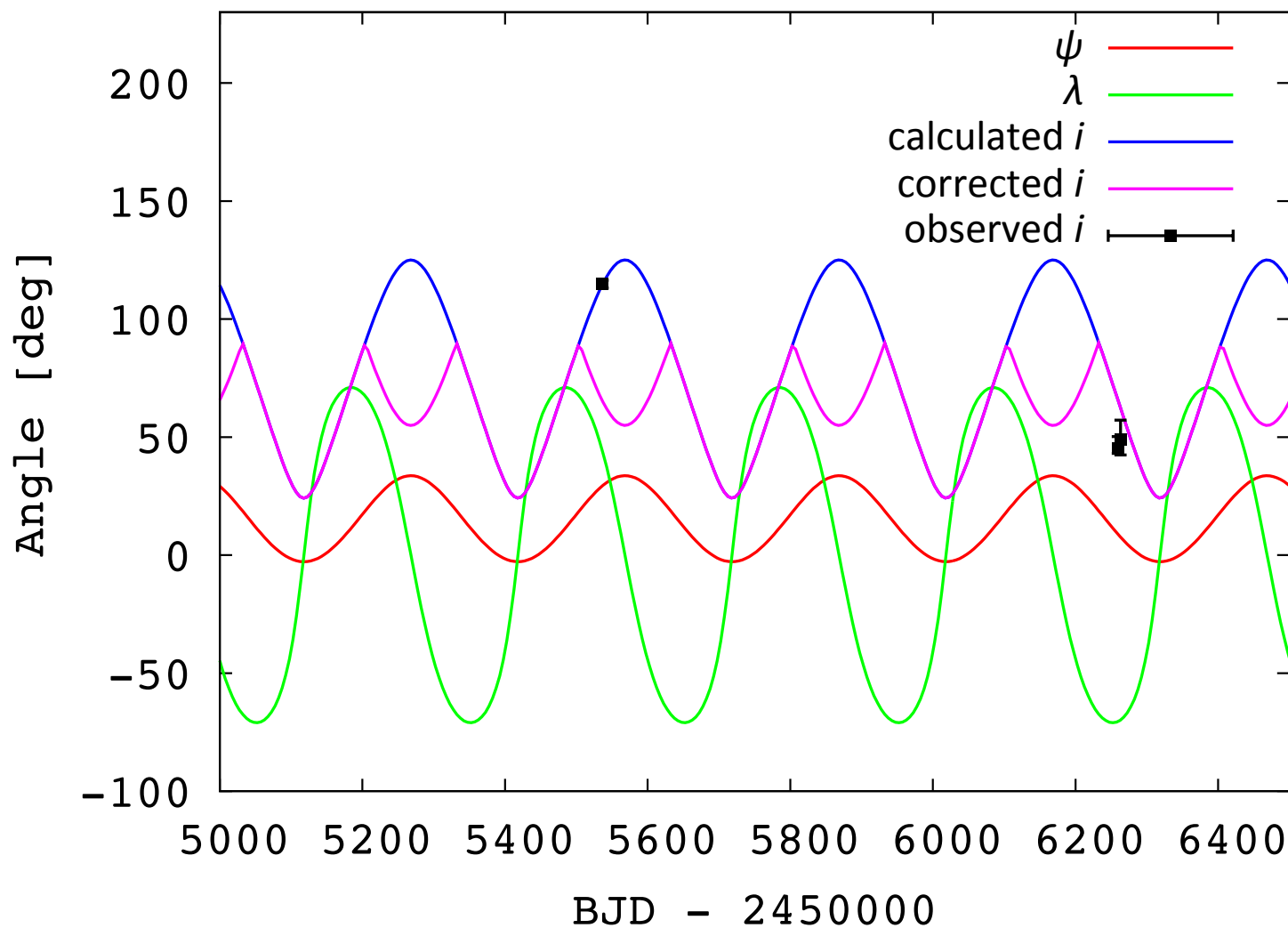
2. 合計角運動量を導出
3. 歳差運動の周期を計算
4. 基準時刻からの経過時間と周期を用いて角運動量を計算
5. 主星と惑星の角運動量を ψ, λ, i に変換



我々の観測は近赤外波長で重力減光の影響を受けにくく、 ψ, λ を求めることが難しいため、**軌道傾斜角 i のみ**で比較

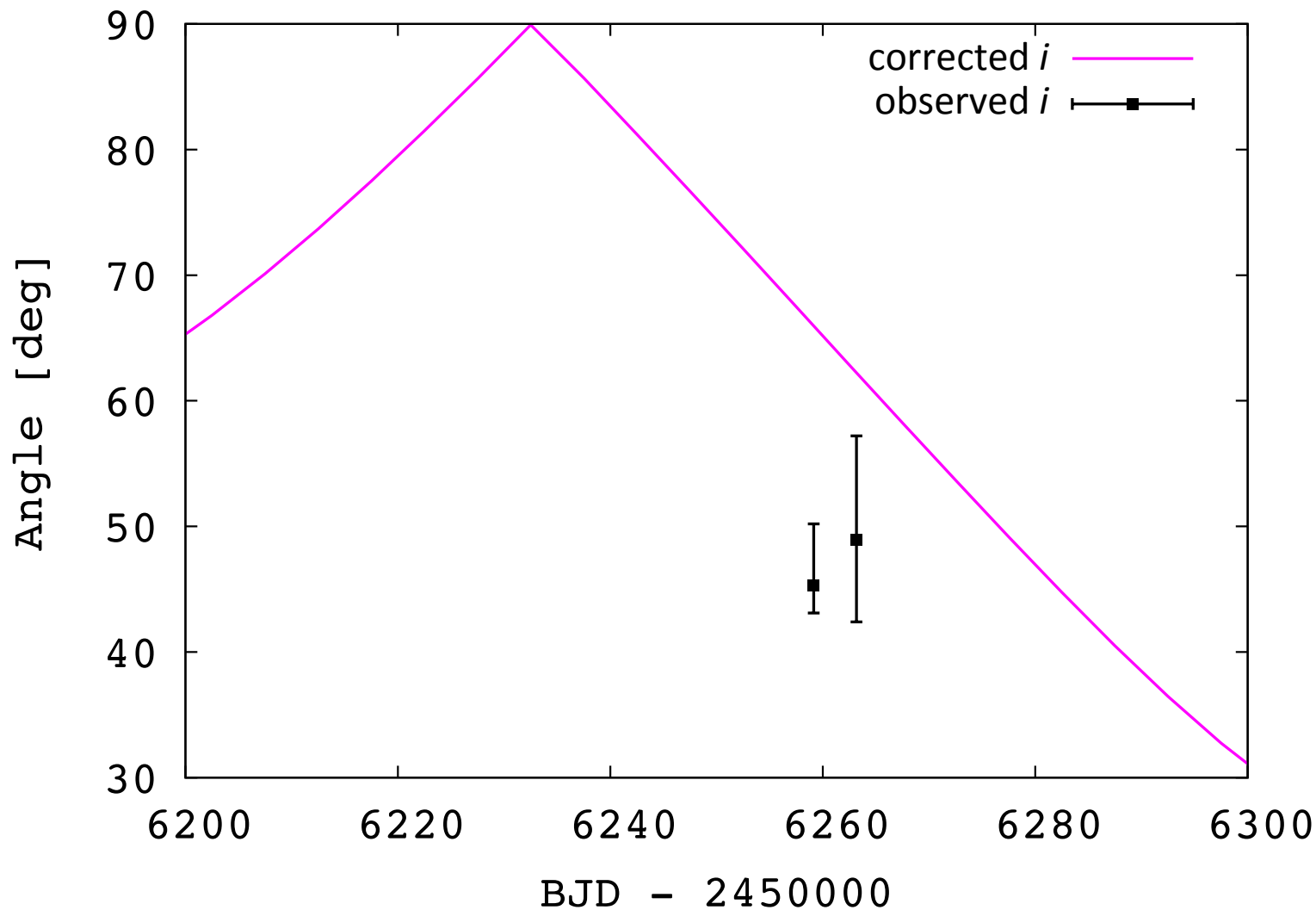
歳差運動

Barnes et al. (2013)の歳差運動に我々の軌道傾斜角をオーバープロット
corrected i : 我々の観測で得られる i の値域 $0^\circ < i < 90^\circ$ で表した軌道傾斜角



歳差運動

Barnes et al. (2013)の歳差運動に我々の軌道傾斜角をオーバープロット
corrected i : 我々の観測で得られる i の値域 $0^\circ < i < 90^\circ$ で表した軌道傾斜角



歳差運動

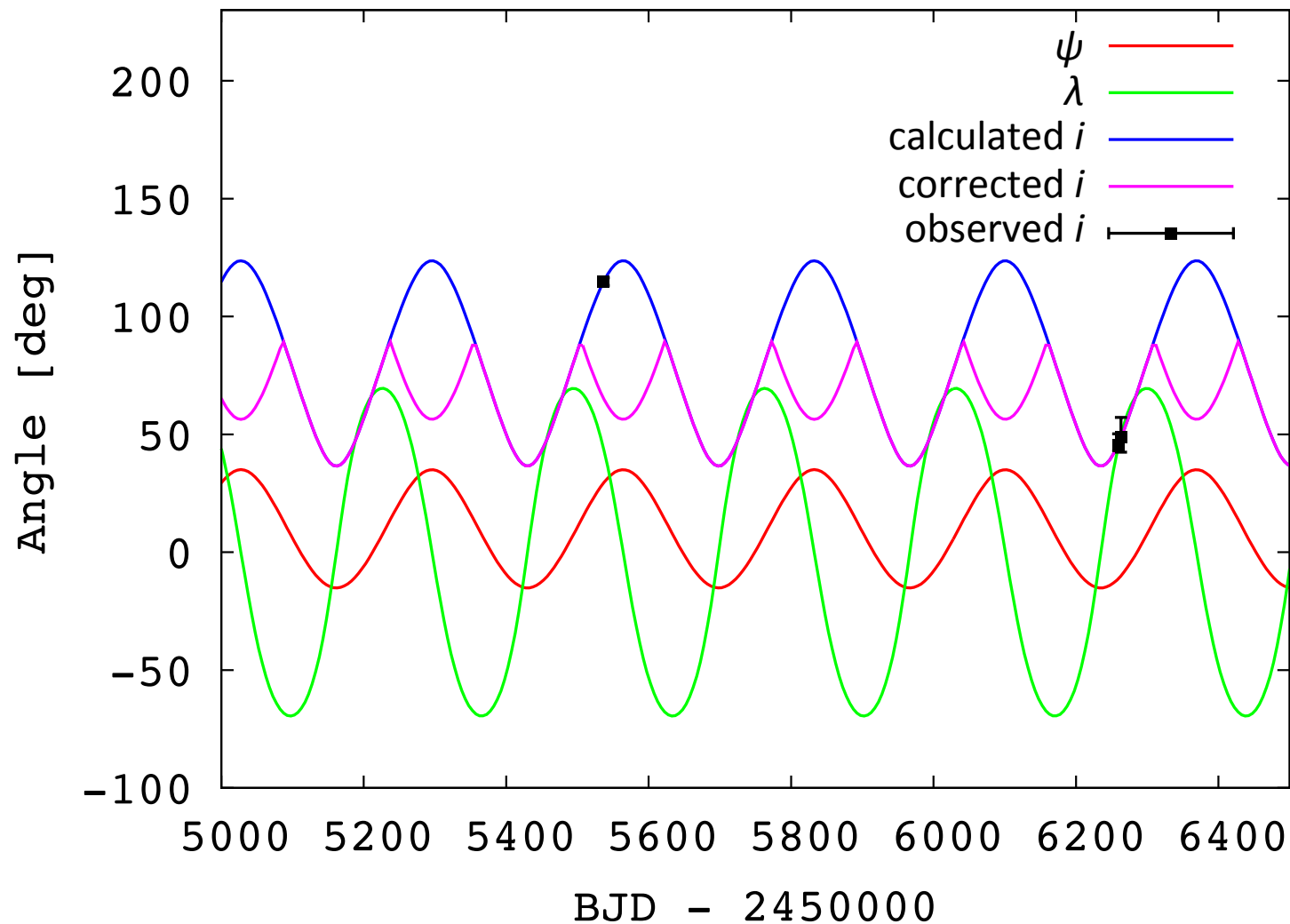
Barnes et al. (2013)のどちらの歳差運動モデルによっても、今回観測された軌道傾斜角を説明することはできなかった

- Barnes et al. (2013)での、基準時刻における ψ, λ, i を固定し、**主星質量のみを動かして我々の観測した軌道傾斜角に合う値を探索**
 - 観測点が少なく、全てのパラメータをフリーにはできない
 - ψ, λ, i は観測から得られた値であるが、主星質量はモデル不定性が存在
 - 重力減光は波長依存性があり、近赤外波長では影響が小さくなるため、我々の観測では軌道傾斜角 i のみしか求めることができない
- 範囲は $0.20\text{-}0.60 M_{\odot}$
- Barnes et al. (2013)における ψ, λ, i の初期値で計算

歳差運動

ベストフィット 主星質量 $M_s = 0.22 M_\odot$ 歳差周期268.3日

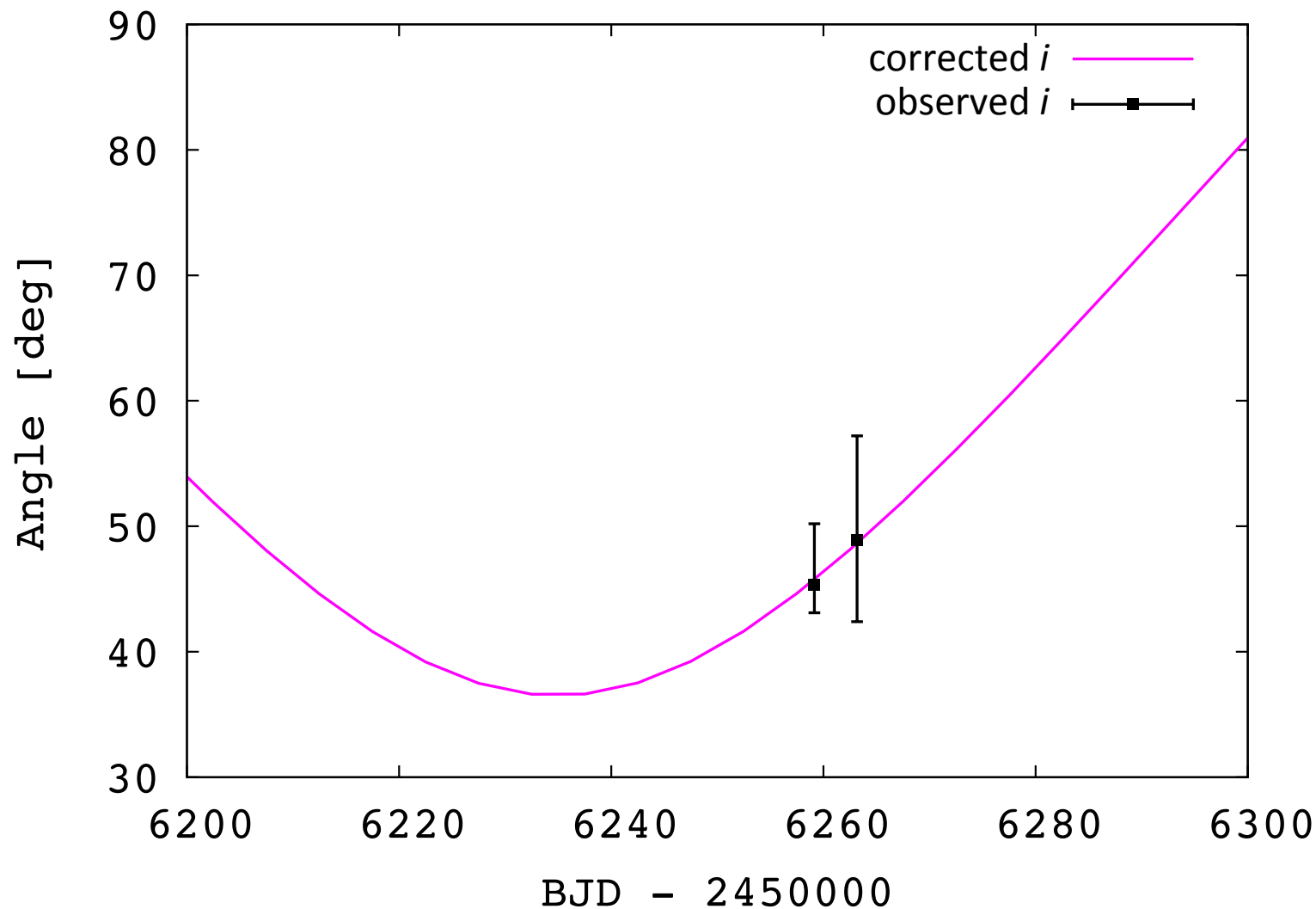
corrected i : 我々の観測で得られる i の値域 $0^\circ < i < 90^\circ$ で表した軌道傾斜角



歳差運動

ベストフィット 主星質量 $M_s = 0.22 M_\odot$ 歳差周期268.3日

corrected i : 我々の観測で得られる i の値域 $0^\circ < i < 90^\circ$ で表した軌道傾斜角

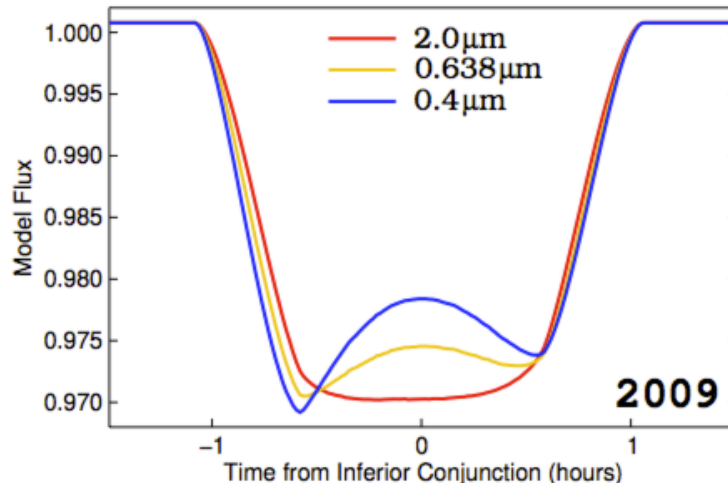
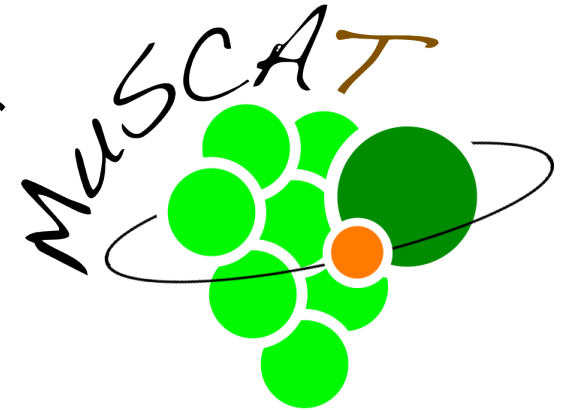


まとめ

- 年齢 ~ 2.6 Myr のTタウリ星CVSO 30を回るホットジュピターについて、黒点の影響が小さくなる近赤外波長(Jバンド)にてトランジット観測を実施
- 軌道傾斜角に発見論文van Eyken et al. (2012)との**不一致**があることを確認
- Barnes et al. (2013)の歳差運動モデルを用いたところ、我々の観測した軌道傾斜角の変化は**歳差運動で説明可能**
歳差運動によるトランジットライトカーブ変動の発見は**Tタウリ星**
では初

将来の展望

- 重力減光と歳差運動によるライトカーブ変化の確認
 - Jバンドでは重力減光の影響を少し受けると予測されるため、重力減光込みのトランジットモデルを構築
 - 岡山188cm望遠鏡の学位論文支援枠での継続観測(2期目)
- 重力減光の波長依存性の確認
 - 多波長同時トランジット測光を行うことにより、重力減光の効果を直接測定可能
 - 岡山188cm望遠鏡では2014年12月にファーストライト予定の**可視同時多色撮像カメラMuSCAT**を利用する予定



重力減光の波長依存性
Barnes et al. (2013)