



MOA 61cm望遠鏡を用いた Transit Timing Variations (TTV)の観測

目次

- ホットジュピターの形成モデル
- TTV法について
- WASP-5bの観測
- 解析&結果
- まとめ

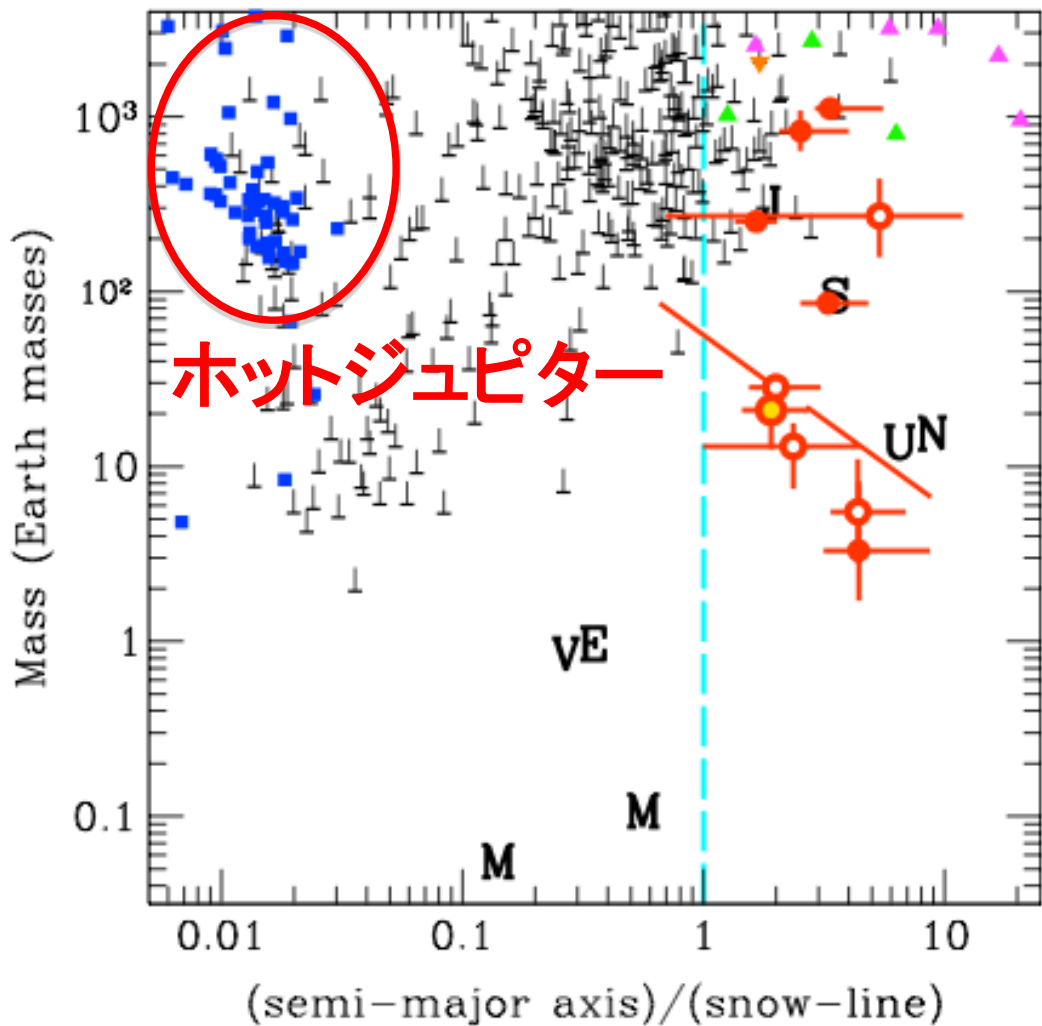
福井 暁彦(名古屋大学)、成田憲保(国立天文台)、
平野照幸(東大/MIT)、田村元秀(国立天文台)、
他MOAグループ

2010/9/18

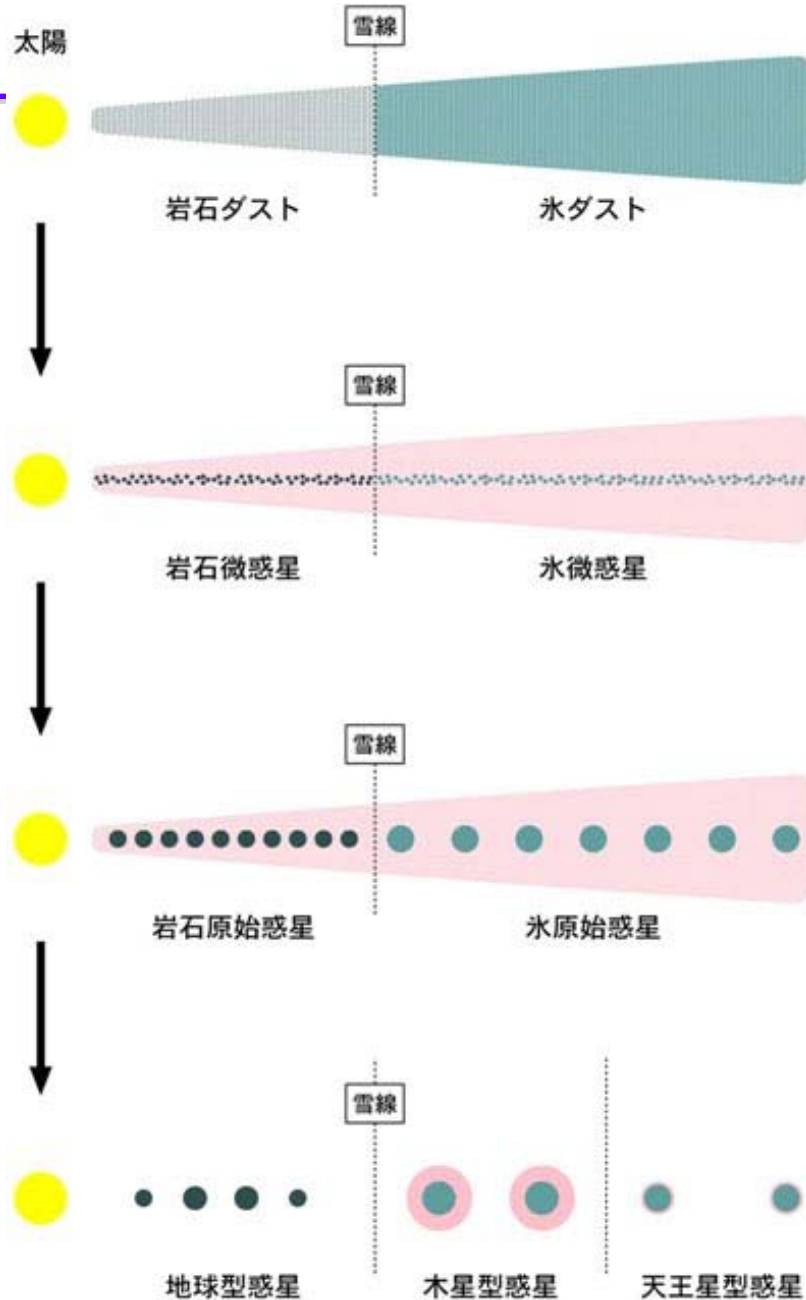
トランジット&小惑星合同研究会@NAOJ

系外惑星の分布

Exoplanet Discoveries vs. Snow-Line



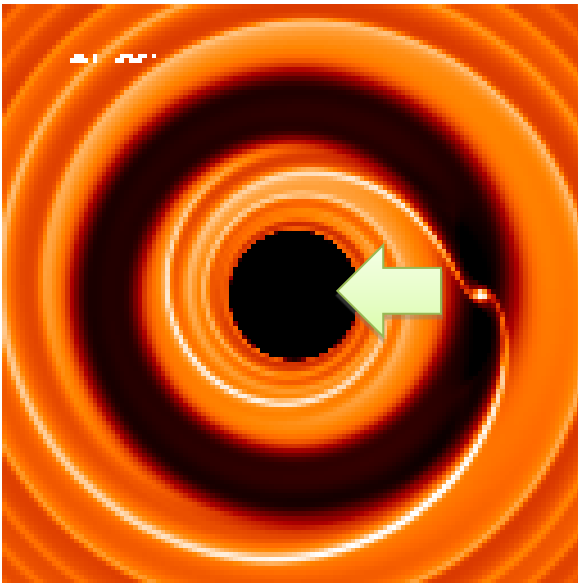
惑星形成標準モデル



ホットジュピターの形成モデル

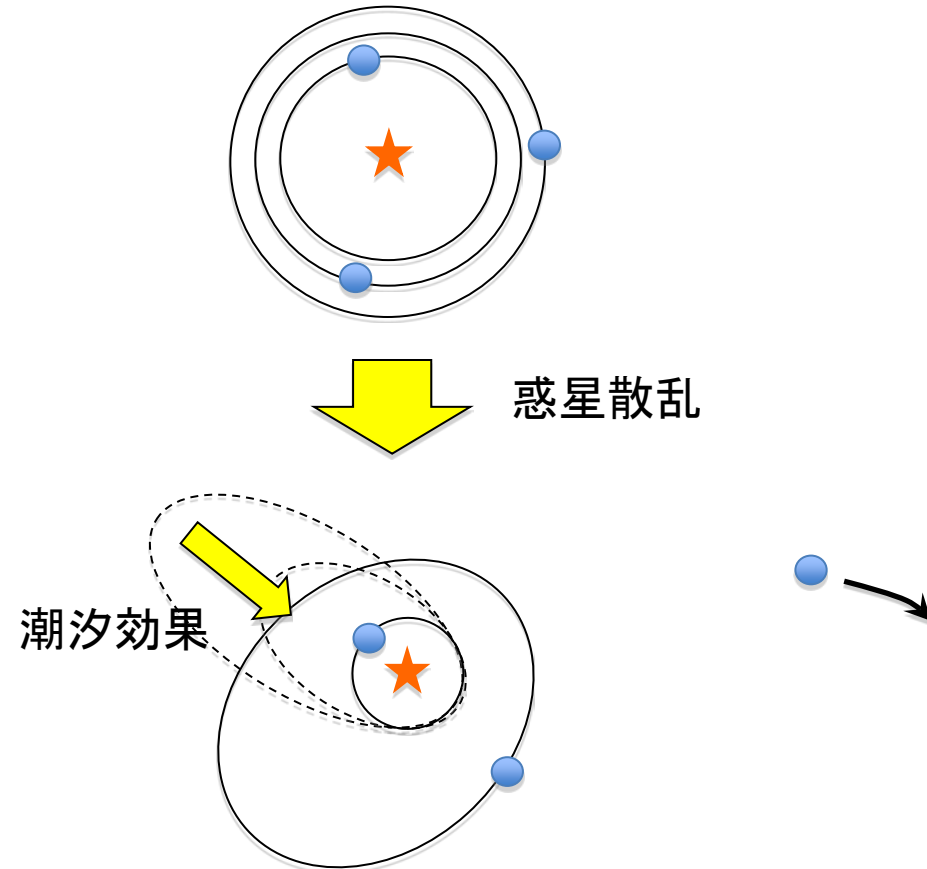
ガス-惑星相互作用モデル

Type-II migration



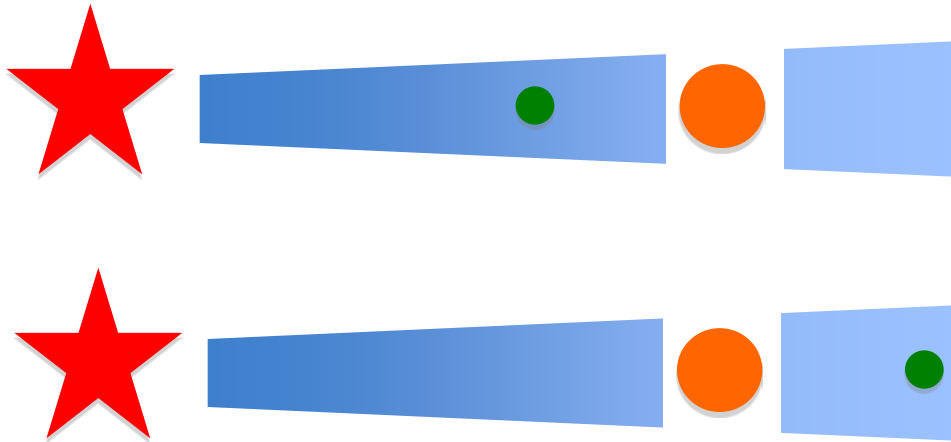
©F. Masset

惑星散乱モデル

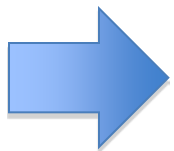


共鳴軌道惑星

- ホットジュピターと軌道共鳴関係にある惑星が見つければ、ガス-惑星相互作用モデルで形成された間接的な証拠になる。

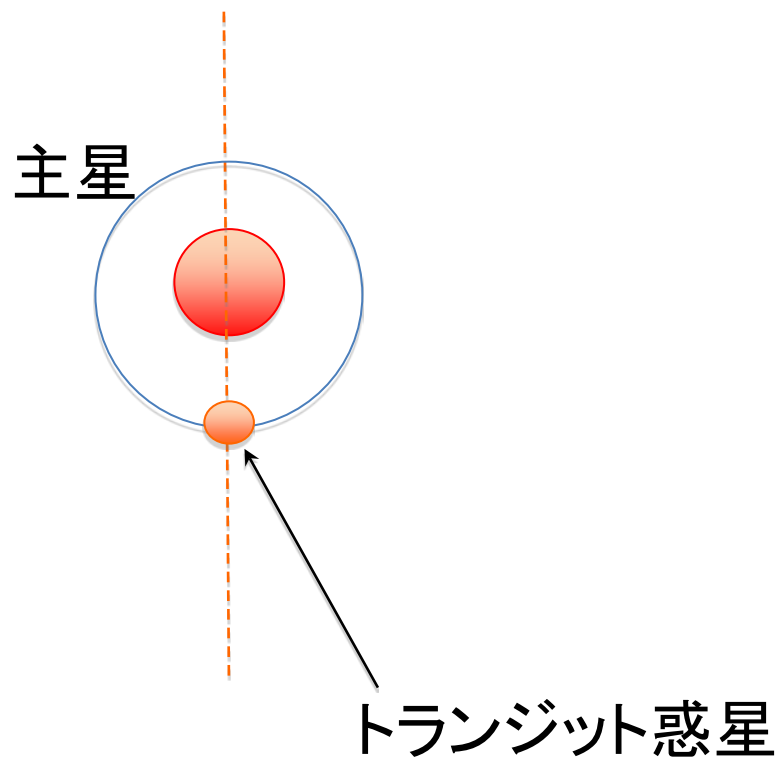
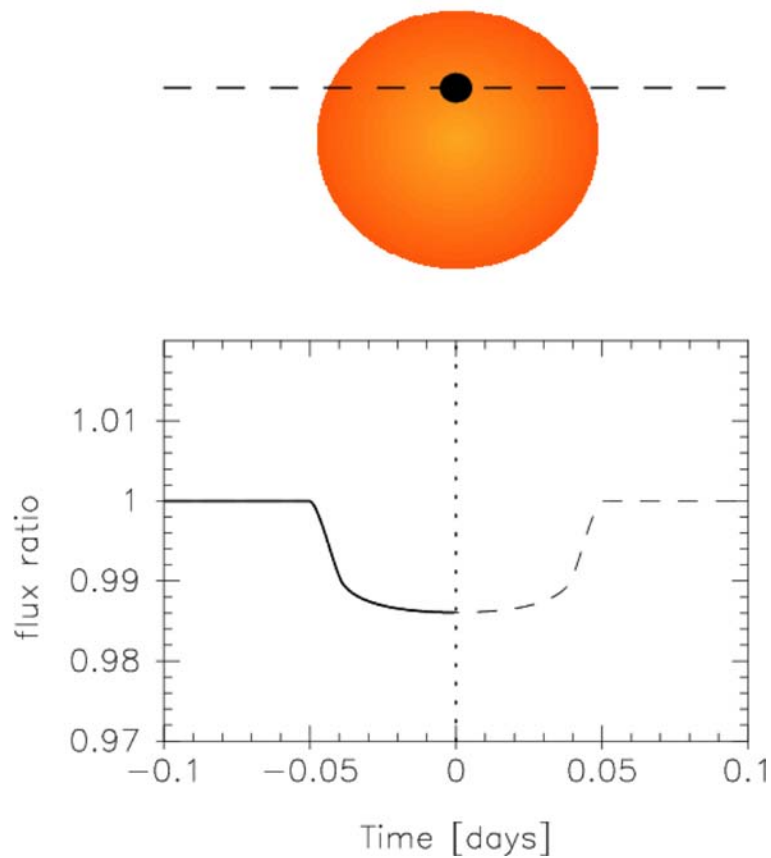


- 視線速度法によって、共鳴軌道の惑星がいくつか見つかった。
 - 例: GJ876 (2:1), HD 82943 (2:1), 55 Cancri (3:1), etc.
- しかし、ホットジュピターを含むものはまだ見つからない。
 - 観測が足りていない、軽い惑星は検出困難

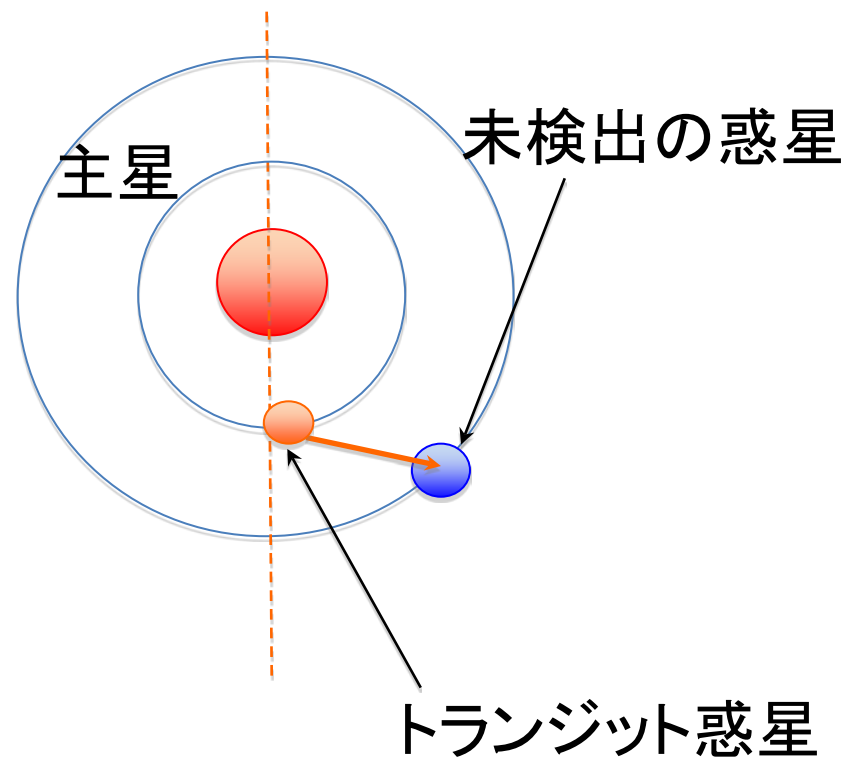
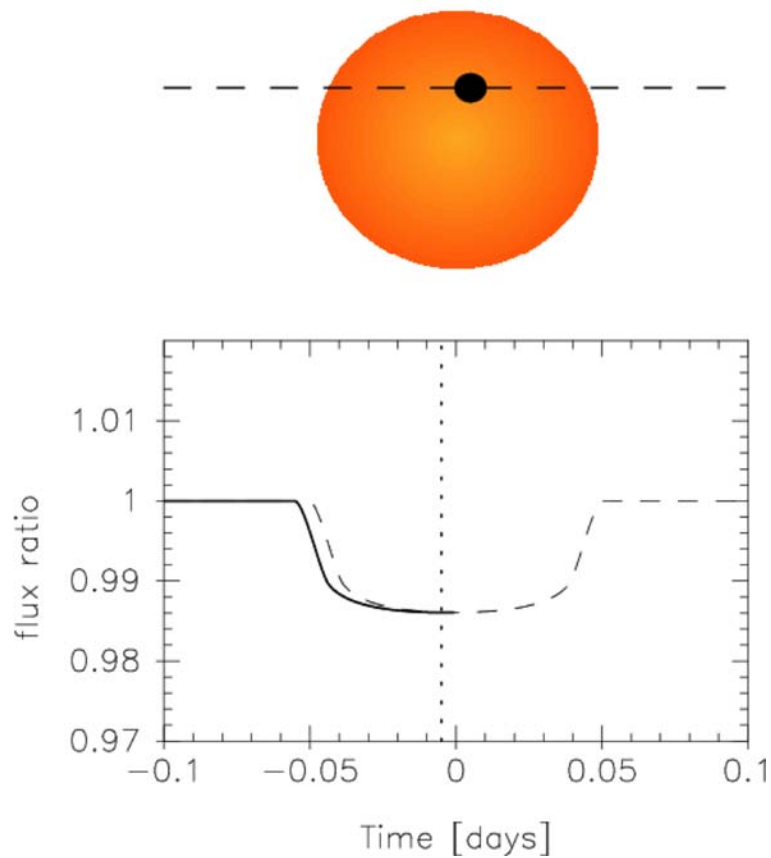


Transit Timing Variation (TTV) 法で探索可能

Transit Timing Variations (TTV) の原理



Transit Timing Variations (TTV) の原理



TTVシグナルの大きさ

TTVが大きくなる条件

- トランジット周期 $P_{transit}$ に比例
- 第2の惑星の質量 M_2 に比例
- 第2の惑星の離心率 e_2 が大
- **共鳴軌道**

地上観測の精度

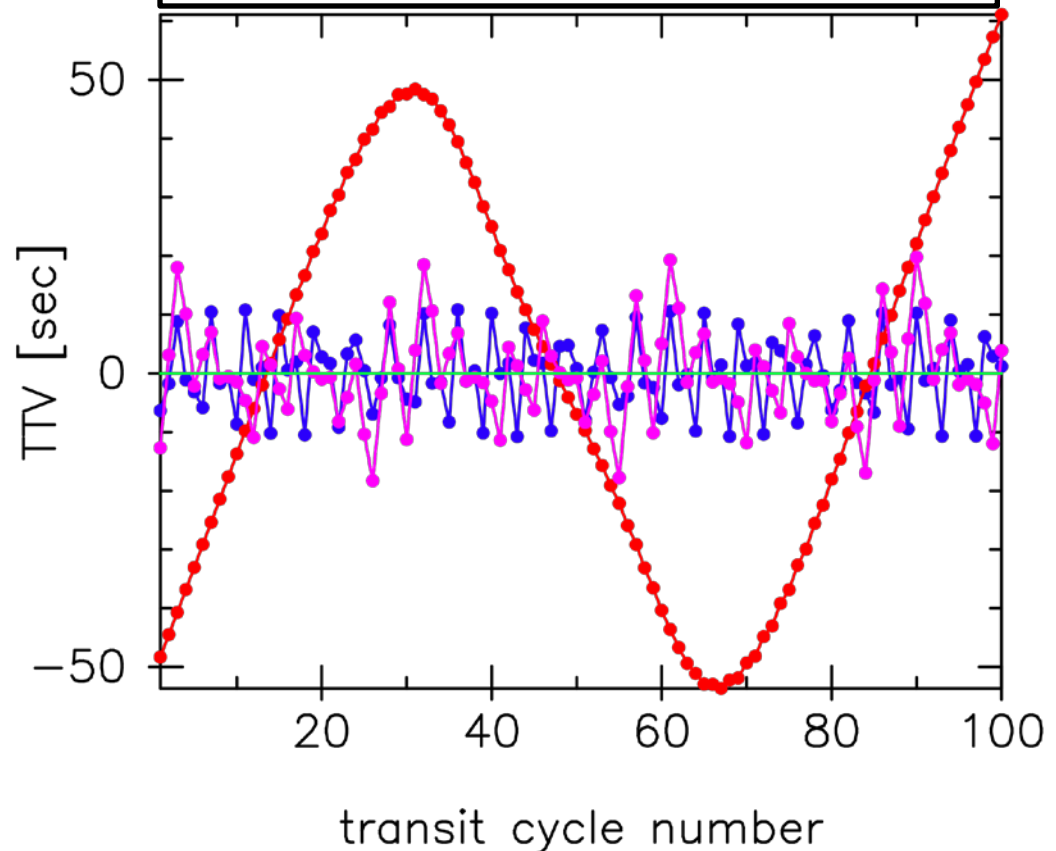
- 口径8m: < 10[sec]
- 口径1.5m: 10-30[sec]
- 口径60cm: 30-60[sec]

$$P_{transit} = 1.6 \text{ [days]}, e_1=0$$

$$P_2/P_{transit} = 4.2, M_2=M_{\text{Jupiter}}, e_2=0$$

$$P_2/P_{transit} = 4.2, M_2=M_{\text{Earth}}, e_2=0.2$$

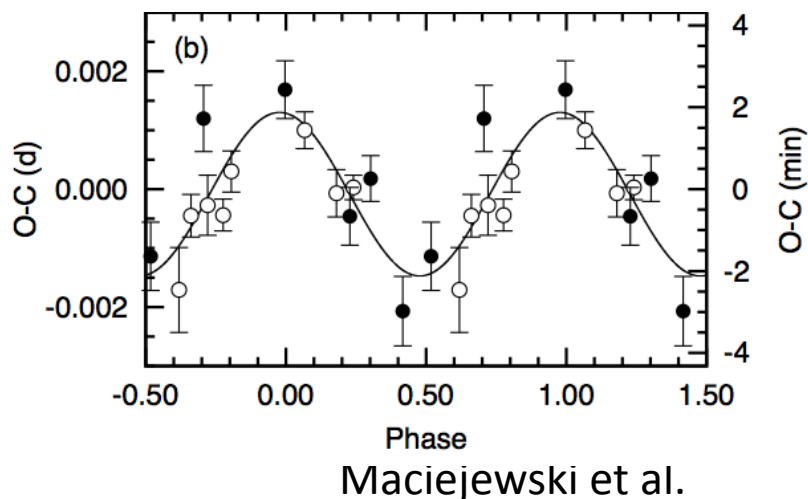
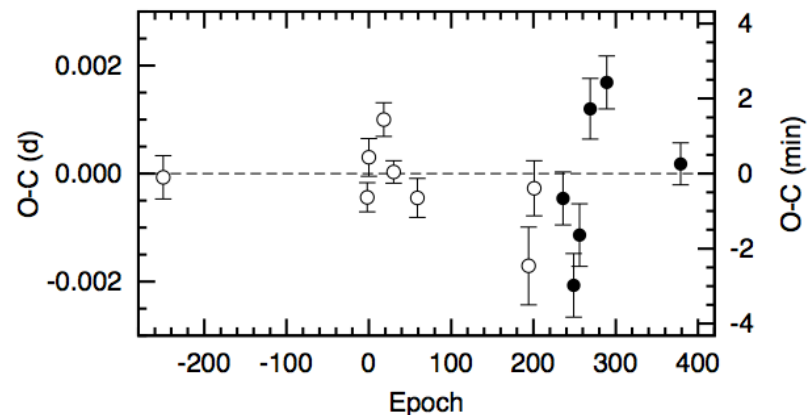
$$P_2/P_{transit} = 2.0, M_2=M_{\text{Earth}}, e_2=0$$



**地上の中小口径望遠鏡で
地球質量の共鳴軌道惑星が検出可能!**

これまでのTTV惑星観測

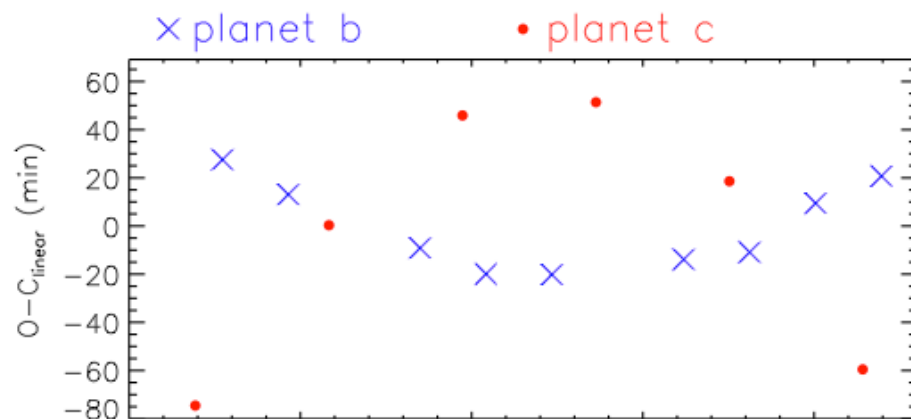
WASP-3b (ホットジュピター)



2010
2:1 の共鳴軌道にある~15 M_{Earth}
の惑星?

Kepler-9b,c

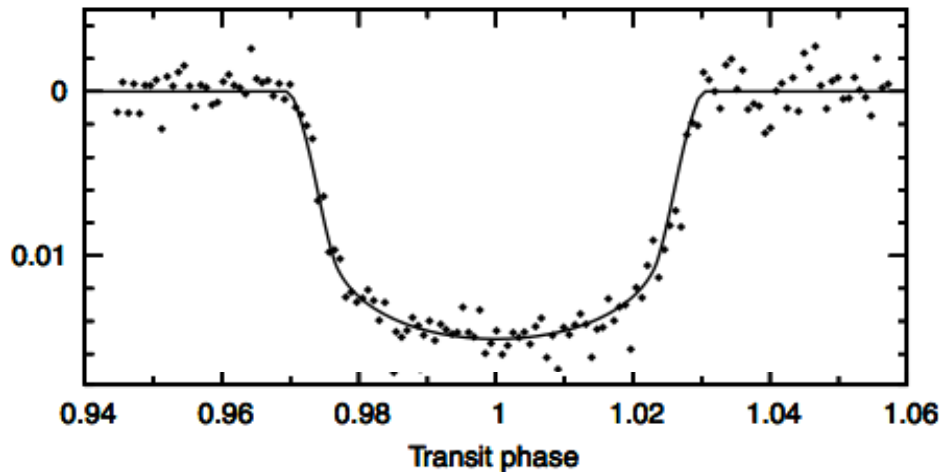
ダブルトランジット!



$P_b = 19.2$ [days]
 $M_b = 0.25$ [M_{Jupiter}]
 $P_c = 38.9$ [days]
 $M_c = 0.17$ [M_{Jupiter}]

1:2の軌道共鳴関係
(ホットジュピターではない)

WASP-5b



Anderson et al. 2008

WASP-5

G4V ($V=12.3$ [mag])

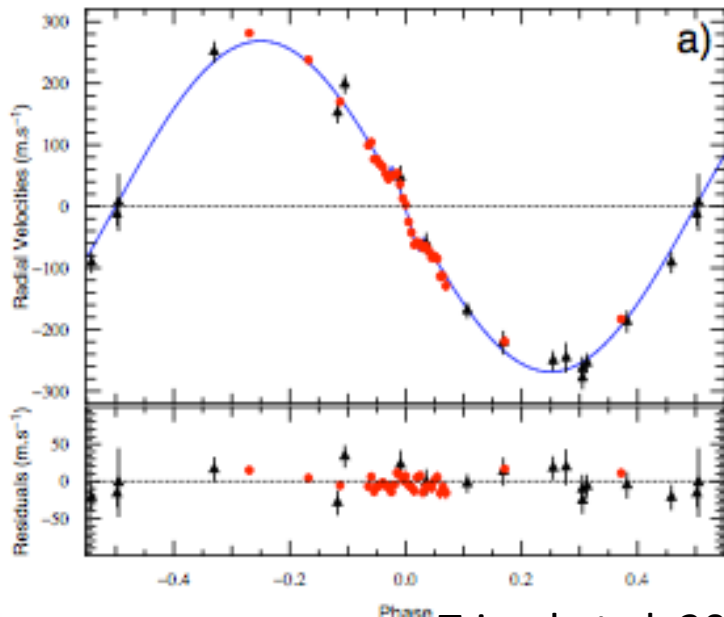
WASP-5b (ホットジュピター)

$P = 1.63$ [days]

$M_p = 1.64$ [M_{jup}]

$inclination = 85.8^\circ$

$eccentricity = 0$



Triaud et al. 2010

トランジット中の視線速度のずれ(ロシター効果)の観測により、主星の自転軸と惑星の公転軸の傾きが求められている。

$\lambda = 12^\circ \pm 10^\circ \pm 8^\circ \pm 0$ (ほぼゼロ)

ガス-惑星相互作用モデルを支持

MOA 61cm B&C望遠鏡を用いたWASP-5bのTTV観測

Mt. John 天文台@ニュージーランド



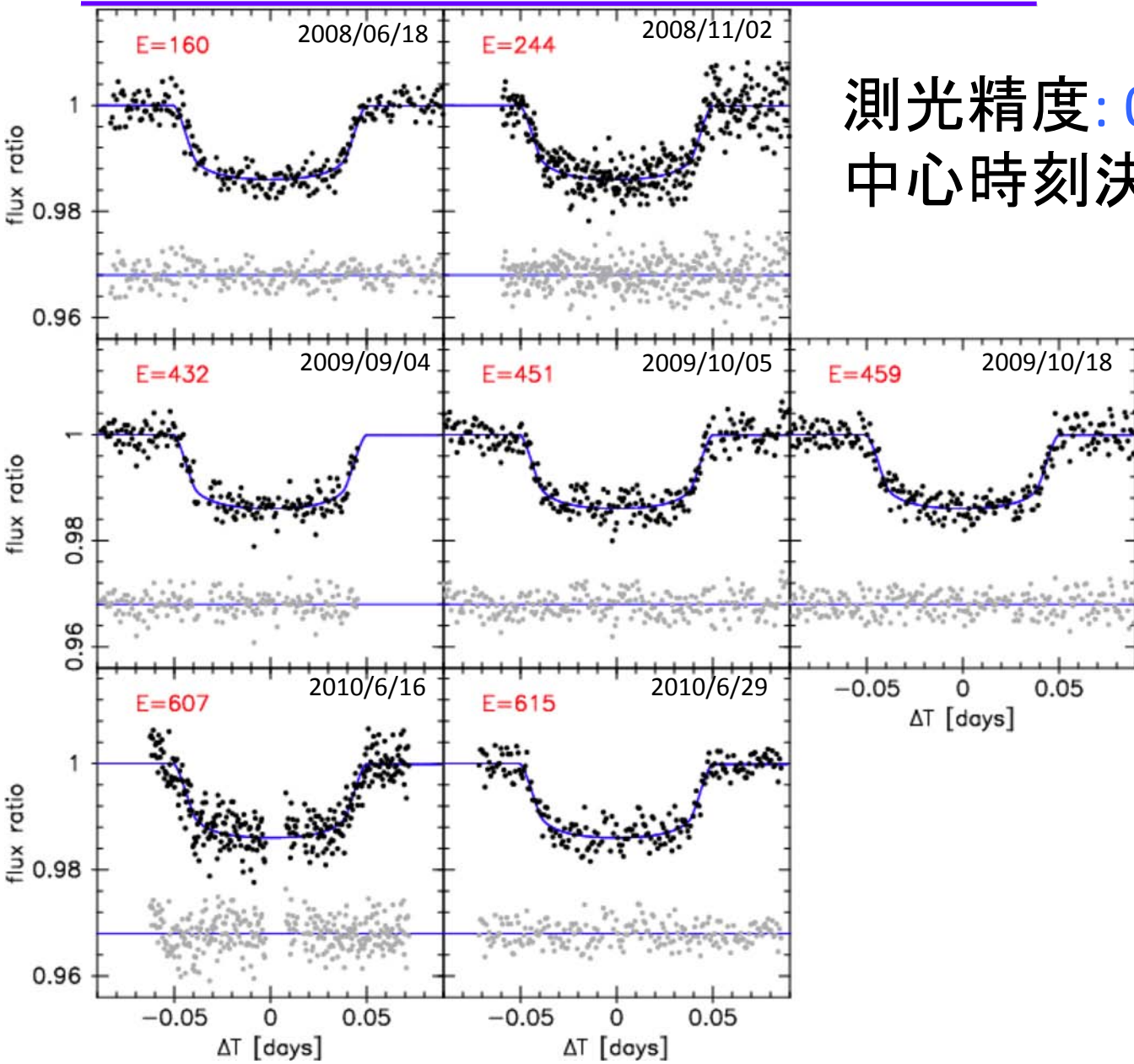
- 観測期間: 2008-2010年
- トランジット観測数: 7回
- フィルター: 1バンド
- 露光時間: 30~60[sec]
- デフォーカス: (基本的に) なし

← B&C望遠鏡



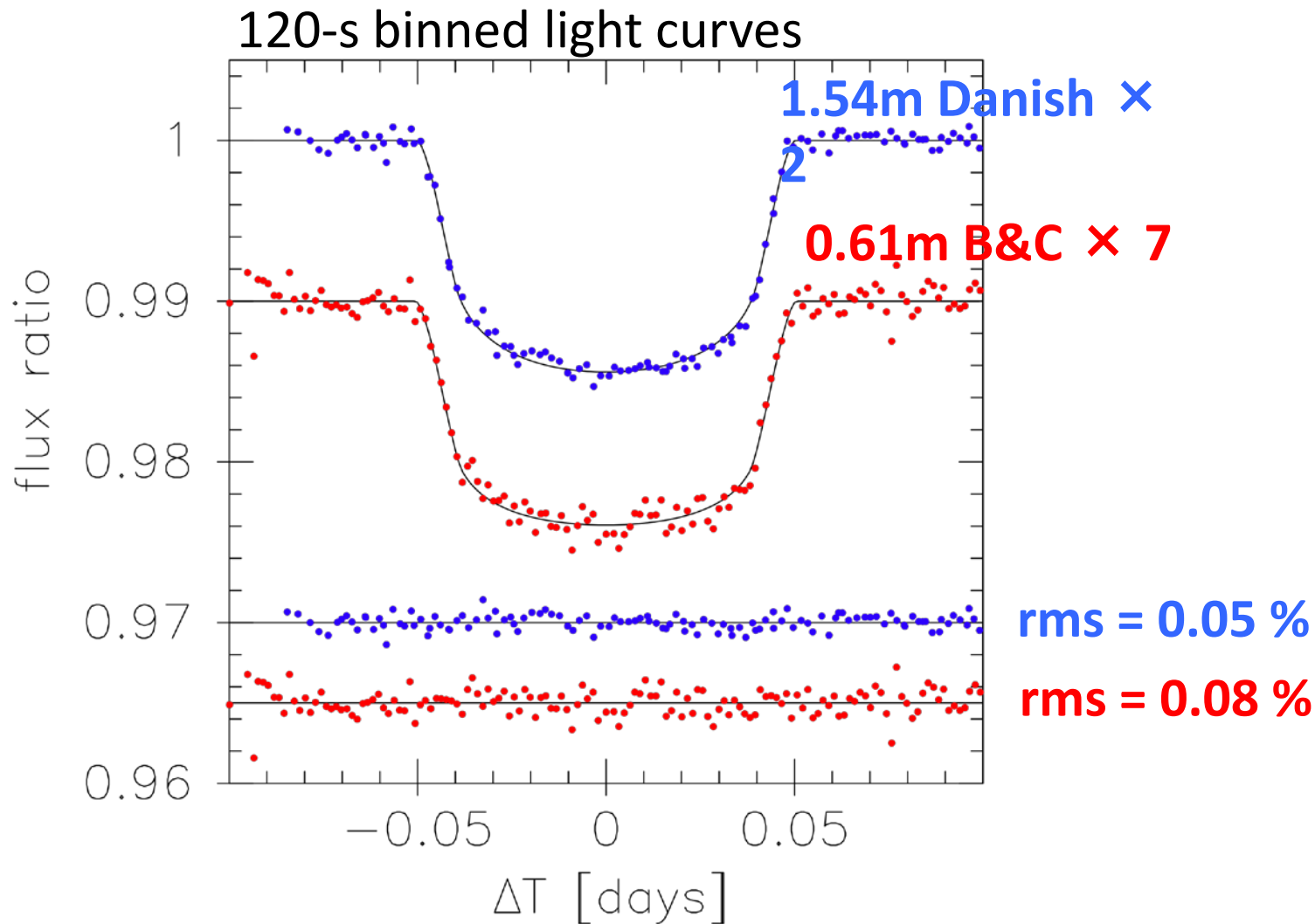
- 口径: 61cm
- CCD: Apogee ALTA U47
1k × 1k[pixels]
- 視野: 5'.5 × 5'.5
- 読み出し時間: ~5[sec]

光度曲線



測光精度: 0.20 – 0.36 %
中心時刻決定精度: 35-63秒

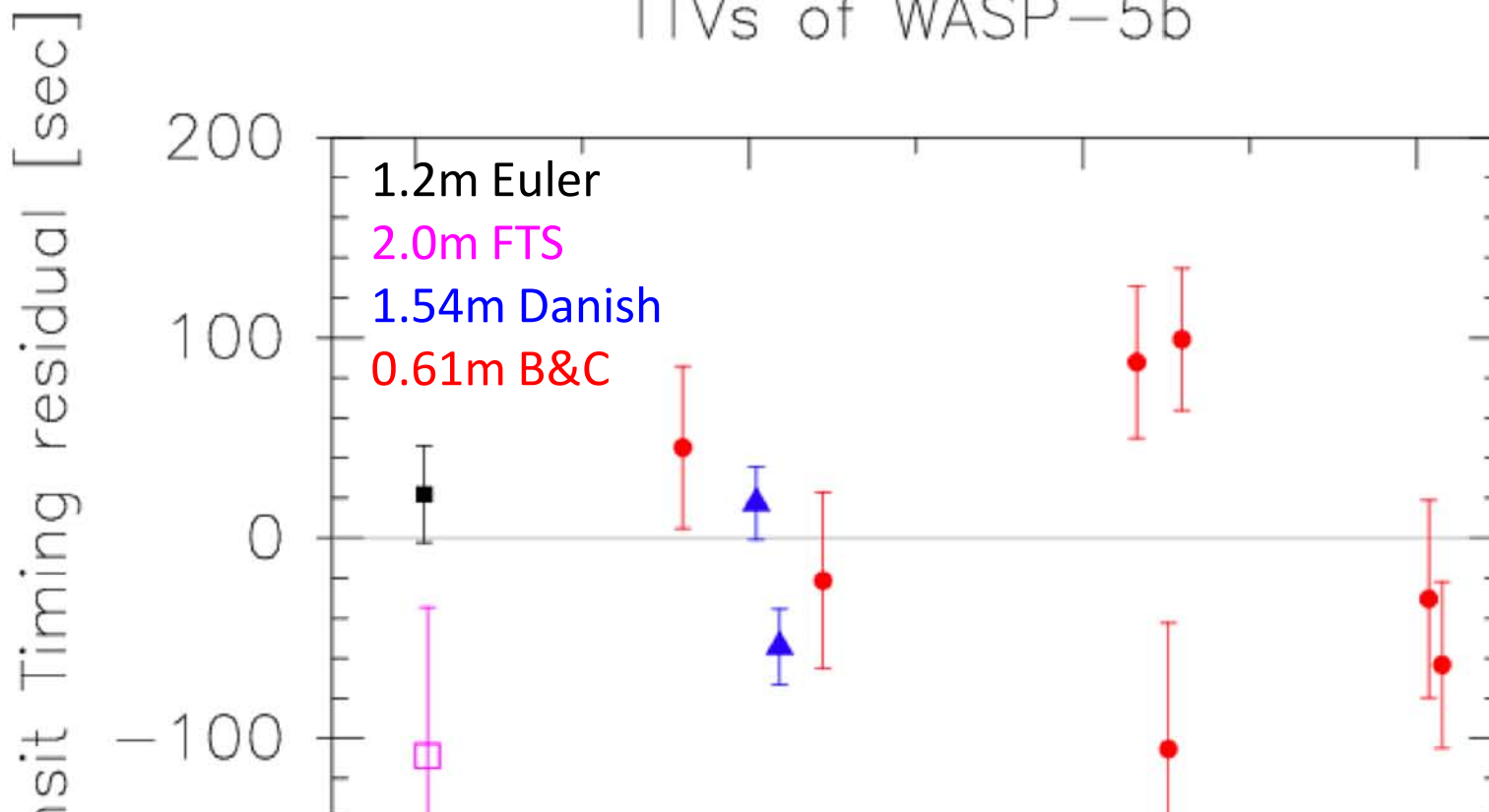
合成した光度曲線



→ 惑星半径などの物理パラメータの決定精度が向上

Transit Timing Variations in WASP-5b

TTVs of WASP-5b

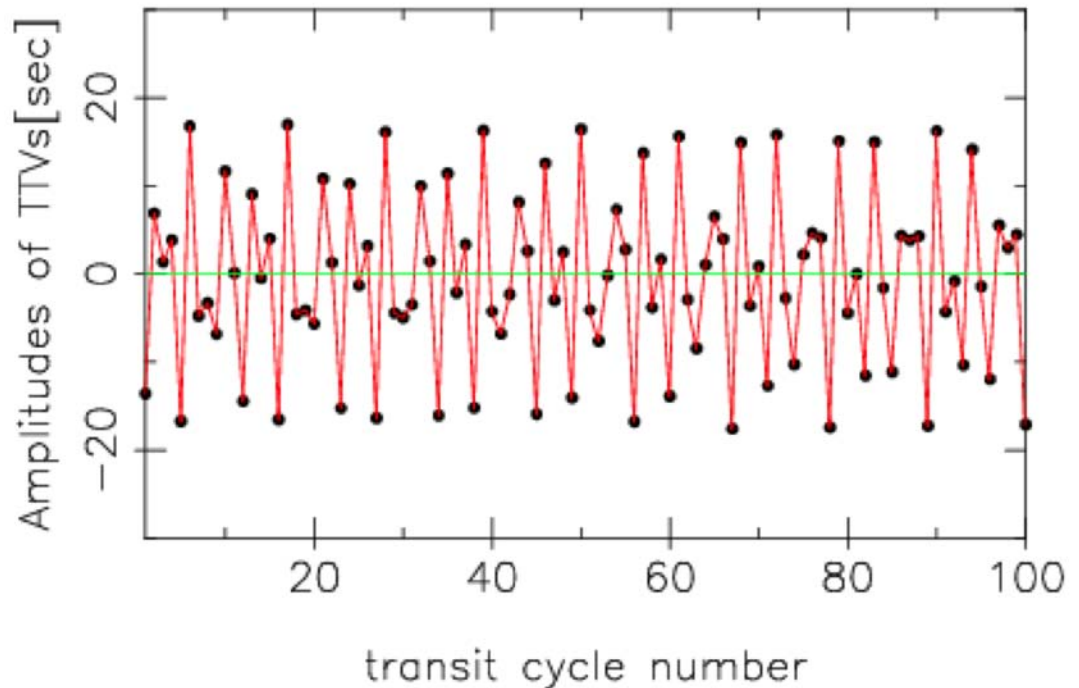
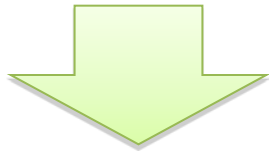


$\chi^2 / \text{dof} = 32.2 / 9$ (99.982 % conf., or 3.7σ)
 $\text{rms}(\text{TTV}) \sim 70$ 秒

transit cycle number

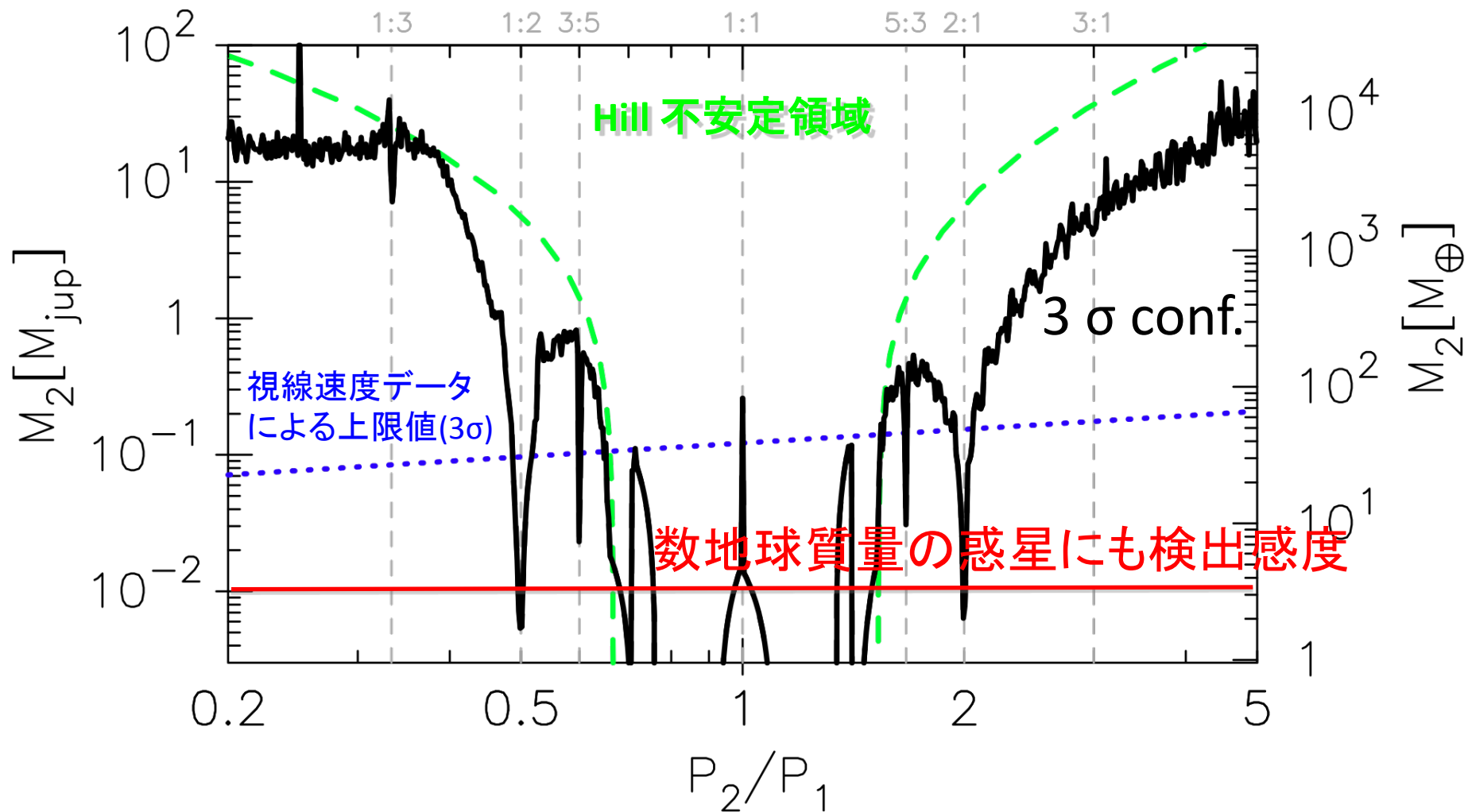
第2の惑星質量の上限値の計算

- 仮定:
 - 同一軌道面上
 - 円軌道



- 周期 P_2 と質量 M_2 に対し、2次元の3体計算で疑似TTVデータを作成。
- フェーズをパラメータとし、実データとフィット。
- ある周期 P_2 において、フィットの χ^2 が直線フィットの χ^2 より9 (3σ) 大きくなるような質量 M_2 を、その周期での質量上限値とする。

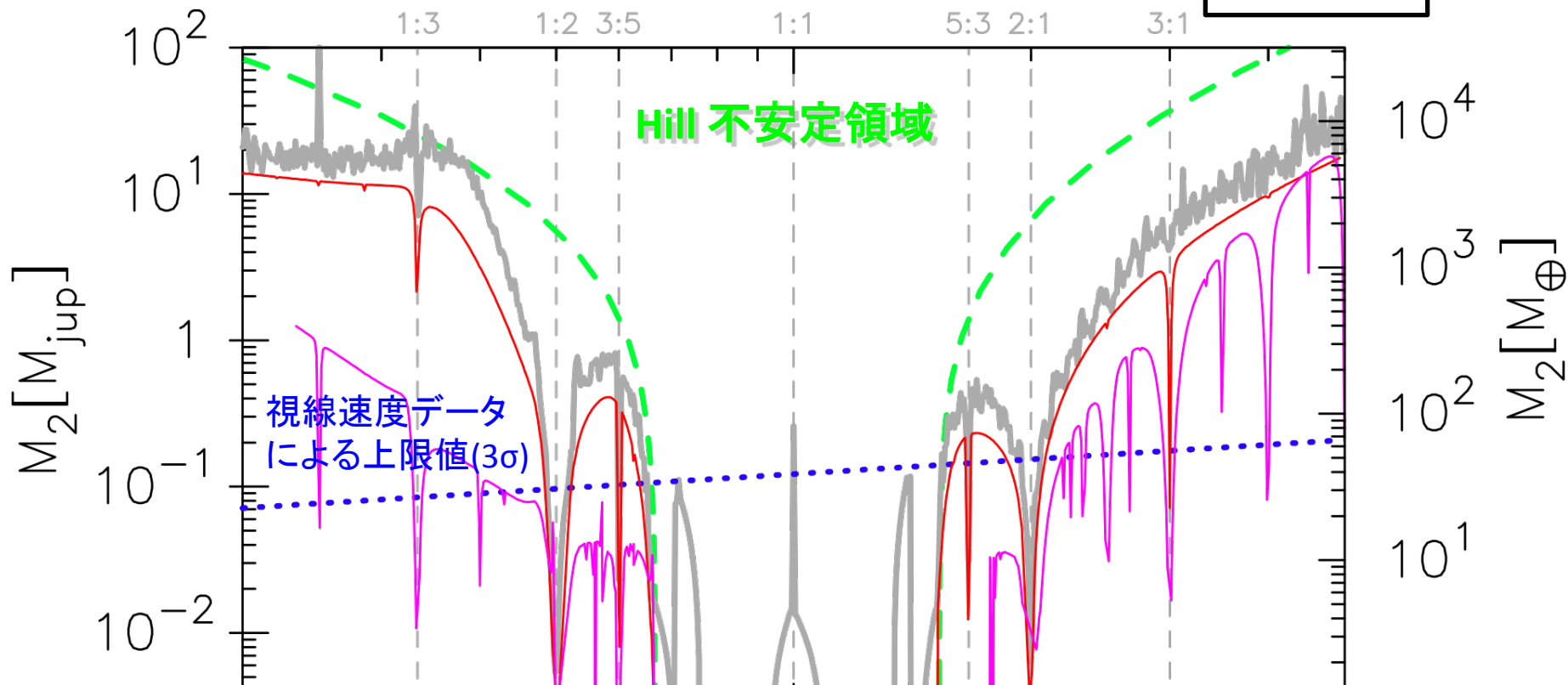
第2の惑星の質量上限値



70秒のTTVを引き起こす惑星領域

$e = 0$

$e = 0.1$



TTVシグナルが本物の場合...

第2の惑星の離心率が小さい場合は、**共鳴軌道の惑星の可能性**が高い。

→ **ガス-惑星相互作用モデル**で形成された間接的証拠

まとめ

- 61cm B&C望遠鏡を用いてホットジュピター WASP-5bのTTV観測を行い、 3.7σ の優位性で公転周期のずれ(rms=70秒)を検出した。
- TTVデータを用いて第2の惑星の質量の上限値を求め、1:2, 2:1, 3:5, 5:3の共鳴軌道で視線速度データで得られる上限値より強い制限(数地球質量)を与えた。
- TTVシグナルが本物で、第2の惑星の離心率が小さい場合、共鳴軌道の惑星の可能性が高く、ガス-惑星相互作用モデルの間接的証拠となりうる。