

Transit timing variation法による 系外惑星の探索

真鍋 翔
伊藤 洋一

神戸大学大学院理学研究科

1.Introduction

1-1.系外惑星とは

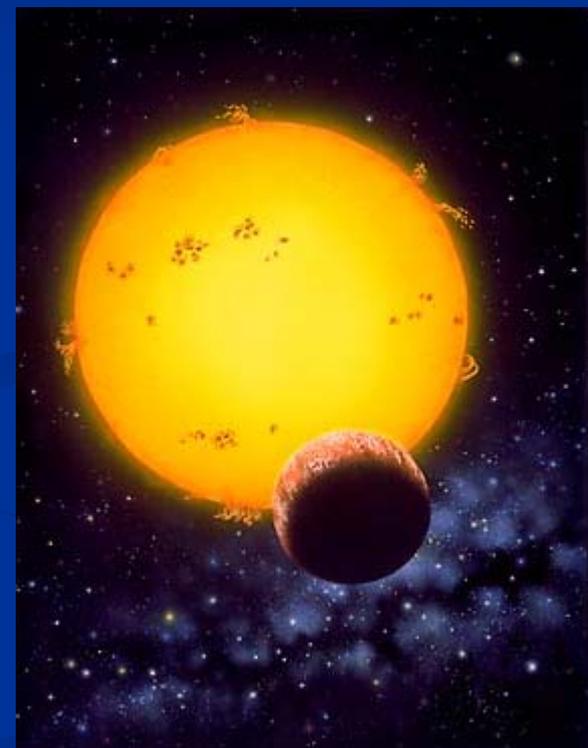
太陽系外の他の恒星の周りを回る天体

- ・主系列星を回る系外惑星の最初の発見
 - Mayor et al. 1995
 - 51Pegb (ホットジュピター)



- ・水星よりも近い位置を公転
- ・木星型惑星

太陽系の惑星からは想像できないタイプの惑星が普遍的にすることが分かった



<http://extrasolar.spaceart.org>

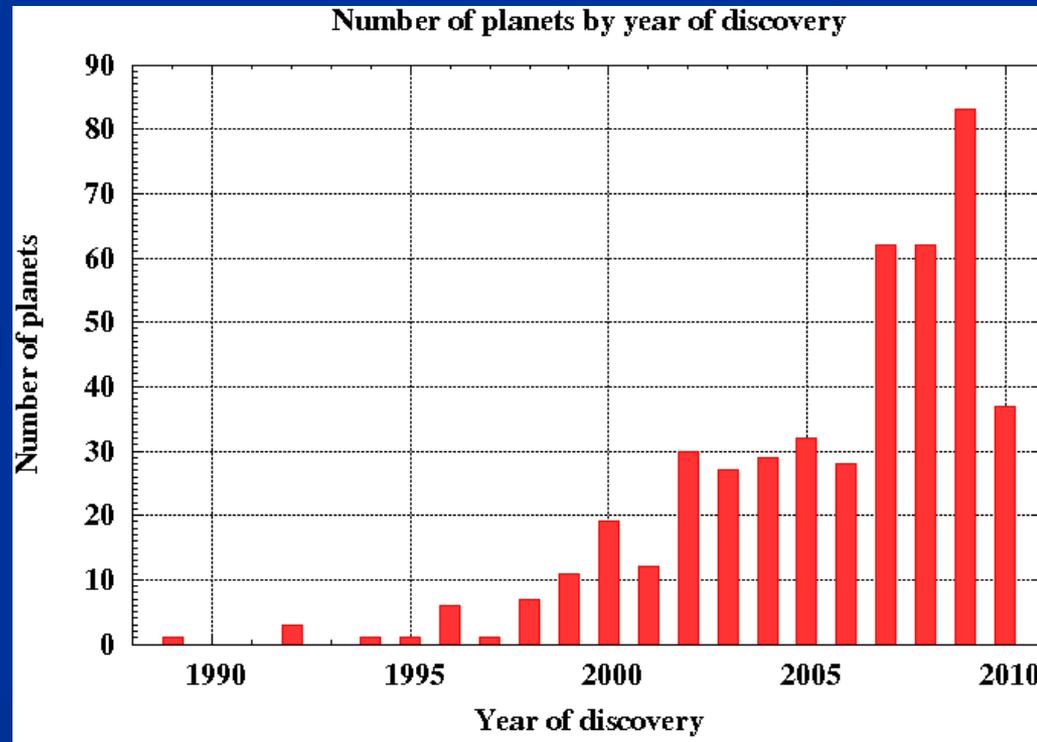
1-2. 発見数

発見数は年々増加の傾向にある

- ・常識が覆されたことにより、探査の対象が広がった
- ・大規模なサーベイプロジェクト
- ・観測装置の性能向上



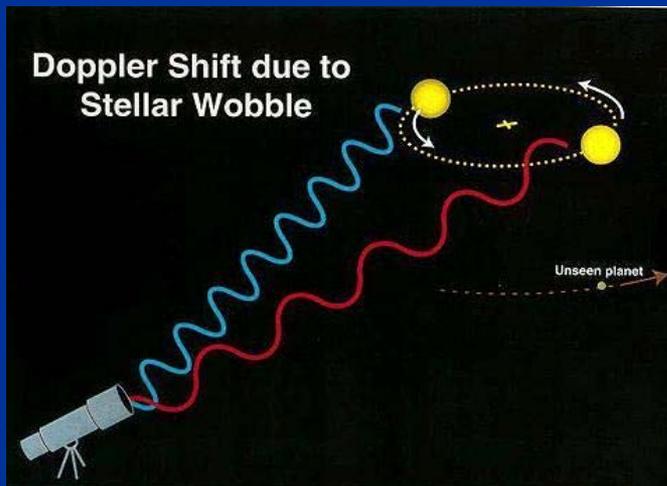
現在までに450個以上
(さらにKepler宇宙望遠鏡は300個以上の系外惑星候補を報告！)



1-3. 観測方法

ドップラーシフト法(約9割)

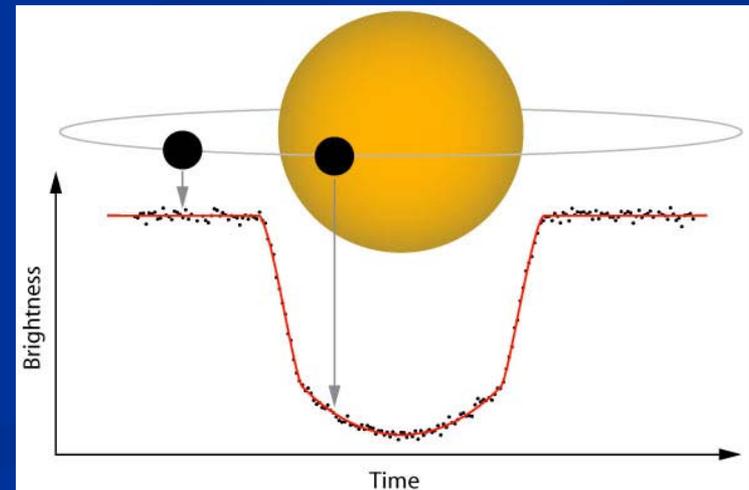
- ・主星のふらつきを分光観測
- ・太陽のふらつきの大きさ
 - ・木星: 13m/s
 - ・地球: 0.1m/s
- ・最も良い精度: HARPSの1m/s



<http://obswww.unige.ch/Exoplanets/method.html>

トランジット法(約90天体)

- ・主星の減光を測光観測
- ・太陽の減光率
 - ・木星: 1%
 - ・地球: 0.01%
- ・トランジットを起こす惑星は2割程度



<http://ifa.hawaii.edu>

1-4.これまでに発見された系外惑星

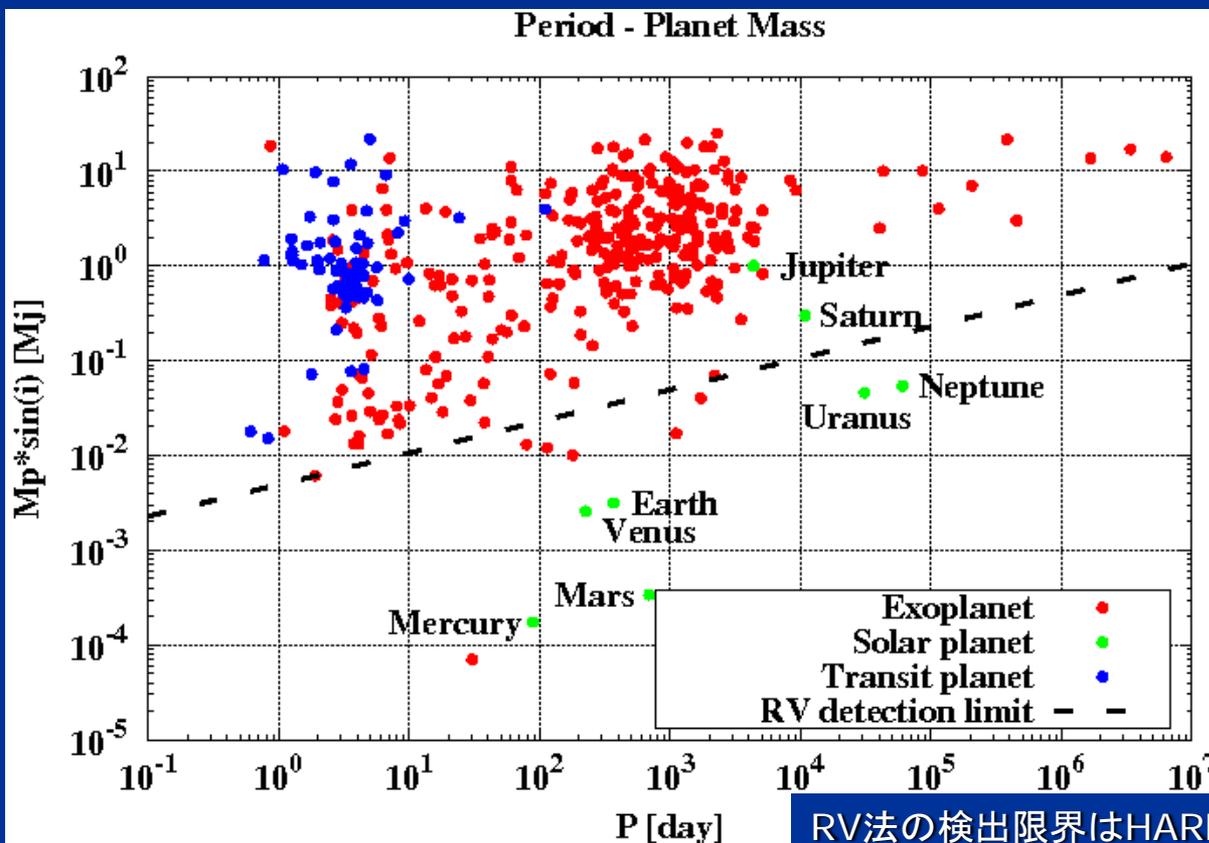
ドップラーシフト法による観測バイアス

より低質量の惑星を発見
するために



Transit timing variation法
(TTV法)

・トランジット惑星による減光
を複数回観測し、減光の周
期のわずかなずれから、惑
星を発見する

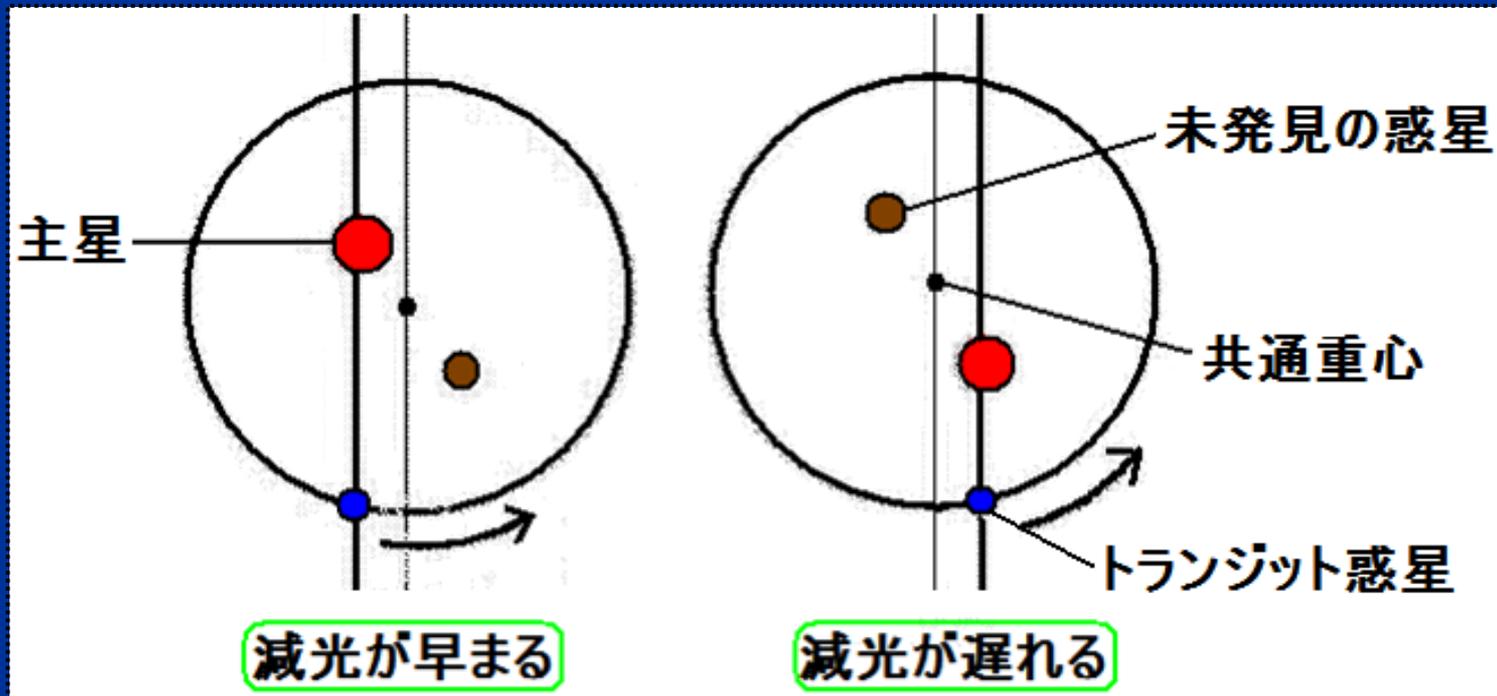


1-5.TTVのメカニズム

『トランジット惑星系』に、未発見の『第2惑星』が存在

→主星が系の共通重心を公転することにより、

→トランジットが起こる周期が一定からわずかにずれる



1-6.TTVの大きさと検出限界

Agol et al. (2005)による近似式

※トランジット惑星の質量を0とした制限3体問題

$$\sigma = \langle (\delta t)^2 \rangle^{1/2} = \frac{P_{tr} a_{pert} M_{pert}}{2^{3/2} \pi a_{tr} M_s}$$

σ : TTVの標準偏差(δt のばらつき)

δt : 時刻のずれの量

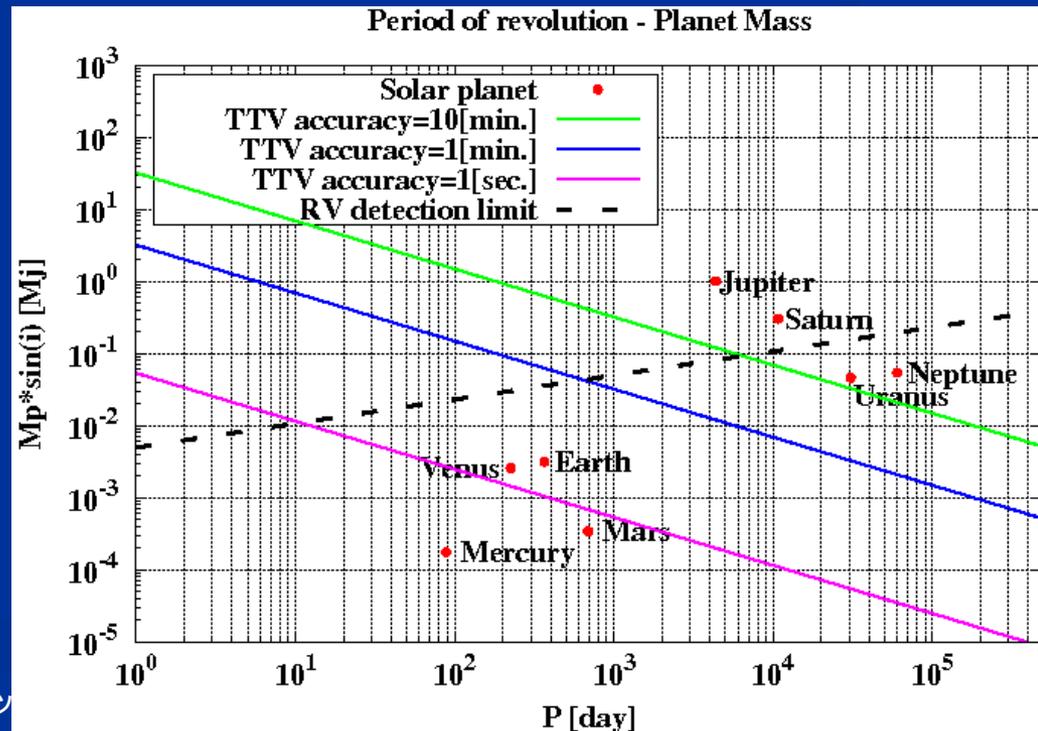
P_{tr} : トランジット惑星の周期

a_{pert} : 第2の惑星の軌道長半径

a_{tr} : トランジット惑星の軌道長半径

M_{pert} : 第2の惑星の質量

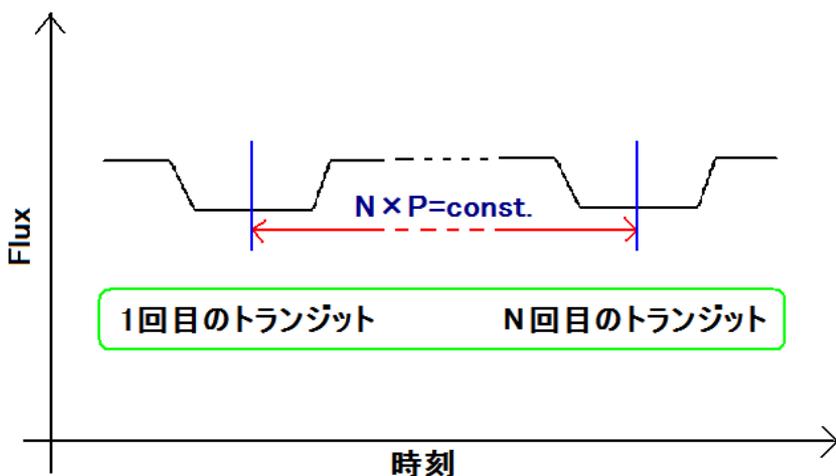
M_s : 主星の質量



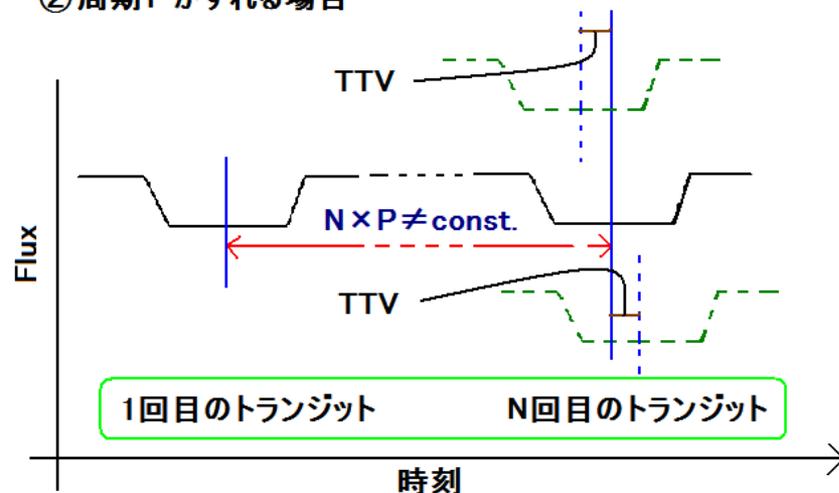
1-7.TTV観測の方法

既知のトランジット天体のトランジット観測を複数回行う

①トランジット惑星の周期Pが一定である場合



②周期Pがずれる場合



- ・それぞれのトランジットにおける観測中心時刻を求める
- ・周期から計算される予測中心時刻と比較する



TTVの変動の周期性を見ることで、惑星を発見する

2.Observation

2-1.観測概要

装置

望遠鏡+CCD:シュミット+2kccd

フィルター:Rバンド(6475 Å)

ターゲット

既知のトランジット天体

V=10~15程度の天体

積分時間

(15,30,45),60s;できるだけ長く(読み出し時間に対する集光の効率を考慮)

フォーカス

サチらない程度にデフォーカスして調整

(ターゲットのピークが20000~30000[cts]に来る程度;FWHMが10~15[pix]程度)

2-2.観測日

・観測日	・天候	・ターゲット
2010/3/2	くもり	WASP-3b
2010/3/3	くもり	HAT-P-13b; GJ436b
2010/3/4	雨	
2010/3/5	くもりのち雨	WASP-12b; HAT-P-13b
2010/3/8	雨	
2010/4/7	くもり(晴れ間あり)	HAT-P-4b
2010/4/8	晴れのちくもり	HAT-P-13b ; GJ1214b
2010/4/9	くもり	HAT-P-13b; WASP-3b
2010/4/10	くもりのち雨	WASP-12b; HAT-P-4b
2010/4/11	雨	
2010/4/12	雨	

3.Reduction

3-1.データ解析①

●IRAFを使用

・一次処理

・オフセット処理

・バイアス処理

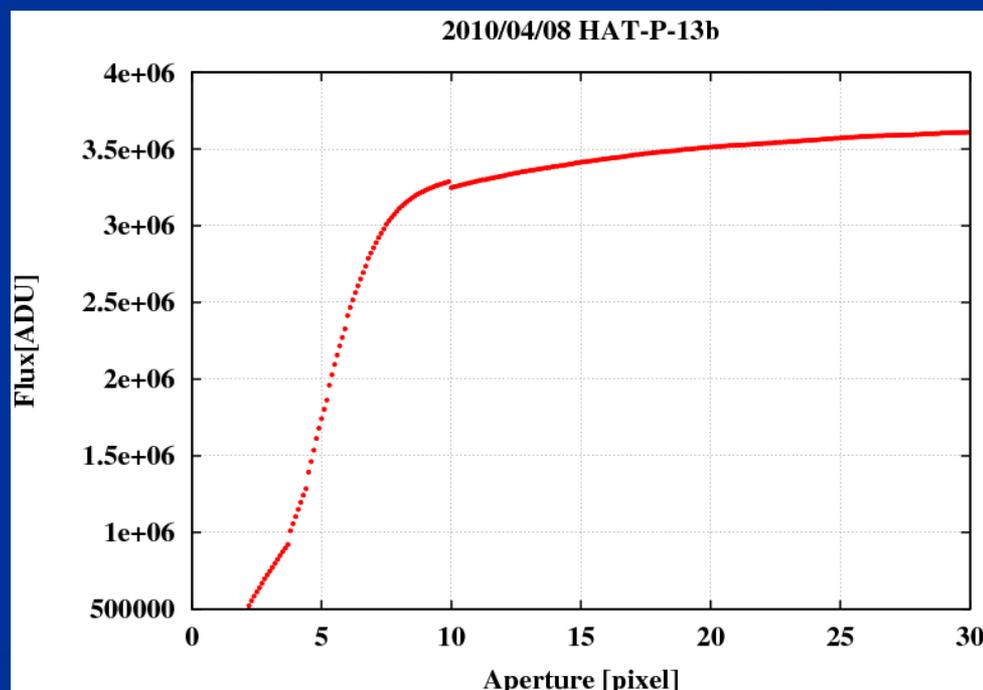
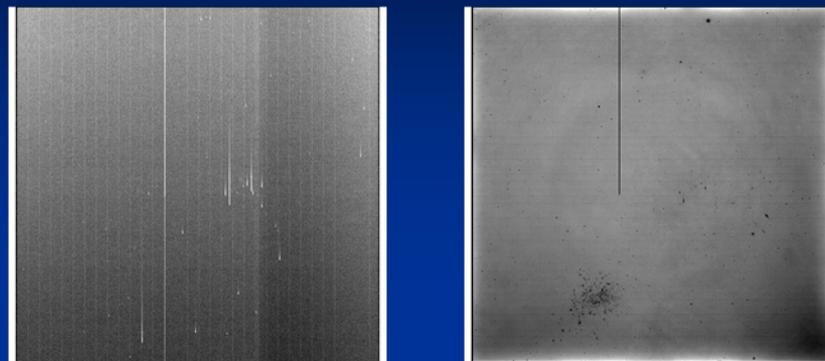
・フラット処理

・アパーチャーの決定

・光源の検出

・測光

・フラックス比の計算



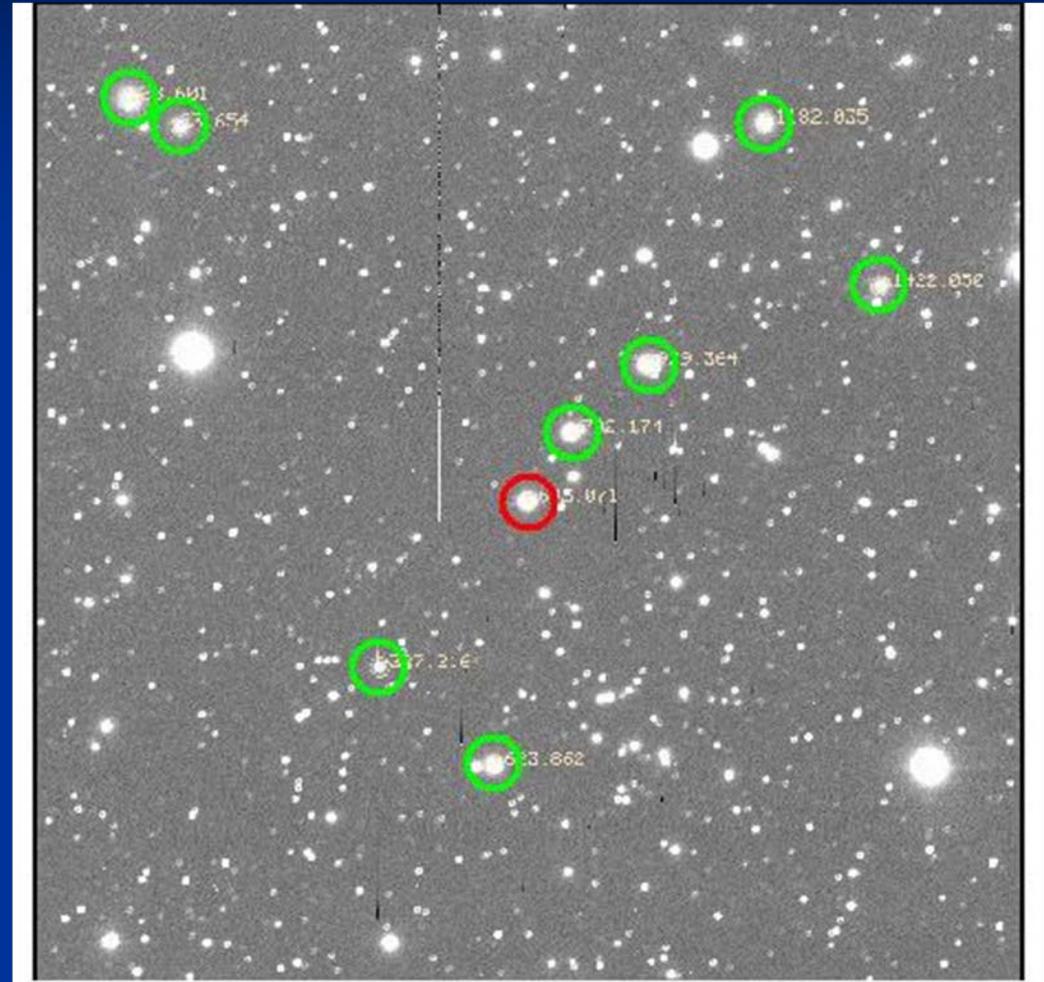
3-1. データ解析②

● IRAFを使用

- ・一次処理
 - ・オフセット処理
 - ・バイアス処理
 - ・フラット処理
- ・アパーチャーの決定
- ・光源の検出
- ・測光
- ・フラックス比の計算

赤丸: ターゲット

緑丸: 参照星

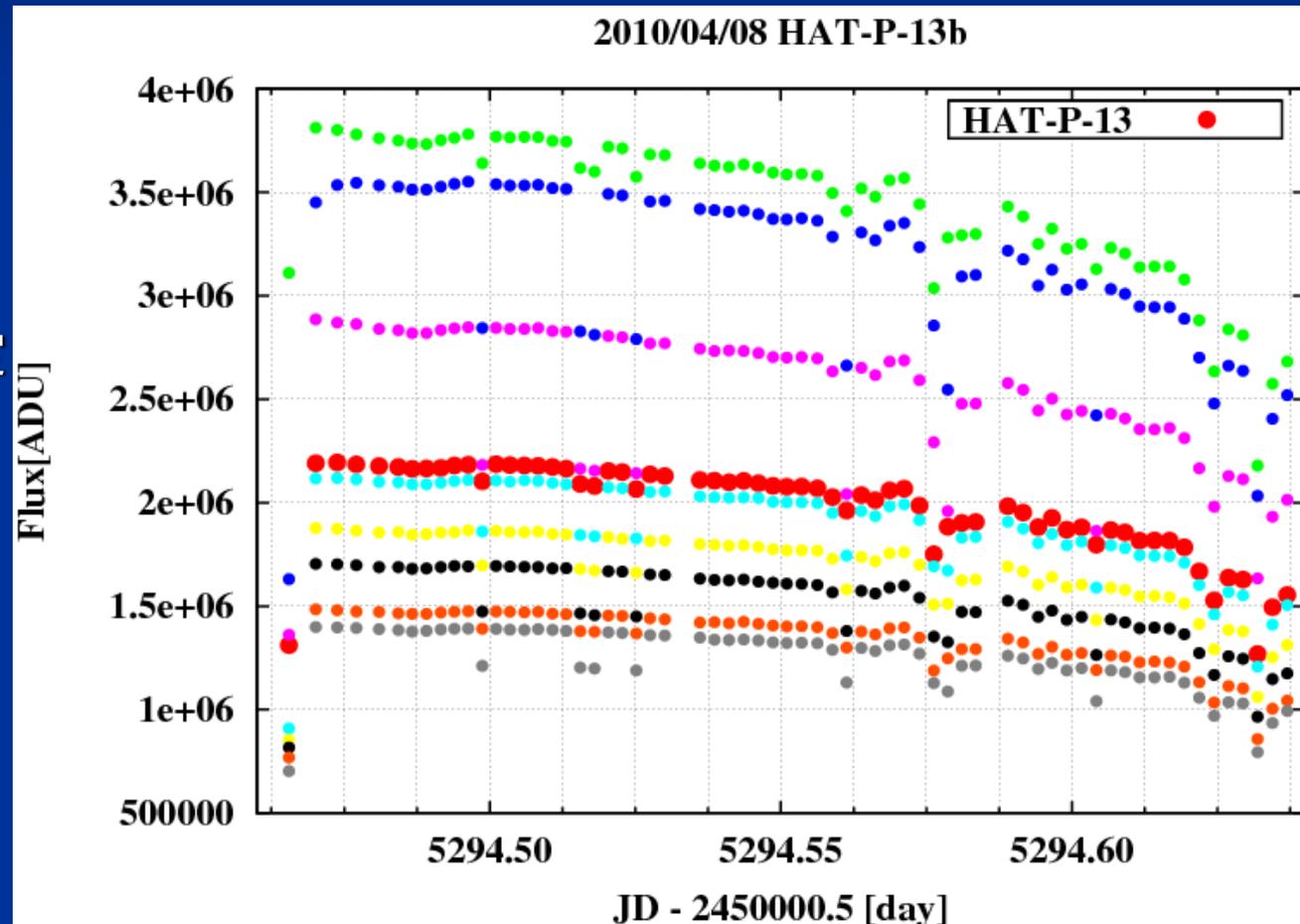


※広視野は良質な参照星を複数得るために大事な要素!

3-1. データ解析③

● IRAFを使用

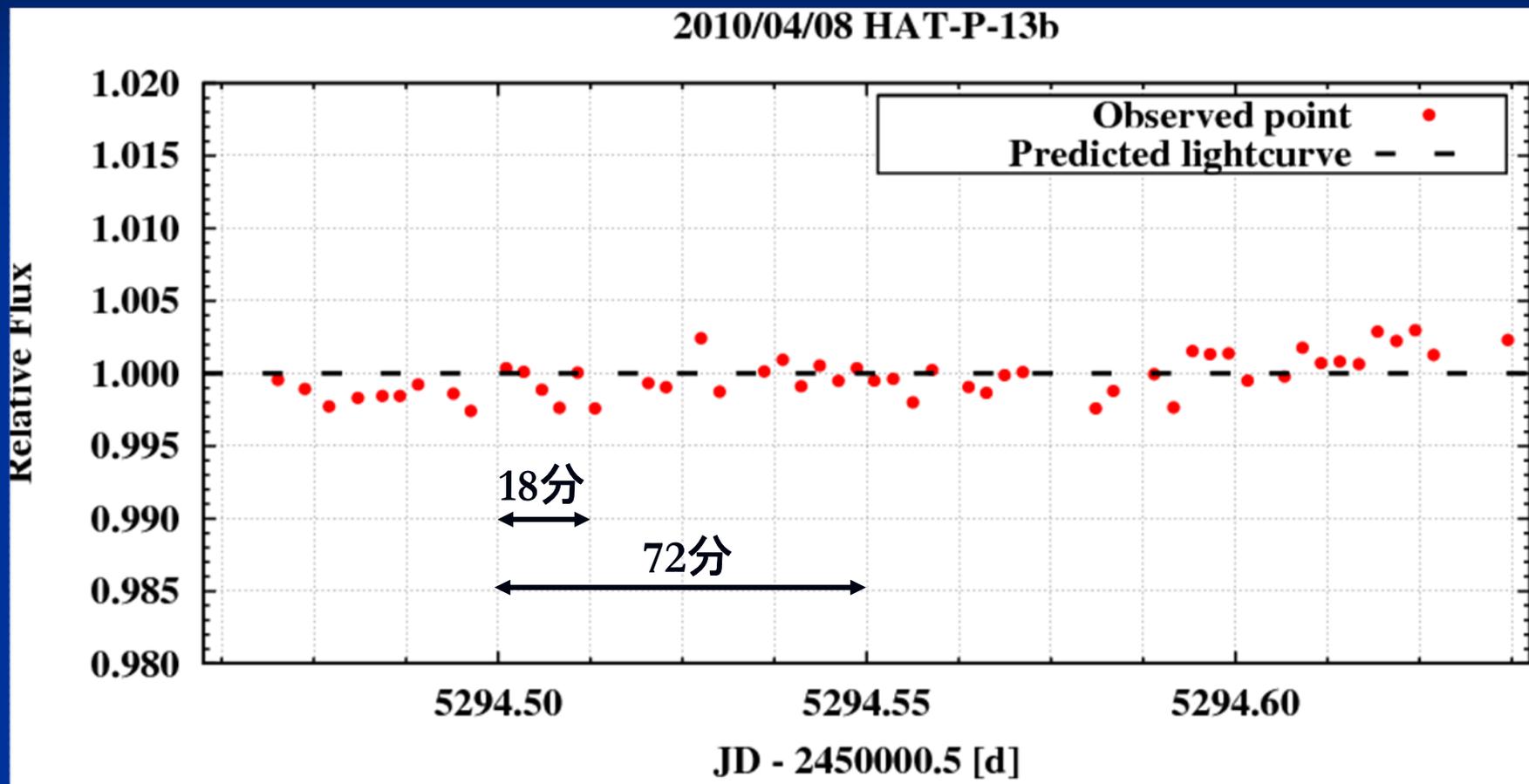
- ・一次処理
 - ・オフセット処理
 - ・バイアス処理
 - ・フラット処理
- ・アパーチャーの決定
- ・光源の検出
- ・測光
- ・フラックス比の計算



4.Results

4-1.測光精度①

相対フラックス



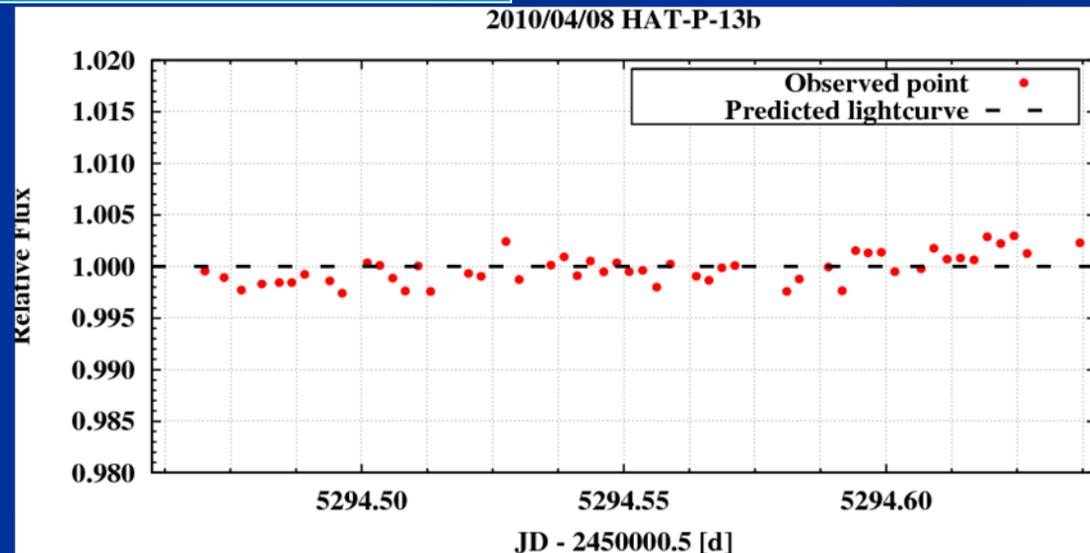
観測時刻

4-1.測光精度②

2010/4/8 20:00-24:00(晴れ)

- ・HAT-P-13b ($V=10.62$ [mag]; 減光率 $\sim 0.55\%$)
- ・トランジットなし
- ・測光精度 $\sim 0.14\%$! ←天王星や海王星のトランジットを検出できるレベル

トランジット検出に十分な精度が出ていることを確認



5.Observation Plan

TTV法による観測

第2惑星の情報を知ることができるのは、トランジット惑星のトランジットのタイミングに限られる

→とびとびの情報しか得られない

 できるだけ連続したトランジットを観測することが重要

ターゲットを絞った観測をすべき

- ・XO-3b($V=9.86$ [mag]; 減光率 $\sim 0.46\%$ 、トランジット継続時間 ~ 173 分)
- ・10~12月期に条件の良い(高度、時刻)トランジットが10回起こる!
- ・1~3月期に5回

XO-3bのトランジットをできるだけ多く(できれば全部)観測したい

6.Summary

- より低質量の系外惑星を発見する方法として、TTV法が有効である
- トランジット観測を3月に5夜、4月に6夜行った
- 天候が良いときに、HAT-P-13の測光精度が約0.14%に達した
- HAT-P-13の減光率が約0.55%なので、トランジット検出が十分可能である
- 今後の計画として、XO-3bのトランジット観測を集中的に行いたい