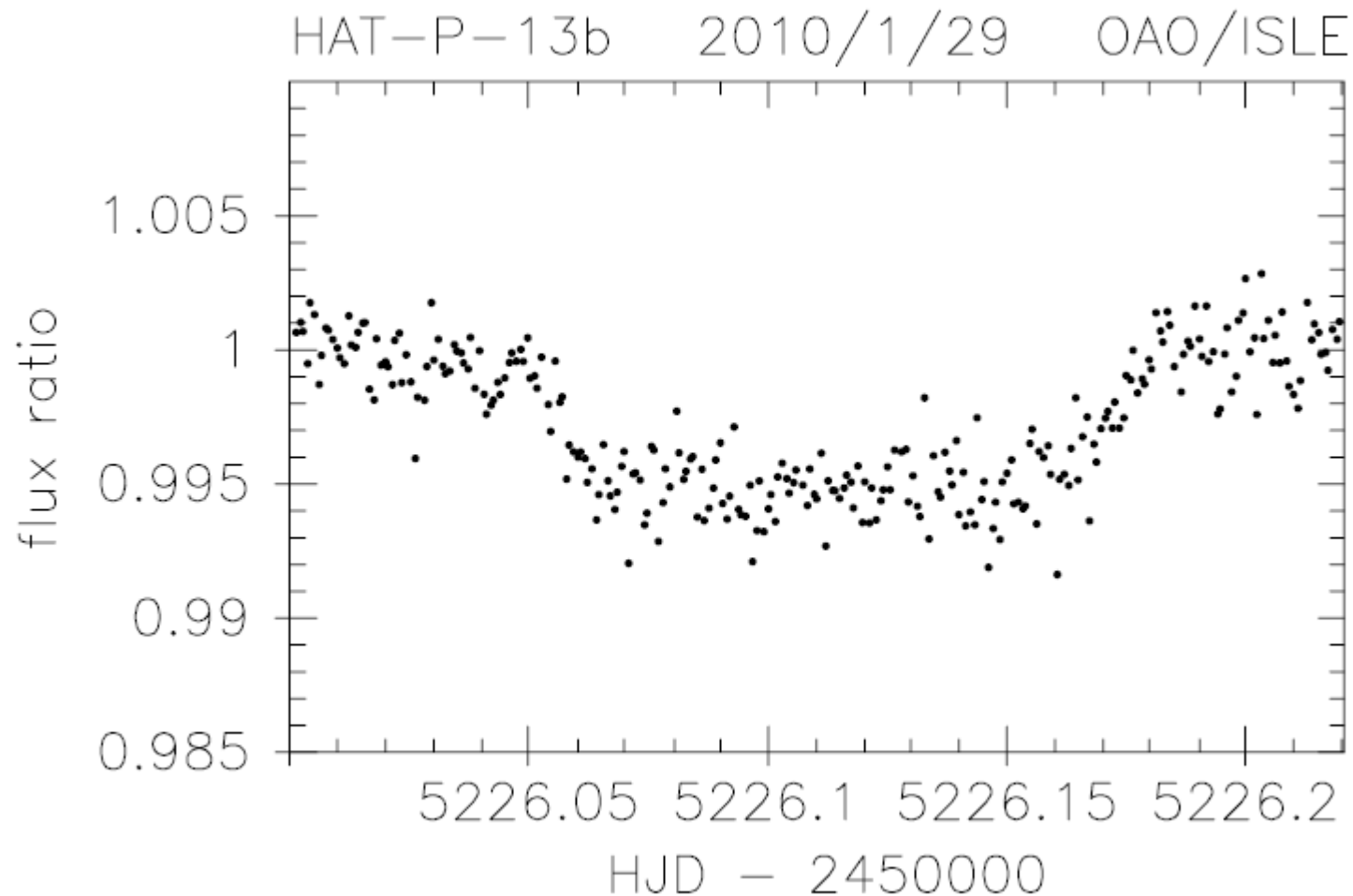


岡山188cm望遠鏡ISLEによる 系外惑星トランジット観測の性能評価



成田憲保 (国立天文台)

発表の概要

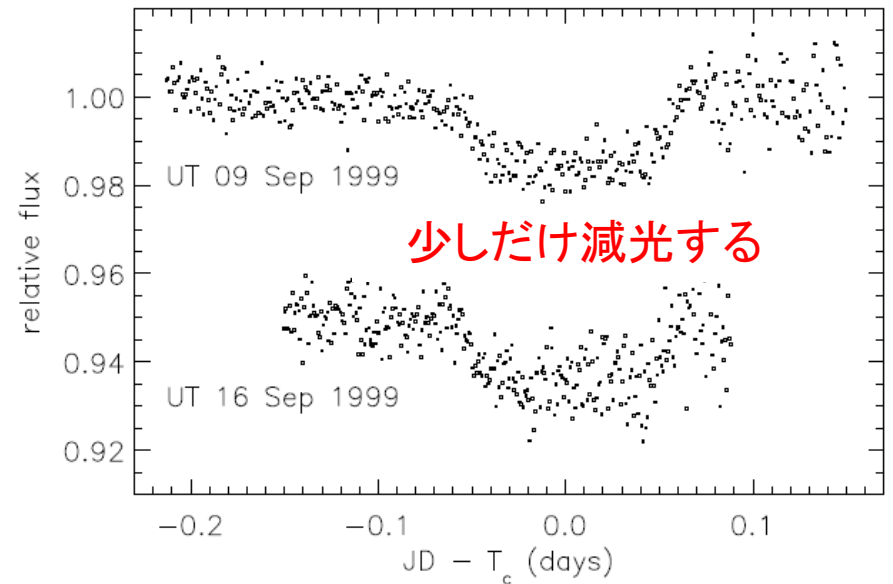
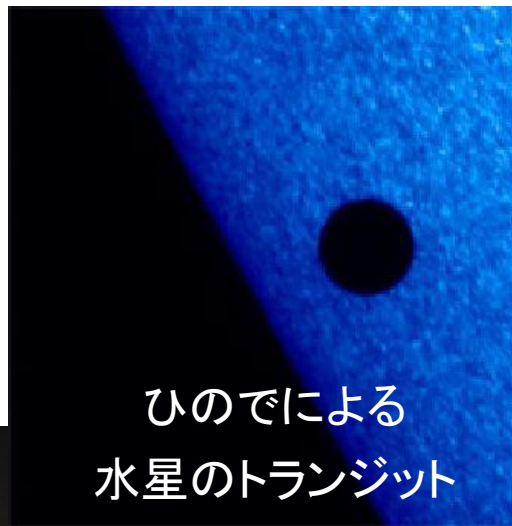
本発表では、OAO/ISLEのJバンド測光観測で
1mmagの測光精度が実際に実現可能であったこと、
およびその方法を報告する

目次

- 系外惑星のトランジット
 - 決定できる物理量
 - 測光観測の主なサイエンス
- 観測提案について
 - ターゲット: HAT-P-13の特長
 - レフェリーとTACコメント
- 観測方法と結果
 - ISLEの特性
 - 結論と展望

系外惑星のトランジット(食)

系外惑星の軌道が太陽系から見てたまたま主星の前を通過する場合、
惑星の公転周期に同期した主星の減光が観測される。



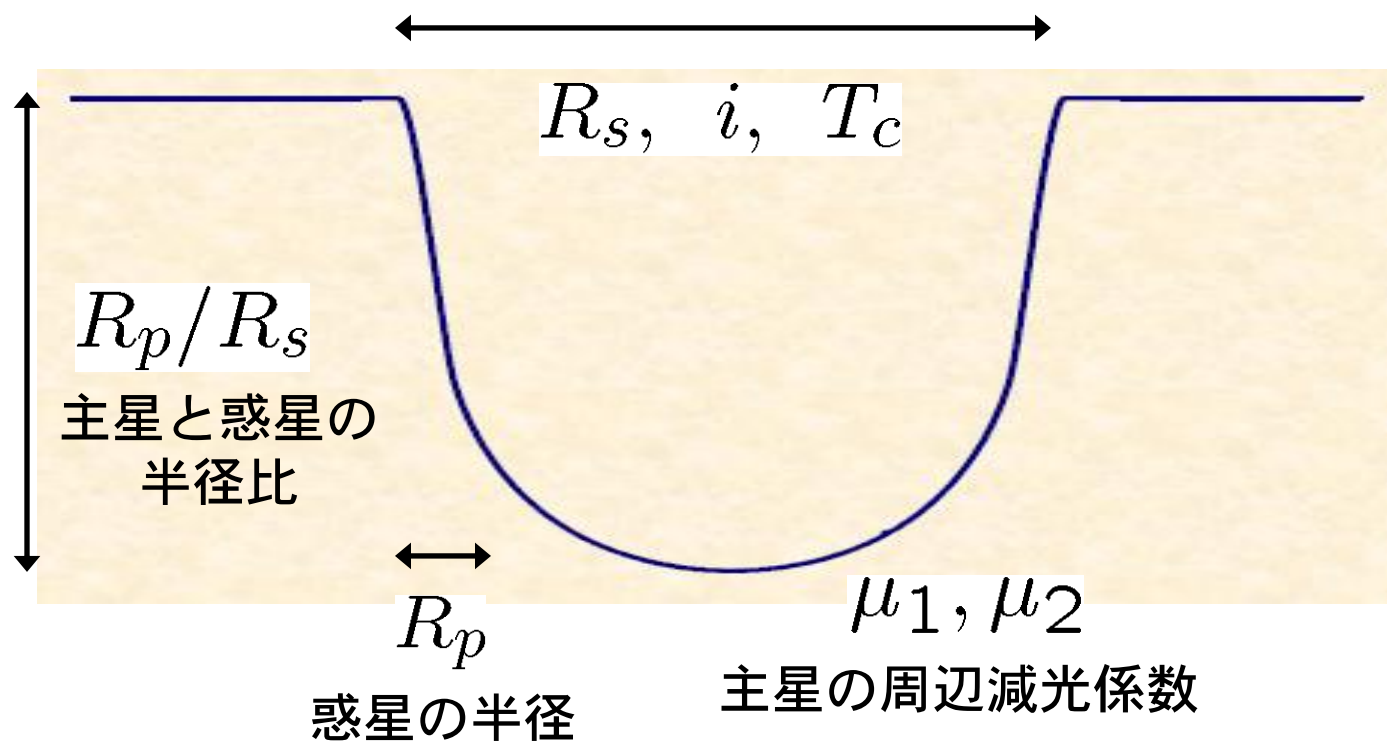
系外惑星のトランジット
(空間的には分解できない)

月のトランジット

太陽系での食現象

トランジット光度曲線からわかること

主星の半径, 軌道傾斜角, トランジット中心時刻



Mandel & Agol (2002), Gimenez (2006), Ohta et al. (2009)

視線速度観測と合わせてわかる物理量

視線速度観測から

- ◆ minimum mass: $M_p \sin i$

トランジット観測から

- planetary radius: R_p
- orbital inclination: i

合わせた情報から

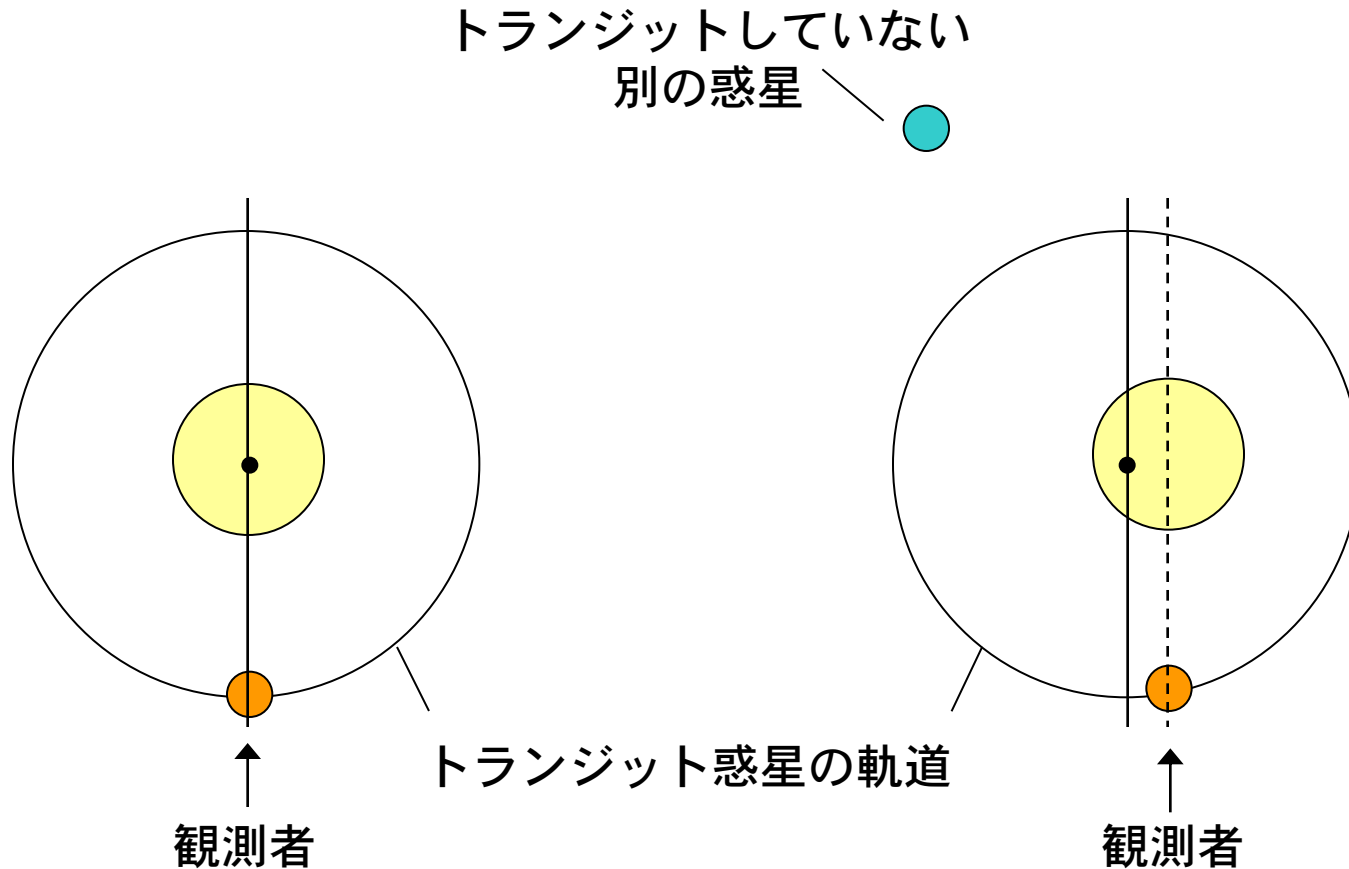
- planetary mass: M_p
- planetary density: ρ

惑星に関する基本的な物理量を全て決定できる

トランジット測光観測の主なサイエンス

- 惑星の内部構造の推定
 - コア質量や構成物質の推定
- 惑星の2次食(惑星が恒星の裏に隠れる現象)
 - 惑星の温度と大気組成の制限
- 惑星に対する摂動天体の探索(TTV)
 - additionalな惑星の探索と軌道の制限
 - 惑星に付随する衛星の探索

Transit Timing Variations (TTV)



別の惑星があるとトランジット時刻の間隔が一定ではなくなる

トランジット時刻の決定精度が重要

TTVのサイエンスの特長

- トランジット惑星のまわりの共鳴軌道にある惑星に対しては、視線速度より低質量の惑星を探索可能
- 複数の惑星があることが分かっている系では、惑星同士の相互軌道傾斜角に制限をつけられる
- 将来的には系外衛星を探索する最も有力な手段

10A-11の提案内容

- 初めて発見された複数惑星を持つトランジット惑星系
HAT-P-13 (G4型、~5Gyr) でTTVを探索する
- 内側のトランジット惑星
 - HAT-P-13b: $0.85 M_{\text{Jup}}$, $e = 0.014$, $P = 2.916$ days
- 外側の褐色矮星(トランジットは未検出)
 - HAT-P-13c: $14 M_{\text{Jup}}$ (minimum mass), $e=0.666$, $P = 448$ days
- TTVで2つの惑星の相互軌道傾斜角が推定できる
 - この惑星系の形成過程に対して強い制限をつけられる
 - 予想されるTTVの大きさは~100秒程度

OAO/ISLE, Jバンドの選択理由

- Tcの測定には高精度(~ 1 mmag)、高頻度(~ 1 min)で、なるべく赤いバンド(特にR, i, z, Jなど)が好ましい
 - やや暗い(V=10.6, J=9.3)HAT-P-13に対しては2 m classが必要
 - 青いバンド(B, Vなど)では参照星とのextinctionの差や、恒星のlimb-darkeningによって誤差が増える
 - さらに赤くなるとバックグラウンドノイズが大きすぎる
 - UH2.2m/z bandでも提案 \rightarrow UHと完全にかぶって不採択
- 1mmag/1minでトランジットを観測できれば、60秒以下のトランジット時刻決定精度

あるレフェリーコメント

- なぜ近赤外測光を行いたいのか？
 - ▶ 分野外の人にわかりにくかったのはこちらの責任
- 参照星とターゲットが視野の両端にある場合に、近赤外で1mmagの精度で測光を行うことは難しい**だろう**。
- 参照星が一つであることも、十分な精度はでない**だろう**。
- Jバンドとはいえ、この精度で測光するためのフラットやダークの同一性の保証は難しい**だろう**。
 - ▶ 全てレフェリーの主観的予想 → 科学的根拠はなく、実証が必要
- このテーマを実施するためには、十分な視野をもつ**小型望遠鏡**、可視での**継続的な測光観測**を勧める。
 - ▶ 同意する部分もあるが、**小型望遠鏡では精度が足りない**

TACコメント

- チャレンジングな内容ですが、2m級望遠鏡での挑戦として興味深い観測提案であると評価しました。一方で、かなり離れた位置にある参照星の測光や近赤外での測光の安定性など、果たして必要な精度が達成できるかどうか分からない点が多く、かつスケジューリング上の要請もあって、現時点で全ての観測夜数を割り当てるに至りませんでした。装置チームと事前の打ち合わせを入念に行い観測を実施して下さい。その上で首尾よく必要な精度が達成できることが確認できれば、さらなる観測提案を行われることを期待します。

10A-11観測の状況

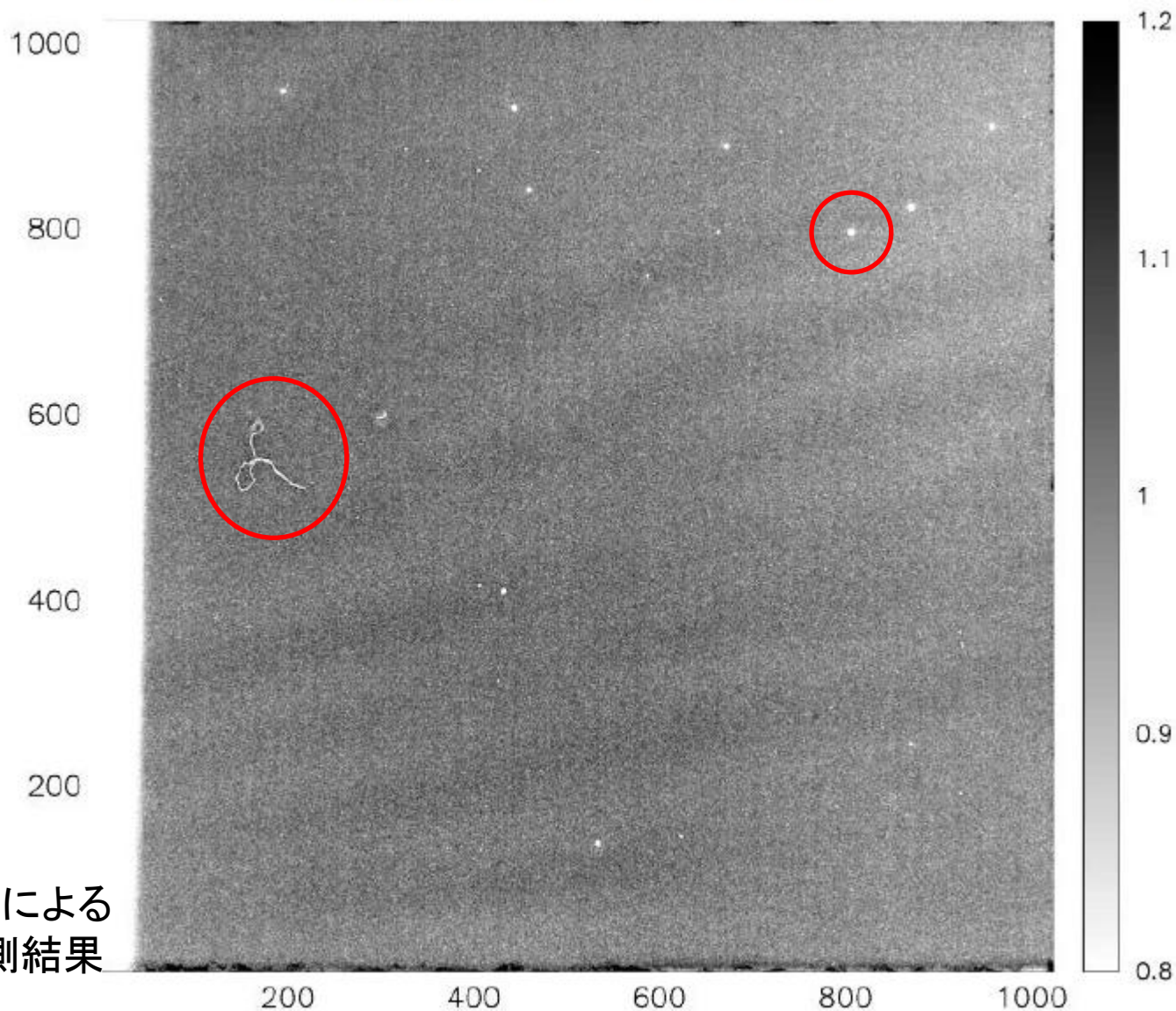
- 9夜要求して、4夜採択
- 4夜中1夜のみ晴れ
 - その他は曇り・雪
 - TTVの観測としては1夜だけでは不十分
 - 継続して観測提案をする予定
- 他の3夜はひたすら試験観測
 - フラットの一晩での変化が小さいことを確認
 - 残光効果の時定数の決定

高精度測光観測に必要な準備

- バッドピクセル位置の把握
- フラット特性の把握
- トラッキング精度の把握
- その他の検出器特性の把握
 - ✓ 非線形性
 - ✓ 残光効果

フラット画像とバッドピクセルの位置

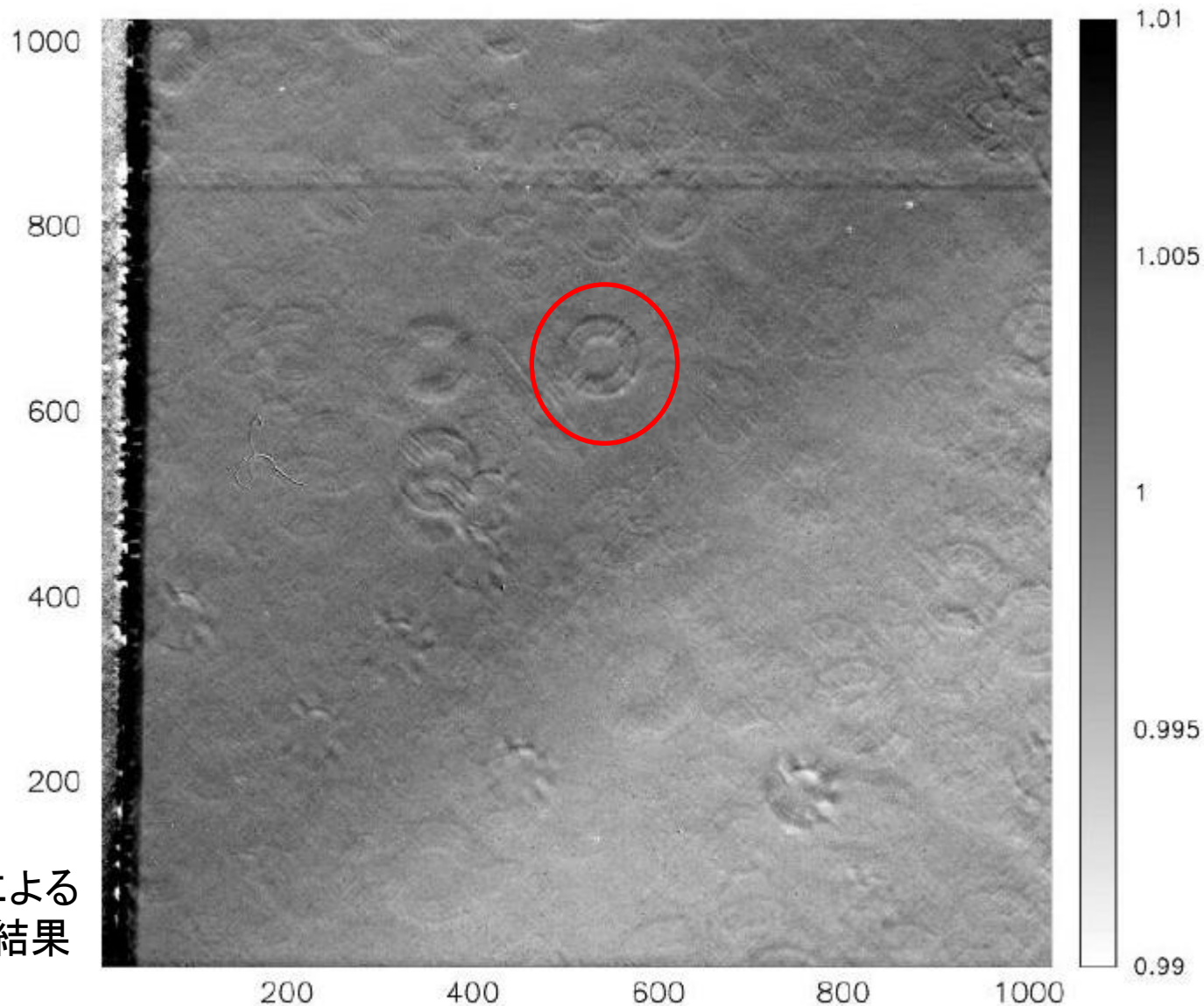
2010/01/06 のドームフラット画像 SN 4000弱



柳澤さんによる
試験観測結果

別の日のフラットとの比の画像

SN 4000弱



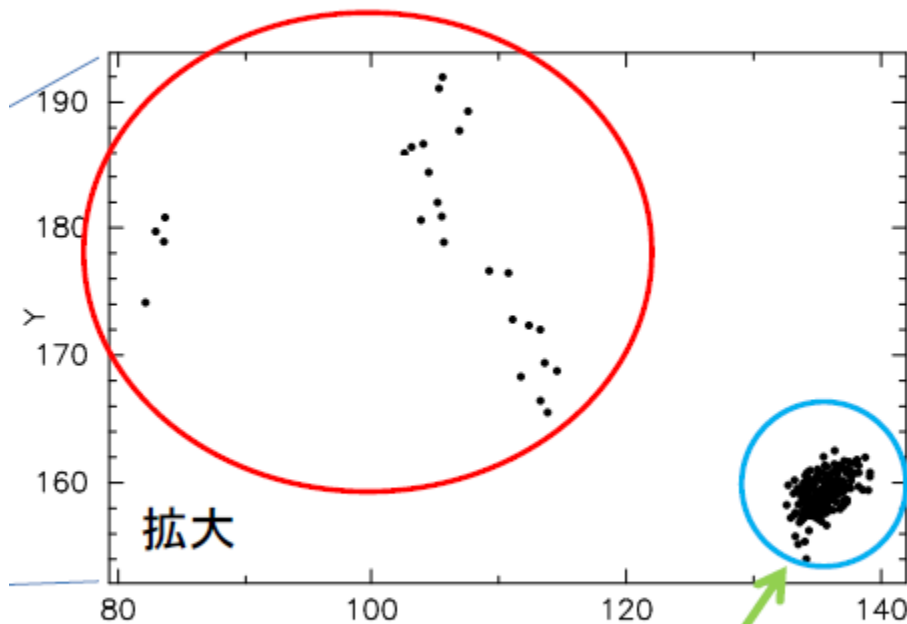
柳澤さんによる
試験観測結果

フラット試験観測から分かったこと

- 別の日のフラットは使えない
- 1日のうちの変化は局所的に1mmag以下だった
- 同じ日に撮ったSNの高いフラットで、星像の位置が動かなければフラットの系統誤差は抑えられる
- 毎日15sec × 300枚 (SN 4000弱) のドームフラットを取得することとした

トラッキング性能について

Auto Guider
の Guide Window
から星が外れる

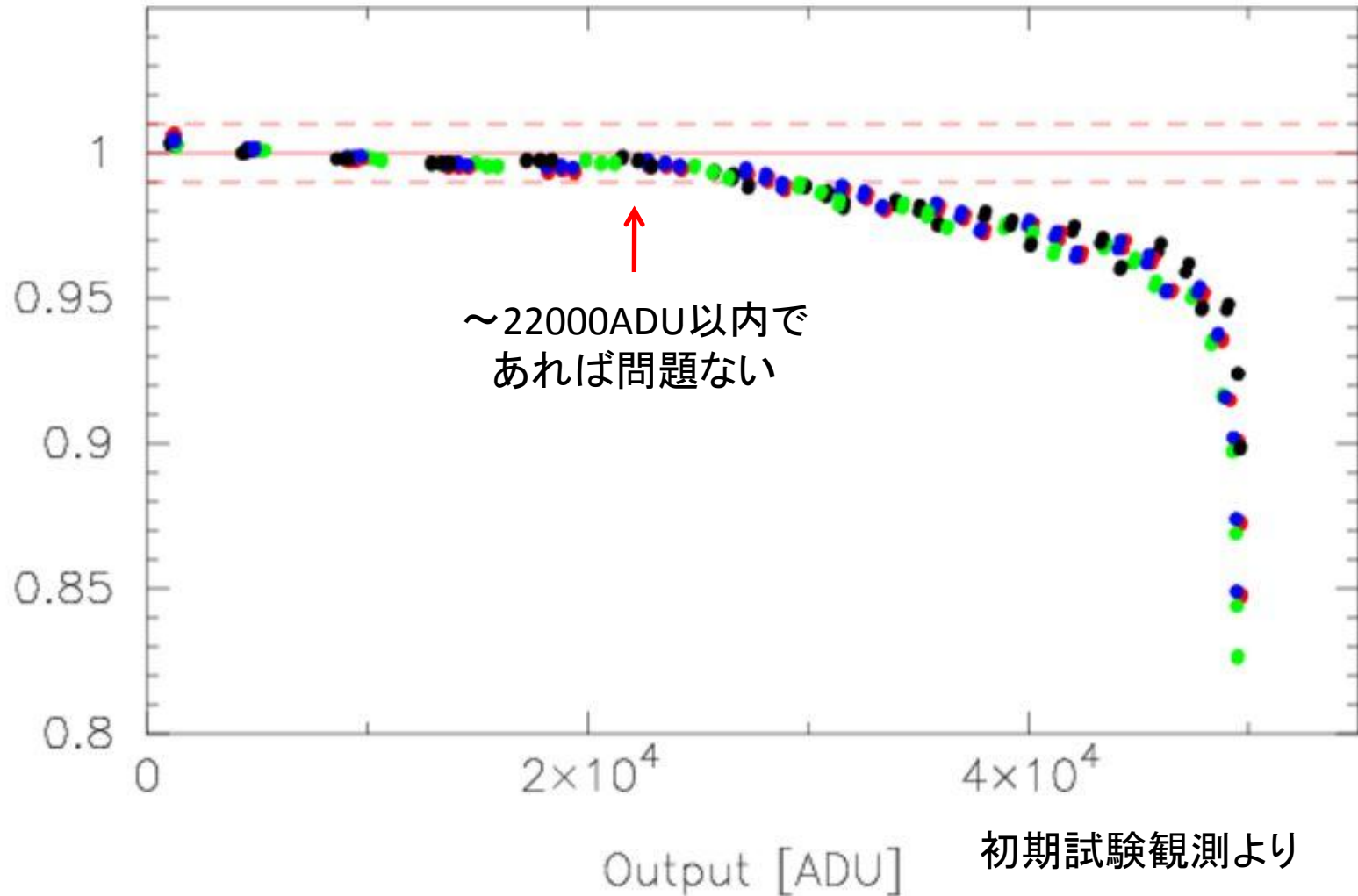


柳澤さんによる
試験観測結果

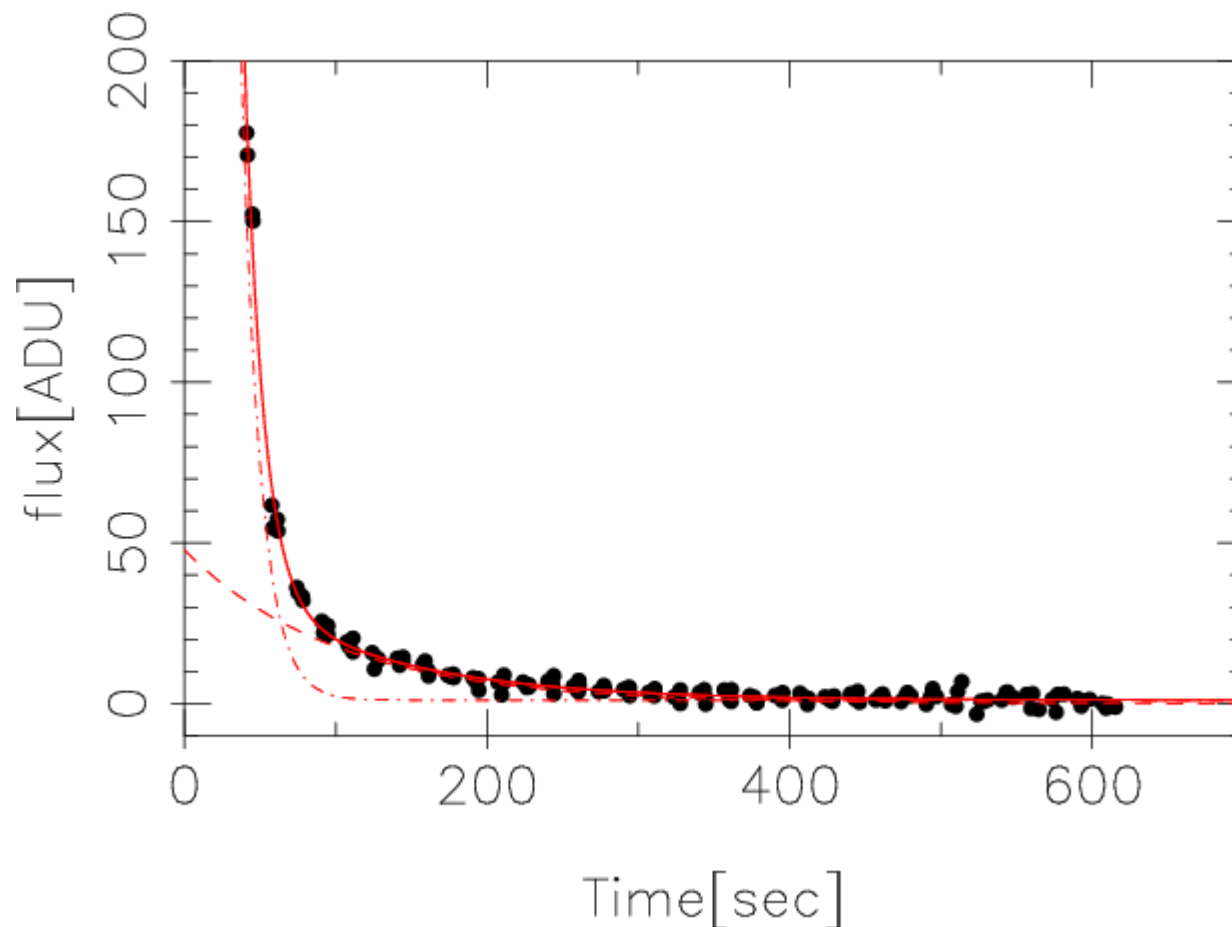
X: 135.49 ± 1.37
Y: 159.13 ± 1.37

- フラットの局所的変動を拾わないよう移動は数ピクセル以内が望ましい
- オートガイドが機能すればOK
- フラット起源の系統誤差は十分1mmag以下に抑えられる
- 本観測時には10回の露光につき1回ガイドをなおした
- 平均的なオーバーヘッド時間は10秒程度(毎回行くと20秒ほど)

検出器の非線形性



赤外検出器の残光効果



明るい光を受けると、2つの時定数で減衰する残光が残る
正確な解析には数枚前までのデータをもとに補正が必要

高精度トランジット測光観測の方法

- 観測開始時にターゲットと参照星をbad pixelに載せないように配置し、オートガイドで位置を固定する
- 星像を十分にデフォーカスする
 - 直径30-40 pixel でPSFがドーナツ状になるようにする
 - 本観測時には20-30 pixelで、シーイングが良くなった時に非線形性を気にする領域に入ってしまったので要改善

星像の配置とPSF

柳澤さんによる
試験観測結果

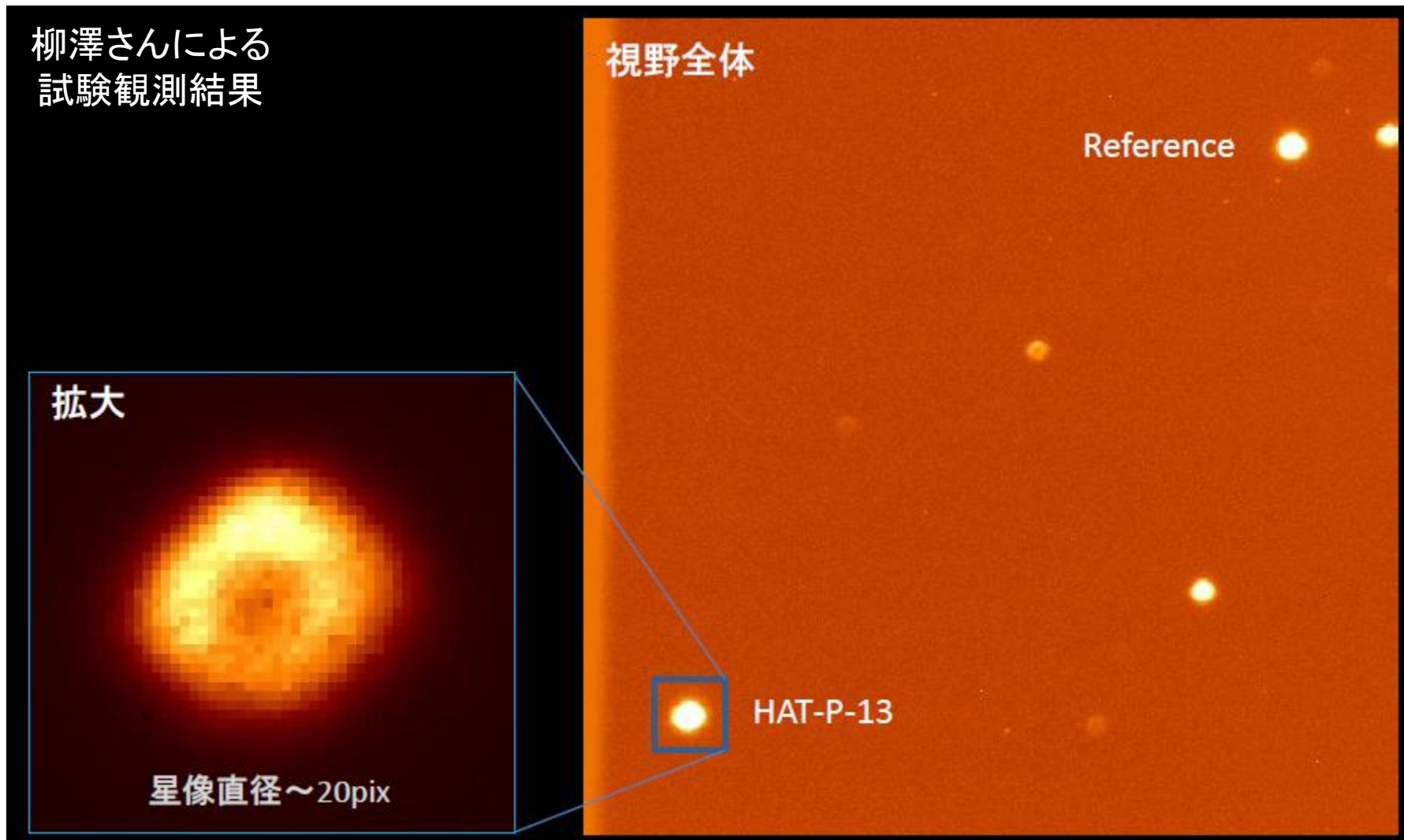
視野全体

Reference

拡大

星像直径 ~ 20 pix

HAT-P-13

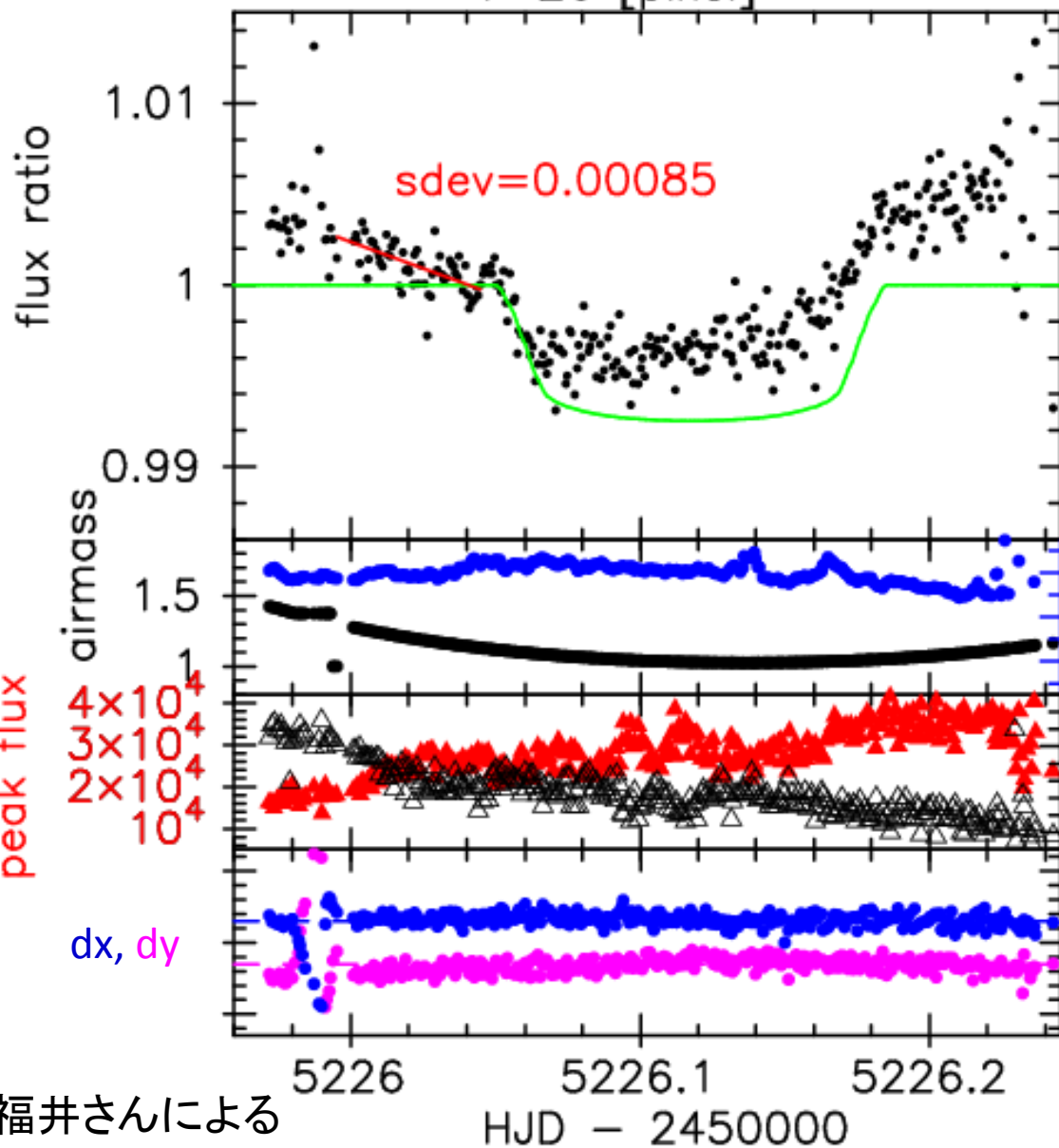


解析の方法

- ターゲットと参照星をアパーチャー測光
- ターゲットのフラックス/参照星のフラックスを計算
- トランジット外のデータを用いてair mass(z) と時間(t)との相関を取り除く

$$\Delta m_{\text{cor}} = \Delta m_{\text{obs}} + \Delta m_0 + k_z z + k_t t$$

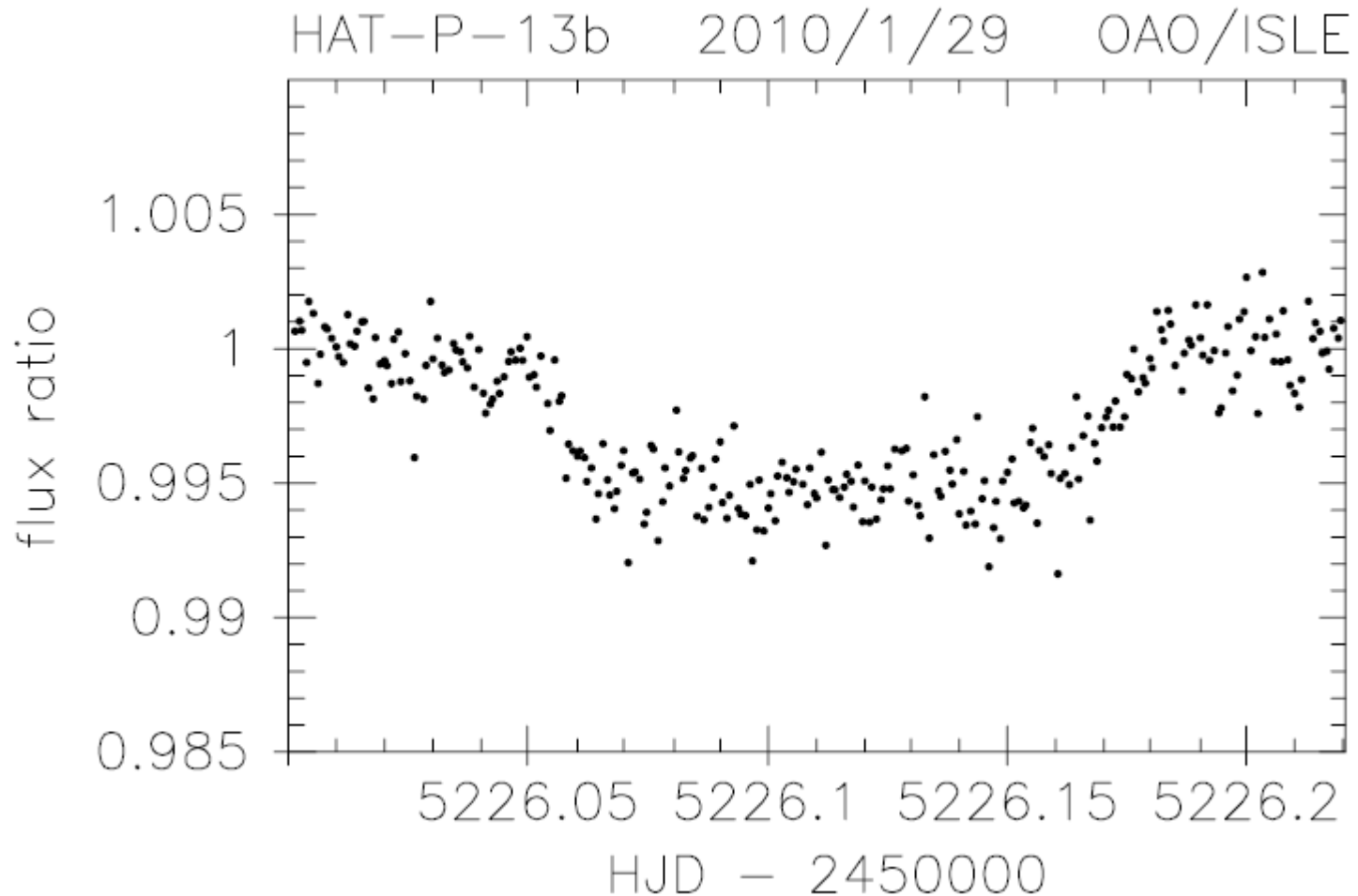
HAT-P-13 2010/1/29
r=26 [pixel]



- エアマスと時間による変動がのったままの図
- エアマスの変化は大きいので要補正
- ピクセル位置の変化も大きい場合はそちらも補正する必要がある
- 今回は問題なさそう

福井さんによる
解析結果

解析結果のライトカーブ



OA0/ISLEで観測された初めての系外惑星トランジット
世界的に見てもかなり良い精度が出せることがわかった

今後の主なタスク

- 非線形性や残光効果などの系統誤差を取り除く
解析ルーチンの開発
- 当初の提案どおり複数のトランジットを観測して、
一定周期からのずれを測定
- 同様の手法でHバンド、Kバンドではどれくらいの
精度になるか？ 可能であれば試験観測をお願い
したい

今後の面白い観測ターゲット

- **M型星まわりの地球型惑星のトランジット観測**
 - M型星は小さいので、地球型惑星のトランジットも地上から検出可能(減光率 1%オーダー)
 - 可視では暗いが、近赤外では5等以上明るくなる
 - 数十日以内に複数の地球型惑星があることが多い
 - 可視より高精度な地球型惑星のトランジット観測が可能
- **TTVが疑われる系で追観測を実施する**
- **周期~1日のextreme hot Jupiterの2次食の観測**
 - Kバンドにおいて複数の地上検出例あり

OAO/ISLEの性能評価のまとめ

- 原因不明の系統誤差が小さく、視野内に良い参照星があれば、比較的楽にJバンドで $\sim 1\text{mmag}$ レベルが達成できる
- トランジットをする系外惑星が近年多数発見されており、さらなるターゲットの拡大が見込まれる
- 世界的にも有数の良装置となるポテンシャル
 - 今後の共同利用観測と成果の発表が重要