

サブミリ等級の精度を達成する までの試行錯誤

大島 修(岡山・水島工業高校)

今から思うと

観測が容易だった初期の例

- HD209458 (検出1999年)
 - $V=7.65$
 - 減光量 0.016等
- HD189733 (検出2005年)
 - $V=7.67$
 - 減光量 0.028等

右図は、三瓶自然館の矢田他による観測

口径10cmで十分じゃないか

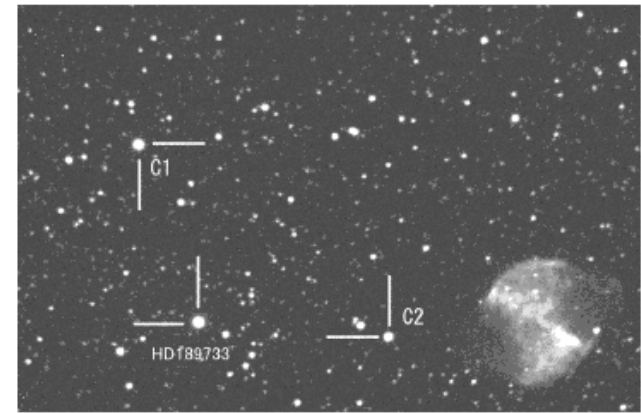


図1 観測星野

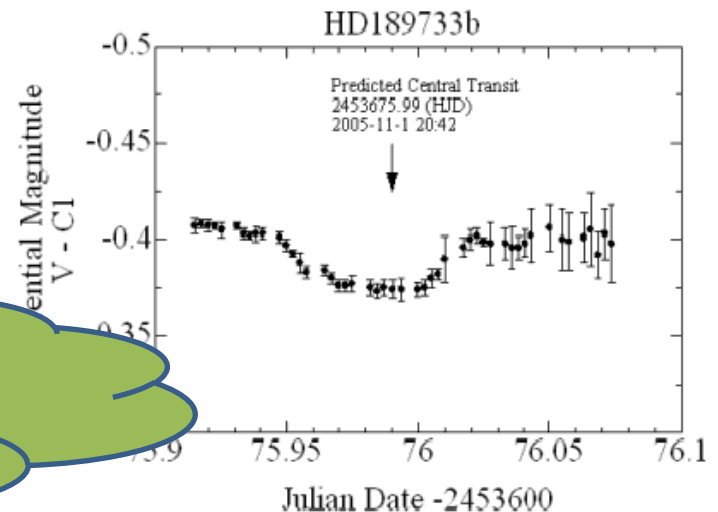


図2a HD189733 と比較星の光度差

Available predictions: (UT evening date)

2010-09- 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30,

2010-10- 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16,

User defined time span: From: Till:

Transits predictions for ELONGITUDE: 134° and LATITUDE: 34°

OBJECT		BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)	D (min)	V (MAG)	DEPTH (MAG)	Elements Coords
TrES-4 b	Her	10:35 73°,W	17.09. 12:23 51°,W	14:11 30°,NW	216	11.3	0.011	54230.9053+3.553945*E RA: 17 53 13.05 DE: +37 12 42.8
HAT-P-7 b	Cyg	10:49 77°,N	17.09. 12:50 63°,NW	14:52 43°,NW	243	10.5	0.007	53790.2593+2.2047299*E RA: 19 28 59.37 DE: +47 58 10.5
CoRoT-11 b	Ser	11:59 51°,SW	17.09. 13:14 37°,W	14:29 22°,W	150.054	12.94	0.012	54597.679+2.99433*E RA: 18 42 44.95 DE: 05 56 16.12
WASP-2 b	Del	15:25 33°,W	17.09. 16:19 22°,W	17:13 11°,W	107.9	11.98	0.022	53991.5146+2.152226*E RA: 20 30 54 DE: +06 25 46
WASP-26 b	Cet	15:18 42°,S	17.09. 16:28 40°,S	17:39 33°,SW	141	11.3	0.011	55123.6379+2.7566*E RA: 00 18 24.7 DE: -15 16 02.3
XO-5 b	Lyn	15:40 8°,NE	17.09. 17:17 24°,NE	18:53 41°,NE	193	12.13	0.014	54485.6664+4.187732*E RA: 07 46 51.959 DE: +39 05 40.47
WASP-1 b	And	16:06 84°,W	17.09. 17:59 60°,W	19:52 37°,W	226.4	11.79	0.017	54013.3127+2.51996*E RA: 00 20 40 DE: +31 59 24
CoRoT-4 b	Mon	15:58 0°,E	17.09. 18:10 27°,E	20:23 50°,SE	265	13.7	0.013	54141.36416+9.20205*E RA: 06 48 46.67 DE: -00 40 22.2
HAT-P-1 b	Lac	9:17 32°,NE	18.09. 10:37 47°,E	11:57 63°,E	159.8	10.4	0.017	53984.397+4.46529*E RA: 22 57 47 DE: +38 40 30

)

- 主星
11~12
等(暗い)
- 減光量
0.01等
=10ミリ
等級

トランジット観測と測光精度

- 検出された系外惑星全490個の内、101個がトランジットを起こす惑星(以下、トランジット惑星)
- トランジット観測
 - 発見:サーベイ(分光・測光)による発見
分光観測から候補にあげられた天体のトランジット検出(N2Kプロジェクト→佐藤講演)必要精度1~10ミリ等級
 - 既発見トランジット惑星の測光観測
分光と測光同時観測(ロシター効果)
TTV観測(→福井講演)
- だんだん暗い対象が増えている
- 測光精度は高いほど良い
 - 地球サイズの惑星の検出には、更に高精度が必要
減光量 0.1ミリ等級for G型主系列
1ミリ等級for M型主系列

高精度な測光を行うには

- 主な誤差要因をいかに減らすか
 - 偶然誤差
 - ショットノイズ(光子ゆらぎ)を減らす
S/N比:天体からの光子数の平方根で向上
ピンぼけにして露出時間を延ばす。明るい比較星を選ぶ。
 - 地球大気のシーイング(シンチレーション)ゆらぎ
露出時間を伸ばす、口径を大きくする
 - 背景ノイズを減らす(明るい空では、暗い天体は諦める)
 - CCDの読み出しノイズ、熱雑音を減らす
 - 系統誤差
 - S/N比の良いフラットフィールド
 - ガイド誤差を減らす(いつも同じピクセルに光を当てる)
 - ダイナミックレンジを考慮(直線性の良い範囲で使う)

減光量の表し方

- 等級……肉眼～天文学の伝統的な表し方

$$m = -2.5 * \log_{10}(\text{光度}) + \text{定数}$$

対数→非直線的

- パーセント表示

直線的

しかし、ある等級の近傍での等級差に注目すると

$$0.01 \text{等} \doteq 1\% (0.01)$$

$$0.001 \text{等} (1 \text{ミリ等級}) = 0.1\%$$

$$\text{サブミリ等級} \cdots 0.000x \text{等} = 0.0x\%$$

主な測光誤差の要因とその解決

- | | |
|-----------------------------|-----------|
| 1. 光子数 | 解決: 2004年 |
| 2. ピクセル内感度不均一 | 2004年 |
| 3. 地球大気の変動 | 2004~09年 |
| 4. キャリブレーション誤差
フラットフィールド | 2006年 |
| 5. ガイド誤差 | 2009年 |

どの誤差も0.1ミリ等級に押さえない

誤差要因(1) 光子の数その1

- ・ 大雑把には SN比は光子数の平方根に比例する

明るい星の場合は、圧倒的に星からの光子数が多いため

- ・ ミリ等級以下の精度 (S/n比 ~ 0.0001) 達成のためには、光子数 $\sim 10^8$ 個 以上を目指す

→フルウェル $\sim 10^4$ 個/pixとすると

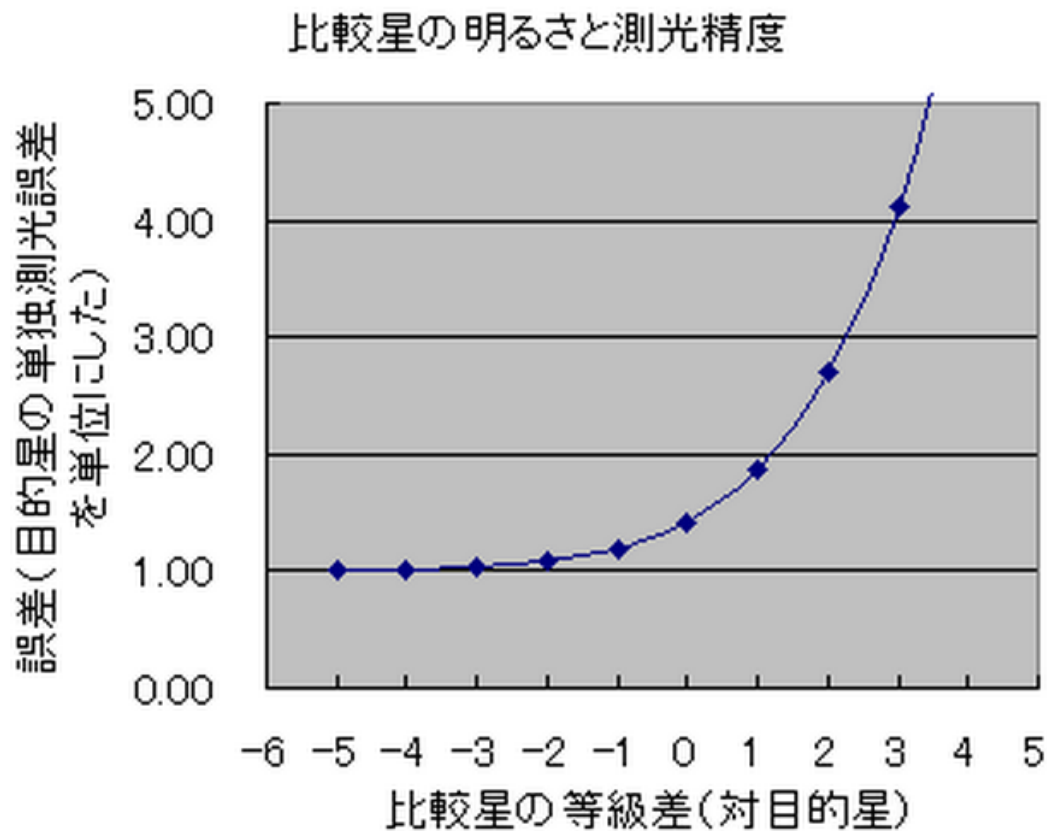
10^4 個のピクセルでカバー(→径 $\sim 10^2$ ピクセル)にぼかす

HSTの場合は、分光器でスペクトルに分散して 10^8 個の光子を得

誤差要因(1) 光子数その2

明るい比較星を使う

比較星が暗ければ、目的の星がいくら明るくても、相対等級の誤差は大きくなる



誤差要因(2)地球大気変動

・ シンチレーション

熱対流により生じる部分的に屈折率の異なる大気乱流塊が、望遠鏡主鏡をカバーする光束を通過することにより(アイソプラナーパッチ)、PSFが時間変化することにより生じる

・ 空間平均効果

IPPのサイズは15cm~20cm程度のものが多い

口径1mの主鏡では20個程度のIPPを含み平均化される

・ 時間平均効果

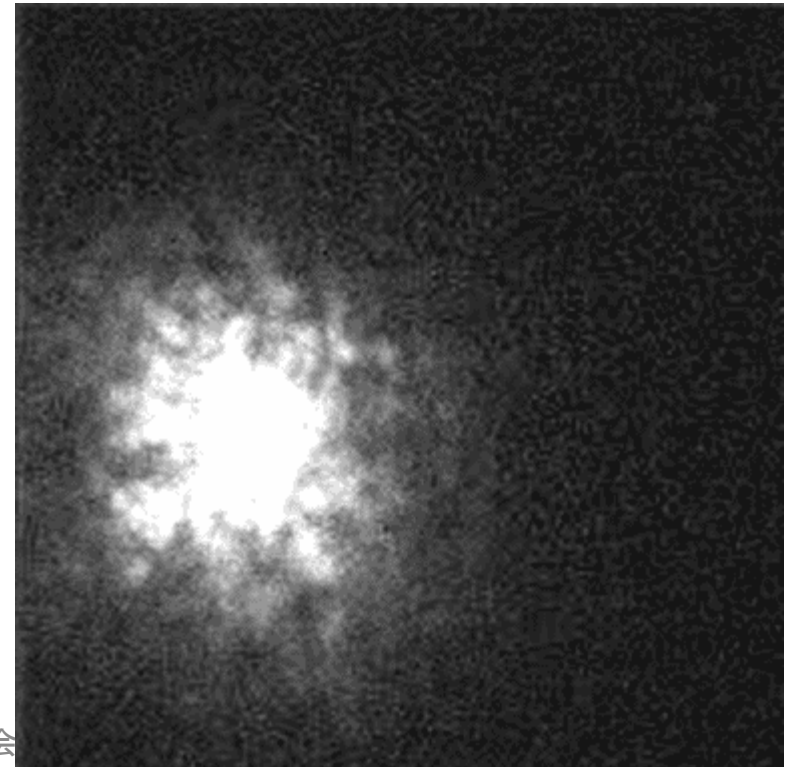
変動の周期は長いものでは数秒のものも含まれている。

20秒以上2分程度まで、積分により時間平均化

・ 透明度変化

透明度の良い天候を選ぶしかない。

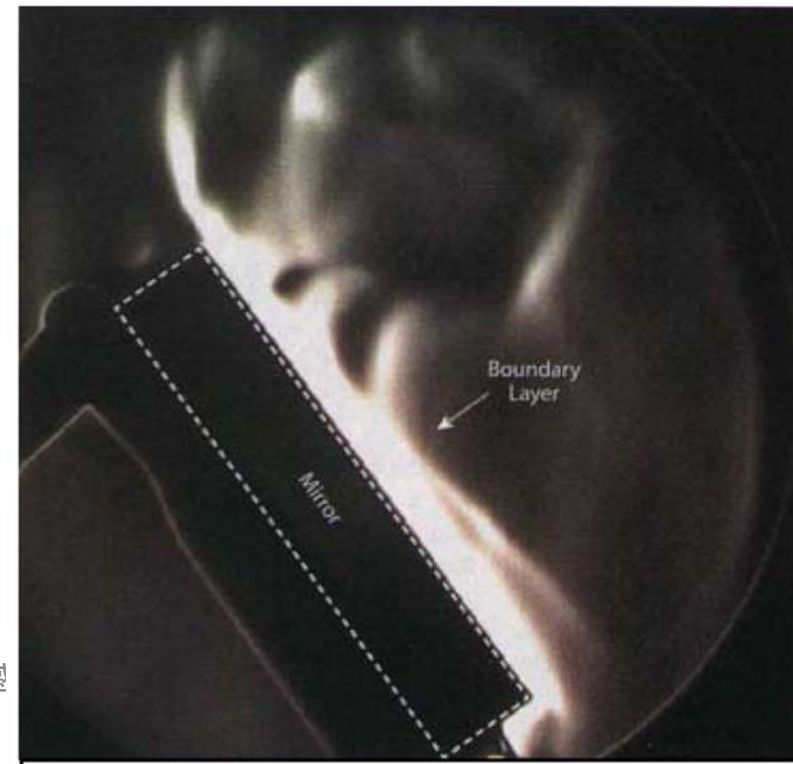
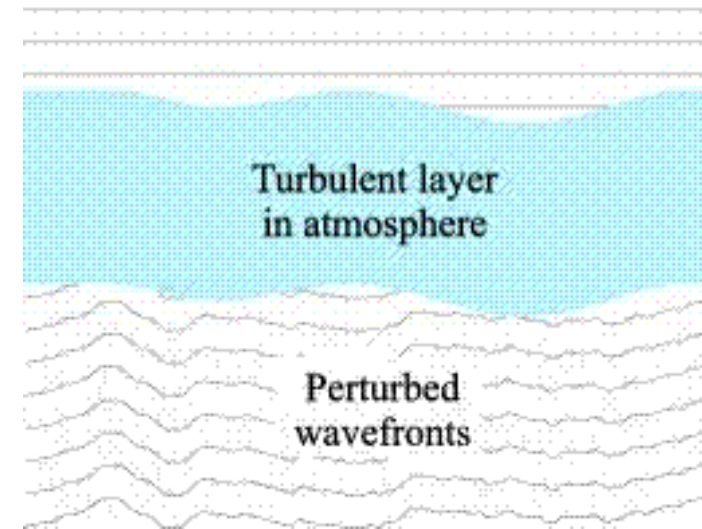
できるだけ高い位置で観測(低い位置での観測はあきらめる)



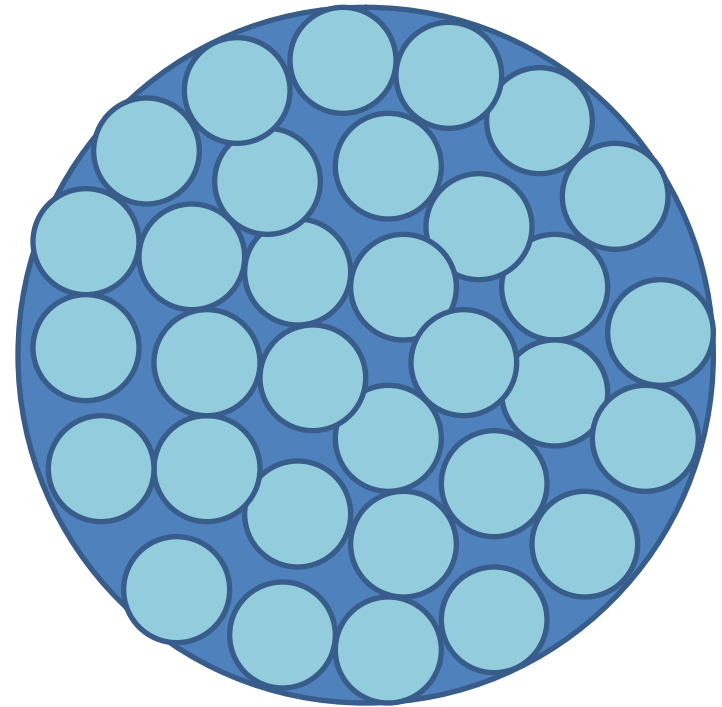
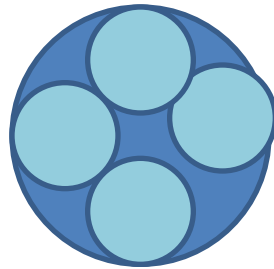
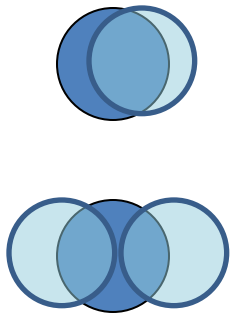
地球大気の悪戯

- 上空大気由来の波
面揺らぎ
- 鏡面上の熱対流
- 均一とみなせる大
気塊(アイソプラ
ナーパッチ) ~ 20cm
- 動画参照 (SFWファイル)

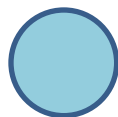
Plane waves from distant point source



口径が大きいほど空間的に 平均化され、測光精度は上がる (数ミリ等級以下の精度を求めるには 配慮が必要)



口径20cm程度が、気流による光度変動の
影響を最も受けやすい



模式化したアイソプラナーパッチ
～直径20cm程度

誤差要因(3) フラットフィールド

- ・ 薄明フラットを使う

10⁴以上のカウントで100枚

→光子数10⁶以上

→それでも1ミリ等級程度の精度

これ以上の精度を求める場合は、目的星と比較星をCCD上での位置を動かさない→ガイドを正確に行う必要がある

Flatの撮像方法

- 薄明フラット(夕方の場合)
 - 天頂より、5度程度の反太陽方向が最も均一
Chromey & Hasselbacher, 1996, PASP 108, p.944
 - 空の明るさは、1秒露出で50000カウント程度以下になってから、10000カウントまで
 - 100枚連続撮像。露出中は望遠鏡をNWSEに振り続ける
 - マスターフラットは100枚のノーマライズ・メジアンで

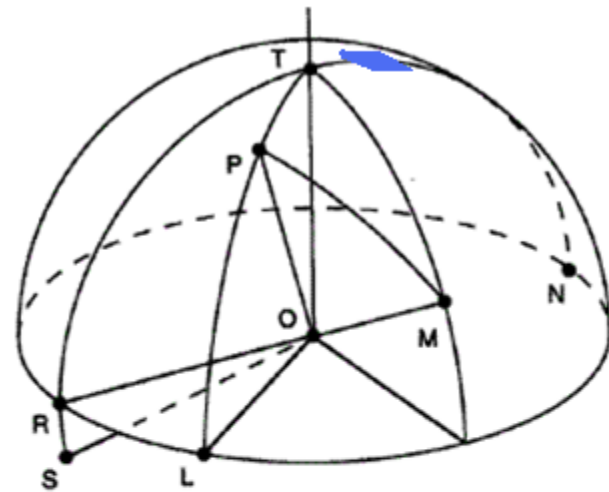
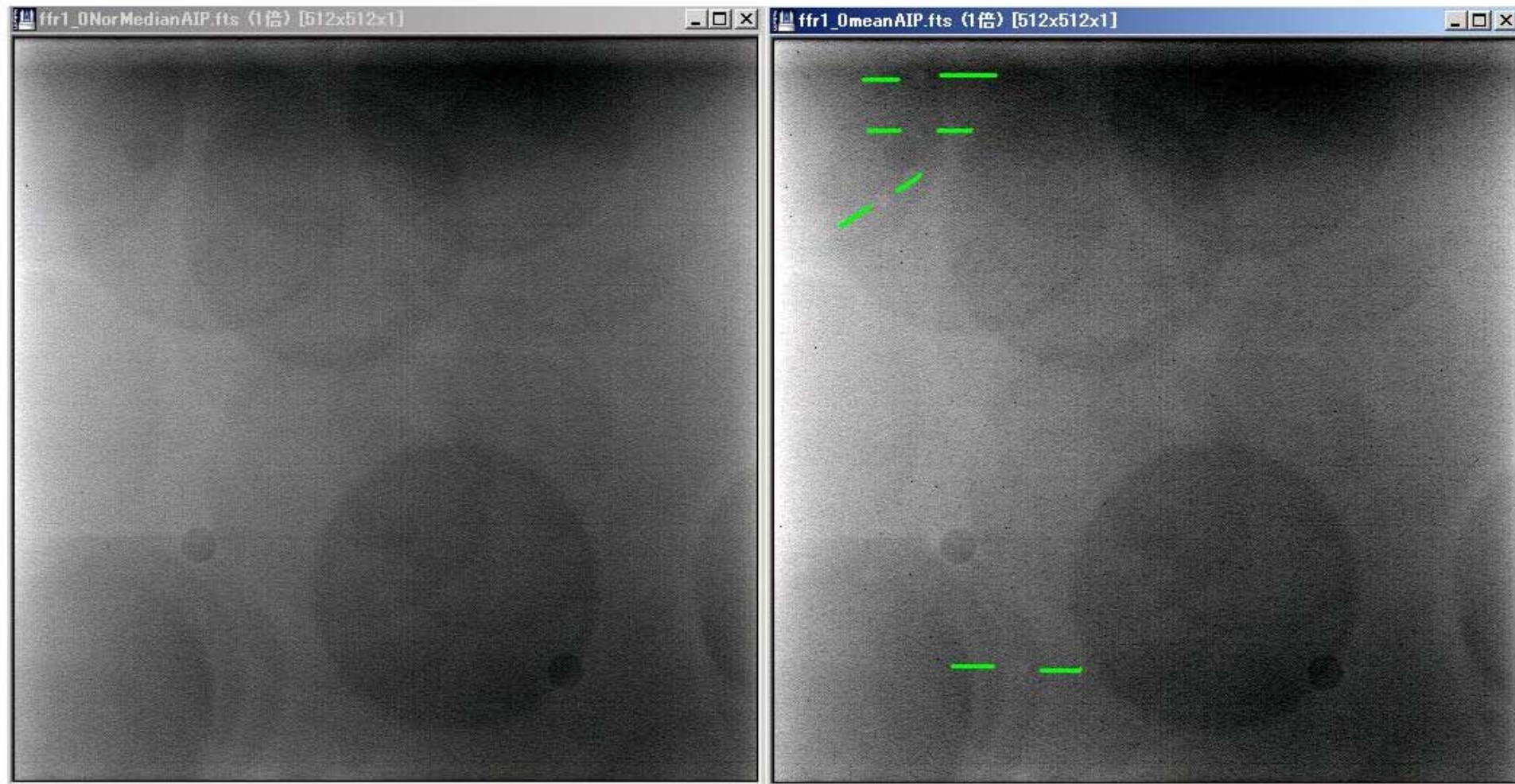


FIG. 1—Definitions of angles. The observer at point O has a local zenith at T , and a horizon circle passing through RLN . The Sun is located at S , on the solar vertical, $SRTN$. Another source, the Moon or bright star, is at M . If point P is observed, then the angles discussed in the text are $z = \angle TOP$, zenith distance of P ; $A = \angle ROL$, azimuth from the solar vertical of P ; $x = \angle LOP$, elevation of P from the solar horizon, taken to be zero at the sunward horizon and 180° at the opposite horizon; $\zeta = \angle TOS$, zenith distance of the Sun; $z_m = \angle TOM$, zenith distance of the Moon; and $r = \angle POM$, distance between P and the Moon.

薄明フラットの事例



この2枚のフレームは、メディアン(Normalized Median、左図)とただの平均値(右図)の処理の違いを示す。平均値処理では、明るい恒星が写っているピクセルの値に、平均値が引きずられているために、50枚の平均をとってもなお星が消えないで残っている。メディアン処理の有効性を示している。もちろん 3σ 以上の信号をノイズとみなして除去した後の平均をとるという処理でもよい

カーブ研究会

いわゆる「CCD方程式」

$$\frac{S}{N} = \frac{N_{*}}{\sqrt{N_{*} + n_{\text{pix}}(N_S + N_D + N_R^2)}}$$

- N_{*} : 星からの光子数の総計
- N_{pix} : ピクセル数 (スカイアパーチャ)
- N_D : ダークノイズ
- N_R : 読み出しノイズ

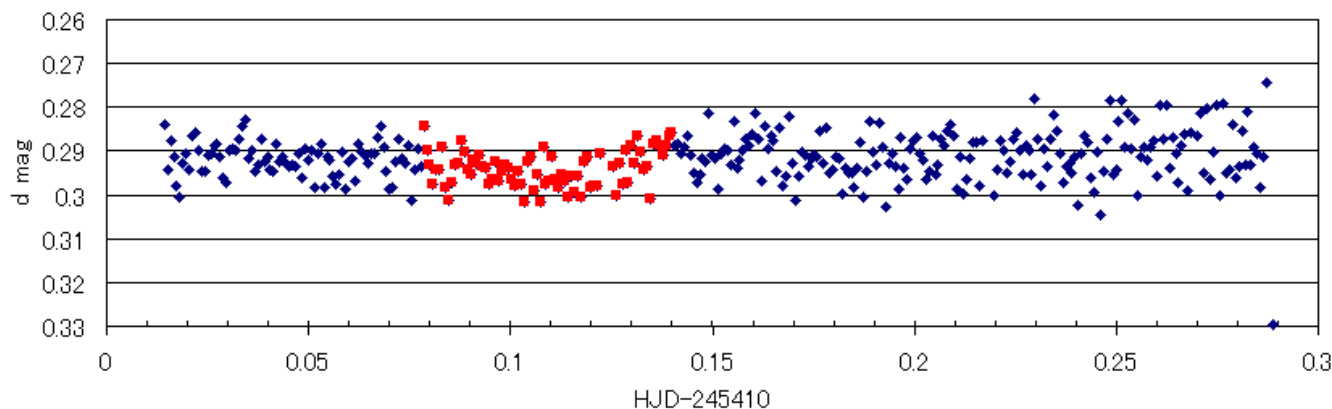
complete CCD Equation (Merline & Howell, 1995) as

$$\frac{S}{N} = \frac{N_{*}}{\sqrt{N_{*} + n_{\text{pix}} \left(1 + \frac{n_{\text{pix}}}{n_B}\right) (N_S + N_D + N_R^2 + G^2 \sigma_f^2)}}$$

誤差要因(4) ガイド誤差の問題

CCD上の位置と減光の関係

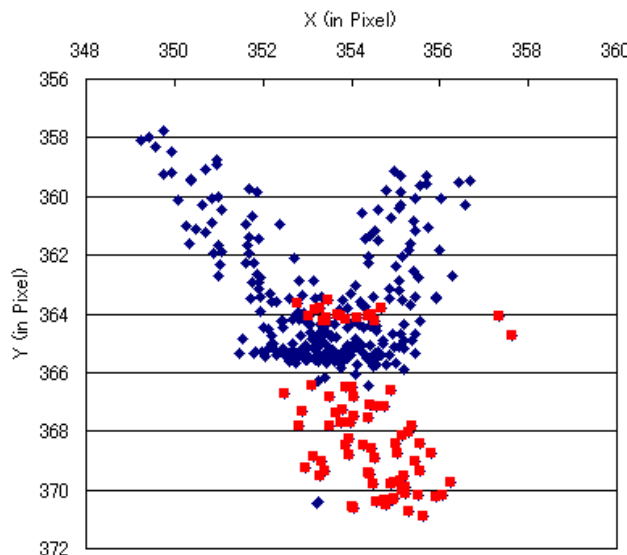
HD60234 by Ohshima 20080213



「減光」現象と
CCD上の位
置には相関
関係がある

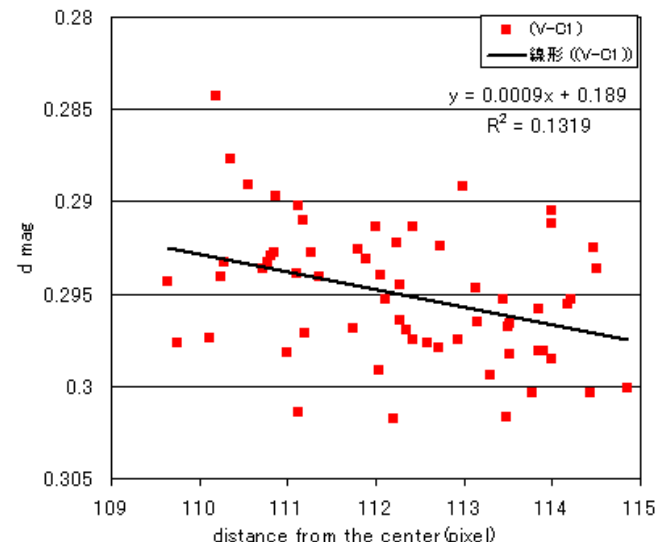
やはり、フラット
フィールドの
不完全性と
ガイド不良
の関係があ
りそう

星像重心の移動



グラフエリア

星像の位置と減光の関係
($0.08 < \text{HJD}-245410 < 0.14$)



これまでの国内での良好な測光例

▪ TrES-3のトランジット

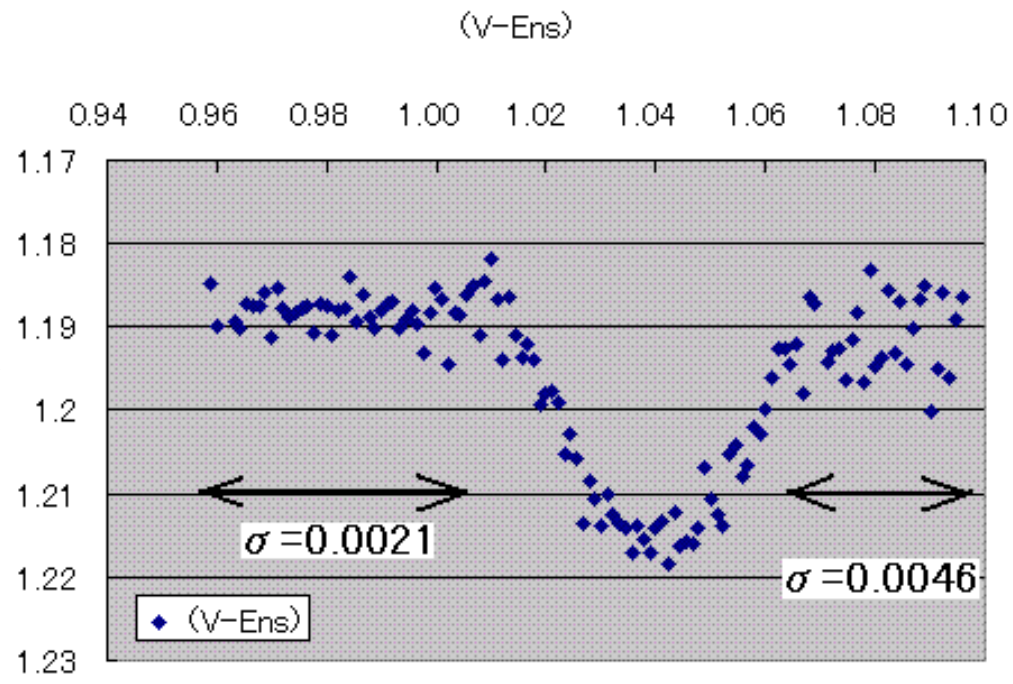
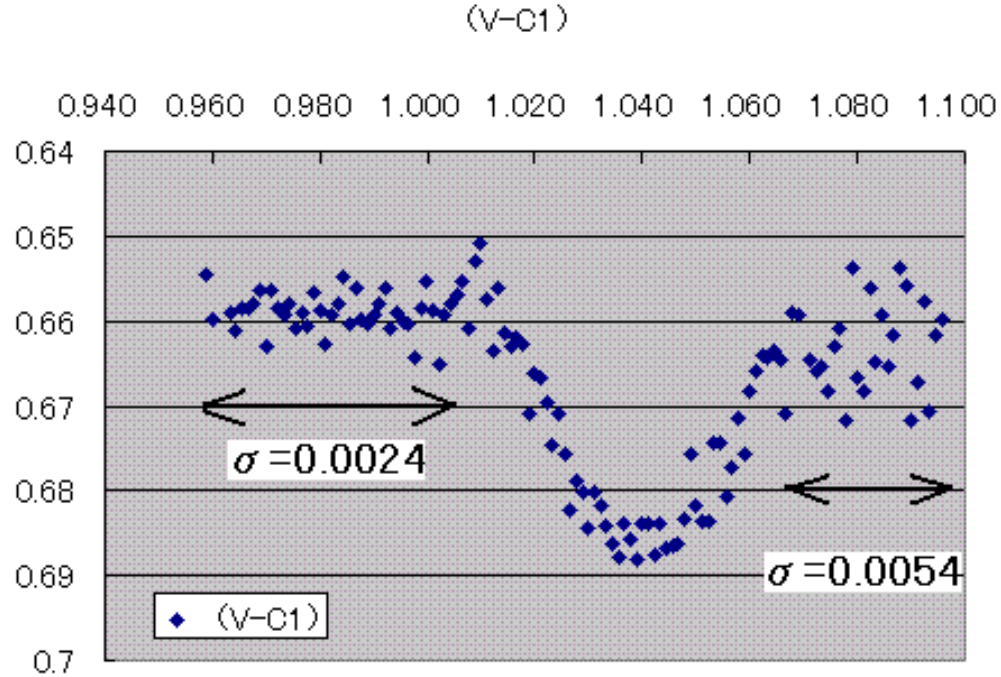
美星天文台101cm望遠鏡

レデューサなし

▪ 標準偏差2mmag

(大島他、2009)

- デフォーカスによる多数ピクセル測光ピクセル内感度ムラの影響を減らす(表面照射チップの場合)
 - ・ 光子数を 10^6 以上稼ぐ
- ・ 良質な薄明フラットフィールドにより、多少のガイド不良があっても補正可能という立場

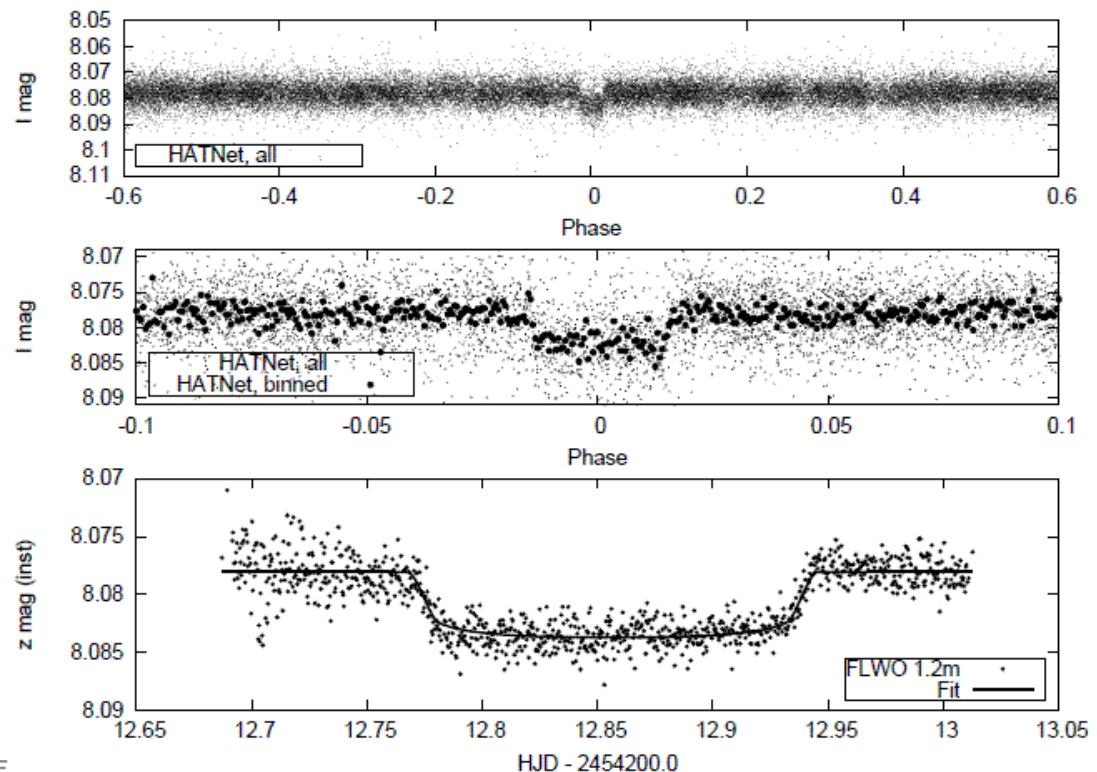


HAT-P-2bの測光

- Hungarian Automatic Telescope Networkによって発見された2番目の系外惑星
- F8型の恒星の周りを、周期5.6日、離心率0.52で、9M_J 0.98R_Jの惑星が周る

• 11.9g/cm³ と高密度、かつe=0.52 という大きな離心率を持つ

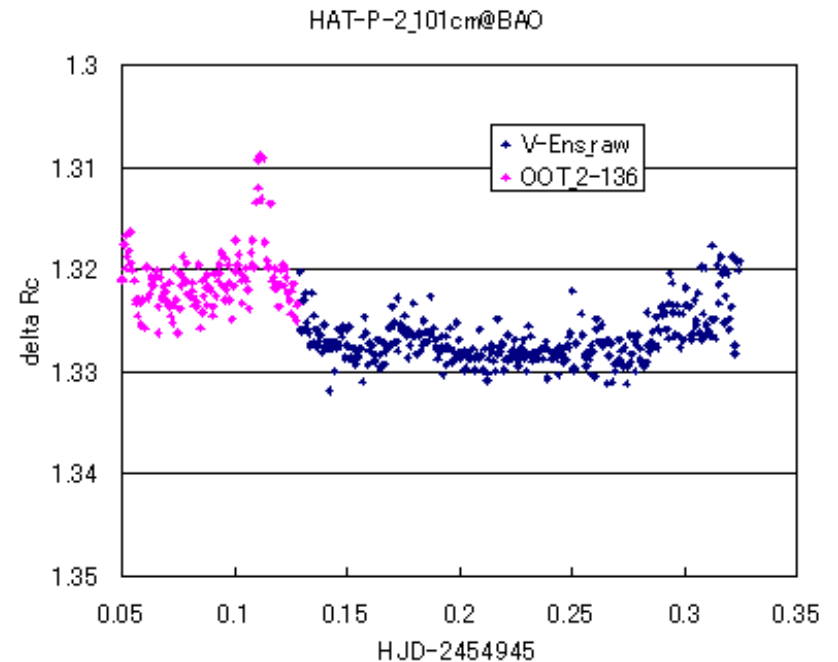
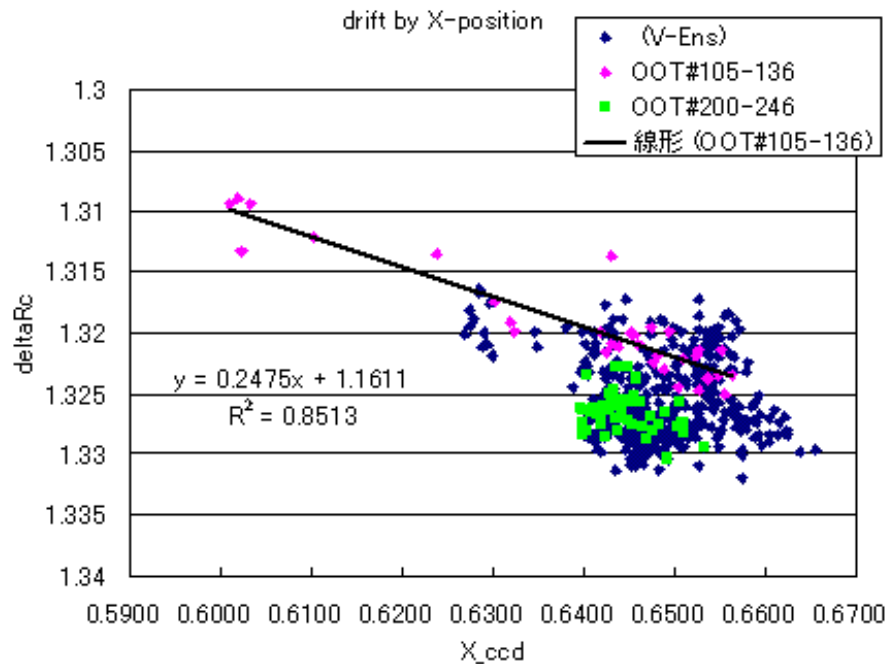
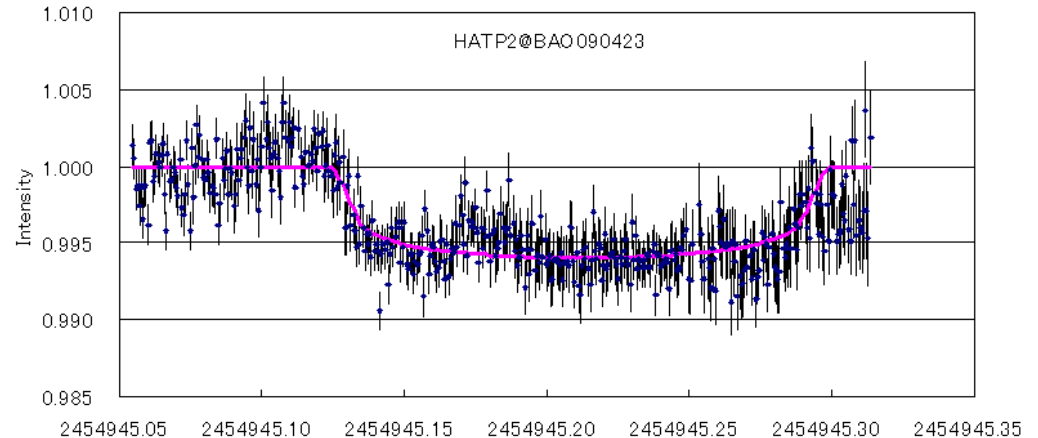
• 2007年に発表されたFLWO1.2m 望遠鏡による観測が唯一の光度曲線 (Bakos et al. 2007)



美星天文台での観測結果(1)

2009年4月23日

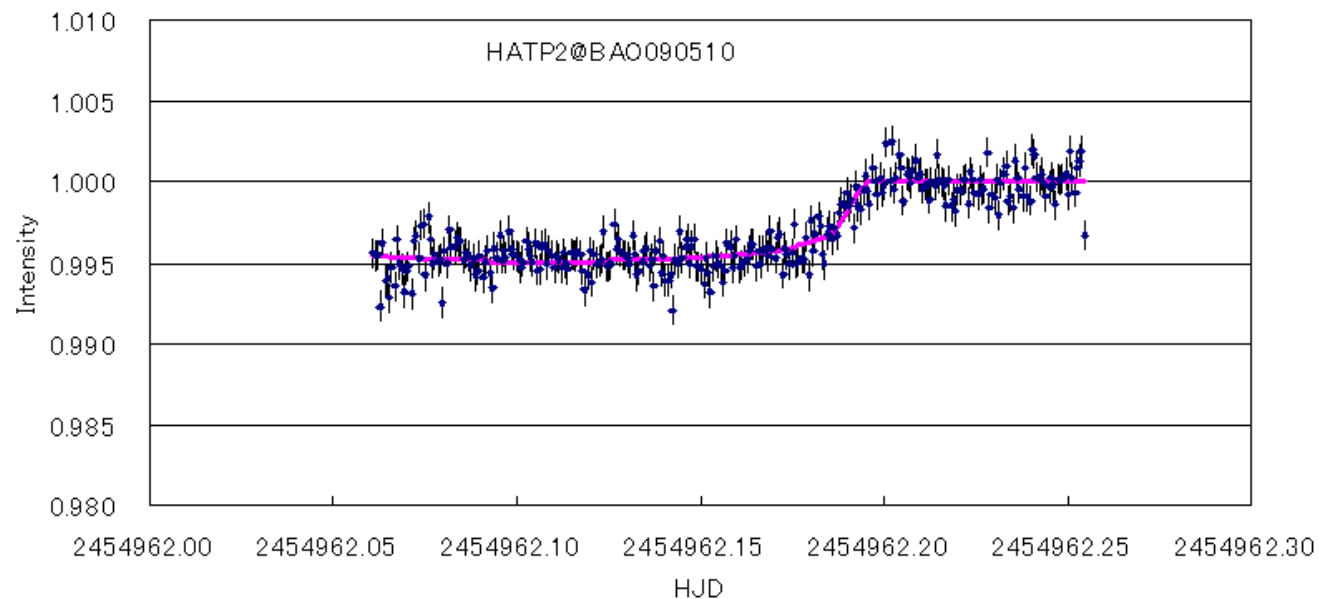
- 黄砂あり 天頂で減光？
- ガイドがいい加減だった
- 系統誤差の補正に苦労



美星天文台での観測(2)

2009年5月10日

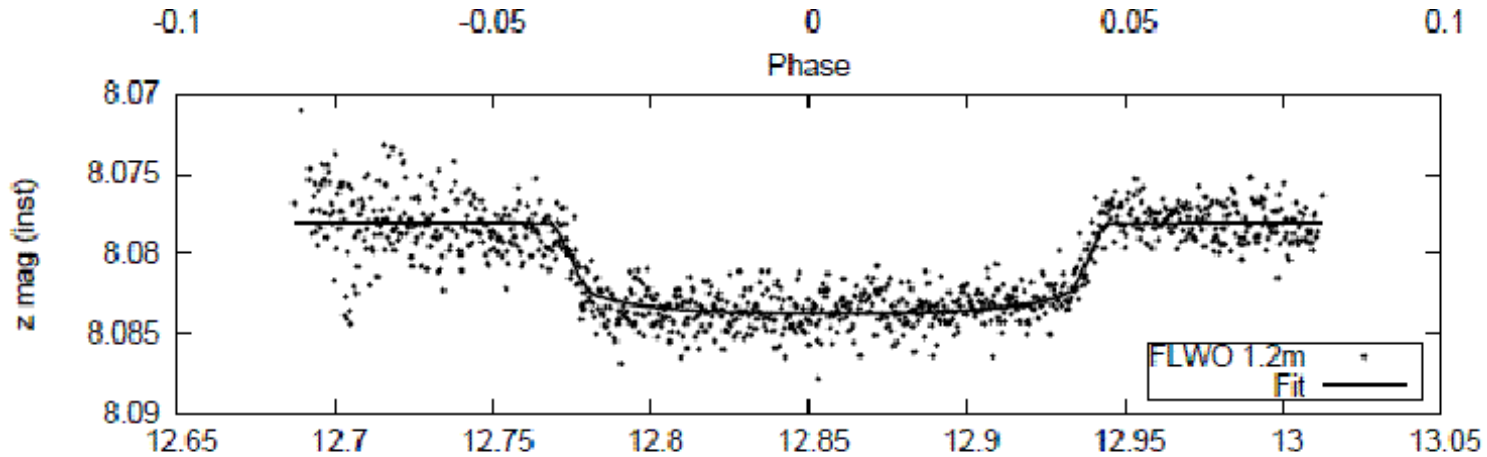
- 天候はまずまず
- 手動ガイドをがんばって±8ピクセル以内に抑えた。



星像30ピクセル(FWHM)に対して1/4程度のガイド誤差
圧倒的な光量 比較星で 2×10^7 カウント

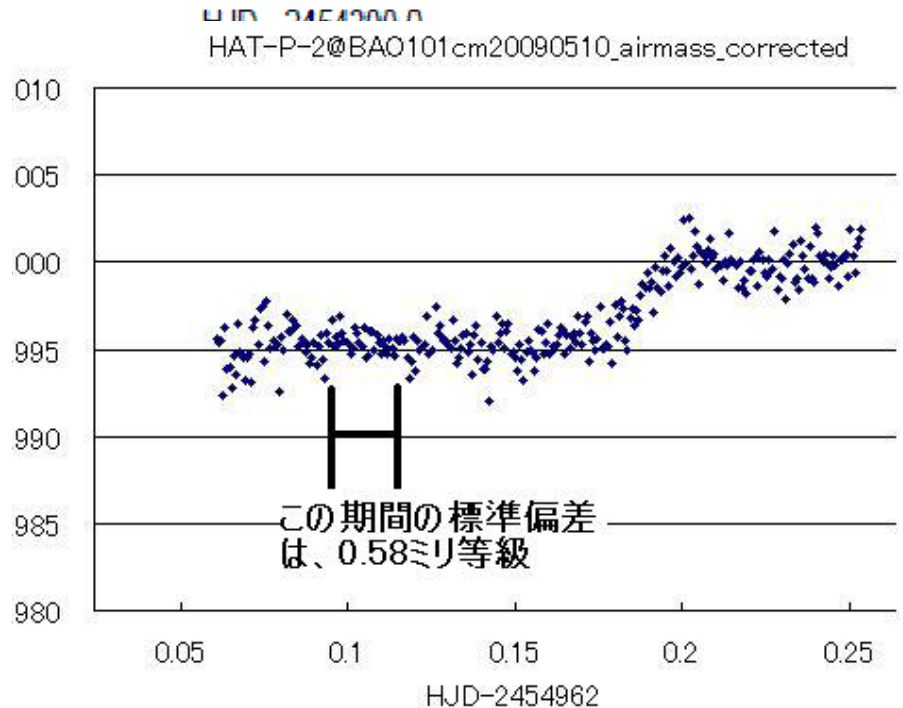
ただし、一般公開のため潜入の観測できず

サブミリ等級精度の測光



悪い条件下

- 満月がすぐ近くにあった
- スカイレベル~1000カウント
- フォーカルレデューサを使用
- 周辺減光が大きい→フラット補正が不満足
- フォールデッドカセグレン
- 迷光多し→フラットフィールドの出来がよくない
- 冷却温度が高かった -15°C



Mirror Seeing

- http://www.footootjes.nl/Astrophotography_Seeing/Astrophotography_Seeing.html
- 35cm 主鏡の温度16°C 外気温2°C