



多色撮像/多天体分光による トランジット惑星の大気観測

国立天文台・岡山天体物理観測所
福井 暁彦

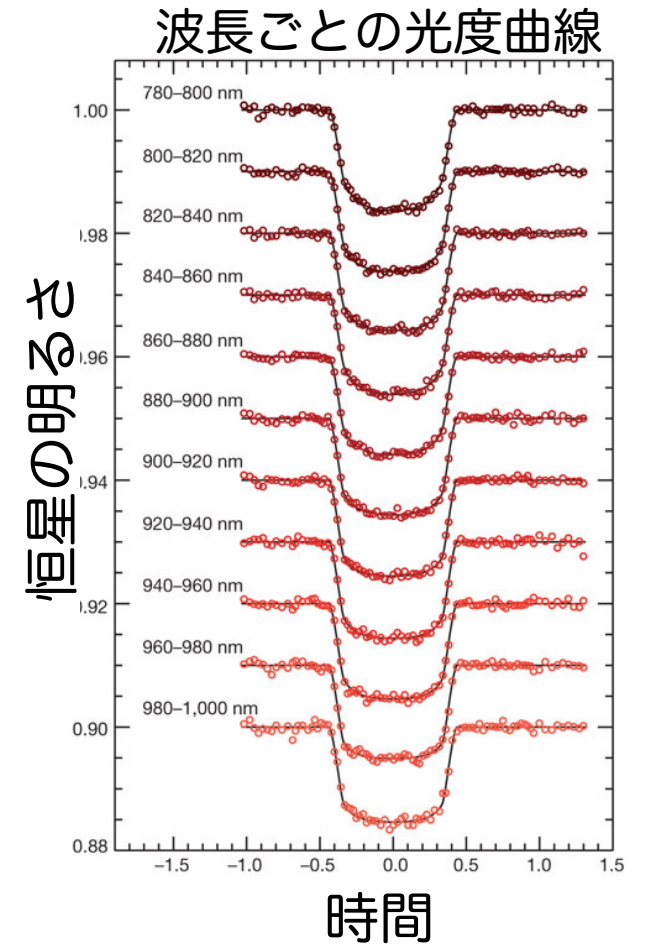
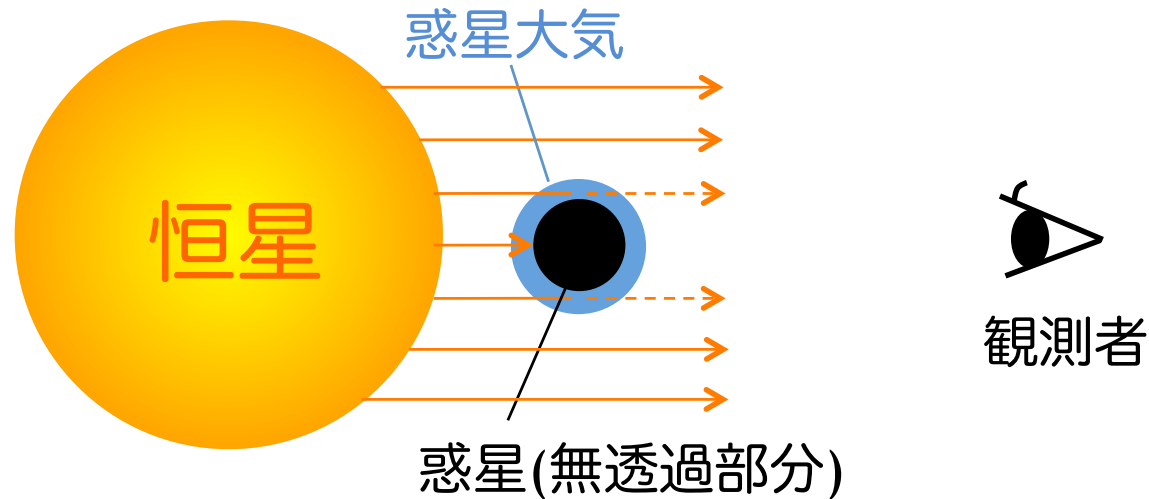
イラスト：プレスリリース
「晴天のスーパーアース？」より
©NAOJ

2013年9月13日
南極赤外線望遠鏡WS@東北大学

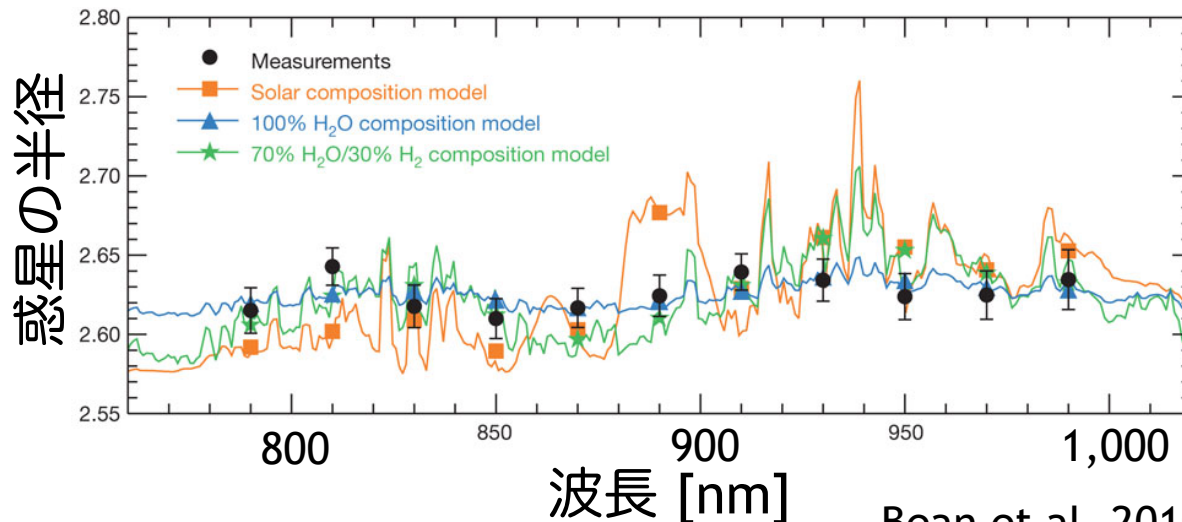
目次

- 岡山188cm/ISLEによる近赤外高精度測光の実現
- 観測例紹介：多色同時撮像による透過分光観測
 - GJ3470b
 - WASP-80b
- 今後の展望：分光測光観測による透過分光観測
- 南極赤外望遠鏡での展望

透過分光法による惑星大気の観測



VLTによるGJ1214bのトランジット・スペクトル



Bean et al. 2010, Nature

- 多色同時撮像観測
- 分光測光観測

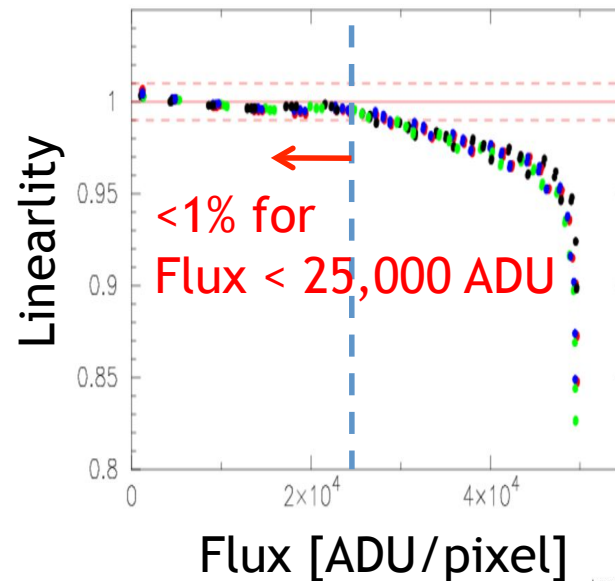
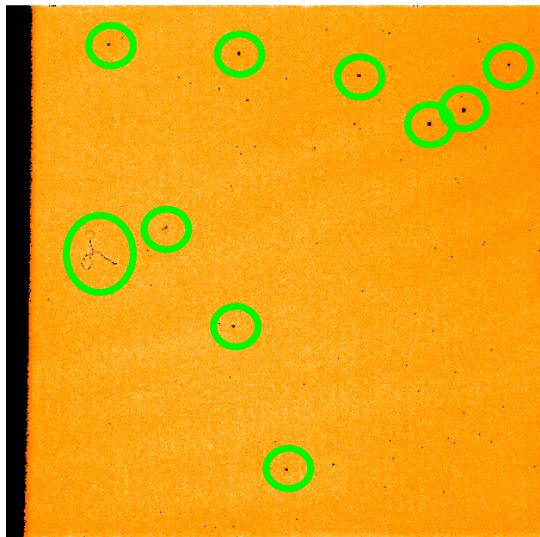
岡山188cm望遠鏡/近赤外撮像分光装置ISLE



Copyright (c) 2011, OAO/NAOJ/NINS, All rights reserved.

Array: HAWAII 1k x 1k
FOV: 4.3' x 4.3'
Filter: J, H, Ks, HK
Mode: Imaging and
low/medium res. spectroscopy

ISLE/J-band flat-field



特徴

- 低い読み出しノイズ (< 9 [e-/pixel]: the lowest in HAWAII-1Ks)
- 欠損画素が少ない
- 優れた反応線形性

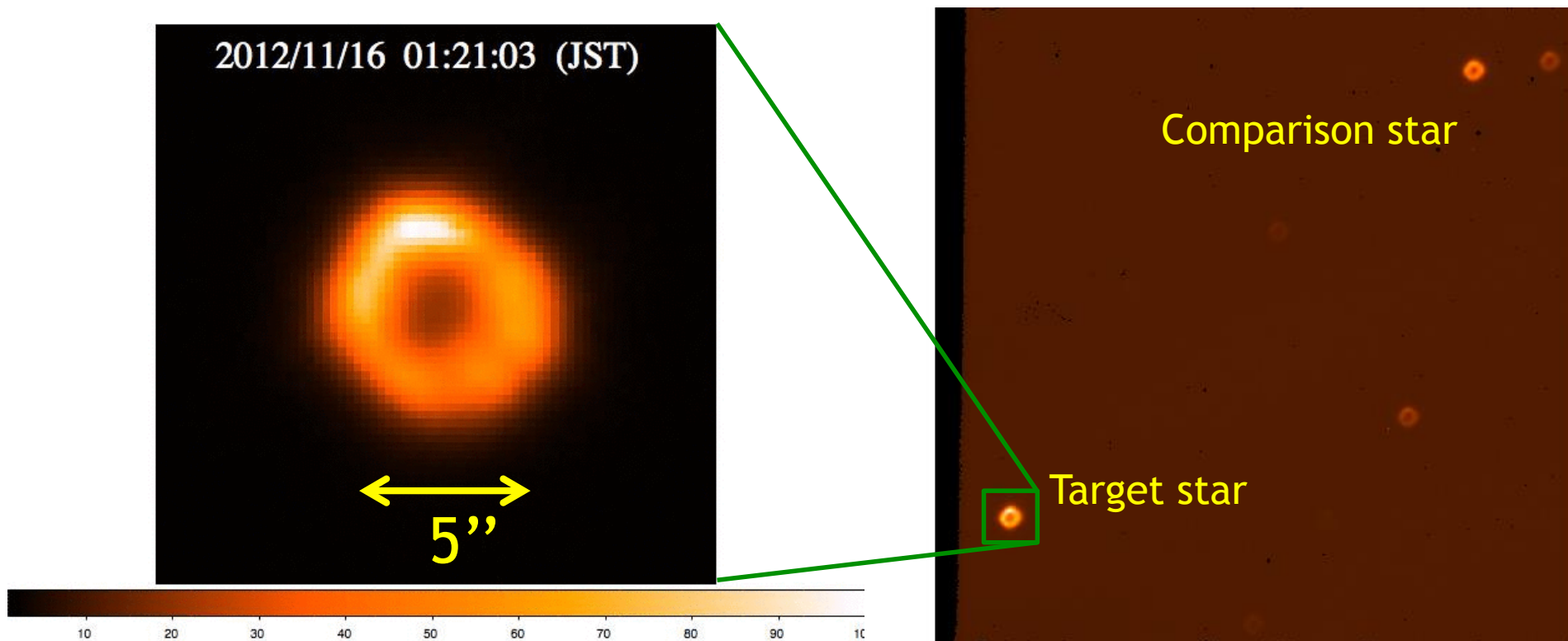
高精度(~0.1%)測光実現のための工夫

- **デフォーカス**

ピクセル間感度ムラの影響による系統誤差を低減
検出器の飽和を避けつつ露光時間を伸ばす

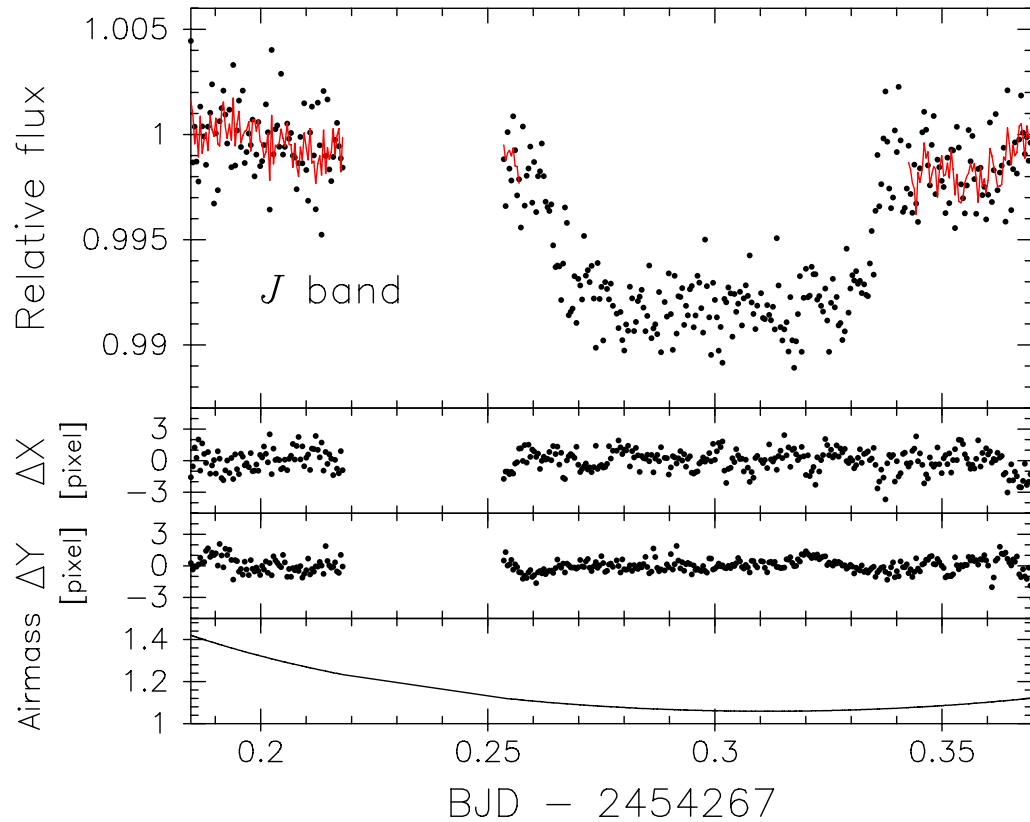
- **高精度ガイド**

ピクセル間感度ムラの影響を出来るだけ回避
ISLEでは1ピクセル (0.245'') rms以下のガイドを実現

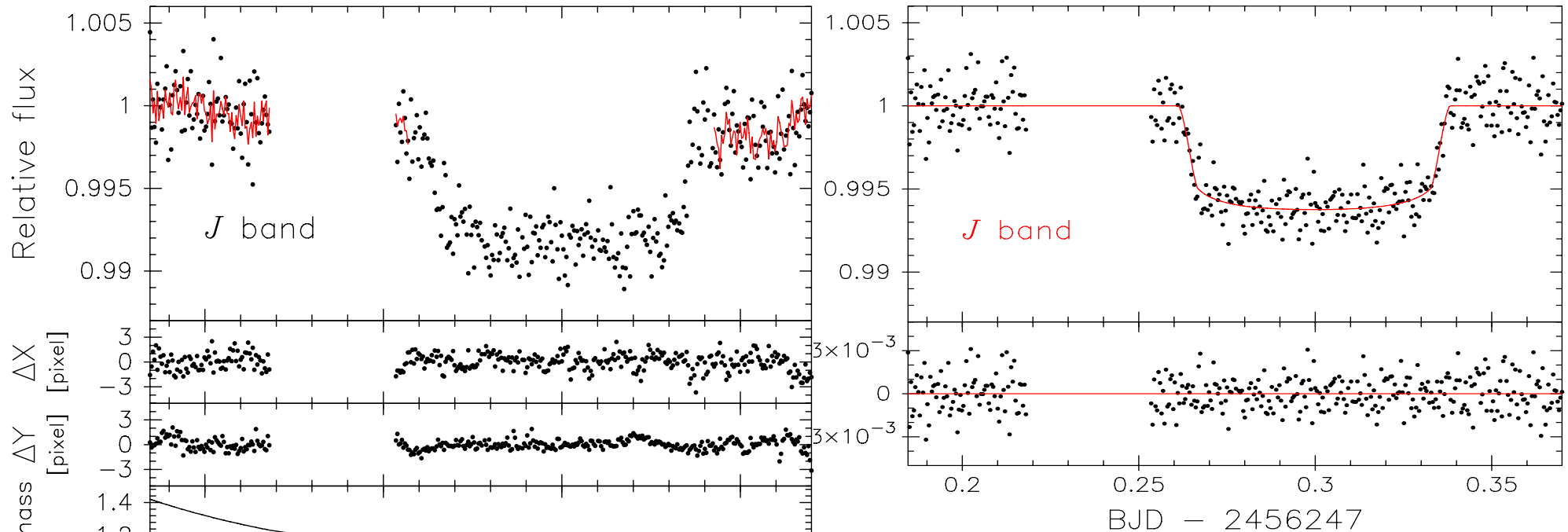


星像変位に伴う系統誤差の補正

補正前



補正後



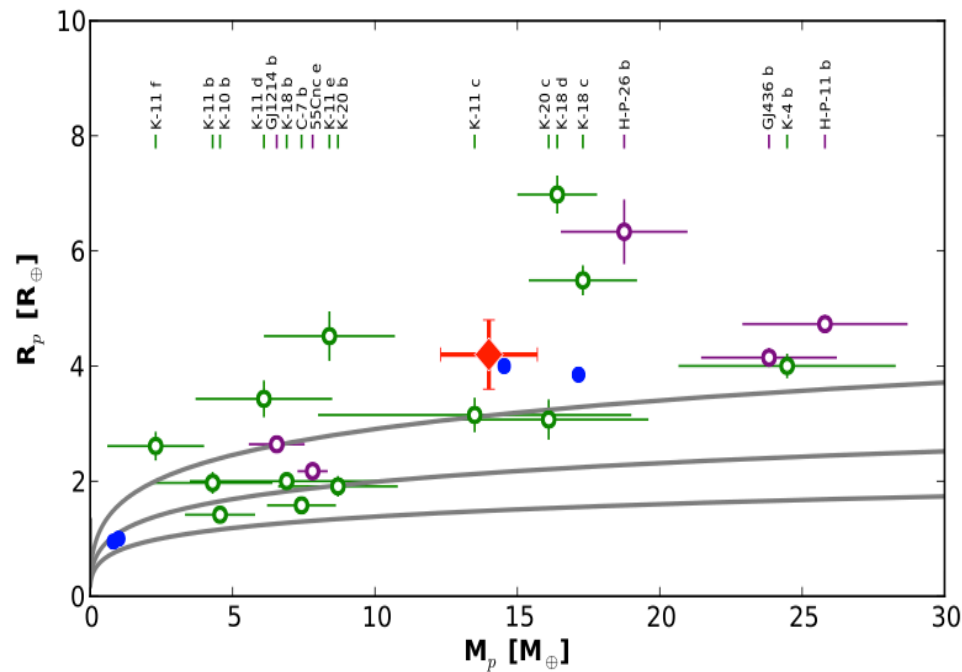
Fukui+ 2013

- 星像変位量： $\Delta X = 1.1$ pix (rms), $\Delta Y = 0.6$ pix (rms)
- 星像変位 ($\Delta X, \Delta Y$) と 관련된 系統誤差が存在
- 測光精度：0.15% (補正前) → **0.12% (補正後)**

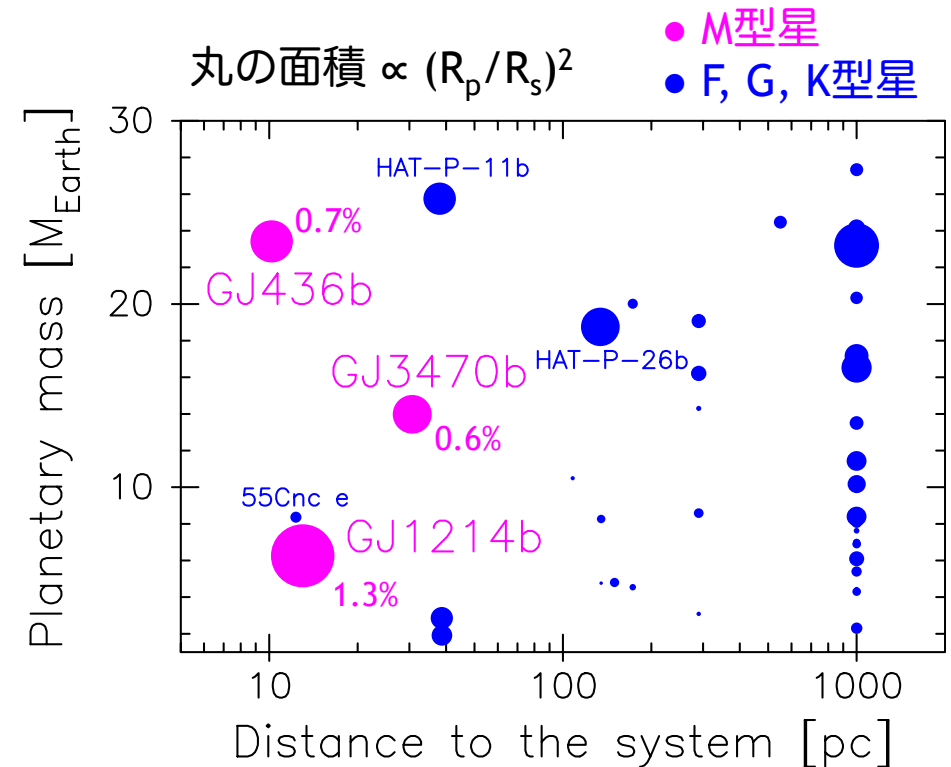
岡山観測所でのGJ3470bの可視+近赤外同時観測

- GJ3470b

- 近傍のM型星をまわるトランジット惑星として3例目 (Bonfils+ 2012)
- GJ1214bに次いで2番目に低質量 ($\sim 14M_E$, 天王星とほぼ同じ)
- 非常に低密度 ($< 1\text{g/cm}^3$) : 比較的多量の大気を保持
- 大気の詳細観測が可能なスーパーアースとして注目



Bonfils+ 2012



岡山観測所でのGJ3470bの可視+近赤外同時観測

- 188cm望遠鏡 / ISLE
 - 近赤外線撮像分光装置
- 50cm MITSuME望遠鏡
 - 可視光3色(g' , R_c , I_c)同時撮像可
- GJ3470bの可視+近赤外 (J) 4色同時測光観測に成功 (2012年11月)



国立天文台岡山天体物理観測所

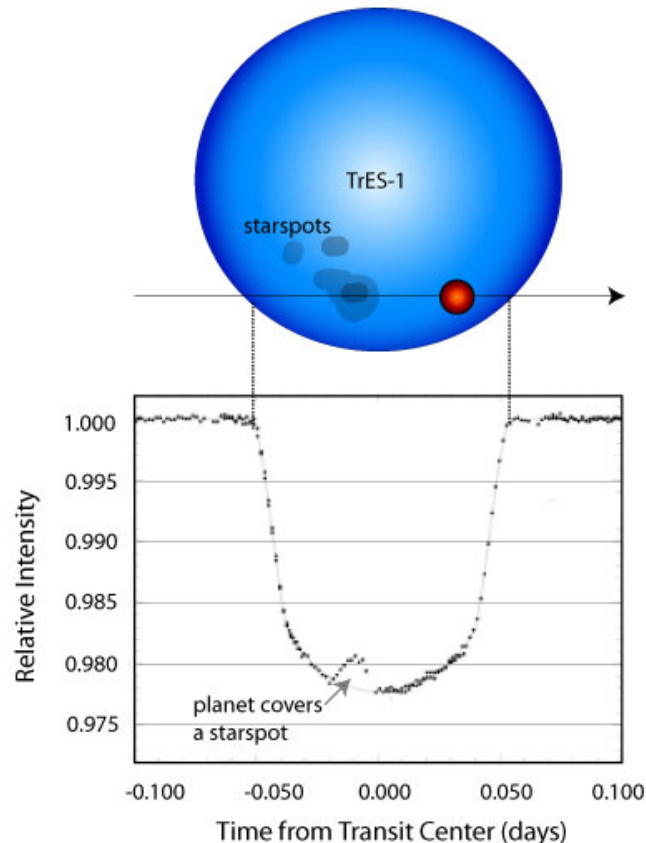


岡山188cm望遠鏡/ISLE

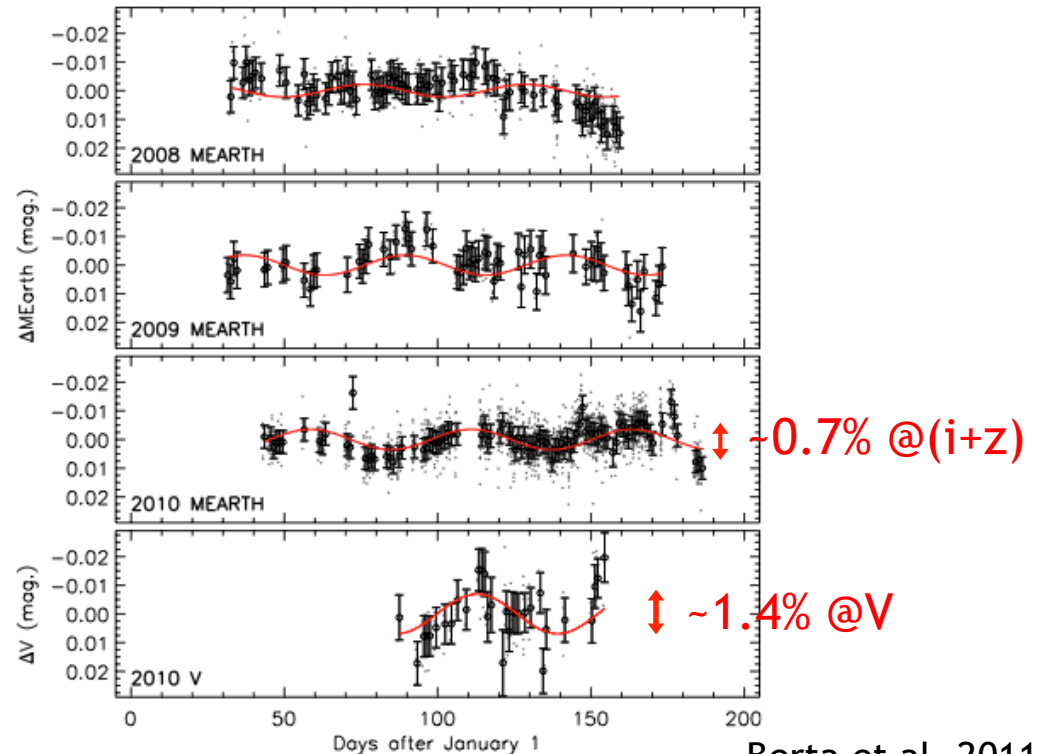


50cm MITSuME望遠鏡

多色同時観測の重要性：黒点の影響



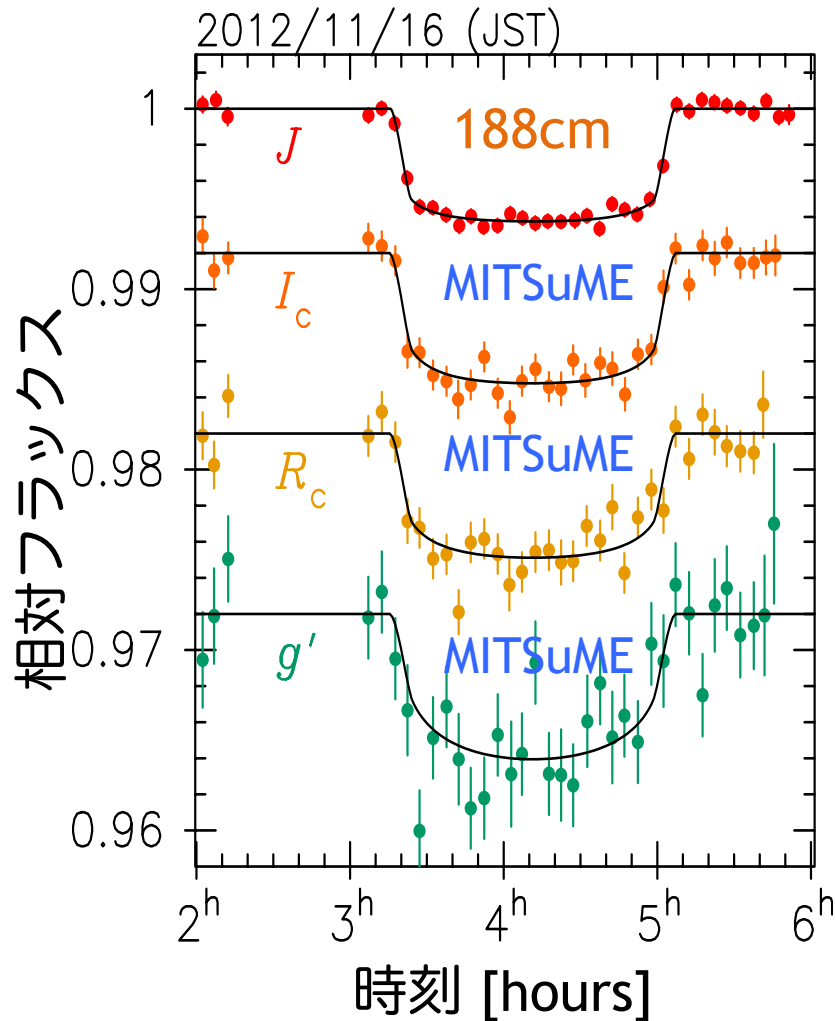
黒点の影響によるGJ1214の長期変動



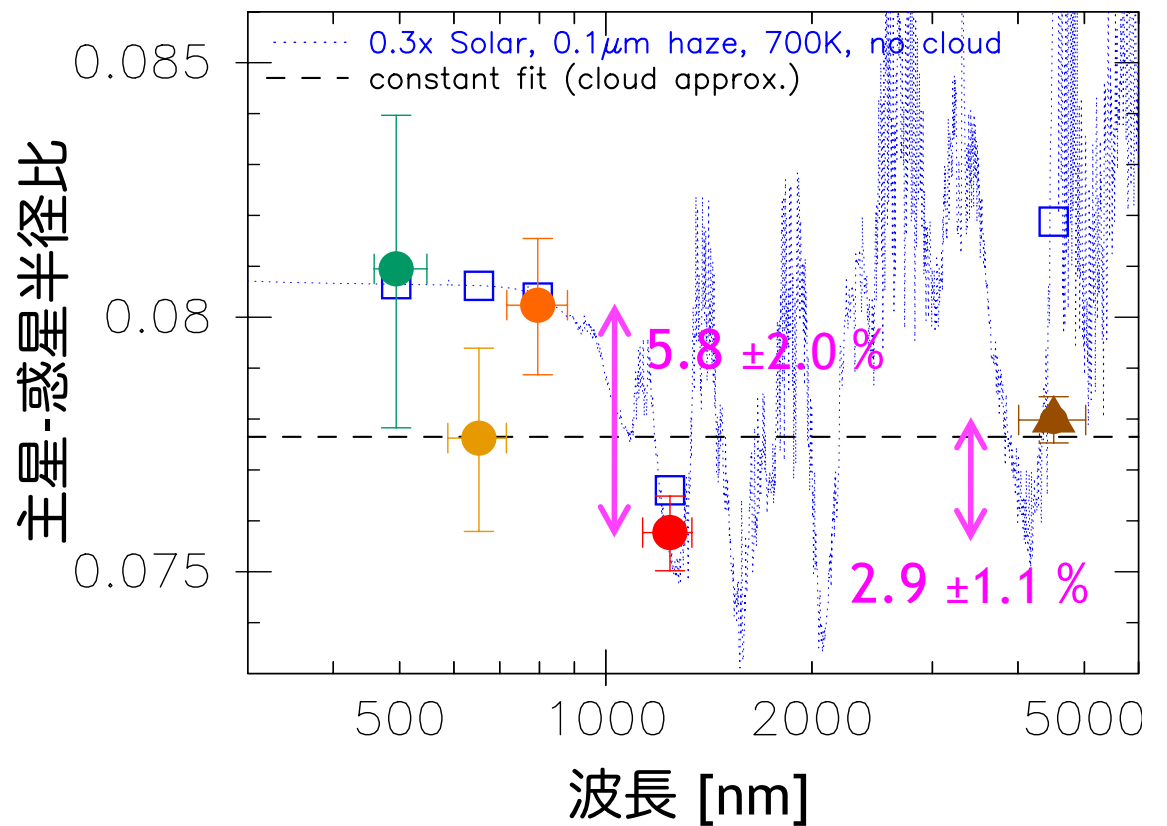
Berta et al. 2011

- 主星に黒点が存在すると、トランジット減光率に2つの影響
 1. 惑星が黒点上を通過すると、光度曲線に「バンプ」
 2. 主星の自転や黒点の発生/消滅により、主星の「見かけの大きさ」が時間変化 ⇒ 「多色同時観測」が有効

GJ3470bの観測結果



GJ3470bのトランジット・スペクトル



Fukui+ 2013, ApJ, 770, 95

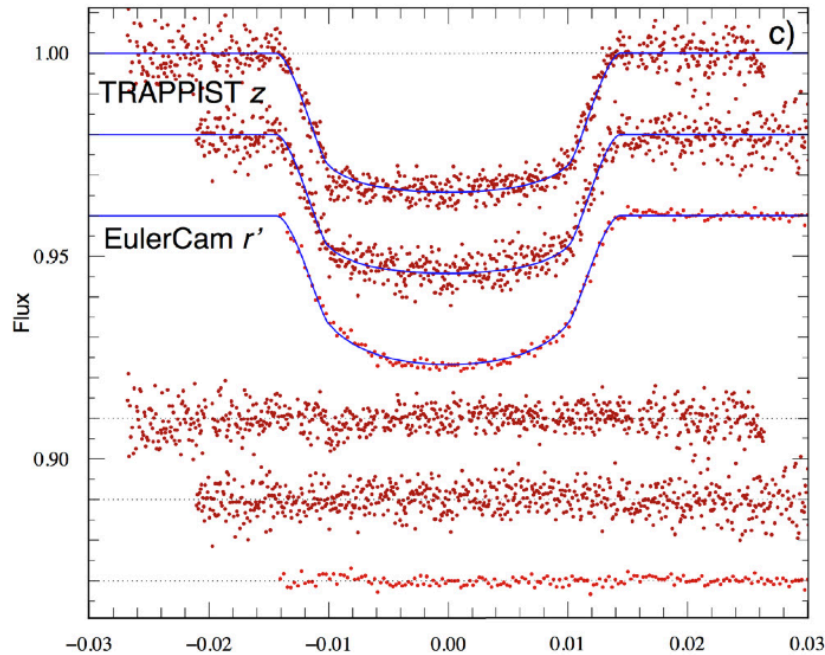
惑星半径の波長依存性を初めて観測

⇒ おそらく水素主体の惑星大気の組成を反映

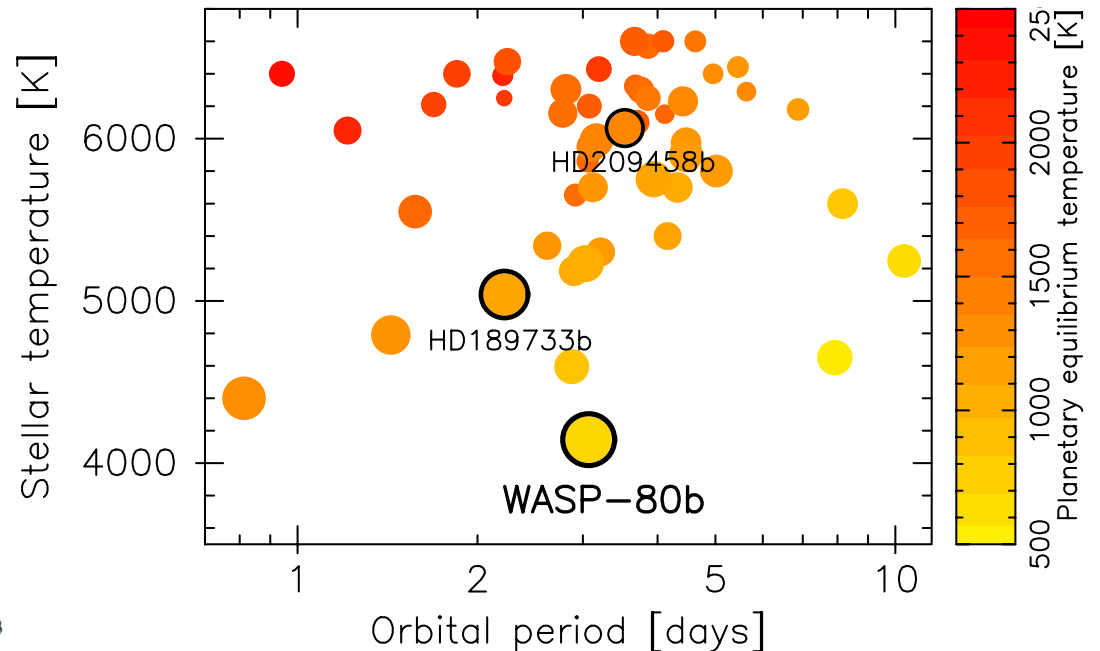
ウォームジュピター-WASP-80bの透過分光観測

- M0型星まわりのトランジット・ホットジュピター
 - M型星のホットジュピターとして2例目(c.f. Kepler-45b)
 - 低温のホットジュピター (800K) → ウォームジュピターとも。
 - CH₄が安定 => 大気中にヘイズが存在する可能性 (c.f. HD189733b)
 - 減光率が非常に大きい (約3%)

WASP-80bの光度曲線 (Triaud+ 2013)



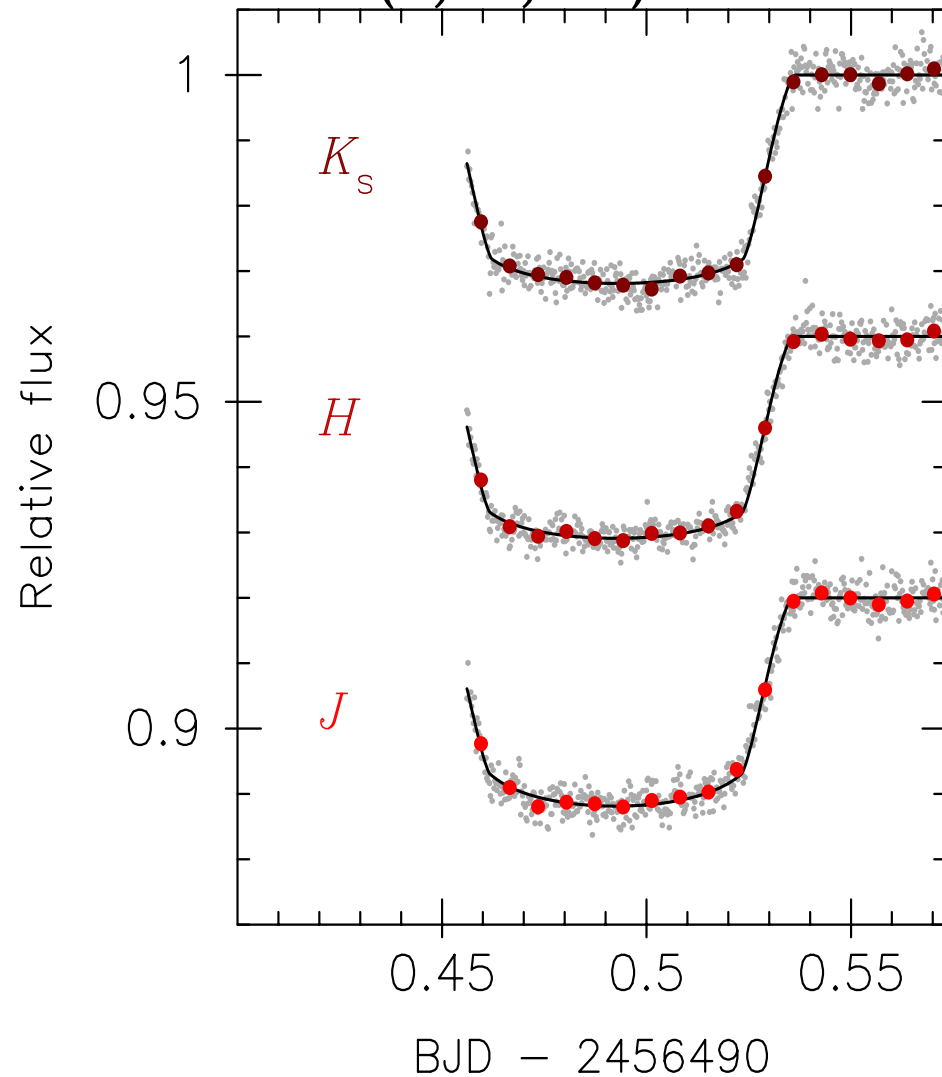
主星が明るい (J<10)トランジット・ホットジュピターの周期-主星温度分布



IRSF, ISLE, MITSuMEでの多色同時観測

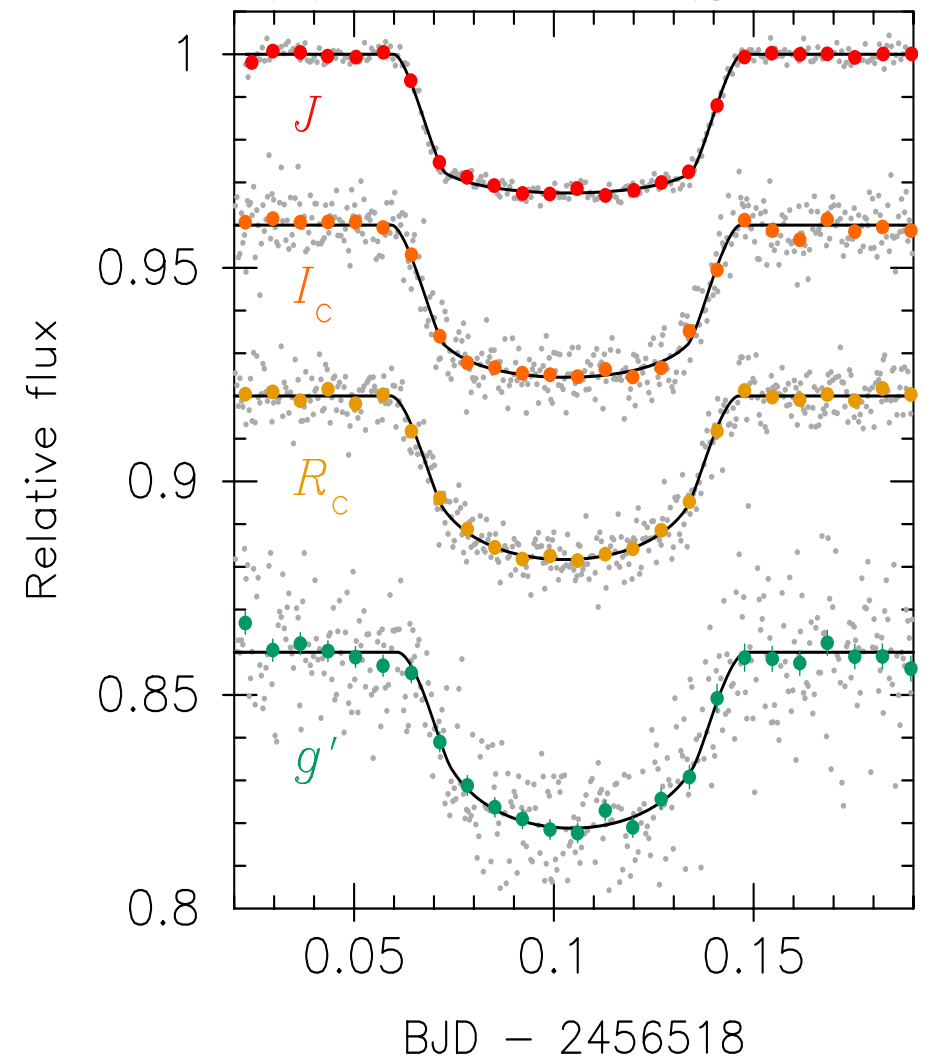
2013.7.16

IRSF (J, H, K_s)



2013.8.13

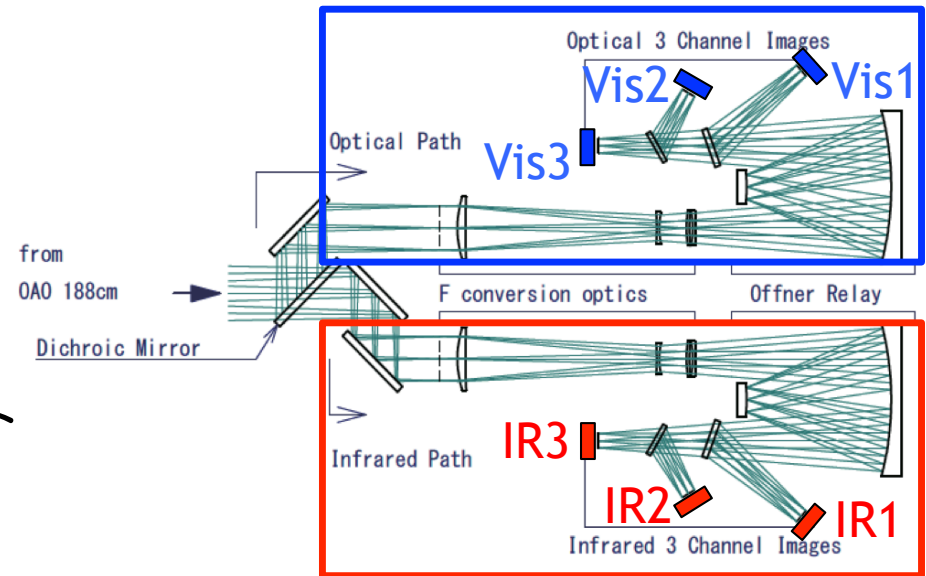
ISLE (J) & MITSuME(g', R_c, I_c)



可視-近赤外同時撮像カメラの開発

- 今後数年間で大気調査可能なスーパーアースが飛躍的に増加

- すばる/IRD (2014~) + トランジットフォローアップ
- TESS衛星計画 (全天トランジットサーベイ、2017~)

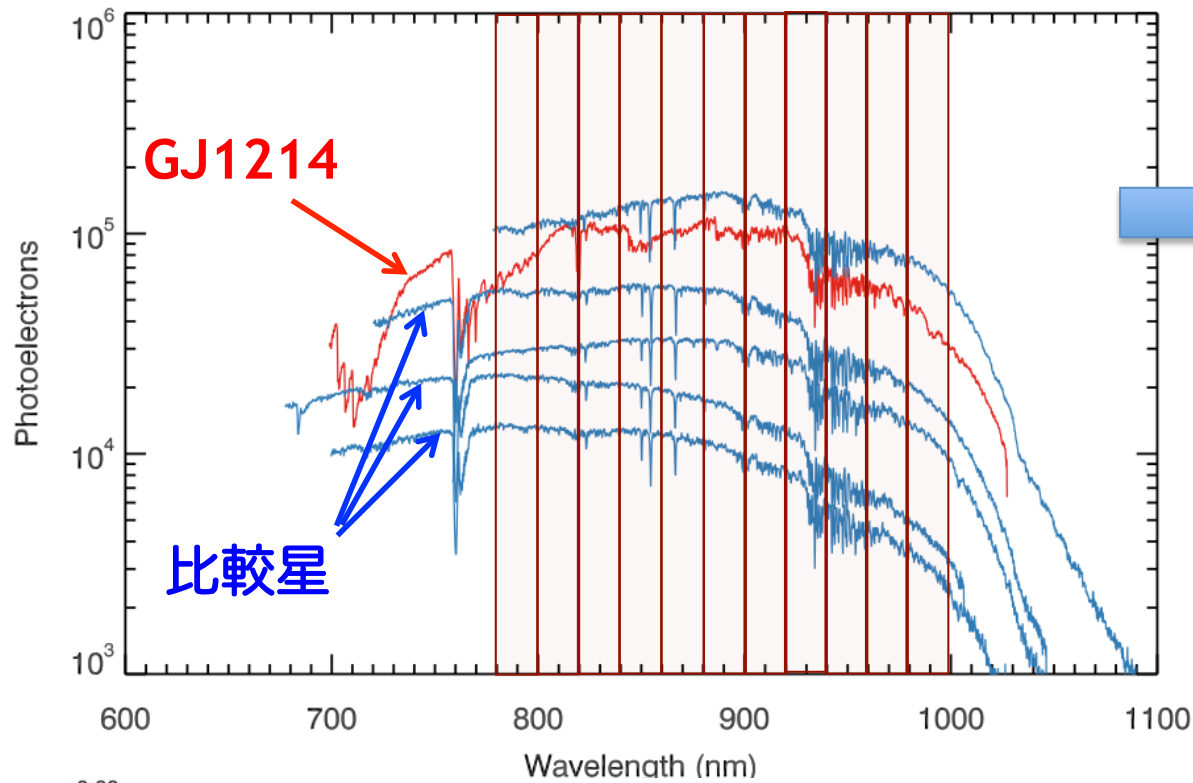


188cm望遠鏡に搭載予定の
広視野6色カメラの光学設計

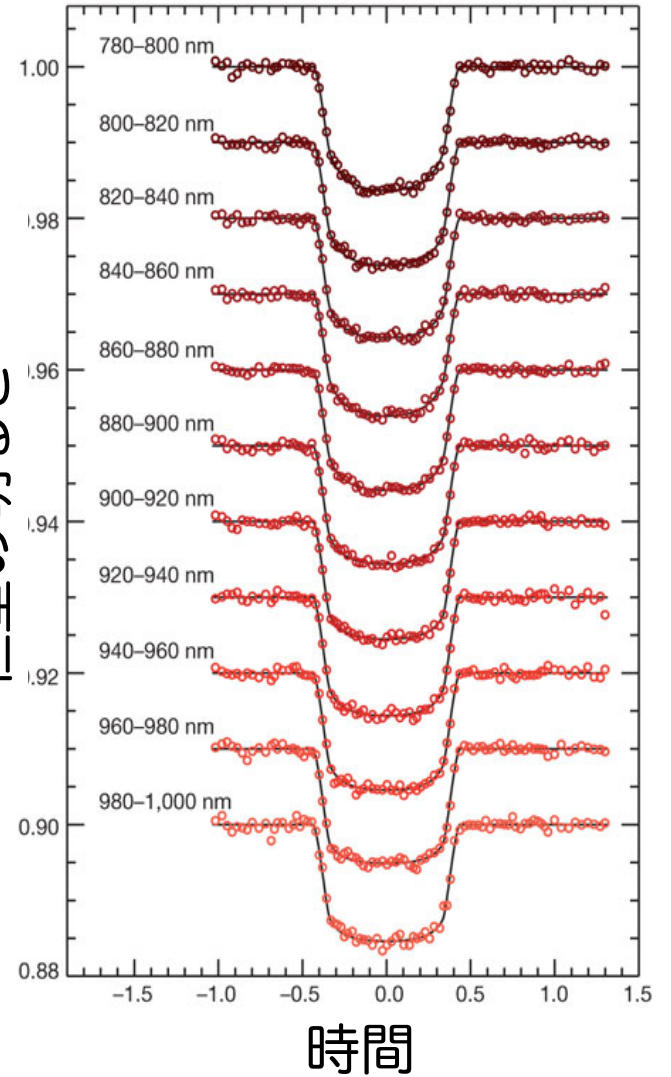
- 系統的な大気調査から、スーパーアース形成起源の解明へ

- 50cm望遠鏡では感度不足⇒188cm望遠鏡に多色広視野カメラが必要
- 可視-近赤外「最大6色同時」広視野(12'x12')撮像カメラの開発を計画中
- 北半球では初。(c.f. GRONDカメラ@チリ: 7色同時)
- 今年度より科研費基盤Aを獲得 (PI: 成田憲保氏)

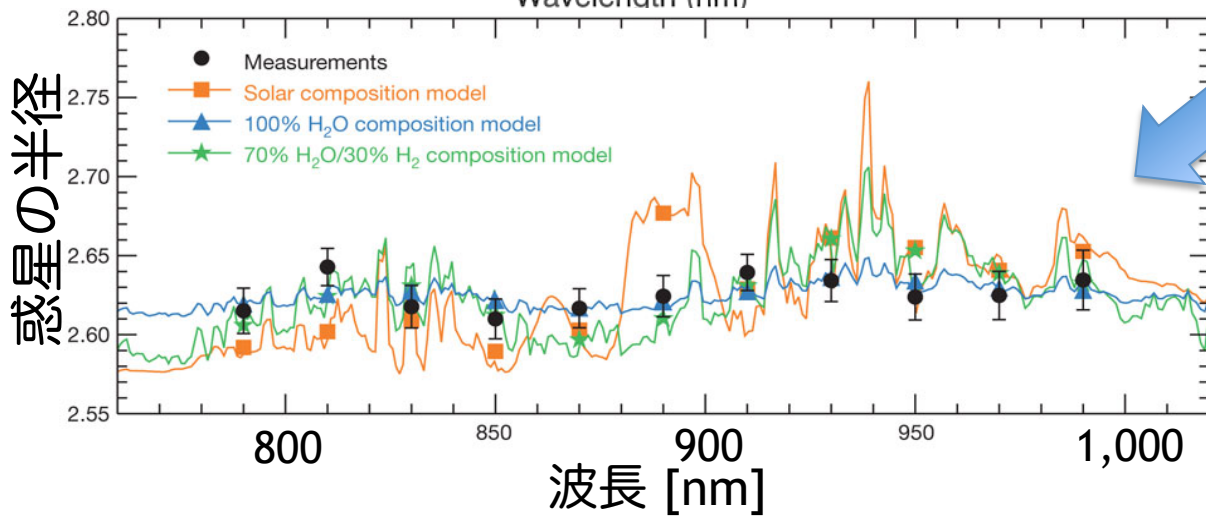
多天体分光による分光測光観測



波長ごとの光度曲線



恒星の明るさ

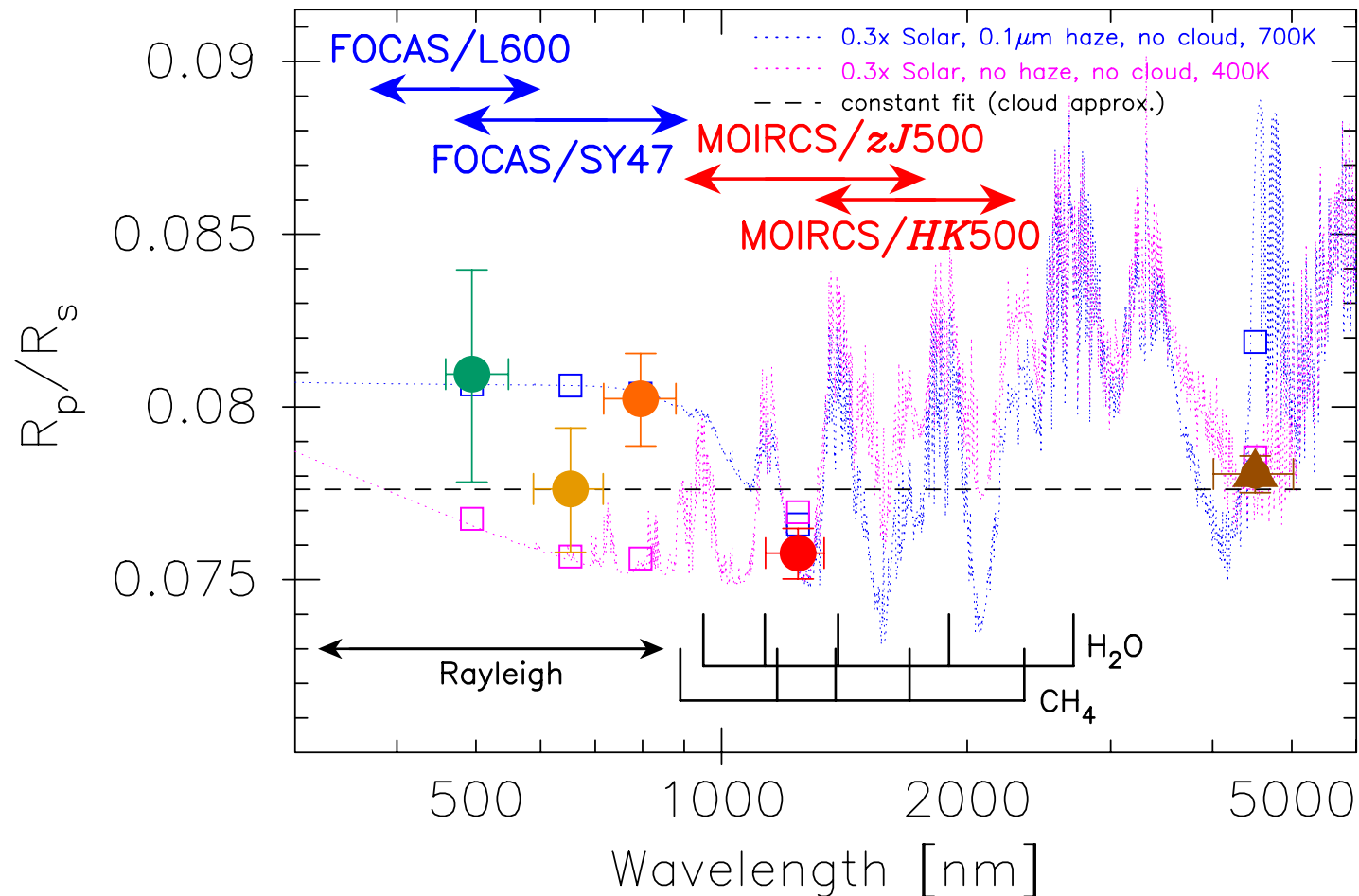


Bean et al. 2010, Nature

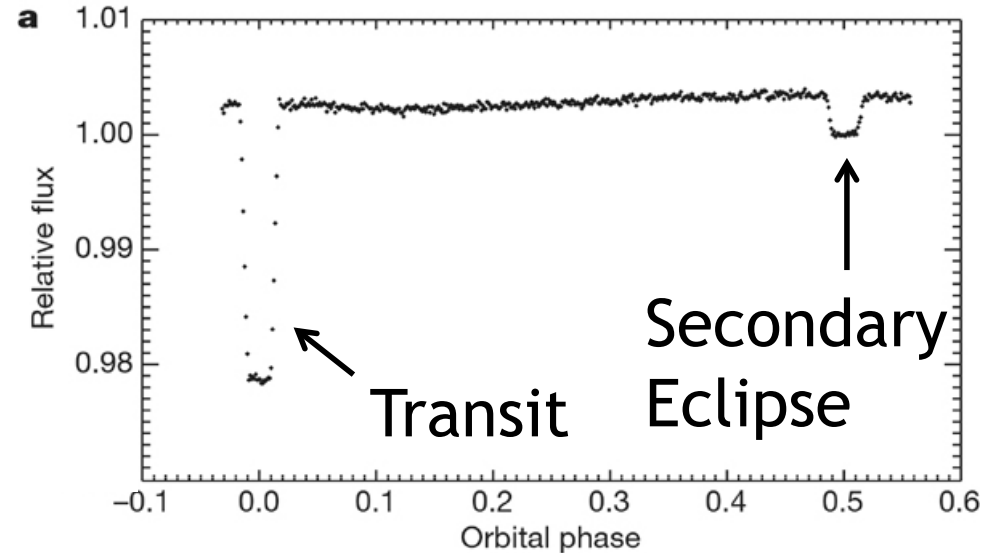
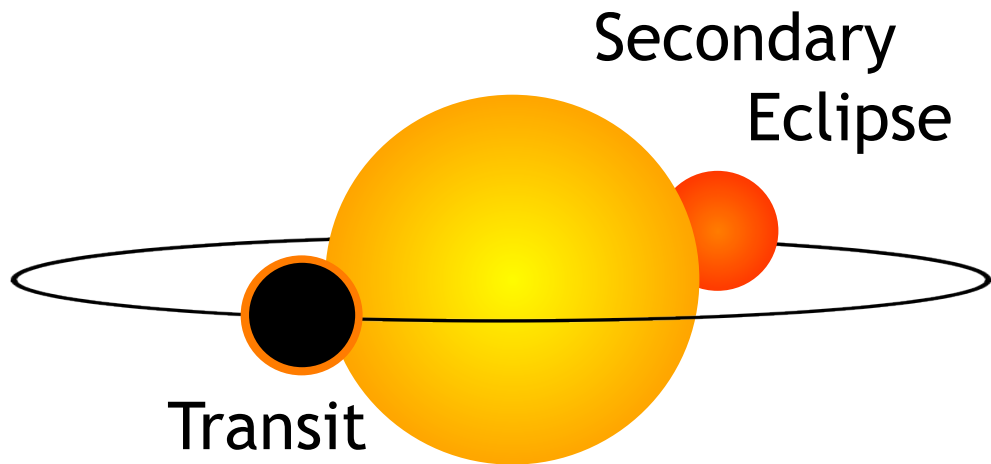
多天体分光による分光測光観測

すばるの多天体分光装置、FOCAS（可視）やMOIRCS（近赤外）を用いて、今後スーパーアースなどに対する分光測光観測を進めていく予定。

GJ3470bのトランジットスペクトル



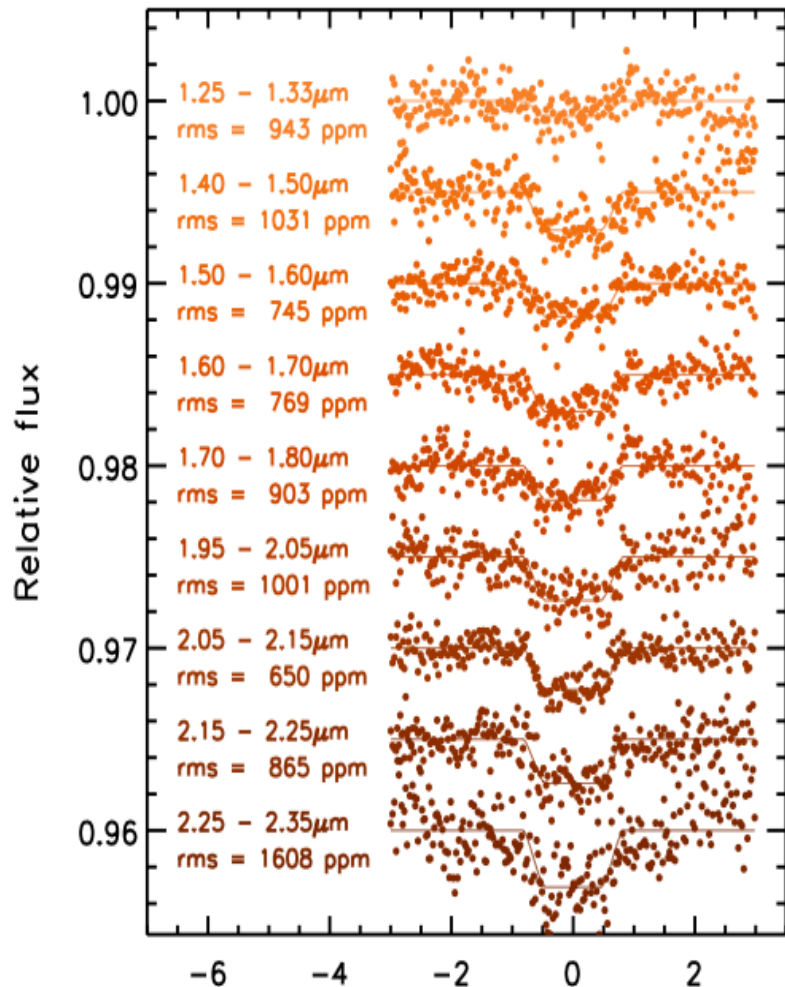
セカンダリ・イクリプスのサイエンス



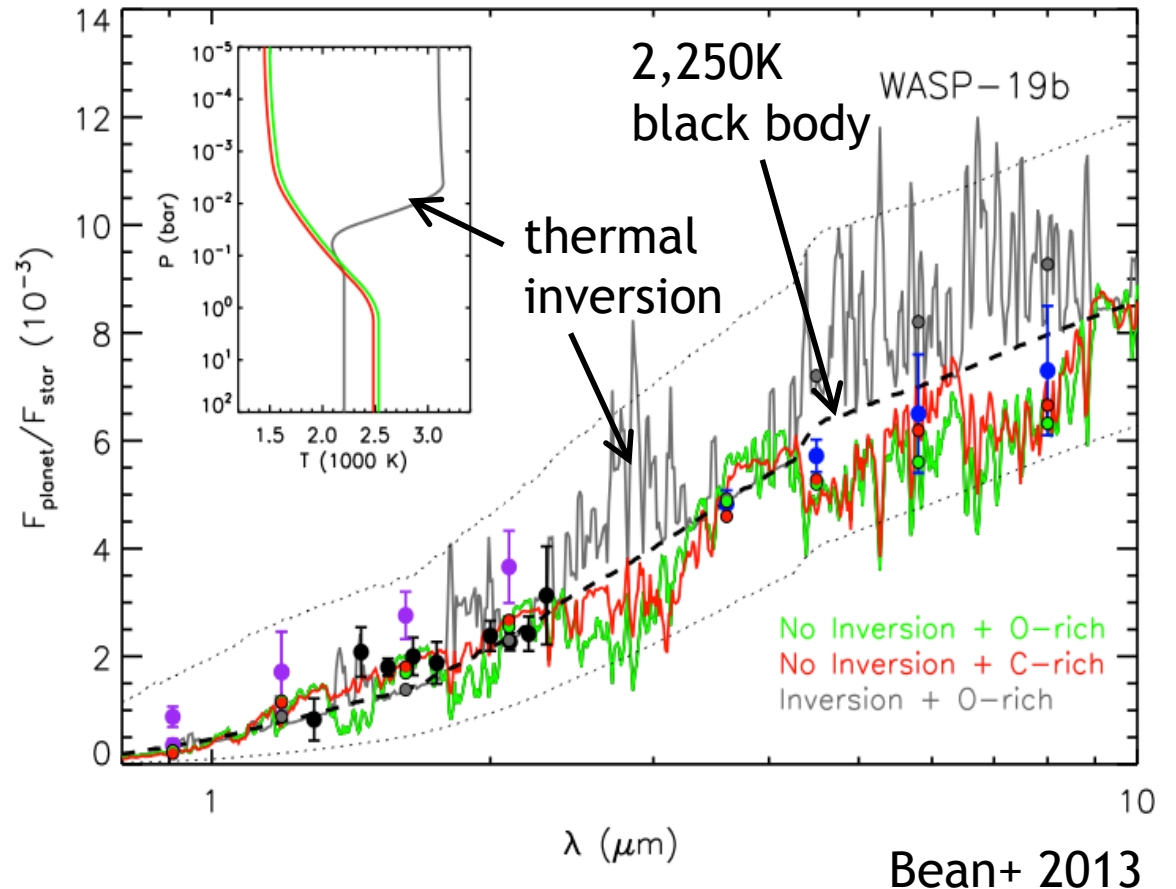
- 非常に熱い巨大惑星 ($>1,500\text{K}$) であれば、セカンダリ・イクリプス (惑星の熱放射) の分光測光観測が可能

セカンダリ・イクリプスのサイエンス

6.5m Magellanを用いたWASP-19bのセカンダリイクリプス観測



惑星 (WASP-19b) の熱放射光スペクトル



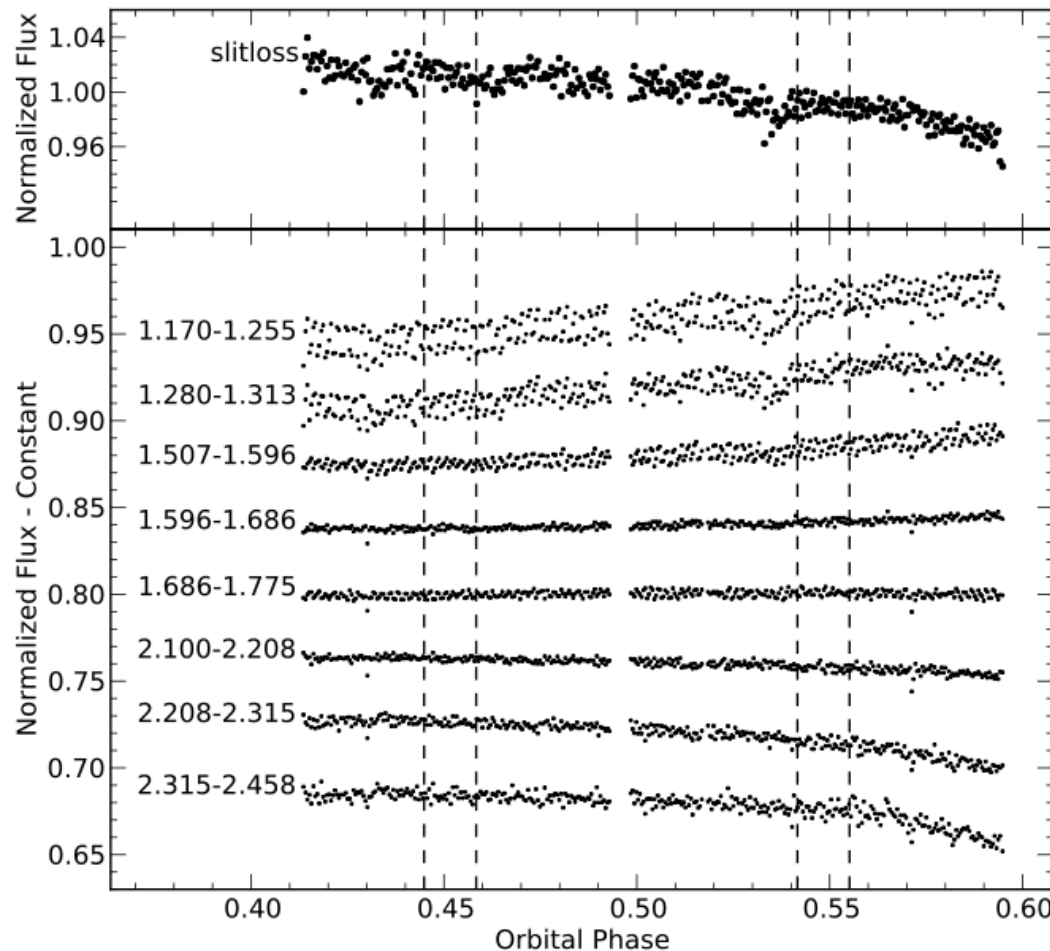
大気組成 + 大気の大気 T-P profile に依存
C/O 比や熱逆転の有無の調査が可能

ターゲットのみの分光による「自己差分法」

- 比較星を使わず、自己スペクトルの平均からの差分をとる手法。
- 視野内に明るい比較星が無い場合に有効。

IRTF/SpeXを用いたWASP-12bのセカンダリ観測

30 Dec 2009



common-mode
light curve

self-differential
light curves

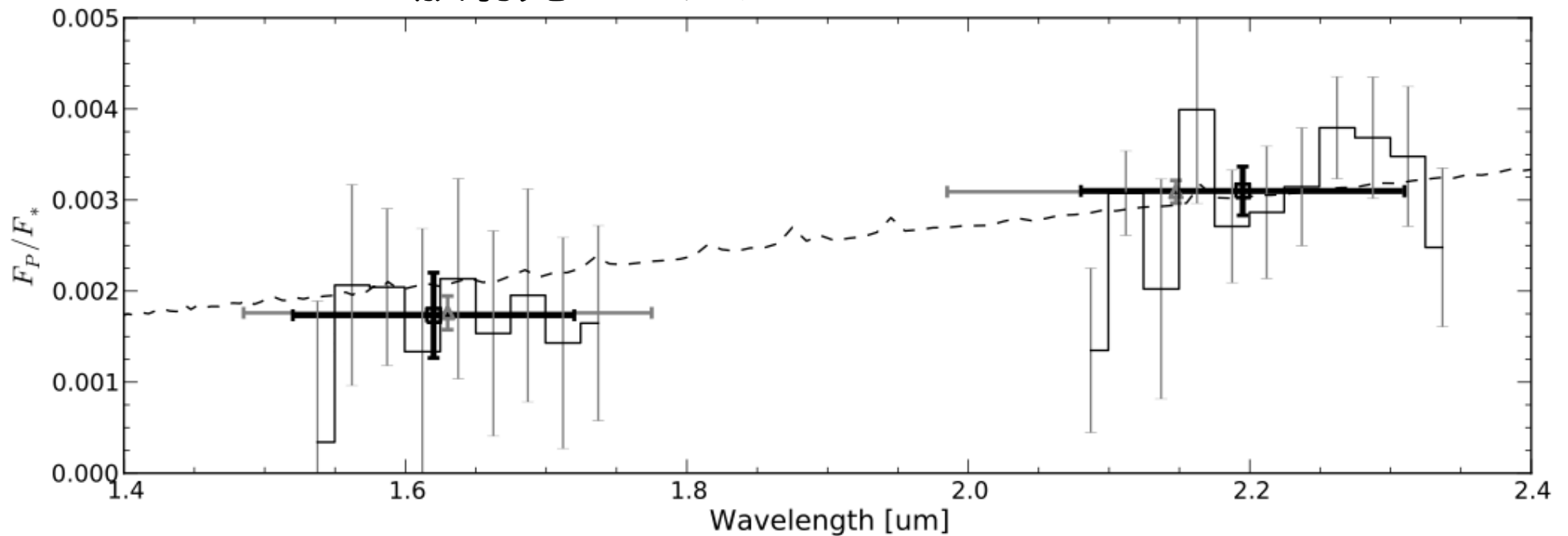


$$(R_p/R_s)^2 - C$$

Crossfield et al. 2012

ターゲットのみの分光による自己差分法

WASP-12bの放射光スペクトル



Crossfield et al. 2012

- 装置由来の系統誤差および地球大気の透過率変化の影響大
⇒ 装置および地球大気の安定性が重要。
- TESSは明るい恒星まわりの惑星を探索
⇒ 比較星を必要としない自己差分法が有効。

南極赤外望遠鏡への期待と要望

- 期待

- 低水蒸気量 ⇒ 惑星大気中の水分子の探索
- 地球大気の安定性 ⇒ 自己差分法での分光測光観測
- 継続観測可 ⇒ 連続したトランジットの観測から、惑星大気環境（天気）の短時間変化を検出可？

- 要望

- 高い追尾性能 (<1pix rms / 数時間)
- 高精度なフォーカス調整機構 (PSFの安定化)
- ワイドスリット (~10")

まとめ

- 岡山188cm望遠鏡/ISLEを用いて、デフォーカスや高精度ガイドなどの工夫により近赤外で測光精度0.1% ($J < 10$)を実現
- スーパーアースGJ3470bに対する多色同時観測から、晴れた大気の兆候を発見
- ウォームジュピターWASP-80bに対する多色同時観測から、大気中のヘイズの兆候を検出
- 現在、岡山188cm望遠鏡に搭載予定の可視-近赤外多色撮像カメラを開発中。
- 今後すばるの多天体分光装置を用いた分光測光観測も進めていく予定。
- 南極赤外線望遠鏡では、低水蒸気量や大気の安定性を活かした透過光分光観測の研究に期待。