

# 多色トランジット観測で迫る 系外惑星の大気

福井暁彦

国立天文台・岡山天体物理観測所

## 共同研究者

(PEaCH・観測) 成田憲保、平野照幸、鬼塚昌宏、川内紀代恵、  
馬場はるか、笠嗣瑠

(PEaCH・理論) 川島由依、生駒大洋、堀安範、黒崎健二  
(論文共著者) 板由房、小野里宏樹、西山正吾、永山貴宏、  
田村元秀、河合誠之、黒田大介、長山省吾、  
太田耕司、清水康弘、柳澤顕史、吉田道利、泉浦秀行

2014年10月11日

第34回望遠鏡技術検討会@キャンパスプラザ京都



# 目次

---

- 系外惑星研究の動向と大気の透過光観測
- 観測成果紹介
  - I: スーパーアースGJ1214b
  - II: 灼熱天王星GJ3470b
  - III: ウォームジュピターWASP-80b
- 新多色撮像カメラMuSCATと将来計画

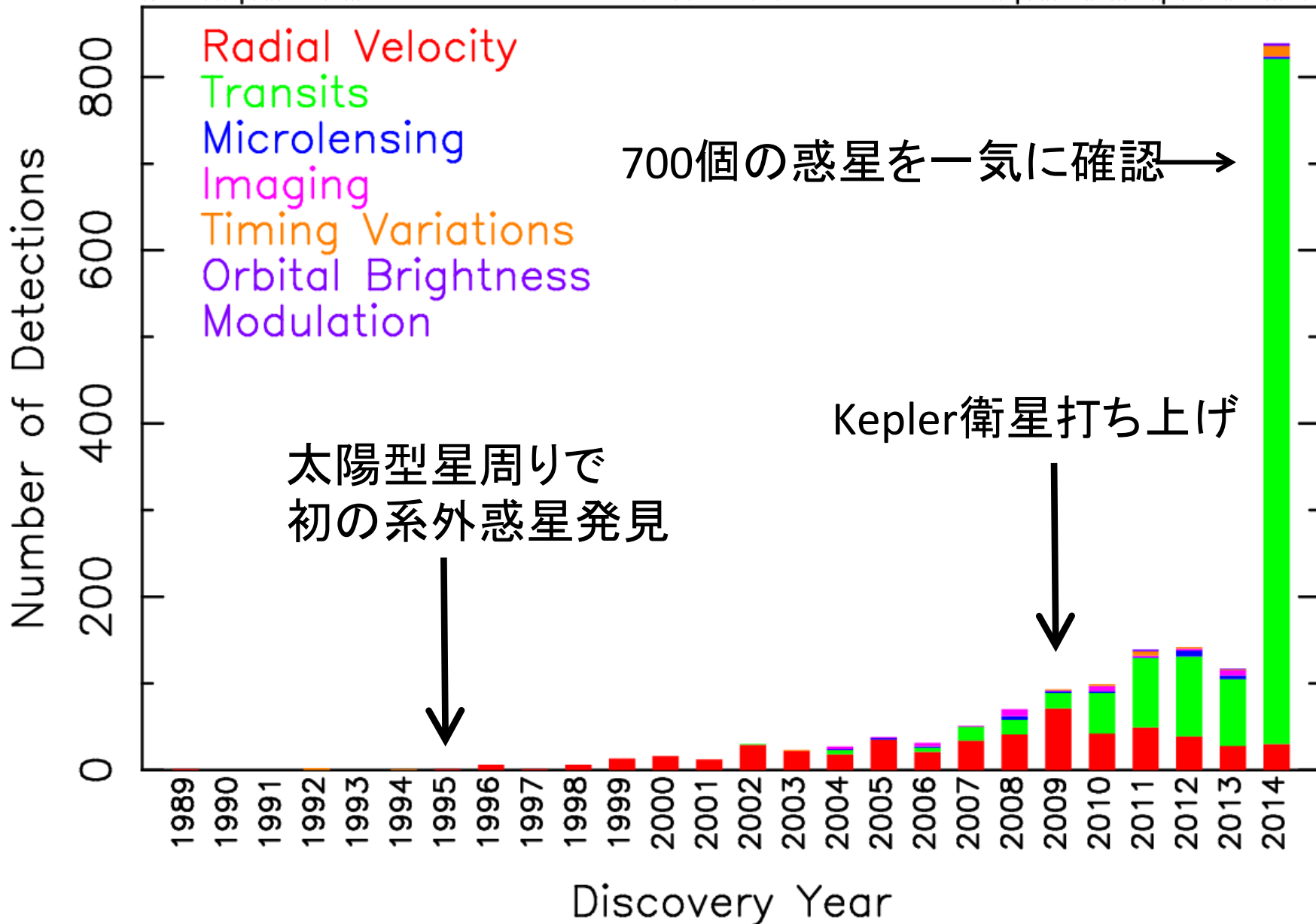
# 系外惑星研究の動向と 大気の透過光観測

# 系外惑星発見数の推移

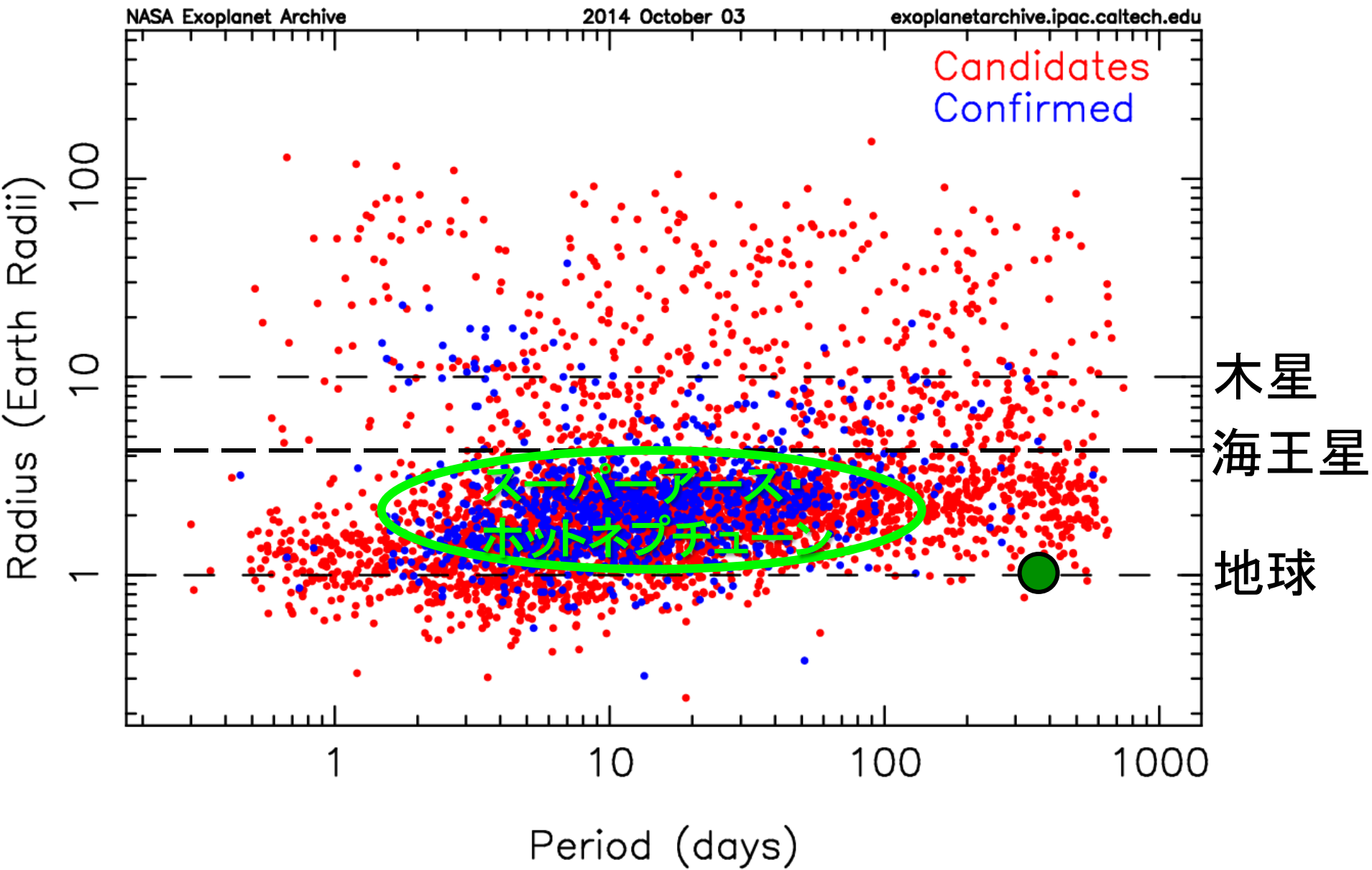
NASA Exoplanet Archive

2014 October 03

exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

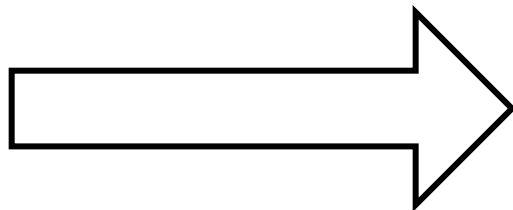


# Kepler衛星が発見した惑星と惑星候補の分布



# From discovery to characterization

## 発見



## 詳細観測

### これまでのサーベイ

- 地上サーベイ
  - ホットジュピター
- Corot, Kepler
  - 数千個の地球～海王星型惑星
  - ただし遠方

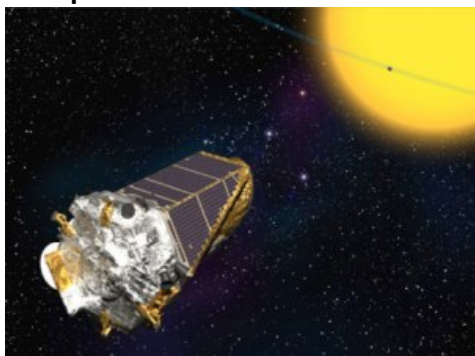
### これからのサーベイ

- K2 (2014-)
- TESS (2017-)
- PLATO (2022-)
  - 近傍の惑星系
  - 詳細観測可

### 将来の大型計画

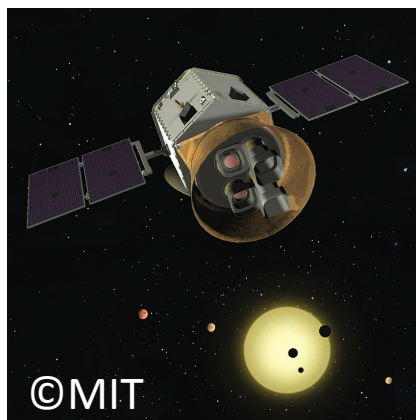
- JWST (2018-)
- TMT (2023-)
- SPICA (2025-)
  - 惑星大気の観測

Kepler



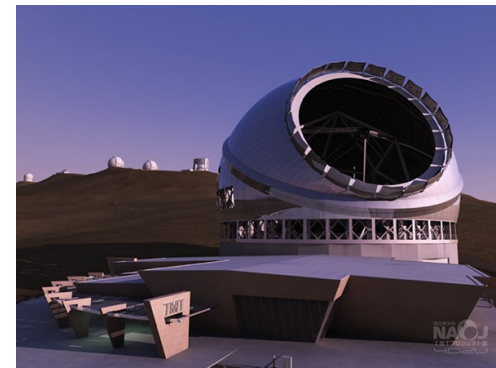
©NASA

TESS



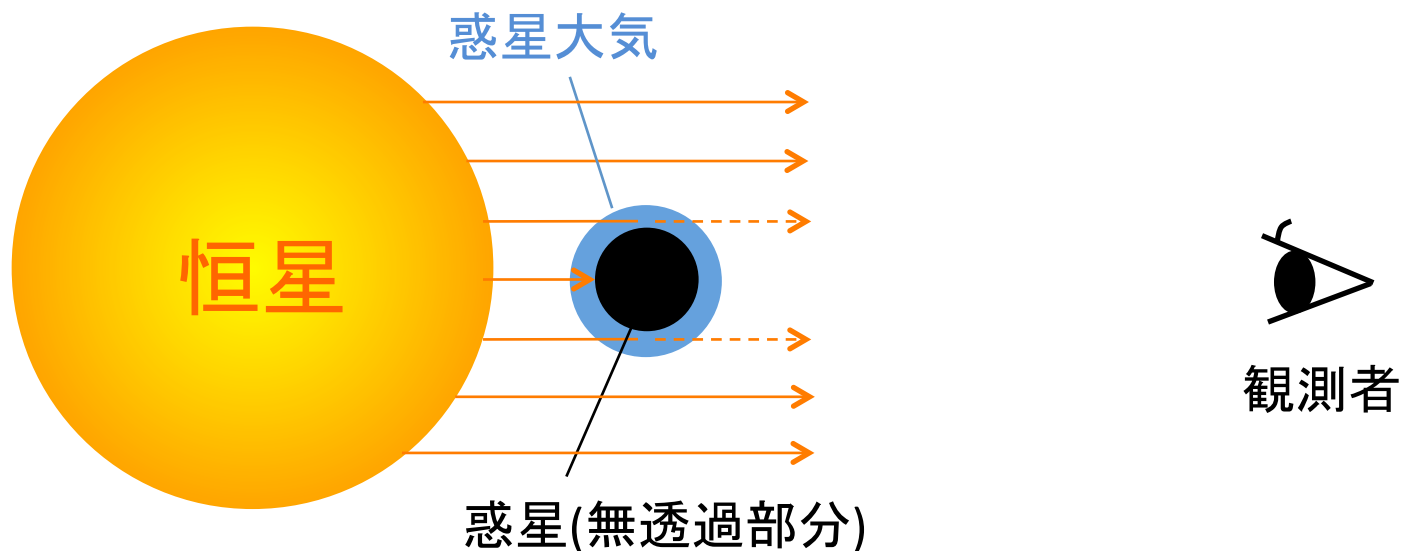
©MIT

TMT

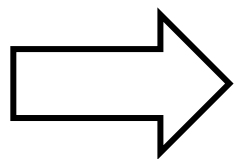


©NAOJ

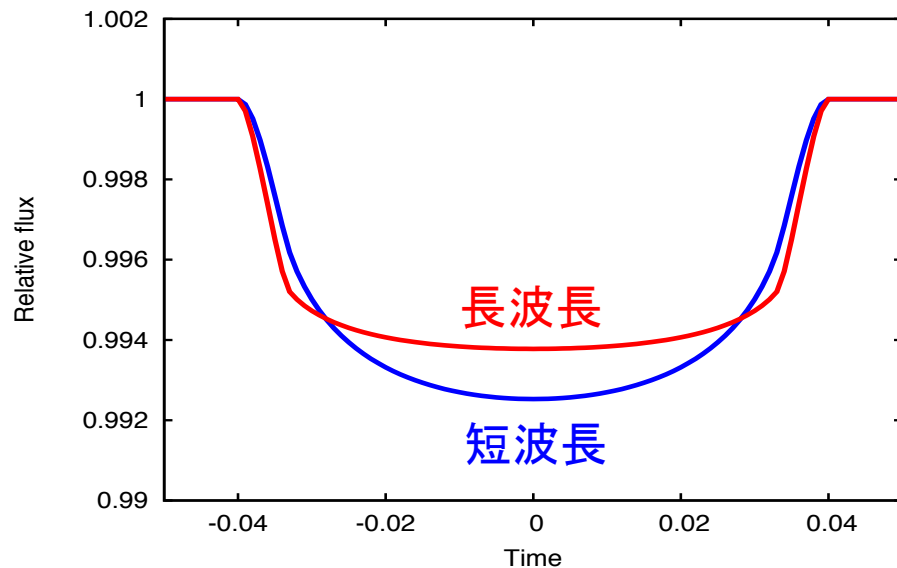
# トランジット惑星の大気透過光観測



トランジットの減光率(見かけの惑星の半径)の波長依存性から、大気組成を決定可能



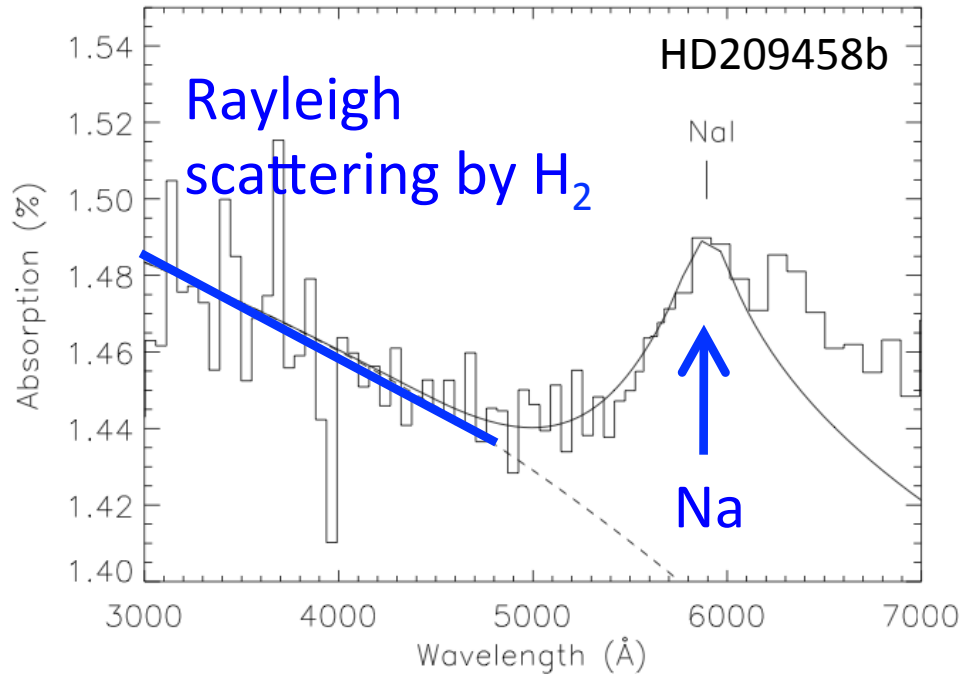
- 惑星大気科学
- 惑星形成論
- ハビタビリティ



# ホットジュピターの大気成分の検出例

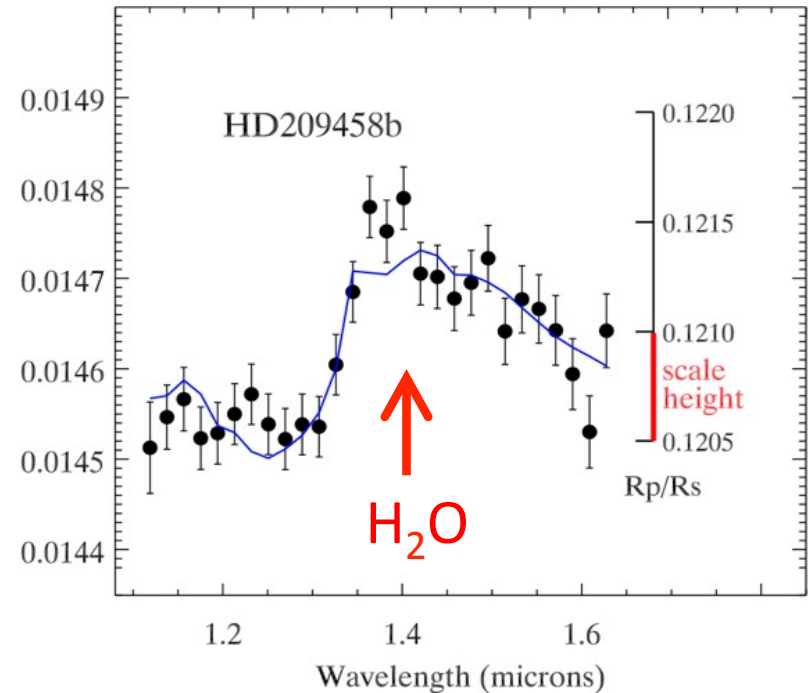
- 可視域: アルカリ金属 (Na, K)、水素分子によるレイリー散乱
- 近赤外域: 水やメタン、COなどの分子

## 可視域



Lecavelier des Etangs+ 2008

## 近赤外域

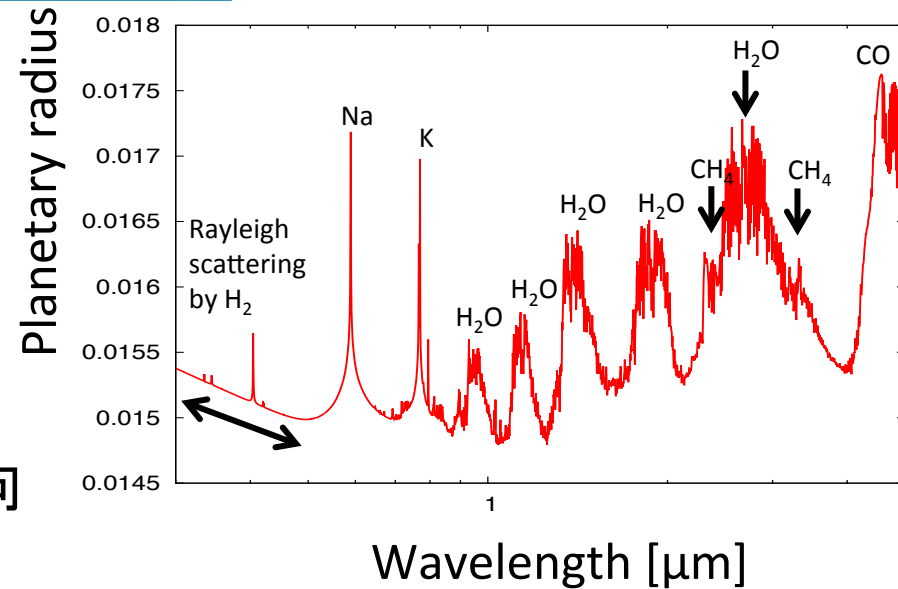


Deming+ 2013



# 大気透過光観測の3つのアプローチ

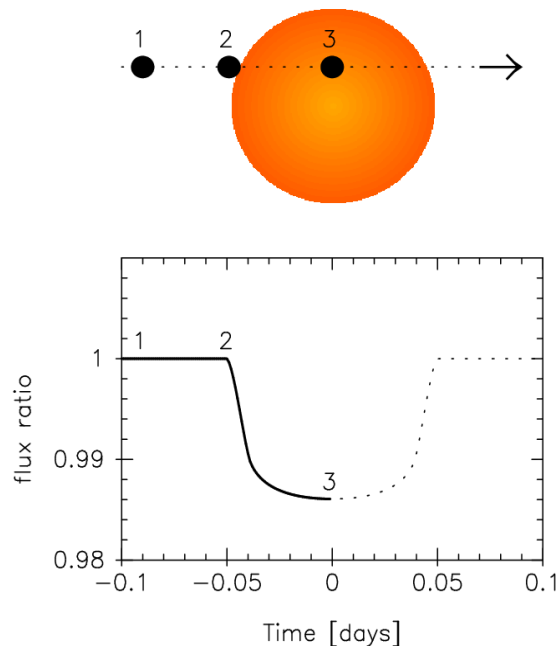
- 高分散分光
  - Na, Kなどの金属元素の検出
  - 大口径望遠鏡が必要
- 低分散分光
  - 狭い波長域でのスペクトルの傾向
  - ⇒ 分子の検出、大気の主成分、雲やヘイズの有無
  - 中～大口径望遠鏡が必要
- 多色バンド測光
  - 広い波長域でのスペクトルの傾向
  - ⇒ 大気の主成分、雲やヘイズの有無
  - 小～中口径望遠鏡でも可能
  - 豊富な観測時間



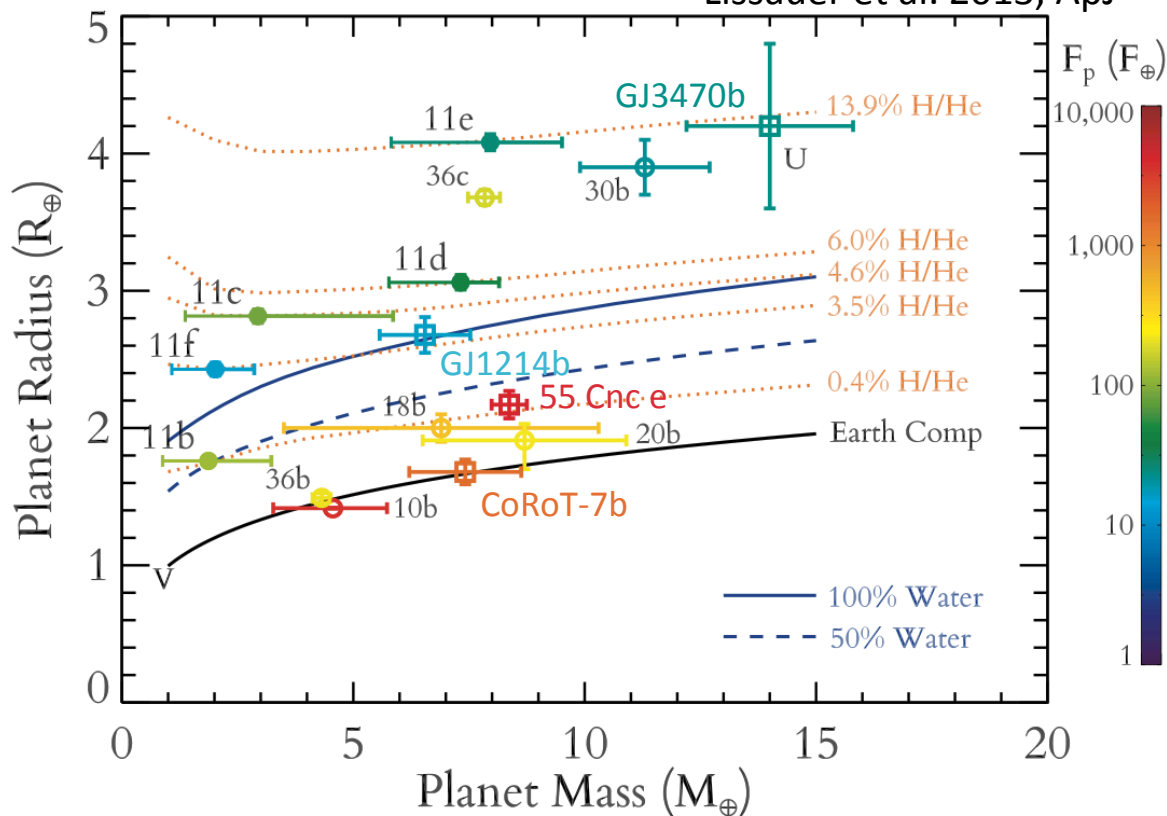
**観測成果I:  
スーパーアースGJ1214b**

# 低質量惑星の質量-半径分布

## トランジット惑星



Lissauer et al. 2013, ApJ



- 減光率 → 惑星の半径
- 視線速度 → 惑星の質量



内部組成の推定が可能

- 半径と質量だけでは、内部組成を一意に決められない。

- 主成分: 岩石、水、ガス(H/He)

惑星の大気組成の調査が重要

# 低質量惑星の大気観測

- 通常、低質量惑星(スーパーアース・ネプチューンズ)に対する大気透過光観測は困難

- 主星が太陽型星の場合、減光率が極めて小さい(0.1%以下)

- 観測に必要な条件

- **M型星**: 主星が小さい ⇒ **減光率大**
  - **太陽系近傍**: 主星が明るい ⇒ **高精度観測**



- 太陽系近傍(<30pc)のM型星まわりの低質量トランジット惑星

(<30M<sub>Earth</sub>) は現在**3個**のみ

- **GJ1214b** (6.6M<sub>Earth</sub>), **GJ3470b** (14M<sub>Earth</sub>), **GJ436b** (23M<sub>Earth</sub>)

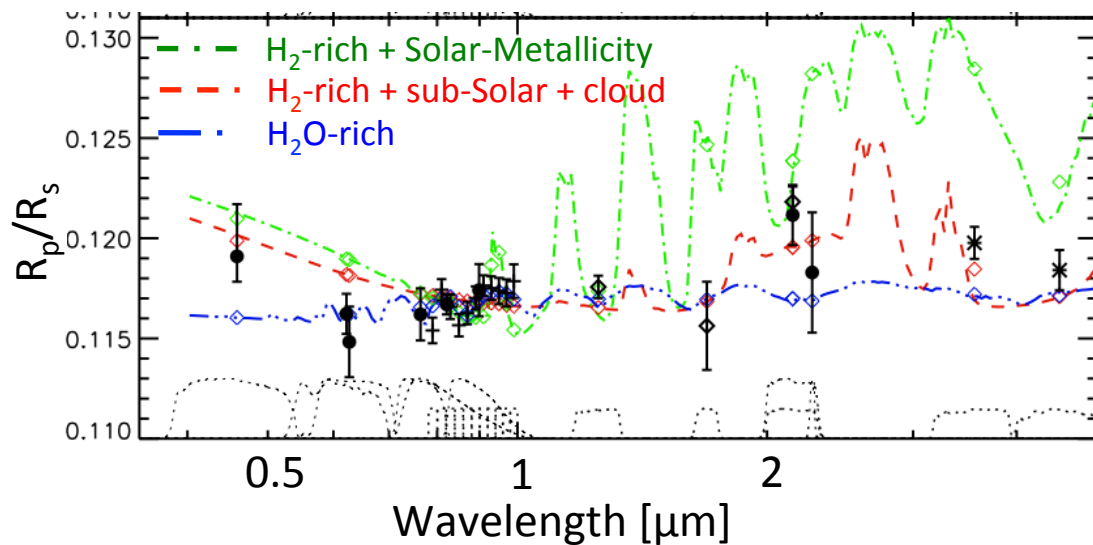
# スーパーアースGJ1214b

## • GJ1214b

- 2009年に発見 (Charbonneau+ 2009, Nature)
- 地上から大気の観測が可能な初のトランジット・スーパーアース

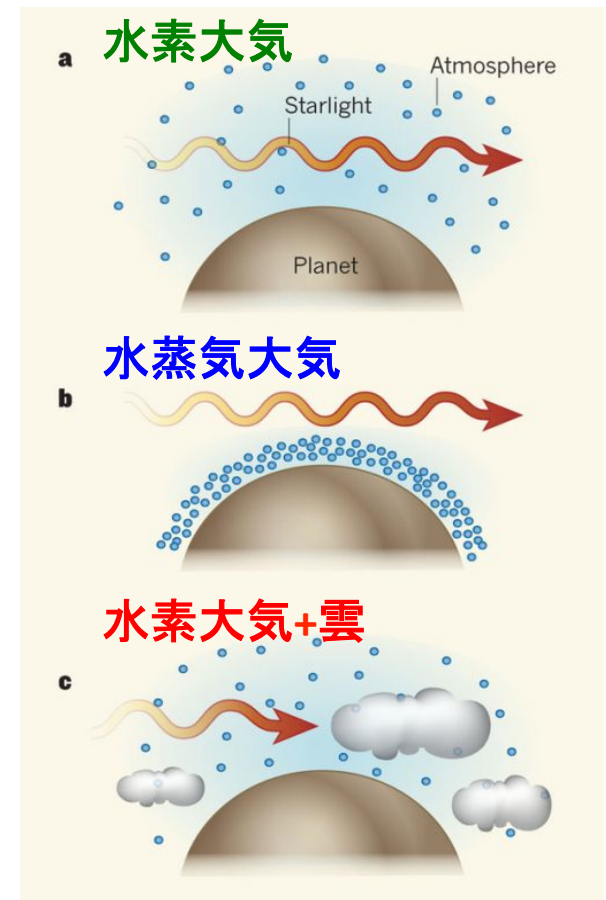
## • スペクトルがフラットになる事が次々報告

- 水蒸気大気 or 雲？
- 近赤外と可視短波長域で議論の余地。



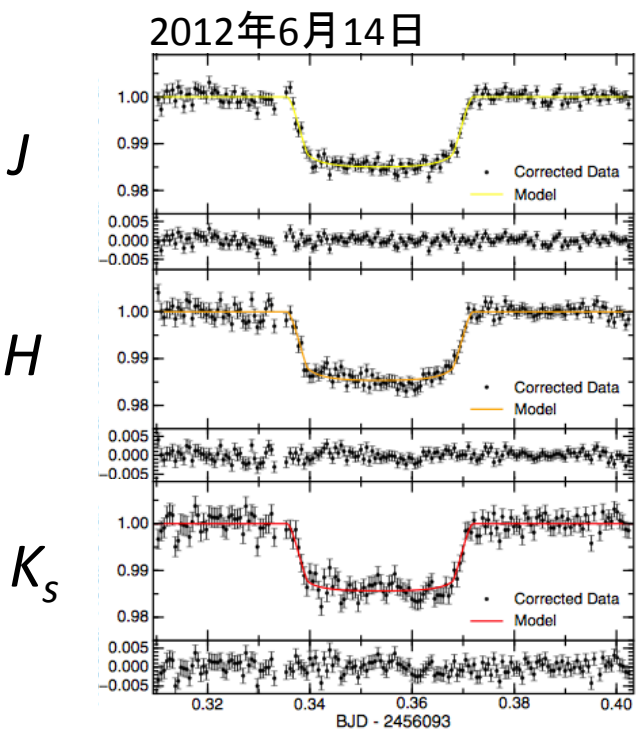
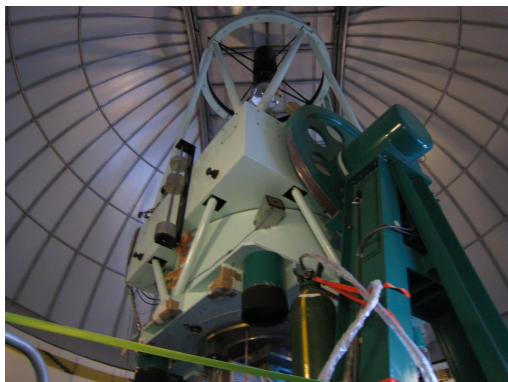
de Mooij et al. 2011

惑星質量	6.6 $M_{\text{Earth}}$
惑星半径	2.6 $R_{\text{Earth}}$
軌道周期	1.6日
主星半径	0.2 $R_{\text{sun}}$
距離	13pc

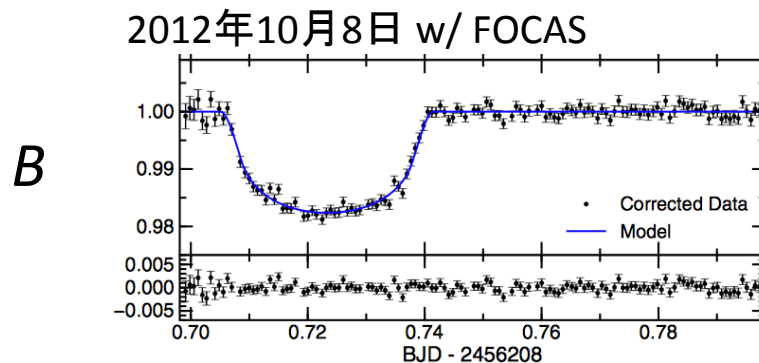
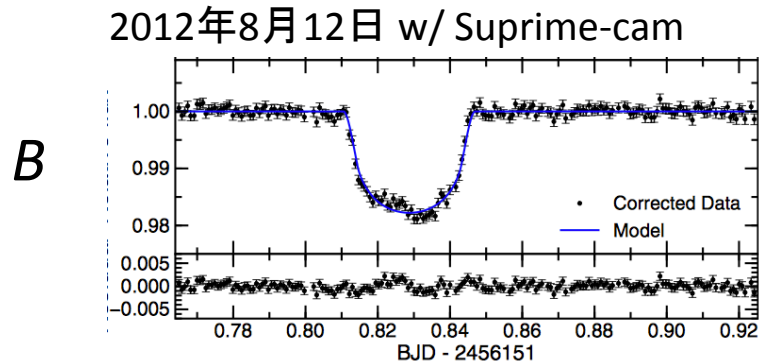
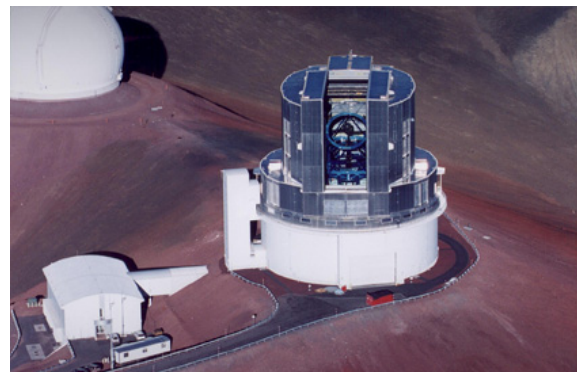


# IRSF及びすばる望遠鏡による観測

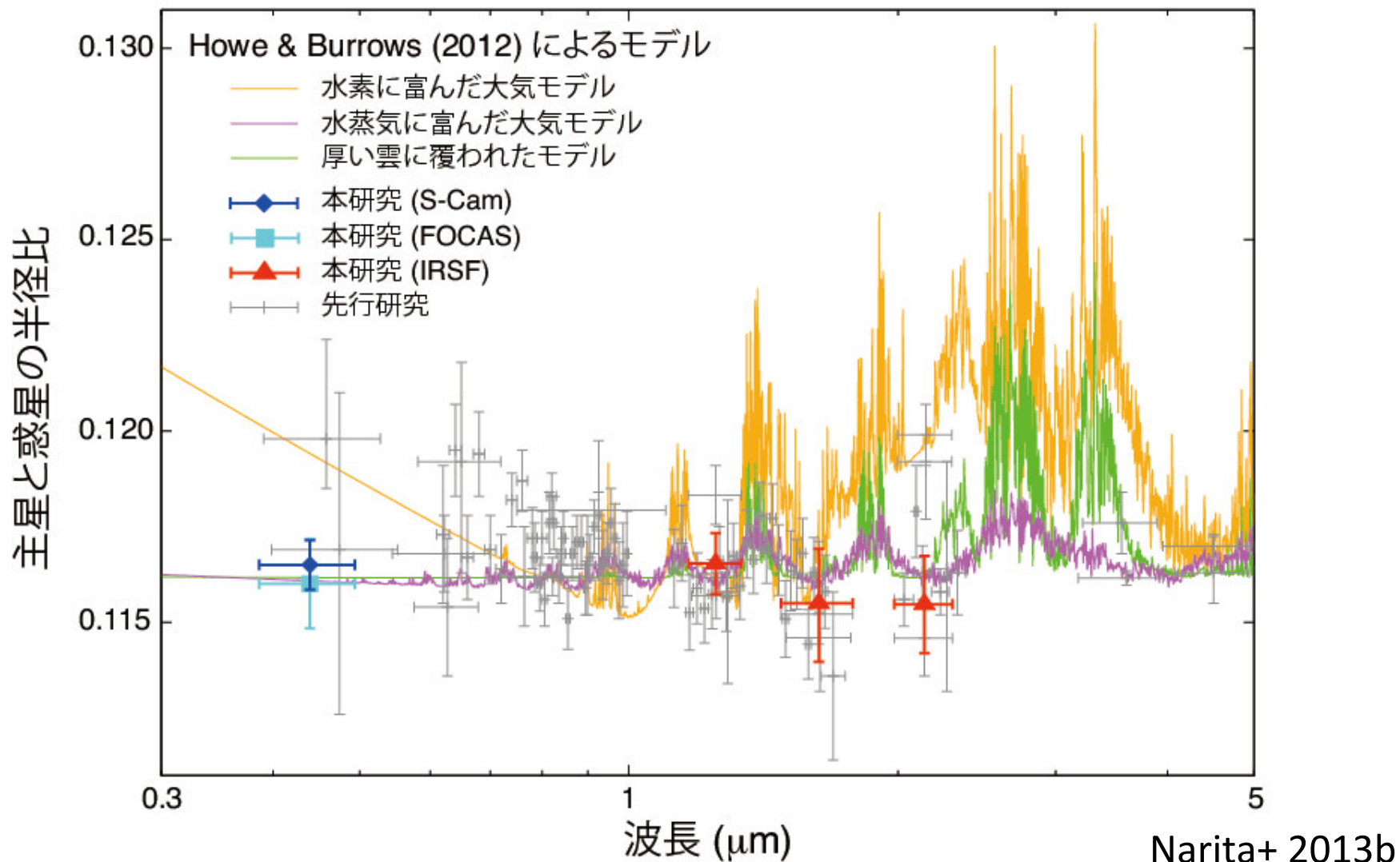
1.4m IRSF望遠鏡を用いた近赤外観測



8.2m すばる望遠鏡を用いたBバンド観測



# IRSF及びすばる望遠鏡による観測



近赤外域と可視短波長域でフラットと一致することを確認。

**觀測成果II:  
灼熱天王星GJ3470b**

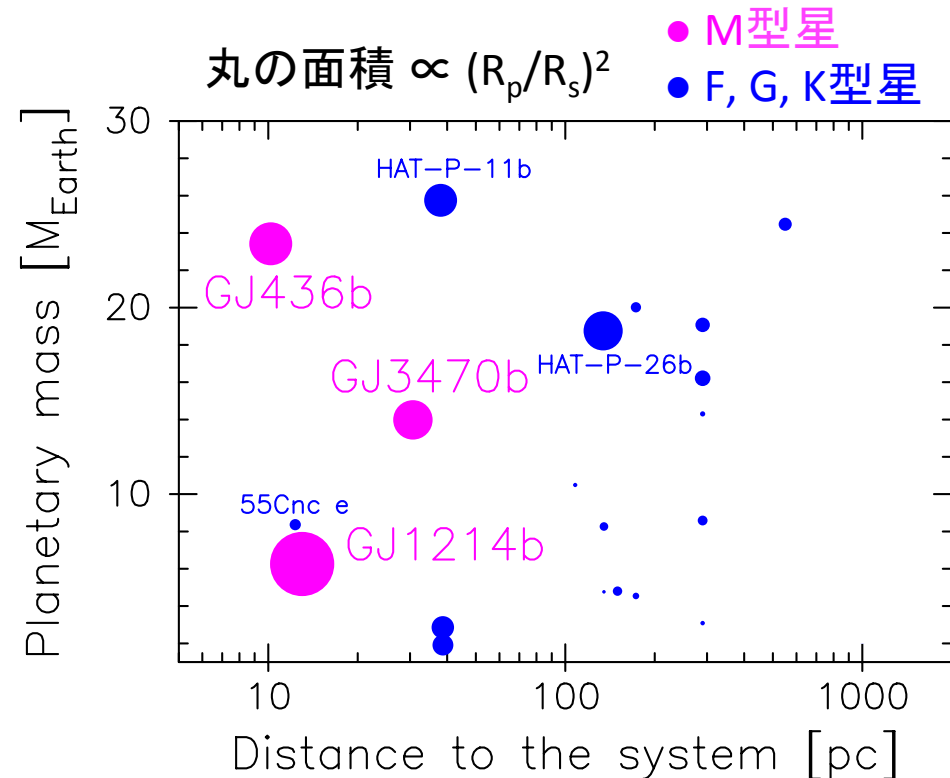


# 灼熱天王星GJ3470b

- 近傍のM型星をまわる3例目のトランジット惑星
  - 2012年7月に発見 (Bonfils+ 2012)
  - GJ1214bに次いで低質量
  - 質量が天王星とほぼ同じ

大気の観測が可能な低質量惑星として貴重なサンプル

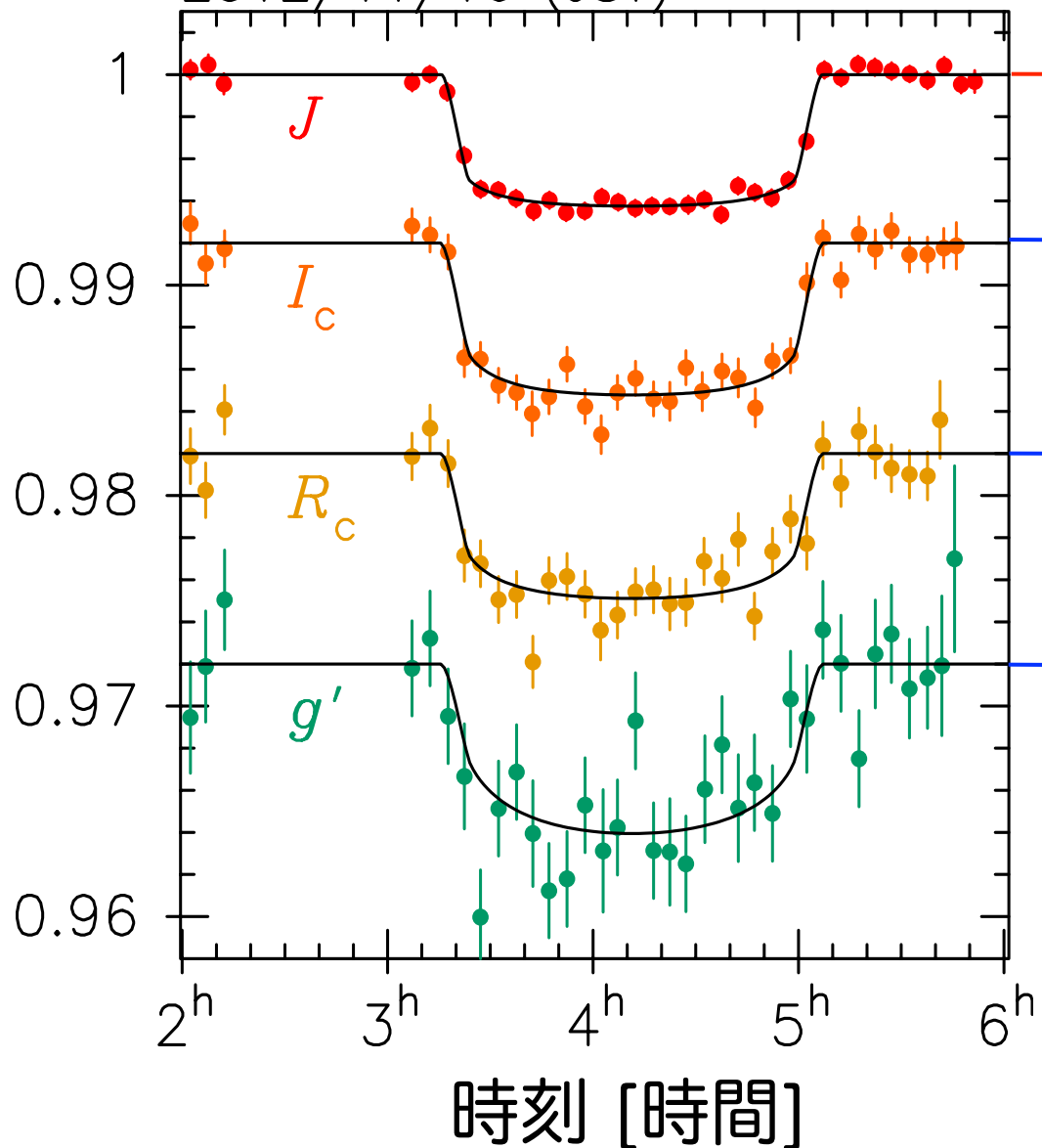
惑星質量	14 $M_{\text{Earth}}$
惑星半径	4.3 $R_{\text{Earth}}$
軌道周期	3.3日
主星半径	0.5 $R_{\text{sun}}$
距離	30pc



# 岡山の2台の望遠鏡を用いた多色トランジット観測

2012/11/16 (JST)

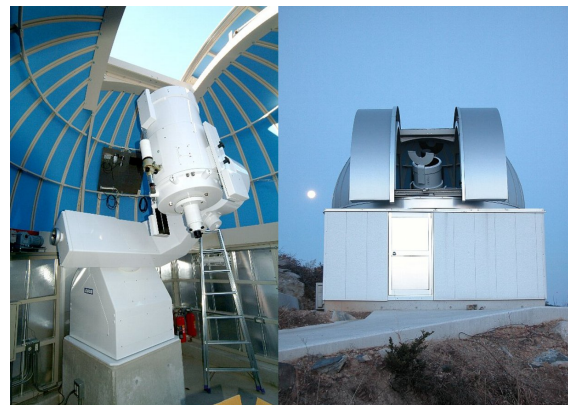
主星の明るさ



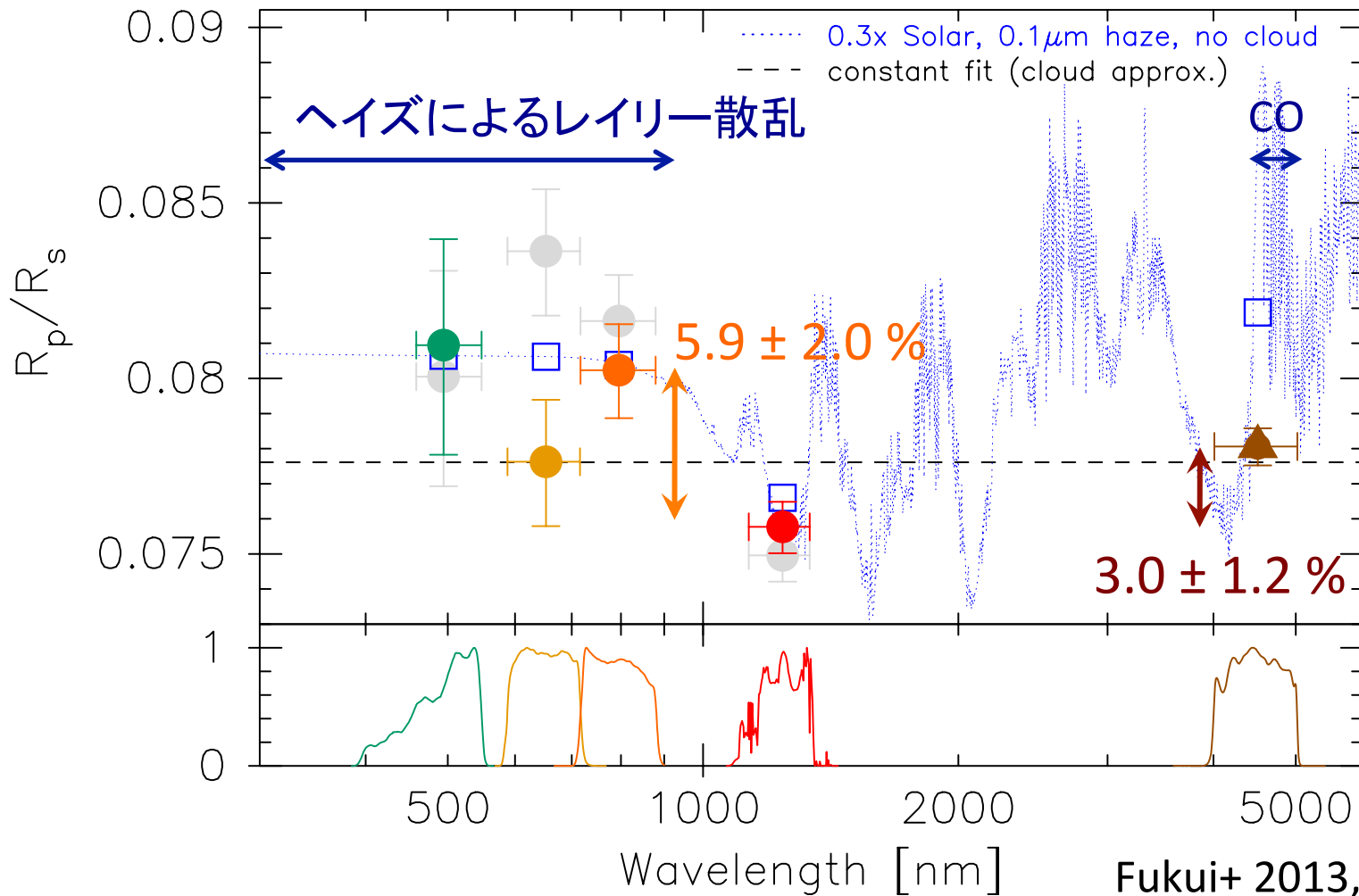
188cm望遠鏡/ISLE



50cm MITSuME



# GJ3470bのトランジット・スペクトル



Fukui+ 2013, ApJ,770,95

## 波長ごとに惑星半径が異なる結果

- 水素主体の大気にヘイズを含む大気モデルで説明可
- 晴れた大気を持つ可能性 ⇒ 雲に邪魔されず様々な分子を特定可

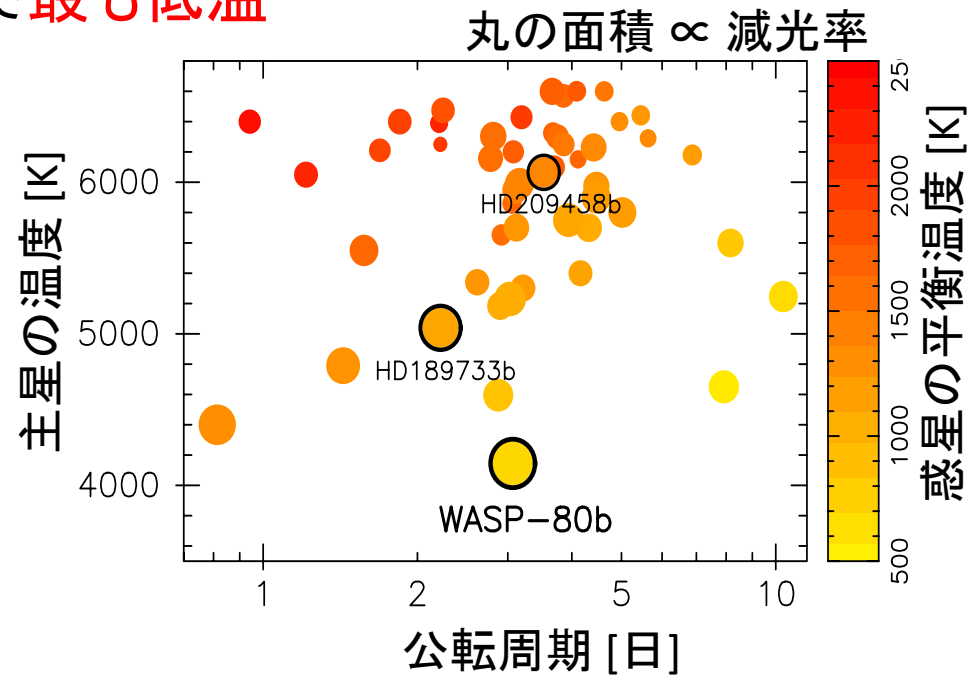
# 観測成果III: ウォームジュピター-WASP-80b

# WASP-80b

惑星質量	$0.55 M_{\text{Jup}}$
惑星半径	$0.95 R_{\text{Jup}}$
軌道周期	3.1日
主星半径	$0.6 R_{\text{sun}}$
距離	60pc

- 近傍のK/M型星を周るトランジット巨大惑星
  - 2013年に発見 (Triaud+ 2013)
  - 理論的、観測的に稀少
- 平衡温度が**800K以下**の「ウォームジュピター」
  - ホットジュピターの平衡温度は1,000K以上
  - 大気が観測された巨大惑星の中で**最も低温**

- 大気中に**ヘイズ**が漂っている可能性
  - ソリン(炭化水素高分子)と呼ばれるヘイズは約1,000K以下で生成



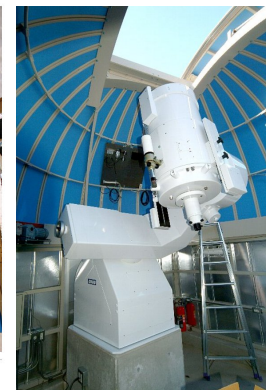
# 岡山およびIRSFにおける観測



1.4m IRSF @SAAO



188cm & 50cm @OAO



- **1.4m IRSF/SIRIUS @SAAO**

- 近赤外3バンド (J, H, Ks) 同時撮像
- 3回のトランジットを観測

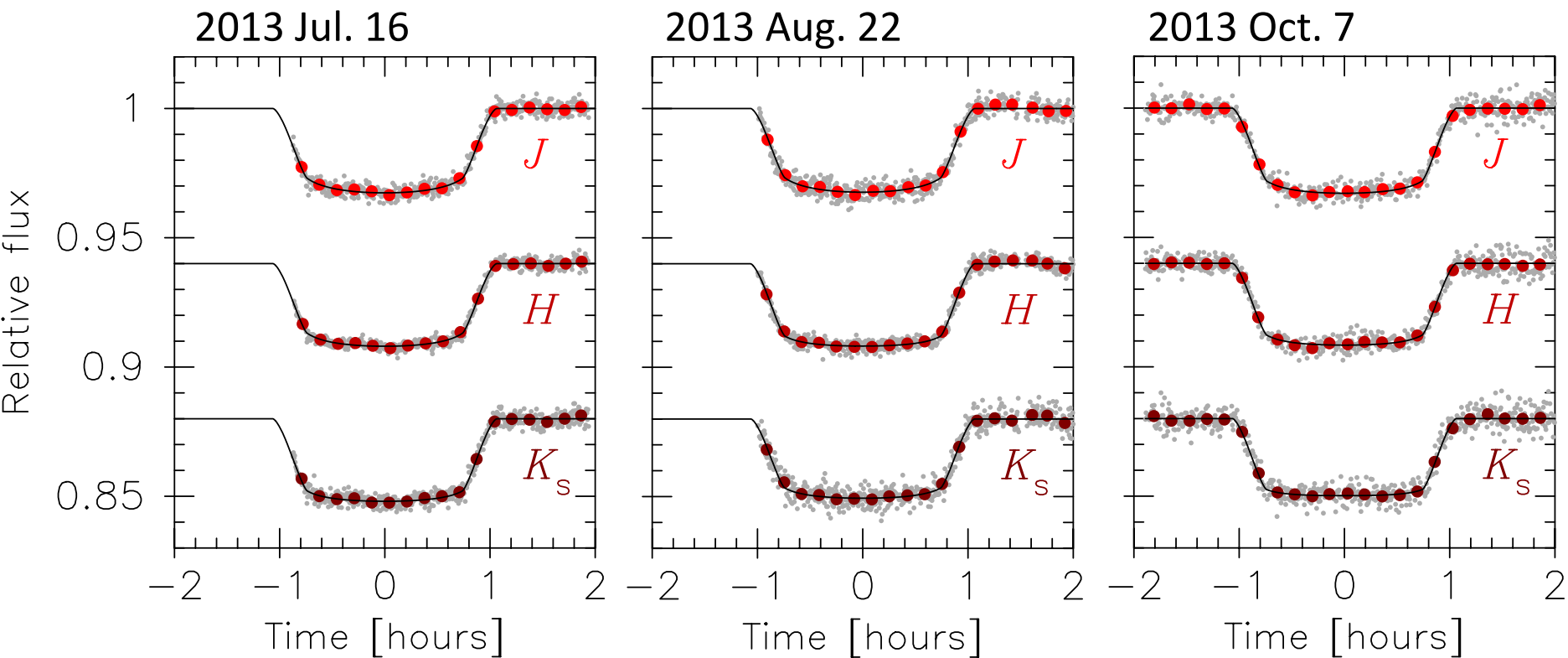
- **188cm/ISLE @OAO**

- 近赤外1バンド (J, H, or Ks)
- 2回のトランジットを観測 (Jバンド)

- **50cm MITSuME @OAO**

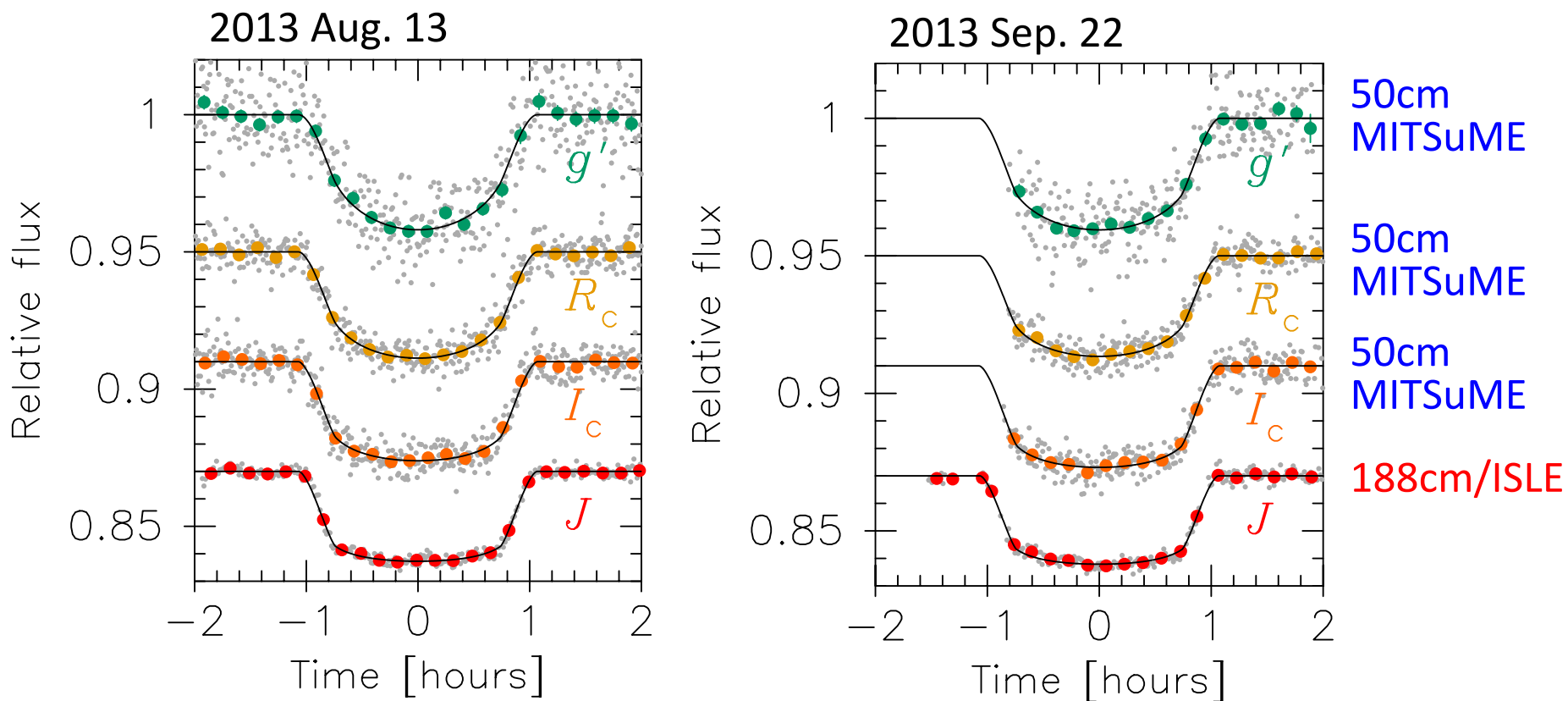
- 可視3バンド (g', Rc, Ic) 同時撮像
- 188cm/ISLEと同時に使用して、2回のトランジットを観測

# IRSFで得られたトランジット光度曲線



- 積分時間: 10秒 (7/16, 10/7) or 15秒 (8/22)
- 測光精度: 0.15% (H)、0.20% (J,  $K_s$ )

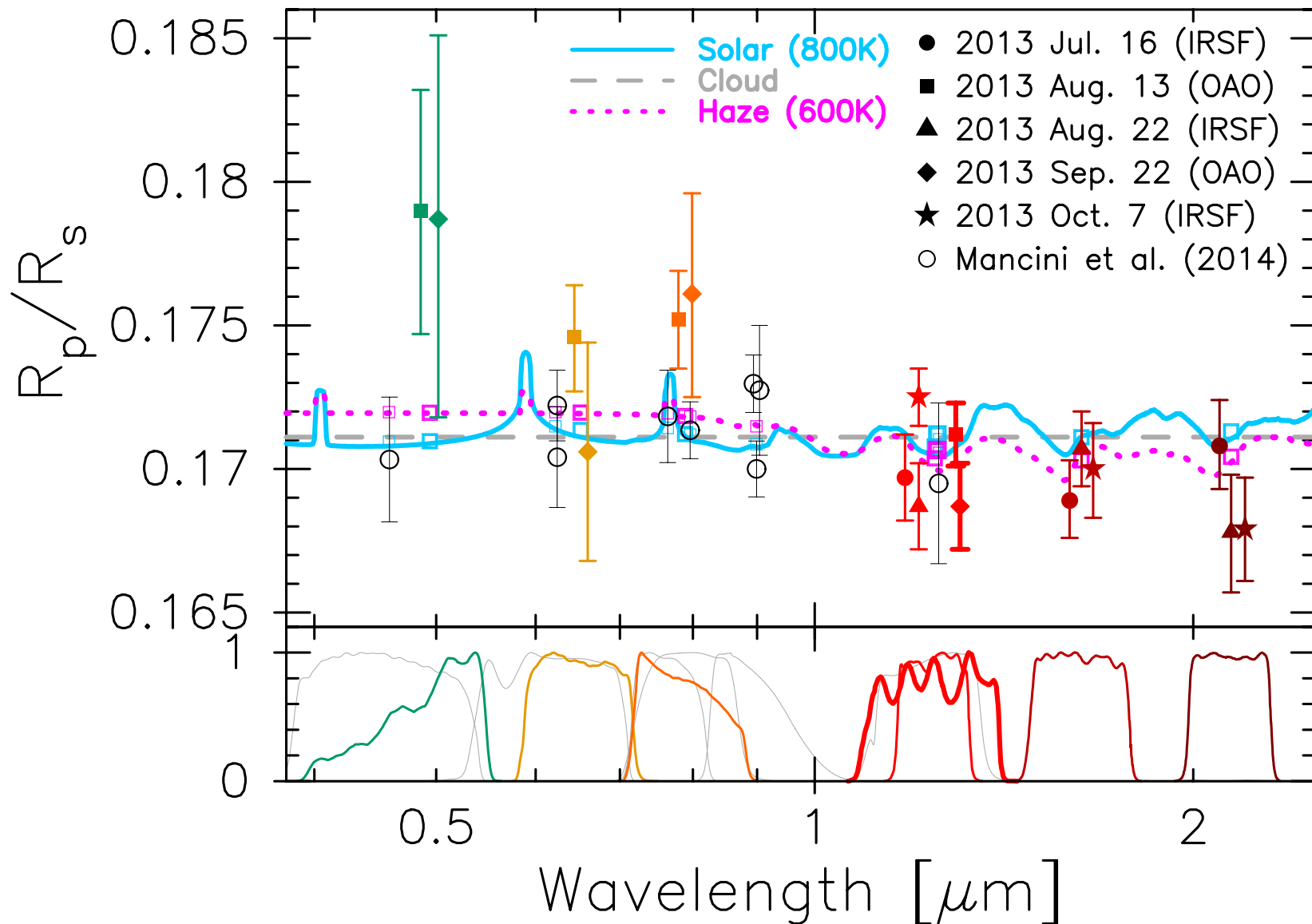
# 岡山観測所で得られたトランジット光度曲線



- 露光時間: 45秒 (ISLE) or 30秒 (MITSuME)
- 測光精度: 0.86% ( $g'$ )、0.42% ( $R_c$ )、0.40% ( $I_c$ )、0.16% ( $J$ )



# WASP-80bのトランジット・スペクトル

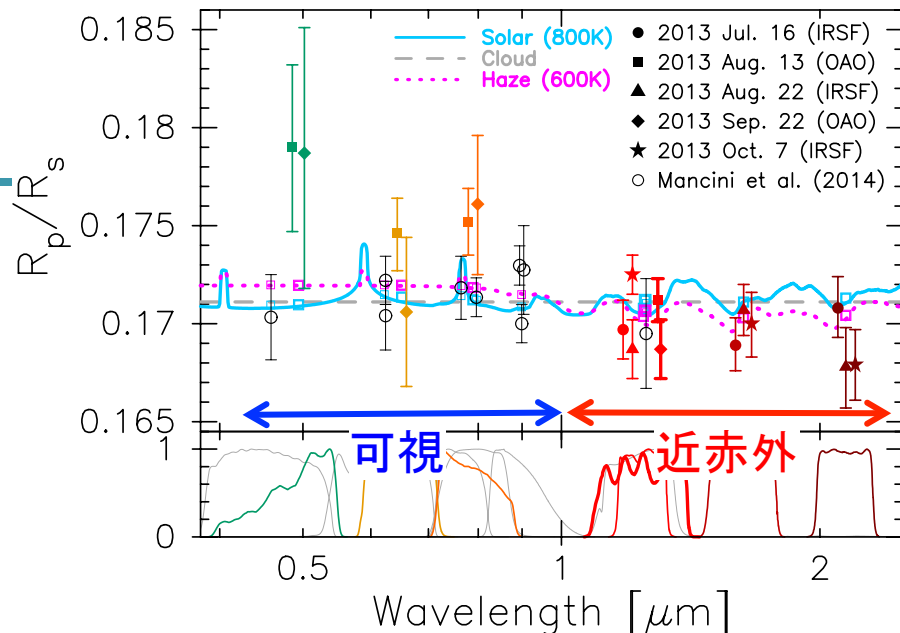


# 結果

- 晴れた太陽組成モデル、厚い雲モデルとも、 $1.7\sigma$ のずれ⇒ 棄却  
できず

一方、

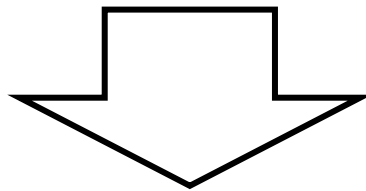
- 可視域 ( $\lambda < 1\mu\text{m}$ ) の惑星半径が近赤外域に比べて平均的に約1%大きい ( $2.9\sigma$ )
  - 可視域で大気が不透明⇒ヘイズが存在している可能性
- ヘイズモデルと良い一致 ( $1.0\sigma$ )
  - 太陽組成大気にヘイズ(タイタンに存在するソリンを仮定)を追加した理論モデルを作成
- もしソリンであれば、理論的な予測と一致
  - 今後、すばる望遠鏡などを用いた詳細観測が必要



# 新多色撮像カメラMuSCATと将来計画

# 現在の問題点と新多色広視野カメラの必要性

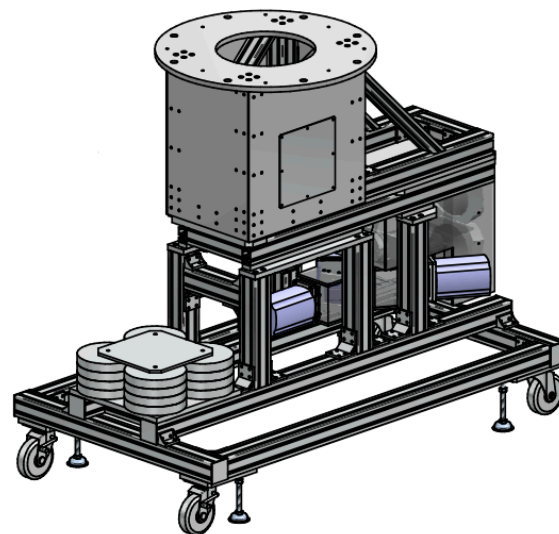
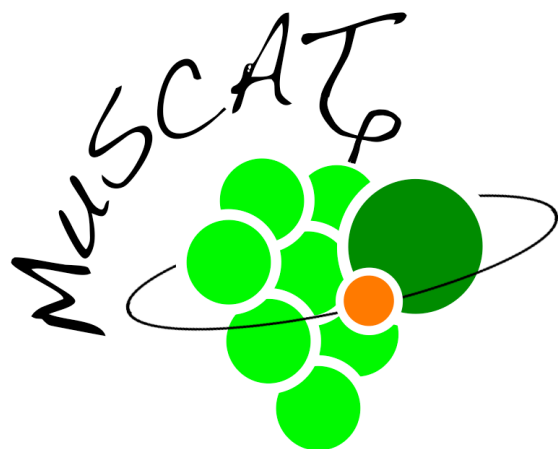
- 可視観測の高精度化が必要
  - 口径50cmのMITSuME望遠鏡では力不足
- 近赤外観測の多色化、広視野化が必要
  - 188cm/ISLEは多色同時撮像不可、かつ視野が不十分( $\Phi=5.9'$ )
  - IRSFは3色同時観測可能かつ比較的広視野( $\Phi=10'$ )だが、可視と同時観測が不可、かつ南天の天体に限られる



北半球に中口径望遠鏡+  
可視近赤外同時多色広視野カメラが必要

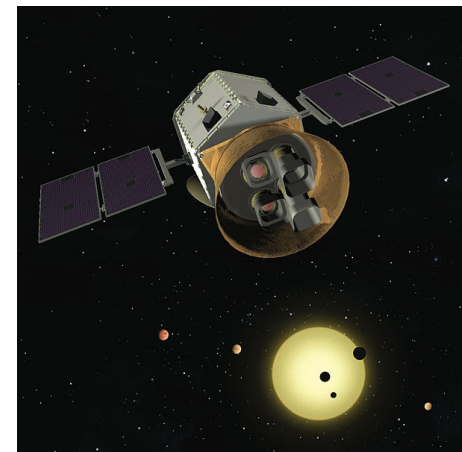
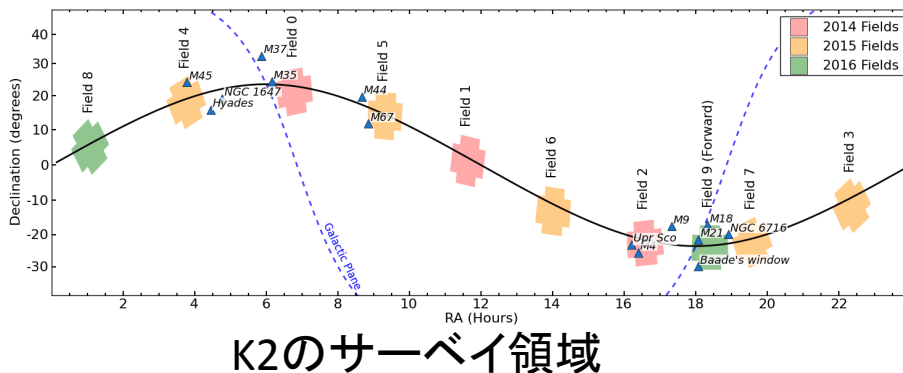
# 新多色撮像カメラ「MuSCAT」

- MuSCAT
  - 装置PI: 成田憲保氏(国立天文台)
  - 目標: 最大6色(可視3色、近赤外3色)かつ広視野( $\Phi=15.5'$ )
  - まずは可視3色(g,r,z)かつ中視野( $\Phi=8.4'$ )のカメラを製作開始(科研費基盤A、代表: 成田氏、平成25年~)
  - 188cm望遠鏡に搭載
  - 2014年末~2015年初頭にファーストライト予定



# MuSCATで狙うサイエンス

- 今後、近傍のM型星まわりの低質量トランジット惑星の数が飛躍的に増加(現在:3個⇒5年後:~1,000個)
  - K2 (2014~)
  - TESS (2017~)



全天サーベイ衛星TESS

- MuSCATを用いて多数の低質量惑星の大気を調査
  - 低質量惑星大気の大まかな特性を統計的に理解
    - 大気の主成分
    - 雲やヘイズの存在条件
  - 大口径望遠鏡では出来ないサイエンス

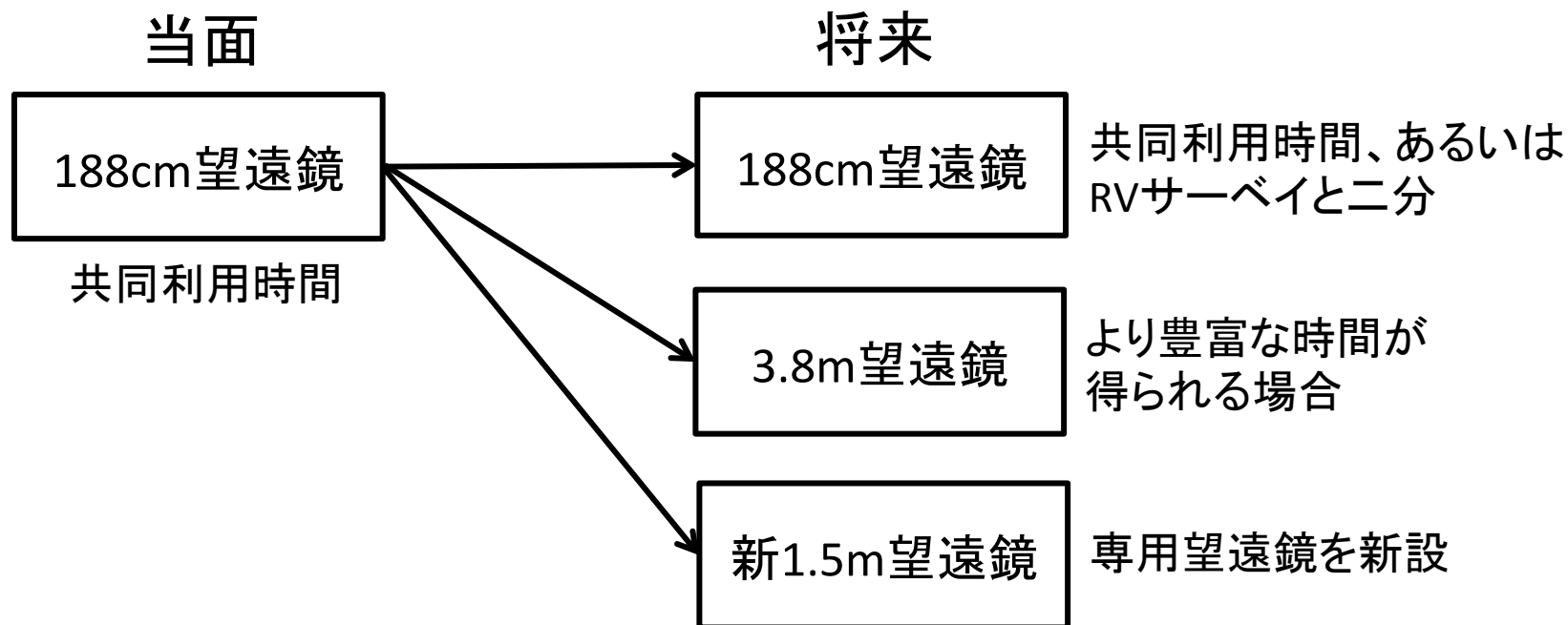
# MuSCATの将来計画

- 装置アップグレード

- 1k × 1k CCD (視野 $\Phi=8.4'$ )  $\Rightarrow$  2k × 2k CCD (視野 $\Phi=15.5'$ )
- 近赤外チャンネルの増設

- 搭載望遠鏡

- 出来るだけ豊富な観測時間が得られる解を模索中



# まとめ

---

- 多色トランジット観測による系外惑星の大気を調べる研究を進めている
  - スーパーアースGJ1214b: 近赤外JHKs, 可視Bバンドでフラットスペクトルになることを確認。
  - 灼熱海王星GJ3470b: 厚い雲の無い、晴れた大気をもつ可能性を発見
  - ウォームジュピターWASP-80b: 大気中にヘイズが存在する可能性を発見
- 新多色撮像カメラMuSCATを開発中
  - まずは可視3バンド、中視野( $\Phi=8.4'$ )で製作開始
  - 可視広視野化および赤外チャンネルのアップグレードを計画中
  - 多数の低質量惑星大気の観測に向け、出来るだけ観測時間が得られる望遠鏡への搭載を検討中。