

188cm/MuSCATによる ハビタブル惑星候補K2-3dの観測

岡山天体物理観測所
福井暁彦

共同研究者:

John Livingston (東大)、成田憲保(東大/ABC)、平野照幸(東工大)、
鬼塚昌宏(総研大)、笠嗣瑠(総研大)、日下部展彦(ABC)

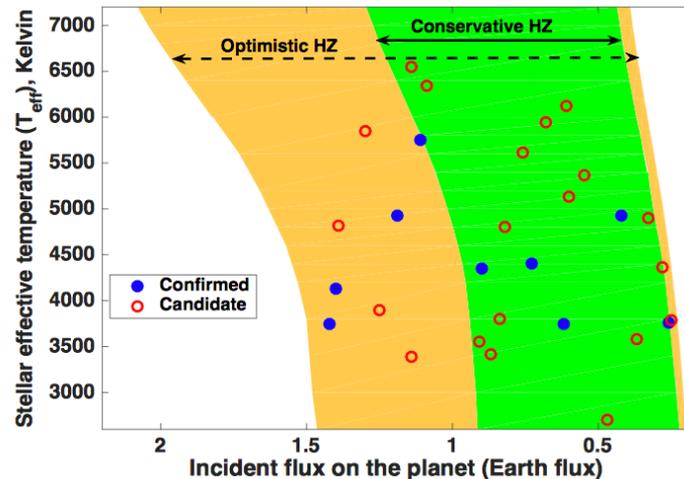
2016年9月7日

2016年度岡山(光赤外)ユーザーズミーティング

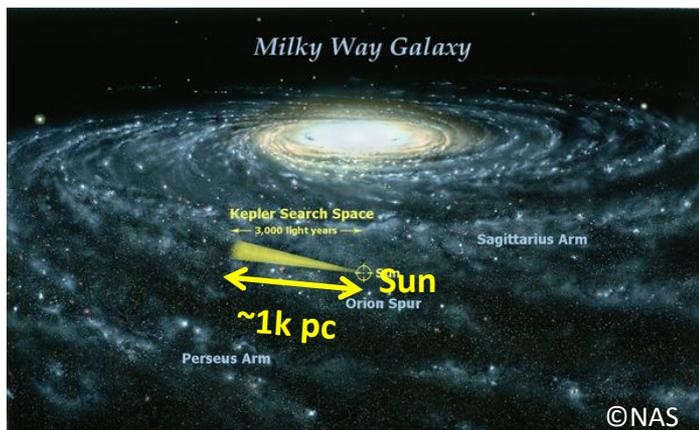


ハビタブル惑星候補

Keplerで発見された
ハビタブル惑星候補の分布



Kane et al. 2016

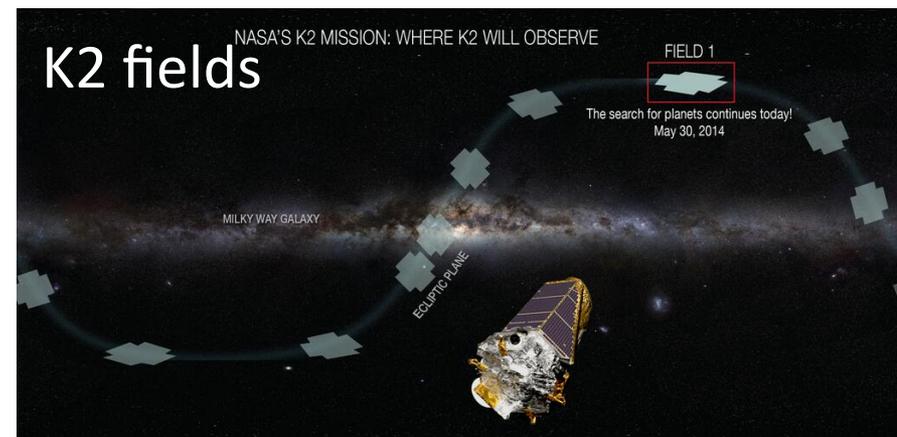
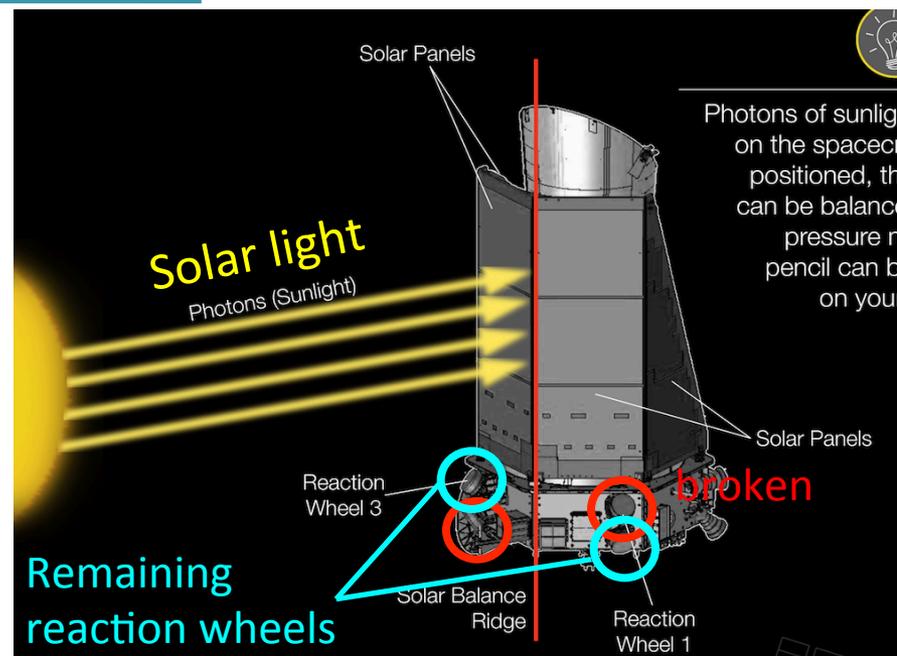


Kepler's observing field

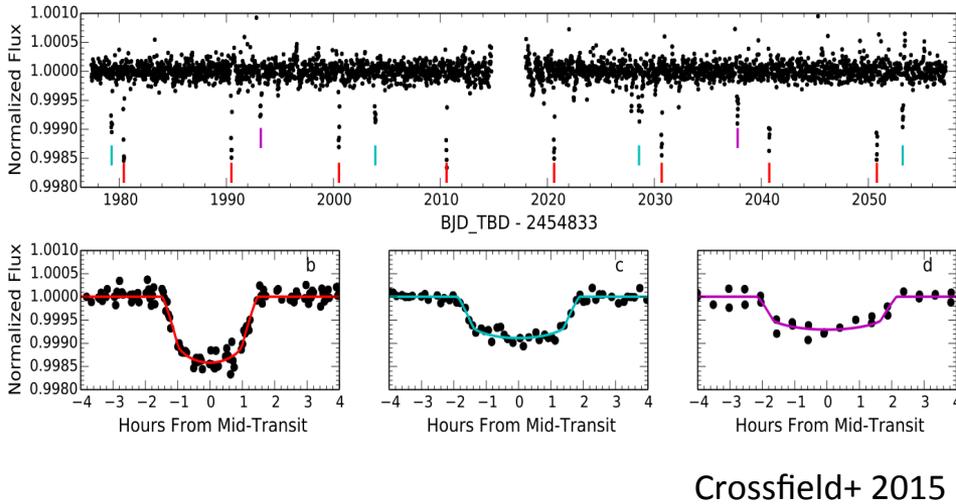
- Keplerの第一期探索(2009~2013)により、**20個以上**のハビタブル惑星候補が発見
- 次のステップは、ハビタブル惑星候補の大気観測
 - JWSTやTMTなどを用いた透過分光観測
 - バイオマーカー探索
- ただし、Keplerで発見された惑星系は遠く、暗過ぎる
 - 太陽系近傍のハビタブル惑星候補の発見が必要

K2ミッション

- Keplerの第一期探索は、衛星に備わる4つの姿勢制御ホイールのうち2つが故障し、2013年に終了
- 残った2つのホイールに加え、太陽光の圧力を利用して、黄道面に沿った領域を80日づつ観測する**K2ミッション**が2014年に開始
- K2は**太陽系近傍の惑星系**の発見に有利
- これまでに200個を超える惑星を発見



K2-3d

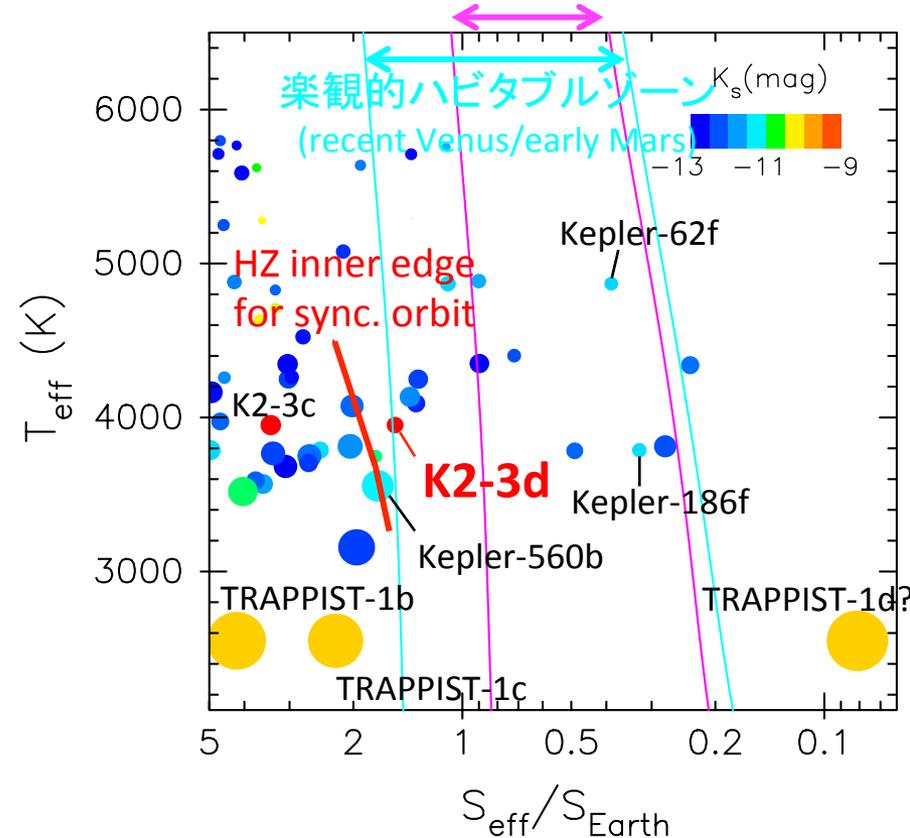


- K2 (Field1)で発見された、近傍M型星まわりのハビタブル惑星候補

- ✧ ハビタブルゾーン内 (P=45d)
- ✧ 岩石惑星サイズ ($1.5R_{\text{earth}}$)
- ✧ 近赤外で明るい ($K_s=8.6$)

2 R_{Earth} 以下のトランジット惑星の分布

保守的ハビタブルゾーン
(moist greenhouse/maximum greenhouse)

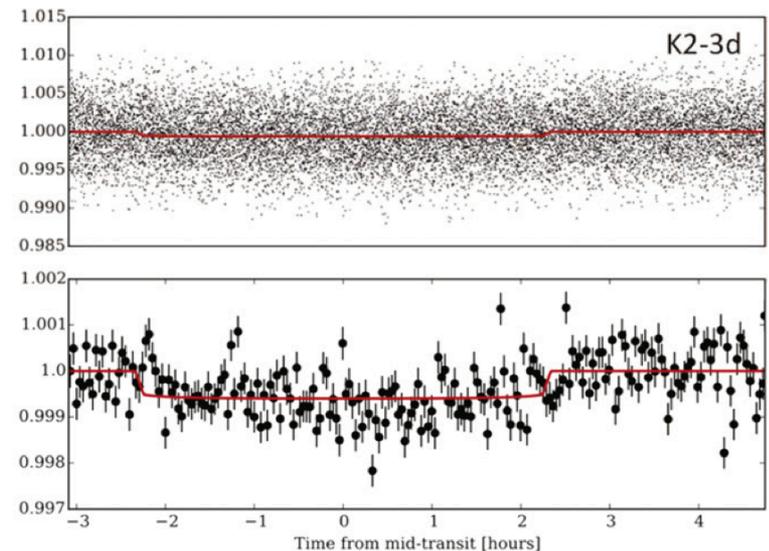


⇒ 将来のバイオマーカー探索の最も有望なターゲットの1つ

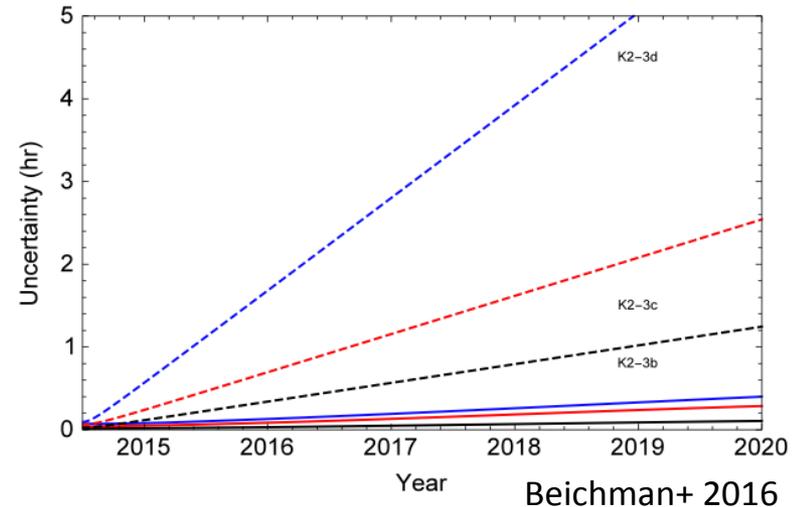
Spitzerによるフォローアップ観測

- K2で観測されたトランジットは**2回**のみ
 - 周期の誤差は**約9分**
 - ⇒ 2019年時点で**5時間以上**の予報誤差
 - 将来の詳細観測 (by e.g. JWST) に向け、トランジットフォローアップによる周期の精度改善が必要不可欠
- Spitzerで**2回**のトランジットを観測 (Beichman+ 2016)
 - 将来の予報誤差を1時間以下に減らしたと主張
 - しかし、**系統誤差による不定性大**
 - ⇒ **追観測による検証が必要**

Spitzerで得られたライトカーブ

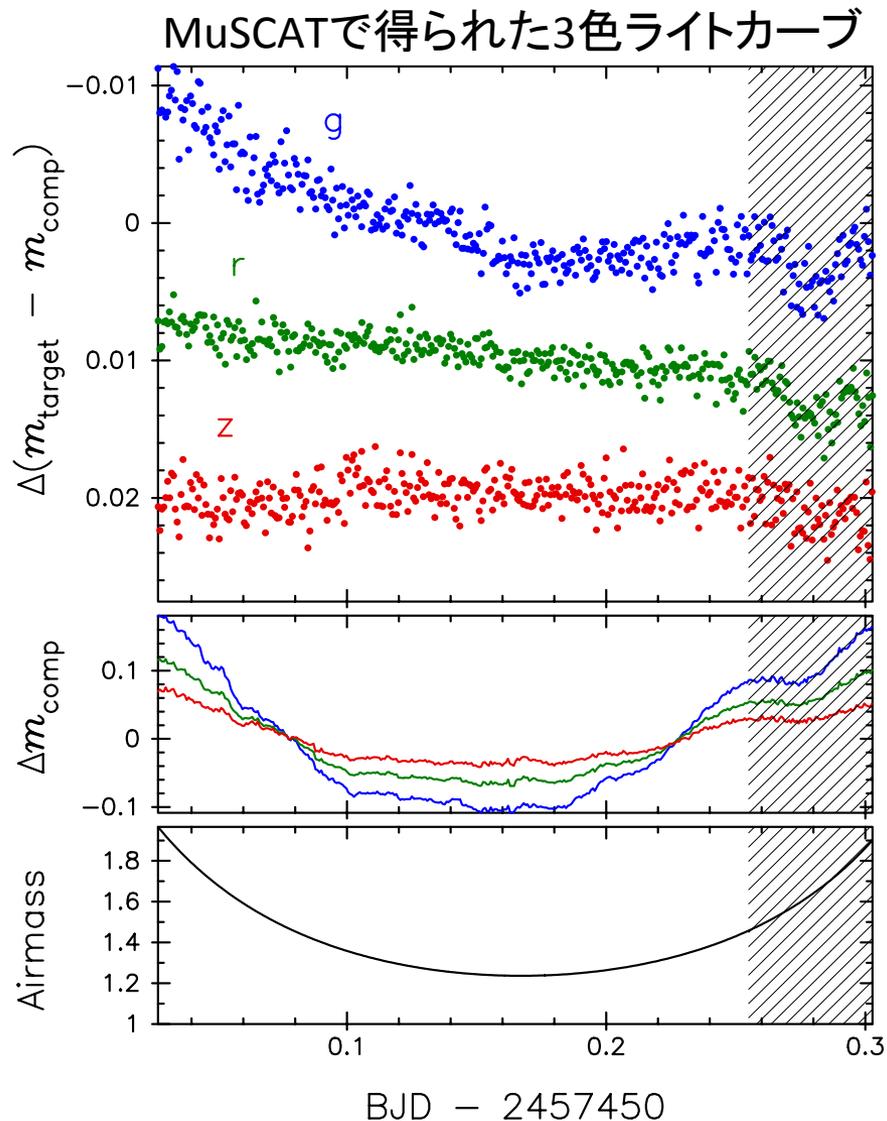


Spitzerの観測による予報誤差の改善

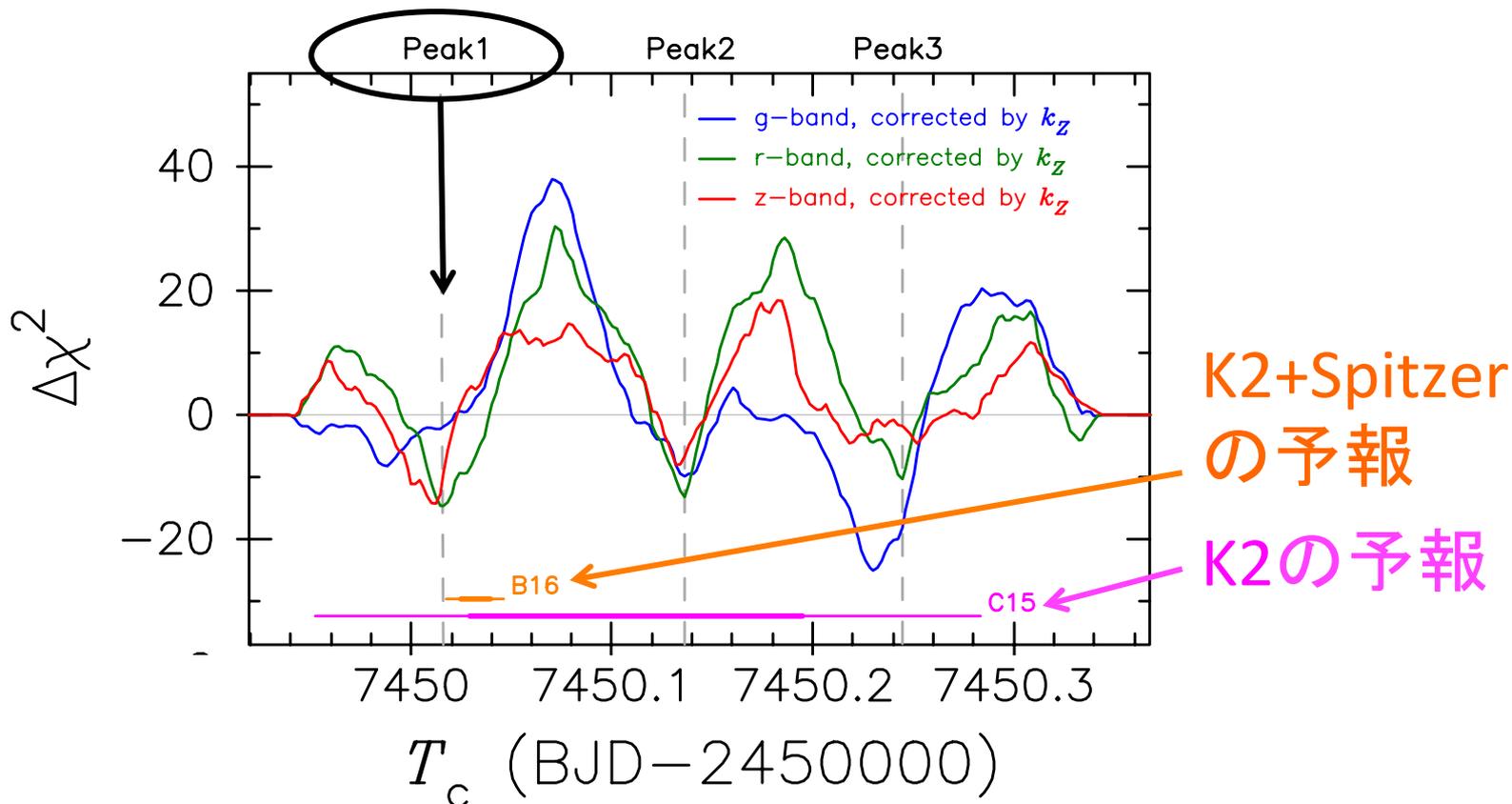


MuSCATによる地上トランジット観測

- 188cm望遠鏡+MuSCATを使って、K2-3dのトランジット観測を実施
 - 共同利用観測 (2016.3.2, PI: 成田氏)
 - 運良く観測に成功
 - 1晩中快晴 (<15%)
 - K2-3dの観測機会は年に1回程度
 - **トランジットの減光率 (0.7mmag) が測光精度と同程度**
 - 1分露光あたりの測光精度:
 - gバンド: 1.2mmag
 - rバンド: 0.9mmag
 - zバンド: 1.2mmag
 - 明白なトランジットは見えず



トランジットシグナルサーチ

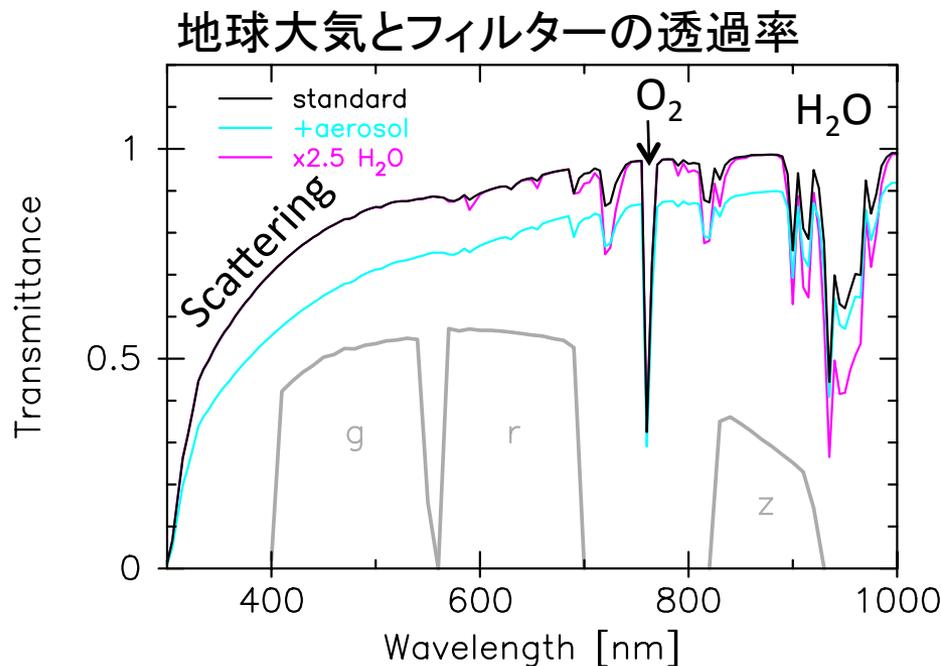


- K2から得られたトランジットの形状を使って、トランジットの中心(T_c)がどこに来るかを探索
- r,zバンドで“Peak1”が最適解だが、他に局所解も存在
- gバンドでは異なる場所に最適解

2nd-order Extinctionによる系統誤差

2nd-order extinction

- 地球大気の透過率は刻一刻と変化
⇒ 参照星を使って補正(相対測光)
- 大気の透過率関数は時間変化
- ターゲットと参照星のスペクトルタイプが異なると、相対減光量が時間とともに変化
⇒ **second order extinction**
- 通常はエアマスの関数で補正
- しかし、大気の透過率関数はエアロゾルやH₂Oの時間変化によっても変化
⇒ **補正しきれない系統誤差**



多色データによる系統誤差補正

多色データを使った新しい補正方法を導入

$$m_{t,\lambda}(t) = \mathcal{M}_{tr}(t) + k_0 + k_t t \leftarrow \text{1次の傾きの補正}$$

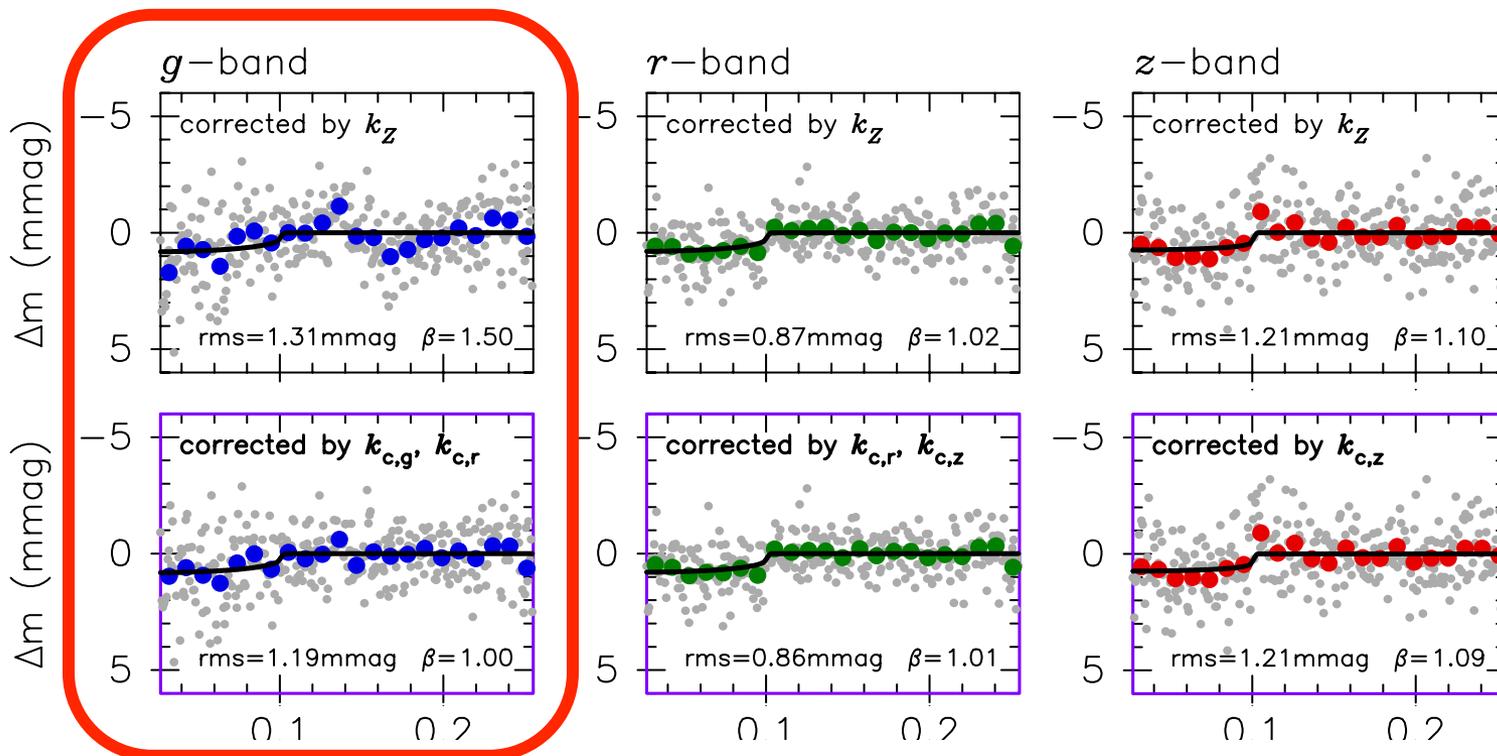
↑
ターゲットの
あるバンドの等級

↑
トランジット
モデル

$$+ \sum_{\lambda'=\{g,r,z\}} k_{c,\lambda'} m_{c,\lambda'}(t)$$

参照星の各バンドの
等級の重み付き平均

従来の補正



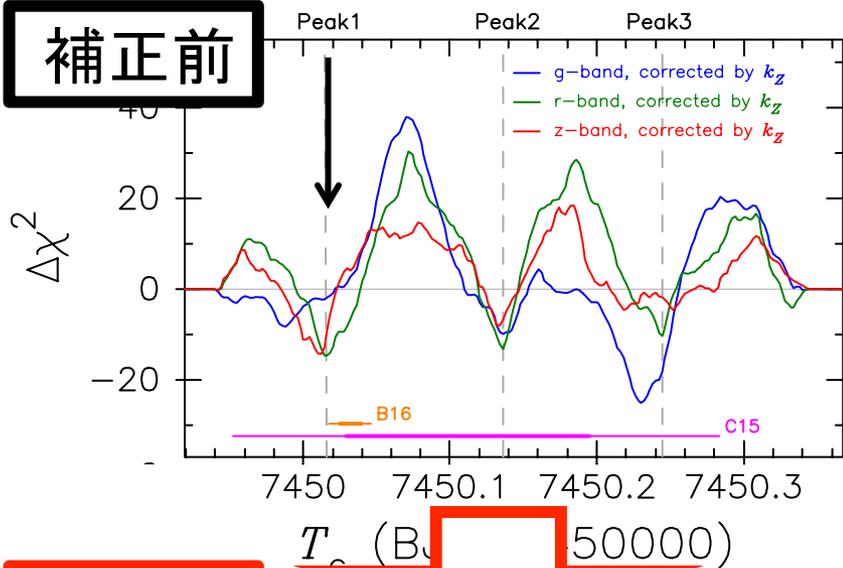
新しい補正

gバンドで系統誤差が大幅に改善 (rms=1.31mmag ⇒ **1.19mmag**)

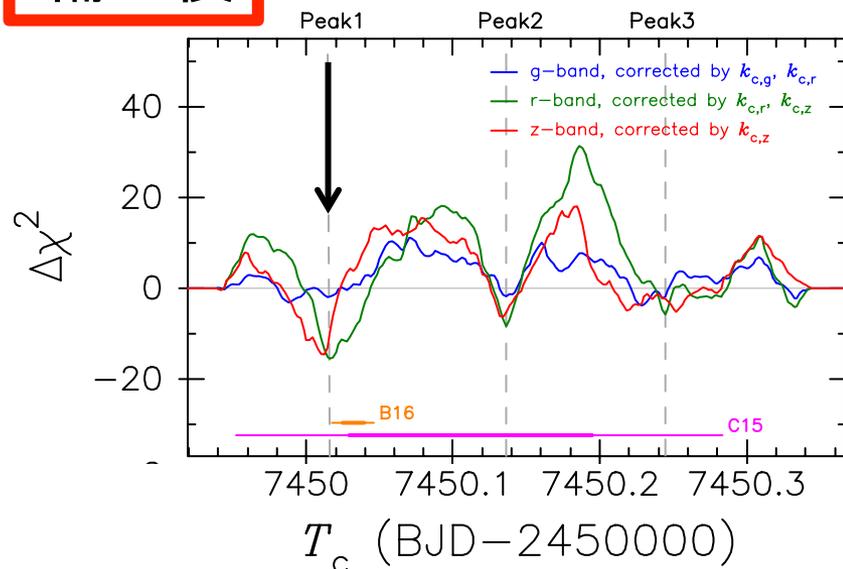
系統誤差補正の結果

MCMC解析
の結果

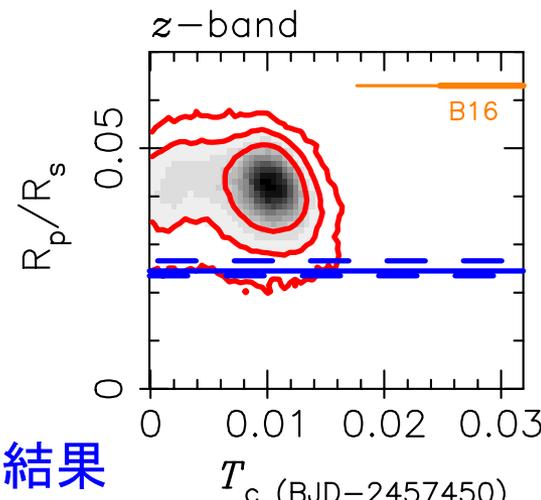
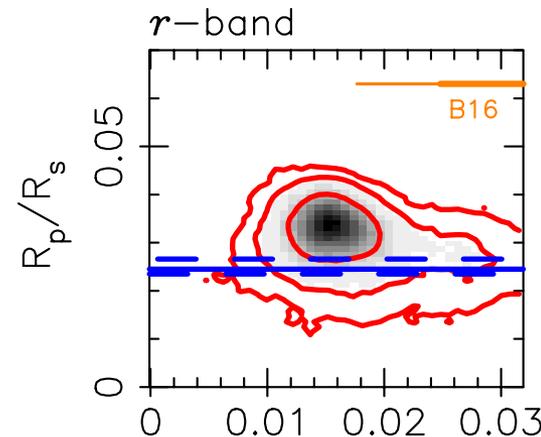
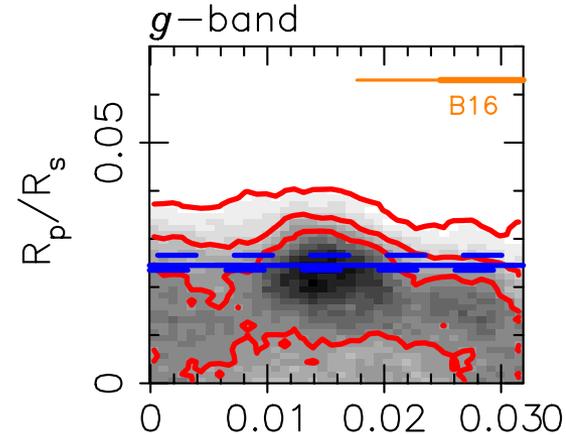
補正前



補正後



主星-惑星半径比
(減光率の1/2乗)



2.5 σ で検出

青線: K2の結果

T_c (BJD-2457450)

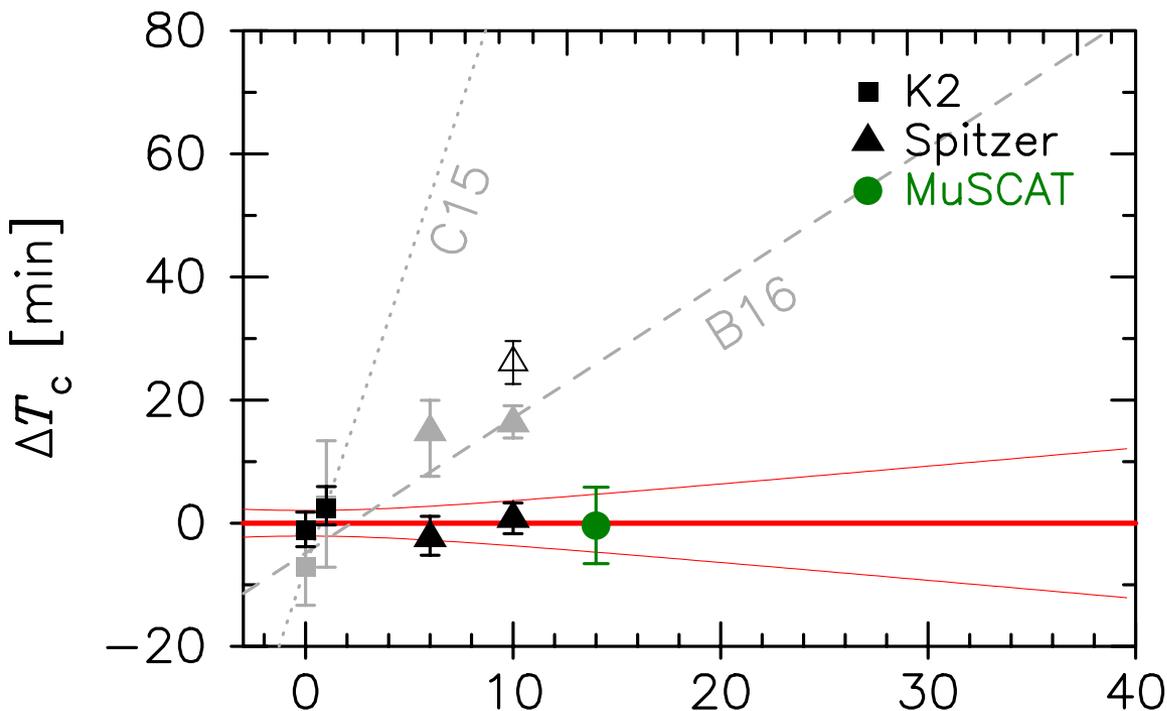
トランジット時刻予報の改善

- K2とSpitzerのデータを再解析
- MuSCATの結果を含め、過去5回のトランジットの中心時刻データを使ってK2-3dの周期を改善

T_cの残差プロット

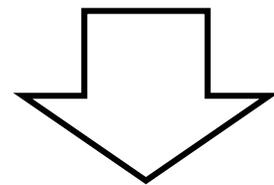
Year

2015 2016 2017 2018 2019



K2+Spitzerによる予報
を大幅に修正

(2019年時点で**約80分**)



将来のバイオマーカー
探索に向け重要な貢献

まとめ

- 188cm望遠鏡/MuSCATを使って、地上で初めてハビタブル惑星候補K2-3dのトランジットを観測
- 多色データを利用して地球大気の影響による系統誤差を低減する新手法を導入。gバンドで大幅な改善。
- 過去のデータと合わせて公転周期を改善。将来のトランジット時刻予報を大幅に修正 (~80分 in 2019)。
- **2mクラスの地上望遠鏡でもサブミリ等級の減光を検出可能 (0.7mmagの減光は地上で捉えられた中で2番目に小さい)**
- **多色カメラは系統誤差の低減にも有用**