

3色同時撮像カメラMuSCATによる 運用2年目の成果

成田憲保(東大/ABC/NAOJ)、福井暁彦(NAOJ/OAO)

共同研究者

装置：日下部展彦、笠嗣瑠、柳澤顕史、泉浦秀行、山室智康、田村元秀

観測：平野照幸、川内紀代恵、John Livingston, Jerome de Leon, 渡辺紀治

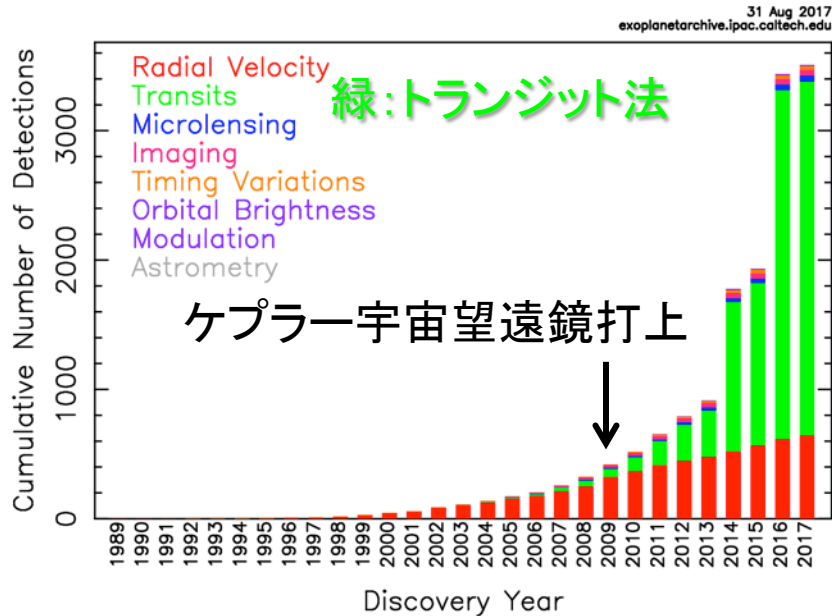
理論：川島由依、堀安範、生駒大洋

2017年9月4日

2017年度岡山(光赤外)ユーザーズミーティング

トランジット系外惑星研究の現状

Cumulative Detections Per Year



ケプラーとTESSの探索領域



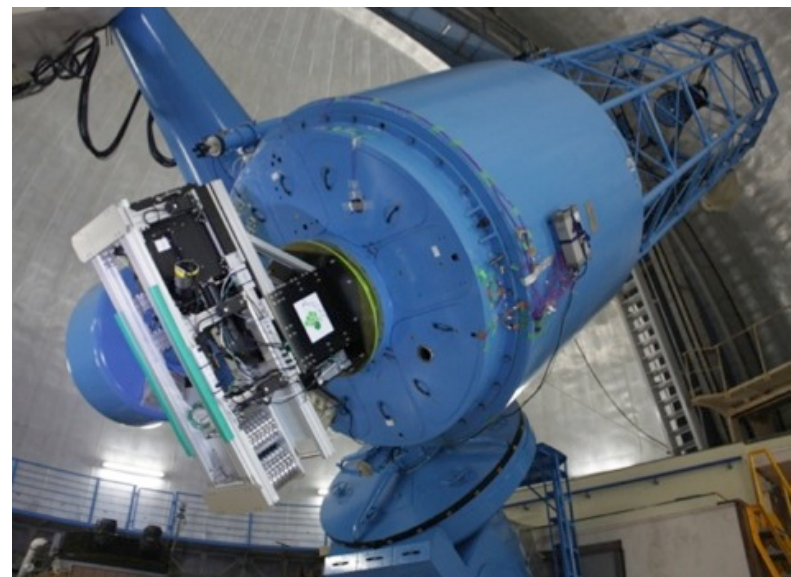
- ケプラー宇宙望遠鏡の欠点: 惑星系が遠く、詳細観測が困難
- 太陽系近傍のトランジット惑星探索に注目
(e.g., K2: 2014~、TESS: 2018~)

⇒ 様々なフォローアップ観測が重要

特に、多色測光はその重要性の割に観測装置が希薄

MuSCAT: トランジット観測を目的とした3色撮像カメラ

- **M**ulticolor **S**imultaneous **C**amera for studying **A**tmospheres of **T**ransiting exoplanets
- g'_2 (400-550nm)、 r'_2 (550-700nm)、 $z_{s,2}$ (800-920nm) の3バンドで同時撮像
- 1k CCD x 3台、視野6.1分角
- 主目的: 太陽系近傍のトランジット系外惑星の**発見確認**および**特徴付け**
- 科研費(基盤A、代表: 成田憲保)をベースに、2013年度より設計・製作を開始
- 2014年12月にファーストライト
- 2015B期よりPI持込装置としてopen useで運用開始、2016A期より一般公開



共同利用の割当夜数

- 2015B: **24**夜
 - 成田: 7, 鬼塚: 7, 福井: 3, 平野: 3, 観測所時間: 4
- 2016A: **22.5**夜
 - 成田: 9, 平野: 6.5, 福井: 3.5, 観測所時間: 3.5
- 2016B: **20.5**夜
 - 成田I: 7, 成田II: 6, 福井: 2, 観測所時間: 5.5
- 2017A: **32**夜
 - 成田: 16, 渡辺: 7, 川内: 3, 観測所時間: 6
- 2017B: **16.5 (+11)**夜
 - 成田: 13, 渡辺: 2, 川内: 1.5 (+3), 観測所時間: 6 (+8)

論文出版状況

- 惑星候補の発見確認

- K2-28b: Hirano et al. 2016a
- K2-105b: Narita et al. 2017
- KELT-9b: Gaudi et al. 2017
- EPIC220621087.1: Hirano et al. in prep.

- 惑星大気の観測

- HAT-P-14b: Fukui et al. 2016a
- CVSO30b: Onitsuka et al. 2017
- K2-95b: Livingston et al. in prep.
- HAT-P-44b: de Leon et al. in prep. => ポスター P12参照

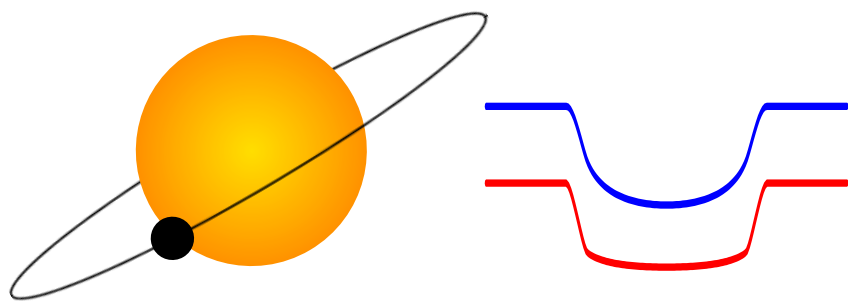
- トランジット時刻の測定

- K2-19b: Narita et al. 2015c
- K2-3d: Fukui et al. 2016b

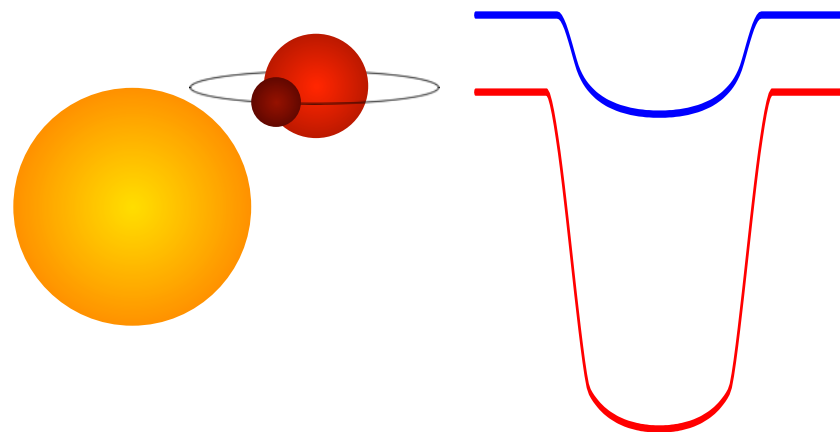
惑星候補の発見確認

- 広域トランジットサーベイで発見される惑星候補は一定割合で偽検出が含まれる ⇒ フォローアップ観測が必須
- 偽検出の大半は食連星のコンタミ
- 食連星のコンタミの場合、トランジットの減光率に大きな波長依存性が見られる ⇒ 多色観測から容易に判別可能

Star + Planet

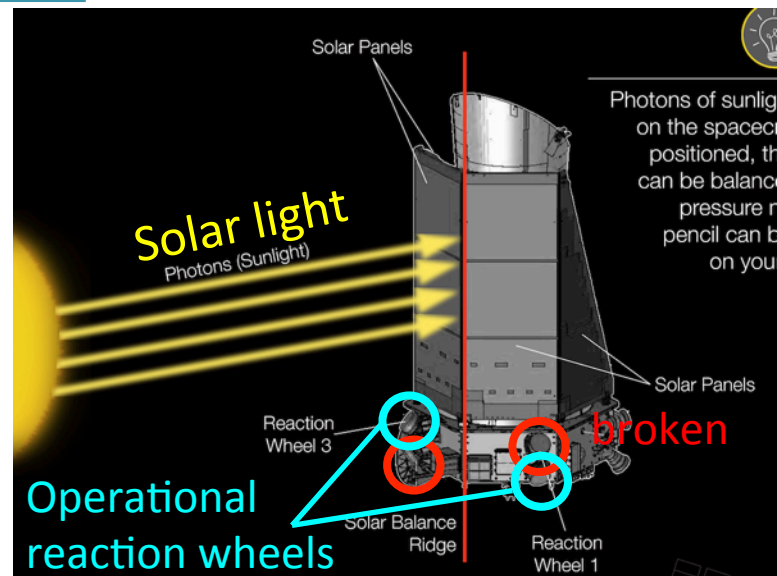


Star + Eclipsing Binary



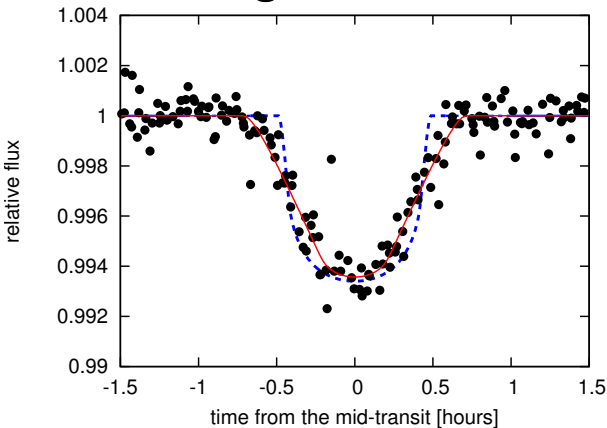
K2 and KESPRINT

- ケプラー宇宙望遠鏡の第一期探索は、姿勢制御装置の一部故障により2013年に停止
- 残った姿勢制御装置を使って黄道面に沿った複数の領域を探索する「**K2ミッション**」として復活(2014～)。
 - 太陽系近傍の惑星の発見に有利
- K2は画像データのみ公開。惑星探索はコミュニティ任せ
 - 惑星候補の探索
 - フォローアップ観測
- **KESPRINT**コラボレーション
 - Spain, Japan, Germany, US, etc. (co-PI: 平野照幸)
 - HARPS, Subaru, IRSF, **OAOMuSCAT**などの複数のリソース

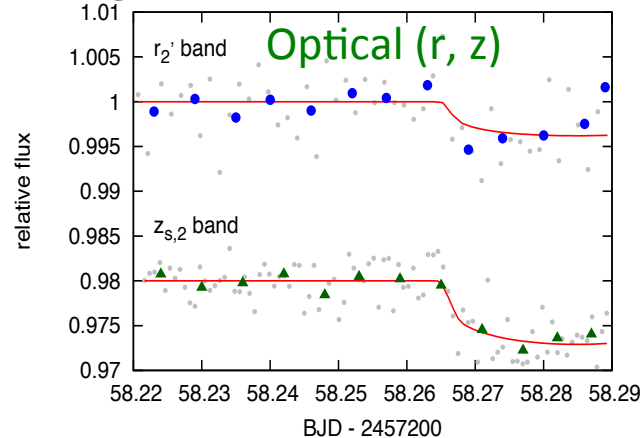


K2-28b: 近傍M型星まわりのスーパーアース

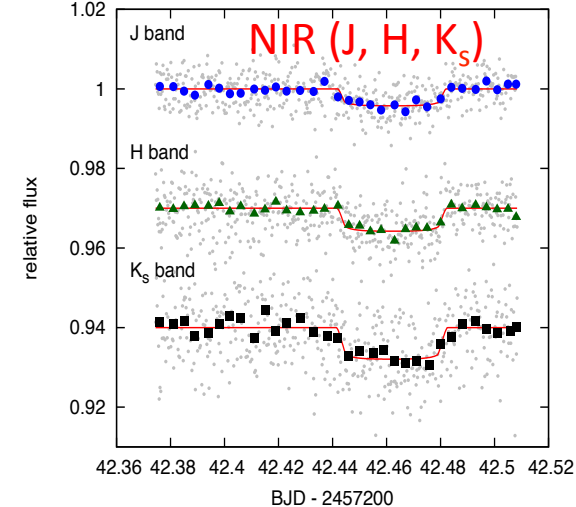
Folded light curve from K2



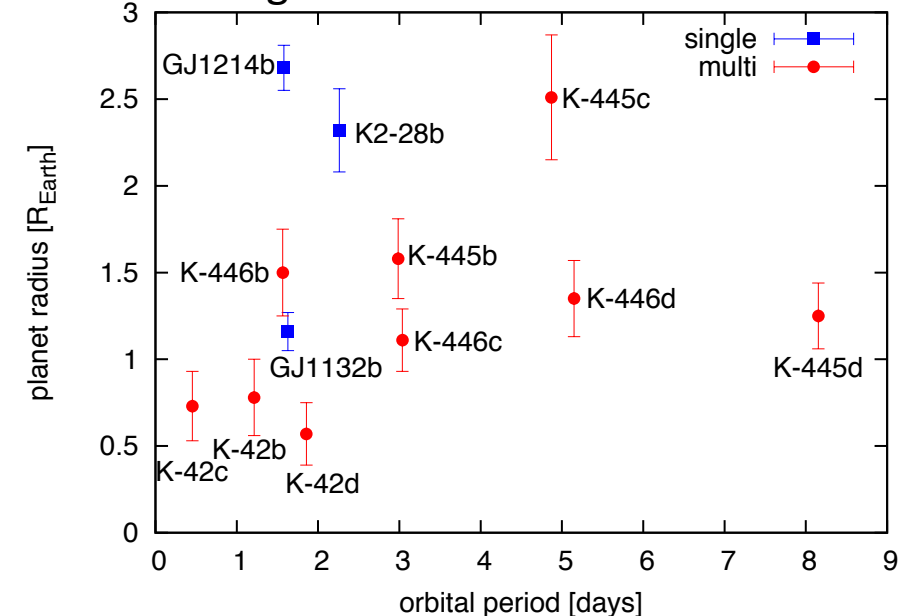
Light curves from MuSCAT



Light curves from IRSF

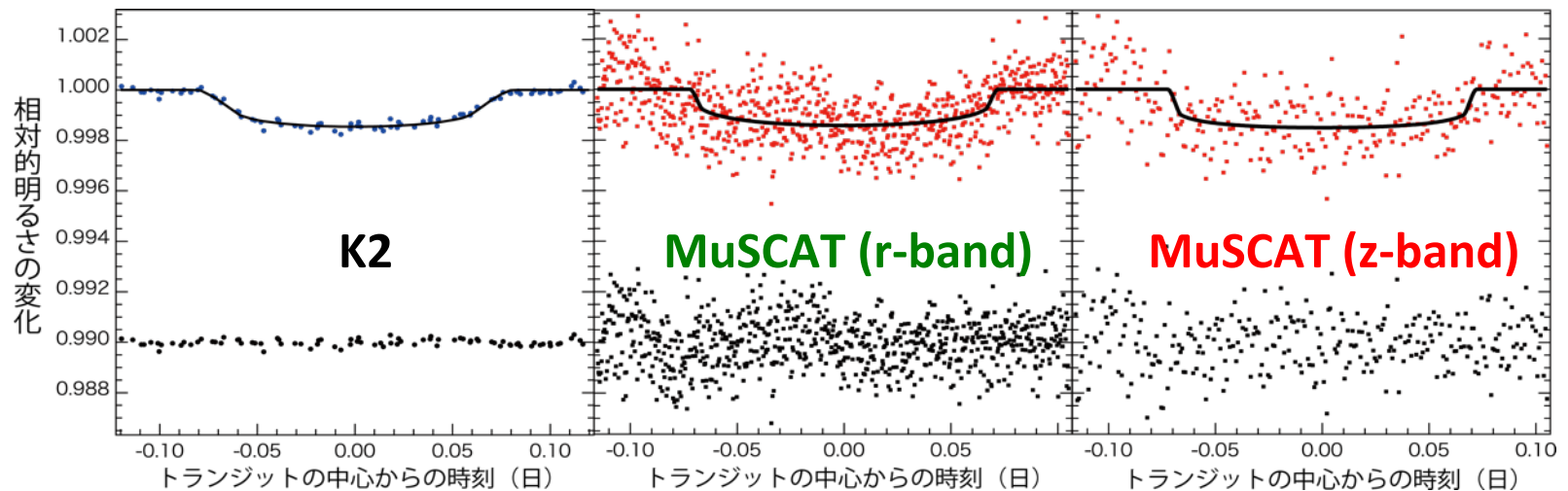


Transiting Planets around mid-M dwarfs

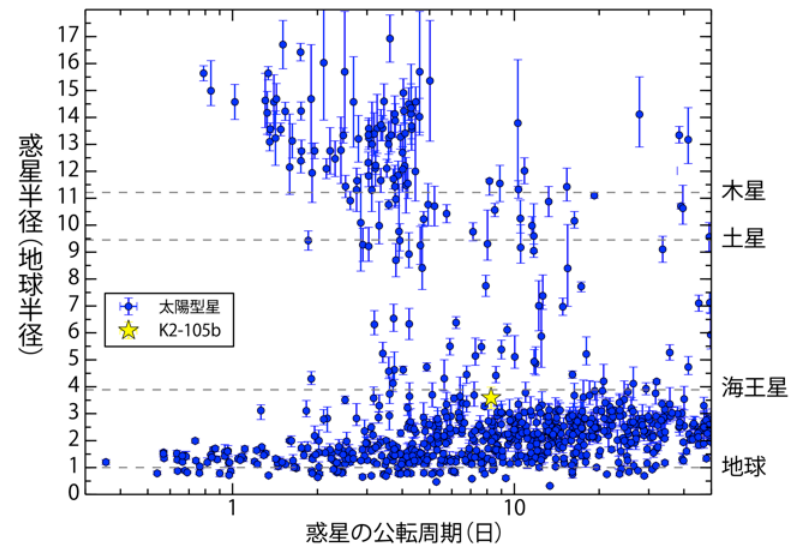


- MuSCATとIRSFでトランジットを観測。減光率が波長依存しないことを確認。
- Subaru/AOなどの観測とも組み合わせ、本物の惑星であることを確認。
- 今後の大気調査の良いターゲット

K2-105b: 明るいG型星まわりのネプチューン

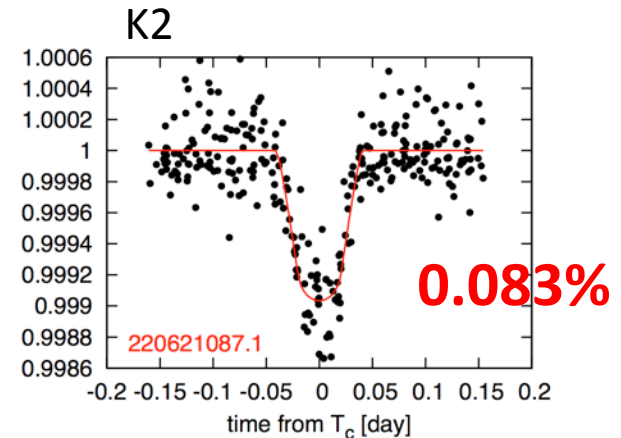


- MuSCATのr, zバンドでトランジットを検出。減光率が波長依存しないことを確認。
- すばるの観測と合わせ、本物の惑星であることを確認。
- 今後の詳細観測対象として良いサンプル

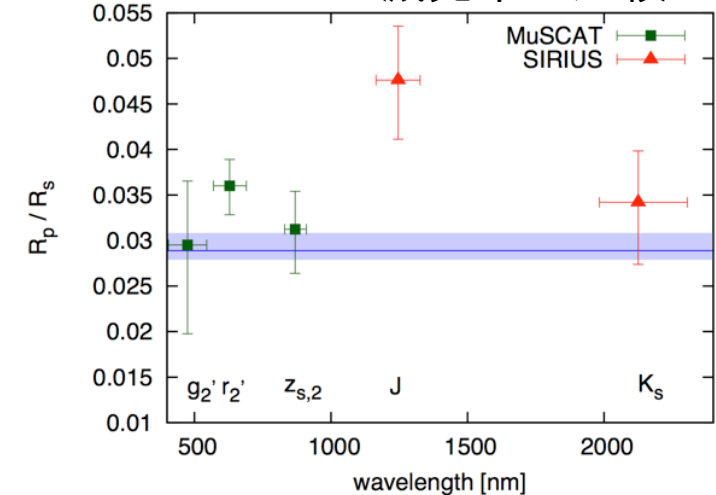


K2-??: 地球サイズの惑星

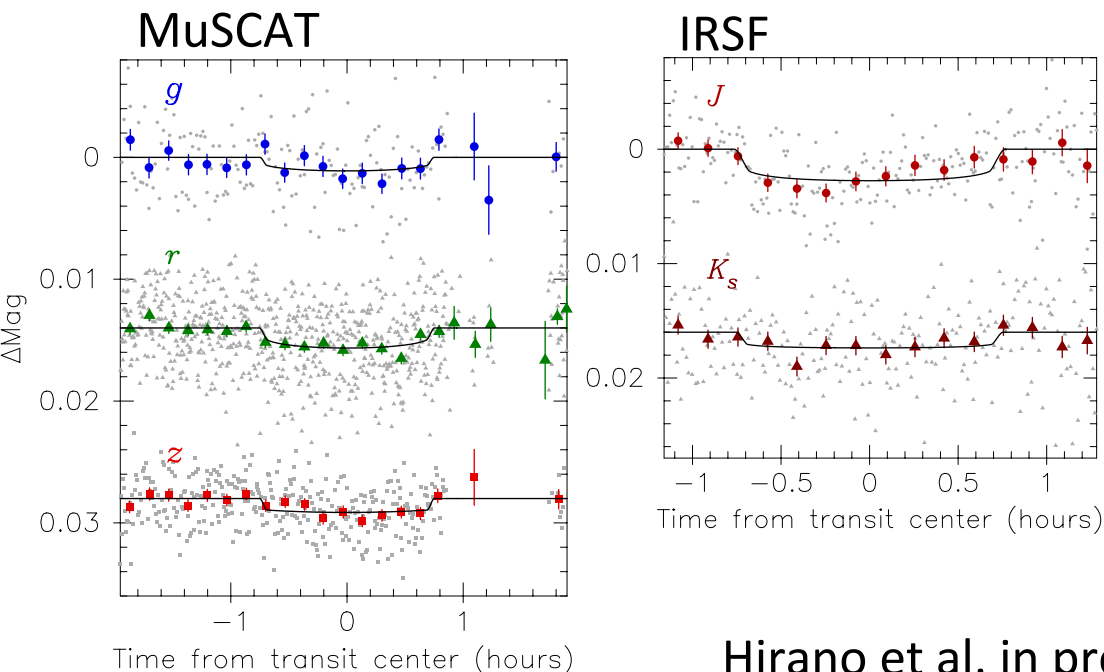
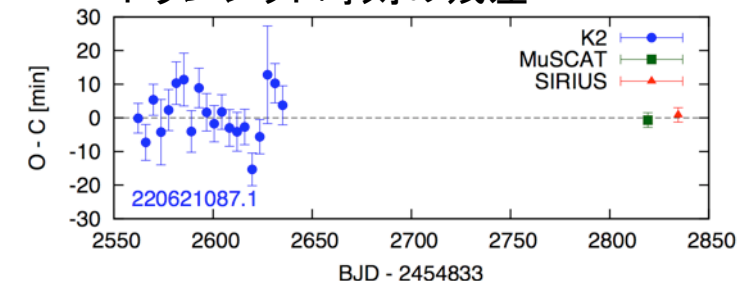
- 明るい($K=10.1$)M型星まわりの地球サイズ($1.2 R_{\text{earth}}$)の惑星
- $\sim 0.08\%$ の微小なトランジットをMuSCATとIRSFで検出
- 減光率が概ねどのバンドでも一致



バンドごとの減光率の比較



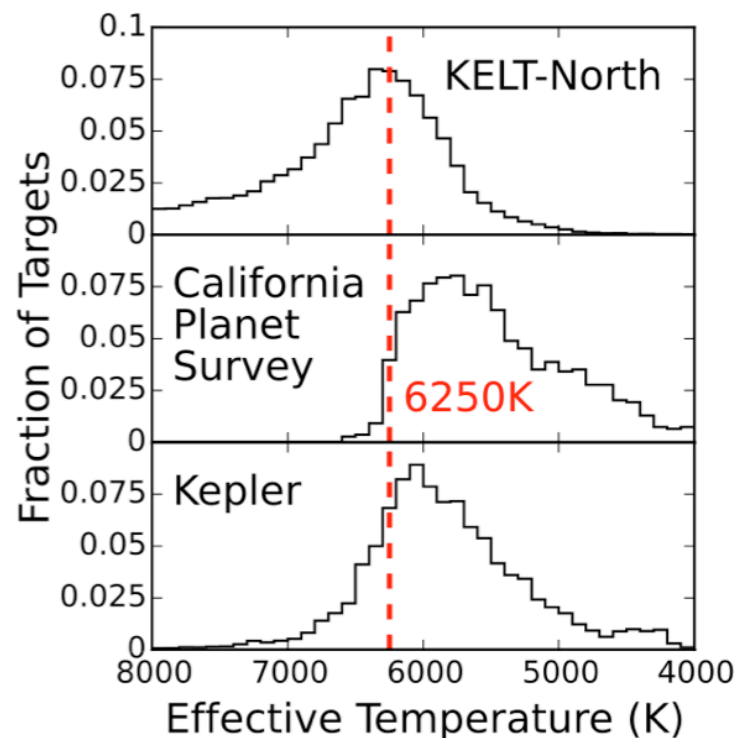
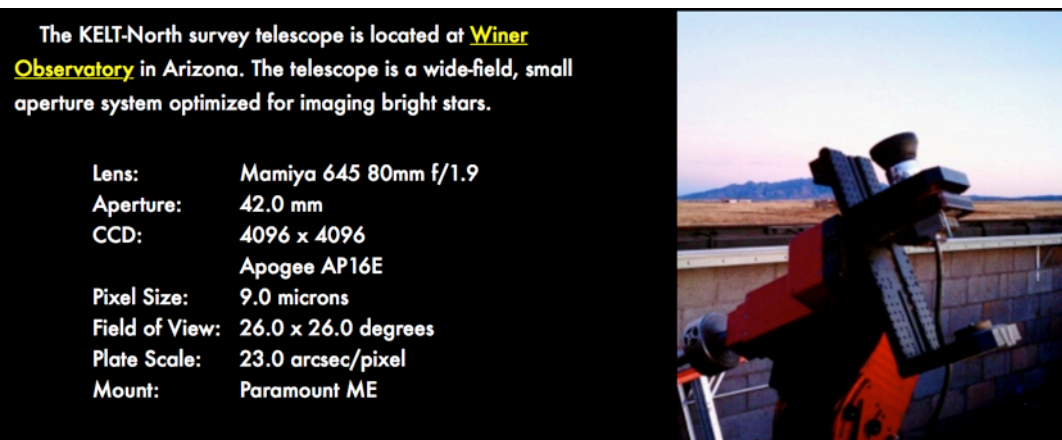
トランジット時刻の残差



Hirano et al. in prep.

KELTサーベイのフォローアップ観測

- KELT: The Kilodegree Extremely Little Telescope
- 口径4.2cmのレンズを使って、非常に明るい($V < 10$ mag)恒星を対象にトランジット惑星を探索
- アマチュアを含む全世界59か所の観測所で中小口径望遠鏡を使ってフォローアップ観測を展開

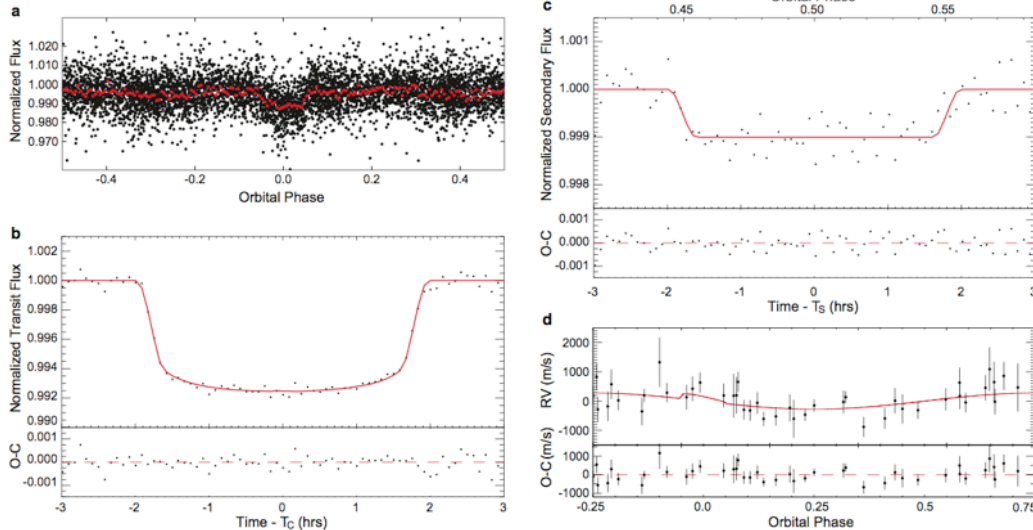


KELT-9b

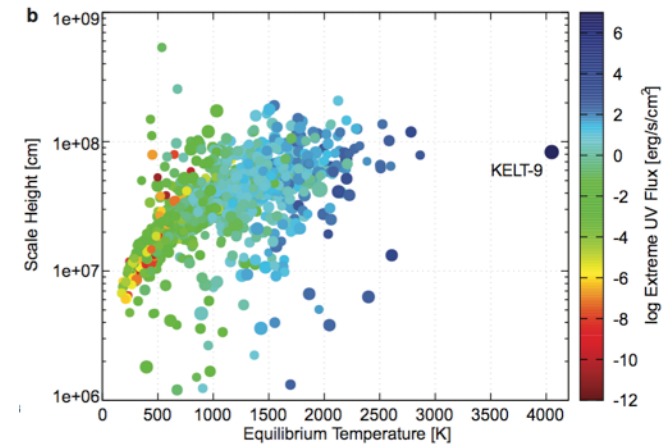
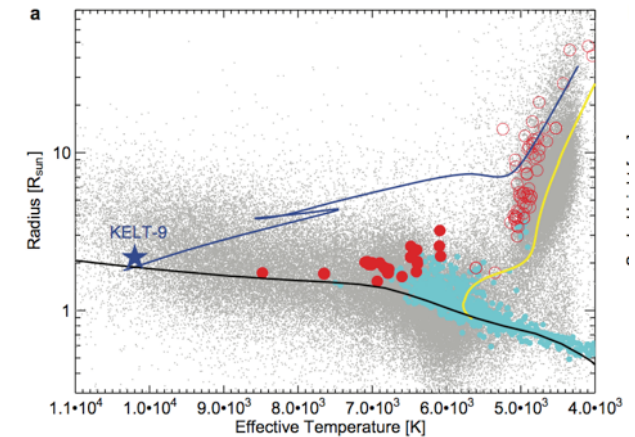
- Star: $2.5 M_{\text{sun}}$, $2.4 R_{\text{sun}}$, $T_{\text{eff}}=10,170\text{K}$
- Planet: $2.9 M_{\text{Jup}}$, $1.9 R_{\text{Jup}}$, $P=1.48\text{d}$
- $T_{\text{eq}} = 4,050\text{K}$, $T_{\text{dayside}} \sim 4,600\text{K}$

⇒ 史上最も熱い惑星

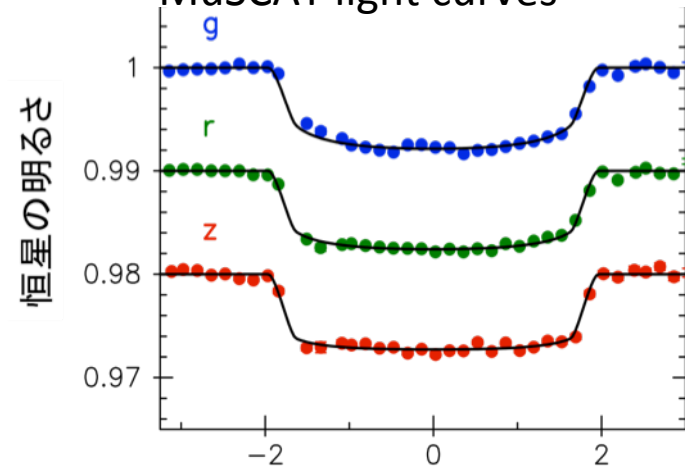
- K型星と同等の表面温度。いずれの分子も存在しない環境。
- 主星から強力な紫外線。6億年以内に大気が全て剥ぎ取られる可能性。



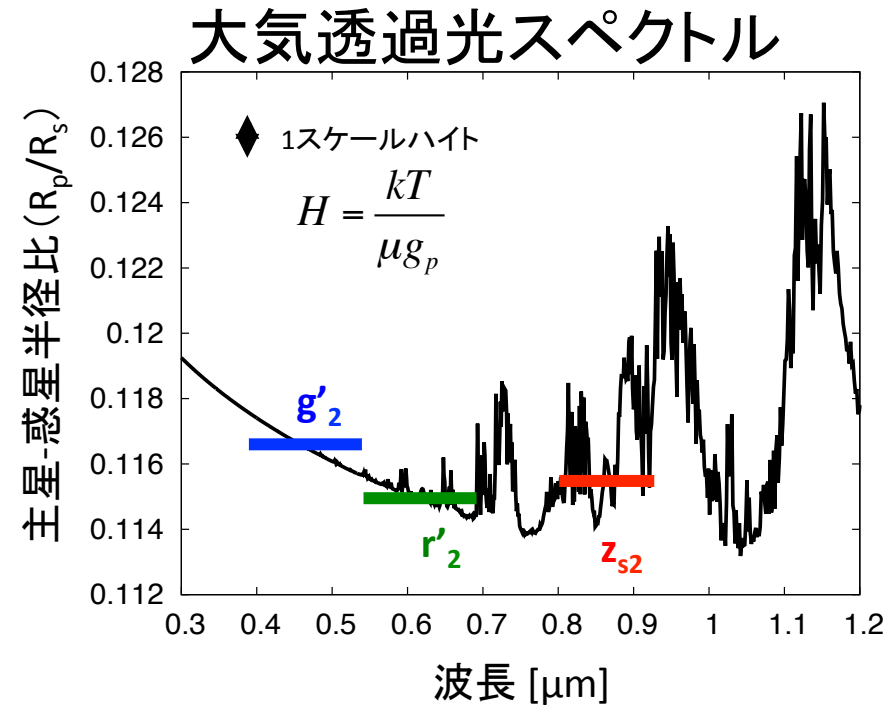
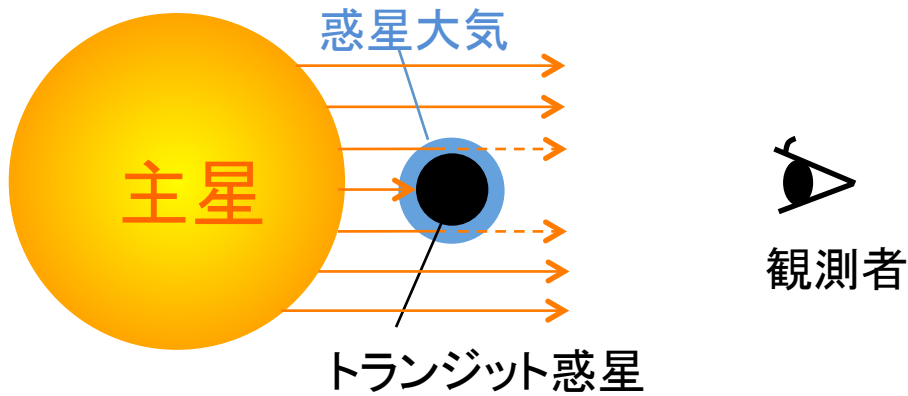
Gaudi et al. 2017, Nature



MuSCAT light curves



惑星大気の観測

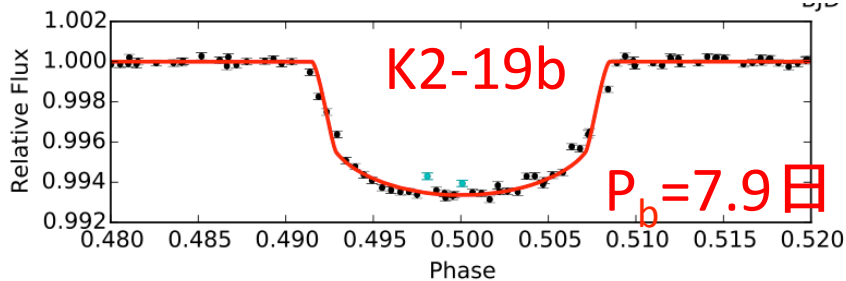


- 着々と観測データを蓄積中... (e.g., GJ3470b, GJ436b, WASP-80b, HAT-P-20b, HAT-P-48b)
- HAT-P-44b $\Rightarrow$ de Leonさんのポスター参照 (P12)

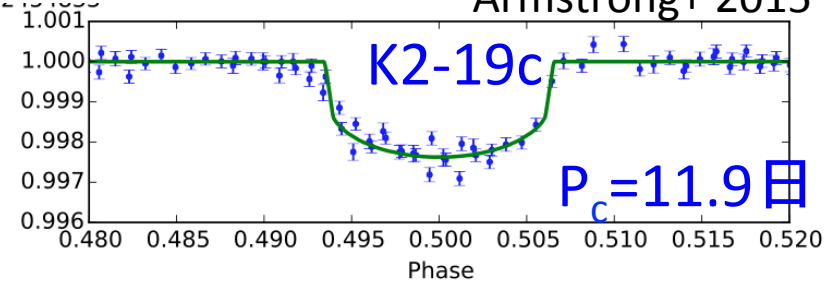
トランジット時刻の測定

複数惑星系では、惑星同士の重力作用によりトランジットの周期が変動(Transit Timing Variations, TTVs)。TTVの観測から相手側の惑星の質量を測定可能。

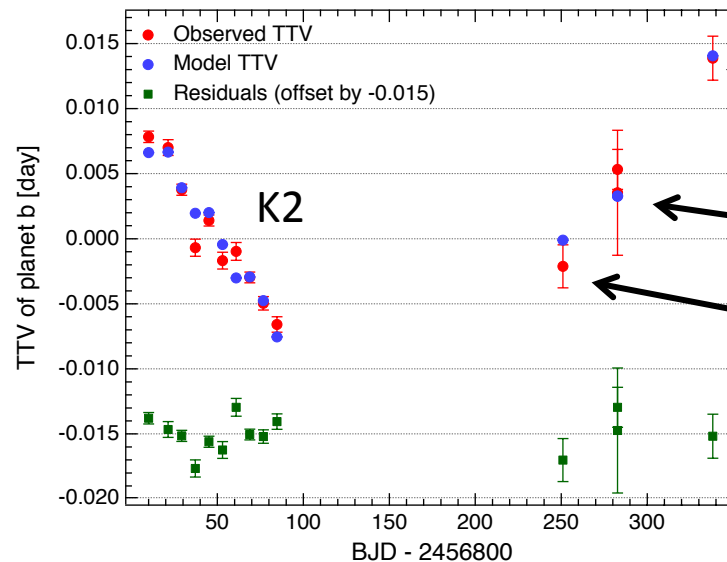
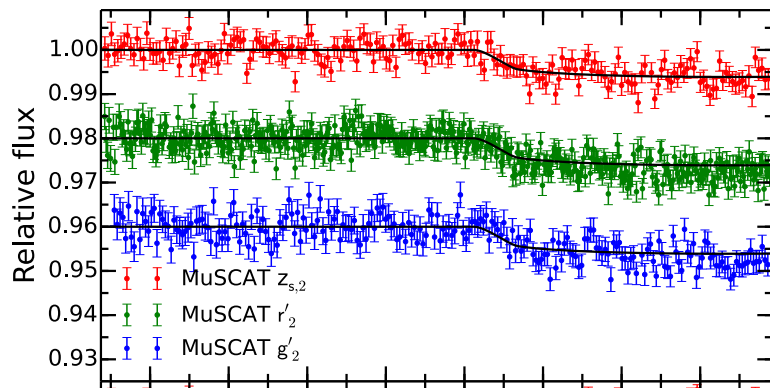
K2で得られた複数惑星K2-19b,cのライトカーブ



Armstrong+ 2015



MuSCATで得られた
K2-19bのライトカーブ

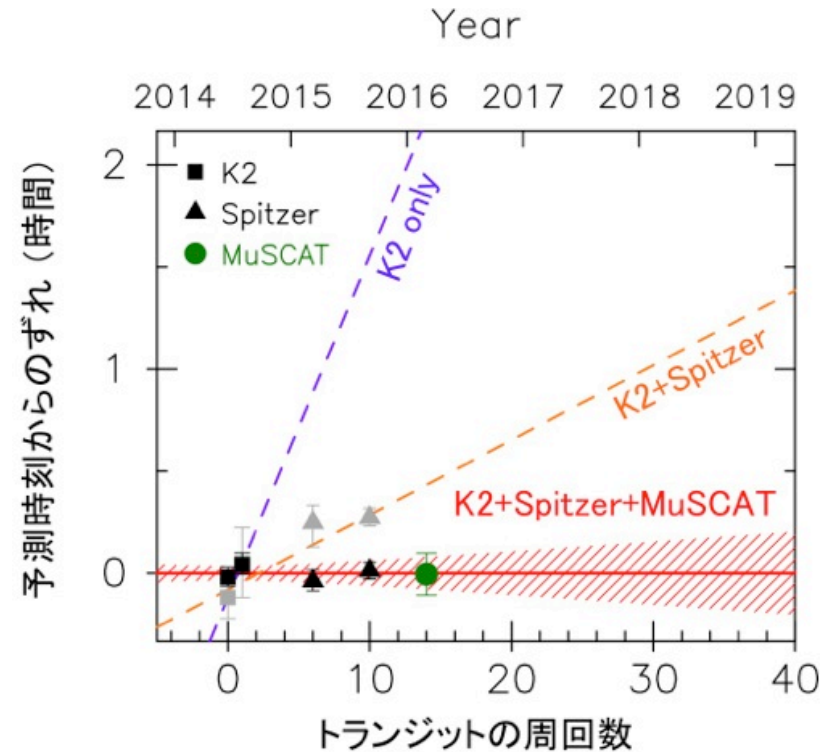
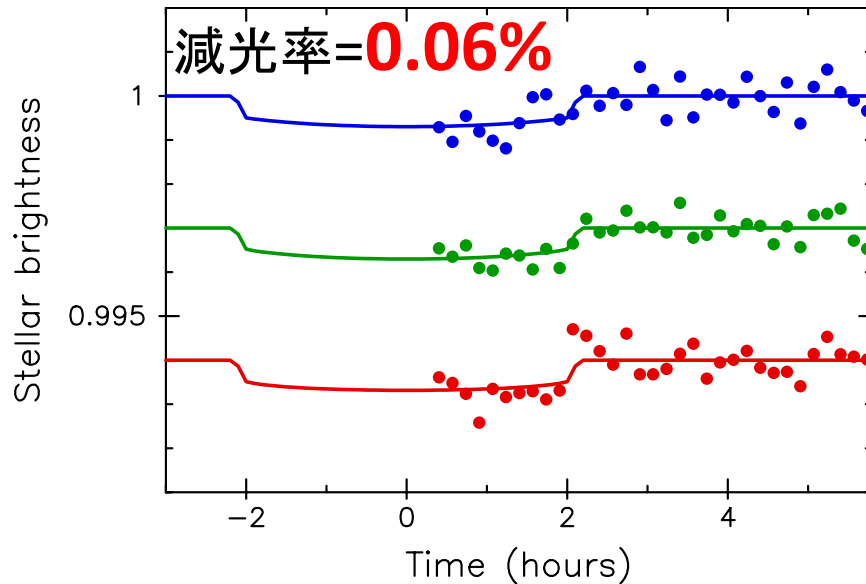


Narita et al. 2015c

⇒ 外側惑星(K2-19c)の質量: $M_c = 23.9 \pm 0.9 M_{\text{Earth}}$

トランジット時刻の測定

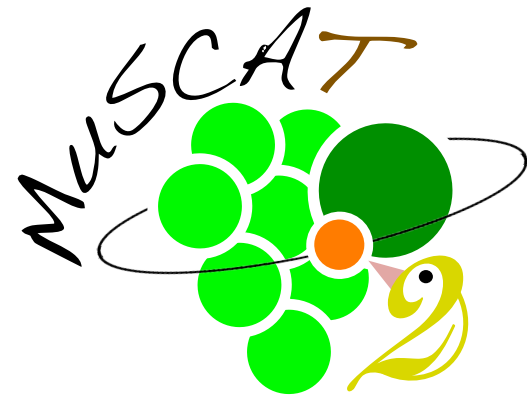
MuSCATで得られたK2-3dのライトカーブ



Fukui et al. 2016b

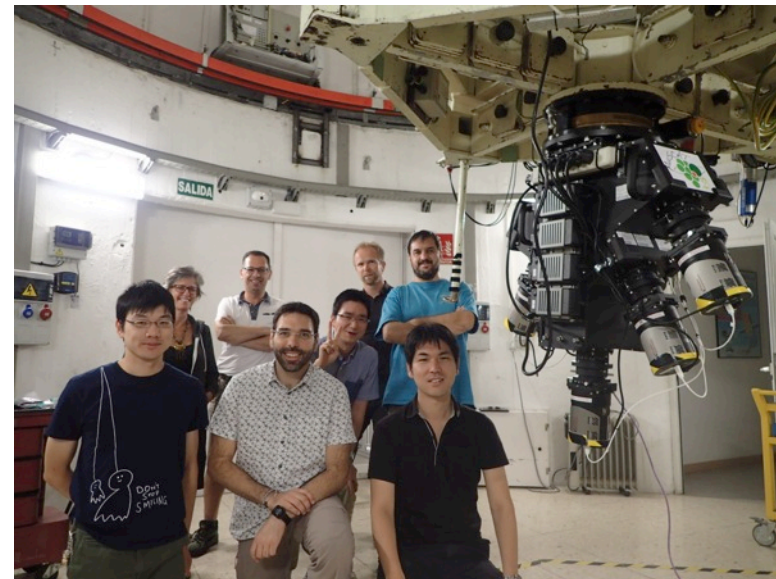
- 地球型($1.5R_{\text{Earth}}$)のハビタブル惑星候補K2-3dを地上初観測。
- 将来のトランジット時刻の予測精度を大幅に改善。
- 次世代望遠鏡を用いたバイオマーカー探索が可能に。

MuSCAT2



	MuSCAT/OAO188cm	MuSCAT2/TCS1.5m
Mirror diameter	1.88m	1.52m
Elevation	372m	2387m
Clear night ratio	30%	70%
FOV	6.1' x 6.1'	7.7' x 7.7'
# of channels	3 (g, r, z)	4 (g, r, i, z)
# of nights	50~120/year? (2018~)	162/year (2018-2022)

- アストロバイオロジーセンターを中心に、スペイン・カナリア諸島の1.5m望遠鏡向けにMuSCATの2号機を開発。
- 覚書により、2018-2022年に年間162夜の望遠鏡時間を使用可能
- 2017年8月末にファーストライト
- 岡山MuSCATとの連携観測に期待



まとめ

- MuSCAT: トランジット観測用の可視3色同時撮像装置
 - 2014年12月完成
 - 2015B期から共同利用時間での運用を開始
- これまでに計7本の成果論文を出版。3本準備中。
 - 惑星候補の発見確認
 - 惑星大気の観測
 - トランジット時刻の測定
- MuSCATの2号機を開発
 - スペイン・カナリア諸島の1.5m望遠鏡用
 - 2018年以降、岡山MuSCATと連携して観測を実施予定