

Tomo-e Gozenによる 銀河面重カマイクロレンズイベントの観測



Observer



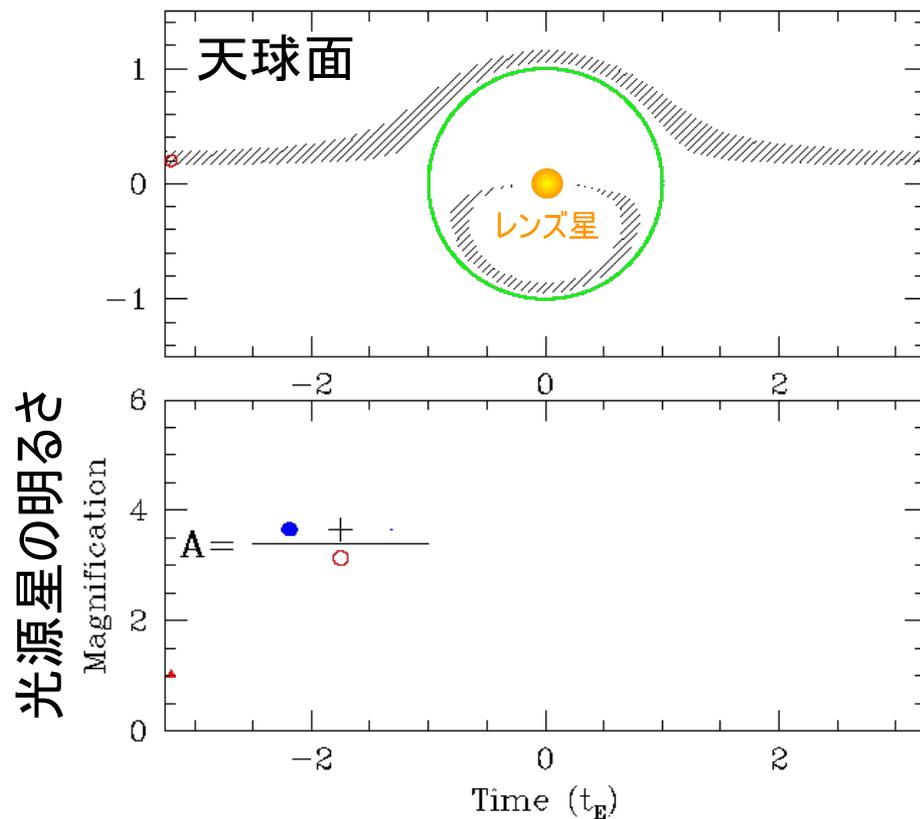
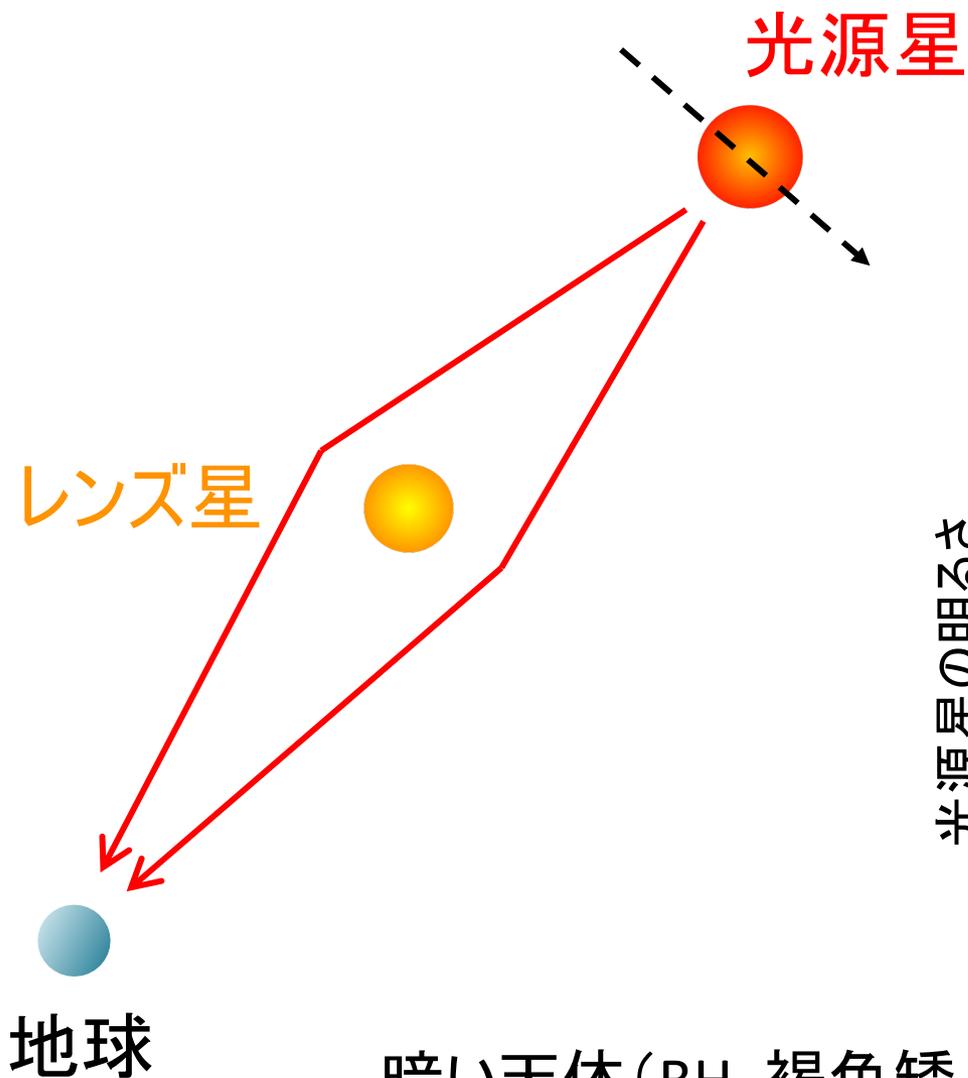
Source

東京大学先進科学研究機構

福井暁彦

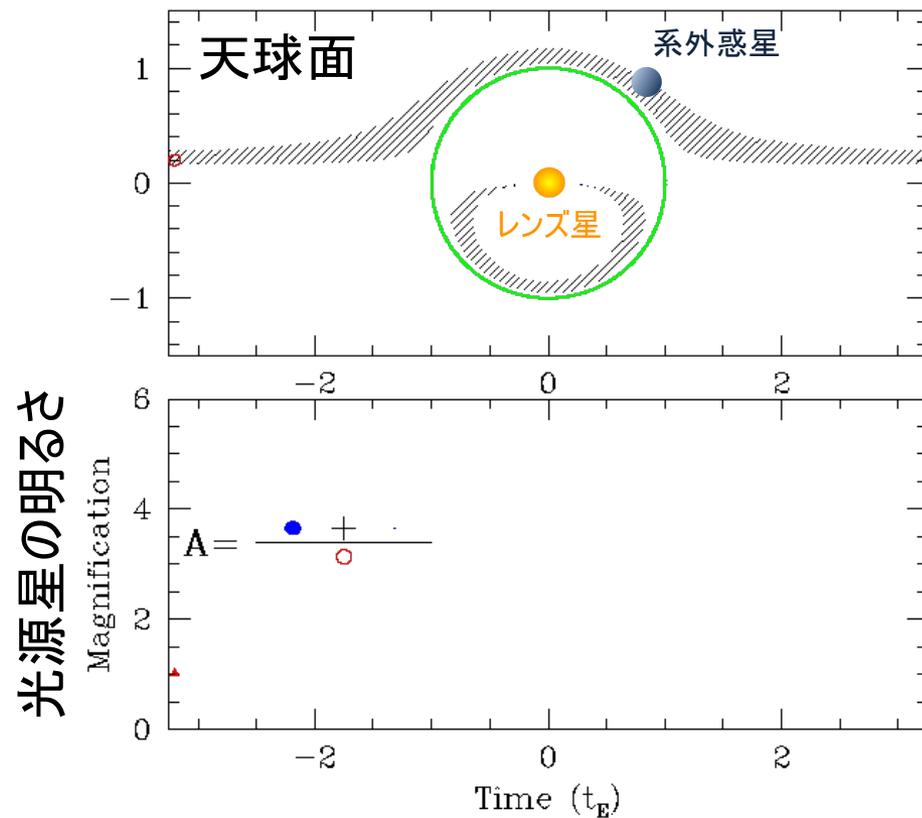
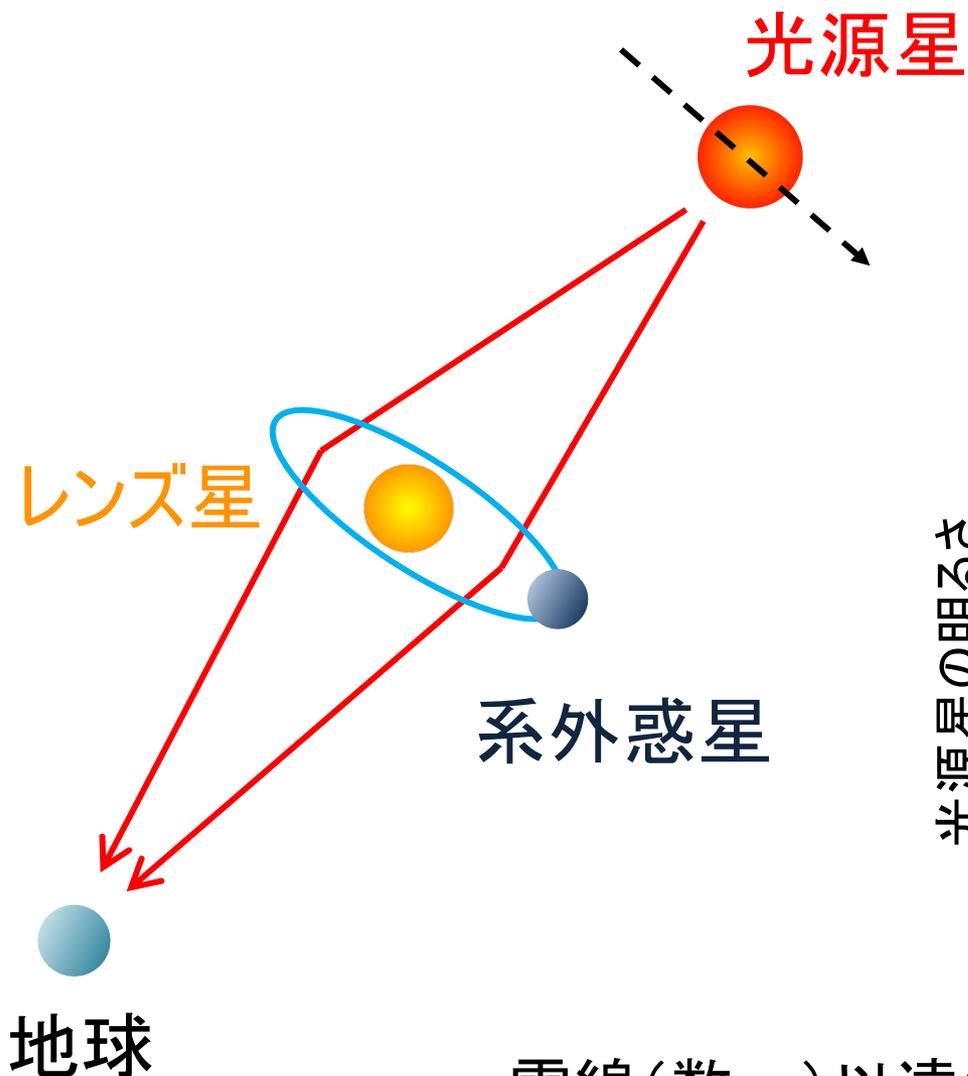
2021年10月6日
木曾シュミットシンポジウム2021

重力マイクロレンズ現象



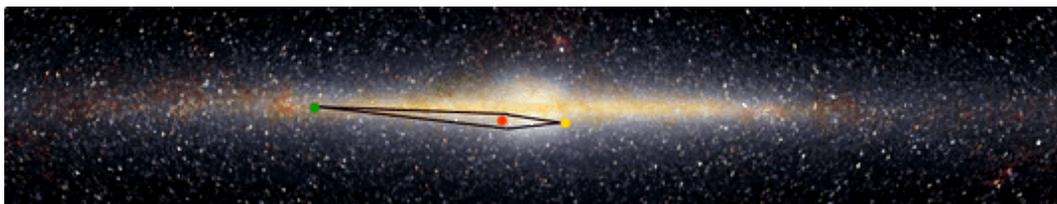
暗い天体 (BH, 褐色矮星、浮遊惑星 etc.) を検出可能

重力マイクロレンズ現象



雪線(数au)以遠の系外惑星を発見可能

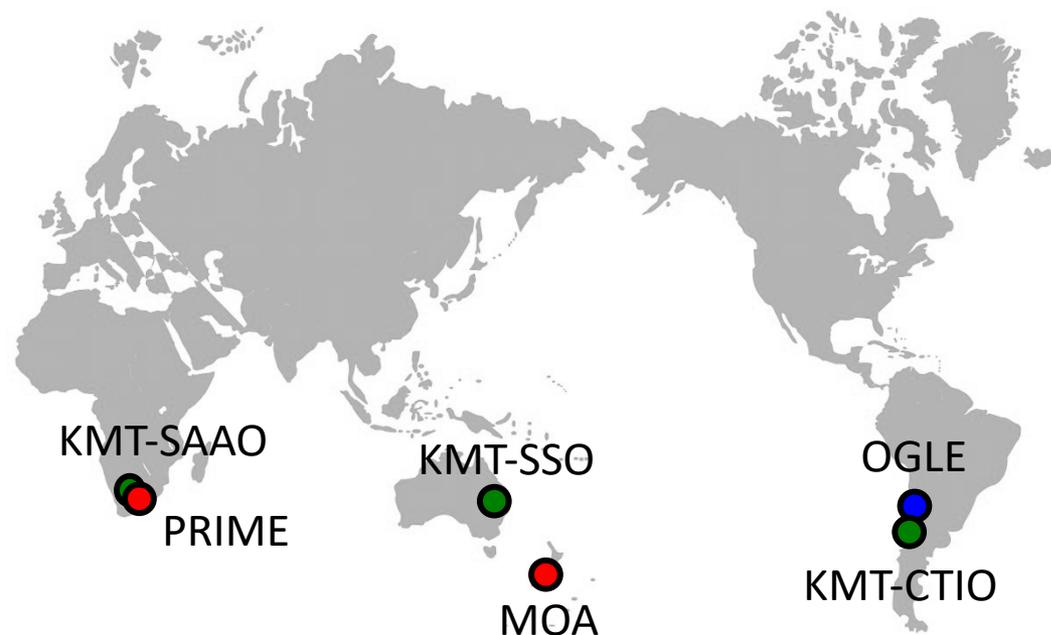
従来の重力マイクロレンズ探索



2天体が $\sim 1\text{mas}$ 以下の場合に増光

- Fieldでは極めて稀 ($\sim 10^{-8}$)
- 確率 \propto 星の個数密度の2乗

銀河中心方向が
イベントレート最大

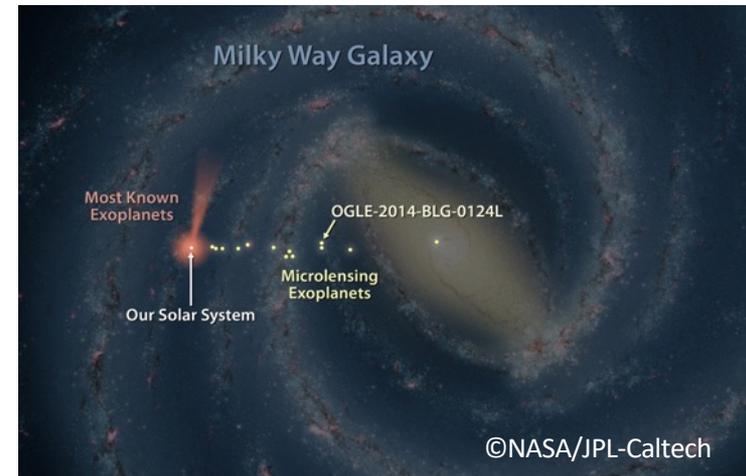


- OGLE-IV (2010-, 1.3m, 1.4deg^2)
- MOA-II (2005-, 1.8m, 2.4deg^2)
- KMTNet (2016-, 1.6m x 3, 4deg^2)
- PRIME (2022?- , 1.8m, 1.45deg^2)

- 単星レンズイベント: ~ 1000 イベント / 年
- 惑星イベント: ~ 10 イベント / 年

重力マイクロレンズの難点

- 銀河中心イベントの場合、レンズ天体までの距離が遠く、追観測が困難
- 質量と距離を一意に解けない場合が多い



観測量: イベントタイムスケール t_E

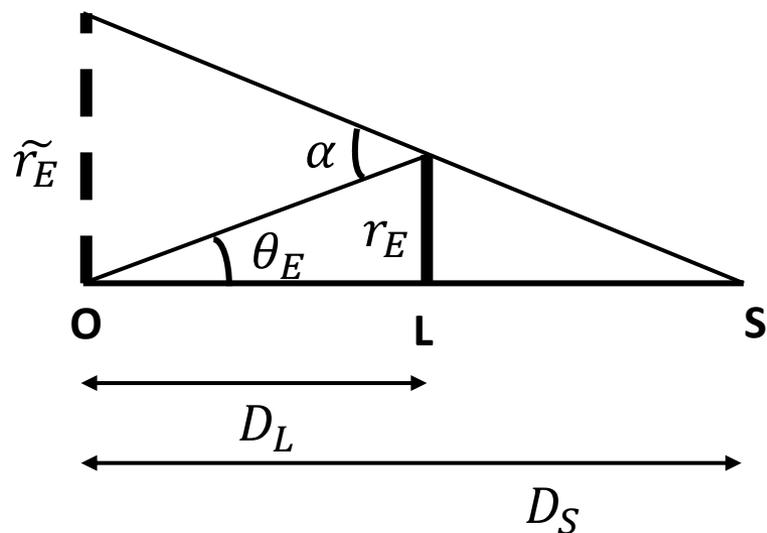
$$t_E = \frac{1}{\mu_{\text{rel}}} \sqrt{\frac{4G}{c^2} M_L \left(\frac{1}{D_L} - \frac{1}{D_S} \right)}$$

レンズの質量 (M_L) と距離 (D_L) が縮退

G : 重力定数, c : 光速
 θ_E : アインシュタイン角半径
 μ_{rel} : 相対固有運動
 M_L : レンズ天体の質量
 D_L : レンズ天体の距離
 D_S : 光源天体の距離

M_L と D_L を解く方法

方法1: 幾何学的手法



$$\alpha = \frac{4GM_L}{r_E c^2}$$

$$\theta_E \tilde{r}_E = \frac{4GM_L}{c^2}$$

$$\frac{\theta_E}{\tilde{r}_E} = D_L^{-1} - D_S^{-1}$$

$$\left(\pi_E = \frac{AU}{\tilde{r}_E}; \text{マイクロレンズ・パララックス} \right)$$

G : 重力定数

c : 光速

M_L : レンズの質量

D_L : レンズまでの距離

D_S : 光源までの距離

r_E : Einstein半径

θ_E : Einstein角半径

$$\theta_E, \pi_E \Rightarrow M_L, D_L$$

方法2: レンズ天体のSED

レンズ天体の明るさと色 (SED) が得られれば、恒星モデルや経験則を介して距離と質量を決定可。

銀河面重力マイクロレンズ探索

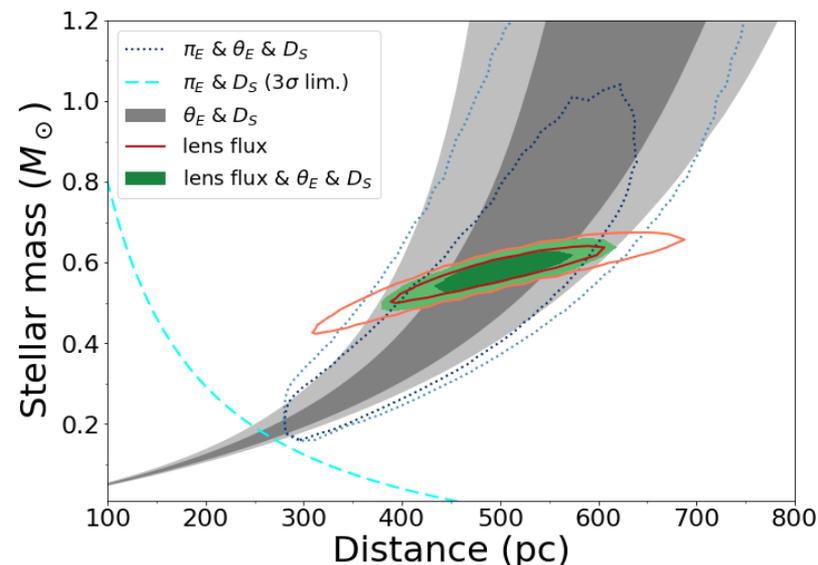
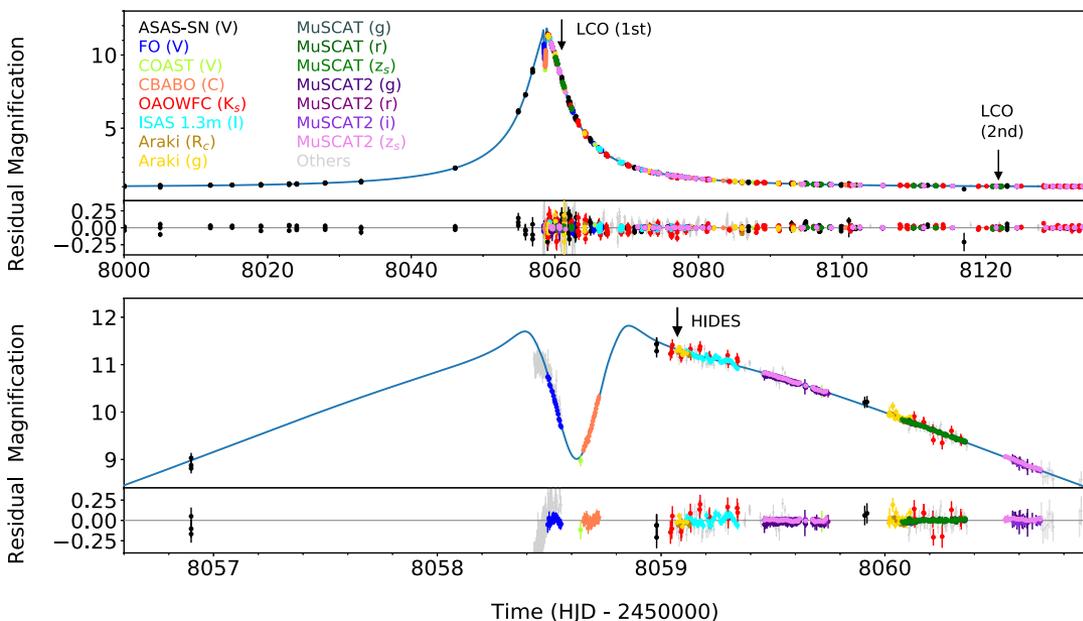
利点

- 銀河中心ほど星が混んでいない
 - 追観測が容易
- 近傍の惑星系を発見可能
 - 主星の明るさを容易に測定可能
 - 惑星系の詳細追観測(分光など)が可能
- 恒星質量「シングル」ブラックホールを発見可能
 - Gaiaによる全天アストロメトリデータを利用

難点

- イベントレートが低い ⇒ 広域を掃く必要あり

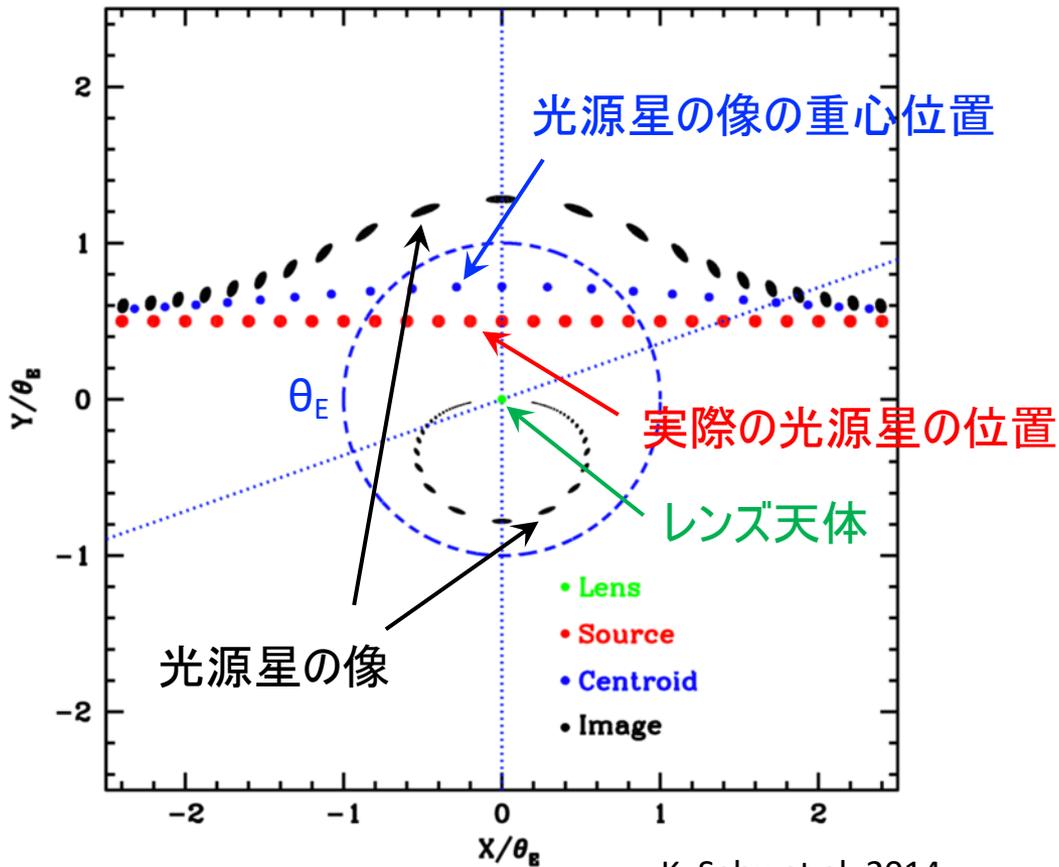
近傍惑星イベント: Kojima-1



AF et al. 2019

- Kojima-1: アマチュア(小嶋さん)が銀河面で発見した明るい重力 μ レンズイベント
 - 光源星は距離約800 pcのF型星
 - レンズに惑星が付随 (Nucita et al. 2018)
- 多色フォローアップ観測により、**レンズ星の明るさと色**を測定
 - 惑星系の質量と距離を決定 (約500 pc: **重力レンズ惑星系で最近傍**)

アストロメトリ重カマイクロレンズ



u (インパクトパラメータ) $\gg 1$ のとき、
像の変位 $\delta\theta \sim u/\theta_E$

$\Rightarrow \theta_E$ が求まる！

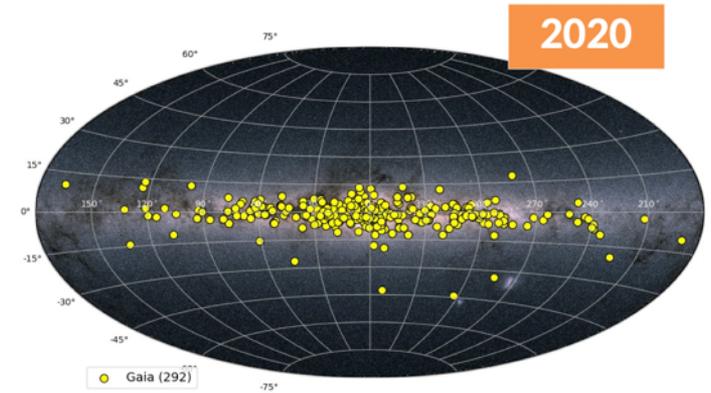
アインシュタイン角半径

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4G}{c^2} M_L \left(\frac{1}{D_L} - \frac{1}{D_S} \right)}$$

G : 重力定数, c : 光速
 M_L : レンズ天体の質量
 D_L : レンズ天体の距離
 D_S : 光源星の距離

Black hole search with Gaia

- 恒星質量ブラックホール
 - 重たい (~数十 M_{sun})
 - タイムスケールが長い (数百日)
 - アstrometriシグナルが大きい (数mas)
- Gaia Science Alerts
 - 観測頻度: 約1回/月
 - これまでに約300個の重カマイクロレンズ候補を発見 ($V_{\text{base}}=20.5 - 14.7 \text{ mag}$)
 - 欧州中心の地上測光分光ネットワークにより、主にタイムスケールの長いイベントを追観測
- Gaiaの時系列アストロメトリデータ
 - DR4 (時期未定)で公開予定



Almost 300 events

Credit: K. Kruszynska

Background image: ESA/DPAC

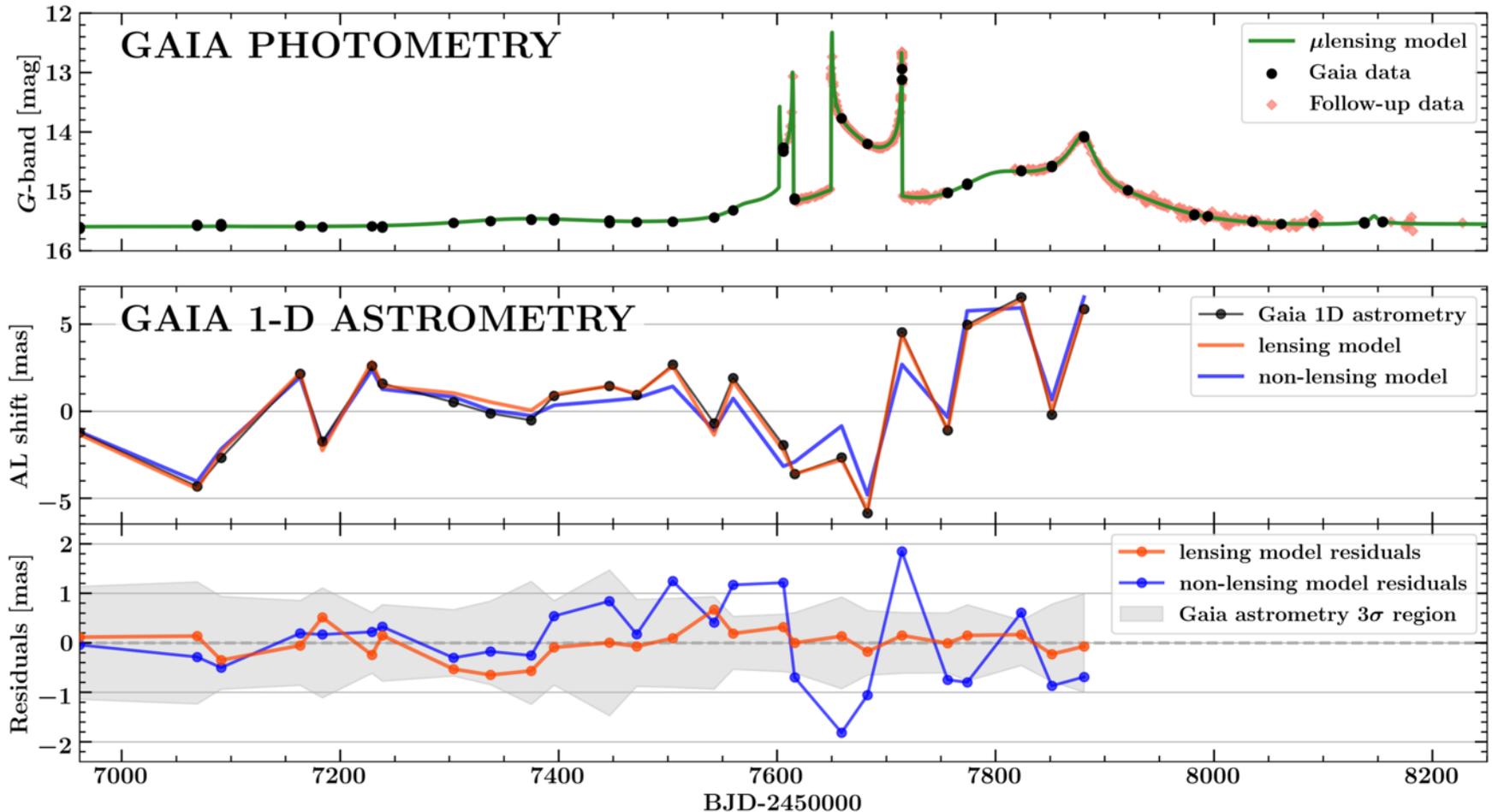
Gaiaアラート追観測ネットワーク



First detection of astrometric microlensing by Gaia

Gaia16aye

プレスリリース@ESA on 2021.9.24



レンズ: K型-M型連星@780 pc

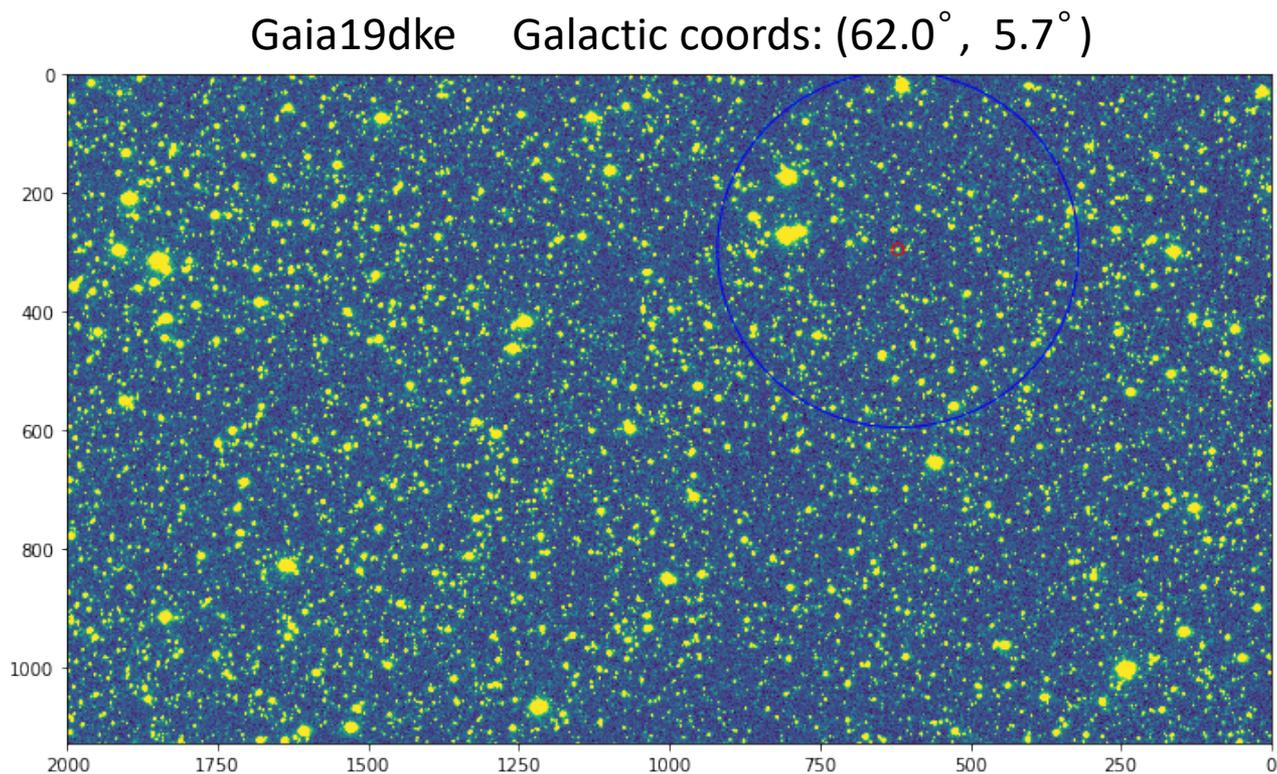
Credit: ESA/Gaia/DPAC,
Acknowledgement: ESA/Gaia/DPAC/CU7-CU3-CU4-CU5,
Krzysztof Rybicki, Łukasz Wyrzykowski (Warsaw University)

Tomo-e Gozenでやりたいこと

- Extra: イベントのリアルタイム・ブラインドサーチ
 - GaiaやZTFよりも早くイベントを発見出来る可能性
- Full: 既知のイベントのリアルタイム解析&アノマリ検出
 - タイムスケールの短い(数時間～数日)惑星シグナルを早期に見つけ、フォローアップにつなげる
 - SNチームのパイプラインを使わせてもらう？
- Minimum: アーカイブ画像から既知のイベントのライトカーブ抽出
 - 他の望遠鏡で得られたデータのギャップを埋められる可能性
 - 簡易なパイプラインを作成

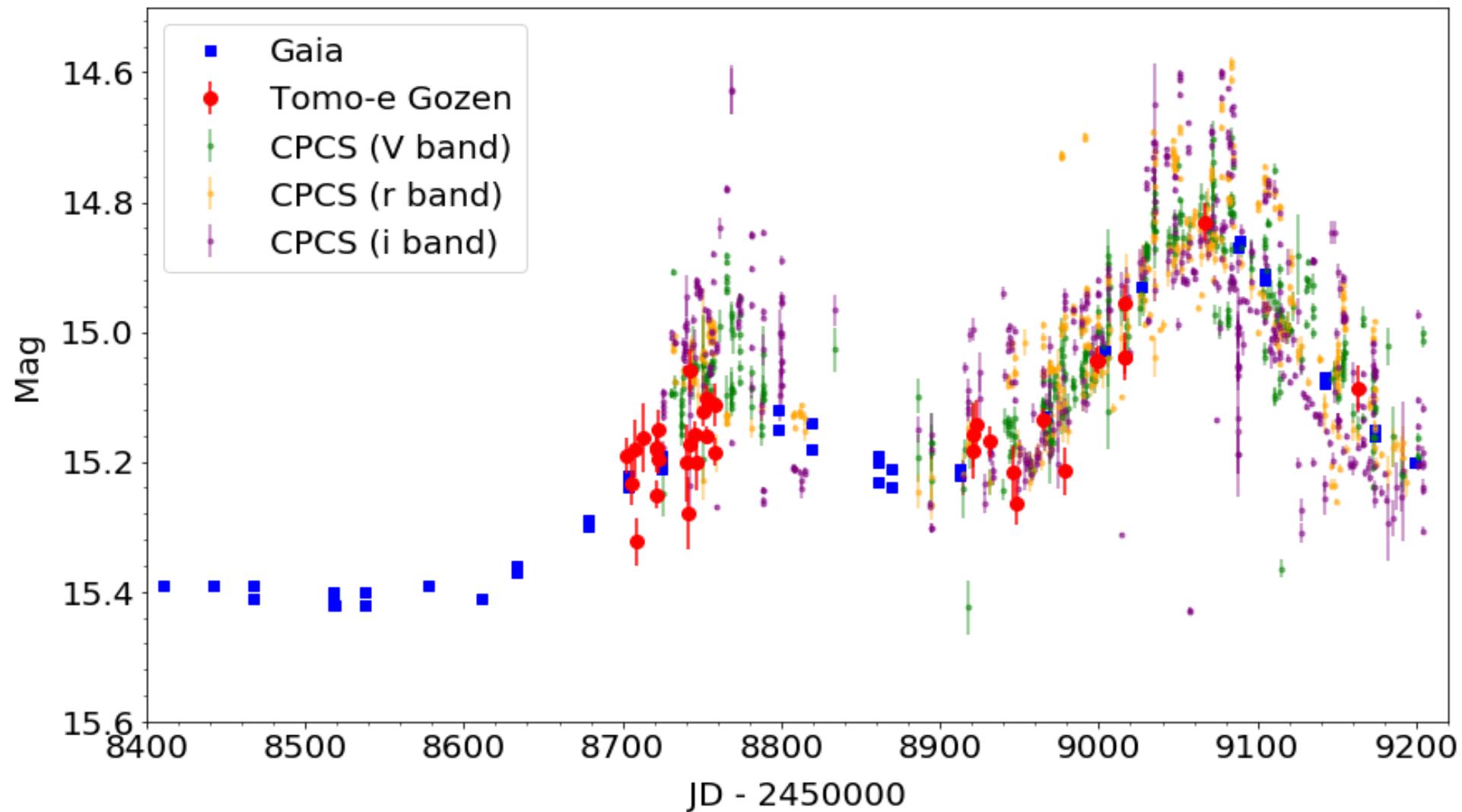
既知のイベントのライトカーブ抽出

- 任意の座標の星について、Tomo-eアーカイブ画像からライトカーブを抽出するパイプラインを作成
 - Aperture photometry (SExtractor)
 - Instrumental magnitude (カタログ等級への補正は無し)



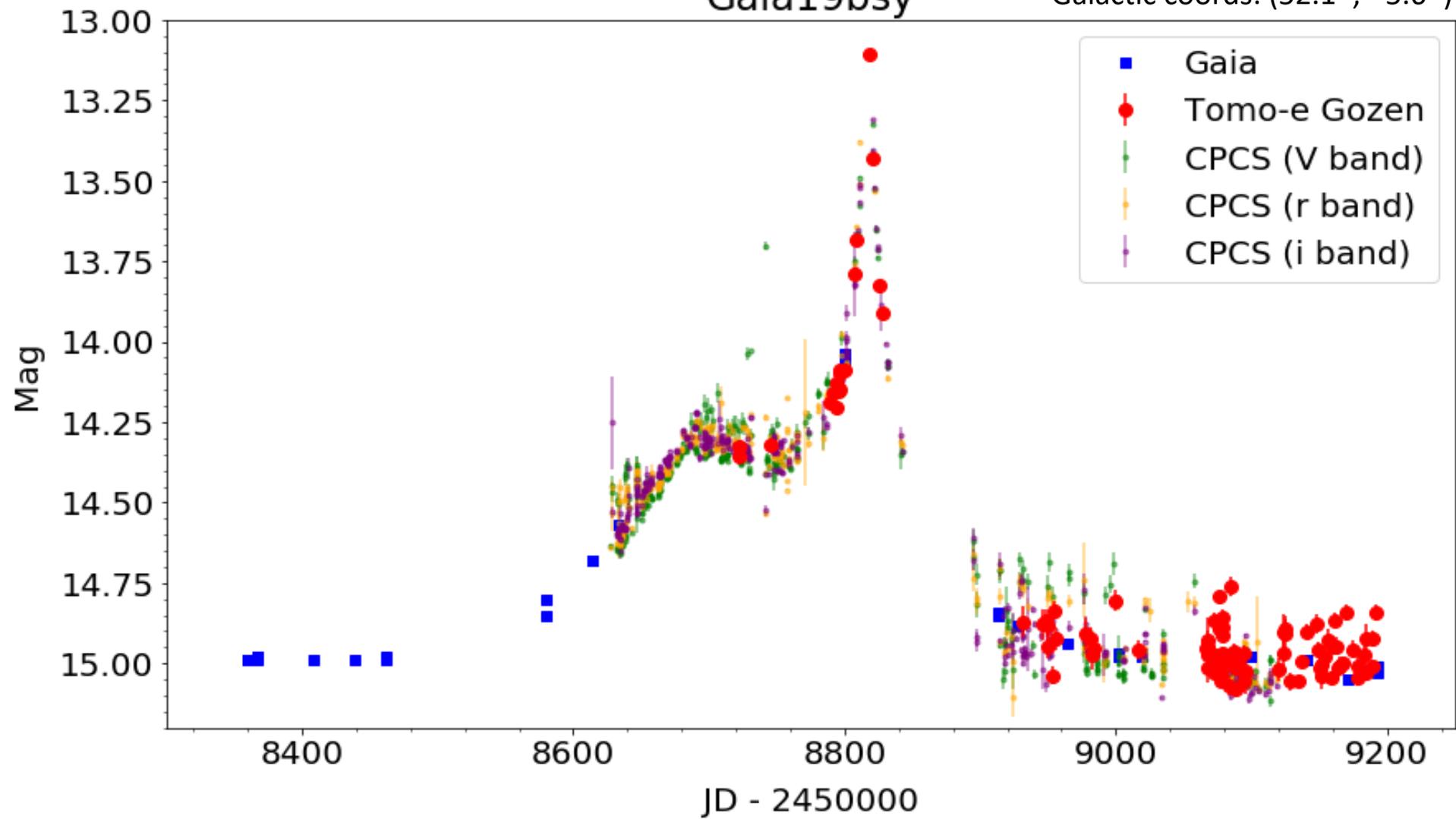
Gaia19dke

Galactic coords: (62.0°, 5.7°)



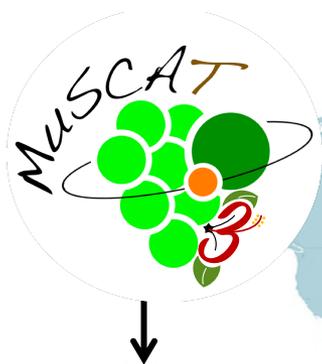
Gaia19bsy

Galactic coords: (52.1°, -5.6°)



フォローアップ体制

MuSCATシリーズ: トランジット惑星観測用の多色同時撮像装置 (PI: 成田憲保@東大)



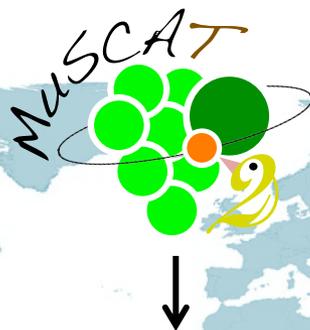
MuSCAT3

LCO 2m望遠鏡

@マウイ島ハレアカラ観測所

Ch: g, r, i, z

運用開始: 2020



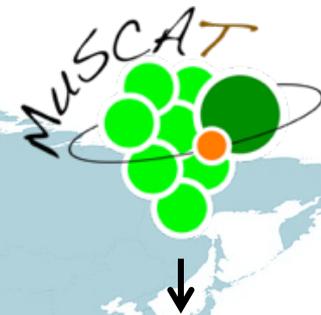
MuSCAT2

1.52m望遠鏡

@テネリフェ島テイデ観測所

Ch: g, r, i, z

運用開始: 2018



MuSCAT

188cm望遠鏡

@国立天文台岡山

Ch: g, r, z

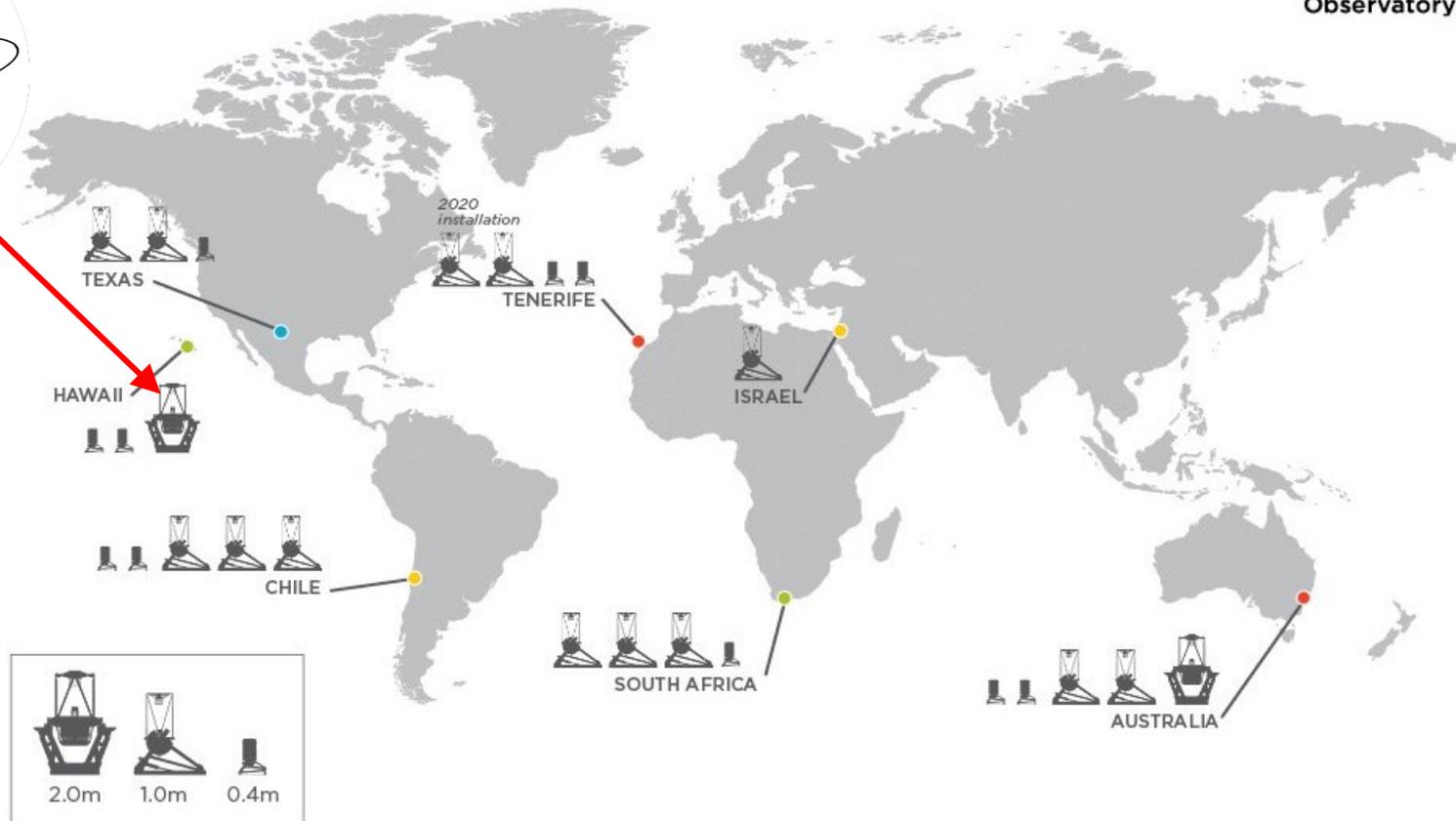
運用開始: 2015

目的: TESSが発見するトランジット惑星候補の網羅的な追観測

Las Cumbres Observatory Global Telescopes



GLOBAL TELESCOPE NETWORK



- GTO時間として、2m/MuSCAT3 (300 hr/yr) と他の1m望遠鏡 (300 hr/yr) の時間を確保
- 重カマイクロレンズ追観測の大規模プログラム (LCO Key Project; PI: E. Bachelet@LCO)

まとめ

- 銀河面重力マイクロレンズ探索により、
 - 近傍の系外惑星を発見可能
 - Gaiaのアstrometriデータと組み合わせることで、single black holeの発見が可能
- Tomo-eのアーカイブ画像から既知のイベントのライトカーブを抽出するパイプラインを作成
- 追観測体制は整っている
 - MuSCATシリーズ
 - LCOGT
- リアルタイム・イベント/アノーマリ検出をしたい。
 - 興味のある方はお声がけください。