

トモエ全天動画レガシーサーベイと 白色矮星の系外惑星探索

T O M O E
G O Z E N



現在、欧州に長期滞在中です。
今回は現地参加が叶わず残念です。
@ミュンヘン近郊
マックスプランク宇宙物理学研究所
お隣には欧州南天天文台本部



東京大学理学系研究科物理学専攻
ビッグバン宇宙国際研究センター 横山順一研究室 博士3年

直川史寛

逢澤 正嵩 (茨城大)、檜山 和己 (東北大)
大澤 亮 (国立天文台)

T O M O • E
G O Z E N



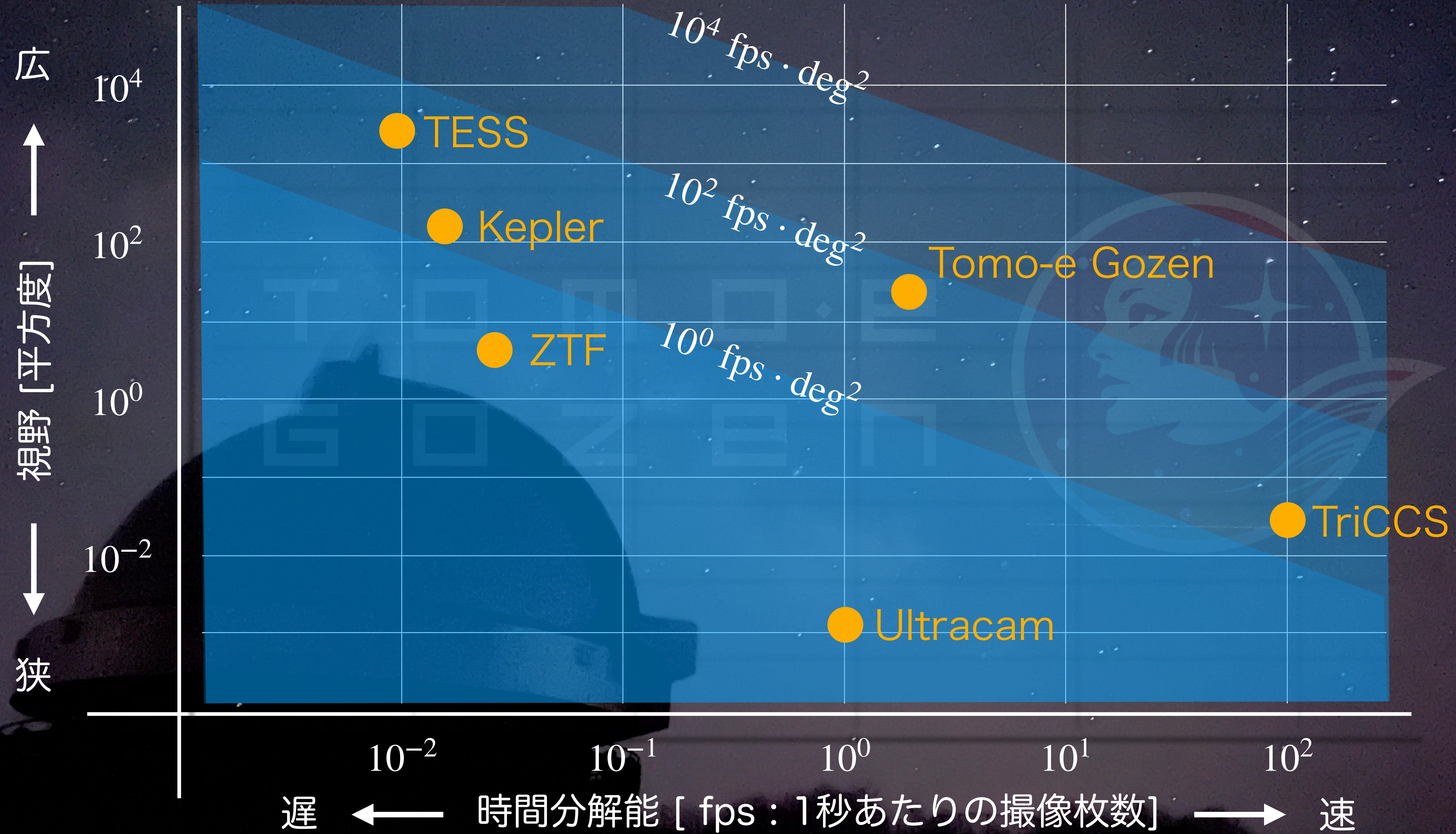
広視野

シュミット望遠鏡



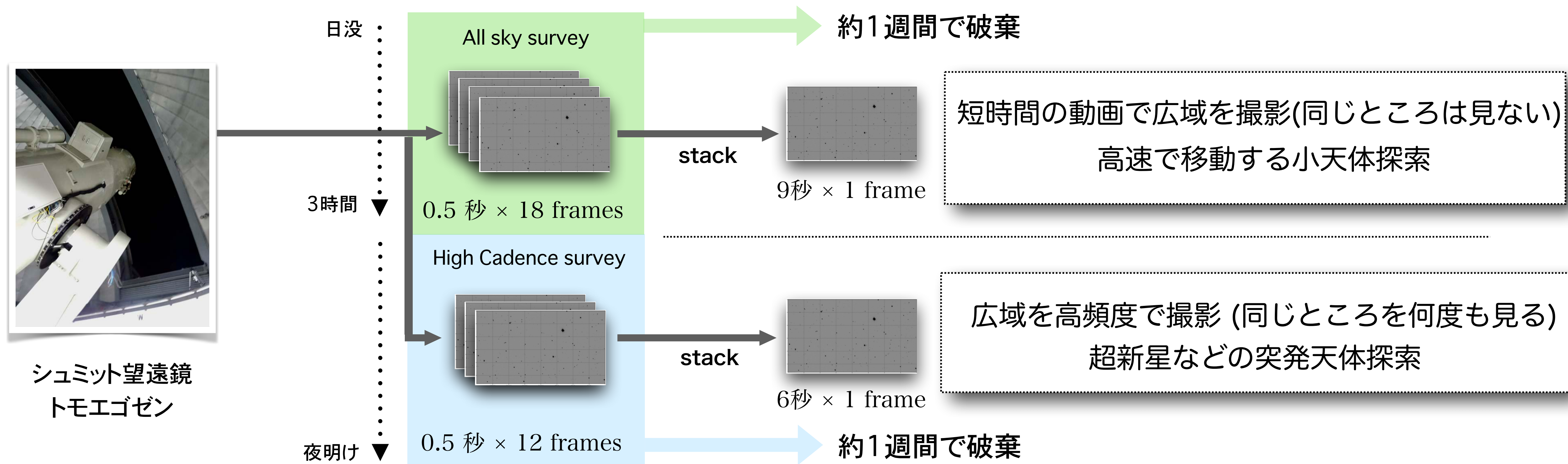
動画観測

Tomo-e Gozen



2019 : トモエゴゼン科学運用開始

~2024 : 主に 2 種類のサーベイが毎日行われてきた



各視野短時間の動画 (<10秒)

動画データは原則1週間程度で破棄 (スタック画像のみをアーカイブ)

長時間の動画サーベイ (キャンペーン観測ベース)

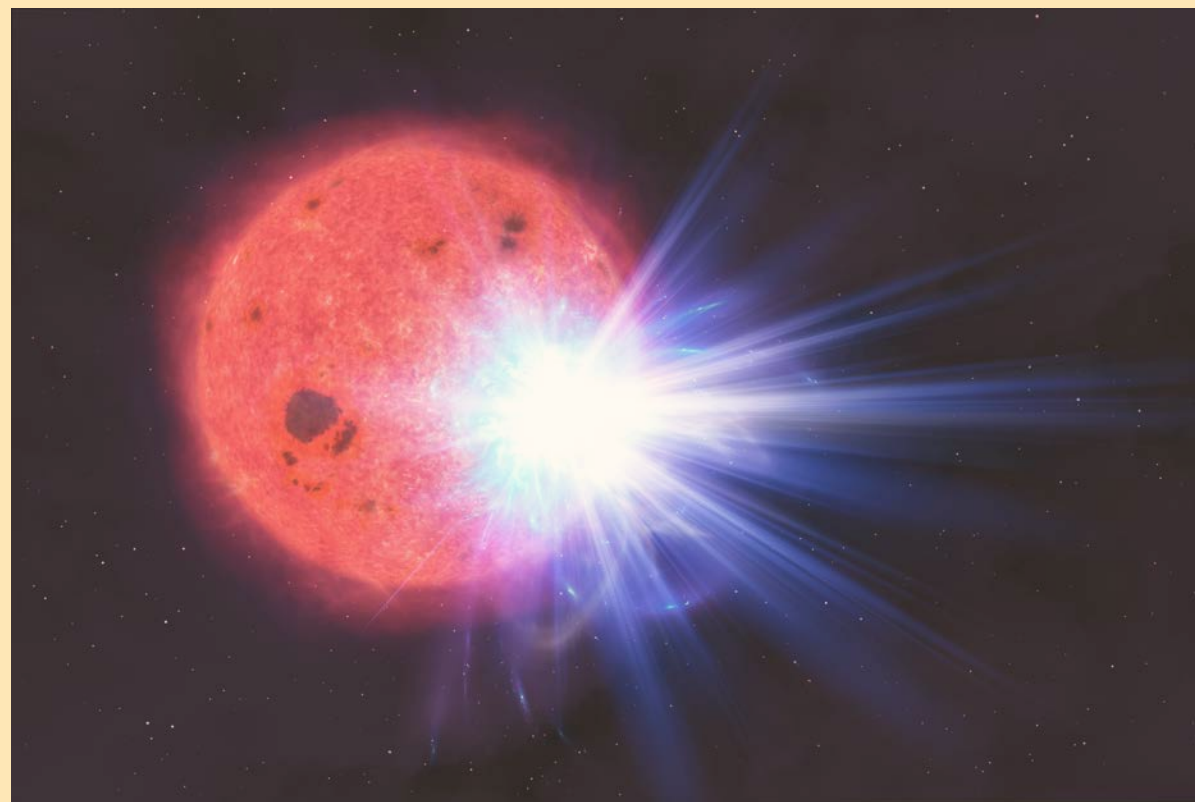
- 高速電波バースト対応天体探索 (新納さん et al.) ⇨ **新納さん、間所さんの講演**
- 秒スケール突発現象探索 (有馬さん et al.) ⇨ **有馬さんの講演**
- 秒スケール変動天体(特に恒星)探索 (逢澤, 檜山, 大澤, 直川 et al.)

HeSO

HeSO (Hertz stellar object) サーベイ

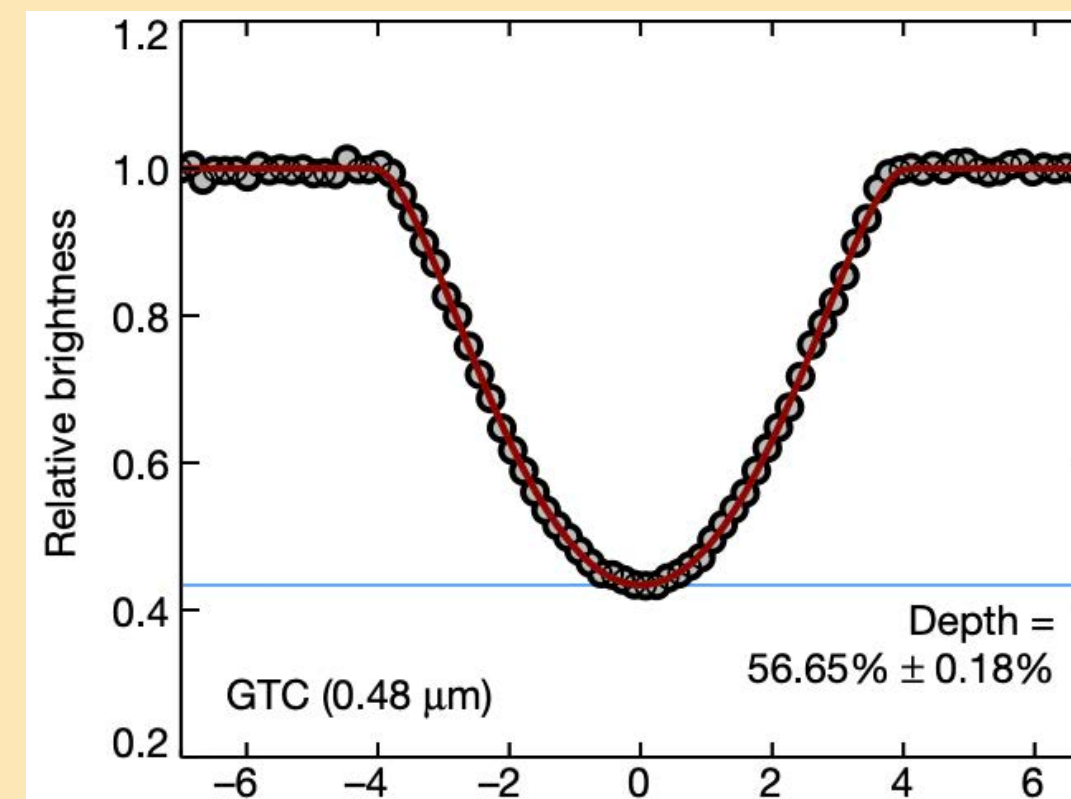
2019-2020 年 : 約 40 時間分 の 1 fps データを取得し、無バイアスサーベイ
M型星の高速フレアを 22 件検出 (Aizawa et al., PASJ, 74, 5, 1069-1094, (2022))

高速 恒星 フレア ($10^1 - 10^2$ 秒)



クレジット : 東京大学木曾観測所

白色矮星トランジット (分)



Vanderburg et al., Nature, Vol585, 363, 2020

高速変動白色矮星

preliminary

● 2025~ “Tomo-e Video Monitoring Survey” 「トモエ動画モニタサーベイ」 開始

with 酒向さん, 新納さん, 瀧田さん, 逢澤さん, 檜山さん, 田中さん, 富永さん, 有馬さん, 根津さん et al.

数十分同じ視野の動画をとる、レガシーデータとして残す

2025年4月2日
20 deg², 1 fps, 1800 frames

2025年4月2日
20 deg², 1 fps, 1800 frames

2025年4月1日
20 deg², 1 fps, 1800 frames

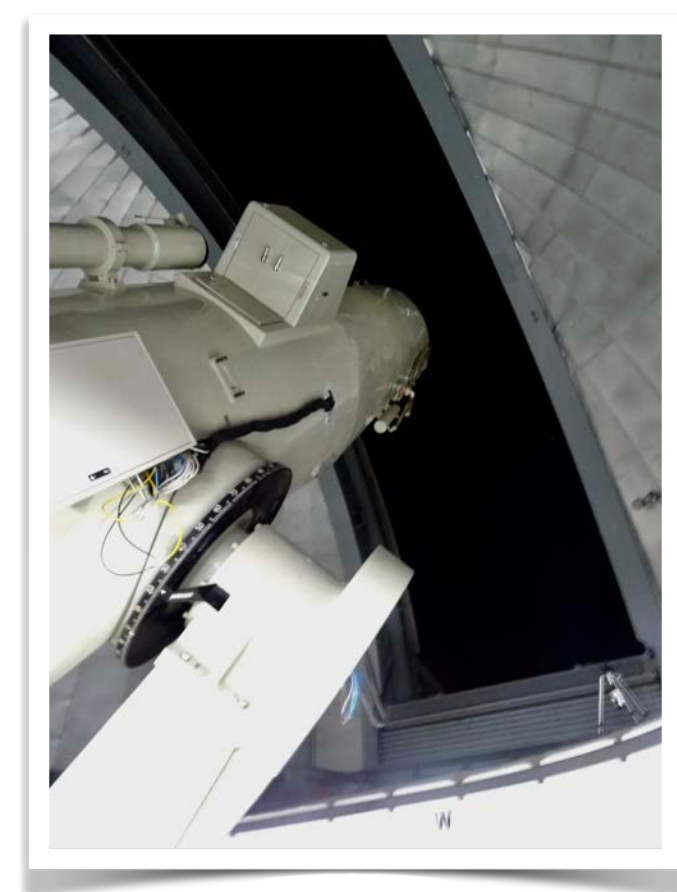
2025年4月1日
20 deg², 1 fps, 1800 frames

➤ 毎晩 1 fps × 30 min × 2 pointings (全天サーベイモードの場合)

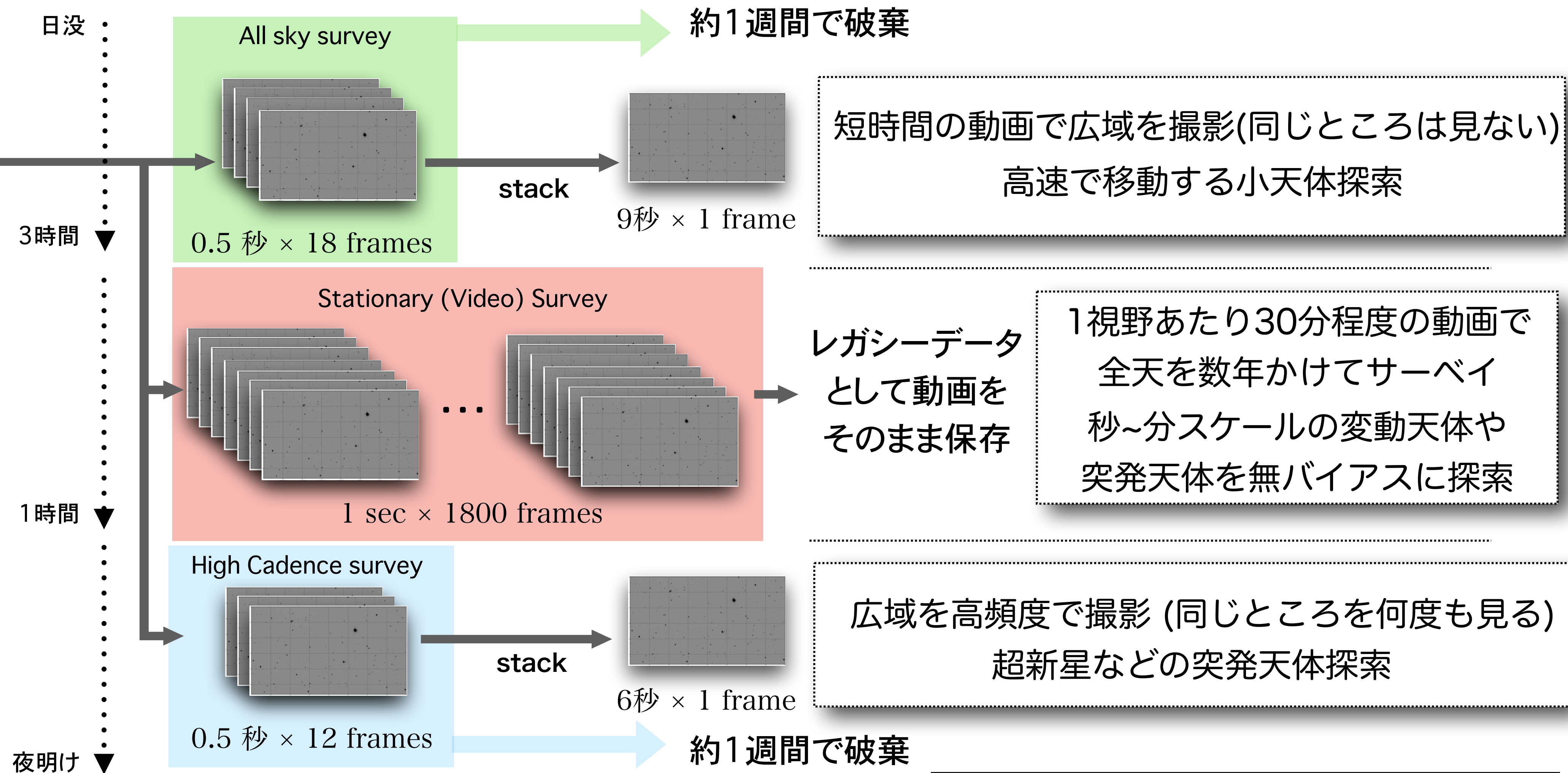
2019 : トモエゴゼン科学運用開始

2019~2024 : 主に 2 種類のサーベイが毎日行われてきた

2025~ : 同じ視野の長時間動画サーベイを追加



Schmidt telescope
Tomo-e Gozen



● 2025~ “Tomo-e Video Monitoring Survey” 「トモエ動画モニタサーベイ」 開始

with 酒向さん, 新納さん, 瀧田さん, 逢澤さん, 檜山さん, 田中さん, 富永さん, 有馬さん, 根津さん et al.

数十分同じ視野の動画をとって、レガシーデータとして残す

2025年4月2日
20 deg², 1 fps, 1800 frames

2025年4月2日
20 deg², 1 fps, 1800 frames

2025年4月1日
20 deg², 1 fps, 1800 frames

2025年4月1日
20 deg², 1 fps, 1800 frames

➤ 毎晩 1 fps × 30 min × 2 pointings (全天サーベイモードの場合)

➤ 需要に合わせた多様なサーベイデザイン

全天サーベイモード: 録画する天域は毎晩変更 (一度見たところは見ない)

多波長観測モード: 他の天文台等との同時観測 ⇨ 新納さん、間所さんの講演

地球影モード: 人工天体のノイズ軽減のため、地球影や月影を観測 ⇨ 有馬さんの講演

主星(白色矮星)が小さい($\sim R_{\oplus}$) ため、食が短く深い

⇒ ケプラー、TESS 等では検出困難

⇒ 測光精度はそこまで必要ない

トランジット観測や直接撮像等でも見つかっている

Mullally et al., 2024 ApJL 962 L32

小天体のトランジットも見つかっている

Veras (2021), 2106.06550

WD1856+458

木星型惑星

➤ 唯一の観測例

WD1856+534 を周る木星サイズの惑星

← 8分 →

白色矮星



$\sim 3R_{\oplus}$

Vanderburg et al., Nature, Vol585, 363, 2020

主星(白色矮星)が小さい($\sim R_{\oplus}$) ため、食が短く深い

⇒ ケプラー、TESS 等では検出困難

⇒ 測光精度はそこまで必要ない

トランジット観測や直接撮像等でも見つかっている

Mullally et al., 2024 ApJL 962 L32

小天体のトランジットも見つかっている

Veras (2021), 2106.06550

WD1856+458

木星型惑星

白色矮星

$\sim 3R_{\odot}$

科学的意義 Limbach et al. 2025

⇒ 主系列後の惑星の軌道進化、安定性

⇒ 恒星進化 (どこまで飲み込むか)

⇒ 低温度惑星に関する貴重な情報

⇒ 主星とのコントラストが小さく
直接撮像の格好のターゲット

主星(白色矮星)が小さい($\sim R_{\oplus}$) ため、食が短く深い

➤ 唯一の観測例

WD1856+534 を周る木星サイズの惑星

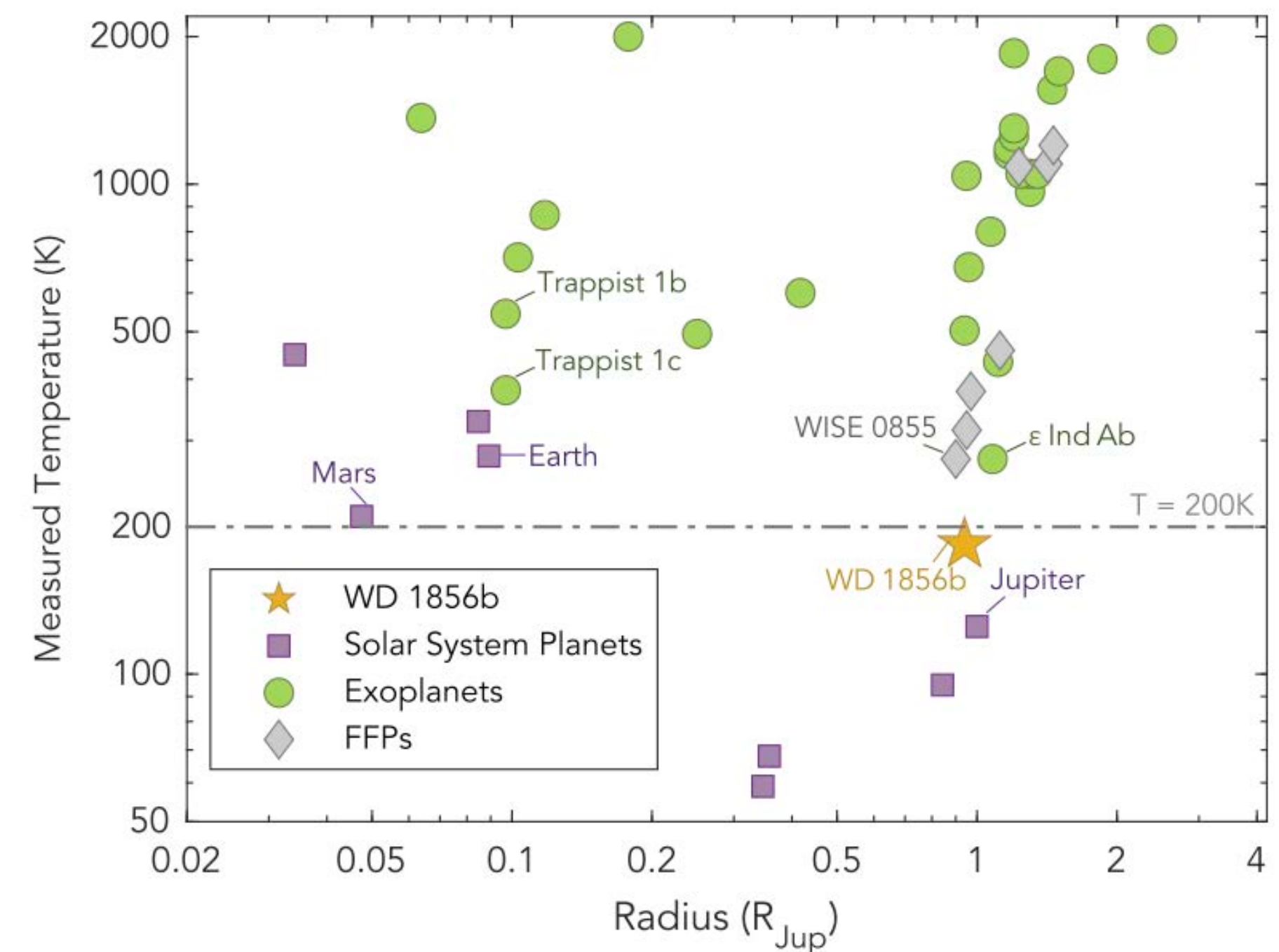
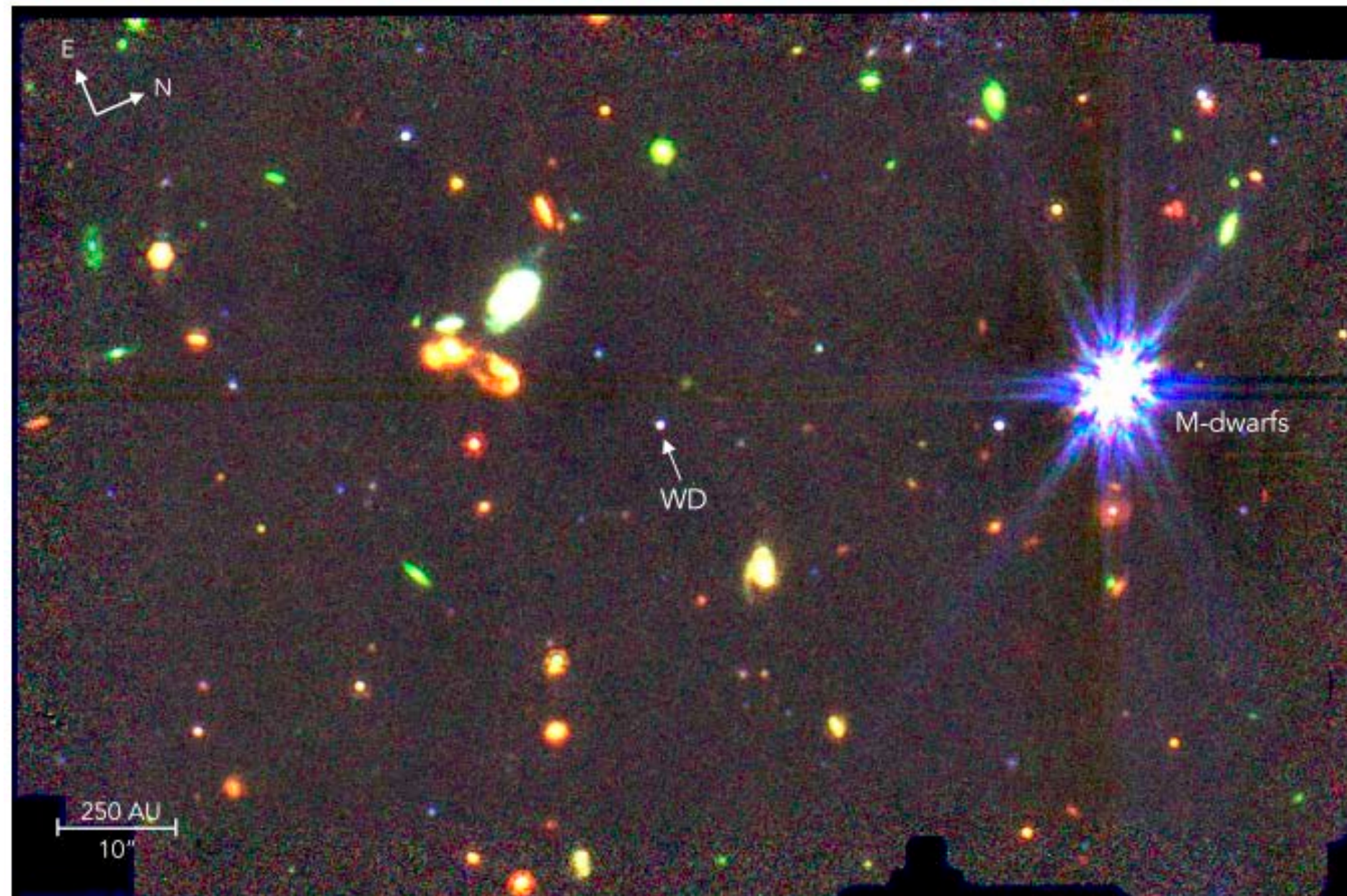
白色矮星

WD1856+458
木星型惑星

➤ JWST MIRI による中間赤外フォローアップ

Limbach et al., ApJL 984:L28 (10pp), 2025

WD1856+534 系からの中間赤外超過を検出 (木星型惑星と確定)



画像クレジット : Limbach et al, CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

主星(白色矮星)が小さい($\sim R_{\oplus}$) ため、食が短く深い

⇒ ケプラー、TESS 等では検出困難

⇒ 測光精度はそこまで必要ない

トランジット観測や直接撮像等でも見つかっている

Mullally et al., 2024 ApJL 962 L32

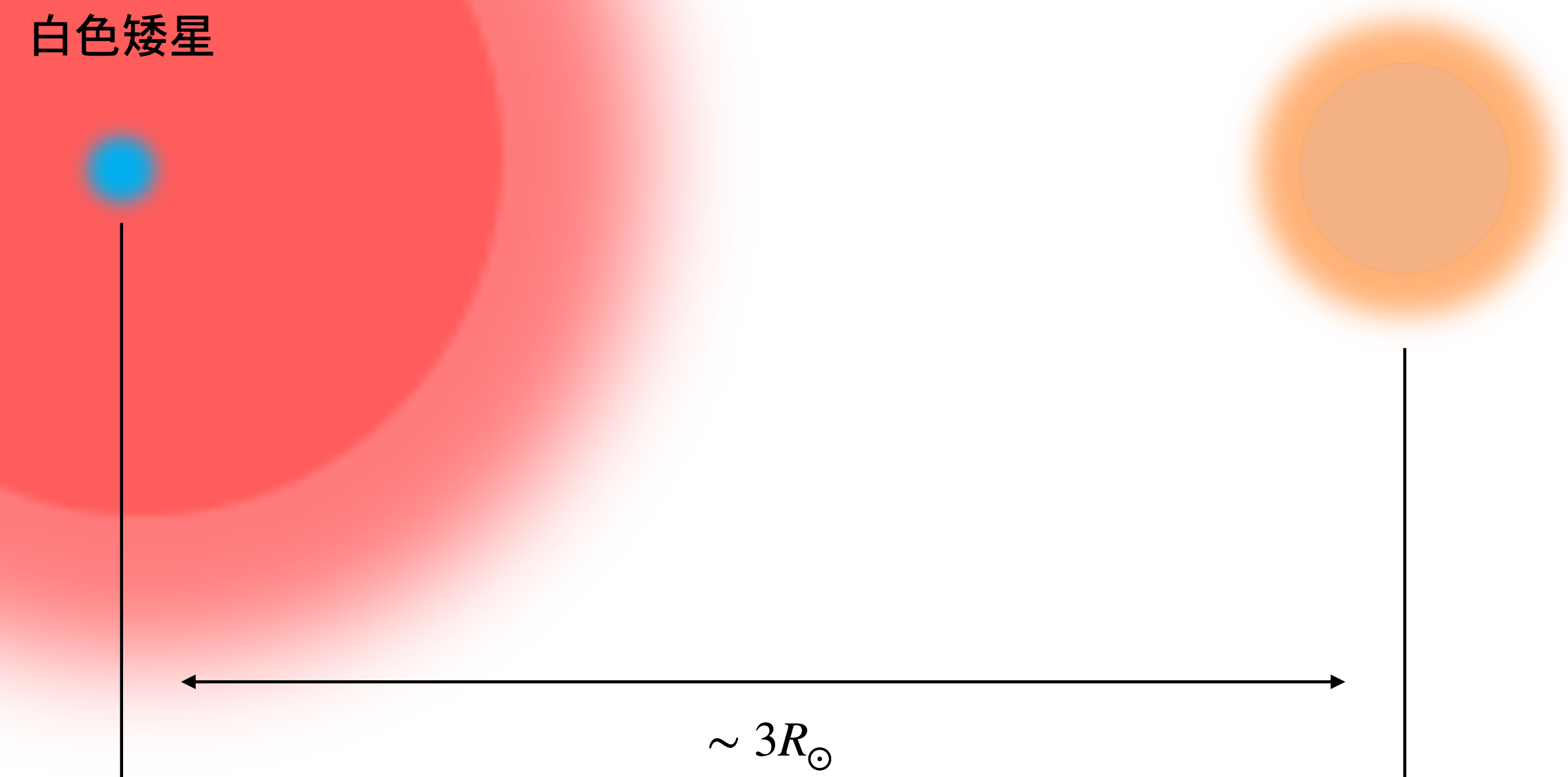
小天体のトランジットも見つかっている

Veras (2021), 2106.06550

WD1856+458

木星型惑星

白色矮星



科学的意義 Limbach et al. 2025

- ⇒ 主系列後の惑星の軌道進化、安定性
- ⇒ 恒星進化 (どこまで飲み込むか)
- ⇒ 低温度惑星に関する貴重な情報
- ⇒ 主星とのコントラストが小さく
直接撮像の格好のターゲット
- ⇒ Tomo-e Gozen と JWST などの
大型望遠鏡とのシナジー
- ⇒ 主系列後の惑星系のハビタビリティ

➤ 地球型惑星のトランジット

トランジットが、より短い

狙うは、主星に結構近い地球型惑星

⇒トランジット確率高い+ハビタブルゾーンもこの辺

2 au あたりを周る地球型がマイクロレンズで1件報告

Zang et al., RAA, 21, 9, 239 (19pp), 2021 Zhang et al., Nature Astro.,8, 1575-1582, 2024

白色矮星

地球型惑星

一発見つければ大発見
制限自体が重要な成果

● 全天サーベイ (1000時間分) を行った場合

$$N \sim 1 \left(\frac{f_{\text{planet}}}{0.20} \right) \left(\frac{R_*}{R_{\oplus}} \right)^{-1} \left(\frac{a}{R_{\odot}} \right)^{-1} \left(\frac{R_* + R_p}{2R_{\oplus}} \right) \left(\frac{N_{\text{pointing}}}{10^3} \right) \left(\frac{\Delta T}{60 \text{ min}} \right) \left(\frac{f_{\text{available}}}{0.2} \right) \left(\frac{n_{\text{WD}}}{10} \right)$$

惑星
保有率

主星
半径

軌道
長半径

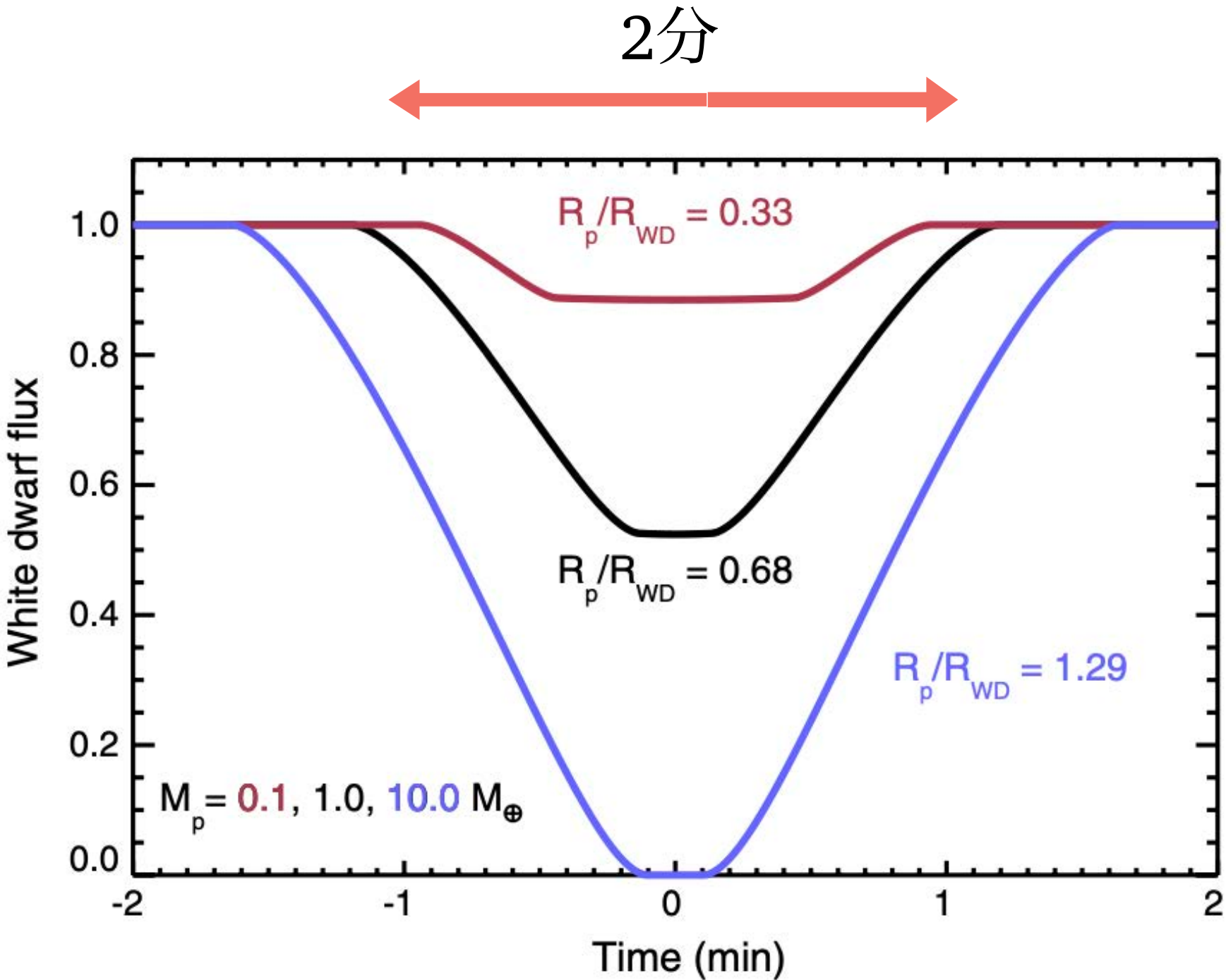
主星半径
+ 惑星半径

総ポインティング

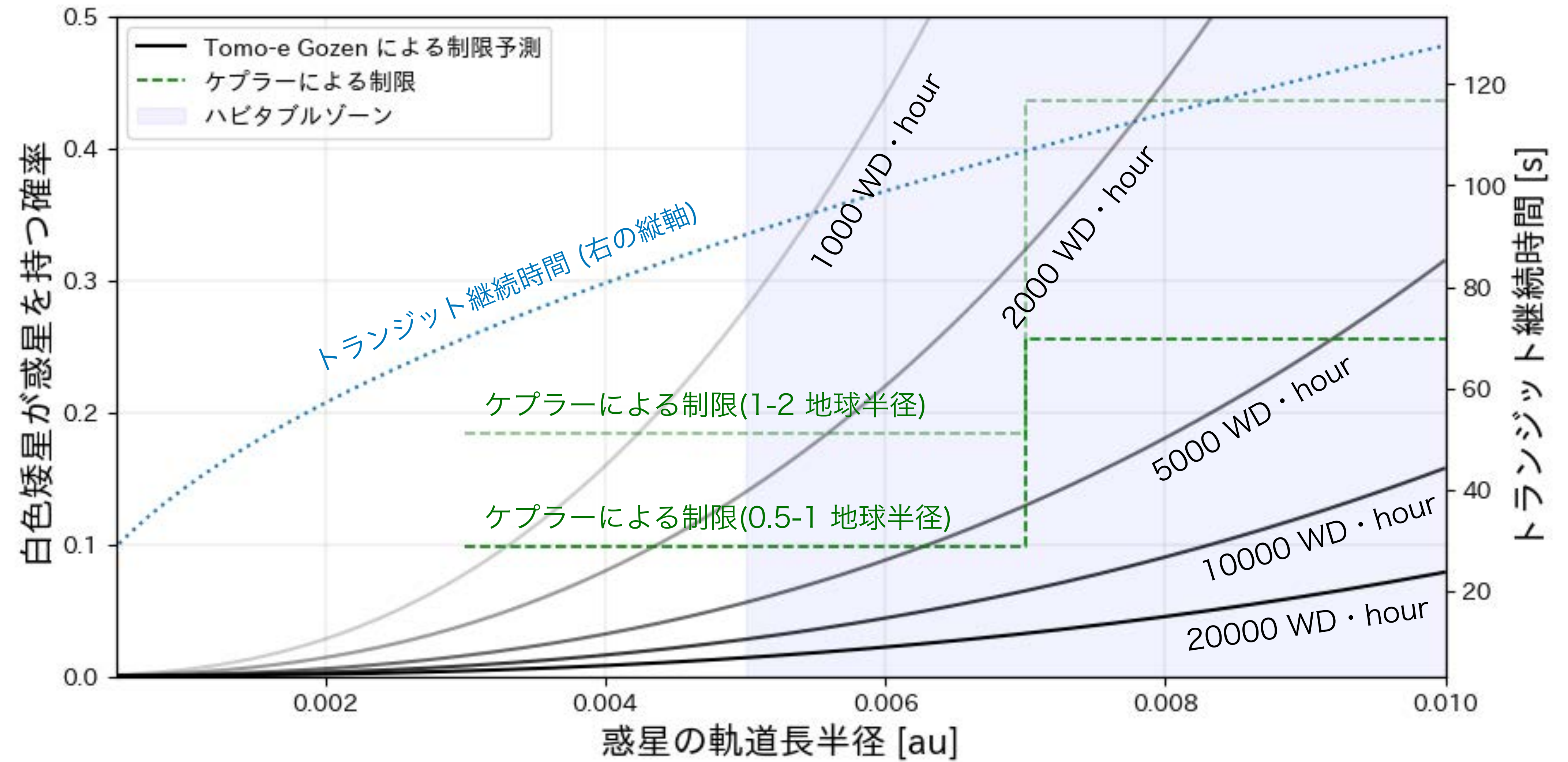
1回の
露光時間

有効データ
取得率

1視野中の
白色矮星数



Agol et al., APJL, 731:L31 (5pp), 2011
CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ハビタブルゾーンは Agol et al., APJL, 731:L31 (5pp), 2011
ケプラーによる制限線は Sluijs et al., MNRAS 474, 4603–4611 (2018)

● “Tomo-e Video Monitoring Survey” 「トモエ動画モニタサーベイ」の現状

➤ 毎晩 1 fps × 30 min × 2 pointings (全天サーベイモードの場合)

➤ 需要に合わせた多様なサーベイデザイン

全天サーベイモード: 録画する天域は毎晩変更 (一度見たところは見ない)

多波長観測モード: 他の天文台等との同時観測 ⇒ 新納さん、間所さんの講演

地球影モード: 人工天体のノイズ軽減のため、地球影や月影を観測 ⇒ 有馬さんの講演

➤ 2024年末 試験運用開始

➤ 2025年1月から 定常的な運用へ

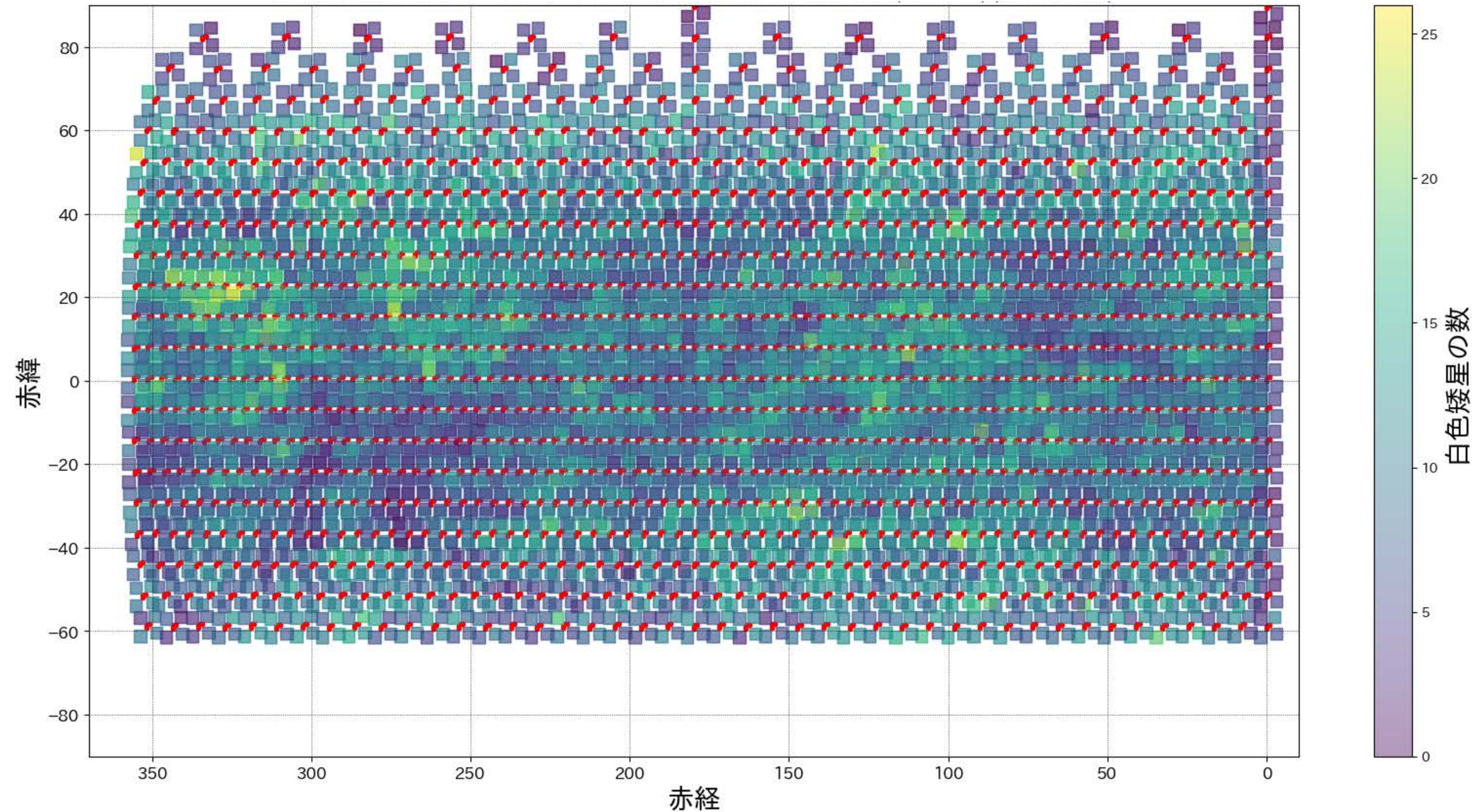
➤ 現在(2025年5月)までに

計 29 夜 で実施 45 視野 約24.5 時間分のデータ
(5/7以降は狭帯域フィルタ観測のため実質約4ヶ月分)

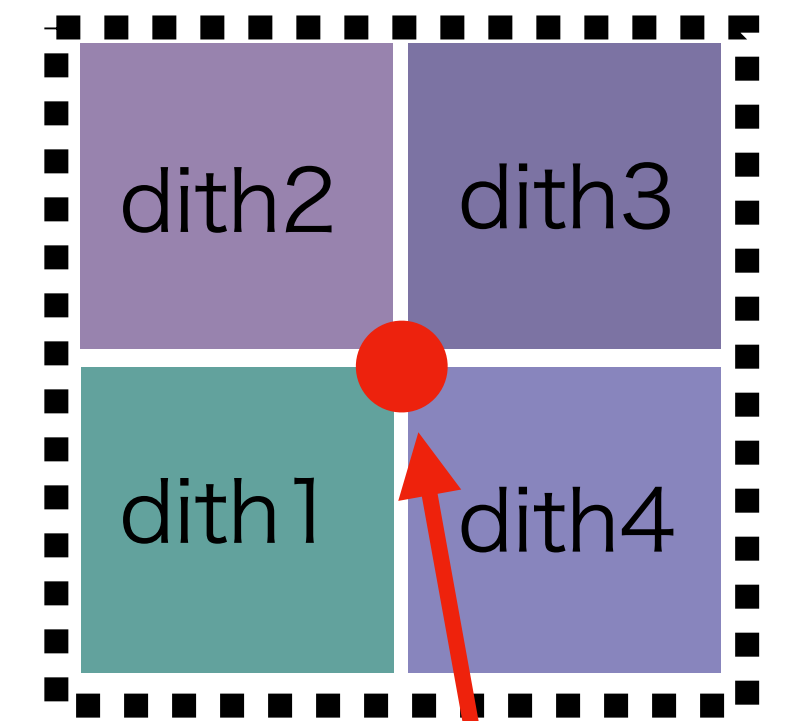
➤ とりあえず白色矮星の多いところから見ている

現在(2025年5月)までに 約 450 WD・hour

各視野あたりの白色矮星数 (<18等)



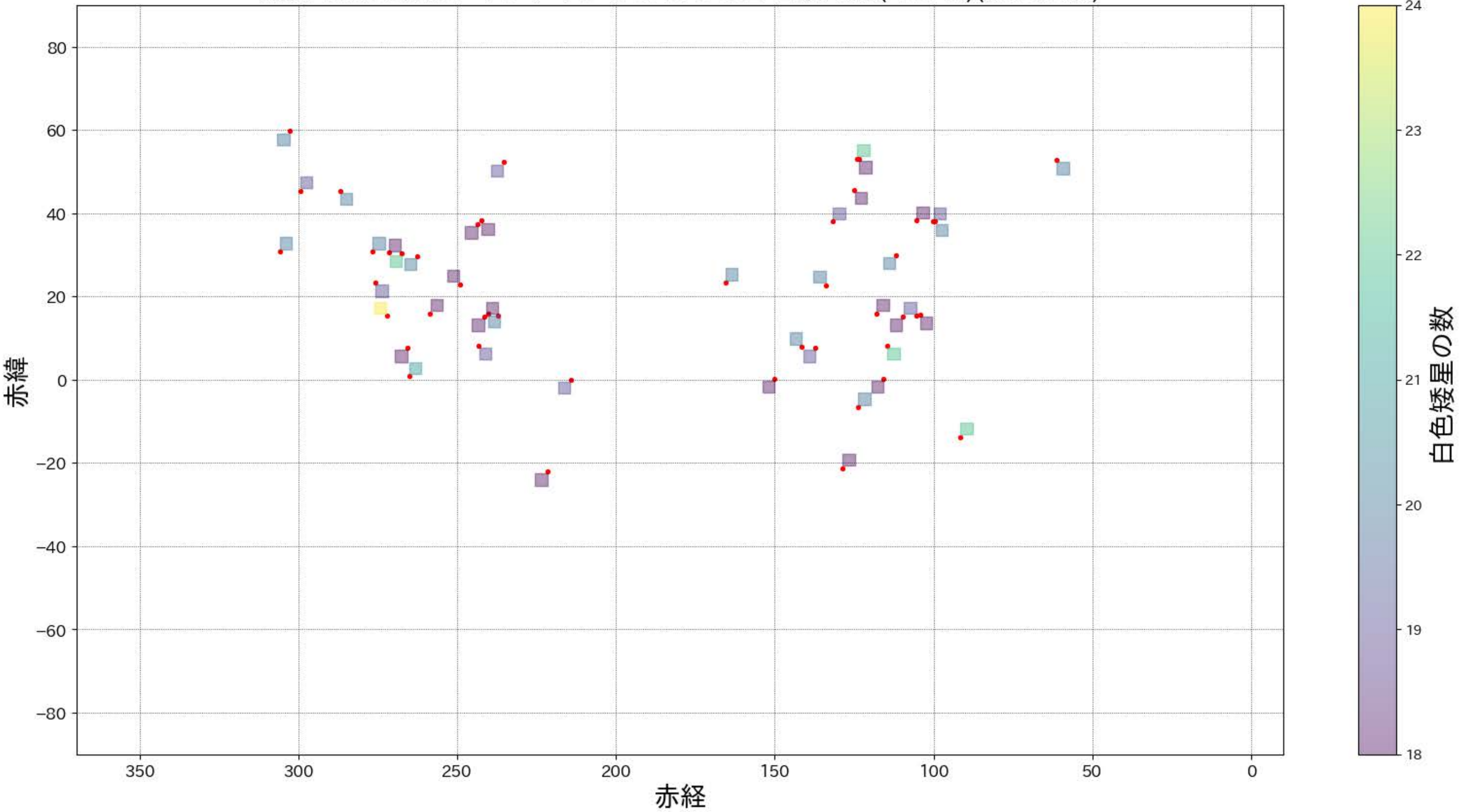
トモエの視野(大体)



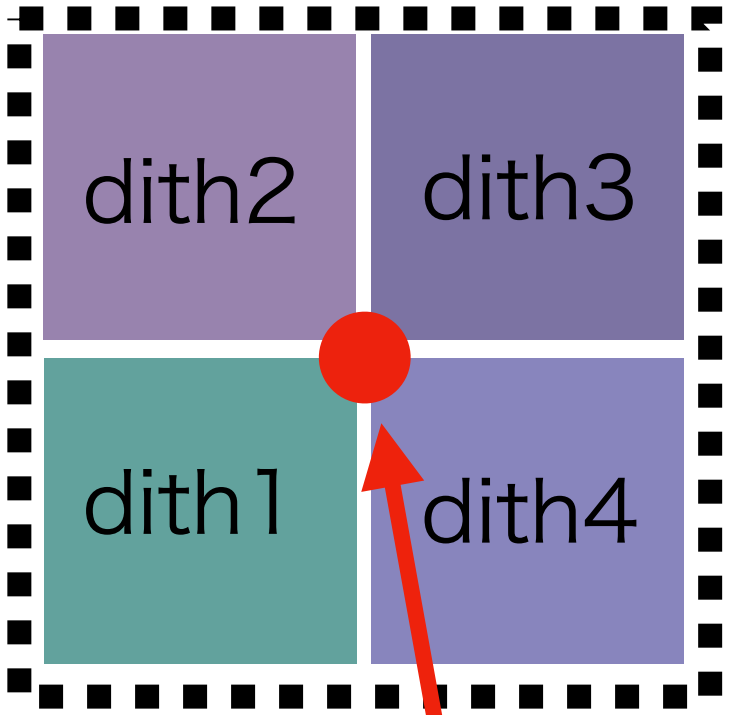
ポインティング中心座標

中心座標の周りに
左下から順に
dith1,dith2,dith3,dith4
を時計回りに便宜上表示
している

2025年5月現在の観測終了天域

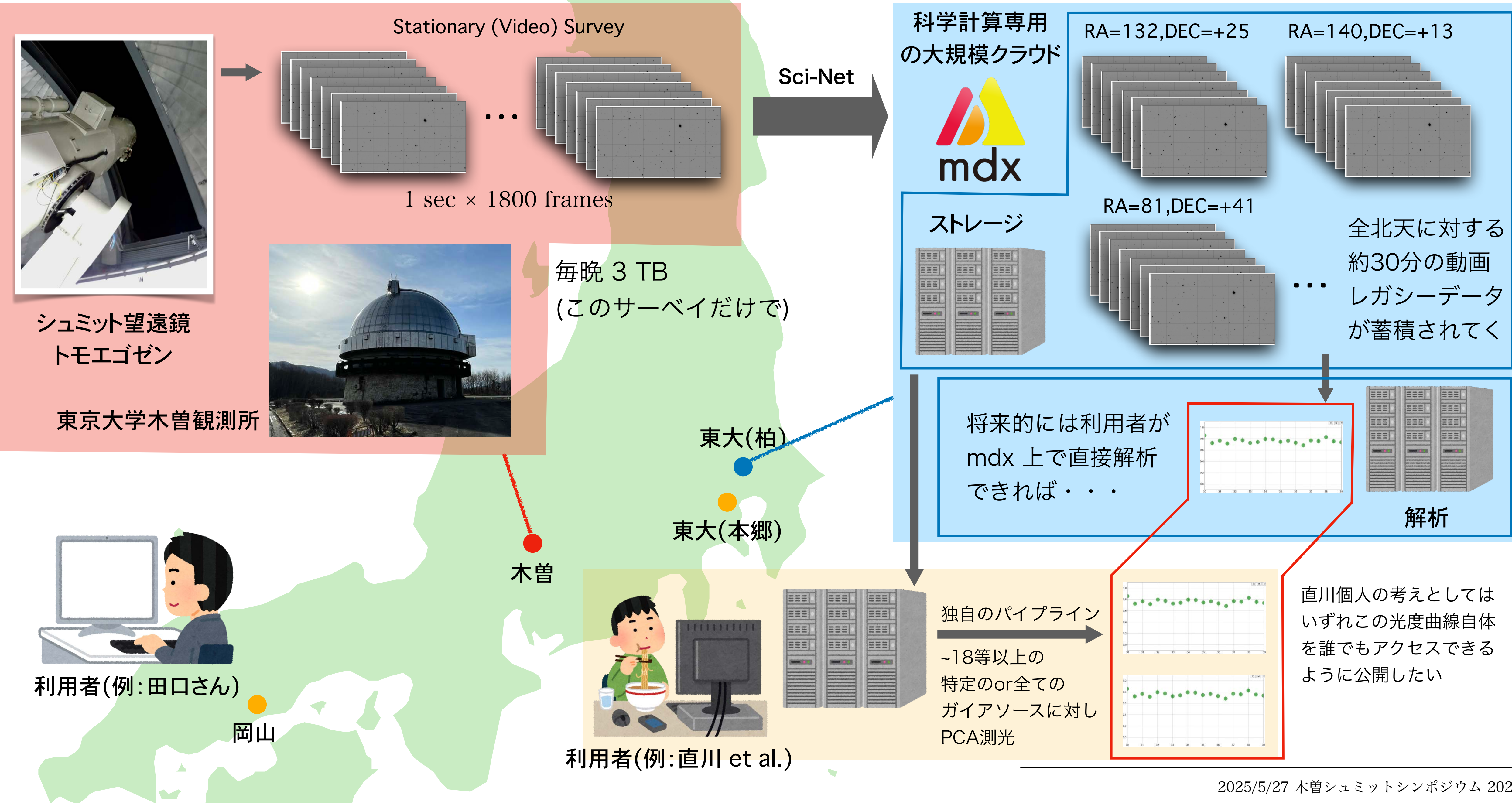


トモエの視野(大体)



ポインティング中心座標

サーベイの現状 (データフロー構想) ⇨ 瀧田さんの講演

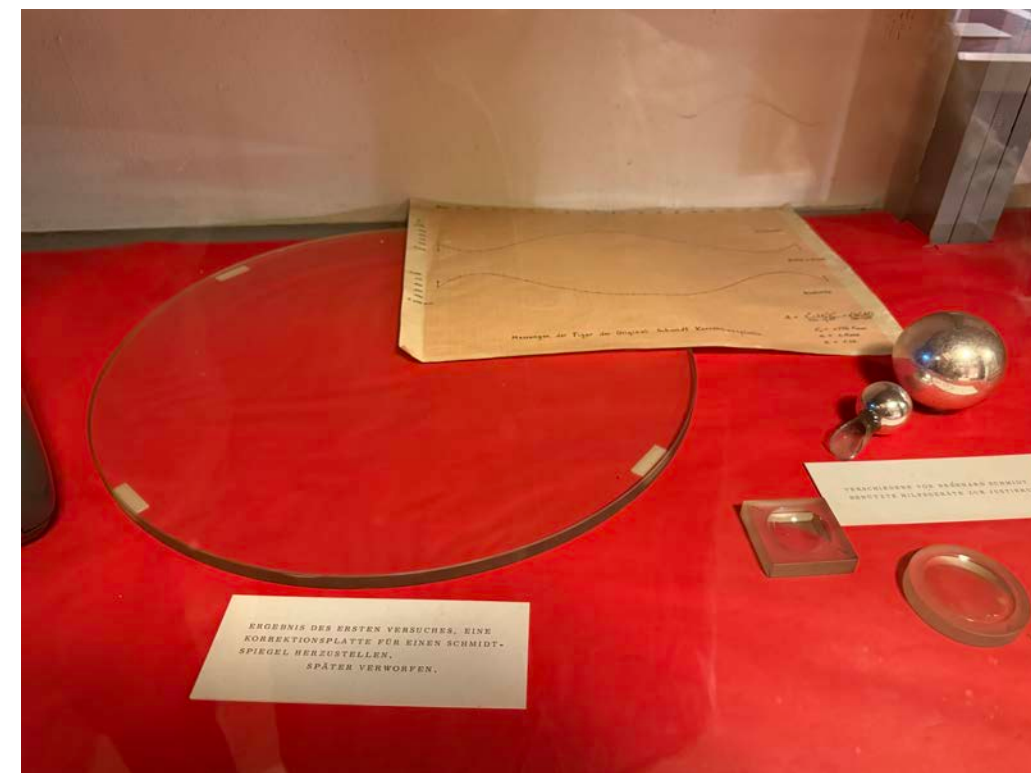


ハンブルク天文台@ハンブルク

ベルンハルト=シュミットがシュミット光学系を発明した地



世界初のシュミットカメラ (1930)



シュミット補正板の試作品

画像クレジット
：ハンブルク天文台

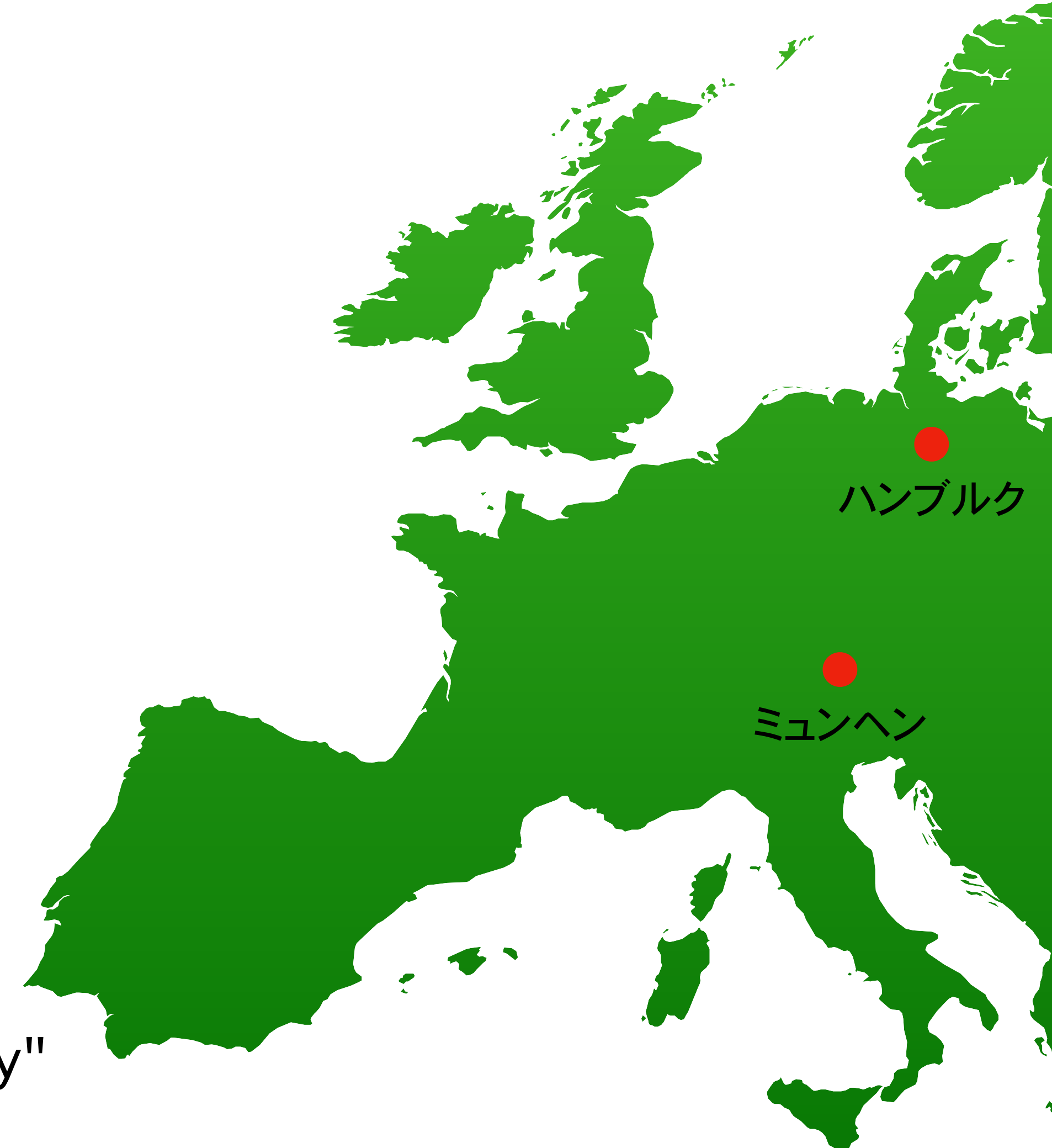
マックスプランク宇宙物理学研究所 (MPA) @ミュンヘン近郊

図書館に・・・

Takase Miyauchi Isobe "Kiso ultraviolet excess galaxy survey"

Miyauchi Isobe Maehara "2nd Kiso ultraviolet excess galaxy survey"

歴史のあるシュミット望遠鏡と最先端の トモエゴゼンを使った本サーベイも
何十年も残るようなレガシーサーベイとしたい！！！！



まとめ

- トモエ全天動画レガシーサーベイ
 - 広視野 × 動画 を活かした長時間の無バイアスモニタ観測
 - 動画データはレガシーデータとして残す
 - 2025年初頭より本格運用中 (ひとまず順調?)
- 白色矮星の系外惑星探索
 - 主系列後の惑星系や恒星の進化を探る上で非常に重要
 - 低温の系外惑星や直接撮像の観点からも非常に興味深い対象
 - 一部すでに観測例も。特に地球型探索ではトモエが世界をリードできる！
- 議論したいこと
 - その他のサイエンス (恒星フレア、白色矮星の光度変動、オールトの雲探索 etc.)
 - サーベイ戦略 (優先的に見たい領域等)
 - データ解析に向けて (mdx へのアクセス、光度曲線の公開など)