

OISTERワークショップ 2024/12/12

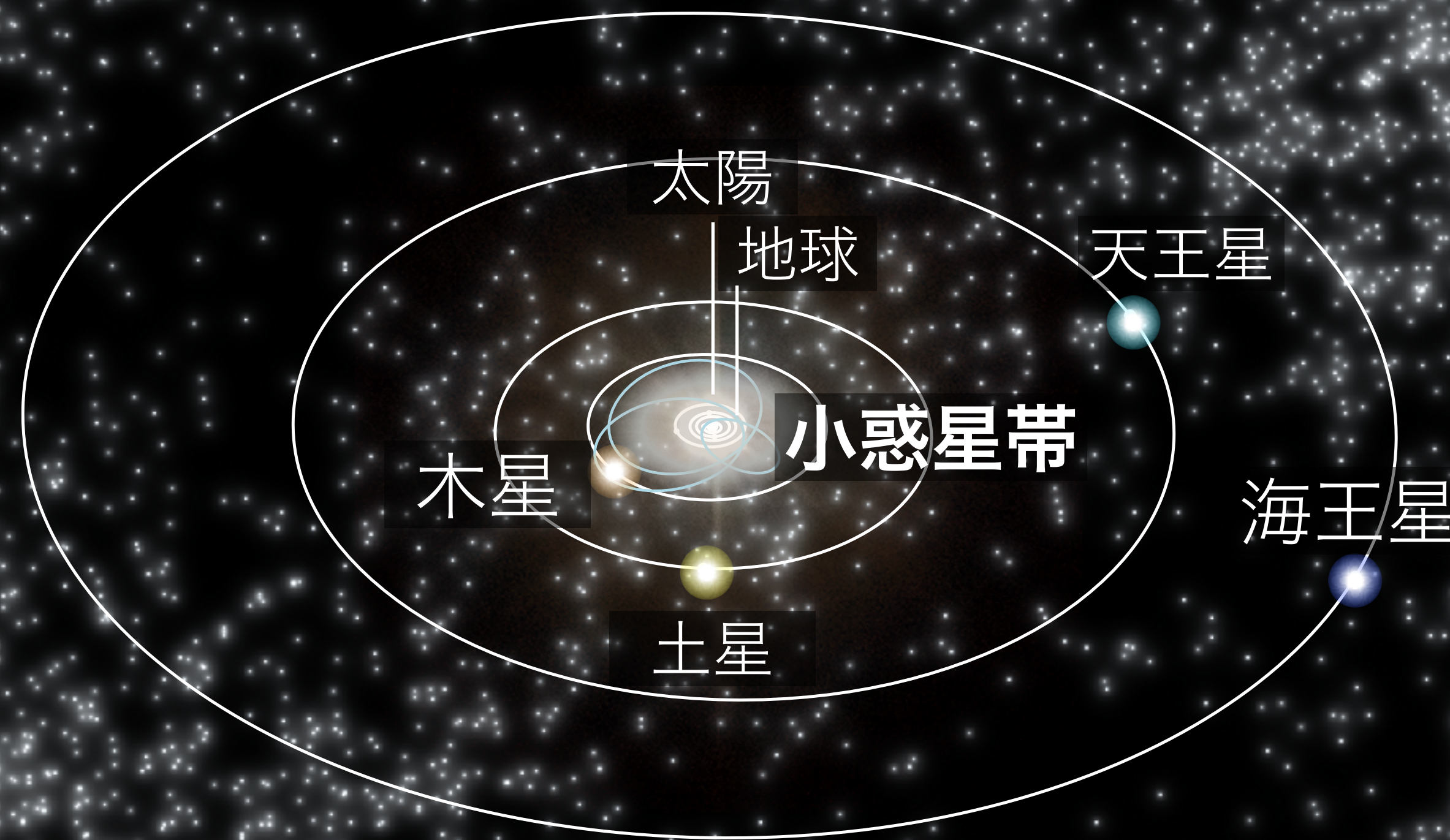
# 小望遠鏡動画天文学はじめ

有松 亘(京都大学)



# 太陽系外縁天体(TNO)

- 太陽系の外側の小天体: 惑星形成の材料『微惑星』の生き残り
  - 地球・太陽から遠方に位置しているため発見・観測が高難易度
- ➔ これまでの観測成果の大半は大望遠鏡・惑星探査機による独壇場



エッジワース・カイパーベルト

30 au

# 現在までに発見されている太陽系外縁天体のサイズ分布



# OASIS

Organized Autotelescopes  
for  
Serendipitous Event Survey

キロメートルサイズのTNOによる恒星の<sup>えんぺい</sup>掩蔽イベントの検出を目的とした動画観測プロジェクト

# 太陽系の果ての小天体を観測する方法: 星を隠す瞬間(掩蔽)<sup>えんぺい</sup>を捉える

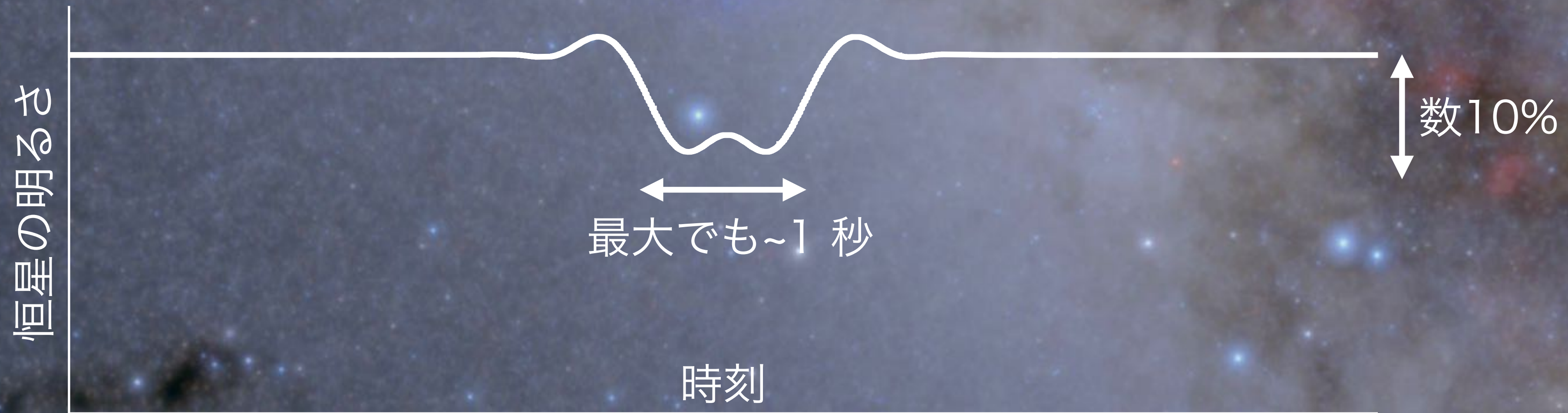
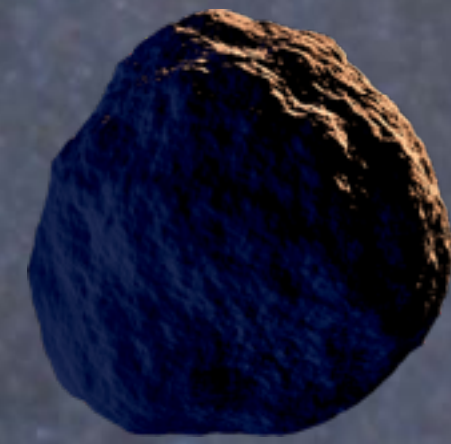
□ 恒星の光度変化シミュレーション: 回折パターンを伴う短時間の光度変化を予想

◎ 極めて短い時間スケール (< ~1 s) の現象: 高時間分解能、『動画』観測が必要

◎ 極めて稀な発生頻度 (< ~10<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> star<sup>-1</sup> @ecliptic): 大量の恒星の同時観測が必要

◎ 再現性なし: 複数の観測装置での同時観測が必要

➡ 複数の観測装置による多数の恒星の動画観測が必要だがアマチュア機材の活用で実現できるのでは…?



# OASES observation systems (Arimatsu et al. 2017): functional overview



□ 民生品の 0.28 m 主焦点光学系 + CMOS カメラ  
-広視野高速撮像を実現

□ 限られたリソースを最大限有効に活用

➡ 総コスト: 1システムあたり~180万円(当時)

# OASES観測地: 宮古島



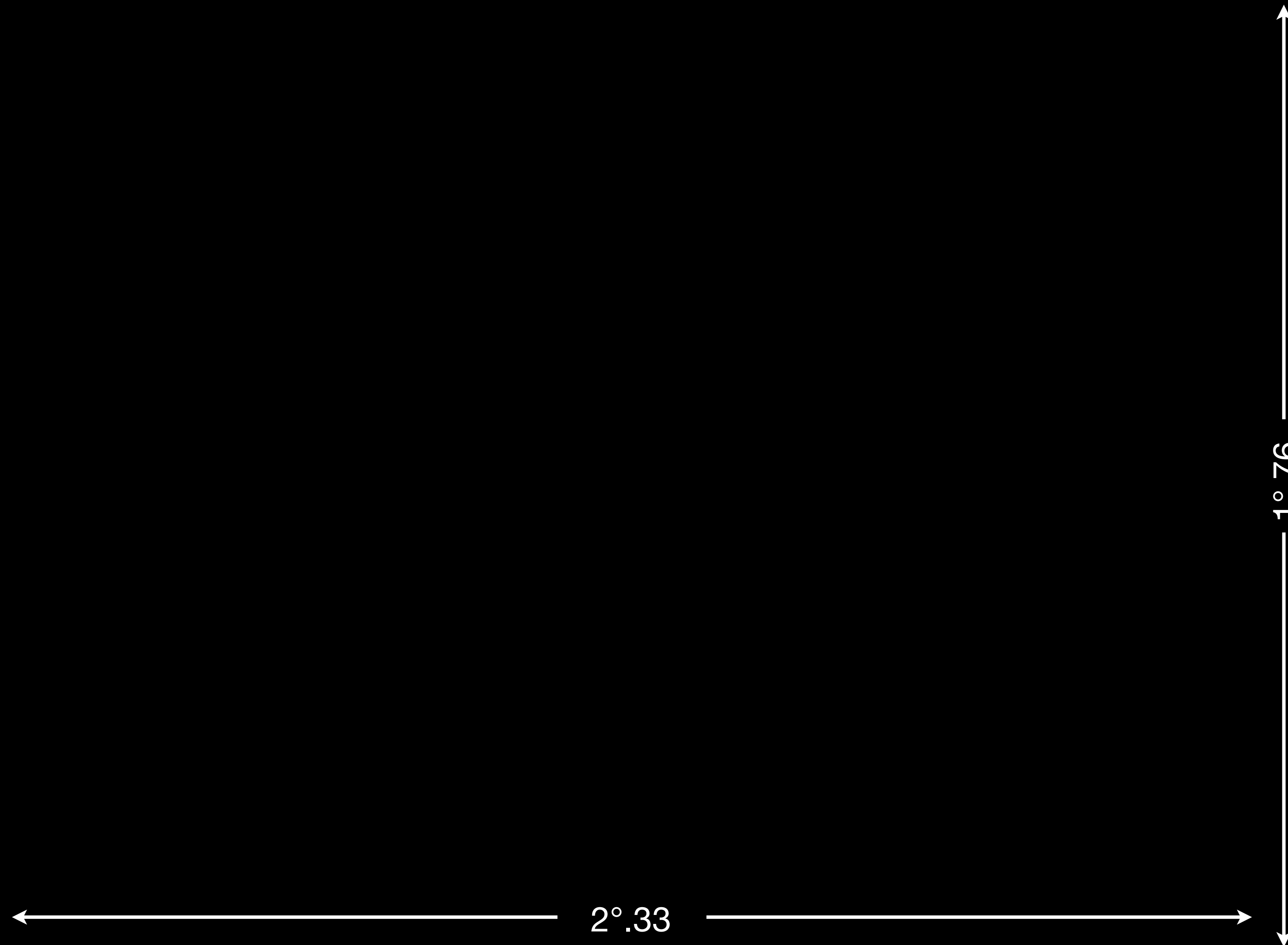
# OASESモニタ観測 @宮古島

- 観測地: 宮古青少年の家
- 施設屋上に2台の観測システムを約40 m離して設置



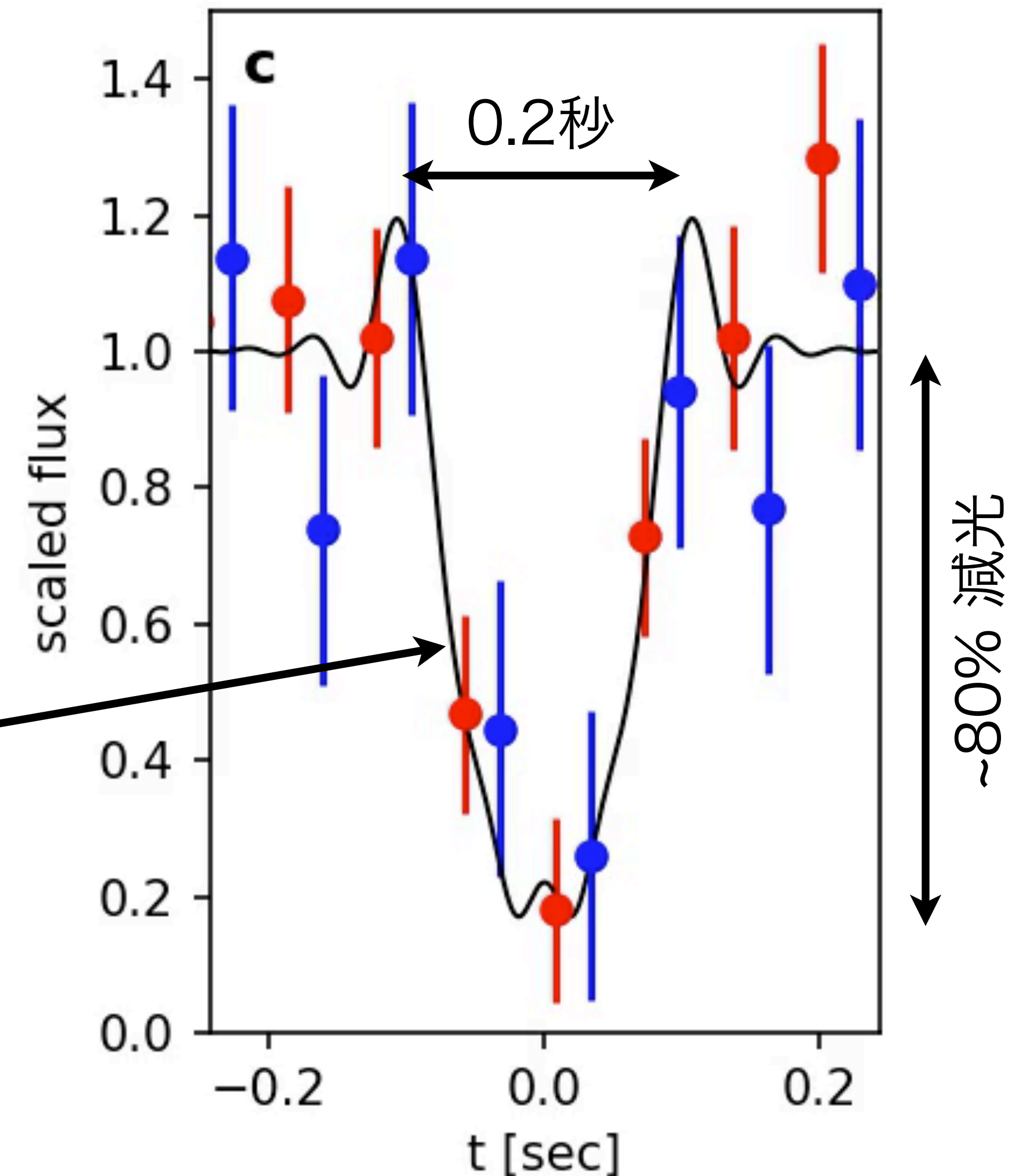
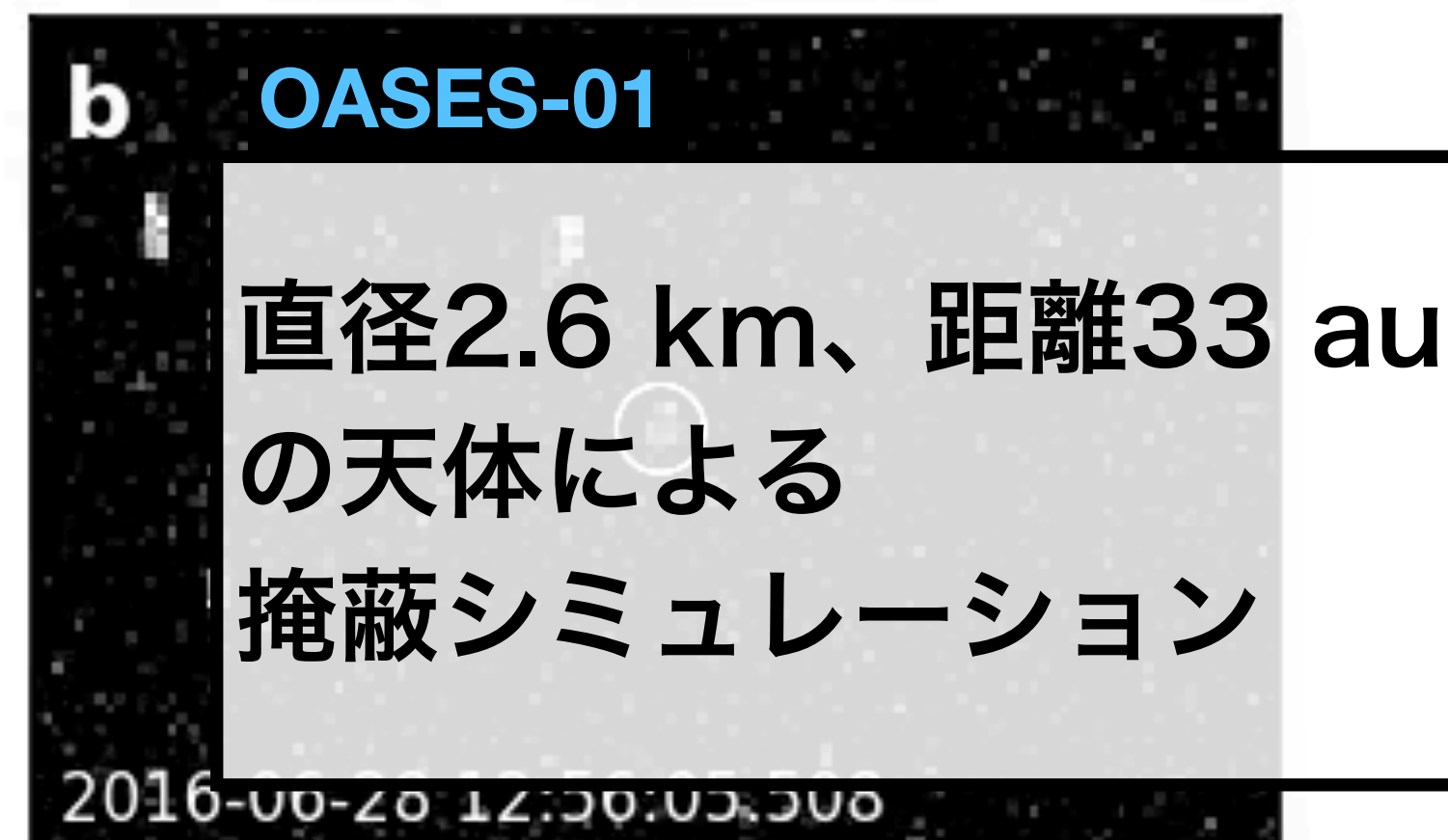
# OASESモニタ観測 @宮古島

- 15.4 Hz cadence sequential images: monitoring of  $\sim 2000$  stars in  $\sim 4 \text{ deg}^2$  observation field
- $\sim 60$  h of imaging data obtained with the two systems simultaneously in the 2016–2017 seasons



## □ The first possible detection of a kilometer-sized TNO

- Flux drop consistent with the theoretical light curve of occultation by a 2.6 km diameter Kuiper-belt object
- Suggestive of abundant small KBOs ( $\sim 6 \times 10^5 \text{ deg}^{-2}$  for  $r > 1.2 \text{ km KBO}$ )



# OASES観測システムのアップグレード: より高効率な掩蔽モニタ観測を目指して

□ 現時点で発見されている掩蔽イベント候補はわずか一例

## ➡ 観測システムのアップグレードを実施

Arimatsu et al. 2024b

- 旧システムの光学系を活用
- 大フォーマット・高量子効率・低ノイズなCMOSセンサを採用
- テスト観測: **9,300恒星の同時動画観測に成功**



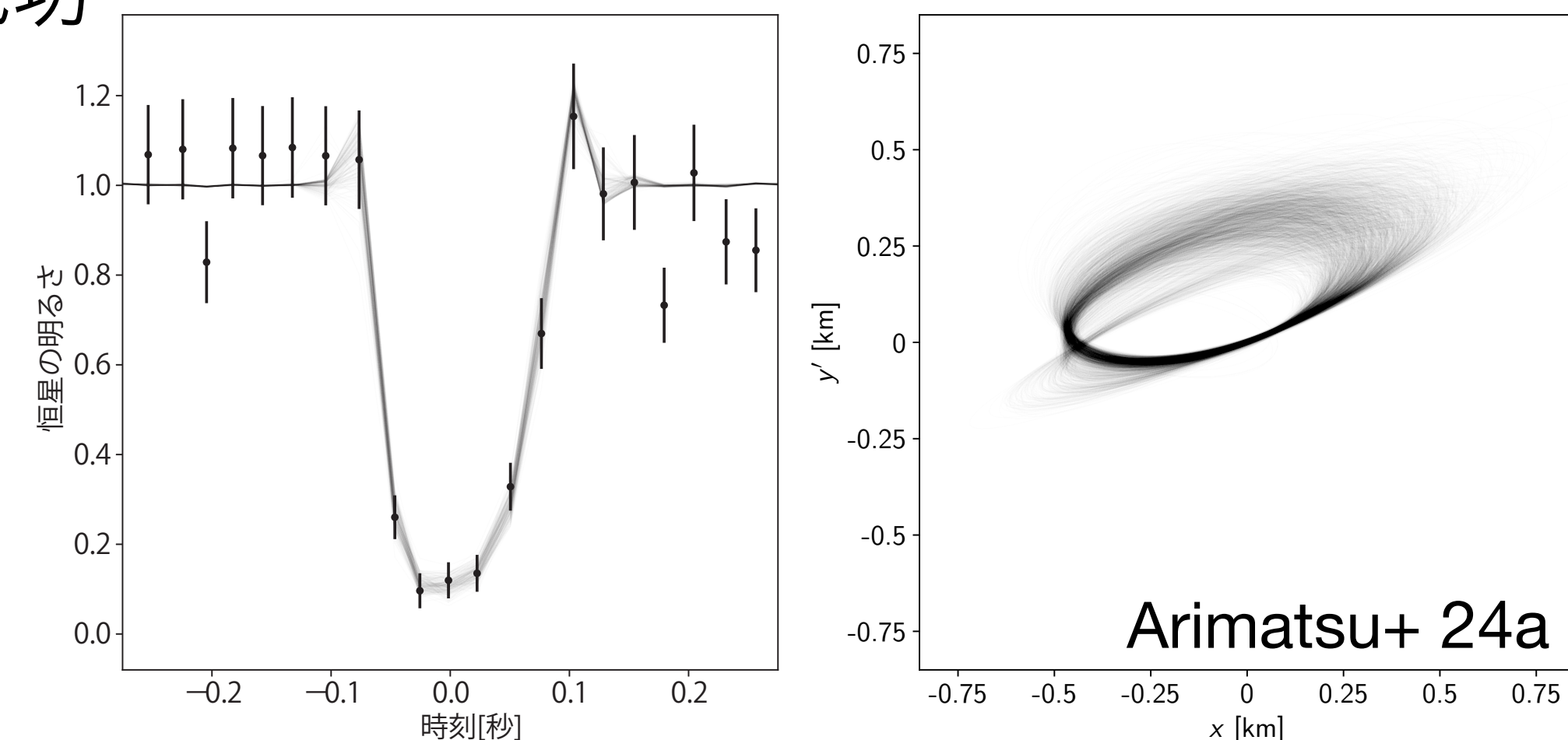
□ 光度曲線解析パイプライン**DOUSHITE**の開発

Arimatsu et al. 2024a

- 限られた**掩蔽観測データから影のサイズ・形状の推定に成功**

□ 2021年から沖縄で試験観測+モニタ観測を実施予定だった

DOUSHITEを用いたTorifuneの形状推定



しかし…

□現時点で発見されている掩蔽イベント候補はわずか一例

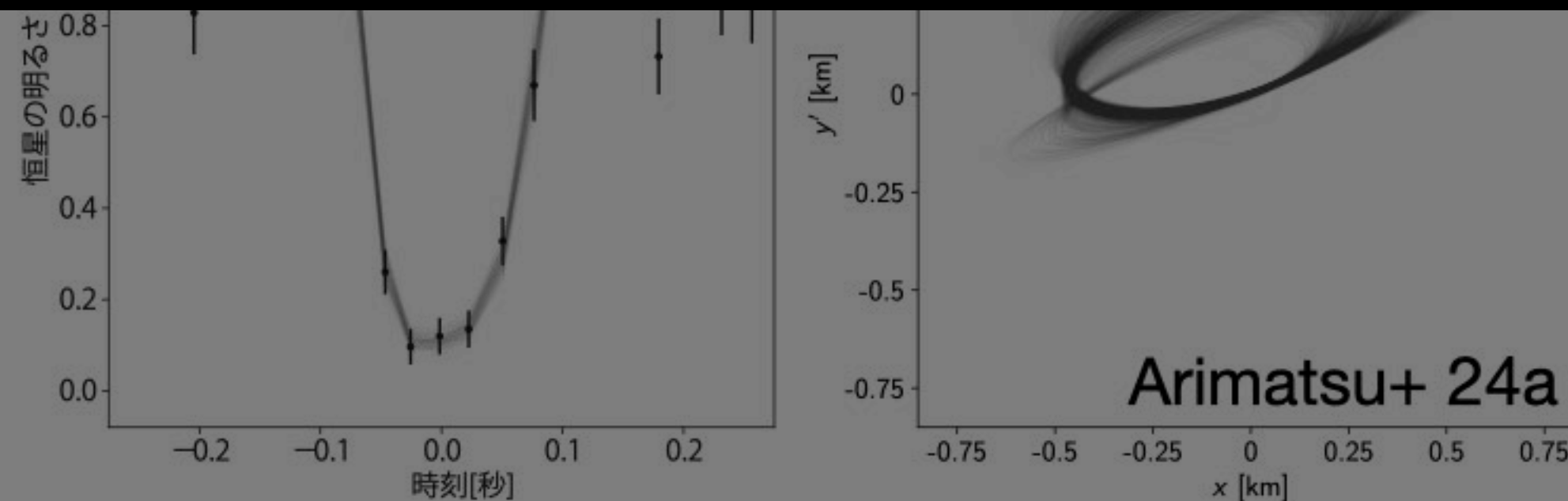
# 新型コロナウイルス(covid-19)感染拡大のため 2021年夏季掩蔽モニタ観測は中止に……

• テスト観測: 10,000恒星の同時動画観測に成功

□光度曲線解析パイプラインDOUSHITEの開発

Arimatsu et al. 2024a

## 代替の動画観測プロジェクト: PONCOTS



つまり… (日本天文学会・京都大学合同記者会見のようす)

**NIET**

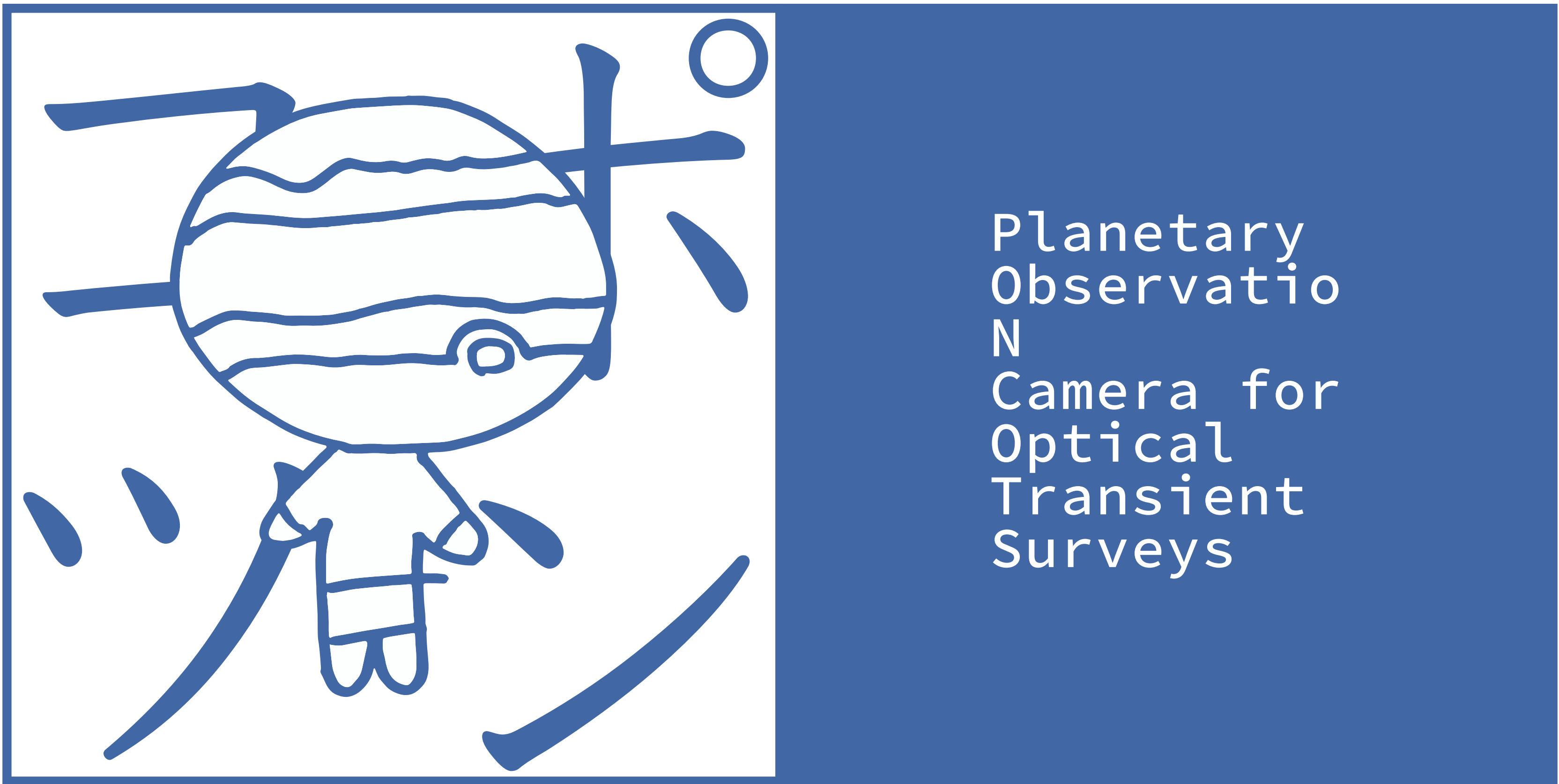
**今世紀最大の“火球”を観測**

**木星への小天体衝突**

**有松 巨**  
特定助教

京都大学

**新型コロナ禍で暇だったから**



Planetary  
Observatio  
N  
Camera for  
Optical  
Transient  
Surveys

木星への微小天体衝突閃光の検出を目的とした動画観測プロジェクト

# PONCOTSの目的: 木星での火球『衝突閃光』を『狙って』観測する

□2010年以降: 木星表面で小天体による衝突閃光が相次いで発見

Hueso et al. 2010, 2013, 2018

- ・木星表面でごく稀に発生する、継続時間1—2秒の光点
- ・衝突天体は太陽系外縁部から供給されるメートルサイズのTNO

Levison et al. 2000

➡**直接・掩蔽観測不可能な太陽系外縁部の極小TNOの『観測』を実現**

□地上観測された過去7例の閃光は全てアマチュア天文家によって偶然発見

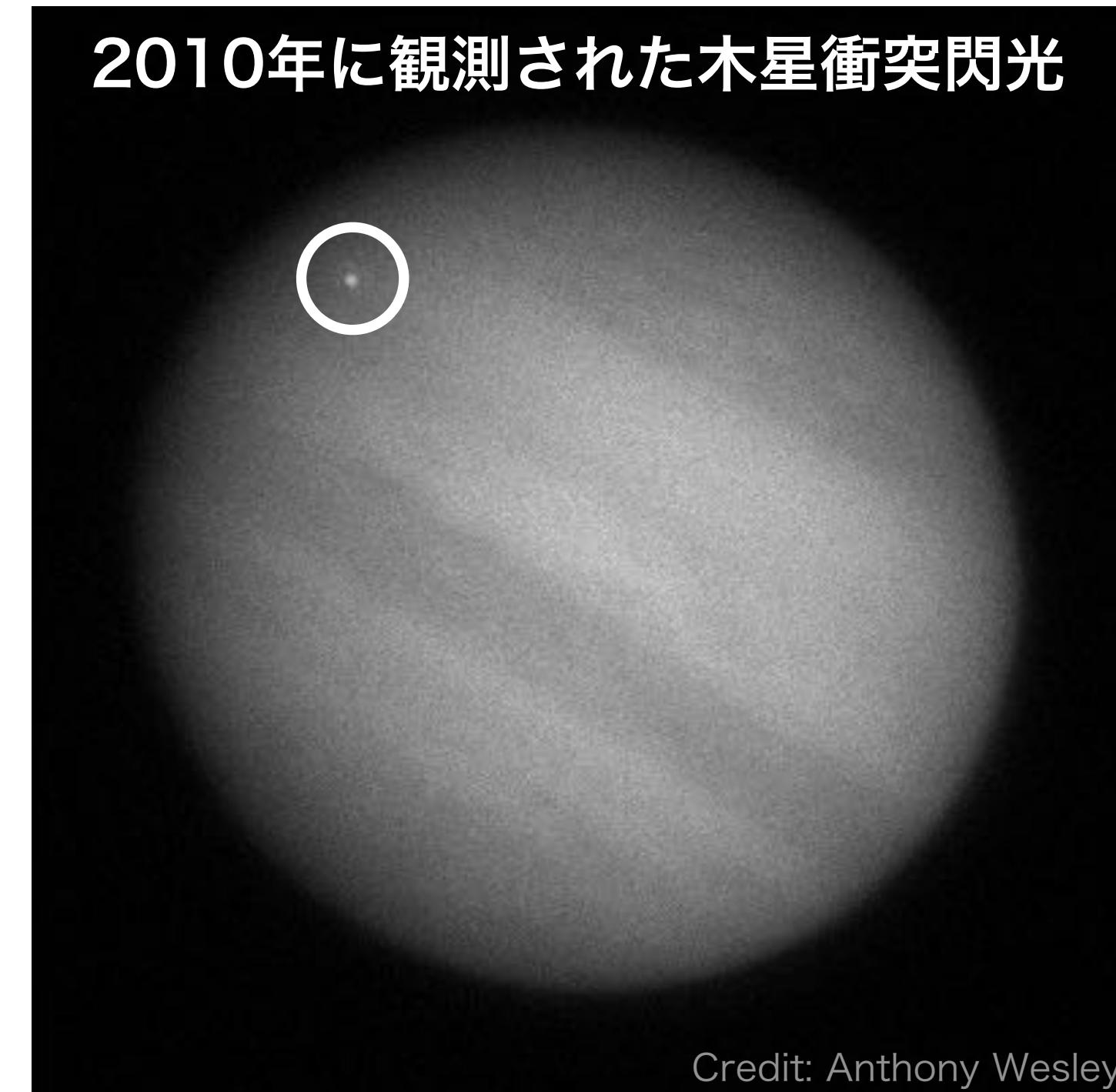
➡得られる情報は限定的

★木星衝突閃光は極めて短い時間しか発生しない、極めて稀な現象

➡OASESで培った経験を活かし、

小望遠鏡による閃光検出に特化した長時間モニタ観測の実施

2010年に観測された木星衝突閃光



Credit: Anthony Wesley

# Planetary Observation Camera for Optical Transient Surveys (PONCOTS) 観測システム

## □ 木星閃光観測に特化した超小型動画観測システム

- 口径0.28 mのアマチュア向け望遠鏡を活用
- ダイクロイックミラーを介して入射光を分割
- 3台のモノクロCMOSビデオカメラを接続、最大3波長での同時動画観測を実現
- 総開発費用: 約140万円

## □ 京都大学吉田キャンパス(京都市左京区)施設屋上に設置

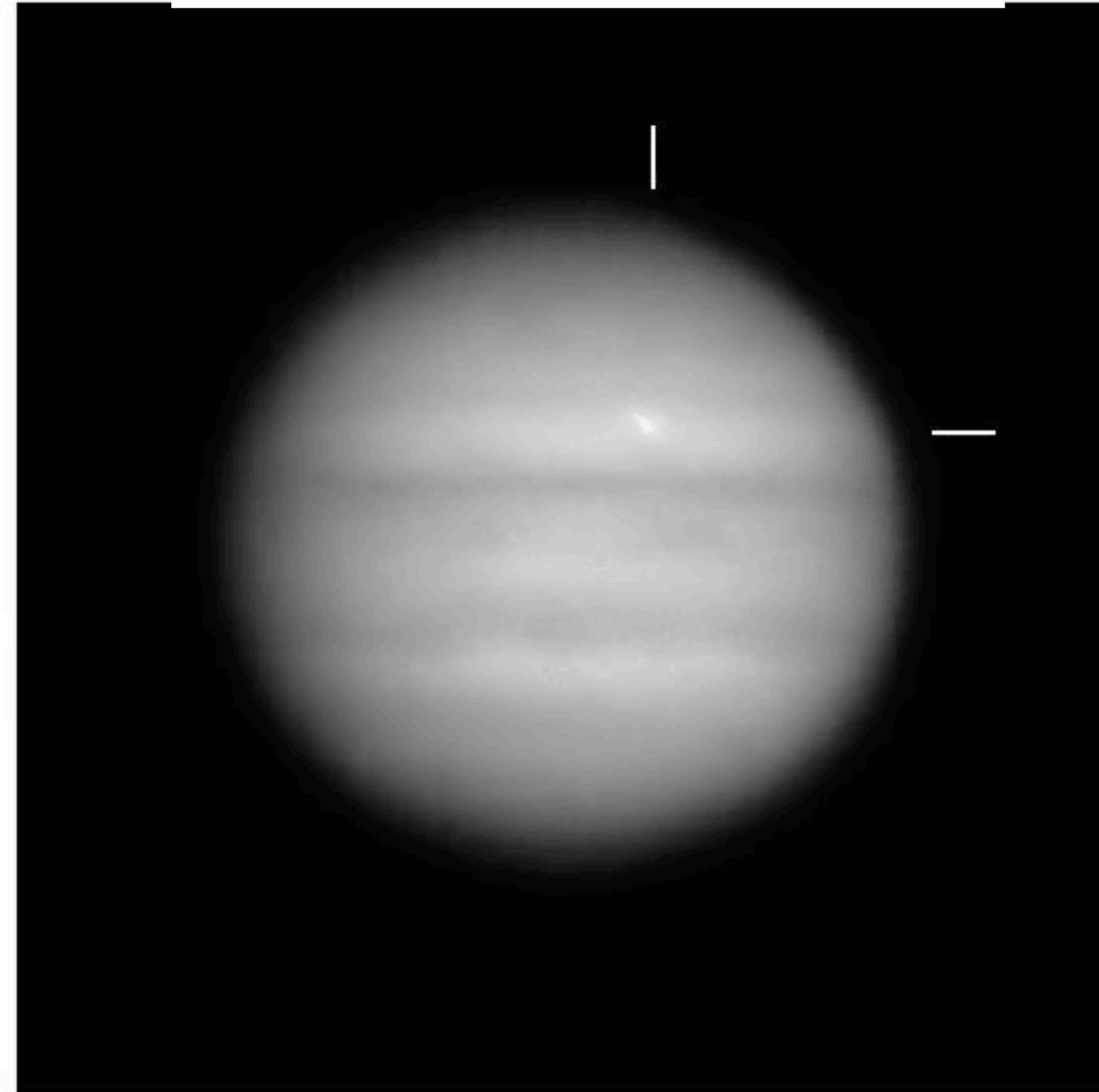
## □ 2021年9月からモニタ観測を実施



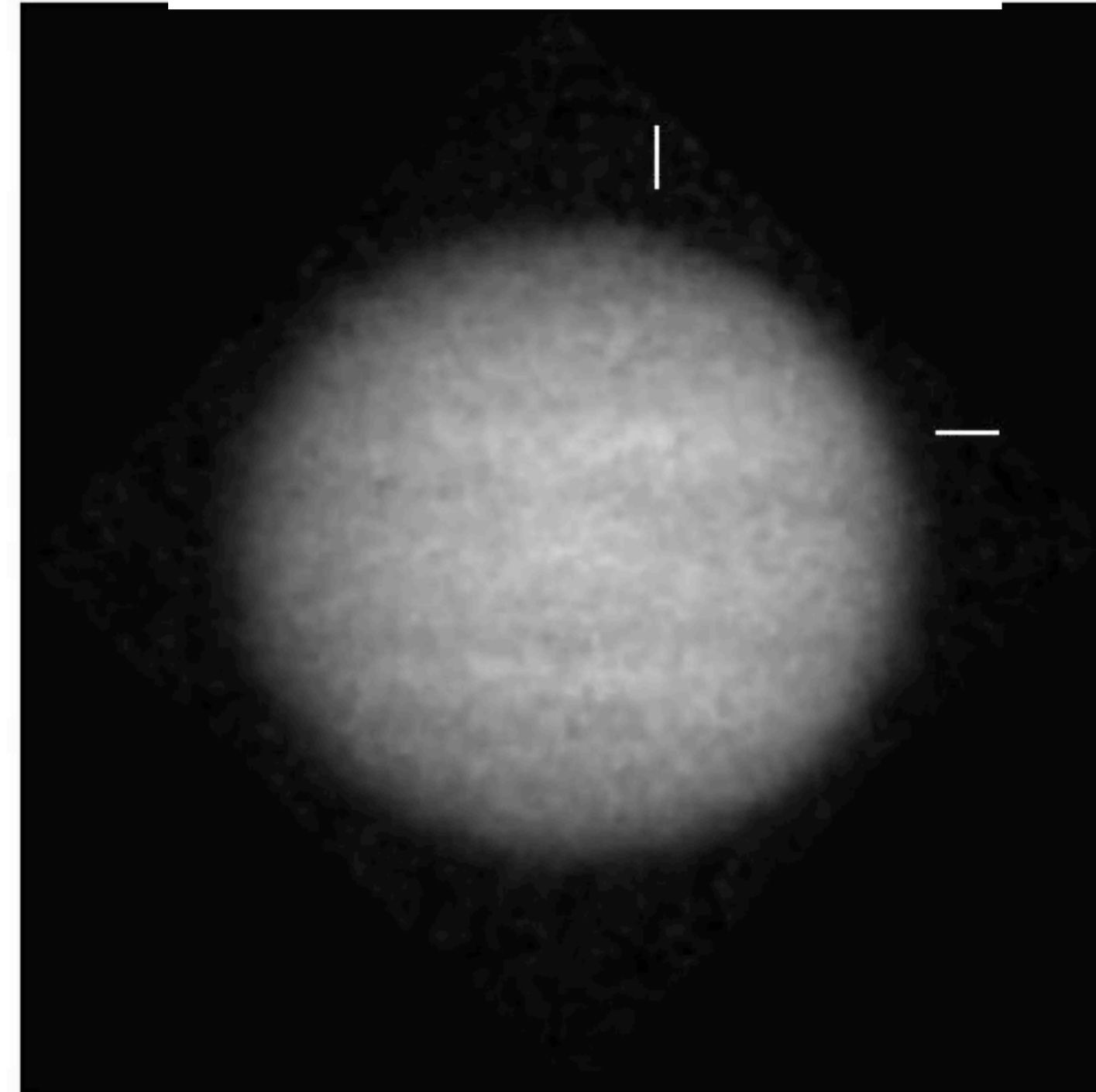


# 2021年10月15日22時24分(日本時間) PONCOTSが衝突閃光を発見!

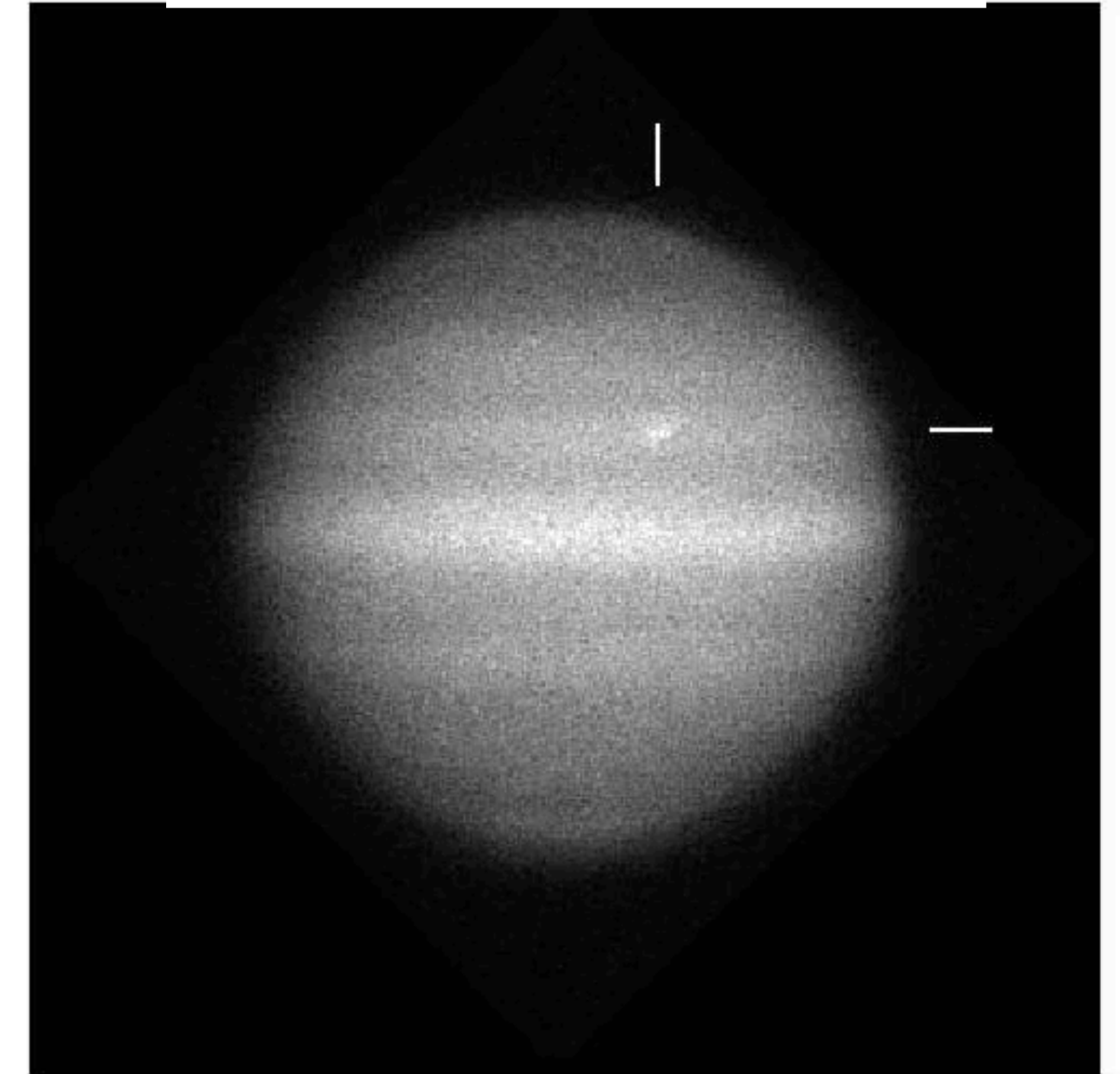
V バンド  
(波長 505—650 nm)



Gh バンド  
(波長 680—840 nm)



CH<sub>4</sub> バンド  
(波長 880—900 nm)

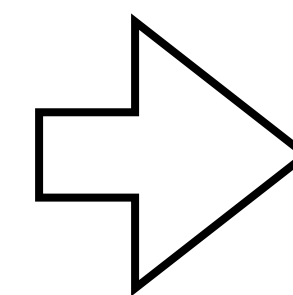
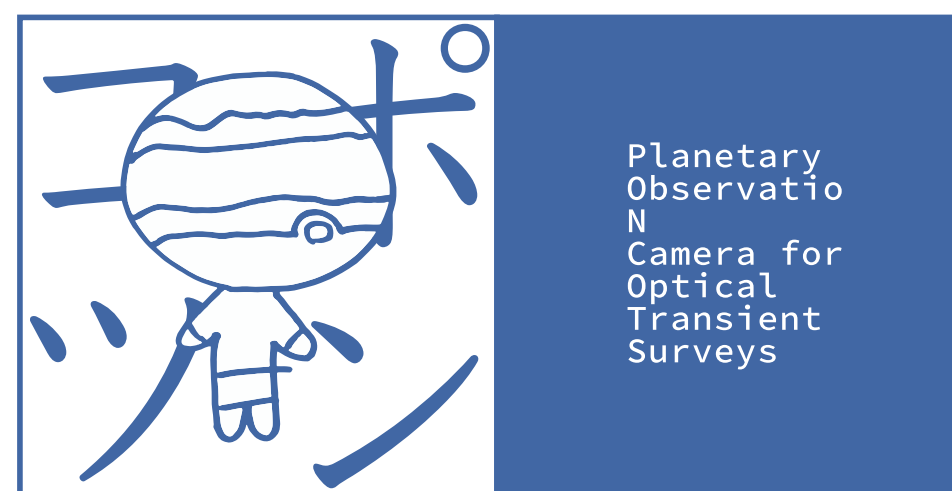
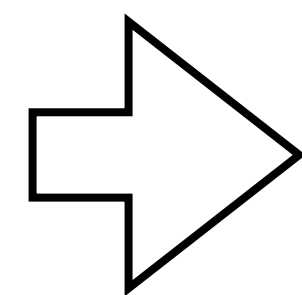


t = -0.65 s

□ **史上初めて『狙った』観測による閃光発見に成功** Arimatsu et al. 2022a

- 多色(3波長)での閃光の動画観測を初めて実現

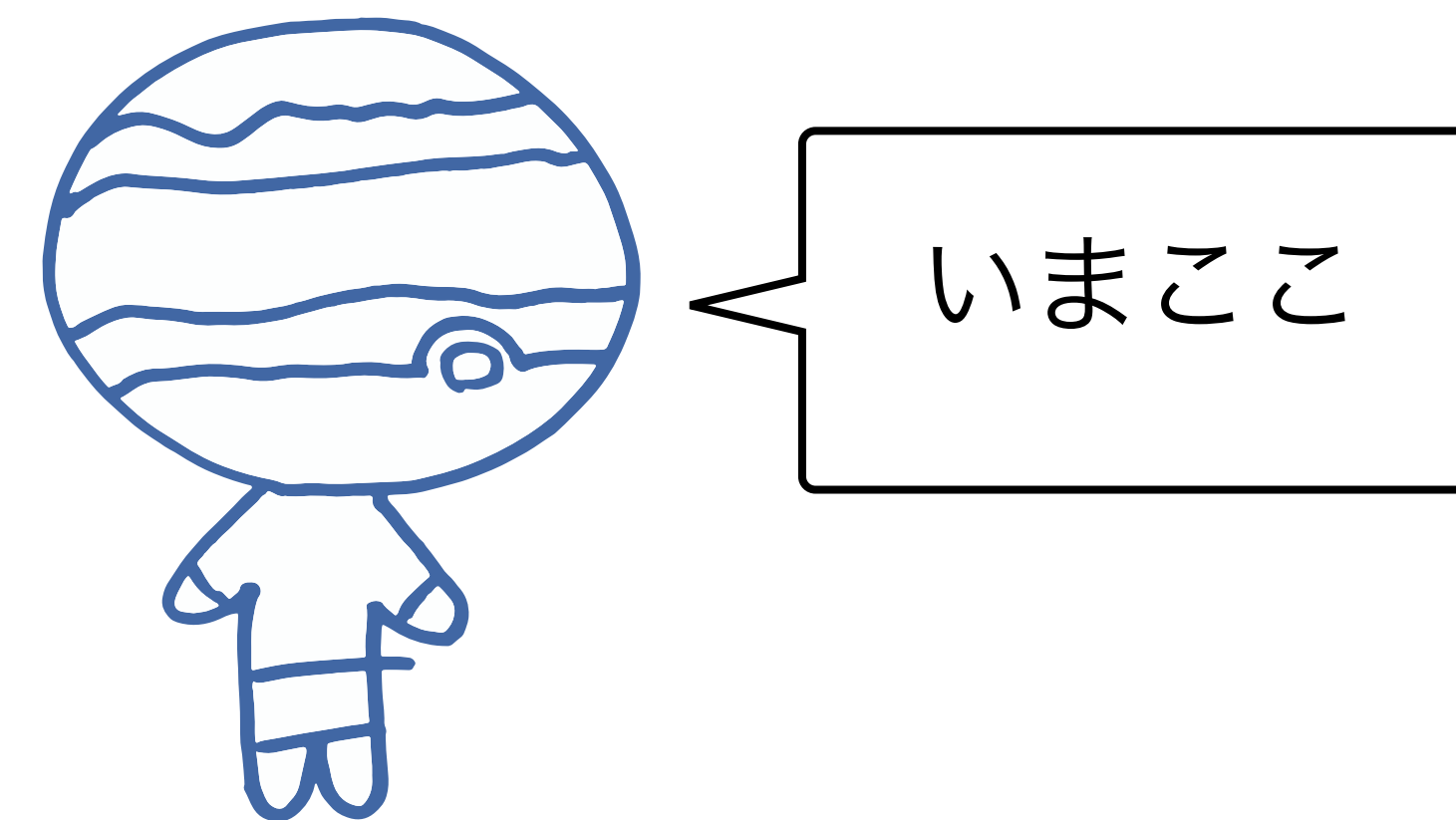
✓ 詳細は論文(Arimatsu et al. 2022a, 2023a, 2023b)、プレスリリースなどをご参照ください…



未知の太陽系外縁小天体  
による恒星掩蔽モニタ観測

未知の太陽系外縁微小天体  
による木星衝突閃光モニタ観測

既知の太陽系外縁大型天体  
による恒星掩蔽キャンペーン観測



# 閑話休題: 『既知TNO』による恒星掩蔽(恒星食)観測の意義

□ 既知TNOによる恒星掩蔽イベントのキャンペーン観測

➡ **天体のサイズ、形状、衛星、環、大気の解明に大きく貢献**

□ 現在~2030年代前半: 掩蔽観測環境が劇的に変化

- Gaiaカタログの改訂により掩蔽予報精度が大幅に向上

- LSSTを用いたTNO搜索により既知天体数が増加見込み

➡ **太陽系外縁部の描像が過去前例のない速度で解明される時代へ**

➡ **光赤外線天文学大学間連携 (OISTER)の観測提案枠**

+ 国際掩蔽観測者協会東アジア (IOTA/EA) の枠組みを利用し、

TNO恒星掩蔽キャンペーン動画観測を実施

# TABASCO

Trans-neptunian Atmospheres and Belts Analysis through  
Stellar-occultation Coordinated Observations

既知のTNOによる恒星の<sup>えんぺい</sup>掩蔽イベントの詳細研究を目的とした動画観測キャンペーン

# 太陽系外縁天体(TNO)の『大気』

□TNO表面・内部の高揮発性分子種氷が大気生成する可能性  
( $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ , ...)

- 太陽熱による表面氷の昇華
- 氷火山
- 天体衝突にともなう気化

→TNOの形成領域・軌道進化を示すトレーサー Brown 2012

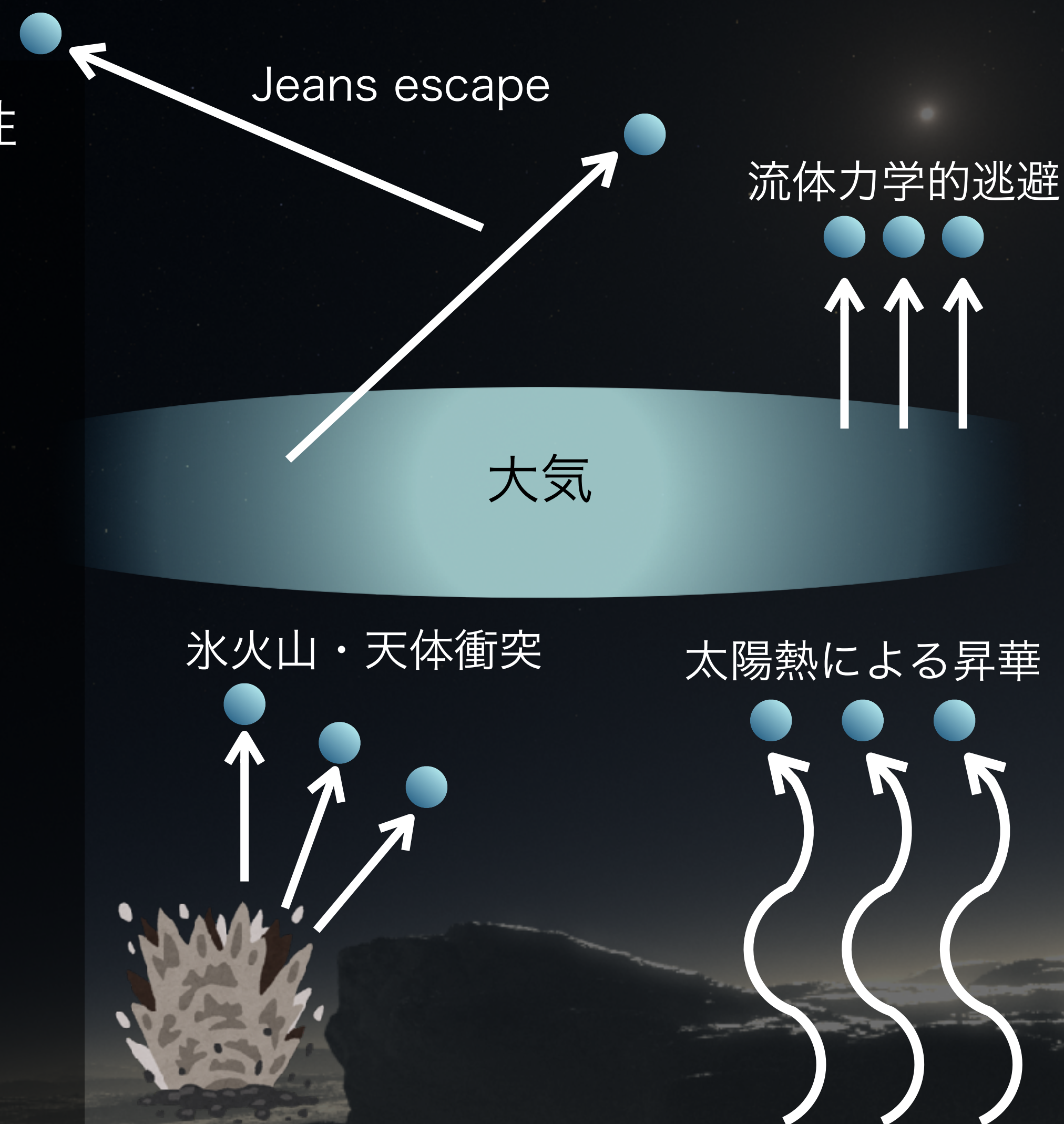
□大気を構成する分子種は(最終的に)宇宙空間に散逸

- Jeans escape (熱的逃避)
- 流体力学的逃避

→散逸過程は形成後のTNOの熱史に強く依存  
Schaller & Brown 2007

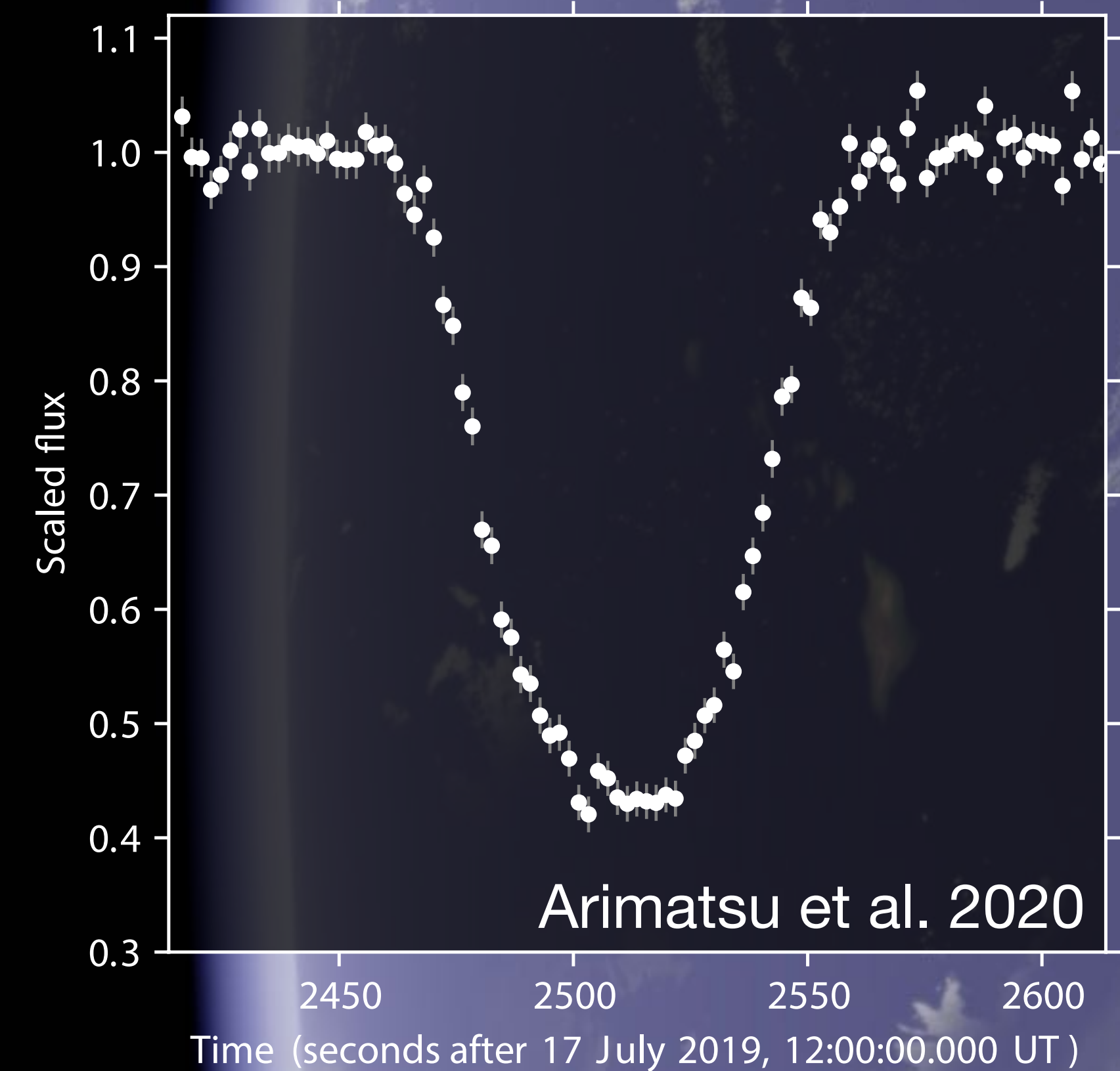
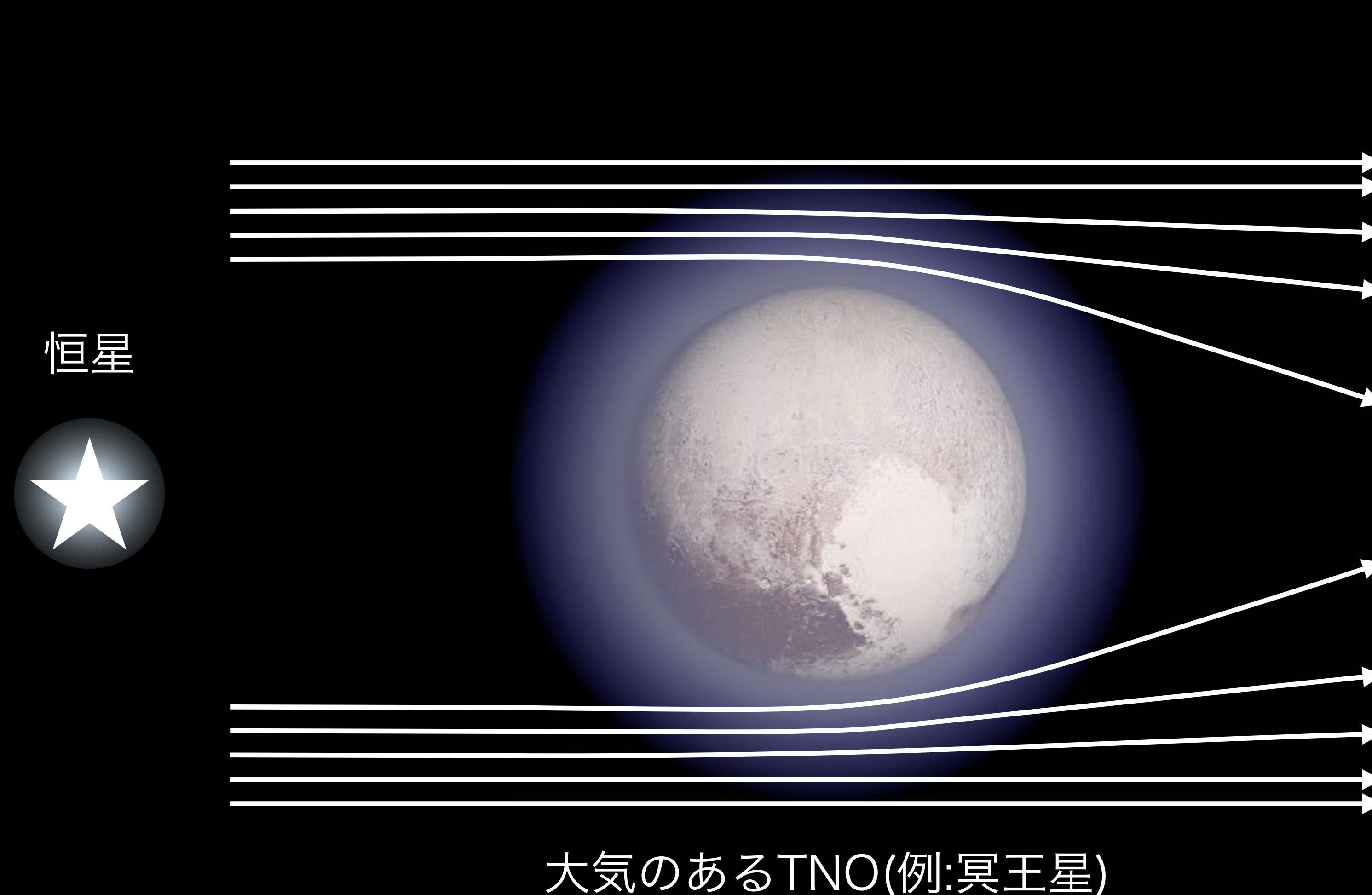
→大気の観測:

**TNOの起源、軌道進化、表面物理・化学史の解明に貢献**



# 掩蔽観測によって明らかになる太陽系外縁天体(TNO)の大気

- 恒星掩蔽の際の屈折現象によって恒星潜入・出現時の光度が緩やかに変動
- ➔ 直接観測困難なTNOの大気の検出・詳細研究に利用
  - 冥王星では掩蔽観測によって大気発見 Hubbard et al. 1988, Elliot et al. 1989



# TNO掩蔽観測キャンペーンの必要性

- 大気が存在が確認されているTNOは冥王星のみ
- 大気圧の上限値が計測されたTNOは6天体のみ  
→ **大気のあるTNOは本当に冥王星だけなのか？**
- 統計的な議論を進めるためにはより多くのTNOで大気の探索を実施する必要

## □現状までの進捗状況

天体 イベント発生日	観測装置	観測成否	減光イベント観測成功
2004 UX10 2023-09-30	Seimei/TriCCS, Kiso/Tomo-e, Pirika/MSI	× (悪天候)	-
2015 MQ204 2023-10-24	Seimei/TriCCS, Kiso/Tomo-e, Pirika/MSI	△ (Tomo-eのみ成功)	×
2002 XW93 2023-11-09	Seimei/TriCCS, Kiso/Tomo-e, Pirika/MSI	× (悪天候)	×
1995 SM55 2023-12-20	Kiso/Tomo-e, Pirika/MSI	× (悪天候)	-
<b>2002 XV93 2024-01-10</b>	<b>Kiso/Tomo-e, SoCoSoCo PONCOTS</b>	○	○
1999 DE9 2024-03-09	(OISTER装置は稼働せず)	○	○
2002 AW197 2024-05-10	Seimei/TriCCS, Kiso/Tomo-e, Murikabushi/MITSuMe	○	○



# Occultation by 2002XV93 (2024-01-10)

## □ (612533) 2002 XV93

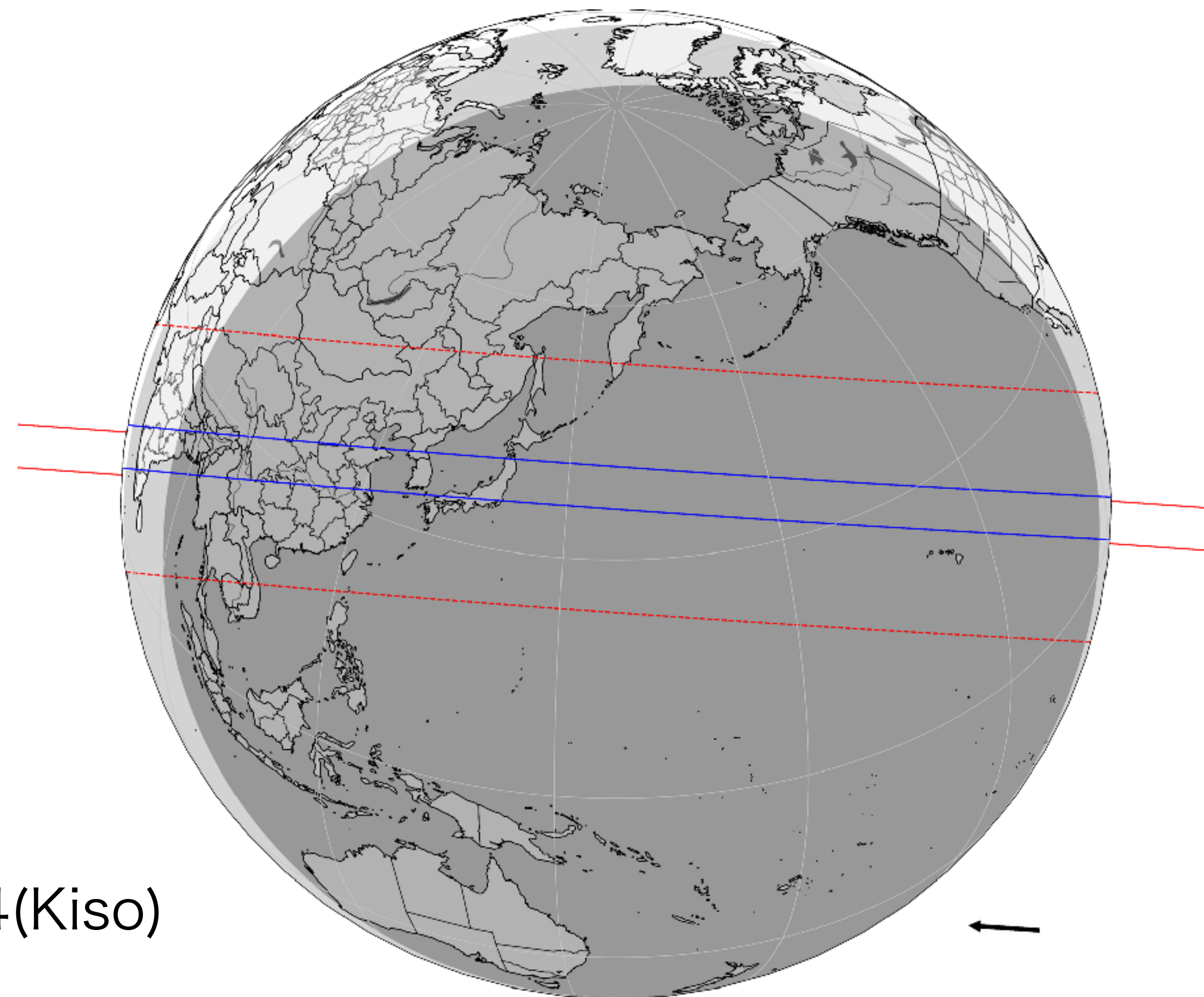
- 冥王星族のカイパーベルト天体
- $a = 39.4 \text{ au}$ ,  $e = 0.13$ ,  $i = 13.3^\circ$
- 赤外観測による推定直径:  $549^{+71}_{-73} \text{ km}$

Vilenius et al. 2012

- **過去に掩蔽観測成功例なし**

## □ 2024年1月10日 掩蔽イベント

- 恒星: Gaia G mag ~ 15.8
- 予測掩蔽中央時刻(JST): 2024-01-10 22:14(Kiso)
- 本体による掩蔽継続時間: 最長21.8 s

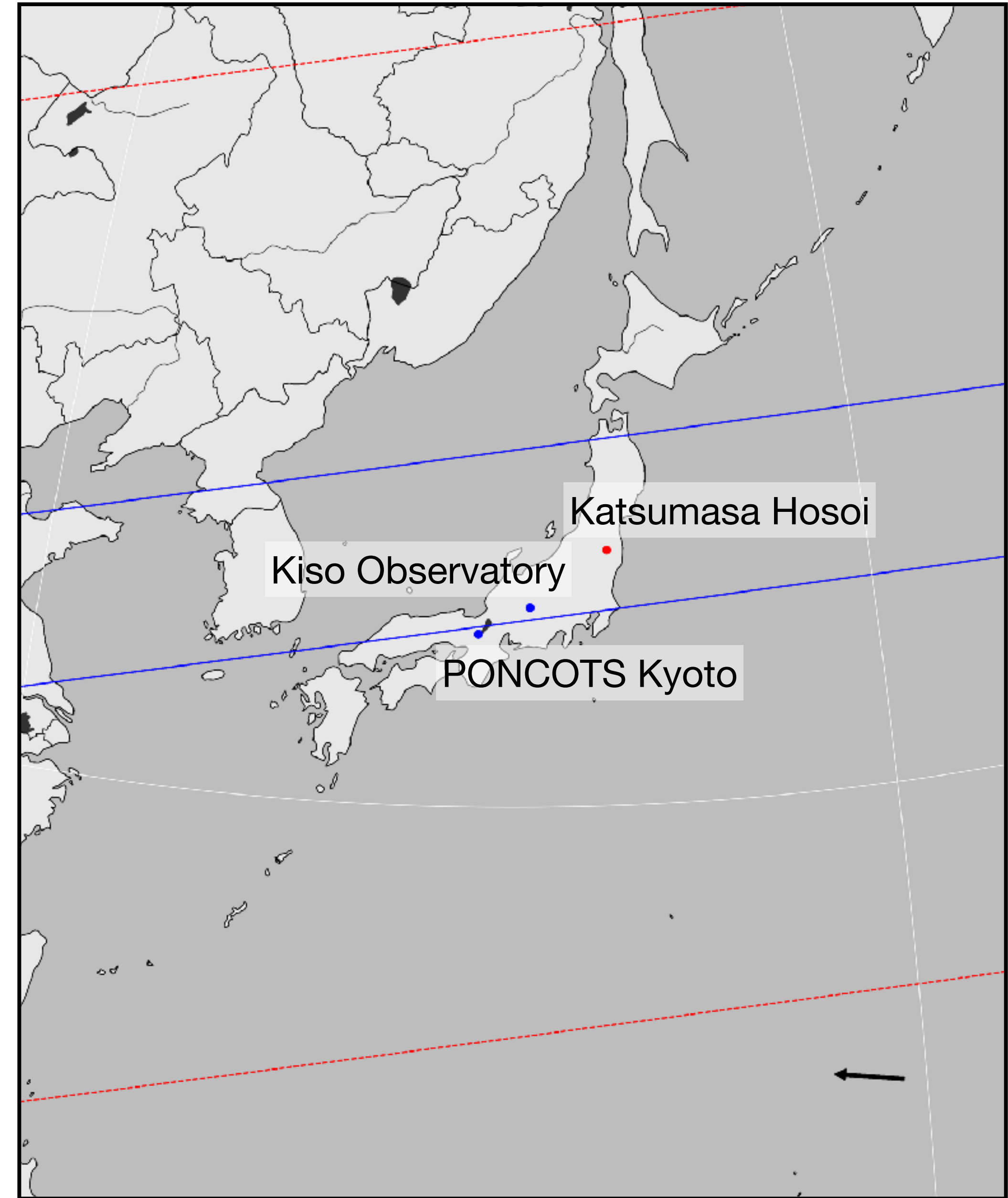


# Occultation by 2002XV93 (2024-01-10): Observation sites

□ 2地点で好天候のもと観測実施

- 東京大学木曾観測所  
105 cm シュミットカメラ/Tomo-e Gozen  
観測者: 瀧田 怜 氏
- 京都大学吉田キャンパス  
20 cm SoCoSoCo PONCOTS

□ 細井克昌氏(福島県)も独自に観測実施



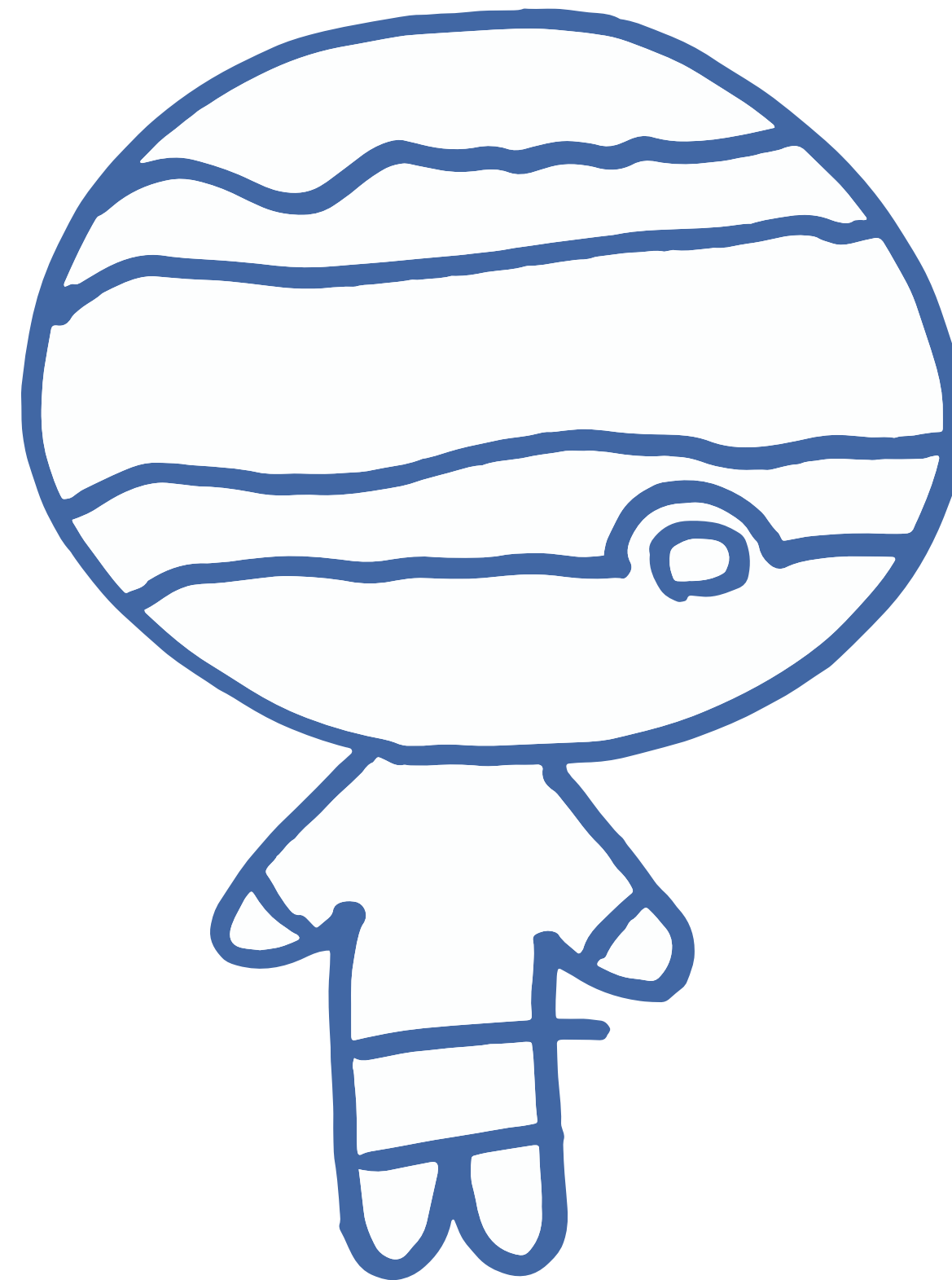
# Occultation by 2002XV93 (2024-01-10): Observation results

- Tomo-e Gozen(木曾)とSoCoSoCo PONCOTS(京都)で掩蔽による減光の観測に成功
- 細井克昌氏の観測では通過

Tomo-e Gozen (Kiso)

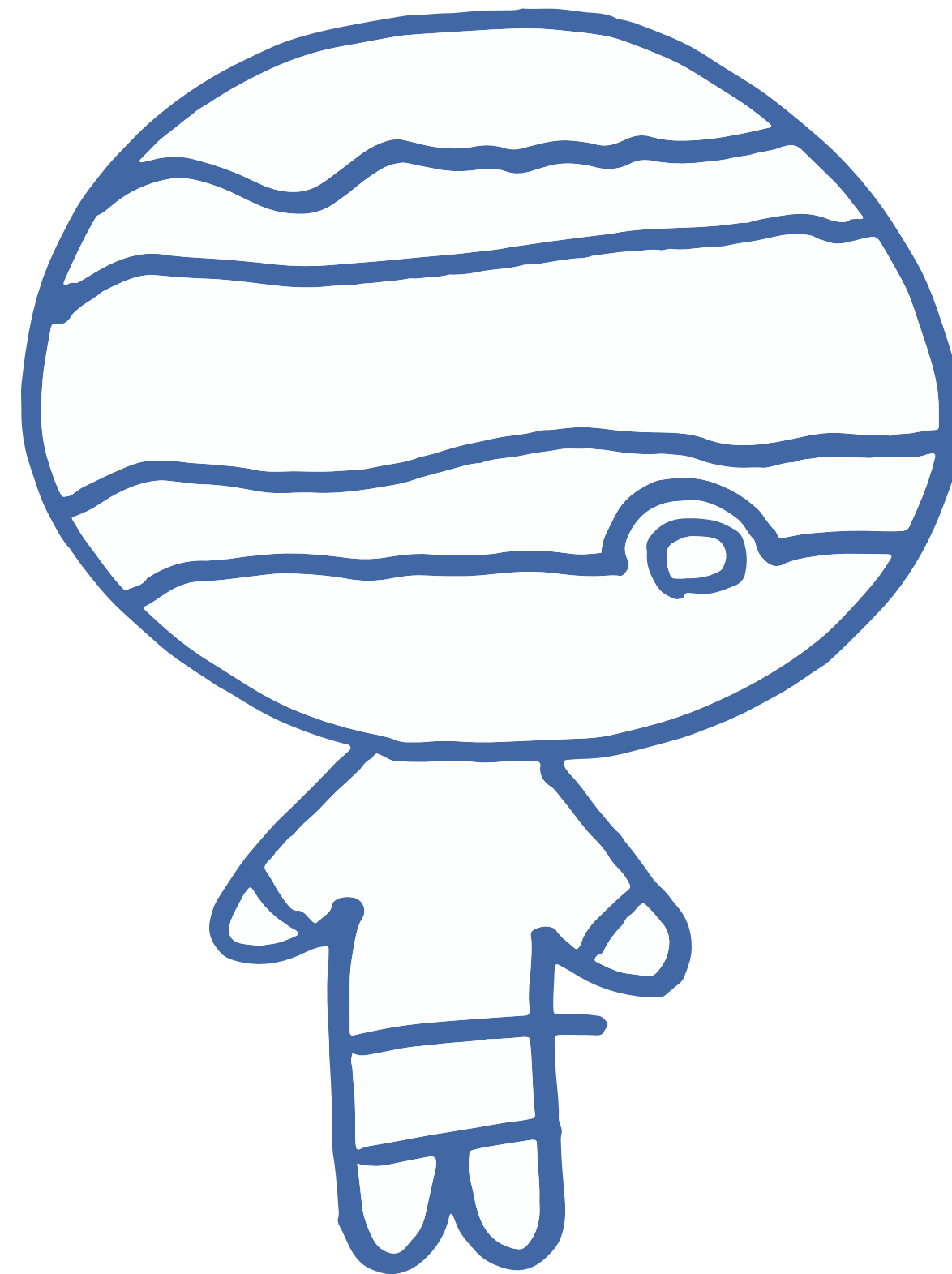
SoCoSoCo PONCOTS (Kyoto)

Preliminary



# Occultation by 2002XV93 (2024-01-10): flux profile obtained by Tomo-e

Preliminary



# まとめ

## □ OASES:

- ・ 未知TNOによる恒星掩蔽モニタ観測を目的とした、口径28 cm × 2台の可視動画観測システム
- ・ カイパーベルトに位置するキロメートルサイズの小天体による恒星掩蔽現象候補の検出に成功

Arimatsu et al. 2017, 2019a, 2024b

## □ PONCOTS:

- ・ 木星への小天体衝突閃光のモニタ観測を目的とした、口径28 cmの可視動画観測システム
- ・ 木星衝突閃光を『狙った』検出および3波長同時動画観測に初めて成功
- ・ 数10メートルサイズの外部太陽系天体の木星への衝突頻度に観測的制約

Arimatsu et al. 2022a, 2023a, 2023b

## □ TABASCO:

- ・ 既知TNOによる恒星掩蔽多地点観測を目的とした、小・中望遠鏡を利用した観測キャンペーン

➡ 小・中望遠鏡の動画観測により、太陽系外縁部の未開領域を開拓することに成功