恒星掩蔽動画観測が明らかにする太陽系外縁の世界

有松 亘　(京都大学)

©Ko Arimatsu/AONEKOYA

■1: 小望遠鏡+動画観測による『未知』太陽系外縁天体の探求

- OASESプロジェクト(Arimatsu et al. 2017, 2019a)の紹介

■2: 中小望遠鏡ネットワーク+動画観測による『既知』太陽系外縁天体の探求

- 2019年の掩蔽観測キャンペーン成果(Arimatsu et al. 2019b, in prep.)の紹介



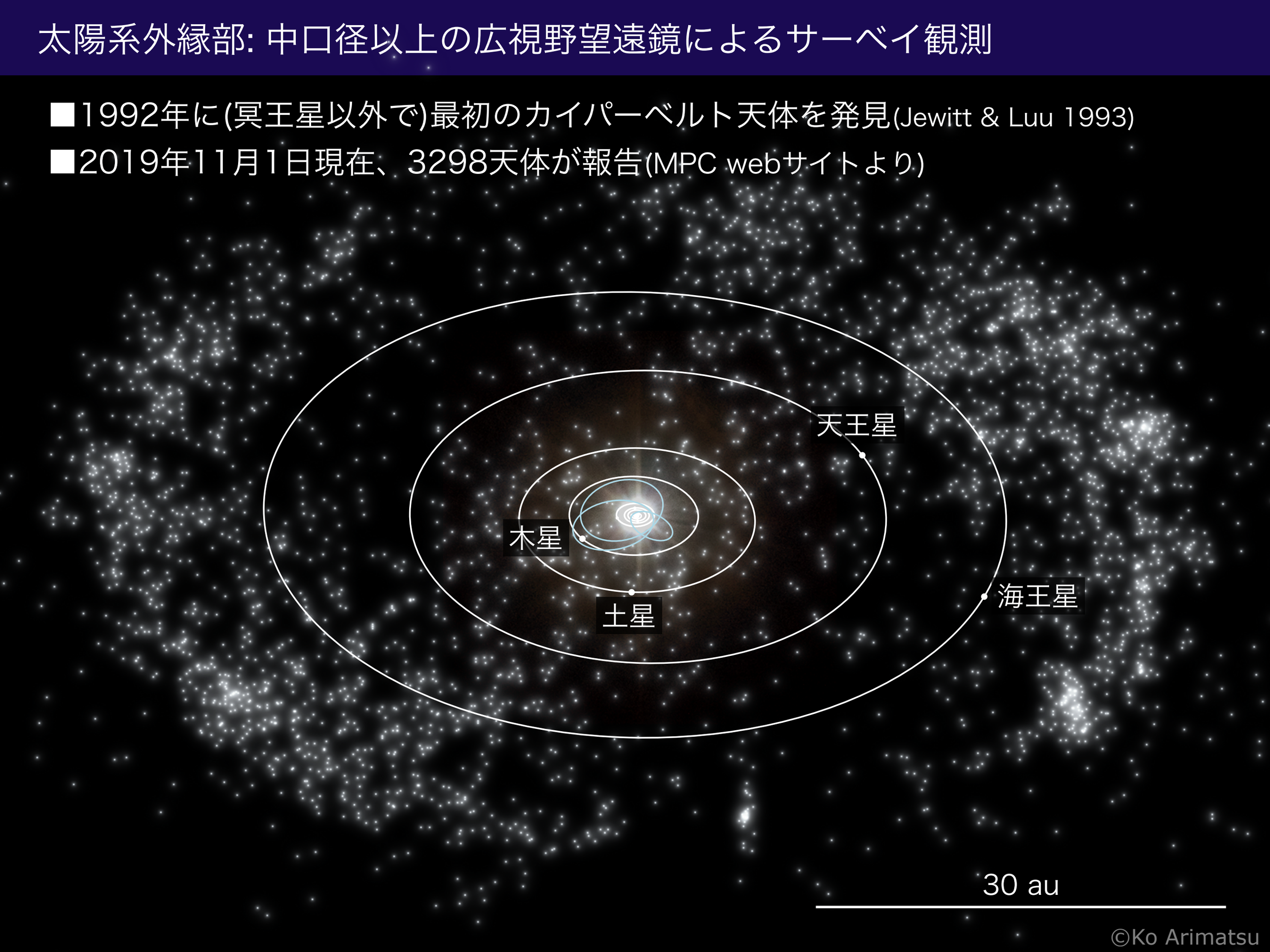
1：小望遠鏡+動画観測による太陽系外縁部の探求

©Ko Arimatsu/AONEKOYA

太陽系外縁部: 中口径以上の広視野望遠鏡によるサーベイ観測

■1992年に(冥王星以外で)最初のカイパーベルト天体を発見(Jewitt & Luu 1993)

■2019年11月1日現在、3298天体が報告(MPC webサイトより)



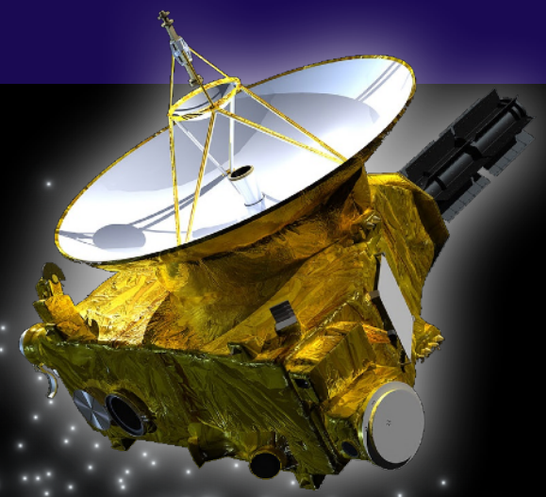
©Ko Arimatsu

太陽系外縁部: New Horizonsによる直接探査



©NASA/JHUAPL/SwRI

2015年7月14日
冥王星-カロン系へのフライバイ



天王

木星

土星



©NASA/JHUAPL/SwRI

2019年1月1日
アロコスへのフライバイ

30 au

©Ko Arimatsu

半径1-10 km(キロメートルサイズ)のカイパーベルト天体(KBO)

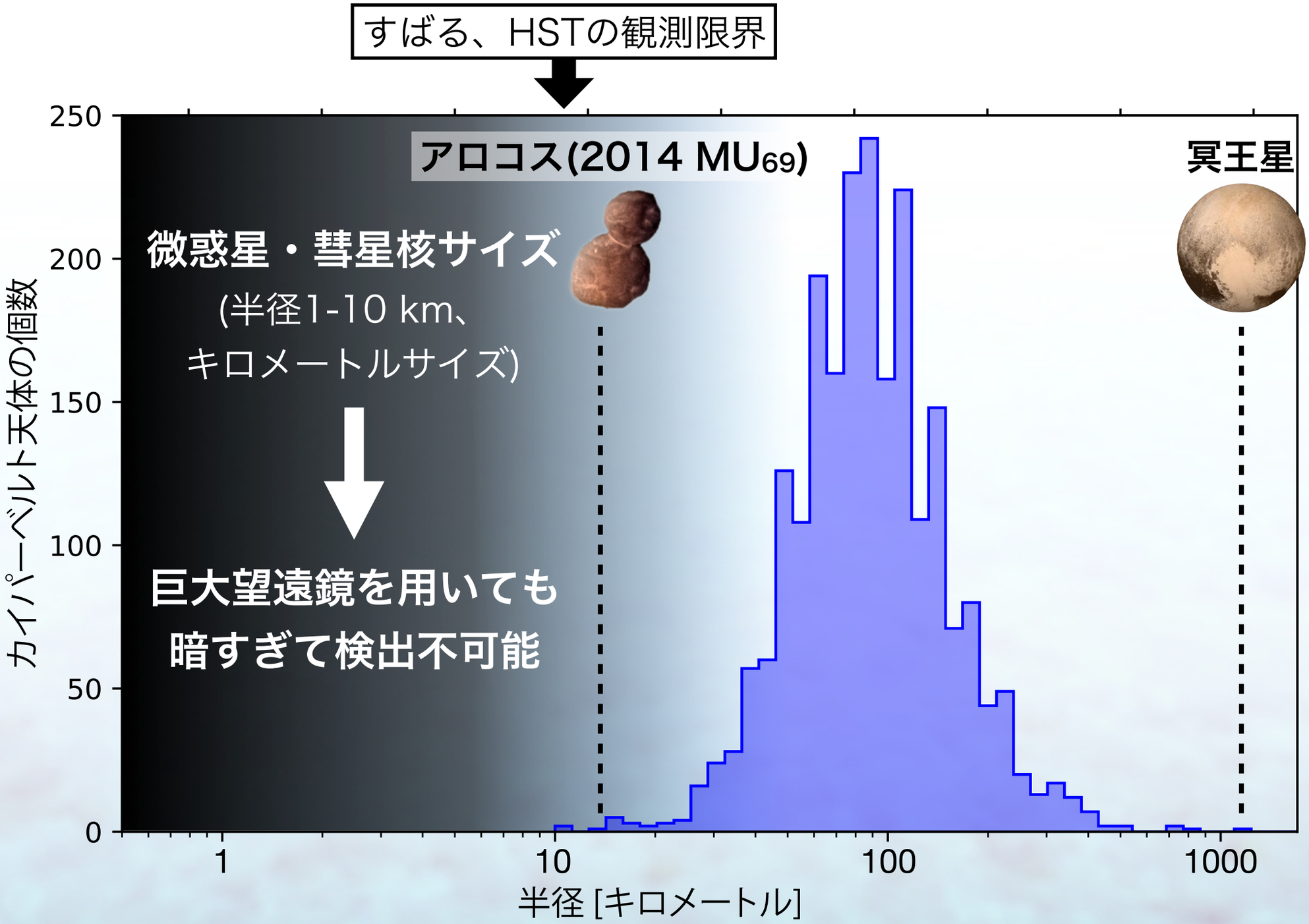
■始原的サイズ分布の特徴を保存 (Schlichting+ 13)

■彗星核と同様のサイズ→木星族彗星の供給源? (e.g., Levison & Duncan 97)

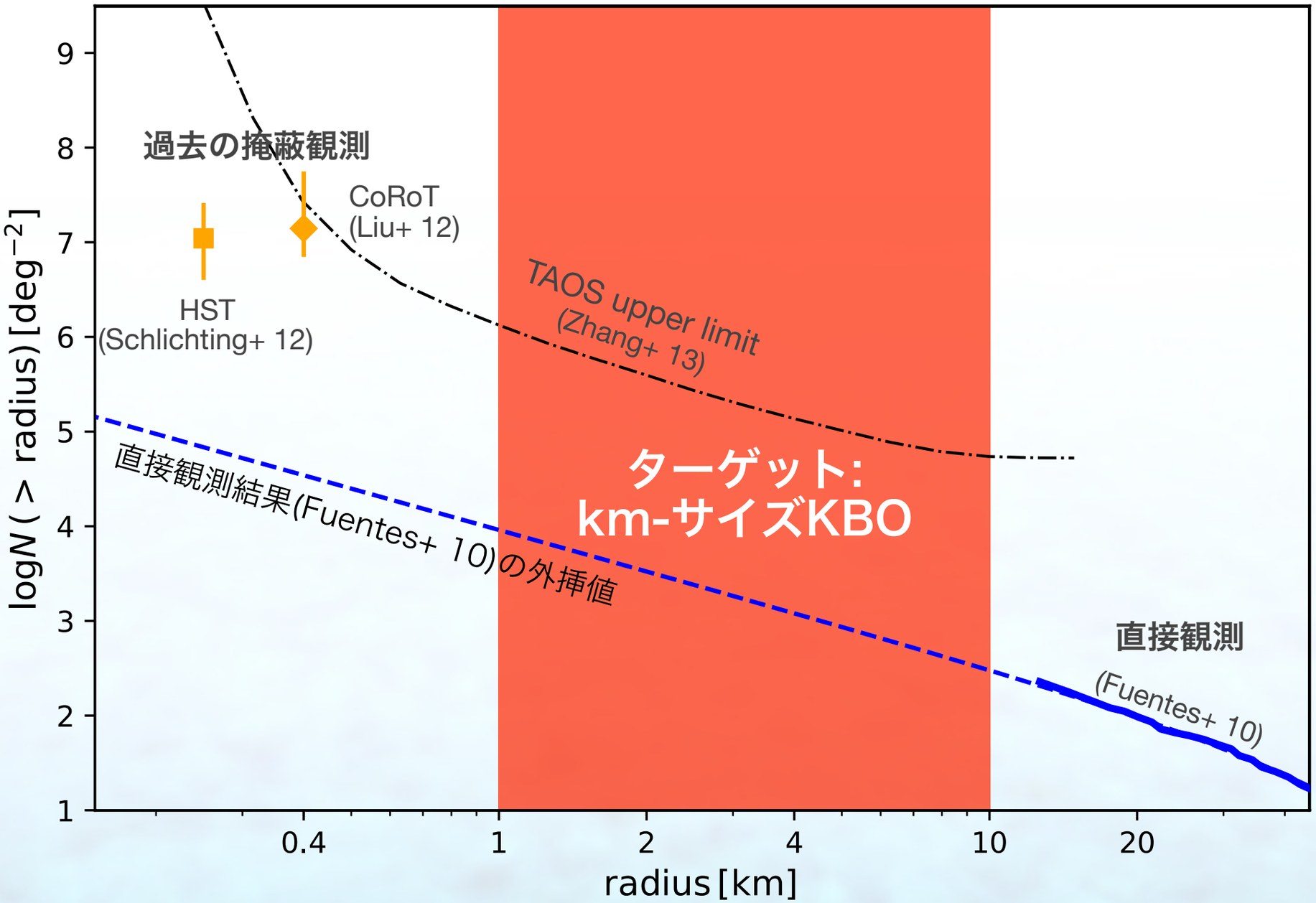


©Ko Arimatsu

太陽系外縁部に残された謎: 小さな天体が未発見



KBOの累積サイズ頻度分布



■直接観測でサイズ頻度分布が解明されているのは r > 10 km のKBOのみ

➡**恒星掩蔽観測**でキロメートルサイズKBOの検出に挑戦

太陽系小天体による恒星掩蔽（えんぺい）

恒星

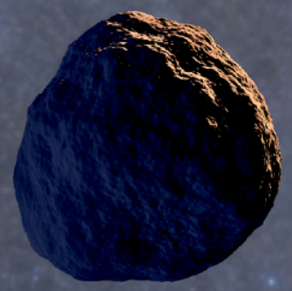
カイパーベルト天体

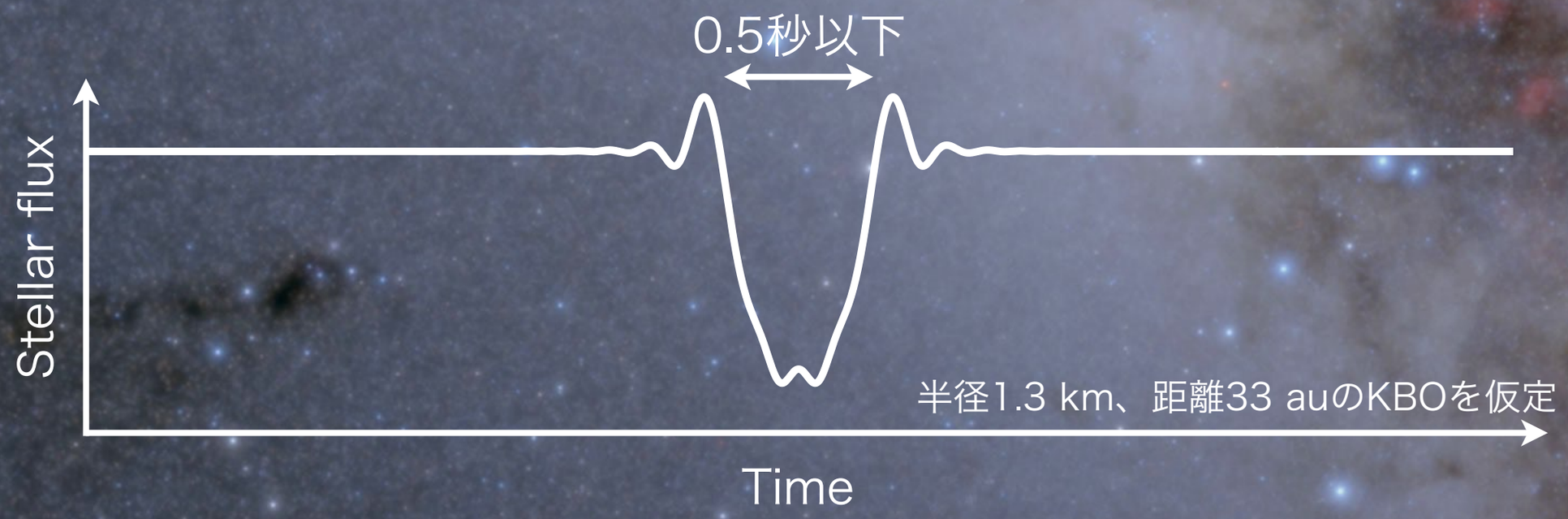
©Ko Arimatsu

kmサイズKBOによる恒星掩蔽の光度曲線シミュレーション

■直接観測不可能な暗い前景天体の観測を実現

■回折パターンから天体の距離・サイズを推定可能





©Ko Arimatsu

キロメートルサイズのカイパーベルト天体による掩蔽の発見に必要な観測装置

- **複数台の観測装置による同時観測**
  -未知の天体による掩蔽は再現性のない一回きりの現象
  ➡複数装置での同時検出で偽検出を除外
    ◉システム全体のコスト増大に対応する必要

- **広い視野**
  -掩蔽の発生頻度: 1恒星だけ観測していたら極めて小さい
    ◉過去の掩蔽観測では観測効率が不足しており発見例ゼロ
  ➡広視野な観測装置を用いてたくさんの星を同時に観測

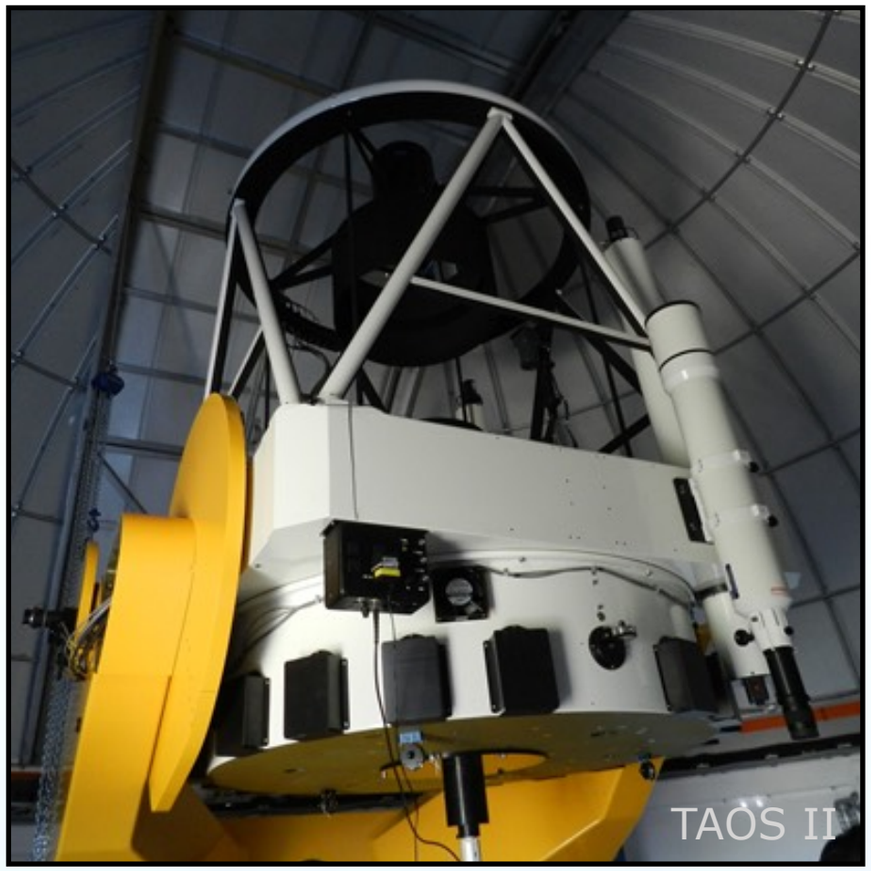
- **動画観測**
  -キロメートルサイズのカイパーベルト天体による掩蔽の継続時間: 0.1-0.5秒
  ➡0.1秒より細かい時間分解能で恒星を『動画』で観測
    ◉『なるべく長い時間シャッターを開けて暗い天体からの光を受ける』ことを目指す通常の天体観測で使用するカメラ(画像の読み出しに数秒以上必要)は使用不可

現在計画進行中のカイパーベルト天体掩蔽観測プロジェクト: TAOSII

- **(Transneptunian Automated Occultation Survey) TAOSII**

  -台湾、アメリカ、メキシコ、カナダ
  の国際プロジェクト
  -口径1.3mの望遠鏡３台をメキシコに新設
  -ドーム、望遠鏡、ビデオカメラを全て新規開発

  -総開発費10万ドル(約10億円)以上
  -2018年現在観測装置開発中


TAOS II


TAOS II

Organized Autotelescopes for Serendipitous Event Survey (OASES)

■計2台の可視小型観測システムを開発 (Arimatsu et al. 2017)

-口径28 cm、合成f/1.58光学系に対角4/3インチ民生品CMOSビデオカメラを装着

-既製品を活用し、2台で開発費約350万円



OASES
Organized Autotelescopes for Serendipitous Event Survey

Organized Autotelescopes for Serendipitous Event Survey (OASES)

■計2台の可視小型観測システムを開発 (Arimatsu et al. 2017)

-口径28 cm、合成f/1.58光学系に対角4/3インチ民生品CMOSビデオカメラを装着

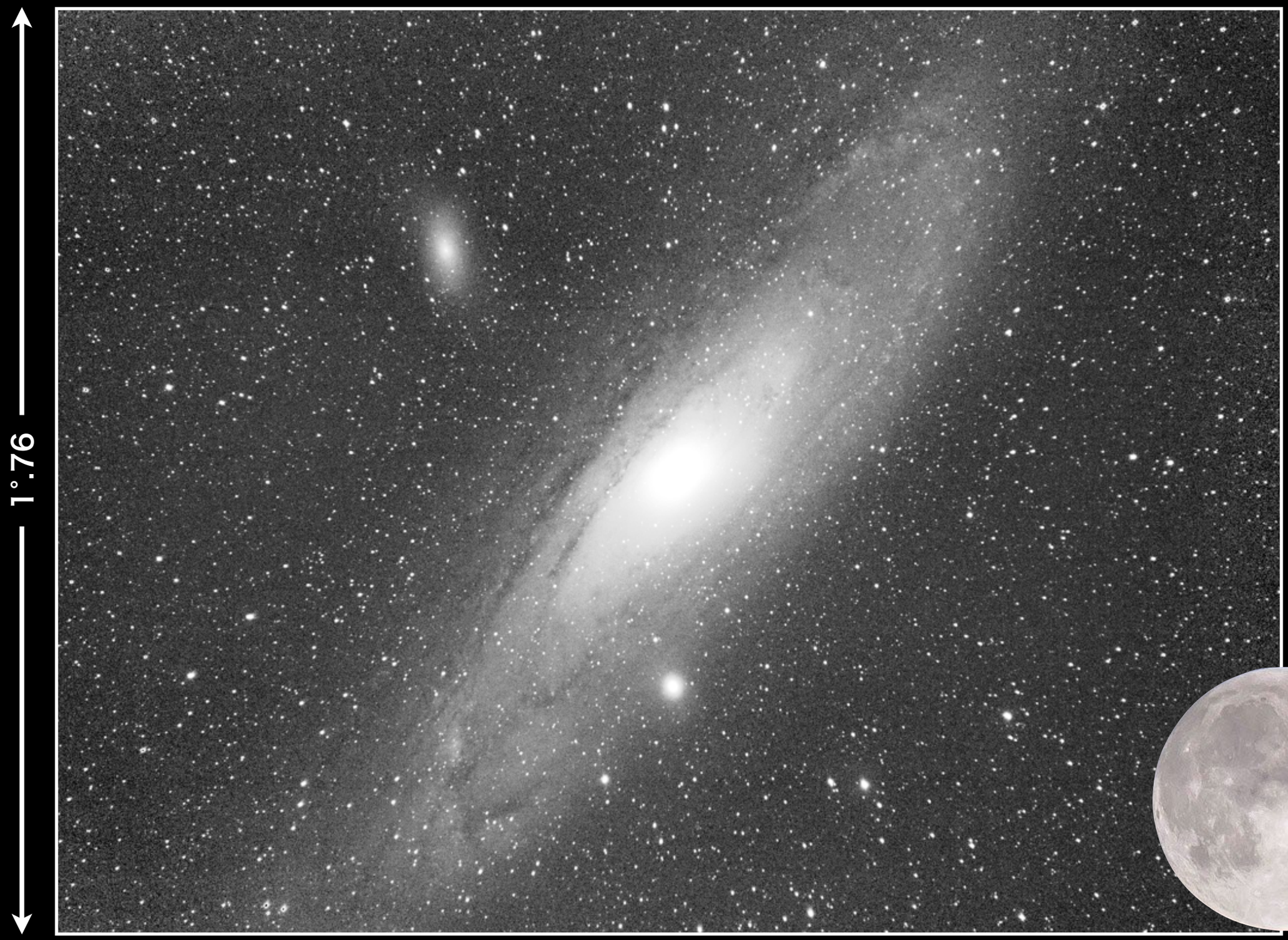
-既製品を活用し、2台で開発費約350万円



OASES
Organized Autotelescopes for Serendipitous Event Survey

OASES観測システムの特徴 1： 約4平方度の広い視野

・テスト観測で撮影したアンドロメダ銀河(M31)の画像データ



OASES
Organized Autotelescopes for Serendipitous Event Survey

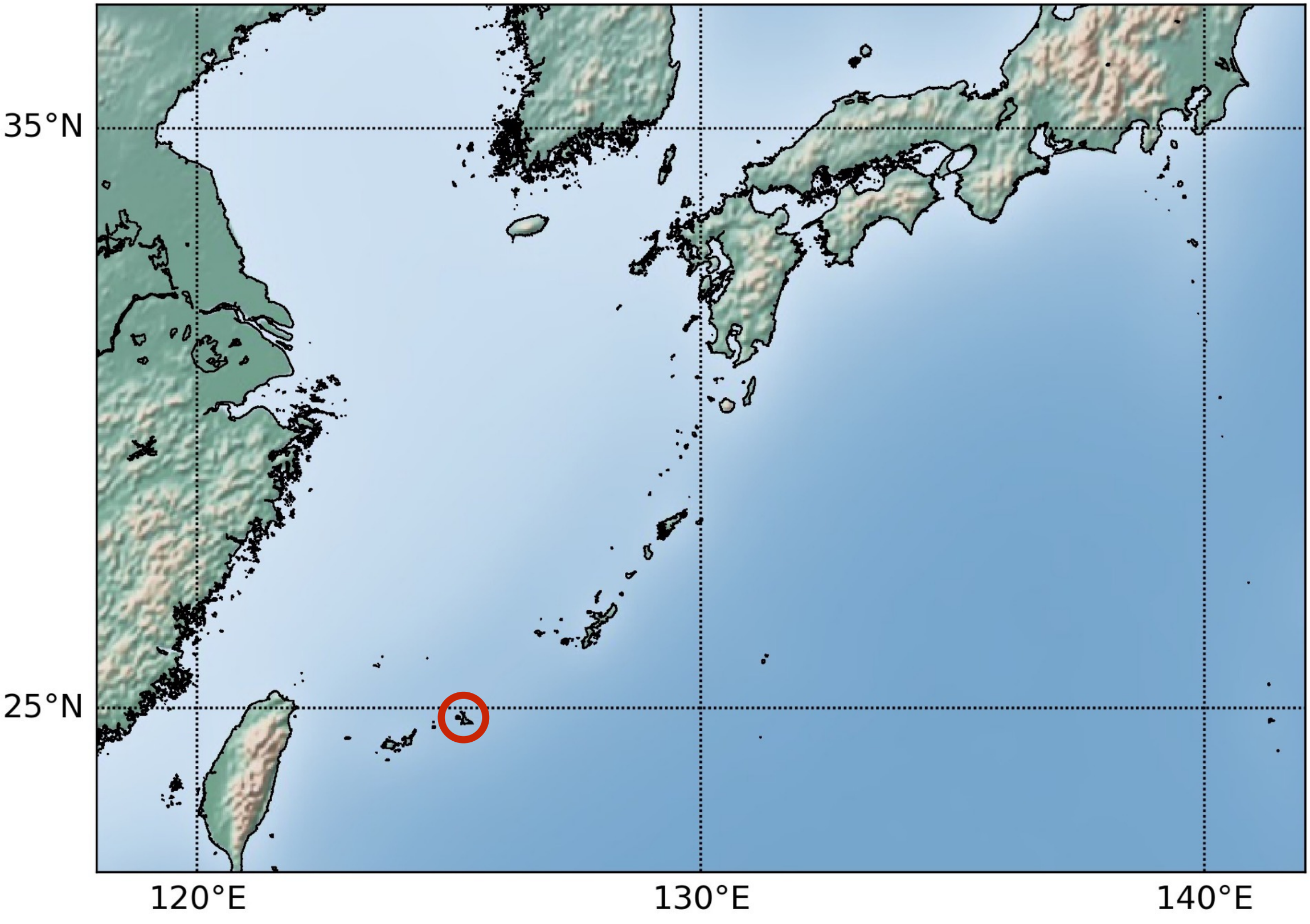
OASES観測システムの特徴 2：『動画』で夜空を撮影可能

・花火の観測データ(フレームレート15.4fps)



OASES
Organized Autotelescopes for Serendipitous Event Survey

OASESプロジェクト観測地：沖縄県宮古島市・宮古島



宮古島



宮古島



OASESプロジェクト観測地:宮古島

・2015年、宮古島・与那覇前浜ビーチで撮影



- **低緯度**: 天の川の最も星が多い部分がじゅうぶんに高い空で観測可能
- **高晴天率**: 天の川の観測条件が良い夏期(6月下旬-8月)に高い晴天率
- **低光害**: 南の空に街明かりが少ない
- **好アクセス**: 限られた予算の中で移動・輸送が容易

Ko Arimatsu

OASESプロジェクト観測地:宮古島



OASES observation site: rooftop of the Miyako open-air school



宮古島での観測のようす



Ko Arimatsu

- 沖縄県立宮古青少年の家の屋上に2台の観測システムを設置
- 2台の観測システムは約40m離して設置

OASESモニタ観測プロジェクト@宮古島





- 沖縄県立宮古青少年の家の屋上に2台の観測システムを設置
- 2台の観測システムは約40m離して設置

宮古島での観測のようす

・2台同時観測を2016年6月-2017年8月にかけて断続的に実施

・恒星とカイパーベルト天体の密度が高い、黄道と銀河面の交点付近の領域を観測

銀河面

恒星が集中

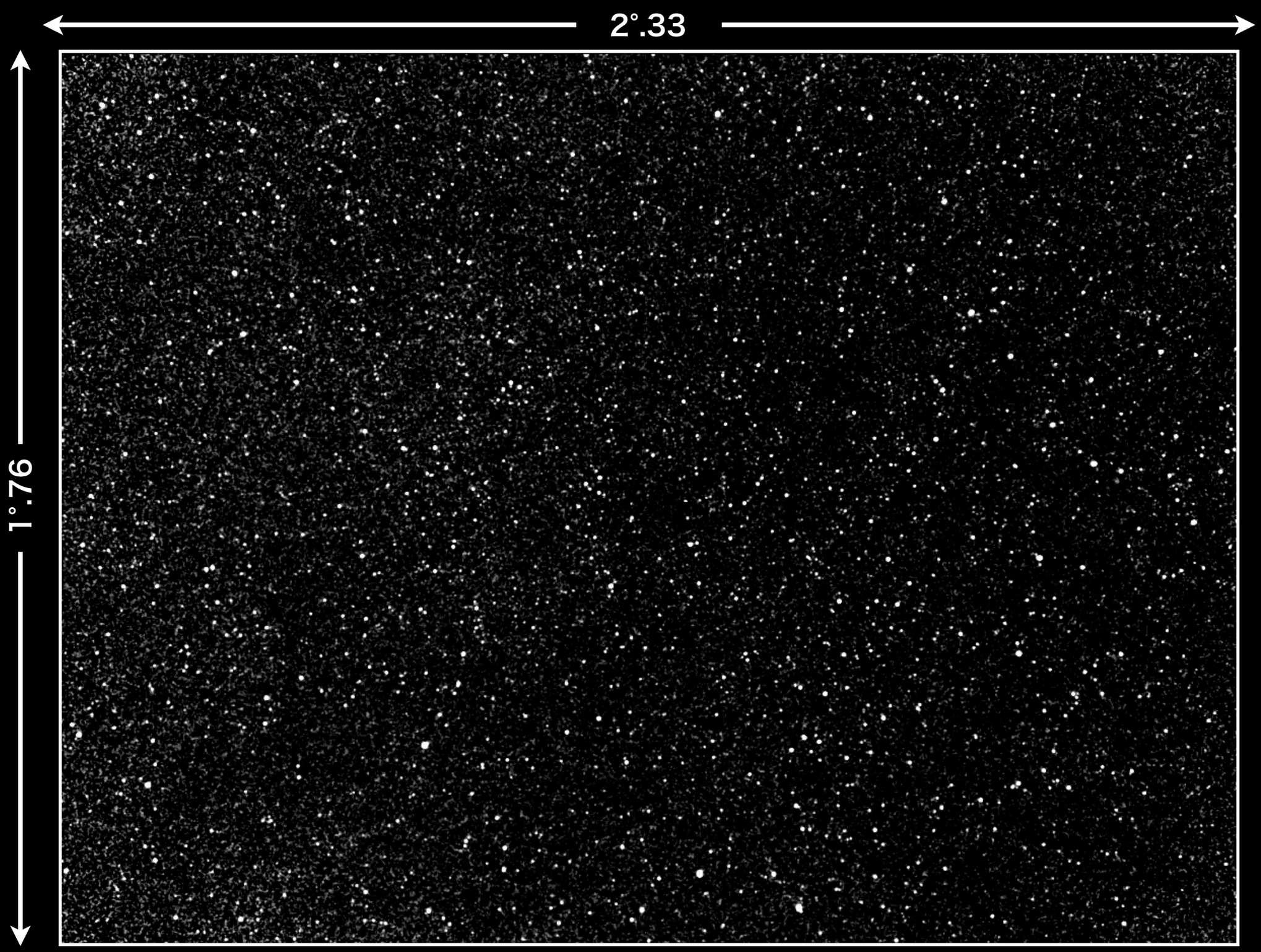
本研究で観測した空の領域

黄道

カイパーベルト天体を含む太陽系天体が集中

Ko Arimatsu

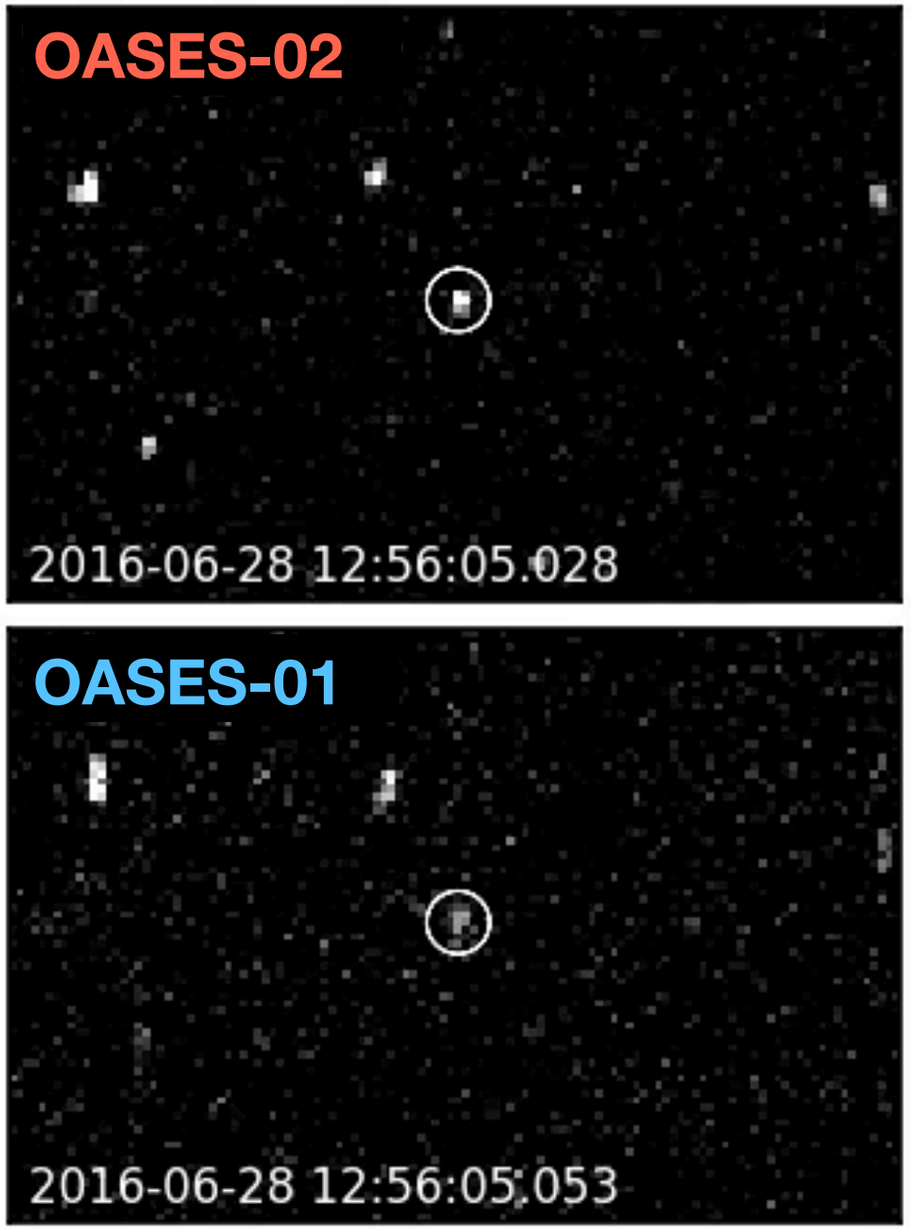
宮古島で観測した星空の『動画』



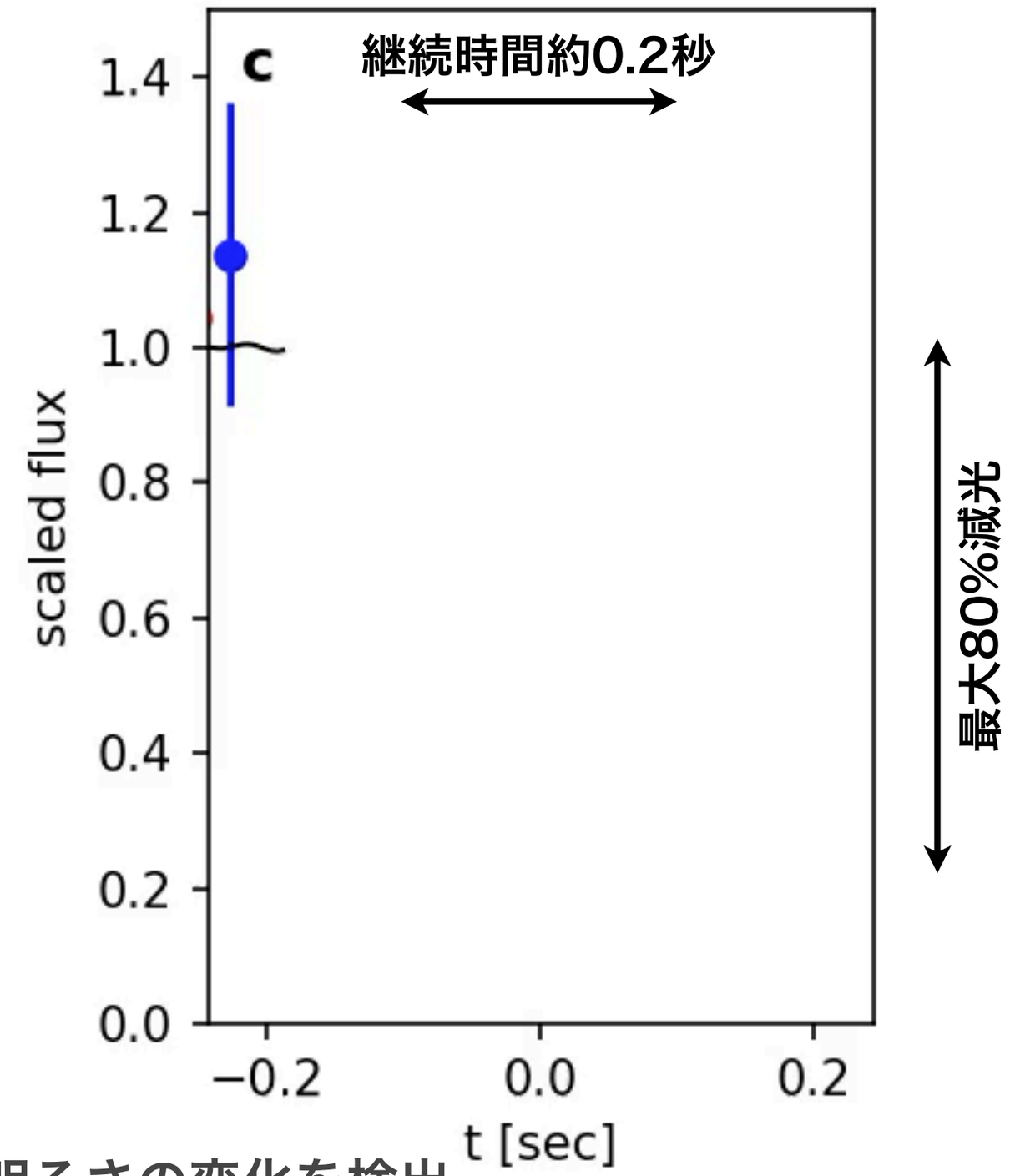
■4平方度の視野内約2000恒星の動画(15.4fps)同時観測を実現

■これまで50時間分の動画データの解析を実施

OASESモニタ観測によって発見された恒星掩蔽候補(Arimatsu et al. 2019a)



Arimatsu et al. 2019a を改変



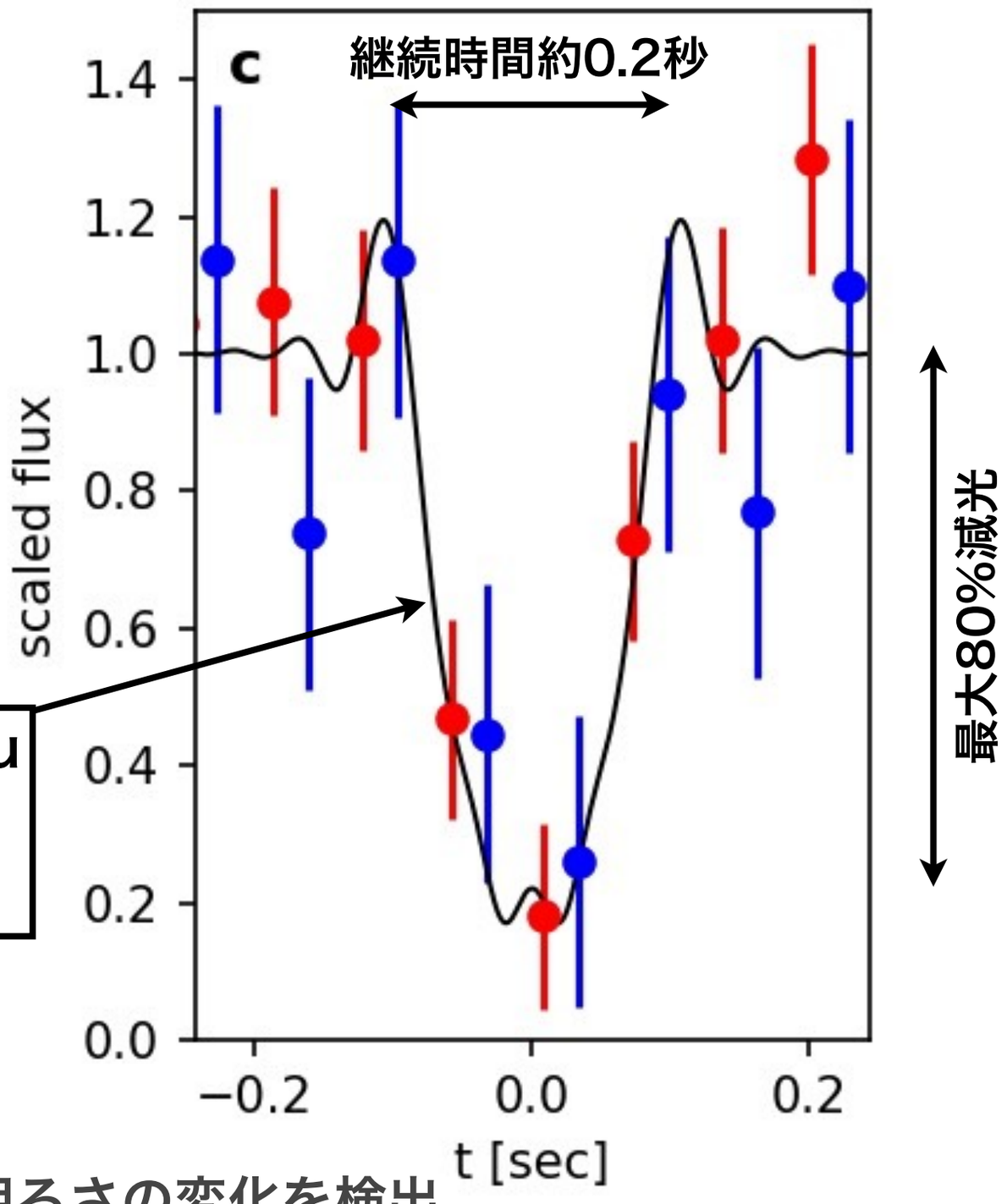
■２台の観測装置で同時に同じような明るさの変化を検出

-雲の遮蔽や大気のゆらぎなどの影響では説明不可能

■カイパーベルト天体による掩蔽シミュレーション結果とよく一致

OASESモニタ観測によって発見された恒星掩蔽候補(Arimatsu et al. 2019a)





Arimatsu et al. 2019a を改変

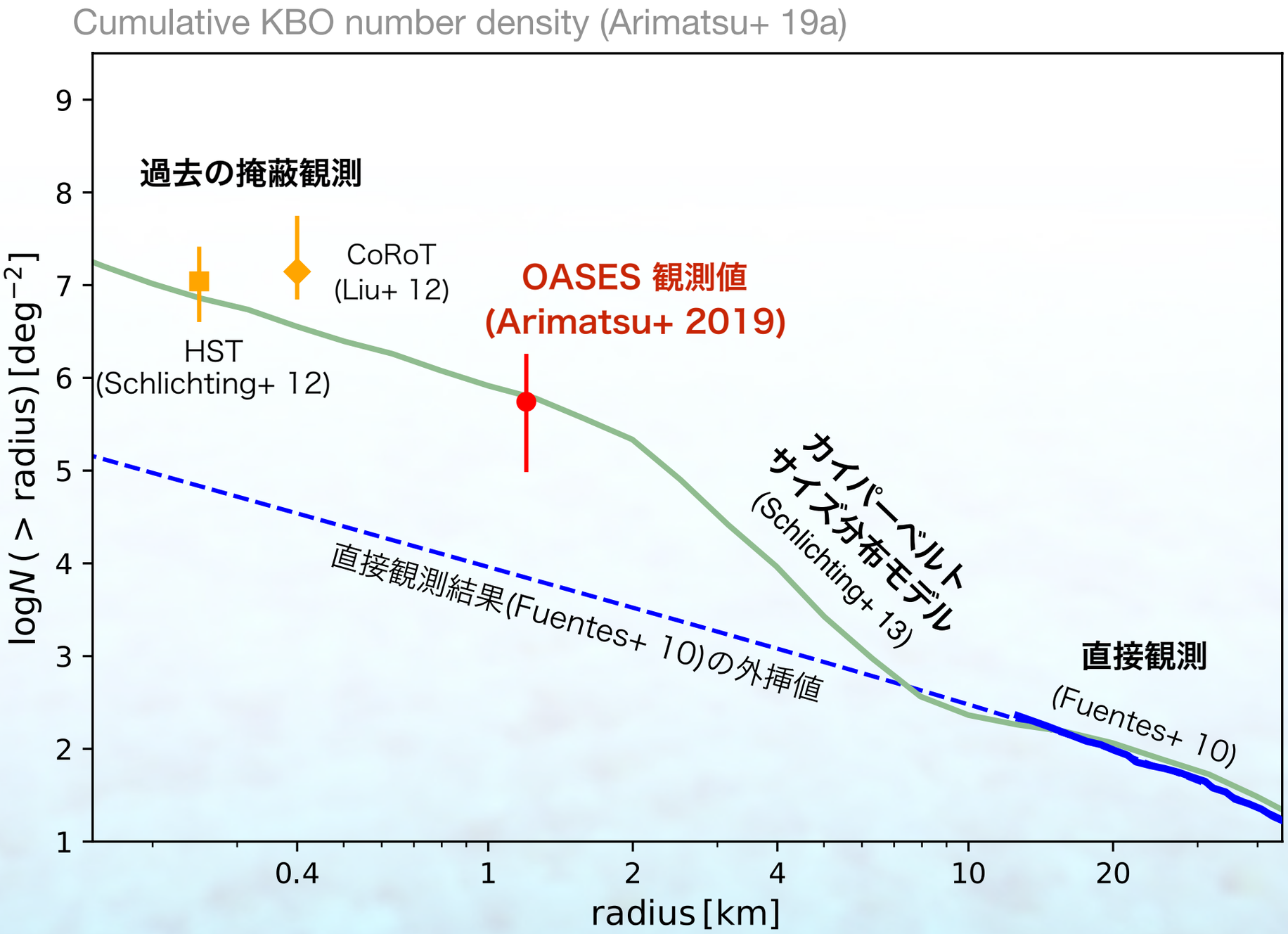
■２台の観測装置で同時に同じような明るさの変化を検出

-雲の遮蔽や大気のゆらぎなどの影響では説明不可能

■カイパーベルト天体による掩蔽シミュレーション結果とよく一致

OASESモニタ観測によって発見された恒星掩蔽候補(Arimatsu et al. 2019a)

■KBOの推定サイズと掩蔽の発生頻度から個数密度に観測的制約を得ることに成功

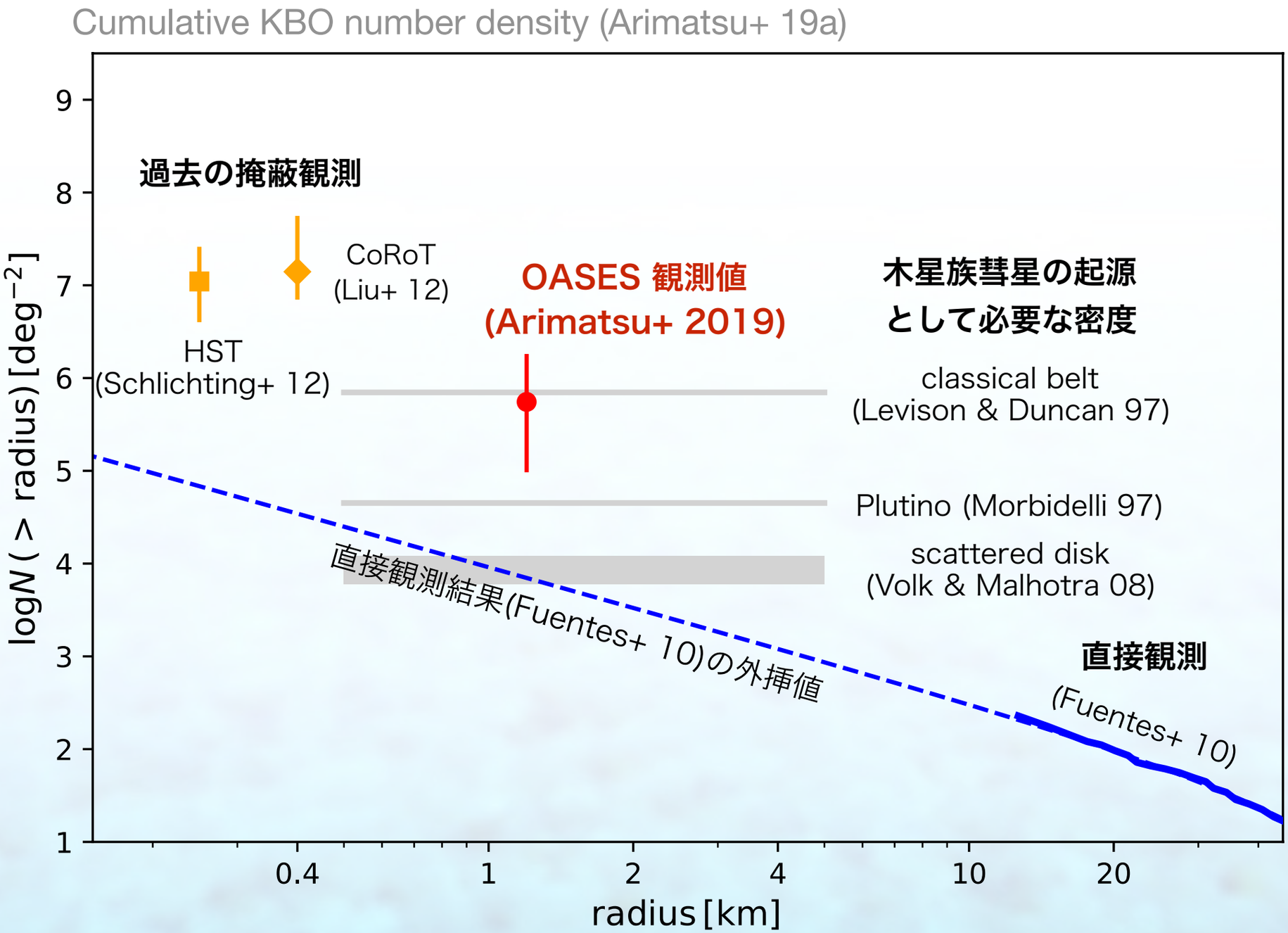


➡直接観測結果の外装値と比較してkmサイズ付近の個数密度が超過

➡kmサイズに個数密度超過を持つサイズ分布モデルと一致

OASESモニタ観測によって発見された恒星掩蔽候補(Arimatsu et al. 2019a)

■KBOの推定サイズと掩蔽の発生頻度から個数密度に観測的制約を得ることに成功



➡kmサイズKBOは木星族彗星の供給源として充分な個数密度あることを示唆

New Horizons によるカロン表面のクレータ頻度分布

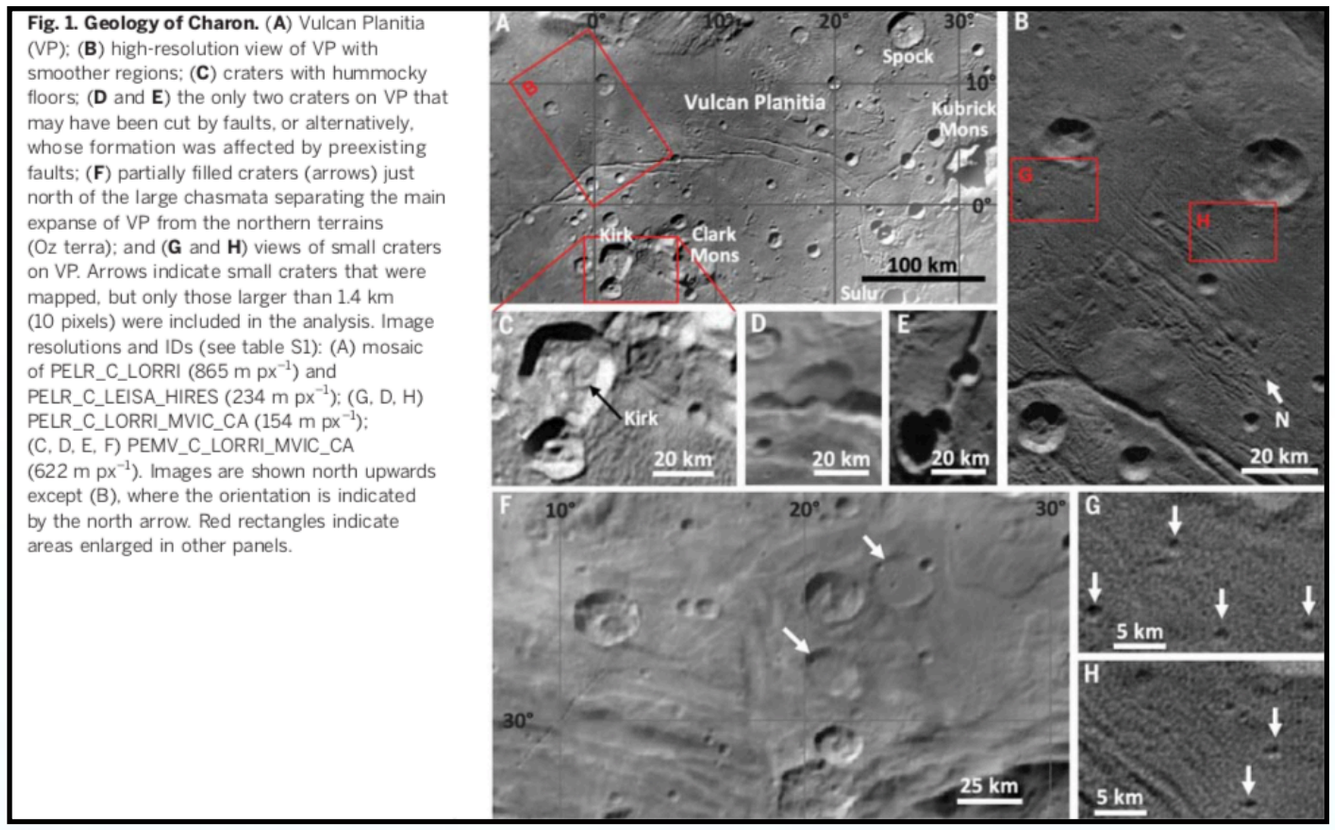


Fig. 1. Geology of Charon. (**A**) Vulcan Planitia (VP); (**B**) high-resolution view of VP with smoother regions; (**C**) craters with hummocky floors; (**D** and **E**) the only two craters on VP that may have been cut by faults, or alternatively, whose formation was affected by preexisting faults; (**F**) partially filled craters (arrows) just north of the large chasmata separating the main expanse of VP from the northern terrains (Oz terra); and (**G** and **H**) views of small craters on VP. Arrows indicate small craters that were mapped, but only those larger than 1.4 km (10 pixels) were included in the analysis. Image resolutions and IDs (see table S1): (A) mosaic of PELR_C_LORRI (865 m px^{-1}) and PELR_C_LEISA_HIRES (234 m px^{-1}); (G, D, H) PELR_C_LORRI_MVIC_CA (154 m px^{-1}); (C, D, E, F) PEMV_C_LORRI_MVIC_CA (622 m px^{-1}). Images are shown north upwards except (B), where the orientation is indicated by the north arrow. Red rectangles indicate areas enlarged in other panels.

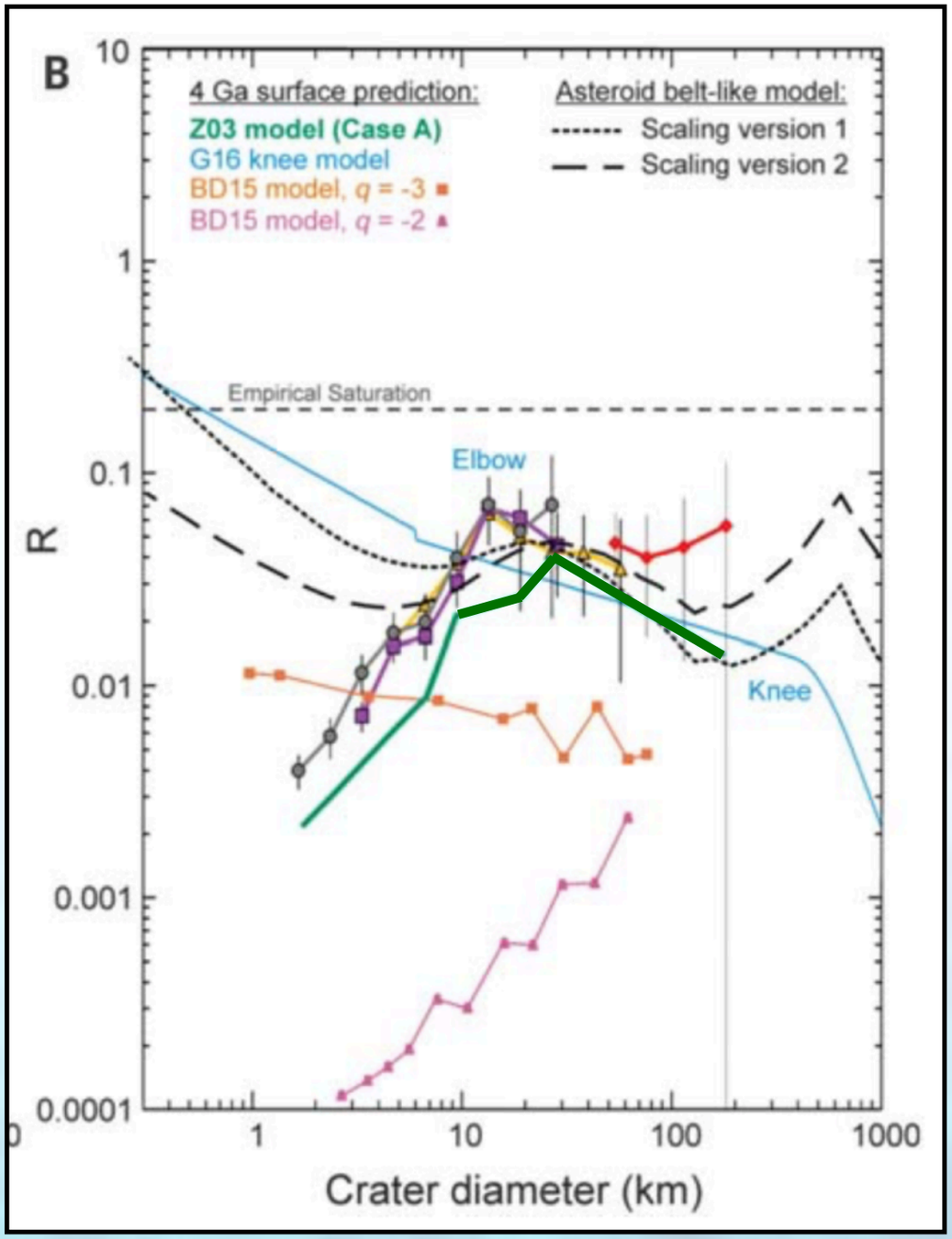
■New Horizons によって冥王星系表面のクレーター個数密度解明(Singer et al. 2019)

■カロン表面のKBO衝突によるクレータ個数密度のR-plot

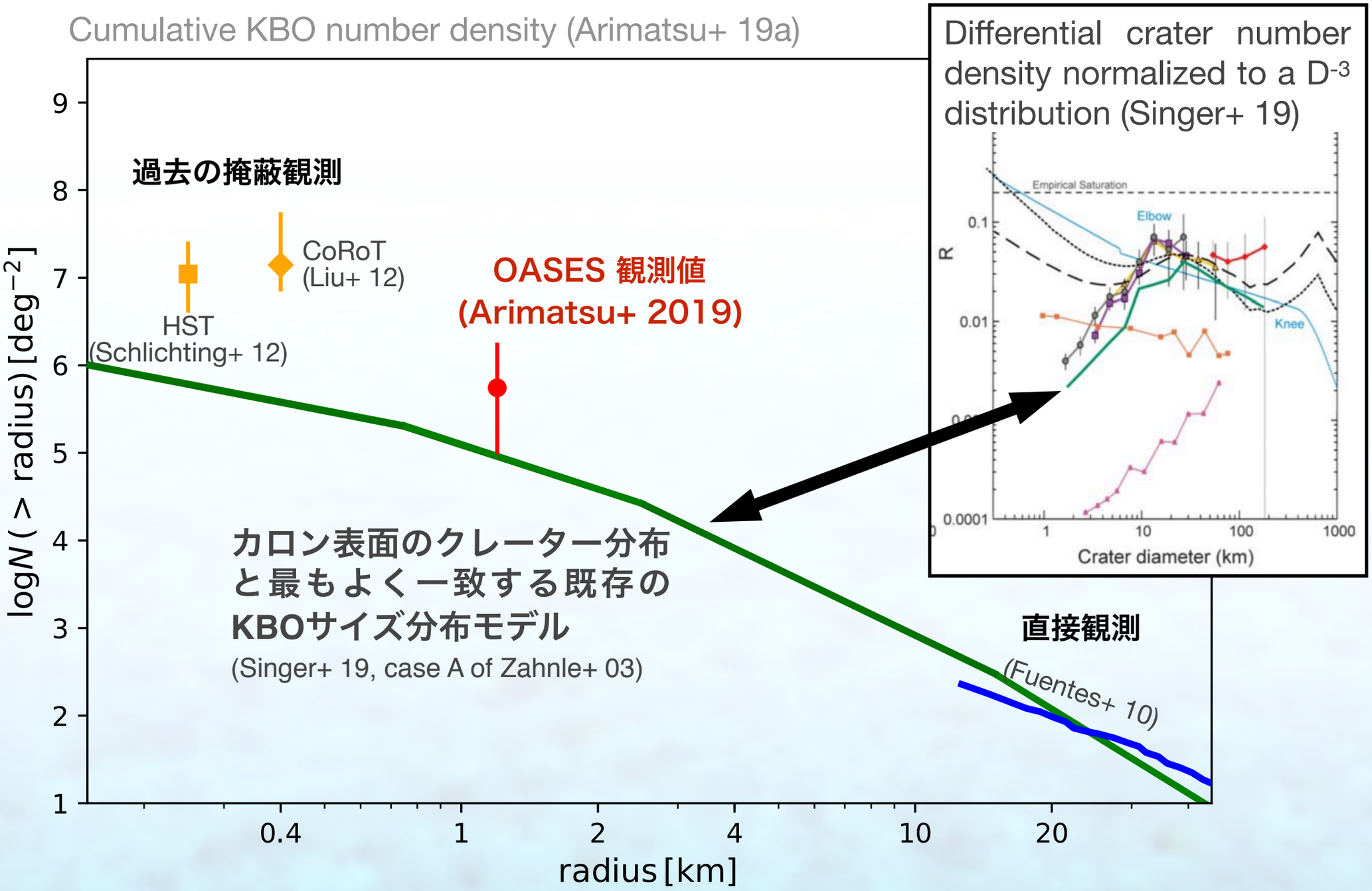
・直径 ~ 13 km 以下のクレータが少ない

➡半径1km以下のKBOの個数密度が少ない?

Crater size-frequency distributions (R-plot, differential number densities normalized to a D^{-3} distribution)



New Horizons によるカロン表面のクレータ頻度分布との比較



➡過去の掩蔽観測結果とは大きく矛盾

➡OASES掩蔽観測結果は New Horizons の結果と矛盾せず

OASES観測システム: 今後の展望

■観測システムのアップグレードを実行中(2019年度中に完了予定)

-CMOSカメラの換装　　→ 広視野(~8平方度)・高感度観測を実現

-観測システムの増設　　→ より確実な掩蔽検出を実現

-観測体制に関するハード面・ソフト面の改良　→ 長期的・恒常的な運用を実現

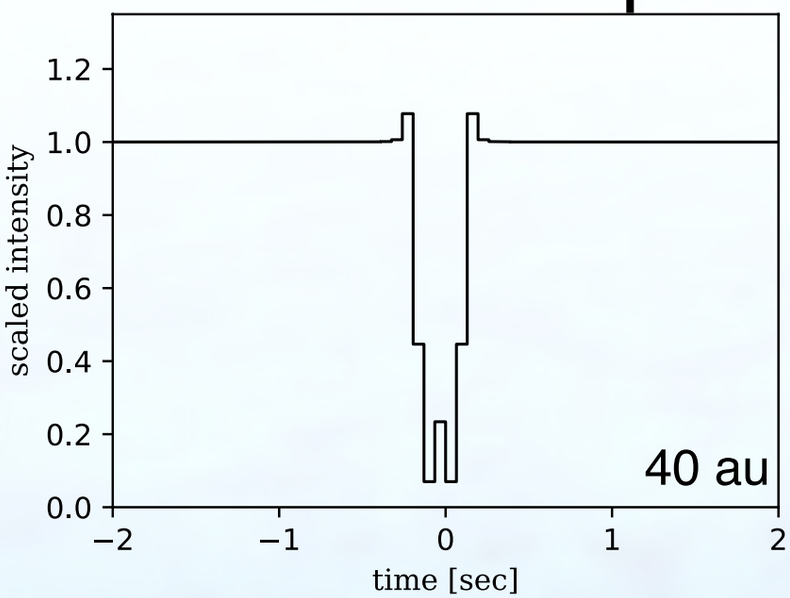


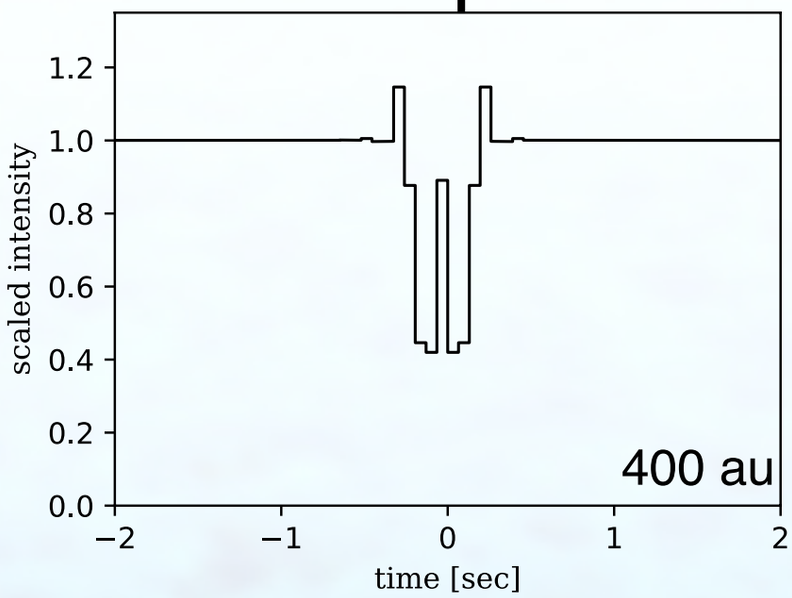
現行機CMOS　改良機CMOS

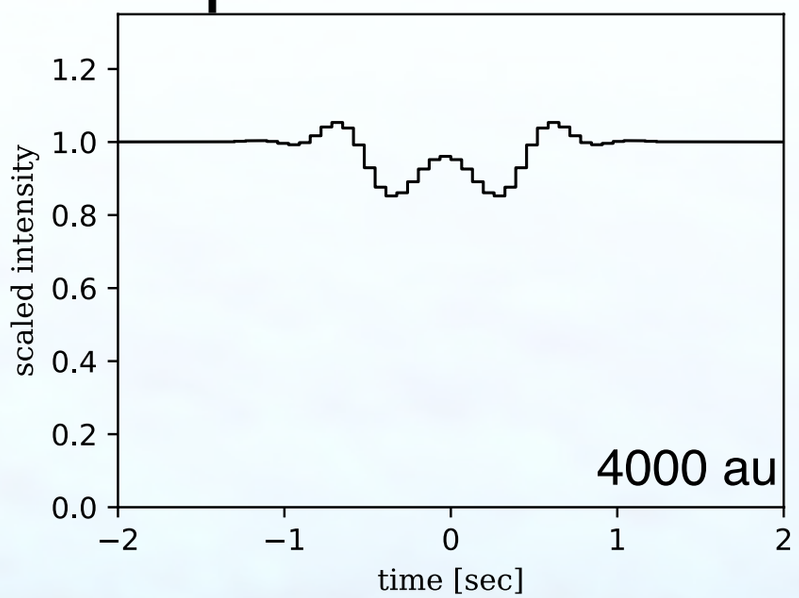


今後の展望









(半径3km, b=0を仮定)

■高効率観測を実現する観測システムのアップグレード

➡より多数の恒星掩蔽検出によるKBOサイズ分布の詳細解明

➡より遠方の天体による恒星掩蔽の検出、『オールトの雲』天体の発見

1: 小望遠鏡+動画による『未知』太陽系外縁天体観測のまとめ

■史上初めてキロメートルサイズのKBOによる恒星掩蔽候補を一例検出

■kmサイズKBOの個数密度に超過を示唆

■木星族彗星の供給源として充分な個数密度あることを示唆

■冥王星-カロン表面のクレーター頻度分布とも矛盾せず

■高効率観測を実現する観測システムのアップグレード

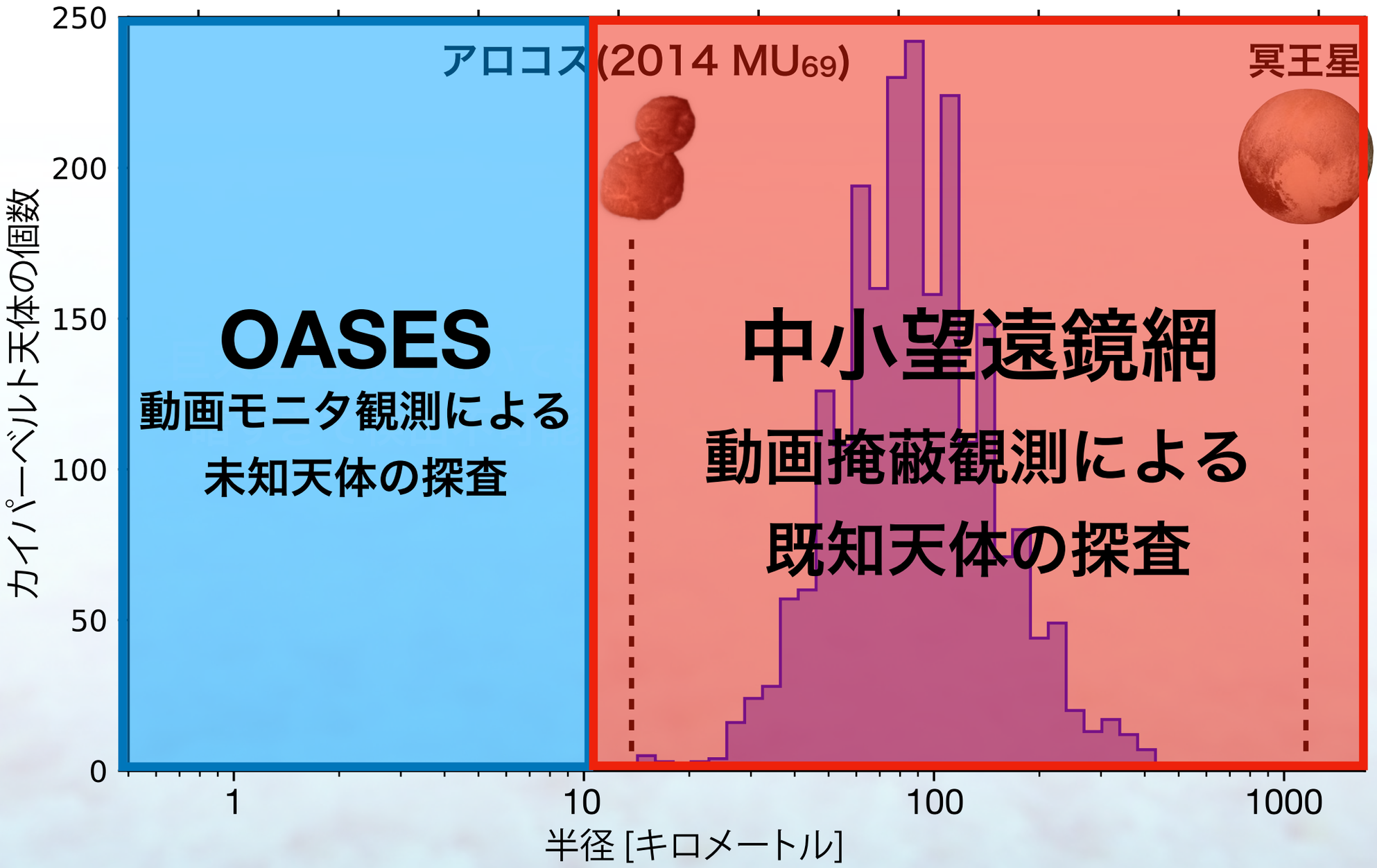
➡より多数の恒星掩蔽検出によるKBOサイズ分布の詳細解明

➡より遠方の天体による掩蔽の検出、太陽系のさいはて『オールトの雲』天体の発見

2: 中小望遠鏡ネットワーク+動画観測による『既知』太陽系外縁天体の探求

©Ko Arimatsu/AONEKOYA

既知の太陽系外縁天体に



2020年代: 既知の外縁天体による掩蔽観測環境が劇的に変化

■既知天体の恒星掩蔽観測: (特にアマチュア天文家の皆様によって実施されてきた)古典的な観測手法

■Gaiaカタログの公開

・Vmag > 10 の恒星の位置決定精度が大幅に向上

➡掩蔽予報精度、観測効率が大幅に向上

■LSSTによるサーベイの開始

・半径~100kmのKBOがほぼ全て発見か

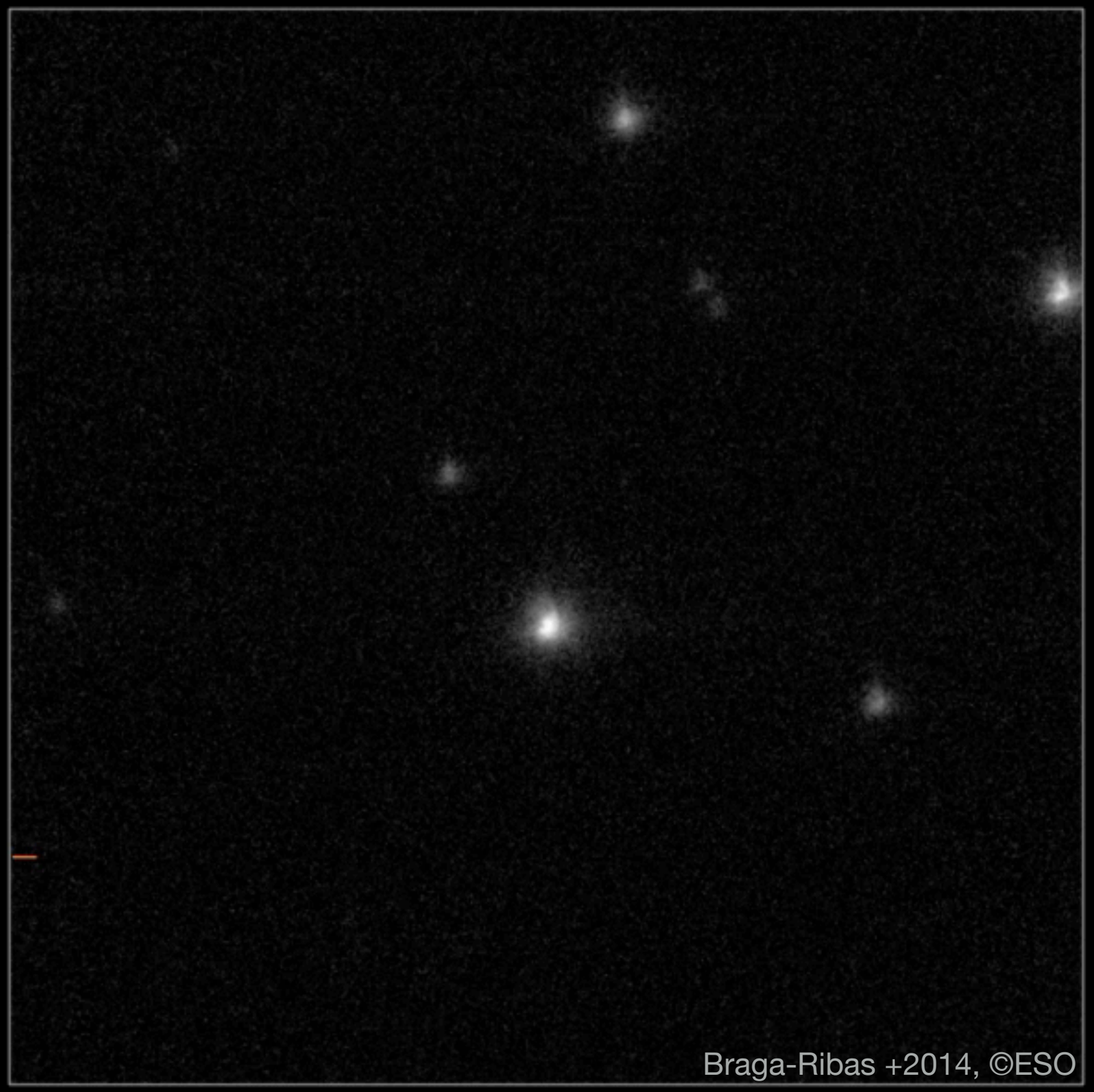
➡発見数が 3300 (2019年現在) → ~ 40000に大幅増加予想 (Schwamb+ 2018)

➡**年間およそ300の恒星掩蔽イベント**が観測できる見込み

➡**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**

重要性の高まる既知外縁天体掩蔽観測: 環の発見

■ケンタウロス族小惑星Charikloによる恒星掩蔽観測(Braga-Ribas +2014)



重要性の高まる既知外縁天体掩蔽観測: 環の発見

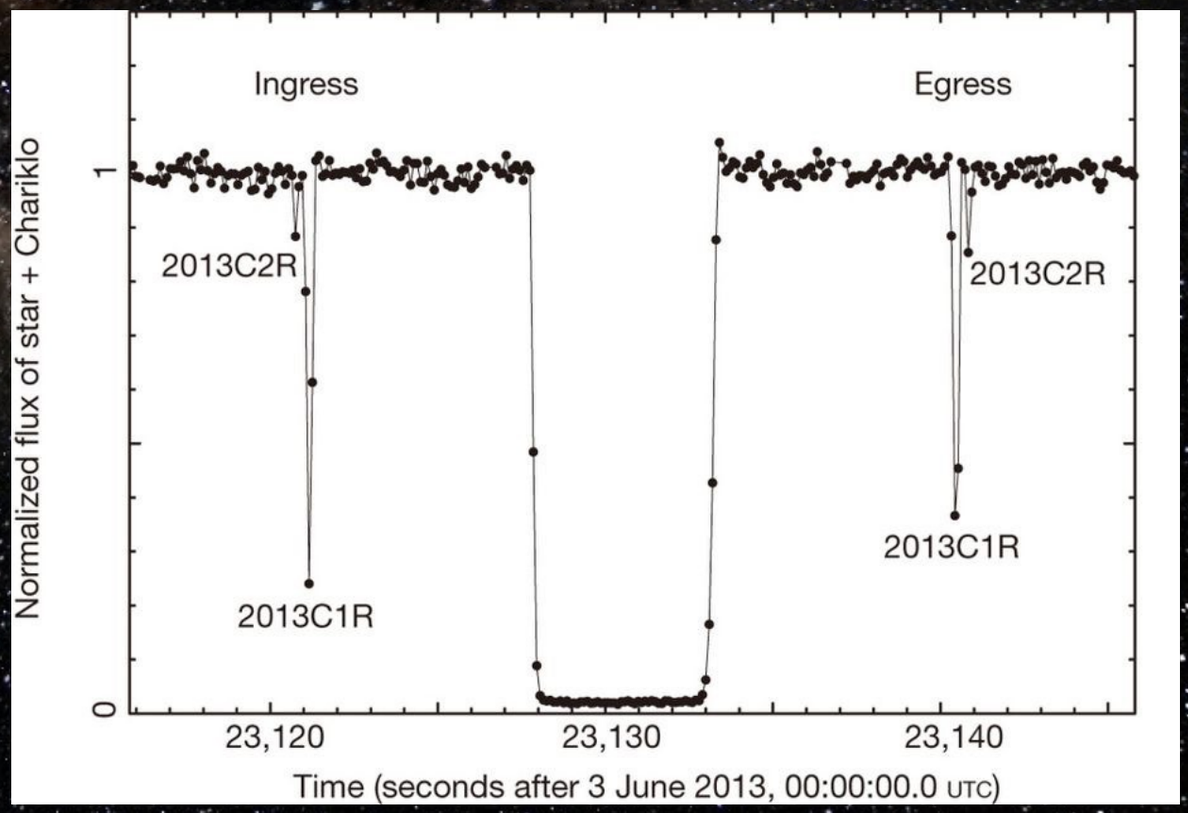
■恒星掩蔽観測によってケンタウロス族Charikloに環を発見(Braga-Ribas+2014)

■他のケンタウロス族・カイパーベルト天体にも環候補を発見(Ruprecht+ 2015)

➡外太陽系の小天体周囲の環はイレギュラーな存在ではない?

■環の形成メカニズムや維持機構は不明

➡より多くの天体に対して掩蔽観測を実施し、KBO特性と多様性を究明したい



準惑星候補天体クワオアー(50000 Quaoar)

■半径およそ560kmのカイパーベルト天体 (Braga-Ribas+ 13)

■宇宙風化をうけやすい結晶質H2O、NH3・H2O氷の発見(e.g., Jewitt & Luu 2004)

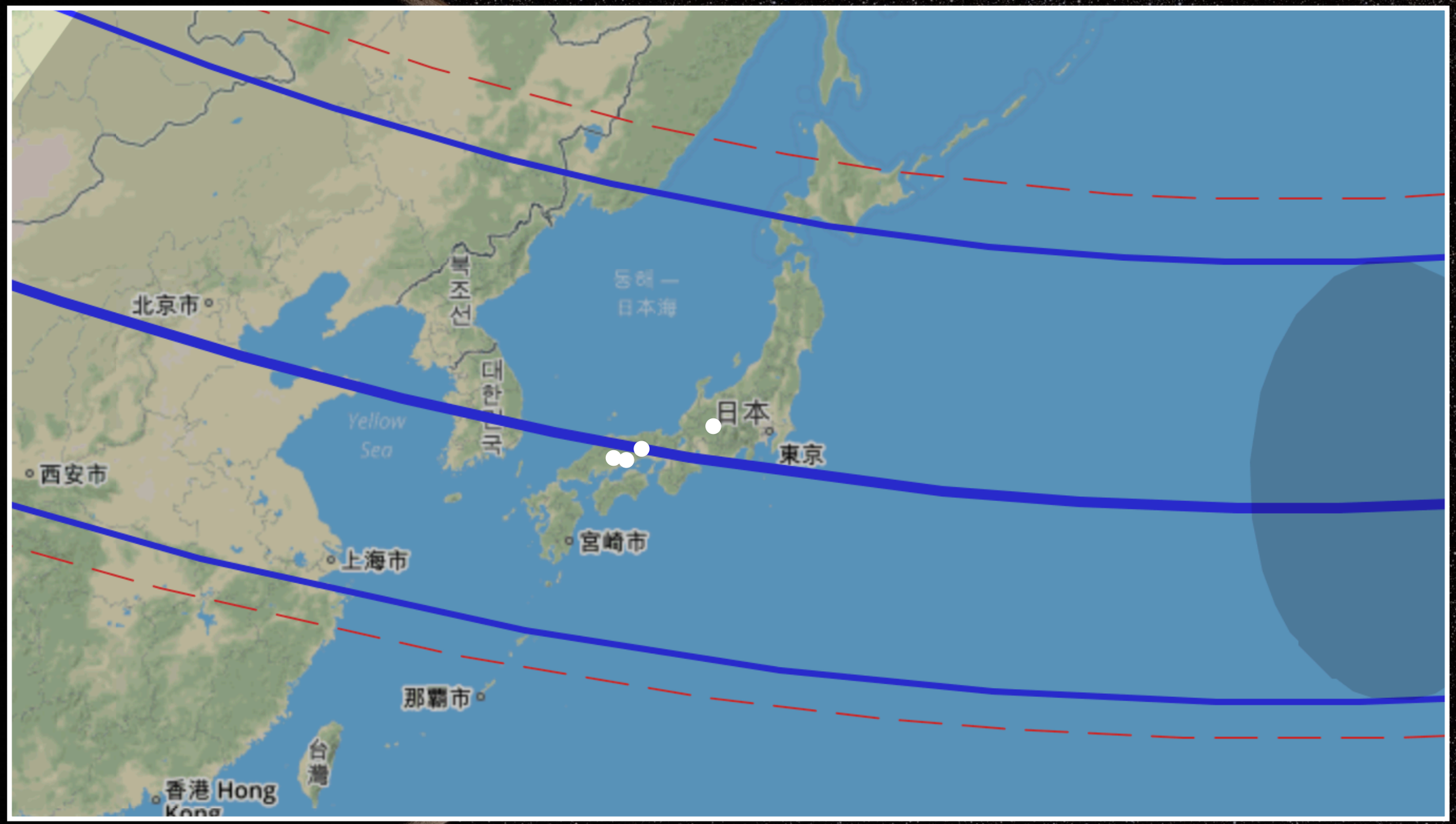
➡大気? 氷の火山?

©Ko Arimatsu/AONEKOYA

クワオアーによる恒星掩蔽@2019年6月28日(Arimatsu et al. 2019b)

■背景星: Gmag = 15.7

■国内4箇所で同時観測

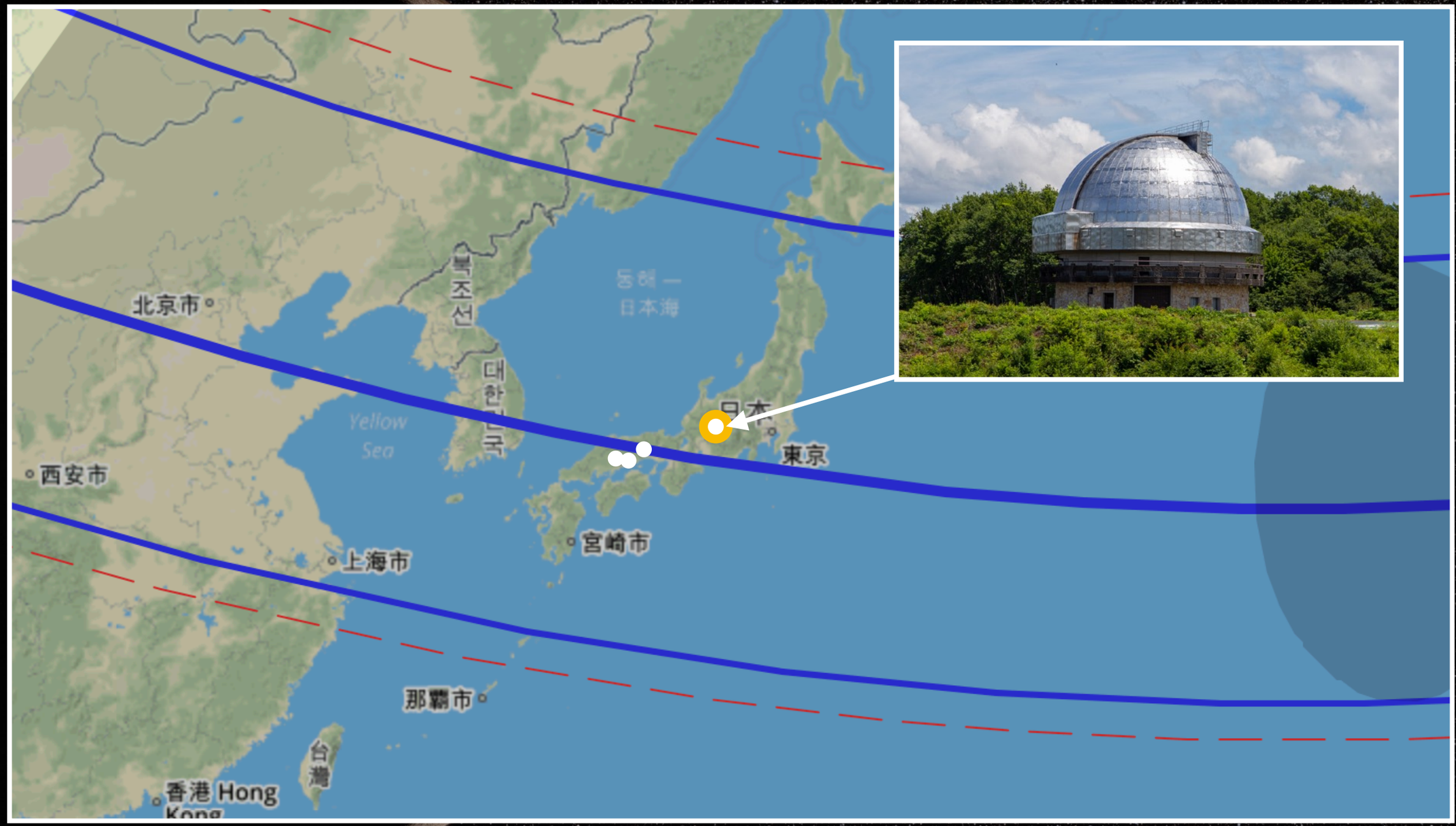


©Ko Arimatsu/AONEKOYA

クワオアーによる恒星掩蔽@2019年6月28日(Arimatsu et al. 2019b)

■国内4箇所で同時観測

➡唯一好天に恵まれた木曽観測所にて1.05mシュミット/Tomo-e Gozenで観測成功

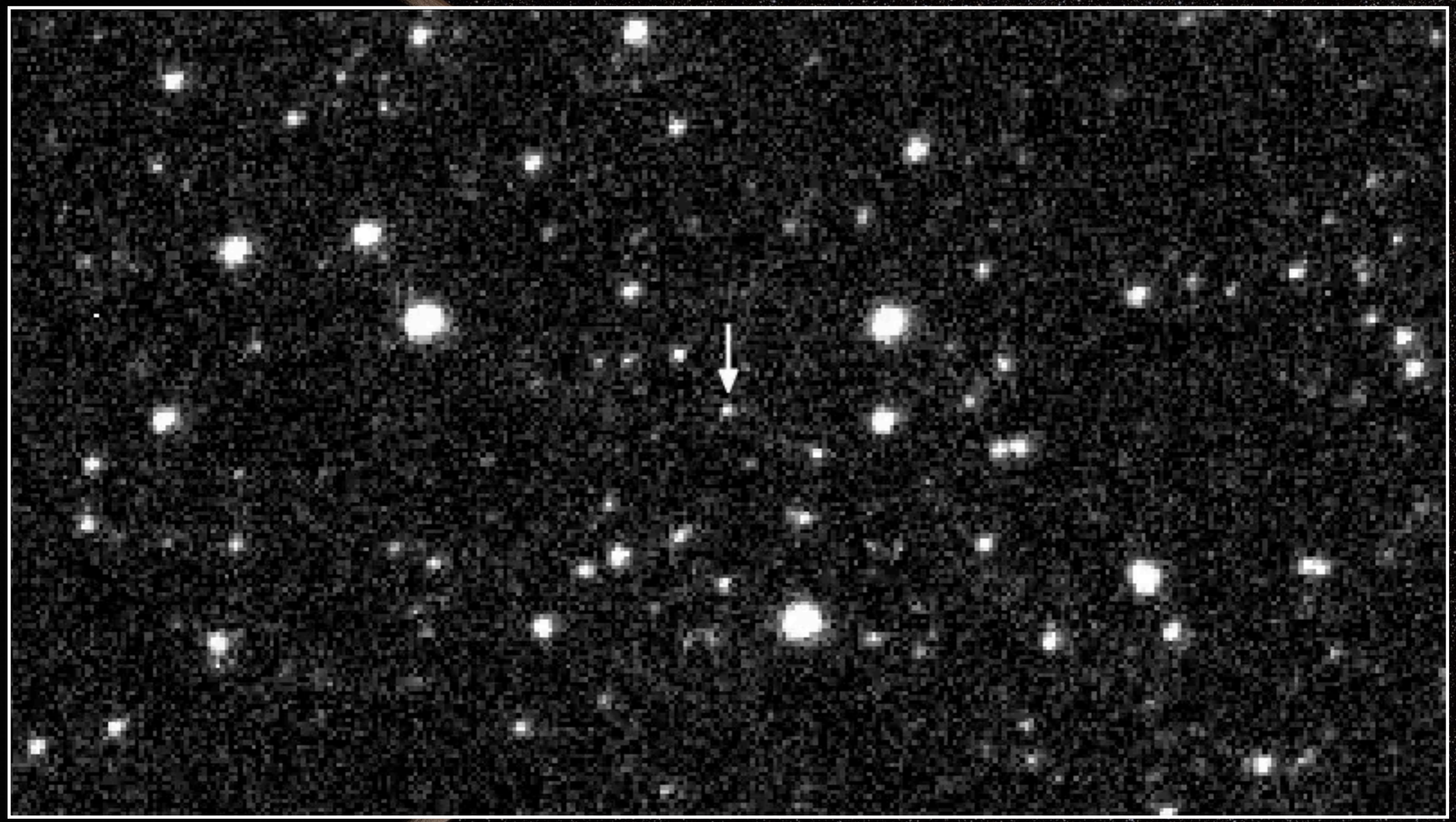


©Ko Arimatsu/AONEKOYA

クワオアーによる恒星掩蔽@2019年6月28日(Arimatsu et al. 2019b)

■国内4箇所で同時観測

➡唯一好天に恵まれた木曽観測所にて1.05mシュミット/Tomo-e Gozenで観測成功

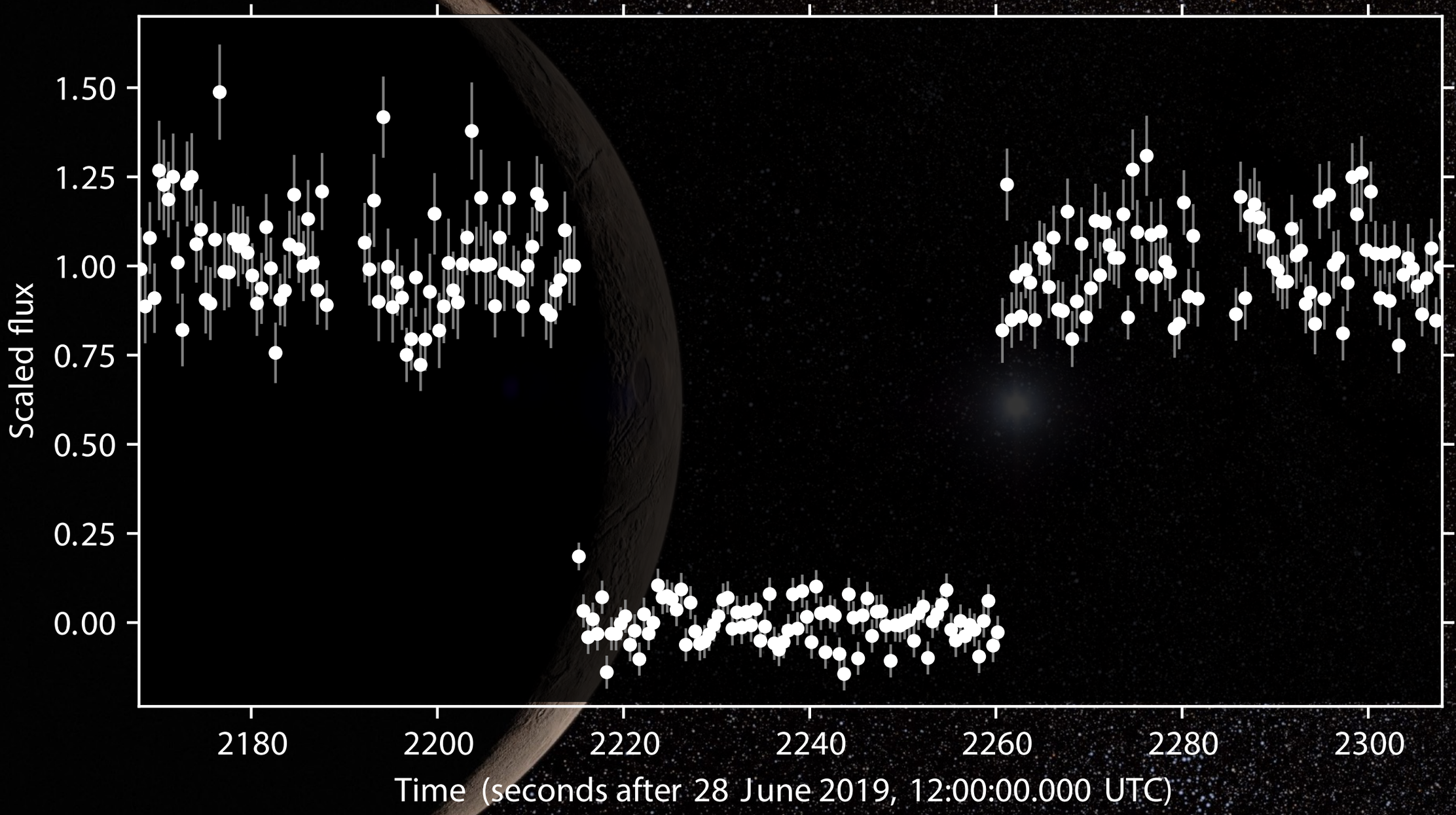


©Ko Arimatsu/AONEKOYA

クワオアーによる恒星掩蔽@2019年6月28日(Arimatsu et al. 2019b)

■木曽観測所にて1.05mシュミット/Tomo-e Gozenで観測された掩蔽の光度曲線

➡G = 15.7 magの非常に暗い背景星ながら高精細な高速(2 Hz)測光観測に成功

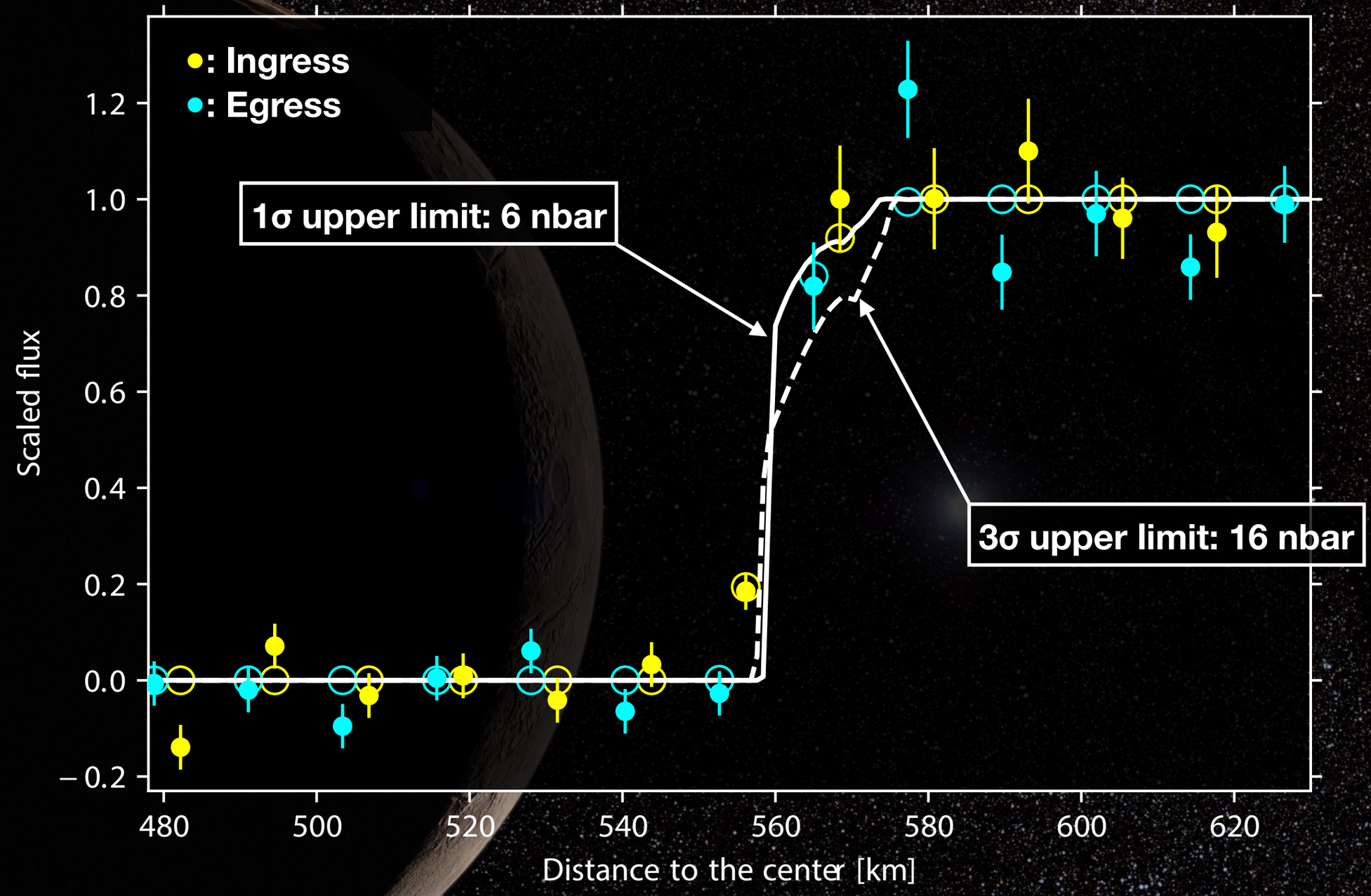


©Ko Arimatsu/AONEKOYA

クワオアーによる恒星掩蔽@2019年6月28日(Arimatsu et al. 2019b)

■潜入/出現時の光度曲線に大気屈折モデルfit(表面気圧をfree parameter)

➡表面大気圧に最も強い観測的制約を得ることに成功



➡先行研究で示唆されていた10nbarレベルのCH_4大気の存在を棄却する結果

©Ko Arimatsu/AONEKOYA

2:中小望遠鏡ネットワーク+動画による既知太陽系外縁天体観測のまとめ

■中小望遠鏡観測網による掩蔽動画観測は太陽系外縁天体の特性究明に威力を発揮
(e.g., Arimatsu et al. 2019b, in prep.)

➡既知天体のサイズ・大気・衛星・環などの解明に貢献

■2020年代前半には掩蔽予報・観測環境が激変

➡既存の観測設備を活用して面白い観測ができそう

・国内(一部国外)の小中天文台ネットワークの活用

・OASESのような小型移動式観測装置の活用

おわり

©Ko Arimatsu/AONEKOYA