

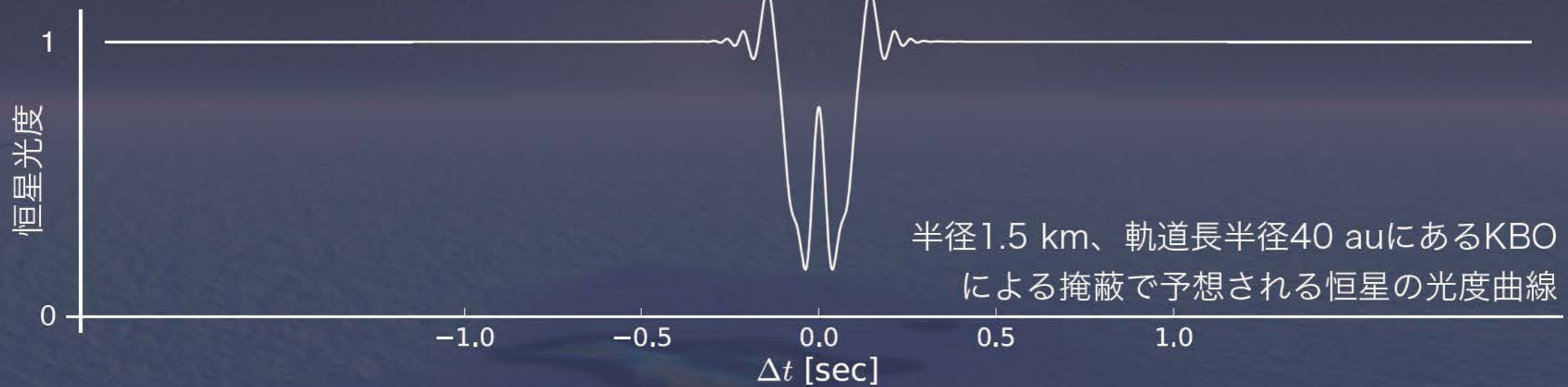


Tomo-eを用いた戦略的観測がつまびらかにする太陽系の『果て』

有松 亘 (国立天文台)

- **恒星掩蔽観測を用いた太陽系外縁部の研究の現状**
 - OASESプロジェクト (Arimatsu et al. 2017, submitted) の紹介
- **Tomo-eを用いた太陽系外縁天体掩蔽観測の可能性**
 - 掩蔽観測におけるTomo-eのポテンシャルを検証

Target: Stellar occultation by a Trans-Neptunian Object (TNO)



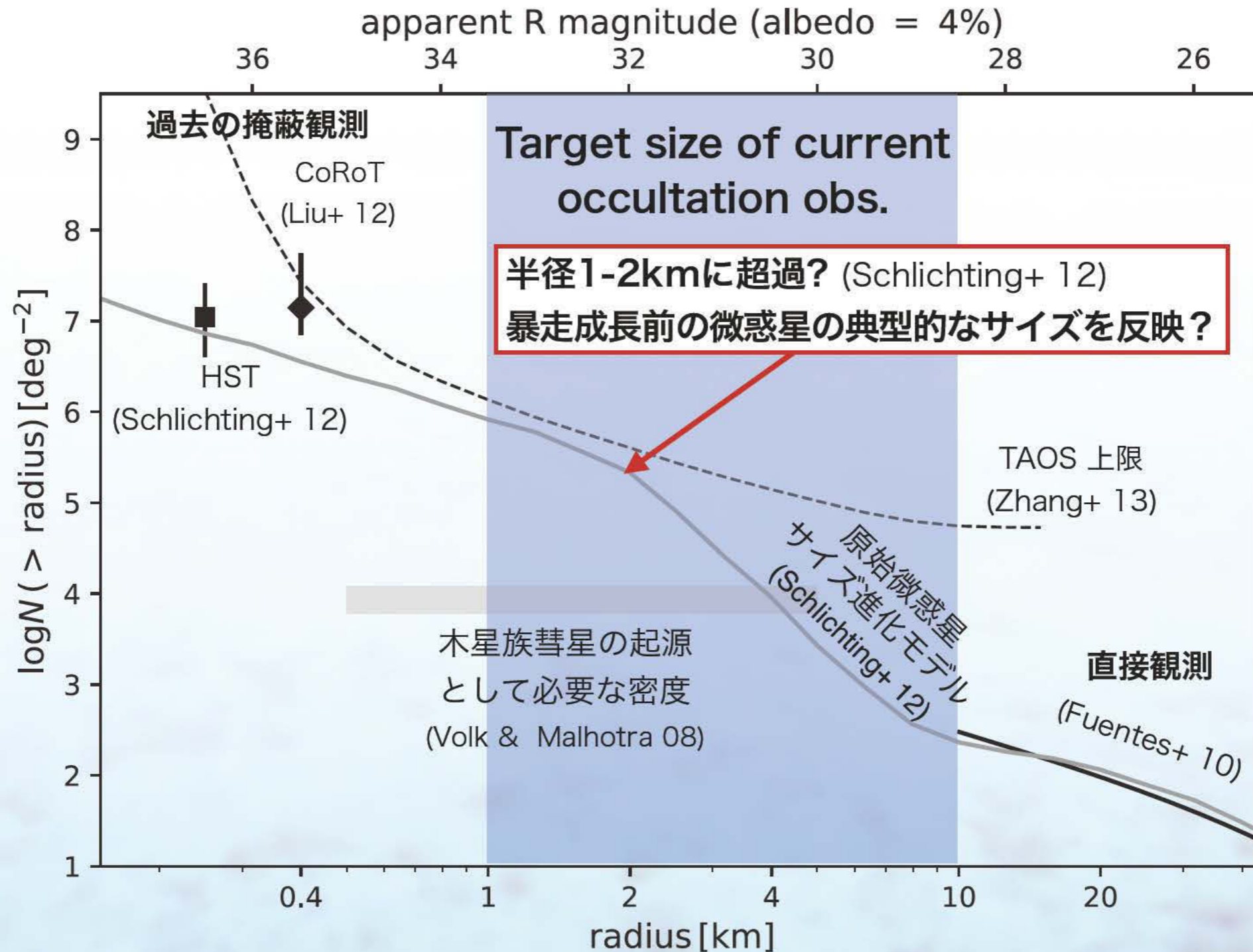
- ・掩蔽の継続時間と減光率から大まかな距離とサイズに制約
- ・掩蔽の発生頻度からサイズ分布の推定

➡ 直接観測不可能な小サイズ、遠方の外縁天体の観測を実現

Primary purpose: size distribution of km-sized Kuiper-Belt Objects (KBOs)

• kmサイズ(半径1-10 km)KBOの累積個数面密度分布(以下サイズ分布)

-KBOの基本特性、惑星形成シナリオ、短周期彗星の起源をさぐる重要な手がかり



➡ 恒星掩蔽現象の検出からサイズ分布に制約を得ることを目指す

• 高速観測

-kmサイズKBOの掩蔽継続時間: 0.2-0.5秒(Nihei+07)

➡ 掩蔽による減光を検出するためには10Hz以上の時間分解能での測光観測が必要

• 広視野

-掩蔽の発生頻度: 1恒星あたり 10^{-2} /年以下(Zhang+ 2013)

➡ 広視野、高感度な観測装置必要

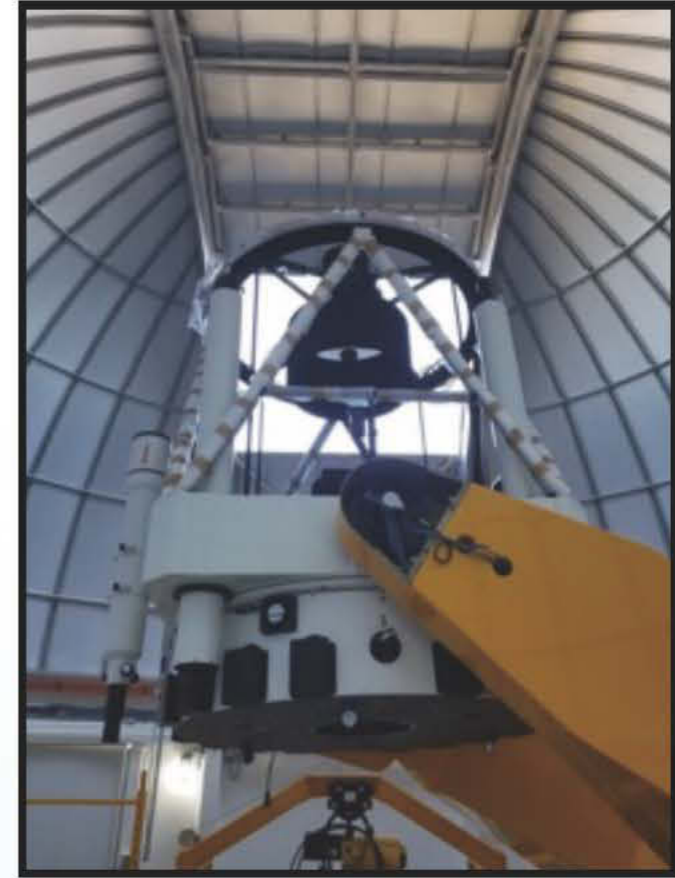
• 再現性ない現象の検出

-シンチレーションノイズ、雲、鳥などによる偽検出の可能性を除外する必要

➡ 複数台の観測装置による同時観測がベター

•TAOSII (Lehner+ 2014)

- 台湾ASIAA、墨UHAM、米CFA、加NRCのプロジェクト
- 1.3m望遠鏡3台をメキシコに新設、同時観測を実施
- 各望遠鏡に10チップの裏面照射CMOSカメラ搭載
- 視野2.3平方度
- 20 Hzフレームレートで約10000の恒星を同時観測実現予定
- 2018年中にはモニタ観測開始?



•CHIMERA (Harding+ 2016)

- 米Caltech+NASA/JPLのプロジェクト
- Hale5.1m望遠鏡の主焦点にEMCCDカメラ2台を搭載
- 視野25平方分
- 20-40 Hzフレームレートで>1000の恒星を2色同時観測
- 2016年には既に観測を開始
- upgradeで視野0.25平方度まで拡張予定



Organized Autotelescopes for Serendipitous Event Survey (Arimatsu et al. 2017)

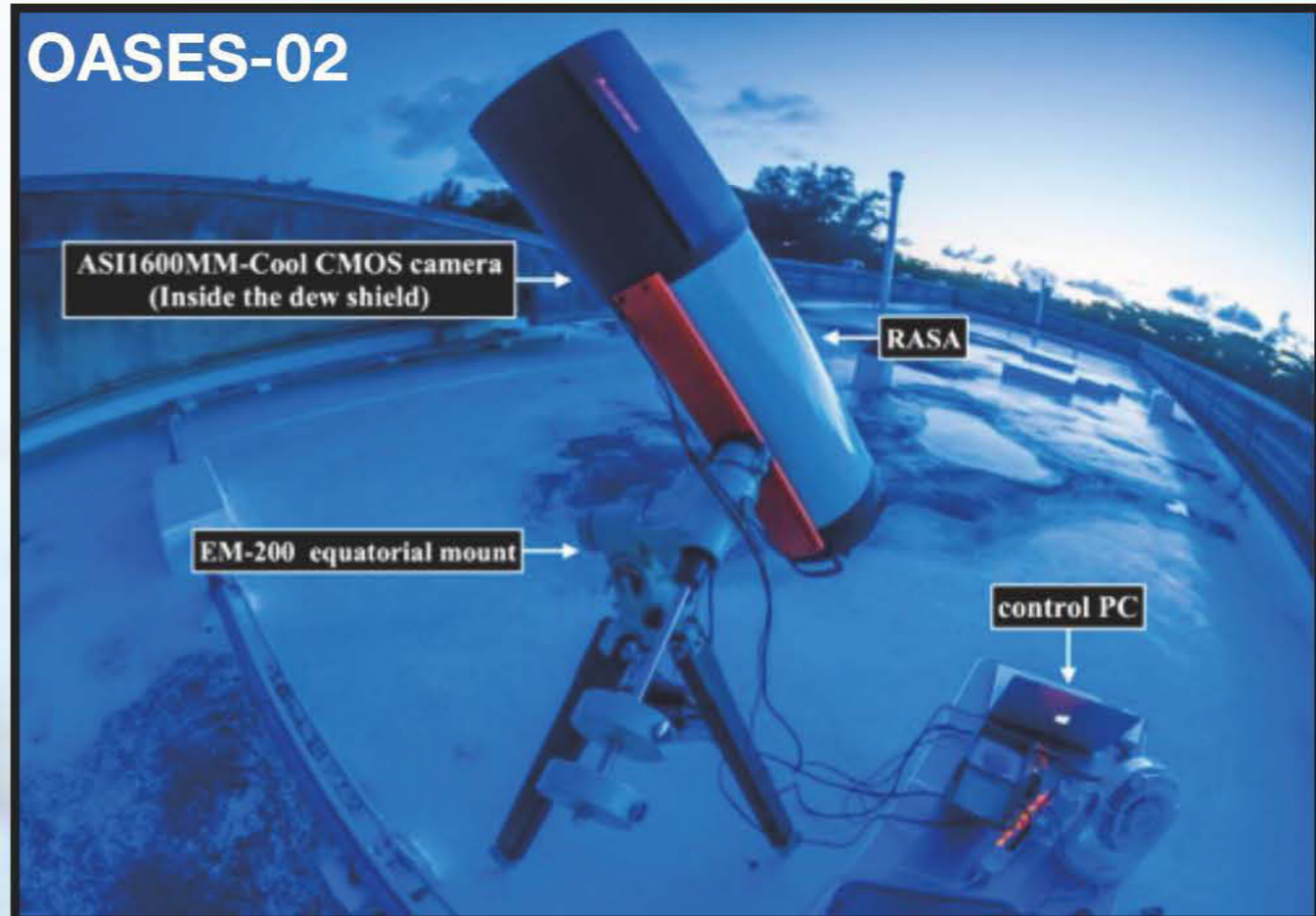
- ・外縁天体による恒星掩蔽観測を実現する小型観測装置
- ・計2台の観測システムを開発
- ・民生品短焦点光学系+CMOSカメラで構成
→低コスト(~16000 USD/台)ながら広視野
高時間分解能観測を実現

口径	279 mm
合成F値	f/1.58
ピクセル数	4656 × 3520
視野	4.05 deg²
読み出しノイズ	2.9 e ⁻
量子効率 (@525 nm)	~60%
撮像フレームレート	15.4 Hz (2×2 bin)
限界等級	V ~12.8 mag

OASES-01



OASES-02



OASES performance test observations (Jul. 2015)



OASES monitoring observations (Jun. 2016 ~)

- ・ 宮古青少年の家屋上に2台の観測システムを40 m離して設置
- ・ 恒星とKBOの天球密度の高い黄道と銀河面の交点付近をモニタ観測

銀河面
掩蔽ターゲットとなる恒星が集中

OASES observation field

黄道
KBOを含む太陽系天体が集中

Example for movie data obtained during OASES monitoring observations

- 4平方度の視野を15.4 Hzのフレームレートで連続撮像観測 (積分時間65 ms)



- 視野内の4000恒星の同時観測を達成 (Arimatsu et al. 2017)
- ➡ 既存の可視高速 (> 5 Hz) 観測装置で最大の同時観測数

今後の掩蔽観測の動向とTomo-eでの観測提案

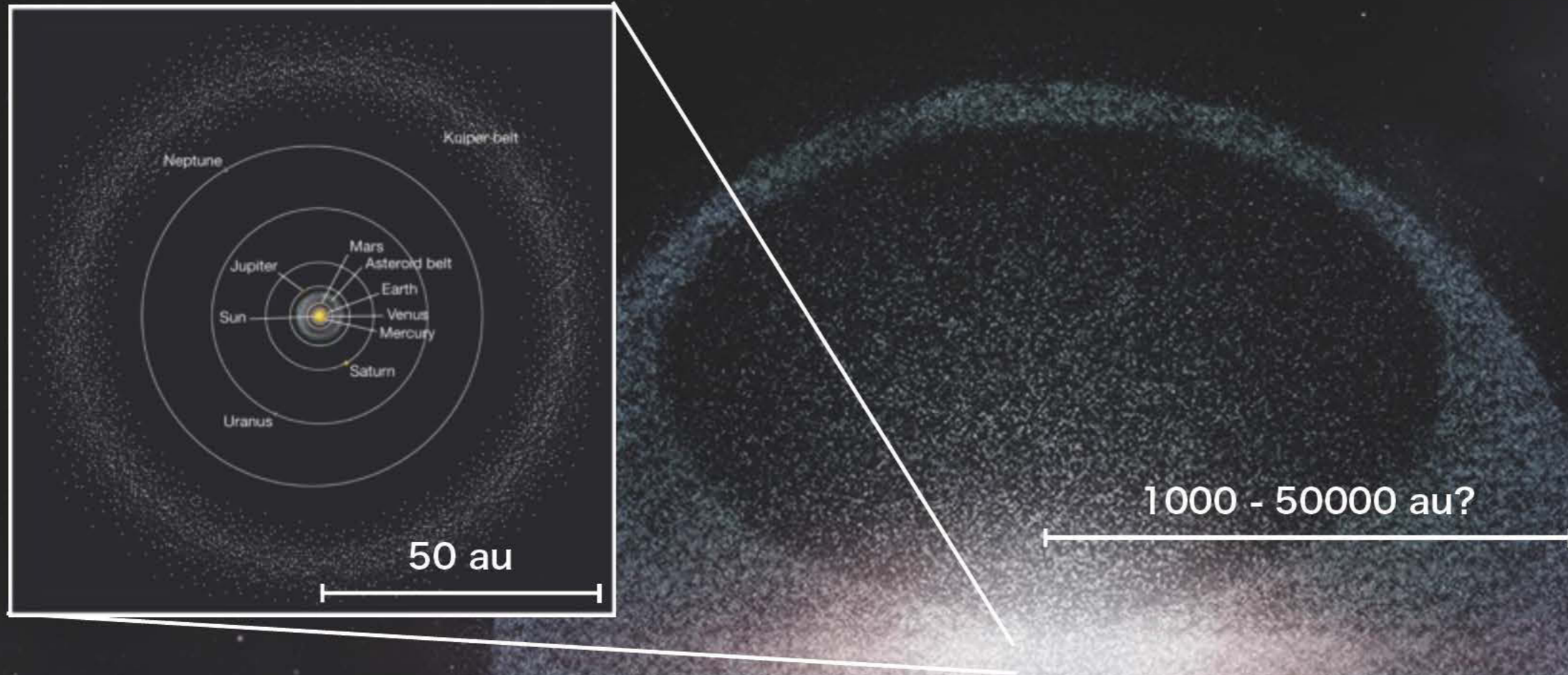
- OASESの結果が示す通り掩蔽観測は太陽系外縁部の観測的解明に有用
- 今後の外縁天体掩蔽観測は専用の大型観測装置を用いた掩蔽特化サーベイが主流に
 - TAOSII (2018年中にモニタ観測開始?)
 - CHIMERA (2016年から断続的に観測実行中)
- いずれも20 Hz以上の複数観測装置を用いた同時観測でKBO掩蔽の検出に特化

[Tomo-eでの掩蔽観測の問題点]

1. Tomo-eで同様の時間分解能(~20 Hz)でKBO掩蔽観測を実施する場合、せっかくの広視野を部分読み出しで生かせないのは勿体無いし、似たような視野の広さ(~2平方度)の単一観測装置でTAOSIIに敵う結果が出せるとは考えにくい
2. 視野全体の1/10しか使用しない観測は他の観測と共存困難で長時間占有の理解得にくい (酒向, 木曾シュミットシンポジウム2016)

[提案] Tomo-eの超広視野を活かした低時間分解能な掩蔽観測

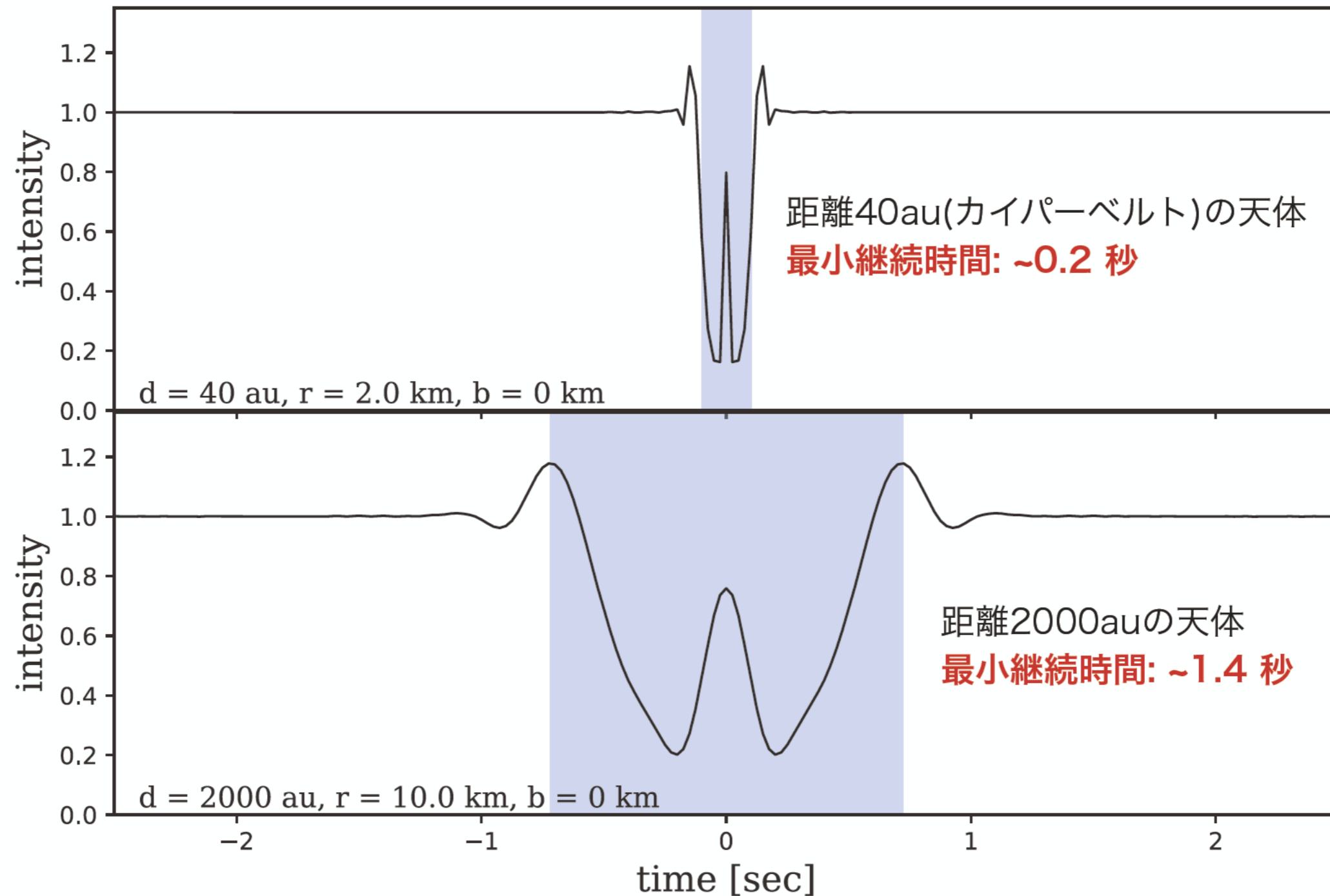
- 10平方度以上の超広視野観測によって銀河面では~10万恒星の同時観測を実現
- ➡ 他のプロジェクトでは検出不可能な発生頻度の小さい掩蔽現象の検出に有利



- **オールト雲:** 長周期彗星の起源として提唱された、太陽系最外縁部の天体群 (Oort 1950)
 - kmサイズ以上の天体が 10^{12} 以上存在すると予想 (Weissman 1996)
 - 距離~1000 auの内縁領域に大量の天体が存在? (Bannister+ 2017)
 - 直接観測は不可能、掩蔽でも発生期待値がKBOに比べ1桁以上低く 検出例無 (Wang+ 09)
- ➡ **Tomo-eによる超多数恒星同時観測で掩蔽の観測を実現できないか**

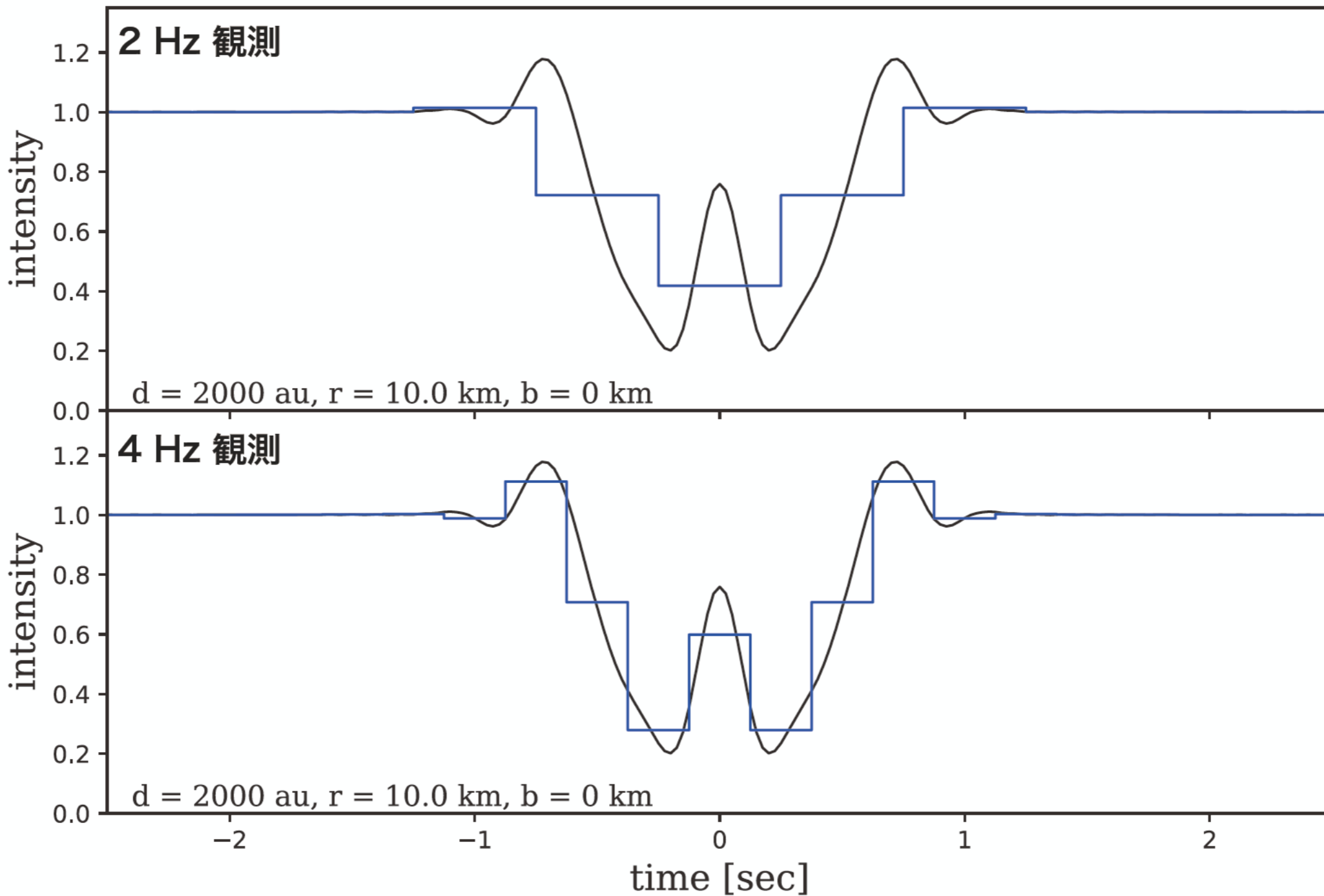
Simulated light curve of an stellar occultation by an Oort cloud object

- ・外縁天体の天球上での移動速度は地球の公転運動速度成分が支配的
- ・影のサイズ(~掩蔽の継続時間)はフレネルスケール($= (d(\text{距離}) \times \lambda(\text{観測波長}) / 2)^{1/2}$)に比例
(Arimatsu+ 2017, impact parameter = 0 の場合)



Simulated light curve of an stellar occultation by an Oort cloud object

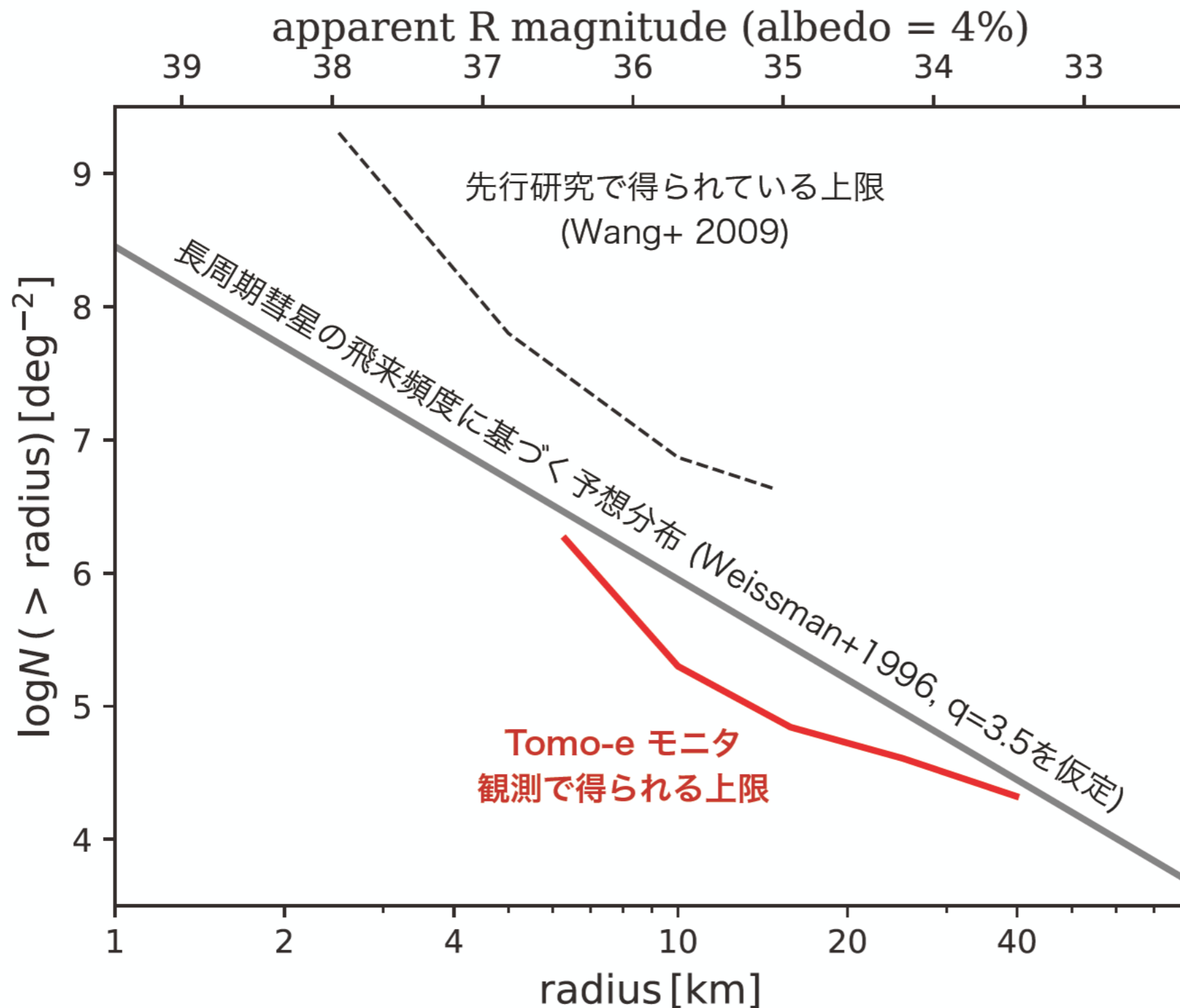
・距離2000auの天体による掩蔽を観測した場合に得られる光度曲線



→2-4 Hz 観測でもオールト雲天体による掩蔽なら複数フレームで検出可能

Tomo-e observation of Oort cloud occultations: Case 1

- 2Hz全画素読み出しモードで銀河面を300時間観測した場合のサイズ分布への制約



観測領域: 典型的な冬銀河面領域((ra,dec)~(6h,+24°))

恒星カタログ: Gaia DR2

オールト雲動径分布:
Duncan+ 87 ($r_{\min} = 1000$ au
を仮定)

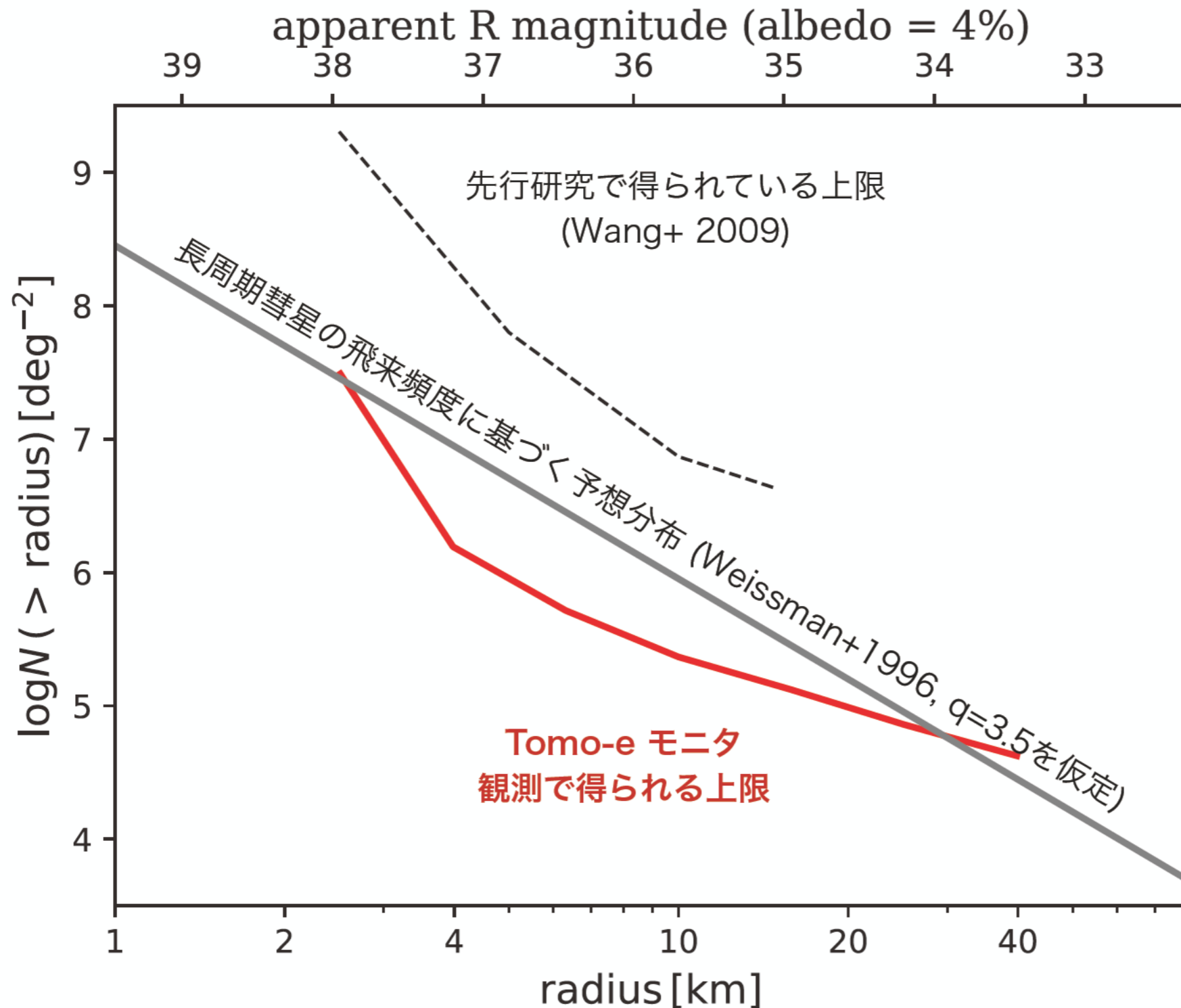
検出基準: 3フレーム以上で
4.5 σ 以上の光度減少を検出
($p < 10^{-13}$)

感度計算: 開示されている
Tomo-eの性能評価結果を使用
(Sako+ SPIE 2018, 一木
木曾シュミットシンポジウム
2016)

- 半径10-40 kmのオールト雲天体に観測的制約

Tomo-e observation of Oort cloud occultations: Case 1

・4Hz部分読み出しモードで銀河面を300時間観測した場合のサイズ分布への制約



観測領域: 典型的な冬銀河面領域((ra,dec)~(6h,+24°))

恒星カタログ: Gaia DR2

オールト雲動径分布:
Duncan+ 87 ($r_{\min} = 1000$ au
を仮定)

検出基準: 3フレーム以上で
4.5 σ 以上の光度減少を検出
($p < 10^{-13}$)

感度計算: 開示されている
Tomo-eの性能評価結果を使用
(Sako+ SPIE 2018, 一木
木曾シュミットシンポジウム
2016)

・半径4-20 kmのオールト雲天体に観測的制約

- **目標: Tomo-eを用いてオールト雲を観測する**

- 17世紀科学革命が発端の『太陽「系」探求史』における最後のフロンティアを解明
- 仮に掩蔽を検出できた場合にはカイパーベルト天体の発見(Jewitt & Luu, 1993, Nature)と同等かそれ以上のインパクト

- ➔ **太陽系・惑星系のあり方を観測的に刷新**

- **観測: 恒星数の多い銀河面領域を2 Hz or 4 Hzの時間分解能で300時間観測**

- 掩蔽観測なら4 Hzでの観測がベターだが、他の観測との共存を考えると2 Hz?
- 銀河面天体/恒星サーベイとは観測共有可能?

- **オールト雲天体の発見可能性は現時点でTomo-eが最も高い**

- 銀河面領域なら~1000000恒星の同時観測実現
- 今年度から開始すればTAOSIIを出し抜ける可能性大



- Tomo-eと木曾観測所内に配置したOASES改良機で
共通天域を同時観測

 - Tomo-e: 2 Hz

 - OASES: 4-5 Hz

- 同時観測可能天域: ~4平方度

- 銀画面観測なら約20000恒星の同時観測可能

