

木曾Tomo-e Gozenを用いた 微小NEOの高時間分解撮像観測

修正版



木曾シュミットシンポジウム2021

@ 木曾観測所 & zoom, 2021年10月4-6日

紅山 仁 (東京大学)

Key Message

小惑星発見： **2752回**、**約140時間** ($+\alpha$) の追跡観測を実施し **28天体を発見**

小惑星の特徴づけ：微小NEO**51天体** ($+\alpha$) の光度曲線を取得 (**> 30時間**)

Tomo-e Gozenに関わる皆様、いつもありがとうございます。

Co: 酒向重行、大澤亮、瀧田怜、小林尚人 (東京大学)、
奥村真一郎、浦川聖太郎(日本スペースガード協会)、
臼井文彦、吉川真 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)、
吉田二美 (産業医科大学、千葉工業大学)、
Tomo-e Gozen Collaboration

科学的背景

- はやぶさ、はやぶさ2、OSIRIS-RExなどによる小惑星の詳細探査 + サンプル採取

-
- 100 m 級小惑星がラブルパイル
 - 宇宙風化作用に関する知見

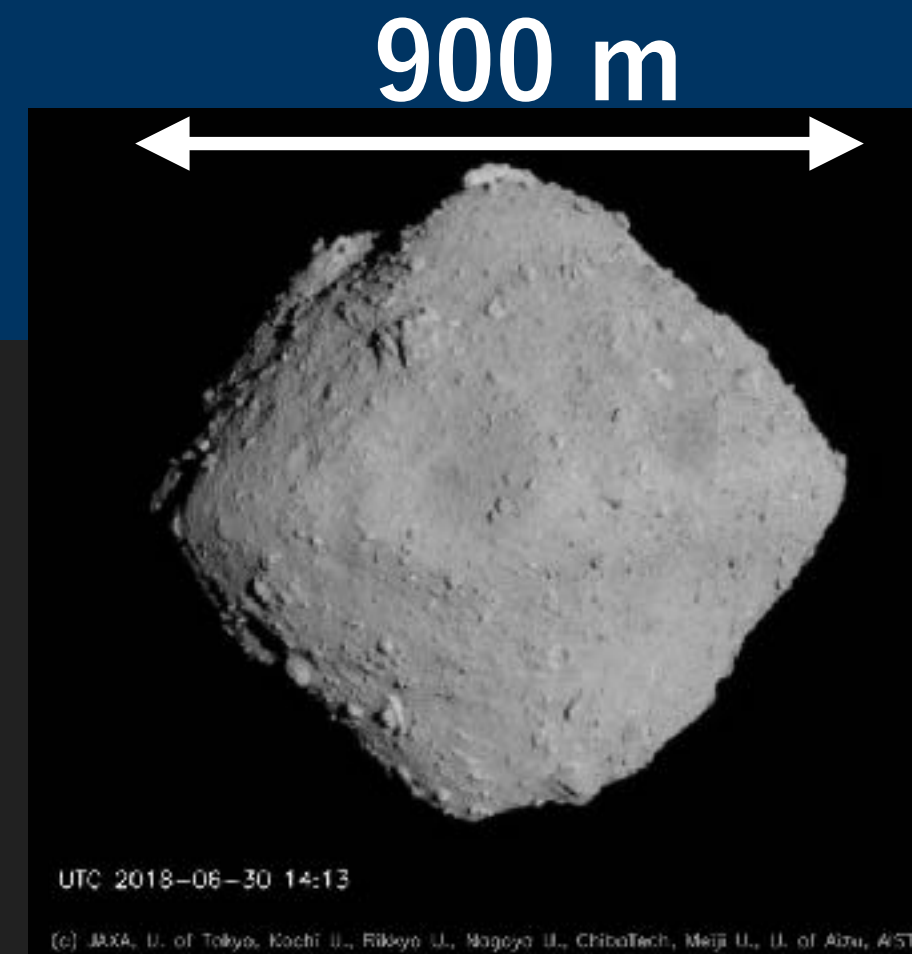
- ラブルパイルの構成物である一枚岩の理解は乏しい。どのような**強度**、組成をもつのか？

地球接近小惑星 (Near-Earth Objects, NEOs)

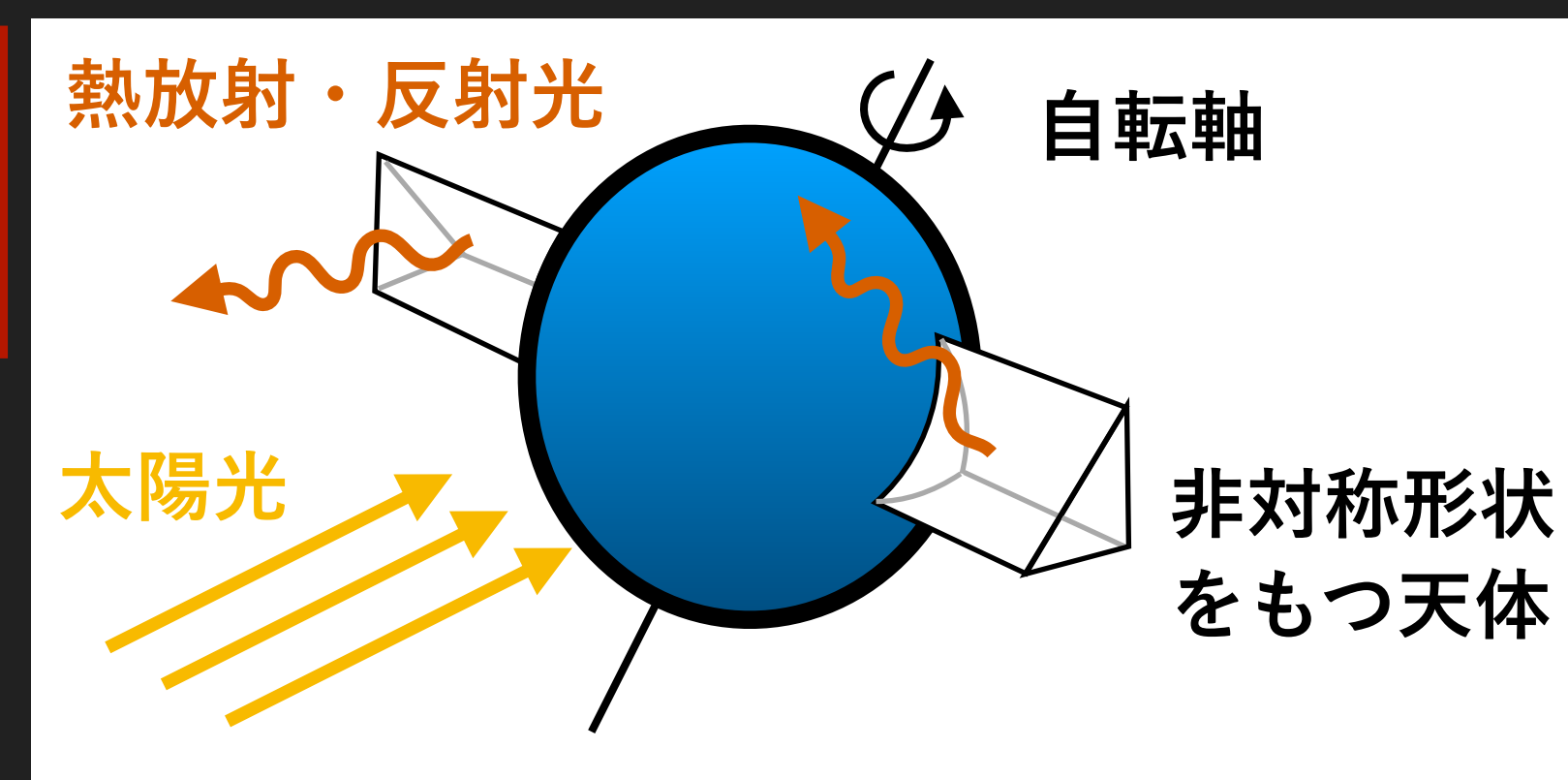
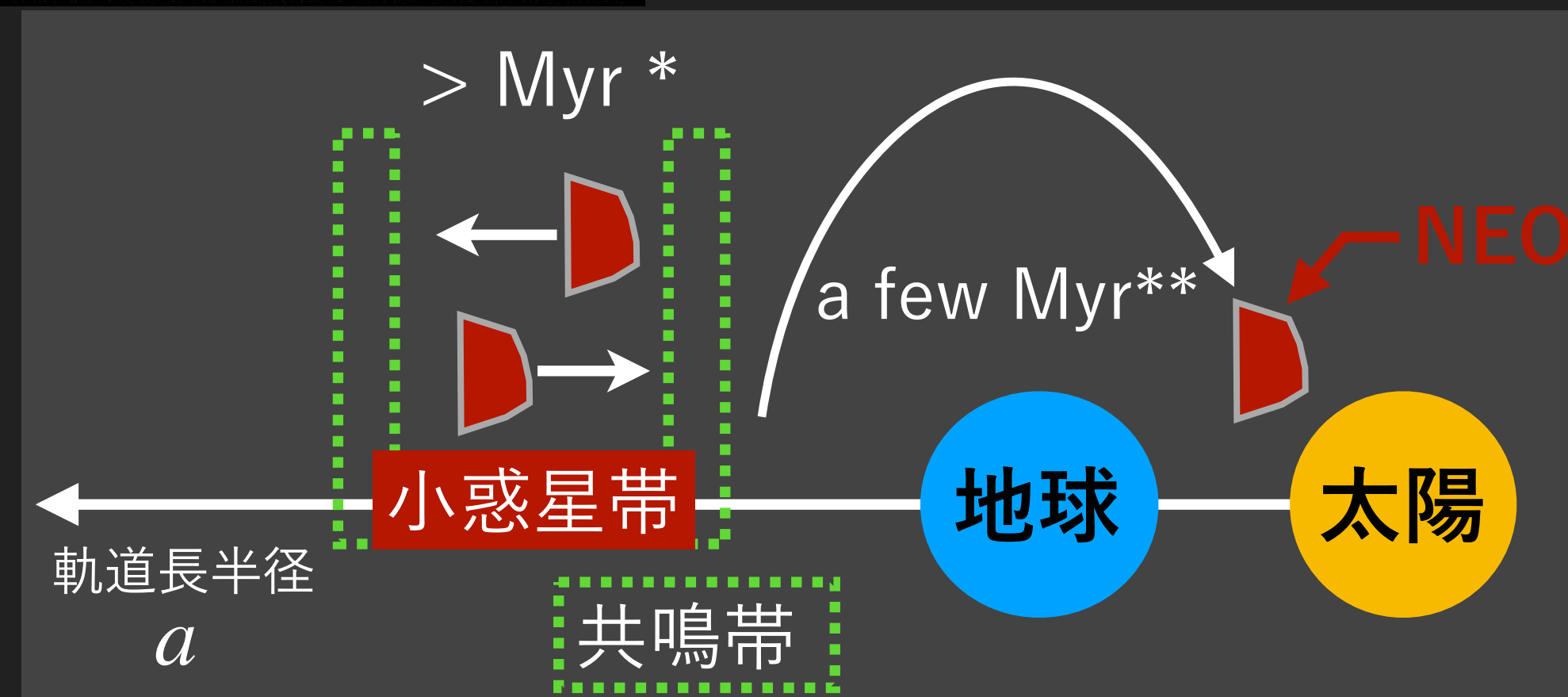
- 近日点距離 $q < 1.3 \text{ au}$
- メインベルトから軌道発展 (~ 10 Myr)
→ 太陽輻射に起因し**自転状態が変化**

ヨーロッパ
YORP 効果 ***
(Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack)

- 臨界自転周期に達すると自転破壊を経験
→ **自転周期分布は小天体の強度のトレーサー**



小惑星 Ryugu
(クレジット：JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研)



YORP効果の概念図

* Greenberg+2020

** Gladman 1997

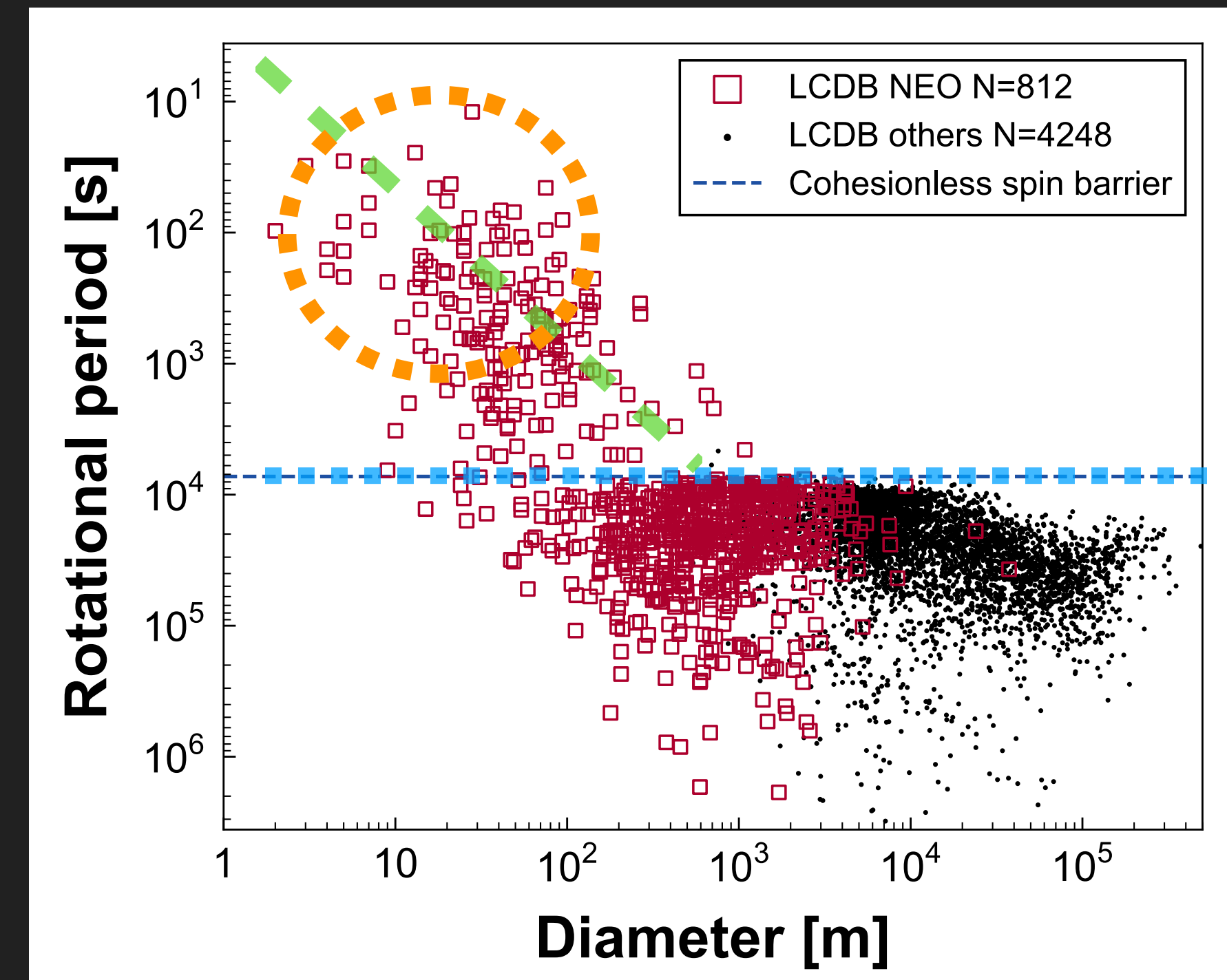
*** Rubincam 2000

直径-自転周期分布

- ・ **重力スピンバリア** $P = \text{const.}$
 - ▶ 大きな小惑星 ($D > 100$ m)、観測数 **多**
 - ▶ 自転周期2時間以下で遠心力に耐えきれず自転破壊 (Pravec & Harris 2000)
- ・ **強度スピンバリア** $P \propto D^{5/4}$
 - ▶ 微小小惑星 ($D < 100$ m)、観測数 **少**
 - ▶ 一枚岩小惑星は引っ張り強度により構造を保持し、重力スピンバリアより高速自転可 (Holsapple 2007)

Question

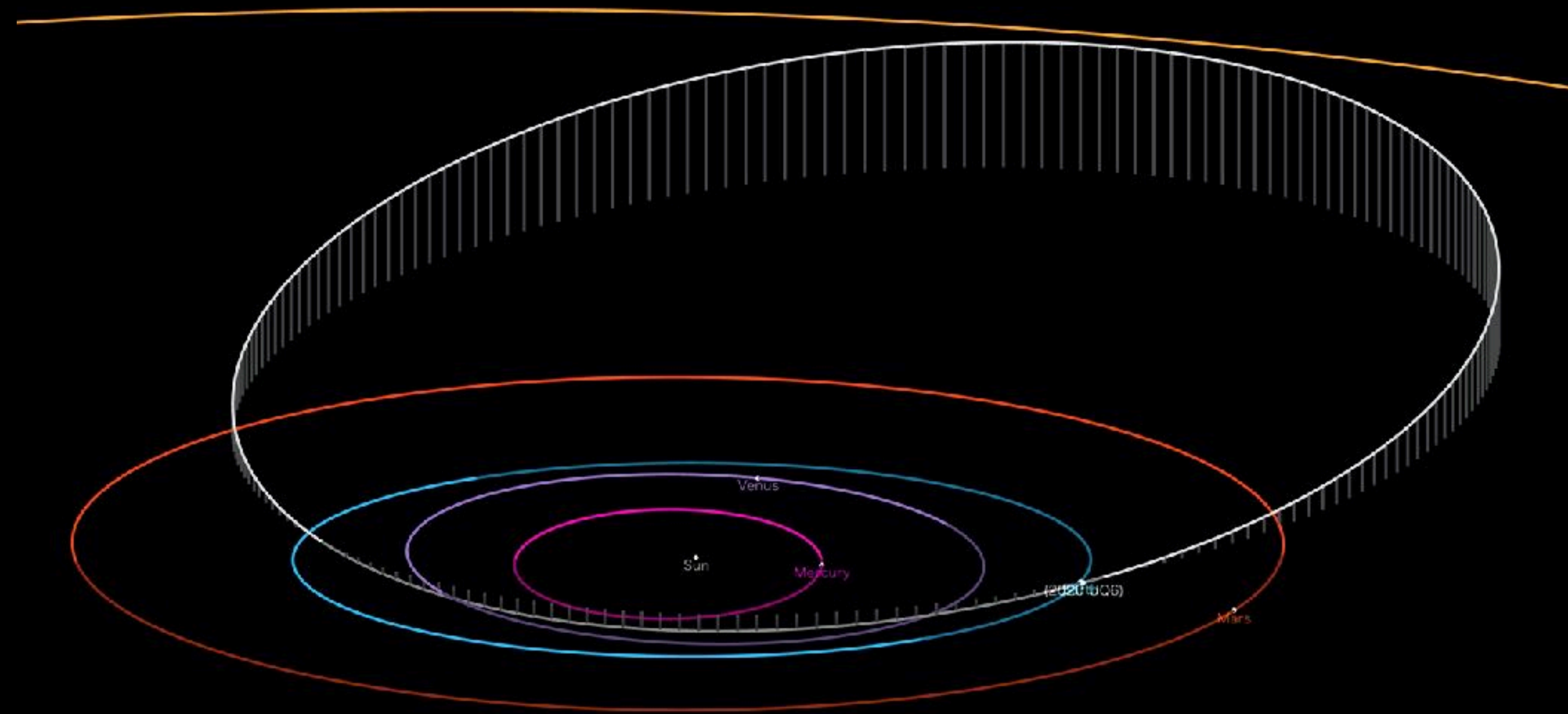
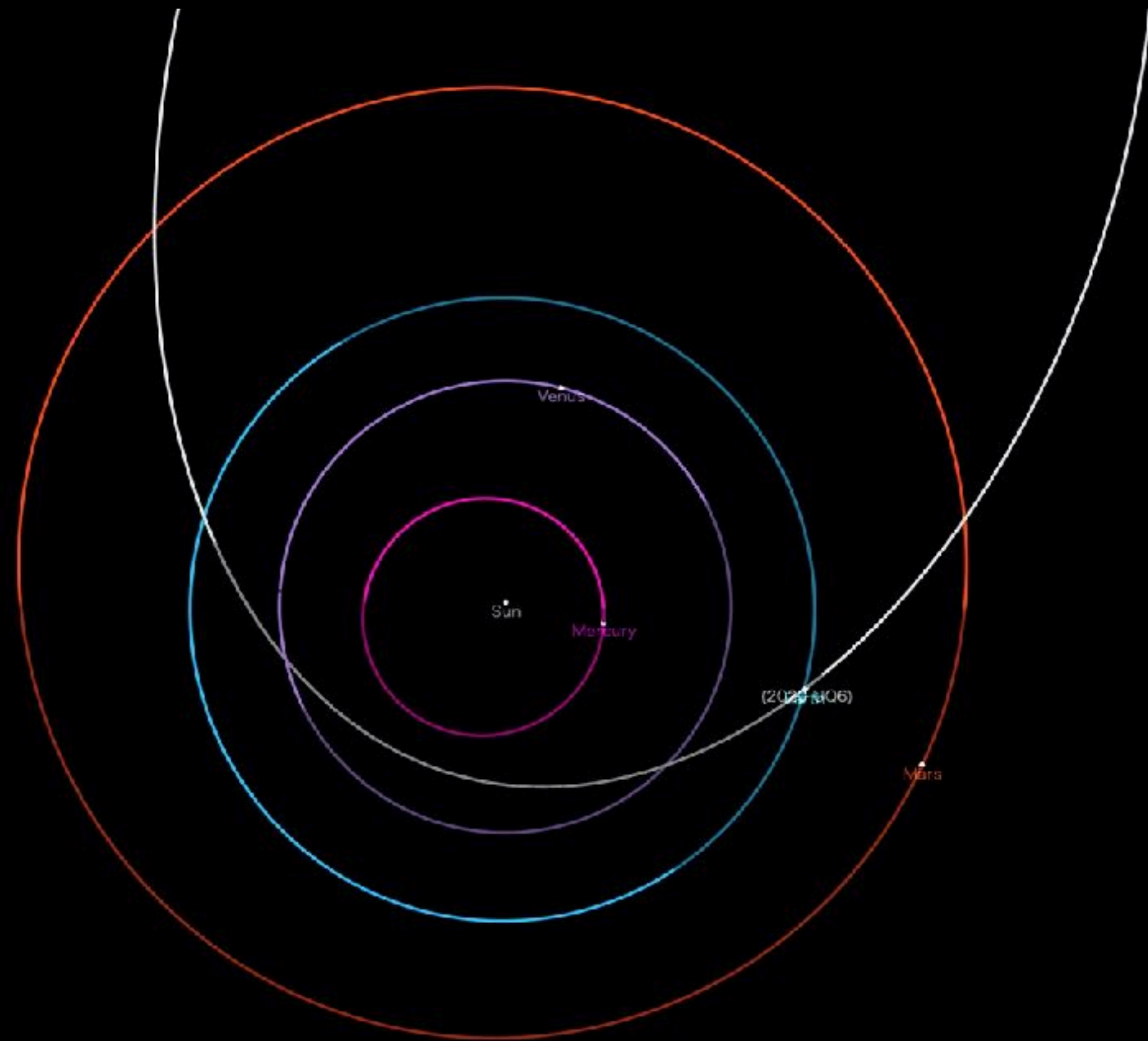
微小小惑星の強度スピンバリアは観測的に存在するのか?



小天体の直径-自転周期関係*

微小NEO観測の困難性

白: 微小NEO (2020UQ6) の軌道

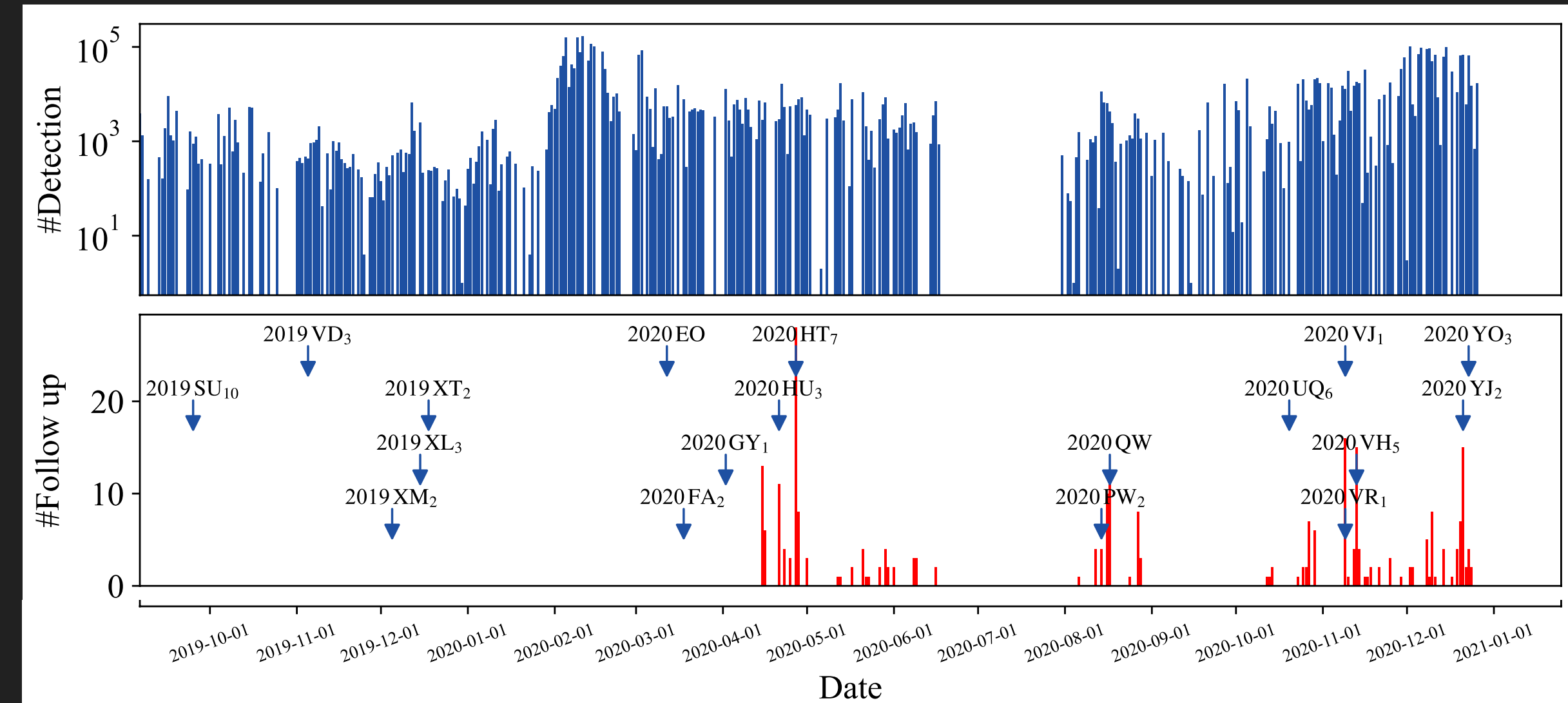


JPL/HORIZONSを使用して作成
(<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html#/>)

NEOの探索

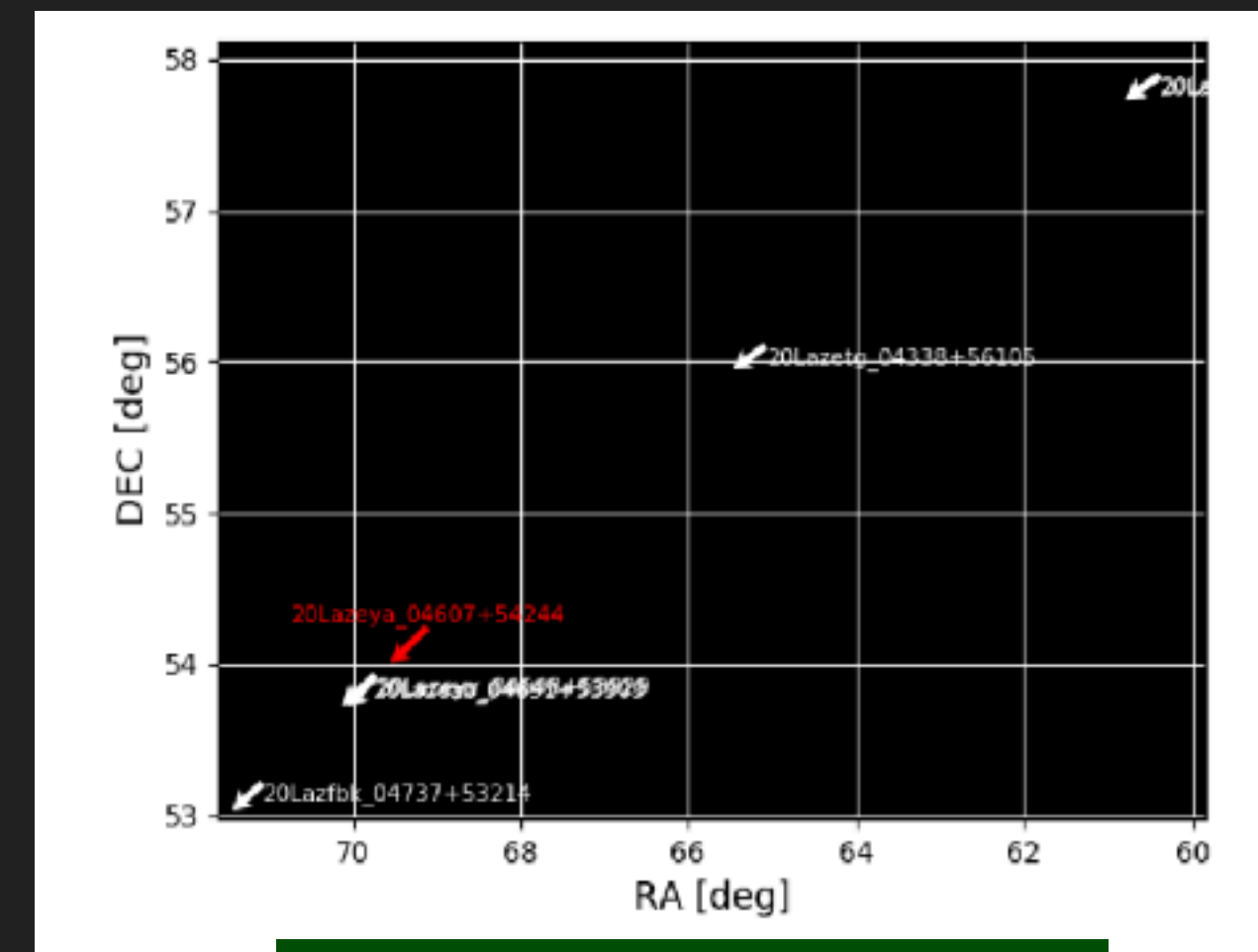
- 毎晩のTomo-e Gozenサーベイ観測データから

- ▶ 移動天体を検出 (Ohsawa 2021)
- ▶ 機械学習を用いて誤検出を削減 **1000–10000 天体/夜**
- ▶ (ほぼ)リアルタイムでウェブアプリケーションを用いて移動天体候補を目視確認 **10–100 天体/夜**
- ▶ **NEO候補天体** に対し追跡観測を実施 **数天体/夜**



移動天体検出数と追跡観測数 (2019年10月–2020年12月)

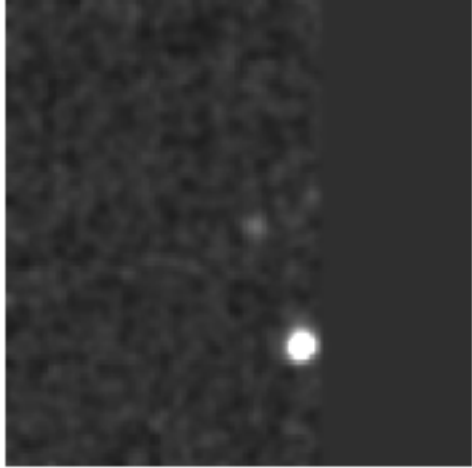
- ▶ 追跡に成功し3点以上検出できた天体を小惑星候補としてIAU 小惑星センタに報告 (ex. TMG0002)
- ▶ 世界中で追跡観測がなされると小惑星候補として認定、仮符号を取得 (ex. TMG0002 -> 2019 FA)



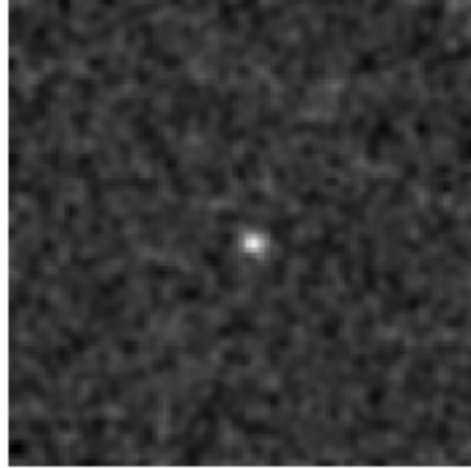
NEO候補天体の追跡例

NEOの探索

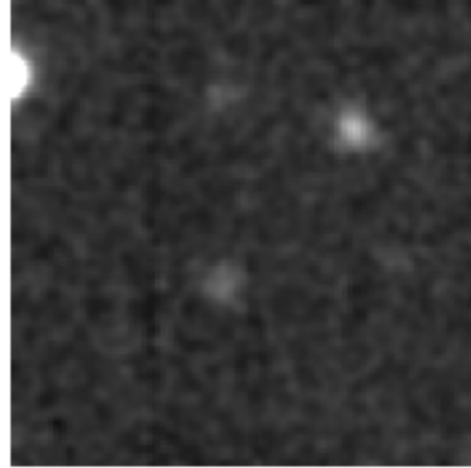
TMG0005



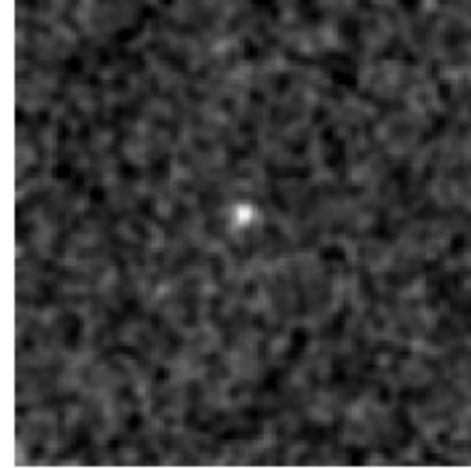
TMG0010



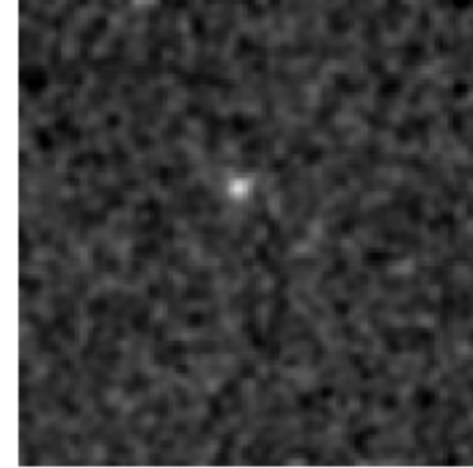
TMG0013



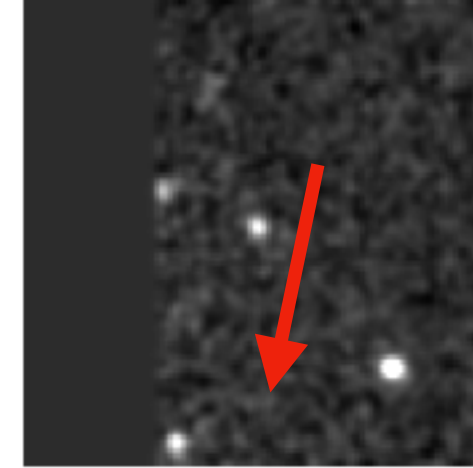
TMG0014



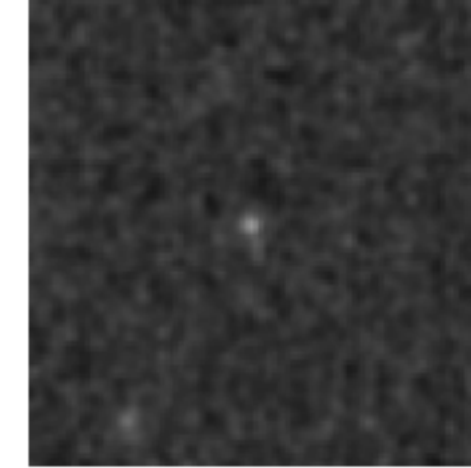
TMG0016



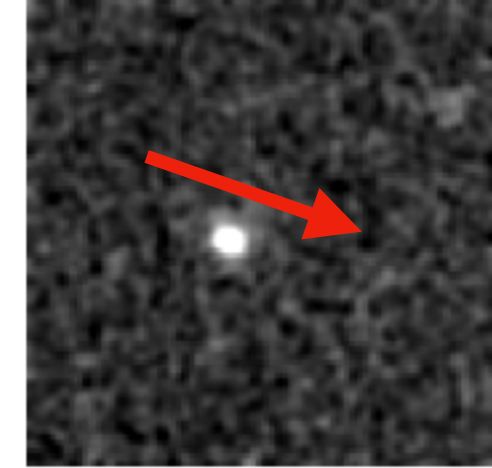
TMG0018



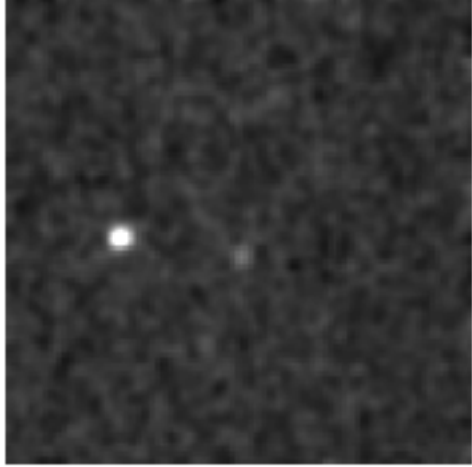
TMG0019



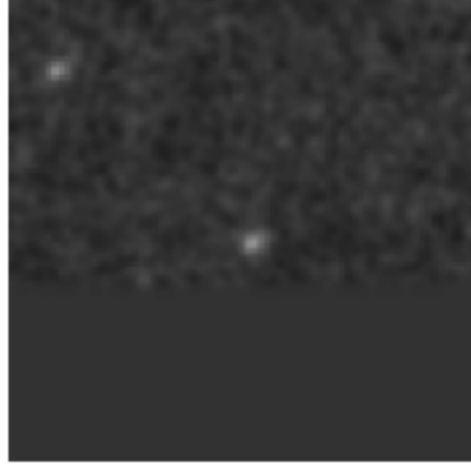
TMG0021



TMG0022



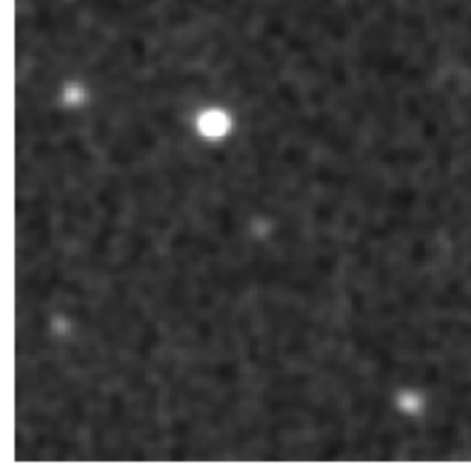
TMG0023



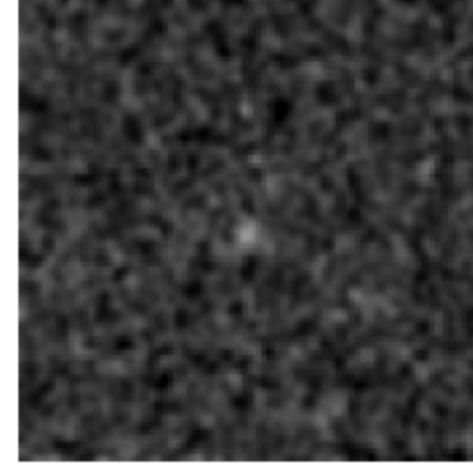
TMG0024



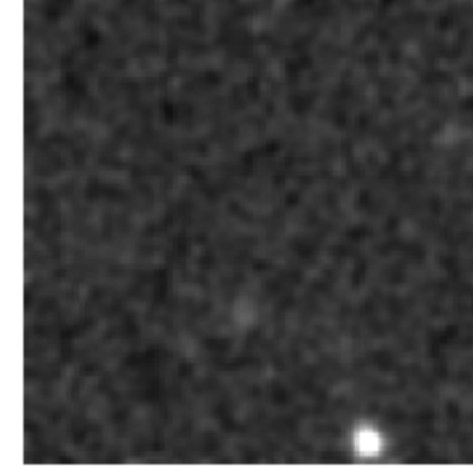
TMG0026



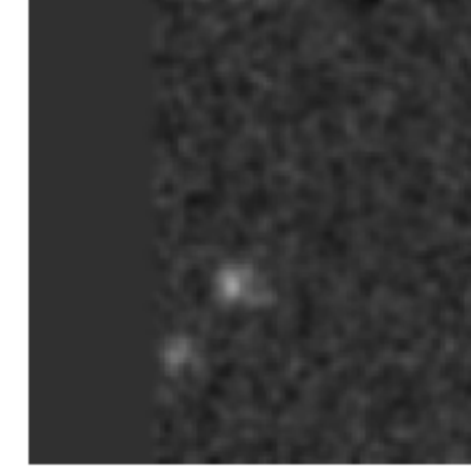
TMG0028



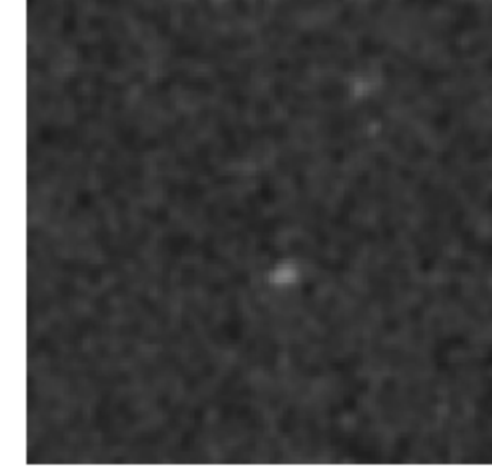
TMG0029



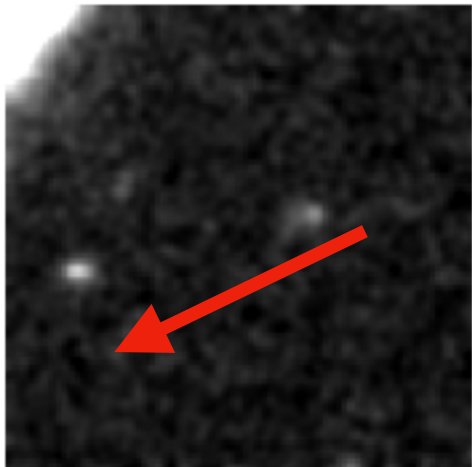
TMG0030



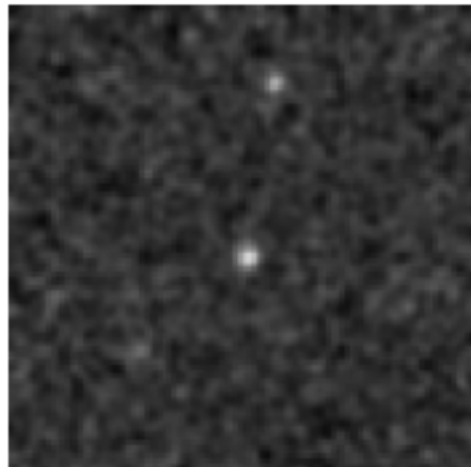
TMG0032



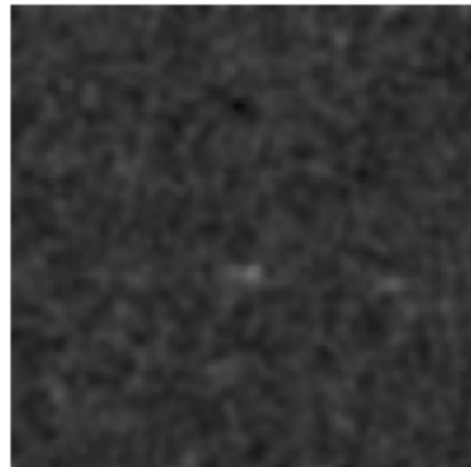
TMG0022



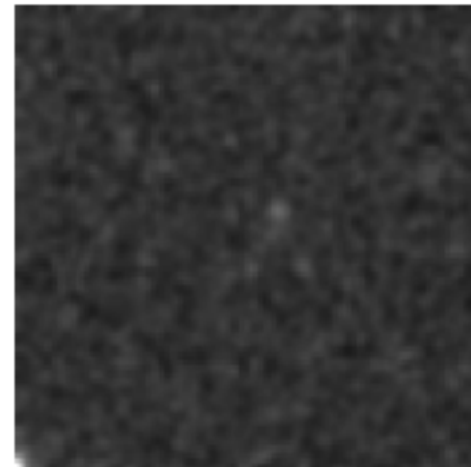
TMG0023



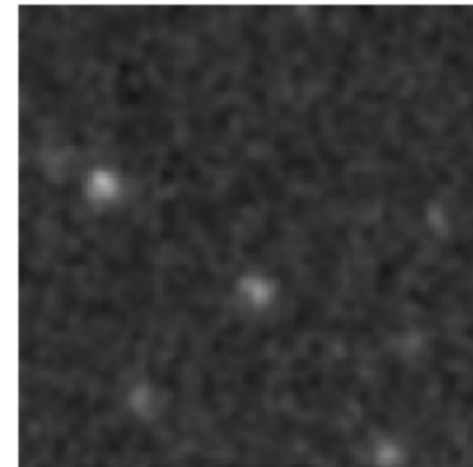
TMG0024



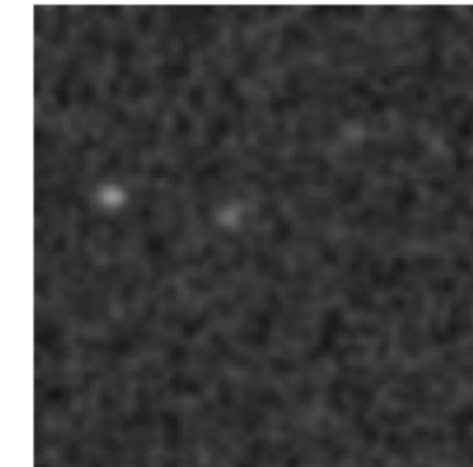
TMG0026



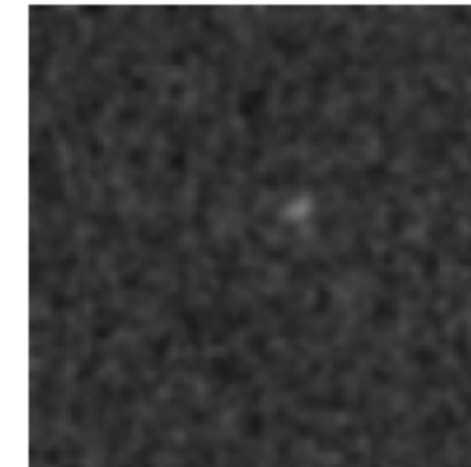
TMG0028



TMG0029



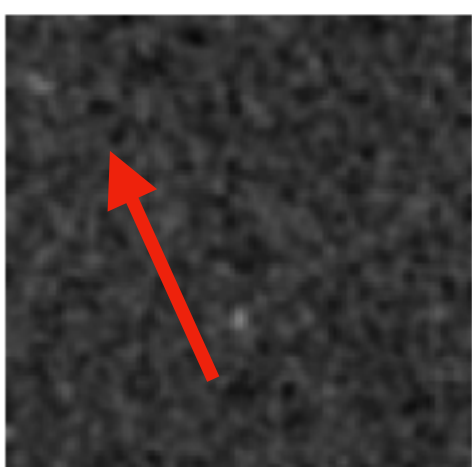
TMG0030



TMG0032



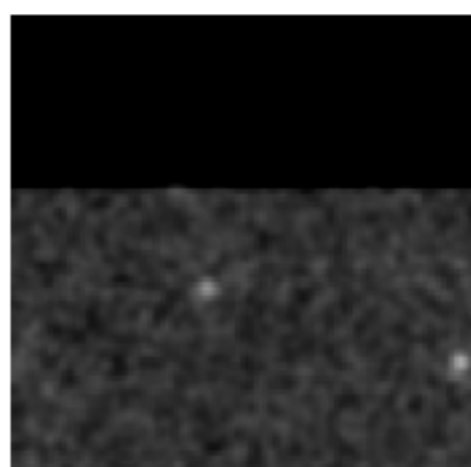
TMG0050



TMG0051



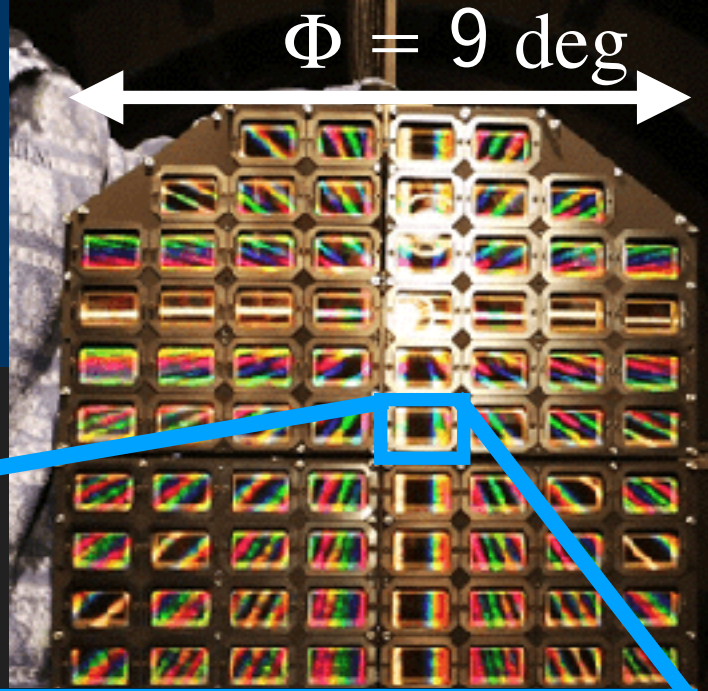
TMG0052



前回のシュミットシンポジウムから2年強で、
新たにNEO27天体を発見

光度曲線観測 & 解析

焦点面に搭載された
Tomo-e Gozen



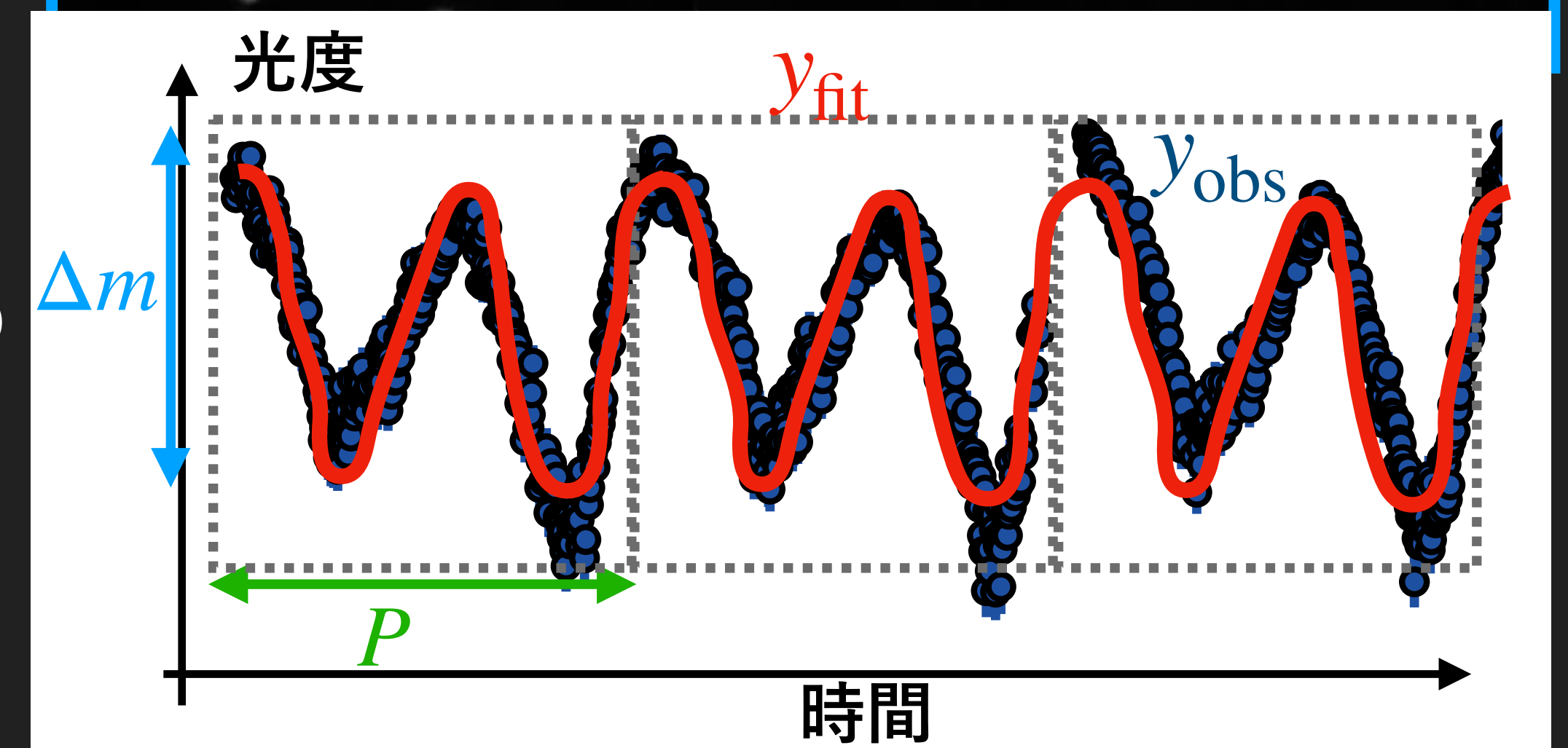
- 観測装置: **Tomo-e Gozen** (Sako+2018)
 - 木曾 105 cm シュミット望遠鏡, 広視野高速カメラ
 - 2 fps 動画観測

- 観測対象
 - $H > 22.5$ ($D < 100 \text{ m}^*$) かつ $V < 17.0$ を満たす **NEO 51天体**

- 観測期間 & 時間
 - 2018年5月 – 2021年5月
 - 典型的に1天体20分

40%にあたる19天体は
Tomo-e Gozenを用いて自ら発見
(e.g. Beniyama et al. 2020, MPEC 2020-U259,
2020年日本惑星科学会秋季公演会 紅山)

- 解析手法
 - 開口測光 (SEP**を使用)
 - 視野内を移動するNEOを追跡
 - Gaia カタログ (G-band等級) で等級を決定 (Gaia Collaboration+2018)
 - 周期解析 (Lomb-Scargle法, Lomb1976, Scargle1982)
三角関数での最小二乗フィッティングから
自転周期 P , **等級振幅 Δm** を推定

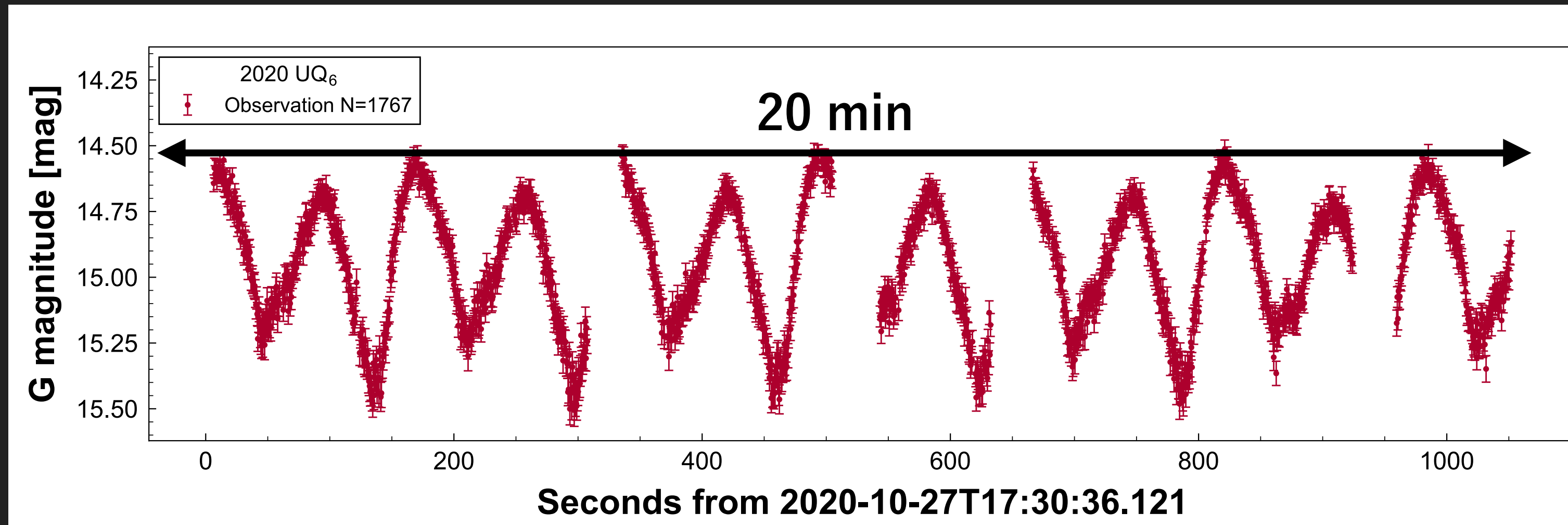


* 可視光幾何アルベド $p_V = 0.2$ を仮定

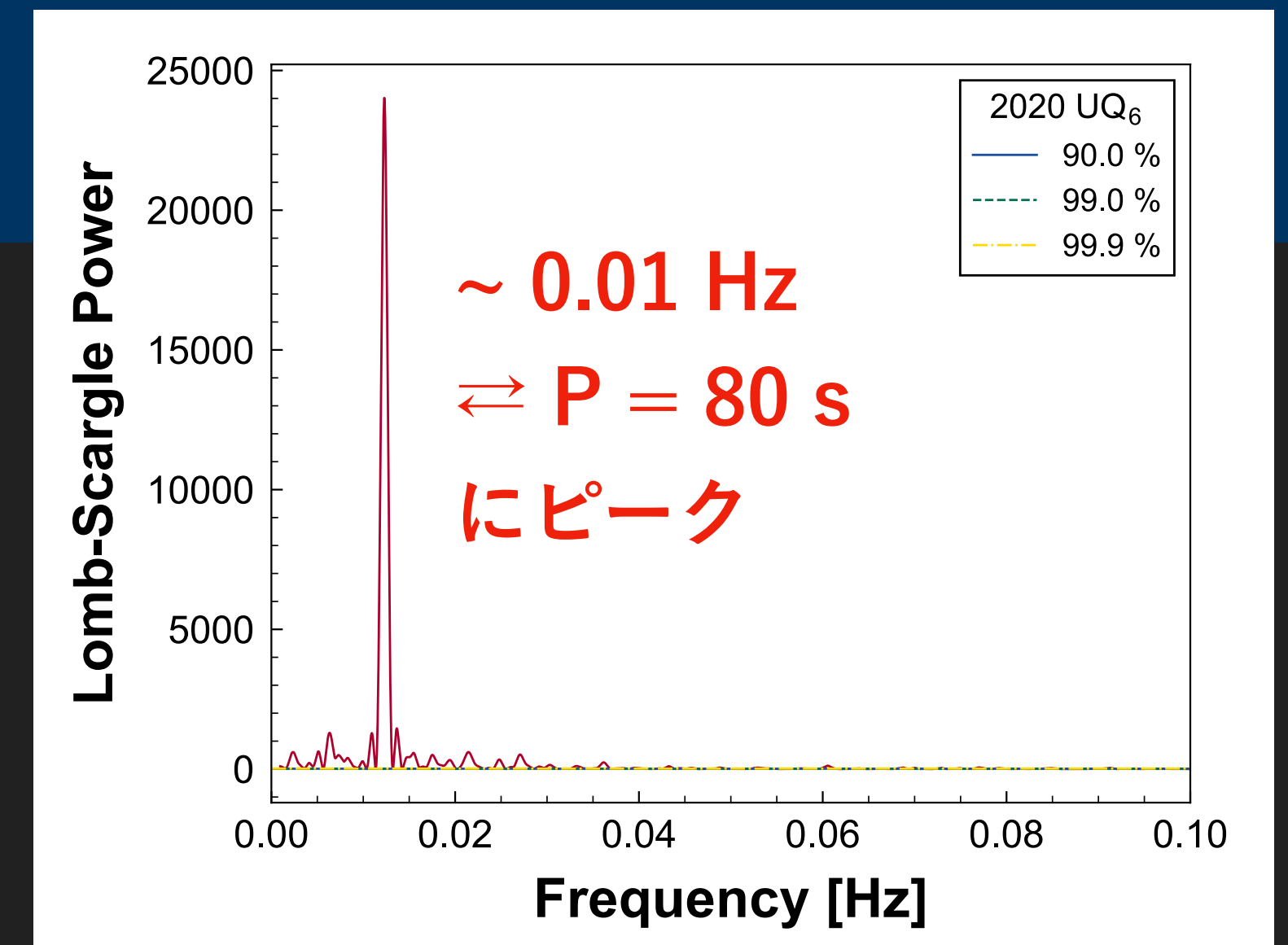
** <https://sep.readthedocs.io/en/v1.0.x/>

結果 ① 光度曲線

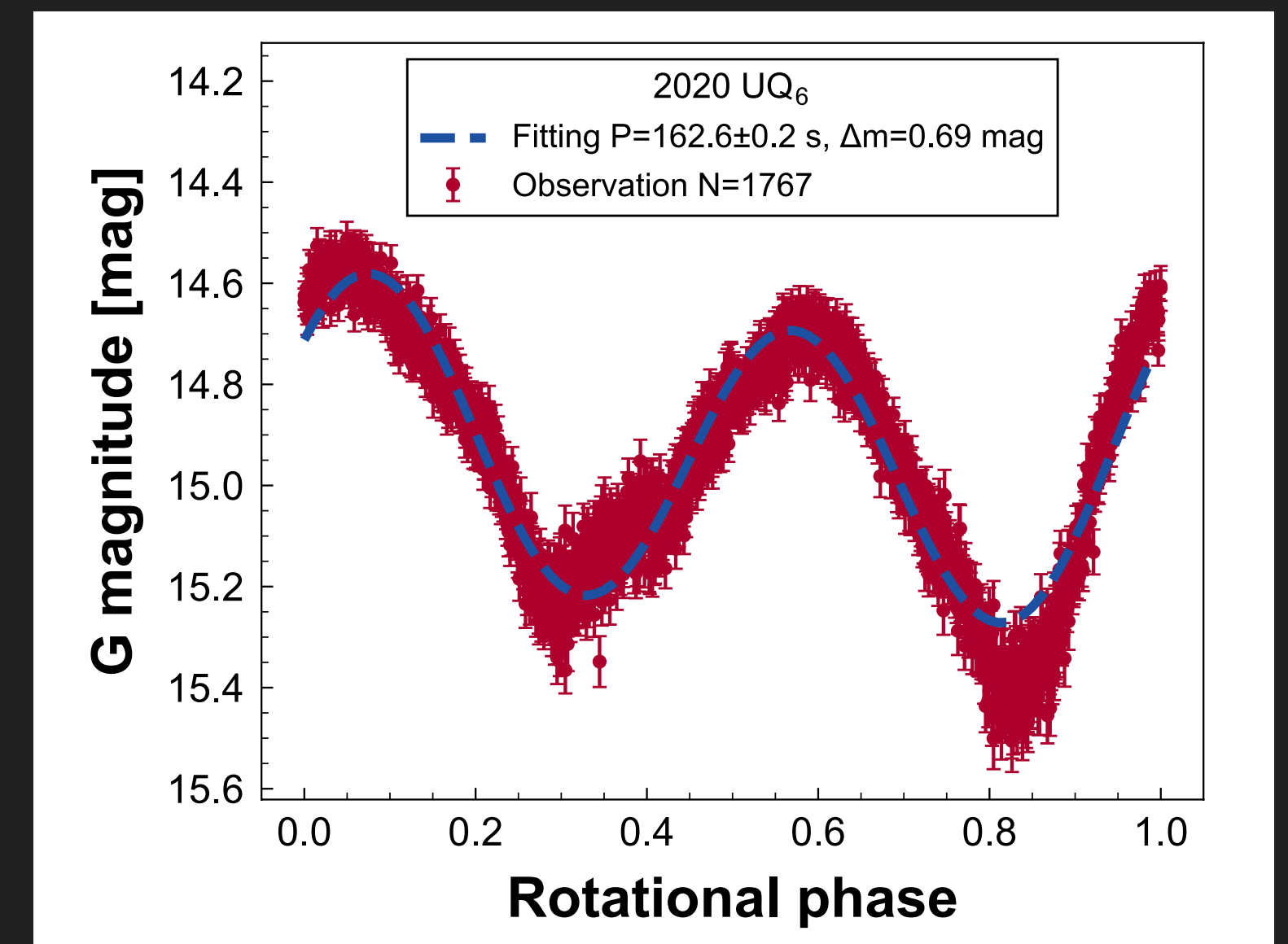
2020 UQ₆ (D = 86 m, 位相角 $\alpha = 16.0^\circ$)



光度曲線 (約20分間)



ピリオドグラム



折り返し光度曲線

$P = 162.6 \text{ s}, \Delta m = 0.69$

結果 ① 光度曲線

32天体の自転周期を推定

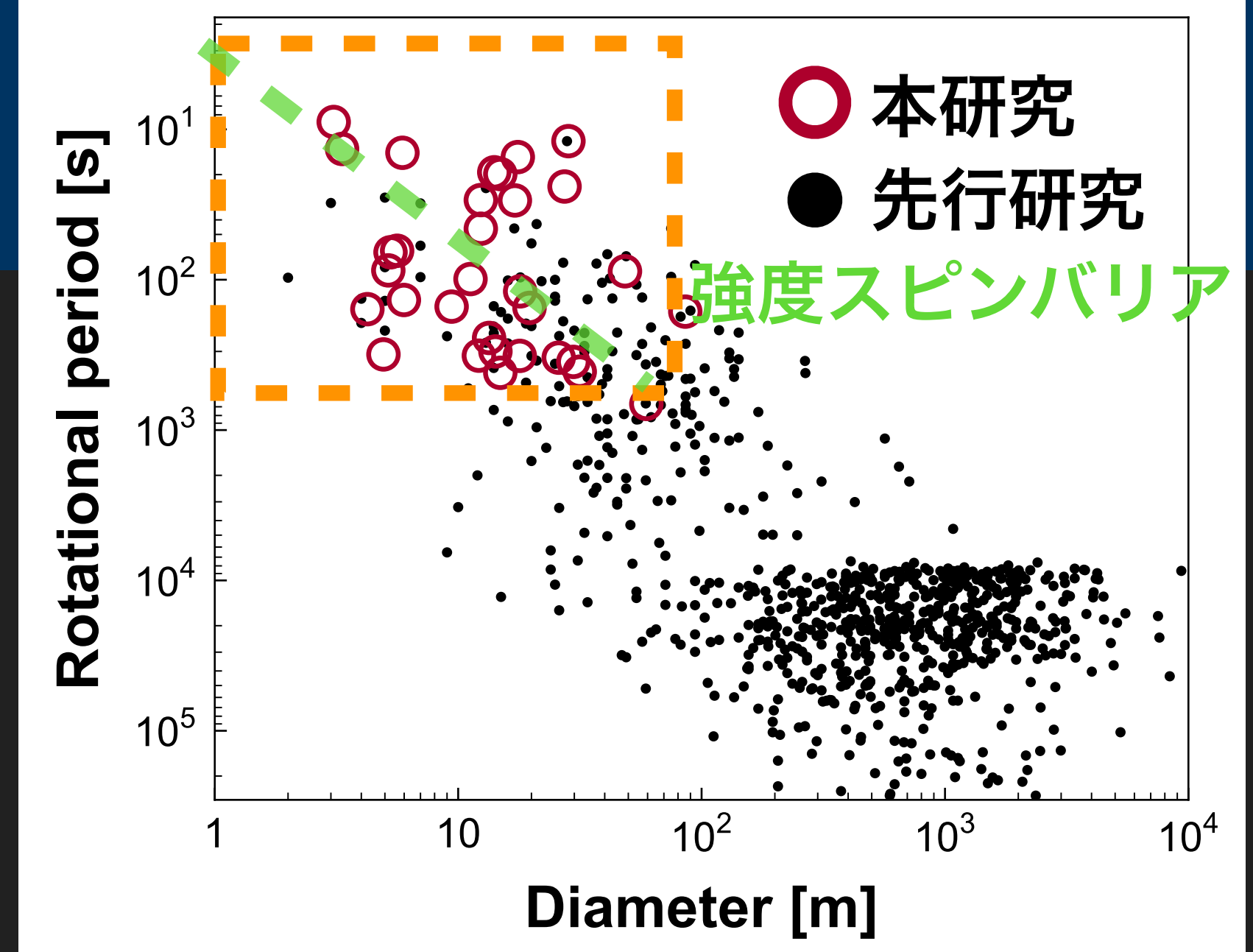
結果 ② 直径 - 自転周期関係

周期解析結果

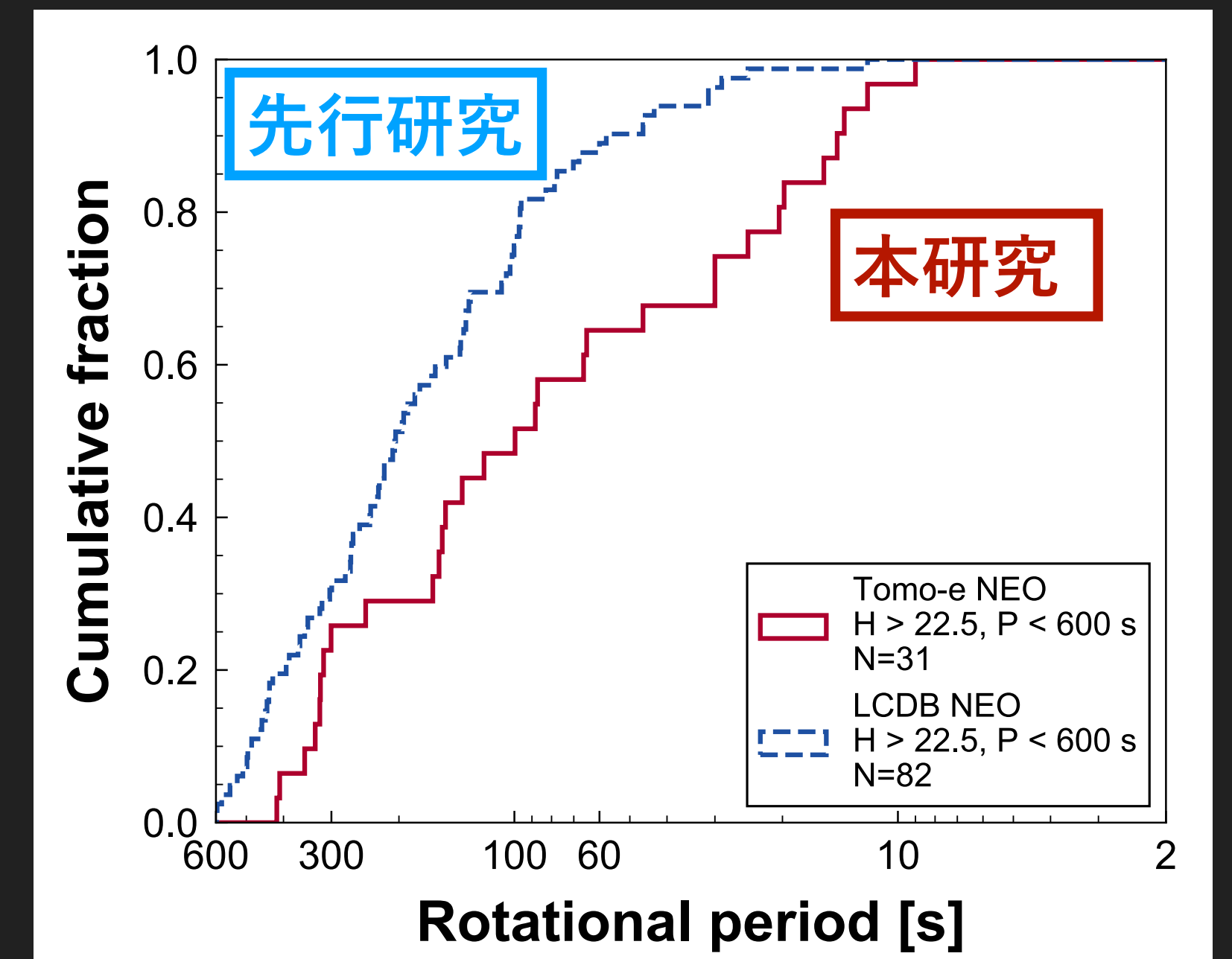
- ▶ 自転周期を推定 : 32天体
- ▶ 平坦な光度曲線 : 13天体
- ▶ 複雑な光度曲線 : 2天体
- ▶ 観測時間より長い周期での光度増減 : 4天体

先行研究(LCDB)と自転周期分布を比較

- ▶ Kolmogorov-Smirnov 検定
 帰無仮説 : 「先行研究と本研究の自転周期分布が等しい」
 → p値 : 0.026 3% の有意水準で帰無仮説を棄却
- ▶ 長時間露光による 高速自転の見落としを示唆



観測天体を含めた小天体の直径 - 自転周期関係



* Warner+2009, Light Curve DataBase 2021年6月版, U >=3

YORP効果による自転加速

YORP効果によりNEOの自転周期をどこまで加速できるか計算

仮定

- ① NEOの初期自転周期は以下の式に従う
(Kadono+2009の図3より)

$$P_{init} = 10 \left(\frac{D_{NEO}}{1 \text{ m}} \right) \text{ [s]}$$

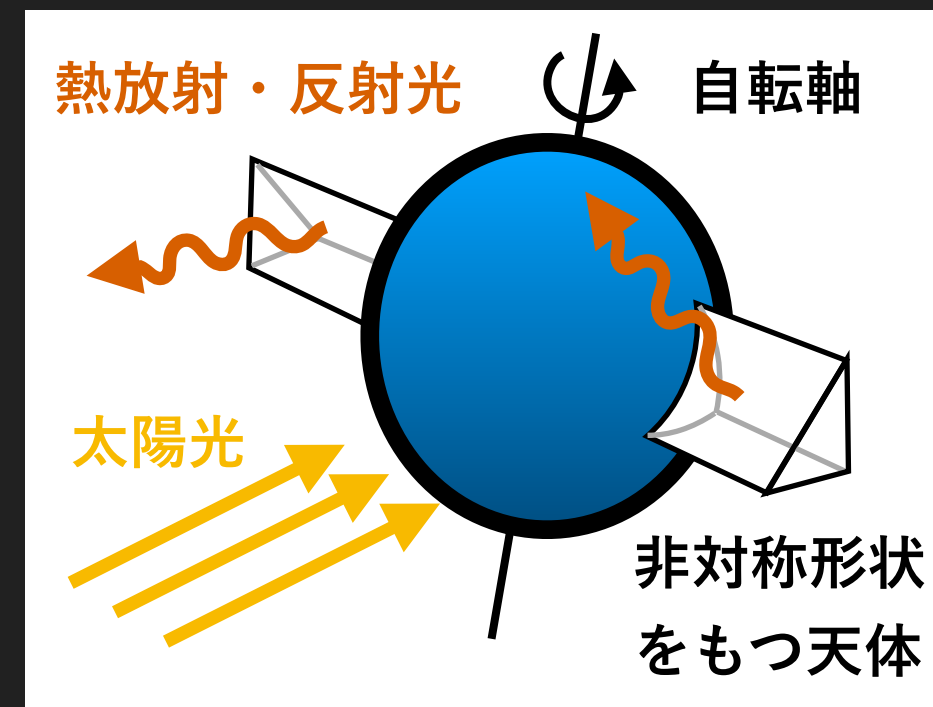
P : 自転周期 [s]
 D : 直径 [m]

- ② YORP効果はBennuの加速度をスケーリング
(Hergenrother+2019)

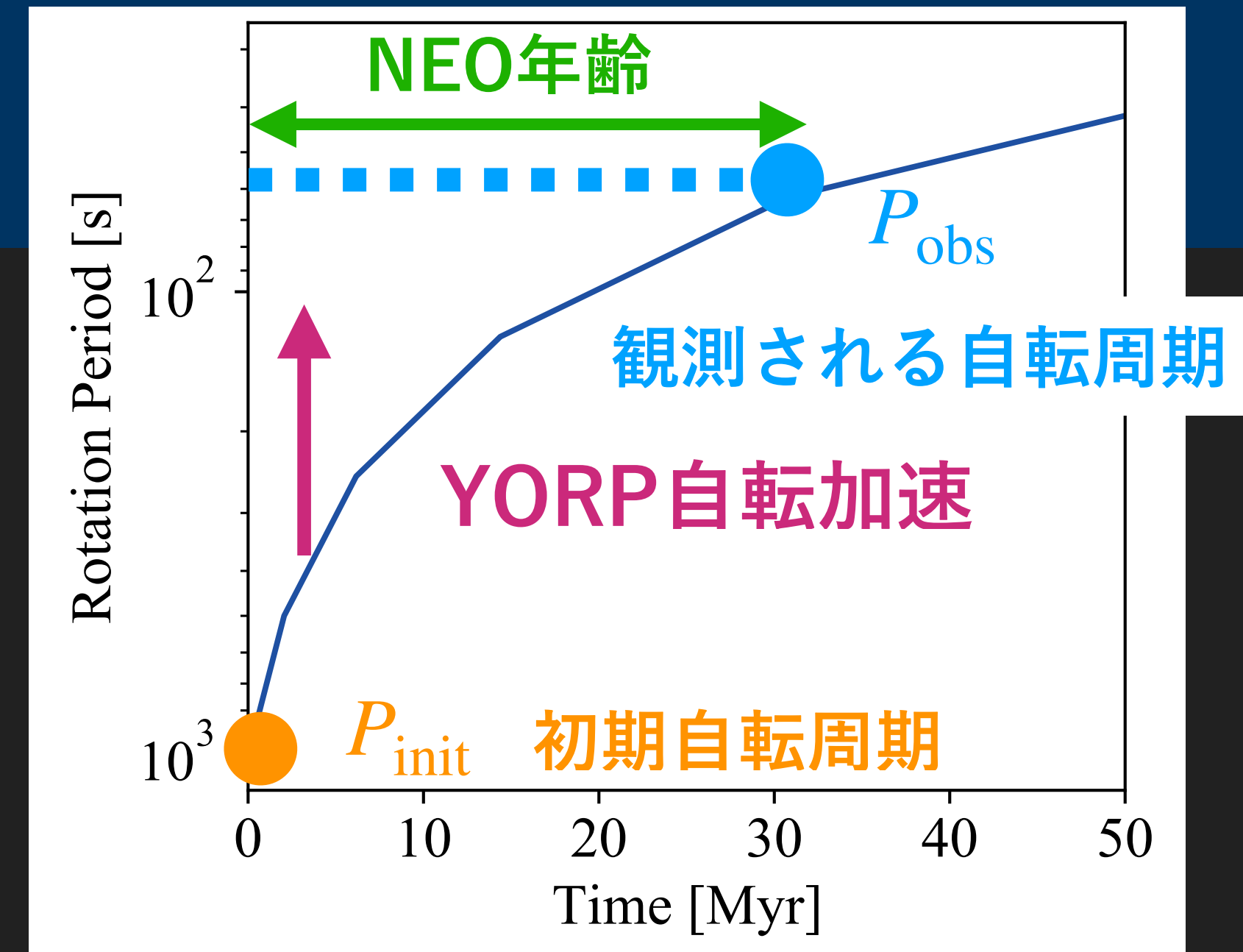
$$\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{a_{Bennu}^2 \sqrt{1 - e_{Bennu}^2}}{a_{NEO}^2 \sqrt{1 - e_{NEO}^2}} \right) \left(\frac{D_{Bennu}}{D_{NEO}} \right)^2 \left(\frac{\rho_{Bennu}}{\rho_{NEO}} \right) \cdot 3.63 \cdot 10^{-6} \text{ [deg/day}^2\text{]}$$

NEOの軌道要素は内側小惑星帯の値で固定 ($e = 0, a = 2$)

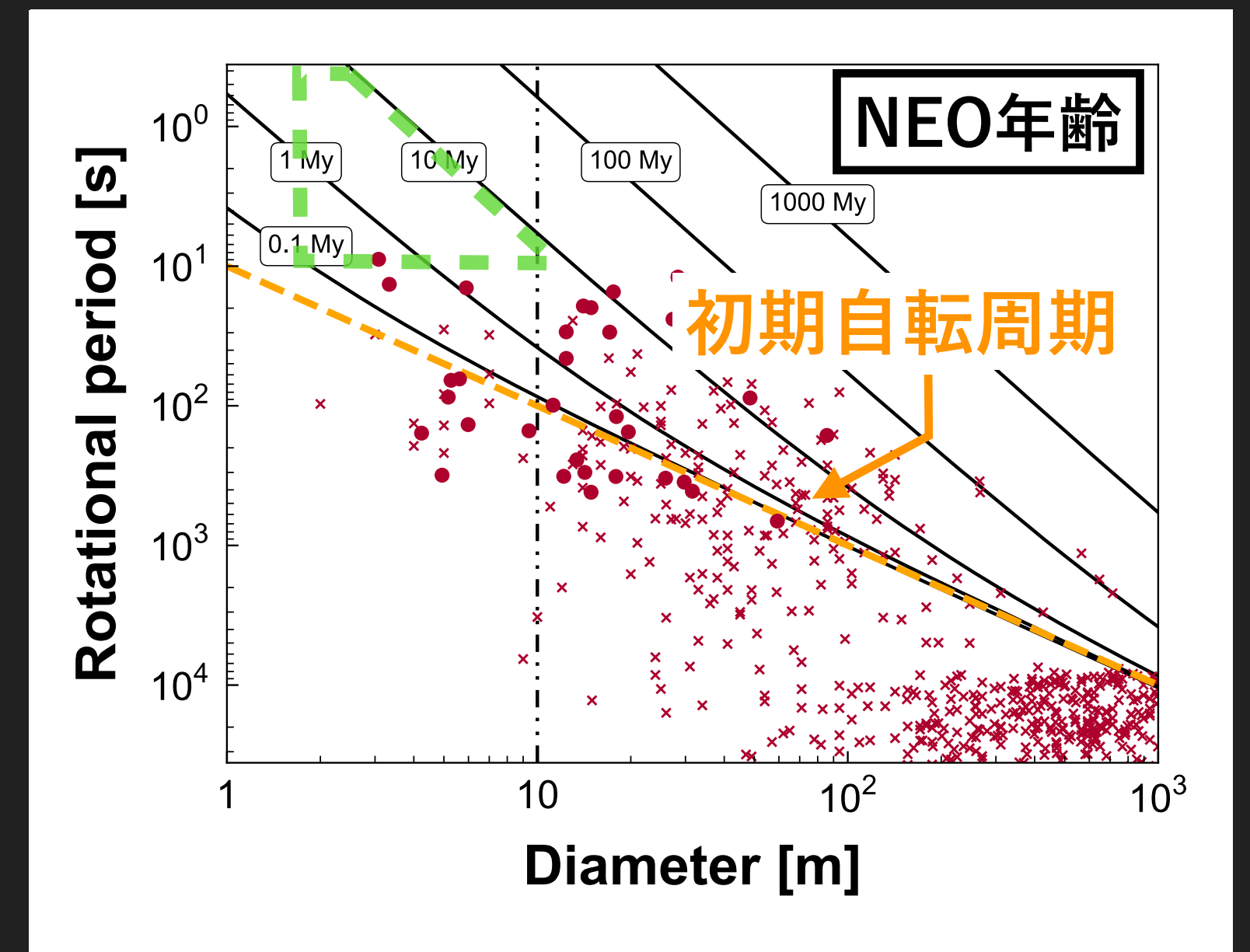
ω : 自転速度 [day/deg²]
 ρ : 密度 [kg/m³]
 a : 軌道長半径 [au]
 e : 軌道離心率



YORP効果の概念図



直径 100 m NEOの自転加速例



“NEO年齢”と直径-自転周期関係

議論：高速自転小惑星の欠如

解釈1：微小NEOが強度スピンバリアに達している

▶ 一枚岩小惑星が破壊せずに自転することができる臨界自転周期を以下の式で計算

臨界自転周期の算出 (Kwiatkowski+2010, Holsapple2007)

$$P_{\text{cri}} [\text{h}] = \frac{7.3 \times 10^{-4}}{C} \left(\frac{\rho}{\kappa} \right)^{1/2} \cdot D^{5/4}$$

C : 形状に関する無次元数

ρ : 密度 (kg/m^3)

κ : 強度定数 ($\text{Nm}^{-3/2}$)

D : 小惑星直径 (m)

計算仮定

1. 形状は $\alpha = c/a = 0.7, \beta = b/a = 0.7$

2. 摩擦角 $\phi = 40^\circ$

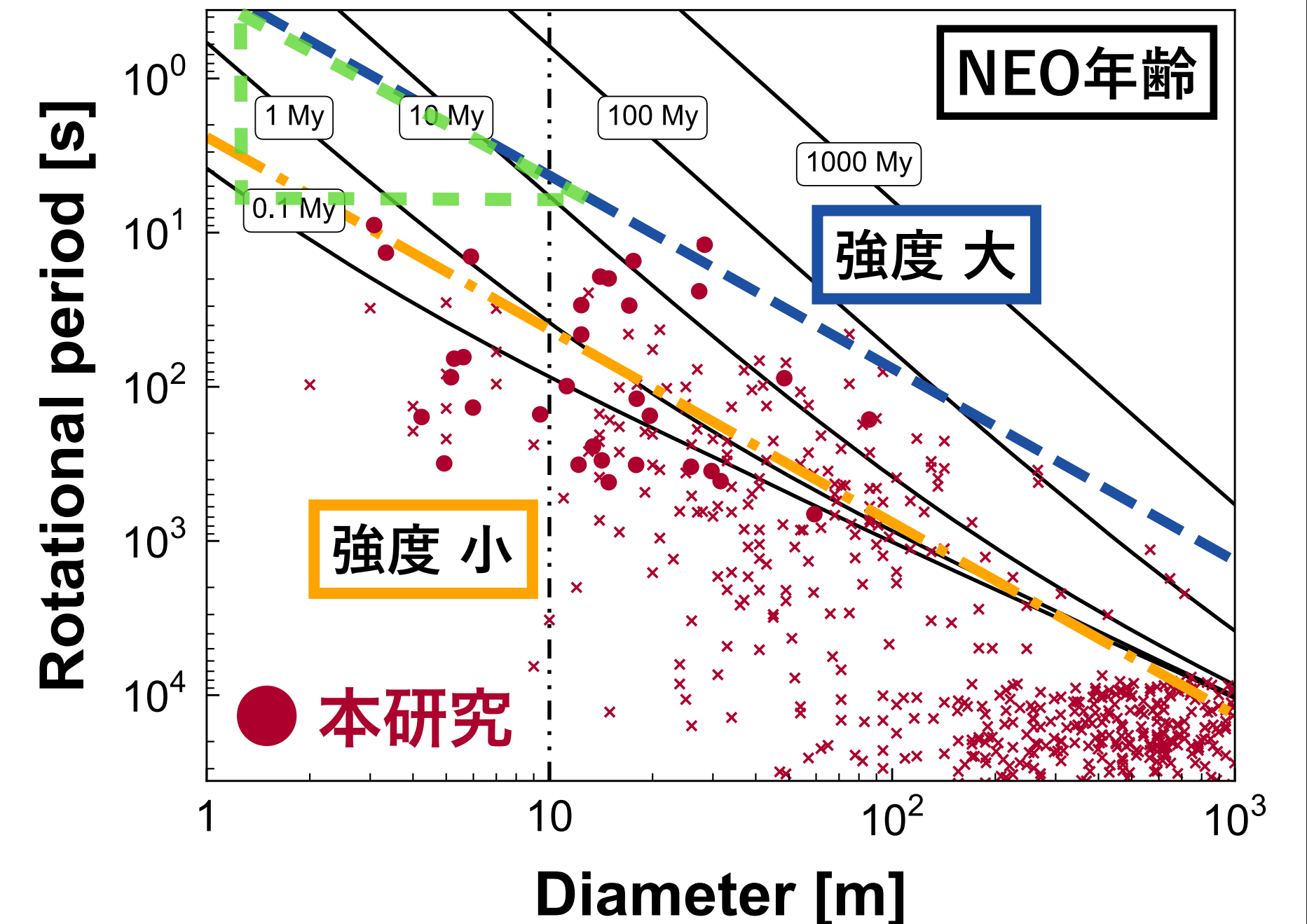
3. 密度は2種類 $\rho = 2500 \text{ kg}/\text{m}^3, 5000 \text{ kg}/\text{m}^3$

4. 強度定数は2種類

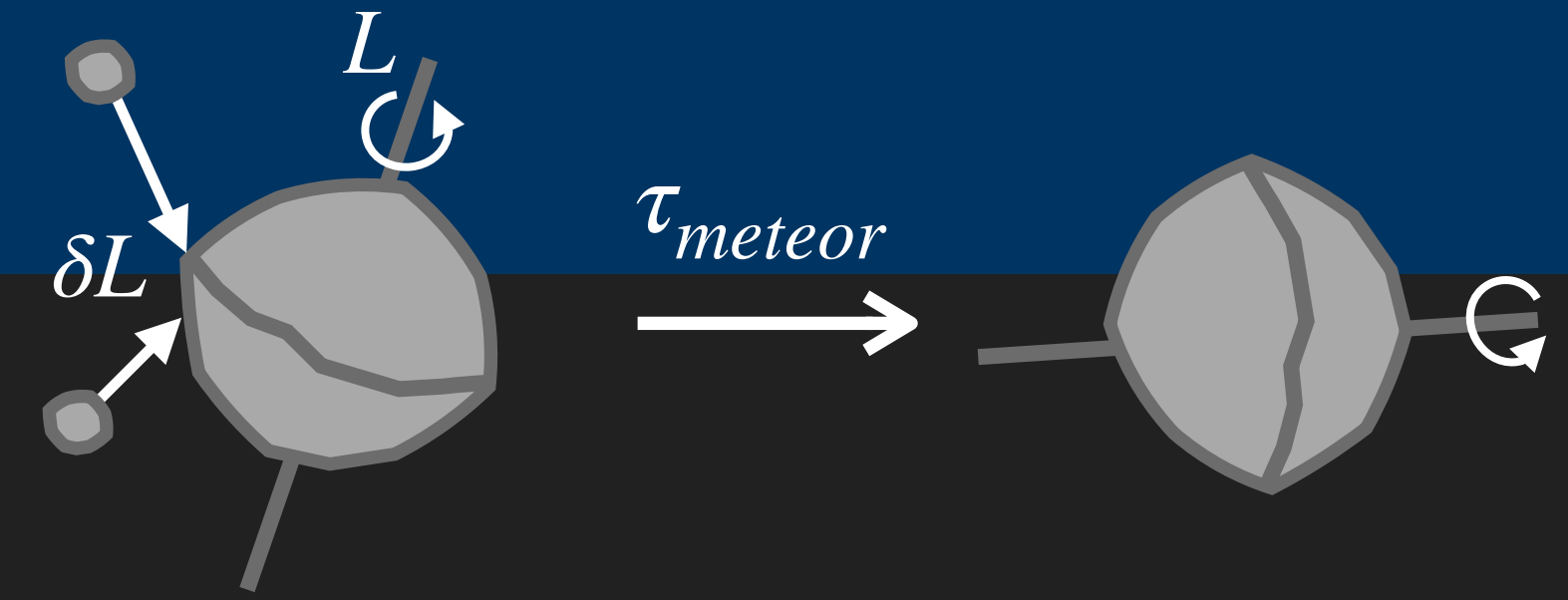
$\kappa = 10^3 \text{ Nm}^{-3/2}, 10^5 \text{ Nm}^{-3/2}$ ($k = \kappa(D/2)^{-1/2}$)

(Housen & Holsapple 1999)

▶ 典型的な地上隕石の強度 ($\kappa = 10^5 \text{ Nm}^{-3/2}$) では
微小高速自転小惑星の欠如を説明できない



議論：高速自転小惑星の欠如



解釈2：微小隕石衝突によるYORPの抑制

①角運動量輸送

NEOがもつ角運動量に対して $\delta L/L$ の角運動量変化をもたらす微小隕石が衝突するとそれ以上YORP自転加速できない

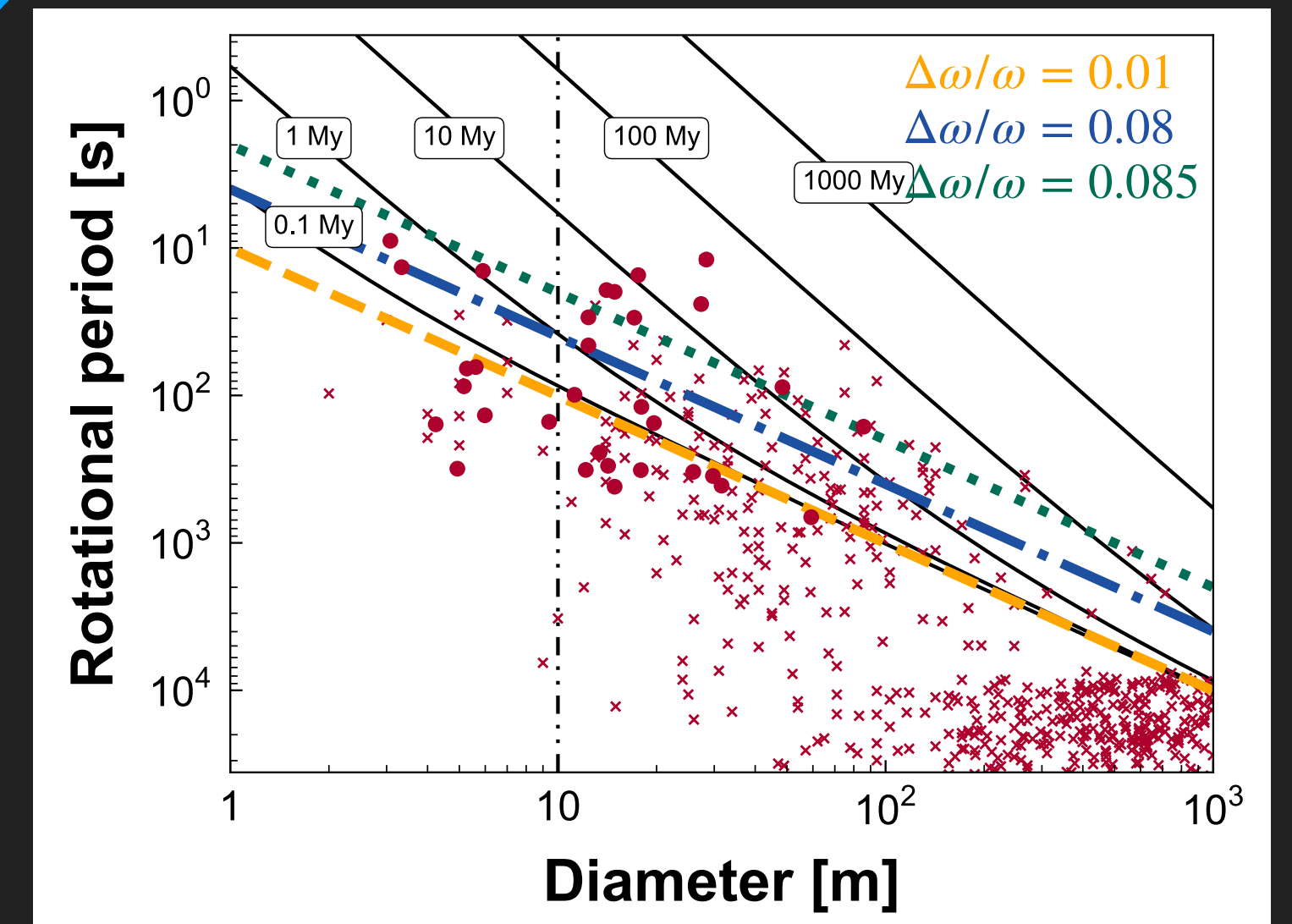
(Wiegert2015, Campbell2011, Brown2002, Brown2013)

典型的タイムスケール

$$\tau_{meteor} \sim 1.1 \times \left(\frac{\delta\omega}{\omega}\right) \cdot \left(\frac{\beta}{20}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{v_{imp}}{30 \text{ km m}^{-1}}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{\rho_{ast}}{2500 \text{ kg m}^{-3}}\right) \cdot \left(\frac{D_{ast}}{1 \text{ m}}\right)^2 \left(\frac{P_{ast}}{1 \text{ s}}\right)^{-1} \text{ Myr}$$

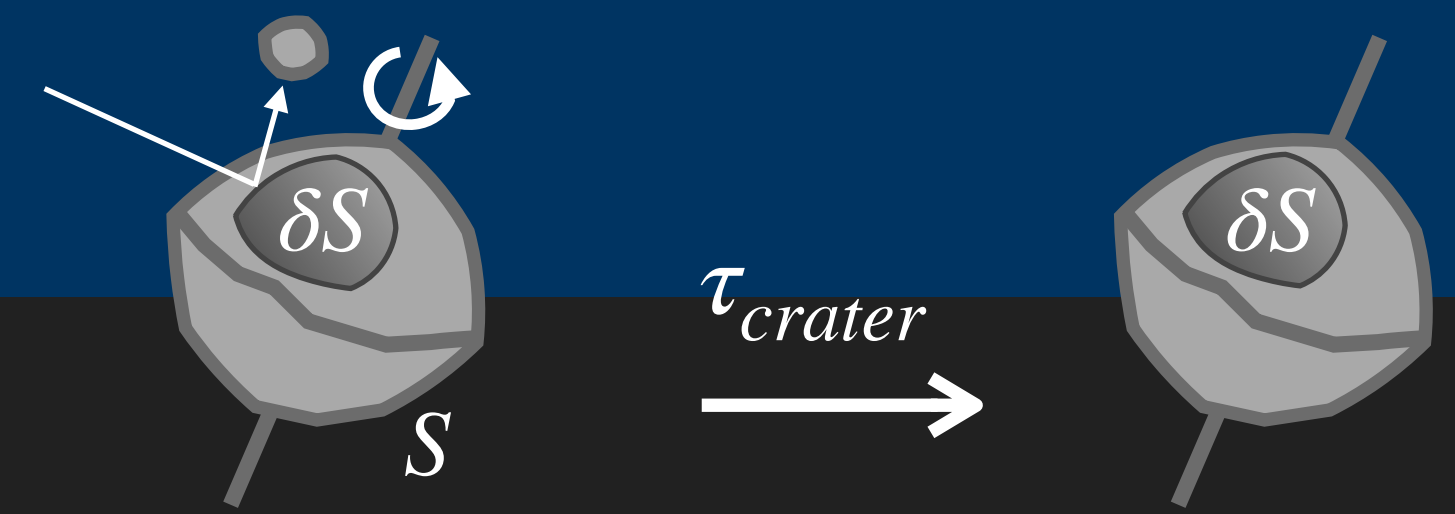
$\tau_{meteor} = \tau_{YORP}$ となるまでYORP加速できると考える

→ 直径自転周期分布上での依存性は $P \propto D$ 観測を説明することはできない



“微小隕石との角運動量交換を考慮した際に加速できる臨界線”と直径-自転周期関係

議論：高速自転小惑星の欠如



解釈2：微小隕石衝突によるYORPの抑制

②クレータ形成

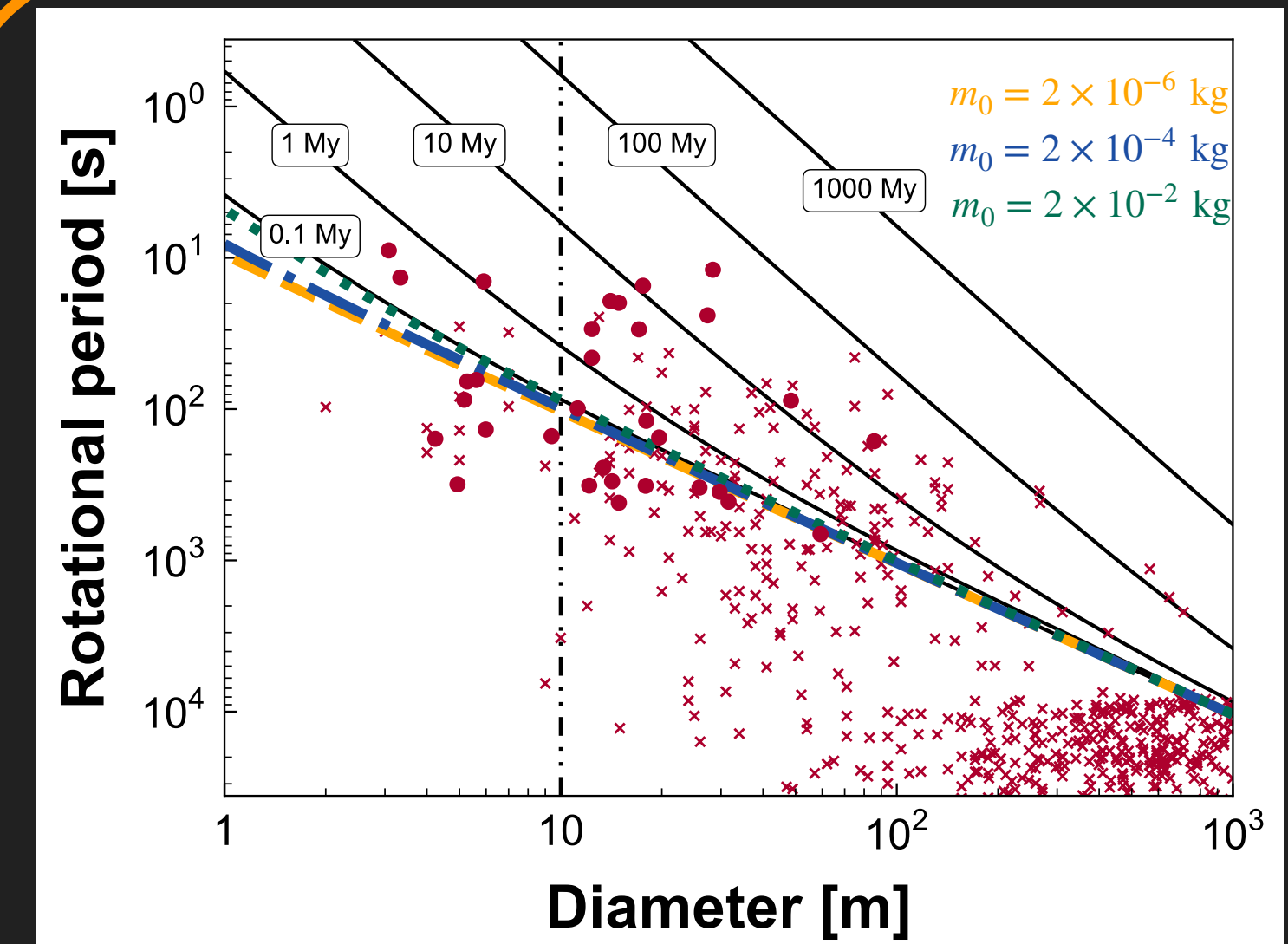
NEOの表面積に対して $\delta S/S$ がクレータで覆われるとそれ以上YORP加速できない (Holsapple1993, Holsapple2020)

典型的タイムスケール

$$\tau_{crater} = 3.15 \times 10^{-3} \left(\frac{\rho}{2500 \text{ kg m}^{-3}} \right)^{\frac{2}{3}-0.55} \left(\frac{v_{imp}}{30 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-1.1} \left(\frac{D}{1 \text{ m}} \right)^{\frac{0.55}{4}} \left(\frac{m_0}{2 \times 10^{-6} \text{ kg}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\delta S}{S} \right) \text{ [Myr]}$$

$\tau_{crater} = \tau_{YORP}$ となるまでYORP加速できる

→ 直径自転周期分布上での依存性は $P \propto D$ (典型的パラメータでの近似)



“微小隕石によるクレータ形成を考慮した際に加速できる臨界線”と直径-自転周期関係

結論

1. 微小NEOが強度スピンバリアに達している
2. 微小隕石衝突によるYORPの抑制 (角運動量輸送、クレータ形成) では微小高速自転NEOの欠如を説明できない

→ NEOのYORPをサイズ選択的に抑制するメカニズムの存在を示唆

まとめ

- 2752回、約140時間 (+ α) の追跡観測を実施し これまでにNEO28天体を発見
- Tomo-e Gozenを用いて直径 100 m 以下の微小 NEO51天体の連続撮像観測を実施
- 計32天体の自転周期を推定
- 観測で得た分布は、NEOの自転加速をサイズ選択的に抑制するメカニズムの存在を示唆

