

## 要旨

### 比較小惑星学 ~地球接近小惑星とメインベルト小惑星~

紅山 仁 (東京大学)

本講演では、近年発見数が増加し小惑星探査でも注目されている地球に近づく軌道を持つ地球接近小惑星 (Near-Earth Asteroid; NEA)と火星-木星間の小惑星帯に存在するメインベルト小惑星(Main-Belt Asteroid; MBA)の観測結果をレビューする。本研究会のテーマである縦と横のマトリックスにおいては「Small body」と「創造」の交点に位置する内容である。NEAとMBAの発見の歴史について概観した後にこれまで天文観測で明らかになっているスペクトル型と自転周期の分布について比較する。現状、多くの観測的困難性からスペクトル型、自転周期ともに直径の小さい微小小惑星の観測は少ない。宇宙風化とそのリフレッシュ作用に関する知見を得るためにはより幅広いサイズの小惑星のスペクトル型推定が重要である。またスピンバリアよりも高速自転する微小小惑星の自転周期分布は、非重力効果と密接に関連する物理量である。毎年3,000個程度発見されているNEAに対し即時追跡観測を行い微小小惑星の特徴付けをすることが重要である。講演の最後には発表者がこれまで従事してきたNEA観測とその結果についても紹介する。

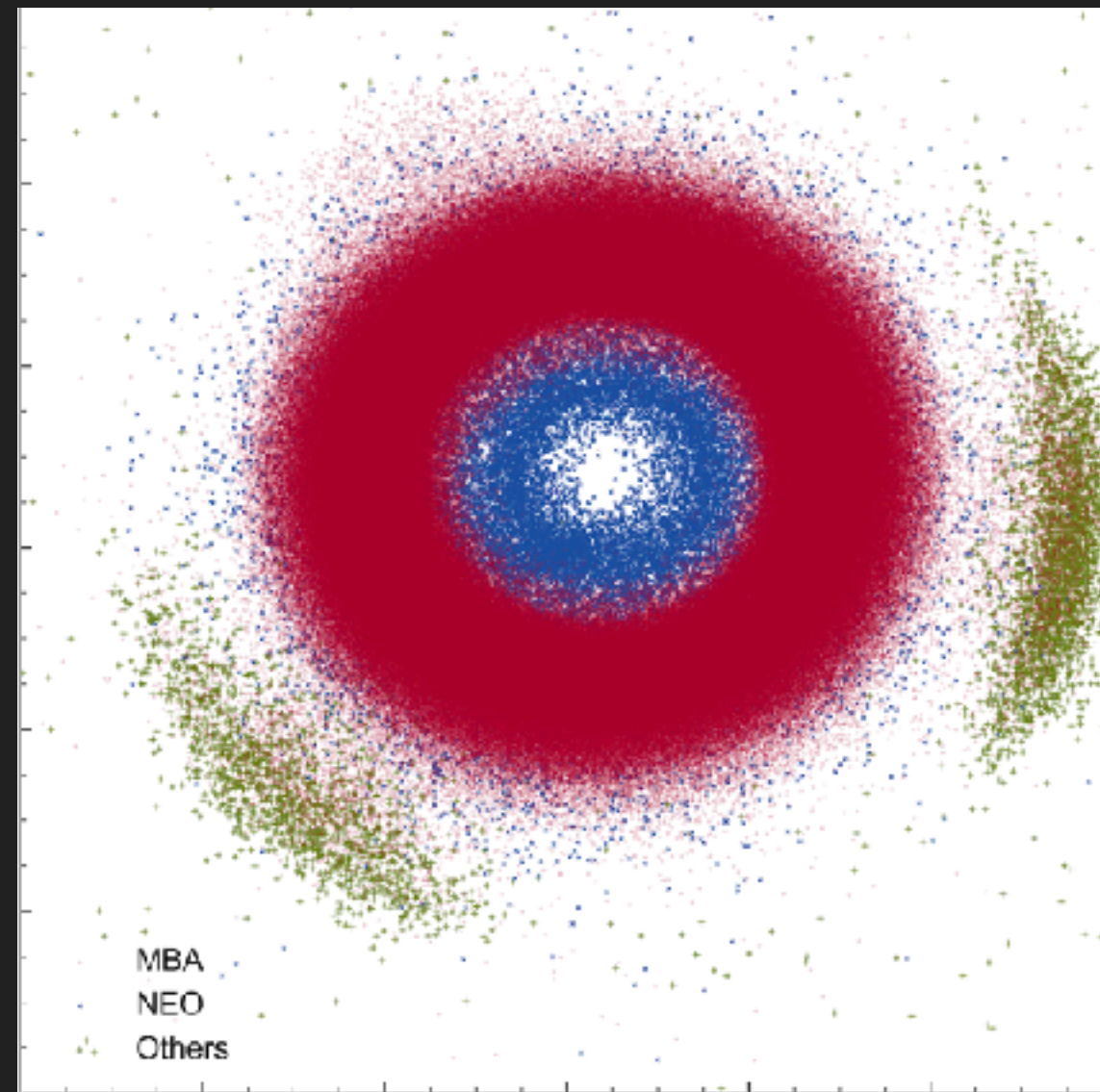
# 比較小惑星学

## ~地球接近小惑星とメインベルト小惑星~

2021年2月8日 11:02-11:27 @ Symposium on Planetary Sciences 2022

べにやま じん

紅山 仁 (東京大学大学院理学系研究科)



### part 1. MBA vs. NEA

- ・ 軌道進化 (NEAの創造)
- ・ 物理量分布の比較

### part 2. NEA観測例 (自身の研究)

- ・ 国内望遠鏡を用いたNEA観測
- ・ (探査予定小惑星)Phaethonの観測

Small  
body

### 創造

Formations & transports  
of planetary worlds

### 水

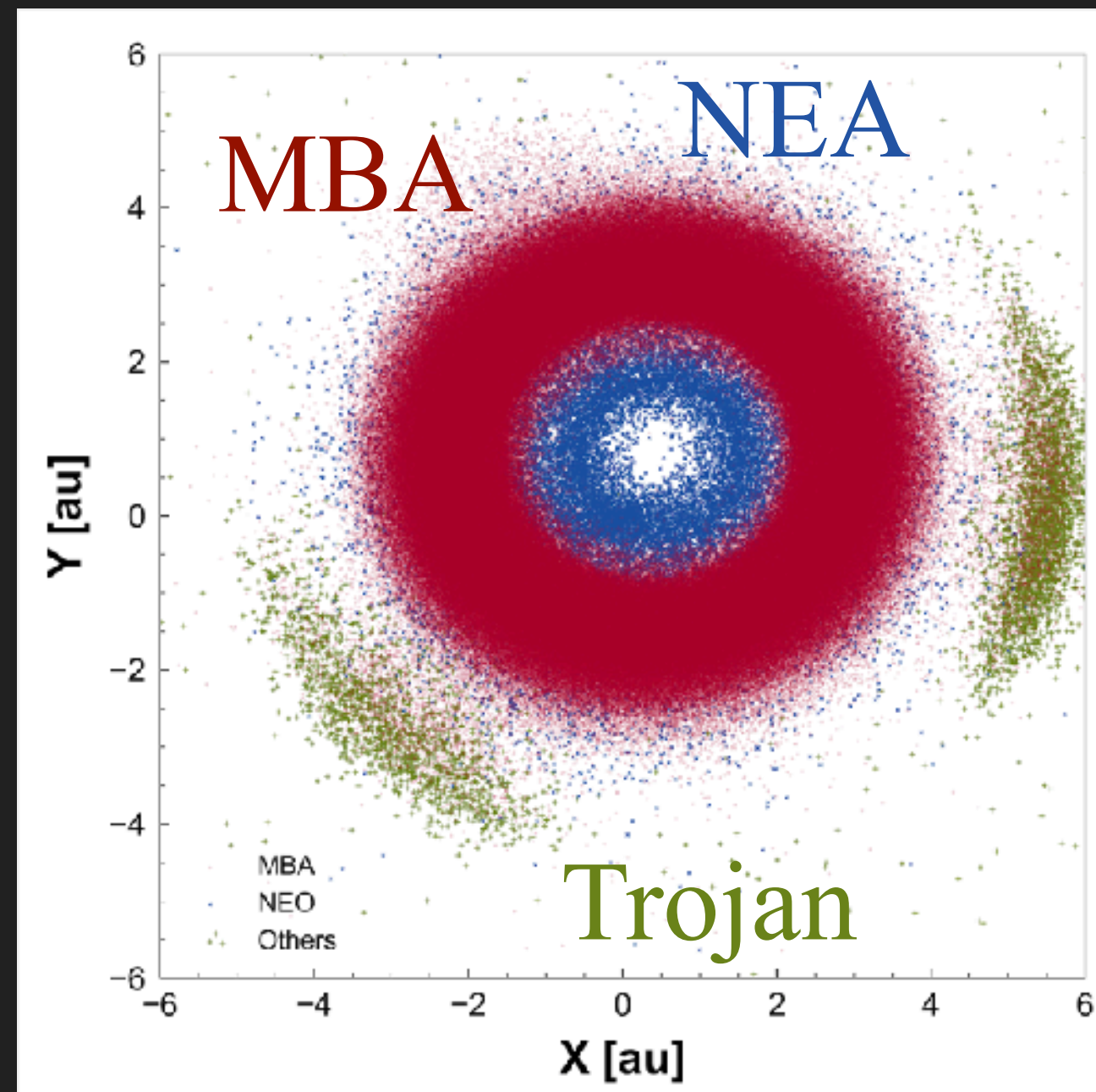
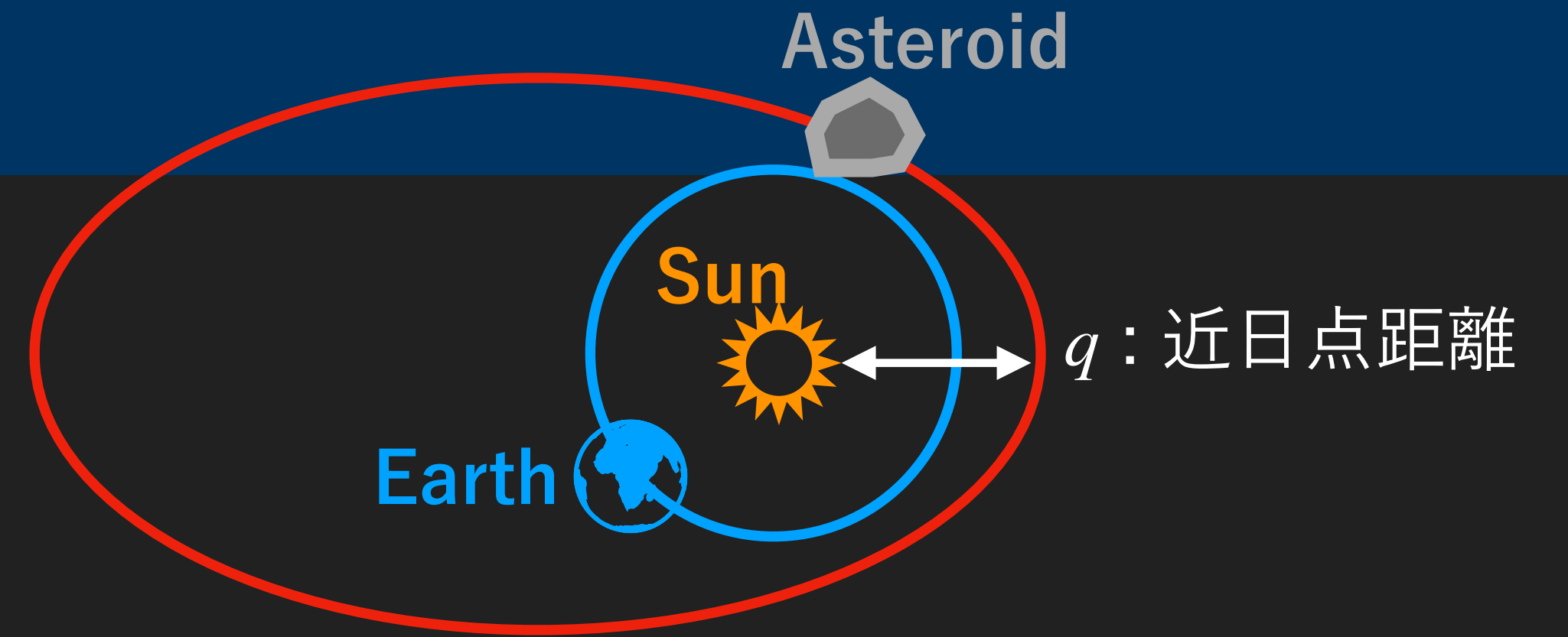
Its origins, transports,  
evolutions, and variations

### おひさま

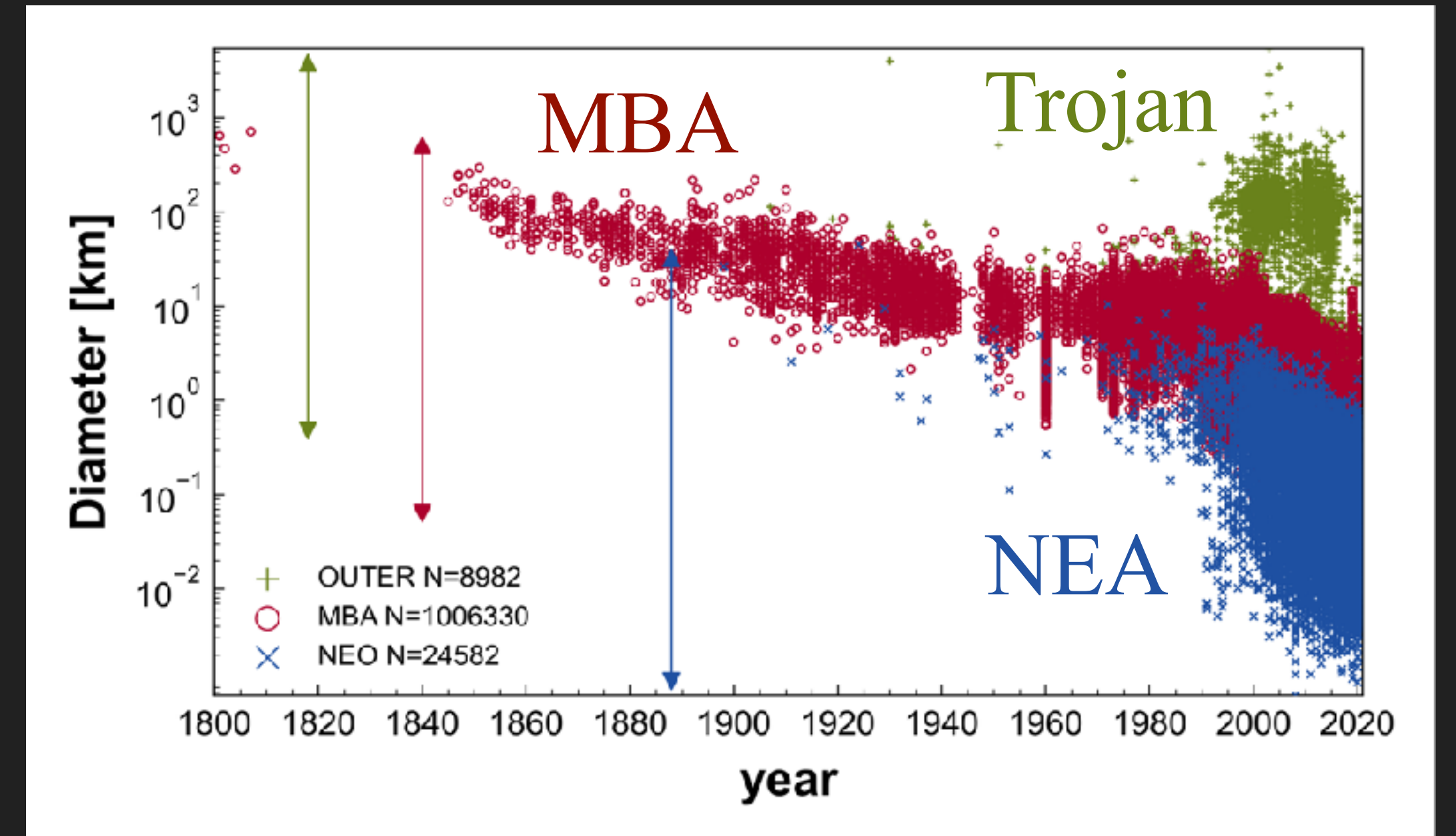
Effects from outer worlds  
~ Sun/Stars, solar winds,  
planets, and satellites

# 小惑星の分類

- 小惑星 (Asteroid) :
  - ▶ メインベルト小惑星 (Main-Belt Asteroid ; MBA) : 火星-木星間
  - ▶ 地球接近小惑星 (Near-Earth Asteroid ; NEA) :  $q < 1.3 \text{ au}$
  - ▶ 木星トロヤ群小惑星 (Jupiter-Trojans) :  $a \sim 5.2 \text{ au}, L_{4,J}, L_{5,J}$



小惑星の空間分布



小惑星発見数の推移

# 小惑星の観測史

- “**小惑星の観測 = メインベルト小惑星の観測**”

- ▶ 測光観測：自転周期、明るさの位相角依存性、アルベド(反射率)
- ▶ 分光観測：表面物質の推定(岩石質、炭素質、金属質…)

- **地球接近小惑星の観測**

3,000個/年のペースで発見

- ▶ **Pan-STARRS**

ハワイ州ハレアカラ山頂の二台の口径 1.8 m 望遠鏡を使用

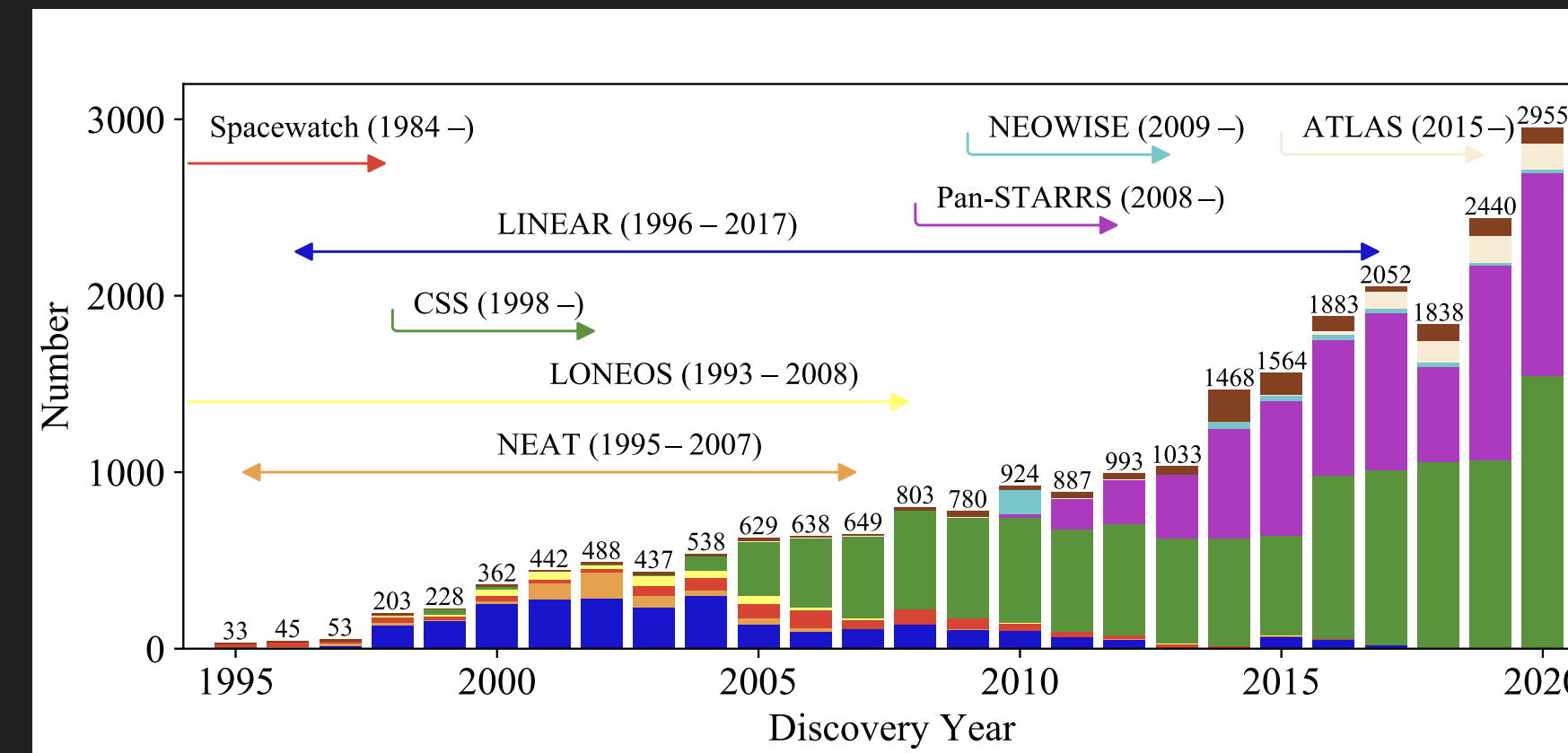
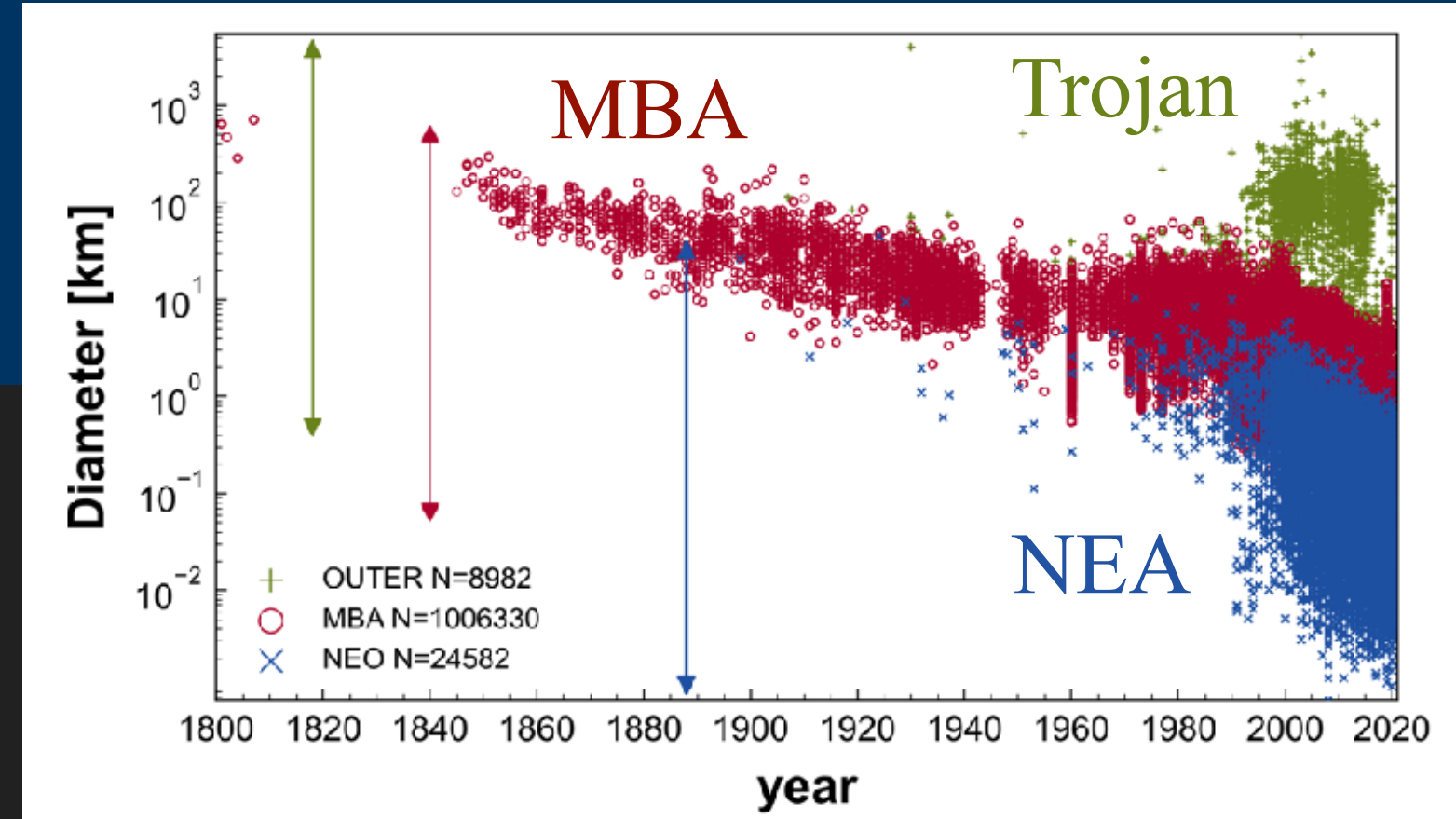
- ▶ **Catalina Sky Survey**

アリゾナ州サンタカタリーナ山地の口径 1.5 m, 1.0 m, 0.7 m 望遠鏡を使用

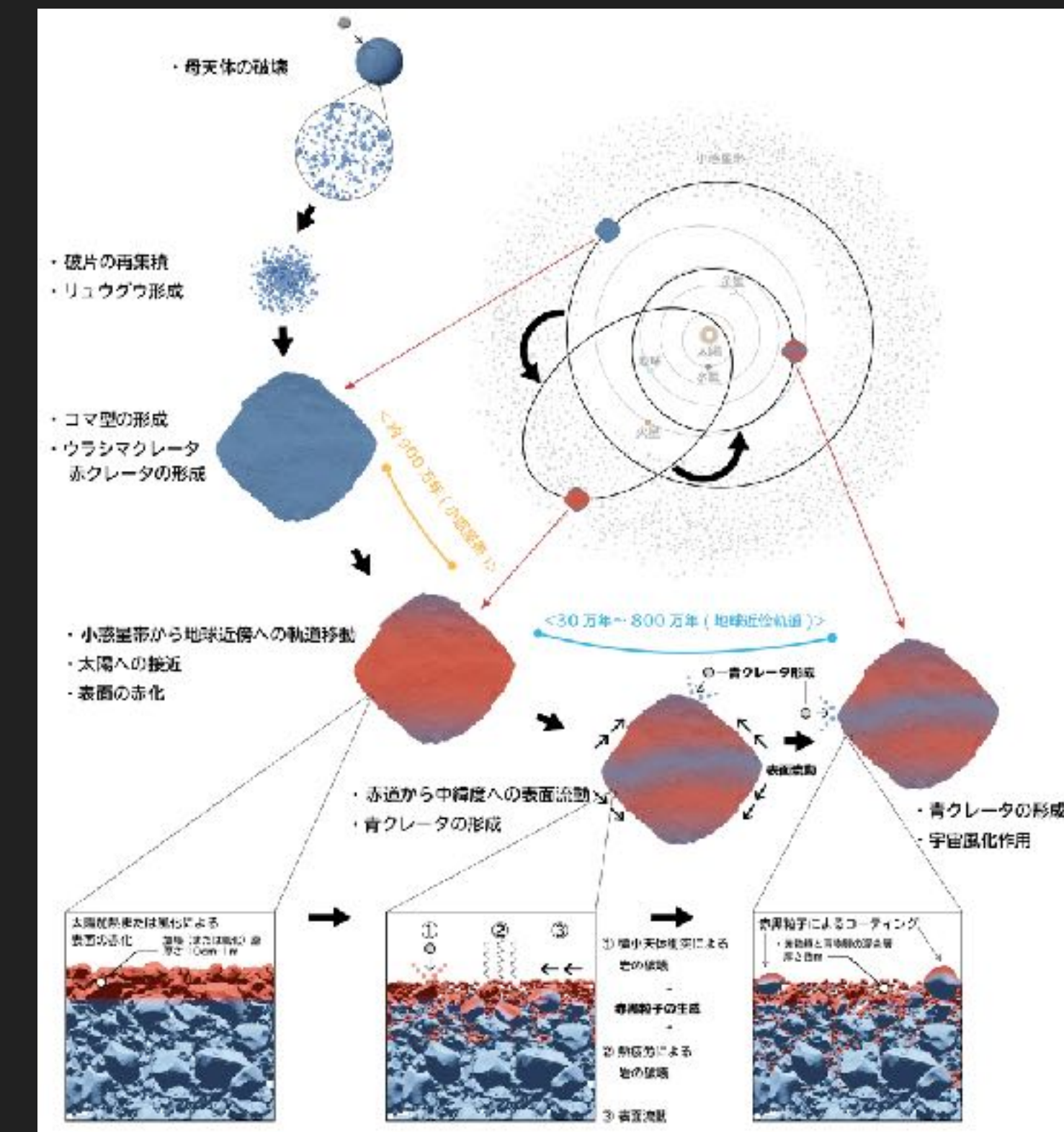
- **探査機によるその場探査**

NEAは「探査機が到達しやすい」探査機による探査は地上観測では得られない知見が得られる

- ▶ サイズ、自転周期の高精度推定
- ▶ 空間分解した表面様相、岩塊やレゴリス



NEA発見数の推移\*



小惑星リュウグウの軌道の進化史 (c) JAXA, 東京大学

\* [https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/site\\_all.html](https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/site_all.html)

# 軌道進化：MBAからNEAへ

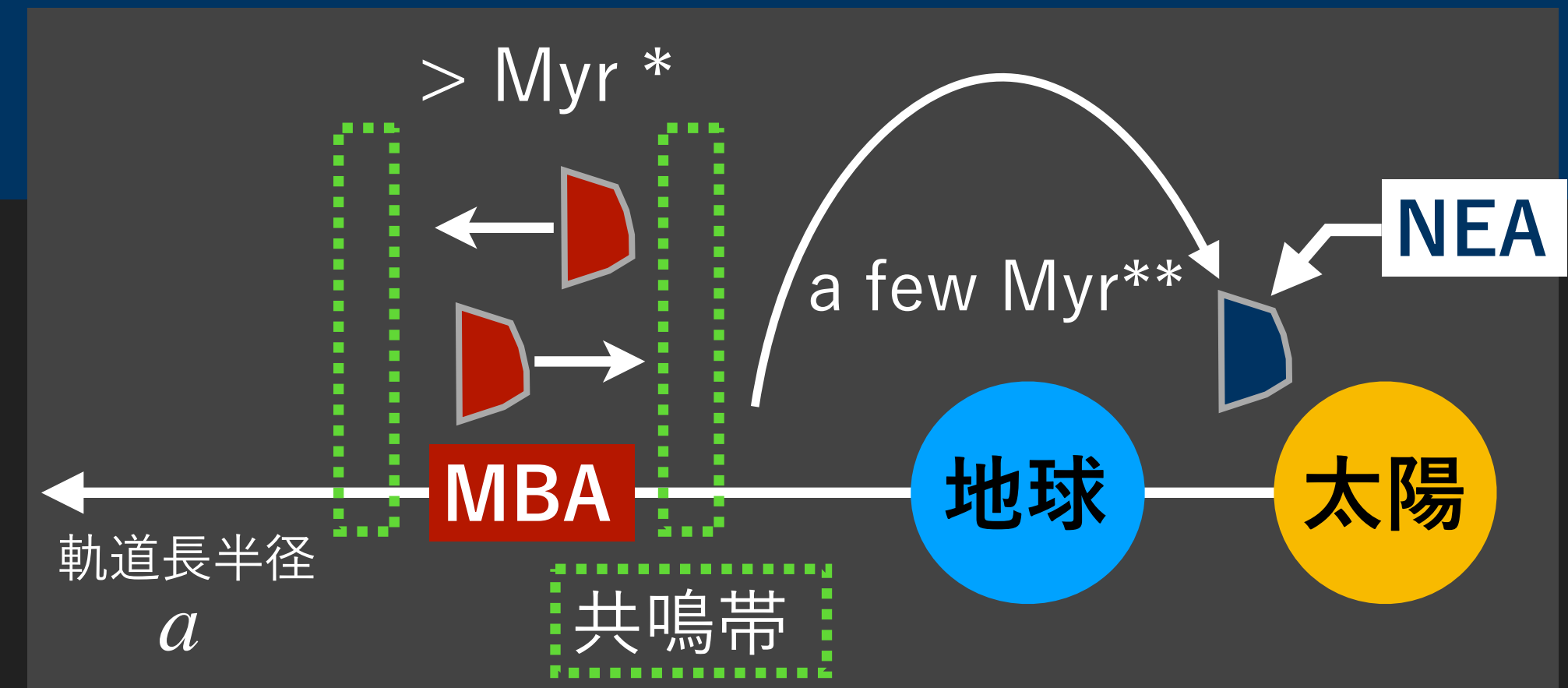
Fact

NEAの多くはMBAが軌道進化した天体<sup>1</sup>

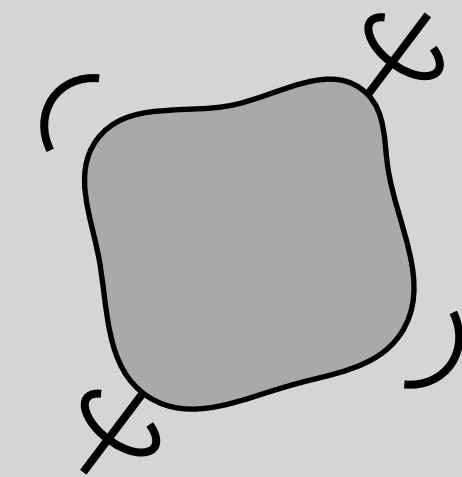
MBA → NEA のタイムスケール  $\sim \text{Myr}^2$

NEA → NEA外のタイムスケール  $< 10 \text{ Myr}^1$

- Yarkovsky効果による軌道変化 (金丸さん発表)  
↓  
共鳴帯から一部がNEAへ  
↓  
再度NEAでなくなる (太陽へ落下、惑星衝突など)
- 近年発見数が増加したNEA 観測はホットな領域  
MBA, NEA の観測を通じた理論との比較



## MBA vs. NEA



1. 組成分布

2. 自転周期分布

3. 観測手法

<sup>1</sup> Bottke et al., 2000, Science, 288, 2190

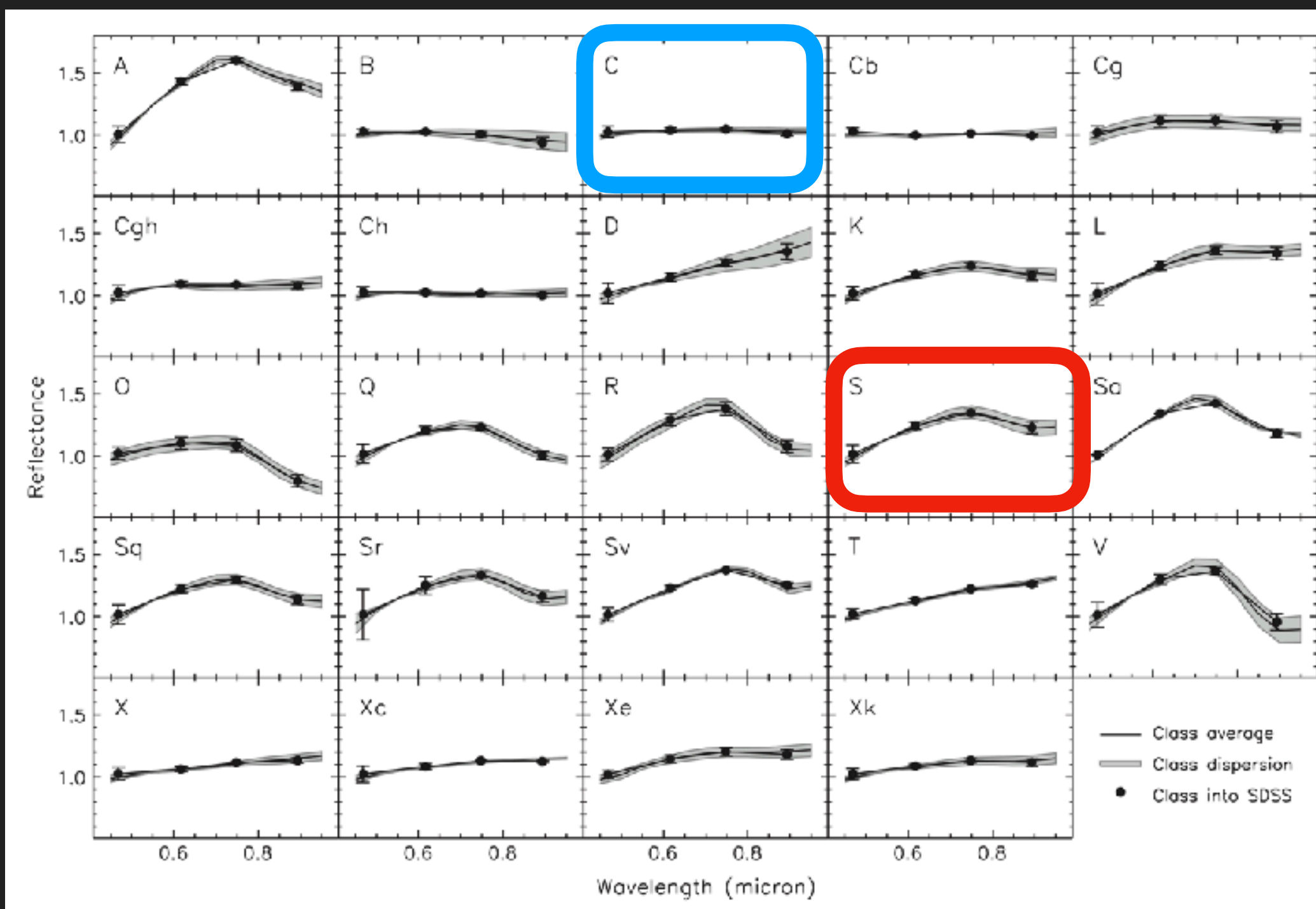
<sup>2</sup> Gladman et al., 1997, Science, 277, 197

# 比較1. 組成(スペクトル)分布

## • スペクトル型

多波長観測で得られる小惑星の表面スペクトル(スペクトル型)とその組成 (composition) と対応づけられる

- ▶ S型 : Stony, Silicate
- ▶ C型 : Carbonaceous



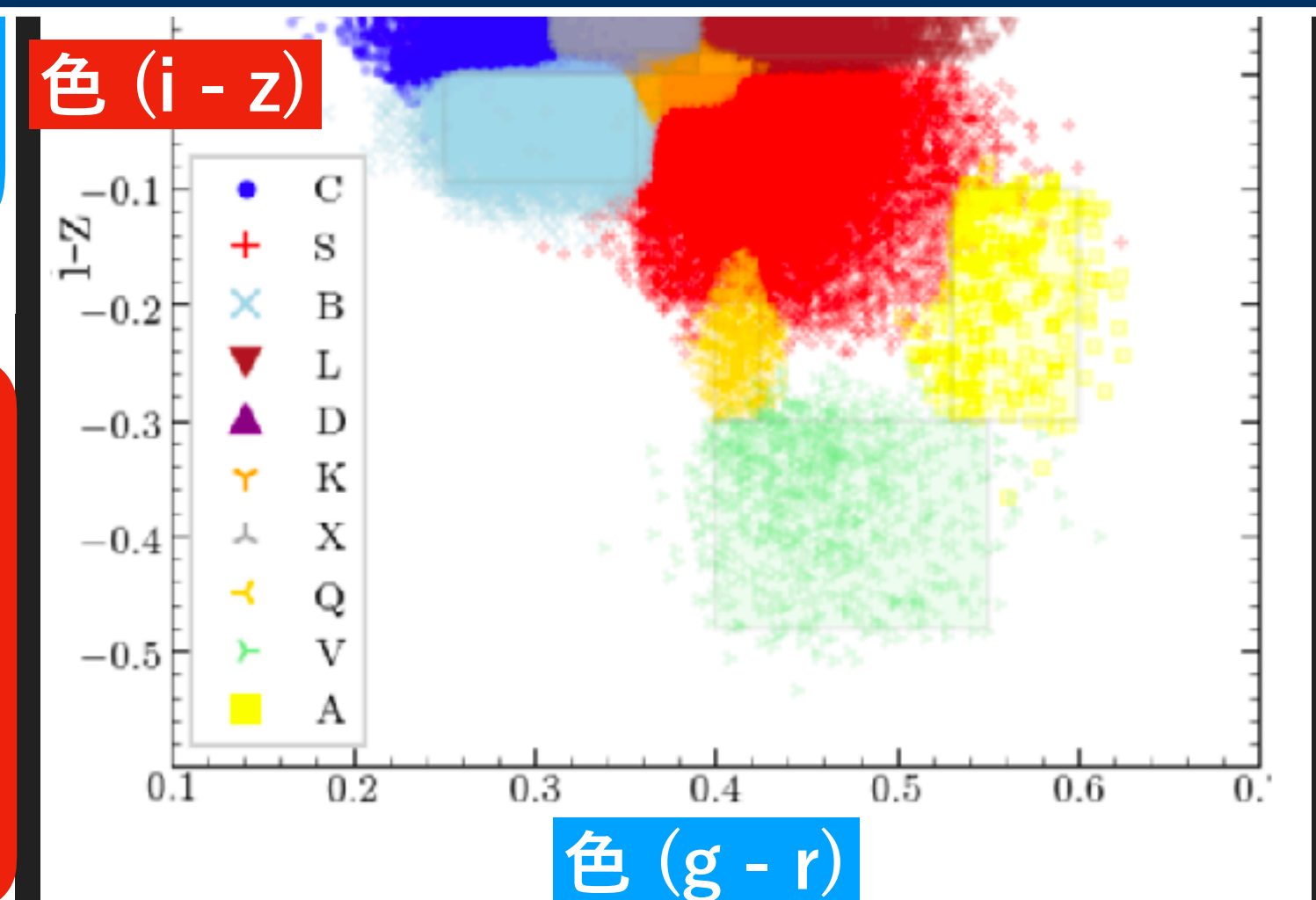
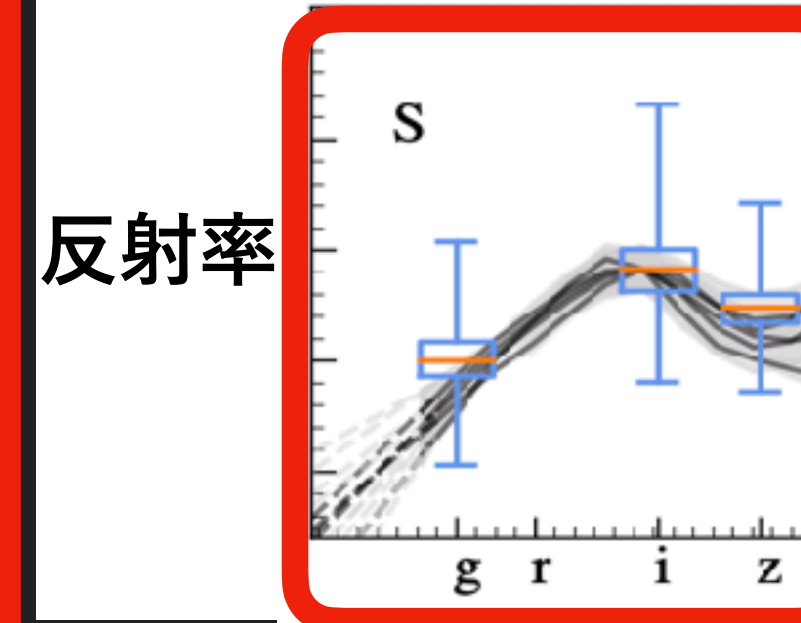
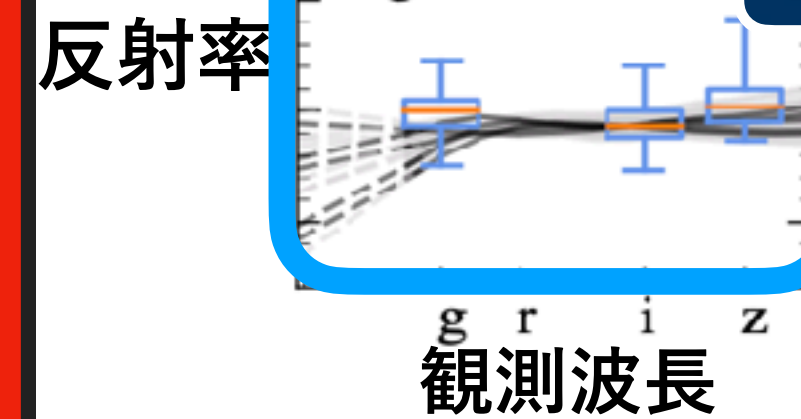
## 多数観測されている

### ▶ 多色観測 (~ 100,000天体)

- SDSS (5bands, 1998–2009, Sergeyev+2021a\*)
- SkyMapper (6 bands, 2014–, Sergeyev+2021b)

### ▶ 分光観測 (~ 1,000天体)

- MANOS (Mission Accessible Near-Earth, Objects Survey, Devogele+2019\*\*, 次ページに図)
- MITHNEOS (MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey, Binzel+2019\*\*\*)



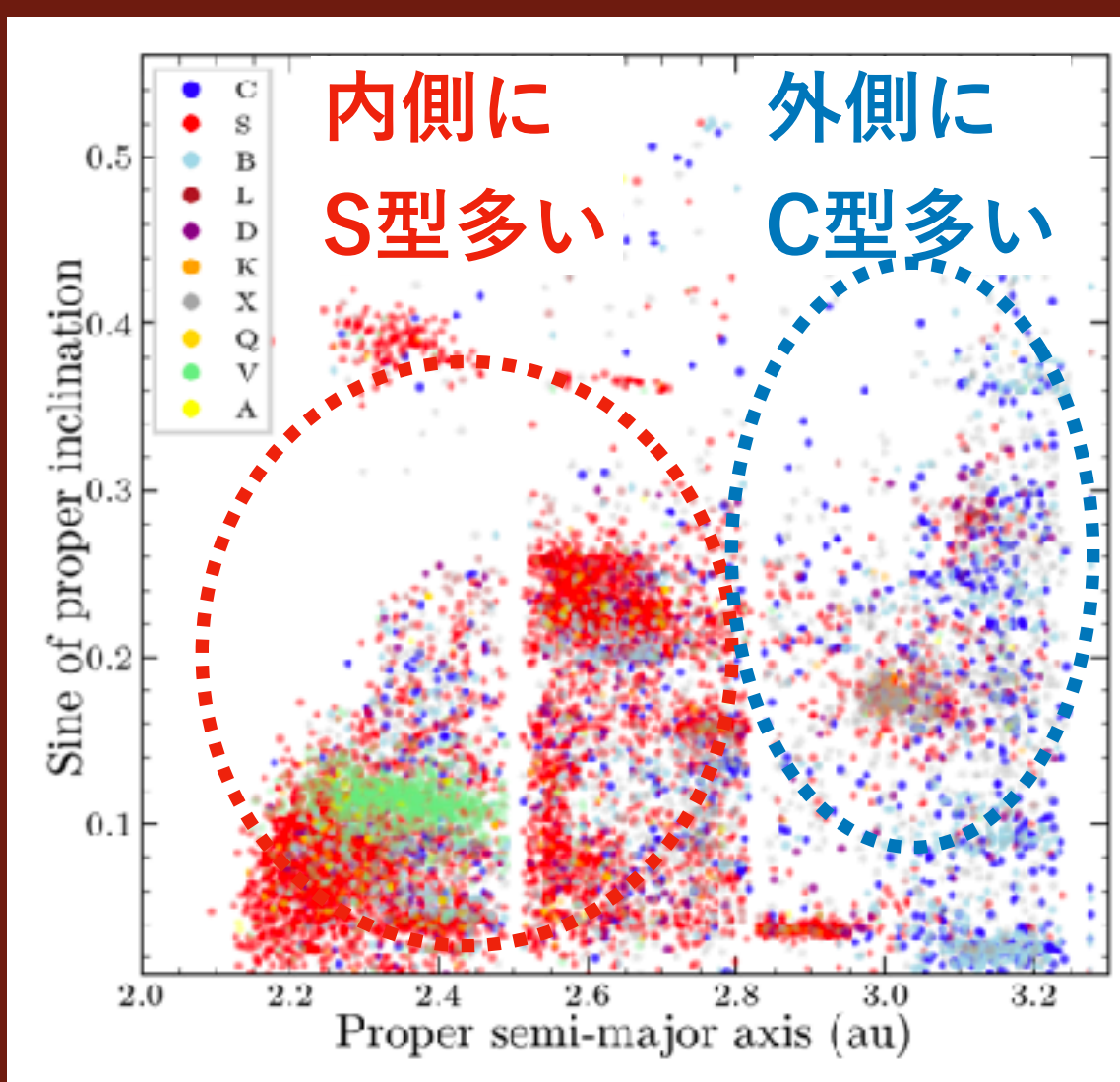
多色観測でスペクトル分類

(Sergeyev et al., 2021a, arXiv:2110.11656, figure B.2, 2)

# 比較1. 組成(スペクトル)分布

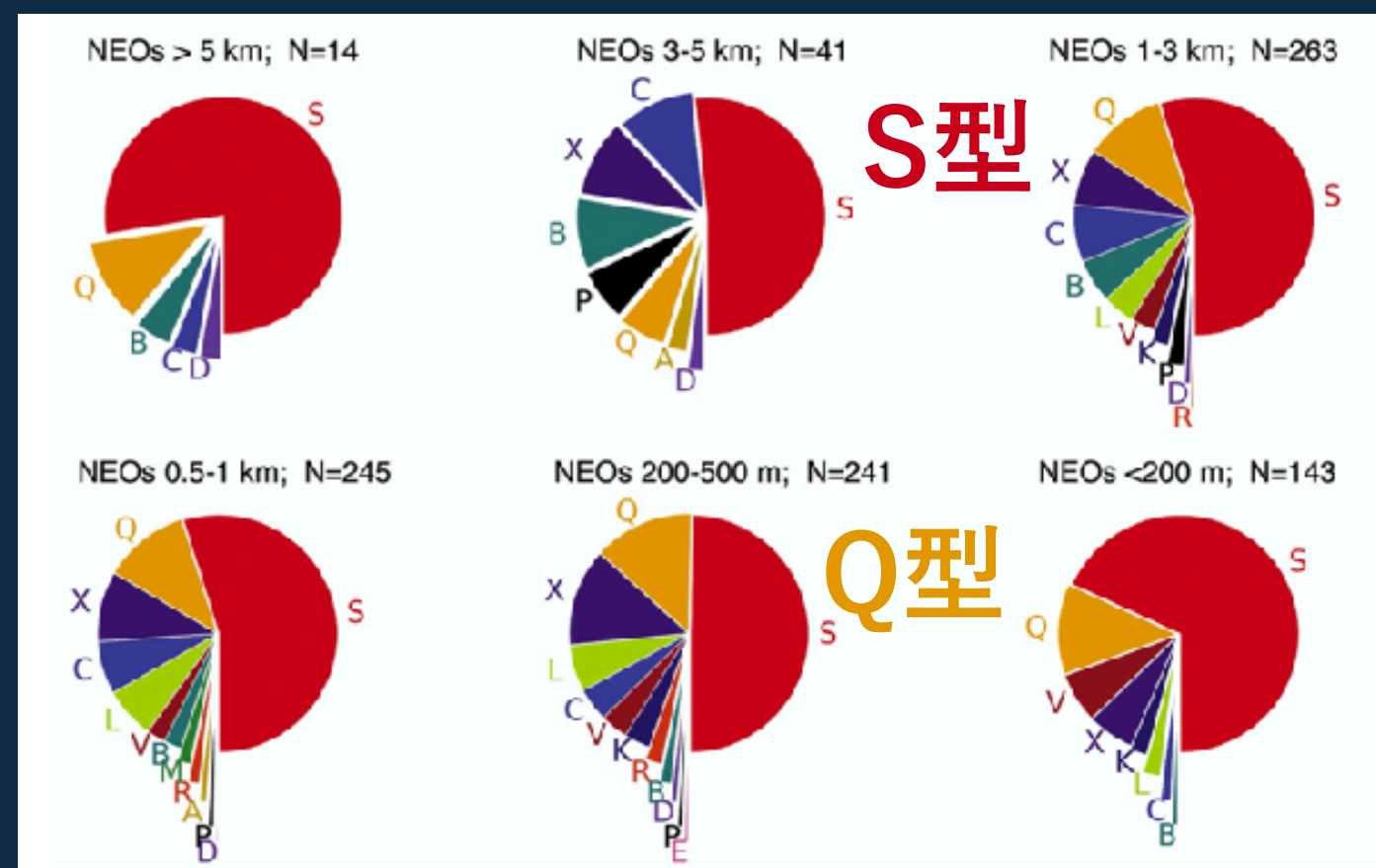
## MBA

- ・多くの観測あり
- ・内側：S型、外側：C型



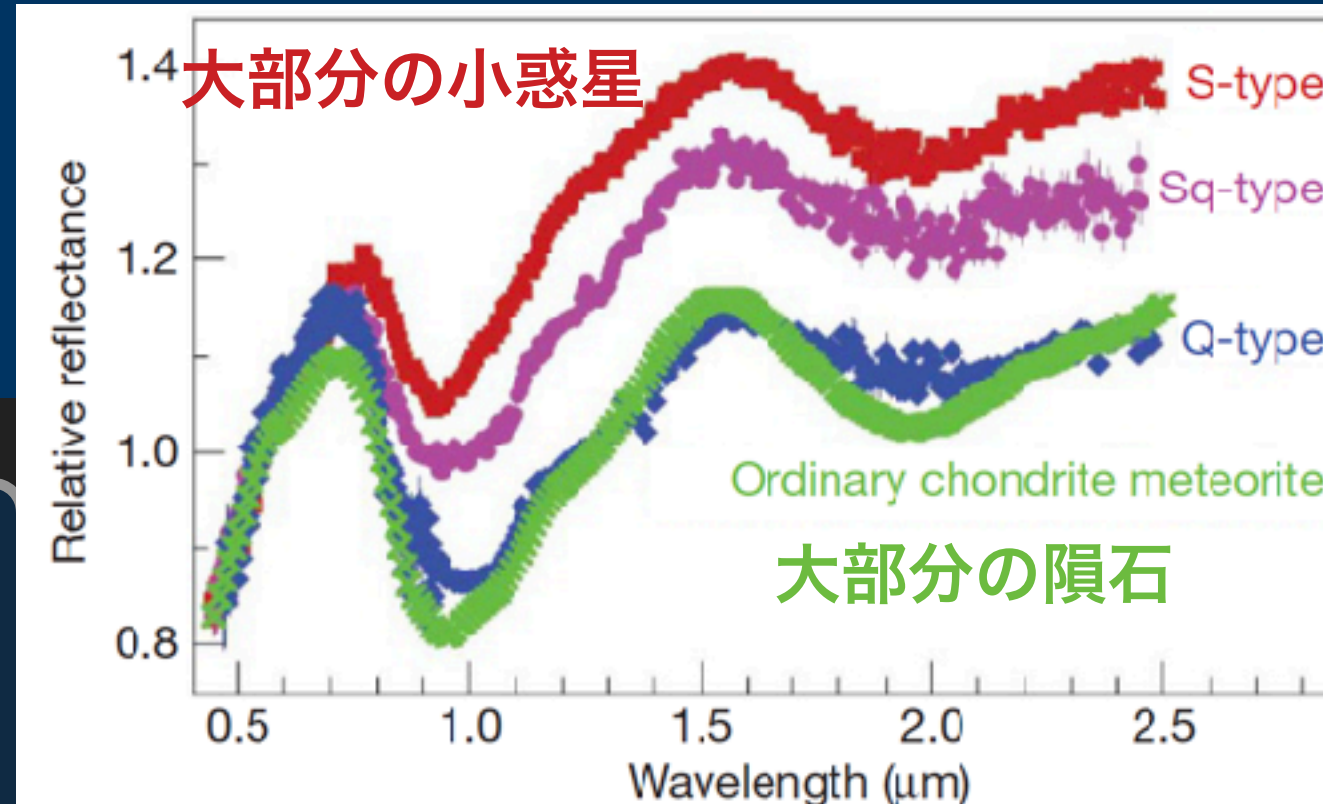
## NEA

- ・S型が多い
- 1. 内側メインベルトにS型が多い
- 2. アルベドが高いという観測(発見)バイアス

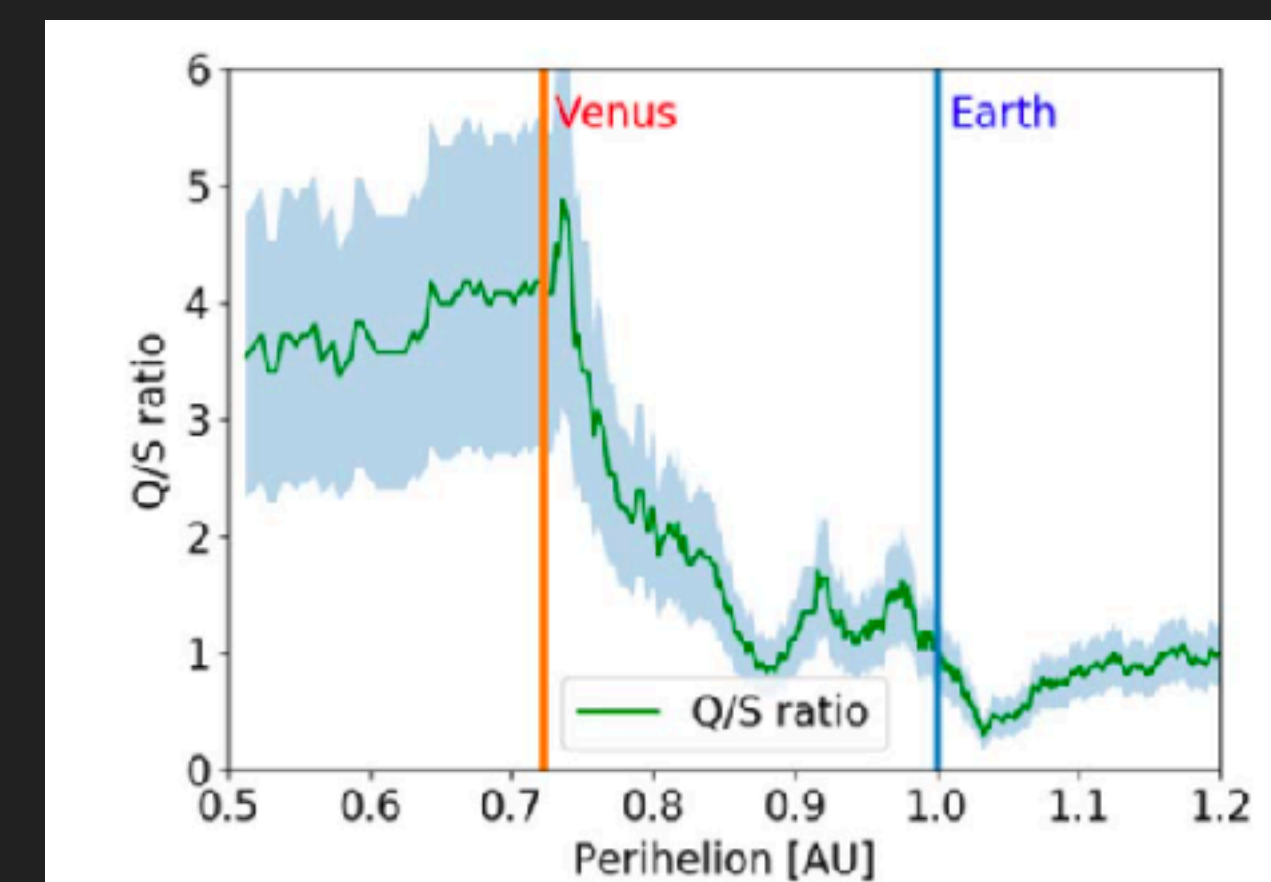


- ・直径 100 m 以下の  
スペクトル型推定 ~ 100天体のみ
- ・新鮮な Q 型が多い  
-> 惑星近接作用による  
宇宙風化リフレッシュ作用を示唆

(Binzel et al., 2010, Nature, 463, 331,  
Devogele et al., 2019, AJ, 158, 196)



隕石と小惑星のスペクトル



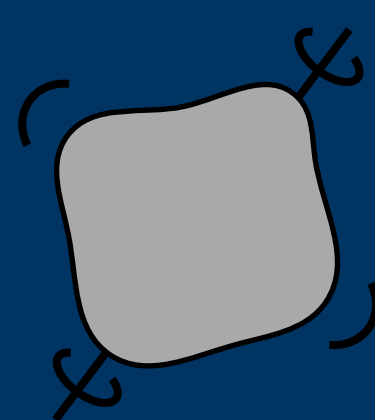
Q型/S型比の近日点距離依存性

## 課題

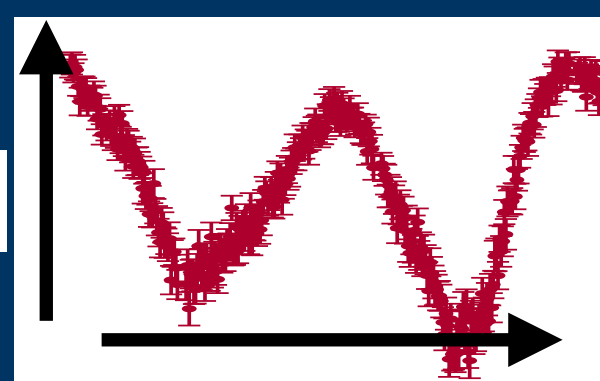
宇宙風化リフレッシュ要因は  
未解明

- ・惑星近接遭遇
- ・自転加速 (YORP効果)
- ・バイナリ形成

# 比較2. 自転周期分布



明るさ

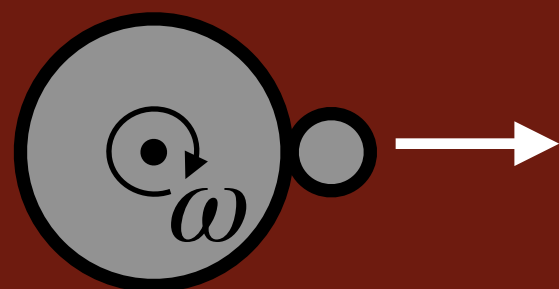


時間

## MBA

- 直径が大きく明るい天体の多くは周期推定済み
- 自転周期2時間以下で遠心力に耐えきれず自転破壊 (NEAも) (Pravec & Harris 2000, Icarus, 148, 12)

$$mR\omega^2 = G \frac{mM}{R^2} \leftrightarrow \omega = \sqrt{\frac{4\pi\rho G}{3}}$$

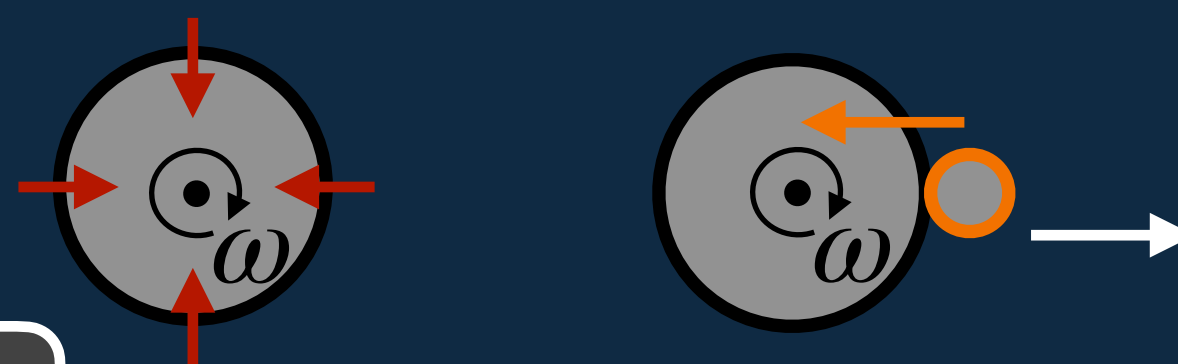


自転破壊は多方面から支持

- ▼ バイナリの自転周期 \*
- ▼ 多色測光を合わせた密度依存性 \*\*

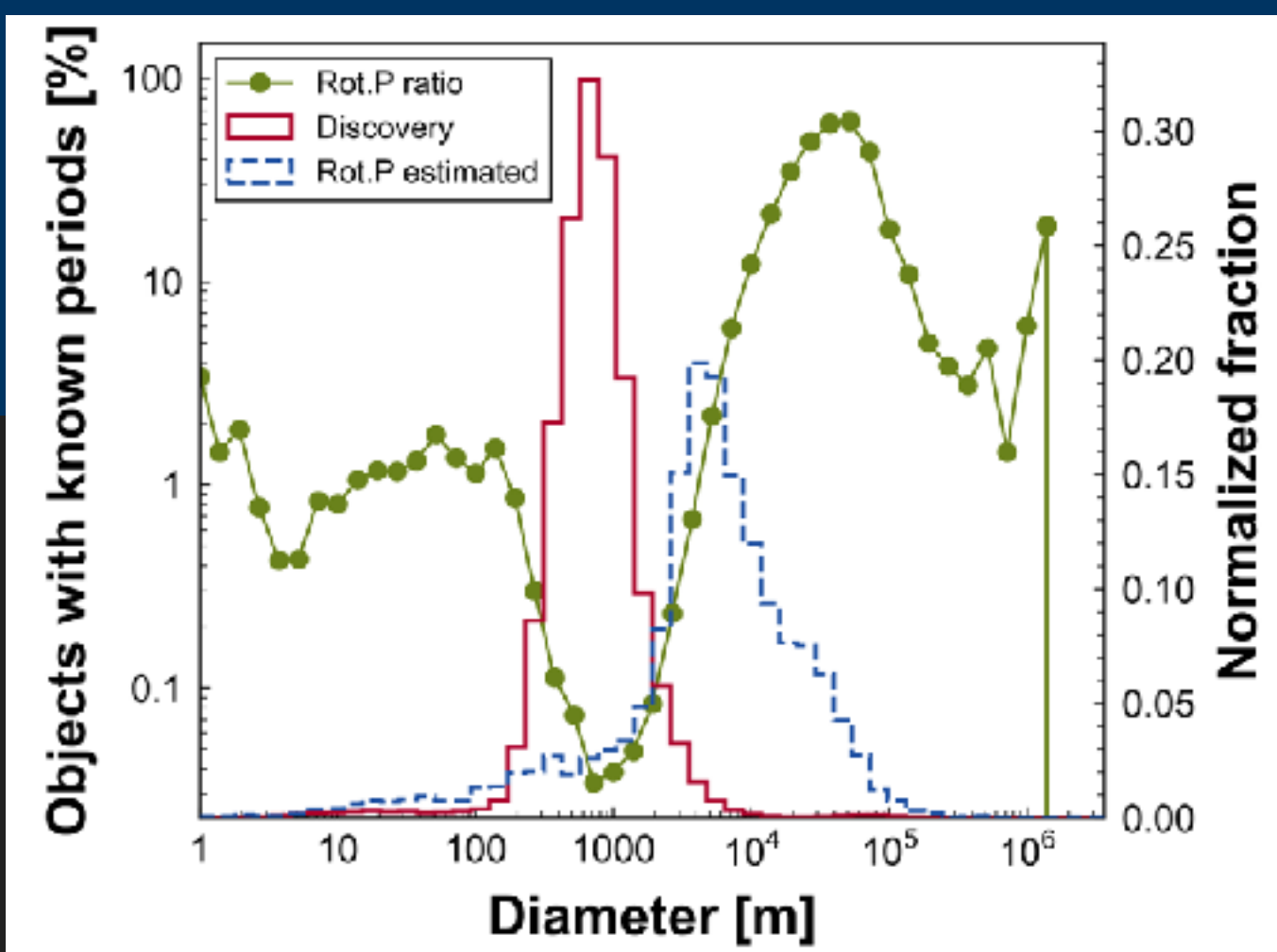
## NEA

- 直径が小さい天体の自転周期推定はNEAのみ
  - 直径 ≤ 200 m の小惑星は ~2 h のスピンバリアより高速自転 (Holsapple 2007, Icarus, 187ZZ, 500)
- > 一枚岩の引っ張り強度  
and/or  
表面レゴリスによる固着力

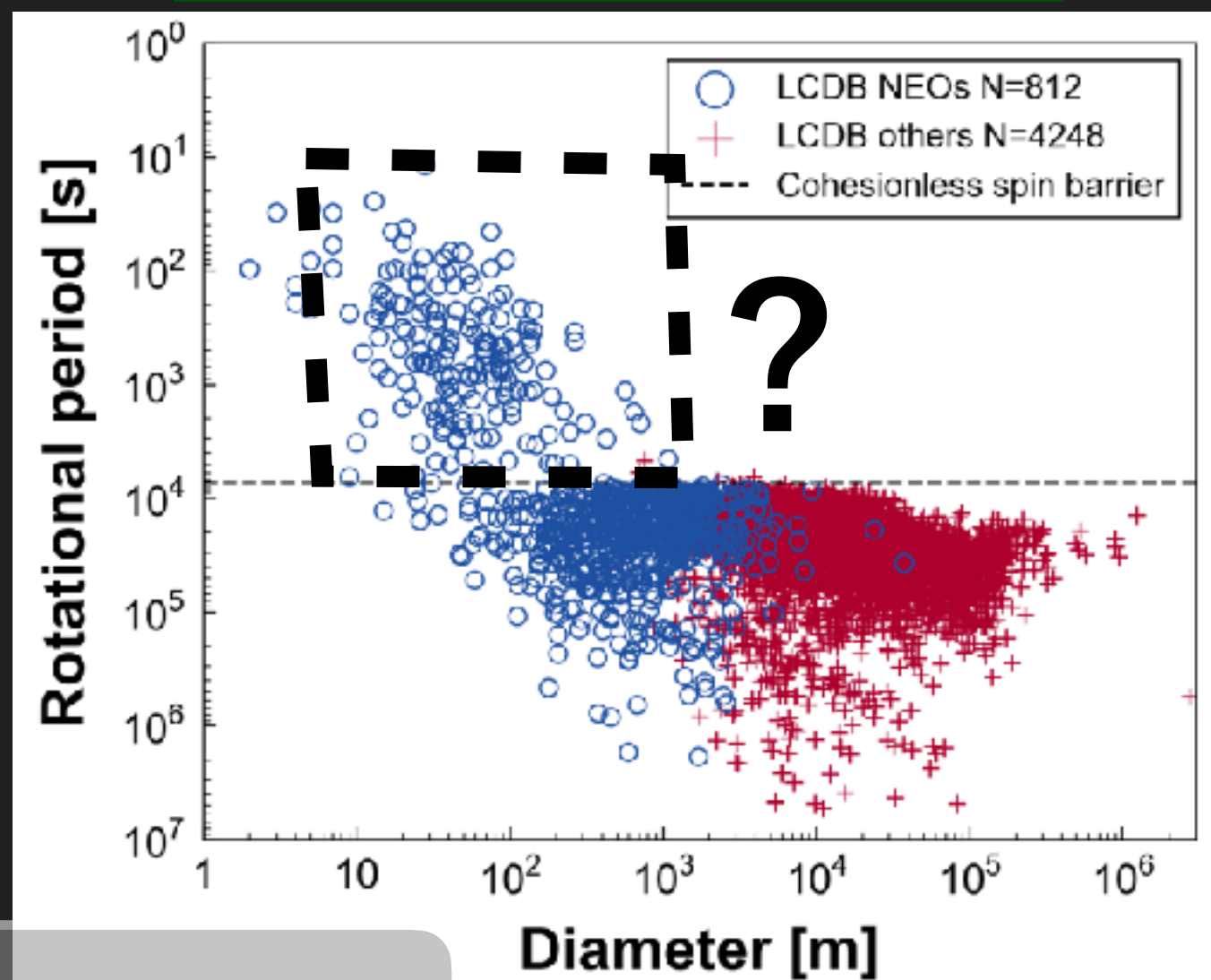


## 課題

- 微小NEAの自転周期分布は?
- 最短自転周期は2年間更新なし。スピンバリアはあるか?
- 秒スケールの自転検出には高速観測が必要
- 微小天体の表面様相は? -> はやぶさ2 拡張ミッション



小天体の自転周期推定状況



小天体の直径-自転周期関係 \*\*\*

\* Pravec & Harris 2007, Icarus, 190, 250

\*\* Carbognani 2017, PSS, 147, 1

\*\*\* Warner et al., 2007, Icarus, 202, 134



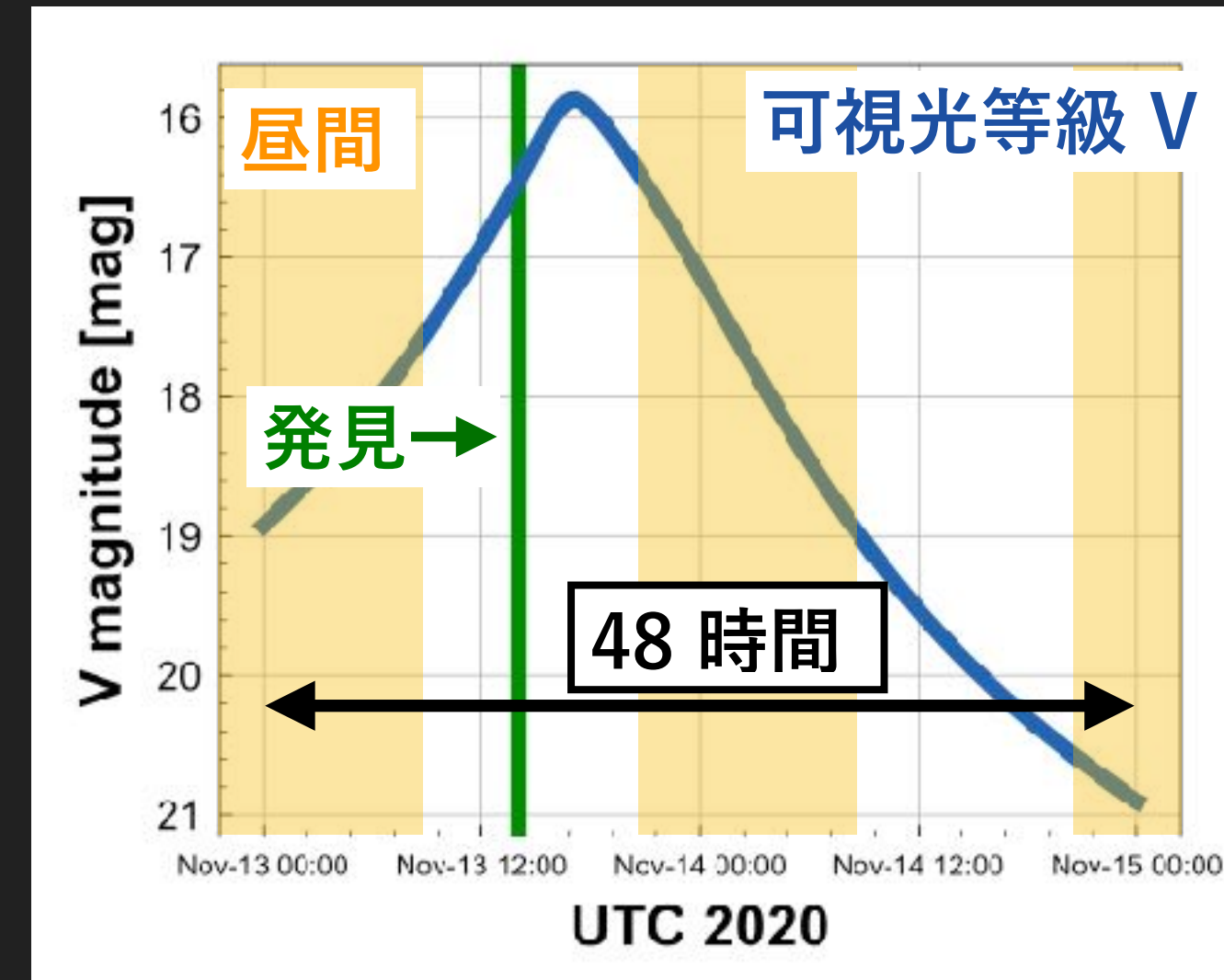
# 比較3. 望遠鏡での観測

## MBA

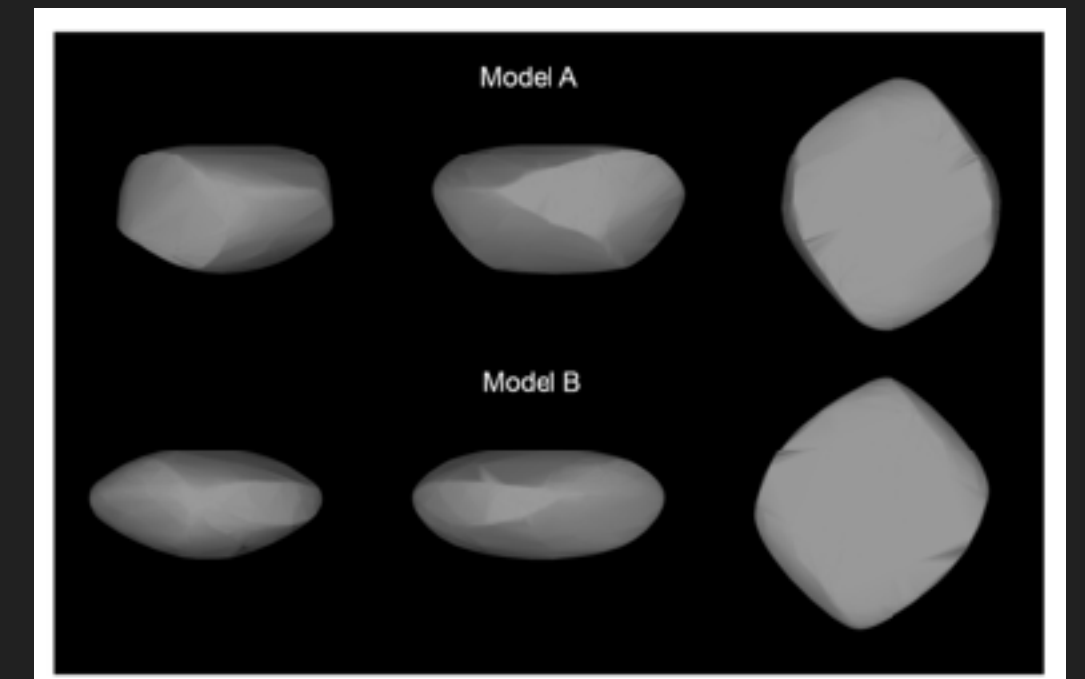
- 直径 > ~1 km
- 天球上の移動速度が小さい  
-> 観測が(比較的)容易
- 回帰ごとに観測できる天体 **(多)**  
-> 観測予定が組みやすい
- 蓄積した光度曲線が豊富で、  
形状推定数 **(多)**

## NEA

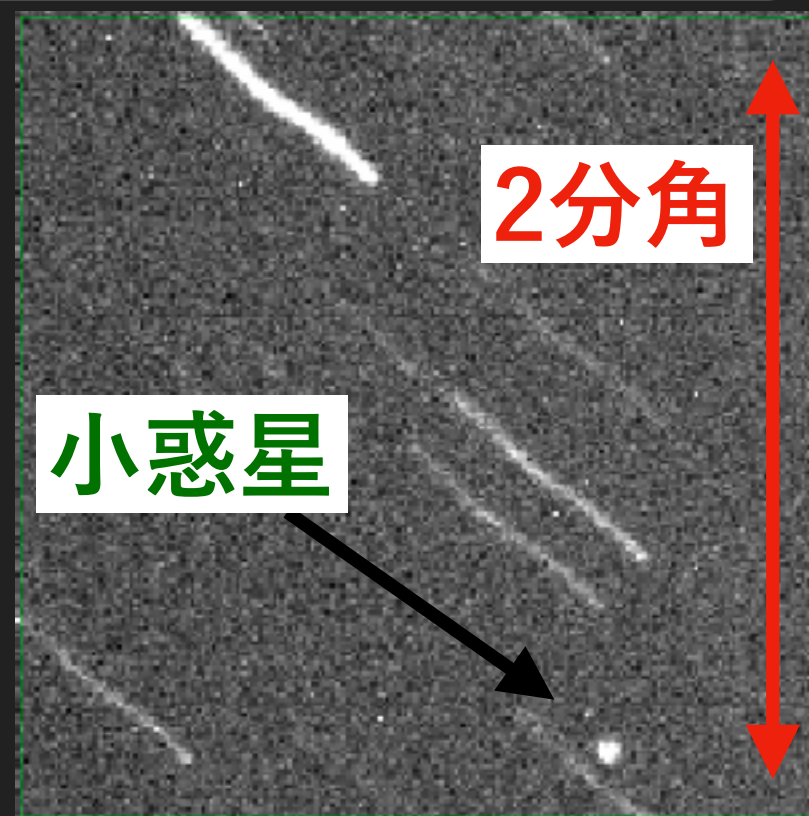
- 最小直径 ~ 1 m
- 天球上の移動速度が大きい  
-> 星像の伸び、短い観測好機
- 一期一会の天体が多数  
-> 発見後すぐの観測が必須
- 短い観測時間で自転周期や形状  
を推定できる可能性  
軸の向き ↔ YORP効果



直径 5 m NEA 2020 VH<sub>5</sub> の天体暦



6晩の測光観測で直径 ~30 m NEA 2021 DW1 の形状を推定 \*

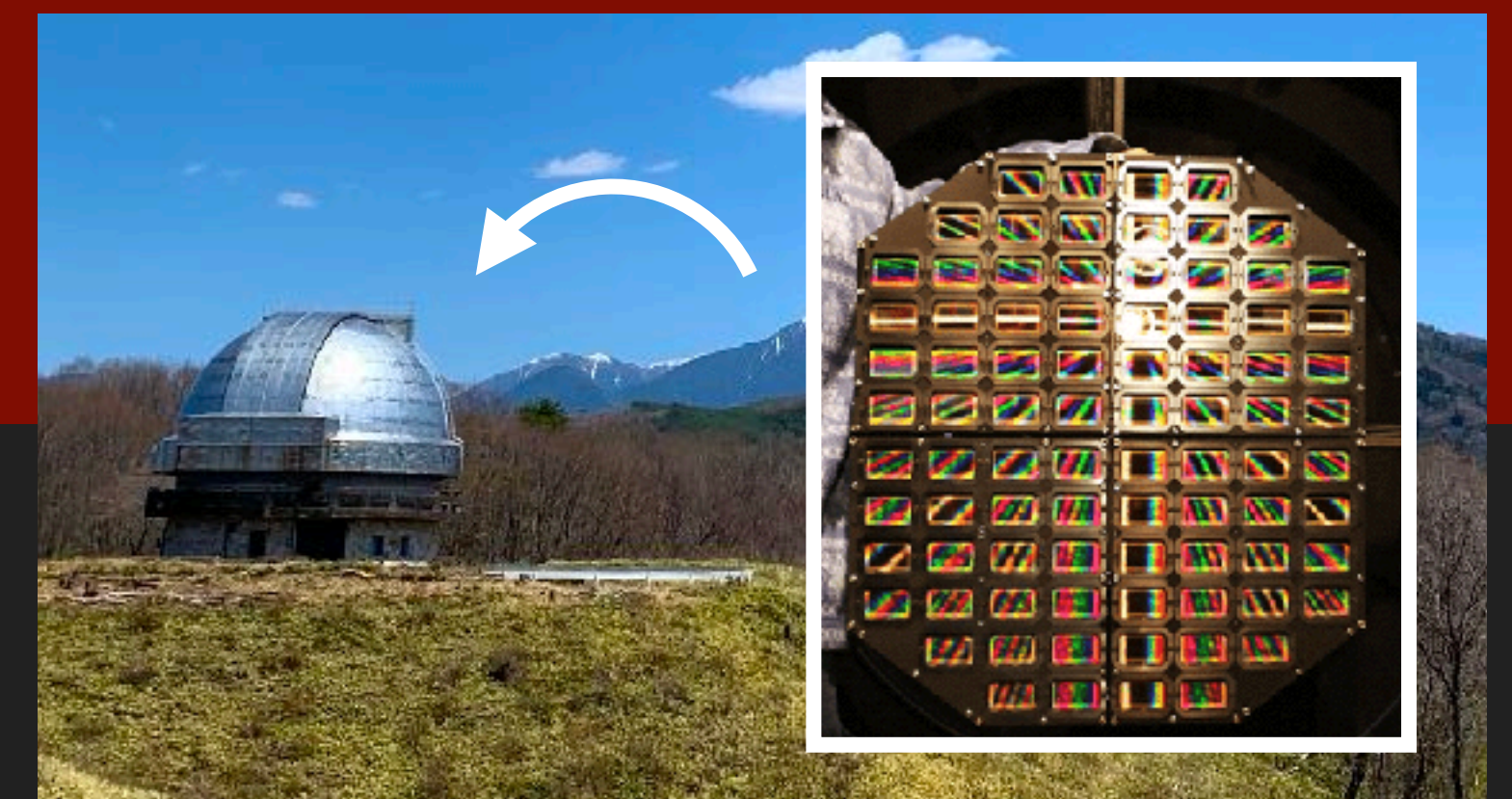


高速移動NEAの観測データ  
10秒間 で 1 分角程度の  
移動しているため  
星像が伸びている

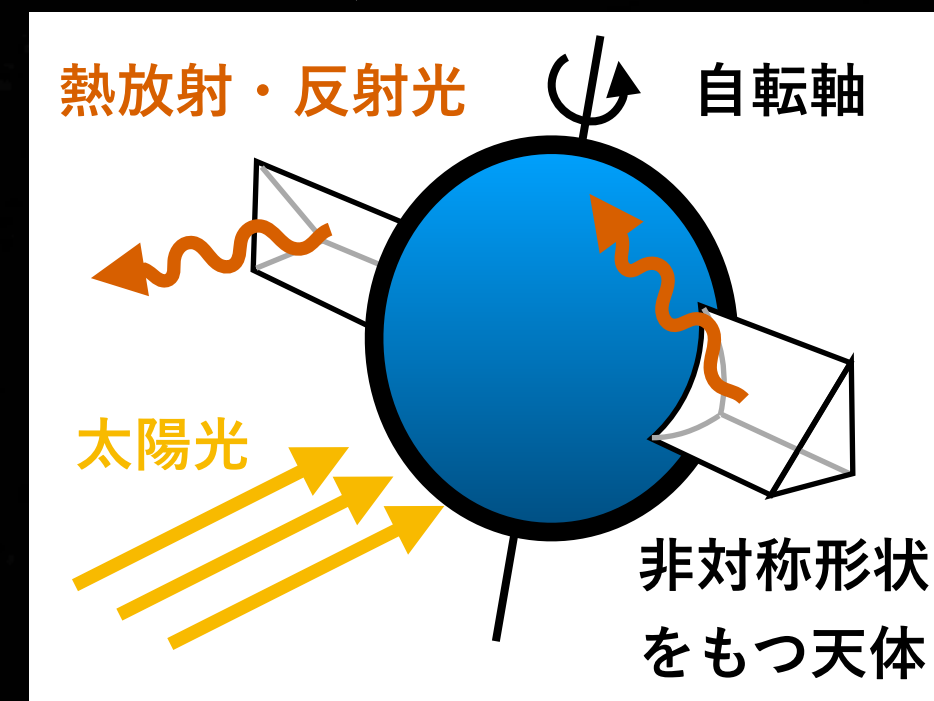
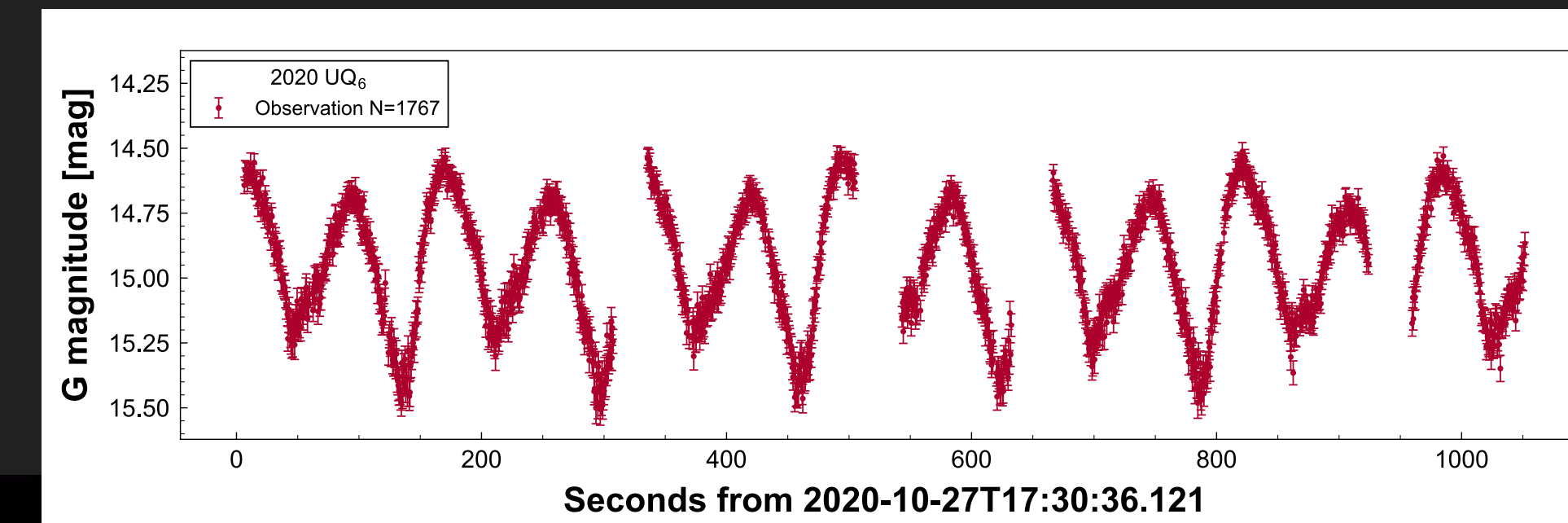
\* Kwiatkowski+2021, A&A, 657, A126

# 国内望遠鏡による微小NEA観測

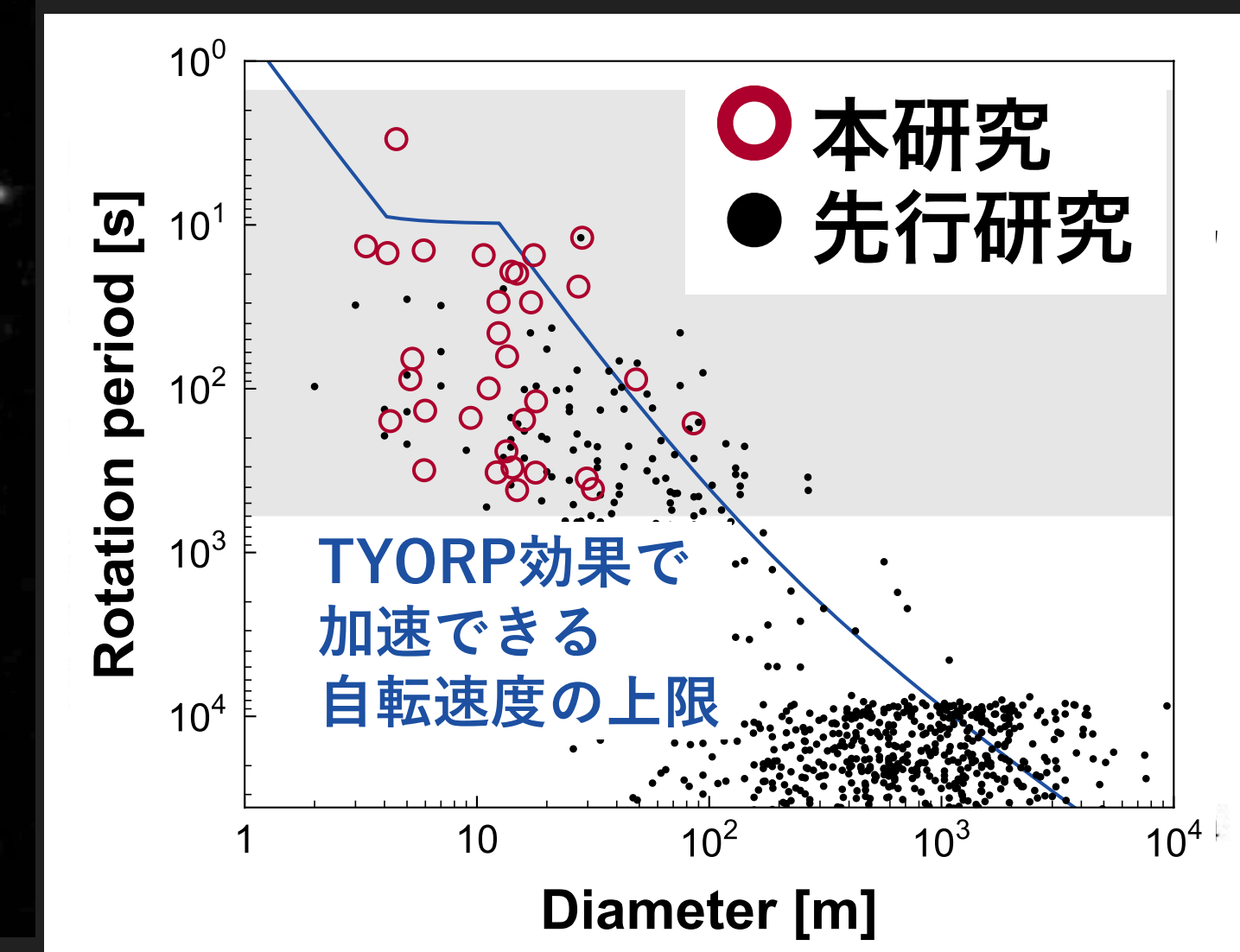
- 地球接近軌道をもつNEAによる物質輸送は水や生命の起源の一つ スペースガードの観点からも観測は重要
- NEAの創造 (MBAからNEAへの軌道進化, 小惑星に働く力学作用) を明らかにする上で、微小天体の自転周期は有用な情報
- 「即時観測」 x 「高速観測」により、これまで観測が困難であった微小NEAの自転周期を推定
- NEAの多くは高速自転している、が典型的な理論予測に比べるとそこまで高速ではない。
- Tangential YORP効果により自転周期分布を説明できる可能性。



広視野高速カメラ Tomo-e Gozen @ 木曾観測所, 長野県



YORP効果の概念図



小天体の直径 - 自転周期関係

# DESTINY+ ミッション 探査小惑星 Phaethon の観測



- Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage with Phaethon fLyby and dUst Science (深宇宙探査技術実証機, 2024年打ち上げ)  
直径 ~ 5 km の活動的小惑星 (3200) Phaethon にフライバイするミッション

- 探査機による探査を成功するためには **探査機到着前の精力的な望遠鏡観測が必須**

- ▶ Itokawa (Hasegawa et al., 2008, PASJ, 60, S399)
- ▶ Ryugu (Müller et al., 2007, Icarus, 187, 611)
- ▶ Bennu (Chesley et al., 2014, Icarus, 235, 5)

- DESTINY+ が探査する小惑星 Phaethon の観測を実施 **3.8 m せいめい望遠鏡を用いて 9 日間の 3 色同時測光観測**

- ▶ サイズ推定
- ▶ Phaethon の表面不均質性 (カラー変化) の推定

Seimei telescope  
@ Okayama Observatory,  
Kyoto University



削除しました

# まとめ

## part 1. MBA vs. NEA

- 地球接近小惑星 (NEA) はメインベルト小惑星 (MBA) が軌道進化した天体 (**NEAの創造**) 。
- NEAであれば直径が小さい天体も観測可能。**  
ただし多くの観測的困難から特徴づけは限られている。
- 微小NEAの自転周期、スペクトル型の推定は **微小天体のスピンバリアの有無、宇宙風化(とそのリフレッシュ)作用** に関する知見を得るために重要。
- 微小NEAをうまく観測できれば、**短い期間で軸や形状推定も可能。**

## part 2. NEA観測例

微小NEA光度曲線観測 -> 創造に関する知見を得た  
Phaethonの観測 -> NEA探査ミッション成功への一歩

Small  
body

### 創造

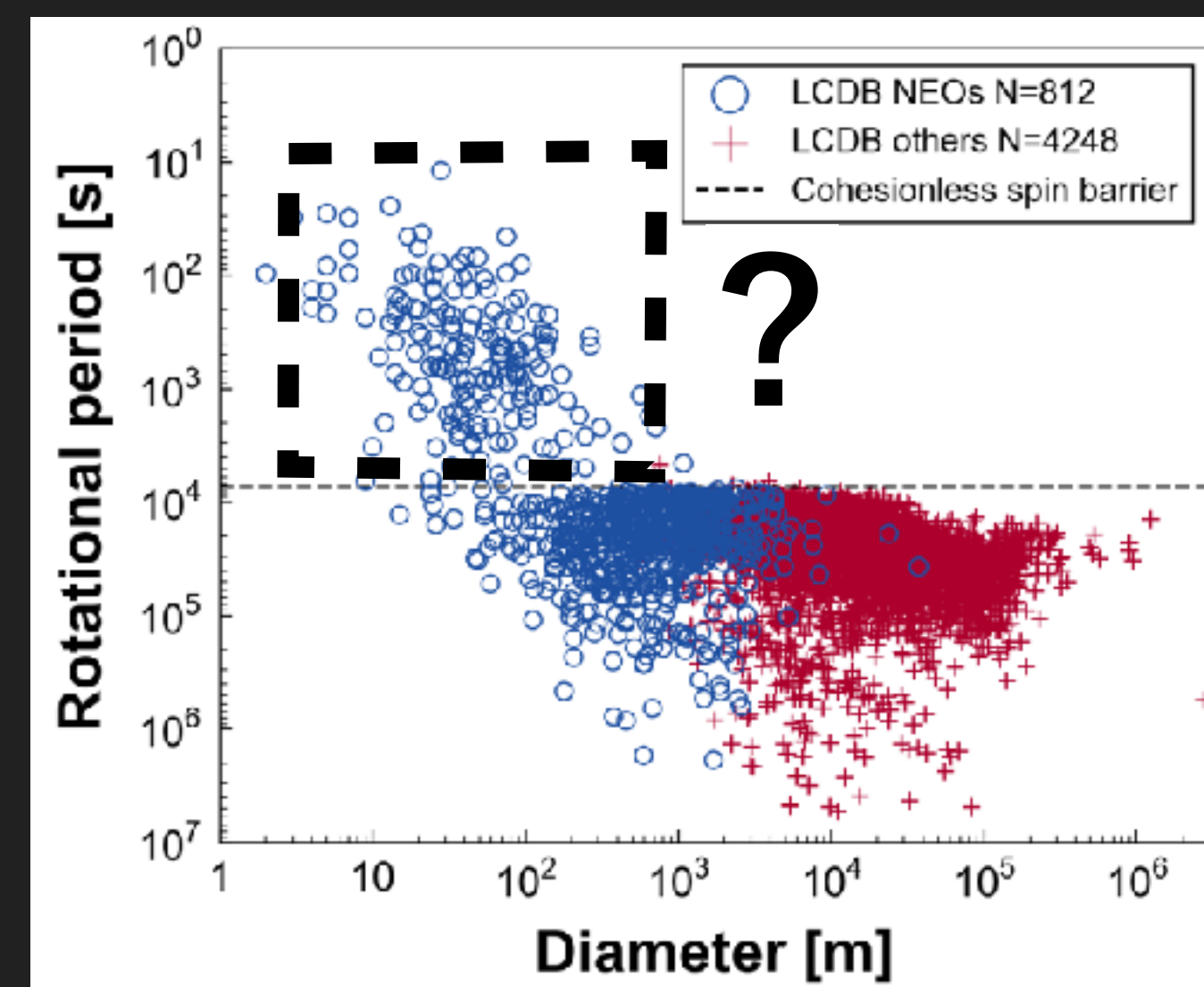
Formations & transports  
of planetary worlds

### 水

Its origins, transports,  
evolutions, and variations

### おひさま

Effects from outer worlds  
~ Sun/Stars, solar winds,  
planets, and satellites



小天体の直径-自転周期関係