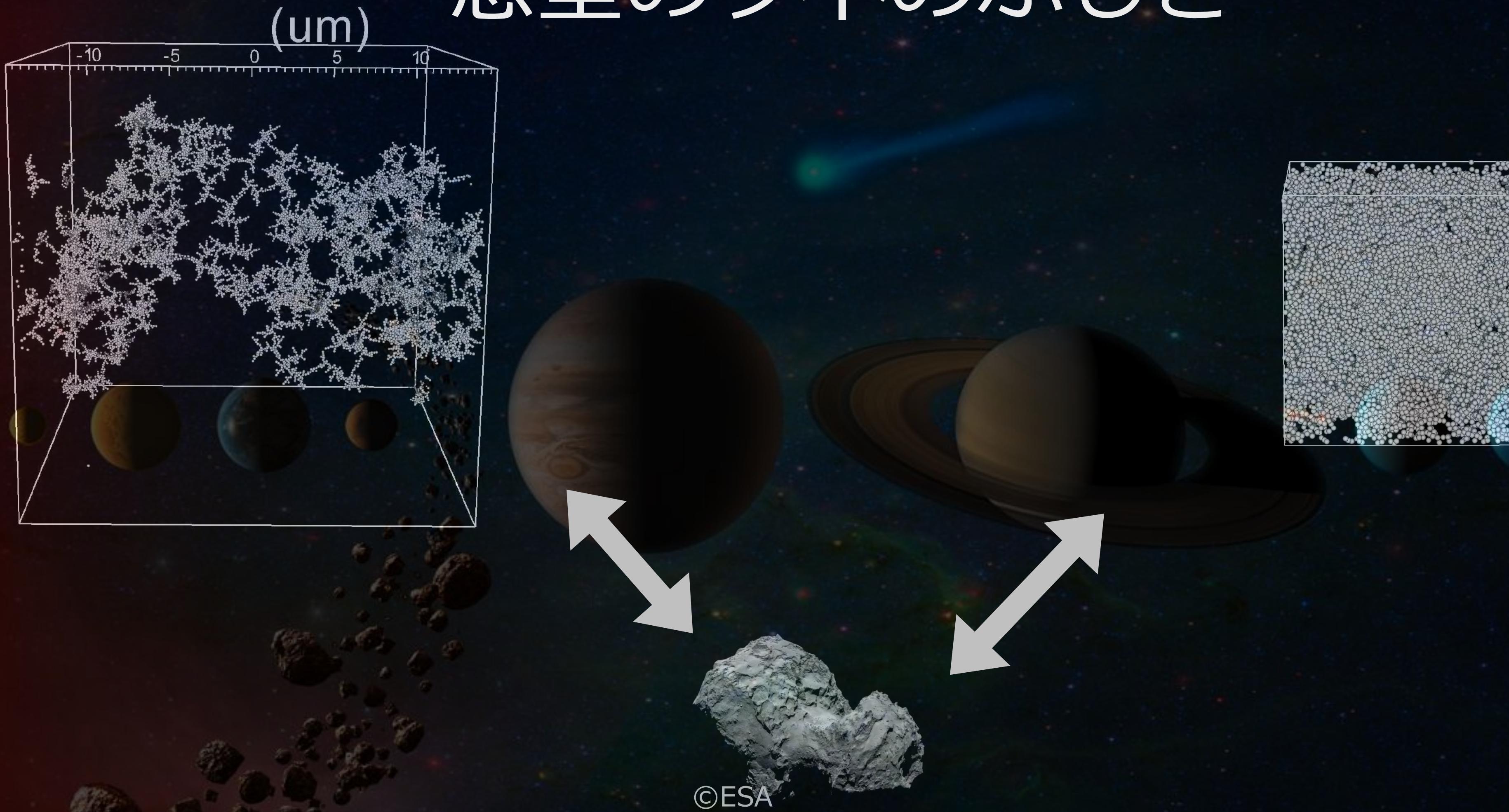


星空ゼミ 2025/8/9

# 惑星のタネのふしぎ



理化学研究所 数理創造研究センター 辰馬 未沙子 (たつうま みさこ)

©NASA

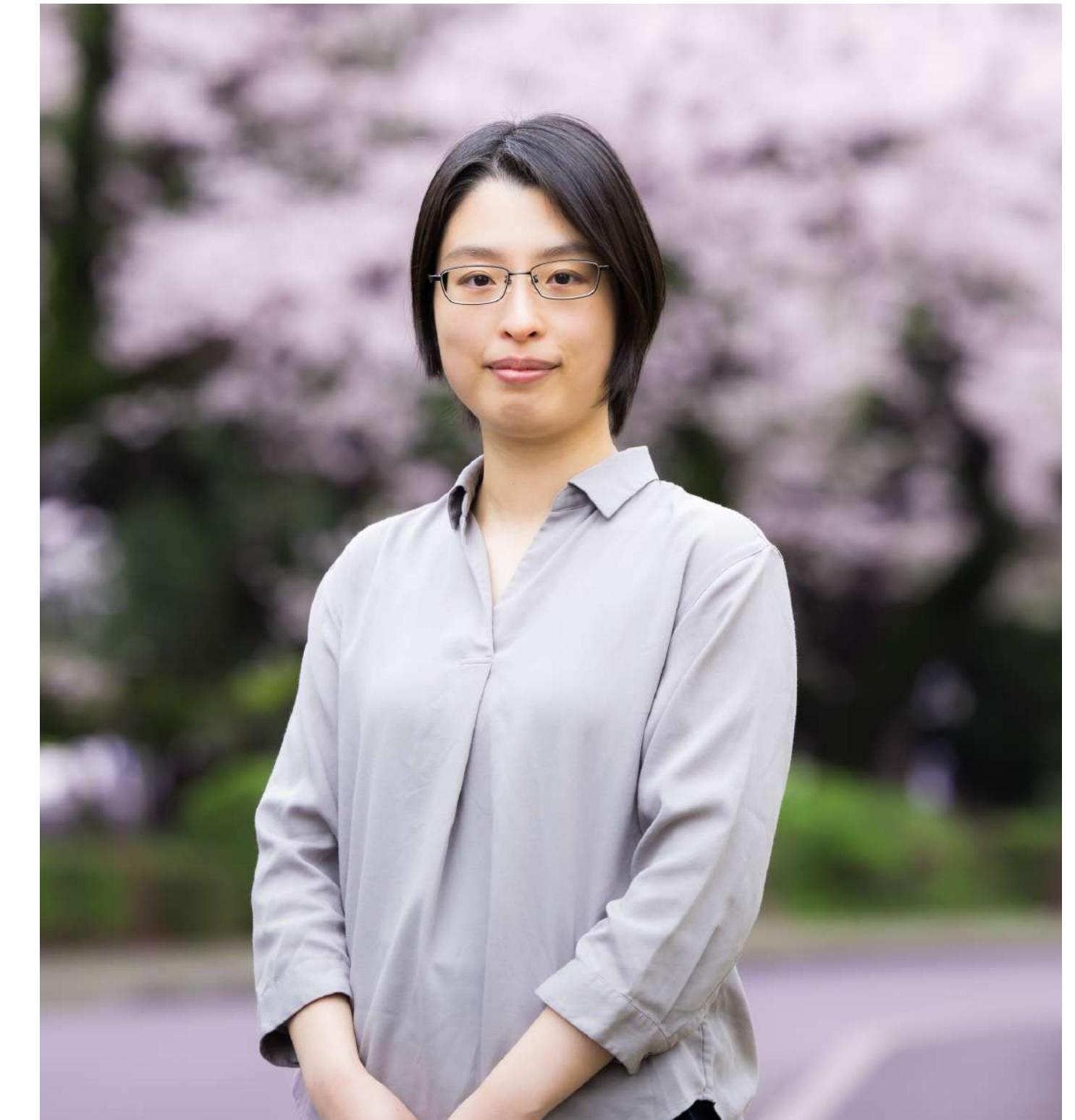
# 自己紹介

名前: 辰馬 未沙子 (たつうま みさこ)

専門: 惑星形成論 (天文学/惑星科学)

経歴:

- 生まれ: 岩手県釜石市 (母の実家)
- 幼稚園: 東京都 → 京都府 (父の仕事の都合で転園)
- 小学校: 京都府の公立
- 中学校: 京都府 → 東京都の公立 (父の仕事の都合で転校)
- 高校: 都立西高等学校
- 大学・大学院: 東京大学 (理科一類 → 理学部天文学科 → 理学系研究科天文学専攻)
- 研究者: 東京工業大学 (2022-2023, 学振特別研究員) → 理化学研究所 (2023-, 研究員)



# 天文・惑星の理論研究者はふだん何をしているの？



望遠鏡は… **のぞきません！**

(※すばる望遠鏡やアルマ望遠鏡による研究成果は使っている)

星座は… **わかりません！**

(※理論家に多い。オリオン座ならわかる)

机にむかい、パソコン・紙とペンを使って  
シミュレーションや計算をしています



# 惑星のタネが直面する困難

# 惑星とは？—2006年国際天文学連合での惑星の再定義—

- 恒星の周りを回り
- ほぼ球形で
- その軌道近くに似た天体がない

天体を惑星という



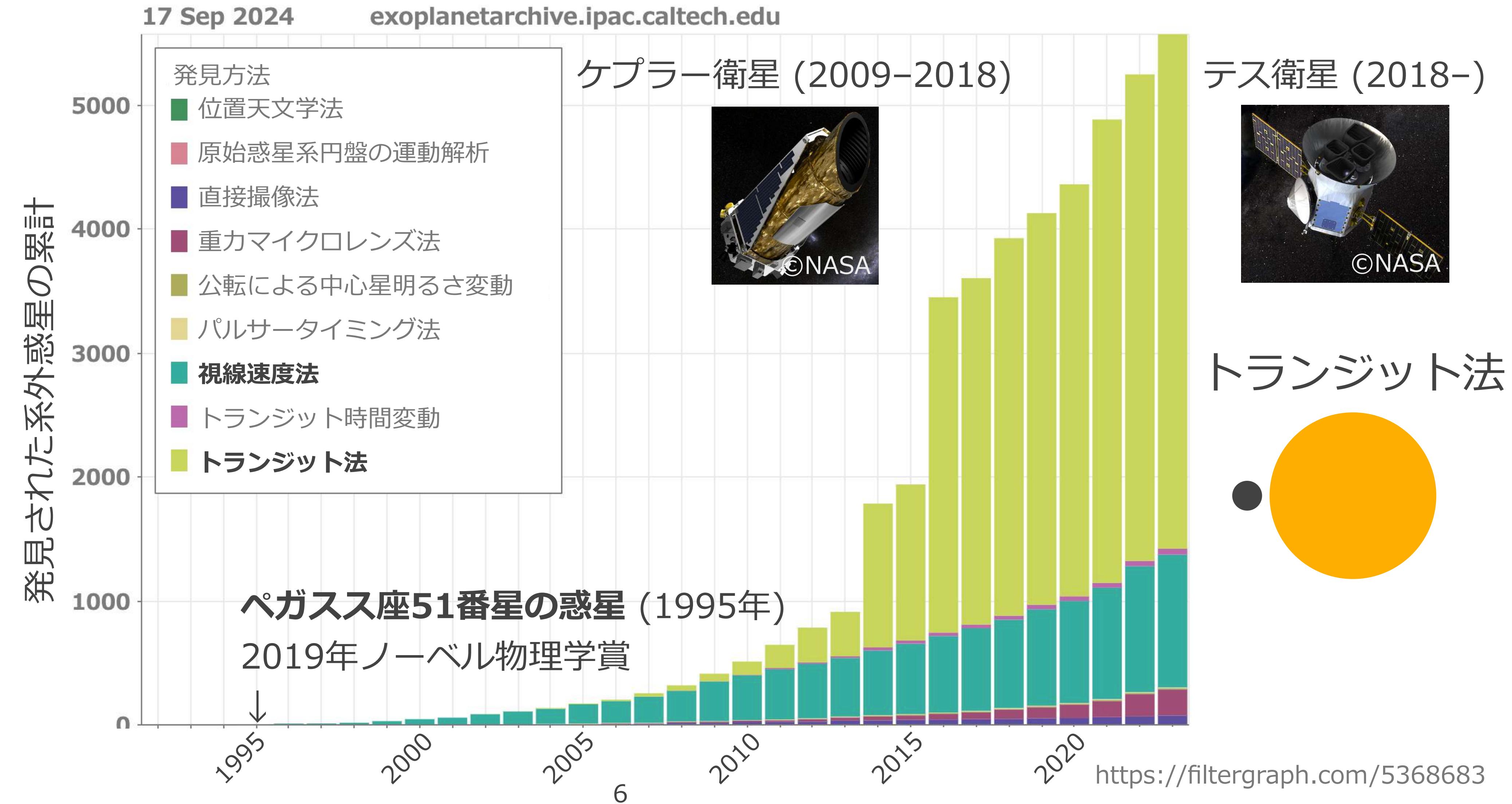
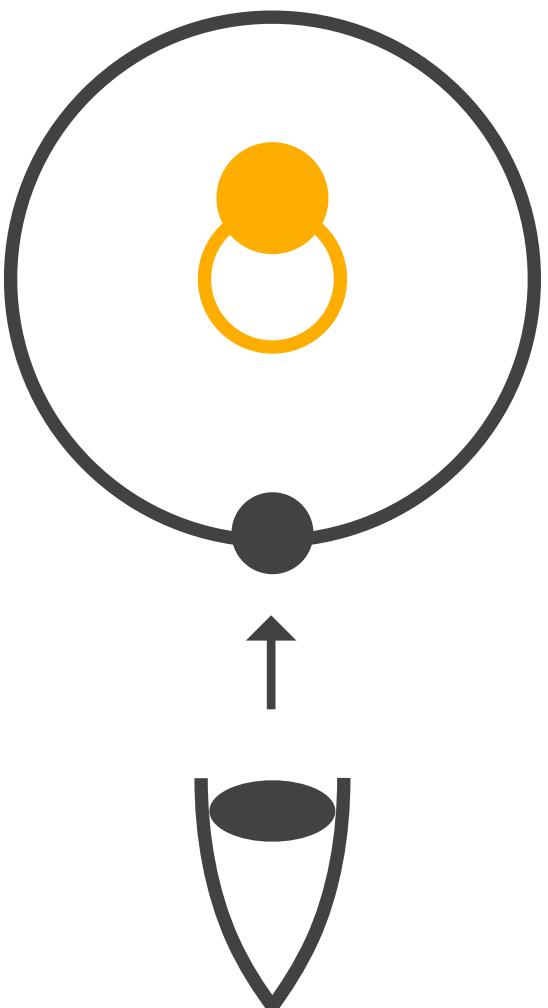
小惑星・彗星：惑星になりきれなかったもの

※見やすくするため、  
惑星の大きさの差は実際よりも小さく、  
軌道の間隔は実際よりも近づけています  
©NASA

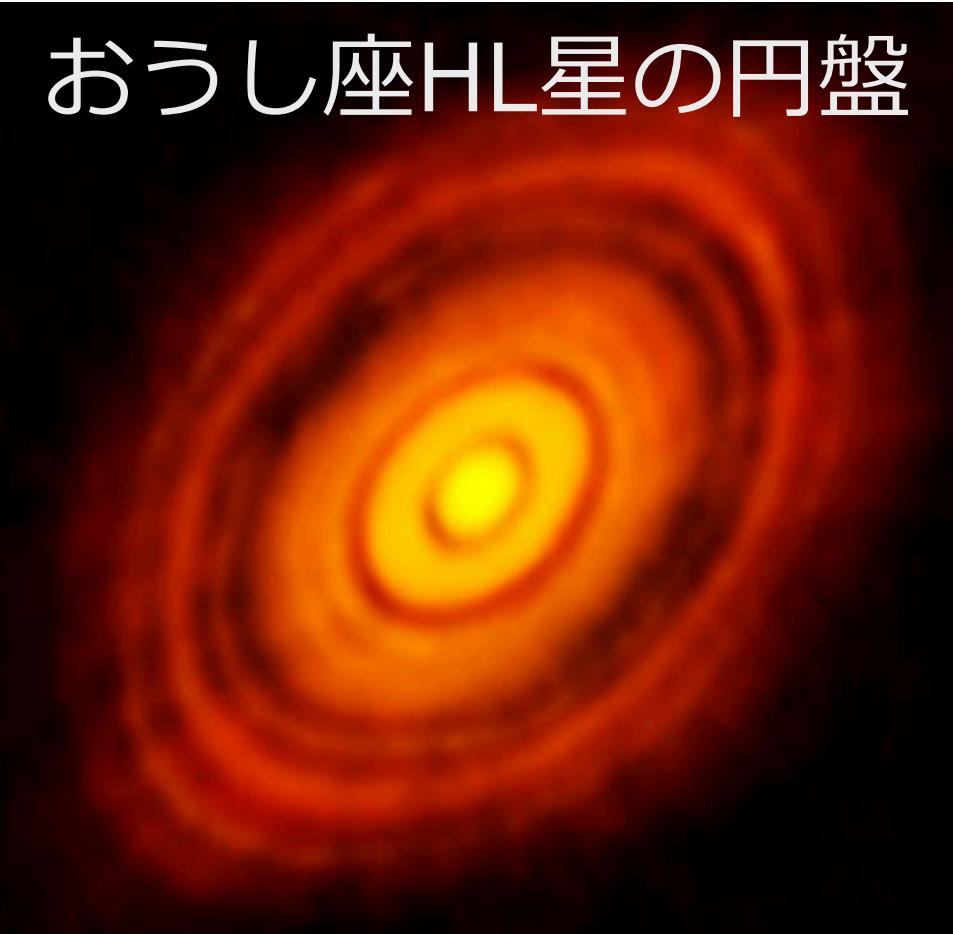
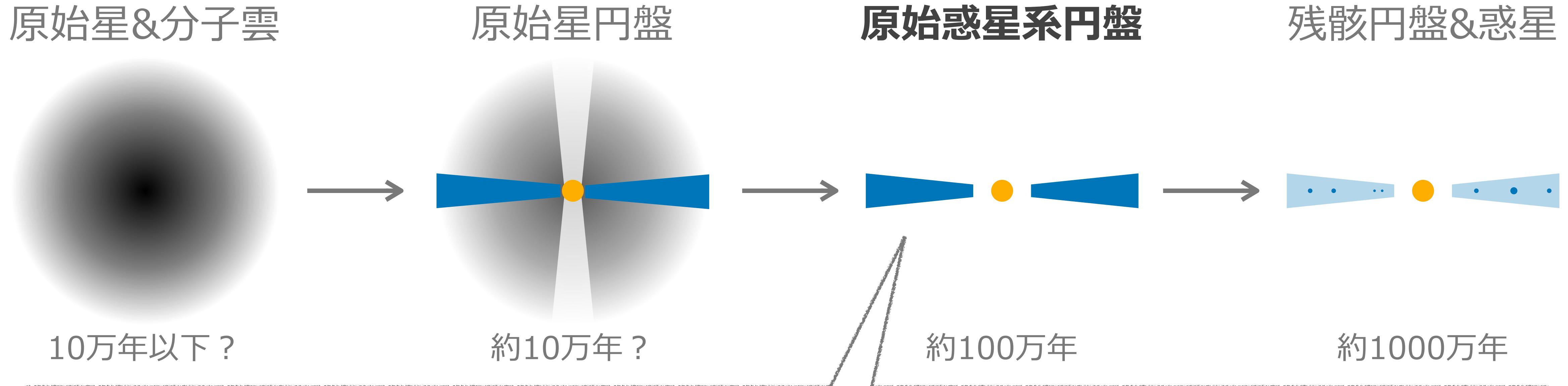
# 太陽系の外に惑星はあるの？

→ ある！系外惑星は5000個以上見つかっている！

視線速度法



# 惑星はいつ、どこで、何から作られるの？



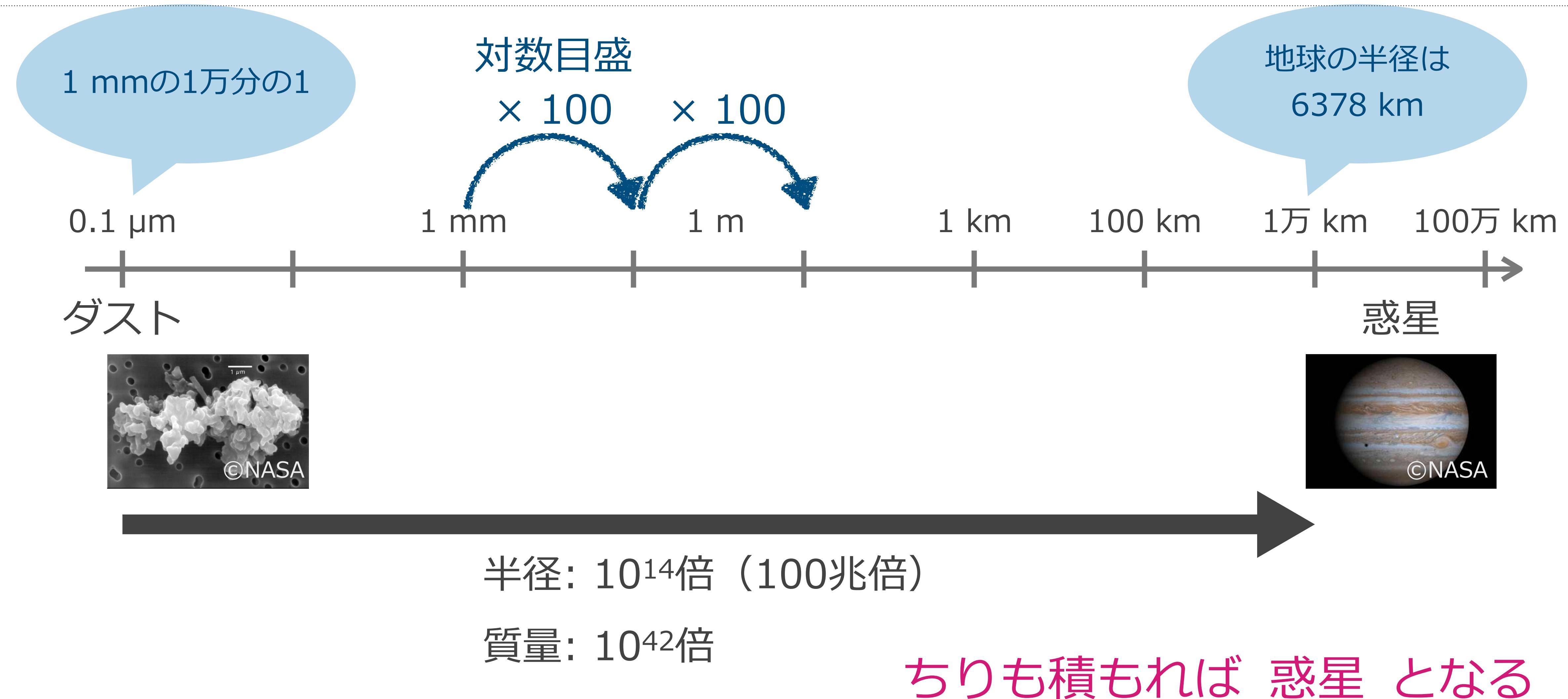
ALMA Partnership et al. (2015)

## おうし座HL星の円盤

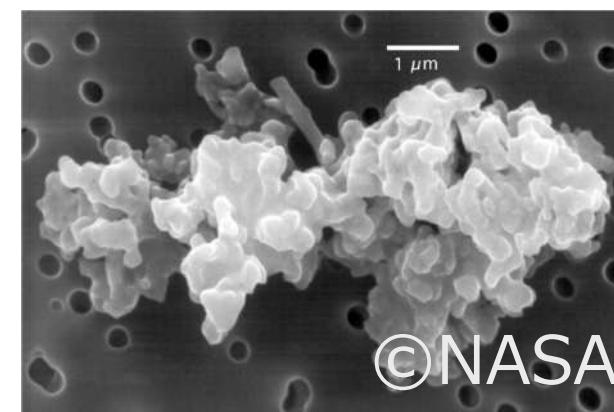
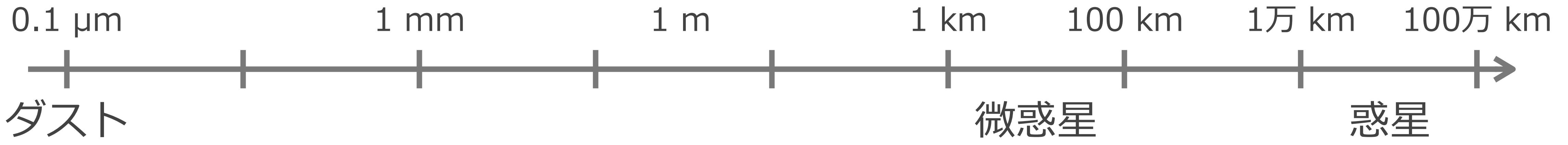
- 大きさ: 約100天文单位  
(天文单位: 地球-太陽間の平均距離)
- 質量: 太陽質量の0.00001-0.1倍
- 成分: 気体99%、固体1%

惑星は、  
星が作られるとき、  
星の周りで、  
星の材料の残り物から作られる  
(木星質量=太陽質量の0.001倍)

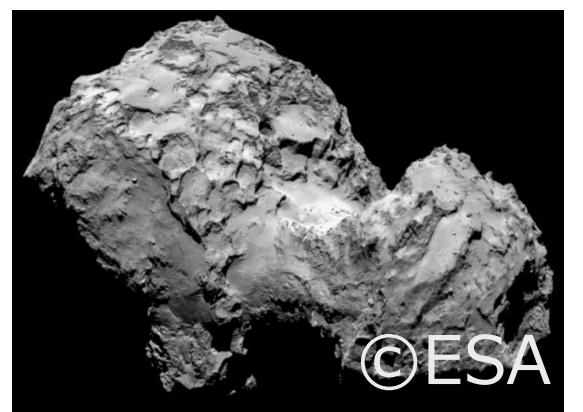
# 惑星形成とは？－固体のサイズ成長の観点から－



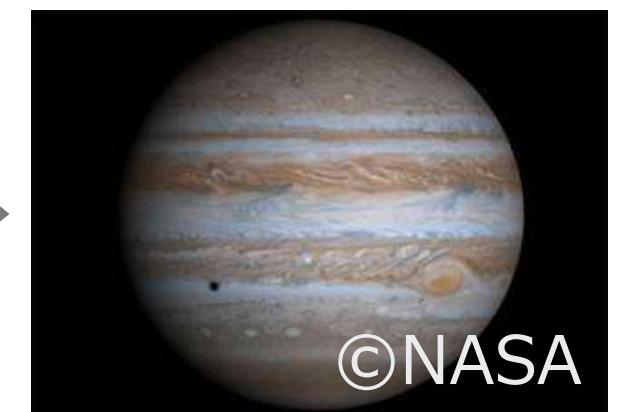
# 惑星形成とは？－固体のサイズ成長の観点から－



分子間力などの付着力で直接合体



重力で合体



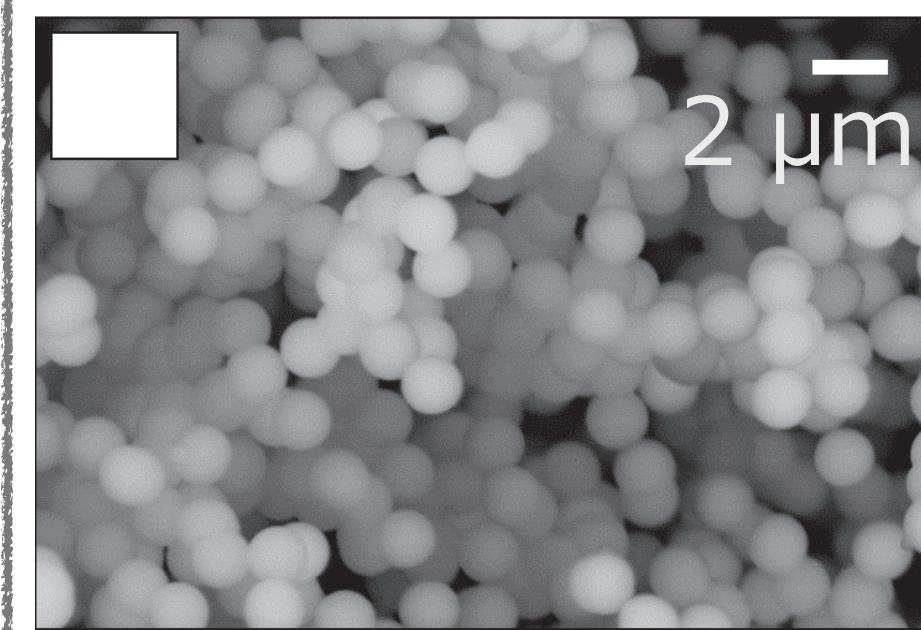
ダスト集合体  
シミュレーション



粒子半径:  $0.1 \mu\text{m}$

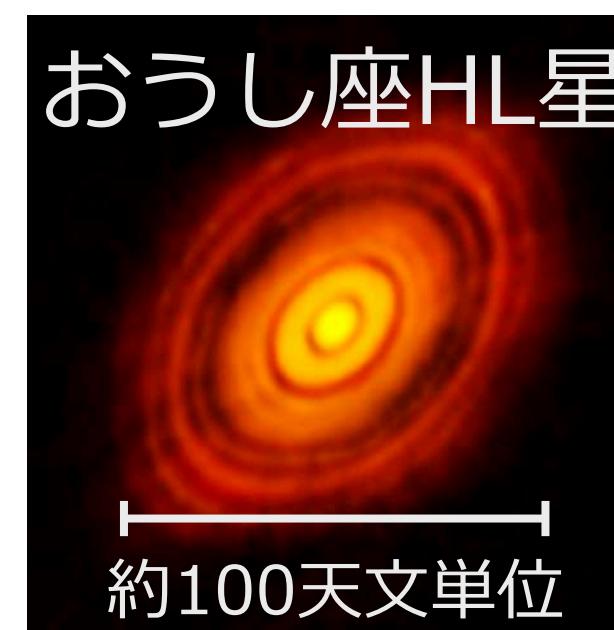
e.g., Suyama et al. (2008)

ダスト集合体  
実験



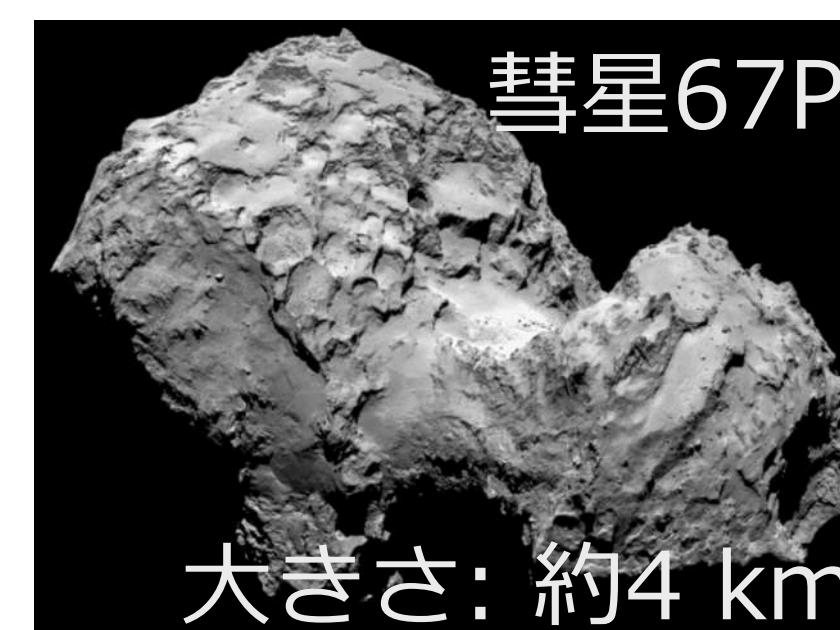
e.g., Blum et al. (2006)

原始惑星系円盤  
ダスト観測



e.g., ALMA Partnership (2015)

太陽系  
小惑星・彗星探査



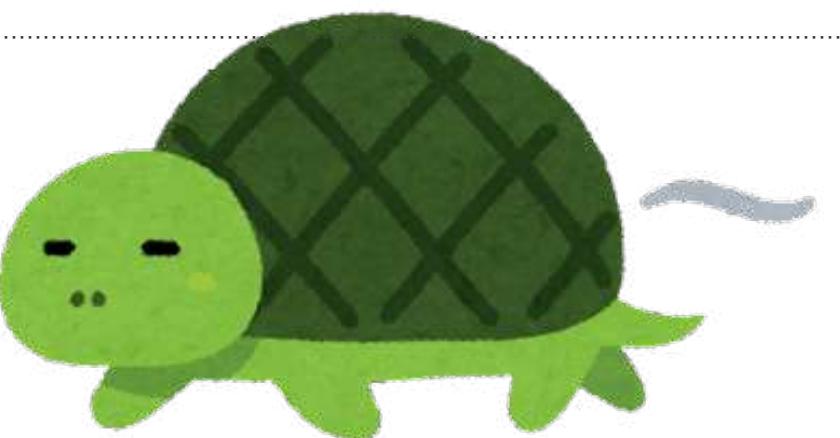
大きさ: 約4 km

©ESA

- 小惑星
- イトカワ
  - リュウグウ
  - ベヌーなど
- 彗星
- 67Pなど

# クイズ: 惑星のタネが衝突する最大の速さは?

A. 亀の歩く速さ  $\approx 0.1 \text{ m/s} = 0.36 \text{ km/s}$



B. 床に物を落とした速さ  $\approx 5 \text{ m/s} = 18 \text{ km/s}$

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

$m$ : 質量、 $v$ : 速度、 $g$ : 重力加速度、 $h$ : 高さ

$$v = \sqrt{2gh} \approx \sqrt{2 \times 10 \times 1} \approx 5 \text{ m/s}$$



C. 野球選手の投球の最速の速さ  $\approx 45 \text{ m/s} \approx 160 \text{ km/h}$



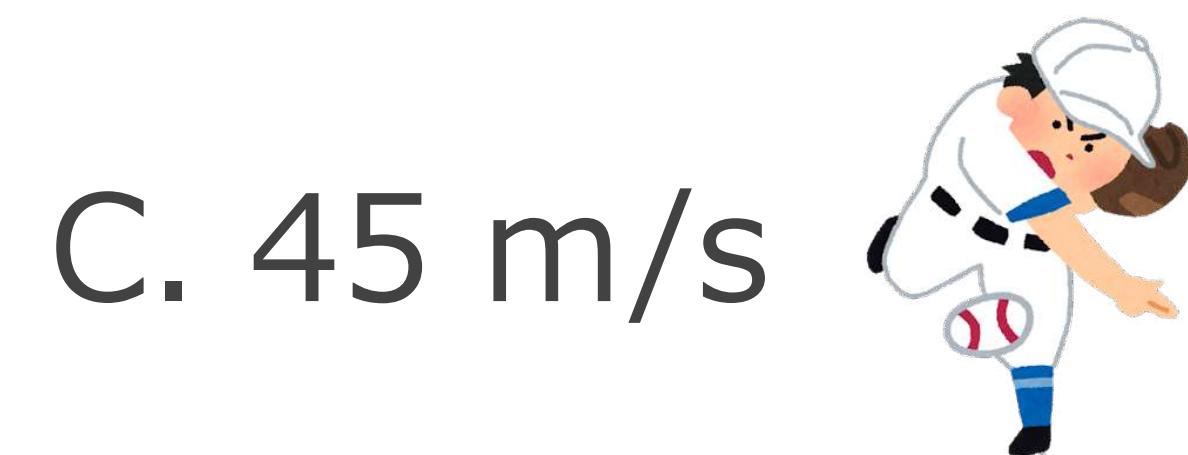
# 惑星のタネが衝突する最大の速さ

原始惑星系円盤の乱流により衝突する最大速度:  $v \approx \sqrt{\alpha c_s}$  (Ormel & Cuzzi 2007)

$\alpha$ : 亂流の強さのパラメータ (Shakura & Sunyaev 1973)

$c_s$ : 音速 (温度は125 K @ 5 au: -148°C @ 木星の軌道長半径)

- 亂流が強い場合 ( $\alpha = 10^{-2}$ ):  $v \approx \sqrt{10^{-2}} \times 670 \text{ m/s} = 67 \text{ m/s}$
- 亂流がほどほどの場合 ( $\alpha = 10^{-3}$ ):  $v \approx \sqrt{10^{-3}} \times 670 \text{ m/s} \approx 21 \text{ m/s}$



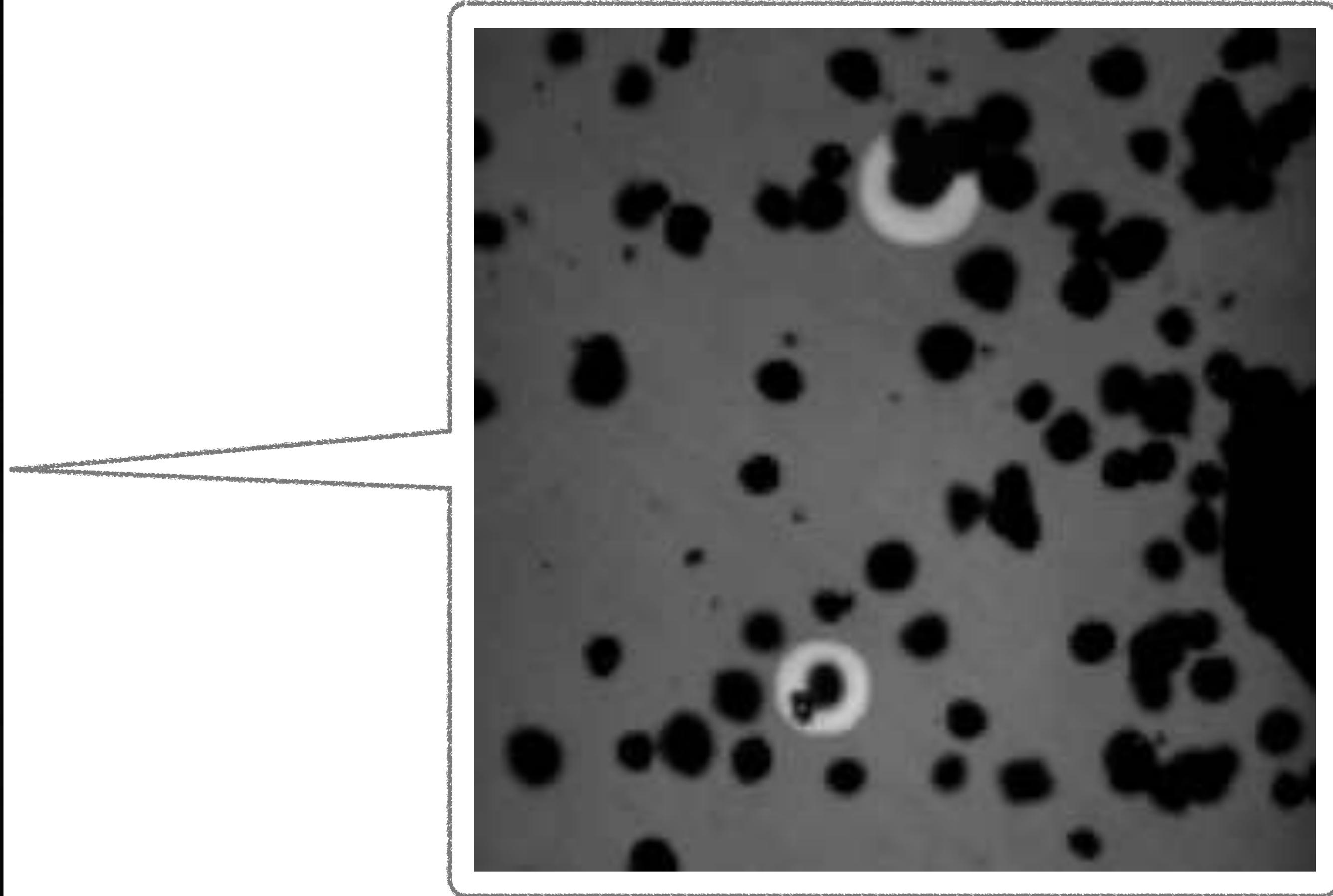
答え: C. 野球選手の投球の最速の速さ に近い速さ

# ダスト同士が高速度で衝突するとどうなる？



ドイツの実験グループ: Blum et al. (<https://www.jove.com/v/51541/laboratory-drop-towers-for-experimental-simulation-dust-aggregate>)

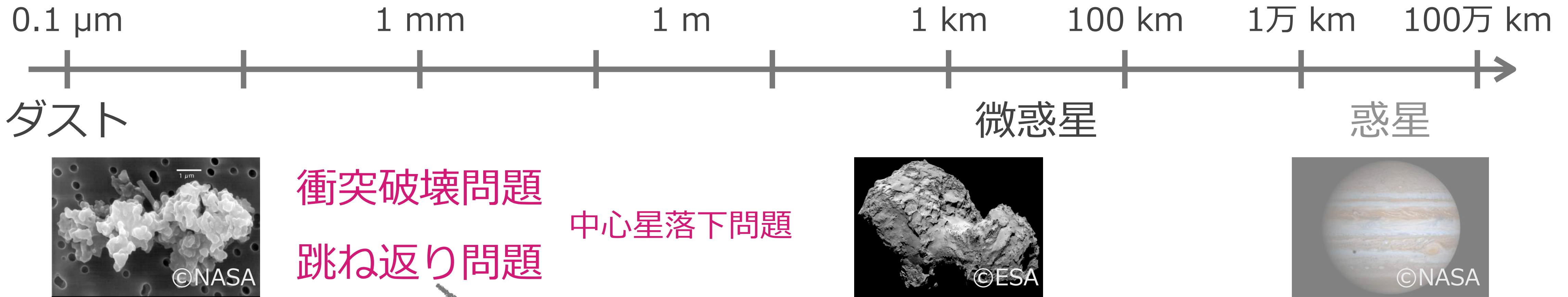
では、ダスト同士が低速度で衝突すれば問題ない？



跳ね返ることもある！

ドイツの実験グループ: Weidling et al. (2012)

# 惑星形成の問題と解決方法



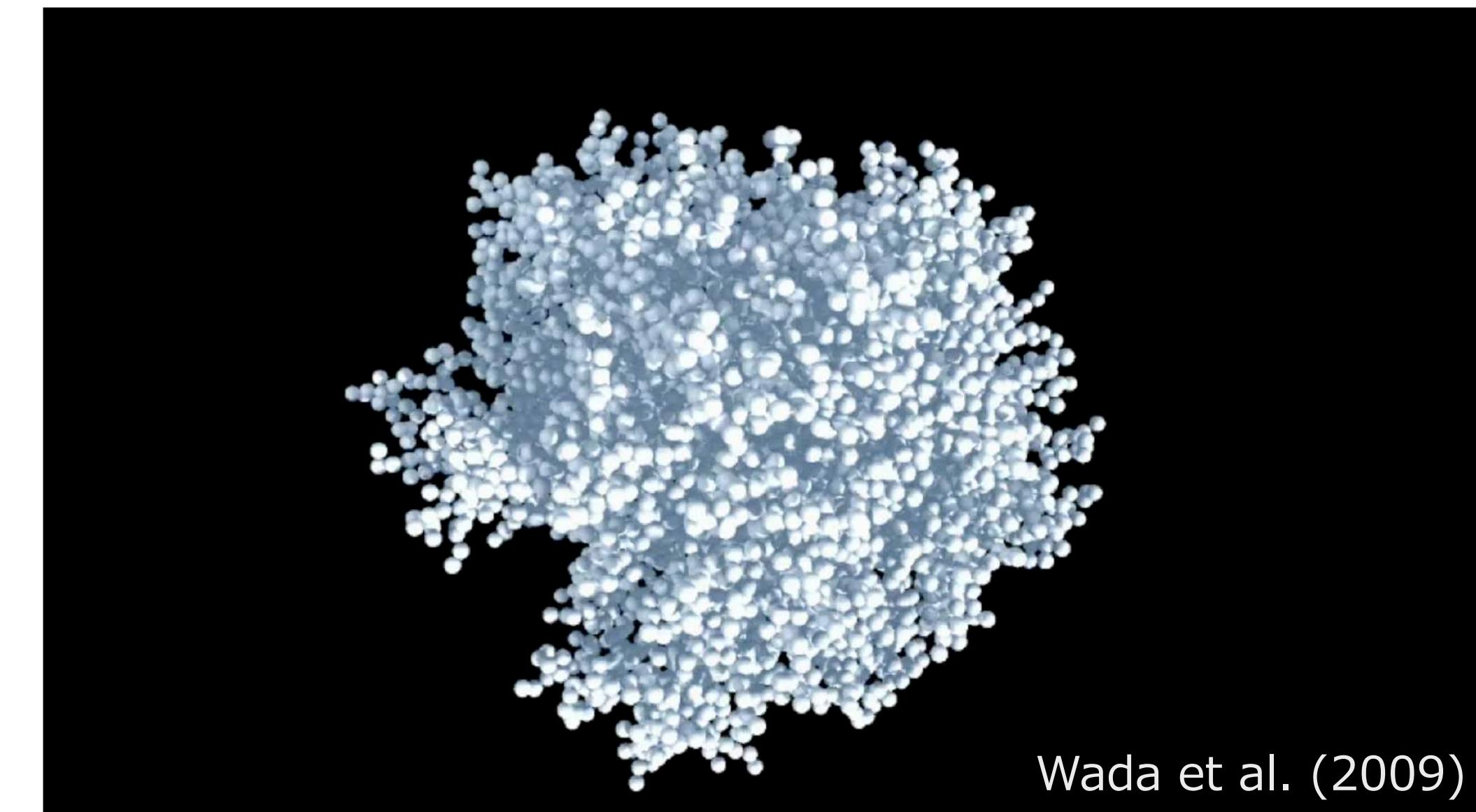
解決方法: ふわふわなダスト集合体



ではなく、

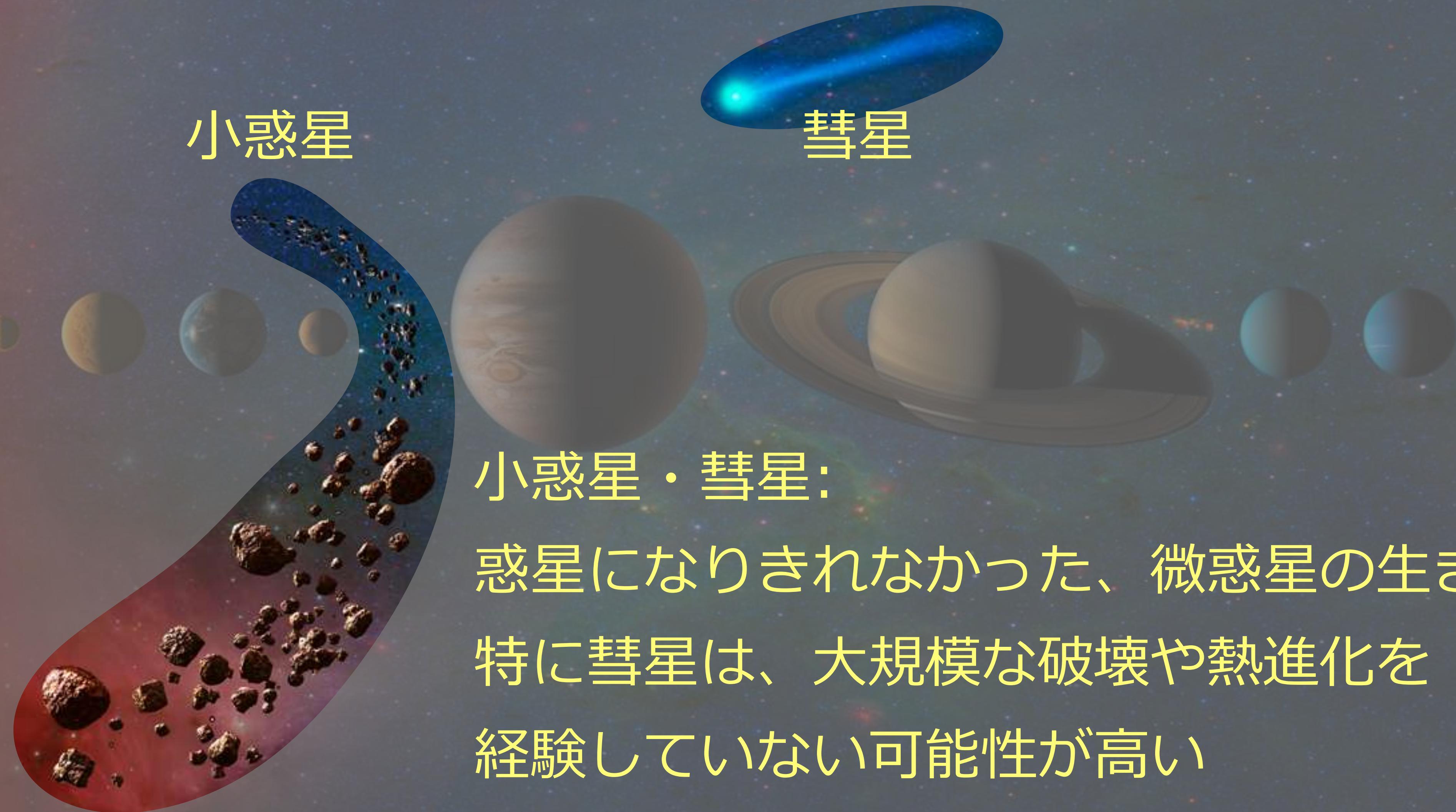


ふわふわ?



Wada et al. (2009)

# 惑星形成の問題と解決方法 + その検証方法



小惑星・彗星:

惑星になりきれなかった、微惑星の生き残り  
特に彗星は、大規模な破壊や熱進化を  
経験していない可能性が高い

Northern  
Hemisphere

# 67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星



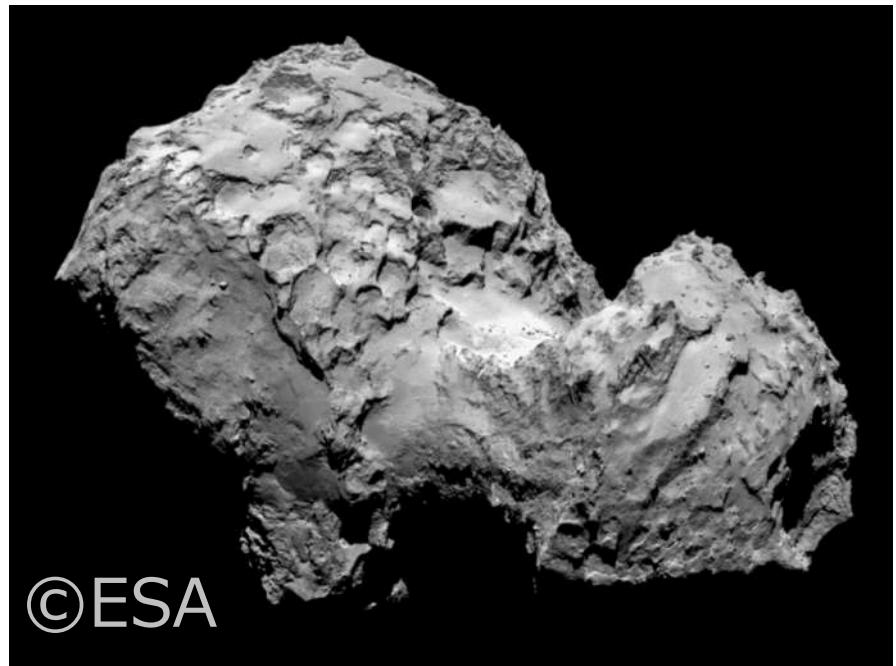
©ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team  
MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA  
Carsten Güttsler博士から個人的にもらった動画

1000 m

16

3 August 2014  
285 km; 5.5 m/px

# 67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星



探査からわかること

- 正確な体積、質量 → 平均密度:  $532 \pm 7 \text{ kg m}^{-3}$  (Jorda et al. 2016)
- 表層の形状 → 引張強度: 1.5–100 Pa (Basilevsky et al. 2016)

密度は水氷の半分（岩よりも軽い！）

強度は弱く、非常に脆い（タバコの灰くらい？）

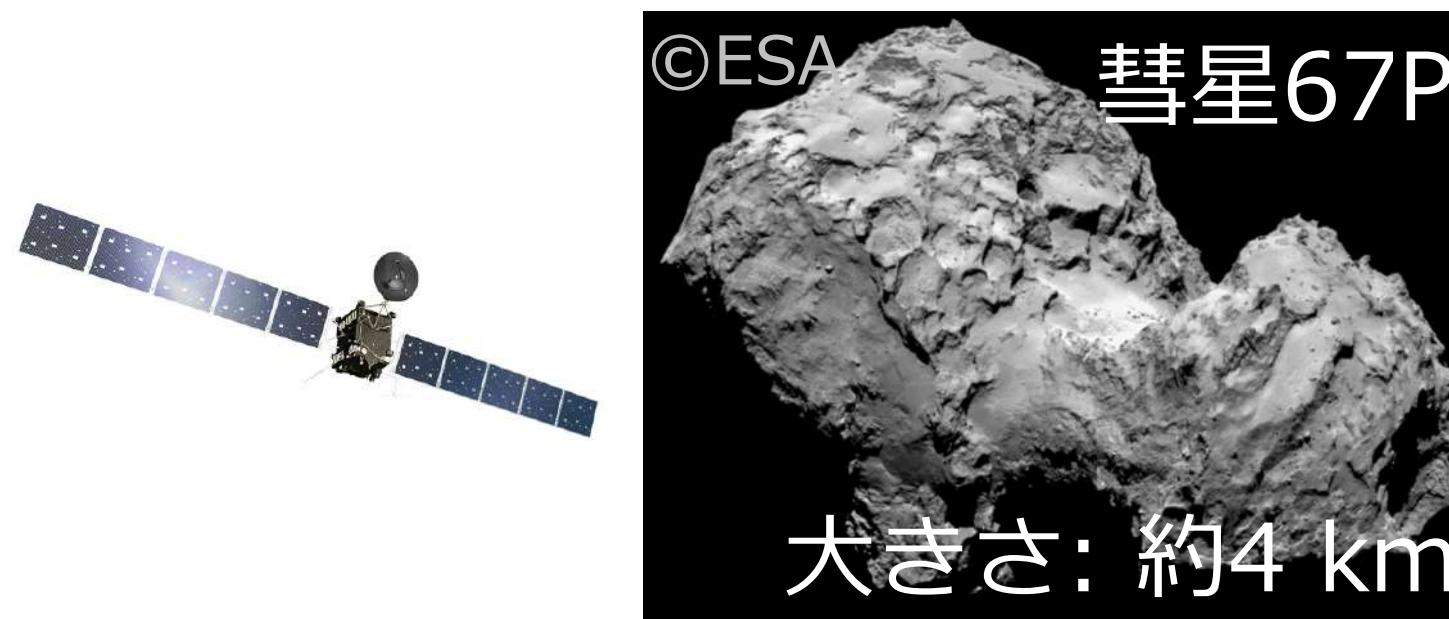
ふわふわなダスト集合体で彗星を説明できるのか？

「ふわふわな惑星のタネ」について調べる！

# 私の研究 —太陽系小惑星・彗星探査との関連—

ふわふわなダスト集合体で、太陽系の小惑星・彗星を説明できるのか？

## 太陽系の小惑星・彗星探査

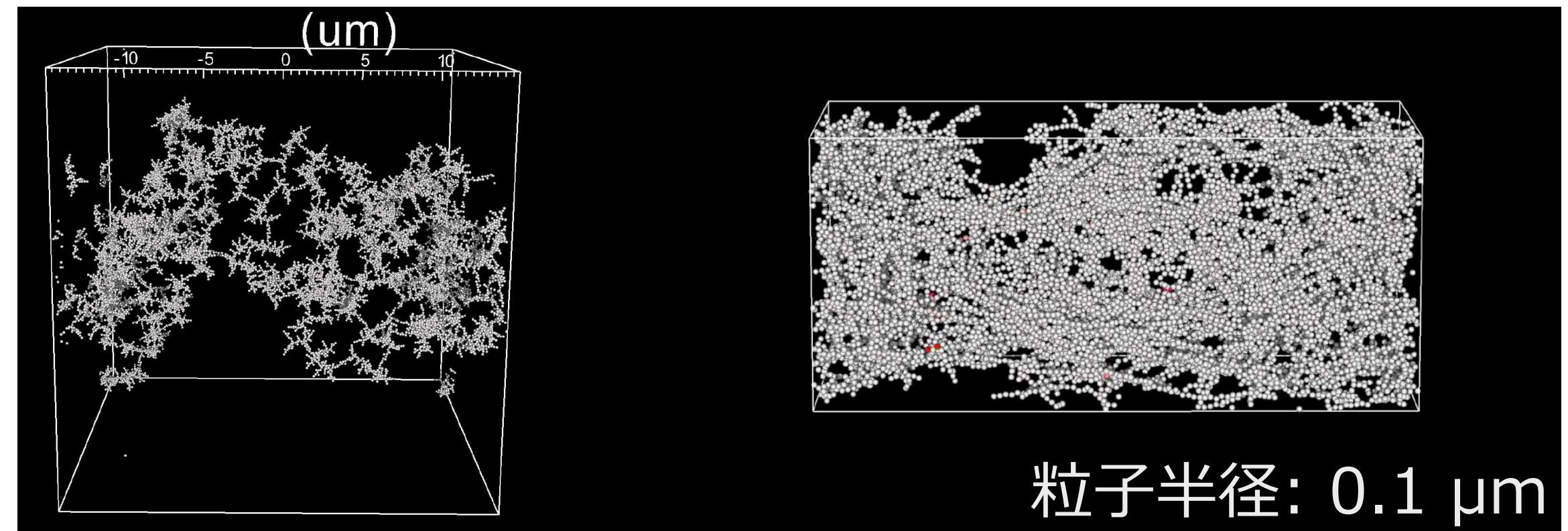


探査からわかること

- 正確な体積、質量 → 平均内部密度
- 表層の形状 → 引張強度

(e.g., Basilevsky et al. 2016, Jorda et al. 2016)

## ダスト集合体のシミュレーション

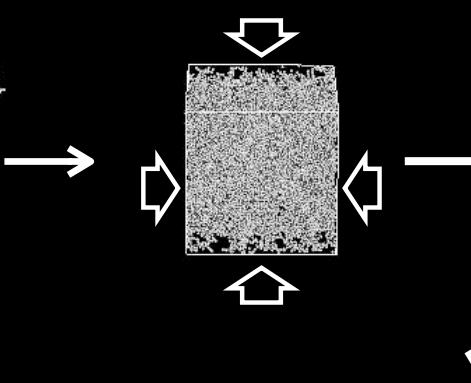
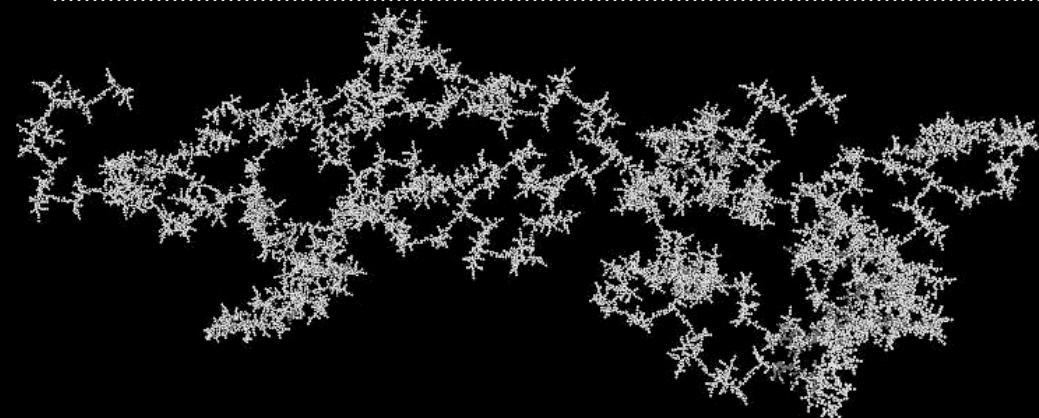


ダスト集合体についてやってきたこと

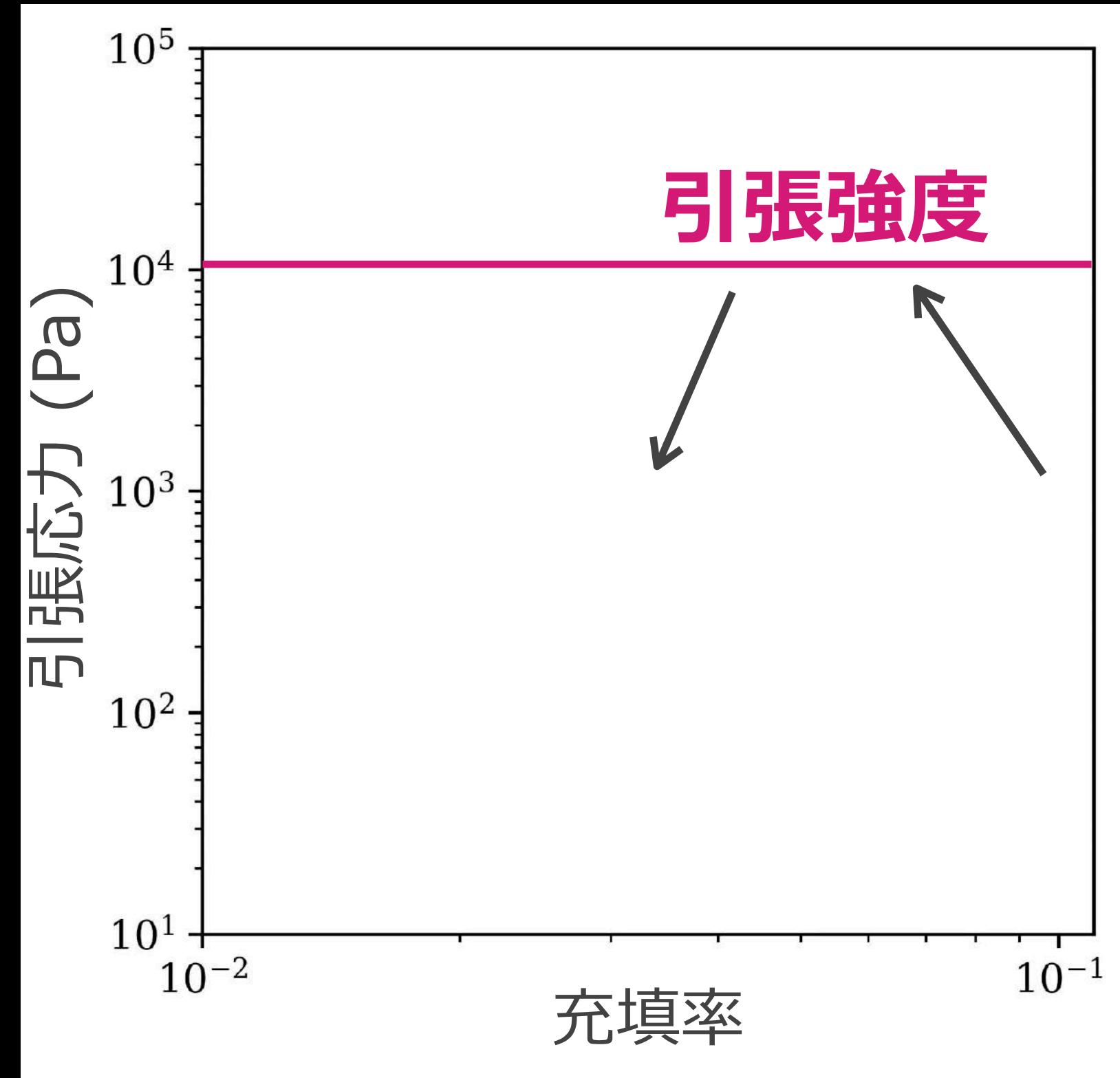
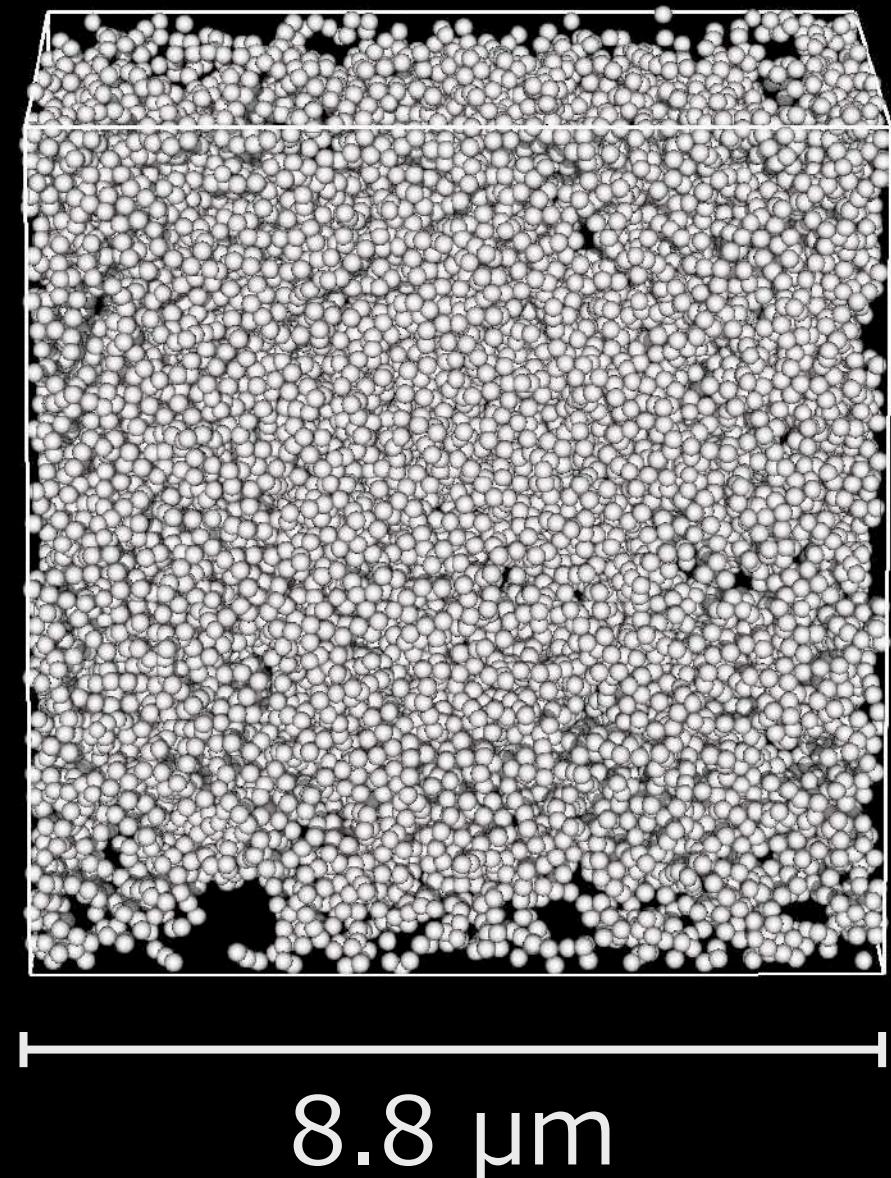
- 圧縮強度モデルの作成 → 平均内部密度への応用と比較
- 引張強度モデルの作成 → 彗星67Pと比較

(Tatsuuma et al. 2019, 2023, 2024)

# ダスト集合体の引張強度をシミュレーションで求める



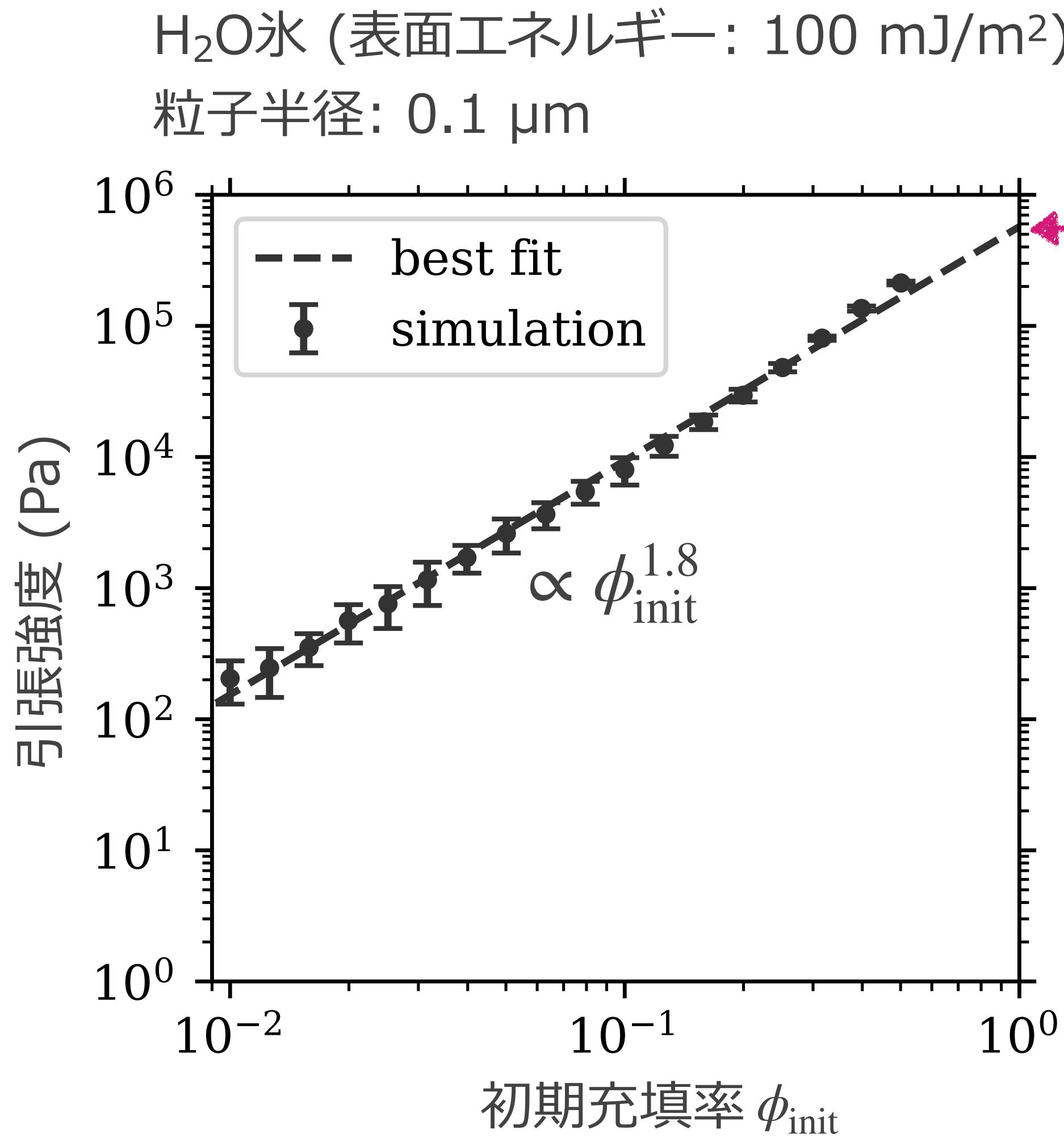
初期充填率: 10%、 $\text{H}_2\text{O}$ 氷、粒子半径: 0.1  $\mu\text{m}$



- ダストを付着力（分子間力）をもった弾性球とし、接触した粒子から受ける力を計算
- 周期境界の壁を動かしていき、応答の力を計算

(Tatsuuma et al. 2019)

# ダスト集合体の引張強度モデルとの比較



## ダスト集合体の引張強度モデル

$$\simeq 6 \times 10^5 \text{ Pa} \left( \frac{\gamma}{100 \text{ mJ m}^{-2}} \right) \left( \frac{r_0}{0.1 \mu\text{m}} \right)^{-1} \phi_{\text{init}}^{1.8}$$

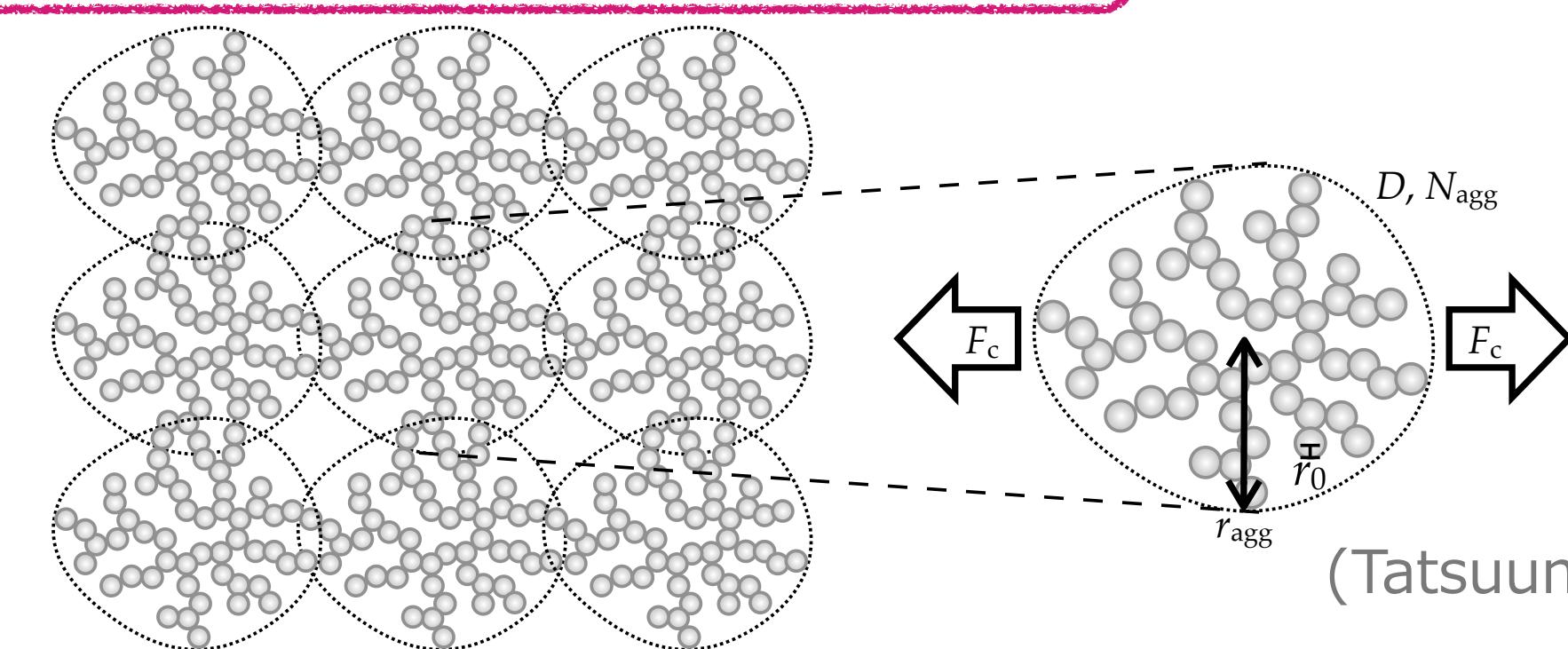
表面エネルギー      粒子半径      初期充填率

ダスト集合体の中の小さな構造同士 (フラクタル次元1.9) がちぎれるときの応力で引張強度モデルを作成

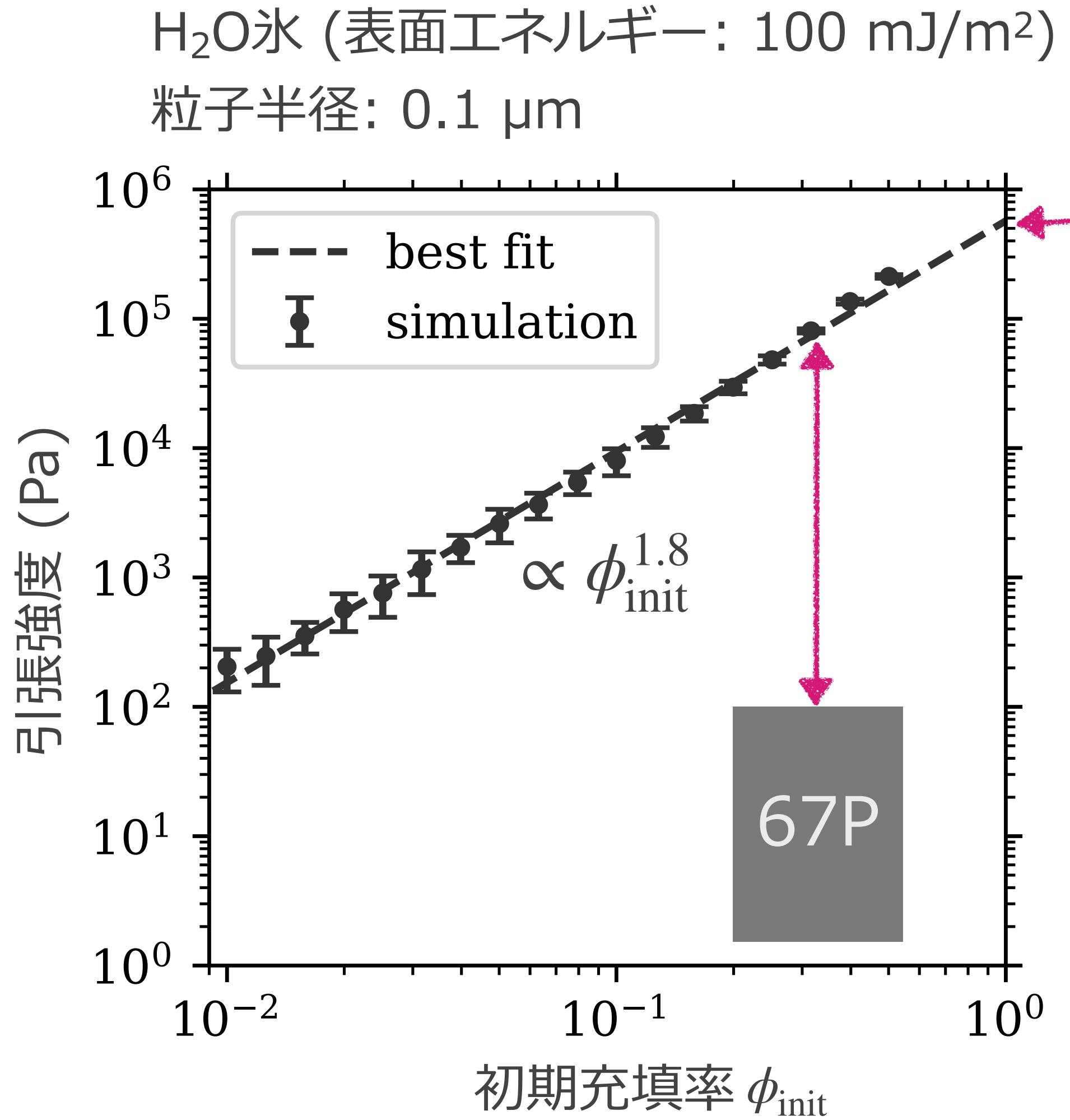
$$\frac{F_c}{r_{\text{agg}}^2} \propto \frac{1.5\pi\gamma r_0}{[r_0\phi_{\text{init}}^{-1/(3-D)}]^2} \propto \gamma r_0^{-1} \phi_{\text{init}}^{2/(3-D)}$$

$$r_{\text{agg}} \propto N_{\text{agg}}^{1/D} r_0$$

$$\phi_{\text{init}} = N_{\text{agg}} (r_0 / r_{\text{agg}})^3$$



# 探査からわかる彗星の引張強度との比較

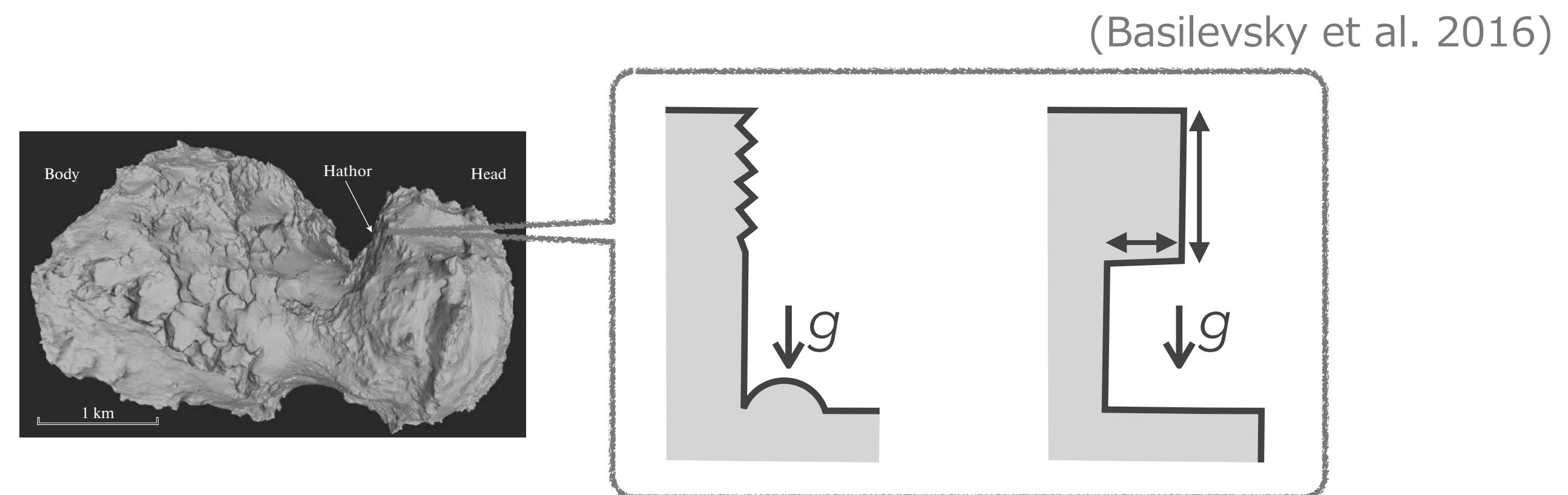


## ダスト集合体の引張強度モデル

$$\simeq 6 \times 10^5 \text{ Pa} \left( \frac{\gamma}{100 \text{ mJ m}^{-2}} \right) \left( \frac{r_0}{0.1 \mu\text{m}} \right)^{-1} \phi_{\text{init}}^{1.8}$$

表面エネルギー 粒子半径 初期充填率

彗星67Pの引張強度 ~ 1.5–100 Pa



- 彗星67Pをもろくするメカニズムが必要
- 構成粒子半径は0.1 μmよりも大きい？

(Tatsuuma et al. 2019)

# まとめ

---

- 0.1  $\mu\text{m}$  サイズのダストから惑星までの形成過程にあった、衝突破壊・跳ね返り問題
  - ふわふわなダスト集合体で解決できる
  - ただし、まだまだ問題は山積み（理論と原始惑星系円盤のダスト観測との整合性など）
- 67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星について
  - 彗星は微惑星の生き残りで、大規模な破壊や熱進化を経験していない可能性が高い
  - 彗星の密度は水氷の半分ほどで、タバコの灰くらい非常に脆い
- 私の研究：シミュレーションでダスト集合体の強度を求め、モデルを作った
  - 太陽系の彗星と比較した結果、彗星をもろくする必要があることがわかった  
→ 彗星の構成粒子半径は0.1  $\mu\text{m}$ よりも大きくなければならない
  - 微惑星形成過程のヒントとなるかもしれない