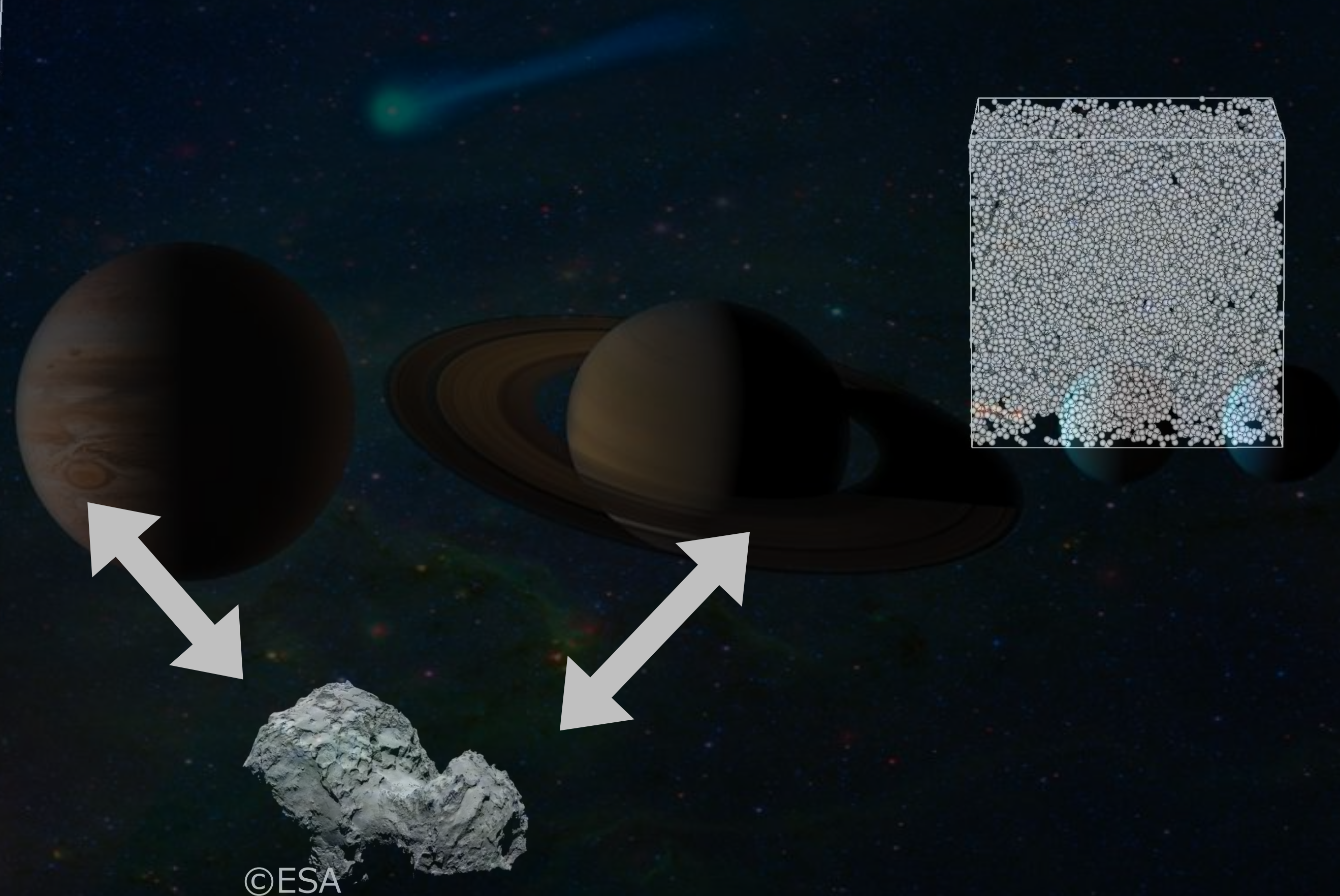
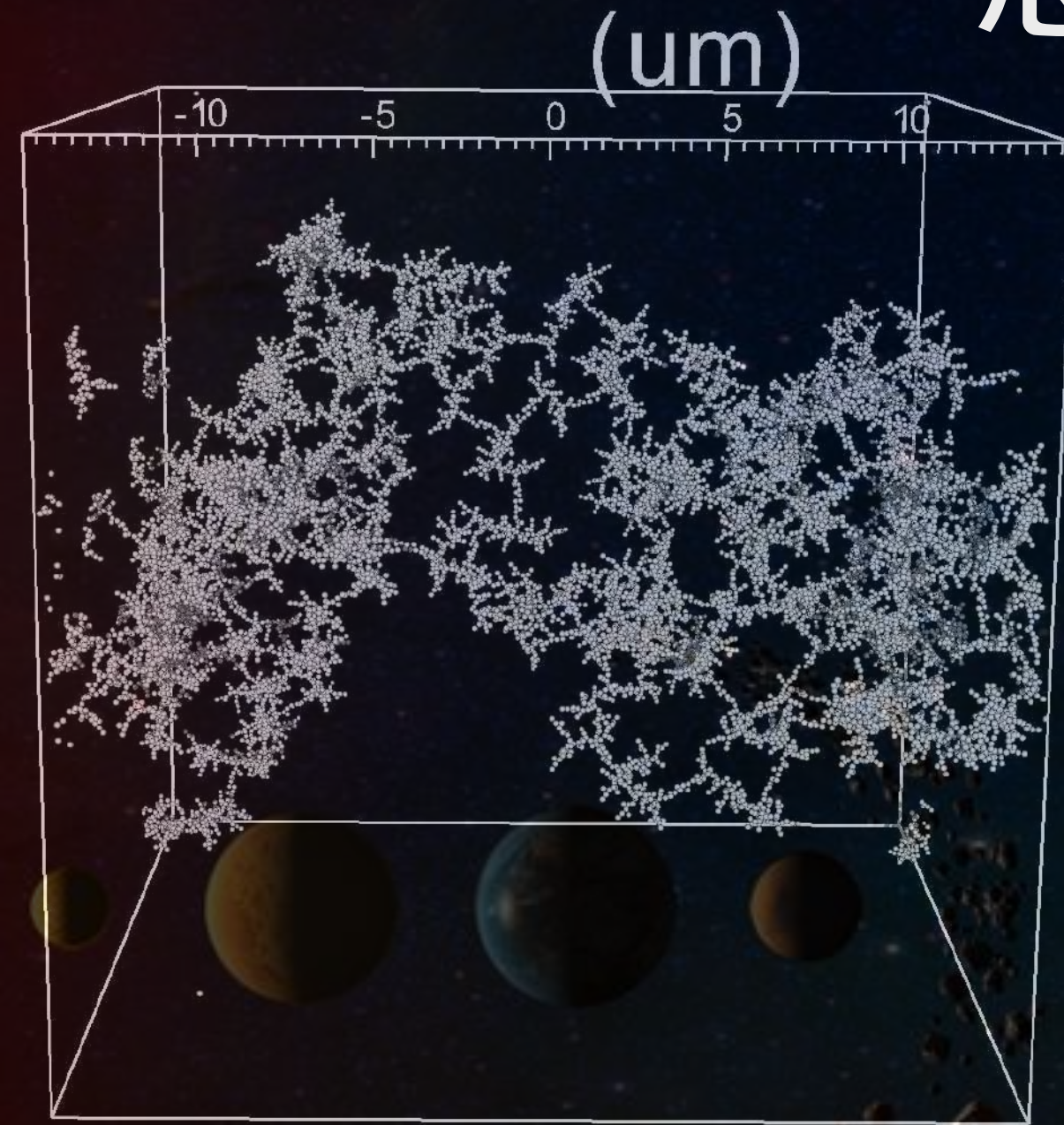


星空ゼミ 2025/8/9

惑星のタネのふしぎ



©ESA

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)

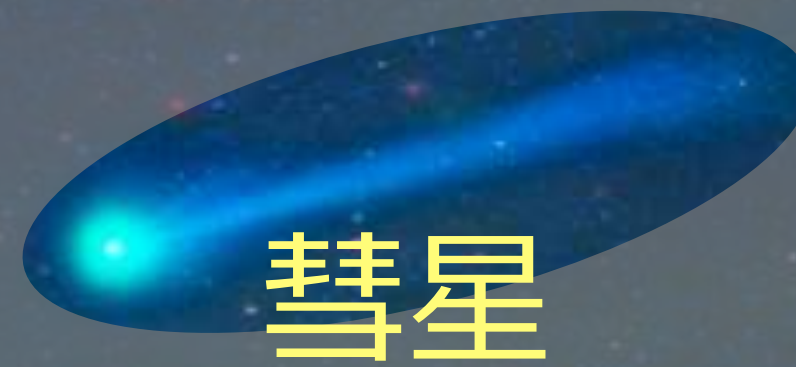
机にむかい、パソコン・紙とペンを使って
シミュレーションや計算をしています



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



彗星



水星 金星 地球 火星



木星



土星



天王星 海王星

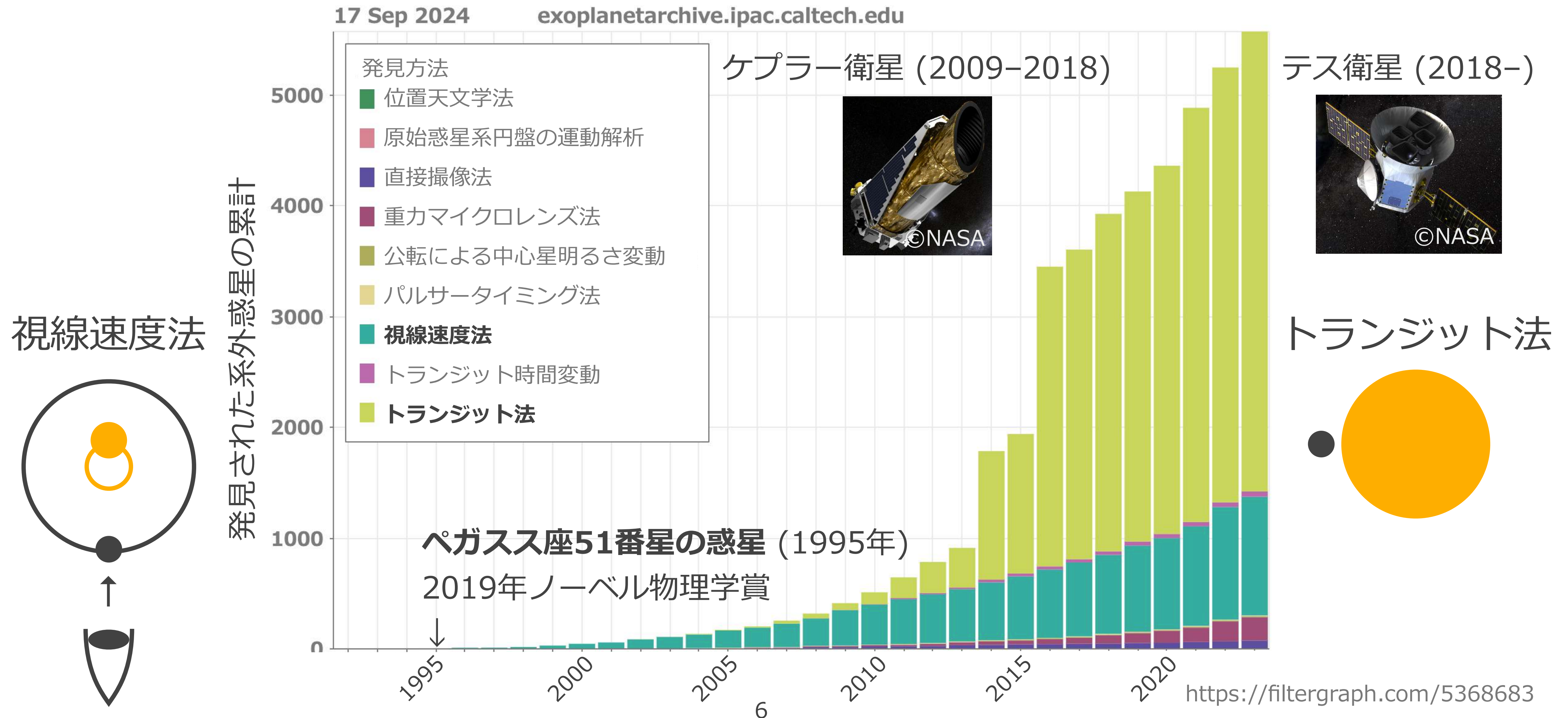
小惑星

小惑星・彗星：惑星になりきれなかったもの

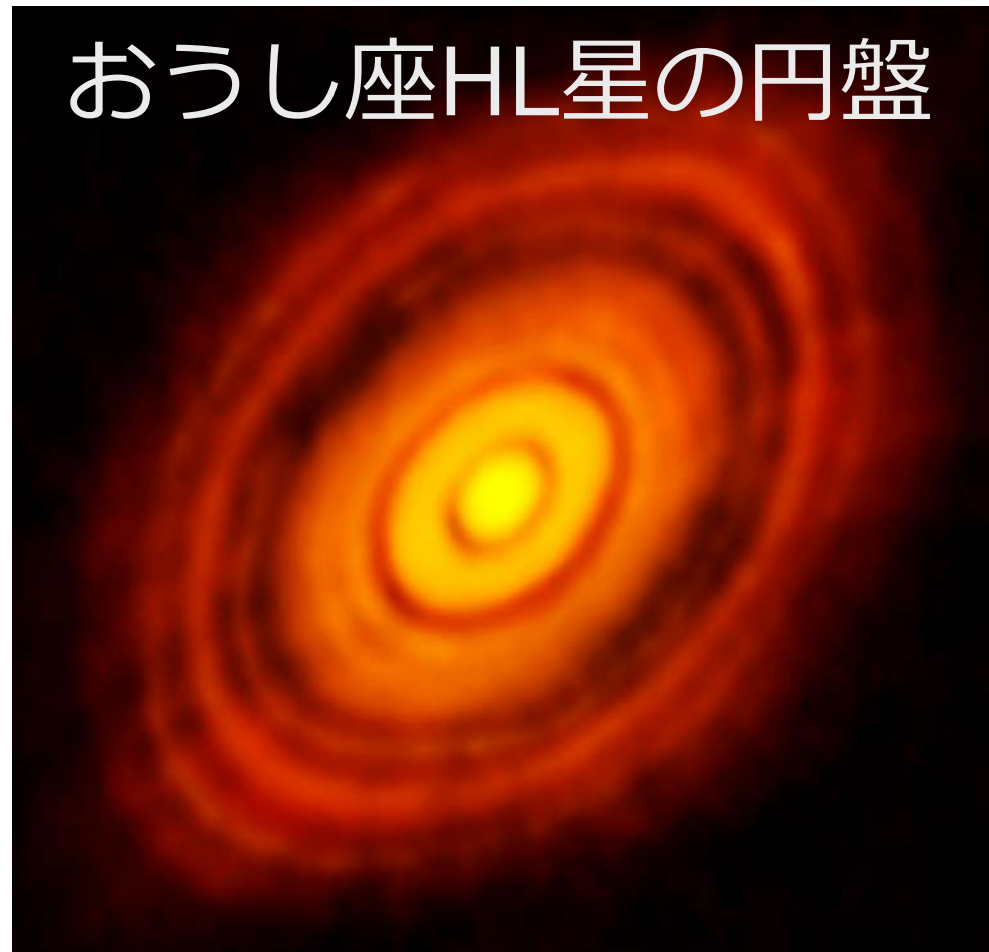
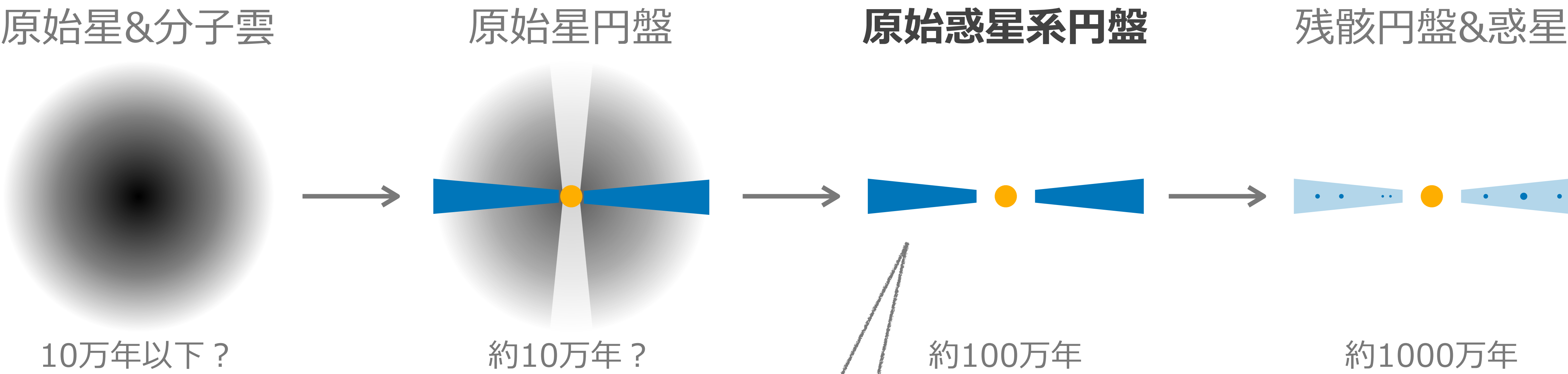
※見やすくするため、
惑星の大きさの差は実際よりも小さく、
軌道の間隔は実際よりも近づけています ©NASA

太陽系の外に惑星はあるの？

→ ある！系外惑星は5000個以上見つかった！



惑星はいつ、どこで、何から作られるの？



おうし座HL星の円盤

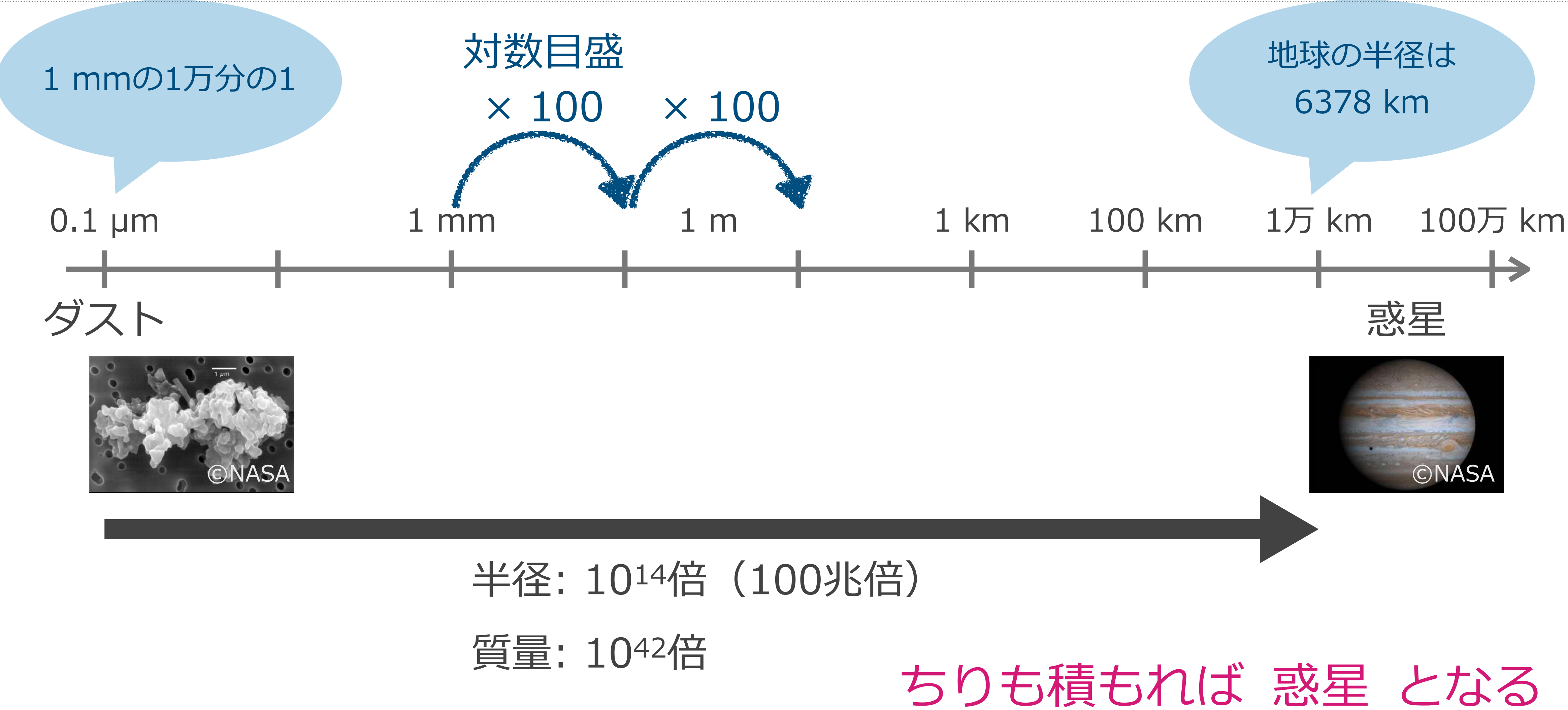
ALMA Partnership et al. (2015)

原始惑星系円盤

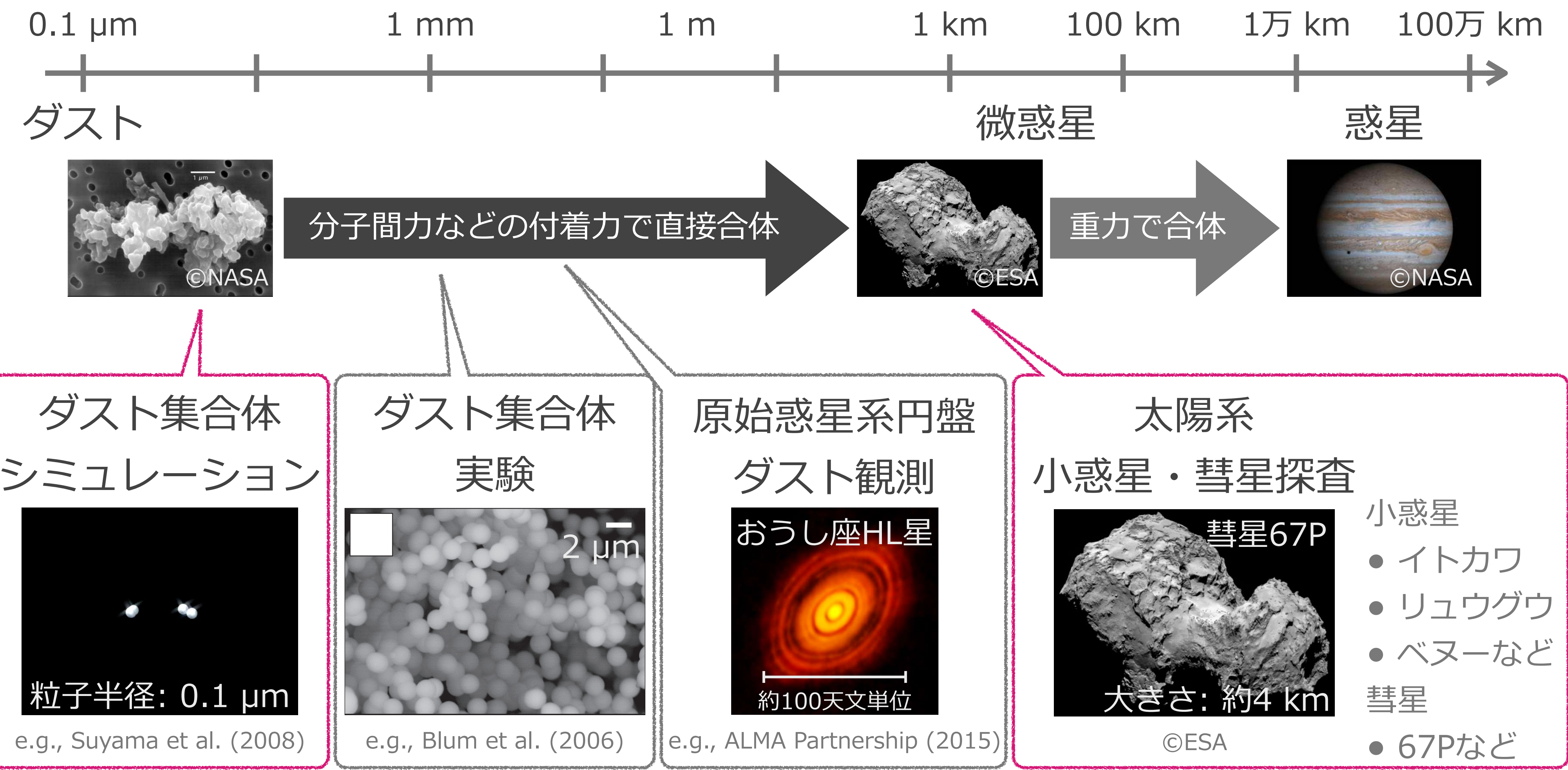
- 大きさ：約100天文単位
(天文単位：地球-太陽間の平均距離)
- 質量：太陽質量の0.00001-0.1倍
- 成分：気体99%、固体1%

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—

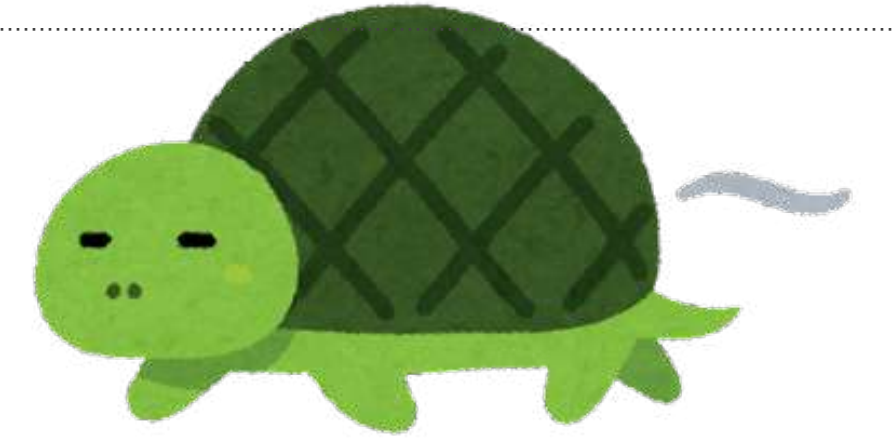


惑星形成とは？ —固体のサイズ成長の観点から—



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)

α : 乱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)

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

A. 0.1 m/s



B. 5 m/s



C. 45 m/s



答え: C. 野球選手の投球の最速の速さ に近い速さ

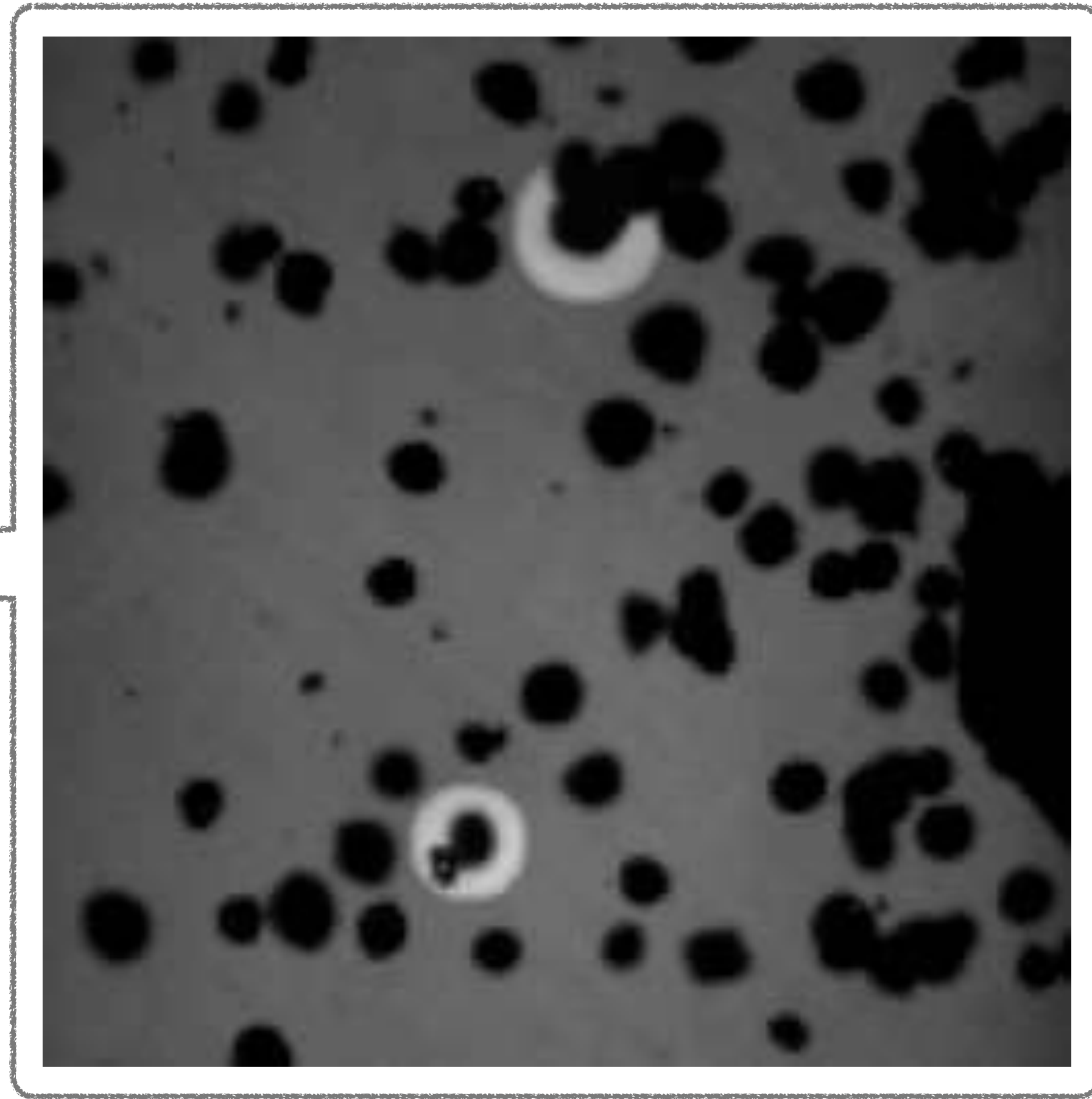
ダスト同士が高速度で衝突するとどうなる？



粉々になる！

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>)

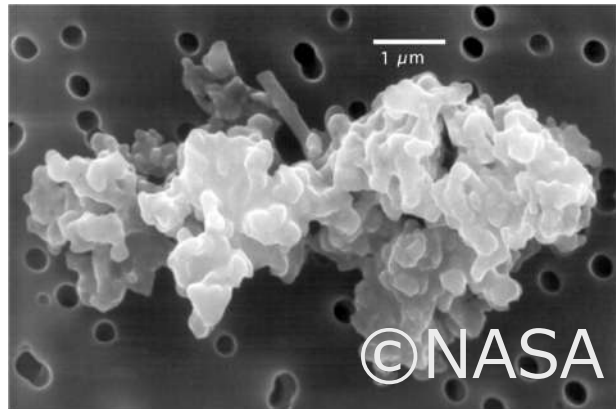
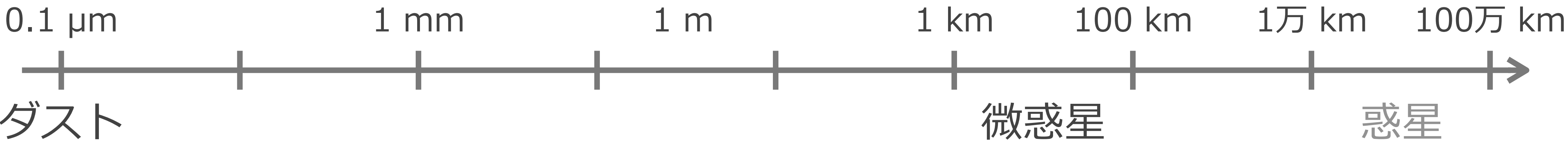
では、ダスト同士が低速度で衝突すれば問題ない？



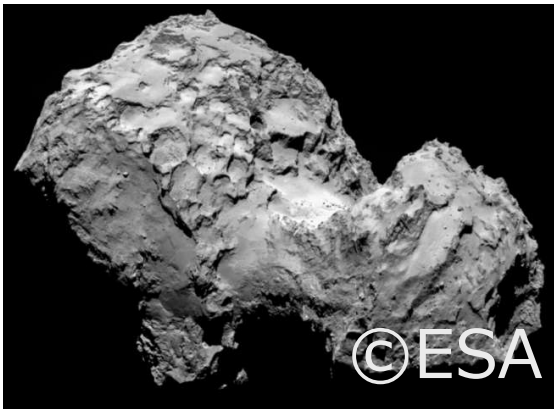
跳ね返ることもある！

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



衝突破壊問題
跳ね返り問題
中心星落下問題



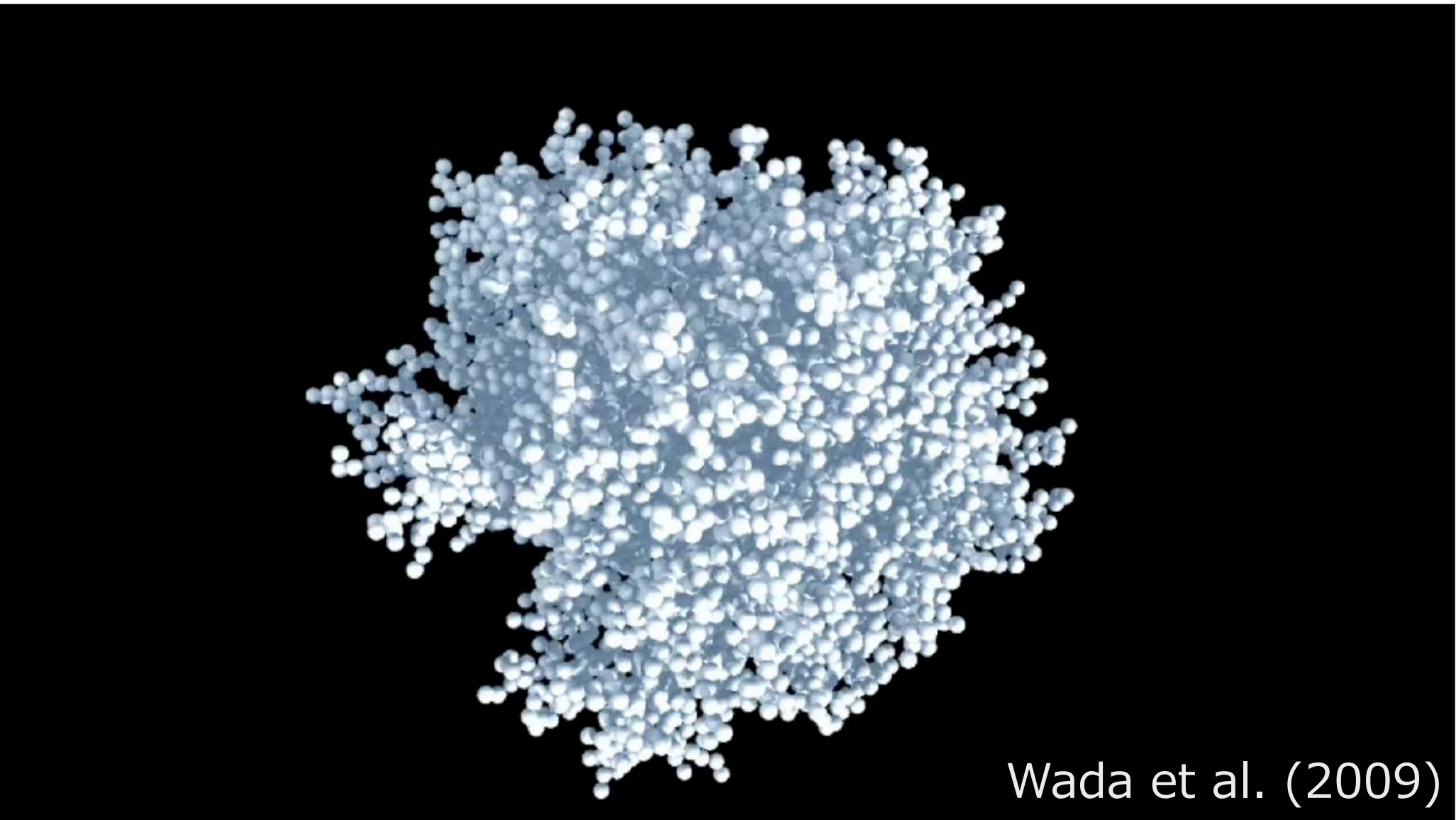
解決方法: ふわふわなダスト集合体



ではなく、



ふわふわ？



惑星形成の問題と解決方法 + その検証方法

小惑星

彗星

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

67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星

Northern
Hemisphere

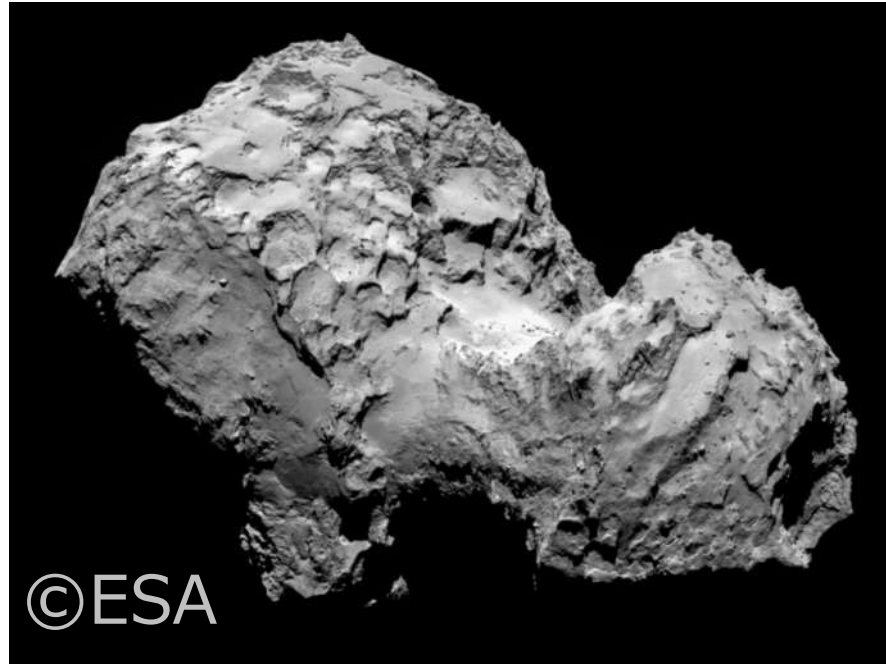


©ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team
MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA
Carsten Güttler博士から個人的にもらった動画

1000 m

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: $1.5\text{--}100 \text{ Pa}$ (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？）

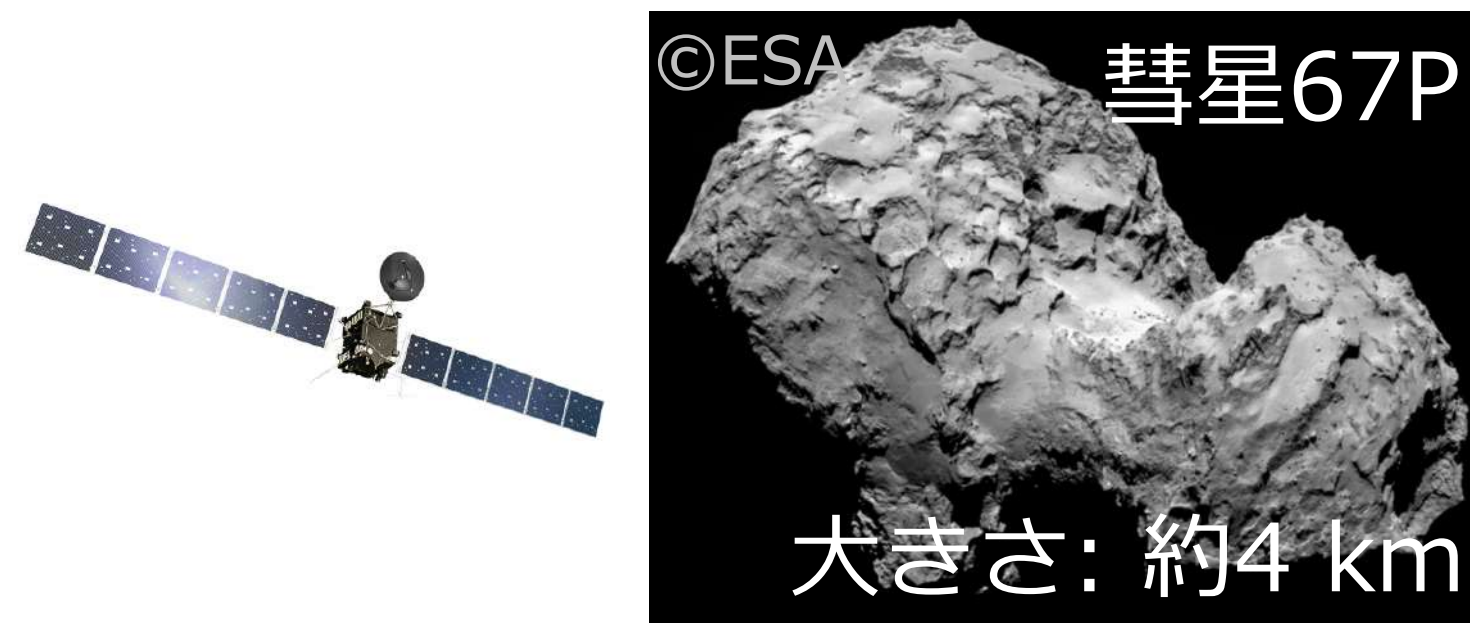
ふわふわなダスト集合体で彗星を説明できるのか？

「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

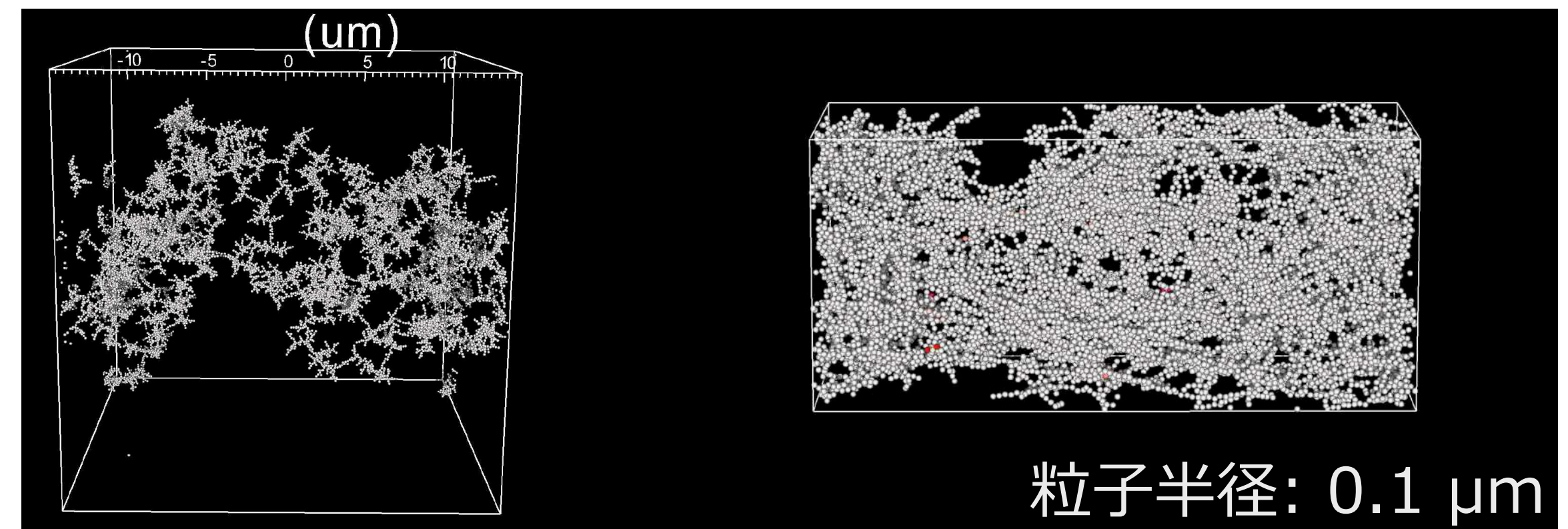


探査からわかること

- 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

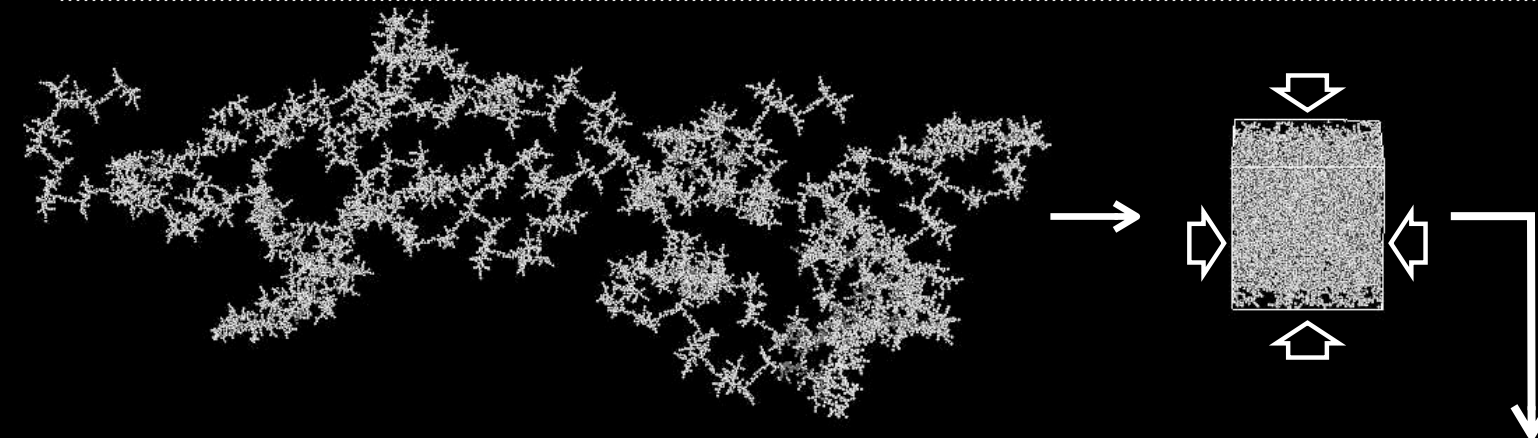


ダスト集合体についてやってきたこと

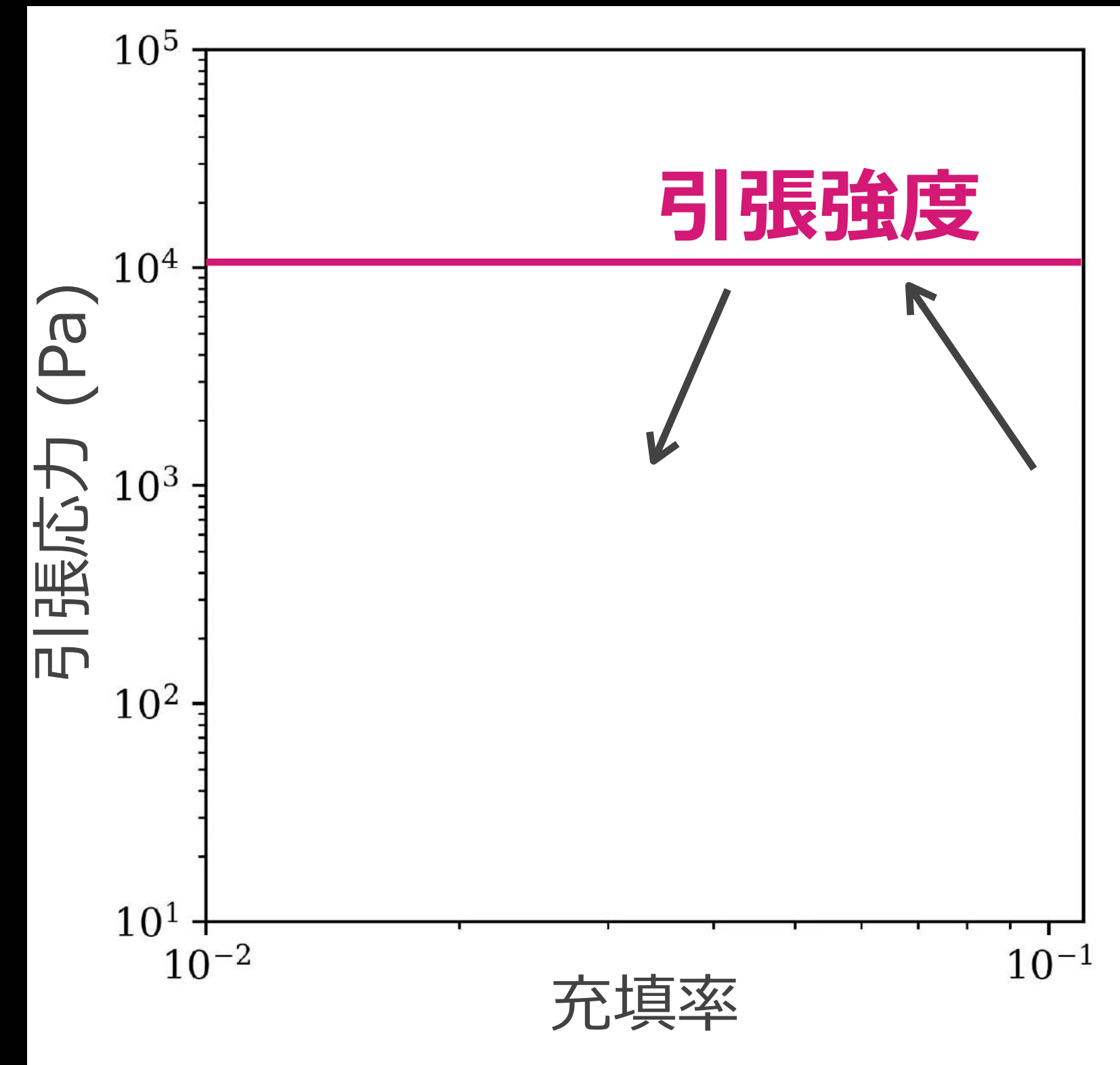
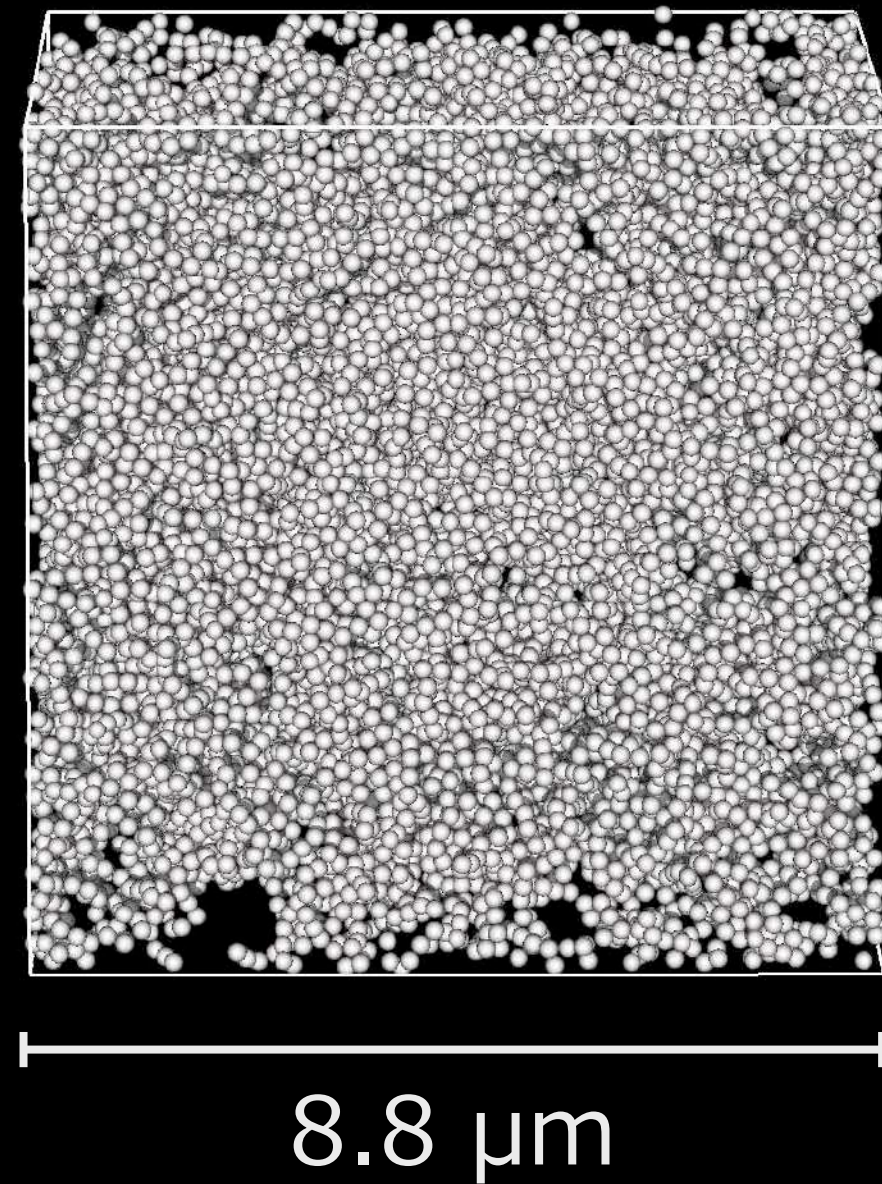
- 圧縮強度モデルの作成 → 平均内部密度への応用と比較
- **引張強度モデルの作成 → 彗星67Pと比較**

(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



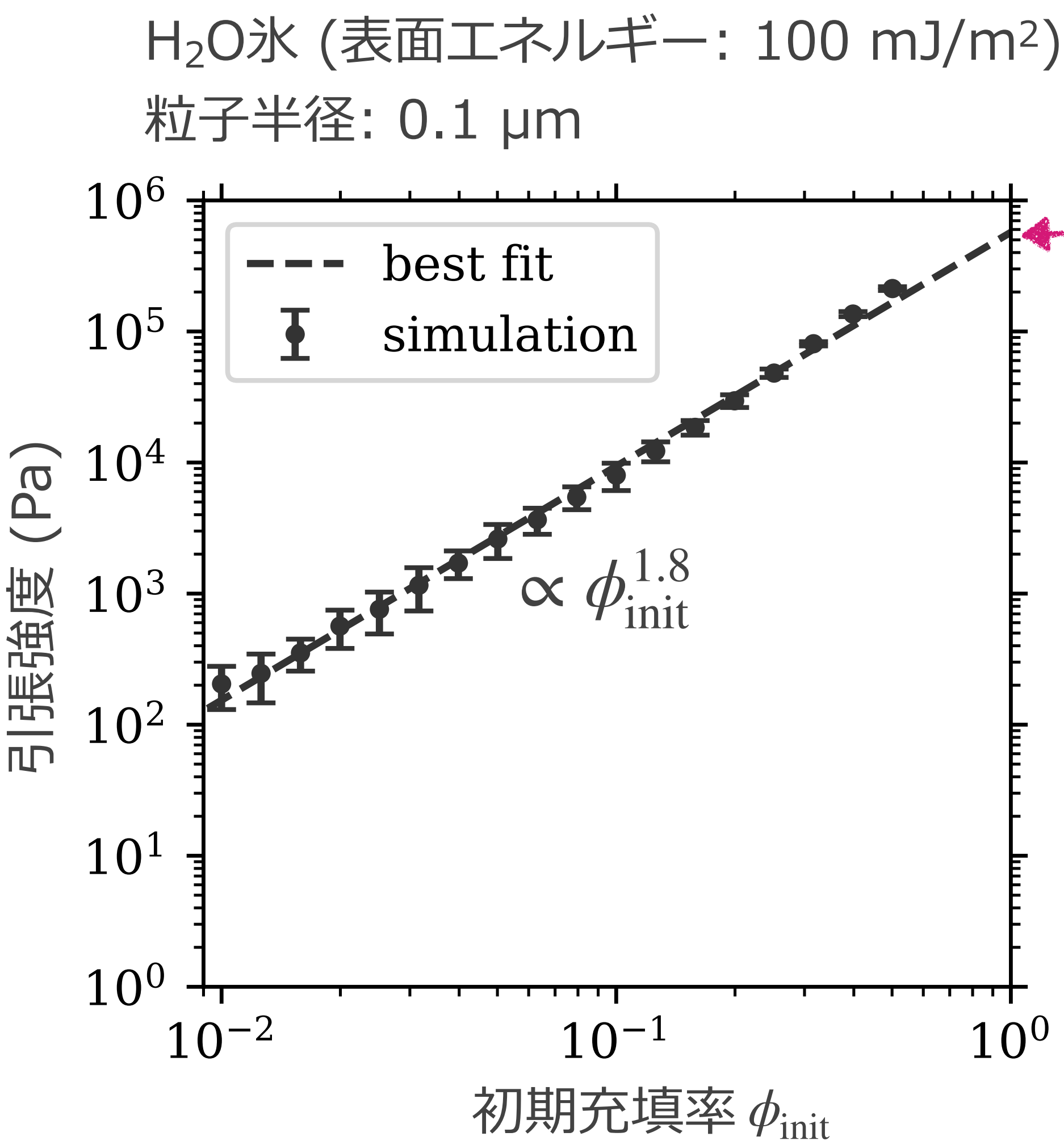
初期充填率: 10%、H₂O氷、粒子半径: 0.1 μm



- 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

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

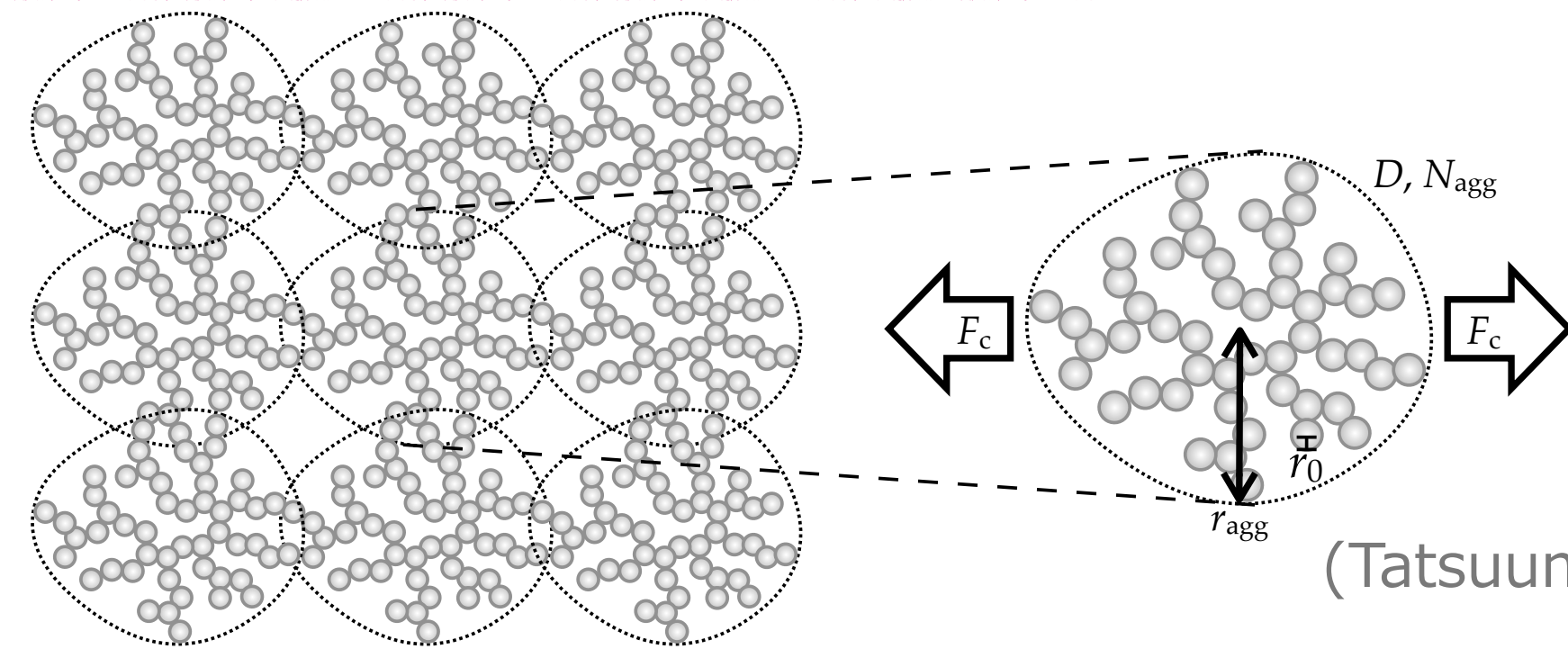
表面エネルギー 粒子半径 初期充填率

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

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

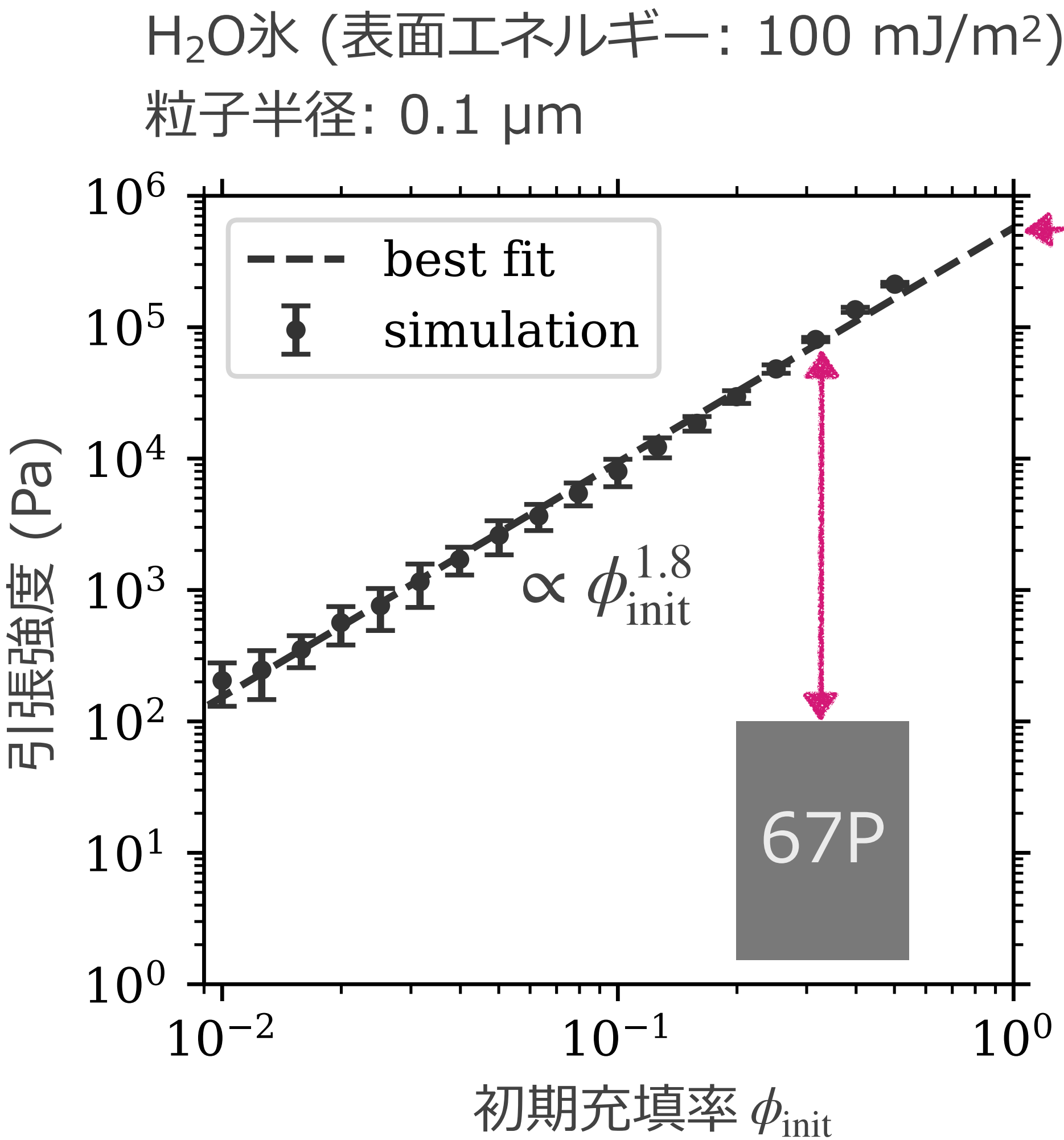
$$r_{\text{agg}} \propto N_{\text{agg}}^{1/D} r_0$$

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



(Tatsuuma et al. 2019)

探査からわかる彗星の引張強度との比較



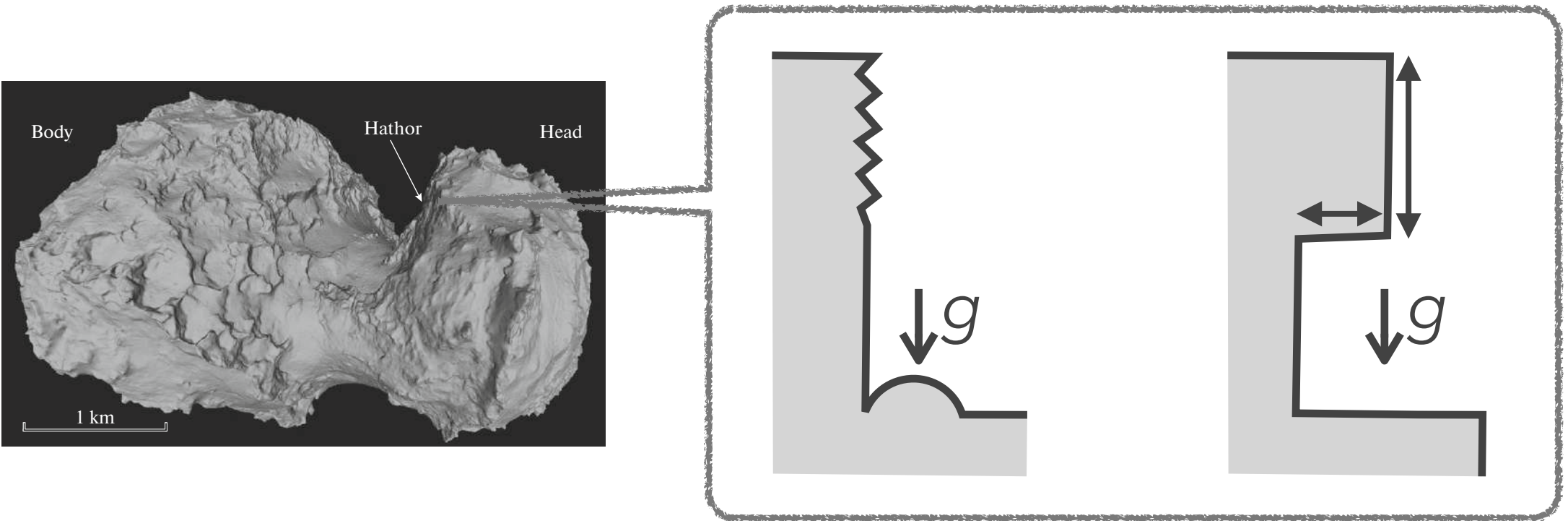
ダスト集合体の引張強度モデル

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

表面エネルギー 粒子半径 初期充填率

彗星67Pの引張強度 $\sim 1.5\text{--}100 \text{ Pa}$

(Basilevsky et al. 2016)



- 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 μm 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 μm 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