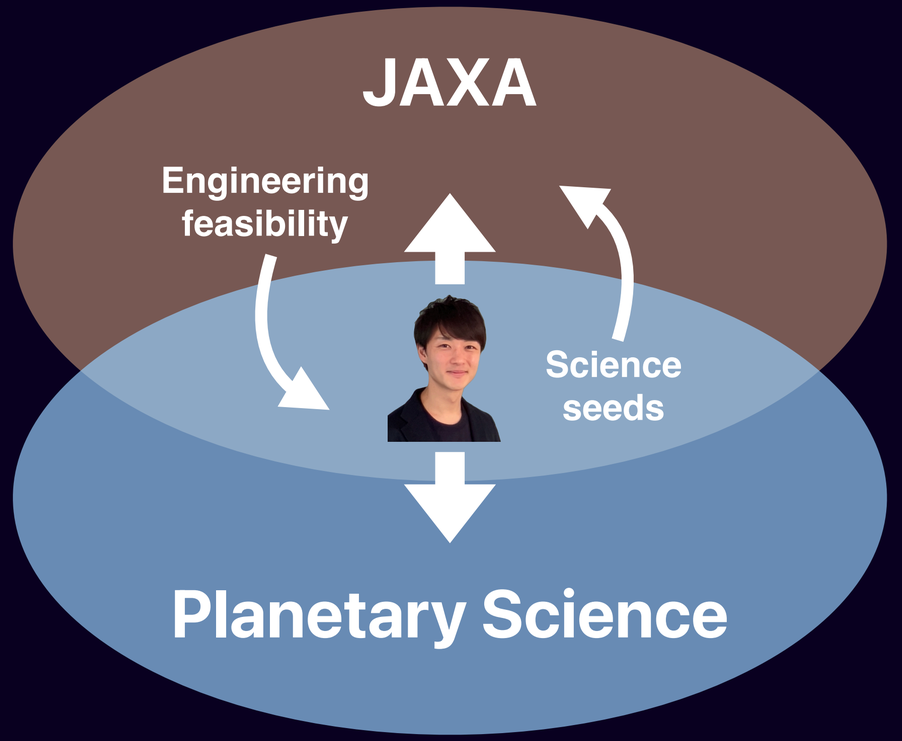
「小惑星探査・外惑星探査×理論惑星科学」に関するある取り組み

1. ラブルパイル小惑星の形状進化（前半）
2. 土星円環探査に関するある取り組み（後半）

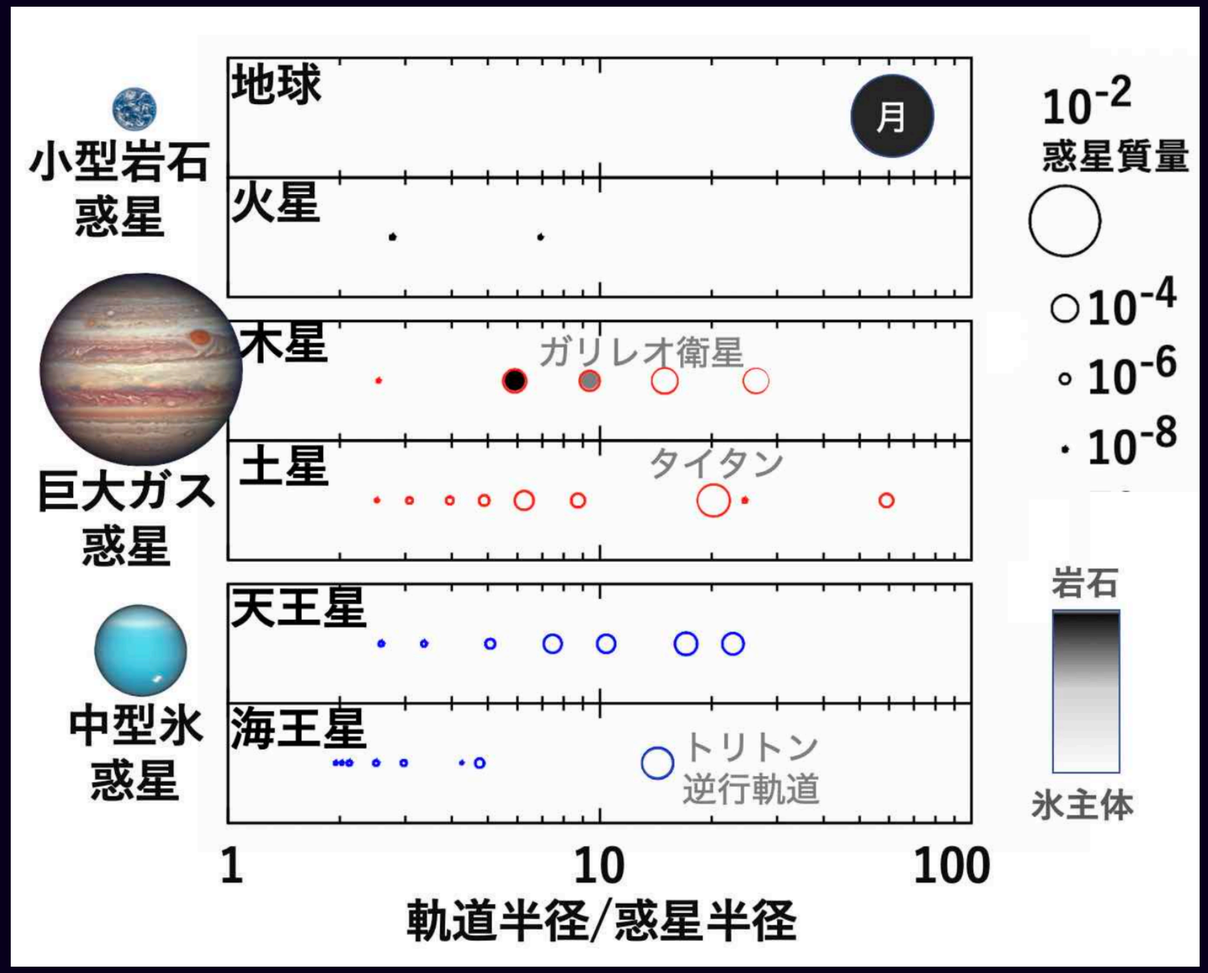


兵頭龍樹
JAXA

太陽系の多様な衛星系

☑ Regular satellites: ほぼ円軌道、ほぼ赤道面

☑ Irregular satellites: 離心率が非常に大きく、軌道傾斜角もランダム



*Moons of planets and dwarf planets.

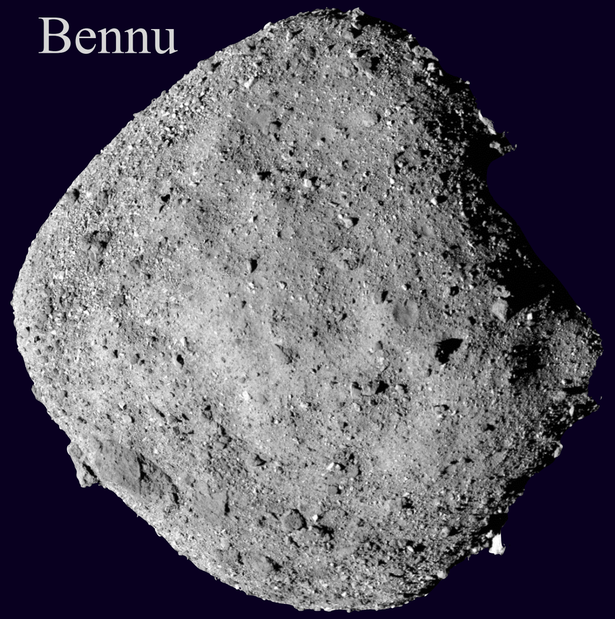
Planet / Dwarf Planet	Confirmed Moons	Provisional Moons	Total
Mercury	0	0	0
Venus	0	0	0
Earth	1	0	1
Mars	2	0	2
Jupiter	53	26	79
Saturn	53	29	82
Uranus	27	0	27
Neptune	14	0	14
Dwarf Planets			
Pluto	5	0	5
Eris	1	0	1
Haumea	2	0	2
Makemake	0	1	1
Ceres	0	0	0
Totals	**158**	**56**	**214***

©NASA

小惑星にも衛星が存在

— Rubble-pile structure (!?)
— Top-shaped figure
— Equatorial bulge/ridge
— Satellite(s) (mass: ~0.01M_c)

Bennu

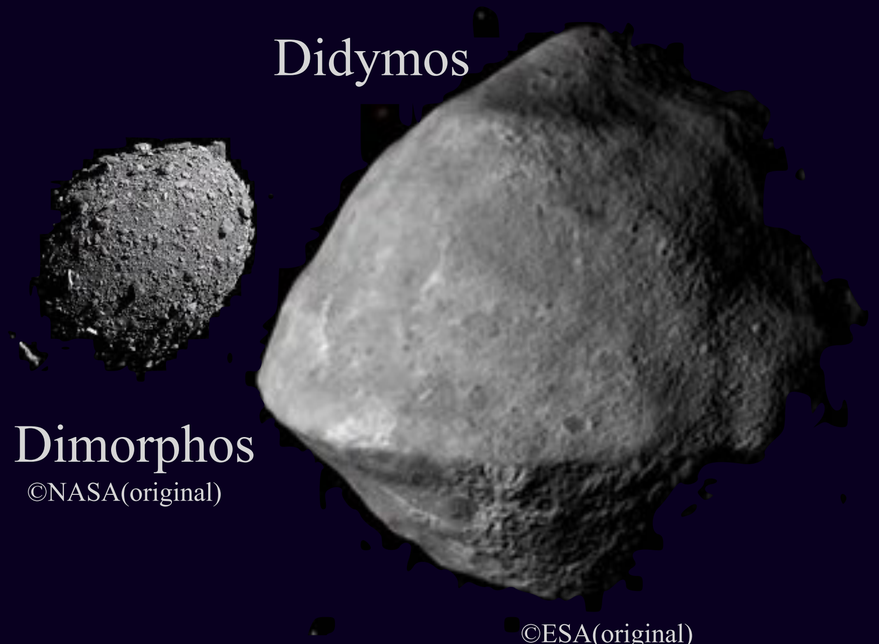


©NASA/Goddard/University of Arizona

Ryugu

©JAXA

Didymos



Dimorphos

©NASA(original)

©ESA(original)

66391 Moshup

Squannit

©S. Ostro (original)

Mass of ~0.01M_c

2001 SN_{263}
(spherical/oblate shape?)

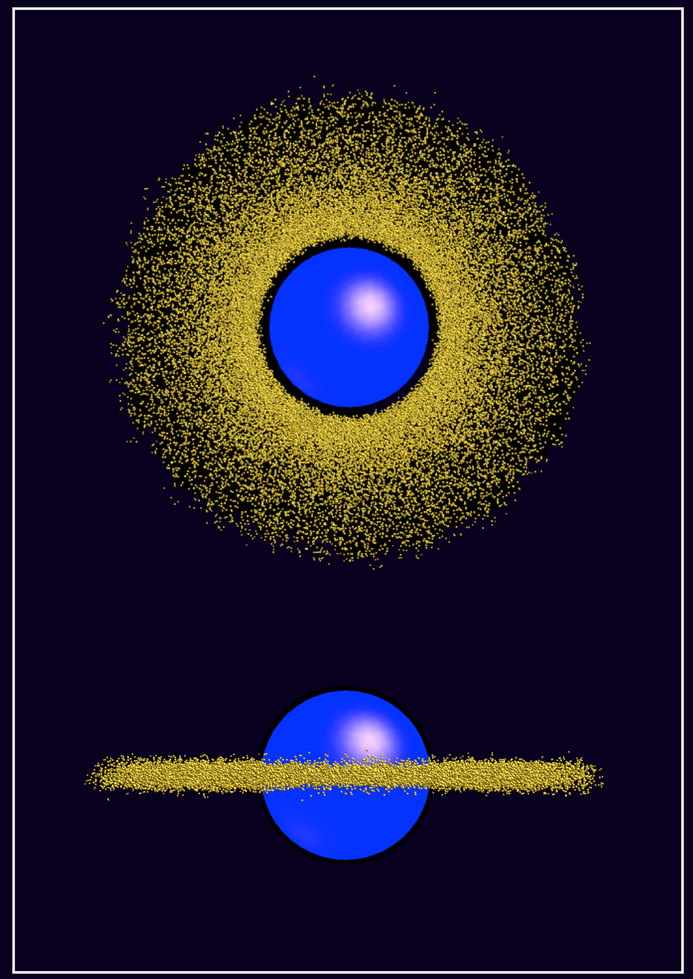
Mass of ~0.03M_c

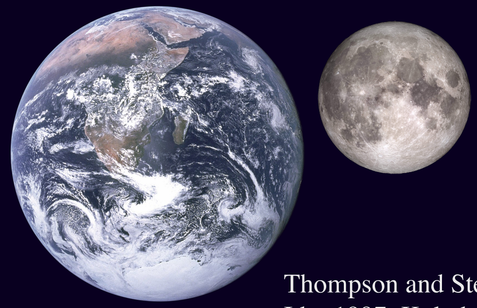
粒子円盤からの衛星形成

巨大衝突
Canup 2004; Nakajima+2014; Hyodo+2017

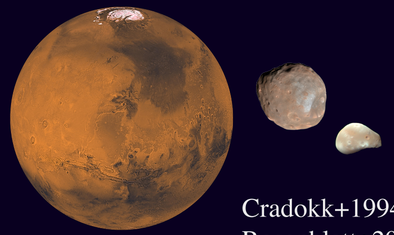
潮汐破壊
Canup 2010; Hyodo+2016

地滑り
Walsh+2008; Sugiura+2021



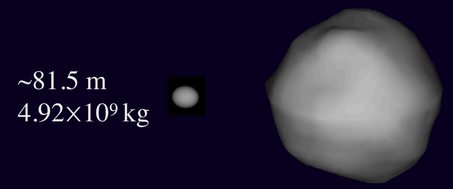


Thompson and Stevenson, 1988
Ida+1997; Kokubo+2000; Hyodo+2015



Cradokk+1994;
Rosenblatt+2016; Hyodo+2018

Charnoz+2010; Crida&Charnoz2010; Hyodo&Ohtsuki 2015



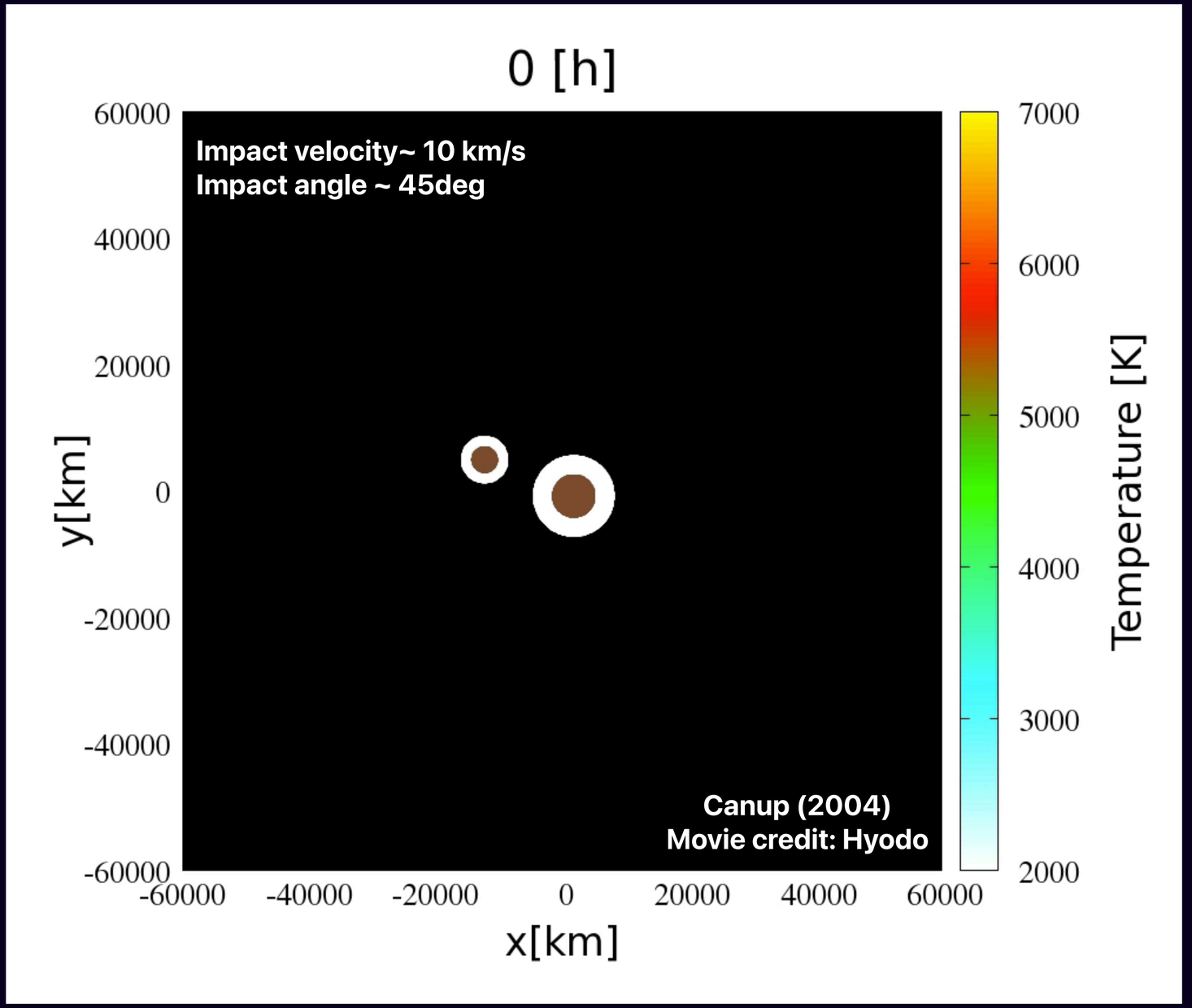
~81.5 m
4.92×10^{9} kg

~390 m
5.32×10^{11} kg

Didymos-Dimorphos

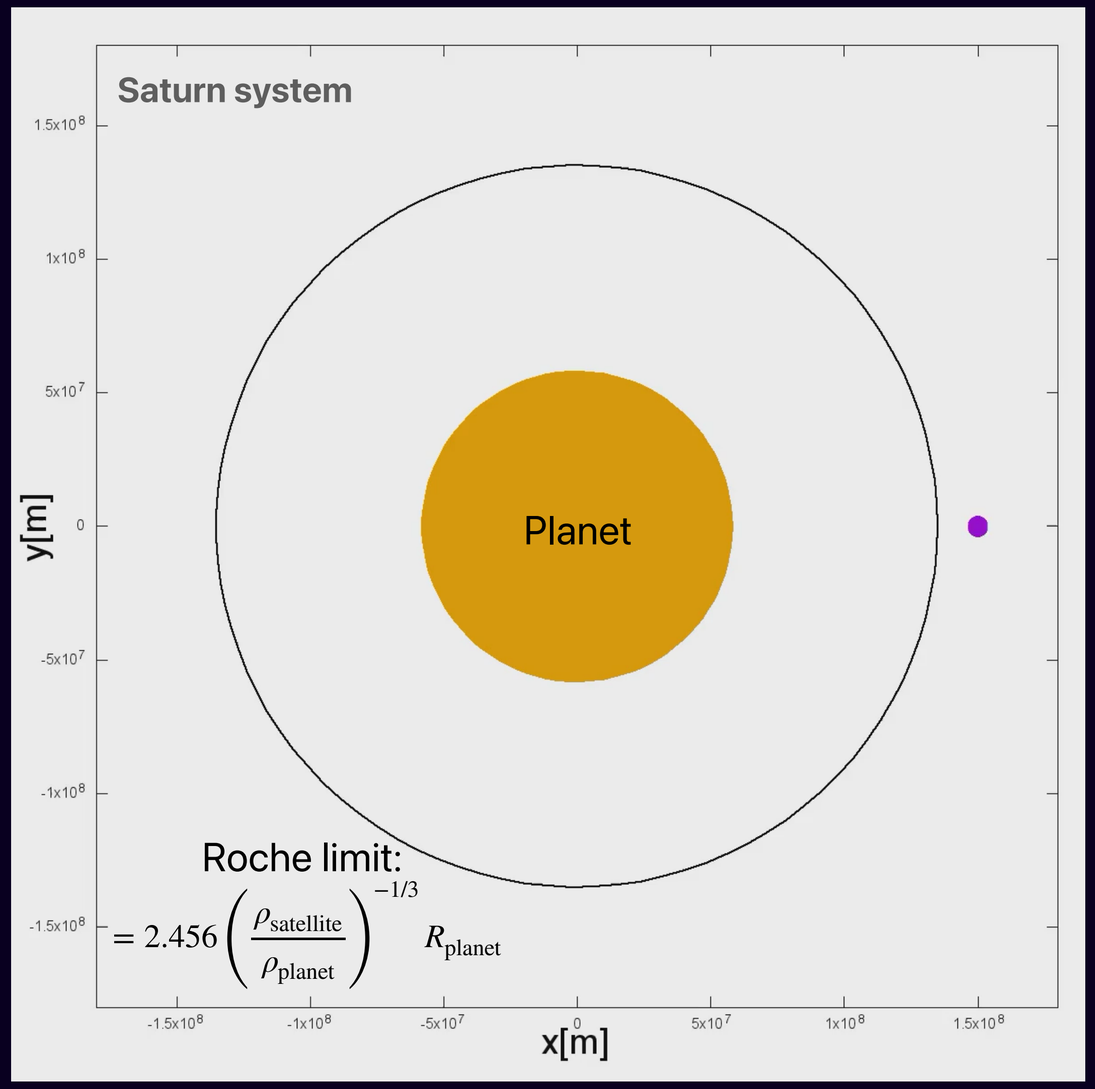
Hyodo & Sugiura 2022

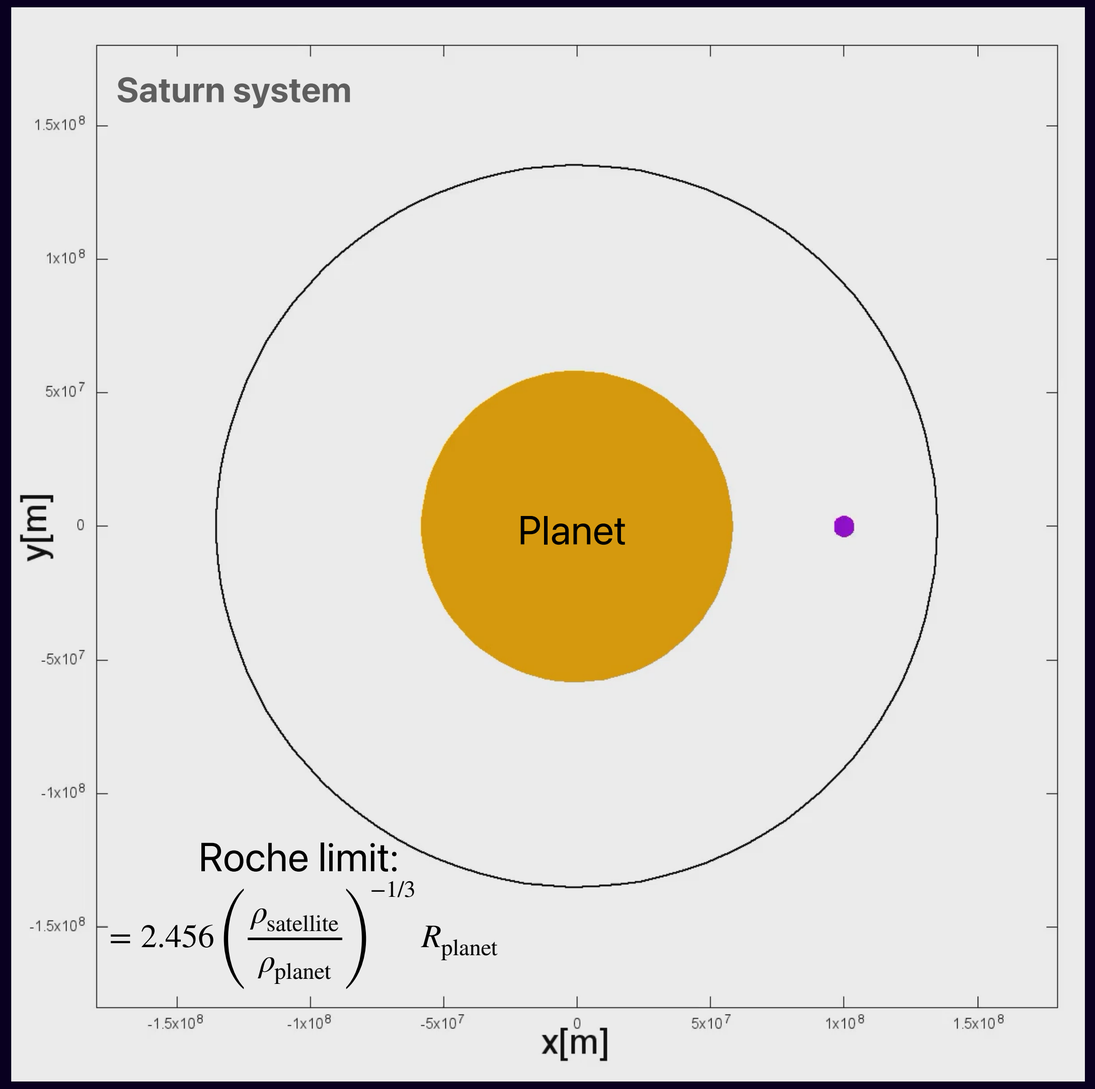
巨大衝突での円盤形成


0 [h]
Impact velocity~ 10 km/s
Impact angle ~ 45deg
Canup (2004)
Movie credit: Hyodo
60000
40000
20000
0
-20000
-40000
-60000
y[km]
-60000
-40000
-20000
0
20000
40000
60000
x[km]
7000
6000
5000
4000
3000
2000
Temperature [K]

潮汐破壊とは？

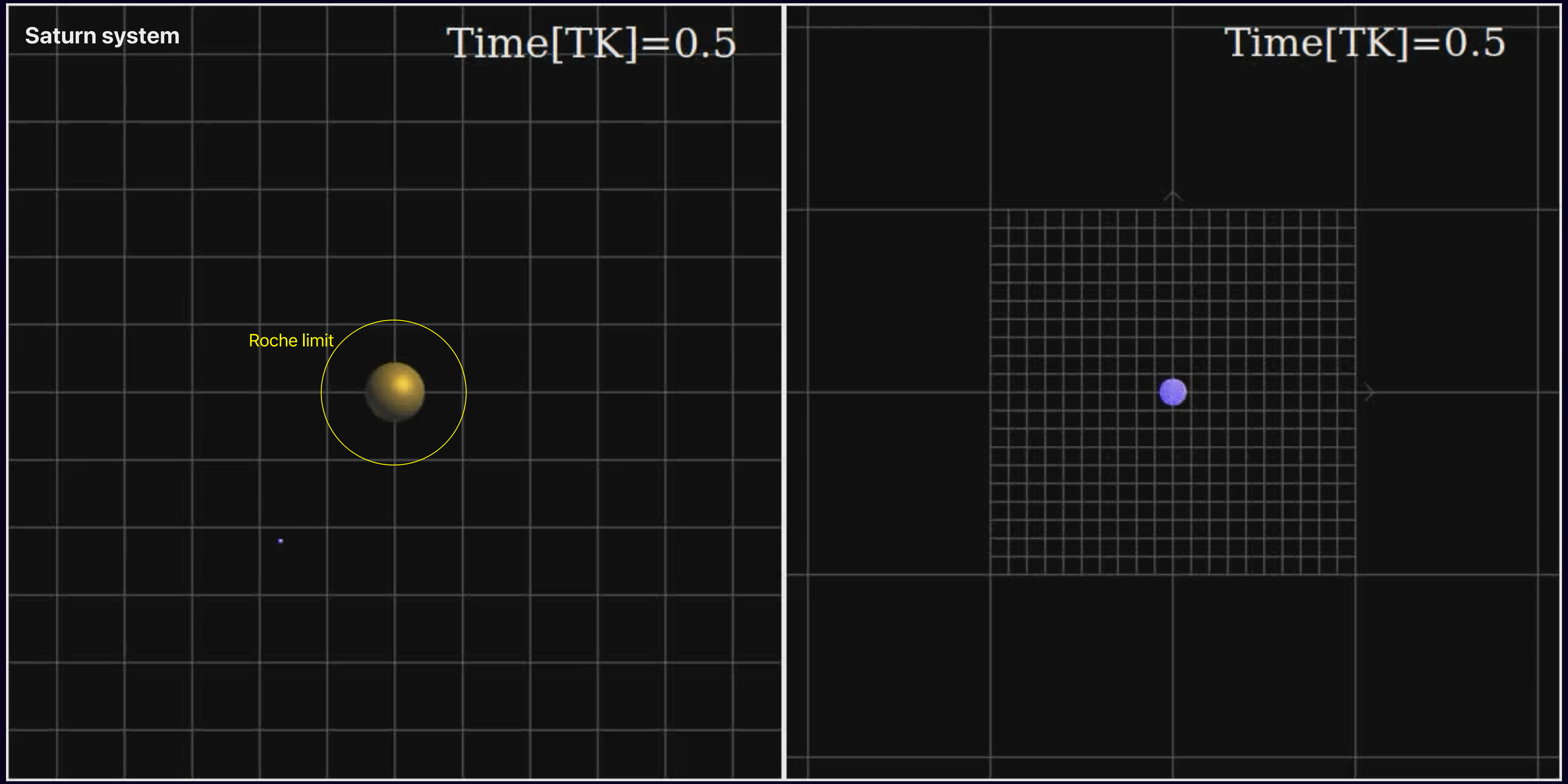
Movie credit: Hyodo





近接遭遇時の潮汐破壊

Hyodo et al. 2017



粒子円盤の拡散進化の基礎

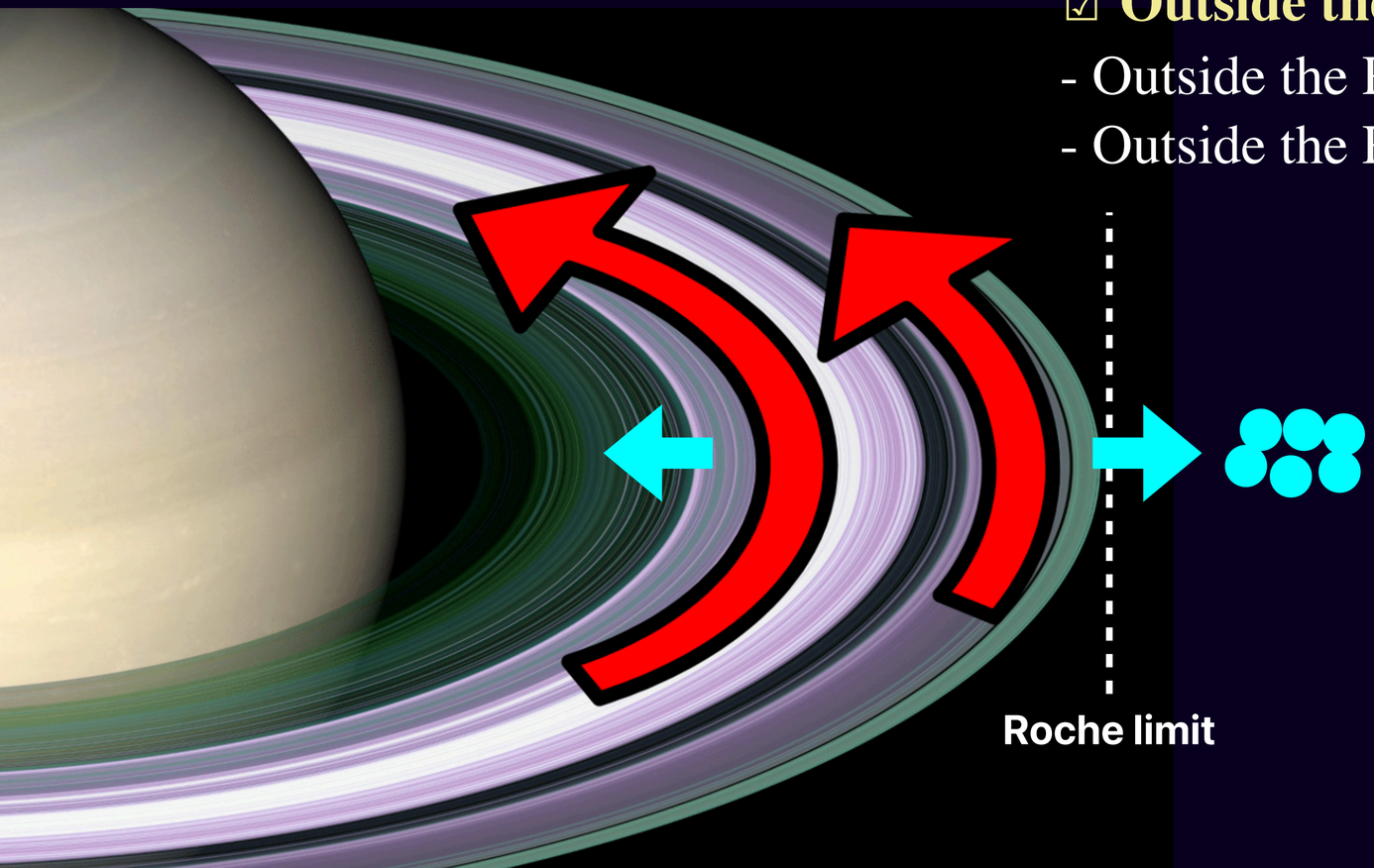
Basic Physics of any Astrophysical Disks

☑ **Disks (rings) spread**

- Inside rotates faster (Kepler's law)
- Friction accelerates the outside and slow down the inside

☑ **Outside the Roche limit, particles accumulate**

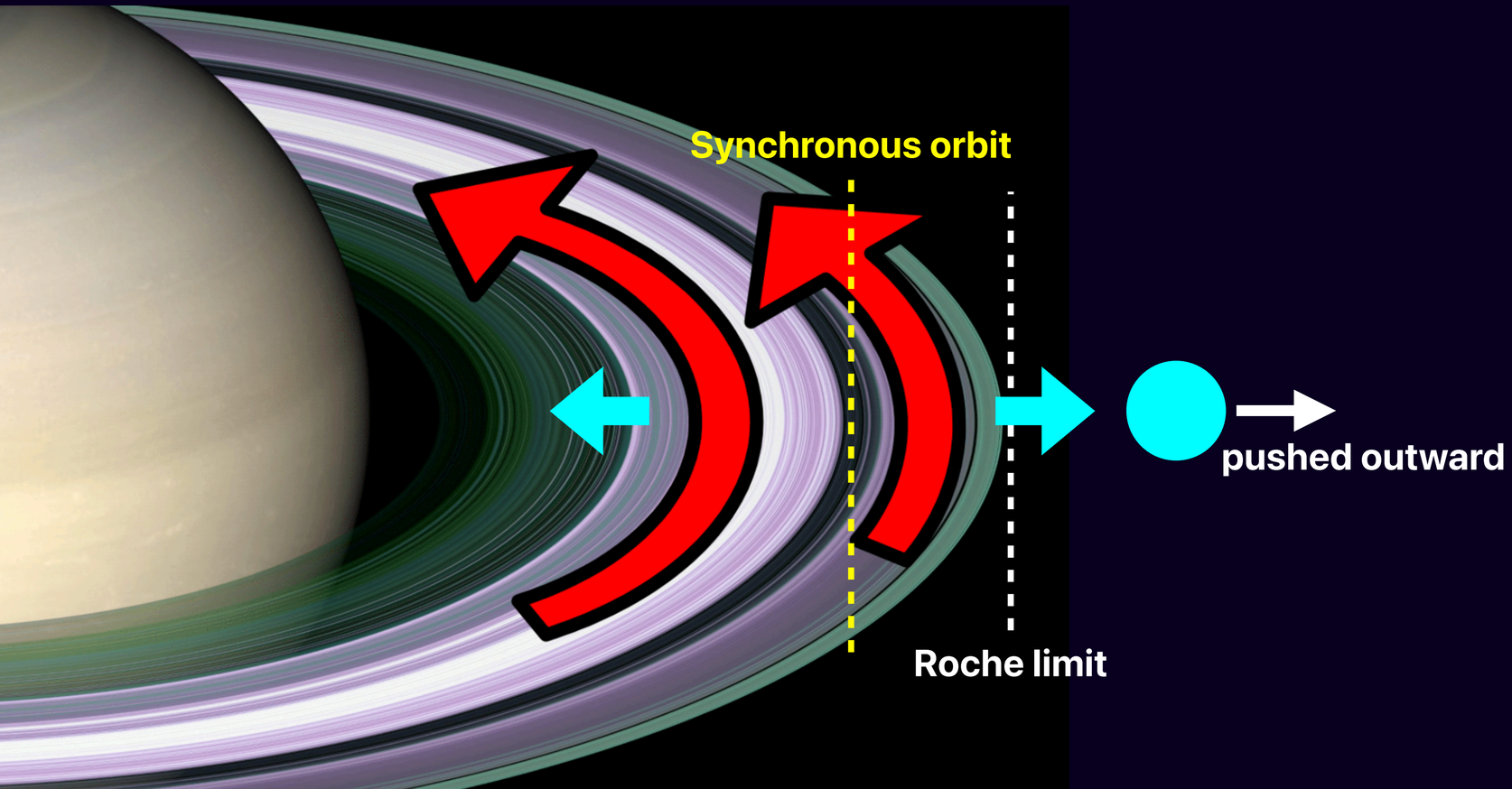
- Outside the Roche limit, the self-gravity dominates over tides
- Outside the Roche limit, satellites can form



Basic Physics of any Astrophysical Disks

☑ **Orbits of the satellites can be expanded over time due to..**

- Ring torque
- Planetary tides (when the synchronous orbit is smaller than satellites)



Satellites can be Pushed Outward

☑ **Ring torque (below 2:1 mean motion resonance with r_{Roche}):**

$$\Gamma = \frac{8}{27}\left(\frac{M_{\text{Satellite}}}{M_{\text{Saturn}}}\right)^2 \Sigma_{\text{Ring}} r_{\text{Roche}}^7 \Omega^2(r_{\text{Roche}})\Delta^{-3}$$

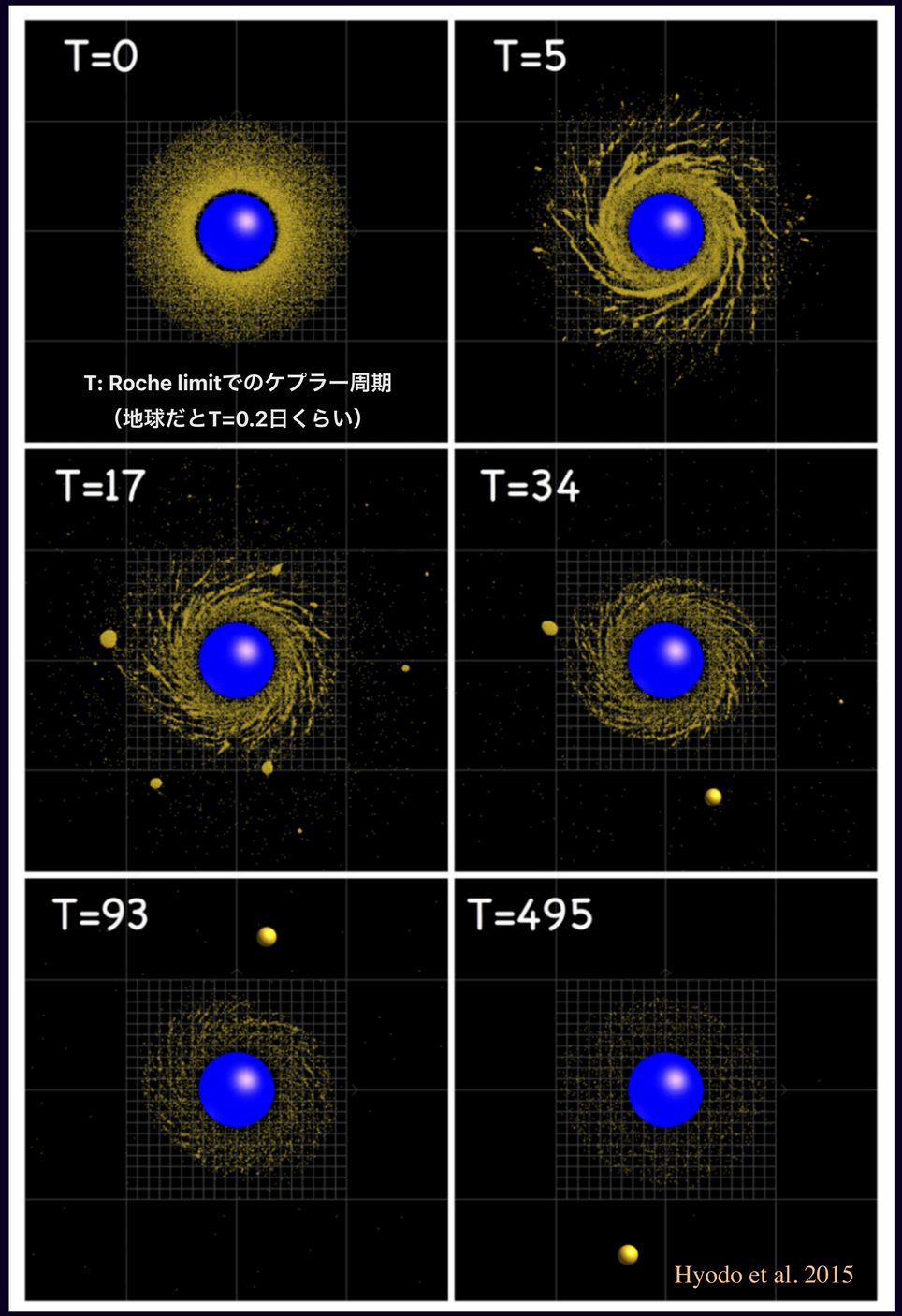
Proportional to $M_{Satellite}^2$ and $\triangle^{-3}$, where $\triangle = (r-r_{Roche})/r_{Roche}$ (Lin & Papaloizou 1979)

The bigger you are, migrate outward faster.
The further you are, migrate more slowly.
→ ~10^8 years ago, Janus was in the rings!?

☑ **Planetary tides (beyond 2:1 mean motion resonance with r_{Roche}):**

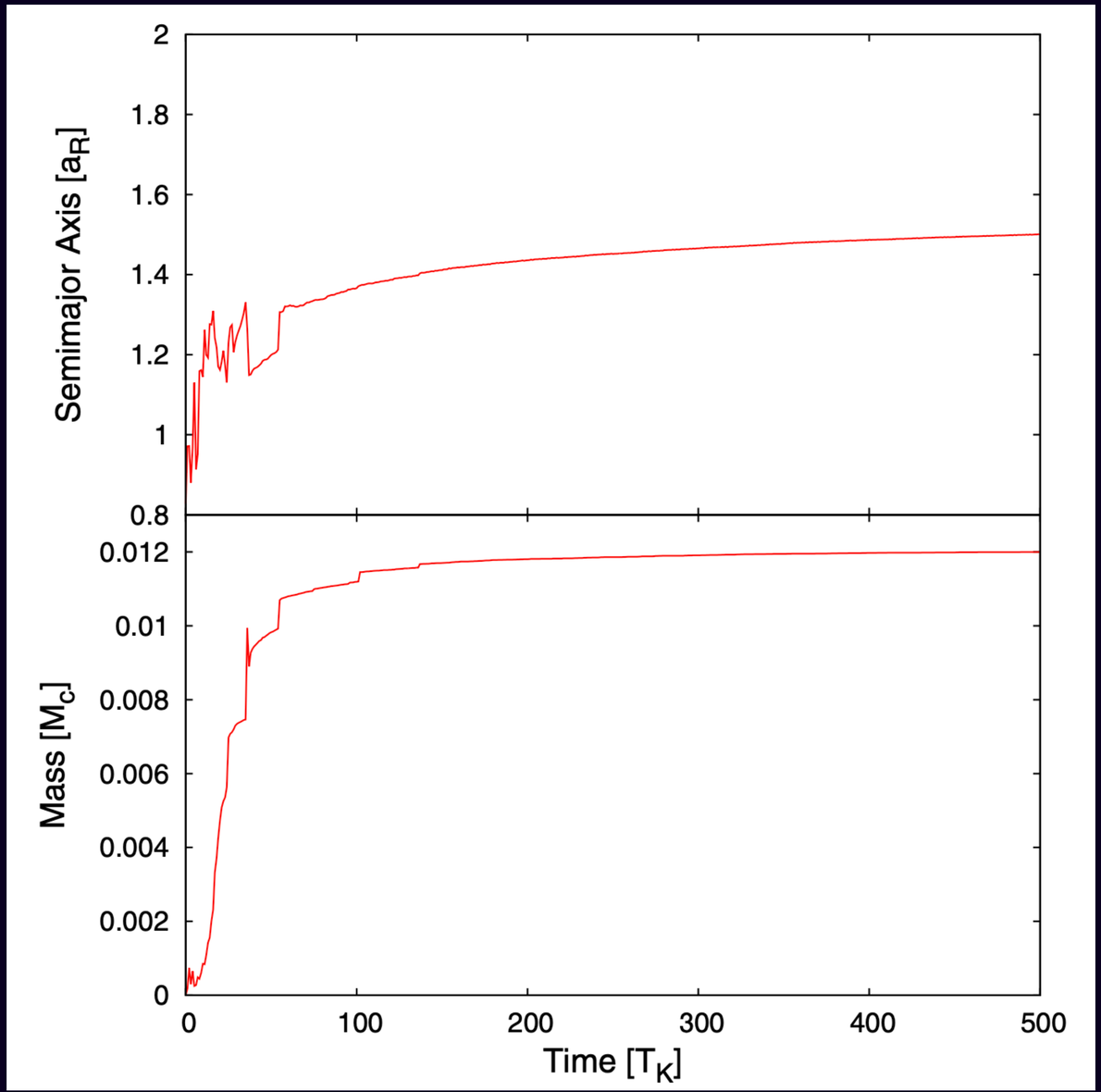
$$\frac{dr}{dt} = \frac{3k_{2p}M_{\text{satellite}}\sqrt{G}R_{\text{Saturn}}^5}{Q_{\text{Saturn}}\sqrt{M_{\text{Saturn}}}} r^{-11/2}$$

K_{2p}: planet's tidal love number, Q_p: planet's dissipation factor



円盤質量が大きい場合

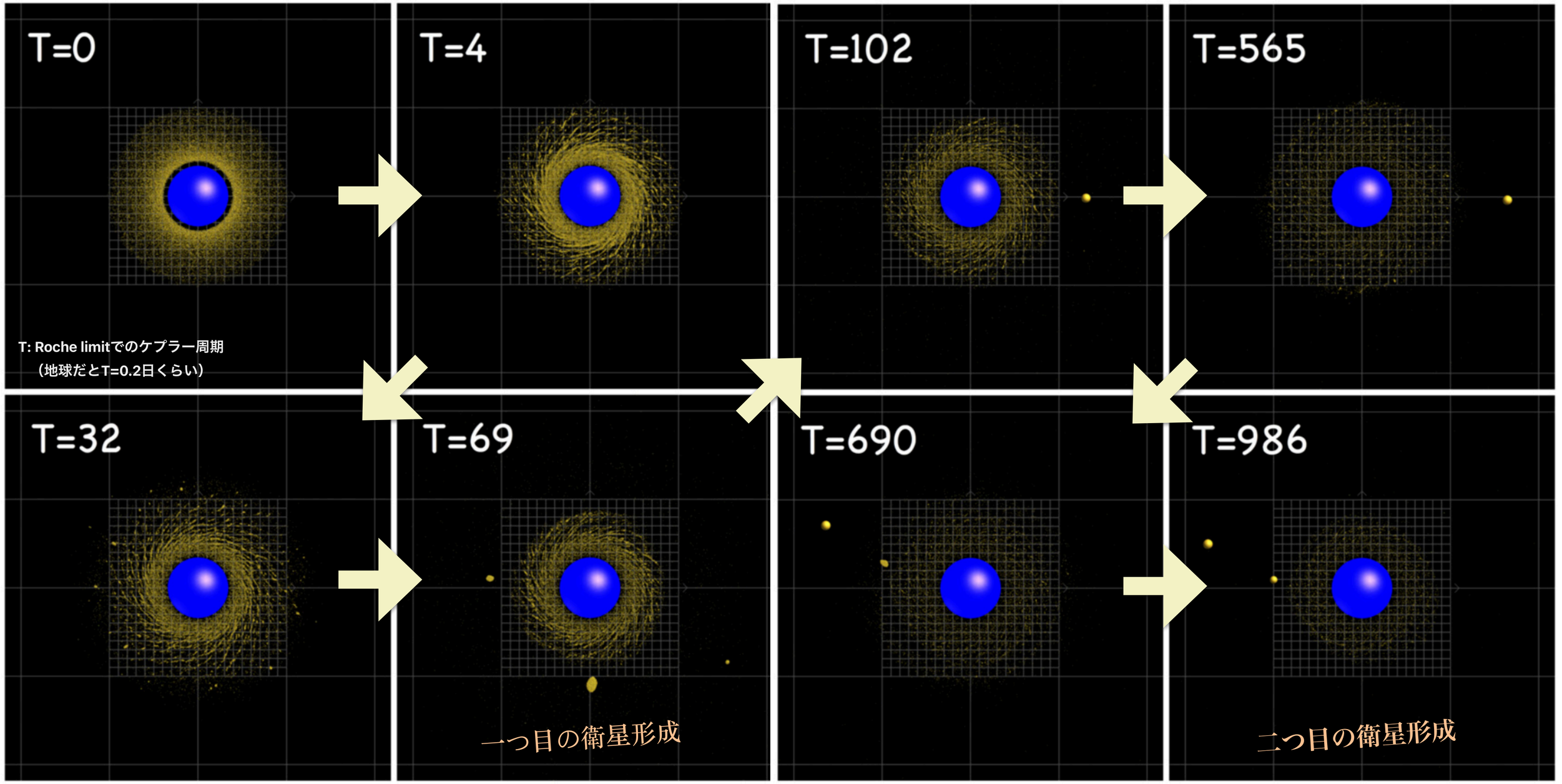
*大きい/小さいの意味はあとで



円盤質量が小さい場合

*大きい/小さいの意味はあとで

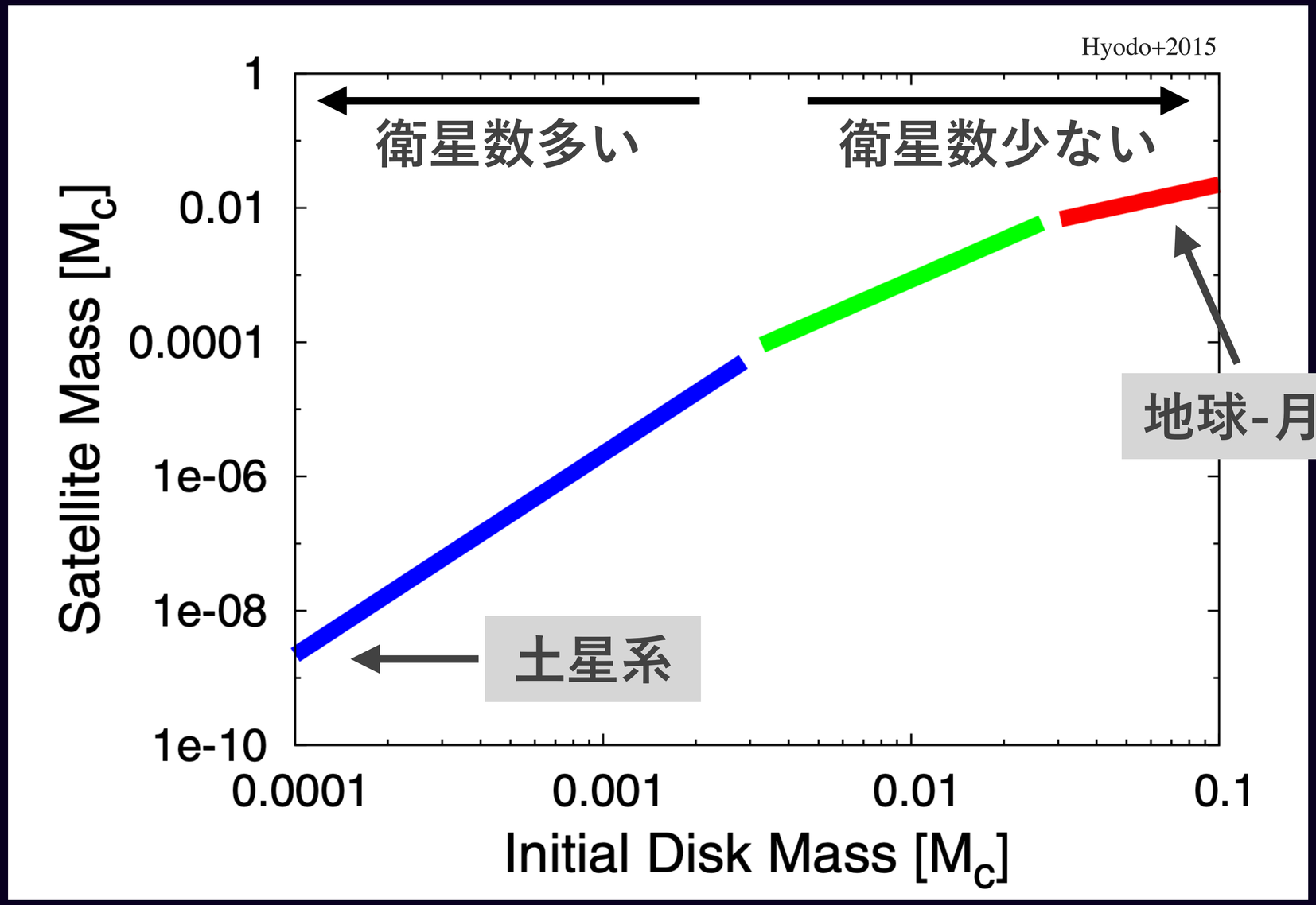
Hyodo et al. 2015



Charnoz+2010; Crida&Charnoz2010; Hyodo+2015

最大サイズの衛星は？

― 初期円盤質量に対する依存性 ―



*実際の地球-月系の形成は，
gas-rich円盤である可能性が高い．
なので，もっと複雑．

T[s]=375000

小惑星の形状進化と衛星形成にも応用できるか！？

Hyodo & Sugiura 2022 ApJL

Previous studies

Walsh et al. 2008, 2012:
- Hard-Sphere DEM (HSDEM)
- Cohesionless; initially rubble-pile sphere (inc. self-gravity)
- No direct modeling of friction forces
- Satellite formation from discretely ejected particles
  (Our study is via the particle disk evolution)

Complex dependencies exist on:

e.g., initial shape, internal structure, spin, particle properties

Sanchez and Scheeres, 2012; Zhang et al., 2018; Ferrari and Tanga, 2020; Hirabayashi et al., 2020

From today's shape of Bennu:
- Mass shedding to form a satellite is unlikely
  Zhang et al., 2021

Top-shape (and ridge) formation:
- Through a fast spin-up process
  Holsapple, 2001, 2004, 2010; Sharma et al., 2009, 2013, 2018; Fahnestock et al. 2009
  Hirabayashi, 2015; Walsh et al., 2008, 2012; Sánchez and Scheeres, 2016, 2018;
  Zhang et al., 2017, 2018; Scheeres 2006; Leisner et al., 2020, Ikeya & Hirata 2021, etc
- Re-accretion after catastrophic disruption of a parent body
  Michel et al. 2020

This study

Hyodo & Sugiura 2022, *ApJL* (also Sugiura+2021, *Icarus*)

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method:
- Initially rubble-pile sphere (inc. self-gravity)
- Number of particles up to ~10^5
- Drucker-Prager yield criterion with zero cohesion (Jutzi, 2015)
- Pressure-dependent shear strength (Jutzi, 2015)
- Effective friction angle is used (mimic/inc. cohesion effect)
- Basaltic Tillotson EOS (Benz & Asphaug 1999)
- First SPH attempt at the rotational deformation
- Shape deformation processes are similar
  btw SPH and SSDEM (but not with HSDEM)

Weaknesses:
- Perfect spheres of particles
- Same-sized particles
- Uniform internal structure
- A direct effect of cohesion (tensile forces) is ignored

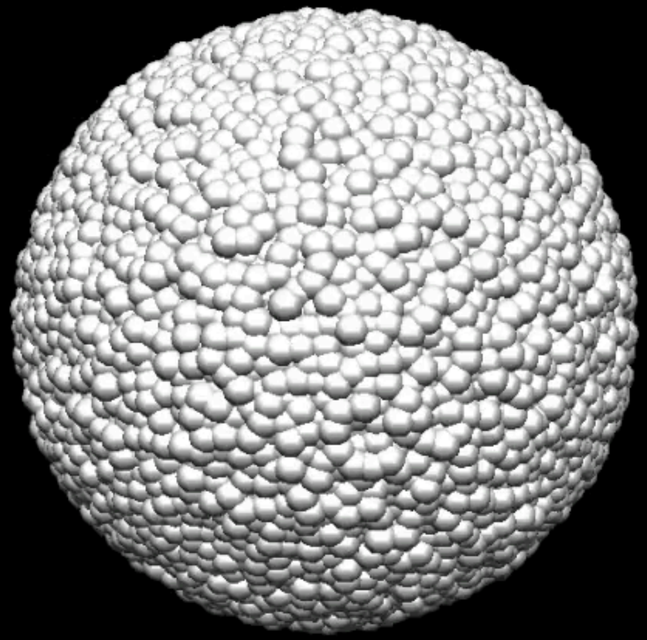
Companion paper: (Madeira, Charnoz, Hyodo, Icarus submitted)
- Dynamical origin of Dimorphos from fast spinning Didymos
- Including the tidal evolution of Dimorphos

1. Avalanche: Surface Landslide

Conditions

— Spin period of ~3h
— Effective friction angle of >70 deg (inc. effect cohesion)
— A spin-up timescale of <a few days (from 3.5 hr to 3.0 hr)

Timescale of ejection:
~3 hours

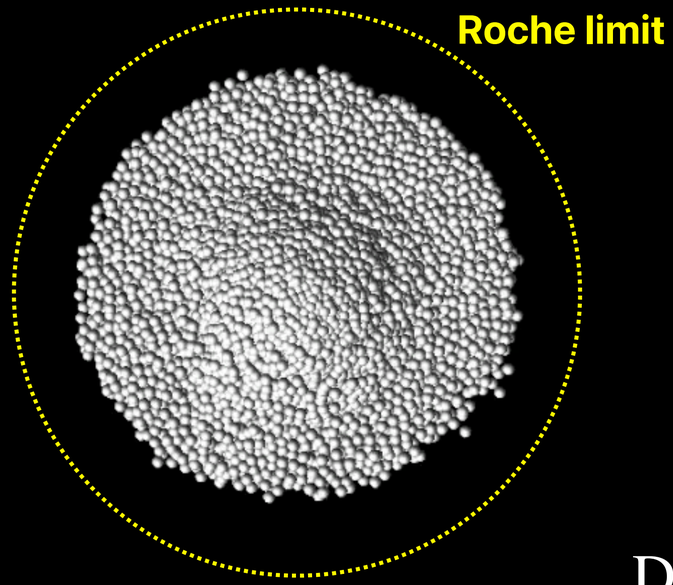


Ejected mass:
~10-20wt.% of the primary

T[s]=100000

2. Disk Formation and Evolution

Disk is gravitationally unstable
and spiral-arms form.

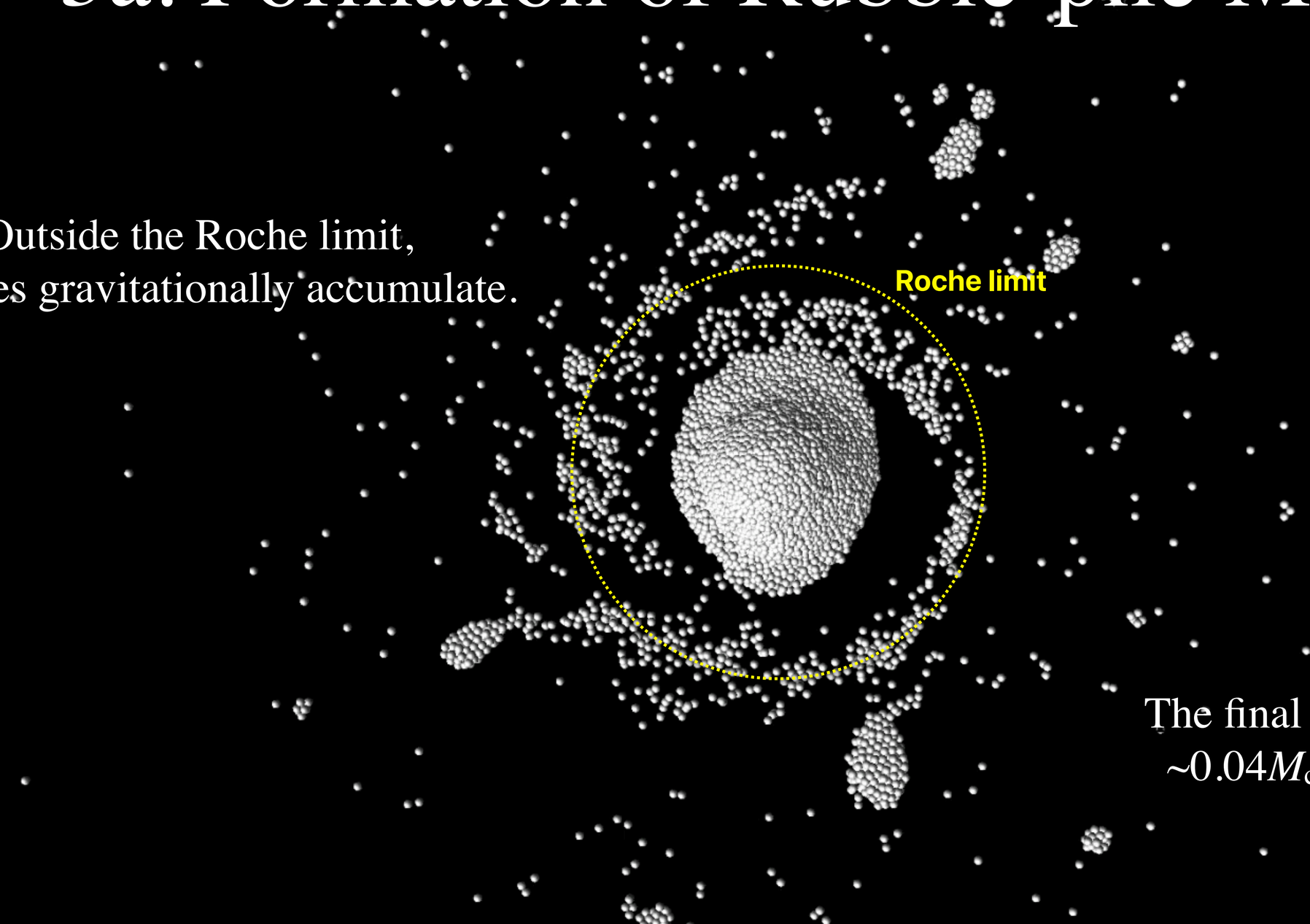


Disk spreads beyond the primary's
Roche limit.
(Disk evolution timescale: ~100h)

T[s]=500000

3a. Formation of Rubble-pile Moons

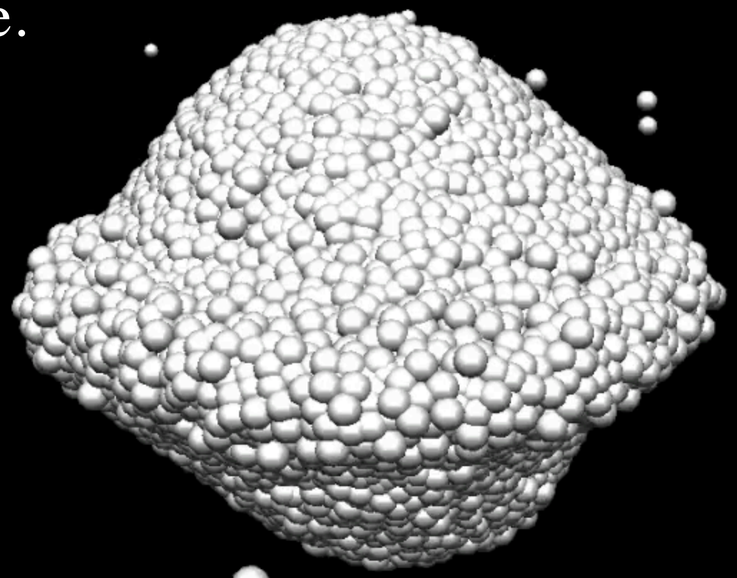
Outside the Roche limit,
particles gravitationally accumulate.



The final mass of the moon:
~0.04M_c after ~300 hours

3a. Equatorial Ridge is Naturally Formed

Disk particles re-accrete *selectively* on the equatorial region of the primary, forming an equatorial ridge.



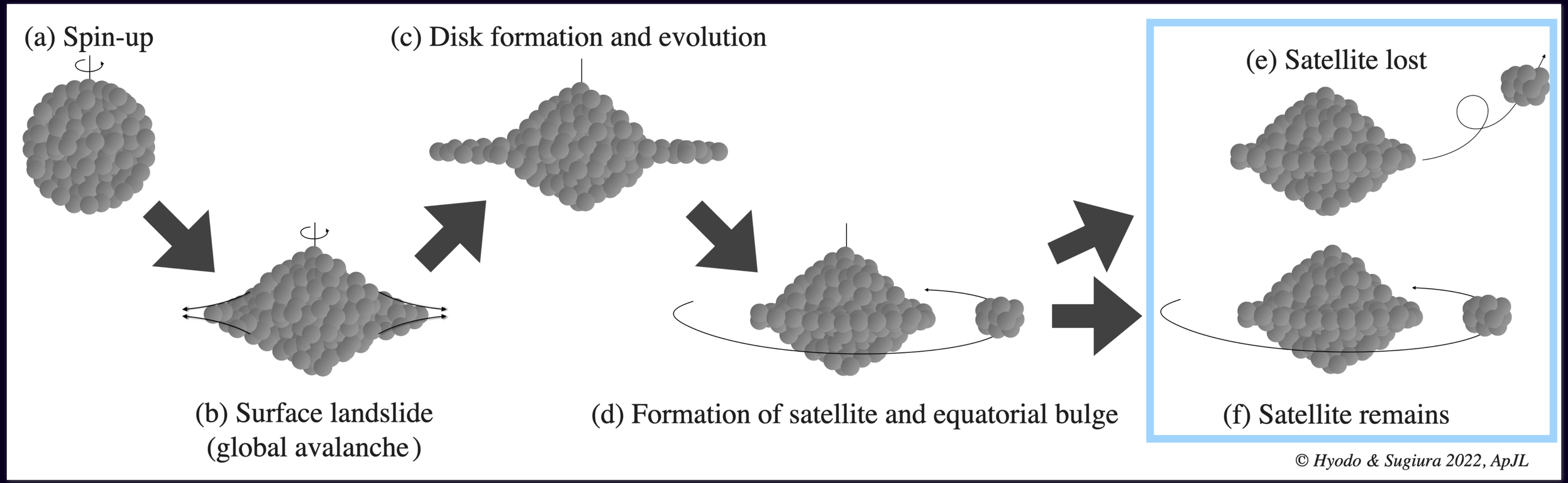
However, the ridge is *too* prominent compared to the observation.

→ limitation of the numerical technics and/or post-formation evolution?

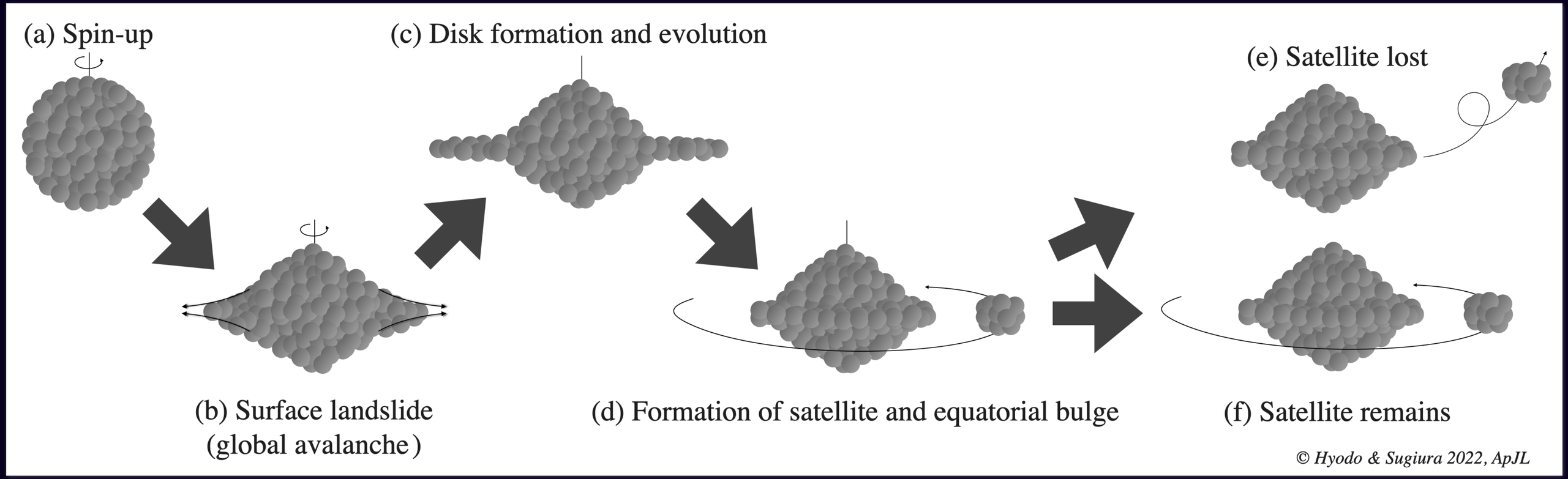
Long-Term Evolution of the Satellite(s)

BYORP (binary YORP) may remove the satellite(s).
Or, a balance btw BYORP and tides may stabilize the satellite.
→ Origin of diverse systems *with/without* a satellite(s)?

(Ćuk & Burns 2005; Ćuk & Nesvorný 2010; McMahon & Scheeres 2010; Jacobson & Scheeres 2011)



Schematic Summary



~3 hours

~300 hours

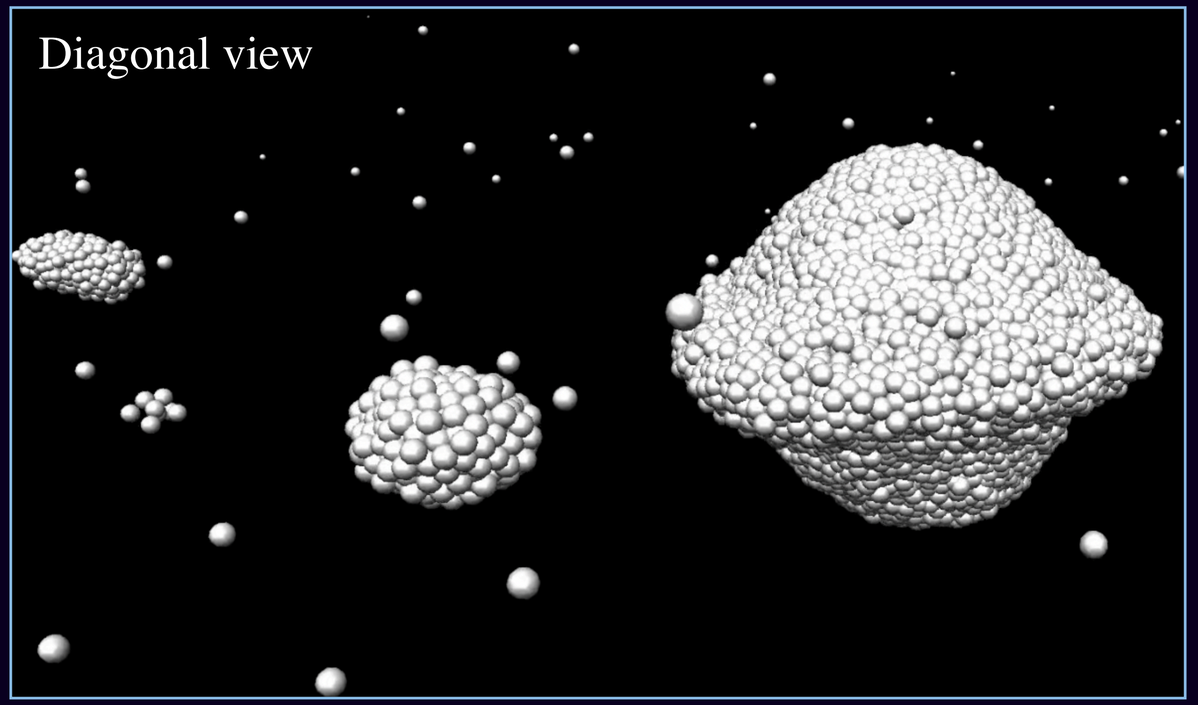
Minimum ~10^5 years to potentially remove satellite via BYORP

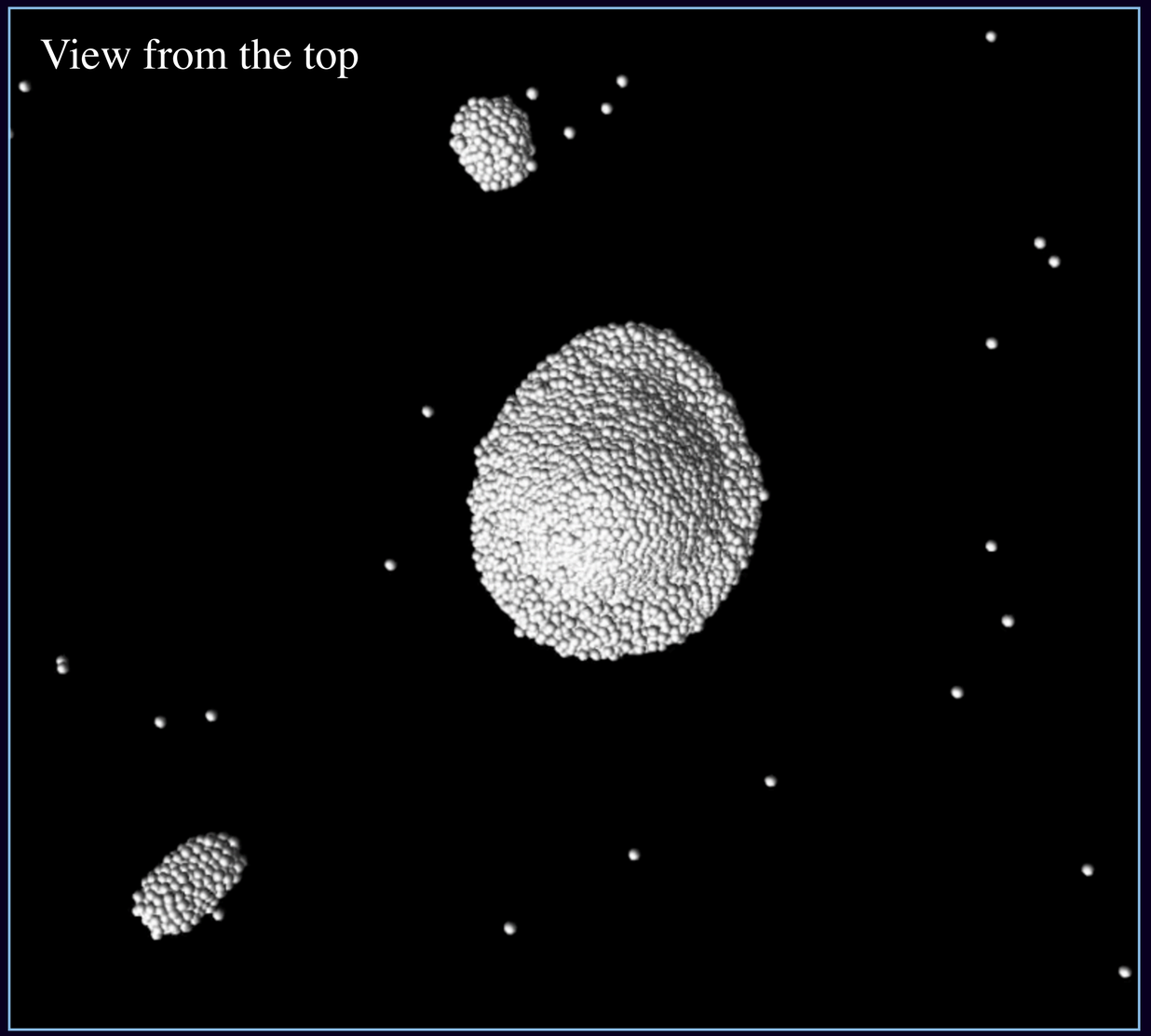
小惑星の衛星が持つ特徴を説明できるか？

1. 衛星の形状
2. 衛星の数
3. 多様性について

衛星の形状について

- ☑ Elongated
- ☑ Consists of rubble piles!?





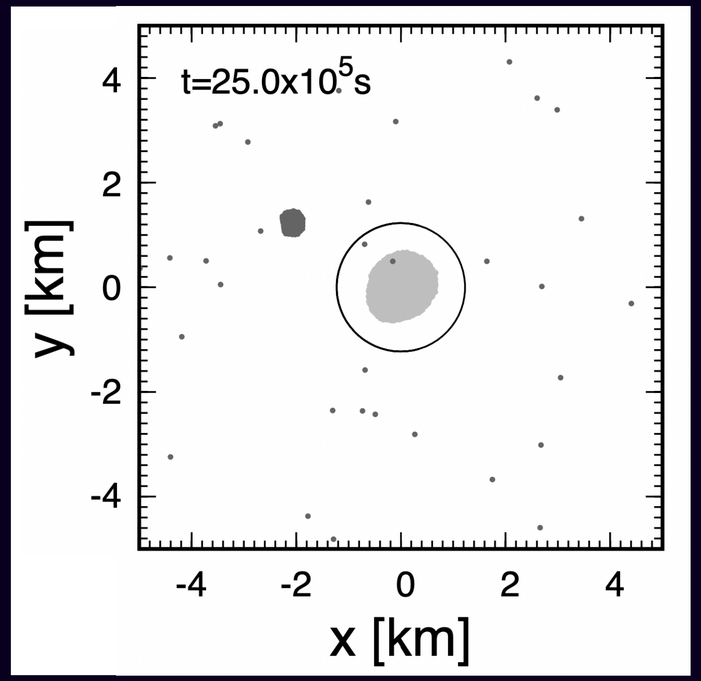
衛星の数について

Accretion via disk spreading is a *stochastic* process.

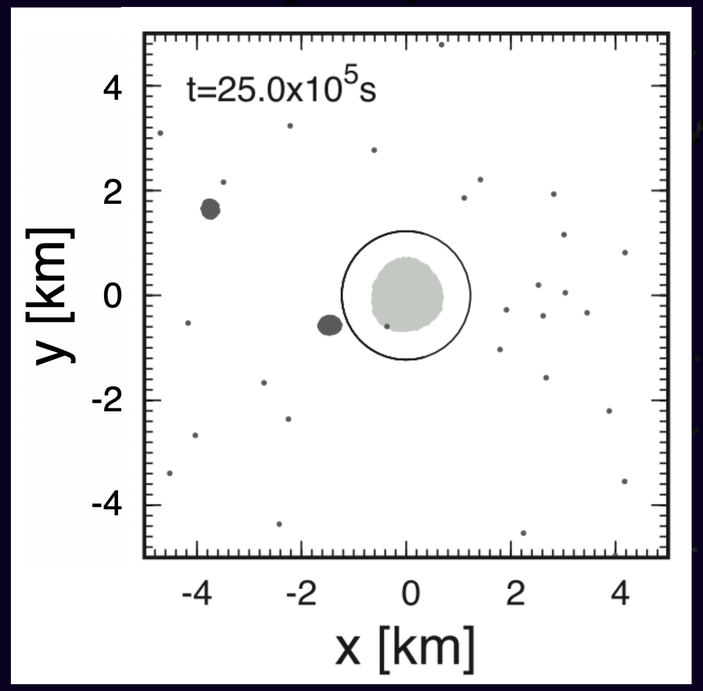
Dimorphos
©NASA(original)

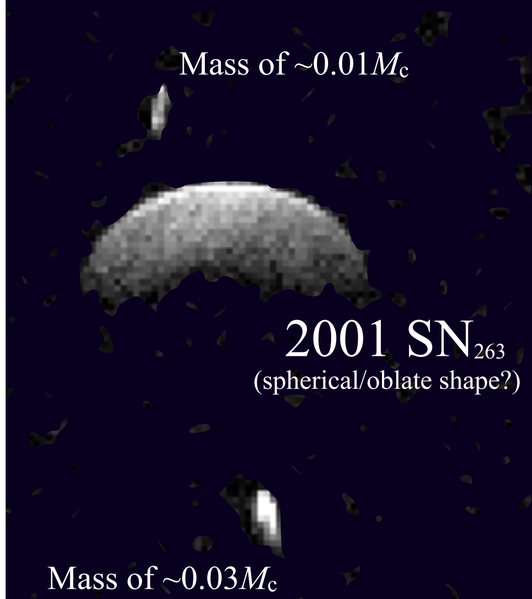
Didymos
©ESA(original)

Result: binary system case



Result: triplet system case





Note that, the total mass of the satellites would not significantly change,
because it is regulated by the initial disk mass.

多様性について

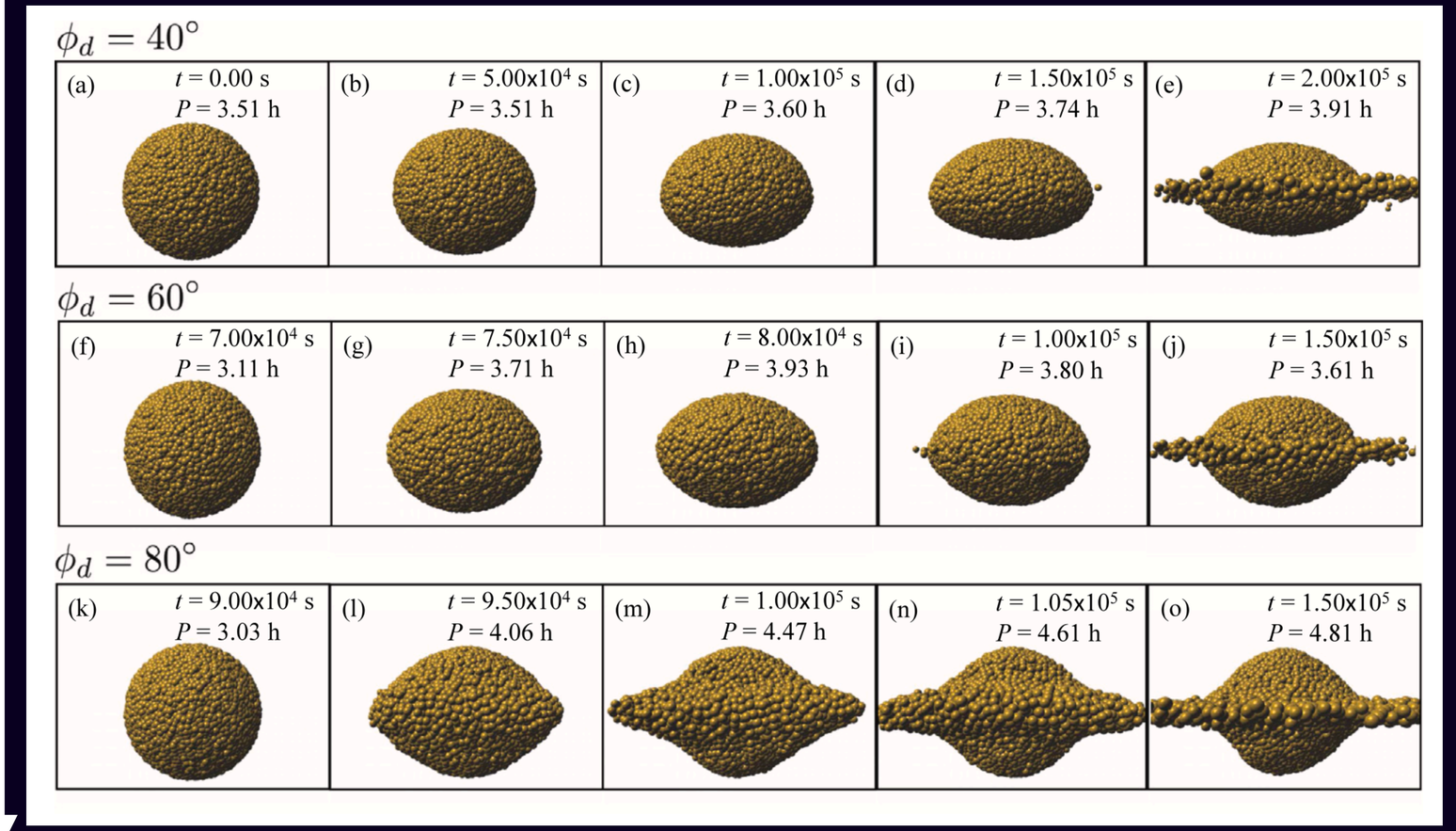
<u>More internal deformation</u>
— Smaller ejected mass
— Lemon-shaped figure

Effective friction angle

Disk mass:
~3 wt.% for $\phi_d = 40°$
~5 wt.% for $\phi_d = 60°$
~20 wt.% for $\phi_d = 80°$

<u>More surface landslide</u>
— Larger ejected mass
— Top-shaped figure

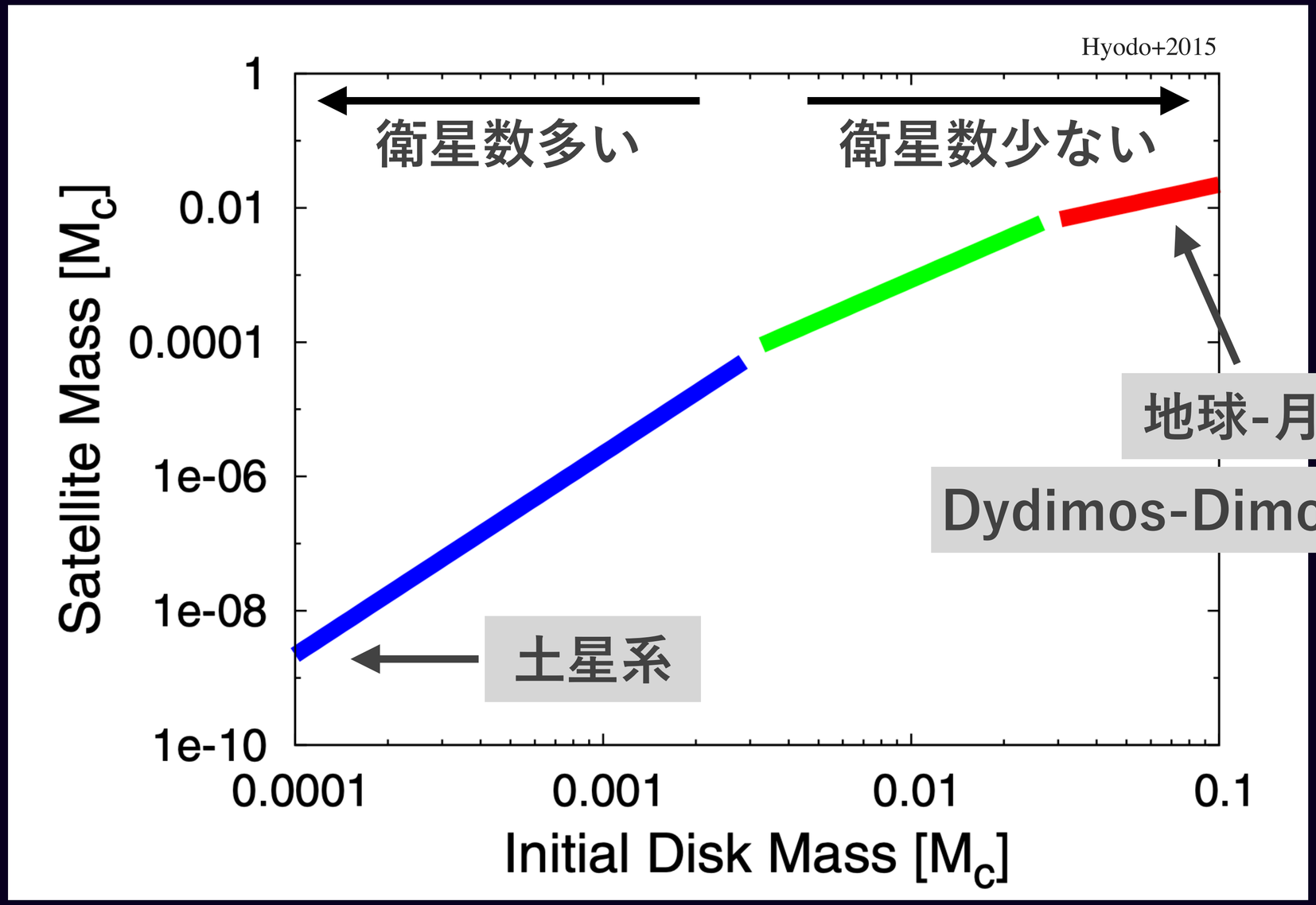
Effective friction angle



Sugiura et al. 2021; Hyodo & Sugiura 2022

最大サイズの衛星は？

― 初期円盤質量に対する依存性 ―



*実際の地球-月系の形成は，
gas-rich円盤である可能性が高い．
なので，もっと複雑．

土星円環探査計画

— ISAS-WG OPENS の活動 —

工学意義：
船瀬龍、尾崎直哉ほか

小型機利用による外惑星探査計画は、
現JAXAの重要な技術フロントローディング活動

理学意義：
兵頭龍樹、矢野創ほか

土星リングほどの巨大構造の形成と進化の理解は、
太陽系形成史解明の“smoking gun”(決定的証拠)となる

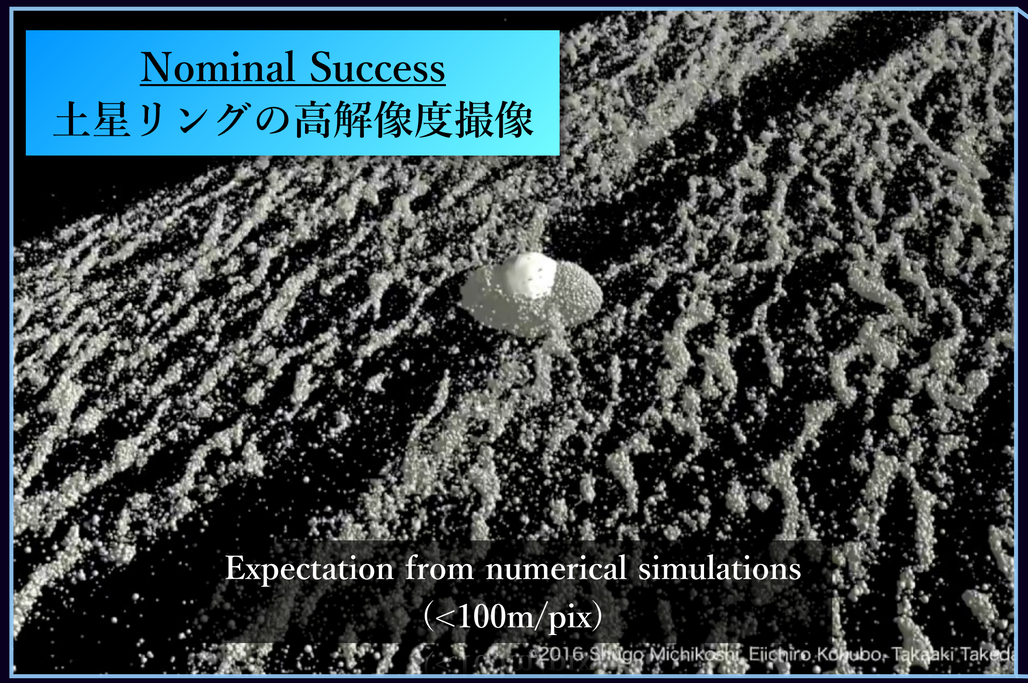
土星リング(探査)は、

- 水氷を主成分とする低温・始原物質探査
- 日単位で、磁気圏相互作用、昇華/凝縮、拡散/衝突/破壊進化する“生きた系”
- 外界からの無数の微隕石衝突でリングは化学/力学進化する。
- リングは拡散し衛星を生む（衛星形成過程の包括的理解に繋がる）
- NASA Cassini のレガシーとしての探査
- 外惑星プログラム探査に資する一翼

Launch 2028, Arrival 2039

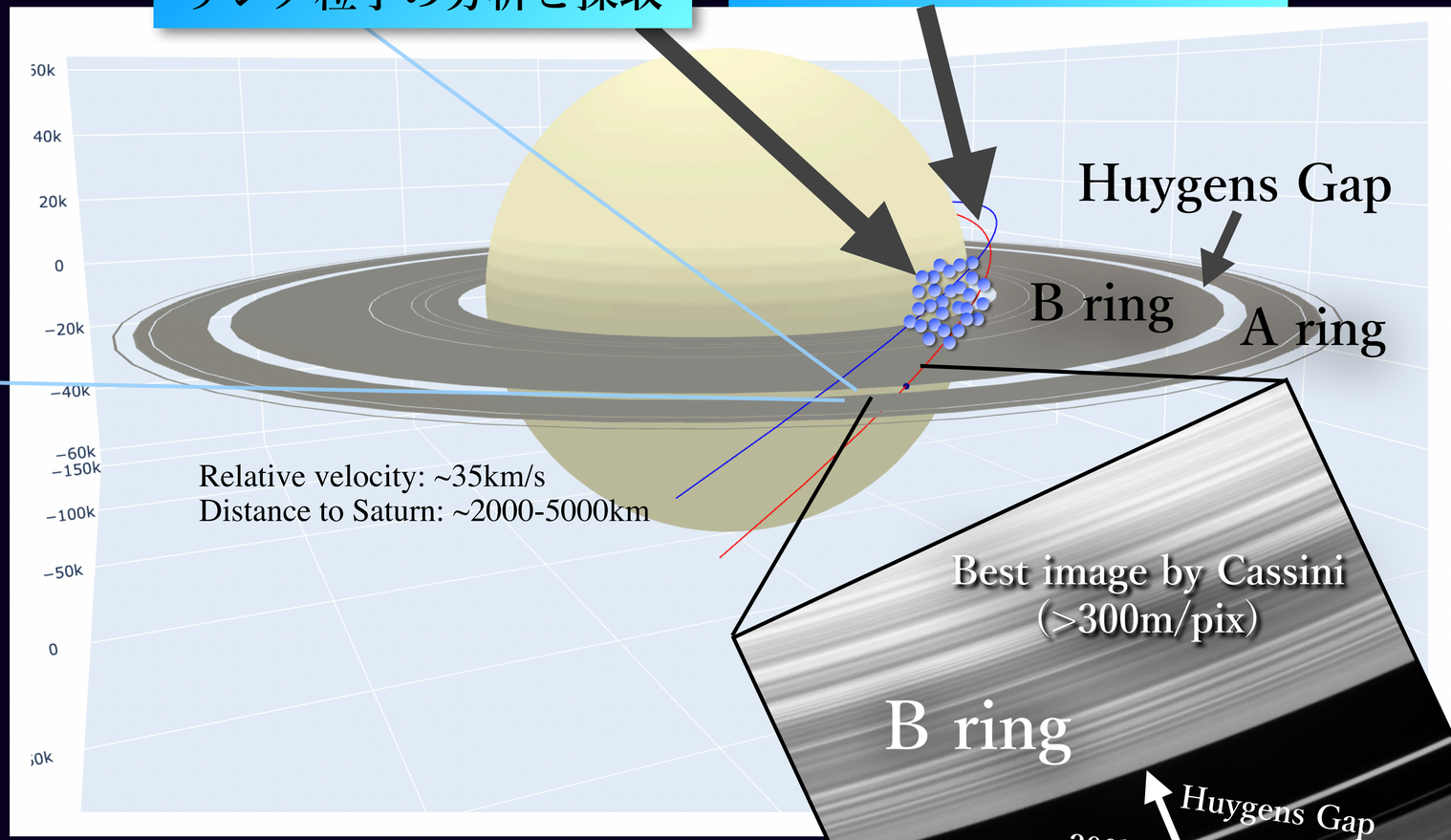
（2028年-地球打上げ, 2029年-地球, 2030年-金星, 2031年-地球, 2034年-地球, 2039年-土星到着）

Nominal Success
土星リングの高解像度撮像



Extra Success 2
リング粒子の分析と採取

Extra Success 1
土星大気の撮像と分光観測



土星円環探査とは,

(1) リングの高解像度撮像

(2) 土星大気の撮像と分光観測

(3) リング粒子の分析と採取

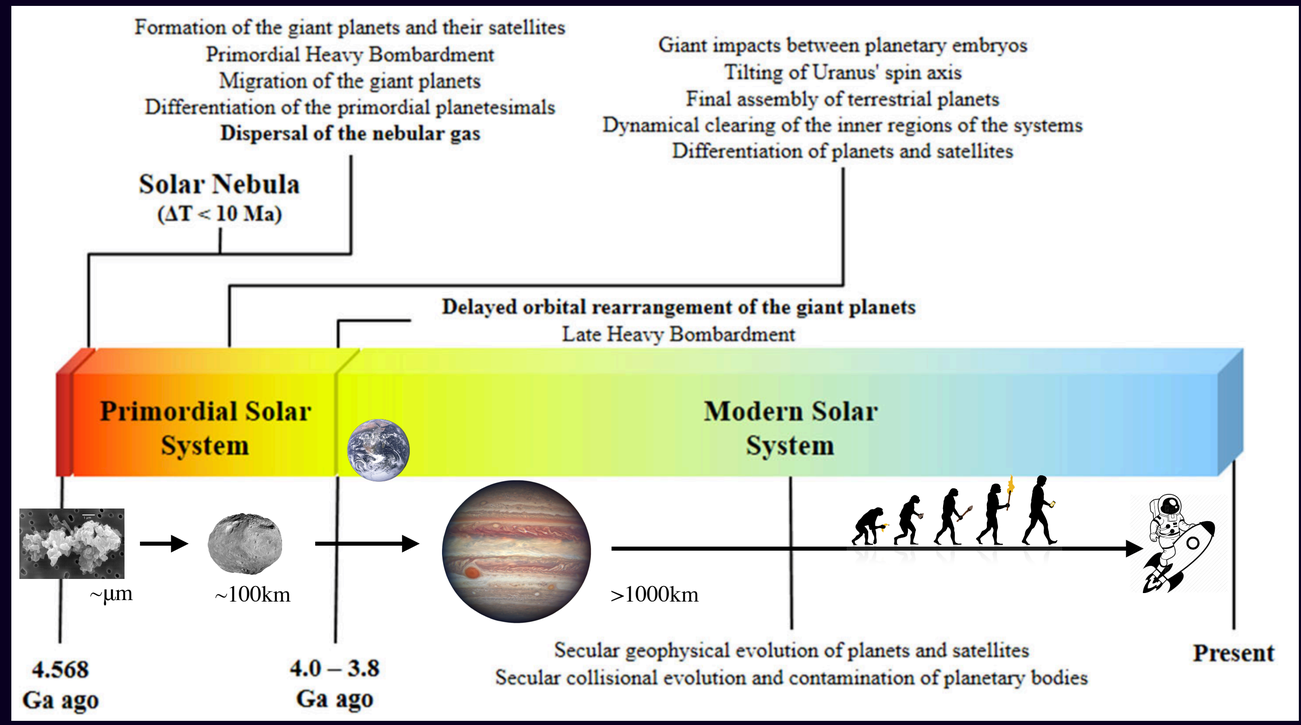
＊ここでの内容は現在進行形の議論なので一例としておく.
(周回軌道への投入解も現在検討している)

太陽系形成の簡単な説明

Solar System History

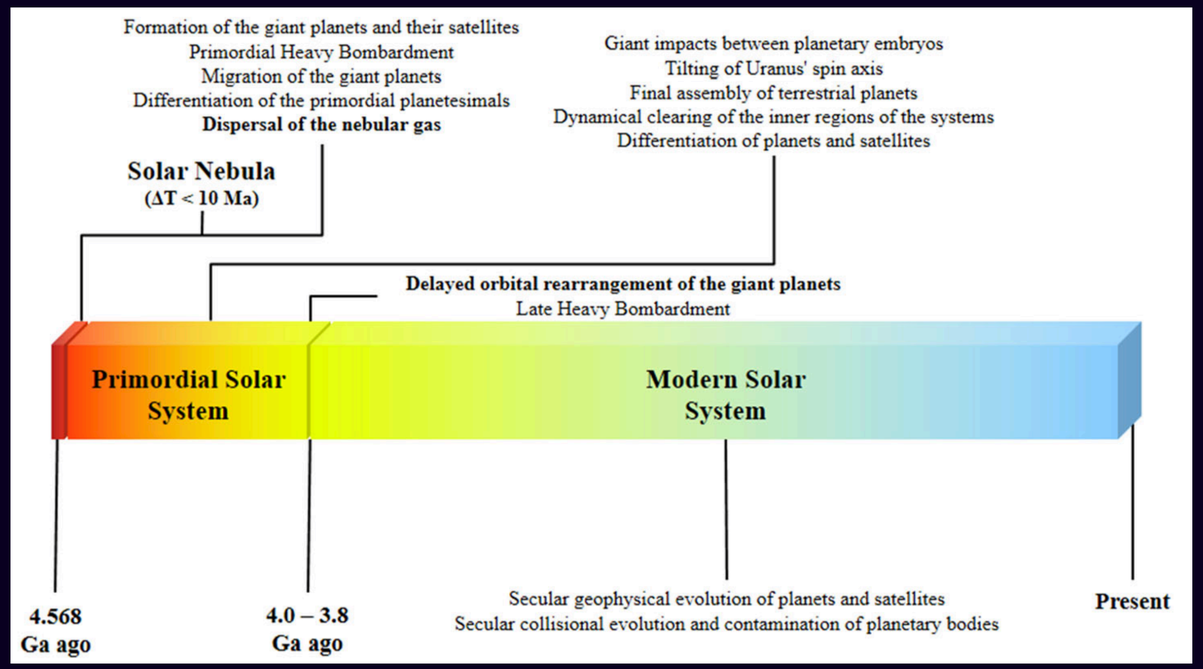
The formation and evolution of the Solar System, chronologically divided into three ages:

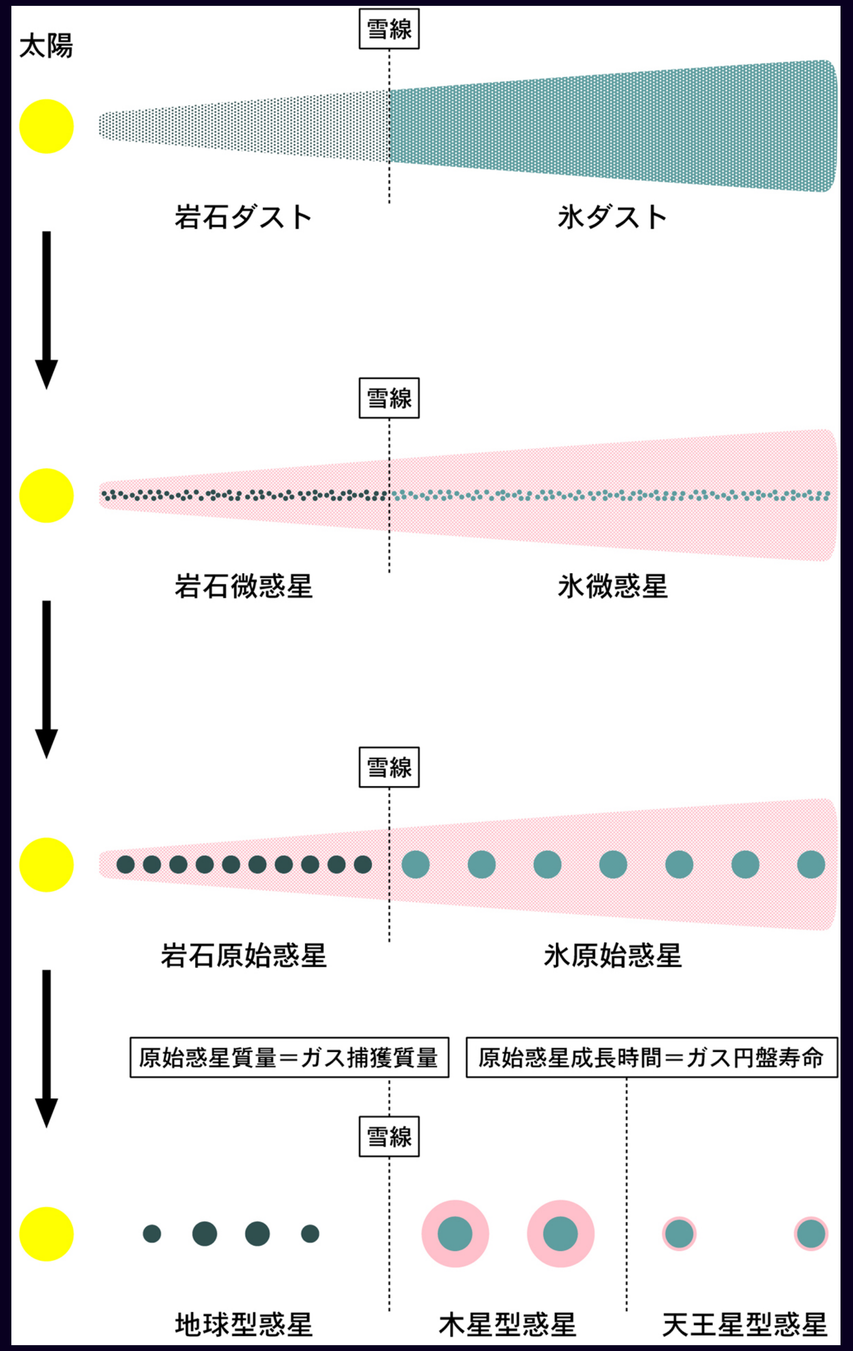
1) The Solar Nebula (first <10 Myr)
   dust → planetesimals
2) The Primordial Solar System (before ~4 Ga)
   planetesimals → planets
3) The Modern Solar System (after ~4 Ga)



modified from Turrini et al. (2014)
©Ryuki Hyodo

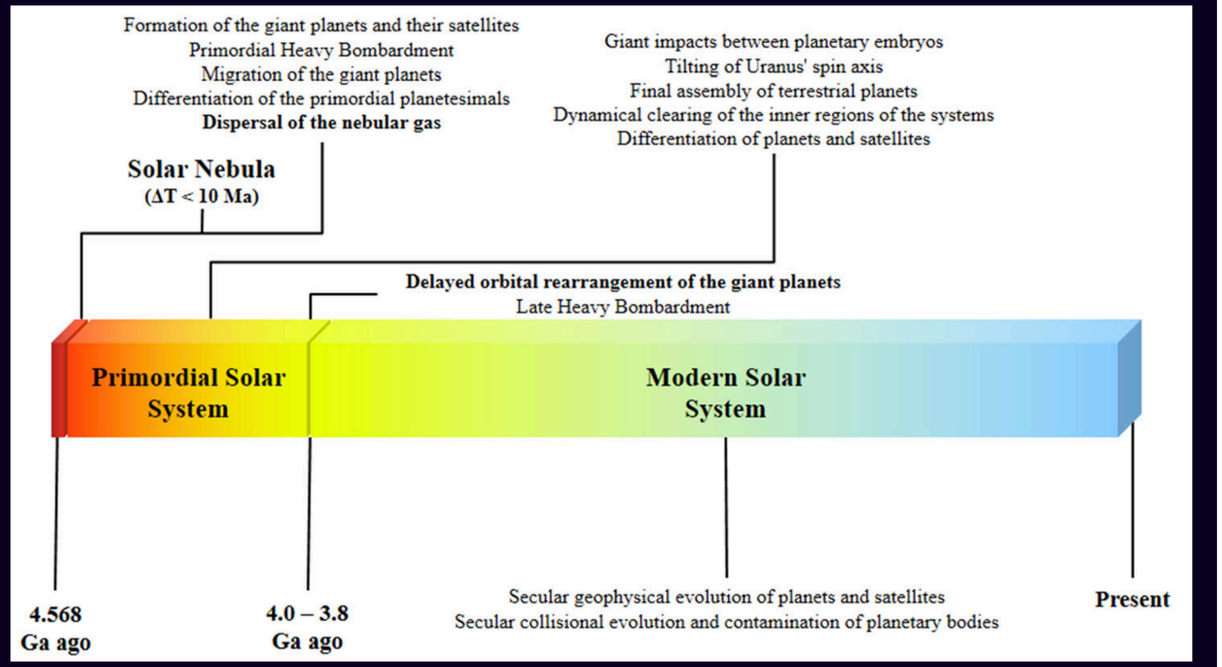
Classical Idea — In-situ

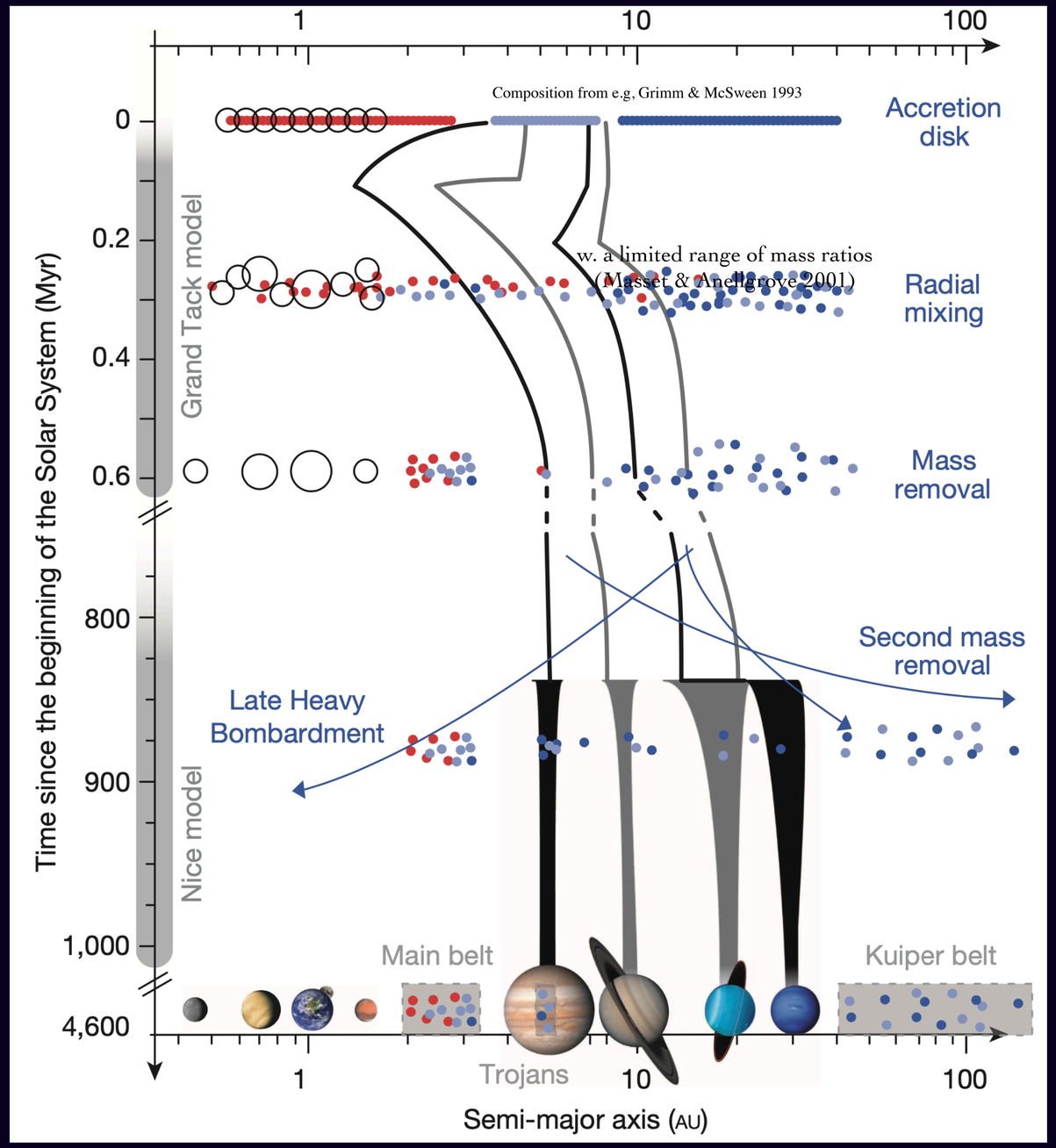




© 理科年表

A Famous Cataclysm





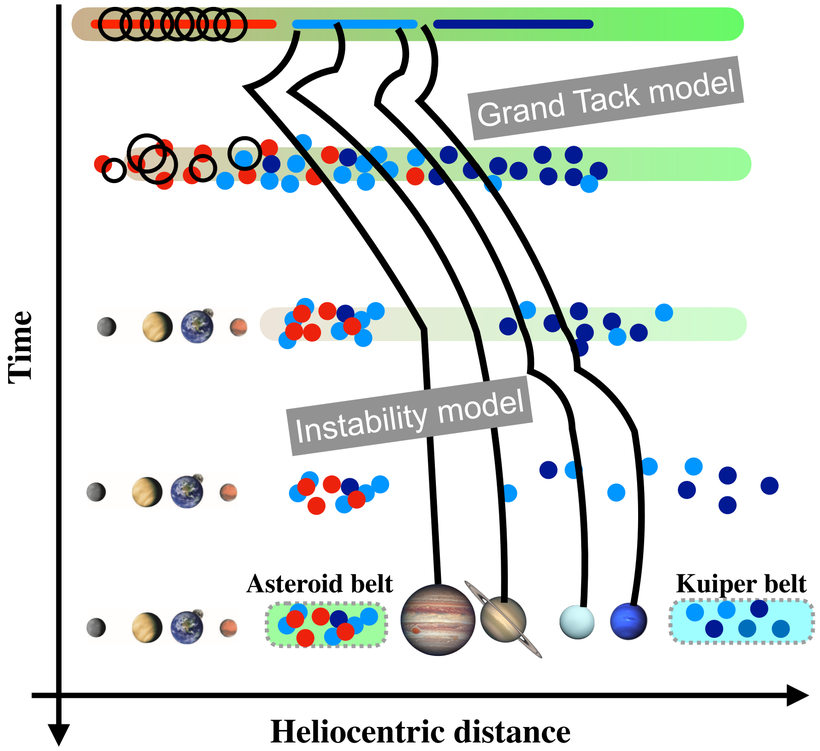
*Just note that this is famous but not certain.

Walsh et al. 2011
DeMeo & Carry 2014

Many Ideas

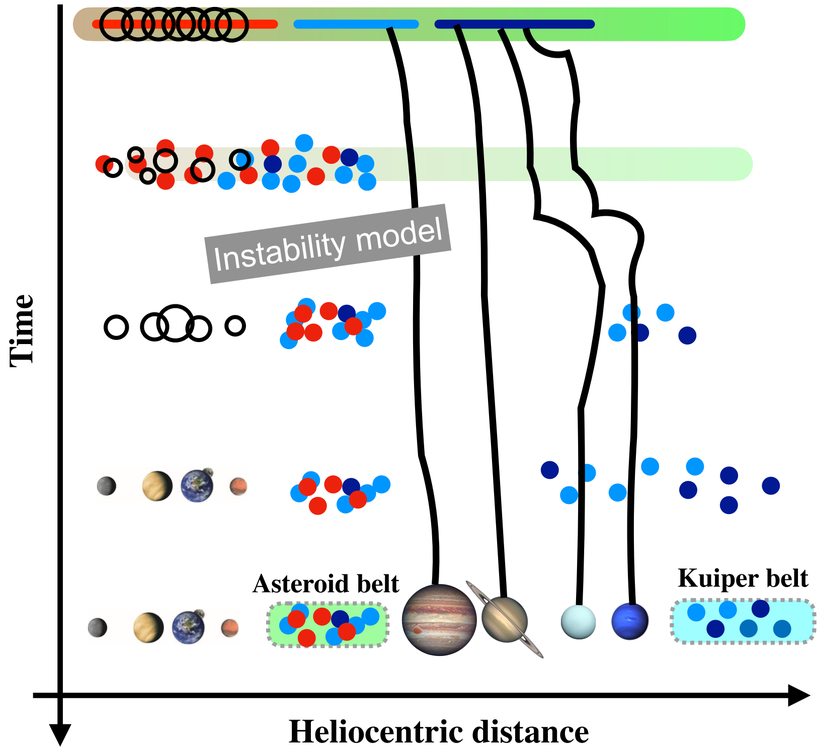
A famous model

Walsh et al. 2011; Gomes et al. 2005;
Morbidelli et al. 2005; Tsiganis et al. 2005



Early Instability

Boehnke & Harrison 2016; Zellner 2017; Morbidelli et al. 2018;
Nesvorný et al. 2018; Clement et al. 2018,2019



Migrating Giants

Pirani et al. 2019;

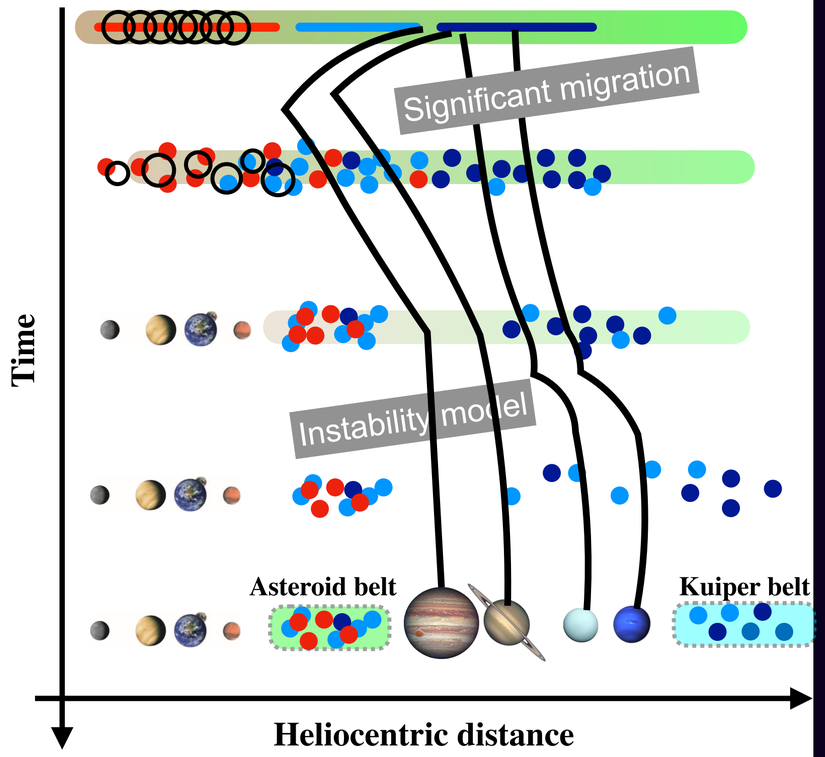
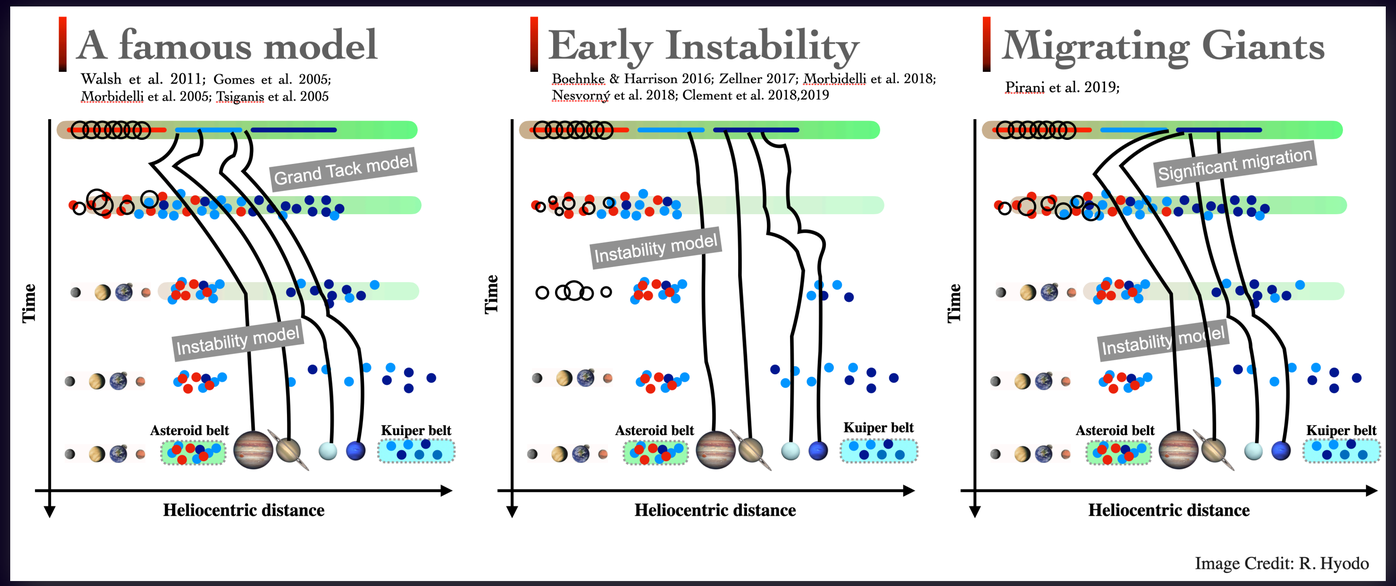
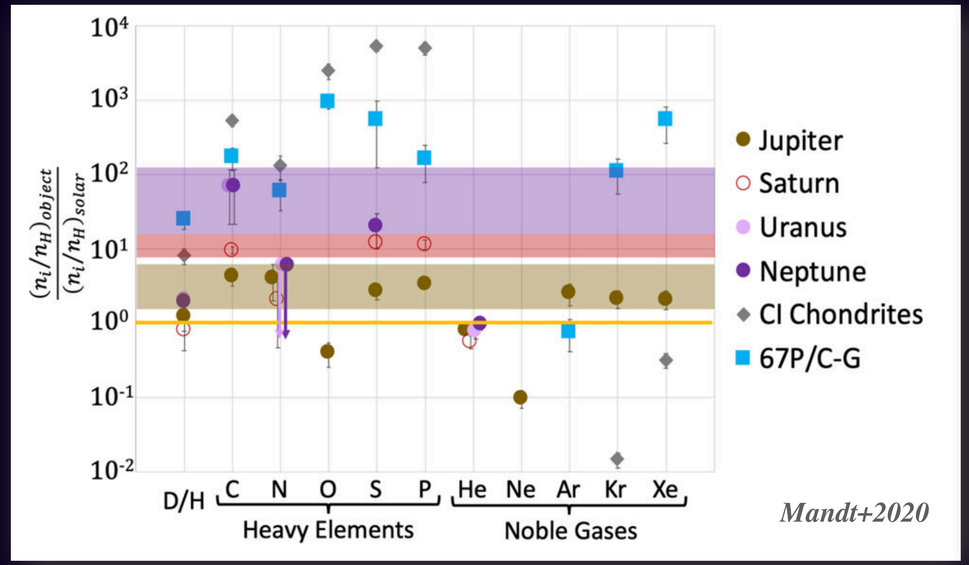
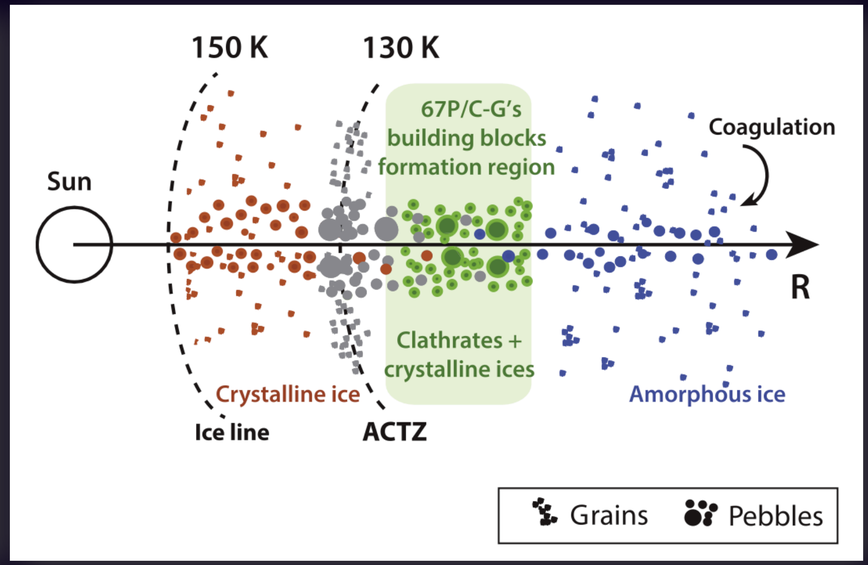


Image credit: R. Hyodo

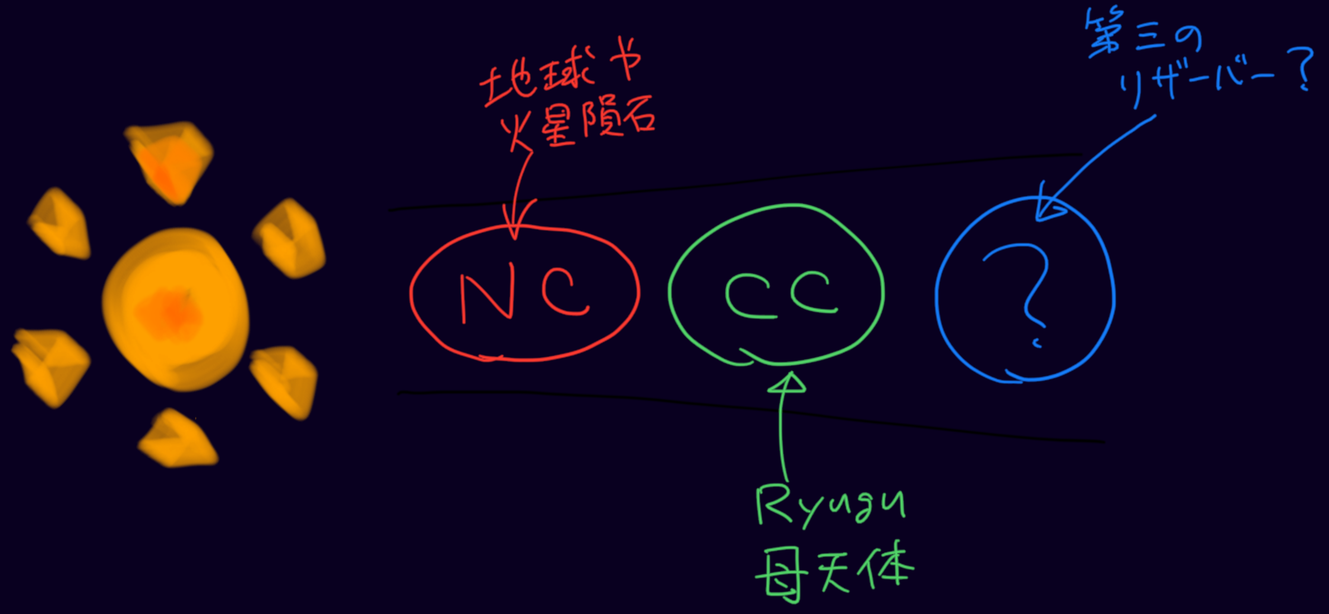
どこでどのように形成されたかで材料物質が異なるだろう





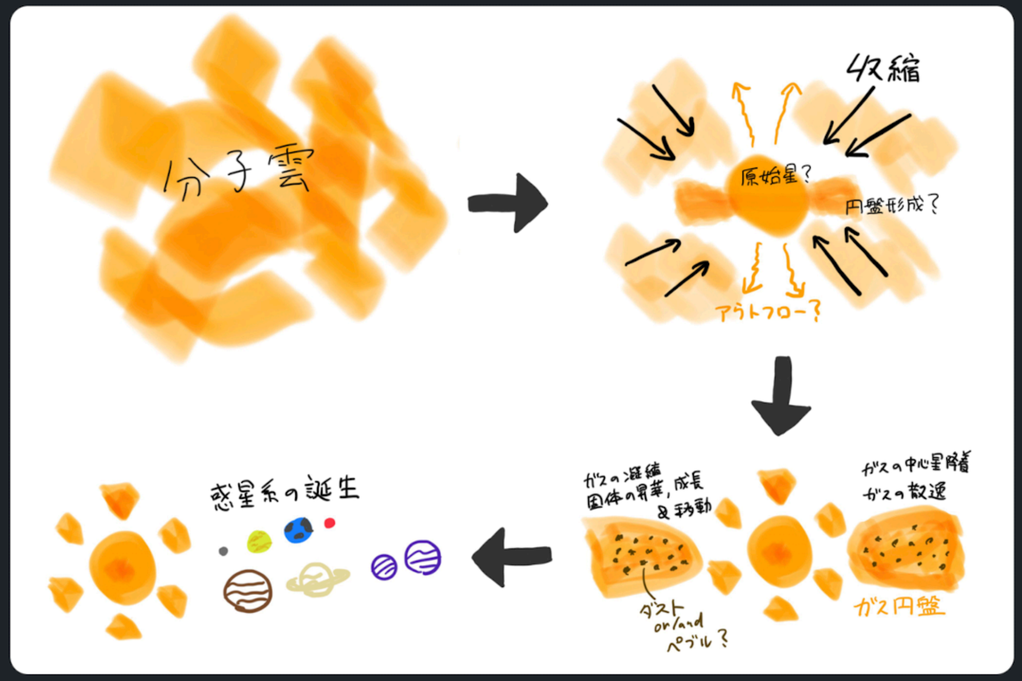


最近は，星形成過程まで遡らないと，“解けない”と思われている．



ISAS（JAXA宇宙科学研究所）
@ISAS_JAXA

JAXA国際トップヤングフェロー・兵頭龍樹（惑星系形成過程の理論研究者）、かく語りき。
「はやぶさ２」が小惑星リュウグウ から持ち帰った試料には、隕石をちゃんと見たこともなかった理論研究者に、研究スタイルを変えてみようと思わせる程のインパクトがあるとのこと。
➡️isas.jaxa.jp/missions/docum...



11:25 · 2023/01/16

73件のリツイート 5件の引用ツイート 359件のいいね

衛星系やリングは,
太陽系の大動乱の副産物として形成されるはず.

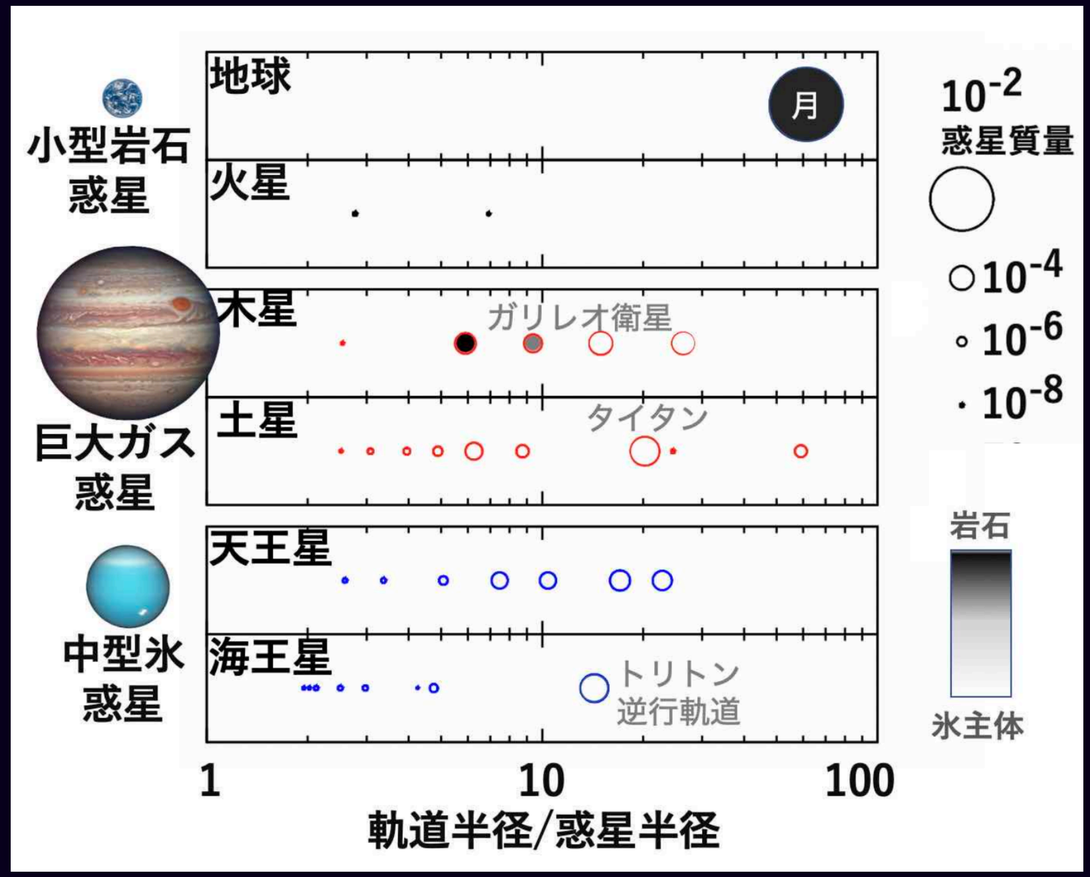
太陽系の多様な衛星系

☑ Regular satellites: ほぼ円軌道、ほぼ赤道面

☑ Irregular satellites: 離心率が非常に大きく、軌道傾斜角もランダム

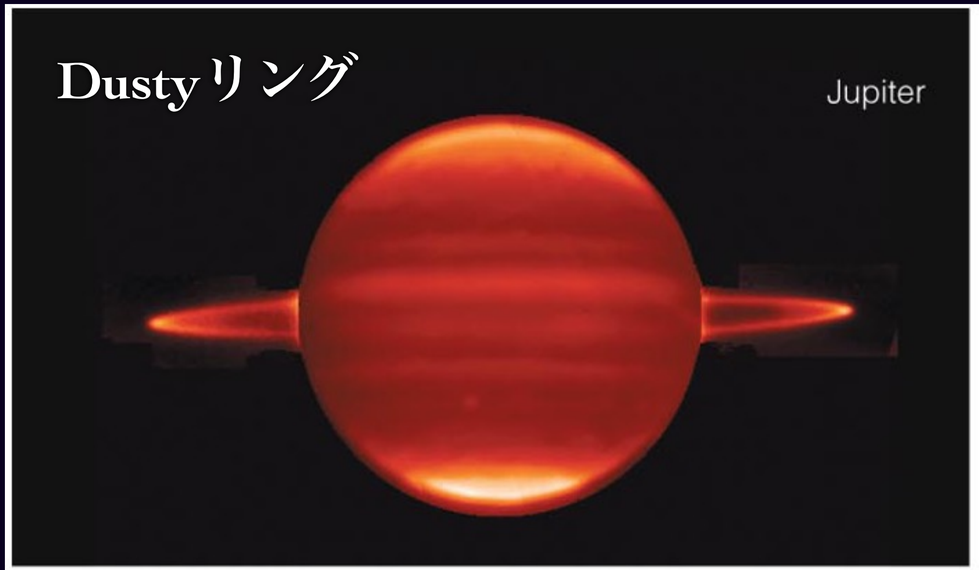
*Moons of planets and dwarf planets.

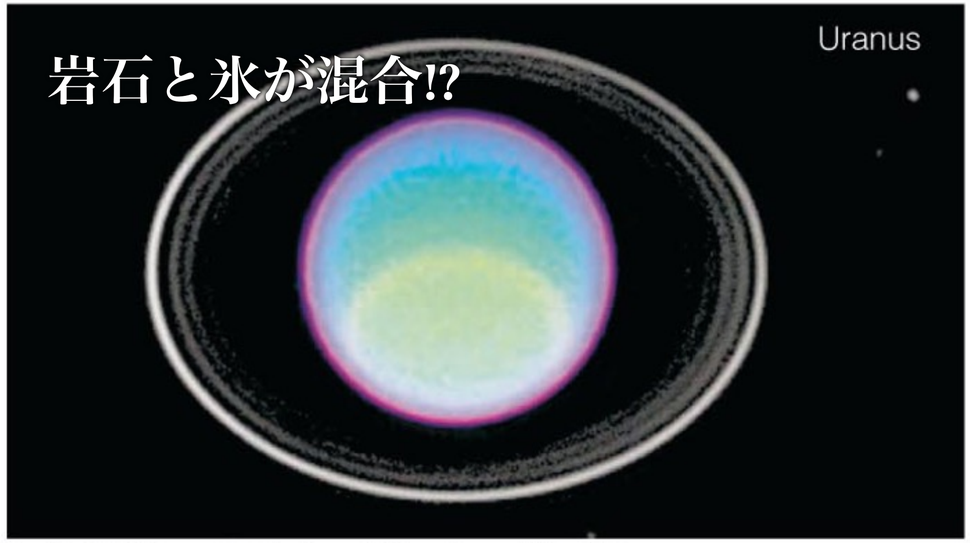
Planet / Dwarf Planet	Confirmed Moons	Provisional Moons	Total
Mercury	0	0	0
Venus	0	0	0
Earth	1	0	1
Mars	2	0	2
Jupiter	53	26	79
Saturn	53	29	82
Uranus	27	0	27
Neptune	14	0	14
Dwarf Planets			
Pluto	5	0	5
Eris	1	0	1
Haumea	2	0	2
Makemake	0	1	1
Ceres	0	0	0
Totals	**158**	**56**	**214***

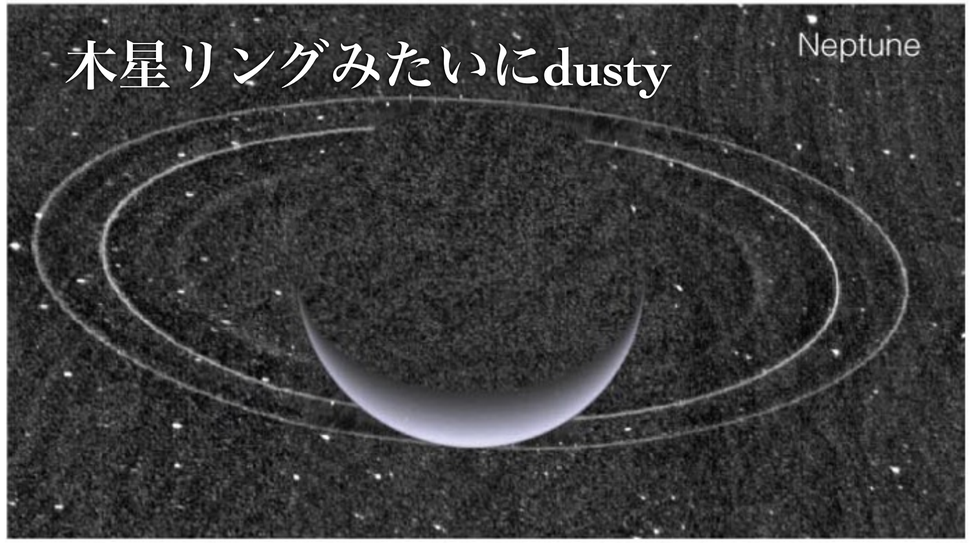


©NASA

Rings around Giant Planets

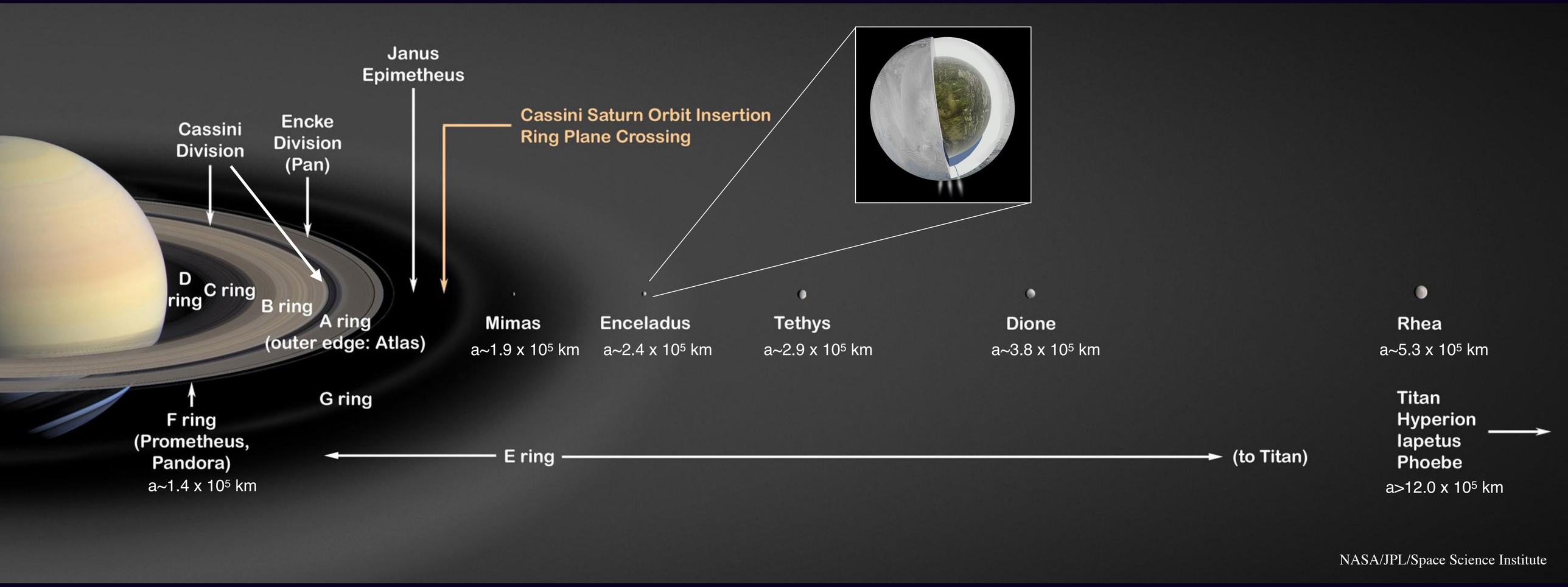






Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

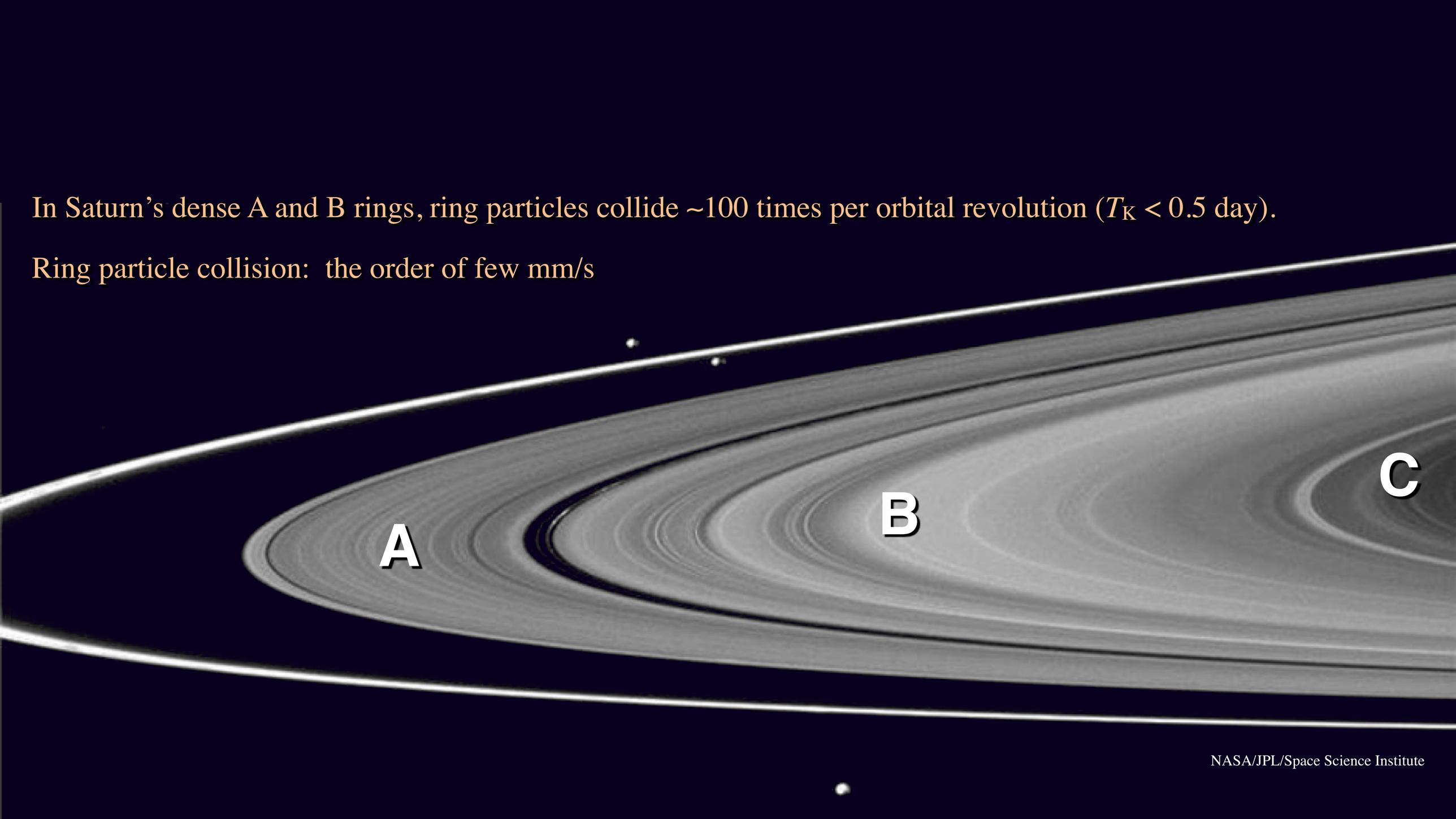
Rings and Moons around Saturn



NASA/JPL/Space Science Institute

In Saturn's dense A and B rings, ring particles collide ~100 times per orbital revolution ($T_K < 0.5$ day).

Ring particle collision: the order of few mm/s



NASA/JPL/Space Science Institute

土星リング-衛星系の３大ミステリー

*独断と偏見による

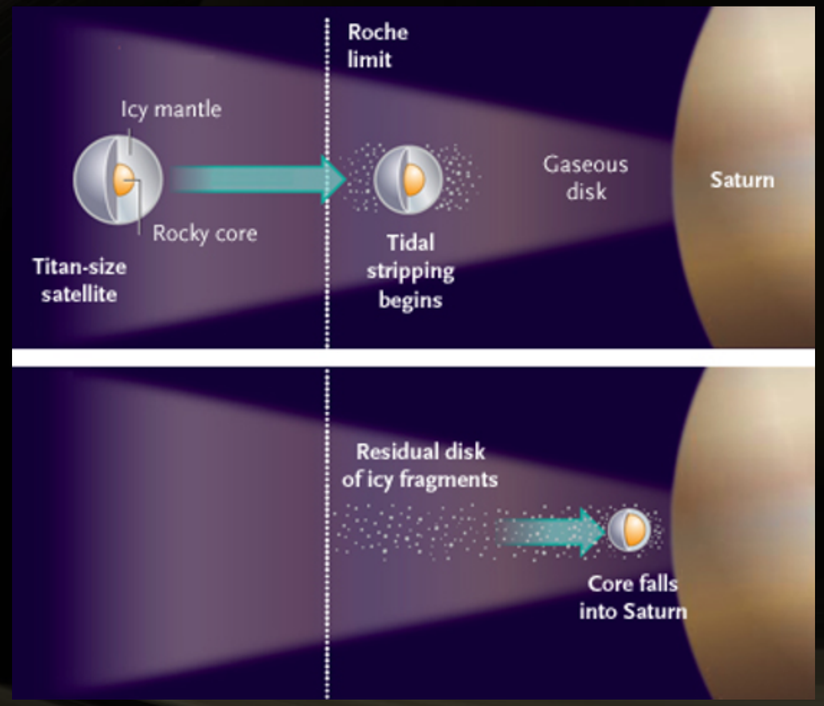
1. リングの起源は？
2. リングの年齢は？
3. リングから衛星が生まれたのか？

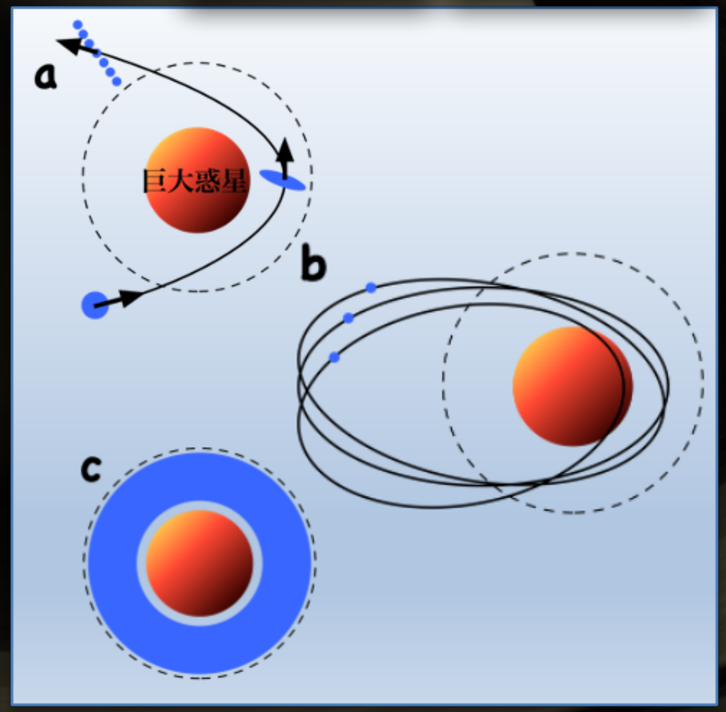
リング起源の論争

巨大衛星落下説 vs 天体近接遭遇説

Canup2010

Hyodo+2017

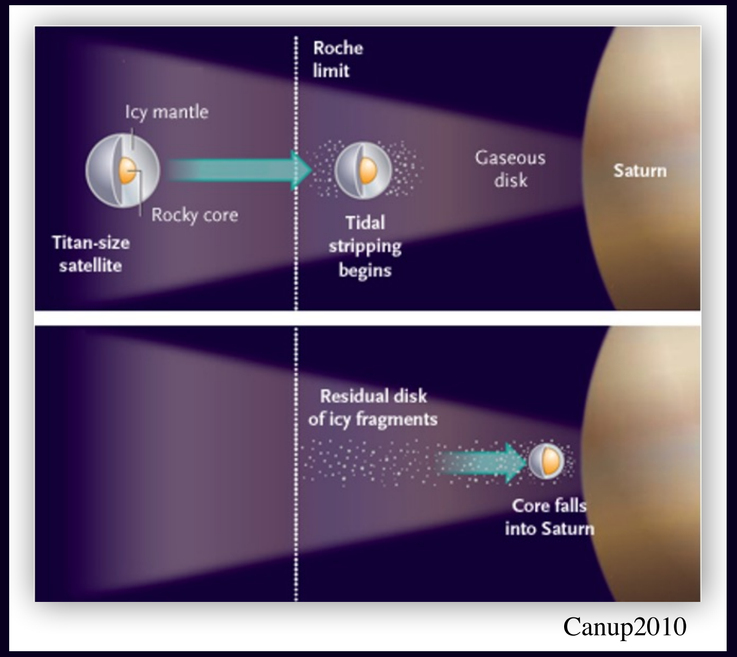




*リングの年齢についても大議論が残っている

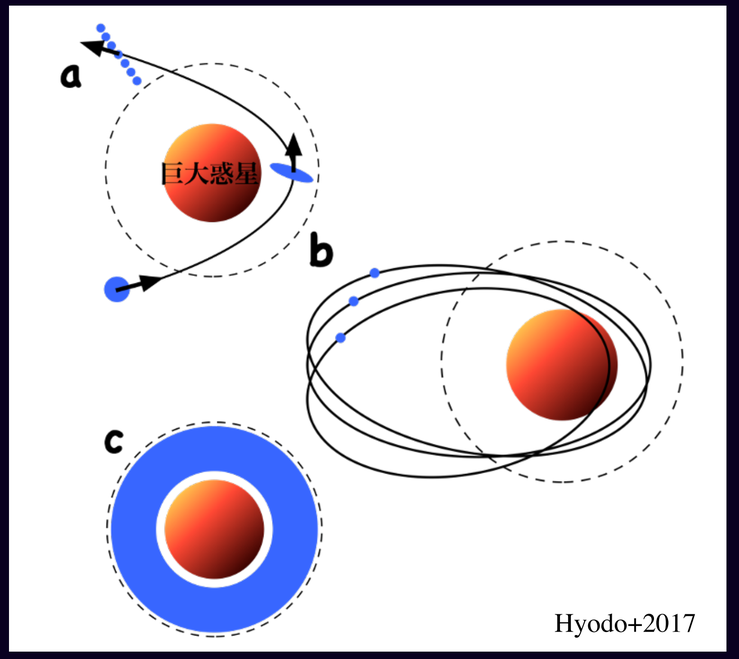
異なる形成論から期待される物質科学的証拠

巨大衛星落下説 vs. 天体近接遭遇説



Canup2010

- タイミングとしては、周太陽ガス散逸前
  （CAI形成後の最初の ~few Myrs）
- 周惑星円盤の高温を経験している可能性がある
  （そうすると, そもそも氷成分を持てないかも）
- 材料物質としては、土星を形成する物質に“リンク”するはず

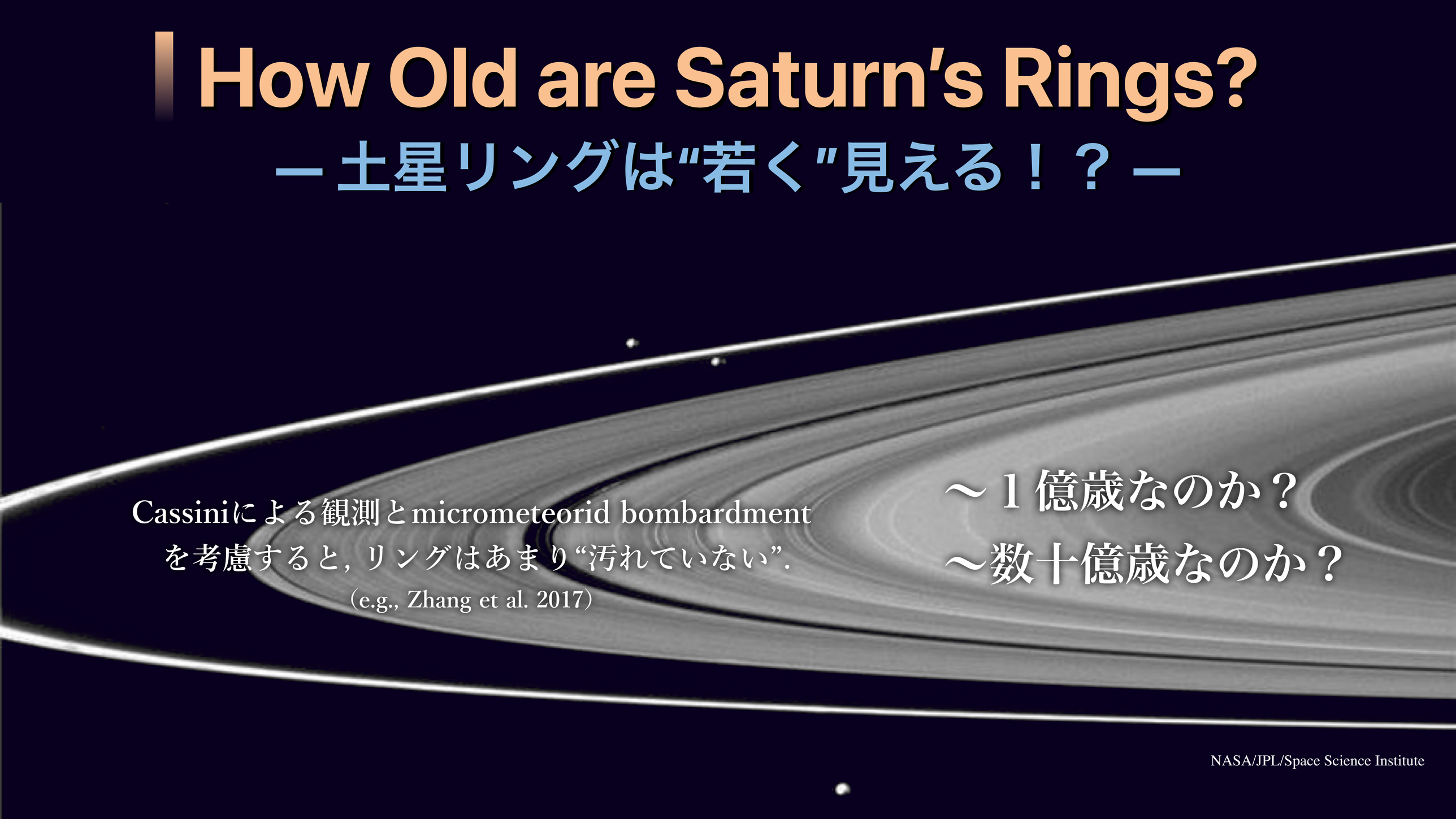


Hyodo+2017

- 巨大惑星の migration の時に起こる可能性が高い
  (35億年前までが確率が高そう)
- 本モデルで経験する温度情報は, 未解明
  （低温過程の可能性が高いが, 詳細な検証が必要）
- 材料物質としては、飛んできた天体の一部

How Old are Saturn's Rings?

ー土星リングは"若く"見える！？ー



Cassiniによる観測とmicrometeorid bombardment
を考慮すると，リングはあまり"汚れていない".
（e.g., Zhang et al. 2017）

～１億歳なのか？
～数十億歳なのか？

NASA/JPL/Space Science Institute

How Old are Saturn's Rings?

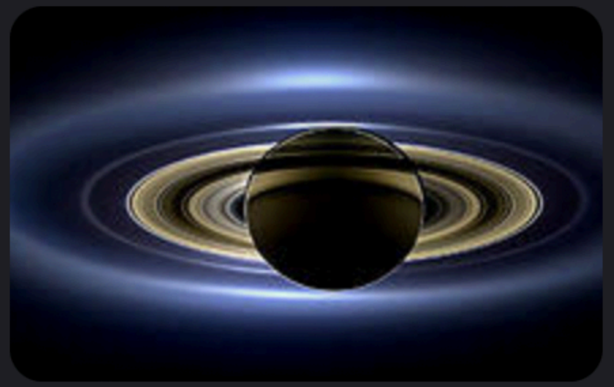
Google

How old are Saturn's rings?

すべて　画像　ニュース　ショッピング　動画　もっと見る　ツール

約 21,500,000 件　(0.54 秒)

between 10 million and 100 million years old



They have been considered to possibly be very old, dating to the formation of Saturn itself. However, data from Cassini suggest they are much younger, having most likely formed within the last 100 million years, and may thus be **between 10 million and 100 million years old**.

https://en.wikipedia.org › wiki › Rings_of_Saturn

Rings of Saturn - Wikipedia

Are Saturn's Rings Young or Old?

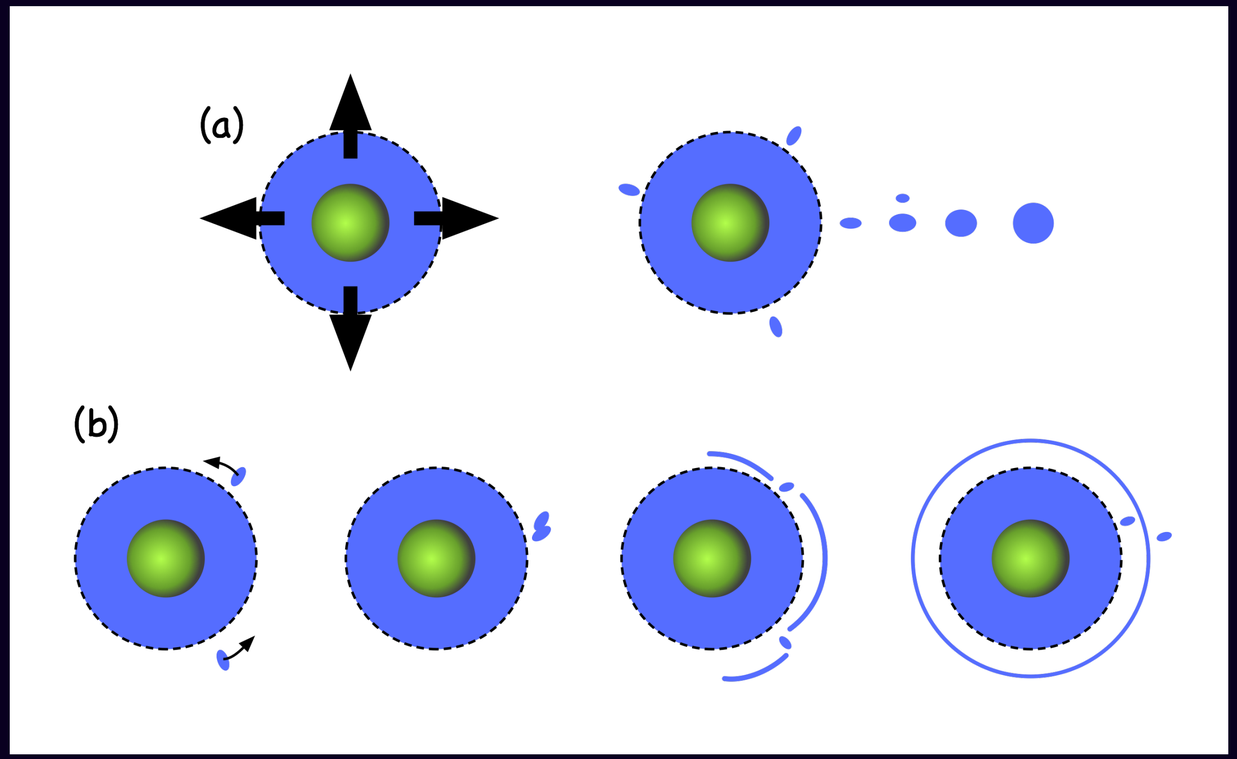
The Cassini spacecraft estimated that Saturn's rings are no more than

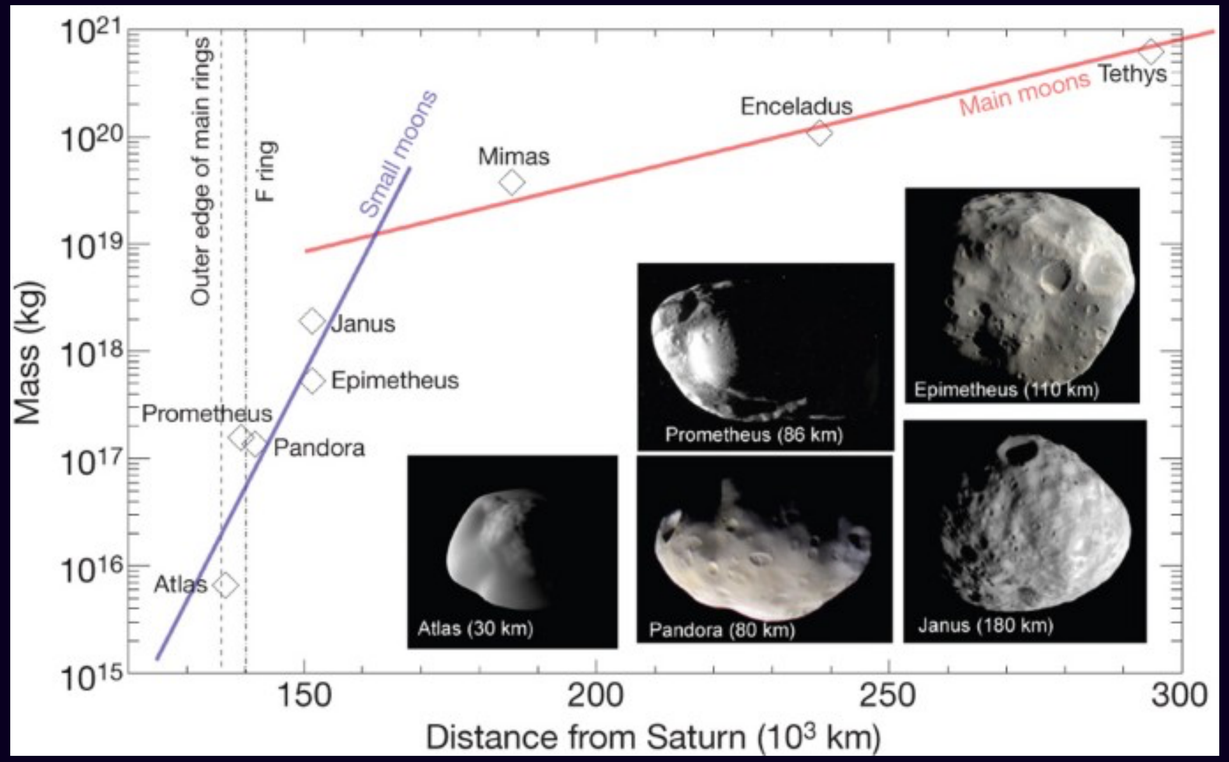
He and other skeptics have pointed out that there are a lot of potential problems with the argument, from the physics of the ring pollution to the origins of the rings themselves. "~~The rings~~ They look young, but that doesn't mean ~~the rings~~ They are really young," said Ryuki Hyodo, a planetary scientist at the Japanese Aerospace Exploration Agency. "There are still some processes that we are not considering."

Meteoroidal impact flux at Saturn per unit area/time (observation)

Total mass of non-icy materials in the rings (observation)

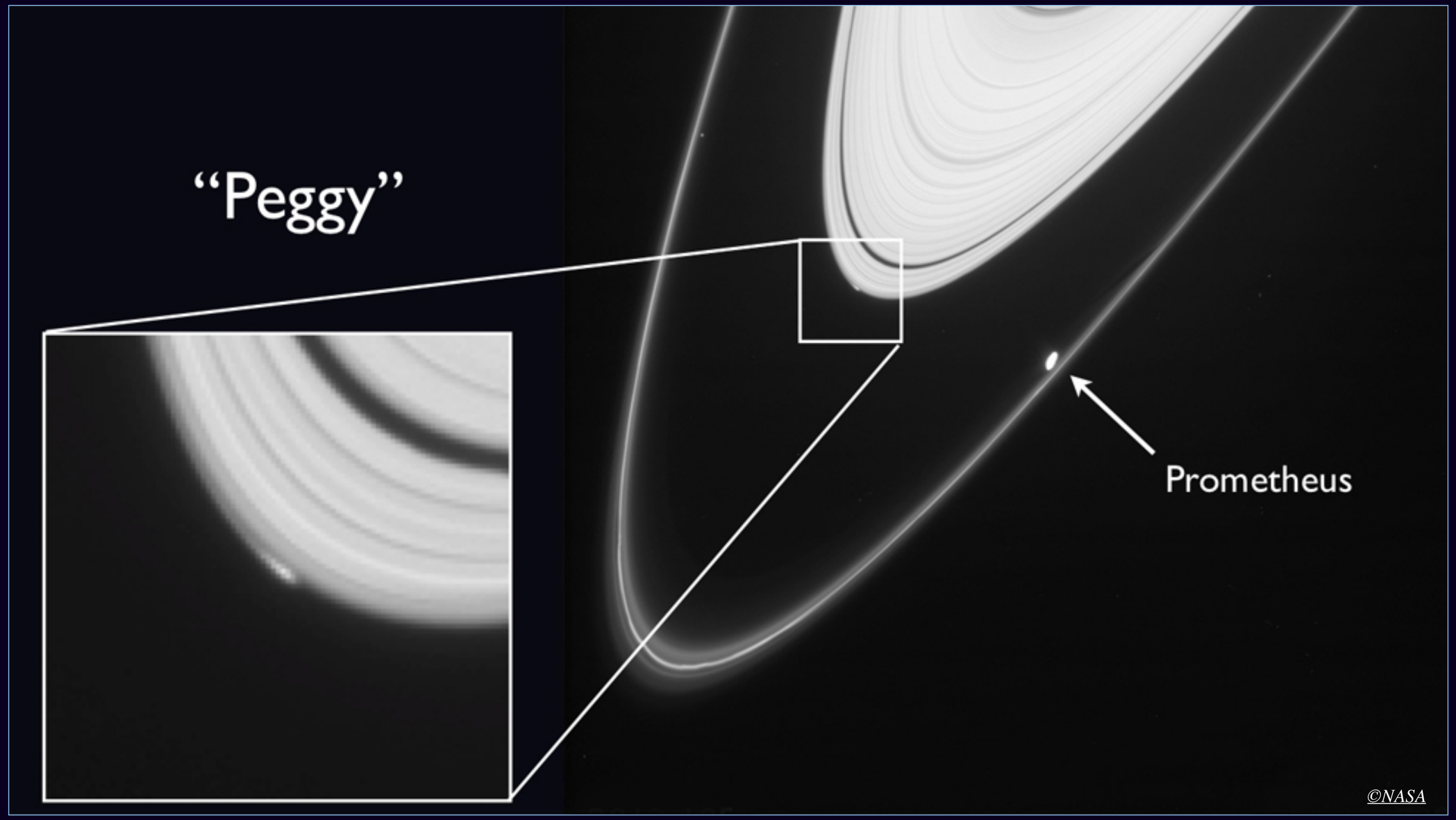
リングの“染み出し”で衛星ができる？





Charnoz+2010, *Nature*
Crida & Charnoz 2011, *Science*
Hyodo+ 2015, *Nature Geo*

今でも“染み出し”が起きている？



リング-衛星系の起源/進化解明の波及効果

例として, 土星系に注目すると

1. リングの起源は？年齢は？

- 周惑星円盤内での潮汐破壊説（太陽系形成から10Myrまで; Canup 2010）
  → 太陽系原始惑星系円盤の描像と巨大惑星の形成過程の理解に波及
- 近接遭遇天体の潮汐破壊説（~35億年前までが高確率!?; Hyodo+2017）
  → 太陽系cataclysmの制約と外縁天体の輸送過程の理解に波及
- ~1億年前の衛星の衝突/潮汐破壊説（Wisdom+2022; Cuk et al. 2016; Hyodo & Charnoz 2016）
  → 惑星-衛星間の軌道共鳴史や衛星系の力学進化史の理解に波及

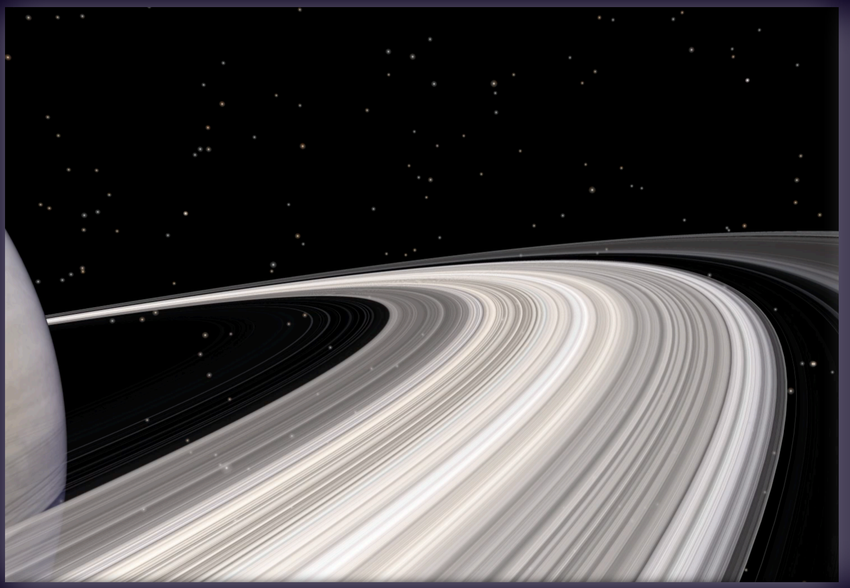
2.（Titanより内側の）順行衛星系の起源と進化は？

- 太古の大質量リングからの拡散説（Charnoz+2010; Crida & Charnoz 2012; Hyodo & Ohtsuki 2015）
- 原始衛星の力学進化と衝突/潮汐破壊説（Wisdom+2022; Hyodo & Charnoz 2016; Cuk+2016）
  → 拡散現象, または, 共鳴, 3体相互作用の一般理解へ繋がる.
  → 系外惑星を含めた内部海を持つ衛星系の形成可能性の一般理解へ繋がる.

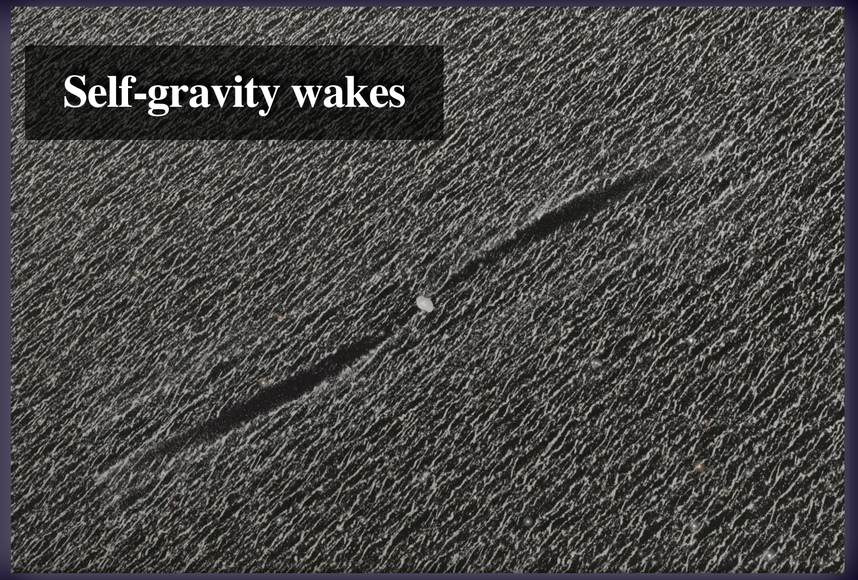
How much do we know? ... as of 2022

Achieved

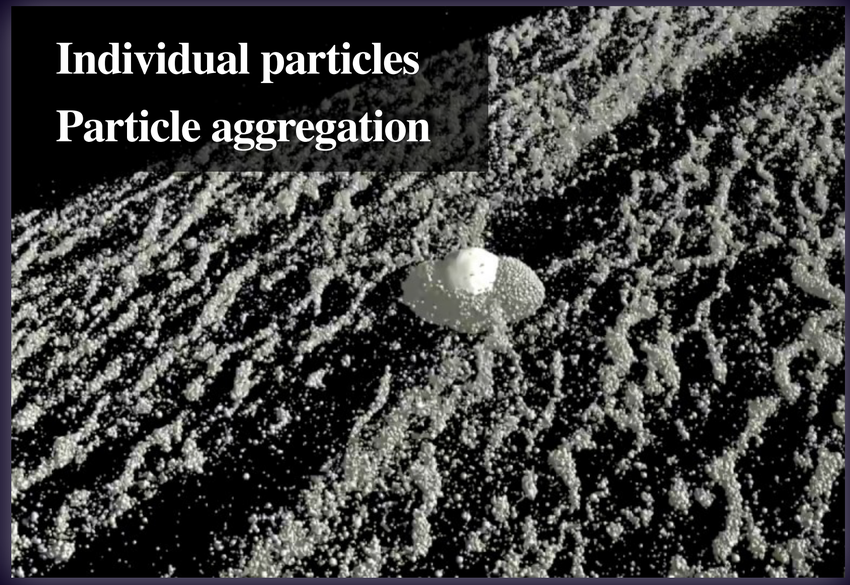
Has not been reached



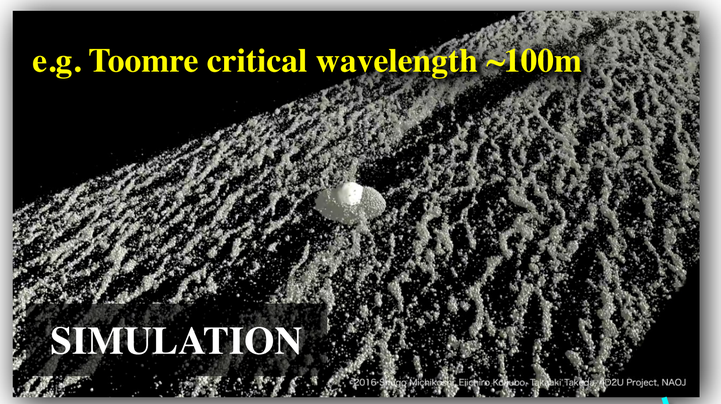
pixel scale
>100m



pixel scale
~m



pixel scale
~cm

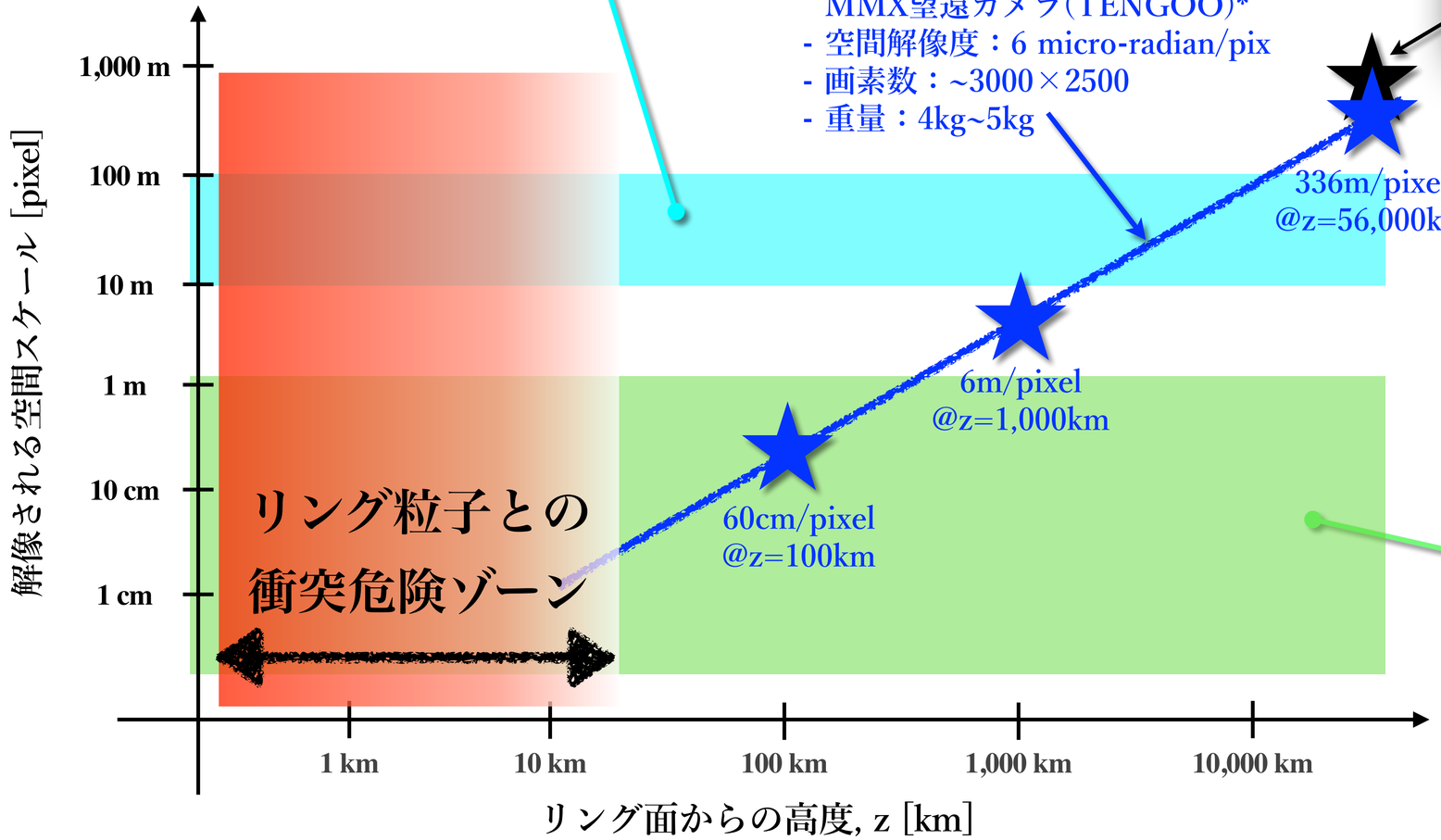


サイエンス１
- 10-100 m/pixel resolution
- self-gravity wakes
- large-scale aggregations (~100m)

MMX望遠カメラ(TENGOO)*
- 空間解像度：6 micro-radian/pix
- 画素数：~3000×2500
- 重量：4kg~5kg

*相対速度に注意
(視線方向と直交する成分画像内を動く速度)
集光に~10msかかる.
→ 10km/sで10msで100mぶれる.

2桁くらいは改善の余地あるかも.
→相対速度10km/sで1m/pixの分解能を達成かも
(e.g., Comet Interceptor)



粒子サイズ：cm~m

サイエンス２
- ~cm/pixel(or ~1m/pixel) resolution
- a large individual particle (~m)
- particle size distribution (~cm)
- small-scale aggregations (<m)

シミュレーションによる予想
(~10-100 m/pix)

目標３
Propeller moon (~100m)

Cassiniによる
最高解像度の撮像
(>300m/pix)

シミュレーションによる予想
(~10-100 m/pix)

目標１
Self-gravity wakes (~100m)

Orbital Motion

Saturn

Self-Gravity Wake

A Ring

F Ring

E Ring

Atlas

Epimetheus

Pandora

Daphnis

Pan

Enceladus

目標２
最大級サイズの粒子

シミュレーションによる予想
(<10 m/pix)

目標１：Self-Gravity Wakes

(構造スケール：~100m)

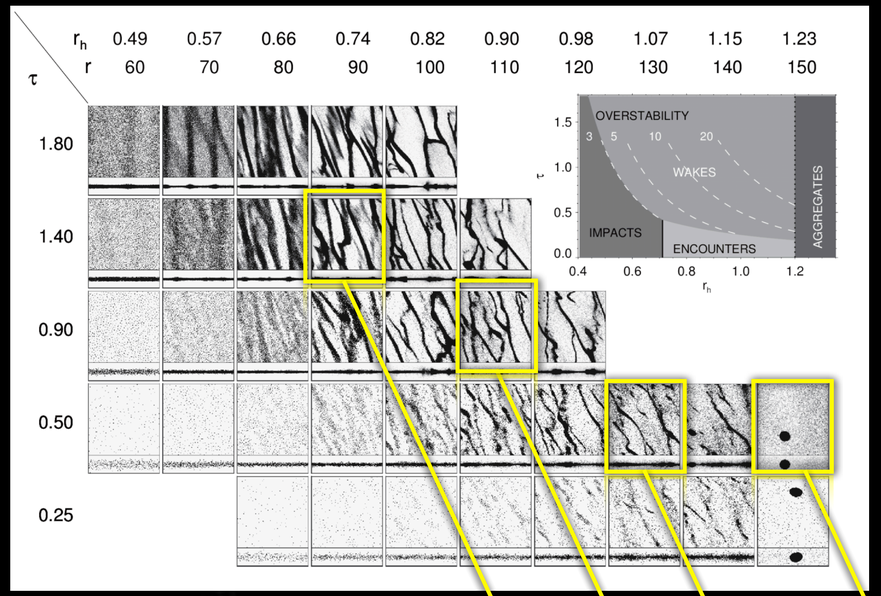
探査機は, 動径距離が14万キロから8万キロをスイープする軌道を狙う.
このとき, リング面からの高度は, 6000kmから1000kmまでと単調減少する.
スイープしながら異なる動径距離で最低10枚ほどの撮像をする.

衝突速度：~20-30 [km/s] 望遠カメラ（TENGOO）
空間解像度：6 micro-radian/pix
画素数：3296×2472
重量：~6.1kg

要求最低視野：縦10km 横10km.
要求される解像度：~10-100m/pix.
(相対速度~15-20km/s. 必要な電力は撮像時で~15W)

波及効果

Self-gravity wakesは土星円環の拡散係数を支配するものであり, その理解の深化は, 我々の多体問題系の素過程の理解だけでなく, 土星円環がどのように拡散し, 周囲に衛星を形成してきたのかという理解に直接的に繋がる.



シミュレーションからの期待

Salo 2012, Salo+2018

Self-gravity wakesの構造は,
土星からの動径距離や
その場所での粒子面密度に依存する.

また, 構成粒子のサイズ分布,
衝突特性などにも強く依存する.

A ring

目標２：最大級サイズの粒子の撮像

(最大粒子サイズ~10m)

最大級サイズの円環粒子（~10m）の直接撮像を目指す. カッシーニによるAリングの掩蔽観測などによって, ~10mサイズの円環粒子は, 1km^{2}に~1個以上あると見積もられている.

望遠カメラ（TENGOO）
空間解像度：6 micro-radian/pix
画素数：3296×2472
重量：~6.1kg

要求最低視野：縦1km × 横1km以上.
要求される解像度：~10m/pix（リングまで~1,000kmまで近づく）
（相対速度~15-20km/s. 必要な電力は撮像時で~15W）

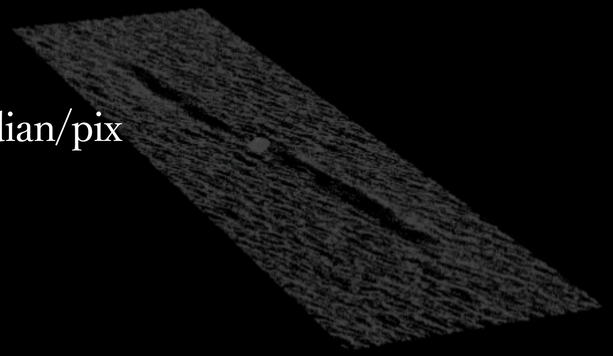
<u>波及効果</u>

観測から得られるデータは, 土星円環粒子の衝突・集積特性を明らかにし,
モデル研究の発展とともに, 土星円環の起源に波及できる可能性がある.

目標３：Propellers and Moons

(moon size：~30m)

プロペラ構造は, カッシーニ探査によって, Aリング中心付近に~1×10^{-3} [個/km^2]程度で存在すると見積もられている. この数密度のプロペラ構造は, その中心に小衛星(~30m)が存在することで形成されると理論モデルと数値シミュレーションから示唆されている.



望遠カメラ（TENGOO）
空間解像度：6 micro-radian/pix
画素数：3296×2472
重量：~6.1kg

要求最低視野: 縦30km × 横30km以上
要求される解像度: ~10-30m/pix（リングまで~1,000kmまで近づく）
(相対速度~15-20km/s. 必要な電力は撮像時で~15W)

<u>波及効果</u>

本ミッションで小衛星を初めて直接撮像することで, 粒子多体系での重力相互作用理論の理解を深めることを目指す. また, 円環粒子の衝突・集積特性の理解に繋げる.

エクストラサクセス１

衛星Atlasの詳細観測

衛星サイズ：40.8 × 35.4 × 18.8 km

これまでの最高解像度撮影：>100m/pix（Cassini ISSで16,000kmから撮影）

望遠カメラ（TENGOO）

空間解像度：6 micro-radian/pix

画素数：3296×2472

重量：~6.1kg

要求最低視野: 縦50km × 横50km以上

要求される解像度: ~10-30m/pix（アトラスまで~1,000kmまで近づく）

（相対速度~15-20km/s. 必要な電力は撮像時で~15W）

<u>波及効果</u>

アトラスの形状の起源として, (1) 内部にコアを含む, または(2) 内部コア無しで, porocityの高い二天体が衝突した, ものが提案されている. 衛星のより詳細な形状と構造の理解は, リング内に存在する衛星の集積過程の理解に繋がる.

エクストラサクセス２

“円環粒子壁”の横からの初撮像

Bリング外端に存在する“円環粒子壁”の構造形成は, 円環力学の謎の一つである. 土星円環は, 平均的にその厚みが,
円環粒子間の重力と衝突が釣り合った結果, ~10m程度である. しかし, この円環粒子壁は, ~数kmの厚みを局所的に持つ.

Comet Interceptorで開発されている広角カメラ(WAC)
空間解像度：~0.77 mrad/pix画素数：~2048 × 2048
質量：~1kg
要求最低視野: 縦10km x 横10km以上.
要求される解像度: <km/pix (粒子壁まで~1000kmに近づく)
(相対速度~15-20km/s. 必要な電力は撮像時で~3W)

<u>波及効果</u>

粒子壁の厚み方向を初めて直接撮像し, その詳細な構造を明らかにすることで, その形成メカニズムの理解に繋げる.
それは未だ我々の知らない拡散物理が反映された構造なのかもしれない. 原始惑星系円盤のギャップ構造に波及するかも.

エクストラサクセス３

Roche Division に存在する粒子の分析

Roche Division の光学的厚みは~10^{-4}程度と見積もられている(Chancia et al. 2019).
最大粒子サイズは, 100μmである(Headman et al. 2009). サイズ分布には大きな不定性がある
(特に, >10μmでよく理解されていない). ある粒子サイズを仮定すると以下のようになる(密度1,000kg/m^{3}を仮定):

単位面積あたりの衝突総回数： $N_{\mathrm{col,tot}} \sim 10^4 [\mathrm{m}^{-2}] \left(\frac{r_\mathrm{p}}{100\,\mu\mathrm{m}} \right)^{-2}$

単位面積あたりの衝突総質量： $M_{\mathrm{col.tot}} \sim 0.04 [\mathrm{g/m}^2] \left(\frac{r_\mathrm{p}}{100\,\mu\mathrm{m}} \right)$

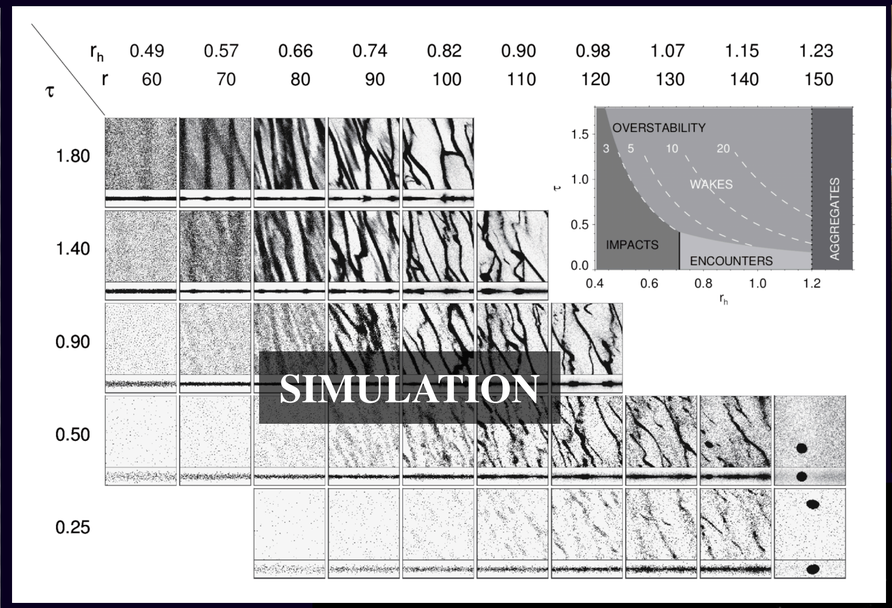
衝突速度：~20-30 [km/s]

現状, 分析装置は未決定 (ペイロード的にも既に厳しい).
また, ダスト衝突は探査機破壊のリスクという側面も持つ (安全面での対応が必要).

What Do Ring Particles Look Like!?

NO ONE has ever seen before!!

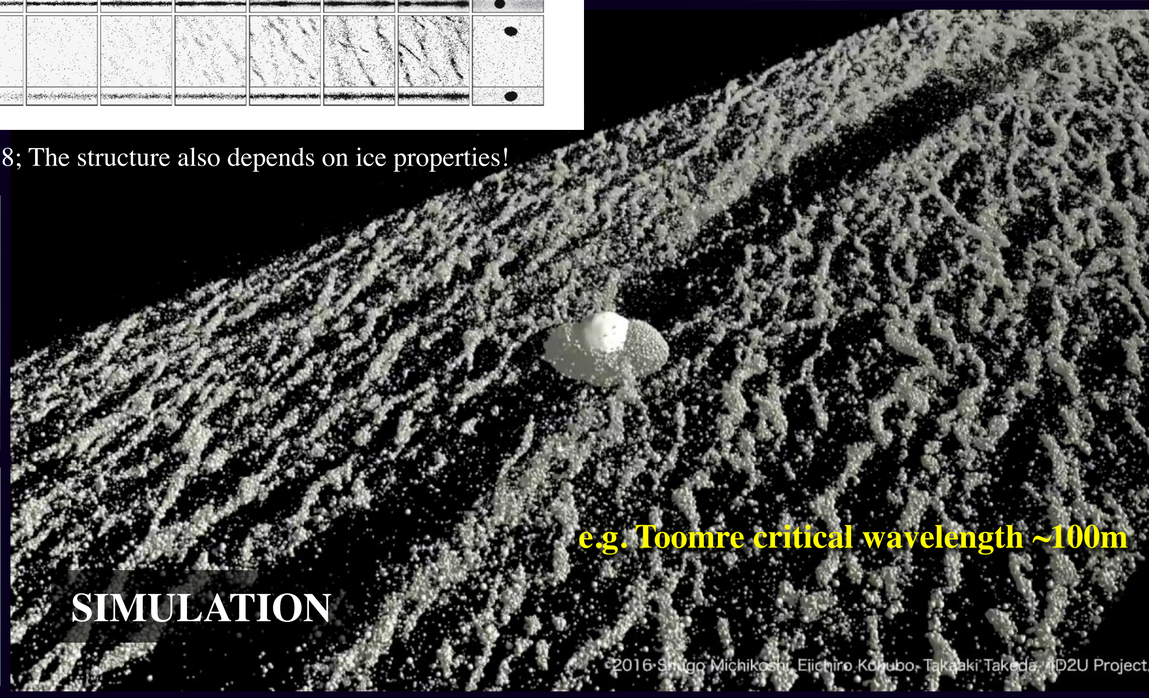
~BEST IMAGE



SIMULATION

Salo 2012, Salo+2018; The structure also depends on ice properties!

IMAGINARY



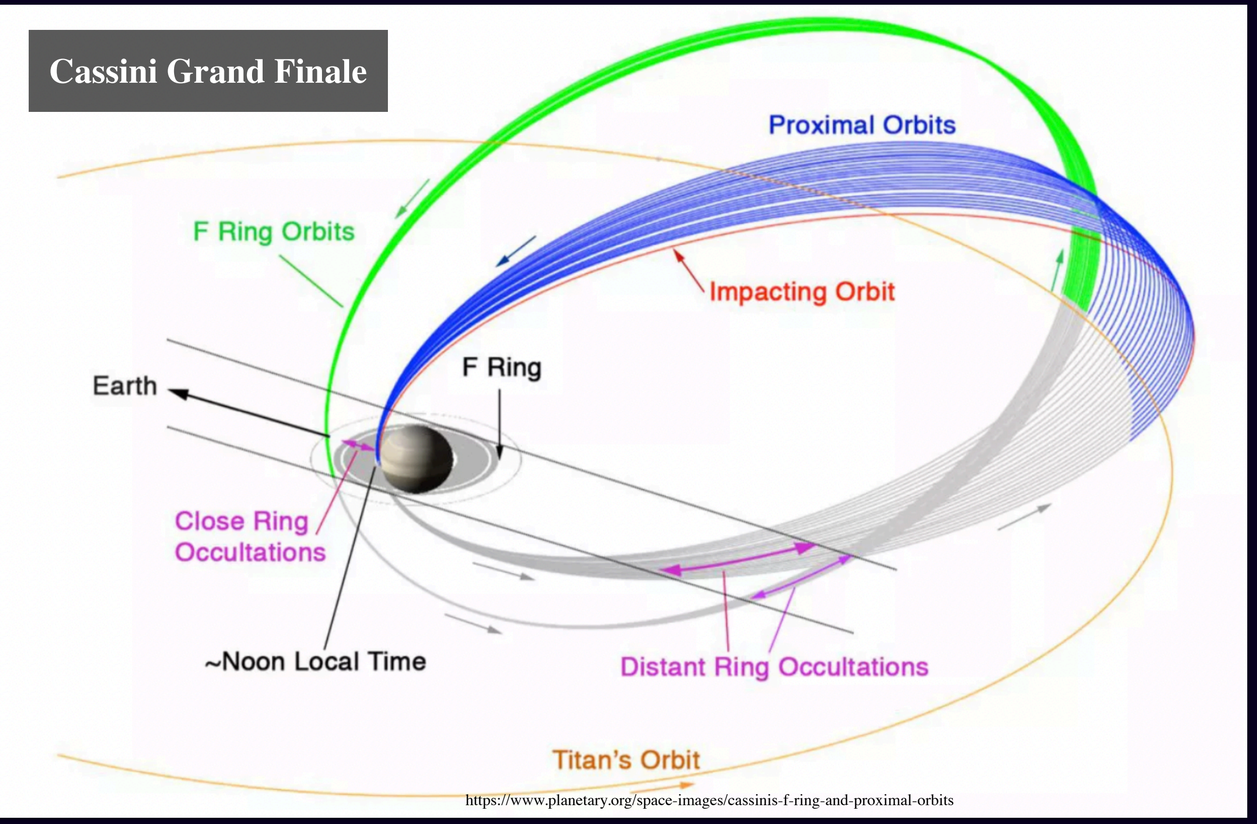
SIMULATION

e.g. Toomre critical wavelength ~100m

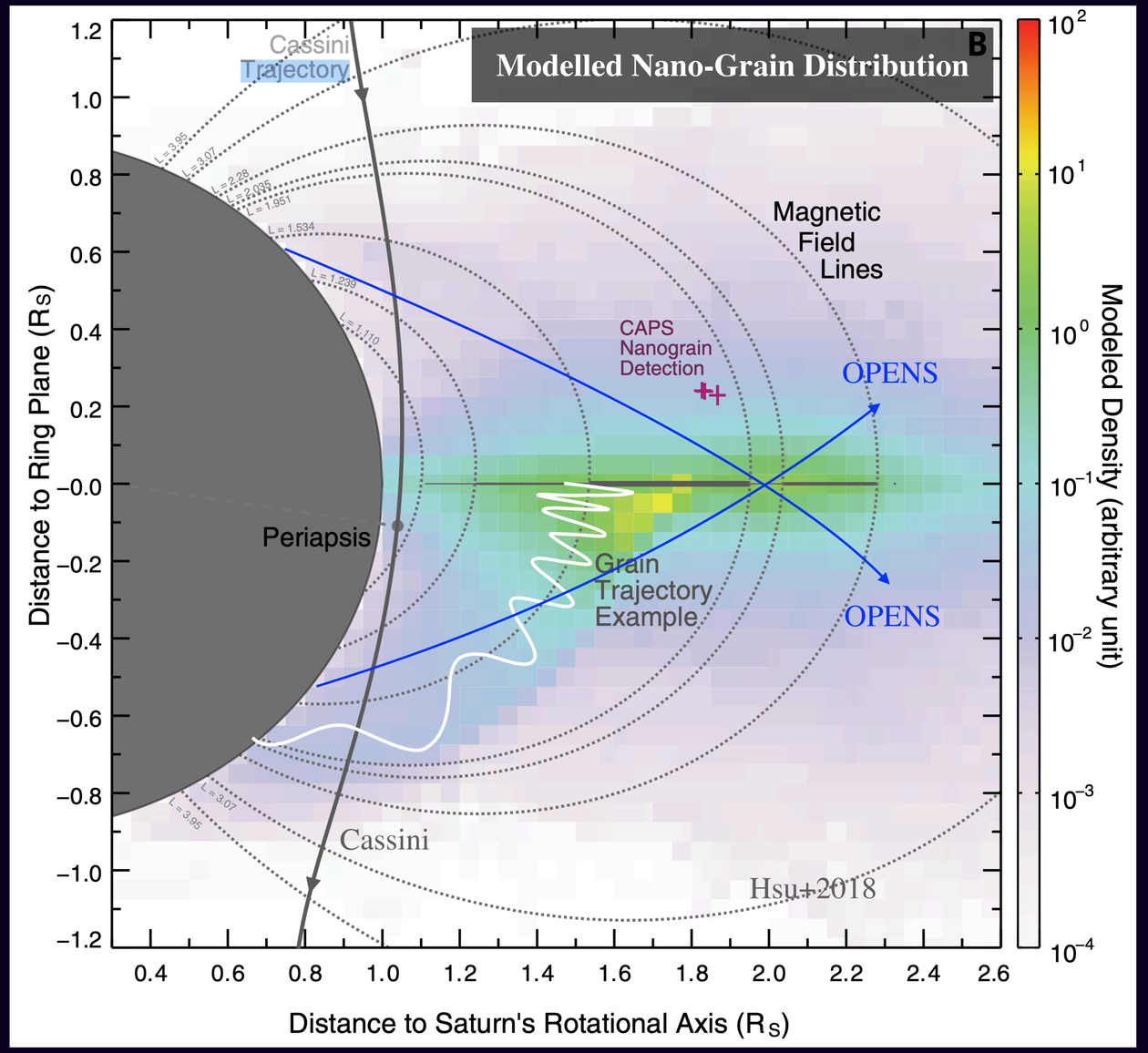
The image (Saturn's A ring) was taken in visible light with the Cassini spacecraft wide-angle camera on Dec. 18, 2016. The view was obtained at a distance of approximately 34,000 miles (56,000 kilometers) from the rings and looks toward the unilluminated side of the rings. Image scale is about a quarter-mile (340 meters) per pixel.

©2016 Shugo Michikoshi, Eiichiro Kokubo, Takayuki Takeda, AD2U Project

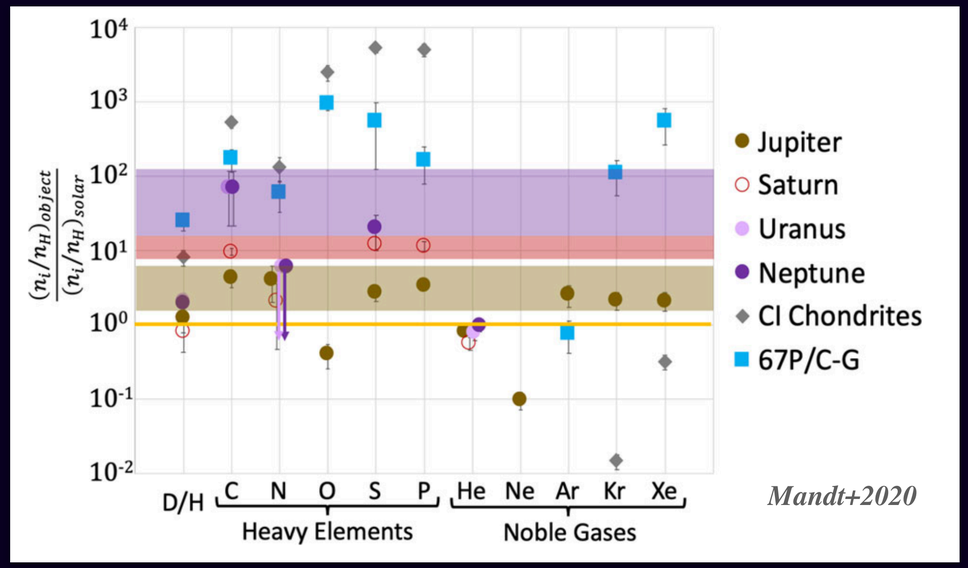
Close Approach to the Rings “and Saturn”

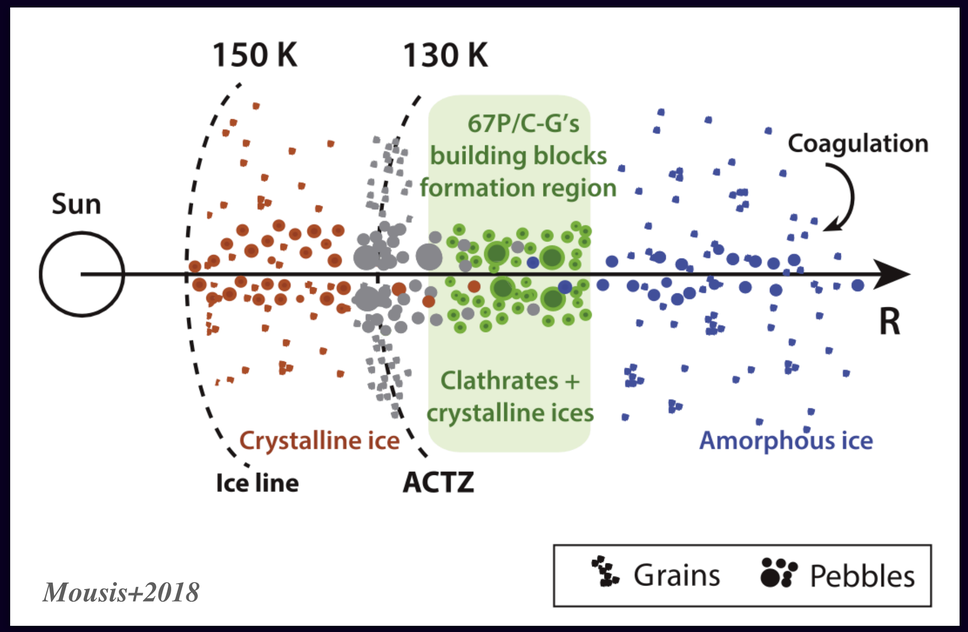


https://www.planetary.org/space-images/cassinis-f-ring-and-proximal-orbits

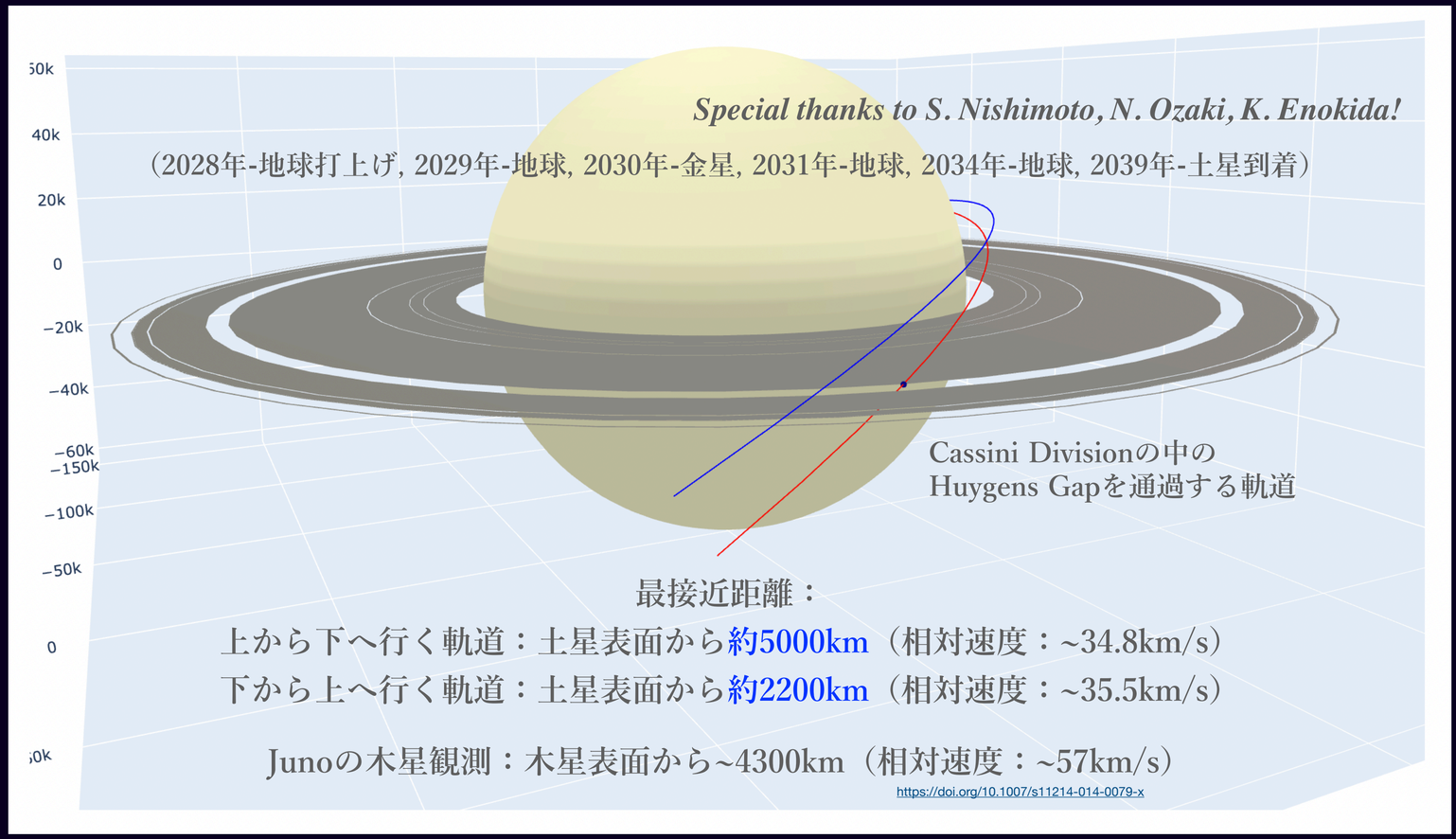


土星への近接サイエンス１

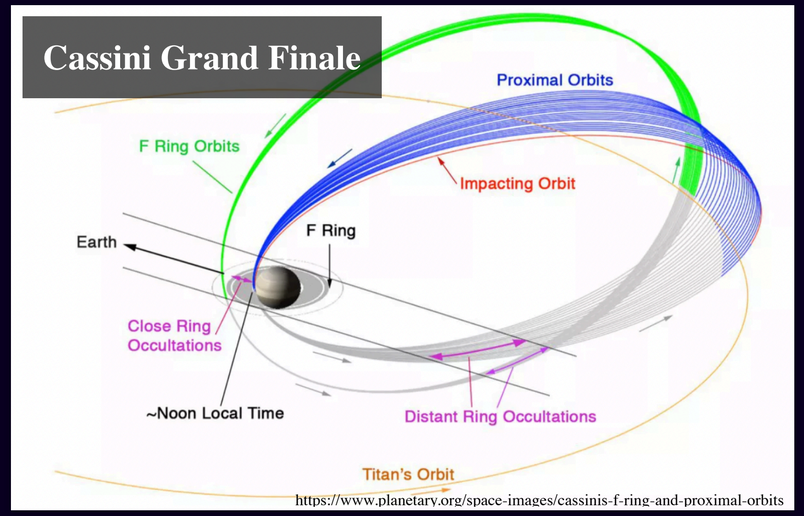


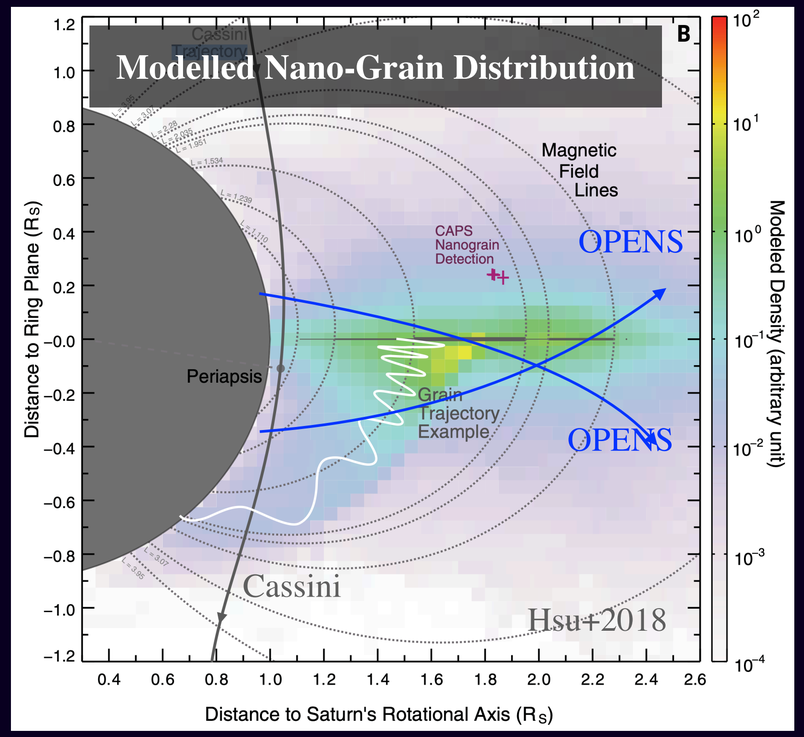


土星大気成分の理解は（木星大気との比較を含め），
巨大惑星の形成位置，形成材料，
そして当時の円盤環境の理解に直接繋がる．

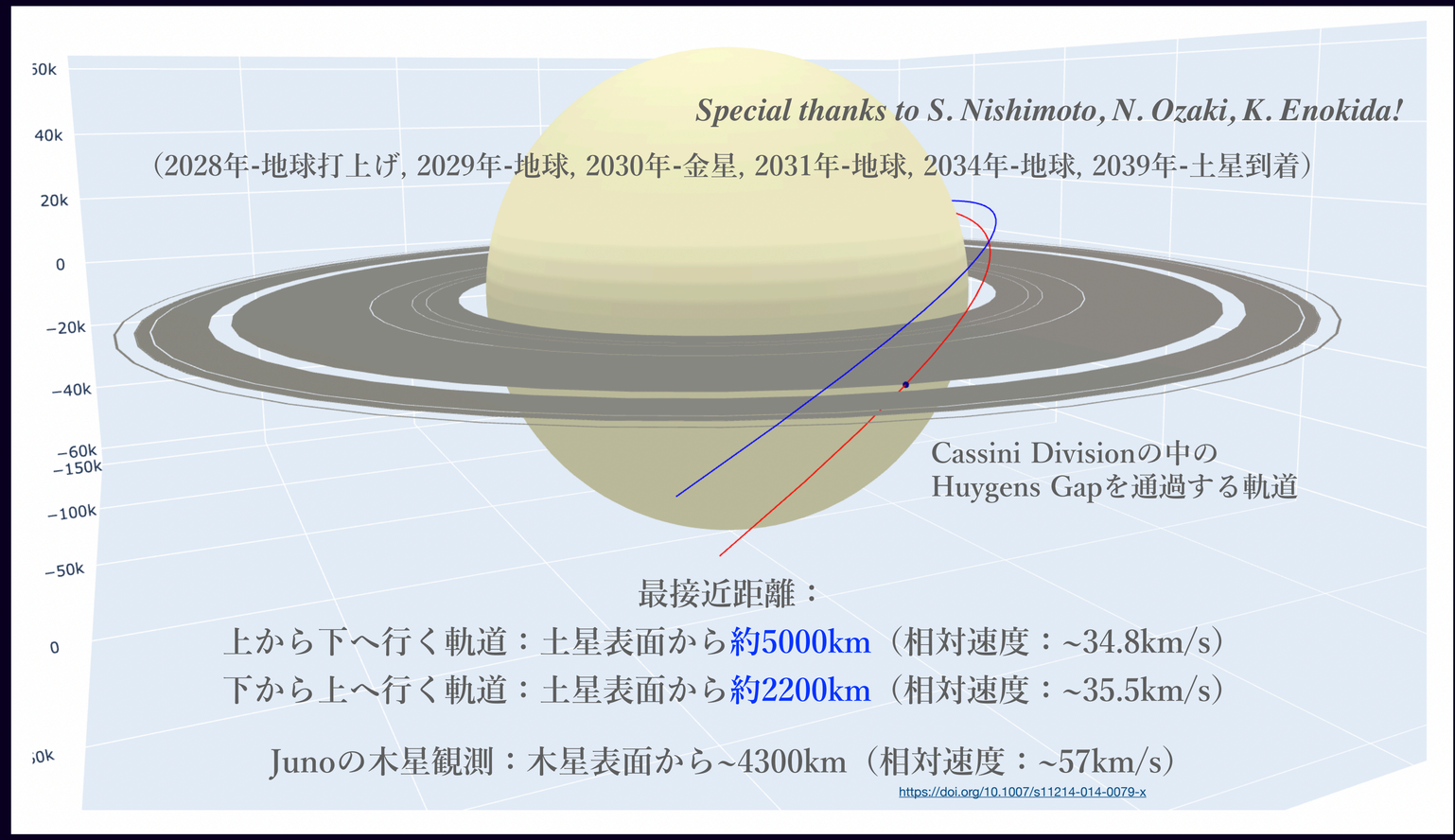


土星への近接サイエンス２





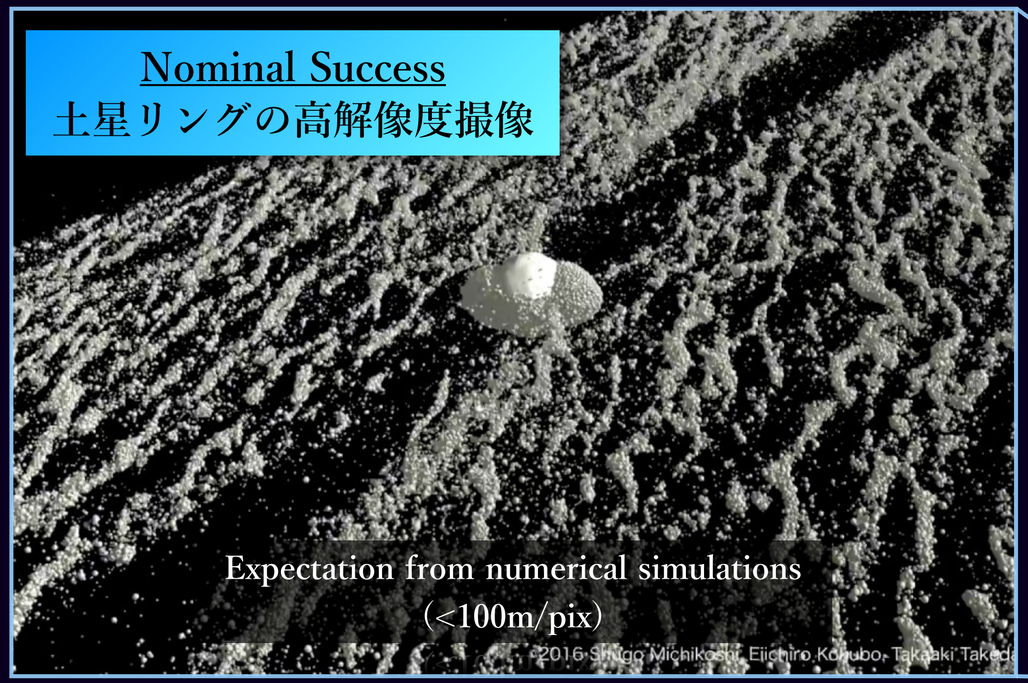
土星近傍で浮遊する ions, electrons, neutrals, dust の
その場分析・捕集も重要な科学目標になる.



Launch 2028, Arrival 2039

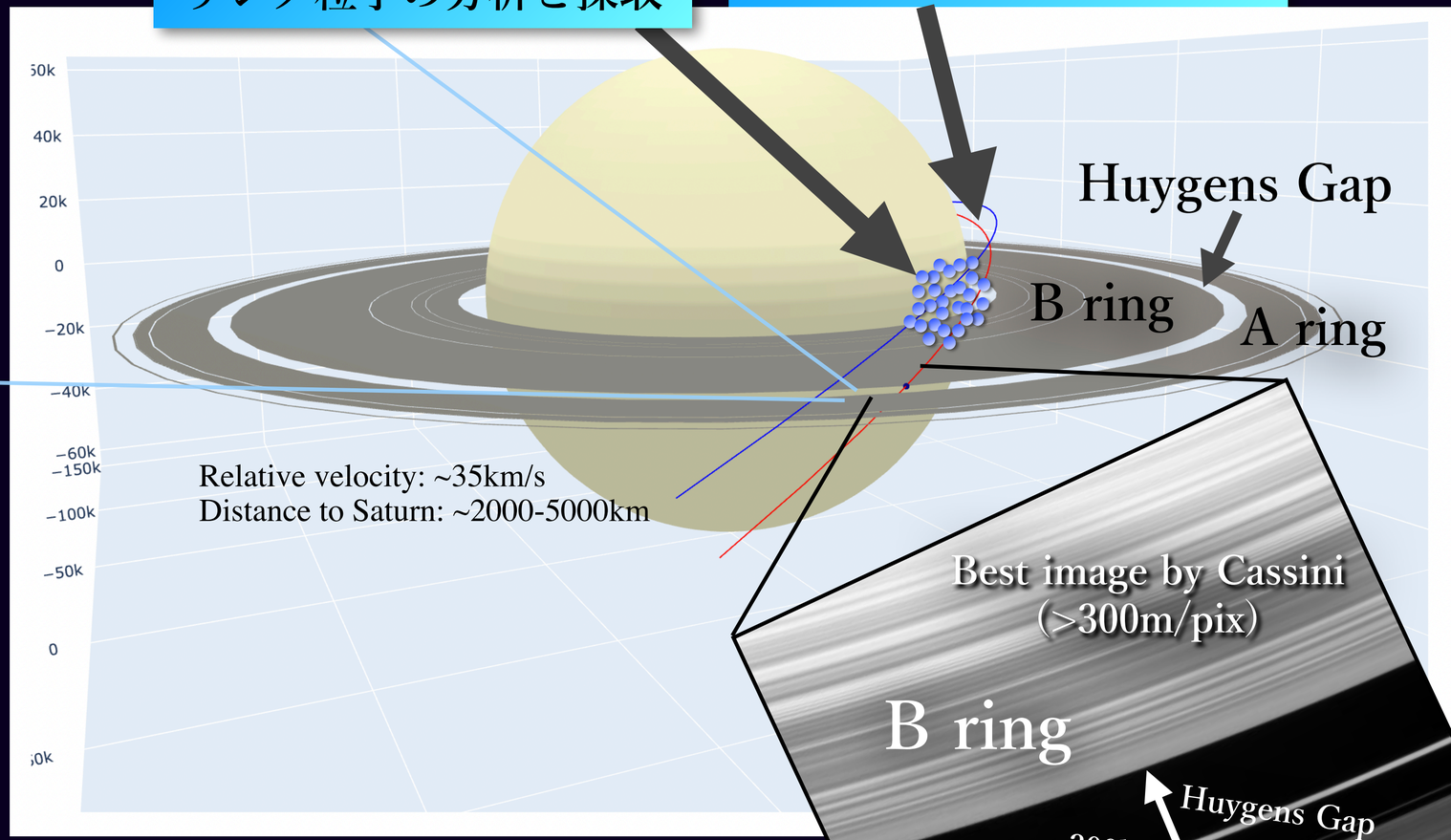
（2028年-地球打上げ, 2029年-地球, 2030年-金星, 2031年-地球, 2034年-地球, 2039年-土星到着）

Nominal Success
土星リングの高解像度撮像



Extra Success 2
リング粒子の分析と採取

Extra Success 1
土星大気の撮像と分光観測



土星円環探査とは,

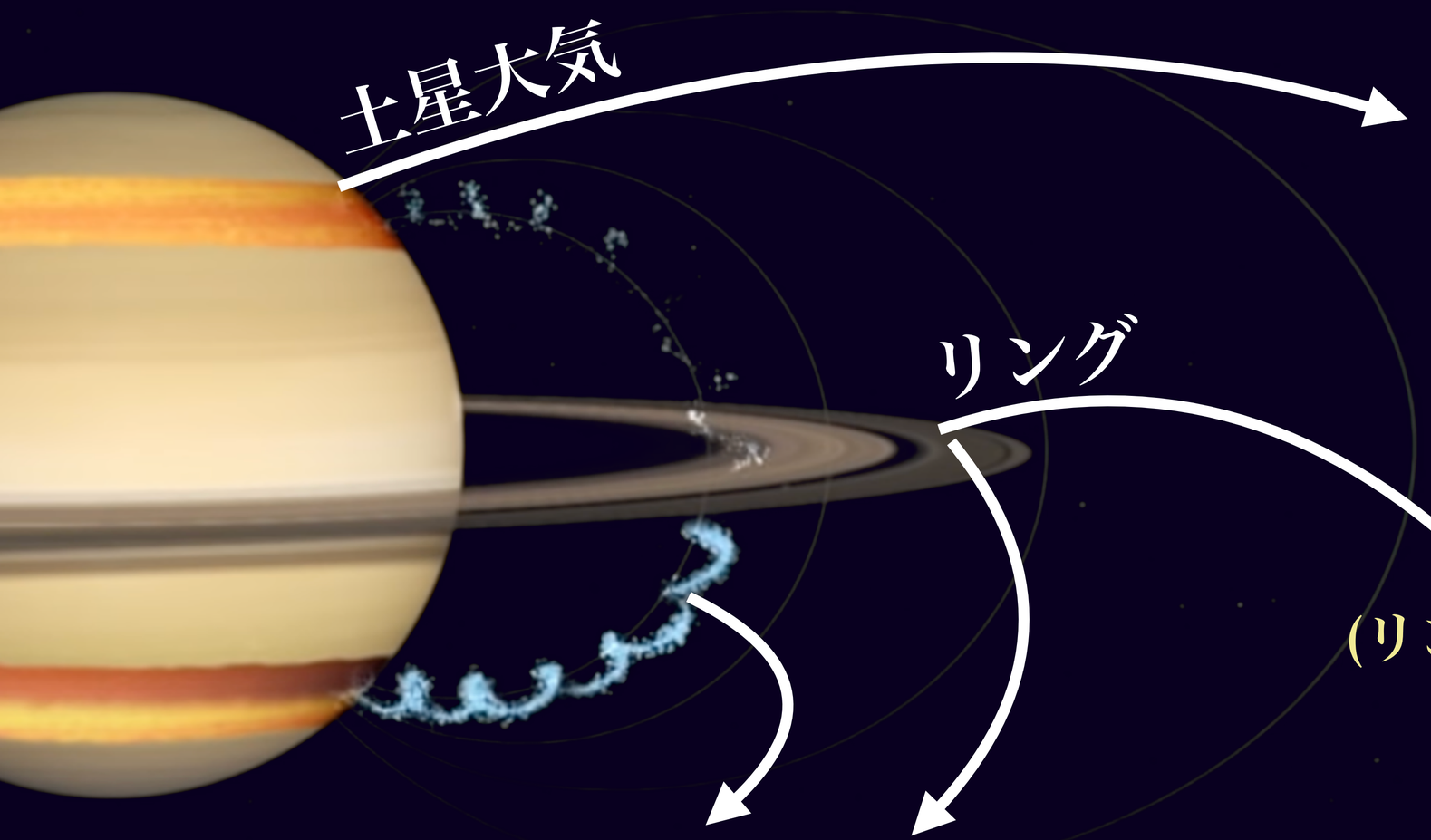
(1) リングの高解像度撮像

(2) 土星大気の撮像と分光観測

(3) リング粒子の分析と採取

＊ここでの内容は現在進行形の議論なので一例としておく.
(周回軌道への投入解も現在検討している)

Summary — Why do we go to Saturn?



<10Myrの太陽系史に波及

✓ Gas from protoplanetary disk
- instability? core accretion?

✓ Heavy elements (inc. ice)
- pristine ice? amorphous ice?
- planetesimals? pebbles?

(リングを形成する)太陽系大動乱に波及

✓A cataclysm? 3-body instability?
✓Passing comet? Primordial moon?

現在の土星内部と土星磁気圏の理解に波及

✓Interaction btw particles and magnetic field
✓Saturn's internal structure perturbs rings

数十億年のリングの進化に波及

✓How did it spread, forming moons?
✓Why does it look clean?