



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：

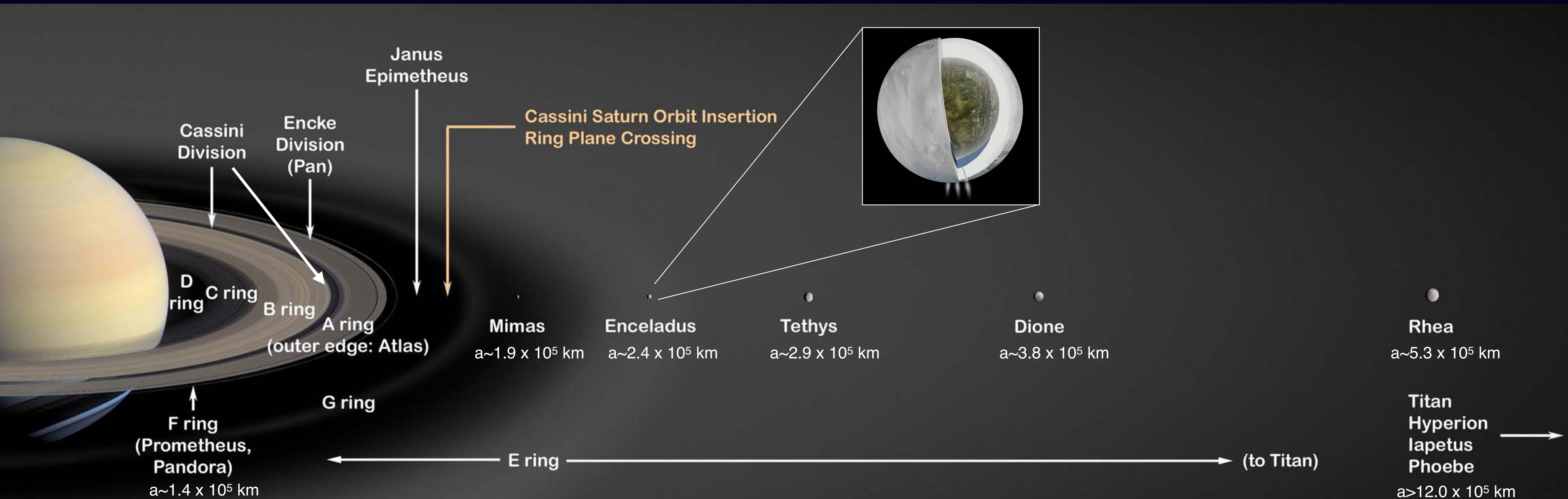
兵頭龍樹、矢野創ほか

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

Rings and Moons around Saturn



Bloody Fight

*based on personal prejudices

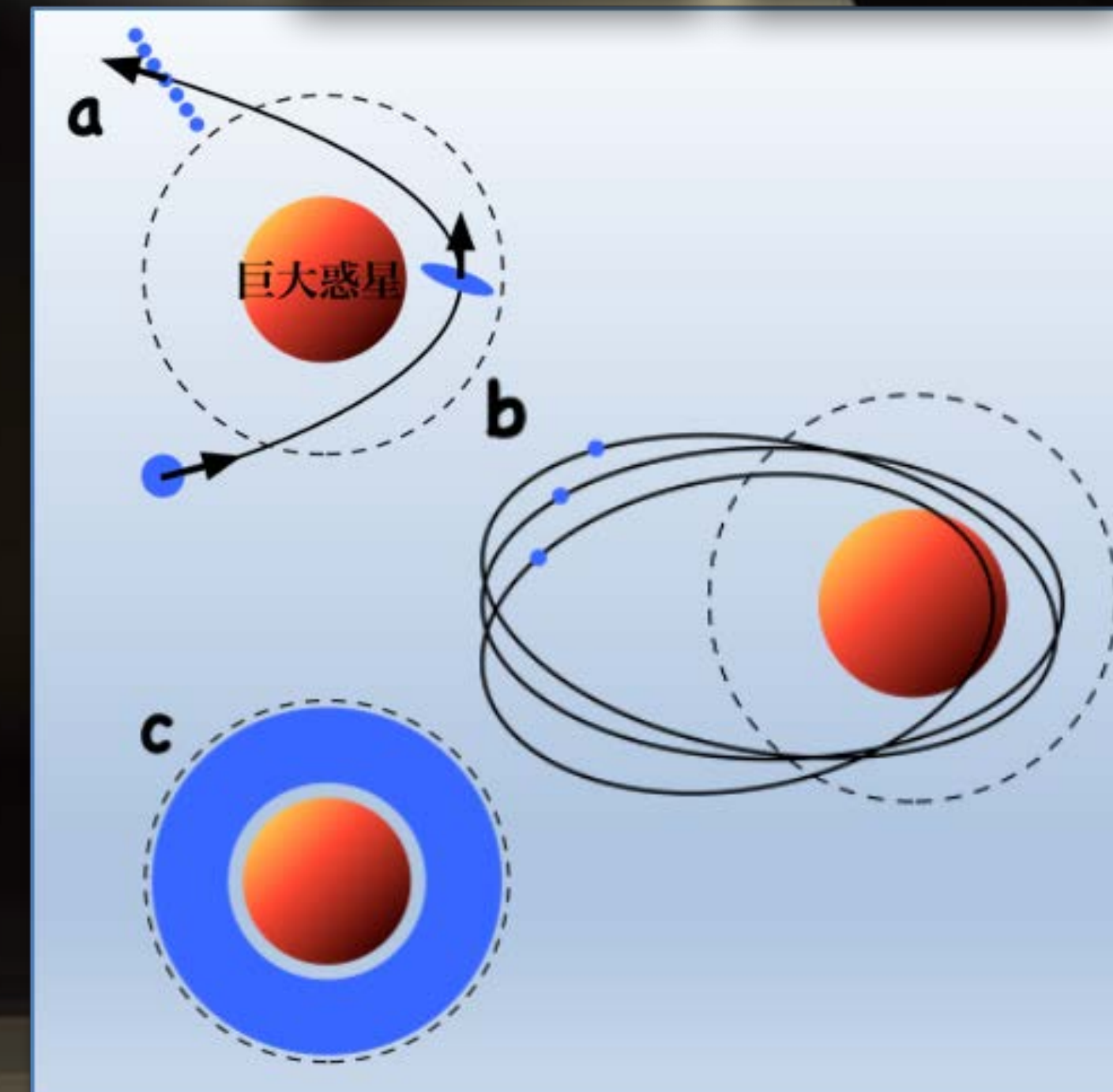
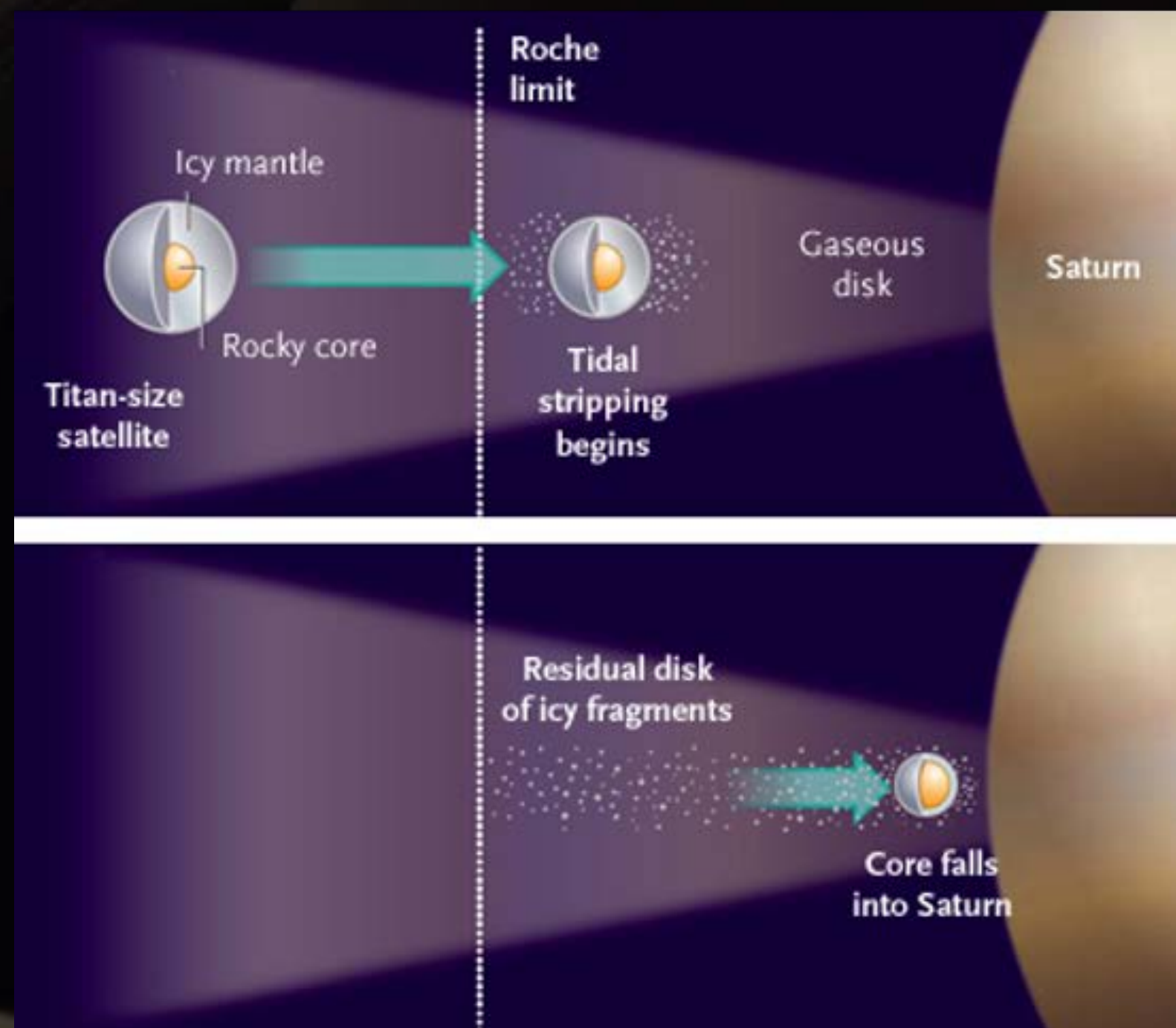
Primordial Satellite vs Random Passing Object



Canup2010

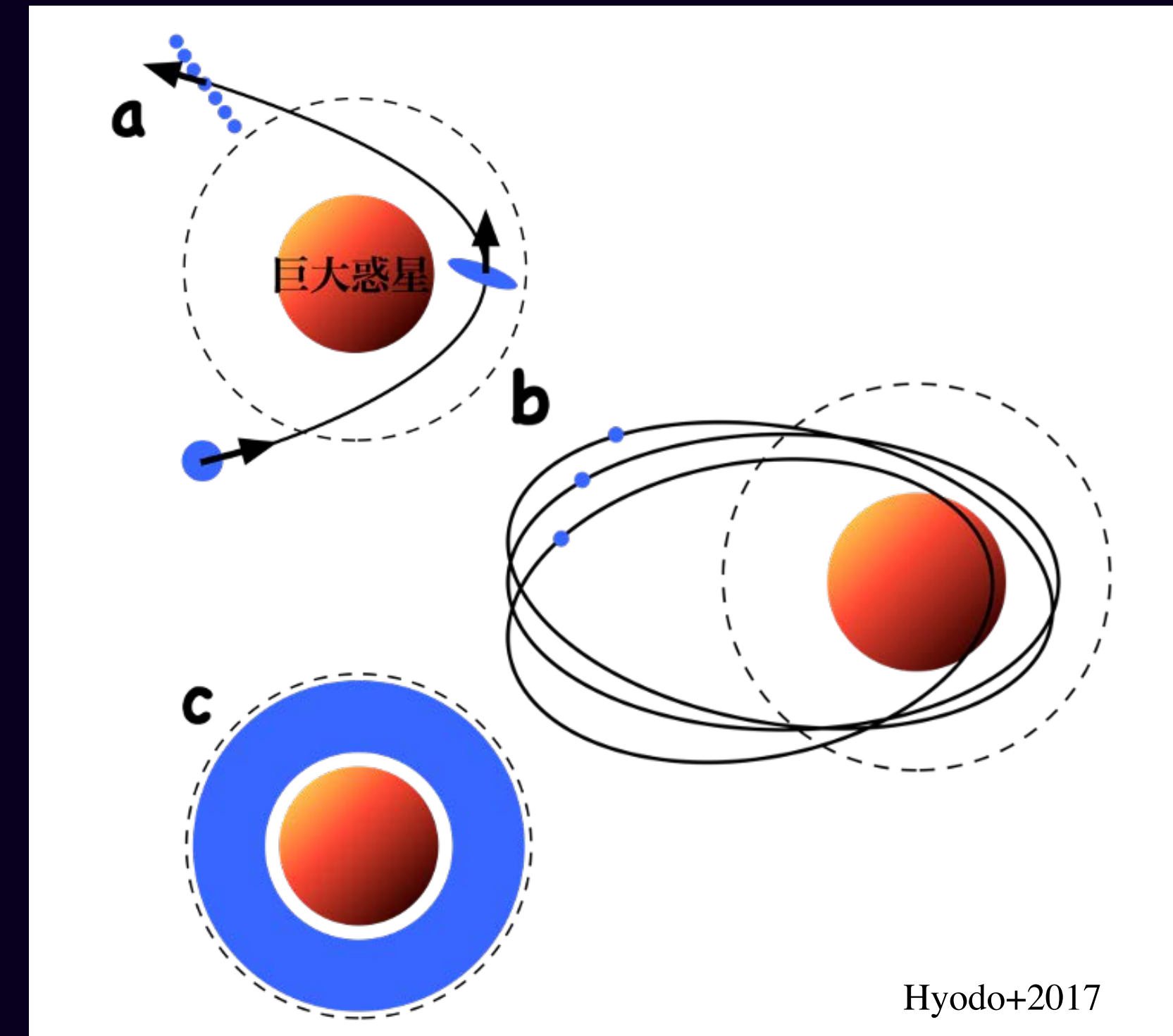
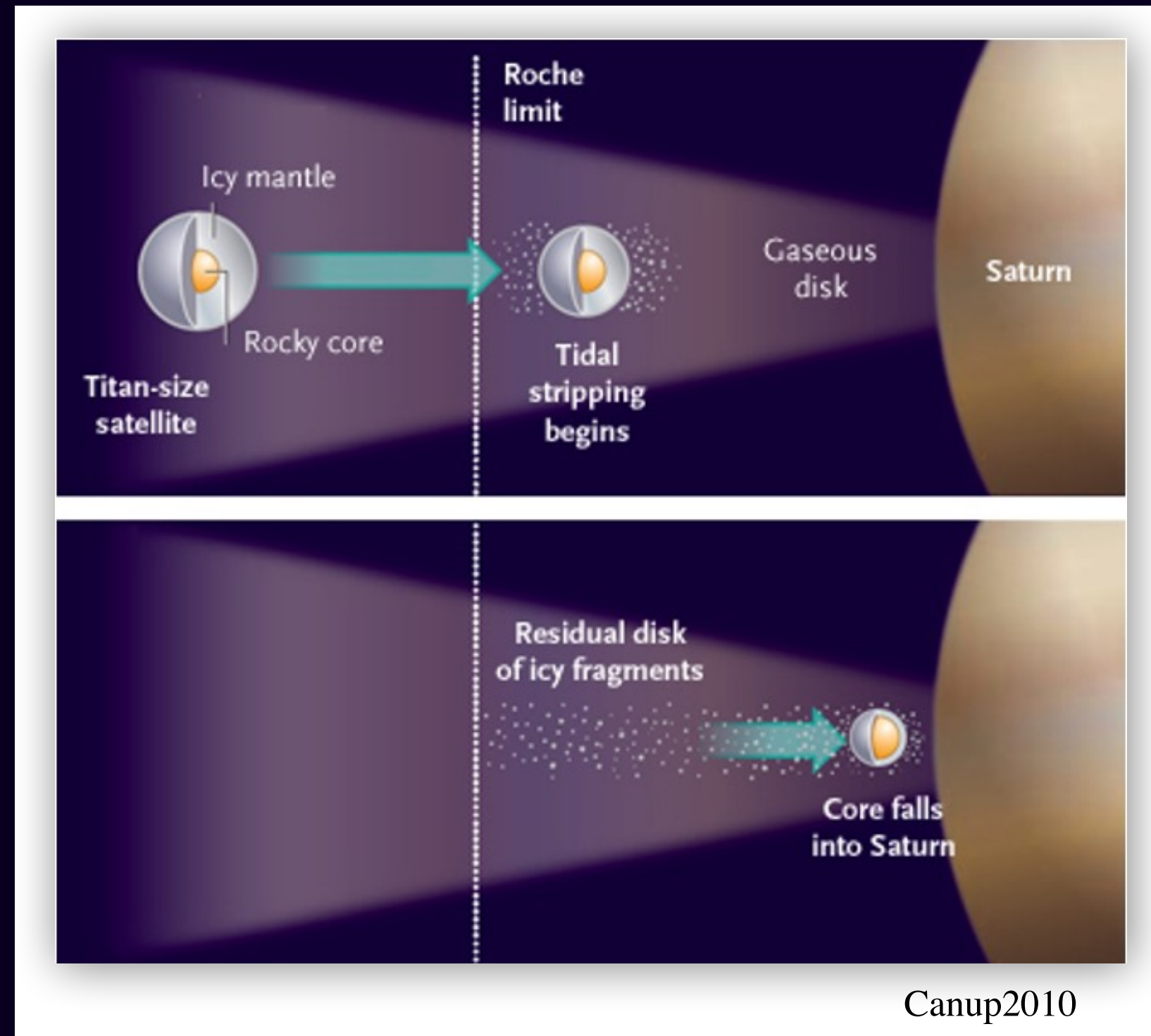


Hyodo+2017



What would be a Smoking Gun!?

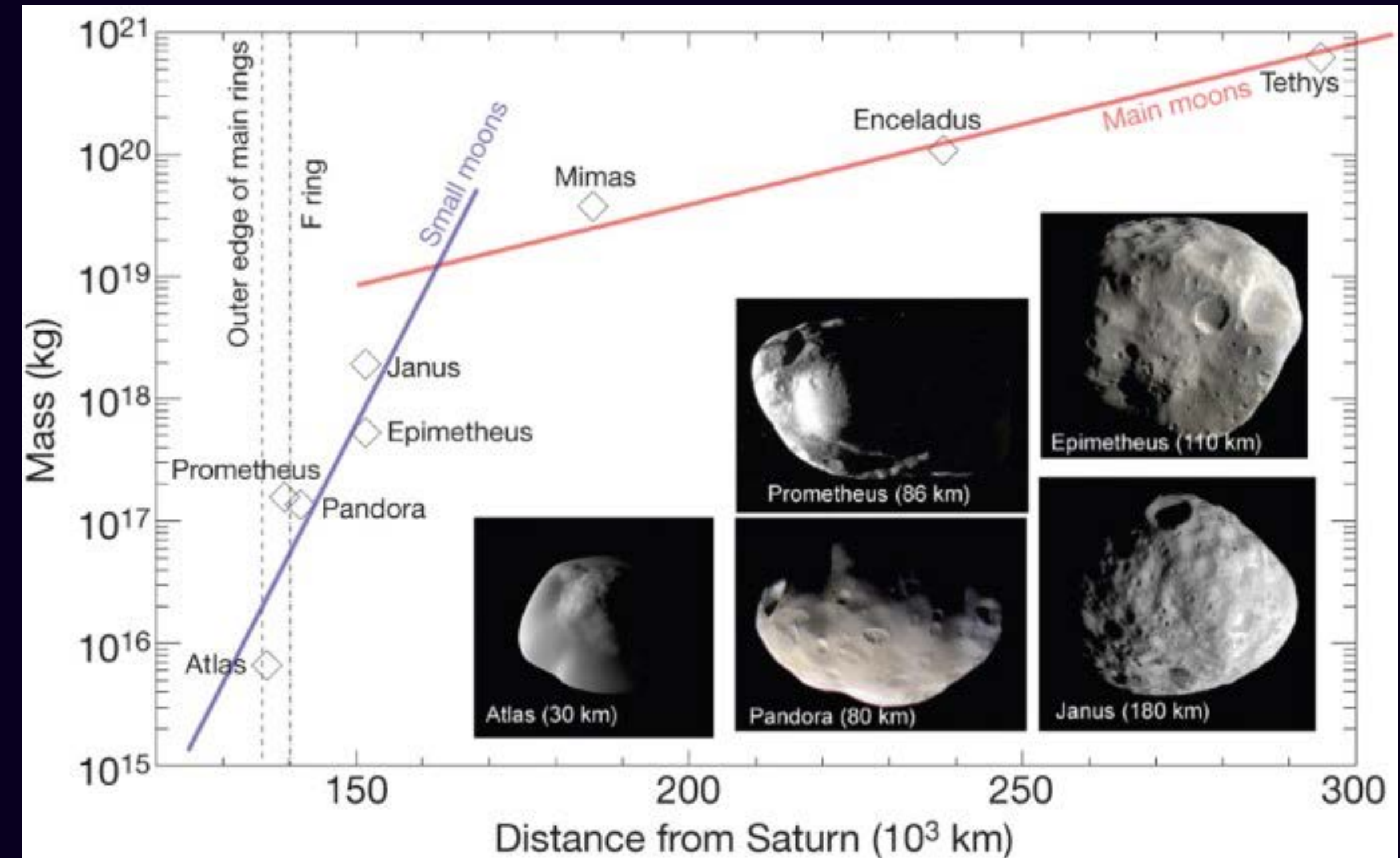
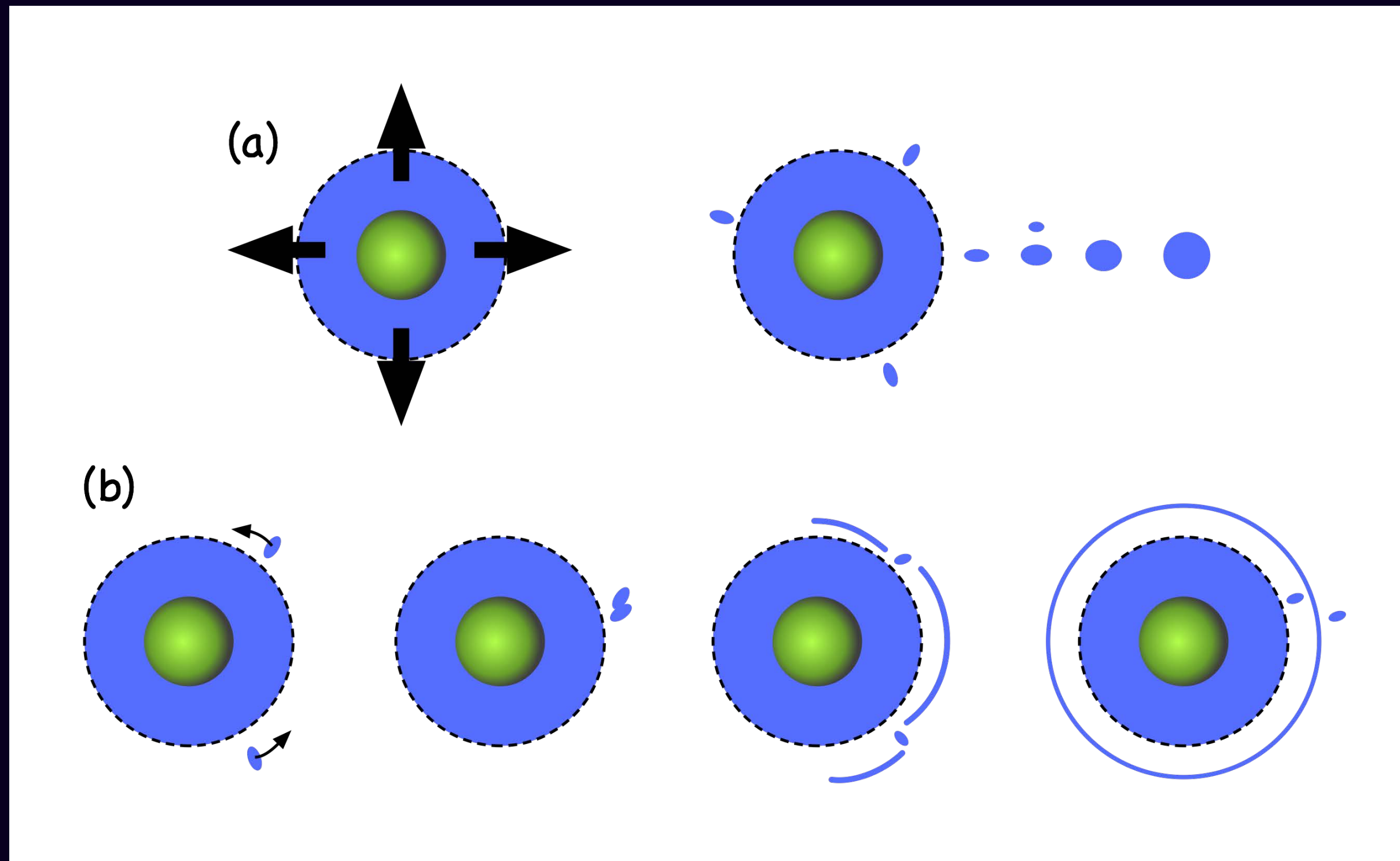
Primordial Satellite vs Random Passing Object



- Should occur before the gas dissipation (first ~few Myrs)
- High-T phase (then, it cannot keep water ice as solids...)
- Composition/isotopes can be “linked” to Saturn!?

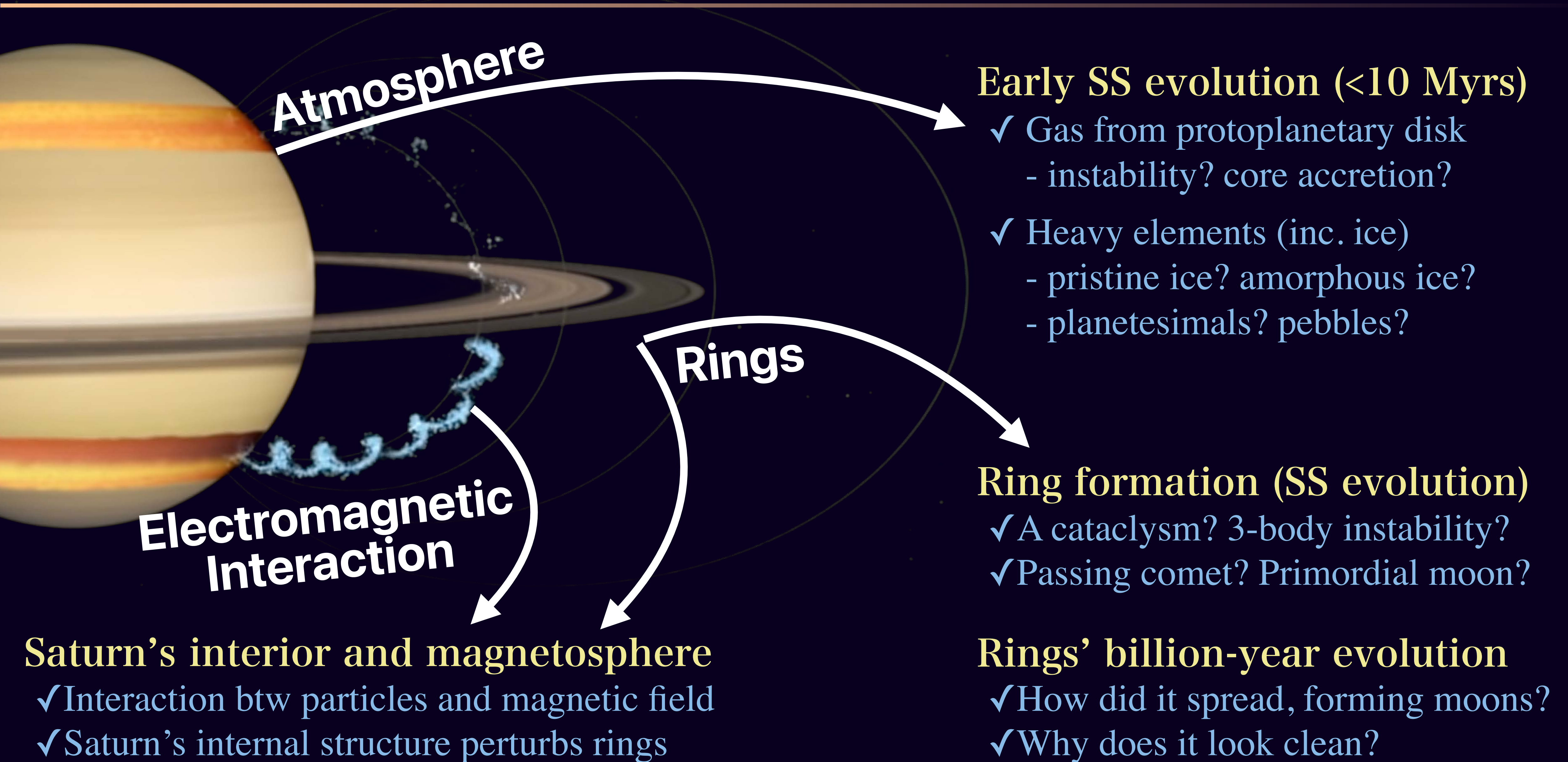
- Higher probability during the cataclysm (up to 3.5Ga?)
- Is there a temperature increase during the formation?
- The composition/isotope can be distinct from Saturn

Rings Formed Satellites?



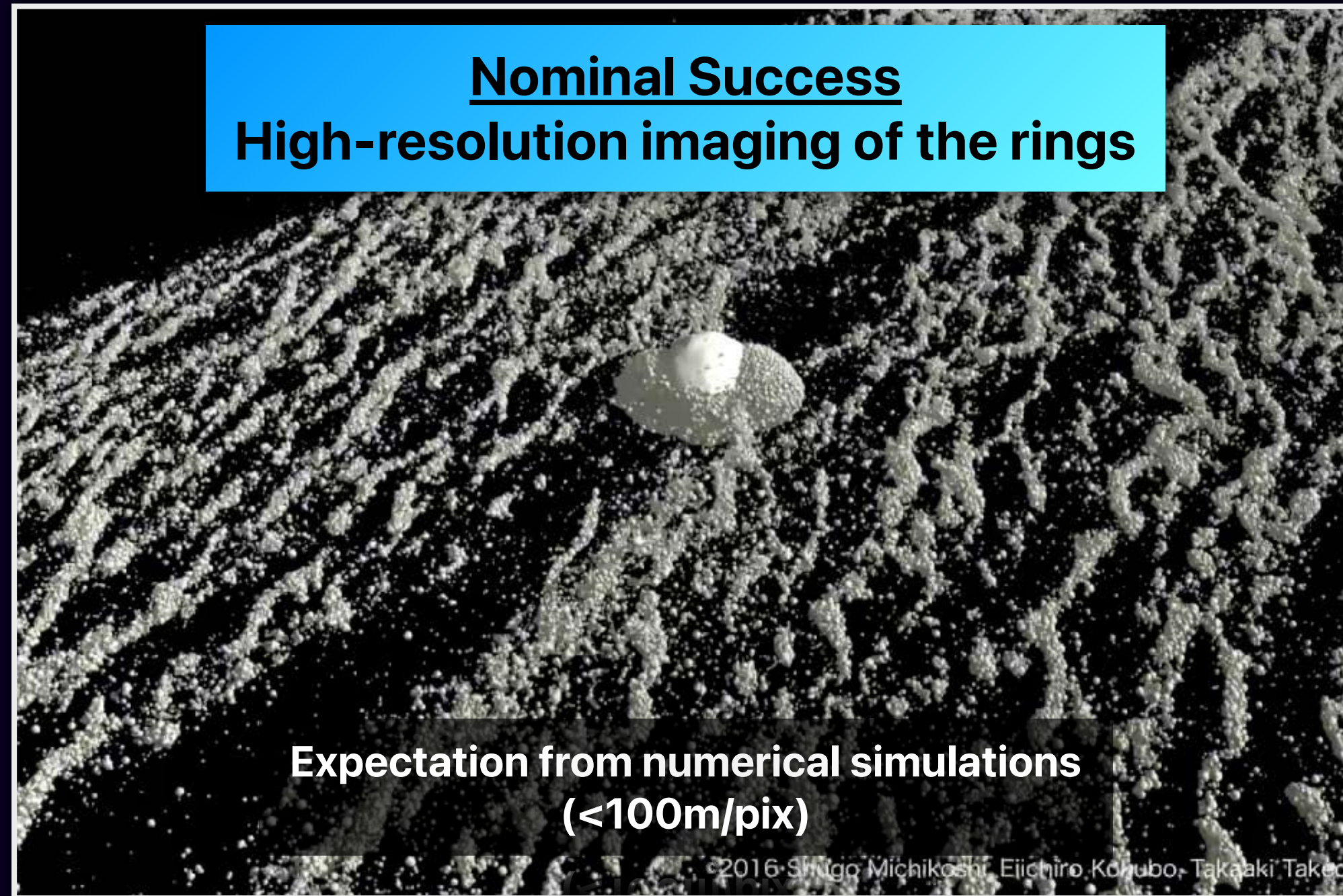
Charnoz+2010, *Nature*
Crida & Charnoz 2011, *Science*
Hyodo+ 2015, *Nature Geo*

Summary — Why do we go to Saturn?



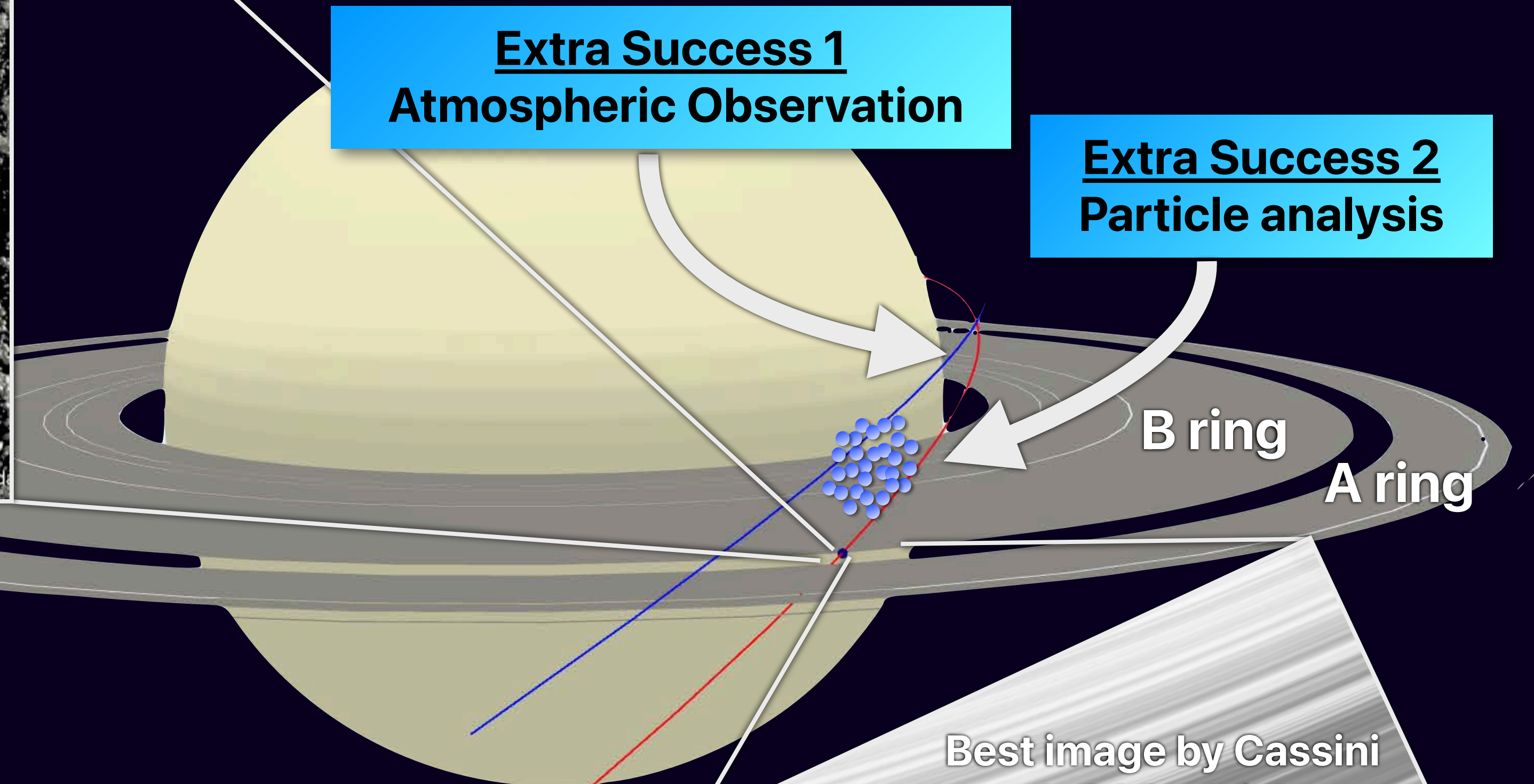
Launch 2028, Arrival 2039

(2028-Launch, 2029-Earth, 2030-Venus, 2031-Earth, 2034-Earth, 2039-Saturn)



Extra Success 1
Atmospheric Observation

Extra Success 2
Particle analysis



Relative velocity to rings: ~15-20km/s
Min. distance to Saturn: ~2000-5000km

Best image by Cassini
(>300m/pix)

B ring

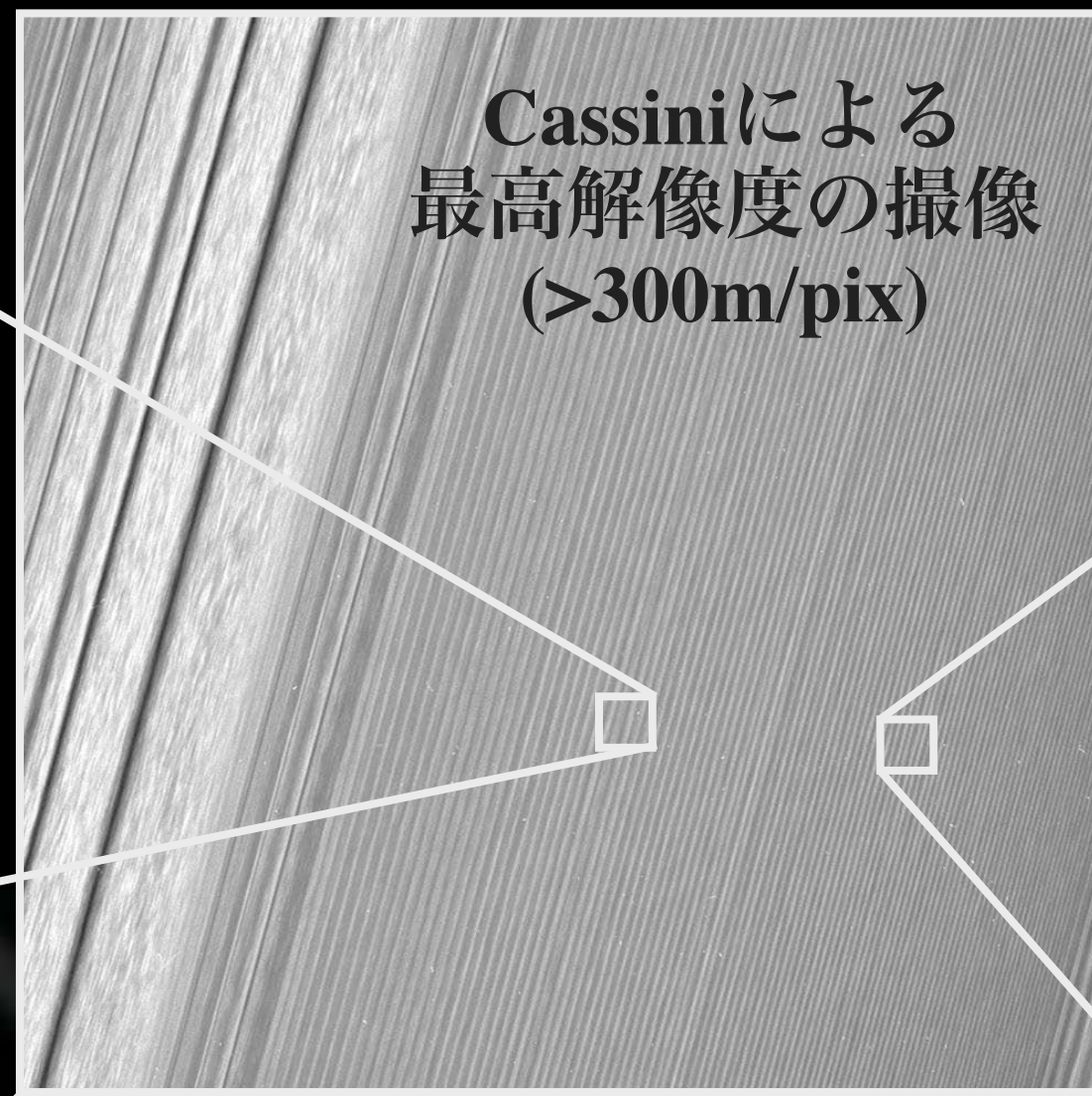
~300km
Huygens Gap

Exploration of Saturn's rings:

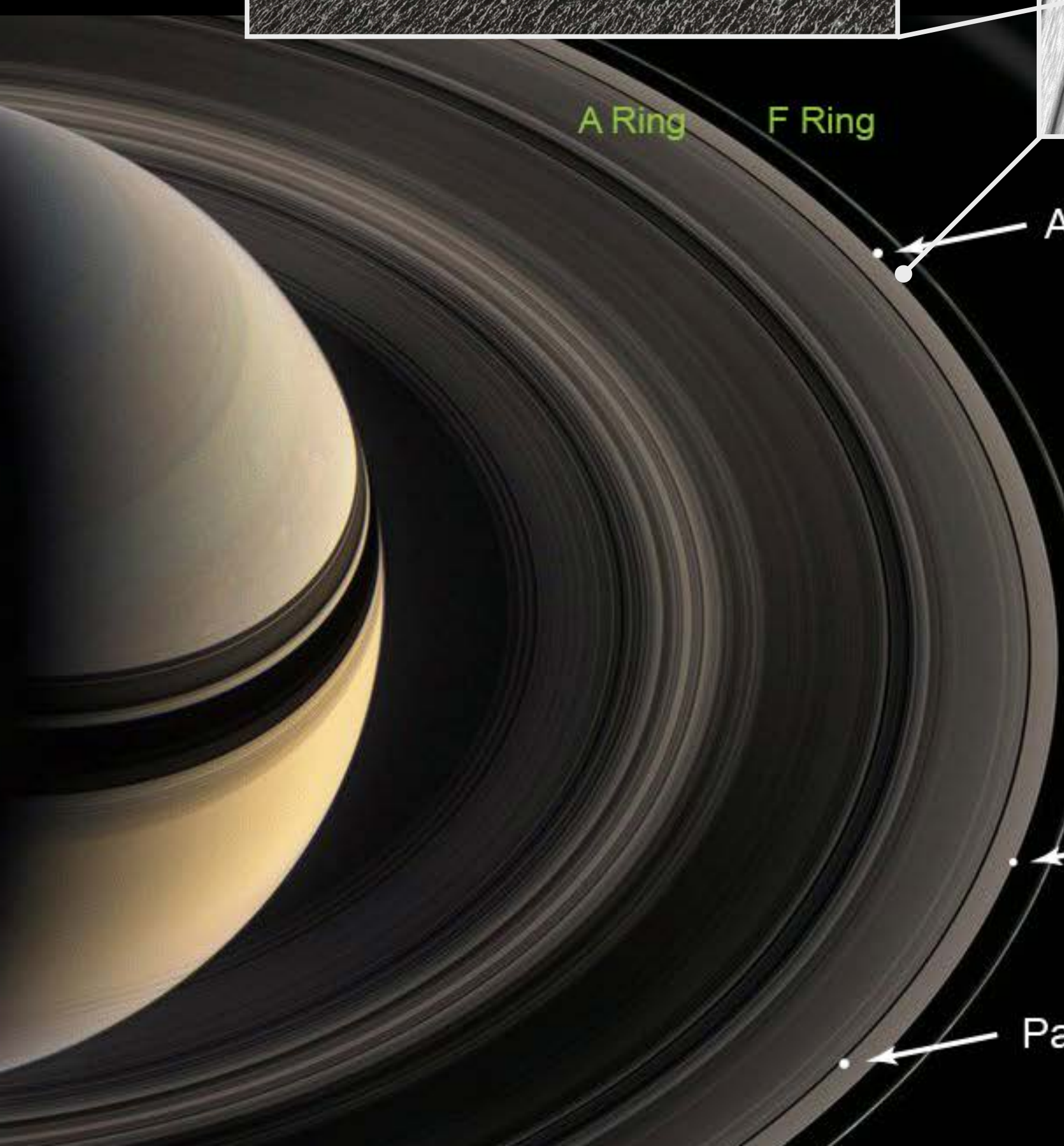
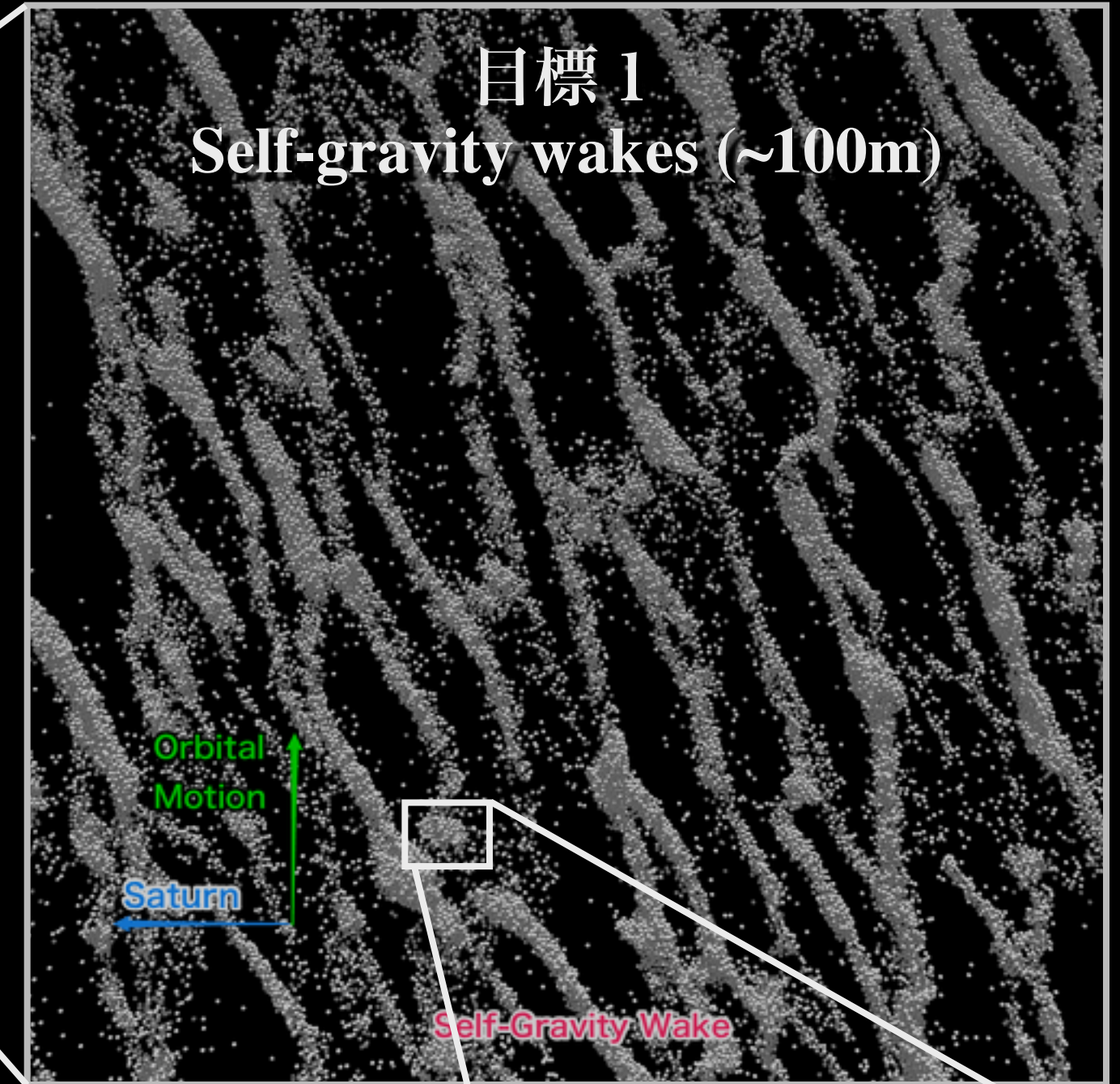
- (1) High-resolution imaging of the rings
- (2) Spectroscopic observations of Saturn's atmosphere
- (3) Analysis and collection of ring particles

*The content here is an example.
(rendezvous is also currently being considered)

シミュレーションによる予想
(~10-100 m/pix)

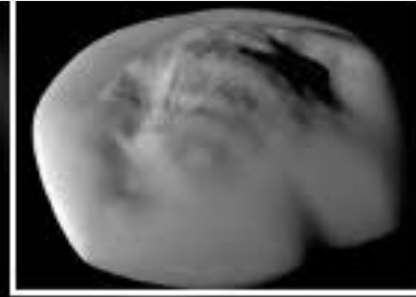


シミュレーションによる予想
(~10-100 m/pix)



A Ring F Ring

Atlas



Epimetheus



Pandora



Daphnis



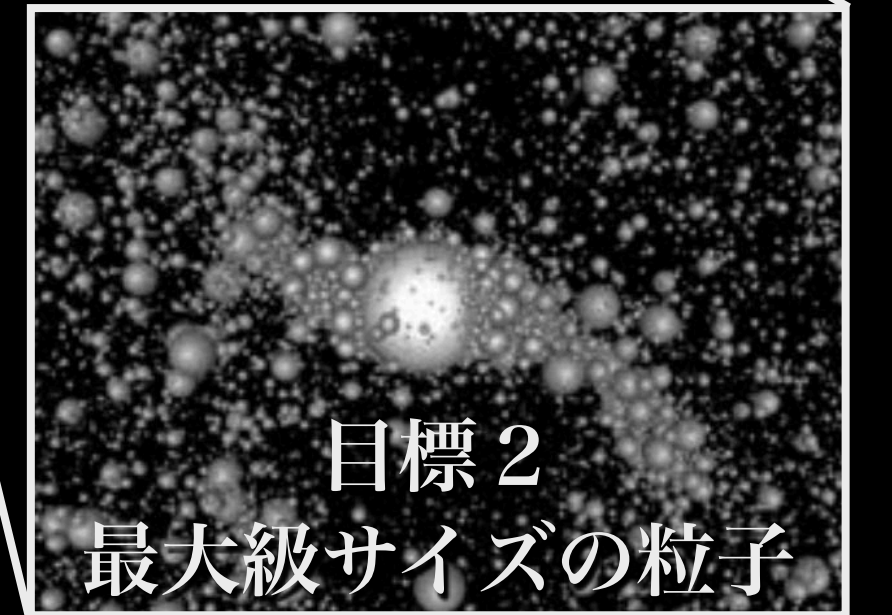
Pan



• 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。

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、1km²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)

波及効果

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 $\sim 1 \times 10^{-3}$ [個/km²]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

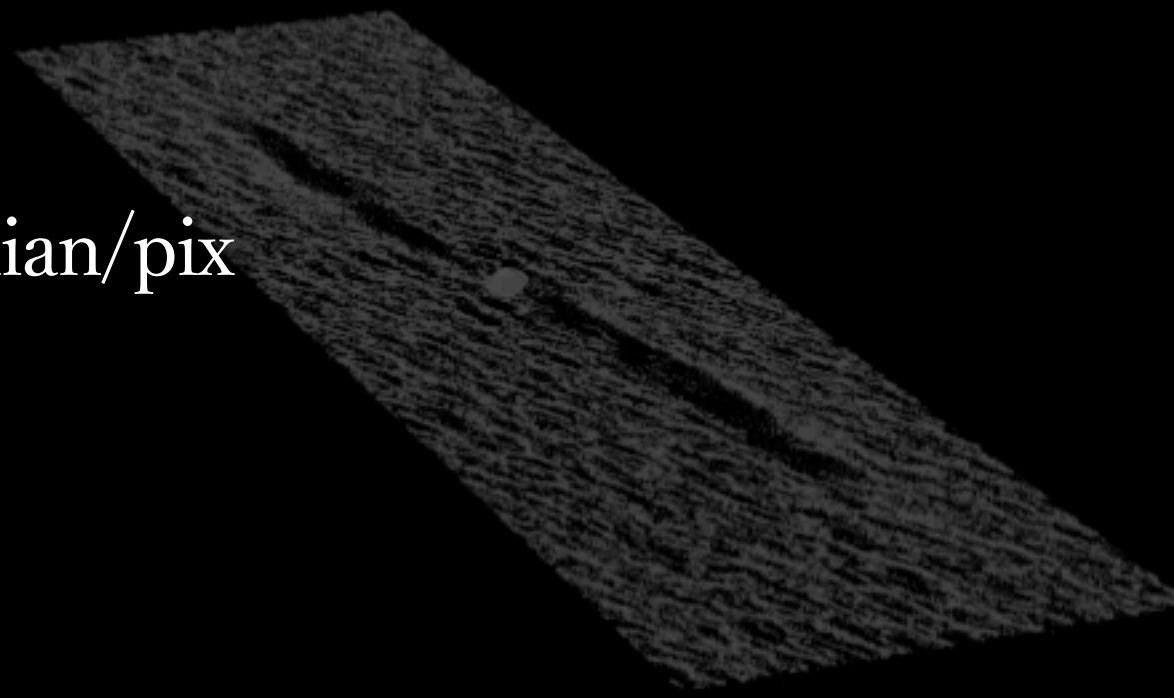
画素数 : 3296 × 2472

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)



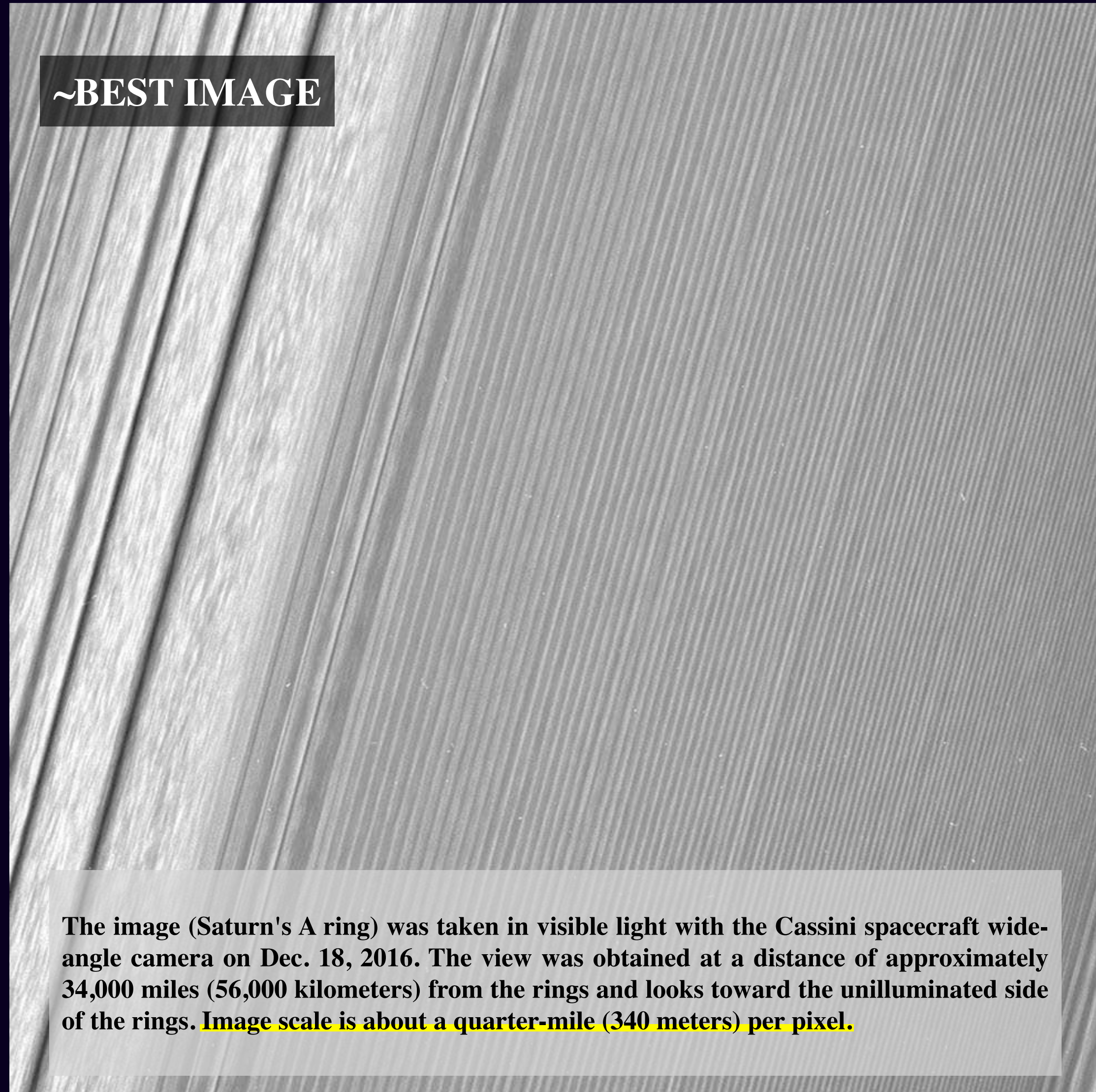
波及効果

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.

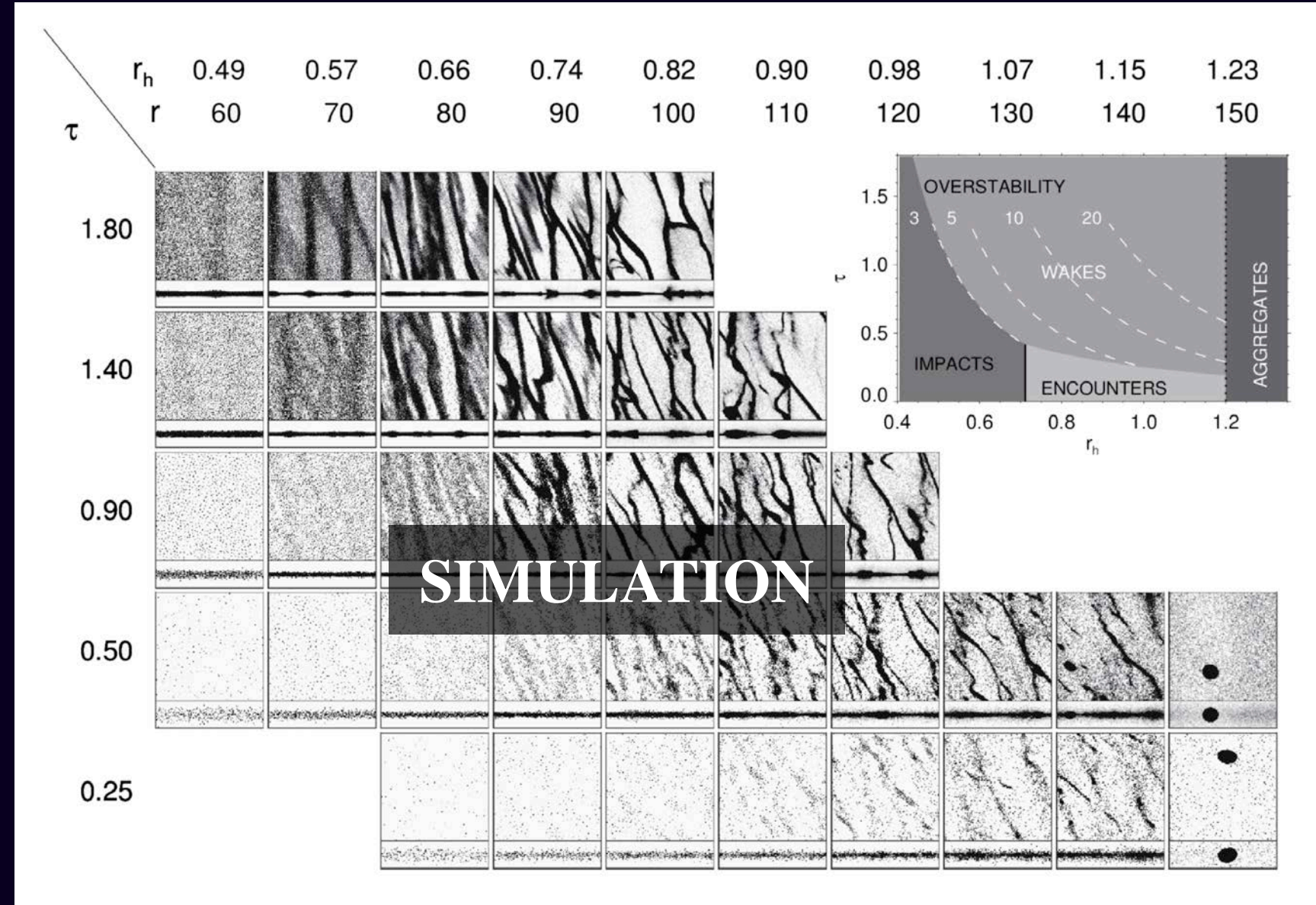
What Do Ring Particles Look Like!?

NO ONE has ever seen before!!

~BEST IMAGE



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.**



SIMULATION

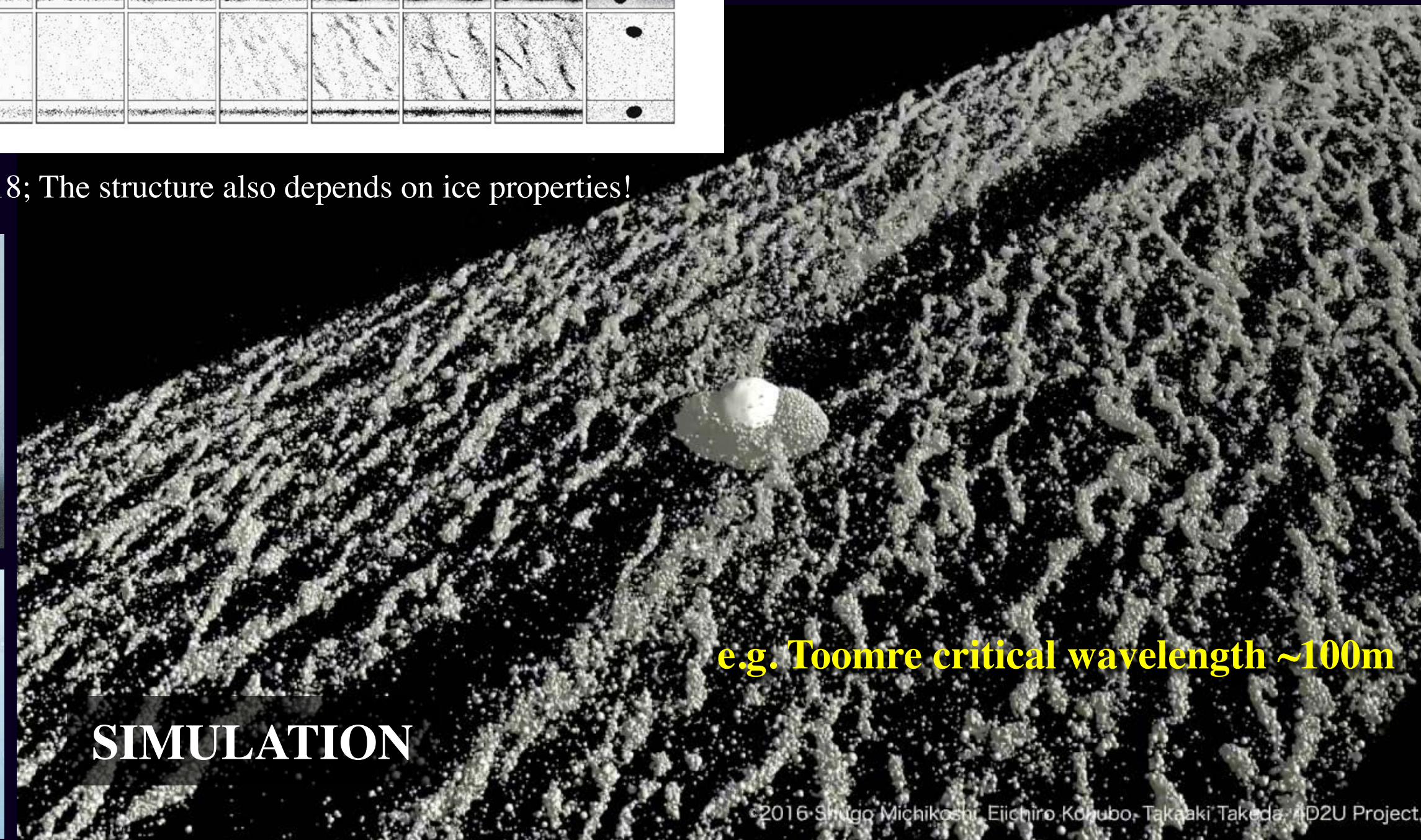
Salo 2012, Salo+2018; The structure also depends on ice properties!



Fluffy Ice??



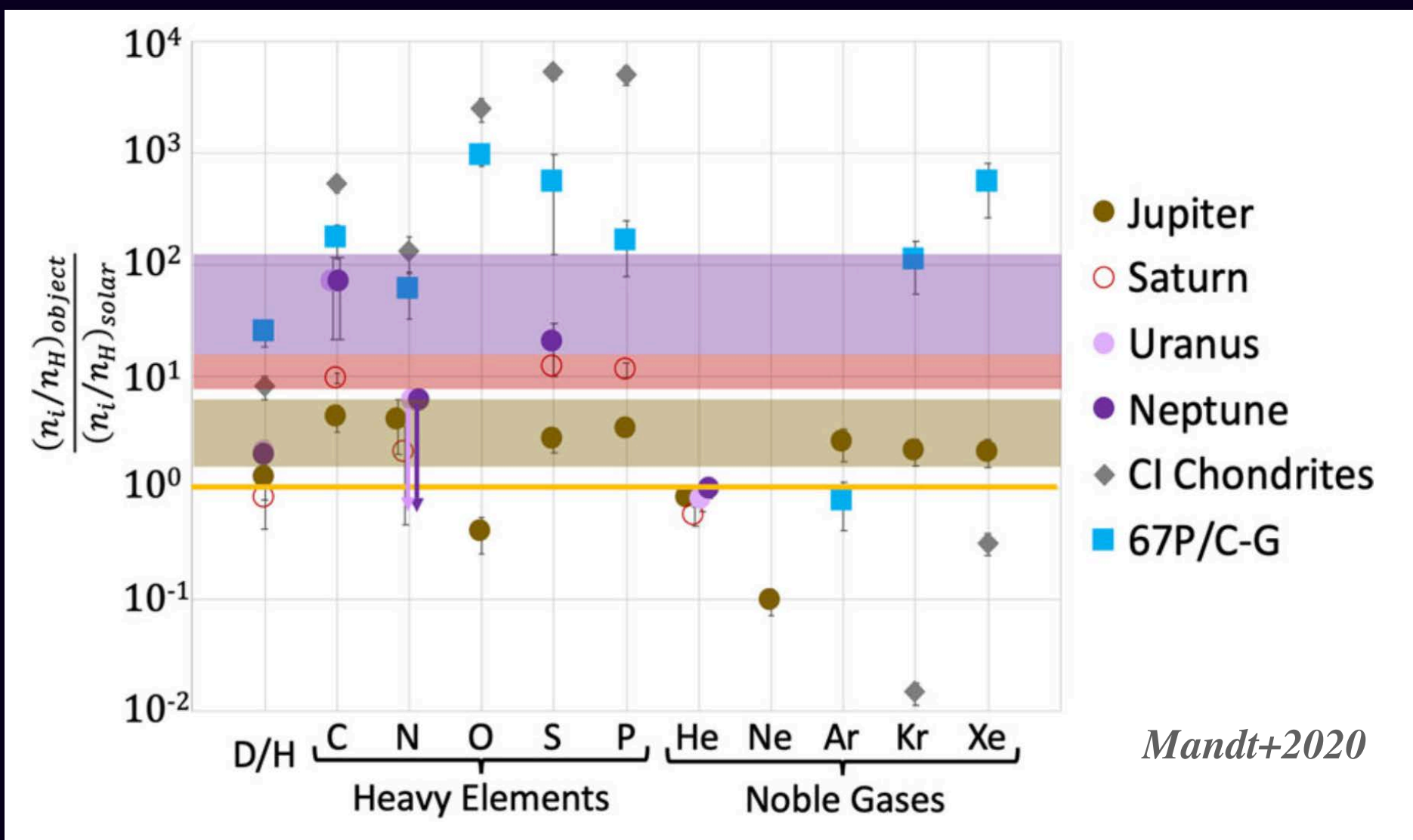
Ice chunks??



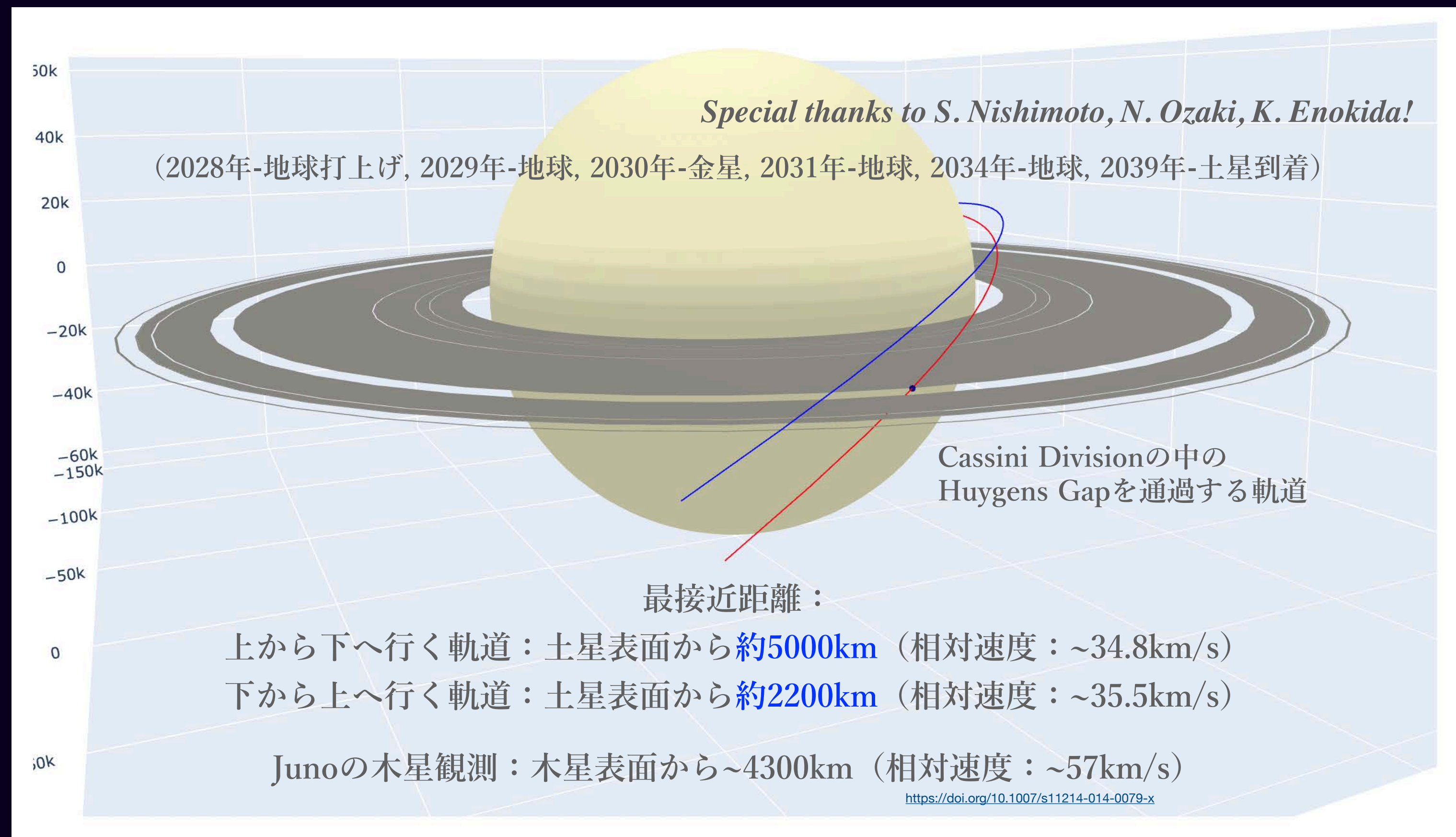
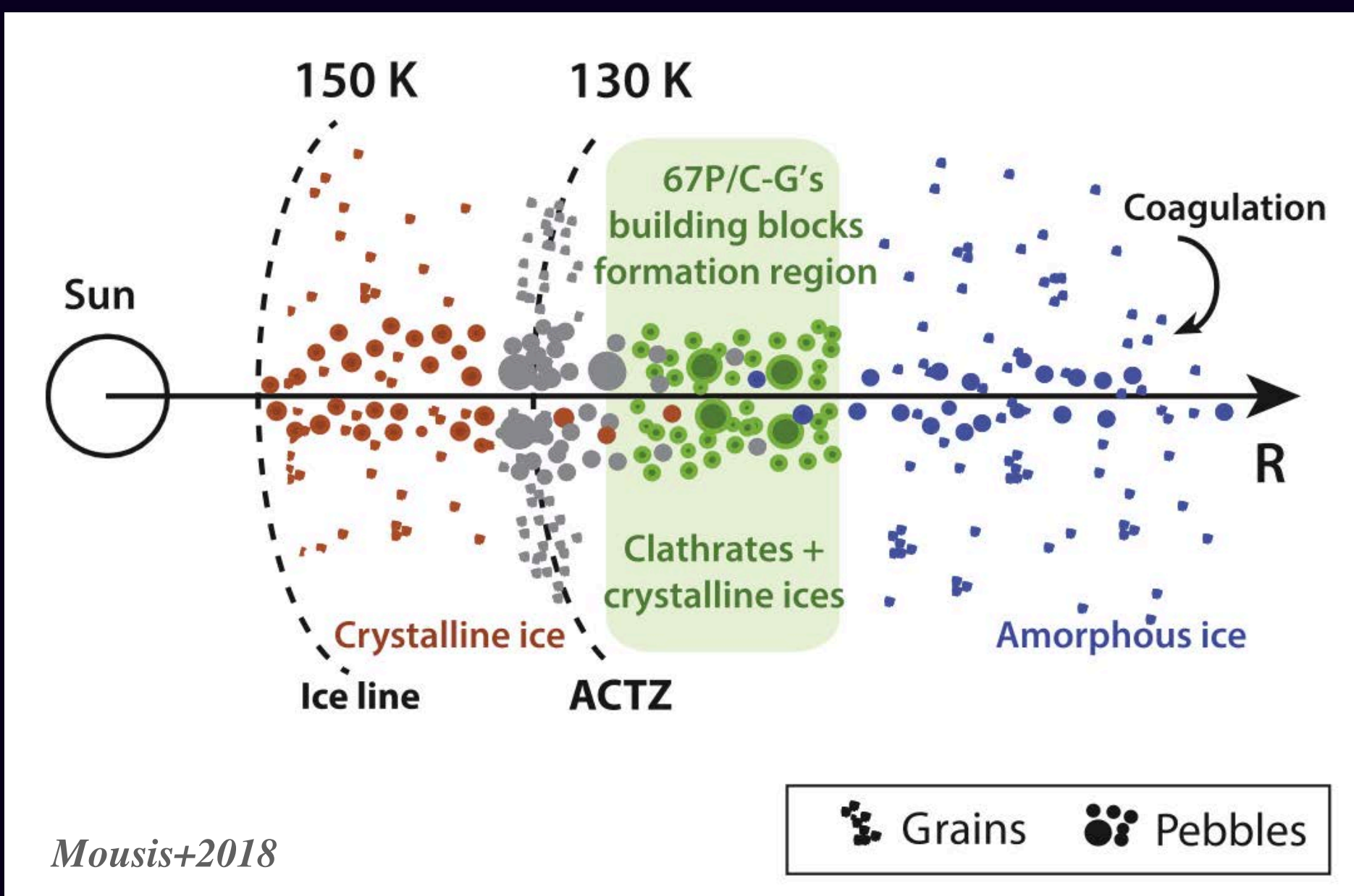
SIMULATION

e.g. Toomre critical wavelength ~100m

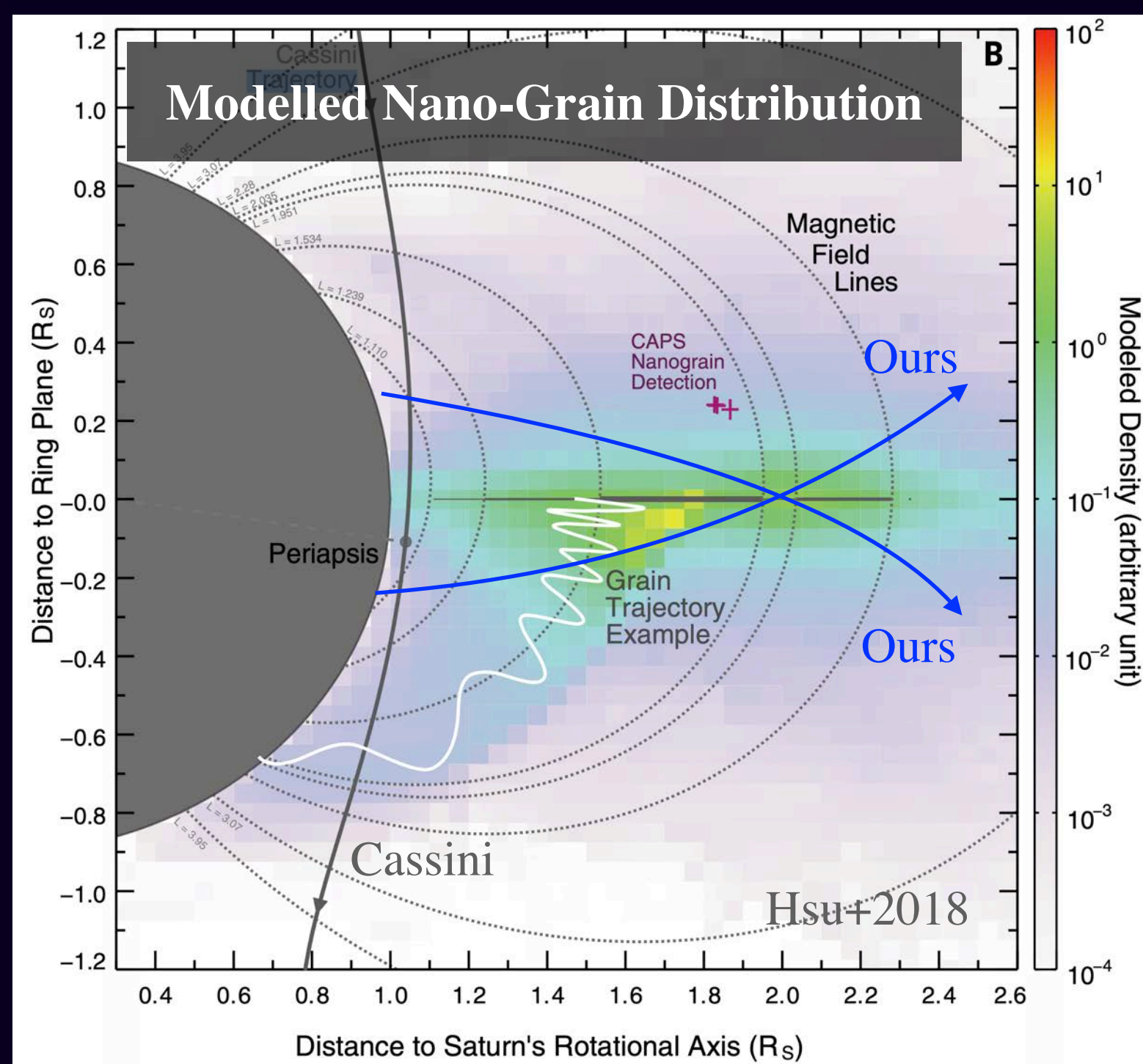
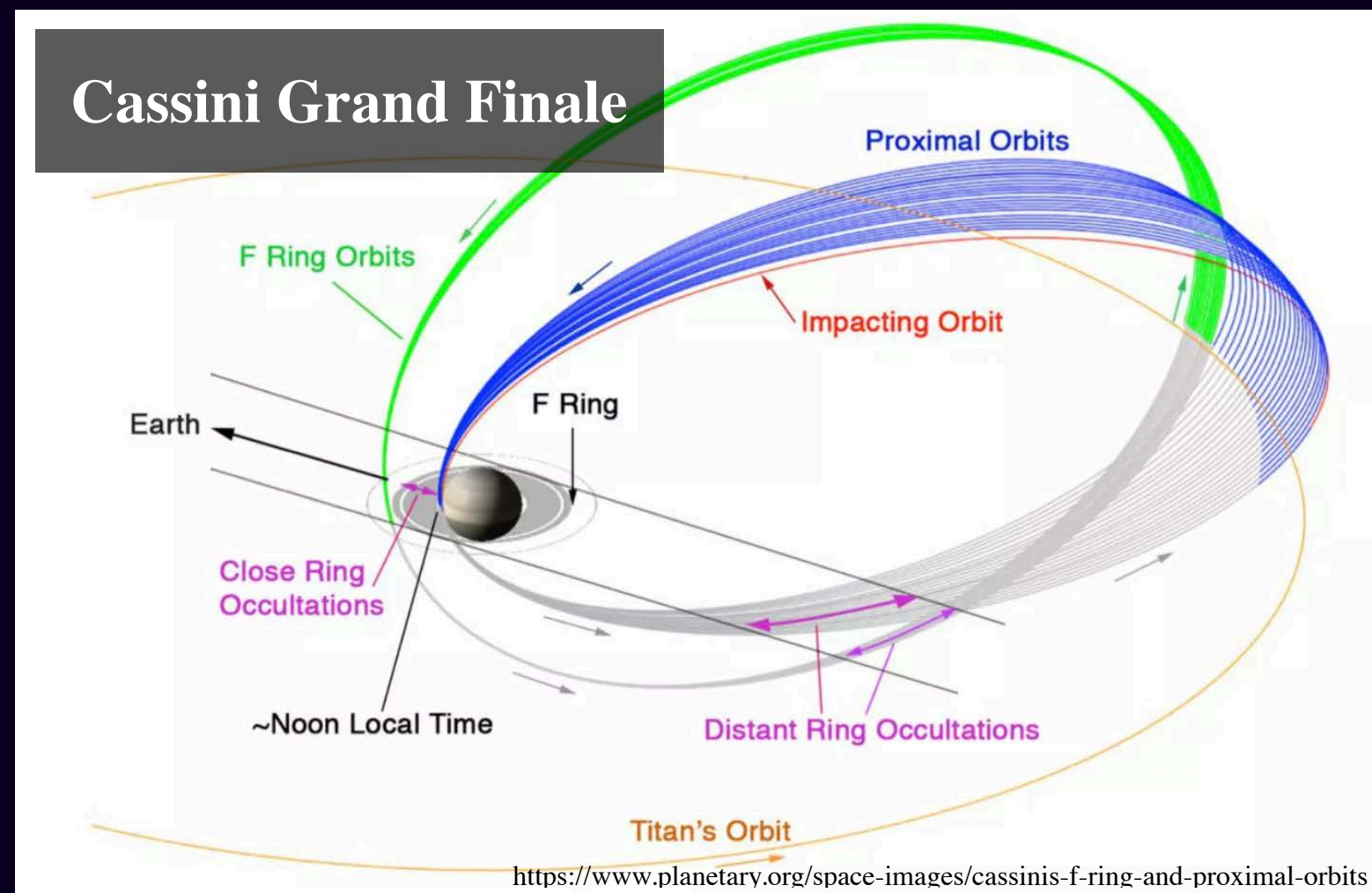
Close Approach Science #1



- Atmospheric composition is keys to understand:
- (1) Where Saturn formed
 - (2) How Saturn formed (pebbles or/and planetesimals?, GI?)
 - (3) Comparison to Jupiter (another giant planet)

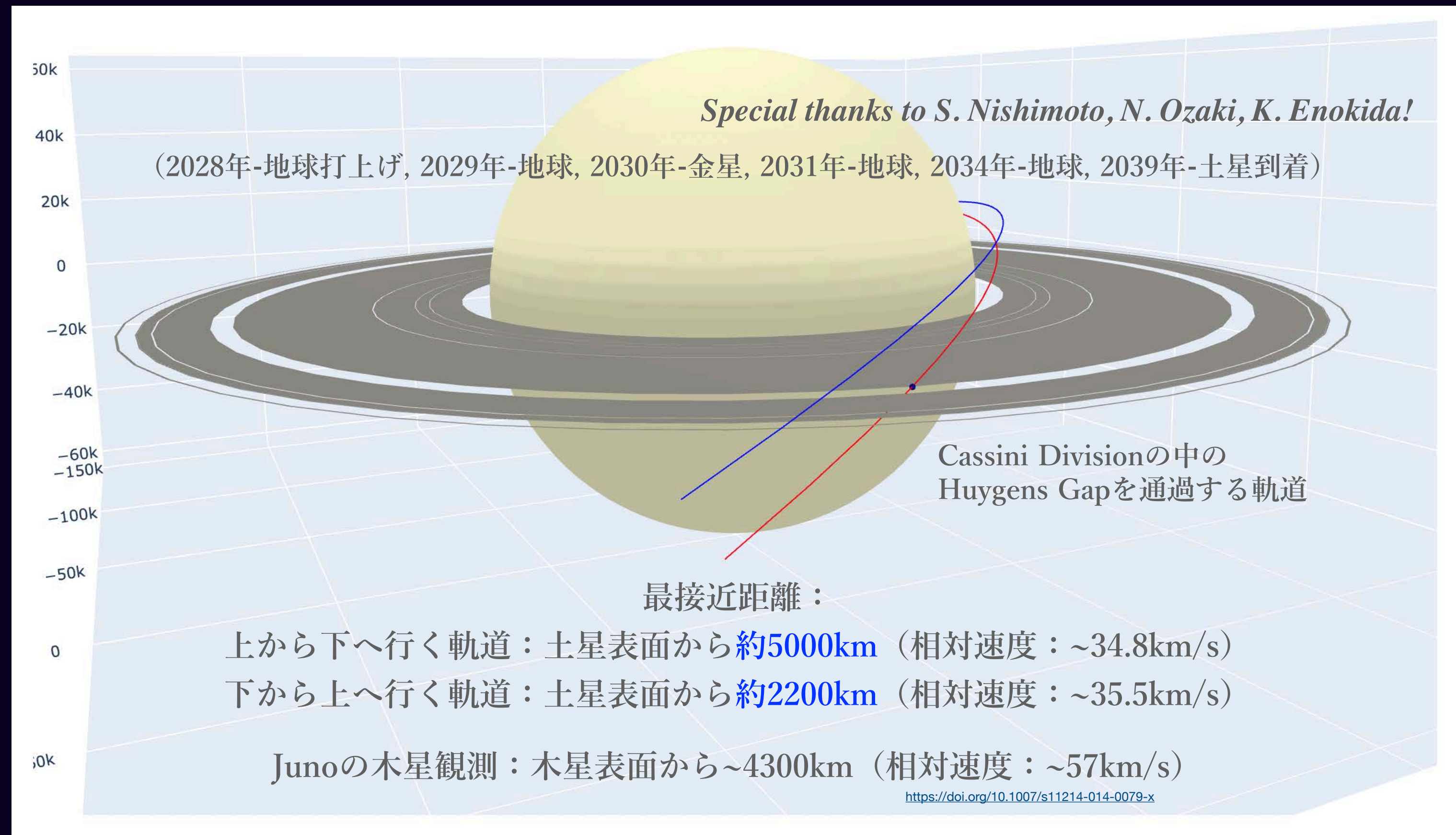


Close Approach Science #2



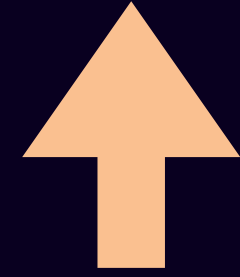
Rings composition needs more study:

- (1) Bulk composition?
- (2) Radial variation?
- (3) Isotopes of minor elements (inc. refractory)

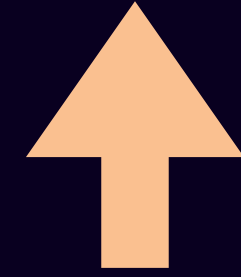


Launch 2028, Arrival 2039

(2028-Launch, 2029-Earth, 2030-Venus, 2031-Earth, 2034-Earth, 2039-Saturn)



小惑星フライバイ
#1



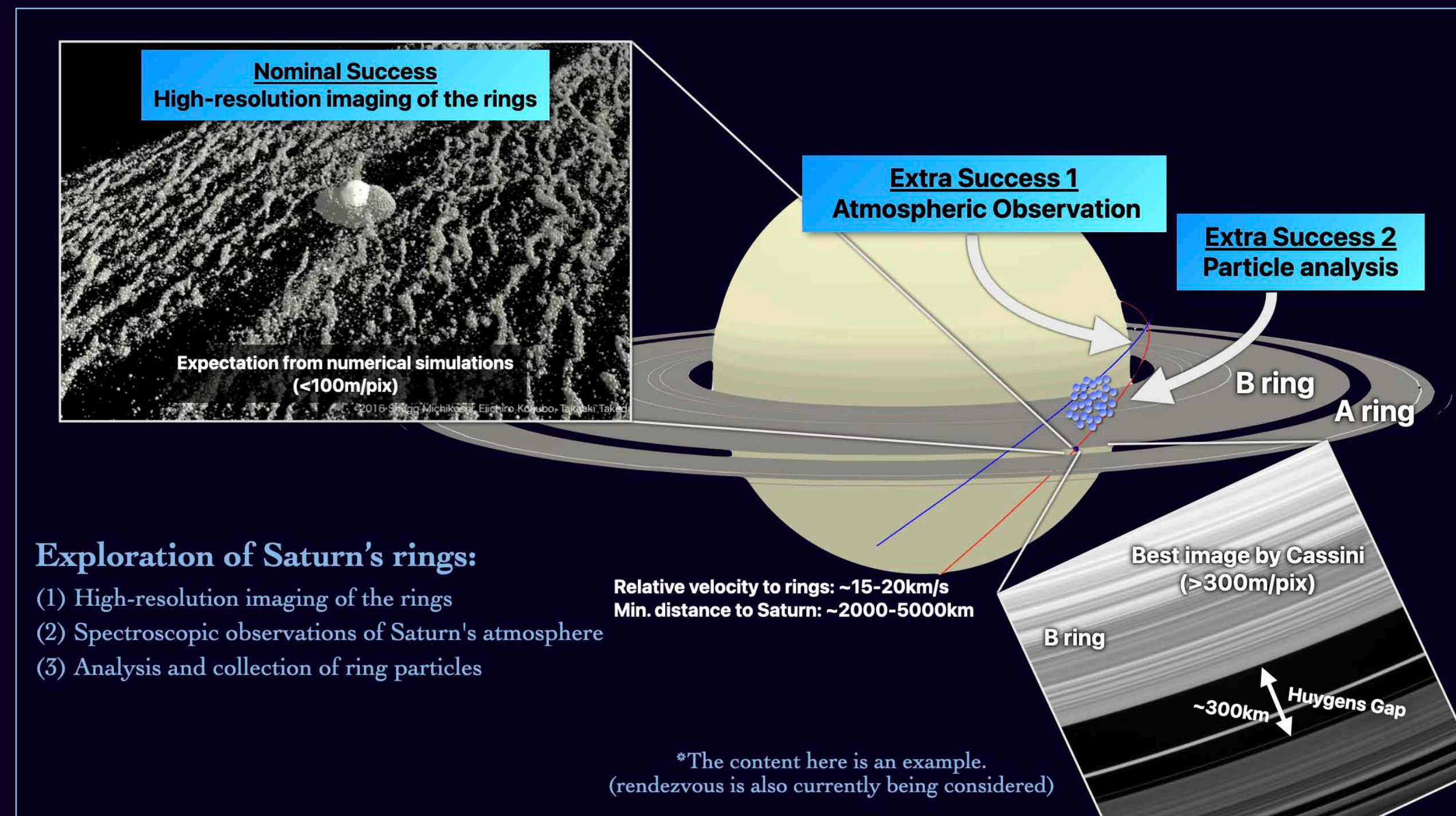
小惑星フライバイ
#2



小惑星フライバイ
#3

「小天体フライバイサイクラー軌道」

Ozaki, .. Hyodo, 2022 JGCD



深宇宙コンステレーションによる 小天体超マルチフライバイ探査構想

「プラネタリーディフェンス」
&
「恒星間天体/長周期彗星の即応型科学探査」
に資すことを目指して

尾崎直哉 & 兵頭龍樹
(工学) (理学)



ISASが目指す新しい小天体探査戦略

2022年11月02日現在、123万個以上の小天体が発見されている。じっくり観測できるのと引き換えに時間の掛かる(ランデブー型の)サンプルリターン探査に対して、ワンチャンスだけど複数の天体に行きやすいマルチフライバイ探査を組み合わせると、より効果的に小天体探査ができる！

事前探査を通じた価値向上

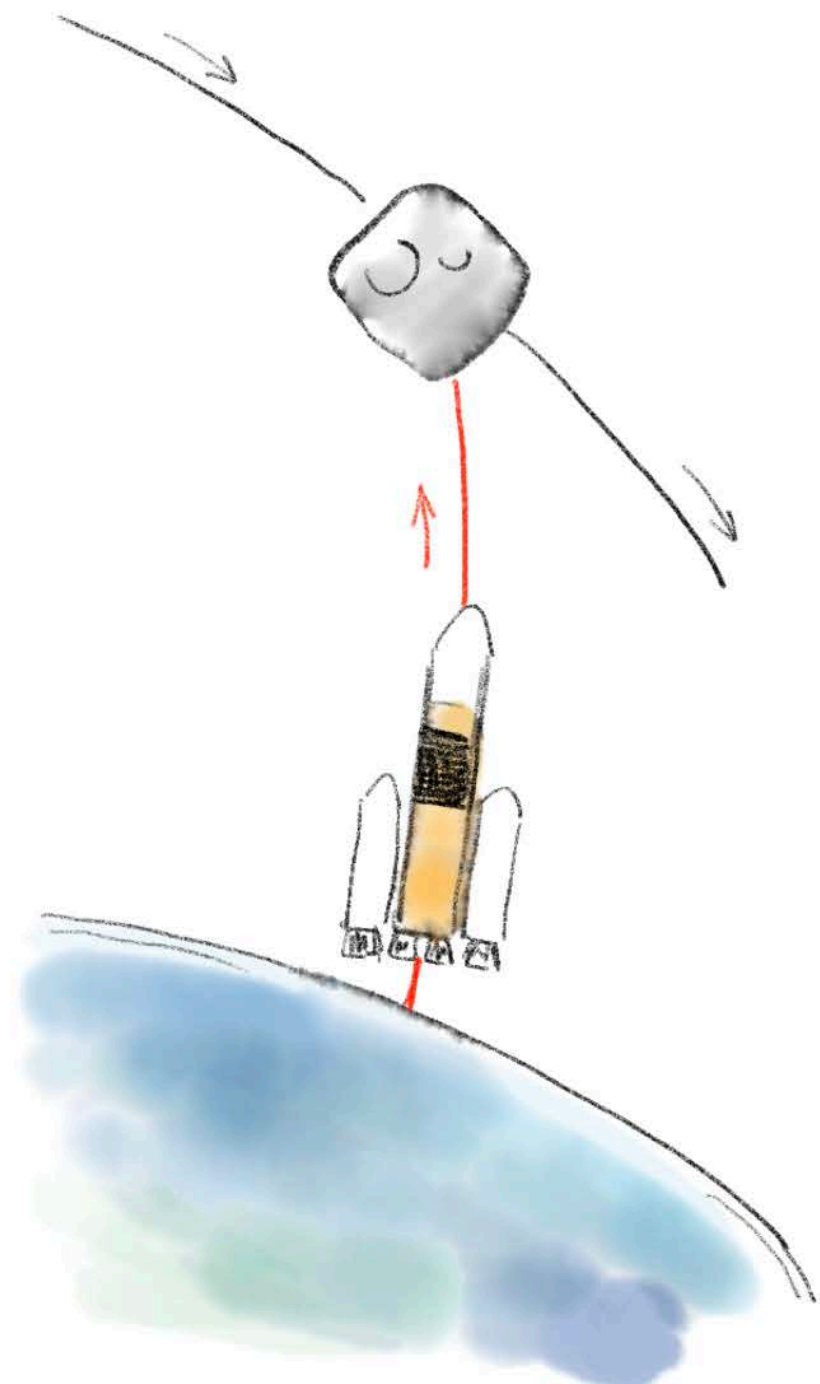
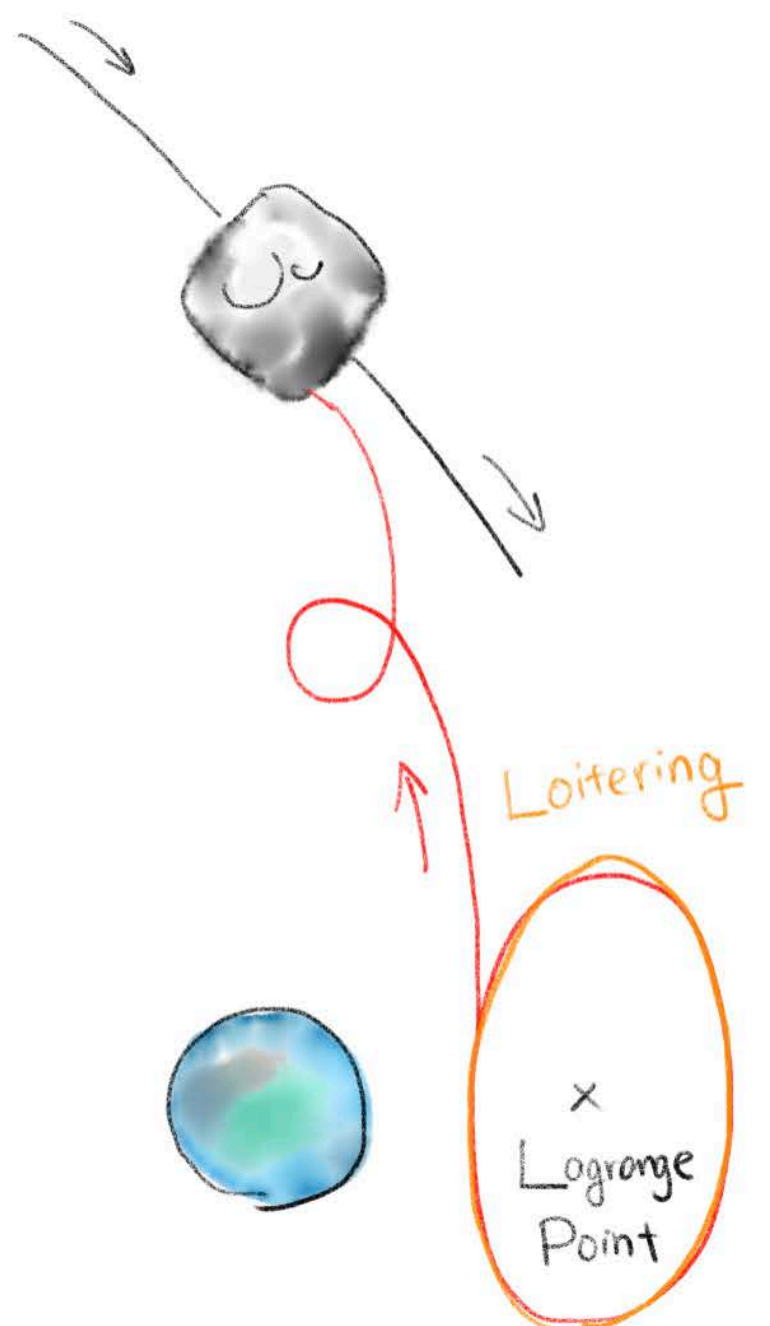
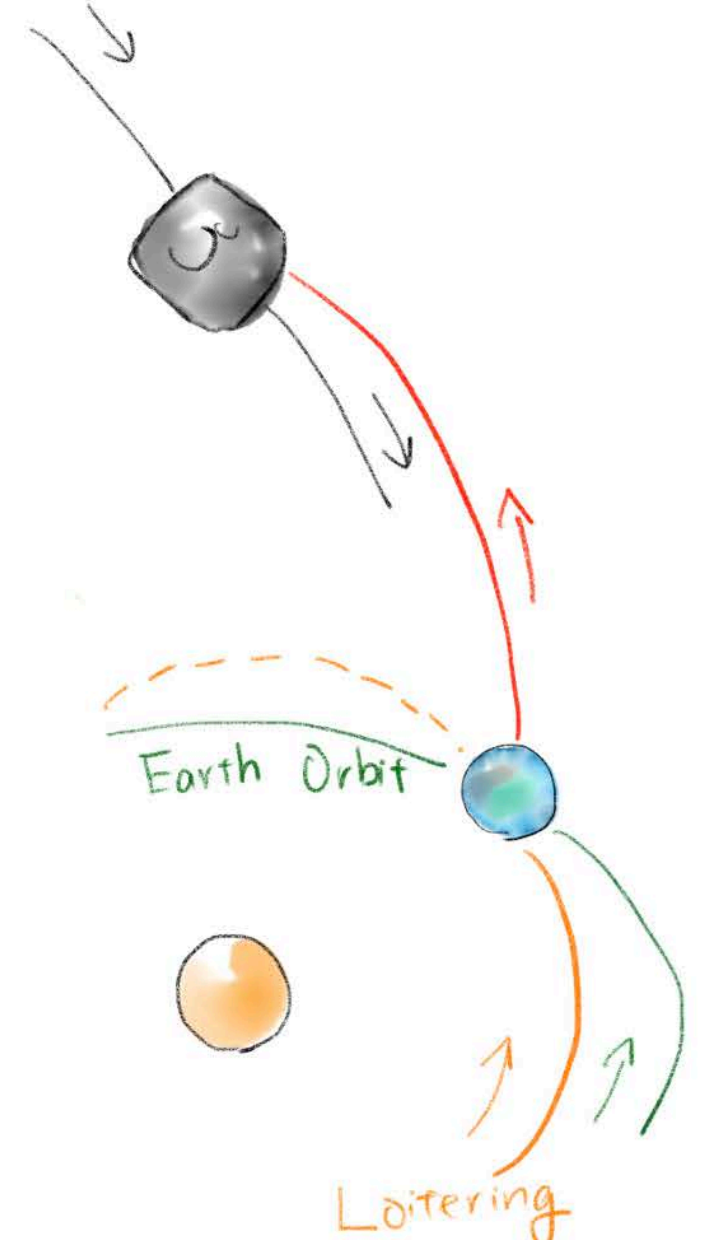
たくさん
観測

DESTINY+ はやぶさ2
(マルチフライバイ) (サンプルリターン)

じっくり
観測

特定の天体に対する発見の一般化

日本が独自に即応型探査を実現するためのシナリオ

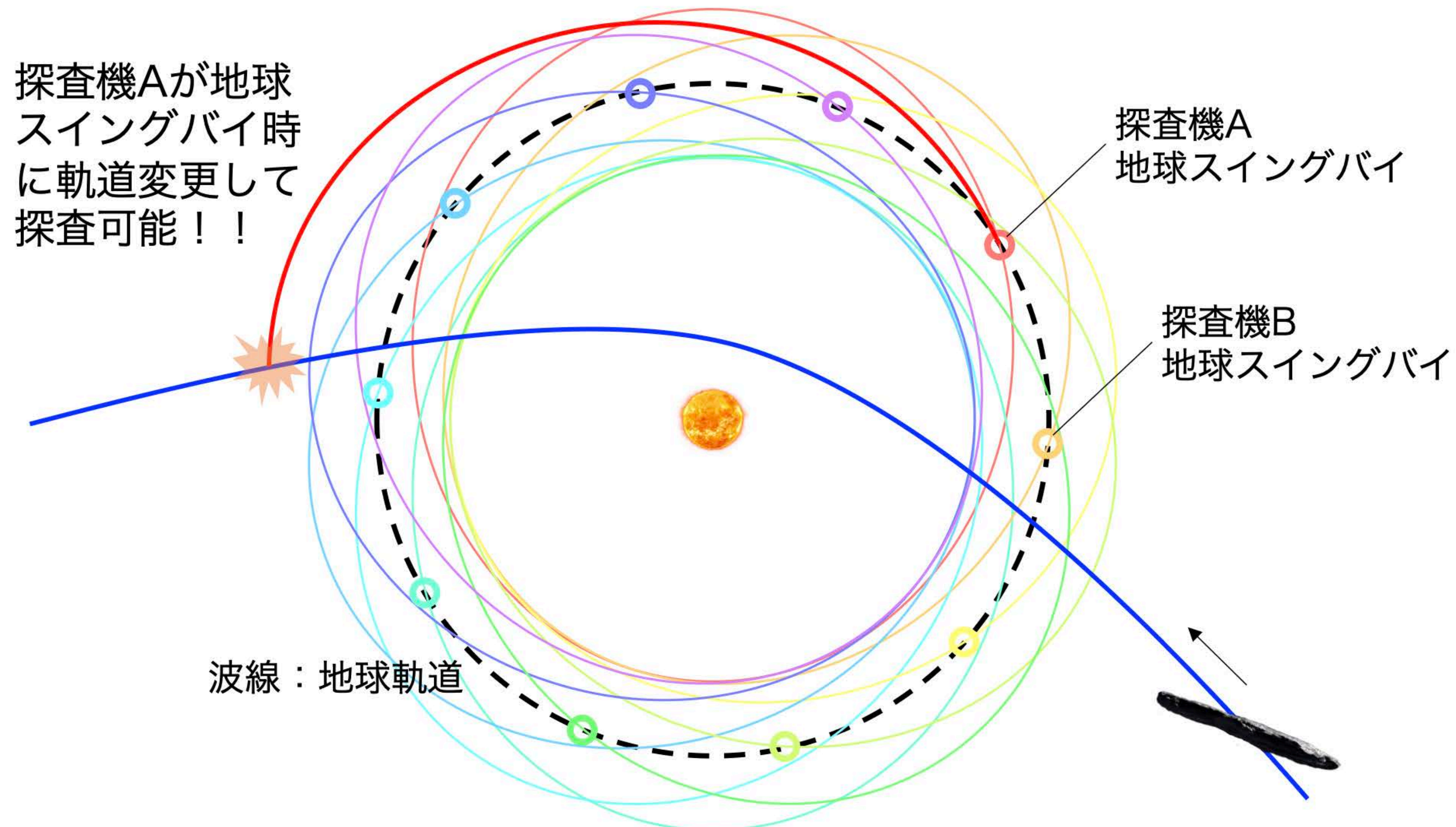
	地球からの直接 打上げ方式	ハロー軌道待機方式	地球スイングバイ方式 (小天体フライバイ サイクラー方式)
概要	<p>対象天体が来たタイミングで ロケットを打ち上げて狙う</p> 	<p>探査機をハロー軌道で待機させてお き、対象天体が来たら脱出し、対象 天体を狙う</p> 	<p>探査機を定期的に地球スイングバイ する軌道に上げておき、対象天体が 来たら、地球スイングバイのタイミ ングで軌道変更し、対象天体を狙う</p> 

日本が独自に即応型探査を実現するためのシナリオ

	地球からの直接 打上げ方式	ハロー軌道待機方式	地球スイングバイ方式 (小天体フライバイ サイクラー方式)
概要	対象天体が来たタイミングで ロケットを打ち上げて狙う	探査機をハロー軌道で待機させてお き、対象天体が来たら脱出し、対象 天体を狙う	探査機を定期的に地球スイングバイ する軌道に上げておき、対象天体が 来たら、地球スイングバイのタイミ ングで軌道変更し、対象天体を狙う
課題	ロケットをいつでも打上げられる状 態にしておく必要がある。PHAsを ターゲットにする場合、10年に1度 あるかどうかのために、探査機を 保持しておくことが難しい。	ハロー軌道から脱出できるエネルギ ーが低いため、そこから電気推進等 で大加速が必要。 現実的な加速量を考えると、恒星間 天体に到達できる確率が低くなる。	10機以上の探査機を同時運用でき るようにしておく必要があり、そのた めの自律化が課題。
ミッション規模	小型探査機が良いがH3のような 液体ロケットが必要	公募型小型クラス	超小型クラス(12U以上) x N機
備考	アメリカが得意そう。 日本でやる場 合には、様々なルールが障壁になり そう。	ESAのComet Interceptor方式	待っている間に小天体マルチフライ バイができるため、コスパが良い。
評価	○	△	◎

提案方式

深宇宙コンステレーションによる即応型探査



異なる黄経で毎年地球スイングバイできるように分散させた軌道に配置する

深宇宙コンステレーション構想の意義

プラネタリー ディフェンス

超小型深宇宙探査
ミッションを通して
宇宙開発後進国
も含めた国際協力※
により全世界で
地球を守るミッション
を推進

深宇宙探査技術

継続的かつ個々の探査機
の失敗を許容した超小型
深宇宙探査機の開発機会
によって積極的な技術実証
による技術力向上と産業・
人材育成を図る

惑星科学

小天体超マルチフライバイ
によって小天体に関する
統計情報を取得する。
恒星間天体・長周期彗星
の世界初の直接探査によって
第一級のサイエンス成果
を得る

※米国カリフォルニア工科大学主催のKISS Workshopにて、本ミッションアイデアを共有しており、米国コミュニティも本ミッション構想に大きな関心を示している。

課題

- ✓複数機同時運用になるので、自立性の確保が必要。
(地上局リソースへの依存度削減のための自律化)
- ✓開発体制の確立 (専門性の高い技術支援)
- ✓打ち上げ機会の確保 (相乗り打ち上げも戦略的に狙う)
- ✓民間・諸外国を巻き込む (友達を作る)
- ✓フライバイの価値を考える (フライバイで可能な科学価値を最大化する)

**「世界初の恒星間天体探査」かつ「小惑星衝突から地球を守る」
ミッションを大学・民間企業・JAXA (&NASA) で一丸になって
実現しませんか？**