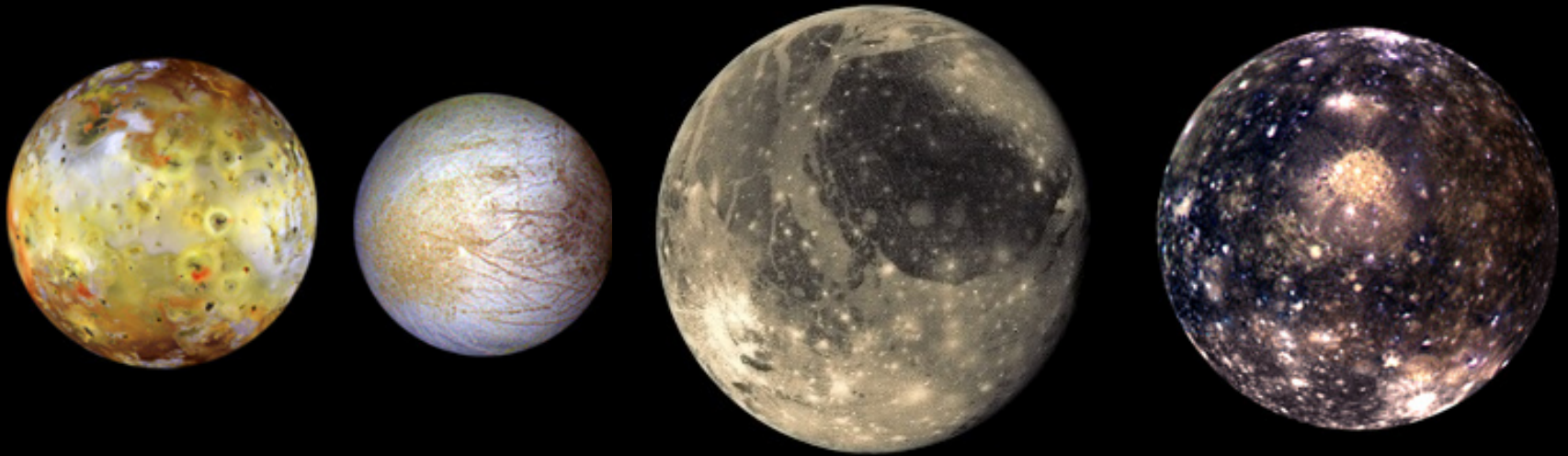


ペブル集積によるガリレオ衛星形成



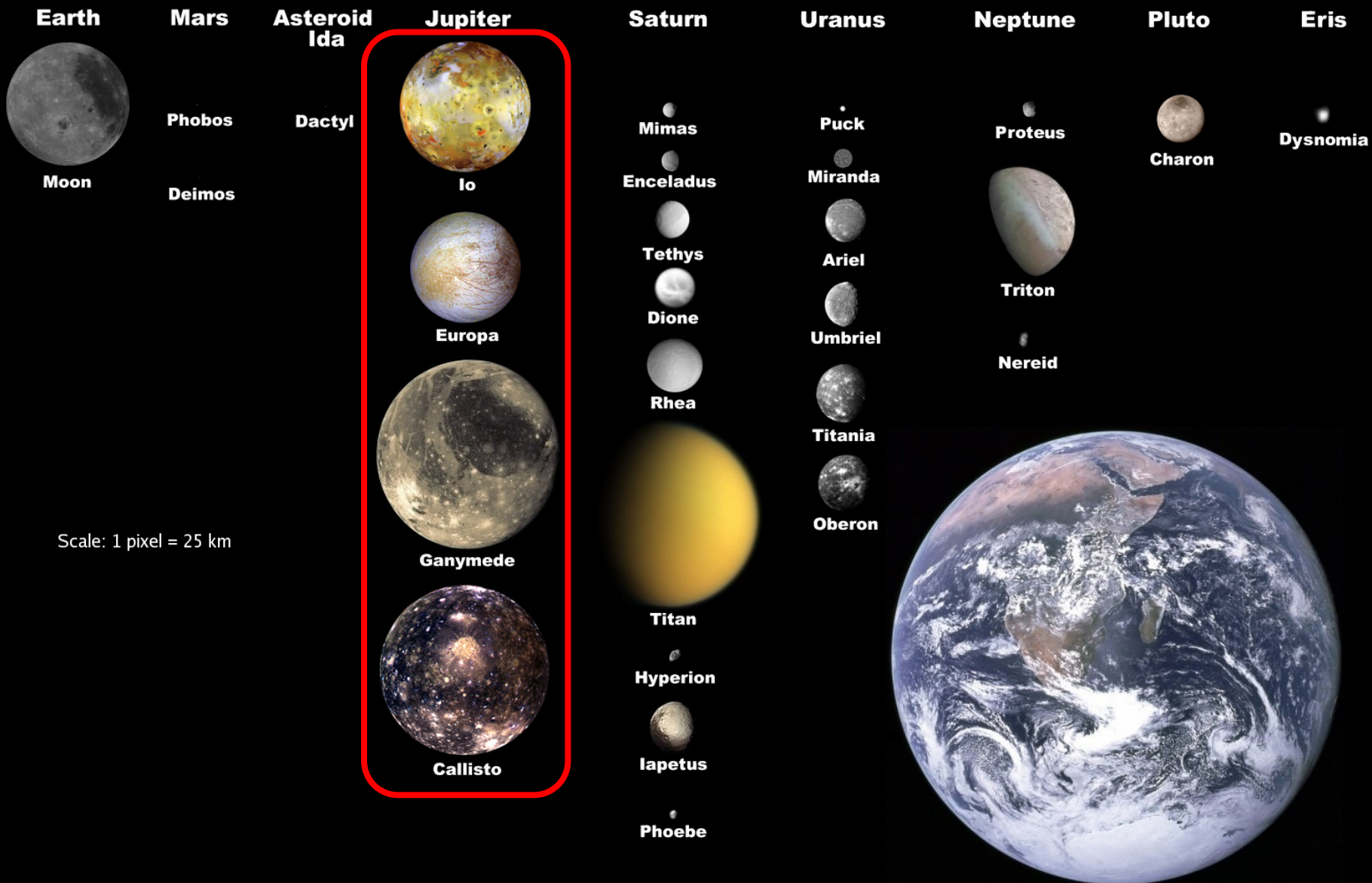
芝池諭人¹

Chris W. Ormel², 井田茂¹, 奥住聡¹, 佐々木貴教³

1. 東京工業大学, 2. University of Amsterdam, 3. 京都大学

2018/08/31, 第6回衛星系研究会

太陽系内の衛星



Scale: 1 pixel = 25 km

Earth

NASA ²

周惑星円盤内でのガリレオ衛星形成

✓ Canup and Ward 2006

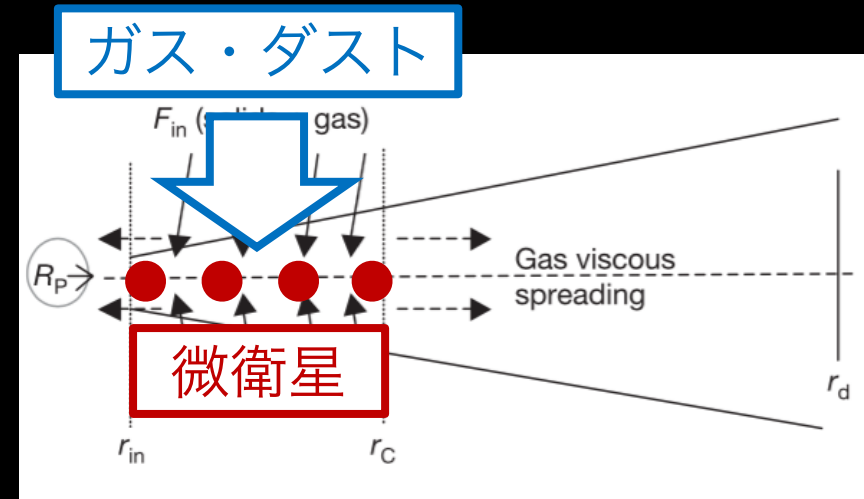
1. ガスとダストの供給

2. 微衛星が衛星に合体成長

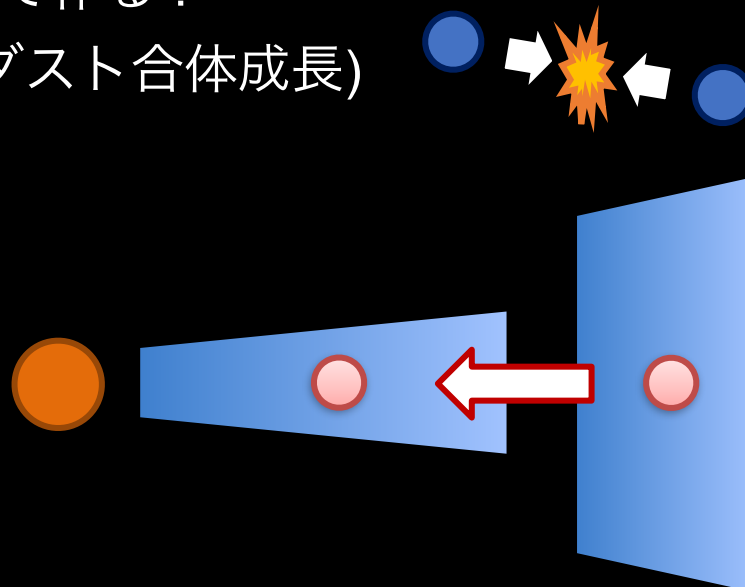
✓ ダストは微衛星まで成長できるのか？

✓ 微衛星はどうやって作る？

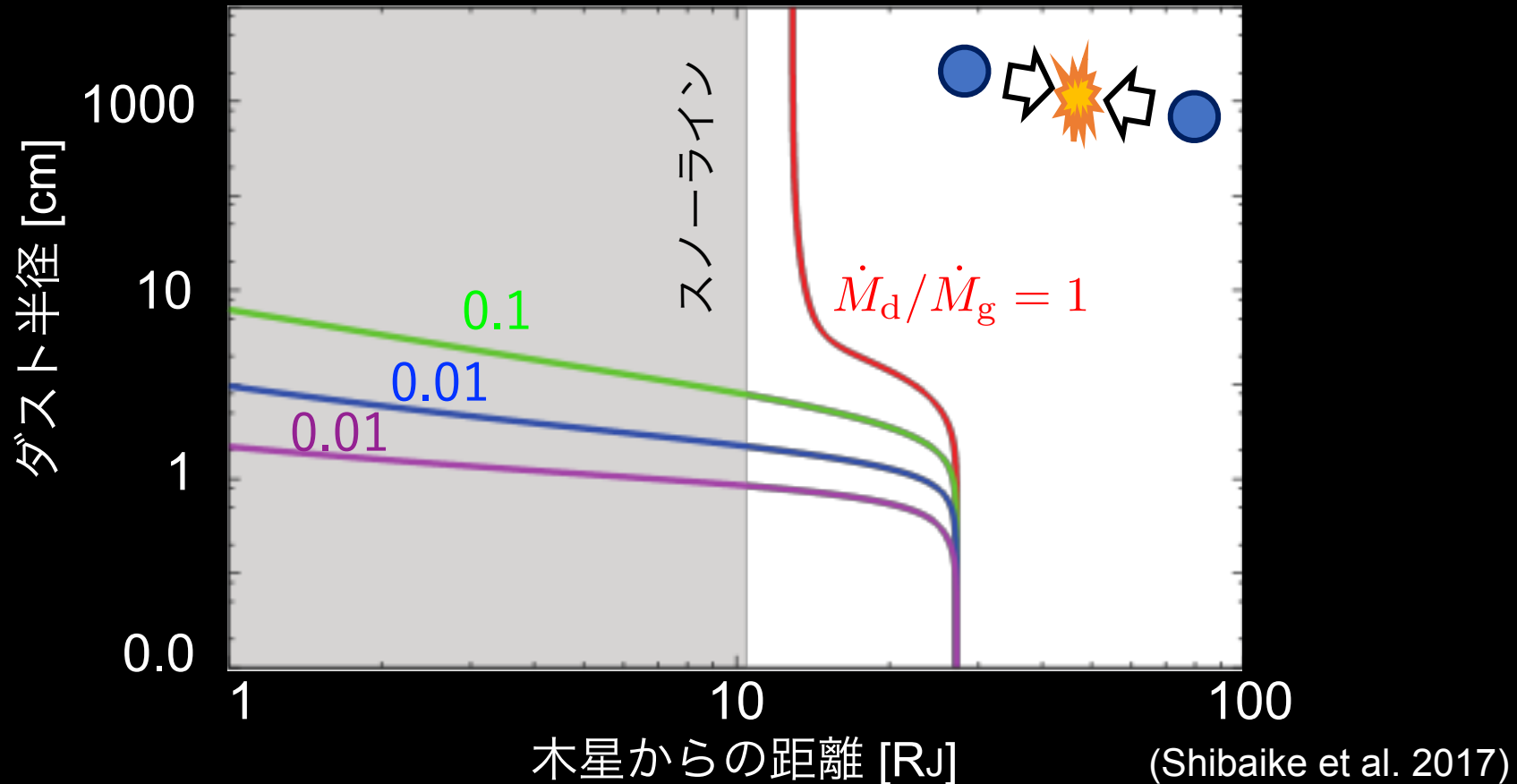
- その場形成(ダスト合体成長)
- 微惑星捕獲



(Canup and Ward 2006)



ダストのドリフトと合体成長



- $\dot{M}_d/\dot{M}_g = 1$ のみ落下前に微衛星にまで成長
→ ダストはギャップ外側に溜まり条件達成困難
(e.g. Kanagawa...Shibaïke et al. submitted)

- ダスト/ガス比の条件の緩和: 奥住さんポスター
- 温度条件の緩和: 森さんポスター

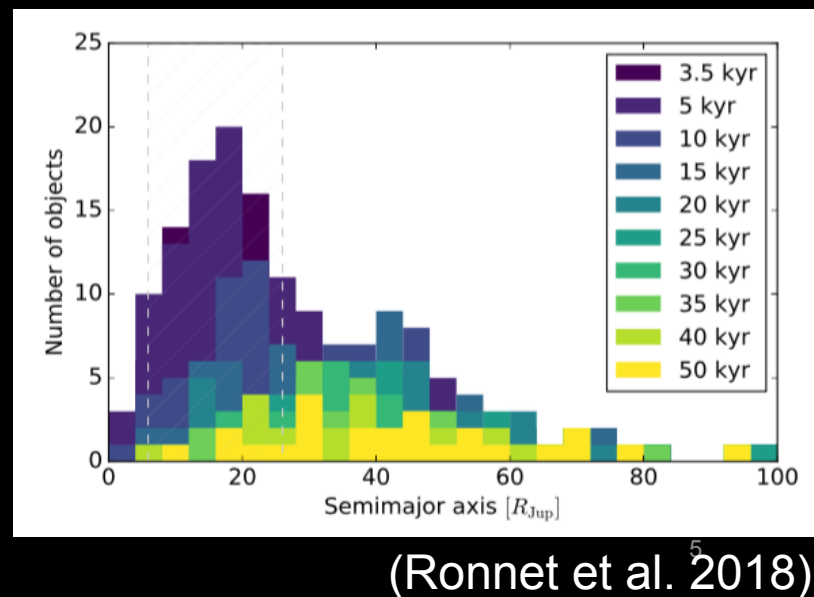
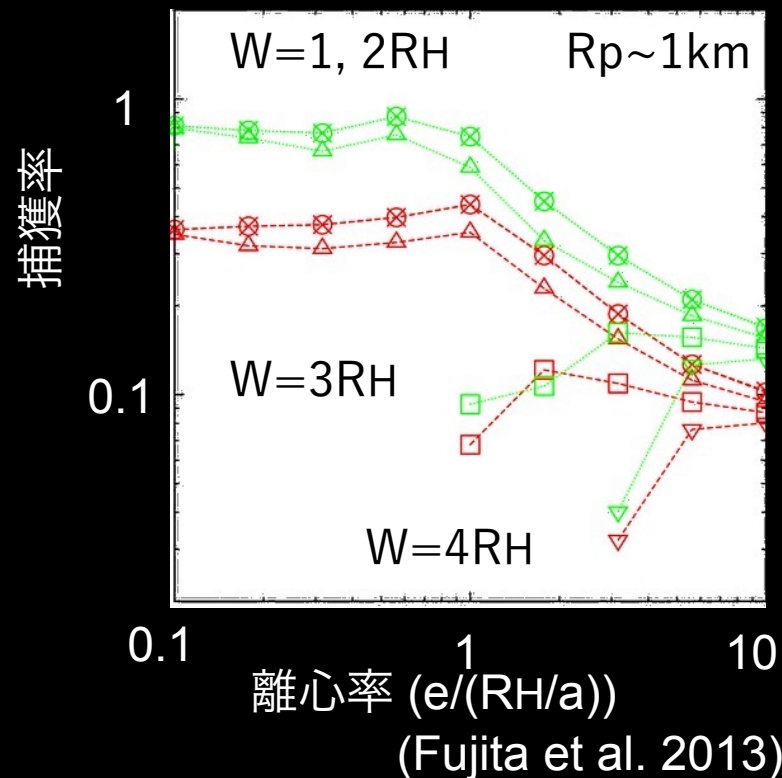
微惑星捕獲

- Canup-Wardモデルでの微惑星の初期条件を再現可能
(e.g. Suetsugu and Ohtsuki 2017)

- 微惑星のギャップ構造
 - Feeding zone に微惑星なし
 - 捕獲率減少 (Fujita et al. 2013)

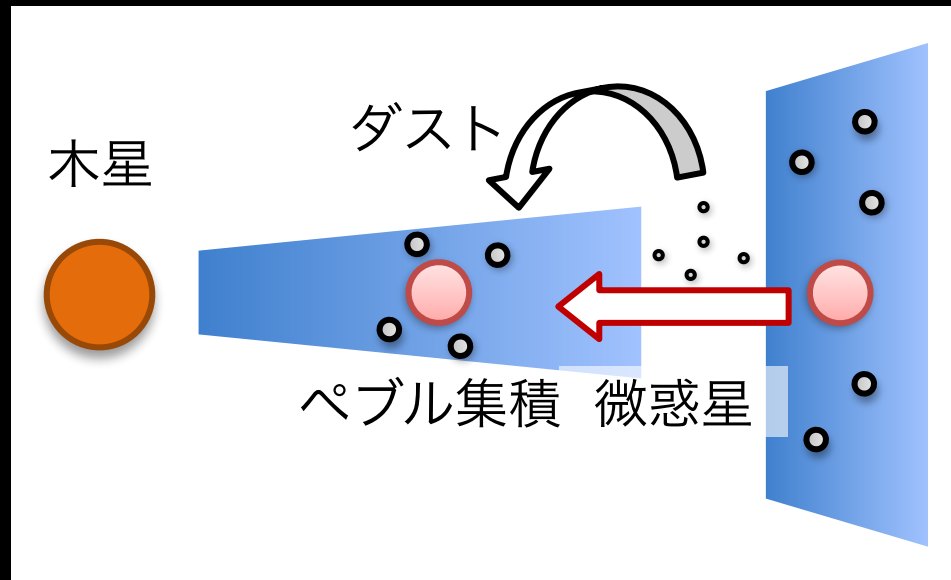
- 土星(の移動)により、ギャップの外側に”溜まった”微惑星を周惑星円盤に運べる
(Ronnet et al. 2018)

- 1km以上の氷微惑星では氷の無いイオとエウロパが作れない
(Ronnet et al. 2017)



ペブル集積によるガリレオ衛星形成

- その場形成(ダスト合体成長) → 条件付き
 - 微惑星捕獲 → 条件付き
- 新しいハイブリッドシナリオ: 「ペブル集積」



ペブル集積シナリオに必要なのは、
落下するペブル + 少数の微惑星のみ

ガリレオ衛星の特徴

1. 質量

- $\sim 10^{25}$ - 10^{26} g (10^{-5} – 10^{-4} MJ)
- 外側二つ > 内側二つ ← 氷あり/なし

2. 軌道・共鳴

- 6-27RJ
- 内側三つが 2:1 の平均運動共鳴

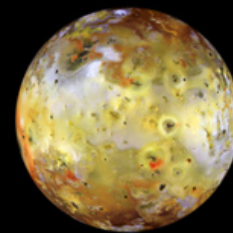
← 衛星の移動, 「最後の世代」かキャビティが必要
(Canup & Ward 2006, Sasaki et al. 2010)

3. 氷/岩石質量比

- 0, 0.08, 0.45, 0.56 (Sohl et al. 2002)
- ← スノーラインがガニメデからエウロパに移動?
(Canup & Ward 2009)

4. 内部分化

- カリストのみが未分化
 - 集積タイムスケール > 0.6Myr (Barr & Canup 2008)
 - なぜガニメデとの違いが生まれた?



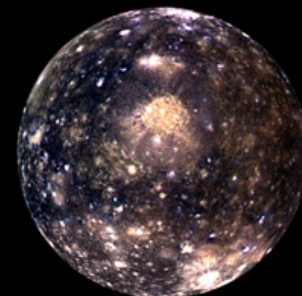
Io



Europa



Ganymede



Callisto

ガリレオ衛星の進化

主要な仮定

$\dot{M}_0 = 0.2 \text{ MJ/Myr}$,

$t_{\text{dep}} = 3 \text{ Myr}$

$r_{\text{cav}} = 5.9 R_J$,
($B_{\text{cp}} \sim 40 \text{ Gauss}$)

$\alpha = 10^{-4}$

$r_{\text{sdg}} = 1.65 \times 10^{-7}$ (温度)

捕獲数 = 4

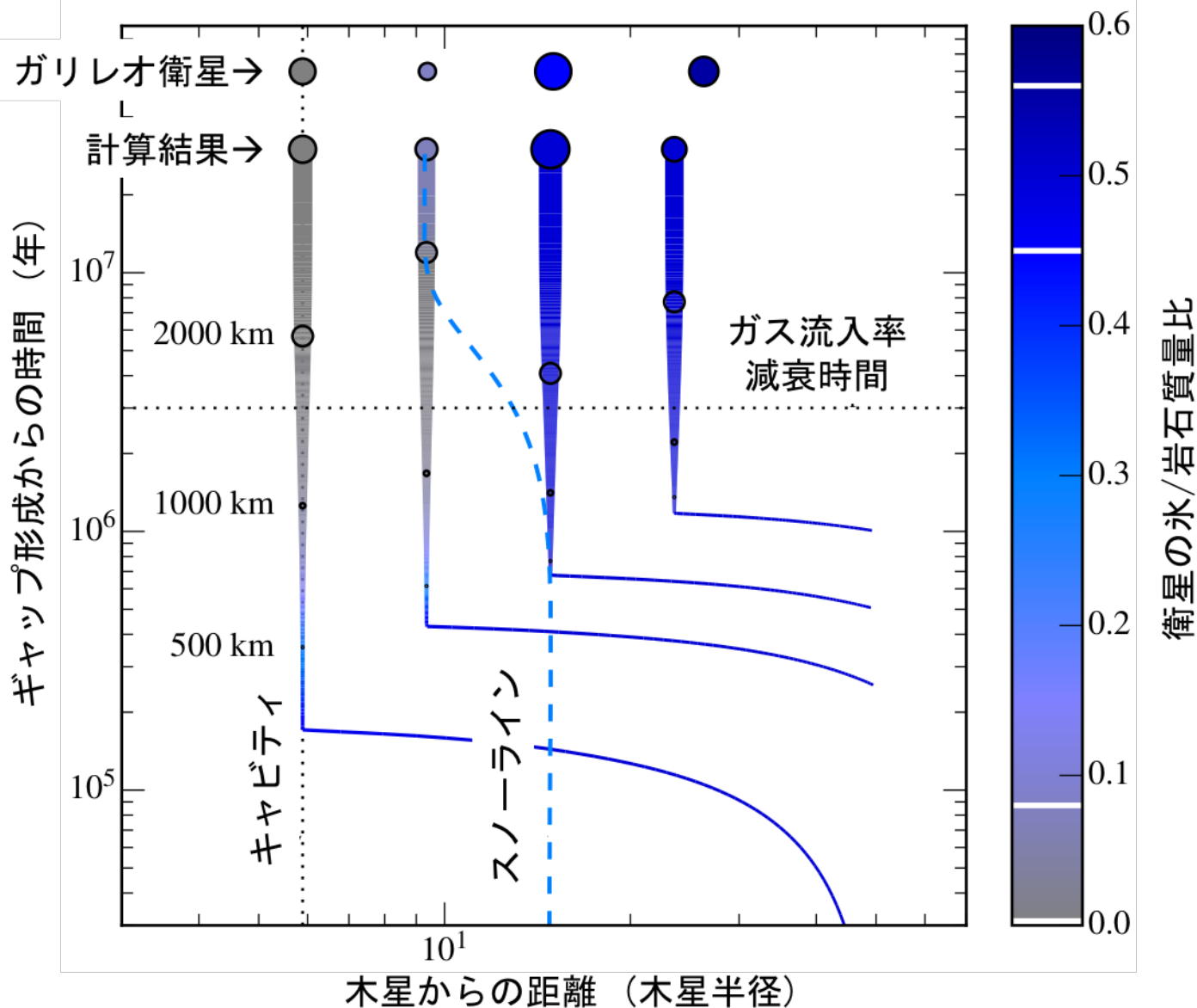
$x = 0.0027$

$t_{\text{gap}} = 1.0 \text{ Myr}$

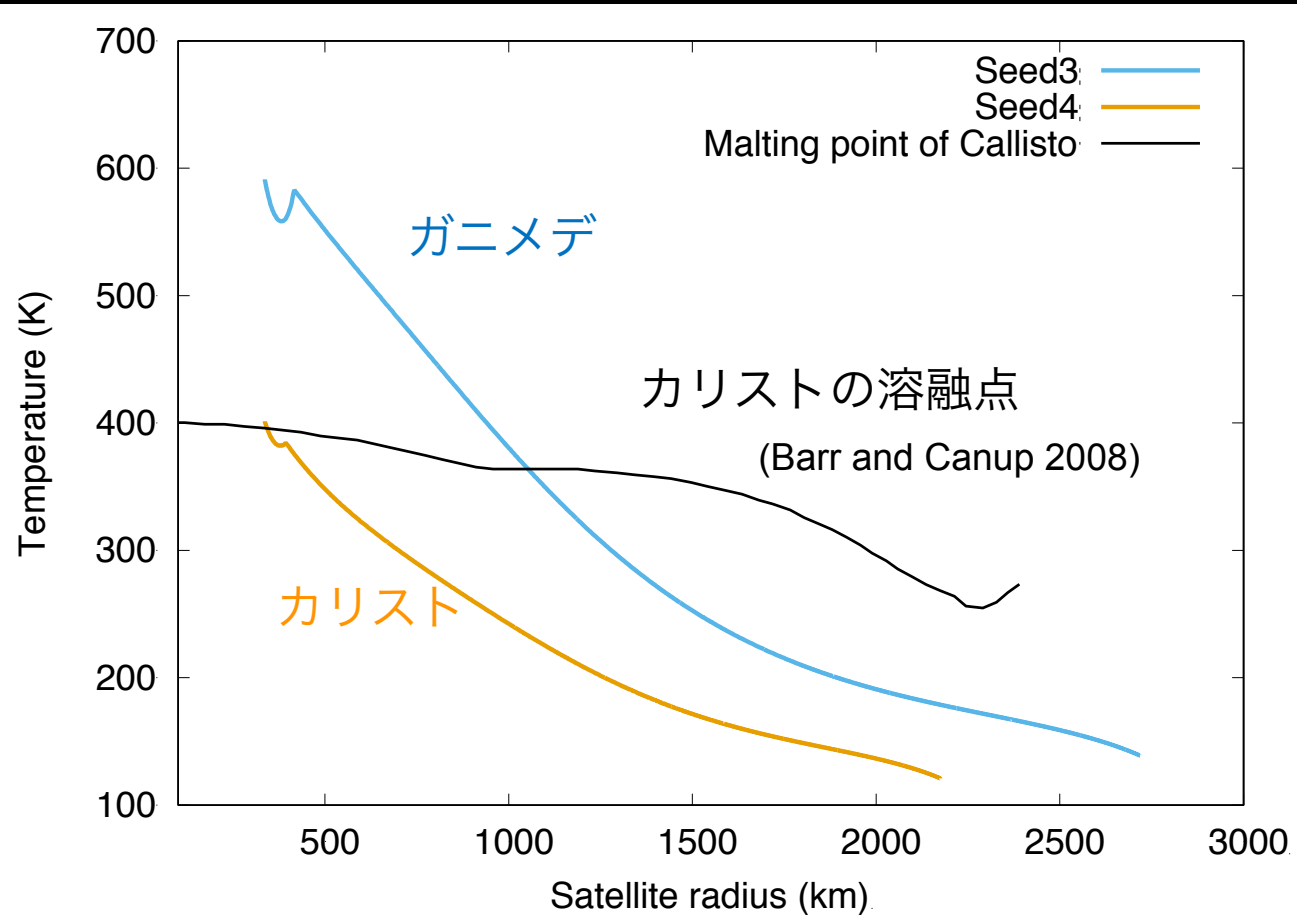
$t_{\text{cap}} = 1.0, 1.25, 1.5,$
 2.0 Myr

$M_{\text{s,start}} = 3 \times 10^{23} \text{ g}$

円軌道



未分化のカリスト



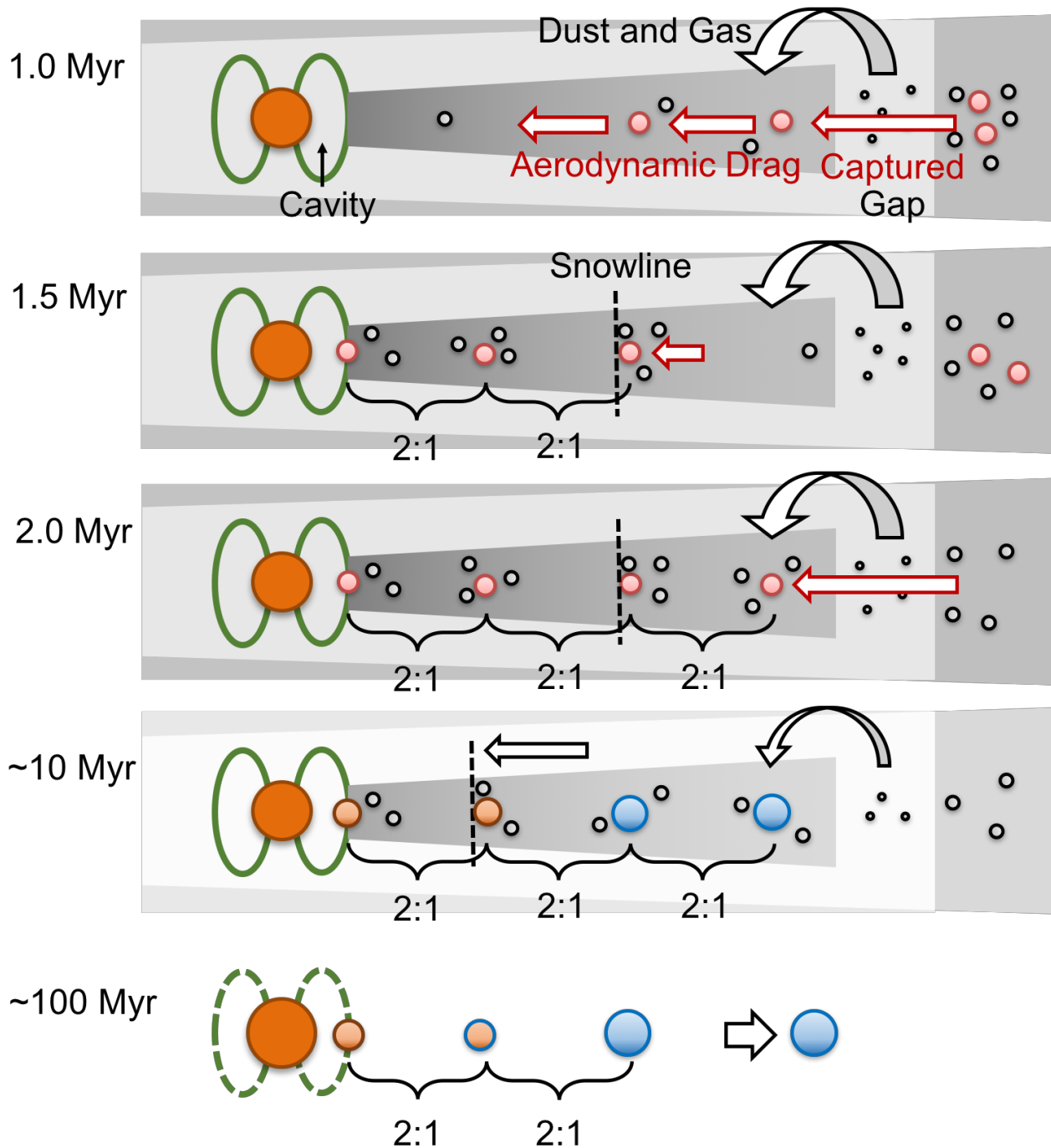
- ガニメデ: CAI形成後1.5Myr で捕獲
 - カリスト: 2.0Myr
- ↓
- ガニメデだけが²⁶Al 放射壊変熱で分化する
- ※ 半減期 0.716 Myr

(Shibaie et al. in prep.)

長い成長タイムスケールで (~10Myr) 衛星形成

- 集積加熱が小さい
- 捕獲時間の違いが最終質量に影響しない

新しい シナリオ



ガリレオ衛星の特徴

1. 質量

- $\sim 10^{25}$ - 10^{26} g (10^{-5} – 10^{-4} MJ)
- 外側二つ > 内側二つ ← 氷あり/なし

✓ 再現

2. 軌道・共鳴

- 6-27RJ
- 内側三つが 2:1 の平均運動共鳴

✓ カリスト

以外再現

← 衛星の移動, 「最後の世代」かキャビティが必要
(Canup & Ward 2006, Sasaki et al. 2010)

3. 氷/岩石質量比

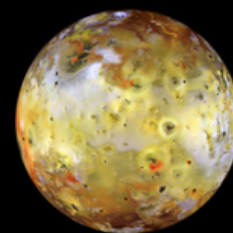
- 0, 0.08, 0.45, 0.56 (Sohl et al. 2002)
- ← スノーラインがガニメデからエウロパに移動?
(Canup & Ward 2009)

✓ 再現

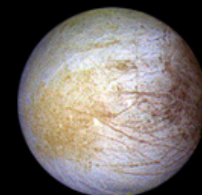
4. 内部分化

- カリストのみが未分化 ✓ 再現
- 集積タイムスケール > 0.6Myr
- なぜガニメデとの違いが生まれた?

(Barr & Canup 2008)



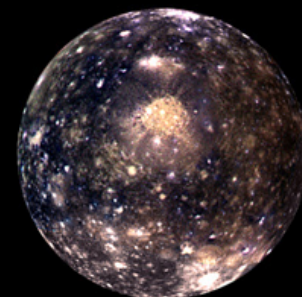
Io



Europa



Ganymede



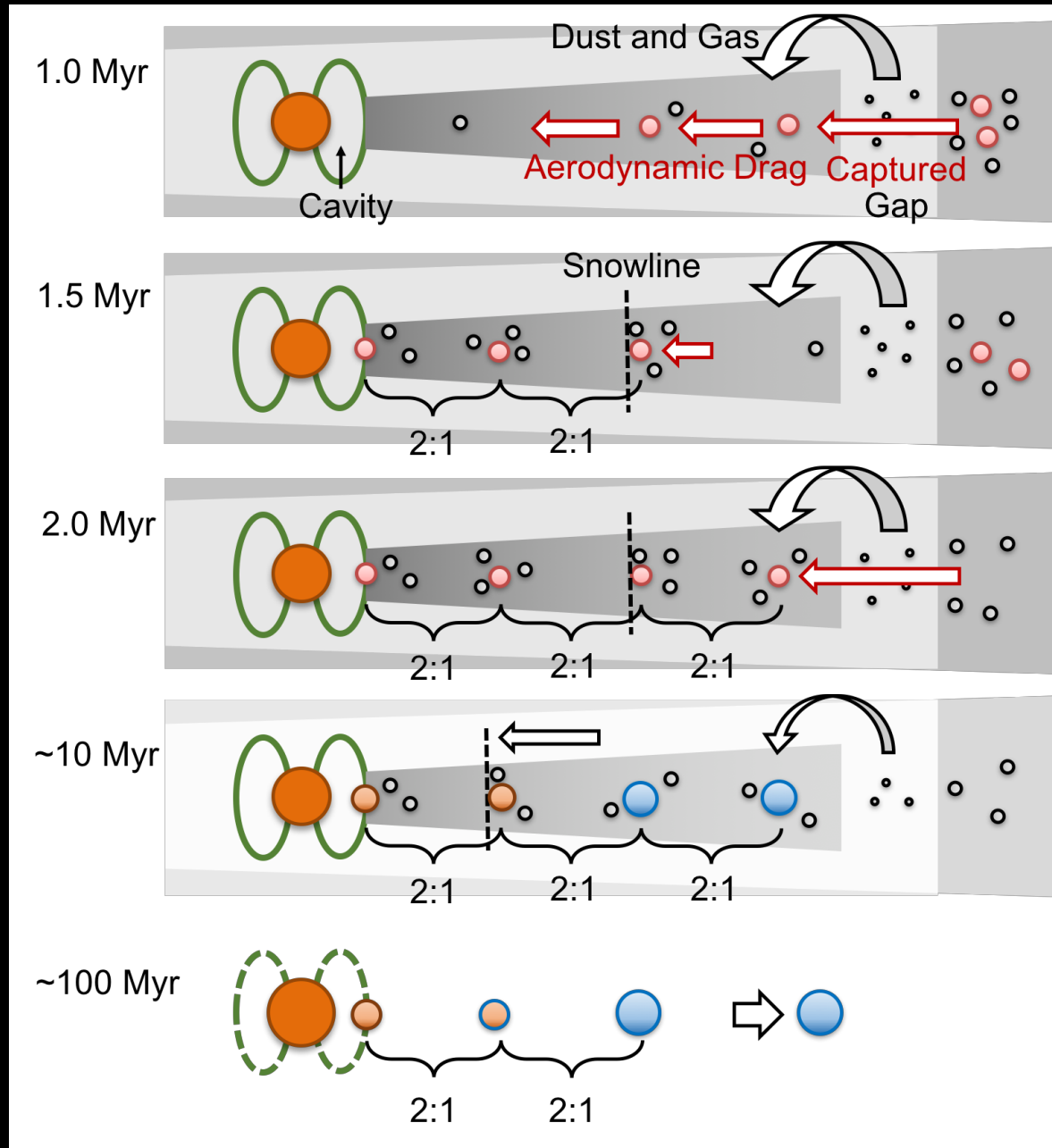
Callisto

主要な仮定とその妥当性

主要な仮定	再現されるガリレオ衛星の特徴	これまでの研究や観測事実との整合性
$\dot{M}_0=0.2\text{MJ}/\text{Myr}$, $t_{\text{dep}}=3\text{Myr}$	(すべての特徴に影響する)	現在の木星質量, PPDの寿命
$r_{\text{cav}}=5.9R_J$, ($B_{\text{cp}}\sim 40\text{Gauss}$)	イオの位置	形成時の木星の強磁場(S83), 円盤電離度不明(TS96,F14), 木星進化の影響
$\alpha=10^{-4}$	(多くの特徴に影響)	MRIが起きない(F14)
$r_{\text{sdg}}=1.65\times 10^{-7}$ (温度)	全衛星の氷/岩石質量比	理由なし
捕獲数=4	衛星の数	円盤への供給は少ない(F13), ギャップ外側での微惑星形成(K12,R18)
$x=0.0027$	全衛星の質量	円盤への供給は少ない(CW02,T14) 値固定の理由なし
$t_{\text{gap}}=1.0\text{Myr}$	ガニメデの分化とカリストの未分化	木星の早期形成(K17)
$t_{\text{cap}}=1.0, 1.25, 1.5,$ 2.0Myr	ガニメデの分化とカリストの未分化	理由なし
$M_{\text{s,start}}=3\times 10^{23}\text{g}$	内側三衛星の共鳴関係	捕獲可能な微惑星の質量(F13,S017), ペブル集積可能な質量(O18)
円軌道	(多くの特徴に影響)	理由なし

まとめ

- ガリレオ衛星は周惑星円盤で形成
- 微衛星は作れる？
 - その場形成: 難
 - 微惑星捕獲: 難
- ペブル集積
- 質量
- 共鳴(カリスト以外)
- 氷/岩石比
- カリストのみ未分化
- を再現
- 少ない固体供給でOK
- 仮定の妥当性...?



(Shibaïke et al. in³ prep.)