

新たな海形成機構の提案

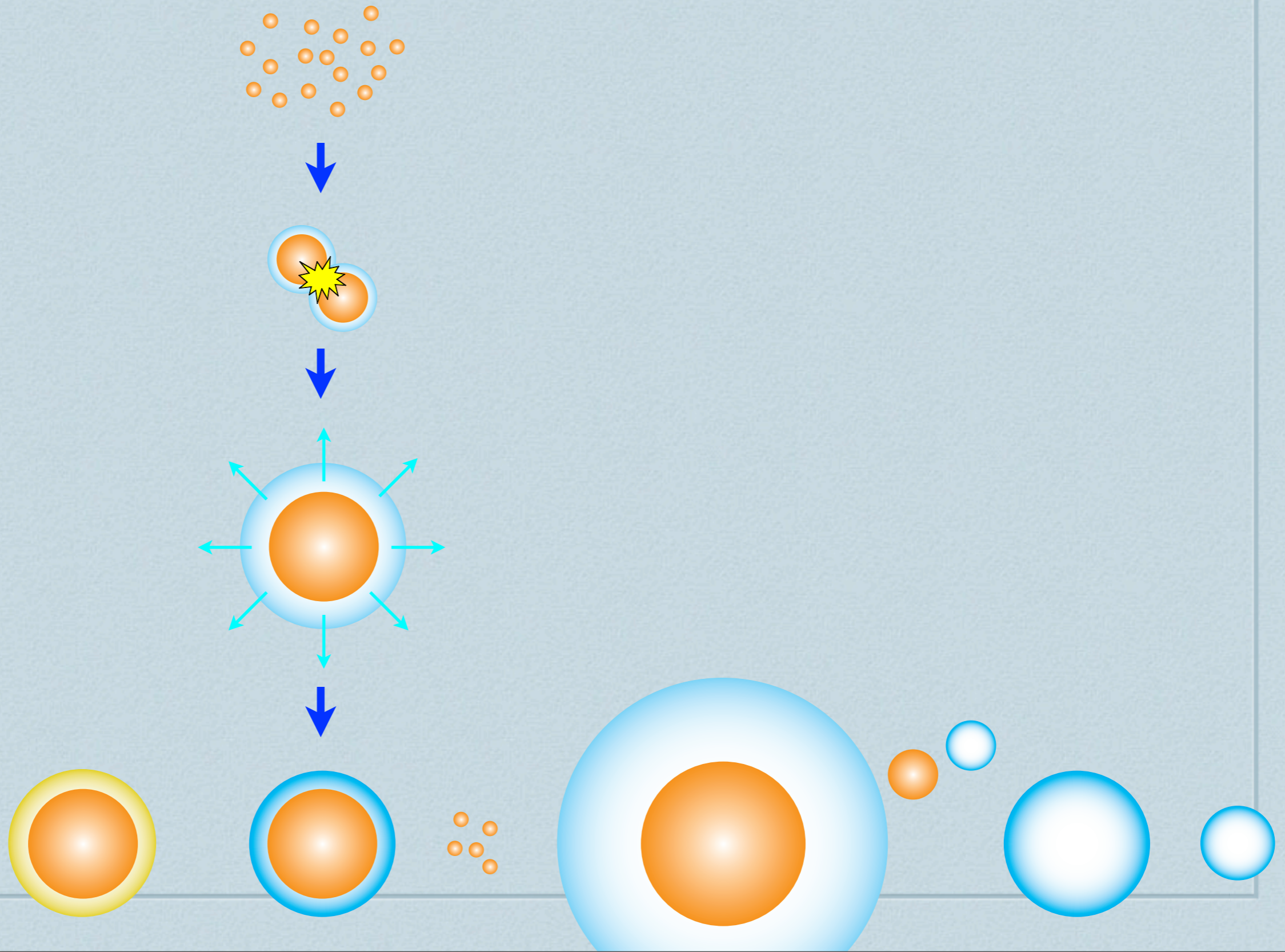
佐々木貴教（東京工業大学）

自己紹介

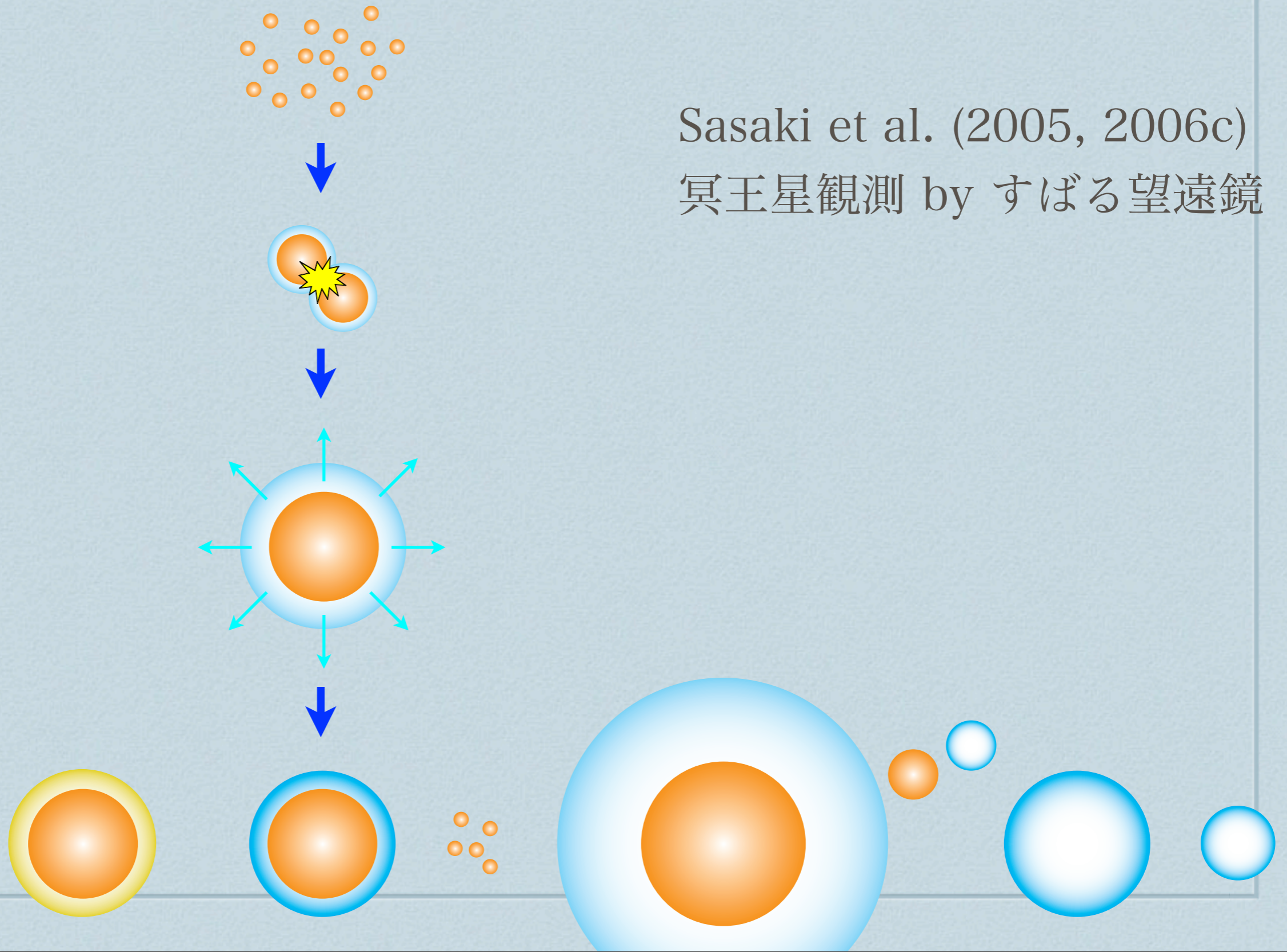
- ❖ 佐々木 貴教 (ささき たかのり)
- ❖ 東京工業大学 大学院理工学研究科 地球惑星科学専攻
GCOE「地球から地球たちへ」 特任准教授
神奈川大学 理学部 非常勤講師
- ❖ 2008年3月 学位取得@東大地惑
- ❖ 専門：惑星と生命の起源と進化
- ❖ Sasaki Takanori Online
<http://sasakitakanori.com>



これまでに行ってきた研究

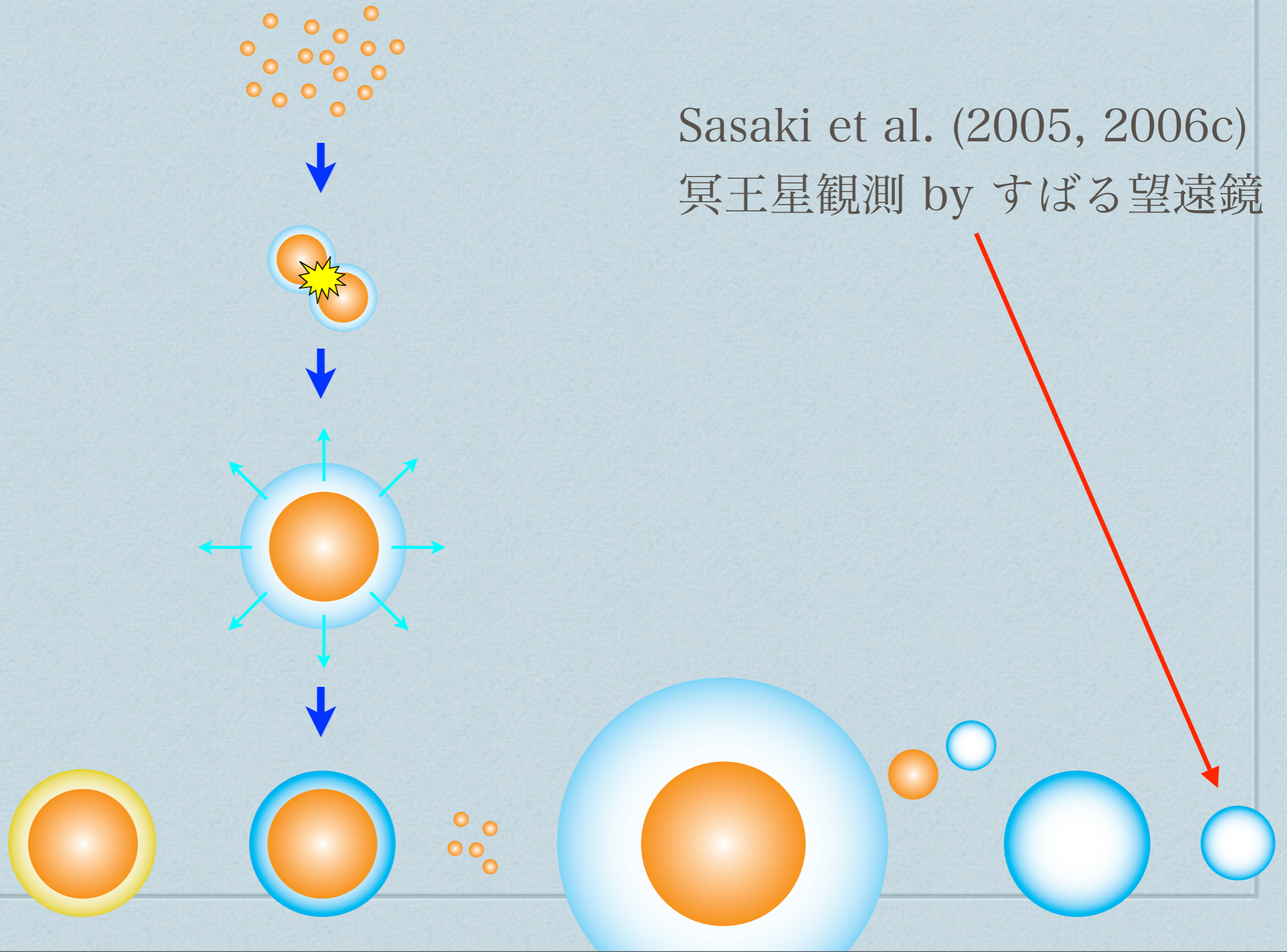


これまでに行ってきた研究



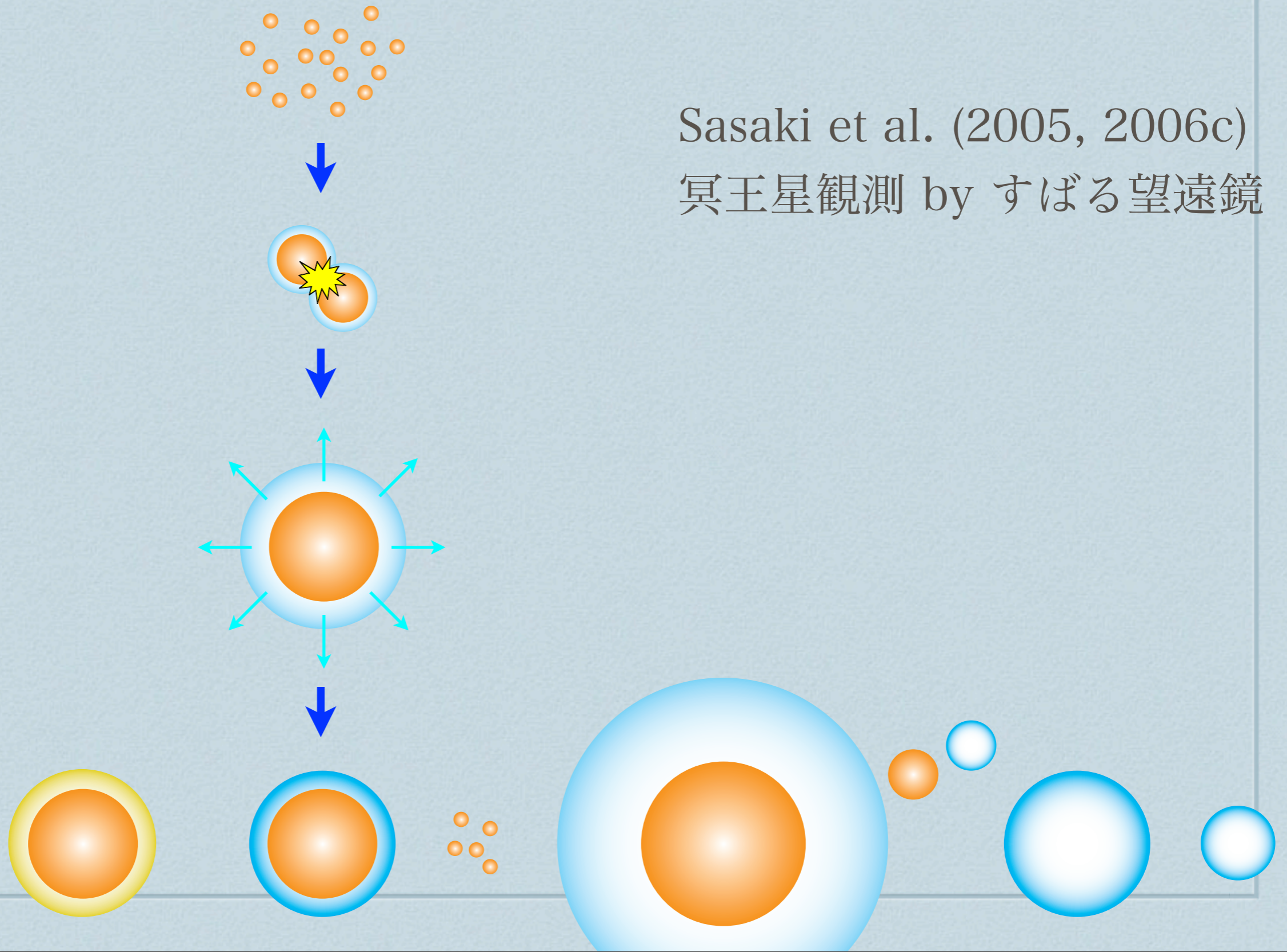
Sasaki et al. (2005, 2006c)
冥王星観測 by すばる望遠鏡

これまでに行ってきた研究



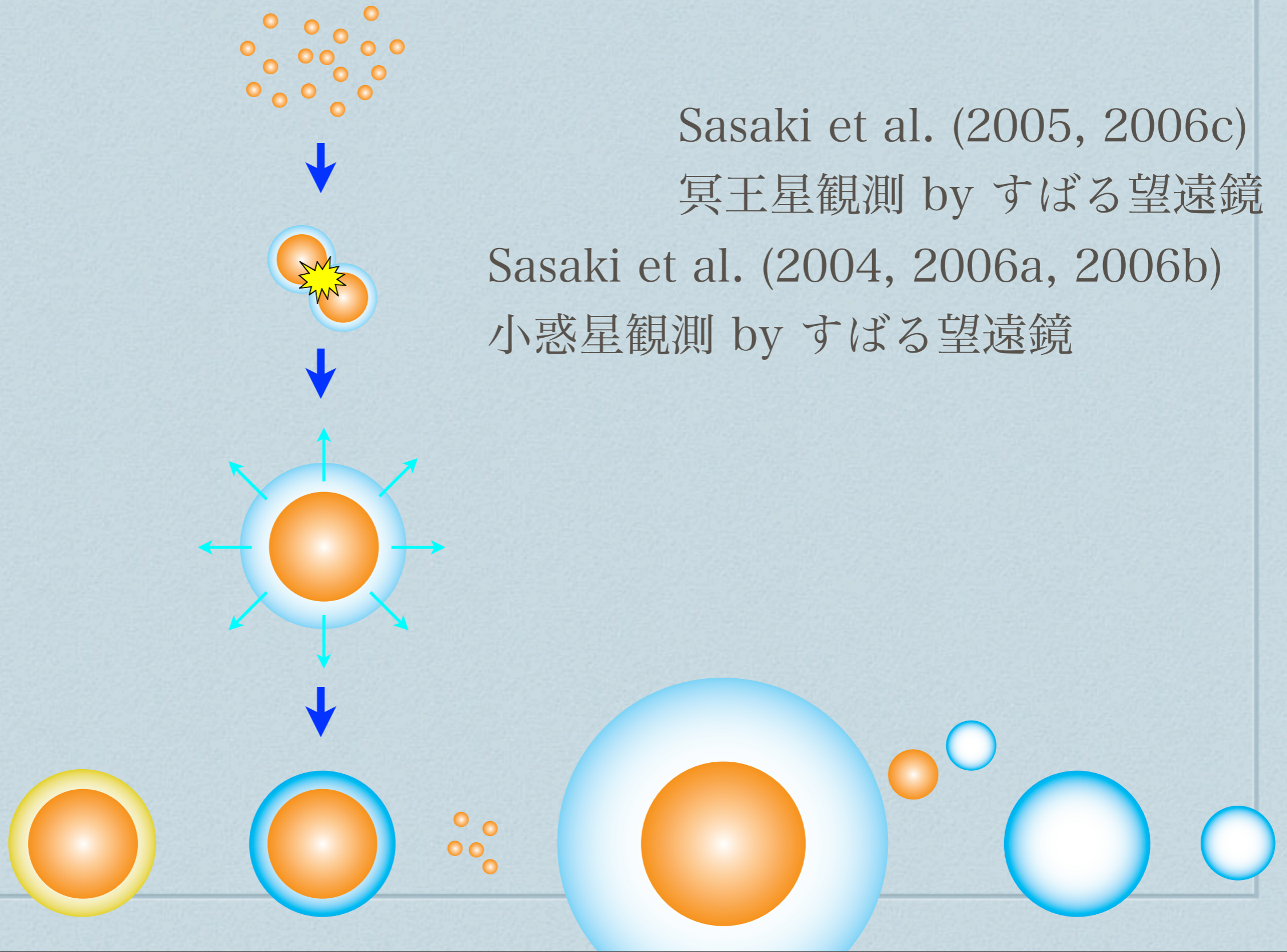
Sasaki et al. (2005, 2006c)
冥王星観測 by すばる望遠鏡

これまでに行ってきた研究

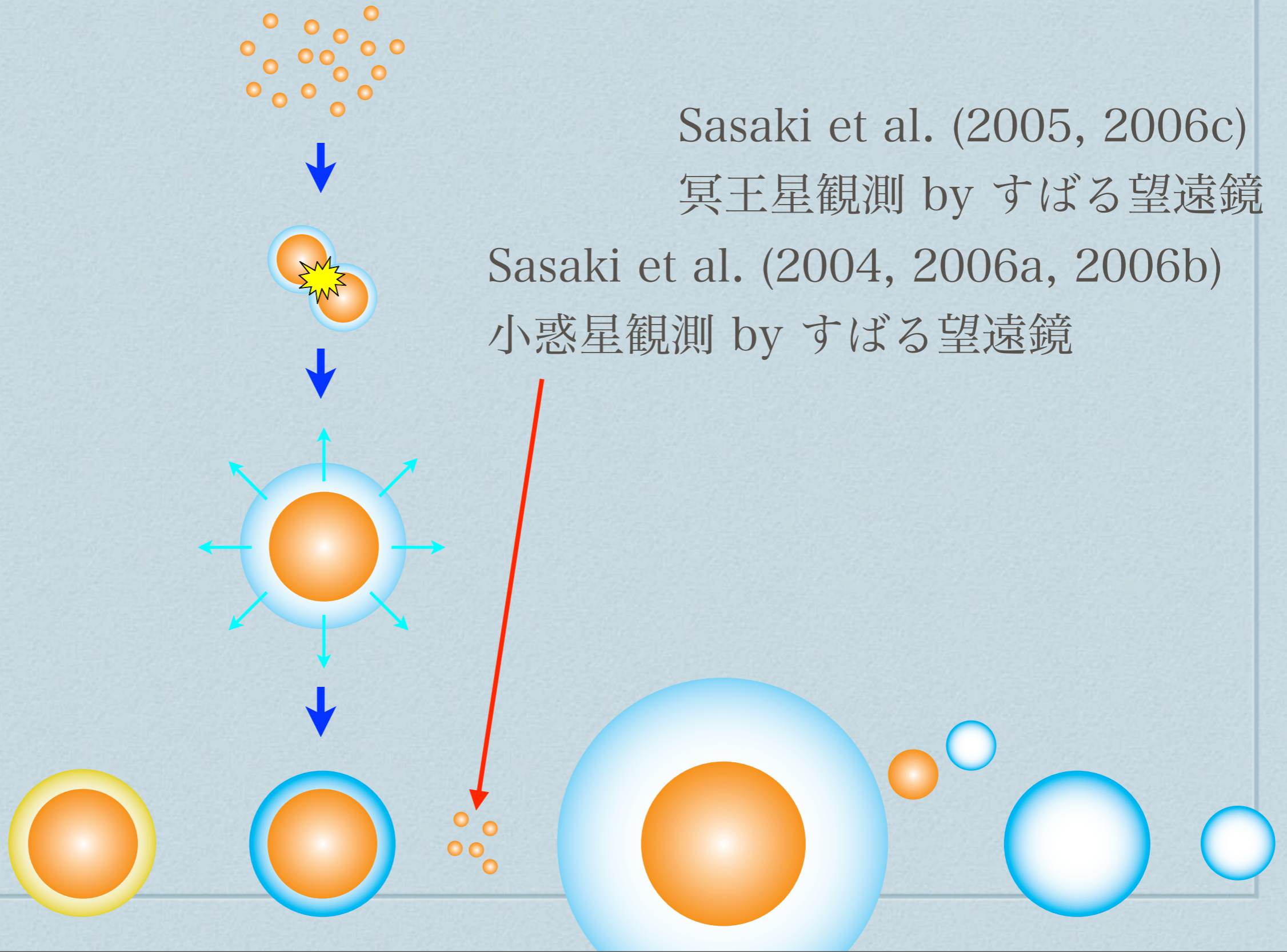


Sasaki et al. (2005, 2006c)
冥王星観測 by すばる望遠鏡

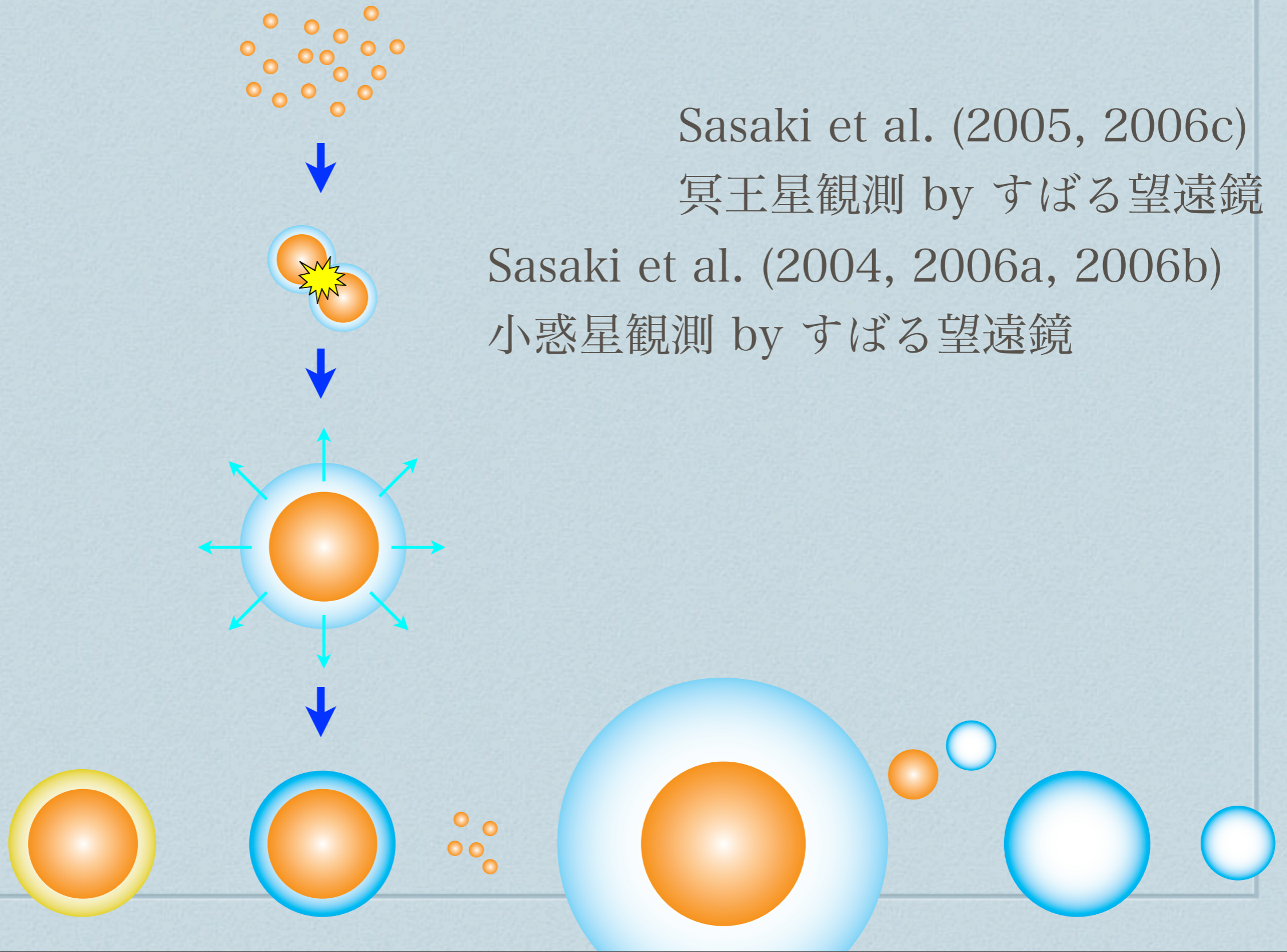
これまでに行ってきた研究



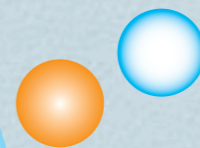
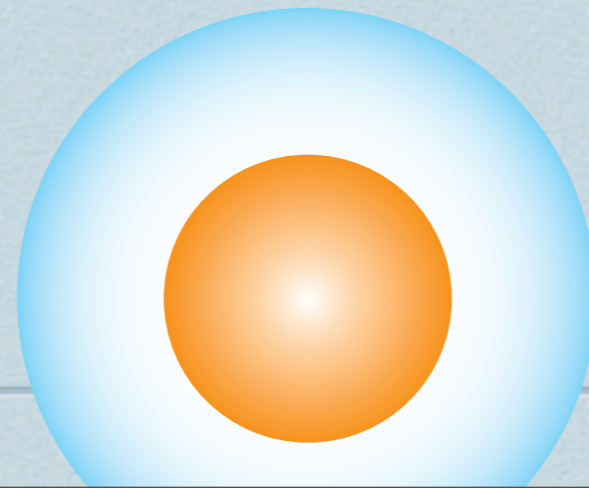
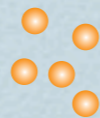
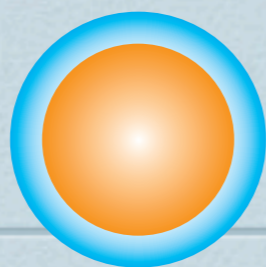
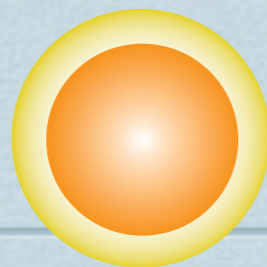
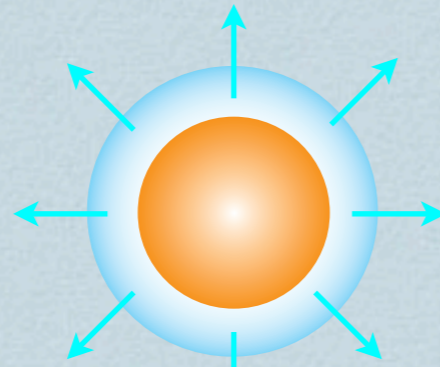
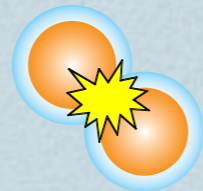
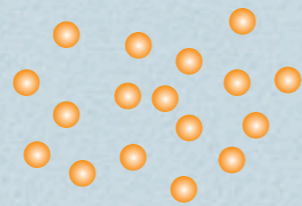
これまでに行ってきた研究



これまでに行ってきた研究



これまでに行ってきた研究



Sasaki et al. (2005, 2006c)

冥王星観測 by すばる望遠鏡

Sasaki & Abe (2007)

巨大天体衝突, Hf-W

Sasaki et al. (2004, 2006a, 2006b)

小惑星観測 by すばる望遠鏡



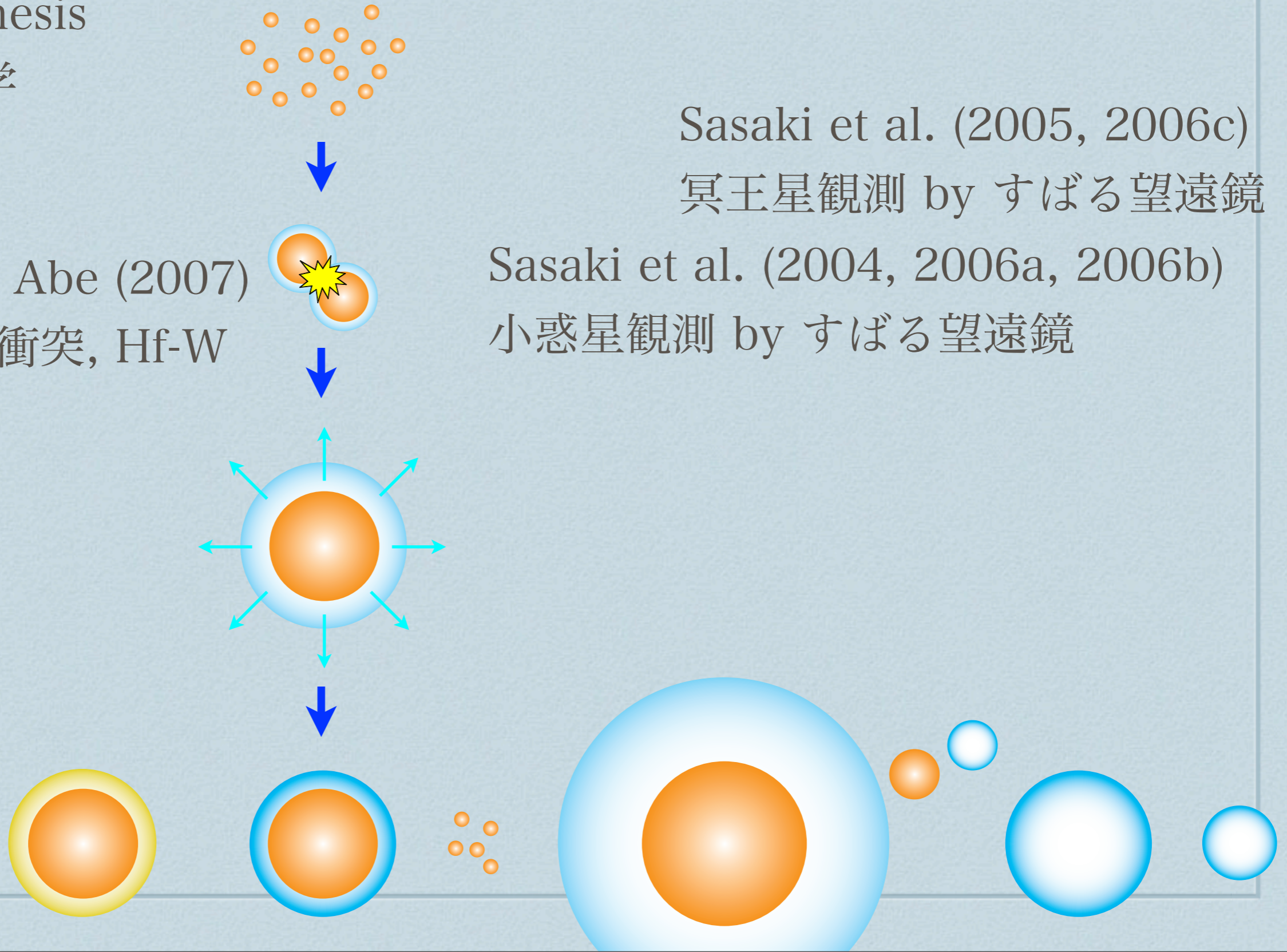
これまでに行ってきた研究

Master Thesis
数理生態学

Sasaki & Abe (2007)
巨大天体衝突, Hf-W

Sasaki et al. (2005, 2006c)
冥王星観測 by すばる望遠鏡

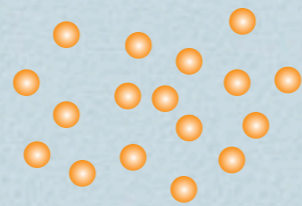
Sasaki et al. (2004, 2006a, 2006b)
小惑星観測 by すばる望遠鏡





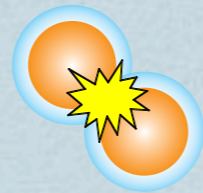
これまでに行ってきた研究

Master Thesis
数理生態学



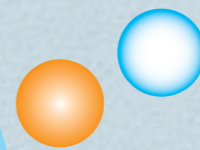
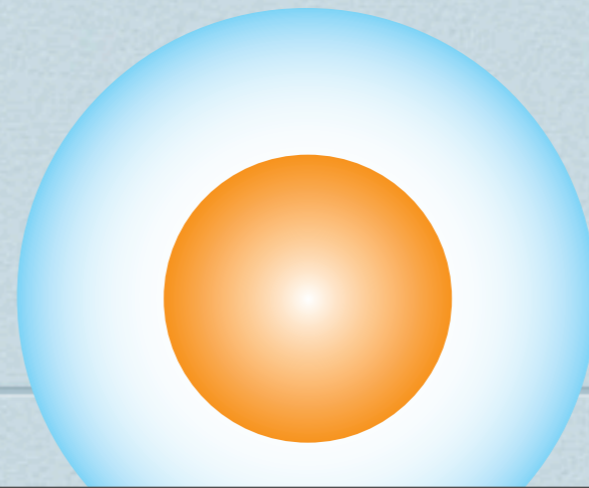
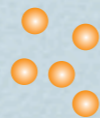
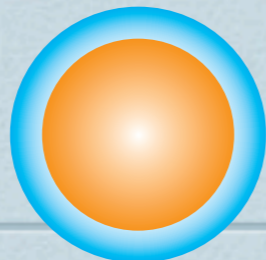
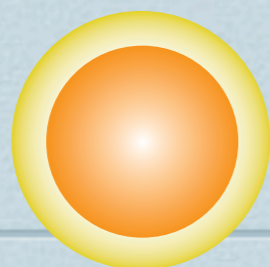
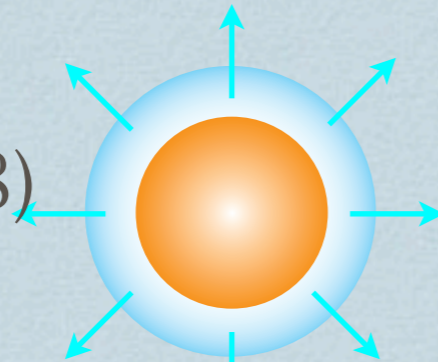
Sasaki et al. (2005, 2006c)
冥王星観測 by すばる望遠鏡

Sasaki & Abe (2007)
巨大天体衝突, Hf-W



Sasaki et al. (2004, 2006a, 2006b)
小惑星観測 by すばる望遠鏡

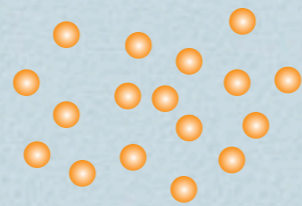
Ph.D. Thesis
Sasaki & Abe (2008)
金星大気の散逸





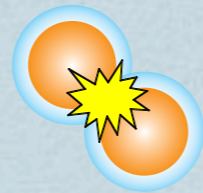
これまでに行ってきた研究

Master Thesis
数理生態学



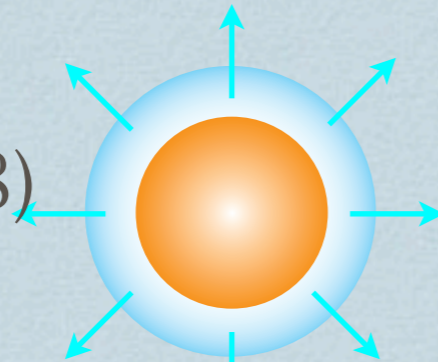
Sasaki et al. (2005, 2006c)
冥王星観測 by すばる望遠鏡

Sasaki & Abe (2007)
巨大天体衝突, Hf-W

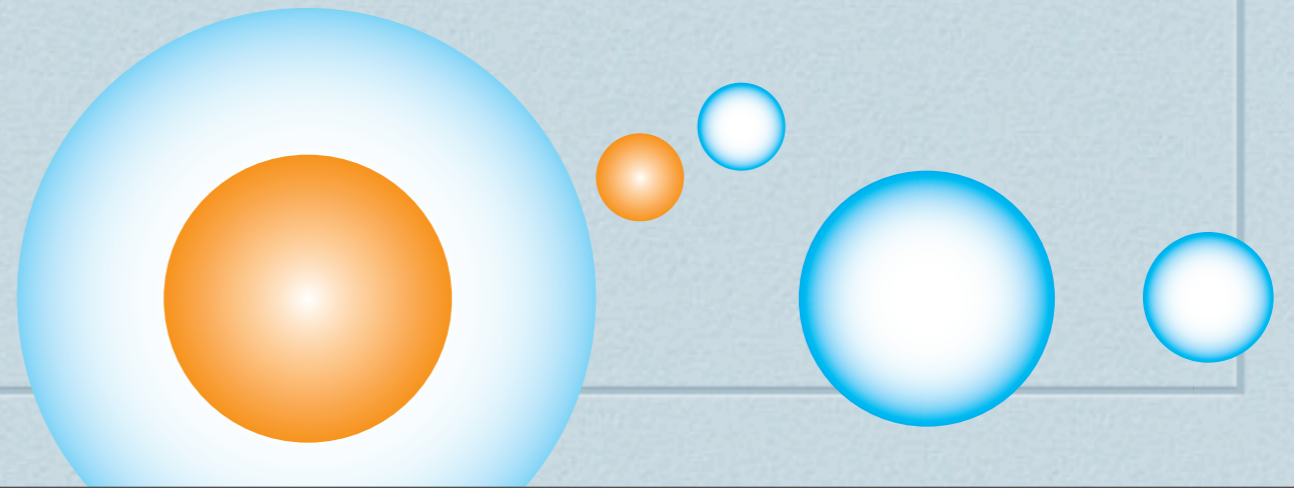
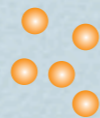
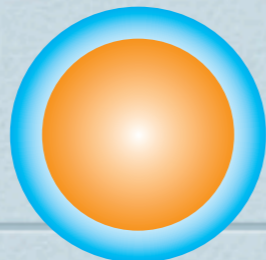
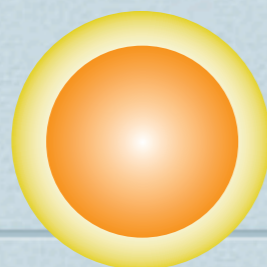


Sasaki et al. (2004, 2006a, 2006b)
小惑星観測 by すばる望遠鏡

Ph.D. Thesis
Sasaki & Abe (2008)
金星大気の散逸



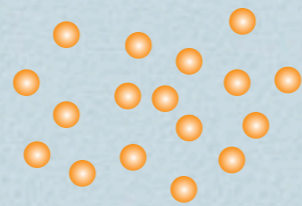
Sasaki et al. (2010a, 2010b, 2011)
ガス惑星周りの衛星系形成





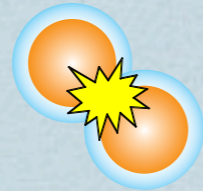
これまでに行ってきた研究

Master Thesis
数理生態学



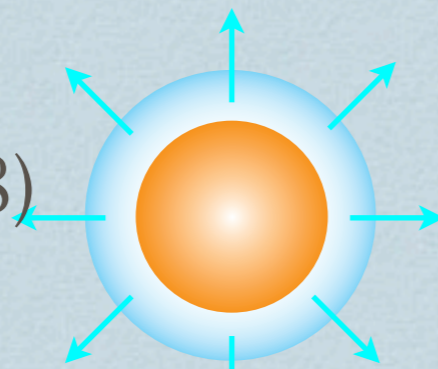
Sasaki et al. (2005, 2006c)
冥王星観測 by すばる望遠鏡

Sasaki & Abe (2007)
巨大天体衝突, Hf-W



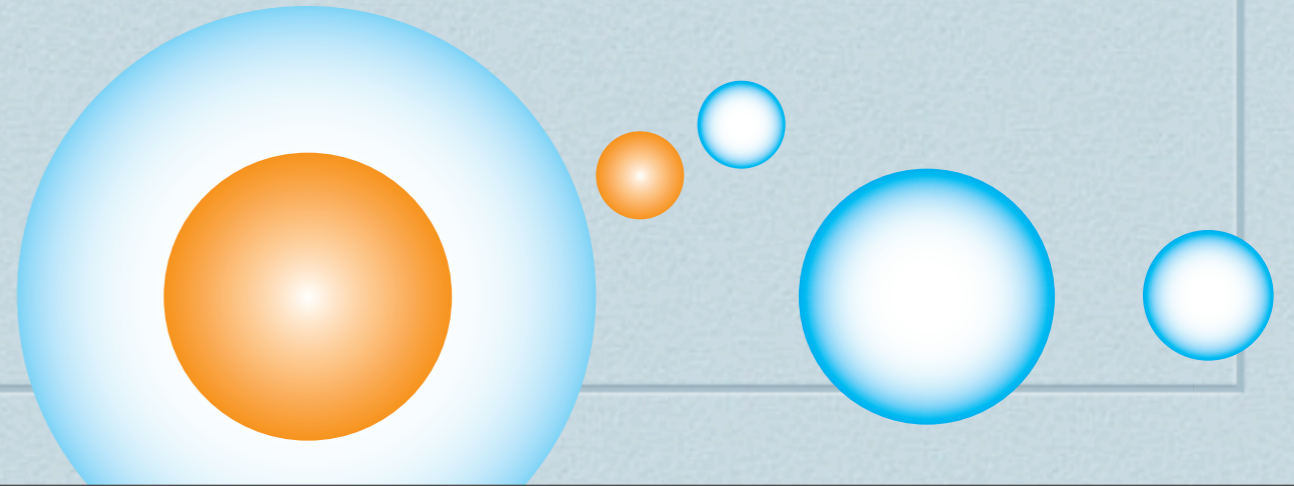
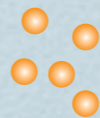
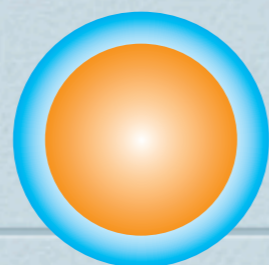
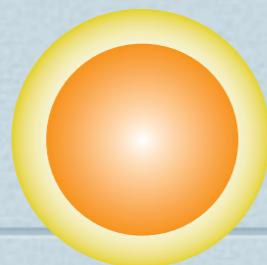
Sasaki et al. (2004, 2006a, 2006b)
小惑星観測 by すばる望遠鏡

Ph.D. Thesis
Sasaki & Abe (2008)
金星大気の散逸



Hosono, Obana & Sasaki, in prep.
木星トロヤ群形成

Sasaki et al. (2010a, 2010b, 2011)
ガス惑星周りの衛星系形成



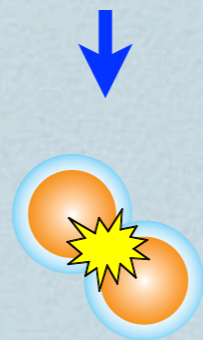
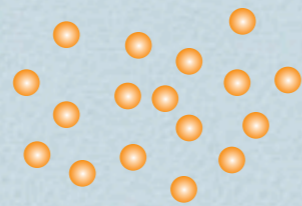


これまでに行ってきた研究

Master Thesis
数理生態学

Dozono et al.
メタゲノム解析

Sasaki & Abe (2007)
巨大天体衝突, Hf-W

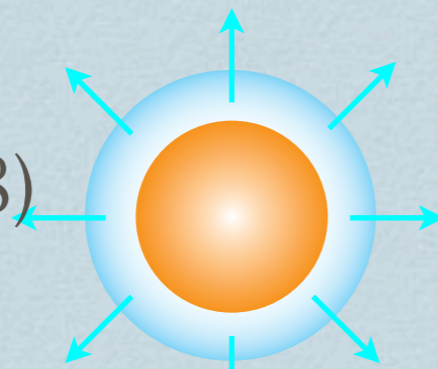


Sasaki et al. (2005, 2006c)
冥王星観測 by すばる望遠鏡

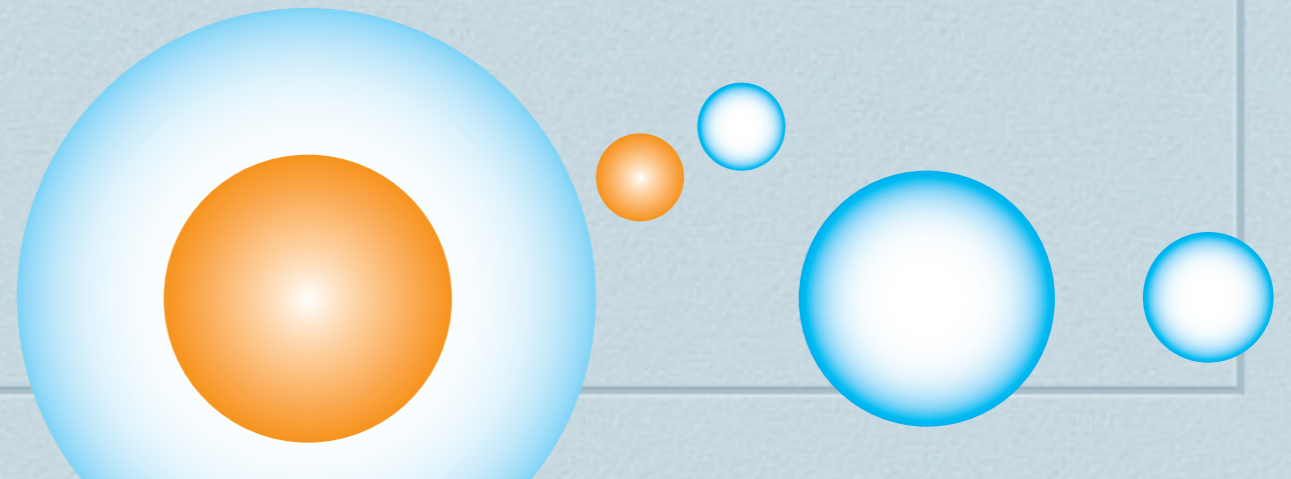
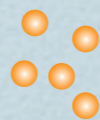
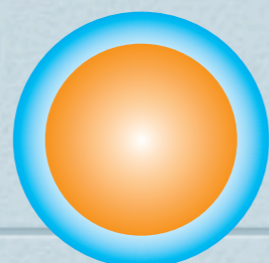
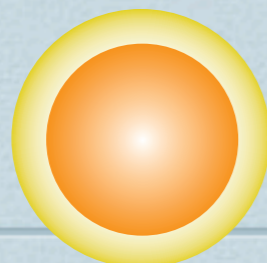
Sasaki et al. (2004, 2006a, 2006b)
小惑星観測 by すばる望遠鏡

Hosono, Obana & Sasaki, in prep.
木星トロヤ群形成

Ph.D. Thesis
Sasaki & Abe (2008)
金星大気の散逸

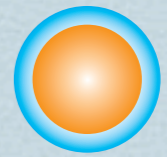


Sasaki et al. (2010a, 2010b, 2011)
ガス惑星周りの衛星系形成





これまでに行ってきた研究



Master Thesis
数理生態学

Dozono et al.
メタゲノム解析

Sasaki & Abe (2007)
巨大天体衝突, Hf-W

Ph.D. Thesis
Sasaki & Abe (2008)
金星大気の散逸

Ueta & Sasaki
ハビタブル浮遊惑星

Sasaki et al. (2005, 2006c)
冥王星観測 by すばる望遠鏡

Sasaki et al. (2004, 2006a, 2006b)
小惑星観測 by すばる望遠鏡

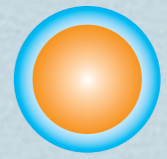
Hosono, Obana & Sasaki, in prep.
木星トロヤ群形成

Sasaki et al. (2010a, 2010b, 2011)
ガス惑星周りの衛星系形成





これまでに行ってきた研究



Master Thesis
数理生態学

Dozono et al.
メタゲノム解析

Sasaki & Abe (2007)
巨大天体衝突, Hf-W

Ph.D. Thesis
Sasaki & Abe (2008)
金星大気の散逸

Sasaki et al.
初期地球大気海洋

Ueta & Sasaki

ハビタブル浮遊惑星

Sasaki et al. (2005, 2006c)

冥王星観測 by すばる望遠鏡

Sasaki et al. (2004, 2006a, 2006b)

小惑星観測 by すばる望遠鏡

Hosono, Obana & Sasaki, in prep.

木星トロヤ群形成

Sasaki et al. (2010a, 2010b, 2011)

ガス惑星周りの衛星系形成



新たな海形成機構の提案

佐々木貴教（東京工業大学）



東京工業大学・東京大学グローバルCOEプログラム

地球から地球たちへ —生命を宿す惑星の総合科学—



新たな海形成機構の提案

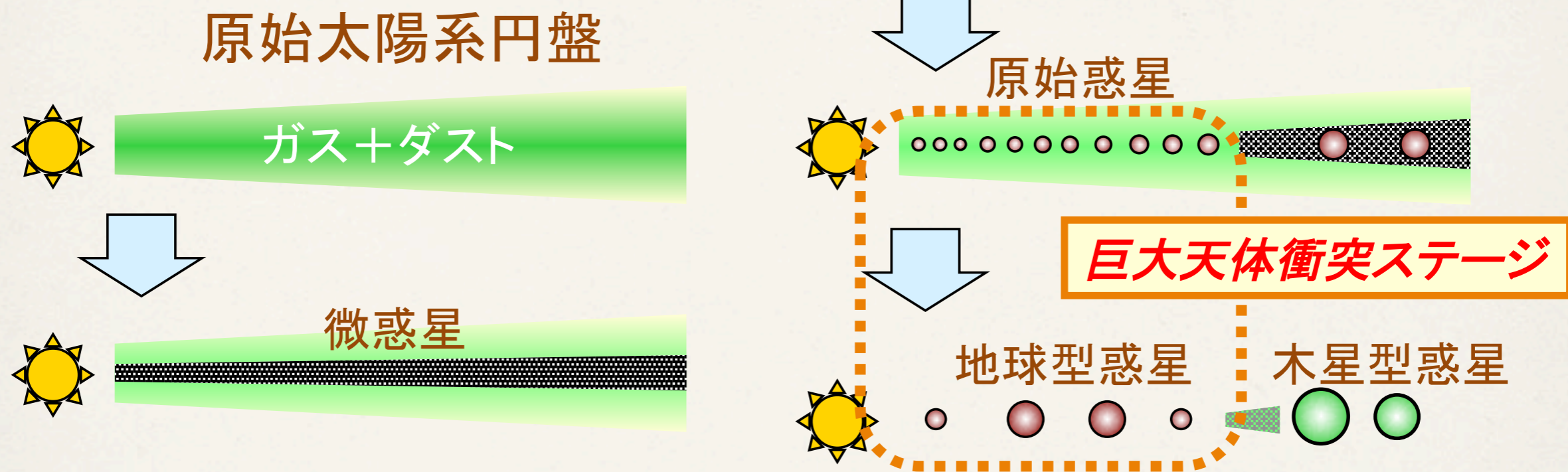
佐々木貴教（東京工業大学）

共著者：玄田英典（東大），上野雄一郎（東工大），飯塚毅（東大），生駒大洋（東大）

巨大天体衝突による“ぼらまき”

Genda et al., in prep., 玄田他 2012年度連合大会

地球型惑星形成の現代的描像



惑星形成 = \sum (**天体の軌道進化** + **天体の衝突**)

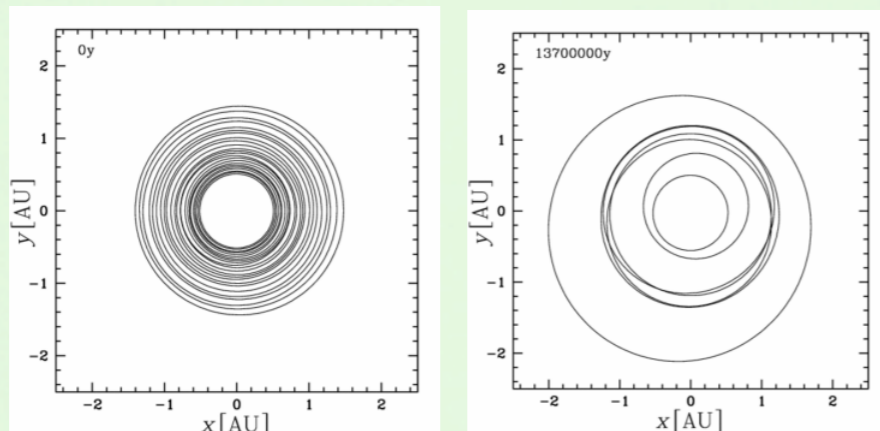
個々の研究はたくさんされているが、
両方をコンシステントに通して行った研究は皆無

惑星の初期配置

ハイブリッドコード

start

N体コード



軌道進化を計算

input

衝突後の惑星の情報
(質量・自転・組成・衛星)
ばら撒かれた微惑星の情報
(数・質量・位置・速度)

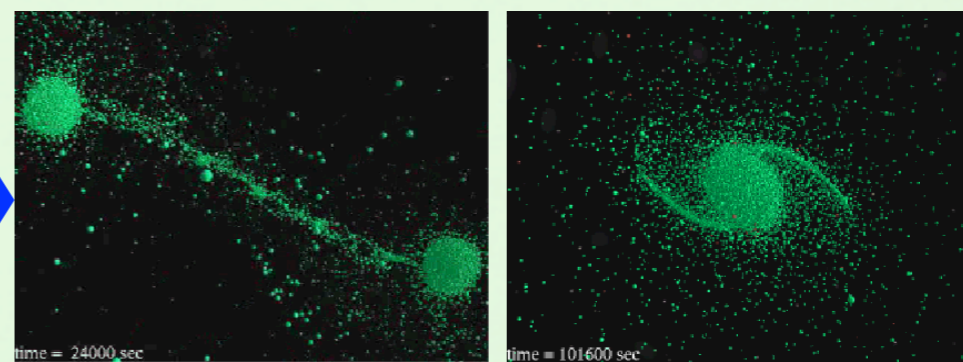
データ解析

衝突イベント検知

衝突天体の情報
(質量・自転・組成・衛星)
衝突条件
(衝突速度・角度)
他の天体の情報
(位置・速度・質量)

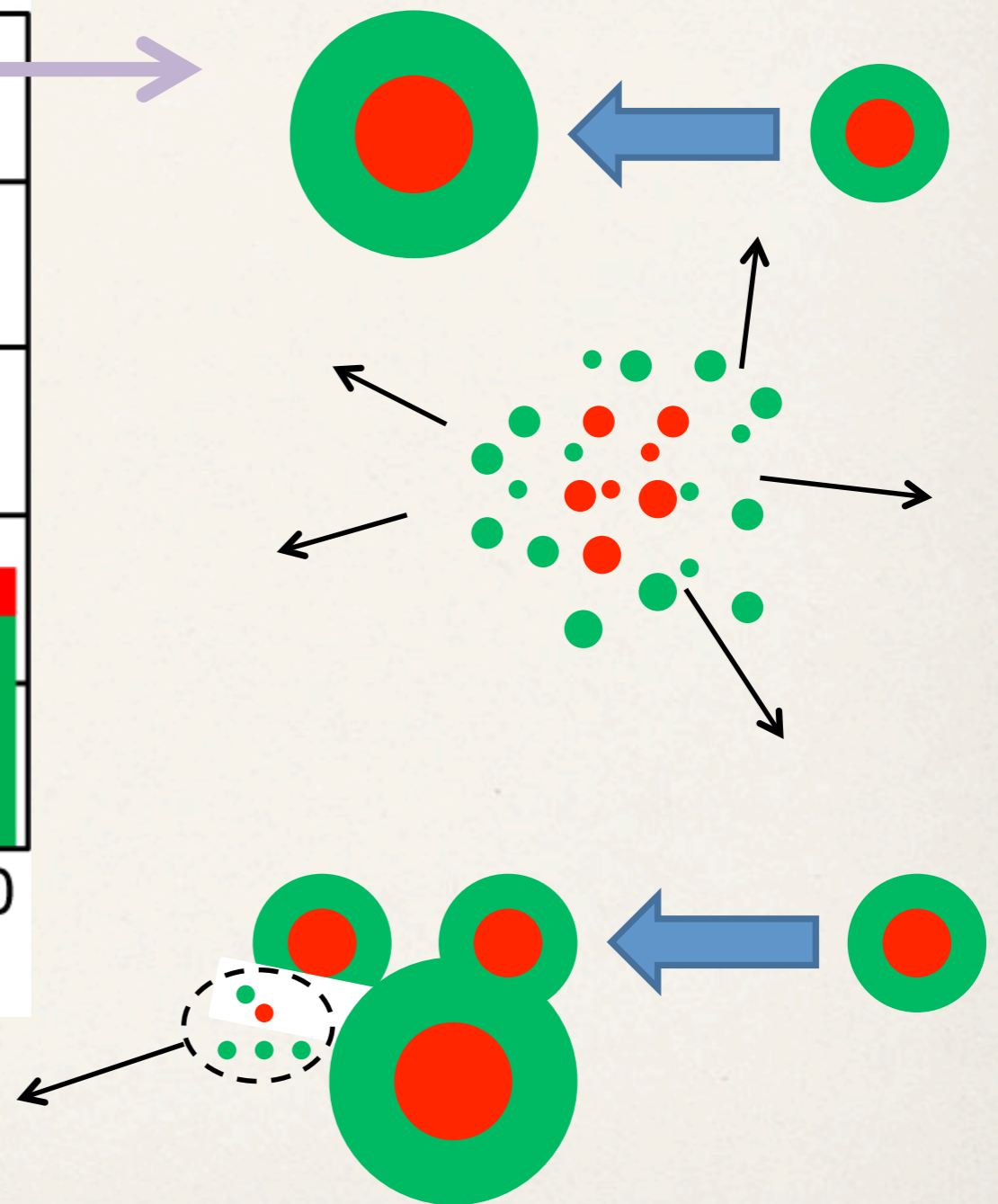
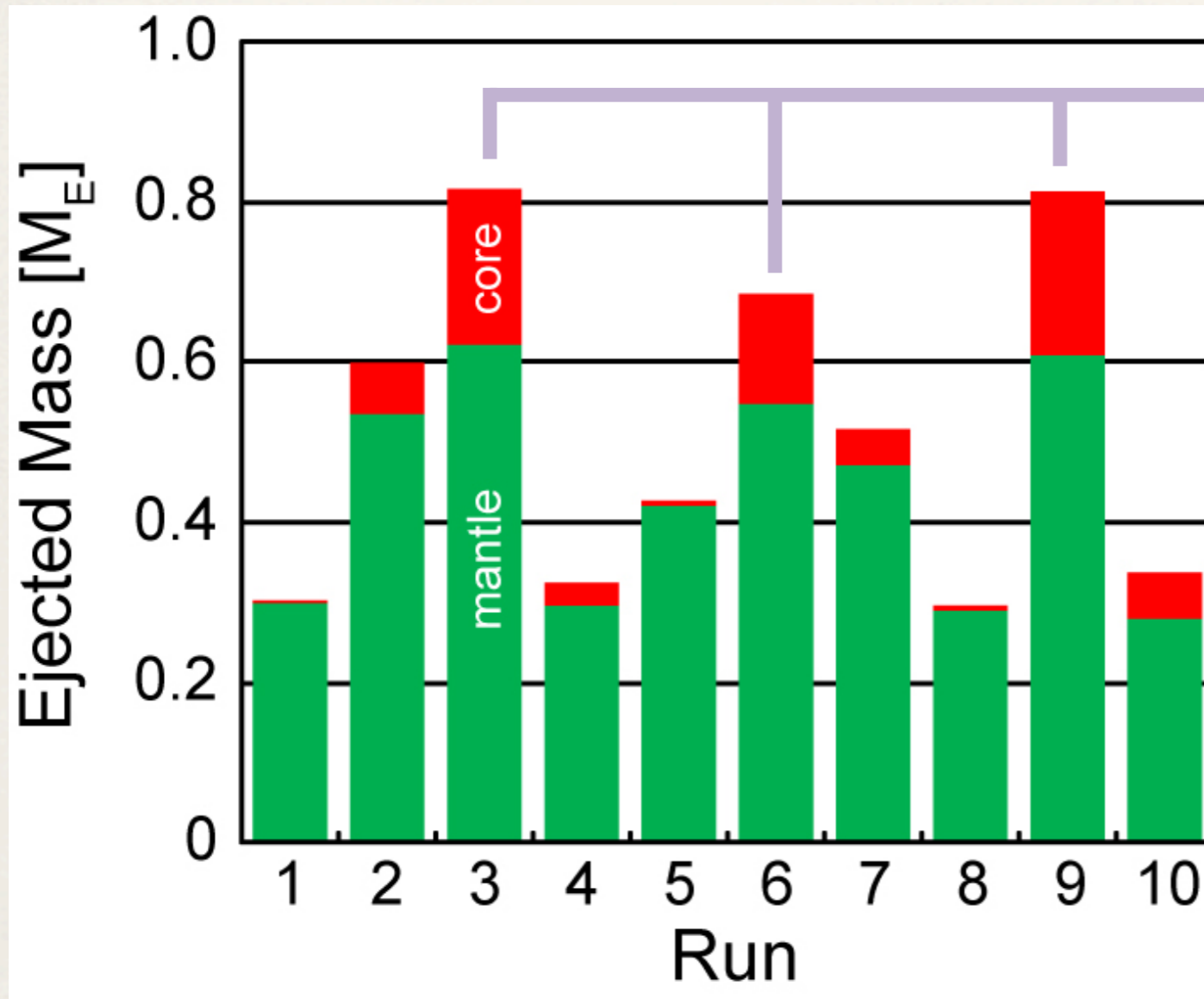
input

SPHコード



惑星の衝突過程を計算

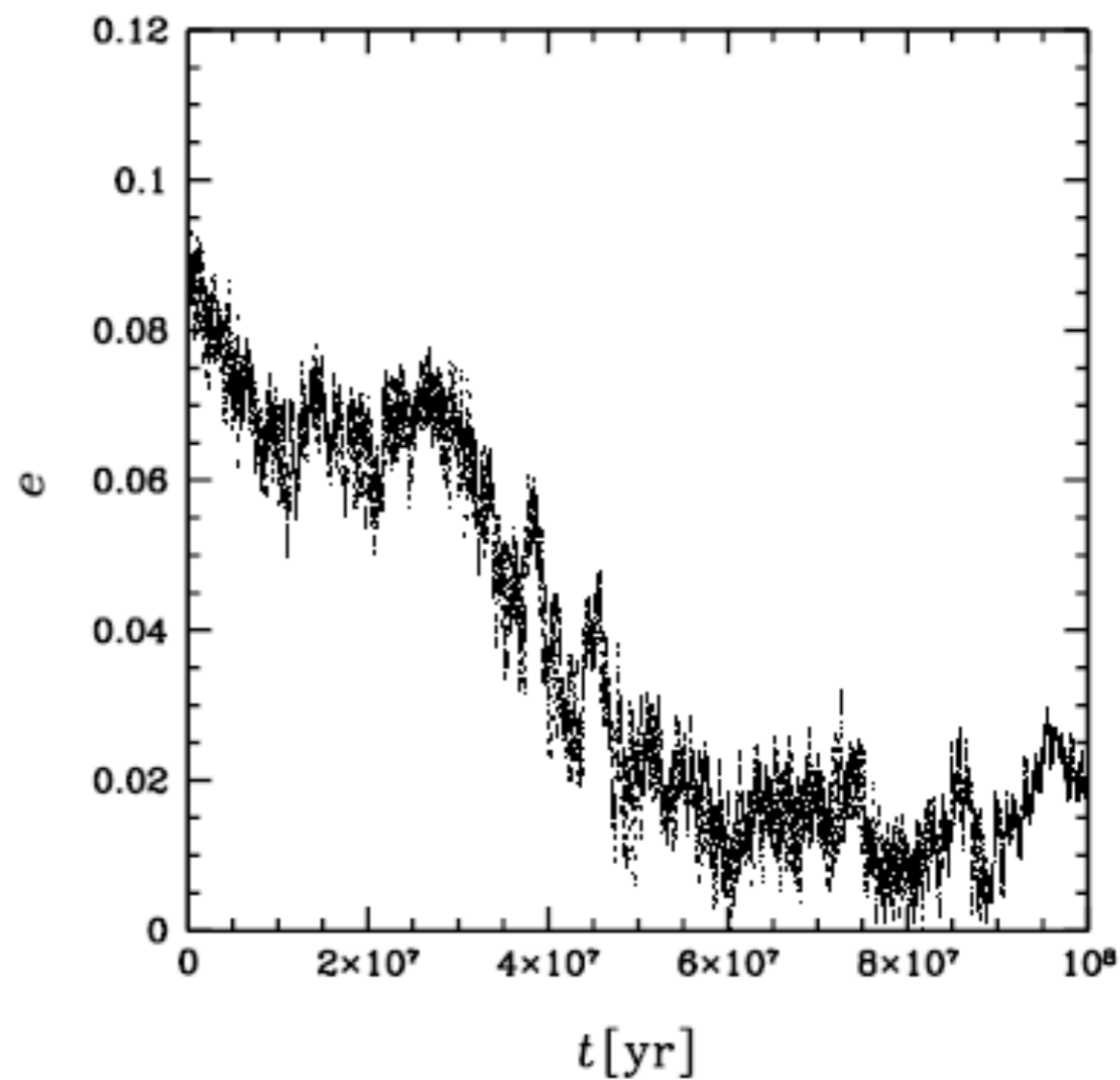
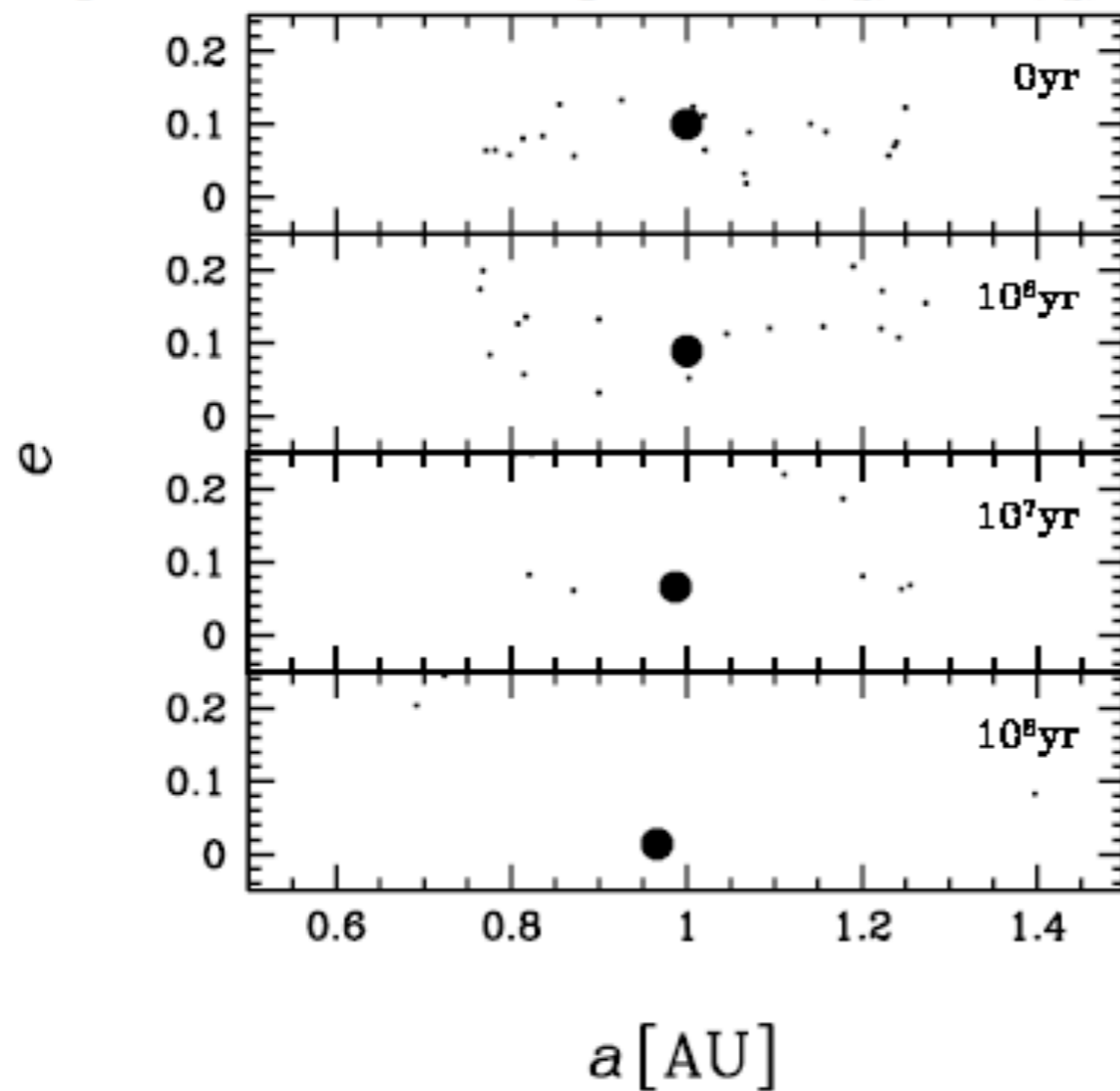
放出物の総質量



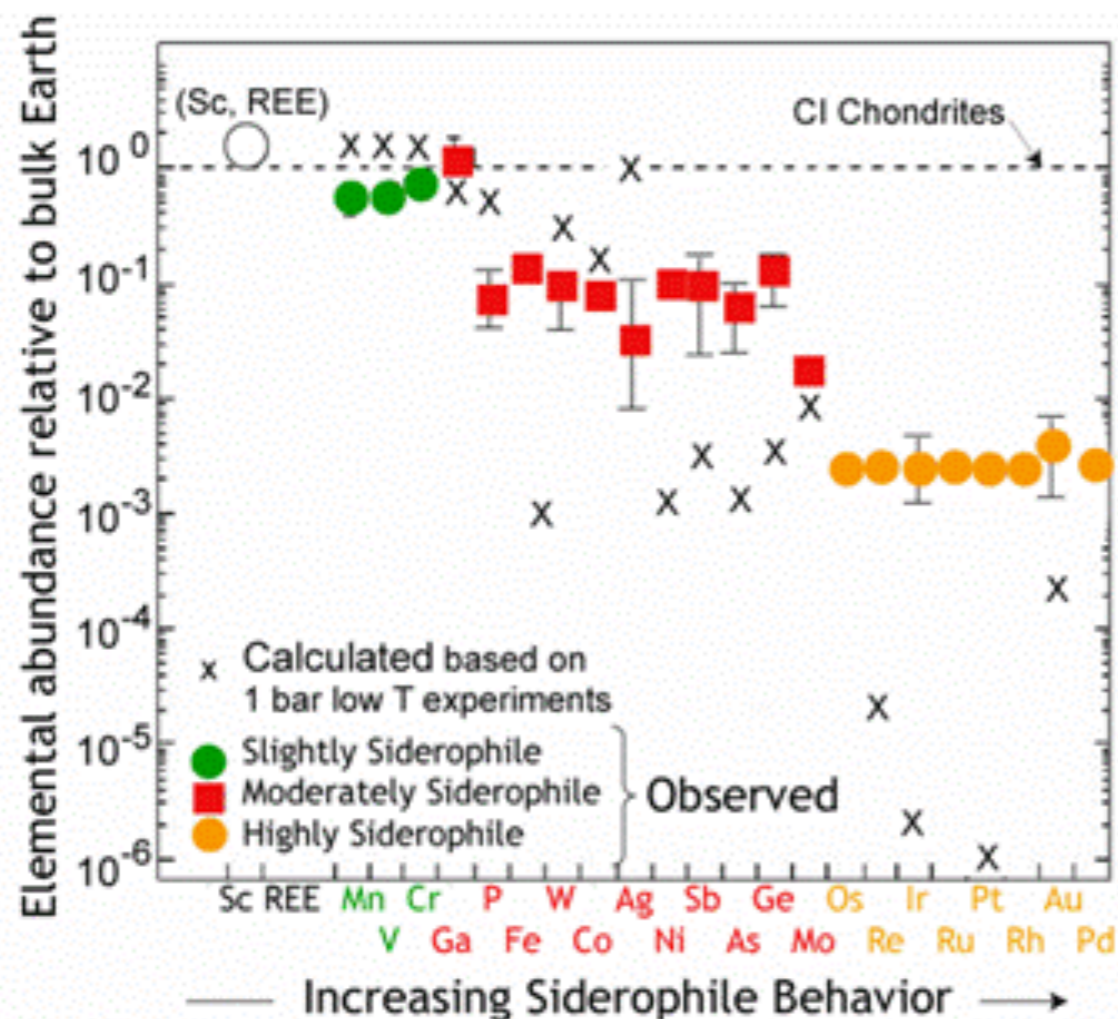
～10%の物質が放出
金属鉄もばらまかれる

離心率のダンピング

$M = 0.9M_{\oplus}$, $e = 0.1$; $M_d = 0.1M_{\oplus}$, $n = 20$, $\langle e_d^2 \rangle^{1/2} = \langle i_d^2 \rangle^{1/2} = 0.1$



レイトベニア？



地球マントル中に
強親鉄性元素が過剰に存在

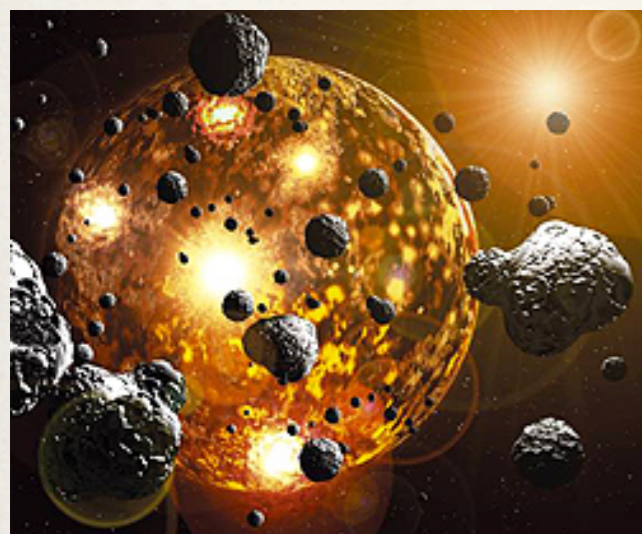


コア形成後、強親鉄性元素を
含む物体が少量降ってきた

- 巨大天体衝突ステージで金属鉄がばらまかれる
- 金属鉄中には強親鉄性元素を多く含む
- すでにコア形成して固化した地球に振る
- レイトベニア

新たな海形成機構の提案

原始海洋 + Fe → 水素大気発生

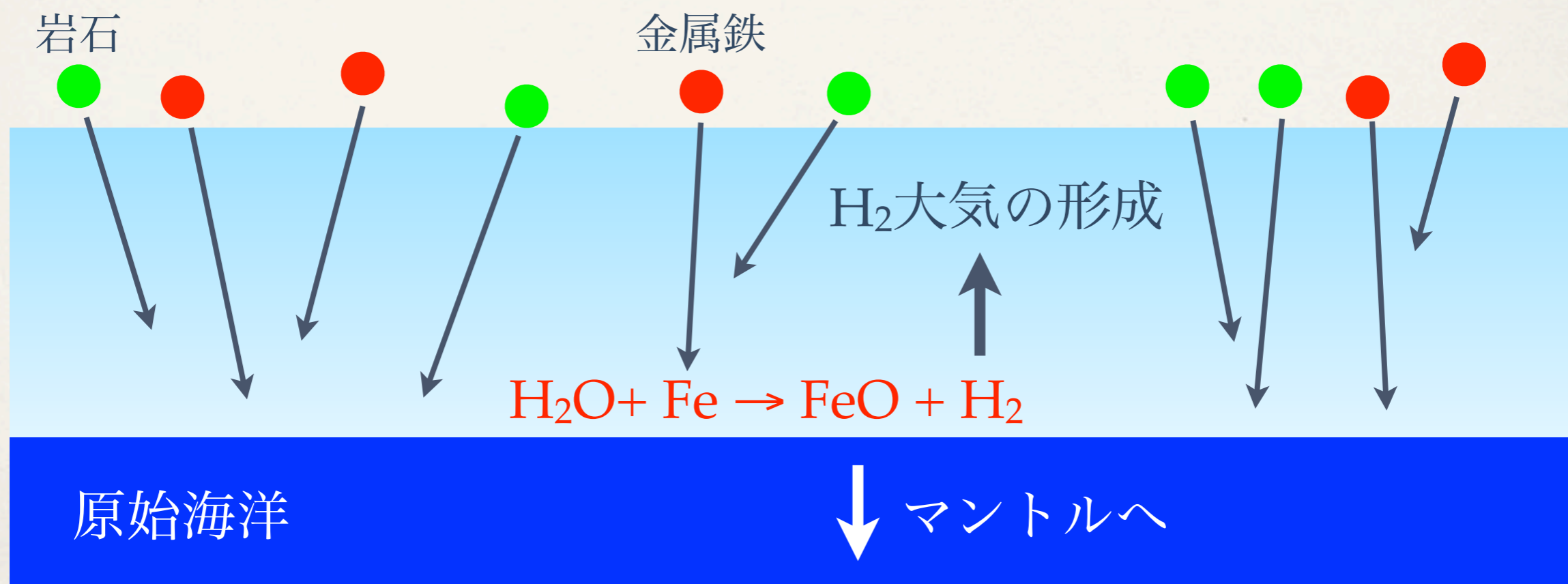


未分化な衝突破片中の金属鉄が集積（レイトベニア）

金属鉄 Fe と原始海洋が反応して水素大気を生成



大量の水素大気をまとった原始地球の誕生



水素大気への火山ガス付加



：還元的大気中での酸素源になる



：高圧水素大気中で OH をつくる多分一番速い反応



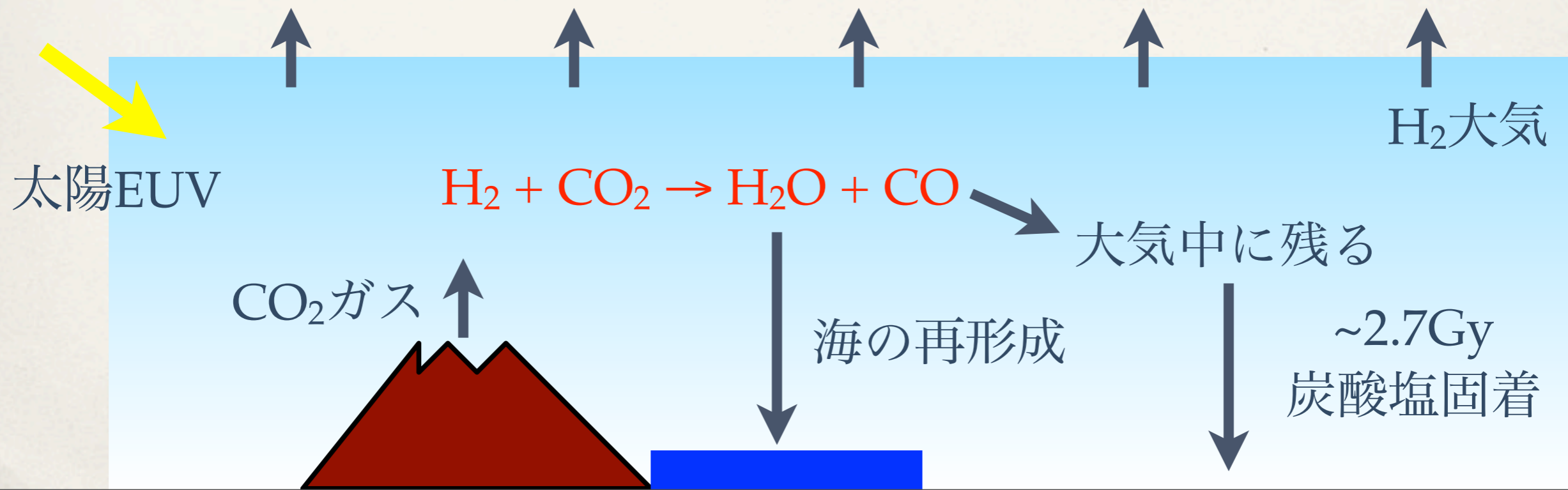
：高圧水素大気中で水をつくる多分一番速い反応

海の再形成シナリオ

原始海洋 + Fe → 海の消失 + 大量の水素大気

水素大気：ハイドロダイナミックエスケープ

水素大気への火山ガス付加 → 水をつくる反応



初期地球で想定される環境

初期の水素大気量：30 - 300 bar (7.6×10^{22} - 7.6×10^{23} mol)

(現在の海洋を全て H_2 にするとおおよそ 30bar の水素大気になる)

H_2 のไฮドロダイナミックエスケープ：energy-limited escape

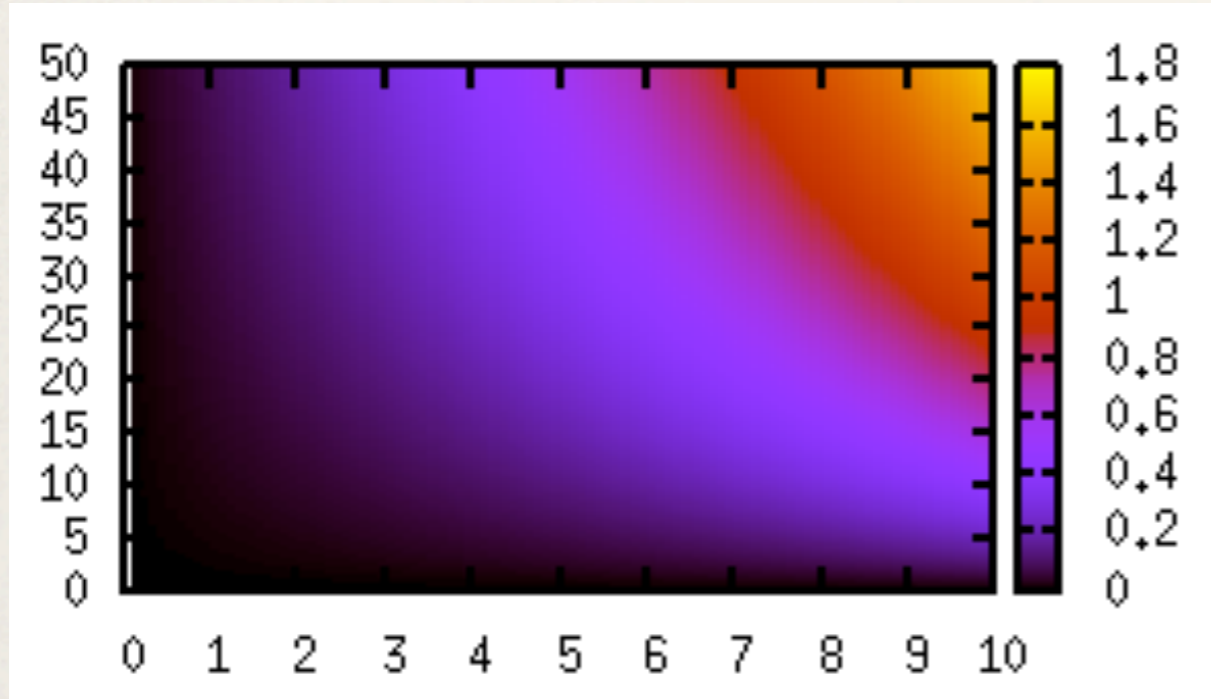
(太陽 EUV のフラックスで散逸率が決まる [Zahnle et al. 1988])

火山ガスとして噴出する CO_2 フラックス： 10^{12} - 5×10^{13} mol/yr

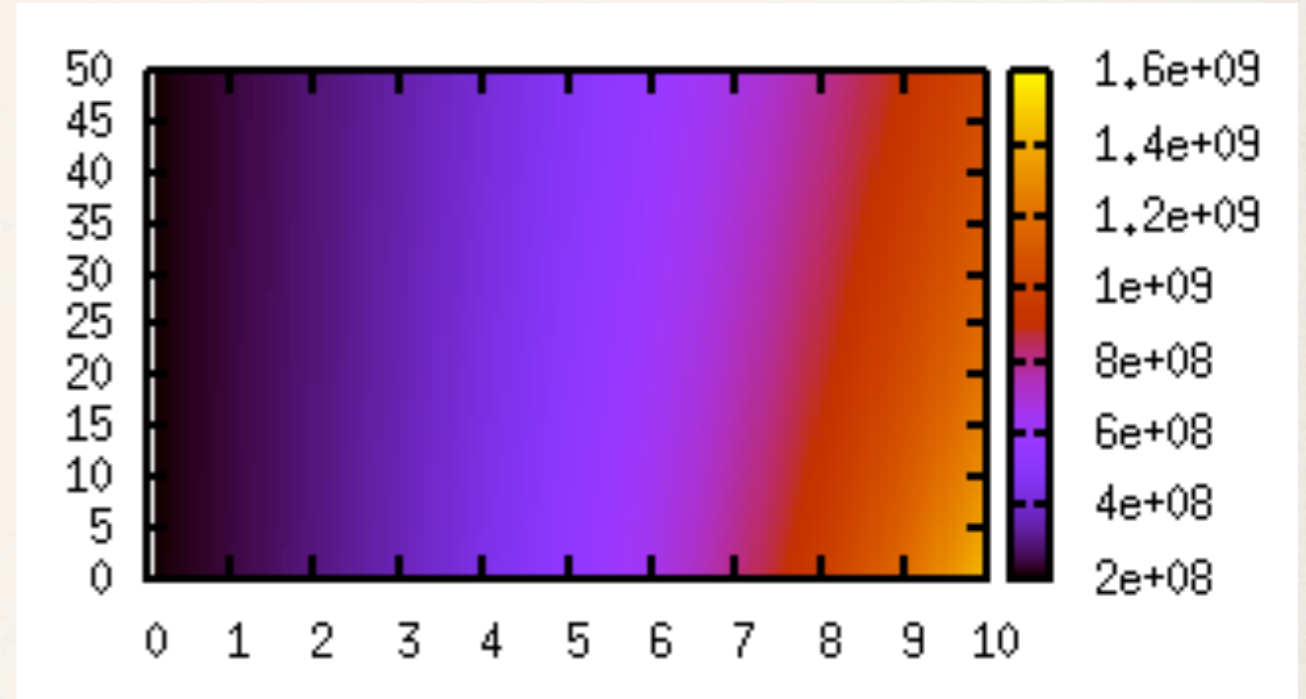
(現在の火山ガスのフラックスはおおよそ 10^{12} mol/yr [Holland 2009])

海洋質量 と H₂ 大気保持期間

海洋質量 / 現在の海洋質量



H₂ 大気の保持期間 (年)



横軸：初期 H₂ 量 (現在の海洋を全て H₂ 大気にした場合を 1 とする)

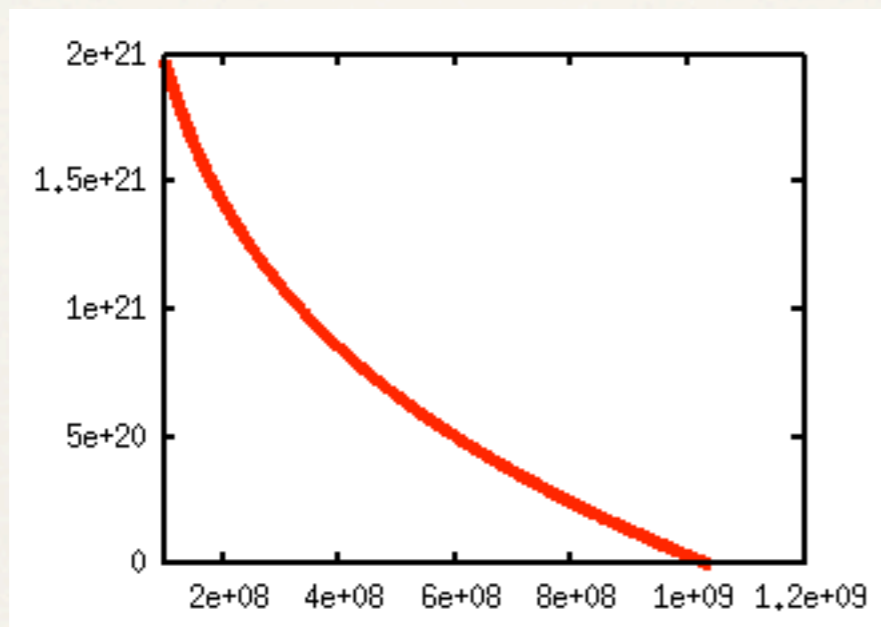
縦軸：火山ガスからの CO₂ フラックス (現在の値を 1 とする)

10億年程度の時間をかけて, 1海洋質量を作り出すことが可能

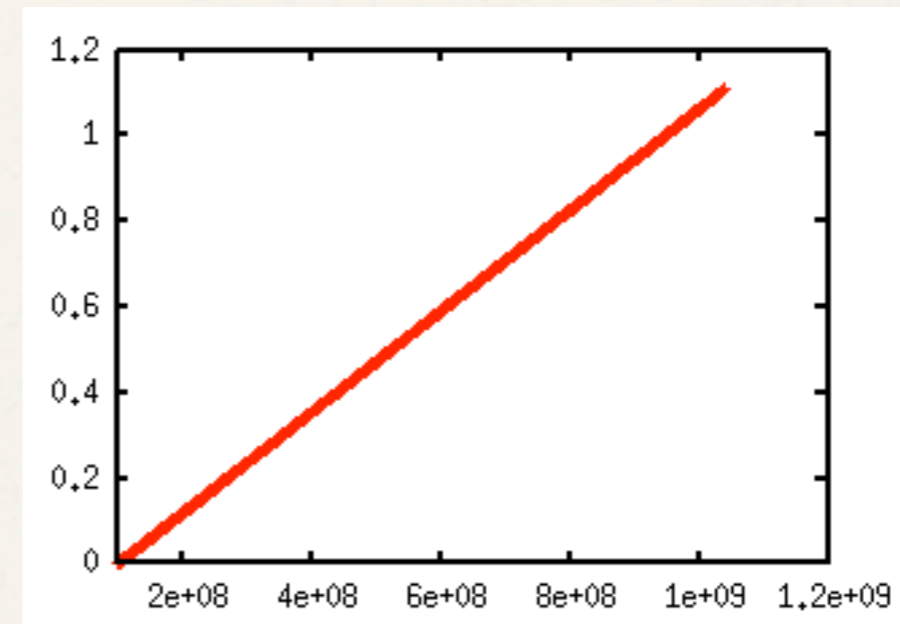
大気と海の時間進化

- 初期の水素大気量：300 bar（現在の海洋の10倍）
- 火山ガスの CO_2 フラックス： 3×10^{13} mol/yr（現在の30倍）

水素大気の散逸



海の形成



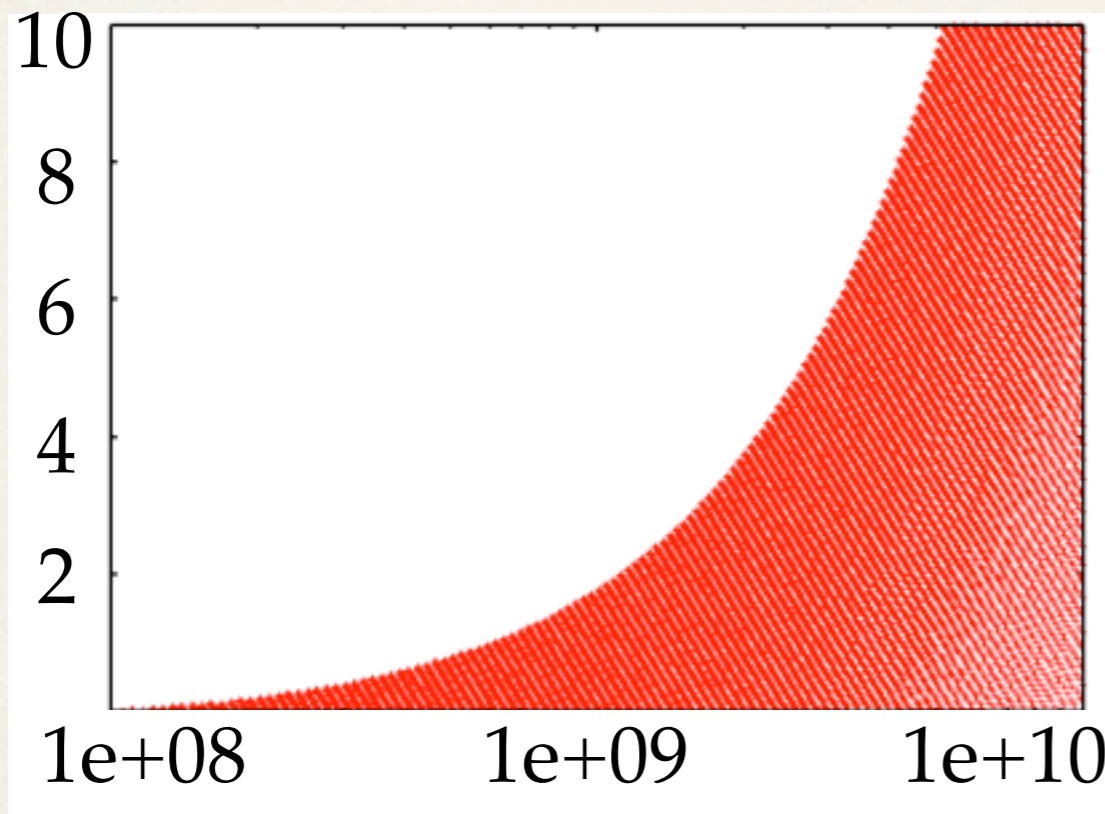
海洋質量は火山ガスの噴出とともに線形で増加

→ 初期7億年間で現在の海洋質量の半分以上を獲得する

獲得可能な海洋質量

- 初期の水素大気量：30 - 1500 bar（現在の海洋の1倍 - 50倍）
- 火山ガスの CO_2 フラックス： 10^{12} - 5×10^{13} mol/yr（現在の1倍 - 50倍）

海洋質量 / 現在の海洋質量



H₂ 大気の保持期間 (年)

数十億年間H₂大気を保持する場合
(H₂大気を数十億年で失う場合)

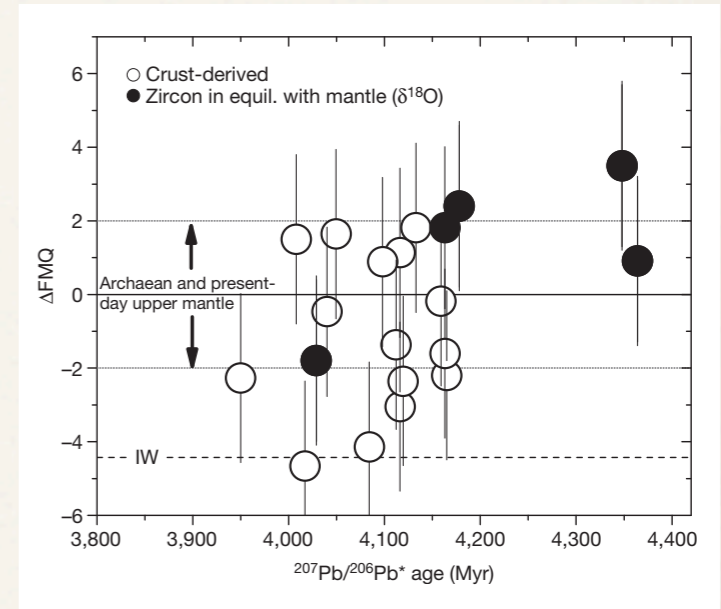
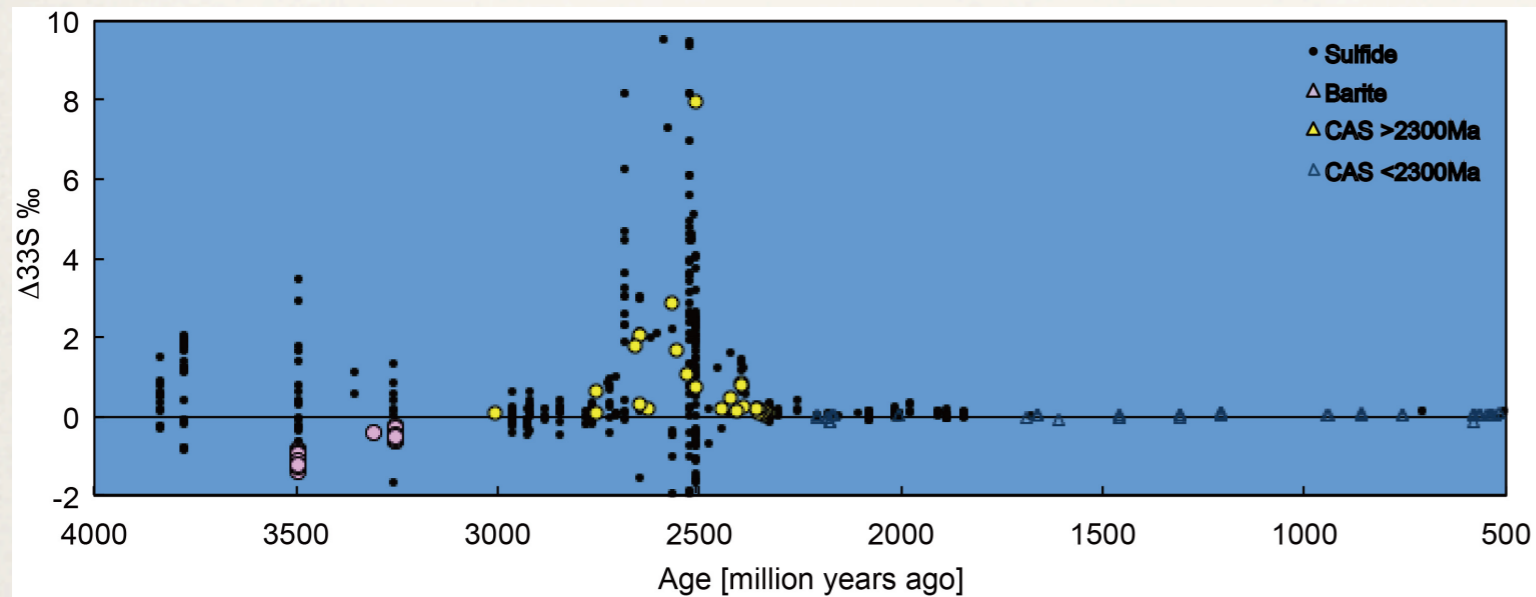


最大数倍の海洋質量を獲得

地球のH₂Oの量は

数海洋質量に制限される

地球は還元的大気を長期間保持



硫黄同位体異常 → 2.5Ga まで低 O_2 , CO_2 濃度
[Farquhar et al., 2000]

マントルはFMQ@4.35Ga
[Trail et al., 2011]

これまで：酸化的な原始地球マントル + 大気とマントルは平衡状態

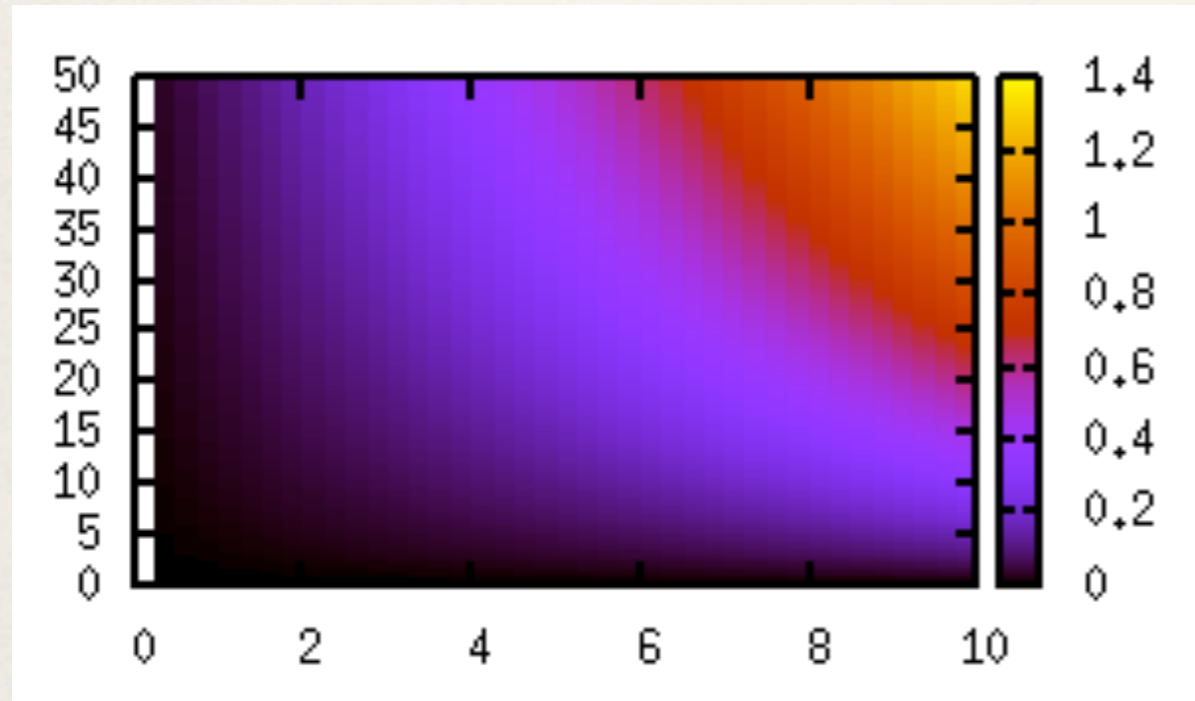
→ 2.5Ga まで大気を低 O_2 , CO_2 濃度にしておくことは困難

本研究：大量の H_2 大気が系を支配 (大気とマントルは非平衡)

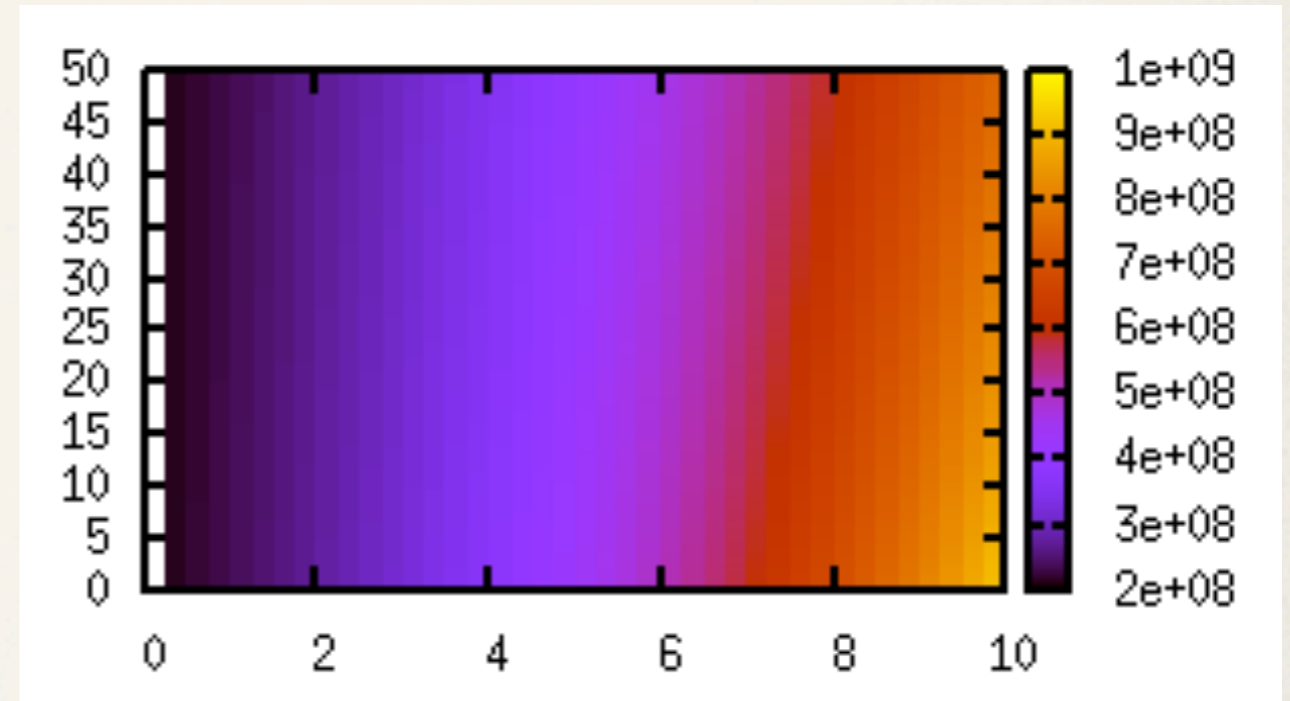
→ 10億年ほど H_2 大気持続, その後も CO , CH_4 が残る

海の再形成@金星

海洋質量 / 現在の海洋質量



H₂ 大気の保持期間 (年)



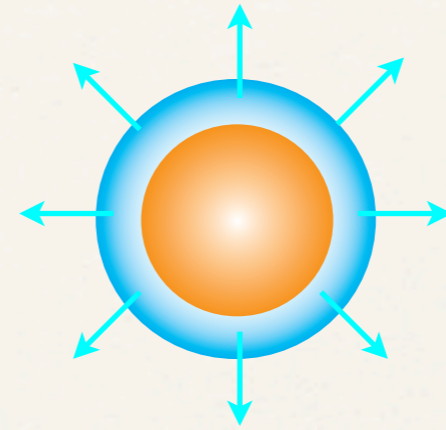
横軸：初期 H₂ 量 (現在の海洋を全て H₂ 大気にした場合を 1 とする)

縦軸：火山ガスからの CO₂ フラックス (現在の値を 1 とする)

10億年程度の時間をかけて, 1海洋質量を作り出すことが可能

金星大気散逸への制約

金星からの水の散逸：



暴走温室状態

水蒸気大気の散逸

H₂ は H.E. するが, O は大気中にたまっていく

熱的に散逸させる → H₂ の H.E. では一緒に散逸しない [Sasaki & Abe, 2008]

非熱的に散逸させる → O⁺ pick up による散逸 [Kulikov et al., 2006]

average solar で 15-20% 地球海洋の O が散逸

金星表面を酸化 → 現在の地球程度のテクトニクスが45億年間続くと

地球海洋の O を消費 [Lewis & Prinn, 1984]

金星の海は2度死ぬ

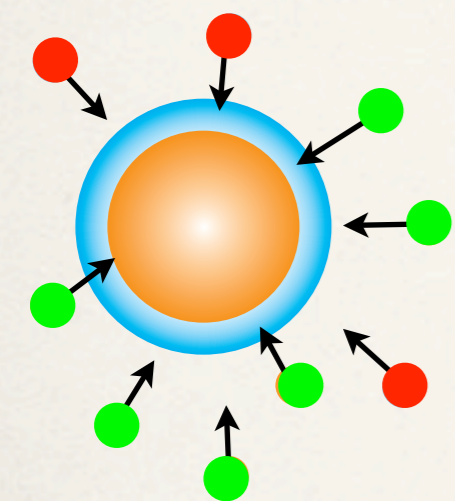
原始海洋の消失, 水素大気の発生, 海の再形成

暴走温室状態での海の蒸発 と 水蒸気大気の発生

H₂: Hydrodynamic Escape, O: CO₂大気を形成



地球・金星大気の初期進化

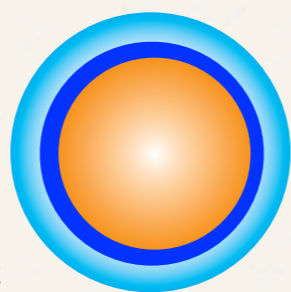


レイトベニア

海の消失

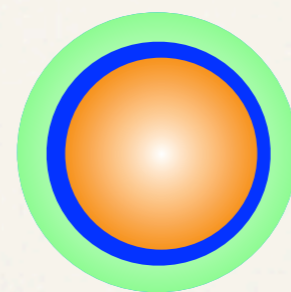
H₂大気出現

還元的大気



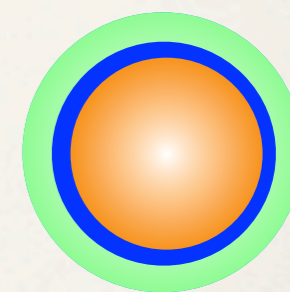
火山ガス付加

海の再形成



COの炭酸塩固定

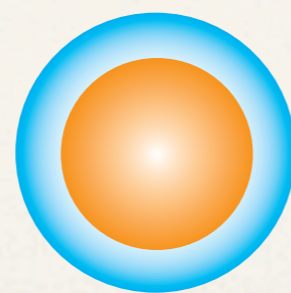
大気の酸化



地球

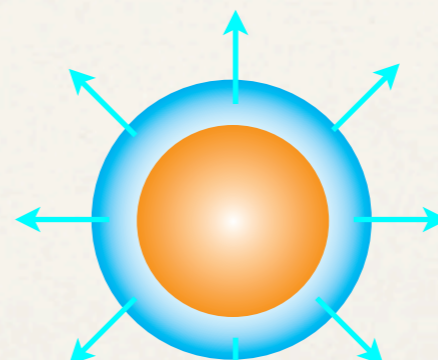
1海洋存在

太陽光度上昇



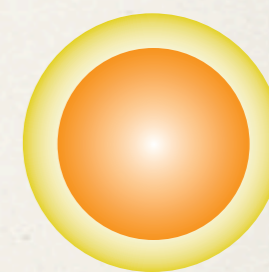
暴走温室状態

海の蒸発



H.E.によるH₂散逸

CO₂の形成



金星

CO₂大気

まとめ

- 原始海洋 + Fe → 海の消失 + 大量の水素大気の発生
- 水素大気への火山ガス付加 → 海の再形成
- 10億年程度の時間をかけて, 1海洋質量の海が形成
- 海の質量は最大で数海洋質量に制限
- 地球：酸化的なマントルと還元的な大気が共存
- 金星：2度の海洋消失イベントによるCO₂大気の形成