

地球を作る実験—星くずから惑星へ



小久保英一郎(国立天文台)

天文学の種類(方法)

観測天文学(紀元前-)

道具: 望遠鏡(+コンピュータ)

「宇宙を観る」

理論天文学(紀元前-)

道具: 紙と鉛筆(+コンピュータ)

「宇宙の物理を考える」

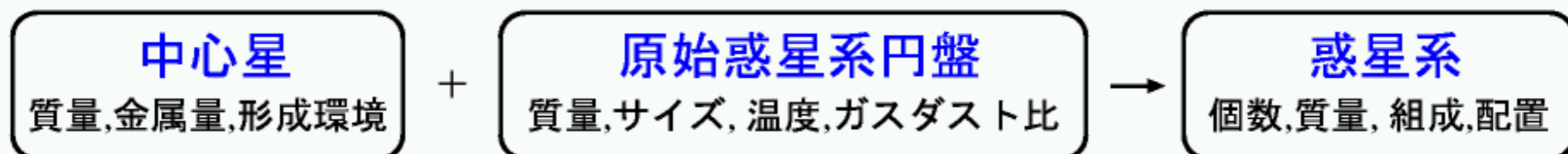
シミュレーション(模擬実験)天文学(20世紀末-)

道具: スーパーコンピュータ

「コンピュータの中に宇宙を再現して実験する」

惑星系形成論

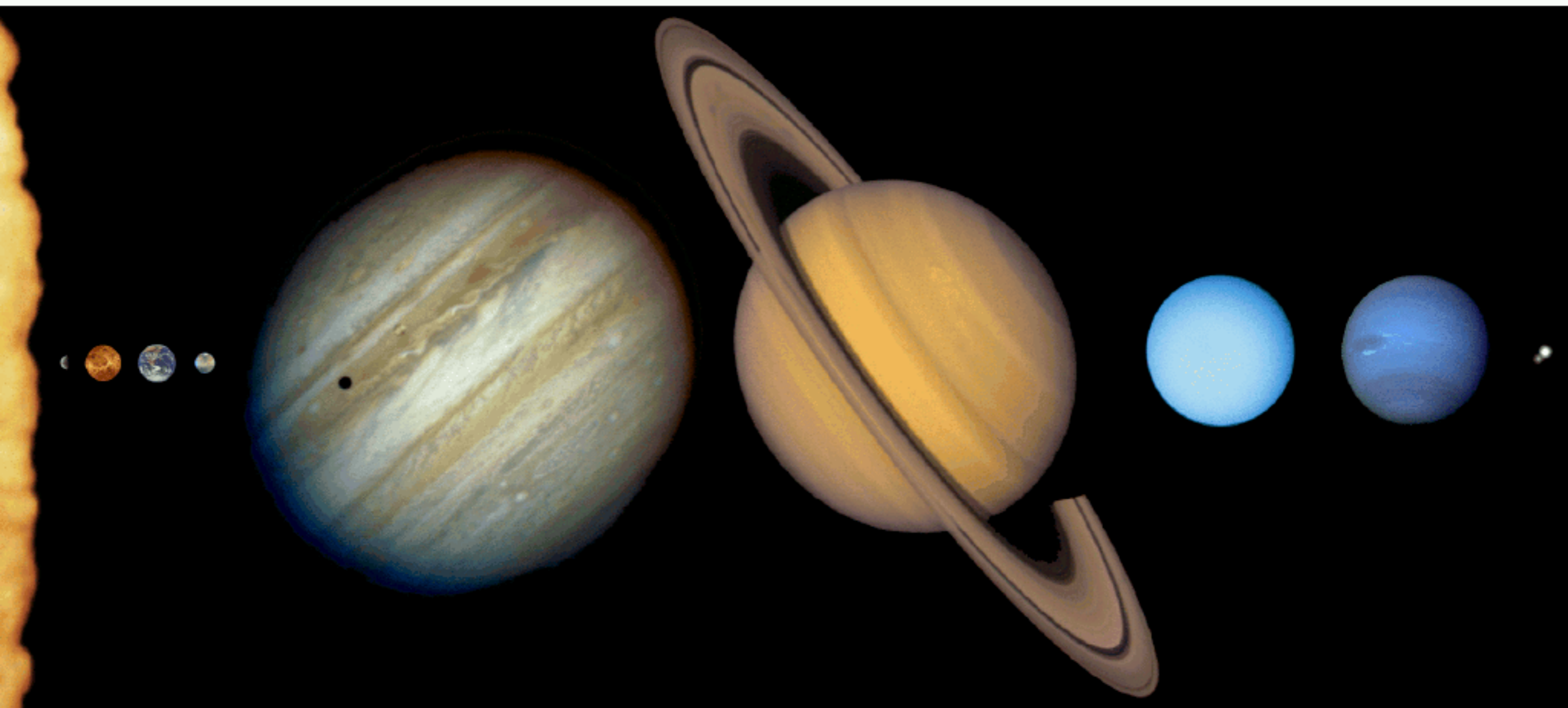
原始惑星系円盤から惑星系までの 形成理論を構築する



- 太陽系(惑星, 衛星, 環, 小惑星, 彗星, ...)の起源
- 系外惑星系(灼熱巨大惑星, 大離心率惑星, ...)の起源
- 第2の「地球」の存在可能性
- 生命の起源

美しい太陽系

太陽系の惑星



地球型惑星
(岩石惑星)

木星型惑星
(ガス惑星)

海王星型惑星
(氷惑星)

太陽系の特徴

大きさと惑星の数

- 0.4-30天文単位に8個の惑星(+無数の小天体)

質量

- 惑星の質量の合計=太陽の質量の1/1000倍

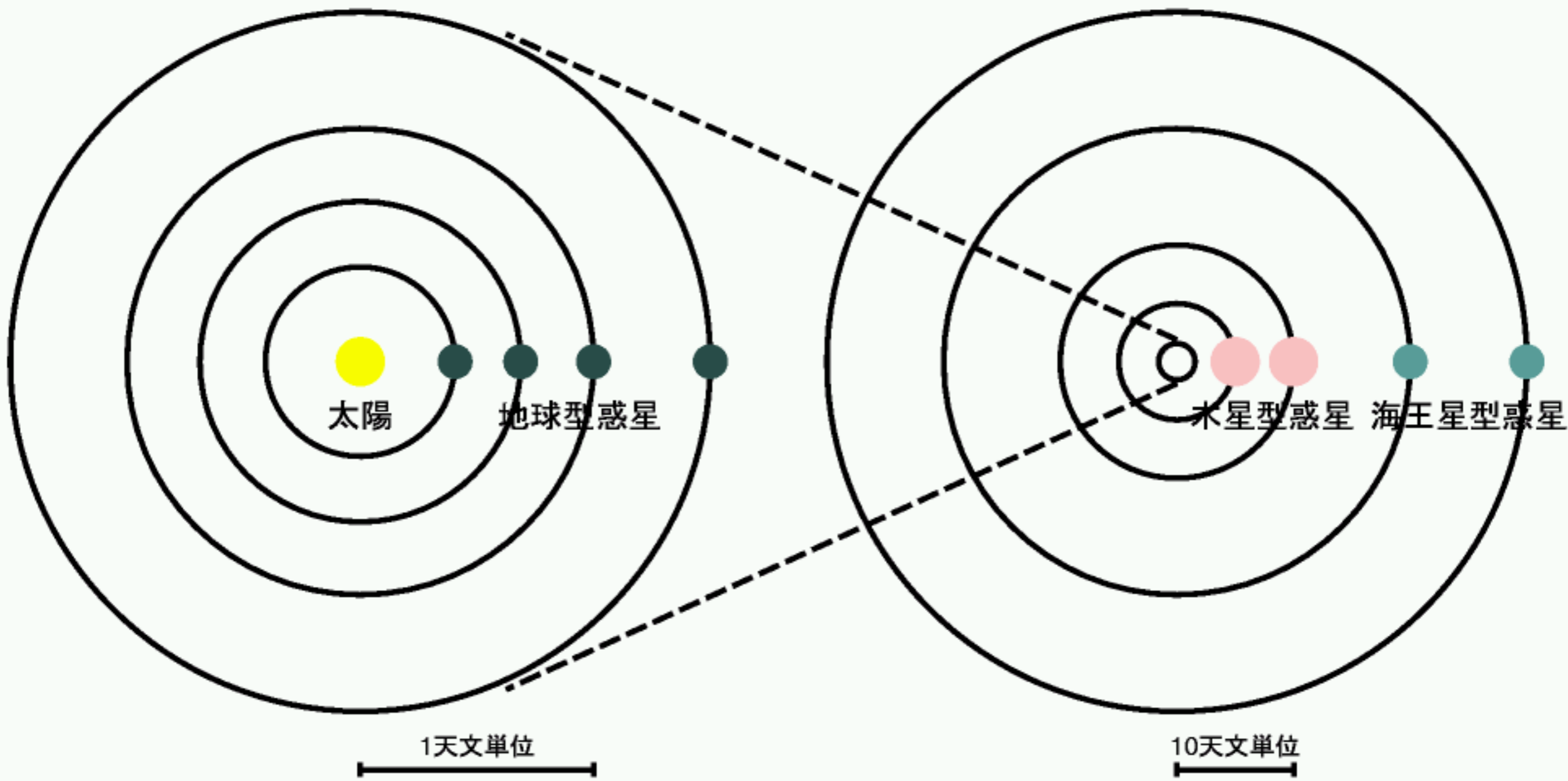
惑星の軌道

- ほぼ同一平面上で同方向、ほぼ円軌道

惑星の組成

- 地球型惑星: 岩石(固体)
- 木星型惑星: 水素, ヘリウム(ガス)
- 海王星型惑星: 氷(固体)

美しい太陽系



太陽系形成の基本的考え方-京都モデル

円盤仮説

- 惑星系は星の周りの軽い**円盤**(原始惑星系円盤)から形成される。
- 円盤はガスとちり(ダスト)から構成される。

微惑星仮説

- ダストの集積により**微惑星**が形成される。
- 微惑星の集積により**固体惑星**が形成される。
- 固体惑星にガスが降り積もることによって**ガス惑星**が形成される。

原始太陽系円盤

円盤 = 太陽形成の残りもの

大きさ

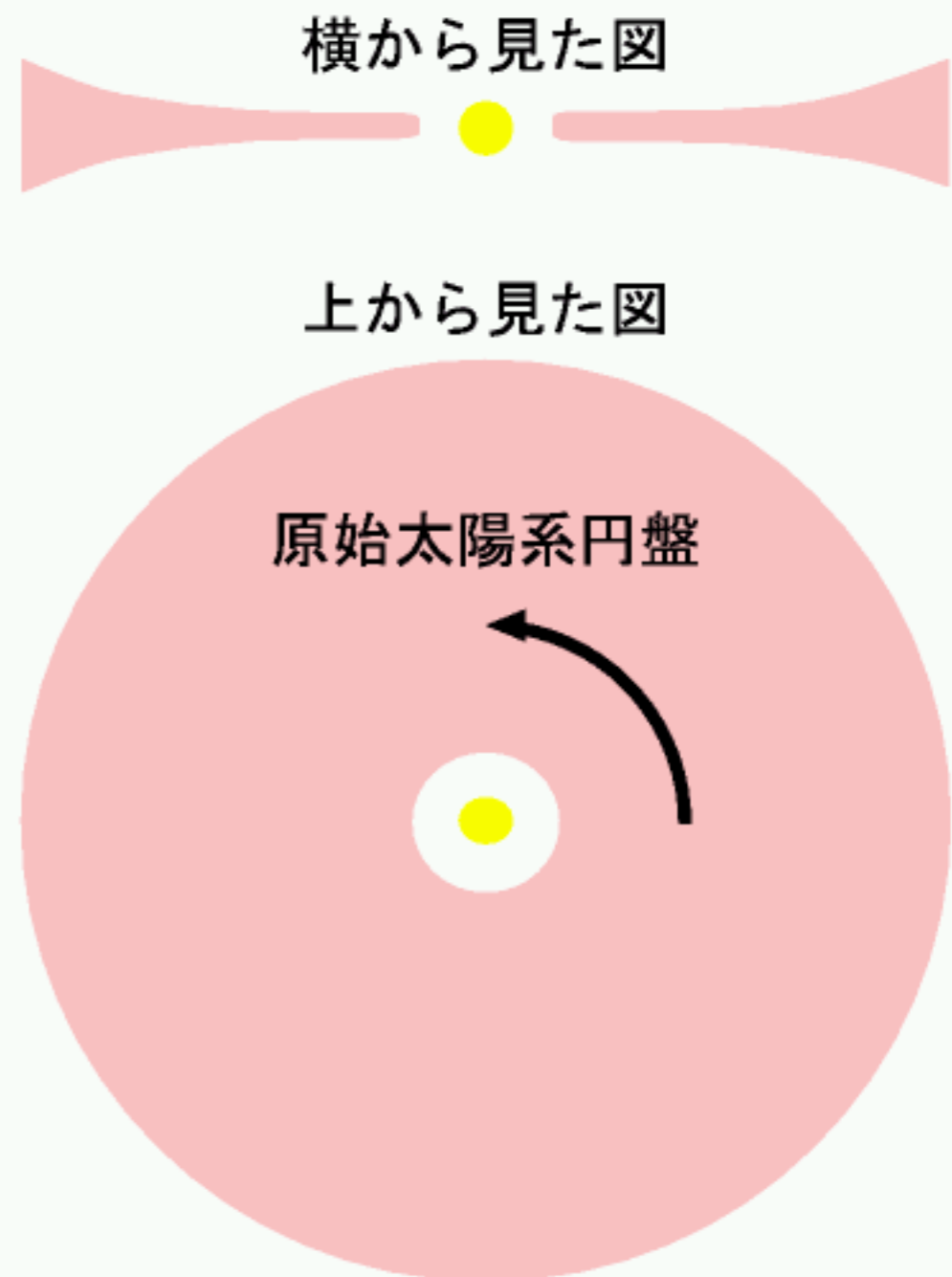
- 太陽系の大きさ

質量

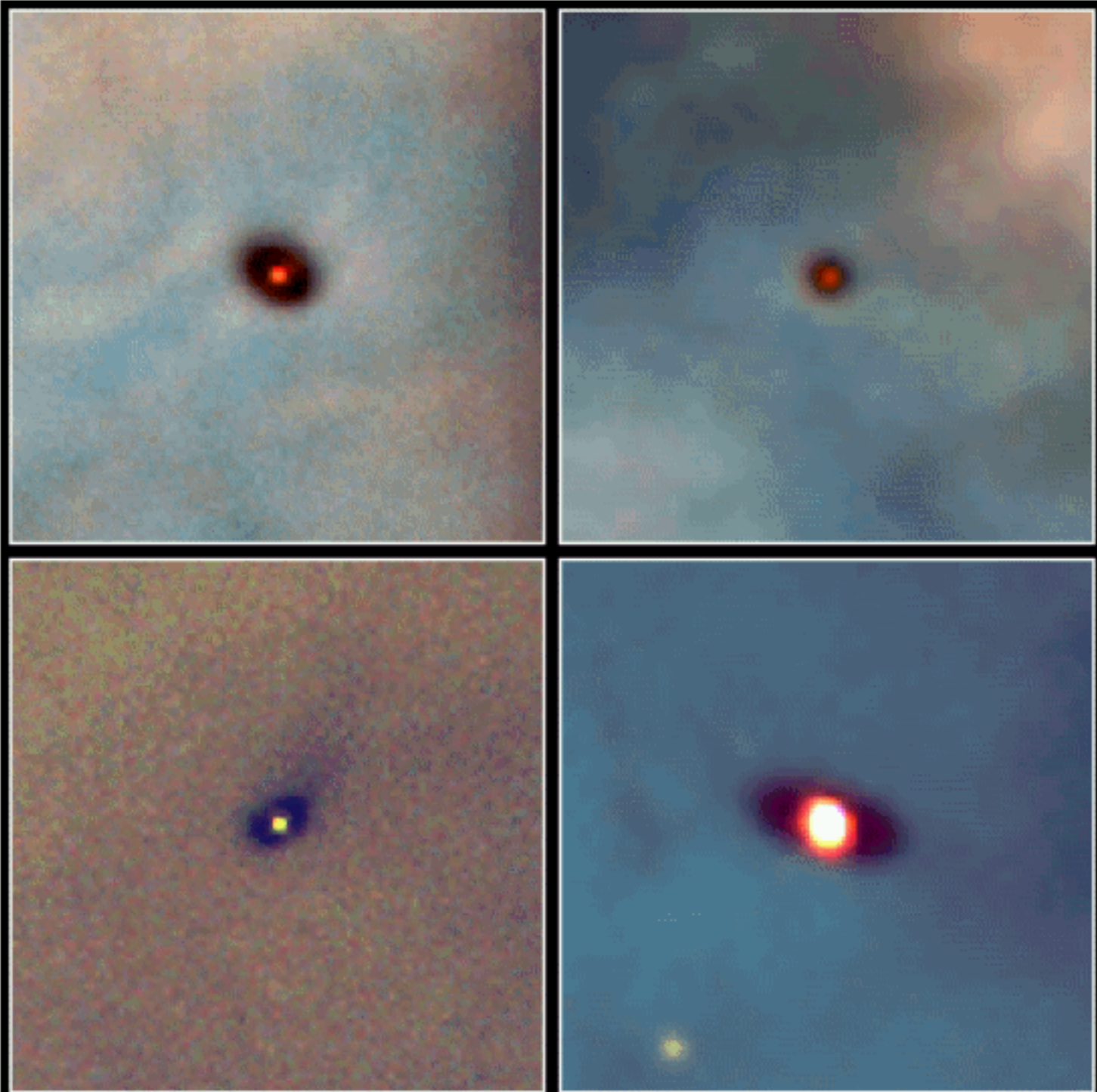
- 太陽質量の1/100倍

組成

- 99%のガス(水素, ヘリウム)
- 1%のダスト(岩石, 氷)



原始惑星系円盤の観測

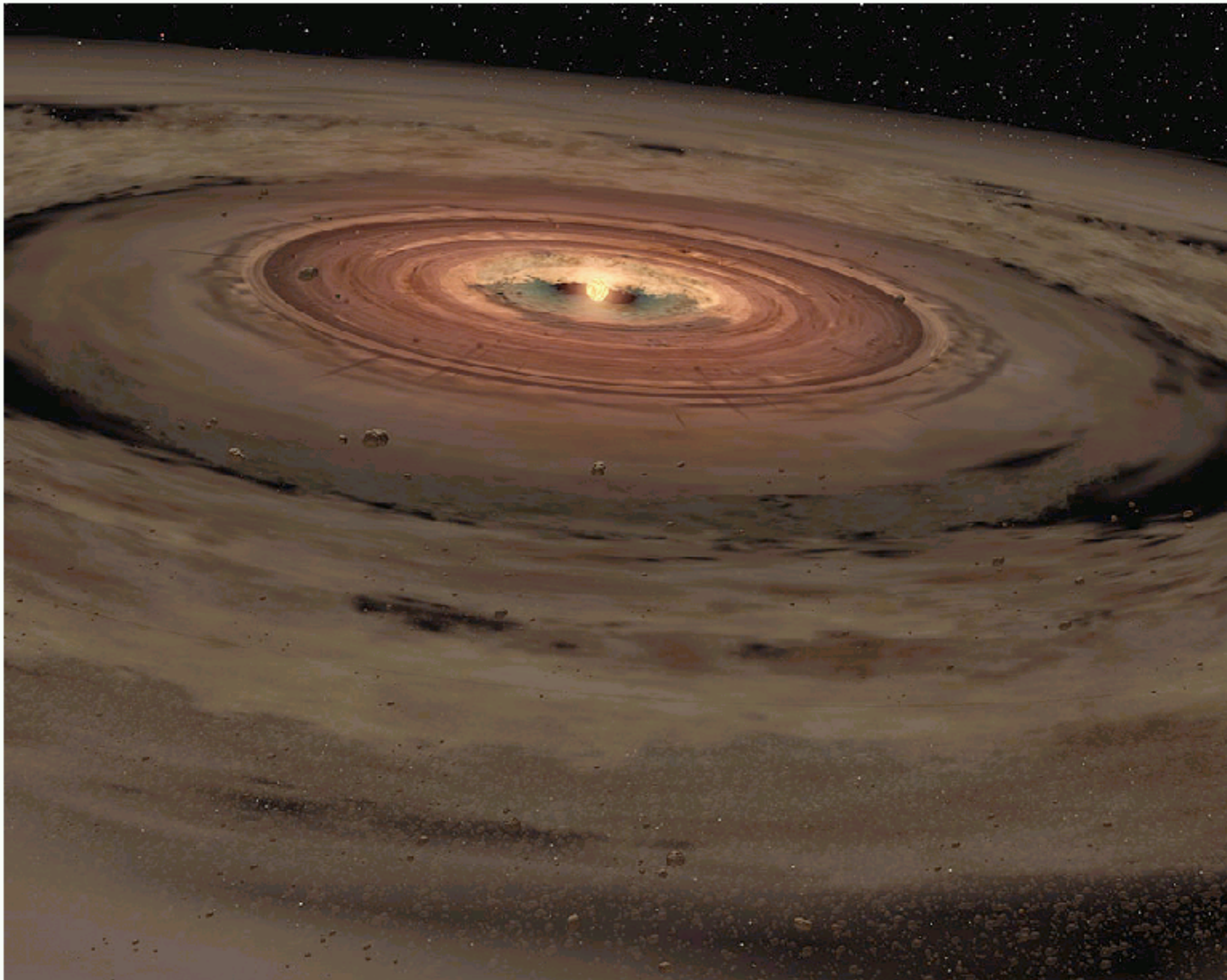


**Protoplanetary Disks
Orion Nebula**

HST · WFPC2

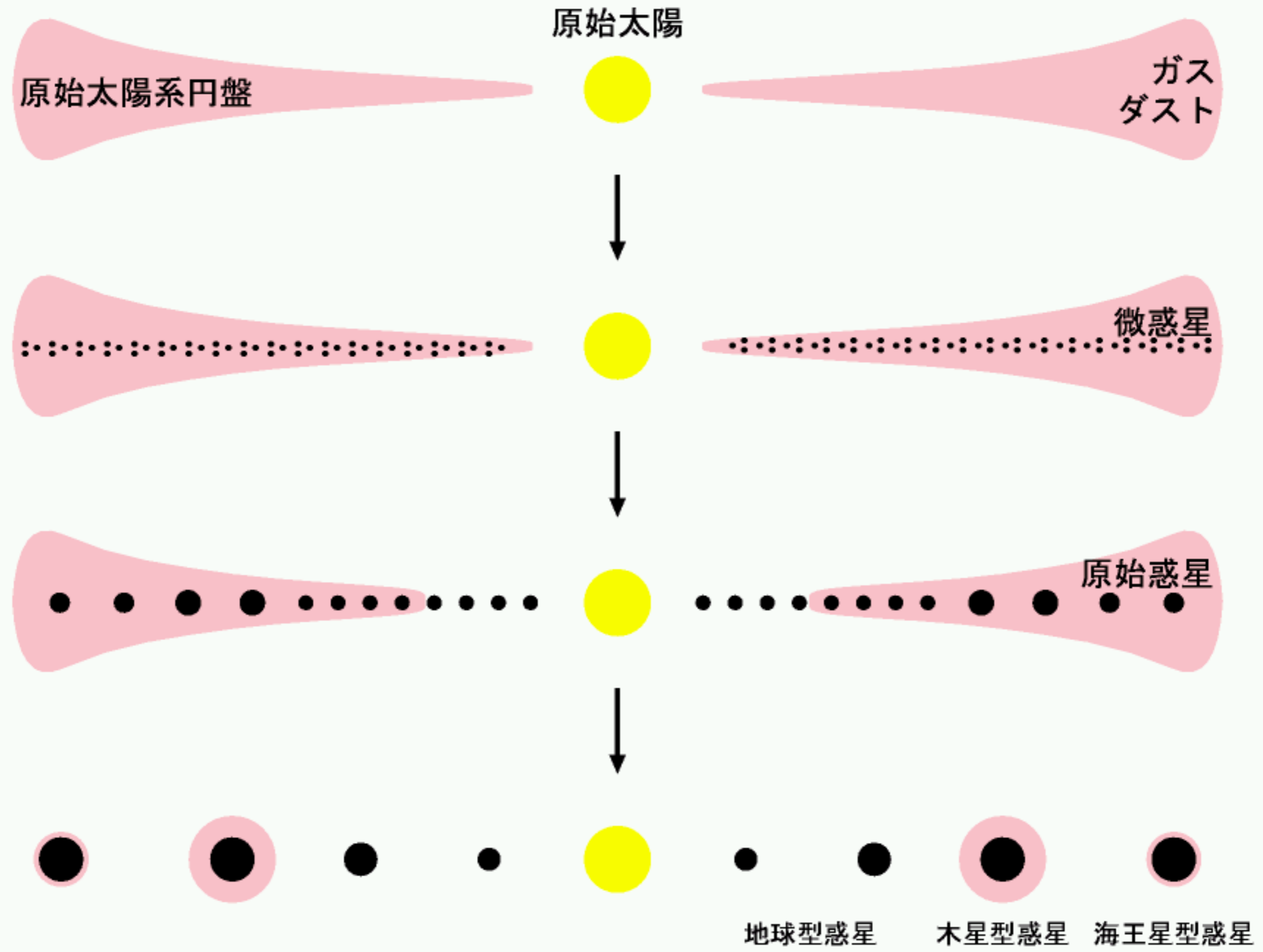
PRC95-45b · ST ScI OPO · November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

原始太陽系円盤(イメージ図)



NASA/JPL-Caltech/T. Pyle (SSC)

太陽系形成の標準シナリオ



星くずから地球へ

地球—水と生命の惑星



質量 (kg)	半径 (km)	密度 (gcm^{-3})	固体組成	大気組成
6×10^{24}	6400	5.5	岩石, 鉄	窒素, 酸素 (水蒸気)

軌道半径 (天文単位)	公転周期 (日)	自転周期 (時)	自転軸傾斜角 ($^{\circ}$)
1	365	24	23.4

宇宙・地球・人間の元素組成

初期宇宙

- H, He, ...

地球

- Fe, O, Si, Mg, S, Ni, Ca, Al, ...

人間

- O, C, H, N, Ca, P, ...

重元素の起源

- Hから恒星内部や超新星爆発で合成

ダスト = 星くず

- 重元素からなる固体微粒子

ダスト(ちり)

起源

- 前世代の恒星による元素合成(星くず)

大きさと総質量

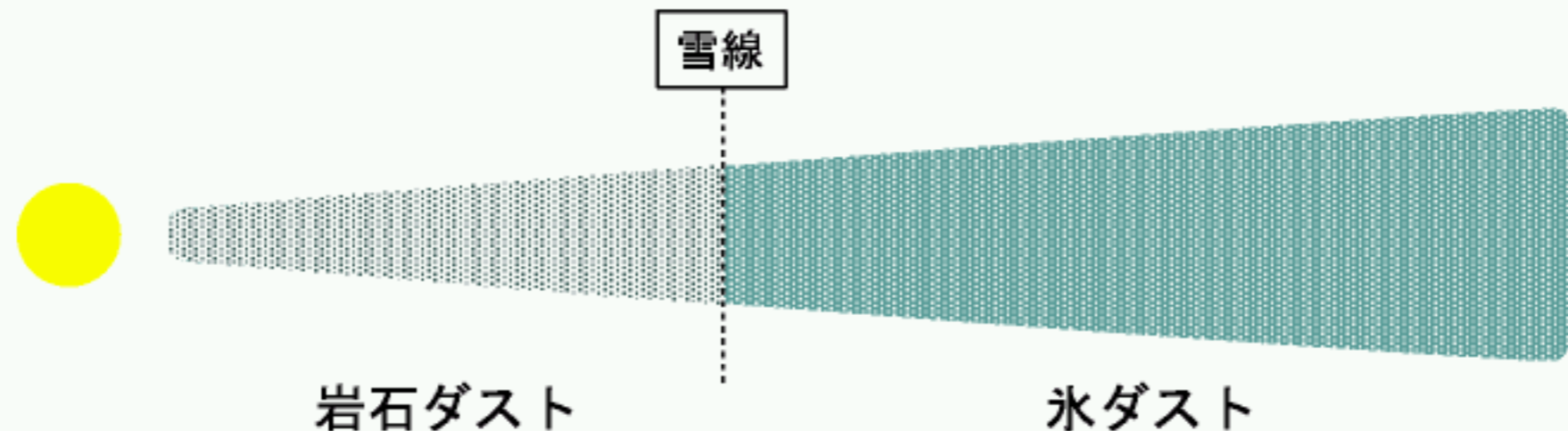
- 0.1-1 μ m(1/1000mm), 太陽質量の1/100000倍

組成

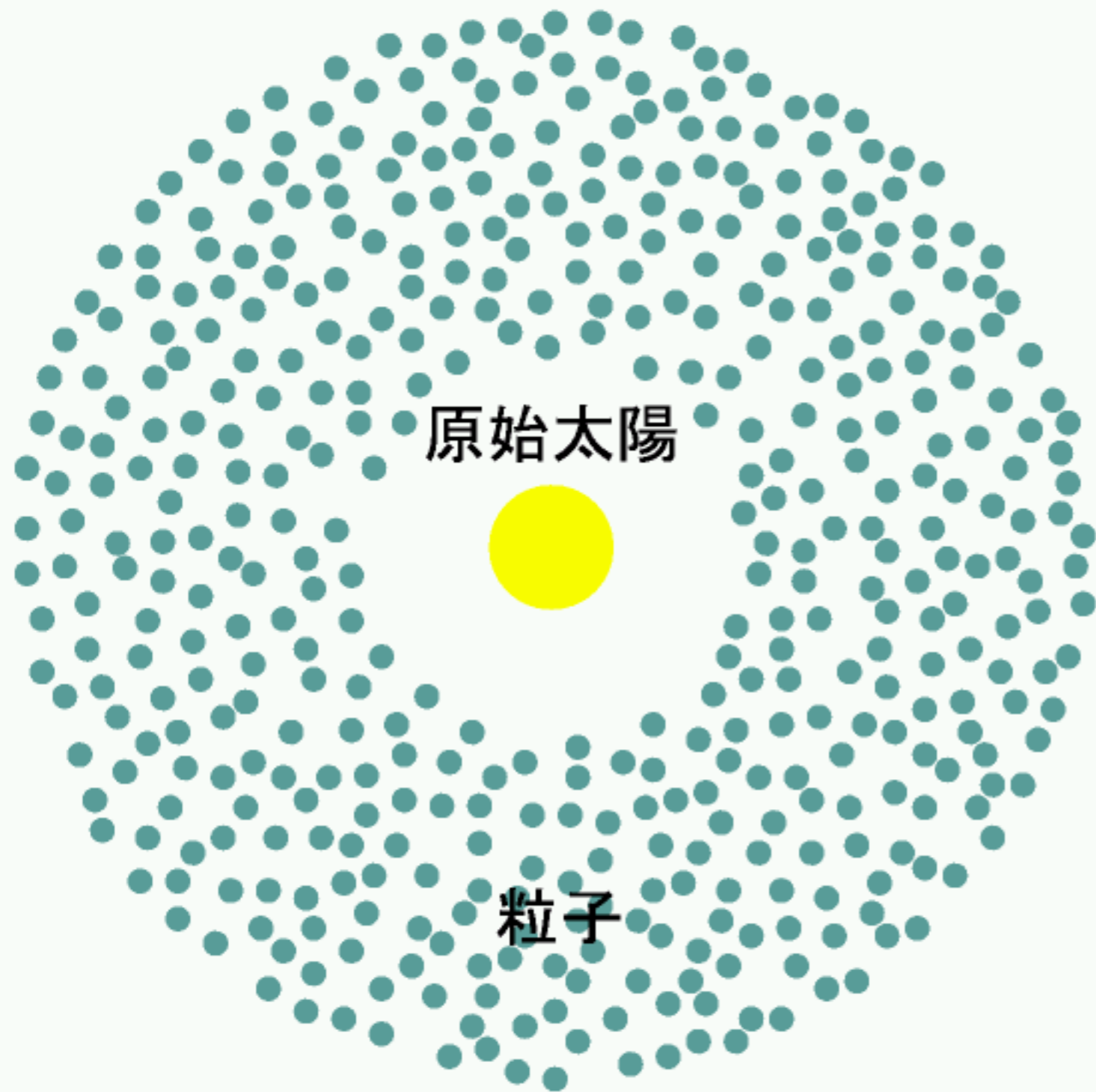
- 雪線の内側-岩石ダスト, 外側-氷ダスト

雪線

- 水が凍る太陽からの距離(約3天文単位)



コンピュータの中の原始太陽系



粒子データ

$$m_1, \boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{v}_1$$

$$m_2, \boldsymbol{x}_2, \boldsymbol{v}_2$$

$$m_3, \boldsymbol{x}_3, \boldsymbol{v}_3$$

⋮

⋮

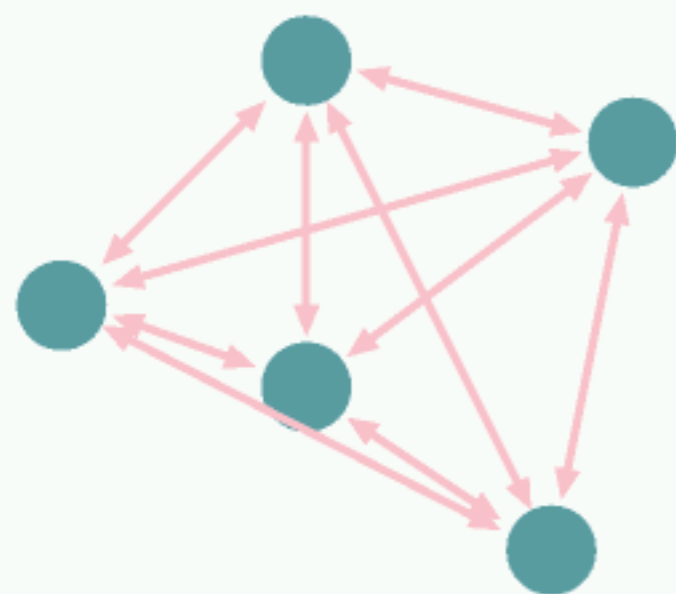
$$m_N, \boldsymbol{x}_N, \boldsymbol{v}_N$$

時間進化

運動方程式を解く

惑星を作る実験

基本原理: 万有引力の法則・運動の法則



運動方程式

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum_{j=1, j \neq i}^N G m_i m_j \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|^3}$$

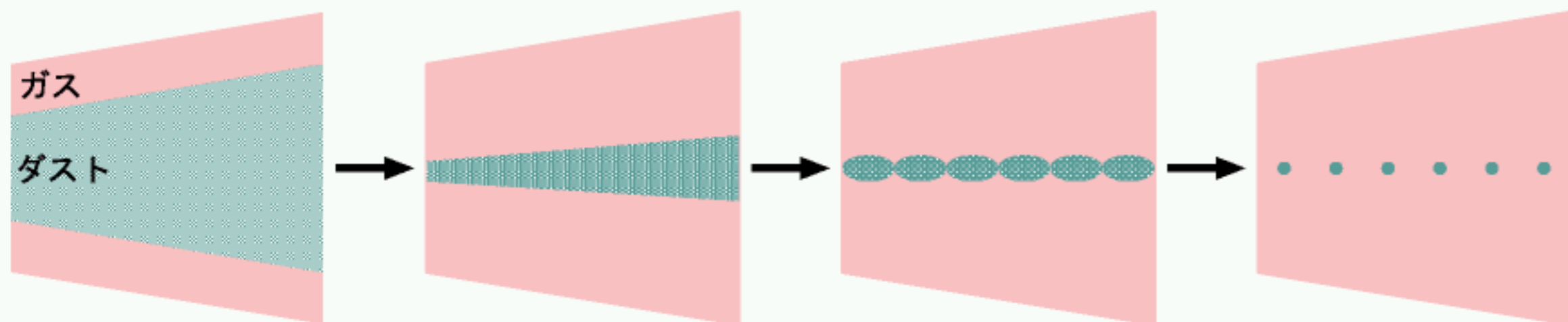
$(m\mathbf{a} = \mathbf{f})$

- 重力(引力)で相互作用する多数の粒子の運動を数値的に計算(3体以上では解析的な解がない!!)
- 重力相互作用の計算が大変!
- スーパーコンピュータを使用!

微惑星の形成

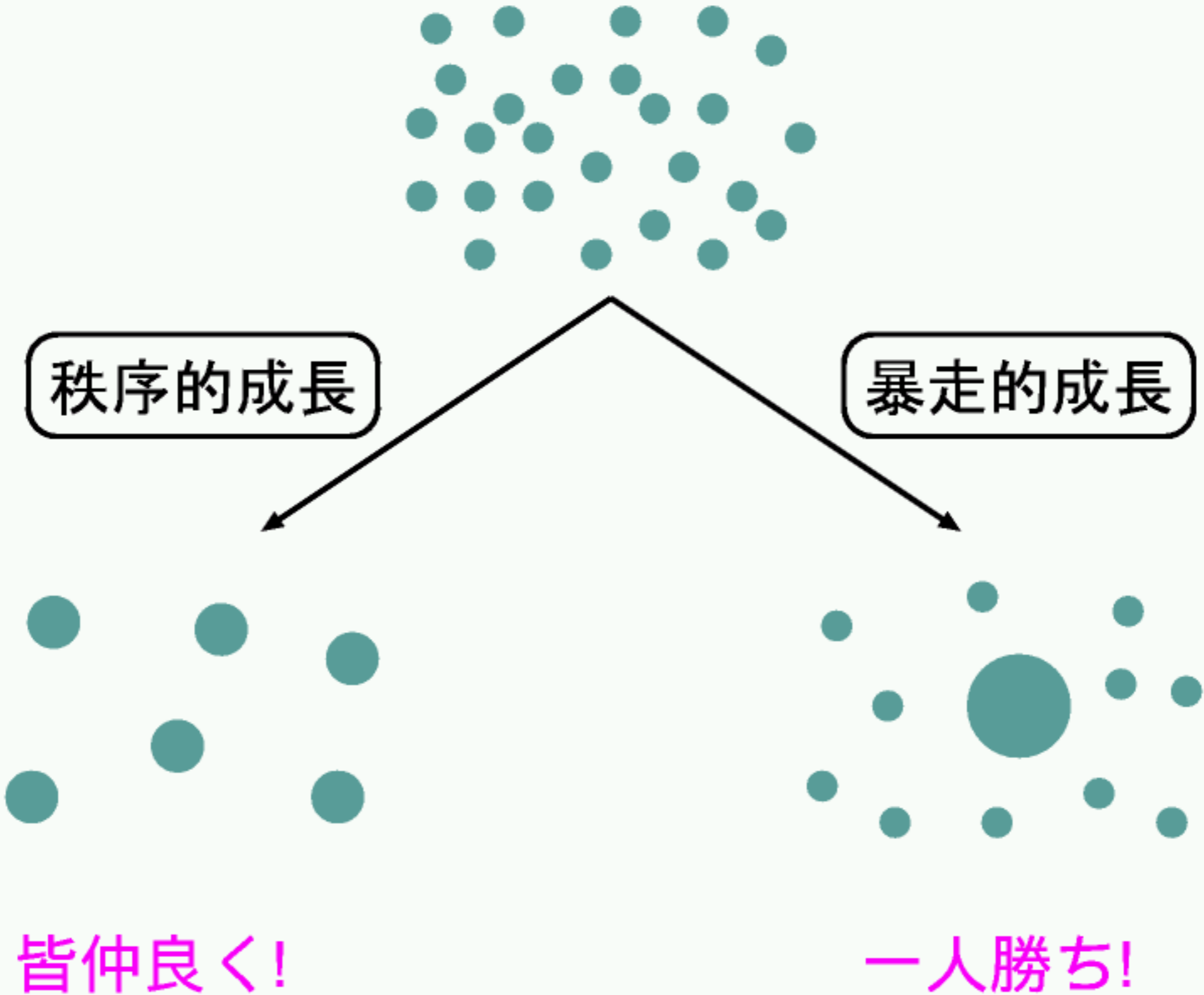
ダストから微惑星を作る(重力不安定説)

- (1) 太陽重力に引かれて円盤にダスト層が形成される
- (2) ダスト層の密度が大きくなる
- (3) ダスト層が不安定になり分裂する
- (4) 分裂したダスト層が収縮して微惑星が形成される



ちりも積もれば微惑星になる

惑星の成長の仕方

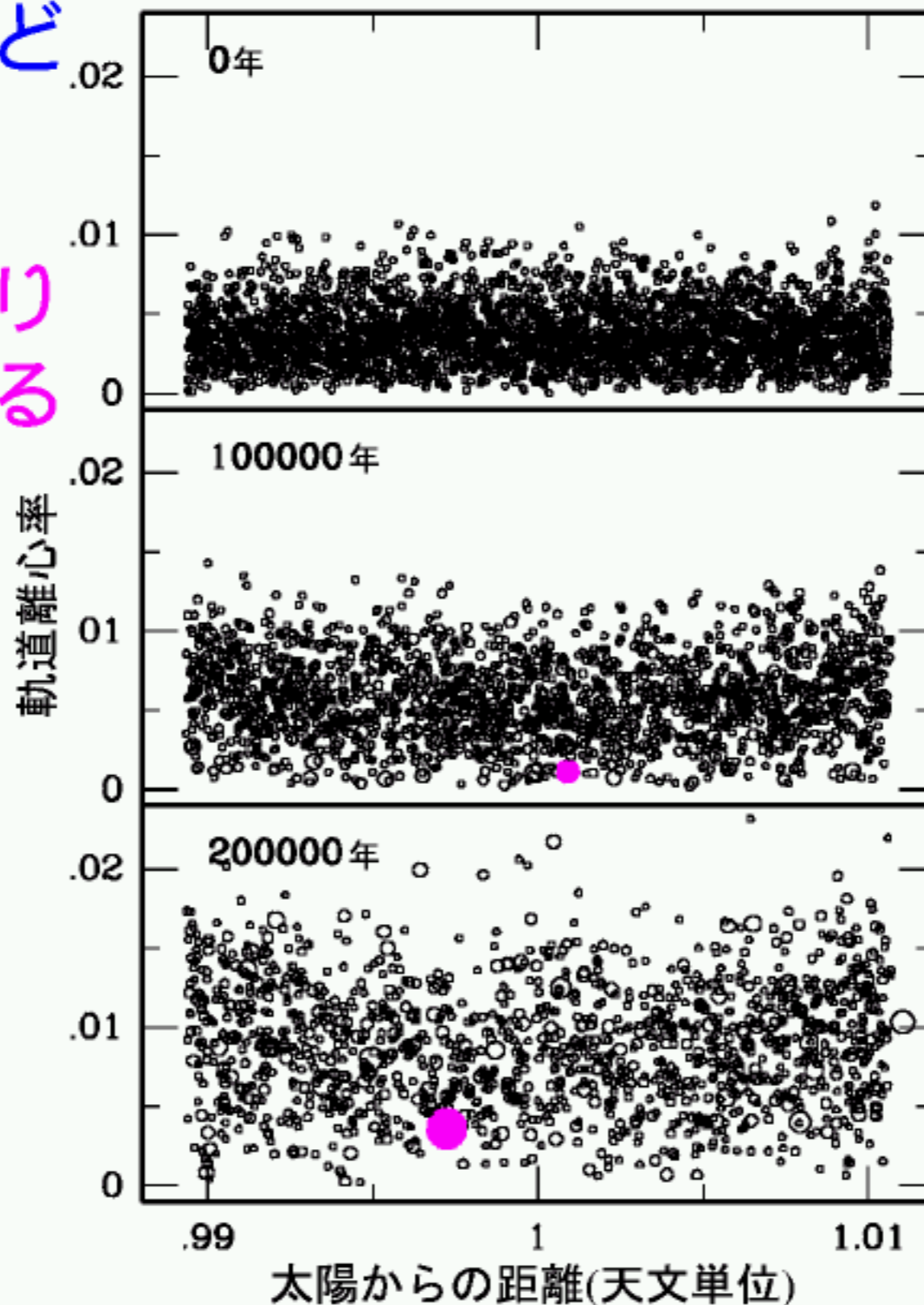


微惑星の暴走的成長

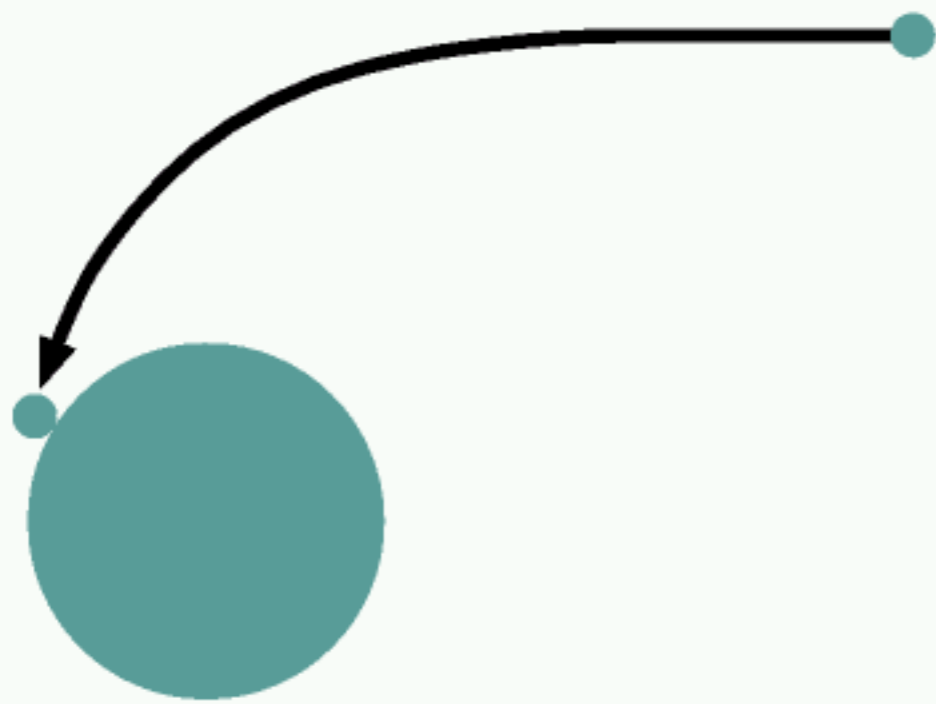
大きな微惑星ほど
速く成長する

強い重力でまわりの
微惑星を集める

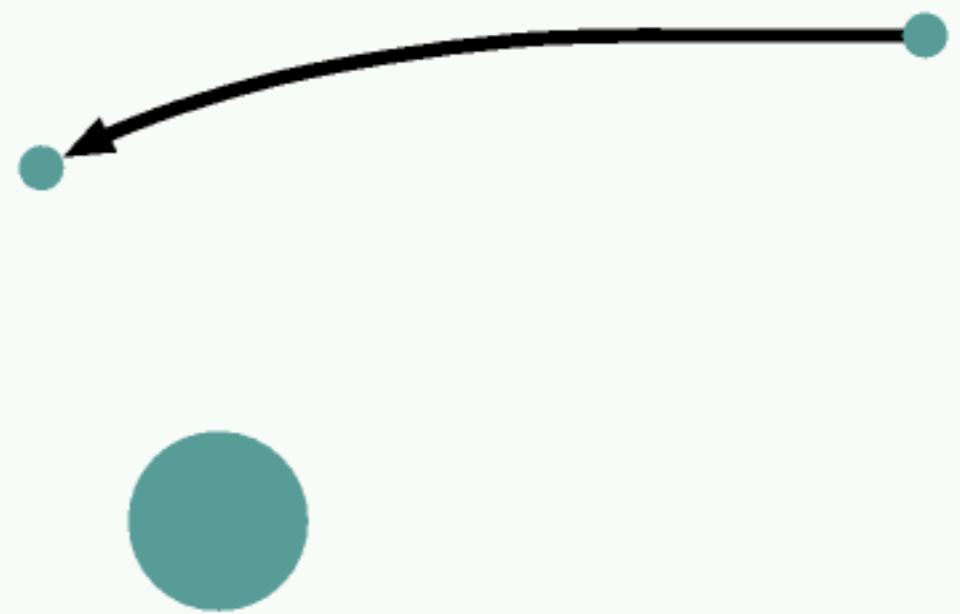
暴走的成長微惑星=
原始惑星



重力による引き付け



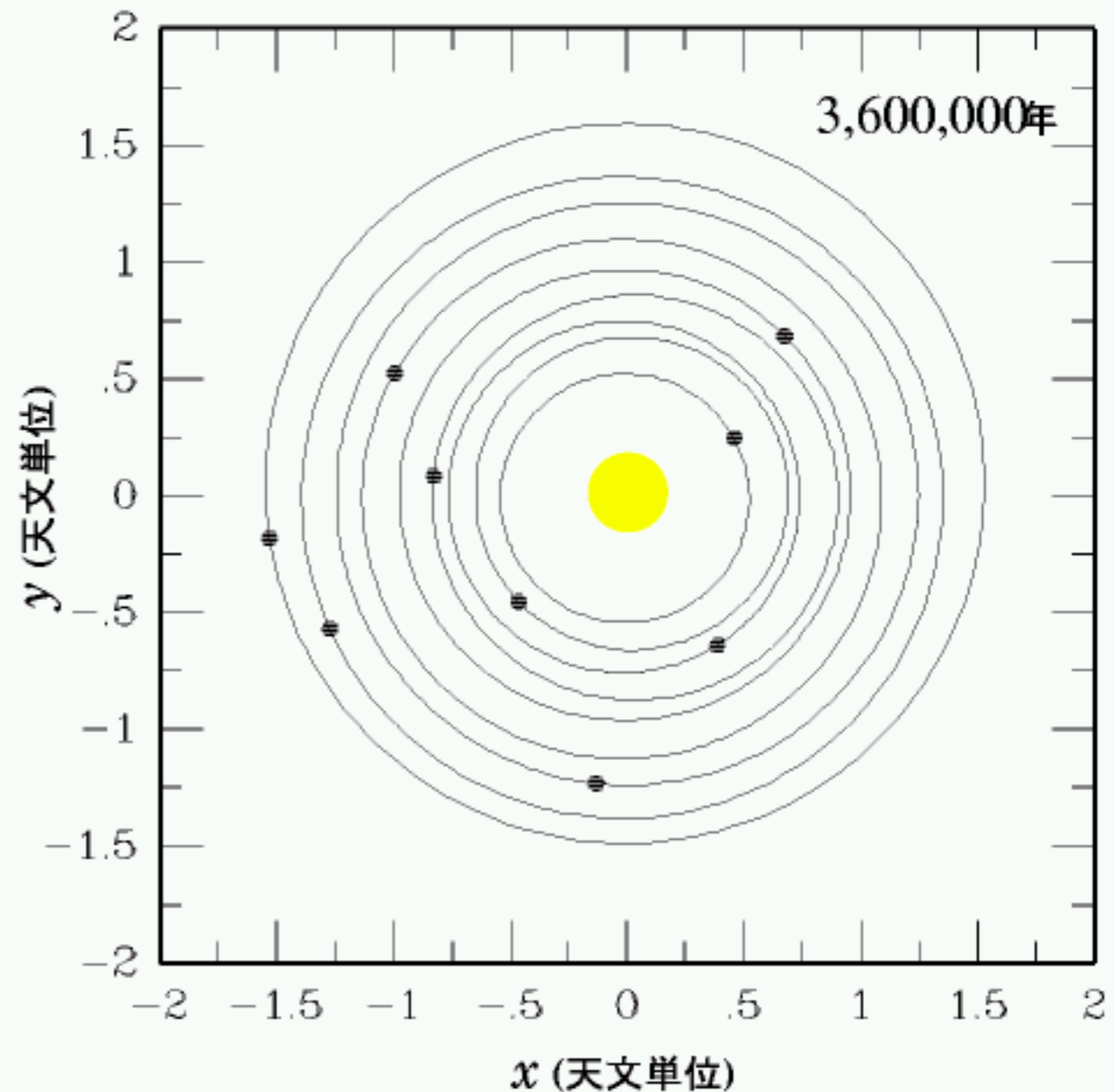
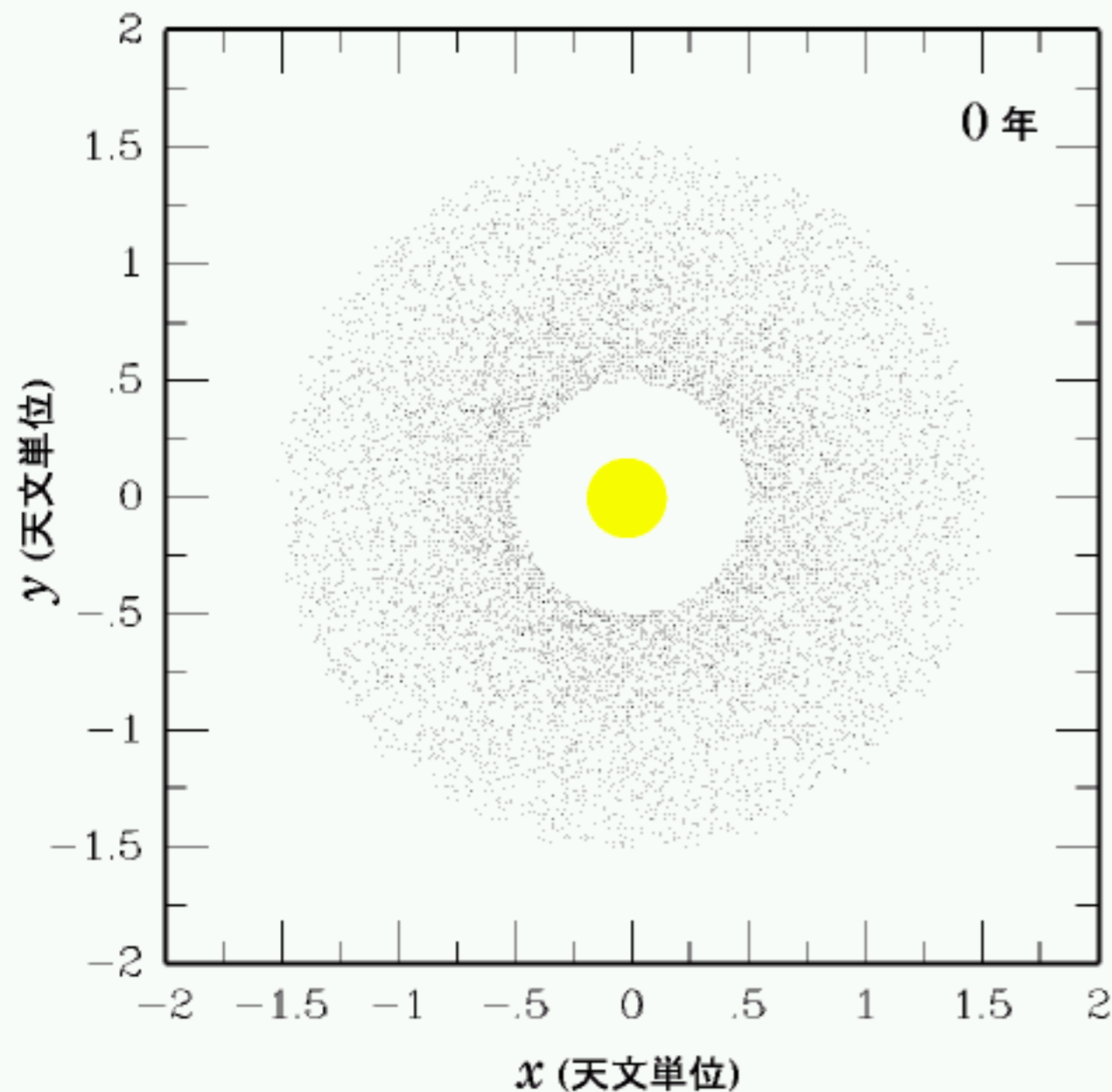
大微惑星(重力強)
衝突



小微惑星(重力弱)
通過

大質量の微惑星ほど速く成長する!

原始惑星の寡占的成長



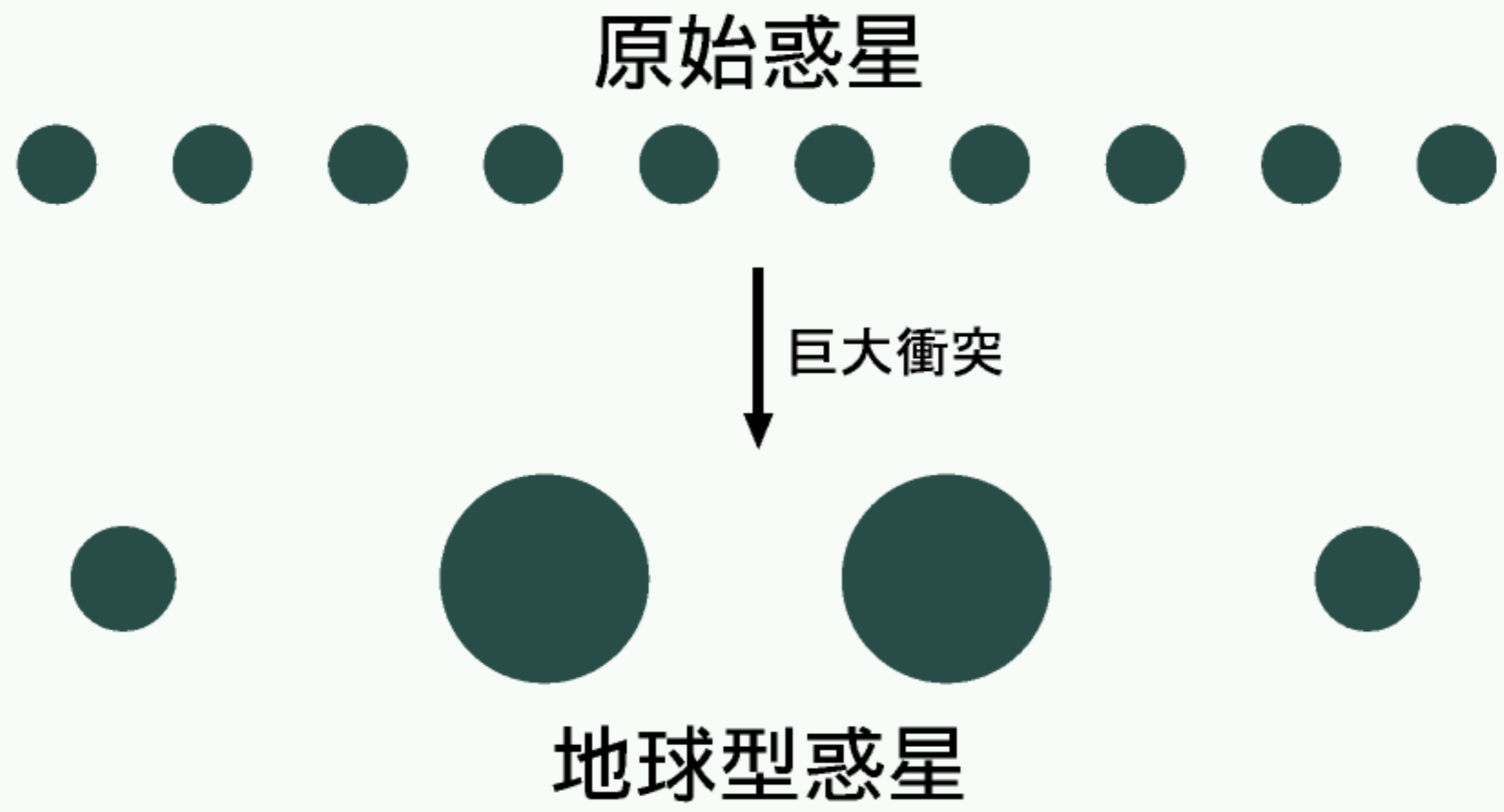
- 原始惑星はある間隔で形成(なわばりがある)
- 原始惑星は平均的に(皆同じように)成長

寡占的成長: 複数の原始惑星が支配的に成長

原始惑星から地球型惑星へ

原始惑星の質量 ~ 0.1 地球質量 $<$ 金星・地球質量

ガス散逸後の原始惑星どうしの巨大衝突



海の形成

現在の海

- 面積: 地球表面の71%
- 質量: 地球質量の0.02%

形成条件

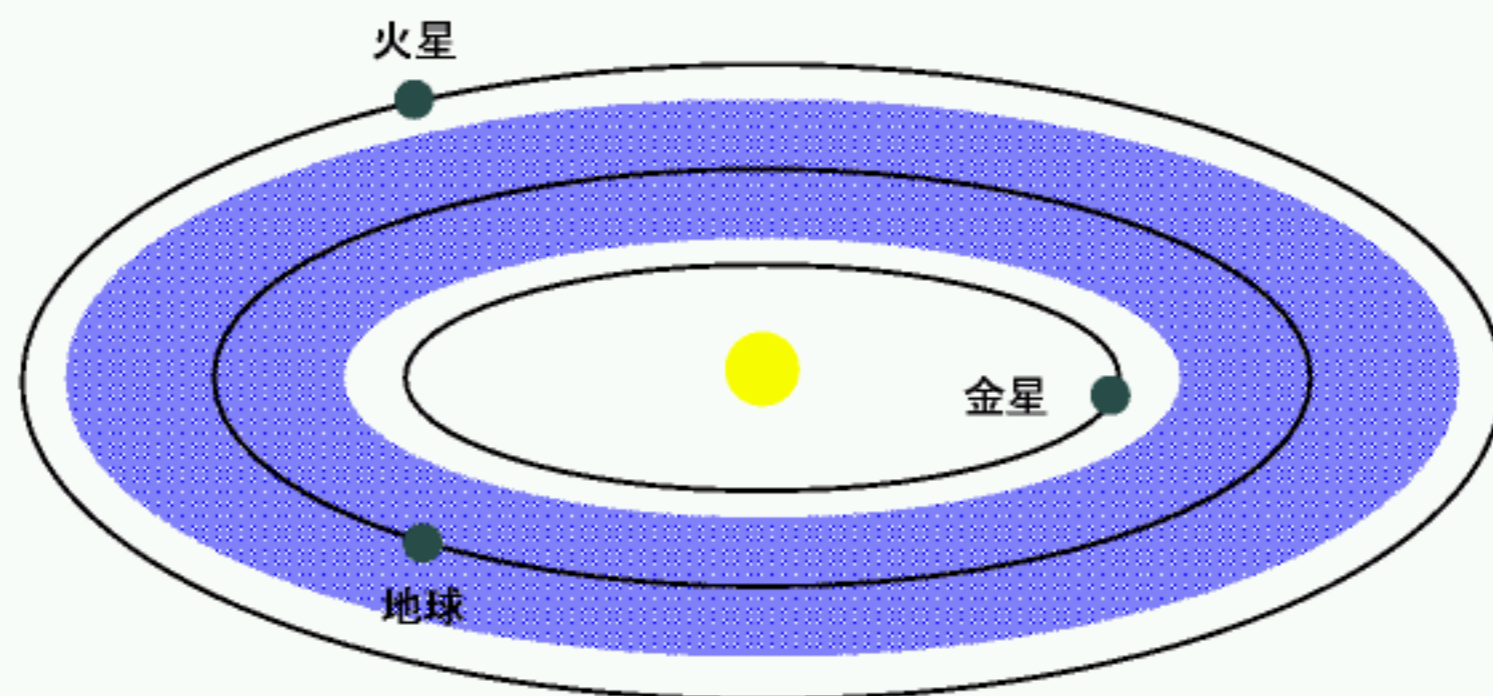
- H₂Oが惑星に供給される
← 微惑星に含まれている
- H₂Oが惑星表面に存在する
← 微惑星の衝突により水蒸気として放出
- H₂Oが液体の水になる
← 惑星表面が水の存在条件を満たす

海の存在の条件

水が存在できる物理条件

温度	0.01-374.1 度
圧力	飽和水蒸気圧以上

水が存在できる天文学的条件



質量	火星以上、地球の約 10 倍以下
軌道半径	金星以上、火星以下 (ハビタブルゾーン)

映画:地球型惑星形成



CG: 三浦均 (4D2U/NAOJ・武蔵野美術大学)

まとめ-星くずから地球へ

星くず

- ダスト=太陽の前世代の恒星が作った重元素

星くずから地球へ

- (0) ガスとダストから太陽と原始太陽系円盤が形成
- (1) ダストが集まって微惑星が形成
- (2) 微惑星が集まって原始惑星が形成
- (3) 原始惑星が集まって地球が形成

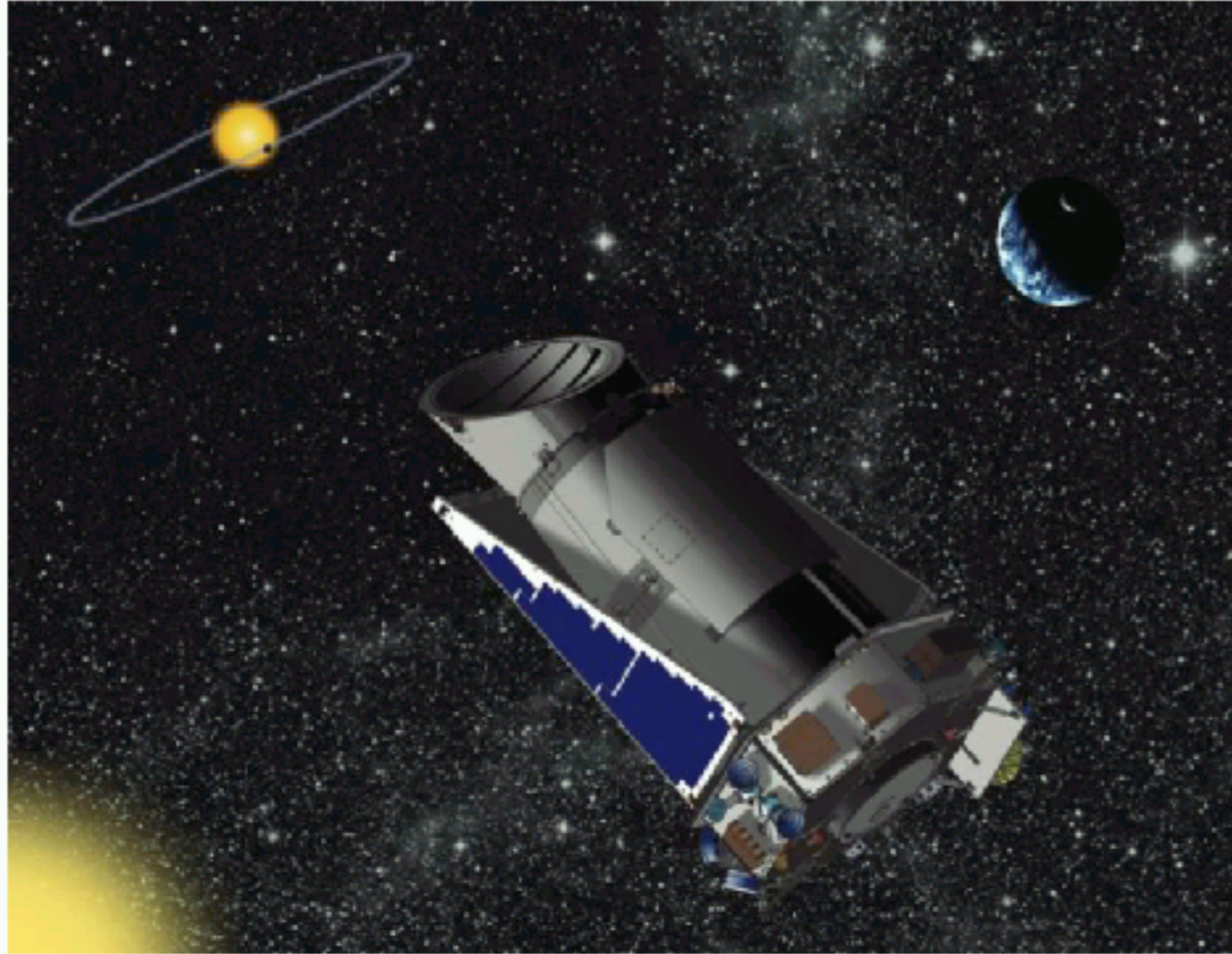
時間: 1億年

第2の「地球」はあるのか?

(「木星」「海王星」はすでに750個以上発見!)

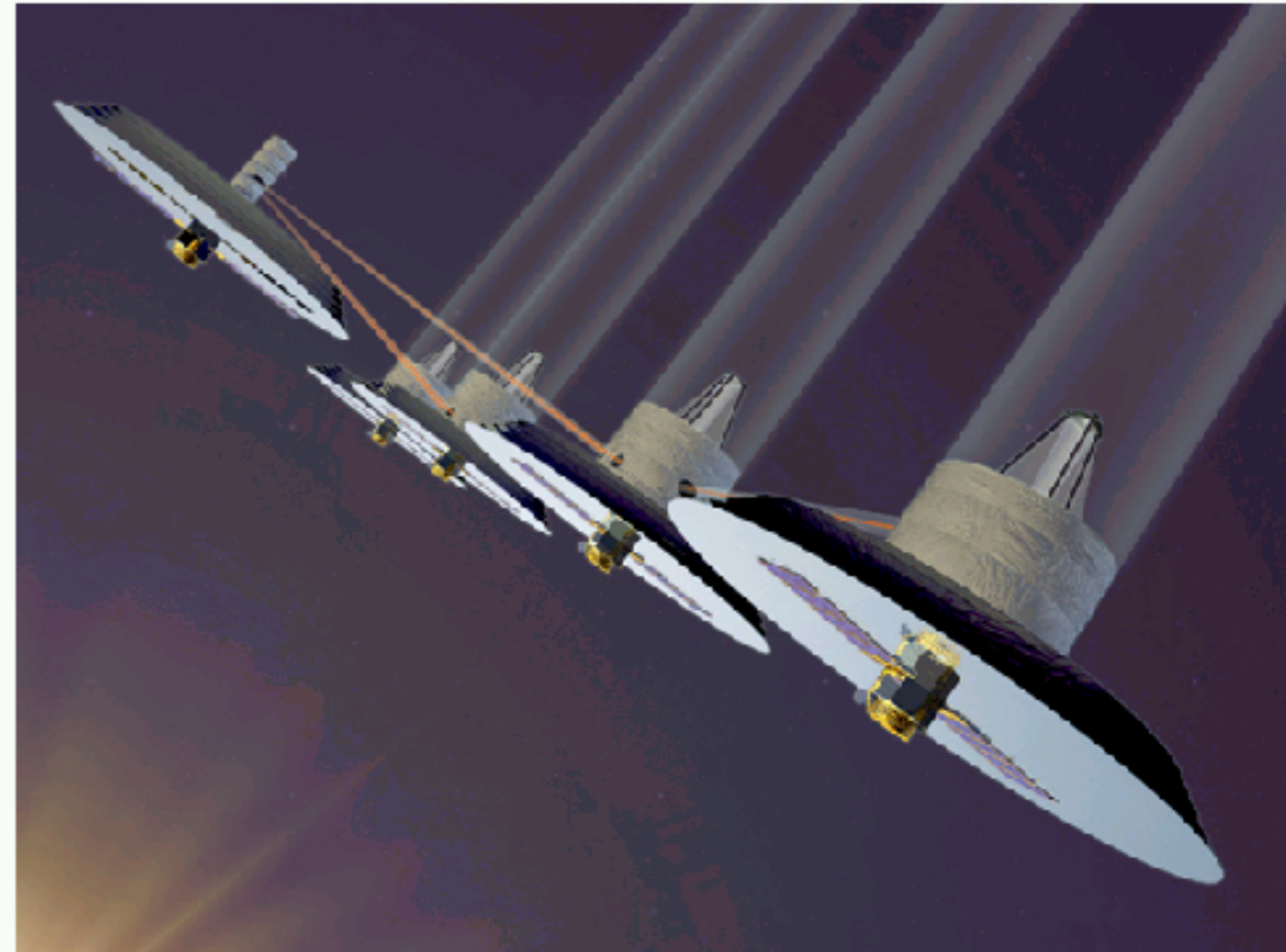
地球型惑星探査計画

(1) 惑星の**影**を探す
(惑星の大きさ、軌道)



Kepler (2009-)

(2) 惑星の**光**を受ける
(惑星の温度、大気組成)



Terrestrial Planet Finder (20XX?)

第2の地球が見つかる日は近い!!?