

宇宙の中の地球



小久保英一郎(国立天文台)

自己紹介

出身: 宮城県仙台市太白区

職業: 天文学者/惑星科学者

所属: 国立天文台理論研究部/東京大学大学院理学系研究科

身分: 教授

専門: 惑星系形成論

趣味: スクーバダイビング、文化財探訪、旅、...

「1つの研究がまとまったら南の島に潜りに行く、という生活
をしたいと思っている」(「一億個の地球」より)

最近潜った海: 石垣島(沖縄)

訪ねた史跡: 恭仁宮跡(京都)

訪ねた寺社: 南禅寺(京都)

見た祭り: こきりこ祭り(富山)

訪ねた街: Noordwijk (オランダ)

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」

国立天文台

日本の天文学研究の中心(大学共同利用機関)



すばる望遠鏡(ハワイ)



スーパーコンピュータ(三鷹)

三鷹キャンパス常時公開 毎日10:00-17:00

<http://www.nao.ac.jp>

10月27日 特別公開(三鷹星と宇宙の日)

なぜ惑星なのか？

地球への思い

- 海
- 生命

「地球」への思い

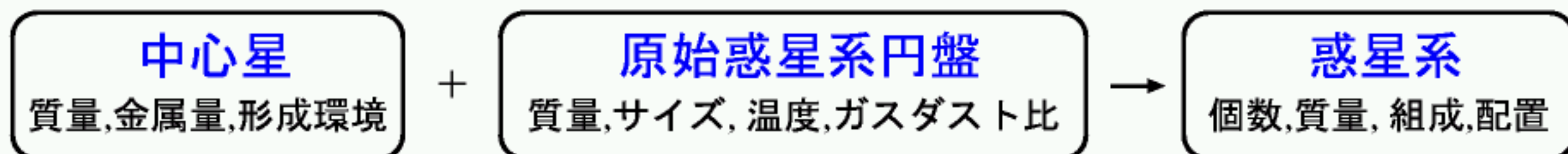
- 第2の地球はあるのか？
- 地球外生命は存在するのか？

宇宙で生命が存在可能な場所としての惑星

- 適当な物質(重元素の濃縮)
- 適当な温度・圧力

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
- 地球外生命の存在可能性

宇宙の中の地球

天文学的な空間(広がり)と時間(流れ)の中で地球を観る

(1)地球のあるところ

「地球はどこにあるのか？」

(2)星くずから地球へ

「地球はどうやって生まれたのか？」

注意

- 現在の標準的な理解
- 問題はまだまだ残っている(研究することが多数!)
- 話がわからないのは小久保の説明が悪い

「宇宙」の始まり

淮南子齊俗訓(漢代の哲学書)

往古来今謂之宙(往古来今これを宙といい)

四方上下謂之宇(四方上下これを宇という)

「宇」 = 空間(縦・横・高さ)

「宙」 = 時間(過去・現在・未来)

「宇宙」 = 時空全体

地球のあるところ

主題

宇宙はどのような姿をしているのか

地球は宇宙のどのようなところにあるのか

太陽系はどのような姿をしているのか

惑星とは？

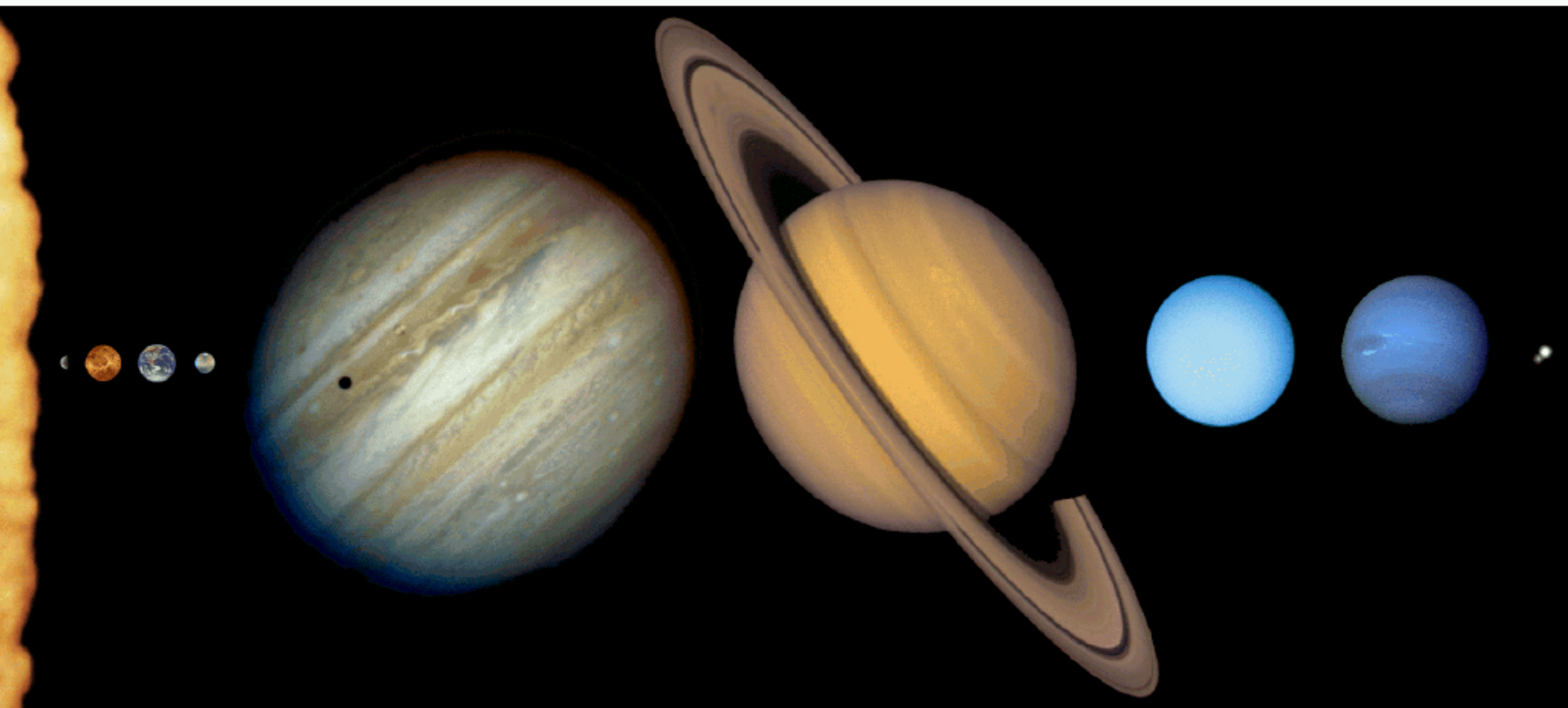
恒星(例:太陽)

- 水素を燃やして(核融合して)光る

惑星(例:地球, 木星)

- 恒星のまわりを回っている
- 丸い(自己重力で平衡形状)
- その場所で最大(存在領域の支配的重力源)
- 自分で光らない(質量が木星質量の約13倍以下)

太陽系の惑星



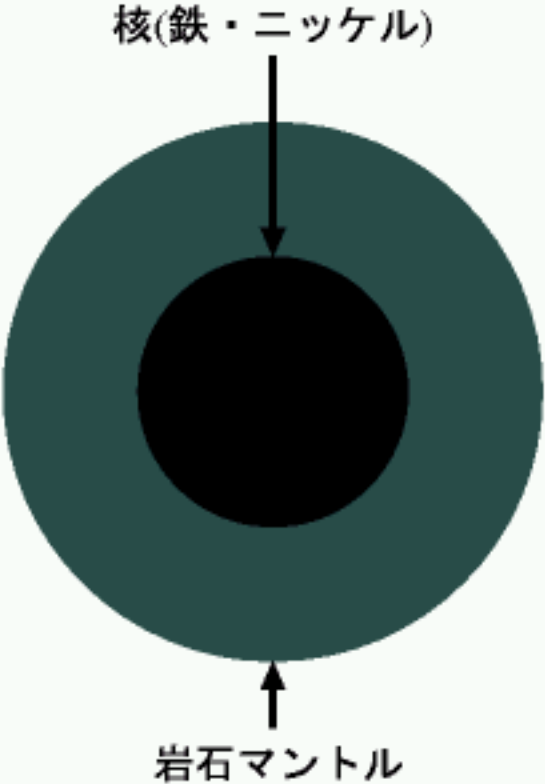
地球型惑星
(岩石惑星)

木星型惑星
(ガス惑星)

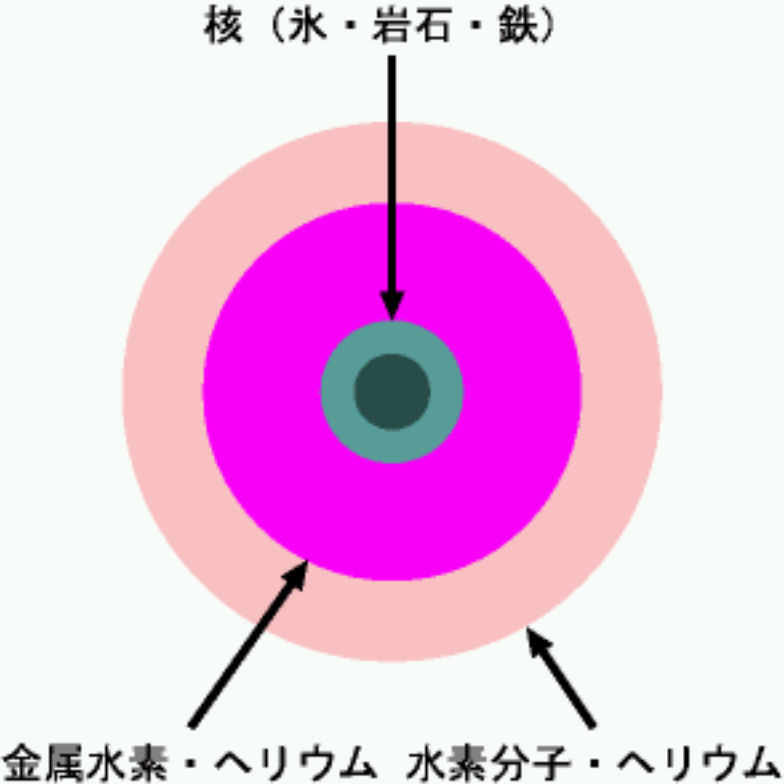
海王星型惑星
(氷惑星)

惑星の種類

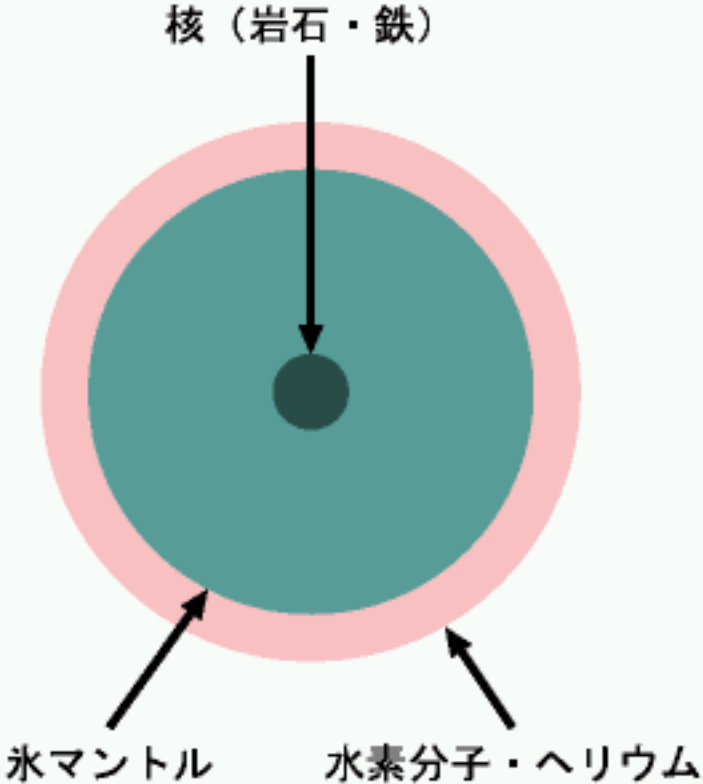
惑星の種類	地球型	木星型	海 (天) 王星型
別名	岩石惑星	ガス惑星	氷惑星
惑星	水星, 金星, 地球, 火星	木星, 土星	天王星, 海王星
存在範囲 (天文単位)	0.4-1.5	5-10	20-30
質量 (地球質量)	~0.1-1	~100	~10
主成分	岩石, 鉄	水素, ヘリウム	水, メタン, アンモニア



地球型惑星



木星型惑星



海王星型惑星

太陽系の特徴のまとめ

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

- 惑星質量=太陽質量の1/1000倍

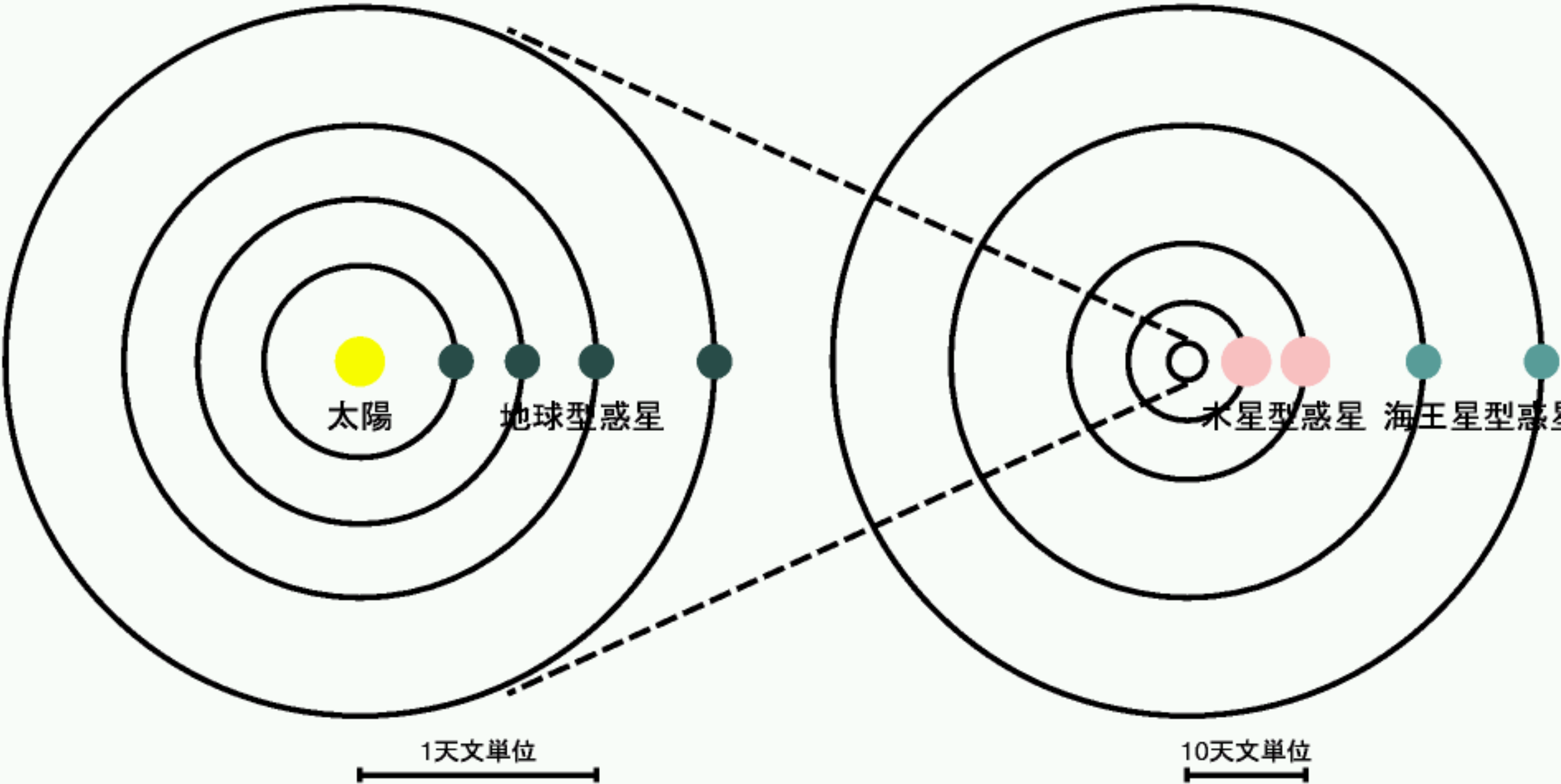
惑星の軌道

- 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





The Pale Blue Dot (Voyager NASA/JPL)

星くずから地球へ



地球らしい景色(パラオ)

主題

太陽系はどのようにして生まれたのか

地球はどのようにして生まれたのか

太陽系形成の基本的考え方-京都モデル

円盤仮説

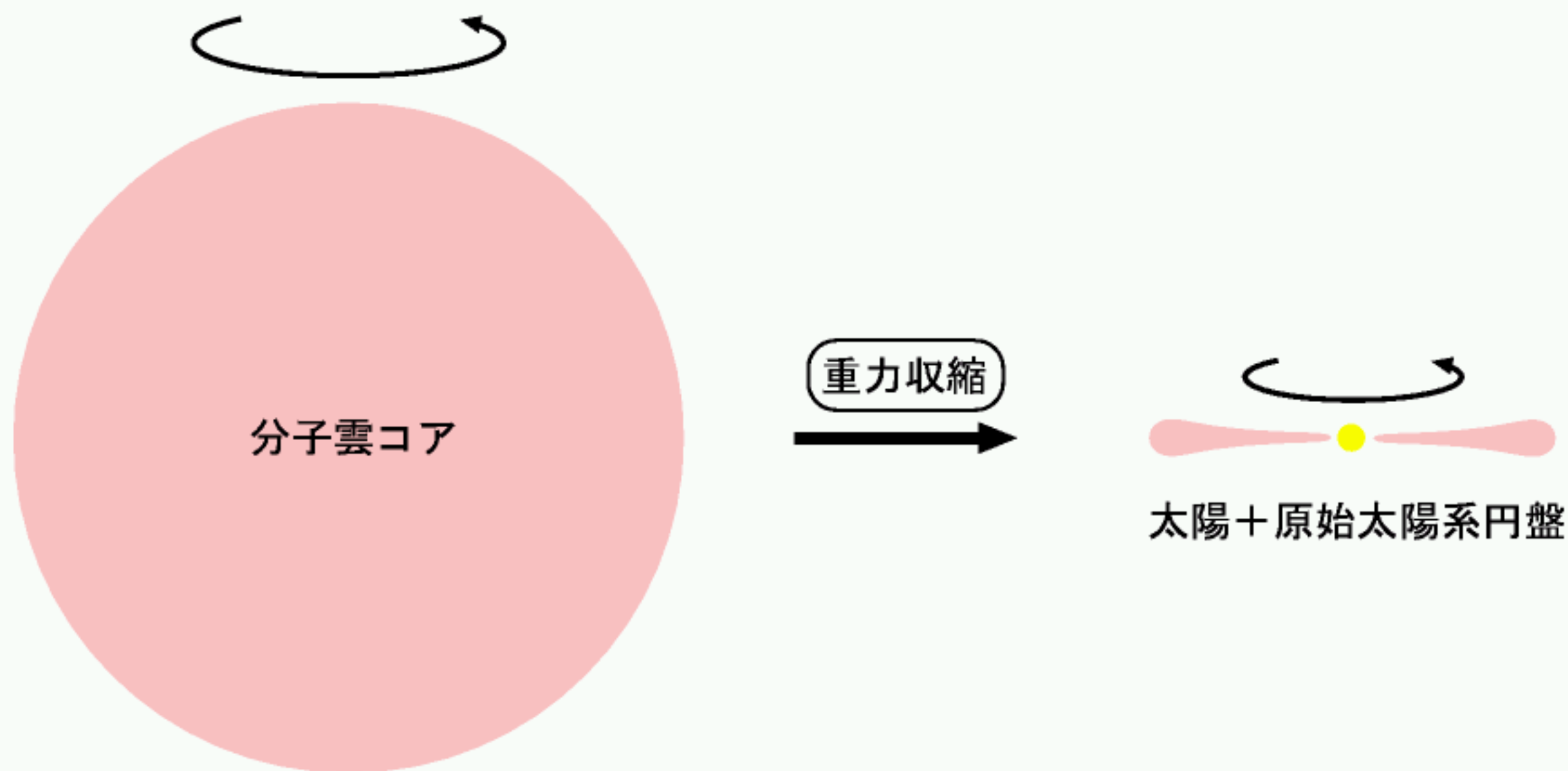
- 惑星系は星の周りの軽い円盤(原始惑星系円盤)から形成される。
- 円盤はガスとちり(ダスト)から構成される。

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。

太陽と原始太陽系円盤の形成

星間雲(ガス+ダスト)の濃い部分(分子雲コア)から形成



太陽: 分子雲コアの重力収縮によって形成

原始太陽系円盤: 太陽に落ちきれなかった物質

原始太陽系円盤(林モデル)

大きさと形状

- 太陽系の大きさの円盤

質量

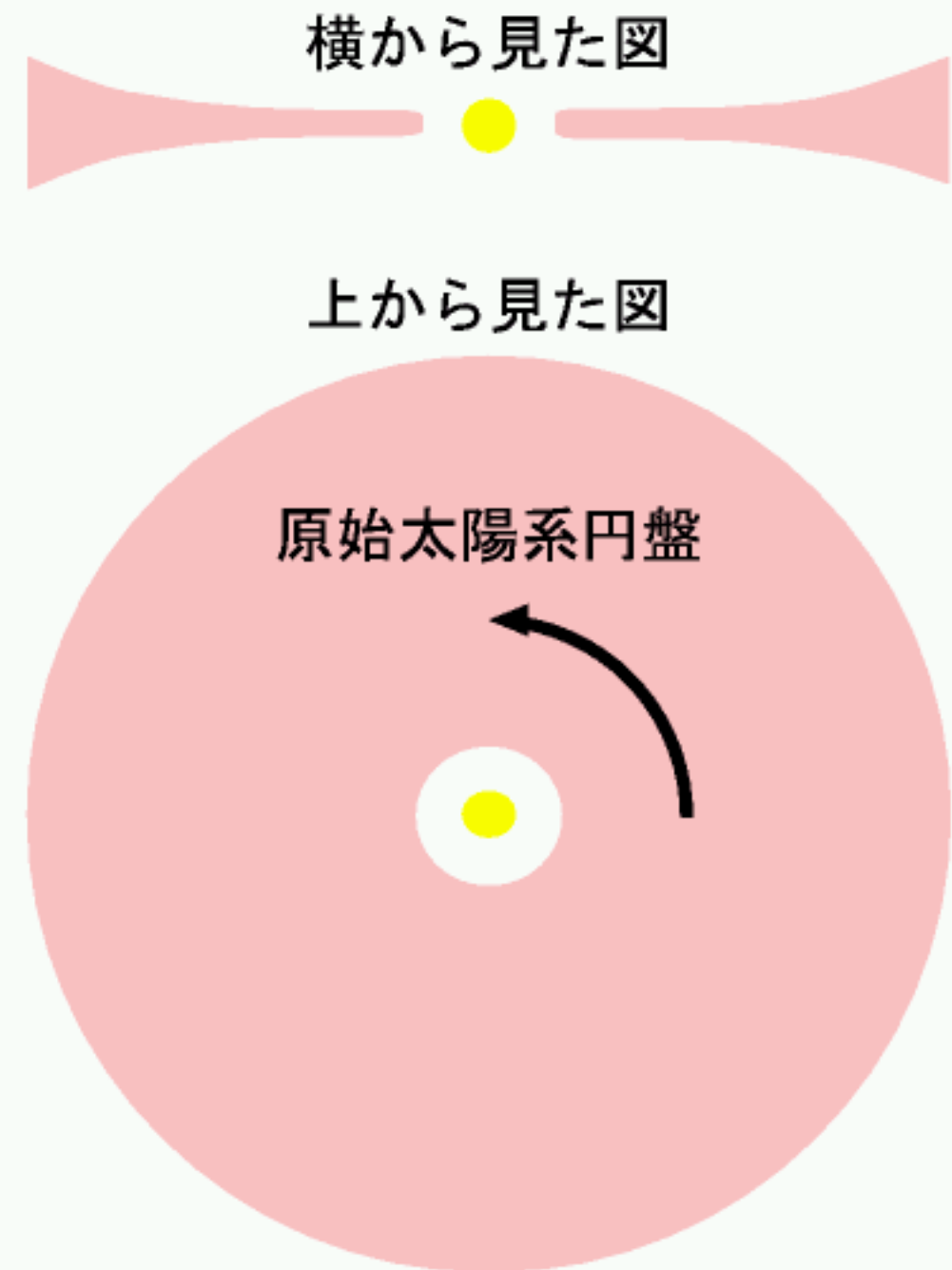
- 太陽質量の1/100倍

組成

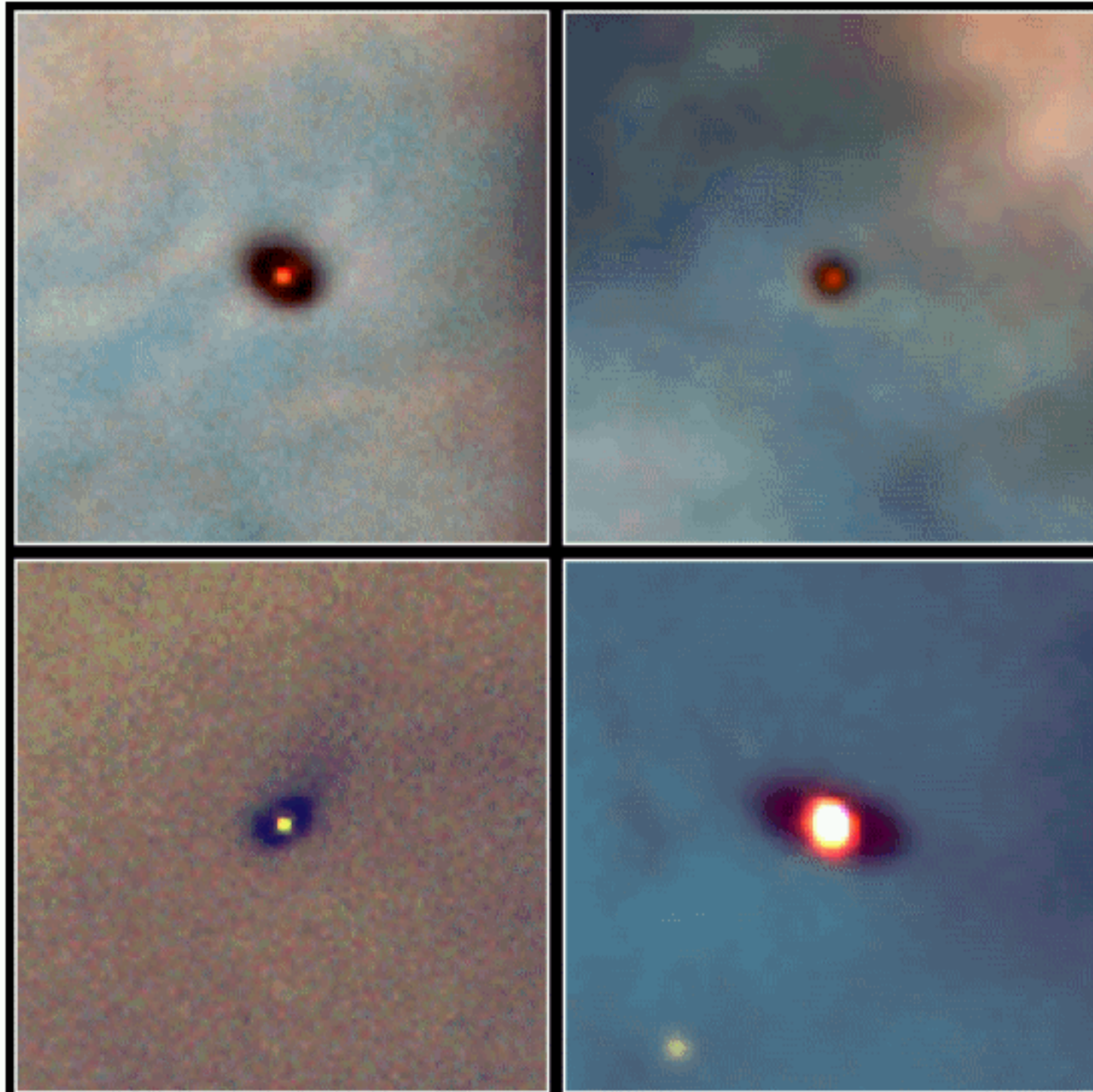
- 99%のガス(水素, ヘリウム)
- 1%のダスト(岩石, 氷)

起源

- ガス: ビッグバン
- ダスト: 恒星(星くず)



原始惑星系円盤の観測



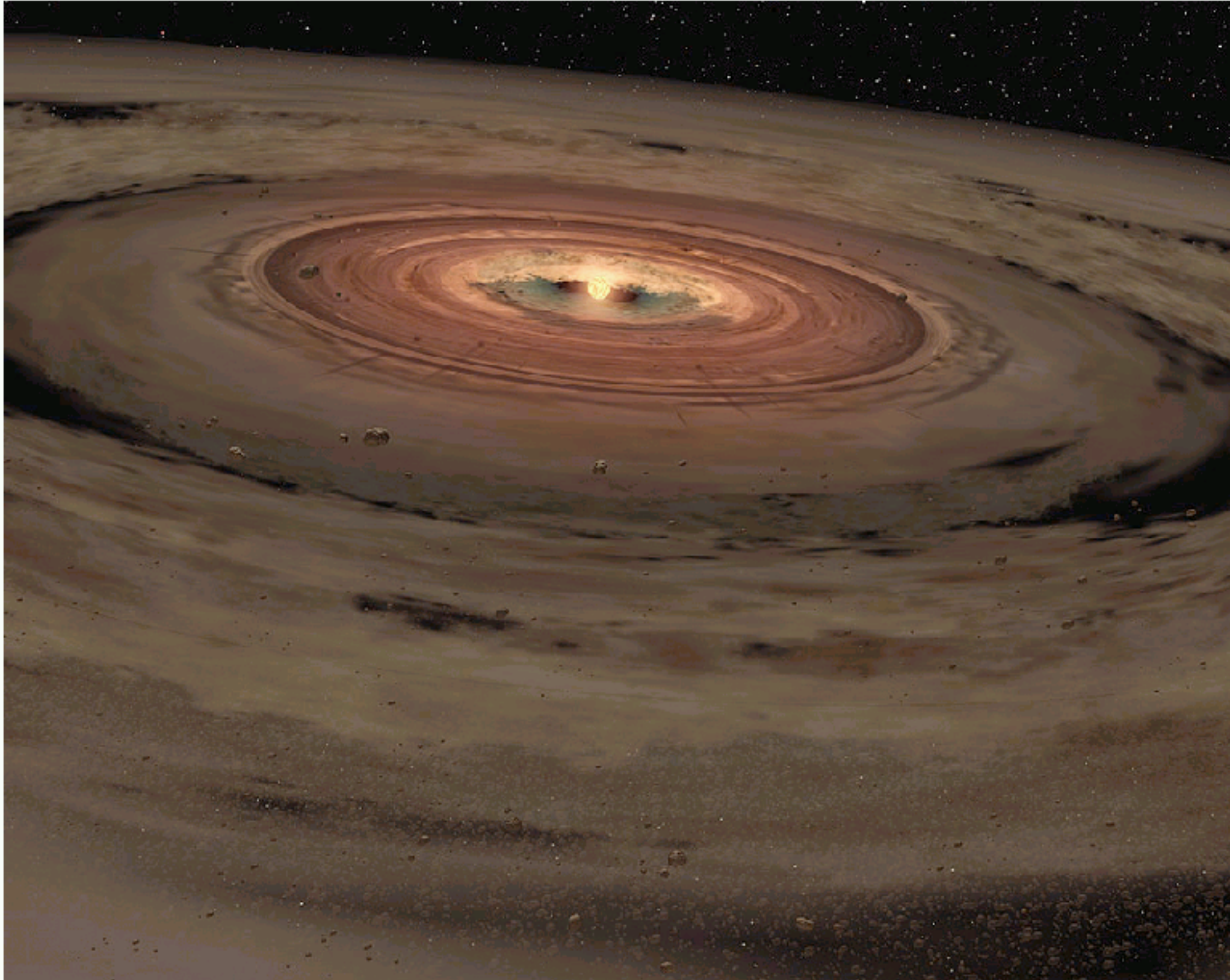
**Protoplanetary Disks
Orion Nebula**

HST • WFPC2

PRC95-45b • ST ScI OPO • November 20, 1995

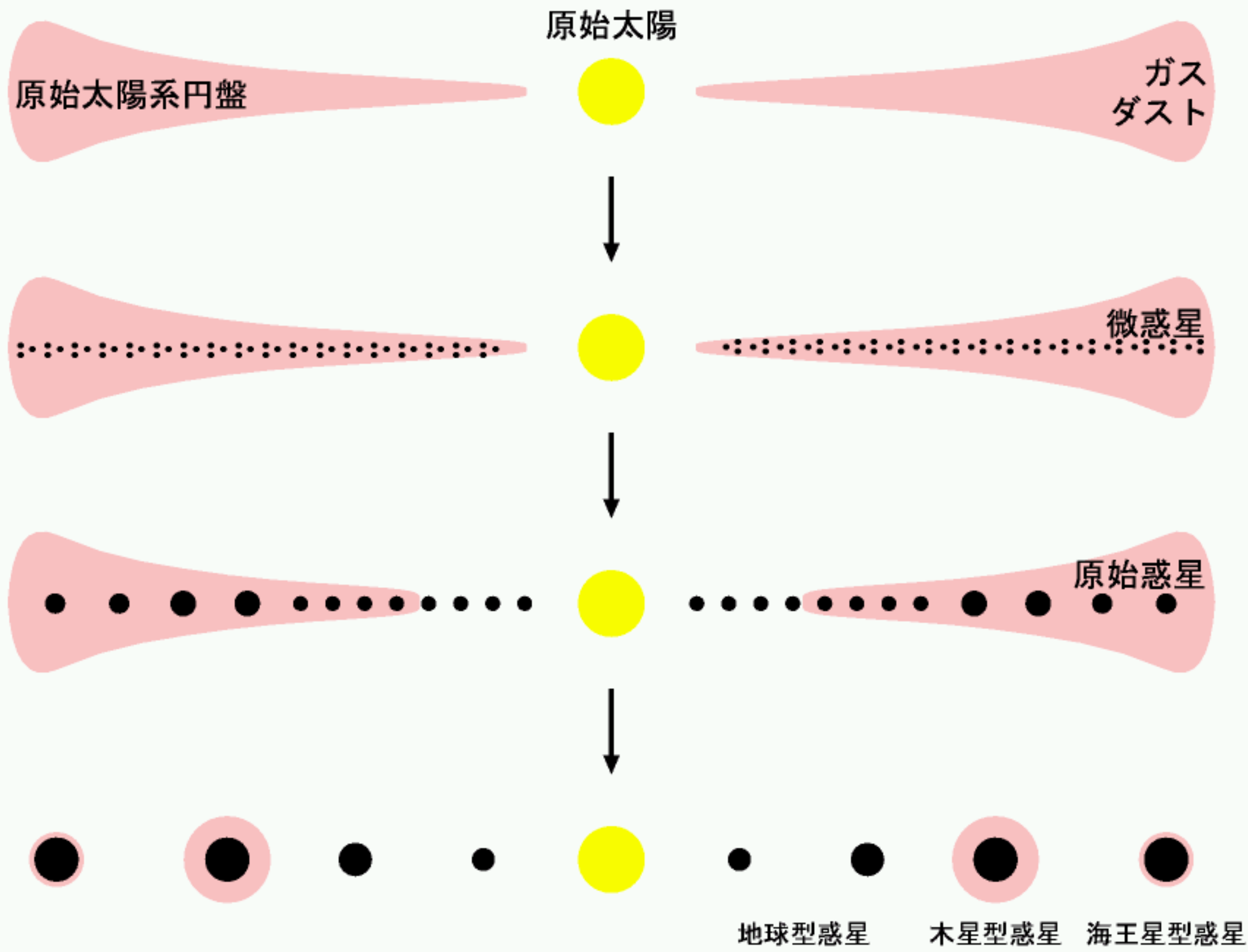
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

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



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

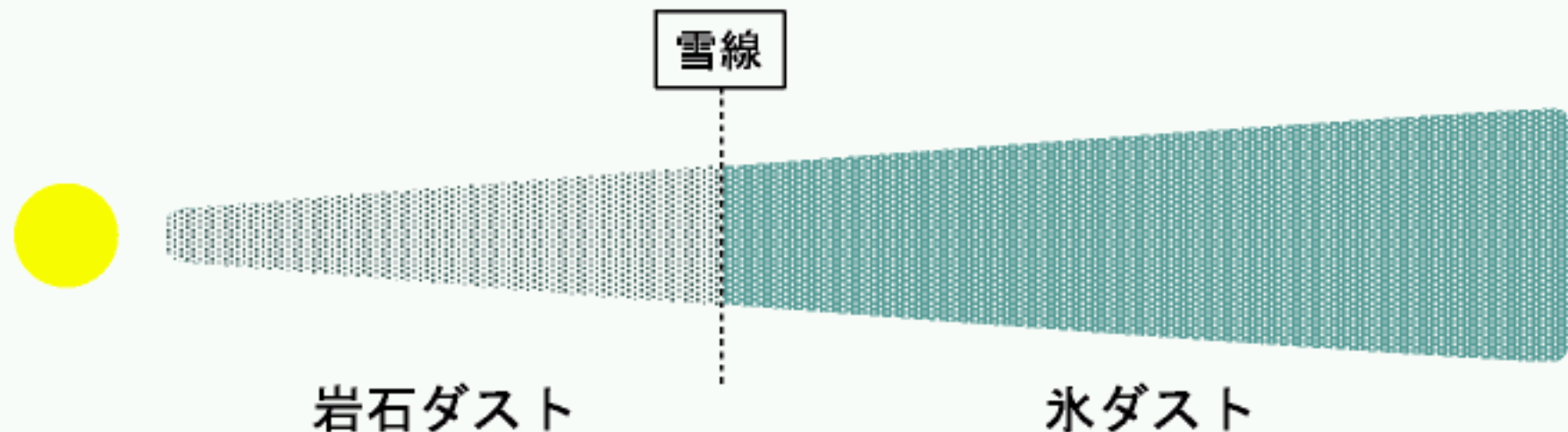
- $0.1\text{--}1\mu\text{m}$ ($1/1000\text{mm}$), 太陽質量の $1/100000$ 倍

組成

- 雪線の内側-岩石ダスト, 外側-氷ダスト

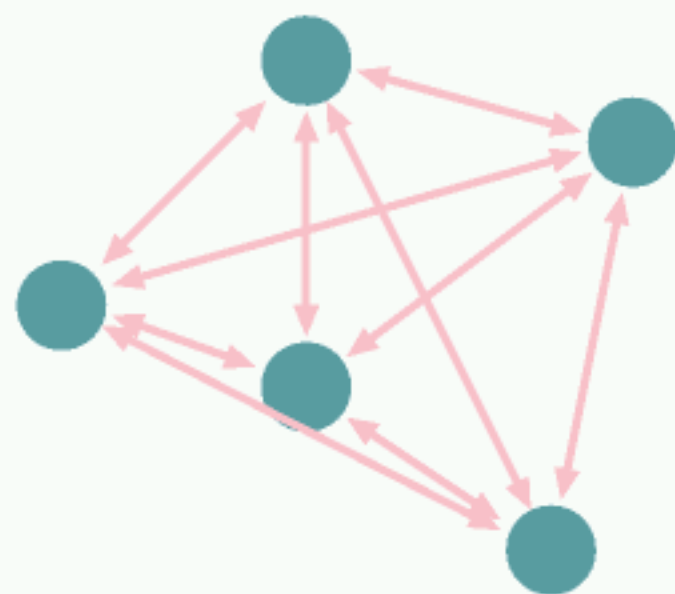
雪線

- 水が凍る太陽からの距離(約3天文単位)



惑星を作る実験(多体シミュレーション)

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!

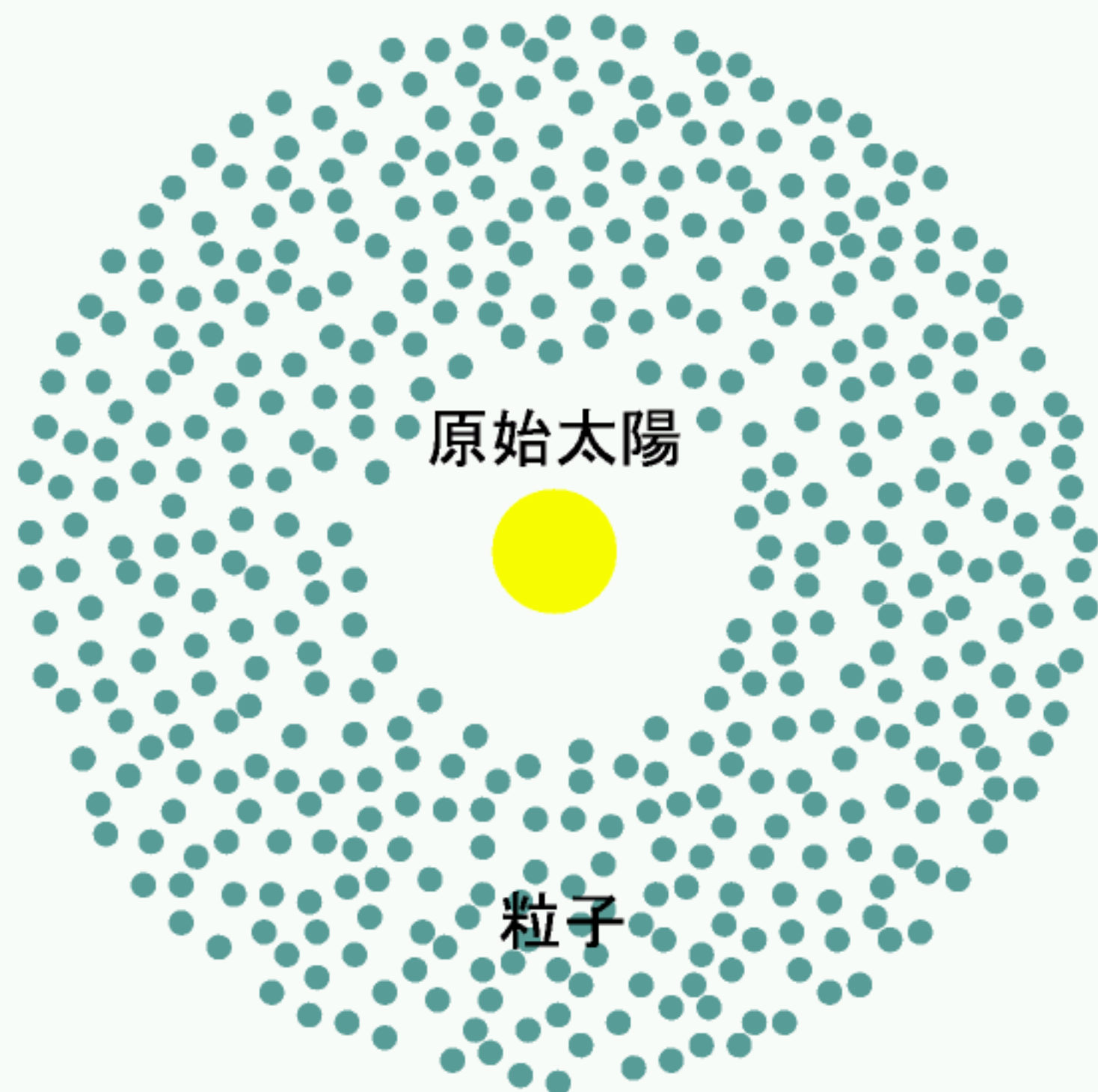
小久保専用計算機:三鷹山



PCの約1000倍の計算速度!

惑星を作る実験

コンピュータの中の原始太陽系



粒子のデータ

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

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

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

⋮

⋮

⋮

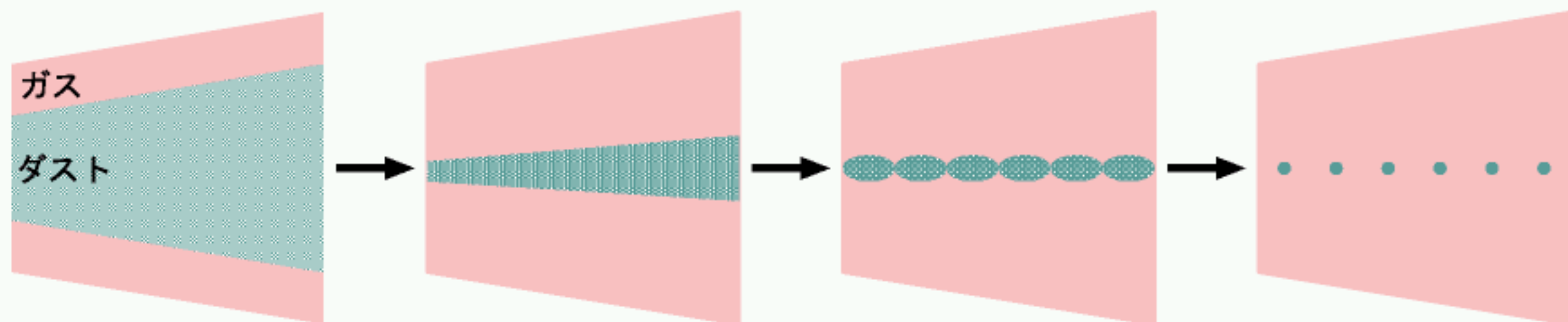
$$m_N, \boldsymbol{x}_N, \boldsymbol{v}_N$$

運動方程式を解く

微惑星の形成

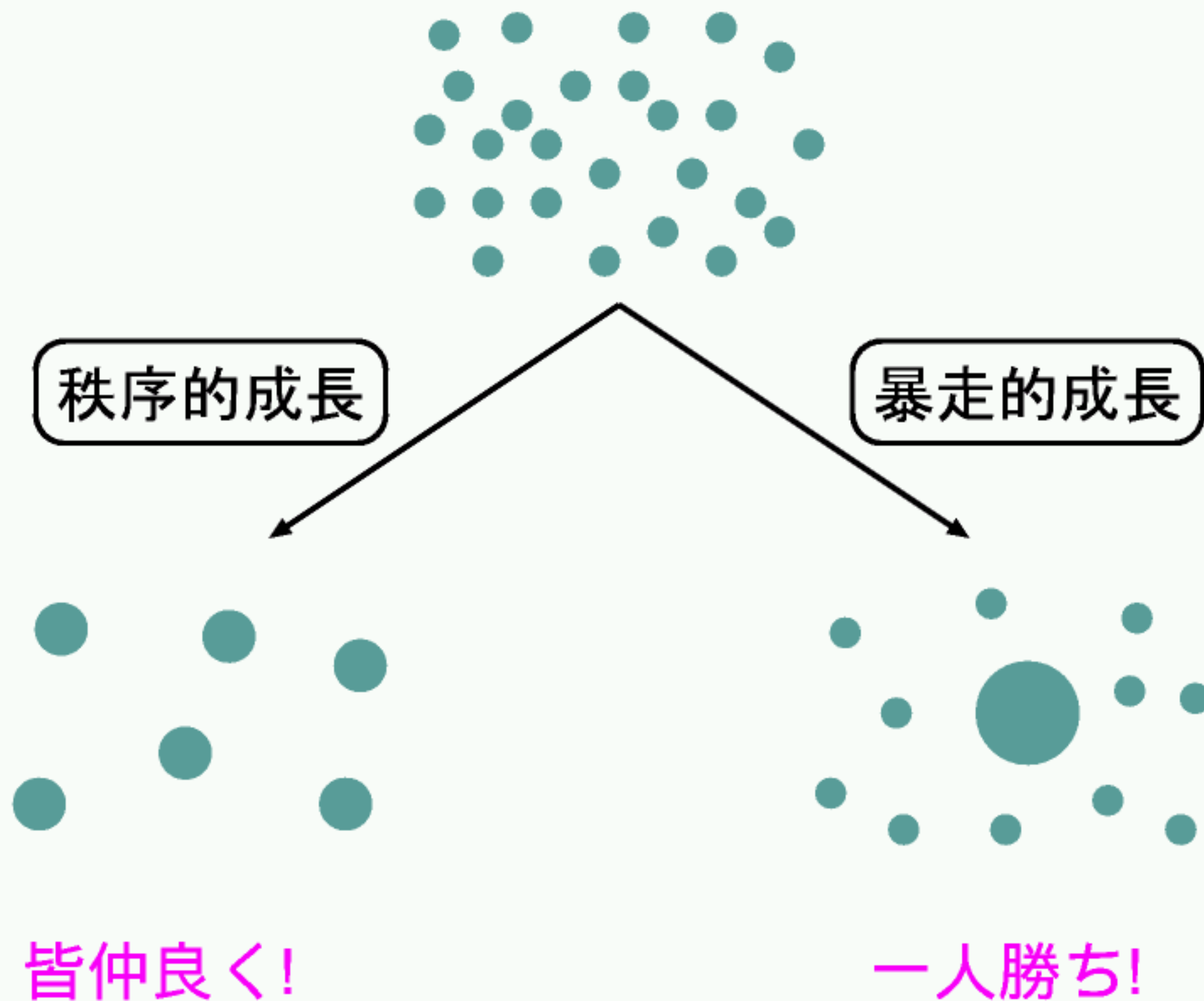
ダストから微惑星を作る(重力不安定説)

- (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となる

惑星の成長の仕方

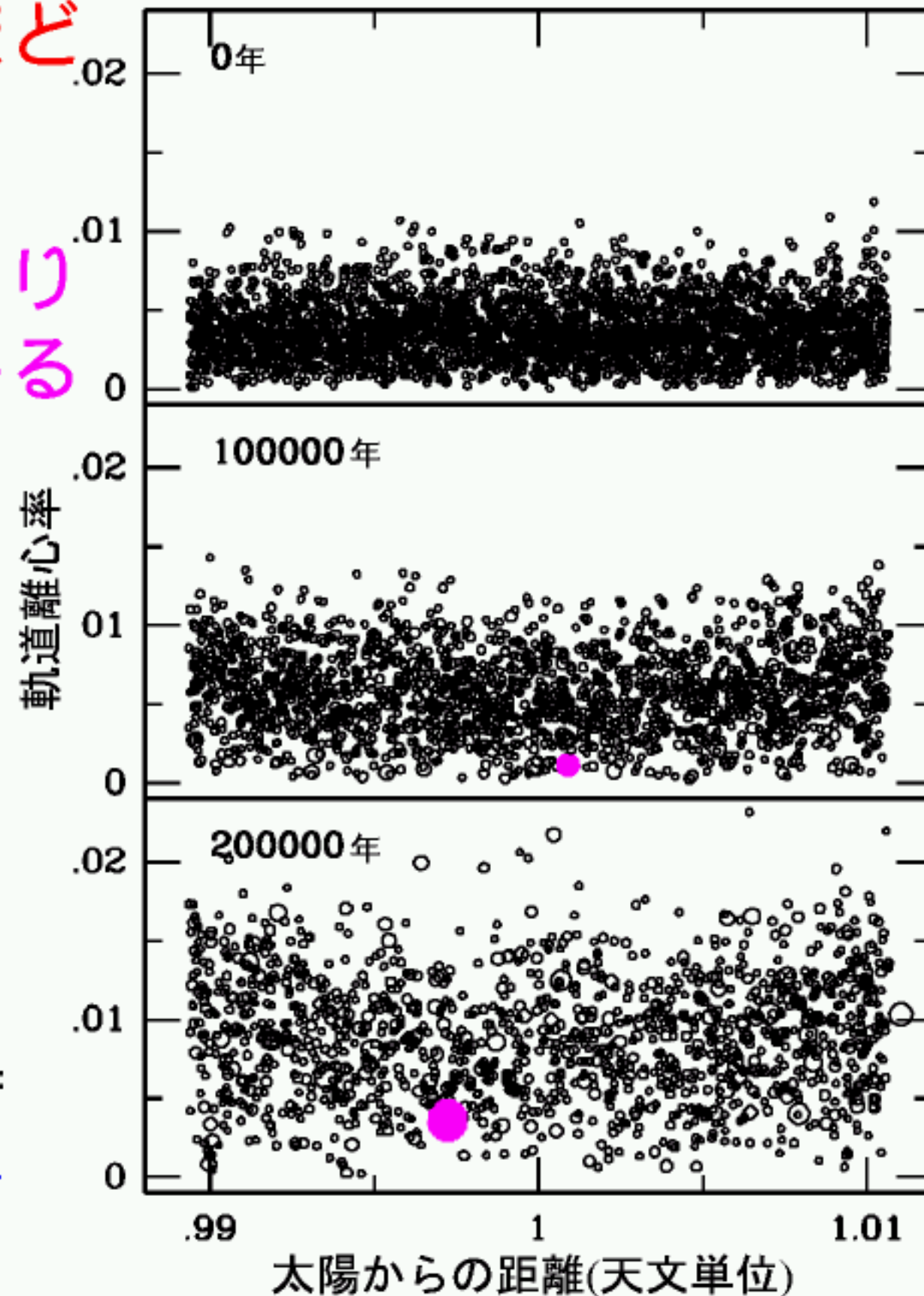


微惑星の暴走的成長

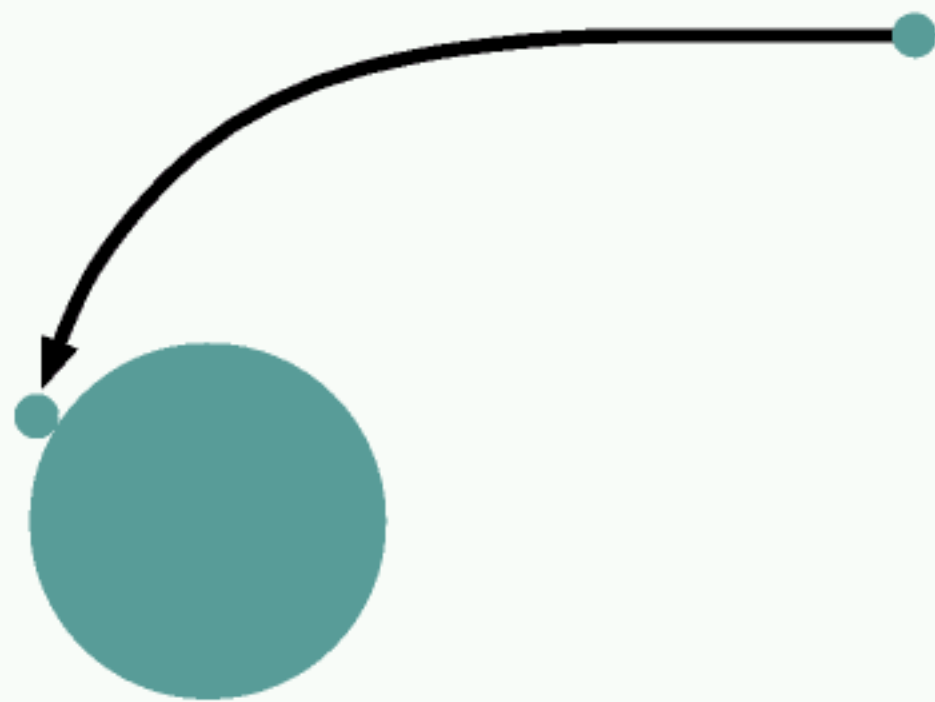
大きな微惑星ほど
速く成長する

強い重力でまわりの
微惑星を集める

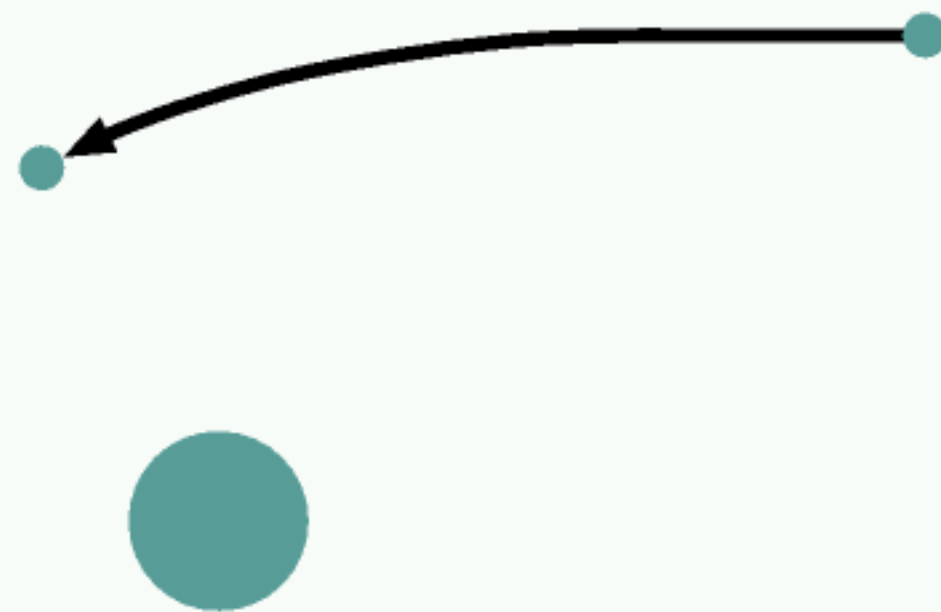
暴走的成長微惑星=
原始惑星



重力による引き付け



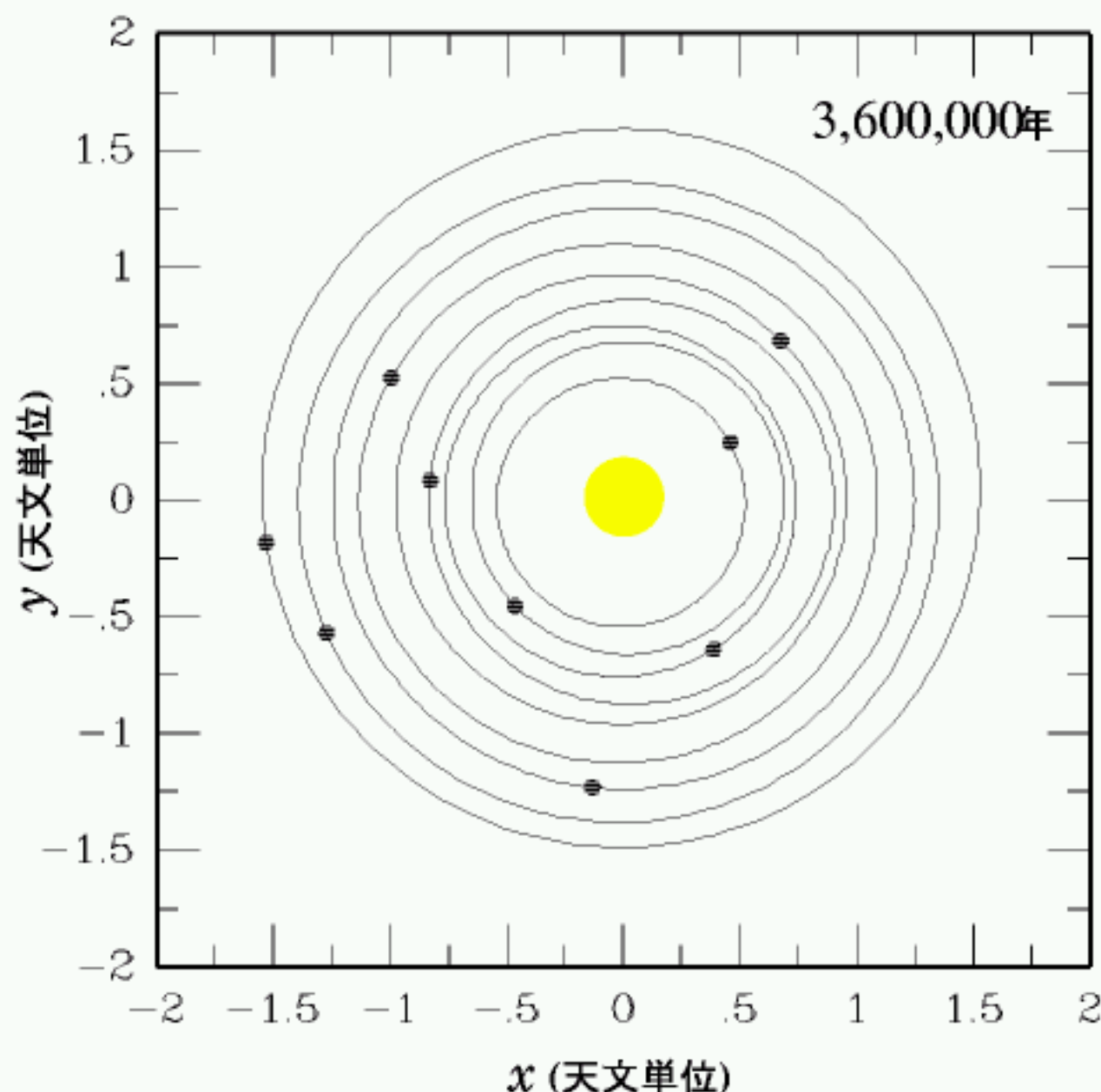
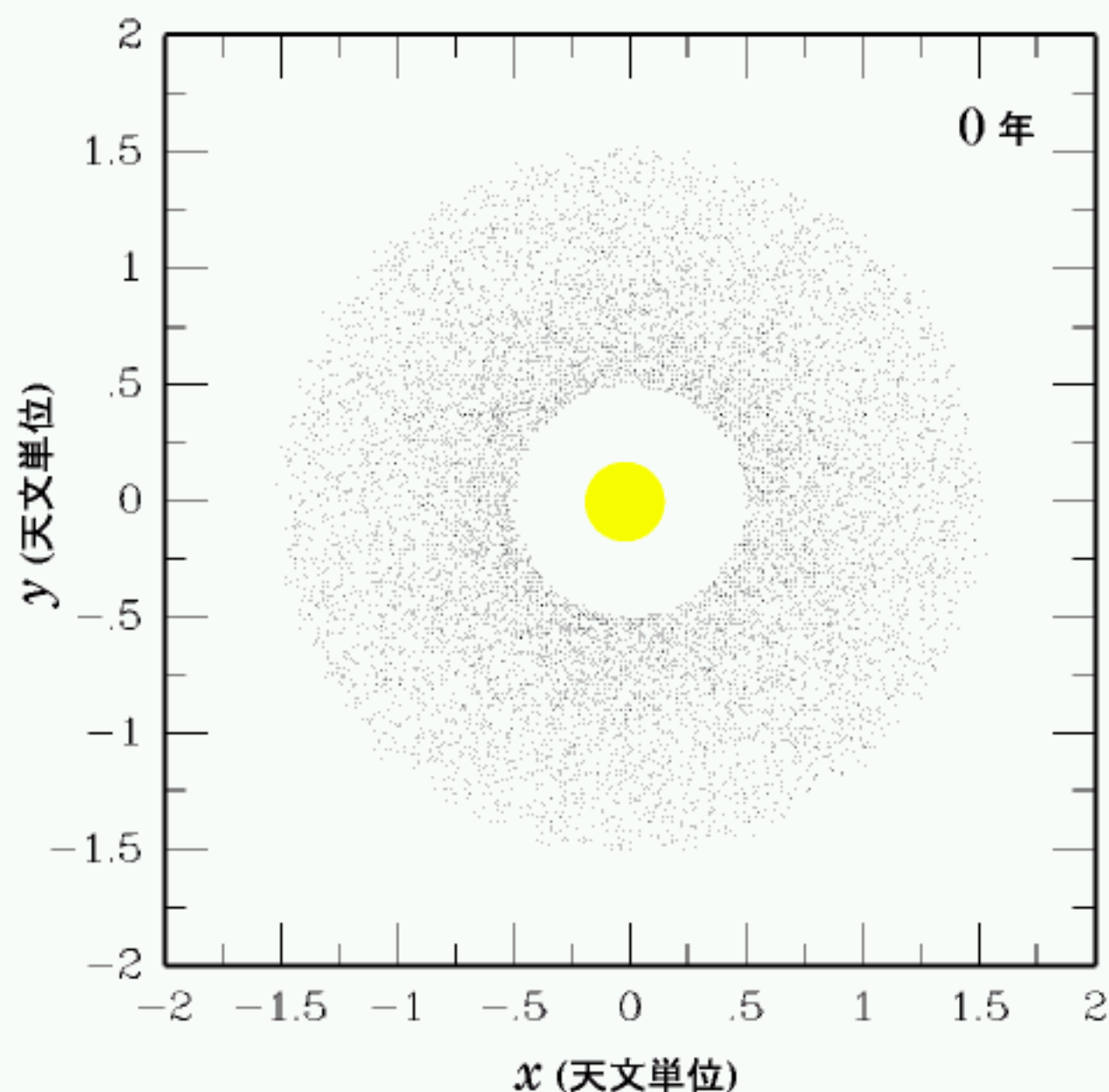
大微惑星(重力強)
衝突



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



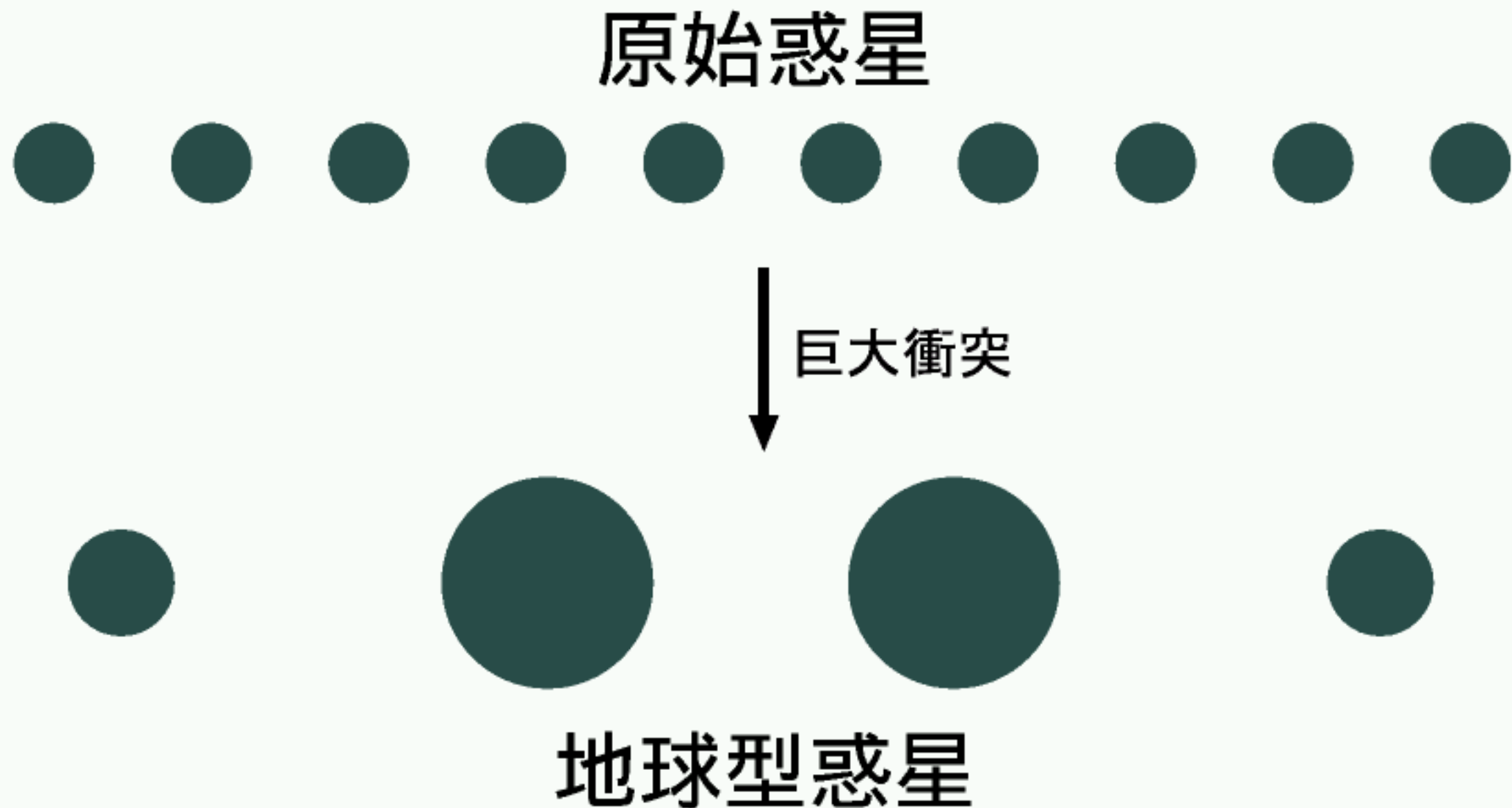
- 原始惑星は**ある間隔**で形成(なわばりがある)
- 原始惑星は**平均的に(皆同じように)**成長

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



映画:地球型惑星形成



CG: 三浦均 (4D2U/NAOJ・武蔵野美術大学)

まとめー宇宙の中の地球

地球のあるところ

宇宙ー局部超銀河団ー局部銀河群ー銀河系ーオリオン座
腕ー太陽系ー地球

星くずから地球へ

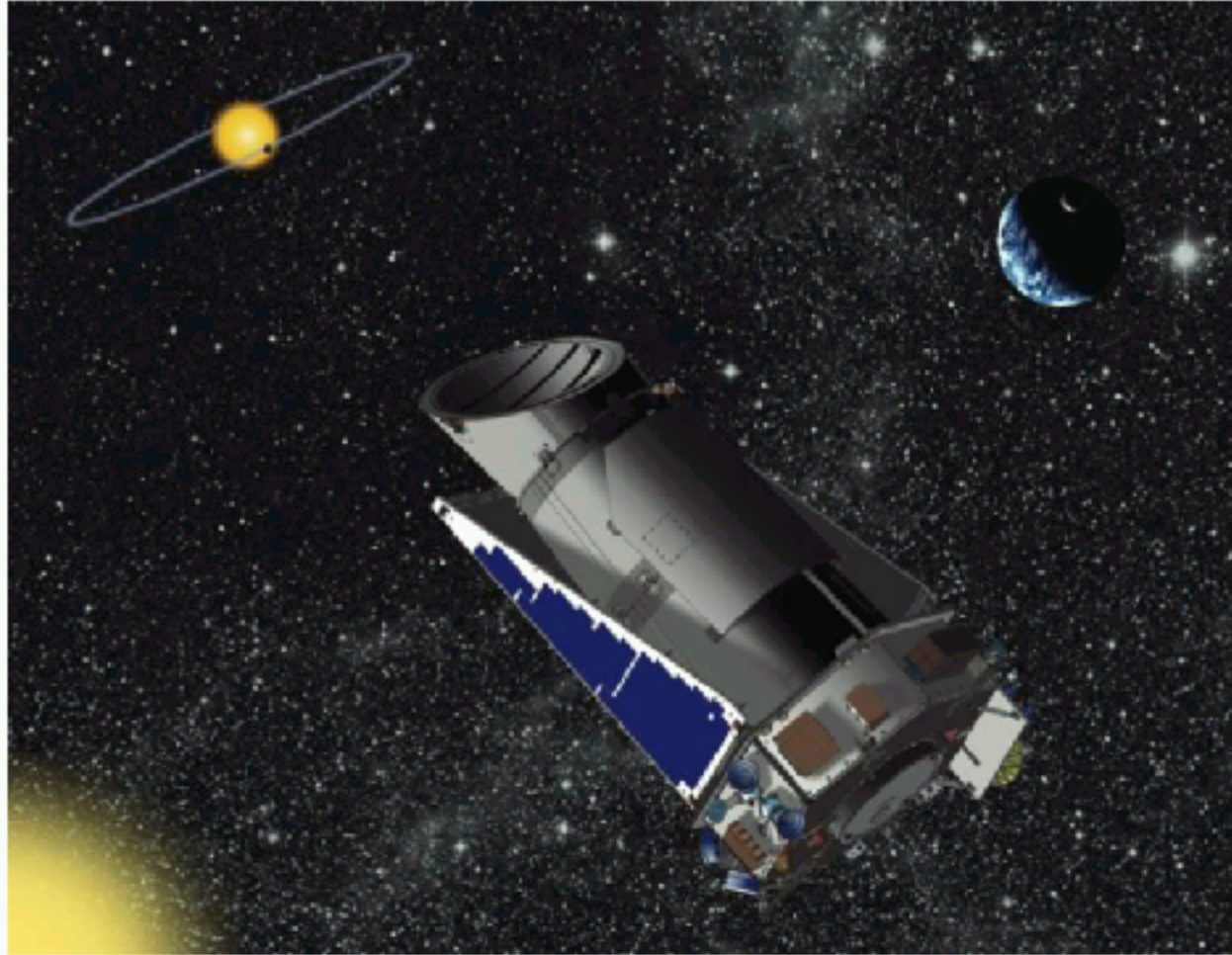
- (0)ガスとダストから太陽と原始太陽系円盤が形成
 - (1)ダストが集まって微惑星が形成
 - (2)微惑星が集まって原始惑星が形成
 - (3)原始惑星が集まって地球が形成
- 時間: 1000万年-1億年

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!)

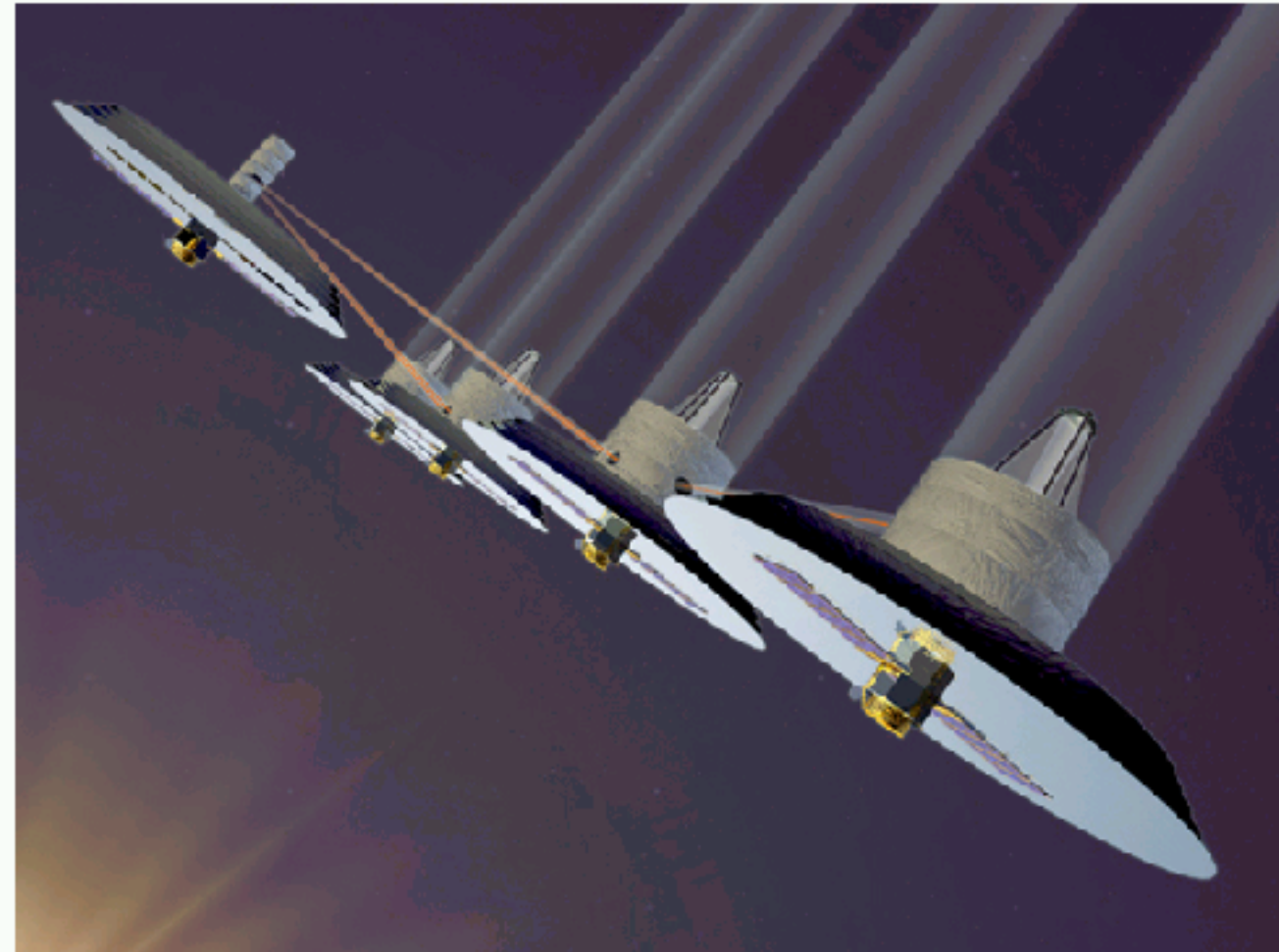
地球型惑星探査計画

(1) 惑星の影を探す
(惑星の大きさと軌道)



Kepler (2009-)

(2) 惑星の光を受ける
(惑星の温度、大気組成)

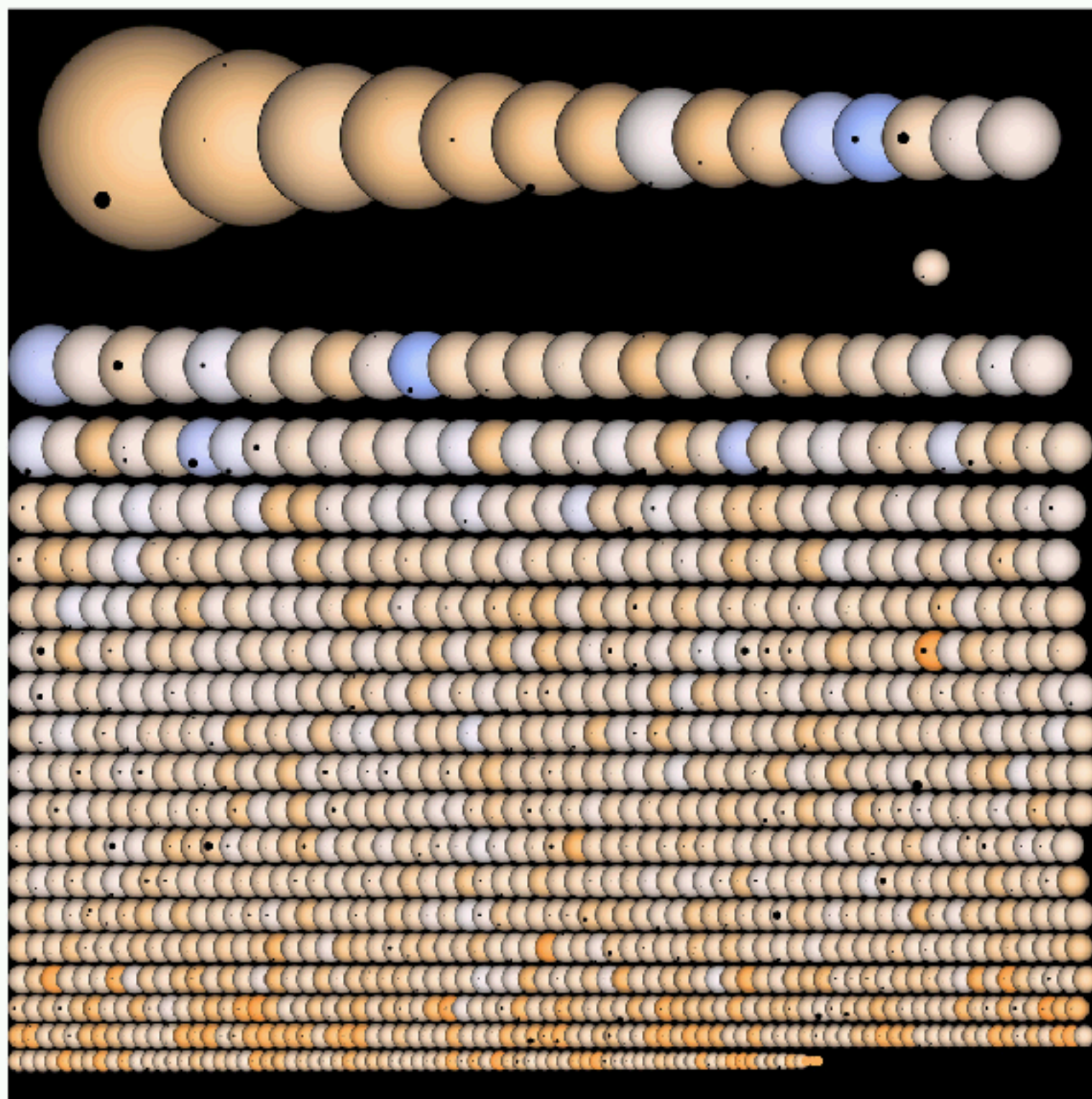


Terrestrial Planet Finder (20XX?)

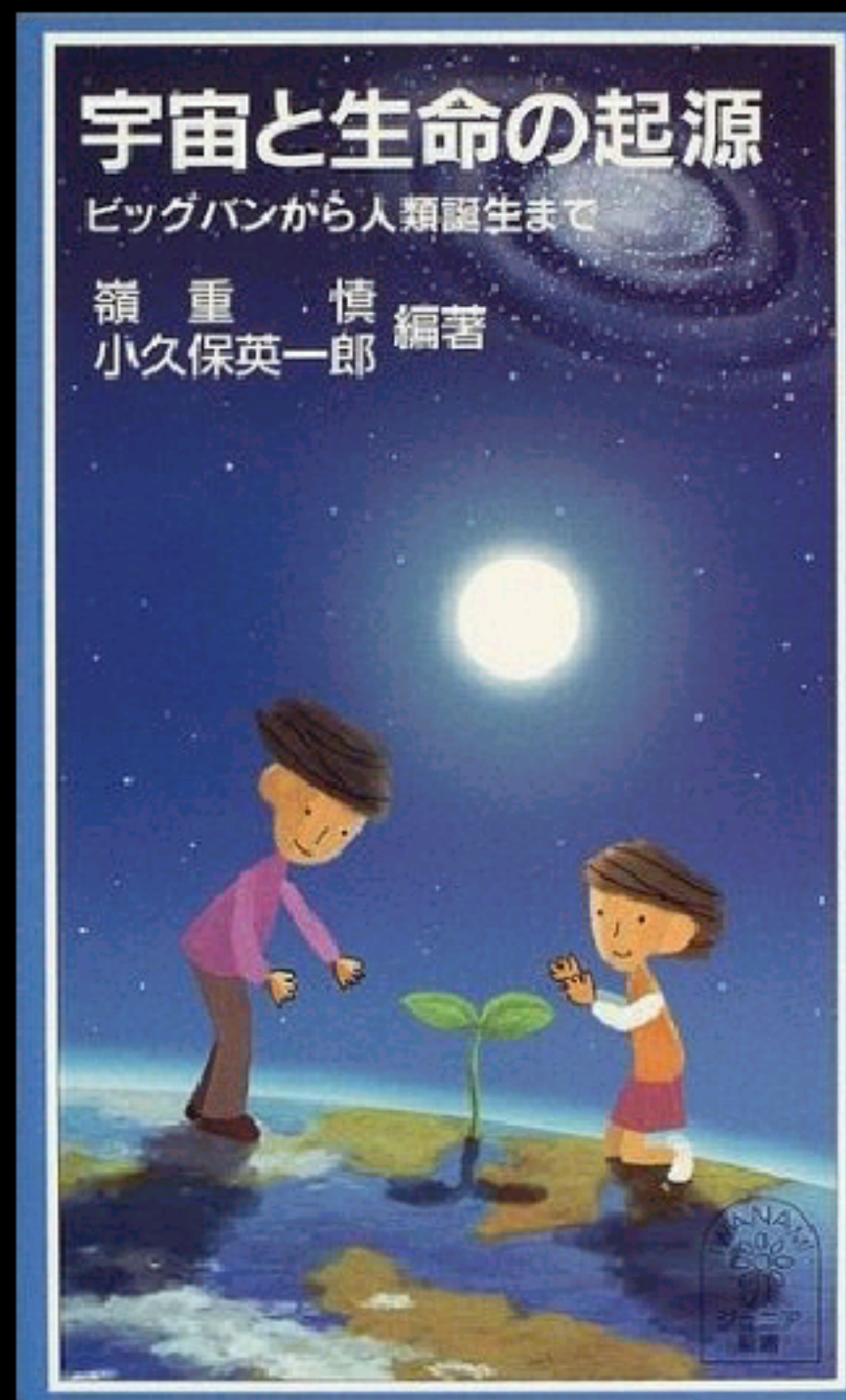
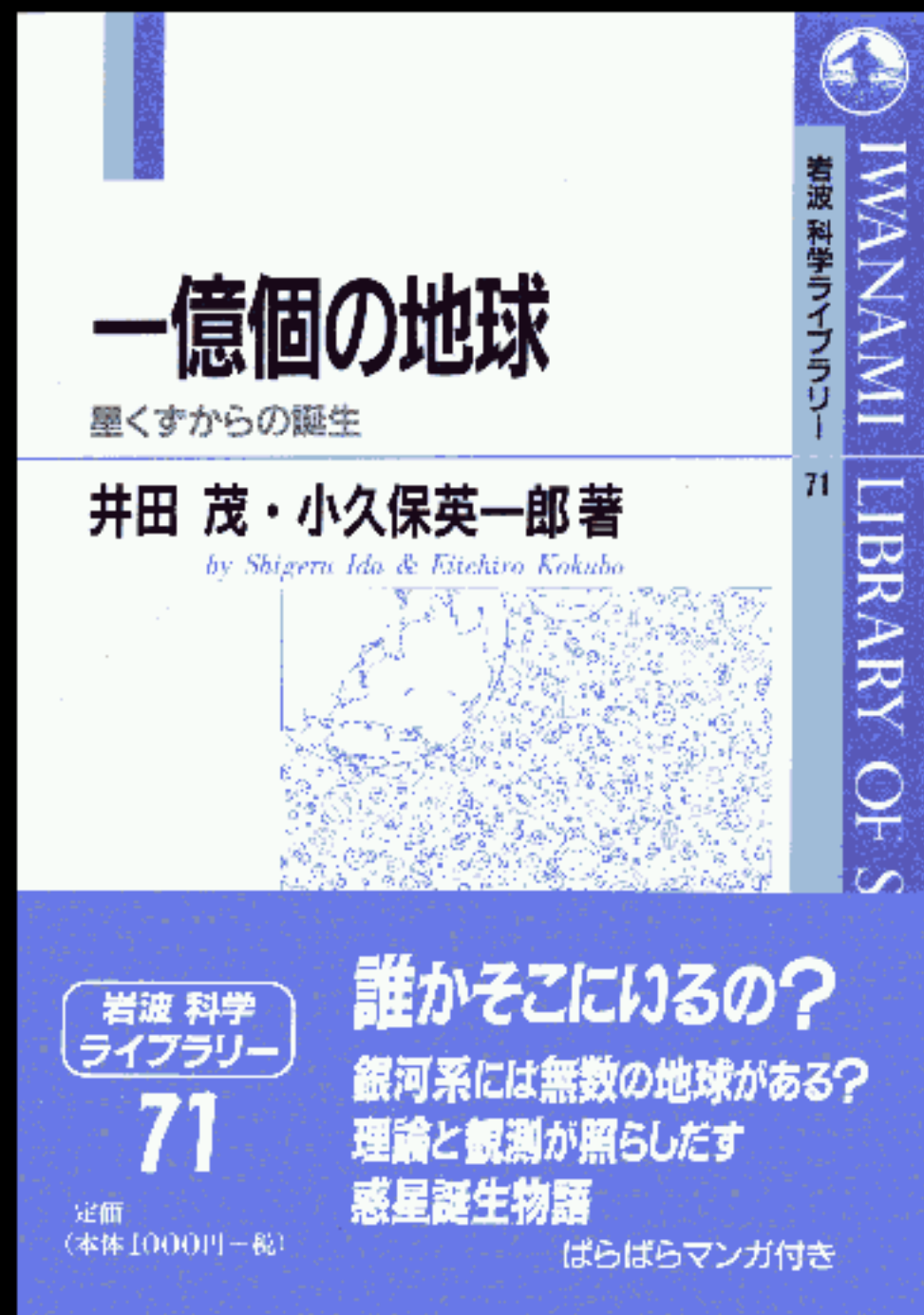
第2の地球が見つかる日は近い!!?

ケプラー望遠鏡の成果

新たに1235個惑星候補天体を発見!



(Rowe, NASA and SETI)



「<宇宙>を読む」 「宇宙の地図」

絶賛発売希望中！