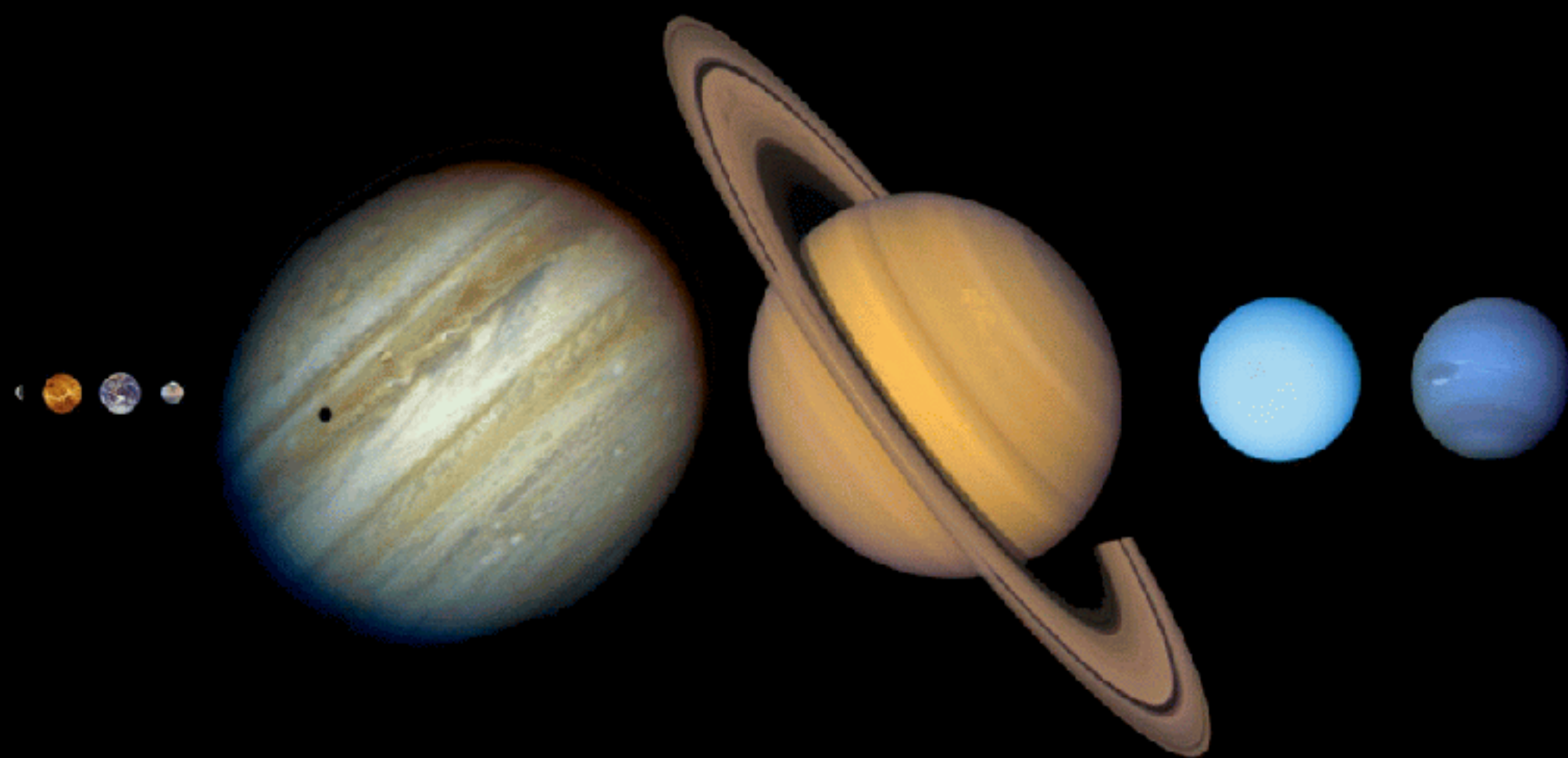


# 惑星系の構造と起源



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 = 理論の望遠鏡

「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「アテルイ」(水沢)

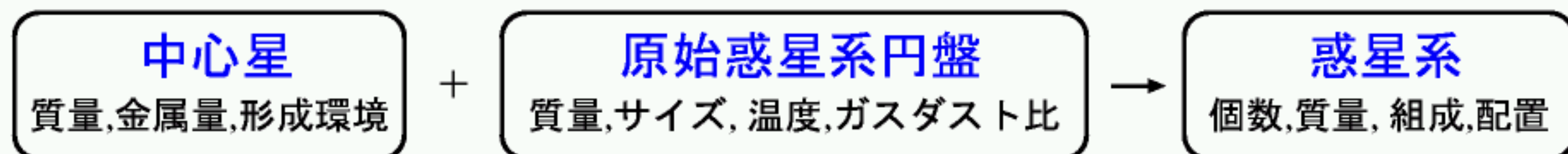
三鷹キャンパス常時公開 毎日10:00-17:00

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



# 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



# 注意点

---

現在の標準的な理解

問題はまだまだ残っている(研究すること多数!)

# 目次

---

## (1) 太陽系の構造

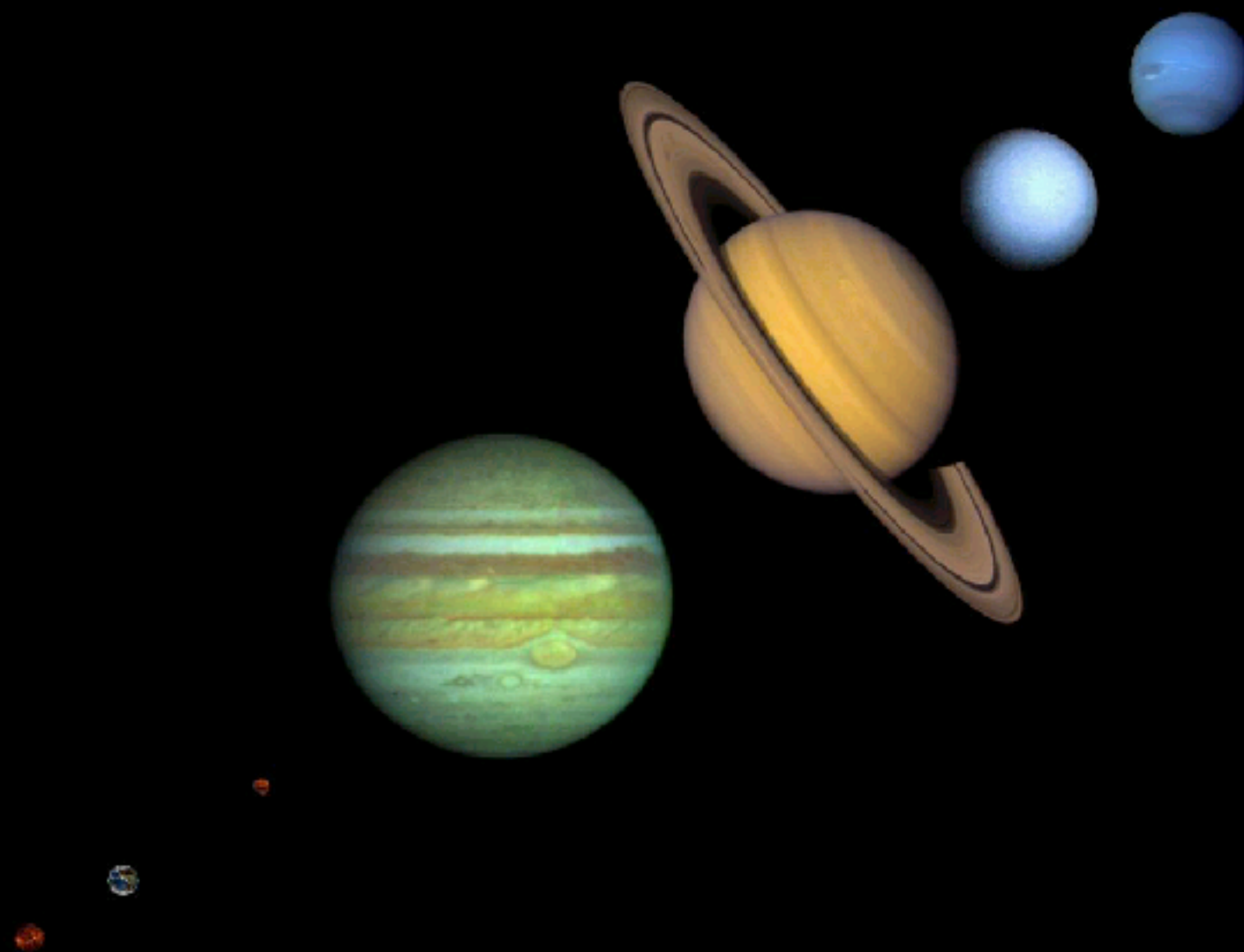
- 惑星の分類
- 小天体系
- 個々の惑星の特徴

## (2) 太陽系の起源

- 微惑星の形成
- 原始惑星の形成
- 惑星の形成
- 小天体系の形成

## (3) 太陽系外惑星

# 太陽系の構造





# 天体の運動

---

## 公転

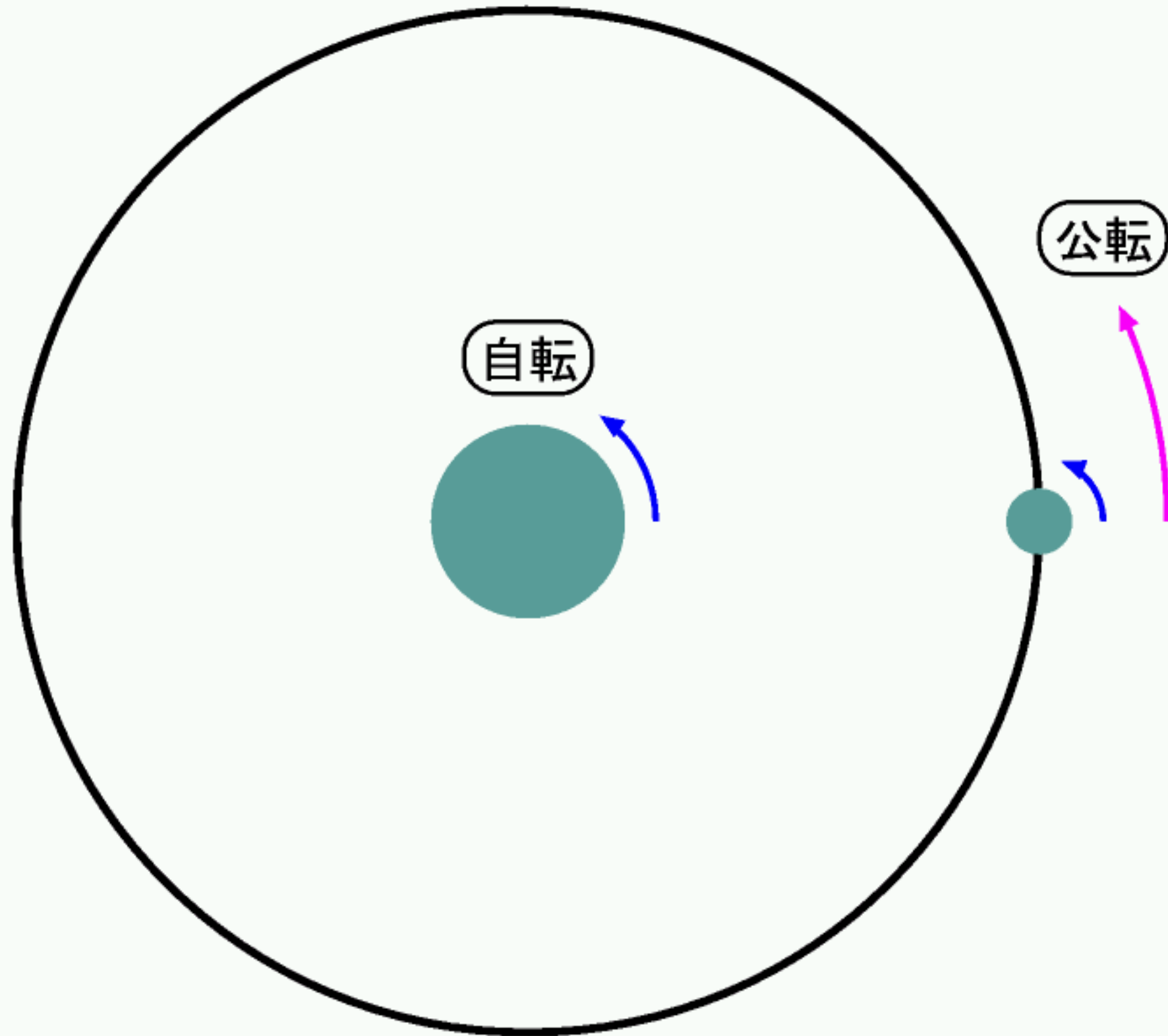
- 〔天〕 (revolution) 惑星・衛星・恒星などがそれぞれ太陽・惑星・他の恒星などのまわりを周期的にまわる運動。

## 自転

- 〔天〕 (rotation) 天体が、それ自身の内部にある軸の周りに回転する運動。

(広辞苑)

# 天体の運動



# 天体の運動の周期

---

## 1日

- 地球の自転周期

## 1月

- 月の公転周期(朔望月)

## 1年

- 地球の公転周期

## 12年

- 木星の公転周期



# 太陽系の定義

---

## 運動による定義

太陽系は次の天体群である。

- 太陽
- 太陽を中心とする公転運動をする天体系

# 惑星の定義(国際天文学連合)

---

## 太陽系の惑星とは

- 太陽の周りを回り
- 十分大きな質量を持つために自己重力が固体としての力よりも勝る結果、重力平衡形状（ほぼ球状）を持ち
- その軌道近くから他の天体を排除した

天体である。

# 準惑星の定義(国際天文学連合)

---

## 太陽系の準惑星とは

- 太陽の周りを回り
- 十分大きな質量を持つために自己重力が固体としての力よりも勝る結果、重力平衡形状（ほぼ球状）を持ち
- その軌道近くから他の天体が排除されていない
- 衛星でない

天体である。



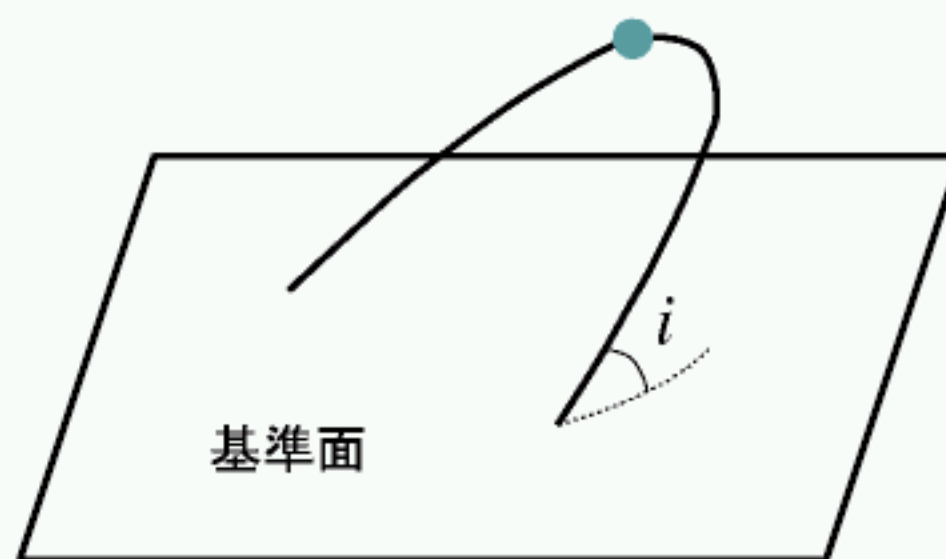
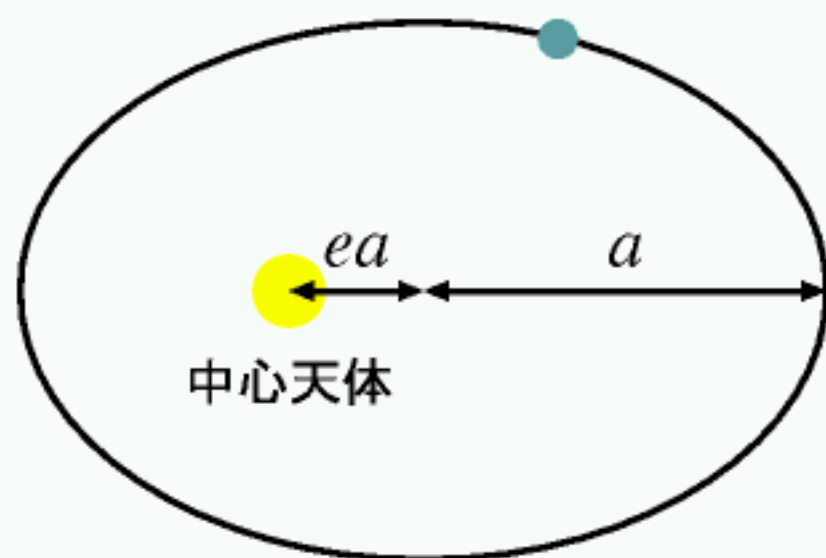
# 天体の軌道運動

## 2体問題

- 重力で相互作用する2体の運動を解く

## ケプラー運動

- 2体問題の解: 楕円軌道、放物軌道、双曲軌道



$a$ : 軌道長半径,  $e$ : 軌道離心率,  $i$ : 軌道傾斜角

# ケプラーの法則

---

## 第1法則

- 惑星は太陽を1つの焦点とする楕円軌道を描く

## 第2法則

- 惑星と太陽とを結ぶ線分が単位時間に描く面積は一定である(角運動量保存)

## 第3法則

- 惑星の公転周期の2乗は軌道長半径の3乗に比例する

→ ニュートンの万有引力の法則へ

# 天文単位

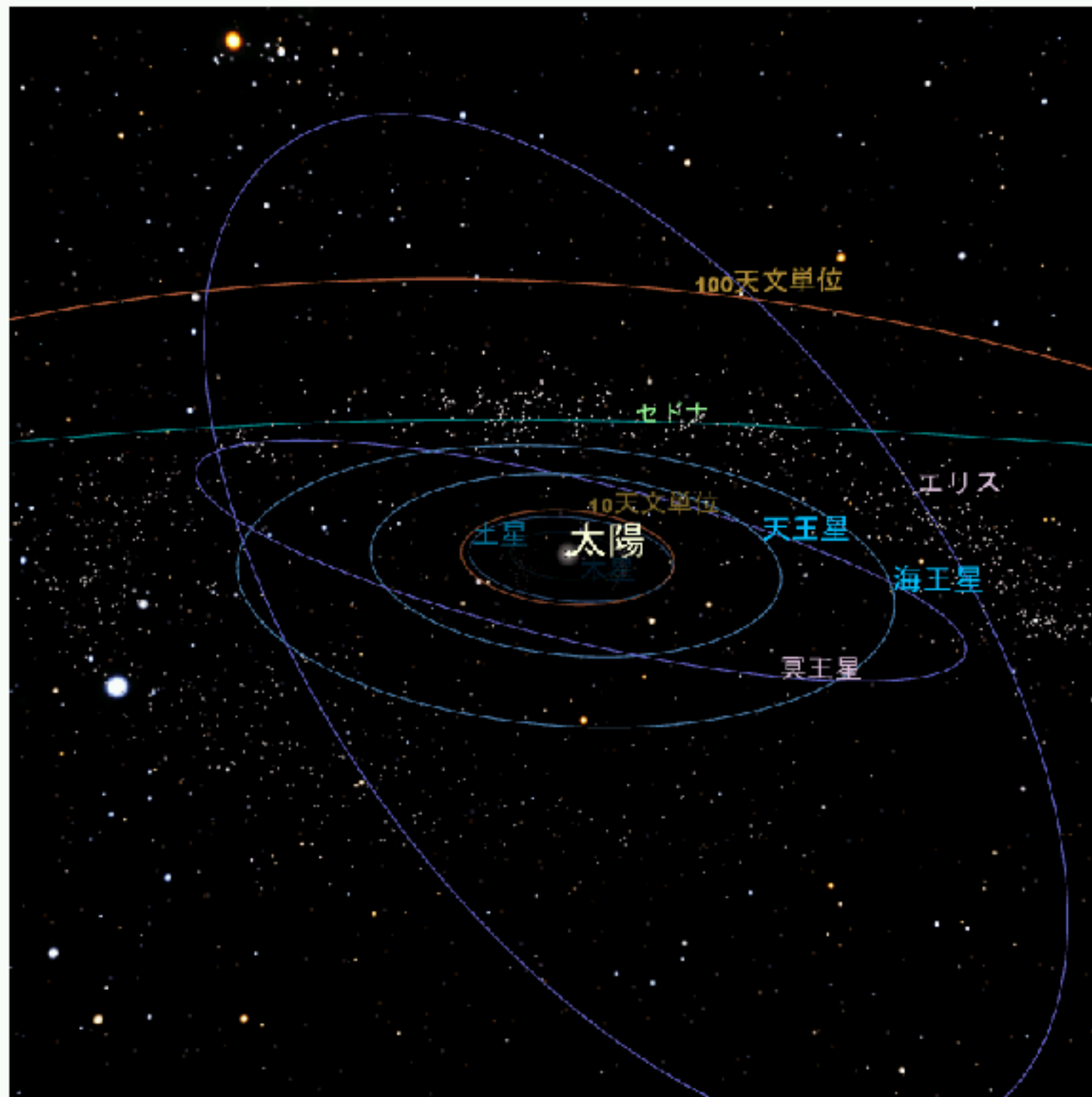
---

地球-太陽間平均距離: 1億5千万 km

- 光(秒速30万 km)で約8分
- 飛行機(時速900 km)で約19年
- 新幹線で(時速300 km)で約57年
- 徒歩(時速5 km)で約3400年



# 太陽系紀行(Mitaka)



<http://4d2u.nao.ac.jp/>

# 銀河系の中の太陽系

---

## 位置

- 銀河系円盤(オリオン座腕)
- 銀河系中心から約3万光年

## 公転

- 速度: 220 km/s
- 周期: 約2.4億年
- 差動回転: 内側ほど短周期で公転

## 振動(周転円運動)

- 半径方向: 周期約1.7億年
- 垂直方向: 周期約0.6億年

# 銀河系の中の太陽系

---

## 大きさ

- 半径: 約20万天文単位(太陽の潮汐半径)

## 黄道面傾斜角

- 銀河系円盤面と地球軌道面のなす角: 63度

## 恒星個数密度

- 約3個/立方光年

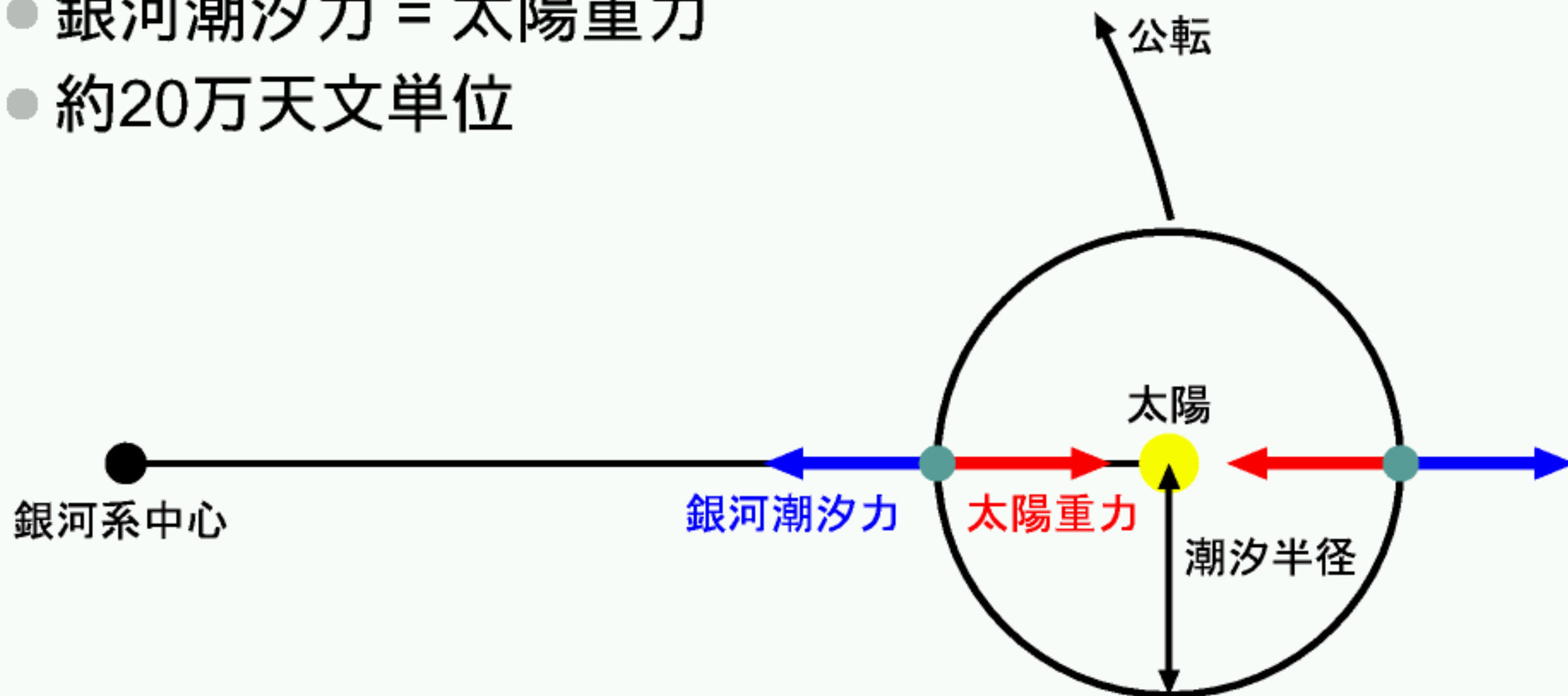
# 潮汐半徑

## 銀河潮汐力

- 銀河潮汐力 = 遠心力 - 銀河系重力

## 潮汐半徑

- 銀河潮汐力 = 太陽重力
- 約20萬天文單位



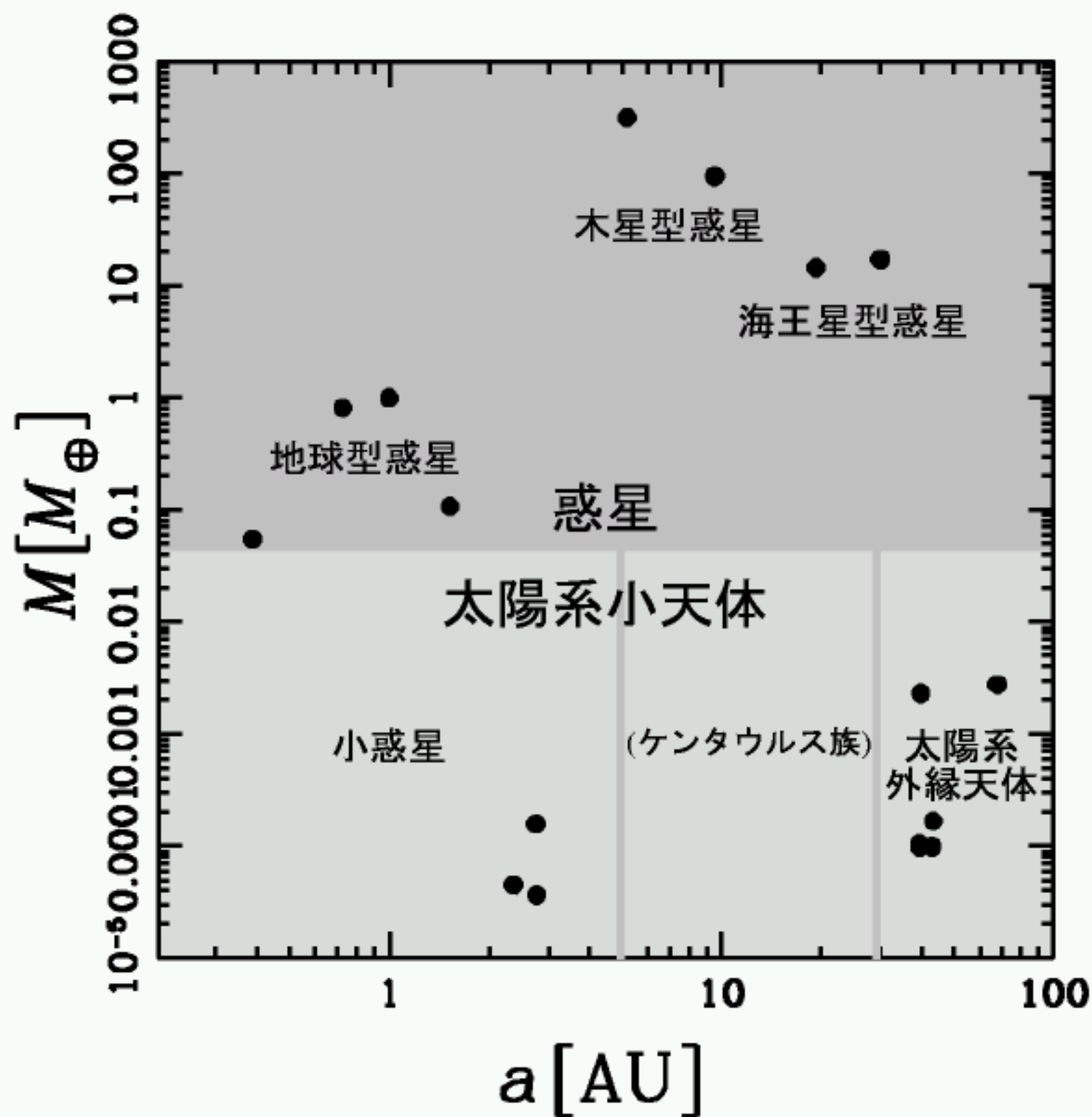
# 天体の分類

## 太陽公転天体

- 惑星
  - 地球型惑星
  - 木星型惑星
  - 海王星型惑星
- (準惑星)
- 太陽系小天体
  - 小惑星
  - 太陽系外縁天体
  - 彗星

## 惑星公転天体

- 衛星
- 環



# 今日の太陽系(2013.7.27)

---

## 太陽公転天体

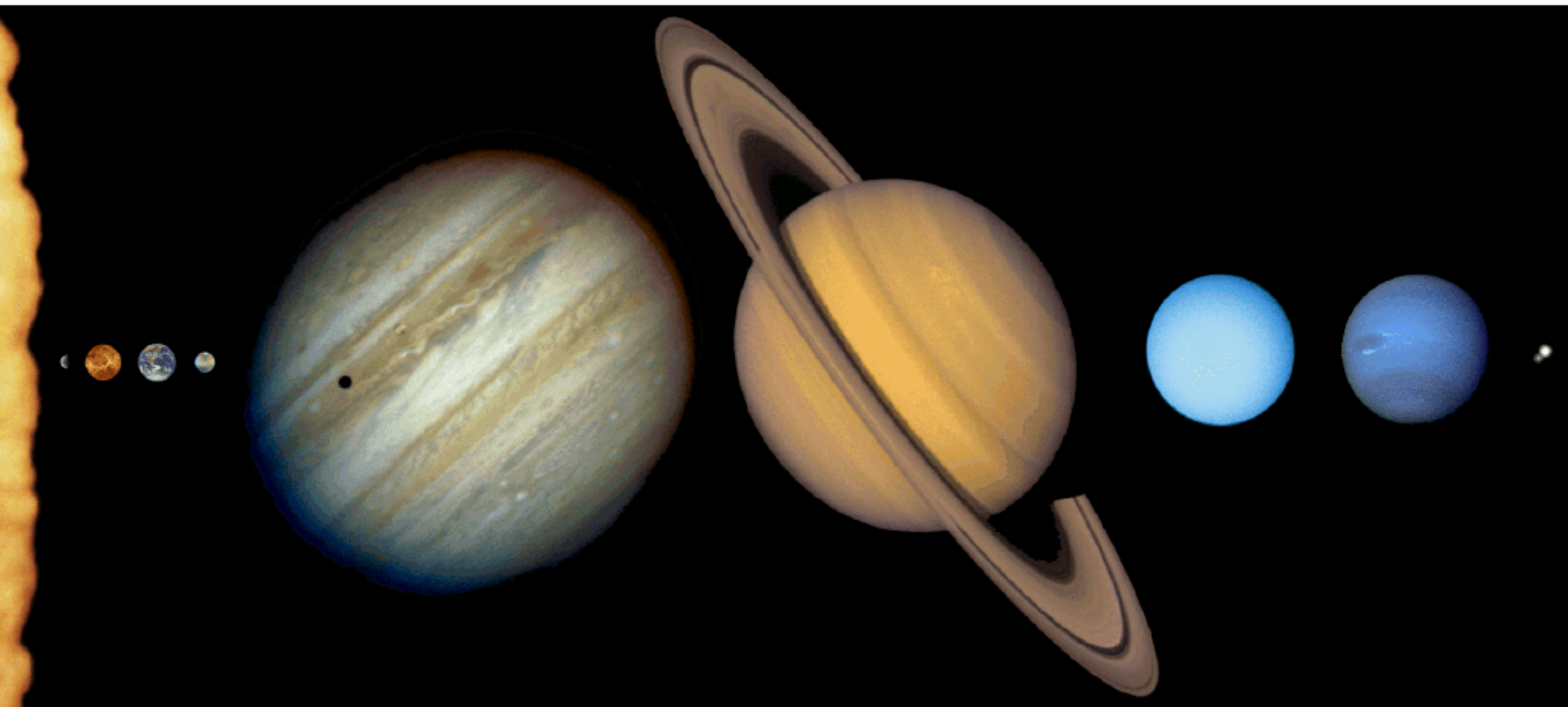
- 惑星: 8
- 準惑星: 5
- 小惑星: 618638
- 太陽系外縁天体: 1641
- 彗星: 4894

## 惑星公転天体

- 惑星衛星: 173
- 準惑星衛星: 8
- 小惑星衛星: 155
- 太陽系外縁天体衛星: 77



# 惑星の種類



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)



# 地球型惑星

## 惑星

- 水星、金星、地球、火星

## 別名

- 岩石惑星

## 存在範囲

- 0.4-1.5天文単位(太陽系の内側)

## 質量

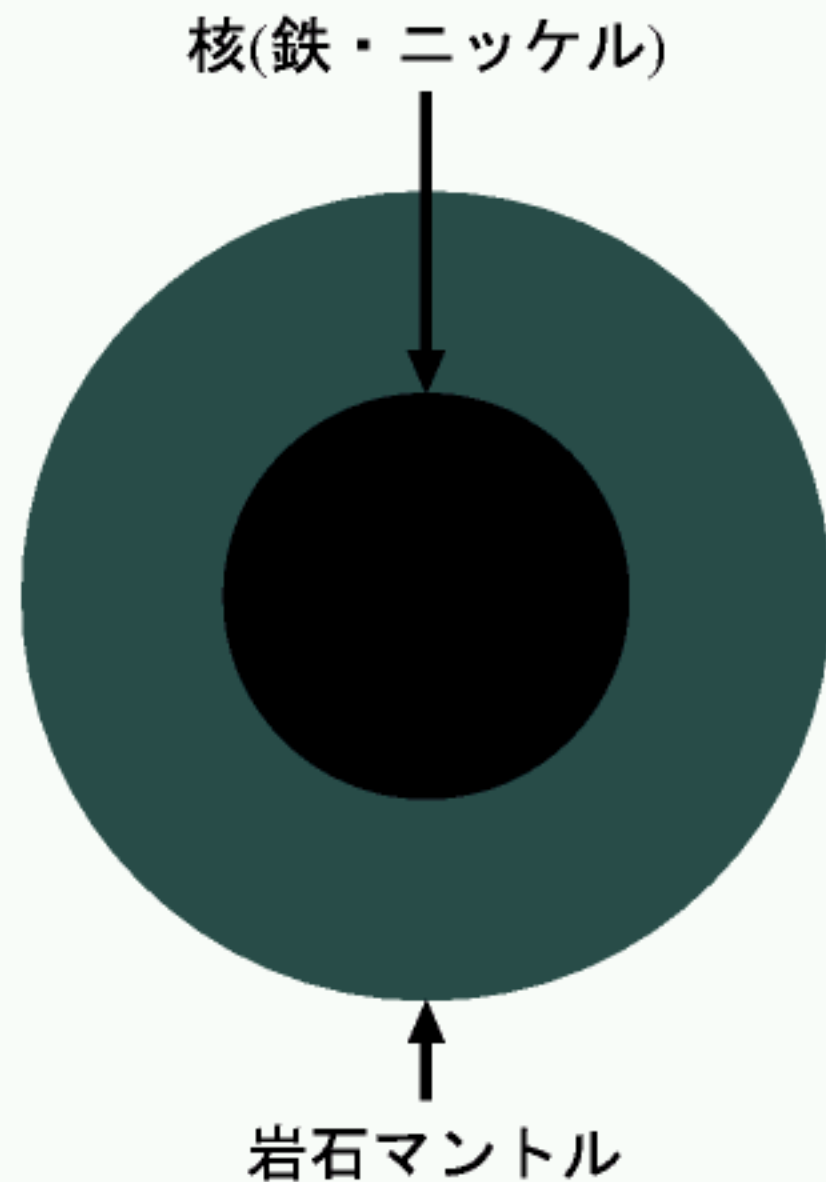
- 0.1-1地球質量

## 主成分

- 岩石、鉄

## 衛星・環

- 少数(地球1、火星2)
- 環なし



# 木星型惑星

## 惑星

- 木星、土星

## 別名

- (巨大)ガス惑星

## 存在範囲

- 5-10天文単位(太陽系の間)

## 質量

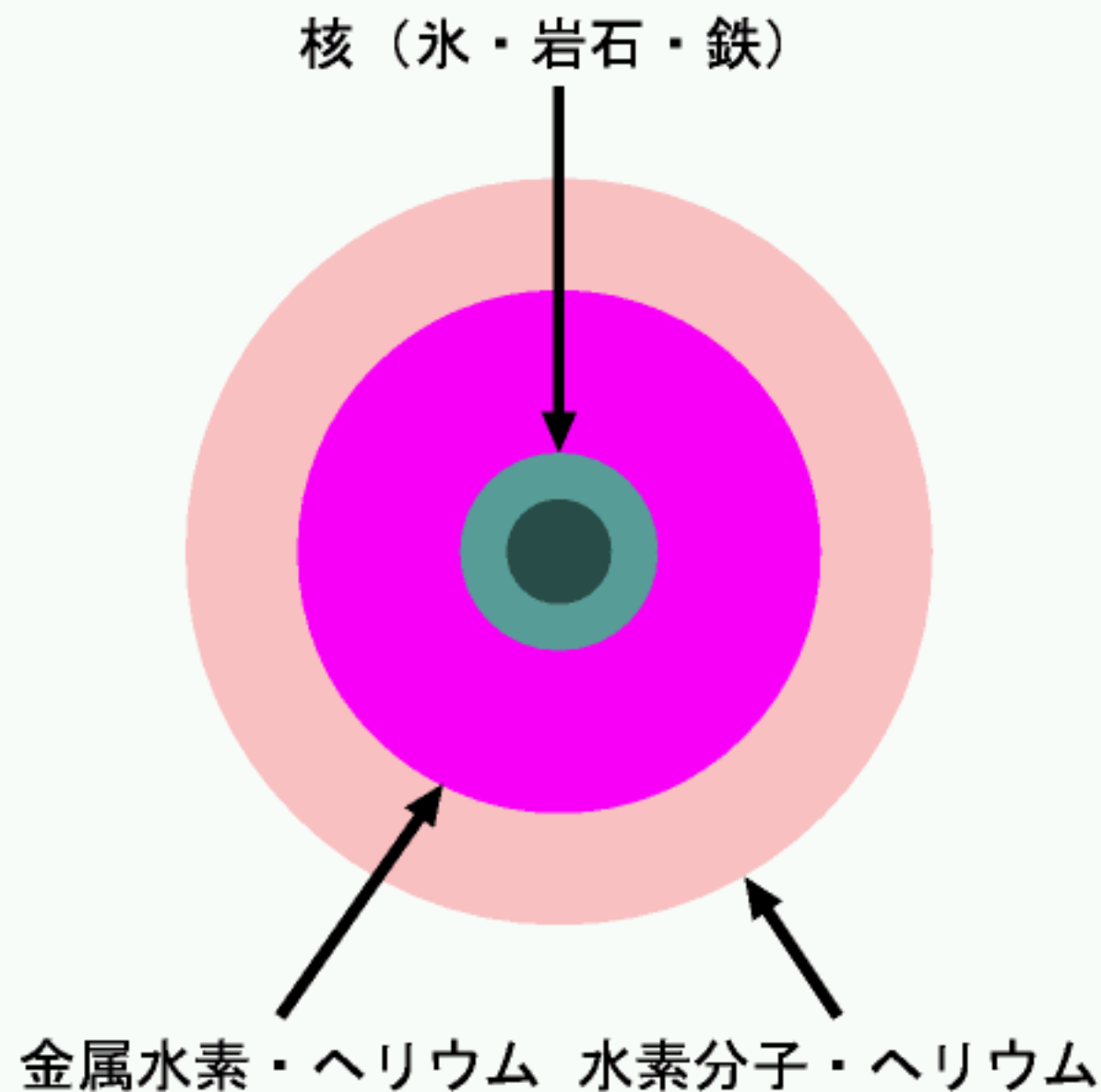
- 100-300地球質量

## 主成分

- 水素、ヘリウム

## 衛星・環

- 多数(木星65、土星62)
- 環あり



# 海王星(天王星)型惑星

## 惑星

- 天王星、海王星

## 別名

- (巨大)氷惑星

## 存在範囲

- 20-30天文単位(太陽系の外側)

## 質量

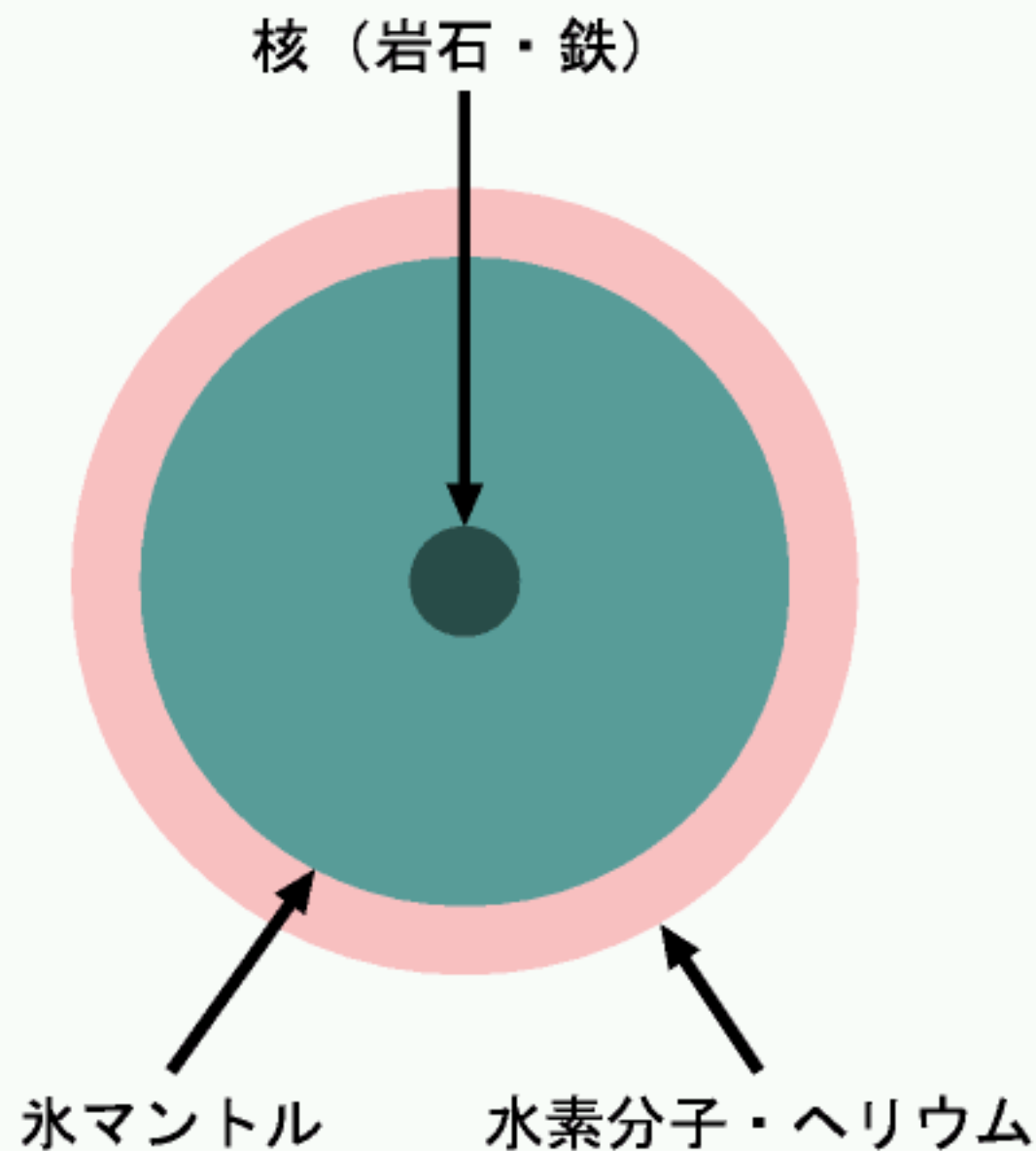
- 10-20地球質量

## 主成分

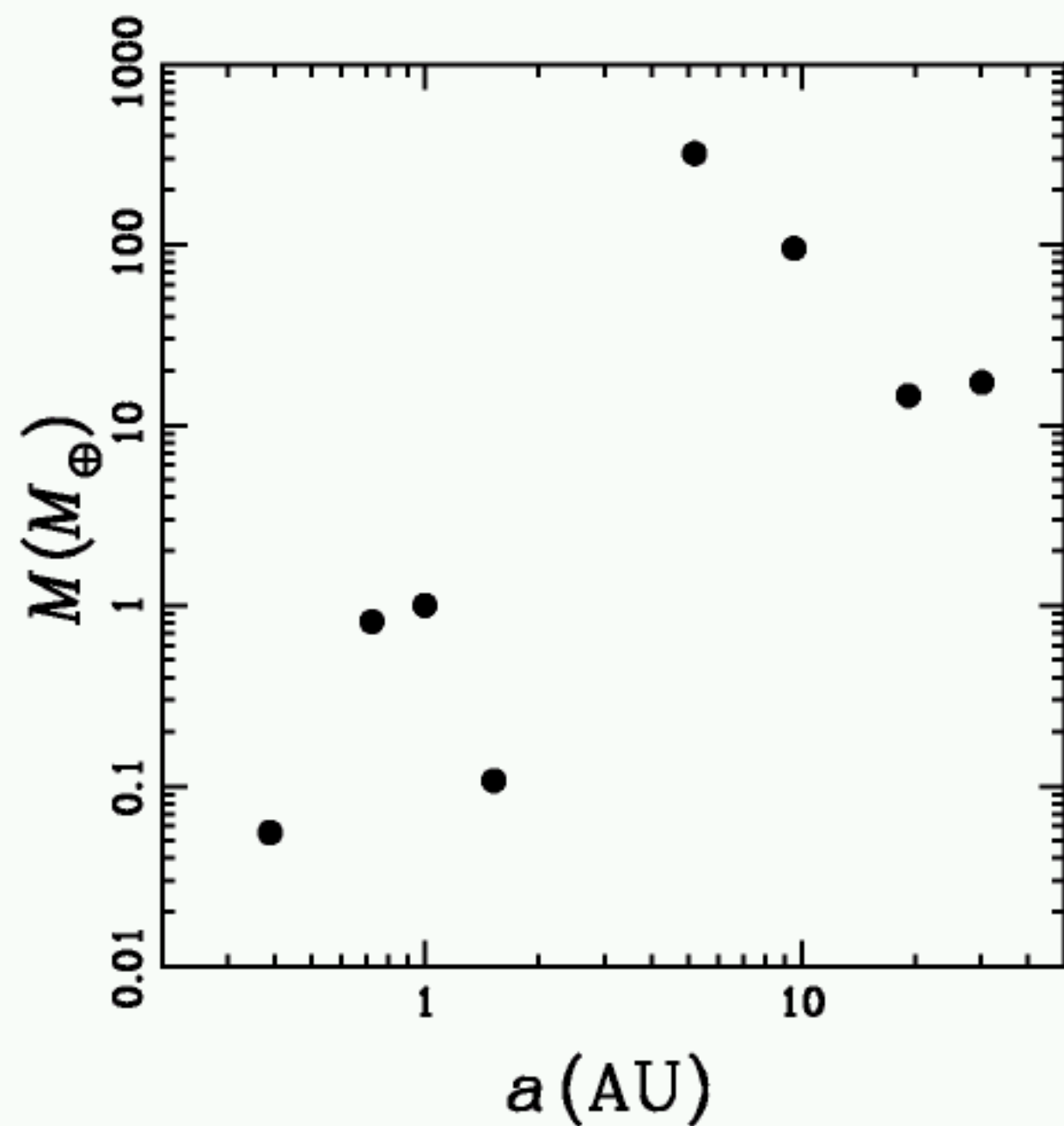
- 氷、メタン、アンモニア

## 衛星・環

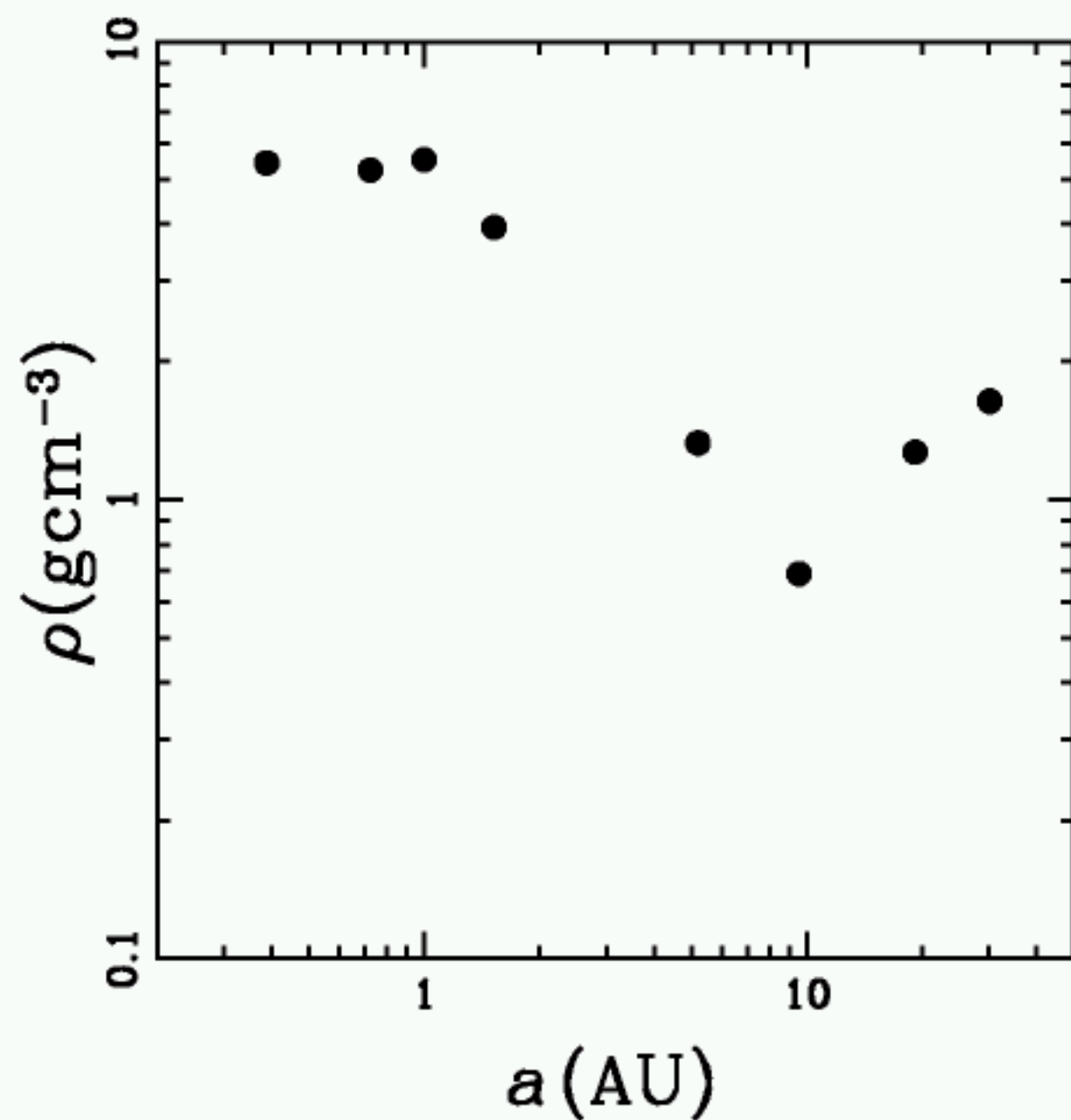
- 多数(天王星27、海王星13)
- 環あり



# 惑星の種類(軌道長半径-質量・密度)

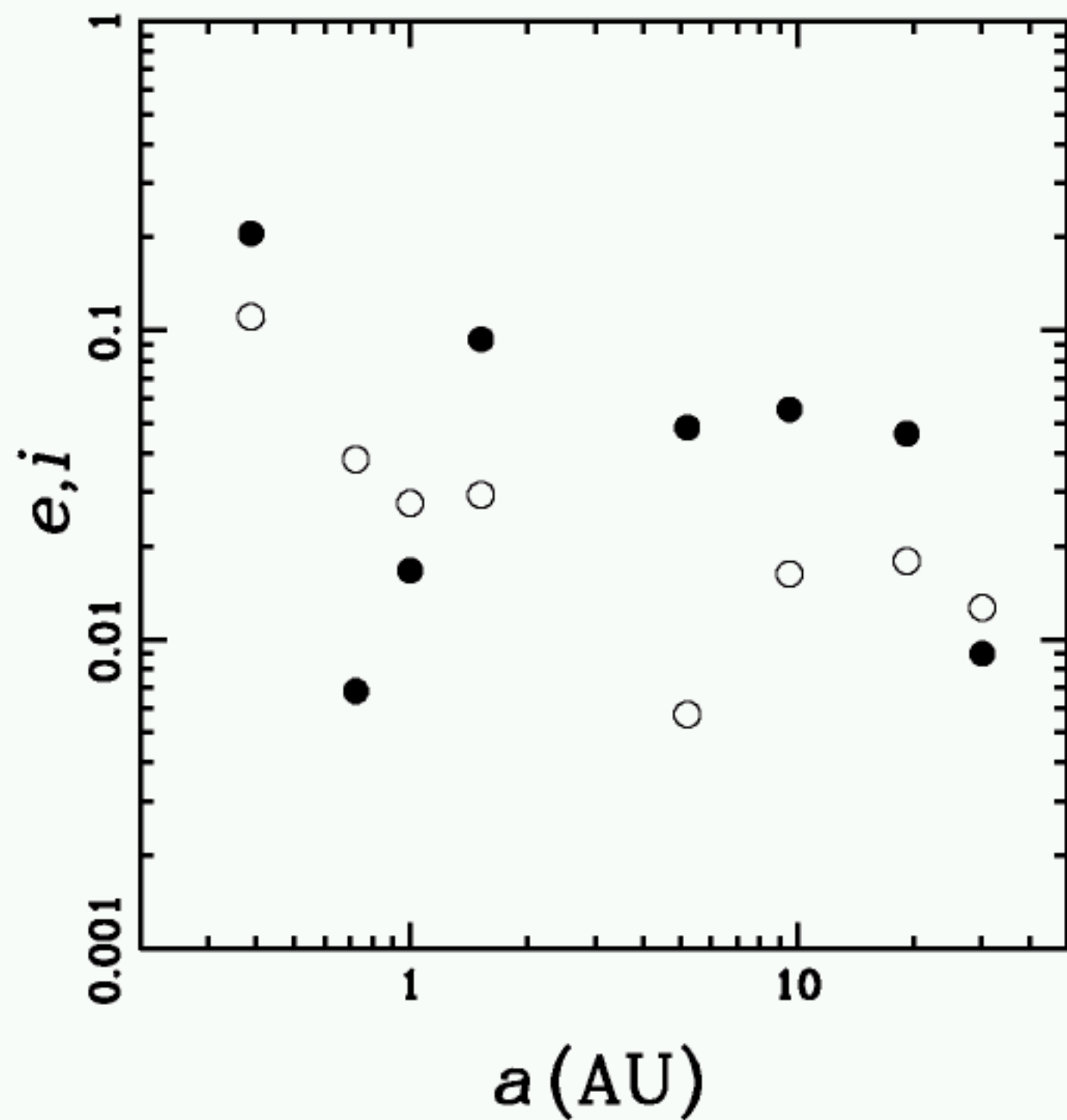


軌道長半径-質量



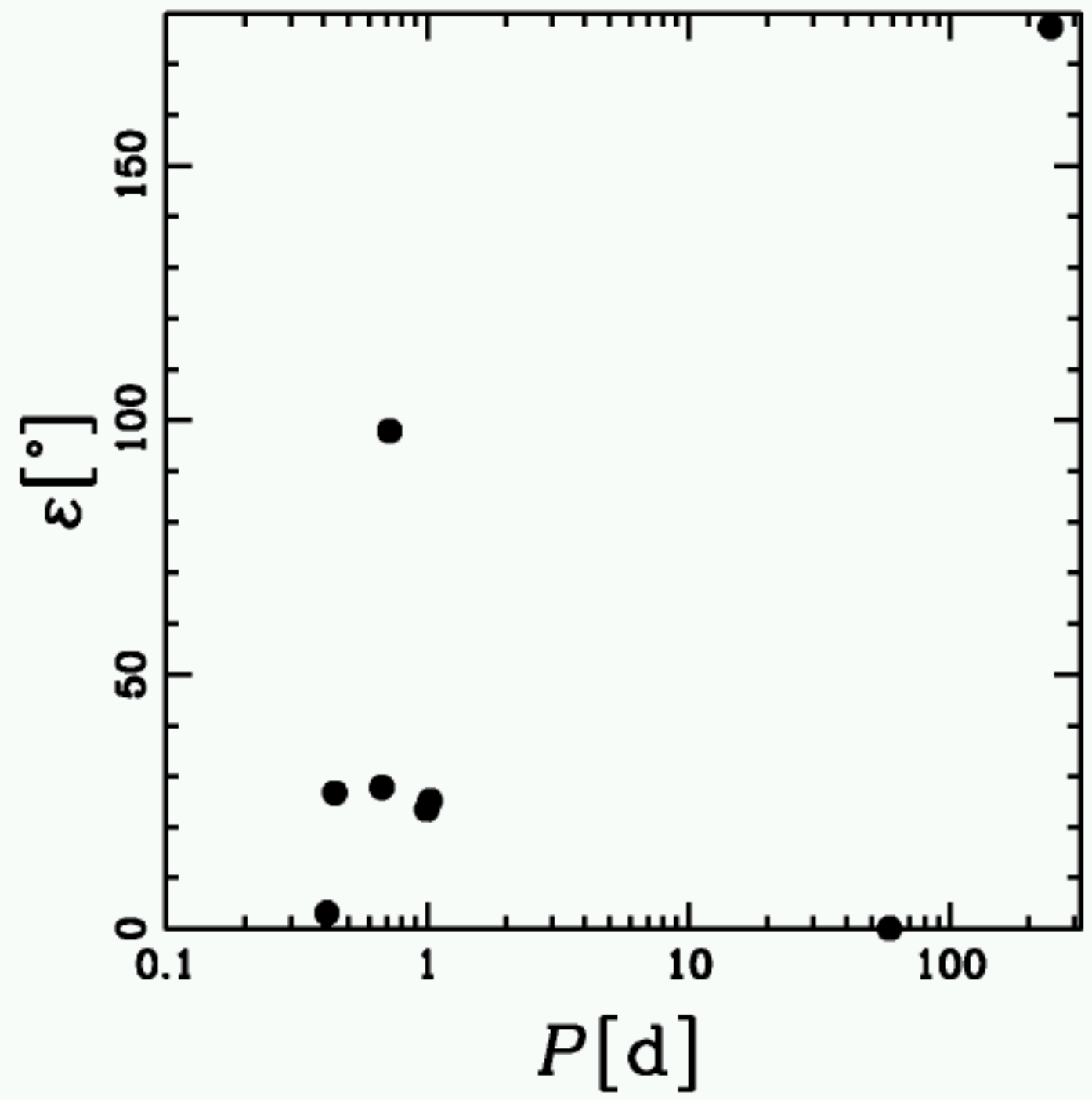
軌道長半径-密度

# 惑星の軌道要素



軌道長半径-軌道離心率●,軌道傾斜角○

# 惑星の自転



自転周期-赤道傾斜角

# 惑星の自転の特徴

---

## 水星

- 2回公転のうちに3回自転(自転-軌道共鳴)

## 金星

- 公転と自転が逆向き(逆行自転)!自転周期243日!

## 天王星

- 横倒し(赤道傾斜角 $98^{\circ}$  )!

## 他の惑星

- 自転周期1日以下、赤道傾斜角 $30^{\circ}$  以下



# 太陽系小天体の分布

## 小惑星帯

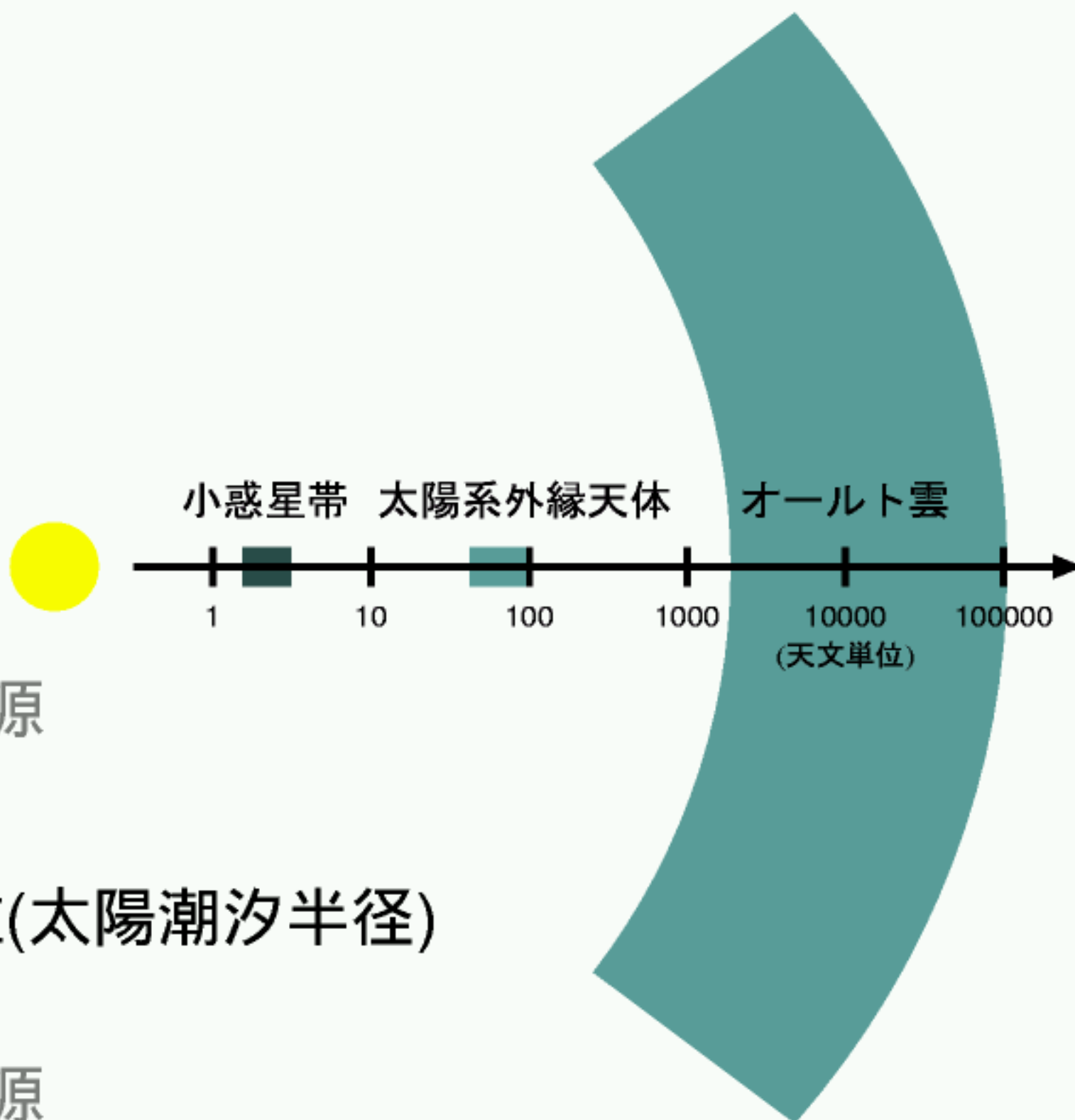
- 2-3天文単位
- 帯状
- 隕石の供給源

## 太陽系外縁天体

- 30天文単位-
- 円盤状?
- 短周期彗星の供給源

## オールト雲

- 数千-10万天文単位(太陽潮汐半径)
- 球殻状
- 長周期彗星の供給源



# 現在進行中の主な太陽系探査計画

---

## Messenger

- 水星軌道

## Dawn

- 小惑星帯(2015年Ceres到着)

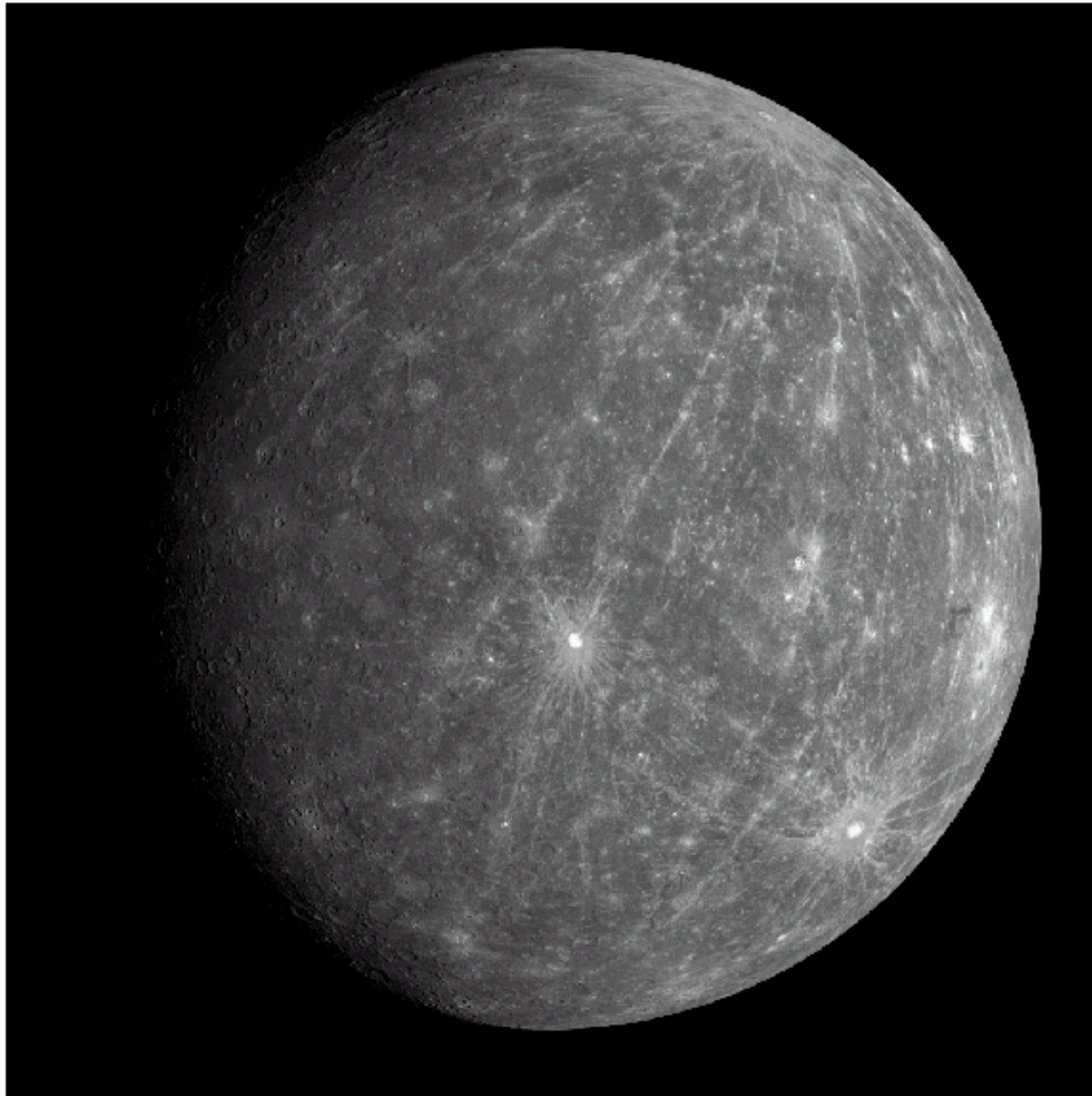
## Cassini

- 土星軌道

## New Horizons

- 2015年冥王星到着

# 水星



太陽からの距離: 0.4天文単位 質量: 0.06地球質量  
「最小の惑星、鉄の惑星」

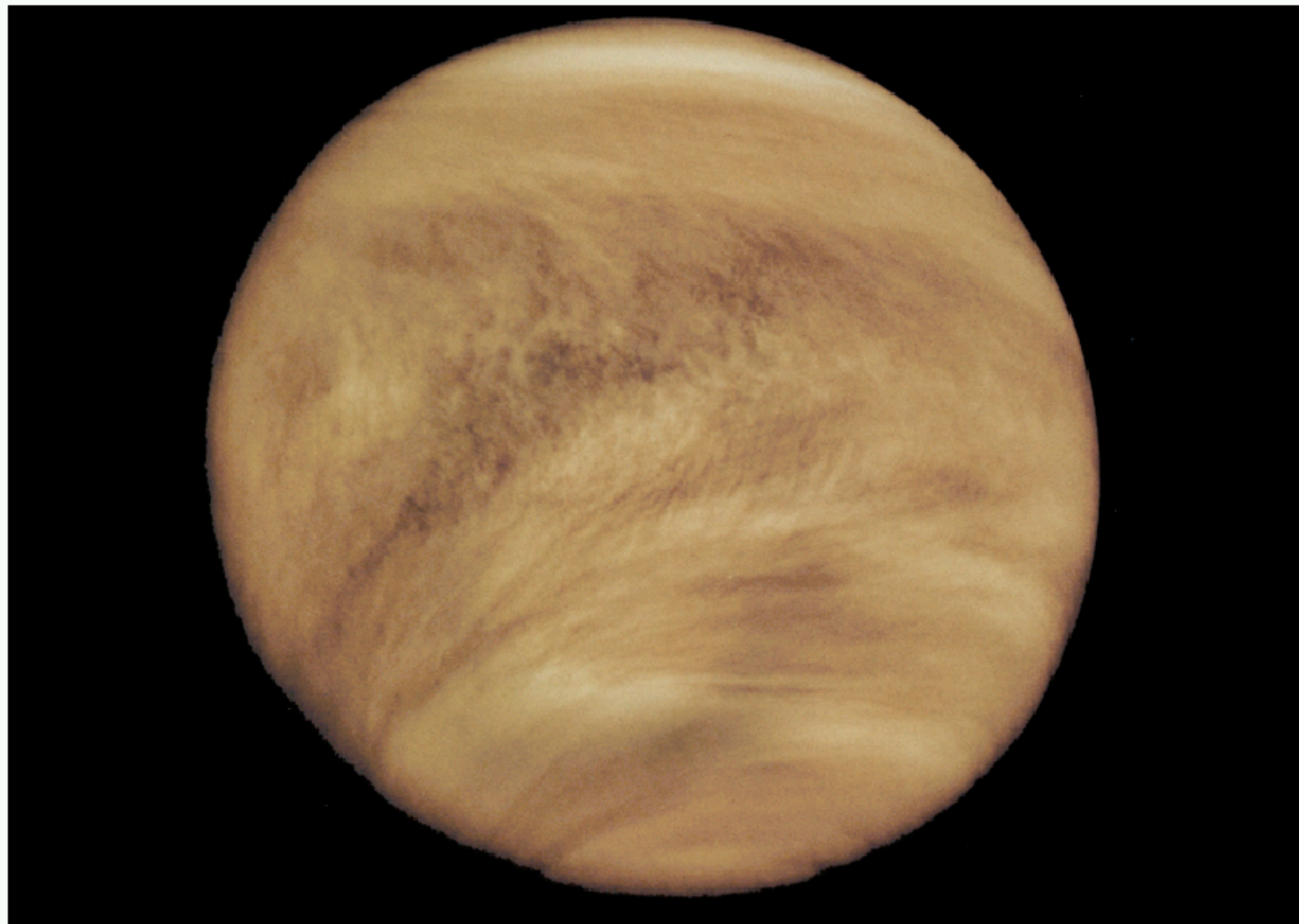
# 水星



水星表面(Messenger/NASA)

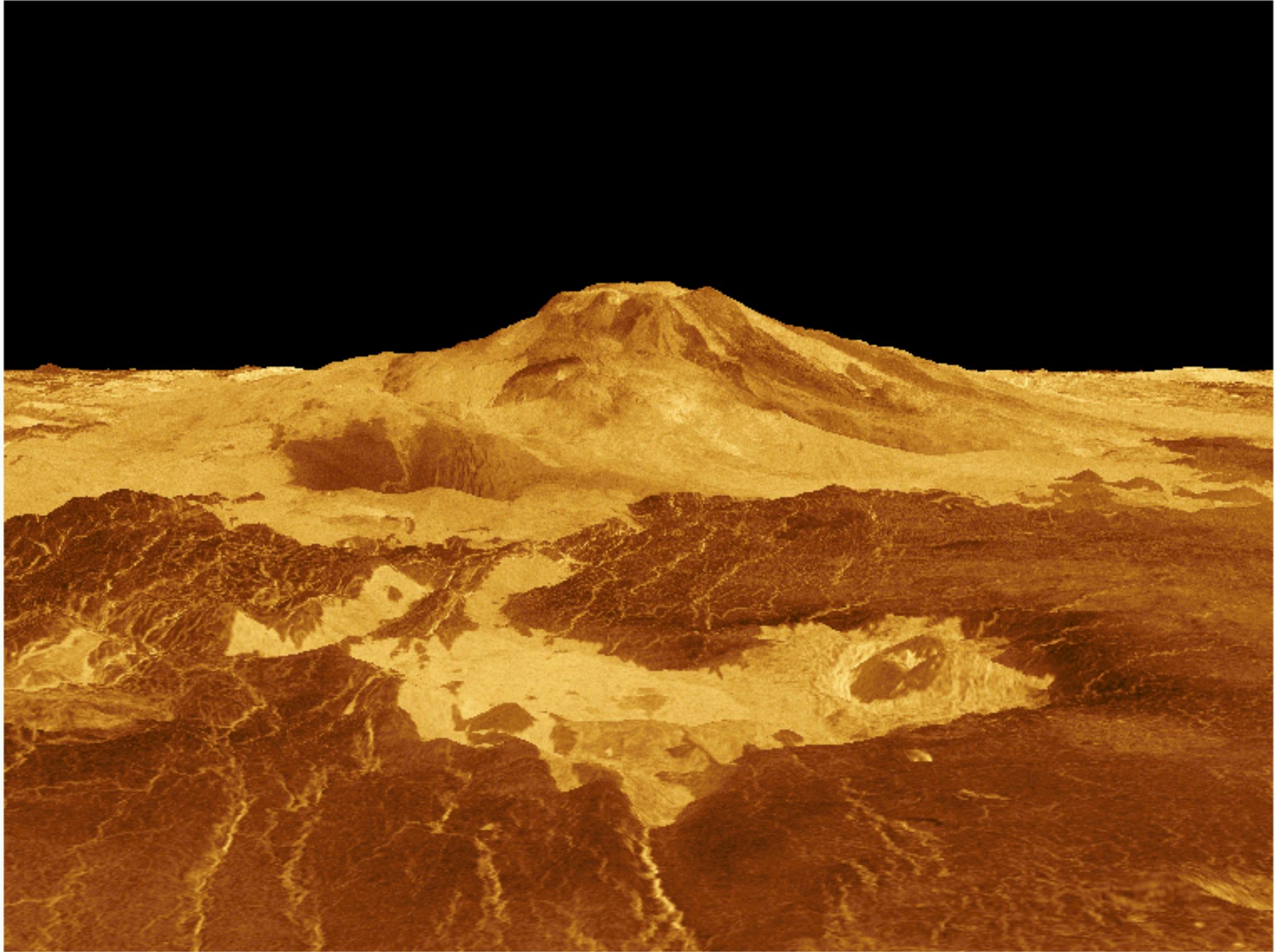


# 金星



太陽からの距離: 0.7天文単位 質量: 0.8地球質量  
「地球になりそこねた惑星」

# 金星



金星表面(JPL)



# 地球



太陽からの距離: 1天文単位 質量: 1地球質量  
「水と生命の惑星」

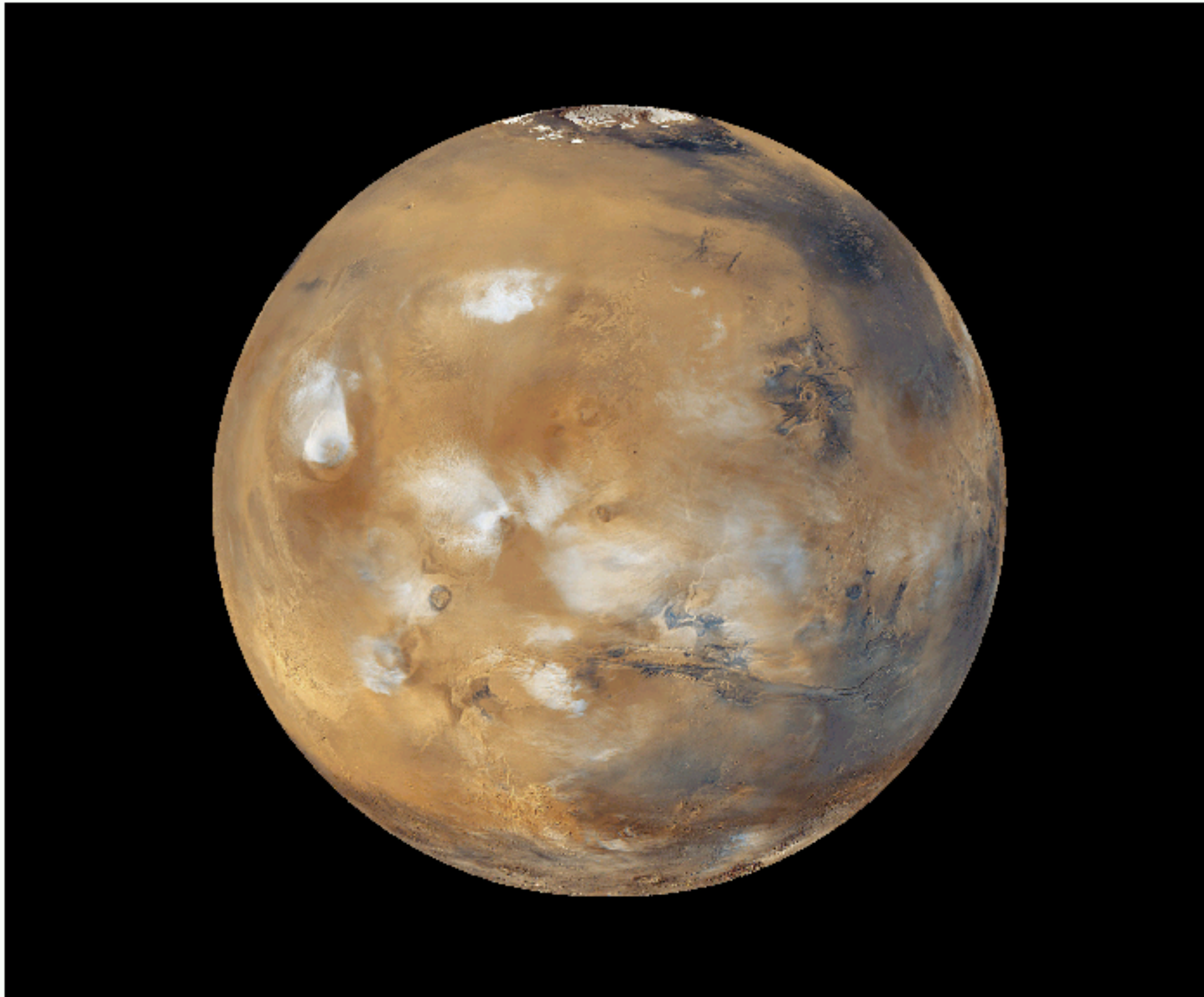


# 地球



セブンティ・アイランド(パラオ)

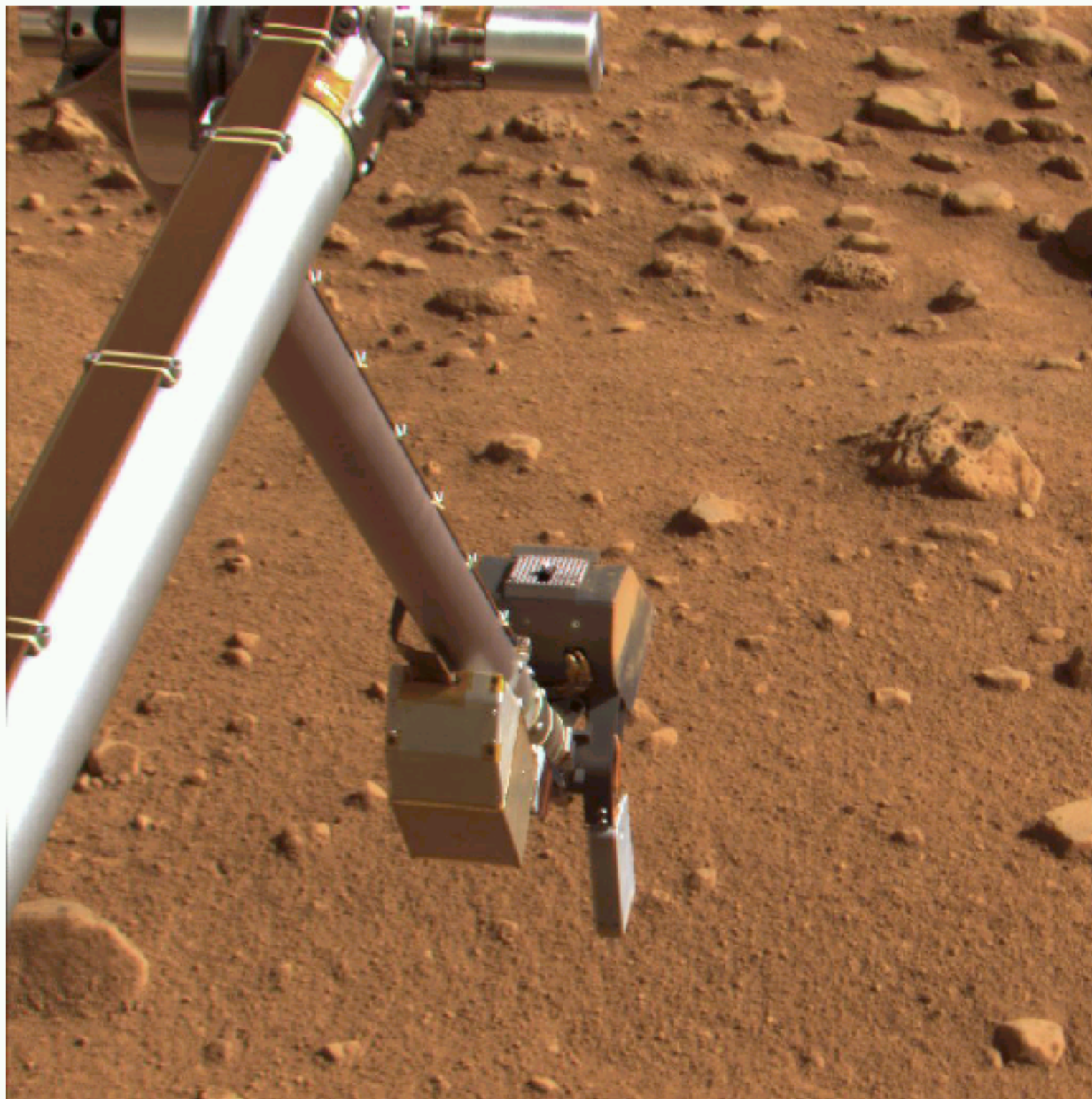
# 火星



太陽からの距離: 1.5天文単位 質量: 0.1地球質量  
「枯れた惑星」

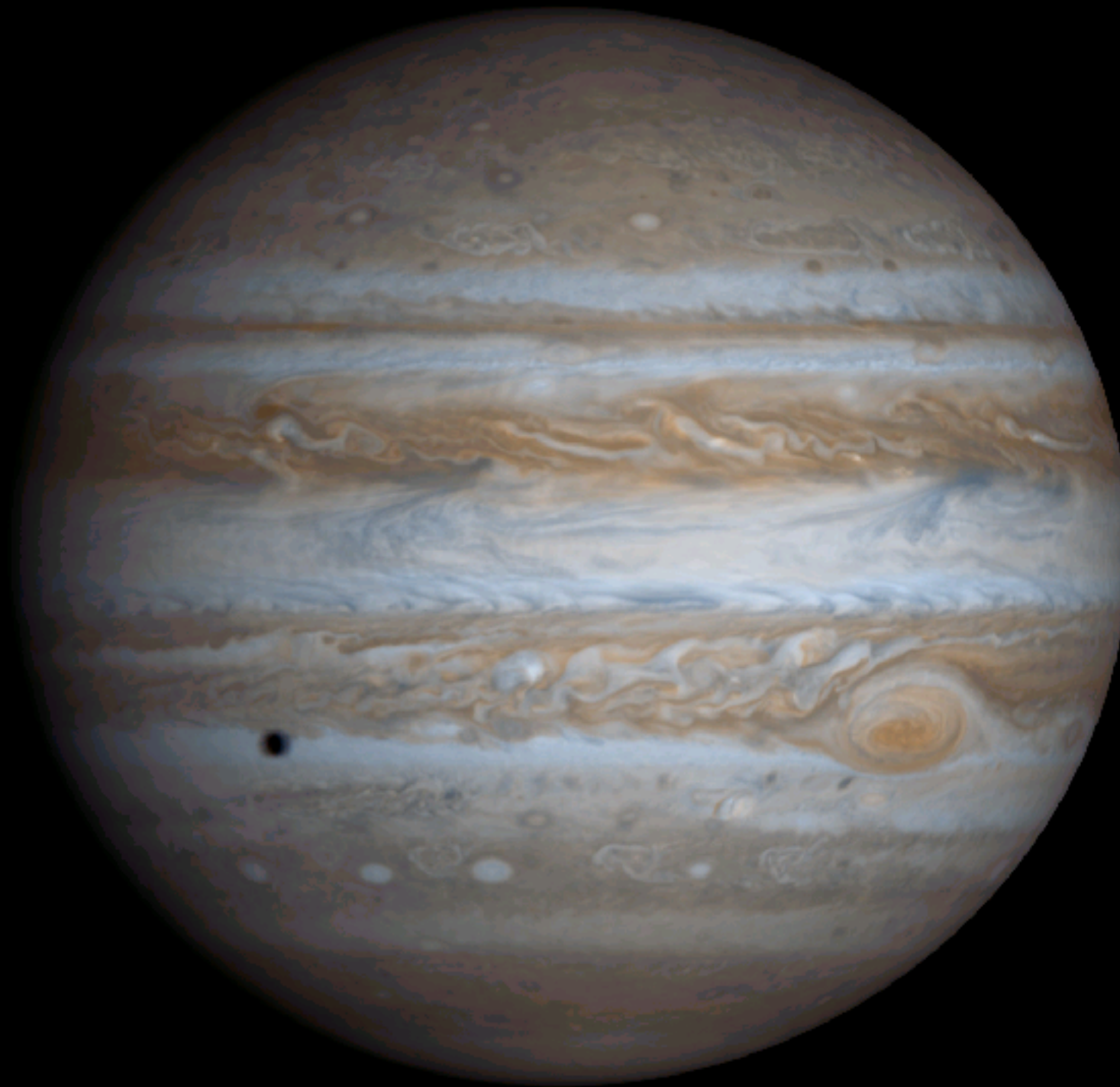


# 火星



火星表面(Phoenix/NASA)

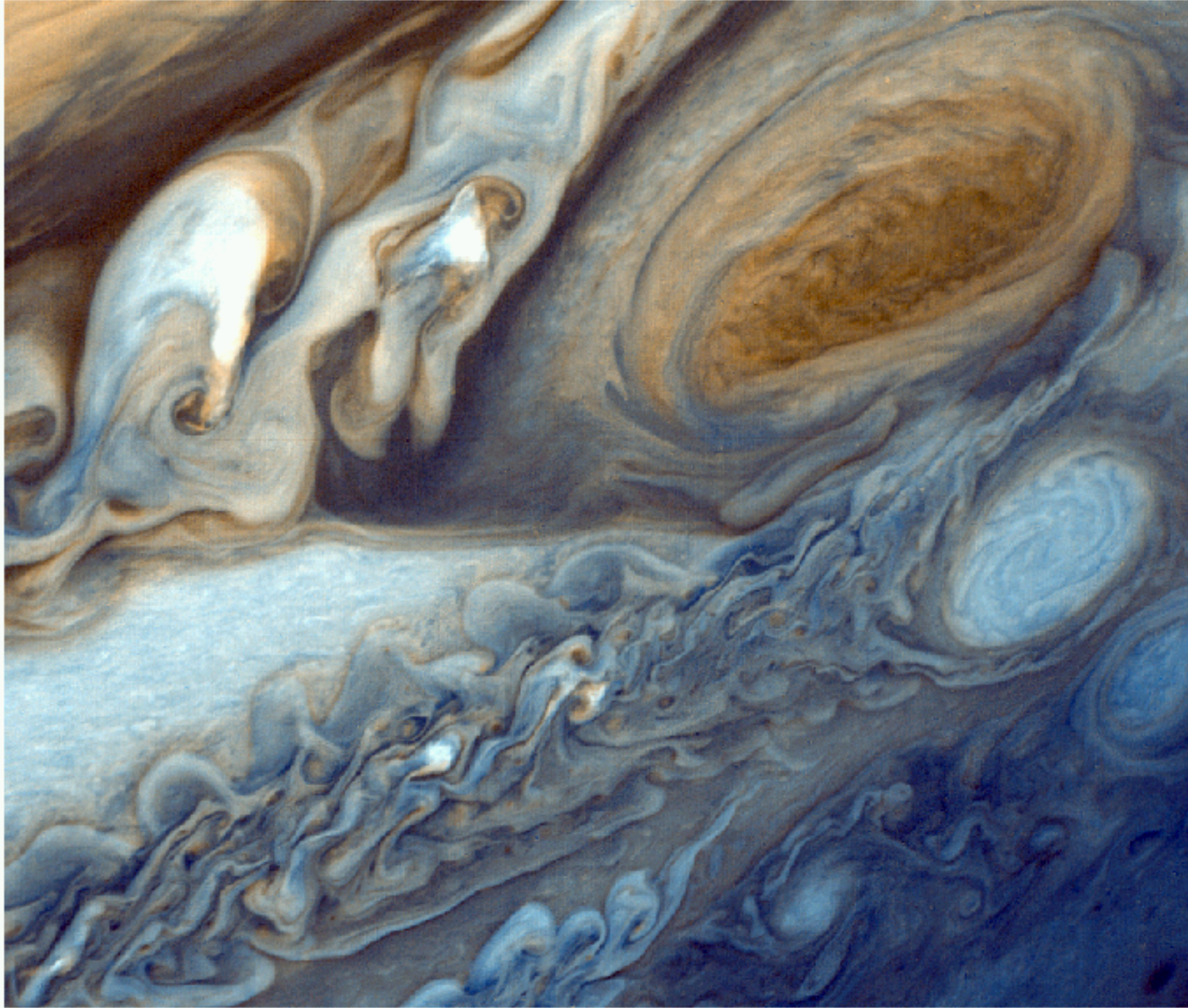
# 木星



太陽からの距離: 5天文単位 質量: 318地球質量  
「太陽になりそこねた惑星?、惑星の王」



# 木星



大赤斑(NASA/JPL)



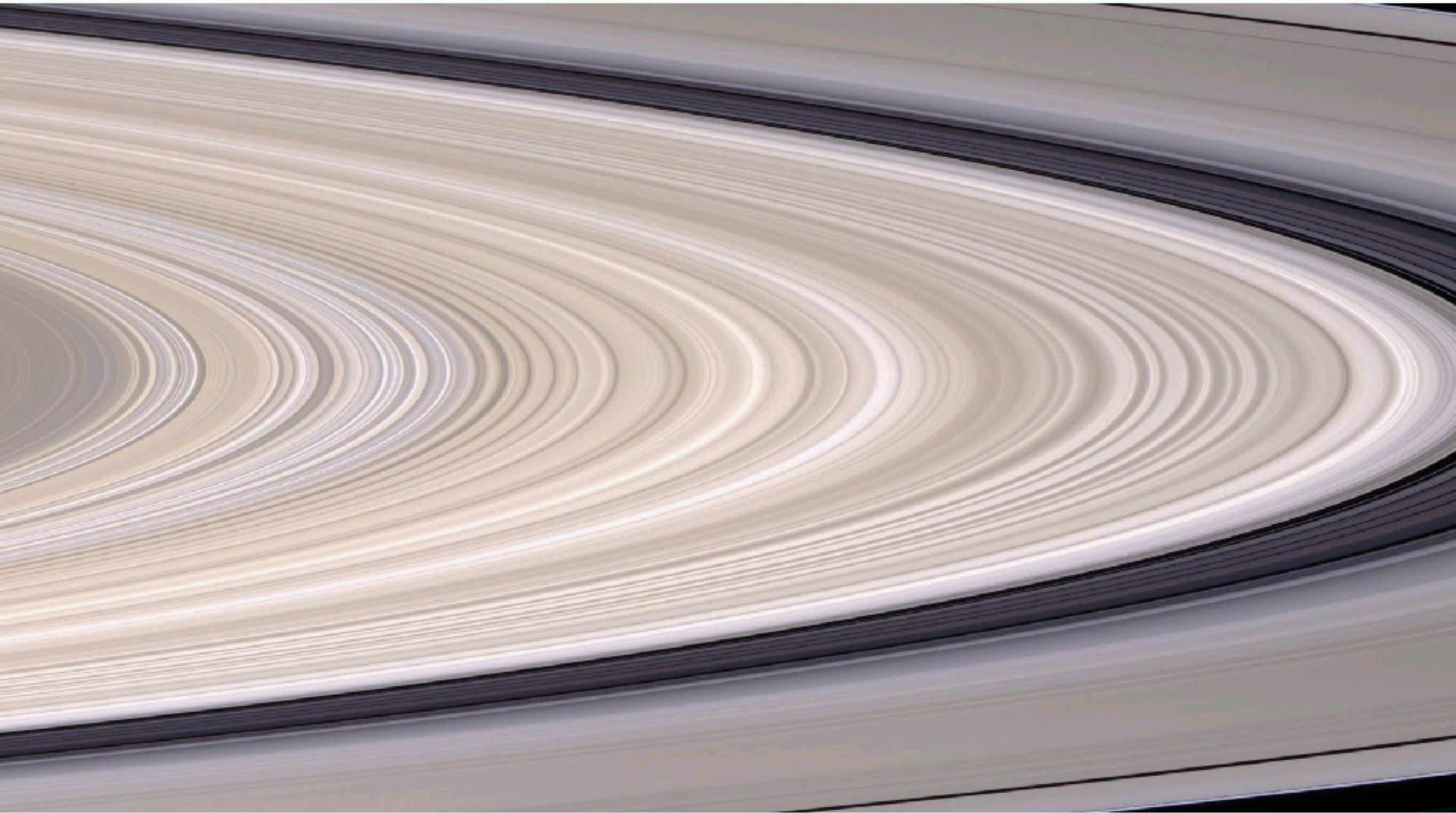
# 土星



太陽からの距離: 10天文単位 質量: 95地球質量  
「環の惑星」



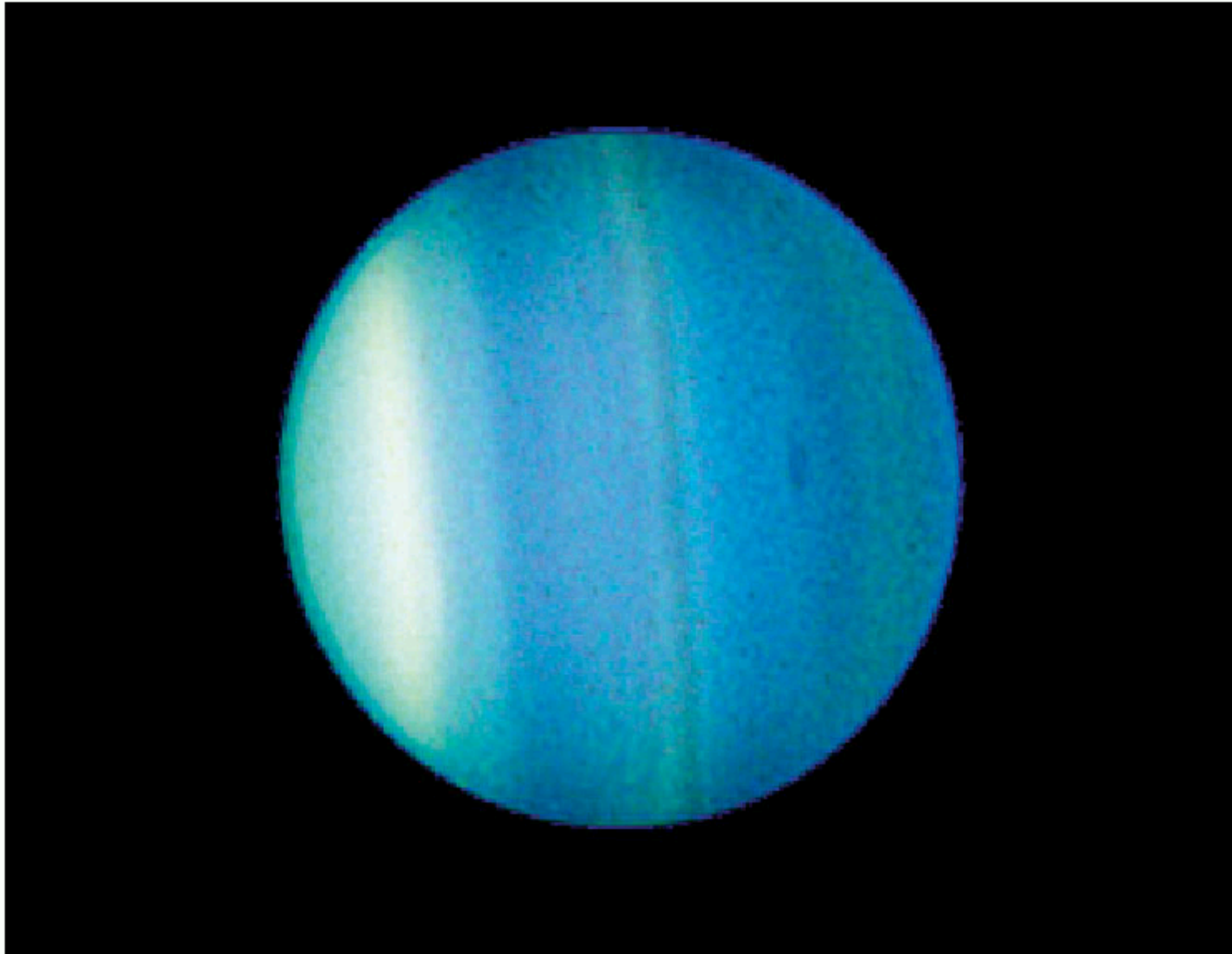
# 土星



土星の環(NASA/JPL/Space Science Institute)

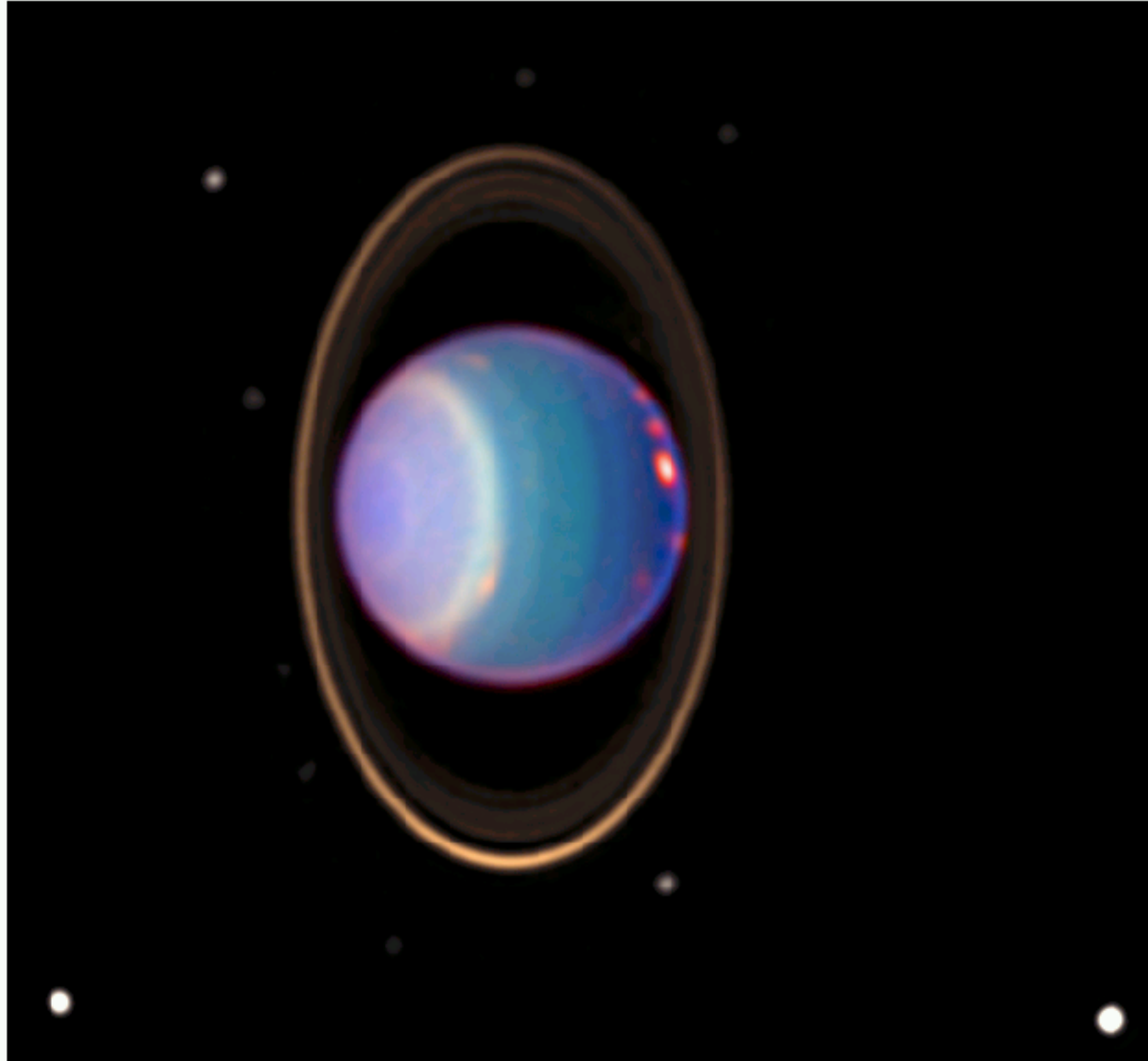


# 天王星



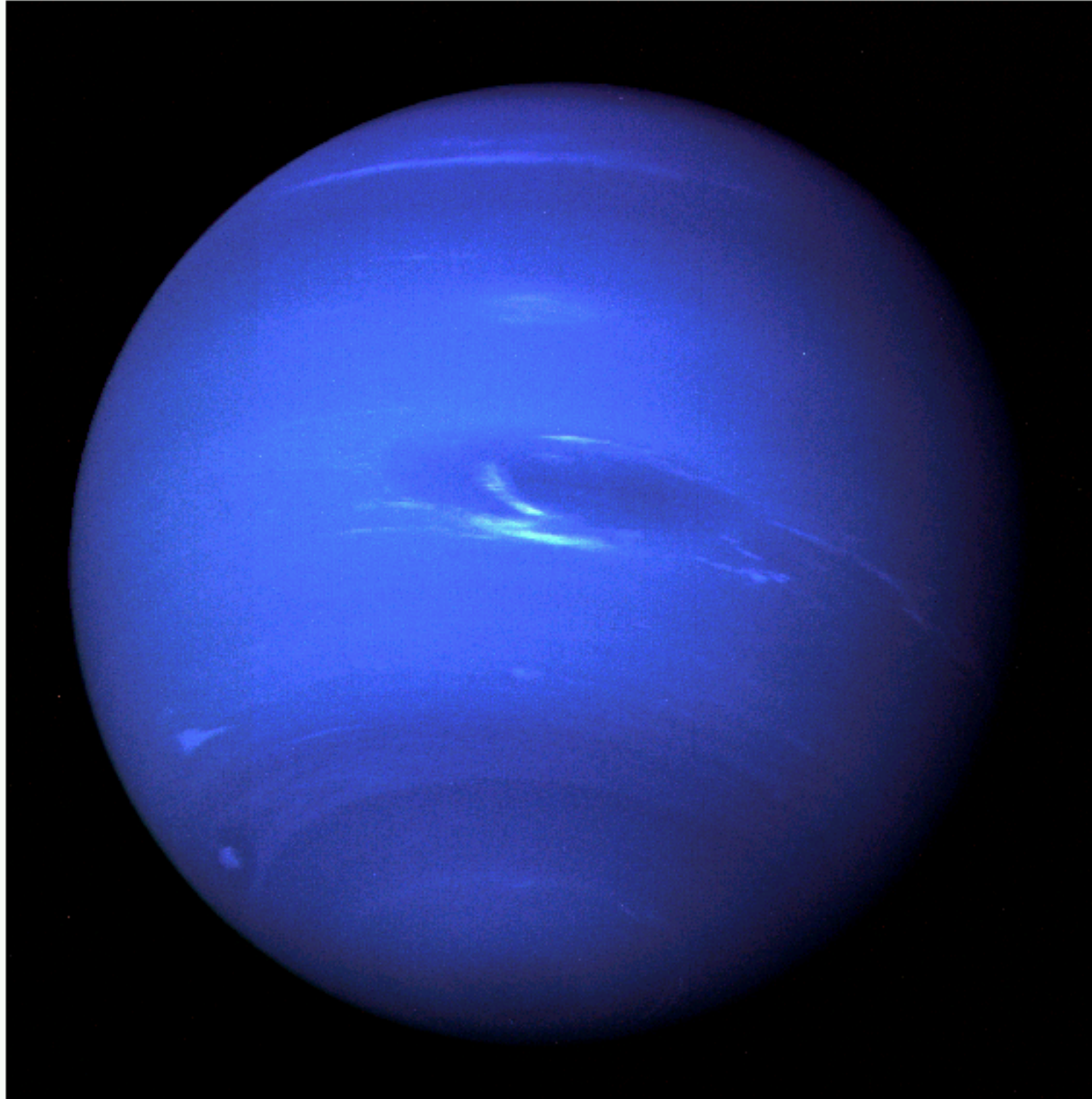
太陽からの距離: 19天文単位 質量: 15地球質量  
「横倒しの惑星」

# 天王星



天王星の衛星と環(Erich Karkoschka/NASA)

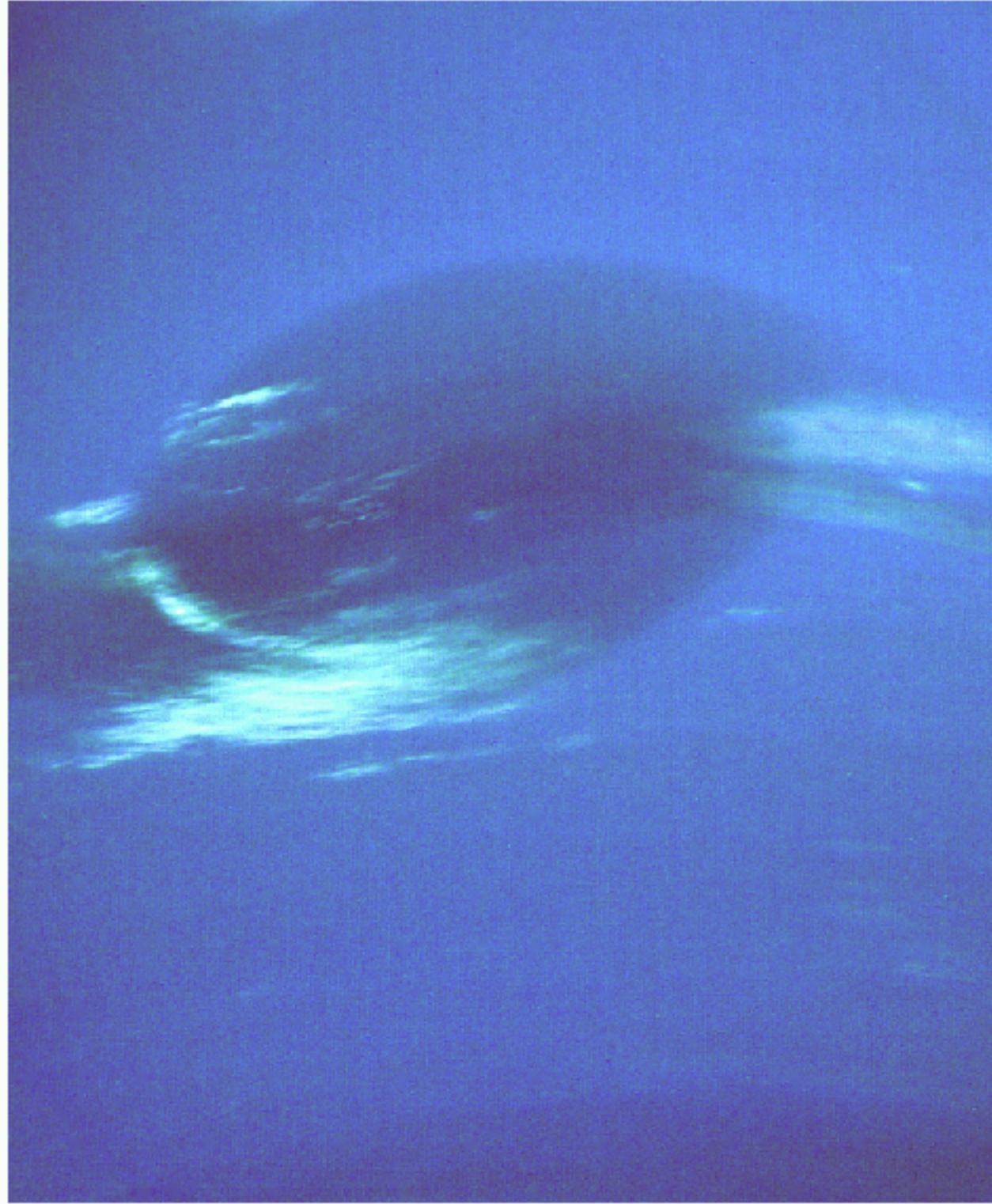
# 海王星



太陽からの距離: 30天文単位 質量: 17地球質量  
「最遠の惑星」



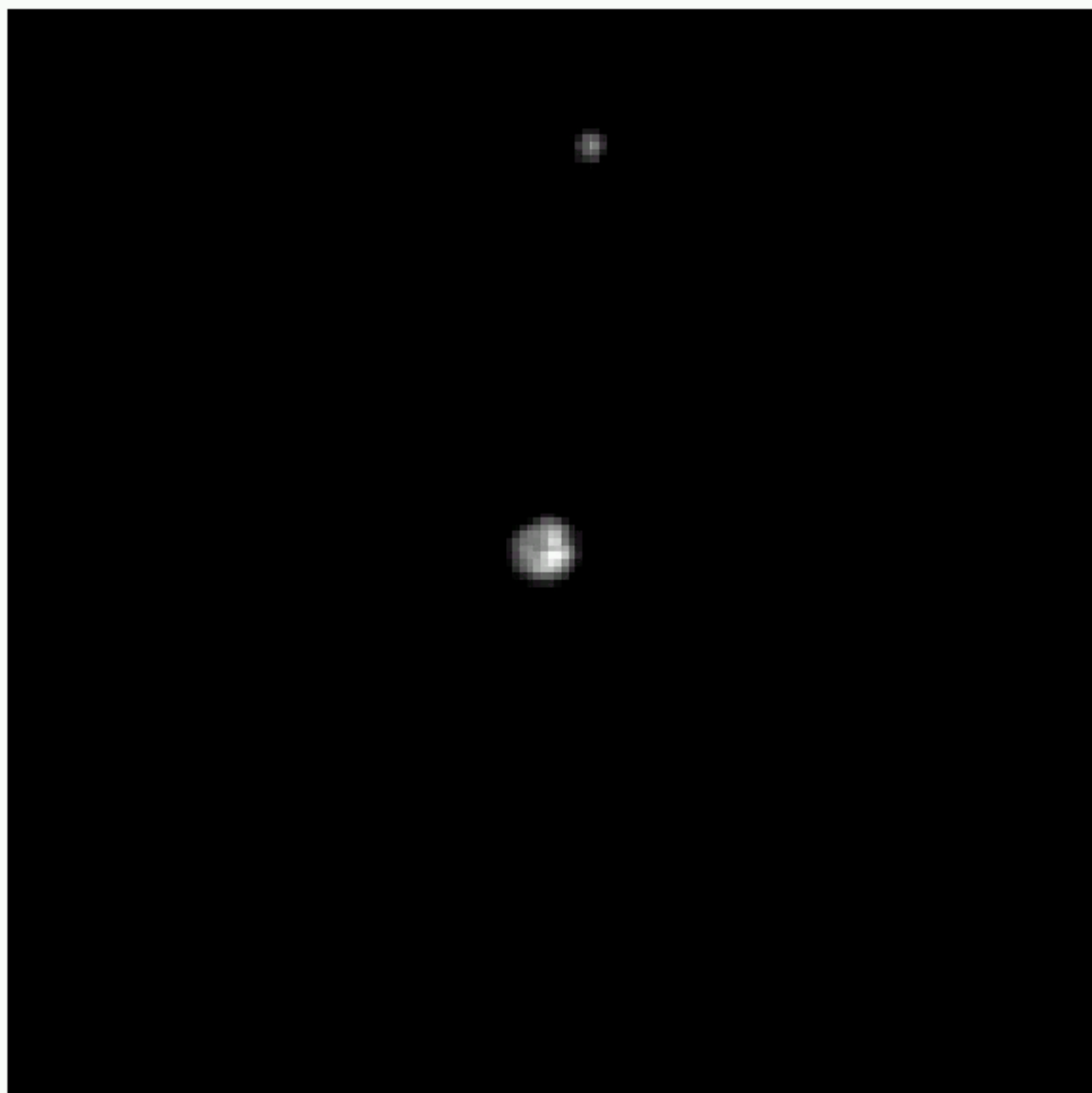
# 海王星



大暗斑(NASA)

# 冥王星(準惑星)

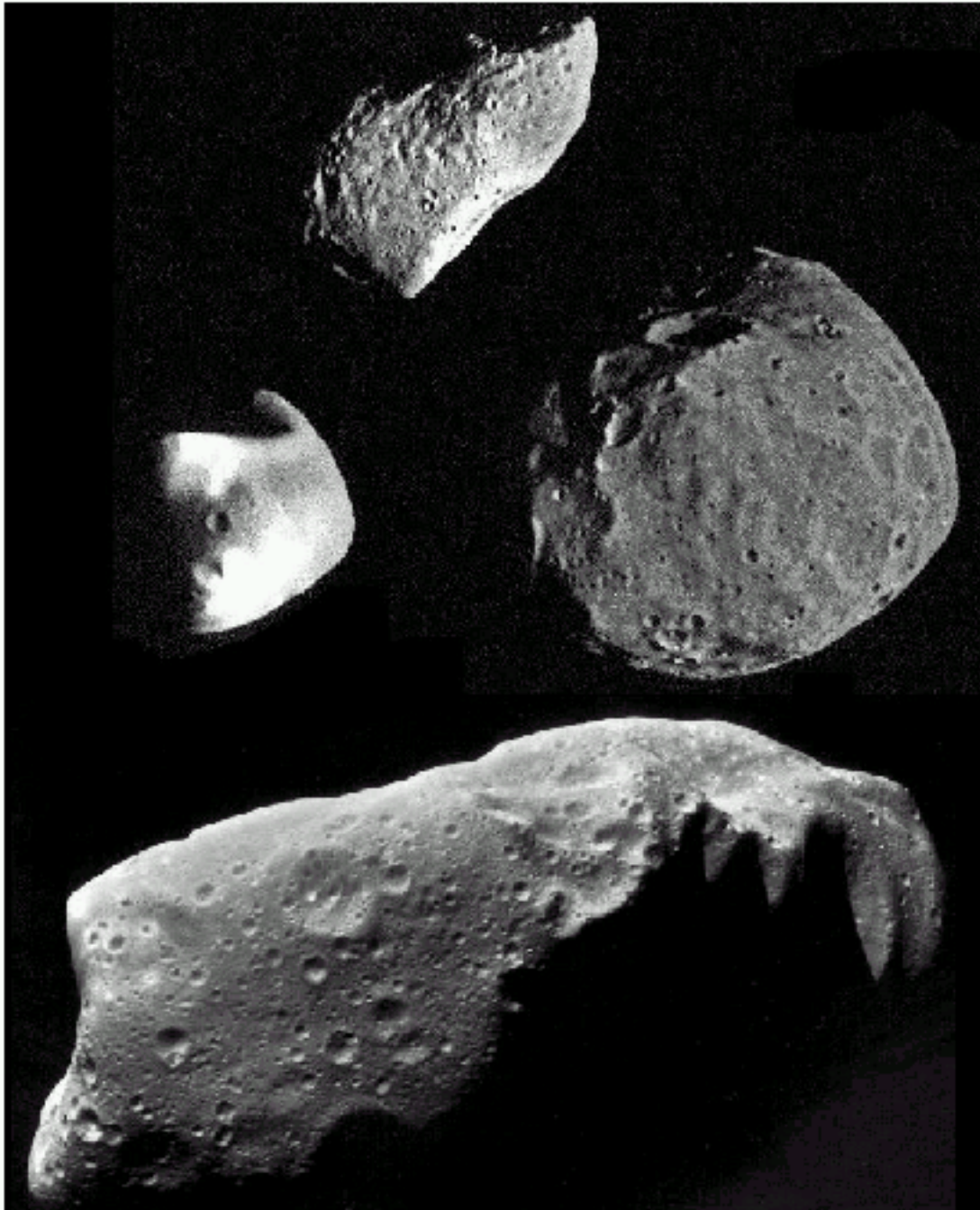
---



太陽からの距離: 40天文単位 質量: 1/500地球質量  
「元惑星、太陽系外縁天体」



# 太陽系小天体



小惑星  
「惑星形成の残骸」



彗星  
「氷微惑星の生き残り」

# 太陽系の特徴ー全体

---

## 大きさと惑星の数

- 惑星領域の半径は約30天文単位
- 8個の惑星(+無数の小天体)

## 質量と角運動量

- 惑星の質量の合計は太陽の質量の1/1000倍
- 惑星の軌道角運動量の合計は太陽の自転角運動量の190倍



# 太陽系の特徴ー惑星

---

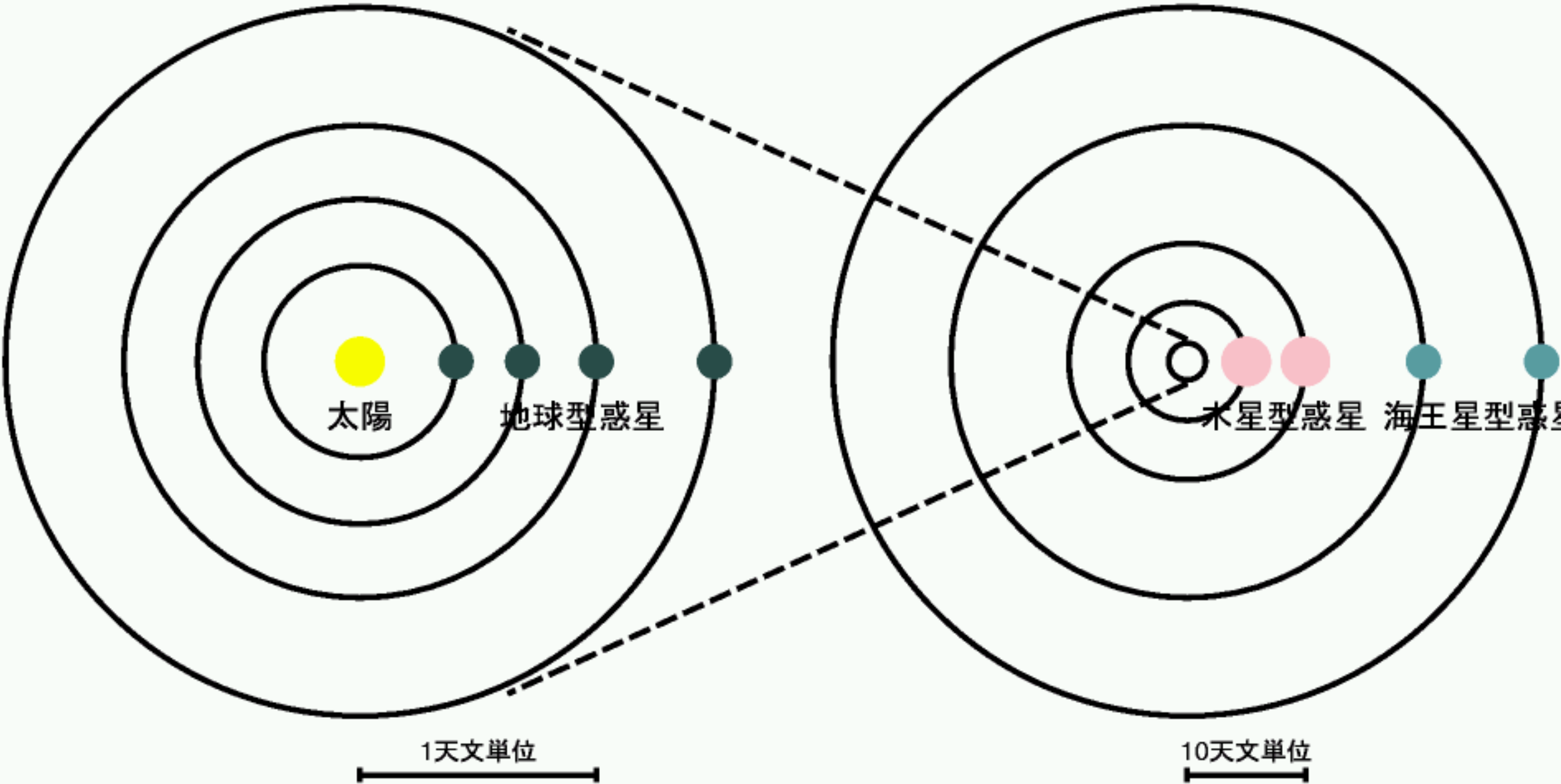
## 惑星の軌道

- ほぼ同一平面上で同方向でほぼ円軌道

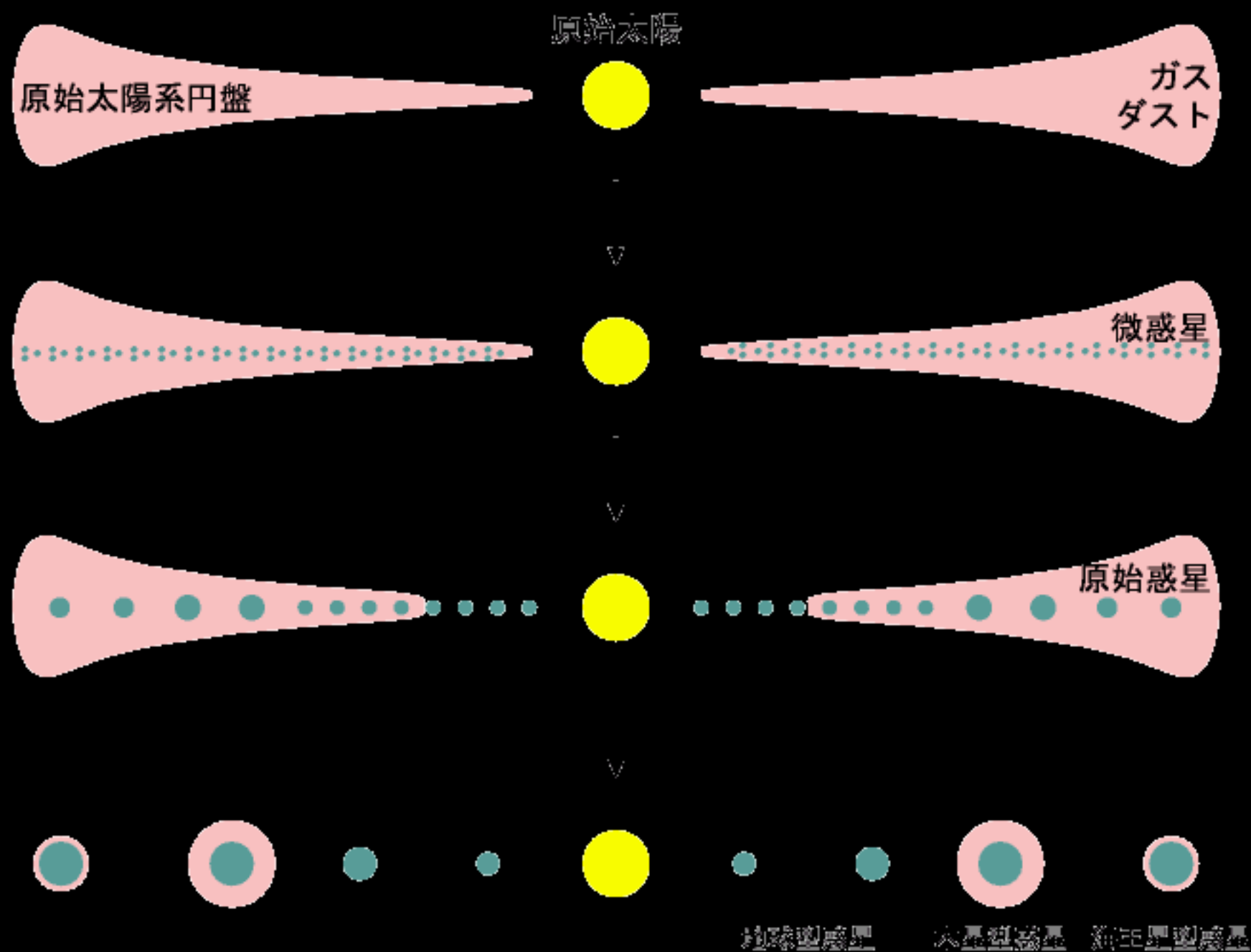
## 惑星の組成

- 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)

# 太陽系の特徴のまとめ



# 太陽系の起源



# 太陽系形成の基本的考え方-京都モデル

## 円盤仮説

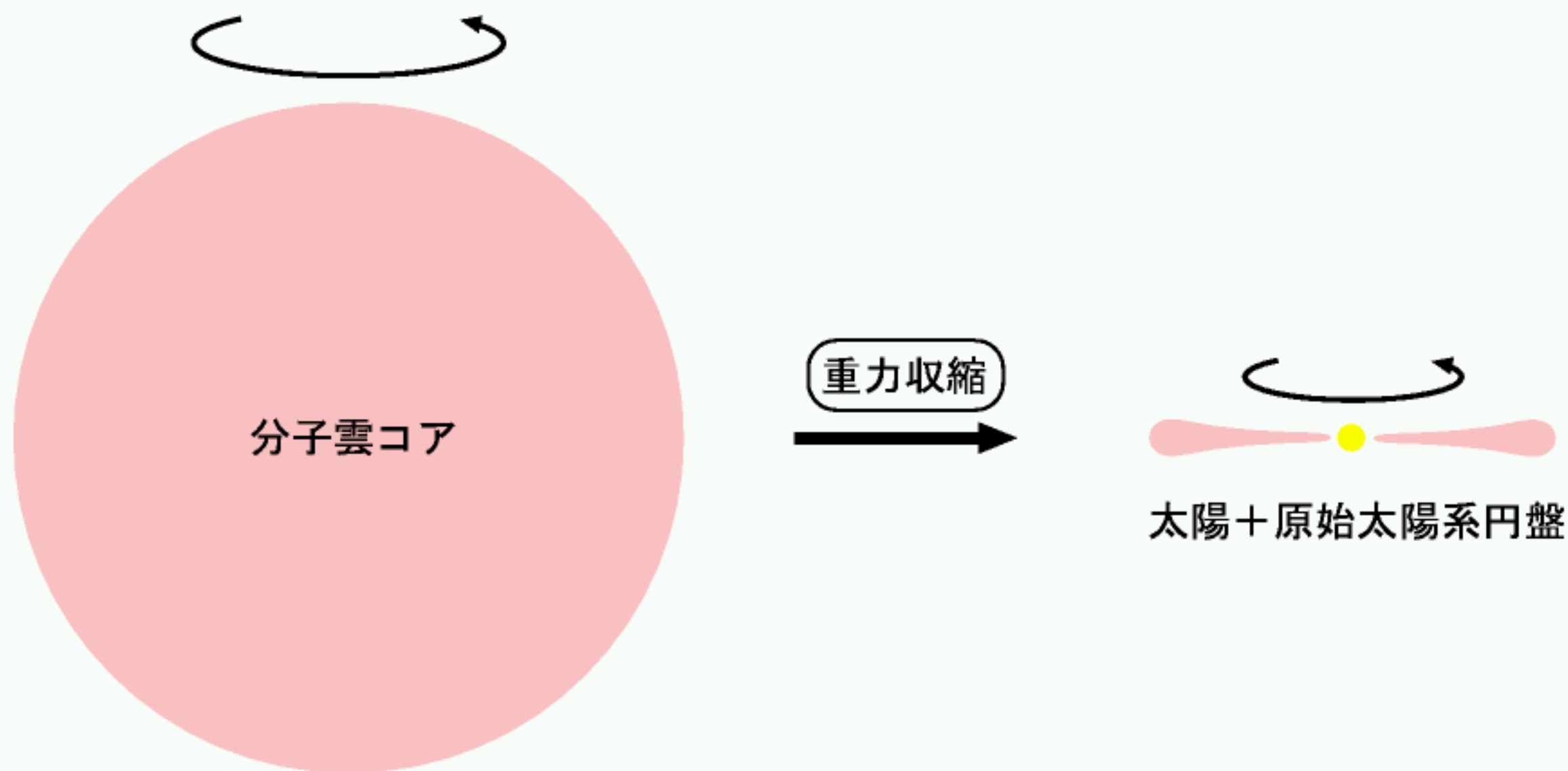
- 惑星系は星の周りの軽い円盤(原始惑星系円盤)から形成される。
- 円盤はガスとちり(ダスト)から構成される。

## 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

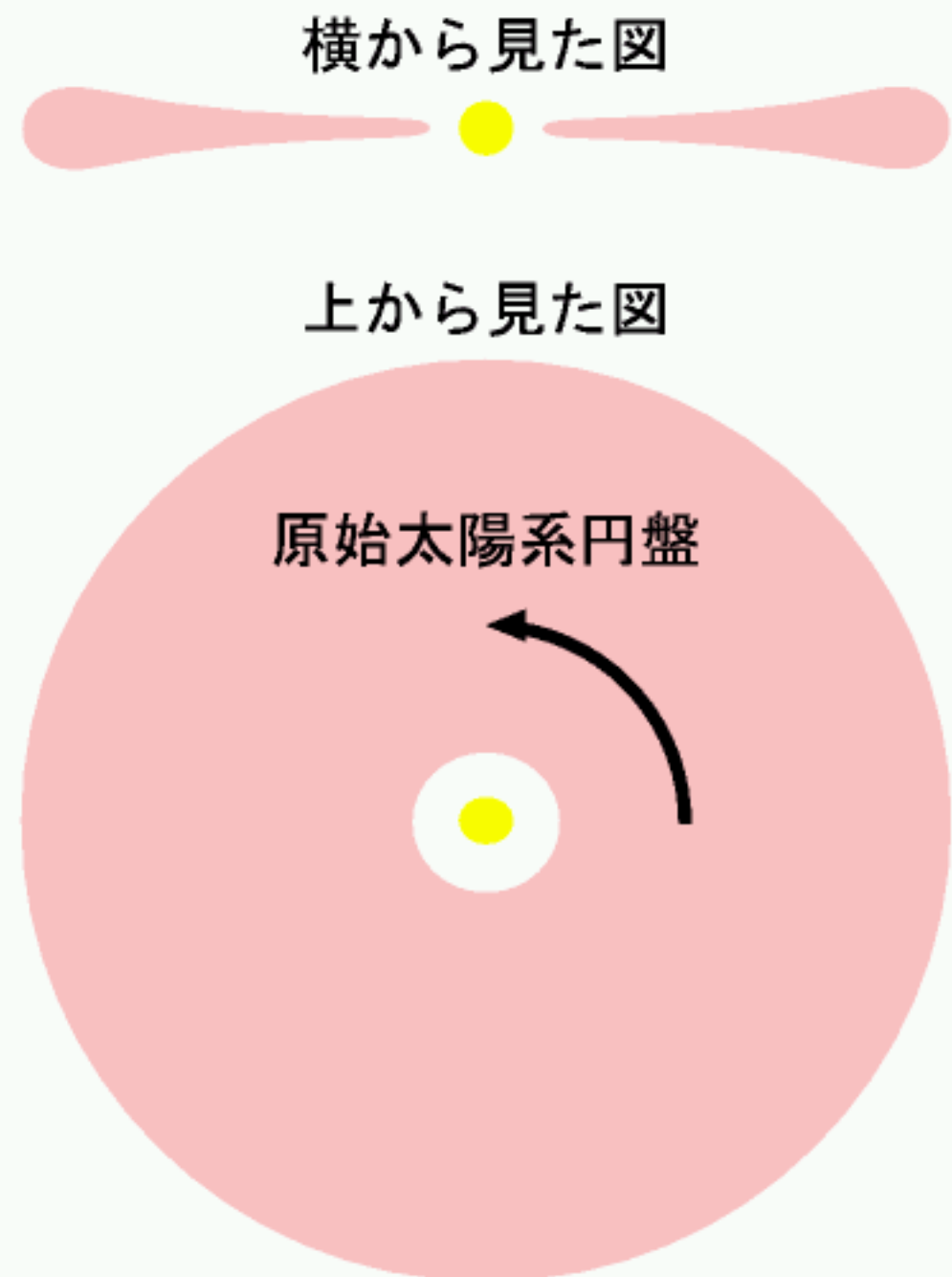
- 太陽系の惑星領域の大きさ

## 質量

- 太陽質量の1/100倍

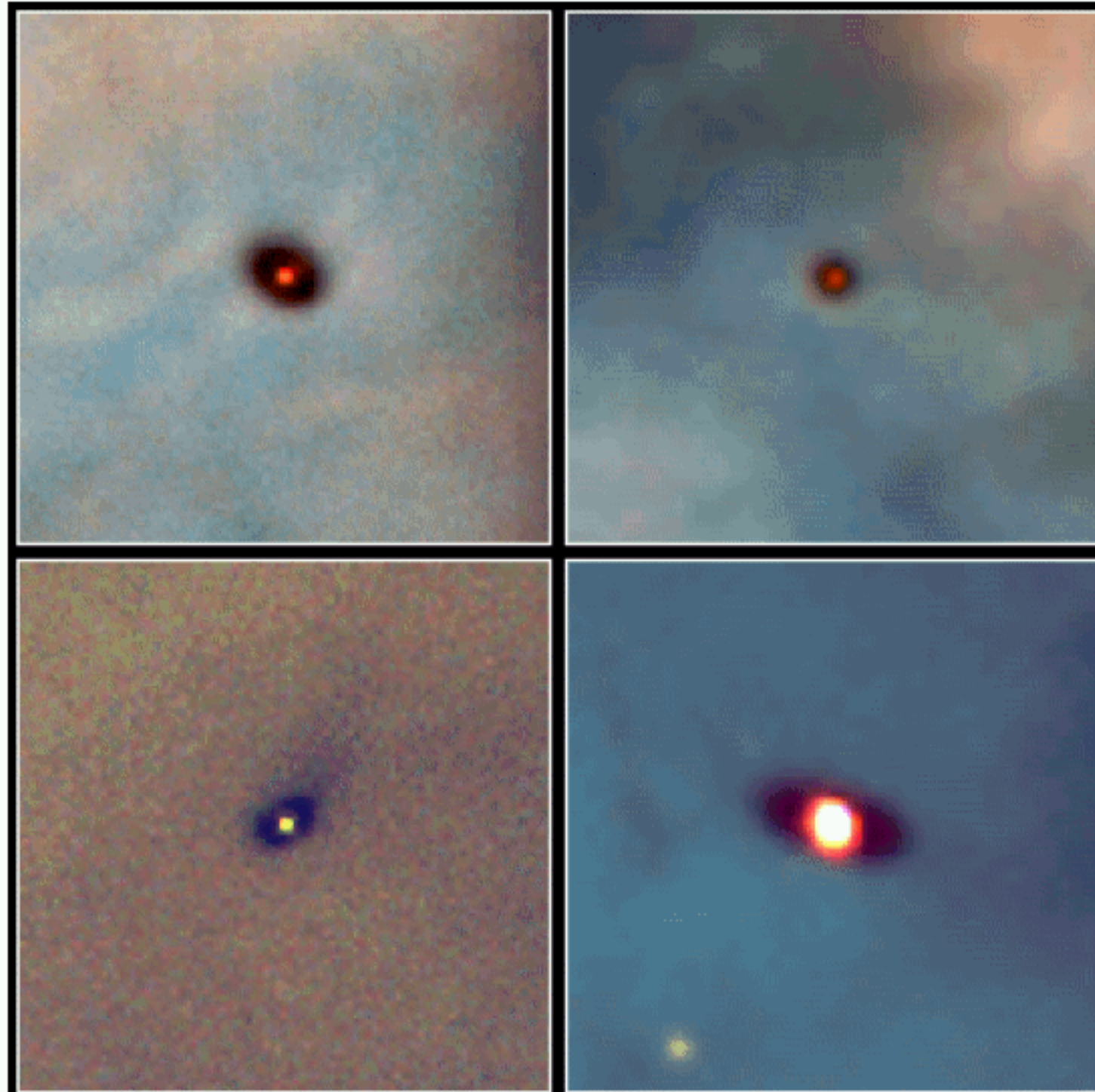
## 組成

- 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**

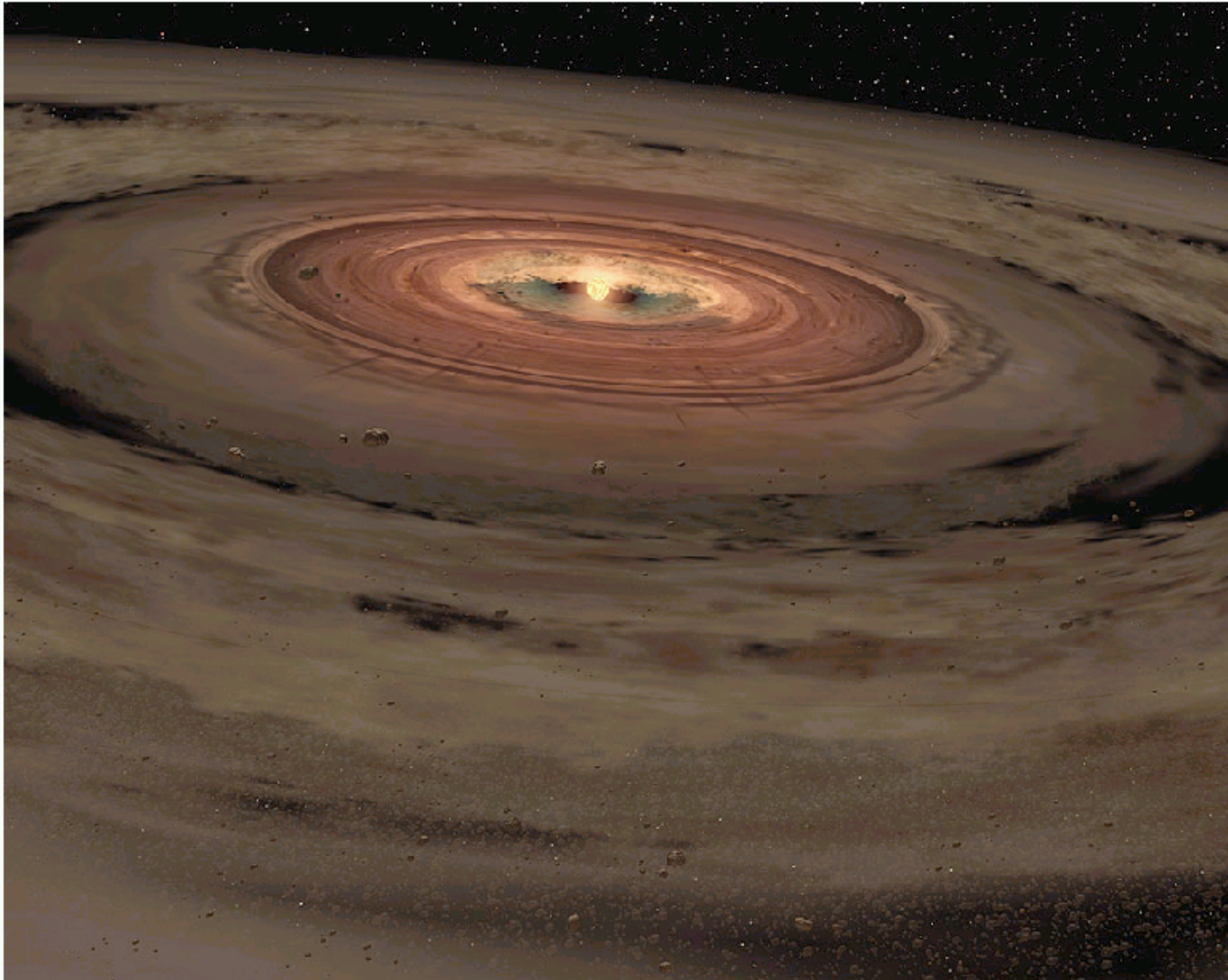
HST • WFPC2

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

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

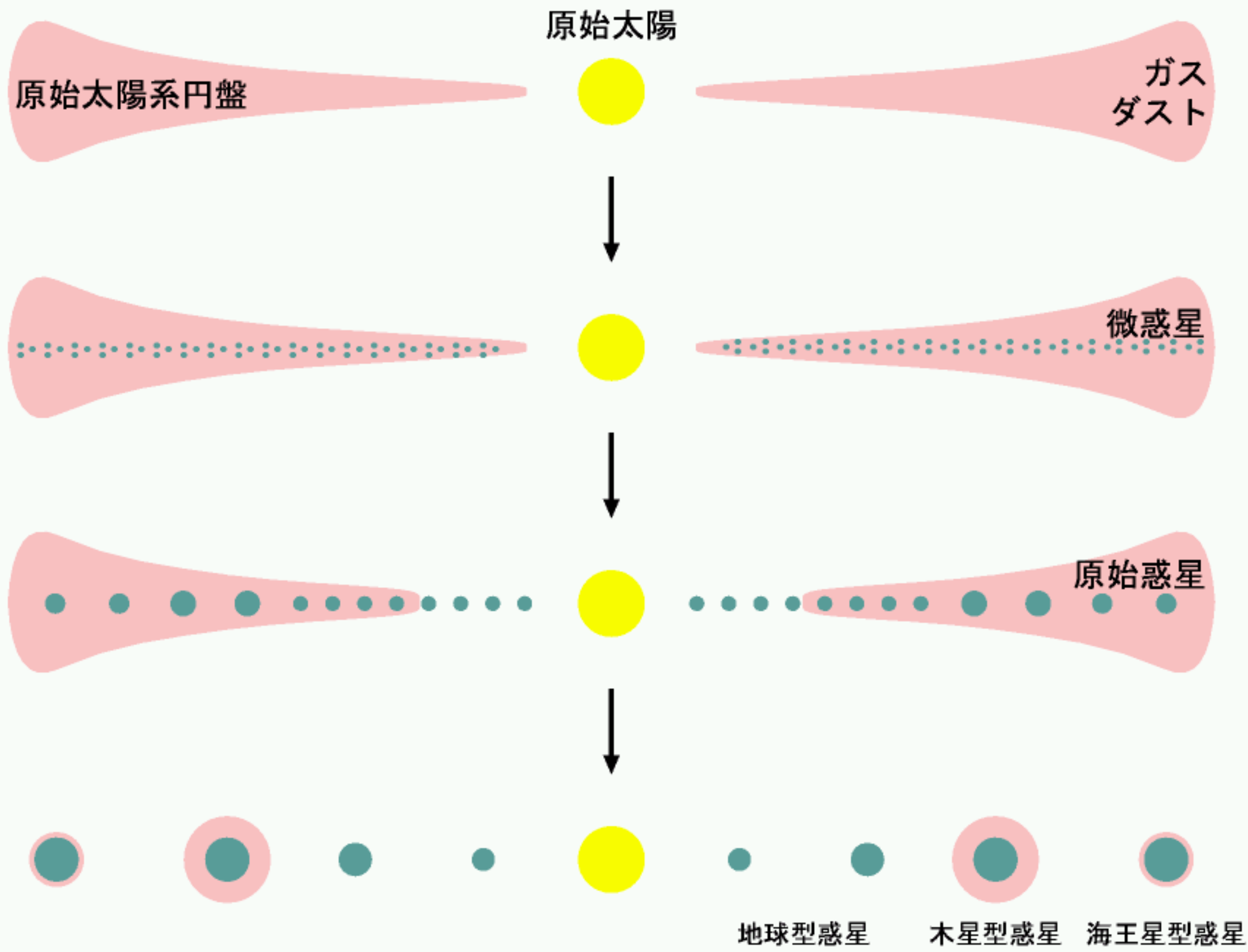


# 原始太陽系円盤(イメージ図)



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

# 太陽系形成の標準シナリオ



# 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

- 前世代星の元素合成(星くず)

## 大きさと総質量

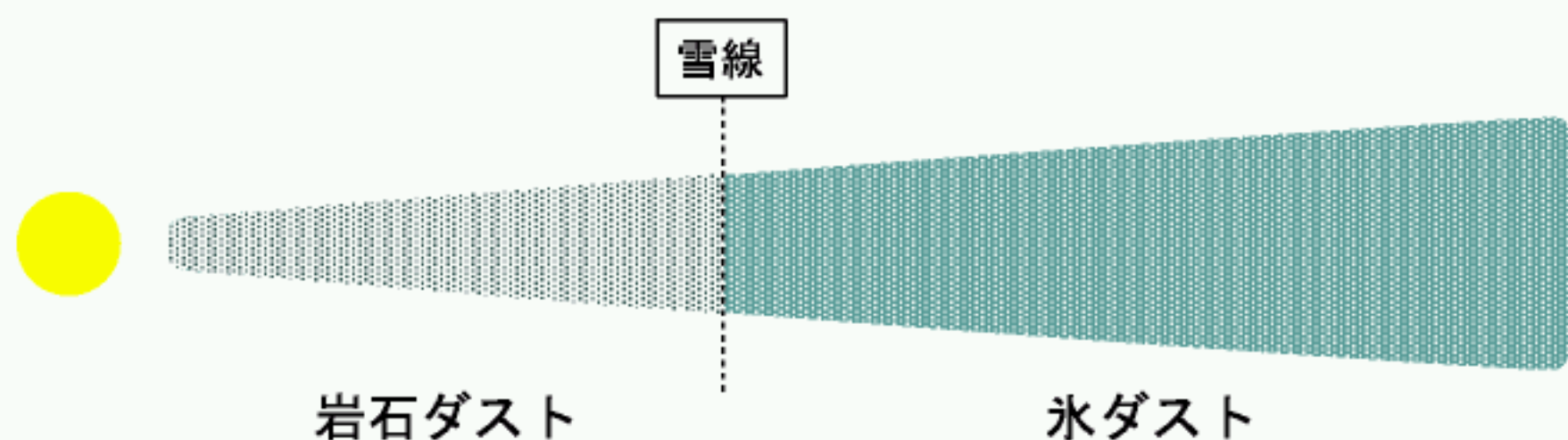
- $0.1-1\mu\text{m}$  ( $1/1000\text{mm}$ ), 太陽質量の $1/100000$ 倍

## 組成

- 雪線の内側-岩石ダスト, 外側-氷ダスト

## 雪線

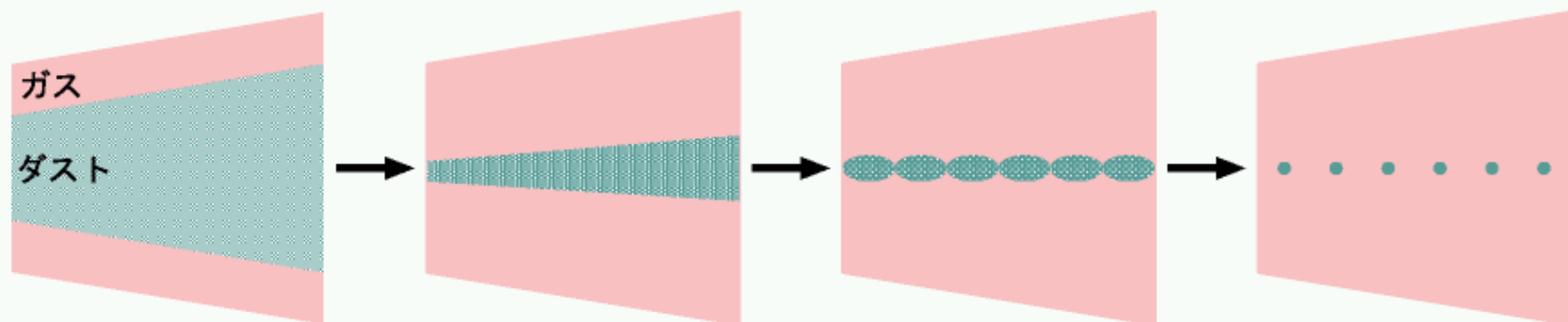
- 水が凍る太陽からの距離(約3天文単位)



# 微惑星の形成

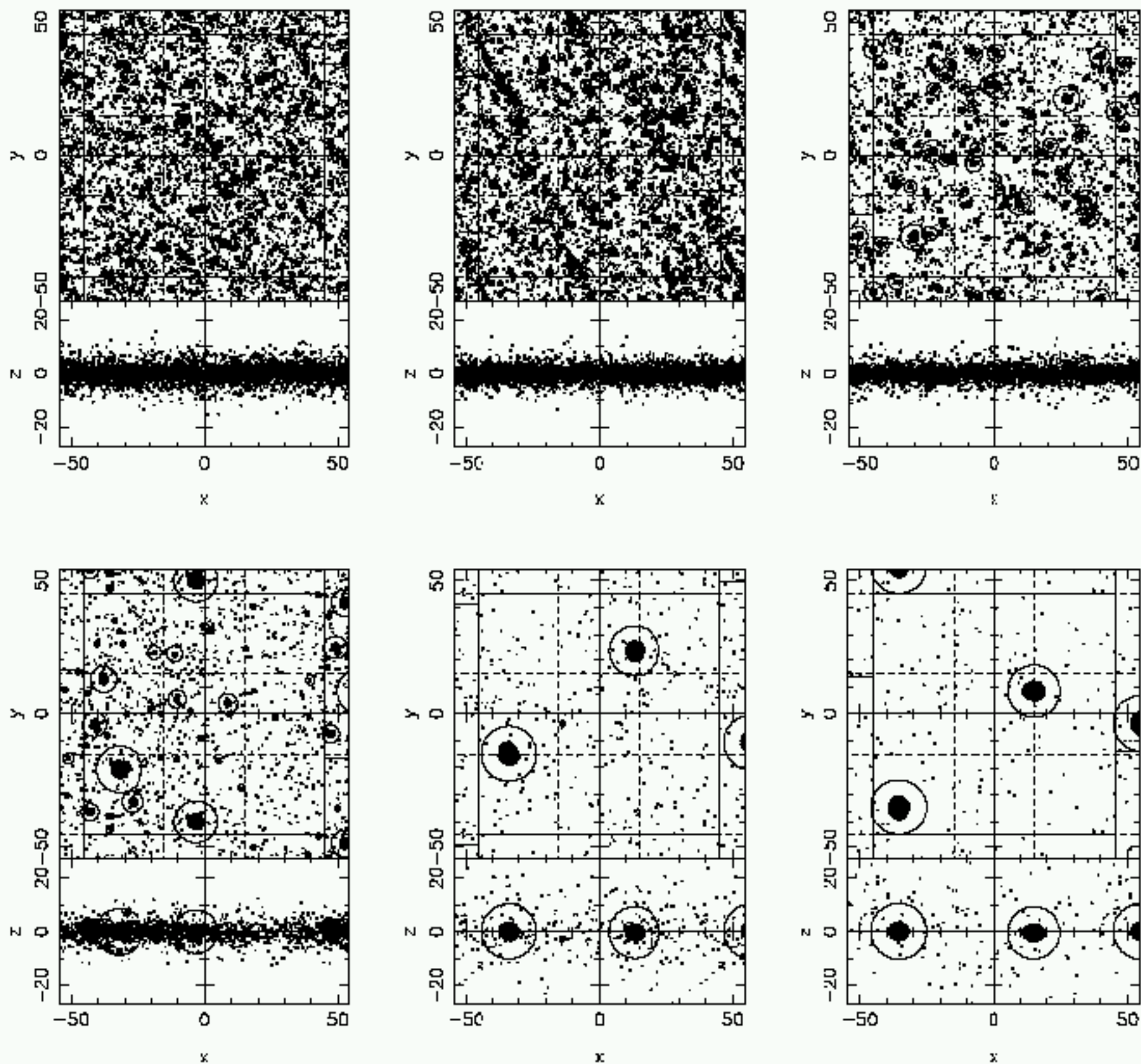
## ダストから微惑星を作る(重力不安定説)

- (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

# 微惑星形成シミュレーション





# 微惑星

## 個数

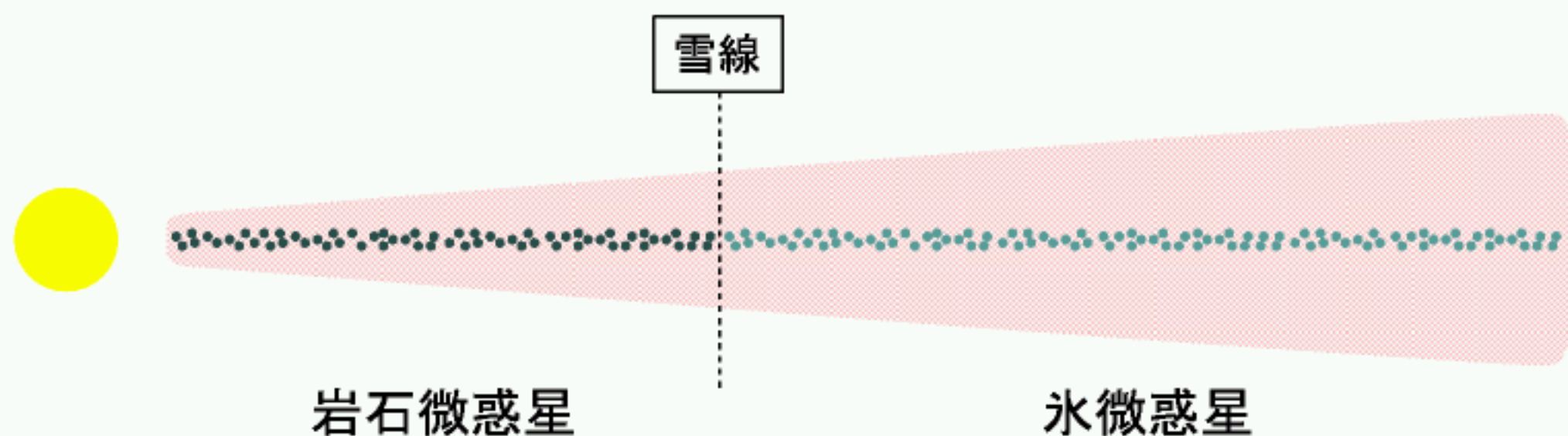
- 約1000億個

## 大きさ

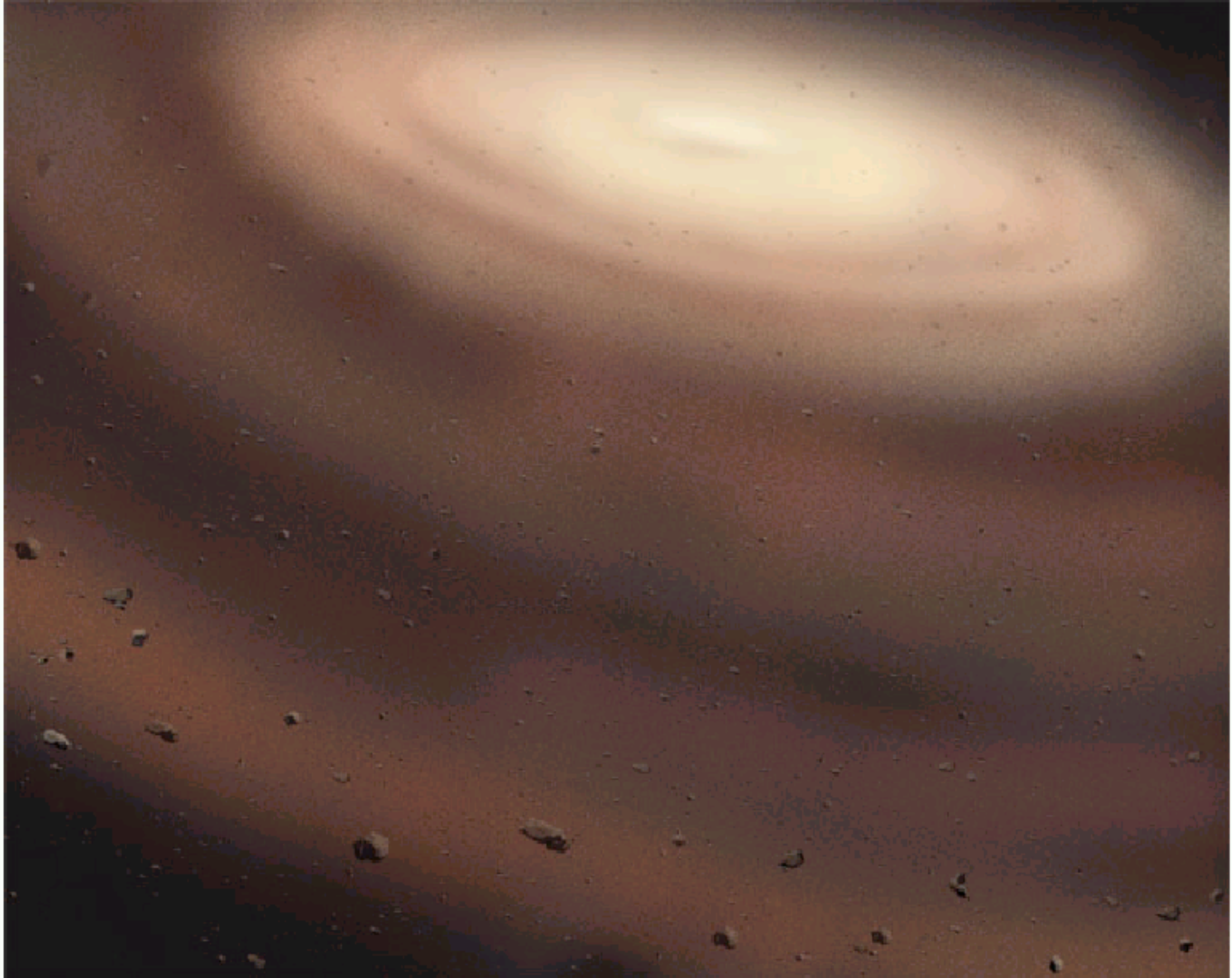
- 1-10 km(太陽から遠いほど大きい)

## 組成

- 雪線の内側-岩石微惑星, 外側-氷微惑星

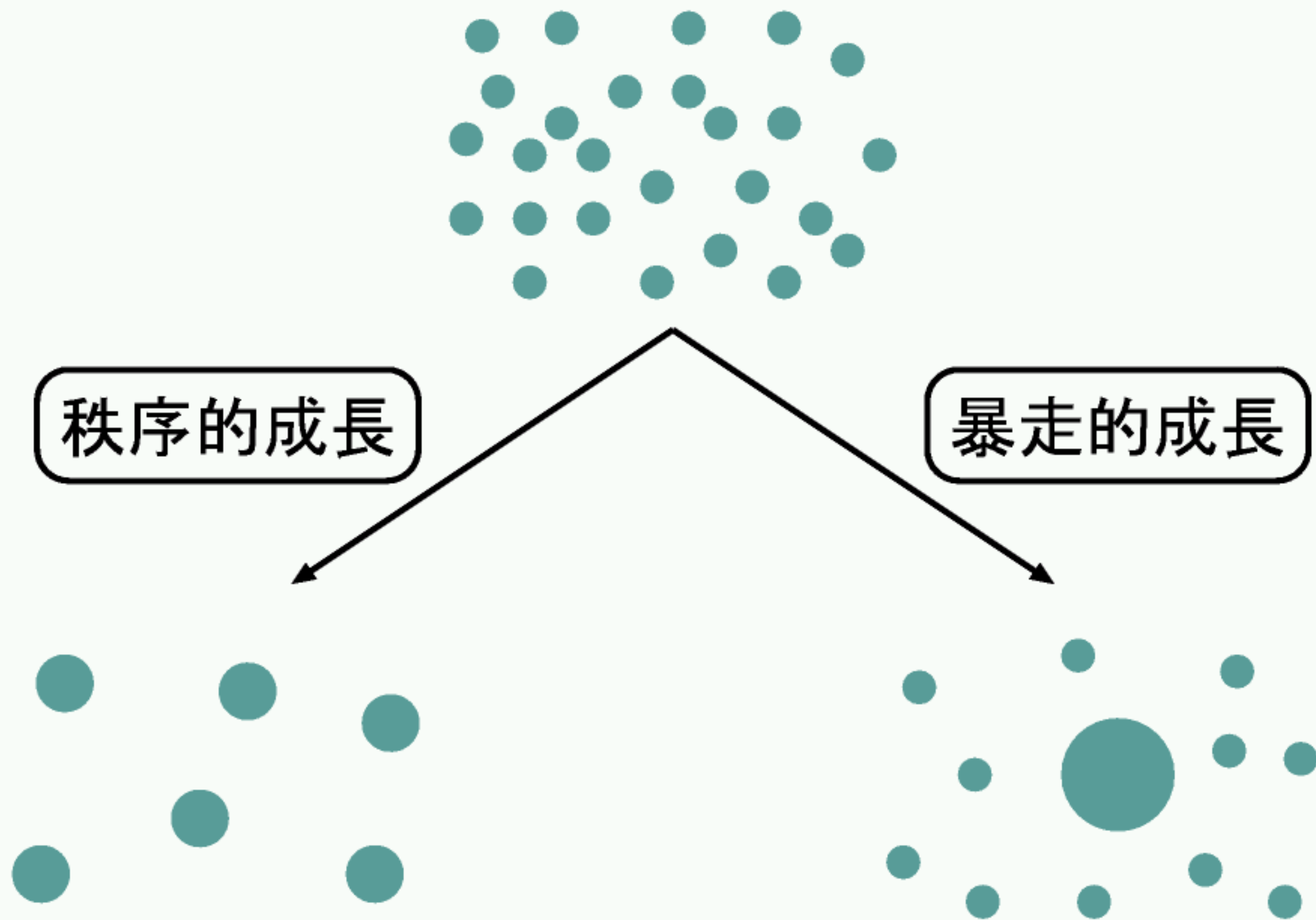


# 微惑星系(イメージ図)



Lunar and Planetary Institute

# 惑星の成長の仕方

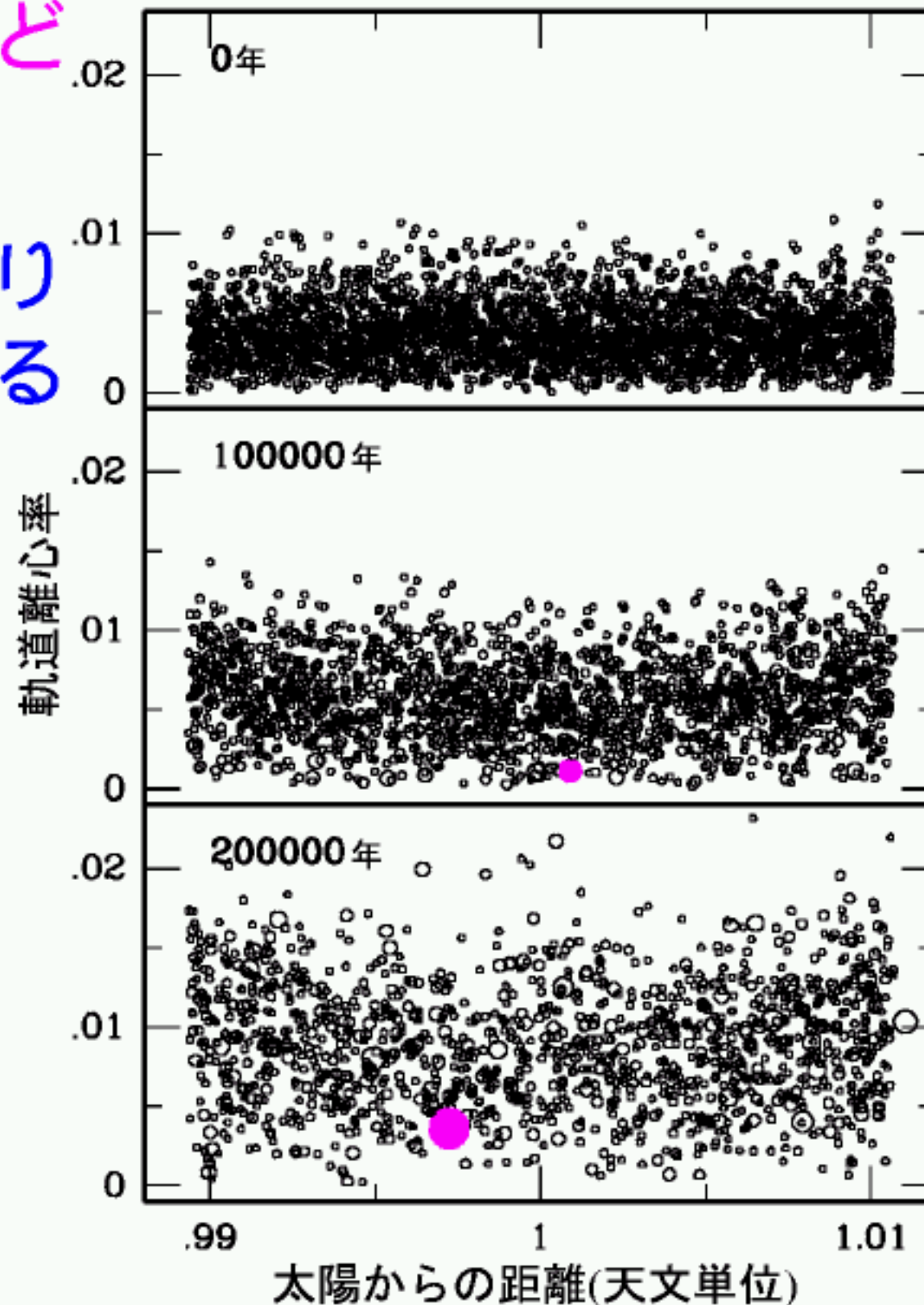


# 微惑星の暴走的成長

大きな微惑星ほど  
速く成長する

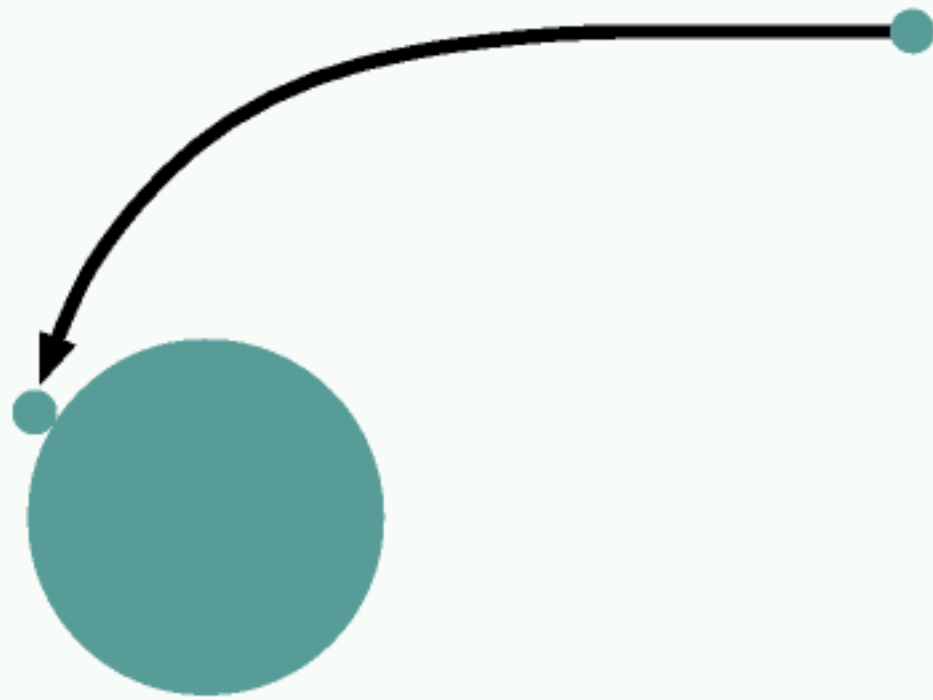
強い重力でまわりの  
微惑星を集める

暴走的成長微惑星=  
原始惑星

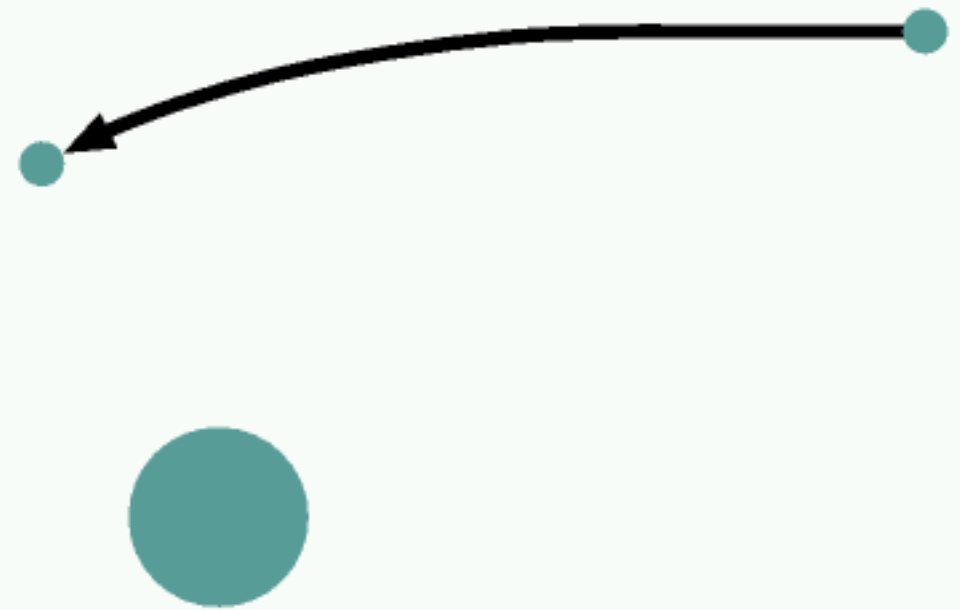




# 重力フォーカシング



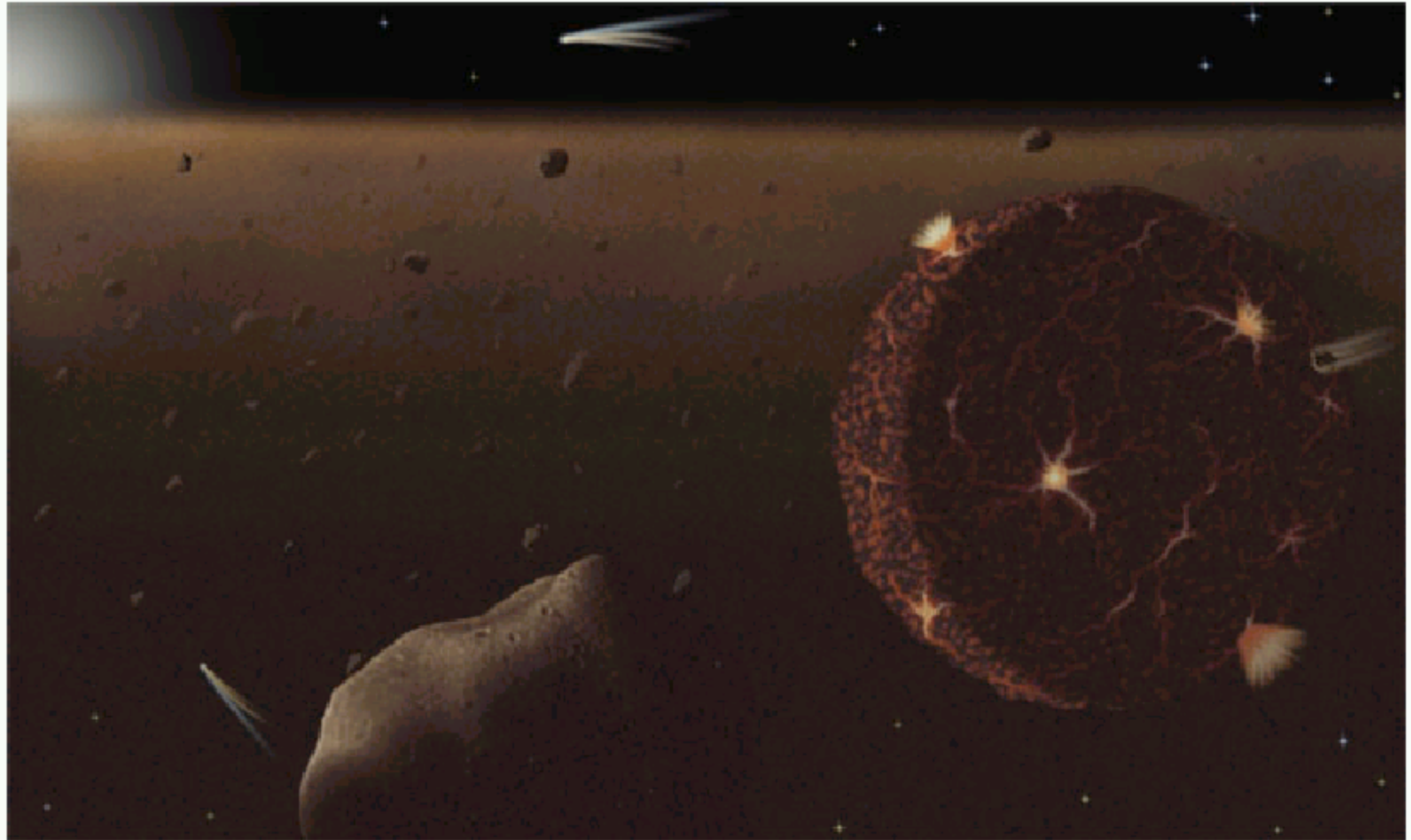
大微惑星(重力強)  
衝突



小微惑星(重力弱)  
通過

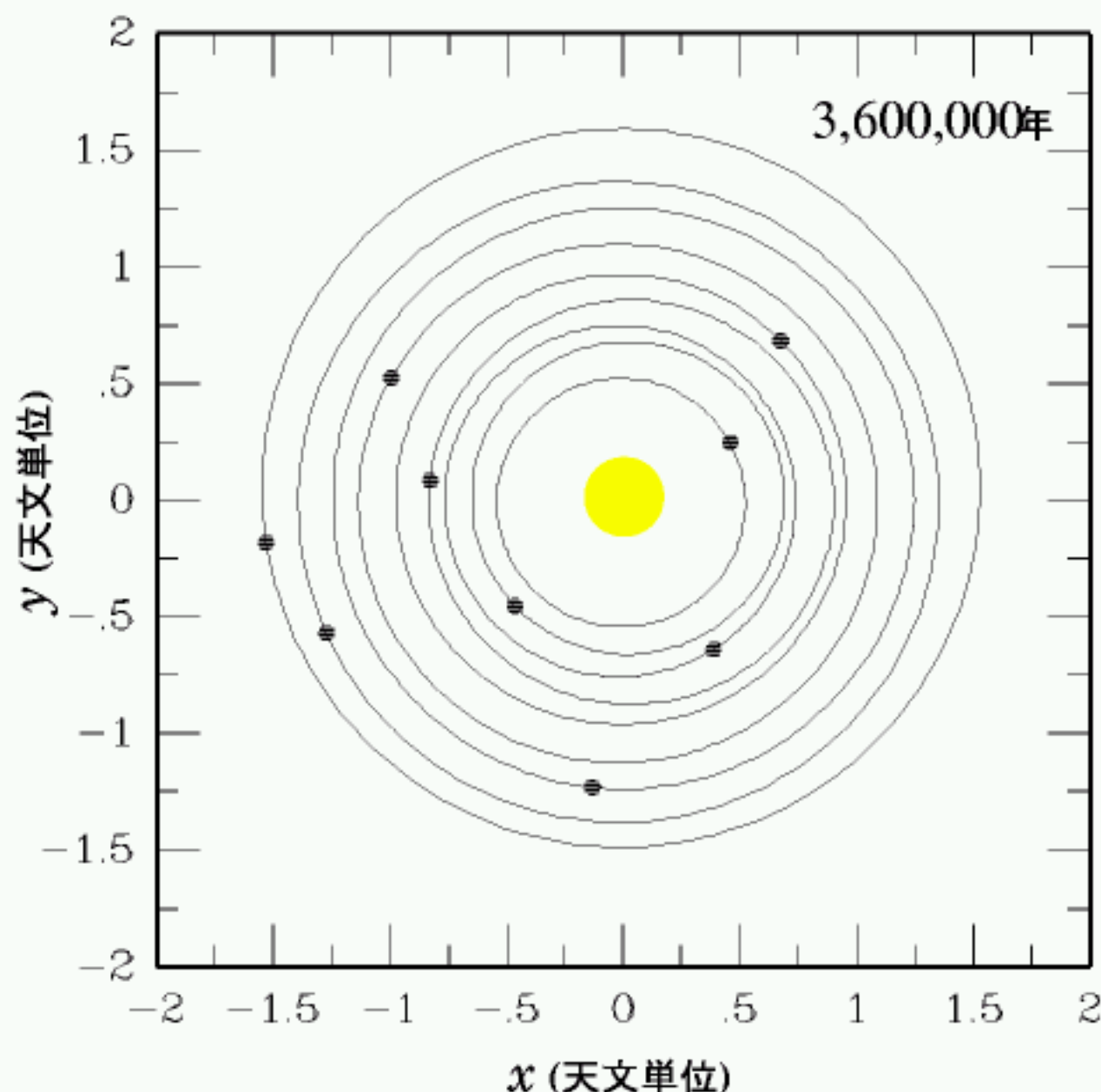
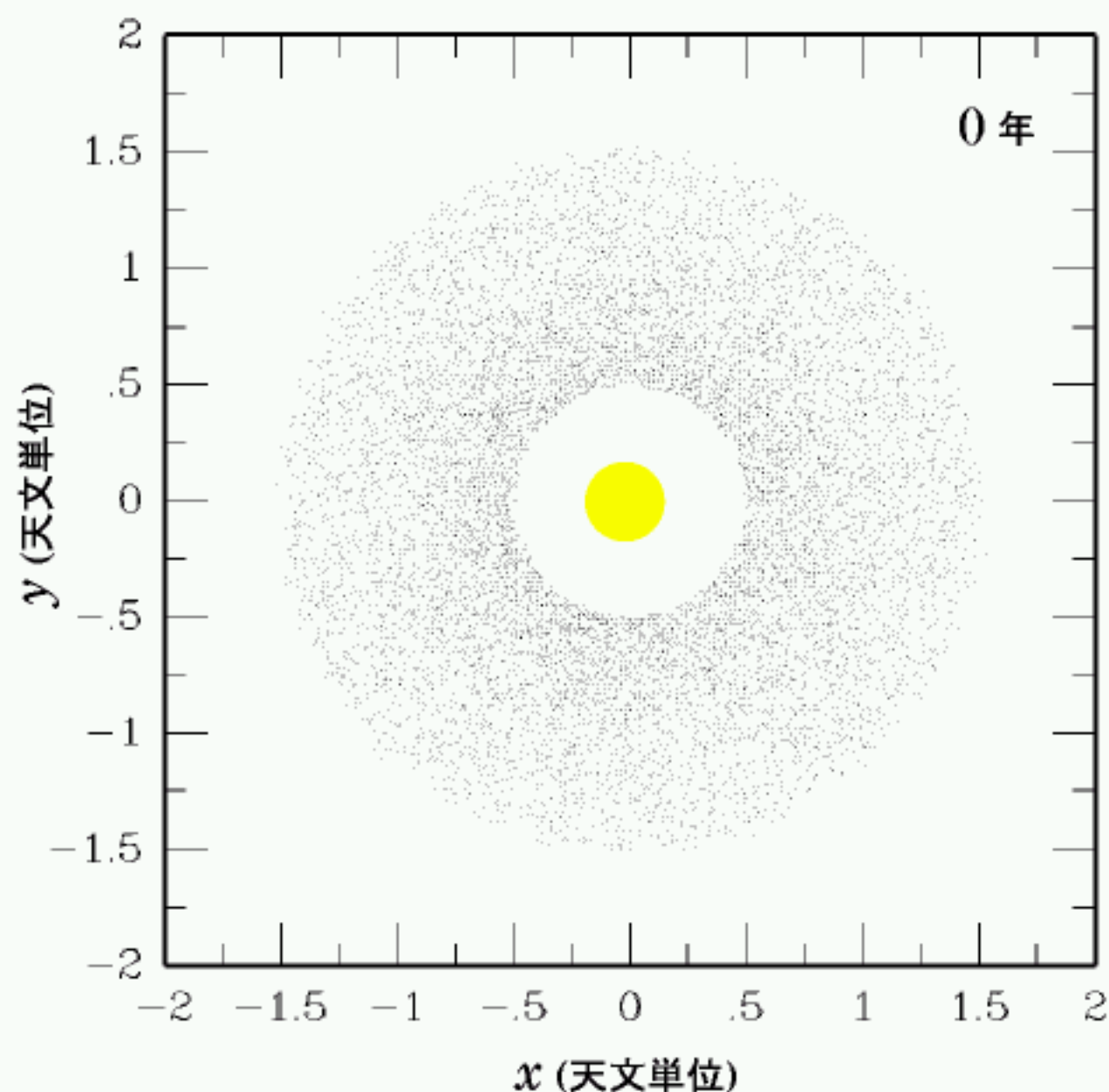
大質量の微惑星ほど速く成長する!

# 暴走的成長をする原始惑星(イメージ図)



Lunar and Planetary Institute

# 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

## 個数と質量

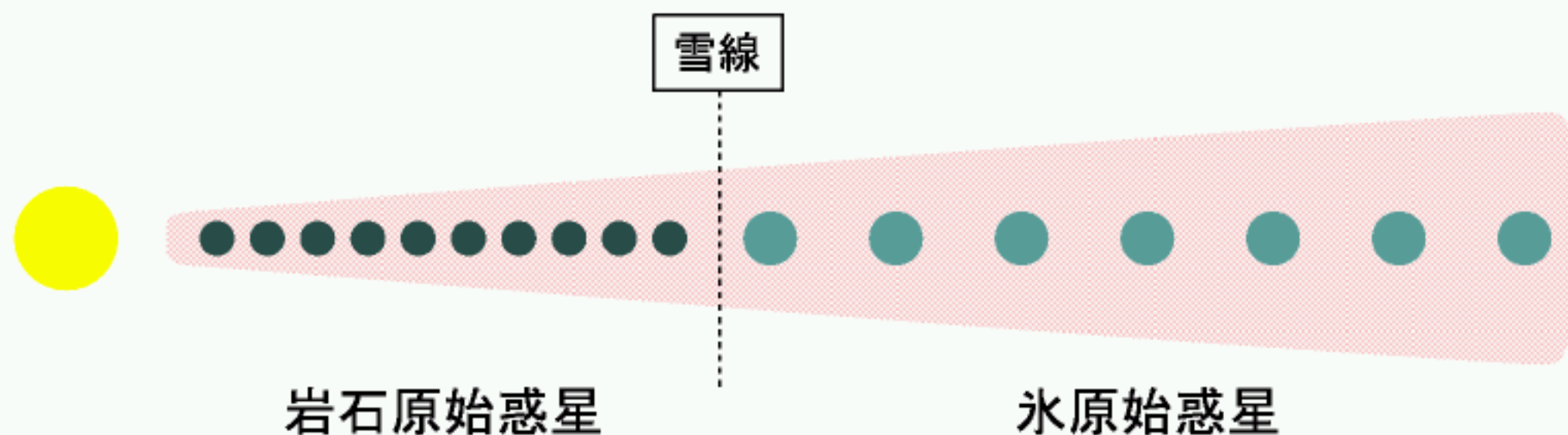
- 数10個
- 地球質量の0.1-10倍(太陽から遠いほど大きい)

## 組成

- 雪線の内側-岩石原始惑星, 外側-氷原始惑星

## 形成時間

- 100万-10億年(太陽から遠いほど長い)





# 原始惑星の質量と組成

## 地球型惑星領域

- 0.1地球質量 < 地球型惑星質量
- 岩石 = 地球型惑星組成

原始惑星どうしの巨大衝突

## 木星型惑星領域

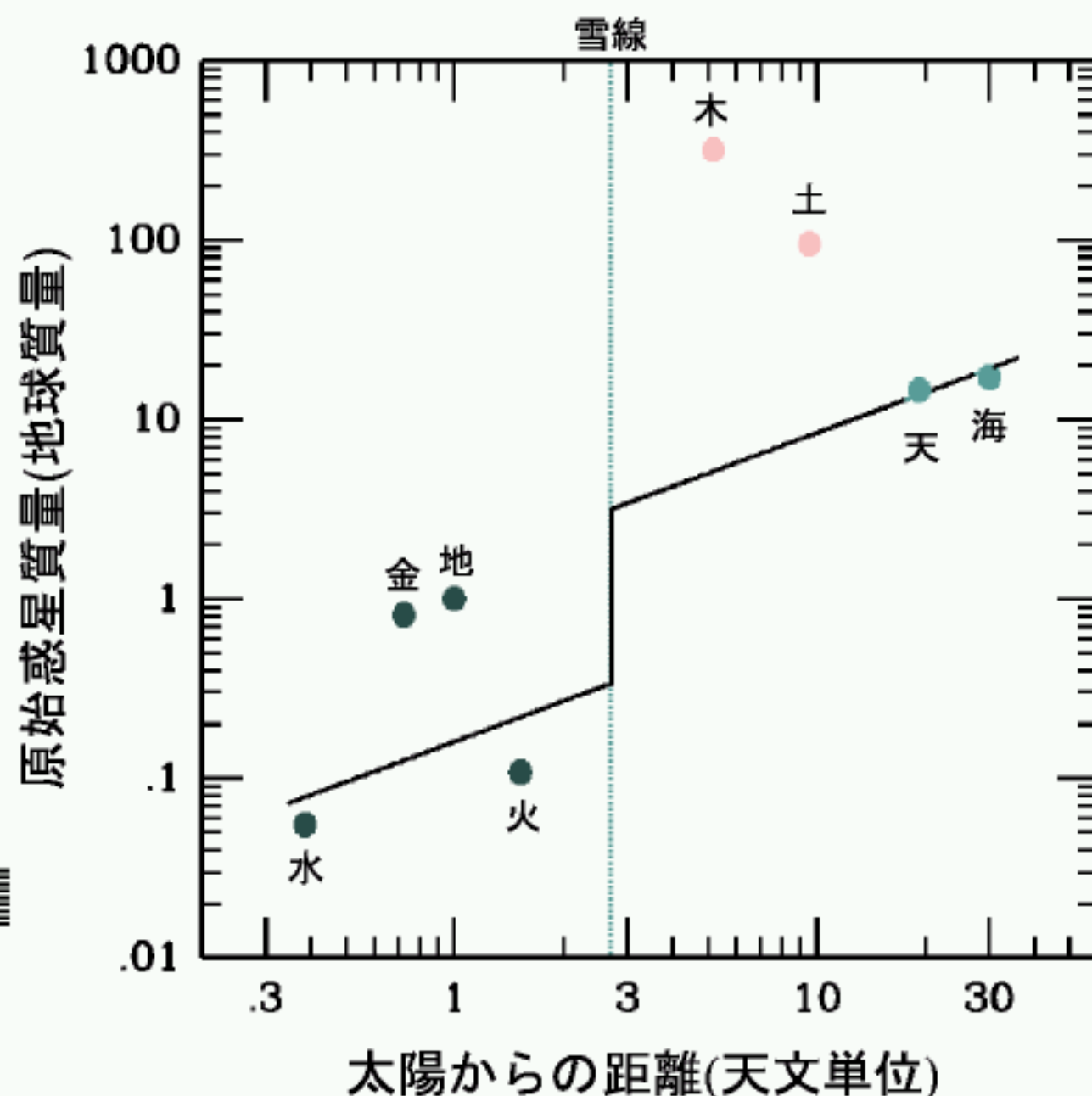
- 10地球質量 ≪ 木星型惑星質量
- 氷 ≠ 木星型惑星組成

原始惑星によるガス降着

## 海王星型惑星領域

- 15地球質量 = 海王星型惑星質量
- 氷 = 海王星型惑星組成

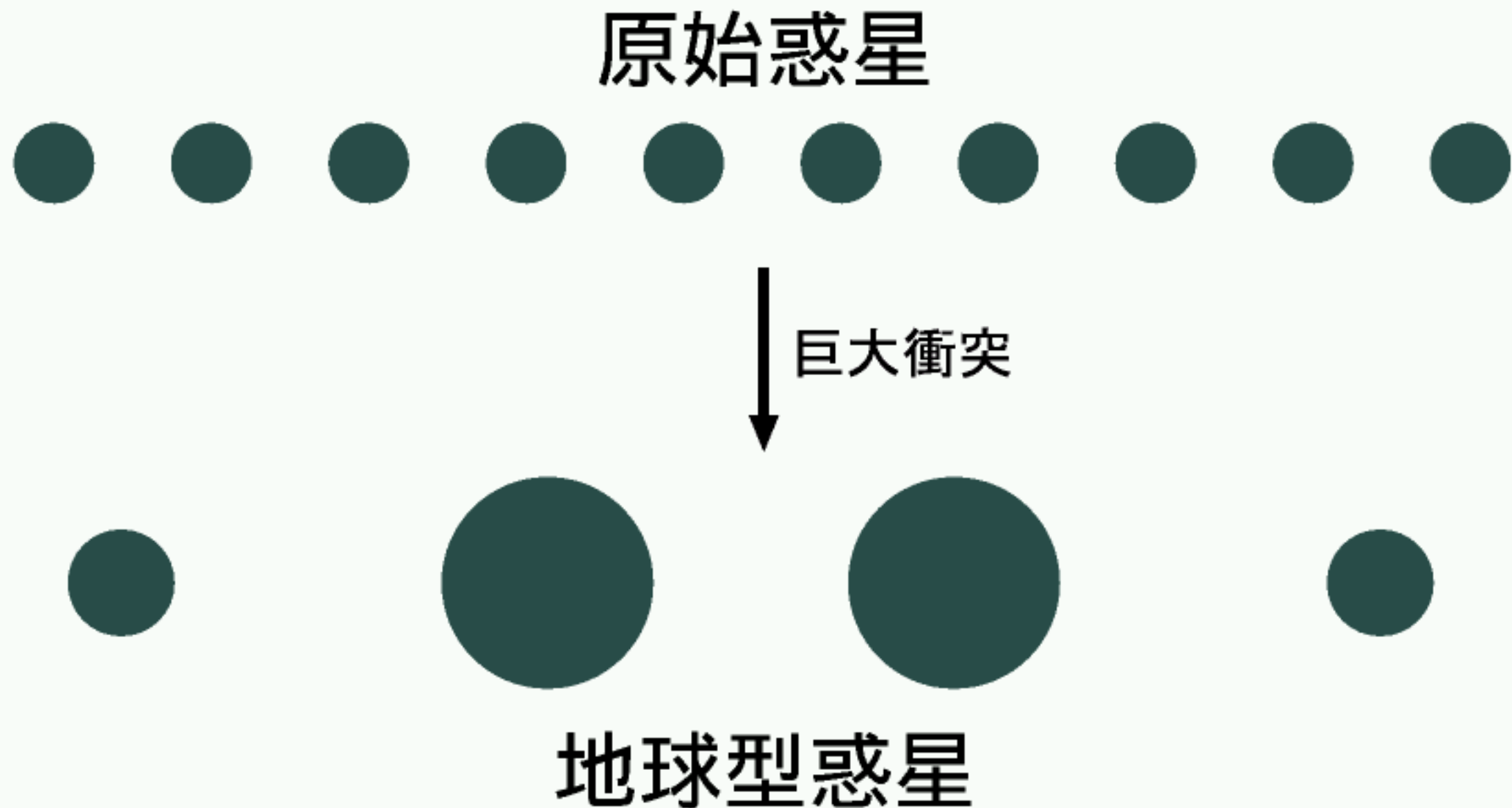
海王星型惑星は原始惑星



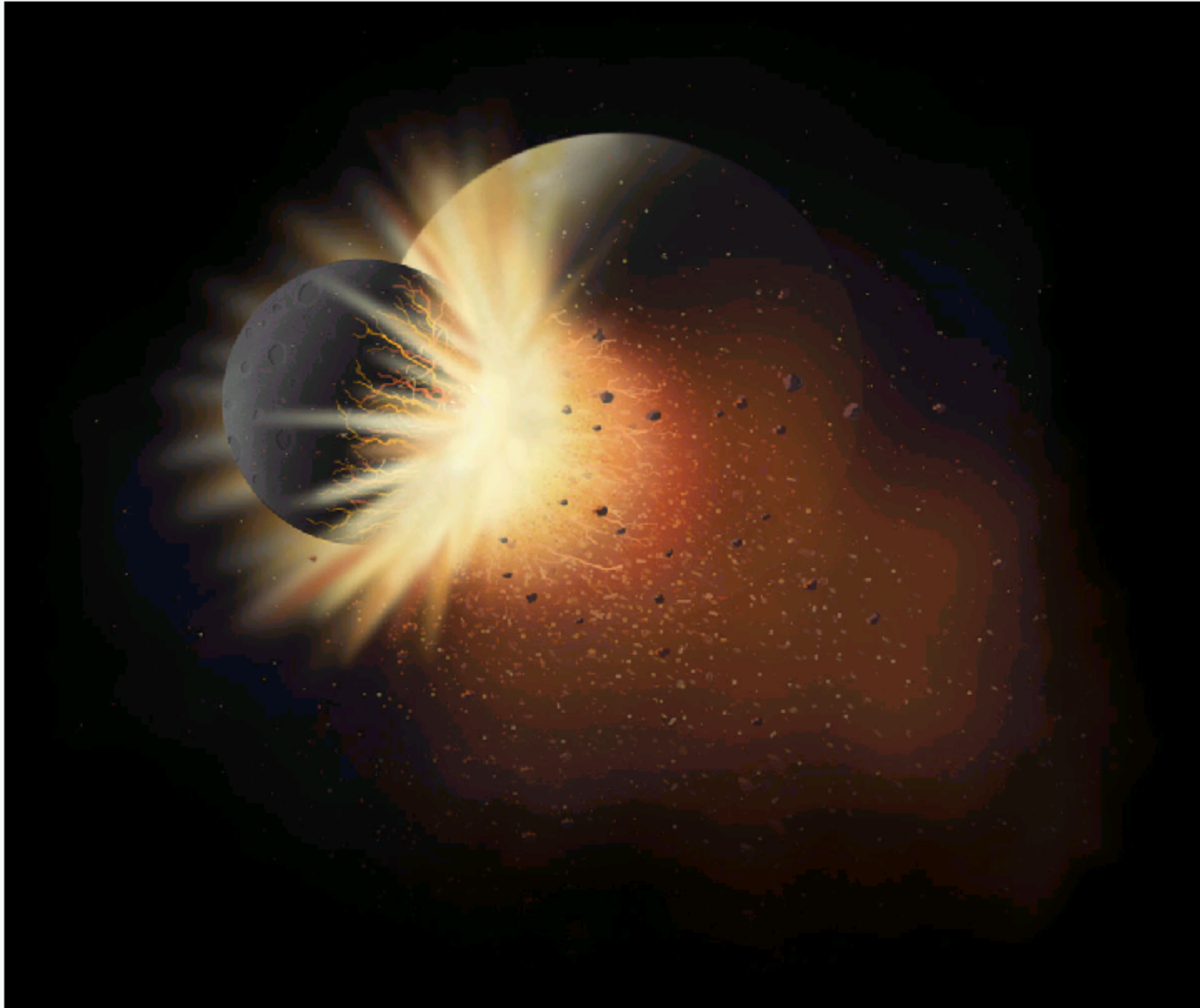
# 原始惑星から地球型惑星へ

原始惑星の質量 $\sim 0.1$ 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

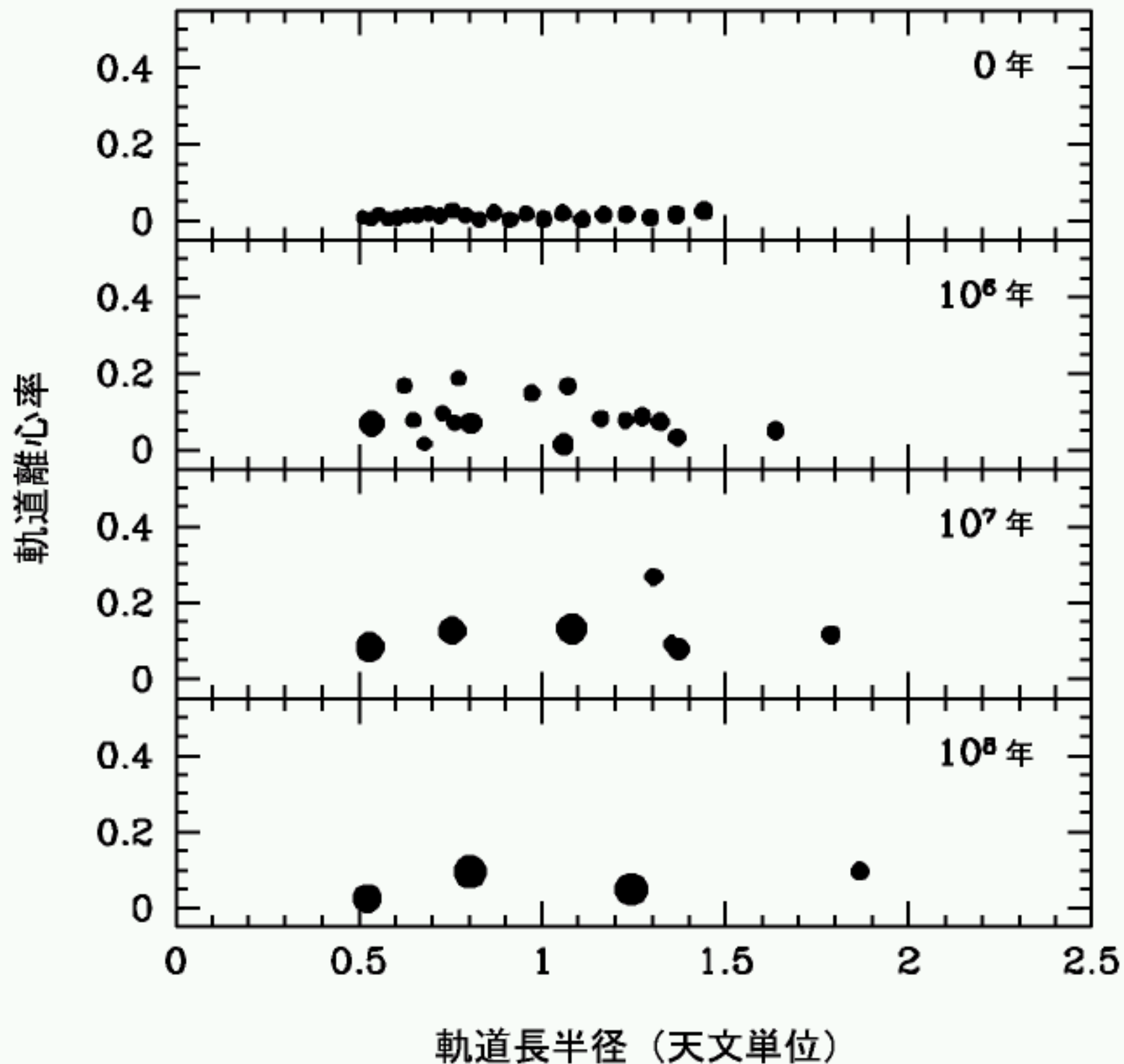


# 巨大衝突(イメージ図)



Lunar and Planetary Institute

# 地球型惑星形成シミュレーション



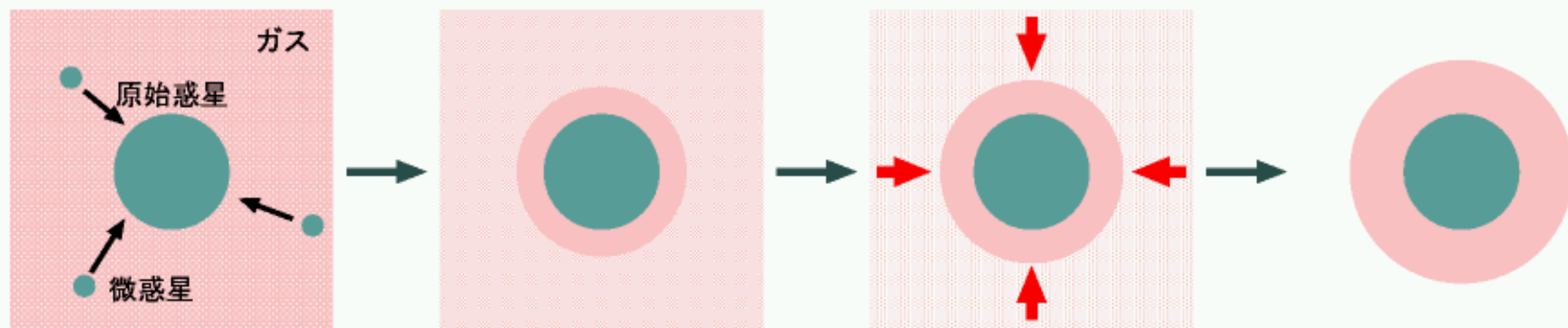


# 原始惑星から木星型惑星へ

原始惑星の質量＝10地球質量≪木星型惑星質量

## 重力によるガス捕獲

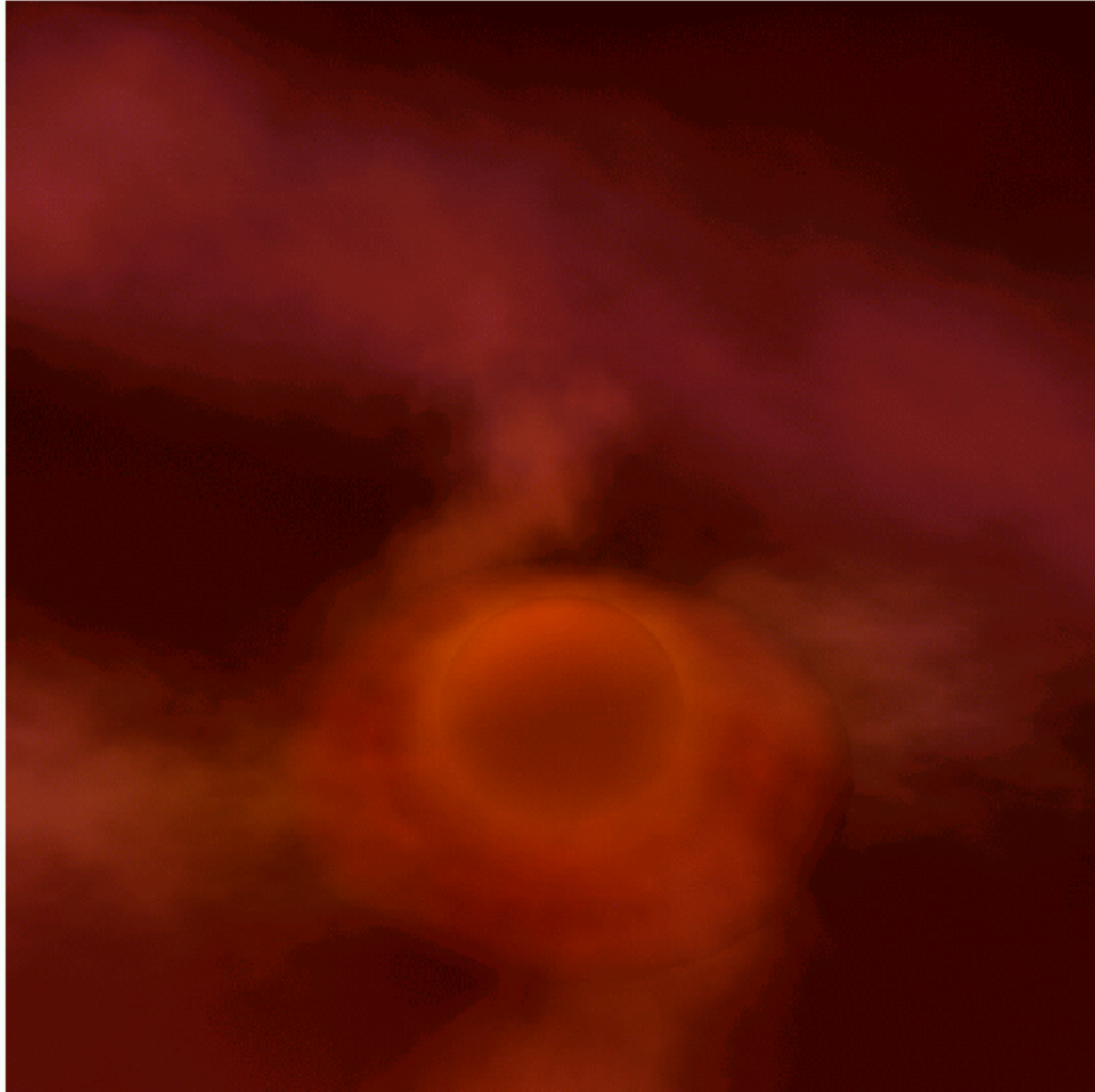
- (1)原始惑星は重力の強さに応じた大気をもつ
- (2)大気が多くなると原始惑星の質量が大きくなる
- (3)質量が大きくなりすぎると大気をささえられなくなる
- (4)まわりに存在する円盤ガスが落ち込む



ガス惑星になれる条件1:

原始惑星の質量＞ガス捕獲臨界質量＝約10地球質量

# 原始惑星のガス捕獲(イメージ図)



「もう一つの地球」(科学未来館)

# 原始惑星から海王星型惑星へ

原始惑星の質量＝15地球質量＝海王星型惑星質量

木星型惑星になりそこなった原始惑星！

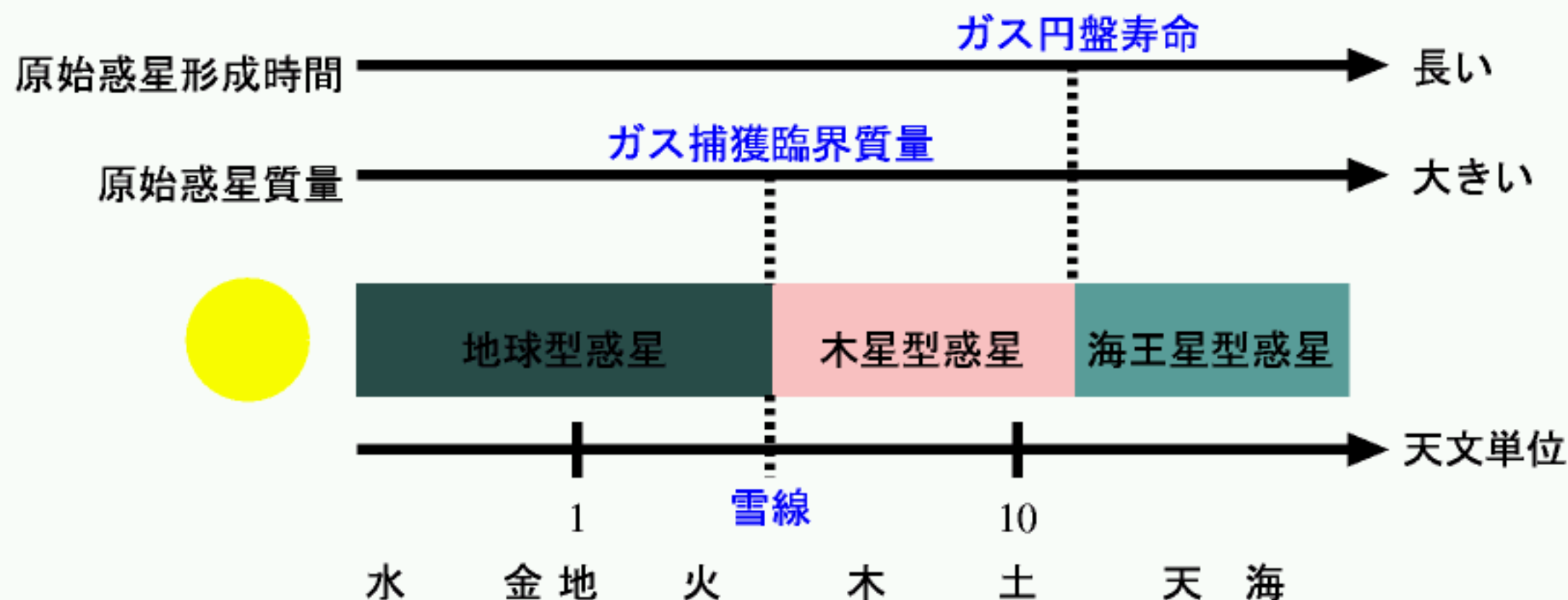
## 海王星型惑星領域

- 原始惑星の質量 > ガス捕獲臨界質量  
→ ガス惑星になれる？
- 原始惑星の形成時間 > ガス円盤の寿命  
→ ガス惑星になれない！！

ガス惑星になれる条件2:

原始惑星の形成時間 < ガス円盤の寿命＝約1000万年

# 惑星の住み分け



## 地球型惑星領域

- 雪線の内側  $\cap$  原始惑星質量 < ガス捕獲臨界質量

## 木星型惑星領域

- 原始惑星質量 > ガス捕獲臨界質量  $\cap$  原始惑星形成時間 < ガス円盤寿命

## 海王星型惑星領域

- 雪線の外側  $\cap$  原始惑星形成時間 > ガス円盤寿命

太陽からの距離が惑星の種類を決める!



# 小天体系の起源

## 小惑星帯

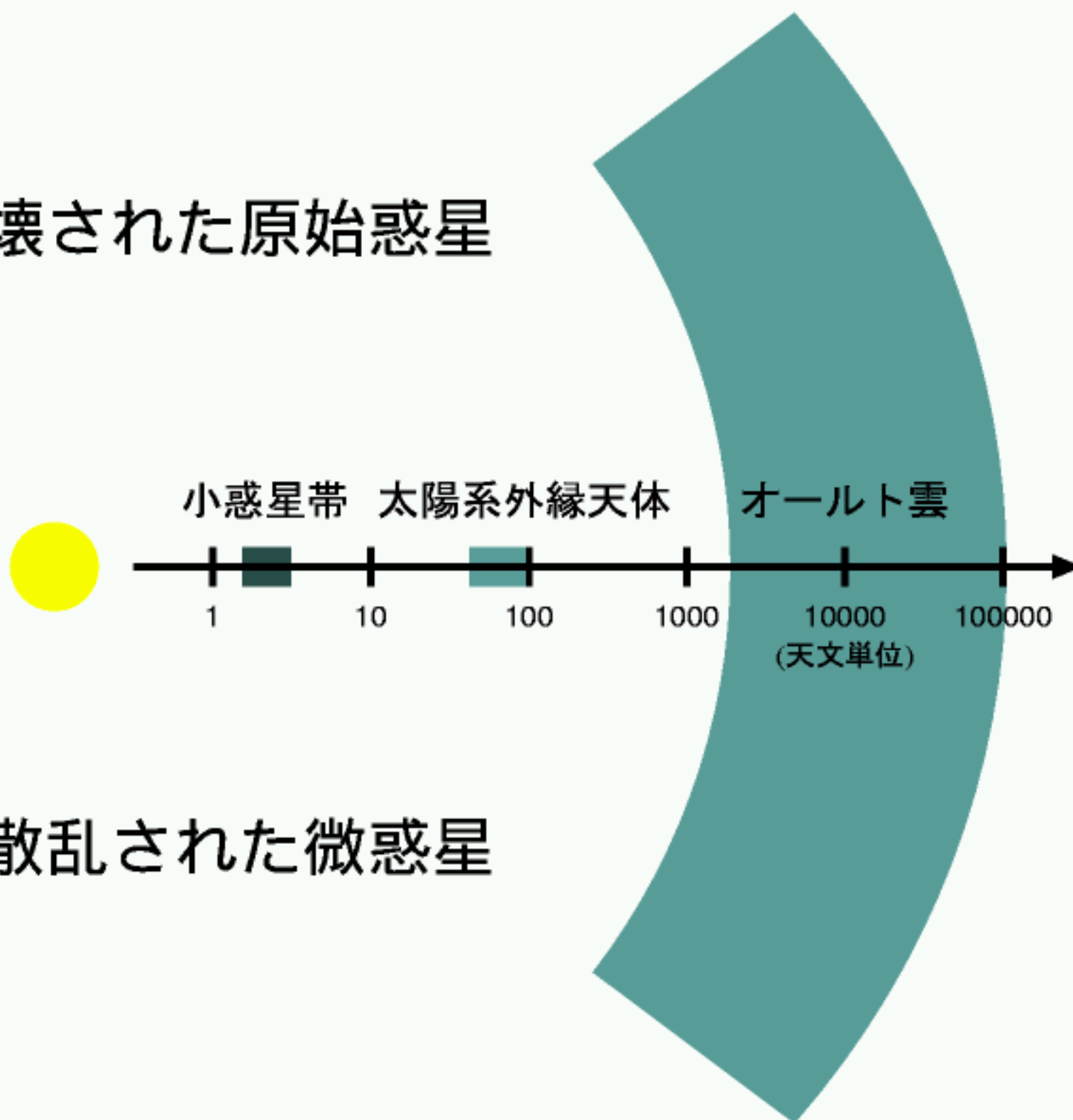
- 微惑星の生き残り
- 高速衝突により破壊された原始惑星

## 太陽系外縁天体

- 微惑星の生き残り

## オールト雲

- 巨大惑星によって散乱された微惑星



# 残されている問題

---

## 微惑星形成

- 原始惑星系円盤の状態？

## 海王星型惑星形成

- 太陽系年齢内に形成可能？

## 原始惑星系円盤消失

- いつどうやって？

## 惑星の移動

- ガス円盤と惑星の相互作用？

## 衛星・環の起源

- いつどうやって？

# 各惑星の問題点

---

## 水星

- なぜ鉄のかたまりなのか？

## 金星

- なぜ逆行自転なのか？

## 火星

- なぜ小さい？

## 木星

- なぜそこにあるのか？

## 土星

- 環はどうやってできたのか？

## 天王星・海王星

- いつどうやってできたのか？

# 太陽系の未来(軌道安定性)

---

## 惑星

- **安定**: 今後50億年間、軌道(長半径、離心率、傾斜角)は現在の軌道からほとんど変化しない

## 太陽系小天体(小惑星・彗星)

- **不安定**: 惑星の重力や衝突などによって軌道を大きく変化させる天体もある



# 太陽系の最後

---

## 太陽の死

- 約50億年後: 主系列星→赤色巨星→白色矮星

## 惑星の運命

- 水星・金星: 巨星に飲みこまれる(?)
- 地球以遠の惑星: 軌道を広げる(?)

## 最後の姿

- 冷えきった白色矮星と6個の惑星(?)

# まとめー太陽系の構造と起源

---

## 太陽系には3種類の惑星がある

- 地球型(岩石), 木星型(ガス), 海王星型(氷)

## 太陽系は原始太陽系円盤から形成される

- ダスト(ちり)→微惑星→原始惑星→惑星
- 形成時間約10億年

## 水金地火木土天海の並びは自然に説明される

- 雪線 → 岩石か氷か
- 原始惑星の質量・形成時間, ガス円盤の寿命 → ガス惑星になれるか

# 今後の展望

---

## 原始惑星系円盤の普遍性と多様性

- 若い星の約50%に存在している
- 円盤の質量と形は多様である

## 惑星系の普遍性と多様性

- 太陽型星の約10%に存在している(現在900個以上!)
- 異形の(?)惑星たちがいた!
  - 灼熱巨大惑星(中心星にとっても近い木星型惑星)
  - 大離心率惑星(彗星のような軌道の木星型惑星)

太陽系形成論から汎銀河系惑星系形成論へ

# 汎銀河系惑星系形成論のテーマ

---

太陽系以外の惑星はどうやってできたのか？

銀河系に惑星はどのくらいあるのか？

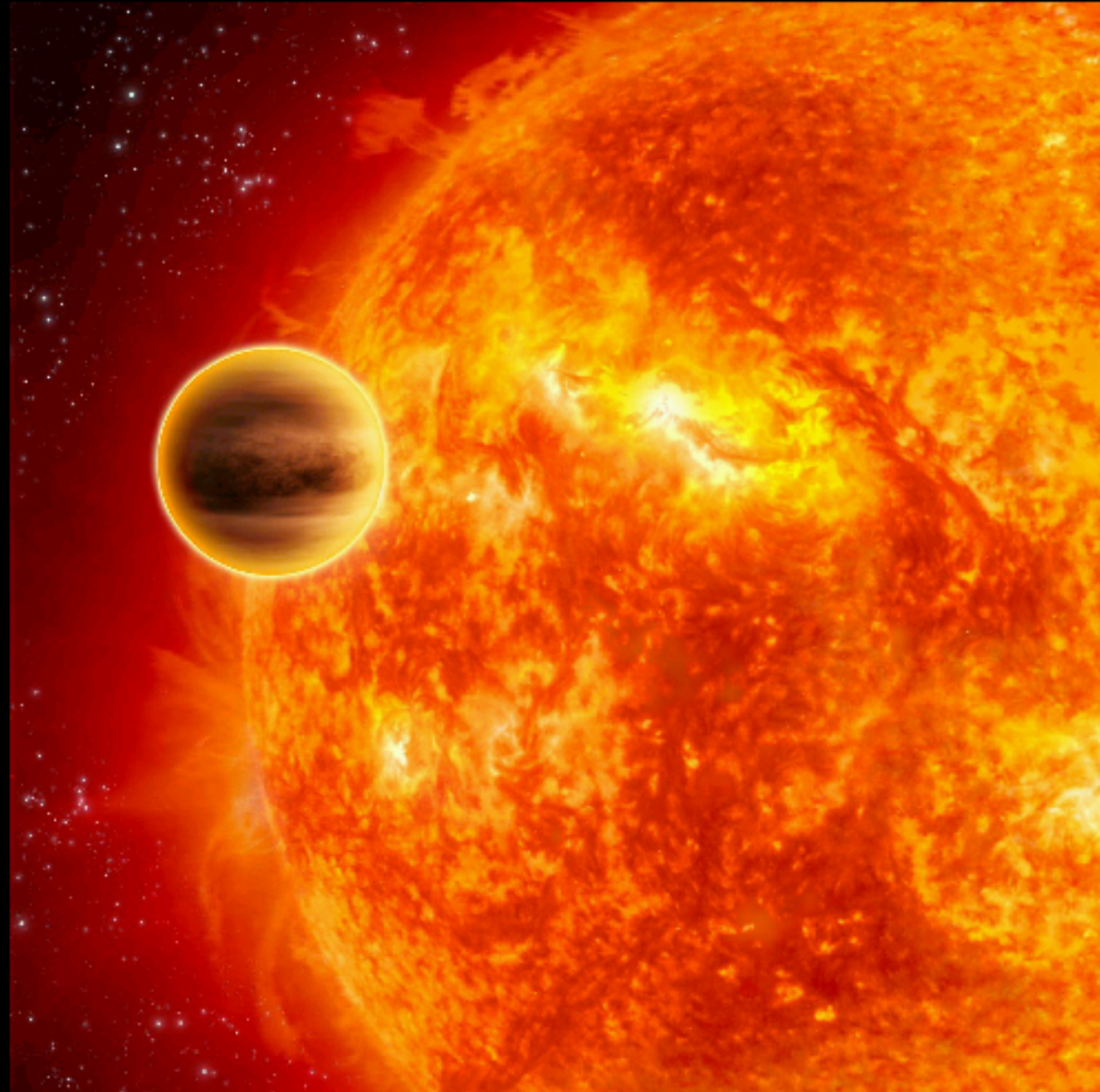
太陽系は特殊か？

地球のような惑星はあるのか？

地球以外に生命はいるのか？



# 太陽系外惑星



# 系外惑星系の観測方法(2013.8.14)

---

## 直接法

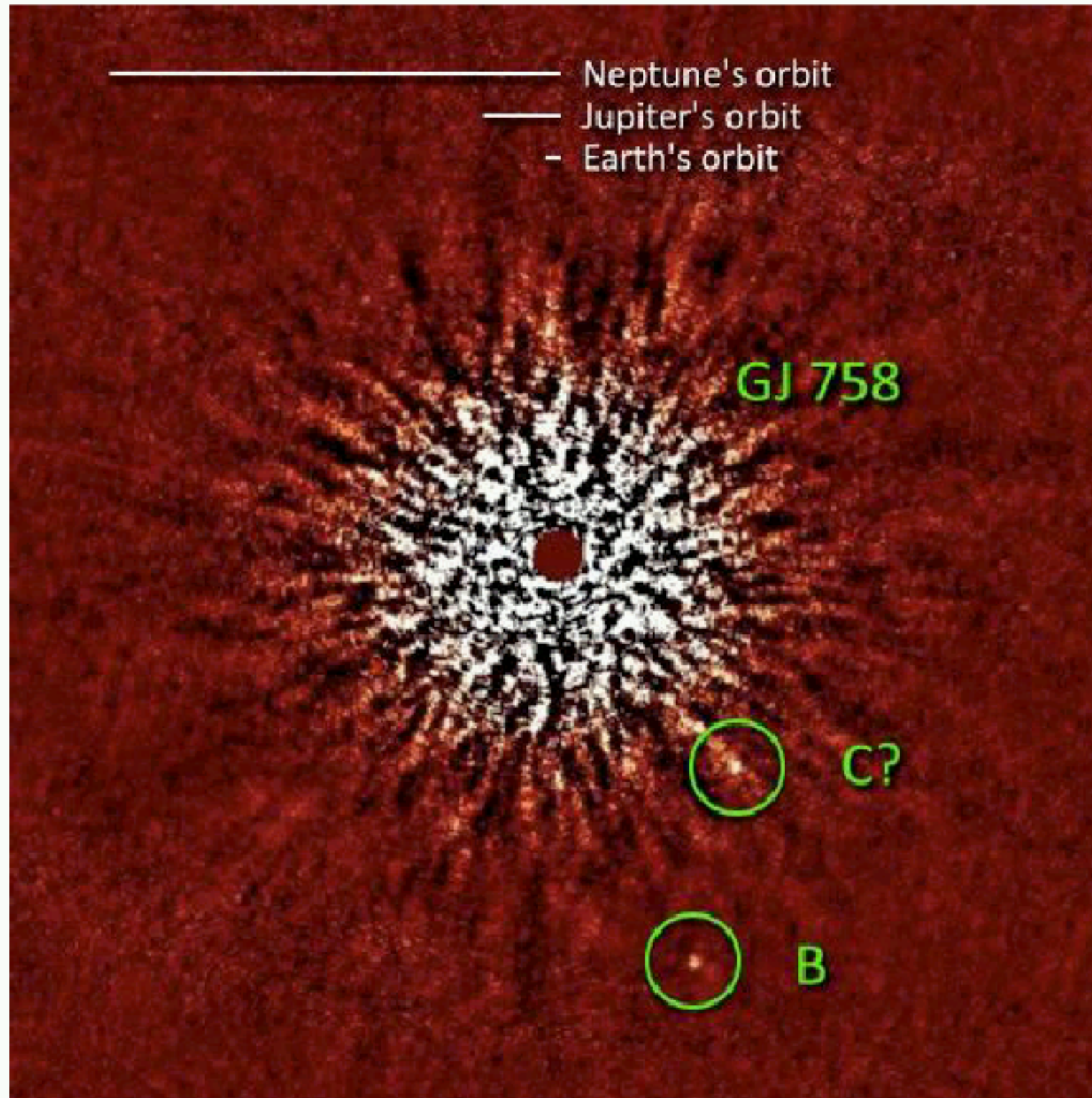
- 直接撮像法(34)

## 間接法

- 視線速度法(531)
- トランジット法(325)
- 重力レンズ法(23)
- 天体位置観測法(1)

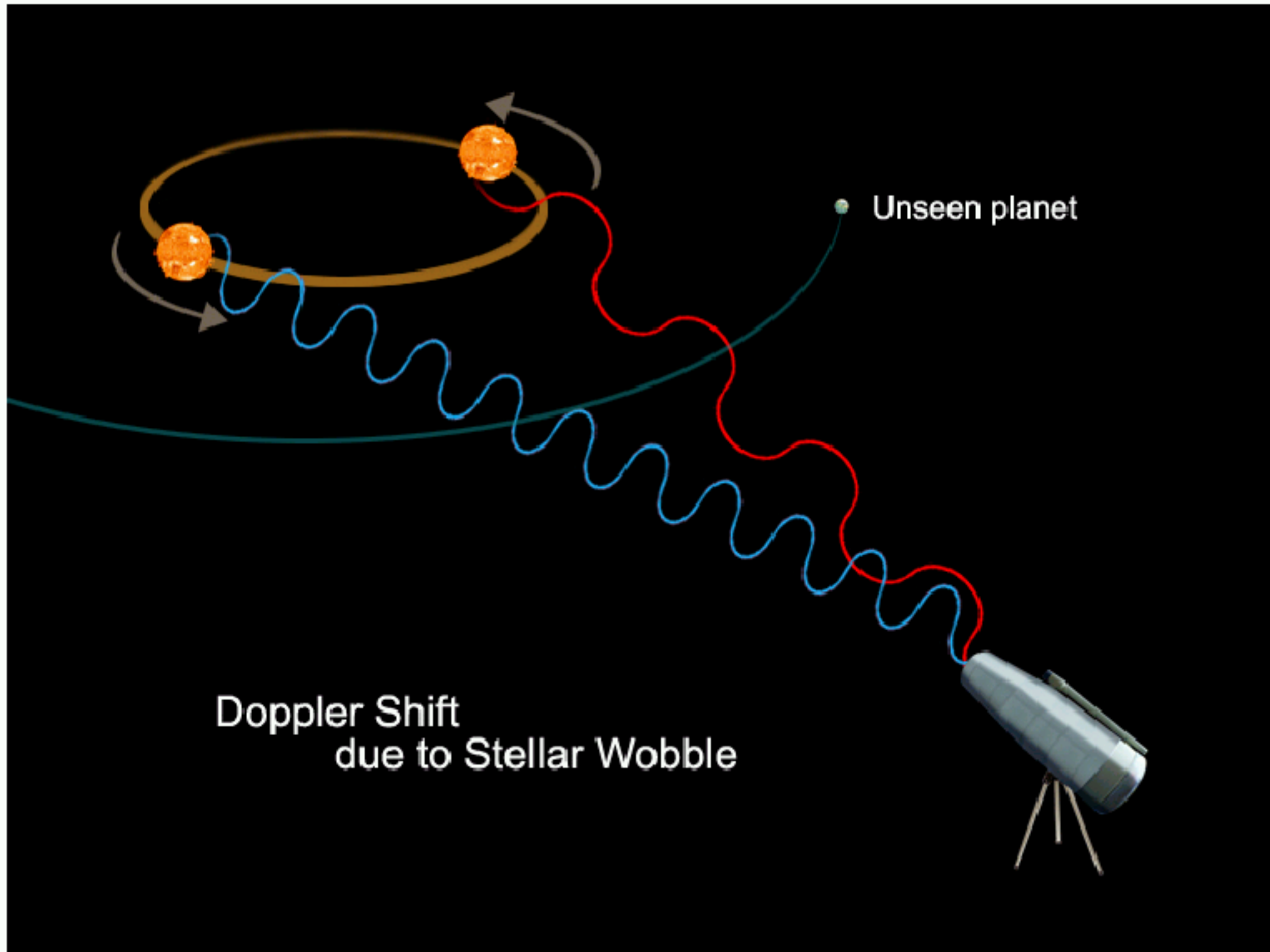


# 直接撮像法の観測例



GJ 758系(Thalmann+ 2009)

# 視線速度法



(NASA)



# 視線速度法

---

## 観測量

- 恒星の動き(重心周りの公転速度)

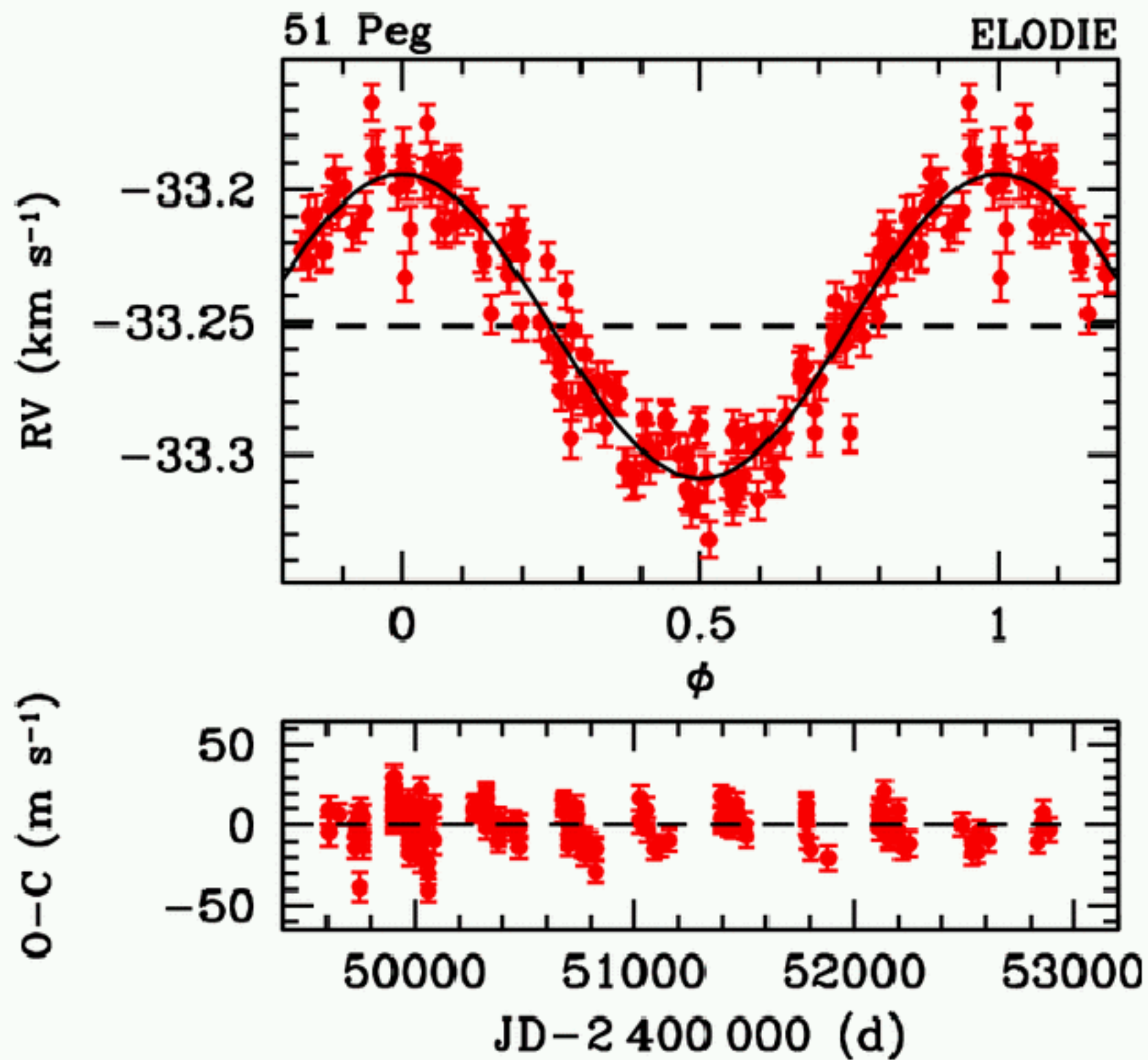
## 惑星物理量

- 質量・軌道傾斜角、軌道長半径、軌道離心率

## 特徴

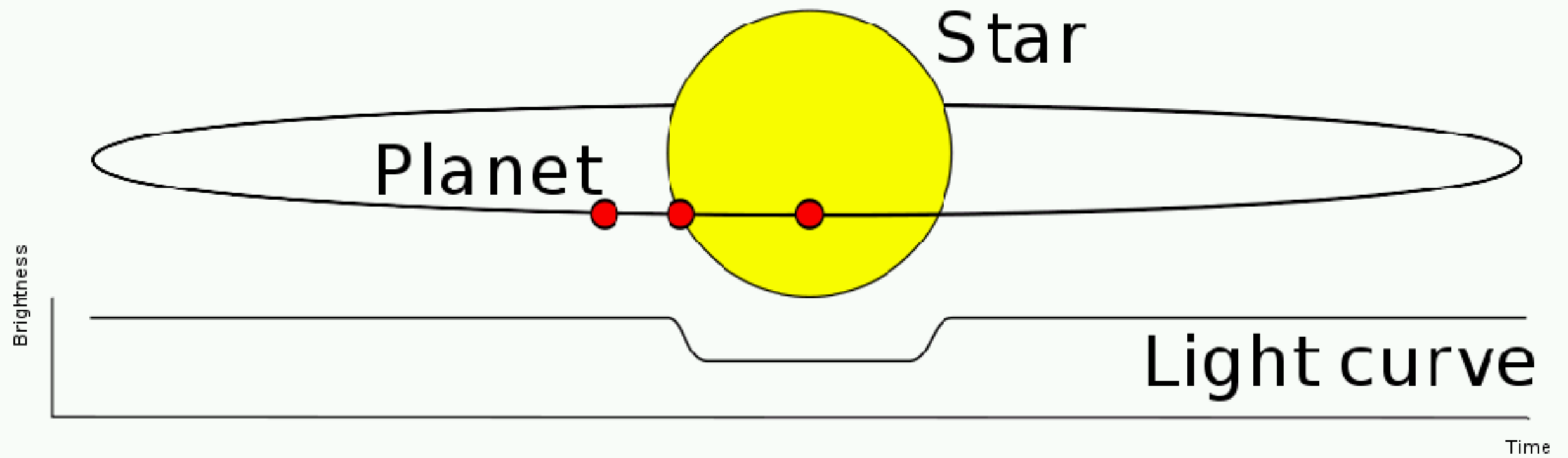
- 大質量で中心星に近い惑星ほど見つけやすい
- 質量、軌道傾斜角は個別には決まらない

# 視線速度法の観測例



ペガサス座51番星の惑星(Naef+ 2004)

# トランジット法



(Wikipedia)

# トランジット法

---

## 観測量

- 惑星による恒星の食(中心星の減光)

## 惑星物理量

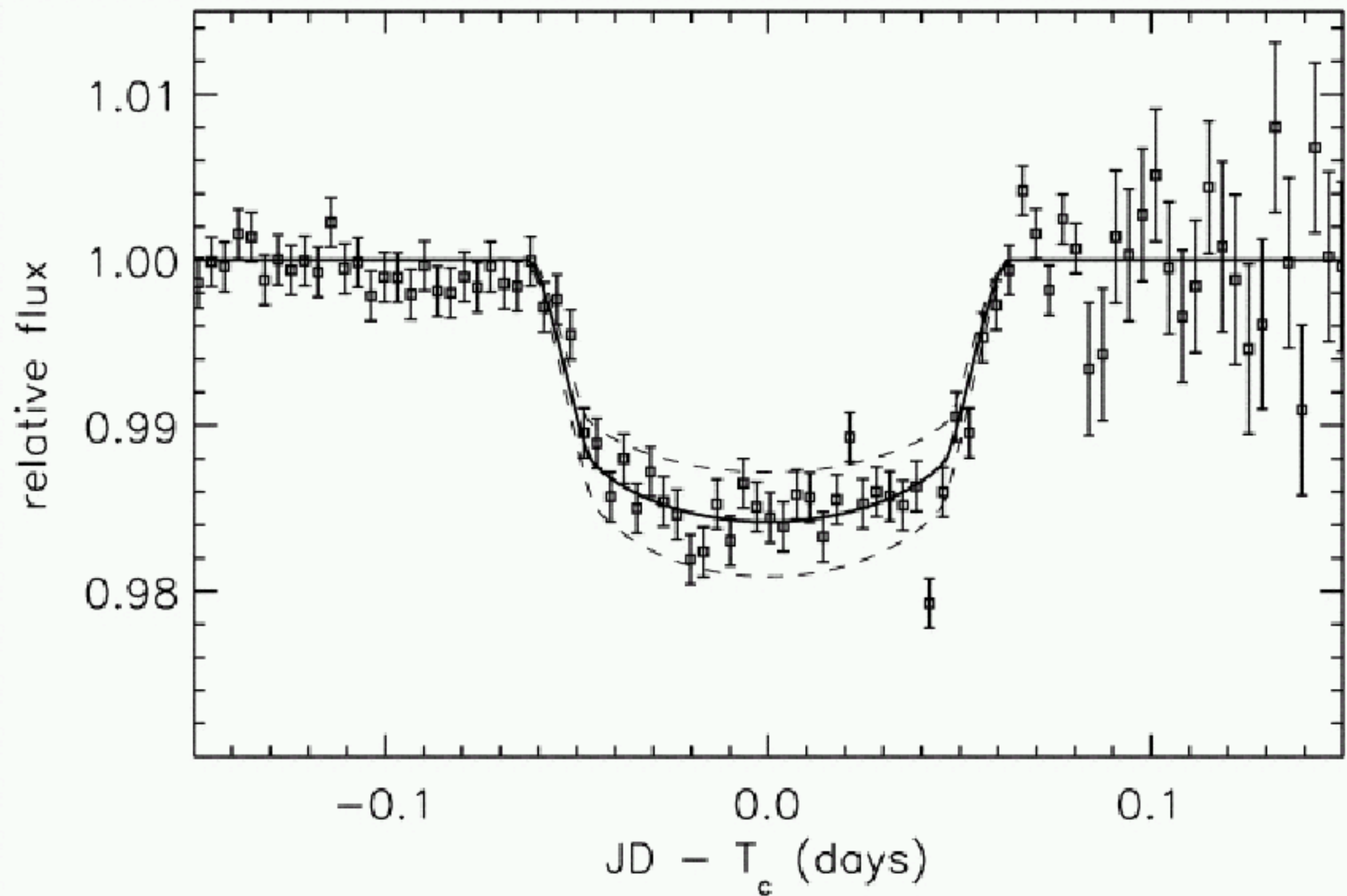
- 半径、軌道長半径、軌道傾斜角

## 特徴

- 大きくて中心星に近い惑星ほど見つけやすい
- 視線速度法と合わせると惑星物理量を決められる

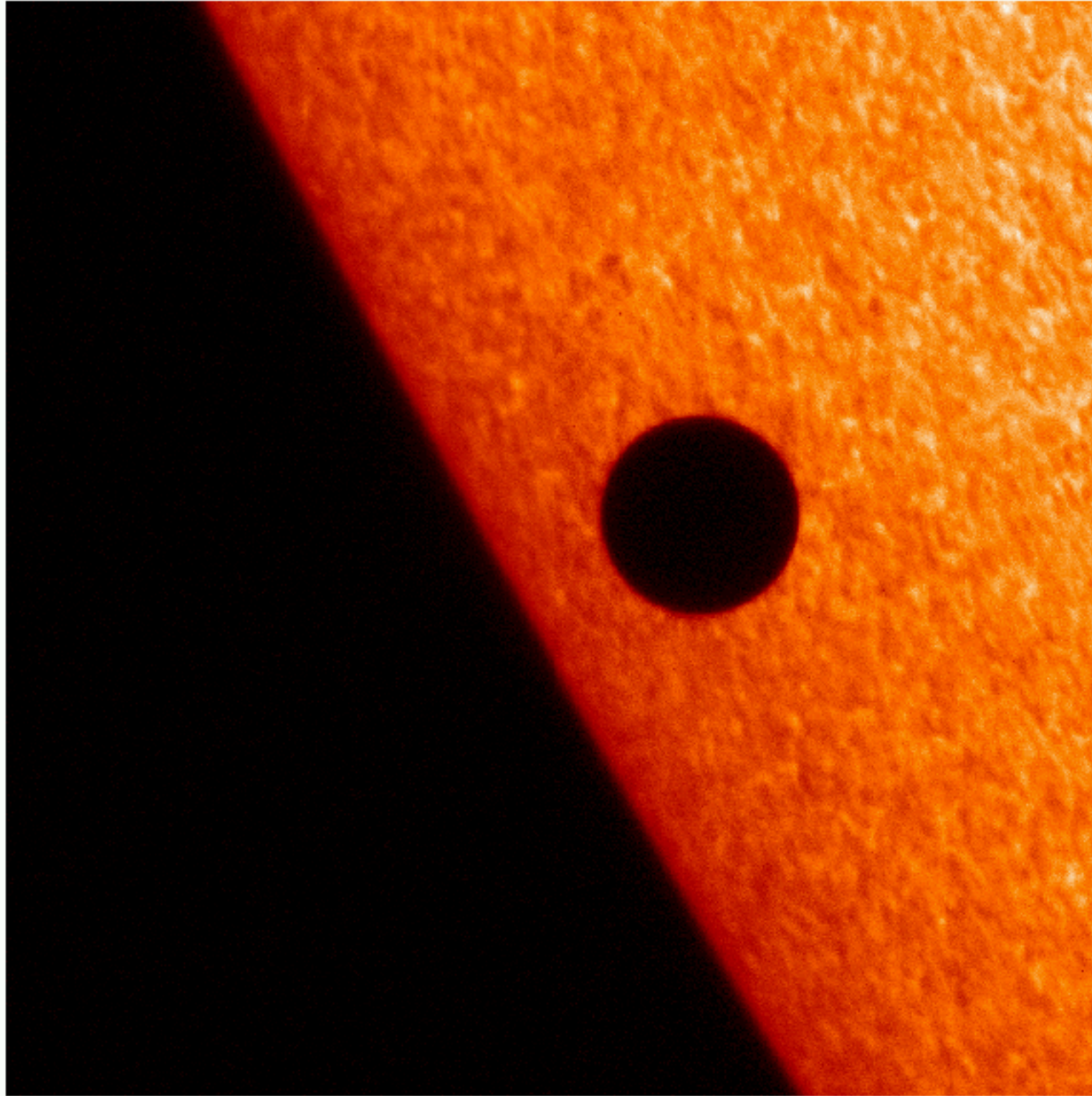


# トランジット法の観測例



HD209458b(Charbonneau+ 2000)

# 太陽系でのトランジットの例



水星の太陽面通過(国立天文台/JAXA)

# 系外惑星の発見

---

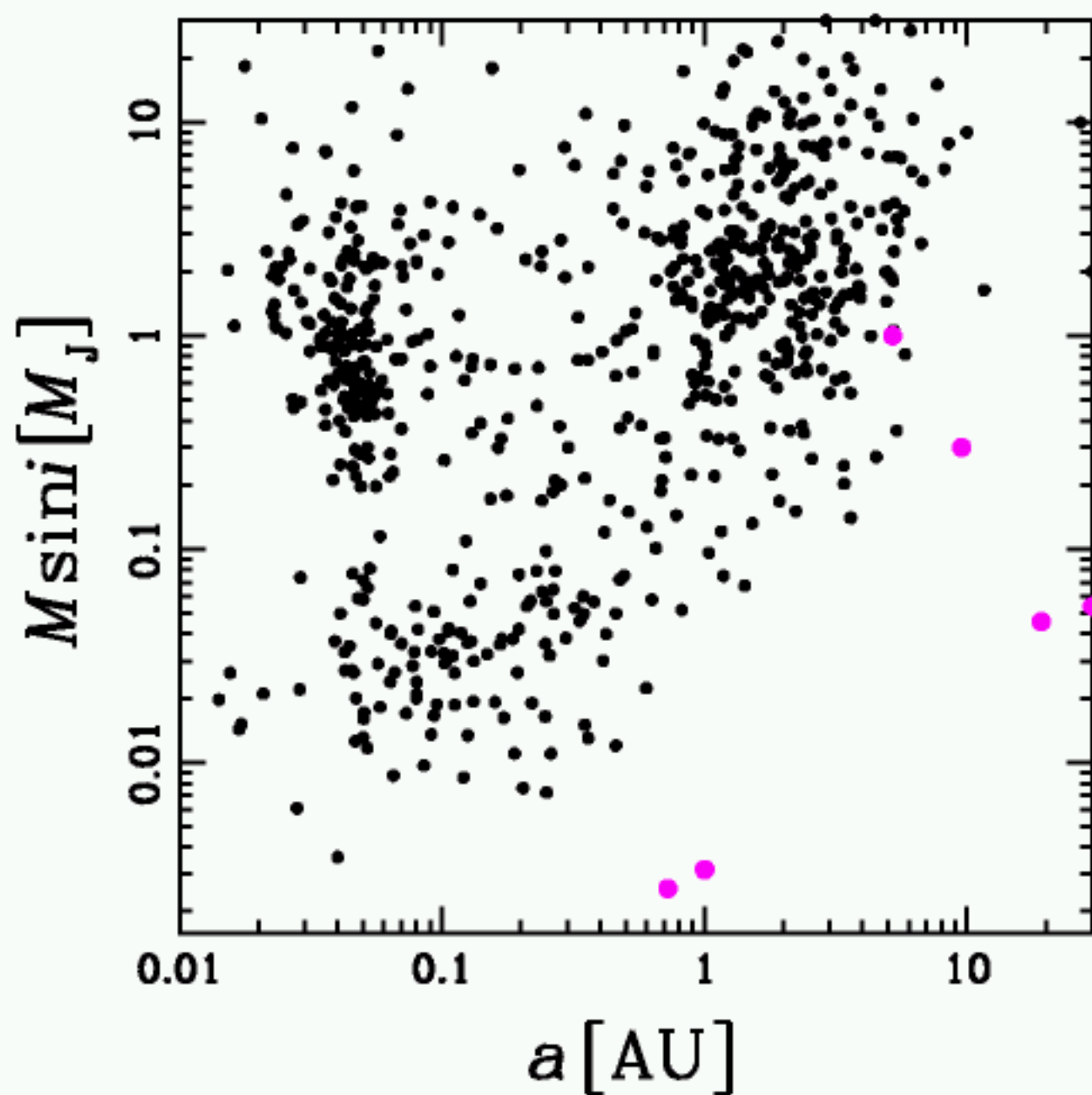
## 観測

- 1995: 51 Peg b の発見 – 新時代の始まり!
- 2013: 900個以上の惑星 – 木星型惑星の普遍性!

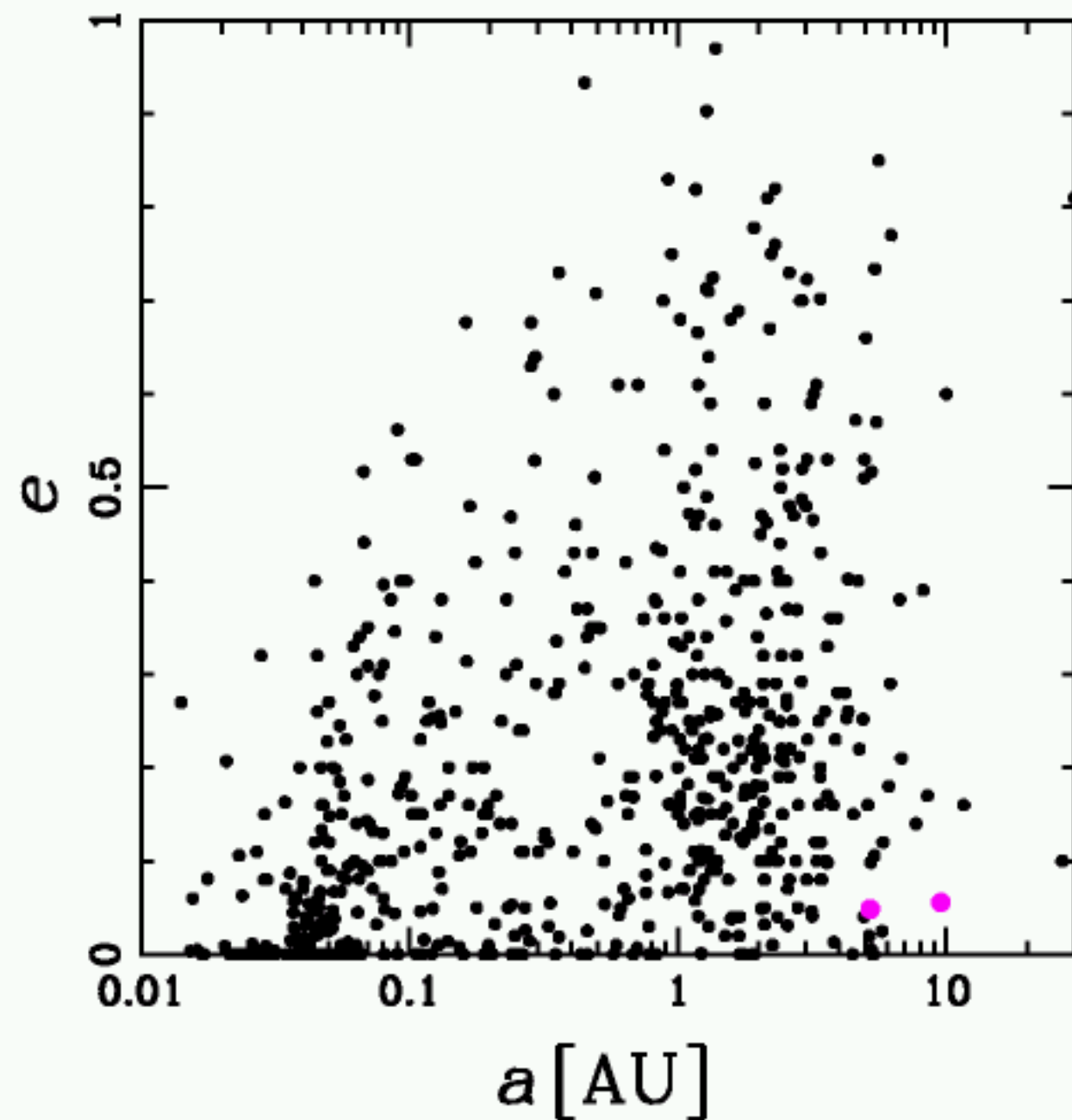
## 惑星の多様性

- hot jupiters/灼熱巨大惑星 (ガス惑星)
- eccentric planets/大離心率惑星 (ガス惑星)
- solar-system type planets/太陽系型惑星 (ガス惑星)
- hot neptunes/灼熱氷惑星 (氷惑星? 水惑星?)
- super earths/超地球 (岩石惑星?)
- 多惑星系

# 系外惑星系



軌道長半径-最小質量

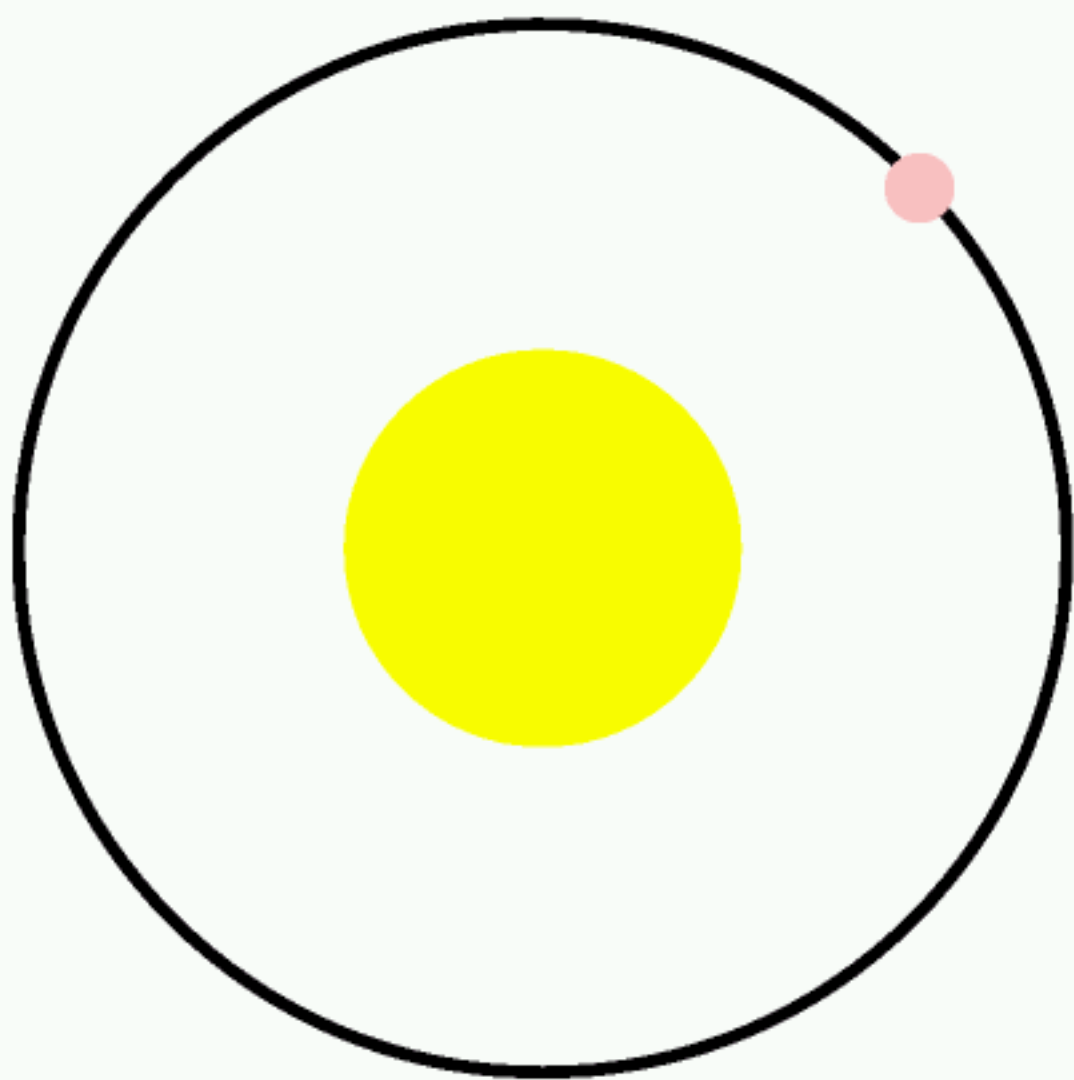


軌道長半径-軌道離心率

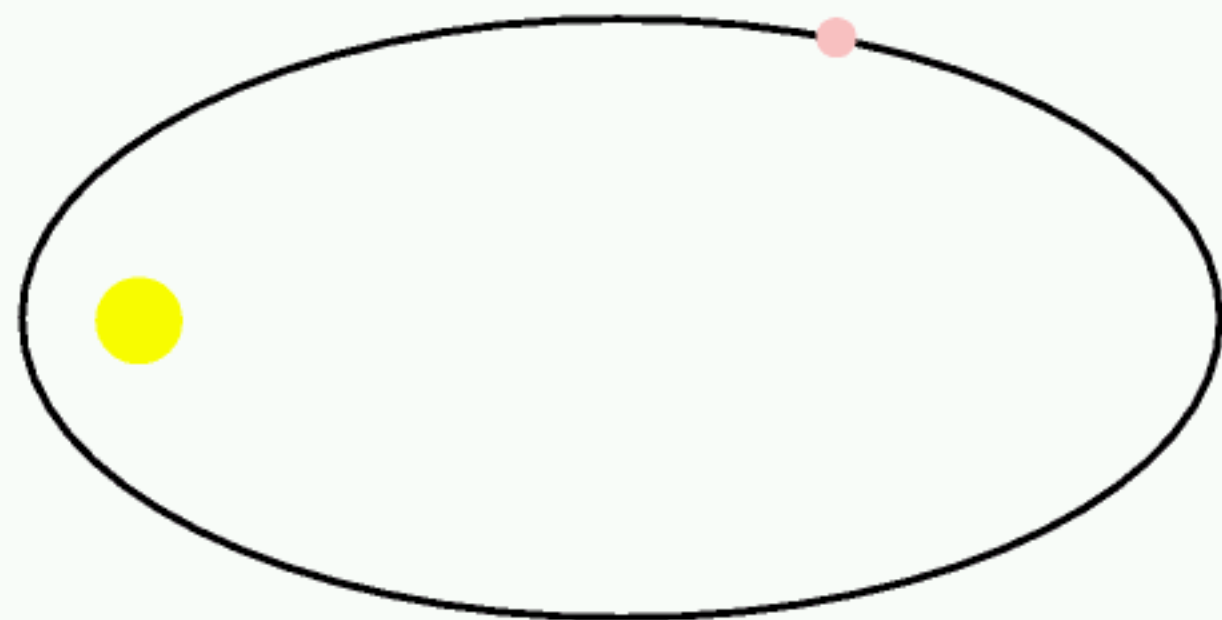
●: 太陽系の惑星



# 灼熱巨大惑星・大離心率惑星



灼熱巨大惑星



大離心率惑星

どのようにして形成されたのか？

# 系外惑星の分類

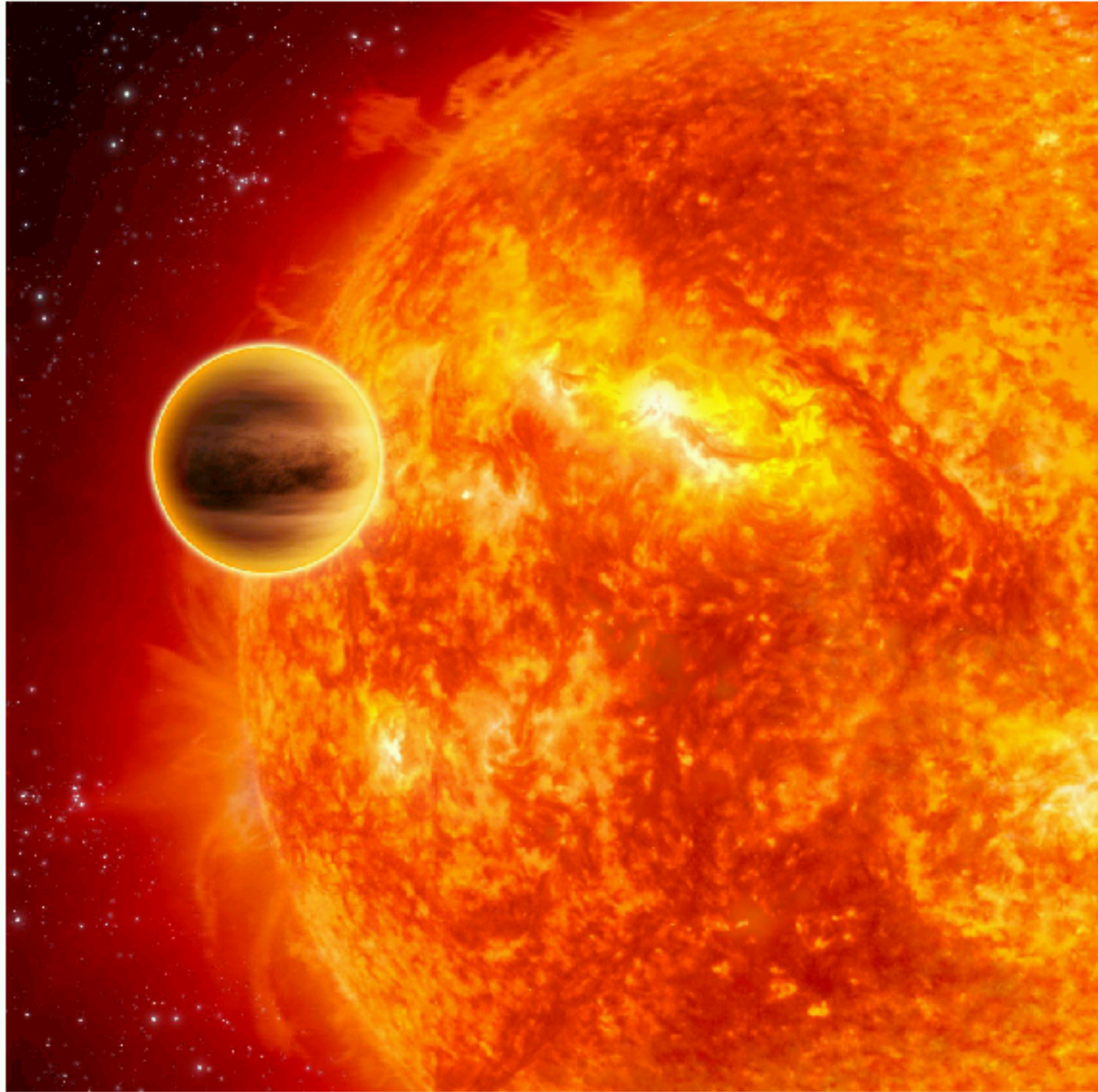
## 軌道による分類

| 種類     | $a(\text{AU})$ | $e$            |
|--------|----------------|----------------|
| 近接惑星   | $\lesssim 0.1$ | $\lesssim 0.1$ |
| 大離心率惑星 | $\gtrsim 0.1$  | $\gtrsim 0.1$  |

## 質量による分類

| 種類     | $M(M_J)$             |
|--------|----------------------|
| 灼熱ガス惑星 | $\simeq 1\text{-}10$ |
| 灼熱氷惑星  | $\simeq 0.1$         |
| 超地球    | $\lesssim 0.1$       |

# 灼熱ガス惑星(イメージ図)



C. Carreau (ESA)

# 惑星系の多様性の起源

---

## 初期条件の違い

- 原始惑星系円盤の大きさ・質量分布・ガスダスト比

## 境界条件の違い

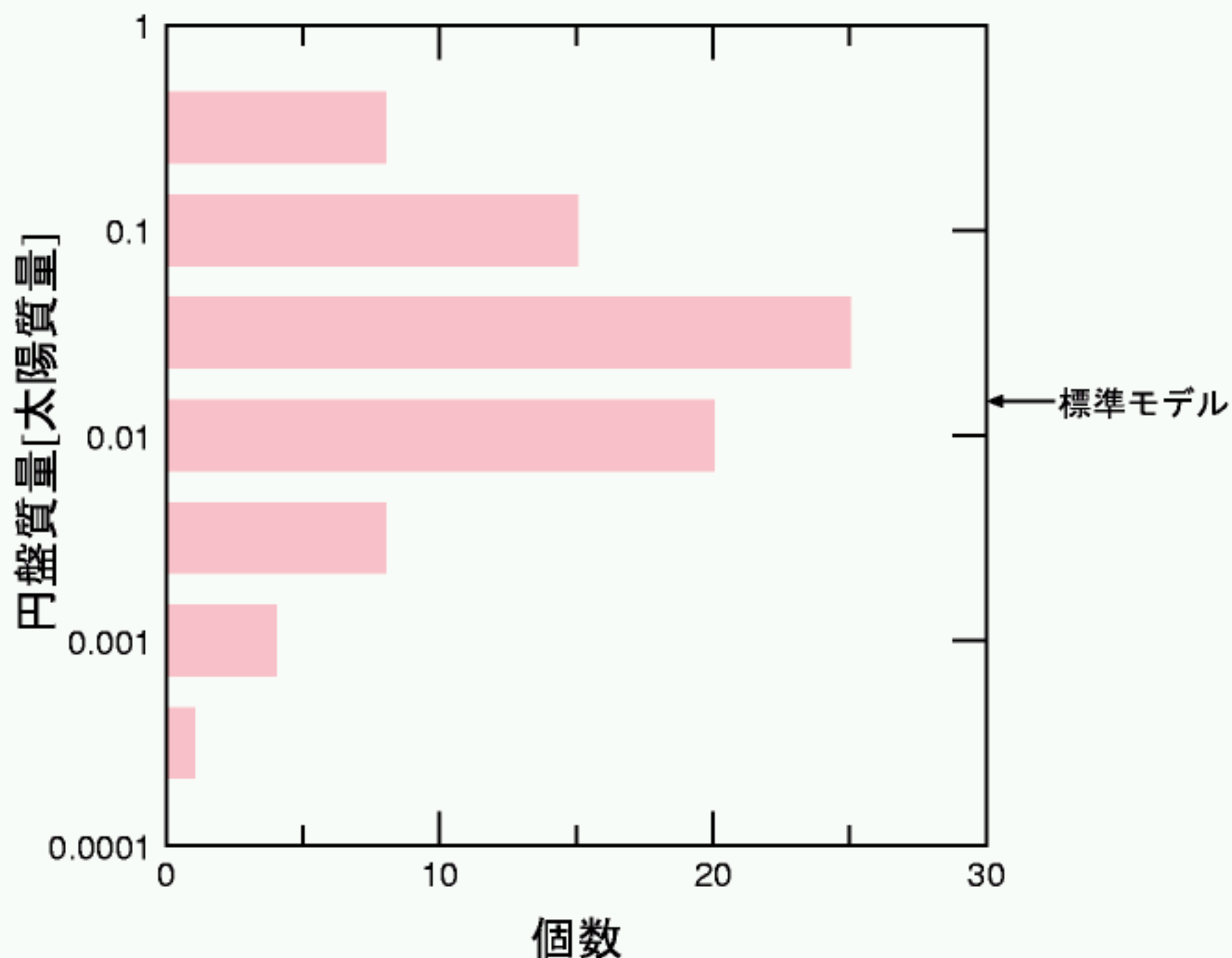
- 中心星の種類・進化段階
- 孤立星、連星、星団
- 銀河系環境

## 多様性を生み出す形成過程

- 惑星の移動(微惑星・ガス円盤との相互作用)
- 惑星どうしの重力散乱



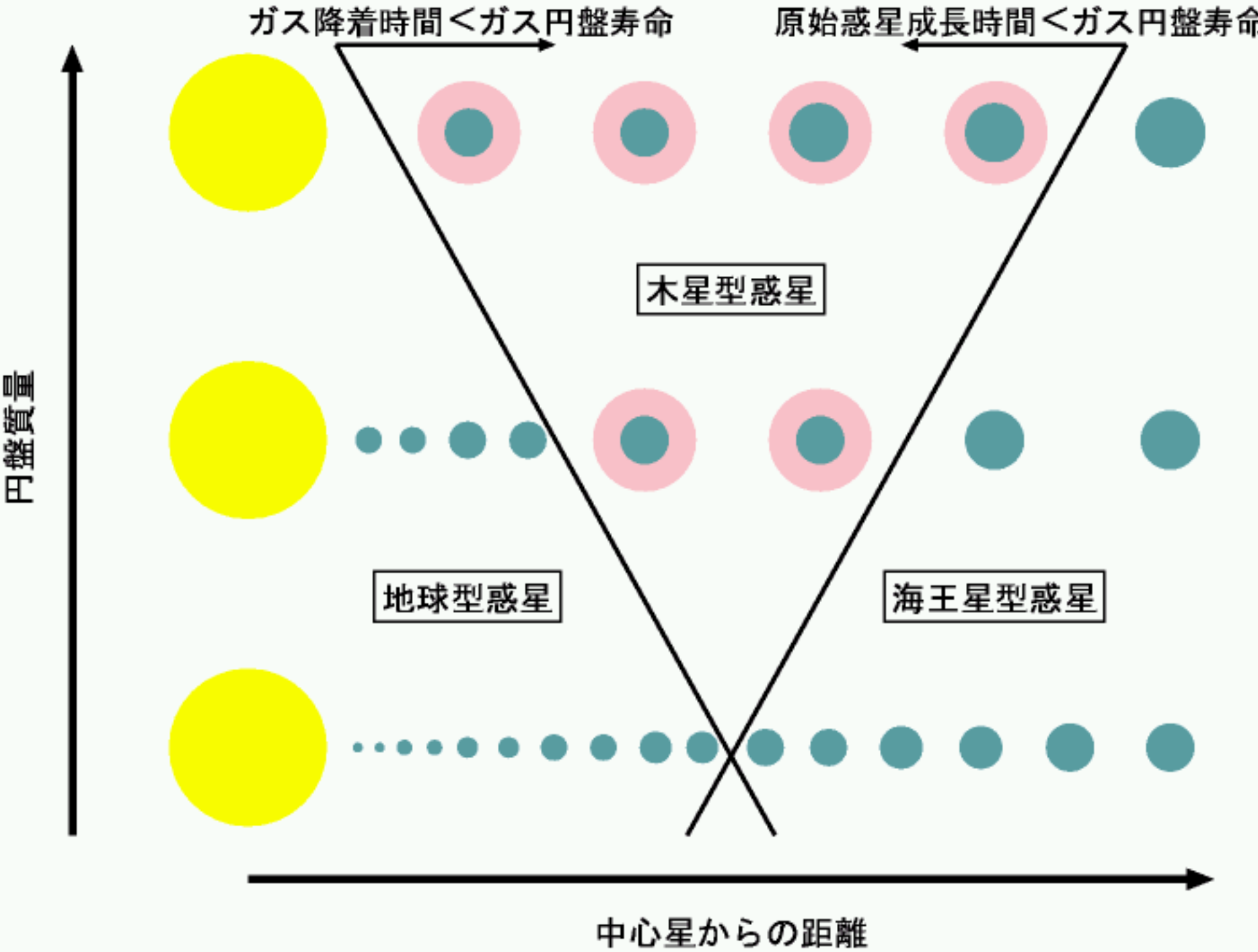
# 原始惑星系円盤の多様性



おうし座+とへびつかい座の原始惑星系円盤質量分布 (Beckwith & Sargent 1996)

質量: 0.001-0.1 太陽質量

# 惑星の住み分け



灼熱巨大惑星と大離心率惑星は大質量円盤から形成？

# まとめー惑星系をねらえ!

---

## 美しい太陽系

- 生命を宿す地球
- 豊かな惑星世界

## 多様な系外惑星系

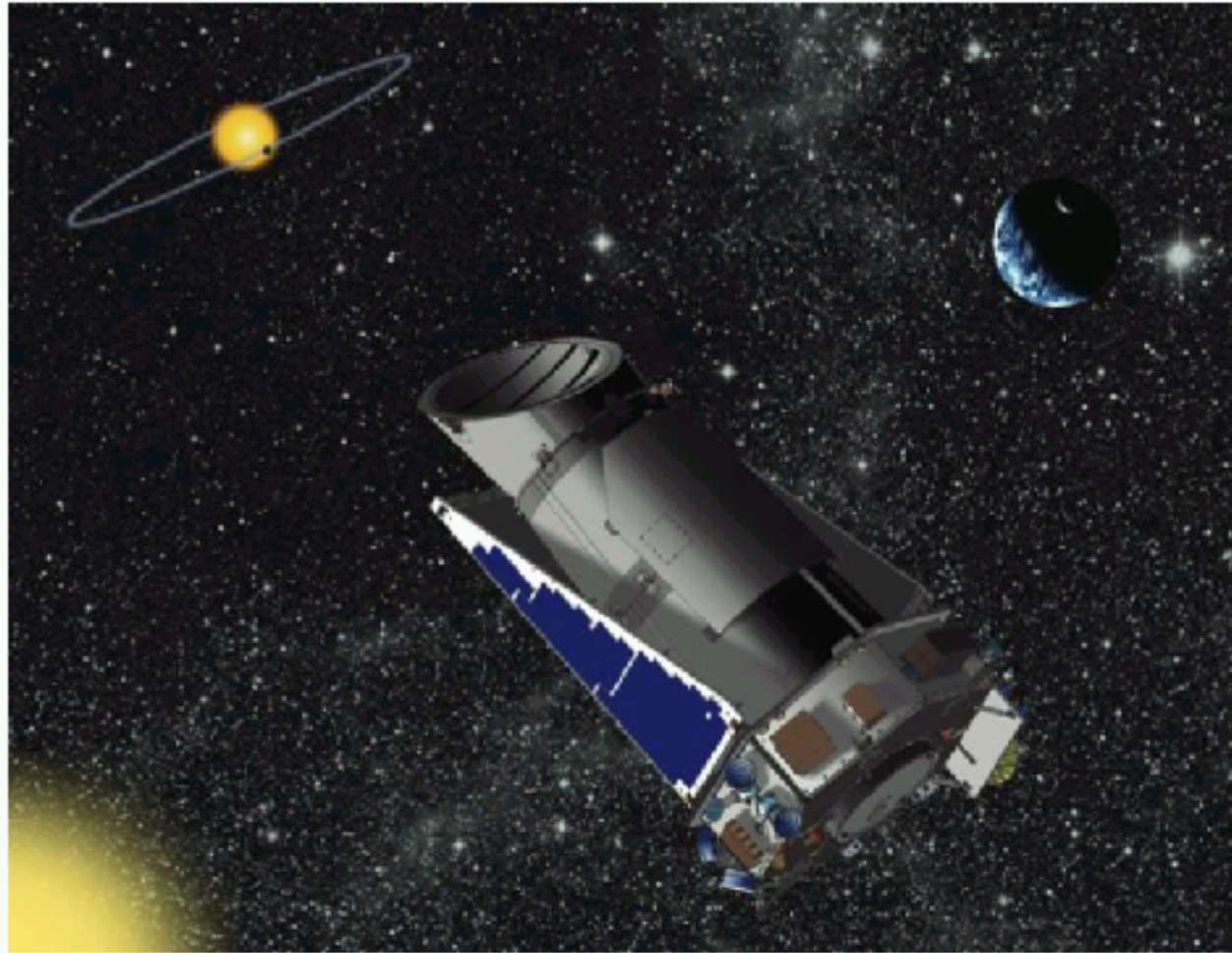
- 惑星の普遍性
- 異形の惑星(灼熱惑星、歪んだ軌道)

## 挑戦

- 太陽系は特殊なのか?
- 第2の地球は存在するのか?

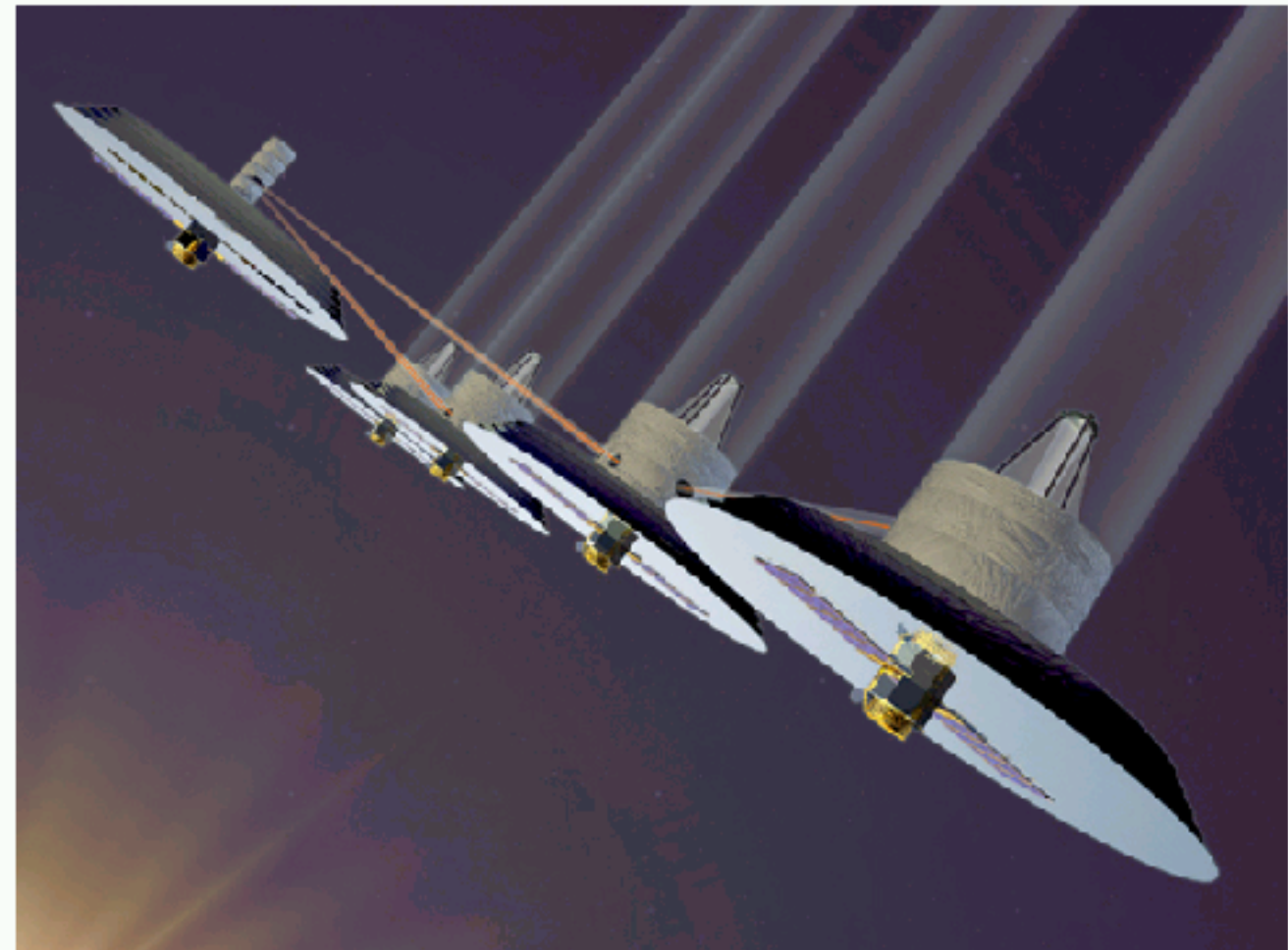
# 地球型惑星探査計画

(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)



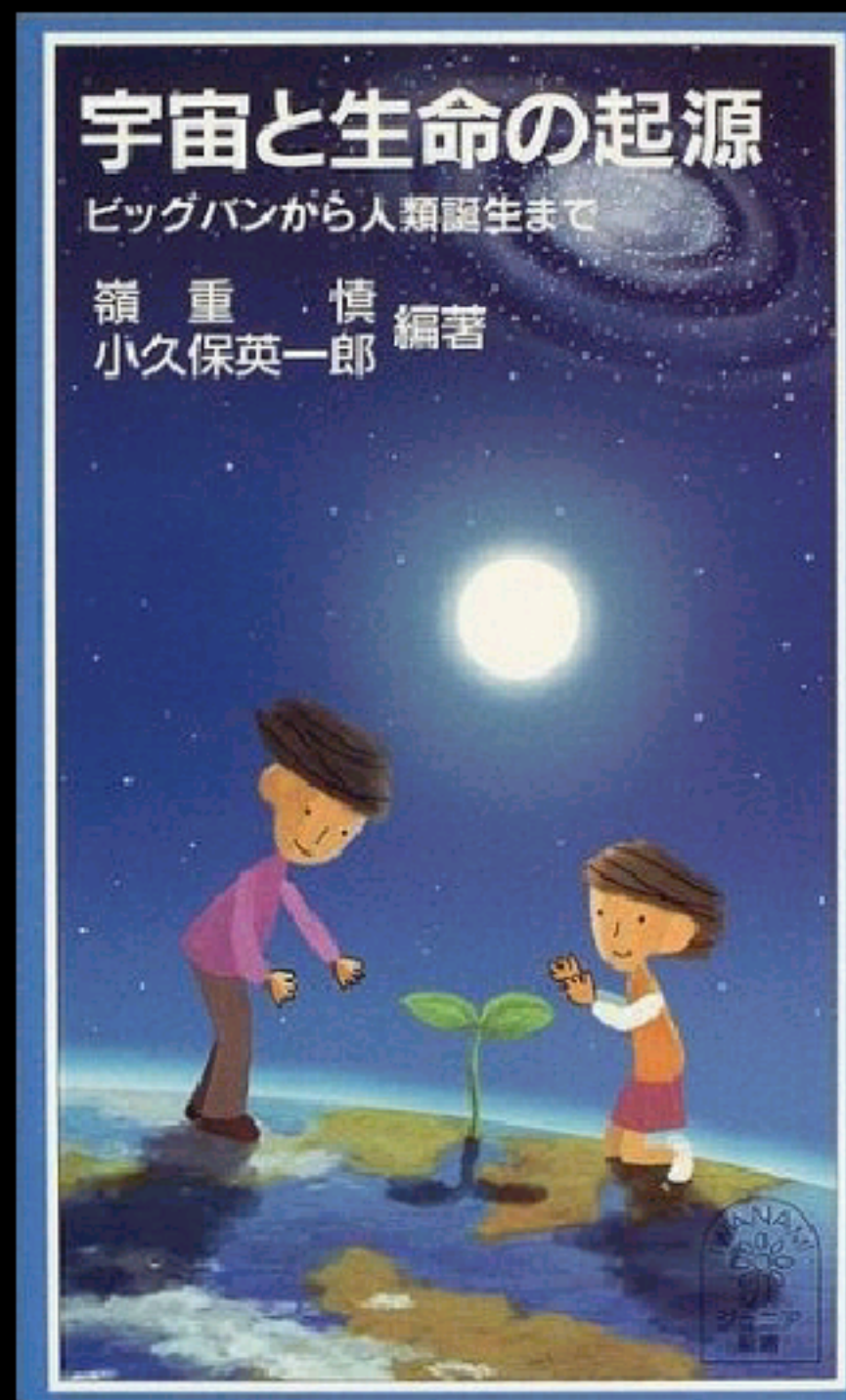
Terrestrial Planet Finder (20XX?)

第2の地球が見つかる日は近い!!?



## 2740個惑星候補天体を発見!





「<宇宙>を読む」 「宇宙の地図」

絶賛発売希望中！