

研究プロジェクト 第1回

- イントロダクション：惑星形成と原始惑星系円盤
- 演習の目標とスケジュールの説明
- 今日の演習：原始惑星系円盤のモデルを自作する

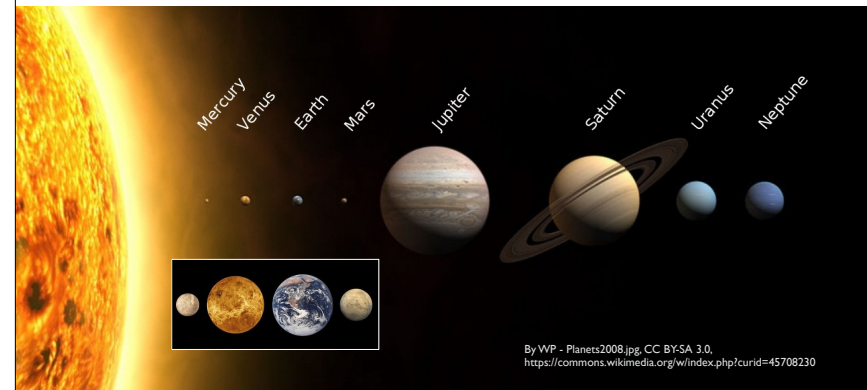
1

太陽系の惑星

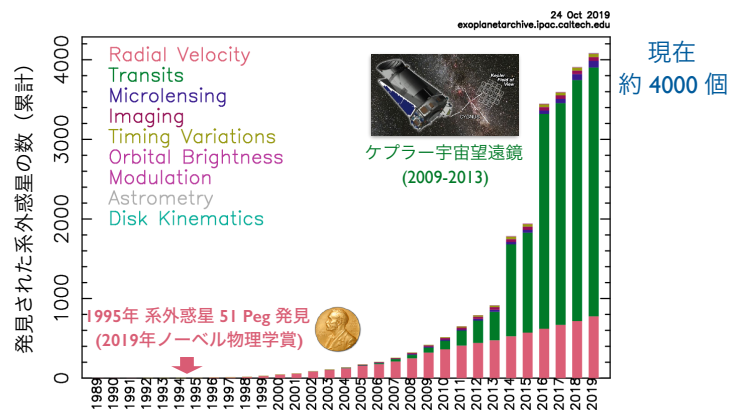
地球型惑星 (水, 金, 地, 火) 主成分: 岩石と金属 (O, Si, Mg, Fe)

巨大ガス惑星 (木, 土) 主成分: H_2 , He 大気

巨大氷惑星 (天王, 海王) 主成分: 氷+大気



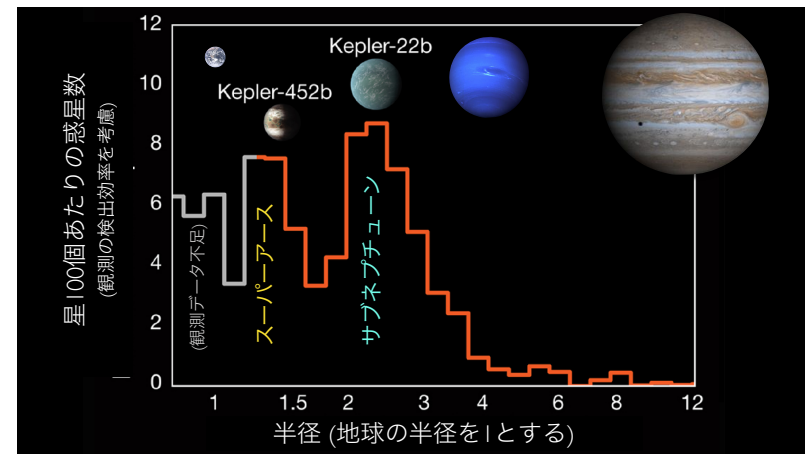
太陽系外惑星



- 全ての系外惑星を観測できるわけではない (精度, 時間, 公転の向き)
- 太陽に似た星は、平均して の惑星を持つと推定される

3

太陽系外惑星のいろいろ



太陽系には無い、地球と海王星の間の大きさの惑星が多数

<https://exoplanets.nasa.gov/news/1443/nasa-releases-kepler-survey-catalog-with-hundreds-of-new-planet-candidates/>

4

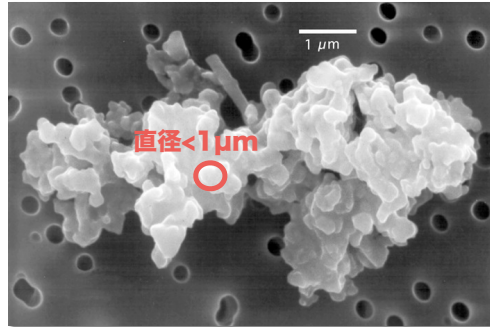
宇宙の“塵”（ダスト）

大きさが $0.01\text{--}1\ \mu\text{m}$ くらいの固体微粒子 (珪酸塩, 氷, 有機物,...)

- 星間塵 (背景の星の光を吸収し、赤外線や電波を放射するので見える)
- 惑星間塵 (小惑星, 彗星由来。地球の成層圏でも採集される)



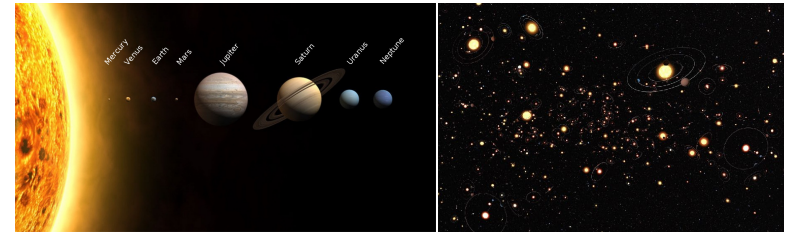
<https://www.eso.org/public/unitedkingdom/news/eso0202/>



成層圏で採集された惑星間塵 (電子顕微鏡画像)

Jessberger et al. (2011) 5

「惑星形成論」とは



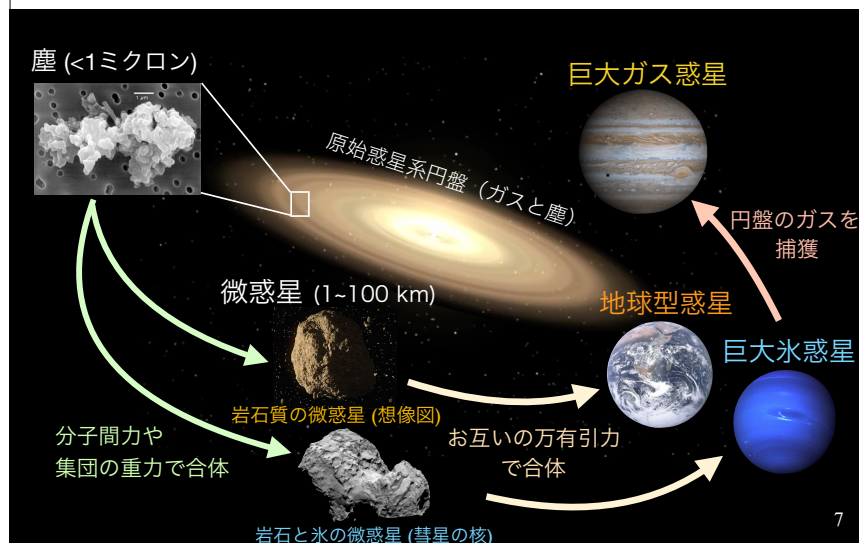
惑星の誕生に関わる以下の3つの問い

1. 惑星はどのような場所でできるか？
2. 惑星は何からできるか？
3. 惑星はどのようにできるか？

に対して、天文観測・太陽系探査・理論計算を駆使して
解明を目指す学問

6

惑星形成の標準モデル（大枠）

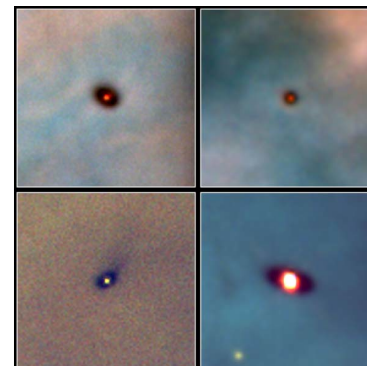


7

原始惑星系円盤

- 若い星 (年齢が約1千万年弱) を取り囲む、ガスと塵の薄い円盤
- 現代では、惑星はこの円盤の中でできると考えられている

ハッブル宇宙望遠鏡で撮影した、原始惑星系円盤の塵 (1995年)



- 質量: 太陽質量の約 (うち99%が水素・ヘリウムのガスと考えられる)
- 半径: 約 天文単位 (1天文単位 = 地球と太陽の距離 = 1億5000万km)

Credit: Mark McCaughrean (MPIA), C. Robert O'Dell (Rice University), and NASA

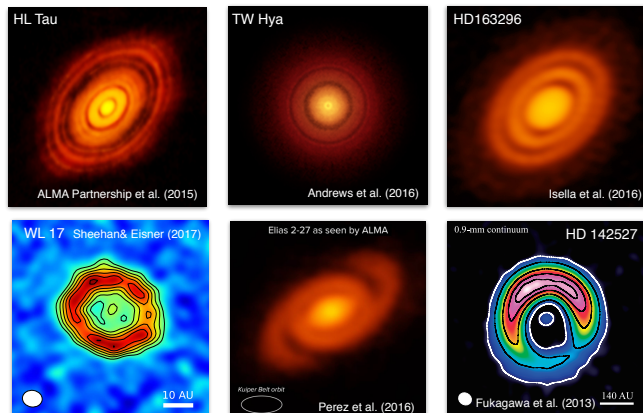
8

ALMA望遠鏡による原始惑星系円盤の最新観測



Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

電波干渉計で宇宙のガスやダストを撮像する
(下の画像は原始惑星系円盤のダストの分布)



9

演習の目標とスケジュール

【目標】

原始惑星系円盤の中でのダストの“落下運動”を理解し、
これが微惑星の形成にどのような影響を与えるかを調べる。

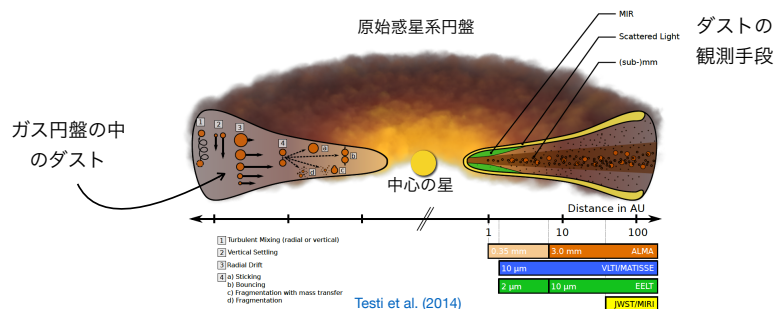
【スケジュール】

- 第1回
原始惑星系円盤のモデルを自作する
- 第2回
ガス円盤の中でのダストの落下を導出する
- 第3回, 第4回
ダストの運動と合体成長を同時に数値計算する

10

今日の演習：円盤モデルを自作する

- 原始惑星系円盤（ガス+ダスト）の密度分布を知りたい
(これがないと惑星形成の計算はできない!)
- 方法：理論計算, 天文観測から推定, 太陽系から推定, ...



11

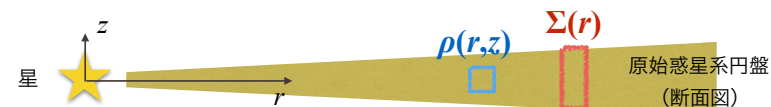
原始惑星系円盤の密度と面密度

- 物質の密度分布 $\rho_{\text{ダスト}}, \rho_{\text{ガス}}$ (単位体積あたりの質量)
- 物質の面密度 $\Sigma_{\text{ダスト}}, \Sigma_{\text{ガス}}$ を以下で定義する：



z : 円盤の厚み方向の座標

これは円盤の単位面積あたりに含まれる物質の質量を表す。



円盤の垂直方向の構造は、理論的に簡単に求められる。

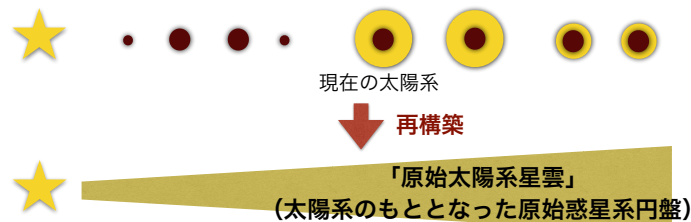
⇒ $\Sigma(r)$ さえわかれば、 $\rho(r, z)$ もわかる。

Q: 円盤の総ガス質量 $M_{\text{ガス}}$ は、 $\Sigma_{\text{ガス}}(r)$ を用いてどのように書けるか？

12

“最小質量” 太陽系星雲モデル

(Weidenschilling 1977b; Hayashi 1981)



再構築の際の仮定 (単に便宜のため):

- 円盤の中の固体は、すべて惑星に取り込まれた
- 固体や惑星の軌道は、大規模に移動しなかった
(= 惑星は、現在の軌道付近の固体を集めてできた)
- 円盤のガスの質量は、固体の質量の だった

13

現在の太陽系データ

表 3.3 現在の太陽系の惑星.

	軌道長半径 a (AU)	離心率 e	傾斜角 i (radian)	質量 (g)	固体コア質量 ⁽¹⁾ (M_E) ⁽²⁾
水星	0.39	0.21	0.12	3.3×10^{26}	—
金星	0.72	0.0068	0.059	4.9×10^{27}	—
地球	1.00	0.017	0.0	6.0×10^{27}	—
火星	1.52	0.093	0.032	6.4×10^{26}	—
木星	5.20	0.048	0.023	1.9×10^{30}	5-15
土星	9.55	0.056	0.043	5.7×10^{29}	9-20
天王星	19.2	0.046	0.013	8.7×10^{28}	10-13
海王星	30.1	0.0090	0.031	1.0×10^{29}	14-16
冥王星	39.5	0.25	0.30	1.3×10^{25}	—

(1) コアの正確な質量は不明, (2) M_E : 地球質量

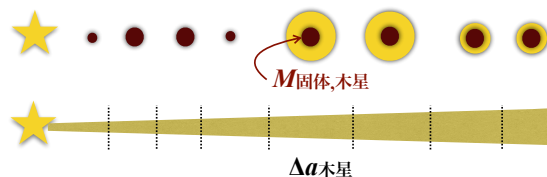
岩波講座 地球惑星科学12『比較惑星学』 p.142

1 au = cm

1 M_E = g

14

最小質量ダスト円盤の自作の手順



1. 各惑星の固体部分の質量 $M_{\text{固体},i}$ (i = 水,金,地,火,...) を仮定せよ。
(あとの便宜のため、単位は g にしよう)
2. 各惑星の材料があった軌道領域 (feeding zoneと呼ぶ) の幅 Δa_i を決めよ。
(あとの便宜のため、単位は cm にしよう)
3. Δa_i は惑星の軌道長半径 a_i より十分小さく、かつ各feeding zone 中での面密度は一樣であるとする。各feeding zone中のダストの総質量が対応する惑星の $M_{\text{固体},i}$ と等しいと置いて、各feeding zoneのダスト面密度 $\Sigma_{\text{ダスト},i}$ を決めよ。
4. 次頁の対数グラフ上に ($a_i, \Sigma_{\text{ダスト},i}$) をプロットし、直線をフィットすることで $\Sigma_{\text{ダスト}}$ が軌道長半径 a のおよそ何乗に比例するかを調べよ。

15

宿題

1. 自作した $\Sigma_{\text{ダスト}}(r)$ から、ガス円盤の面密度 $\Sigma_{\text{ガス}}(r)$ を求めよ。単位は $g\ cm^{-2}$ とする。
2. 円盤の外縁半径を $r_{\text{out}} = 30\ au$ とする。ガス円盤の総質量 $M_{\text{ガス}}$ を求めよ。単位は太陽質量とする。
(内縁半径は0としてよい。多分発散しないはず。)
3. ガス円盤の厚み $H(r)$ は、 r の5%であるとする。ガス円盤の密度 $\rho_{\text{ガス}}(r)$ を求めよ。単位は $g\ cm^{-3}$ とする。円盤は垂直方向に一樣であるとしてよい。
4. 円盤のガス面密度および密度を、地球大気的面密度および密度と比べてみよう (ヒント: 地球大気の厚み $\approx 8\ km$)

結果はすべて有効数字1桁で良い

16