

# 13.13 観測的事実に基づく理論

2020/11/13

北海道大学理学院宇宙理学専攻惑星宇宙グループ

有馬 銀河

これまで

- 太陽系での観測
- 系外惑星の観測

⇒ 円盤中の微惑星降着による惑星形成論が確立

しかし、未だに完全には理解されていない

## 13.13.1 太陽系の動的状態

- 惑星の軌道がほぼ同一平面上にある
  - ⇒ 原始太陽系円盤から微惑星が形成された
  - ※太陽系の外側領域を除く
  
- 固体惑星のサイズと惑星間の間隔は軌道が交差するときのそれぞれの惑星の重力が与える摂動に依存
  - ・ この摂動は共鳴しあう
  - ・ この摂動のタイムスケールは微惑星形成よりはるかに長い (13.5.3節)
  
- 微惑星の降着には確率的な過程が重要
  - ⇒ 初期の状態が同じでも最終的に全く違う状態になり得る
  - 例. 大きな原始惑星系円盤があったとして, そこから形成される惑星の数は少ないかもしれない
  - 太陽系で地球型惑星は4つあるが, 3つや5つ形成された可能性

➤ 小惑星帯では惑星形成が起こらない・・・木星が重要な役割

木星が共鳴を引き起こす

⇒ 小惑星帯の微惑星が  
攪拌 or Embryo領域に散乱

木星が引き起こす散乱によって

- ・ 微惑星の成長が妨げられる
- ・ 形成されていた惑星を追い出す

➤ 巨大惑星はある程度の大きさを持つ他の固体微惑星を惑星圏外へ追い出す

⇒ 微惑星の多くは太陽系外へと追い出されるが、 $\geq 10\%$  はオールトの雲に行きつく

## ➤ オールトの雲

- ・ 銀河潮汐力による摂動
- ・ 移動している惑星
- ・ 巨大分子雲

⇒ 45億年間ずっとオールトの雲由来の彗星の軌道変化に寄与している可能性

銀河潮汐力によってオールトの雲がもまれて少し平らになるというのを無視しても（？），オールトの雲は球状の形をしている

## ➤ カイパーベルト

カイパーベルト：海王星軌道以遠にある微惑星からなる

カイパーベルトの動的構造（dynamic structure）から，惑星形成の最終段階で海王星が数AUゆっくりと外側へ移動していたことが示唆

その結果，現在，海王星と冥王星族は2:3の共鳴関係

➤ 惑星の順行

- ・木星と土星：基本的にはガスの降着で説明できる
- ・他の惑星：降着が起こる領域が大きかった

惑星すべてが順行：単に偶然の結果起こった可能性もある

➤ 惑星の傾斜角

惑星の大きさ and/or 惑星同士の軌道共鳴  
によって確率的に決まる

➤ 巨大惑星の衛星系の特徴

その惑星のまわりに円盤があったと考えると理解できる（実際多くのシミュレーションではそのような状況を仮定している）

➤ 現在の太陽系内の角運動量分布

原始太陽系円盤において質量と角運動量が外側に輸送

そののちに太陽の自転角運動量の多くが太陽風によって取り除かれた

## ➤ クレーター

原始太陽系の天体でクレーターの割合が大きく、現在の太陽系の天体で小さいのは、惑星形成の間に小さな天体が掃きだされた結果である

大きな天体の衝突によって

- ・ 月ができた
  - ・ 水星の表面がはがされた
  - ・ 天王星の自転軸の方向が変わった
- が起こったと考えられている

➤ 比較的大きな微惑星の中には、惑星形成の過程で惑星の赤道面に取り込まれたものもあった

例. 海王星のトリトンなど



## 13.13.2 惑星の構成物質

---

➤ 惑星の質量・大きさ

原始太陽系円盤を考えれば理解できる

太陽から離れるほど温度と密度が小さくなる

◎地球型惑星

太陽の近くでは揮発性成分が生き残れない

⇒地球型惑星は主に岩石からなる

◎木星型惑星

～4AU以遠では

- ・氷が存在できる
- ・惑星は質量が大きいためある程度の量の $H_2$ , Heがトラップできる
- ・ガスが降着する時間が長い

## ➤ 太陽系内での混合

固体物質の中には

「太陽系円盤内を移動しているもの and/or 太陽系誕生以前の物質の生き残り」  
が原始太陽系円盤内を水平方向に移動

この過程によって円盤内で物質の混合が起こる

⇒ コンドライト隕石のバルク組成（難揮発性物質＋揮発性物質）が説明できる

※隕石の特徴（特にコンドリュールの生成や磁気の残留）についてはいまだに議論がなされている

原始的隕石の年代と太陽系内の岩石の年代がだいたい同じである理由が微惑星仮説によって説明

## ➤ 形成直後の惑星

- ・ 地球型惑星：形成期 and/or 火成活動が起こっている間高温であった
- ・ 木星・土星・天王星：降着や分化に伴う熱放出が大きかった

小惑星帯や彗星由来のレイトベニアの付加による原始惑星からの脱ガスによって原始惑星に大気をもたらされた

## 13.13.3 系外惑星

---

## ➤ 系外惑星の観測

現在多くの系外惑星が見つかっているが

- ・ 大きな検出バイアス
- ・ 手元のデータの制約
- ・ 今あるモデルの適用範囲外

⇒ 系外惑星についてあまり情報を得られていない

## ➤ 系外惑星における理論的考察

- ・ 系外惑星においても原始惑星系円盤内での水平方向の移動が重要なプロセス
- ・ 惑星と円盤間の重力の相互作用が作り出すトルクが惑星の軌道変化に重要
- ・ 惑星と円盤間の相互作用は、惑星が内側に落ちずいるのが難しいくらい大きかった可能性がある

## 13.13.4 まとめ

---

- ◆ 太陽系内にある地球型惑星・巨大惑星のコア・小天体の形成は微惑星仮説で説明できる
- ◆ 惑星サイズの固体天体の形成は、若い恒星の周りでは一般的に起こる  
(連星を持たない場合)
- ◆ 円盤が十分な体積と質量を持っていれば、中心星をまわる惑星は太陽系と同じような過程で形成される
- ◆ 多量の $H_2, He$ を持つ巨大惑星の形成ではコアが急速に形成される必要がある  
⇒ ガスが拡散される前に、自身の重力によってガスを捕獲
- ◆ この節でのシナリオに基づくと、ある領域の中で最も大きな天体で最も効率的に降着が起こる

この天体について

- ・ 質量はこの周辺为天体群の質量分布から'runs away'な状態 (他の天体よりも早く質量が2倍になる)
- ・ この天体では $\sim 10^6$ 年で巨大惑星のコアが形成される