

惑星系天文学の未来

小久保英一郎 (国立天文台理論天文学研究系)

1 はじめに—惑星系天文学の基本問題

これまで太陽系の惑星だけが対象だった惑星系天文学は、太陽系外惑星系の発見により、太陽系に限らない一般的な惑星系についての最先端の天文学の分野の1つになった。その惑星系天文学の基本問題は次のようなものだろう。

1. 惑星系はどのようなものか?
2. 惑星系はどのくらいあるのか?
3. 惑星系はどのようにしてできるのか?
4. 第2の地球 (生命を宿す惑星) はあるのか?

これらの問題に対する答を観測的かつ理論的に求めて行くのがこれからの惑星系天文学の課題となろう。ここでは簡単に太陽系形成シナリオの問題を整理し、今後の方向について考えてみる。

2 太陽系形成標準シナリオ

まず太陽系形成の標準シナリオをまとめておく (e.g., 渡辺・井田 1997)。惑星系 (太陽系) 形成の2大基本概念は

円盤仮説

惑星系はガスとダストからなる中心星と比べて質量の小さい星周円盤から形成される。

微惑星仮説

先にダストから固体惑星が形成され、その後ガスを捕獲することによってガス惑星は形成される。

である。円盤仮説は太陽系の質量の太陽集中と角運動量の惑星集中、惑星軌道がほぼ同一平面上にあるという事実から自然に推測される。この太陽系の母胎となる星周円盤は原始太陽 (惑星) 系円盤と呼ばれる。また、微惑星仮説は地球型 (岩石) 惑星・天王星型 (氷) 惑星はもちろんのこと、木星型 (ガス) 惑星でも、重元素の存在比が太陽組成より大きなことから要請される。

図1に原始太陽系円盤からの太陽系形成の概念図を示す。シナリオの概要を説明する。

- (0) 原始太陽のまわりにその誕生とともに、ガスとダストからなる円盤状の原始太陽系円盤が形成される。

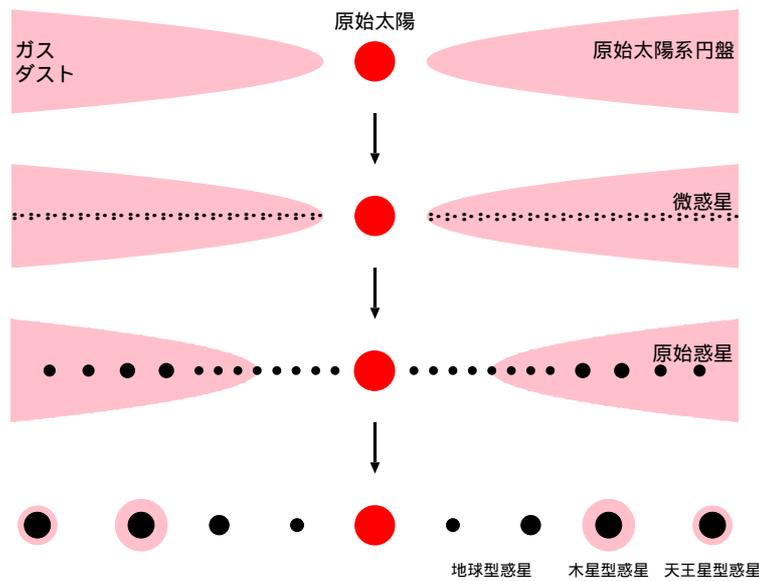


図 1: 太陽系形成シナリオの概念図。

- (1) 原始太陽系円盤中のダストから第一世代のマクロな天体である微惑星 (10^{15-18}kg) が形成される。
- (2) 微惑星は太陽のまわりを公転しながら互いに衝突合体 (集積) して成長する。微惑星の成長により原始惑星とよばれる第二世代の天体 (10^{24-26}kg) が形成される。
- (3) 地球型惑星は原始惑星の衝突合体により完成する。
- (4) 木星型・天王星型惑星領域ではより大きな原始惑星が形成される。この原始惑星が原始太陽系円盤から重力によりガスをまとうことによって木星型・天王星型惑星は完成する。

3 残されている問題

この標準形成シナリオは大枠では物理的に無理なく太陽系形成を説明できるが、様々な問題も残されている。以下に残されている主な問題を簡単にまとめる。

微惑星形成

微惑星形成には2つの考え方がある。1つは重力不安定説と呼ばれ、ダスト層の重力不安定によってダスト円盤が分裂し、分裂片が収縮して微惑星が形成されるというものである。もう1つはダストの段階的付着成長説と呼ばれ、重力不安定をかいさずにダストをこつこつと地道に積み上げて微惑星を形成するというものである。どちらの描像が正しいのかは原始太陽系円盤の運動状態による。

木星型・天王星型惑星の形成時間

木星型惑星を形成するには、ガス円盤が十分ある間にコア（原始惑星）が形成されていなければならない。木星のコアが数地球質量だとすると、標準シナリオでぎりぎりコアを形成することができる。さらに厳しい問題なのは天王星型惑星の形成時間である。標準シナリオでは海王星の形成時間が太陽系の年齢を越えてしまう。

ガス円盤の消失過程

ガス円盤の消失過程は実はまだよくわかっていない。原始太陽の強力な紫外線や太陽風でガスを吹き飛ばすというアイデアがある。しかし本当に吹き飛ばせるのかはまだはっきりしない。また、巨大ガス惑星の形成によってその内側のガス円盤は巨大ガス惑星の重力トルクにより太陽に落されてしまう可能性も示唆されている。

惑星の移動

標準シナリオでは惑星はほぼその場で形成されると考えられている。しかし、近年、ガス円盤と惑星の相互作用により惑星は大きく移動する可能性が示唆されている。

小天体の起源

惑星の形成過程の大枠が明らかになって、やっと惑星以外的小天体の起源も惑星系形成の枠組の中で考えられるようになってきた。小惑星帯、カイパーベルト、彗星雲などの小天体系や、惑星まわりの衛星系についても惑星形成過程と矛盾しないような形成シナリオの構築が始められている。

このような問題を考える上で欲しい観測データはどのようなものか素直に述べる。惑星が存在する領域はせいぜい 50AU 以内と考えられる。このような領域のガスとダストの分布と運動をなるべく細かく知りたい。可能なら AU スケール以下で分解したい。ガスとダストの空間分布や運動状態を中心星の年齢の関数として知ることができれば、惑星系形成に重要な制限をつけることができる。例えば、上で述べたように微惑星の形成過程は原始惑星系円盤の運動状態による。乱流の弱い静かな円盤なら重力不安定説、強い乱流がある場合は段階的付着成長説になる。また、大きな惑星が形成されると惑星とガス円盤の相互作用によってガス円盤に構造が形成される。これを観測することによって、形成されつつある惑星の質量やガス円盤の消失過程、さらに惑星移動などが明らかになってくるだろう。

4 惑星系の普遍性と多様性—汎惑星系形成論へ

惑星系は太陽系だけではない。2002 年冬の時点で、太陽近傍の 100 個以上の恒星に惑星系が発見されている。しかもそのほとんどは太陽系とはまったく似ていない。発見された系外惑星はどれも木星程度以上の質量をもつ。その軌道は、軌道長半径が水星軌道より小さかったり（灼熱巨大惑星）、軌道離心率が彗星なみに大きかったり（大離心率惑星）、太陽系とは大きく違う。現在、太陽型星でのこのような惑星系の存在確率は約 3% である。惑星系は太陽系のようなものばかりではなかったのである。これらの太陽系外惑星系はどのよ

うにして形成されたのだろうか。そしてこのような惑星系の存在はこれまで見てきた太陽系形成シナリオと矛盾しないのだろうか。

太陽系形成シナリオは現在の太陽系の起源を説明するためにチューニングされたモデルである。これは、太陽系形成シナリオでは捨てられてきたパラメータが惑星系の多様性を生み出す可能性があること意味する。原始惑星系円盤は確率 50%以上で若い星のまわりに普遍的に存在する。原始惑星系円盤は実は多様で、質量には太陽質量の 1/1000–1/10 倍というばらつきがある (Beckwith & Sargent 1996)。しかし、標準シナリオでは原始惑星系円盤の質量は太陽質量の約 1/100 倍に固定されている。原始惑星系円盤の質量の多様性が惑星系の多様性を生み出す源かもしれない。また、標準シナリオでは考えられていない惑星の移動によって惑星系はますます多様になるだろう。

銀河系に普遍的に惑星系が存在することが明らかになった今、惑星系形成の研究を原始惑星系円盤に関するパラメータのより広い範囲に拡張する必要がある。そして、太陽系とは大きく違う多様な太陽系外惑星系の起源を解明し、太陽系の起源も含めた一般化された惑星系形成論、「汎惑星系形成論」を構築するのはこれからである (Kokubo & Ida 2002)。

5 まとめ

太陽系形成標準シナリオを概観し、そこに残されている主な問題について紹介した。これらの問題を解決し、シナリオを洗練していくことがまずやらねばならないことである。そのためには惑星系形成現場の詳細な観測データが必要である。惑星領域 ($\lesssim 50$ AU) での AU スケール以下での原始惑星系円盤の進化を知ることができれば、惑星系形成に大きな制限をつけることができるだろう。また、太陽系外惑星の形成シナリオの構築は始まったばかりである。今後、太陽系の起源を含めたより一般的な惑星系の起源について考える汎惑星系形成論へ進んでいくことになるだろう。

最後に最初にあげた基本問題について、現状をまとめておく。1. 惑星系は太陽系のようなものだけでなく多様であることがわかってきた。2. 惑星系は普遍的に存在する。太陽近傍の太陽型星に巨大惑星が存在する確率は約 3%となっている。3. 太陽系形成シナリオの大枠は押えられつつある。現在はそのシナリオの洗練と一般的な惑星系への拡張が進められつつある。4. これについてはこの稿では触れなかったが、TPF などの地球型惑星探査の計画が進んでいる。惑星系天文学の未来は明るい。遠くない未来に基本問題の答が得られるだろう。

参考文献

渡辺・井田 1997, 地球惑星科学 12 巻「比較系惑星学」, 岩波書店, 131

Beckwith, S. V. W., & Sargent, A. I. 1996, *Nature*, 383, 139

Kokubo, E., & Ida, S. 2002, *ApJ*, in press