

---

# 惑星形成理論の初期条件

~原始惑星系円盤の密度分布の由来を探る~

大阪大学 理学研究科  
宇宙進化グループ M2  
大谷卓也

---

# 概要

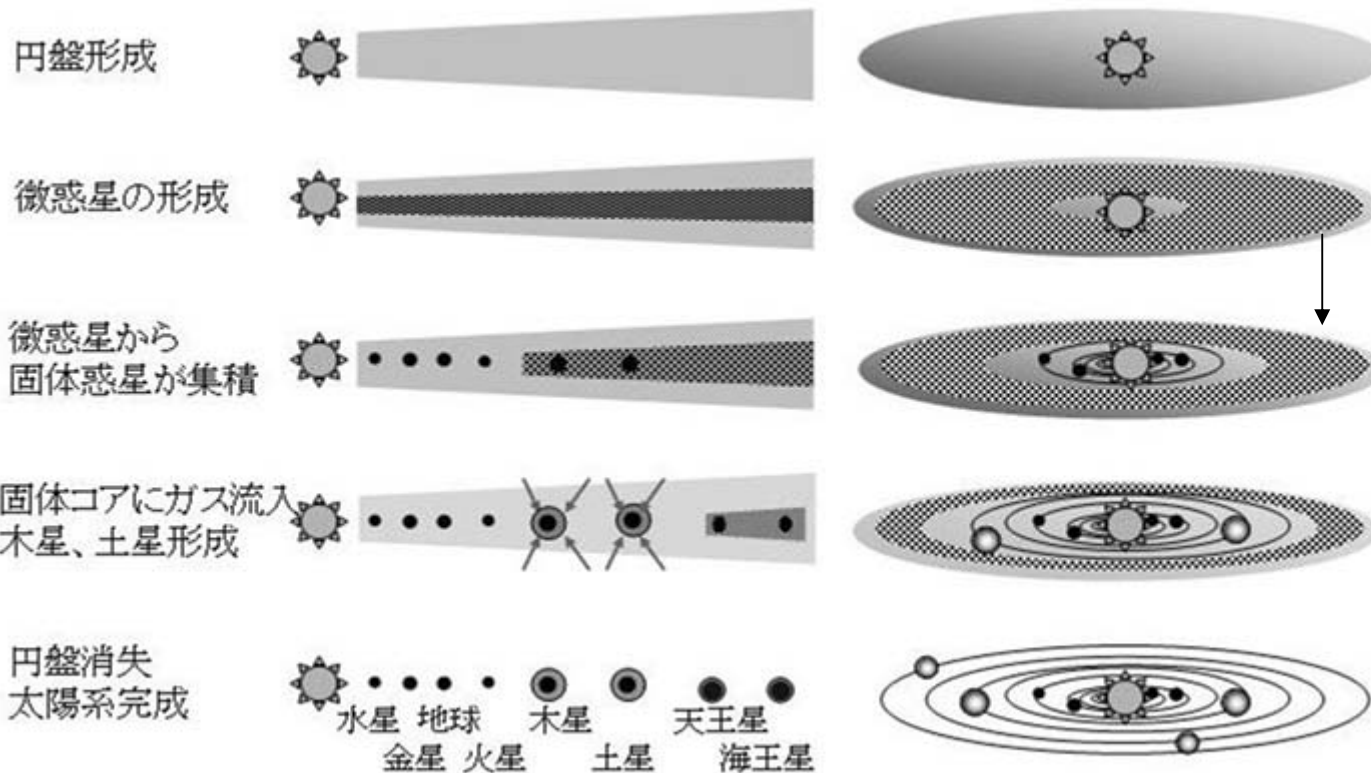
- 系外惑星を含めた惑星系の多様性は、最初に設定した原始惑星系円盤面密度の違いに起因するとした論文を紹介する。

Ref: Kokubo&Ida 2002 ApJ.581,666

- その論文の結果を元に、新たな問題提起を行う。では円盤の姿はどのように決まるのであろうか。考慮すべき物理量を列挙し、妥当性を議論する。問題点を提示するのが主な目的である。

# 1 Intro ~標準惑星形成理論~

## ■ 太陽系の形成を説明 (80年代~)



各段階の研究により一旦は解決

詳細

小久保・井田

1998,2000

---

# Intro: 標準理論の問題点

- 元々の標準惑星形成理論は太陽系の姿を説明するものであった。大まかには上にあるような図の流れになる。中心星の周りに軸対称に回転している円盤が存在し、其中で自己重力により微惑星ができ、それらが惑星の元となったとするものである。
  - 今回紹介する論文の著者は微惑星から原始惑星のステージにおいて先駆的な研究を成されている。こういう風にして、いくつか問題点はあるものの一旦は解決していた。
-

# Intro:系外惑星

## ■ 太陽系外での惑星

- ・ 太陽に近いところを巨大な惑星がまわっている('95~) (hot Jupiter)

(0.05AU,0.47木星質量.1.05太陽質量)

- ・ 地球のような惑星も見つかっている(2006)

(2.6AU 5.5地球質量 中心星:0.26太陽質量)

Ref):[http://planetquest.jpl.nasa.gov/atlas/atlas\\_index.html](http://planetquest.jpl.nasa.gov/atlas/atlas_index.html)



Hot Jupiterのイメージ  
ref:cosmosmagazine.com

“汎惑星形成理論”  
が必要

- 太陽系の外で惑星が見つかったからは、太陽系と違う姿をしている惑星系の説明が標準モデルではできないということになっていた。太陽系ではこんな位置に大きなものを作れるような材料が足りないのである。
- 標準モデルが万能ではないということが分かったが、実際には太陽系は存在しているし、のちに地球のような惑星もみつかった。
- なので、太陽系も説明でき、こういう太陽系とは違う惑星系も説明できる”汎惑星形成理論”の構築が求められている。
- 多くの方がこの問題に取り組まれ、いろいろと解決策が考えられている、今回紹介するのは、その解決策の一つとして、先ほどの理論のうち、微惑星が合体して原始惑星と呼ばれるものになるステージを修正した論文である。

# 論文紹介1:設定

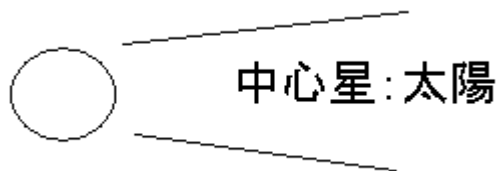
標準モデルの大筋は変えないでおく

円盤仮説・原始惑星系円盤を設定する

微惑星仮説・微惑星はできるものとする

重要な変更点:円盤の面密度

(dustの面密度と微惑星の面密度は同じとする)



中心星は太陽のような恒星として、円盤の面密度を変える。パラメータは  $\Sigma_1$ 、 $\alpha$

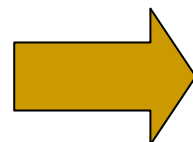
標準モデル

$$\Sigma_{dust} = 7.1 \times f_{ice} \left( \frac{r}{1AU} \right)^{-\frac{3}{2}} g/cm^2$$

修正モデル

$$\Sigma_1 f_{ice} \times \left( \frac{r}{1AU} \right)^{-\alpha}$$

$$\Sigma_{gas} = 2400 \times \left( \frac{r}{1AU} \right)^{-\frac{3}{2}} g/cm^2$$



$$\Sigma_{1,gas} \times \left( \frac{r}{1AU} \right)^{-\alpha}$$

# 論文紹介1

- この論文では、設定として、標準理論の大まかな流れは変えていない。”円盤ができた”とする円盤仮説、自己重力不安定により微惑星ができたとする微惑星形成仮説を取り入れている。
- 微惑星とダストの面密度分布が等しいとしたうえで、この論文の設定のポイントは、中心星は太陽程度のものを考えているのに(温度分布に関係)、円盤の面密度を標準モデルと違う分布にしたという点。
- いろんな円盤にあてはめられるようにパラメータとして  $\Sigma_1, \alpha$  を設定。

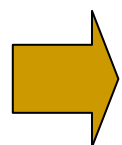


# 論文紹介2:惑星系の姿への影響

微惑星→原始惑星形成期において

孤立質量

形成時間



- ・地球型・・・固体コア
- ・木星型・・・巨大固体コア + envelop
- ・天王星型・・・巨大コア

微惑星の面密度が関係しているので、面密度を変えると大きな影響が

原始惑星集積の半解析理論 (小久保・井田1998,2000)

孤立質量  $M_{iso} \propto r^3 \Sigma_{dust}^{\frac{3}{2}}$

形成時間  $T_{grow} \propto M^{\frac{1}{3}} \Sigma^{-1} r^{\frac{1}{2}}$

$M^{\frac{1}{3}} \Sigma^{-1} r^{\frac{3}{2}}$

Gasあり

Gasなし

$\Sigma_{dust}$  を具体的に書かずパラメータ表示したものを、新たな汎半解析理論とする。(2002)

- 円盤密度を変えると影響してくる物理量がある。原始惑星の集積時間と孤立質量である。これら二つの物理量は、巨大ガス惑星が形成可能かどうかの基準となる。
- 原始惑星が大気流入の条件を満たさなければ木星のようにガス惑星にならないし、かといってその質量になるまでに円盤からガスが抜けてしまうと天王星海王星のように巨大氷惑星になってしまう。
- そして標準理論では上記のページ下のような式になる。見てわかるように、半径依存性と面密度依存性が入っている。
- 太陽系の中だけの閉じた話では、このダストの面密度のところに標準モデルの値を挿入したものになっており、重力N体計算でもそれを支持する結果になっている。  
(Kokubo&Ida 1998 2000)

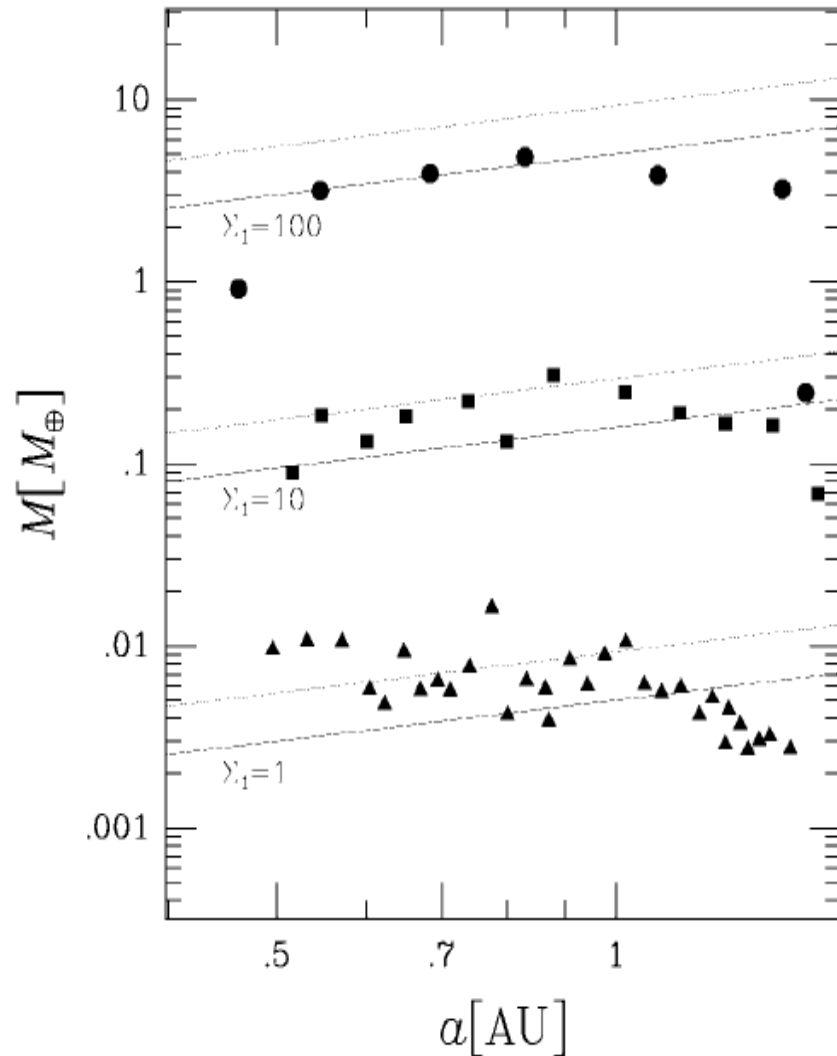
- ここでは、この  $\Sigma$  dust というところに、今回の面密度モデルの値を入れたものを修正原始惑星形成モデルとして提案している。
- そしてN体計算でも確認されている、その依存性が確認された。(下図参照)
- ここまでの結果で面白いのは、出来上がる原始惑星の姿はもともと設定した円盤の姿に大きく影響されるということである。

# 結果 1 (抜粋)

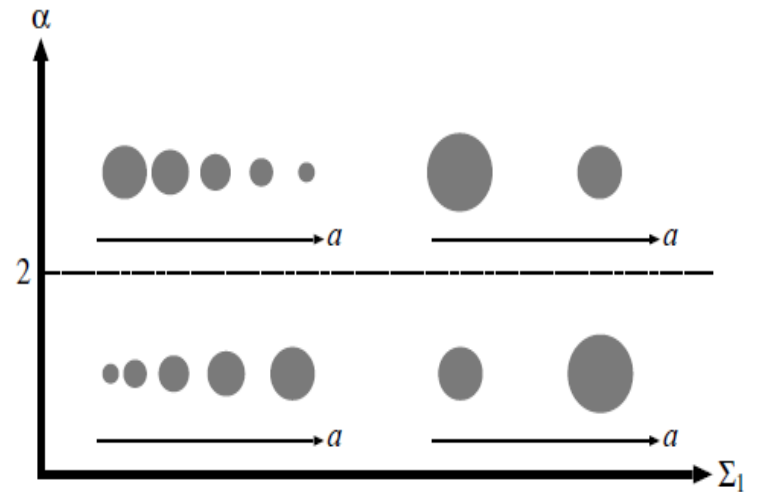
N体計算で確認(2002)

$$M_{iso} \propto r^3 \Sigma_{dust}^{\frac{3}{2}}$$

$$\propto \Sigma_1^{\frac{3}{2}} r^{\frac{3}{2}(2-\alpha)}$$



- $\Sigma_1$  が大きい方が原始惑星の質量が大きい(左図)
- $\Sigma_1$ ,  $\alpha$  を変えると、定性的には下図のようになる

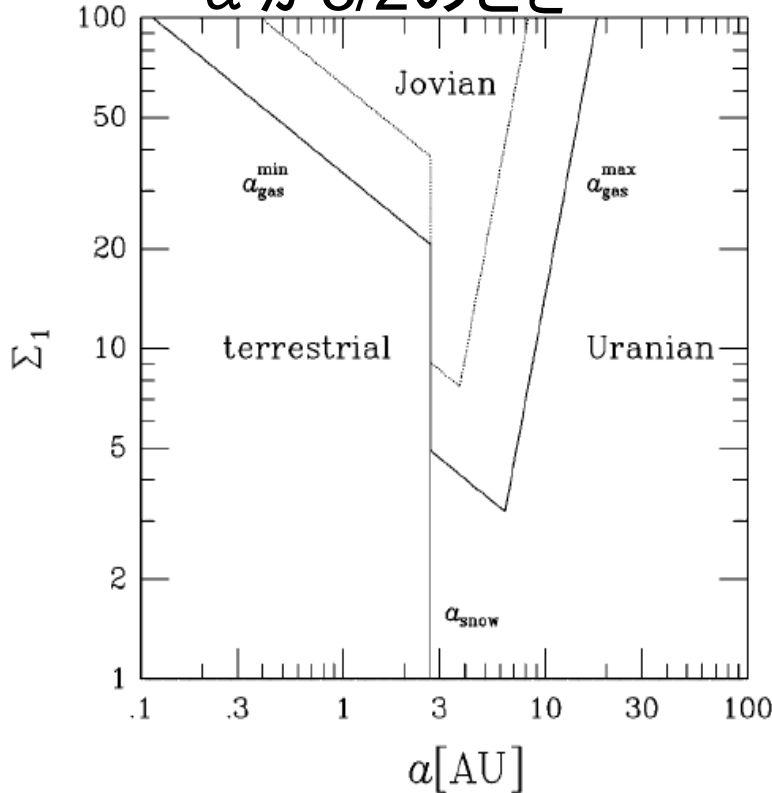


# 結果2(抜粋)

巨大ガス惑星形成条件をあてはめる

限界コア質量  $M_{crit} \approx 10M_{earth}$  Mizuno1980

$\alpha$  が3/2のとき



左のライン: 孤立質量 > 限界コア質量

右のライン: コア形成時間 > 円盤散逸

時間 ( $\sim 10^7$ yr)

・この二つの理論を巨大ガス惑星形成条件にあてはめると、形成可能領域がこのようになる。ガス円盤が存在しているときに限界コア質量を超えることが巨大ガス惑星形成条件。

・密度が大きいと、木星形成可能領域が広がる傾向がみえる。

・これは、密度が大きいと重い原始惑星ができるということと、衝突回数が多くなるのではやくその質量になるという効果の両方がかかっているということを反映している。

# 過去の研究のまとめ

- 微惑星→原始惑星の理論に従うと、  
微惑星の面密度が太陽系と異なれば  
(太陽系と異なる原始惑星系円盤を用意すれば)、  
最終的に木星型惑星の形成可能領域が変わる。
- Migrationの効果も合わせると多様な惑星系が  
説明できることが期待される。

**原始惑星系円盤の姿が大事**

# 問題提起

- 円盤の姿がどうなっているかが大事
- では、円盤はどうやってできる？
- 円盤は、星の形成時にできる

原始惑星系円盤の姿について、星形成の理論と整合性のとれた理論を作る必要がある

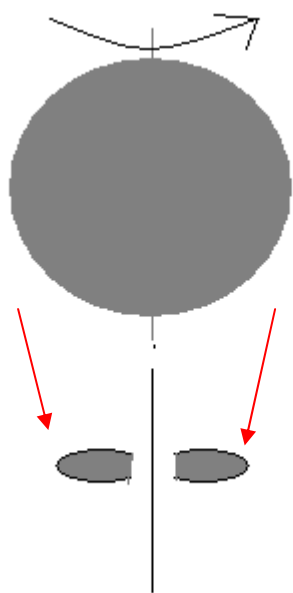
最初のアプローチ：円盤の姿を決める物理量は何であるのか？

# 星形成理論からの考察

(円盤ができる段階)

- 回転している分子雲コアが収縮し、平衡状態になっている。粘性なしとしたときのつりあいの式

模式図



重力      圧力勾配      遠心力

$\Omega$

$$F_r = \frac{c_s^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial r} - \frac{v_\phi^2}{r}$$

← 回転速度: 収縮前の角運動量を反映

$$F_z = \frac{c_s^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

← 音速: 系の温度に依存

重要なパラメータ

・温度 ・(分子雲コアの)角運動量分布



# 降着円盤の方程式からの考察

- 質量保存 
$$r \frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (r \Sigma v_r) = 0$$
- 運動方程式(r) 
$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{c_s^2}{\Sigma} \frac{\partial \Sigma}{\partial r} - F_r + \frac{v_\phi^2}{r}$$
- 角運動量保存 
$$r \frac{\partial}{\partial t} (\Sigma r v_\phi) + \frac{\partial}{\partial r} (r \Sigma v_r r v_\phi) = \frac{\partial}{\partial r} \left( \nu \Sigma r^3 \frac{\partial \Omega}{\partial r} \right)$$

$\nu$  : 粘性係数

粘性項

例)  $\nu = \text{const}$

$h \propto r^{\frac{5}{4}}$  太陽系円盤モデル

$\nu = \alpha c_s h$

粘性係数の形を変えると、変化の仕方が変わる

# まとめ

- 汎惑星形成理論において、初期条件として円盤の姿が大事
- 星形成の理論から一貫した円盤形成理論を作る必要がある

円盤形成の統一的な理解が必要であり、研究する価値がある。

- 姿を決めるとなる重要なパラメータは温度、初期角運動量分布、粘性の分布が挙げられる。
- ほかに、分子雲からの降着がいつ終わるのかも重要となる可能性