

散逸円盤中の円盤温度変化による惑星の獲得大気の応答

廣瀬 翔 (東京大学大学院 理学系研究科 M1)

Abstract

多数の発見報告がある低密度スーパーアースは、様々な内部組成モデルが議論されている。観測の進展により、質量と半径がともに分かった惑星も増えており、組成に対する議論も可能となった。しかし、質量-半径の関係のみでは、H-He 大気存在量によって岩石主体惑星と水成分主体惑星のどちらかを区別することができず、組成が縮退してしまうことが知られている。本研究では、従来の固体コア質量と獲得大気質量比計算では考慮されていなかった固体コアの熱進化を考慮することを目的とし、円盤温度に対する獲得大気量の応答を調べた。結果、主星から遠い位置で形成されたスーパーアースほど、大気質量が小さいことが分かった。今後固体コアの熱進化も入れて計算することで、さらに正確に内部組成に制約が与えられ、惑星形成への理解が進むと期待される。

1 Introduction

現在、約 900 個の系外惑星の発見報告がなされ、およそ 20 地球質量以下のスーパーアースと呼ばれるような低質量惑星の報告も増えてきている。また、視線速度法とトランジット法の技術進化により質量と半径が測定された惑星も多く、惑星の組成に関する議論も可能となってきた。

スーパーアースの中には、同じ質量の岩石惑星よりも半径が大きく、低密度なものが多く存在することが明らかになってきた。しかし、観測された質量-半径の関係を満たす内部組成モデルは複数存在し、内部組成の解が縮退している。内部組成は惑星がどこで集積・移動するかの手がかりとなるため、惑星の形成過程を考える上で組成の縮退を減らすことが必要となる。今回の研究では、組成が縮退している一つの原因である、H-He 大気の獲得量に着目した。

H-He 大気を多量に纏っている岩石主体惑星と H-He 大気が薄い水成分主体惑星は、半径・質量とも一致してしまう。そのため、観測量である質量-半径の関係だけでは岩石主体か水成分主体かを推定することはできなくなってしまうので、H-He 大気量の見積もりが組成推定において重要となる。スーパーアースが獲得する H-He 大気量につて、Ikoma & Hori (2012) で議論されている。彼らは、Ikoma & Genda (2006) の計算モデルをもとに、原始惑星系円盤中で準静的な進化を遂げる岩石コア惑星が獲得する H-He 大気

量を数値計算により求めた。その結果、円盤温度と円盤消失時間の依存性はあるが、全惑星質量に対しておよそ 10% の H-He 大気を獲得するまでは、コア質量が増えるにつれて大気質量比も増えていく。しかし、獲得大気質量比が約 10% を超えると、大気の暴走獲得が起きてしまい巨大ガス惑星へと成長してしまうため、大気質量比は急激に上昇するということが分かった。また円盤の散逸過程において、惑星の大気流出が起こることも分かった。

彼らは、固体コアの熱進化を正確には計算しておらず、コアの比熱が一定と仮定していた。しかし、円盤散逸過程における大気流出には、円盤ガスの圧力減少による大気膨張効果よりも固体コアによる大気加熱の影響の方が大きいと考えられる。よって固体コアの熱進化もより厳密に計算することで、大気の暴走獲得の閾値や獲得大気量が変化する可能性がある。そこで本研究では、スーパーアースの惑星内部組成に制約を与えるため、岩石コアの熱進化を考慮した惑星の獲得大気量を推定。そのために、まずは Ikoma & Genda (2006) の計算手法で、惑星を包む円盤の温度を変化させ、それに対する大気質量の応答を調べた。

2 Methods

固体コアは一定の熱放射を出すと仮定し、円盤温度を変化させて惑星大気構造について数値計算を行った。モデルは Ikoma and Genda (2006) のものを用いた。

2.1 基礎方程式

周囲の円盤ガスに接続した状態の球対称大気を仮定した。

静水圧平衡：

$$\frac{\partial P}{\partial M_r} = -\frac{GM_r}{4\pi r^4} \quad (1)$$

質量保存：

$$\frac{\partial r}{\partial M_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho} \quad (2)$$

ここで、 P, ρ は大気の圧力と密度、 r は惑星中心からの距離で M_r は半径 r の球内部の質量、 G は重力定数である。

大気の温度構造および熱進化は以下の式により記述される。

エネルギー伝達：

$$\frac{\partial T}{\partial M_r} = -\frac{GM_r}{4\pi r^4} \frac{T}{P} \nabla \quad (3)$$

エネルギー保存：

$$\frac{\partial L_r}{\partial M_r} = -T \frac{dS}{dt} \quad (4)$$

T は大気の温度、 S はエントロピー、 L_r は半径 r の球が出すルミノシティであり、 κ はロスランド平均オパシティを用いた。

また、 ∇ は圧力温度勾配を表し

$$\nabla = \begin{cases} \nabla_{\text{rad}} = \frac{3}{16\pi acG} \frac{\kappa L_r P}{M_r T^4} & (\nabla_{\text{rad}} < \nabla_{\text{ad}}) \\ \nabla_{\text{conv}} = \nabla_{\text{ad}} + V^2 - U^2 & (\nabla_{\text{rad}} > \nabla_{\text{ad}}) \end{cases} \quad (6)$$

$$\nabla_{\text{ad}} = \left(\frac{\ln T}{\ln P} \right)_S$$

V, U は各地点ごと決まる値であり、大気中ではエントロピー変化以外は内部加熱源は無いと仮定した。

質量の時間変化：

$$\frac{dM_r}{dt} = \dot{M}_{\text{core}} \Theta(r - r_{\text{core}}) \quad (7)$$

$M_{\text{core}}, r_{\text{core}}$ は固体コアの質量と半径、 \dot{M}_{core} は微惑星の集積速度、 $\Theta(r - r_{\text{core}})$ は $r = r_{\text{core}}$ で 0 から 1 になるステップ関数である。

また、水素：ヘリウム：それ以外の組成のの質虜比は $X=0.74, Y=0.24, Z=0.02$ とし、状態方程式は Saumon et al (1995) を用いた。

2.2 境界条件

大気の内側境界 (大気-コア境界)：

$M_r = M_{\text{core}}$ において

$$r = r_{\text{core}}, \quad L_r = \frac{GM_{\text{core}} \dot{M}_{\text{core}}}{r_{\text{core}}} \quad (8)$$

コアの平均密度は $\rho_{\text{core}} = 3.9(\text{g}/\text{cm}^3)$ とした。

外側境界 (大気-円盤境界)：

$M_r = M_{\text{tot}}$ において、

$$\rho = \rho_s, T = T_s, r = \min(R_H, R_B) \quad (9)$$

$$R_H = \left(\frac{M_{\text{tot}}}{3M_*} \right)^{1/3} a, \quad R_B = \frac{GM_{\text{tot}}}{c^2} \quad (10)$$

ρ_s, T_s は円盤の密度と温度であり、 M_{tot} は大気も含めた惑星質量、 R_H, R_B はそれぞれ Hill 半径と Bondi 半径である。

3 Results

図.1 が円盤温度 $T_d = 200\text{K}, 550\text{K}, 940\text{K}$ とした場合の固体コア質量と獲得大気質量比の図である。獲得大気量比は円盤の散逸時間にもよるので、 $\tau_d = 10\text{kyrs}, 100\text{kyrs}, 1\text{Myrs}$ とした場合も調べた。

どのパラメータにおいても、コア質量が小さい領域では、コア質量の増加にともなって大気質量比も増加していく。コア質量がある閾値を超えると、とだんに大気質量比は増加し、大気の暴走獲得が起こっている。また、わずかではあるが、円盤温度が高く、散逸時間が短い程、大気暴走獲得が起きる大気質量比は小さくなる傾向がある。

今回の結果より、円盤の温度が高くなる、つまり中心星からの距離が遠い程、大気ガスの暴走獲得が起きる大気量が少なくなることが分かった。つまり、中心星からはなれた位置で形成された岩石惑星ほど、大気量は薄いことが示唆される。

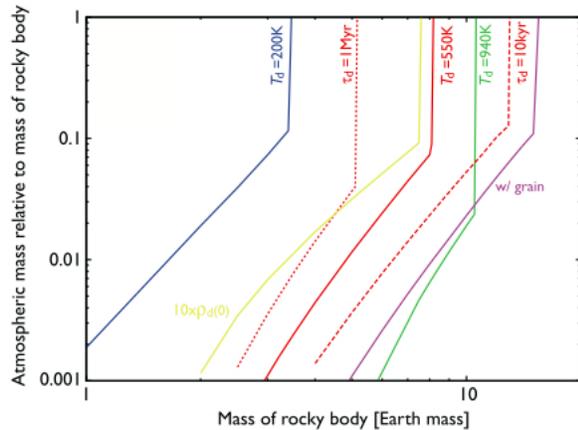


図 1: 円盤散逸後の固体コア質量と大気質量比。赤い実線は円盤温度 $T_d = 550\text{K}$ 、円盤散逸時間 $\tau_d = 100\text{kyrs}$ 。青と緑の実線は同じ散逸時間で $T_d = 200\text{K}$, $T_d = 940\text{K}$ としたもの。(Ikoma & Hori 20012 より)

4 Future Work

今回は固体コアからの熱放射が一定だと仮定してシミュレーションした結果、大気の薄い岩石惑星は比較的中心星から遠くで形成されたと考えられる。しかし、岩石コアの熱進化を考慮すれば、大気が加熱されることにより気流出が促進されると予想される。特に円盤と大気が接続している状況下では、収縮により円盤ガスが流入して惑星質量が増加することで、コアが加熱されて大気に対する放射は増加するはずである。よって、今後は固体コアの熱進化も含めて計算を行い、より正確な内部組成制約を求め、惑星形成に対する理解を進めていきたい。

Reference

- Ikoma, M., & Genda, H. 2006, *apj*, 648, 696
- Ikoma, M., & Hori, Y. 2012, *apj*, 753, 66
- Saumon, D., Chabrier, G., & van Horn, H. M. 1995, *apjs*, 99, 713
- Freedman, R. S., Marley, M. S., & Lodders, K. 2008, *apjs*, 174, 504
- Kokubo, E., & Ida, S. 2000, *icarus*, 143, 15