

回転不安定から考える原始惑星系円盤の外側領域の構造

小野 智弘 (京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室)

Abstract

1990 年代初頭に太陽系外惑星が初めて発見されて以後、2014 年 5 月の段階で 1700 個以上の系外惑星が発見されている。これらの中には、巨大惑星にもかかわらず短周期軌道を持つ短周期巨大惑星などの太陽系内惑星とは異なった性質を持つ惑星が多数存在する。このように、系外惑星は軌道や質量における多様性を持つ。しかし、系外惑星が持つ多様性の成因は未解決な問題である。この問題を解決する為に、惑星形成の場である原始惑星系円盤の構造や進化を従来研究に比べ、より詳細に調べることが必要である。ケプラー回転円盤の気体面密度分布の解析解として、相似解がある (Lynden-Bell & Pringle 1974)。最近では高感度電波観測によって原始惑星系円盤の測定が成されており、観測は原始惑星系円盤の気体面密度分布が相似解であることを示唆している。また、この気体面密度分布が相似解であることを仮定することで、原始惑星系円盤の大きさや質量などを観測結果から得ている。つまり、相似解は円盤の諸性質を測る為の定規として利用されている。我々は相似解が円盤外側領域において、重力に比べ圧力勾配力が無視できなくなる点に着目した。回転円盤内の圧力勾配力が無視できない領域では、回転不安定がおこることが理論的に知られている (Chandrasekhar 1961)。相似解の安定性について解析的に調べた結果、中心星の質量が小さく、かつ円盤外側で高温な場合には、相似解が回転不安定性の為に円盤外側領域で破綻することを発見した (Ono et al. 2014)。この結果は、相似解は円盤の諸性質を測る為の定規として、常に有用であるわけではないことを示唆する。また、円盤外側の面密度分布は ALMA 等の高感度電波観測により、近い将来詳細な観測が可能であると考えられる。これらの観測を本研究の結果と比較することで、回転不安定性の観測的検証が期待される。

1 導入

1990 年代初頭に太陽系外惑星が初めて発見されて以後、2014 年 5 月の段階で 1700 個以上の系外惑星が発見されている。これらの中には、巨大惑星にもかかわらず短周期軌道を持つ短周期巨大惑星などの太陽系内惑星とは異なった性質を持つ惑星が多数存在する。このように、系外惑星は軌道や質量における多様性を持つ。しかし、系外惑星が持つ多様性の成因は未解決な問題である。この問題を解決する為に、惑星形成の場である原始惑星系円盤の構造や進化を従来研究に比べ、より詳細に調べることが不可欠である。

原始惑星系円盤は一般的に、乱流起源の粘性による角運動量輸送によって進化すると考えられている。原始惑星系円盤の粘性進化のモデルとして Lynden-Bell & Pringle (1974, 以後 LBP74) がある。LBP74 ではケプラー回転円盤を仮定しており、これは圧力勾配力が中心星重力に比べ無視できるほど小さい時に良い近似となる。一般的に原始惑星系円盤の温度は低く、

圧力勾配力は中心星重力に比べ無視できるほど小さい。しかし、気体面密度が急激に変化する領域では圧力勾配力は無視することができなくなり、このような領域では圧力勾配力を考慮して LBP74 モデルを修正する必要がある。LBP74 モデルは、円盤面密度分布の解析解として相似解を与えている。相似解は時間と共に相似的に変化し、さらに円盤外側領域で面密度の指数関数的減少 (exponential tail) が見られる。exponential tail 領域はその面密度の急激な変化の為に圧力勾配力が無視出来ず、相似解は自己矛盾を起こしている。

近年の電波干渉計の技術進歩により、原始惑星系円盤の面密度構造を測定することが可能になってきている (e.g., Hughes et al. 2008; Andrews et al. 2009, 2010; Akiyama et al. 2013)。これらの観測結果は原始惑星系円盤が相似解的な面密度分布を持つことを示唆している。しかし、ALMA などの高感度電波干渉計では、圧力勾配力が無視出来なくなるような低

密度円盤外側領域の観測が可能になることが期待される。その為、ケプラー回転円盤を仮定しないで円盤外側領域を調べる事が求められる。

圧力勾配力が無視出来ない回転円盤では、流体不安定性の一つである回転不安定が起こることが知られている (Chandrasekhar 1961)。非粘性回転円盤において、回転安定となる為の条件は比角運動量 (j) が動径方向 (R) について単調増加になることであり、これをレイリー条件と言う。比角運動量は常に正の為、レイリー条件は

$$\frac{\partial j^2}{\partial R} > 0, \quad (1)$$

のように書ける。回転不安定は粘性により起こり難くなり、一方でエントロピー勾配を考慮すると起こり易くなる。しかし、本研究では簡単の為に不安定性の条件としてレイリー条件を用いる。

本研究では相似解の回転不安定性について調べた。また、回転不安定性について中立安定を満たす円盤の性質を解析的に求めた。その結果、中立安定では相似解よりも面密度勾配が緩やかになると共に、回転速度もケプラー回転より遅くなる事が分かった。もし回転速度のケプラー回転からの逸脱を観測することができれば、そこは圧力勾配力が強い領域であることを意味する。

2 章では回転不安定性について中立安定となる条件を解析的に求め、その結果を典型的な原始惑星系円盤に応用する。その後、非相似解的な面密度分布の観測可能性について 3 章で議論し、4 章でまとめを行う。本研究は一般的な降着円盤の外側領域に応用可能であるが、ここでは原始惑星系円盤に着目する。

2 原始惑星系円盤と回転不安定性

この章では回転不安定性について中立安定となる面密度分布を求める。また、相似解が回転不安定となる点で中立安定の面密度分布に接続する。

2.1 回転不安定性の中立安定

軸対称かつ鉛直方向に静水圧平衡な回転円盤について考える。円柱座標系での動径方向の力の釣り合

いの式は

$$\begin{aligned} \frac{j^2}{R^3} &= \frac{GM}{R^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R}, \\ &= \frac{GM}{R^2} + \frac{1}{\Sigma} \frac{\partial (c_s^2 \Sigma)}{\partial R} - \frac{c_s^2}{H} \frac{\partial H}{\partial R}, \end{aligned} \quad (2)$$

となる。 G は重力定数、 M は中心星質量、 P は圧力、 ρ は円盤面での密度、 Σ は面密度を表す。また、 $H \equiv c_s/\Omega_K$ はスケールハイトであり、 c_s は音速、 $\Omega_K \equiv (GM/R^3)^{1/2}$ はケプラー角速度である。ここで動径方向について局所的に等温を仮定する ($P = c_s^2 \rho$)。また、幾何学的に薄い円盤を仮定 ($H/R \ll 1$) かつ、鉛直方向の等温を仮定する ($\Sigma = \sqrt{2\pi} \rho H$)。

一般化の為に円盤半径、面密度の無次元量をそれぞれ

$$R = R_0 r \quad \text{and} \quad \Sigma = \Sigma_0 \sigma, \quad (3)$$

と定義する。ここで R_0, Σ_0 はそれぞれの規格化定数。動径方向の温度分布は、中心星に照らされた円盤モデルにおいて典型的な $-1/2$ の幕として仮定して、

$$T = T_0 r^{-1/2}, \quad (4)$$

とする (e.g., Kenyon & Hartmann 1987; Chiang & Goldreich 1997; D'Alessio et al. 1998)。この時、音速とスケールハイトは

$$c_s = c_0 r^{-\beta/2} \quad \text{and} \quad H = H_0 r^{(3-\beta)/2}, \quad (5)$$

となる。 $T_0, c_0, H_0 = c_0/(GM/R_0^3)^{1/2}$ はそれぞれ $R = R_0$ での温度、音速、スケールハイト。

(1)-(5) 式より、回転不安定性について中立安定となる条件は

$$\frac{3}{2} \frac{\partial (\ln \sigma)}{\partial (\ln r)} + \frac{\partial^2 (\ln \sigma)}{\partial (\ln r)^2} + \left(\frac{R_0}{H_0} \right)^2 r^{(-1/2)} - \frac{21}{8} = 0, \quad (6)$$

となる (see also Yang & Menou 2010)。(6) 式の解を σ_{ms} とすると、

$$\sigma_{\text{ms}} = \exp \left[-\frac{2}{3} C_1 r^{-3/2} + 2 \left(\frac{R_0}{H_0} \right)^2 r^{-1/2} + \frac{7}{4} \ln r + C_2 \right], \quad (7)$$

C_1, C_2 は積分定数。この時、(7) 式は回転不安定性に対して中立安定な面密度分布となる。

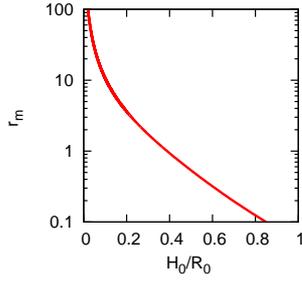


図 1: H_0/R_0 と r_m の関係性。

2.2 相似解の回転不安定性

ここで LBP74 モデルの解である相似解が回転不安定となる臨界半径を調べる。ケプラー回転円盤の面密度進化の式は、

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[R^{1/2} \frac{\partial}{\partial R} (R^{1/2} \nu \Sigma) \right], \quad (8)$$

となり (e.g., Pringle 1981), t は時間, ν は粘性係数を表す。ここで α 粘性円盤モデル (Shakura & Sunyaev 1973) より, ν は

$$\nu = \alpha c_s H \propto r, \quad (9)$$

と表され, α は標準粘性パラメータと呼ばれる。面密度進化の式の解析解を r と t に関して変数分離した時, r に依存する方を σ_s とすると,

$$\sigma_s = r^{-1} \exp[-r], \quad (10)$$

となる (Hartmann et al. 1998)。これを相似解と呼び, 相似解が不安定となる半径 r_m は (10) 式を (6) 式に代入して,

$$\left(\frac{R_0}{H_0} \right)^2 = \frac{5}{2} r_m^{3/2} + \frac{33}{8} r_m^{1/2}, \quad (11)$$

となる。 $r > r_m$ において相似解は回転不安定となり, その分布を維持できない。図 1 で横軸 H_0/R_0 , 縦軸 r_m を示した。典型的な原始惑星系円盤では $\beta = 1/2$ で, H_0/R_0 が 0.1-0.3 の範囲にある。 $H_0/R_0 = 0.1, 0.2, 0.3$ における r_m は, それぞれ凡そ 10, 3, 1 となる。

2.3 面密度分布

簡単な為に, 回転不安定の結果, 中立安定面密度分布になるとし, $r = r_m$ で相似解と中立安定面密度分布

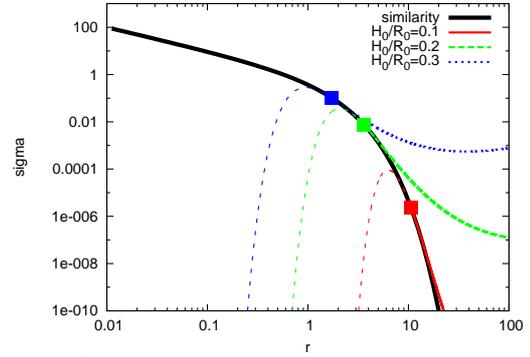


図 2: 面密度分布の図。相似解 (黒線) と中立安定面密度分布 (赤線, 緑破線, 青点線) を $r = r_m$ (四角点) で滑らかに接続した。赤, 緑, 青はそれぞれ $H_0/R_0 = 0.1, 0.2, 0.3$ を表している。

が滑らかに接続すると仮定する (Tanigawa & Ikoma 2007)。この時, 接続条件は,

$$C_1 = \frac{3}{2} r_m^{5/2} + \frac{11}{8} r_m^{3/2}, \quad (12)$$

$$C_2 = \frac{2}{3} C_1 r_m^{-3/2} - \frac{11}{4} \ln r_m - 6 r_m - \frac{33}{4}, \quad (13)$$

となる。(7), (10)-(13) より, 横軸半径 r , 縦軸面密度分布 σ で表したものが図 2 である。黒線は相似解を表し, 赤線, 緑破線, 青点線はそれぞれ $H_0/R_0 = 0.1, 0.2, 0.3$ での中立安定面密度分布に対応している。また, 四角点は各 H_0/R_0 での r_m の位置を表す。 $r > r_m$ では相似解は回転不安定となり, 中立安定面密度分布になっている。中立安定面密度分布は相似解に比べて面密度の減少が緩やかであることが分かる。

2.4 回転速度分布

$r > r_m$ で中立安定面密度分布を持つとすると, 中立安定の条件が $\partial j / \partial r$ なので, この領域における比角運動量は一定となる ($j(r) = j(r_m)$)。よって回転速度 (v_ϕ) は $r > r_m$ で

$$v_\phi \equiv \frac{j}{R} = \sqrt{\frac{GM r_m}{R_0}} r^{-1}, \quad (14)$$

となる。ケプラー回転速度は $v_K \equiv \sqrt{GM/R_0} r^{-1/2}$ なので, 中立安定面密度分布を持つのであれば, 円盤外側領域で角速度がケプラー回転より遅くなる。逆に, ケプラー回転からの逸脱を観測することが出来れ

ば、回転不安定性が円盤に影響を与えていることを示唆する。

3 議論

3.1 非相似解的な面密度分布の観測可能性

この章では非相似解的な面密度分布を持つ原始惑星系円盤の観測可能性について議論する。図 1, 2 より回転不安定性は H_0/R_0 の値に依存する。一般的な T タウリ型星周りの円盤のスケールハイトは

$$\frac{H}{R} \approx 0.1 \left(\frac{T_0}{28\text{K}} \right)^{1/2} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{-1/2} \left(\frac{R_0}{100\text{AU}} \right)^{1/4}, \quad (15)$$

と表せ、典型的に $H_0/R_0 = 0.1 - 0.18$ となる。ここで、 T_0 は $R = R_0$ での円盤温度である。 H_0/R_0 は中心星質量が小さく、温度が高い円盤ほど大きくなるのが分かる。また、原始惑星系円盤の近傍に大質量星があり、大質量星からの照射を受ける場合はより円盤が高温になる。その為、 H_0/R_0 の値は約 0.3 まで近づき得る。

図 2 より、 $H_0/R_0 \sim 0.1$ の時、相似解が回転不安定になるのは非常に低密度な領域であり、非相似解的な面密度分布を観測することは困難である。しかし、 $H_0/R_0 \sim 0.2 - 0.3$ の時、相似解が回転不安定となるのは、観測が不可能な程低密度領域ではない。ALMA 等の高感度電波望遠鏡によって、中心星質量が小さく温度が高い円盤や、大質量星の照射を受ける円盤を持つ非相似解的な面密度分布や回転速度分布が観測されることが期待される。

さらに、ガスがケプラー回転より遅い時、ダストが動径方向内側に移動することが知られている (Takeuchi et al. 2005)。このことから、ガスだけでなくダストを観測することによっても非相似解的な面密度分布の存在を確かめることが出来ると考えられる。

3.2 本研究の不定性

本研究で相似解は円盤外側領域で回転不安定となることを明らかにしたが、その結果どのような面密度分布、回転速度分布になるかは明らかではない。実際の面密度分布、回転速度分布、またその時間進化を知

る為には、幾何学的に常に薄いことや、軸対称などの仮定をせずに流体計算をして円盤の進化を求める必要がある。これは近い将来やらなければならない課題である。

4 まとめ

本研究では原始惑星系円盤の面密度分布が相似解を取りうるか、またその安定性について議論した。我々は相似解が円盤外側領域で回転不安定となることを明らかにした。中心星質量が小さく円盤の温度が高い時や、円盤近傍の大質量星によって円盤が照らされる時、非相似解的な面密度分布、回転分布が ALMA 等の高感度電波望遠鏡によって観測される可能性があることを予測した。また、回転不安定性の結果円盤面密度分布がどのようなようになるかを流体計算によって求めることは近い将来やらなければならない仕事である。

Reference

- Akiyama, E., Momose, M., Kitamura, Y., et al. 2013, PASJ, 65, 123
- Andrews, S. M., Wilner, D. J., Hughes, A. M., Qi, C., & Dullemond, C. P., 2009, ApJ, 700.1502
- Andrews, S. M., Wilner, D. J., Hughes, A. M., Qi, C. & Dullemond, C. P. 2010, ApJ, 723, 1241
- Chandrasekhar, S. 1961, Hydrodynamic and Hydro-magnetic Stability, International Series of Monographs on Physics (Oxford: Clarendon)
- Chiang, E. I., & Goldreich, P. 1997, ApJ, 490, 368
- D'Alessio, P., Canto, J., Calvet, N., & Lizano, S. 1998, ApJ, 500, 411
- Hartmann, L., Calvet, N., Gullbring, E., & D'Alessio, P. 1998, ApJ, 495, 385
- Hughes, A. M., Wilner, D. J., Qi, C., & Hogerheijde, M. R. 2008, ApJ, 678, 1119
- Kenyon, S. J., & Hartmann, L. 1987, ApJ, 323, 714
- Lynden-Bell, D., & Pringle, J. E. 1974, MNRAS, 168, 603
- Ono, T., Nomura, H., & Takeuchi, T. 2014, ApJ, 787, 37
- Pringle, J. E. 1981, ARA&A, 19, 137
- Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. 1973, A&A, 24, 337
- Takeuchi, T., Clarke, C. J., & Lin, D. N. C. 2005, ApJ, 627, 286
- Tanigawa, T., & Ikoma, M. 2007, ApJ, 667, 557
- Yang, C.-C., & Menou, K. 2010, MNRAS, 402, 2436