

N-body simulation for evolution of spiral arms

熊本 淳 (東北大学大学院 理学研究科)

Abstract

孤立系の円盤銀河を想定した N 体シミュレーションを行ない、spiral arms の形成と進化の様子調べる。シミュレーションの結果として現れた spairal arms を思わせる構造について、logarithmic spiral を想定したフーリエ解析を行い、その進化の様子を解析する。解析の結果、spiral arms の構造は時間変化していることを発見した。spiral arms は形成されながら徐々にピッチ角を小さくし、さらにピッチ角を小さくしながら消えていった。この進化の過程は swing amplification を思わせる。銀河が数回転するまでの間は形成と消滅を繰り返したが、その後は形成されなくなった。

1 Introduction

spiral arms の形成については、密度波理論 (Lin. & Shu. (1964)) や swing amplification theory (Toomre. (1981)) などが考えられている。また、観測による研究から spiral arms の構造や進化について調べる研究なされてきた。しかしながら、spiral arms の dynamics についての理解は未だに完全ではない。

そこで、今回、N 体シミュレーションを行い spiral arms の形成、進化について調べる。特にシミュレーションの結果得られた spiral arms の構造がどのように進化するか、その時間発展についてフーリエ解析を用いて追跡する。

2 Simulation Model

今回、spiral arms の形成と進化を調べるため、孤立系にある円盤銀河を想定した N 体シミュレーションを行なう。このシミュレーションでは、ダークマターハローとディスクからなる銀河を考える。ディスクはガスを考えず、星だけからなる pure stellar disk とする。

2.1 halo

ハローは定常的な球対照なものを考える。ハローの重力ポテンシャルとして plummer model

$$\Phi_{halo}(r) = -\frac{GM_{halo}}{\sqrt{r^2 + b^2}}$$

を用いる。ここで、G は万有引力定数で、 M_{halo} はハローの全質量、b はハローの形を決定するフリーパラメータ。今回のシミュレーションでは $b = 10^{-0.5}$ を用いた。

2.2 disk

今回のシミュレーションでは簡単のため 2 次元かつガスなしのディスクを考え、星粒子の表面密度分布は

$$\Sigma(R) = \Sigma_0 \exp\left(-\frac{R}{R_d}\right)$$

とする。ここで、 Σ_0 は中心での表面密度で、 R_d はスケール半径。また、ディスクの安定性を表す Q パラメータ

$$Q = \frac{\sigma_R \kappa}{3.36 G \Sigma}$$

の初期値は 1.3 とした。ここで、 σ_R は動径方向の速度分散、 κ は epicyclic 振動数。このようなモデルでの星の rotation curve は図 1 のようになる。

シミュレーションを簡単にするために $10R_d = 1$ として、無次元量として扱う。また、 $R=1$ より内側のハローとディスクの質量比は 1:1 とした。

3 Results

シミュレーションの結果を図 2、図 3 に示す。各時間において、図に表したエリアを 80×80 のメッシュに区切り、face-on から見たときに各メッシュ内

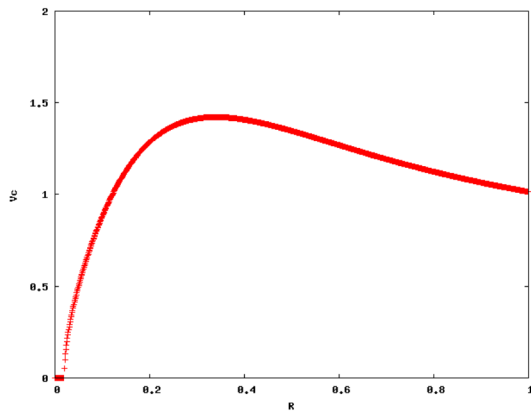


図 1: rotation curve

の粒子数をコントアで示したもの。ここで時間は、 $R = 0.2$ において粒子が 1 回転する時間を $T = 1$ とする。

この結果から、始め spiral arms を思わせる構造が現れるが、その後その構造が消えているように見える。この構造についてフーリエ解析を行い、amplitude A を求める (Sellwood, & Carlberg, (1984))。具体的な式は以下のとおり。

$$A = \frac{1}{N^2} \left[\sum_i \cos(\Theta_i) + \sum_i \sin(\Theta_i) \right]^2$$

$$\Theta_i = m\theta_i + p \ln r_i$$

ここで r_i 、 θ_i は i 番目の粒子の極座標表表記での座標、 m は波数を表し、spiral arms の腕の数に相当する整数。 p は spiral arms のピッチ角を特徴づけるパラメータで、ピッチ角は $\arcsin(p/m)$ で与えられる。シミュレーション結果を $m=3$ の場合について各時刻、各 p で amplitude を求め、図 4 にコントアで示す。図 4 では amplitude の大きいところが、図の左下から右上にかけてライン上に分布していることがわかる。 p はピッチ角を特徴づけるパラメータであったことから、spiral arms は大きいピッチ角で現れ、時間発展に伴ってピッチ角が小さくなり、その後消えるという特徴が表れていることがわかる。また、 $T \sim 3$ までは連続的に spiral arms が現れては消えてという特徴を繰り返している。その後は特に目立った amplitude は現れなかった。

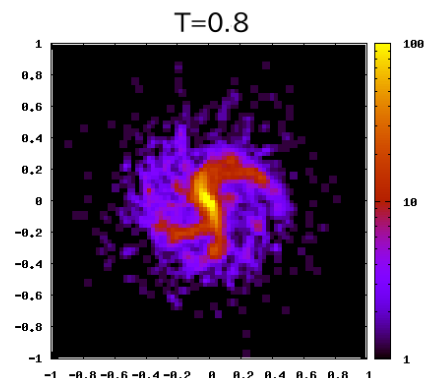
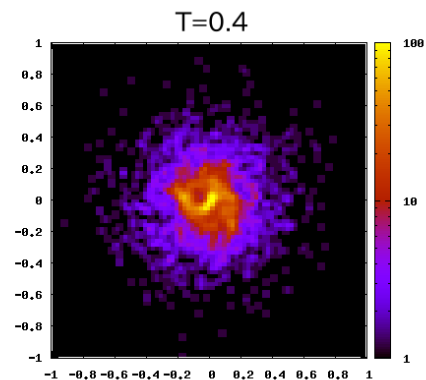
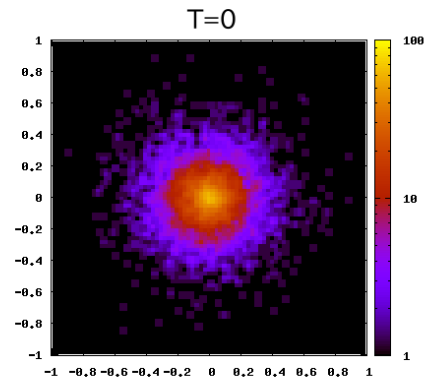


図 2: time sequence for the evolution of a disk

4 Discussion & Conclusion

spiral arms の形成と進化を調べるために孤立系にある円盤銀河の pure stellar disk についての N 体シ

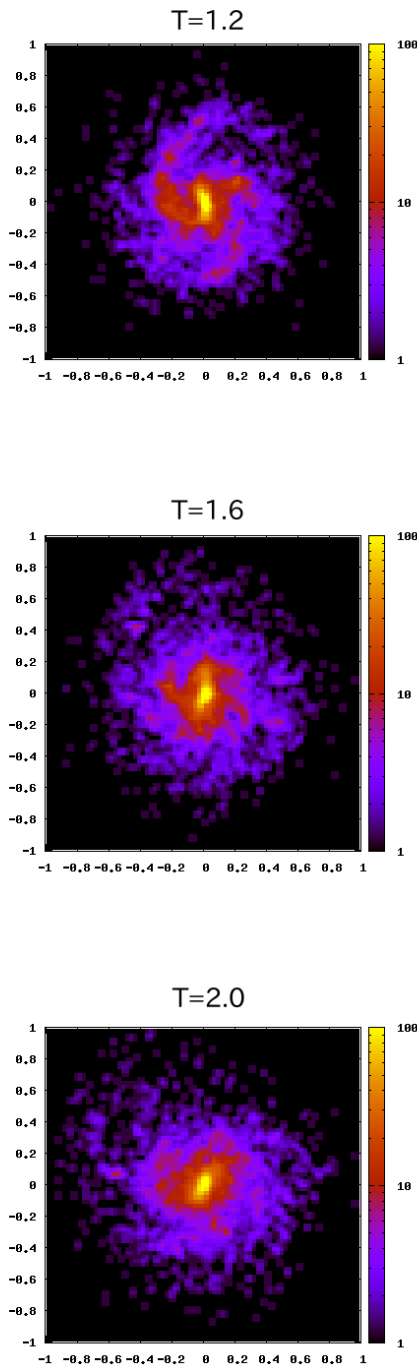


図 3: 図 2 の続き

ミュレーションを行った。その結果を時間ごとにフーリエ解析したところ、図 4 のような結果が得られた。

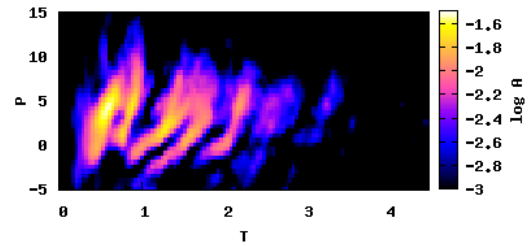


図 4: evolution of Fourier amplitude

ここから言える特徴としては、spiral arms は大きいピッチ角で現れ、徐々にピッチ角を小さくしながら成長し、ある程度成長するとピッチ角はさらに小さくなるが spiral arms としての構造は消えていく。この特徴は swing amplification(Toomre. (1981)) によく似ている。

また、 $T \sim 3$ 以降で目立った amplitude が現れなかった。これは、粒子数が少なかったために初期状態で Poisson noise が大きくなり、その結果として heating が早く進みディスクが安定になってしまったため (Fujii et al. (2011)) だと考えられる。粒子数を大きくすれば、より長い時間 spiral arms を維持できると考えられる。

今回のシミュレーションでは孤立系の円盤銀河で swing amplification を思わせる過程で spiral arms の構造が形成、進化した。さらに real な銀河について spiral arms について調べるために、ガスやフィードバック効果を入れたり、satellite galaxy を入れたり、ダークマターハローの形状を変えたりすることも重要になってくるだろう。

Reference

- Sellwood, R.A. and Carlberg, R.G. 1984. ApJ, 282, 61
- Toomre, A. 1981. seng.proc, 111
- Fujii, M.S. and Baba, J. and Sitoh, T.R. and Makino, J. and Kokubo, E. and Wada, K. 2011. ApJ, 730, 109
- Lin, C.C. and Shu, F.H. 1964. ApJ, 140, 646