# wakeletsの非線形相互作用による銀河の大局的渦状腕形成

熊本 淳 (東北大学大学院 理学研究科)

## Abstract

円盤銀河に存在する渦状腕構造の形成と進化に対して数値シミュレーションによる研究が多くなされてい る。孤立系円盤銀河でのN体シミュレーションなどにより渦状腕の振る舞いやパターン(渦状腕の本数や巻 きの強さ)はよく理解されている。しかし、渦状腕の形成メカニズムそのものについては十分な理解がなさ れていない。近年の研究では局所的密度揺らぎ(wakelets)が接合することで大局的渦状腕を形成するという 提案がなされている。しかし、個々のwakeletsが接合するメカニズムの詳細な調査はなされていない。そこ で、本研究ではwakeletsが接合するメカニズムを詳しく調べた。N体シミュレーションを用いて、安定な 銀河円盤に摂動源を加え、人為的にwakeletsを発生させ、それらの相互作用について解析を行う。摂動源の 配置が異なるモデルを比較することで、wakeletsの非線形相互作用が大局的渦状腕を形成することを発見し た。また、近年のシミュレーションによる研究は、比較的本数の多い渦状腕(multiple-armed spiral)につい て「大局的渦状腕のパターン速度が各半径で星の回転速度と一致する」ことを示唆する。一方で、「大局的な 渦状腕はより局所的なモードの重ね合わせである」という主張も存在する。今回の結果は、より高い視点か らこれら2つの主張を統合する役割を果たす。

## **1** Introduction

円盤銀河に存在する渦状腕構造については、様々 な議論がなされてきた。しかし、渦状腕の形成と進 化のメカニズムは完全には解明されておらず、現在 でも重要な問題である。

渦状腕構造の形成と進化に対するアプローチと して数値シミュレーションが多く行われている。近 年のシミュレーション結果から、渦状腕は連続的に 形成と消滅を繰り返す一時的な構造 (Carlberg & Freedman 1985; Bottema 2003; Sellwood 2011; Fujii et al. 2011; Grand et al. 2012b,a; Baba et al. 2013; D'Onghia et al. 2013; Roca-Fàbrega et al. 2013) と 考えられている。この特徴はスイング増幅と一致する。

しかし、広い範囲で渦状腕の回転速度が星の回転 速度と一致する (Wada et al. 2011; Grand et al. 2012b; Baba et al. 2013; D'Onghia et al. 2013; Roca-Fàbrega et al. 2013) など、本来のスイング増幅とは 異なる性質も報告されている。さらに、本来のスイ ング増幅仮説は、すでに存在する密度ゆらぎから成 長する渦状腕の進化を計算したものであり、始めに 揺らぎが現れる過程には言及していない。そのため、 スイング増幅だけでは渦状腕の物理メカニズムを完 全には説明できないという問題点がある。

そこで、新たに渦状腕の形成メカニズムを考える必 要がある。一般に、渦状腕は銀河円盤の重力不安定に より形成される。そのため、星の速度分散が大きいモ デルでは銀河円盤が安定となり渦状腕が形成されな い (Sellwood & Carlberg 1984)。しかし、D'Onghia et al. (2013) は『安定な銀河円盤でも複数の摂動源 を加えることで局所的な密度揺らぎが発生し、それ らが互いに接合することで、大局的渦状腕が形成さ れる』と考察した。スイング増幅がひとつの揺らぎ からの成長を考えていたのに対し、この主張は複数 の揺らぎから渦状腕が形成されるという点で大きく 異なる。各密度揺らぎが星と同じ回転速度を持って いるとすると、星と渦状腕の回転速度の一致を自然 に説明できる。

一方で、Sellwood & Carlberg (2014) は、渦状腕 は複数の局所的なモードに分けられると主張した。渦 状腕と星の回転速度が一致するのは、渦状腕の本数 が多い場合に、各半径に存在するモードを重ね合わ せた結果がそのような分布に見えるためであると考 察した。

本研究では、局所的な密度揺らぎの相互作用を詳

しく解析し、より詳細な渦状腕の形成メカニズムを 考える。そこで、前述の D'Onghia et al. (2013) と同 様に、安定な銀河円盤モデルに摂動源として他の粒子 より質量の大きい粒子を加え、それらの重力により局 所的な密度揺らぎを発生させる。しかし、D'Onghia et al. (2013)の計算では、摂動源を恒星円盤上にラン ダムに発生させていた。そのため、形成される渦状 腕の物理メカニズムを解釈するのは難しい。そこで、 本研究では規則性を持って摂動源を配置する。これ により密度揺らぎの相互作用を単純なモデルとして 扱うことができ、解釈が容易になる。このようなシ ミュレーションの結果から、銀河円盤に局所的密度 揺らぎが生じた時、それらの非線形相互作用によっ て大局的渦状腕が形成されることを発見した。

2章では、今回のシミュレーションで用いた銀河モ デル、方法について述べる。3章でシミュレーション 結果の解析と簡単な解釈を行い、4章では、それら の結果から、大局的渦状腕の形成メカニズムを考え、 先行研究との関連性について考察する。

#### 2 Methods

孤立系にある円盤銀河を考え、定常的なダークマ ターハロー内の銀河円盤に対してN体シミュレーショ ンを行った。用いた銀河モデルについて、回転曲線 と銀河円盤の密度分布は以下のとおりである。

$$V_c = \frac{200}{1 + \left(\frac{R_d}{R}\right)^2} \left[\frac{R}{8kpc}\right]^{C_{shear}} km/s \qquad (1)$$

$$\rho_{disk}(R,z) \propto \operatorname{sech}\left(\frac{z}{z_s}\right) \exp\left(-\frac{R}{R_s}\right) \qquad (2)$$

ここで $R_d$  = は中心部で回転速度をゼロに収束させるためのファクターで、 $R \ll R_d$ で $V'_c$ はゼロに漸近する。今回の計算では、 $R_d = 0.4 kpc$ 、 $C_{shear} = 0.0$ とした。また、 $z_s, R_s$ はそれぞれ、scale height, scale radius を表す。今回の計算では、 $z_s = 0.3 kpc$ 、 $R_s = 3.0 kpc$ とした。銀河円盤の質量を $M_{disk} = 1.5 \times 10^{10} M_{\odot}$ とした時の回転曲線を図1に示す。

以上に示した方法で銀河円盤の運動をシミュレー ションによって計算する。さらに、今回の研究では局 所的な密度揺らぎを人為的に発生させる。そこで、Q パラメータが十分大きく、自発的に密度揺らぎが発生



図 1: 銀河の回転曲線

しない安定な円盤を用いる。D'Onghia et al. (2013) と同様に、安定な円盤に摂動源として他の粒子より質 量の大きい粒子を加える。それらの重力により局所的 な密度揺らぎを発生させる。D'Onghia et al. (2013) の計算では、摂動源を円盤上にランダムに発生させ ていた。そのため、銀河円盤の振る舞いは複雑で、渦 状腕の形成メカニズムを解釈するのは難しい。本研 究では規則性を持って摂動源を配置することで密度 揺らぎの発生を制御し、渦状腕の形成・成長のメカ ニズムを解明する道を開く。

具体的には、任意の半径の円周上に等間隔に摂動源 を配置する。これらの摂動源はその半径の星の平均回 転速度を最初に与え、等速円運動するようにした。摂 動源配置する半径や摂動源数を変化させたモデルを 比較することで、摂動源の周りで成長する wakelets 同士の相互作用から渦状腕が成長するメカニズムを 調べる。

## 3 Results

シミュレーションから得られた銀河の表面密度分 布の時間発展を図2に示す。図は摂動源の配置が異 なる4つのモデルについて上段から下段にかけて時 間発展の様子を表している。各 model a,b,c はそれ



図 2: model a,b,c,d における表面密度分布の時間発展。左列から順に model a,b,c,d の結果を表し、上段から順に時刻が 0Myr,150Myr,300Myr の表面密度をコントアで表している。図中の丸点はそれぞれのモデルで配置した摂動源の位置を表してい る。特に緑色の点はt = 0Myrにおいてx軸上の正の部分に配置した摂動源の位置を示している。

置しているが、円周の半径が異なる。model a,b は それぞれ 6kpc,9kpc の円周上に摂動源を配置してい る。model c は 6kpc と 9kpc の両方の円周上に摂動 源を配置した。また、model d は摂動源を配置せず 同様に計算を行ったモデルである。

摂動源の周りでは高密度な構造 (wakelets) がで きているのがわかる。model c では異なる半径に wakelets が形成されることで、相互作用を起こすこ とが期待される。このような相互作用の効果だけを 直接評価するために他モデルとの表面密度分布の差 を計算する。

$$\Delta \Sigma = (\Sigma_c + \Sigma_d) - (\Sigma_a + \Sigma_b) \tag{3}$$

 $\Sigma$ は各モデルの表面密度を表す。 $\Delta\Sigma$ を計算すること で、model c の表面密度が model a と model b の単 純な重ね合わせでなく、非線形的な相互作用によって 密度が増減する効果を含んでいることがわかる。そ

ぞれ任意の円周上に7つの摂動源(図の丸点)を配の結果を図3に示す。図中の赤色の領域が非線形相 互作用によって密度が増加した場所と言える。内側 と外側の摂動源結ぶ位置で非線形成長が起こってい るのがわかる。

> この構造について詳細に調べるためにフーリエ変 換を用いて回転角速度を調べた結果が4である。こ の結果より非線形成長は摂動源を間の半径で起こる ことがわかる。

#### **Discussion & Conclusion** 4

シミュレーション結果より wakelets の相互作用に より非線形成長をする渦状腕構造を確認した。今回 のシミュレーションは理想的なモデルであったが、実 際の渦状腕でこのようなメカニズムが及ぼす効果を 考える。



図 3: t = 300 Myr における  $\Delta \Sigma$  の分布。緑色の点は同時刻に おける model c での摂動源の位置を示している。コントアで赤く (青く)示した領域が  $\Delta \Sigma$  が正(負)の領域。



図 4: wakelets の非線形相互作用によって非線形成長した密度 構造をフーリエ解析した結果。横軸は銀河中心からの半径、縦軸 は回転角速度で、コントアでフーリエ強度を示している。水平方 向の直線は摂動源の回転角速度を表し、シアンの線は各半径の平 均回転角速度(実線)とLindblad resonance(破線)を示している。 え点は、このパラメータ空間での摂動源の位置を示している。

D'Onghia et al. (2013) は巨大分子雲が摂動源の役 割を果たし、wakelets を形成すると考えた。一方で、 Sellwood & Carlberg (2014) は、高解像度のシミュ レーションから円盤銀河に局所的なモードが複数存 在することを主張した。このようなモードは存在する 半径での星の平均回転速度で回転する波であり、今回 のシミュレーションで形成された wakelets と類似の 振る舞いを示す。よって、実際の円盤銀河ではこのよ うな局所的モードが非線形に相互作用し大局的渦状 腕を形成すると考えられる。また、非線形相互作用の 効果で形成される構造の特徴(図4)から、形成され る渦状腕は多くの先行研究(Wada et al. 2011; Grand et al. 2012b; Baba et al. 2013; D'Onghia et al. 2013; Roca-Fàbrega et al. 2013)が示唆するように各半径 で星と共回転すると考えられる。したがって wakelets が相互作用するタイムスケールでフーリエ解析すれ ば、星と共回転する大局的渦状腕が得られ、より長 いタイムスケールでフーリエ解析を行うと局所的な モードが見えると考えられる。

## Acknowledgement

基礎物理学研究所(研究会番号:YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

# Reference

- Baba, J., Saitoh, T. R., & Wada, K. 2013, ApJ, 763, 46
- Bottema, R. 2003, MNRAS, 344, 358
- Carlberg, R. G., & Freedman, W. L. 1985, ApJ, 298, 486
- D'Onghia, E., Vogelsberger, M., & Hernquist, L. 2013, ApJ, 766, 34
- Fujii, M. S., Baba, J., Saitoh, T. R., et al. 2011, ApJ, 730, 109
- Grand, R. J. J., Kawata, D., & Cropper, M. 2012a, MNRAS, 426, 167
- -... 2012b, MNRAS, 421, 1529
- Roca-Fàbrega, S., Valenzuela, O., Figueras, F., et al. 2013, in Highlights of Spanish Astrophysics VII, ed. J. C. Guirado, L. M. Lara, V. Quilis, & J. Gorgas, 612–617
- Sellwood, J. A. 2011, MNRAS, 410, 1637
- Sellwood, J. A., & Carlberg, R. G. 1984, ApJ, 282, 61
- —. 2014, ApJ, 785, 137
- Wada, K., Baba, J., & Saitoh, T. R. 2011, ApJ, 735, 1