

銀河衝撃波に伴う Wiggle Instability の再検討

菊池 大輔

千葉大学宇宙物理学研究室 M 1

概要

渦巻き銀河の多くには、渦状腕に垂直なダークレーン構造が見られる。この構造の原因の一つとして、Wiggle 不安定性が考えられている。Wada&Koda (2004) は 2 次元シミュレーションによってこの構造を再現した、数値不安定性に因る可能性も考えられたが、スキームに依らずに再現されたことからその可能性も否定されていた。しかし我々の用いた計算方法では、この構造は現れなかった。本研究では、今までの計算方法の問題点と我々の結果の妥当性を含め、Wiggle 不安定性について考えていく。

1 イントロダクション

M51 に代表される渦巻き銀河の特徴として、渦状腕に垂直なダークレーン構造が挙げられる。この構造の期限としては、自己重力不安定性と銀河衝撃波に伴う衝撃波後面の腕に垂直な方向での速度シアと密度勾配によって生じるとされている Wiggle 不安定性の 2 つが考えられている。Wada&Koda (2004) は、自己重力を含めない高解像度な 2 次元シミュレーション、つまり Wiggle 不安定性に起因するという立場からこの構造を再現した。シミュレーションで得られたこの構造は、数値不安定性に因る可能性も考えられたが、計算方法に依らず再現されたことから現在では Kelvin-Helmholtz 不安定性の一種として考えられている。しかし、この不安定性は数値流束の計算方法を工夫することで発生しなくなる。既に述べたとおり Wiggle 不安定性を考える上で、衝撃波付近の扱いが重要となる。ところがシミュレーションにおいて、数値解から得られる衝撃波の特徴が実際の衝撃波に対してなまった構造を持つため、これらの数値解から見積もった流束の値は信頼性に欠けるものと考えられる。そこで、衝撃波付近での物理量の変化は飛びを持つものと考え、通常の線形補間を行わず、異なる方法で流束を計算することにした。

2 計算方法とモデル

流束の決定には、数値流束を評価する面の両側 2 セルずつの速度、密度から単調性を保つように補外して求めた風上側の値を用いた。単調性を保つため minmod 制限関数を使ったが、これに加え補外に用いる勾配に

$$\left| \frac{\partial v_x}{\partial x} \right| \leq \frac{\alpha c_s}{\Delta x} \quad (1)$$

$$\left| \frac{\partial}{\partial x} \ln \rho \right| \leq \frac{\alpha}{\Delta x} \quad (2)$$

という上限をそれぞれに対して設けた。ここで c_s は音速、 Δx はセルの幅、 $\alpha(\geq 0)$ は 1 より小さい無次元の定数である。

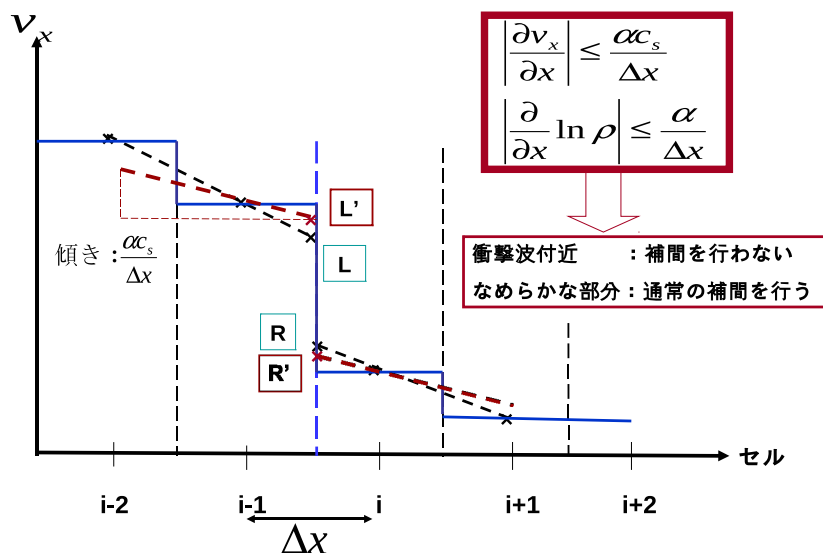


図 1: 流束計算の評価方法

図 1 は今回用いた数値流束の計算方法を表わしている。物理量の変化がそれほど大きくない部分では L, R を、物理量の変化が大きい衝撃波付近では通常の補外は行わずに L', R' の値を用いて数値流速を評価する。

簡単のため今回用いたモデルは、ガスは等温で自己重力を無視し、磁場は存在しないものとした。また、銀河の重力ポテンシャル Φ は回転系から見て以下の軸対称な Φ_0 と渦状の Φ_1 を採用した。

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_1 \quad (3)$$

$$\Phi_0 = -\sqrt{\frac{27}{4}} \frac{av_a^2}{(r^2 + a^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

$$\Phi_1 = \epsilon_0 \frac{ar^2\Phi_0}{(r^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \cos(2\phi + 2 \cot i \ln r) \quad (5)$$

ここで、コア半径 $a = 2\text{kpc}$ 、回転速度 $v_a = 220\text{km s}^{-1}$ 、ポテンシャルの強さ $\epsilon_0 = 0.01$ 、ピッチ角 $i = 10^\circ$ とした。

3 結果

銀河モデルを同一 (パターン速度 $\Omega_p = 45 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ 、音速 $c_s = 10 \text{ km s}^{-1}$ 、セル幅 5 pc 、メッシュ数 1200×1200) とし、制限の有無による違いを表わしたものが以下の図である。

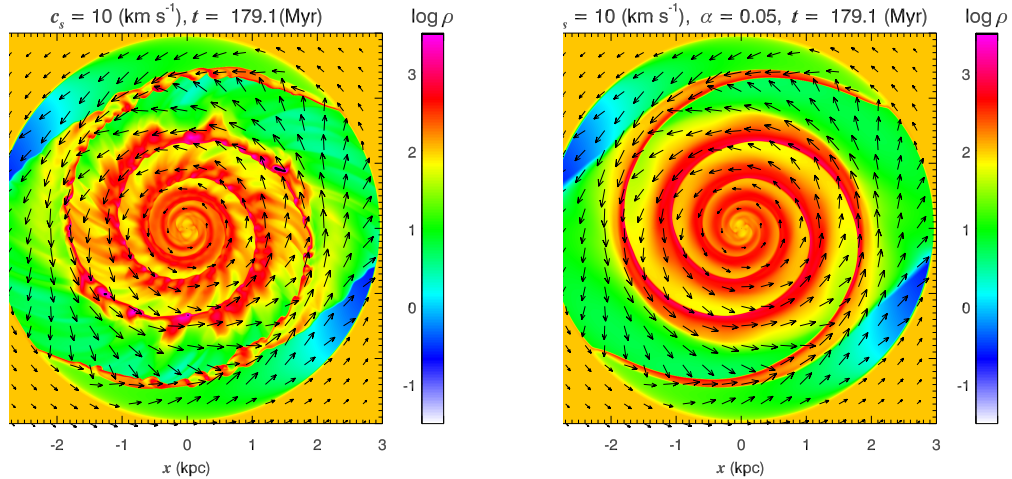


図 2: 左は制限をつけない従来の計算方法、右は制限をつけた計算方法の結果。色はガスの密度の対数を取った値の分布、矢印は速度分布を示している

左図では銀河のゆらぎが成長し、3回転した時点ではっきりとスパーク構造が見られる。一方、右図では補外に用いる速度勾配の上限をセル幅あたり音速の5%とした。つまり速度勾配が $0.5 \text{ km s}^{-1} \text{ pc}^{-1}$ を越える場所にのみ制限を加え、1次精度に近い値で数値流束を計算している。この場合、不安定性は発生しないためスパーク構造も現れない。

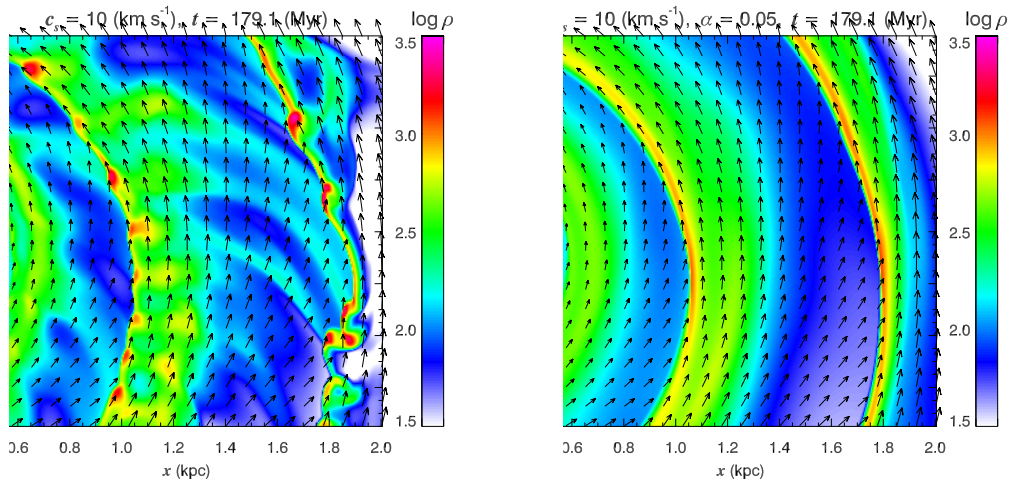


図 3: 0.5kpc から 2.0kpc の部分を拡大

腕付近を拡大するとその違いがはっきりと見える。制限を加えた方はなめらかな分布をし

ていることがわかる。また、構造の違いはメッシュ数にも依存する。

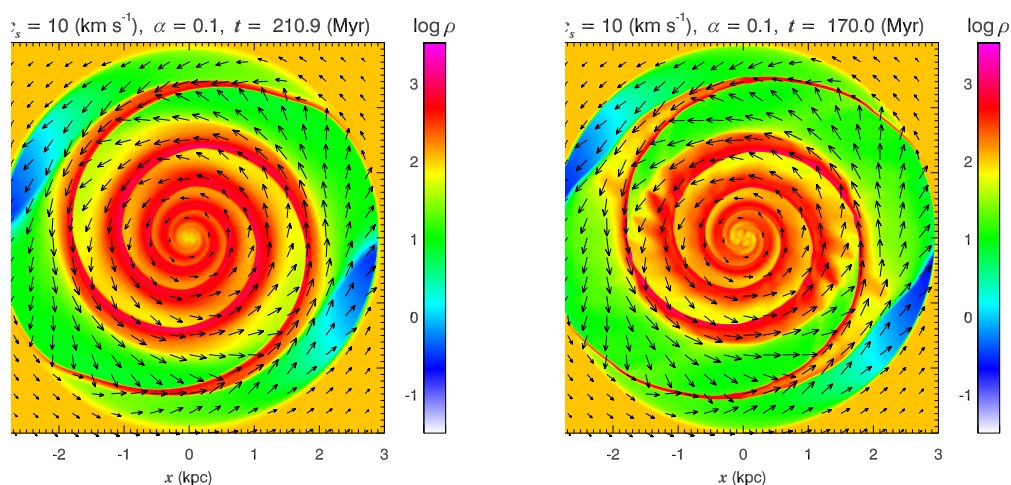


図 4: $\alpha = 0.1$ の場合。左がセル幅 10pc、右はセル幅 5pc

$\alpha = 0.1$ とした場合、セル幅 10pc の時は現れない構造が右のセル幅 5pc の時では見られる。このことからセル幅を小さくすると発生しやすくなることがわかる。

4 考察とまとめ

一般的には高次精度化を行うことで、数値粘性が少なくなっている。しかし衝撃波に関して言えば、それは物理的ではない。なぜなら粘性が少ないと力学的エネルギーとして残るため、実際の衝撃波で見られるエントロピーが正しく評価されていないからである。それに対して今回 α の制限を用いることで、勾配が小さいところでは 2 次精度、勾配が大きい衝撃波付近では 1 次精度に近い値で数値流束を評価した。これによって従来より計算よりも良く粘性を考慮することで実際の衝撃波の特徴を捉えることができ、その結果として Wiggle 不安定性は発生しなかった。以上のことから、銀河渦状腕で起こると考えられていた Wiggle 不安定性は数値的なものであると結論づけられる。

参考文献

- [1] Wada, K. and Koda, J., "Instabilities of spiral shocks - I. Onset of wiggle instability and its mechanism," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 349, pp.270-280