

1 銀河ガス円盤における磁場増幅・維持の大局的 3 次元磁気流体数値実験

1.1 Introduction

我々は、銀河ガス円盤内での磁場の増幅・維持機構を調べる目的で、大局的 3 次元散逸性 MHD 数値実験を行って来た。初期モデルとして、星の系が作る軸対称なポテンシャル中に銀河中心から遠方に弱い方位角方向磁場に貫かれた角運動量一定のトーラスを置き、その後の進化を調べた。中心の境界条件として、半径 0.6kpc で吸収境界のモデルを置き、また、重力ポテンシャルとしては、ダークマターの効果を含むモデルを採用した。

1.2 Simulation Model

座標系として円筒座標系 (ϖ, φ, z) を採用し、計算領域を $0\text{kpc} < \varpi < 56\text{kpc}$, $0 < \varphi < 2\pi$, $0\text{kpc} < z < 10\text{kpc}$ 、メッシュ数を $(\varpi, \varphi, z) = (256, 64, 320)$ とした。計算は、Modified Lax-Wendroff 法を用いた 3 次元散逸性 MHD 計算コードを用いて行った。

初期のガス密度として、静水圧平衡状態にある高温ハロー中においたトーラスを仮定した。重力ポテンシャルとして、Miyamoto et al. (1980) による、ダークマターの効果を含んだ軸対称ポテンシャルを採用した。

$$\phi(\varpi, z) = \sum_{i=1}^3 \frac{GM_i}{[\varpi^2 + \{a_i + (z^2 + b_i^2)^{0.5}\}^2]^{0.5}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.0\text{kpc}, b_1 = 0.47\text{kpc}, M_1 = 1.95 \times 10^{10} M_{\odot} \\ a_2 &= 6.2\text{kpc}, b_2 = 0.15\text{kpc}, M_2 = 17.4 \times 10^{10} M_{\odot} \\ a_3 &= 0.0\text{kpc}, b_3 = 31.2\text{kpc}, M_3 = 73.5 \times 10^{10} M_{\odot} \end{aligned} \quad (2)$$

初期磁場として、 $\beta = P_{\text{gas}}/P_{\text{mag}} = 100$ 程度の、弱い方位角方向の磁場を初期トーラスの中のみに与えた。このトーラスに方位角方向の速度にランダムな摂動を与えた。放射冷却、自己重力は無視した。また、中心から 0.6kpc に吸収境界を置いた。

1.3 Results

銀河円盤が、中心から 10kpc で約 10 回転するまでのシミュレーションを行った (図 1.1)。磁気回転不安定性の成長とともに、磁氣的角運動量輸送が生じ、初期に置いたトーラスは角運動量の再分配によってディスク状になった。増幅された磁場は、数十億年の間 $\sim \mu G$ で維持されている事が分かった。(図 1.2) 磁場は大局的には方位角方向成分が卓越していたが、局所的には乱流状の磁場構造が現われていた。

また方位角方向の速度分布は、観測結果とよくあっていることが分かった。

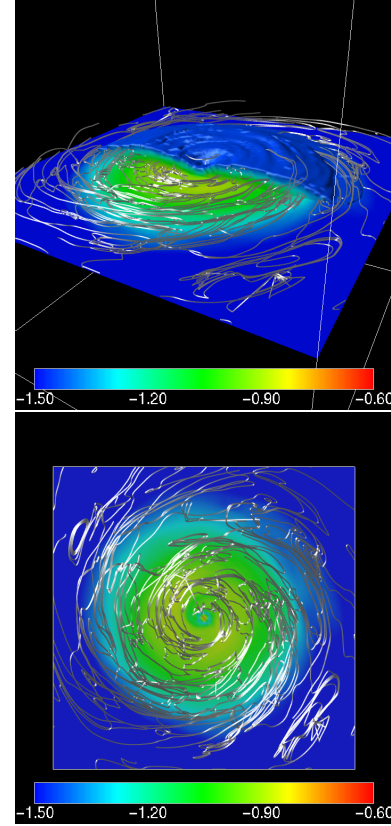


図 1.1 中心を吸収境界としたモデルの、約 20 回転後の密度、磁力線分布 (30kpc×30kpc×30kpc)。物質が中心に降着するにつれ、ディスク状の密度分布になった。磁場は大局的には渦状構造を示したが、局所的には乱流状になっていた。

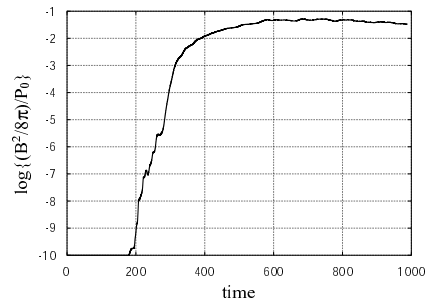


図 1.2 $2\text{kpc} < \varpi < 5\text{kpc}$ での磁気エネルギーの時間発展。磁気エネルギーは、指数関数的に増幅され数十億年におわたって維持された。

2 銀河渦状腕の磁気流体数値実験

2.1 Motivation

渦状重力ポテンシャル中を回転する銀河ガス円盤のシミュレーションを行った。

にスパイク状のスパーク構造を見る事が出来る。Wada & Koda (2003) は、この構造はスパイラルポテンシャルの谷間に形成されるショックを通過したガス中で発生する流体不安定性によって形成されるというモデルを提唱した。不安定性の起源は、衝撃波通過後ガスが加速されることによって生じる、速度差による Kelvin-Helmholtz (K-H) 不安定性と考えられる (Wada & Koda 2003)。Wada らの計算では磁場の影響を考慮に入れていなかった。一般に速度シア層の境界に平行な磁場は K-H 不安定性を抑える働きがある。そこで、スパーク構造形成に磁場が及ぼす影響を調べるために 2 次元磁気流体数値実験を行った。

2.2 Models

ガス密度が一樣な状態を初期状態とする。重力ポテンシャル (Φ) は軸対称な中心力ポテンシャル (Φ_0) に星の重力による非軸対称なスパイラル状のポテンシャル (Φ_1) を合わせたものとする。

$$\Phi = \Phi_0(r) + \Phi_1(r, \phi) \quad (3)$$

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

$$\Phi_1(r, \phi) = \varepsilon_0 \frac{ar^2\Phi_0}{(r^2 + a^2)} \cos[2\phi + 2 \cot i \cdot \ln(r)] \quad (5)$$

初期にガスは重力と遠心力が釣り合うように回転運動しているとした。モデルは等温変化 ($T_g = 10^4$ K)、ガスの面密度 ($\rho = 7M_\odot pc^{-2}$) (一樣) で、自己重力は無視した。

以下の 3 モデルを調べた。

- (1) Model H : 磁場なし
- (2) Model $M_{弱}$: トロイダル磁場 (半径 1kpc にて $\beta = 100$)
- (3) Model $M_{強}$: トロイダル磁場 (半径 1kpc にて $\beta = 10$) ($\beta \equiv P_{gas}/P_{mag}$)

2.3 Scheme

Scheme : Modified Lax-Wendroff 法

境界条件 : 境界で一定値になるようにダンピングする

計算領域 : 4kpc $\times$ 4kpc

座標系 : カートesian座標グリッド数 : 1024 $\times$ 1024

2.4 Simulation Results

右図は 3 つのモデル (Model H , $M_{弱}$, $M_{強}$) における同時刻の密度分布である。初期に密度一樣であったガスが、スパイラルポテンシャルによってスパイラルショックを形成し、このショックに垂直な方向にスパイク状に ‘スパーク’ が形成され、Wada の計算を再現することに成功した (図 2.1 参照)。

次にこの計算の磁場による影響を調べた。初期磁場が弱いモデル (Model $M_{弱}$) では、磁場なしモデル (Model H) と比べ、それほど変わらず ‘スパーク’ 構造が表れたのが、磁場が強いモデル (Model $M_{強}$) では、ガスの回転により、スパイラルショック後方にて、磁場が強められ、それにともない磁気圧が上る。この結果、スパークに必要とされる、K-H 不安定性の成長が抑えられ、他のモデルと比べるとスパークが形成されにくくなった。しかし、Model $M_{強}$ においても、長時間経つと、不安定性が成長

スパイラルショックが途切れてしまう。

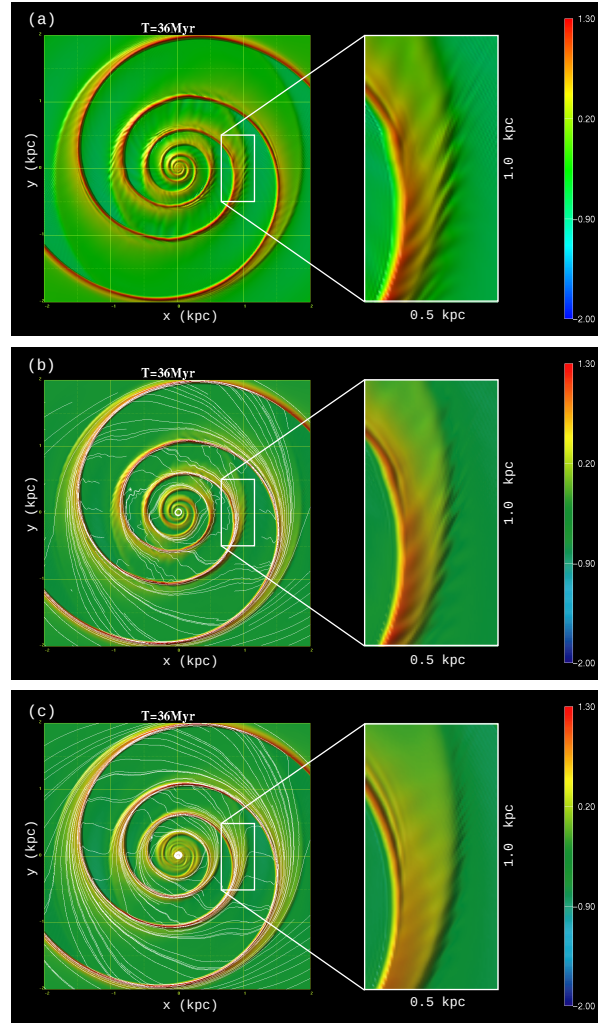


図 2.1 $t = 36 \text{ Myr}$ における密度分布 (右: 全体図、左: 拡大図)。カラーバーは log スケールで表されている。実線は磁力線を示す。(a) Model H (b) Model $M_{弱}$ (c) Model $M_{強}$

2.5 Summary

今回の数値実験により、初期にある程度強い磁場がある場合は K-H 不安定性の成長率が減少することが確かめられた。しかし、磁場がある場合でも長時間経過すると、不安定性が成長し、スパークが形成された。

参考文献

- [1] Wada, K., Koda, J., 2003, *Astro-ph* 0308203