

国立天文台 天文学データ解析計算センター  
成果報告書 (平成 16 年度)

応募カテゴリ (いずれかを選択)      B

システム (いずれかを選択)      VPP

プロジェクト ID: rhn31b

研究代表者 (現在のユーザ ID : nishirhr)

|                      |                                                     |
|----------------------|-----------------------------------------------------|
| 氏名                   | 錦織 弘充                                               |
| 所属機関名                | 千葉大学大学院自然科学研究科数理物性科学専攻                              |
| 連絡先住所                | 〒 263-8522<br>千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33 千葉大学理学部物理学科宇宙物理学研究室 |
| 電話番号                 | 043 (290) 3720                                      |
| E-mail               | nisikori@astro.s.chiba-u.ac.jp                      |
| 職または学年               | 博士後期課程 2 年                                          |
| 研究代表者が学生の場合には指導教官の氏名 | 松元 亮治                                               |

研究課題名

|      |                                                                    |
|------|--------------------------------------------------------------------|
| (和文) | 銀河ガス円盤の大局的 3 次元磁気流体数値実験                                            |
| (英文) | Global Three-Dimensional MHD Simulations of Galactic Gaseous Disks |

研究分担者

| 氏名    | 所属機関名                     | E-mail                                                      | ユーザ ID   |
|-------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|----------|
| 田中 実  | 千葉大学大学院自然科学研究科            | mtanaka@astro.s.chiba-u.ac.jp                               | tanakamn |
| 桑原 匠史 | 情報通信研究機構<br>(申請時：千葉大学研究員) | takuhito@nict.go.jp<br>(申請時：takuhito@astro.s.chiba-u.ac.jp) | kuwabrtk |

## 成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

### (1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

#### □ 論文

“Global Three-dimensional MHD Simulations of Galactic Gaseous Disks:

I. Amplification of Mean Magnetic Fields in Axisymmetric Gravitational Potential”

Nishikori, H., Machida, M., and Matsumoto, R.

(現在、The Astrophysical Journal に投稿中)

“The Acceleration Mechanism of Resistive MHD Jets Launched from Accretion Disks”

Kuwabara, T., Shibata, K., Kudoh, T., and Matsumoto, R., *ApJ*, 621, 921 (2005)

#### □ 国際会議発表

“Global Three-dimensional MHD Simulations of Galactic Gaseous Disks”

Nishikori, H., Machida, M. and Matsumoto, R.

*Magnetic Fields in the Universe: from Laboratory and Stars to Primordial Structures*

Nov. 28 - Dec. 3, 2004, Brazil

“Magnetohydrodynamic Simulations of the Wiggle Instability in Spiral Galaxies”

Tanaka, M., Wada, K., Machida, M., Miyaji, S., and Matsumoto, R.

*Magnetic Fields in the Universe: from Laboratory and Stars to Primordial Structures*

Nov. 28 - Dec. 3, 2004, Brazil

“Linear Analysis of Parker-Jeans Instability with Cosmic-Ray”

Kuwabara, T., and Ko, C. M.

*International Conference on Cosmic Rays and Magnetic fields in Large Scale Structure*

Aug. 16 - 20, 2004, Korea

“The Jet Formation by the Global Three-Dimensional MHD Simulation in Cartesian Coordinate”

Kuwabara, T., Goto, S., and Matsumoto, R.

*East-Asia Numerical Astrophysics Meeting*

Nov. 30 - Dec. 2, 2004, NAOJ

#### □ 国際会議集録

“Global Three-dimensional MHD Simulations of Galactic Gaseous Disks”

Nishikori, H., Machida, M., and Matsumoto, R.

*Proceedings of Magnetic Fields in the Universe: from Laboratory and Stars to Primordial Structures in press*

“Magnetohydrodynamic Simulations of the Wiggle Instability in Spiral Galaxies”

Tanaka, M., Wada, K., Machida, M., Miyaji, S., and Matsumoto, R.

*Proceedings of Magnetic Fields in the Universe: from Laboratory and Stars to Primordial Structures in press*

“Linear Analysis of Parker-Jeans Instability with Cosmic-Ray”

Kuwabara, T., and Ko, C. M. 2004, *JKAS*, 37, 601

□ 学会

“渦状銀河における磁場増幅・維持機構の大局的 3 次元磁気流体数値実験”

錦織 弘充、町田 真美、松元 亮治 (日本天文学会 2004 年春季年会)

“銀河渦状ポテンシャル中における渦状衝撃波不安定性の磁気流体数値実験”

田中 実、松元 亮治、和田 桂一、町田 真美 (日本天文学会 2004 年春季年会)

“渦状銀河におけるスパー構造形成の磁気流体数値実験”

田中 実、和田 桂一、町田 真美、松元 亮治 (日本天文学会 2004 年秋季年会)

“分子雲フィラメント構造に宇宙線が及ぼす影響”

桑原 匠史、Chung-Ming Ko (日本天文学会 2004 年秋季年会)

“渦状銀河におけるスパー構造形成の磁気流体数値実験”

田中 実、松元 亮治、和田 桂一、町田 真美 (日本流体力学 2004 年会)

□ その他出版物

“数値天文学テクニカルマニュアル”

(2) これまでのプロジェクトの今年度中の成果

□ 論文

“Nonlinear Parker Instability with the Effect of Cosmic-Ray Diffusion”

Kuwabara, T., Nakamura, K., and Ko, C. M., *ApJ*, 607, 828 (2005)

## 成果の概要

### (I) 銀河ガス円盤における大局的な平均磁場の形成と維持

我々は、渦状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、銀河円盤全体を計算領域に含む大局的 3 次元磁気流体数値実験を行ってきた。まず、宮本ら (1980) による星とダークマターによって作られる軸対称重力ポテンシャル中に置いた、弱い方位角方向磁場 ( $\beta = P_{gas}/P_{mag} \sim 1000$ ) に貫かれたガストーラスの時間発展を調べた。座標系として円筒座標系 ( $\varpi, \varphi, z$ ) 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  $(N_{\varpi}, N_{\varphi}, N_z) = (250, 64, 319)$  とした。

その結果、トーラス中で磁気回転不安定性が成長して磁気乱流が生成され、角運動量の再分配によりトーラスはディスク状になること、弱かった初期磁場が数十億年の間に約  $1\mu\text{G}$  程度まで増幅され維持されること、などがわかった。また、計算結果の各グリッドについて  $\varpi, z$  方向に  $\pm 10$  メッシュずつ、 $\varphi$  方向に  $\pm 3$  メッシュずつで平均をとり、平均磁場を求めた。その結果、平均磁場は方位角方向成分の反転を繰り返しながら振幅を増幅させていくこと、赤道面付近とコロナで平均磁場の方向が逆転していること等がわかった。これは、現象論的なダイナモパラメータ  $\alpha$  を導入しない直接計算によって銀河ダイナモの時間発展を初めて示した、画期的な成果である。この成果は、The Astrophysical Journal に投稿中である。

我々は、バー銀河に対応する非軸対称重力ポテンシャル下でも計算を行った。その結果、初期トーラスは早い段階で力学的平衡を失うために、軸対称ポテンシャルの場合よりも早く降着し、非軸対称ディスクを形成した。局所的には乱流状の磁場構造が見られた。このモデルについても平均磁場を計算したところ、渦状の磁場構造が現われた。また、その磁気エネルギーの飽和値は軸対称ポテンシャルの場合とほぼ同じ値であった。

### (II) 銀河衝撃波後方での構造形成

渦状銀河衝撃波の安定性に磁場が及ぼす効果を、2 次元局所磁気流体数値実験によって調べた。我々は、van Albada (1982) 等によって行われた銀河円盤の一部を取り出した 1 次元局所流体計算を衝撃波面に平行方向の摂動を加えて 2 次元に拡張し、その時間発展を調べた。数値計算は等温を仮定し、自己重力は無視した。その結果、衝撃波面に垂直方向にスパイク状のスパーク構造が形成され、長時間経過した後に乱流状態となることがわかった。

次に、この実験に磁場の効果を加え、スパークが最も成長する波長と磁場の関係を調べた。磁場の強さは、初期に  $\beta (= P_{gas}/P_{mag})$  が 1000、100、10 の 3 つのモデルについて行った。その結果、磁場は不安定性の成長率を下げるが、長時間経つと、流体計算の結果と同様にスパーク構造が形成され、やがて乱流状態になることがわかった。さらに、Fourier 解析を行った結果、磁場を強くするとスパークの間隔が大きくなる事がわかった。これは、磁場を考慮すると Kelvin-Helmholtz 不安定性が最も良く成長する波長が、長くなるためである。

以上の結果から、スパーク構造のメカニズムは、衝撃波後方の速度差により起こる Kelvin-Helmholtz 不安定性であると考えられる。

### (III) 宇宙線関係

星間空間における、宇宙線のエネルギーは磁場のエネルギーと同等であり、宇宙線は銀河中におけるガスダイナミクスにおいて無視出来ない存在である。一方、星間空間におけるガスダイナミクスに重要な役割を担っていると考えられている磁気的不安定性として Parker 不安定性がある。従来行われてきた Parker 不安定性の研究では、宇宙線の効果は無視されるか、考慮する場合には宇宙線の拡散速度は無限大に仮定されてきた。我々は Drury & Volk (1981) に習い、宇宙線の効果を磁気流体レベルで導入し、拡散は磁力線に沿い、拡散速度は有限の仮定の下で、銀河円盤における Parker 不安定性の線形解析と 2 次元磁気流体数値計算を行った。その結果、宇宙線と磁場とのカップリングが強い場合には、磁力線に沿って宇宙線の分布が非一様となり、宇宙線の圧力が磁力線に沿ったガスの落下を妨げるために Parker 不安定性の成長速度が遅くなるということが明らかになった。また、宇宙線の効果は、宇宙線と磁場とのカップリングが弱い場合には Parker 不安定性の成長を早める効果がある事を示した。

### (IV) jet 関係

大局磁場に貫かれた降着円盤からのジェット形成の非線形時間発展について多くの研究が行われてきた。中でも、非線形時間発展の結果として定常的なジェットが形成されるのかどうかの一つの大きな興味となっている。ジェット形成のシミュレーションは、降着円盤表面を計算境界にする手法と降着円盤を計算領域に含めて、形成されるジェットと円盤の相互作用まで計算する手法に分かれる。前者は質量放出率等を境界条件で設定するため、長時間計算を行うとジェットはやがて定常状態になる。後者では Kuwabara et al. (2000) や Casse & Keppens (2002, 2004) により磁気拡散の効果を導入することにより系が準定常状態に漸近することが確かめられた。我々は磁気拡散がある場合のジェットの加速機構を CIP-MOCCT 法を散逸性磁気流体に拡張して計算を行い、詳しく調べた。その結果、ジェットはまずガス圧勾配により重力ポテンシャルをのり越え、slow point を通過し磁気遠心力により加速されることが明らかになった。また、質量降着で解放されたエネルギーが中心天体に持ち込まれる移流優勢降着流 (ADAF) とは異なり、解放されるエネルギーの半分はジェットのエネルギーになることがわかった (Kuwabara et al 2005 ApJ)。