

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 31 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2015

課題番号：23740153

研究課題名(和文) 銀河ガス円盤の磁気流体数値実験：磁気浮上ループ・渦状腕衝撃波による粒子加速の寄与

研究課題名(英文) Magneto-hydrodynamic simulations of galactic gaseous disk

研究代表者

町田 真美 (Machida, Mami)

九州大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50455200

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：銀河ガス円盤の磁場増幅・維持機構を解明する目的で3次元磁気流体数値実験を行った。その結果、初期に過程した弱い方位角方向磁場は磁気回転不安定性によって増幅される事、増幅された磁場の圧力がガス圧と同程度になるとパーカー不安定性によってハロー領域に放出される事を示した。この作用によって、ガス円盤内の磁束は周期的にその方向が反転し、太陽同様バタフライダイアグラムを形成する事を示した。更に数値計算結果を観測と比較するために、結果を用いてシンクロトロン放射強度や偏波放射強度を求めた。その結果、GHz帯では円盤の渦状構造をトレースする一方、MHz帯ではハロー磁場を観測できる事を示した。

研究成果の概要(英文)：We performed three-dimensional magneto-hydrodynamic simulations of galactic gaseous disk due to clarify a mechanism of amplification of galactic magnetic fields. The weak toroidal magnetic fields we assumed initially are amplified by magneto-rotational instability. When the magnetic pressure amplified by MRI became comparable to the gas pressure, magnetic fields are buoyantly rising to the halo region and the ratio of gas pressure to magnetic pressure reached quasi-steady state. We also performed observational visualization using the simulation data. We calculated synchrotron intensity and polarized intensity. The intensity map of GHz-bands traced the magnetic spiral arms inside the galactic disk. On the other hands, halo magnetic fields are observed in MHz-bands.

研究分野：理論天文学

キーワード：銀河ガス円盤 磁気流体数値実験 磁気乱流 観測的可視化 理論天文学

1. 研究開始当初の背景

渦巻き銀河の磁場強度は電波による観測から、平均で数マイクロガウスであると考えられている。また、磁場の乱流成分と揃った成分が同程度の強さを持つ事も示唆され始めてきた (Beck et al. 2007, Soida et al. 2011 他)。銀河は形成から数十億年経ているはずであるが、数マイクロガウスの磁場は速い磁気散逸を考慮すると銀河年齢維持する事が難しい事が知られている。また、銀河磁場の生成の起源も不明な点が多く、銀河磁場の問題として、その起源、生成機構、生成した磁場を数十億年維持する機構などが残っていた。更に、銀河磁場の形状はその回転量度-方位角方向角度分布関係から、軸対称渦状磁場 (ASS) や双対称渦状磁場 (BSS) などに分類されてきたが、観測精度の向上により分類に当てはまらないものが増えてきていた。更に、トモグラフィーの手法によって電波観測結果を再解析すると、一つの銀河であっても円盤部とハロー部で磁場形状に違いがある事が指摘されていた (Fletcher et al. 2011)。一方、宇宙の誕生時の磁場構造や高エネルギー宇宙線の起源を知る事を目的に Planck 衛星や地上のガンマ線望遠鏡などが整備されてきていた。これらの観測結果から、正確に過去の宇宙からの微弱な情報を引き出すためには、天の川銀河の磁場による影響を出来る限り排除する必要があったが、銀河磁場のトポロジー形成の詳細には不明な点も多かった。

2. 研究の目的

本研究では、銀河ガス円盤全体を計算領域に含む大局的な磁気流体数値計算を行う事で、銀河磁場の重要性を明らかにする事を目的としている。特に、銀河磁場の生成・維持機構である銀河ダイナモ機構のモデルを構築し、実際の電波による回転量度解析などと比較し、典型的な磁場構造モデルの構築を目指す。

3. 研究の方法

銀河の星とバルジの作るポテンシャル (Miyamoto & Nagai 1975) 中を銀河ガス円盤を形成するプラズマガスが運動していると仮定し、プラズマガスの運動の時間進化を 3 次元磁気流体方程式を解く事で追跡している。数値計算手法は修正 Lax-Wendroff 法、又は HLLD 法を用い、円筒座標系を採用している。計算グリッドは (250, 257, 512) 用い、動径方向に 30kpc、鉛直方向に 10kpc、方位角方向は 360 度の計算領域をカバーしている。磁場は太陽フレア研究で採用される異常抵抗モデルを仮定する事で、磁気リコネクションによる磁場の散逸も考慮した計算を行っている。

計算の初期条件としては、等温で銀河のポテンシャルと釣り合っている回転しないハロー内に弱い方位角方向磁場を持つ初期デ

イスクを置いている。本研究では、初期の磁気圧はガス圧の 1% と仮定している。数値計算では、約 10 億年程度の時間進化を追っている。

4. 研究成果

釣り合った状態の初期状態に、方位角方向速度に弱い摂動を与えて系の時間進化を調べた。その結果、初期に与えた弱い方位角方向磁場は指数関数的に増加し数億年で飽和状態になる事を示した。この時の飽和値の平均はおおよそ 5 マイクロガウスとなり、渦状銀河で観測される平均的な磁場強度を説明できる事が判った。この磁場強度はおおよそ、ガス圧の 10% 程度となっている。また、銀河ガス円盤内は磁気乱流状態となっているが大局的には磁気渦状腕が 2~4 程度見られる形状となった。

磁場増幅機構は、ブラックホール降着円盤などと同様に磁気回転不安定性で説明できる事がわかった。磁気回転不安定性は、差動回転するプラズマが弱く磁化されている時に、運動によって磁気エネルギーが増大していく不安定性である (Bulbus & Hawley 1991)。

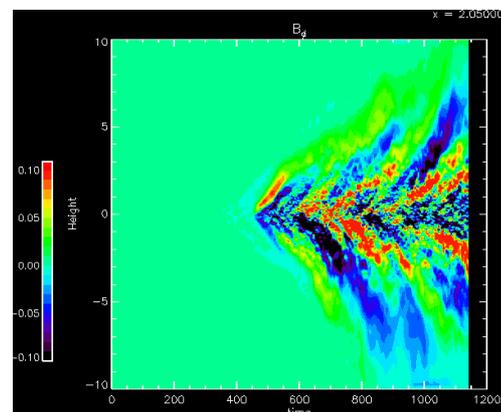


図 1 銀河磁場のバタフライダイアグラム
カラーは方位角方向磁場を示し、横軸は時間、縦軸は鉛直方向高さを示す (町田ら 2013)

一方、数億年経過した所で、磁場増幅が頭打ちになり、磁気エネルギーの平均値は 5 マイクロガウス程度となるが、激しい時間変動を示していた。図 1 に中心から半径 2kpc の位置で計測した方位角方向に平均化した方位角方向磁場の時間進化を示す。横軸は計算ユニットタイムで規格化した時刻、縦軸は鉛直方向の高さを示している。この図から、おおよそ計測する半径の回転周期の 10 倍程度の周期で磁場増幅と消滅を繰り返している事がわかる。このような関係は質量降着率や質量放出率でもみられ、磁束の解放と質量降着に相関がある事がわかる。この時間進化を詳しく調べた所、銀河ガス円盤内部の磁気エネルギーがガス圧の数十%に達すると、鉛直方向に働く浮力によって磁束管がハロー領域に噴出している事がわかった。このような不安定性は磁気不安定性の一つであるパーカー不安定性であると考えている。磁束の噴出

時間は半径に依存し、内側程早まるため、中心軸近傍からは間欠的なアウトフローが噴出する事となる。このようなアウトフローは天の川銀河でも電場ロープや Fermi バブルとして観測されており、それらの構造の起源となる可能性もある。

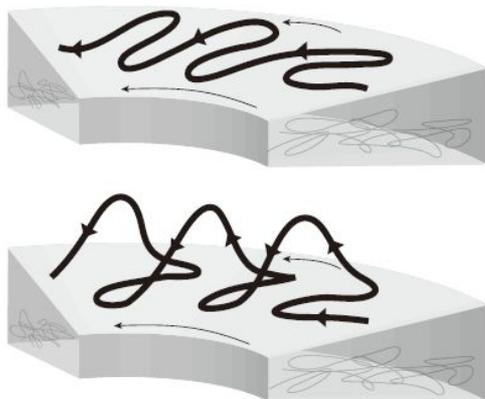


図 2 銀河ダイナモ機構の模式図。銀河ガス円盤内部に形成された磁束管が形成される。磁束管の磁気圧がガス圧の 10%程度になると、磁気浮力不安定性が生じ、磁束はハローに流出する。一方、反対向きの磁力線は円盤内部にとどまり、次のダイナモの種となる。(町田ら 2013)

図 2 に本数値計算に基づいて考えられる銀河ダイナモ機構の模式図を示す。弱い種磁場は磁気回転不安定性による磁気乱流の生成によって増幅される。その時に、差動回転による引き延ばしが乱流の起源であるために、最初に与えた磁場の向きが反対向きよりも早く増幅する。磁気乱流は逆カスケードにより一部に磁束管を形成する。この磁束管の磁場強度がガス圧の 10%程度に増幅されると、パーカー不安定性によって磁束管がハロー領域に浮かび上がり、ハローへ放出される。その結果、最初に与えられた磁場の向きとは逆向きの磁場が銀河ガス円盤内部に残る。この残った磁場が次のサイクルの種磁場となる事で、磁束の生成する。この研究によって、我々は銀河磁場の生成・維持機構は磁気回転不安定性による磁場の指数関数的成長とパーカー不安定性によるハロー領域への磁束流出とのつり合いによって成り立つ、銀河ダイナモ機構を提唱した。

数値計算結果からは密度などの物理量が得られる。一方、観測からは電波の放射強度やストークスパラメータなどの放射強度とそこから求められる回転量度などの情報を得る事になる。従って、観測量と数値計算結果を直接比較する事はできない。そこで、守田ら(2016、投稿中)では、数値計算結果からシンクロトロン放射強度(ストークスパラメータ)や回転量度を求め、観測量の分布を調べた。守田ら(2016)では、数値計算結果を系外銀河に見立てて、その見込み角によって回転量度分布や偏波の向きがどのように変化するかを系統的に調べた。その結果、

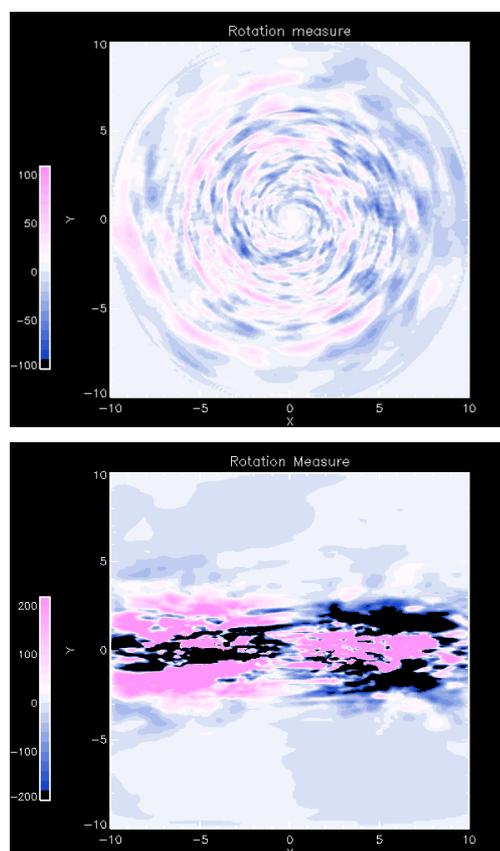


図 3 回転量度分布。色は回転量度の値を示す。(上)見込み角 5 度の場合、(下)見込み角 85 度の場合

Face-on に近い見込み角 5 度の場合には、回転量度の値は数十程度と小さく、正負入り乱れた非常に複雑な構造を示す事がわかった(図 3 上)。また、大局的には磁気渦状構造の存在をかすかにトレースできた。これは、ガス円盤内部の磁気乱流構造を反映している。一方、図 3 下の図が示すように、Edge-on に近い 85 度の見込み角の場合には、回転量度の値は数百程度となり、鉛直方向に正負が変わりまた、x 軸方向 0 を対称に正負が反転している事がわかった。これは、ガス円盤中で支配的な方位角方向磁場の向きを示しており、また鉛直方向に流出するダイナモの名残を示している。回転量度分布と方位角の関係から、大局磁場構造を分類すると、Face-on に近い時には BSS 様の磁場構造、Edge-on に近い場合には ASS 様の磁場構造が存在するように観測できる事を示した。これは、回転量度を元にした大局磁場分類は、見込み角に結果が依存する事を示唆している。

更に、これらの回転量度分布を元に、ストークスパラメータを調べた所、8GHz と高周波数では円盤部の磁場をトレースした偏波が観測される事、一方、数百 MHz 帯では、円盤部の強い磁場は偏波解消によって偏波が逆に弱まり、希薄なハロー領域の磁場を観測できる可能性がある事を示した。数百 MHz 帯の観測は非常に難しいが、今後の大型電波干渉計の計画によって、このようなハロー磁場の情報が得られる事が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

1. T. Akahori, Y. Fujita, K. Ichiki, S. Ideguchi, T. Kudoh, M. Machida, H. Nakanishi, H. Ohno, T. Ozawa, K. Takahashi, M. Takizawa
“Resolving 4-D Nature of Magnetism with Depolarization and Faraday Tomography: Japanese SKA Cosmic Magnetism Science”, Japan SKA Consortium Science Book, 2016, 24pp
2. Suzuki T. K., Fukui Y., Torii, K., Machida M., Matsumoto R.
“Stochastic non-circular motion and outflows driven by magnetic activity in the Galactic bulge region”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2015 454 (3): 3049-3059
3. Machida, M., Nakamura, K.E., Kudoh, T., Akahori, T., Sofue, Y., Matsumoto, R.
“Dynamo Activities Driven by Magneto-rotational Instability and the Parker Instability in Galactic Gaseous Disks”, Astrophysical Journal, vol. 764, p.81 (2013)
4. Kudo, N., Torii, K., Machida, M. et al.
“High Excitation Molecular Gas in the Galactic Center Loops; 12CO (J = 2-1 and J = 3-2) Observations” Publications of the Astronomical Society of Japan, vol.63, No. 1, p.171-p.197 (2011)
5. Machida, M., Matsumoto, R., Nozawa, S., Takahashi, K., Torii, K., Kudo, N., and Fukui, Y.
“Three-dimensional Global MHD Simulations of the Magnetic Loop Structures in our Galaxy” Astronomical Society of the Pacific, 439, 65-66, (2011)
6. Fukui, Y., Torii, K., Kudo, N., Yamamoto, H., Kawamura, A., Machida, M., Takahashi, K., Nozawa, S., Matsumoto, R., “Molecular Loops in the Galactic Center” Astronomical Society of the Pacific, 439, 61, (2011)
[学会発表](計 25 件)
1. “Global 3D MHD Simulations of Disk Dynamo”町田真美、中村賢仁、松元亮治、MHD and Kinetic Processes in Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas Workshop, 北京大学、2011 年 6 月 8 日(招待講演)
2. “Quasi-periodic galactic dynamo obtained from 3D MHD Simulations”町田真美、中村賢仁、松元亮治、Magnetic fields in the Universe III: From Laboratory and Stars to Primordial

Structures, ザコパネ、2011 年 8 月 25 日

3. “Three dimensional MHD simulations of Differentially rotating systems”町田真美、中村賢仁、松元亮治、2011 Northeastern Asian Symposium on Plasma Fusion, テジョン、2011 年 9 月 27 日(招待講演)
4. “銀河ガス円盤ダイナモの 3 次元磁気流体数値実験”町田真美、中村賢仁、松元亮治、日本流体力学会年会 2011、首都大学東京、2011 年 9 月 7 日
5. “銀河磁場ダイナモ機構に関する 3 次元磁気流体数値実験”町田真美、中村賢仁、松元亮治、日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島、2011 年 9 月 20 日
6. “MHD 数値実験より求めた RM 分布の初期磁場構造依存性”町田真美、中村賢仁、赤堀卓也、祖父江義明、松元亮治、日本天文学会 2012 年春季年会、龍谷大学、2011 年 3 月 21 日
7. “Three-dimensional Magneto hydrodynamic Simulations of Disk Dynamos”松元亮治、町田真美、US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection MR2012, Princeton University (USA)、2012 年 5 月 23 日~5 月 25 日
8. “銀河ガス円盤に関する数値実験”町田真美、中村賢仁、松元亮治、日本 SKA サイエンス会議「宇宙磁場 2012」、志賀島(福岡)、2012 年 6 月 25 日~26 日
9. “銀河ガス円盤における磁気流体ダイナモ機構の探求”町田真美、中村賢仁、松元亮治、日本流体力学会年会 2012、高知大学、2012 年 9 月 16 日~18 日
10. “銀河ガス円盤ダイナモの初期磁場構造依存性について”町田真美、中村賢仁、松元亮治、日本天文学会 2012 年秋季年会、大分大学、2012 年 9 月 19 日
11. “降着円盤ダイナモと状態遷移の大局的 3 次元磁気流体数値実験”小野貴史、小川崇之、川島朋尚、町田真美、松元亮治、日本天文学会 2012 年秋季年会、大分大学、2012 年 9 月 19 日
12. “Global Three-dimensional Magneto-hydrodynamic simulations of Disk Dynamos”松元亮治、小川崇之、小野貴史、町田真美、East Asia Numerical Astrophysics Meeting、奈良、2012 年 10 月 31 日
13. “Magnetic Fields in Astrophysical Disks”松元亮治、町田真美 APCTP Workshop on Astrophysics: Magnetic Fields in Astrophysics, Pohang, 2-12 年 11 月 21 日
14. “巨大ブラックホール降着流の磁気流体数値実験の進展”松元亮治、小野貴史、小川崇之、町田真美、川島朋尚、小田寛、大須賀健、日本天文学会 2013 年春季年会、埼玉大学、2013 年 3 月 22 日

15. “ 銀河ダイナモ磁気流体計算に基づくファラデー回転度分布と観測との比較 ” 松元亮治、工藤祐己、朝比奈雄太、町田真美、森嶋隆裕、服部誠、日本天文学会 2013 年秋季年会、東北大学、2013 年 9 月 10 日～12 日
16. “ 降着円盤のグローバル MHD シミュレーション ” 町田真美、中村賢仁、松元亮治、STE シミュレーション研究会(招待講演) 九州大学、2013 年 12 月 24 日～27 日
17. “ 冷却効果を考慮した銀河ダイナモの大局的磁気流体シミュレーション ” 工藤祐己、町田真美、朝比奈雄太、松元亮治、日本流体力学会年会 2014、2014 年 9 月 15 日～17 日、東北大学
18. “ ブラックホール降着円盤乱流の初期磁場依存性 ” 町田真美、中村賢仁、松元亮治、日本天文学会 2015 年春季年会、大阪大学、2015 年 3 月 18 日～21 日
19. “ 幾何学的に薄い銀河ガス円盤におけるダイナモの大局的 3 次元磁気流体シミュレーション ” 工藤祐己、町田真美、松元亮治、日本天文学会 2015 年春季年会、大阪大学、2015 年 3 月 18 日～21 日
20. “ Rotation measure distribution obtained from numerical simulation ” 町田真美、守田佳永、中村賢仁、赤堀卓也、中西裕之、The Galactic center workshop 2015、2015 年 7 月 13 日-14 日、名古屋大学、(国際研究集会招待講演)
21. “ Three dimensional MHD Simulations of Differentially Rotating Systems ”, 町田真美、中村賢仁、松元亮治、Northeastern Asian Symposium on Plasma Fusion, 韓国、2011 年 9 月 25 日-28 日、(国際会議招待講演)
22. “ Global 3D MHD Simulations of Disk Dynamo ” 町田真美、中村賢仁、松元亮治、MHD and Kinetic Processes in Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas Workshop, Beijing, China, 2011 年 6 月 6 日-9 日、(国際会議招待講演)
23. 町田真美、赤堀卓也、中村賢仁、中西裕之、“ 銀河ガス円盤数値実験による観測的可視化 II 天の川銀河 ”, 日本天文学会 2016 年春季年会、首都大学東京、2016 年 3 月 14 日
24. 柿内健佑、鈴木建、福井康雄、鳥居和史、町田真美、松元亮治 “ 銀河中心領域の磁気活動による高速度分散領域形成メカニズムの解明 ” 日本天文学会 2016 年春季年会、首都大学東京、2016 年 3 月 15 日
25. 中西裕之、Naomi, McClure-Griffiths, 町田真美、齊田千恵、“ Helically moving HI cloud found in the outer Galactic disk ” 日本天文学会 2016 年春季年会、首都大学東京、2016 年 3 月 15 日

〔図書〕(計 0 件)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

町田 真美 (MACHIDA, Mami)

九州大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号 : 50455200