

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540274

研究課題名(和文) 銀河のダイナモ機構：宇宙線と磁場が駆動する非線形ダイナミクスの検証

研究課題名(英文) Dynamo mechanism in galaxies: nonlinear dynamics driven by cosmic rays and magnetic fields

研究代表者

工藤 哲洋 (Kudoh, Takahiro)

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号：60413952

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：太陽は恒星の集団である銀河に属し、恒星間には希薄な星間ガスが存在しています。そして、星間ガスには磁場が存在し、太陽のような恒星が星間ガスから誕生する時に大きな影響を与えています。しかし、星間磁場がどのように維持されているのかはよくわかっていません。私たちは、星間磁場の維持増幅機構(銀河のダイナモ機構)に興味を持ち、その機構に重要な不安定性を研究しました。特に、星間空間に存在する宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子に着目し、それが不安定に寄与する事で、銀河の中における星間ガスの密度や磁場の分布が大きく変化を受けることを発見し、それがダイナモ機構に影響を与えていることを確認しました。

研究成果の概要(英文)：The sun belongs to the Galaxy, in which there is interstellar gas between stars. In the interstellar gas, there exist magnetic fields that affect star formation, like the formation of the sun. However, it is not known how the interstellar magnetic fields are maintained. We are interested in the dynamo process that can maintain and amplify the interstellar magnetic fields, and study an important instability in that process. Especially, we focus on the effect of the high-energy particles (cosmic rays) in the interstellar space. We found that the distribution of the gas density and magnetic field dramatically alter in the interstellar space if the cosmic rays contribute to the instability, and confirmed that it will affect the dynamo process.

研究分野：天体物理学

キーワード：天文 宇宙物理 理論天文学 流体力学

1. 研究開始当初の背景

宇宙には磁場が存在する。恒星と他の恒星との間には希薄なガスがあり、星間ガスと呼ばれる。星間ガスの中には磁場が存在し、磁場は太陽のような恒星がガスの中から誕生する時に影響を与えている(現在の太陽磁場の起源となる種磁場は星間ガスからとりこまれた)。星間ガスの中で磁場がどのように維持生成されているのかはよくわかっていない。その維持生成機構として有力なモデルが銀河のダイナモ機構である。銀河のダイナモ機構において重要な役割を果たす物理機構が、パーカー不安定であると考えられている。そこで、その不安定性を中心に銀河のダイナモ機構を解明することが重要と考えた。(なお、パーカー不安定とは、銀河面にある磁力線が浮力を得て銀河面の上空へ膨張する不安定である。)

星間ガスには磁場に加えて宇宙線と呼ばれる高エネルギーの荷電粒子が存在する。宇宙線のエネルギー密度は、ガスや磁場のエネルギー密度と同程度あり、星間ガスの力学進化を考える際に無視出来ない。しかし、宇宙線を含めたパーカー不安定やダイナモの研究は、あまり進展していない。理由はその非線形発展を調べるための数値シミュレーションコードがこれまであまり発展していないためである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙線からの力学的寄与を取り入れた数値シミュレーションコードを開発し、それを用いて銀河ダイナモの基礎過程を調べる事である。特に星間ガスにおけるパーカー不安定の非線形発展を調べる。

3. 研究の方法

まず、宇宙線の力学的寄与を考慮した磁気流体力学の数値シミュレーションコードを開発する。宇宙線粒子一つ一つは非常に高エネルギーであるが、全体としては星間ガスに比べて密度が非常に小さい。そこで、宇宙線を質量が無視できるような流体モデルで記述する。このモデルの基では、宇宙線の圧力の従う方程式は通常ガス圧が従う方程式に拡散項が加わった形となる。宇宙線は磁力線方向には拡散しやすいが、磁力線に垂直方向には拡散しにくい。そこで、磁力線に垂直方向の拡散を近似的にゼロとしてコードを作成する。

そして、そのコードを用いて、銀河スケールで生じるパーカー不安定の非線形発展を調べる。これまで多くの研究で仮定されていた銀河面対称性は仮定せず、銀河面全体を数値シミュレーションの計算領域とし、より現実的な状況でどのように非線形発展が進行するのかを調べる。

最終的には、パーカー不安定の非線形発展が銀河回転と組合わさることで生じる銀河ダイナモの基礎過程を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 宇宙線の及ぼす圧力を考慮した磁気流体力学の数値シミュレーションコードを開発した。空間2次元のコードに関しては、計算手法として、Kuwabara et al. (2003)の方法を参考に、磁力線方向の拡散に関して陰解法の方法を用いた。しかし、空間3次元のコードに関しては計算効率を考慮して、Hanasz et al. (2003)の方法を参考に、陽解法の手法を用いた。

コードを作成して計算した結果、陰解法の場合は、グリッドの幅や時間刻み幅を変化させた時に、数値的な不安定が生じることがわかった。対処法を講じて数値的な不安定が起きないようにすることはできたが、根本的な解決には至らなかった。一方、陽解法を用いるとそのような不安定は発生しなかったが、現実的なパラメータによる計算に時間がかかるといった問題点が残った。以下の研究では、場合によって計算法を使い分けた。よりよい計算方法を構築するという課題は残された。

(2) 上記(1)で開発した計算コードを用いて、銀河スケールで生じるパーカー不安定性の数値シミュレーションを行った。銀河面対称性を仮定しない条件で計算を行ったところ、宇宙線の力学的寄与が相対的に小さい時と大きい時とで、銀河面に対して異なる対称性のモードが成長することがわかった。

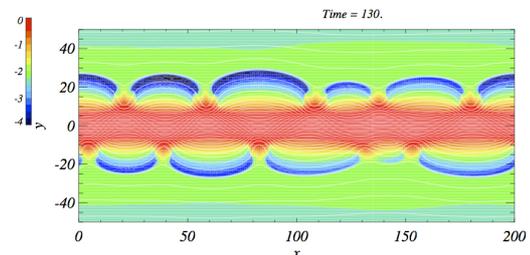


図1: 無次元化されたガス圧力に対する対数スケールのカラーマップ(宇宙線の力学的寄与がない場合)。白い線は磁力線。Time=130の結果。

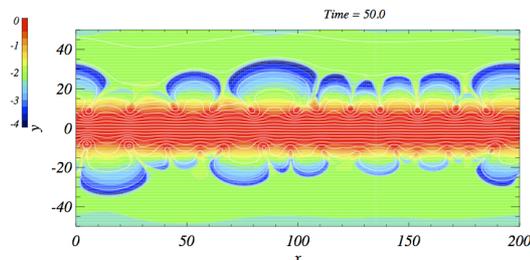


図2: 無次元化されたガス圧力に対する対数スケールのカラーマップ(宇宙線の力学的寄与がある場合)。白い線は磁力線。Time=50.0の結果。

図1は宇宙線の力学的寄与がない場合の結果。

果である (Time=130)。y=0 の面が銀河面となる。この場合は、磁力線が上空へ ($|y|$ が増大する方向へ) 膨張する際に、磁力線が銀河面をまたいで波打つようなモードのみが得られた。一方、図2は宇宙線の力学的寄与が相対的に大きい場合の結果である (Time=50)。この場合は、磁力線が銀河面をまたぐようなモードに加えて銀河面に対して対称のモードも同時に成長することがわかった。この結果は、工藤祐己氏の研究協力のもとで、同じパラメータから計算した線形解析の結果からも確認された。二つのケースが存在することは以前の線形解析の研究から知られていたが、宇宙線の寄与を変化させることでそれが変化する場合があることは、これまで強調されておらず、結果を新しい観点から再発見する形となった。実際の星間磁場においては、磁力線が銀河面をまたぐモードよりは、銀河面に対して対称になるモードが卓越していると考えられている。そのようなモードが卓越する条件に宇宙線の力学的寄与が関係していることが示された。

その後、時間が経過し非線形性が強くなると、宇宙線の力学的寄与が相対的に大きい場合には、磁力線が上空へと膨張した結果、ループ状の磁力線 (磁気ループ) 同士が頻繁に衝突することがわかった。その際、先に成長した磁気ループが遅れて成長してきた磁気ループに覆い被さり、遅れて成長してきた磁気ループが上空へ膨張できずに縮んでしまう現象が確認できた。さらに、磁気ループ同士が衝突した結果、磁気ループと磁気ループとの間に高密度のガスがフィラメント状に形成された。またそれらフィラメントが、膨張できなかった磁気ループの上へと落下することで、ループ状の高密度領域も形成された (図3)。観測から、銀河面のガスの中には、銀河面に垂直なフィラメント的な構造があることがわかっており、そのような構造を説明するモデルとしても興味深い結果が得られた。なお、磁気ループが衝突したところでは磁力線のつながりかえ (磁気リコネクション) も生じる可能性があることがわかった。

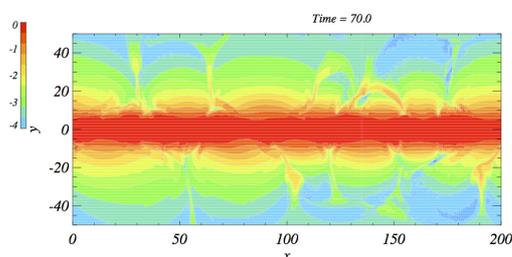


図3：無次元化されたガス密度に対する対数スケールのカラーマップ (宇宙線の力学的寄与がある場合)。Time=70の結果。

さらに、圧力の銀河面に対する鉛直分布に着目し解析した。その結果、パーカー不安定が十分成長した後の平均的な圧力の鉛直分布を見ると、銀河面から離れた上空では、宇

宙線圧、磁気圧、ガス圧の順に強くなることがわかった。これは、パーカー不安定の成長によって、ガスは銀河面に落下し、宇宙線や磁場は上空に排出されたためと理解できる。一方、銀河面付近では、ガス圧、磁気圧、宇宙線圧の順に強くなり、初期に宇宙線圧よりも弱かった磁気圧が銀河面では相対的に強くなることがわかった。これは磁場よりも宇宙線圧の方が上空に排出されやすいためと考えられる。本研究では宇宙線は新たに生成されないと仮定したが、宇宙線が定常的に生成される場合にどのような鉛直分布になるのかについての課題が残された。

(3) 上記(2)と同様の計算を、那須田哲也氏の研究協力のもとで、空間3次元の計算でも行った。その結果、3次元の場合には、2次元の場合に比べると、磁力線が膨張して上空に磁束を排出しにくくなることがわかった。これは3次元の場合には、上空で磁気ループがループの奥行き方向 (図2などで紙面に垂直方向) に対しても膨張することができるためであると考えられる。磁束を排出する時間で考えると、それが約2倍長くなることがわかった。一方で、2次元の時にみられた密度の上昇に関してはそれほど大きな差がないことがわかった。この研究成果は、那須田哲也氏の修士論文 (“Three-Dimensional Magnetohydrodynamic Simulation of the Magnetic Buoyancy Instability with the Effect of Cosmic Rays” 東京大学 2015年3月) としてまとめられた。

(4) 銀河のダイナモ機構とパーカー不安定との関係について、町田真美氏との共同研究を行った。パーカー不安定によって銀河円盤から磁場を排出される効果が銀河ダイナモの過程に重要であることを確認した。

(5) 星間ガスに磁場がある場合のケルビンヘルムホルツ不安定に関して、宇宙線の力学的寄与を含めた場合に拡張した研究を、鈴木昭宏氏との共同研究で行った。宇宙線の力学的寄与があると、より速い時間にケルビンヘルムホルツ不安定が成長することがわかった。本研究は当初の計画にはなかったが、星間ガスにおける宇宙線の寄与という観点から新しい問題を発見し、鈴木昭宏氏の貢献のもとで成果をあげることができた。

銀河のダイナモ機構の基礎過程を調べた結果を総合すると、宇宙線の力学的寄与が磁場の強さを数倍は変化させるであろうことは見積もる事ができた。宇宙線の力学的寄与を含めた自己無撞着な計算を行うことが課題として残された。

<引用文献>

Kuwabara, T., Nakamura, K., and Ko, C-M., “Nonlinear Parker Instability with the

Effect of Cosmic-Ray Diffusion”, ApJ 607, 2004, pp828-839

Hanasz, M. and Lesch, H. “Incorporation of cosmic ray transport into the ZEUS MHD code. Application for studies of Parker instability in the ISM”, A&A 412, 2003, pp331-339

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

(1) Akihiro Suzuki, Hiroyuki R. Takahashi, Takahiro Kudoh, “Linear Growth of the Kelvin-Helmholtz Instability with an Adiabatic Cosmic-ray Gas”, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 787, 2014, id. 169
DOI:10.1088/0004-637X/787/2/169

(2) Takahiro Kudoh, Takaaki Yokoyama, Ryoji Matsumoto, “Magnetohydrodynamic Numerical Simulation of Parker Instability in Interstellar Gas with Cosmic Ray Pressure”, Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference, 査読無, Vol. 1, 2014, id. 015105,
DOI:10.7566/JPSCP.1.015105

(3) Mami Machida, Kenji E. Nakamura, Takahiro Kudoh, Takuya Akahori, Yoshiaki Sofue, Ryoji Matsumoto, “Dynamo Activities Driven by Magnetorotational Instability and the Parker Instability in Galactic Gaseous Disks”, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 764, 2013, id. 81
DOI:10.1088/0004-637X/764/1/81

[学会発表] (計11件)

(1) 工藤哲洋、「宇宙線パーカー不安定性により生じる銀河円盤の密度分布」、日本流体力学会年会 2014、2014年9月15日-9月17日、東北大学（宮城県・仙台市）

(2) 工藤哲洋、「Numerical Simulation of Cosmic-ray Parker Instability」、Magnetic Reconnection 2014、2014年5月20日-24日、東京大学（東京都・文京区）

(3) 工藤哲洋、「宇宙線パーカー不安定性の赤道面对称性」、日本天文学会 2013年秋季年会、2013年9月10日-9月12日、東北大学（宮城県・仙台市）

(4) 工藤哲洋、「宇宙線圧力の影響を受けたパーカー不安定性の数値シミュレーション」、日本物理学会第68回年次大会、2013年3月26日-3月29日、広島大学（広島県・東広島市）

(5) 工藤哲洋、「宇宙線の影響を受けたパーカー不安定性の非線形発展」、日本天文学会 2011年秋季年会、2011年9月19日-9月22日、鹿児島大学（鹿児島県・鹿児島市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

工藤 哲洋 (KUDOH, Takahiro)
国立天文台・理論研究部・助教
研究者番号：60413952

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

横山 央明 (YOKOYAMA, Takaaki)
東京大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：00311184

松元 亮治 (MATSUMOTO, Ryoji)
千葉大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：00209660

(4) 研究協力者

工藤 祐己 (KUDOH, Yuki)
那須田 哲也 (NASUDA, Tetsuya)
町田 真美 (MACHIDA, Mami)
鈴木 昭宏 (SUZUKI, Akihiro)