

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月27日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740118

研究課題名（和文） 宇宙線変性衝撃波における粒子加速と磁場増幅

研究課題名（英文） Particle acceleration and magnetic field amplification at cosmic-ray modified shocks

研究代表者

天野 孝伸（AMANO TAKANOBU）

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：00514853

研究成果の概要（和文）：

天体衝撃波における宇宙線加速機構の問題点である非線形反作用の問題を注入問題との関連に着目しながら議論した。数値シミュレーションおよび理論解析によって新しい注入問題の解を提唱し、これが既存の観測を矛盾なく説明し得ることを明らかにした。また、反作用によって変性を受けた宇宙線変性衝撃波の安定性を詳細に調べた。更に、相対論的衝撃波においては相対論的強度の電磁波によって、新しいタイプの変性衝撃波が形成されることも分かった。

研究成果の概要（英文）：

We have discussed the nonlinear feedback of cosmic rays in connection with the injection problem. By using numerical simulations and theoretical analysis, we have proposed a new injection model that can explain existing observations very well. We have also studied the stability of the cosmic ray modified shocks. In addition, we have found that a novel modified shock forms due to intense electromagnetic waves in a relativistic shock.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：理論天文学

キーワード：宇宙線、プラズマ、衝撃波、粒子加速、超新星残骸

## 1. 研究開始当初の背景

銀河宇宙線の起源は古くから系内の超新星残骸だと考えられ、実際に近年の観測的研究によって超新星残骸衝撃波における宇宙線加速の証拠が得られるようになってきた。ところが、理論的には衝撃波加速理論にはいくつかの未解決問題が残されており、これが観

測結果を解釈する際の不定性として残っていた。特に加速された宇宙線が衝撃波構造に及ぼす非線形反作用を考えることにより、加速効率に正のフィードバックを引き起こすとの考え方があったが、その詳細についてはよく理解されているとは言い難い状態であった。

## 2. 研究の目的

宇宙線の非線形反作用の効果を明らかにするのが本研究の目的である。特に反作用の結果として宇宙線の加速効率が向上するのか、また近年の観測で指摘されている衝撃波における磁場生成の問題に反作用がどのような役割を果たすのか、などが大きなテーマとなる。しかし、一方でこの問題は衝撃波加速理論のもう一つの未解決問題である注入問題と密接に関連していると考えられる。従って、これらの問題を独立の問題とは捉えずに、相補的に理解を進めていくことが必要である。

## 3. 研究の方法

本研究は主に数値シミュレーションと理論解析を用いて行った。数値シミュレーションは宇宙線と背景プラズマの相互作用をマクロに扱う2流体シミュレーション、プラズマ中のマイクロな過程を扱うために電子・陽子および電磁場を自己無撞着に扱う全粒子シミュレーション、陽子のみを粒子として扱うハイブリッドシミュレーション、また与えられたモデル電磁場の元での粒子軌道を追跡するテスト粒子シミュレーションなどを場合に応じて適宜使い分けた。またシミュレーションをするだけでは理解が困難な場合には理論的な解析を用いて総合的に研究に取り組んだ。

## 4. 研究成果

空間1次元の衝撃波の全粒子シミュレーションから得られた被加速電子の軌道解析結果などを元にして理論解析を行い、電子の注入過程を説明する新しい機構を発見した。この結果によって、それまでに報告されていた観測結果を初めて矛盾なく説明することができた。さらにこれを発展させるにあたって、衝撃波の多次元構造の効果を考察した。具体的には、多次元のシミュレーションにおいて報告されている衝撃波面の揺らぎをモデル化した解析的な電磁場の元でのテスト粒子シミュレーションを行い、その効果を議論した。

また宇宙線の非線形反作用によって衝撃波構造が変性を受けた宇宙線変性衝撃波について、その安定性を議論した。通常の流体衝撃波と異なり、宇宙線変性衝撃波の定常解は一般には複数の解（最大で3個）があることが知られており、それぞれ宇宙線の生成率が大きく異なることから実際に実現され得る解を知ることは非常に重要である。そこで2流体モデルを採用し、これらの複数解の安定性を調べた。その結果、3つの解が存在する領域においては最も宇宙線の生成率が良い解

と悪い解が安定であり、中間の解が不安定であることが分かった。この安定性は有限の摂動に対しても安定であり、また注入効率などにも依存しない。このため、初期条件として宇宙線の無い流体衝撃波から数値シミュレーションを始めた場合には最も効率の悪い解に漸近することが分かった。このことは、実際の超新星残骸などでも複数解領域において実際に実現され得る解が宇宙線生成率の低い解であることを示唆するものである。

更に、パルサー風に見られるような非常に強く磁化した相対論的衝撃波においては全く異なる新しい変性衝撃波が形成され得ることも分かった。磁軸と回転軸が傾いたパルサーからはパルサー風と共に大振幅の磁気流体波動も放射されていると考えられている。このような大振幅波動を伴うパルサー風と衝撃波の相互作用を数値シミュレーションで調べたところ、低周波の磁気流体波動が衝撃波との相互作用によって相対論的強度の高周波電磁波に変換されることが分かった。この電磁波がパラメトリック不安定を通して引き起こす散逸によって、衝撃波構造が大きく変性を受け宇宙線変性衝撃波と類似の構造を形成することが分かった。これに伴い、上流の電磁場のエネルギーが非常に効率よくプラズマ粒子のエネルギーに変換されることを明らかにした。これはパルサー星雲の観測結果をよく説明することができる。

## 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10件) 全て査読有り

- ① Amano, T., Kirk, J.G., The Role of Superluminal Electromagnetic Waves in Pulsar Wind Termination Shocks, *Astrophys. J.* 770, 18, 2013
- ② Minoshima, T., Matsumoto, Y., Amano, T., Multi-moment advection scheme in three dimension for Vlasov simulations of magnetized plasma, *J. Comput. Phys.*, 236, 81-95, 2013
- ③ Matsumoto, Y., Amano, T., Hoshino, M., Electron Accelerations at High Mach Number Shocks: Two-Dimensional Particle-in-Cell Simulations in Various Parameter Regimes, *Astrophys. J.*, 755, 109, 2012
- ④ Umeda, T., Matsukiyo, S., Amano, T., Miyoshi, Y., A Numerical Electromagnetic Linear Dispersion Relation for Maxwellian Ring-Beam Velocity Distributions, *Phys. Plasmas*, 19, 072107, 2012

- ⑤ Amano, T., Hoshino, M., Recent Progress in the Theory of Electron Injection in Collisionless Shocks, *Astrophys. Space Sci. Proc.*, 33, 143-152, 2012
- ⑥ Hayakawa, T., Torii, K., Enokiya, R., Amano, T., Fukui, Y., Molecular and Atomic Gas toward HESS J1745-303 in the Galactic Center: Further Support for the Hadronic Scenario, *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 64, 8, 2012
- ⑦ Amano, T., Torii, K., Hayakawa, T., Fukui, Y., Stochastic Acceleration of Cosmic Rays in the Central Molecular Zone of the Galaxy, *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 63, L63-L66, 2011
- ⑧ Minoshima, T., Matsumoto, Y., Amano, T., Multi-Moment Advection Scheme for Vlasov Simulations, *J. Comput. Phys.*, 230, 17, 6800-6823, 2011
- ⑨ Amano, T., Seki, K., Miyoshi, Y., Umeda, T., Matsumoto, Y., Ebihara, Y., Saito, S., Self-consistent Kinetic Numerical Simulation Model for Ring Current Particles in the Earth's Inner Magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 116, A02216, 2011
- ⑩ Amano, T., Hoshino, M., A Critical Mach Number for Electron Injection in Collisionless Shocks, *Phys. Rev. Lett.*, 104, 181102, 2010

[学会発表] (計 14 件)

- ① 天野 孝伸, J. Kirk, 相対論的電磁変性衝撃波の構造と電磁エネルギー散逸, 日本物理学会, 広島大学, 2013/03/27 (招待講演)
- ② Amano, T., Kirk, J. G., Structure of Relativistic Shock Modified by Nonlinear Superluminal Waves, *Nonlinear Waves and Chaos Workshop 9*, La Jolla, USA, Mar. 7, 2013 (招待講演)
- ③ 天野 孝伸, J. Kirk, 相対論的電磁変性衝撃波の構造, 日本地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 札幌コンベンションセンター, 2012/10/21
- ④ 天野 孝伸, J. Kirk, パルサー風の終端衝撃波における電磁エネルギーの散逸, 日本天文学会秋季年会, 大分大学, 2012/09/20
- ⑤ 天野 孝伸, J. Kirk, 相対論的衝撃波における電磁場エネルギーの散逸, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 2012/05/22
- ⑥ Amano, T., Seki, K., Miyoshi, Y., Umeda, T., Matsumoto, Y., Ebihara, Y., Saito, S., Self-consistent Drift-kinetic Numerical Ring-current Modeling : Five-dimensional Vlasov-Maxwell Approach, *Inner Magnetosphere Coupling II (IMC II)*, Los Angeles, USA, Mar. 20, 2012 (招待講演)
- ⑦ Amano, T., Seki, K., Miyoshi, Y., Umeda, T., Matsumoto, Y., Ebihara, Y., Saito, S., Self-consistent Kinetic Ring Current Modeling : The GEMSIS-RC Code, *GEMSIS International Workshop*, Nagoya, Japan, Mar. 12, 2012
- ⑧ Amano, T., Hoshino, M., Nonthermal Electron Acceleration and Injection in Collisionless Shocks, *International Astrophysics Forum Alpbach (IAFA) 2011*, Alpbach, Austria, Jun. 24, 2011 (招待講演)
- ⑨ Amano, T., Seki, K., Miyoshi, Y., Umeda, T., Matsumoto, Y., Ebihara, Y., Saito, S., Kinetic and Self-consistent Numerical Modeling of the Terrestrial Inner Magnetosphere, *6th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows (ASTRONUM 2011)*, Valencia, Spain, Jun. 17, 2011 (招待講演)
- ⑩ 天野 孝伸, イオンスケール揺らぎ存在下における電子の衝撃波ドリフト加速の効率, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 2011/05/25
- ⑪ Amano, T., Seki, K., Miyoshi, Y., Umeda, T., Matsumoto, Y., Ebihara, Y., Saito, S., Development of a Fully Self-consistent Numerical Simulation Model for Ring Current Dynamics in the Inner Magnetosphere, *AGU Fall Meeting*, San Francisco, USA, Dec. 13, 2010
- ⑫ 天野 孝伸, 揺らいだ衝撃波面におけるドリフト加速, 日本地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 沖縄県市町村自治会館, 2010/11/01
- ⑬ Amano, T., Hoshino, M., Electron Acceleration and Injection by Whistler Waves in Collisionless Shocks, *2010 International Space Plasma Symposium*, Tinan, Taiwan, Jun. 28, 2010 (招待講演)
- ⑭ 天野 孝伸, 星野 真弘, 無衝突衝撃波における電子注入の臨界マッハ数, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ, 2010/05/23

6. 研究組織

(1) 研究代表者

天野 孝伸 (AMANO TAKANOBU)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号：00514853

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし