

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17702

研究課題名(和文)部分電離プラズマ中の宇宙線加速機構の解明と初期宇宙への応用

研究課題名(英文) Study for cosmic-ray acceleration in partially ionized plasmas and application to the early universe

研究代表者

大平 豊 (Ohira, Yutaka)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：40589347

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：部分電離プラズマ中を伝搬する無衝突衝撃波のプラズマ粒子シミュレーションを世界で初めて行った。電荷交換反応により生じた下流の高温の水素原子が上流に向かって染み出すこと、それらが電離したのちに上流プラズマと相互作用することで衝撃波構造を変えることを示した。宇宙線加速について電離度の制限が存在することを世界で初めて示した。また、初期宇宙での宇宙線加速について理論的に調べ、 $z=20$ ごろの初代星が超新星残骸を作る際に、宇宙線が1GeVまで加速されることを明らかにした。同じ $z=20$ 程度の時期に生じる構造形成に伴う衝撃波は、電離度が非常に低い衝撃波となるため宇宙線を加速することができないことも判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エネルギーの高い宇宙線は、宇宙の様々な天体に影響を及ぼす。地球でも、半導体エラーや雲や雷に影響を及ぼす。このように地球上から宇宙に渡って至る所に影響を及ぼす宇宙線は、いまだその加速源がわかっていない。本研究は、これまで完全電離を仮定して議論されていた宇宙線加速過程を見直し、より現実的な部分電離プラズマ中での宇宙線加速過程を調べた。その結果、これまでいつでも宇宙線を加速できると思われていた無衝突衝撃波は、電離度によっては宇宙線加速に適さないことが明らかになった。これは、未解明の宇宙線源の候補を絞る上で非常に役に立つ結果である。

研究成果の概要(英文)：We first performed plasma particle simulations for collisionless shocks propagating to partially ionized plasmas. We showed that some of downstream hot hydrogens that are generated by the charge exchange process leak into the shock upstream region. After the leaking neutral atoms are ionized, the ionized particles change the shock structure. In addition, we first showed that there is the critical ionization fraction that controls the cosmic-ray acceleration. Furthermore, we investigated the cosmic-ray acceleration in the early universe. We showed that the first cosmic rays are accelerated by first supernova remnants at $z \sim 20$. The maximum energy of the first cosmic ray is about 1 GeV. Moreover, we showed that accretion shocks associated with cosmological large scale structure formation at $z \sim 20$ cannot accelerate cosmic rays because of a low ionization fraction.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙線 超新星残骸 プラズマ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙線は、銀河団を加熱したり、銀河風を駆動し星形成率を下げたり、分子雲や原始惑星系円盤の電離度を決めたりと、宇宙の様々なスケールで重要な影響を与えることが指摘されている。地球上でも半導体エラーや、雲や雷生成を引き起こすなどの影響を与える。宇宙線が発見されて100年以上がたった現在も、いまだに宇宙線加速源と宇宙線加速機構は分かっておらず、宇宙物理学最大の謎の一つとなっている。地球に飛来する宇宙船に限らず、宇宙線と同様に高エネルギーの荷電粒子は、様々な天体現象で加速されていることがわかっている。これまでの宇宙線研究や天体での高エネルギー粒子の研究は、加速領域のプラズマは完全電離を暗に仮定していた。しかし、現実の宇宙空間プラズマは、しばしば部分電離状態である。また、宇宙初期は宇宙のほとんどの領域が部分電離状態となる。

また現在の宇宙に存在する宇宙線が、宇宙誕生後いつどこでどのように加速され始めたのか、宇宙線はいつから宇宙の様々なスケールで重要な影響を及ぼすようになったのか、全く調べられていない。この問題は、いつ非熱的宇宙が始まったのか？というより大きな問題とみなすことができる。

2. 研究の目的

現実的な部分電離プラズマ中の無衝突衝撃波の構造とそこで起きるプラズマ不安定性、宇宙線加速過程を明らかにすることで、現在の宇宙の宇宙線源と、初期宇宙での初代宇宙線の加速源を明らかにする。

3. 研究の方法

部分電離プラズマ中で生じる電荷交換反応と衝突電離を考慮したプラズマ粒子シミュレーションコードを開発し、スーパーコンピュータを用いて大規模計算を行うことで、部分電離プラズマ中の無衝突衝撃波とそこで起きる宇宙線加速過程を調べる。その結果を、初期宇宙での宇宙線加速に応用し、初代宇宙線がどこで加速できるかを明らかにする。

4. 研究成果

部分電離プラズマ中で生じる電荷交換反応と衝突電離を考慮したプラズマ粒子シミュレーションコードの開発に成功した。世界で初めて、空間2次元の部分電離プラズマ中の無衝突衝撃波のシミュレーションを実行し、以下の点を明らかにした。

- 1) 電荷交換反応で生成された衝撃波下流の高温水素原子は、電磁場と相互作用しないために、衝撃波上流へ染み出す(図1)。
- 2) 染み出した水素原子が衝撃波上流で電離した後、衝撃波上流で高温のピックアップイオンになる。
- 3) ピックアップイオンの温度非等方性によって、プラズマ不安定性が駆動され、電磁場の擾乱が成長する。また衝撃波上流では、電離による新しい音波不安定性を発見した。
- 4) 上流のプラズマ不安定性の非線形発展の結果作られた密度擾乱が衝撃波面と相互作用することで、衝撃波下流に強い乱流が駆動される。その結果、衝撃波下流では、乱流ダイナモによって磁場が強く増幅される。
- 5) 衝撃波上流で作られたピックアップイオンは、上流の熱的プラズマに比べてエネルギーが高いため、その後衝撃波を再び通過するとき、熱的プラズマに比べて優先的に加速される。
- 6) 衝撃波上流のピックアップイオンの圧力勾配により、部分電離プラズマ中の衝撃波は完全電離プラズマの場合に比べて5桁も大きな空間スケールの構造を持つこと。その空間スケールは電離長程度になる。
- 7) 電離度が低いと、衝撃波構造の変化の度合いが大きくなり、加速される宇宙線のべきが非常にソフトになるため、エネルギーの高い粒子を十分な数加速できなくなる。

さらに、空間3次元の部分電離プラズマ中の無衝突衝撃波のシミュレーションを実行し、上流に染み出した水素原子が、最終的に衝撃波統計加速によって、エネルギーを1万倍まで加速することを示した(図2)。

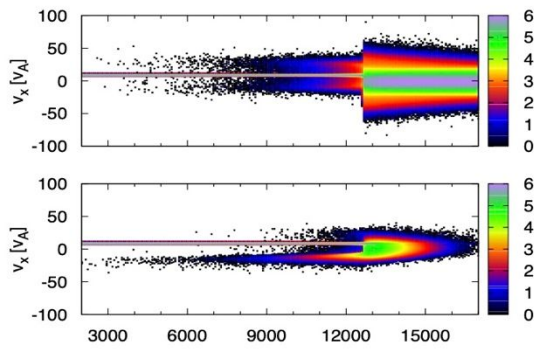


図1 上のパネルが陽子の位相空間図。
下のパネルが水素原子の位相空間図。

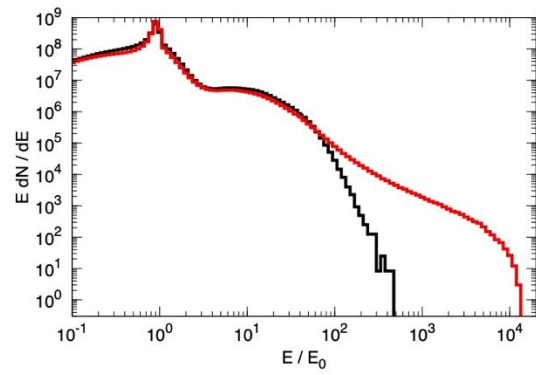


図2 黒と赤のヒストグラムは、それぞれ
2次元と3次元の場合のエネルギー
スペクトル。

上記の結果を、初期宇宙に適用した結果、初代宇宙線は、赤方偏移が約 20 程度の初代星の超新星残骸で加速され、同じ時期の構造形成に伴う衝撃波では加速できないことを明らかにした。初代星周辺は、初代星からの強い紫外線によって、その周囲が完全電離状態になるが、赤方偏移が約 20 程度の構造形成に伴う衝撃波は、電離度が非常に低くなるためである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Umeda Takayuki, Yamazaki Ryo, Ohira Yutaka, Ishizaka Natsuki, Kakuchi Shin, Kuramitsu Yasuhiro, Matsukiyo Shuichi, Miyata Itaru, Morita Taichi, Sakawa Youichi, Sano Takayoshi, Sei Shuto, Tanaka Shuta J., Toda Hirohumi, Tomita Sara	4. 巻 26
2. 論文標題 Full particle-in-cell simulation of the interaction between two plasmas for laboratory experiments on the generation of magnetized collisionless shocks with high-power lasers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 032303 ~ 032303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5079906	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sezer A, Ergin T, Yamazaki R, Ohira Y, Cesur N	4. 巻 481
2. 論文標題 A Suzaku X-ray study of the mixed-morphology supernova remnant Kes 69 and searching for its gamma-ray counterpart	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1416 ~ 1425
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty2387	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ohira Yutaka, Kisaka Shota, Yamazaki Ryo	4. 巻 478
2. 論文標題 Pulsar Wind Nebulae inside Supernova Remnants as Cosmic-Ray PeVatrons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 926 ~ 931
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1159	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Bamba Aya, Ohira Yutaka, Yamazaki Ryo, Sawada Makoto, Terada Yukikatsu, Koyama Katsuji, Miller Eric D., Yamaguchi Hiroya, Katsuda Satoru, Nobukawa Masayoshi, Nobukawa Kumiko K.	4. 巻 854
2. 論文標題 The Transition from Young to Middle-aged Supernova Remnants: Thermal and Nonthermal Aspects of SNR N132D	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 71 ~ 71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaa5a0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shimoda Jiro, Ohira Yutaka, Yamazaki Ryo, Laming J. Martin, Katsuda Satoru	4. 巻 473
2. 論文標題 Polarized Balmer line emission from supernova remnant shock waves efficiently accelerating cosmic rays	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1394 ~ 1406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx2339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yutaka Ohira, Ryo Yamazaki	4. 巻 13
2. 論文標題 Inverse Compton emission from a cosmic-ray precursor in RX J1713.7-3946	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Astrophysics	6. 最初と最後の頁 17,21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jheap.2017.03.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sato, Toshiki; Maeda, Yoshitomo; Bamba, Aya; Katsuda, Satoru; Ohira, Yutaka; Yamazaki, Ryo; Masai, Kuniaki; Matsumoto, Hironori; Sawada, Makoto; Terada, Yukikatsu; Hughes, John P.; Ishida, Manabu	4. 巻 836
2. 論文標題 Multi-year X-Ray Variations of Iron-K and Continuum Emissions in the Young Supernova Remnant Cassiopeia A	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/836/2/225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yutaka Ohira	4. 巻 827
2. 論文標題 Injection to Rapid Diffusive Shock Acceleration at Perpendicular Shocks in Partially Ionized Plasmas	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/827/1/36	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomita Sara, Ohira Yutaka	4. 巻 825
2. 論文標題 Weibel Instability Driven by Spatially Anisotropic Density Structures	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/825/2/103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takeda Sawako, Bamba Aya, Terada Yukikatsu, Tashiro Makoto S., Katsuda Satoru, Yamazaki Ryo, Ohira Yutaka, Iwakiri Wataru	4. 巻 68
2. 論文標題 Suzaku observations of the hard X-ray spectrum of Vela Jr. (SNR RX J0852.0-4622)	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psw036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryo Yamazaki, Katsuaki Asano, Yutaka Ohira	4. 巻 2016
2. 論文標題 Electromagnetic afterglows associated with gamma-ray emission coincident with binary black hole merger event GW150914	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptw042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yutaka Ohira, Norita Kawanaka, Kunihito Ioka	4. 巻 93
2. 論文標題 Cosmic-ray hardenings in light of AMS-02 data	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.93.083001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yutaka Ohira
2. 発表標題 Collisionless shocks driven by a high-power laser
3. 学会等名 The 4th STEPS Symposium on Photon Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大平豊
2. 発表標題 超新星残骸内部のパルサー星雲によるKnee宇宙線の加速
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Ohira
2. 発表標題 Acceleration of First Cosmic Rays
3. 学会等名 MAX PLANCK PRINCETON CENTER WORKSHOP 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大平豊
2. 発表標題 Nonlinear evolution of the Weibel instability induced by asymmetric counter-streaming beams
3. 学会等名 2018年度CfCAユーザーズミーティング
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大平豊
2. 発表標題 宇宙線の標準理論未来に向けての再考
3. 学会等名 第31回 理論懇シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大平豊
2. 発表標題 宇宙線と磁場
3. 学会等名 高エネルギー天体現象の多様性 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaka Ohira
2. 発表標題 Particle accelerations, plasma instabilities, and collisionless shocks in partially ionized plasmas
3. 学会等名 AAPPS-DPP2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大平豊
2. 発表標題 Origin of the First Cosmic Rays
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大平豊
2. 発表標題 低電離プラズマ中の無衝突衝撃波のハイブリッドシミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会2018年春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大平豊
2. 発表標題 宇宙線と磁場
3. 学会等名 研究会X (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大平豊
2. 発表標題 超新星残骸衝撃波中のピックアップイオン
3. 学会等名 PSTEP・ISEE研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大平豊
2. 発表標題 First cosmic ray
3. 学会等名 第30回 理論懇シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大平豊
2. 発表標題 宇宙線Kneeの起源
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大平豊
2. 発表標題 Particle acceleration by pulsar wind nebulae inside supernova remnants
3. 学会等名 ICRC2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大平豊
2. 発表標題 超新星残骸での粒子加速と非熱的放射
3. 学会等名 磁気リコネクション・粒子加速勉強会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 PeVatron理論レビュー
3. 学会等名 2016年度CRC将来計画タウンミーティング (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 銀河宇宙線の加速・逃走・伝搬の研究
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会（2017年）（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 部分電離プラズマ中の無衝突衝撃波と粒子加速
3. 学会等名 「自然科学における階層と全体」シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 部分電離プラズマ中の衝撃波統計加速
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 部分電離プラズマ中の平行無衝突衝撃波の構造
3. 学会等名 平成27年度CfCAユーザーズミーティング（招待講演）
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----