

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01893

研究課題名（和文）宇宙誕生後最初に加速した宇宙線の加速機構とその影響の解明

研究課題名（英文）Study for acceleration mechanism of first cosmic rays and their influences

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） 12,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、宇宙誕生後いつから宇宙線が加速され、いつから宇宙線が宇宙の様々な現象に重要な寄与をし始めたのかを調べた。宇宙が誕生して数億年後の初代星の爆発によって生じた無衝突衝撃波で、最初の宇宙線が加速されることを明らかにした。その初代宇宙線が銀河間空間を伝搬する際に、磁場を生成したり、ガスを加熱したりすることを明らかにした。また、この宇宙線によって作られた種磁場は、現在の宇宙に存在する磁場の起源となりえること、宇宙線による宇宙初期のガス加熱が、将来の21cm観測によって検証可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の宇宙では、宇宙線によって銀河風が吹いたり、宇宙のガスを加熱したり、分子雲や原始惑星系円盤の電離率が決まったり、雷などの地球大気中の雷雲中の放電現象を開始させたり、様々な空間スケールで宇宙線が重要な役割を果たすと指摘されている。しかし、宇宙が誕生していつから宇宙線が加速され、いつから現在のように宇宙線が様々な天体現象に重要な役割を果たすようになったのか？全く調べられていなかった。本研究は、その問題提議とプラズマ物理学に基づく研究を最初に行った。これは、星や銀河が作られていく熱的宇宙の進化とは対照的な、高エネルギー粒子が重要な役割を果たす、非熱的宇宙の開始と進化を理解するための研究と言える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated when cosmic rays were accelerated after the big bang of the universe and when cosmic rays began to make important contributions to various astronomical phenomena. We showed that the first cosmic rays were accelerated by collisionless shock waves generated by the explosion of the first stars hundreds of millions of years after the birth of the Universe. We then showed that the first cosmic rays generate magnetic fields and heat gas as they propagate through intergalactic space. In addition, we showed that the seed magnetic field created by the first cosmic rays could be the origin of the magnetic fields that exist in the present-day Universe, and that the heating of gas in the early Universe by cosmic rays could be verified by future 21 cm observations.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙線 超新星残骸 初期宇宙 プラズマ 磁場

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 現在の宇宙には宇宙線と呼ばれる高エネルギーな荷電粒子が存在する。宇宙線 1 粒子のエネルギーは最高で  $10^{20}$  eV にも達する。銀河内の約  $10^9$  eV の宇宙線のエネルギー密度は、銀河内を満たす 1 eV 程度の熱的なガスや磁場のエネルギー密度と同程度ある。これは、銀河で発生するエネルギーが、大多数の熱的粒子と少数の高エネルギー宇宙線と磁場で等分配されていることを示している。銀河全体のエネルギー緩和過程が、地上で起きるものと全く異なっている大変興味深い事実である。銀河内に存在する宇宙線の源は、星の大爆発で形成される衝撃波であると思われる。その衝撃波はクーロン散乱などの個々の粒子間衝突による運動量交換が無視できる無衝突衝撃波となる。爆発現象の観測から、その衝撃波近傍で磁場が増幅されていることがわかってきたがその増幅機構は謎である。磁場は荷電粒子である宇宙線の運動を決定するため、宇宙線加速の理解には加速源の磁場を理解する必要がある。宇宙線は、銀河空間中の分子ガスの電離度を決めたり、ベリリウムなどの軽元素の起源であったり、銀河団の加熱、地球型惑星の素となる固体微粒子の帯電、地球の雲生成、半導体デバイス内のビット反転など、地上の日常生活から遠くの天体現象まで様々な空間スケールにおいて、重要な役割を果たす。

(2) しかし、宇宙線が宇宙誕生後いつから作られたのか、いつから重要な役割を果たすようになったのかは謎である。宇宙誕生直後、物質はプラズマ状態だが宇宙膨張に伴い中性化し、その後天体からの光で再びプラズマ化する。その間、宇宙の構造形成に伴い様々な空間スケールで部分電離プラズマ中を伝搬する衝撃波が形成される。また、現在の宇宙を満たす磁場も宇宙誕生から現在までどのようにして作られてきたのか謎である。宇宙初期で形成される衝撃波で宇宙線が加速されるかどうか、プラズマ物理学に基づいた研究はされていない。

### 2. 研究の目的

(1) 現在の宇宙では宇宙線と磁場が存在し、それらが様々な天体現象に影響を及ぼしている。本研究の目的は、宇宙誕生後いつから、どこで、どのようにして磁場と宇宙線は作られたのか? いつから宇宙線は他の天体に影響を及ぼし始めたのか? を明らかにすることであった。宇宙線を作り出す天体は宇宙誕生後に作られ進化する。宇宙初期の天体形成とその進化は盛んに研究されている。しかし宇宙線の観測的・理論的研究は、現在の宇宙に限って行われている。現在の宇宙に存在する天体では、宇宙線や磁場は大きく影響する。宇宙初期に形成される天体も同様に、宇宙線や磁場が存在すればその影響を大きく受けるはずである。しかし、宇宙線や磁場が宇宙誕生後いつどこで作られたかがわからないために、その影響は詳しく調べられていない。

### 3. 研究の方法

(1) これまでの宇宙初期の天体現象による磁場生成を調べる研究は、マクスウェル方程式と宇宙線を無視したオームの法則を使い近似的に解いていた。その方法では、発生した電流を打ち消すよう発生源の周りを流れるはずの帰還電流が流れず、磁場を正しく求めることができない。また、電荷保存を満たさない場合もある。これらの問題を解決できるような新しい定式化を構築し、それを解析的または数値的に解くことで電流と磁場の生成を正しく解明した。また第一原理的にマクスウェル方程式と多数の荷電粒子の運動を同時に、スーパーコンピュータを使って数値的に解くことで電流と磁場の発展を明らかにした。

### 4. 研究成果

(1) たとえ宇宙初期に天体スケールの磁場が存在しなくても、宇宙が誕生して数億年後の初代星の爆発によって生じた無衝突衝撃波で、最初の宇宙線が加速されることを明らかにした。またその宇宙線の最高エネルギーが 100 MeV 程度になること、その超新星残骸から逃走できる宇宙線の最低エネルギー宇宙線が 1 MeV 程度になることを導いた。

(2) 宇宙初期での宇宙線による磁場生成機構について理論的に調べた。初代星が超新星爆発した後の超新星残骸で加速される初代宇宙線による赤方偏移  $z=20$  程度の宇宙における磁場生成機構として、下記の 3 つを新たに発見した。

初代宇宙線が広がっていく系での一般化されたオームの法則を導出した。宇宙線がない系では、存在しない新しい項が加わることを示した。宇宙線電流を打ち消すために生じる電子の帰還電流によって生じる電子の流れが非一様なとき、電磁場が自然に生成されることを発見した。また、第一原理プラズマ粒子シミュレーションによって、発見した新しい磁場生成機構を再現することに成功した。

宇宙線電流を打ち消すために生じる電子の帰還電流によって生じる電子の流れは、電子の密度分布を変えずに圧力分布だけを変えること、それによってピアマン バッテリー機構が働き磁場が生成されることを発見した。また多流体プラズマシミュレーションによって、発見した新しい磁場生成機構を再現することに成功した。

宇宙線電流を打ち消すために生じる電子の帰還電流によって生じる電子の流れは、陽子とのクーロン相互作用により散逸し、電子プラズマは加熱される。その結果、ピアマンバッテリー機構が働き磁場が生成されることを発見した。

さらに、初期に磁場がない部分電離プラズマ中を伝搬する無衝突衝撃波中の磁場生成機構について調べ、電荷交換反応によって、陽子プラズマのみが実質加速されることになり、電子と陽子との間で相対速度が生成され、磁場が作られることを発見した。また、電荷交換反応によって生じる陽子ビームが電子の帰還電流を誘導するため、上記のその他の磁場生成機構も働くことを示した。

(3) 宇宙線が初期宇宙空間を伝搬する際に、熱的プラズマ同士の電気抵抗によって発生する電場を定量的に評価し、電気抵抗によるプラズマ加熱が、初期宇宙のガスの加熱に効くことを発見した。初代宇宙線による赤方偏移  $z=2-20$  の宇宙における新しいガスの加熱機構を定量的に評価した結果、これまで考えられていた宇宙初期でのガスの加熱機構(X線加熱と宇宙線による電離加熱)に比べて、宇宙線電流が誘導する抵抗性加熱の方が効率良くガスを加熱する時期があること、ガスの加熱によって抵抗が弱くなり、最終的には抵抗性加熱が効かなくなることが明らかになった。

(4) 地球上の雷の発生機構を宇宙に応用することで、宇宙線電流が誘導する抵抗性電場で宇宙線が作り出す2次電子が加速されることを発見した。2次電子の加速によって、熱的電子の帰還電流が減少すること、それによって電子の帰還電流を起因とする磁場生成機構が抑えられることを発見した。また、抵抗性電場による2次電子加速と抵抗性電場の減少の発展を調べるため、2次電子の生成、電場による加速、原子や分子の励起や電離にともなうエネルギー損失、抵抗性電場の発展を同時に数値的に解いた。その結果、電子雪崩が生じること、その後の準定常状態では、有限の抵抗性電場が残ること、その電場の大きさは、宇宙線電流の大きさによらず、ガスの電離度に依存することを明らかにした。また、電子雪崩が起きている最中の電離率は、これまで考えられてきた宇宙線による電離率に比べ100倍くらい大きくなり得ることを明らかにした。また、電離率だけでなく、原子や分子の励起率も10-100倍くらい大きくなることを明らかにした。

(5) 天体が形成される以前から天体スケールの磁場が作られていた場合、赤方偏移  $z=10$  程度の構造形成に伴う衝撃波で宇宙線が加速される場合の最高エネルギーを評価した。天体スケールの磁場がないときは、最高エネルギーが10の5乗 eV 程度だが、天体スケールの磁場が存在する場合は、宇宙線による磁場増幅が働いた結果、最高エネルギーが10の15乗 eV 程度になることを明らかにした。宇宙初期の宇宙線の最高エネルギーを調べることができれば、宇宙の磁場の起源についての情報が得られる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Ohira Yutaka	4. 巻 929
2. 論文標題 Self-discharge by Streaming Cosmic Rays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 106 ~ 106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac5abc	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Fujita Yutaka, Yamazaki Ryo, Ohira Yutaka	4. 巻 933
2. 論文標題 The Gamma-Ray Emission from the Supernova Remnant RX J1713.7-3946 Interacting with Two-phase Medium	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 126 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac731e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tomita Sara, Ohira Yutaka, Kimura Shigeo S., Tomida Kengo, Toma Kenji	4. 巻 936
2. 論文標題 Interaction of a Relativistic Magnetized Collisionless Shock with a Dense Clump	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L9 ~ L9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac88be	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yokoyama Shota L, Ohira Yutaka	4. 巻 515
2. 論文標題 Biermann battery powered by resistive heating induced by cosmic ray streaming	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5467 ~ 5472
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shimoda Jiro, Ohira Yutaka, Bamba Aya, Terada Yukikatsu, Yamazaki Ryo, Inoue Tsuyoshi, Tanaka Shuta J	4. 巻 74
2. 論文標題 X-ray line diagnostics of ion temperature at cosmic ray accelerating collisionless shocks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1022 ~ 1040
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac053	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 Takahashi Kazuya, Ioka Kunihito, Ohira Yutaka, van Eerten Hendrik J	4. 巻 517
2. 論文標題 Probing particle acceleration at trans-relativistic shocks with off-axis gamma-ray burst afterglows	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5541 ~ 5559
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac3022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kamijima Shoma F., Ohira Yutaka	4. 巻 106
2. 論文標題 Escape of cosmic rays from perpendicular shocks in the circumstellar magnetic field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.123025	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 Yuri, Obayashi Kaori, Theodre Zhang B., Tanaka Shuta J., Murase Kohta, Ohira Yutaka, Yamazaki Ryo	4. 巻 37
2. 論文標題 Synchrotron self-compton emission in the two-component jet model for gamma-ray bursts	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Astrophysics	6. 最初と最後の頁 51 ~ 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jheap.2022.12.004	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 Yamazaki R. et al.	4. 巻 105
2. 論文標題 High-power laser experiment forming a supercritical collisionless shock in a magnetized uniform plasma at rest	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	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/PhysRevE.105.025203	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 Suzuki Hiromasa, Bamba Aya, Yamazaki Ryo, Ohira Yutaka	4. 巻 924
2. 論文標題 Observational Constraints on the Maximum Energies of Accelerated Particles in Supernova Remnants: Low Maximum Energies and a Large Variety	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 45 ~ 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac33b5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sakawa Youichi, Ohira Yutaka, Kumar Rajesh, Morace Alessio, D'hl Leonard N. K., Woolsey Nigel	4. 巻 104
2. 論文標題 Identification of electrostatic two-stream instabilities associated with a laser-driven collisionless shock in a multicomponent plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review E	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/PhysRevE.104.055202	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 Kashiwamura Shuhei, Ohira Yutaka	4. 巻 922
2. 論文標題 Magnetic Field Generation by Charge Exchange in a Supernova Remnant in the Early Universe	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 63 ~ 63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac23d1	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 Sato Yuri, Obayashi Kaori, Yamazaki Ryo, Murase Kohta, Ohira Yutaka	4. 巻 504
2. 論文標題 Off-axis jet scenario for early afterglow emission of low-luminosity gamma-ray burst GRB 190829A	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5647 ~ 5655
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1273	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 Ohira Yutaka	4. 巻 911
2. 論文標題 The Biermann Battery Driven by a Streaming Plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 26 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abec41	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 Ohira Yutaka	4. 巻 911
2. 論文標題 The Biermann Battery Driven by a Streaming Plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abec41	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 Suzuki Hiromasa, Bamba Aya, Yamazaki Ryo, Ohira Yutaka	4. 巻 72
2. 論文標題 Study on the escape timescale of high-energy particles from supernova remnants through thermal X-ray properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa061	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 Kamijima Shoma F., Ohira Yutaka, Yamazaki Ryo	4. 巻 897
2. 論文標題 Fast Particle Acceleration at Perpendicular Shocks with Uniform Upstream Magnetic Field and Strong Downstream Turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab959a	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 Yokoyama Shota L., Ohira Yutaka	4. 巻 897
2. 論文標題 Particle Acceleration in a Shock Wave Propagating to an Inhomogeneous Medium	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab93c3	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 Ohira Yutaka	4. 巻 896
2. 論文標題 Magnetic Field Generation by an Inhomogeneous Return Current	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab963d	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, Yamazaki Ryo	4. 巻 886
2. 論文標題 Weibel-mediated Shocks Propagating into Inhomogeneous Electron?Positron Plasmas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab4a10	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 Ohira Yutaka, Murase Kohta	4. 巻 100
2. 論文標題 Origin and impacts of the first cosmic rays	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.061301	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

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 抵抗性電場によって加速された宇宙線2次電子によるガスの電離
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 2040年代の宇宙線研究
3. 学会等名 2040年代のスペース天文学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 宇宙線放電による2次電子加速とガスの電離と加熱
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 宇宙線流によって駆動する宇宙空間での放電現象
3. 学会等名 第152回SGEPSS講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Ohira
2. 発表標題 Cosmic-ray acceleration in the early universe
3. 学会等名 IRCC-AFPworkshop2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 銀河系内宇宙線と銀河系外宇宙線の遷移
3. 学会等名 空気シャワー勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 銀河系内宇宙線と銀河系外宇宙線の遷移
3. 学会等名 第五回 空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 宇宙で生じる様々な無衝突衝撃波
3. 学会等名 衝撃波シンポジウム2021年度（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 宇宙線によって引き起こされる宇宙での放電現象
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Ohira
2. 発表標題 Magnetic field generation by the first cosmic rays
3. 学会等名 37th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大平 豊
2. 発表標題 Magnetic field generation by the first cosmic ray
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaka Ohira
2. 発表標題 Cosmic ray acceleration in supernova remnants
3. 学会等名 YITP workshop “Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaka Ohira
2. 発表標題 Origin of the first cosmic rays
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大平豊
2. 発表標題 最高エネルギー宇宙線理論レビュー
3. 学会等名 CRC将来計画タウンミーティング (招待講演)
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

## 8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Princeton University	The Pennsylvania State University		
ドイツ	Max Planck Institutes			
英国	University of Bath	University of York		