

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540308

研究課題名(和文) 銀河・銀河団内の宇宙線とそれが母天体に与える影響

研究課題名(英文) Influence of cosmic-rays on their host galaxies and clusters of galaxies

研究代表者

藤田 裕 (Fujita, Yutaka)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10332165

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：銀河、銀河団のガス中には宇宙線が存在し、銀河、銀河団の進化に影響を与えていると考えられている。本研究では銀河、銀河団での宇宙線の加速過程と、その後の拡散過程、さらには拡散した宇宙線が周囲の環境に与える影響について統一的に研究を行い、主に以下のようなことがわかった。(1) 銀河においては多くの宇宙線は超新星残骸で加速されるが、加速された宇宙線はプラズマ中に波を発生させる。波との相互作用により宇宙線の拡散速度は著しく低下する。(2) 銀河団の中心ではAGNにより宇宙線が加速されるが、加速された宇宙線はプラズマの波とともに銀河団ガス中に広がり、広く銀河団ガスを加熱する。

研究成果の概要(英文)：Cosmic-rays affect the evolution of galaxies and clusters of galaxies. I studied the acceleration and diffusion of cosmic-rays in galaxies and clusters as well as their influence on the surrounding environment in a unified framework. The main results of this study are given as follows. (1) In galaxies, most cosmic-rays are accelerated at supernova remnants. During their diffusion into interstellar space, they excite plasma waves, which interact cosmic-rays and delay their diffusion. (2) In clusters, cosmic-rays are accelerated at the central AGNs. They propagate in intracluster gas along with plasma waves and widely heat the gas.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線 銀河 銀河団

## 1. 研究開始当初の背景

銀河は宇宙に広く存在し、その中には数千万から数千億もの恒星が輝いている。これらの恒星は銀河内の星間空間に広がるガスを原料として誕生したと考えられており、そのため、星間空間の構成要素としてはまずガスがよく調べられてきた。しかし現在では、星間空間の圧力に寄与する割合は、磁場や宇宙空間をほぼ光速で飛び回っている宇宙線もガスと同等、あるいはそれ以上であることが知られている。宇宙線は星形成に影響を与えていると考えられており、銀河の形成・進化と深く結びついているはずである。

銀河内の宇宙線の多くは超新星残骸で加速されたという説が有力である。X線観測から電子が実際に超新星残骸で加速されていることが知られている。一方、陽子も同様に加速されているはずであるが、直接電磁波を放射しないので、確認が難しい。しかし陽子に関連があると思われるガンマ線が、近年超新星残骸周辺で観測されており、理論との詳細な比較が可能になりつつある。

銀河団は全体を覆う銀河団ガスの温度が高いこともあり、ガスのエネルギーの方が宇宙線のエネルギーよりも高いが、それでも宇宙線のエネルギーはガスのエネルギーの10%程度であると見積もられている。銀河団の宇宙線の多くは、銀河団ガスで加速されたと考えられている。メカニズムとしては、私自身も提唱者の一人である銀河団ガス中で発生した大規模乱流で加速されたという説が有力であるが、銀河団衝突で発生する衝撃波で加速される可能性も指摘されている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は以下の通りである。

- (1) 銀河・銀河団における宇宙線加速の条件を明らかにする。宇宙線からの非熱的放射を理論的に予想し、観測と比較する。
- (2) 加速された宇宙線が周囲の空間に広がる過程を明らかにする。具体的には、宇宙線が周囲のプラズマと相互作用をすることで、自身の拡散に影響を与える効果を調べる。
- (3) 宇宙線が銀河・銀河団の形成と進化に与える影響を明らかにする。特に、宇宙線が天体内でのエネルギーの輸送に果たす役割について調べる。

## 3. 研究の方法

研究の手法としては理論研究と観測研究の両方を行う。

理論研究においては、まず、天体において宇宙線が加速されるような条件が満たされるか検討する。加速される場合は、宇宙線と周囲のプラズマの相互作用により増幅され

るアルフベン波の進化を計算し、それを宇宙線の拡散係数にフィードバックさせ、宇宙線の輸送拡散方程式を数値的に解く。また、輸送拡散方程式を解くことで求めた天体内の宇宙線の空間分布とエネルギースペクトルをもとに、宇宙線からの非熱的放射を計算し、観測との比較を行う。

観測研究においては、すざくX線天文衛星を用い、銀河団ガスの詳細な観測を行い、特に銀河団周辺部のガスの状態を調べる。また、電波望遠鏡により、銀河系内で宇宙線からの放射が見られる天体について観測を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 理論研究

宇宙線の加速と拡散を調べるため、流体、宇宙線粒子の両方の分布の時間進化を同時に解く特殊な数値シミュレーションコードを開発した。銀河系での宇宙線の運動量の範囲は9桁以上にも及び、そのため宇宙線の特徴的な空間スケールもその分変わる。また宇宙線が衝撃波で加速する場合は、衝撃波前面の流体に小さいスケールの precursor と呼ばれる構造ができるが、その構造は宇宙線の加速に大きな影響を与える。このような広い範囲に渡る空間スケールの変化を取り扱うためには、数値計算コード中で空間メッシュを設定するとき工夫が必要であった。

実際に開発したコードを使用し、超新星残骸の衝撃波で加速された宇宙線粒子が、超新星残骸から脱出したときに、粒子のエネルギースペクトルがどのようになるか調べた。その結果、宇宙線はプラズマ不安定性により自ら星間ガス中に波を発生させ、その波との相互作用で、星間空間への拡散は大きく遅れることが明らかになった。この遅れのため、粒子のエネルギースペクトルは大きく変形される。

銀河団中の銀河、特に銀河団の中心にあるcD銀河と銀河団ガスの関係について調べた。cD銀河を覆うガスは強いX線を放射しており、急速にエネルギーを失っているはずであるが、温度はあまり下がっておらず、何らかのエネルギー供給メカニズムが働いていると考えられている。そこでエネルギー供給源としてcD銀河の中心に存在する巨大ブラックホール(活動銀河核)を考え、エネルギーの運搬役として宇宙線考えた。ブラックホールの周囲では宇宙線が加速されており、加速された宇宙線は銀河団内へと流れ出す。宇宙線は銀河団ガスと相互作用をし、プラズマ不安定によりアルフベン波を励起する。この際、宇宙線からアルフベン波にエネルギーが渡される。アルフベン波の成長は最終的に非線形効果により止められる。この際、波のエネルギーが銀河団ガスへ渡される。以上の過程により、ブラックホールの周辺で宇宙線の形で生成されたエネルギーが、銀河団ガスへ渡されるはずである。

この過程について数値シミュレーションを用いて調べたところ、これまで考えられてきた多くのエネルギー供給メカニズムと異なり、エネルギーが安定にブラックホール周囲から銀河団ガスへ渡されることがわかった。

さらにこの過程でエネルギーを運搬する宇宙線からの非熱的放射についても調べた。宇宙線からは、シンクロトロン放射、逆コンプトン放射、中間子からのガンマ線放射がある。そのうちのシンクロトロン放射に関する予言は電波放射の観測と一致し、他の放射は弱く、観測は難しいことがわかった。

銀河系の中心部にはフェルミバブルという巨大なガンマ線の構造が見られるが、ガンマ線を放射している宇宙線の起源がよくわかっていない。この問題について、宇宙線が超新星残骸と同じように、バブル周囲の衝撃波で加速されたたると、観測をよく説明できることを示した。

## (2) 観測研究

すざく衛星によるX線観測により、銀河団の外周部のエントロピーは、従来の理論予想より小さいことを明らかにした。また、この現象が、銀河団周辺部で発生した衝撃波により加速された宇宙線が、ガスの運動エネルギーを消費した結果であることを指摘した。

Hydra A 銀河団の中心にある cD 銀河をすばる望遠鏡で観測し、巨大な冷たいガスの円盤が存在することを明らかにした。このガスの一部はブラックホールに落下し、宇宙線ジェットとして噴出していると考えられる。

散開星団 RSGC1 のガンマ線は陽子宇宙線ではなく電子宇宙線によるものであることを明らかにした。また、電子宇宙線はパルサーにより、供給されていることを示した。

## 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 16 件)

Y. Fujita, H. Nakanishi, E. Muller, N. Kobayashi, M. Saito, C. Yasui, H. Kikuchi, & K. Yoshinaga, "The Environment around the Young Massive Star Cluster RSGC 1 and HESS J1837-069", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 66, Issue 1, article id. 19, 5 pp. (2014)

DOI:10.1093/pasj/pst020, 査読有  
Y. Fujita, N. Okabe, K. Sato, T. Tamura, S. Matsushita, H. Hirashita, M. Nakamura, K. Matsushita, K. Nakazawa, & M. Takizawa, "Discovery of an Outstanding Disk in the cD Galaxy of

the Hydra A Cluster", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 65, Issue 6, article id. L15, 5 pp. (2013)

DOI:10.1093/pasj/65.6.L15, 査読有  
M. Yagi, L. Gu, Y. Fujita, K. Nakazawa, T. Akahori, T. Hattori, M. Yoshida, & K. Makishima, "Multi-Wavelength Studies of Spectacular Ram Pressure Stripping of a Galaxy. II. Star Formation in the Tail", The Astrophysical Journal, Volume 778, Issue 2, article id. 91, 17 pp. (2013)  
DOI:10.1088/0004-637X/778/2/91, 査読有

L. Gu, M. Yagi, K. Nakazawa, M. Yoshida, Y. Fujita, T. Hattori, T. Akahori, & K. Makishima, "Multi-Wavelength Studies of Spectacular Ram Pressure Stripping of a Galaxy. I. Discovery of an X-ray Absorption Feature", The Astrophysical Journal Letters, Volume 777, Issue 2, article id. L36, 5 pp. (2013)

DOI:10.1088/2041-8205/777/2/L36, 査読有

Y. Fujita, Y. Ohira, & Y. Yamazaki, "The Fermi Bubbles as a Scaled-up Version of Supernova Remnants", The Astrophysical Journal Letters, Volume 775, Issue 1, article id. L20, 5 pp. (2013)

DOI:10.1088/2041-8205/775/1/L20, 査読有

Y. Fujita, S. Kimura, & Y. Ohira, "Stability Analysis for Cosmic-Ray Heating of Cool Cores in Galaxy Clusters", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 432, Issue 2, p.1434-1443 (2013)

DOI:10.1093/mnras/stt563, 査読有  
Y. Fujita, Y. Ohira, & Y. Yamazaki, "Entropy at the Outskirts of Galaxy Clusters as Implications for Cosmological Cosmic-Ray Acceleration", The Astrophysical Journal Letters, Volume 767, Issue 1, article id. L4, 4 pp. (2013)

DOI:10.1088/2041-8205/767/1/L4, 査読有

K. Ichikawa, K. Matsushita, N. Okabe, K. Sato, Y.-Y. Zhang, A. Finoguenov, Y. Fujita, Y. Fukazawa, M. Kawaharada, K. Nakazawa, T. Ohashi, N. Ota, M. Takizawa, T. Tamura, & K. Umetsu, "Suzaku observations of Abell 1835 outskirts: Deviation from hydrostatic equilibrium", The Astrophysical Journal, Volume 766, Issue 2, article id. 90, 19 pp. (2013)

DOI:10.1088/0004-637X/766/2/90, 査読有  
Y. Fujita, & Y. Ohira, "Radio Mini-Halo Emission from Cosmic Rays in Galaxy Clusters and Heating of the Cool Cores", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 428, Issue 1, p.599-608 (2012)  
DOI:10.1093/mnras/sts050, 査読有  
T. Sato, T. Sasaki, K. Matsushita, E. Sakuma, K. Sato, Y. Fujita, N. Okabe, Y. Fukazawa, K. Ichikawa, M. Kawaharada, K. Nakazawa, T. Ohashi, N. Ota, M. Takizawa, & T. Tamura, "Suzaku observations of the Hydra A cluster out to the virial radius", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 64, Issue 5, article id. 95, 1 pp. (2012)  
DOI:10.1093/pasj/64.5.95, 査読有  
S. Pasetto, G. Bertelli, E. K. Grebel, C. Chiosi, & Y. Fujita, "Dissipative phenomena in extended-bodies interactions I: Methods Dwarf galaxies of the Local Group and their synthetic CMDs", Astronomy & Astrophysics, Volume 542, article id. A17, 15 pp. (2012)  
DOI:10.1051/0004-6361/201117612, 査読有  
Y. Fujita, & Y. Ohira, "Non-thermal Emissions from Cool Cores Heated by Cosmic-Rays in Galaxy Clusters", The Astrophysical Journal, Volume 746, Issue 1, article id. 53, 7 pp. (2012)  
DOI:10.1088/0004-637X/746/1/53, 査読有  
T. Yamagami, & Y. Fujita, "Star Formation in the Cometary Tails Associated with Cluster Galaxies", Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 63, Issue 6, pp.1165-1169 (2011)  
<http://pasj.asj.or.jp/v63/n6/630611/630611-frame.htm>, 査読有  
Y. Fujita, & Y. Ohira, "Stable Heating of Cluster Cooling Flows by Cosmic-Ray Streaming", The Astrophysical Journal, Volume 738, Issue 2, article id. 182, 7 pp. (2011)  
DOI:10.1088/0004-637X/738/2/182, 査読有  
Y. Fujita, Y. Ohira, "Stable Heating of Cluster Cooling Flows by Cosmic-Ray Streaming", The Astrophysical Journal, Volume 738, Issue 2, article id. 182, 7 pp. (2011)  
DOI:10.1088/0004-637X/738/2/182, 査読有  
Y. Fujita, F. Takahara, Y. Ohira, & K.

Iwasaki, "Alfvén wave amplification and self-containment of cosmic rays escaping from a supernova remnant", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 415, Issue 4, pp. 3434-3438 (2011)  
DOI:10.1111/j.1365-2966.2011.18980.x, 査読有

[学会発表](計 29 件)

藤田 裕 岡部信広 佐藤浩介 松下恭子 田村隆幸 松下聡樹 平下博之 中村雅徳 中澤知洋 滝沢元和 「電波銀河 Hydra A で見つかった巨大ガス円盤」日本天文学会 2014 年春季年会(2014 年 3 月 19 日(水) - 22 日(土) 国際基督教大学)

藤田 裕 菊地洋輝 吉永圭吾 中西裕之 Erik Muller 齋藤正雄 小林尚人 安井千香子 「ガンマ線散開星団 RSGC 1 が置かれている環境」日本天文学会 2014 年春季年会(2014 年 3 月 19 日(水) - 22 日(土) 国際基督教大学)

藤田 裕 大平 豊 山崎 了 「The Fermi Bubbles as a Scaled-up Version of Supernova Remnants」日本天文学会 2014 年春季年会(2014 年 3 月 19 日(水) - 22 日(土) 国際基督教大学)

Y. Fujita, "Search of dust lanes in massive elliptical galaxies", Quasar science with HSC: Toward the first results (January 14 - 16, 2014, ASIAA, Taiwan)

藤田 裕 「銀河団コアの非熱的現象」研究会「銀河団の物理」2013 年 12 月 28 日 東京理科大学

藤田 裕 「The Fermi Bubbles as a Scaled-up Version of Supernova Remnants」理論懇シンポジウム 2013 年 12 月 25 日 - 27 日 東京大学

藤田 裕 「The Fermi Bubbles as a Scaled-up Version of Supernova Remnants」高エネルギー宇宙物理学研究会 2013 年 11 月 17 日 - 19 日 パレス松州(宮城県)

Y. Fujita, "The Fermi Bubbles as a Scaled-up Version of Supernova Remnants", X-raying the Gamma-Ray Universe (November 4 - 6, 2013, Hakone, Japan)

Y. Fujita, "Heating of Galaxy Clusters by Cosmic-Rays", From black holes to cosmic rays (October 14 - 18, 2013, Les Houches, France)

藤田 裕 「銀河団中心銀河での AGN の大規模活動」研究会「ALMA で探るブラックホール高エネルギー現象」2013 年 9 月 25 日 - 26 日 国立天文台

藤田 裕 「銀河団の電波観測から探る銀河団の宇宙線加熱」日本 SKA サイエンス会議「宇宙磁場」2013 年 9 月 13 日

- 14 日 国立天文台水沢 VLBI 観測所  
藤田 裕 大平 豊 山崎 了「宇宙線加速が  
銀河団のエントロピー分布に与える影響」  
日本天文学会 2013 年秋季年会(2013  
年 9 月 10 日から 12 日 東北大学)

藤田 裕 「The Fermi Bubbles as a  
Scaled-up Version of Supernova  
Remnants and Predictions in the TeV  
Band」 高エネルギーガンマ線でみる極  
限宇宙 2013 2013 年 9 月 3 日 - 4 日 東  
京大学宇宙線研究所

藤田 裕 木村創大 大平 豊 「銀河団  
コアの宇宙線加熱の安定性」日本天文学会  
2013 年春季年会(2013 年 3 月 20 日 - 23  
日 埼玉大学)

Y. Fujita, "Generation of Magnetic  
Fields in the Universe through the  
Weibel instability", Axion Cosmophysics  
(November 6 - 9, 2012, KEK, Tsukuba)

藤田 裕 「宇宙線による銀河団の加熱」  
高エネルギー宇宙物理学研究会 2012 年  
10 月 4 日 - 6 日 首都大学東京

藤田 裕 大平 豊 「銀河団コアを加熱  
する宇宙線からの電波放射」日本天文学会  
2012 年秋季年会(2012 年 9 月 19 日 - 21  
日 大分大学)

Y. Fujita, "Stable Heating of Cluster  
Cool Cores by Cosmic-Ray Streaming",  
IAU General Assembly (August 20 - 24,  
2012, Beijing, China)

Y. Fujita, "Heating of cluster cooling  
cores by cosmic-ray streaming", BLACK  
HOLE FEEDBACK 2012 (July 30 -  
August 3, 2012, Dartmouth College,  
USA)

藤田 裕 「銀河団コアからの電波放射」  
日本 SKA サイエンス会議「宇宙磁場」  
2012 2012 年 6 月 25 日 - 26 日 福岡県  
志賀島

②① 藤田 裕 大平 豊 「宇宙線で加熱された  
銀河団コアからの放射」日本天文学会  
2012 年春季年会(2012 年 3 月 19 日 - 22  
日 龍谷大学)

②② 藤田 裕 「銀河団の宇宙線からの放射」  
銀河団研究会 2011 年 12 月 18 日 - 19  
日 箱根強羅静雲荘

②③ 藤田 裕 「銀河団の宇宙線による加熱」  
高エネルギー宇宙物理学研究会 2011 年 12  
月 15 日 - 17 日 大阪大学

②④ Y. Fujita, "Escape of Cosmic Rays from  
Supernova Remnants", High Energy  
Astroparticle Physics 2011 (November  
13 - 15, 2011, KEK, Tsukuba)

②⑤ 藤田 裕 「銀河団の非熱的輻射と CTA」  
マルチメッセンジャー宇宙物理学と CTA  
2011 年 9 月 29 日 - 10 月 1 日 東京大学  
宇宙線研究所

②⑥ 山上 高宏 藤田 裕 「銀河の尾の中での  
星形成」日本天文学会 2011 年秋季年  
会(2011 年 9 月 19 日 - 22 日 鹿児島大

学)

②⑦ 藤田 裕 大平 豊 「Cosmic-Ray  
Streaming による銀河団コアの加熱」日  
本天文学会 2011 年秋季年会(2011 年 9  
月 19 日 - 22 日 鹿児島大学)

②⑧ 藤田 裕 「銀河団コアの宇宙線による加  
熱」 第 11 回高宇連研究会 2011 年 8  
月 9 日 - 11 日 早稲田大学

②⑨ Y. Fujita, "Alfvén Wave Amplification  
and Self-Containment of Cosmic-Rays  
Escaping from a Supernova Remnant",  
Cosmic rays and their interstellar  
medium environment (June 26 - July 1,  
2011, Montpellier, France)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp/~fujita/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 裕 (FUJITA YUTAKA)  
大阪大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：10332165

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

