

機関番号：14401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540269

研究課題名 (和文) マクロとミクロの視点からの銀河団の研究

研究課題名 (英文) Research on Clusters of Galaxies from Macroscopic and Microscopic Point of Views

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

研究成果の概要 (和文)：

宇宙で最大の天体である銀河団を、銀河団そのもののマクロなスケールと、星、さらには原子が運動するミクロなスケールの観点から観測的、理論的に調べた。特に構成成分の宇宙線に注目した、観測的には X 線天文衛星や電波望遠鏡を用い、観測天体では宇宙線が周囲の環境に与える影響は、これまで考えられていたよりは少ないことを明らかにした。理論の面からは、銀河団内空間に宇宙線を供給する加速源天体からの宇宙線の脱出には、これまで考えられていたよりはるかに長い時間がかかることが明らかになった。

研究成果の概要 (英文)：

We studied clusters of galaxies from the macroscopic and microscopic viewpoints. We revealed the dynamics of hot intracluster gas and cosmic-rays through observations with an X-ray satellite and a radio telescope. We also found that cosmic-rays take a long time to escape from acceleration sources.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理、X 線天文学、プラズマ・核融合、宇宙線

## 1. 研究開始当初の背景

銀河団は宇宙で最大の天体であるため、その上の階層である宇宙そのものの性質をよく反映していると考えられている。そのため、伝統的に、宇宙論パラメーターとの関係や、宇宙の銀河進化など、宇宙論的なマクロな視点からの研究が多く行われてきた。一方、銀河団の主要構成要素の一つである銀河団ガスはプラズマであり、その観測データを解釈

するためには、原子スケールのミクロな物理を取り扱うプラズマ物理学の知識が必要である。また銀河団ガス中に存在する宇宙線の起源も明らかになっていなかった。宇宙線は銀河団中の銀河の進化に影響を与える可能性がある銀河団の構成要素の一つである。宇宙線の研究もプラズマ物理学の視点が必要であるが、それは銀河団研究者にはあまりなじみのないものであり、そのためこの視点から銀河団について調べる研究はあまり行わ

れてこなかった。

銀河団の本質的な理解のためにはマクロとミクロの両者を統合した視点が必要であると考え、本研究課題を提案した。

## 2. 研究の目的

本研究ではマクロとミクロの研究を同時に行いながら互いの研究にフィードバックさせ、最終的に銀河団の全体像を明らかにすることを目的とした。

具体的には、マクロとミクロの現象の結びつきが特に強い以下のテーマの解決を目指した。

- (1) 粒子加速に必要な銀河団ガスの運動の観測的な確認
- (2) 銀河団中の星形成と銀河進化の歴史の関係
- (3) 銀河団中心の巨大ブラックホールの活動が周囲の銀河に与える影響
- (4) 衝突中の銀河団（衝突銀河団）での衝撃波、乱流による粒子加速
- (5) 銀河団中心の巨大ブラックホールの活動に伴う粒子（特に陽子）の加速モデルの構築とその観測的な確認

(1)から(3)は主にマクロな視点、(6)は主にミクロな視点が求められる。(4)と(5)は両方の視点が必要である。これらは互いに結びついており、同時に研究を発展させることができる。

## 3. 研究の方法

研究の手法としては観測研究と理論研究の両方を行う。

観測においては、X線天文衛星すざくにより銀河団の観測を行った。特に大規模な衝突中の銀河団に注目をする。理論的にはこのような銀河団では、銀河団ガスが10-100万光年のスケールで $\sim 1000$  km/sの速さで運動していると考えられている。

理論においては、宇宙線粒子加速の様々な可能性を追究する。多くの銀河団では相対論的高エネルギー電子が存在していることが、空間的に広がった電子のシンクロトロン電波放射の存在から観測的に示されている。この多くは銀河団衝突に伴い銀河団ガス中に発生した乱流か衝撃波と関係していると考えられている。実際にシンクロトロン放射が観測されている銀河団の多くは衝突中の銀河団である。シンクロトロン放射をしている電子は、乱流や衝撃波で直接加速された1次電子であると考えられているが、観測と直接比較するためのより精密なモデルの構築を行う。

さらに宇宙線のより詳細な加速メカニズムについても注目した。銀河団は銀河系の外

のはるか遠方にあるので、ミクロなスケールで起こる宇宙線加速の詳細を観測と比較することは難しい。そこでまず銀河系内の近傍にある超新星残骸について理論モデルを構築し、観測と比較した。この観測にもすざくを用い、さらに結果を銀河団での宇宙線加速モデルの構築にフィードバックする。

## 4. 研究成果

(1) 銀河団の観測（「2. 研究の目的」の(1)、(4)に対応）

### ① へびつかい座銀河団

すざくを用い、へびつかい座銀河団に充満する約1億度の高温ガスの観測を行った。従来この銀河団では他の銀河団との衝突で発生した宇宙線粒子が存在すると言われていたが、我々の観測はそのような粒子がほとんどないことを示した。この結果は銀河団の衝突と宇宙線粒子の加速の関係の見直しを迫るものである。

### ② A2204

すざくによる銀河団A2204の外周部のX線観測も行った。その結果、質量が大きい銀河団に関しては、X線を放出する銀河団ガスは、銀河団内部で加速された宇宙線粒子の影響をあまり受けていないことがわかった。

(2) 電波銀河の観測（「2. 研究の目的」の(3)、(5)に対応）

野辺山45m電波望遠鏡を用い、銀河団スケールに広がった電波銀河からの電波放射の観測データの解析を行った。この電波銀河の中心には巨大ブラックホールが存在し、電波放射はこのブラックホールの活動に起因すると考えられている。研究対象に選んだ電波銀河にはシンクロトロン放射が存在することから、この電波銀河の周辺の領域には宇宙線粒子が存在していることが予想されたが、その宇宙線粒子によって宇宙背景放射のスペクトルが変形するスニヤエフ・ゼルドビッチ効果は観測されなかった。このことから電波銀河周囲の宇宙線粒子の密度について制限が得られた。

(3) 銀河中心ブラックホール「2. 研究の目的」の(3)に対応）

理論の面から、銀河団を構成する銀河の中心にある、質量が太陽の1億倍にもなる巨大ブラックホールの進化に焦点を当てた研究を行った。銀河はしばしば衝突と合体を行うが、そのとき、それぞれの銀河の中心にあるブラックホールも衝突し、合体すると以前は考えられていた。しかし、近年のコンピューターの能力の向上に伴い可能になった高精度重力波計算により、ブラックホールは合体時の重力波の放出による反動で、銀河中心か

ら飛び出す可能性が指摘されている。本研究では、その飛び出したブラックホールが周囲の環境に与える影響について調べた。その結果、ブラックホールが銀河の重力に引かれて銀河円盤に戻ってきたとき、周囲の星間ガスを吸収することで明るく輝き、周囲を熱する可能性を示した。

(4) 星形成領域（「2. 研究の目的」の(2)に対応）

マクロな銀河団中のミクロな構成要素である星形成領域に焦点を当てた研究を行った。

まずすざくにより、最近星が誕生したばかりの領域、Westerlund 2 の X 線による観測を行った。この領域ではこれまでの観測でガンマ線が発生していることが知られている。星形成領域からガンマ線が観測されることはめったになく、なぜこの領域からどのようなメカニズムでガンマ線が発生しているのかは全くの謎になっていた。すざくによる観測により電子からの非熱的 X 線はほとんど発生していないことが分かり、ガンマ線が電子ではなく、陽子により発生していることがわかった。ガンマ線と X 線の観測と理論モデルを比較した結果、陽子は Westerlund 2 内部に隠された超新星残骸で加速された可能性が高いことがわかった。さらに理論モデルを開発して調べたところ、Westerlund 2 のような星形成領域で加速された宇宙線粒子は銀河全体の進化に大きな影響を与えることも示した。

(5) 宇宙線粒子の加速（「2. 研究の目的」の(2), (4) に対応）

銀河団は遠方にあるため、その中で宇宙線粒子加速について詳細な観測データを得ることは難しい。そこで星形成領域での宇宙線粒子の加速の研究をまず行い、その成果をマクロなスケールである銀河団に応用した。まず理論的に星形成領域での粒子加速と、加速された粒子の伝播について調べた。手法としては数値シミュレーションを用いた。粒子の伝搬は粒子の運動に伴って発生する磁場のゆらぎに依存するので、その効果も考慮した。これがこれまでの研究と異なる本研究の特徴である。計算の結果、粒子の伝搬は粒子自身が生み出す磁場のゆらぎに妨害され、これまで考えられていたよりも有意に遅くなることがわかった。本研究の結果から、銀河団で加速された粒子が周囲の空間に広がる過程もかなり遅いことが予想される。さらに精密なシミュレーションコードの開発も行った。このコードは粒子の加速と伝搬を同時に扱える世界でも珍しいものである。

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 9 件）

①Masako Yamada, Yutaka Fujita, et al., “Search for the Sunyaev-Zel'dovich Effect in a Giant Radio Galaxy B1358+305”, The Astronomical Journal, 査読有, 139 巻, 2010, 2494-2503

② Yutaka Fujita, Yutaka Ohira, Fumio Takahara, “Slow Diffusion of Cosmic Rays Around a Supernova Remnant”, The Astrophysical Journal, 査読有, 712 巻, 2010, L153-L156

③ Yutaka Fujita, Kiyoshi Hayashida, et al., “Suzaku Observation of Diffuse X-Ray Emission from the Open Cluster Westerlund 2: a Hypernova Remnant?,” Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 61 巻, 2009, 1229-1235

④ Yutaka Fujita, Yutaka Ohira, et al., “Molecular Clouds as a Probe of Cosmic-Ray Acceleration in a Supernova Remnant”, The Astrophysical Journal, 査読有, 707 巻, 2009, L179-L183

⑤ Yutaka Fujita, Kazunori Kohri, et al., “Is the PAMELA anomaly caused by supernova explosions near the Earth?,” Physical Review D, 査読有, 80 巻, 2009, 063003 1-5

⑥ T. H. Reiprich, D. S. Hudson, Y.-Y. Zhang, K. Sato, Y. Ishisaki, A. Hoshino, T. Ohashi, N. Ota, Yutaka Fujita, “Suzaku Measurement of Abell 2204's Intracluster Gas Temperature Profile out to 1800 kpc”, Astronomy and Astrophysics, 査読有, 501 巻, 2009, 899-905

⑦ Yutaka Fujita, “Long-Term Evolution of and X-Ray Emission from a Recoiling Supermassive Black Hole in a Disk Galaxy”, The Astrophysical Journal, 査読有, 691 巻, 2009, 1050-1057

⑧ Yutaka Fujita, Kiyoshi Hayashida, et al., “Suzaku Observation of the Ophiuchus Galaxy Cluster: One of the Hottest Cool Core Clusters”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 60 巻, 2008, 1133-1142

⑨ Yutaka Fujita, “X-Ray Emission from a

Supermassive Black Hole Ejected from the Center of a Galaxy”, The Astrophysical Journal, 査読有, 685 巻, 2008, L59-L62

( )

研究者番号 :

[学会発表] (計 7 件)

①藤田 裕、高原文郎、加速された宇宙線の超新星残骸からの脱出について、日本天文学会、2011 年 3 月 18 日、東日本大震災により予稿集での発表

②藤田 裕、大平 豊、高原文郎、超新星残骸で加速された宇宙線のゆっくりとした脱出、日本天文学会、2010 年 9 月 22 日、金沢大学

③藤田 裕、大平 豊、田中周太、高原文郎、分子雲からの  $\gamma$  線で探る超新星残骸での宇宙線加速、日本天文学会、2010 年 3 月 25 日、広島大学

④藤田 裕、林田 清、高橋宏明、高原文郎、「すざく」による  $\gamma$  線散開星団 Westerlund 2 の観測、日本天文学会、2009 年 9 月 15 日、山口大学

⑤藤田 裕、郡 和範、山崎 了、井岡邦仁、PAMELA anomaly の超新星爆発による説明、日本天文学会、2009 年 9 月 15 日、山口大学

⑥藤田 裕、すざくで銀河団の「何」がわかるか、日本天文学会、2008 年 9 月 13 日、岡山理科大学

⑦藤田 裕、反跳巨大ブラックホールからの放射、日本天文学会、2009 年 3 月 25 日、大阪府立大学

[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