

平成30年 4月17日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05080

研究課題名(和文) 銀河団環境とブラックホールの共進化

研究課題名(英文) Co-evolution of galaxy clusters and black holes.

研究代表者

藤田 裕 (Fujita, Yutaka)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10332165

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙最大の天体銀河団とその中心に存在する巨大ブラックホールは互いに影響を及ぼしながら成長してきたと考えられる。その相互作用メカニズムの解明を理論と観測の両面から追求した。理論の面では、ジェットやブラックホール近傍で加速された宇宙線が星間空間に広がっていく過程で周囲のガスを加熱するメカニズムを明らかにした。観測の面からは、まず電波観測により、ブラックホールで発生したジェットが周囲のガスと相互作用をすることでガスをかき混ぜ、ガスのブラックホールへの降着に影響を及ぼしている様子を明らかにした。X線観測からは、ブラックホールの活動により、銀河より重元素が放出される過程などを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Galaxy clusters are the largest celestial bodies in the Universe. The clusters and the massive black holes at their center have evolved with mutual influence. We investigated the interaction mechanisms. In terms of theory, we showed that the black holes heat the surrounding gas as jets and cosmic rays accelerated near them diffuse into the interstellar space. From the viewpoint of observation, firstly, our radio observations showed that the jet generated around the black hole interacts with the surrounding gas, stirring it and affecting the gas accretion toward the black hole. Our X-ray observations revealed the process on how heavy elements are released from galaxies due to the activity of black holes.

研究分野：宇宙物理

キーワード：銀河団 ブラックホール プラズマ 宇宙線

## 1. 研究開始当初の背景

銀河団は宇宙最大の重力的に閉じた天体である。多くの銀河団の中心には cD 銀河と呼ばれる特殊な巨大楕円銀河が存在し、中心にはさらに巨大ブラックホールを含む AGN が存在する。cD 銀河中の AGN は、銀河団が成長する前の太古の宇宙では、クエーサーなど形で強烈な可視光放射をしていた可能性が高い。しかし、現在の(近傍の)宇宙では、そのような活動をしている AGN は存在しない。現在の cD 銀河中の AGN は電波を放射しつつ、ジェットを噴出することにより、周囲の高温の銀河団ガスをかき乱している。AGN の活動の様式が、このように時間とともに変遷していく様子は、観測的に明らかにされたものであり、その理論的なメカニズムは明らかになっていないが、銀河団の成長とともに変遷していることは、少なくとも銀河団環境にコントロールされているメカニズムであることが予想される。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は以下の通りである。

- (1) AGN の活動が銀河団環境に与える影響を明らかにする。
- (2) 銀河団の進化が AGN の活動とその中心のブラックホールの成長に与える影響を明らかにする。
- (3) (1), (2) の効果を組み合わせて検討することで、ブラックホールと銀河団環境の共進化を明らかにする。

## 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、AGN ジェットが周囲の銀河団ガスに与える影響を調べるために、ジェットがガスと相互作用をしながら成長する過程と、ジェット活動が終了した後の周囲のガスの進化に注目し、この両者を統一的に取り扱う解析的モデルを構築する。さらに AGN が加速した宇宙線が周囲のガスを加熱する効果も調べる。そこで AGN での宇宙線加速モデルと、加速された宇宙線の星間空間伝搬モデルを構築した。このテーマについては観測との比較を考慮し、まず観測データが豊富な銀河系に関して解析的なモデルを作成することにした。

銀河団での宇宙線加熱モデルを構築する際に問題になるのは、AGN 以外にも、銀河団衝突で加速される宇宙線が存在することである。AGN 起源の宇宙線と区別するために、銀河団衝突起源の宇宙線についても加速、伝搬モデルを構築した。

観測研究においては、X線観測と電波観測

を主に行う。X線観測では当初ひとみ衛星による観測を予定していたが、ひとみ衛星の喪失により、すざく衛星で得られた過去のデータの再解析に重点を置くことにした。さらに電波観測をより重視することにした。電波観測では超高分解能の VLBA 電波望遠鏡を用い、銀河団中心の AGN の活動を直接観測し、AGN と周囲の環境との相互作用を調べる。

## 4. 研究成果

### (1) 理論研究

AGN で発生したエネルギーのかなりの割合はジェットの形で放出されていると考えられているが、具体的にそのエネルギーが銀河団ガスに受け渡されるためには、ジェットが壁となる AGN 近傍の高密度ガス領域を突破する必要がある。そこで構築した理論モデルを用い、突破する条件を実際のジェットが満たすかどうか調べた。その結果、強さが  $< 10^{44}$  erg/s のジェットは高密度ガス領域を突破するものの、高密度ガスとの相互作用で強い減速を受けることがわかった。銀河団に存在するジェットはこのタイプが多く、タイプ FRI 電波銀河として観測されているものが多いことも説明できた。また、この研究から、AGN ジェットによる加熱は多くの場合 AGN 周囲にとどまることも言えた。またジェット活動が終了した後は、ジェットに加熱されたガスは泡として銀河団ガス中を上昇することもわかった。さらに我々の近くにあるペルセウス座銀河団中のジェットの詳細な観測データとモデルを比較することで、AGN 周囲のガスが非一様状態になっていることを明らかにした。このことは AGN への銀河団からのガス供給が間欠的に起きていることを示している。以上の研究により、銀河団から AGN へのガス供給が AGN のごく近傍でコントロールされているという共進化メカニズムの一つの形を明らかにすることができた。

AGN での宇宙線加速に関しては、降着円盤中での宇宙線加速を考えたモデルを提唱した。このモデルでは、超新星残骸よりも高いエネルギーの宇宙線も加速される。さらにこのモデルを銀河系中心の AGN に適用したところ、地球付近の高エネルギー宇宙線のスペクトルを説明できることがわかり、有望であることがわかった。このモデルの銀河団への具体的な適用は今後の課題としたい。銀河団衝突による宇宙線加速では、これまで定説とされてきた衝撃波加速ではなく、衝撃波下流での乱流加速を提唱した。このメカニズムで加速される宇宙線スペクトルは衝撃波加速のものよりも観測とよく一致する。一方、加速された宇宙線は銀河団全体の進化には大きな影響は与えないことも示した。

### (2) 観測研究

AGN の中心部の詳細な状態を把握するために、VLBA 電波望遠鏡による AGN 3C84 の観測を行った。その結果、わずか 10 年ほど前に始まったジェット活動をとらえることができた。またこの観測でも巨大ブラックホール付近のガスは非一様になっていることが明らかになった。

X線観測ではまず銀河団 Abell 399、401 間の連結領域をすざく衛星で観測し、宇宙の大規模構造形成に伴う衝撃波を発見した。これにより、理論シミュレーションが予想するように、銀河団間のフィラメントに物質が降着していることが明らかになった。さらに銀河団 Abell 3391、3395 間の連結領域を観測し、重元素が太陽組成の約 0.3 倍であることを明らかにした。この比較的大きい組成量は、銀河団が形成される前に AGN の活動により銀河から重元素が銀河間空間に放出されたとするシナリオと一致する。この重元素は銀河団形成後にガスの冷却材となるので、銀河団ガスの温度進化に影響する。さらに結果として銀河団中心のブラックホールへのガスの流入量に強い影響を与えるので、重元素放出を通じた AGN と銀河団の共進化現象を明らかにしたと言える。また X線観測とすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam の重力レンズ観測を組み合わせ、銀河団内のガスの正確な量と分布を測定した。

#### 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 22 件)

#### **Suzaku Observations of the Outskirts of the Galaxy Cluster Abell 3395 including a Filament toward Abell 3391**

*Y. Sugawara, M. Takizawa, M. Itahana, H. Akamatsu, Y. Fujita, T. Ohashi, & Y. Ishisaki*  
2017, PASJ, 69, 93

DOI: 10.1093/pasj/psx104

査読有

#### **Enhanced Polarized Emission from the One-Parsec-Scale Hotspot of 3C 84 as a Result of the Interaction with Clumpy Ambient Medium**

*H. Nagai, Y. Fujita, M. Nakamura, M. Orienti, M. Kino, K. Asada, & G. Giovannini*  
2017, ApJ, 849, 52

DOI: 10.3847/1538-4357/aa8e43

査読有

#### **Properties of the cosmological filament between two clusters: A possible detection of a large-scale accretion shock by Suzaku**

*H. Akamatsu, Y. Fujita, T. Akahori, Y. Ishisaki, K. Hayashida, A.*

*Hoshino, F. Mernier, K. Yoshikawa, K. Sato, & J. S. Kaastra*

2017, A&A, 606, A1

DOI: 10.1051/0004-6361/201730497

査読有

#### **Sagittarius A\* as an Origin of the Galactic PeV Cosmic Rays?**

*Y. Fujita, K. Murase, & S. S. Kimura*

2017, JCAP, 04, 037

DOI:

10.1088/1475-7516/2017/04/037

査読有

#### **Probing WHIM around Galaxy Clusters with Fast Radio Bursts and the Sunyaev-Zel'dovich effect**

*Y. Fujita, T. Akahori, K. Umetsu, C. L. Sarazin, & K.-W. Wong*

2017, ApJ, 834, 13

DOI: 10.3847/1538-4357/834/1/13

査読有

#### **Discovery of a new subparsec counterjet in NGC 1275: the inclination angle and the environment**

*Y. Fujita, & H. Nagai*

2017, MNRAS, 465, L94

DOI: 10.1093/mnras/slw217

査読有

#### **Turbulent Cosmic-Ray Reacceleration and the Curved Radio Spectrum of the Radio Relic in the Sausage Cluster**

*Y. Fujita, H. Akamatsu, & S. S. Kimura*

2016, PASJ, 68, 34

DOI: 10.1093/pasj/psw022

査読有

#### **AGN Jet Power, Formation of X-ray Cavities, and FR I/II Dichotomy in Galaxy Clusters**

*Y. Fujita, N. Kawakatu, & I. Shlosman*

2016, PASJ, 68, 26

DOI: 10.1093/pasj/psw01

査読有

#### **Central Mass Profiles of the Nearby Cool-core Galaxy Clusters Hydra A and A478**

*N. Okabe, K. Umetsu, T. Tamura, Y. Fujita, M. Takizawa, K. Matsushita, Y. Fukazawa, T. Futamase, M. Kawaharada, S. Miyazaki, Y. Mochizuki, K. Nakazawa, T. Ohashi, N. Ota, T. Sasaki, K. Sato, & S. I. Tam*

2016, MNRAS, 456, 4475

DOI: 10.1093/mnras/stv291

査読有

#### **The young radio lobe of 3C 84: inferred gas properties in the central**

## 10 pc

Y. Fujita, N. Kawakatu, I. Shlosman, & H. Ito

2016, MNRAS, 455, 2289

DOI: [10.1093/mnras/stv248](https://doi.org/10.1093/mnras/stv248)

査読有

## Turbulent Cosmic Ray Reacceleration at Radio Relics and Halos in Clusters of Galaxies

Y. Fujita, M. Takizawa, R. Yamazaki, H. Akamatsu, & H. Ohno

2015, ApJ, 815, 116

DOI:

[10.1088/0004-637X/815/2/11](https://doi.org/10.1088/0004-637X/815/2/11)

査読有

## Hadronic origin of multi-TeV gamma rays and neutrinos from low-luminosity active galactic nuclei: Implications of past activities of the Galactic center

Y. Fujita, S. S. Kimura, & K. Murase

2015, PRD, 92, 023001

DOI: [10.1103/PhysRevD.92.023001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.023001)

査読有

[学会発表](計 25 件)

藤田裕 村瀬孔大 木村成生 「Sgr A\* 起源の knee 宇宙線」日本天文学会 2017 年秋季年会(2017 年 9 月 11 日から 13 日 北海道大学)

Y. Fujita, & H. Nagai, “Jets and a cold chaotic disk in the central pc of the Perseus cluster”, 16th HEAD Meeting (August 20-24, 2017, Sun Valley Resort, Idaho, USA)

Y. Fujita, & S. Matsukiyo, “Turbulent Acceleration at the ICM”, Proton Acceleration at Collisionless Shocks and Gamma-ray Emission from Galaxy Clusters (July 10-12, 2017, CHEA, UNIST, Ulsan, Korea)

Y. Fujita, T. Akahori, K. Umetsu, C. L. Sarazin, & K.-W. Wong, “Probing WHIM around Galaxy Clusters with Fast Radio Bursts and the Sunyaev-Zel’dovich effect”, Physics of the Intra-Cluster Medium 2017 (April 3-7, 2017, Beijing Normal University, China)

藤田裕 永井洋 「NGC 1275 の新しい

サブパーセクスケールのジェットの見えと降着円盤」日本天文学会 2017 年春季年会(2017 年 3 月 15 日から 18 日 九州大学)

Y. Fujita, & H. Nagai, “Discovery of a new subparsec counterjet in NGC 1275: the inclination angle and the environment”, Challenges of AGN Jets (January 18-20, 2017, National Astronomical Observatory, Japan)

藤田裕 川勝望 Isaac Shlosman 「AGN ジェットの進化と FR I/II 分類について」日本天文学会 2016 年秋季年会(2016 年 9 月 14 日から 16 日 愛媛大学)

Y. Fujita, S. S. Kimura, & K. Murase, “Diffuse gamma-ray emission from the Galactic center and implications of its past activities”, The Multi-Messenger Astrophysics of the Galactic Centre (July 18-22, 2016, Hotel Grand Chancellor Palm Cove, Australia)

Y. Fujita, N. Kawakatu, I. Shlosman, & H. Ito, “The young radio lobe of 3C 84: inferred gas properties in the central 10 pc”, M87 Workshop (May 23-27, 2016, Academia Sinica Institute of Astronomy & Astrophysics, Taiwan)

藤田裕 川勝望 Isaac Shlosman 伊藤裕貴 「活動銀河核 3C84 の近傍 10pc のガスの状態の推定」日本天文学会 2016 年春季年会(2016 年 3 月 14 日から 17 日 首都大学東京)

藤田裕 「宇宙線起源研究の展望」日本物理学会 2015 年秋季大会(2015 年 9 月 25 日から 28 日 大阪市立大学)

藤田裕 木村成生 村瀬孔大 「Sgr A\* の過去の活動を起源とする銀河系中心からのガンマ線放射」日本天文学会 2015 年秋季年会(2015 年 9 月 9

日から 11 日 甲南大学)

Y. Fujita, I. Shlosman, N. Kawakatu, H. Ito, & Y. Ohira, “Gas Accretion onto Black Holes, Jet Power and Feedback in Galaxy Clusters”, Guillermo Haro 2015 Workshop (July 23, 2015, INAOE, Tonantzintla, Puebla, Mexico)

〔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：

### (4) 研究協力者

( )