

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18740105  
 研究課題名（和文） 銀河銀河団のガスの X 線観測で探る宇宙重元素合成史  
 研究課題名（英文） X-ray study of the hot gas in galaxies and clusters of galaxies and the chemical evolution of the universe  
 研究代表者  
 松本 浩典（MATSUMOTO HIRONORI）  
 京都大学・大学院理学研究科・助教  
 研究者番号：90311365

## 研究成果の概要：

宇宙の誕生当時には、水素やヘリウムしか存在しなかった。しかし現在は、炭素・酸素・鉄などの重元素がたくさん存在している。これらは星や超新星爆発による核融合で合成された後、なんらかの過程で宇宙空間へと拡散したものである。銀河や銀河団は重力で高温ガスを閉じ込めており、それは重元素の貯蔵庫といえる。そこで我々は、日本の X 線天文衛星すざくで銀河・銀河団の高温ガスを観測することにより、重元素が増える過程を観測的に明らかにした。また、銀河中心領域の超高エネルギーガンマ線天体をすざく衛星で X 線観測し、これらは X 線で非常に暗いことを発見した。これは、これらの天体で陽子が加速されており、宇宙線の起源と関連することを示唆する。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,200,000	0	1,200,000
2007 年度	900,000	0	900,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	330,000	3,530,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：X 線 線天文学、銀河・銀河団

## 1. 研究開始当初の背景

ビッグバンによって宇宙が誕生した直後には、水素やヘリウムしか存在しなかった。ところが現在は、炭素・酸素・鉄など様々な元素(重元素と呼ぶ)が存在している。これらは宇宙が誕生して以降、星や超新星爆発の核融合により生成されたものである。

## 2. 研究の目的

いつごろ、どのような過程を得て、重元素が星から宇宙空間へと拡散していったのかを、銀河銀河団の高温ガスを観測することにより、観測的に明らかにすることが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

(1) 銀河系や銀河団は、その重力ポテンシャルに高温のガスを蓄えている。高温ガスには、過去に生成された重元素が閉じ込められているので、重元素合成の歴史を閉じ込めた貯蔵庫と考えてよい。重元素は高温のため電離されて水素状やヘリウム状のイオンになり、特性 X 線を発する。従って銀河・銀河団ガスの X 線観測を行い、重元素の分布の様子を明らかにすれば、重元素合成史を解明することができる。

(2) 特に我々の住む天の川銀河系の中心部には、温度約 6 千万度の高温ガスが存在し、その起源が謎となっている。銀河中心ガスの X 線観測を通じて、銀河中心の活動性や宇宙線加速との関連を探る。

### 4. 研究成果

(1) お互いに合体しつつある銀河団 A399 と A401 の境界領域を X 線天文衛星すざくで観測した。その結果、A399 や A401 の中心から 2Mpc も離れたところにも、重元素が存在することを発見した。重元素の組成比は太陽組成比の 0.2 倍程度で、これは銀河団の中心部と同程度である。銀河団の形状は比較的丸く、合体による激しいかき混ぜが起こっているとは考えにくい。また、外部にこれほど多くの重元素が存在していることは、ram pressure stripping が銀河から銀河団への重元素輸送の主な物理機構が、ram pressure stripping ではないことを示している。また、重元素が一様に分布していることは、銀河団形成後の通常の銀河風による重元素拡散では説明できない。おそらく、銀河団の形成以前に強力な銀河風が発生し、これにより運ばれた重元素によって銀河間空間が汚染されたことを示すと考えられる。

(2) Ophiuchus 銀河団を X 線天文衛星すざくで観測し、銀河団中心部に温度の低いガスが存在することを発見した。また、銀河団中心部にむかって、重元素組成比が増大することを発見した。中心部分をのぞき、ガスの温度は温度 1 億度でほぼ一定であった。これらの観測結果から、Ophiuchus 銀河団は合体によって大きな影響を受けた銀河団ではなく、冷たいコアを持つ最も温度の高い銀河団であることがわかる。

(3) 最近、銀河面に沿って超高エネルギーガンマ線を出す天体が多く発見されている。それらは多くの場合、他波長に対応が知られていないので、暗黒加速器と呼ばれる。我々は暗黒加速器の一つ HESSJ1614-518 を X 線天文衛星すざくで観測し、異常に暗い X 線対応天体を発見した。他の暗黒加速器 HESSJ1616-508 の場合には、X 線対応天体を発見できず、その光度に非常に厳しい上限値

を与えた。暗黒加速器のガンマ線が高エネルギー電子起源ならば、星間磁場との相互作用によって、シンクロトロン X 線を大量に放出するはずである。暗黒加速器が X 線では非常に暗いという観測事実は、ガンマ線の起源が陽子起源であることを示唆する。長らく謎であった宇宙線の起源なのかもしれない。

(4) これらの観測結果は、全て X 線天文衛星すざく搭載 X 線 CCD (XIS) によるものである。我々は XIS の性能を最大限に引き出すため、電荷注入による放射線ダメージの回復方法を編み出し、実際に XIS に適用した。その結果、打ち上げから 4 年を経過した現在でも、XIS のエネルギー分解能は世界最高レベルをキープし続けている。

### 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 32 件)

1. Tsai, A.-L., Matsushita, Matsumoto, H., 他 7 名、掲載順 7 番目、"Molecular Superbubbles and Outflows from Starburst Galaxy NGC 2146"、Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.61, No.2, pp.237-250, 2009、査読有
2. Bamba, A., Yamazaki, R., Kohri, K. Matsumoto, 他 3 名、掲載順 4 番目、"X-Ray Observation of Very High Energy Gamma-Ray Source, HESS J1745-303, with Suzaku", The Astrophysical Journal, Vol. 691, pp. 1854-1861, 2009、査読有
3. Miyawaki, R., Makishima, K., Matsumoto, H., 他 6 名、掲載順 8 番目、"Suzaku Observations of M 82 X-1 : Detection of a Curved Hard X-Ray Spectrum"、Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.61, No.SP1, pp.S263-S278, 2009、査読有
4. Koyama, K., Takikawa, Matsumoto, H., 他 4 名、掲載順 5 番目、"Spatial Distribution of the Galactic Center Diffuse X-Rays and the Spectra of the Brightest 6.4keV Clumps", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.61, No.SP1, pp.S255-S262, 2009、査読有
5. Inui, T., Koyama, K., Matsumoto, H., and Tsuru, T. G.、"Time Variability of the Neutral Iron Lines from the Sgr B2 Region and its Implication of a Past Outburst of Sgr A \* "、Publications of the Astronomical

- Society of Japan, Vol.61, No.SP1, pp.S241-S253, 2009、査読有
6. Nakajima, H., Tsuru, T. G., Matsumoto, H., 他 5 名、掲載順 4 番目、"X-Ray Reflection Nebulae with Large Equivalent Widths of Neutral Iron Ka Line in the Sgr C Region" Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.61, No.SP1, pp.S233-S240, 2009、査読有
  7. Yamauchi, S., Ebisawa, K., Matsumoto, H., 他 5 名、掲載順 5 番目、"Iron Emission Lines on the Galactic Ridge Observed with Suzaku", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.61, No.SP1, pp.S225-S232, 2009、査読有
  8. Tsuru, T. G., Nobukawa, M., Matsumoto, H., 他 3 名、掲載順 4 番目、"A New Supernova Remnant Candidate and an Associated Outflow in the Sagittarius C Region"、Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.61, No.SP1, pp. S219-S223, 2009、査読有
  9. Uchiyama, H., Matsumoto, H., 他 3 名、掲載順 2 番目、"Suzaku Observation of HESS J1825-137: Discovery of Largely-Extended X-rays near from PSR J1826-1334", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.61, No.SP1, pp.S189-S196, 2009、査読有
  10. Nobukawa, M., Koyama, K., Matsumoto, H., and Tsuru, T. G., "Discoveries of 3 K-shell Lines of Iron and a Coherent Pulsation of 593-sec from SAX J1748.2-2808", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.61, No.SP1, pp.S93-S98, 2009、査読有
  11. Uchiyama, H., Ozawa, M., Matsumoto, H., 他 21 名、掲載順 3 番目、"New CTI Correction Method for the Spaced-Row Charge Injection of the Suzaku X-Ray Imaging Spectrometer", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.61, No.SP1, pp.S9-S15, 2009、査読有
  12. Ozawa, M., Uchiyama, H., Matsumoto, H., 他 25 名、掲載順 3 番目、"Energy-Scale Calibration of the Suzaku X-Ray Imaging Spectrometer Using the Checker Flag Charge Injection Technique in Orbit"、Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.61, No.SP1, pp.S1-S7, 2009、査読有
  13. Fujita, Y., Hayashida, K., Nagai, M., Inoue, S., Matsumoto, H., 他 4 名、掲載順 5 番目、"Suzaku Observation of the Ophiuchus Galaxy Cluster: One of the Hottest Cool Core Clusters", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.60, No.5, pp.1133-1142, 2008、査読有
  14. Matsumoto, H., Uchiyama, H., 他 9 名、掲載順 1 番目、"Discovery of Extended X-Ray emission from the unidentified TeV source HESS J1614-518 using the Suzaku Satellite", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.60, No.SP1, pp.S163-S172, 2008、査読有
  15. Nobukawa, M., Tsuru, T. G., Matsumoto, H., 他 7 名、掲載順 7 番目、"Suzaku Spectroscopy of an X-Ray Reflection Nebula and a New Supernova Remnant Candidate in the SgrB1 Region", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.60, No.SP1, pp.S191-S200, 2008、査読有
  16. Hyodo, Y., Tsujimoto, M., Matsumoto, H., 他 5 名、掲載順 8 番目、"Suzaku X-Ray Spectroscopy of a Peculiar Hot Star in the Galactic Center Region" Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.60, No.SP1, pp.S173-S182, 2008、査読有
  17. Koyama, K., Inui, T., Matsumoto, H., and Tsuru, T. G., "A Time-Variable X-Ray Echo: Indications of a Past Flare of the Galactic-Center Black Hole", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.60, No.SP1, pp.S201-S206, 2008、査読有
  18. Fujita, Y., Tawa, N., Matsumoto, H., 他 4 名、掲載順 5 番目、"High Metallicity of the X-Ray Gas Up to the Virial Radius of a Binary Cluster of Galaxies: Evidence of Galactic Superwinds at High-Redshift", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.60, No.SP1, pp.S343-S351, 2008、査読有
  19. Nakajima, H., Yamaguchi, H., Matsumoto, H., 他 17 名、掲載順 3 番目、"Performance of the Charge-Injection Capability of Suzaku XIS"、Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.60, No.SP1, pp.S1-S10, 2008、査読有
  20. Bamba, A., Yamaguchi, H., Matsumoto, H., 他 26 名、掲載順 12 番目、"Oxygen line mapping of SN 1006 with Suzaku" Advances in Space Research, Volume

- 41, Issue 3, p. 411-415., 2008、査読有
21. Takagi, S.-I., Tsuru, T. G., Matsumoto, H.、他 10 名、掲載順 4 番目、"Development of an n-channel CCD, CCD-NeXT1, for Soft X-ray Imager onboard the NeXT satellite", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 582, Issue 2, p. 546-553., 2007、査読有
  22. Matsumoto, H., Ueno, M., Bamba, A.,、他 15 名、掲載順 1 番目、"Suzaku Observations of HESS J1616-508: Evidence for a Dark Particle Accelerator"、Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, No.SP1, pp.199-208, 2007、査読有
  23. Ishisaki, Y., Maeda, Y., Matsumoto, H.、他 31 名、掲載順 21 番目、"Monte Carlo Simulator and Ancillary Response Generator of Suzaku XRT/XIS System for Spatially Extended Source Analysis"、Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, No.SP1, pp.113-132, 2007、査読有
  24. Hamaguchi, K., Petre, R., Matsumoto, H.、"Suzaku Observation of Diffuse X-Ray Emission from the Carina Nebula"、他 9 名、掲載順 3 番目、Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, No.SP1, pp.151-161, 2007、査読有
  25. Tsuru, T. G., Ozawa, M., Matsumoto, H.、他 11 名、掲載順 4 番目、"X-Ray Spectral Study of the Extended Emission, 'the Cap', Located 11.6kpc above the Disk of M82", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, No.SP1, pp.269-282, 2007、査読有
  26. Koyama, K., Tsunemi, H., Matsumoto, H.、他 43 名、掲載順 7 番目、"X-Ray Imaging Spectrometer (XIS) on Board Suzaku"、Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, No.SP1, pp.23-33, 2007、査読有
  27. Koyama, K., Inui, T., Matsumoto, H.、他 8 名、掲載順 4 番目、"Discoveries of Diffuse Iron Line Sources from the Sgr B Region"、Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, No.SP1, pp.221-227, 2007、査読有
  28. Koyama, K., Hyodo, Y., Matsumoto, H.、他 14 名、掲載順 5 番目、"Iron and Nickel Line Diagnostics for the Galactic Center Diffuse Emission"、Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, No.SP1, pp.245-255, 2007、査読有
  29. Koyama, K., Uchiyama, H., Matsumoto, H.、他 5 名、掲載順 4 番目、"X-Ray Spectrum of Sagittarius A East"、Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, No.SP1, pp.237-243, 2007、査読有
  30. Mitsuda, K., Bautz, M., Matsumoto, H.、他 140 名、掲載順 72 番目、"The X-Ray Observatory Suzaku"、Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, No.SP1, pp.1-7, 2007、査読有
  31. Bamba, A., Koyama, K., Matsumoto, H.、他 10 名、掲載順 8 番目、"Discovery of a Possible X-Ray Counterpart to HESS J1804-216", Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, No.SP1, pp.209-214, 2007、査読有
  32. Murashima, M., Kokubun, M., Makishima, K., Kotoku, J., Matsumoto, H.、他 7 名、掲載順 10 番目、"Suzaku Reveals Helium-burning Products in the X-Ray-emitting Planetary Nebula BD +30 3639", The Astrophysical Journal, Volume 647, Issue 2, pp. L131-L134., 2006、査読有
- 〔学会発表〕(計 16 件)
1. 松本浩典、`すざく衛星による TeV 線天体 HESSJ1614-518 の観測 その 2`、日本物理学会、2009/3/30、立教大学
  2. 松本浩典、`すざく衛星による、2005 年 9 月の太陽活動に起因する太陽風と地球大気の荷電交換反応の観測`、日本天文学会、2009/3/24、大阪府立大学
  3. 松本浩典、`X 線天文衛星すざく搭載 X 線 CCD(XIS)の現状報告`、日本物理学会、2008/9/20-23、山形大学
  4. Matsumoto, H.、`X-ray Observations of the Dark Particle Accelerators`、Invited talk at `International Summer School on the Galactic Center 2008 - from cold molecular gas to high energy phenomena -`、2008/9/15-19, Nagoya Univ., Japan
  5. Matsumoto, H.、`Suzaku XIS calibration status`、International Astronomical Consortium for High Energy Calibration, 3rd meeting、2008/5/18-21, Schloss Ringberg, Germany
  6. Matsumoto, H.、`Suzaku observations of HESS sources`、Swiss-Japan Seminar in 2008; Suzaku-Integral workshop、2008/4/15-18, ISAS/JAXA

7. Matsumoto, H., ``Discovery of Extended X-Ray emission from the Dark Accelerator HESS J1614-518'', The Suzaku X-ray Universe, 2007/12/10-12, San Diego, CA, USA
8. 松本浩典, ``すざく衛星による広がった TeV 線未同定天体の観測'', 高エネルギー宇宙物理連合研究会, 2007/10/24, 青山学院大学
9. 松本浩典, ``すざく衛星による TeV 線天体 HESSJ1614-518 の観測'', 日本物理学会, 2007/09/21-24, 北海道大学
10. 松本浩典, ``すざく搭載 X 線 CCD(XIS) の現状報告'', 日本天文学会, 2007/03/28-30, 東海大学
11. 松本浩典, ``X 線天文衛星「すざく」搭載 X 線 CCD(XIS)の現状報告'', 日本物理学会, 2007/03/26, 首都大学東京
12. 松本浩典, ``X 線天文衛星「すざく」による HESS 未同定天体の観測'', 超高エネルギーガンマ線天体研究会, 2007/03/08, 東京大学宇宙線研究所
13. Matsumoto, H., ``X-ray Observations of the HESS Unidentified Sources from the Galactic Plane'', The Extreme Universe in the Suzaku Era, 2006/12/4-8, Kyoto, Japan
14. Matsumoto, H., ``Suzaku First Results on Galactic Diffuse Objects'', The 2006 HEAD meeting (high Energy Astrophysics Division), 2006/10/4-7, San Francisco, CA, USA
15. 松本浩典, ``すざく衛星による TeV 線天体 HESSJ1616-508 の観測'', 日本物理学会, 2006/9/23, 奈良女子大学
16. 松本浩典, ``X 線天文衛星「すざく」搭載 X 線 CCD(XIS)の現状と軟 X 線バンドの較正について'', 日本物理学会, 2006/9/23, 奈良女子大学

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/matumoto/index.html>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

松本 浩典 (MATSUMOTO HIRONORI)  
 京都大学・大学院理学研究科・助教  
 研究者番号：90311365

### (2)研究分担者

( )

研究者番号：

(3)連携研究者  
 ( )

研究者番号：