

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：14602
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22740124
 研究課題名（和文）銀河団超高温ガスの探査

研究課題名（英文）Search for super-hot gas in clusters of galaxies

研究代表者

太田 直美 (OTA NAOMI)
 奈良女子大学・自然科学系・助教
 研究者番号：40391891

研究成果の概要（和文）：銀河団の進化の解明を目指して、「すざく」衛星の広帯域X線分光データの解析を行った。複数の銀河団において、天体同士の衝突合体に伴って作られた超高温のガスの存在を確認した。一方、高エネルギー粒子からの非熱的硬X線放射は検出されず、従来よりも厳密な制限を得ることに成功した。さらに、準静水圧平衡の条件のもとで放射冷却下にある銀河団ガスの密度分布を計算し、観測との比較を示した。

研究成果の概要（英文）：To reveal the evolution of galaxy clusters in the Universe, X-ray spectroscopic data taken with the Suzaku satellite were analyzed. The existence of super-hot gas produced by cluster merging was confirmed, while hard X-ray emission from high-energy particles was not detected. In addition, density profiles of the cluster gas were calculated assuming that the gas is in a quasi-hydrostatic cooling state and compared with previous X-ray observations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：X線天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：X線 γ 線天文学

1. 研究開始当初の背景

(1)宇宙最大の天体である銀河団の衝突合体は、ビッグバン以降の宇宙でもっとも大きなエネルギーのイベントであり、銀河団の質量構造に多大な影響を及ぼす。衝突の運動エネルギーは莫大であり、そのエネルギーは銀河団中のガスを激しく加熱したり、ガス乱流を生んだりすることに使われると予想される。「すざく」衛星を用いたX線分光から、遠方銀河団中に温度が3億度にもものぼる超高温の

ガスが存在していることをすでに見つけた。これは銀河団同士の激しい衝突合体により生成された可能性が高い。銀河団の形成過程では、このように超高温ガスが作られている可能性があるが、この説を検証するためには、サンプル数を増やして系統的な温度構造の解析が必要である。

(2)銀河団のガスは、衝突合体から十分時間が経過するとポテンシャルに緩和し、中心領域

では放射冷却が進んで温度が低下する。しかし従来の理論モデルが予想するような冷え切ったガスは見つかっておらず、なんらかの加熱源が冷却を食い止めていると考えられる。このように銀河団ガスは、加熱と冷却の複雑な過程を経て進化すると考えられるが、より詳細な検討が必要である。

2. 研究の目的

(1) X線分光観測から複数の銀河団について超高温ガスや非熱的ガスを探索し、それらの物理的な性質を調べる。これから超高温ガスの起源を解明し、銀河団のダイナミックな進化に制限をつけることを目指す。

(2) 銀河団のうち約半数が、放射冷却によって周囲のガスよりも温度の低いガスコア(以下、クールコア)を持つことが知られている。クールコアのガス密度の分布について理論計算を行い、観測との比較から銀河団コアの熱的進化について議論する。

3. 研究の方法

(1) 衝突合体現象が顕著な遠方の銀河団 A2163 と 1E0657 に注目し、「すざく」衛星で取得した広帯域X線スペクトルの解析から超高温ガスや非熱的ガスの存在に制限をつける。このような高エネルギー放射の成分を精度良く測定するためには、それ以外の放射成分を正確に見積もる必要がある。そのため、空間分解能の高いチャンドラ衛星やニュートン衛星のX線データを相補的に用いる。

(2) 従来の理論では、銀河団中心で放射冷却が加速的に進むため、宇宙年齢のうちにガスが冷え切ってしまう、観測と矛盾するという問題があった。そこで、ガス冷却は緩やかで、準静水圧平衡の条件を保つという条件のもとで、ガス密度を計算する。これをX線の観測結果と比較する。

4. 研究成果

(1) アーベルカタログの天体のうち最もガス温度の高い A2163 銀河団について、「すざく」衛星の広帯域X線観測を行った。この銀河団については、過去に RXTE 衛星により非熱的な硬X線放射が測定されたが、フラックスの不定性が大きいことや解析に単純な熱的放射モデルを用いていることが問題であった。今回、「すざく」により硬X線放射を高い有意性で検出することに初めて成功した。この放射の起源を調べるため、ニュートン衛星のX線データと組み合わせながら解析を行ったところ、銀河団同士の激しい衝突合体の痕跡と考えられる非常に温度の高い領域があることを確認した。また、非熱的硬X線放射は有意ではなく、従来よりも厳密な

制限を得ることに成功した(図1)。

同様の解析を、1E0657 銀河団についても行った。「すざく」衛星の硬X線スペクトルは超高温成分を加えた二温度モデルで再現でき、チャンドラ衛星のデータから構築した二次元温度分布とも矛盾しないことがわかった。一方で非熱的放射は有意ではなく、非熱的硬X線フラックスの上限值を得た(図2)。

これらの成果を国際会議や国内学会で発表した(学会発表⑥, ⑧, ⑨)。また、国際天文学連合の依頼を受け、銀河団のX線分光観測の基礎と最新の研究成果をふまえてレビューを執筆し、フリーアクセスのオンライン論文として公表した(雑誌論文⑦)。

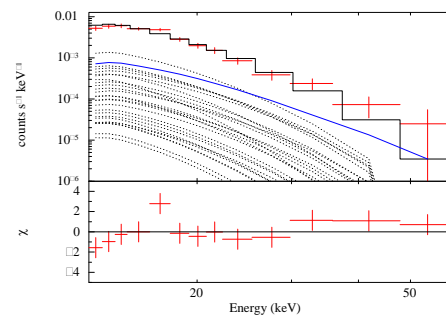


図1: A2163 銀河団の「すざく」衛星による硬X線スペクトル(0ta 2013より)。上のパネル: 観測データを赤の十字、最適モデルを黒の実線、そのうち多温度プラズマからの寄与を点線、非熱的放射成分を青線で示してある。下のパネル: 最適モデルに対する残差。

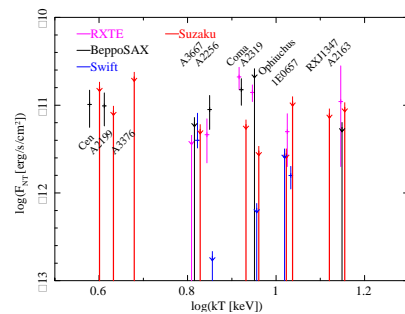


図2: 「すざく」衛星でこれまでに得られた銀河団の非熱的硬X線フラックスの上限值(赤の矢印)と過去のRXTE衛星やSAX衛星、Swift衛星による測定値との比較(0ta 2013より)。

(2) 放射冷却の効いたクールコアのガス密度分布を計算した。その際、まず、ダークマターの重力ポテンシャルはKingモデルあるいはNFWモデルで表されるとし、ポリトロップガスを仮定してガスの初期分布を計算した。次にクールコアの密度分布を、重力ポテ

ンシヤル中でガスが準静水圧平衡の状態にあるとして求めた。その結果を図 3 に示す。冷却前と比べて、ガスの中心密度は約 4-6 倍増加する。

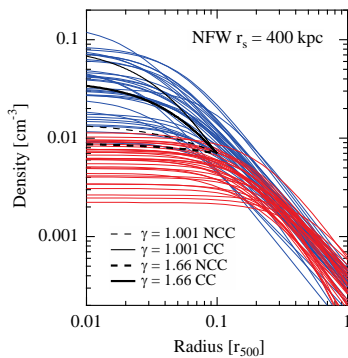


図 3: 準静水圧平衡モデルによる銀河団ガスの密度分布と観測との比較。冷却前と冷却後の計算結果をそれぞれ黒の破線と実線、クールコアを持つ銀河団と持たない銀河団の観測結果を青と赤の実線で示した。

さらに、冷却下にあるガスの密度分布は、経験的によく用いられてきた二重 β モデルでよく再現できることも確かめられた。加えて、圧力やエントロピーの計算も行ったところ観測結果とよく一致することがわかった。今後は、この準静水圧平衡の描像をより詳しく検証し、衝突合体などによるガス加熱の影響も考慮しながら、ガスの熱的進化を総合的に理解する必要がある。

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 13 件)

- ① N. Ota, K. Onzuka, K. Masai, “Density Profile of a Cool Core of Galaxy Clusters”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 査読有, 65, 2013, article id. 47, 11pp. <http://pasj.asj.or.jp/v65/n2/650047/650047.pdf>
- ② 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 the Outskirts of A1835: Deviation from Hydrostatic Equilibrium”, *Astrophys. J.*, 査読有, 766, 2013, article id. 90, 19pp. DOI: 10.1088/0004-637X/766/2/90
- ③ M. Oguri, T. Schrabback, E. Jullo, N. Ota, C. S. Kochanek, X. Dai, E. O. Ofek, G. T. Richards, R. D. Blandford, E. E. Falco, & J. Fohlmeister, “The Hidden Fortress: structure and substructure of the complex strong lensing cluster SDSS J1029+2623”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 査読有, 429, 2013, p.482-493 DOI: 10.1093/mnras/sts351
- ④ 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”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 査読有, 64, 2012, article No. 95, 1pp. <http://pasj.asj.or.jp/v64/n5/640095/640095-frame.html>
- ⑤ N. Ota, M. Oguri, X. Dai, C. S. Kochanek, G. T. Richards, E. O. Ofek, R. D. Blandford, T. Schrabback, & N. Inada, “The Chandra view of the Largest Quasar Lens SDSS J1029+2623”, *Astrophys. J.*, 査読有, 758, 2012, 26-35 DOI: 10.1088/0004-637X/758/1/26
- ⑥ T. Takahashi (ほか 223 名、144 番目), “The ASTRO-H X-ray Observatory”, *SPIE*, 査読無, 8443, 2012, article id. 84431Z, 22pp. DOI: 10.1117/12.926190
- ⑦ N. Ota, “X-ray spectroscopy of clusters of galaxies”, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 査読有, 12, 2012, 973-994 DOI: 10.1088/1674-4527/12/8/006
- ⑧ H. Akamatsu, A. Hoshino, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Sato, Y. Takei, & N. Ota, “X-Ray Study of the Outer Region of Abell 2142 with Suzaku”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 査読有, 63S, 2011, pp. 1019-1033 <http://pasj.asj.or.jp/v63/sp3/63s348/63s348-frame.html>
- ⑨ T. Sato, K. Matsushita, N. Ota, K. Sato, K. Nakazawa, & C. L. Sarazin, “Suzaku Observations of Iron K-Lines from the Intracluster Medium of the Coma Cluster”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 査読有, 63S, 2011, 991-1007 <http://pasj.asj.or.jp/v63/sp3/63s345/63s345-frame.html>
- ⑩ E. Sakuma, N. Ota, K. Sato, T. Sato, & K. Matsushita, “Suzaku Observations of Metal Distributions in the Intracluster Medium of the Centaurus Cluster”, *Publ. Astron. Soc. Japan*,

査読有, 63S, 2011, pp. 979-990
<http://pasj.asj.or.jp/v63/sp3/63s344/63s344-frame.html>

- ⑪ T. Lehto, J. Nevalainen, M. Bonamente, N. Ota, & J. Kaastra, “Suzaku observations of X-ray excess emission in the cluster of galaxies A 3112”, *Astron. Astrophys.*, 査読有, 524, 2010, id. A70, 8 pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201014508
- ⑫ E. D. Reese, H. Kawahara, T. Kitayama, N. Ota, S. Sasaki, & Y. Suto, “Impact of Chandra calibration uncertainties on galaxy cluster temperatures: application to the Hubble Constant”, *Astrophys. J.*, 査読有, 721, 2010, pp. 653-669 DOI: 10.1088/0004-637X/721/1/653
- ⑬ T. Takahashi (ほか 176 名、116 番目), “The ASTRO-H Mission”, *SPIE*, 査読無, 7732, 2010, article id. 77320Z, 18pp. DOI: 10.1117/12.857875

[学会発表] (計 42 件)

- ① 吉田浩子, 太田直美, “すざく衛星による近傍銀河団のガスバルク運動の探査”, 日本天文学会 2013 年春季年会, 2013 年 3 月 20 日, 埼玉大学, 埼玉県
- ② 茨木優希子, 太田直美, 赤松弘規, Y.-Y. Zhang, A. Finoguenov, F. Braglia, “すざく衛星による遠方の衝突銀河団 A2744 のフィラメント領域の観測”, 日本天文学会 2013 年春季年会, 2013 年 3 月 20 日, 埼玉大学, 埼玉県
- ③ 藤野遥子, 太田直美, 山内茂雄, H. Boehringer, G. W. Pratt, “XMM-Newton 衛星を用いた低表面輝度銀河団 A1631 のエントロピー測定”, 日本天文学会 2013 年春季年会, 2013 年 3 月 20 日, 埼玉大学, 埼玉県
- ④ N. Ota, “Density Profile of Cool Core of Galaxy Clusters”, The mass profiles of galaxy clusters from the core to the outskirts: the need for a multi-wavelength approach, 2013 年 3 月 18 日, Madonna di Campiglio, Italy
- ⑤ N. Ota, “The ASTRO-H Mission”, Science with eROSITA and ART-XC aboard Spectrum-RG, 2012 年 9 月 4 日, Kazan, Russia
- ⑥ N. Ota, “Impact of Suzaku Measurements on Astroparticle Physics”, Vulcano Workshop 2012: Frontier Objects in Astrophysics and Particle Physics, 2012 年 6 月 28 日, Vulcano, Italy
- ⑦ 藤野遥子, 太田直美, 山内茂雄, H.

Boehringer, “すざく衛星による低表面輝度銀河団 A76 のエントロピー測定”, 日本天文学会 2012 年春季年会, 2012 年 3 月 19 日, 龍谷大学, 京都府

- ⑧ 永吉賢一郎, 太田直美, 松下恭子, 満田和久, “すざく衛星を用いた The Bullet Cluster の硬 X 線探査”, 日本天文学会 2012 年春季年会, 2012 年 3 月 19 日, 龍谷大学, 京都府
- ⑨ N. Ota, et al., “Detection of hard X-ray emission from the hottest Abell galaxy cluster A2163 with Suzaku”, The 4th Suzaku Science Conference - Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond, 2011 年 7 月 20 日, SLAC National Accelerator Laboratory, USA
- ⑩ 太田直美, G. W. Pratt, 北山哲, 大島泰, 松尾宏, 坪井昌人, T. H. Reiprich, “すざく衛星による高温銀河団 A2163 からの硬 X 線放射の検出”, 日本天文学会 2010 年秋季年会, 2010 年 9 月 24 日, 金沢大学, 石川県
- ⑪ 佐久間絵理, 松下恭子, 太田直美, “すざく衛星によるケンタウルス座銀河団の重元素分布の決定”, 日本天文学会 2010 年秋季年会, 2010 年 9 月 24 日, 金沢大学, 石川県

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 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 0 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://www.phys.nara-wu.ac.jp/~ota/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 直美 (OTA NAOMI)

奈良女子大学・自然科学系・助教

研究者番号：40391891

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：