

2D Mapping of Abell 2199 ¹

1 銀河団外縁部でのICM熱力学と金属

低く安定したバックグラウンド (BGD) 性能を持つすざくによって、ビリアル半径 (r_{vir}) まで届く大きなスケールでのガス (ICM) 分布が測定できるようになってきた。例えば、我々は A1795 の南北を r_{vir} まで観測し、北側で輝度すなわち ICM 密度の超過を発見した³。このような探査は、十以上の銀河団で試みられている。

我々は、すざくと「すばる」による重力レンズの系統的な観測を進めている。その成果のまとめが、[Okabe+ (2014a)] である。規模の異なる四銀河団の r_{vir} までの広い領域を観測し、次のような新しい知見を得た。(1) X線観測から求めた「静水圧平衡質量」は、「重力レンズ質量」に比べて系統的に小さい ($1/2r_{\text{vir}}$ で $\sim 70\%$, r_{vir} で $\sim 40\%$)。 (2) ガスと重力質量の比は外側ほど大きく、 r_{vir} で「宇宙の平均バリオン比」に届く。(3) 外縁部でのガスのエントロピー ($K = kTn_e^{-3/2}$) は、重力質量に比例する。(4) ガスの密度 (n_e) と温度 (kT) の半径分布は、どの銀河団でも同じ形を持つ (図 1)⁴。(5) K の分布も相似形であり、 $1/2r_{\text{vir}}$ までは、「静水圧平衡・重力ショックモデル ($r^{1.1}$)」に従うが、それより外側では一定になる。その要因として、「密度の超過」よりむしろ「温度の低下」の影響が大きい。

図 2 に示したように「外側でのフラットな K の分布」は、他の銀河団でも見られる。温度と K には、ガスの熱史が記録されている。我々は「外側では、静水圧平衡の仮定が成り立たず、非熱的なエネルギー源 (乱流やバルク運動) があり、重力によるガスのショック加熱が不完全であること」で K 分布が説明できると考えている。ただし、外側では、ICM 分布が非一様 (clumping) で、見かけの密度が高くなっている可能性も指摘されている⁵。また、密度の低い外縁部では、電子とイオンが熱平衡に達していない可能性もある⁶。原因が何であれ、銀河団の外縁部の熱力学を測定し、宇宙での構造形成の現場を系統的に捉えたい。これは、質量測定の系統誤差を全て理解し、精密宇宙論を実現するためにも必須の課題である。

我々は「あすか」、XMM を用いて、ICM の金属量を測定し、各衛星を代表する成果を上げてきた⁷。また、すざく

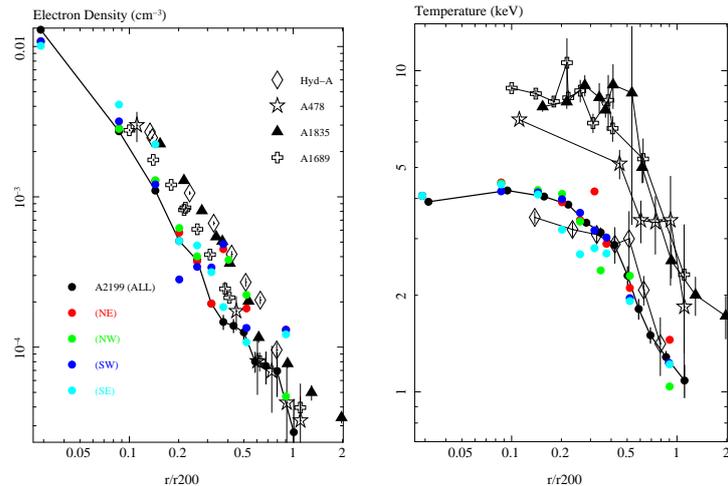


図 1: すざくによる ICM の密度と温度の半径分布。A2199 は、我々の解析による四方位角と平均 (ALL) での結果、それ以外は、[Okabe+ (2014a)] より。横軸の半径は、 $r_{200} \sim r_{\text{vir}}$ で規格化している。

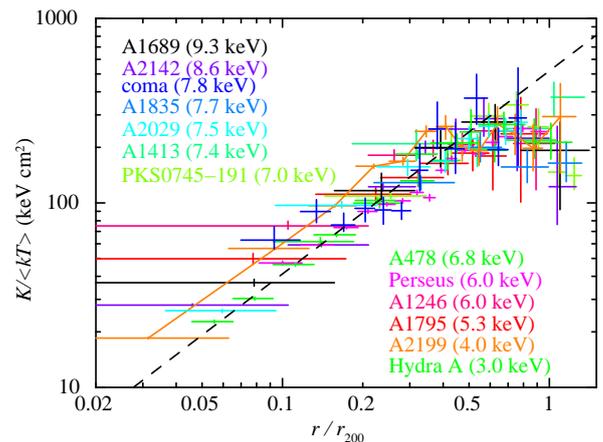


図 2: すざくによるエントロピー分布。点線は $r^{1.1}$ のモデル。

を用いて新しい知見を見いだした。(1) O, Si, S, Fe, Ni などの組成比⁸, (2) 外縁部までの Fe/H と Fe の総量と銀河光度の比 (IMLR) の分布⁹。金属の源がメンバー銀河であり、金属がその場に留まっているのであれば、その比 (IMLR) は一定になる。しかし、実際には IMLR は外側に向かって増加している。我々は、銀河団ができる前の大量の星生成と金属汚染を示唆している¹⁰。これらの測定によって、宇宙全体での星と銀河の生成の歴史、および銀河風や構造形成に伴う物質循環を定量的に制限できる。外縁部まで含めた銀河団全体での分布が測定されたのは、少数だけで、それらでも半径分布にとどまっている。

⁸e.g. [Sato Ph.D (2007)]; [Tamura+ (2009)]

⁹e.g. [Matsushita+ (2013)]

¹⁰[Fujita+ (2008a)]

¹田村隆幸 (ISAS) 他、紙面の都合上、参考文献リストを以下に置く。
<http://www.isas.jaxa.jp/home/ttamura/suzakuA2199/>

²平衡に達した領域を示すビリアル半径。例えば以下で推定できる $r_{\text{vir}} \sim r_{180} = 2.8h_{70}^{-1} \sqrt{k <T> / 10\text{keV}} \text{Mpc}$. $r_{500} \sim 1/2r_{180}$

³[Bautz+ (2009)]

⁴その絶対値は、重力レンズから求めたビリアル質量に比例している。

⁵e.g. [Simionescu+ (2011)], [Walker+ (2013)]

⁶e.g. [Takizawa(1998)], [Hoshino+ (2010)]

⁷e.g. [Fukazawa Ph.D (1998)]; [Tamura+ (2004)]

2 Abell2199の広視野観測

2.1 ICM, 銀河, 暗黒物質の三次元分布

これまでにない感度での次の3つの観測を組み合わせ、広い空間スケールでのICM, 銀河, 暗黒物質(DM)の三次元分布を測定する。(1) すぎくのkey project¹¹と追加観測によるX線ICM観測。(2) 可視光(SDSS)と赤外(WISE)での深いサーベイのデータから作った銀河カタログ¹²。(3) 2014年に運用を開始したすばるのHyper Suprime-Cam(HSC)による銀河と重力レンズ効果¹³。

2.2 ターゲットの選定

どの波長でも、近い天体が空間分解能の点で有利である。ただし、近すぎる天体は視野角が大きすぎる。 $z = 0.03$ のA2199は、全天で約10番目にX線で明るい銀河団で、Hercules超銀河団を構成している。 $0.4r_{\text{vir}}$ までの温度、Fe分布が測定されている¹⁴。メンバー銀河とICMは、同じ方向(北北東)に r_{vir} 以上のスケールまで伸びている。その方向には銀河団A2197に繋がる銀河フィラメントが見える。

2.3 計画の特色, 他の観測との違い・相補性

すぎくでは、 $z = 0.06 - 0.1$ の多数の銀河団を r_{vir} まで観測しているが、多くは特定の方位角をカバーしているだけである。我々は、より遠い天体を複数ポインティングで全面観測している(e.g. A1689, A1835)。これらは、比較的に高温である。また光子統計が足りず、すぎくの空間分解能が活かされていない。本計画では、銀河団全体を含む二次元分布をより高い精度で測定する。

銀河団の内外で銀河の分布は非対称で、フィラメント・ポイド構造を持つ。実際に、我々はすぎくによって非対称で銀河分布と相関するガス分布を発見した¹⁵。このような非対称構造の全貌を把握するには、特定方向の測定だけでは不十分である。

すぎくは、Perseus($z=0.018$), Coma($z=0.023$), Virgo($z=0.004$)でもマッピングを行っている。Perseusの観測からは、インパクトの高い成果が生み出されている¹⁶。これらの結果が、Perseusの特異性によるのか、銀河団の典型的な性質であるのか不明である。A2199は、Perseus

に比べ以下の点で有利である。(1) すでに r_{vir} 以内の領域の80%以上が観測されている。一方、Perseusは半分以上の領域が未観測。(2) Perseusは、銀河面に近く($l = 151^\circ$, $b = -13^\circ$), 銀河吸収が強く($N_{\text{H}} \sim 1.5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$), 銀河データが少ない。一方、A2199方向では、 $N_{\text{H}} \sim 0.1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ と少ない。Comaは近い距離と温度(規模)が高いため、 $r_{\text{vir}}=90'$ となり、見かけの視野角でA2199の4倍大きい。これまでの観測では、 r_{vir} 内の面積の10%程度しかカバーできていない¹⁷。また、比較的に高温のため金属量の測定の点で不利である。Virgoは、A2199より約5倍近く、大きすぎる。

他の衛星でも外縁部の探査が行われている¹⁸。ROSATは感度と分光性能が低く、XMMやChandraはBGDが高い。これらでは、Stacking解析での半径分布の測定がやっとであり、個々の天体の中の非対称分布を見るのは難しい。

銀河団の外縁部からのX線はいくつかの成分からなるBGDより暗い。したがって、系統誤差をいかに減らすかが本質的である。本計画では、以下を活かしてすぎくの性能限界に挑む。(1) 近い天体は、CXB/点源の揺らぎ($\propto \Omega^{-1/2}$)を下げられる。(2) 点源除去のため、空間分解能の良いX線データが有効。我々は、A2199のXMMデータを持っている。(3) 二次元分布を得ることは、ほぼ空間的に一様な天の川成分や時間変動する太陽風電荷交換成分を引き去る上でも有効である。(4) 銀河団中心からの漏れ込みの影響は、近い天体ほど小さい¹⁹。(5) すぎくの迷光は、非対称な空間分布を持っている。いろいろなロール、観測位置でのデータを比較し、その再現性を調べる。

2.4 これまでの観測結果

Key projectの各点の積分は約15ks($< 0.5 r_{\text{vir}}$)から約30ks($0.5r_{\text{vir}}-r_{\text{vir}}$)である。これに、中心の5点、Offset-E,NE,FE²⁰のデータを加え合計500ks以上の解析を進めている。これまでの結果は、学会などで報告している²¹。図3に画像を示す。これまでのデータでは、温度の二次元分布を得るには統計が不十分である。そこで、銀河団をフィラメントに沿ったNEとSWとポイドに沿ったNWとSEの4方向に分けて解析を行っている(図1)。

密度・エントロピー: $0.4r_{\text{vir}}$ 付近から、特にフィラメント方向(NE)で「密度の超過」が見られる。これに伴い「フ

¹¹AO6, PI: 松下, "Distribution of Temperature and Entropy of Intracluster Medium of nearby clusters up to Virial Radius"

¹²e.g. [Hwang+ (2012a)], [Lee et al.(2014)]

¹³2015年5月に観測予定

¹⁴[Kawaharada+ (2010b)]

¹⁵e.g.[Ichikawa+ (2013)]

¹⁶e.g. [Simionescu+ (2011)]; [Werner+ (2013)]

¹⁷[Simionescu+ (2013)]

¹⁸e.g.[Eckert et al.(2013)]

¹⁹A1689($z=0.18$)の場合には、 r_{vir} 付近の0.5-2 keVでの信号のうち、50%近くが漏れ混み、A1795($z=0.06$)の場合には、5%程度であった。

²⁰PI 赤松および佐藤

²¹これまでの結果に比べ、精度の高いBGD推定を注意深く行ってきたためデータ解析に時間がかかっている。2015年1月現在、これらの成果を投稿論文にまとめている。

ラットな K 分布」が見える (図 2)。A2199 では、比較的小さい半径からこれらの兆候が見られる。

温度: 全ての方位角で外側での温度低下が見られ、 r_{vir} では 1 keV 付近まで下がっている。全方位角でこのような精度で実測されたのは初めてである。温度分布は、他の銀河団と似ているが、精度が高く特徴的な形をしている。他の方向に比べ NE 方向の $0.3r_{\text{vir}}$ 付近で局所的に温度が上昇している。この領域は、ちょうどフィラメントと銀河団の結合部であり、銀河群が存在する。衝突によるショック加熱を見ている可能性がある。

Fe の分布: 図 2.4 に示したように $0.5r_{\text{vir}}$ 付近までの Fe/H が測定できた。方向による違いはなく、どの方向でも、0.2–0.4 太陽値である。 $0.5r_{\text{vir}}$ より外側では、Fe/H が減っていることを示唆している。最も外側 ($0.8r_{\text{vir}}$) では、 0.1 ± 0.1 と銀河団平均より有為に低い。これは、Perseus での結果とは異なる²²。IMLR の値は比較的に小さく、Perseus や Hyd-A に比べ 1/2 程度である²³。

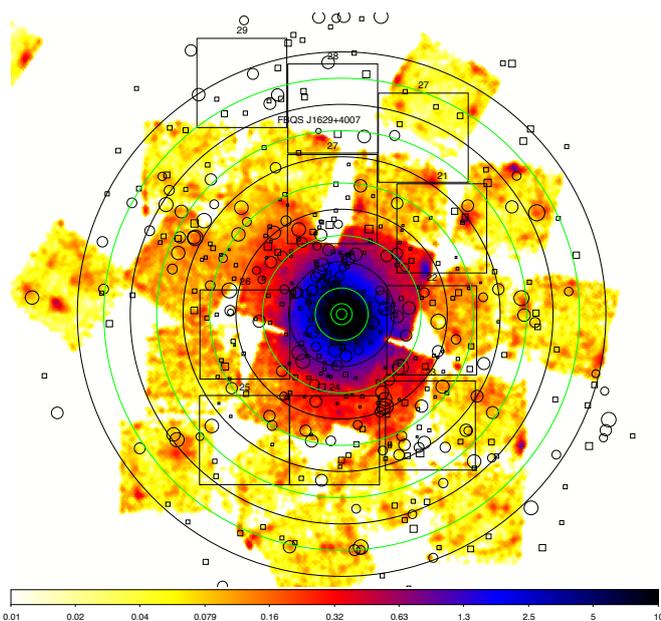


図 3: XIS による A2199 周辺の 0.7–2.0 keV 輝度分布。NXB を引き、Vignetting の補正をした。上が北、右が西。10 個の四角で提案する Pointing 計画を示す。小さな丸 (楕円銀河) と四角 (渦巻き) は、SDSS データから選択されたメンバー銀河。丸と四角の大きさは、銀河の明るさに比例。大きな黒の丸の半径は、10', 20', 30', 40', 50'。銀河団の外縁部でも、X 線放射と関連した銀河集団がいくつか見える (例: $R \sim 30 - 40'$ 右上)。

²²[Matsushita+ (2013)], [Werner+ (2013)]

²³外縁部では Fe-K が見えず Fe-L によって Fe/H が決まっているので、より注意深い解析が必要である。

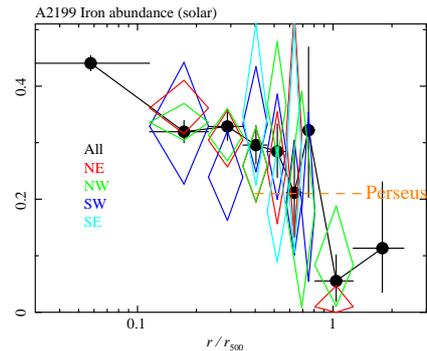


図 4: 「すざく」による A2199 の ICM の鉄 (Fe/H) の四方位角での半径分布。このうち、NE, SW がフィラメント方向。A2199 では、 $r_{180} \sim 2r_{500} = 48'$ 。

3 追加観測の目的と計画

3.1 二次元地図の完成

ICM 分布測定を、未踏の r_{vir} まで広げる。これによってガスの降着と宇宙線加速、それに伴うガスの加熱の現場を実測する。AO6 では r_{vir} まで届く広い領域を観測することを優先した。次のステップとして、 $(1/2-3/4)r_{\text{vir}}$ 周辺を隙間なくかつ深く (統計を上げ) 観測する。

いくつかの銀河団から大きなスケールに広がる「非対称構造」が発見されている。例えば Coma では、100-200 kpc スケールでの準線形な構造が見つかった²⁴。Perseus では、銀河団の中心から外側にかけての全方位角を回る「渦巻き」が示唆されている²⁵。これらは非常に暗く、「対称成分」を引き去った後でないと見えてこない。また、輝度ではなく温度の分布で非対称性が見えてくる場合もある²⁶。これらは、形成の歴史をひもとく新しいプローブである。

図 3 をよく見ると $0.5r_{\text{vir}}$ 付近の南から東、北、西にかけて淡い放射が見える。これまでの A2199 データでは、XIS の視野以上につながった低輝度の構造を捉えることは難しい。すきまを埋め、これらの放射が本当に繋がり銀河団に付随しているのか検証する。より深く隙間のない地図によって、数分の銀河規模から銀河団を超える (\sim 直径 90 分) 広い範囲の構造を探す。近傍の銀河団において r_{vir} まで届く二次元地図を作ることのできる機会は、A2199 のみである。

3.2 弱いレンズ効果・銀河サーベイとの共働

これまでの X 線/ICM と弱い重力レンズ/DM の比較は、系全体での半径分布に留まっている。これは、X 線で明い

²⁴Sanders+ (2013)

²⁵e.g.[Simionescu+ (2012)]

²⁶e.g.[Tanaka+ (2010)]

$z < 0.1$ の天体では、レンズの効果が弱いためである。この困難に [Okabe et al.(2014b)] では「すばる」Suprime-Cam の 18 ポインティングによる Coma の観測で挑んだ。注意深い解析により、世界で初めて銀河団内の 32 個もの DM サブハローの分布 ($3 - 70 \times 10^{12} M_{\odot}$) を明らかにした。すぎくの観測との比較も興味深い結果を示している²⁷。

銀河データも合わせて用いる。A2199 を含む超銀河団領域では可視光や赤外での深い銀河サーベイのデータがあり、環境の異なる広い領域での銀河の進化と環境の関係がよく研究されている。局所的な ICM の密度と銀河の性質の相関を調べる。また、銀河の周りで ICM の金属汚染が局所的にどれだけ進んでいるかを実測する。銀河と ICM の相互作用の観測は、より近い Virgo などで行われている。これに対し A2199 は、ICM と銀河を個々に分解してかつシステム全体を包括的に見ることができユニークな天体である。

図 3 を見ると、外縁部で X 線と銀河の分布が重なる銀河群領域がいくつか見える。測光的レッドシフトで決められた銀河分布、X 線放射、さらにはレンズ測定を組み合わせることで、前・背景の放射との切り分けがより容易になり、全てのデータの価値を高められる。特に S/N が低い外縁部において有効である。これまでのデータの隙間になっている場所にも、銀河集団が見られる。これらを埋め、バイアスのない統計的な相関を調べる。隙間が空いていると解析に余計な処理が必要になり、結果の信頼性が下がる。

本計画では、このような新しい測定を系統的に発展させ、ICM と DM、さらには銀河の空間分布を銀河 (10-100 kpc) から銀河団 (Mpc) という広いスケール範囲で比較する。それによって、三成分の相互作用と共進化を定量化する。ICM と銀河はそれぞれ異なった階層構造を持つが、DM はどのような分布であろうか²⁸。これを ICM や銀河の力学状態の仮定によらずに実測する。以上によって構造形成を支配している DM の性質を探る。

「すばる」HSC などの広視野での銀河サーベイや Planck 衛星などによるスニヤエフ・ゼルドビッチ (SZ) 効果のサーベイ計画が急速に進展している。すぎくで、これらと比較できる広く深いデータを得ておくことは、新種の天体や多様な研究への発展の意味でも大切である。

3.3 ポインティング計画

目的を達成するために、銀河団全体でのデータの均質性が重要である。そこで、これまでの観測の隙間になってい

²⁷ガス/DM の質量比の測定、ガスと DM の「乖離」が見つかっており、松下らによって論文準備中

²⁸これは、我々が「あすか」の時代から取り組んできた課題である e.g. [Makishima et al.(2001)], [Tamura (1998)]

る $(1/2-3/4)r_{\text{vir}}$ 付近の 10 点を既存の観測と同程度の積分 (30 ks) で観測する (図 3)。特に、銀河フィラメントのある北側に観測を伸ばす。

既存のデータでは $0.5r_{\text{vir}}$ 付近を四方位角方向に分けた分光で以下の精度を得た。密度: $\pm 30\%$ 温度: 2 ± 0.5 keV, Fe/H: 0.3 ± 0.1 。追加観測によって、同程度の精度を、XIS の視野程度の空間分解能 ($10' - 20', 30 - 60$ kpc) で達成できる。

観測期間を確保するためロール角制限は行わない。可能な範囲でロール角を調整し、迷光を低減する。XIS の台数が減っても積分時間が確保できれば、目的を達成できる。

外縁部での観測では、その天体の方向に近い領域での BGD 測定が必須である。本計画では、A2199 から半径 4 度以内にある計 120 ks 以上の blank sky データを利用する²⁹。

3.4 将来計画への発展

我々は、すぎくの銀河団観測で多くの成果を上げてきた³⁰。これらを発展させるため、本計画ではより高品質の観測を実施する。これらの成果を指針に、我々は以下の銀河団研究で連携して行く。(1) すぎくのアーカイブデータを利用した外縁部の系統的な解析 (田村を中心に)。(2) *ASTRO-H* による観測 (松下, 赤松, 深沢)。広い視野の SXI を用いて外縁部の観測を発展させる。銀河団の構造形成には、宇宙線加速とガスの運動が伴い、WHIM がその源となる。これらを直接的に捕らえるのが、HXI (硬 X 線) と SXS (高精度分光) の大きな役目である。ただし、SXS の視野は小さく、その寿命も限られる。どこにガス運動があり、それと銀河団全体の構造との関係をあらかじめ検討し、最適な観測場所を選ぶ。そのためにも A2199 の二次元地図は貴重なデータとなる。(3) SDSS に続く銀河サーベイを利用したメンバー銀河の統計的な性質 (星生成, AGN, ICM との相互作用) の探査 (Hwang)。(4) すばる HSC による主サーベイ (戦略枠プログラム) および個々の銀河団サーベイ。HSC の目的は、銀河団のレンズ観測を用いた宇宙論である。我々もこの計画に貢献する。(5) HSC の主サーベイ領域にある 10 の銀河団の XMM 観測 (2015 年観測, PI:岡部)。ACTPol/SZ データも合わせて用い、X 線観測とレンズ質量の統計的な性質を高精度で較正する。(6) 銀河団構造形成の理論的な研究。藤田らは宇宙線、滝沢らは磁場や非平衡プラズマの影響を調べている³¹。

²⁹A2199-OFF5, A2199-OFF16, High Lat. Diffuse A.

³⁰参考のため PI が著者に含まれる論文をあげる。Ota+ (2007; Centaurus), Matsushita+ (2007; Fornax), Werner+ (2007; Sersic), Takei+ (2007; A2218), Takei+ (2008; Coma), Tamura+ (2008; A2052), Bautz+ (2009; A1795), Tamura+ (2009; Perseus), Sato+ (2010; Sculptor SCL), Tanaka+ (2010; A85), Hoshino+ (2010; A1413), Tamura+ (2011; A2256), Sato+ (2012; Hyd-A), Ichikawa+ (2013; A1835), Tamura+ (2014; Perseus), Okabe+ (2014a; 4CL), Tamura+ (2015; Perseus)

³¹e.g. [Fujita+ (2013)], [Takizawa+ (2010)]

参考文献

- [Eckert et al.(2013)] Eckert, D., Molendi, S., Vazza, F., Etori, S., & Paltani, S. 2013, *Astron. Astrophys.*, 551, AA22
- [Lee et al.(2014)] Lee, G.-H., Hwang, H. S., Lee, M. G., et al. 2014, arXiv:1412.3996
- [Makishima et al.(2001)] Makishima, K., Ezawa, H., Fukuzawa, Y., et al. 2001, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 53, 401
- [Tamura (1998)] Tamura, T., 1998, Ph.D thesis, Tokyo University
- [Fujita+ (2013)] Fujita, Y., Ohira, Y., & Yamazaki, R. 2013, *Astrophys. J. Letters*, 767, LL4
- [Takizawa+ (2010)] Takizawa, M., Nagino, R., & Matsushita, K. 2010, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 62, 951
- [Takizawa(2000)] Takizawa, M. 2000, *Astrophys. J.*, 532, 183
- [Sato+ (2007b)] Sato, K., Yamasaki, N. Y., Ishida, M., et al. 2007, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 59, 299
- [Ota+ (2007)] Ota, N., Fukazawa, Y., Fabian, A. C., et al. 2007, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 59, 351
- [Tamura+ (2009)] Tamura, T., Maeda, Y., Mitsuda, K., et al. 2009, *Astrophys. J. Letters*, 705, L62
- [Werner+ (2007)] Werner, N., Kaastra, J. S., Takei, Y., et al. 2007, *Astron. Astrophys.*, 468, 849
- [Takei+ (2007)] Takei, Y., Ohashi, T., Henry, J. P., et al. 2007, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 59, 339
- [Tamura+ (2011)] Tamura, T., Hayashida, K., Ueda, S., & Nagai, M. 2011, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 63, 1009
- [Takei+ (2008)] Takei, Y., Miller, E. D., Bregman, J. N., et al. 2008, *Astrophys. J.*, 680, 1049
- [Tamura+ (2008)] Tamura, T., Mitsuda, K., Takei, Y., et al. 2008, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 60, 695
- [Tamura+ (2014)] Tamura, T., Yamasaki, N. Y., Iizuka, R., et al. 2014, *Astrophys. J.*, 782, 38
- [Fujita+ (2013)] Fujita, Y., Okabe, N., Sato, K., et al. 2013, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 65, L15
- [Tamura+ (2014)] Tamura, T., Iizuka, R., Maeda, Y., Mitsuda, K., & Yamasaki, N. Y. 2014, arXiv:1412.1869
- [Okabe+ (2014a)] Okabe, N., Umetsu, K., Tamura, T., et al. 2014, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 66, 99
- [Okabe et al.(2014b)] Okabe, N., Futamase, T., Kajisawa, M., & Kuroshima, R. 2014, *Astrophys. J.*, 784, 90
- [Walker+ (2013)] Walker, S. A., Fabian, A. C., Sanders, J. S., Simionescu, A., & Tawara, Y. 2013, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 432, 554
- [Fukazawa Ph.D (1998)] Fukazawa, Y., Ph.D thesis, Tokyo University, 1998
- [Sato Ph.D (2007)] Sato, K., Ph.D thesis, Tokyo Metropolitan University, 2007
- [Werner+ (2013)] Werner, N., Urban, O., Simionescu, A., & Allen, S. W. 2013, *Nature*, 502, 656
- [Simionescu+ (2013)] Simionescu, A., Werner, N., Urban, O., et al. 2013, *Astrophys. J.*, 775, 4
- [Ichikawa+ (2013)] Ichikawa, K., Matsushita, K., Okabe, N., et al. 2013, *Astrophys. J.*, 766, 90
- [Matsushita+ (2013)] Matsushita, K., Sato, T., Sakuma, E., & Sato, K. 2013, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 65, 10,
- [Matsushita+ (2013)] Matsushita, K., Sakuma, E., Sasaki, T., Sato, K., & Simionescu, A. 2013, *Astrophys. J.*, 764, 147 ,
- [Sato+ (2012)] Sato, T., Sasaki, T., Matsushita, K., et al. 2012, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 64, 95
- [Simionescu+ (2012)] Simionescu, A., Werner, N., Urban, O., et al. 2012, *Astrophys. J.*, 757, 182
- [Hwang+ (2012a)] wang, H. S., Geller, M. J., Diaferio, A., & Rines, K. J. 2012, *Astrophys. J.*, 752, 64
- [Simionescu+ (2011)] Simionescu, A., Allen, S. W., Mantz, A., et al. 2011, *Science*, 331, 1576
- [Sato+ (2010)] Sato, K., Kelley, R. L., Takei, Y., et al. 2010, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 62, 1423
- [Tanaka+ (2010)] Tanaka, N., Furuzawa, A., Miyoshi, S. J., Tamura, T., & Takata, T. 2010, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 62, 743

- [Kawaharada+ (2010a)] Kawaharada, M., Okabe, N., Umetsu, K., et al. 2010, *Astrophys. J.*, 714, 423
- [Hoshino+ (2010)] Hoshino, A., Henry, J. P., Sato, K., et al. 2010, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 62, 371
- [Kawaharada+ (2010b)] Kawaharada, M., Makishima, K., Kitaguchi, T., et al. 2010, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 62, 115
- [Nishino+ (2010)] Nishino, S., Fukazawa, Y., Hayashi, K., Nakazawa, K., & Tanaka, T. 2010, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 62, 9
- [Tamura+ (2009)] Tamura, T., Maeda, Y., Mitsuda, K., et al. 2009, *Astrophys. J. Letters*, 705, L62
- [Bautz+ (2009)] Bautz, M. W., Miller, E. D., Sanders, J. S., et al. 2009, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 61, 1117
- [Kawano+ (2009)] Kawano, N., Fukazawa, Y., Nishino, S., et al. 2009, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 61, 377
- [Fujita+ (2008a)] Fujita, Y., Tawa, N., Hayashida, K., et al. 2008, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 60, 343
- [Fujita+ (2008b)] Fujita, Y., Hayashida, K., Nagai, M., et al. 2008, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 60, 1133
- [Sato+ (2007)] Sato, K., Tokoi, K., Matsushita, K., et al. 2007, *Astrophys. J. Letters*, 667, L41
- [Matsushita+ (2007)] Matsushita, K., Fukazawa, Y., Hughes, J. P., et al. 2007, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 59, 327
- [Tamura+ (2004)] Tamura, T., Kaastra, J. S., den Herder, J. W. A., Bleeker, J. A. M., & Peterson, J. R. 2004, *Astron. Astrophys.*, 420, 135
- [Takizawa(1998)] Takizawa, M. 1998, *Astrophys. J.*, 509, 579