

# 「すざく」衛星による電波銀河「ろ」座A ローブからの熱的X線プラズマの発見



瀬田 裕美

〈首都大学東京理工学研究科 〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1〉

e-mail: seta@tmu.ac.jp

電波ローブは、銀河の両側に電波で見られる二つ目玉の構造である。銀河の大きさをはるかに超える巨大な構造が、銀河の中心に位置する巨大ブラックホールから放出される物質やエネルギーの「吹き溜まり」として形成される。ローブからの放射の正確な評価は、ローブそのものの理解にとどまらず、ブラックホールが周辺へ及ぼす影響の定量化の指標となりうる。すなわち、ブラックホールと母銀河の共進化を理解するうえでも重要である。これまでローブは、典型的な非熱的放射源として知られてきた。私たちは、「すざく」X線衛星を用いた代表的なローブ「ろ」座Aの観測で、ローブに付随する熱的なプラズマ放射を発見した。さらに熱的プラズマの総質量が約 $10^{10}$ 太陽質量にも及び、母銀河のガス質量に匹敵するほどあることがわかった。これまで知られていなかったローブの「熱い」一面をご紹介したい。

## 1. 電波ローブとその位置づけ

銀河の中心には、太陽質量の100万倍から10億倍の質量をもつ巨大ブラックホールが存在する。そこからは、相対論的速度をもったジェットが噴き出すこともある。ジェットは、母銀河をも超えて、星間空間を突っ走り、最終的には、衝撃波を起し、乱流の嵐となって「ローブ」と呼ばれる吹き溜りを作る。ローブの中には、ジェットが長年にわたって運んできた物質やエネルギーがたまっている。

1950年代ころより、電波観測は、電波干渉計を用いて角分解能を向上させ、たくさんの宇宙の電波源が可視光天体に同定されることになった。そのうちいくつかの電波放射は、楕円銀河を間にして対構造をしていることがわかった<sup>1)</sup>。これが、電波ローブの発見である。ローブは、このころ電波観測の絶好のターゲットだったようだ。巨大なローブ全体を見ることのできる視野角の大き

い電波イメージは、観測技術が格段に進歩した現在でも貴重なデータである。例えば、私たちに最も近い「ケンタウルス」座Aのローブは、南北差し渡し約10度角近くにも及び双対する目玉の構造である。こんな巨大で特異な形状をしたものを初めて見つけた人は、さぞびっくりしたに違いない。

ローブの電波放射機構の理解が進んだのは、1980年代頃である。ジェットによって運ばれた非熱的なエネルギー分布をもつ電子群（以下、非熱的電子）が、銀河間磁場と相互作用してシンクロトロン放射し、これが電波帯域で明るく捉えられる。さらに、この非熱的電子は、宇宙にまんべんなく広がる宇宙マイクロ波背景光と相互作用して逆コンプトン放射を放出し、これがX線帯域で卓越すると予想された。ローブから待望のX線放射が捉えられたのは、1995年である。ドイツのローサット、日本の「あすか」X線天文衛星が相次いで、「ろ」座Aのローブから非熱放射を検出

した<sup>2),3)</sup>。

このように、電波に加えてX線でもローブを観測することで、同じ電子が作り出すシンクロトロン、逆コンプトン放射の両方を測定し比較することが可能になり、ローブの磁場や非熱的電子数など、ローブの身体検査をすることができる<sup>4)</sup>。X線帯域では、つづく米国のチャンドラ、欧州のニュートン、そしてわれわれの「すざく」衛星などによって、観測されるローブの標本数が数十程度にまで増え、系統的な研究も進んできた<sup>5),6)</sup>。

さて、ローブは、活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; 以下AGN) のフィードバックを捕らえるプローブの一つでもある。フィードバックとは、巨大ブラックホールと銀河の共進化を理解するキーワードの一つで、銀河中心に位置する巨大ブラックホールが母銀河やそれを含む銀河団の進化を左右するような影響を与えるというものである。

ローブを用いてフィードバック効果の定量的な評価を行った有名な研究がMcNamaraら<sup>7)</sup>である。図1のように、ジェットが銀河間ガスを押し

のけて広がることで、銀河団高温ガス中に周囲よりX線放射強度の低い“キャビティー (空隙)”が観測されることがある。空間分解能に優れるチャンドラ衛星によってこれを分解撮像し、その体積 $V$ とガス圧 $p$ の積がジェットによる力学的な仕事としてジェットによる力学的なパワーを見積もる、というテクニックで、多数のAGNの標本を調査した。その結果、4桁にわたる電波光度で、力学的なパワーが電波光度 (シンクロトロンによる放射パワーの指標) を約100倍も上回っているという見積もりが得られた。なかには、力学的パワーがキューサーの放射パワーほどあるものもあり、これは銀河団ガスの冷却率に匹敵する。すなわち、銀河団ガスの放射冷却を相殺する程度のエネルギー入力が、ジェットから銀河間空間に注入されているということだ。

このように、ジェットが放出してローブに貯蔵され放出されるエネルギー形態には、これまで直接的に観測されてきた非熱的放射以外にもありうる。これらを認識し、全体のエネルギーバランスについて理解を深めることは、ローブだけではなく、銀河団や宇宙の進化を理解するうえでも重要である。

## 2. 「ろ」座Aローブからの熱的プラズマX線放射の発見

### 2.1 研究のはじまり

筆者が埼玉大学の大学院に入ったとき、指導教官の田代信先生から面白いデータがあると渡されたのが、前年に観測した「ろ」座AローブのX線観測データだった。これは、日本の「すざく」衛星の2年目に150 ks (約4日) かけて観測した貴重なデータである。X線イメージを見て、指導教官や先輩が「これは何かいるぞ！」と盛り上がっている。しかし、観測データの解析を始めたばかりの私には、何も写っていないようにしか見えなかった。こんなしょぼい天体が論文になるのかと、とても心細くなった。これが発展して、自分

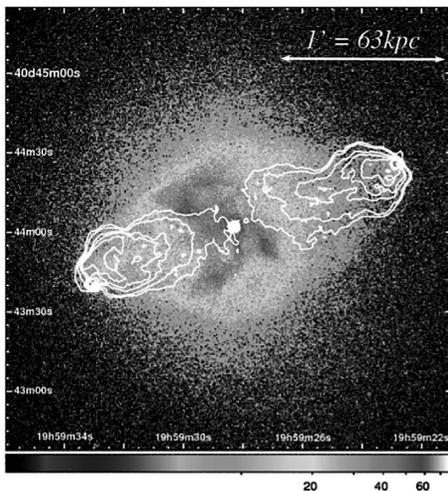


図1 電波銀河はくちょう座Aのイメージ<sup>8)</sup>。等高線: 電波, グレイスケール: X線. ローブがX線で輝く銀河ガスを押しつけるように広がっていることがわかる。

の博士論文のテーマの一部にまでなってしまうとは、今でも驚きである。

実は、ローブに付随するX線放射のような、表面輝度が非常に低い拡散放射の観測こそが、「すぎく」衛星の最も得意とするところなのである。現在稼働中の欧米のX線天文衛星と異なり、近地球軌道をとる「すぎく」衛星は、宇宙線粒子を起源とするバックグラウンドが低くかつ安定している。中でも、搭載するX線CCD検出器XIS (X-ray Imaging Spectrometer) は、大きな有効面積をもつ望遠鏡の焦点面にて、18分角四方の広い視野で撮像・分光観測を行う装置であり、かつ、エネルギー分解能やバックグラウンドスペクトルが長期間にわたってよく較正されている。低輝度拡散X線放射の観測においては、近い未来を含めてもこれにまさる装置はないのである。本稿で紹介する電波ローブからの熱的プラズマの放射の観測も、Stawarzら<sup>9)</sup>をはじめとして「すぎく」衛星が強力に進めた分野の一つである。「ろ」座Aローブは欧州のニュートンX線衛星でも観測しており、私もそのデータを解析したのだが、やはりバックグラウンドが高すぎてローブ放射を取り出すに至らなかった<sup>10)</sup>。

## 2.2 「ろ」座Aの観測

こうして、「すぎく」衛星の性能を活かしたローブからのX線放射の研究が始まった。われわれがターゲットとして選択した「ろ」座Aローブは、中心銀河NGC1316から東西に二つ目玉の構造を見せる、典型的な電波ローブである(図2)。初期において、センチ波によりシンクロトロン放射が<sup>11)</sup>、また軟X線(0.7-2キロ電子ボルト(keV)帯域)<sup>2)</sup>と硬X線(1.5-7 keV帯域)<sup>3)</sup>で逆コンプトン放射が初めて報告された天体でもある。この天体は、観測するうえでいくつもの有利な点をもつ。まず、距離が比較的近く(18.6 Mpc<sup>12)</sup>)、また実サイズも大きい(東西それぞれ差し渡し、約100 kpc)ため、見かけの大きさ(約30分角)が適度である。これより見かけが小さいと「すぎく」

衛星の空間分解能(約2分角)で内部の構造が分離しきれないし、これより大きいと全体を覆うのに膨大な観測点数が必要となる。次に、中心銀河NGC1316に存在する巨大ブラックホールがX線で非常に暗く( $5-10^{39}$  erg s<sup>-1</sup>)、AGNの活動を停止していると考えられている<sup>13)</sup>。したがって、AGNからの漏れこみ放射の影響が少ない。さらに、「ろ」座Aは、所属する「ろ」座銀河団の中心から大きく(約3.5度角)離れている。一般に、銀河団はプラズマで埋められており、中心部に近づくに従って指数関数的に強度を増す拡散X線放射が付随している。周縁部に存在することで、銀河団起源の放射の寄与が非常に小さく抑えられる。

上述の、運用2年目の観測で、中心銀河と西側ローブ中央部を覆った。まずは、このデータを元に、硬X線検出器を用いてローブからの非熱的X線放射を20 keVまでのスペクトルで捕らえることに成功し、逆コンプトン放射をするX線放射とシンクロトロン放射をする電波放射の電子が同一のエネルギースペクトルをもつことが疑いなく示

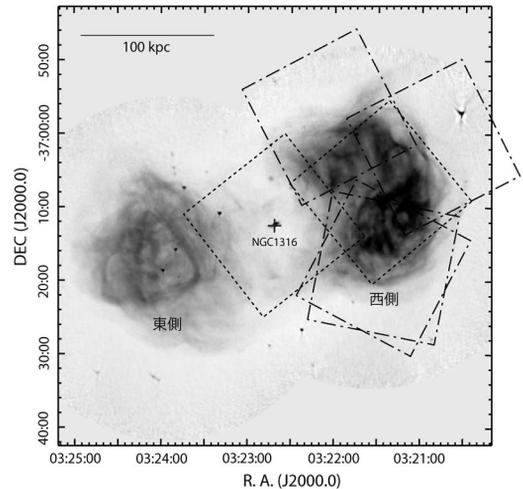


図2 「ろ」座Aローブの1.5 GHz強度図(グレースケール)<sup>15)</sup>。中心銀河NGC 1316の東西に典型的な目玉構造のローブが見える。四角が「すぎく」衛星による観測視野。点線は2006年、破線は2009年に観測した。

された<sup>14)</sup>。私は、これを引き継いで、非熱的放射の空間分布を調べるべく、運用4年目には隣接領域の観測も追加してローブ西側全体を一気に覆った(図2)。観測中に、硬X線検出器が停止するというハプニングがあったのだが、再観測の結果、配分以上の積分時間をもらえた。博士論文にまとめ、本稿で示すのは以上のデータであるが、運用8年目にも観測点を追加し、「ろ」座Aローブ東西のマッピングを完了している。足掛け7年、総積分時間約500 ksで、X線CCD検出器を用いた貴重な撮像分光データセットを構築することができた。

**2.3 熱的プラズマ放射の発見**

X線観測において、これまで観測されたローブからの放射は、ローブ内に存在する非熱的電子による非熱的放射であった。ローブには、非熱的放射しか存在しないというのが、ここ数十年の定説であった。私も、当初は、ローブが代表的な非熱的放射源との刷り込みがあったので、非熱的X線スペクトルにしか注目していなかった。しかし、ローブの外側領域を含めたマップをいくつかのエネルギー帯域で作るにつれ、おかしなことに気づき始めた。非熱的放射が卓越するのは大体5 keV以上である。この帯域で、電波のマップと似た空間分布を示すのは理解できる。しかし、1 keV付近の帯域でも、なぜか電波と同じようにローブ中心部分が周囲よりも放射が強いのである。この帯域は、温度1,000万度の熱的プラズマスペクトルが卓越するとして説明でき、自分でもスペクトルフィットで確かにそのような成分を入れていた。ただしその意図は、銀河団ガスの熱的プラズマや前景銀河系放射が視野全面にわたって存在してもおかしくない、という暗黙の想定によるものであって、ローブの位置にかかわらずほぼ一様に存在すると思っていた。

実は、「ろ」座AローブのX線スペクトルに広がったように見える熱的成分が含まれているというのは、これまで繰り返主張されてきたことな

のである<sup>2), 3), 14), 16), 17)</sup>。しかしいずれの論者も、私の先入観と同じく、これがローブとは関係のない放射であると片付けてしまっていた。ローブの外側までカバーするわれわれの撮像分光マッピングデータによって初めて、この熱的放射がローブ位置に局在していることが明らかになったのである(図3)。

そこで、ローブに付随する熱的放射をスペクトル上で分離するため、ほかの放射の寄与を見積もった。考えられるのは、(イ)「すぎく」衛星で分解できないX線点源(主に銀河系内の晩期型星)の重ね合わせ、(ロ)中心銀河NGC 1316に付随するX線放射の漏れ出し(「銀河成分」)、(ハ)「ろ」座銀河団全体に広がる高温ガス(「銀河団成分」)、(ニ)銀河系ハロー放射である。(イ)については、ローブ西側の大半を覆うニュートン衛星のアーカイブデータを用いて評価した。バックグラウンドが高いものの、空間分解能が「すぎく」衛星の数十倍も高いため、点源に対する感度ははるかに高い。(ロ)の銀河成分は、われわれの観測でスペクトル形状が得られ<sup>18)</sup>、また米国のチャン

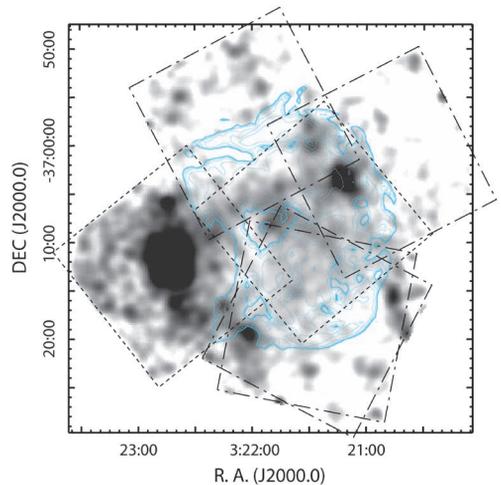


図3 「すぎく」衛星によるローブ西側のX線対数強度分布(グレースケール)と1.5 GHzの偏光度(等高線)<sup>15)</sup>。X線強度は0.67-1.5 keVとして、温度1,000万度の熱的プラズマガスが最も顕著に見えるようにした。

ドラ衛星による観測で空間的に中心核周囲（10秒角以内）に局在する<sup>19)</sup> ことがわかっている。したがって、空間的なマスクにより影響を排除できる。（ハ）の銀河団成分は、「ろ」座銀河団のような緩和した系では球対称分布の仮定が有効であり、「すざく」衛星のアーカイブデータでX線放射強度の銀河団半径依存性を導出して、「ろ」座Aの位置の値を評価した。（ニ）は、「すざく」衛星のこれまでの研究の蓄積があり、正確に見積もることができる<sup>20)</sup>。

解析の結果、ほかの放射では、検出された熱的放射のたかだか半分程度しか説明できず、ローブに付随する拡散X線放射が確かに存在することがわかった。特に、X線スペクトルに見られる1 keV付近での盛り上がり（図4）は高階電離したネオンの輝線に由来し、熱的成分の存在を表している。この輝線は、別の熱的成分（ニ）では温度が高すぎ、（ロ）、（ハ）では輝度が高すぎるため、ローブ自体に熱的プラズマが存在する強い証拠になった。このような低輝度放射から熱的輝線を分離するのは、「すざく」衛星でしか成し得ない観測である。

2.4 熱的プラズマガスの物理量

観測したローブの西側に熱的プラズマが一様に充満する（volume filling factorが1）と仮定してその全質量と全エネルギーを見積もってみよう。

衝突電離プラズマからのX線スペクトルの強度は  $n_e^2 V/4\pi D^2$  に比例する。ここで、 $n_e$ は電子密度、 $V$ は放射体積、 $D$ は天体までの距離である。プラズマは陽子と電子だけと仮定している。 $V$ が見かけの大きさ12分角の半径をもつ球とすると、電子密度  $n_e=3.0\times 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ 、全エネルギー  $E_T=3n_e k_B T V\sim 5\times 10^{58} \text{ erg}$ 、全質量  $M_T=m_p n_e V\sim 9\times 10^9 M_\odot$  となる。 $m_p$ は陽子の質量である。これを、既知の非熱的エネルギーの物理量と比較する。Tashiroら<sup>14)</sup>では、観測された電波とX線の放射がそれぞれ一様磁場のシンクロトロン放射と宇宙マイクロ波背景放射の光子をたたき上げた逆コンプトン散乱と仮定して、磁場  $\epsilon_{\text{mag}}=6.7\times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-3}$ 、非熱的電子  $\epsilon_{\text{NT,e}}=5.0\times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-3}$  のエネルギー密度を得ている。ここから、観測された非熱的成分として両者を足すと、 $\epsilon_T/\epsilon_{\text{NT,e}}\sim 3$  となる。つまり、今回検出された熱的エネルギー密度  $\epsilon_T$  は、これまで知られていた非熱的エネルギー密度と同程度かそれ以上もあることがわかる。先に報告のあったケンタウルス座Aローブでも、ほぼ同様の指摘がされている<sup>9),21)</sup>。

2.5 熱的プラズマガスの起源

このような熱的プラズマは、どのようにしてできたのであろうか？ 注目すべきはその巨大な総質量  $M_T\sim 9\times 10^9 M_\odot$  である。NGC 1316の中心ブラックホール質量  $M_{\text{BH}}\sim (1-2)\times 10^8 M_\odot$ <sup>22)</sup>

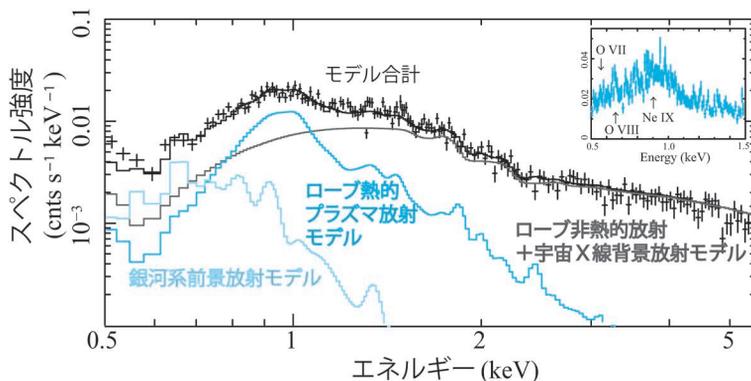


図4 「すざく」衛星による、「ろ」座Aローブ西側のX線スペクトル。十字はデータ点。実線はデータに合わせたモデル。各モデルの詳細は図を参照。図中図に1 keV付近の拡大図を示す。

と比較して約100倍、現在の母銀河ガスの全質量  $M_{g,host} \sim 3.3 \times 10^9 M_{\odot}^{23}$ ) と同程度もある。

まず、ブラックホールに降着したものより、噴出したもののほうが100倍重い（現在のブラックホールの質量の大半が降着物質によるものとして）というのは起こりそうもないので、中心核からジェットによって噴き出した物質だけでローブの熱的プラズマを構成するのは難しい。したがって、より大きなスケールで物質を掃き集めた結果であると推測される。もし、巨大ブラックホールからのジェットが、母銀河内を進行するに従って星間物質をジェット自体に積み増したとすると、相対論的なジェットは一気に減速されてしまい、そもそもローブのような巨大な構造は形成されないはずである。故に、熱的プラズマは、ローブが十分広がって大きくなった後、（おそらくジェットによるエネルギー注入の休止後）、ローブと外部の物質間で相互作用（例えばレイリーテイラー不安定性など）を通して、ローブ内に引きずりこまれ充満したと考えられる。外部には、巨大ブラックホールのAGN活動に伴って吹き散らされた銀河間物質や母銀河の星間物質があるだろう。単純な仮定であるが、もし、ローブの熱的プラズマの物質の全てが母銀河由来なら、もともと母銀河に付随していたガスの半分以上がこのようにして失われたことになる。これが正しければ、AGN活動が母銀河の進化に与える影響は無視できないものになるだろう。

### 3. 今後の展望

以上のように、「ろ」座Aの西ローブに熱的プラズマが存在することがわかった。前述のように、2013年8月にわれわれは、この西ローブの結果をより確実にするため、「すざく」衛星を用いて東側ローブの観測を行った。すると、上述の背景放射やローブからの非熱的放射だけでは説明のつかない、1 keV付近に盛り上がるスペクトル成分が弱いながらも存在することがわかった（瀬田ら

2014年春季年会発表）。

いよいよ今年は、日本の6番目のX線天文衛星「ひとみ」による新時代の幕開けである。著者も、打ち上げ時は種子島宇宙センターで、検出器のデータを通信が途切れるまで見張り、検出器チームメンバーとその成功を喜んだ。これからの「ひとみ」衛星が取得する天体の観測データがとても楽しみである。しかし、これで「すざく」衛星の役割が終わるわけではない。低輝度拡散X線放射に対する観測器の感度を有効面積と視野の積で評価するなら、実は「すざく」衛星のほうがよいのである（「ひとみ」衛星搭載精密X線分光器（SXS）は、有効面積は大きい視野が狭い。軟X線撮像検出器（SXI）は視野は大きい有効面積は約1/3）。昨年夏に「すざく」衛星は観測停止してしまったが、まだまだデータを大事に使って、研究を進展させていきたい。

### 謝辞

本稿は、筆者の博士論文<sup>24)</sup>の一部と投稿論文<sup>25)</sup>を基にしました。この研究テーマでご指導いただいた田代信教授（埼玉大学）に心から感謝します。また、観測結果の解釈に重要な意味づけをいただいた井上進氏（理研）、大学院時代にデータ解析の方法をご教授いただいた磯部直樹氏（宇宙科学研究所）にも感謝します。

私事ですが、本研究は私が初めての妊娠中に論文にまとめたものです。当時は、経験したことのない体調不良と、予定どおり研究が進まないストレスに苛まされる毎日でしたが、周囲のたくさんの方々に助けられて、出版までこぎつけることができました。さらに、出産4カ月後には、この論文を元にして研究会や国際学会の口頭発表などの機会をいただき、研究復帰へのステップができました。研究と育児との両立、といえばカッコイイですが、息子が2歳すぎた今でも、そのバランスを模索する日々が続いています。出産前は普通だった、朝から晩まで研究に没頭するような生活

はできなくなりました。しかし、出産、育児を経験することで、時間をより有効に活用できるようになったり、面接などで少しは度胸がついたり、良いこともあります。研究を続けるのはたいへんですが、大切なことなんだと改めて思いました。楽しく子どもの成長を見守りながら、天文月報を書けるところまでたどり着き、感謝の気持ちでいっぱいです。本当にどうもありがとうございました。

最後に、本天文月報に書くチャンスをくださり、遅筆にもかかわらず励ましてくれた編集委員の馬場彩さんに感謝します。

### 参考文献

- 1) 例えば, Ryle M., Elsmore B., Neville A. C., 1965, Nature 205, 1259
- 2) Feigelson E. D., Laurent-Muehleisen S. A., Kollgaard R. I., Fomalont E. B., 1995, ApJL 449, L149
- 3) Kaneda H., Tashiro M., Ikebe Y., et al., 1995, ApJ 453, L13
- 4) Begelman M. C., Blandford R. D., Rees M. J., 1984, Reviews of Modern Physics 56, 255
- 5) Croston J. H., Hardcastle M. J., Harris D. E., et al., 2005, ApJ 626, 733
- 6) Isobe N., Seta H., Tashiro M. S., 2011, PASJ 63, S947
- 7) McNamara B. R., Nulsen P. E. J., 2012, New Journal of Physics 14, 05502
- 8) Yaji Y., Tashiro M. S., Isobe N., et al., 2010, ApJ 714, 37
- 9) Stawarz L., Tanaka Y. T., Madejski G., et al., 2013, ApJ 766, 48
- 10) Nulsen P., Panagoulia E., Kraft R., et al., 2011, in AAS/High Energy Astrophysics Division 12, 46.03
- 11) Ekers R. D., Goss W. M., Wellington K. J., et al., 1983, A&A 127, 361
- 12) Madore B. F., Freedman W. L., Silbermann N., et al., 1999, ApJ 515, 29
- 13) Iyomoto N., Makishima K., Tashiro M., et al., 1998, ApJ 503, L31
- 14) Tashiro M. S., Isobe N., Seta H., Matsuta K., Yaji Y., 2009, PASJ 61, 327
- 15) Fomalont E. B., Ebneter K. A., van Breugel W. J. M., Ekers R. D., 1989, ApJ 346, L17
- 16) Tashiro M., Makishima K., Iyomoto N., Isobe N.,

- Kaneda H., 2001, ApJ 546, L19
- 17) Isobe N., Makishima K., Tashiro M., et al., 2006, ApJ 645, 256
- 18) Konami S., Matsushita K., Nagino R., et al., 2010, PASJ 62, 1435
- 19) Kim D.-W., Fabbiano G., 2003, ApJ 586, 82
- 20) Kushino A., Ishisaki Y., Morita U., et al., 2002, PASJ 54, 327
- 21) O' Sullivan S. P., Feain I. J., McClure-Griffiths N. M., et al., 2013, ApJ 764, 162
- 22) Kuntschner H., 2000, MNRAS 315, 184
- 23) Forman W., Jones C., Tucker W., 1985, ApJ 293, 102
- 24) 瀬田裕美, 2012, 博士論文 (埼玉大学)
- 25) Seta H., Tashiro M. S., Inoue S., 2013, PASJ 65, 106

### Detection of Thermal X-Ray Emission from a Radio Lobe with Suzaku

Hiromi SETA

*Department of Physics, Tokyo Metropolitan University, Minami-Osawa 1-1, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan*

Abstract: Radio lobes are seen in both sides of radio galaxies. The supermassive black hole at the center of a radio galaxy ejects mass and energy and create the lobe that extends far beyond the host galaxy. The strength of the emission from a lobe can be used to quantify the effect of a supermassive black hole upon surrounding environment. Precise estimate of it is important to understand not only the lobes themselves but also the co-evolution of black holes and host galaxies. To date, radio lobes have been known as typical non-thermal emitters. Using the Suzaku X-ray satellite, we discovered the thermal X-ray emission from an archetypical radio lobe Fornax A. The estimated total mass of the plasma amounts to  $10^{10} M_{\odot}$ , which is comparable to the gas mass of the host galaxy. In this article, I present a "hot" view of radio lobes that has not been widely recognized.