

氏名	瀬田 裕美
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学位記号番号	博理工甲第 865 号
学位授与年月日	平成 24 年 3 月 22 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	X-ray Study on Extended Emissions from Radio Lobes of Active Galaxies (活動銀河の電波ローブに付随する広がった X 線放射の観測的研究)
論文審査委員	委員長 教授 田代 信 委員 教授 井上 直也 委員 准教授 寺田 幸功 委員 連携准教授 望月 優子

論文の内容の要旨

活動銀河核は、銀河の中心に存在する太陽の 100 万から 10 億倍もの質量をもった巨大ブラックホールである。活動銀河核には、ブラックホールへ周辺物質が落ちることによって解放された重力エネルギーの一部を、相対論的速度をもったプラズマ流「ジェット」として噴出するものがある。ジェットは、銀河を遥かに超えて伸び、莫大なエネルギーを放出している。そして周辺ガスとの間で衝撃波を起こし、最終的には乱流となって銀河間空間に拡散していく。この拡散過程に見られる、強い電波を放射するプラズマの巨大な溜まり場を、「ローブ」と呼ぶ。ローブは、直径 100 kpc 程の球となって、銀河間空間に広がる。

宇宙にあるブラックホールは大きく 2 種類に分けられる。我々の天の川銀河に存在する太陽質量程度の小ブラックホールと、巨大ブラックホールである。大きな違いは、時間発展のタイムスケールである。小ブラックホールの場合、数日から数年であるのに対し、巨大ブラックホールの場合、質量が 6 倍以上異なるため、時間スケールも長く観測には工夫が必要である。これまで小ブラックホールのジェットの速い時間変動の研究はたくさん行われてきた。しかし、巨大ブラックホールでは、ジェットの放出するエネルギーは宇宙進化に影響するほどでありながら、その長い時間スケールと暗い光度のため、効果的な時間変化の研究が不足していた。

本論文では、活動銀河核ジェットの時間発展を明らかにするために、2つの異なった視点のもと、2天体を研究対象とした。一つめの視点は、ジェット活動の微分的視点であり、観測者の視線方向にジェットを噴くブレイザー天体 OJ 287 に注目した。もう一つの視点は、ジェット活動の積分的視点であり、最近傍でかつ最も電波で明るいローブの一つろ座 A ローブに注目した。

ブレイザー天体 OJ 287 は、巨大ブラックホールの連星系をなす珍しい系である。連星の接近により、人が観測できる短い時間（約 10 年）に降着率が劇的に変化し、2度の増光を起こすことが知られるため、時間発展の長いジェットを微分的に捕捉できる。さらに、多波長スペクトルを得れば、広帯域放射をする 2つ

の放射、熱的な降着円盤（紫外～軟X線）と非熱的なジェット放射（電波～ γ 線）、を切り分け、両者の相関を時間軸上でみることが出来る。本論文では、OJ 287 天体の 2007 年秋に予期された増光と静穏時を捕えるため、多波長同時観測を遂行した。得られた多波長スペクトルは、ジェットによるシンクロトロン放射とその光子による逆コンプトン散乱放射モデルで再現できることを示した。さらに静穏時と比較することで、この増光が劇的な電子注入による純粋なジェット起源であることを初めて明らかにした。1 回目の増光と比較すると、1 回目の増光でX線帯域に見られた熱的な降着円盤による黒体放射を示唆するスペクトル成分は、2 回目の増光では見られなかった。これにより、質量降着により降着円盤が増光し、その後、ジェットが激しく噴出するという、小ブラックホールで見られるジェット噴出の描像を示唆する観測的結果を、活動銀河ジェットによって初めて捕えることができた。

もう一つの視点として、活動銀河核ろ座 A の西ローブの観測を行った。ローブの放射の空間分布が得れば、これまで噴出したジェットの痕跡をたどることが出来る。X線天文衛星「すざく」を用い、ろ座 A の西ローブのローブ全体を覆うように 6 回のマッピング観測を行った。詳細な空間分布を求めるにあたって、まずバックグラウンドの評価に十分注意した。バックグラウンドは主に 3 種類あることが知られている。宇宙線起源の非X線背景放射、天の川銀河の放射、近傍の明るいX線天体、遠方の活動銀河核の足し合わせである宇宙X線背景放射である。これらを一つずつ慎重に評価することで、ローブから 0.8 keV 程度の熱的X線放射を捕えることに成功した。ろ座 A からの熱的X線放射成分はこれまで知られていたが、この放射がローブ起源であることを本論文で初めて明らかにした。これはローブから熱的放射成分の検出としても、世界初である。また、同放射の熱的エネルギー密度は、 $7 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-3}$ と求まり、一方の非熱的放射のエネルギー密度は、非熱的電子が $3 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-3}$ 、磁場が $0.8 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-3}$ であった。求められた熱的放射のエネルギー密度は、これまで知られていた非熱的エネルギー密度と同程度である。さらに、詳細なローブの空間輝度分布を測定したところ、ローブの南側が北側よりも、熱的放射成分の温度が高く、ローブの非熱的放射成分も多く存在することがわかった。ろ座 A の中心核はすでに休止状態であるとされ、電波観測によりローブ北側の方向へ小さなジェットの噴出の痕跡がある。以上より、もしジェットによってローブに注入された非熱的電子が、熱的放射へ変化すると仮定すると、ジェットは最近までローブ南側へ非熱的電子を注入し、現在ローブ北側へ向きを変えたのではないかと考えられる。南側の熱的放射と非熱的放射のエネルギー密度が北側まで冷える冷却時間は、それぞれ 5Gyr、2Gyr と求まったので、数 Gyr でジェットが歳差運動していると考えられる。

以上の二つの視点より、活動銀河核は、活動期間中にジェットを断続的に、歳差運動をしながら噴出しているという、いずれも降着円盤の状態を強く反映した系であるとの示唆を得た。

論文の審査結果の要旨

本論文は、活動銀河にともなう宇宙ジェット活動の時間的遷移の観測的研究に関するものである。

活動銀河核は、銀河の中心に存在する太陽の 1000 万から 10 億倍もの質量をもった巨大ブラックホールである。活発な星形成領域などにある周辺物質は、降着円盤を形成しながらブラックホールへ降着してゆく。このとき解放された重力エネルギーと物質の一部が、相対論的速度をもったプラズマ流である宇宙ジェットとして噴出される。ジェットは、銀河間空間にいたる 100 kpc もの距離を走り、莫大なエネルギーを運ぶ。ジェットは、最終的に周辺ガスとの間で衝撃波を起こし、乱流となって銀河間空間にゆっくりと広がる。この巨大な溜まり場は、直径 100 kpc 程の球に成長し、銀河間空間磁場によってシンクロトロン電波を放出、電波「ローブ」として観測される。このローブと銀河間ガスとの相互作用は、観測的に明らかになってはいないが、銀河間ガスの加熱や再電離、さらに巨大ブラックホールと母銀河の共進化に大きな役割を果たしていると考えられている。しかし、その活動期間を通じてどれほどのエネルギーが解放されるかは、ジェットの運ぶ力学的エネルギーや活動頻度に大きく依存しており、いずれも現在までよくわかっていない。

本論文は、この問題に、経時的なジェットの変動が観測できるブレイザー天体と、ジェット活動の積分的なエネルギーを測定できる電波ローブ天体の両者の観測からアプローチし、ジェットの活動と向きの遷移について、はじめての有力な観測的証拠をあたえた。

まず本論文では、ブレイザー天体 OJ287 の多波長観測によるジェット活動の変化についての研究を行った。この活発なジェットをともなう活動銀河核は、12 年の周期的活動が可視光で観測されており、連星ブラックホールによる降着円盤の周期的な摂動が予想されている。申請者は 12 年周期でおこる 2 回の可視光増光における電波から高エネルギーガンマ線に至る多波長観測を比較することで、ジェットの噴出が、降着率の変動による降着円盤の状態遷移に追隨して起こっている非常に動的な現象であることを、観測的に明らかにした。

次いで本論文は、電波ローブ天体 Fornax A の X 線による観測を行った。電波ローブは、相対論的電子と磁場の相互作用によってシンクロトロン放射をし、電波で明るく観測されるものであるが、その一方で、このシンクロトロン電子と宇宙を均等に埋め尽くす宇宙マイクロ波背景放射の光子を逆コンプトン散乱することで X 線でも観測される。この両者を比較することで、エネルギー等分配や最小エネルギーの仮定によらずジェットによって銀河間空間に輸送されてきた電子のエネルギーを求めることができる。本研究で取り上げた Fornax A は、見かけの大きさが差し渡し 1 度におよぶローブをもち、X 線の空間分布を捕えるのに最適な天体である。申請者は、X 線天文衛星「すざく」を用い、西ローブのローブ全体を覆うマッピング観測を行い、空間スペクトル解析を実行することで、ローブに付随する相対論的電子と熱的プラズマを分離、それぞれのエネルギー密度（圧力）を求めることで、ローブの南北で、熱的プラズマの温度と、相対論的電子のエネルギー密度が、有意に異なっていることを発見した。ローブの南領域は、プラズマガスの温度が $kT=0.84$ keV、ローブからの非熱的 X 線のフラックスは $0.21 \mu\text{Jy}$ であり、一方北領域は、プラズマガスの温度が $kT=0.73\text{keV}$ 、ローブからの非熱的 X 線放射のフラックスは $0.10 \mu\text{Jy}$ であった。つまり、南領域の方が、北領域よりも温度が高いプラズマを含んでおり、同時に供給されている非熱的電子もよりエネルギー密度が高いことがわかった。さらに、熱的プラズマの温度差を放射冷却によって解消するには約 40 億年かかると見積もられ、これは相対論的電子のシンクロトロンおよび逆コンプトンによる冷却時間とほぼ一致している。

この結果、両者が密接に関連しており、熱的プラズマがジェット-ローブによる加熱によって温度上昇を起こしている可能性を示唆する。一方で、北側を中心にローブ全体を覆うようひろがる低温のプラズマの冷却時間は、ひと桁以上おおきく、ジェット-ローブ系によるエネルギー注入によるエネルギー積分を反映していると考えられる。電波による中心核の精密空間分解画像によると、Fornax A のジェットは、現在はローブの北方向に噴出しているとされており、上の結果とあわせるとジェットが数十億年のスケールで歳差運動を行っていることが示唆される。

このような歳差は、降着円盤の歳差に起源をもつと考えるのが自然であり、先に取り上げた、経時的活動遷移とあわせて、活動銀河核ジェットが、降着円盤の状態によって大きく影響をうけるダイナミックな現象であることを多角的に明らかにしたもとして重要な成果であり、また、先行研究に例のない視点をあたえるものとして評価できる。

また本論文の主要部分は、査読制度のある国際的学術誌 Publications of Astronomical Society of Japan に英文で1編掲載され、また論文提出者によって国際会議で3編のポスター発表がなされている。また国内学会および研究会においても、4度にわたって口頭発表されている。このほか本論文に密接に関係する研究として査読付き雑誌に出版された論文が、4編ある。その他、検出器開発や活動銀河核以外の観測的研究の分野で、査読付き雑誌に掲載された論文が、主著2編と共著3編ある。以上の実績をふまえ、本論文は十分学位論文に値すると判断され、学位論文審査委員会は全員一致で合格と判定した。