

氏 名 中原 聡美

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1989 号

学位授与の日付 平成 30 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Study for the physical properties of active galactic nucleus
jets by radio imaging analyses of jet structure from
Schwarzschild-radius to galactic scales

論文審査委員 主 査 教授 松原 英雄
准教授 村田 泰宏
教授 堂谷 忠靖
教授 吉田 哲也
教授 本間 希
教授 海老沢 研 宇宙科学研究所

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

Relativistic jets are ubiquitous in mass accreting black hole systems, including active galactic nuclei (AGNs) having supermassive black holes at the center of galaxy. However, its collimation and acceleration mechanisms are big challenges that have not been solved for many years in the research field of astrophysical jets. The present study approaches the unsolved problem by imaging analysis techniques to measure the radial profiles of jet width throughout the physical scales beyond the sphere of gravitational influence of the central black holes (typically $\sim 10^5$ Schwarzschild radii (R_s) as Bondi radii) from the Schwarzschild scale for several AGNs. Recently, the evidence for the relationship between the bulk acceleration and geometrical collimation in the M87 jet has been observationally obtained (Asada et al. 2014); the region at which the jet acceleration is observed coincides with that at the jet is collimated into a parabolic streamline up to the Bondi radius from the central black hole (Asada & Nakamura 2012). The transition from the parabolic to the conical expansions in the jet occurs at $\sim 10^5$ times the R_s . Subsequently, the similar radial profile of jet width has been found in the NGC 6251 jet (Tseng et al. 2016). Such a phenomenon is successfully explained by theoretical studies via general relativistic magnetohydrodynamics (MHD) simulations (e.g., McKinney 2006); In order to maintain a parabolic shape, a transverse pressure from the external medium with relatively shallow radial dependence (e.g., Komissarov et al. 2009) is required. However, there have been only two observational examples for established parabolic-to-conical profiles in jet width (M87 and NGC 6251).

The present study provides three more AGNs whose jet widths have been measured throughout physical scales comparable with those of the two AGNs by the previous studies. NGC 4261, NGC 1052, and Cygnus A are newly investigated at very wide scale in radial distance from the central engine. These radio galaxies are located at relatively nearby universe, and have very high-mass black hole. Therefore, geometrical investigations in a unit of R_s can be advantageously promoted in these radio galaxies. They have characteristics that differ from the M87 and NGC 6251; NGC 4261, NGC 1052, and Cygnus A have two-sided jets due to highly inclined jets with large inclination angles. These three contribute to expand the parameter space by adding the variety of inclination angle and symmetry. Furthermore, a Fanaroff–Riley Class II (FR-II) radio galaxy was investigated for the first time with Cygnus A.

I performed a pixel-based analysis on the total intensity maps of interferometric images at many frequencies and various angular scales, to measure the jet width in the both approaching and counter sides of the three AGNs. The intensity of jets was sliced transversely at a sampling rate of one-fifth of the synthesized beam size, and

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

then, a Gaussian fitting to derive a deconvolved width of the jet is performed. Furthermore, the present study will attempt a pixel-based analysis along the jet axis for one AGN on the single side (NGC 4261 on the approaching side). In this context, the measurement of jet width has an implication to obtain the volume of jets; at the same time the analyzing of intensity along jets is to obtain the intensity of radiation emitted from the volume. Combining the two above observables is to estimate synchrotron luminosity related to internal energy, magnetic field, and jet pressure in jets.

I illustrate here comprehensive picture of jet evolution over 10^1 – $10^9 R_s$ on the basis of the three nearby AGNs (NGC 4261, NGC 1052, and Cygnus A) that were investigated by the present study in addition to M87 and NGC 6251 that were reported by the previous studies by the other authors.

Transitions from parabolic to conical streamlines of jets were found in all the four FR I. This discovery suggests that the jet acceleration mechanism by collimation plays a universal role in FR I AGNs. However, note that the transition in the NGC 4261 jet was found at $\sim 10^4 R_s$, which does not coincide with the Bondi radius, unlike the cases of M87 and NGC 6251. To establish the theoretical picture for magnetized jets collimated by external pressure, the radial profile of pressure distribution in the core region of host galaxy should be estimated more precisely on the basis of higher angular resolutions in X-rays.

One FR-II AGN was included in the sample, and showed a unique property in the jet width profile. No transition was found throughout the radial distances ranging from $\sim 10^3$ to $10^9 R_s$. A parabolic shape maintains up to this large scale. It is noteworthy that an apparent discontinuity in jet width, showing a jump roughly one order of magnitude. The location of the discontinuity coincides with the boundary of VLBI observational scale and VLA one. This surprising property can be explained by the combination of Doppler-debeaming effect and the limited sensitivities of telescopes in the framework of the multi-layered structure in a stratified jet scenario for this highly inclined AGN.

The framework of the stratified jet can also understand another discovery that the scale factor of jet width among AGNs is apparently correlated with inclination angle. Doppler-beaming/debeaming effect can explain well this phenomenon if the high-brightness inner layers are accelerated in streamlines and dominated by outer layer flows, which are slower and not so deboosted. Degree of this effect is primarily determined by viewing angle of jets. I consider it is a reason why the jet widths of NGC 4261, NGC 1052, and Cygnus A are globally wider than those of M87 and NGC 6251.

The present study additionally focused on counter jets by adding AGNs with two-sided jets to the sample for the first time. Almost perfect symmetry in terms of the radial profiles of jet width has been confirmed for all the two-sided AGN sample,

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

which consists of NGC 4261, NGC 1052, and Cygnus A. This property suggests a universal mechanism in which the collimation and expansion of the magnetized jet is globally regulated by the pressure profile in the host galaxies and intragalactic medium (the intragalactic medium is the hot, X-ray emitting gas that spreads through the space between galaxies). To verify the universality, a larger number of sample is required to investigate.

As a new attempt in this field of research, in this PhD thesis I estimated the development of physical parameters over a very wide range in the NGC 4261 jet. This estimation was made possible by combining the measurement of radiation profile with that of jet width profile. The radial profile of radiation along the jet shows two transitions at $\sim 10^6 R_s$ and $10^4 R_s$; the former one coincides with the transition found in the jet-width profile. Under the assumption of equipartition condition in synchrotron plasma, I showed the physical jet conditions in terms of synchrotron luminosity per unit volume (synchrotron emissivity), synchrotron luminosity per unit length, strength of magnetic field, jet pressure, and magnetic energy per unit length. I found that the magnetic energy in the jet was consumed through parabolic and conical streamlines (in which the magnetic energy is probably used for jet bulk acceleration); subsequently, the kinetic energy of the accelerated jet was converted again to the magnetic and particle energies (presumably by deceleration in the jet flow) at the kpc scale and dissipated as synchrotron radiation. The jet's magnetic pressure is eventually consistent with the ambient pressure of intragalactic medium at a large scale. The detailed investigation for the NGC 4261 jet provide us more comprehensive understanding of the physical evolution of jets throughout from the Schwarzschild scale to the intragalactic scale.

Through this research, two important findings have also been obtained as bi-products. From the measurement of jet-width radial profile in NGC 1052, interstellar broadening that is frequency-dependent effect due to radio scattering by ionized gas intervening our line of sight was discovered as the first example of a phenomenon associated with a supermassive black hole system other than the Galactic center Sgr A*. Moreover, an over-collimation on jets is found at the innermost region of NGC 1052. A relatively flat profile is reminiscent of that observed in the jet-width radial profile of very young radio galaxy 3C 84 (Nagai et al. 2014), although the measurement for 3C 84 was limited to the range of $\sim 10^4$ – $10^5 R_s$. The common property of NGC 1052 and 3C 84 as AGNs is that the nucleus is surrounded by the pc-scale plasma torus/disk causing strong free-free absorption. The over-collimations in NGC 1052 could be responsible for the ambient pressure gradient with a significantly shallower profile.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本論文は、AGN（活動的銀河核）ジェットの形状調査をシュバルツシルト半径（ R_s ）スケールから銀河スケールにわたってVLBI（超長基線電波干渉法）等による1.4~43 GHzの多周波高空間分解能観測によって得られた画像データを用いて、ジェットの形状計測・強度プロファイル計測からジェット生成機構やジェットのエネルギー収支について研究したものである。従来このような広い空間スケールにわたっての研究はM87とNGC6251の2例しかなかったところ、本研究でNGC4261、Cygnus A、NGC1052の3天体を加えたことで、ジェット形状の共通性・相違性について初めて議論が可能になった。以下に各章の記載事項と、重要な成果についてまとめる。

第一章（Introduction）では、AGNジェットの概要説明とそのメカニズムの理論的アプローチとして磁気駆動モデルを概説した上で、観測的に求められるジェット形状と外圧（理論予測）との関係、ジェットの加速・減速とジェット形状の関係について説明している。その上で本研究の目的が、①AGNジェットに共通な特徴は何かを抽出しその生成機構に迫ること、及び②ジェットのエネルギー収支：ジェットの形成から散逸までの全体像を理解すること、と述べている。最後に本研究で取り扱ったAGNの選び方として、両極ジェット（我々に近づいているアプローチジェット（AJ）と、遠ざかっているカウンタージェット（CJ））が連続的に見えており、且つジェット形状変化の空間スケールを含む広範なスケールのデータが得られるよう、できるだけ近傍かつブラックホール質量の大きいものとしたことを説明している。

第二章（NGC4261）、第三章（NGC1052）、及び第四章（Cygnus A）は対象としたAGNのVLBI観測データの処理画像から得られたジェット幅プロファイル及び放射プロファイル（NGC4261のみ）の解析結果を述べている。まずNGC4261については、AJとCJ両方のジェット幅プロファイルが対称な形であり、中心からの距離が $10^4 R_s$ 付近で放物形状から円錐形状に遷移している。また興味深いことにジェット軸方向の放射プロファイルも大体同じ場所（ $2 \times 10^4 R_s$ ）で距離についてのべき乗則に折れ曲がりがあることがわかった。さらに円錐形状領域中で中心から $\sim 3 \times 10^6 R_s$ 離れたところで、放射プロファイルが大きく性質を変えることも解った。次にNGC1052については、両極ジェットが対称で、 $10^4 R_s$ に於いてAJ/CJどちらも円柱形状（上流側）から円錐形状に遷移していることがわかった。さらにNGC1052については、Interstellar Broadening（星間プラズマによる電波散乱により画像解像度が波長の二乗で悪化する現象）が、系外銀河としては初めて発見されたことを報告し、ジェット上流側の円柱形状との関連性について触れている。最後にCygnus Aについては、本論文で扱う5サンプル中唯一のFR-II型（ジェットローブの外側端が輝いているパワフルなジェット）であるが、上流と下流で同じ放物形状であり左右のジェットは対称であった。これはパワフルなFR-IIジェットは途中で形状変化（減速）せず、遠方まで放物形状（加速領域）が広がっていると解釈される。ただし $\sim 10^6 R_s$ で、ジェット幅は6倍ジャンプしている（その解釈は第五章で述べられている）。

第五章（Discussion）では、第一章で述べた本研究の二つの目的の達成を目指した議論を展開している。①「AGNジェットに共通な特徴は何か」については、FR-I型4天体に共

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

通な事象として両極ジェットの左右の形状は対称であること、どれもジェットの途中で形状遷移（放物／円柱→円錐）していることが挙げられる。これはジェット加速領域における収束（外圧による絞り込み）がFR-I型では普遍的であることを示唆している。しかし興味深いことに、形状遷移を起こす場所は天体によって異なる。また、ジェットの物理的太さは天体によって異なるが、これは視線方向に対するジェットの傾斜角と良い相関がある。この観測的振る舞いは、ジェットが早い流れの内層と遅い流れの外層の二層構造をしており、傾斜角が小さいと相対論的ビーミング効果により細い内層が観測され、傾斜角が大きい場合は流れが遅く太い外層が主に観測されることで説明が可能である。さらに前述したFR-II型（Cygnus A）におけるジェット幅のジャンプは、この二層モデルとビーミング効果に加えて、観測装置の輝度感度の違いによって説明できることが示されている。一方②「ジェットのエネルギー収支：ジェットの形成から散逸までの全体像」については、ジェット幅プロファイルだけでなく放射輝度プロファイルを新たな手法として導入しNGC4261について議論している。円錐形状（減速）領域を放射輝度プロファイルが明確に異なる（中心から $\sim 10^6 R_s$ で遷移）二領域に分け、合計三領域について5つの物理パラメータ（ジェット圧・磁場エネルギー等）のプロファイルを導出し、それによりジェットの形成・散逸を含めたエネルギー収支を初めて観測的に示した。即ち相対論的プラズマにおけるエネルギー等分配の仮定の下で、磁場エネルギーはジェットの進行につれて運動エネルギーに転換していくが、ジェットの減速が進むと粒子エネルギーと磁場エネルギーに戻りシンクロトロン放射でエネルギーを失う、というようなエネルギー転換が起きている可能性を示した。

第六章（Conclusion）では以上の議論で得られた結論を簡潔にまとめている。第七章（Future prospects）では、本研究が当該分野に与えるインパクトと、将来への課題を述べている。前述のようにジェット幅と放射強度プロファイルの用いた研究手法を今後他天体に応用することでジェットの発展とエネルギー収支の普遍的な機構の理解が進むと期待される。この他、ジェット太さと傾斜角の関係、FR-II型におけるジェット幅プロファイルのジャンプ、系外銀河でのInterstellar Broadeningの発見等、当該分野へのインパクトが大きく将来の発展が期待される解析結果がいくつも提示されている。

このように、本研究は、 R_s スケールから銀河スケールにわたってVLBI等による画像からAGNジェットの形状を初めて多数の天体について調べ普遍的な特徴を抽出するとともに、幾つもの新しい発見を成し、今後のAGNの観測的研究に対して興味深い新たな知見を提供したものであり、その成果は高く評価される。

審査会においては、約1時間の公開講演、質疑応答、その後の審査委員全員との非公開質疑を通し、出願者が観測データの収集・データ解析・議論にいたるまで主体的に研究を進めたことが確認された。審査委員会は全員一致で本論文が博士論文に相応しい優れたものであることを認め、合格であると判断する。