

氏 名 羽賀 崇史

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1661 号

学位授与の日付 平成26年3月20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 Structure of the Central Engine in NGC 4261 Revealed by Core
Shift Measurements

論文審査委員 主 査 教授 松原 英雄
准教授 村田 泰宏
助 教 土居 明広
准教授 本間 希樹
教 授 海老澤 研 宇宙科学研究所

論文内容の要旨

論文題目 Structure of the Central Engine in NGC 4261
Revealed by Core Shift Measurements

The compact regions in some galaxies generate a huge amount of energy and a various characteristic activities from radio thorough gamma rays, which called active galactic nuclei (AGNs). It is widely believed that the powerful energy and activities originate from a release of gravity energy onto a super massive black hole (SMBH) from an accretion disk and this is a central engine of AGNs. The parts of energy and matter can eject in the form of jets, which have relativistic speed and emit non-thermal synchrotron. A central engine and jets are most essential components for understanding the phenomena of AGNs. However, there are some remaining problems on the black hole, the accretion disk and the jet, respectively. We do not know the position of the black hole with a sufficient accuracy, the form and the state of the accretion disk and the details of the jet mechanism such as the originating point and the form.

The main goal of this thesis is to determine the position of the black hole and to reveal the structure of the central engine and the jet mechanism. For this purpose, it is important to observe directly the location of generating the jet and the accreting the matter with the highest spatial resolution using very long baseline interferometry (VLBI). Additionally, I measure core positions with a high accuracy using multi-frequency astrometry observations and phase-referencing technique. A radio core represents the peak flux in VLBI images located at the base of jets. It appears different positions depending on frequencies, which is known as “core shift”, caused by absorption of the core emission. I select the best target source NGC 4261 for this research because it is nearby radio galaxy, has prominent two-sided jets and is a candidate of the accretion disk with sub-parsec scale.

I analyzed the core shifts to measure the core positions in both approaching and counter jet side to determine the position of the central engine in NGC 4261. The position of the core at infinity of frequency, which indicates the emission peak with no absorption, was separated by $82 \pm 16 \mu\text{as}$ from 43 GHz core position, corresponding to $310 \pm 60 R_s$ (Schwarzschild radius). Additionally, it is found that the core (innermost component) in counter jet side appeared to approach to the same position. I confirm for the first time that the position of the jet base is coincided with the black hole in NGC4261. Following this determination, I investigated the structure of the accretion disk relative to the position of the black hole. Spectral index maps obtained by phase referencing technique indicate that the emission of the counter jet is affected by free-free absorption (FFA). It is consistent with

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

the core shift profile on counter jet side because the core positions at 5–15 GHz cannot be explained for a simple synchrotron self-absorption (SSA) model. A possible solution is the SSA core shift with an additional disk-like absorber. The disk opacity profile at the counter jet side indicates the optical depth changes dramatically into optically thin at inner than the 22 GHz core position. I propose two-component structure; radiatively inefficient accretion flow (RIAF) at the inner region and a truncated disk in the outer region.

I also examined the form of the jet through the range from $10^3 - 10^9 R_s$ in NGC4261. Using Very Large Array (VLA) data in addition to VLBA data, I measured the jet width relative to the distance from the black hole. I found that the jet shape is maintained with almost conical ($W \propto r^a$, $a = 0.91 \pm 0.03$, where W and r are the jet radius and the distance from the black hole, respectively) from parsec scale to kilo-parsec scale in outer region. This is clearly distinct from another nearby radio galaxy, M87, whose shape of the jet transitions in the region of the Bondi radius; the upstream jet maintains a parabolic shape and the downstream jet is a conical shape. Comparison of the shapes between them indicates that the jet of NGC 4261 is less accelerated while that of M87 is extremely accelerated from the modest velocity to almost light speed.

博士論文の審査結果の要旨
Summary of the results of the doctoral thesis screening

論文題目 : Structure of the Central Engine in NGC 4261 Revealed by Core Shift Measurements

本論文は、比較的近傍に存在し、双方向にジェットを放出しているAGN（活動銀河核）を持つ電波銀河 NGC 4261に注目し、VLBI(超長基線電波干渉法)による1.4, 2.2, 5, 8, 15, 22, 43 GHzの多周波高空間分解能観測によって、AGNの中心エンジンであるブラックホール(BH)とその周辺にある降着円盤の構造を解明した。特に、プラズマガスによる吸収に注目し、BHの位置の同定、その周辺の円盤の構造等について、以下に述べるような重要な結果を得た。

第一章 (Introduction) では、現在のAGNの中心エンジンの研究における未解決問題として、BHの位置、降着円盤の状態・形状、さらにジェット発生メカニズム等があることを示した。さらに、低周波電波の吸収にはSSA(Synchrotron Self Absorption : シンクロトロン自己吸収)とFFA(Free-Free Absorption : 自由-自由吸収)があり、その周波数依存性の違いから、ジェットの根元の電波放射のピーク（電波コア）が、プラズマガスの吸収によって低周波ほどジェットの発生点から離れていくコアシフト現象について説明し、これらの問題に取り組んだ先行研究についてのレビューを行っている。さらに多周波数での観測で高精度の結果を得るためには、位置天文観測を取り入れて正確に各周波数の画像を重ね合わせることが重要であることを示した。また、この研究を進めるにあたって本博士論文で研究対象とする電波銀河NGC4261を紹介した。この天体には双方向のジェット（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)) が観測されており、また天体までの距離が近いことから、この研究に適していることを示した。

第二章では、電波銀河NGC4261についての電波干渉計観測について述べている。パーセクスケールの中心エンジンに近い領域の構造を得るための米国のVLBI観測装置であるVLBAを使って多周波数位置天文観測を行い、さらにキロパーセクスケールの大きなジェットの構造を得るためアメリカ国立電波天文台のVLA（超大型干渉型電波望遠鏡）のアーカイブデータを使った。これらの観測とデータ処理方法について説明している。さらに位置天文観測において得られた位置の誤差の見積もりについても、Appendix Bと合わせて記述している。

第三章では、各観測で得られたVLBIの各周波数での画像およびVLAの画像を最初に示し、観測品質の基本的なパラメータ（空間分解能、画像の雑音レベル等）について述べている。得られた画像を使って、AJ、CJそれぞれについてコアの位置の同定を行った。その結果、AJ側のコアシフトについては、SSAによって予想される周波数に対するべき乗則で良く説明でき、43GHzでのコア位置から 82 ± 16 マイクロ秒角上流側にジェットの発生点があることを示した。一方、CJ側のコアシフトについては、単純なSSAモデルや球対称の吸収物質によるFFAでは説明ができないことを示した。

さらにスペクトルインデックスのデータを示し、画像の重ね合わせによる誤差も見積もったうえで明らかにスペクトルインデックスがSSAで説明できる2.5を超える領域があることを示し、FFAによる吸収があることを示唆した。

また、ジェットの構造については、VLBAおよびVLAの画像からジェットの幅について

(Separate Form 3)

も測定を行い、ジェット幅がブラックホールからの距離の0.91乗のべきで良く説明できることを示し、ジェットの形状が5桁の空間スケールに渡ってほぼ円錐であることを示した。

第四章では、BHの位置を同定するためにCJ側のコアシフトの議論を行っている。5, 8, 15 GHzのコアシフトは、単純なSSAやFFAのモデルでは説明できないため、SSAモデルによるコアシフトに加えて、プラズマガスの円盤によるFFAが寄与するというモデルを立てた。一方CJの1.4, 2.2, 22, 43 GHzのコアシフトはAJと同じSSAに依るものと考えて説明ができる。その結果CJ側からもジェットの発生点を求めることができ、CJ, AJ両側から求めたジェットの発生点は誤差の範囲で一致することが示された。その結果NGC4261については、ジェットの発生点はBHの位置と僅かシュバルツシルト半径の60倍以下という非常に高い精度で一致することが示された。

次に、2.2~22 GHzについて、それぞれのコアの位置でスペクトル解析することにより、その光学的厚さを求めた。その結果、15GHz以下のコアでの光学的厚さについては、標準円盤モデルによるプラズマガスのFFAで説明できることがわかり、その吸収量から、円盤の温度構造、密度構造についても示すことに成功した。さらに、22 GHzでの吸収量は標準円盤モデルでは説明できず、別のモデルが必要であることを示した。論文では、その1つの可能性として、高温・低密度のRIAF (Radiative Inefficient Accretion Flow) ディスクで説明できることを示している。

さらに、ジェットの形状についてはその幅に注目し、視野の広いVLAによる観測と、今回のVLBI観測のデータを組み合わせ、シュバルツシルト半径の数百倍から数千万倍の約5桁のスケールに渡ってジェット幅の調査を行った。M87に於いて同様の先行研究が行われており、下流側と上流側でジェットの形状が変わっていることが示されたが、今回のNGC4261では、そのような形状の変化が観測されず、円錐形状に近いジェットであることが示された。このような研究は2例目であるが、M87と違う結果が出ていることは興味深い。

第五章では、それまでの結果、議論を受けて、今回NGC4261で得られた、中心エンジンとジェット描像についてまとめるとともに、今後の研究の方向性についても示唆を与えている。

このように、本研究は、VLBIによる位置天文観測を用いて、7つの周波数の画像を高精度に重ね合わせることに成功し、それによりプラズマガスの吸収に注目し、BHの位置を高精度で決定するとともに、その周辺の円盤構造についても従来の観測よりもより詳細にその構造を明らかにした。さらにジェットの形状についても、1例目のM87の結果とは異なる結果を示した。これらは、今後のAGNの観測的研究に対してより高精度の観測データと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、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。