

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月4日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17619

研究課題名(和文) ALMA偏波観測で明らかにする低光度活動銀河核のブラックホール降着流

研究課題名(英文) Probing Black Hole Accretion in Low Luminosity AGNs using ALMA Polarimetry

研究代表者

永井 洋 (Nagai, Hiroshi)

国立天文台・アルマプロジェクト・特任准教授

研究者番号：00455198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：低光度活動銀河核は近傍宇宙に最も多くの割合を占める活動銀河核である。放射非効率なブラックホール降着流を持つため、あまり明るく輝くことができないと理解されているが、その実態は観測的にあまりよくわかっていない。本研究では、アルマやVLBIを用いて、近傍宇宙を代表する2つの低光度活動銀河核を観測した。活動銀河核からの放射を背景光として、質量降着流によって起こるファラデー回転を測定し、質量降着流の状態を探った。どちらの天体でも、従来考えられてきた降着流だけでは説明が難しく、幾何学的に薄く密度の高い降着円盤との共存、あるいは極めて非一様な降着流の存在が示唆されることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブラックホールの重力エネルギーを起源として光り輝く活動銀河核は、天体毎の明るさに大きなばらつきが見られる。明るさのばらつきは、ブラックホール近傍における物質の降着の仕方に起因していると考えられる。我々の観測結果は、従来考えられてきた理論的な描像では説明が難しく、ブラックホールへ物質が落ちる過程は想像以上に複雑であることを示唆している。

先日、ブラックホールシャドウ撮影の成功が報告されたことにより、ますますブラックホールへの関心が高まりつつある。本科研費による研究成果ならびに今後の発展によって、ブラックホール周辺の物理についての理解がますます進むと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Low-luminosity AGNs (LLAGNs) constitutes the largest population of AGNs in the nearby Universe, and thus the physical origin of those activities is quite important for the understanding of black hole accretion and its relation with the galaxy evolution in the present day of Universe. The polarization angle of the emission from AGNs is rotated as a passage through the accretion flow, so-called Faraday rotation effect. The measurement of Faraday rotation is a key method to constrain the accretion flow properties. We conducted ALMA and VLBI observations on the two nearby low luminosity AGNs. We found that the measured Faraday rotation is not consistent with the radiatively inefficient accretion flow (RIAF) model, which is the most favored model to explain the low luminosity. Alternatively, we propose that both RIAF and standard accretion disk co-exist or the accretion flow is highly inhomogeneous for these sources.

研究分野：電波天文学

キーワード：活動銀河核 ブラックホール降着流 ALMA VLBI

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

活動銀河核は質量降着ガスを燃料として輝くセントラルエンジンで、その観測的特徴は多様性に富んでいる。多様性を生む根本的な原因を探ることは活動銀河核の統一モデルの構築において必須である。活動銀河核のうち H 輝線で測定された光度が  $10^{40}$  erg/s 以下の天体は低光度活動銀河核と分類される。低光度活動銀河核は近傍宇宙において大多数を占めることから、その性質の解明は活動銀河核全体の理解において必要不可欠である。これらの天体はクエーサーのような高光度の活動銀河核とは異なる降着状態にあると考えられ、放射非効率なために高温で幾何学的に厚い降着流を形成しているとされている。放射非効率な降着流の代表例は移流優勢降着流とよばれ、さらにいくつかのサブモデルに分類される。それぞれ降着率が異なると考えられているが、その実態はあまりよくわかっていない。降着率を観測的に決定し、モデルとの比較を行うことで、活動性の違いの原因に迫ることができる。

質量降着率の推定方法として、観測光度 ( $L$ ) が質量降着率 ( $\dot{m}$ ) に比例するという仮定のもとに算出する方法が一般的であるが、放射効率 ( $\eta$ ) に大きな不定性があるという問題点がある ( $\dot{m} \propto (\eta L)^{-1}$ )。一方で、ファラデー回転量度 (RM) を使って見積もる方法が提案されている ( $\dot{m} \propto RM^{-1.5}$ , Quataert & Gruzinov 2000)。ファラデー回転とは、偏波している電磁波がプラズマ中を伝播する仮定で偏波角が回転する現象である。活動銀河核の多くは電波帯でジェットによるシンクロトロン放射を伴い、シンクロトロン放射は高い偏波率を示す。したがってジェットを背景光として RM を測定することで質量降着率を決定することが可能である。実際にこの方法によって天の川銀河中心核 SgrA\* の質量降着率が見積もられた例がある (Bower et al. 2006)。その結果、移流優勢降着流 (放射非効率降着流のサブモデルの一つ) から予測される降着率よりも低いことがわかり、何らかの方法で質量を抜く過程 (例えばジェット) が示唆されている。

### 2. 研究の目的

RM の測定によって質量降着率を見積もった例は SgrA\* のみにとどまっていて、他の天体では例がない。本研究では ALMA を使った高精度サブミリ波偏波観測によってこの状況を打開し、近傍の低光度活動銀河核における降着率を決定する。そして、理論モデルとの比較を行い、降着流の実態を解明する。

ファーストステップとして代表的な近傍の低光度活動銀河核 Centaurus A に対象を絞り、サブミリ波偏波観測によって RM が測定できることを明らかにする。次に、より多くの天体に対象を広げ、低光度活動銀河核の RM 観測を系統的に実施し、これらの天体における質量降着率を明らかにする。

### 3. 研究の方法

RM の測定はなぜ SgrA\* だけにとどまっていたのか? SgrA\* からの放射は、センチ波帯の波長で偏波率が極めて低いのに対し ( $<0.1\%$ )、ミリ波サブミリ波帯では偏波率が高く ( $\sim 10\%$ ) なるということが明らかになっている (Bower et al. 2006)。この傾向はファラデー消偏波でうまく説明することができる。ブラックホール周辺では質量降着ガスが濃く、かつガスの密度や磁場が非一様であるため、RM の空間分布に揺らぎがある。これをある程度大きな分解能で観測すると、分解能よりも小さいスケールで偏波角が様々な向きをとるため、偏波がキャンセルされてしまうのだ。しかし、短波長になると消偏波の影響が弱くなるので (Burn 1966)、ミリ波サブミリ波で偏波が検出されると理解できる。

他の低光度活動銀河核においても、偏波検出ならびに RM 測定にはミリ波よりも短波長での観測が鍵となるが、これは技術的に難しく成功していなかった。そもそも、ミリ波サブミリ波で観測できる条件が整ったサイトは限定的で、望遠鏡の数はそれほど多くない。しかも高感度の観測が難しく、偏波観測にいたっては高精度の較正が難しいという問題があった。SgrA\* は他の低光度活動銀河核に比べて非常に明るいいため、このような困難がある中でもかろうじて偏波が検出できたのである。

2011 年から運用を開始した ALMA は、これらの問題を打破できる望遠鏡である。2013 年に観測募集が行われた第 3 回目の共同利用「Cycle 2」から偏波観測も可能となり、低光度活動銀河核の RM 測定を系統的に行うことができる時代がまさに到来した。我々は、近傍の低光度活動銀河核の代表である Centaurus-A を観測する提案を行い、観測提案は高い評価で採択された。

### 4. 研究成果

まず、我々は、ALMA の偏波観測の較正手法の確立と性能評価から取り掛かった。先に述べたように、ALMA はミリ波サブミリ波帯での高精度偏波観測を実現できるポテンシャルを持つ望遠鏡ではあるものの、具体的な較正手法や結果の妥当性については多くの研究要素が残されていた。ALMA サイエンスペリフィケーションのデータを用いて、 $0.1\%$  という高い

精度の偏波観測を実現できることを証明した (Nagai et al. 2016)。

続いて、ALMA で観測を行った Centaurus A のデータ解析を行った。予想に反して、偏波が検出されなかったものの、偏波率の下限値が 0.1% という非常に強い制限を得ることができた。偏波率が非常に低い理由が、質量降着流に起因したファラデー消偏波だとした場合の、予想される質量降着率と RM の関係を図 2 に示す。図中を斜めに走る 4 本の線は、理論的に予想される質量降着率と RM の関係を示している。グレーで塗った領域は、観測で得られた偏波率の下限値によって棄却された領域である。緑で囲った領域が、測定された偏波率の下限値から許される範囲である。一方、過去の X 線観測から測定された銀河中心核領域の温度をもとに、移流優勢円盤の場合の質量降着率を見積もると黄緑の横線が引ける。この図からわかるように、今回の観測から予想される質量降着率は、移流優勢円盤の場合よりも大きな値を取る。

移流優勢円盤から予想される質量降着率よりも大きくなった原因として、2つの可能性が考えられる。一つは、移流優勢円盤に加え、幾何学的に薄く密度の高い円盤 (標準降着円盤) が赤道面上に存在している可能性である。Centaurus A は、ジェットをほぼ真横から見込む天体で、標準降着円盤を真横から見込むと考えられる。そのため、単純な移流優勢円盤よりも柱密度が高い領域が視線上に存在するため、想定よりも大きな RM の値が観測されたと説明できる。もう一つの可能性は、降着流が非一様である可能性だ。移流優勢円盤は、球対称に近い降着流と考えられていて、一様なガス分布となることが想定されている。しかし、数値実験によると、降着流の中で対流が成長したり、アウトフローの影響によって降着流がかき乱される可能性が指摘されている。このような場合、降着流の密度の非一様性が生まれ、移流優勢円盤の場合よりも密度が高い領域が視線上に存在しうる。今回の観測では、どちらの可能性がもっとも正しいかは判別ができないが、少なくとも、単純な移流優勢円盤では説明ができないということが明らかになった。

上記の研究に加え、VLBI 観測によって、別の低光度活動銀河核 NGC 1275 の質量降着流の研究を行った。偏波観測による RM 測定に加え、ジェットからの放射が降着流によって吸収される現象に着目し、降着流の物理状態について迫った。その結果、NGC 1275 でも、Centaurus A と同様の結論を得た (Fujita & Nagai 2017; Nagai et al. 2017)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件) 以下代表的なものだけ記載。全リストは各年度の研究実施報告書に記載。

[1] Nagai, H.; Fujita, Y.; Nakamura, M.; Orienti, M.; Kino, M.; Asada, K.; Giovannini, G., 2017, "Enhanced Polarized Emission from the One-parsec-scale Hotspot of 3C 84 as a Result of the Interaction with the Clumpy Ambient Medium", *ApJ*, 849, 52, [10.3847/1538-4357/aa8e43](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8e43) (査読あり)

[2] Fujita, Y. & Nagai, H. 2017, "Discovery of a new subparsec counterjet in NGC 1275: the

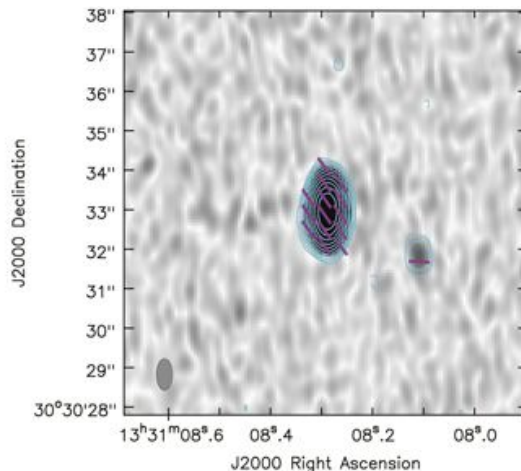


図 1: クエーサー 3C 286 の偏波画像。等高線は放射強度 (Stokes I)、グレーは偏波強度、ベクトルは偏波角を表す。偏波強度の画像 rms は、放射強度ピークの約 0.1% (3 )で、この波長帯では革新的な検出精度を実現した (Nagai et al. 2016)。

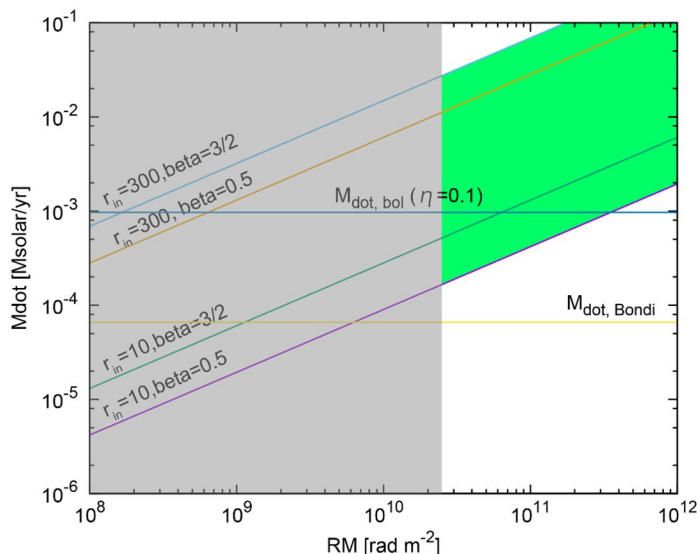


図 2: Centaurus A の質量降着率と RM の関係。

inclination angle and the environment”, MNRAS, 465, 94, [10.1093/mnras/slw217](https://doi.org/10.1093/mnras/slw217) (査読あり)

[3] [Nagai, H.](#); Nakanishi, K.; Paladino, R.; Hull, C. L. H.; Cortes, P.; Moellenbrock, G.; Fomalont, E.; Asada, K.; Hada, K., 2016, “ALMA Science Verification Data: Millimeter Continuum Polarimetry of the Bright Radio Quasar 3C 286”, ApJ, 824, 132, [10.3847/0004-637X/824/2/132](https://doi.org/10.3847/0004-637X/824/2/132) (査読あり)

〔学会発表〕(計 5 件)

[1] [Nagai, H.](#) et al. “What does ALMA tell us about extragalactic magnetic field?”, New Insights in Extragalactic Magnetic Fields, Focus Meeting 8 at the XXX IAU General 2018 (招待講演)(国際学会)

[2] [Nagai, H.](#), “ALMA Polarimetric Observations of Centaurus A”, Submm/mm/cm QUESO Workshop 2017: Centimetre-Sub-Millimetre Q&U (and V) European Southern Observatory Workshop (国際学会)

[3] [永井 洋](#), “ファラデー回転で探る NGC1275 の核周環境”, 2017 年日本天文学会秋季年会

[4] [Nagai, H.](#) “Accretion Flow Properties of NGC 1275”, Polarised Emission from Astrophysical Jets 2017 (国際学会)

[5] [永井 洋](#), “アルマ偏波観測で探る Centaurus A の質量降着流”, 2016 年日本天文学会秋季年会

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://alma-intweb.mtk.nao.ac.jp/~nagai/>

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし。

(2)研究協力者

研究協力者氏名：中西 康一郎、藤田 裕、浅田 圭一

ローマ字氏名：Kouichiro Nakanishi, Yutaka Fujita, Keiichi Asada

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。