

令和元年6月11日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05731

研究課題名(和文) 赤外干渉計で解き明かす銀河中心核構造とバイナリーブラックホールの存在

研究課題名(英文) Infrared interferometric approach on supermassive black holes and their binary structure

研究代表者

岸本 真 (KISHIMOTO, Makoto)

京都産業大学・理学部・准教授

研究者番号：00733354

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,500,000円

研究成果の概要(和文)：今世紀初頭頃から、様々な銀河の中心には太陽質量の百万倍から10億倍程度の巨大ブラックホールがほぼ普遍的に存在すると考えられるようになってきている。これらの一部は周りの星間空間からの多量の質量降着により明るく輝いている、あるいは輝いているフェーズにある。活動銀河核と呼ばれるこうした天体における質量降着・放出構造は、その母銀河の形成・進化と密接に関連していると思われるが、その物理過程は未だに十分理解されていない。本研究では、近赤外及び中間赤外での長基線干渉計を用いた観測によって中心部数光年を直接空間分解し、その構造の新たな描像の構築を進めることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

巨大ブラックホールを中心とする大質量降着構造の理解は、銀河の形成・進化、ひいては宇宙の構造形成の歴史の理解にとって大きな意味を持つ。これまで30年以上にわたって、巨大ブラックホールを取り巻く円盤状・赤道方向の構造が推測されてきたが、直接空間分解することで、10光年程度のスケールにおいては意外にも極方向のアウトフロー成分が卓越していることがわかってきた。また1光年程度のスケールにおいては、これまで推測されてきたとおり、円盤状の高速回転構造が直接見えてきた。これらは、活動銀河核の物理過程の理解を確実に進めるものである。

研究成果の概要(英文)：Over the last 20 years, there has been a growing consensus that the central region of almost every galaxy hosts a supermassive black hole of mass ranging from a million to billion solar masses. A subset of these black holes are accreting significant mass from the surrounding interstellar region, and thus emitting strong radiation. The mass accretion or ejection processes in these objects, called active galactic nuclei (AGN), are believed to have a close relationship with the host galaxy's formation and evolution. However, these processes and the AGN structure have not been well understood despite the long history of the studies. Here we have made significant effort on spatially resolving the structure using infrared long-baseline interferometry. The resolved structure shows unexpected, polar-elongated morphology at 10 light-year scales, and a long-sought, equatorial fast-rotating gas clouds at the inner 1 light-year scales.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：巨大ブラックホール系の構造 活動銀河中心核の物理 高空間分解能観測 光赤外干渉計

1. 研究開始当初の背景

今世紀に入ってから現在までに、様々な銀河の中心には太陽質量の百万倍から 10 億倍程度の巨大ブラックホールがほぼ普遍的に存在すると考えられるようになった。こうした巨大ブラックホールの形成過程及びその周辺での質量降着・放出過程は、銀河形成・進化過程と密接な関連を持つと推測されている。

巨大ブラックホールへ十分な質量が降着している場合 (A) ブラックホール周辺には高密度ガス円盤が形成されて紫外・可視光で明るく輝き (B) さらにその周りが比較的 low density の高速回転ガスで囲まれて強い輝線を放ち (広輝線領域領域 Broad-line region; BLR) (C) ダスト粒子が溶融せずに存在できる半径以内ではこうしたダスト粒子を含むガスがトーラス状の構造を形成して赤外光で強い熱的放射 (1500K~300K) を放つ、と考えられている。こうした銀河中心の巨大ブラックホール系は活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) と呼ばれる。こうした構造は様々な観測を矛盾なく説明するために推測されてきた。しかし、これらの中での物理過程や、回転円盤構造やトーラス構造が本当にあるのか、それらはどのようにして形成・維持されるのか、長年研究されてきたにも関わらず、未だによく理解されていない。

その根本的な原因は、空間分解能が絶対的に足りないことではないか。すなわち、こうした構造の最も外側にあると考えられる (C) のトーラス構造 (1 光年程度の大きさ) でさえ、近傍の活動銀河核でも内縁部の角サイズは 1 ミリ秒角を切り、可視・赤外域で現在最大の口径 10m 級望遠鏡の空間分解能の限界 (回折限界; 50 ミリ秒角程度) を持ってしても、空間分解して調べることができず、理論的推測を直接検証することができないのである。

2. 研究の目的

こうした状況を打開するのが、単一の望遠鏡ではなく複数の望遠鏡を同時に用いる「干渉計」の光赤外波長域での実現である。電波の分野では、長い波長のため単一望遠鏡の空間分解能が悪く、早い段階から干渉計が発展してきた。一方、光赤外域干渉計はまだ歴史が浅く、地球大気に強く影響を受けるため、他の銀河系内天体よりはるかに暗い系外の活動銀河核に適用するのは非常に難しい。我々の研究グループはこうした状況を打開すべく、活動銀河核の赤外干渉計観測を開拓してきた。本研究ではこれをさらに推進させ、より長い基線での観測を行ない、中心核構造を直接空間分解することで、その物理の包括的な理解をめざす。

3. 研究の方法

米国カリフォルニアにある CHARA 干渉計は、6 個の口径 1 m 望遠鏡で構成され、最高 330m の基線を持つ。赤外干渉計としてこの長基線は世界最大であり、世界最高の赤外線空間分解能を誇る。現在まで主に銀河系内天体の観測に用いられており、より暗い活動銀河核を安定的に観測するには至っていない。本研究では、(a) 高感度天体導入システムの構築、(b) 観測所における補償光学システムの構築と改良、(c) 高感度リアルタイムフリンジ検出ソフトウェアの開発を行なうことで、活動銀河核の安定的観測をめざす。

また、南米チリにある南ヨーロッパ天文台 (European Southern Observatory) の VLT (Very Large Telescope) 干渉計は、4 個の口径 8.2m 望遠鏡で構成され、最長 130m の基線を持つ。CHARA 干渉計よりも基線は短いものの、大口径望遠鏡の集光力を活かした高感度の観測が可能である。これを中間赤外の波長域で用いて 10 光年スケールの構造を探り、また近赤外の高波長分解能モードで用いて輝線領域の力学的構造を探る。

4. 研究成果

(1) CHARA 干渉計による観測

カリフォルニアの CHARA 干渉計による観測では、本科研費による観測に加えて、NOAO (National Optical Astronomy Observatory; アメリカ国立光学天文台) を通じた観測提案が複数回認められ、観測時間を多く獲得。3 年間で全 20 半夜の観測時間を得た。しかしながら悪天候や観測所の電源トラブル、装置不良などで多くの観測時間を失い (表 1 参照)、実際に観測できたのは 7 半夜強のみであった。現在までのところ、活動銀河核に対する数百メートル基線での近赤外干渉計観測の安定的成功には至っていない。

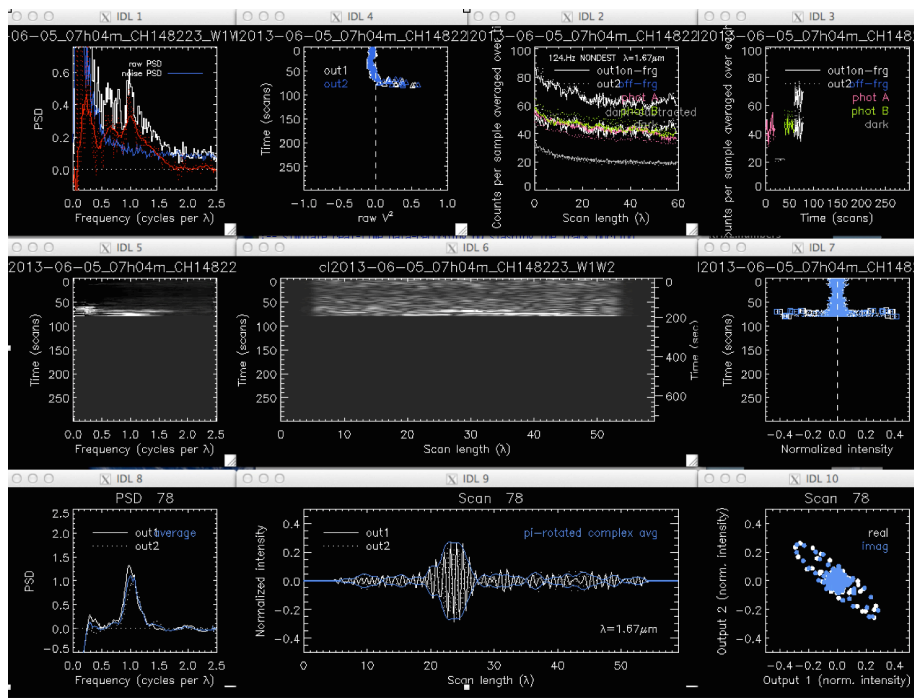


図 1: 開発したリアルタイムフリンジ検出ソフトウェアの実行画面．各フリンジスキャンの結果が連続的にリアルタイムで表示され，かつそのフーリエ変換の時間平均も表示される．その他のデータ診断図もリアルタイムで更新される．

年度	月	獲得 夜数	観測 可能率	観測 夜数
平成 28 (2016)	9 月	2 半夜	50%	1 半夜
平成 29 (2017)	5 月	2 半夜	10%	0.2 半夜
	9 月	3 半夜	5%	0.2 半夜
平成 30 (2018)	4 月	4 半夜	50%	2 半夜
	9 月	4 半夜	100%	4 半夜
	2 月	5 半夜	0%	
合計		20 半夜		7.4 半夜

表 1: CHARA における観測

(a) 一方で，高感度天体導入システム構築は 6 つの全望遠鏡について完了．ファインダーカメラと acquisition カメラを従来のビデオシステムから高感度 CCD システムにアップグレードした．これにより，より暗い天体の導入が確実に可能になった．活動銀河核の母銀河も 5 秒程度の積分で十分確認することができる．

(b) また，この新システム構築は予定通り観測所の補償光学システム構築と並行して行ってきた．この補償光学 (Adaptive Optics; AO) システムは，6 台の各望遠鏡において波面検出装置 (Wave Front Sensor; WFS) を用いてビーム中心位置補正 (tip-tilt correction) を行なえるようにし，かつ各望遠鏡からの光を干渉させるラボまでのビームをラボ内の可変鏡でコントロールするというものである．この AO Phase I システムのインストールと並行して，我々 AGN 観測チームが on-sky テストを繰り返しながらシステムを改良し，AGN 観測を実行してきた (これが表 1 の観測夜である)．2018 年 9 月の観測まででこの Phase I が実質的に完了．現在は，各望遠鏡においても可変鏡を用いて完全な closed-loop AO を行なう Phase II のインストールが進行中である．

我々のテスト観測によると，Phase I の状態でおそらく 2 等級ほどより暗い天体が観測できるようになったと思われ，最も明るい活動銀河核は好天候であれば観測可能になっているはずである．Phase II が完了すれば，さらにより暗い活動銀河核が観測可能になると思われる．

(c) こうしたシステムのインストールと並行して，リアルタイムフリンジ検出ソフトウェアの開発を

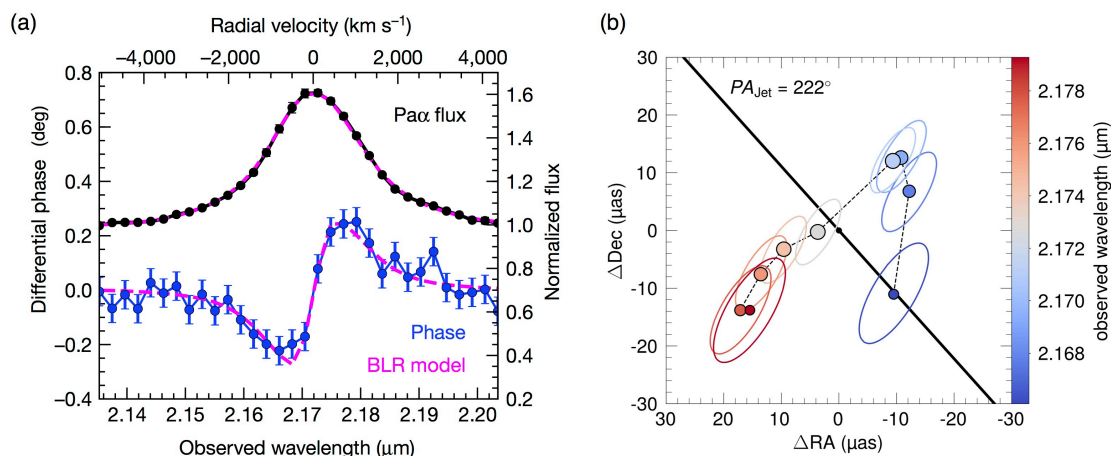


図 2: 近傍の非常に高光度の活動銀河核 3C273. (a) 水素の P α 輝線フラックススペクトルと位相スペクトル. (b) いくつかの基線 (baseline) で得た位相スペクトルから、画像中心位置を波長ごと決めて実質的に広輝線領域をマップした結果. GRAVITY Collaboration, Sturm et al. (2018) より.

行ない、数回の on-sky テストの後、運用を開始することができた (図 1). 複数のフリンジスキャンのフーリエ変換をリアルタイムで平均することができるので、感度の良いフリンジ検出が可能である. 今後の AGN 観測は常にこのソフトウェアを使用することになる.

(2) VLT 干渉計による観測

チリの VLT 干渉計による観測では大きな進展をさせることができた. まず、第 2 世代装置 GRAVITY が 2016 年に始動し、活動銀河核の国際共同研究グループの一員として観測研究に参画. 上述の巨大ブラックホール周りの構造のうち、いわゆる広輝線領域といわれる、ブラックホールの周りを高速回転する比較的低密度のガス領域の直接的探査を行なった. 従来からこの領域はブラックホールの質量の測定に用いられてきた. すなわち、この領域から発せられる輝線の幅から回転速度を測り、円盤状の回転を仮定してブラックホールの質量が見積もられてきた. 従って、この「円盤状の回転」を実際に空間的に分解して直接示すことが非常に重要な課題であった.

この領域の大きさは近傍の明るい活動銀河核でも 0.1 ミリ秒角を切ると予想される. 一方、VLT 干渉計の最大基線は 130m であるので、近赤外での空間分解能は数ミリ秒角、つまり 1 桁以上足りない. しかし、もしこの領域が全体として回転していれば、ドップラーシフトにより、輝線の redshift 側と blueshift 側の波長での画像にズレが出るはずで、干渉計ではこれは位相 (画像の重心位置の情報にあたる) が輝線の波長域でサインカーブを描くことを意味する. 我々のグループはこれを世界で初めて検出することに成功した (図 2 a). つまり実質的に広輝線領域の回転を直接分解したことになり、これは活動銀河核の分野での大きなブレイクスルーである. この結果は Nature 誌で出版することができた (GRAVITY Collaboration, Sturm et al. 2018).

一方で、中間赤外装置 MIDI を使った観測では、我々のグループは、上述の「トーラス」と呼ばれる構造が予想に反して極方向に伸びていることを示してきたが、これをさらに追認する結果を得ることができた (Leftley et al. 2018). この極方向の伸びは、おそらくトーラスが中心部を隠しかつ極方向へのアウトフローにもなっていることを意味するのではないかと考えている.

(3) トーラスアウトフローモデルの構築

こうした「超」高空間分解能データの解釈のためには、従来の全波長域スペクトルのモデリングに加えて、高解像度のモデル画像を疑似干渉計データに変換して観測と比較する必要がある. さらに、我々の新しい描像である上の「アウトフロー」の要素を加えた包括的なモデルが必要である. こうしたモデルを Hoenig & Kishimoto (2017) として出版した. 現在のところ、赤外干渉計データと可視/赤外スペクトルを同時に説明する唯一のモデルとなっている.

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 11 件)

- ① GRAVITY Collaboration, Sturm, Dexter, Pfuhl, Stock, Davies, Lutz, Clénet, Eckart, Eisenhauer, Genzel, Gratadour, Hönig, [Kishimoto](#), Lacour, Millour, Netzer, Perrin, Peterson, Petrucci, Rouan, Waisberg, Woillez, Amorim, Brandner, Förster-Schreiber, Garcia, Gillessen, Ott, Paumard, Perraut, Scheithauer, Straubmeier, Tacconi, Widmann, "Spatially resolved rotation of the broad-line region of a quasar at sub-parsec scale", *Nature*, 査読有, Vol.563, 2018, pp. 657-660, DOI: 10.1038/s41586-018-0731-9
- ② Hönig, Alonso-Herrero, Gandhi, [Kishimoto](#), Jörg-Uwe, Ramos Almeida, Surdej, Tristram, "New active galactic nuclei science cases with interferometry", *Experimental Astronomy*, 査読有, Vol.46, 2018, pp. 413-419, DOI: 10.1007/s10686-018-9612-3
- ③ Defrère, Aerts, [Kishimoto](#), Léna, "A recent history of science cases for optical interferometry", *Experimental Astronomy*, 査読有, Vol.46, 2018, pp. 389-399, DOI: 10.1007/s10686-018-9580-7
- ④ Lopez-Rodriguez, Antonucci, Chary, [Kishimoto](#), "The highly polarized dusty emission core of Cygnus A", *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol.861, 2018, L23, DOI: 10.3847/2041-8213/aacff5
- ⑤ Leftley, Tristram, Hönig, [Kishimoto](#), Asmus, Gandhi, "New evidence for the dusty wind model: Polar dust and a hot core in the Type-1 Seyfert ESO 323-G77", *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol.862, 2018, p.17, DOI: 10.3847/1538-4357/aac8e5
- ⑥ Hönig, [Kishimoto](#), "Dusty winds in active galactic nuclei: Reconciling observations with models", *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, Vol.838, 2017, L20, DOI: 10.3847/2041-8213/aa6838
- ⑦ Jensen, Hönig, Rakshit, Alonso-Herrero, Asmus, Gandhi, [Kishimoto](#), Smette, Tristram, "PAH features within few hundred parsecs of active galactic nuclei", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, Vol.470, 2017, pp. 3071-3094, DOI: 10.1093/mnras/stx1447
- ⑧ Garcia-Gonzalez, Alonso-Herrero, Hönig, Hernan-Caballero, Ramos Almeida, Levenson, Roche, Gonzalez-Martin, Packham, [Kishimoto](#), "A mid-infrared statistical investigation of clumpy torus model predictions", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, Vol.470, 2017, pp. 2578-2598, DOI: 10.1093/mnras/stx1361
- ⑨ Hönig, Watson, [Kishimoto](#) et al., "Cosmology with AGN dust time lags - Simulating the new VEILS survey", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, Vol.464, 2017, pp. 1693-1703, DOI: 10.1093/mnras/stw2484
- ⑩ Kreplin, Madlener, Chen, Weigelt, Kraus, Grinin, Tambovtseva, [Kishimoto](#), "Resolving the inner disk of UX Orionis", *Astronomy & Astrophysics*, 査読有, Vol.590, 2016, p.6, DOI: 10.1051/0004-6361
- ⑪ Burtscher, Hönig, Jaffe, [Kishimoto](#), Lopez-Gonzaga, Meisenheimer, Tristram, "Infrared interferometry and AGNs: Parsec-scale disks and dusty outflows", *Proceedings of SPIE*, 査読無, Vol.9907, 2016, 99070R14, DOI: 10.1117/12.2231077

〔学会発表〕(計 1 件)

発表者: 岸本 真、標題: The three dimensional distribution of AGN gas clouds at 1-100 pc scales、
年月日: 2018 年 12 月 10 日、場所: Puerto Varas (チリ)、国際会議名称: Torus 2018: The many
faces of the AGN obscuration

〔その他〕

米国 Astro2020 decadal survey のための Scicene White Paper: Kishimoto, "Exploring active su-
permassive black holes at 100 micro-arcsecond resolution", arXiv:1903.09356, 2019

6 . 研究組織

研究協力者

研究協力者氏名: テンブルメラー テオ
ローマ字氏名: (TEN BRUMMELAAR, Theo)

研究協力者氏名: ホーニヒ セバスティアン
ローマ字氏名: (HÖNIG, Sebastian)

研究協力者氏名: アントヌッチ ロバート
ローマ字氏名: (ANTONUCCI, Robert)

研究協力者氏名: ミロア フローレンタン
ローマ字氏名: (MILLOUR, Florentin)