

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 11 日現在

機関番号：34304

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26887044

研究課題名(和文) 超高空間分解能観測で明かす巨大ブラックホール近傍構造

研究課題名(英文) Revealing the vicinity of supermassive black holes with super high spatial resolution observations

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) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：様々な銀河の中心にほぼ普遍的に存在すると考えられる巨大ブラックホール。これを中心とした質量降着・放出構造は、おそらくその母銀河の形成・進化と密接に関連している。特に鍵となる中心部数光年あるいはそれ以下のスケールの構造は、これまで十分に空間分解されなかったために、本質的な理解が中々進んでこなかった。本研究は、この構造の探査を、近赤外及び中間赤外での長基線干渉計を用いた高空間分解能観測によって推進し、特に光度あるいはブラックホールへの質量降着率に対する、その構造の進化を明らかにするものである。

研究成果の概要(英文)：A supermassive black hole is now believed to reside at the center of each galaxy quite ubiquitously. Mass accretion and ejection processes around this central black hole is likely to be closely related to the formation and evolution of the host galaxy. However, our understanding of the key structure at a central spatial scale of a few light years has seen only a slow progress, probably due to the critical lack of spatial resolutions. We aim to vastly advance our knowledge on this central structure with super high spatial resolutions given by near- and mid-infrared interferometers, revealing in particular the luminosity evolution of the structure.

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

宇宙における質量降着・放出過程、特に様々な銀河中心にほぼ普遍的に存在すると考えられるようになった巨大ブラックホール近傍の物理過程の理解は、銀河形成・進化過程との密接な関連に伴って、近年ますます重要度を増しつつある。しかし、活動銀河核の周りにあると思われるダストトラス、広輝線領域、降着円盤そしてジェットへと続くガス降着・放出過程が、これほどまでに長年研究されながら未だに理解できない大きな原因は、空間分解能が絶対的に足りないことではないだろうか。

すなわち、電波ジェットなどの非熱的放射源ではなく、ガス降着・放出過程に直結した熱的放射源を未だに十分に空間分解できないのである。この場合の熱的放射源とは紫外・可視・赤外域にわたるものである。この波長域で現在の最大の口径 10m 級の望遠鏡を使い、かつ補償光学を用いて回折限界近くまで高空間分解能を達成したとしても、熱的放射源を分解するには、少なくとも 1 桁あるいはそれ以上分解能が足りない。

こうした状況を打開しつつあるのが、単一ではなく複数の望遠鏡を用いたいわゆる「干渉計」技術の光赤外域での展開である。2003-2004 年頃から 8-10m 級光赤外望遠鏡の干渉計で活動銀河核がなんとか観測できるようになり、2009 年頃からのケック近赤外干渉計での複数の活動銀河核の観測開始を含め、この分野は少しずつ発展してきた。

2. 研究の目的

本研究では、このような長基線赤外線干渉計による超高空間分解能観測を用い、今まで非熱的放射でしか到達できなかったミリ秒角 (近傍銀河で sub-pc、ダスト溶融半径 R_{sub} に迫る) スケールでの活動銀河核の探査を推進する。直接空間分解することにより、今まで得ることができなかった幾何学および物理的構造に対する強い制限を得て、巨大ブラックホール近傍の構造と物理過程の理解に迫る。

3. 研究の方法

南米チリにある南ヨーロッパ天文台の VLT (Very Large Telescope) 干渉計における中間赤外波長域装置 MIDI は、現在この波長域において世界で最も感度の高い装置である。この装置を用いて取られた膨大なデータの中で、自分で取得したデータも含めて 20 数個の明るい活動

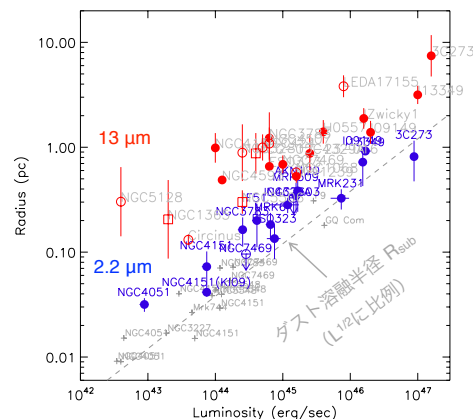


図 1: 明るい活動銀河核について、赤外干渉計で測った half-light radius、あるいはガウシアン半径を光度 luminosity に対してプロットしたものである。

銀河核のデータを均質に系統的に解析することで、中心核構造の光度依存性を明らかにする。

近赤外においては、同じく VLT 干渉計の近赤外装置 AMBER、および米国カリフォルニアにある CHARA 干渉計を用いて、中間赤外で見える領域よりさらに高温の、より中心核に近い領域の構造を探る。一方で、活動銀河核は可視光で比較較正星に比べて非常に暗いため、近赤外の干渉縞の visibility が、可視光側で動く補償光学装置のパフォーマンスに影響されることがわかってきているため、可視等級の異なる較正星の観測によってこの影響を定量化する。

4. 研究成果

(1) 光度進化

図 1 が 20 数個の明るい活動銀河核のデータを系統的に解析した結果である。すなわち、中心核から半径方向のダスト分布が、半径の巾乗に比例するとして、half-light radius $R_{1/2}$ を求めたものである。より具体的には、各観測波長での visibility が 0.5 になる基線長を、補間か外挿により見積もり、これを半径サイズに変換する。中間赤外データに対しては、いくつかの観測基線長データに対してこうして得られた $R_{1/2}$ の平均値とその標準偏差を求め、後者を error bar としてプロットしている。

ここで、灰色でプロットされているデータが、可視光の変動と近赤外光の変動の時間差から測られたダスト溶融半径であり、点線はこれらのデータに対する、光度 L の $1/2$ 乗でのフィットの結果である (Suganuma et al. 2006)。近赤外域 $2.2\mu\text{m}$ 干渉計で測られたサイズはこのダスト溶融半径の $1\sim 3$ 倍程度で、ダスト溶融半径

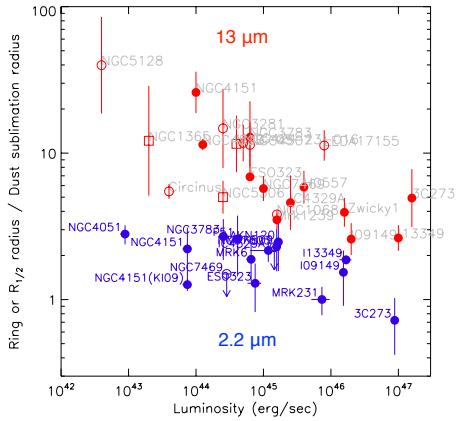


図 2: ダスト溶融半径単位でみた中心核サイズ

と同様にほぼ $L^{1/2}$ に比例して大きくなっている。ところが、中間赤外域 $13\mu\text{m}$ においては、 L とともに大きくなってはいるものの、 $1/2$ 乗ほど変化は速くない。

全く同じデータをダスト溶融半径で規格化したものが図 2 である。ダストは中心核からの紫外・可視光によって熱せられ、赤外域で熱輻射を放出することで温度が決まっていると考えられている。すると同じ温度のところの半径は $L^{1/2}$ に比例して大きくなっていくと考えられる。ダスト溶融半径が $L^{1/2}$ に比例するのは、つまり同じダスト溶融温度のところを見ているからであろう。従って、様々な活動銀河核の大きさをダスト溶融半径単位で見れば、同じ温度のダストの領域を直接比べることができ、 $L^{1/2}$ に単純に比例するスケールングを取り除くことができる。

すると、図 2 で明らかにわかるのは、高い光度側で外側の領域 (ダストが比較的低温の領域) がなくなってきていることである。これは、たった 6 個の活動銀河核で出された結果 (Kishimoto et al. 2011) を非常に確実にしたものであり、構造が光度進化をしているのはこれでほぼ確立されたのではないと思われる。今後、この物理的解釈の進展によって、構造の物理的理解が大きく進むと期待できる。

(2) 鉄輝線領域

以上の結果を出すにあたっては、ダスト溶融半径で規格化したサイズを見ていくことが鍵になっている。するとダスト溶融半径あるいはダスト溶融領域そのものの物理的性質や幾何学的構造を同時に探査していくことが非常に重要である。特に、活動銀河核では X 線において強い

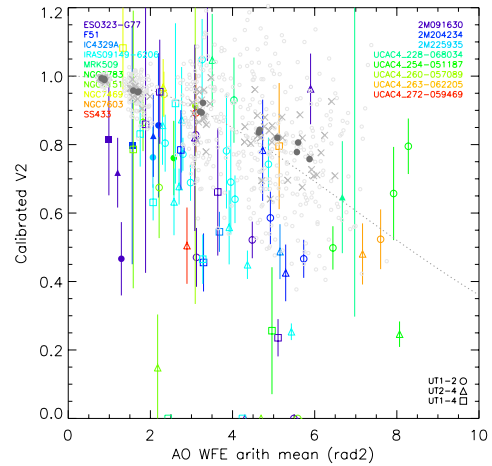


図 3: 波面の精度 (WFE) に対する visibility の減少を示したものの。観測シミュレーションの結果も示してある (灰色のデータポイント)。

鉄輝線 $K\alpha$ line が観測されるが、この輝線が出される領域とダスト溶融半径との関係は、これまでしばしば問題になってきた。これに対し、近赤外干渉計から得られたダスト溶融領域サイズを多く用いながら詳しく解析を行なうと、13 個の活動銀河核について、ダスト溶融半径がちょうど鉄輝線領域の外縁に位置しているという結果を得た (Gandhi et al. 2015)。これも今後ダストの幾何学的分布や中心領域の物理的理解を進める上での重要な制限であると考えられる。

(3) VLT 近赤外干渉計 AMBER による観測

2014 年 6 月、2015 年 3 月及び 2016 年 1 月に観測時間を得て観測を実行した。いずれも天候が良好でなく大気の状態がそれほど安定しなかったため、限られた量のデータのみを取得。近赤外干渉計観測において、かなり一般的に、補償光学装置が干渉縞観測データ (visibility) に与える影響を定量化する必要があり、観測時間の一部を使って、このための較正データを取得した。特に、活動銀河核と同様に赤い較正星のデータを確保することで、効果のより確実な定量化をねらった。図 3 はこれによって得られた結果を示す。すなわち、補償光学装置によって補正された波面の精度 (wave front error; WFE) の関数として、visibility がどのように減少するかを示している。これをさらに確立することで、較正が確実になるとと思われる。

(4) CHARA 近赤外干渉計による観測

2014 年 6 月、2015 年 6 月に観測時間を得て観測を実行したが、残念ながら天候が良好でなく、干渉縞は見えても安定しない。特に後者の時間では天候不良のため非常に限られた時

間しかドームを開けることができなかつた。しかしながら一定量の較正データを取得。上記の AMBER の場合と同様に、補償光学装置 (現在 CHARA では tip-tilt のみ) のパフォーマンスが visibility に与える影響を定量化する必要があり、このための較正データの蓄積を進めることができたと考える。また、CHARA 観測所に滞在して、データの解析ソフトウェアの開発をさらに進めることができた。今後の観測での利用とさらなる開発の基礎となると思われる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

- ① Gandhi, Hönig, Kishimoto, "The Dust Sublimation Radius as an Outer Envelope to the Bulk of the Narrow Fe K α Line Emission in Type 1 AGNs", The Astrophysical Journal, 査読有, Vol.812, 2015, 113 pp. 1-11, DOI: 10.1088/0004-637X/812/2/113
- ② Vazquez, Galianni, Richmond, Robinson, Axon, Horne, Almeyda, Fausnaugh, Peterson, Bottorff, Gallimore, Elitzur, Netzer, Storchi-Bergmann, Marconi, Capetti, Batcheldor, Buchanan, Stirpe, Kishimoto, Packham, Perez, Tadhunter, Upton, Estrada-Carpenter, "Spitzer Space Telescope Measurements of Dust Reverberation Lags in the Seyfert 1 Galaxy NGC 6418", The Astrophysical Journal, 査読有, Vol.801, 2014, 127 pp. 1-11, DOI: 10.1088/0004-637X/801/2/127
- ③ Hönig, Watson, Kishimoto, Hjorth, "A dust-parallax distance of 19 megaparsecs to the supermassive black hole in NGC4151", Nature, 査読有, Vol.515, 2014, pp. 528-530, DOI: 10.1038/nature13914

[学会発表](計 3 件)

- ① 発表者: 岸本 真、標題: The mid-/near-IR interferometry of AGNs: key results and their implications (招待講演)、年月日: 2015 年 9 月 14 日、場所: Winchester (英国)、国際会議名称: Torus 2015 – The unification after 30 years

- ② 発表者: 岸本 真、標題: Polarization from the inner regions of AGNs (招待レビュー講演)、年月日: 2015 年 5 月 11 日、場所: Strasbourg (フランス)、国際会議名称: Polarization and AGN II
- ③ 発表者: 岸本 真、標題: The innermost dusty region and the BLR: constraints from IR interferometry (招待講演)、年月日: 2014 年 9 月 13 日、場所: Austin (米国)、国際会議名称: The inner regions of quasars

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究協力者

HÖNIG, Sebastian (HÖNIG, Sebastian)
University of Southampton, UK

MILLOUR, Florentin
(MILLOUR, Florentin)
Observatoire de la Côte d Azur, France

TEN BRUMMELAAR, Theo
(TEN BRUMMELAAR, Theo)
CHARA Array, Georgia State University,
USA