

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540268

研究課題名(和文)活動銀河の環境と質量降着過程の研究

研究課題名(英文)Mass accretion process onto central engine of active galactic nuclei

研究代表者

亀野 誠二 (KAMENO, Seiji)

国立天文台・チリ観測所・教授

研究者番号：20270449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：活動銀河核のエネルギー源である、大質量ブラックホールへの降着物質の起源と角運動量輸送機構を調べる目的で、近傍の活動銀河を調査した。電波銀河Cen AでCO (J=2-1)輝線をALMA望遠鏡で観測した結果、銀河回転に沿う分子ガス円盤から中心20 pcへと落ち込むフィラメント状のガス流、および中心でブラックホールに束縛された恒星の運動に沿う特異な回転運動が見つかり、乱流粘性で中心へ流れたガスとそこで生成した恒星による力学的摩擦によって角運動量が輸送される機構が考えられる。その他に電波銀河でジェット放出に伴い変動する分子ガスメーザー輝線の発見、線放出するジェット成分の同定などの成果を挙げた。

研究成果の概要(英文)：Active Galactic Nuclei (AGNs) are powered by accretion matter onto Super Massive Black Hole (SMBH) in the galactic centers. To clarify the origin of accretion matter, physical condition, and angular momentum transfer mechanism, we observed molecular gas, dust, and plasma in 10-pc-scale vicinity of nearby AGNs. ALMA observations of CO (J=2-1) toward Cen A revealed (1) molecular gas disk that follows galactic rotation, (2) S-shaped filamentary gas stream toward 20-pc circumnuclear region, and (3) compact gas condensation which shows rapid rotation within 20 pc. Since the rotation is similar to SMBH-bound stellar velocity field, we consider that these stars are formed in the condensed molecular gas and its dynamical friction would work for angular momentum transfer. We also found variation of maser emission synchronized with jet eruption in NGC 1052, identified radio component of gamma-ray flare source in 3C 84, etc.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：活動銀河 ブラックホール 質量降着 電波天文学 光赤外線天文学 X線天文学

1. 研究開始当初の背景

(1) 活動銀河核は 10^{33-40} W (太陽光度の 10^{6-14} 倍) ものパワーを生成する宇宙最大規模のエンジンであり、そのエネルギー源は銀河中心の大質量ブラックホールに降着する物質の重力エネルギーと考えられている。活動銀河核に大質量ブラックホールが存在することは観測的な証拠が得られていたが、降着物質の起源や物質構成などについては定説がなく謎だった。降着物質はエネルギー源となる「燃料」であるとともに、ブラックホール成長を担う「材料」でもある。ブラックホール質量と質量降着率が活動銀河核の性質を決定する2大要因であり、質量降着過程を解明することは活動銀河核の形成と活動性のメカニズムを知る上で欠かせない。

(2) 銀河円盤から物質がブラックホールへ降着するためには、降着物質の角運動量を効果的に抜く必要がある。角運動量を抜くブレーキとしてはたらく作用は降着物質の種類によって異なり、恒星であれば力学的摩擦、ダストであれば中心核からの放射、分子雲であれば乱流粘性、プラズマであれば磁気粘性などの機構が考えられる。角運動量輸送のメカニズムを知るには、降着物質の物理状態を調べる必要がある。

(3) 降着物質の観測が難しいのは、空間分解能と感度を両立する観測装置が欠けていたからである。活動銀河核においては、中心から 1 pc (パーセク: 3.1×10^{16} m) を境に外側では銀河回転、内側ではブラックホールに束縛されたケプラー回転を示すことが知られていたため、1 pc の空間分解能で降着物質の分布や運動を調べる必要があった。このスケールは近傍の活動銀河である Cen A (距離 3.7 Mpc) において 0.02 秒角に相当し、既存の望遠鏡では分解できなかった。VLBI はこの分解能が得られるが、熱的放射を検出する感度が得られなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、活動銀河核の降着物質の分布と運動を調べて、降着物質の起源と角運動量輸送機構を解明することである。先行研究によって降着物質は中心から 0.1 - 10 pc のスケールで銀河円盤からブラックホールに束縛された運動に移行することが分かっている。このスケールを空間分解する ALMA 望遠鏡で分子ガスの分布と運動を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) ALMA 望遠鏡に活動銀河核の降着物質を解像する観測提案を行なう。提案が採択されなかった場合は科学試験観測 (SV) データ、あるいはアーカイブデータを用いる。

(2) VLBI を用いて活動銀河核から放出されるジェットと相互作用する分子ガスの様子を捉える。

(3) 単一電波望遠鏡によって分子ガスの基

線放射をモニター観測し、活動銀河核の活動性と分子ガス輝線との関係を調べる。

(4) 将来の高空間分解能観測が可能な計画を準備する。

4. 研究成果

(1) ALMA 望遠鏡による科学試験観測データのうち電波銀河 Centaurus A の CO (J=2-1) 輝線の観測結果を用いて、分解能 2 秒角の電波像を得た。この結果、4 kpc のスケールに広がる銀河回転に沿った運動を示す分子ガス円盤、中心 20 - 100 pc の領域で銀河回転から離れ中心に集中したガス、および両者をつなぐ S 字状のフィラメント構造が明らかになった (図 1)。このフィラメント構造は ALMA の高分解能・高ダイナミックレンジ像で初めて明らかになったものであり、銀河回転からブラックホールに落ち込むガス流を捉えたものと考えられる (図 2)。この成果は Radio Science 誌へ投稿 (Lee M. et al.) した。

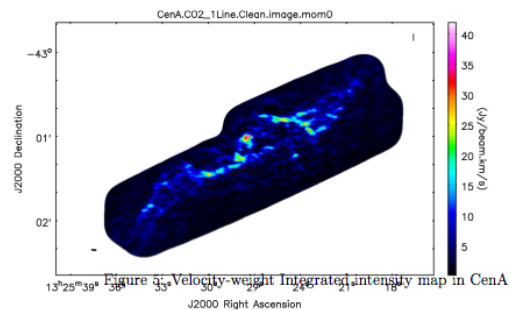


図 1: Cen A の CO 分子輝線強度分布

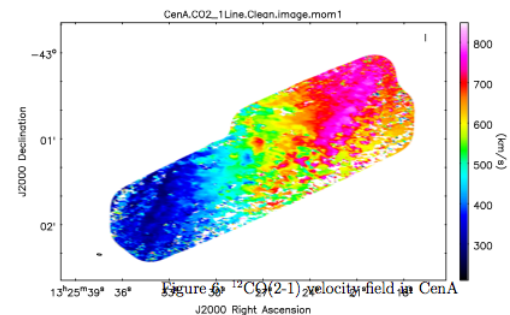


図 2: CO 分子輝線の色速度場。中心核付近がブラックホールに束縛された特異な回転運動を示している。

また、ALMA 望遠鏡に近傍の電波銀河 NGC 1052 の降着物質を探る観測提案行ない、Cycle-2 (2014 年 6 月より) に highest priority として採択された (2013. 1. 01225. S “Accretion matter onto the central engine of the nearby radio galaxy NGC 1052”)。

(2) 近傍の電波銀河 NGC 1052 において、歳差運動するジェットに伴って時間変動するメーザー輝線を発見した。メーザー放射する高密度分子ガスが赤方偏移していることから、中心核へ向かう降着流を捉えたと考えている。この成果についての論文を準備中である。

(3) 近傍の電波銀河 NGC 4261 において、高密度プラズマによってジェットのシンクロトロン放射が吸収 (free-free absorption) を受ける効果を利用して、中心核に束縛され集中した高密度プラズマの分布を得た。この成果は Haga et al. (2014) として *Astrophysical Journal* 誌に投稿中である。

(4) ALMA 望遠鏡の基線長を 300 km へ拡張して 1 ミリ秒角を切る VLBI 並の分解能と 200 K の輝度温度感度で中心核付近の降着物質を解像する ALMA 拡張アレイの提案を行なった。活動銀河核へのガス供給・ダスト供給・および恒星の流れも解明できる。本計画は日本学術会議の中期計画の候補に挙げられている。

(5) その他の成果：高エネルギー γ 線を放射する電波銀河 3C 84 において、電波ジェット成分の発生と同期しない γ 線フレアイベントを発見した (Nagai+2012)。低高度活動銀河核である NGC 4258 のミリ波帯スペクトルの時間変動を用いて、中心核エンジンに起因する放射成分と、微小ジェットによるシンクロトロン放射成分とを分離した (Doi+2011)。クエーサー 3C 380 の kpc スケールの衝撃波ノットを発見した (Koyama+2013)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

① “The core shift measurements for two-sided jets affected by Free-Free absorption using VLBA”, Haga, T., Doi, A., Murata, Y., Sudou, H., Kameno, S., Hada, K., Nagai, H. *European Physical Journal Web of Conferences*, Vol. 61, p. 8004 (2013), DOI:10.1051/epjconf/20136108004 [査読有](#)

② “Outflow Launching Mechanisms”, Ohsuga, K., Mineshige, S. *Space Science Reviews*, Vol. 88 (2013), DOI:10.1007/s11214-013-0017-3 [査読有](#)

③ “Development of 32-m Radio Telescopes for Monitoring Observations of Methanol Masers, H₂O Masers, and Radio Continuum”, Yonekura, Y., Saito, Y., Saito, T., Mori, T., Soon, K. L., Momose, M., Yokosawa, M., Ogawa, H., Fujisawa, K., Sugiyama, K., Motogi, K., Takaba, H., Sorai, K., Nakai, N., Kameno, S., Kobayashi, H., Kawaguchi, N., Hachisuka, K. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 476, p. 415 (2013)

④ “ALMA Extended Array”, Kameno, S., Nakai, N., Honma, M. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*,

Vol. 476, p. 409 (2013)

⑤ “Optimization by Smoothed Bandpass Calibration in Radio Spectroscopy”, Kameno, S., Yamaki, H., Mizuno, I., Beppu, H., Imai, H., Kuno, N., Akashi, T. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 476, p. 407 (2013)

⑥ “A New 45 GHz Band Receiver with Dual Polarization for NRO 45-m Telescope”, Tokuda, K., Kozu, M., Kimura, K., Muraoka, K., Maezawa, H., Onishi, T., Ogawa, H., Nakamura, F., Kuno, N., Takano, S., Iono, D., Kawabe, R., Kameno, S. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 476, p. 403 (2013)

⑦ “Jet Kinematics and Absorbing Matter in the Quasar 1413+135”, Lee, M., Hiwaki, H., Kameno, S. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 476, p. 291 (2013)

⑧ “The CCS 45 GHz Zeeman Project: Magnetic Field Measurements Towards Prestellar Cores”, Nakamura, F., Ogawa, H., Kameno, S., Kimura, K., Mizuno, I., Tokuda, K., Kozu, M., Tanaka, T., Iono, D., Takano, S., Dobashi, K., Matsumoto, T., Kuno, N., Kawabe, R., Onishi, T., Momose, M., Shinnaga, H., Yamamoto, S., Maezawa, H., Hirota, T. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 476, p. 239 (2013)

⑨ “VLBI Imagings of a Kilo-Parsec Knot in 3C 380”, Koyama, S., Kino, M., Nagai, H., Hada, K., Kameno, S., Kobayashi, H. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 65, p. 29 (2013), DOI:10.1093/pasj/65.2.29 [査読有](#)

⑩ “Nuclear Radio Jet from a Low-luminosity Active Galactic Nucleus in NGC 4258”, Doi, A., Kohno, K., Nakanishi, K., Kameno, S., Inoue, M., Hada, K., Sorai, K. *The Astrophysical Journal*, Vol. 765, p. 63 (2013), DOI:10.1088/0004-637X/765/1/63 [査読有](#)

⑪ “Optimization by Smoothed Bandpass Calibration in Radio Spectroscopy”, Yamaki, H., Kameno, S., Beppu, H., Mizuno, I., Imai, H. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 64, p. 118 (2012), DOI:10.1093/pasj/64.5.118 [査読有](#)

⑫ “VLBI and single-dish monitoring of 3C 84 for the period 2009–2011”, Nagai, H., Orienti, M., Kino, M., Suzuki, K., Giovannini, G., Doi, A., Asada, K., Giroletti, M., Kataoka, J., D’Ammando, F., Inoue, M., Lähteenäki, A., Tornikoski, M., León-Tavares, J., Kameno, S., Bach, U. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 423, L122 – L126 (2012), DOI:10.1111/j.1745-3933.2012.01269.x [査読有](#)

⑬ “A Candidate Active Galactic Nucleus with a Pure Soft Thermal X-Ray Spectrum”, Terashima, Y., Kamizasa, N., Awaki, H., Kubota, A., Ueda, Y. The Astrophysical Journal, Vol. 752, p. 154 (2012), DOI:10.1088/0004-637X/752/2/154 [査読有](#)

⑭ “ALMA reveals a chemically evolved submillimeter galaxy at $z = 4.76$ ”, Nagao, T., Maiolino, R., De Breuck, C., Caselli, P., Hatsukade, B., Saigo, K. Astronomy and Astrophysics, Vol. 542, L34 (2012), DOI:10.1051/0004-6361/201219518 [査読有](#)

⑮ “Exploring the Central Sub-parsec Region of the γ -Ray Bright Radio Galaxy 3C 84 with VLBA at 43 GHz in the Period of 2002–2008”, Suzuki, K., Nagai, H., Kino, M., Kataoka, J., Asada, K., Doi, A., Inoue, M., Orienti, M., Giovannini, G., Giroletti, M., Lähteenäki, A., Tornikoski, M., León-Tavares, J., Bach, U., Kameno, S., Kobayashi, H. The Astrophysical Journal, Vol. 746, 140 (2012), DOI:10.1088/0004-637X/746/2/140 [査読有](#)

⑯ “Millimeter Radio Continuum Emissions as the Activity of Supermassive Black Holes in Nearby Early-type Galaxies and Low-luminosity Active Galactic Nuclei”, Doi, A., Nakanishi, K., Nagai, H., Kohno, K., Kameno, S. The Astronomical Journal, Vol. 142, p. 167 (2011), DOI:10.1088/0004-6256/142/5/167 [査読有](#)

⑰ “Global Structure of Three Distinct Accretion Flows and Outflows around Black Holes from Two-dimensional Radiation-magnetohydrodynamic Simulations”, Ohsga, K., Mineshige, S. The Astrophysical Journal, Vol. 736, p. 2 (2011), DOI:10.1088/0004-637X/736/1/2 [査読有](#)

[学会発表] (計 11 件)

① 「ソフトウェア偏波分光計 PolariS の開発 III --- GPU を用いた分光処理」亀野誠二, 日

本天文学会 2013 年秋季年会 (東北大学, 宮城県)

② 「電波分光観測の効率化 IV --- 高感度スプリアス検出と抑圧」亀野誠二, 日本天文学会 2013 年秋季年会 (東北大学, 宮城県)

③ 「電波分光観測の効率化 III --- NR045m 鏡での検証とシステム変動の較正」亀野誠二, 日本天文学会 2012 年秋季年会 (大分大学, 大分県)

④ 「ソフトウェア分光計 PolariS の開発」亀野誠二, 日本天文学会 2012 年秋季年会 (大分大学, 大分県)

⑤ 「Optimization of Bandpass Calibration for Radio Spectroscopy」亀野誠二, East Asia VLBI Workshop 2012 年 (Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics, 台湾)

⑥ 「Digital Signal Processing for Accurate Calibration」亀野誠二, East Asia VLBI Workshop 2012 年 (Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics, 台湾)

⑦ 「ALMA 拡張アレイ」亀野誠二, 宇宙電波懇談会シンポジウム 2011 年 (大阪府立大学, 大阪府)

⑧ 「Optimization of Bandpass Calibration in Radio Spectroscopy」亀野誠二, ALMA EA Development Workshop 2011 年 (国立天文台, 東京都)

⑨ 「Statistics of Digital Signals for Accurate Amplitude Calibration」亀野誠二, ALMA EA Development Workshop 2011 年 (国立天文台, 東京都)

⑩ 「ALMA Extended Array」亀野誠二, ALMA EA Development Workshop 2011 年 (国立天文台, 東京都)

⑪ 「電波分光観測の効率化 II --- 平滑化窓とスキャンパラメーターの一般化」亀野誠二, 山本春霞, 日本天文学会 2011 年秋季年会 (鹿児島大学, 鹿児島県)

[その他]

ホームページ等

<http://milkyway.sci.kagoshima-u.ac.jp/~kamenogbt/>

<http://milkyway.sci.kagoshima-u.ac.jp/~kamenogpsurvey/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

亀野 誠二 (KAMENO, Seiji)

国立天文台・チリ観測所・教授
研究者番号：20270449

(2) 研究分担者
該当者なし

(3) 連携研究者

大須賀 健 (OHSUGA, Ken)
国立天文台・理論研究部・助教
研究者番号：90386508

寺島 雄一 (TERASHIMA, Yuichi)
愛媛大学大学院・理工学研究科・教授
研究者番号：20392813

長尾 透 (NAGAO, Toru)
愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授
研究者番号：00508450

須佐 元 (SUSA, Hajime)
甲南大学・理工学部・教授
研究者番号：00323262