

令和元年6月13日現在

機関番号：55401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17670

研究課題名（和文）多階層モデルによる超巨大ブラックホールと銀河核ガス円盤の共進化過程の解明

研究課題名（英文）Coevolution and Formation of Supermassive Black Hole and circumnuclear disk by Multi-scale Theoretical Model

研究代表者

川勝 望 (Kawakatsu, Nozomu)

呉工業高等専門学校・自然科学系分野・准教授

研究者番号：30450183

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的、50パーセクスケールの銀河核ガス円盤からのガス降着と、それにともなう輻射が与える影響を考慮した計算を実装し、“銀河核ガス円盤”とブラックホールを取り巻く“降着円盤”を相互に連結させた「多階層モデル」の構築を行うことである。結果として、近傍銀河の銀河核ガス円盤の物理状態と「多階層モデル」との比較から、降着率の高い銀河の銀河核円盤は幾何学的に厚く、降着率が低いほど幾何学的に薄くなるという理論予想を観測的に検証した。さらに、銀河核ガス円盤の幾何学構造がブラックホール質量、活動銀河核の光度、ガス円盤の密度に強く依存することが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近傍銀河中心の観測との比較により得られた結果は、銀河中心50パーセクスケールの銀河核ガス円盤の重力不安定性が、超巨大ブラックホールへのガス降着量を左右することを示唆するものである。また、本研究で明らかになった銀河核ガス円盤の幾何学構造のパラメータ依存性は、銀河中心領域の物理状態の理解に留まらず、超巨大ブラックホール形成史に関わる統計量（光度関数や質量関数など）の解釈にも大きな影響を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：To understand the evolution and formation of supermassive black holes (SMBHs), it is crucial to link mass accretion processes from a galactic scale with those from an accretion disk in the vicinity of a central BH. To this aim, we have constructed a novel evolutionary model of Active galactic nuclei (AGNs) and circumnuclear disk, considering the gas fueling from host galaxies. Comparing our model with nearby observations of Seyfert galaxies, we found that CNDs likely play an important role in fueling black holes, whereas  $> \text{kpc}$  scale gas does not. Moreover, we predict the obscured fraction of AGNs by taking account of the anisotropic radiation pressure from AGNs.

研究分野：理論天文学

キーワード：超巨大ブラックホール 銀河 共進化 星形成

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙の基本構造である「銀河」の中心には太陽質量の 100 万倍から 10 億倍もの超巨大ブラックホールが存在すると考えられている。しかし、この超巨大ブラックホールの形成過程については定説すらないのが現状である。超巨大ブラックホール形成の最大の困難は角運動量輸送問題にある。つまり、ブラックホール形成問題を解明するためには、銀河（10 キロパーセク）からブラックホールまで、106 ものダイナミックレンジにわたるガス降着過程を統合的に扱う必要がある。これまで、銀河スケールから 50 パーセクスケールまでのガス降着過程の研究は多数あるが、「最終的に何%のガスがブラックホールまで辿り着くのか」という本質的な問題は明らかになっていない。この問題を解決するには銀河からのガス供給により形成される 50 パーセクスケールの「銀河核ガス円盤」とブラックホールを取り巻く“降着円盤”を相互に連結させた「多階層モデル」の構築が重要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、以下で述べる 50 パーセクスケールの銀河核ガス円盤の物理状態とブラックホールまでのガス降着過程を統合的に結びつけることで、超巨大ブラックホール形成・進化に対する新しい知見を与える。具体的には、銀河核ガス円盤からのガス降着と、それにもなう輻射が与える影響を輻射輸送方程式を用いて調べる。これにより、次の点を明らかにする。(a) ブラックホール成長率と銀河核ガス円盤の物理状態との関係を調べることで、ブラックホールへのガス降着率を決定している主要因を制限する。(b) 「ブラックホール近傍からの膨大な輻射が本当にブラックホール成長を抑制する効果として働くのか、ブラックホール成長率と銀河核ガス円盤からのアウトフロー率の関係を系統的に調べることで明らかにする。(c) 銀河核ガス円盤の幾何学的構造とブラックホール成長率の関係を調べ、ブラックホールが急速に成長する段階の天体の特徴を予言する。

以上の理論予言と ALMA による銀河核ガス円盤の観測を詳細に比較することで、「何%のガスが最終的にブラックホールまで辿り着くのか」という本質的な問題を解き明かす。

## 3. 研究の方法

銀河核ガス円盤”とブラックホールを取り巻く“降着円盤”を相互に連結させた「多階層モデル」をもとに、“超巨大ブラックホールの形成・進化の物理”を解明するためには、理論モデルの構築だけでなく、理論予言と観測との詳細な比較が重要である。

### ○「多階層モデル」の構築

#### 【ステップ1】

まず、これまでに申請者らが構築した銀河核ガス円盤のモデルに対して、降着円盤および銀河核ガス円盤からの輻射を考慮することで、銀河核ガス円盤からブラックホールへのガス降着率を評価する。これにより、超巨大ブラックホール成長によって重要となるスーパーエディントン降着が実現可能な条件を調べる。

#### 【ステップ2】

次に、ブラックホール成長率と降着円盤からの輻射の非等方性との関係に注目した先行研究をもとに、輻射の非等方性が銀河核ガス円盤の物理状態に与える影響を調べ、ブラックホール成長率と銀河核ガス円盤からのアウトフロー率の関係を明らかにする。

#### 【ステップ3】

銀河核ガス円盤と降着円盤の間に存在するガスは、ブラックホールからの強い輻射にさらされるため、ダストを含むガスの一部は電離ガスや中性水素ガスに変化する。このようなガスの状態変化はガスのオパシティを変化させるために、ブラックホールへ降着するガスダイナミクスに大きな影響を与えることが予想される。この効果を定量的に調べるためには、3次元輻射輸送計算を行う必要があり、この分野の第一人者の和田氏（鹿児島大）と協力し、モデルの構築を行う。

これにより、降着円盤と銀河核ガス円盤とを物理的に接続する多階層モデルを構築する。

### ○観測との比較

研究協力者の泉氏（東大）と河野氏（東大）がアーカイブデータや ALMA で取得したデータを用いて、近傍の銀河中心 50 パーセクの銀河核ガス円盤を既に調べており、それらとの詳細な比較を行う。さらに、理論モデルの予言をもとに、泉氏と河野氏と協力して ALMA への観測提案を行い、統計的な議論ができるだけデータを取得する。これらのデータとモデルの比較により、ブラックホール成長率をコントロールする銀河核ガス円盤の物理状態を決定する。

【研究組織体制】研究代表者は、研究協力者（鹿児島大学の和田桂一氏、東京大学の河野孝太郎氏、泉拓磨氏）と密に連絡を取りながら、研究全体の進行を統括するとともに、主体的に計算と解析、議論、結果のとりまとめを行う。以下に、研究代表者と研究協力者の具役割を示す。

	氏名	所属	役割
研究代表者	川勝 望	呉工業高等専門学校 准教授	本研究の統括 ・銀河核ガス円盤と降着円盤を連結させた多階層モデル構築 ・降着円盤・銀河核ガス円盤からの放射の効果 ・観測提案への理論的観点のインプット
	和田桂一	鹿児島大学 大学院理工学研究科 物理・宇宙専攻 教授	・数値シミュレーションとモデルとの比較 ・放射輸送計算のコード提供
	河野孝太郎	東京大学 附属天文学教育研究センター 教授	・理論モデルへの観測的観点のインプット ・観測提案の立案
	泉拓磨	東京大学 博士課程 2年 天文学専攻	・理論モデルと比較する観測データの取得および解析 ・観測提案の立案

#### 4. 研究成果

(1) 近傍 Seyfert 銀河の中心部の高密度ガス円盤 (Circumnuclear disk = CND) を電波干渉計で観測した。50-500pc 程度の分解能のデータを、文献や各種アーカイブから集めて解析した。本研究では、典型的な高密度分子ガスのトレーサーである HCN(1-0) 輝線を用いた。ただし、現段階では CND を十分に空間分解するには至っていない。解析の結果、「CND の分子ガス質量 (HCN 輝線光度から推定) とブラックホール質量の比」と、「ブラックホールへの質量降着率 (AGN の X 線光度から推定)」の間に相関関係を見出した (図 1)。これは、Kawakatu & Wada 2008 モデルで想定されている、CND 内で発達した乱流 (超新星爆発等の星形成活動に起因) により分子ガスの角運動量が効率よく引き抜かれて降着するという描像と整合する結果である。一方で、同様な相関は、母銀河スケールの分子ガスにおいては全く見られなかった。これは、ブラックホールへの直接的質量供給源としての CND の重要性を示唆する結果である (Izumi, Kawakatu, Kohno 2016)。

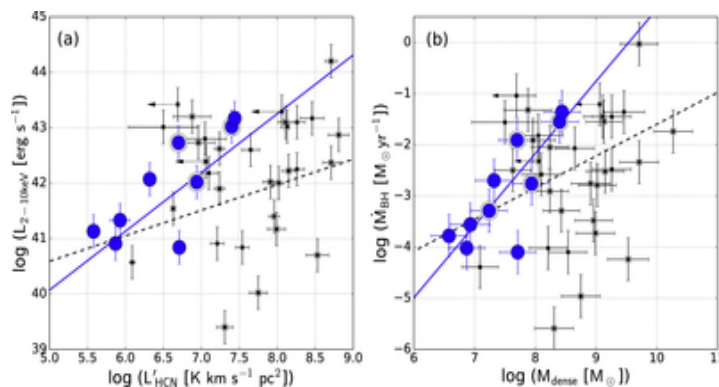


図 1 活動銀河核の活動性と銀河核ガス円盤の質量の関係

#### (2)

宇宙の基本構造である「銀河」の中心には太陽質量の 100 万倍から 10 億倍もの超巨大ブラックホール (SMBH) が存在すると考えられている。超巨大ブラックホール形成の最大の困難は角運動量輸送問題にある。これまで、銀河から 50 パーセクスケールまでのガス降着過程の研究は多数あるが、「最終的に何%のガスがブラックホールまで辿り着くのか」という本質的な問題は明らかになっていない。我々はこれまで 50pc 領域のガス円盤 (銀河核ガス円盤: CND) での超新星爆発による乱流粘性によって駆動されるガス降着モデル (超新星爆発駆動モデル) を提案してきた (Kawakatu & Wada 2008)。このモデルは、「活動銀河核 (AGN) 光度と CND スケールでの星形成率との関係」 (Esquej et al. 2014) や、近年の ALMA 観測で明らかになった「AGN の活動性と CND の高密度ガス質量との関係」を説明できる (Izumi, Kawakatu & Kohno 2016)。本研究では、この超新星爆発駆動モデルに AGN からの非等方放射が CND の物理状態に与える効果を考慮し、AGN 光度と CND の幾何学構造との関係を調べ、次のことが分かった。(1) 比較的軽い SMBH の場合 ( $M_{BH} < 10^8 M_{\odot}$ ) には、AGN 遮蔽率は、AGN 光度がエディントン光度の ~10% でピークに達し、その最大値は 0.6 程度であった。(2) 重い SMBH の場合 ( $M_{BH} > 10^8 M_{\odot}$ ) には、AGN 遮蔽率は常に  $< 0.2$  と非常に小さく、また AGN 光度にほとんど依存しなかった。(3) CND の面密度が高くなると、遮蔽率は小さくなり、遮蔽率が最大となるエディントン光度比は大きくなった。(4) この

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

モデルによると、エディントン光度比の非常に大きい/小さいAGNは幾何学的に薄いCNDとなり、多くは1型として観測されることが予想される(Kawakatu, Wada, Ichikawa in preparation)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

① Fujita, Yutaka; Kawakatu, Nozomu; Shlosman, Isaac, AGN jet power, formation of X-ray cavities, and FR I/II dichotomy in galaxy clusters, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 68, Issue 2, id.26 20 pp., 2016 (査読有)

DOI: 10.1093/pasj/psw012

② Izumi, Takuma; Kawakatu, Nozomu; Kohno, Kotaro, Do Circumnuclear Dense Gas Disks Drive Mass Accretion onto Supermassive Black Holes?, The Astrophysical Journal, Volume 827, Issue 1, article id. 81, 16 pp., 2016 (査読有)

DOI: 10.3847/0004-637X/827/1/81

③ Kino, M.; Ito, H.; Wajima, K.; Kawakatu, N.; Nagai, H.; Itoh, R., Fossil Shell in 3C 84 as TeV  $\gamma$ -Ray Emitter and Cosmic-Ray Accelerator, The Astrophysical Journal, Volume 843, Issue 2, article id. 82, 12 pp., 2017 (査読有) .

DOI: 10.3847/1538-4357/aa7336

④ Izumi, T.; Kohno, K.; Fathi, K.; Hatziminaoglou, E.; Davies, R. I.; Martín, S.; Matsushita, S.; Schinnerer, E.; Espada, D.; Aalto, S.; Onishi, K.; Turner, J. L.; Imanishi, M.; Nakanishi, K.; Meier, D. S.; Wada, K.; Kawakatu, N.; Nakajima, T., On the Disappearance of a Cold Molecular Torus around the Low-luminosity Active Galactic Nucleus of NGC 1097, The Astrophysical Journal Letters, Volume 845, Issue 1, article id. L5, 7 pp., 2017 (査読有)

DOI: 10.3847/2041-8213/aa808f

⑤ Ikeda, H.; Nagao, T.; Matsuoka, K.; Kawakatu, N.; Kajisawa, M.; Akiyama, M.; Miyaji, T.; Morokuma, T., An Optically Faint Quasar Survey at  $z \sim 5$  in the CFHTLS Wide Field: Estimates of the Black Hole Masses and Eddington Ratios, The Astrophysical Journal, Volume 846, Issue 1, article id. 57, 16 pp., 2017 (査読有)

DOI: 10.3847/1538-4357/aa83ae

⑥ Kino, M.; Wajima, K.; Kawakatu, N.; Nagai, H.; Orienti, M.; Giovannini, G.; Hada, K.; Niinuma, K.; Giroletti, M., The Astrophysical Journal, Volume 864, Issue 2, article id. 118, 9 pp., 2018 (査読有)

DOI: 10.3847/1538-4357/aad6e3

[学会発表] (計12件)

① 川勝望、和田桂一、Formation of flared dusty circumnuclear disk by AGN and starburst feedback, Hidden Monsters: Obscured AGNs and connections to galaxy evolution, 2016年8月8日~12日、ダートマス大学(米国)(国際会議)

② 川勝望、紀基樹、輪島清昭、和田桂一、長尾透(愛媛大)、パーセクスケール電波ローブの非対称性から探る3C84の中心核構造、日本天文学会2016秋季年会、愛媛大学、松山、2016年9月14日~16日

③ 輪島清昭、紀基樹、川勝望、GENJIプログラムメンバー、日韓共同ミリ波帯VLBI観測による3C84のサブパーセクスケール吸収円盤の発見、日本天文学会2016秋季年会、愛媛大学、松山、2016年9月14日~16日

④ 紀基樹、伊藤裕貴、輪島清昭、川勝望、M. Orienti、永井洋、伊藤亮介、電波銀河3C84のシェルにおけるガンマ線、宇宙線生成について、日本天文学会2016秋季年会、愛媛大学、松山、2016年9月14日~16日

⑤ 川勝望、超新星爆発駆動モデルによる活動銀河核の遮蔽構造、鹿児島大学理学部談話会、鹿児島大学、郡元、2017年8月24日(招待講演)

⑥ 川勝望、Obscuring dusty circumnuclear disk driven by starburst feedbacks、大阪大学理学部宇宙進化グループ談話会、大阪大学、豊中、2017年11月13日(招待講演)

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

⑦ 川勝望、和田桂一、超新星爆発駆動モデルによる活動銀河核の遮蔽構造、日本天文学会 2017 秋季年会、北海道大学、札幌、2017 年 9 月 12 日

⑧ 川勝望、AGN ジェットと SMBH 近傍の高密度ガス雲との関係 (Physical relationship between AGN jets and high density gas clouds near SMBHs)、鹿児島大学、郡元、2017 年 12 月 21 日 (招待講演)

⑨ 川勝望、南極 30m テラヘルツ望遠鏡で探る超巨大ブラックホールの成長過程、南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡計画 - 高赤方偏移銀河・AGN の観測 - 検討会、筑波大学、つくば、2018 年 3 月 27 日 (招待講演)

⑩ 川勝望、Direct evidence of a few to tens parsec torus in 3C84、IAU General Assembly 2018 FM#3 on Radio galaxies、オーストリア、ウィーン、2018 年

⑪ 川勝望、AGN-SB 関係と遮蔽構造、すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam と ALMA で挑むクエーサー研究、東京大学天文教育センター、三鷹、2018 年 10 月 9 日 (招待講演)

⑫ 川勝望、紀基樹、輪島清昭、新沼浩太郎、和田桂一、澤田-佐藤聡子、電波銀河 3C84 の中心 1 パーセクの遮蔽構造の非一様性、日本天文学会 2018 秋季年会、兵庫県立大学、姫路、2018 年 9 月 21 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号 (8 桁):

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 和田 桂一

ローマ字氏名: (Wada, Keiichi)

研究協力者氏名: 河野 孝太郎

ローマ字氏名: (Kohno, Kotaro)

研究協力者氏名: 泉 拓磨

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

ローマ字氏名：(Izumi, Takuma)

※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。