

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月25日現在

機関番号：12102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22840007

研究課題名（和文） 多階層連結モデルによる超巨大ブラックホール形成と進化の解明

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

研究代表者

川勝 望 (KAWAKATU NOZOMU)

筑波大学・数理物質系・助教

研究者番号：30450183

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、異なる空間スケールの現象を物理的に結び付けることで、銀河スケールからブラックホール近傍までの質量降着メカニズムを統一的に理解できる多階層連結モデルを構築し、超巨大ブラックホールの形成・進化を解明することである。結果として、超巨大ブラックホールが軽いほど、最終的に形成されるブラックホール質量はガス供給継続時間に強く依存し、活動銀河核の光度は間欠的になることが明らかになった。さらに、母銀河からのガス供給継続時間と超新星爆発由来の乱流粘性によるガス降着時間の大小関係が、超巨大ブラックホールと銀河のどちらが先に成長するのかという問題と密接に関係することが分かった。

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. As a result, we found that the final mass of SMBHs strongly depends on a period of mass supply from a host galaxy, and the AGN activity becomes intermit, as the mass of SMBH is smaller. Moreover, the evolution of SMBH-bulge mass ratio could be constant only if the timescale of BH growth is comparable to that of mass supply from hosts, assuming that the mass of galactic bulge is proportional to the mass supplied from galaxies. This would be linked to the cosmological evolution of SMBHs and galactic bulges.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,130,000	339,000	1,469,000
2011年度	1,030,000	309,000	1,339,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,160,000	648,000	2,808,000

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：理論天文学、超巨大ブラックホール・銀河・共進化

1. 研究開始当初の背景
超巨大ブラックホール (10^{6-9} 倍の太陽質量)

は、クェーサー（太陽系程度の領域から銀河の明るさ以上のエネルギーを放射する宇宙

で最も明るい天体)を代表とする銀河中心核のエネルギー源として考えられてきた。近年の高精度観測装置により、活動銀河核を持たない通常の銀河の中心領域にも超巨大ブラックホールの証拠が次々に見つかった。さらに、超巨大ブラックホール質量は銀河円盤の質量ではなく、銀河バルジ(円盤銀河の中心部で星が球状に分布している領域。楕円銀河の場合はそれ自体。)の質量に比例し、その0.1%程度になっていることが報告されている(以下、「超巨大ブラックホールと銀河バルジとの関係」と記す)。これは、超巨大ブラックホールの形成と銀河バルジの形成が物理的に関係していることを示唆している。一方で、超巨大ブラックホールが形成されるためには、コンパクトな領域に十分なガスを集めなくてはならない。そのスケールは銀河のスケールと比べて7桁も小さい。したがって、超巨大ブラックホールを作るためには、銀河内のガスから角運動量を十分に引き抜かなくてはならない。銀河スケールからの角運動量輸送機構として、円盤の回転速度差による摩擦粘性や棒状に分布した星の作る非軸対称重力ポテンシャルにおける重力トルクが考えられてきた。しかし、これらの物理過程は銀河の円盤成分のみで働くため、観測されている「巨大ブラックホールと銀河バルジとの関係」を説明するのは困難である。

2. 研究の目的

(1) 本研究代表者らの先行研究

研究代表者らは銀河バルジでの巨大ブラックホール形成を、球形状の系において効果的に働く輻射流体力学メカニズムにより説明するという新しい理論の提示を行った。角運動量輸送過程として、銀河内の星からの輻射により引き起こされる相対論的な「輻射抵抗」に注目した巨大ブラックホール形成シナリオが観測で示唆される密度に濃淡のある(clumpyな)ガス分布で効果的に働くかどうか3次元輻射輸送計算により調べた。その結果、輻射抵抗モデルは巨大ブラックホール質量と銀河バルジ質量との比例関係を自然に説明できること、そしてその比例係数は水素からヘリウムへの核融合エネルギー変換効率(=0.007)という物理定数で決まることを示した(Umemura 2001; Kawakatu and Umemura 2002)。さらに、巨大ブラックホール形成と銀河進化との物理的繋がりを解明するために、クエーサーなどの銀河中心核の形成・進化についても新しい理論モデルの構築を行った。銀河内の星の進化を取り入れ、銀河進化と輻射抵抗による超巨大ブラックホール成長過程を物理的に結びつけた「共進化モデル」を構築し、これによって新たなクエーサー形成のシナリオを提唱した。その結果、母銀河が中心核よりも明るく、ブラック

ホール成長段階にある「原始クエーサー」状態の存在を予言し、中心核の明るいクエーサー状態へは約 10^8 年で進化することが分かった。また、原始クエーサー段階でのブラックホールとバルジとの質量比が近傍銀河での値(~ 0.001)と比べてかなり小さいことを予言した(Kawakatu et al. 2003)。ここで、原始クエーサーは降着率が非常に高い「スーパーエディントン降着天体¹」であると予想されるが、何を観測すればスーパーエディントン降着天体であると言えるか明らかでなかった。それに加えて、銀河スケール(\sim キロパーセク)で有効に働く質量降着過程(輻射抵抗や銀河合体による重力トルク等)のみでは銀河内のガスの角運動量を全て取り除くことはできないために、角運動量を失ったガスは直接ブラックホールへ落ち込まず、角運動量バリアで決まる半径(~ 100 パーセク)のガス円盤が形成されると考えられる。このような銀河核ガス円盤からブラックホールへのガス供給過程が、ブラックホールの成長や、活動銀河核の再帰性と密接に関わっている可能性が高い。

(2) 本研究課題の目的

これまでの多くの研究では、銀河スケールでの角運動量輸送過程に注目しつつも、銀河中心へ掃き集められたガスの辿る運命については、ほとんど明らかにされていなかった。近年、100パーセクの銀河核ガス円盤での自己重力や超新星爆発によるエネルギー供給を考慮した3次元数値シミュレーションにより、ガス円盤の力学構造が詳細に調べられてきた。その結果、超新星爆発起源の乱流粘性によって数パーセクまでガスを落とせることが示された(Wada and Norman 2002)。

そこで、銀河中心で起こる爆発現象による角運動量輸送過程を考慮することで、銀河スケールからブラックホール近傍までの質量降着過程を統一的に理解できる理論モデルを構築することを計画した。研究期間内に、この理論モデルを用いて、(1) 銀河からのガス供給過程の多様性(ガス供給率やガス供給継続時間)と超巨大ブラックホール成長との関係や、(2) 活動銀河核の再帰性について明らかにする。それに加えて、(3) 降着率の非常に高い降着円盤からの放射特性に注目し、急速に成長する超巨大ブラックホール天体探査の新しい方法を提示することである。

¹ 重力と輻射力のバランスで決まる降着率の上限(エディントン限界)を超える降着率を示す天体のこと。最近のシミュレーションにより、スーパーエディントン降着が実現することが示されている(Ohsuga et al. 2009)。

3. 研究の方法

銀河スケールからブラックホール近傍までのガス降着過程を扱うために、本研究では、超新星爆発による乱流粘性由来の角運動量輸送に注目し、銀河からのガス供給とそれに連動するガス円盤の状態変化を考慮した「超巨大ブラックホールと銀河核ガス円盤の進化モデル」を構築した。この2つの異なる階層を連結することにより、数キロパーセクから数パーセクまでのガス降着過程を初めて統一的に扱えるようになった。解くべき方程式は、(1) 静水圧平衡の式(乱流運動による圧力勾配と円盤に垂直な方向の重力とのつり合いの式)、(2) エネルギー保存の式(乱流エネルギーの散逸と超新星爆発からのエネルギー供給とのつり合いの式)、(3) 乱流粘性による質量降着の式、である。ここで、質量降着率は「乱流粘性の大きさ」に比例し、乱流粘性の大きさは「乱流渦の大きさ(～円盤の厚み)」と「乱流速度」で与えられる。ブラックホール質量とガス円盤の密度が決まると、式(1)と式(2)から「乱流速度」と「円盤の厚み」が求まる。これらの結果と式(3)からブラックホールへの質量降着率を計算する。本研究では、質量降着率がガス円盤の重力安定性に依存するモデルを採用した。すなわち、円盤が重力的に不安定な場合には、質量降着率は超新星爆発による乱流粘性で決まり、それは重力的に安定なガス円盤の場合の値よりも桁で大きくなる。

4. 研究成果

(1) 銀河からのガス供給の多様性と超巨大ブラックホール成長の関係について

超巨大ブラックホールと銀河核ガス円盤の共進化モデル(Kawakatu and Wada 2008, 2009)をさらに発展させ、母銀河からのガス供給過程の多様性が、超巨大ブラックホール成長とどのように関係するかどうか調べた。その結果、超巨大ブラックホールが軽いほど、最終的に形成されるブラックホール質量はガス供給継続時間に強く依存し、さらに活動銀河核の光度は間欠的になることが明らかになった。さらに、母銀河からのガス供給継続時間とブラックホール成長時間(乱流粘性のガス降着時間)の大小関係が、超巨大ブラックホールと銀河のどちらが先に成長するのかという問題と密接に関係することが分かった。これは超巨大ブラックホールと銀河バルジの宇宙論的進化に対する新たな知見を与えるものである(Kawakatu and Wada 論文投稿準備中)。

(2) 活動銀河核の再帰性について

銀河中心が活動的になる条件は、銀河内のガス質量だけで決まるのであろうか? 前述したように、ブラックホールへのガス降着率

は銀河スケールのガスを如何にして落とすかで決まる。そのため、銀河スケールからのガス降着過程を考慮することが欠かせない。

そこで、本研究では、銀河中心のブラックホール質量と銀河から供給されるガス質量の比を変化させて、中心核光度がクエーサー級の明るさになる条件を調べた。その結果、質量比が1よりも十分小さくなると、銀河核ガス円盤が重力的に安定になるため、銀河中心は活動的にならないことが分かった。観測との比較に使われてきた従来のモデルでは、簡単のために、銀河内にガスが存在すれば、銀河中心核は活発になるとしていた。そのため、活動銀河核の数を過大評価していた可能性がある。本研究で得られた結果は、クエーサーを始めとする活動銀河核の光度関数などの時間進化を理論的予言する上で重要になるであろう(Kawakatu and Wada 論文投稿準備中)。

(3) 降着率の非常に高い活動銀河核の探査

一般に、ブラックホール近傍から出た輻射は中心核を取り囲むドーナツ状の遮蔽構造(トーラス)内縁のダストに吸収され、近赤外線で光ると考えられている。そこで、我々はスーパーエディントン降着天体から出る輻射の異方性を考慮し、「トーラス内縁からの近赤外線光度」と「降着円盤からの可視・紫外線光度」の関係調べた。その結果、エディントン限界以下の降着率を示す活動銀河核と比べて、「近赤外線光度と可視・紫外線光度の比」が極端に小さくなることが分かった。また、トーラスが幾何学的に薄いほど、この傾向はより強くなるという結果が得られた(Kawakatu and Ohsuga 2011)。

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5件)

① Motoki Kino, Nozomu Kawakatu and Fumio Takahara, Calorimetry of Jets: Testing Plasma Composition in Cygnus A, accepted for publication in Astrophysical Journal, 2012 (査読有)

URL: <http://ads.nao.ac.jp/abs/2012arXiv1204.3363K>

② Nozomu Kawakatu, Ken Ohsuga, New Method for Exploring Super-Eddington AGNs by Near-infrared Observations, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.417, No.4, 2562–2570, 2011 (査読有)

DOI:10.1111/j.1365-2966.2011.19422.x

③ Hirotake Ito, Motoki Kino, Nozomu Kawakatu and Shoichi Yamada, Evolution of Non-Thermal Emission from Shell Associated with AGN Jets, The Astrophysical Journal, Vol. 270, No.2, 120-131, 2011 (査読有)
DOI: [10.1088/0004-637X/730/2/120](https://doi.org/10.1088/0004-637X/730/2/120)

④ Masatoshi Imanishi, Kohei Ichikawa, Tomoe Takeuchi, Nozomu Kawakatu, Nagisa Oi and Keisuke Imase, Infrared 3-4 μ m Spectroscopy of Nearby PG QSOs and AGN-Nuclear Starburst Connections in High-luminosity AGN Populations, Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.63, No.SP2,447-456, 2011 (査読有)
URL:<http://ads.nao.ac.jp/abs/2011PASJ...63S.447I>

⑤ Hirotake Ito, Motoki Kino, Nozomu Kawakatu and Shoichi Yamada, International Journal of Modern Physics D, Vol.19, No.6, 893-899,2011 (査読なし)
DOI: [10.1142/S0218271810017111](https://doi.org/10.1142/S0218271810017111)

[学会発表] (計 18 件)

① 川勝望, 和田桂一「銀河からのガス供給過程の多様性と超巨大ブラックホール成長との関係」, 『日本天文学会春季年会』, 龍谷大学, 京都, 2012年3月20日

② 濟藤祐理子, 諸隈智貴, 峰崎岳夫, 川勝望, 川口俊宏, 長尾透, 松岡健太, 今西昌俊, 美濃和陽典, 大井渚, 今瀬佳介「Cosmological Evolution of SMBH mass-Bulge mass Relation investigated by SDSS QSOs at $z \sim 3$ 」, 『日本天文学会春季年会』, 龍谷大学, 京都, 2012年3月20日

③ 土居明広, 柳楽央至, 川勝望, 紀基樹, 永井洋, 浅田桂一「狭輝線セイファート1型銀河の電波銀河の発見」, 『日本天文学会春季年会』, 龍谷大学, 京都, 2012年3月20日

④ 川勝望 「Coevolution Model of SMBHs and Nuclear Starbursts」, 『Colloquium of Astronomy Program at SNU』, SNU, Seoul, Korea, 2012年3月8日

⑤ 川勝望 「AGN Outflow/Inflow with SKA」, 『Workshop on East-Asian Collaboration for SKA』, KASI, Daejeon, Korea 2011年12月2日 (招待講演)

⑥ 伊藤裕貴, 紀基樹, 川勝望 「Emission from Shells Associated with Dying Radio Sources」, 『Workshop on East-Asian

Collaboration for SKA』, KASI, Daejeon, Korea 2012年12月2日

⑦ 川勝望 「超巨大ブラックホール進化モデルの現状と今後の課題」, 『HSC 活動銀河核探査によるサイエンス』, 京都大学, 京都, 2011年11月16日

⑧ 川勝望, 紀基樹 「LOFAR/SKA で探る活動銀河核ジェットからの熱的シンクロトロン放射」, 『日本天文学会秋季年会』, 鹿児島大学, 鹿児島, 2011年9月22日

⑨ 紀基樹, 伊藤裕貴, 川勝望, モニカ・オリエンティ 「電波ダークなミニAGNシェル: 新しいTeVガンマ線源の可能性」, 『日本天文学会秋季年会』, 鹿児島大学, 鹿児島, 2011年9月22日

⑩ 伊藤裕貴, 紀基樹, 川勝望 「死んだ電波ロープを取り囲むシェルからの非熱的放射」, 『日本天文学会秋季年会』, 鹿児島大学, 鹿児島, 2011年9月22日

⑪ 川勝望, 和田桂一 「Growth of supermassive BHs and mass supply processes from galaxies」, 『Starburst-AGN Connection under the Multiwavelength Linelight』, ESAC, Madrid, Spain 2011年9月14日

⑫ 川勝望, 白川友紀, 本多正尚, 戸田さゆり 「筑波大学「理数学生応援プロジェクト」と大学での科学教育」, 『日本科学教育学会』, 東京工業大学, 横浜, 2011年8月25日 (招待講演)

⑬ 川勝望, 「ガス降着による超巨大ブラックホール形成理論の現状と今後の課題」, 『日本天文学会春季年会予稿集』, 筑波大学, つくば, 2011年3月18日 (招待講演)

⑭ 川勝望, 平下博之, 梅村雅之 「Blue Compact 矮小銀河中心の巨大ブラックホール探査」, 『ALMA-Subaru Workshop 2010 (宇宙・銀河・星・惑星・生命の誕生)』, 国立天文台, 三鷹, 2010年10月1日

⑮ 川勝望, 白川友紀, 本多正尚, 戸田さゆり 「筑波大学「理数学生応援プロジェクト」における最先端研究体験企画」, 『日本天文学会秋季年会』, 金沢大学, 金沢, 2010年9月22日

⑯ 川勝望 「ALMA-AGN サイエンス」, 『ALMA-近傍AGN観測検討会』, 国立天文台, 三鷹, 2010年8月23日 (招待講演)

⑰川勝望 「銀河中心に潜む超巨大ブラックホール形成はどこまで分かったのか?」, 『第40回天文天体物理若手夏の学校』, ホテル日航豊橋, 豊橋, 2010年8月2日 (招待講演)

⑱川勝望, 和田桂一 「What determines AGN activity?: Important of circumnuclear disk」, 『Central Massive Objects: The Stellar Nuclei-Black Hole Connection』, ESO, Munich, Germany 2010年6月24日

[その他]

①ホームページ等

<http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/Astro/Members/kawakatu/>

②アウトリーチ活動

・一般・ウィークエンド・カフェ・デ・サイエンス (WEcafe) 2012年2月29日
第24回「ブラックホールカフェ」にて講演

・大学説明会・模擬授業: 千葉県立佐倉高校筑波大学で行っている理工農系のユニークな取組の紹介、「超巨大ブラックホール形成の謎」という題目で模擬授業を行った。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川勝 望 (KAWAKATU NOZOMU)

筑波大学・数理物質系・助教

研究者番号: 30450183