

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：16301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2022

課題番号：20K22360

研究課題名（和文）AGN空間統計量を駆使した超巨大ブラックホールガス降着過程の解明

研究課題名（英文）Study of the gas accretion processes onto the supermassive black holes through the spatial statistics of AGN

研究代表者

大木 平 (Oogi, Taira)

愛媛大学・宇宙進化研究センター・研究員

研究者番号：90792078

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：銀河中心に普遍的に存在する超巨大ブラックホールへのガス降着過程と、その際に重力エネルギーを解放して光り輝く天体である活動銀河核 (AGN) の放射過程が、AGN の統計的性質にどのような影響を与えるのかを明らかにした。このために、スーパーコンピュータを用いた大規模N体シミュレーションをベースにした準解析的銀河・AGN形成モデルを構築した。世界トップレベルの精度でAGNの空間相関を高い精度で理論予測し、我々のモデルが観測結果とよく整合することが分かった。さらに、次世代天文衛星によるAGN探査に向けた理論予測を行い、探査によって超巨大ブラックホール形成の理論モデルを制限できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

なぜ超巨大ブラックホールが銀河中心に普遍的に存在するのか、また超巨大ブラックホールの形成と銀河の進化との関わりはよく分かっておらず、天文学における重要なテーマの一つである。本研究では、超巨大ブラックホールと銀河の進化を包括的に説明することで、超巨大ブラックホールに対して新たな知見を与えた。また、本研究によって得られた我々のモデル銀河・活動銀河核カタログ Uchuu-2GC を、誰にでもアクセス可能な状態で web上に公開した。これは、他に類を見ない広い計算領域を扱うモデルカタログである。このように、研究成果を研究コミュニティに還元している。

研究成果の概要（英文）：Supermassive black holes (SMBHs) reside in the nuclei of most galaxies. And SMBH use the gravitational energy of the gas to shine as active galactic nuclei (AGN). We have investigated how the gas accretion processes on to SMBHs affect the statistical properties of AGN. We have constructed a semi-analytical model of galaxy and AGN formation based on the state-of-the-art cosmological N-body simulations. We have predicted the spatial correlation functions of AGN with sufficient accuracy, and the results are in agreement with current observations. We have also predicted the number of AGN expected to be detected by future AGN surveys with new astronomical satellites, and have clarified the possibility of constraining theoretical SMBH and galaxy formation models with the surveys.

研究分野：天文学

キーワード：超巨大ブラックホール 活動銀河核 銀河形成 銀河進化 宇宙の大構造

1. 研究開始当初の背景

- (1) 申請者等は、宇宙論的構造形成のもとで銀河と活動銀河核 (Active Galactic Nuclei, AGN) の形成・進化を解く、準解析的モデル $\nu^2\text{GC}$ を構築し、小スケールの物理である AGN の放射過程と大スケールの統計量である AGN 空間相関との関係性を見出していた。さらに、同様に小スケールの物理である超巨大ブラックホール (Supermassive Black holes, SMBHs) へのガス降着過程と AGN 空間相関にも関係性を見出しつつあった。これまでの研究で得られた重要な結果を発展させ、AGN 空間相関を用いて、様々な SMBH へのガス降着モデル及び AGN 放射モデルにどれだけ制限が与えられるかを詳細に調べる必要があると考えた。また、観測データとの比較に向けて、モデル間の縮退、すなわち異なるモデルが観測される AGN 相関関数を同程度に説明できてしまう可能性を詳細に調べ上げることが重要である。
- (2) すばる望遠鏡による AGN 観測計画が進行中であり、また次世代天文衛星による観測も準備が進んでいた。この研究によって、SMBHs へのガス降着モデルに基づき AGN の空間統計が予言できれば、将来のサーベイ観測による詳細な空間統計解析がなされた際に、SMBH 成長・AGN 形成モデルへのより強い制限が得られることが期待される。

2. 研究の目的

- (1) 本研究の目的は、SMBHs へのガス降着流モデル及び AGN 放射モデルが、AGN 空間統計量にどのように影響を与えるのかを、準解析的銀河・AGN 形成モデルを用いて明らかにすることである。そのために、銀河から SMBH 周辺までのガス降着過程を取り扱う複数の理論モデルを構築する。そして、モデルから予言される AGN 空間統計量と現在進行中である AGN の大規模サーベイ観測との比較を通じて、SMBH 成長と銀河進化を結びつける共進化過程を明らかにする。
- (2) さらに、我々の理論モデルによって得られる銀河と AGN のカタログをインターネット上で公開する。これにより広く理論・観測研究者と連携をすることが可能になり、本研究成果をコミュニティーに還元できる。

3. 研究の方法

- (1) 宇宙論的 N 体シミュレーションによって得られるダークマターハロー (ダークマターが自己重力で作る塊状の構造) の合体史 (マージャーツリー) に基づいて、各々のダークマターハロー内でのバリオン物質の時間変化をモデル化する。モデルには、銀河形成の主要な物理過程と考えられている、ガス冷却、星形成、超新星フィードバック、重元素汚染、ブラックホール形成、銀河合体、ディスク不安定、AGN フィードバックなどが含まれる。モデルによって得られた AGN の空間分布を用いて AGN 自己相関関数の計算等を行う。
- (2) 最新の宇宙論的 N 体シミュレーションである Uchuu simulation (Ishiyama et al. 2021) を用いて、我々のモデル用にダークマターハローのマージャーツリーを再構築する。得られたマージャーツリーに我々のモデルを適用してモデル銀河・AGN を作成する。AGN の光度関数に着目し、観測領域ごとの光度関数のばらつき (コズミックバリエーション) を定量化する。モデルによって得られた膨大な銀河・AGN の天体カタログをインターネット上で公開する。

4. 研究成果

- (1) 我々は、特に SMBH へのガス降着タイムスケールが重要となる、比較的低光度の AGN である X-ray AGN の空間相関解析を行った。その結果、モデルから得られる AGN 自己相関関数は観測をよく再現することが分かった (図 1)。また、観測と同様の解析を行い X-ray AGN の住むダークマターハロー質量を求めた結果、典型的なダークマターハロー質量は 10^{13} 乗太陽質量程度と見積もられ、観測から推定されるホストハロー質量を説明できることが分かった。さらに、ハロー内の AGN の平均個数 (Halo Occupation Distribution) を求め、結果が観測から推定されるものとよく一致するものであることを確認した。この研究を通して、我々は SMBH へのガス降着タイムスケールが、X-ray AGN の空間統計に大きな影響を与えることを明らかにした。これは、より詳細な空間相関の観測によって、SMBH へのガス降着過程に観測的制限を与えることができることを示唆している (Oogi et al. 2020)。

(2) 次世代天文衛星であるジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) や ユークリッド (Euclid) 衛星による AGN 観測を見据えて、我々のモデルを用いて高赤方偏移 ($z \sim 4-8$) での AGN 紫外線光度関数を調べた。次世代観測であっても観測される領域は限られるため、領域ごとの光度関数のばらつき (コズミックバリエーション) の影響は避けられない。我々は各サーベイ計画の探査体積や限界等級に基づいて、モデルの計算領域から複数の小領域を切り出し、AGN 光度関数のばらつきを調べた。その結果、AGN 光度関数はコズミックバリエーションの影響を強く受けることが分かった (図 2)。その結果、JWST によるサーベイでは AGN 光度関数を制限するのは困難であることが分かった。一方、Euclid 衛星を用いたサーベイや、地上望遠鏡によるサーベイ計画 Legacy Survey of Space and Time (LSST) では AGN 光度関数の一部を制限可能であることを明らかにした。さらに、コズミックバリエーションを考慮し観測される天体数を見積もった結果、Euclid-deep サーベイによって赤方偏移 7 において紫外線絶対等級 -20.5 等より明るい AGN が 16-80 個観測されるという予想が得られた。同様に、Euclid-wide サーベイでは、 -22.5 等より明るい AGN が 3000-15000 個観測されると予想される (Oogi et al. 2022, 論文投稿中)。

(3) モデルによって得られた世界最大規模の銀河・AGN カタログの作成をインターネット上で公開した。17TB もの大容量のデータを HDF5 形式で保存し、高速転送可能にしている。

<引用文献>

- ① Ishiyama T., et al. 2021, Mon. Not. R. Astr. Soc., 506, 4210-4231
- ② Oogi T., et al., 2020, Mon. Not. R. Astr. Soc., 497, 1-18

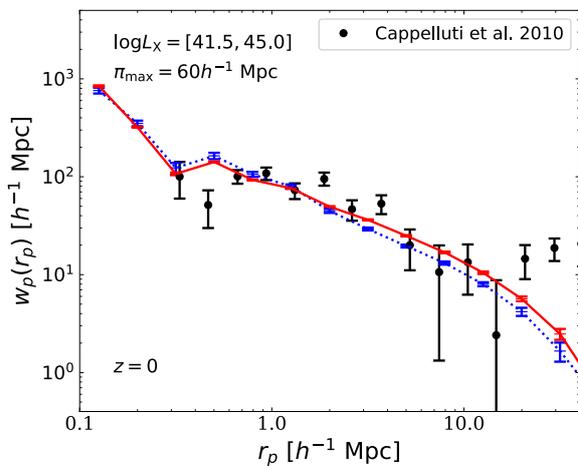


図 1 近傍宇宙における AGN 自己相関関数 (Oogi et al. 2020)。赤と青の線は異なる理論モデルの結果を表す。エラーバー付きの黒い点は Cappelluti et al. (2010) の観測結果を表す。

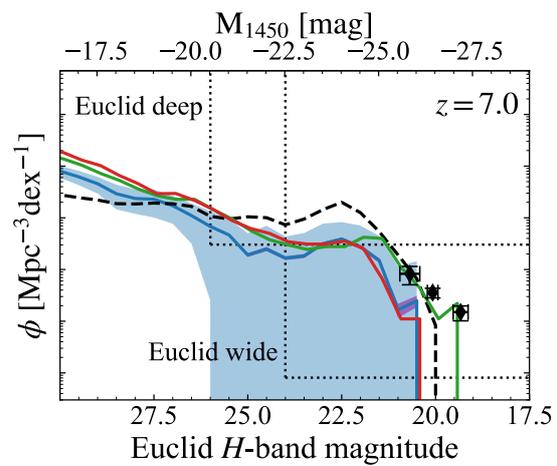


図 2 Euclid H-band を用いた赤方偏移 7 における AGN 光度関数 (Oogi et al. 2022, 論文投稿中)。複数の線は異なる理論モデルによる結果を、網掛け領域はコズミックバリエーションによる光度関数の不定性を表す。エラーバー付きの黒い菱形の点は Wang et al. (2019) の観測結果を表す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Moline, Angeles; Sanchez-Conde, Miguel A.; Aguirre-Santaella, Alejandra; Ishiyama, Tomoaki; Prada, Francisco; Cora, Sofia A.; Croton, Darren; Jullo, Eric; Metcalf, R. Benton; Oogi, Taira; Ruedas, Jose	4. 巻 518
2. 論文標題 CDM halo substructure properties revealed with high-resolution and large-volume cosmological simulations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 157-173
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2930	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ishiyama Tomoaki, Prada Francisco, Klypin Anatoly A, Sinha Manodeep, Metcalf R Benton, Jullo Eric, Altieri Bruno, Cora Sofia A, Croton Darren, de la Torre Sylvain, Millan-Calero David E, Oogi Taira, Ruedas Jose, Vega-Martinez Cristian A	4. 巻 506
2. 論文標題 The Uchuu simulations: Data Release 1 and dark matter halo concentrations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4210 ~ 4231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1755	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shirasaki Masato, Moriwaki Kana, Oogi Taira, Yoshida Naoki, Ikeda Shiro, Nishimichi Takahiro	4. 巻 504
2. 論文標題 Noise reduction for weak lensing mass mapping: an application of generative adversarial networks to Subaru Hyper Suprime-Cam first-year data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1825 ~ 1839
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab982	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ishikawa Shogo, Kashikawa Nobunari, Tanaka Masayuki, Coupon Jean, Leauthaud Alexie, Toshikawa Jun, Ichikawa Kohei, Oogi Taira, Uchiyama Hisakazu, Niino Yuu, Nishizawa Atsushi J.	4. 巻 904
2. 論文標題 The Subaru HSC Galaxy Clustering with Photometric Redshift. I. Dark Halo Masses versus Baryonic Properties of Galaxies at $0.3 \leq z \leq 1.4$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abbd95	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Oogi Taira, Shirakata Hikari, Nagashima Masahiro, Nishimichi Takahiro, Kawaguchi Toshihiro, Okamoto Takashi, Ishiyama Tomoaki, Enoki Motohiro	4. 巻 497
2. 論文標題 Semi-analytic modelling of AGNs: autocorrelation function and halo occupation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1~18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1961	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shirakata Hikari, Kawaguchi Toshihiro, Okamoto Takashi, Nagashima Masahiro, Oogi Taira	4. 巻 898
2. 論文標題 Revisiting the Soltan Argument Based on a Semianalytical Model for Galaxy and Black Hole Evolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab9949	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ogura Kazuyuki, Nagashima Masahiro, Shimakawa Rhythm, Hayashi Masao, Kobayashi Masakazu A. R., Oogi Taira, Ishiyama Tomoaki, Koyama Yusei, Makiya Ryu, Okoshi Katsuya, Onodera Masato, Shirakata Hikari	4. 巻 895
2. 論文標題 Quantifying the Effect of Field Variance on the H Luminosity Function with the New Numerical Galaxy Catalog (2GC)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8631	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件(うち招待講演 1件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Oogi T., Nagashima M., Kawaguchi T., Okamoto T., Enoki M., Ogura K., Shirakata H., 2GC collaboration, Uchuu collaboration
2. 発表標題 Host galaxies of high-redshift quasars within the Uchuu- 2GC semi-analytic model
3. 学会等名 Tracing the SMBH growth: outlook beyond the HSC-SSP, and future collaborations (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Oogi T., Ishiyama T., Prada F., Sinha M., Croton D., Cora S. A. Uchuu collaboration, 2GC collaboration
2. 発表標題 Field variance forecasts of high redshift AGNs for future surveys with a semi-analytic model
3. 学会等名 What drives the growth of black holes: a decade of reflection (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大木平, 長島雅裕, 川口俊宏, 岡本崇, 榎基宏, 小倉和幸, 白方光, 2GC collaboration
2. 発表標題 準解析的モデルで探る高赤方偏移クエーサーの母銀河
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Oogi T., Ishiyama T., Prada F., Croton D., Sinha M., Cora S. A.
2. 発表標題 Field variance forecasts of high redshift AGNs with a semi-analytic model with the Uchuu simulation
3. 学会等名 IAU Symposium 373: Resolving the Rise and Fall of Star Formation in Galaxies (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Oogi T., Ishiyama T., Prada F., Croton D., Sinha M., Cora S. A.
2. 発表標題 Cosmic variance forecasts of high redshift AGNs with Uchuu- 2GC
3. 学会等名 COSPAR 2022 44th Scientific assembly, E1.11: Supermassive Black Holes at High Redshift (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大木平、石山智明、Prada Francisco、Croton Darren、Sinha Manodeep、Cora Sofia A、Uchuu collaboration、 2GC collaboration
2. 発表標題 Uchuu simulation と準解析的モデルで探るAGN光度関数の field variance
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Oogi T., Ishiyama T., Prada F., Croton D., Sinha M., Cora S. A., Uchuu collaboration, 2GC collaboration
2. 発表標題 Cosmic variance forecasts of high redshift AGNs with Uchuu- 2GC
3. 学会等名 Galaxy formation Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大木平、石山智明、長島雅裕、川口俊宏、岡本崇、榎基宏、白方光、小倉和幸、 2GC collaboration、Uchuu collaboration
2. 発表標題 準解析的モデルを用いた銀河合体によるAGNの形成と進化
3. 学会等名 埋もれたAGNの宇宙論的進化 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Oogi T., Ishiyama T., Nagashima M., Kawaguchi T., Okamoto T., Enoki M., Shirakata H., Ogura K., 2GC collaboration
2. 発表標題 Formation of high-redshift AGNs from the 2GC semi-analytic model
3. 学会等名 East-Asia AGN Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大木平、石山智明、長島雅裕、川口俊宏、岡本崇、榎基宏、白方光、小倉和幸、 2GC collaboration
2. 発表標題 Uchuu simulation と準解析的モデルで探る高赤方偏移クエーサー形成
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大木平、白方光、長島雅裕、西道啓博、川口俊宏、岡本崇、石山智明、榎基宏、 2GC collaboration
2. 発表標題 富岳時代の準解析的銀河・AGN形成モデル
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Oogi T., Shirakata H., Nagashima M., Nishimichi T., Kawaguchi T., Okamoto T., Ishiyama T., Enoki M.
2. 発表標題 The recent updates of the New Numerical Galaxy Catalog (2GC)
3. 学会等名 Galaxy Evolution Workshop 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大木平、白方光、長島雅裕、西道啓博、川口俊宏、岡本崇、石山智明、榎基宏、 2GC collaboration
2. 発表標題 超大規模宇宙論的N体シミュレーションを用いた準解析的AGN形成モデル
3. 学会等名 令和2年度国立天文台CfCAユーザーズミーティング
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Oogi T., Shirakata H., Nagashima M., Nishimichi T., Kawaguchi T., Okamoto T., Ishiyama T., Enoki M.
2. 発表標題 Semi-analytic modeling of AGNs: auto-correlation function and halo occupation
3. 学会等名 Supermassive Black Holes (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大木平、白方光、長島雅裕、西道啓博、川口俊宏、岡本崇、石山智明、榎基宏
2. 発表標題 AGNクラスタリングで探る超巨大ブラックホール成長史
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関