

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：32408

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01950

研究課題名（和文）新世代銀河形成モデルを活用した活動銀河核の空間分布の解析

研究課題名（英文）Analysis for spatial correlations of AGNs by using a new generation galaxy formation model

研究代表者

長島 雅裕（Nagashima, Masahiro）

文教大学・教育学部・教授

研究者番号：20342628

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙進化に基づく銀河の形成・進化の過程を明らかにするために、申請者らは、N体シミュレーションをベースにした準解析的銀河形成モデル、「2GC」(New Numerical Galaxy Catalog)を構築してきた。今回、最新の巨大N体計算「Uchuu シミュレーション」を用い、新たに「Uchuu- 2GC」を開発し、超大質量ブラックホールの形成・進化の過程の解析や、活動銀河核の空間分布を計算し、新しい宇宙望遠鏡JWST等による深宇宙活動銀河核の観測結果の予想を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により構築した銀河・活動銀河核(AGN)形成の準解析的モデルにより、極めて広大な領域にどのように天体が分布しているのかを計算することが可能になった。これを深宇宙に適用することにより、最新の宇宙望遠鏡等により明らかにされると見込まれる、これまで得られなかった観測データを予測した。これにより、将来的に観測データが得られた際、データと比較することにより、いち早くモデルに含まれる物理プロセスやプロセス間の関連について、深い理解が得られることになる。

研究成果の概要（英文）：To elucidate the process of galaxy formation and evolution in the cold dark matter Universe, we have constructed a semi-analytic galaxy formation model called "2GC" (New Numerical Galaxy Catalog) utilizing N-body simulations. Using the state-of-the-art large-scale N-body simulation, the "Uchuu Simulation," we have developed a new model called "Uchuu- 2GC." By using this new model, we have conducted analyses on the formation and evolution of supermassive black holes, calculated the spatial distribution of active galactic nuclei, and made predictions on observed results of deep-space active galactic nuclei using upcoming telescopes such as the JWST (James Webb Space Telescope).

研究分野：理論天文学

キーワード：理論天文学 銀河形成 活動銀河核 宇宙の大構造

1. 研究開始当初の背景

宇宙項入りの冷たい暗黒物質(Cold Dark Matter, 以下 CDM)モデルが標準宇宙論モデルとして確立し、宇宙論パラメーターの精度を上げる試みがなされる段階に来ている。CDM モデルはいわゆる階層的構造形成(ボトムアップ)シナリオをその自然な帰結として予言するが、バリオンを含めた銀河や、銀河中心に存在することが明らかとなった超大質量ブラックホールなどの構造の形成過程については未だ解明されているとは言い難い。CDM モデルに基づく銀河形成モデルとして、「準解析的銀河形成モデル(Semi-analytic galaxy formation model, 以下 SA モデル)」の開発が 90 年代半ばより世界各地で精力的に進められ、申請者も 90 年代後半から独自のモデルの開発を行ってきた。特に 2005 年に出版したモデルは他グループのモデルに比べより多くの観測を良く再現していることがわかっており、さらに、2013 年度より採択された科学研究費(基盤 B)により、我々は抜本的に更新したモデル「²GC」を開発した。このモデルは扱う領域の広さや精度においても海外の他のグループを凌駕するものである。2017 年度より採択された化学研究費(基盤 B)では、このモデルが多くの銀河や活動銀河核(Active Galactic Nuclei; AGN)の観測を再現できることが示された。このモデルをフルに活用し、銀河・AGN 形成を深く理解するとともに、進行中の大規模銀河サーベイを理論的にバックアップしていくことが観測グループからも求められている状況にあった。

一方、モデルがベースとするのはバリオン抜きで CDM のみを計算する N 体シミュレーションである。N 体シミュレーションからダークマターハローの合体形成史を構築し、その歴史に沿ってバリオン成分の進化を計算するのが SA モデルである。そのため、N 体シミュレーションの質、即ち計算領域の広さと分解能が、SA モデルの質を規程するようになる。長年共同研究を行っている石山智明(千葉大)による新しい大規模 N 体シミュレーションが準備されているのが当初の状況であった。

研究開始当時はすばる望遠鏡の新たな観測装置 HSC が稼動を始め、Subaru Strategic Program (SSP,戦略枠)による 300 晩もの観測時間を使う大規模サーベイ HSC-SSP の観測が順調に進行していた。最終的には 1400 平方度もの広大な領域のサンプルが得られ、また一部の領域(3.5 平方度)では極めて暗い天体を含む深いサーベイデータが得られる大規模なものである。

²GC は、この観測データに匹敵するクオリティを持ち、サーベイデータからサイエンスを引き出すのに十分な能力を持つことがわかってきた。また、AGN の空間分布も、様々な時代で次第に明らかにされてきていた。AGN はブラックホール(BH)への質量降着により光ると考えられているが、その詳細は未解明であり、理論計算の結果もグループごとに異なっており観測結果を再現しているとは言い難い。稀な天体である AGN は、数値流体シミュレーションでは必要な分解能を維持すると満足な統計を稼げず、SA モデルを用いて大量の AGN を生成し解析する必要がある。このようなモデルを用いて、BH 周囲の物理と大規模サーベイというまったくスケールの異なる現象を有機的に結合させ、大規模サーベイから引き出せる物理について理論的に予測することが求められる状況にあった。

2. 研究の目的

本研究は、これまでの ²GC の成功をもとに、(a)モデルの一層の改善、(b)銀河・AGN のクラスタリング解析、を主要な目的とし、特に(b)はすばる HSC サーベイのデータが出てくることから、それを活用するのは無論のこと、関連するサイエンスを引き出すことを考えた。以下詳述する。

(a) ²GC の一層の強化を行う。具体的には、国立天文台のスパコン「アテルイ II」を用い、一辺が約 3Gpc の領域で、粒子数が 12,8003 の超大規模 N 体シミュレーションを行う。精度(すなわち解析可能な最小ハロー質量)を維持しつつ、ここまで広い領域を計算できる SA モデルは他になく、銀河形成のサイエンスを牽引する役割を發揮できる。また、個々のダークマターハロー中には、ハローの合体前から存在していたハローがサブハローとして生き残っているが、これまではサブハローは陽には扱わず、モデルを介して間接的な取り扱いをしてきた。これを、サブハローの合体史を直接扱うモデルにグレードアップする。これにより、サテライト銀河(ハロー周縁部の銀河)同士の合体による AGN 形成がより正確に解け、近接 AGN の相関関数をより正確に求められる。また、銀河団銀河の進化や銀河系に付随する矮小銀河の進化もより正確に求められる。

(b) ²GC のアドバンテージである広大な領域と良い精度を活かし、銀河・AGN のクラスタリングからその形成過程に迫る。我々は既に ²GC を活用し、AGN 光度がエディントン限界で制限されるか否か、というブラックホールのごく近傍での物理と、AGN の二体相関関数が関係していることを示し、AGN サーベイ観測から AGN の根元の物理に迫れる可能性を切り拓いた。このような異なるスケールの物理を結合してサイエンスを引き出すのは SA モデルならではの強みであり、この解析を拡張する。具体的には、宇宙初期(遠方)から現在付近(近傍)までの相関関数の進化から、AGN 形成史についての概略を得る。特に宇宙初期については、現在存在する巨

大ブラックホールと同程度の質量のものが発見されており、その形成過程に注目が集まっているが(超エディントン降着流によるのか、そもそも種ブラックホールが巨大だったのか)、この研究を通して、宇宙初期においてそのような巨大なブラックホールが普遍的に存在し得るのか、あるいは極めてレアな存在であり、巨大がゆえに観測できたというバイアスによるものなのかが明らかになると期待される。また、巨大な領域を計算することにより、AGN 自己相関関数の計算も可能になる。

3. 研究の方法

研究協力者の石山が実行する新しいN体シミュレーション「Uchuu simulation」の完成と、それを用いたSAモデル「Uchuu-²GC」の開発を、やはり研究協力者の大木平(愛媛大学)を中心に行う。このモデルをもとに、銀河やAGNの空間分布の解析を行うが、代表(長島雅裕)のもと、石山・大木に加え、長尾透(愛媛大学)がサーベイ観測を実施する立場から、それ以外の研究協力者が主に理論の立場から議論をすすめる、計算するターゲットや、その科学的意味について議論しなばらすめる。

4. 研究成果

新型コロナウイルスの蔓延により、新しいモデルの開発や、密接な議論が妨げられ、なかなか満足の行く進展は得られなかったが、それでも以下のような成果が得られた。

(1) 新しいSAモデル「Uchuu-²GC」の完成(論文)

最新のN体シミュレーション「Uchuu simulation」を活用した新しいSAモデル「Uchuu-²GC」を開発した。近傍宇宙の観測をよく再現するとともに、メインターゲットとして深宇宙を設定し、今後予定されているジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)や、Euclid, LSSTといった望遠鏡によるAGNサーベイ観測が、限られた天域の観測からどれだけ誤差(cosmic variance)を含むものになるのかを予測した。その結果、JWSTのように個別の遠方天体をシャープに撮像できるだけでは光度関数のような統計量については議論することが厳しく、 $z>5$ になると、ほとんど制限をかけられないことがわかった。EuclidやLSSTではwide surveyでは1万平方度を越えるサーベイを計画しており、これぐらいの広さを見ることができれば、光度関数の明るい側、つまり天体の少ない側でも議論できるだけの数を発見できると予想される。ただし、その分一領域にかけられる観測時間が減るため、暗いAGNは制限がつけられなくなる。狭い領域で深いサーベイをした場合でもEuclidでは厳しく、LSST並の領域の広さが必要なことがわかった。

(2) 超大質量ブラックホール(Supermassive Black Hole; SMBH)の進化の研究(論文)

観測的にはSMBH質量と銀河のバルジ質量には良い相関があることが知られている。我々のモデルでも、その関係はよく再現されている。²GCではSMBHが太る過程として2種類のプロセスを導入している。銀河同士の合体と、銀河円盤が過剰に重い場合に円盤が力学的に不安定になりバルジへと落ち込むプロセス(Disk Instability; DI)である。 $z=0$ の宇宙では、SMBH質量とバルジ質量の観測的な相関を再現するようにモデルは作られているが、深宇宙でどうなっているかは自明ではなかった。我々は、将来、深宇宙におけるデータも得られると予想し、SMBH質量とバルジ質量の関係の進化を調べた。その結果、 $z>2$ では二つの系列に分岐しており、それぞれ銀河合体とDIによって成立していることがわかった。これは将来観測データが得られれば、SMBHの形成過程に強い制限が与えられることを示唆するものである。

<引用文献>

Oogi, T. et al. 2022, "Uchuu-²GC galaxies and AGN: Cosmic variance forecasts of high-redshift AGN for JWST, Euclid, and LSST", submitted

Shimizu, T. et al. 2023, "The evolution of supermassive blackhole mass-bulge mass relation by a semi-analytic model, ²GC", submitted

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

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 9~9
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	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 63~63
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大木平 他
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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大木平 他
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 日本天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大木平 他
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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大木平 他
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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大木平 他
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
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水達生 他
2. 発表標題 SMBH質量-バルジ質量関係の赤方偏移進化
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上進 他
2. 発表標題 PeV ガンマ線で捕らえた天の川銀河ハロー宇宙線の兆候とその銀河進化に 対する意義
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2022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
研究協力者	大木 平 (Oogi Taira)		
研究協力者	石山 智明 (Ishiyama Tomoaki)		
研究協力者	大越 克也 (Okoshi Katsuya)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	榎 基宏 (Enoki Motohiro)		
研究協力者	岡本 崇 (Okamoto Takashi)		
研究協力者	小林 正和 (Kobayashi Masakazu)		
研究協力者	真喜屋 龍 (Makiya Ryu)		
研究協力者	小倉 和幸 (Ogura Kazuyuki)		
研究協力者	長尾 透 (Nagao Tohru)		
研究協力者	大須賀 健 (Ohsuga Ken)		
研究協力者	井上 進 (Inoue Susumu)		

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
---------	---------