

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：32408

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02867

研究課題名(和文) 新世代銀河形成モデルを活用した銀河・活動銀河核の形成進化の研究

研究課題名(英文) Research for galaxy and AGN formation by using a new generation 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) 13,400,000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、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を構築し、銀河中心に存在する超巨大ブラックホールの形成・進化と、ブラックホールへのガス降着により発現する活動銀河核の進化の理解を進めてきた。その結果、ブラックホールにどうガスが落ちるかという小スケールの物理と活動銀河核の空間分布という大スケールの物理を有機的に結合して捉えることに成功した。また、ガスがブラックホール近傍まで落ちるにはガスの角運動量を抜かなければならない。このプロセスを考慮すると、暗い活動銀河核の個数密度も良く再現できることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブラックホールも銀河もともに重要な天体であり、近年、それらは「共進化」というキーワードでの理解が不可欠と考えられるようになった。我々のモデルでは、宇宙進化における構造形成の一環として両者を自然に扱えるようにしたものである。そのため、ブラックホールにガスが降着する物理と銀河や活動銀河核の空間分布という何桁も異なるスケールの現象を同時に扱うことができる。この特長を活かし、他の手法ではいまのところ理論的取り扱いが不可能な活動銀河核の空間分布を計算し、続々と生み出される観測データと比較することを可能にした。

研究成果の概要(英文)：We have constructed a semi-analytic model of galaxies and active galactic nuclei (AGNs) in order to clarify their formation and evolution in the context of the cold dark matter cosmology. We have succeeded in making connection between processes of gas accretion onto supermassive black holes and spatial clustering of AGNs which is activated by the gas accretion onto the supermassive black holes. This shows that physical processes with very different spatial scales are closely related, and that we can infer the information on the black hole physics from large-scale surveys of galaxies and AGNs. Moreover we have found that we need to introduce a new timescale for gas accretion, which includes a loss of angular momentum of accreting gas, to reproduce observed luminosity functions of faint AGNs.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：理論天文学 宇宙物理学 銀河形成論 超巨大ブラックホール 活動銀河核 シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

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て久しい。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いるが、既に 10 年以上経過し、また宇宙論パラメータの決定精度も上がり、モデルの更新が待たれていた。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。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。

研究開始当時はすばる望遠鏡の新たな観測装置 HSC が稼働を始め、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 の観測が開始されたところであった。完了時には、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予定である。この観測データからサイエンスを引き出すためには、それに匹敵するクオリティの理論モデルが要求される。

また、誤差は大きいものの、AGN の空間分布も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十分な統計を稼げず、準解析的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

本研究計画の終了年度と HSC-SSP の当初予定の完了年度が同一のため、サーベイチームと協力し、途中でリリースされるデータとの比較もすすめて、HSC-SSP のフルデータから最大限サイエンスを引き出せるだけのモデルの改良及びモデルによる予言を行うことを目的とした。特に、我々のモデルの特長である、広い領域を扱えることを活かし、稀な天体である AGN を生成させ、観測と比較しながらその物理に迫ることを主眼に置いた。

その上で、以下のような柱を立てた。

(1) 2015 年に完成した新しいモデルを用いて、既存の観測データを再現するために必要な BH への質量降着率と AGN 光度との関係を求め、これが BH 周辺の物理に関するこれまでの理論的知見と整合性があるかどうかを検討する。

(2) HSC-SSP の初期データと比較を行うことで、理論パラメータの絞り込みを行い、銀河・AGN の形成過程について理解を深める。また HSC 以外の広汎な観測データとも比較するために、多様な観測量を計算していく必要がある。この過程で、銀河の形成過程への理解を深めつつ、モデルパラメータのより詳細なチューニングも行う。

また、状況が許せば、以下の諸点について取り組みを開始することとしていた。

(1) サブハロー(ダークマターハロー内で生き残っているより小さなダークマターハロー)の合体形成史を考慮し、AGN 活動性の引き金となる銀河の合体を精度良く解けるようにする。

(2) 各銀河の星形成史をストックし、星形成から爆発まで Gyr (10⁹ 年)のオーダーのタイムラグがある Ia 型超新星を計算できるようにする。

(3) 銀河の固有速度を陽に考慮し赤方偏移空間での銀河分布を実現する。

3. 研究の方法

我々が開発した新しい準解析的銀河形成(SA)モデル「²GC」を活用し、銀河・AGN の大規模サーベイ観測と比較することで、理論的理解を深めるとともに、観測データからその物理的意味を探るのが本研究の手法である。特に AGN エンジンである銀河中心 BH 周辺の物理過程をモデル化し、AGN 相関関数に現れる変化を調べることで、宇宙の大構造と BH 周辺の物理を結合する。すばる望遠鏡による大規模サーベイ HSC-SSP の完成年度を目指し、観測グループとの共同により、サーベイの深さなどの観測パラメータをチューニングし、詳細な比較が行えるよう疑似カタログを作成する。より現実的なモデル構築のため、SA モデルのさらなる改良をすすめる。このため、観測データとの比較を行いつつモデルのコード開発をすすめるためのポスドク研究員を 1 名雇う。

本研究を進めるにあたっては、「京」コンピュータ等スパコンの性能を最大限活かした計算が可能な研究者として石山智明(千葉大学)、HSC サーベイ計画に中心的に関係する研究者として長尾透(愛媛大学)、BH 周辺の詳細な相対論的輻射流体シミュレーションを実行し AGN 活動性の物理に詳しい大須賀健(国立天文台;現筑波大学)、主に銀河形成シミュレーションの立場から研究

をすすめ、銀河形成過程における AGN の役割について詳しい岡本崇(北海道大学)を連携研究者として組織した。メインテーマとなる SA モデルの開発・改良については、長島雅裕(文教大学、研究代表者)、長島と共同して SA モデルを開発してきた榎基宏(東京経済大学)と小林正和(呉高専)を連携研究者とし、また研究協力者として、新しい SA モデルの開発を中心的にすすめてきた真喜屋龍(東京大学)、大木平(東京大学;現千葉大学)を組織した。さらにコード開発補助として、初年度後半よりポスドク研究員を1名雇用した(小倉和幸;現西はりま天文台)。開発の途上においては、適宜ワークショップを開き、必要な知見の確保に努めた。

本研究で用いる銀河形成の SA モデルは、それ自体に重要な特長がある。これは、CDM の N 体計算によるダークマターハローの合体形成史と、個々のハローの内部でのガスの冷却や星の形成などをモデル化して計算することで、銀河の形成過程を追うモデルである。ガスや星の進化は複雑な物理過程であり、シミュレーションで計算するならば単体の銀河を精度良く扱わなければ意味がない。そこである程度モデル化する代わりに広大な領域を一度に計算し、統計量を計算できるようにしたのが SA モデルである。海外のサーベイ観測でも SA モデルとの比較は頻繁に行われているが、国内で本格的な SA モデルを開発しているのは我々のグループのみである。そして、「京」等を用いた N 体計算は 1Gpc 以上の領域を扱っており、宇宙の広い範囲を高精度を維持したまま一度に計算できる。これにより、AGN のような、銀河よりさらに数桁個数密度の低い稀な天体をも統計的に扱うことが可能になる。これは世界的に見ても極めて高いレベルであると言える。

また、このモデルを介し、大規模サーベイと AGN の BH 周辺の物理を有機的に結びつけられる可能性が具体的に示されつつある。10 桁にわたる空間的なスケール結合を行い、大規模サーベイ観測による実証可能性を持つという点でも、独創的な研究と言える。

このような特色あるモデルを活用することが、本研究における方法の最大の特徴である。

4. 研究成果

主な成果を以下に記す。

(1) 我々の準解析的(SA)モデルにおいて、BH へのガス降着率と放射光度の関係(図 1)について最新の数値シミュレーション等から示唆される関係を用いると、単純にそれらが比例するとした場合のモデルに比べ、深宇宙におけるキューサーの相関関数におけるバイアスが大きくなり、観測で報告されている値に近付くことがわかった。これはキューサーの相関関数が計算できるほどの巨大かつ高精度の N 体シミュレーションができるようになったことと、数値銀河シミュレーションではこの先長期間にわたって計算不可能な量であるということから、これらの量を示せたということ自体が画期的な結果である。また、BH 近傍という極めて小スケールの物理と、キューサー同士の相関という大スケールの物理を関係づけられたという点でも画期的である(論文)。

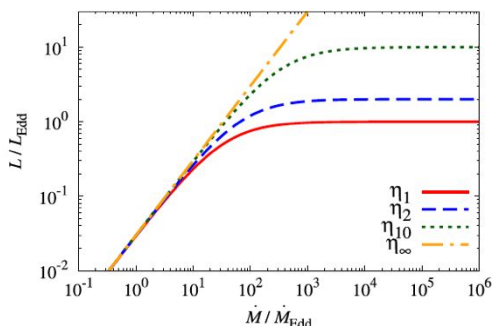


図 1. BH への質量降着率に対する放射光度の関係(どちらもエディントン降着率・光度で規格化してある)。各モデルは、 η の添字がエディントン光度の何倍で光度が頭打ちになるかを示す。

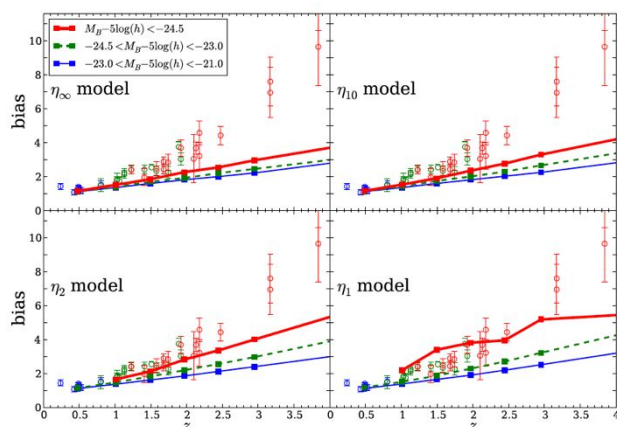


図 2. キューサーのダークマター分布に対するバイアスと赤方偏移の関係。放射光度の上限が厳しいほど、高赤方偏移でのバイアスが大きくなる。

(2) 従来の SA モデルでは、銀河合体時に降着するガスは、すべて速やかに BH 周囲まで落ち、そこから AGN の寿命程度で BH に落ちきる、という仮定がなされていた。我々は、そもそも BH 周辺までガスが落ちるのにもガスの角運動量が十分抜けるまでの時間がかかるであろうことを考慮し、BH や銀河の質量に依存して角運動量が抜けるタイムスケールを与えることによって、より詳細に観測と合うモデルを構築した(論文)。従来、多くのグループの SA モデルでも、暗い AGN の光度関数が再現できていなかったが、これにより暗い AGN までよく観測と合うことが示された(図 3)。1 グループが別の仮定により同様に暗い AGN の光度関数を合わせられることを見出し、どちらが正しいかは別の観測によって今後決着をつけることになる。

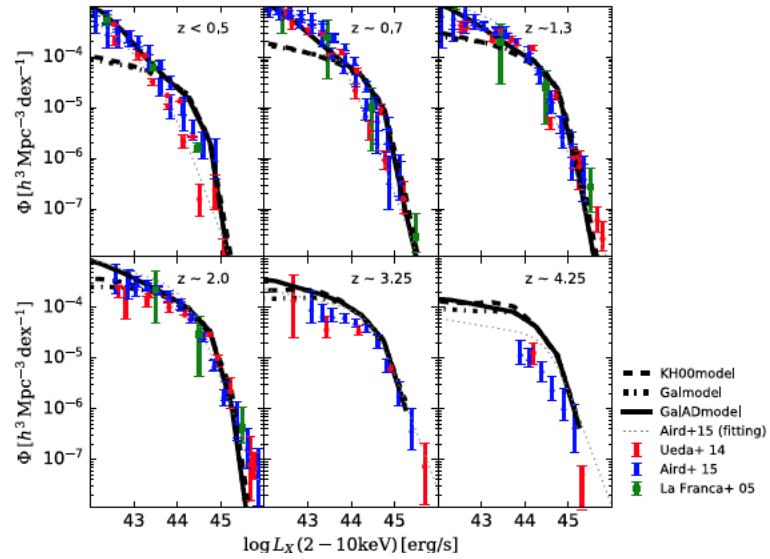


図3. X線のAGN光度関数。各パネルは赤方偏移の違いを表す。実線が新しいモデル。シンボルは観測データ。特に低赤方偏移で暗いAGNを良く再現するようになった。

<引用文献>

Oogi, T. et al. 2017, "Imprints of the super-Eddington accretion on the quasar clustering", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 471, L21-L25

Shirakata, H. et al. 2019, "The New Numerical Galaxy Catalogue (2GC): properties of active galactic nuclei and their host galaxies", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 482, 4846-4873

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shirakata Hikari, Kawaguchi Toshihiro, Oogi Taira, Okamoto Takashi, Nagashima Masahiro	4. 巻 487
2. 論文標題 Slowing down of cosmic growth of supermassive black holes: theoretical prediction of the Eddington ratio distribution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 409 ~ 419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz1282	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, Okamoto Takashi, Kawaguchi Toshihiro, Nagashima Masahiro, Ishiyama Tomoaki, Makiya Ryu, Kobayashi Masakazu A R, Enoki Motohiro, Oogi Taira, Okoshi Katsuya	4. 巻 482
2. 論文標題 The New Numerical Galaxy Catalogue (2GC): properties of active galactic nuclei and their host galaxies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4846 ~ 4873
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty2958	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 Totani Tomonori, Omiya Hidetoshi, Sudoh Takahiro, Kobayashi Masakazu A.R., Nagashima Masahiro	4. 巻 19
2. 論文標題 Lethal Radiation from Nearby Supernovae Helps Explain the Small Cosmological Constant	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrobiology	6. 最初と最後の頁 126 ~ 131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1089/ast.2018.1895	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 He Wanqiu et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Clustering of quasars in a wide luminosity range at redshift 4 with Subaru Hyper Suprime-Cam Wide-field imaging	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S33-S33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx129	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 Oogi Taira, Enoki Motohiro, Ishiyama Tomoaki, Kobayashi Masakazu A. R., Makiya Ryu, Nagashima Masahiro, Okamoto Takashi, Shirakata Hikari	4. 巻 471
2. 論文標題 Imprints of the super-Eddington accretion on the quasar clustering	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L21 ~ L25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slx102	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2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 大木平, 白方光, 長島雅裕, 川口俊宏, 岡本崇, 石山智明
2. 発表標題 準解析的モデルによるAGN自己相関の研究
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2018年 ~ 2019年

1. 発表者名 Masahiro Nagashima
2. 発表標題 Evolution of dwarf galaxies in a semi-analytic galaxy formation model
3. 学会等名 International Astronomical Union (国際学会)
4. 発表年 2018年 ~ 2019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)		

6. 研究組織（つづき）

	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	真喜屋 龍 (Makiya Ryu)		
連携研究者	岡本 崇 (Okamoto Takashi) (50541893)	北海道大学・理学研究科・講師 (10101)	
連携研究者	榎 基宏 (Enoki Motohiro) (50399284)	東京経済大学・経営学部・准教授 (32649)	
連携研究者	長尾 透 (Nagao Tohru) (00508450)	愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授 (16301)	
連携研究者	石山 智明 (Ishiyama Tomoaki) (90616426)	千葉大学・統合情報センター・准教授 (12501)	
連携研究者	小林 正和 (Kobayashi Masakazu) (20631683)	呉工業高等専門学校・自然科学系分野・准教授 (55401)	
連携研究者	大須賀 健 (Ohsuga Ken) (90386508)	筑波大学・計算科学研究センター・教授 (12102)	