

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 7 月 1 日現在

機関番号：32408

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287041

研究課題名(和文)「京」コンピュータを活用した次世代銀河形成モデルの開発

研究課題名(英文) Development of New Generation Galaxy Formation Model using K computer

研究代表者

長島 雅裕 (NAGASHIMA, MASAHIRO)

文教大学・教育学部・准教授

研究者番号：20342628

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：「京」コンピュータ等の世界最先端のスーパーコンピュータを用いたダークマターのN体シミュレーションを実行し、ダークマター天体の分布とその形成史を求めた。さらに、バリオンガスの進化を考慮し、ダークマター天体中での銀河の形成過程や銀河中心超巨大ブラックホールの形成モデルを組み込み、新しい銀河形成モデルを開発した。超巨大ブラックホールにガスが落ち込むことによって発現する活動銀河核は、銀河にくらべて数が少ないが、このモデルでは巨大な領域を一度に計算することが可能なため、統計的に十分な数の活動銀河核を計算し、空間分布から相関関数を計算して観測と比較することで、銀河の形成過程について理解をすすめた。

研究成果の概要(英文)：We have constructed merger trees of dark matter halos via N-body simulations using super-computers such as K computer. Taking into account the evolution of baryons, we have developed a new galaxy formation model, which includes many physical processes and formation processes of supermassive black holes within dark matter halos. Active galactic nuclei (AGNs) are activated by accreting gas, and therefore their number density is much lower than that of galaxies. Because our model can compute AGNs in huge volume of the Universe, we create many AGNs enough to discuss their evolution statistically. Thus we estimated their correlation functions and compared them with observations to clarify the evolution of galaxies and 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

### 1. 研究開始当初の背景

冷たい暗黒物質(Cold Dark Matter; 以下 CDM)モデルが標準的宇宙論モデルとして確立し、そのもとでの構造形成過程がいわゆるボトムアップシナリオとなることが明らかとなつて久しい。直接観測されるのは CDM ではなく銀河であるため、CDM モデルのもとでの銀河の形成過程を明らかにすることが重要であり、様々な手法で研究がすすめてきた。そのなかでも、銀河形成の準解析的(Semi-analytic; 以下 SA)モデルは大量の銀河を同時に生成することが可能なため、大規模サーベイ観測との比較において有利であり、世界的に開発がすすめられていた。我々も長年その開発に携わってきたが、「京」コンピュータなど世界最先端の計算機にアクセスできるようになってきたことから、それらを活用したモデリングが可能になってきたこと、また一方観測においても、すばる望遠鏡の新たな観測装置 Hyper-SuprimeCam (以下 HSC)が稼動目前となり、我が国を中心とした大規模観測サーベイが行われつつある状況で、抜本的に質を高めたモデルの構築が求められる状況であった。

### 2. 研究の目的

これまで我々が開発してきたモデルを基礎的な資源とし、「京」コンピュータ等最先端の計算機を活用したモデルを構築することが第一の目的である。また、すばる HSC によるサーベイを展望し、それに見合う形での擬似カタログを構成し、観測と直接比較し得る形でのアウトプットを出していく。そのために、モデルの開発に専従するポスドク研究員を一名雇用し、また連携研究者として、すばる望遠鏡の活用実績があり、サーベイ観測の主導的立場にある研究者を含めた。

### 3. 研究の方法

以下の3つの柱をたてた。

- (1) 「京」コンピュータ等による高精度 N 体シミュレーションに基づく天体形成史の構築。CDM 分布の進化については、最先端のスーパーコンピュータを用いて計算し、CDM 天体がどのような形成史をたどって現在まで辿りついたのかを計算する。これは、バリオンガス等の振る舞いを計算するためのベースとなる。この N 体シミュレーションの質が、モデルの質を決定的に左右するが、我々は世界最高水準のデータを得た。
- (2) 銀河形成モデルの開発。これまで開発してきた SA モデルも、開発当時は世界最高水準を誇っていたが、コンピュータパワーの進歩に伴い、また新たな物理過程の導入などが他モデルで進められ、陳腐化しつつあった。そこで、超巨大ブラックホール形成をはじめとする新たな物理プロセスを導入し、様々な観測量を計算し

て多面的に観測と比較していく。

- (3) すばる HSC によるサーベイ観測のデザイン等の進展状況をリアルタイムで取り入れながら、観測をバックアップし、観測データから最大限のサイエンスを引き出すための方法論の導出。年に3回程度、定期的に会合を開き、モデル開発の方向性を絞っていった。

### 4. 研究成果

主な成果を以下に示す。

- (1) 連携研究者を含めた多数の研究者の協力、特に「京」コンピュータ等を活用した N 体シミュレーション(論文 )により、新たなモデルを開発し、発表することができた(論文 )。世界最大規模の領域をカバーする計算や、コンピューターパワーの限界から来る数値的な分解能ではなく、物理的に意味のある質量分解能を達成することができ、またこれまで再現が難しいと言われていた深宇宙での銀河の個数密度などの再現に成功した。
- (2) 同時に、旧来のモデルのバージョンアップも続け、超巨大ブラックホールを導入することで、これまで再現困難であった、活動銀河核(AGN)のダウンサイジング(明るいAGNほど宇宙初期に個数密度のピークを迎え、暗くなるほどピークが後期にシフトしていく現象)を自然に再現することができた(論文 )。
- (3) 大規模 N 体シミュレーションの利点を活かし、数の少ないAGNの相関関数を計算してその進化について調べた(論文 )。宇宙初期に行くほど、分布がダークマターにくらべてバイアスされる(よりAGNが密集する)傾向を再現した。現在観測データが得られている最も宇宙初期のデータは、誤差が多いとはいえ我々の理論予測とはずれがあることが明らかになったが、その食い違いについて考察を行った。

### 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6件)

Makiya, R., Enoki, M., Ishiyama, T., Kobayashi, M. A. R., Nagashima, M., Okamoto, T., Okoshi, K., Oogi, T., Shirakata, H. (2016). "The New Numerical Galaxy Catalog ( 2 GC): An updated semi-analytic model of galaxy and active galactic nucleus formation with large cosmological N -body simulations." Publications of the Astronomical Society of Japan, 68(2), 25 (26 pages). 査読有 10.1093/pasj/psw005

Oogi, T., Enoki, M., Ishiyama, T.,

Kobayashi, M. A. R., Makiya, R., & Nagashima, M. (2016). "Quasar clustering in a galaxy and quasar formation model based on ultra high-resolution N-body simulations," Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 34, 30-34. 査読有 10.1093/mnrasl/slv169

Ishiyama, T., Enoki, M., Kobayashi, M. A. R., Makiya, R., Nagashima, M., & Oogi, T. (2015). "The  $\Lambda$ CDM GC simulations: Quantifying the dark side of the universe in the Planck cosmology." Publications of the Astronomical Society of Japan, 67(4), 61 (16 pages). 査読有 10.1093/pasj/psv021

Shirakata, H., Okamoto, T., Enoki, M., Nagashima, M., Kobayashi, M. A. R., Ishiyama, T., & Makiya, R. (2015). "The impact of dust in host galaxies on quasar luminosity functions." Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 450(1), L6-L10. 査読有 10.1093/mnrasl/slv035

Enoki, M., Ishiyama, T., Kobayashi, M. A. R., & Nagashima, M. (2014). "ANTI-HIERARCHICAL EVOLUTION OF THE ACTIVE GALACTIC NUCLEUS SPACE DENSITY IN A HIERARCHICAL UNIVERSE." The Astrophysical Journal, 794(1), 69 (8 pages) 査読有 10.1088/0004-637X/794/1/69

Makiya, R., Totani, T., Kobayashi, M. A. R., Nagashima, M., & Takeuchi, T. T. (2014). "Galaxy luminosity function and its cosmological evolution: testing a new feedback model depending on galaxy-scale dust opacity." Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 441(1), 63-72. 査読有 10.1093/mnras/stu561

[学会発表](計 21 件)

小林正和 "Revisiting the Intra-Halo Light Model as the Origin of the Cosmic Near-infrared Background Radiation", 日本天文学会、2016年3月17日、首都大学東京(東京都八王子市)

白方光 "超大質量ブラックホールに付随する circum nuclear disk がブラックホール成長に与える影響についての準解析的銀河形成モデルを用いた研究", 日本天文学会、2016年3月16日、首都

大学東京(東京都八王子市)

大木平 "AGN クラスタリング解析による AGN の活動性への制限", 日本天文学会、2016年3月16日、首都大学東京(東京都八王子市)

大木平 "準解析的銀河・AGN 形成モデルによる AGN 自己相関関数", 日本天文学会、2015年9月10日、甲南大学(兵庫県神戸市)

白方光 "circum nuclear disk が超大質量ブラックホール成長史に与える影響についての準解析的モデルを用いた研究", 日本天文学会、2015年9月10日、甲南大学(兵庫県神戸市)

大木平 "準解析的銀河・AGN 形成モデルを用いた AGN クラスタリング解析", 日本天文学会、2015年3月21日、大阪大学(大阪府豊中市)

榎基宏 "大規模サーベイに活用できる準解析的銀河・AGN 形成モデルの開発", 日本天文学会、2015年3月21日、大阪大学(大阪府豊中市)

小林正和 "New Numerical Galaxy Catalog (GC) Model. Cosmic Near-Infrared Background Radiation", 日本天文学会、2015年3月21日、大阪大学(大阪府豊中市)

真喜屋龍 "宇宙論的銀河形成モデルによる数値銀河カタログの構築", 日本天文学会、2015年3月20日、大阪大学(大阪府豊中市)

白方光 "クエーサースペクトルエネルギー分布の準解析的モデルへの導入と解析", 日本天文学会、2015年3月20日、大阪大学(大阪府豊中市)

白方光 "ダスト減光効果を考慮した準解析的モデルによるクエーサー光度関数の研究", 日本天文学会、2014年9月13日、山形大学(山形県山形市)

小林正和 "New Numerical Galaxy Catalog (GC) Model. High-z Galaxies", 日本天文学会、2014年9月13日、山形大学(山形県山形市)

大木平 "New Numerical Galaxy Catalog (GC) Model. AGN のクラスタリングとその進化", 2014年9月13日、日本天文学会、山形大学(山形県山形市)

榎基宏 "New Numerical Galaxy

Catalog ( GC) Model. . SMBH and AGN evolution”, 日本天文学会、2014年9月13日、山形大学(山形県山形市)

石山 智明 “New Numerical Galaxy Catalog ( GC) Model. . 超大規模宇宙論的 N 体シミュレーション”, 日本天文学会、2014年9月13日、山形大学(山形県山形市)

真喜屋 龍 “New Numerical Galaxy Catalog ( GC) Model. . 新たな数値銀河カタログの構築”, 日本天文学会、2014年9月13日、山形大学(山形県山形市)

長島 雅裕 “New Numerical Galaxy Catalog ( GC) Model.0. 新しい準解析的銀河・AGN 形成モデルの完成”, 日本天文学会、2014年9月13日、山形大学(山形県山形市)

小林 正和 “宇宙再電離過程の解明に向けた Ly Emitter 理論モデルの開発 II”, 日本天文学会、2014年3月22日、国際基督教大学(東京都三鷹市)

真喜屋 龍 “The cosmological galaxy formation model in the far IR and sub-mm: Predictions for ALMA and SPICA”, 日本天文学会、2014年3月21日、国際基督教大学(東京都三鷹市)

真喜屋 龍 “The cosmological galaxy formation model in the far IR and sub-mm: Predictions for ALMA and SPICA”, 日本天文学会、2013年9月11日、東北大学(宮城県仙台市)

21 小林 正和 “宇宙再電離過程の解明に向けた Ly Emitter 理論モデルの開発”, 日本天文学会、2013年9月11日 東北大学(宮城県仙台市)

〔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：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://phys.koshigaya.bunkyo.ac.jp/~masa/index-j.html>  
<http://www.imit.chiba-u.jp/faculty/nngc/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長島 雅裕 (NAGASHIMA, Masahiro)  
文教大学・教育学部・准教授  
研究者番号：20342628

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

榎 基宏 (ENOKI, Motohiro)  
東京経済大学・経営学部・准教授  
研究者番号：50399284

石山智明 (ISHIYAMA, Tomoaki)  
千葉大学・統合情報センター・准教授  
研究者番号：90616426

長尾 透 (NAGAO, Tohru)  
愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授  
研究者番号：00508450