

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25年 5月31日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740123

研究課題名（和文） 宇宙進化における重元素生成史の研究

研究課題名（英文） Study on the metal enrichment history in the Universe

研究代表者

長島 雅裕 (NAGASHIMA MASAHIRO)

長崎大学・教育学部・准教授

研究者番号：20342628

研究成果の概要（和文）：

現代の標準的な宇宙論モデルである冷たい暗黒物質モデルに基づいた準解析的銀河形成モデルを改良し、様々な特徴を持つ銀河について調べた。特に、銀河中心超巨大ブラックホールをエンジンとする活動銀河核の進化や周囲の銀河との関係について調べた。また、赤外線衛星「あかり」のデータを用い、重元素からなるダストからの赤外放射と銀河における星形成活動の関係について新たなモデルをたてて銀河形成モデルに組み込み計算を行った。

研究成果の概要（英文）：

We analyzed many types of galaxies by using the semi-analytic galaxy formation model based on the cold dark matter model that is the currently standard cosmological model. In particular, we investigate the evolution of active galactic nuclei that have central super-massive black holes as the engine of the activity and the relationship between surrounding galaxies and them. Also, we investigated the relationship between the star formation activity and the infrared radiation from dust, which is made of heavy elements, by modifying the star formation model in the semi-analytic galaxy formation model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：理論天文学、宇宙物理学、銀河形成論

1. 研究開始当初の背景

宇宙における重元素生成史を解明することは、単に天文学上の問題にとどまらず、惑星形成から生命の誕生にまで関わる重要性を持つ。近年の多波長高精度観測により、様々な天体の重元素量が正確に測られるよ

うになって来た。太陽近傍星はもとより、バルジ星についてのデータも増えてきた。近傍矮小楕円銀河を構成する個々の星の重元素量の測定も可能になってきた。ごく近い将来、近傍銀河についても、我々の銀河系と同様のクォリティで観測データが得ら

れると予想される。また銀河のみならず、QSO 吸収線系の観測から深宇宙での重元素量の進化が観測されつつある。ここ数年で飛躍的に増大した QSO サンプルにより、観測精度は飛躍的に向上するであろう。

一方、増大・高精度化する観測データに対応する理論のほうはまだ不十分である。

CDM 宇宙における銀河形成過程は、右下図に示すように階層的である。重元素生成過程を解析するためには、この階層的に形成される銀河の星形成史を計算する必要がある。ところが、銀河形成の数値シミュレーションは、現在の限られた計算機能力のため、幾つかのパラメータを導入し、星形成過程等を解いているのが現状である。しかもダイナミクスも計算することから、莫大な計算時間が必要になる。そのため、重元素量のような銀河形成の物理過程に敏感な物理量を計算するにはまだ不十分であると言わざるを得ない。

数値シミュレーションと相補的なアプローチとして発展してきたのが、本研究で用いる銀河形成の準解析的モデルである。これは、ダークマターの重力進化はダイナミクスに基づいて計算するものの、星形成などの物理過程は銀河スケールでの簡単なモデルを導入するものである。そのため、厳密さは欠くものの、広いダイナミックレンジで大量の銀河について計算することが可能であり、矮小銀河から銀河団まで統計的に議論することが可能である。

ただし、重元素生成史を解明するためには、合体をくり返す銀河の履歴をすべて記憶しておかなければならない。これは計算機パワーを要し、簡単ではない。申請者により、近年ようやく道が開かれたところである。

申請者は、準解析的モデルの構築に日本では最も早い段階から取り組み、様々な研究者と協力してモデルを改良し、また多岐に亘る観測結果との比較・解釈を行ってきた。その一つの結節点が「数値銀河カタログ (Numerical Galaxy Catalog; ν GC)」である。これは、ダークマターの重力進化は高精度 N 体シミュレーションを用いて解き、その結果に銀河形成の物理過程を考慮し、銀河の光度などの様々な特性だけではなく、空間分布まで計算可能にしたモデルである。2005 年に発表した論文ではあるが、現在でも、その分解能は世界トップクラスであり、多くの観測量を再現するのに成功している。

2. 研究の目的

銀河の形成・進化の解析をもとに、宇宙における重元素生成史を理解する。本研究では、冷たい暗黒物質 (CDM) が支配する宇宙での階層的な銀河の形成のモデルをより現実的なものに改良しつつ、単に観測を再現するだけでなく宇宙における重元素生成史の本質を理解することを目的とし、以下について調べる。(1) 元素ごとに重元素量を計算できるようにモデルを改良する、(2) 改良モデルを用い、各種観測データと比較する、(3) 直接的な観測量は重元素量そのものではなくスペクトルにあらわれる線幅であるが、理論モデルで直接線幅を計算し、ダイレクトに観測量と比較できるようにする。以上を通じて、CDM 宇宙での重元素生成史の概略が、ほぼ確立すると考えられる。

初年度に、まずモデルの高精度化及び拡張を行う。最も重要な点は、Ia 型超新星による重元素生成過程を、統合的に組み込むことである。既に過去の論文の幾つかで Ia 型超新星による効果は考慮しているが、より現実的に取り入れるということである。準解析的モデルに Ia 型超新星の効果を取り入れたのは私が世界で最初であり、この方向を強化することは、世界の最先端に立つ上で重要であると考えられる。

二年目以降の具体的なターゲットは以下の通り。

■銀河系の重元素生成史。特に太陽近傍星や、JASMINE 計画のような次世代位置天文衛星計画により詳細なデータが得られると期待されるバルジ星の、年齢まで含めた総合的な解析。

■近傍矮小銀河。近年、近傍矮小楕円銀河の星が観測されるなど、この分野の観測的進展は目覚ましいが、それを理論的にサポートできるようにする。また大小マゼラン雲のように、ガスも含めて詳細が分かっている銀河は星形成史の解析や遠方の QSO 吸収線系との関係でも重要であるので、これも主なターゲットとなる。

■QSO 吸収線系。これも既に我々は論文を出しているが、元素ごとの重元素量を計算することによって、詳細な宇宙の重元素生成史を明らかにする。

■楕円銀河。[α /Fe] と銀河の速度分散の間の相関の起源を解明することは、楕円銀河形成における最大の謎の一つである。元素ごとの計算は既に我々を行っているが、ここでは、単に重元素量を計算するだけでなく、観測されたスペクトルに現れる、各元素に起因する吸収線の幅 (いわゆる Lick Index) を直接計算する。予備的な計算は既に行っており、ベースとなるモデルの改善を待って、本格的な計算に移行する予定である。

■銀河団ガス。最新の X 線衛星の結果との詳細な比較を行う。

3. 研究の方法

CDM 宇宙での銀河形成シナリオは、前節で示したように、小さいダークマターハローが合体・成長する中でバリオンガスが冷却、星形成・超新星爆発を行うというものである。本研究においては、このシナリオを準解析的モデルという形で具体化し、計算する。

まずは次世代準解析的モデルの構築を行う。申請者がこれまで開発してきたモデルをベースにする。予備的な改良には一部既に成功しているため、初年度のうちに基礎的な部分はすべて開発を終え、速やかに観測データとの比較に移り、二年目以降につなげていく。二年目以降は観測グループとも協力しながら、多様な観測データとの同時比較に取り組む。

ダークマターの進化を解く高精度 N 体シミュレーションが、矢作日出樹(九州大学; 研究協力者)によってすすめられている。現状は、 512^3 個の粒子数を用いた計算で、ボックスサイズが 100h-1Mpc のものが 8run、200h-1Mpc が 4run、300h-1Mpc が 3run、さらに最近 1024^3 粒子の計算(70h-1Mpc)の run が成功している。また 2048^3 の計算も計画されている。計算 run が増えたことで、統計的な信頼度が増す。さらに高解像度にした計算も可能になれば、宇宙の再電離前の過程の効果も考慮することも可能になる。そこで、初年度は、これらを活かした計算コードの改良と、基本的なアウトプットを中心に進める。

銀河形成モデルの方は、個々の銀河の星形成史をストックすることにより、星形成から爆発まで時間がかかる Ia 型超新星の爆発率を計算できるようにする。爆発までの時間は採用した初期質量関数 (IMF) と整合的になるようにする。

なお、1 run あたり数十万個の銀河が生成され、それぞれについて光度やサイズなどの物理量以外に、星形成史や星が生成された時点での重元素量をバルジやディスクごとにストックする必要があるため、10GB 程度のメモリは最低でも必要になる(現在の予備計算では、小さいハローのみを計算して銀河の数を減らしたり、星形成史をストックするタイムステップを荒くして、普通の PC で計算可能な 3GB 程度にメモリ消費量を抑えている)。しかし高解像度 N 体シミュレーションデータはハローの数も増えるため、32GB メモリのマシンを購入して対応する。

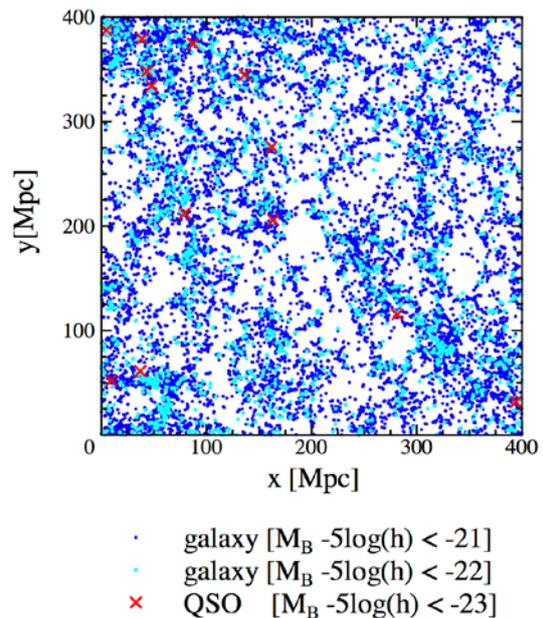
なおモデル構築においては長年共同研究を行ってきた榎基宏(東京経済大学; 研究協力者)との継続的な議論により研究を進めていく予定である。QSO/AGN からの銀河形成への寄与を考慮するために有益と考えられる。

4. 研究成果

現代の標準的な宇宙論モデルである冷たい暗黒物質モデルに基づく準解析的銀河形成モデルを改良し、特に、活動銀河核 (AGN/QSO) と呼ばれる天体の形成過程についての研究を行った。

AGN/QSO は、そのエネルギー源として超巨大ブラックホール (SMBH) を持つことが知られているが、我々の銀河形成モデルに SMBH 形成モデルを標準モデルとして組み込むよう改良した。また、銀河が激しく合体する際には、銀河が持つガスの一部が SMBH に落ち込み、その活動性を発現させるが、その過程も組み込むことで、観測された AGN/QSO の統計とダイレクトに比較ができ、銀河の進化と共に議論ができるようになった。これは、現在議論中の、すばる望遠鏡次世代観測装置 Hyper-SuprimeCam (HSC) を用いた AGN 大規模サーベイを理論的にサポートする強力な道具となる。

下に、改良したモデルによる銀河と QSO の空間分布の図を示す。一辺が 400Mpc という巨大な領域内での QSO の分布が得られたことにより、良質の空間相関関数を求めるデータが得られるようになった。



また、重元素はダストを形成し、ダストは紫外線などの短波長の光を吸収し暖められ、それにより赤外放射をする。また、短寿命の大質量星は紫外線をよく放出するため、銀河の星形成率と赤外線光度の関係については以前より議論されてきた。我々のモデルでは重元素の量が計算できているため、銀河内にどれくらいのダストが存在するかも見積ることが可能である。そのダストによる紫外線の吸収が効果的に行われるぐらいにダストが豊富にあれば、新たに星を形成しようとする領域に紫外線が入射しなくなり、星形成が活発に進むことが予想される。逆に、ダスト

が薄ければ、星形成が阻害されると考えられる。我々は、「あかり」赤外線観測衛星によるデータを用い、銀河の表面密度と星形成率密度の関係が、ダストの面密度で規定されると考えると、観測データをよく再現することを見出した

なお、Lick Index モデルについては、海外のグループによるデータベースの開発が遅れており、我々のモデルに導入するところまでは到達できなかった。また、JASMINE 衛星と絡めたバルジ形成や、QSO 吸収線の問題については、研究協力者による観測等が進展してはいるが、現在のところ論文文化までは至っておらず、早急にまとめる必要がある。

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 2 件)

Ryu Makiya, Tomonori Totani, Tsutomu T. Takeuchi, Masahiro Nagashima, & Masakazu A. R. Kobayashi, “Infrared Spectral Energy Distribution of Galaxies in the Akari all Sky Survey: Correlations with Galaxy Properties and Their Physical Origin”, 2012, Publ. Korean Astron. Soc., Vol. 27, pp.325-329, 査読無, DOI: 10.5303/PKAS.2012.27.4.325

Tomonori Totani, Tsutomu T. Takeuchi, Masahiro Nagashima, Masakazu A. R. Kobayashi, & Ryu Makiya, “Infrared Spectral Energy Distribution of Galaxies in the AKARI All Sky Survey: Correlations with Galaxy Properties, and Their Physical Origin”, 2011, Publ. Astron. Soc. Japan, Vol. 63, pp.1181-1206, 査読有, <http://pasj.asj.or.jp/v63/n6/630613/630613-frame.html>

Kazuaki Ota, Masanori Iye, Nobunari Kashikawa, Kazuhiro Shimasaku, Masami Ouchi, Tomonori Totani, Masakazu A. R. Kobayashi, Masahiro Nagashima, Atsushi Harayama, Natsuki Kodaka, Tomoki Morokuma, Hisanori Furusawa, Akito Tajitsu, Takashi Hattori, “LY-ALPHA EMITTERS AT $Z = 7$ IN THE SUBARU/XMM-NEWTON DEEP SURVEY FIELD: PHOTOMETRIC CANDIDATES AND LUMINOSITY FUNCTIONS”, 2010, Astrophys. J. 722, 803-811, 査読有, DOI:10.1088/0004-637X/722/1/803

[学会発表] (計 6 件)

榎基宏、石山智明、小林正和、長島雅裕、矢作日出樹, “準解析的銀河・QSO 形成ハイブリッドモデルの構築”, 日本天文学会、筑波大学(茨城県つくば市)、2011年3月19日 2011年日本天文学会春季年会予稿集

Masahiro Nagashima, Takashi Okamoto, “Metal abundances in dwarf spheroidals in the CDM Universe”, in 11th Asian-Pacific Regional IAU Meeting (Chiang Mai, Thailand, 26-29 Jul 2011)

Ryu Makiya, Tomonori Totani, Tsutomu T. Takeuchi, Masahiro Nagashima & Masakazu A. R. Kobayashi, “Infrared Spectral Energy Distribution of Galaxies in the Akari all Sky Survey: Correlations with Galaxy Properties and Their Physical Origin”, in The Second AKARI Conference: Legacy of AKARI: A Panoramic View of the Dusty Universe (2012 February 27-29, Ramada Plaza Hotel, Jeju, KOREA)

Masahiro Nagashima, “Galaxy Formation in the CDM Universe”, in Galaxies: Origin, Dynamics, Structure (Sochi, Russia, 14-18 May 2012)

榎基宏、石山智明、小林正和、長島雅裕, “AGN の個数密度の反階層的進化と階層的銀河形成”, 日本天文学会、大分大学(大分県大分市)、2012年9月20日

Masahiro Nagashima, “Prospects of the semi-analytic model of galaxy formation”, in Supermassive Black Holes in the Universe: The Era of the HSC Surveys (Ehime University, Matsuyama, Ehime, 20 Dec 2012)

[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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長島 雅裕 (NAGASHIMA MASAHIRO)

長崎大学・教育学部・准教授

研究者番号：20342628

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：