

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18540242
 研究課題名（和文）
 高精度ハイブリッドシミュレーションで探る銀河の発生学
 研究課題名（英文）
 Quest for embryology of galaxies by high-resolution hybrid-simulations
 研究代表者
 森 正夫 (MORI MASAO)
 筑波大学・大学院数理物質科学研究科・准教授
 研究者番号：10338585

研究成果の概要：

本研究では、“高赤方偏移で発見されている天体が、近傍宇宙のハッブル系列を構成する銀河の進化経路の一側面を見ているに過ぎない”という仮説を掲げ、銀河の化学力学モデル（SCDモデル）という武器を駆使して、銀河の発生について詳細な理論模型を構築する。その為に、超高精度の大規模3次元流体シミュレーションを実行し、SCDモデルによる銀河形成の理論模型を構築し、多波長観測データとの詳細な比較を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,000,000	0	1,000,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	480,000	3,080,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：理論天文学・宇宙物理学・銀河形成

1. 研究開始当初の背景

我々人類は過去10年の間で、我々の住む現在の宇宙とは全く異なった様相を呈する銀河誕生期の宇宙を垣間見ることが出来るようになった。宇宙望遠鏡や8-10mクラスの地上望遠鏡等の観測機器の登場と観測技術や検出装置の飛躍的な進歩により、それまでは全く知り得なかった宇宙の深遠部で、活発な星形成の兆候を示す莫大な数の銀河が観測されている。また観測分解能の向上とともに、遠方の銀河に対しても様々な物理量についてその平均化された量だけでなく、2次

元の空間分布についても多くの情報を得ることが可能になった。そしてハッブル宇宙望遠鏡によって行われたハッブル深宇宙探査をはじめとして、地上の高性能望遠鏡を用いた深宇宙の探査が精力的に行われ、現在では、赤方偏移が7に至るまでの遠方の原始銀河候補天体を捕らえることが出来るようになった。例えば、赤方偏移が3付近で大量に発見されているライマンブレイク銀河(LBG)、ライマンブレイク銀河よりもより遠方の宇宙に存在し、ライマンアルファ輝線で輝くライマンアルファエミッター(LAE)、赤方偏移3

で発見された物理スケールで 100kpc もの広範囲にわたってライマンアルファ輝線で輝くライマンアルファブロップ (LAB)、赤方偏移が 1~3 あたりで発見された極赤銀河 (ERO)、サブミリ銀河 (SMG) と呼ばれるサブミリ波で非常に明るく輝く銀河等々枚挙に暇がない。”原始宇宙はまるで銀河動物園 (Galaxy Zoo)”と形容されるほどである。

それではこのような多様な特徴を持つ深宇宙の天体は、いったいどのようにお互いが関連しあっているのだろうか？あるいは関連していないのだろうか？我々の住む現在の宇宙に存在し、ハッブル系列などで分類され研究されてきた近傍銀河とどのように関連しあっているのだろうか？これらは非常に基本的な問いかけにもかかわらず、現在までのところその明確な答えを我々はもっていない。それどころか、その理解を導くための理論的なガイドラインすら提出されていないのが現状である。その理由のひとつは、観測的宇宙論や銀河形成論の枠組みの中でこのような高精度観測データを解釈する際の理論模型の多くが、1980 年代後半に確立された Arimoto & Yoshii 模型に代表される銀河の空間構造を無視し、系の一様等方性を常に仮定した伝統的 1 ゾーンモデルを使用してきたことにある。

銀河の化学・光学進化の 1 ゾーンモデルは、1980 年代後半から 1990 年代にかけて観測データの解釈に広く活用され、多くの有意義な研究成果を齎してきた。しながらハッブル宇宙望遠鏡、すばる望遠鏡等に代表される高分解能の観測機器及び検出器の進歩により、銀河の内部構造の進化の詳細について多くの情報を得ることが可能になった現在では、これまでの単純化された銀河進化模型ではせっかくの高精度観測データを活かしきれないばかりでなく、その理解には不適切となりつつある。以上のような状況を打破するため、我々は銀河の化学・光学進化模型に力学進化を取り入れることによる理論模型の格段の精密化を行ってきた。流体系と重力多体系が混在した系の力学的進化と、放射冷却、星形成、超新星爆発の物理過程を同時に計算し、さらに星やガスから放出される電磁波のスペクトルを計算する 3 次元のシミュレーションコードを製作した。これを用いて我々は銀河の理論的スペクトルエネルギーディストリビューション (SED) の時間的、空間的進化を計算する銀河のスペクトル・化学・力学進化 (SCD モデル) 法を世界ではじめて開発した (Mori et al. ApJ, 478, L21 (1997)、Mori, Yoshii & Nomoto, ApJ, 511, 585 (1999))。この手法により、理論 SED と観測データとを直接比較したり、あるいは理論 SED を観測に対応する感度曲線を用いて積分することにより、等級やカラー等の情報に焼き直し、観

測データと比較することが可能になった。

2. 研究の目的

本研究では、“高赤方偏移で発見されている様々な銀河天体が、近傍宇宙のハッブル系列を構成する銀河の進化経路の一側面を見ているに過ぎない”という仮説を掲げ、SCD モデルという武器を駆使して、銀河の発生について詳細な理論模型を構築することでこの仮説を検証する。いわば高赤方偏移天体を内包する銀河系統樹 (Galactic Evolutionary Tree) を作り上げることを目標とする。このような問題で物理過程を正しく扱うためには計算の分解能が重要となる。銀河全体の重元素汚染過程を正しく計算するためには、そのサブスケールである超新星爆発の影響を力学的・熱力学的及び化学的な側面から正確に計算することが必須である。現在、盛んに行われている SPH 法では超新星残骸のような低密度領域では計算精度を著しく喪失するため、超新星の影響を正確に計算することはできない。一方、メッシュ法ではその空間分解能が格子点数に限られてしまうため、数 10kpc の銀河を数 10pc の超新星残骸のスケールを分解しながら計算するには、少なくとも 1024^3 格子点が必要となり、大規模シミュレーションの実行が必要となる。

我々は超高精度シミュレーションによる銀河形成の理論模型を構築し、観測データとの詳細な比較を行う。さらに観測から得られた理論の不具合を修正、理論模型の再検討を行うことにより、銀河進化模型の詳細なキャリブレーションを行う。現在、天文学は高精度観測時代に突入し、均質で大量のデータが蓄積され、銀河形成論・観測的宇宙論は今後いっそう発展すると思われる。しかしながら、そのような状況であるからこそ、理論的に裏打ちされた明確な研究動機と長期的な視点を持って研究目標を掲げておかないと、溢れる高精度データに埋もれてしまう可能性が大きい。特に、様々な物理過程が複雑に絡まりあっている銀河形成の分野で高精度データを有効に活用した研究を行うためには、常に理論的背景を念頭におき、問題とする対象について、その構造や進化の具体的なイメージをもって観測データに向かうことが重要となってくる。理論模型を持ちつつ現象を眺め、理論模型を検証するための観測提案を行ったり、データ解析を見直す、さらには理論模型を修正するというサイクルが必要である。そして可視・近赤外線、中間・遠赤外線、サブミリ波、電波、X線等の多波長観測と SCD モデルを融合することで、理論と観測の相互のフィードバックサイクルを徹底的におこない、銀河形成・進化の標準模型を作り上げる。

3. 研究の方法

実際の計算は、これまでに開発してきた自己重力多体系と自己重力流体系が混在した系のハイブリッドシミュレーションコード AFD2 を使用する。ここでは、星やダークマターは自己重力多体系として取り扱う一方で、ガスなどの流体系に関しては AUSM-DV というメッシュ法の有限体積法をベースにしたスキームを採用している。計算コードは 3 次元流体力学に加えて、重元素量に依存した放射冷却の効果 (Sutherland & Dopita 1993) とガス、星、ダークマターの自己重力、ガスから星への星形成、II 型超新星爆発及び Ia 型超新星爆発による熱エネルギーと重元素の放出の効果がインストールされている。星形成のアルゴリズムは、これまでに採用されたものをそのまま使用する。超新星爆発を導入するに当たって、星の初期質量関数を仮定する必要があるが、本研究全体を通して Salpeter の関数を採用する。また、超新星爆発による重元素ならびに熱エネルギーは対応する各流体格子点に源泉関数として与え、その後は流体力学及び熱力学の方程式にしたがって変化していくことになる。計算は、ダークマターの密度揺らぎが最大膨張半径に到達した赤方偏移からはじめ、そのなかで小さな密度揺らぎが成長し、やがて星を形成し、銀河を形成していく様子を調べる。このような計算により、ガスの密度分布や温度分布、重元素分布、あるいは星の質量や位相空間での分布、重元素分布などの時間変化を知ることができる。

4. 研究成果

本研究により、並列計算機上で効率的に動く自己重力多体系と自己重力流体系が混在した系のハイブリッドシミュレーションコード AFD2 を完成させた。そしてそのコードを使用して 10^8 - 10^{12} 太陽質量の銀河質量のシミュレーションを行った。

我々が一般に標準的パラダイムとして信じているコールドダークマターを基本とした宇宙における階層的構造形成のシナリオでは、宇宙の初期にビルディングブロックと呼ばれる矮小銀河スケールの小さな銀河ができ、それらの銀河が次第に合体を繰り返しながらやがて大きな銀河へと成長することを示唆している。このモデルは宇宙の大規模構造などの大きな構造や銀河の統計的性質を説明する上で重要な役割を果たしてきた。その一方で、最近のワイドフィールドサーベイの観測によると、赤方偏移が 1 までの宇宙に限っていえば、銀河形成過程は階層的構造形成が示唆するようなボトムアップ的な進

化ではなく、むしろ先に大きな銀河が出来上がり、その後で、矮小銀河が出来始めるといったトップダウンもしくは、ダウンサイジングといった構造形成の兆候が明らかにされた。

本研究では低質量銀河でかつ低密度領域から誕生するような銀河の形成過程で、超新星爆発による銀河システムへの力学的・熱力学的影響が星形成史におよぼす影響を調べ、超新星爆発によるエネルギーインプットが重力ポテンシャルの浅い矮小銀河の形成をどの程度遅延させるのかを詳細に調べた。さらに、原始銀河でのダストの存在は銀河進化の見かけに大きな影響を与えることを検証するため、上記の研究で得られた系統的な銀河進化モデルで銀河のダストの寄与を考慮した場合の SED を計算した。

さらに、現在の標準的な宇宙構造形成論で示唆される階層的構造形成における最も基本的な力学過程である小質量銀河が大質量銀河に衝突合体していく過程を、これまでにない高精度シミュレーションにより調べた。近傍銀河ではこのような矮小銀河の衝突過程が詳細に観測でき、原始銀河の衝突合体過程を理解する上で有意義なものとなった。また、このような銀河進化と銀河中心のブラックホールの進化の関係を検討した。さらに銀河形成の標準的描像のボトムアップシナリオを精査するため、近傍銀河であるアンドロメダ銀河で発見された銀河衝突の痕跡の数値解析をおこなった。これにより、最近近傍で見つかっているライマンアルファ輝線銀河の正体や、遠方銀河で頻繁に起こっているはずのマイナーマージャーを考える上で非常に重要となる知見を得ることができた。

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 11 件)

- ① Yajima, H., Umemura, M., Mori, M. and Nakamoto, T., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398, 715-721 (2009) 査読有
- ② Koch, A., Rich, R. M., Reitzel, D. B., Martin, N. F., Ibata, R. A., Chapman, S. C., Majewski, S. R., Mori, M., Loh, Y.-S., Ostheimer, J. C., Tanaka, M., Kinematic and Chemical Constraints on the Formation of M31's Inner and Outer Halo, *Astrophysical Journal*, 689, 958-982 (2008), 査読有
- ③ Mori, M. and Rich, M. R., The Once and Future Andromeda Stream, *Astrophysical Journal*, Vol. 674, pp.

L77-L80, 2008. 査読有

- ④ Mori, M. and Umemura M., Galactic Winds from Primeval galaxies, *Astrophysics and Space Science*, 311, 111-115 (2007), 査読有
- ⑤ Mori, M. and Umemura M., Chemodynamics of Lyman alpha emitters, Lyman break galaxies and elliptical galaxies, *EAS Publications Series*, 24, 221-226 (2007), 査読無

[学会発表] (計 11 件)

- ① 森正夫, ALMAへの期待：銀河の形成, 日本天文学会, 2009年3月26日, 大阪府立大学

[その他]

- ① テレビ報道
The History Channel, "The Biggest Things in Space.", 2008年3月25日午後9時, アメリカ合衆国
- ② 新聞掲載
読売新聞夕刊 2008/3/25、東京新聞朝刊 2008/3/24, 2006/6/20、神奈川新聞朝刊 2008/3/24, 神戸新聞 2008/3/24、US Front line 2008/3/23、共同通信、時事通信、その他。
- ③ 雑誌掲載
Newton (ニュートン) 2007/12月号
- ④ 展示
ロンドン科学博物館 Science Museum London(<http://www.sciencemuseum.org.uk/antenna/galaxyformation/>)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 正夫 (MORI MASAO)
筑波大学・大学院数理物質科学研究科・准教授
研究者番号：10338585