

近傍銀河の形成・進化の探究

Formation and evolution of local galaxies

森正夫

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

我々の住む銀河はどのように誕生し進化してきたのだろうか。本研究では高精度観測データと大規模シミュレーションを組み合わせ、近傍銀河の形成・進化の詳細なモデルを構築し、数値銀河考古学を完成させる。さらに、銀河の形成・進化の研究を通して、宇宙物理学における最大の謎とされているダークマター(DM)の性質及びその諸問題について詳細に調査することを目的とする。2020 年度も引き続き、天の川銀河やアンドロメダ銀河、近傍の銀河やそれに付随するダークマターハロー(DMH)が、銀河集団という環境の中でどのような歴史を歩んで現在に至り、またこれからどのような未来が待ち受けているのかを、N 体計算及び流体の大規模シミュレーションを駆使して明らかにした。特に、現在の標準的な構造形成理論である cold dark matter(CDM)の銀河スケールにおける諸問題や銀河進化と銀河中心ブラックホールの共進化について研究を行った。

2. 研究成果の内容

(1) 暗黒物質サブハローと M31 恒星ストリームの相互作用

本研究では、M31 のハロー領域に存在する恒星ストリームである North-Western (NW) ストリームに注目し、NW ストリームと DM サブハローの近接遭遇時の痕跡を理論・観測両側から調べることで、DM サブハロー数の評価を目指している。我々は NW ストリームに注目した研究に継続的に取り組んでおり、NW ストリームの 3 次元構造を N 体計算を用いて再現済みである Kirihara et al. 2017; Komiyama et al. 2018)。本研究では、NW ストリームと DM サブハローの衝突実験を N 体計算を用いて遂行し、DM サブハローの質量が程度以上の近接遭遇時においては位相空間上に明確な痕跡が残ることを示した。さらに、衝突パラメータによっては、ストリーム自身が並行する二本の細長いストリームに分裂する現象が発生する事を見出した。M31 ハロー領域で観測されているステラーストリームでは、複数のストリームがほぼ平行に位置する場合が複数発見されているが、その生成メカニズムとしての可能性について解析を進めた。

(2) 銀河衝突と銀河中心ブラックホールの活動性

宇宙には太陽質量の100 万倍を超える大質量ブラックホールが遍く存在する。ごく一部の質量ブラックホールは落ち込む物質をエネルギー源にして明るく輝き、激しい活動性を示すが、そのほとんどは銀河の中心でひっそりと佇んでいる。しかし、こうしたブラックホールの活動と休眠の間の状態変化をつかさどるメカニズムは、未だ完全には解明されていない。我々は、Oakforest-PACS 等のスーパーコンピュータを駆使し、銀河衝突と銀河中心ブラックホールの活動性の関係を詳細に調べた。これまで、銀河衝突で銀河中心ブラックホールは激しく活動すると信じられてきた。衝突によって銀河円盤の物質が中心に落下し、ブラックホールに落ち込むことでその活動が活性化するのである。しかし、銀河衝突が中心で起こった場合には事態は全く異なる。中心に衝突した銀河がブラックホール周辺のガスを持ち去ってしまい、エネルギー源を失ったブラックホールは活動を停止することを世界で初めて示した。

(3) Dark matter halo に付随する subhalo の軌道運動と衝突過程

コールドダークマターモデルを基礎とした銀河形成シナリオでは、銀河系ほどの大きさを持った銀河に付随する矮小銀河の総数に関する理論予測が、実際の観測と大きく食い違っている、いわゆるMissing Satellite Problem が未解決問題として指摘されている。この解決案として、観測が不可能なほどに暗いsub-halo (Dark Satellite) の存在が考えられており、先行研究からこのDark Satellite の存在を観測可能なBright Satellite との衝突から間接的に示せる可能性が示唆された。本研究では、宇宙論的N体シミュレーションの結果を用いて、Milky Way サイズのHost 銀河に付随した(Bright、Dark を含む)sub-halo 同士の二体衝突の頻度を、Host銀河が時間進化する系の中で詳細に調べた。その結果、宇宙年齢の間にsub-halo同士の正面衝突が数回以上、また弱い相互作用は少なくとも数千回は生じていることを突き止め、矮小銀河の観測を通してDark Satelliteの存在を観測的に見極める可能性を示した。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

これまで学際共同利用として、OFP、Cygnus 等の並列計算機を活用した、大規模並列 N 体シミュレーション及び流体シミュレーションを多数実施し実績をのこしてきた。特に、本研究ではステラーストリームや矮小銀河と衝突する Dark Satellite の軌道要素を正確に決めることが求められ、相互作用する銀河の初期軌道要素についての合計 6 次元のパラメータ空間を十分な分解能で調べる必要があった。このような膨大なパラメータ空間を扱うためには、高い演算性能を持つ OFP 及び Cygnus による大規模並列パラメータサーベイが、最も強力な手段であって、本研究ではその性能を最大限に発揮することができた。

4. 今後の展望

今後は、重力多体系の力学過程を調査するとともに、より複雑な流体力学的効果をできるだけ正確に取り入れた銀河進化モデルを構築する。そのために、SPH法による流体とN体のハイブリッド計算に、銀河形成の物理過程として星形成や超新星フィードバック、放射冷却等の効果を実装した銀河形成シミュレーションの準備を整えていく。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- Yohei Miki, Masao Mori, and Toshihiro Kawaguchi, “Destruction of the central black hole gas reservoir through head-on galaxy collisions”, *Nature Astronomy* 5 (Jan. 2021).

(2) 学会発表

- 森正夫, “Formation of local galaxies”, 12th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (オンライン開催, Oct. 6, 2020).
- 大滝恒輝, 森正夫, “ダークマター欠乏銀河の形成シミュレーション”, 銀河・銀河間ガス研究会2020 (オンライン開催, Aug. 3-5, 2020).
- 大滝恒輝, 森正夫, “銀河衝突によるダークマター欠乏銀河の形成シミュレーション”, 日本流体力学学会年会(山口大学, オンライン開催, Sept. 18-20, 2020).
- 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, “遷音速銀河風モデルによる星間ガス流出量の推定”, 日本流体力学学会年会(山口大学, オンライン開催, Sept. 18-20, 2020).
- 大滝恒輝, 森正夫, “銀河衝突によるダークマター欠乏銀河の形成: 衝突速度依存性について”, 日本天文学会秋季年会(弘前大学, オンライン開催, Sept. 8-10, 2020).
- 大滝恒輝, 森正夫, “銀河衝突によるダークマター欠乏銀河の形成: 質量依存性について”, 天体形成研究会2020 (筑波大学, Online, Nov. 6-7, 2020).
- 田中駿次, 森正夫, “天の川銀河衝突シミュレーションに向けて”, 天体形成研究会2020 (筑波大学, Online, Nov. 6-7, 2020).
- 須永泰聖, 森正夫, “Galactic Habitable Zone について”, 天体形成研究会2020 (筑波大学, Online, Nov. 6-7, 2020).
- 大滝恒輝, 森正夫, “銀河衝突によるダークマター欠乏銀河形成の解析”, 初代星初代銀河研究会2020 (東北大学, Online, Nov. 16-18, 2020).

- 大滝恒輝, 森正夫, “銀河衝突によるダークマター欠乏銀河の形成シナリオ”, 第 33 回理論懇シンポジウム(オンライン, Dec. 23-25, 2020).
- 数野優大, 森正夫, “Milky Way like な銀河に付随する Dark Matter Subhalo の衝突頻度”, 第 33 回理論懇シンポジウム(オンライン, Dec. 23-25, 2020).
- 大滝恒輝, 森正夫, “ダークマターサブハロー衝突によるダークマター欠乏銀河の形成過程”, 日本天文学会 2021 年春季年会(オンライン, Mar. 16-19, 2021).

(3) その他

- 森正夫, “銀河同士の大衝突”, Newton 別冊宇宙の終わり. ニュートンプレス, Jan. 2021. Chap. 5, pp. 94-103.

使用計算機	使用計算機 に○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
Cygnus	○	18,000	
Oakforest-PACS	○	96,000	
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			