

jh180045-NAH

高精度・高分解能シミュレーションを用いた銀河の形成・進化史の探求

三木 洋平 (東京大学 情報基盤センター)

概要

近年の観測機器の高性能化に伴い、従来観測では検出できなかったような非常に暗い構造が多数発見され、今までよりも 10 倍以上質量分解能の高いシミュレーションを遂行する必要性が生じてきた。そこで本課題では、こうした高精度・高分解能シミュレーションを遂行可能なコードを開発し、宇宙物理学の研究に適用していく。コード開発として、GPU を用いた重力ツリーコードを Pascal 世代の GPU である Tesla P100 向けに最適化した。東京工業大学の TSUBAME3.0 を用いた性能評価の結果、GPU あたりの最大粒子数は $30 \times 2^{20} = 31457280$ であり、この時の実行時間はステップあたり 0.33 秒であった。実アプリケーションとしては、アンドロメダ銀河北西領域のストリーム構造の再現に向けて計算結果の粒子数依存性を調べ、100 万程度の粒子数を用いることで結果が収束することが分かった。また、天の川銀河内の矮小銀河 Fornax dSph 周辺の球状星団分布に関する計算では潮汐力による質量剥ぎ取りの効果の重要性が明らかになり、 N 体+SPH による計算で矮小不規則銀河 IC 10 周辺のガストリームを再現した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京大学・情報基盤センター、東京工業大学・
学術国際情報センター

(2) 共同研究分野

□ 超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

三木 洋平：GPU コードの改良・性能評価

森 正夫：SPH 法の改良、NW ストリームの形成
過程

桐原 崇亘：NW ストリームの形成過程

矢島 秀伸：銀河と BH の共進化

杉村 和幸：銀河と BH の共進化

宮川 銀次郎：暗黒銀河と矮小銀河の相互作用

2. 研究の目的と意義

すばる望遠鏡に搭載された超広視野主焦点カメラ HSC や Gaia 衛星といった、近年運用が開始された観測機器を用いることで、銀河の形成・進化史についての観測的な研究の進展が加速している。さらに、2021 年に稼働予定のすばる望遠鏡の超広視野分光器 PFS、打ち上げ予定の James Webb 宇宙望遠鏡といった近未来の観測機器の登場によって、こうした研究はますます進展していくことが予想される。一方で、最新の観測データを解釈

し、銀河の形成・進化史の理解を深めていくためには、同時に理論的な研究を進めていくことも非常に重要である。この際には、特にスーパーコンピュータを用いて高分解能かつ高精度な大規模数値シミュレーションを遂行し、観測データとシミュレーション結果を詳細に比較していくことが欠かせないプロセスである。

近年の銀河の形成・進化史研究においては、宇宙論的構造形成シナリオの検証、銀河中心の巨大ブラックホールとそのホスト銀河の共進化過程の解明などが特に重要な研究課題とされている。しかしながら、他にも円盤状に分布する衛星銀河群や長方形のハロー構造を持つ銀河といった形成過程が不明な構造が多数発見されており、今後解決していくべき問題が山積しているというのが実情である。

銀河の形成・進化過程において最も重要な相互作用は天体どうしにはたらく重力であるので、まずは大規模重力多体計算を用いてこうした未解決問題に挑む。しかしながら、銀河進化を考える上では流体相互作用や恒星進化といった過程を取り入れていくことも重要である。そこで本研究では、重力相互

作用を皮切りに、必要な物理過程を順次取り入れた大規模シミュレーションを遂行し、最新の観測データとシミュレーション結果を詳細に比較することで銀河の形成・進化史を明らかにしていくことを目指す。

宇宙物理学的な観点では、銀河の形成・進合理論における未解決問題に挑むという点が重要である。宇宙論的構造形成シナリオと観測の不一致の代表例として衛星銀河問題が挙げられる。これは、宇宙論的構造形成シミュレーションによって形成される構造（ダークマターサブハロー）の数が、天の川銀河近傍で見ついている衛星銀河の数に比べて1桁程度多すぎるといった問題である。この比較の最大の問題点は電磁波観測では検出できないサブハローの数と、可視光で検出可能な衛星銀河の数を比較しているという点である。そこで、アンドロメダ銀河のハロー領域に存在する North-Western (NW) ストリームをプローブとして、サブハローが NW ストリーム近傍を通過する際に作る“ギャップ”の数を観測的に評価するという国際共同研究が進行中である。この研究の完成にはサブハローと NW ストリームの相互作用の頻度を計算した理論テンプレートの構築が必要不可欠であり、本研究は研究全体の要である。

計算科学的な観点では、複雑なアルゴリズムを GPU 向けに実装・最適化するという点がチャレンジングである。細粒度で複雑な計算は GPU に代表されるメニーコアアーキテクチャには適していないが、本研究においては一部の粒子だけを抜き出しての高精度重力計算、流体力学過程や恒星進化過程の取り込みなど数多くの物理過程について、順次アップデートしていく予定である。これは GPU 向きでないとされるものも含めた多種多様な特性を持つアプリケーションを GPU 上で実装・最適化することを意味しており、他分野の科学技術計算に与える波及効果が大きいため、挑戦する価値がある。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究で予定しているパラメータ探索においては、 N 体計算による時間発展の計算と同時進行で計算結果の解析を実行し、解析結果だけを出力するという手順を採用する。こうしたコードを開発するためには、GPU を用いた N 体計算コードを高速化するために計算機科学分野の研究者と、得られた計算結果から必要な情報を抜き出すための定量的な解析ができる宇宙物理学分野の研究者両方の協力が欠かせない。こうした、複数分野の協力を前提として単一の成果を目指すという研究を実施する枠組みとしては JHPCN の枠組みは適しており、本研究を推進する上での後押しとなった。

また、複数拠点の計算機資源を使用することでコードのデバッグが容易になる場合もあった。スパコン上でコードが正常に動作しなかった際のデバッグ作業において、同一のコードを複数環境で使用することによって、コード自体の問題とジョブスクリプトの問題とを切り分けることができた。

最後に、拠点シンポジウムに参加することで、有用な研究手法に関する情報収集もできた。後述するように、本研究で予定しているパラメータ探索を遂行する際に単純なグリッドサーチを用いると、当初の見積もりよりも必要な計算量が増加したために、研究計画の見直しが必要となった。この作業においては、拠点シンポジウムでも紹介されていた手法をはじめのキーワードとして用いることで、速やかに効率的なアルゴリズムに到達できた。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本課題は該当しないため、省略する。

5. 今年度の研究成果の詳細

課題期間の前期において、本研究で用いる GPU 向けのツリーコード GOTHIC (Miki & Umemura 2017) を Pascal 世代の GPU である

Tesla P100 向けに最適化した、Pascal 世代においては、Fermi 世代や Kepler 世代と比較して大容量である 64KB ものオンチップメモリが使える。さらに、このオンチップメモリがすべてシェアードメモリとして割り当てられているので、本研究では重力計算カーネルにおいてシェアードメモリに今までよりも多くのデータを置くという最適化を施した。GPU 向けの計算コードにおいてはブロックあたりのスレッド数などのパラメータを適切に設定することが高性能化を達成するための鍵である。本研究では東京工業大学の TSUBAME3.0 を用いてパラメータ探索を実施した。

Tesla P100 向けに最適化したコードの性能測定の結果を以下に示す (図 1)。測定に用いた粒子分布はアンドロメダ銀河を模した銀河モデルを初期条件生成コード MAGI (Miki & Umemura 2018) を用いて生成したものであり、 $2^{23} = 8388608$ 粒子を用いた。Tesla P100 を用いた際の計算時間は赤丸で示したとおりであり、Fermi, Kepler, Maxwell 世代の GPU よりも高速である。典型的な精度である $\Delta_{\text{acc}} = 2^{-9} = 1.953125 \times 10^{-3}$ におけるステップあたりの計算時間は 7.4×10^{-2} 秒であった。Fermi 世代の GPU である Tesla M2090 からの速度向上率はおよそ 8 倍であり、これは両 GPU の理論ピーク性能比に対応している。

また、図 2 に GOthic の実行時間の粒子数依存性を示す。計算時間はほぼ重力計算によって占められており、大粒子数の領域においてはほぼ $O(N)$ となっている。コードが動作した最大の粒子数は $30 \times 2^{20} = 31457280$ であり、この時の実行時間はステップあたり 0.33 秒であった。

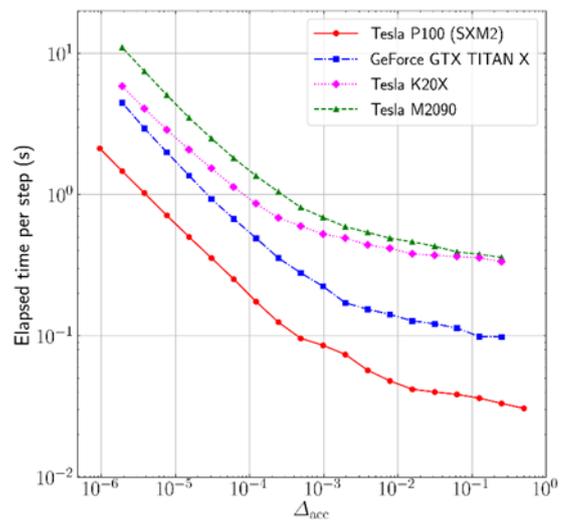


図 1: GOthic の実行時間。重力計算の精度を制御するパラメータ Δ_{acc} の関数として、ステップあたりの実行時間を示した。

CUDA 9 において Cooperative Groups が導入され、NVIDIA が提供する全体同期機能ができるようになった。今までの CUDA においては複数のブロックをまたいで同期機能が提供されておらず、一旦カーネル関数を閉じることで同期するか、ユーザ自身が独自に全体同期関数を実装するかのものであった。したがってユーザ視点ではコードの実装が簡便になっており、カーネル関数を開け閉めするのに比較して高性能化が期待できるという状態になっている。

東京大学情報基盤センターの Reedbush-L においては CUDA 9 がインストールされているので、Cooperative Groups を用いての複数ブロックの同期機能をテストした。GOthic においては、Xiao & Feng (2010) によって提案された全体同期関数を実装済みであったので、独自実装の全体同期関数と Cooperative Groups による全体同期機能を用いた際の性能比較を行った。Cooperative Groups による全体同期機能を用いるためにはコンパイル・リンク方法についても変更しなければならないので、比較のためにコンパイル・リンク方法だけを Cooperative Groups 向けのものに変えた場合とも比較した。コー

ド全体の改訂は作業量が膨大となるため、ここでは作業量が少なくすむ関数を 1 つだけ取り出して比較した。

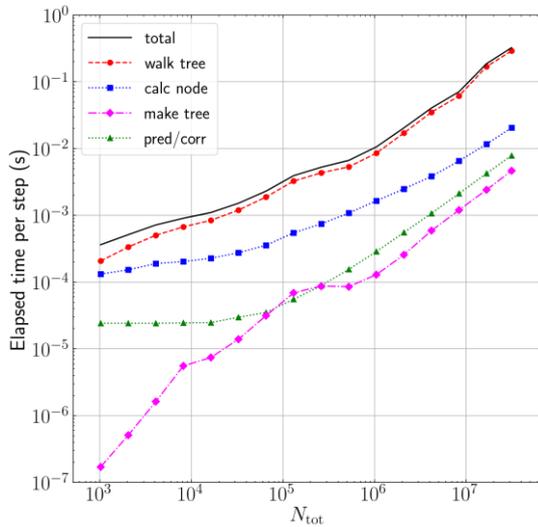


図 2: GOthic の実行時間の粒子数依存性. 全粒子数 N_{tot} の関数として, $\Delta_{acc} = 2^{-9} = 1.953125 \times 10^{-3}$ における実行時間を示した.

粒子分布を $2^{24} = 16777216$ 体の Hernquist 球, 重力計算の精度パラメータをとしたときの結果を比較すると, 独自実装版で 1.28×10^{-2} 秒, コンパイル・リンク方法だけを変えた場合で 1.28×10^{-2} 秒, Cooperative Groups による全体同期機能を用いた場合に 1.43×10^{-2} 秒となった. つまり, コンパイル・リンク方法を変えたことの影響はなかったが, Cooperative Groups による全体同期機能を用いることで 1 割程度の性能低下となった. この関数では全体同期関数をステップあたりに 21 回使用するため, Cooperative Groups の全体同期関数に切り替えたことによる 1 回あたりの追加コストは 7.1×10^{-5} 秒程度となる. また, コンパイル・リンク方法を変更したことによる性能への影響はなかったが, スレッドあたりのレジスタ使用数が 64 本から 71 本へと増加していた. したがって, レジスタ使用数によってオキュパンシーが決まる場合にはコンパイル・リンク方法を変化させ

ることによる性能低下も起こりうる. また, Cooperative Groups の全体同期関数を用いた際には 77 本のレジスタを使用していた.

Tesla V100 上で同様の実験を行った際には, 独自実装版で 4.05×10^{-3} 秒, コンパイル・リンク方法だけを変えた場合で 4.38×10^{-3} 秒, Cooperative Groups による全体同期機能を用いた場合に 4.87×10^{-2} 秒となった. レジスタの使用本数は独自実装版で 56 本, コンパイル・リンク方法だけを変えた場合と Cooperative Groups による全体同期関数を用いた場合で 64 本であった. 後者の場合には, SM あたりのブロック数が 9 から 8 へと減少していたので, コンパイル・リンク方法だけを変えた場合に性能が低下した理由はオキュパンシーの低下であると考えられる. また, Cooperative Groups の全体同期関数に切り替えたことによる 1 回あたりの追加コストは 2.3×10^{-5} 秒程度となる.

次に, アンドロメダ銀河の NW ストリーム関連に関する研究結果を紹介する. 先行研究である Kirihara et al. (2017), Komiyama et al. (2018) では N 体計算を用いて NW ストリームの 3 次元構造を概ね再現し, NW ストリームの母体が矮小銀河であることを明らかにした. しかし, 実際の矮小銀河ではダークマター成分が支配的であるため, 計算モデルのアップデートが必要である. NW ストリームを対象とした一連の研究の最終目的は, ストリーム近傍を通過するダークマターサブハローによる力学的擾乱を数值的・観測的に評価することである. このためには, ストリームを構成する恒星粒子の力学状態を正確に決定しておくことが重要であり, 矮小銀河内の力学状態を支配するダークマター成分の物理量を正確に決定しておく必要がある. そこで今年度は, NW ストリームの母体となった元衛星銀河の恒星成分とダークマター成分それぞれの質量, サイズに制限をつけるこ

とを目指す。実際のパラメータ探査はパラメータ空間が矮小銀河の物理量 (4 パラメータ) と軌道要素 (6 パラメータ) という膨大なものであるため、 N 体計算と同時に解析するという手法を取る。この目的のために、Komiya et al. (2018)においてすばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ HSC を用いて取得された star count map を国立天文台の小宮山氏から提供してもらい、観測データの解析を進めている。

課題期間の前期においては、この解析作業と並行して、パラメータ探査の前に粒子数に関する収束性を検証した。用いた粒子数は 16384, 65536, 262144, 1048576, 4194304, 16777216 の合計 6 通りである。この結果として、計算結果を十分に収束させるためには 26 万粒子では不十分であり、100 万程度の粒子数が必要であることが分かった。特に、元矮小銀河のコアが衝突後も生き残って現在観測可能であるかを議論するためには、十分な粒子数を用いた計算を実行することが重要である。ちなみに、 N 体計算を用いて NW ストリームを再現した先行研究は Kirihara et al. (2017) および Komiya et al. (2018) のみであり、用いた粒子数は 65536 であったので、

今回実行したテスト計算は NW ストリームを対象とした世界最大の計算である。

課題期間の後期においては、元矮小銀河のダークマター成分の密度プロファイルの違いが最終的な構造に及ぼす影響を調べた。宇宙論的 N 体計算からは中心でダークマター密度が発散するカスプ状の構造を持つことが示唆されている。これに対して近傍の矮小銀河の観測からは、ダークマターが中心部でコア状の構造を持つことが示唆されており、この不一致はコア・カスプ問題として知られている。NW ストリームの母体となった元矮小銀河についても、中心部におけるダークマター分布がカスプ状かコア状のどちらであるかは不明であるので、 N 体計算によって検証する必要がある。本年度実施したテスト計算においては、中心部でカスプを持つダークマター分布の方が元矮小銀河の星成分からなるコアが生き残りやすいことが確認された。現在の観測では NW ストリーム中には明確なコアは検出されていないので、今後パラメータ探査を進めていくことで NW ストリームの母体となった元矮小銀河の密度プロファイルに対する制限が与えられると期待される。

また、計算結果を収束させるために最低で

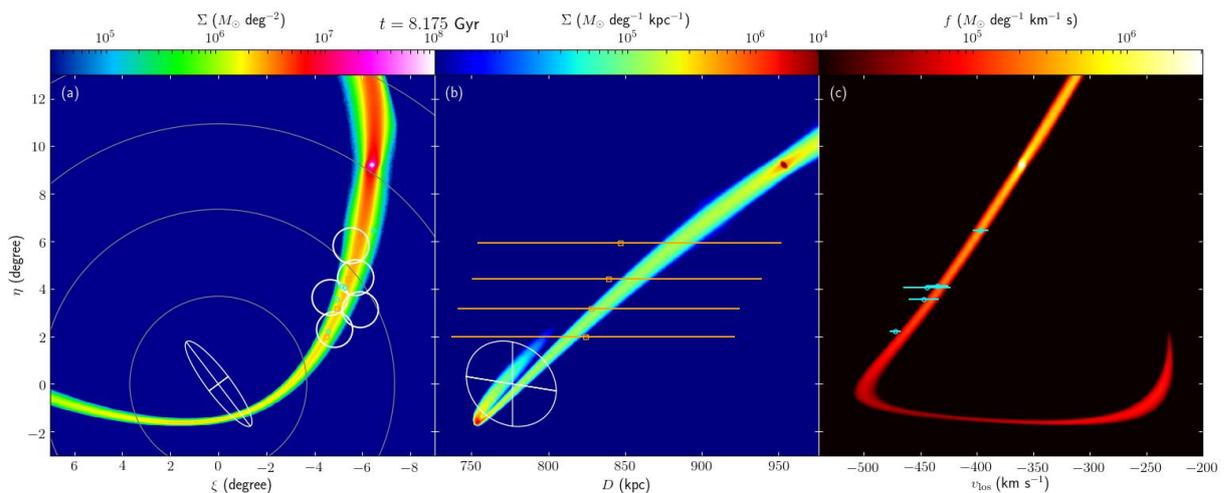


図 3 : NW ストリームの構造. (a) 天球面上での面密度分布を示した. (b) 奥行方向の分布を示した. オレンジの誤差棒付きのデータ点はすばる望遠鏡の HSC を用いて測定された NW ストリームまでの距離であり、観測結果をよく再現している. (c) 視線速度分布を示した. NW ストリームに沿って分布する球状星団の視線速度 (水色のデータ点) とよく一致している.

も 100 万粒子程度の粒子数が必要となることがわかったため、パラメータ探査の効率化を図ることが必須となった。このため、共分散行列適応進化戦略 (CMA-ES) を用いたパラメータ探査コードを実装し、テストを進めた。

天の川銀河に付随する矮小銀河である Fornax dSph に注目した研究も進めている。Fornax dSph の周辺には 5 個の球状星団が分布していることが古くから知られているが、Fornax dSph 中心からの距離が 1 kpc 程度の位置に分布していることが議論の種になっている。これは、Fornax dSph のハロー内を軌道運動する球状星団は、力学低摩擦によって宇宙年齢以内に Fornax dSph の中心へと落下すると見積もられているためである。力学的摩擦とは、球状星団やブラックホールなどの大質量天体が、恒星やダークマター粒子などの小質量天体からなる集団中を通過する際に働く物理機構である。質量の小さい天体が、大質量天体の後方にかき集められることによって、大質量天体は後方に引きずられることになり、やがてその運動速度を失う。この結果として質量の大きい天体の運動速度は低下することとなり、例えば銀河内を円運動していた場合には遠心力が弱くなり、中心領域へと落ち込んでいくこととなる。また、摩擦を受ける天体の質量が大きいほどより多くの天体を後方にかき集めるため、より強い摩擦力を受けることとなる。Chandrasekhar による力学的摩擦の定式化においては、大質量天体を質点として扱っており、その質量は時間的に変動しない。しかし、球状星団は大きさを持つ天体であるため、宿主天体からの潮汐力を受ける。これにより外縁部からの質量の剥ぎ取りが起こることとなるため、時間とともに質量が減少していく。力学的摩擦の強さは天体質量の 2 乗に比例するため、現状での見積もりは力学的摩擦の効果を過大評価しており、このことによっ

て宇宙年齢以内に中心に落下すると予言している可能性がある。

そこで本研究では、(1) 力学的摩擦だけを考えた場合、(2) 力学的摩擦に加えて潮汐力による質量の剥ぎ取りを考えた場合における球状星団の軌道進化を調べた。本計算において考慮すべきパラメータは球状星団の初期質量、初期サイズ、初期位置、初期軌道離心率である。また、潮汐力の効果を調べるためには、宿主銀河の質量やサイズについても Fornax dSph の値からずらした計算を行うておく必要がある。このため、6 次元パラメータ空間における探査が必要となるため N 体計算によって研究を進めることは現実的ではない。そこで本研究では潮汐力による進化をモデル化することによってテスト粒子を用いた計算に落とし込んだ。本計算は、東京工業大学の TSUBAME3.0 と東京大学の Reedbush-L 両方を使用して行っている。

以下では、宿主ハローの質量を $2 \times 10^7 M_{\odot}$ 、スケール長を 300 pc とした場合に、球状星団モデルとして質量 $10^{5-7} M_{\odot}$ (全 32 モデル)、スケール長 0.1 – 100 pc で (全 32 モデル)、初期の軌道離心率 0 – 0.96 で (全 16 モデル) をパラメータとして合計 16384 モデルの軌道進化を宇宙年齢 14 Gyr に渡って追った結果を紹介する。球状星団を宿主ハローから 1 kpc だけ離して置いた場合には、力学的摩擦のみを考えた際には 3 Gyr 以内に中心領域へと落下してし、観測されている球状星団分布を再現できなかった (図 4)。この結果は、先行研究によるものと一致している。これに対して、球状星団が潮汐力による質量の剥ぎ取りも受けた場合には、図 5 が黒く塗りつぶされていることから分かるように、宇宙年齢に渡って数 100 – 1 kpc の位置を運動することが分かった。こうした結果は観測されている球状星団分布とも符合するものであり、潮汐力による質量の剥ぎ取りを考え、力学的摩擦の効果を弱めることが重要であ

ることが分かった。

課題期間の後期においてはホストハローの質量 (全 32 モデル) やスケール長 (全 32 モデル) についてのパラメータ探査を実施した。特に、ホストハローの密度分布については中心部で r の -1 乗となる密度分布 (カスプ) と r の 0 乗となる密度分布 (コア) の 2 パターンの計算を実行した。全体のモデル数が 3000 万モデルにも及ぶために解析作業は完了していないが、力学的摩擦と潮汐力による質量の剥ぎ取りの効果の競争について系統的に議論するための基礎データは取得できたと考えている。

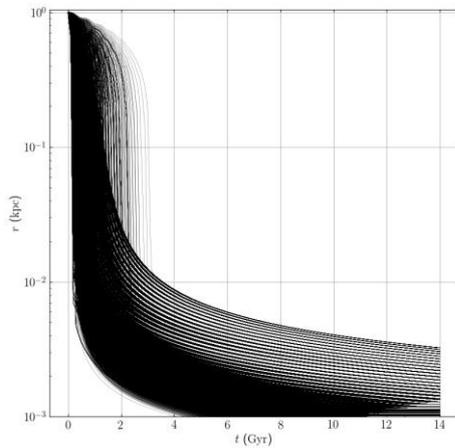


図 4: 力学的摩擦のみを考慮した場合の球状星団の軌道進化。各線が 1 つの星団モデルに対応する。

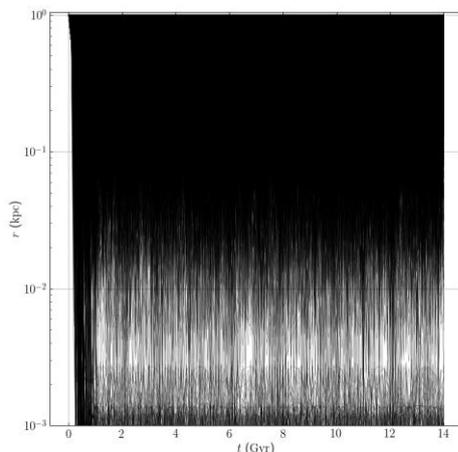


図 5: 力学的摩擦と潮汐力両方を考慮した場合の球状星団の軌道進化。

主に課題期間の後期に実施した、近傍の矮小不規則銀河 IC 10 に注目した研究について紹介する。IC 10 周辺には中性水素ガスのストリーム構造が観測されているが、このストリームには恒星成分が付随していない (Nidever et al. 2013)。こうしたガス分布を再現するために、FDPS (Iwasawa et al. 2016) を用いた N 体+SPH の計算を遂行した。この結果として、ダークマター成分とガス成分からなるサブハローが IC 10 に衝突したというモデルで IC 10 の不規則構造と恒星成分を付随しないガスストリームの両方を同時に再現できることが分かった (図 6)。本研究の成果は宮川氏の修士論文としてまとめられている。

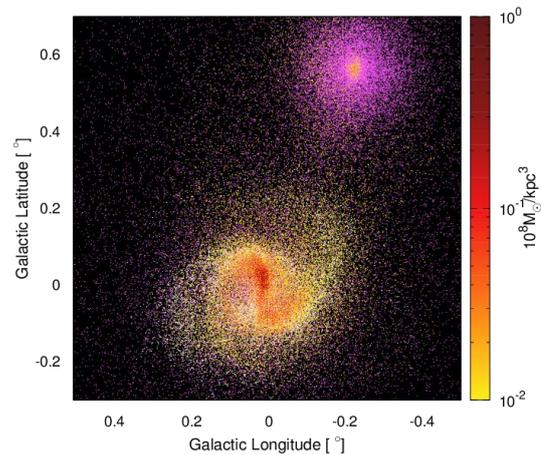


図 6: 矮小銀河 IC 10 とサブハローの相互作用シミュレーション。ダークマター粒子 (マゼンタ) と恒星粒子 (白) の位置、ガス粒子の密度分布 (カラーマップ) を示した。IC 10 付近で観測されているガスの構造および IC 10 の不規則形状を表現することに成功している。

参考文献:

Iwasawa et al. 2016, Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, 54
 Kirihaara et al. 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 469, 3390
 Komiyama et al. 2018, Astrophysical

Journal, 853, 29

Miki & Umemura 2017, *New Astronomy*, 52, 65

Miki & Umemura 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475, 2269

Nidever et al. 2013, *Astrophysical Journal Letters*, 779, L15

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

NW ストリームの再現については、当初計画では先行研究と同程度の計算規模である 6 万 体程度の N 体計算で十分であると想定していたが、実際に粒子数に関する収束性を調べてみたところ 100 万 体程度の粒子数が必要であることが分かったため、2018 年度中に完結させることはできなかった。このため、CMA-ES を用いることでパラメータ探索の効率化を図ることで 2019 年度中に NW ストリームを再現できるパラメータの発見を目指す。CMA-ES モジュール以外にも、M31 からの重力場を評価するモジュールの実装、座標変換モジュールの実装、可視化モジュールの実装については完了しているため、研究全体としては 3 割程度の作業が完了したと見積もっている。また、これに加えて、2018 年 10 月 18 日に PAndAS (Pan-Andromeda Archaeological Survey) というアンドロメダ銀河周辺の大規模撮像観測の全データが公開された (McConnachie et al. 2018)。現時点で取得できているすばる/HSC のデータは 5 フィールド分の領域だけであり、NW ストリームの全体構造をカバーするには至っていなかった。このため、PAndAS データを加えた解析を実施することで観測されている NW ストリームの全体構造との定量的な比較ができると期待される。

N 体計算の高精度化については、PPPT 法 (Oshino et al. 2011) という、ツリー法の中でブラックホール周辺などの一部分だけを

切り出して高精度化する手法の採用を計画していたが、ツリー法を用いた複数のテスト計算において、一部分だけの高精度化では不十分な場合があることが分かってきた。例えば円盤銀河の長時間進化を計算した際には、銀河円盤の円盘面 ($z=0$) においては上方 ($z>0$) からの重力と下方 ($z<0$) からの重力がちょうど打ち消し合う必要があるが、ツリー法を用いた N 体計算においてはこの打ち消しは保証されずに銀河円盤が漂流し始めることが分かっており、単に PPPT 法を用いるだけで解決可能な問題ではない。このため、FMM, Hierarchical Hamiltonian Splitting 法 (HHS 法, Pelupessy et al. 2012)、高次精度シンプレクティック法を組み合わせたコードの実装を進めており、adaptive softening への対応も含めて定式化を完了させた。研究計画としては実装完了を目指していたので達成率は 3 割程度であるとみなしている。本コードについては、2019 年度中に初期実装を完了させる予定である。

並列流体コードについては、現在は FDPS (Iwasawa et al. 2016) を用いた実装を採用し、IC 10 周辺のガスストリームの計算を遂行できた。2018 年度の計画としてはコード開発のみであったので、当初計画よりも進行しているといえる。今後のコード開発としては、Fujiwara & Mori (2016) による改良版 Integral Approach や Townsend (2009) による Exact Integration 法を取り入れていく。

矮小銀河 Fornax 周辺の球状星団分布に関する研究は当初計画にはリストアップしていなかったが、共同研究者との議論を通じて重要性が共有できたこと、現時点で計算が実行可能であると見積もられたため 2018 年度中に計算を完了させた。2019 年度には、上記計算の解析を進めていく。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

(2) 国際会議プロシーディングス

(3) 国際会議発表

T. Kirihara, Y. Miki, M. Mori, “The nature of the progenitor of the M31 north-western stream: globular clusters as milestones of its orbit”, The Eighth East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM 2018), Taiwan, Oct. 22–26, 2018.

T. Kirihara, Y. Miki, M. Mori, “The nature of the progenitor of the M31 north-western stream: globular clusters as milestones of its orbit” (poster), The life and times of the Milky Way, Shanghai, Nov. 12–16, 2018.

(4) 国内会議発表

宮川 銀次郎, 森 正夫, 三木 洋平, 桐原 崇亘, “Dark satellite と矮小銀河の衝突シミュレーション”, 日本天文学会秋季年会, 兵庫県立大学, 2018 年 9 月 19 日–21 日

三木 洋平, “Volta 世代の GPU における重カトルーコードの性能評価”, 第 166 回 HPC 研究発表会, 北海道立道民活動センター, 2018 年 9 月 27 日–28 日

三木 洋平, “Volta 世代の GPU における重カトルーコードの性能評価”, 天体形成研究会, 筑波大学, 2018 年 11 月 2 日–3 日

宮川 銀次郎, “IC 10 の HI gas stream で探る dark satellite の存在”, 天体形成研究会, 筑波大学, 2018 年 11 月 2 日–3 日

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)