

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）

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。実アプリケーションとして、アンドロメダ銀河北西領域のストリーム構造とダークマターサブハローの衝突実験を行い、 $10^9 M_{\odot}$ 程度以上のサブハローとの衝突痕跡がすばる望遠鏡に搭載予定の超広視野分光器 PFS を用いて検出可能であることを示した。また低質量矮小銀河において、質量分解能が太陽質量という高分解能シミュレーションを実行し、始原ブラックホールによる 2 体緩和がカस्प・コア遷移を引き起こす可能性を示した。計算コードの開発としては、運動量・角運動量を保存できる軌道積分法である hierarchical Hamiltonian Splitting 法の高次精度化に取り組み、4 次精度化に成功した。

1 共同研究に関する情報

1.1 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

1.2 共同研究分野

■超大規模数値計算系応用分野

1.3 参加研究者の役割分担

三木 洋平 (GPU コードの開発・性能最適化, 衛星銀河問題), 森 正夫 (衛星銀河問題, SPH コードの開発), 桐原 崇亘 (衛星銀河問題), 矢島 秀伸 (銀河とブラックホールの共進化), 杉村 和幸 (銀河とブラックホールの共進化), 佐々木 竜志 (衛星銀河問題), 大滝 恒輝 (SPH コードの開発)

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。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、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、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・進化管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う問題である。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 向きでないと言わ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 当拠点公募型研究として実施した意義

観測機器の高性能化に伴い、従来の観測では検出できなかった非常に暗い構造が多数見つかった。こうした最新の観測データと比較するためには、従来のシミュレーションよりも1桁以上質量分解能の高い重力多体計算を遂行する必要がある。また、近年の GPU の高性能化や大規模 GPU クラスターの登場によって大規模な重力多体計算が高速に計算できるようになったため、こうした高分解能の大規模計算が実現可能なものとなってきた。しかし、計算機科学分野の専門家の助けなしに GPU の高い演算性能を十分に引き出すことは容易ではない。加えて観測データの精密化により、今までは重要視されてこなかった物理過程についても精密にモデル化する必要が生じており、コード全体

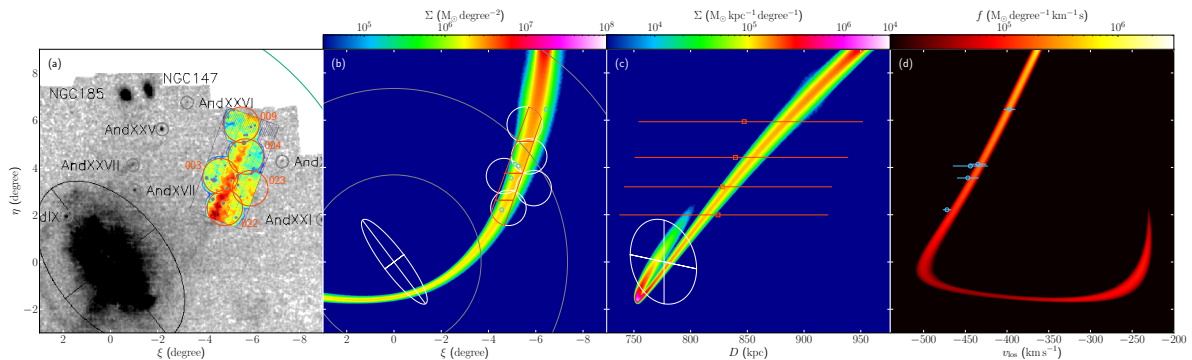


図1 (a) M31 周辺の恒星分布. Richardson et al. (2011) によって得られた恒星分布の上に、すばる望遠鏡の HSC を用いて得られた NW ストリーム領域での恒星分布 (Komiya et al. 2018) を重ねて表示した. (b) N 体計算を用いて再現した NW ストリーム. (c) NW ストリームの奥行き構造. N 体計算の結果に、Komiya et al. (2018) による距離推定の結果 (誤差棒つきの四角形) を重ねて表示した. (d) NW ストリームの視線速度構造. N 体計算の結果に、Veljanoski et al. (2014) によって得られた NW ストリームに沿って分布する球状星団の視線速度 (水色の丸) を重ねて表示した.

の複雑化はもはや避けられない。また本課題で実施するパラメータ探査では、ファイルの入出力量を削減しながら時系列データを効率的に解析するために N 体計算と同時に解析処理を行うが、このためには解析処理と N 体計算コードを統合する必要があり、コードの複雑化に拍車をかけてしまう。こうした状況は計算機科学分野の専門家にとっても困難なものであり、計算コード内に新たな物理過程を取り入れる際には、計算手法の開発などの宇宙物理学分野の専門家による支援が欠かせない。したがって、本研究の遂行のためには宇宙物理学分野と計算機科学分野の両分野の研究者どうしの緊密な協力が不可欠であり、貴拠点公募型共同研究の枠組みが研究推進のために適している。

4 前年度までに得られた研究成果の概要

NW ストリームについての研究では、恒星成分のみで表現した矮小銀河モデルやダークマター成分と恒星成分からなる矮小銀河モデルを

用いた N 体計算によって、観測されているストリームの 3 次元構造を再現した (図 1)。特に、矮小銀河を構成するダークマター成分と恒星成分それぞれの質量、サイズやアンドロメダ銀河への突入軌道を決定するための大規模パラメータ探査を遂行する前に N 体計算の粒子数に対する収束性を検証する必要があったため、16384, 65536, 262144, 1048576, 4194304, 16777216 の合計 6 通りの粒子数を用いてのテスト計算を遂行した。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 万体では不十分であり、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の遂行が必須であることが分かった。

GPU を用いた N 体計算コードの開発については、Maxwell 世代以前の GPU に向けて最適化されていたツリーコードである GOTHIC (Miki & Umemura 2017) を Pascal および Volta 世代の GPU 向けに最適化した。Tesla

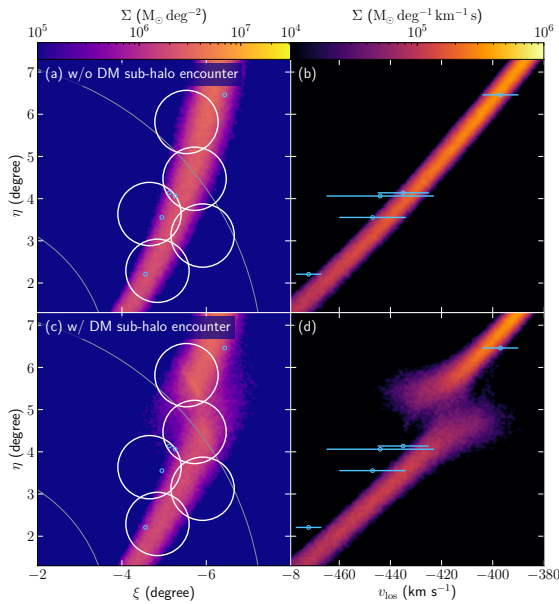


図 2 NW ストリームとダークマターサブハローの衝突痕跡。ダークマターサブハローとの衝突がない場合の結果を上段に、質量 $10^{9.5} M_{\odot}$ のダークマターサブハローとの衝突を経験した場合の結果を下段に示した。左側のパネルには NW ストリーム成分の天球面上での分布を、右側のパネルには NW ストリーム成分の視線速度構造を示しており、それぞれすばる望遠鏡の HSC 観測における観測領域 (Komiya et al. 2018) 及び NW ストリーム周辺の球状星団の分布 (Veljanoski et al. 2014) を重ねて表示した。

P100 上での計算時間は、8388608 粒子の円盤銀河モデルを用いた際に典型的な精度で 1 ステップあたり 74 ms であった。

5 今年度の研究成果の詳細

5.1 NW ストリームに関する研究成果

今年度は、NW ストリームとダークマターサブハローの系統的な衝突実験を実施する前の予備実験を行った。本予備実験においては、ダークマターサブハローの軌道を NW ストリームに衝突する円軌道として予め設定した上で、ダークマターサブハローの質量、衝突時

刻の影響を調べた。また、ダークマターサブハローについても質点として表現した場合と N 体モデルとして表現した場合についても計算を実施した。図 2 に、質量 $10^{9.5} M_{\odot}$ の質点モデルが現在時刻の 1.2 Gyr 過去に衝突した際の結果を示した。本実験の結果から、衝突の痕跡は $\eta \sim 5$ degree の位置付近におけるストリームの歪み (図 2c) およびギャップ (図 2d) としてあらわれることが分かった。この位置は Komiya et al. (2018) によって報告された NW ストリーム成分の面密度分布が低下する領域 (図 1a) と対応する。

ダークマターサブハローの衝突痕跡が NW ストリームに残ることが予備実験の結果から分かったが、今後すばる望遠鏡の HSC や PFS を用いた観測を実施するにあたっては、衝突痕跡が検出可能であるかを検討しておく必要がある。そこで、HSC の 1 視野分の領域における質量分布 (図 3) および速度分布 (図 4) を調べた。実際の観測においては、注目している NW ストリーム成分以外にも背景・前景成分が混入するため、ここでは $S/N = 3$ のホワイトノイズを加えた上で衝突痕跡が検出可能であるかを議論する。質点の質量が $10^8 M_{\odot}$ の時には空間分布・速度分布ともに衝突の痕跡がはっきりとは識別できないが、 $M \gtrsim 10^9 M_{\odot}$ であれば明確な痕跡が残るため、衝突痕跡の検出が可能だと考えられる。この痕跡は速度構造においてより顕著であるため、ダークマターサブハローとの衝突痕跡を探す上では視線速度の観測が重要であることが分かる。すばる望遠鏡の次期主力装置である PFS は、 $\sim 1.25 \text{ degree}^2$ の視野内の 2400 天体の視線速度を同時に測定可能な装置であるため位相空間上における構造探索に適しており、ダークマターサブハローと NW ストリームの衝突痕跡の検出に威力を発揮すると期待できる。以上の結果は、日本天文学会の 2020

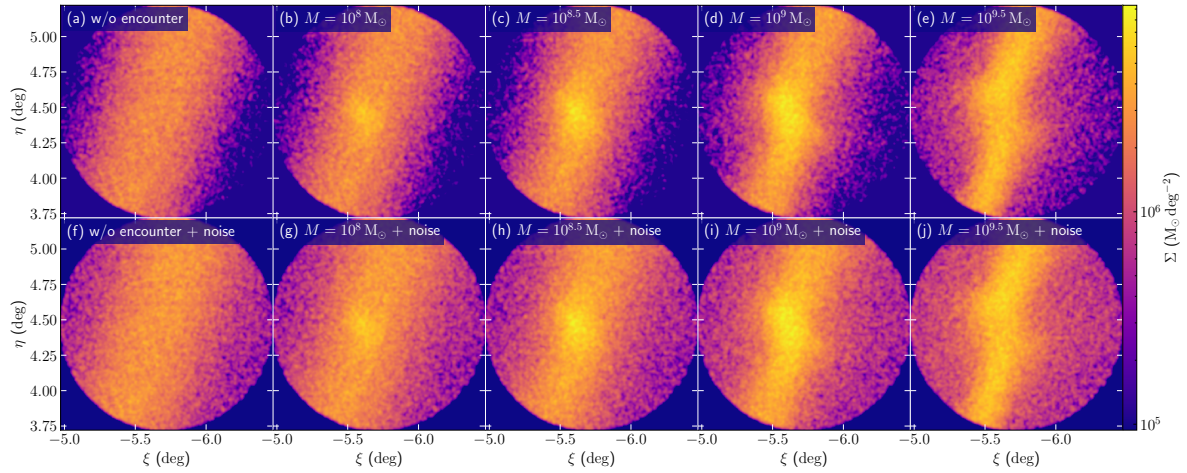


図3 ダークマターサブハローとの衝突後のNWストリームの構造. すばる望遠鏡 HSC の1視野分の領域における空間分布を示した. 左から順にダークマターサブハローとの衝突がない場合, $M = 10^8 M_\odot$, $10^{8.5} M_\odot$, $10^9 M_\odot$, $10^{9.5} M_\odot$ の質点との衝突を経験した場合の結果である. 上段には計算結果をそのまま表示しており, 下段には背景・前景成分によるノイズを加えた結果を表示した.

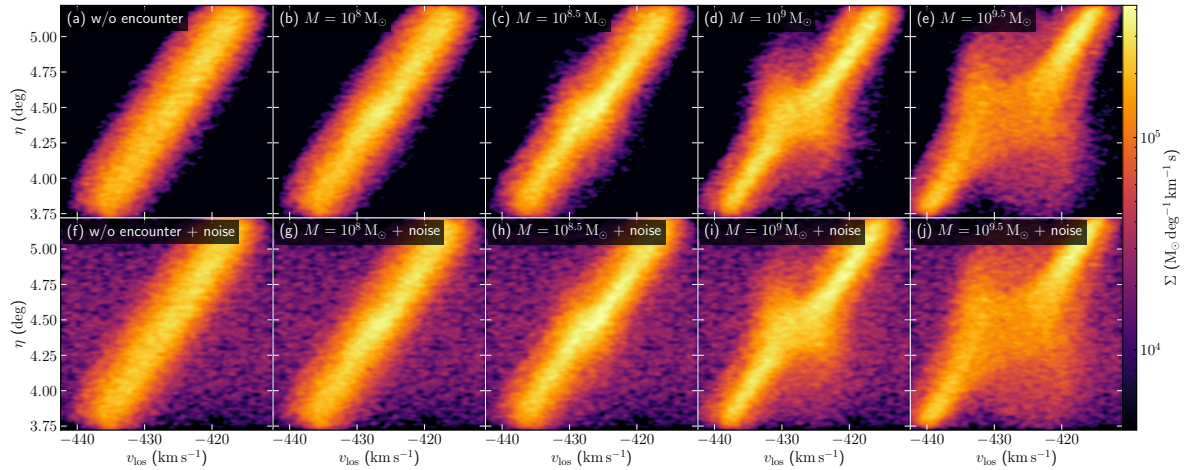


図4 ダークマターサブハローとの衝突後のNWストリームの構造. すばる望遠鏡 PFS の1視野分相当の領域における速度構造を示した. 左から順にダークマターサブハローとの衝突がない場合, $M = 10^8 M_\odot$, $10^{8.5} M_\odot$, $10^9 M_\odot$, $10^{9.5} M_\odot$ の質点との衝突を経験した場合の結果である. 上段には計算結果をそのまま表示しており, 下段には背景・前景成分によるノイズを加えた結果を表示した.

年春季年会において報告した。

また、NW ストリームの母体となった矮小銀河の性質を制限するためのパラメータ探索についても遂行した。本パラメータ探索においては、矮小銀河の軌道要素に加えて矮小銀河のダークマター成分・恒星成分それぞれの質量およびサイズを探索するため、単純なグリッドサーチでは探索しきれない。また、高次元空間におけるパラメータ探索としては MCMC がよく用いられるが、MCMC 自体はあまり並列化に適さないため、本研究では CMA-ES (Covariance Matrix Adaption evolution strategy) を採用したコード群を整備した。パラメータ探索の実行手順は

1. 前世代の計算結果からパラメータ分布を決定し、 N 体計算の初期条件を設定する。
2. N 体計算を実行し、時間発展の計算と同時進行で模擬観測を行い、観測された構造との一致度を出力する。
3. 観測との一致度と入力パラメータセットの対応関係を用いてパラメータ分布を更新する。

というものであり、これを観測された構造とよく一致するまで繰り返す。

本年度は、Komiyama et al. (2018) による観測データの提供を受けて模擬観測結果と実際の構造との一致度の定量化を行い、解析コードと N 体コード GOTHIC (Miki & Umemura 2017; Miki 2019) の統合、CMA-ES 法によるパラメータ推定と初期条件生成コード MAGI (Miki & Umemura 2018) の統合を行い、実際にパラメータ探索作業を実行した。しかし、現段階ではまだ有力なパラメータセットの特定に至っていないため、今後も継続的に探索作業を遂行する予定である。

5.2 始原ブラックホールによるカスプ・コア遷移に関する研究成果

本共同研究において継続的に開発してきた N 体コード GOTHIC (Miki & Umemura 2017; Miki 2019) 及び初期条件生成コード MAGI (Miki & Umemura 2018) を用いて、ダークマター候補の 1 つである始原ブラックホールとコア・カスプ問題に関する共同研究 (Boldrini et al. 2020) の成果を報告する。コア・カスプ問題とは、宇宙論的 N 体計算によって形成されたダークマターハローの密度分布は中心で発散するカスプ構造を持つものに対し、近傍宇宙における矮小銀河の観測からは密度分布が中心でコア状になることが示唆されているという理論と観測の不一致である。コア・カスプ問題の解決策としては、星形成・超新星爆発のサイクルに伴う周期的な重力ポテンシャルの変動によって中心部を力学的に加熱することでカスプ状の密度構造をコアへと遷移させるモデルなどが提唱されているが、本研究では恒星成分やガス成分を一切含まない系においても適用できるモデルとして始原ブラックホールに注目する。始原ブラックホールとは、ビッグバン直後に形成された可能性のある仮説上のブラックホールであり、ダークマター候補の 1 つである。ダークマター候補としての始原ブラックホールが許される質量レンジは $m_{\text{PBH}} = 4 \times 10^{-17} M_{\odot}, 2 \times 10^{-14} M_{\odot}, 25 M_{\odot} - 100 M_{\odot}$ (Carr et al. 2017) であり、本研究では $m_{\text{PBH}} = 25 M_{\odot} - 100 M_{\odot}$ に注目する。この質量レンジにおいては、全てのダークマター質量を始原ブラックホールとするモデルは既に棄却 (Carr et al. 2017) されており、ここでは全ダークマター質量に対する始原ブラックホール質量の割合 f_m を 0.01, 0.1, 0.5 の場合について調べた。

以降では、始原ブラックホールに関する物

物理量については PBH を、始原ブラックホール以外のダークマターに関する物理量については CDM をつけて区別することとする。始原ブラックホールによってダークマターハローのカスプ・コア遷移を起こす物理過程としては 2 体緩和が考えられるため、その緩和時間 $T_r(r)$ は、位置 r 以内の全質量 $M(r)$ 、始原ブラックホール数 $N_{\text{PBH}}(r)$ 、始原ブラックホール以外のダークマター粒子数 $N_{\text{CDM}}(r)$ 、位置 r における自由落下時間 $t_{\text{ff}}(r)$ 、クーロン対数 $\ln \Lambda$ と始原ブラックホール以外のダークマター粒子の粒子質量 m_{CDM} を用いて
$$\frac{M^2(r)}{N_{\text{PBH}}(r)m_{\text{PBH}}^2 + N_{\text{CDM}}(r)m_{\text{CDM}}^2} \frac{t_{\text{ff}}(r)}{32 \ln \Lambda}$$
 と見積もられる。この見積もりに典型的な値を代入すると $M = 10^7 M_\odot$ のハローであれば緩和時間が宇宙年齢よりも短くなるため、本研究では $M = 10^7 M_\odot$ のハローに注目する。ハローの密度分布は NFW モデル (Navarro et al. 1996) を採用し、始原ブラックホール粒子については質量 m_{PBH} の粒子を $f_m M/m_{\text{PBH}}$ 個、残りのダークマター粒子については質量 $m_{\text{CDM}} = 1 M_\odot$ の粒子を $(1 - f_m)M/m_{\text{CDM}}$ 個用いた。通常のダークマターハローのスケール長については、赤方偏移 $z = 2$ の $M = 10^7 M_\odot$ のハローを想定して Prada et al. (2012) による経験式から $r_s^{\text{CDM}} = 314 \text{ pc}$ と設定し、始原ブラックホール分布については $r_s^{\text{PBH}} = r_s^{\text{CDM}}$, $r_s^{\text{CDM}}/2$ の 2 通りのモデルを用いた。こうした 2 成分系を初期条件生成コードとして MAGI (Miki & Umemura 2018) を用い、準力学平衡系にある粒子系として表現した。

N 体コードとして GOTHIC (Miki & Umemura 2017; Miki 2019) を用い、11 Gyr の時間発展を計算する事で、始原ブラックホールによるカスプ・コア遷移が起こるかを調べた。この結果、 $f_m = 0.1, 0.5$ のモデルについては他のパラメータ設定によらずにカスプ・コ

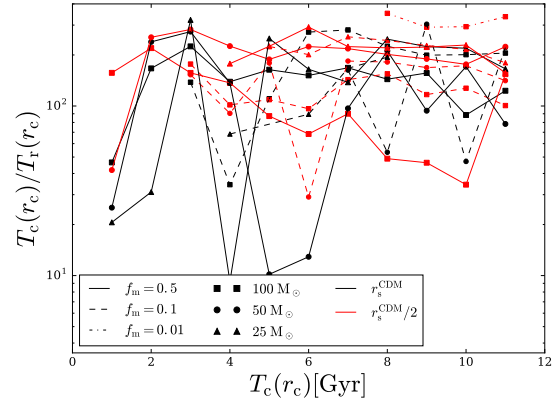


図5 コア形成時間 $T_c(r_c)$ と 2 体緩和による緩和時間 $T_r(r_c)$ の比の時間進化。線種は始原ブラックホールの割合 f_m 、シンボルは始原ブラックホールの粒子質量 m_{PBH} 、色は始原ブラックホール分布のスケール長 r_s^{PBH} に対応している。Boldrini et al. (2020) の Figure 6 を転載した。

ア遷移が起きることが分かった。

カスプ・コア遷移を引き起こした素過程を調べるために、コア半径が r_c となる時刻をコア形成時間 $T_c(r_c)$ とし、これをコア半径の位置で測った 2 体緩和時間 $T_r(r_c)$ と比較した (図 5)。図からは比 $T_c(r_c)/T_r(r_c)$ が多くのモデルにおいてあまり時間変動せず、また $f_m, m_{\text{PBH}}, r_s^{\text{PBH}}$ といったパラメータに対する依存性も小さいことが読み取れる。これはカスプ・コア遷移が 2 体緩和によって引き起こされていることを示唆している。また、 $T_c(r_c)/T_r(r_c) \lesssim 300$ であることから、コア形成時間を $T_c(r_c) \sim 300 T_r(r_c)$ として予測できるようになった。

図 6 において、ここまでで得られた理論式と計算結果を比較した。数値計算の結果 (図中のシンボル) と理論予測 (背景のカラーマップ) がよく対応していることから、カスプ・コア遷移が 2 体緩和による力学的な加熱によって起こっていると解釈がもっともらしいと考えられる。本研究によって、低質量ハローについ

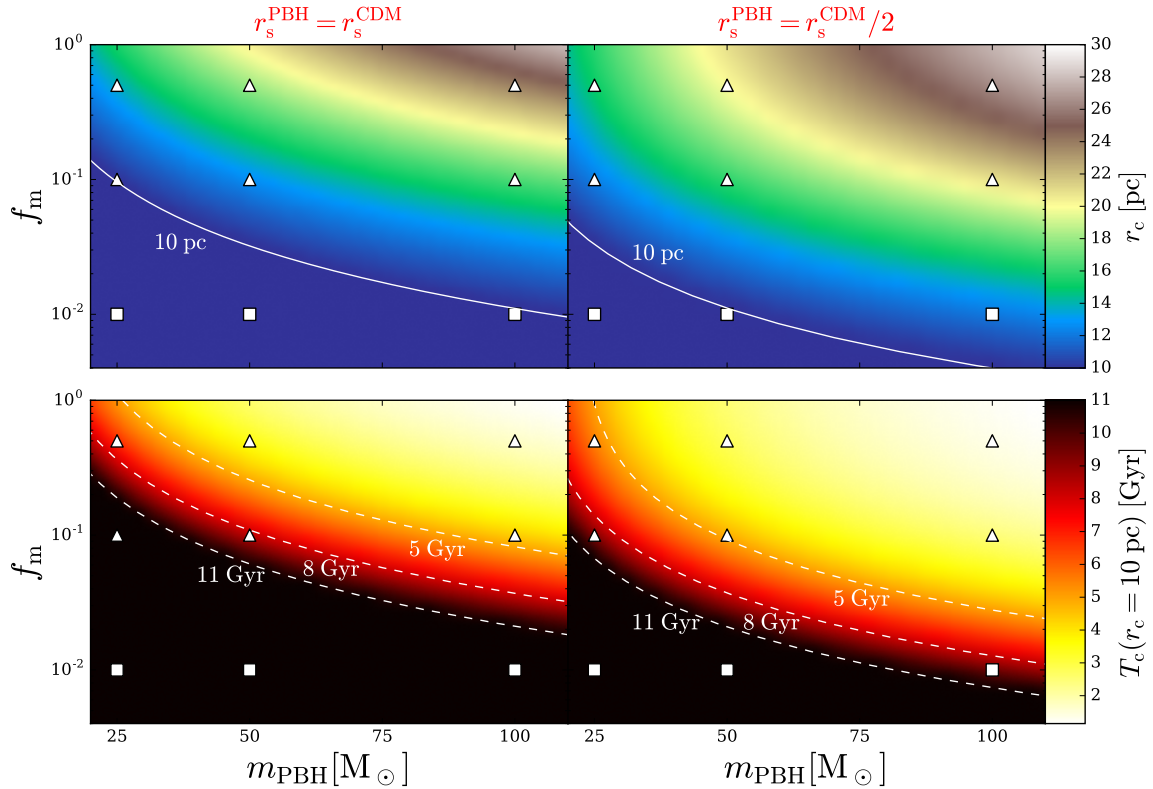


図6 コアの大きさと形成時間. コアの大きさ (上段) と形成時間 (下段) を始原ブラックホールの質量 m_{PBH} と割合 f_m に対して表示した. コアの大きさについては $t = 11$ Gyr における結果から, コア形成時間については $r = 10$ pc において見積もった. 初期のカスプ状の中心密度分布がコア状に遷移した計算結果を三角形で, 遷移しなかった計算結果を四角形で表示した. Boldrini et al. (2020) の Figure 7 を転載した.

ではカスプ・コア遷移を起こすために恒星やガスといったバリオン成分は必要でないことが分かった. これにより, ダークマターサブハローの中心領域の密度分布がコア状になっていることが考えられるため, 5.1 節で扱った研究において対象としたダークマターサブハローについても中心密度分布がカスプ状のものだけでなくコア状のものも取り扱う必要があることが分かった.

5.3 N 体計算コードの高精度化に関する研究成果

計算コードの開発として, 高次精度シンプレクティック法の適用による hierarchical Hamil-

tonian splitting (HHS) 法の高精度化・評価を行った. HHS 法は Pelupessy et al. (2012) によって提案された時間積分手法であり, 系の Hamiltonian H を時間進化が速い H_{fast} と時間進化の遅い H_{slow} の 2 種類に分割し, $H = H_{\text{fast}} + H_{\text{slow}}$ として時間発展を計算する. この時に時間刻みを複数階層設定するため, 階層的に Hamiltonian を分割することとなる. 通常の独立時間刻み法や階層化時間刻み法を用いた際には系の運動量や角運動量といった保存量が保存しなくなるという問題があるが, HHS 法においては運動量などが浮動小数点演算の精度で保存されるという特長がある.

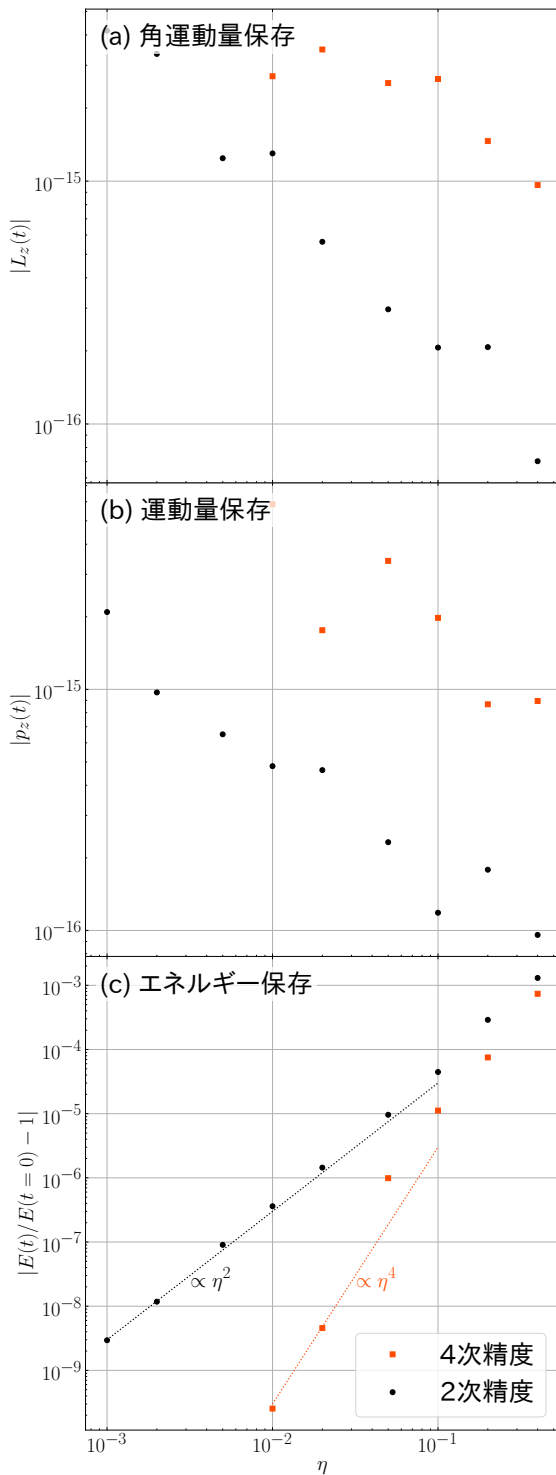


図7 高精度時間積分法の性能評価. 黒丸は先行研究 (Pelupessy et al. 2012) の手法, 赤の四角形は本研究によって 4 次精度へと拡張した手法による結果を示す. 横軸は時間刻みの制御パラメータ η の値であり, 縦軸は角運動量の z 成分の絶対値 (a), 運動量の z 成分の絶対値 (b), 全エネルギー保存の相対誤差 (c) である.

Pelupessy et al. (2012) は時間 2 次精度のスキームのみを提案したが, 4 次精度以上への適用可能性については議論されなかった. そこで本研究では, Yoshida (1990) によって提案された時間 4 次精度の leap-frog 法を応用することで, 時間 4 次精度の HHS 法を実装した. 結果は図 7 に示したとおりであり, block time step を採用しているにも関わらず, 角運動量および運動量が倍精度浮動小数点演算の演算精度程度まで保存されていることが分かる. 時間精度についても 4 次精度が達成されている.

6 今年度の進捗状況と今後の展望

NW ストリームについての研究としては, CMA-ES を用いた効率的なパラメータ探索手法の採用, 実際の観測データの提供を受けた上での定量的な評価基準の構築については, 計画通り実行できた. 一方で, 2019 年度中にパラメータ探索を終えるところまでを計画していたため, この部分については未完了である. 未完了部分については, 2020 年度からの科研費に採択された (若手研究 (20K14517) 「恒星ストリームの重力多体計算で駆動する暗黒衛星銀河探索」) ので, 当該課題の中で継続的に研究を進めていく予定である.

また観測分野の研究者との議論を進める中で, NW ストリームとダークマターサブハローとの衝突実験を実施しておく必要があることを認識したため, 2019 年度の研究計画にはなかったが複数の衝突実験を遂行した. これにより, すばる望遠鏡の HSC や PFS を用いての観測可能性が議論できるようになったため, 非常に有用な進展が得られたと言える.

加えて, 本課題の中で開発を進めてきた N 体コードを活用した共同研究として, 始原ブラックホールによるカスプ・コア遷移の研究を行った. 本共同研究により, バリオン成分を全

く含まないダークマターサブハローにおいてもカスプ・コア遷移が起こる可能性があることを示した。

N 体計算コードの高精度化については, HHS 法と高次精度シンプレクティック法の統合には成功したものの, 時間 6 次精度以上への拡張中に計算時間の増大という問題に直面した。これは, Hamiltonian の分割と軌道積分両方に高次精度 leap-frog 法を採用したためにステップあたりの重力計算の評価回数が増大したことが原因である。現在は高次精度 leap-frog 法と Hermite 法を組み合わせた実装を検討中であり, 適切な軌道積分法を構築できた後に重力計算関数の高速化に取り組む予定である。

流体計算については, Townsend (2009) による Exact Integration scheme を採用した N 体 + SPH 法の計算コードを用いてのテスト計算が実行できるようになった。今後, 実際の天体に応用した研究成果が得られた際に, 査読付論文誌に投稿する予定である。

7 研究業績一覧 (発表予定も含む)

学術論文 (査読あり)

- P. Boldrini, Y. Miki, A. Y. Wagner, R. Mohayaee, J. Silk, A. Arbey, “Cusp-to-core transition in low-mass dwarf galaxies induced by dynamical heating of cold dark matter by primordial black holes”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 492, pp.5218–5225, 11 March, 2020

国際会議プロシーディングス (査読あり)

- Y. Miki, “Gravitational Octree Code Performance Evaluation on Volta GPU”, *Proceedings of the 48th International Conference on Parallel Processing*,

pp.62:1–62:10, 5 August, 2019

国際会議発表 (査読なし)

国内会議発表 (査読なし)

- 佐々木 竜志, “Milky Way の thick disk 形成シミュレーションと Missing Satellites Problem”, 天体形成研究会 2019, 2019 年 10 月 18 日
- 三木 洋平, “アンドロメダ銀河 North-Western ストリームとダークマターサブハローの相互作用”, 天体形成研究会 2019, 2019 年 10 月 19 日
- 三木 洋平, 桐原 崇亘, 森 正夫, 小宮山 裕, 千葉 柁司, 田中 幹人, 石垣 美歩, 林 航平, “M31 恒星ストリームと暗黒物質サブハローの相互作用:すばる PFS への期待”, 日本天文学会 2020 年春季年会, 2020 年 3 月 17 日
- 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”, 日本天文学会 2020 年春季年会, 2020 年 3 月 17 日

その他 (特許, プレス発表, 著書等)

- 三木 洋平, 2019 年度 (令和元年度) 山下記念研究賞, 情報処理学会, 2020 年 3 月 6 日

参考文献

- Boldrini, P., Miki, Y., Wagner, A. Y., et al. 2020, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492, 5218
- Carr, B., Raidal, M., Tenkanen, T., Vaskonen, V., & Veermäe, H. 2017, *Physical Review D*, 96, 023514
- Komiyama, Y., Chiba, M., Tanaka, M., et al. 2018, *The Astrophysical Journal*, 853, 29
- Miki, Y. 2019, in *Proceedings of the 48th International Conference on Parallel Pro-*

- cessing, ICPP 2019 (New York, NY, USA: ACM), 62:1–62:10
- Miki, Y., & Umemura, M. 2017, *New Astronomy*, 52, 65
- . 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475, 2269
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1996, *The Astrophysical Journal*, 462, 563
- Pelupessy, F. I., Jänes, J., & Portegies Zwart, S. 2012, *New Astronomy*, 17, 711
- Prada, F., Klypin, A. A., Cuesta, A. J., Betancort-Rijo, J. E., & Primack, J. 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 423, 3018
- Richardson, J. C., Irwin, M. J., McConnachie, A. W., et al. 2011, *The Astrophysical Journal*, 732, 76
- Townsend, R. H. D. 2009, *The Astrophysical Journal Supplement*, 181, 391
- Veljanoski, J., Mackey, A. D., Ferguson, A. M. N., et al. 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442, 2929
- Yoshida, H. 1990, *Physics Letters A*, 150, 262