

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K17677

研究課題名（和文）新しいN体粒子モデル構築法の開発と矮小銀河暗黒物質ハローの3次元構造の解明

研究課題名（英文）Development of a new particle-based modelling method and determination of three-dimensional dark matter structures in a dwarf galaxy

研究代表者

井上 茂樹 (Inoue, Shigeki)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：80791053

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、現代の天文学・宇宙物理の大きな謎の一つである、矮小銀河の暗黒物質の分布形状の推定に挑戦した。数学解に基づいてきた従来の計算法とは大きく異なる、スーパーコンピュータによる数値的な新手法の開発を行った。この手法は数学的な方程式に頼らないため幾何学的な柔軟性に優れており、従来法では扱えなかった形状の暗黒物質分布をも扱うことが出来る。結果として、手法の理論的な実行可能性を示すことができたが、現状の計算機の能力では十分な精度を得ることができないということも分かった。今後の大型計算機の発展やデータサイエンス的手法の応用などの計算高速化により将来的な目的達成を目指して研究を続けたい。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では銀河天文学、宇宙論といった分野に関連する重要な、矮小銀河の暗黒物質ハローの問題を解き明かすための新しい手法の開発を行った。既存の方法の応用ではなく、全く新しいアイデアでこれまでに知られていない方法に取り組んだという点で学術的な意義が認められると思う。また、従来の解析的手法に頼らず大型コンピュータのパワーを最大限に活用して初めて成果が得られる手法であり、国内でも開発が進められるスーパーコンピュータの新しいアプリケーションの提案であると言える。今回の研究では十分な精度を得られなかったが、必要な計算量などの見積もりには成功しており、今後の将来的な大型コンピュータ計画へ期待を引き継いだ。

研究成果の概要（英文）：In this project, I study density distribution of a dark matter halo of a dwarf galaxy, which is still an open question of modern astronomy and astrophysics. To this end, I developed a novel method to deduce the shape of a dark matter halo, which is based on a more numerical approach in contrast to an orthodox one relying on analytical solutions. This method is highly flexible and can be applied to a non-spherical and arbitrarily oriented system. As results, I showed the feasibility of the novel method in theory. However, I found that enormous computational cost is required to adopt the method for achieving a practical accuracy of its parameter determinations. It means that further development of supercomputers and/or application of machine-learning methods are needed to overcome the difficulty. I continue to develop the method for the application for real dwarf galaxies with sufficient accuracy.

研究分野：銀河天文学・天体物理学

キーワード：銀河動力学 力学解析 暗黒物質 矮小銀河

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現代の宇宙論や銀河形成理論において、矮小銀河は重要な天体である。冷たい暗黒物質 (CDM) に基づく宇宙論は、通常の銀河以上の比較的大きな物理スケールの構造を再現することには概ね成功したが、矮小銀河のような小さなスケールの構造においては、未だ観測との不一致が数多く報告されている。例としては、CDM 宇宙論では銀河ハローの暗黒物質の分布は、銀河中心に向かって高密度になる「カスプ構造」が理論的に予言されるが、観測的には矮小銀河の中心では暗黒物質密度が一定である「コア構造」が支持されている (カスプ-コア問題)。他にも、天の川銀河周辺の矮小銀河の暗黒物質ハローの質量が、数値シミュレーションの予測よりも有意に軽いものが多いという問題 (TBTF 問題) などがある。こうした問題を説明・解決できるかどうかは、現在の宇宙物理学において大きなテーマとなっている。これらは銀河形成シミュレーションなどの未熟さが原因かもしれないが、「見えない暗黒物質の密度や質量を観測的に推定する」ということの難しさも一因となっている。

矮小銀河中の暗黒物質分布を推定する典型的な方法としては、まず観測された銀河の星の密度分布と仮定された重力ポテンシャルを使って、力学的な平衡解の方程式 (ジーンズ方程式など) を解く。その結果として、星の速度分散の予測が得られるので、この予測値が観測値を最も良くフィットできる重力ポテンシャルを探す、という手順で暗黒物質分布を推定する。私は過去に、星ではなく球状星団の運動を用いる方法を提案してきたが、いずれの手法においても暗黒物質分布の推定には、球対称・軸対称の銀河形状、等方な速度分布などの強い仮定を用いなければならなかった。この理由は主に、そうしないと平衡解の方程式が解けないという数学的な問題や、星の天球面上での位置と視線方向速度しか観測できないことによる観測的な制約が挙げられる。しかし、実際の矮小銀河の多くはむしろ非対称 (扁平・偏長) であり、こうした形状の対称性や速度の等方性の仮定は常に問題視されてきた。事実、Hayashi & Chiba (2012) は球対称仮定と軸対称仮定では求められる暗黒物質質量が大きく異なってしまうことを指摘している。

### 2. 研究の目的

本研究では矮小銀河の暗黒物質の分布形状を推定するための新たな手法を開発することを目的とする。これまでの多くの矮小銀河の研究は、上記のような平衡解の方程式に立脚するものが多く、全く異なるコンセプトの手法はこの研究分野における大きな進展をもたらす可能性があり、挑戦する価値があると考えられる。数学的な解析解に頼らず、より数値的に計算することによって、これまで扱えなかった暗黒物質分布形状を議論することが出来る。

手法の開発の他に、天の川銀河の近傍に存在する矮小銀河における暗黒物質を含む質量の測定を行う。上述の矮小銀河の問題は、暗黒物質質量の測定の不確かさにも原因があると考えられており、CDM 宇宙論の検証にも関連する重要さがある。本研究で開発された手法を既存の観測データに適用することで得られた、実際の矮小銀河の暗黒物質質量の推定値から、近傍宇宙での CDM 宇宙論の再検証を行いたい。

この研究は、矮小銀河だけではなく、楕円銀河や近年新たに見つかっている極めて表面輝度の低い銀河における力学解析にも応用可能であると期待できる。こうした銀河でも暗黒物質分布の問題は指摘されており、今後の発展も期待できる手法である。

### 3. 研究の方法

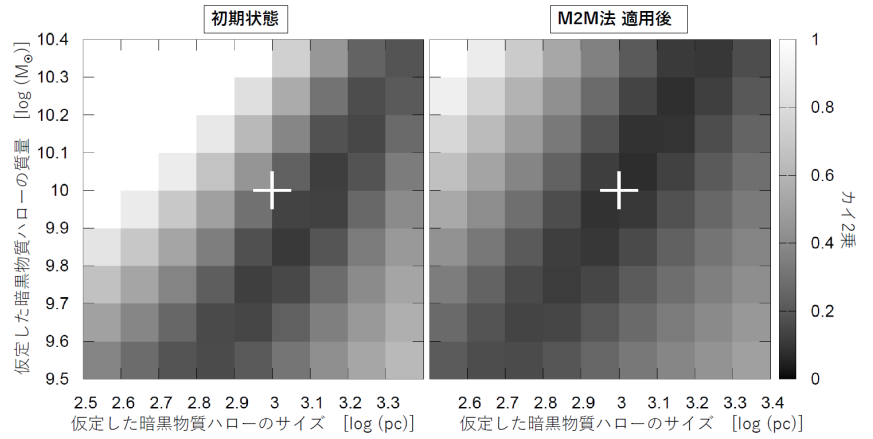
本研究は、対称性・等方性を仮定しないモデリング手法として、M2M (made-to-measure) 法に着目する。M2M 法は N 体粒子に基づいたモデリング方法であるため、数学的な解が得られない非対称な系も扱えるという柔軟性を持っており、再現したい銀河 (ターゲット) の星の密度分布や速度など、様々な観測値をうまく再現するような N 体粒子系モデルを作り出すことが可能である。手法としては、まず背景ポテンシャルを仮定し、その中で平衡な N 体粒子の系の初期条件を作る。この初期条件は任意であり、数学的な解が存在するものを選べばよい。そして数値計算によって軌道計算を行い N 体粒子系を時間発展させながら、N 体系とターゲットの密度・速度分布の一致度 (カイ 2 乗) を評価し、一致度の高い粒子の質量を増やし、一致度の低い粒子の質量は減らす操作を軌道計算しながら繰り返し行う。そうすると、N 体系はターゲットに一致するように密度・速度分布を徐々に変化させていき、全体として平衡な状態へ向かっていく。最終的に系が平衡すると完成である。完成した N 体モデルがどれほど上手くターゲットを再現したかは、最後にカイ 2 乗をもう一度計算すれば精度を評価できる。ジーンズ方程式のような数学的解法ではないため、非球対称なポテンシャルに対しても適用可能である。

M2M 法は本来、観測と比較可能な星系を N 体粒子でモデル化する方法である。しかし本研究は、この M2M 法を MCMC (マルコフ連鎖モンテカルロ) 法と組み合わせることで、観測不可能な暗黒物質の分布形状の推定に応用する方法を開発する。MCMC 法とは、天文・宇宙物理の分野では主にフィッティングパラメータの最適値を探すために使われる方法であり、多数のパラメータを扱う際に非常に効率的に最適値を探すことができる。また同時に、統計的な系統誤差、誤差範囲、パラメータ間の縮退の強さなども計算できるという利点がある。

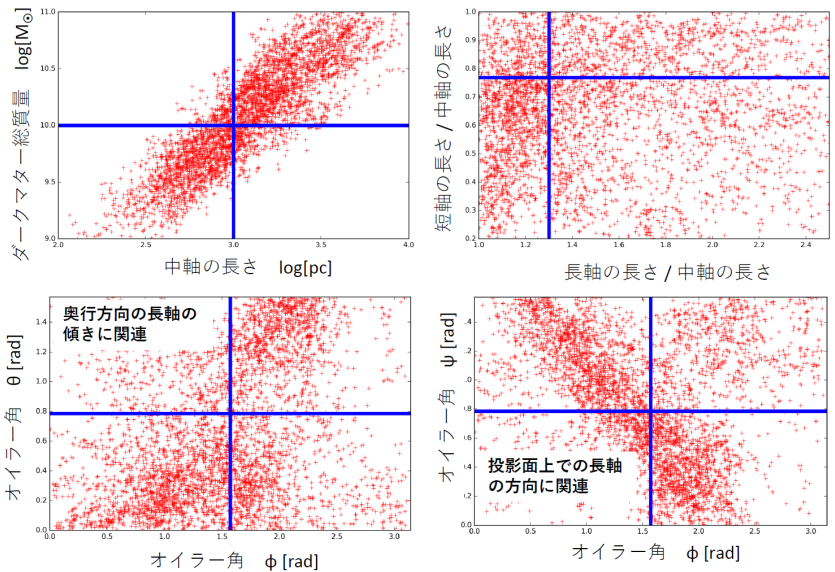
この手法を適用するターゲットの銀河として、近傍の矮小銀河の星の分光観測データを用いる、特に Fornax 矮小銀河は比較的明るく銀河であるため、星サンプルのデータが豊富であり、第 1 候補として良い天体であると期待できる。

#### 4. 研究成果

右図は、テスト計算として球対称のポテンシャルを用いて計算した例である。縦軸と横軸はポテンシャルのパラメータ、色の濃淡はカイ 2 乗の値である。中央付近の白い十字マークが、パラメータの真値を表している。注目すべき点は、M2M 計算を始める前の初期状態 (左) では、パラメータの真値でカイ 2 乗が最低値になっていないが、M2M 法の適用後 (右) では真値のところでカイ 2 乗が最低値を示している。また、M2M 法の適用後も、結果のカイ 2 乗は一定ではなく、仮定されたポテンシャルのパラメータに依存している。つまり、本研究の狙い通り、M2M 計算によるモデリングは、仮定する背景ポテンシャルの影響を受け、仮定が間違っているとフィッティングが悪くなり、最も良いフィッティング (カイ 2 乗の最低値) はパラメータが真値の場合に得られるということがわかる。



右図は、先ほどの計算を MCMC 法と組み合わせて行った場合である。先ほどの図の色の濃淡は、この図では赤い点の密集度で表される。暗黒物質ポテンシャルの形状も球対称ではなく、3 軸不等楕円体とし、さらに軸の向きも視線方向からずらした場合をテストした。左上図が先ほどの図と同じものに相当しており、暗黒物質の総質量とハローのサイズを示している。右上図はハローの 3 軸の比を示している。左下と右下図は、ハローの軸の向きを記述するパラメータである。この計算では合計 7 パラメータとなっており、各図の青い線の交点がパラメータの真値である。まず最も強くパラメータが制限出来ているのは、左上図に示したハローの質量とサイズの関係である。球対称でないハローであっても暗黒物質分布の総量と半径はよく決定できるというのがわかる。次に強く制限できるのは、右下図の投影面上でのハローの向きである。銀河が天球面上でどちらの方向を向いているかが決定できている。また、右上図から 3 軸の長さもそれぞれおおよそ決定できるということがわかる。しかし、問題は左下図に示す、奥行き方向のハローの向きである。この向きを記述するパラメータは現状の計算ではまったく制限できていない。



結果の詳細に解析した結果、このハローの奥行き方向の角度が決定できない理由は、銀河の外縁部の星がわずかにしか存在しない領域におけるサンプルの少なさが原因であることが分かった。上記の計算では N 体の粒子数が足りず、こうした低密度領域の情報がノイズに埋もれてしまっていると考えられる。ゆえに粒子数を増やすことが解決策であるのだが、それは計算コストの増大に直結してしまう。およそ 10 倍程度以上の粒子数をつぎ込まなくてはならないが、上記の計算でさえ、数か月程度を要しているため、テスト計算などを含めると現実的な規模ではないと思われる。このように手法としては理論上は可能であることが証明できたが、十分な精度を得るために必要な計算量はあまり現実的ではないということが分かった。だが、今後計算機能力の向上や機械学習などデータサイエンス手法を取り入れるなどで高速化できる可能性は十分にあり得る。今後とも研究を重ね、手法の改良に努力していきたい。

このように、本来の研究テーマはあまり成功したとは言えないが、関連する分野において多くの査読付き投稿論文を発表することが出来た。私を主著者とする査読付き論文 5 編、共著者として関わるもの 5 編を、当該期間中に発表することが出来た。

#### <引用文献>

K. Hayashi & M. Chiba, “Probing Non-spherical Dark Halos in the Galactic Dwarf Galaxies”, The Astrophysical Journal, Volume 755, Issue 2, article id. 145, 13 pp. (2012).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hayashi Kohei, Inoue Shigeki	4. 巻 481
2. 論文標題 Effects of mass models on dynamical mass estimate: the case of ultradiffuse galaxy NGC 1052-DF2	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L59 ~ L63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/sly162	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Inoue Shigeki, Yoshida Naoki	4. 巻 485
2. 論文標題 Spiral-arm instability ? II. Magnetic destabilization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3024 ~ 3041
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz584	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujimoto Seiji, Inoue Shigeki, others	4. 巻 861
2. 論文標題 ALMA 26 Arcmin2 Survey of GOODS-S at One Millimeter (ASAGAO): Average Morphology of High-z Dusty Star-forming Galaxies in an Exponential Disk ( $n \approx 1$ )	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 7 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aac6c4	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hayashi Kohei, Ishiyama Tomoaki, Ogiya Go, Chiba Masashi, Inoue Shigeki, Mori Masao	4. 巻 843
2. 論文標題 Universal Dark Halo Scaling Relation for the Dwarf Spheroidal Satellites	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 97 ~ 97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa74d9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Inoue Shigeki, Yoshida Naoki	4. 巻 474
2. 論文標題 Spiral-arm instability: giant clump formation via fragmentation of a galactic spiral arm	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3466 ~ 3487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx2978	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 井上 茂樹
2. 発表標題 宇宙論的シミュレーションにおける銀河形態のISMモデルに対する依存性
3. 学会等名 日本天文学会2019年 春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 茂樹
2. 発表標題 星形成銀河における円盤不安定性と星形成クランプの形成プロセス
3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上 茂樹
2. 発表標題 M51の渦状腕に対する力学不安定解析
3. 学会等名 日本天文学会2018年 秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上 茂樹
2. 発表標題 軸対称磁場による銀河渦状腕の不安定化とクランプ形成
3. 学会等名 日本天文学会2018 年 秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上 茂樹
2. 発表標題 Spiral-arm instability: destabilization by magnetic fields
3. 学会等名 第5回 銀河進化研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shigeki Inoue
2. 発表標題 Spiral-arm instability: Giant clump formation via fragmentation of a galactic spiral arm
3. 学会等名 Disk Instabilities across cosmic scales (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shigeki Inoue
2. 発表標題 Spiral-arm instability: Giant clump formation via fragmentation of a galactic spiral arm
3. 学会等名 Japan-German (JSPS-DAAD) Workshop 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井上 茂樹
2. 発表標題 渦状腕の線形摂動理論：渦状腕分裂によるクランプ形成
3. 学会等名 第4回 銀河進化研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井上 茂樹
2. 発表標題 渦状腕の重力不安定理論 I: 不安定性パラメータと分裂不安定条件
3. 学会等名 日本天文学会 2017年 秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井上 茂樹
2. 発表標題 渦状腕の重力不安定理論 II: 渦状腕分裂によるクランプ形成
3. 学会等名 日本天文学会 2017年 秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井上 茂樹
2. 発表標題 渦状腕の線形摂動理論
3. 学会等名 天の川銀河研究会2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----