シミュレーションで探る天の川銀河の運動と構造

藤 井 通 子

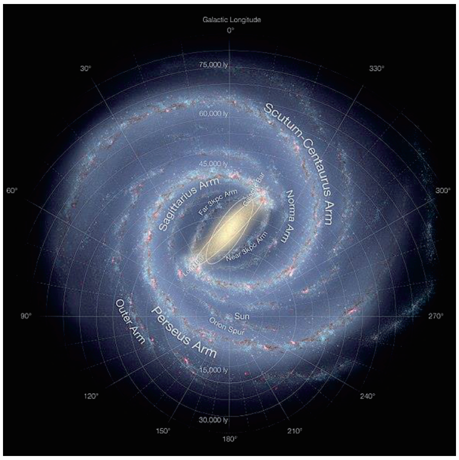
東京大学大学院理学系研究科

1．研究の背景

我々の住む太陽系は天の川銀河と呼ばれる円盤銀河の円盤の中に位置する(図 1 左)。太陽系は銀河円盤の中にあるため，我々は天の川銀河を上から眺めて見ることはできない。そのため，星までの距離をできるだけ正確に測定することによって，また他の銀河の形状から類推することによって，天の川銀河の形状を理解してきた。その結果，天の川銀河は中心部に「バー」と呼ばれる棒状の構造を持ち，その外側には「渦状碗」を持つと考えられている。また，円盤銀河は一般に，中心部にはバルジと呼ばれる球対称に近い星の分布を持ち，銀河円盤とバルジはダークマターで構成される「ハロー」の中にある(図 1 右)。

我々が観測できる範囲には限界があるため，天の川銀河の形状については，まだ多くの謎が残っている。銀河円盤を構成する星は銀河中心を中心として回転している。銀河円盤の中で，星同士の自己重力によって渦状碗は生まれ，銀河円盤のシミュレーションからは，渦状碗が時間と共に絶えず形を変えるダイナミックな銀河の姿が示唆されている[1]。しかし，太陽の位置にある星が天の川銀河の円盤の中を一周する時間は約 2 億年(200Myr)と非常に長いため，観測によって銀河の渦状碗の形状の変化を直接見ることはできない。そのため，シミュレーションは銀河の進化と現在の力学を知るために欠かせないツールである。

2018 年 4 月，2013 年に打ち上げられたヨーロッパの位置天文学衛星 Gaia がその観測結果の一部を公開した(Data Release 2; DR2)。この Gaia DR2 は Gaia が観測した 10 億個以上の星の位置、速度のデータである。10 億個以上の星であっても，太陽からの距離が数 kpc(1kpc は約 3 千光年)以内の星であり，銀河円盤の星の一部に過ぎない。これらの星の位置と速度の情報から銀河円盤全体の力学を知るためにも，シミュレーションとの比較が重要となる。一方，シミュレーションで扱える星の数は，まだ実際の銀河には遠く及ばない。



第 1 図: (左)天の川銀河の想像図 ©NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt，(右)銀河構造の模式図。

銀河の力学進化のシミュレーションでは，バルジ，円盤，ハローを粒子で再現し，粒子間に働く重力を計算して，粒子一つ一つの位置と速度の時間変化を数値積分によって求める。銀河の質量の大半を占めるのはダークマターハローであり，シミュレーションに必要なダークマターハローの粒子数は，円盤とバルジを構成する星粒子の約 20 倍である。よって，現在までに行われた天の川銀河モデルのシミュレーションで最大規模のものでも，銀河円盤を表すために用いられた粒子の数は円盤全体で 40 億粒子であり，実際の星の数より一桁少ない[2]。

銀河の渦状碗とバーは，銀河を構成する星やダークマター間に働く重力によって形成するが，非線形成長をするため，初期条件から終状態を解析的に求めることが難しい。そのため，天の川銀河の年齢である約 100 億年(10Gyr)までシミュレーションを行って，現在の天の川銀河との比較を行い，モデルを評価する必要がある。粒子一つ当たりの質量を大きくし，シミュレーションの解像度を下げて多くのモデルを試すことも可能だが，解像度が渦状碗の形成，進化に影響を与えるため，円盤に最低でも 100 万粒子が必要であることがわかっている[1]。このように，最適な天の川銀河モデルを見つけだすには，初期条件のパラメータを変えて，複数の大規模シミュレーションを行う必要がある。

２．並列 GPU ツリーコード「Bonsai」

本研究で用いたコードは，我々が 2014 年に開発した GPU に対応した並列ツリーコード「Bonsai[1]」である[2]。ツリーコードとは、ツリー法を用いて粒子間の重力を計算するコードである。ツリー法では，立方体を再帰的に分割する 8 分木構造に粒子を割り当て，十分遠くにある立方体の中にある粒子からの力は，立方体中の粒子のポテンシャルを四重極展開したものを用いる。こうすることによって，粒子間の力を全て計算する場合，粒子数 N の 2 乗の計算コストであったのに対し，ツリー法では重力の計算量を $N\log N$ に減らすことができる。

Bonsai は，粒子をツリー構造に割り当て，粒子ごとにツリー構造を辿り，重力の計算までを全て GPU 上で行う。一方，CPU はノード間の粒子情報、ツリー情報の交換，GPU—CPU 間のデータ転送を行う。このように，計算と通信をオーバーラップさせることで，Bonsai は高い並列化効率を達成しており，18600GPU を用いて 24.77Pflops を達成している。

３．銀河モデル

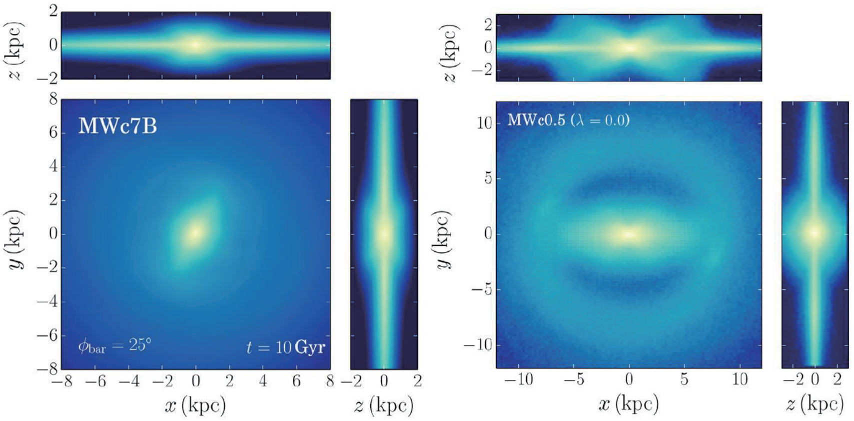
シミュレーションの初期条件は，GalactICs[3]を用いて生成した。GalactICs はオープンソースコードであり，Bonsai の中に組み込み，並列で初期条件を生成するように改良してある。GalactICs では，円盤の質量，スケール長，速度分散，バルジの半径，速度分散，ハローのスケール長，速度分散，スピンをパラメータとし，力学平衡な銀河モデルを生成する。これらのパラメータを変え，約 50 モデルについて，10Gyr までシミュレーションを行った。この時の円盤の粒子数は 800 万粒子とした。10Gyr でシミュレーション結果を以下に述べる方法で観測と比較し，天の川銀河との整合性を評価した。その中で最も実際の天の川銀河に近いと判定されたモデル 3 つについて，粒子数を約 50 倍に増やした高分解能シミュレーションを行った。今回のシミュレーションでは，ダークマターを含めると最大 80 億粒子を使用している。これらの高分解能シミュレーションは Swiss National Supercomputing Centre の GPU クラスタ Piz Daint を用いて行った。

---

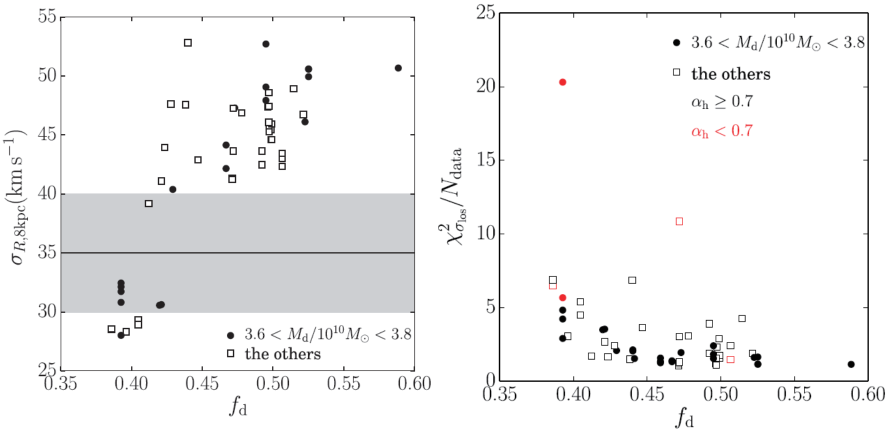
1 https://github.com/treecode/Bonsai

4. 結果：観測との比較

第 2 図(左)は、最も観測と合うモデルの 10Gyr での円盤の面密度分布(スナップショット)である。実際の天の川銀河と同程度の長さのバーが形成していることがわかる。次に，観測との比較を行うために，太陽の位置(銀河中心から 8kpc)での円盤の面密度，円盤の星の速度分散，バルジ領域の星の速度構造を観測と比較した。また，これらの値の初期条件依存性を調査し，初期条件を決定するパラメータの内，どれが重要であるかを調べた。第 3 図の横軸は，初期条件における円盤の全体に対する質量比(f_d)である。この f_d は円盤の太陽近傍での速度分散(第 3 図左)とバルジ領域の速度構造(第 3 図右)に対して傾向が逆であるため，これらの情報から，f_d=0.4−0.45 が天の川銀河モデルとして最適であることがわかった。



第 2 図：(左)ベストフィットモデルのひとつの 10Gyr での円盤。(右)ハロースピンのないモデル。Fujii et al. 2019, MNRAS, 482, 2, p.1983-2015 [4] 図 6, 7 より転載。

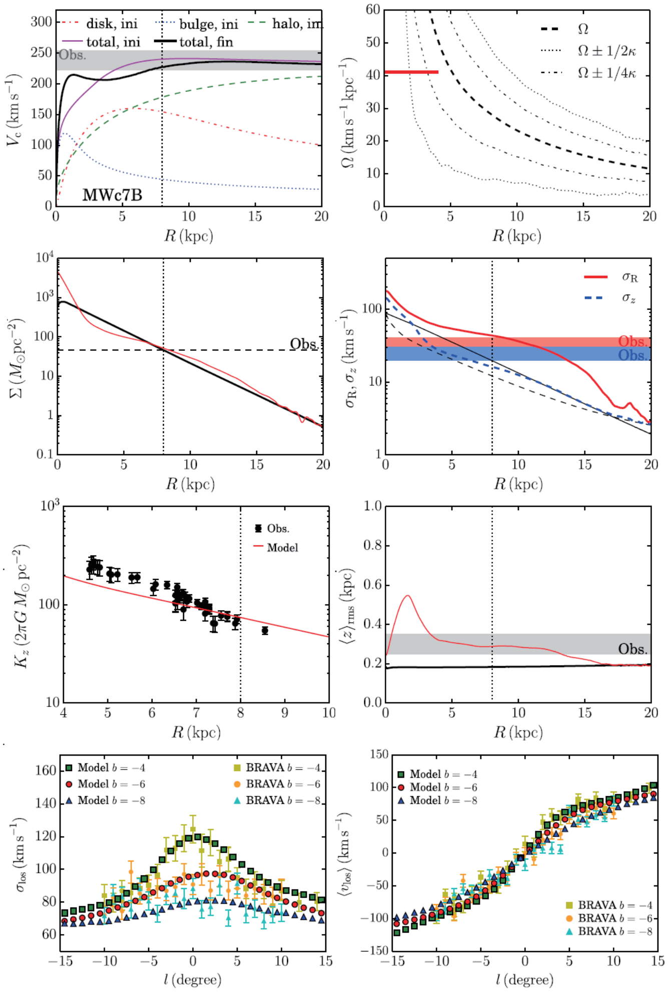


第 3 図：(左)円盤の質量が全体に占める割合と円盤領域での最終的な速度分散の関係(プロット点はシミュレーション)，グレーの領域は天の川銀河で観測された値の範囲。(右)円盤の質量の割合とバルジ領域の速度構造(第 4 図参照)の観測とのずれ(χ^2)。

この値が小さいほど観測との差が小さい。Fujii et al. 2019, MNRAS, 482, 2, p.1983-2015 [4] 図 11, 13 より転載。

また，ハローのスピンもバーの長さと回転速度に対し，非常に重要なパラメータであることもわかった。第 2 図右は，初期のハロースピン(円盤と同方向のハローの回転)がないモデルである。一方，ベストフィットモデルではいずれも，ハロー粒子の 80%が初期に正の z 軸方向(円盤の回転軸)の角運動量を持っていた(50%の場合，スピンなし)。バーは，角運動量をハローに渡すことで回転速度を下げ，その結果，バーの長さはより長くなる。しかし，ハローが初期に円盤と同方向のスピンを持つと，バーがハローに輸送できる角運動量がスピンのない場合より早期に限界に達し，その時点でバーの成長が止まる[5]。天の川銀河でもこのプロセスが働いている可能性が高い。

このような値と観測値とのずれを 50 以上の全てのモデルについて評価し，ベストフィットモデルとして 3 つのモデルを選び，粒子数を増やした高解像度のシミュレーションを行った。第 4 図は，第 2 図(左)にあるベストフィットモデルの 10Gyr での銀河の回転速度，バーのパターン測度，円盤の密度プロファイル，円盤の星の速度分散，バルジの星の速度構造の天の川銀河の観測値との比較である。このモデルが観測をほぼ再現できていることがわかる。



第 4 図：10Gyr での銀河円盤の回転速度，バーの回転速度，密度プロファイル，速度分散，円盤の z 方向の重力，円盤の厚さ，バルジ領域の速度分散と視線速度の分布。

Fujii et al. 2019, MNRAS, 482, 2, p.1983-2015 [4] 図 3 より転載。

５．議論：天の川銀河の力学

Gaia[6]や30年前の位置天文学衛星Hipparcosの観測[7]によって，太陽近傍の星の速度空間分布にはHercules streamと呼ばれる特徴的な構造が見られ，それは天の川銀河のバーによって作られる星の共鳴によるものであると考えられてきた。もし，Hercules streamがバーとの共鳴によるものだとすると，バーの回転するパターン速度は50 km/s/kpc程度であると推定される[8]。一方，同じGaiaのデータを用いても，バーの中の星の速度構造の解析からは，バーのパターン速度は40 km/s/kpcと推定されている[9]。本研究で得られたベストフィットモデルでは，バーのパターン速度は40−45 km/s/kpcと遅めの値であった。

また，シミュレーションの結果を疑似観測することで，Hercules streamのような構造が見られるのかを調べた。シミュレーションで得られた天の川銀河モデルでは，時間と共に渦状碗の構造が変わる。バーと渦状碗の運動は相互に依存し，バーのパターン速度は渦状碗によって振動する。このような環境下で，共鳴が常に起こっているかは定かではない。実際，パターン速度から推定される共鳴によるstreamが見られるはずの場所での疑似観測では，100個ほどの時間の異なるデータセットのうち，約半数でしかstreamが見られなかった。今後，シミュレーションデータから粒子一つ一つの軌道を追い，共鳴の有無について調べたり，シミュレーションで得られたstream構造を作る要因は何であるのかを調べたりしていく必要がある。

６．まとめ

本研究では最大80億粒子を用いた大規模シミュレーションを行い，粒子系で表現された天の川銀河モデルの構築を行った。これは世界最大規模の天の川銀河シミュレーションである。50以上のモデルを計算した結果，天の川銀河に近いモデルを作るために必要な条件は，円盤の質量などの他に，円盤の質量の銀河全体の質量に対する比が0.4—0.45程度であること，ハローが初期に円盤と同方向のスピンを持つことであることがわかった。

また，2018年に位置天文学衛星Gaiaのデータリリースがあったが，本研究で得られたデータはこのような大規模データとの比較も可能な粒子数のデータである。さらに，時間方向のデータも豊富にあるため，粒子一つ一つの軌道を保存されたデータから追うこともできる。今後は，保存されたデータを詳しく解析し，Gaiaの観測データと比較していくことで，天の川銀河の構造と運動の理解が進むことが期待される。

謝　辞

本研究のシミュレーションはReedbush-Lの他，Swiss National Supercomputing CentreのPiz Daintを用いて行われました。コードの開発には、筑波大学計算科学研究センターのHA-PACS, Oak Ridge National LaboratoryのTitan, Leiden ObservatoryのLittle Green Machine，国立天文台 天文シミュレーションプロジェクトのATERUIを利用しました。

参　考　文　献

[1] Fujii, M. S., Baba, J., Saitoh, T. R., Makino, J., Kokubo, E., & Wada, K., “The dynamics of spiral arms in pure stellar disks”, 2011, ApJ, 730, 109

[2] Bédorf, J., Gaburov, E., Fujii, M. S., Nitadori, K., Ishiyama, T., & Portegies Zwart, S. “24.77 Pflops on a gravitational tree-code to simulate the Milky Way Galaxy

with 18600 GPUs", 2014, SC '14 Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, Pages 54-65

[3] L. M. Widrow, B. Pym, and J. Dubinski, "Dynamical Blueprints for Galaxies", 2008, ApJ , 679, pp. 1239-1259

[4] Fujii, M., Bedorf, J., Baba, J., & Portegies Zwart, S., "Modeling the Milky Way as a Dry Galaxy", 2019, MNRAS, 482, 2, p.1983-2015

[5] Long S., Shlosman I., Heller C., "Secular Damping of Stellar Bars in Spinning Dark Matter Halos", 2014, ApJ, 783, L18

[6] Dehnen W., "The Effect of the Outer Lindblad Resonance of the Galactic Bar on the Local Stellar Velocity Distribution", 2000, AJ, 119, 800

[7] Gaia Collaboration, 2018, MNRAS, 616, A1

[8] Monari G., Kawata D., Hunt J. A. S., Famaey B., "Tracing the Hercules stream with Gaia and LAMOST: new evidence for a fast bar in the Milky Way", 2017, MNRAS, 466, L113

[9] Bovy, J., Leung, H. W., Hunt, J. A. S., Mackereth, J. T., Garcia-Hernandez, D. A., Roman-Lopes, A., "Life in the fast lane: a direct view of the dynamics, formation, and evolution of the Milky Way's bar", 2019, arXiv:1905.11404