

伴銀河から摂動を受ける銀河系円盤のN体シミュレーション

N-body simulations of the Galactic disk perturbed by the satellites

朝野哲郎
東京大学

1. 研究目的

欧州宇宙機関 (ESA) の位置天文衛星Gaiaの観測によって、天の川銀河の星の位置・速度が大規模かつ高精度に測定されている。Gaiaの観測から、天の川銀河円盤の力学的な構造が明らかになってきており、最新のデータでは円盤に波のような構造が見つかっている。このような構造は、天の川銀河が非定常・非平衡状態にあることを示唆していて、伴銀河（特に、いて座矮小銀河）による外的摂動に起因すると考えられている。観測データは、天の川銀河の現在時刻におけるスナップショットであり、銀河構造の時間進化を明らかにするためには、観測データと理論モデルとの比較が必要である。

本研究では、天の川銀河といて座矮小銀河を組み合わせた系の大規模N体シミュレーションを行うことで、伴銀河による外的摂動が銀河円盤に与える力学的影響を理論的に調べた。特に、天の川銀河モデルには、伴銀河との近接遭遇以前からバーを持つ円盤銀河モデルを用いることで、外的摂動がバーに与える影響についても調査した。

2. 研究成果の内容

本研究では、孤立円盤銀河のN体モデル (Fujii et al. 2019) に、いて座矮小銀河に対応する伴銀河を追加してN体シミュレーションを行った。GPU並列のツリーコードBonsaiを用い、計算はCygnusで実行した。はじめに、いて座矮小銀河と同じような軌道を持つ伴銀河の初期条件を探すために、低解像度（粒子数1000万程度）のシミュレーションを約100モデルに対して行い、その中の数モデルについては、最終的に粒子数50億体の計算を行った。以下、高解像モデルの解析に基づく、主要な結果を記す。

(1) 銀河円盤振動の時間進化

銀河円盤のz方向（銀河面に鉛直方向）の振動には、bendingとbreathingという二つのモードが存在する。bending (breathing)は、銀河面の上下が同方向（逆方向）に振動するモードである。Gaiaの観測では、太陽近傍や銀河円盤外縁方向ではbendingの兆候が強く現れているのに対して、銀河中心方向ではbreathingが強く見られている。bendingモードについては、伴銀河による外的摂動によって説明できることが先行研究で示されている。一方、breathingモードについては、その起源は解明されていない。本研究のシミュレーションでは、bendingとbreathingの両方を再現できており、特にbreathingモードについては外的摂動に起因する渦状腕 (tidally induced spiral arm) によって励起されていることがわかった。また、bendingモードとbreathingモードは減衰の時間スケールが異なること、さらに

bendingモードについては減衰時間スケールが銀河中心からの距離とともに増加することを示した。Gaiaデータで見られているbendingとbreathingモードの空間的棲み分けは、二つの振動モードの振る舞いの違いによって説明できる。

(2) 外的摂動下でのバー進化

伴銀河による外的摂動がバーに与える影響を調べた。具体的には、銀河全体の表面密度を求めフーリエ変換することで、バーのパターン速度を計算した。図1は、孤立銀河モデルとそれに伴銀河を追加したモデルでの、バーのパターン速度の時間進化を示している。t=2Gyrで伴銀河が近点通過した後、伴銀河のあるモデルでは、バーの減速率がわずかに上昇した。ただし、その後、時間が経過すると二つのモデルは同程度のパターン速度となった。他にもバーの強度、長さを計算したが、パターン速度と同様に二つのモデルで僅かな差がみられた。いて座矮小銀河のように極軌道を持つ伴銀河の場合、バーへの影響は小さいことがわかった。

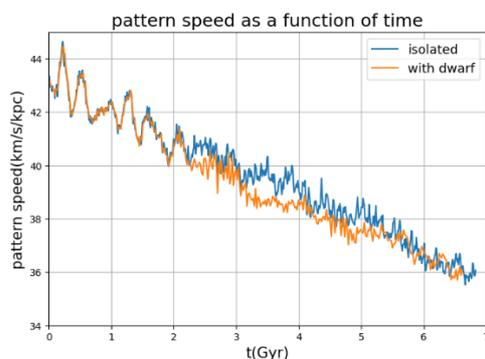


図1 バーパターン速度の時間進化。青：孤立銀河モデル。オレンジ：同じモデルに外的摂動源として伴銀河を追加した場合。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

Gaiaによって太陽近傍の星の詳細な位相空間分布が観測的に求められている。Gaiaで観測されているような位相空間分布の微細構造を分解するためには、大量の円盤粒子（数千万から1億体程度）を用いた高解像度のシミュレーションを行う必要がある。さらに、銀河円盤とダークマターハロとの相互作用や、動的摩擦による伴銀河軌道の減衰を正しく計算するには、ダークマターハロも円盤と同じ質量分解能の粒子系として取り扱う必要がある。このような条件から要求される総粒子は約50億であり、このような大規模N体計算を実行するためには、Bonsaiのような高い並列化性能を持つ計算コードに加えてCygnusのような大規模GPU計算機が不可欠であった。

4. 今後の展望

2.で記したように、伴銀河との近接遭遇に起因してバーの強度とパターン速度の変化が見られた。バーは円盤の星の運動に強い影響を与えており、特にパターン速度が減速する場合には、星の動径方向の移動（radial migration）を引き起こすことが理論的に示されている（e.g., Chiba et al.）。外的摂動がバーのパターン速度変化を誘発するならば、伴銀河は、直接的影響のみならず、バーの進化を介して間接的に円盤の星の運動

に影響を与える可能性がある。今回のシミュレーションは、いて座矮小銀河のみをターゲットにしていたが、今後は伴銀河の軌道や質量を変えて計算を行い、外的摂動がバーに与える影響を系統的に調査する。

5. 成果発表

(1) 学術論文

Asano Tetsuro, Kawata Daisuke, Fujii Michiko S, Baba Junichi, “Growing local arm inferred by the breathing motion”, 2024, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 527, L7

(2) 学会発表

朝野哲郎, 『天の川銀河のN体シミュレーション』, シミュレーション天文学のこれまでとこれから -ハードウェア・アプリケーション・サイエンス-, 2023年9月
朝野哲郎, 藤井通子, 馬場淳一, Jeroen Bedorf, Simon Portegies Zwart 『伴銀河からの外的摂動に起因する銀河系円盤の振動』, 日本天文学会2023年秋季年会, 2023年9月

Tetsuro Asano, “Bending and breathing waves of the Galactic disc”, Surveying the Milky Way: The Universe in Our Own Backyard, 2023年10月

朝野哲郎, “Vertical oscillation of the Galactic disk”, 第36回理論懇シンポジウム「高赤方偏移のフロンティア」, 2023年12月

Tetsuro Asano, “Vertical oscillation of the Galactic disc”, Dark Matter in the Universe: The Present and Future of Galactic Archaeology and Near-field Cosmology, 2024年3月

朝野哲郎, 『銀河円盤の鉛直振動から示唆される渦状腕の成長・崩壊』, 天の川銀河研究会2024, 2024年3月

(3) その他

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	○	22,000	
Wisteria/BDEC-01			

※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。