

天の川銀河とその伴銀河の N 体シミュレーション

N-body simulations of the Milky Way and its satellite gala

朝野哲郎

東京大学

1. 研究目的

欧州宇宙機関 (ESA)の観測衛星 Gaia によって大規模な位置天文観測サーベイが行われている。星は銀河の重力ポテンシャルに従って運動しているため、位置天文観測データから得られる星の位相空間分布を詳細に調べることで、天の川銀河の力学構造とその進化の歴史に関する情報を引き出すことができる。特に、Gaia 第二期データ公開以降、銀河円盤が非定常・非軸対称であることを示唆する結果が多く得られている。その一つが、 $z-v_z$ 空間 (z と v_z はそれぞれ銀河面に垂直方向の位置と速度) の **phase spiral** と呼ばれる位相空間サブ構造である。**phase spiral** は、天の川銀河の衛星銀河の一つである「いて座矮小銀河」によって銀河円盤が揺さぶられたことで、生じたものだと考えられている。先行研究では、N 体シミュレーションや解析的な理論モデルなどによって、衛星銀河による外的摂動が **phase spiral** を発生させることが示されているが、実際のいて座矮小銀河よりも 10 倍以上重い摂動源を仮定していたり、天の川銀河自身のバーや渦状腕による内的摂動が無視されているなど、理想化された状況のみが考えられてきた。本研究の目的は、現実的な N 体シミュレーションによって、いて座矮小銀河のような衛星銀河による摂動が **phase spiral** を発生させ得るか検証し、さらに Gaia の観測データと比較可能な高解像度の N 体銀河モデルを構築することである。

2. 研究成果の内容

天の川銀河+衛星銀河の系の 50 億体規模の N 体シミュレーションを行った。天の川銀河の初期条件としては、Fujii et al. (2019)による孤立円盤銀河シミュレーションの最終スナップショットを用いた。衛星銀河については、現在のいて座矮小銀河と同程度 (5×10^8 太陽質量) の質量の場合とその 10 倍程度の質量の場合の 2 パターンを試した。重い衛星銀河による摂動では、その近接遭遇時に母銀河の円盤に振動を発生させ、その振動が $z-v_z$ 空間の **phase spiral** として観測されることを確認した。また、銀河円盤の振動には **bending** モードと **breathing** モードと呼ばれる 2 つの振動モードが存在し、それぞれ異なるメカニズムで発生することを明らかにした。**Bending** モードが衛星銀河による外的摂動によって直接的に励起されるのに対して、**breathing** モードは外的摂動に起因する渦状腕 (tidally induced spiral arms)に付随し

て発生することが分かった。二つの振動モードは、減衰のタイムスケールが異なるため、この時間差を利用して観測的に、天の川銀河が摂動を受けた時間を推定することができる可能性がある。また、軽い衛星銀河による摂動の場合には、太陽近傍（銀河中心からの距離 8 kpc 付近）では **phase spiral** は見られなかったものの、バー端では衛星銀河の近点遭遇直後に **phase spiral** が発生した。この成因については外的摂動がバーに対して何かしらの影響を与えたなどの可能性が考えられる。

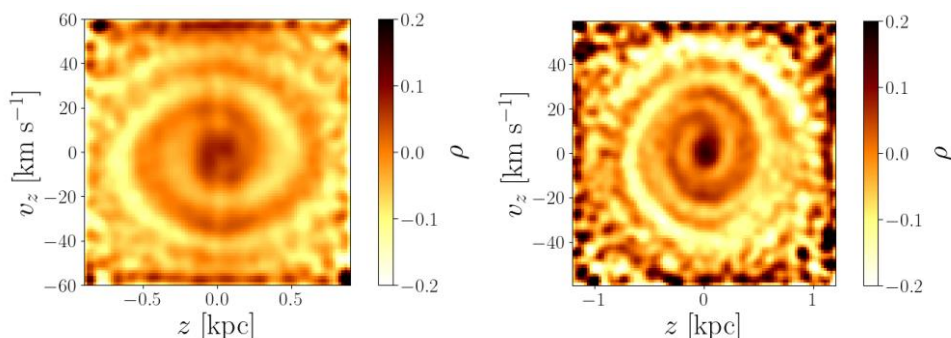


Figure 1 太陽から 1 kpc 以内の星の $z - v_z$ 空間分布。左 : Gaia 衛星の観測データ。右 : シミュレーション。 $\rho \equiv n(z, v_z) / n_{smoothed}(z, v_z) - 1$, $n(z, v_z)$ は $z - v_z$ 空間の数密度、 $n_{smoothed}$ は、それに Gaussian smoothing を施したものの。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究では、位相空間分布の微細構造まで分解できるような高解像度の N 体シミュレーションを行った。力学摩擦による衛星銀河の軌道減衰やダークマター (DM) ハロと銀河円盤の間の相互作用を正しく計算するには、DM ハロも円盤粒子と等質量の粒子系として表現しなければならず、必要な粒子数は合計で 50 億程度となる。本研究では、このような大規模計算のために GPU ツリーコード Bonsai を用いた。Bonsai を高並列で動かすためには、多数の GPU を搭載したスーパーコンピュータである Cygnus が必要であった。

4. 今後の展望

今回のシミュレーションによって、衛星銀河による外的摂動に起因してバーや渦状腕の構造の変化が見られた。今後、衛星銀河の質量や軌道などのパラメータを変えながらシミュレーションを行い、衛星銀河が渦状腕やバーに与える影響を系統的に調査していく予定である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

「位置天文観測と天の川銀河の N 体シミュレーションの比較」、日本天文学会 2022 年秋季年会、2022 年 9 月、新潟大学

「伴銀河から摂動を受ける天の川銀河円盤」、天の川銀河研究会 2022、2022 年 11 月、鹿児島大学

"Galactic disk perturbed by the satellite galaxies", CHALLENGES AND INNOVATIONS IN COMPUTATIONAL ASTROPHYSICS – IV, 2022 Nov, Online

「いて座矮小銀河から摂動を受ける天の川銀河円盤」、第 33 回理論懇シンポジウム、2022 年 12 月、福島市

“Impact of the Satellites on the Dynamical Evolution of the Galactic Disk”, IAU Symposium 372 “Early disk formation from JWST to Milky Way”, 2023 Feb, Kuala Lumpur

(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	○	12600	
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。			