



Um modelo de N-corpos auto-consistente da Via Láctea

A self-consistent N-body model of the Milky Way

Gustavo Fernandes Gonçalves¹, Rubens Eduardo Garcia Machado²

RESUMO

A utilização de simulações N -corpos é uma abordagem comumente aplicada para explicar, reproduzir e prever fenômenos em astronomia extragaláctica. Um modelo da Via Láctea consistente com os valores de referência físicos atuais é particularmente valioso para analisar fenômenos, como a distribuição das estrelas em seus diferentes componentes, históricos e possíveis futuros da Galáxia. Este trabalho teve como objetivo apresentar um modelo numérico de uma galáxia espiral barrada isolada que reproduz com precisão várias características físicas da Via Láctea simultaneamente, para isso foi empregado o uso do software GADGET-4 de N -corpos e Hidrodinâmica de Partículas Suavizadas (HPS). Como uso prático para o modelo numérico, projetamos um algoritmo para estimar o comprimento da barra da galáxia. Valores da taxa de formação estelar, a proporção de gás, a distribuição das estrelas formadas, morfologia e aspectos da barra foram alcançados de acordo com valores de referência em nosso modelo numérico.

PALAVRAS-CHAVE: Galáxia; parâmetros fundamentais; métodos numéricos; Via Láctea.

ABSTRACT

The use of N -body simulations is a commonly applied approach to explain, reproduce and predict phenomena in extragalactic astronomy. A model of the Milky Way that is consistent with current physical reference values is particularly valuable for analyzing phenomena, such as the distribution of stars in its different components, the history and future of the Galaxy. This work aimed to present a numerical model of an isolated barred spiral galaxy that accurately reproduces several physical characteristics of the Milky Way simultaneously, using the software GADGET-4 N -body and Smoothed-particle Hydrodynamics (SPH) software. As a practical use for the numerical model, we designed an algorithm to estimate the galaxy's bar length. Values of the star formation rate, the proportion of gas, the distribution of the stars formed, morphology and aspects of the bar were achieved according to reference values in our numerical model.

KEYWORDS: Galaxy; fundamental parameters; numerical methods; Milky Way.

INTRODUÇÃO A SIMULAÇÃO DE N -CORPOS

As simulações numéricas são fundamentais na astronomia extragaláctica moderna (VOGELSBERGER et al., 2020), sendo processadas em supercomputadores e envolvendo bilhões de partículas. Existem simulações que focam em estruturas em grande escala, como estruturas filamentosares em cubos cosmológicos (PILLEPICH et al., 2018), enquanto outras se concentram em galáxias isoladas, analisando detalhes em escala espacial menor.

Ao estudar galáxias individuais, podemos analisar parâmetros morfológicos internos e a evolução temporal de características como taxa de formação estelar e enriquecimento químico devido ao feedback de supernovas.

¹ Estudante do curso de Licenciatura em Física. UTFPR, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: goncalvesg@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 7416443230735445.

² Docente no Departamento Acadêmico de Física (DAFIS). UTFPR, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: rubensmachado@utfpr.edu.br. ID Lattes: 4539413496131441.

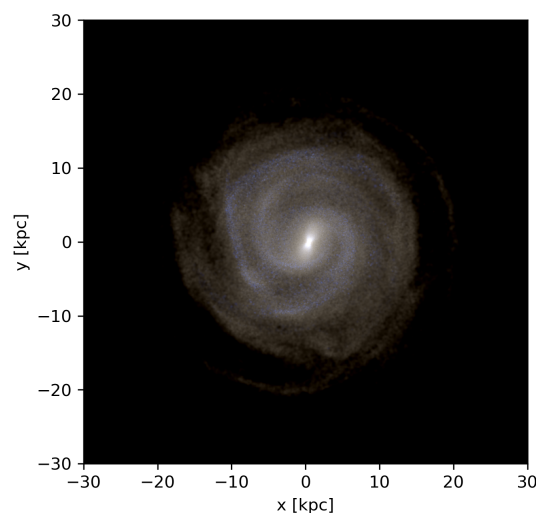


UM MODELO DA VIA LÁCTEA

Simulações de galáxias isoladas são feitas para replicar características observadas da Via Láctea (BENNETT; BOVY; HUNT, 2022; BOVY et al., 2019; FRAGKOU DI et al., 2020; TEPPER-GARCÍA et al., 2021; KAWATA et al., 2017). Este enfoque ajuda a reconstituir o passado da Via Láctea, fazer previsões e investigar áreas ocultas por limitações observacionais.

Este trabalho visa criar um modelo numérico auto-consistente alinhado com valores de referência da Via Láctea, utilizando métodos numéricos e dados recentes. Além de reproduzir características morfológicas como pode ser visto na Figura 1, como braços espirais com regiões de formação estelar destacadas pela contribuição de estrelas azuis e presença da estrutura da barra central, cujos detalhes serão discutidos na seção de resultados, a simulação será analisada para estudar a evolução temporal da galáxia, focando no momento em que o modelo reproduz simultaneamente diversas características conhecidas da Via Láctea (BLAND-HAWTHORN; GERHARD, 2016). Assim, buscamos garantir a coerência do modelo com a compreensão atual da Galáxia e viabilizar futuras aplicações computacionais.

Figura 1 – Visualização sintética (mock) no óptico do modelo numérico



Fonte: Os autores.

MATERIAL E MÉTODOS

Para desenvolver um modelo numérico da Via Láctea, selecionamos parâmetros baseados em pesquisas similares. Estes parâmetros, que abrangem aspectos computacionais e físicos da galáxia, são essenciais para estabelecer uma condição inicial adequada para a simulação.

A CONDIÇÃO INICIAL

A condição inicial de uma simulação de N -corpos é o ponto de partida para os cálculos gravitacionais. Utilizamos o software GALSTEP (RUGGIERO; LIMA NETO, 2017) para estabelecê-la. Este programa define componentes de uma galáxia disco, como massa do halo de matéria escura, fração de gás inicial,



comprimentos de escala do perfil de densidade, entre outros, e configura o início da simulação. O halo de matéria escura segue um perfil de Hernquist (HERNQUIST, 1990), enquanto os componentes do disco têm um perfil exponencial.

A versão final da condição inicial incorpora todas as correções e ajustes feitos por tentativa e erro. Os parâmetros finais estão listados na Tabela 1:

Tabela 1 – Parâmetros do modelo.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Massa do halo de matéria escura	M_h	$1.10 \times 10^{12} M_\odot$
Comprimento de escala Hernquist	a_h	46 kpc
Massa do disco estelar	M_d	$3.55 \times 10^{10} M_\odot$
Comprimento de escala do disco estelar	R_d	3.5 kpc
Comprimento de escala vertical do disco estelar	Z_{0d}	0.7 kpc
Massa do disco gasoso	M_g	$0.75 \times 10^{10} M_\odot$
Comprimento de escala do disco gasoso	Z_{0g}	0.035 kpc
Metalicidade inicial do gás	Z	0.002

Fonte: Os autores.

Definida a condição inicial, executamos simulações por meio do código de N -corpos GADGET-4 (SPRINGEL et al., 2022), que permite simulações locais com paralelização de processos através de um algoritmo *tree-code*. Com isso, executamos várias simulações que duraram de horas a poucos dias.

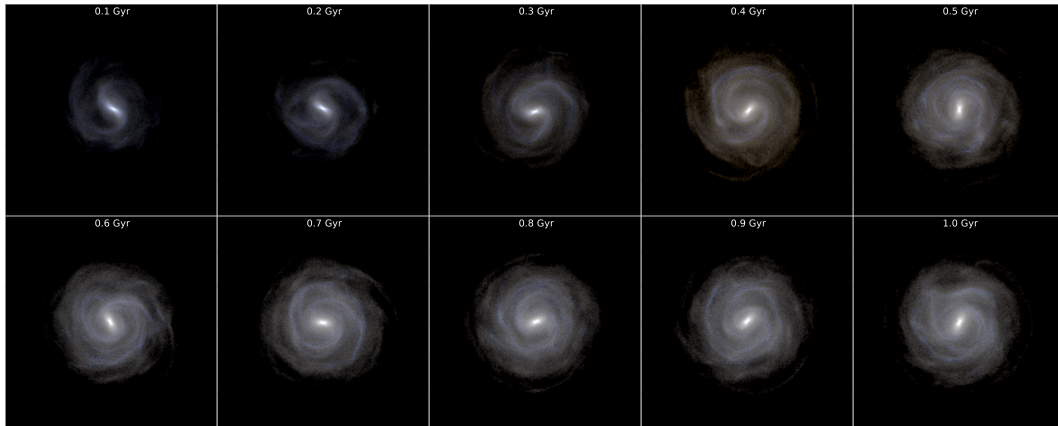
O monitoramento das simulações é feito localmente, ajustando-se as condições iniciais para garantir a precisão. Parâmetros como a massa dos componentes (disco bariônico, gás, bojo e halo de matéria escura) são ajustados, bem como os comprimentos de escala dos perfis de densidade e a metalicidade primordial, baseando-se nos resultados da simulação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observando os resultados das simulações numéricas iterativas, identificamos que, no primeiro giga ano, a galáxia simulada reflete características atuais da Via Láctea. A evolução temporal da galáxia, com ênfase nas idades e metalicidade das estrelas, é ilustrada na Figura 2 por meio de visualizações sintéticas no óptico, onde cada quadro possui 60 kpc de largura. Os primeiros quadros do mosaico temporal, demonstram que a condição inicial tem uma alta taxa de formação estelar no início da simulação, pois a contribuição das visualizações no óptico é de essencialmente estrelas azuis. Após cerca de 0.4 giga anos de simulação, as estrelas formadas já fazem o disco galáctico apresentar braços espirais e em 0.4 Gyr temos um disco estável, cujas cores demonstram a contribuição de estrelas de idade intermediária e estrelas jovens destacadas pela cor azulada dos braços espirais. Em 0.4 Gyr é possível ver na região central a barra galáctica, cujas propriedades estão apresentadas nas subseções seguintes.

A Figura 3 apresenta a taxa de formação estelar e a variação da fração de gás conforme novas estrelas se formam. A região destacada pela cor verde no gráfico representa os valores observacionais atuais destas duas informações da Via Láctea, cujos valores atuais estão registrados em (BLAND-HAWTHORN; GERHARD, 2016). Podemos acompanhar nos gráficos da Figura 3 como a fração de gás inicial evolui no tempo sendo consumida ao surgirem novas estrelas devido ao algoritmo de formação estelar do

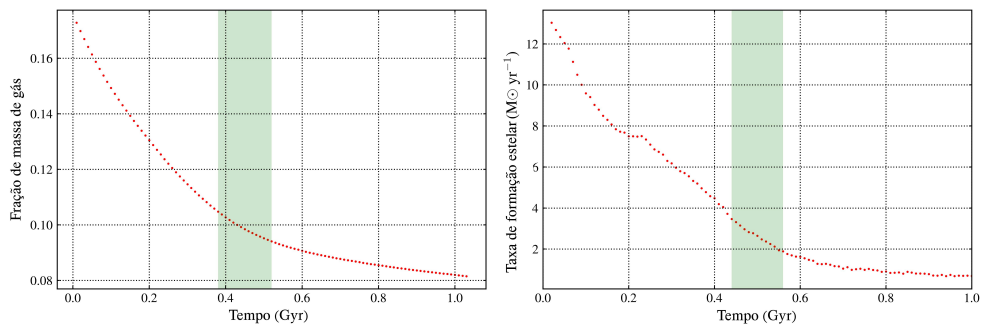
Figura 2 – Mock apresentando evolução temporal do modelo numérico.



Fonte: Os autores.

nosso modelo numérico. A principal informação destes gráficos são as regiões onde os pontos da nossa simulação estão dentro da seção verde destacada (valor de referência observacional da Via Láctea).

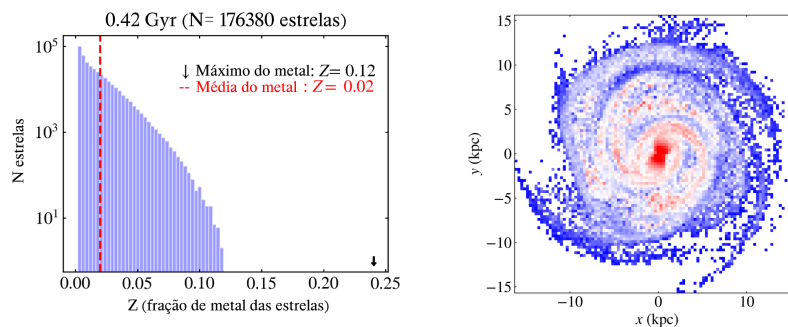
Figura 3 – Fração de gás e taxa de formação estelar no tempo



Fonte: Os autores.

A distribuição da metalicidade das estrelas formadas até 0.42 Gyr é mapeada nos histogramas da Figura 4. A região central da galáxia evidencia um pico de metalicidade, assim como destacam-se as estrelas ricas em metal nos braços espirais. O valor numérico da metalicidade e sua distribuição espacial no disco também encontram-se de acordo com as estimativas observacionais da Via Láctea.

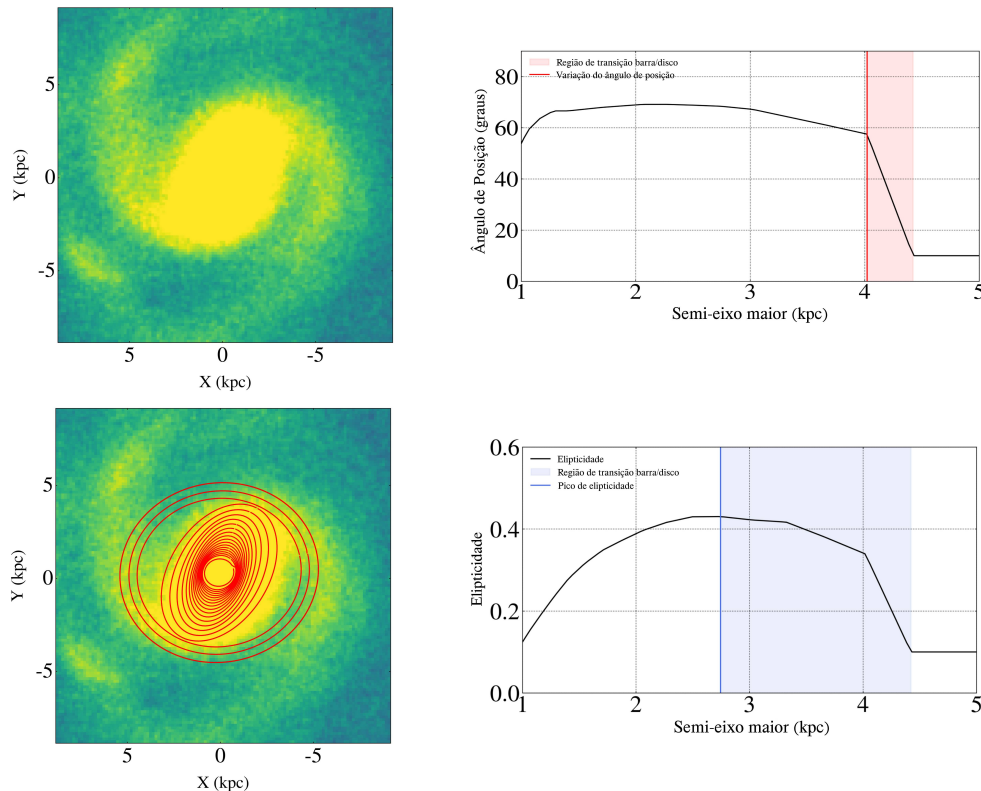
Figura 4 – Histogramas de metalicidade das estrelas formadas



Fonte: Os autores.

Como uso prático do modelo numérico, criamos um algoritmo para estimar o comprimento da barra de galáxias através do ajuste de elipses concêntricas (MICHEL-DANSAC; WOZNIAK, 2006). Na região esquerda da Figura 5, plotamos a distribuição espacial de massa da região central da galáxia, especificamente a barra galáctica e suas elipses ajustadas às suas isocurvas de massa.

Figura 5 – Processo do algoritmo para estimar o comprimento da barra.



Fonte: Os autores.

Na região superior direita da Figura 5 encontra-se um gráfico que mostra a posição angular das elipses ao longo do raio, é possível identificar o fim do platô do ângulo de posição das elipses da barra em aproximadamente 4.0 kpc. Na região inferior direita da Figura 5, no gráfico da elipticidade ao longo do raio, pode ser visto um pico em cerca de 2.75 kpc (estudos anteriores indicaram que esta técnica pode frequentemente subestimar o comprimento da barra). Os valores médios, determinados a partir destas duas metodologias diferentes (elipticidade e ângulo de posição), indicam um comprimento da barra de aproximadamente 3.0 kpc e uma elipticidade de 0.4, que estão de acordo com dados observacionais recentes da Via Láctea (LUCHEY et al., 2023). Destacamos que a identificação da posição que delimita o fim da barra e o início do disco galáctico é uma tarefa especialmente complexa, as regiões de transição foram postas em destaque nas áreas coloridas dos gráficos de elipticidade e posição angular.

CONCLUSÕES

Este estudo propôs um modelo de simulação auto-consistente da Via Láctea, ajustando múltiplos parâmetros de referência através de simulações iterativas. Ajustar valores como taxa de formação estelar,



proporção de gás e morfologia exigiu a aplicação de técnicas numéricas variadas. Todas as características propostas no objetivo inicial puderam ser ajustada em nosso modelo numérico de acordo com seus valores de referência.

O modelo final obtido, embora promissor, destaca a necessidade do desenvolvimento de modelos mais elaborados e de acordo com as previsões observacionais, especialmente no que diz respeito ao processo de formação estelar. Limitações no código de síntese e formação estelar do GADGET-4 dificultam a criação de um modelo da Via Láctea que ajuste todos os parâmetros e apresente um histórico simulado com mais de 1 Gyr, pois a taxa de formação estelar de referência é alcançada rapidamente independente da fração de gás inicial.

Outro ponto a ser destacado é o fato de que os algoritmos deste estudo e modelo obtido têm potencial para serem aplicados em futuros trabalhos, contribuindo para pesquisas subsequentes em extragaláctica e *N*-corpos. Um exemplo de aplicação é utilizar este modelo numérico para avaliar ambientes diversos, como sua interação com galáxias satélites ou colocando-o em um meio com gás circun-galáctico para avaliar seu impacto na taxa de formação estelar da Via Láctea.

Em suma, este trabalho é uma contribuição significativa para o Grupo de Astronomia Extragaláctica Computacional da UTFPR Curitiba, fornecendo insights e estabelecendo um ponto de partida para futuras investigações. Contudo, é apenas uma etapa de um esforço contínuo, e mais pesquisa tratando dos pontos indicados é essencial para aprimorar resultados e alcançar um modelo ainda mais amplo e completo da Via Láctea.

Agradecimentos

- Ao CNPq, pelo financiamento dos recursos computacionais vitais para a investigação de simulação de *N*-corpos.
- Ao clube de astronomia CAUTEC, pelo apoio incondicional dos seus membros.
- Ao Prof. Dr. Rubens E. G. Machado, pelos inestimáveis direcionamentos e orientações.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- BENNETT, Morgan; BOVY, Jo; HUNT, Jason AS. Exploring the Sgr–Milky Way–disk Interaction Using High-resolution N-body Simulations. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 927, n. 1, p. 131, 2022.
- BLAND-HAWTHORN, Joss; GERHARD, Ortwin. The galaxy in context: structural, kinematic, and integrated properties. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, Annual Reviews, v. 54, p. 529–596, 2016.
- BOVY, Jo et al. Life in the fast lane: a direct view of the dynamics, formation, and evolution of the Milky Way's bar. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 490, n. 4, p. 4740–4747, 2019.



XIII Seminário de Extensão e Inovação XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR

Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão
20 a 23 de novembro de 2023 - Campus Ponta Grossa, PR

SEI-SICITE
2023



FRAGKOU DI, F et al. Chemodynamics of barred galaxies in cosmological simulations: On the Milky Way's quiescent merger history and in-situ bulge. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 494, n. 4, p. 5936–5960, 2020.

HERNQUIST, Lars. An analytical model for spherical galaxies and bulges. **Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X)**, vol. 356, June 20, 1990, p. 359-364., v. 356, p. 359–364, 1990.

KAWATA, Daisuke et al. Impacts of a flaring star-forming disc and stellar radial mixing on the vertical metallicity gradient. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 464, n. 1, p. 702–712, 2017.

LUCEY, Madeline et al. Dynamically constraining the length of the Milky way bar. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 520, n. 3, p. 4779–4792, 2023.

MICHEL-DANSAC, Leo; WOZNIAK, Hervé. The length of stellar bars in SB galaxies and N-body simulations. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 452, n. 1, p. 97–112, 2006.

PILLEPICH, Annalisa et al. Simulating galaxy formation with the IllustrisTNG model. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 473, n. 3, p. 4077–4106, 2018.

RUGGIERO, Rafael; LIMA NETO, Gastao B. The fate of the gaseous discs of galaxies that fall into clusters. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 468, n. 4, p. 4107–4115, 2017.

SPRINGEL, Volker et al. GADGET-4: Parallel cosmological N-body and SPH code. **Astrophysics Source Code Library**, ascl–2204, 2022.

TEPPER-GARCÍA, Thor et al. A barred Milky Way surrogate from an N-body simulation. **arXiv preprint arXiv:2111.05466**, 2021.

VOGELSBERGER, Mark et al. Cosmological simulations of galaxy formation. **Nature Reviews Physics**, Nature Publishing Group UK London, v. 2, n. 1, p. 42–66, 2020.