



# Análise estrutural de galáxias espirais nas simulações cosmológicas IllustrisTNG

## Structural analysis of spiral galaxies in the IllustrisTNG cosmological simulations

Nicholas Schweder Souza<sup>1</sup>, Rubens Eduardo Garcia Machado<sup>2</sup>

### RESUMO

Simulações cosmológicas de formação de galáxias são de vital importância para o desenvolvimento de modelos cosmológicos, pois informações advindas da escala galáctica permitem impor restrições sobre tais modelos. Este trabalho visa estudar a estrutura de galáxias presentes nas simulações do projeto IllustrisTNG. Foram selecionadas cinco galáxias espirais razoavelmente análogas à Via Láctea. Em seguida, para cada galáxia, foram obtidos os dados de posição e massa para as partículas do halo de matéria escura de modo a estudar sua distribuição espacial. Ajustou-se curvas de massa cumulativa ao modelo de Hernquist e obteve-se os respectivos comprimentos de escala para cada halo. Assim, foi possível constatar que o perfil de Hernquist é adequado para descrever as distribuições em questão, dado o devido cuidado à eventual anisotropia nesses sistemas. Afinal, galáxias possuem histórias de evolução complexas, eventuais interações podem vir a tornar um perfil com simetria esférica inviável para a descrição do halo de matéria escura.

**PALAVRAS-CHAVE:** galáxias espirais; matéria escura; simulação cosmológica.

### ABSTRACT

Cosmological simulations of galaxy formation are of vital importance for the development of cosmological models, as information from the galactic scale makes it possible to impose restrictions on such models. This work aims to study the structure of galaxies present in simulations of the IllustrisTNG project. Five spiral galaxies reasonably analogous to the Milky Way were selected. Then, for each galaxy, position and mass data for the dark matter halo particles were obtained in order to study their spatial distribution. Cumulative mass curves were fitted to the Hernquist model and the respective scale lengths were obtained for each halo. Thus, it was possible to verify that the Hernquist profile is adequate to describe the distributions in question, given due care to possible anisotropy in the system. After all, galaxies have complex evolution histories, and eventual interactions could make a profile with spherical symmetry unfeasible for describing the dark matter halo.

**KEYWORDS:** spiral galaxy; dark matter; cosmological simulation.

### INTRODUÇÃO

Os avanços computacionais ao longo das últimas décadas têm viabilizado a execução de simulações a respeito de cenários físicos envolvendo cada vez mais partículas. Em particular, é possível simular e estudar a formação de estruturas do universo em escala cosmológica. Tal capacidade é de suma importância para que possamos estudar os detalhes de modelos cosmológicos, suas consequências em diversas escalas, para então compará-las às observações. Atualmente,

<sup>1</sup> Bolsista do CNPq. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: nicholas.souza@ufpr.br. ID Lattes: 9393221283049917 .

<sup>2</sup> Docente no PPGFA. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: rubensmachado@utfpr.edu.br. ID Lattes: 4539413496131441 .



# 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

existem simulações capazes de gerar uma quantidade de detalhes sem precedentes, tornando possível o estudo da formação e evolução de galáxias (com variadas morfologias, conforme observa-se no universo real), suas propriedades, estruturas e dinâmica.

O projeto IllustrisTNG é um conjunto de simulações cosmológicas, de última geração que visa o estudo de formação de galáxias (NAIMAN et al., 2018; SPRINGEL et al., 2018; PILLEPICH; NELSON; HERNQUIST et al., 2018; MARINACCI et al., 2018; NELSON; PILLEPICH; SPRINGEL; WEINBERGER et al., 2018; NELSON; PILLEPICH; SPRINGEL; PAKMOR et al., 2019; PILLEPICH; NELSON; SPRINGEL et al., 2019). Cada simulação evolui um universo (uma caixa) simulado desde logo após o Big-Bang até os dias atuais, levando em conta uma ampla gama de processos físicos que fazem parte do complexo mecanismo de formação de galáxias. Existem três principais tipos de simulações no projeto: TNG50, TNG100 e TNG300; cada número representa o tamanho da aresta de cada universo simulado (em Mpc). Ao variar o tamanho das caixas, propicia-se o estudo de objetos em diferentes escalas; altera-se a resolução de massa. A menor caixa viabiliza análises de detalhes na escala intragaláctica, porém com um número menor de objetos disponíveis, enquanto que as outras são mais adequadas para o estudo de fenômenos na escalas extragaláctica e cosmológica com maior riqueza estatística.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é realizar análises estruturais acerca de galáxias presentes nas simulações TNG50 e TNG100. Busca-se encontrar os comprimentos de escala de halos de matéria escura dentre um conjunto de galáxias selecionadas.

## MÉTODOS

Os outputs das simulações são separados em snapshots, cada uma correspondente a uma determinada idade do universo (convencionalmente representada pelo redshift associado). Considerou-se somente dados do fim das simulações (o último snapshot). É possível obter os dados de todas as partículas da simulação para um dado redshift (não desejável neste caso), ou fazer uso dos catálogos organizados pelo próprio projeto. Tais catálogos agrupam halos (dentro dos quais diversas galáxias e/ou aglomerados podem residir) e subhalos (aqueles associados às galáxias individualmente) de modo que pode-se filtrar uma seleção de galáxias de acordo com critérios específicos.

Por conveniência e controle, escolheu-se selecionar galáxias razoavelmente análogas à Via Láctea, de acordo com os critérios em (SIVIERO; MENÉNDEZ-DELMESTRE; GONÇALVES, 2022): velocidade circular máxima entre 200 km/s e 315 km/s, e taxa de formação estelar entre  $1.0 M_{\odot}/\text{yr}$  e  $8.5 M_{\odot}/\text{yr}$ . Assim, foram escolhidas quatro galáxias da TNG50 (IDs: 545437, 184939, 117255, 371127). Ademais, de (ISHCHENKO et al., 2023), foi escolhida uma galáxia da TNG100, previamente selecionada de modo a reproduzir o potencial da Galáxia (ID: 411321). Os subhalos provenientes da TNG50 possuem, nestes casos, em média, pouco menos de 2 milhões de partículas de matéria escura, enquanto que aquele da TNG100, possui pouco mais de 300 mil.

Em seguida, foram baixados os dados de posições e massas das partículas de matéria escura em cada um dos subhalos em questão. Estão disponíveis também as coordenadas do centro (pico de densidade) de cada subhalo. Logo, para cada caso, o referencial foi transladado para ter origem neste centro. Então, escolheu-se estudar o comportamento da massa cumulativa



$M(r)$ . Ao reorganizar os arrays contendo o raio e a massa de cada partícula, foi encontrada a massa cumulativa para cada raio.

De modo a analisar o comportamento da massa cumulativa, considerou-se o perfil de Hernquist (HERNQUIST, 1990); partindo da expressão para a densidade volumétrica de massa, obtém-se a massa cumulativa:

$$\rho(r) = \frac{M}{2\pi} \frac{a}{r} \frac{1}{(r+a)^3} \implies \int_V \rho(r) dV = M(r) = M_t \frac{r^2}{(r+a)^2} \quad (1)$$

onde  $M_t$  é a massa total e  $a$  é o comprimento de escala da distribuição.

Para conseguir devidamente utilizar os conjuntos de dados com os valores de  $r$  e  $M(r)$ , é necessário realizar uma binagem sobre os raios, pois a abundância de pontos esconde a dependência funcional a ser analisada. Logo após, os dados reduzidos foram utilizados para ajustar curvas de massa cumulativa conforme a equação (1).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra cada ajuste de curva realizado e os respectivos parâmetros encontrados. De modo similar, a Tabela 1 apresenta compiladamente os parâmetros obtidos.

**Tabela 1 – Parâmetros obtidos através dos ajustes de curvas de massa cumulativa para cada subhalo, de modo que todos pertencem à TNG50 a não ser pelo ID 411321, que provém da TNG100. O parâmetro de Hubble  $h$  vale, nestas simulações, 0.6774.**

Parâmetro	Unidade	545437	371127	184839	117255	411321
Total mass, $M_t$	$10^{10} M_{\odot}/h$	72.42	52.12	22.97	84.16	193.76
Halo scale length, $a$	kpc/h	28.09	13.29	11.72	23.42	60.88

Fonte: Autoral

Um primeiro comentário, mas de central importância, é que as galáxias em questão não estão completamente isoladas. Isso é esperado, afinal o propósito das simulações cosmológicas é justamente estudar a evolução natural desses sistemas: os encontros com outras galáxias são praticamente inevitáveis. Apesar disso, é notável que algumas curvas ajustadas de fato modelam razoavelmente bem o comportamento dos pontos, mais notoriamente aquela associada ao subhalo 411321, da TNG100. Ou seja, a falta de isotropia nessas distribuições, consequência das complicadas histórias de formação das galáxias, não necessariamente inutiliza completamente o perfil de Hernquist. Contudo, algumas curvas são claramente menos bem ajustadas do que outras: o subhalo 117255, da TNG50, por exemplo. Ao olhar para a distribuição das partículas deste subhalo em específico, na Figura 2, percebe-se a presença de outro subhalo. A anisotropia neste caso é muito mais expressiva e relevante: o perfil de Hernquist não é tão cabível quanto anteriormente (ele presume simetria esférica). É importante mencionar que as massas totais  $M_t$  certamente não dizem respeito apenas às galáxias centrais, mas também às suas satélites e outros objetos. De mesmo modo, os comprimentos de escala  $a$  são associados às distribuições de partículas que eventualmente englobam estruturas periféricas.



# 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

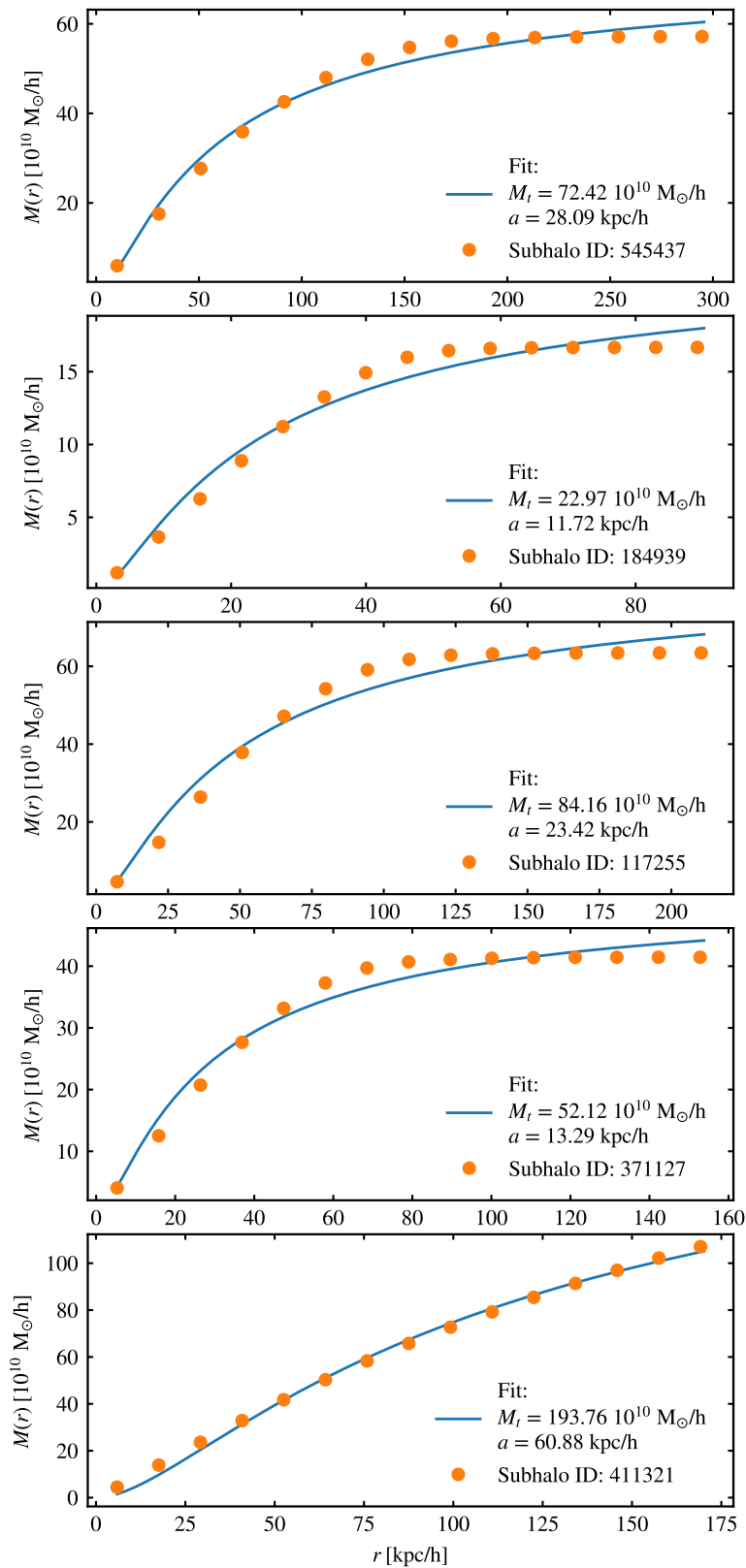


Figura 1 – Ajustes de curvas de massa cumulativa. Todos os IDs dizem respeito à TNG50, com exceção de 411321 que é oriundo da TNG100.

Fonte: Autoral

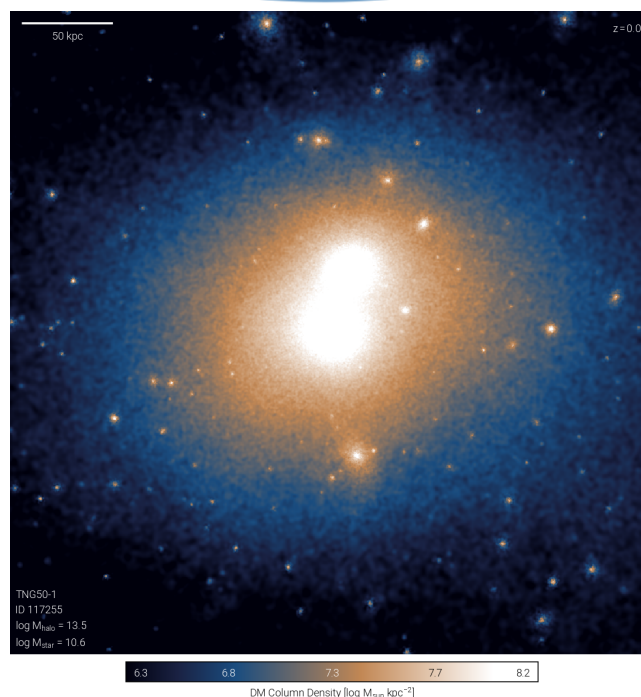


Figura 2 – Visualização da distribuição de matéria escura no subhalo 117255, da TNG50.  
Fonte: TNG Project.

## CONCLUSÃO

Simulações cosmológicas de formação de galáxias são uma ferramenta poderosa para o estudo da dinâmica e estrutura destes objetos, propiciando avanços qualitativos para a astronomia. Em particular, o projeto IllustrisTNG dispõe de simulações sem precedentes que têm revolucionado os campos de pesquisa associados. Neste trabalho, ao selecionar determinadas galáxias nas simulações TNG50 e TNG100, acessar seus dados e analisá-los, pôde-se concluir que o perfil de Hernquist pode ser utilizado para descrever de maneira satisfatória certas distribuições de matéria escura, como esperado. Mostrou-se que halos não isotrópicos, devido às interações e/ou colisões com outras galáxias, eventualmente podem tornar esse modelo não tão cabível: há a perda da simetria esférica.

Como perspectiva, pretende-se enriquecer as análises deste projeto ao calcular os comprimentos de escala dos discos destas e de outras galáxias (melhorando os critérios de seleção). Além disso, espera-se também estudar a evolução temporal (em redshift) destes parâmetros.

## Agradecimentos

Direcionam-se agradecimentos ao orientador deste projeto, bem como ao CNPq pela oportunidade de trabalhar neste projeto como bolsista.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.



## REFERÊNCIAS

- HERNQUIST, Lars. An Analytical Model for Spherical Galaxies and Bulges. **ApJ**, v. 356, p. 359, jun. 1990. DOI: [10.1086/168845](https://doi.org/10.1086/168845).
- ISHCHENKO, M. et al. Milky Way globular clusters on cosmological timescales. I. Evolution of the orbital parameters in time-varying potentials. **arXiv e-prints**, arXiv:2304.03547, arxiv:2304.03547, abr. 2023. DOI: [10.48550/arXiv.2304.03547](https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.03547). arXiv: 2304.03547 [astro-ph.GA].
- MARINACCI, Federico et al. First results from the IllustrisTNG simulations: radio haloes and magnetic fields. **MNRAS**, v. 480, n. 4, p. 5113–5139, nov. 2018. DOI: [10.1093/mnras/sty2206](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2206). arXiv: [1707.03396](https://arxiv.org/abs/1707.03396) [astro-ph.CO].
- NAIMAN, Jill P. et al. First results from the IllustrisTNG simulations: a tale of two elements - chemical evolution of magnesium and europium. **MNRAS**, v. 477, n. 1, p. 1206–1224, jun. 2018. DOI: [10.1093/mnras/sty618](https://doi.org/10.1093/mnras/sty618). arXiv: [1707.03401](https://arxiv.org/abs/1707.03401) [astro-ph.GA].
- NELSON, Dylan; PILLEPICH, Annalisa; SPRINGEL, Volker; PAKMOR, Rüdiger et al. First results from the TNG50 simulation: galactic outflows driven by supernovae and black hole feedback. **MNRAS**, v. 490, n. 3, p. 3234–3261, dez. 2019. DOI: [10.1093/mnras/stz2306](https://doi.org/10.1093/mnras/stz2306). arXiv: [1902.05554](https://arxiv.org/abs/1902.05554) [astro-ph.GA].
- NELSON, Dylan; PILLEPICH, Annalisa; SPRINGEL, Volker; WEINBERGER, Rainer et al. First results from the IllustrisTNG simulations: the galaxy colour bimodality. **MNRAS**, v. 475, n. 1, p. 624–647, mar. 2018. DOI: [10.1093/mnras/stx3040](https://doi.org/10.1093/mnras/stx3040). arXiv: [1707.03395](https://arxiv.org/abs/1707.03395) [astro-ph.GA].
- PILLEPICH, Annalisa; NELSON, Dylan; HERNQUIST, Lars et al. First results from the IllustrisTNG simulations: the stellar mass content of groups and clusters of galaxies. **MNRAS**, v. 475, n. 1, p. 648–675, mar. 2018. DOI: [10.1093/mnras/stx3112](https://doi.org/10.1093/mnras/stx3112). arXiv: [1707.03406](https://arxiv.org/abs/1707.03406) [astro-ph.GA].
- PILLEPICH, Annalisa; NELSON, Dylan; SPRINGEL, Volker et al. First results from the TNG50 simulation: the evolution of stellar and gaseous discs across cosmic time. **MNRAS**, v. 490, n. 3, p. 3196–3233, dez. 2019. DOI: [10.1093/mnras/stz2338](https://doi.org/10.1093/mnras/stz2338). arXiv: [1902.05553](https://arxiv.org/abs/1902.05553) [astro-ph.GA].
- SIVIERO, Maria C.; MENÉNDEZ-DELMESTRE, Karín; GONÇALVES, Thiago S. Dark matter distribution in simulated Milky Way analogs. **Sessão de Pôsteres: XLV Reunião Anual da SAB**, 2022.
- SPRINGEL, Volker et al. First results from the IllustrisTNG simulations: matter and galaxy clustering. **MNRAS**, v. 475, n. 1, p. 676–698, mar. 2018. DOI: [10.1093/mnras/stx3304](https://doi.org/10.1093/mnras/stx3304). arXiv: [1707.03397](https://arxiv.org/abs/1707.03397) [astro-ph.GA].