

## Simulações numéricas de galáxias barradas no contexto cosmológico

## Numerical simulations of barred galaxies in the cosmological context

### RESUMO

**Eduardo Piaceny Ribas**  
[eduardoribas@alunos.utfpr.edu.br](mailto:eduardoribas@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

**Rubens Eduardo Garcia Machado**  
[rubensmachado@utfpr.edu.br](mailto:rubensmachado@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

A formação de diferentes galáxias é fortemente ligada a sua composição em sua origem. Sabe-se, portanto, que na cosmologia moderna, simulações são amplamente utilizadas para reproduzir e analisar o desenvolvimento de suas estruturas como um todo, a partir de condições iniciais. A fim de investigar e estudar a morfologia de diferentes galáxias, este trabalho tem o objetivo de analisar seus perfis de densidade de matéria escura a partir de dados fornecidos por banco de dados de simulações cosmológicas, e caracterizá-los de acordo com suas funções analíticas. Para tanto, foram desenvolvidos códigos com o intuito de coletar dados dessas simulações, diretamente de um banco de dados público, utilizando-os para analisar quais perfis se adequam de melhor forma. Sumariamente, os resultados obtidos indicam que os perfis de Hernquist e NFW são seguidos em ótima aproximação dependendo da distribuição de matéria escura no centro de cada galáxia.

**PALAVRAS-CHAVE:** Astrofísica. Galáxias. Simulações.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



### ABSTRACT

The formation of different galaxies is strongly bounded to its composition in their origin. It's known, therefore, that in modern cosmology, simulations are broadly used to reproduce and analyse the development of their own structures from initial conditions. In order to investigate and study the morphology of different galaxies, this work has the objective of analysing their dark matter density profiles from cosmological simulations databases, and distinguish them according to their analytic functions. Therefore, codes were developed in order to collect data from these simulations directly from their public database, using them to analyse in which profile they would fit better. The obtained results indicate that Hernquist and NFW profile are followed in great approximation, depending on the dark matter distribution in the center of each galaxy.

**KEYWORDS:** Astrophysics. Galaxies. Simulations.

## INTRODUÇÃO

As galáxias são estruturas compostas por estrelas e nuvens de gás envoltas em um halo de matéria escura. Na cosmologia moderna, o halo de matéria escura é entendido como uma região de matéria que desacoplou da expansão de Hubble e colapsou (WECHSLER, 2018). Vale ressaltar que o halo é um dos maiores responsáveis pela dinâmica galáctica, tendo em vista que condensa a maior parte da matéria, sendo sua massa cerca de cinco vezes maior que a bariônica. Apesar disso, sua natureza misteriosa dificulta a sua detecção e entendimento, tendo em vista que sua única interação é com o campo gravitacional e, portanto, não absorve e nem irradia luz.

Dentre as galáxias, existem as espirais, como a própria Via Láctea, que apresentam uma estrutura espiral formada pela rotação de estrelas e gás em torno do seu próprio eixo. As galáxias espirais típicas contêm entre seus componentes um disco rotativo proeminente formado por estrelas e gás; um bojo composto por estrelas antigas; uma barra formada por estrelas; um halo de matéria escura; e por fim, um buraco negro em seu centro (KRUIT, 2011). A partir da caracterização e classificação morfológica das galáxias, como no caso das espirais, é possível traçar um histórico desde a formação de suas estruturas que permite o estudo e a compreensão de suas origens e, para tanto, a cosmologia moderna conta com um grande poder computacional para simular esses eventos.

As simulações de galáxias são amplamente utilizadas na astronomia a fim de avaliar e estudar diversos fenômenos, por exemplo a formação de barras em galáxias espirais (ATHANASSOULA, 2013). Essas simulações, em sua maioria, são feitas a partir de aplicações da dinâmica newtoniana, em que se calcula a evolução da força gravitacional, combinada com hidrodinâmica ao longo de um intervalo de tempo de bilhões de anos. De modo geral, os resultados indicam a influência da composição de uma galáxia em sua morfologia.

Além de simulações de galáxias individuais, existem simulações cosmológicas, que englobam o universo como um todo. Essas simulações são vitais para estabelecer o que se compreende do modelo cosmológico. Vale ressaltar que o avanço tecnológico tem permitido uma crescente melhora no desempenho e na produção da astronomia computacional, visto que inicialmente as simulações continham apenas matéria escura (SPRINGEL, 2006), enquanto atualmente contam com partículas de gás, e são capazes de reproduzir fenômenos físicos, como a formação de supernovas, AGNs (Núcleos Ativos de Galáxias) e até de modelar energia escura (VOGELSBERGER, et al, 2020). Dentre as simulações mais importantes da atualidade, vale destacar a Illustris (VOGELSBERGER, et al, 2014) e a EAGLE (MCALPINE, et al, 2016). Ambas são simulações de larga escala com uma alta resolução de matéria escura, e possuem seus resultados disponíveis em bancos de dados abertos ao público, o que torna possível a análise e o estudo de diversas propriedades de galáxias.

## OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi acessar o banco de dados da simulação cosmológica EAGLE, a fim de adquirir dados e analisar propriedades estruturais de galáxias, caracterizando seus perfis de densidade com funções analíticas. Além

disso, um objetivo específico foi reproduzir uma amostra de galáxias com certas massas estelares a partir dos dados coletados da EAGLE. (ALGORRY, et. al 2017).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para calcular a evolução gravitacional das galáxias, foi utilizado o Gadget2 (SPRINGEL, 2005), um código altamente paralelizável capaz de realizar simulações acolisionais utilizando princípios da dinâmica newtoniana assim como modelar estruturas hidrodinâmicas, sendo a última opcional. As simulações são executadas a partir de condições iniciais, sendo que, para efetuar-las, foi utilizado o Galstep (RUGGIERO, 2017), um código que permite a utilização de inputs para determinar a quantidade de partículas, e suas respectivas massas. Os valores escolhidos foram de 100000 partículas. O *output* é um número de *snapshots* com um mesmo intervalo de tempo entre eles, de 0 a 2 bilhões de anos.

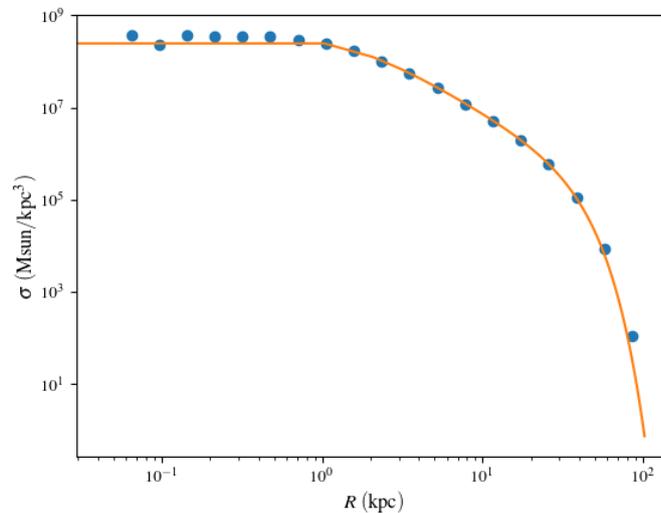
A fim de acessar simulações cosmológicas de larga escala, foi utilizado o *Database* da EAGLE (The EAGLE team), que disponibiliza de dados sobre a formação de populações de galáxias, possibilitando a delimitação das mais apropriadas para o estudo. Cada execução do banco de dados possui um título autoexplicativo acerca das propriedades do cubo cosmológico em que a simulação foi realizada. Como exemplo, a RefL0100N1504, utilizada para a reprodução da figura 4, é um cubo com arestas equivalentes a 100 Mpc comóveis e possui precisamente  $2 \times 1504^3$  partículas. O seu acesso, assim como das demais simulações, pode ser feito a partir da linguagem SQL remotamente a partir de *scripts* em python.

Com o intuito de medir e plotar os perfis de densidade das galáxias selecionadas, assim como de outras galáxias isoladas, foi utilizada a linguagem de programação python, tendo em vista a sua alta versatilidade assim como a sua facilidade de uso e sua popularidade no ramo da cosmologia.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Levando em conta que a maior contribuição em termos de massa de uma galáxia é proveniente de seu halo de matéria escura, a sua distribuição é um indicativo de qual modelo será mais apropriado para o *plot*. Se tratando de uma curva com o núcleo do tipo core, foi aplicado o modelo de Hernquist (HERNQUIST, 1990), representado pela figura 1.

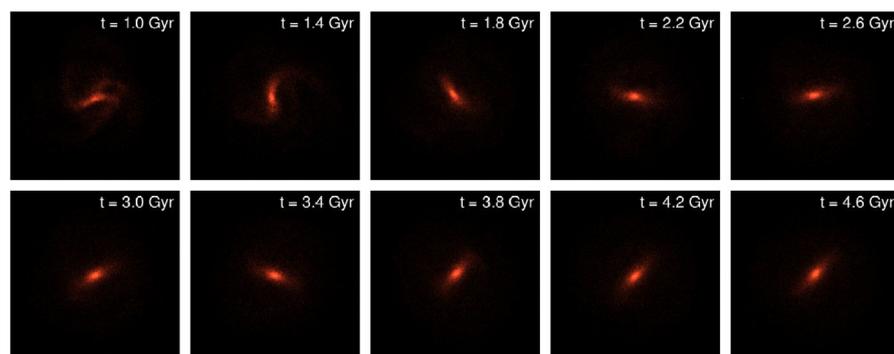
Figura 1 – Representação da densidade do halo de matéria escura de uma galáxia utilizando o perfil de Hernquist. Os pontos são o resultado da medição de uma galáxia simulada e a curva correspondente à função analítica.



Fonte: Autoria própria.

As simulações a partir do Gadget2 resultaram em *snapshots* que ilustram a evolução de uma galáxia a partir de condições iniciais. É possível analisar, portanto, toda evolução temporal obtendo como resultado uma galáxia mostrada na figura 2, que representa a formação de uma galáxia barrada numa escala espacial de 20 kpc em cada *frame*. Para a realização da simulação foram utilizados quatro processadores.

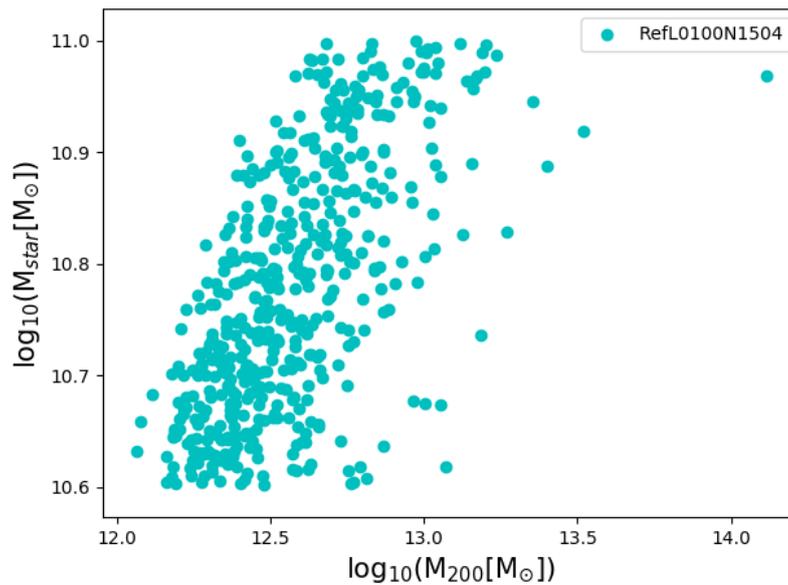
Figura 2 – Evolução temporal de uma galáxia barrada, dada uma condição inicial.



Fonte: Autoria própria.

A partir dos argumentos de condição do código de acesso ao banco de dados, foi possível selecionar galáxias apropriadas e, utilizando um *script* em python, reproduzir a figura 1 (ALGORRY, et al. 2017), que mostra a massa estelar em função da massa do virial de 495 galáxias, como indica a figura 3.

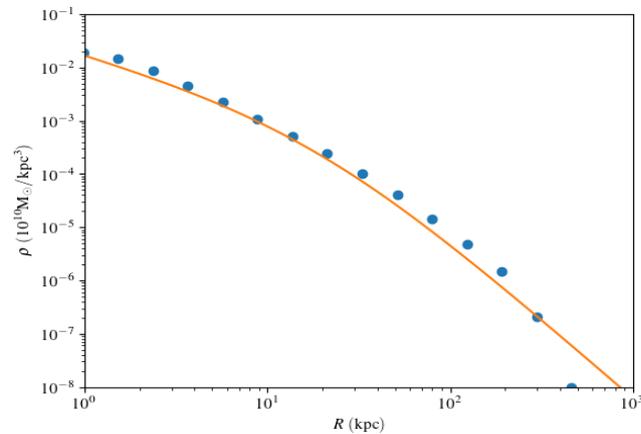
Figura 3 – Distribuição de cada galáxia conforme a sua massa estelar e a sua massa do virial.



Fonte: Autoria própria.

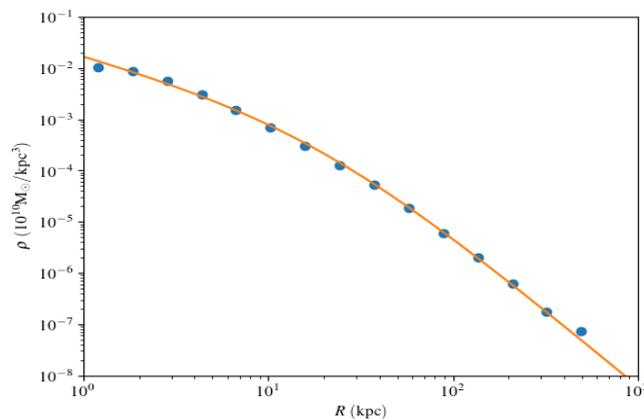
A distribuição de matéria escura também pode resultar em outros tipos de perfil, como no caso das galáxias 1567250 e 1608845, com seus respectivos IDs correspondentes a 15 e 17, retratadas respectivamente nas figuras 4 e 5. Essas galáxias são provenientes da simulação RecalL0025N0752. O motivo dessa simulação ter sido escolhida é pelo fato de ter uma resolução de partículas de matéria escura maior que das demais simulações com L0100 (arestas de 100 Mpc). Por fim, pode-se inferir que esses perfis são mais apropriadas para serem modelados a partir da equação de NFW, visto que se ajustam bem ao perfil cusp.

Figura 4 – Representação da densidade do Halo de matéria escura da galáxia 15 utilizando o perfil de NFW.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5 – Representação da densidade do Halo de matéria escura da galáxia 17 utilizando o perfil de NFW.



Fonte: Autoria própria.

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados expostos, conclui-se que foi possível desenvolver uma estrutura a fim de acessar e coletar dados de simulações cosmológicas. Além disso, foram verificados os perfis de densidades de matéria escura das galáxias 15 e 17 indicando que elas seguem o perfil de NFW em excelente aproximação. Por fim, a amostra do Algorry foi capaz de ser reproduzida com os métodos adotados.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Rubens Eduardo Garcia Machado pela contribuição na iniciação científica.

## REFERÊNCIAS

ALGORRY, D. G. et al. Barred galaxies in the EAGLE cosmological hydrodynamical simulation. **MNRAS**, v. 469, n. 1, p. 1054–1064, jul. 2017.

ATHANASSOULA, E.; MACHADO, R. E. G.; RODIONOV, S. A. Bar formation and evolution in disc galaxies with gas and a triaxial halo: morphology, bar strength and halo properties. **MNRAS**, v. 429, p. 1949–1969, mar. 2013.

HERNQUIST, L. **An Analytical Model for Spherical Galaxies and Bulges**. *ApJ*, v. 356, p. 359, jun. 1990.

KRUIT, P. C. van der; Freeman, K. C. **Galaxy Disks**. , v. 49, n. 1, p. 301–371, set. 2011.

MCALPINE, S. et al. The EAGLE simulations of galaxy formation: Public release of halo and galaxy catalogues. **Astronomy and Computing**, v. 15, p. 72–89, abr. 2016.

RUGGIERO, R. galstep: **Initial conditions for spiral galaxy simulations**. 2017. ascl:1711.007 p.

SPRINGEL, V.; Frenk, C. S.; White, S. D. M. The large-scale structure of the Universe. **Nature**, v. 440, n. 7088, p. 1137–1144, abr. 2006.

SPRINGEL, V. The cosmological simulation code GADGET-2. **MNRAS**, v. 364, p. 1105–1134, dez. 2005.

The EAGLE team. The EAGLE simulations of galaxy formation: **Public release of particle data**. arXiv e-prints, p. arXiv:1706.09899, jun. 2017.

VOGELSBERGER, M. et al. Cosmological simulations of galaxy formation. **Nature Reviews Physics**, v. 2, n. 1, p. 42–66, jan. 2020.

VOGELSBERGER, M. et al. Introducing the Illustris Project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the Universe. **MNRAS**, v. 444, n. 2, p. 1518–1547, out. 2014.

WECHSLER, R. H.; Tinker, J. L. **The Connection Between Galaxies and Their Dark Matter Halos**. , v. 56, p. 435–487, set. 2018.