

#### 23 a 27 de Novembro | Toledo - PR



https://eventos.utfpr.edu.br//sicite/sicite2020

# Simulações numéricas de galáxias barradas comparadas à Via Láctea

# Numerical simulations of barred galaxies compared to the Milky Way

#### **RESUMO**

Galáxias são grandes estruturas formadas por estrelas, matéria escura, gás e poeira. Existem diferentes classes morfológicas de galáxia. Entre elas, as galáxias espirais barradas, que possuem uma estrutura central em formato de barra. Neste trabalho, visamos estudar a dinâmica destas galáxias. Realizamos simulações de N-corpos de dezesseis galáxias do porte da Via Láctea, com diferentes frações de gás e massa de bojo. Podemos concluir que a barra de uma galáxia similar à Via Láctea está presente desde  $\sim$  0.7 Gyr. E comparando o resultado final — depois de 2 Gyr — das dezesseis simulações, concluímos que a massa do bojo e a fração de gás inibem a formação e atrapalham a evolução da barra da galáxia.

PALAVRAS-CHAVE: Galáxias. Simulações de N-corpos. Evolução da Barra.

#### **ABSTRACT**

Galaxies are great structures composed of stars, dark matter, gas and dust. Galaxies are classified in different morphological types. Among them, the barred spiral galaxies, that have a central structure in the shape of a bar. In this work, we sought to study the dynamics of this type of galaxy. We ran sixteen N-body simulations of different galaxies of the size and composition of the Milky Way, with different gas fractions and bulge mass. Thus, we can conclude that a bar of a galaxy comparable in size and composition to the Milky Way is present since  $\sim 0.7$  Gyr. And comparing the final results – after 2 Gyr – of the sixteen simulations, we concluded that the bulge mass and the gas fraction inhibit the formation and hinder the evolution of the bar.

**KEYWORDS:** Galaxies. *N*-body Simulations. Bar Evolution.

Kenzo Ryu Sakamoto sakamoto@alunos.utfpr.edu.br Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Rubens Eduardo Garcia Machado

rubensmachado@utfpr.edu.br Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná. Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2020. **Aprovado:** 01 out. 2020.

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











#### 23 a 27 de Novembro | Toledo - PR



#### INTRODUÇÃO

Galáxia é um sistema gravitacionalmente ligado formado por estrelas, matéria escura e um meio interestelar composto de gás e poeira. Existem três classes morfológicas de galáxias: elípticas, irregulares e espirais. As elípticas têm formato de elipsóide, que pode ser um pouco achatado ou quase esférico. As irregulares não possuem formato definido, e especula-se que sejam provenientes de colisão entre galáxias. Já as espirais, como é o caso da nossa Galáxia, possuem um formato de disco achatado com um esferóide no centro chamado de bojo.

As galáxias espirais possuem duas subclassificações: barradas e não barradas, que consistem na existência— ou não— de uma estrutura central em formato de barra, cujas pontas são a origem dos braços espirais. O foco deste trabalho são as galáxias espirais barradas, que provavelmente representam cerca de dois terços das espirais no universo local (i.e. em baixo redshift) (DE VAUCOULEURS, 1963) (SHETH, 2008). Já sabemos por (ATHANASSOULA, 2003) que a força e velocidade angular da barra evoluem através da troca de momento angular com outros componentes da galáxia (e.g. parte interior e exterior do disco, bojo, halo etc.), e que alguns componentes, como por exemplo o tamanho do bojo (ATHANASSOULA, 1980), também influenciam na sua força. A Via Láctea, conforme ilustra (BLITZ, 1991) e, mais recentemente, (ANDERS, 2019)(QUEIROZ, 2020), também possui a sua barra, porém não é uma barra forte.

As simulações de N-corpos vêm desempenhando um importante papel em dinâmica galáctica e cosmologia, complementando as observações. Com o artifício das simulações, somos capazes de entender fenômenos que demorariam bilhões de anos para acontecer. Por exemplo, sabemos que o formato do halo de matéria escura e a presença de gás influenciam diretamente na evolução da barra (ATHANASSOULA, 2013). Também sabemos que a massa (KATARIA, 2019) e o tamanho (ATHANASSOULA, 2003) do bojo inibem a formação e atrapalham a evolução das barras de galáxias espirais. Uma simulação cosmológica é uma simulação que representa o universo como um todo.

Estas consistem em ter um volume de algumas centenas de milhões de parsecs como condição inicial, e simular a evolução de galáxias e aglomerados de galáxias. Recentemente foi realizada a simulação Illustris (VOGELSBERGER, 2014). E, como foi estudado em (PESCHKEN, 2019)(ROSAS-GYEVARA, 2020), galáxias espirais barradas foram geradas por consequência gravitacional das condições onde suas partículas se encontravam. Similarmente, a formação de galáxias barradas [13] também foi estudada com a simulação cosmológica EAGLE (SCHAYE, 2015). O que corrobora com os estudos de galáxias barradas simuladas individualmente.



#### 23 a 27 de Novembro | Toledo - PR



#### **OBJETIVOS**

Neste trabalho, visamos estudar a dinâmica de galáxias barradas. Para isso, executamos diversas simulações de *N*-corpos com diferentes frações de gás e massa de bojo, a fim de analisar a sua influência na formação e evolução da barra da galáxia.

#### **MATERIAIS E MÉTODOS**

Para simulações de *N*-corpos, o código Gadget-2 (SPRINGEL, 2005a) se tornou a melhor opção para o desenvolvimento deste trabalho, pois é open source, disseminado mundialmente e projetado tanto para supercomputadores quanto para computadores pessoais. Em conjunto com um algoritmo de tree code, o código utiliza da Lei da Gravitação Universal para calcular as interações entre partículas. E no caso hidrodinâmico do gás, o código usa equações da termodinâmica para mecânica de fluidos. Cada partícula representa uma quantidade específica de massa; no caso de nosso trabalho, escolhemos 3.10<sup>4</sup> partículas para representar a massa do halo de matéria escura, 3.10<sup>4</sup> partículas para representar a massa de gás e 3.10<sup>4</sup> partículas para representar a soma das massas de disco estelar e bojo. A massa total das componentes da galáxia (i.e. halo, disco, gás e bojo) é dividida igualmente entre suas respectivas partículas.

Os outputs das simulações, a fim de serem menos pesados, vêm em grandes arquivos escritos em código binário. Torna-se necessária a utilização de bibliotecas específicas para poder retirar desses arquivos as informações que utilizaremos para analisar as simulações (e.g. velocidade, posição, tempo etc.).

Para este trabalho, foi realizado um total de dezesseis simulações. Elas foram rodadas em sua totalidade em um processador de dois núcleos, tendo um tempo médio de simulação de 1h30m para cada. No fim, as simulações geraram um total de 3200 snapshots (200 por simulação) ocupando um total de 5.78 GB (em média 1.85 MB por snapshot).

Para executar as simulações, precisamos fornecer ao Gadget-2 informações, as quais serão utilizadas para desenvolver uma galáxia. Essas informações são conhecidas como condições iniciais, e precisam ser fornecidas no mesmo formato do output do código; para isso, são geradas conforme o método descrito em Springel (2005b). Nesse arquivo de condições iniciais, está um conjunto de informações sobre cada partícula de uma galáxia que possuirá disco estelar, halo de matéria escura, bojo e gás. Adotamos, então, a massa total de 95.24×10<sup>10</sup> M para a galáxia, sendo 90.00 × 10<sup>10</sup> M sempre a massa do halo, e o restante é dividido entre disco, gás e bojo (Tabela 1) dependendo da proporção.

Além de declarar quanta massa terá cada partícula, é necessário empregar perfis de densidade para cada uma ser alocada com coordenadas adequadas. Para as partículas do halo de matéria escura, o modelo de (SPRINGEL, 2005b) utiliza a seguinte equação (Eq. 1) de (HERNQUIST, 1990):



#### 23 a 27 de Novembro | Toledo - PR



$$\rho(r) = \frac{M_{dm}}{2\pi} \frac{a}{r} \frac{1}{(r+a)^3},\tag{1}$$

em que  $M_{dm}$  é a massa total do halo de matéria escura,  $\rho_{dm}(r)$  é a densidade volumétrica e r é a distância medida a partir do centro do halo. Por sua vez, o comprimento de escala a é definido da seguinte maneira (Eq. 2):

$$a = r_s \sqrt{2[\ln(1+c) - c/(1+c)]},$$
 (2)

sendo que  $c = r200/r_s$  é a concentração,  $r_s$  é o comprimento de escala do perfil de densidade de (NAVARRO, 1997) e r200 é o raio do virial. Os perfis de densidade do gás (Eq. 3) e do disco estelar (Eq. 4) são traçados por uma função exponencial bidimensional de comprimento de escala h:

$$\Sigma_{\text{gas}}(r) = \frac{M_{\text{gas}}}{2\pi h^2} \exp(-r/h), \tag{3}$$

$$\Sigma_{\star}(r) = \frac{M_{\star}}{2\pi h^2} \exp(-r/h),\tag{4}$$

em que  $\Sigma$  é o perfil de densidade superficial dos discos, r é o vetor distância até o centro da galáxia e M é a massa total do gás e do disco estelar respectivamente.

Por fim o bojo, por motivos de praticidade, tem seu perfil de densidade traçado com o mesmo perfil do halo de Hernquist (Eq. 5):

$$\rho_b(r) = \frac{M_b}{2\pi} \frac{b}{r} \frac{1}{(r+b)^3},\tag{5}$$

sendo b um comprimento de escala medido a partir do comprimento de escala do disco estelar e  $M_b$  a massa total do bojo.

A fim de analisar os resultados das simulações, realizar cálculos matemáticos e construir gráficos e imagens, optamos pela linguagem de programação *Python*. Esta é mundialmente conhecida pela sua simplicidade e objetividade para desempenhar tarefas científicas computacionais. Por ser uma linguagem muito utilizada, as bibliotecas mais atuais e otimizadas são desenvolvidas primeiramente para ela. E para conceber as imagens, utilizamos o software *GLnemo2*.



### 23 a 27 de Novembro | Toledo - PR



#### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste trabalho rodamos dezesseis simulações, todas de galáxias espirais do porte da Via Láctea. As condições iniciais foram modeladas de forma a alterar a fração gás de 0%, 10%, 20% e 30% da massa do disco, e a massa do bojo de 0%, 10%, 20% e 30% da massa do disco (os dados específicos de cada modelo estão apresentados na Tabela 1). Com os resultados dessas simulações, foi possível analisar a influência desses parâmetros na formação e evolução da barra do disco estelar.

Tabela 1 — Proporções de massa das condições iniciais dos modelos utilizados nas simulações, para cada tipo de partícula. Sendo  $M_{\rm b}$  a massa do bojo,  $M_{\rm gas}$  a massa do gás,  $M_{\star}$  a massa do disco e  $M_{\rm dm}$  a massa do halo de matéria escura.

Modelo	M <sub>b</sub> (10 <sup>10</sup> M)	M <sub>gas</sub> (10 <sup>10</sup> M)	M <sub>★</sub> (10 <sup>10</sup> M)	M <sub>dm</sub> (10 <sup>10</sup> M)
B0G0	0.00	0.00	5.24	90.00
B1G0	0.52	0.00	4.72	90.00
B2G0	1.05	0.00	4.19	90.00
B3G0	1.57	0.00	3.67	90.00
B0G1	0.00	0.52	4.72	90.00
B1G1	0.52	0.47	4.24	90.00
B2G1	1.05	0.42	3.77	90.00
B3G1	1.57	0.37	3.30	90.00
B0G2	0.00	1.05	4.72	90.00
B1G2	0.52	0.94	3.77	90.00
B2G2	1.05	0.84	3.35	90.00
B3G2	1.57	0.73	2.93	90.00
B0G3	0.00	1.57	3.67	90.00
B1G3	0.52	1.41	3.30	90.00
B2G3	1.05	1.26	2.93	90.00
B3G3	1.57	1.10	2.57	90.00

Fonte: Autoral (2020).

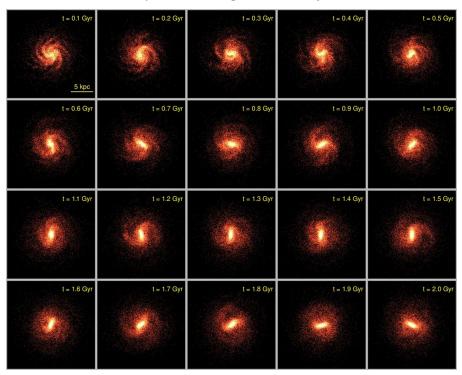
As Figuras 1 e 2 mostram imagens do disco estelar e do gás de uma galáxia com 10% da massa do disco estelar sendo bojo e 10% da massa restante sendo gás (B1G1 na Tabela 1), evoluindo de 0 Gyr até 2 Gyr. Esta galáxia é muito próxima da Via Láctea em termos de distribuição de massa. É notável que a barra do disco se forma rapidamente, e já está presente desde  $\sim$  0.7 Gyr.



## 23 a 27 de Novembro | Toledo - PR

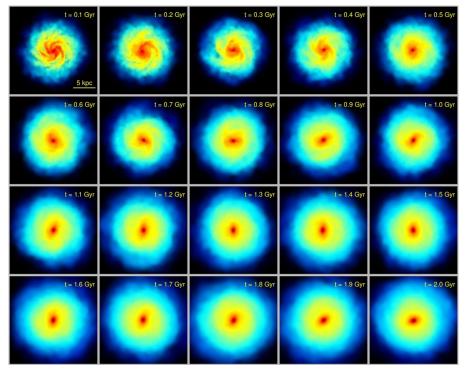


Figura 1: Evolução do disco estelar de uma galáxia do porte da Via Láctea de 0 Gyr até 2 Gyr, com 10% de gás e 10% de bojo.



Fonte: autoral (2020)

Figura 2: Evolução do gás de uma galáxia vista face on do porte da Via Láctea de 0 Gyr até 2 Gyr, com 10% de gás e 10% de bojo.



Fonte: autoral (2020).

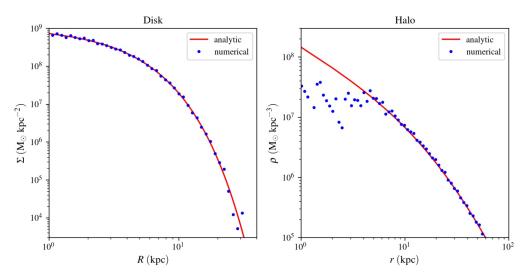


### 23 a 27 de Novembro | Toledo - PR



Representados na Figura 3 estão dois gráficos. O primeiro é o perfil de densidade superficial do disco estelar em função da distância ao centro da galáxia; a curva vermelha representa a equação 4, e os pontos azuis são calculados medindo a densidade de sucessivos anéis provenientes da simulação B1G1, geradas com a mesma equação 4. O segundo gráfico representa o perfil de densidade volumétrica do halo de matéria escura em função da distância ao centro da galáxia; a curva vermelha é o perfil de densidade de Hernquist (1990) e os pontos azuis também são retirados da mesma simulação B1G1, medindo a densidade de sucessivas cascas esféricas. Perto do centro da galáxia existe uma disparidade entre os pontos numéricos e a função analítica. Isso se deve ao fato de a resolução da simulação ser muito baixa para representar dados físicos acurados perto do centro da galáxia. Ambos os gráficos representam as condições iniciais (t = 0 Gyr).

Figura 3: À esquerda: perfil de densidade superficial do disco estelar de uma galáxia do porte da Via Láctea em função da distância ao centro, com 10% de bojo e 10% de gás. À direita: perfil de densidade volumétrica do halo de matéria escura da mesma galáxia em função da distância ao centro.



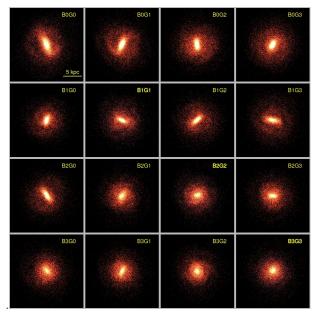
Fonte: autoral (2020).



#### 23 a 27 de Novembro | Toledo - PR



Figura 4: Comparação de dezesseis galáxias espirais em t = 2.0 Gyr. Da esquerda para a direita: aumento da porcentagem de gás de 0% a 30%. De cima para baixo: aumento da porcentagem de bojo de 0% a 30%.



Fonte: autoral (2020).

A Figura 4 mostra dezesseis resultados de simulações (Tabela 1) em t = 2 Gyr. É notável que o brilho e a forma da barra são mais fortes em B0G0, e que são mais fracos em B3G3, indicando que o fator bojo e o fator gás contribuem negativamente para a força da barra. Fica explícito, também, a força da barra diminui gradativamente da esquerda para a direita e de cima pra baixo.

#### **CONCLUSÃO**

Neste trabalho, realizamos um total de dezesseis simulações de N-corpos de galáxias espirais barradas, a fim de analisar a influência da fração de gás e da massa do bojo na formação e evolução da barra da galáxia. Podemos concluir que a quantidade de bojo tende a inibir a formação da barra, como mostra também Kataria (2019). Assim como a fração de gás também inibe a presença de uma barra forte, compativelmente com Athanassoula (2013).

As simulações do trabalho, a fim de diminuir o tempo de CPU e o espaço ocupado em disco, foram realizadas com a resolução de  $3.10^4$  partículas, o que é considerado baixa resolução. Para fins de nosso trabalho, essa resolução foi o suficiente, porém contém algumas limitações. Na Figura 3, é notável que os pontos numéricos perto do centro do halo de matéria escura se desviam da curva da função analítica, por exemplo. No futuro, será necessário executar novas simulações de alta resolução para termos melhora nos resultados. Também será importante considerar o fator de formação estelar, pois nos nossos modelos, a fração de gás se manteve constante. E por fim, podemos futuramente estender o tempo das simulações de 2 Gyr para  $\sim 10$  Gyr, a fim de explorar efeitos de evolução secular.



#### 23 a 27 de Novembro | Toledo - PR



#### **REFERÊNCIAS**

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

ANDERS, F. et al. **Photo-astrometric distances, extinctions, and astrophysical** parameters for Gaia DR2 stars brighter than G = 18. A&A, v. 628, p. A94, 2019.

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, 2013.

ATHANASSOULA, E.; Martinet, L. A correlation between the lengths of bars and the sizes of bulges. A&A, v. 87, n. 3, p. L10, 1980.

ATHANASSOULA, E. What determines the strength and the slowdown rate of bars? MNRAS, v. 341, n. 4, p. 1179–1198, 2003.

BLITZ, L.; SPERGEL, D. N. **Direct Evidence for a Bar at the Galactic Center.** ApJ, v. 379, p. 631, 1991.

DE VAUCOULEURS, G. Revised Classification of 1500 Bright Galaxies. ApJS, v. 8, p. 31, 1963.

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

KATARIA, S. K.; DAS, M. The Effect of Bulge Mass on Bar Pattern Speed in Disk Galaxies. ApJ, v. 886, n. 1, p. 43, 2019.

NAVARRO, J. F.; FRENK, C. S.; WHITE, S. D. M. **A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering**. ApJ, v. 490, n. 2, p. 493–508, 1997.

PESCHKEN, N.; ŁOKAS, E. L. **Tidally induced bars in Illustris galaxies**. MNRAS, v. 483, n. 2, p. 2721–2735,2019.

QUEIROZ, A. B. A. et al. **The Milky Way's bar and bulge revealed by APOGEE DR16 and Gaia DR2**. arXiv e-prints, p. arXiv:2007.12915,2020.

ROSAS-GUEVARA, Y. et al. The buildup of strongly barred galaxies in the TNG100 simulation. MNRAS, v. 491, n. 2, p. 2547–2564,2020.



### 23 a 27 de Novembro | Toledo - PR



SCHAYE, J. et al. The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments. MNRAS, v. 446, n. 1, p. 521–554, 2015.

SHETH, K. et al. Evolution of the Bar Fraction in COSMOS: Quantifying the Assembly of the Hubble Sequence. ApJ, v. 675, n. 2, p. 1141–1155, 2008.

SPRINGEL, V.; DI MATTEO, T.; HERNQUIST, L. **Modelling feedback from stars and black holes in galaxy mergers**. MNRAS, v. 361, n. 3, p. 776–794, 2005.

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

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, 2014.