



Simulações de formação estelar em galáxias barradas

Simulations of star formation in barred galaxies

Kenzo Ryu Sakamoto*, Rubens Eduardo Garcia Machado†.

RESUMO

Galáxias são estruturas de grande porte ligadas gravitacionalmente. Elas são formadas por suas componentes: estrelas, matéria escura, gás e poeira. Das diversas classificações morfológicas de galáxias, estudamos as espirais barradas, que possuem uma estrutura central no formato de barra. Então, visamos estudar a dinâmica presente nestas galáxias. Para esse fim, executamos simulações de N -corpos de dezesseis galáxias do porte da nossa galáxia, com distintas frações de gás e massa de bojo. Podemos concluir a partir de medições e qualitativamente que a barra de uma galáxia similar à Via Láctea está presente desde ~ 0.7 Gyr (bilhões de anos). Realizando a comparação de todos os resultados finais— depois de 10 Gyr — concluimos 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, espiral barrada, formação estelar.

ABSTRACT

Galaxies are large, gravitationally bound structures. They are formed by their components: stars, dark matter, gas and dust. From the various morphological classifications of galaxies, we studied barred spirals, which have a central structure in the shape of a bar. So, we aimed to study the dynamics present in these galaxies. For this purpose, we performed N -body simulations of sixteen galaxies the size of our galaxy, with distinct gas fractions and bulge mass. We can conclude from measurements and qualitatively that the bar of a galaxy similar to the Milky Way is present since ~ 0.7 Gyr (billions of years). Comparing all the final results— after 10 Gyr —we concluded that the bulge mass and the gas fraction inhibit formation and hinder the galaxy bar evolution.

Keywords: galaxies, simulations, barred spirals, star formation.

1 INTRODUÇÃO

Galáxias são sistemas gravitacionalmente ligados compostos por estrelas, matéria escura, gás e poeira. Classificamo-las em três classes morfológicas: elípticas, irregulares e espirais. As que possuem formato de elipsóide são elípticas. As irregulares não possuem forma definida, e especula-se que sejam frutos de colisões entre galáxias. As espirais, como a Via Láctea, possuem forma de disco achatado com um esferóide no centro - o bojo. Existem subclassificações para as galáxias espirais: barradas e não barradas, dependendo da existência de uma estrutura central cujas pontas originam os braços espirais. Focamos nas galáxias espirais barradas, que representam cerca de dois terços das espirais no universo local. Estudos de (ATHANASSOULA, 2003) mostram que a força e velocidade angular da barra evoluem pela troca de momento angular com outros componentes da galáxia. Alguns componentes, como tamanho do bojo, também influenciam na sua força.

* Licenciatura em Física, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil; sakamoto@alunos.utfpr.edu.br

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba; rubensmachado@utfpr.edu.br



A astronomia é muito estudada a partir de observações. Porém, outro método recente de estudo se consolidou com as simulações de N -corpos. Elas desempenham um importante papel em dinâmica galáctica e cosmologia. Com o artifício das simulações, somos capazes de modestamente entender fenômenos que, caso contrário, demorariam bilhões de anos para acontecer de fato. Por exemplo, sabemos que o formato do halo de matéria escura e a presença de gás influenciam diretamente na evolução da barra (ATHANASSOULA, MACHADO, RODINOV, 2013). Também sabemos que a massa e o tamanho do bojo inibem a formação e atrapalham a evolução das barras de galáxias espirais. Uma simulação consiste em simular o universo, como um todo, desde um ponto de partida, até um tempo estabelecido. Elas são modeladas para ter um volume de centenas de milhões de anos-luz como condição inicial, e simular a evolução de galáxias e aglomerados - como a simulação Illustris (VOGELSBERGER, 2014). Como foi estudado em (PESCHKEN, 2019; ROSAS-GUEVARA, 2020), galáxias espirais barradas foram geradas por consequência gravitacional – sem *inputs* diretos. A formação de galáxias barradas também foi estudada com outra simulação cosmológica, a EAGLE (SCHAYE, 2015). Isso corrobora com os estudos que vêm sendo feitos de galáxias barradas simuladas isoladamente. Neste trabalho, o objetivo é estudar a dinâmica de galáxias barradas. Então, executamos dezesseis simulações de N -corpos, e de alta resolução, com diferentes massas de bojo e frações de gás, com o propósito de analisar a sua influência direta na formação e evolução da barra galáctica.

2 MÉTODO

2.1 Simulações

O código de simulações de N -corpos, Gadget-2 (SPRINGEL, 2005), é mundialmente conhecido por sua excelência na área, e tornou-se uma opção óbvia para o desenvolvimento deste trabalho, pois possui código aberto, é disseminado mundialmente e desenhado para grandes clusters e computadores pessoais. O código utiliza a Lei da Gravitação Universal para calcular as inúmeras interações entre partículas. O gás é calculado usando equações da termodinâmica para mecânica de fluidos – é um caso hidrodinâmico. Cada partícula representa uma quantidade específica de massa; escolhemos 1×10^6 partículas para representar a massa do halo de matéria escura, 1×10^5 partículas para representar a massa de gás e 2×10^5 partículas para representar a soma das massas de disco estelar e bojo. A massa total das componentes da galáxia é dividida de forma homogênea entre as suas partículas. As dezesseis simulações que realizamos eram de alta resolução, então ficou impraticável realizar em computadores pessoais, como foi feito anteriormente. Então, neste trabalho, pudemos contar com a ajuda imprescindível do complexo de supercomputadores Santos Dumont, do Laboratório Nacional de Computação Científica, em Petrópolis, Rio de Janeiro. O acesso e instalação dos softwares necessários foi realizado localmente a partir de VPN e comandos do terminal de Linux.

2.2 Condições Iniciais

São as informações necessárias para se iniciar uma simulação, contendo os parâmetros a serem utilizados, a massa e o número de cada tipo de partícula. Usamos os métodos descritos em (SPRINGEL; DI MATTEO; HERNQUIST, 2005) para gerar esses arquivos. Foi adotada uma massa total de $95.24 \times 10^{10} M_{\odot}$.



(massas solares) para toda a galáxia, sendo $90.00 \times 10^{10} M_{\odot}$ todas as vezes a massa do halo, e o restante é dividido entre disco, gás e bojo dependendo de sua proporção.

Apenas dizer a quantidade de massa de cada partícula não é suficiente para gerar a condição inicial; as coordenadas de cada partícula devem ser descritas a partir de perfis de densidade aplicados. Para as partículas do halo de matéria escura, consideramos adequado o modelo descrito por (SPRINGEL; NAVARRO; DI MATTEO, 2005), ele usa a seguinte equação (HERNQUIST, 1990):

$$\rho_{dm}(r) = \frac{M_{dm}}{2\pi} \frac{a}{r} \frac{1}{(r+a)^3} \quad (1)$$

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. $c = r_{200}/r_s$ é a concentração, r_s o comprimento de escala do perfil de densidade de (NAVARRO; FRENK; WHITE, 1997)) e r_{200} o raio do virial

Os perfis de densidade do gás e do disco estelar são traçados por uma função exponencial bidimensional de comprimento de escala h :

$$\Sigma_{gas}(r) = \frac{M_{gas}}{2\pi h^2} \exp\left(-\frac{r}{h}\right) \quad (2)$$

$$\Sigma_{*}(r) = \frac{M_{*}}{2\pi h^2} \exp\left(-\frac{r}{h}\right) \quad (3)$$

em que Σ 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 tem seu perfil de densidade traçado com o mesmo perfil do halo de Hernquist:

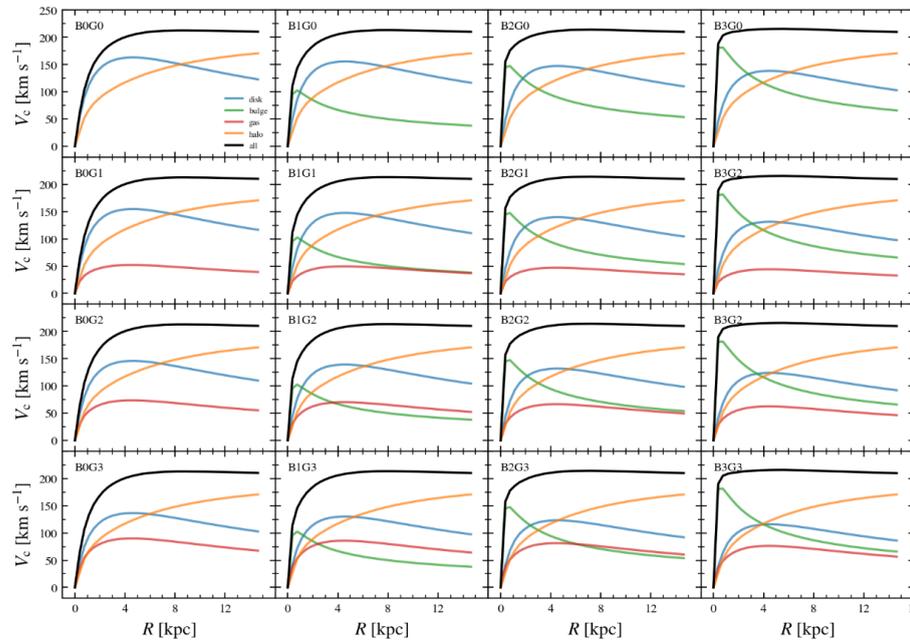
$$\rho_b(r) = \frac{M_b}{2\pi} \frac{b}{r} \frac{1}{(r+b)^3} \quad (4)$$

b é o comprimento de escala a partir do comprimento de escala do disco estelar e M_b a massa total do bojo.

3 RESULTADOS

Modelamos as condições iniciais 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. Um bom modo de categorizar as condições iniciais, seria mostrando a contribuição de cada componente para a velocidade circular total da galáxia (Figura 1). Com os resultados das simulações, fomos capazes de analisar analiticamente, a partir de códigos em Python, a influência de todos esses parâmetros na formação e evolução da barra do disco estelar.

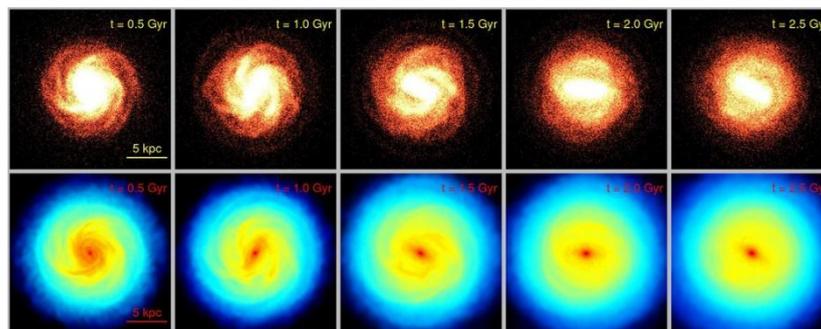
Figura 1 - Comparação da velocidade circular V_c em função do raio r , das dezesseis condições iniciais.



Fonte: O autor (2021).

A Figura 2 representa o disco estelar e do gás de uma galáxia com 10% da massa do disco estelar sendo bojo e 10% da massa restante sendo gás (BIG1 na figura 4), evoluindo de 0.0 Gyr até 2.5 Gyr. Esta galáxia foi selecionada por ser muito próxima da Via Láctea na distribuição de massa nas componentes. Fica evidente a velocidade precipitada da formação da barra do disco. E já está presente desde ~ 1.0 Gyr.

Figura 2 – Evolução do disco estelar e de gás de uma mesma galáxia.



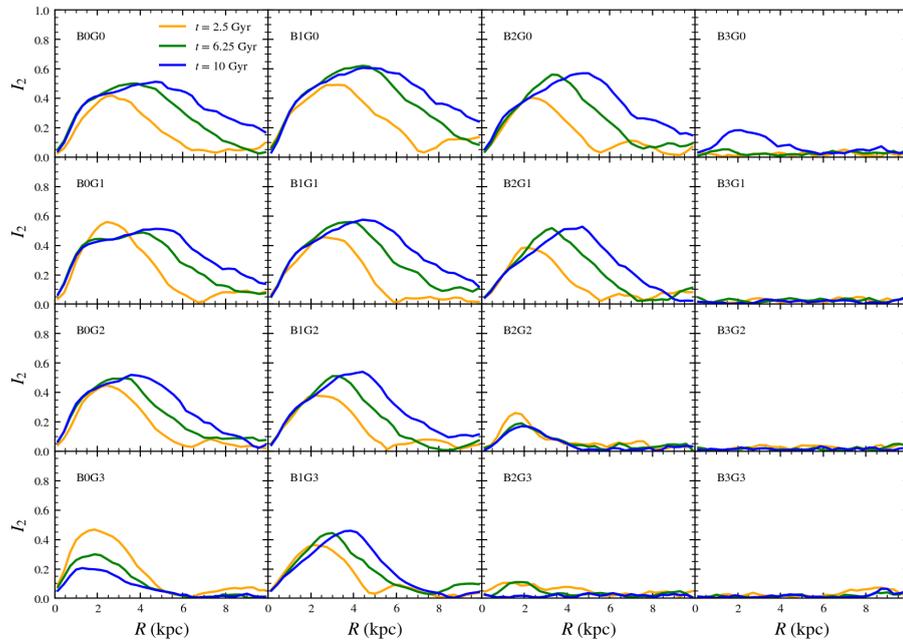
1ª linha: evolução do disco estelar de uma galáxia vista *face on* do porte da Via Láctea de 0.0 Gyr até 2.5 Gyr, com 10% de gás e 10% de bojo. 2ª linha: evolução do disco de gás da mesma galáxia vista *face on* de 0.0 Gyr até 2.5 Gyr.

Fonte: O autor (2021).

Além da análise qualitativa (visual) dos resultados, também medimos o parâmetro I_2 , que representa geometricamente a força da barra utilizando os coeficientes de Fourier; e comparamos, nos dezesseis casos, três diferentes tempos: 2.50 Gyr, 6.25 Gyr e 10.00 Gyr (Figura 3). A Figura 4 mostra os dezesseis resultados finais das simulações em $t = 10$ Gyr. Fica visualmente notável que o brilho e a forma da barra são mais fortes

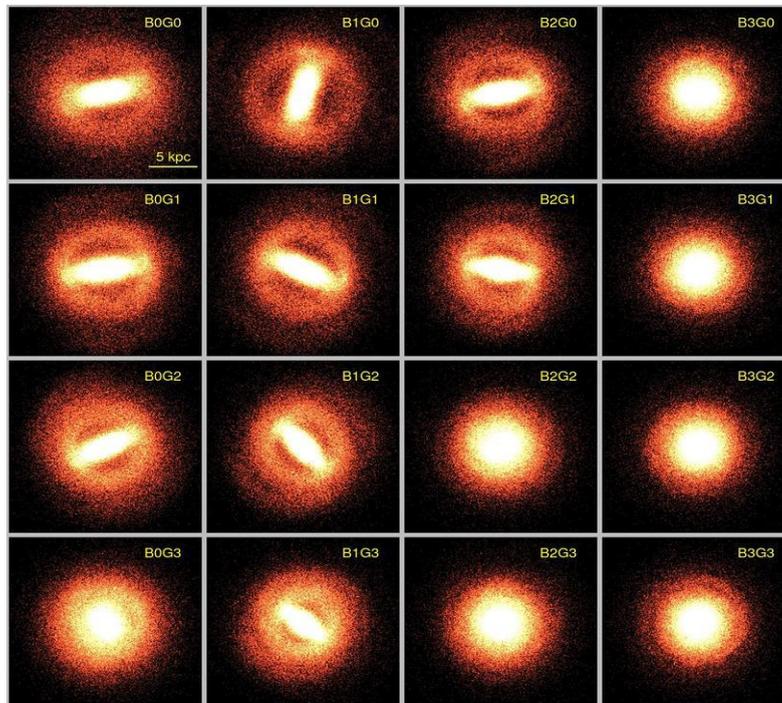
em B0G0, e que são mais fracos em B3G3, indicando que o fator bojo e o fator gás contribuem negativamente para a força da barra. Fica explícito, também, que a força da barra diminui gradativamente da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Figura 3 – Comparação do parâmetro I_2 , em função do raio r . Medição em 2.50 Gyr, 6.25 Gyr e 10.00 Gyr.



Fonte: O autor (2021).

Figura 4 – Comparação de dezesseis galáxias espirais em $t = 10.0$ Gyr.



Da esquerda para a direita: aumento da porcentagem de bojo de 0% a 30%.
 De cima para baixo: aumento da porcentagem de gás de 0% a 30%



Fonte: O autor (2021).

4 CONCLUSÃO

Realizamos dezesseis simulações de N -corpos de galáxias do porte da Via Láctea, para analisar se existe influência da fração de gás e massa de bojo na formação e evolução da barra da galáxia. Podemos concluir que a quantidade de bojo tende a inibir a formação da barra. Concluimos, juntamente, que a fração de gás atrapalha o desenvolvimento de uma barra forte, consoante aos resultados de (ATHANASSOULA, 2013).

As simulações do trabalho puderam ser realizadas em um super computador com múltiplos processadores potentes, então foi possível realizar com a alta resolução de 1×10^6 partículas. Em resultados anteriores, havíamos rodado as simulações localmente em baixa resolução, entretanto agora conseguimos esse auxílio do cluster Santos Dumont para executarmos em alta resolução. Os resultados não diferem muito, o que acaba sendo positivo para a análise. A alta resolução também possibilitou a análise geométrica na Figura 4 – anteriormente, a análise foi feita somente de forma visual. Também conseguimos executar a simulação até o tempo mais avançado de 10 Gyr, o que possibilita análise de evoluções seculares.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq e à Fundação Araucária (UTFPR) pelo fomento neste ano difícil de trabalho durante a pandemia. Também agradeço ao meu orientador, Rubens, por toda atenciosidade e dedicação. Por fim, agradeço ao LNCC por disponibilizar o supercomputador Santos Dumont para realizar as simulações.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ATHANASSOULA, E. **What determines the strength and the slowdown rate of bars?** MNRAS, v. 341, n. 4, p. 1179–1198, jun. 2003.
- HERNQUIST, L. **An Analytical Model for Spherical Galaxies and Bulges.** ApJ, v. 356, p. 359, jun. 1990.
- 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, dez. 1997.
- PESCHKEN, N.; ŁOKAS, E. L. **Tidally induced bars in Illustris galaxies.** MNRAS, v. 483, n. 2, p. 2721–2735, fev. 2019.
- ROSAS-GUEVARA, Y. et al. **The buildup of strongly barred galaxies in the TNG100 simulation.** MNRAS, v. 491, n. 2, p. 2547–2564, jan. 2020.
- 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, jan. 2015.
- SPRINGEL, V. **The cosmological simulation code GADGET-2.** MNRAS, v. 364, p. 1105–1134, dez. 2005.
- 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, ago. 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, out. 2014.