



# Simulações de discos galácticos verticalmente assimétricos

## *Simulations of vertically asymmetric galactic disks*

Andressa Wille \*

Rubens E. G. Machado<sup>†</sup>

2021

### RESUMO

Vários estudos observacionais e de simulações numéricas têm revelado cada vez mais detalhes sobre a estrutura das galáxias. Nesta pesquisa, o objeto de estudo foram as assimetrias verticais em formato de S, chamadas de S-shaped warps, no disco de galáxias espirais. A fim de reproduzir esta morfologia específica através de simulações com condições iniciais idealizadas, foram utilizados os códigos Galstep e Gadget-2, além de programas em Python para a interpretação dos resultados. Com base em estudos recentes, foram estabelecidas quatro amplitudes iniciais diferentes (0.7, 2, 4 e 10 kpc) para a warp artificialmente imposta ao disco de uma galáxia comparável a Via Láctea. As simulações mostraram que esta assimetria vertical apresenta uma forte dependência da amplitude inicial estabelecida. A warp desaparece rapidamente no caso de uma amplitude inicial de 0.7 kpc, porém pode durar alguns Gyr se a amplitude inicial for de 2 kpc, e pode ser ainda mais duradoura no caso de uma amplitude inicial de 4 ou 10 kpc.

**Palavras-chave:** galáxias. warps. simulações numéricas.

### ABSTRACT

Several observational studies and numerical simulations have revealed more and more details about the structure of galaxies. In this research, the object of study was the vertical S-shaped asymmetries, called S-shaped warps, in the disk of spiral galaxies. In order to reproduce this specific morphology through simulations with idealized initial conditions, the codes Galstep and Gadget-2 were used, as well as Python programs for the interpretation of the results. Based on recent studies, four different initial amplitudes (0.7, 2, 4 and 10 kpc) were established for the warp artificially imposed on the disk of a Milky Way-like galaxy. The simulations revealed that this vertical asymmetry has a strong dependence on the initial amplitude established. The warp disappears quickly in the case of an initial amplitude of 0.7 kpc, but can last for a few Gyr if the initial amplitude is 2 kpc, and can be even more long-lived in the case of an initial amplitude of 4 or 10 kpc.

**Keywords:** galaxies. warps. numeric simulations.

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das estruturas mais importantes das galáxias espirais, o disco, pode apresentar assimetrias verticais. As warps, por exemplo, acontecem quando há mudança de inclinação nas partes mais exteriores do disco (SCHÖNRICH; DEHNEN, 2018). Em particular, uma das morfologias que mais chama atenção é a warp em forma de S (ou em forma de integral), em que um dos lados é inclinado para cima e o outro é inclinado para baixo.

No Grupo Local, já foram detectadas três galáxias espirais com esse formato: a Via Láctea, a galáxia do Triângulo (M33) e a galáxia de Andrômeda (M31) (SEMCZUK et al., 2020).

\* DAFIS, Licenciatura em Física; ✉ [andressawille@alunos.utfpr.edu.br](mailto:andressawille@alunos.utfpr.edu.br).

† DAFIS, Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia; ✉ [rubensmachado@utfpr.edu.br](mailto:rubensmachado@utfpr.edu.br);

<https://orcid.org/0000-0001-7319-297X>.



O estudo das warps pode trazer informações importantes sobre a formação e a evolução das galáxias (POGGIO; DRIMMEL et al., 2019) e por isso já foram propostas várias teorias para explicar esse tipo de assimetria. Embora sua origem ainda não seja completamente compreendida, alguns dos mecanismos que podem levar a formação de warps nos discos das galáxias são: forças de maré provocadas pela passagem próxima de galáxias satélites; colisões e fusões entre galáxias; acreção de gás desalinhado resultante de interações com outras galáxias; entre outros fenômenos (GÓMEZ et al., 2016).

Atualmente, surveys de cinemática estelar como RAVE, GAIA, SDSS e LAMOST mapeiam o disco da Via Láctea com grande precisão (NARAYAN; DETTMAR; SAHA, 2020). Estes estudos são muito relevantes para um melhor entendimento da warp da Galáxia, sua extensão e amplitude.

Além do trabalho observacional, as simulações computacionais são excelentes ferramentas para compreender diversos aspectos da evolução de galáxias, inclusive a formação de assimetrias verticais. Neste sentido, através de simulações, como reproduzir a morfologia de uma warp em uma galáxia comparável a Via Láctea? O objetivo deste estudo é criar condições iniciais com diferentes métodos para simular a morfologia de uma warp em um disco galáctico e investigar como diferentes amplitudes iniciais desta assimetria evoluem com o tempo.

## 2 MÉTODOS

O trabalho com simulações numéricas consiste basicamente de três estágios: criar de condições iniciais, rodar as simulações e analisar os outputs.

Nesta pesquisa, foram utilizados os códigos Galstep (RUGGIERO; LIMA NETO, 2017) e Gadget-2 (SPRINGEL, 2005).

Primeiramente, foram criadas condições iniciais no Galstep, com o número de partículas de  $N_{disk} = 10^5$  e  $N_{halo} = 10^6$  e massas de  $M_{disk} = 5 \times 10^{10} M_{\odot}$  e  $M_{halo} = 100 \times 10^{10} M_{\odot}$ .

Essas condições idealizadas foram alteradas com algoritmos em Python, para que reproduzissem a morfologia de warp em formato de S, usando quatro métodos para distorcer artificialmente o disco de uma galáxia comparável a Via Láctea.

Os dois primeiros métodos tiveram como base o estudo de ondas bidimensionais. No primeiro, foram usadas a equação da membrana quadrada, considerando seus modos de oscilação. Os modos (1,2), (2,1) e (2,2) se mostram bastante eficientes para simular a estrutura de uma warp. Com base neles, alteramos a altura  $z$  do disco. Já no segundo, o processo foi similar, porém foram usadas as funções de Bessel, a fim de reproduzir uma membrana circular. Os modos de oscilação (1,1), (1,2) e (2,2) foram escolhidos como base para a criação de condições iniciais com este método.

Posteriormente, uma equação com dependência do cosseno (BINNEY; TREMAINE, 2008) para a caracterização de distorções em discos galácticos também foi usada como método. Já o quarto e último método foi o de anéis inclinados (*tilted rings*), que consistia em aplicar uma matriz de rotação a sucessivos anéis do disco galáctico, inclinando-os a diferentes ângulos para reproduzir a morfologia em formato de S.

Em seguida, dentre essas condições iniciais advindas dos diferentes métodos, foi escolhida uma para rodar uma simulação com o tempo de 10 giga anos (Gyr). A escolhida foi o modo (1,1) da membrana circular, com amplitude inicial de 10 kpc, que aparentava ser um dos métodos mais promissores. Para fins comparativos, também rodamos uma simulação de um disco sem assimetrias verticais. Para as duas simulações foi usado o código Gadget-2. Além disso, em ambas o halo foi representado por um potencial analítico, pois este tipo de simulação demanda muito esforço computacional. Como o halo permanece aproximadamente esférico durante



toda a simulação, suas partículas podem ser substituídas por equações analíticas que representam a interação entre elas.

Para analisar os resultados das simulações foram escritos algoritmos em Python para desinclinarmos o disco, que durante a simulação sofreu uma inclinação que prejudicaria certas medições; plotar mapas de altura média e mapas de desvio padrão da altura; plotar gráficos da altura média em relação ao ângulo  $\theta$  e também um gráfico para observar a evolução da amplitude máxima da warp com o passar do tempo.

Uma parte posterior da pesquisa foi escolher diferentes amplitudes iniciais para rodar mais simulações com o método da membrana circular. Desta vez, buscou-se em artigos valores realistas para a amplitude. Os trabalhos escolhidos foram tanto pesquisas com dados observacionais quanto com simulações computacionais. A maioria dos artigos investigados citava valores entre 2 e 4 kiloparsec (kpc) para a altura da assimetria vertical (LI et al., 2020; GÓMEZ et al., 2016; POGGIO; LAPORTE, C. F. P. et al., 2021). Uma das pesquisas inclusive citava um valor de amplitude para a warp da Via Láctea: 0.7 kpc (NARAYAN; DETTMAR; SAHA, 2020). Apenas um dos artigos citava o valor de 10 kpc, divergindo dos outros (LAPORTE, C. et al., 2018).

Com base nessa investigação, os valores escolhidos para amplitude inicial da assimetria foram: 0.7 kpc (A1), 2 kpc (A2) e 4 kpc (A3). Rodou-se mais três simulações, com as condições iniciais baseadas no método da membrana circular, considerando as amplitudes escolhidas, com o código Gadget-2. Novamente, o tempo foi de 10 Gyr, o número de partículas e as massas foram os mesmos da primeira simulação. O halo foi representado por um potencial analítico mais uma vez.

Para analisar os outputs das simulações, utilizou-se novamente os algoritmos em Python para desinclinarmos o disco; plotar mapas de altura média e mapas de desvio padrão de altura; plotar gráficos da altura média em relação ao ângulo  $\theta$ ; e plotar o gráfico da evolução da amplitude máxima da warp com o passar do tempo.

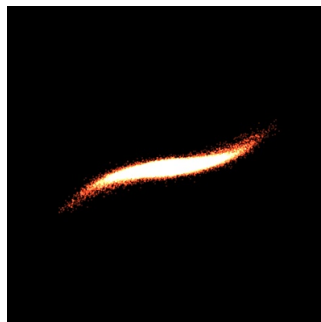
Para calcular a amplitude máxima  $A_{max}$ , usou-se os resultados dos gráficos da altura média em relação ao ângulo  $\theta$ . As maiores diferenças de altura se encontram nas bordas, entre 20 e 35 kpc de raio, então considerando os setores circulares do disco no anel  $20 < \text{raio} < 35$  kpc, é possível fazer uma média das alturas máximas (a parte do disco que está inclinada para cima) e das alturas mínimas, em módulo (a parte do disco que está inclinada para baixo). Essa média foi definida como a  $A_{max}$ . Posteriormente, foi ajustada uma curva média a esses gráficos.

A simulação que já havia sido feita com amplitude inicial de 10 kpc (A4), e seus resultados, também foi considerada.

### 3 RESULTADOS

A Figura 1 mostra a warp com amplitude inicial de 10 kpc (A4).

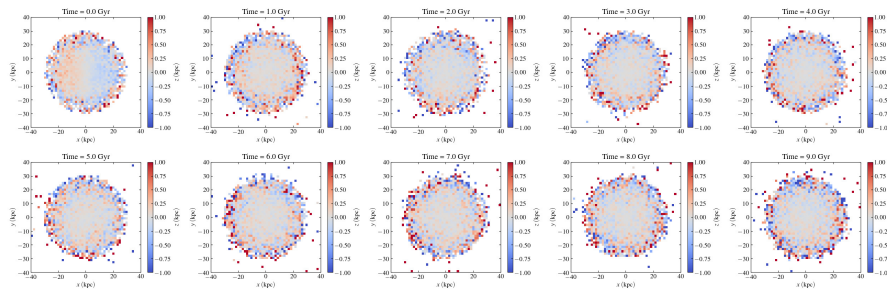
**Figura 1 – Disco artificialmente deformado com warp de amplitude 10 kpc**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

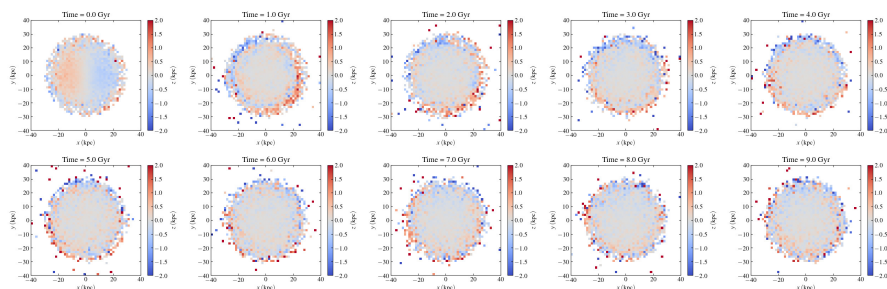
Os mapas de altura média das simulações mostram como a altura média vai mudando conforme o tempo passa. Durante o primeiro Gyr, surgem espirais, pois é um período de instabilidades iniciais. Porém, com o passar do tempo, as espirais desaparecem e então as maiores diferenças de alturas passam a se concentrar nas bordas, caracterizando o formato de S da warp. Nas Figuras 3 e 4 observa-se ainda que o dipolo azul/vermelho, que caracteriza as alturas menores e maiores respectivamente, não se mantém parecido com a situação inicial, pois não há simetria com a esquerda/direita do eixo x. Este dipolo azul/vermelho permanece perceptível por mais tempo no caso da amplitude de 4 kpc.

**Figura 2 – Mapa de alturas médias da galáxia com warp de amplitude inicial 0.7 kpc**



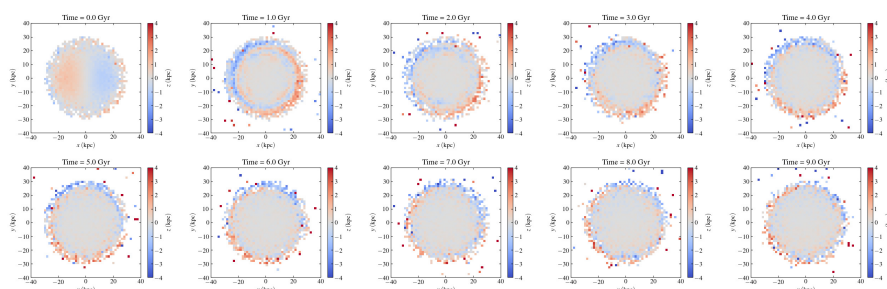
Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 3 – Mapa de alturas médias da galáxia com warp de amplitude inicial 2 kpc**



Fonte: Autoria própria (2021).

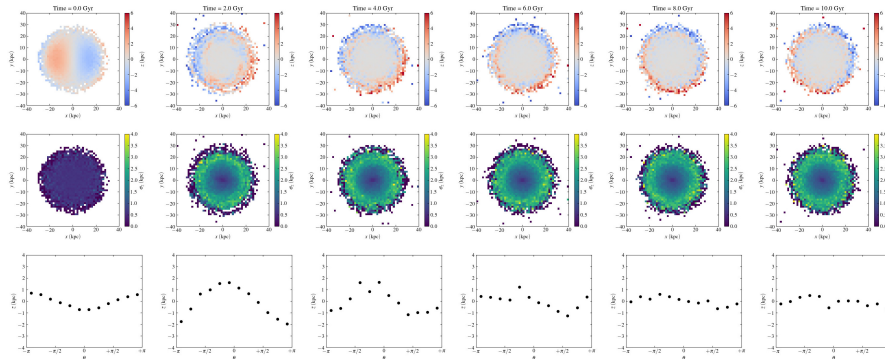
**Figura 4 – Mapa de alturas médias da galáxia com warp de amplitude inicial 4 kpc**



Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 5 mostra as análises feitas para a simulação da galáxia com warp de amplitude 10 kpc. No painel superior estão os mapas de altura média. Esta é a simulação com maior amplitude inicial e é perceptível que a warp é mais duradoura, em comparação com as outras. No painel do meio, temos o mapa de desvio padrão de alturas. Ocorre uma maior dispersão da altura no meio do disco, porém o centro e as bordas tem dispersão perto de zero. No painel inferior, os gráficos de altura em relação ao ângulo  $\theta$  mostram um formato quase senoidal nos primeiros Gyr, mas depois as alturas vão se aproximando de zero.

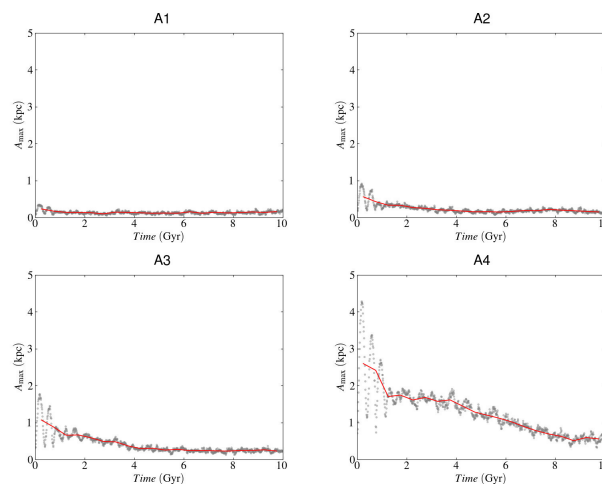
**Figura 5 – Análises para a simulação da galáxia com amplitude inicial de 10 kpc**



Fonte: Autoria própria (2021).

Quanto aos gráficos de amplitude máxima com o passar do tempo (Figura 6), fica clara a dependência da amplitude inicial para a evolução da amplitude máxima através dos anos.

**Figura 6 – Gráficos de amplitude máxima**



Fonte: Autoria própria (2021).

## 4 CONCLUSÕES

As Figuras 2, 3 e 4 mostram um forte indicativo de que a duração da warp está relacionada com a amplitude inicial dela.

A assimetria desaparece rapidamente, durante o primeiro Gyr, no caso de uma amplitude inicial de 0.7 kpc (A1). Porém, com uma amplitude inicial de 2 kpc (A2), a duração é maior, cerca de 5 Gyr. Se tal amplitude é de 4 kpc (A3) ou 10 kpc (A4), a warp é long-lived, durando até o final das simulações (10 Gyr). A diferença entre estes dois últimos casos fica clara na Figura 6, que mostra a evolução da amplitude máxima ao longo do tempo, sendo esta bem maior se a amplitude é de 10 kpc (A4).

Isso indica que assimetrias verticais em discos de galáxias espirais podem ser duradouras e, portanto, warps detectadas atualmente podem ter sido causadas há alguns Gyr (LAPORTE, C. et al., 2018), pelos fenômenos já comentados na Introdução.



## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pela participação no Programa de Voluntariado em Iniciação Científica e Tecnológica (Edital PROPPG 05/2020 - PIVICT) da estudante Andressa Wille.

## REFERÊNCIAS

- BINNEY, James; TREMAINE, Scott. **Galactic Dynamics**. 2. ed. Princeton: Princeton University Press, 2008.
- GÓMEZ, Facundo A. et al. Warps and waves in the stellar discs of the Auriga cosmological simulations. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 465, n. 3, p. 3446–3460, nov. 2016.
- LAPORTE, Chervin F.P. et al. The influence of Sagittarius and the Large Magellanic Cloud on the stellar disc of the Milky Way Galaxy. English (US). **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 481, n. 1, p. 286–306, nov. 2018.
- LI, X.-Y. et al. Mapping the Galactic Disk with the LAMOST and Gaia Red Clump Sample. IV. The Kinematic Signature of the Galactic Warp. **The Astrophysical Journal**, American Astronomical Society, v. 901, n. 1, p. 56, set. 2020.
- NARAYAN, Chaitra A; DETTMAR, Ralf-Jürgen; SAHA, Kanak. Wobbly discs – corrugations seen in the dust lanes of edge-on galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 495, n. 4, p. 3705–3714, mai. 2020.
- POGGIO, E.; DRIMMEL, R. et al. Evidence of a dynamically evolving Galactic warp. **Nature Astronomy**, v. 4, p. 590–596, 2019.
- POGGIO, Eloisa; LAPORTE, Chervin F P et al. Measuring the vertical response of the Galactic disc to an infalling satellite. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, ago. 2021.
- 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**, v. 468, n. 4, p. 4107–4115, mar. 2017.
- SCHÖNRICH, Ralph; DEHNEN, Walter. Warp, waves, and wrinkles in the Milky Way. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 478, n. 3, p. 3809–3824, mai. 2018.
- SEMCZUK, Marcin et al. Tidally induced warps of spiral galaxies in IllustrisTNG. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 498, n. 3, p. 3535–3548, ago. 2020.
- SPRINGEL, Volker. The cosmological simulation code gadget-2. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 364, n. 4, p. 1105–1134, dez. 2005.