



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
OBSERVATÓRIO DO VALONGO

MODELANDO A DISTRIBUIÇÃO DE MATÉRIA ESCURA EM
GALÁXIAS ANÁLOGAS À VIA LÁCTEA

Trabalho de conclusão de curso de graduação por

NATANAEL GOMES DE OLIVEIRA

Orientadora: Prof. Dr. Karín Menéndez-Delmestre

Rio de Janeiro, Fevereiro de 2023

Natanael Gomes de Oliveira

MODELANDO A DISTRIBUIÇÃO DE MATÉRIA ESCURA EM GALÁXIAS
ANÁLOGAS À VIA LÁCTEA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Astronomia – Astrofísica, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Astronomia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Orientadora: Prof. Dr. Karín Menéndez-Delmestre

Rio de Janeiro

2023

AGRADECIMENTOS

Diferentemente de todas as seções de agradecimentos que eu já li, começarei esta agradecendo a mim mesmo, mas não ao eu de hoje – ao Natanael mais jovem. Gostaria de agradecer pela coragem de enfrentar tudo e todos para seguir em busca do sonho de estudar Astronomia. Foi realmente muito difícil, mas você conseguiu.

Aos meus pais, Silene e Zé Isídio, em especial à minha mãe, toda a minha gratidão por ter criado meus cinco irmãos e eu, nunca nos deixando faltar comida. Eu tenho plena consciência do quão difícil foi; lembro de todas as dificuldades, mas a senhora também conseguiu. Definitivamente esse diploma é, também, graças a vocês, mãe, pai, Alda, tia Nininha e Yara.

Aos meus amigos, em especial a Andrei, que sempre esteve comigo desde nossos 6 (?) anos, todo o meu carinho e admiração. Isaque, Mariane, Marlene, Cristiane e Ana Júlia: obrigado por fazerem da minha infância uma época mais feliz (e por continuarem até hoje!). Obviamente, não podia deixar de agradecer àqueles que eu conheci ao longo dessa graduação: Paola, João Pedro, Raquel, Yasmin, Débora, Caroline, Sharon, Rayssa, Raimundo, Rayane, Rebecca, Nico e Isabel; podem ter certeza que vocês me ajudaram muito nessa trajetória. Obrigado mesmo, gente! Vocês são incríveis e vou levar cada um pra sempre comigo.

Ao meu grupo de pesquisa, o LASEX, agradeço pelas ótimas discussões e conversas. Em especial, Thiago, Marco, Amanda e Arianna: vocês são cientistas incríveis!

Meu mais sincero agradecimento à minha referência de cientista e grande responsável por este projeto, quem eu também tenho a honra de chamar de orientadora: Karín. Obrigado por todo o suporte, por acreditar em mim e por fazer a Astronomia tão melhor (desde IAM!).

Também gostaria de agradecer aos funcionários do Valongo, que sempre cuidaram tão bem do observatório. Finalizo agradecendo ao CNPq e SigmaXi por financiarem este projeto.

Sem ciência, uma nação sempre estará fadada ao fracasso.

*“Love me when I least deserve it,
because that’s when I need it most.”*

– Swedish proverb

RESUMO

Estimativas recentes indicam que a matéria escura representa cerca de 85% da matéria total do universo. No entanto, sua presença, até o momento, é manifestada apenas através de efeitos gravitacionais, onde uma de suas maiores evidências pode ser constatada a partir das curvas de rotação de galáxias de disco. Apesar de sua predominância, ainda é um desafio estimar a densidade local de matéria escura – isto é, a densidade de matéria escura na vizinhança solar, ~ 8 kpc do centro da Via Láctea (VL). Atualmente, essas estimativas são baseadas em suposições sobre o formato do halo de matéria escura da VL ou em condições locais da cinemática estelar que apresentam grandes incertezas. Motivados em entender como a matéria escura se distribui em galáxias como a nossa, definimos uma amostra de galáxias análogas à VL. Nossa amostra é derivada dos levantamentos S⁴G e VIVA, no infravermelho médio (3.6 e 4.5 μm) e rádio (hidrogênio atômico neutro, HI), respectivamente. O imageamento que o levantamento S⁴G provê é o melhor traçador de banda única da massa estelar, nos permitindo fazer uma análise cuidadosa da distribuição da matéria bariônica – fortemente dominada pela componente estelar. Por outro lado, usando os cubos de dados do levantamento VIVA podemos usar HI para traçar a massa dinâmica e, conseqüentemente, mapear a distribuição de matéria escura de nossa amostra. Combinando essas observações, atingimos nosso objetivo principal: isolar a componente de matéria escura, construindo mapas de matéria escura para nossa amostra. A amostra final é composta por 6 galáxias e foi definida com base em cortes na velocidade máxima de HI ($v_{\text{max,HI}} = 160\text{--}280 \text{ km s}^{-1}$) e tipo morfológico (Sab–Sbc), visando escolher sistemas semelhantes à VL. A partir dos mapas de intensidade e velocidade de HI, derivados dos cubos de dados disponíveis através de VIVA, construímos as curvas de rotação para cada galáxia da amostra. Desenvolvemos um modelo analítico capaz de decompor a curva de rotação do objeto em suas diferentes contribuições (bojo, disco, gás e halo), nos permitindo ajustar perfis de distribuição de massa em galáxias análogas à VL. Finalmente, seguindo uma abordagem independente e inovadora, a qual se baseia na modelagem guiada por parâmetros efetivamente calculados a partir dos dados observacionais, obtivemos valores para a densidade local de matéria escura ($\rho_{\text{dm},\odot} = 0.18\text{--}0.39 \text{ GeV cm}^{-3}$) consistentes com abordagens mais clássicas da literatura.

Palavras-chave: Galáxias próximas; Matéria escura; Curvas de rotação; HI; Massa estelar.

ABSTRACT

Recent estimates indicate that dark matter represents about 85% of the total matter in the universe. However, its presence, so far, is only manifested through gravitational effects, where one of its greatest evidence can be seen in the rotation curves of disk galaxies. Despite its dominance, it is still a challenge to estimate the local dark matter density – that is, the dark matter density in the solar neighborhood, ~ 8 kpc from the center of the Milky Way (MW). Currently, these estimates are based on assumptions about the shape of the MW dark matter halo or on local conditions of stellar kinematics that present large uncertainties. Motivated to understand how dark matter is distributed in galaxies like ours, we defined a sample of MW analog galaxies. Our sample is derived from both the S⁴G and VIVA surveys, in the mid-infrared (3.6 and 4.5 μm) and radio (neutral atomic hydrogen, HI), respectively. Imaging from the S⁴G survey provides the best single-band tracer of stellar mass, allowing us to make a careful analysis of the baryonic matter distribution – strongly dominated by the stellar component. On the other hand, using the data cubes from the VIVA survey we can use HI to derive the dynamical mass and consequently mapping the dark matter distribution of our sample. Combining these observations, we achieved our main goal: isolating the dark matter component, building dark matter maps for our sample. The final sample is composed of 6 galaxies and it was defined based on cuts in both the HI maximum velocity ($v_{\text{max,HI}} = 160\text{--}280$ km s⁻¹) and morphological type (Sab–Sbc), aiming to choose systems similar to the MW. From the HI intensity and velocity maps derived from the data cubes available through VIVA, we constructed the rotation curves for each galaxy in the sample. We developed an analytical model capable of decomposing the object’s rotation curve into its different contributions (bulge, disk, gas and halo), allowing us to adjust mass distribution profiles in analog galaxies to the MW. Finally, following an independent and innovative approach, which is based on parameter-guided modeling duly calculated from observational data, we obtained values for the local dark matter density ($\rho_{\text{dm},\odot} = 0.18\text{--}0.39$ GeV cm⁻³) consistent with more classical approaches of the literature.

Keywords: Nearby galaxies; Dark matter; Rotation curves; HI; Stellar mass.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	O meio interestelar de galáxias espirais	1
1.2	A matéria escura como um dos grandes problemas da astronomia con- temporânea	4
1.3	Os WIMPs e a busca pela detecção direta de matéria escura	7
1.4	Objetivos	9
2	A amostra e os dados.....	12
2.1	Amostra de galáxias análogas à Via Láctea.....	12
2.1.1	S ⁴ G survey	12
2.1.2	VIVA survey	13
2.1.3	THINGS survey	14
2.1.4	Seleção baseada na morfologia	14
2.1.5	Seleção baseada na velocidade máxima orbital do gás hidrogênio atômico neutro	15
2.1.6	Seleção baseada na massa estelar	15
2.2	Construção das curvas de rotação	16
3	Distribuição de massa em galáxias análogas à Via Láctea.....	24
3.1	Modelos de distribuição de massa	24
3.2	Decomposição de curvas de rotação	29
3.3	Decomposição da massa dinâmica: o caso de NGC 4698	33
4	Resultados e discussão	38
5	Sumário do trabalho	43
5.1	Passos futuros	44
	Referências bibliográficas	46
	Apêndice A: Manual de análise de cubos de dados	49
	Apêndice B: Código para extrair curvas de rotação.....	50
	Apêndice C: Decomposições de curva de rotação e imagens da amostra	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Classificação morfológica de Hubble revisada	2
Figura 1.2 Composição de M81 usando diferentes filtros	3
Figura 1.3 Curva de rotação esperada vs. curva de rotação observada	6
Figura 1.4 Experimento LUX-ZEPLIN de detecção direta de WIMPs	9
Figura 2.1 Comparação das propriedades físicas entre a amostra de análogas e a amostra de S ⁴ G	17
Figura 2.2 Espectros HI da amostra de análogas à Via Láctea	17
Figura 2.3 Imagens da distribuição estelar da amostra de análogas em 3.6 μm	18
Figura 2.4 Mapas de fluxos e velocidades da galáxia NGC 4651	20
Figura 2.5 Espectro HI de NGC 4651: observado vs. emitido	21
Figura 2.6 Curva de rotação de NGC 4651	21
Figura 2.7 Curvas de rotação da amostra de análogas	22
Figura 3.1 Imagem de NGC 4651 com as componentes do bojo e disco destacadas ...	29
Figura 3.2 Imagem de NGC 2903 em 3.6 μm com contornos de HI	31
Figura 3.3 Curva de rotação de NGC 2903 decomposta nas contribuições individuais do bojo, disco, gás e halo	32
Figura 3.4 Distribuição de massa por raio em NGC 4698	34
Figura 3.5 Relação massa-luminosidade em função do raio e da massa dinâmica em NGC 4698	35
Figura 4.1 Densidade local de matéria escura das análogas em função das massas estelar e do halo	40
Figura 4.2 Curva de rotação de NGC 4698 decomposta, com a posição do Sol indicada	40
Figura 4.3 Relação massa estelar–massa do halo para a nossa amostra	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Amostra final de galáxias análogas usadas neste trabalho	16
Tabela 2	Parâmetros físicos das galáxias análogas usadas neste trabalho	31
Tabela 3	Parâmetros retornados pelas decomposições de RC	33
Tabela 4	Estimativas da densidade local de matéria escura	39

LISTA DE SIGLAS

Sigla	Significado
RC	Curva de rotação
VL	Via Láctea
LDMD	Densidade local de matéria escura
HI	Hidrogênio atômico neutro
ISM	Meio interestelar
DM	Matéria escura
UV	Ultravioleta
IR	Infravermelho
VLA	Very Large Array

LISTA DE SÍMBOLOS E CONSTANTES

Símbolo	Grandeza	Valor em unidades do SI
M_{\odot}	Massa solar	1.99×10^{30} kg
kpc	Quiloparsec	3.09×10^{16} km
c	Velocidade da luz no vácuo	2.98×10^8 m s ⁻¹
G	Constante gravitacional	6.67×10^{-11} N kg ⁻² m ²
\sim	Aproximadamente igual a	

1 INTRODUÇÃO

Por volta de 1970, Vera Rubin, astrônoma estadunidense, ao estudar a fundo a curva de rotação de Andrômeda, galáxia vizinha à Via Láctea, foi surpreendida por um movimento de rotação angular atípico, dado o que era até então conhecido; as velocidades medidas por ela eram maiores do que aquelas que a dinâmica de rotação newtoniana previa para objetos situados a grandes distâncias do centro galáctico. Tal fenômeno passou a ser estudado com maior frequência e por uma quantidade cada vez maior de cientistas, uma vez que, para explicar tal comportamento, era necessário adicionar um grande percentual de “massa faltante” (Rubin & Ford 1970). O fato de haver uma dinâmica de rotação incomum forçou os cientistas a atribuírem uma grande relevância a algo ainda desconhecido. Isso gerou alguns ceticismos em parte da comunidade científica, sobretudo porque a presença de uma matéria invisível ao espectro eletromagnético põe à prova parte do atual conhecimento de gravitação e indica a presença de partículas não consideradas no modelo padrão da física de partículas. A partir disso, inúmeros estudos vêm sendo desenvolvidos, a exemplo deste, com o objetivo de compreender melhor a problemática que se tornou a matéria escura, desde a sua composição até os seus comportamentos e efeitos na estrutura e evolução de galáxias e do universo como um todo. Assim, este trabalho tem como tema principal a matéria escura e sua distribuição em galáxias parecidas com a Via Láctea.

1.1 O MEIO INTERESTELAR DE GALÁXIAS ESPIRAIS

Hoje em dia, sabemos que galáxias não são objetos isolados, mas, sim, sistemas auto-regulados que têm sua vida governada pelo equilíbrio entre o reabastecimento do gás, através do meio interestelar (ISM), seu consumo, via formação estelar, e a consequente ejeção, através de “outflows”, a exemplo de ventos estelares e/ou explosões características do final da vida de estrelas massadas¹, como supernovas (Cortese, Catinella & Smith, 2021). A presença de gás frio² – principal componente das nuvens moleculares que servem de berço para a formação estelar – está fortemente relacionada com o tipo morfológico da

¹Estrelas que, ao entrar na sequência principal da evolução estelar, apresentam massas maiores que $\sim 10M_{\odot}$.

²Gás usualmente molecular (H_2 e CO) em temperaturas da ordem de 7–15 K.

galáxia em questão³, como discutido por [Bait, Sudhanshu & Yogesh \(2017\)](#). Em 1936, Edwin Hubble publicou o que viria a ser o primeiro diagrama morfológico de galáxias, o qual hoje é conhecido como “turning-fork diagram” ([Hubble 1936](#)). No “diagrama de garfo”, em tradução livre, Hubble separou as galáxias em duas classes principais: as galáxias elípticas (ou galáxias early-type) e as espirais (ou galáxias late-type). A [Figura 1.1](#) mostra o esquema de classificação morfológica de Hubble revisada, como proposto por [Kormendy & Bender \(2012\)](#).

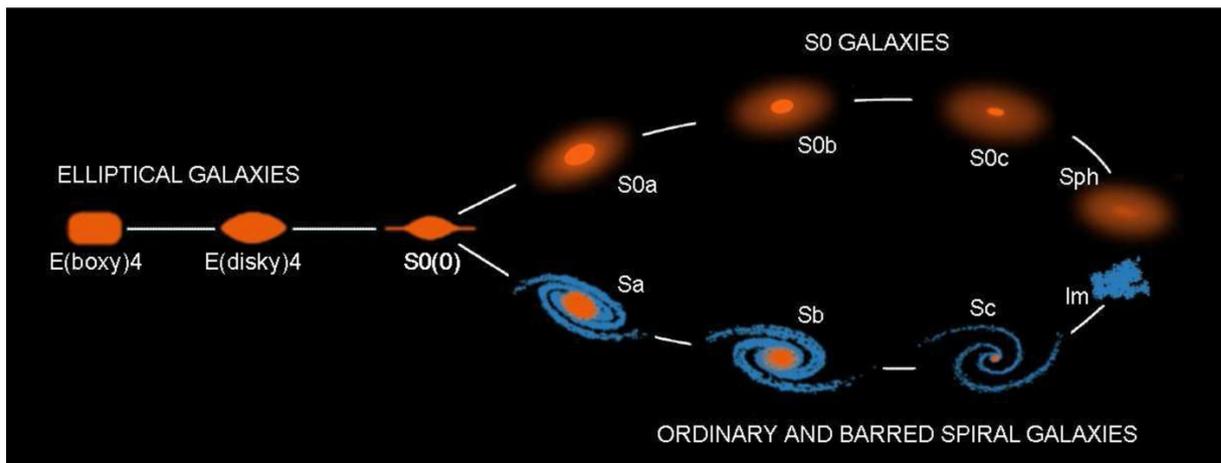


Figura 1.1: Classificação morfológica de Hubble revisada, como apresentada e discutida por [Kormendy & Bender \(2012\)](#). Além das galáxias elípticas (lado esquerdo da imagem) e espirais (bifurcação inferior), o diagrama revisado mostra também as galáxias lenticulares (S0 e extensões), esferoidais (Sph) e irregulares (Im) – propostas inicialmente por [Sandage \(1961\)](#). Créditos da imagem: Kormendy & Bender (2012).

Além da estrutura interna de uma galáxia elíptica ser consideravelmente diferente daquela vista em uma galáxia de disco, um dos principais fatores que diferenciam visualmente essas morfologias é a sua cor. A cor de uma galáxia pode ser relacionada com inúmeras características físico-químicas do objeto, a exemplo da taxa de formação estelar (SFR), extinção por poeira ou composição química ([Feldmann et al. 2017](#)). Em particular, a cor é um excelente indicador da população estelar presente no objeto. Galáxias elípticas têm uma população estelar velha⁴, a qual é responsável pela cor vermelho-amarelada característica desse tipo morfológico. A ausência de um abundante conteúdo de gás em elípticas faz com que as nuvens moleculares sejam minoria e, conseqüentemente, a formação estelar seja inviabilizada. Por outro lado, galáxias espirais são conhecidas por

³Usando como base a classificação morfológica de Hubble, a Via Láctea é uma galáxia espiral levemente barrada, de morfologia Sbc ([Ortwin 2002](#); [Alsobaie 2019](#); [Hou & Han 2014](#)).

⁴Conhecida como População II, composta por estrelas velhas e vermelhas. A ausência de elementos mais pesados que o hélio nas estrelas de População II indica que essas estrelas se formaram nos primeiros bilhões de anos da história de formação estelar da galáxia.

serem formadoras de estrelas, uma vez que a vasta quantidade de gás e poeira presentes nesses objetos fornece as condições necessárias para que a formação estelar ocorra.

As nuvens moleculares, consideradas como o “berçário das estrelas”, podem ser encontradas principalmente no disco das galáxias espirais⁵. Essas nuvens bastante densas⁶ e frias têm temperaturas da ordem de 10 K e são compostas majoritariamente por hidrogênio molecular (H_2) e monóxido de carbono (CO). No entanto, apesar de H_2 ser a molécula mais comum no universo, sua observação direta é praticamente impossível. Por se tratar de uma molécula simétrica e de baixa massa, H_2 não emite em baixas temperaturas – típicas das nuvens moleculares (Cortese et al. 2021). Uma maneira indireta de traçar a distribuição de H_2 é usar CO como indicador de sua presença e, consequentemente, de regiões de formação es-



Figura 1.2: A imagem é uma composição usando observações em diferentes filtros da galáxia espiral M81, mostrando a componente estelar (óptico e infravermelho) e a componente de gás quente (raio-x). Créditos da imagem: X-ray: NASA/CXC/SAO; Optical: Detlef Hartmann; Infrared: NASA/JPL-Caltech.

telar. Além do gás molecular, a poeira também desempenha um papel vital na formação estelar. Sua presença é a peça responsável por manter a nuvem molecular fria, protegendo seu interior da radiação que constantemente chega de todas as direções do cosmos. Um exemplo dessa radiação incidente são os fótons UV emitidos por estrelas jovens, os quais acabam sendo absorvidos pela poeira, que, mais tarde, os reemite na região infravermelha do espectro eletromagnético.

De forma análoga às nuvens moleculares, as nuvens de gás hidrogênio atômico neutro (HI) também estão espalhadas ao longo da estrutura de galáxias espirais. Quando um átomo de hidrogênio está em seu estado de energia mais baixo, seu próton e elétron possuem um spin que permite duas configurações de energias diferentes. No entanto, através de interações com elétrons ou outros átomos, é possível que o átomo de hidrogênio adquira uma pequena quantidade de energia, o levando a um estado levemente excitado no qual,

⁵Mas não apenas nelas, uma vez galáxias irregulares, por exemplo, também podem ter uma formação estelar muito ativa.

⁶A densidade das nuvens moleculares é da ordem de 100 partículas/cm³

se deixado por muito tempo (~ 10 milhões de anos), o elétron mudará espontaneamente a orientação de seu spin de volta para a configuração de energia mais baixa, emitindo radiação. O comprimento de onda da radiação emitida nessa transição é 21.1 cm, se manifestando na banda do rádio do espectro eletromagnético. Apesar dessa transição ser rara, o hidrogênio é o elemento químico mais abundante no universo, de forma que esse não seja um evento incomum e, portanto, seja possível a formação de gigantescas nuvens de HI que se estendem para muito além do disco óptico. Na verdade, o fato de a distribuição de HI ser, em geral, consideravelmente maior que a distribuição estelar vista no óptico é o principal motivo que faz de HI uma ferramenta indispensável para este trabalho; graças a sua extensão, HI se apresenta como um excelente traçador das regiões mais externas das galáxias – locais onde a matéria escura domina em relação à contribuição bariônica.

1.2 A MATÉRIA ESCURA COMO UM DOS GRANDES PROBLEMAS DA ASTRONOMIA CONTEMPORÂNEA

No atual modelo cosmológico padrão, conhecido como Λ -cold dark matter (Λ CDM), a matéria escura e a energia escura formam os principais ingredientes do conteúdo de massa-energia do universo. Estimativas recentes indicam que a matéria escura compreende cerca de 85% de toda a massa do universo ([Abdullah, Klypin & Wilson 2020](#); [Planck Collaboration 2016](#)). Em um cenário como esse, as galáxias se reúnem e evoluem dentro de grandes halos de matéria escura, os quais são formados a partir de um processo conhecido como “crescimento hierárquico” ([White & Rees 1978](#); [Artale et al. 2019](#)).

Apesar de dominar a componente de massa no universo como um todo, a presença de matéria escura, até o momento, apenas pode ser constatada a partir de efeitos gravitacionais que modificam a dinâmica de rotação de galáxias e objetos de escala ainda maior, como os aglomerados de galáxias. A dificuldade de observá-la de forma direta se deve a ela não interagir eletromagneticamente, não absorvendo, emitindo ou refletindo luz. Tal característica é considerada a base para muitos trabalhos que, mesmo hoje, permanecem ativos na busca por uma explicação para as inconsistências observacionais através de formas alternativas da dinâmica newtoniana (MOND; Modified Newtonian Dynamics; [Milgrom 1983](#)). No entanto, estudos que seguem essa abordagem mais cética em relação

à matéria escura acabam se deparando constantemente com inúmeros indícios claros de sua presença no universo. Dentre as evidências observacionais, as lentes gravitacionais – fenômeno conhecido pela deformação da luz emitida por objetos distantes, quando esta encontra fortes campos gravitacionais em sua trajetória – formam um dos melhores cenários onde podemos analisar diretamente como a matéria escura age. Além disso, a própria composição primordial do Universo é uma prova de como a matéria escura moldou a formação e o agrupamento de galáxias e aglomerados de galáxias (Savastano et al. 2019). As fusões dos halos de matéria escura ao longo da história de formação e evolução de galáxias devem, de fato, ditar a forma como a matéria bariônica está distribuída no universo e vice-versa, uma vez que a evolução dos halos de matéria escura também parece ter sido afetada pela presença de bárions, como mostrado por Artale et al. (2019). Dessa forma, do ponto de vista cosmológico, não é exagero dizer que a matéria escura se apresenta como uma das principais peças no que diz respeito ao surgimento da vida, uma vez que, sem sua influência, a própria formação de galáxias não teria acontecido, ou, pelo menos, não da forma como temos conhecimento.

No entanto, talvez a maior evidência de que a matéria escura povoa o espaço aparentemente vazio esteja concentrada nas curvas de rotação de galáxias, especialmente aquelas de morfologia espiral. Curvas de rotação são gráficos que mostram como a velocidade de objetos, como estrelas ou gases, evolui à medida que esses objetos se distanciam do centro de sua galáxia hospedeira (ver Figura 1.3). Essas curvas fornecem informações precisas da cinemática interna das galáxias e permitem mensurar a massa dinâmica total do sistema – necessária para o estudo da distribuição de massa em galáxias. Além disso, estes gráficos são muito convenientes para inferir e comparar a trajetória evolutiva do objeto, descrevendo o papel que as interações desempenharam em sua estrutura ao longo do tempo cósmico, como discutido por Sofue & Rubin (2001). Curvas de rotação baseadas na velocidade orbital de HI se mostram especialmente importantes quando buscamos entender a distribuição de matéria escura, uma vez que o raio galáctico observado da distribuição de HI é, em geral, cerca de três vezes maior do que o raio de uma galáxia espiral visto na banda do visível.

A forma como a matéria escura se distribui dentro das galáxias também tem sido um tema de bastante interesse no que diz respeito à evolução de galáxias com o tempo cósmico (Salucci 2019). Apesar de sua composição ser ainda desconhecida e, até então,

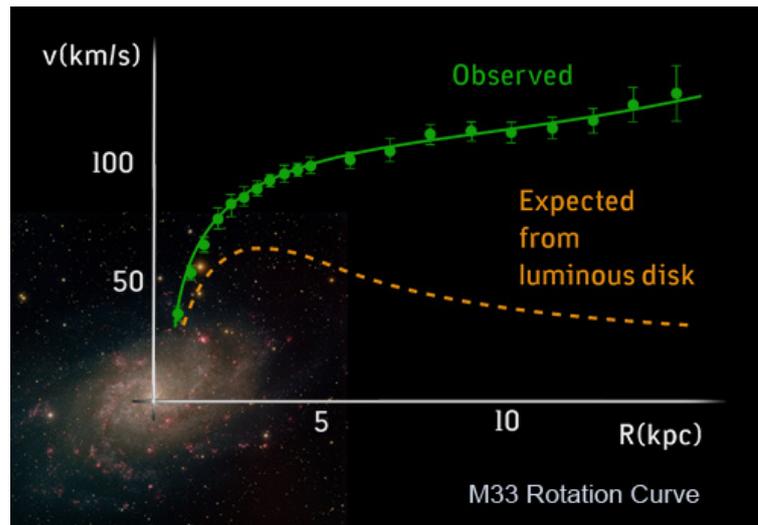


Figura 1.3: Curvas de rotação esperada (curva tracejada laranja), dada a distribuição de massa do disco luminoso, e observada (curva sólida verde) da galáxia M33, situada a ~ 835 kpc de distância da Via Láctea. Créditos da imagem: [Corbelli & Salucci \(2000\)](#)

indetectável (ver §1.3), a distribuição de matéria escura pode ser estudada a partir de curvas de rotação como a mostrada na Figura 1.3. Além de permitir mensurar a massa total do sistema, a curva de rotação de uma galáxia também pode nos dizer precisamente o quanto cada componente do objeto está contribuindo para a massa observada. Essa análise é permitida através da decomposição de uma curva de rotação em diferentes componentes. Se, por um lado, a componente estelar domina a distâncias em que uma forte componente luminosa permanece presente, por outro lado a massa do halo escuro que envolve a galáxia domina a matéria do sistema como um todo. Dessa forma, decompor uma curva de rotação nos ajuda a entender como as matérias bariônica (essencialmente composta por estrelas, gás e poeira) e escura se distribuem, o que, por sua vez, é essencial na busca por explicações sobre como a matéria escura se comporta e, até mesmo, sua natureza. Apesar de muito úteis, as decomposições podem ser bastante enviesadas de acordo com o perfil de densidade de matéria escura utilizado. O mais famoso deles, o perfil de Navarro-Frenk-White (NFW; [Navarro et al. 1996, 1997](#)), desenvolvido a partir de simulações cosmológicas de N-corpos, assume que a densidade de matéria escura é dada por uma lei de potência que varia suavemente com o raio. O perfil de NFW, assim como os perfis de densidade de massa do bojo e do disco, é discutido em mais detalhes no capítulo 2 deste trabalho.

1.3 OS WIMPS E A BUSCA PELA DETECÇÃO DIRETA DE MATÉRIA ESCURA

Na última década, avanços significativos no estudo da distribuição de matéria escura em galáxias foram desenvolvidos (ver, por exemplo, [Jimenez & Heavens 2020](#); [Chakrabarti 2020](#) e [Ravanbakhsh et al. 2017](#)). Grande parte desses avanços está relacionado com estudos de partículas candidatas a comporem a matéria escura, de forma que, tanto partículas presentes no atual modelo padrão da física de partículas quanto partículas ainda idealizadas, desempenham grande relevância nesses trabalhos. De forma geral, os trabalhos que buscam entender a natureza da matéria escura dividem sua possível composição em duas vertentes: a matéria escura quente (WDM), que seria composta por partículas relativísticas⁷, a exemplo dos neutrinos ultra-energéticos, e a matéria escura fria (CDM), composta por partículas que operam longe do regime relativístico. Os objetos massudos e compactos do halo (MACHOs; Massive Compact Halo Objects), compostos por corpos celestes relativamente bem conhecidos há décadas, como planetas gigantes, anãs-marrons, anãs-brancas ou mesmo buracos negros, são exemplos de candidatos que estão de acordo com o modelo padrão, uma vez que sua existência é estritamente baseada na matéria ordinária⁸. Sendo assim, usar MACHOs para explicar por completo a natureza da matéria escura é análogo a dizer que ela não tem nada de misteriosa, já que sua composição e comportamentos são bem entendidos há um bom tempo⁹. No entanto, mesmo as previsões mais otimistas que atribuem a composição da matéria escura aos MACHOs não podem explicar por completo de onde vem tanta massa. Os resultados mais recentes mostram que a massa total de objetos compactos com massas na faixa de 10-100 M_{\odot} não poderia explicar mais de $\sim 15\%$ da massa total de um halo galáctico padrão, jogando os MACHOs para um posição coadjuvante na disputa pelo protagonismo no que diz respeito à natureza da matéria escura ([Blaineau et al. 2022](#)).

A situação passa a ser um pouco diferente quando nos voltamos às partículas massivas que interagem com a matéria ordinária via força fraca, conhecidas como WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles; [Steigman & Turner 1985](#)). Essas partículas exóticas têm se mostrado ser os candidatos mais promissores ([Profumo 2017](#)), uma vez que o

⁷Partículas que viajam à velocidades próximas à velocidade da luz no vácuo, a qual é 2.98×10^8 m/s.

⁸Matéria ordinária é aquela composta por átomos, análoga à matéria bariônica.

⁹Com exceção dos buracos negros, os quais seguem sendo um dos objetos mais desafiadores da astronomia.

modelo padrão prevê a existência de partículas que possuem massa e são fracamente interagentes, além de que a matéria escura poderia ser explicada por completo usando como base essas partículas ainda não detectadas. A dificuldade em detectá-las está no fato de sua interação – além da interação gravitacional, claro – somente se dá por meio da força fraca, a qual tem um alcance extremamente curto, de tamanho da ordem de um núcleo atômico. Dessa forma, seria necessário que o WIMP literalmente batesse de frente com um núcleo atômico para que qualquer sinal de sua passagem venha a ser detectado. Apesar de extremamente improvável, essa colisão ainda pode acontecer, e é exatamente esta a premissa dos experimentos que buscam detectar diretamente os WIMPs, a exemplo do LUX (Large Underground Xenon experiment; [Akerib et al. 2012](#)).

Ao mesmo tempo que buscam encontrar os sinais de uma colisão elástica entre um núcleo de matéria bariônica e uma partícula de matéria escura, os experimentos de detecção direta de matéria escura ainda precisam se preocupar com o constante bombardeio de partículas indesejadas, a exemplo de partículas ultra-energéticas como os raios cósmicos ou os neutrinos. Pensando nisso, experimentos como o LUX operam a mais de um quilômetro e meio abaixo do nível da superfície, de forma que a camada de terra entre o detector e a superfície age como uma “peneira” para partículas indesejadas. Após contribuições significativas na compreensão do que pode ser ou não a matéria escura, o experimento LUX foi desativado em 2016, a fim de dar lugar ao seu sucessor, o LUX-ZEPLIN, o qual já está operando e provendo seus primeiros resultados ([Aalbers et al. 2022](#)). A [Figura 1.4](#) mostra esquematicamente o coração do experimento LUX-ZEPLIN, o qual consiste em um tanque de 10 toneladas de xenônio líquido. Qualquer partícula que atravessar o tanque e interagir com um núcleo de xenônio irá produzir dois sinais: um flash de luz e a liberação de elétrons, que, por sua vez, são redirecionados por um campo elétrico aplicado até o topo do tanque, onde produzem um segundo flash de luz via eletroluminescência. Juntos, esses dois sinais transmitem a energia e a posição da interação, bem como o tipo da partícula que interage. O WIMP então produzirá uma combinação característica de flashes, que serão detectados com um total de 494 tubos fotomultiplicadores nas partes superior e inferior do tanque.

Por trás de experimentos como o LUX ou LUX-ZEPLIN, pesquisadores ao redor do mundo todo trabalham com o objetivo de contribuir de alguma forma para o eventual sucesso de detectar a primeira partícula que compõe a matéria escura. Dentre outras

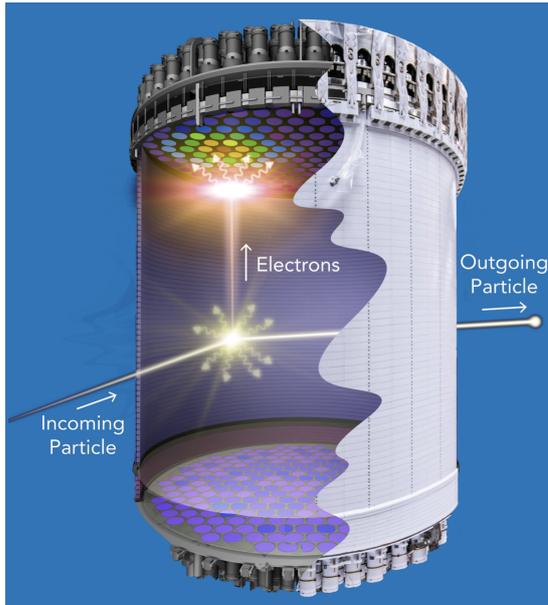


Figura 1.4: Representação esquemática do experimento LUX-ZEPLIN. A imagem mostra a interação de uma partícula com um núcleo de xenônio, produzindo um flash de luz e liberando elétrons. Créditos da imagem: SLAC National Accelerator Laboratory.

idiossincrasias, o sucesso desses experimentos depende de estimativas precisas para a densidade local de matéria escura, isto é, a densidade de matéria escura à mesma posição que o sol ocupa a Via Láctea (~ 8 kpc do núcleo galáctico). Uma vez tendo esses valores em mãos, é possível estimar o número de eventos esperados. Em outras palavras, a densidade local de matéria escura é responsável por dizer quantos WIMPs devem interagir com o xenônio e, consequentemente, ser detectados pelos tubos fotomultiplicadores. No entanto, as atuais estimativas da densidade local de matéria escura ainda são bastante incertas,

uma vez que elas são baseadas ou em suposições sobre o formato do halo de matéria escura da Via Láctea ou em condições locais da cinemática estelar que apresentam grandes incertezas (Sofue 2020; Iocco et al. 2011). Com o objetivo de contribuir com esses experimentos que buscam a detecção direta de matéria escura, usar galáxias “espelho” parece ser uma abordagem promissora na construção de um modelo realístico do halo de matéria escura da própria Via Láctea, o qual, por sua vez, permitirá prover estimativas para a densidade local de matéria escura, como discutido mais em mais detalhes no capítulo 4 deste trabalho.

1.4 OBJETIVOS

Usando como base galáxias que apresentam características semelhantes à Via Láctea (ver capítulo 2 para a definição da amostra), o objetivo central deste projeto de pesquisa é desenvolver um modelo fidedigno da distribuição de matéria escura na estrutura de galáxias análogas. Para isso, o ponto-chave deste trabalho é usar imagens da distribuição estelar e de HI de galáxias do universo local ($z < 0.008$) para, através de uma modelagem guiada por parâmetros efetivamente calculados a partir de observações, gerar mapas preci-

dos da distribuição de massa em galáxias semelhantes à Via Láctea. Com este modelo em mãos, visamos prover estimativas precisas da densidade local de matéria escura, a fim de restringir ainda mais a janela de valores introduzida por trabalhos prévios da literatura, a exemplo de [Iocco et al. \(2011\)](#).

No capítulo 2 apresentamos a amostra e os dados utilizados nesta pesquisa. No capítulo 3 introduzimos uma nova forma de modelar a distribuição de matéria escura em galáxias análogas à Via Láctea, a qual é baseada na decomposição de curvas de rotação de galáxias “espelho”, fazendo um comparativo com a distribuição de massa obtida puramente através de resultados observacionais. No capítulo 4 apresentamos os principais resultados encontrados neste projeto, bem como uma breve discussão acerca do obtido. Finalmente, no capítulo 5 mostramos as conclusões deste trabalho, finalizando com os passos futuros.

Ao longo deste trabalho, nós adotamos uma cosmologia Λ CDM plana, com parâmetros $\Omega_{m,0} = 0.27$ e $\Omega_{\Lambda,0} = 0.73$, e $H_0 = (68.7 \pm 3.1) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ([Planck Collaboration, Fermi Collaboration et al. 2015](#); [Thakur et al. 2023](#)).

2 A AMOSTRA E OS DADOS

Quando seguimos uma abordagem de tomar galáxias independentes como um indicador das características presentes na Via Láctea, a forma como essa amostra de objetos é definida está diretamente relacionada com a robustez dos resultados esperados. Como o principal objetivo deste projeto de pesquisa é entender como a matéria escura está distribuída na estrutura de galáxias semelhantes à Via Láctea, é vital, por exemplo, levar em consideração galáxias que apresentam uma dinâmica de rotação parecida com aquela observada na VL. Sendo assim, a seção a seguir introduz nossa amostra de galáxias análogas, além de uma discussão acerca de suas principais características.

2.1 AMOSTRA DE GALÁXIAS ANÁLOGAS À VIA LÁCTEA

Definir uma amostra de galáxias análogas à Via Láctea não é uma tarefa simples, uma vez que não basta apenas selecionar objetos com características semelhantes, mas também objetos que possuam dados observacionais presentes na literatura, de forma que possamos ter as ferramentas necessárias para desenvolver o projeto. Sendo assim, é de suma importância que os objetos selecionados estejam presentes em levantamentos observacionais cuja finalidade se alinha bem aos objetivos postos. Em particular, os objetos de nossa amostra de galáxias análogas foram definidos com base em três levantamentos extragalácticos, os quais são brevemente apresentados a seguir.

2.1.1 S⁴G SURVEY

O *Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies* (S⁴G; [Sheth et al. 2010](#)) é um levantamento de galáxias que fez o imageamento de 2331 galáxias do universo local (<40 Mpc de distância da Via Láctea) e pode ser considerado o levantamento base de nossa amostra, já que todos os objetos foram derivados de sua amostra geral. O S⁴G usou o telescópio espacial Spitzer, da NASA, para prover uma boa caracterização da emissão nas bandas de 3.6 e 4.5 μm , no infravermelho médio, apresentando uma resolução espacial de ~ 100 pc, com um tamanho de pixel de 0.75" ([Sheth et al. 2010](#)).

Apesar das estrelas mais massudas serem das classes espectrais O, B e A, as estrelas de baixa massa, como as de classe espectral G, K e M, dominam em quantidade, de

forma que a sua contribuição para a massa estelar total de uma galáxia é, em geral, significativamente maior do que a contribuição proveniente de estrelas massudas. Isso se deve à função de massa inicial (IMS). A IMS é o número relativo de estrelas, em função da massa inicial individual, que se formam durante um único episódio de formação estelar. Essa função privilegia estrelas de baixa massa, de forma que apenas $\sim 4.5\%$ das estrelas formadas na nuvem molecular apresenta massa inicial maior que $1 M_{\odot}$. O fato de estrelas vermelhas e de baixa massa dominarem a componente estelar da galáxia é o principal motivo que faz do infravermelho médio de S⁴G um ótimo traçador da distribuição estelar, uma vez que essa população estelar é forte emissora nessas bandas. Dessa forma, com os dados que S⁴G disponibiliza em seu banco de dados¹, é possível traçar a distribuição de matéria bariônica nessas galáxias, a qual é fortemente dominada pela componente estelar².

2.1.2 VIVA SURVEY

O *VLA Imaging of Virgo in Atomic gas* (VIVA; Chung et al. 2009) é um levantamento da distribuição de hidrogênio atômico de 53 galáxias³ do aglomerado de Virgem (sendo 48 delas de morfologia espiral). O VIVA usou o radiotelescópio Very Large Array (VLA), localizado no Novo México, nos Estados Unidos, para traçar a dinâmica de rotação do gás HI, na linha de 21.1 cm, na banda do rádio. As observações de VIVA contam com resoluções espacial e espectral de $\sim 15''$ e 10 km s^{-1} , respectivamente, com uma densidade de coluna de $\sim 3 - 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ e pixéis de tamanho de $5''$ quadrados (Chung et al. 2009; Reynolds et al. 2020), permitindo estudar com boa precisão a dinâmica externa de sua amostra.

Como discutido na §1.1, estudar a componente de gás HI é muito importante quando buscamos entender a distribuição de matéria escura, uma vez que a distribuição de HI se estende muito além do disco óptico. A vantagem de ter um traçador que vai além do disco óptico está na oportunidade de medir a dinâmica de rotação das regiões mais externas das galáxias, onde, em geral, não há uma forte componente luminosa, de forma que a massa contida em tais regiões é essencialmente proveniente da matéria escura. Dessa forma, estudar as regiões mais externas da estrutura galáctica e como a dinâmica

¹Disponíveis em: <https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/S4G/>

²É estimado que a contribuição do gás para a massa bariônica total de uma galáxia espiral gira em torno de apenas 10% (Simon et al. 2003; Frank et al. 2016).

³Todas elas presentes no levantamento S⁴G.

se apresenta em tais regiões está diretamente relacionado com a distribuição de matéria em galáxias.

A partir do banco de dados do levantamento VIVA⁴, temos acesso aos cubos de dados tridimensionais da distribuição de HI da amostra geral de 53 galáxias. Um cubo de dados refere-se a um intervalo de valores em três ou mais dimensões que geralmente são usados para explicar a sequência de tempo dos dados de uma imagem. De forma geral, podemos dizer que esses cubos são usados para representar dados que são muito complexos para serem descritos por uma tabela de linhas e colunas. A partir dos cubos de VIVA, é possível fazer uma análise e construir os chamados “mapas de momento”. Aqui, chamamos de mapas de momento de ordem 0, 1 e 2 os mapas de fluxo, velocidade e dispersão de velocidade, respectivamente.

2.1.3 THINGS SURVEY

O *The HI Nearby Galaxy Survey* (THINGS; [Walter et al. 2008](#)), assim como o VIVA, é um levantamento da distribuição de hidrogênio atômico em galáxias próximas ($2 < D < 15$ Mpc). A amostra total de THINGS⁵ compreende 34 galáxias (a maior parte delas é composta por espirais), todas observadas com o VLA. O levantamento THINGS apresenta dados de alta resolução espacial, de $\sim 6''$ (resultando em resoluções lineares de $\sim 100 - 500$ pc), com uma densidade de coluna de típica de $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ e pixels de tamanho de $1 - 1.5''$ ([Walter et al. 2008](#)).

Tendo em mente a importância de levar em conta aspectos que serão responsáveis pela representatividade dos resultados esperados, nossa amostra é, então, definida com base em três características principais: tipo morfológico, massa estelar e velocidade máxima orbital do gás hidrogênio atômico neutro. Cada uma dessas características é discutida brevemente a seguir.

2.1.4 SELEÇÃO BASEADA NA MORFOLOGIA

Estudos recentes indicam que a Via Láctea é uma galáxia de disco que apresenta barra e braços espirais ([Alsobaie 2019](#); [Hou & Han 2014](#)). Sabendo disso, definimos a nossa amostra de análogas considerando apenas galáxias de morfologia espiral. Para

⁴Disponível em: <http://www.astro.yale.edu/cgi-bin/viva/observations.cgi>

⁵Disponível em: <https://www2.mpia-hd.mpg.de/THINGS/Data.html>

isso, o corte foi aplicado no Hubble T-type, parâmetro que classifica numericamente as diversas morfologias possíveis de galáxias. O Hubble T-type varia entre -6.0 e 11.0, sendo -6.0 o parâmetro numérico correspondente às galáxias puramente elípticas, enquanto que um T-type ~ 4.0 representa as galáxias espirais e 11.0 as galáxias irregulares. Dessa forma, todas as galáxias de nossa amostra possuem um parâmetro morfológico de Hubble T-type entre 1.5 e 5.0, cobrindo as morfologias SAb/SABb/SBb, SAbc/SABbc/SBbc e SAc/SABc/SBc.

2.1.5 SELEÇÃO BASEADA NA VELOCIDADE MÁXIMA ORBITAL DO GÁS HIDROGÊNIO ATÔMICO NEUTRO

A velocidade máxima com que o gás HI orbita o núcleo galáctico está diretamente relacionada com a dinâmica presente no halo escuro, o qual, por sua vez, é o principal alvo quando se estuda a distribuição de matéria escura. A região onde a velocidade orbital de HI é máxima quase sempre corresponde a pontos ultraperiféricos das galáxias espirais. Nessas regiões, a componente bariônica é negligenciável, sustentando o fato de que a dinâmica é governada majoritariamente pela componente escura. Assim, utilizar a velocidade máxima de rotação de HI como um critério de seleção de objetos significa restringir nossa amostra à galáxias que apresentam não apenas uma estrutura morfológica semelhante, mas também uma componente de matéria escura muito próxima àquela predita para a Via Láctea. Tendo como base os trabalhos desenvolvidos por [Reid & Dame \(2016\)](#) e [Sofue \(2020\)](#), a velocidade máxima de rotação de HI na Via Láctea parece convergir para um valor entre 220 e 240 km s⁻¹. Assim, consideramos razoável nossa amostra ser restrita a objetos com velocidade máxima do gás hidrogênio atômico dentro do seguinte intervalo: $160 \text{ km s}^{-1} \leq V_{HI} \leq 280 \text{ km s}^{-1}$.

2.1.6 SELEÇÃO BASEADA NA MASSA ESTELAR

Apesar da velocidade de HI ser um bom indicador da massa bariônica presente no objeto e, portanto, da massa estelar, selecionar galáxias de acordo com sua massa estelar também parece um critério válido. A massa estelar de uma galáxia segue muito bem o perfil de distribuição da matéria bariônica da mesma. Trabalhos como o de [Frank et al. \(2016\)](#) indicam que a componente estelar representa cerca de 90% da matéria bariônica

total do sistema, concentrando os 10% restante no gás (seja ele atômico, ionizado ou molecular) e na poeira interestelar. Sendo assim, é importante que os objetos presentes na amostra sigam um intervalo representativo da massa estelar estimada para a Via Láctea. Usando como base medições prévias da literatura e um método estatístico hierárquico Bayesiano de alta confiabilidade, [Licquia & Newman \(2015\)](#) estimaram a massa estelar total da Via Láctea em $M_{\star} = (6.08 \pm 1.14) \times 10^{10} M_{\odot}$. Como critério para a amostra, consideramos apenas galáxias que apresentam uma massa estelar total dentro de um fator de ± 3 vezes a massa estelar da Via Láctea.

Ao aplicar os cortes descritos acima, temos, finalmente, uma amostra final de 6 galáxias análogas utilizadas neste trabalho. A [Tabela 1](#) mostra a identificação, tendo como padrão o nome do objeto no “New General Catalogue”, e algumas características físicas relevantes de nossa amostra, como morfologia e massa estelar. A [Figura 2.1](#) mostra uma comparação da massa estelar e velocidade de HI das análogas e com os valores da amostra geral do levantamento S⁴G.

Tabela 1: Amostra final de galáxias análogas usadas neste trabalho

Objeto	Morfologia	T-Type	M_{\star}	Vel. HI	Incl.	Fonte dos dados
-	-	-	$\left[\log_{10} \left(\frac{M_{\star}}{M_{\odot}} \right) \right]$	$[\text{km s}^{-1}]$	$[\circ]$	-
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
NGC 4698	Sab	1.7 ± 1.0	10.85	192.8 ± 3.4	73.4	S ⁴ G, VIVA
NGC 4501	Sb	3.3 ± 0.7	11.18	242.4 ± 4.5	62.9	S ⁴ G, VIVA
NGC 4651	Sc	5.2 ± 0.6	10.84	168.6 ± 2.7	49.5	S ⁴ G, VIVA
NGC 2903	SABb	4.0 ± 0.1	10.67	172.2 ± 3.5	67.1	S ⁴ G, THINGS
NGC 5055	Sbc	4.0 ± 0.2	10.78	178.6 ± 4.2	54.9	S ⁴ G, THINGS
NGC 3521	SABb	4.0 ± 0.2	11.03	212.2 ± 4.2	60.2	S ⁴ G, THINGS

Notas: Os dados foram tirados da tabela geral da amostra do levantamento S⁴G. (1) Identificação da galáxia; (2) tipo morfológico; (3) Hubble T-type; (4) massa estelar; (5) velocidade máxima de rotação do gás HI; (6) inclinação (7) levantamentos que provêm os dados de infravermelho e rádio dos objetos.

2.2 CONSTRUÇÃO DAS CURVAS DE ROTAÇÃO

Como introduzido brevemente em [§1.2](#), curvas de rotação são gráficos que mostram como velocidade rotacional de uma galáxia varia de acordo com a distância galac-

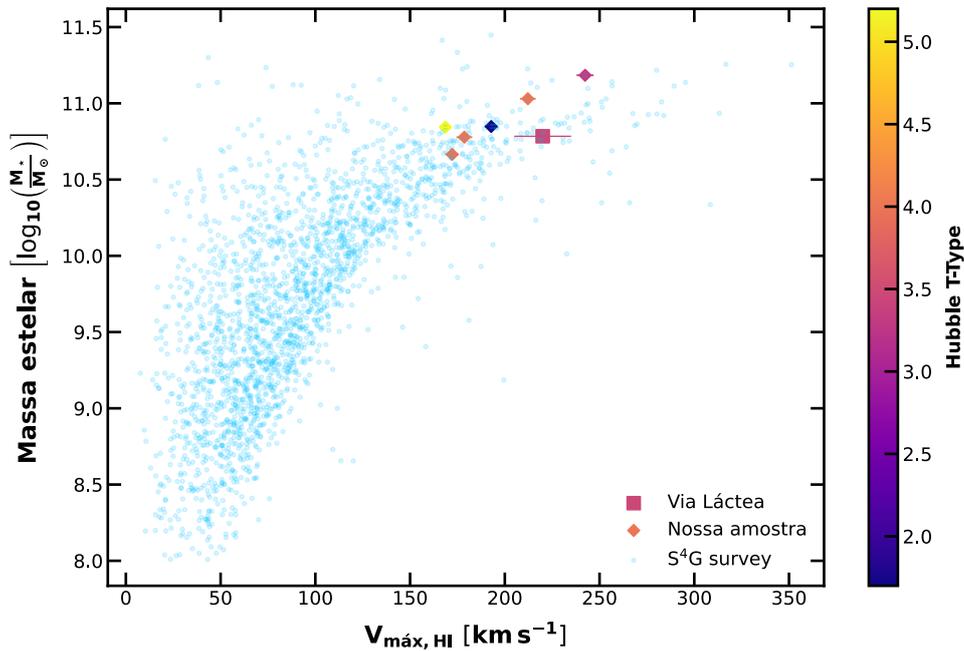


Figura 2.1: Massa estelar em função da velocidade circular máxima de HI para a nossa amostra de galáxias análogas (diamantes) sobreposta à amostra total do levantamento S⁴G (círculos azuis). A amostra de análogas, bem como a Via Láctea (quadrado), tem sua morfologia representada de acordo com a barra de cores.

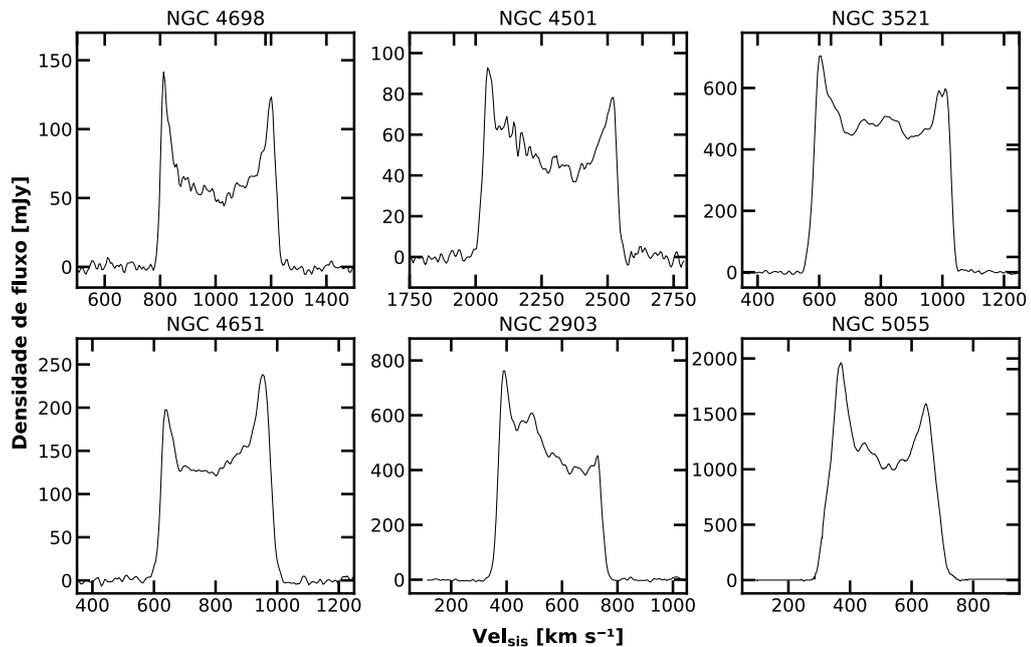


Figura 2.2: Espectros HI da densidade de fluxo em função da velocidade sistêmica da amostra de galáxias análogas. Os espectros de NGC 4698, NGC 4501, NGC 4651 e NGC 2903 foram produzidos com o radiotelescópio de Arecibo (305 m). Os espectros de NGC 3521 e NGC 5055 foram produzidos com o radiotelescópio Green Bank (91 m).

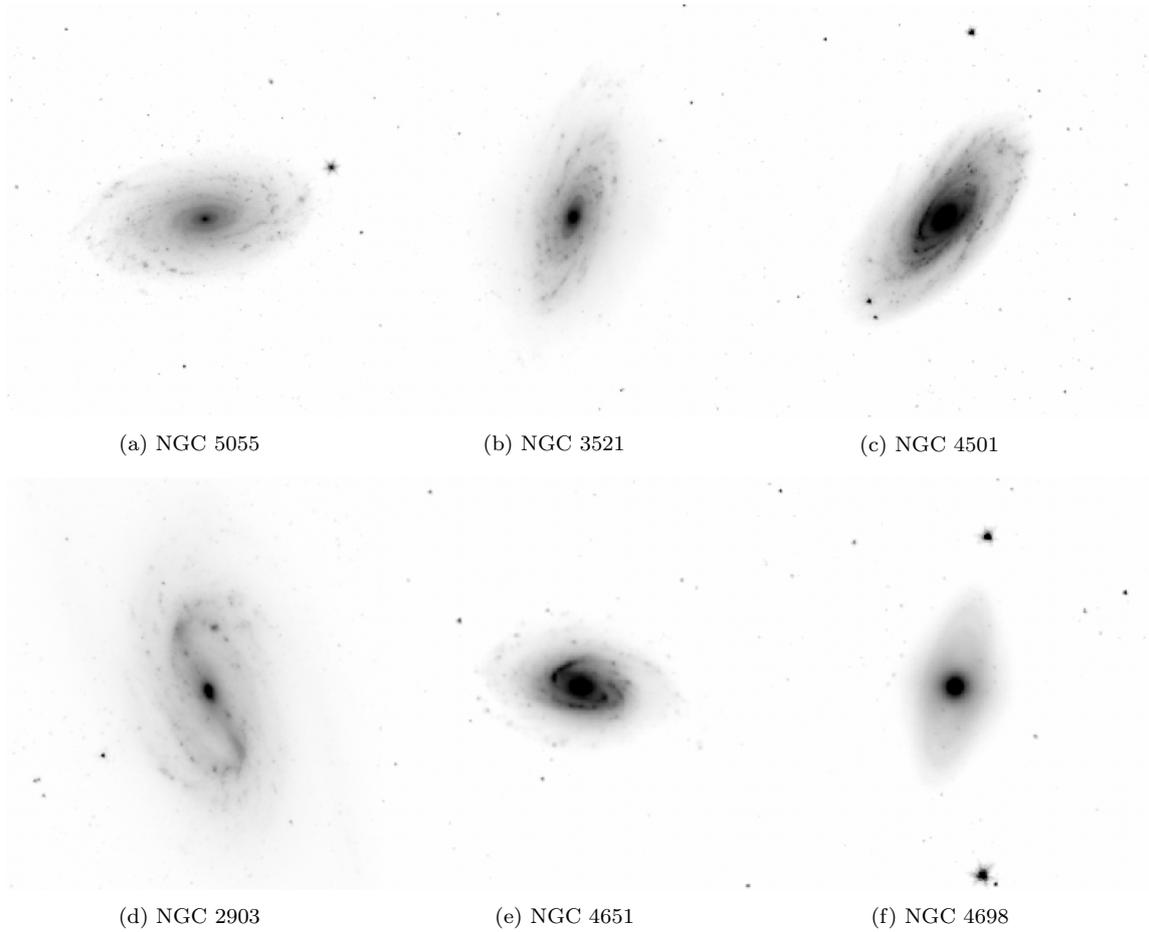


Figura 2.3: Imagens da componente estelar dos objetos de nossa amostra na banda de $3.6 \mu\text{m}$, no infravermelho médio do levantamento S⁴G.

tocêntrica. É importante deixar claro que há uma diferença entre velocidade rotacional e velocidade circular. Se, por um lado, a velocidade rotacional é a velocidade média de uma determinada componente de matéria da galáxia (isto é, estrelas ou gás) a uma dada distância do centro do objeto, a velocidade circular é um conceito matemático que pode ser aplicado a qualquer sistema. A velocidade circular representa a velocidade que uma dada partícula teria em um determinado local que está exposto a um potencial gravitacional. Tendo isto em mente e assumindo uma distribuição de simetria esférica, a velocidade circular de uma galáxia se relaciona com o seu potencial gravitacional a partir da relação:

$$\frac{d\Phi(r)}{dr} = \frac{v_c^2(r)}{r} = \frac{GM(r)}{r^2}, \quad (2.1)$$

onde $\Phi(r)$ é o potencial gravitacional; $v_c(r)$ é a velocidade circular; r é o raio e $M(r)$ é a massa contida no raio r . A rigor, quando buscamos derivar a velocidade circular de uma componente é necessário fazer uma correção conhecida como “asymmetric drift cor-

rection”, como discutido por Binney e Tremaine (2008). No entanto, quando as galáxias rodam com velocidades superiores a $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$, essas correções podem ser negligenciadas. Sendo assim, aqui também trabalhamos sob a suposição de que $v_c = v_{rot}$, uma vez que as velocidades circulares dentro da galáxia serão representadas pelas curvas de rotação observadas.

Como mencionado em §2.1, os dados utilizados neste trabalho são provenientes de três levantamentos diferentes: S⁴G, VIVA e THINGS. Enquanto os dados de S⁴G são imagens em formato .FITS e podem ser analisadas diretamente através de linguagens de programação ou softwares, como o SAOImageDS9⁶, os dados de VIVA e THINGS são cubos de dados, de forma que necessitam de um tratamento à parte para gerar os mapas de fluxo e velocidade necessários na construção de curvas de rotação. Contudo, tanto a colaboração de VIVA quanto a de THINGS disponibilizam também esses mapas já reduzidos e prontos para fazer ciência. Por este motivo, aqui, não entraremos em detalhes na redução e análise desses cubos de dados. Todavia, como parte deste trabalho, foi desenvolvido um manual de análise de cubos de dados, cujo link de acesso pode ser encontrado no Apêndice A deste trabalho. O manual descreve o processo realizado até a construção dos mapas de momento, apresentando também o código desenvolvido para analisar os cubos de dados utilizados aqui.

Uma vez tendo em mãos os mapas de momento, podemos usar programação em PYTHON a fim derivar a curva de rotação de cada objeto de nossa amostra. O código desenvolvido com a finalidade de construir curvas de rotação, dados como pontos de partida os mapas de fluxo e velocidade, também está disponível e pode ser encontrado no Apêndice B deste trabalho. O método usado para derivar a curva de rotação é baseado em traçar uma reta que compreende a posição de maior gradiente de velocidades da galáxia. Essa reta deve, obrigatoriamente, passar pelo centro do objeto, o qual é encontrado através da função *photutils.centroids* do ASTROPY, que usa o mapa de fluxos da galáxia para encontrar o centroide do objeto. Em outras palavras, o código deve inicialmente traçar uma reta sobre a galáxia e incliná-la em todos os ângulos possíveis, de forma a encontrar a posição que determina o eixo de maior variação de velocidades do objeto. Um exemplo dos mapas de fluxo e velocidade já com o eixo de maior gradiente de velocidades traçado pode ser visto na Figura 2.4.

⁶Disponível em: <https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9>

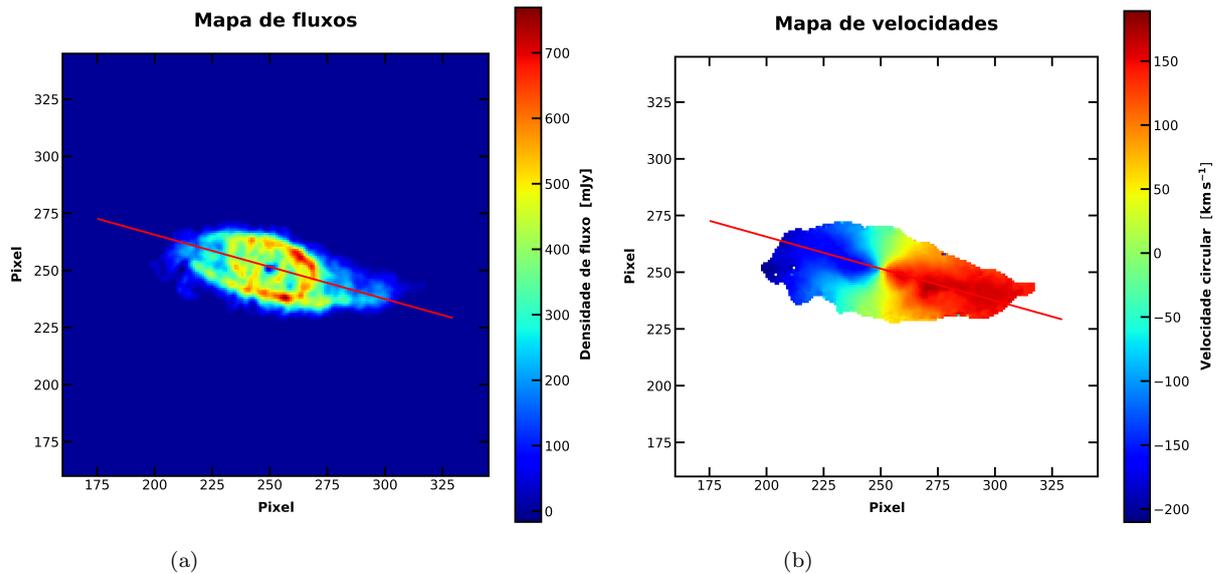


Figura 2.4: Mapas de fluxos (painel esquerdo) e velocidades (painel direito) da galáxia NGC 4651. O segmento de reta sólido vermelho sobre a galáxia representa o eixo de maior gradiente de velocidades do objeto.

Inicialmente, o mapa de velocidades é centrado na velocidade sistêmica do objeto em questão⁷, sendo necessário fazer uma correção pelo redshift. Para isso, podemos aplicar a equação (2.2) e analisar a galáxia em seu referencial, passando a ter uma velocidade central nula, como mostrado na Figura 2.4.

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} = \frac{v}{c} \quad (2.2)$$

Onde z é o redshift do objeto⁸; λ_{em} é o comprimento de onda emitido⁹; λ_{obs} é o comprimento de onda observado aqui na Terra; v é a velocidade sistêmica do objeto e c é a velocidade da luz no vácuo. Um exemplo prático do desvio entre os comprimentos de onda emitidos pelo objeto e aqueles observados na Terra pode ser visto na Figura 2.5.

Outra informação importante que pode ser extraída do espectro da Figura 2.5 é a velocidade máxima de rotação de HI. Essa velocidade pode ser encontrada – de forma um tanto grosseira – a partir da média da velocidade dos picos do espectro, de forma que o valor encontrado corresponde à velocidade platô que é comumente verificada na curva de rotação de galáxias de disco.

A partir do mapa de velocidades apresentado na Figura 2.4b, o código extrai a

⁷ $(800.1 \pm 0.6) \text{ km s}^{-1}$, no caso de NGC 4651 (Chung et al. 2009).

⁸ (0.00267 ± 0.00000) , segundo o NASA/IPAC Extragalactic Database.

⁹HI é caracterizado por ter sua linha de emissão em 21.106 cm, na banda do rádio.

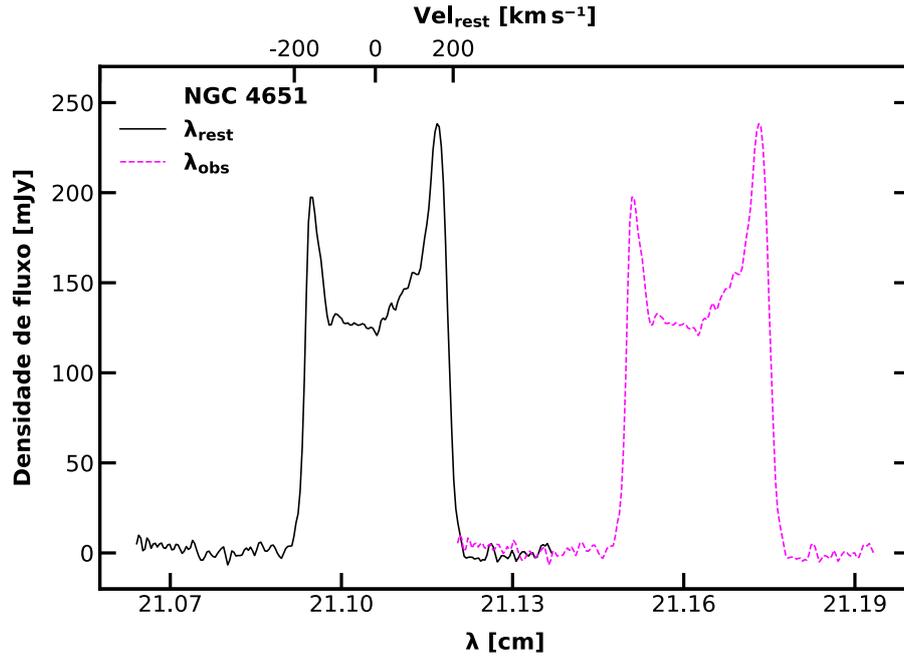


Figura 2.5: Espectro HI de NGC 4651 observado (linha tracejada rosa) e emitido pela fonte (linha contínua preta), após a correção pelo redshift. O espectro foi produzido com dados do radiotelescópio de Arecibo.

informação de velocidade presente em cada pixel que está sob a reta traçada. Portanto, uma vez tendo em mãos os mapas de momento, é possível derivar a curva de rotação correspondente (ver figura [Figura 2.6](#)).

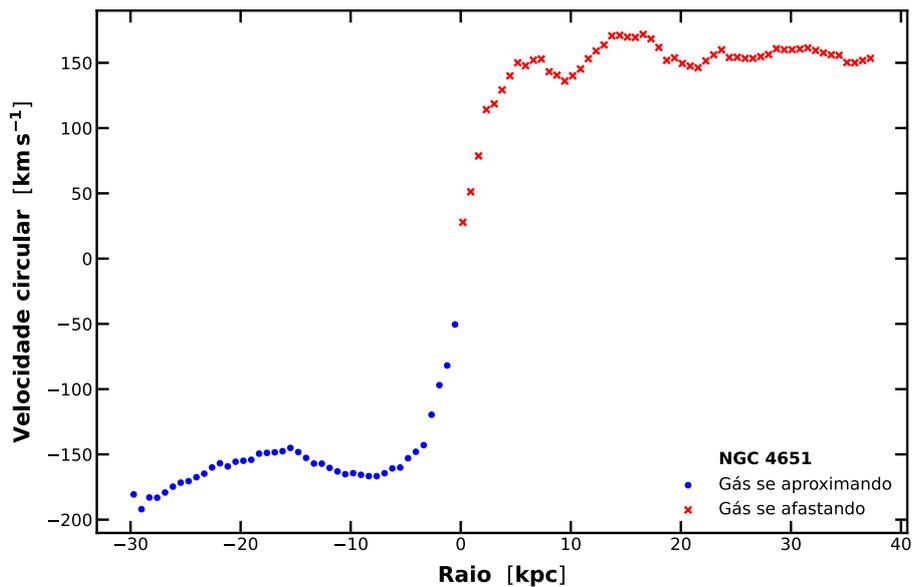


Figura 2.6: Curva de rotação de NGC 4651 baseada na velocidade de HI. A curva é construída a partir do mapa de velocidades apresentado na [Figura 2.4](#).

Apesar da maior parte das galáxias espirais apresentar uma velocidade aproximadamente constante em suas periferias, é importante deixar claro que nem toda curva de rotação segue esse padrão. Dependendo do histórico de interação da galáxia com outros objetos, por exemplo, a curva de rotação pode seguir um comportamento significativamente diferente (Sofue & Rubin 2001). De forma geral, todos os objetos presentes em nossa amostra parecem seguir um perfil de velocidades semelhante àquele tipicamente associado à forte presença de matéria escura, como pode ser visto ao analisar as curvas de rotação da amostra (ver figura Figura 2.7).

Tendo em vista a característica de simetria morfológica das galáxias de nossa amostra, vemos que não há uma forte dependência de qual lado da curva de rotação deve ser priorizado na posterior análise. Em outras palavras, a diferença na velocidade de afastamento ou aproximação de HI pode ser, a grosso modo, negligenciada, uma vez que todos os objetos são simétricos. Os mapas de velocidades de HI, sobrepostos aos mapas de fluxo em $3.6 \mu\text{m}$, podem ser encontrados no Apêndice C deste trabalho.

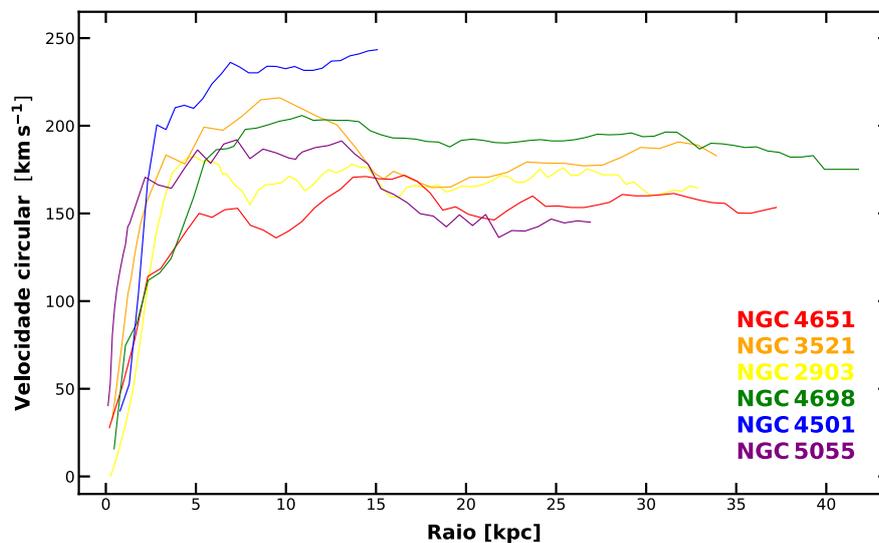


Figura 2.7: Curvas de rotação baseadas na velocidade de HI da amostra de galáxias análogas.

3 DISTRIBUIÇÃO DE MASSA EM GALÁXIAS ANÁLOGAS À VIA LÁCTEA

A distribuição de massa em galáxias do universo local é um resultado de eventos ocorridos ao longo do tempo cósmico. Qualquer modelo válido que trate sobre a formação ou evolução de galáxias deve reproduzir a distribuição de massa galáctica local. Nesse sentido, escolher cuidadosamente os perfis de distribuição de massa a serem utilizados é um ponto-chave em direção a um modelo razoável de distribuição de matéria escura.

3.1 MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE MASSA

Diferentemente de galáxias elípticas que, em geral, apresentam uma simetria puramente esférica, galáxias de disco possuem uma estrutura interna significativamente mais complexa. Em galáxias de disco, características como a presença de barras ou até mesmo a espessura do disco devem ser levadas em conta quando estudadas. Em geral, podemos fragmentar uma galáxia de disco em três componentes principais: bojo, disco e halo. Cada componente apresenta uma simetria e distribuição de massa diferentes da outra, tornando necessário estudá-las individualmente. Dessa forma, o perfil de densidade de massa e, conseqüentemente, o potencial gravitacional e velocidade circular mudarão de acordo com o perfil usado para descrever cada componente.

O perfil total de velocidade circular usado na decomposição de uma curva de rotação representa a soma em quadratura de todas as componentes que contribuem para a velocidade observada:

$$v_{c,\text{total}}^2(r) = v_{c,\text{bojo}}^2(r) + v_{c,\text{disco}}^2(r) + v_{c,\text{gás}}^2(r) + v_{c,\text{halo}}^2(r) \quad (3.1)$$

Dessa forma, cada componente desempenha um papel importante no formato de uma curva de rotação. Sendo assim, o texto que segue busca introduzir o perfil de cada uma das contribuições presentes na equação (3.1) utilizadas neste trabalho.

PERFIL DE HERNQUIST PARA O BOJO:

O perfil de Hernquist é usado para descrever exclusivamente a distribuição de massa em galáxias elípticas ou bojos de galáxias de disco (Hernquist 1990). Seu perfil de densidade tem a seguinte forma:

$$\rho(r) = \frac{M_b a}{2\pi r} \frac{1}{(r+a)^3} \quad (3.2)$$

Onde M_b é a massa total da distribuição em questão (neste caso, usaremos este perfil para descrever o bojo de nossas galáxias análogas à VL); a é o comprimento de escala e r é o raio considerado. O comprimento de escala é definido como sendo o raio no qual o brilho de uma componente (neste caso, do bojo) cai por um fator de e (~ 2.71) a partir do centro. Este comprimento está relacionado ao raio de meia massa¹ da componente através da relação

$$r_{1/2} = (1 + \sqrt{2}) a, \quad (3.3)$$

e com seu raio efetivo² por

$$R_e = 1.8153 a. \quad (3.4)$$

A distribuição de massa do perfil de Hernquist é muito semelhante àquela sugerida por outros perfis da literatura, a exemplo do perfil de Jaffe (Jaffe 1983). No entanto, no perfil de Hernquist, a densidade de massa cai com $\rho(r) \propto r^{-1}$, quando $r \rightarrow 0$, diferente de Jaffe ou NFW, por exemplo. Seguindo a equação (3.2), temos a seguinte distribuição de massa cumulativa:

$$M(< r) = M_b \frac{r^2}{(r+a)^2} \quad (3.5)$$

O potencial do perfil de Hernquist pode ser encontrado integrando a equação de Poisson. Para a densidade da equação (3.2), temos:

$$\Phi(r) = -\frac{G M_b}{r+a} \quad (3.6)$$

Onde G é a constante gravitacional. Uma vez que

$$v_c^2(r) = r \frac{\partial \Phi(r)}{\partial r}, \quad (3.7)$$

¹Raio de meia massa é aquele no qual metade da massa total da componente está concentrada.

²Raio efetivo é aquele no qual metade da luz da galáxia está contida.

podemos, então, definir a velocidade circular para o perfil de Hernquist (a qual será utilizada no momento de decompor as curvas de rotação):

$$v_{c,bojo}^2(r) = \frac{G r M_{bojo}}{(r + a)^2} \quad (3.8)$$

No caso de algum dos passos mostrados acima não ter ficado claro, não hesite em ler atentamente o trabalho de [Hernquist \(1990\)](#).

PERFIL DE KUZMIN PARA O DISCO:

Quando se trata da distribuição de massa em galáxias espirais, é importante levar em consideração a espessura do disco, uma vez que o seu perfil deve representar razoavelmente o formato observado. O perfil de Kuzmin é especialmente recomendado para descrever a distribuição de massa em galáxias que apresentam discos de espessura fina ([Kuzmin 1956; em russo](#)). Em relação à amostra de análogas, todos os objetos parecem ter um disco fino, tornando o perfil de Kuzmin o modelo mais razoável para descrever a distribuição estelar presente nesta componente. A densidade de massa do perfil de Kuzmin é apresentada na equação (3.9).

$$\rho(r) = \frac{M_d}{2\pi} \frac{a}{(r^2 + a^2)^{3/2}} \quad (3.9)$$

Onde, aqui, a representa o comprimento de escala do disco. O perfil de massa cumulativa é dado por

$$M(< r) = M_d \left(1 - \frac{a}{\sqrt{r^2 + a^2}} \right). \quad (3.10)$$

Por sua vez, o potencial do perfil de Kuzmin é mostrado na equação (3.11), onde o parâmetro z está relacionado com a espessura do disco.

$$\Phi(r, z) = -\frac{G M_d}{\sqrt{r^2 + (|z| + a)^2}} \quad (3.11)$$

No limite em que $z \rightarrow 0$ (o que é uma aproximação bastante razoável, uma vez que z é muito menor que o raio da galáxia), temos um potencial que representa um disco fino. Isto é, quando

$$\lim_{z \rightarrow 0} \Phi(r, z),$$

temos

$$\Phi(r) = -\frac{G M_d}{\sqrt{r^2 + a^2}}. \quad (3.12)$$

Finalmente, usando mais uma vez a equação (3.7), temos a seguinte velocidade circular para o perfil de Kuzmin:

$$v_{c,\text{disco}}^2(r) = \frac{G M_d r^2}{(r^2 + a^2)^{3/2}} \quad (3.13)$$

Além da distribuição estelar, a distribuição de gás no disco galáctico também desempenha um papel não-negligenciável na composição de matéria bariônica de uma galáxia – especialmente em galáxias de disco, onde o conteúdo de gás é maior em comparação com aquele visto em morfologias que não apresentam tal componente. Sendo assim, de forma a levar em consideração a contribuição de massa proveniente do gás, usamos o perfil de distribuição de gás introduzido por [Chauhan et al. \(2019\)](#), o qual assume um disco exponencial e tem seu perfil de velocidade circular dado por

$$v_{c,\text{gás}}^2(x) = \frac{G M_{\text{gas}}}{R_{\text{vir}}} \times \frac{c_{\text{gas}} + 4.8 c_{\text{gas}} \exp\left[-0.35 c_{\text{gas}} x - \frac{3.5}{x c_{\text{gas}}}\right]}{x c_{\text{gas}} + (x c_{\text{gas}})^{-2} + 2 (x c_{\text{gas}})^{-1/2}}, \quad (3.14)$$

onde $c_{\text{gas}} \equiv r_{\text{vir}}/r_{s,\text{gas}}$ é o parâmetro de concentração para o disco de gás, com $r_{s,\text{gas}} = r_{\text{gas}}/1.67$, e M_{gas} representando a massa total do gás (atômico e molecular) da galáxia.

PERFIL DE NAVARRO-FRENK-WHITE PARA O HALO:

O perfil de Navarro-Frenk-White (NFW) é o modelo de matéria escura mais utilizado na literatura científica atualmente ([Navarro et al. 1996, 1997](#)). Em meados da década de 90, o perfil de NFW foi o responsável por renascer o estudo da matéria escura, usando para isso simulações numéricas da formação de estruturas a partir do poço de potencial desempenhado pela matéria escura fria. Ao ajustar um perfil de densidade analítica às distribuições de densidade resultantes, essas simulações cosmológicas prevêm um perfil de densidade de matéria escura dado por:

$$\rho_{NFW}(r) = \frac{\rho_{\text{crit}} \delta_c}{\frac{r}{r_s} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2} \quad (3.15)$$

Onde o “raio de escala” (ou “raio característico”), r_s , é igual a

$$r_s = \frac{r_{vir}}{c}; \quad (3.16)$$

a densidade crítica, ρ_{crit} , é dependente do atual valor da constante de Hubble e tem a forma

$$\rho_{crit} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}; \quad (3.17)$$

os parâmetros δ_c e c são conhecidos como a sobredensidade característica e o parâmetro de concentração do halo, respectivamente, e estão ligados a partir da relação

$$\delta_c = \frac{200}{3} \frac{c^3}{\ln(1+c) - \frac{c}{1+c}}. \quad (3.18)$$

É importante notar que o raio virial, r_{vir} , é suficiente para determinar a massa do halo, uma vez que

$$M_{vir} = 200\rho_{crit} \frac{4\pi}{3} r_{vir}^3. \quad (3.19)$$

Note que a densidade de massa nesse modelo diverge quando $r \rightarrow 0$. Por sua vez, o potencial é descrito pela equação (3.20).

$$\Phi(r) = -4\pi G\rho_{crit} \delta_c r_s^2 \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{r}{r_s}\right)}{\frac{r}{r_s}} \right] \quad (3.20)$$

Finalmente, temos o perfil de velocidade circular para o perfil de Navarro-Frenk-White:

$$v_{c,halo}^2(r) = \frac{G M_{vir}}{r} \frac{\ln(1+cy) - \frac{cy}{1+cy}}{\ln(1+c) - \frac{c}{1+c}} \quad (3.21)$$

Onde $y = \frac{r}{r_{vir}}$; $c = \frac{r_{vir}}{r_s}$ e M_{vir} é a massa virial.

3.2 DECOMPOSIÇÃO DE CURVAS DE ROTAÇÃO

Uma vez tendo em mãos os perfis de cada componente galáctica, podemos reescrever a equação (3.1), agora com o perfil total de velocidades usado na decomposição das curvas de rotação de nossa amostra:

$$v_{c,total}^2 = \underbrace{\frac{G M_b r}{(r+a)^2}}_{\text{Bojo}} + \underbrace{\frac{G M_d r^2}{(r^2+a^2)^{3/2}}}_{\text{Disco}} + \underbrace{\frac{G M_{gas}}{R_{vir}} \frac{c_{gas} + 4.8 c_{gas} \exp \left[-0.35 c_{gas} x - \frac{3.5}{x c_{gas}} \right]}{x c_{gas} + (x c_{gas})^{-2} + 2 (x c_{gas})^{-1/2}}}_{\text{Gás}} + \underbrace{\frac{G M_{vir}}{r} \frac{\ln(1+cy) - \frac{cy}{1+cy}}{\ln(1+c) - \frac{c}{1+c}}}_{\text{Halo}} \quad (3.22)$$

A equação (3.22) explicita o grande número de variáveis necessárias para decompor uma curva de rotação em suas diferentes contribuições. De fato, uma forte degenerescência seria inevitável se fixássemos cada uma das variáveis como um parâmetro livre do código. Com o objetivo de evitar tal situação, usamos como ferramenta imagens da distribuição estelar e da distribuição de hidrogênio atômico de nossa amostra, de forma a medir efetivamente cada uma das variáveis presentes em 3.22. Como ponto de partida,

usamos como base a decomposição estelar em $3.6 \mu\text{m}$, realizada por Salo et al. (2015), para separar as contribuições devidas ao bojo e ao disco e estimar individualmente o parâmetro de massa de cada componente. Na Figura 3.1 mostramos a imagem da galáxia NGC 3521 com as componentes do bojo e do disco destacadas, tal como utilizadas na decomposição de massa estelar de Salo et al. (2015) e neste trabalho. Seguindo o trabalho de Eskew, Zaritsky & Meidt (2012),

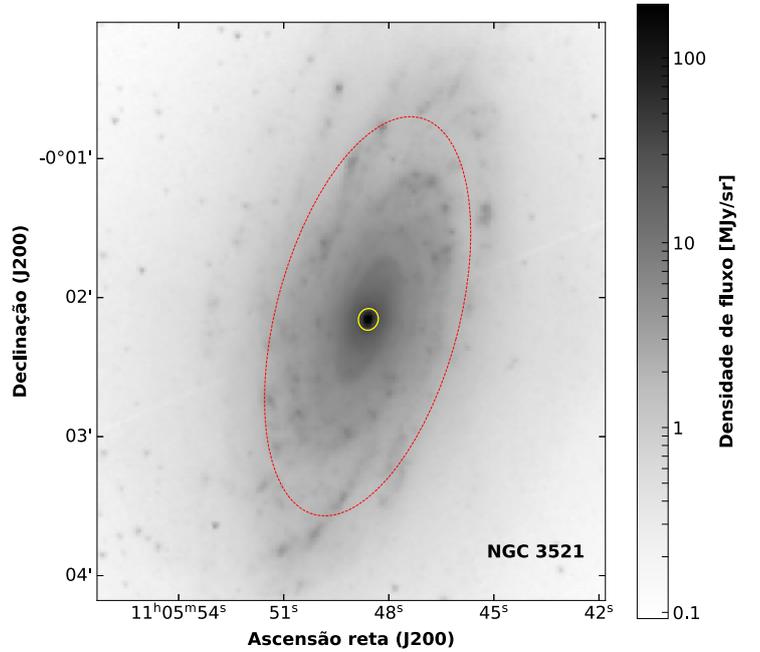


Figura 3.1: Imagem em $3.6 \mu\text{m}$ da galáxia NGC 3521 destacando as componentes do bojo (contorno sólido amarelo) e do disco (contorno tracejado vermelho).

a massa estelar de uma galáxia pode ser calculada a partir de seus fluxos em 3.6 e 4.5 μm , no infravermelho médio. Para isso, os autores introduzem uma relação de proporcionalidade entre a massa estelar, fluxo em 3.6 μm do objeto e sua distância:

$$M_{\star} = 10^{5.65} F_{3.6\mu\text{m}}^{2.85} F_{4.5\mu\text{m}}^{-1.85} \left(\frac{D}{0.05} \right)^2 \quad (3.23)$$

Onde M_{\star} é a massa do objeto, dada em massas solares; $F_{3.6\mu\text{m}}$ e $F_{4.5\mu\text{m}}$ são os respectivos fluxos em Jansky e D é a distância até a galáxia, dada em megaparsecs. A partir da equação (3.23), calculamos as massas do bojo e disco, usando como base os fluxos individuais de cada componente fornecidos por Salo et al. (2015). Os valores de massa de cada componente podem ser encontrados na Tabela 2. Além dos fluxos individuais, Salo et al. (2015) usaram a ferramenta de decomposição GALFIT³ para prover também os comprimentos de escala do bojo e do disco para todas as galáxias da amostra de S⁴G. Esses valores também podem ser encontrados na Tabela 2. Como exceção, na galáxia NGC 5055 não foi verificada uma componente de bojo. Além da massa estelar, a massa do gás HI também pode ser calculada. Para isso, usamos a relação de Catinella et al. (2010a), onde o fluxo integrado de HI é proporcional à massa de HI correspondente:

$$\frac{M_{HI}}{M_{\odot}} = \frac{2.356 \times 10^5}{1+z} \left[\frac{d_L(z)}{\text{Mpc}} \right]^2 \left(\frac{\int S dv}{\text{Jy km s}^{-1}} \right) \quad (3.24)$$

Onde $d_L(z)$ é a distância de luminosidade da galáxia em redshift z , como medido a partir do espectro de HI, e $\int S dv$ é o fluxo integrado da linha de HI. As massas de HI das análogas também podem ser encontradas na Tabela 2.

Na Figura 3.2 mostramos um bom exemplo comparativo entre a distribuição estelar, no infravermelho médio, e a de HI, no rádio. Mostramos na figura os contornos de HI da galáxia, cuja distribuição se estende até ~ 3 vezes a distribuição estelar no mid-IR do objeto. As imagens compostas em 3.6 μm + contornos HI de toda a amostra podem ser encontradas no Apêndice C deste trabalho.

Finalmente, os parâmetros M_{vir} e r_s , isto é, a massa virial e o raio de escala do halo, respectivamente, são definidos como parâmetros livres do nosso modelo de decomposição, de tal forma que seus valores são derivados como produto final do código de ajuste de dados observacionais ao modelo apresentado pela equação (3.22). É importante deixar

³A página oficial da ferramenta está disponível em: <https://users.obs.carnegiescience.edu/peng/work/galfit/galfit.html>

Tabela 2: Parâmetros físicos das galáxias análogas usadas neste trabalho

Objeto	$M_{*,b}$	$M_{*,d}$	M_{HI}	a_b	a_d	Distância	Referências
-	$\left[\log_{10} \left(\frac{M_*}{M_{\odot}} \right) \right]$			[kpc]		[Mpc]	-
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
NGC 4698	10.31	10.70	9.21	2.51	6.23	23.65	1, 2, 4, 8
NGC 4501	9.99	11.20	9.73	0.33	5.99	19.13	1, 2, 4, 8
NGC 4651	9.68	10.81	9.61	0.15	6.79	23.65	1, 2, 4, 8
NGC 2903	9.56	10.66	9.18	0.22	3.92	9.06	1, 3, 6, 8
NGC 5055	-	10.78	9.91	-	2.81	8.33	1, 3, 7, 8
NGC 3521	9.73	11.01	9.18	0.33	3.72	12.08	1, 3, 5, 8

Notas: (1) Identificação da galáxia; (2) massa estelar contida no bojo; (3) massa estelar contida no disco; (4) massa do gás HI; (5) comprimento de escala do bojo; (6) comprimento de escala do disco (7) distância do objeto; (8) referências: [1] Sheth et al. (2010); [2] Chung et al. (2009); [3] Walter et al. (2008); [4] Reynolds et al. (2020); [5] Elson (2014); [6] Irwin et al. (2009); [7] Bosma (1978); [8] Salo et al. (2015).

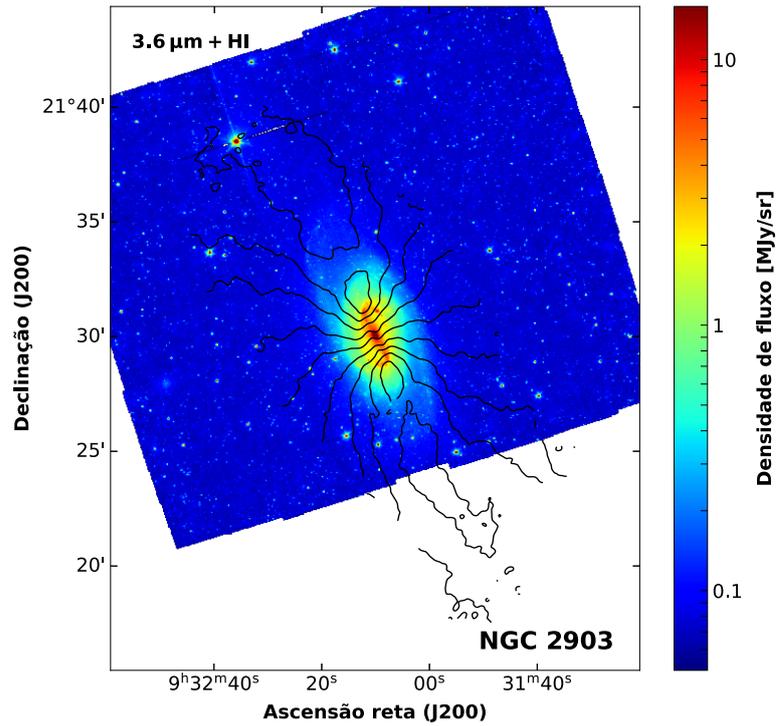


Figura 3.2: Imagem da distribuição estelar em $3.6 \mu\text{m}$ da galáxia NGC 2903 com contornos de HI sobrepostos, projetados através dos cubos de dados disponibilizados pelo levantamento VIVA.

claro que M_{vir} é um parâmetro de massa do halo e não uma “massa total”, uma vez que a massa total é divergente no perfil de NFW.

Tendo em mãos os parâmetros de entrada (apresentados na Tabela 2), podemos

finalmente decompor as curvas de rotação da amostra de galáxias análogas em suas contribuições individuais provenientes do bojo, disco, gás e halo escuro. Tomando como exemplo o caso da galáxia NGC 2903, a qual teve sua curva de rotação anteriormente estudada por Hoeneisen (2019), vemos que a metodologia desenvolvida para a decomposição se mostrou muito eficiente, de forma que a curva de *best fit* parece acompanhar muito bem os dados observacionais de HI. Para o caso de NGC 2903, o ajuste retornou um valor de $\chi^2/N \approx 0.95$, onde N representa os graus de liberdade do ajuste. Na região mais interna, em torno das dependências do bojo – local onde a dinâmica é, em geral, dominada pela dispersão – a velocidade orbital de HI parece subestimar o perfil de rotação sugerido pela quantidade de massa contida no bojo do objeto, como pode ser visto na Figura 3.3. A decomposição da curva de rotação de toda a amostra foi feita e pode ser encontrada no Apêndice C deste trabalho.

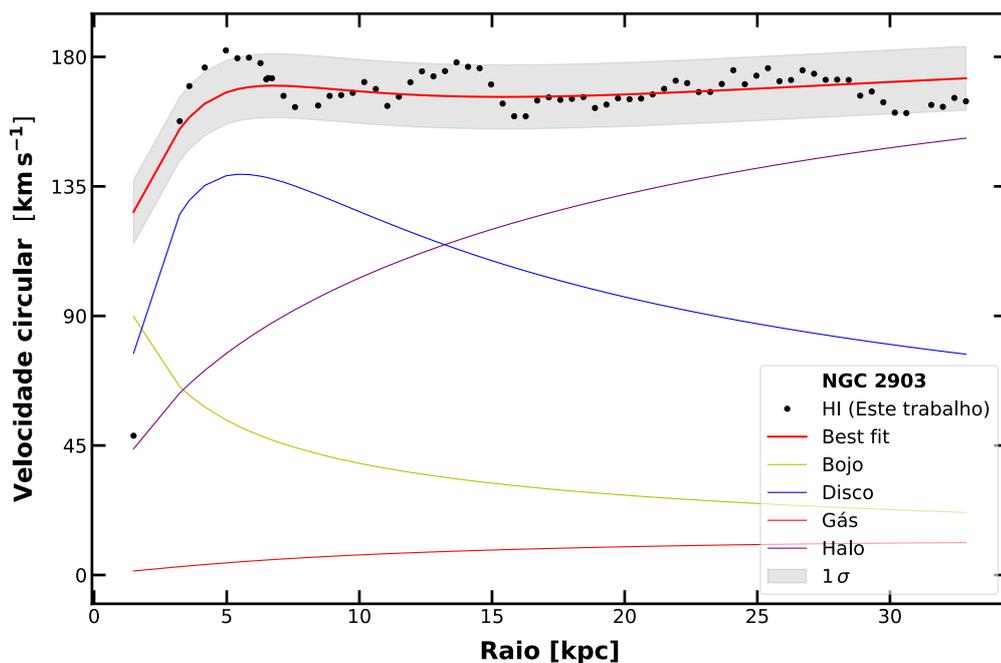


Figura 3.3: Curva de rotação de NGC 2903 decomposta nas contribuições individuais do bojo (linha traço-ponto amarela), disco (linha pontilhada azul), gás (linha traço-ponto vermelha) e halo (linha tracejada roxa). A curva de melhor ajuste aos dados observacionais é representada pela linha sólida preta. A região em torno da curva ajustada representa o intervalo de confiança de 1σ . O ajuste retorna um valor de $\chi^2/N \approx 0.95$.

O valor dos parâmetros de massa e raio do halo escuro, encontrados a partir do ajuste, bem como o respectivo χ^2 por grau de liberdade e o número de dados observacionais utilizados em cada ajuste podem ser encontrados na Tabela 3.

As decomposições das curvas de rotação de nossa amostra, vistas no Apêndice

C deste trabalho, em geral, são consistentes com a hipótese de que a posição do Sol (dada a posição na qual se localiza na Via Láctea) parece convergir com a região onde a contribuição das matérias bariônica e escura se sobrepõe. Dessa forma, parece razoável que a densidade local de matéria deve convergir para um valor relativamente próximo àquele assumido para a densidade local de matéria bariônica.

Tabela 3: Parâmetros retornados pelas decomposições de RC

Objeto	χ^2/N	M_{vir}	r_s	RC
-	-	$\left[\log_{10}\left(\frac{M_*}{M_\odot}\right)\right]$	[kpc]	-
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
NGC 4698	1.79	11.40	36.49	68
NGC 4501	5.22	11.43	50.00	28
NGC 4651	3.12	11.48	50.00	40
NGC 2903	0.95	11.55	53.98	69
NGC 5055	4.82	11.36	56.09	49
NGC 3521	3.35	11.51	70.00	33

Notas: (1) Identificação da galáxia; (2) χ^2 por grau de liberdade retornado pelo ajuste; (3) parâmetro de massa do halo; (4) raio de escala do halo; (5) número de dados observacionais utilizados no ajuste.

3.3 DECOMPOSIÇÃO DA MASSA DINÂMICA: O CASO DE NGC 4698

Uma outra abordagem promissora para verificar a distribuição de massa em galáxias é calcular efetivamente a quantidade de massa contida dentro de um intervalo de raios do objeto. Isso pode ser feito a partir da seguinte relação:

$$M(i \leq r \leq j) = M(r \leq j) - M(r \leq i), \text{ com } i < j; \quad (3.25)$$

onde i e j são dois pontos distintos de raio do objeto. Dessa forma, tanto a massa estelar quanto aquela devido ao gás podem ser diretamente calculadas a partir das relações mostradas nas equações 3.23 e 3.24, usando como base 3.25. Na Figura 3.4 mostramos um exemplo da decomposição de massa da galáxia NGC 4698, na qual a contribuição

da componente de gás é essencialmente devida ao hidrogênio atômico neutro. O método usado para traçar a contribuição devido à matéria escura se baseia na curva de rotação HI do objeto. A partir da curva de rotação, a massa dinâmica contida em cada raio pode ser estimada usando como base a equação (2.1). A contribuição devido à componente

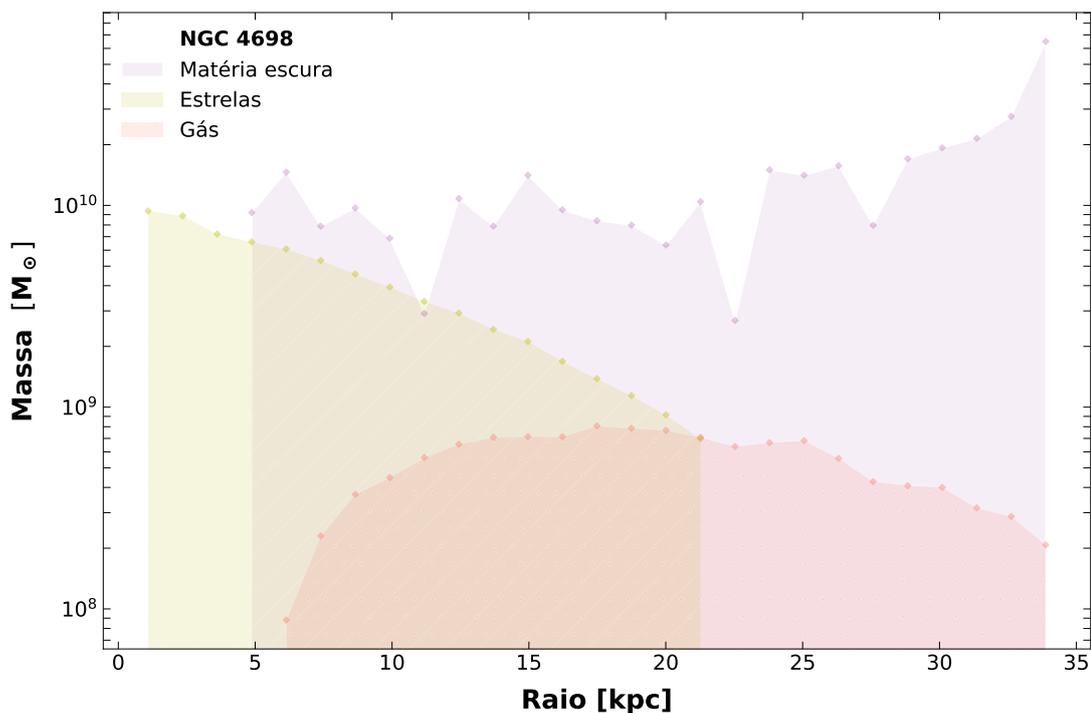


Figura 3.4: Contribuição de massa por raio na galáxia NGC 4698. Os diamantes amarelos representam a contribuição de massa por raio devido à componente estelar. A contribuição do gás é essencialmente devida ao hidrogênio atômico e está representada pelos círculos avermelhados. Os quadrados roxos representam o “residual” de massa por raio contido na galáxia, que não é devida ao gás ou às estrelas.

estelar vista na Figura 3.4 é calculada a partir das imagens de fluxo em 3.6 e 4.5 μm de S⁴G, enquanto que a massa do gás é derivada através do mapa de fluxos de HI, disponíveis através do levantamento VIVA. Nesse sentido, a contribuição indicada pela matéria escura na Figura 3.4 representa uma espécie de “residual” de massa, indicando a massa restante após separar e subtrair as contribuições estelar e gasosa da massa dinâmica total estimada pela equação (2.1). A Figura 3.4 sugere que nenhuma contribuição devido à matéria escura é vista na região mais interna (0–5 kpc) de NGC 4698. No entanto, essa ausência não deve ser entendida como uma falta de matéria escura, de fato. Nas regiões mais internas das galáxias espirais – especialmente as de alta massa –, HI não parece descrever propriamente bem a dinâmica de rotação. Isso provavelmente está relacionado com o fato

de que, nessas regiões mais internas (dentro e ligeiramente em torno das dependências do bojo), a dinâmica é governada pela dispersão de velocidades, e não mais pela rotação, como no caso do disco frio. Isso implica que a velocidade medida de HI talvez não seja a melhor forma de acompanhar a evolução da massa dinâmica nas regiões mais internas da galáxia, subestimando a massa dinâmica total estimada para essas regiões.

A contribuição da matéria escura para a massa dinâmica total parece crescer suavemente com raio. Esse crescimento suave pode ser melhor percebido na [Figura 3.5a](#), onde a razão massa-luminosidade da galáxia NGC 4698 é mostrada como uma função do raio galactocêntrico.

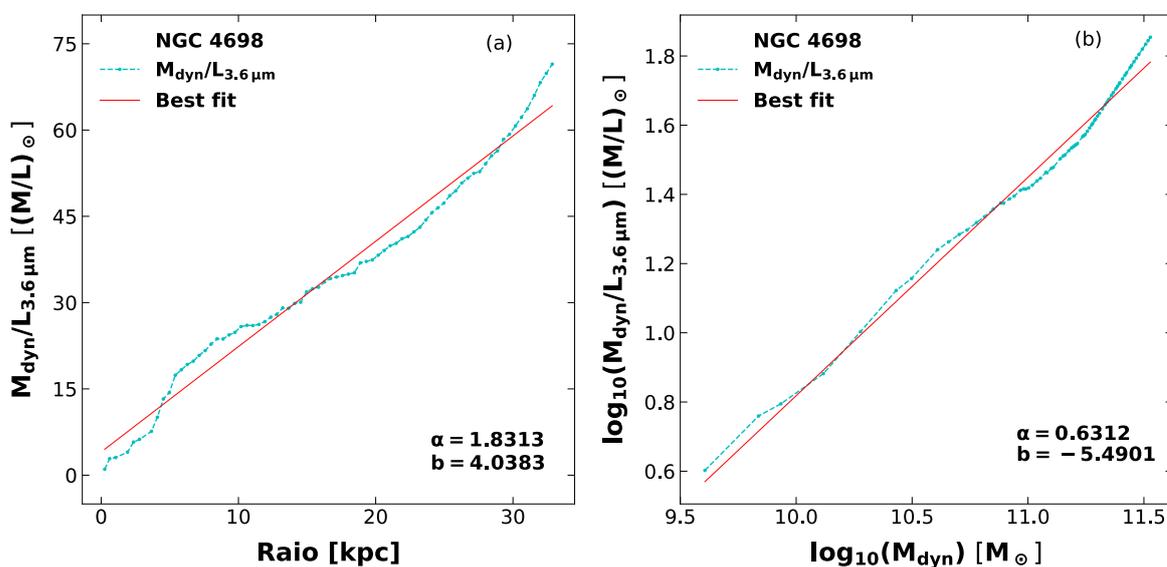


Figura 3.5: *Painel esquerdo*: Relação massa-luminosidade da galáxia NGC 4698 em função da distância galactocêntrica. A relação M/L segue um perfil aproximadamente linear, aproximado pela reta de ajuste linear aos dados (reta vermelha). *Painel direito*: Relação M/L em função da massa dinâmica. A relação mostra um crescimento aproximadamente linear no plano $\log \times \log$.

Para as relações apresentadas nas [Figuras 3.5a](#) e [3.5b](#), a luminosidade foi calculada com base na emissão estelar no infravermelho médio, a partir do fluxo na banda de $3.6 \mu\text{m}$, enquanto que a massa dinâmica foi medida através da curva de rotação HI da galáxia. De forma geral, isto está relacionado com o fato de que, em grandes distâncias do centro galáctico ($> \sim 18 \text{ kpc}$), a contribuição bariônica se torna negligenciável, enquanto a massa dinâmica continua crescendo suavemente ([Sofue 2017](#)). Esse comportamento pode ser ainda melhor percebido na [Figura 3.5b](#), onde a razão M/L em função da massa dinâmica segue um crescimento aproximadamente linear no plano $\log \times \log$.

Usando como base a distribuição de matéria escura – tal como a apresentada

na [Figura 3.4](#), que usa como base o cálculo direto da massa de cada componente –, o próximo passo deste trabalho é ajustar outros modelos de densidade de massa do halo à distribuição medida a partir da metodologia apresentada nesta seção. A partir disso, será possível prover um perfil de distribuição de matéria escura mais realista para a Via Láctea.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As primeiras estimativas para a massa dinâmica da vizinhança solar foram desenvolvidas há cerca de um século, pelos trabalhos de [Kapteyn \(1922\)](#), [Jeans \(1922\)](#) e [Oort \(1932\)](#), os quais usaram os movimentos verticais de estrelas para prover essa estimativa. Mais tarde, ao final da década de 1980, progressos significativos na área foram desenvolvidos, inclusive estimando a densidade de matéria local em $0.1 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$ ([Kuijken & Gilmore 1989](#)). Com o aumento gradativo da quantidade e qualidade dos dados (provenientes, por exemplo, de missões como Hipparcos), essas estimativas locais têm sido cada vez mais refinadas ([de Salas & Widmark 2021](#)). Em particular, estudos sobre a densidade local de matéria escura têm convergido para valores próximos a 0.4 GeV cm^{-3} , como mostramos na compilação de dados da literatura apresentada na [Tabela 4](#). Neste trabalho, tomamos uma abordagem independente, baseada em parâmetros efetivamente calculados em galáxias próximas e análogas à Via Láctea, com o objetivo de separar as contribuições de cada componente galáctica para a massa dinâmica total. Como resultado, a densidade local de matéria escura foi calculada para as 6 galáxias análogas apresentadas na [§2.1](#). Para isso, aplicamos o perfil de densidade de matéria escura de NFW à posição que o Sol ocupa na Via Láctea ($\sim 8 \text{ kpc}$):

$$\rho_{DM}(r = 8 \text{ kpc}) = \frac{\rho_{crit} \delta_{NFW}}{\left(\frac{8 \text{ kpc}}{r_s} \left(1 + \frac{8 \text{ kpc}}{r_s}\right)\right)^2}, \quad (4.1)$$

onde

$$\rho_{crit} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 1.8788 \times 10^{-26} h^2 [\text{kg m}^{-3}] \quad (4.2)$$

$$h = \frac{H_0}{100 [\text{km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}]} \approx 0.68. \quad (4.3)$$

Usando como base a equação [4.1](#), nossas estimativas convergem para $\rho_{dm,\odot} = 0.18 - 0.39 \text{ GeV cm}^{-3}$ ou, ainda, $\rho_{dm,\odot} = (0.48 - 1.04) \times 10^{-2} M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$. Esse resultado está fortemente de acordo com trabalhos prévios da literatura (ver [Tabela 4](#)). Em particular, encontramos um intervalo de valores para densidade local de matéria escura muito próximo àquele sugerido pelo trabalho de [Iocco et al. \(2011\)](#), como pode ser visto na [Figura 4.1](#).

¹É comum vermos estimativas da densidade de matéria em unidades de $M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$; uma conversão útil é: $0.008 M_{\odot} \text{ pc}^{-3} = 0.3 \text{ GeV cm}^{-3}$.

Tabela 4: Estimativas da densidade local de matéria escura

Referência	ρ_{\odot}	R_0	V_0
-	[GeV cm ⁻³]	[kpc]	[km s ⁻¹]
(1)	(2)	(3)	(4)
Huang et al. (2016)	0.32 ± 0.02	8.3	240
McMillan (2017)	0.38 ± 0.04	8.2	233
Lin & Li (2019)	0.58 ± 0.09	8.1	240
Salucci (2019)	0.43 ± 0.06	8.3	239
Eilers et al. (2019)	0.30 ± 0.03	8.1	229
de Salas et al. (2019)	0.30 – 0.40	8.1	229
Cautun et al. (2019)	0.34 ± 0.02	8.0	229
Karukes et al. (2019)	0.43 ± 0.03	8.3	240
Iocco et al. (2011)	0.20 – 0.56	8.0	240
Sofue (2013)	0.40 ± 0.04	8.0	238
Sofue (2020)	0.36 ± 0.02	8.0	238
de Oliveira et al. (2022) (Este trabalho)	0.18 – 0.39	8.0	235

Notas: (1) Artigo usado como referência; (2) densidade local de matéria escura; (3) distância solar do centro da Via Láctea; (4) velocidade circular do Sol.

Analisando a [Figura 3.3](#) e [Figura 3.4](#), vemos que tanto a decomposição de curva de rotação quanto a decomposição de massa bariônica parecem concordar com a hipótese de que o Sol ocupa a região em torno da qual as contribuições das matérias bariônica e escura são muito próximas. Em particular, a decomposição da curva da rotação da galáxia NGC 4698 parece sustentar essa hipótese (ver [Figura 4.2](#)). Como visto na [Tabela 1](#), NGC 4698 possui uma massa estelar particularmente próxima à da Via Láctea, além de apresentar uma componente de bojo, fazendo com que sua decomposição seja particularmente um forte indicador das características observadas na Via Láctea. A curva de rotação de NGC 4698 foi alvo de estudo do trabalho de [Mancera-Piña et al. \(2022\)](#), que obteve uma decomposição muito parecida com a apresentada na [Figura 4.2](#).

A relação massa estelar–massa do halo (SHMR) tem sido amplamente estudada nos últimos anos, especialmente com o objetivo de entender melhor a eficiência da formação estelar como uma função da massa do halo escuro do objeto. Trabalhos como o de [Moster](#)

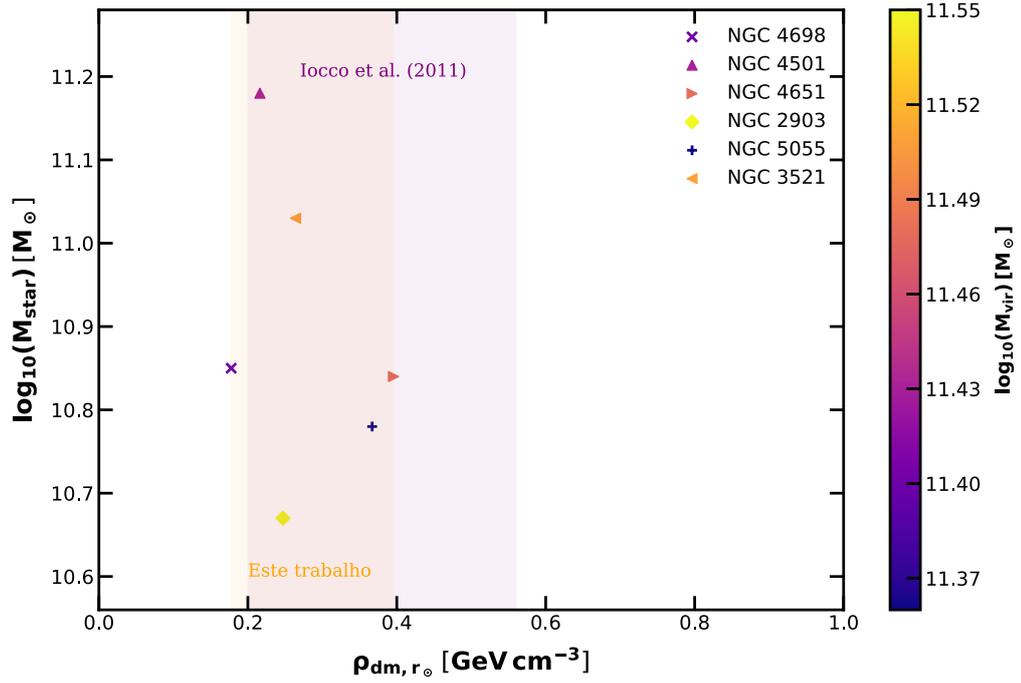


Figura 4.1: Estimativas da densidade local de matéria escura da nossa amostra de galáxias. A região sombreada em lilás mostra o intervalo de LDMD sugerido por [Iocco et al. \(2011\)](#). A região sombreada em laranja aponta para o intervalo de estimativas encontrado com este trabalho. A barra de cores representa a massa virial dos objetos, estimada através da decomposição de curvas de rotação.

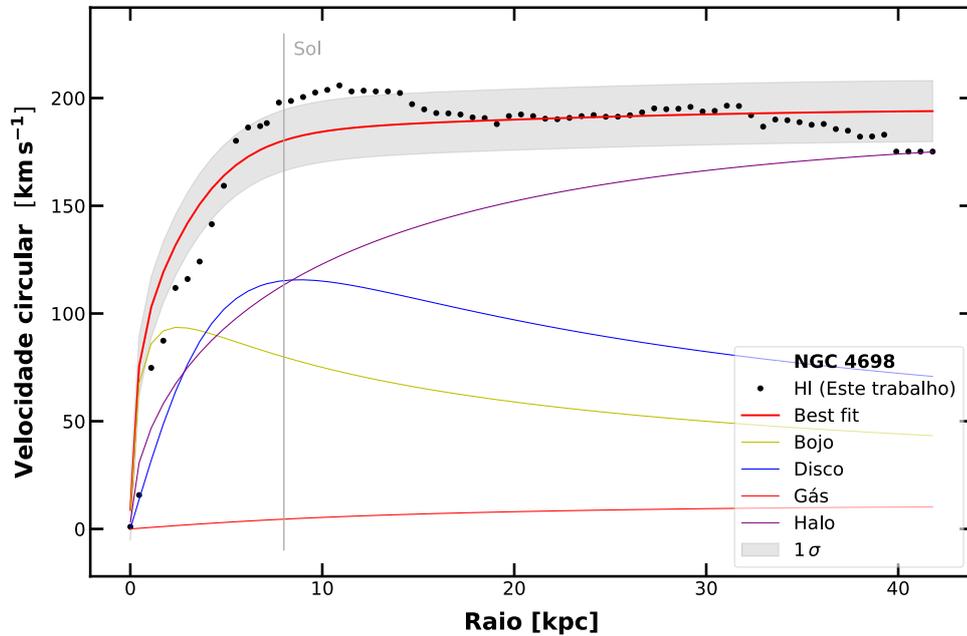


Figura 4.2: Decomposição da curva de rotação da galáxia NGC 4698. A linha vertical cinza mostra a posição do Sol, dada a posição que o Sol ocupa na Via Láctea. As contribuições individuais do bojo (linha traço-ponto amarela), disco (linha pontilhada azul), gás (linha traço-ponto vermelha) e halo (linha tracejada roxa) também são apresentadas. A região em torno da curva ajustada representa o intervalo de confiança de 1σ . O ajuste retorna um valor de $\chi^2/N \approx 1.79$.

et al. (2013) e Posti et al. (2019) sugerem relações significativamente distintas entre si sobre a SHMR, mostrando que a massa estelar e a massa do halo do objeto ainda não conversam muito bem e permanece sendo um tópico de bastante discussão. Na Figura 4.3 mostramos a SHMR para a nossa amostra de galáxias, fazendo um comparativo com trabalhos prévios da literatura. Os objetos de nossa amostra parecem não se encaixar bem nas relações sugeridas por Moster et al. (2013) e Posti et al. (2019), que usou 110 galáxias espirais de alta massa do levantamento SPARC² (Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves; Lelli et al. 2016) para sugerir uma SHMR linear. Como pode ser visto na Figura 4.3, a massa estelar das análogas sugere uma massa virial maior do que os valores derivados na decomposição, o que pode significar que existem inconsistências no ajuste da curva do halo e, conseqüentemente, na estimativa da massa virial da amostra.

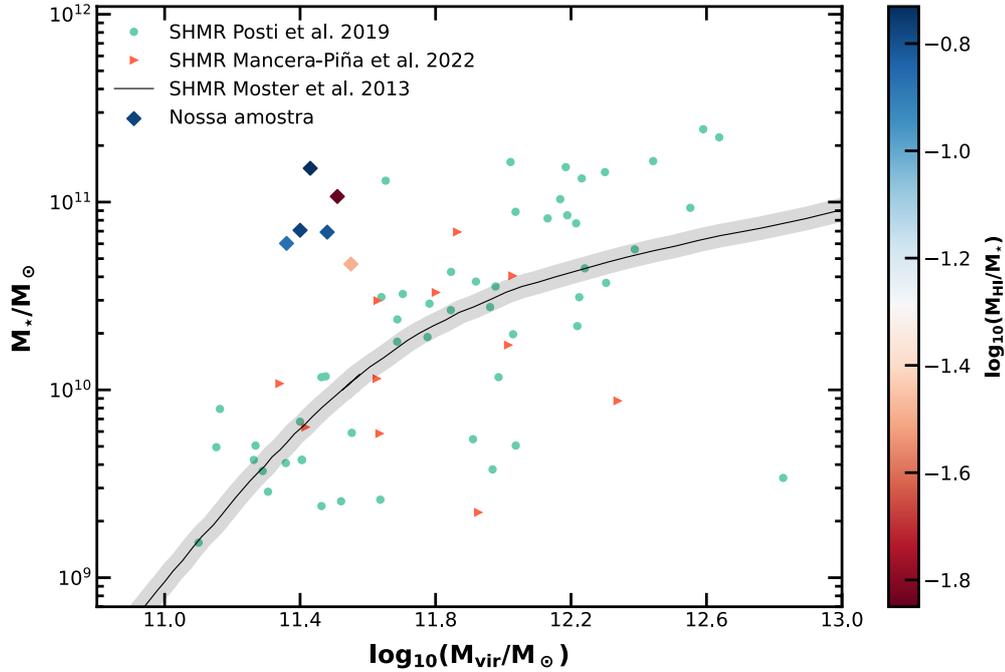


Figura 4.3: Relação massa estelar–massa do halo para a nossa amostra (diamonds colour coded). Para efeito de comparação, nós plotamos os dados apresentados por três trabalhos independentes: os triângulos laterais representam parte da amostra de galáxias de disco do trabalho de Mancera-Piña et al. (2022); os círculos verdes mostram as galáxias da amostra de Posti et al. (2019) com massa estelar entre $10^9 M_\odot < M_\star < 10^{12} M_\odot$. Finalmente, a curva contínua preta representa a relação sugerida por Moster et al. (2013).

²Banco de dados disponível em: <http://astroweb.cwru.edu/SPARC/>

5 SUMÁRIO DO TRABALHO

Análises cuidadosas da distribuição de massa em galáxias mostram que a dinâmica rotacional desses objetos é significativamente diferente daquela esperada, tendo em vista a física newtoniana. Ao invés de decair abruptamente como esperado, a velocidade de rotação se mantém constante mesmo em regiões ultraperiféricas das galáxias, de tal forma que a massa bariônica observada não é suficiente para manter tais objetos presos ao poço de potencial da galáxia. Em outras palavras, os resultados têm mostrado que as galáxias estão envoltas por um grande halo escuro e massudo, de natureza não-bariônica.

Neste trabalho, definimos uma amostra de galáxias análogas à Via Láctea, usando como critérios a velocidade máxima de rotação do gás hidrogênio atômico e a morfologia, a fim de estudar a distribuição de matéria escura em galáxias semelhantes à nossa. Usamos a distribuição estelar e de HI da amostra (todos os objetos em $z \sim 0$) para decompor suas curvas de rotação nas respectivas contribuições para o perfil observado (bojo, disco estelar, disco gasoso e halo escuro). Para isso, nossa metodologia segue uma abordagem independente, de forma que a decomposição é guiada por parâmetros efetivamente calculados a partir de dados observacionais. Para descrever o formato do halo de matéria escura das galáxias de nossa amostra, usamos o perfil de NFW. A decomposição foi feita, levando como parâmetros livres a massa virial do halo e seu raio de escala.

Usando como base os parâmetros livres ajustados na decomposição de curvas de rotação, pudemos estimar a densidade local de matéria escura, sugerindo um intervalo de valores de $\rho_{dm,\odot} = 0.18 - 0.39 \text{ GeV cm}^{-3}$. A decomposição mostrou, ainda, que, quanto maior a massa estelar do objeto, mais o ponto de sobreposição entre as contribuições bariônica e escura é deslocado para regiões mais distantes do centro.

Com o objetivo de estudar a distribuição de matéria escura sem necessariamente assumir um perfil de sua distribuição, apresentamos a decomposição de massa da galáxia NGC 4698. Para isso, usamos a distribuição estelar em $3.6 \mu\text{m}$ e a distribuição de HI, de forma a medir diretamente a massa observada em cada componente e separar o residual – cuja procedência é desconhecida e, portanto, redirecionada à matéria escura.

As nossas decomposições nos permitiram analisar algumas das relações importantes entre as análogas à Via Láctea e seu halo de matéria escura. Em particular, mostramos que a relação massa estelar–massa virial de nossos objetos não segue perfeitamente bem o

comportamento sugerido em trabalhos prévios da literatura. Isso pode estar relacionado com uma eventual subestimação dos parâmetros de massa e raio do halo obtidos com a nossa decomposição. Além disso, mostramos que a razão M_{vir}/M_* de nossa amostra diminui com o aumento da massa estelar do objeto. No entanto, isso apenas parece acontecer com objetos que apresentam massa estelar até $\sim 10^{11} M_{\odot}$, quando a razão M_{vir}/M_* parece se estabelecer e permanecer constante mesmo para objetos mais massudos.

5.1 PASSOS FUTUROS

Apesar de inovadora, nossa abordagem precisa ser otimizada. Para isso, é necessário, antes de tudo, desenvolver uma análise estatística, de forma a estimar os eventuais erros envolvidos ao longo do processo, consequentemente permitindo caracterizar as incertezas nas nossas medidas. Em particular, os raios de escala obtidos com a nossa decomposição de curvas de rotação parecem superestimar os valores da literatura, tornando necessário uma melhor análise em busca de eventuais inconsistências. O código de decomposição deve, também, ser otimizado e testado em mais objetos, tal que haja uma certificação de que a metodologia é robusta o suficiente para ser usada por estudos que vão além da distribuição de matéria escura.

Além disso, uma nova amostra de galáxias análogas (contendo 68 objetos, 6 deles já apresentados neste trabalho) foi definida. No entanto, dados observacionais de HI ainda não estão disponíveis. Pensando nisso, submetemos recentemente propostas observacionais em radiotelescópios, a exemplo de ATCA (Australia Telescope Compact Array) e de GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope); submeteremos uma para o VLA na próxima chamada. A partir disso, teremos uma amostra maior e resultados ainda mais fidedignos, de forma a restringir efetivamente a janela de valores da densidade local de matéria escura sugerida pela literatura. Para isso, este projeto terá continuidade, agora como um projeto de mestrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aalbers et al., 2012, arXiv e-prints, arXiv:2207.03764
- Abdullah M. H., Klypin A., Wilson G., 2020, ApJ, 901, 90
- Akerib et al., 2012, NIMPA, 668, 1
- Alsobaie, 2019, arXiv e-prints, arXiv:1902.08325
- Artale et al., 2019, A&A, 622, A197
- Bait O., Barway S., Wadadekar Y., 2017, MNRAS, 471, 2687
- Binney J., Tremaine S., 2008, ISBN 978-0-691-13026-2
- Blaineau et al., A&A, 664, A106
- Bosma A., 1978, PhD thesis, University of Groningen, Netherlands
- Catinella et al., 2010, MNRAS, 403, 683
- Cautun et al., 2020, MNRAS, 494, 4291
- Chakrabarti, Soumya, 2020, arXiv e-prints, arXiv:2004.00244
- Chauhan et al., 2019, MNRAS, 488, 5898
- Chung et al., 2009, AJ, 138, 1741
- Corbelli, Edvige & Salucci, Paolo, 2000, MNRAS, 311, 441
- Cortese, L., Catinella, B. & Smith, R., 2021, PASA, 38, 35
- de Oliveira, N., Menéndez-Delmestre, K. & Gonçalves, T., 2022, VLTI-How, 18, 18
- de Salas & Wildmark, 2021, RPPH, 84, 4901
- Eilers et al., 2019, ApJ, 871, 120
- Elson, 2014, MNRAS, 437, 3736
- Eskew et al., 2012, AJ, 143, 139
- Feldmann et al., 2017, MNRAS, 470, 1050
- Frank et al., 2016, AJ, 151, 94
- Hernquist, 1990, ApJ, 356, 359
- Hou & Han, 2014, 26, 569
- Hoeneisen, 2019, IJAA, 9, 71
- Huang et al., 2016, MNRAS, 463, 2623
- Hubble, E. P., 1936, Realm of the Nebulae
- Iocco et al., 2011, JCAP, 11, 029
- Irwin et al., 2009, ApJ, 692, 1447
- Jaffe, 1983, MNRAS, 202, 995
- Jeans, 1922, MNRAS, 82, 122

Jimenez, Raul & Heavens, Alan F., 2020, MNRAS, 498, 93
Kapteyn, 1922, ApJ, 55, 302
Karutes et al., 2019, JCAP, 09, 046
Kormendy J., Bender R., 2012, ApJS, 198, 2
Kuijken & Gilmore, 1989, MNRAS, 239, 571
Kuzmin, 1957, PTarO, 33, 75
Lelli et al., 2016, AJ, 152, 157
Licquia & Newman, 2015, ApJ, 806, 96
Lin & Li, 2019, MNRAS, 487, 5679
Mancera-Piña et al., 2020, MNRAS, 514, 3329
McMillan, 2017, MNRAS, 465, 76
Milgrom, 1983, ApJ, 270, 365
Moster B. P., Naab T., White S. D. M., 2013, MNRAS, 428, 3121
Navarro, F., Frenk, S. & White, D. M., 1996, ApJ, 462, 563
Navarro, F., Frenk, S. & White, D. M., 1996, ApJ, 490, 493
Planck Collaboration et al., 2016, A&A, 594, 13
Planck Collaboration, A&A, 2015, 582, 32
Posti L., Fraternali F., Marasco A., 2019, A&A, 626, 56
Profumo, 2017, World Scientific Europe
Ravanbakhsh, S., Oliva, J., Fromenteau, S., et al. 2017, arXiv e-prints, arXiv:1711.02033
Reid & Dame, 2016, ApJ, 832, 159
Reynolds et al., 2020, MNRAS, 493, 5089
Rubin, Vera C. & Ford, W. Kent, Jr., 1970, ApJ, 159, 379
Salo et al., 2015, ApJS, 219, 44
Salucci P., 2019, A&ARv, 27, 2
Sandage A., 1961, The Hubble Atlas of Galaxies
Savastano, Amendola, Rubio & Wetterich, 2019, Phys. Rev. D 100, 083518
Shankar, Salucci & Danese, 2004, SISSA, 59
Sheth et al., 2010, PASP, 122, 1397
Sofue, Yoshiaki, 2013, PASJ, 65, 118
Sofue, Yoshiaki, 2017, PASJ, 69, 1
Sofue, Yoshiaki, 2020, Galaxies, 8, 37
Sofue, Yoshiaki & Rubin, Vera, 2001, ARAA, 39, 137
Steigman & Turner, 1985, NuPhB, 253, 375

Thakur et al., 2023, arXiv e-prints, arXiv:2301.06140

Walter et al., 2008, AJ, 136, 2563

White, S. D. M. ; Rees, M. J., 1978, MNRAS, 183, 341

APÊNDICE A

O MANUAL DE ANÁLISE DE CUBOS DE DADOS, EXPLICANDO O PASSO A PASSO PARA GERAR OS MAPAS DE MOMENTO 0, 1 E 2 (FLUXO, VELOCIDADE E DISPERSÃO DE VELOCIDADES, RESPECTIVAMENTE) ESTÁ DISPONÍVEL EM: [CLIQUE AQUI!](#)

APÊNDICE B

CÓDIGO PARA EXTRAIR A CURVA DE ROTAÇÃO A PARTIR DOS MAPAS DE FLUXO E VELOCIDADE:

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 from astropy.io import fits
3 from photutils.isophote import Ellipse
4 from photutils.isophote import EllipseGeometry
5 import numpy as np
6 from astropy.cosmology import WMAP9 as cosmo
7 import numpy as np
8 import matplotlib.pyplot as plt
9 import pandas as pd
10 import plotly.graph_objs as go
11 from plotly.offline import plot, iplot, init_notebook_mode
12 from photutils.centroids import centroid_com
13
14 # Abre o mapa de fluxo
15 data = fits.open('Diretorios/NGCxxxx.mom0.fits')
16 fluxmap = data[0].data
17
18 # Abre o mapa de velocidades
19 data2 = fits.open('Diretorios/NGCxxxx.mom1.fits')
20 velmap= data2[0].data
21
22 # O centro do objeto pode ser definido de duas maneiras: (1) colocando
23     diretamente as coordenadas do centro do objeto na imagem .fits e (2)
24     usando photutils.centroids para encontrar o centroide a partir do
25     mapa de fluxos.
26
27 centrox = xxx.xx
28 centroy = xxx.xx
29 # centroidx, centroidy = centroid_com(fluxmap)
30
31 # Criar uma curva de rotacao a partir do eixo de maior gradiente de
32     velocidades:
33
34 x1 = np.linspace(0,66,100) # Define o vetor com as coordenadas x da
35     imagem do mapa de velocidades
36
37 reta = np.tan(2)*x1+(-(centroidx)*np.tan(2) + centroidy) # Eixo de
```

```

    rotacao (angulo obtido(isolist.pa))
30 newx = np.round(x1) # Transforma as coordenadas em inteiro
31 newreta = np.round(reta)
32 cortereeta=[]
33 cortreta = []
34 for i in range(len(x1)):
35     cortreta.append((x1[i],reta[i]))
36     for j in range(len(cortreta)):
37         if cortreta[j][1]>=0 and cortreta[j][1]<len(velmap[:,1]):
38             cortereeta.append((cortreta[i][0],cortreta[i][1]))
39 cortereeta = np.asarray(cortereeta)
40
41 # Agora devemos variar a reta em todos os angulos possiveis para
    encontrar o eixo de maior gradiente de velocidades:
42 ret = []
43 distanc = np.arange(-80,80,1.1)
44 gradiente = []
45 thet = np.linspace(1,180,28)
46 theta = np.round(thet)
47 maxgrad = 0
48 velocmax = []
49 coordreta = []
50 velofinal = []
51 x0=centrox
52 y0= centroy
53 for i in theta:
54     xx = x0 + distanc*np.cos(i)
55     yy = y0 + distanc*np.sin(i)
56
57     matriz=[] # Cria uma matriz com as coordenadas x e y da reta
58     for j in range(len(distanc)):
59         matriz.append([xx[j],yy[j]])
60         #print(matriz)
61
62     velo = [0] * 100 # Cria um vetor nulo de velocidades de tamanho 100
63     for k in range(100):
64         if matriz[k][1] >= 0 and matriz[k][1]<=len(velmap[:,1]) and
matriz [k][0]>=0 and matriz[k][0]<len(velmap[:,1]):
65         velocidade = velmap[int(matriz[k][1]),int(matriz[k][0])]

```

```

66         if velocidade > -1000:
67             velo[k] = velmap[int(matriz[k][1]), int(matriz[k][0])]
68             #print(veloc[k])
69
70     maximo = max(velo) # Pega os pontos maximos e minimos da velocidade
71     minimo = min(velo)
72     imax = [k for k, y in enumerate(velo) if y == maximo] # Pega os
73     indices onde a velocidade eh maxima e minima
74     imax = max(imax)
75     imin = [k for k, y in enumerate(velo) if y == minimo]
76     imin = min(imin)
77     dist = (np.sqrt((matriz[imax][0] - matriz[imin][0])**2 + (matriz[
78     imax][1] - matriz[imin][1])**2)) # Distancia entre os pontos de
79     maximo e minimo
80     grad = (maximo - minimo)
81
82 # Loop para pegar o angulo cuja reta tem o maior gradiente:
83     if grad > maxgrad:
84         maxgrad = grad
85         retfinal = matriz
86         thetfinal = i
87
88 retafinal = np.asarray(retfinal)
89 velofinal = []
90 coordreta = [] # Coordenadas da reta final
91 for i in range(len(retafinal)): # Loop para extrair a velocidade da reta
92     de maior gradiente
93     if retafinal[i][1] >= 0 and retafinal[i][1]<=(len(velmap[:,1])):
94         coordreta.append([retafinal[i][0],retafinal[i][1]])
95         velocidade = velmap[int(retafinal[i][1]),int(retafinal[i][0])]
96         if velocidade > -1000:
97             velofinal.append((retafinal[i][0],retafinal[i][1], velmap[
98             int(retafinal[i][1]), int(retafinal[i][0])]))
99             #velocfinal.append(velmap[int(test[i][1]), int(test[i][0])])
100 coordfinal= np.asarray(coordreta) # Coordenadas da reta de maior
101     gradiente, que vao entrar como indice para extrair a velocidade
102 velocfinal = np.asarray(velofinal) # Array com a velocidade ao longo da
103     reta de maior gradiente
104
105

```

```

98 # Calcula a distancia entre o centro da galaxia e cada ponto da reta:
99 dist = []
100 for i in range(len(velocfinal)):
101     dist.append((velocfinal[i][1],((centroy - velocfinal[i][1])/(np.abs(
102         centroy - velocfinal[i][1]))*(np.sqrt((velocfinal[i][0] - centrox)**2
103         + (velocfinal[i][1] - centroy)**2))))))
104 distancia = np.asarray(dist)
105
106 # Para plotar o mapa de fluxos:
107 plt.figure(figsize=(12,12))
108 plt.imshow(fluxmap, cmap= 'jet')
109 plt.plot(coordfinal[:,0], coordfinal[:,1], color='red', label = "eixo de
110     maior gradiente")
111 plt.title("Mapa de fluxos")
112 plt.legend(loc='best')
113 plt.colorbar()
114 plt.show()
115
116 # Para plotar o mapa de velocidades:
117 plt.plot(distancia[:,0], velocfinal[:,2])
118 plt.xlabel('Distancia [Pixels]')
119 plt.ylabel('Velocidade [Km/s]')
120 plt.title('Mapa de velocidades')
121 plt.show()

```

APÊNDICE C

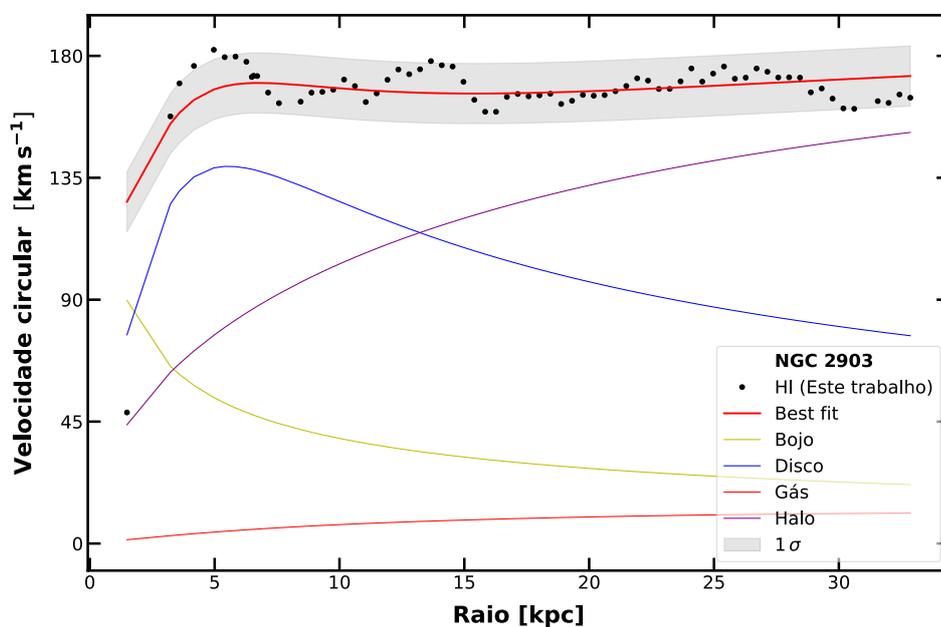
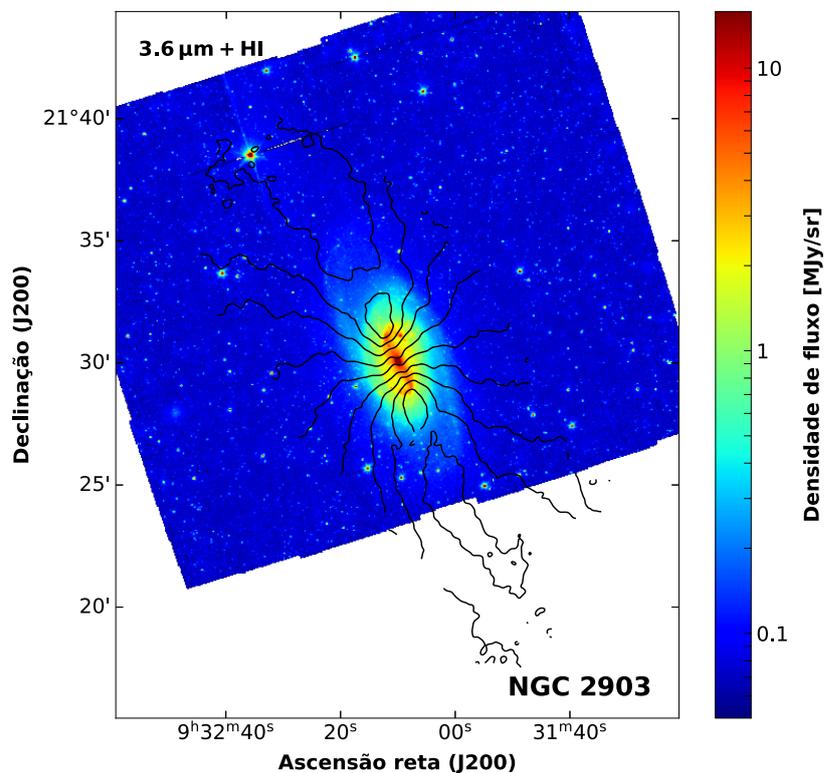


Imagem superior: Contornos de HI da galáxia NGC 2903 sobrepostos à distribuição estelar em 3.6 μm. *Imagem inferior:* Curva de rotação HI decomposta em suas contribuições individuais do bojo (linha traço-ponto amarela), disco (linha pontilhada azul), gás (linha traço-ponto vermelha) e halo (linha tracejada roxa). A curva de melhor ajuste é representada pela linha contínua preta.

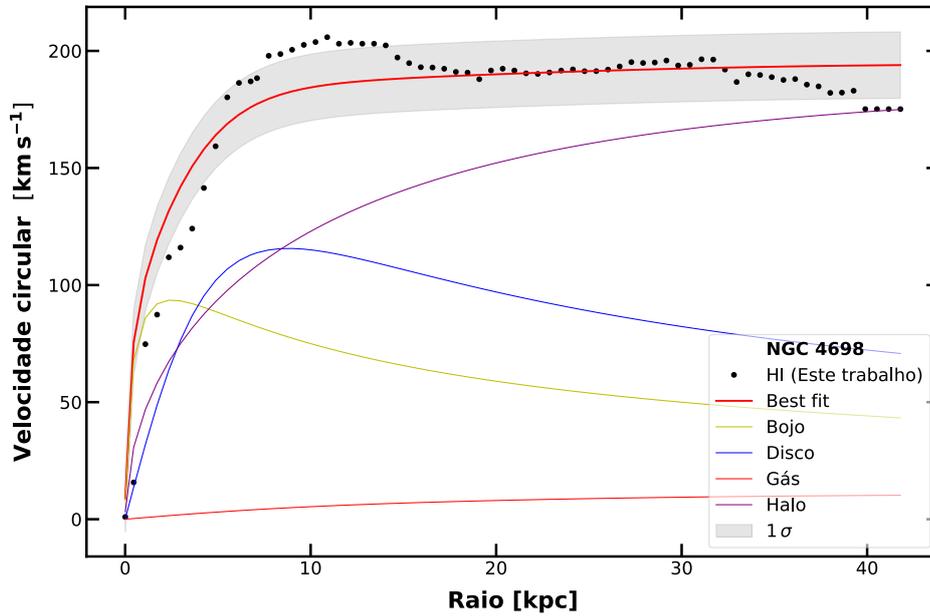
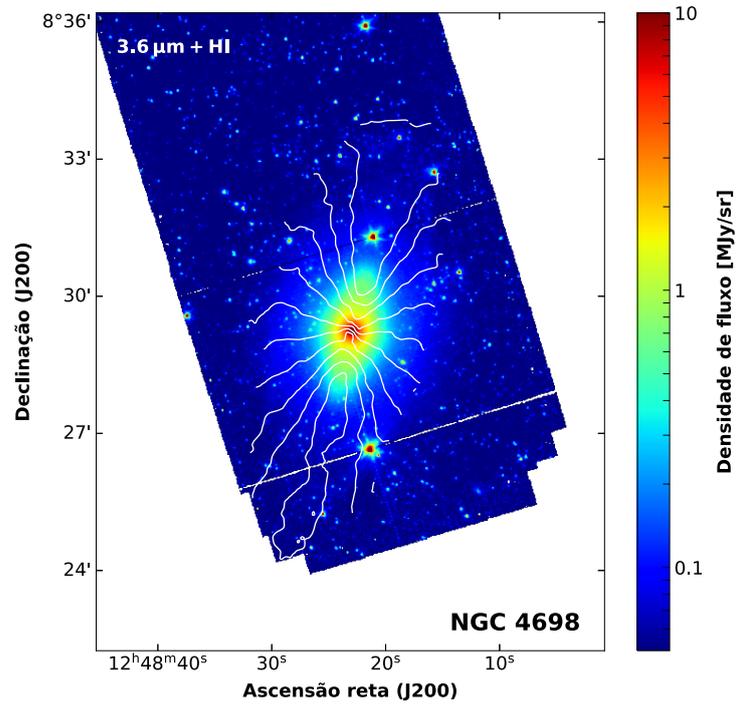


Imagem superior: Contornos de HI da galáxia NGC 4698 sobrepostos à distribuição estelar em 3.6 μm. *Imagem inferior:* Curva de rotação HI decomposta em suas contribuições individuais do bojo (linha traço-ponto amarela), disco (linha pontilhada azul), gás (linha traço-ponto vermelha) e halo (linha tracejada roxa). A curva de melhor ajuste é representada pela linha contínua preta.

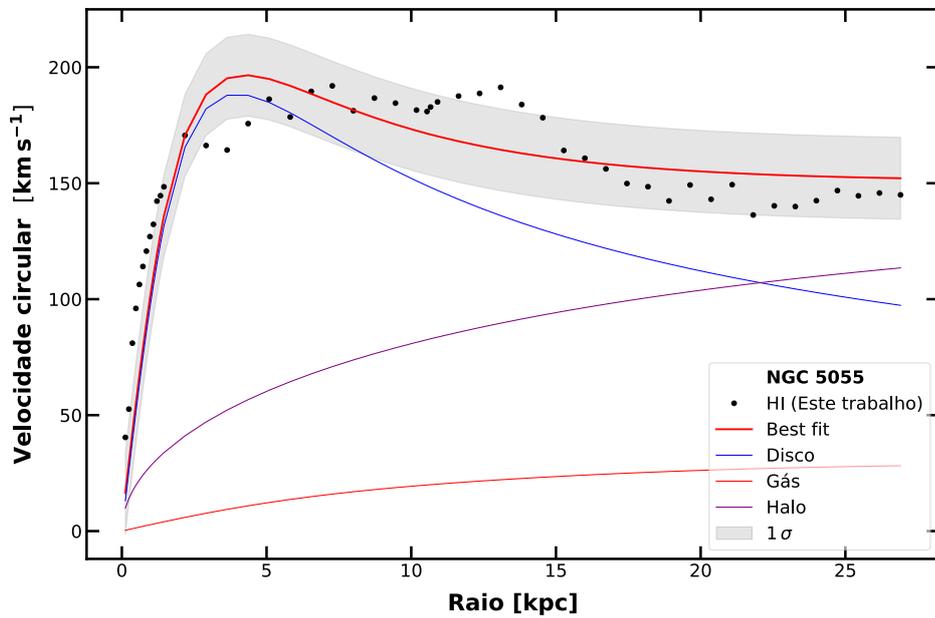
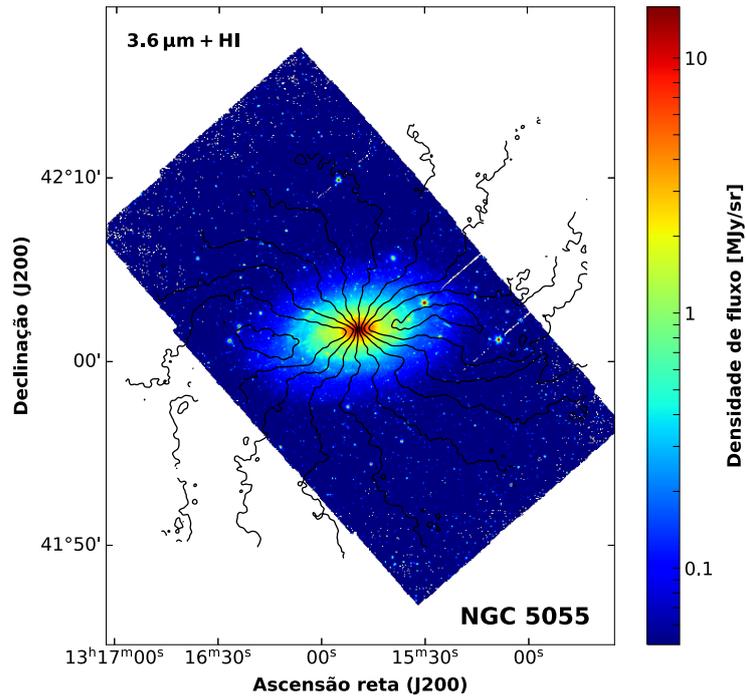


Imagem superior: Contornos de HI da galáxia NGC 5055 sobrepostos à distribuição estelar em $3.6 \mu\text{m}$. *Imagem inferior:* Curva de rotação HI decomposta em suas contribuições individuais do disco (linha pontilhada azul), gás (linha traço-ponto vermelha) e halo (linha tracejada roxa). A curva de melhor ajuste é representada pela linha contínua preta.

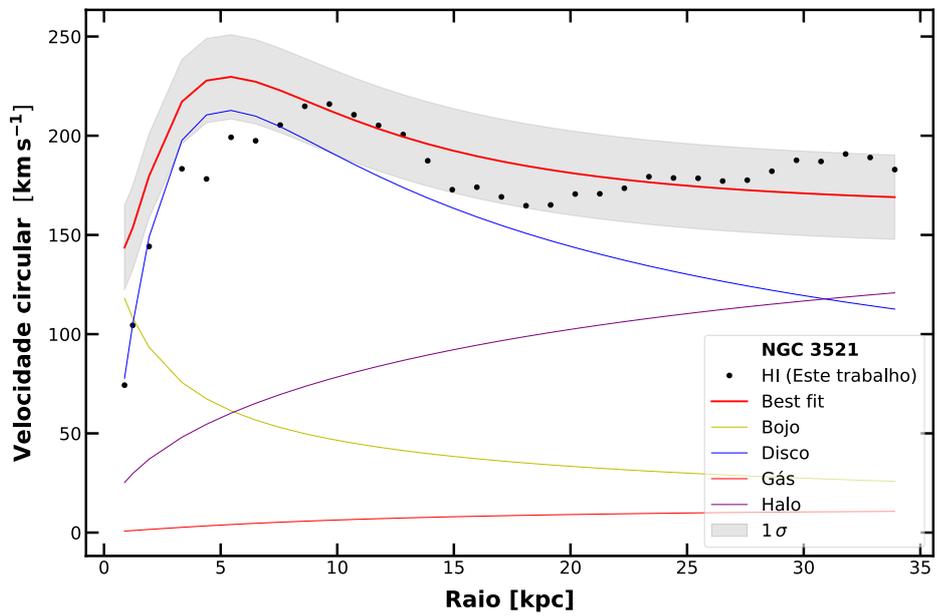
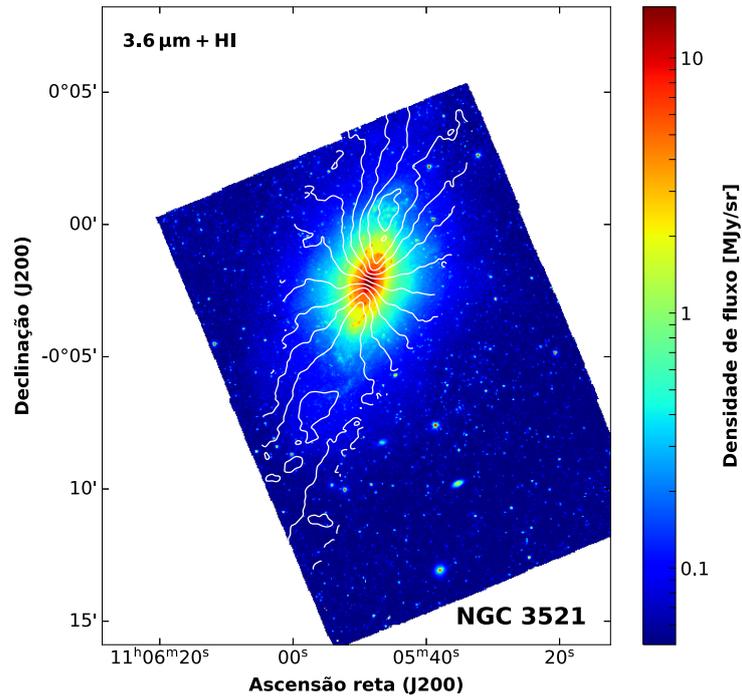


Imagem superior: Contornos de HI da galáxia NGC 3521 sobrepostos à distribuição estelar em 3.6 μm . *Imagem inferior:* Curva de rotação HI decomposta em suas contribuições individuais do bojo (linha traço-ponto amarela), disco (linha pontilhada azul), gás (linha traço-ponto vermelha) e halo (linha tracejada roxa). A curva de melhor ajuste é representada pela linha contínua preta.

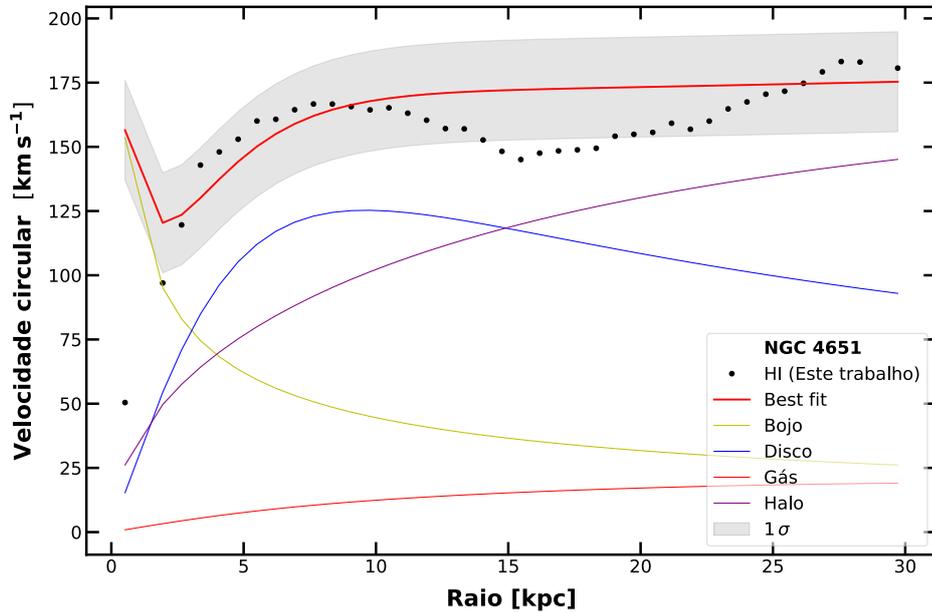
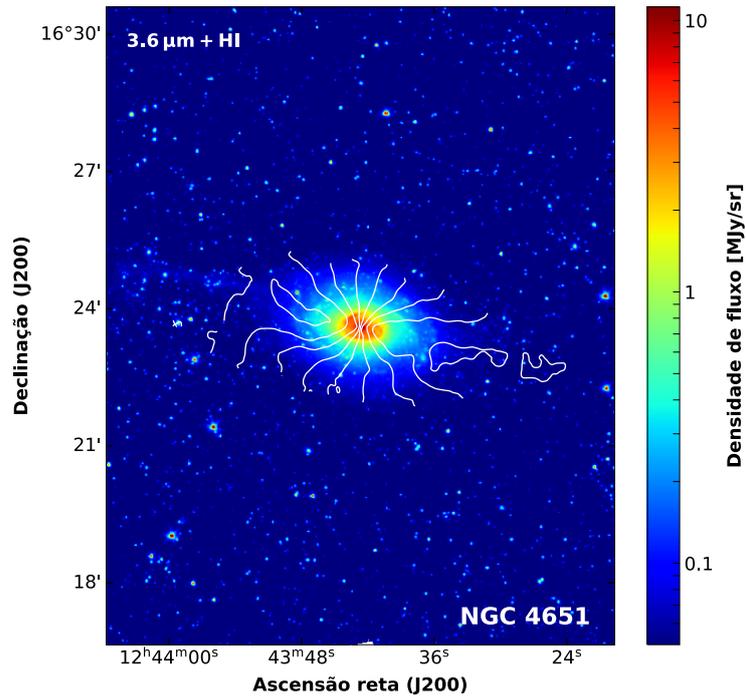


Imagem superior: Contornos de HI da galáxia NGC 4651 sobrepostos à distribuição estelar em 3.6 μm. *Imagem inferior:* Curva de rotação HI decomposta em suas contribuições individuais do bojo (linha traço-ponto amarela), disco (linha pontilhada azul), gás (linha traço-ponto vermelha) e halo (linha tracejada roxa). A curva de melhor ajuste é representada pela linha contínua preta.

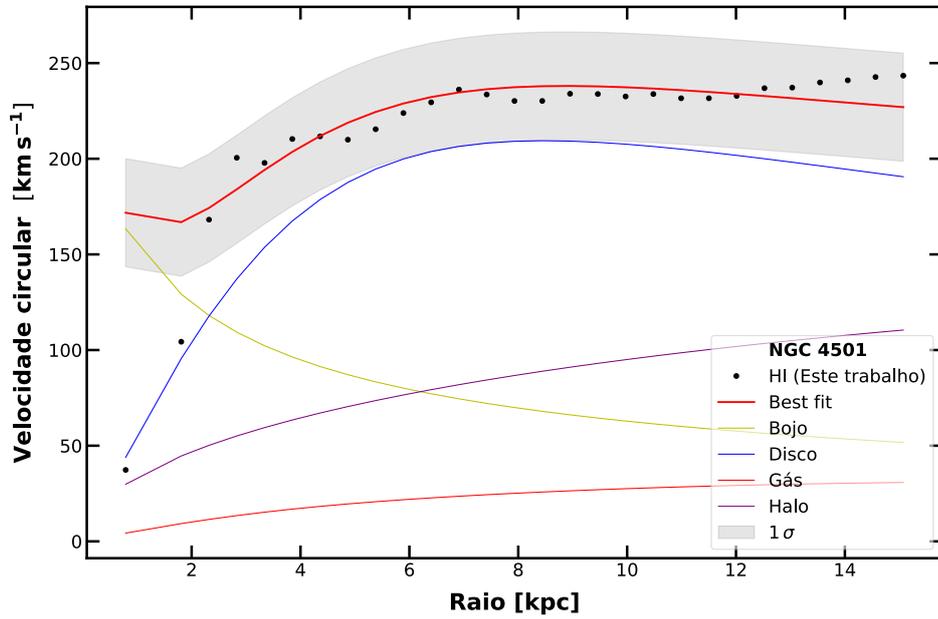
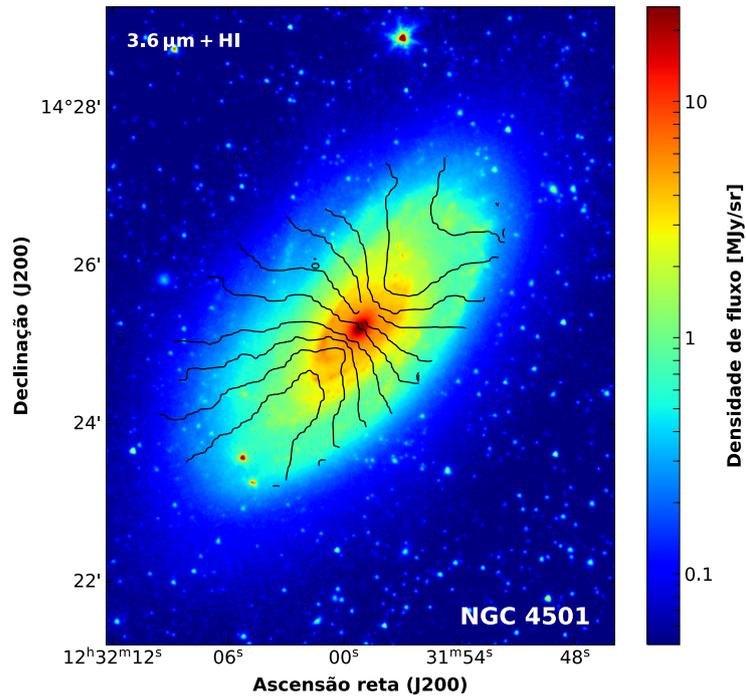


Imagem superior: Contornos de HI da galáxia NGC 4501 sobrepostos à distribuição estelar em 3.6 μm. *Imagem inferior:* Curva de rotação HI decomposta em suas contribuições individuais do bojo (linha traço-ponto amarela), disco (linha pontilhada azul), gás (linha traço-ponto vermelha) e halo (linha tracejada roxa). A curva de melhor ajuste é representada pela linha contínua preta.