
Mass Distribution in Spiral Galaxies Distribuição de Massa em Galáxias Espirais

Received: 2023-01-11 | Accepted: 2023-02-12 | Published: 2023-03-02

Elcimar Pessoa Rocha

Instituto de Federal da Bahia – IFBA, DEFIS-IFBA campus Salvador, Brasil
E-mail: elcimar@ifba.edu.br

Nathália Ribeiro Cavalcante Silva

Instituto de Federal da Bahia - IFBA, Brasil
E-mail: nathalyacavalcantes@hotmail.com

Emilly Ribeiro Evangelista

Instituto de Federal da Bahia - IFBA, Brasil
E-mail: emillyribeiroevangelista@gmail.com

Nelson Barrelo Jr

SSE, Faculdade de Educação, Universidade Federal Fluminense - UFF
E-mail: nbarrelo@id.uff.br

ABSTRACT

The study of kinematics and dynamics is of great importance in the study of spiral galaxies, they contributed to the proof of the existence of exotic dark matter (not baryonic), matter that interacts gravitationally, but does not interact electromagnetically with ordinary matter, that is, it does not emit light. The present research started from the bibliographic review of the galaxies NGC 3351 and NGC 3938. Followed by obtaining data from the $H\alpha$ emission line and velocity maps from observations of the $H\alpha$ line, made with a Fabry-Perot scanning, emitted by ionized gas (CeSAM / LAM database). A rotation curve (made with ADHOCw) and a brightness profile with photometric data (J-band of 2MASS, made as IRAF) were constructed. The dynamic (total) mass is obtained from the rotation curve, and the brightness profile estimates the luminous mass (bulge and disk). Starting from a mass decomposition model (modmass) and using a density profile for the dark halo (ISO), the best fit is made in a space of 4 parameters (M/L_{disk} , M/L_{bulge} , ρ_0 , and r_0). After comparing the results with the literature, a good agreement was verified.

Keywords: Spiral galaxies; Ionized gas; Mass distribution; Dark matter.

RESUMO

O estudo da cinemática e da dinâmica têm grande importância no estudo de galáxias espirais, eles contribuíram na comprovação da existência de matéria escura exótica (não bariônica), matéria que interage gravitacionalmente, porém não interage eletromagneticamente com a matéria ordinária, ou seja, não emite luz. A presente pesquisa partiu da revisão bibliográfica de um par de galáxias, a NGC 3351 e a NGC 3938. Seguida da obtenção dos dados de mapas de emissão monocromática em $H\alpha$ e de velocidades oriundos de observações da linha de $H\alpha$, feitas com um Fabry-Perot de varredura, emitida pelo gás ionizado (banco de dados CeSAM/LAM). Foi construído de curva de rotação (feita com o ADHOCw) e perfil de brilho com dados fotométricos (Banda-J do 2MASS, feito como IRAF). A massa dinâmica (total) é obtida da curva de rotação, e do perfil de brilho estima-se a massa luminosa (boje e disco). Partindo de um modelo de decomposição de massa (modmass) e utilizando um perfil de densidade para o halo escuro (ISO), faz-se o melhor ajuste num espaço de 4 parâmetros (M/L_{disk} , M/L_{bulge} , ρ_0 , e r_0). Após comparação dos resultados com a literatura foi verificado bom acordo.

Palavras-chave: Galáxias espirais; Gás ionizado; Matéria escura; Distribuição de massa.

INTRODUÇÃO

As galáxias são compostas de estrelas, gás, poeira interestelar e de matéria escura, ligadas pelo campo gravitacional. Elas são divididas em três tipos morfológicos: elípticas, espirais (normais e barradas) e irregulares. As galáxias espirais, as quais são objeto de estudo deste trabalho, possuem certos componentes visíveis, um bojo (predominantemente constituídos de estrelas de população II, menores e mais velhas sendo assim o bojo avermelhado) situado no centro com forma elíptica, disco achatado onde predominam estrelas maiores e mais jovens (Estrelas azuladas típicas da população I), além dos braços espirais fazem parte do disco. As estrelas jovens se distribuem predominantemente nos braços. Há ainda, um halo estelar formado por estrelas, gás e matéria bariônica. O último componente das espirais é o halo escuro. Este halo é formado por matéria escura exótica (ou não bariônica) uma vez que não interage eletromagneticamente com a matéria ordinária (ou bariônica, comum) não é visível. Porém interage gravitacionalmente com a matéria ordinária. Por não emitir luz é dita matéria escura.

A linha que dá origem aos dados deste trabalho está centrada em $\lambda_0 = 6563 \text{ \AA}$, devido ao fato de ser observado a emissão do gás ionizado pela proximidade de estrelas jovens e quentes tipo O e B com temperatura efetiva superior a $T_{ef} > 25\,000 \text{ K}$. Estrelas desses tipos são as maiores e de vida mais curta, cerca de milhões de anos. São responsáveis pela maior fração da luminosidade da galáxia, apesar de contribuir com menos de 20% da massa total da galáxia. Em contrapartida, estrelas mais velhas, menores e mais frias, tipicamente avermelhadas (estrelas tipo M) contribuem com mais de 80% da massa total de uma galáxia espiral. O gás ionizado emite segundo o esperado pela série de Balmer, transições do átomo de hidrogênio quando o elétron migra de níveis superiores ao nível 2 e retorna ao nível 2, sendo que a linha de $H\alpha$ é especificamente a transição do nível $n = 3$ para $n = 2$. Todavia o observado depende de algumas variáveis dessa forma a raia observada (λ_{obs}) pode não está centrada em λ_0 e este fato é justamente o que permite a determinação da rotação das galáxias espirais. Observações de uma raia devem ser feitas por um instrumento de alta sensibilidade, no caso, tais observações foram feitas por meio de um Fabry-Perot de varredura (Betzler, 2002; Blais-Ouelette et al., 2000).

METODOLOGIA

Efeito Doppler, os Mapas de Emissão em $H\alpha$ e a Construção dos Mapas de Velocidades

Do efeito Doppler da luz sabe-se que quando a fonte emissora (gás ionizado) se movimenta¹ com relação ao observador (telescópio), a luz observada sofre um desvio. O desvio será para o vermelho (redshift) se o movimento for de afastamento ou o desvio será para o azul

¹ Aqui cabe ressaltar que o importante, na verdade, é a velocidade relativa entre fonte e observador, não importando quem de fato se movimenta, ou se ambos se movimentam.

(blueshift) se for de aproximação. Uma forma mais precisa, menos relativa, de definir o efeito Doppler da luz é dizer que o redshift implica que o comprimento de onda observado será maior que o emitido e quando ocorre blueshift o comprimento de onda observado será maior que o emitido pela fonte. Em termos matemáticos fica:

$$v = c(\Delta\lambda/\lambda_0) \quad (1)$$

onde λ_0 e λ_{obs} são os comprimentos de onda emitido e observado ($\lambda_0 = \lambda_{H\alpha} = 6563 \text{ \AA}$); c é a velocidade da luz no vácuo e v a velocidade da porção do gás que emitiu a luz observada.

Uma vez que conhecemos a velocidade sistêmica de uma galáxia, velocidade com a qual este objeto se aproxima ou se afasta do sistema solar². Uma vez que esse efeito é “descontado” o que resta é o efeito de aproximação e afastamento do disco da galáxia devido a rotação do disco. E assim, de posse da relação anterior, é possível determinar a velocidade de aproximação e afastamento de cada elemento da galáxia observada. O caminho para a construção dos mapas é o seguinte: a linha de $H\alpha$ é observada e após tratamento dos dados brutos o que sobra é um perfil da linha observada. a intensidade desse perfil servirá para construir o mapa de emissão e centro dá o comprimento de onda observado. Comparando o valor observado com de referencia determinamos a velocidade de um determinado elemento da galáxia e de posse dos valores de todos os elementos constrói-se o mapa (ou campo) de velocidades.

Curvas de Rotação

A partir dos mapas de emissão e de velocidades³ foram construídas as curvas de rotação (CR). Para tal foi utilizado o usando o software ADHOCw⁴ [Bulesteix, 1993; Blais-Ouelette et al., 2000]. O disco galáctico é dividido por uma malha radial onde, com um raio e dois ângulos, se obtém qualquer elemento. A equação que descreve a velocidade radial observada de cada elemento, é dada por:

$$V_{obs} = V_S + V_{rot} \cdot \sin i \cdot \sin \theta' + V_{exp} \cdot \sin i \cdot \sin \theta' + V_z \cdot \cos i \quad (2)$$

onde: V_{rot} é a velocidade de rotação; V_{obs} é a velocidade radial observada; V_{exp} é a velocidade no plano galáctico; V_z é a velocidade na direção perpendicular ao plano galáctico; V_S é a velocidade sistêmica do objeto; i é o ângulo de inclinação; ρ e θ são coordenadas polares no plano da Galáxia; ρ e θ são as coordenadas polares no plano do céu.

² Para não haver erro de paralaxe devido a época do ano da observação, é feita a correção heliocêntrica, as medidas são feitas da Terra e o referencial é mudado para o referencial do Sol.

³ Os dados foram obtidos no Fabry-perot, do CeSAM/LAM (<https://cesam.lam.fr/fabryperot/>)

⁴ ADHOCw acrônimo do Francês Analyse et Dépouillement Homogène des Observations Cigale.

Como as velocidades no eixo z, V_z , e plano do disco, V_{exp} , são desprezíveis, temos que a eq. (2) se resume a:

$$V_{rot} = \frac{V_{obs} - V_s}{\text{sen } i \times \text{cos } \theta'} \quad (3)$$

De posse da velocidade de cada elemento da malha plota-se um gráfico dessa velocidade em função da distância ao centro da galáxia. Isso gera um gráfico que ocupa as regiões do primeiro e terceiro quadrantes, mas comumente são postos, ambos no quadrante 1 fazendo diferenciação por cor, ver figura 4, as azuis são velocidades de aproximação (“negativas”) e as vermelhas de afastamento.

RESULTADOS

Descrição da amostra

As galáxias espirais da pequena amostra são: NGC 3351, uma SB(r)b e NGC 5474, uma SA(s)cd e NGC 3938 SA(s)c. Os parâmetros das galáxias foram obtidos junto ao banco de dados do NED⁵ e do HyperLeda⁶.

NGC 3351

Figura 1- Imagem DSS da Galáxia NGC 3351



Fonte: Aladyn Sky Atlas.

A galáxia NGC 3351 é uma galáxia espiral barrada, uma SB(r)b que foi descoberta em 1781 por Pierre Méchain, catalogada por Charles Messier no catálogo astronômico conhecido Catálogo Messier. A galáxia NGC 3351 é conhecida também por Messier 95 ou M95 e situada na

⁵ Banco de dados extragaláctico da NASA, NED/IPAC <<http://ned.ipac.caltech.edu/>>

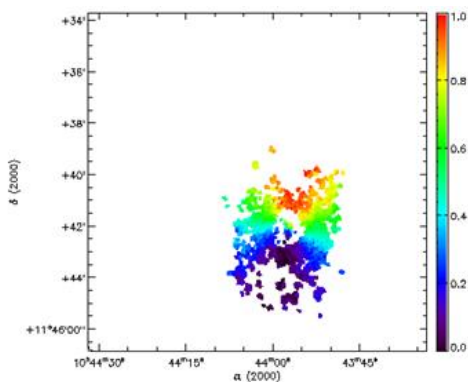
⁶ Banco de dados do HyperLeda <<http://leda.univ-lyon1.fr/>>

Constelação de Leão. Na figura 1 uma imagem, DSS, da galáxia NGC 3351 obtida do O atlas do céu Aladin (Aladin Sky Atlas).

Mapas de velocidade e monocromáticos da NGC 3351

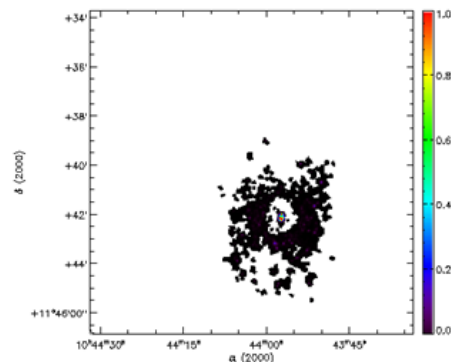
Na figura 2, temos o mapa de velocidades da NGC 3351, onde vemos em cores mais vermelhas e mais “quentes” a região que, devido ao giro do disco está se afastando e em azul/violeta a região que se aproxima. Na figura 3, temos o mapa de emissão monocromática em $H\alpha$ da NGC 3351, mostrando os picos de emissão que coincidem com regiões de atividade de formação estelar recente.

Figura 2- Mapas de Velocidade para a Galáxia NGC 3351 (1 pixel = 1").



Fonte: Fabry-perot, do CeSAM/LAM (<https://cesam.lam.fr/fabryperot/>)

Figura 3- Mapa de Emissão Monocromática em $H\alpha$ para a Galáxia

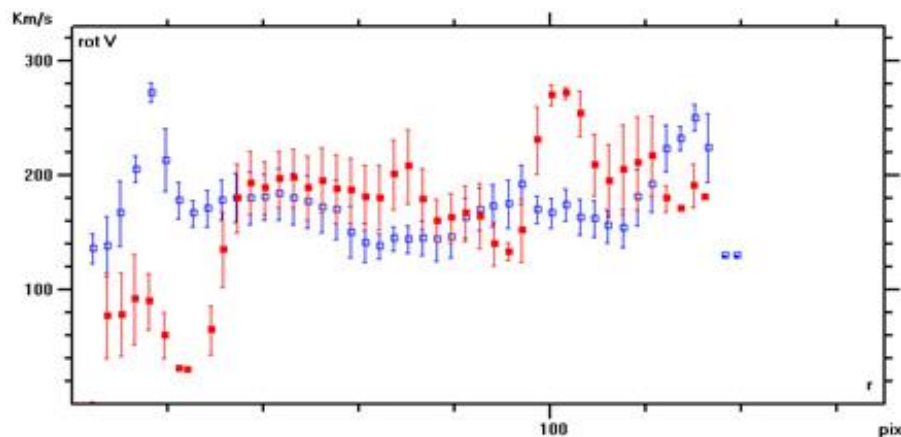


Fonte: Fabry-perot, do CeSAM/LAM (<https://cesam.lam.fr/fabryperot/>)

A curva de rotação da NGC 3351

Foi feita a construção da curva de rotação usando o ADHOCw, a seguir:

Figura 4 - Curva de rotação da Galáxia NGC 3351 (1 pixel = 1"). O lado que se aproxima em azul e o lado que se afasta em vermelho.



Fonte: Própria

As cores, azul e vermelho, mostram o lado da galáxia que se aproxima do observador (em azul) e o que se afasta (em vermelho), ver figura 4. Em uma situação ideal há simetria entre os

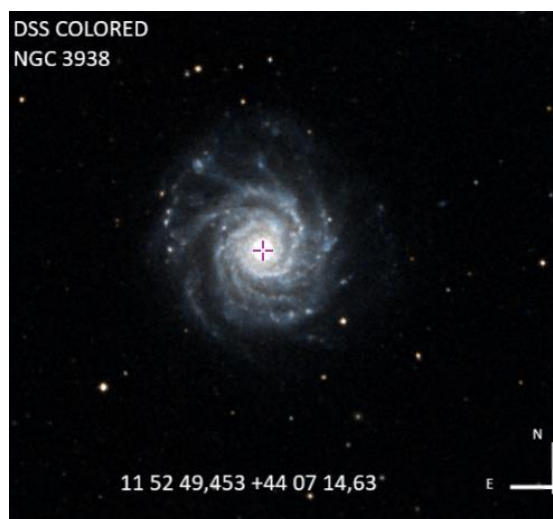
lados, na galáxia estudada há indícios de perturbações na região mais próxima do centro principalmente entre 10" e 30" e entre 95" e 110". A CR da NGC 3351 atinge um platô com velocidades próximas de 170 km s^{-1} . Os parâmetros utilizados na construção da CR são o ângulo de posição (P.A.), inclinação e o centro do objeto. Foram feitos testes usando o P.A. e inclinação tomada por métodos cinéticos e fotométricos, então a melhor curva de rotação foi escolhida, e pode ser vista na figura 4.

NGC 3938

Situada na direção da constelação da Ursa Maior (Ursa Major), a galáxia NGC 3938 é uma galáxia simples (SA(s)c) descoberta por Willian Hershel em 1788. Na Figura 5 temos uma imagem DDS, desta galáxia obtida pelo Aladyn Sky Atlas. A galáxia NGC 3938 é classificada como uma "SA(s)c". O SA é por ser uma galáxia espiral simples e o "c" é por ter um núcleo menor, braços grandes e mais abertos. Tem uma magnitude aparente de 10,9, uma declinação de $+44^{\circ} 07' 14.6''$ e uma ascensão reta de 11h 52min 49,45s, Eq J2000, [NED]. Possui aproximadamente 67.000 anos-luz de diâmetro e é considera uma das galáxias mais brilhantes da Ursa Maior Sul [Atlas of the Universe], a distância da NGC 3938 é uma estimativa de 43 milhões de anos-luz da Terra, atualmente têm-se o conhecimento de duas supernovas dentro da NGC 3938. A SN 2005ay que é uma supernova do tipo II, descoberta em 2005 com uma magnitude de 15,6 e a SN 2017ein do tipo Ic, descoberta em 2017 com uma magnitude de 14,9.

Na figura 6, temos o mapa de velocidades da NGC 3938, em verde a região que se afasta e em azul e violeta a região que se aproxima devido ao giro do disco galáctico. O mapa de emissão monocromática em $H\alpha$ é mostrado na figura 7, temos, mostrando os picos de emissão que coincidem com regiões de atividade de formação estelar recente, onde fica evidente os braços da galáxia principalmente nas proximidades da região central.

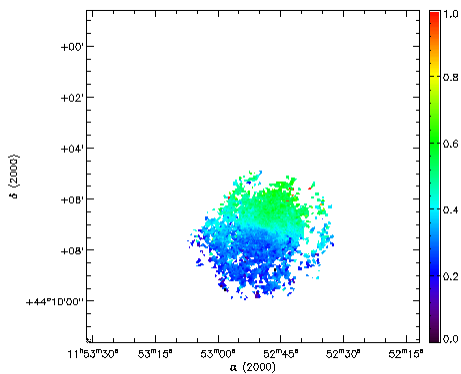
Figura 5 – Imagem DSS para a Galáxia NGC 3938



Fonte: Aladyn Sky Atlas.

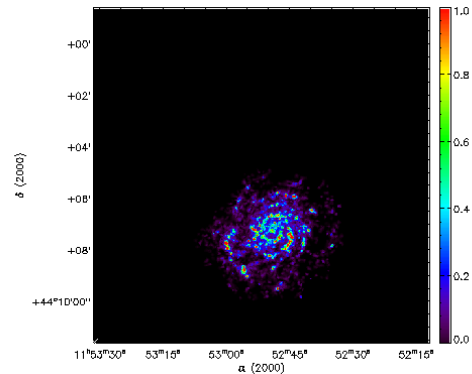
Mapas de velocidade e monocromáticos da NGC 3938

Figura 6 – Mapa de Velocidade para a Galáxia NGC 3938.



Fonte: Fabry-perot, do CeSAM/LAM (<https://cesam.lam.fr/fabryperot/>)

Figura 7 – Mapa de Emissão Monocromática para a Galáxia NGC 3938.

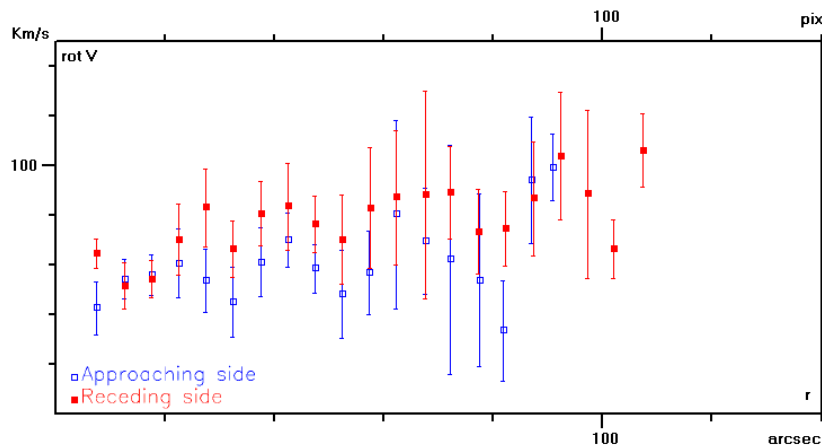


Fonte: Fabry-perot, do CeSAM/LAM (<https://cesam.lam.fr/fabryperot/>)

A curva de rotação da NGC 3938

Na Figura 8, vemos a CR da NGC 3938, o lado que se aproxima (em azul) e o lado que se afasta (em vermelho). O lado que se afasta tem comprimento maior se estendendo de 92'' (onde o lado azul termina) até cerca de 110''. O lado que se afasta tem velocidade superior em praticamente toda a extensão da CR, em especial entre 30'' e 85''. A velocidade do platô fica próxima de 60 kms^{-1} . Assim como na anterior os parâmetros de entrada são os mesmos.

Figura 8 – Curva de rotação da Galáxia NGC 3938 (1 pixel = 1''), o lado que se aproxima está em azul e o que se afasta em está vermelho.



Fonte: Própria

DISTRIBUIÇÃO DE MASSA EM GALÁXIAS

A concentração de estrelas de baixa massa corresponde a grande parte da massa das galáxias, como estrelas do tipo K e M. Por outro lado, a luminosidade é devida as estrelas de maior massa e de maior luminosidade. (Silk et al. 2013, apud Rocha, E. P. 2016). De acordo com Rocha (2016), quanto maior o raio de órbita da estrela, mais próximo do valor real da massa será

a estimativa, para isso explica que nas galáxias espirais a dinâmica das estrelas no disco é predominante em relação a movimentação das estrelas do bojo. Pode-se medir a massa de galáxias espirais através da cinemática das estrelas do disco. Ao pegar uma estrela que está situada no disco, que tenha uma órbita circular e se conhecidos o raio (r') e a velocidade $v(r')$ de sua órbita. Pode-se calcular a massa interna, M_r , conforme a seguinte equação:

$$M_r = \left(\frac{r' \cdot v^2}{G} \right) \quad (4)$$

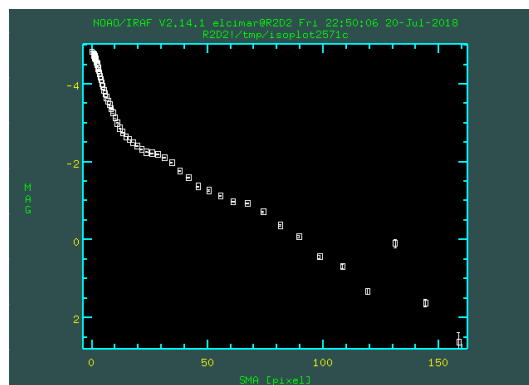
Porém a partir de um certo raio a quantidade de estrelas sofre uma diminuição significativa, e assim a observação de uma estrela pela equação acima fica mais difícil. Para contornar esse problema, assume-se que a curva de rotação da galáxia espiral será mais ou menos plana, assimilando isso ao raio máximo da galáxia (R) e a velocidade máxima de rotação (V_{max}^2), a massa total de uma galáxia espiral (M_s) fica melhor determinada com:

$$M_s = \left(\frac{R \cdot V_{max}^2}{G} \right) \quad (5)$$

Perfil de Brilho Superficial

Os perfis de brilho superficial de uma galáxia mostram a distribuição de brilho e podem revelar detalhes estruturais da galáxia. O brilho superficial mostra como varia o fluxo por unidade de área por toda a galáxia. Estrelas mais jovens contribuem muito para o brilho total das galáxias, enquanto estrelas mais velhas estão diretamente ligadas a massa da mesma, contribuindo menos com o brilho total. (Silk et al. 2013, apud Rocha, 2016). Assim ao tomar o brilho em uma faixa específica é possível selecionar a contribuição de um grupo particular de estrelas. Para este trabalho, foi escolhido a banda-J ($1,25 \mu m$) pois esta faixa que seleciona muito bem as estrelas que contribuem mais significativamente com a massa da galáxia (mais de 80% da massa total). Assim a escolha da Banda-J é explicada por sofrer menos com a extinção estelar e oferecer melhor estimativa para a massa das galáxias.

Figura 9 – Perfil de brilho correspondente a NGC 3938 construído no IRAF.



Fonte: Própria

Utilizamos os dados fotométricos do 2MASS⁷ e reduzidos utilizando o IRAF⁸. Na figura 9, temos o perfil de brilho preliminar construído utilizando o IRAF em ambiente Linux.

Na construção do perfil o programa parte dos dados da fotometria e de parâmetros como o centro da galáxia. Identificado o centro, são ajustadas elipses e é feito a leitura do brilho para cada anel elíptico, o valor encontrado é anotado e assim constrói-se o gráfico do perfil de brilho. É necessário fazer o ajuste deste perfil, não só um ajuste, mas uma decomposição do perfil em termos da contribuição devido ao bojo e ao disco (Plana et al., 2010, apud Rocha, 2016), o qual foi feito utilizando software caseiro em linguagem Supermongo. deste modo, para se fazer a decomposição do perfil de brilho superficial em suas componentes, precisamos modelar o bojo que é feito obedece a lei de $r^{\frac{1}{4}}$, donde matematicamente:

$$\mu = \mu_e + 8,3268 \left[\left(\frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{4}} + \left(\frac{r}{r_t} \right)^4 \right] \quad (6)$$

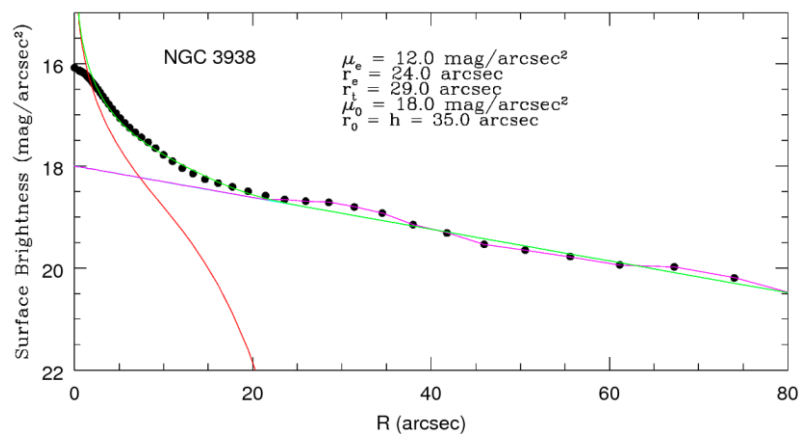
sendo: μ_e o brilho superficial central; r_e e r_t fatores de escala do bojo

No caso do disco exponencial foi usado:

$$\mu = \mu_0 + 1,0857 \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (7)$$

onde μ_0 é o brilho superficial central e r_0 o parâmetro de escala do disco.

Figura 10 – Perfil de brilho ajustado para a NGC 3938. Em verde a curva que fita o perfil produzido no IRAF por ajuste de elipses, em vermelho o bojo e em magenta o disco exponencial.



Fonte: Própria

⁷ Two Micron All-Sky Survey ou 2MASS, foi um levantamento de todo o céu, entre 1997 e 2001, em três faixas do infravermelho próximo, <http://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/2mass.html>.

⁸ IRAF é o acrônimo de Image Reduction and Analysis Facility, o projeto concebido e mantido pelo National Optical Astronomy Observatories – NOAO (<http://iraf.noao.edu/>).

Na Figura 10 é mostrado a decomposição do perfil de brilho na Banda-J da NGC 3938. A curva que fita o perfil produzido no IRAF, por ajuste de elipses, está em verde, em vermelho é mostrada a contribuição do bojo e em magenta do disco exponencial. O dado de entrada para o modelo de massa será, para o bojo, os dados que geraram a curva em vermelho e para o disco a curva em magenta. Para o disco é usada uma parte teórica ($R < 23''$) que é a curva que fita os dados em verde subtraído do bojo, e outra observada ($R > 80''$). Essa escolha faz com que tenhamos uma estimativa do disco na parte mais interna da galáxia e o próprio disco observado a partir do raio que a influência da luminosidade do bojo tende a zero.

Uma vez de posse da curva de rotação e do perfil de brilho decomposto, pode-se fazer a decomposição da massa da galáxia. Com a curva de rotação é possível se determinar com boa qualidade a massa total ou massa dinâmica da galáxia. A partir do perfil de brilho e sabendo que a razão massa luminosidade, M/L , é aproximadamente constante pode-se estimar a contribuição em termos de massa da parte luminosa da galáxia (Plana et al., 2010). De posse dessas informações escolhe-se um modelo de densidade para o halo de matéria escura. Para o caso foi escolhido o modelo da esfera-pseudo isotérmica (Carroll & Ostlie, 2006, apud Rocha, 2016) porque, na literatura tem se mostrado melhor na estimativa das massas das componentes. O perfil de densidade ISO pode ser escrito como:

$$\rho = \frac{\rho_0}{\left[1 + \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (8)$$

Na Tabela 1 temos os parâmetros fotométricos do ajuste para a galáxia NGC 3938.

Tabela 1 – Parâmetros Fotométricos Ajustados e Parâmetros do Modelo de Massa usando o Modelo ISO.

Galáxia	Parâmetros Fotométricos					Modelo de Massa ISO				
	μ_0	r_0	μ_e	r_e	r_t	M/L_{bojo}	M/L_{disco}	r_0	ρ_0	X^2
NGC3938	18,0	35,0	12,0	24,0	29,0	0,30	0,30	0,10	3,10	0,23

Fonte: Própria

Onde: μ_0 é o brilho superficial central do disco, em mag/ arcsec²; r_0 (Parâmetro fotométrico) é o parâmetro de escala do disco, em arcsec; μ_e o brilho superficial central do bojo, em mag/ arcsec²; r_e é o raio característico do bojo, em arcsec; r_t é a característica generalizada do raio do bojo, responsável pela queda rápida do bojo, em arcsec; M/L_{bojo} é a Razão Massa/ Luminosidade para o bojo, em M_{\odot}/L_{\odot} ; M/L_{disco} é a Razão Massa/ Luminosidade para o disco,

em M_{\odot}/L_{\odot} ; r_0 é o raio característico para o halo escuro, em kpc ; ρ_0 é a densidade central do halo escuro, em M_{\odot}/pc^3 ; χ^2 reduzido.

Tabela 2 – Resumo da decomposição utilizando o modelo ISO.

Galáxia	Componente Dominante	Bojo	Tipo de Curva de rotação
NGC 3938	Disco	Presente	Flat, crescimento médio
NGC 3351	-----	-----	Flat, crescimento médio

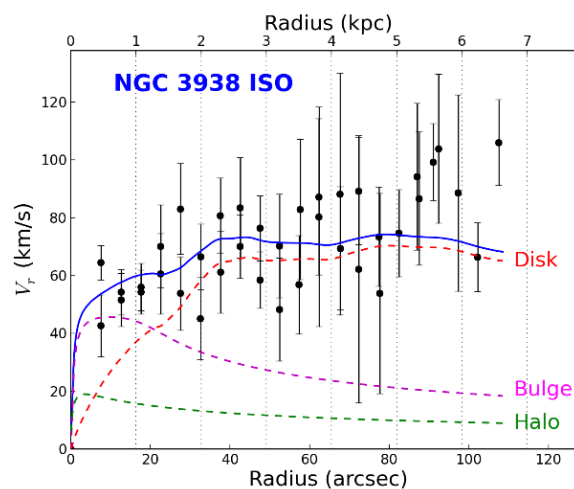
Fonte: Própria

Na Figura 11 tem-se a curva de rotação da NGC 3938 decomposta utilizando o perfil ISO, onde pode-se observar as contribuições das componentes luminosas do bojo e do disco e a contribuição da componente escura, a contribuição do halo de matéria escura. Observando a Figura 11, tem-se como resultado que o disco domina e que a contribuição do halo é muito pequena sendo menor, inclusive, que a do próprio bojo. Os pontos pretos são os dados devido a observação; em azul é o melhor ajuste para a curva de rotação observada; em verde é a contribuição devido ao halo escuro; em vermelho a contribuição devido ao disco e em magenta a contribuição devido ao bojo. Na tabela 2, mostra o resumo dos resultados obtidos no que diz respeito a componentes e formas das CRs e componentes de massa.

Na NGC 3938 o disco assume o componente principal, era de se esperar visto que o disco dessa galáxia é grande. O bojo e o halo contribuem pouco com a curva de rotação.

Na tabela abaixo vemos a distribuição de massa para a NGC 3938. Podemos notar que a contribuição para a massa da galáxia devido a matéria escura é 2 ordens de grandeza menor que a massa do disco (disco + bojo) ou seja, quase 100% da massa dessa galáxia é devido aos componentes luminosos.

Figura 11 – Curva de rotação da NGC3938 decomposta utilizando o perfil ISO.



Fonte: Própria

Tabela 3 – Resumo da decomposição utilizando o perfil ISO. Todas as massas são dadas, em função da massa do Sol, multiplicadas por $10^{10} M_{\odot}$.

Galáxia	Distância (Mpc)	Massa disco+bojo	Massa Halo	Massa Total	Massa Disco+Bojo/Halo
NGC3938	6,6	1,7	0,012	1,8	0,99

Fonte: Própria

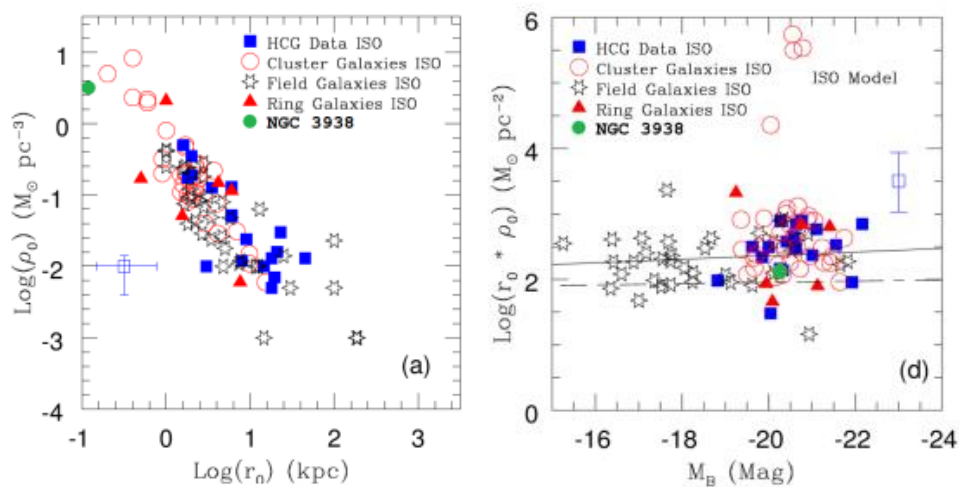
CONSIDERAÇÕES FINAIS

Construímos as CRs, fizemos o levantamento bibliográfico básico, descrição e o estudo cinemático inicial das galáxias espirais NGC 3351 e NGC 3938. Fizemos o perfil de brilho ajustado e decomposição de massa para a NGC 3938. Pretendemos, como próximo passo, determinar o perfil de brilho e a decomposição de massa da NGC 3351 e de mais um par de galáxias que devido ao panorama atual não foi possível finalizar as reduções e tratamentos de dados para as outras galáxias. No resultado obtido para a distribuição de massa, o χ^2 teve um bom valor, com predominância do disco, em geral, mesmo resultado obtido por Rocha, E. P. (2016) para o mesmo modelo de halo escuro (no caso o perfil ISO).

A galáxia NGC 3938 é uma galáxia sem interações violentas a vista por ser uma galáxia de campo (algo como galáxia “aproximadamente” isolada), e para essas galáxias o modelo ISO tem se mostrado melhor.

Figura 12 – Comparação com a literatura, círculo cheio verde representa a NGC 3938.

O trabalho atual superpostos aos dados de Plana et al. (2010) e Rocha, E. P. (2016), figura adaptada da última referência. No diagrama da esquerda temos a correlação entre a densidade do halo central e o raio do núcleo do halo para o modelo ISO. No diagrama da direita temos a densidade central do halo vs. magnitude absoluta na banda-B.



Fonte: Própria

Na figura 12, abaixo, comparamos a NGC 3938 com outros grupos de galáxias, a partir de dados da literatura, superpomos os resultados aqui obtidos para a NGC 3938 (círculo verde cheio) aos triângulos cheios vermelhos devido a Rocha (2016) e os devido a Plana et al. (2010), figura adaptada deste último artigo. No diagrama da esquerda temos a correlação entre a densidade do halo central (ρ_0) e o raio do núcleo do halo (r_0) para o modelo ISO. No diagrama da direita temos a correlação entre densidade central do halo e raio do núcleo vs. magnitude absoluta na banda-B. Assim vemos que os resultados para a decomposição de massa da NGC 3938 concordam com os encontrados na literatura. Esses resultados nos dão a estimativa de massa para esta galáxia assim como sua possível distribuição em termos de componentes luminosa (com a separação bojo disco) e escura todas em função do raio.

Parte do estudo cinemático dessa galáxia já existia, não foi preciso tratar um cubo de dados bruto para chegar ao mapa de emissão monocromática em $H\alpha$ nem fazer o mapa de velocidade. Fizemos a Curva de rotação e sua distribuição de massa. Para que os estudos cinemáticos e dinâmicos estejam completos há a possibilidade de estudos da dinâmica do gás ionizado fazendo uso dos mapas de velocidades residuais e estudando assim os movimentos não circulares. Esse tipo de estudo oferece além de possíveis explicações para a dinâmica interna da galáxia um conjunto de testes que pode dirimir dúvidas a respeito dos parâmetros de observação e modelagem de uma galáxia espiral como a velocidade sistêmica, a inclinação, verificação se a velocidades que desconsideramos deveriam ser consideradas. Em uma possível continuação de trabalho com estas galáxias, deste modo, estudar a dinâmica interna poderia ser um caminho a seguir. E como já mencionado, a construção o perfil de brilho e a decomposição de massa para NGC 3351 e de mais um par de galáxias estão entre as perspectivas de continuação do projeto.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos bancos de dados: Fabry Perot, operado no CeSAM / LAM, Marselha, França; ao HyperLeda; e ao NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) operado pela Caltech, sob contrato com o NASA sem os quais este trabalho não poderia ser feito.

Agradecemos ao PIBIC IFBA/IFBA pelo apoio financeiro, uma vez que este trabalho é fruto de trabalhos de IC e como tal propõe-se a auxiliar no fomento à pesquisa nos Institutos Federais, proporcionando aos participantes bolsistas ou voluntários treinamento técnico na área de astrofísica observacional assim como na formação geral em pesquisa científica.

REFERÊNCIAS

BETZLER, K. Fabry-Perot Interferometer. KB20020122, Universitat Osnabruck, Fachbereich Physik, 2002.

BLAIS-OUELLETTE, S. Distribution de la matière sombre dans les galaxies spirales. Tese Doutorado | Aix-Marseille 1, 2000.

BOULESTEIX, J. ADHOC reference manual. Marseille: Publ. de l'Observatoire de Marseille, 1993.

BUTA, Ronald J. "Galaxy morphology." Planets, Stars and Stellar Systems. Springer Netherlands, 2013. 1-89.

CARIGNAN, C.; Freeman, K. Basic parameters of dark halos in late-type spirals. The Astrophysical Journal, v. 294, p. 494-501, 1985.

CARROLL, B. W.; Ostlie, D. A. An introduction to modern astrophysics and cosmology. Addison-Wesley, 2006.

FLETCHER, R. A new approach to variable metric algorithms. The computer journal, v. 13, p. 317-322, 1970

NAVARRO, J.; White, S. D. The structure of cold dark matter halos. In: Kluwer Academic Publishers Group. Symposium-International Astronomical Union. 1996. v. 171, p. 255-258.

PLANA, H.; Amram, P.; Oliveira, C. M. d.; Balkowski, C. Mass distribution in hickson compact groups of galaxies. The Astronomical Journal, v. 139, p. 1, 2010.

ROCHA, E. P. Cinemática do Gás Ionizado em Galáxias Barradas com Anéis, Dissertação Mestrado, UESC, 2016.

SELLWOOD, J. A. "Secular evolution in disk galaxies." Reviews of Modern Physics 86. (2014): 1.

SILK, J.; Di Cintio, A.; Dvorkin, I. Galaxy formation. arXiv preprint arXiv:1312.0107, 2013. Disponível em: <<http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept13/Silk/frames.html>>

VAN DER KRUIT, P.; Allen, R. The kinematics of spiral and irregular galaxies. Annual review of Astronomy & Astrophysics, v. 16, p. 103-139, 1978.