

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Maria Luísa Gomes Buzzo

**Desvendando a morfologia de galáxias
utilizando imagens do telescópio T80-South
e dos mapeamentos S-PLUS e J-PLUS**

São Paulo

2017

Maria Luísa Gomes Buzzo

**Desvendando a morfologia de galáxias
utilizando imagens do telescópio T80-South
e dos mapeamentos S-PLUS e J-PLUS**

Monografia apresentada ao Departamento de
Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica
e Ciências Atmosféricas da Universidade de
São Paulo como requisito para a obtenção do
título de Bacharel em Ciências.

Área de Concentração: Astronomia

Orientador(a): Prof.^(a) Dr.^(a) Claudia Lucia
Mendes de Oliveira

São Paulo

2017

Resumo

Neste trabalho, vamos estudar a estrutura e formação de galáxias por meio da análise de imagens em muitos comprimentos de onda. Usando essas informações é possível determinar parâmetros importantes dessa galáxia, como sua cor, tamanho, massa e história de formação estelar. Esses parâmetros nos dão indícios de como as galáxias evoluem.

O estudo foi desenvolvido com o programa MegaMorph, rotina de ajuste de modelo de imagens de galáxias, capaz de ajustar simultaneamente várias imagens da mesma galáxia em comprimentos de onda diferentes, decompondo sua distribuição de luz em suas componentes, como bojo e disco. Este estudo é focado nas imagens dos mapeamentos S-PLUS e J-PLUS, porém, a galáxia aqui estudada é a NGC 3115, uma galáxia lenticular (S0) com imagens em 8 comprimentos de onda, este trabalho foi desenvolvido como um método para aprender a usar o programa e desenvolver um roteiro de como analisar imagens em mais de um comprimento de onda simultaneamente, com resultados encontrados computacional e estatisticamente e independentes de visão humana.

Abstract

In this work, we will study the structure and formation of galaxies using multi-wavelength images. Using these informations is possible to determine important parameters of these galaxies, like its color, size, mass and stellar formation. These parameters give us clues of how these galaxies have evolved and are evolving.

This study was developed using MeGaMorph, a galaxy fitting routine, capable of fitting several images of galaxies simultaneously in different wavelengths, decomposing its light distribution into its components, like bulge and disk. This study is focused on S-PLUS and J-PLUS surveys, although the galaxy here studied is NGC 3115, a lenticular galaxy (S0) with images in 8 different wavelengths and this work was developed as a method to learn how to use the program e create a pipeline on how to study multi-wavelength images, with computational and statistical results independent from human seeing.

Lista de Figuras

1.1	Aglomerado de estrelas jovens na galáxia NGC 3115, nesta figura é possível ver a cor do bojo da galáxia e demonstra como isto está relacionado à banda na qual foi obtida esta imagem (6).	13
1.2	Aglomerado de estrelas velhas, conhecido como Liller 1, localizado próximo ao centro da Via Láctea (7).	13
1.3	Galáxia S0 NGC 3115	14
3.1	Histograma com os valores encontrados para BIC dentre os modelos gerados para a galáxia NGC3115 num formato “single sersic”.	21
3.2	Histograma com os valores encontrados para AIC dentre os modelos gerados para a galáxia NGC3115 num formato “single sersic”.	21
3.3	Variação de BIC e AIC de acordo com os valores obtidos de todos os modelos gerados num formato “single sersic”.	22
3.4	Modelo criado para a galáxia NGC3115 em formato “single sersic” no qual o sersic index (N) pode variar com 3 graus de liberdade, o raio efetivo (Re) com 3, a posição angular (PA) com 1 e a razão entre os eixos (B/A) com 3 graus de liberdade. Nesta figura, a primeira linha se refere ao input, a segunda aos modelos criados e a terceira ao resíduo e as colunas se referem aos comprimentos de onda, indo do ultravioleta (FUV) ao infravermelho próximo (WISE).	22
3.5	Esta figura é o resultado da análise “Residual/Input”, em que o resíduo do modelo criado num formato “single sersic”, com somente uma componente, é dividido pelo input para cada um dos comprimentos de onda. Cada pixel dessa imagem revela se nele houve mais ajuste do que o esperado ou menos e a média dos valores dos pixels dessa imagem revela se este é um bom modelo (i.e. variância pequena).	23

3.6	Esta figura mostra o modelo criado para a galáxia NGC3115 usando duas componentes, dois perfis sersic. Neste modelo, os parâmetros n e Re são mantidos com três graus de liberdade para as duas componentes, e PA e B/A são mantidos com um grau de liberdade. Este modelo será usado como condição inicial para a criação de modelos com três componentes para essa galáxia.	24
3.7	Esta figura é o resultado da análise "Residual/Input", em que o resíduo do modelo criado com duas componentes, dois perfis sersic, é dividido pelo input para cada um dos comprimentos de onda.	24
3.8	Modelo criado para a galáxia NGC3115 usando três componentes, um bojo e dois perfis sersic. O bojo aqui encontrado tem n fixo em 4, para todos os graus de liberdade, definindo assim um perfil de Vancouleurs, o bojo aqui encontrado será mantido para todos os próximos ajustes.	25
3.9	Esta figura é o resultado da análise "Residual/Input", em que o resíduo do modelo criado com três componentes, um bojo e dois perfil sersic, é dividido pelo input para cada um dos comprimentos de onda. Cada pixel dessa imagem revela se nele houve mais ajuste do que o esperado ou menos e a média dos valores dos pixels dessa imagem revela se este é um bom modelo.	26
3.10	Modelo criado para a galáxia NGC3115 usando três componentes, um bojo, um disco e um perfil sersic livre. De acordo com o n encontrado nesse perfil, é possível determinar a qual componente se refere (i.e. se ≈ 1 é disco, se ≈ 0.5 barra).	26
3.11	Esta figura é o resultado da análise "Residual/Input", em que o resíduo do modelo criado com três componentes, um bojo, um disco e um perfil sersic, é dividida pelo input para cada um dos comprimentos de onda.	27
3.12	Modelo criado para a galáxia NGC3115 usando três componentes, um bojo e dois discos.	27
3.13	Esta figura é o resultado da análise "Residual/Input", em que o resíduo do modelo criado com três componentes, um bojo e dois discos, é dividido pelo input para cada um dos comprimentos de onda.	28

Lista de Tabelas

3.1	Resultados das Análises de Melhor Modelo	29
-----	--	----

Sumário

1. Introdução	13
1.1 Objetivos	14
2. Análise	15
2.1 Parâmetros	15
2.2 MegaMorph	16
2.3 Os Métodos Estatísticos usados para encontrar os Melhores Modelos	16
2.3.1 BIC	17
2.3.2 AIC	17
2.3.3 Residual/Input	18
2.4 NGC 3115	18
2.4.1 Criação de modelos com uma componente	19
2.4.2 Criação de modelos com duas componentes	19
2.4.3 Criação de modelos com três componentes ou mais	20
2.4.3.1 Bojo e dois sersic	20
2.4.3.2 Bojo e dois discos ou Bojo, disco e sersic	20
3. Resultados	21
3.1 O melhor modelo com duas componentes	23
3.2 O melhor modelo com três componentes	25
4. Conclusões	31
Referências	33

Introdução

Nesta parte do projeto buscaremos entender como as galáxias se formaram a partir de suas populações estelares. Isto pode ser observado no espectro obtido delas, por exemplo, se as galáxias são dominadas por estrelas velhas, no intervalo óptico, a galáxia emitirá mais na parte vermelha do espectro, isto pode ser visto na figura 1.2, enquanto as mais jovens emitem no azul, o que pode ser visto na figura 1.1. Assim, ao estudar a mesma galáxia em vários comprimentos de onda, é possível determinar a cor da galáxia e de seus componentes separadamente, além da sua forma e tamanho.

Muitas dessas propriedades são obtidas dos dados das imagens, principalmente pela medição de suas magnitudes.

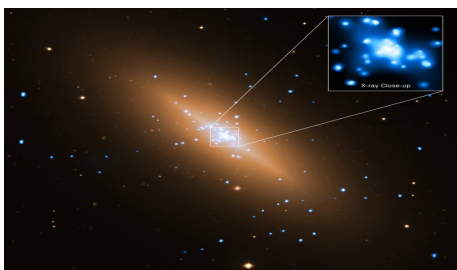


Figura 1.1: Aglomerado de estrelas jovens na galáxia NGC 3115, nesta figura é possível ver a cor do bojo da galáxia e demonstra como isto está relacionado à banda na qual foi obtida esta imagem (6).



Figura 1.2: Aglomerado de estrelas velhas, conhecido como Liller 1, localizado próximo ao centro da Via Láctea (7).

Para este tipo de estudo, foi desenvolvido um programa chamado *MegaMorph* (*Measuring Galaxy Morphology* (4)), este é baseado nos programas já conhecidos *Galfit* e *Galapagos* e se baseia em reconstruir um modelo paramétrico da distribuição de luz da

galáxia. A grande diferença do MegaMorph, é que este se propõe a fazer este estudo decompondo simultaneamente imagens em vários comprimentos de onda da mesma galáxia.

Com ele, é possível otimizar o uso de imagens obtidas em muitos comprimentos de onda pelo modernos *surveys*, pois o processo de fitar a galáxia em muitas bandas aumenta o sinal sobre o ruído, sem necessariamente aumentar o número de parâmetros livres. A combinação de vários comprimentos de onda diminui as barras de erro dos parâmetros fitados e nos permite fazer o ajuste de galáxias menos brilhantes e com “redshifts” mais altos.

1.1 Objetivos

Nesse projeto, o estudo da história e evolução de galáxias está sendo feito a partir dos dados de imagens em vários comprimentos de onda da mesma galáxia, buscando encontrar parâmetros que ajudem a conhecer a estrutura dessa galáxia, como a formação estelar, a cor, tamanho, luminosidade a até mesmo sua massa.

Com isto em mente, este semestre de estudos é dedicado a aprender, entender e aprimorar o uso do programa MegaMorph em uma galáxia com as propriedades já bem conhecidas e imagens já obtidas e não ainda com imagens do J-PLUS ou S-PLUS.

A galáxia estudada foi a NGC 3115 (fig 1.3), uma galáxia lenticular.



Figura 1.3: Galáxia S0 NGC 3115

Análise

As componentes de uma galáxia (bojo, disco, barra, ...) podem ser modeladas separadamente por meio de uma decomposição dos dados da imagem, ou seja, de sua distribuição de luz. Isso pode ser usado para calcular a razão entre a intensidade de luz do bojo e do disco e outros parâmetros que caracterizam essas componentes.

2.1 Parâmetros

Cada galáxia tem um formato, tamanho, luminosidade e diversos outros parâmetros que a definem. São estes parâmetros que tornam a criação de um modelo para uma galáxia, possível.

Para estimar parâmetros morfológicos das galáxias, precisamos decompor a distribuição de luz delas em suas componentes principais, isto porque cada uma das componentes contém diferentes parâmetros e formas.

Se a galáxia possui um disco, por exemplo, alguns parâmetros que o definem são seu ângulo (PA), elipticidade (B/A), magnitude (M), seu achatamento (C0) e até mesmo o seu centro (que pode ser diferente do centro de outras componentes). Para ajustar o bojo de uma galáxia, todos esses parâmetros também são necessários, assim como para uma barra ou qualquer outro componente existente na galáxia.

A diferenciação entre as componentes se dá por meio do perfil Sérsic, ou seja, é este perfil que define se a componente será ajustada como um disco, bojo, barra ou outro.

O perfil Sersic é uma função matemática que descreve como a intensidade (I) de uma galáxia varia com a distância (R) ao centro e é definida por:

$$I(R) = \ln I_0 - kR^{\frac{1}{n}} \quad (2.1)$$

onde I_0 é a intensidade em $R = 0$. O parâmetro n é chamado “Sérsic index” e controla o grau de curvatura do perfil.

Por exemplo, se o perfil é o de um bojo, ele tem $n = 4$ e é chamado perfil de Vancouleurs ou, se o perfil diz respeito a um disco, ele tem $n = 1$ e é um perfil exponencial.

2.2 MegaMorph

Para fazer a decomposição de galáxias, é possível usar o programa MegaMorph (5), uma rotina de ajuste de galáxias. Sua atuação em dados permite decompor a luz das estrelas nas componentes do disco e esferoide. Este pode trabalhar com imagens em diferentes comprimentos de onda simultaneamente.

Com o uso do Megamorph, é possível escolher quantos graus de liberdade cada parâmetro pode ter, ou seja, o quanto pode variar este parâmetro de acordo com a variação dos comprimentos de onda. A função usada para descrever a dependência de todos os parâmetros com relação aos comprimentos de onda são os polinômios de Chebyshev, definidos por:

$$\tilde{p}_i(\lambda, q_{i,j}) = \sum_{j=0}^{m_i} q_{i,j} T_j[z(\lambda)]. \quad (2.2)$$

Onde $T_j[z(\lambda)]$ é o polinômio de Chebyshev de ordem j . λ é o comprimento de onda da imagem, e $q_{i,j}$ são os coeficientes de Chebyshev da série para o parâmetro i .

2.3 Os Métodos Estatísticos usados para encontrar os Melhores Modelos

O método proposto para encontrar a morfologia de galáxias parte de um processo iterativo. Primeiro, foram criados modelos com somente uma componente para essa galáxia. Os resultados obtidos foram usados como condições iniciais para a criação de modelos com duas componentes, e isso é feito sucessivamente até encontrar o melhor modelo para esta galáxia, ou seja, aquele que tem o menor resíduo.

Dessa maneira, se faz necessário definir quais serão os métodos estatísticos utilizados para analisar os modelos e resíduos para encontrar o melhor dentre todos.

2.3.1 BIC

O Critério de Informação Bayesiano (BIC) é definido como a estatística que maximiza a probabilidade de se identificar o verdadeiro modelo dentre os avaliados. O valor do critério BIC para um determinado modelo é dado por:

$$BIC = \chi^2 + k \ln(n)$$

Sendo k , o número de graus de liberdade e n , o número de pixels da imagem. O modelo com menor BIC é considerado o de melhor ajuste.

2.3.2 AIC

O Critério de Informação de Akaike (AIC) admite a existência de um modelo "real" que descreve os dados que é desconhecido, e tenta escolher dentre um grupo de modelos avaliados, o que minimiza a divergência de Kullback-Leibler (K-L).

O valor de K-L para um modelo f com parâmetros θ , em relação ao modelo "real" representado por g é definido por:

$$I(g, f\theta) = \int g(y) \ln \left(\frac{g(y)}{f(y)|\theta} \right) dy$$

Esta divergência está relacionada à informação perdida por se usar um modelo aproximado e não o real.

A estimativa do AIC é dada por:

$$AIC = 2k + \chi^2$$

De mesmo modo que o BIC, o modelo com menor valor de AIC é considerado o modelo de melhor ajuste.

2.3.3 Residual/Input

A imagem "Residual/Input" serve como uma função delta (Δ) para analisar os resultados. Podemos escrever essa estatística como sendo

$$\Delta = \frac{I - M}{I}$$

Onde I é o input e M é o modelo.

Assim, se

- $\Delta = 0$, então $I = M$ e o ajuste é exatamente o esperado.
- $\Delta > 1$, então $M < 0$, ou seja, o modelo está ajustando menos do que deveria do input.
- $\Delta < 1$, então $M > 1$, isto é, o modelo está ajustando mais do que deveria dado o input

Essa análise é feita para cada um dos pixels da imagem e depois é feita uma média para saber o resultado final para toda a imagem.

É este resultado que nos dirá o quão bom é o nosso modelo, dado que só o BIC e AIC não são suficientes para analisar os resultados, pois apesar de eles balancearem um bom χ^2 com um grande número de graus de liberdade, pode acontecer de o resultado encontrado por eles ser ainda com os parâmetros muito livres e isso não refletir o que estamos buscando.

2.4 NGC 3115

Para o estudo desta galáxia, serão utilizadas imagens em 8 bandas. Do projeto "Galex" foram obtidas as imagens em "*FUV (far UV)* - 1520 Å" e "*NUV (near UV)* - 2270 Å", do "Subaru Prime Cam", foi obtida a imagem em "*R-band* - 6800 Å", do projeto "2 MASS" foram obtidas as imagens em "*J-band* - 12500 Å", "*H-band* - 16500 Å" e "*K-band* - 21700 Å", além das imagens com comprimentos de onda de 34000 Å e 46000 Å, obtidas do "WISE data".

2.4.1 Criação de modelos com uma componente

Primeiramente, com o uso da rotina MeGaMorph e do Python, foram criados todos os possíveis modelos para essa galáxia num formato “single sersic”, isto é, supondo que ela teria somente uma componente. Isto foi feito baseado na variação e combinação de todos os graus de liberdade que os parâmetros poderiam assumir.

Dessa forma, os 8 graus de liberdade de quatro parâmetros: sersic index (n), posição angular (PA), razão entre os eixos (b/a) e raio efetivo (R_e), foram combinados de maneiras diferentes a cada iteração, criando milhares de modelos possíveis para essa galáxia.

Os parâmetros encontrados no melhor modelo “single sersic”, isto é, o que tem as melhores estatísticas, são utilizados como parâmetros iniciais para a criação de modelos mais complexos, incluindo outras componentes da galáxia.

Ao finalizar a parte com somente uma componente, decidimos tomar dois caminhos diferentes:

- Criar todos os possíveis modelos com duas componentes, com as diversas combinações de graus de liberdade.
- Usar os resultados do melhor modelo “single sersic” para adicionar mais componentes à essa galáxia usando os mesmos graus de liberdade desse encontrado. Isto é, se o melhor modelo encontrado for com R_e com três graus de liberdade, por exemplo, então esse mesmo valor será usado para todos os próximos ajustes com R_e .

A partir desse ponto, falaremos somente sobre a segunda maneira de analisar os modelos, pois a primeira os resultados ainda não foram obtidos. Deste modo, para as próximas análises falaremos somente de “residual/input”, pois a comparação de BIC e AIC só faz sentido se feita entre muitos modelos. No caso que vamos usar aqui, a análise dos resíduos é mais correta e não permite tantos erros.

2.4.2 Criação de modelos com duas componentes

Após encontrar o melhor modelo com uma componente, é adicionada outra componente com perfil sersic, essas duas vão determinar as principais componentes desta galáxia, uma vez que, se n se aproxima de 4, este é um perfil de Vancouleurs e se n se aproxima de 1, é

um perfil exponencial.

Assim, de mesmo modo que o feito para modelos "single sersic", os parâmetros encontrados por estes modelos com duas componentes são utilizados para gerar modelos com mais componentes.

2.4.3 Criação de modelos com três componentes ou mais

O melhor modelo criado anteriormente é usado como ponto de partida para a criação de modelos mais complexos e bem definidos, esses dois sersic encontrados anteriormente podem ser usados de diferentes maneiras para criar novas componentes para essa galáxia.

2.4.3.1 Bojo e dois sersic

O primeiro ajuste que pode ser feito é simplesmente adicionar um bojo a esses modelos, isto é, mais um modelo sersic, dessa vez com n fixo e igual a 4, isso é usado para descobrir se a galáxia tem outras componentes além de um bojo e um disco. Por exemplo, definindo essa nova componente, é possível descobrir se os outros dois sersic encontrados anteriormente são referentes a dois discos, assim como na Via Láctea, um fino e um espesso. Ou eles podem também representar um disco e uma barra, isso será descoberto nas próximas fases ao restringir os parâmetros de acordo o esperado.

2.4.3.2 Bojo e dois discos ou Bojo, disco e sersic

Ao se definir um bojo, podemos usar os resultados do ajuste para transformar os perfil sersic em discos para a galáxia, para isso, são usadas as seguintes transformações:

- $Mag_{disco} = Mag_{ss} + 0.65$
- $Rd_{disco} = 1.5 \times Re_{ss}$
- $B/A_{disco} = \text{média de } B/A_{ss} \text{ em todas as bandas}$

Assim, se fizermos as transformações para os dois sersic, então acreditamos que existem dois discos nessa galáxia. Se fizermos só uma das transformações, acreditamos que existe um bojo, um disco e alguma outra componente com um sersic diferente dessas duas.

Resultados

De mesmo modo iterativo, conforme são adicionadas mais componentes, são usados os métodos estatísticos definidos em acima para definir o melhor modelo a ser usado como condição inicial para a criação dos modelos com mais componentes. As imagens 3.1 e 3.2 mostram o histograma encontrado com os valores de BIC e AIC para os modelos "single sersic".

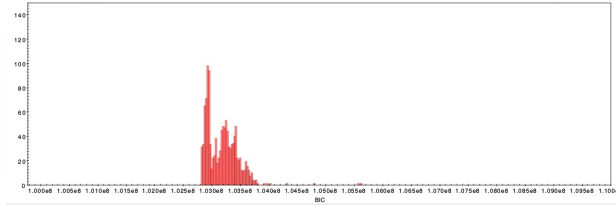


Figura 3.1: Histograma com os valores encontrados para BIC dentre os modelos gerados para a galáxia NGC3115 num formato "single sersic".

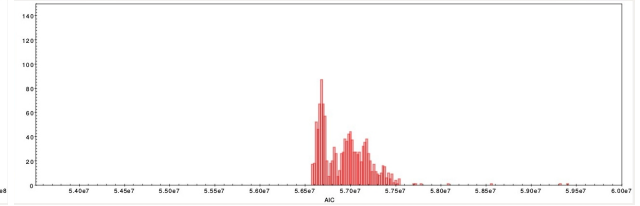


Figura 3.2: Histograma com os valores encontrados para AIC dentre os modelos gerados para a galáxia NGC3115 num formato "single sersic".

Na figura 3.3 é mostrada a variação de BIC e AIC e é dessa relação que retiramos o modelo que minimiza simultaneamente as duas análises.

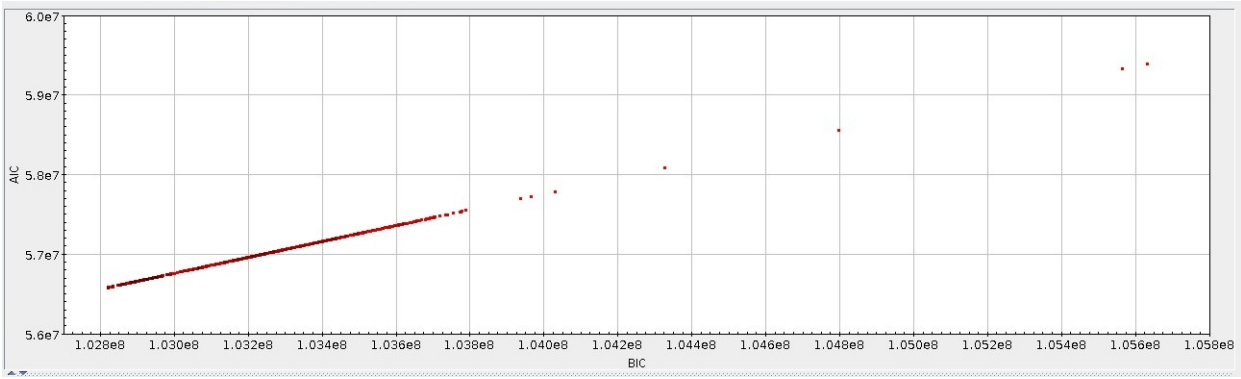


Figura 3.3: Variação de BIC e AIC de acordo com os valores obtidos de todos os modelos gerados num formato “single sersic”.

Deste gráfico, foi possível encontrar o modelo que contém o menor valor de BIC e de AIC.

- O melhor modelo é aquele em que os parâmetros variam com os seguintes graus de liberdade:

$$N - 3, Re - 3, PA - 1, B/A - 1$$

e ele está representado na figura 3.4, são estes graus de liberdade que serão utilizados para definir todos os ajustes a partir de agora.

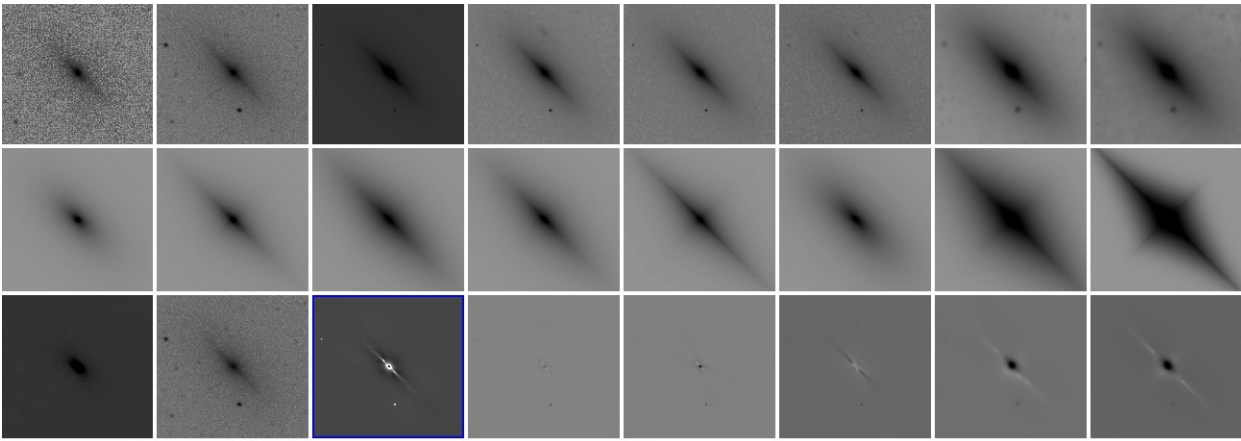


Figura 3.4: Modelo criado para a galáxia NGC3115 em formato “single sersic” no qual o sersic index (N) pode variar com 3 graus de liberdade, o raio efetivo (Re) com 3, a posição angular (PA) com 1 e a razão entre os eixos (B/A) com 3 graus de liberdade. Nesta figura, a primeira linha se refere ao input, a segunda aos modelos criados e a terceira ao resíduo e as colunas se referem aos comprimentos de onda, indo do ultravioleta (FUV) ao infravermelho próximo (WIS).

A figura 3.5 é o resultado “Residual/Input”.

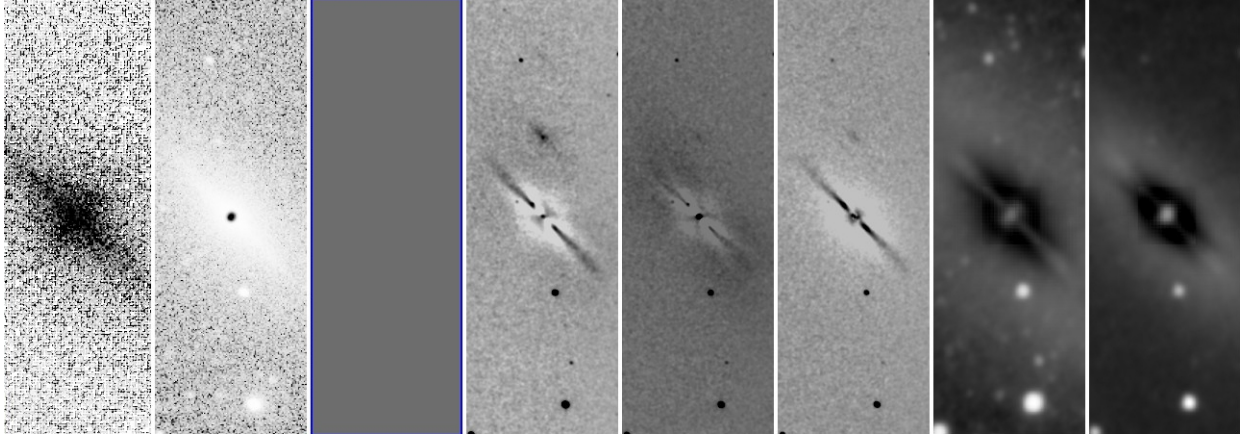


Figura 3.5: Esta figura é o resultado da análise "Residual/Input", em que o resíduo do modelo criado num formato "single sersic", com somente uma componente, é dividido pelo input para cada um dos comprimentos de onda. Cada pixel dessa imagem revela se nele houve mais ajuste do que o esperado ou menos e a média dos valores dos pixels dessa imagem revela se este é um bom modelo (i.e. variância pequena).

Fazendo a média dos valores pos pixels da figura 3.5 do modelo N3-Re3-PA1-B/A 1 em todas as suas componentes obtemos o valor de 0.03 (sendo que as imagens FUV e NUV não são levadas em consideração nessa média, pois seus valores divergem muito do esperado), o que mostra que, na média, este é um bom ajuste para ser usado como condição inicial para criar os modelos com duas componentes, uma vez que ele se aproxima de zero e indica que ainda há mais a ser fitado.

3.1 O melhor modelo com duas componentes

Adicionando uma outra componente com perfil sersic ao melhor modelo anteriormente encontrado obtivemos o que é mostrado na figura 3.6

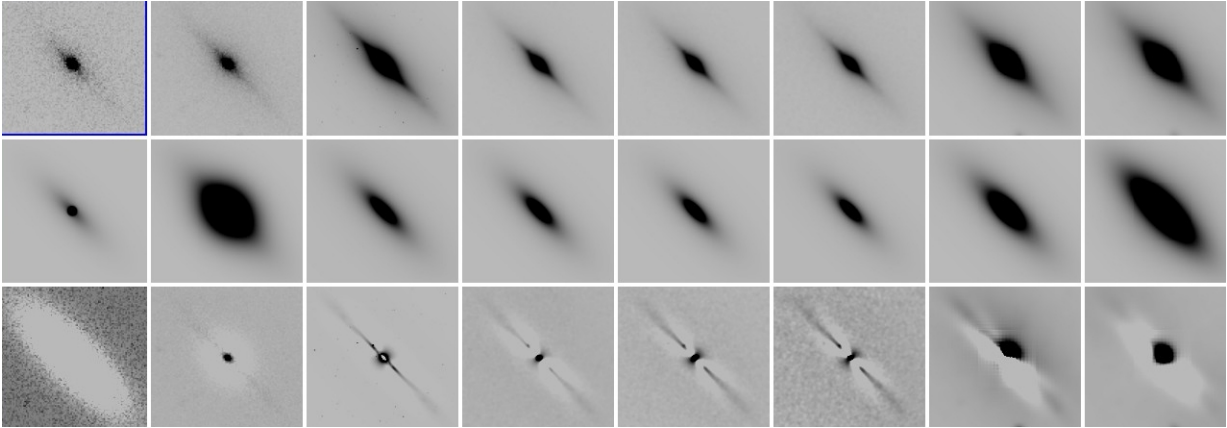


Figura 3.6: Esta figura mostra o modelo criado para a galáxia NGC3115 usando duas componentes, dois perfis sersic. Neste modelo, os parâmetros n e Re são mantidos com três graus de liberdade para as duas componentes, e PA e B/A são mantidos com um grau de liberdade. Este modelo será usado como condição inicial para a criação de modelos com três componentes para essa galáxia.

Como os resíduos desse modelo ainda mostram que existe uma forma remanescente que não está sendo ajustada, este resultado será usado como parâmetro inicial para a criação de modelos com três componentes.

A figura 3.7 é o resultado "Residual/Input".

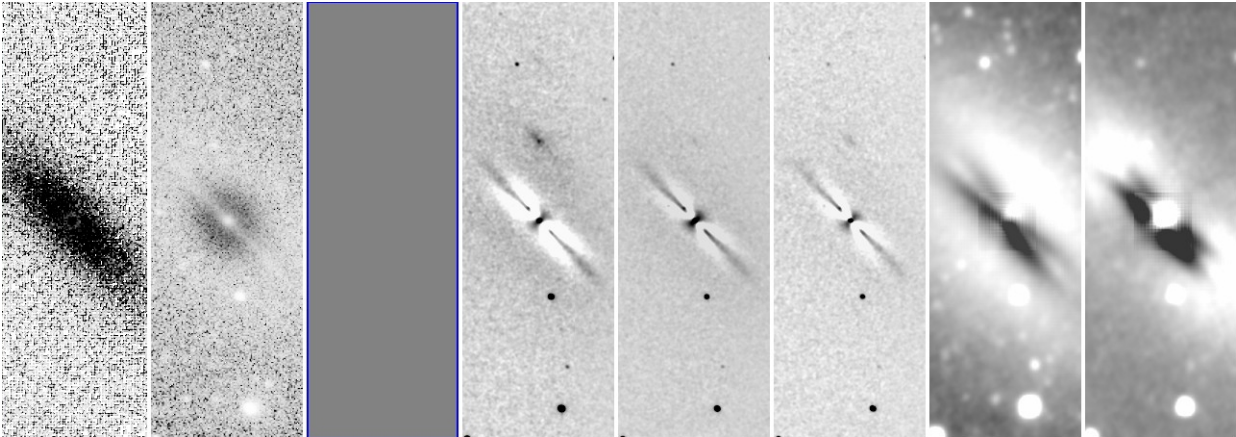


Figura 3.7: Esta figura é o resultado da análise "Residual/Input", em que o resíduo do modelo criado com duas componentes, dois perfis sersic, é dividido pelo input para cada um dos comprimentos de onda.

A média do valor dos pixels nessa análise é 0.03, o que mostra que ainda faltam componentes a serem ajustadas e além disso, os parâmetros devem ser melhorados, uma vez que a segunda componente está ajustando muito mais do que deveria, o que é indicado

pelos pontos pretos no centro da imagem, isso faz com que a variância no valor dos pixels seja maior.

3.2 O melhor modelo com três componentes

O processo desenvolvido para encontrar o melhor modelo com três componentes se dividiu em três partes.

- Manter os dois sersic anteriores e adicionar um bojo

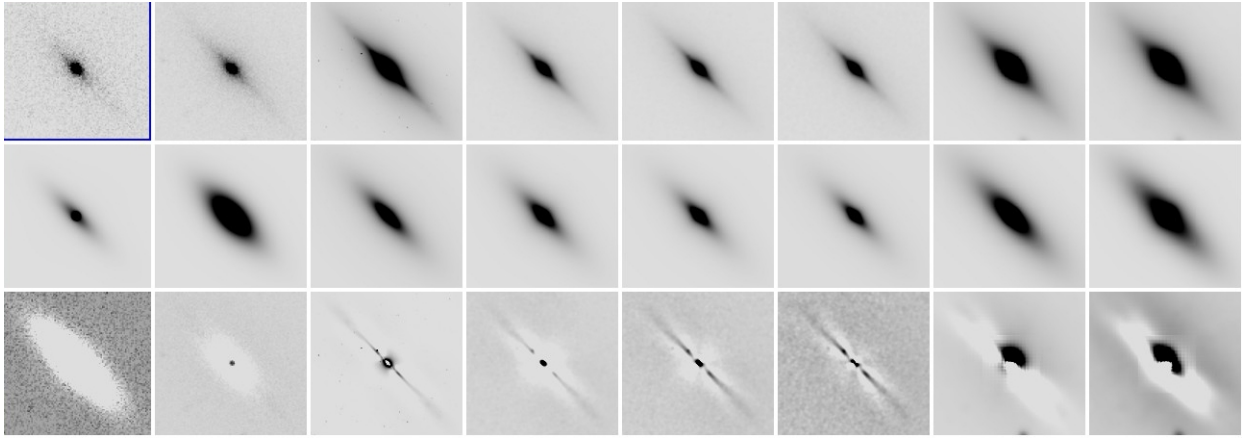


Figura 3.8: Modelo criado para a galáxia NGC3115 usando três componentes, um bojo e dois perfis sersic. O bojo aqui encontrado tem n fixo em 4, para todos os graus de liberdade, definindo assim um perfil de Vancouleurs, o bojo aqui encontrado será mantido para todos os próximos ajustes.

A figura 3.9 é o resultado "Residual/Input".

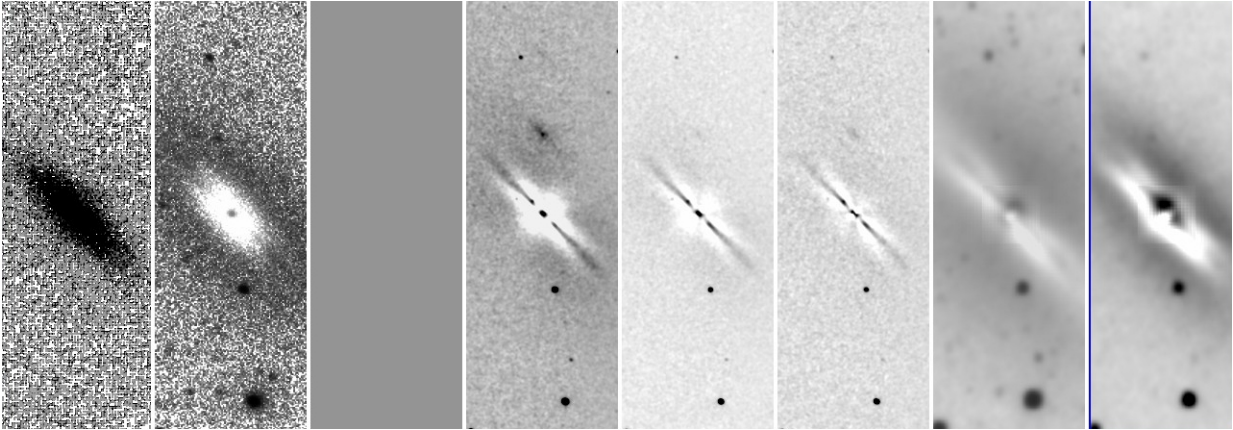


Figura 3.9: Esta figura é o resultado da análise "Residual/Input", em que o resíduo do modelo criado com três componentes, um bojo e dois perfil sersic, é dividido pelo input para cada um dos comprimentos de onda. Cada pixel dessa imagem revela se nele houve mais ajuste do que o esperado ou menos e a média dos valores dos pixels dessa imagem revela se este é um bom modelo.

A média do valor dos pixels nessa análise é 0.04. Este ajuste é próximo de zero, como gostaríamos e mostra seus resíduos mostram um bom ajuste. Como podemos ver também no modelo comparado ao input, a morfologia se assemelha muito àquela esperada.

- Manter o bojo encontrado no ajuste anterior e transformar um dos perfil sersic em um disco.

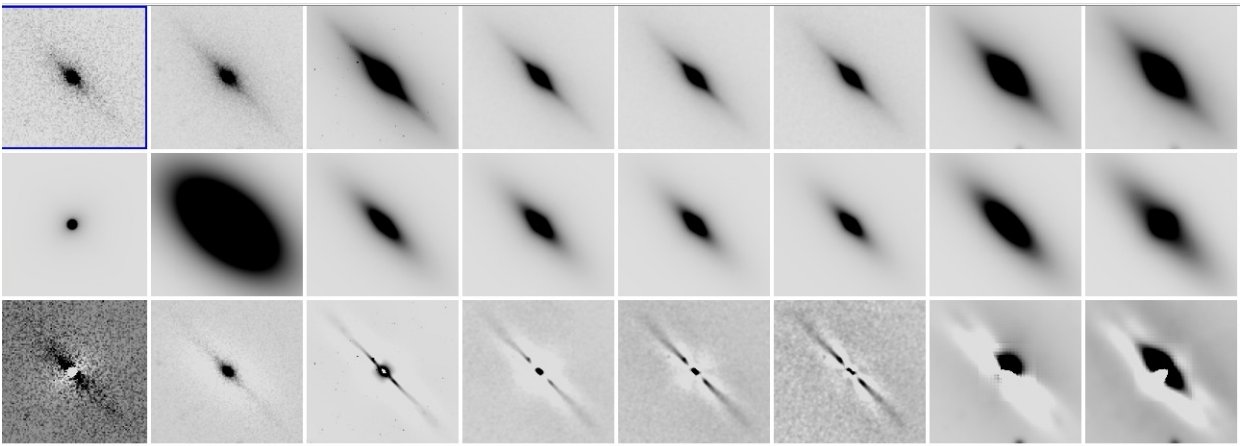


Figura 3.10: Modelo criado para a galáxia NGC3115 usando três componentes, um bojo, um disco e um perfil sersic livre. De acordo com o n encontrado nesse perfil, é possível determinar a qual componente se refere (i.e. se ≈ 1 é disco, se ≈ 0.5 barra).

A figura 3.11 é o resultado "Residual/Input".

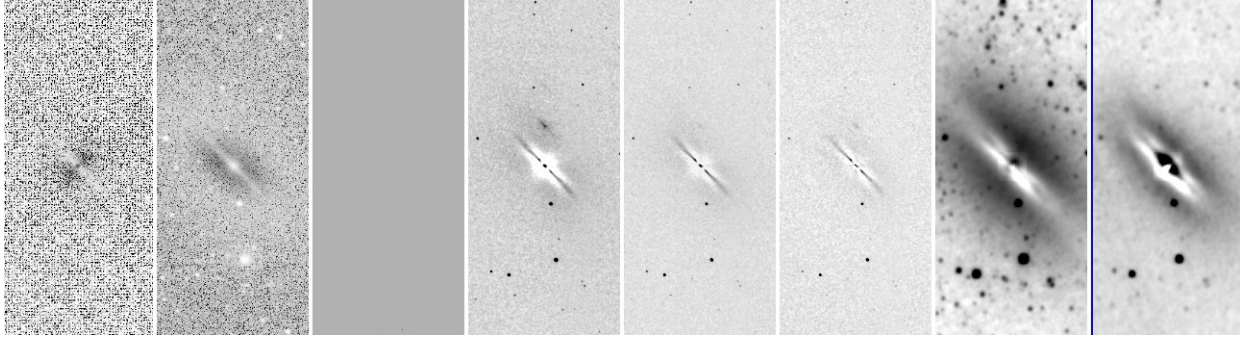


Figura 3.11: Esta figura é o resultado da análise "Residual/Input", em que o resíduo do modelo criado com três componentes, um bojo, um disco e um perfil sersic, é dividida pelo input para cada um dos comprimentos de onda.

A média do valor dos pixels nessa análise é -0.03 . Este resultado, além de mais próximo de zero do que os outros, ainda é negativo, o que mostra que o ajuste criado conseguiu ajustar todas as componentes a qual foi proposto, apesar de em algumas partes o modelo superar a luz do input (o que torna a média negativa).

- Manter o bojo e transformar os dois sersic em dois discos

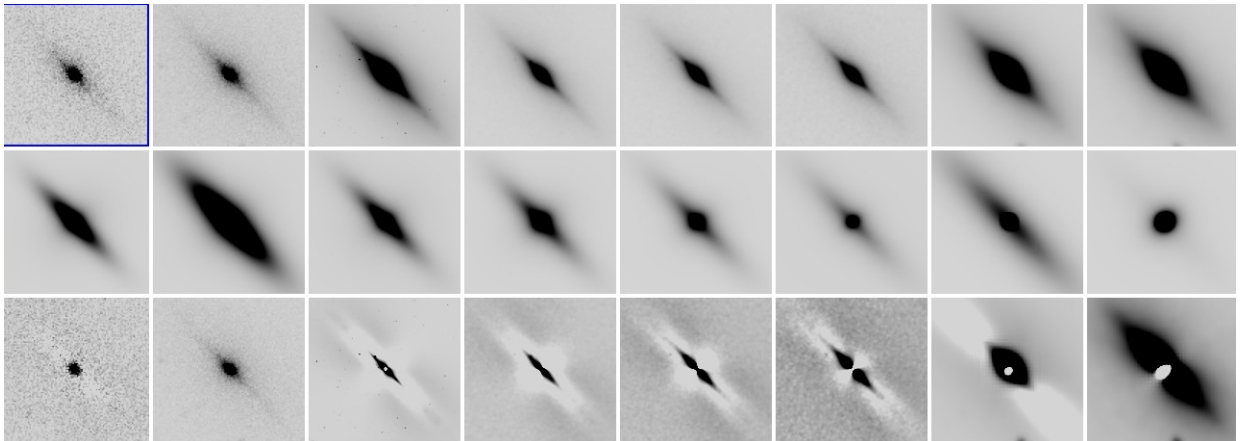


Figura 3.12: Modelo criado para a galáxia NGC3115 usando três componentes, um bojo e dois discos.

A figura 3.13 é o resultado "Residual/Input" aplicado a esse modelo com um bojo e dois discos.

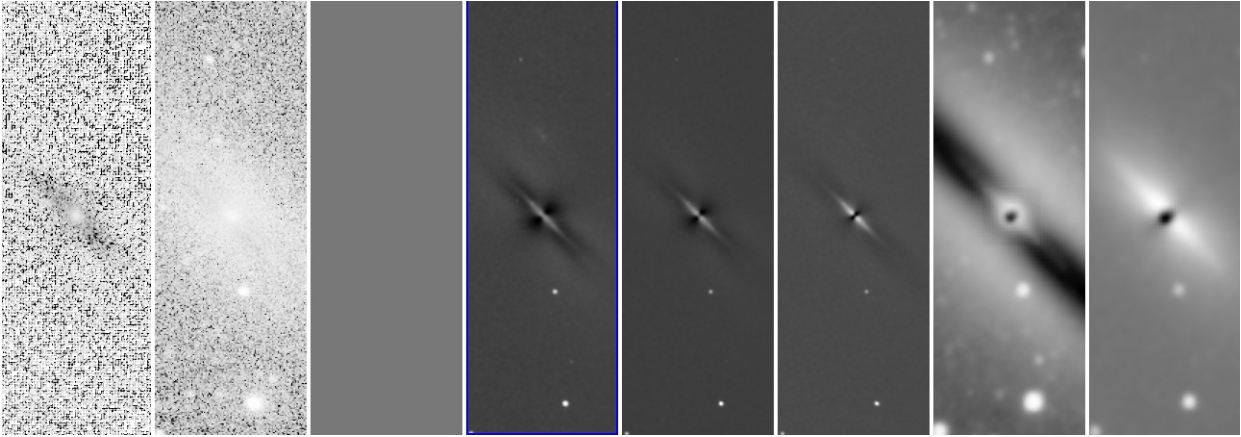


Figura 3.13: Esta figura é o resultado da análise "Residual/Input", em que o resíduo do modelo criado com três componentes, um bojo e dois discos, é dividido pelo input para cada um dos comprimentos de onda.

A média do valor dos pixels nessa análise é -0.07 , o que mostra que esse modelo está ajustando muito mais do que deveria do input e os resíduos mostram que esse ajuste não é feito da melhor maneira, o que indica que provavelmente esta galáxia não possui dois discos.

Ao comparar esses modelos, suas análises e resíduos, vemos que os ajustes com dois sersic e um bojo e um sersic, um disco e um bojo ajustam bem os dados e suas estatísticas estão próximas do esperado.

Dentro do erro, não é possível determinar qual dos dois modelos melhor ajusta essa galáxia. Entretanto, é possível perceber que não é mais necessário adicionar outras componentes, apenas três são capazes de determinar sua morfologia. Estudos mais detalhados, como o que será feito com os resultados dos modelos com diversas combinações de graus de liberdade, serão capazes de determinar qual é essa terceira componente que é ajustada pelo perfil sersic.

Na tabela ?? são apresentados todos os valores das médias das imagens "Residual/Input" para cada um dos comprimentos de onda estudados e a média total delas.

Tabela 3.1 - Resultados das Análises de Melhor Modelo

Modelo	Single Sersic	Dois Sersic	Bojo e dois sersic	Bojo, disco e sersic	Bojo e dois discos
$\text{med}(FUV)$	–	–	–	–	–
$\text{med}(NUV)$	–	–	–	–	–
$\text{med}(R)$	0.386	0.33	0.411	–0.142	–0.481
$\text{med}(J)$	–0.0006	0.00005	0.0005	0.000008	0.0012
$\text{med}(H)$	–0.002	–0.002	–0.002	–0.002	–0.002
$\text{med}(K)$	0.002	–0.002	0.0002	0.0001	0.0004
$\text{med}(3.4)$	–0.054	–0.052	–0.058	–0.048	–0.037
$\text{med}(4.6)$	–0.044	–0.045	–0.044	–0.045	–0.037
Média total	0.03	0.03	0.4	–0.03	–0.07

Conclusões

Em busca de desenvolver uma nova maneira de analisar imagens de galáxias em vários comprimentos de onda, este trabalho foi focado em aprender a usar e interpretar os resultados do programa MegaMorph, rotina de ajuste de modelo de imagens de objetos utilizada para ajustar galáxias em vários comprimentos de onda simultaneamente.

A galáxia que estudamos foi a NGC 3115, uma galáxia S0 que dispunha de imagens em 8 comprimentos de onda, indo do ultravioleta ao infravermelho próximo. Neste estudo, desenvolvemos programas para criar os modelos possíveis para essa galáxia, supondo, primeiramente, que esta conteria somente um bojo como componente, depois, com os resultados obtidos adicionamos outras componentes, sempre usando os resultados do melhor ajuste com menos componentes como condição inicial para os modelos mais complexos. Deixando variar livremente os graus de liberdade de quatro parâmetros (sersic index, posição angular, razão entre os eixos e raio efetivo), foram criados diversos modelos com combinação diferente dos graus de liberdade dos parâmetros, isto foi feito para o modelo com somente uma componente e o melhor modelo encontrado foi utilizado para criar os novos modelos com mais uma componente. Este resultados ainda não estão prontos, então decidimos utilizar os graus de liberdade encontrados como melhores para os modelos com uma componente para todos os seguintes modelos, adicionando componentes uma a uma. O melhor modelo encontrado com uma componente continha n e Re variando com 3 graus de liberdade e PA e B/A com 1 grau de liberdade.

Para analisar quais seriam os melhores modelos, foram utilizadas três estatísticas BIC, AIC e "residual/input", sendo que os melhores modelos são aqueles que minimizam BIC e AIC e que "Residual/Input" é próximo de zero. Para os modelos analisados a partir de duas componentes, a única análise feita foi a "Residual/Input" pois essa é melhor para

analisar resultados isolados, enquanto BIC e AIC são melhores para analisar resultados em conjunto.

Partindo do melhor modelo com uma componente e dessas estatísticas, fizemos modelos com duas componentes (dois sersic) e com esses resultados criamos modelos com três componentes, um somente adicionando um bojo aos sersic, outro mantendo esse bojo e transformando um dos sersic para um disco e outro mantendo o bojo e transformando os dois sersic em discos.

Os resultados que obtivemos foram que as estatísticas são muito boas para os modelos com bojo, disco e sersic e bojo e dois sersic, sendo a análise "Residual/Input" muito próxima de 0, o que mostra que conseguimos extrair o que queríamos das componentes e o programa somente falhou captando mais luz do que o esperado em alguns casos, porém ambos estes modelos mostram que não há estruturas remanescentes a serem ajustadas e que esta galáxia provavelmente tem três componentes somente.

Além disso, pudemos concluir que essas componentes são um bojo, um disco e a terceira têm de ser melhor estudada para a determinação total de sua morfologia. Acreditamos que este estudo pode ser feito com os modelos que estão sendo criados com a variação dos graus de liberdade dos parâmetros e melhores resultados devem ser encontrados num futuro próximo.

Referências Bibliográficas

Douglas, N. G.; Arnaboldi, M.; Freeman, K. C.; Kuijken, K.; Merrifield, M. R.; Romanowsky, A. J.; Taylor, K.; Capaccioli, M.; Axelrod, T.; Gilmozzi, R.; Hart, J.; Bloxham, G.; Jones, D., 2002. *PASP*, **114**, 1234D. *The Planetary Nebula Spectrograph: The Green Light for Galaxy Kinematics*.

A. Cortesi, M. Arnaboldi, L. Coccato, M.R. Merrifield, O. Gerhard, S. Bamford, A. J. Romanowsky, N. R. Napolitano, N. G. Douglas, K. Kuijken, M. Capaccioli, K. C. Freeman, A. L. Chies-Santos and V. Pota, 2013. *A&A*, **549**, A115. *The Planetary Nebula Spectrograph survey of S0 galaxy kinematics: Data and Overview*.

A. Cortesi, M. R. Merrifield, L. Coccato, M. Arnaboldi, O. Gerhard, S. Bamford, N. R. Napolitano, A. J. Romanowsky, N. G. Douglas, K. Kuijken, M. Capaccioli, K. C. Freeman, K. Saha, and A. L. Chies-Santos, 2013. *MNRAS*, **432**, 1010. *Planetary Nebula Spectrograph survey of S0 galaxy kinematics - II. Clues to the origins of S0 galaxies*

B. HÅuÅler; S. P. Bamford; M. Vika; A. L. Rojas; M. Barden; L. S. Kelvin; M. Alpaslan; A. S. Robotham; S. P. Driver; I. K. Baldry; S. Brough; A.M. Hopkins; J. Liske; R. C. Nichol; C. C. Popescu; R. J. Tuffs, 2013. *MNRAS*, **430**. *MegaMorph - multiwavelength measurement of galaxy structure: complete SÅ©rsic profile information from modern surveys*

M. Vika, B. Vulcani, S.P. Bamford, B. HÅuÅler, A.L. Rojas, 2015. *A&A*, **577**. *MegaMorph: classifying galaxy morphology using multi-wavelength SÅ©rsic profile fits*

DisponÅvel em <http://universoobservado.blogspot.com.br/2013/02/ngc-3115-chandra-observa-gas-fluindo-em.html>, acessado em 02/01/2017 Å s 14h.

Ecco Liller 1, l'ammasso globulare dove le stelle collidono, disponível em <http://www.magazine.unibo.it/archivio/2015/07/02/ecco-liller-1-lammasso-globulare-dove-le-stelle-collidono>, acessado em 03/01/2017 À s 18h.