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

Matheus Zaghi de Oliveira

Dinâmica de Galáxias Elípticas através de Cubos de Dados

São Paulo
2018

Matheus Zaghi de Oliveira

Dinâmica de Galáxias Elípticas através de Cubos de Dados

Trabalho de Graduação II apresentado ao Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Área de Concentração: Astronomia
Orientador: Dr. Carlos Eduardo Barbosa
Coorientadora: Prof.(ª) Dr.(ª) Claudia Lucia Mendes de Oliveira

São Paulo

2018

à minha família

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha família, pelo suporte, apoio e motivação constante durante toda minha gradução;

Aos meus orientadores, Carlos e Cláudia, pela paciência e conselhos para a realização deste projeto;

Aos amigos da universidade, pela união e ajuda mútua nos momentos de dificuldade do curso;

À Universidade de São Paulo e ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas pela oportunidade de aprendizado;

À todos os funcionários da universidade, por manter nosso campus um ambiente agradável e receptivo;

À CNPq, pelo apoio financeiro, sob o projeto n^o: 157354/2017-2;

Esta tese/dissertação foi escrita em LaTeX com a classe IAGTESE, para teses e dissertações do IAG.

"*Os dois dias mais importantes da sua vida são: o dia que você nasceu, e o dia que você descobre o porquê.*"

Mark Twain

Resumo

Mediante os avanços da tecnologia nos últimos anos, telescópios mais potentes são capazes de gerar dados de alta qualidade, possibilitando estudos mais precisos sobre a dinâmica do universo. O espectrógrafo *Multi Unit Spectroscopic Explorer* (MUSE), é capaz de gerar um cubo de dados, um arranjo de informação em que é possível analisar o espectro de cada pixel da imagem. O trabalho tem como objetivo principal o estudo e análise da cinemática das estrelas de galáxias elípticas através de cubos de dados. A galáxia utilizada no estudo foi a galáxia elíptica UGC 9799, uma galáxia de tipo morfológico cD. Para determinar a cinemática da galáxia, adotou-se uma parametrização da distribuição da velocidade da linha de visada (DVLDV) que segue uma expansão de Gauss-Hermite. Para determinar os parâmetros que definem o movimento das estrelas, utilizou-se o *software penalized pixel-fitting* (pPXF), no qual foram feitas convoluções entre espectros de populações estelares simples (SSPs) e o espectro de cada pixel do cubo, parametrizados pela velocidade (V), pela distribuição de velocidade (σ) e pelos momentos h_3 e h_4 que definem a cinemática da galáxia. Após ajustar os espectros para a mesma resolução espectral, definir um mesmo comprimento de onda inicial, inserir no espectro das SSPs linhas de emissão que estão presentes na galáxia e também mascarar as linhas da "região do céu", realizou-se os cálculos. Com os parâmetros bem definidos, plotou-se seus mapas e assim fez-se a análise da cinemática. Conclui-se, dos resultados, que o método adotado ajusta bem os espectros. Pode-se afirmar também que a galáxia possui uma baixa variação de distribuição de velocidades (ΔV = 20km/s) comparada com a dispersão de velocidades (σ = 220 km/s). O parâmetro h_3 é nulo para quase toda a galáxia e o parâmetro h_4 possui valores positivos. A galáxia UGC 9799, portanto, possui as característcas de uma *slow-rotator* de alta massa.

Palavras-Chave: Galáxias, elípticas, cubos de dados, cinemática

Abstract

With advances in technology in recent years, more powerful telescopes are capable of generating high-quality data, enabling more accurate studies of the dynamics of the universe. The Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE) spectrograph is capable of generating a data cube, an information arrangement in which it is possible to analyze the spectrum of each pixel of the image. The main objective of this work is the study and analysis of the kinematics of the stars of elliptical galaxies through data cubes. The galaxy used in the study was the elliptical galaxy UGC 9799, a galaxy of the morphological type cD. To determine the kinematics of the galaxy, a parameterization of the line-of-sight velocity distribution (DVLDV) was adopted following a Gauss-Hermite expansion. In order to determine the parameters that define the motion of the stars, the software penalized pixel-fitting (pPXF) was used, in which convolutions were made between single-stellar population (SSPs) spectra and the spectrum of each pixel of the cube, parametrized by velocity (V), by velocity distribution (σ), and by moments h_3 and h_4 that define the kinematics of the galaxy. After adjusting the spectra for the same spectral resolution, defining the same initial wavelength, inserting into the spectrum of SSPs emission lines that are present in the galaxy and also masking the lines of the "sky region", the calculations were performed. The parameters were well defined, their maps were plotted and thus the kinematics analysis was made. From the results it is concluded that the adopted method fits well the spectra.It can also be said that the galaxy has a low variation of distribution ($\Delta V = 20$ km/s) compared to the velocity dispersion ($\sigma = 220$ km/s). The parameter h_3 is null for almost the entire galaxy and the parameter h_4 has positive values. The galaxy UGC 9799 therefore has the characteristics of a high-mass *slow-rotator*.

Keywords: Galaxies, eliptical, cube data, kinematic

Lista de Figuras

1.1 UGC 9799 20

2.1 Espectro de um píxel do cubo de dados. 22
2.2 Resolução espectral da galáxia UGC 9799 23

3.1 Ajuste inicial utilizando pPXF 25
3.2 Mapa sinal-ruído 27

4.1 Ajuste após a otimização 29
4.2 Mapa de velocidade 30
4.3 Mapa da dispersão de velocidades 31
4.4 Mapa do momento h_3 31
4.5 Mapa do momento h_4 32

Sumário

1. Introdução 17
1.1 Galáxias 17
1.2 Cubos de Dados 18
1.3 Distribuição de Velocidades 19
1.4 Dados e Objetivos 20

2. Metodologia 21
2.1 Parametrização Gauss-Hermite da distribuição de velocidades 21
2.2 Aplicação do pPXF nos dados de UGC 9799 21
2.3 Resolução Espectral 23

3. Otimização do Ajuste 25
3.1 Linhas de Emissão 26
3.2 Razão Sinal-Ruído 26

4. Resultados e Análise 29

5. Conclusões 33

Referências 35

Capítulo 1

Introdução

1.1 Galáxias

Atualmente define-se como galáxia uma grande acumulação de estrelas, poeira e gás que se encontra isolada no espaço e cujos constituintes se mantêm unidos entre si devido a mútuas interações gravitacionais (Binney e Tremaine, 1987). Galáxias possuem, em média, uma massa de $10^5 M_\odot$ a $10^{13} M_\odot$. Sabe-se que a existência das galáxias apenas é possível devido à pequenas flutuações na distribuição de matéria nos primeiros segundos do Universo. Tais flutuações permitiram que, ao longo de bilhões de anos que se seguiram, nuvens de gás fossem formadas e, junto com o nascimento das estrelas, deu-se origem às galáxias. No século XX, após um grande avanço na tecnologia e na ciência, foi possível criar telescópios cada vez mais potentes, o que permitiu observar corpos celestes mais distantes com uma melhor resolução. Após um trabalho sistemático de Edwin Hubble (Hubble, 1926), conseguiu-se demonstrar que as galáxias não possuíam todas a mesma natureza. As galáxias observadas possuiam características bem diferentes uma das outras, tais como formato, cor e tamanho. Ao longo de seu trabalho, Hubble criou uma classificação de galáxias de acordo com sua aparência, classificando-as como espirais, espirais barradas, elípticas ou irregulares. Tal classificação morfológica é utilizada até hoje. É possível obter várias informações sobre as galáxias através de sua cinemática. A cinemática de galáxias espirais é bem definida a algum tempo (Rubin e Ford Jr, 1970); as galáxias elípticas, entretanto, tem sido objetos de intensos estudos, que indicam que elas não são tão simples quanto se pensava.

Galáxias elípticas (galáxias com classificação entre $E0$ e $E7$ na escala de Hubble) são caracterizadas por terem uma distribuição de brilho elíptica, por conterem gás e em meno-

res quantidades do que se observa em galáxias espirais. Galáxias elípticas também possuem menos poeira no meio interestelar comparado à galáxias espirais, e é um sistema com uma população estelar mais velha. Galáxias elípticas geralmente possuem uma cor, em bandas largas, avermelhada.

Na última década, com a grande quantidade de informações obtidas através de levantamentos como SAURON, ATLAS^{3D} e CALIFA nos campos de galáxias elípticas, permitiram o estudo detalhado das propriedades dinâmicas de galáxias elípticas (Krajnović et al., 2011). Tais levantamentos, fazem observações *integral field unit* (IFU), em que é possivel observar propriedades dos espectros com boa resolução espacial em duas dimensões (2D), e não apenas em *long-slit* (observação em fenda longa). Antes de tais levantamentos, acreditava-se que galáxias elípticas eram sistemas simples e relaxados. Porém, estes levantamentos realizados com observações espacialmente resolvidas apontam que tais sistemas podem possuir várias propriedades desconhecidas. Por exemplo, descobriu-se que a maioria das galáxias elípticas de massas próximas à Via Láctea são suportadas por rotação, e não por velocidade de dispersão, enquanto que o inverso ocorre com galáxias elípticas mais massivas. Isso levou à divisão das galáxias elípticas em galáxias com pouca rotação (*slow rotator*) e com muita rotação (*fast rotator*), que sugere distinstas vias para a formação destes objetos.

1.2 Cubos de Dados

Os avanços no estudo destes sistemas estão diretamente ligados com os avanços na tecnologia de armazenamento de dados e na instrumentação. O desenvolvimento de CCDs com alta eficiência e maiores campos de visão permite um estudo detalhado da cinemática de galáxias a partir da informação espectroscópica contidas em linhas de absorção. Entre os instrumentos mais recentes, o espectrógrafo MUSE, do European Southern Observatory, se destaca como o mais avançado instrumento da atual geração. O MUSE está instalado no *Very Large Telescope* (VLT), um telescópio de 8 metros, que fica no Chile. O MUSE possui um campo de visão 1×1 arcmin^2 e resolução espacial $0,3$ arcsec.

O espectrógrafo MUSE, além de outras funcionalidades, é capaz de gerar um cubo de dados. Um cubo de dados é um arranjo utilizado para representar dados multidiensionais. No caso dos cubos de dados do MUSE, o cubo é usado para representar as duas dimensões

espaciais mais uma dimensão indicando o comprimento de onda dos espectros, tornando possível uma análise profunda de todo o espaço visualizado.

A imagem original do cubo possui 358 pixels de largura e 320 pixels de altura. O cubo possui 921 pixels no eixo espectral, e cada pixel corresponde a $1,25$Å.

1.3 Distribuição de Velocidades

A dinâmica das estrelas em uma galáxia é definida pela função de distribuição e pelo potencial na qual as estrelas se movem (Binney e Tremaine, 1987). A configuração de equilíbrio das estrelas e do gás traz informações importantes sobre a formação da galáxia. Ainda não se sabe ao certo quais parâmetros observáveis são necessários para obter a função de distribuição nem o potencial gravitacional das estrelas, mas sabe-se que isso não seria possível sem a distribuição de velocidade da linha de visada (DVLDV) em todas as posições espaciais da galáxia. Considerando galáxias como sistemas puramente compostos por estrelas, seu espectro observado é uma soma dos espectros individuais das estrelas com um redshift dado por sua velocidade da linha de visada.

A maioria dos métodos para a obtenção da DVLDV eram baseados em técnicas de Fourier que permitiam a sua obtenção através de um processo de convolução (Bender, 1990). Com o avanço da tecnologia do poder de armazenamento de dados, a distribuição de velocidades pode ser estudada de maneira mais direta que o método de Fourier, onde é possível analisar o efeito da convolução diretamente no espaço de parâmetro. Tal método é mais eficiente pois torna mais fácil excluir as linhas de emissão de gás ou pixels ruins. Este método também faz um ajuste em que o modelo final pode ser facilmente comparado com o espectro que se quer ajustar, além de que uma grande quantidade de espectros de estrelas podem ser usadas para comparar com o espectro da galáxia.

A distribuição de velocidades da linha de visada contém informações sobre a cinemática da galáxia, incluindo a velocidade do sistema V e a dispersão de velocidades σ. Adota-se uma parametrização da DVLDV que segue uma expansão de Gauss-Hermite, definida pela equação

$$\mathcal{L}(V) = \frac{e^{-\frac{1}{2}y^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}}\left[1 + \sum_{m=3}^{M} h_m H_m(y)\right], \tag{1.1}$$

onde $y = (V - < V >)/\sigma$, h_m são os momentos de ordem maior da distribuição e H_m são

os polinômios de Gauss-Hermite de ordem m.

1.4 Dados e Objetivos

A galáxia selecionada para estudo nesse projeto foi a galáxia UGC 9799, Figura 1.1, observada pelo espectrógrafo MUSE (*Multi Unit Spectroscopic Explorer*) na data 16 de junho de 2017. A galáxia se encontra nas coordenadas ($\alpha = 229,185371; \delta = 7,02162$). O tipo morfólogico da galáxia é cD, uma elipse gigante e muito massiva, tipicamente encontrada em centros de aglomerados. A galáxia se encontra a 145 Mpc de distância, possui um $redshift$ $z = 0,34$ e sua velocidade de recessão é 10330 km/s.

O principal objetivo do projeto é investigar a galáxia elíptica a partir de análises de cubos de dados através de uma parametrização Gauss-Hermite. Em particular, deseja-se determinar a cinemática desta galáxia através do estudo das linhas de emissão. Mapeando a distribuição de velocidades na linha-de-visada (velocidade radial, velocidade de dispersão e momentos superiores), será possível compreender se a galáxia é suportada por rotação ou por dispersão, e determinar cenários que expliquem como essa galáxia pode ter sido formada.

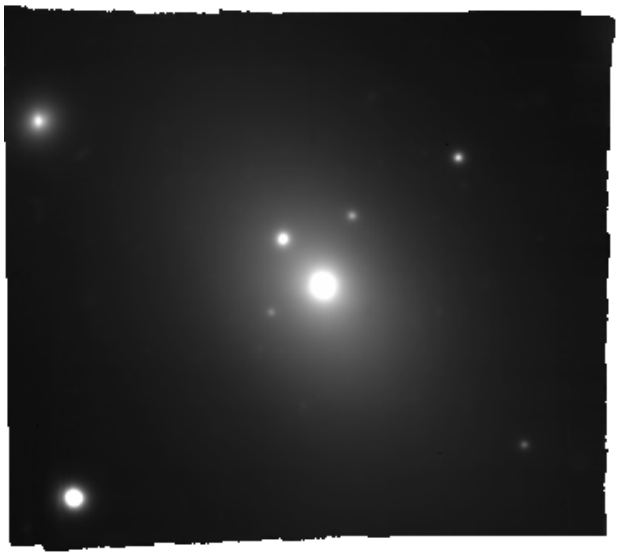

Figura 1.1: Imagem da galáxia UGC 9799. O cubo possui 358 pixels de largura e 320 pixels de altura. O eixo do espectro é composto por 921, onde um pixel corresponde a $1,25\mathring{A}$.

Capítulo 2

Metodologia

2.1 Parametrização Gauss-Hermite da distribuição de velocidades

A obtenção da DVLDV consiste em criar um modelo do espectro da galáxia ($G_{modelo}(x)$) utilizando o *software penalized pixel-fitting* (pPXF, Cappellari e Emsellem, 2004) através de uma convolução da DVLDV parametrizada com templates de espectros $T_k(x)$, onde x é o comprimento de onda que é escalado como x = lnλ, preservando o fluxo. O programa usa uma série de templates $T_k(x)$ para reproduzir o espectro da galáxia pelo modelo:

$$G_{model}(x) = \sum_{k=1}^{N} \omega_k [\mathcal{L}(V) * T_k(x)] + \sum_{l=0}^{L} b_l \mathcal{P}_l(x), \tag{2.1}$$

onde $\omega_k \geq 0$ são os pesos dos templates, $\mathcal{L}(V)$ é a função de alargamento que descreve a DVLDV. O símbolo $*$ indica convolução e $\mathcal{P}_l$ é um conjunto de polinômios de Legendre de peso b_l. Os polinômios foram adicionados com o propósito de ajustar o contínuo dos espectros dos templates com o espectro da galáxia, caso haja uma divergência entre eles.

Os melhores parâmetros a serem ajustados serão aqueles que minimizam o χ^2 utilizando-se uma penalização para que a distribuição tenda a ser Gaussiana. Definindo os parâmetros da velocidade V, da dispersão das velocidades σ, e dos momentos h_3 e h_4 que satisfazendo a equação (2.1) é possível determinar a cinemática da galáxia em cada píxel do cubo. As incertezas calculadas pelo pPXF são baseadas nas variações de χ^2.

2.2 Aplicação do pPXF nos dados de UGC 9799

Os templates utilizados para obter G_{modelo} através da convolução com a série de Gauss-Hermite foram retirados projeto MILES (Vazdekis et al., 2015). Utiliza-se como templates

espectros de SSPs (*simple stellar populations*, populações estelares simples), pois eles possuem um espectro mais próximo do encontrado em galáxia do que espectros de estrelas individualmente. Selecionaram-se espectros de estrelas de idades entre $0,1$ e $14,0$ Gyr, com $[\alpha/\mathrm{Fe}] = 0,00$ e $0,40$ e de todas as metalicidades.

A análise cinemática é feita utilizando apenas a parte óptica do espectro, considerando a região do espectro contida no intervalo $[4749, 5900]$ angstroms. Tal medida foi adotada pois os templates MILES adotados não possuem dados no infravermelho próximo e o infravermelho próximo do espectro MUSE pode conter linhas telúricas e resíduos da subtração do céu que podem atrapalhar o ajuste.

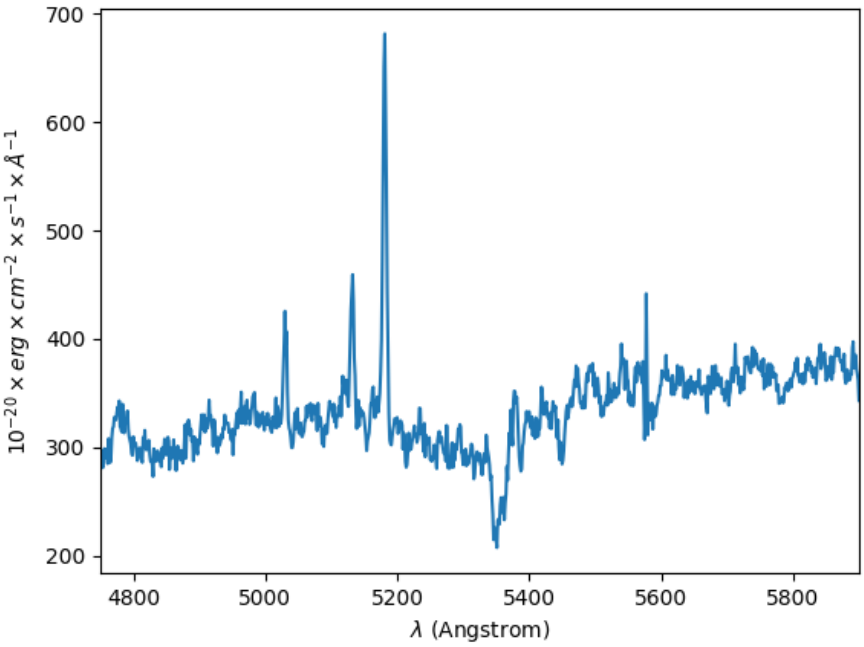

Figura 2.1: Espectro plotado de um píxel próximo ao centro da galáxia.

Antes de se utilizar o programa pPXF para o ajuste da cinemática, foi necessário preparar os dados de maneira adequada para o programa. Foi necessário mudar a escala do espectro para uma escala logaritmica (rebinagem) usando a equação $\mathrm{x} = \ln\lambda$; ajustar a escala dos templates e dos dados para a mesma resolução espectral.

2.3 Resolução Espectral

Cada espectrógrafo, utilizado para realizar as medidas, possui uma resolução espectral própria e seu valor depende da capacidade dos sensores em distinguir entre dois níveis de intensidade do sinal (de M. NOVO, 1992). Os espectros dos templates foram medidos pelo projeto MILES, enquanto o cubo de dados foi feito por uma medida do espectrógrafo MUSE. Uma possível diferença entre as resoluções espectrais do cubo de dados e dos templates pode alterar os resultados dos parâmetros da cinemática da galáxia, uma vez que a distribuição de velocidades depende diretamente da distribuição da Gaussiana. Foi necessário verificar tal valor e ajustar os dados para prevenir qualquer erro nos ajustes.

A resolução espectral dos templates do projeto MILES é $\mathrm{FWHM}_M = 2,51\text{Å}$ para todos os comprimentos de onda. Para verificar se existe uma diferença na resolução espectral do cubo de dados com os templates foi necessário reproduzir a resolução do cubo. Notou-se que a resolução do MUSE varia, como pode ser observado na Figura 2.2, e tal diferença pode comprometer os resultados.

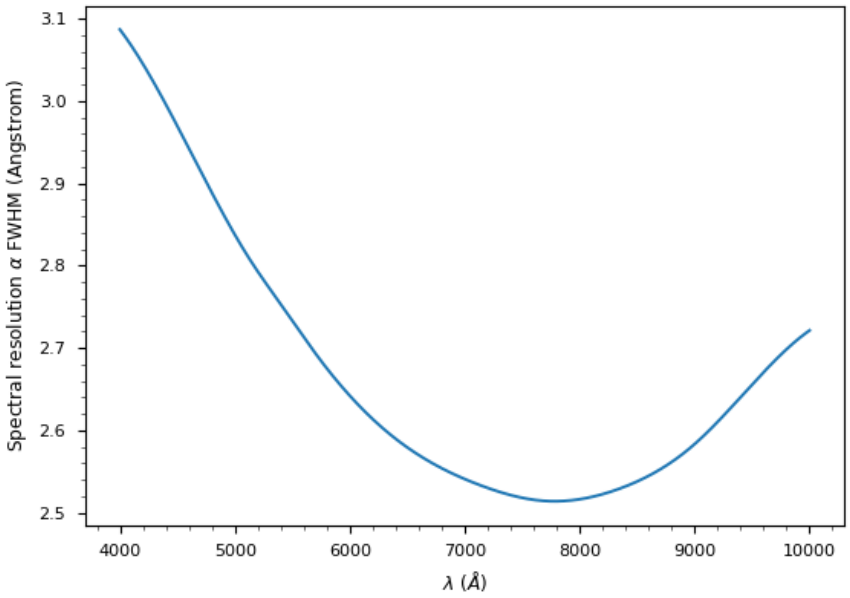

Figura 2.2: Resolução do espectro da galáxia em todos os comprimentos de onda.

O valor máximo da resolução espectral do espectro da galáxia é aproximadamente $\mathrm{FWHM}_C = 2,95\text{Å}$. Para evitar que essa diferença de resolução interfira nos resultados, aumentou-se a resolução espectral de todo o espectro tenha o mesmo valor de FWHM=

$3,00$Å. Também foi necessário degradar a resolução dos templates para também possuírem uma resolução $\mathrm{FHWM}_M = 3,00$Å.

Além da resolução espectral, também foi necessário calcular a diferença entre os comprimentos de onda iniciais para calcular uma correção para a velocidade obtida. Isso foi necessário pois o programa trabalha internamente com pixels e não comprimento de onda.

Capítulo 3

Otimização do Ajuste

Realizando o processo descrito pela Equação 2.1, plotou-se uma imagem do espectro criado com o espectro da galáxia para um determinado pixel.

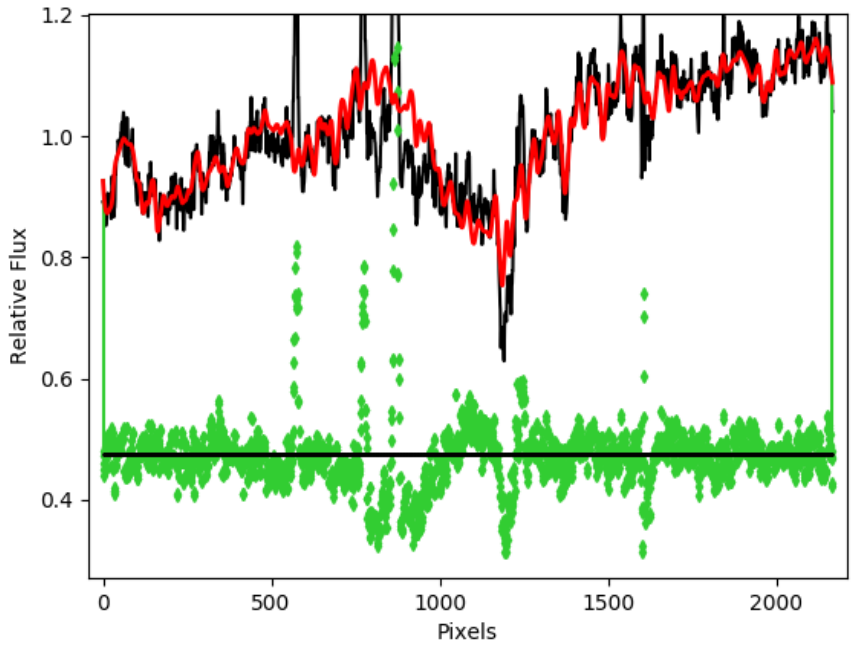

Figura 3.1: Ajuste dos espectros da estrela, em vermelho, com o espetro da galáxia, em preto, para um determinado pixel.

Observando a imagem, nota-se que há regiões específicas em que o ajuste não é bom, especialmente onde há linhas de emissão e absorção no espectro da galáxia que não estão presentes no espectro das estrelas. Fazendo com que o espectro das estrelas se ajuste bem nesses pontos, obtém-se um resultado mais refinado e de maior qualidade.

3.1 Linhas de Emissão

Para resolver o problema de ajuste nas regiões de linhas de emissão, foi necessário primeiro identificar quais linhas de emissão estão presentes no espectro da galáxia e não estão presentes no espectro das estrelas.

As linhas de emissão presentes no espectro da galáxia são as linhas Hβ e [O III]. Para melhorar o ajuste, essas linhas foram adicionadas no espectro das estrelas levando em consideração o redshift da galáxia. Foi necessário inserir as linhas com a mesma resolução espectral de $FWHM = 3,0$.

3.2 Razão Sinal-Ruído

A Razão Sinal-Ruído (RSR) é uma medida utilizada para quantificar a relação de informação recebida do objeto estudado com a informação de fundo. Quanto maior essa relação, maior a qualidade dos dados.

Para selecionar a região do cubo cujos resultados terão uma qualidade boa para serem analisados, calculou-se a razão sinal-ruído para cada pixel do cubo. O método utilizado para este cálculo foi definido em pelo seguinte método (Stoehr, 2010). O sinal S é determinado como a mediana do fluxo do espectro. O ruído R é definido pela Equação 3.1:

$$R = \frac{1,482602 \cdot \overline{r}}{\sqrt{6}}, \tag{3.1}$$

onde r é dado como $r = |2 \times f_i - f_{i-2} - f_{i+2}|$, em que f_i é o fluxo f do píxel de índice i. O sinal-ruido de cada pixel é, então, dado por S/N. A Figura 3.2 representa o sinal-ruído de todos os pixels do cubo.

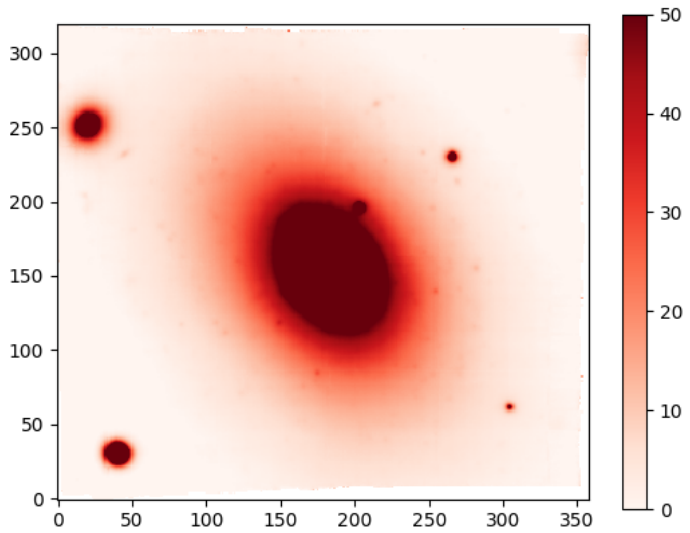

Figura 3.2: Mapa do sinal-ruído do cubo de dados. O valor é maior nas regiões próximas ao centro da galáxia e diminui em pixels mais distantes.

Decidiu-se selecionar pixels com valores $S/R \geq 40$. Portanto, a região utilizada para calcular a cinemática possui largura $x = 85$ e altura $y = 85$ pixels, concêntrica ao cubo de dados.

Com a região onde se encontram bons pixels definida, foi possível realizar os procedimentos descritos no Capítulo 2 e então obter os parâmetros que definem a cinemática da galáxia.

Capítulo 4

Resultados e Análise

Realizando as etapas descritas no Capítulo 2, calculou-se os parâmetros necessário para definir a cinemática da galáxia. A Figura 3.1 representa o ajuste realizado antes de se fazer a otimização. É possível notar que o espectro das estrelas, em vermelho, se ajusta bem melhor ao espectro da galáxia. Há regiões, porém, que o ajuste não é muito bom, principalmente onde há linhas de emissão e absorção.

A Figura 4.1 representa o mesmo pixel após feita a otimização, onde foram inseridas as linhas de emissão e onde as linhas do céu foram mascaradas. A região em azul, na imagem, indica a "região do céu", intervalo onde o espectro foi mascarado e não foi utilizado para o ajuste.

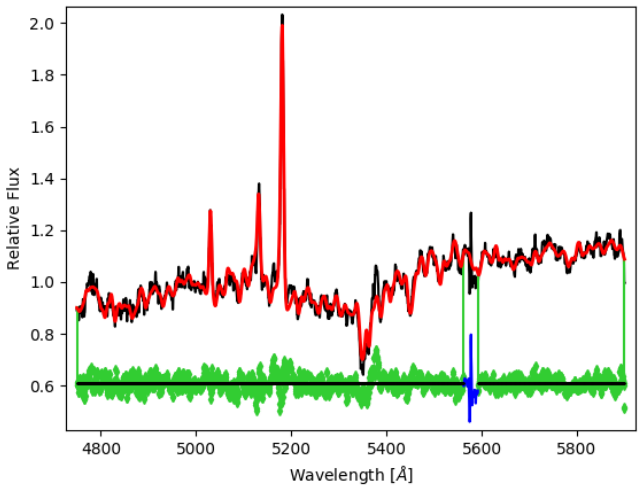

Figura 4.1: Exemplo de saída do programa após realizada a otimização. É possível notar que, após a otimização, as linhas de emissão estão bem ajustadas. A região em azul corresponde à região do céu, onde parte do espectro foi mascarado e não foi levado em consideração para o ajuste.

Obtendo os parâmetros de cada espectro presente no cubo de dados, foi possível criar um mapa para cada um deles. A Figura 4.2 representa o mapa de velocidade para um intervalo $\Delta V = 20$km/s.

O mapa do parâmetro σ está representado na Figura 4.3, onde os valores menores estão representados em azul e os valores maiores em vermelho.

Os parâmetros h_3 eh_4 estão representados nas Figuras 4.4 e 4.5, respectivamente. Novamente, valores menores estão em azul e valores maiores em vermelho.

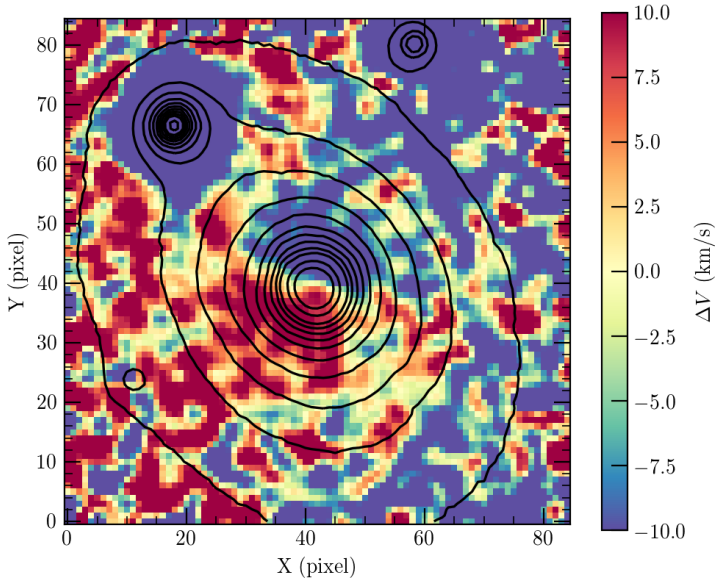

Figura 4.2: Mapa de velocidade da região do cubo estudada. Selecionou-se um intervalo $\Delta V = 20$ km/s. A cor vermelha representa regiões com velocidade de aproximação ($redshift$) e, em azul, regiões com velocidade de afastamento ($blueshift$).

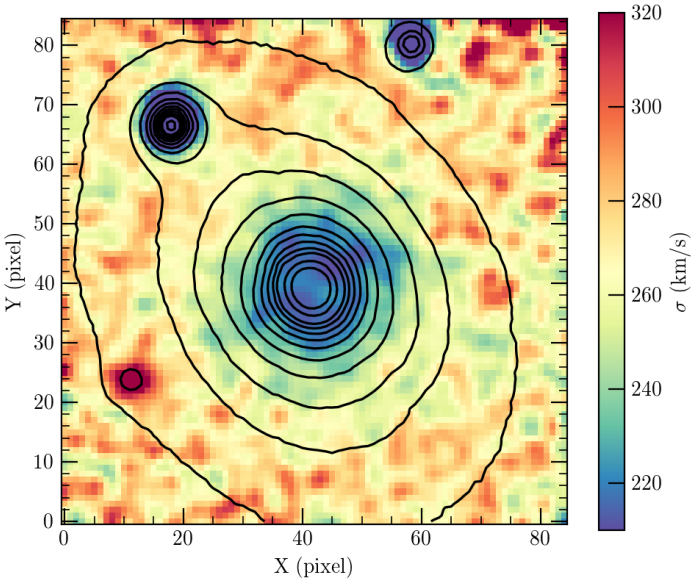

Figura 4.3: Mapa da dispersão de velocidades (σ) da região selecionada. Os resultados foram plotados considerando o intervalo entre 220 *e* 320 km/s. Valores menores de σ estão em azul, enquanto valores maiores estão representados em vermelho.

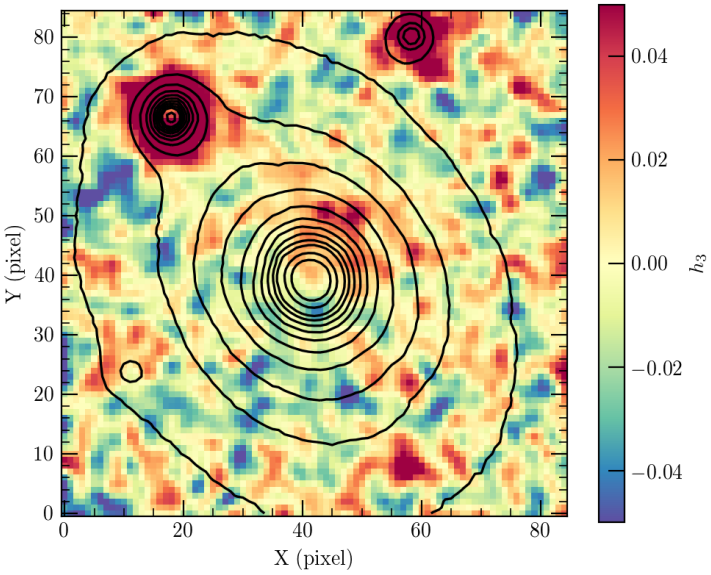

Figura 4.4: Mapa do parâmetro h_3, utilizado para o ajuste. Os resultados foram plotados dentro do intervalo $-0,05$ *e* $0,05$.

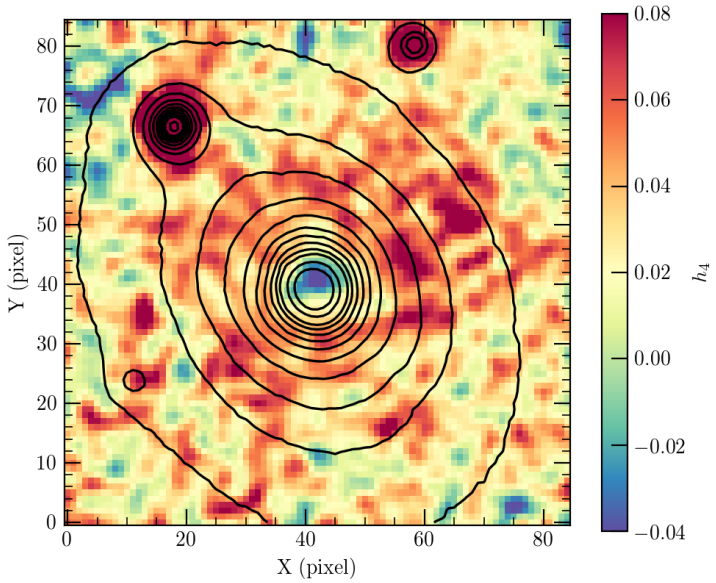

Figura 4.5: Mapa do parâmetro h_4, utilizado para o ajuste. Os valores foram plotados em um intervalo entre $-0,04$ *e* $0,08$

É possível perceber que o espectro obtido se ajusta bem ao espectro do pixel analisado, confirmando que o método utilizado é confiável para determinar a cinemática da galáxia.

Observando a Figura 4.2, é possível notar um eixo de rotação bem definido no centro da galáxia. Na região superior há uma predominância da cor azul ($blueshift$) na parte superior, e uma predominância da cor vermelha ($redshift$) na parte inferior. Nota-se, porém, que seu eixo de rotação não está alinhado com o eixo principal da galáxia.

Na Figura 4.3, nota-se que a dispersão de velocidades é menor nas regiões mais próximas ao centro da galáxia (σ próximo a $220km/s$), e, para regiões mais afastadas, seu valor aumenta.

A velocidade de rotação é relativamente baixa quando comparada à dispersão de velocidades, isso indica que o sistema estudado pode ser classificado como $slow - rotator$.

Não é possível indentificar uma estrutura muito clara do parâmetro h_3. O mais provável é que este momento possua um valor quase nulo neste sistema.

O parâmetro h_4 possui valores positivos em quase todo o sistema. Isso é comum em galáxias de alta massa (Barbosa et al., 2018), como a UGC 9799, e reforça a afirmação desse sistema ser $slow - rotator$.

Capítulo 5

Conclusões

Inicialmente escolheu um cubo de dados de uma galáxia elíptica com uma boa resolução espacial e os espectros das estrelas. A galáxia selecionada para estudo foi a NGC 9799. Realizando os procedimentos descritos no Capítulo 2, criou-se mapas para os parâmetros da Equação 2.1.

Conforme exposto, os resultados obtidos indicam que a galáxia possui uma baixa velocidade de rotação. Os resultados também mostram que essa galáxia é muito massiva, o que é esperado para galáxias desse tipo.

Os processos desenvolvidos para a obtenção dos dados podem ser utilizados para estudar outras galáxias. Os resultados obtidos podem servir como base para o estudo da dinâmica de outras galáxias.

Referências Bibliográficas

Barbosa C., Arnaboldi M., Coccato L., Gerhard O., de Oliveira C. M., Hilker M., Richtler T., Sloshing in its cD halo: MUSE kinematics of the central galaxy NGC 3311 in the Hydra I cluster, Astronomy & Astrophysics, 2018, vol. 609, p. A78

Bender R., Unraveling the kinematics of early-type galaxies-Presentation of a new method and its application to NGC4621, Astronomy and Astrophysics, 1990, vol. 229, p. 441

Binney J., Tremaine S., Galactic dynamics, 1987

Cappellari M., Emsellem E., Parametric recovery of line-of-sight velocity distributions from absorption-line spectra of galaxies via penalized likelihood, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2004, vol. 116, p. 138

de M. NOVO E., Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. Edgard Blücher, 1992

Hubble E., No. 324. Extra-galactic nebulae., Contributions from the Mount Wilson Observatory/Carnegie Institution of Washington, 1926, vol. 324, p. 1

Krajnović D., Emsellem E., Cappellari M., Alatalo K., Blitz L., Bois M., Bournaud F., Bureau M., Davies R. L., Davis T. A., et al., The ATLAS3D project–II. Morphologies, kinemetric features and alignment between photometric and kinematic axes of early-type galaxies, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, vol. 414, p. 2923

Rubin V. C., Ford Jr W. K., Rotation of the Andromeda nebula from a spectroscopic survey of emission regions, The Astrophysical Journal, 1970, vol. 159, p. 379

Vazdekis A., Coelho P., Cassisi S., Ricciardelli E., Falcón-Barroso J., Sánchez-Blázquez P., Barbera F. L., Beasley M., Pietrinferni A., Evolutionary stellar population synthesis

with MILES–II. Scaled-solar and α-enhanced models, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, vol. 449, p. 1177