



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE FÍSICA - LICENCIATURA**

ALAN PATRIQUE DE SOUZA DE OLIVEIRA

**MEDIÇÃO DA MASSA DO BURACO NEGRO SUPERMASSIVO DA GALÁXIA NGC
4546 UTILIZANDO MODELOS ANISOTRÓPICOS DE JEANS**

**CERRO LARGO
2022**

ALAN PATRIQUE DE SOUZA DE OLIVEIRA

**MEDIÇÃO DA MASSA DO BURACO NEGRO SUPERMASSIVO DA GALÁXIA NGC
4546 UTILIZANDO MODELOS ANISOTRÓPICOS DE JEANS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para obtenção do grau de Licenciado em Física da Universidade Federal da Fronteira Sul.
Orientador: Dr. Tiago Vecchi Ricci

**CERRO LARGO
2022**

Oliveira, Alan Patrique de Souza de

MEDIÇÃO DA MASSA DO BURACO NEGRO SUPERMASSIVO DA GALÁXIA NGC 4546 UTILIZANDO MODELOS ANISOTRÓPICOS DE JEANS / Alan Patrique de Souza de Oliveira. – 2022.

38 f.: il.

Orientador: Dr. Tiago Vecchi Ricci.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal da Fronteira Sul, curso de Física - Licenciatura, Cerro Largo, RS, 2022.

1. Buracos Negros Supermassivos. 2. Óptica Adaptativa. 3. Núcleo Ativo de Galáxias. 4. Modelos Anisotrópicos. I. Ricci, Dr. Tiago Vecchi, orientador. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

© 2022

Todos os direitos autorais reservados a Alan Patrique de Souza de Oliveira. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: alanp.oliveira@outlook.com

ALAN PATRIQUE DE SOUZA DE OLIVEIRA

**MEDIÇÃO DA MASSA DO BURACO NEGRO SUPERMASSIVO DA GALÁXIA
NGC4546 UTILIZANDO MODELOS ANISOTRÓPICOS DE JEANS (JAMS)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Física - Licenciatura da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de licenciado em Física.

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em: 07/04/2022

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Tiago Vecchi Ricci – UFFS

Orientador



Prof. Dr. Márcio do Carmo Pinheiro – UFFS

Avaliador



Prof. Dr. Thiago de Cacio Luchese – UFFS

Avaliador

RESUMO

A maioria das galáxias com bojos bem definidos carregam em seu centro um Buraco Negro Supermassivo (BNSM). Tem-se essa ideia porque nelas é notado um Núcleo Ativo da Galáxia (AGN). Esses AGNs foram propostos para explicar a alta luminosidade dos quasares, cuja energia é consequência de um disco de acreção em torno destes buracos negros supermassivos. Buracos Negros (BNs) são regiões no espaço onde o campo gravitacional age tão intensamente que nada consegue escapar, nem mesmo a luz. Diferente dos Buracos Negros Estelares (BNEs), acredita-se que BNSMs foram formados quando o universo ainda estava em sua fase inicial e possuía grande quantidade de gás e aglomerados de estrelas que colapsavam por suas próprias gravidades. Os BNSMs possuem massa superior à massa dos BNEs, podendo chegar a valores entre um milhão e um bilhão de massas solares. Sua detecção e caracterização é importante para entender a influência que possuem na formação e evolução da galáxia hospedeira. Neste trabalho, pretende-se determinar a massa do buraco negro supermassivo da galáxia NGC 4546 usando cubos de dados obtidos com o "Gemini Multi-Object Spectrograph"(GMOS) no modo modo de espectroscopia de campo integral (IFU, de "Integral Field Unit"). Isso será feito calculando o segundo momento de velocidades estelares dos objetos a partir dos Modelos Anisotrópicos de Jeans (JAMs), que assumem apenas um formato axissimétrico e uma inclinação para o bojo, além de uma anisotropia de dispersão de velocidades que é caracterizada pelo achatamento das elipsoides das dispersões de velocidade ao longo do eixo de simetria do objeto. Deseja-se verificar se os dados do GMOS-IFU, que possuem resoluções espaciais limitadas pelo "seeing", são adequados para estudar o movimento das estrelas na região nuclear deste objeto. De maneira específica, deseja-se avaliar as incertezas na determinação da massa do buraco negro supermassivo de NGC 4546 e comparar os resultados com a determinação feita por Ricci & Steiner (2020) usando cubos de dados deste objeto obtidos com a técnica de óptica adaptativa.

Palavras-chave: Buracos Negros Supermassivos. Óptica Adaptativa. Núcleo Ativo de Galáxias. Modelos Anisotrópicos.

ABSTRACT

Most of the galaxies with well-defined bulges carries in its centre a supermassive black hole (SMBH). It has that idea because it is noticed an active galaxy nuclei (AGN). They were proposed to explain the high luminosity from quasars, wich energy is consequence of an accretion disk around those supermassive black holes. Black holes are regions in space where gravitational force acts so intense that nothing can escape, not even light. Different from the stellar black hole, it is believed that SMBH were made when the universe was still in its beggining fase, when it used to have great quantities of gas and star clusters which colapsed by their own gravities. SMBH's mass is superior than black holes mass, reaching values between one million and one billion of solar masses. Their detection and characterizing are important to understand their influence on the formation and evolution of the hosstess galaxy. On this work, it is intended to determine the mass of the supermassive black hole found in the galaxy NGC 4546 by using data cube obtained with GMOS-IFU. This will be done by calculating the second moment of stellar speeds from the objects starting from the Jean Anisotropic Models, which assume an assimetric format and an inclination to the bulge, in addition to a velocity dispersion anisotropy that is characterized by the flattening of the ellipsoids of velocity dispersions along the object's symmetry axis. It is hoped to verify if Gemini Multi-Object Spectrograph GMOS, using the mode integral field unit (IFU) data, wich has spatial resolutions limited by seeing, are appropriate to study the stars movement in the nuclear region of this object. Specifically, it is hoped to evaluate these uncertainties on determination of the mass of the supermassive black hole of NGC 4546 and then compare the results with the determination made by Ricci & Steiner (2020) by using data cube of this object with the adaptive optics technique.

Keywords: Supermassive Black Holes. Adaptive Optics. Active Galaxy Nuclei. Anisotropic Models.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação da Classificação Morfológica proposta por Hubble (Diapasão de Hubble).	14
Figura 2 – Classificação de galáxias Elípticas.	14
Figura 3 – Galáxias de diferentes tipos morfológicos.	16
Figura 4 – Curva de rotação HST/FOC do disco de gás ionizado em M87. As diferentes linhas correspondem a diferentes ajustes de modelo aos dados.	18
Figura 5 – Correlações da massa do BN com a dispersão central de velocidades, luminosidade na banda B.	19
Figura 6 – Imagem de NGC 4546 e imagem média do cubo de dados. À esquerda está a imagem de NGC 4546 nas bandas J, H e K (infravermelho próximo) e à direita está a imagem média do cubo de dados	21
Figura 7 – Espectro observado, modelo e resíduo. Nos painéis superiores da figura, os espectros observados são apresentados em preto e os modelos em vermelho. Nos painéis inferiores, são apresentados os resíduos do ajuste.	22
Figura 8 – Representação de um cubo de dados.	26
Figura 9 – Mapas de velocidade radial e da dispersão de velocidades estelar.	27
Figura 10 – Valores de M_{BH} , M/L e β_z para a primeira PSF.	28
Figura 11 – Valores de M_{BH} , M/L e β_z para a segunda PSF	29
Figura 12 – Vrms e modelos ajustados para cada PSF	30
Figura 13 – Perfis paralelos e perpendiculares à rotação da galáxia	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados MGE para a imagem HST/WFPC2 da NGC 4546. Aqui, I_{Rj} é o brilho superficial central na banda R, σ_j é a dispersão das funções Gaussianas ao longo do semi-eixo maior e q_j é a razão axial observada.	25
Tabela 2 – Valores obtidos para MBH, M/L e β em comparação com os de Ricci & Steiner (2020)	32

LISTA DE ABREVIATURAS

AGN	Active Galactic Nuclei ou Núcleo Ativo de Galáxias
BH	Black Hole
BN	Buraco Negro
BNE	Buraco Negro Estelar
BNSM	Buraco Negro Supermassivo
fpd	Função distribuição de probabilidade
FOV	Field of View ou Campo de Visada
FWHM	Full Width at a Half Maximum ou Largura a meia altura
GMOS	Gemini Multi-Object Spectrographs
HST	Hubble Space Telescope
IFU	Integral Field Unit ou Unidade de Campo Integral
JAMs	Jeans Anisotropic Models ou Modelos Anisotrópicos de Jeans
LINER	Low Ionization Nuclear Emission-Line Regions
MBH	Massa do Buraco Negro
MILES	Medium resolution INT Library of Empirical Spectra
M/L	Razão Massa Luminosidade
MGE	Multi Gaussian Expansion ou Expansão Multi-Gaussiana
NGC	New General Catalogue
NED	NASA/IPAC Extragalactic Database
pPXF	penalized PiXel Fitting
PSF	Point Spread Function
SMBH	Super Massive Black Hole
WFPC	Wide-Field Planetary Camera

LISTA DE SÍMBOLOS

M_{\odot}	Massa do Sol (aprox. $2 \times 10^{30} \text{ kg}$)
ano-luz	Distância ($9.461 \times 10^{15} \text{ m}$)
parsec	1 pc = 3.26 anos-luz
arcsec	Segundos de arco
Å	Angstrom (10^{-10} m)
σ	Dispersão de velocidades

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	GALÁXIAS	13
1.2	OS NÚCLEOS GALÁCTICOS	17
2	METODOLOGIA	21
2.1	A GALÁXIA NGC 4546	21
2.2	PPXF	22
2.3	O MÉTODO DE JEANS	23
2.4	EXPANSÃO MULTI-GAUSSIANA DE IMAGENS FOTOMÉTRICAS DE GALÁXIAS	24
2.5	CUBOS DE DADOS	25
3	RESULTADOS	27
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	33
5	CONCLUSÃO	35
6	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

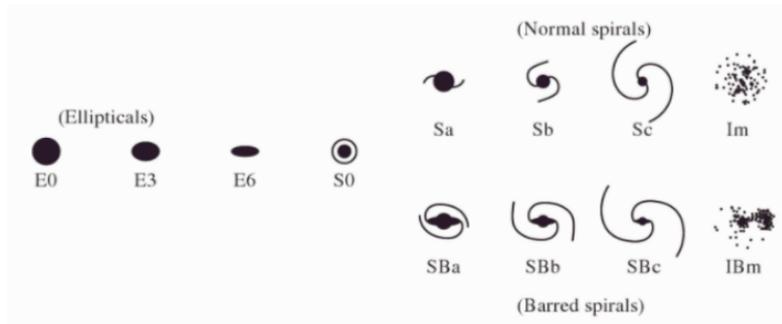
1.1 GALÁXIAS

Galáxias são estruturas complexas, gravitacionalmente ligadas e compostas de estrelas, gás e poeira. O primeiro a propor algo semelhante à definição atual foi Immanuel Kant (1724-1804), que no século XVIII cogitava a hipótese de existirem sistemas estelares muito parecidos com a Via Láctea. Por parecer estarem isolados, Kant deu a esses sistemas o nome de “ilhas no Universo”. Entretanto, sua ideia foi mantida em segundo plano e seguia-se chamando tudo aquilo que era observado no céu de nebulosa, acreditando que tais nebulosas eram componentes de nossa galáxia. Porém, na década de 1920, Edwin Hubble fez importantes observações de variáveis cefeidas pertencentes à galáxia de Andrômeda, que indicaram uma distância de $2.75 \times 10^5 \text{pc}^1$ para este objeto. Como as estimativas para o tamanho da Via-Láctea naquela época eram de aproximadamente 30000pc , ele concluiu que Andrômeda deveria ser um objeto extragaláctico.

No decorrer de seu trabalho, Hubble classificou as galáxias em espirais, espirais barradas, elípticas e irregulares com base em sua aparência. Mais tarde, ele acrescentou galáxias lenticulares como um objeto intermediário entre as elípticas e as espirais. Essa classificação morfológica se tornou a base para um diagrama representativo chamado de Diapasão de Hubble, apresentado na Fig.1. Utilizar o diapasão como esquema evolutivo não é correto, ele serve como referência para entendermos a complexidade das galáxias observadas, de tal maneira que, galáxias do tipo elípticas são mais simples do que as lenticulares. As galáxias espirais corresponderiam ao maior nível de complexidade do Diapasão, sendo as com braços mais abertos às mais complexas dentre todas. Mesmo as galáxias não evoluindo da esquerda para direita no diagrama, pode-se definir algumas características que se alteram sistematicamente ao longo do mesmo. Seguindo o diagrama de Hubble de esquerda para a direita, tem-se uma menor razão bojo/disco (luminosidade), a taxa de formação estelar aumenta nessa direção e a coloração acaba ficando mais azulada (GASTÃO, 2020).

¹ 1 pc = 3.26 anos-luz.

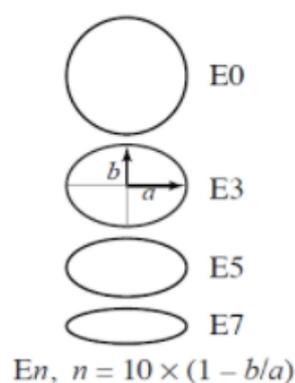
Figura 1 – Representação da Classificação Morfológica proposta por Hubble (Diapasão de Hubble).



Fonte: Retirado de H. Mo, F. van den Bosch & S. White, do Galaxy Formation and Evolution p.39 (2010)

As galáxias elípticas, como o nome sugere, tem a forma de uma elipse (ou possivelmente uma esfera) sem qualquer estrutura bem definida. Elas possuem um formato de elipsoide e seus brilhos advêm, na sua maioria, de populações estelares mais velhas e de alta metalicidade². Galáxias elípticas são designadas "En", onde n é o grau de achatamento. As com aparência esférica são chamadas de E0 e conforme vão ficando mais achatadas o valor de n aumenta até chegarem em E7, conforme esquema mostrado na Fig.2. Galáxias elípticas são classificadas segundo seu grau de achatamento aparente, caracterizados por b/a , onde a e b são os semi-eixos maior e menor, respectivamente. Imagens de galáxias elípticas são apresentadas na Fig.3 (E0, E2, E4).

Figura 2 – Classificação de galáxias Elípticas.



Fonte: Gastão (2020)

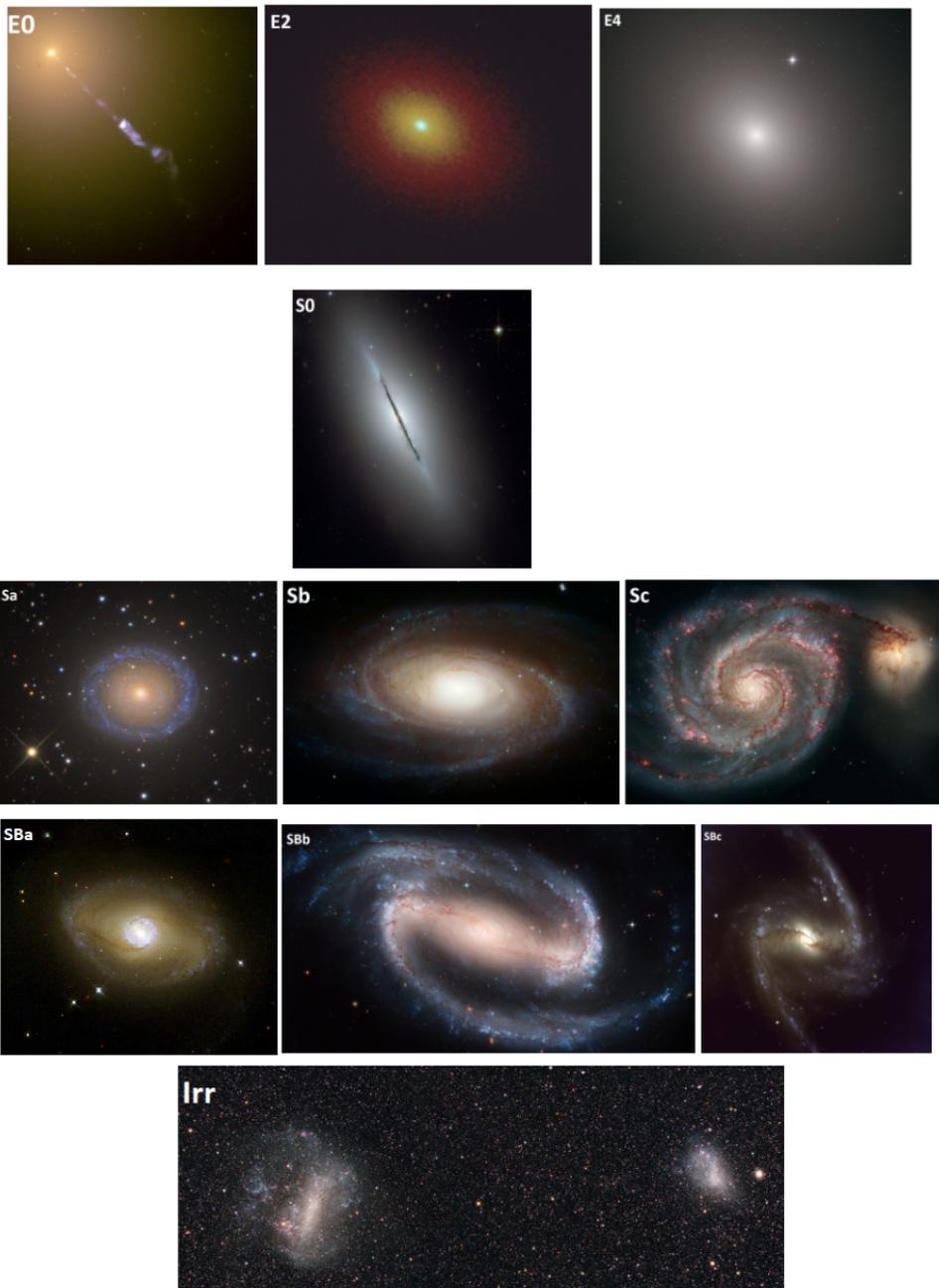
² Ter alta metalicidade indica que as estrelas possuem uma fração maior de elementos químicos mais pesados, quando comparados com o Sol (mais pesados do que H e He).

As galáxias espirais possuem bojo e disco. O bojo possui uma estrutura semelhante às galáxias elípticas, contendo também populações estelares velhas e de alta metalicidade. Existe pouco gás no bojo das espirais, o que resulta em uma área de pouca formação estelar. No disco, são observados braços espirais que começam no centro ou nos extremos de uma barra (espirais barradas). O disco é algo parecido com um antigo vinil, que tem uma espessura expressivamente menor que o diâmetro da galáxia e se distribui de forma a ser cada vez menos espesso em direção às bordas. Os braços espirais provenientes do disco desse tipo de galáxia são classificados em duas classes principais, as normais (Sa, Sb, Sc) e as barradas (SBa, SBb, SBc). Nesses braços espirais e em seus arredores são encontradas populações de estrelas mais jovens, o que indica que galáxias espirais possuem formação estelar ativa na região do disco (PETERSON, 1997). Imagens de galáxias espirais são mostradas na Fig.3(Sa, Sb, Sc, SBa, SBb, SBc).

As irregulares não apresentam nenhuma forma bem definida na sua caracterização, o que pode ser explicado pelo fato de serem galáxias mais novas e com intensa formação estelar. Geralmente, galáxias satélites são irregulares. Dois exemplos são as nuvens de Magalhães, ambas apresentadas na Fig.3(Irr), que apresentam pouca organização em suas estruturas.

As lenticulares tem um formato de disco com um acentuado bojo central. Essas galáxias possuem discos muito fracos, como uma espécie de transição entre as elípticas e as espirais do ponto de vista morfológico e possuem alta razão bojo/disco. Seus discos não apresentam uma estrutura aparente, como braços espirais. Um exemplo é apresentado na Fig.3(SB0).

Figura 3 – Galáxias de diferentes tipos morfológicos.



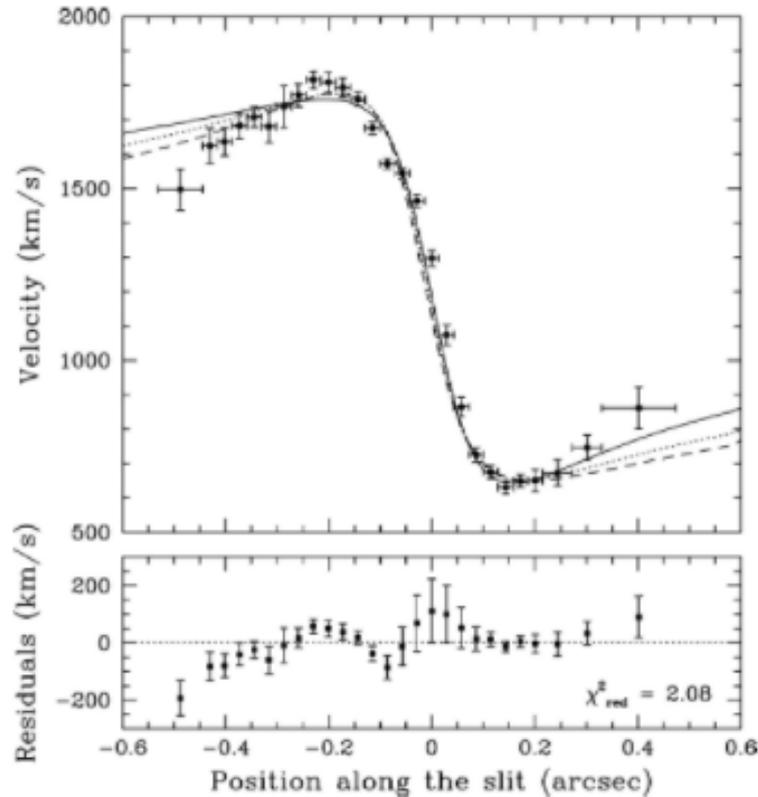
Fonte: <https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/m87-jet.jpg>
<https://esahubble.org/images/opo9209a/>
<https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/potw1911a.jpg>
<https://esahubble.org/images/opo0624a/>
<http://skycenter.arizona.edu/gallery/Galaxies/NGC7217>
<https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/m81-print.jpg>
https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/m51-and-companion_0.jpg
<https://apod.nasa.gov/apod/ap011121.html>
<https://hubblesite.org/contents/media/images/2005/01/1636-Image.html>
<https://www.eso.org/public/brazil/images/eso9920f/?lang>
<http://astro.if.ufrgs.br/galax/lmsmc.jpg>

As galáxias da Fig. 3, estão em ordem de classificação morfológica, o termo NGC que precede sua numeração é o indicativo de qual catálogo está inserida a galáxia em questão. NGC é a abreviatura do New General Catalog (Novo Catálogo Geral de Nebulosas e Aglomerados de Estrelas), a numeração que vem após o NGC, indica a posição da galáxia na lista de galáxias catalogadas. A primeira galáxia é a NGC 4486 ou M87, uma galáxia elíptica gigante do tipo E0; a NGC 0221 ou M32 é uma galáxia anã, também elíptica só que do tipo E2; a NGC 4472 ou M49 é uma galáxia elíptica do tipo E4, é também a galáxia mais brilhante do Aglomerado de Virgem; a quarta galáxia é a NGC 5866, também chamada de M102 ou ainda Messier 102, é uma galáxia lenticular do tipo S0; a NGC 7217 é uma galáxia espiral do tipo Sa; a NGC 3031 ou M81 é uma galáxia espiral do tipo Sb. É também chamada de galáxia de Bode graças ao nome de seu descobridor, Johann Elert Bode; a galáxia NGC 5194 ou M51a é do tipo Sc e possui uma galáxia companheira denominada de M51b. É chamada de Galáxia do Rodamoinho porque possui braços espirais bem definidos, o que é característico de galáxias do tipo Sc; a galáxia NGC 6782 é do tipo SBa; a galáxia NGC 1300 é do tipo SBb; a NGC 1365 é uma galáxia espiral barrada do tipo SBc; e por fim temos as chamadas galáxias Irregulares ou Irr. Na imagem são apresentadas a Grande Nuvem de Magalhães - GNM (à esquerda) e a Pequena Nuvem de Magalhães - PNM (à direita). A GNM e a PNM são galáxias satélites da Via Láctea, isto porque estão no chamado Grupo Local do qual fazemos parte. As galáxias irregulares não possuem regiões bem estruturadas, porém têm intensa formação estelar.

1.2 OS NÚCLEOS GALÁCTICOS

Sabe-se que galáxias com bojos bem definidos possuem buracos negros supermassivos em suas regiões centrais. Em um primeiro momento, eles foram propostos para explicar a alta luminosidade dos quasares, cuja energia emitida é consequência de um disco de acreção em torno destes buracos negros supermassivos. Os quasares são um dos tipos de núcleos ativos de galáxias, que compreendem também as galáxias Seyfert, Blazares e LINERs. Na Fig.3(E0), o jato observado na galáxia elíptica M87 é consequência do núcleo ativo observado neste objeto, que corresponde à emissão síncrotron de elétrons relativísticos espiralando em torno de um campo magnético. Apenas em 2019 foi feita a primeira imagem observacional de um buraco negro supermassivo, o qual está localizado na galáxia M87. Entretanto, em galáxias sem núcleos ativos a detecção dos buracos negros supermassivos é feita a partir do estudo do movimento das estrelas e do gás na região central destes objetos.

Figura 4 – Curva de rotação HST/FOC do disco de gás ionizado em M87. As diferentes linhas correspondem a diferentes ajustes de modelo aos dados.



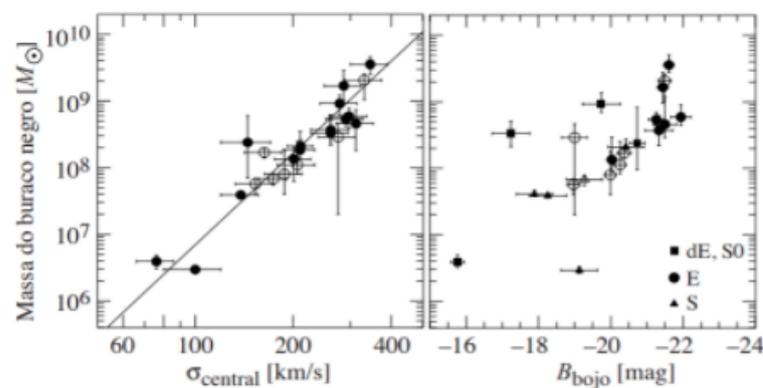
Fonte: Macchetto 1997

Buracos Negros são regiões no espaço onde o campo gravitacional é tão intenso que nada consegue escapar, nem mesmo a luz. Foram detectados através da influência gravitacional que exercem sobre as estrelas e o gás presente na sua vizinhança (BERGMANN, T.S, 2009). Diferente dos buracos negros estelares (BNEs), que são formados a partir de explosões de supernovas em estrelas de alta massa, acredita-se que os Buracos Negros Supermassivos (BNSM) tenham sido formados quando o Universo ainda era jovem e possuía grande quantidade de gás e aglomerados de estrelas se colapsando por sua própria gravidade. Enquanto BNEs têm massas entre cinco a dez vezes a massa do Sol, BNSMs podem chegar a massas que variam de um milhão a um bilhão de vezes a massa do Sol. A detecção e caracterização dos BNSMs é de suma importância, pois observações recentes tem mostrado que eles influenciam a evolução de suas galáxias hospedeiras. O estudo dos BNSMs demonstra haver uma importante função desses quanto à formação e evolução das galáxias. Existe conexão entre a massa do BN central, com (I) a luminosidade B do bojo hospedeiro; (II) com a dispersão de velocidades (GASTÃO, 2020), conforme demonstrado na Fig. 5.

Uma das maneiras mais simples de se determinar a massa de um BNSM é a partir da observação de discos de gás presentes ao redor destes objetos. A cinemática destes discos pode ser explicada por meio de modelos keplerianos. Um exemplo é o disco de gás da galáxia M87. Usando observações com um espectrógrafo de fenda longa instalado no telescópio espacial Hubble, que permite resolver espacialmente o raio de influência gravitacional do BNSM, Macchetto et al. (1997) encontrou para massa do BNSM $= (3.2 \pm 0.9) \times 10^9 M_{\odot}^3$.

A Fig.4 mostra os resultados destas observações juntamente com o modelo que melhor ajustou os dados. Entretanto, deve ser notado que gases no centro de galáxias podem estar sujeitos a movimentos não gravitacionais (e.g. fluxos de gás causados pela atividade nuclear). Por outro lado, a cinemática estelar de galáxias é consequência apenas do seu potencial gravitacional (BNSM + estrelas + matéria escura). Neste caso, um modelo bastante simples pode ser construído usando as equações de Jeans para sistemas axissimétricos (Jeans 1922, mas ver também Binney & Tremaine 2008). Com o advento de observações feitas com espectrógrafos de campo integral, que permitem obter informações sobre um objeto celeste em duas dimensões espaciais e na dimensão espectral de maneira simultânea, o estudo da cinemática estelar com as equações de Jeans tem fornecido valores de massa para o BNSM de maneira bastante robusta (Krajnović et al. 2009; Drehmer et al. 2015; Krajnović et al. 2018; Thater et al. 2019; Ricci & Steiner 2020). Neste caso, também é importante que as observações sejam capazes de resolver espacialmente o raio de influência gravitacional do BNSM.

Figura 5 – Correlações da massa do BN com a dispersão central de velocidades, luminosidade na banda B.



Fonte: Adaptada por Gastão (2020) de Ferrarese (2005)

³ M_{\odot} é o símbolo para massa solar. $1 M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$ kg

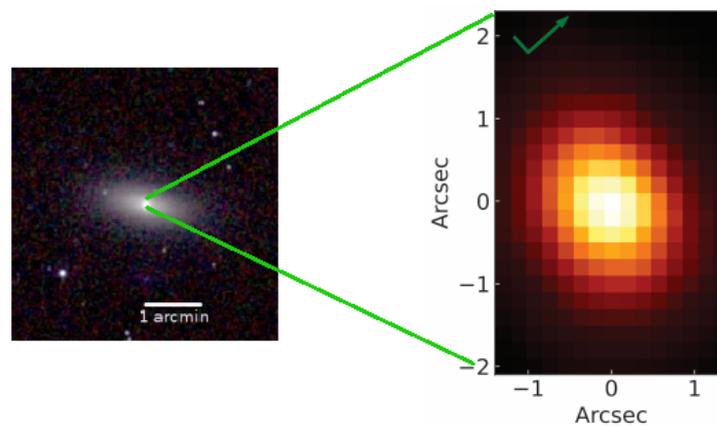
Neste trabalho, será determinada a massa do buraco negro supermassivo da galáxia NGC 4546 usando cubos de dados obtidos com o GMOS-IFU. Isso será feito calculando o segundo momento de velocidade estelare do objeto a partir dos Modelos Anisotrópicos de Jeans (JAMs), que assumem apenas um formato axissimétrico e uma inclinação para o bojo, além de uma anisotropia de dispersão de velocidades que é caracterizada pelo achatamento das elipsóides das dispersões de velocidade ao longo do eixo de simetria do objeto. Deseja-se verificar se os dados do GMOS-IFU, que possuem resoluções espaciais limitadas pelo "seeing", são adequados para estudar o movimento das estrelas na região nuclear deste objeto. De maneira específica, deseja-se avaliar as incertezas na determinação da massa do buraco negro supermassivo de NGC 4546 e comparar os resultados com a determinação feita por Ricci & Steiner (2020) usando cubos de dados deste objeto obtidos com a técnica de óptica adaptativa.

2 METODOLOGIA

2.1 A GALÁXIA NGC 4546

O objeto de estudo deste trabalho é a Galáxia NGC 4546, que foi descoberta em 1786 por William Herschel, faz parte do chamado aglomerado de Virgo e está localizada a uma distância de aproximadamente 14 Mpc¹. Alguns trabalhos mencionam uma barra (GALLETTA, 1987) e a classificam como lenticular barrada SB0. Esta foi uma das primeiras galáxias na qual o fenômeno de contra-rotação entre gás e estrelas foi observado. Há indícios de que uma fusão de NGC 4546 com uma galáxia satélite (NORRIS; KANNAPPAN, 2011) tenha causado esse acréscimo de gás que rotaciona no sentido contrário com relação às estrelas. A NGC 4546 possui também um núcleo ativo do tipo LINER (RICCI et al. 2014b).

Figura 6 – Imagem de NGC 4546 e imagem média do cubo de dados. À esquerda está a imagem de NGC 4546 nas bandas J, H e K (infravermelho próximo) e à direita está a imagem média do cubo de dados



A massa do buraco negro em seu centro foi medida utilizando dados de espectroscopia de campo integral no infravermelho próximo usando o sistema de óptica adaptativa (Ricci & Steiner 2020). Tal técnica produz dados com resolução espacial próxima ao limite de difração do telescópio, uma vez que reduz os efeitos de distorção na imagem causados pela atmosfera terrestre. Isto permitiu obter informações precisas da região interna ao raio de influência gravitacional do BN deste objeto. Usando modelos anisotrópicos de Jeans, Ricci & Steiner (2020) encontraram $MBH = (2.56 \pm 0.16) \times 10^8 M_{\odot}$ (intervalo de confiança de 3σ).

¹ Distância obtida da página "NASA Extragalactic Database"(NED - <https://ned.ipac.caltech.edu/>)

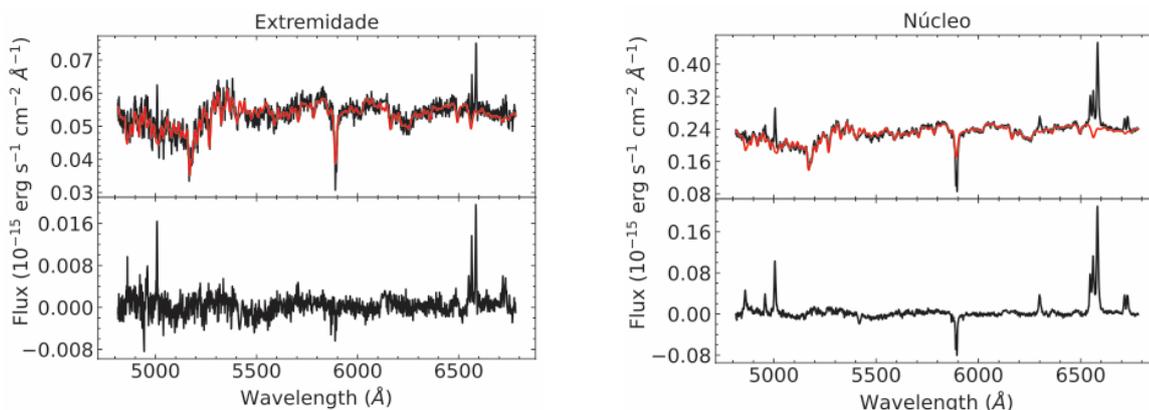
2.2 PPXF

As informações da cinemática estelar de uma galáxia são obtidas a partir do perfil de linhas em absorção presentes no espectro destes objetos. Um dos métodos mais utilizados na literatura é o "penalized PiXel Fitting" (pPXF, Cappellari & Emsellem 2004). O pPXF assume que o espectro estelar de uma galáxia é determinado pela combinação de populações estelares com diferentes idades e metalicidades. O resultado dessa combinação é depois convoluído por uma função gaussiana. O resultado dessa convolução informará a velocidade radial do espectro e a dispersão de velocidade estelar.

A base de populações estelares usada nesse trabalho é baseada na biblioteca de espectros estelares MILES (Vazdekis et al. 2015). Essa base possui populações estelares com idades entre 30×10^6 e 13×10^9 anos, metalicidade entre 0.2 e $2.4 Z_{\odot}^2$ e razão α/Fe^3 entre 0.0 e 0.4.

A Fig. 7 mostra dois exemplos de ajuste feito com o pPXF no cubo de dados de NGC 4546: um na região nuclear da galáxia e outro na extremidade inferior direita do campo de visada (FOV, do inglês "field of view"). Note que o pPXF descreve apenas o espectro estelar da galáxia (contínuo mais linhas em absorção). As regiões do espectro que contém linhas em emissão, provenientes do gás ionizado de NGC 4546, e o duplete de Na I λ 5890, 5896, originado no meio interestelar do objeto, devem ser mascaradas previamente ao ajuste. É possível notar que o ajuste feito pelo pPXF descreve adequadamente o espectro estelar de NGC 4546.

Figura 7 – Espectro observado, modelo e resíduo. Nos painéis superiores da figura, os espectros observados são apresentados em preto e os modelos em vermelho. Nos painéis inferiores, são apresentados os resíduos do ajuste.



(a) Espectro da extremidade inferior direita do cubo

(b) Espectro da parte nuclear do cubo

² Z_{\odot} se refere a uma metalicidade solar

³ Essa razão corresponde à quantidade de elementos α em uma estrela com relação a quantidade de Ferro. Diferentes valores para esta razão indicam diferenças na escala do tempo de formação das populações estelares (Thomas et al. 2005)

2.3 O MÉTODO DE JEANS

Galáxias são formadas por uma quantidade enorme de estrelas, cada uma delas variando suas respectivas posições $x = (x_1, x_2, x_3)$ e velocidades $v = (v_1, v_2, v_3)$. No espaço de fases (\mathbf{x}, \mathbf{v}) , é possível definir uma função distribuição de probabilidades (fdp) $f(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ para as estrelas de uma galáxia. Uma importante hipótese é assumir que essa fdp tenha uma variação suave ao longo do espaço de fases, uma vez que a posição e a velocidade de uma estrela é afetado apenas pela massa interna a sua órbita, i.e., seu movimento não é afetado por uma estrela próxima qualquer de maneira individual. Em outras palavras, assume-se que não há colisões de estrelas em uma galáxia. A partir disso, podemos imaginar o que acontece com o número total de estrelas dentro de um volume V no espaço de fases com superfície S . Se não há criação nem destruição de estrelas, então a variação da fdp nessa região do espaço de fases é dada apenas pelo fluxo de estrelas que entram e saem deste volume. Em outras palavras, a fdp deve obedecer a equação da continuidade para a densidade de estrelas no espaço de fases. Tais argumentos, aliados ao fato de que $\dot{v} = -\frac{\partial \phi}{\partial x}$, onde ϕ é o potencial gravitacional da galáxia, resulta na equação de Boltzmann para um sistema não colisional, também conhecida como equação fundamental da dinâmica estelar, dada por (Binney & Tremaine 1987, 4-13):

$$\sum_{i=1}^3 \left(v_i \frac{\partial f}{\partial x_i} - \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial v_i} \right) = 0. \quad (2.1)$$

A partir da equação 2.1, é possível derivar uma relação entre as velocidades quadráticas médias das estrelas com o potencial gravitacional da galáxia. Essas equações foram derivadas pela primeira vez por Jeans (1922). Neste trabalho, iremos seguir com a derivação apresentada por Cappellari (2008). Considerando um sistema de coordenadas cilíndricas (R, z, φ) , e assumindo que este sistema possui simetria axial:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \varphi} = \frac{\partial f}{\partial \varphi} = 0 \quad (2.2)$$

A equação (2.1) pode ser reescrita como:

$$v_R \frac{\partial f}{\partial R} + v_z \frac{\partial f}{\partial z} + \left(\frac{v_\varphi^2}{R} - \frac{\partial \phi}{\partial R} \right) \frac{\partial f}{\partial v_R} - \frac{\partial \phi}{\partial z} \frac{\partial f}{\partial v_z} - \frac{v_R v_\varphi}{R} \frac{\partial f}{\partial v_\varphi} = 0. \quad (2.3)$$

Multiplicando a eq.(2.3) por v_R e por v_z e integrando para todas as velocidades, vamos obter duas equações de Jeans (Jeans 1922, 4-29) que são:

$$\frac{\overline{v v_R^2} - \overline{v v_\phi^2}}{R} + \frac{\partial(\overline{v v_R^2})}{\partial R} + \frac{\partial(\overline{v v_R v_z})}{\partial z} = -v \frac{\partial \phi}{\partial R} \quad (2.4)$$

$$\frac{\overline{v v_R v_z}}{R} + \frac{\partial(\overline{v v_z^2})}{\partial z} + \frac{\partial(\overline{v v_R v_z})}{\partial R} = -v \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.5)$$

Entretanto temos quatro incógnitas ($\overline{v_R^2}$, $\overline{v_\phi^2}$, $\overline{v_z^2}$ e $\overline{v_R v_z}$) para apenas as duas equações 2.4 e 2.5 o que impossibilita a sua resolução. Resultados experimentais sugerem que $\overline{v_R v_z} = 0$ e que a razão entre $(\overline{v_R^2})/(\overline{v_z^2})$ é uma constante a ser determinada a partir das observações de Cappellari et al, MNRAS, 2007 379, 418 e Cappellari 2008. A partir das soluções das equações 2.4 e 2.5 com tais vínculos experimentais, é possível construir mapas da velocidade quadrática média em função do potencial gravitacional da galáxia, que depende da massa estelar do objeto somada à massa do BN central. De acordo com Cappellari (2008), uma boa representação observacional da velocidade quadrática média $V_{RMS} = \sqrt{V_R^2 + \sigma^2}$, onde V_R e σ são a velocidade radial e a dispersão de velocidades medidas para um objeto, respectivamente.

2.4 EXPANSÃO MULTI-GAUSSIANA DE IMAGENS FOTOMÉTRICAS DE GALÁXIAS

Para determinar a parte estelar do potencial gravitacional de uma galáxia é necessário saber qual a real distribuição das estrelas no objeto. Tal informação deve ser extraída a partir de imagens fotométricas. Entretanto, tais imagens fornecem diretamente apenas a distribuição superficial de brilho de uma galáxia, que é a projeção bi-dimensional da densidade volumétrica de luminosidade do objeto. Para se determinar a densidade volumétrica em massa, é necessário realizar a deprojeção da distribuição superficial de brilho e calcular a razão massa-luminosidade (M/L) das estrelas na galáxia. Neste trabalho, iremos assumir que M/L é constante ao longo de todo o FOV de NGC 4546. Tal parâmetro deverá ser determinado a partir da modelagem da cinemática estelar deste objeto. Para a deprojeção, iremos considerar que a distribuição superficial de brilho da NGC 4546 pode ser descrita por uma soma de funções Gaussianas bi-dimensionais. Tal método é chamado de expansão multi-gaussiana (MGE, Emsellem et al., A&A, 1994, 285, 723, Cappellari, MNRAS, 2002, 333, 400). A vantagem de se usar tal metodologia é que, matematicamente, a deprojeção de uma função Gaussiana bi-dimensional é uma função Gaussiana tri-dimensional. Isso indica que se o brilho superficial de NGC 4546 pode ser descrito pela soma de N Gaussianas 2D, a densidade volumétrica desse objeto será dada pela soma de N Gaussianas 3D. Neste procedimento, assume-se que a galáxia possui um formato axissimétrico e uma inclinação do eixo de simetria com relação à linha de visada no céu.

Na prática, é importante que as imagens fotométricas de um objeto onde deseja-se determinar a massa do BN central possuam alta resolução espacial, i.e. o raio de influência gravitacional deste objeto deve ser espacialmente resolvido (Kormendy & Ho 2013, ARA&A, 51, 511). No caso de NGC 4546, foi utilizada uma imagem obtida com o filtro F606W do "Wide-Field Planetary Camera", instalado no Telescópio Espacial Hubble (HST). Será utilizado os resultados do MGE obtidos por Ricci & Steiner (2020) para essa imagem (ver Tabela 1), uma vez que a ideia central desse trabalho é verificar as diferenças nas medidas da massa do buraco negro central obtidas usando cubos de dados com diferentes resoluções espaciais. É importante também mencionar que a contribuição da massa do BN será calculada somando-se

uma Gaussiana bi-dimensional aos resultados do MGE com formato circular e dispersão igual ao menor elemento de resolução da imagem do HST (~ 0.1 arcsec).

Tabela 1 – Resultados MGE para a imagem HST/WFPC2 da NGC 4546. Aqui, I_{Rj} é o brilho superficial central na banda R, σ_j é a dispersão das funções Gaussianas ao longo do semi-eixo maior e q_j é a razão axial observada.

j	$I_{Rj}(10^3 L_{\odot} \text{ pc}^{-2})$	$\sigma_j(\text{arcsec})$	q_j
1	390	0.034	1
2	118	0.070	0.52
3	57.3	0.119	0.82
4	44.6	0.222	0.68
5	22.9	0.373	0.78
6	17.4	0.686	0.57
7	11.9	1.13	0.78
8	6.85	2.07	0.79
9	3.17	3.35	0.96
10	0.772	5.31	0.92
11	1.63	11.7	0.44

Fonte: Ricci & Steiner. MNRAS 495, 2620–2629 (2020).

A tabela 1 mostra os resultados do MGE obtidos com a imagem do "Wide-Field Planetary Camera" do HST para NGC 4546.

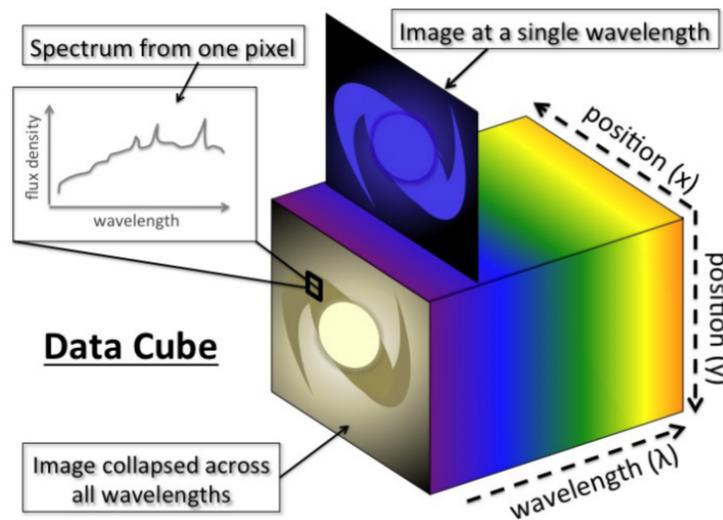
2.5 CUBOS DE DADOS

NGC 4546 foi observada com o Telescópio Gemini Sul usando o instrumento "Gemini Multi-Object Spectrograph"(GMOS) no modo de espectroscopia de campo integral (IFU, de "Integral Field Unit"). O GMOS-IFU⁴ usa uma matriz de lentes acopladas cada uma a uma fibra. Algumas destas fibras pegam como amostra uma área vazia do céu para sua subtração. O GMOS-IFU possui modos com uma ou duas fendas. O modo de fenda única oferece um campo de visada (FOV, de "field of view") menor quando comparado ao modo de duas fendas, mas uma cobertura espectral maior. O produto final desse instrumento é um cubo de dados, que possui informações em duas dimensões espaciais e em uma dimensão espectral (ver Fig. 8). Com a NGC 4546, foi utilizado o modo com uma fenda, que resulta em um FOV de $3.5 \times 5.0 \text{ arcsec}^2$. Foi utilizada a rede de difração R831-G5322, que gerou espectros com uma resolução $\sigma = 30$ km/s, medida a partir da largura a meia altura da linha de céu em 5577 \AA . Maiores detalhes sobre a redução do cubo de dados da galáxia NGC 4546 podem ser encontrados em Ricci et al. (2014a).

⁴ <https://gmios-ifu-1-data-reduction-tutorial-gemini-iraf.readthedocs.io/en/latest>

A resolução espacial do cubo de dados é limitada pelos efeitos da atmosfera terrestre sobre a luz do objeto observado. Uma maneira de se caracterizar a resolução espacial é medindo a distribuição espacial de uma fonte puntiforme na imagem. Essa distribuição espacial é chamada de "point spread function"(PSF). Matematicamente, uma imagem observada é igual à imagem real do objeto convoluída pela PSF. Neste trabalho a PSF foi medida de duas maneiras: usando uma imagem adquirida imediatamente antes à observação com o IFU (chamada imagem de aquisição) e medindo a distribuição espacial de luz de estrelas nessa imagem. Nesse caso, assume-se que a PSF é descrita por uma função Gaussiana. A outra maneira foi usando os resultados do MGE aplicados na imagem do HST deste objeto. Como as imagens do telescópio espacial não sofrem efeitos da atmosfera terrestre, a distribuição de brilho superficial da galáxia terá sua resolução limitada apenas pelo limite de difração do telescópio. Neste caso, assumiu-se que a PSF do cubo de dados de NGC 4546 é dado pela soma de duas funções Gaussianas. Em seguida, convolveu-se os resultados do PSF pela soma destas funções Gaussianas, variando-se a dispersão de cada uma delas dentro de uma faixa de valores. A PSF será aquela cuja comparação entre o modelo convoluído e a imagem média do cubo de dados gera o menor valor de chi-quadrado (χ^2).

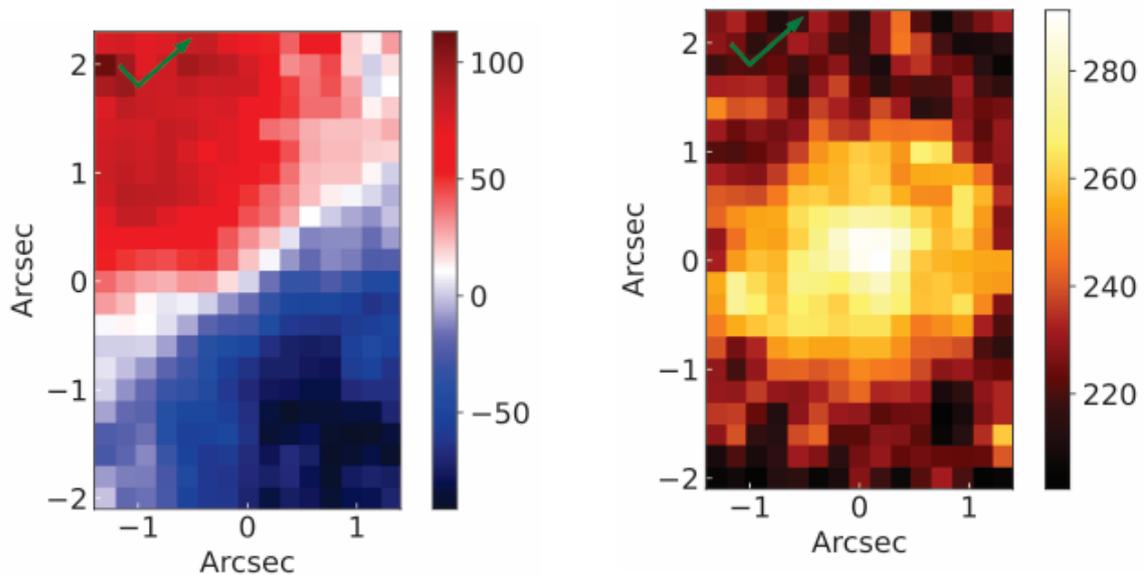
Figura 8 – Representação de um cubo de dados.



3 RESULTADOS

Os mapas da velocidade radial e da dispersão de velocidades estelar de NGC 4546 que foram obtidos com o pPXF são apresentados na Fig.9. Os erros destes parâmetros foram calculados a partir de simulações de Monte Carlo. Para isso, foram somados ruídos aleatórios ao modelo do espectro estelar obtido pelo pPXF, já convoluído pela função Gaussiana com as informações cinemáticas medidas. Depois aplicou-se novamente o pPXF neste espectro. Tal procedimento foi repetido 100 vezes. O erro dos parâmetros cinemáticos é dado pelo desvio padrão destas 100 medidas. A partir dos mapas cinemáticos, foi calculado o mapa do V_{rms} observado. O resultado é apresentado na Fig.12.

Figura 9 – Mapas de velocidade radial e da dispersão de velocidades estelar.

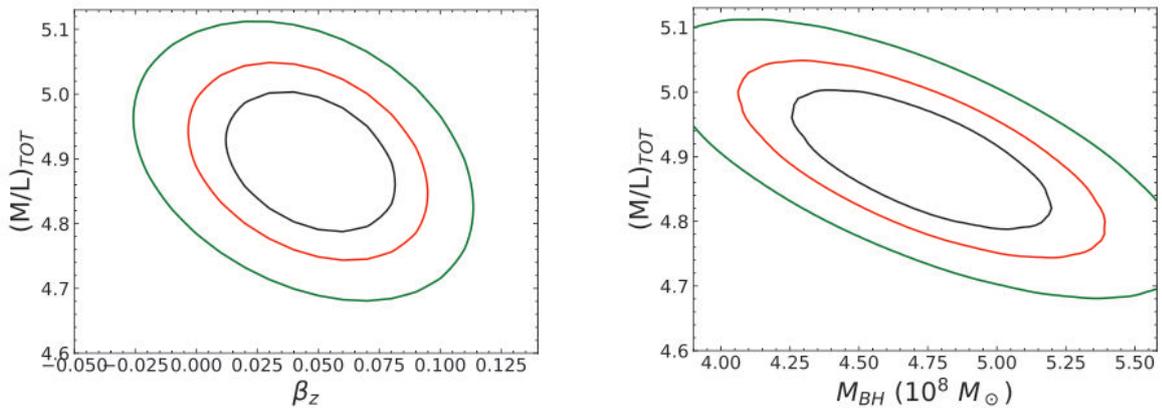


Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Em seguida, foram gerados diversos modelos para o V_{rms} a partir das equações de Jeans e utilizando os resultados do MGE descritos na Seção 2.4. Cada modelo possui um valor de massa do BN, da razão M/L e do parâmetro $\beta_z = 1 - (\sigma_z/\sigma_R)^2$, onde σ_z e σ_R correspondem às dispersões de velocidade estelar ao longo do eixo de simetria da galáxia e ao longo da direção radial, respectivamente. Tal parâmetro está relacionado com a anisotropia da distribuição de dispersão de velocidades estelar no objeto (para uma distribuição isotrópica, $\sigma_z = \sigma_R$ e $\beta_z = 0$). Cada modelo gerado foi comparado com o mapa observado de V_{rms} , onde se calculou o valor de chi-quadrado. As figuras 10 e 11 mostram as curvas de chi-quadrado constante para os dois modelos de PSF do cubo de dados para diferentes pares de parâmetros medidos. Isso fornecerá uma medida direta dos erros dos parâmetros. O melhor modelo é aquele que irá fornecer o menor valor de chi-quadrado.

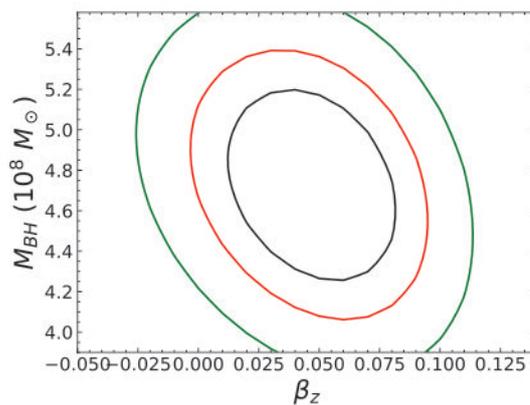
Cada linha presente nos gráficos das Figuras 10 e 11 corresponde a determinada porcentagem de encontrar a resposta correta: a linha preta corresponde ao intervalo de 1σ dos valores medidos, a linha vermelha corresponde ao intervalo de 2σ e a linha verde ao intervalo de 3σ . O intervalo de 1σ tem uma probabilidade de 68% de conter a resposta correta, 2σ de 90% e 3σ de 99%.

Figura 10 – Valores de M_{BH} , M/L e β_z para a primeira PSF.



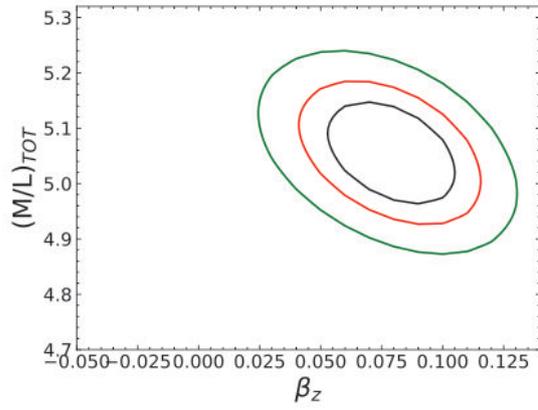
(a) Razão Massa Luminosidade em Função de β_z

(b) Razão massa Luminosidade em Função da Massa do Buraco Negro

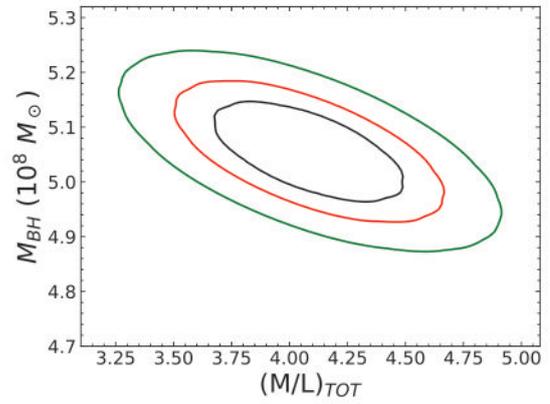


(c) Massa do Buraco Negro em função de β_z

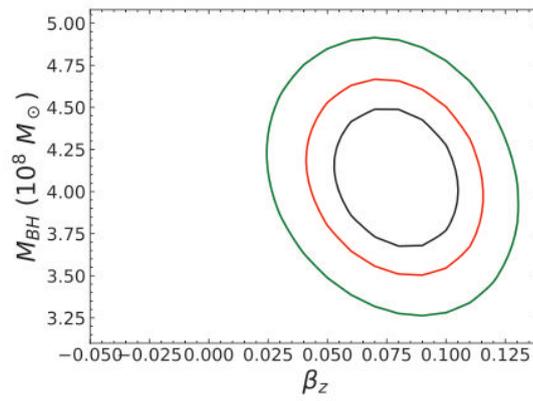
Figura 11 – Valores de M_{BH} , M/L e β_z para a segunda PSF



(a) Razão Massa Luminosidade em Função de β_z



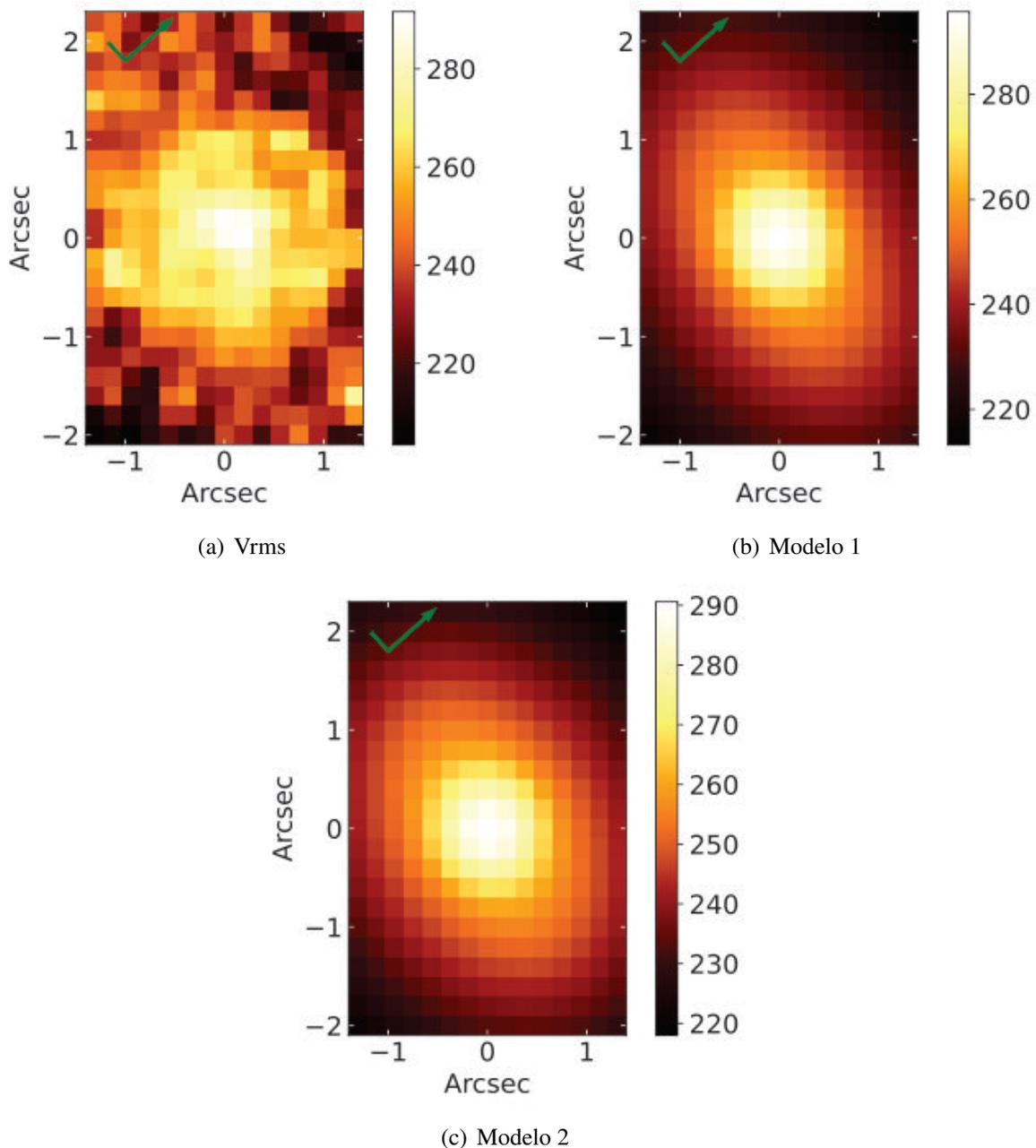
(b) Razão massa Luminosidade em Função da Massa do Buraco Negro



(c) Massa do Buraco Negro em função de β_z

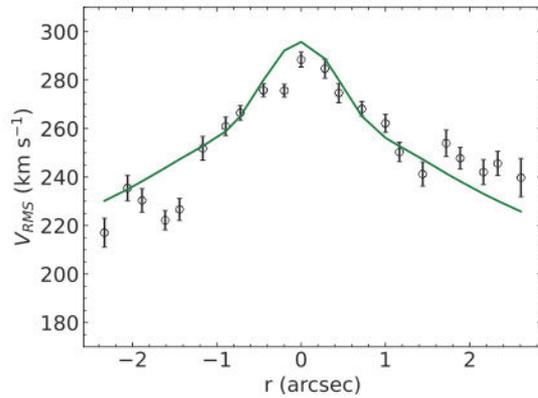
Dentre os modelos de Jeans com as duas propostas de PSF para o cubo de dados do GMOS, os melhores ajustes foram obtidos com o modelo utilizando apenas uma Gaussiana para descrever a PSF. A Fig. 12 mostra os mapas de V_{rms} correspondentes aos melhores modelos obtidos com cada uma das PSFs. A Fig. 13 compara os modelos com os dados observados ao longo de perfis unidimensionais extraídos ao longo da direção de rotação estelar e ao longo da direção perpendicular à rotação estelar. Nestes gráficos, é possível verificar que os modelos são bastante adequados para descrever a cinemática estelar de NGC 4546. A Tabela 2 mostra os resultados contendo os parâmetros dos melhores modelos obtidos com ambas as propostas de PSF.

Figura 12 – V_{rms} e modelos ajustados para cada PSF

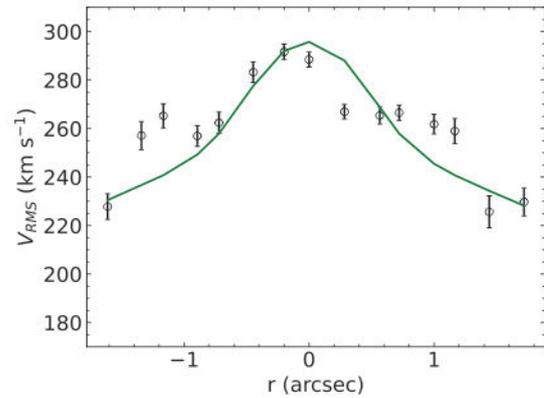


Os gráficos presentes na Fig.13 são cortes paralelos e perpendiculares à rotação da galáxia NGC 4546. Os pontos pretos são os dados observados e a linha verde os dados modelados para cada PSF. Com esses dados, pode-se avaliar se o modelo está ajustando bem os dados observacionais. Cabe notar que os modelos para a PSF2 estão melhores que os da PSF1.

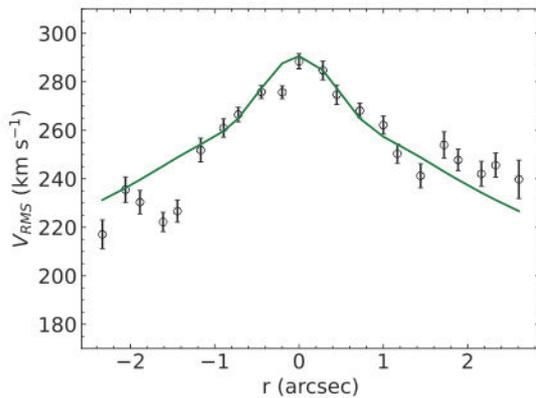
Figura 13 – Perfis paralelos e perpendiculares à rotação da galáxia



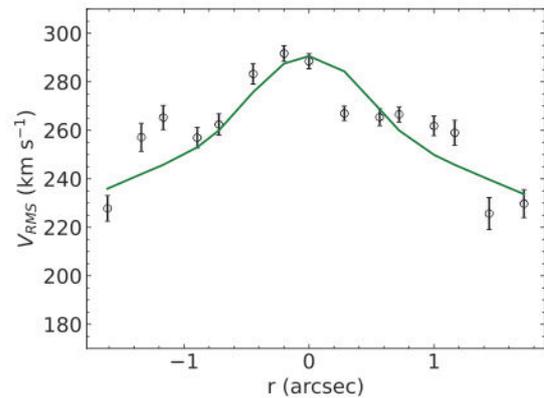
(a) Paralelo obtido com PSF1



(b) Perpendicular obtido com a PSF 1



(c) Paralelo obtido com a PSF2



(d) Perpendicular obtido com a PSF2

Tabela 2 – Valores obtidos para MBH, M/L e β em comparação com os de Ricci & Steiner (2020)

	PSF1	PSF2	Ricci & Steiner 2020
M_{BN}	$(4.72 \pm 0.82) \times 10^8 M_{\odot}$	$(4.10 \pm 0.70) \times 10^8 M_{\odot}$	$(2.56 \pm 0.16) \times 10^8 M_{\odot}$
M/L	4.89 ± 0.19	5.05 ± 0.17	4.34 ± 0.07
β_z	0.05 ± 0.06	0.08 ± 0.05	-0.015 ± 0.030

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

É possível notar que os resultados MBH, M/L e β não são compatíveis com os resultados apresentados por Ricci & Steiner (2020). Isto pode ter ocorrido devido ao fato dos modelos de PSF não serem ainda adequados aos cubos do GMOS ou pelo fato de que o raio de influência gravitacional do BN estar no limite de resolução espacial do cubo de dados do GMOS. A razão entre o raio de influência e a dispersão da PSF (1 sigma) é 1.6, o que indica que o raio de influência está no limite de ser não resolvido espacialmente. As incertezas da MBH, M/L e β são maiores para o GMOS em comparação com o cubo de dados com óptica adaptativa, o que é esperado dada a diferença na resolução espacial do cubo de dados.

O que poderia ser feito para testar essa última hipótese seria degradar o cubo de dados com óptica adaptativa para que ele ficasse com a mesma resolução espacial do GMOS e fazer as medidas nesse cubo degradado. Isso poderá revelar se a incompatibilidade é causada por medidas feitas com o raio de influência gravitacional estar bastante perto do limite de ser resolvido espacialmente.

5 CONCLUSÃO

Os valores obtidos para MBH, razão M/L e β da galáxia NGC 4546, contidos neste trabalho, são incompatíveis com os do artigo de Ricci & Steiner (2020). Isso provavelmente se deve ao fato dos valores estarem próximos do limite de se resolver o raio de influência do BN.

Como perspectiva para obtenção de dados mais próximos aos encontrados por Ricci & Steiner (2020), pode ser feita uma análise com o cubo de dados obtido com a técnica de óptica adaptativa com a resolução espacial degradada para a resolução espacial do GMOS, isso servirá pra saber se a diferença sistemática é causada pela resolução espacial.

6 REFERÊNCIAS

ALLINGTON-SMITH, J. et al. **Integral Field Spectroscopy with GEMINI and Space Telescopes**. NASA ADS, v. 195, p. 319, 1 jan. 2000.

BERGMANN, T.S. **Buracos negros supermassivos: os monstros que se escondem no centro das galáxias**, 2009.

BINNEY, J.; TREMAINE, S. **Galactic dynamics, Galactic dynamics**. Princeton, NJ, Princeton University Press, 1987, 747 p.

BINNEY, J.; TREMAINE, S. **Galactic Dynamics Second Edition**. Princeton; Oxford Princeton University Press, 2008.

CAPPELLARI, M. EMSELLEM, E. **The SAURON project – III. Integral-field absorption-line kinematics of 48 elliptical and lenticular galaxies**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 352, n. 3, p. 721–743, 11 ago. 2004.

DREHMER, D. et al. **The benchmark black hole in NGC 4258: dynamical models from high-resolution two-dimensional stellar kinematics**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 450, n. 1, p. 128–144, abr. 2015.

FERRARESE, L.; FORD, H. **Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei: Past, Present and Future Research**. Space Science Reviews, v. 116, n. 3-4, p. 523–624, fev. 2005.

GALLETTA, G. **Detection of Retrograde Gas Streaming in the SB0 Galaxy NGC 4546**. The Astrophysical Journal, v. 318, p. 531, 1 jul. 1987.

GASTÃO, 2020. **Astronomia Extragaláctica - Notas de Aula**. Disponível em: <<http://www.astro.iag.usp.br/gastao/Extragal.html>>. Acesso em: 12 jan. 2022.

JEANS, J. H. **The Motions of Stars in a Kapteyn-Universe**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 82, n. 3, p. 122–132, jan. 1922.

KRAJNOVIĆ, D. et al. **Determination of masses of the central black holes in NGC 524 and 2549 using laser guide star adaptive optics**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 399, n. 4, p. 1839–1857, 11 nov. 2009.

KRAJNOVIĆ, D.; CAPPELLARI, M.; MCDERMID, R. M. **Two channels of supermassive black hole growth as seen on the galaxies mass–size plane**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 473, n. 4, p. 5237–5247, 23 out. 2017.

KRAJNOVIĆ, D. et al. **A quartet of black holes and a missing duo: probing the low end of the MBH– σ relation with the adaptive optics assisted integral-field spectroscopy.**

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 477, n. 3, p. 3030–3064, 23 mar. 2018.

MACCHETTO, F. et al. **The Supermassive Black Hole of M87 and the Kinematics of Its Associated Gaseous Disk.** The Astrophysical Journal, v. 489, n. 2, p. 579–600, 10 nov. 1997.

NORRIS, M. A.; KANNAPPAN, S. J. **The ubiquity and dual nature of ultra-compact dwarfs.** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 414, n. 1, p. 739–758, 6 abr. 2011.

PETERSON, B. M. **An Introduction to Active Galactic Nuclei.** Publisher: Cambridge, New York Cambridge University Press, Physical description xvi, 238 p. ISBN 0521473489. 1997.

Quick intro to GMOS IFU — GMOS IFU-1 Data Reduction Tutorial - Gemini IRAF 1.0.0 documentation. Disponível em: <<https://gmos-ifu-1-data-reduction-tutorial-gemini-iraf.readthedocs.io/en/latest/gmosifu.html>>. Acesso em: 15 mar. 2022.

RICCI, T. V., 2013, **PhD Thesis**, Universidade de São Paulo.

RICCI, T. V.; STEINER, J. E.; MENEZES, R. B. **Integral field unit spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei – I. Principal component analysis Tomography and nuclear activity.** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 440, n. 3, p. 2419–2441, 5 abr. 2014.

RICCI, T. V.; STEINER, J. E.; MENEZES, R. B. **IFU spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei – II. Nuclear emission line properties.** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 440, n. 3, p. 2442–2456, 5 abr. 2014.

RICCI, T. V.; STEINER, J. E. **Measuring the mass of the supermassive black hole of the lenticular galaxy NGC 4546.** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 495, n. 3, p. 2620–2629, 21 maio 2020.

THATER, S. et al. **Six new supermassive black hole mass determinations from adaptive-optics assisted SINFONI observations.** Astronomy Astrophysics, v. 625, p. A62, maio 2019.

TULLY, R. B. et al. **COSMICFLOWS-2: THE DATA.** The Astronomical Journal, v. 146, n. 4, p. 86, 5 set. 2013.

VAZDEKIS, A. et al. **Evolutionary stellar population synthesis with MILES – II. Scaled-solar and -enhanced models.** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 449, n. 2, p. 1177–1214, 23 mar. 2015.