

Dissertação de Mestrado

Tomografia PCA aplicada a cubos de dados no infravermelho próximo para a galáxia Seyfert Mrk 1066

Moiré Gonçalves Hennig

Dissertação realizada sob orientação do Prof. Dr. Rogemar A. Riffel, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física da UFSM como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Física.

Santa Maria
2014

Tomografia PCA aplicada a cubos de dados no infravermelho próximo para a galáxia Seyfert Mrk 1066

por

Moiré G. Hennig

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Física da UFSM
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr. Rogemar A. Riffel

Santa Maria, RS, Brasil, 2014

G. Hennig, Moiré
Tomografia PCA aplicada a cubos de dados no
infravermelho próximo para a galáxia Seyfert Mrk 1066 /
Moiré G. Hennig.-2014.
81 f.; 30cm

Orientador: Rogemar A. Riffel
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Física, RS, 2014

1. AGNs 2. Tomografia PCA 3. Infravermelho próximo I.
A. Riffel , Rogemar II. Título.

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Programa de Pós-graduação em Física

Tomografia PCA aplicada a cubos de dados no infravermelho próximo para a galáxia Seyfert Mrk 1066

elaborado por

Moiré Gonçalves Hennig

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
MESTRE EM FÍSICA

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rogemar A. Riffel - Orientador, UFSM

Prof. Dr. Sandro Barboza Rembold, UFSM

Prof. Dr. Fabricio Ferrari, FURG

Santa Maria, Junho de 2014.

Agradecimentos

Muitas pessoas fizeram parte dessa minha trajetória. Minha esposa Lucimara em especial compartilhou comigo todos os detalhes deste percurso. O detalhe mais significativo foi o nascimento do nosso filho Mateus. Muitas complicações aconteceram, desde a internação da minha esposa e posteriormente à internação do nosso filho que nasceu prematuro passou por duas cirurgias, mas tudo acabou bem. Sou muito grato aos meus colegas de laboratório e ao meu orientador, por todo apoio que me foi dado em todos estes momentos. Em particular alguns itens de agradecimentos devem ser enunciados:

- de modo geral em especial agradeço a Deus, onde em muitos dos momentos mais difíceis, fui retribuído;
- à minha esposa pela paciência, pelo apoio e incentivo nessa jornada;
- ao professor Rogemar, pelo apoio e dedicação em nos ajudar na construção do conhecimento;
- à todo pessoal do nosso grupo de trabalho, em especial ao Marlon pelo apoio e ajuda;
- ao professor Augusto Maciel do departamento de estatística da UFSM, pela ajuda fornecida;
- à todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho;
- à CAPES, pelo apoio financeiro.

Resumo

Neste trabalho aplicamos a Tomografia PCA (*Principal Component Analysis*) a cubos de dados para a região central da galáxia Seyfert 2 Mrk 1066. As observações foram realizadas com o instrumento NIFS (*Near-infrared Integral Field Spectrograph*) do telescópio Gemini Norte nas bandas J e K com resolução espacial de ~ 35 pc. A galáxia Mrk 1066 já foi objeto de estudos pelo nosso grupo de trabalho, com a aplicação de técnicas tradicionais (como por exemplo, ajustes de linhas de emissão e medidas da cinemática estelar). Dessa forma a Tomografia PCA, sendo uma poderosa ferramenta estatística, tem por finalidade nessa dissertação confirmar resultados já obtidos com o uso de técnicas tradicionais e ao mesmo tempo buscar por detalhes sobre a física da região central desta galáxia, não vistos na análise tradicional.

A Tomografia PCA foi aplicada aos cubos de dados das bandas J e K, para diferentes regiões espectrais e espaciais de forma a realçar regiões de interesse. Com a análise dos tomogramas e autovetores em conjunto, podemos destacar alguns resultados para a região central de Mrk 1066: 1) Detectamos um anel de gás molecular (H_2) com raio de ~ 75 pc, observado pela primeira vez nesta galáxia e que parece estar sendo alimentado por escoamentos de gás ao longo de braços espirais que se originam no anel; 2) detectamos emissão de poeira em uma estrutura central não resolvida, a qual interpretamos como sendo relacionada à presença do toróide de poeira previsto pelo modelo unificado de AGNs (*Active Galactic Nuclei*); 3) movimentos de rotação de gás em um disco no plano da galáxia, em concordância com estudos prévios; 4) *Outflows* de gás ionizado, associados ao jato rádio, além de fenômenos com cinemática complexa, não interpretados neste trabalho.

Construímos mapas de fluxos para a emissão contínua e para as principais linhas de emissão usando cubos reconstruídos a partir de somente alguns autovetores de forma a realçar fenômenos físicos. Observamos uma boa correlação entre os fluxos das linhas de emissão de gás ionizado e a emissão rádio em alguns tomogramas e investigamos a origem da emissão da linha do [Fe II] em $1,2570 \mu\text{m}$ a partir de razões de linhas. Encontramos os valores $[\text{Fe II}]\lambda 1,2570 \mu\text{m} / \text{Pa}\beta = 0,9$ e $[\text{Fe II}]\lambda 1,2570 \mu\text{m} / [\text{P II}]\lambda 1,1886 \mu\text{m} = 4,2$. Esses valores indicam haver contribuição por choques devido ao jato rádio com grãos de poeira, liberando Fe destes grãos e dessa forma ocorre um aumento nos fluxos das linhas de emissão do [Fe II].

Palavras-chave: AGNs; Tomografia PCA; Infravermelho próximo.

Abstract

In this work, we apply the PCA Tomography technique (Principal Component Analysis) to data cubes for the central region of the Seyfert 2 galaxy Mrk 1066. The observations were done with the NIFS (Near-infrared Integral Field Spectrograph) instrument at Gemini North Telescope in the spectral bands J and K and with spatial resolution of ~ 35 pc. Mrk 1066 has been the subject of studies by our working group, with the application of traditional techniques (as fitting of the emission-line profiles and measurements of stellar kinematics). Thus the use of the PCA Tomography in this work, which is a powerful statistical tool, is aimed to confirm previous results obtained with the use of traditional techniques, and at the same time searching for details of the physics of the central region of this galaxy, not seen in traditional analysis.

The PCA Tomography was applied to datacubes for J and K bands at distinct spectral and spatial regions in order to emphasize regions of interest. With the simultaneous analysis of the eigenvectors and tomograms, we highlight some results for the central region of Mrk 1066: 1) We detected a ring of molecular gas (H_2) with a radius of ~ 75 pc, not detected in previous works, which seems to be being fed by gas flows along the spiral arms that originate in the ring; 2) we detected dust emission in an unresolved central structure, which was interpreted as being related to the presence of the dusty torus postulated by the unified model for AGNs (Active Galactic Nuclei); 3) emission of gas in a rotating disk in the plane of the galaxy was also detected, in agreement with previous studies; 4) we found *outflows* of ionized gas from the nucleus of Mrk 1066 associated with the radio jet, beyond phenomena with complex kinematics, not interpreted in this work.

We constructed flux maps for the continuum emission and for the main emission lines present in the spectra of Mrk 1066 from reconstructed datacubes using only some eigenvectors in order to highlight physical phenomena. We observed a good correlation between the fluxes of emission lines of the ionized gas and radio emission in some tomograms and investigated the origin of the [Fe II] line emission using line ratios. We found the following values $[\text{Fe II}]\lambda 1,2570\mu\text{m}/\text{Pa}\beta = 0,9$ and $[\text{Fe II}]\lambda 1,2570\mu\text{m}/[\text{P II}]\lambda 1,1886\mu\text{m} = 4,2$. These values indicate that there may be a contribution by shocks due to radio jet to the [Fe II] excitation. The shocks release the Fe from grains of dust enhancing the Fe abundance and thus the fluxes of the emission lines of the [Fe II] is increased.

Keywords: AGNs; PCA Tomography; Near Infrared.

Sumário

1	Introdução	6
1.1	Classificação de Galáxias Ativas	7
1.1.1	Galáxias Seyfert:	7
1.1.2	Quasares (Quasi-Stellar Radio Sources):	8
1.1.3	Rádio Galáxias:	9
1.1.4	LINERs (Low-Ionization Nuclear Emission-line Region):	9
1.1.5	Blazares:	10
1.2	Modelo Unificado de AGNs	10
1.2.1	Buraco Negro Supermassivo - BNS	10
1.2.2	Disco de Acreção	12
1.2.3	Região de Linhas Largas - BLR	12
1.2.4	Região de Linhas Estreitas - NLR	12
1.2.5	Toróide de Poeira	13
1.3	Espectroscopia IFU no Infravermelho próximo de AGNs	14
1.3.1	A Galáxia Mrk 1066	21
1.4	Justificativa e Objetivos do trabalho	23
2	Tomografia PCA	25
2.1	A técnica	25
2.1.1	Descrição matemática da PCA	28
2.2	Reconstrução do cubo de dados	34
2.3	Resultados prévios usando tomografia PCA	35
2.4	Metodologia	38
2.4.1	Filtro Butterworth	38

3	Resultados	41
3.1	Banda K	41
3.1.1	Região espectral: 2,1 μ m a 2,47 μ m	42
3.1.2	Região espectral: 2,13 μ m a 2,2 μ m	47
3.1.3	Região espectral: 2,123 μ m a 2,167 μ m	51
3.2	Banda J	53
3.2.1	Região espectral: 1,15 μ m a 1,35 μ m	54
3.2.2	Região espectral: 1,26 μ m a 1,30 μ m	58
4	Discussões	62
5	Considerações Finais	68
5.1	Conclusões	68
5.2	Perspectivas	69

Lista de Figuras

1.1	Representação esquemática do Modelo Unificado de AGNs	11
1.2	Representação esquemática de dois tipos de modelos para o toróide de poeira	13
1.3	Cenário físico para a região “circum-nuclear” de Mrk 1066	23
2.1	Pixéis espaciais e espectrais geometricamente representados no espaço tridimensional	26
2.2	Pixéis espaciais e espectrais representados geometricamente no plano bidimensional	27
2.3	Esquema de representação para a análise das componentes principais	27
2.4	Imagens do contínuo antes e depois do uso do filtro butterworth e imagem do resíduo	39
2.5	Imagem referente ao resíduo subtraído do contínuo, após o uso do filtro Butterworth .	40
2.6	Tomograma e autovetor 5 para a banda J, sem o uso do filtro de Butterworth.	40
2.7	Tomograma e autovetor 5, com o uso do filtro butterworth	40
3.1	Espectro na banda K da galáxia Mrk 1066	42
3.2	Autovetores e tomogramas 1, 2 e 3 da banda K, para região de $2,1\mu\text{m}$ a $2,47\mu\text{m}$	43
3.3	Autovetores e tomogramas 4, 5 e 6 da banda K, para região de $2,1\mu\text{m}$ a $2,47\mu\text{m}$	45
3.4	Autovetores e tomogramas 7, 8 e 9 da banda K, para região de $2,1\mu\text{m}$ a $2,47\mu\text{m}$	46
3.5	Autovetores e tomogramas 1, 2 e 3 da banda K, para região de $2,13\mu\text{m}$ a $2,2\mu\text{m}$	47
3.6	Autovetores e tomogramas 4, 5 e 6 da banda K, para região de $2,13\mu\text{m}$ a $2,2\mu\text{m}$	48
3.7	Autovetores e tomogramas 7, 8 e 9 da banda K, para região de $2,13\mu\text{m}$ a $2,2\mu\text{m}$	49
3.8	Autovetores e tomogramas 1, 2 e 3 da banda K, para região de $2,123\mu\text{m}$ a $2,167\mu\text{m}$.	51
3.9	Autovetores e tomogramas 4, 5 e 6 da banda K, para região de $2,123\mu\text{m}$ a $2,167\mu\text{m}$.	52
3.10	Espectro da banda J, para galáxia Mrk 1066	54
3.11	Autovetores e tomogramas 1, 2 e 3 da banda J, para região de $1,15\mu\text{m}$ a $1,35\mu\text{m}$	55
3.12	Autovetores e tomogramas 4, 5 e 6 da banda J, para região de $1,15\mu\text{m}$ a $1,35\mu\text{m}$	56
3.13	Autovetores e tomogramas 7, 8 e 9 da banda J, para região de $1,15\mu\text{m}$ a $1,35\mu\text{m}$	57

3.14	Autovetores e tomogramas 1, 2 e 3 da banda J, para região de $1,26\mu\text{m}$ a $1,30\mu\text{m}$. . .	58
3.15	Autovetores e tomogramas 4, 5 e 6 da banda J, para região de $1,26\mu\text{m}$ a $1,30\mu\text{m}$. . .	59
3.16	Autovetores e tomogramas 7, 8 e 9 da banda J, para região de $1,26\mu\text{m}$ a $1,30\mu\text{m}$. . .	60
4.1	Mapas de fluxos para o contínuo e para as linhas de emissão do $\text{H}_2 \lambda 2,12183\mu\text{m}$ e $\text{Br}\gamma$	63
4.2	Imagem de RGB da sobreposição das imagens da figura 4.1	65
4.3	Mapas de fluxo das linhas de emissão do $[\text{Fe II}] \lambda 1,25702\mu\text{m}$ e $\text{Pa}\beta$	66
4.4	Imagem de RB, da sobreposição das imagens da figura 4.3	66

Lista de Tabelas

2.1	Tabela com variáveis X e Y , referente a observações em cinco indivíduos	30
3.1	Tabela de variância dos dados da banda K, para região de $2,1\mu\text{m}$ a $2,47\mu\text{m}$	44
3.2	Tabela de variância dos dados da banda K, para região de $2,13\mu\text{m}$ a $2,2\mu\text{m}$	50
3.3	Tabela de variância dos dados da banda K, para região de $2,123\mu\text{m}$ a $2,167\mu\text{m}$	53
3.4	Tabela de variância dos dados da banda J, para região de $1,15\mu\text{m}$ a $1,35\mu\text{m}$	54
3.5	Tabela de variância dos dados da banda J, para região de $1,26\mu\text{m}$ a $1,30\mu\text{m}$	61

Capítulo 1

Introdução

As galáxias que possuem um componente estrutural esferoidal ou elipsoidal (Galáxias Elípticas e Espirais), possuem um buraco negro central (Ferrarese; Merritt, 2000; Gebhardt et al., 2000), mas nem todas possuem matéria disponível nas redondezas para ser acretaada por ele. Galáxias nas quais um buraco negro supermassivo (BNS) está acretaando matéria são chamadas de galáxias ativas ou galáxias com núcleo ativo (Active Galactic Nuclei - AGN). O modelo mais aceito, para explicar a energia vinda dos AGNs está relacionado à presença de um BNS no seu núcleo, assim a diferença entre uma galáxia ativa e uma normal, está no fato do BNS da ativa estar acretaando matéria, enquanto que em uma galáxia não ativa isto não ocorre.

Galáxias ativas são divididas em várias classes, conforme sua luminosidade nuclear e de acordo com outros fatores como emissão em rádio, intensidade da radiação, largura das linhas de emissão e orientação da linha de visada. Os AGNs podem ser divididos nas seguintes classes: Quasares, Galáxias Seyfert, Rádio galáxias, Blazares e LINERs (Low-Ionization Nuclear Emission-line Region). As principais características de AGNs são:

- Seu brilho nuclear é até 100 vezes maior, do que o brilho do restante da galáxia;
- Uma grande luminosidade, aproximadamente $10^{11} L_{\odot}$ ou maior, é produzida em uma pequena região espacial;
- Se comparado com uma galáxia normal, possui excesso de fluxo em algumas regiões do espectro (rádio, infravermelho, ultravioleta e raios-X);
- As linhas de emissão permitidas do espectro de um AGN são muito largas, podendo ter larguras a meia altura, $\text{FWHM} > 10\,000 \text{ km s}^{-1}$;
- Os fluxos em linhas de emissão e contínuo possuem variabilidade (podem variar em escalas de dias ou semanas).

É importante notar que nem todos os AGNs apresentam todas as características descritas anteriormente, porém estas são as mais marcantes dos mesmos.

1.1 Classificação de Galáxias Ativas

Nessa seção serão discutidas as propriedades de cada classe de AGNs.

1.1.1 Galáxias Seyfert:

Carl Keenan Seyfert é lembrado principalmente pelo nome do “Sexteto de Seyfert” dado a um grupo de galáxias que estudou mais amplamente (NGC1068, NGC1275, NGC3516, NGC4051, NGC4151 e NGC7469), com a denominação “Galáxias Seyfert” para a classe de galáxias ativas por ele descoberta.

Numa primeira tentativa de entender a física das galáxias Seyfert, são destacadas duas características (Peterson, 1997): 1) O núcleo não é resolvido por telescópios de pequeno e médio porte¹ e é menor que 100 parsecs²; 2) As galáxias Seyfert são aproximadamente 1%, sua emissão nuclear dura em torno de 10^8 anos. Se observarmos uma galáxia do tipo Seyfert, ela provavelmente se parecerá com uma galáxia espiral normal com uma fonte puntual no seu centro. Isto se deve ao fato de que todas, ou quase todas as galáxias do tipo Seyfert, são classificadas morfologicamente como espirais. As seis galáxias que Seyfert analisou (descritas anteriormente), foram selecionadas com base no alto brilho central (possuindo aparência estelar). Ele obteve alguns espectros destas galáxias e descobriu que o espectro ótico de várias delas é dominado pela emissão de linhas nucleares com alta excitação (Peterson, 1997). As galáxias Seyfert possuem magnitude absoluta de $M > -21,5 + 5 \log h_0$ em que $h_0 = H/100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, onde H é a constante de Hubble. (Peterson, 1997; Schmidt; Green, 1983).

As galáxias Seyfert podem ser divididas em duas subclasses: **Seyfert 1** e **Seyfert 2**. Basicamente estas duas subclasses tem como distinção a largura de suas linhas espectrais. Estas linhas espectrais são detectadas de duas regiões do AGN, que conforme o espectro observado, veremos galáxias do tipo Seyfert 1 ou do tipo Seyfert 2. Estas regiões são: região de onde são provenientes as linhas largas (BLR - *Broad Line Region*) e região de onde são provenientes as linhas estreitas (NLR - *Narrow Line Region*). As linhas de emissão que são observadas no espectro da galáxia Seyfert 1, pertencem às duas regiões (BLR e NLR), enquanto que as linhas observadas da galáxia Seyfert 2, pertencem à região da NLR.

A subclasse Seyfert 1 apresenta linhas de emissão permitidas muito largas de H I, He I e He II,

¹Um telescópio de médio porte possui ≈ 3 a 4m de diâmetro

²1 parsec (pc) corresponde a $3,086 \times 10^{13}$ km

com largura aproximada de 1 a $5 \times 10^3 \text{ km s}^{-1}$ (FWHM). Para linhas proibidas, como as linhas dos elementos [O III] $\lambda\lambda 4959, 5007$, [N II] $\lambda\lambda 6548, 6583$ e [S II] $\lambda\lambda 6716, 6731$ o FWHM é cerca de 500 km s^{-1} (Osterbrock, 1989). Para galáxias do tipo Seyfert 2 não são detectadas linhas largas. As linhas estreitas detectadas podem ser permitidas ou proibidas e possuem larguras FWHM $\approx 500 \text{ km s}^{-1}$ (Osterbrock; Ferland, 2006).

Existem também outras subclasses de galáxias Seyfert, baseadas no espectro ótico: Seyfert 1.5, 1.8 e 1.9. Em Seyfert 1.9, a componente larga é detectada apenas na linha $H\alpha$, enquanto que em galáxias Seyfert 1.8, as componentes largas são muito fracas, no entanto é detectável em $H\alpha$ e em $H\beta$. Nas galáxias Seyfert 1.5 as intensidades das componentes largas e estreitas das linhas são comparáveis (Peterson, 1997; Osterbrock, 1981).

1.1.2 Quasares (Quasi-Stellar Radio Sources):

Os Quasares são objetos muito luminosos (os mais luminosos dentre os AGNs). Eles possuem tamanho angular pequeno, não sendo resolvidos espacialmente por telescópios de médio porte. A grande diferença entre estes objetos e as galáxias Seyfert é sua luminosidade, que pode ser até cem vezes maior em relação ao observado em Seyferts (Peterson, 1997). Os espectros dos Quasares são semelhantes aos espectros das galáxias Seyfert, com exceção de que as absorções estelares são muito fracas e as linhas estreitas são geralmente mais fracas do que as linhas largas. Algumas das principais propriedades dos Quasares são:

- Núcleo extremamente compacto e luminoso (emitindo até cem vezes mais radiação do que toda a galáxia);
- Alguns são intensas fontes de rádio;
- Possuem emissão contínua variável no tempo;
- Grande emissão no ultravioleta e em raios-X;
- Intensas linhas de emissão e altos *redshifts*.

1.1.3 Rádio Galáxias:

São galáxias com intenso brilho e grande emissão em rádio (10^{33} a 10^{38} W), apresentam um núcleo brilhante e pontual no visível. São galáxias elípticas em sua maioria, quando observadas no ótico. Possuem uma estrutura dupla com lóbulos emissores em rádio nos dois lados do núcleo, com uma distância de até 6 Mpc de seu centro, com jatos de matéria saindo da fonte central. Da mesma forma que para os quasares, a explicação seria de partículas carregadas movendo-se em um campo magnético, com movimento acelerado e helicoidal, irradiando energia. Partículas com velocidades relativísticas emitindo radiação eletromagnética. Este tipo de radiação é chamada de radiação sincrotrônica.

As rádio galáxias são fortes emissores em rádio (*radio loud*) e normalmente são consideradas como análogas das galáxias Seyferts, que não apresentam emissão em rádio muito significativa (*radio quiet*), apresentando para esses objetos similaridade nas características espectrais e para a luminosidade. As rádio galáxias podem se dividir em dois tipos: as *Broad-Line Radio Galaxies* (BLRGs), que apresentam linhas estreitas e largas em seus espectros e as *Narrow-Line Radio Galaxies* (NLRGs) que possuem apenas linhas estreitas.

1.1.4 LINERs (Low-Ionization Nuclear Emission-line Region):

Uma das formas de classificar um AGN, como sendo um LINER, é através das seguintes relações: $[O III] \lambda 5007/H\beta < 3$, $[O I] \lambda 6300/H\alpha > 0,05$, $[S II] (\lambda 6716 + \lambda 6731)/H\alpha > 0,4$ e $[N II] \lambda 6583/H\alpha > 0,5$ (Osterbrock; Ferland, 2006).

Com exceção da presença das linhas de elementos de baixa ionização, como $[O I] \lambda 6300$ e $[N II] \lambda \lambda 6548, 6583$, os LINERs se assemelham às galáxias Seyfert 2. Os LINERs são muito comuns e possivelmente estão presentes em quase metade das galáxias espirais (Peterson, 1997). Outro ponto importante é sua baixa luminosidade (a menor de todos os AGNs), sendo encontrados mais em galáxias espirais. Um modo de distinguir as galáxias Seyfert 2 de LINERs é a partir das razões de linhas: $[O III] \lambda 5007/H\beta$ em relação a $[N II] \lambda 6583/H\alpha$, para as quais as razões possuem menores valores para o primeiro caso. Outra situação, são os altos valores em regiões de $[H II]$ para $[N II] \lambda 6583/H\alpha$ (Peterson, 1997)

1.1.5 Blazares:

Os Blazares dividem-se em dois tipos: objetos OVV's (Optically Violent Variables) e Objetos BL Lac. Possuem algumas propriedades iguais, sendo que os objetos BL Lac podem ser distinguidos pela ausência de intensas linhas de emissão e absorção no espectro, apresentando também emissão contínua intensa. Os OVV's possuem uma grande variabilidade no contínuo em todos os comprimentos de onda (desde raios-X até rádio), tendo grande variação de fluxo, com linhas de emissão largas, possuindo alta variabilidade no visível e alta polarização.

1.2 Modelo Unificado de AGNs

Os objetos pertencentes aos AGNs descritos anteriormente podem ser entendidos usando uma representação esquemática, conhecida como modelo unificado, sendo diferenciados por alguns parâmetros físicos como: luminosidade, emissão em rádio e orientação em relação a linha de visada (Antonucci, 1993; Urry; Padovani, 1995; Osterbrock, 1978). Este modelo baseia-se na existência de um BNS central, para explicar a energia vinda do núcleo destas galáxias.

A figura 1.1 mostra uma representação esquemática do modelo unificado de AGNs, na qual o BNS central é circundado pelo disco de acreção. Externamente a este disco localiza-se o toróide de poeira, que delimita a região de formação de linhas largas da região de formação de linhas estreitas. Na parte interna do disco de acreção se originam jatos de partículas relativísticas. A seguir descreve-se detalhes destas estruturas.

1.2.1 Buraco Negro Supermassivo - BNS

Na figura 1.1 podemos observar o BNS que está na região central, onde o campo gravitacional é muito forte devido a grande quantidade de matéria contida em uma região muito pequena. O nome “negro” da palavra buraco negro, quer dizer que não podemos ver nada interno ao horizonte de eventos do BNS, pois a luz não é capaz de escapar. A força de atração gravitacional do BNS é extremamente grande, mas há um limite para uma aproximação máxima do BNS em que a luz pode escapar. Neste limite temos o horizonte de eventos, onde a velocidade de escape é igual ao módulo da velocidade da luz. Esta aproximação máxima é chamada de raio de Schwarzschild.

Sendo a velocidade de escape do BNS igual a velocidade da luz ($v = c$), podemos encontrar o raio de Schwarzschild igualando a energia potencial gravitacional a energia cinética de uma partícula de prova de massa m :

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{GMm}{R}, \quad (1.1)$$

então

$$R = R_{\text{schw}} = \frac{2GM}{c^2}, \quad (1.2)$$

onde G é a constante de gravitação universal e M a massa do BNS. Podemos encontrar o raio de Schwarzschild para uma massa de BNS de $10^6 M_{\odot}$, substituindo na equação acima. Assim $R_{\text{schw}} \approx 10^{-7}$ pc. Para uma massa de BNS de $10^9 M_{\odot}$, encontramos $R_{\text{schw}} \approx 10^{-4}$ pc. Estes são os limites de nossas observações para o BNS.

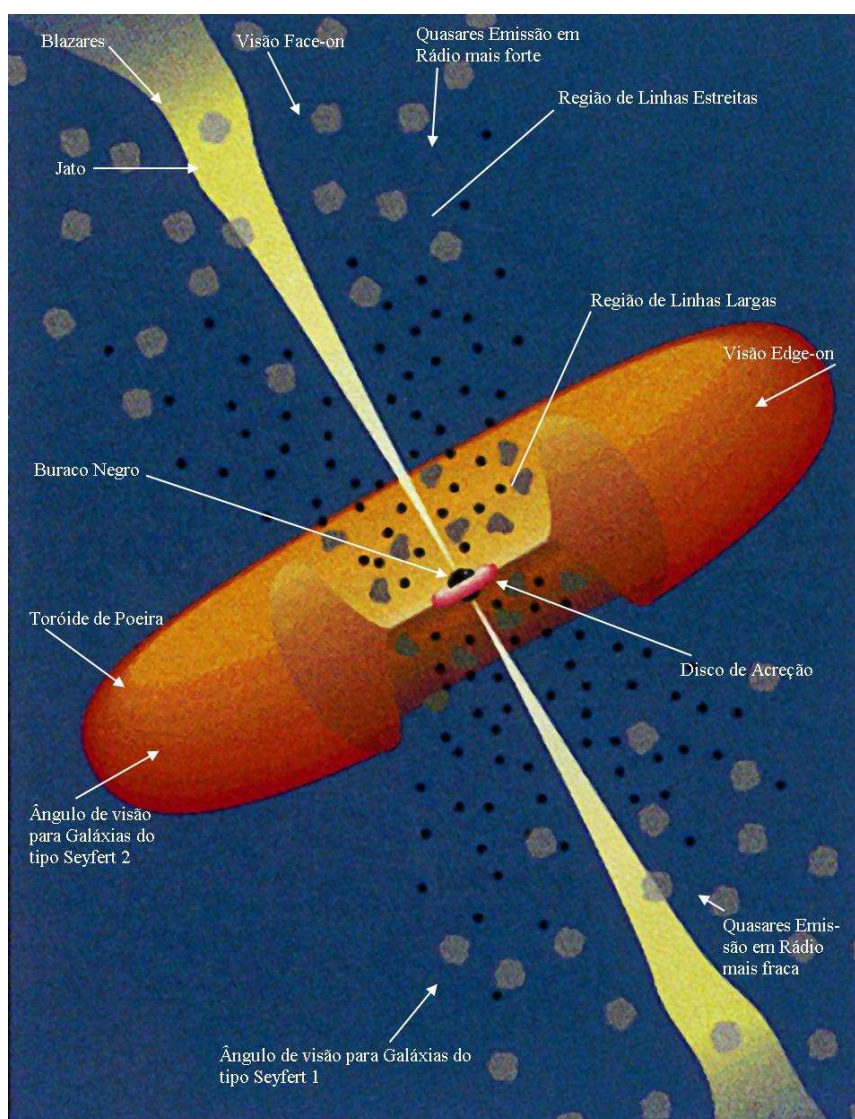


Figura 1.1: Representação esquemática do Modelo Unificado de AGNs, extraído e modificado de: <http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/blackholes3.html>.

1.2.2 Disco de Acreção

Na figura 1.1 em uma região mais externa ao buraco negro central, podemos observar o disco de acreção com um tamanho $< 0,1\text{pc}$, que é um tamanho muito maior do que do buraco negro central, mas se comparado com a galáxia hospedeira ($\approx 30\text{kpc}$), possui um tamanho muito pequeno. Nessa região, existe gás sendo capturado pelo campo gravitacional do BNS. Acredita-se que o material a ser acretado, não flui radialmente na direção do buraco negro central, mas sim que o material possua momento angular e espirale em torno do buraco negro, formando assim o disco de acreção. As nuvens de gás ao serem capturadas pelo disco de acreção começam a ser aquecidas a temperaturas muito altas, movendo-se também a velocidades muito altas. Na figura 1.1 são observados também dois longos jatos de partículas que saem paralelamente em duas extremidades. Os gases que não caem em direção ao buraco negro, desviam-se do horizonte de eventos e são lançados em velocidades muito altas, sendo ejetados para o espaço. Acredita-se que a maior parte da emissão observada nos AGNs é devido a emissão do disco de acreção (Frank; King; Raine, 2002).

1.2.3 Região de Linhas Largas - BLR

A BLR é a região onde as componentes largas de emissão são produzidas. A BLR é a região mais próxima do centro, nas proximidades do disco de acreção com um tamanho $< 1\text{ pc}$. Esta aproximação com o centro explica as altas velocidades das nuvens, com FWHM de até 10^4 km s^{-1} . O movimento nesta região é determinado pela fonte central, onde ocorre uma competição entre a gravidade e a pressão de radiação. Esta região possui alta densidade eletrônica, com valores acima de 10^8 cm^{-3} . A temperatura nesta região é estimada em 10^4 K (Osterbrock, 1989).

1.2.4 Região de Linhas Estreitas - NLR

A NLR é mais extensa (≈ 10 a 100 pc) sendo a região onde são produzidas as componentes estreitas das linhas de emissão, localizando-se em uma região mais externa em relação a BLR, com um tamanho de centenas de parsecs. Esta região fica mais distante do centro, possuindo uma densidade eletrônica menor em relação a NLR e também nuvens com velocidades menores. A densidade da NLR varia de aproximadamente 10^3 a 10^6 cm^{-3} e diferentemente da BLR ocorre também a formação de linhas proibidas. A temperatura é parecida com a região da BLR, cerca de 10^4 K (Osterbrock; Ferland, 2006).

1.2.5 Toróide de Poeira

De acordo com o modelo unificado, a região da BLR é interna a um toróide de poeira, e dessa forma se nosso ângulo de observação for diretamente para a borda do toróide, então não receberemos luz proveniente da BLR e veremos um AGN do tipo 2, onde somente observamos luz da NLR. Assim os espectros das galáxias Seyfert 2 não apresentam linhas largas. Caso o ângulo de observação seja mais elevado, veremos então as duas regiões, a BLR e a NLR, onde neste cenário veremos um AGN do tipo Seyfert 1, que apresenta em seus espectros linhas estreitas e largas.

O toróide de poeira também é um agente colimador, pois causa o obscurecimento da radiação incidente nele. O tipo de galáxia ativa está também relacionado com a luminosidade que chega até nós e não somente com a orientação da linha de visada em que observamos o objeto. Um tipo de análise bastante usada para o toróide de poeira é de que seja uma região de densidade contínua em função de seu raio (Nenkova et al., 2008). Mas também pode haver outro tipo de distribuição, como na distribuição de nuvens (Krolik; Begelman, 1988), onde haveria várias nuvens de poeira, distribuídas de forma individual e com um determinado espaçamento entre elas. Este tipo de distribuição para o toróide de poeira é o mais aceito atualmente.

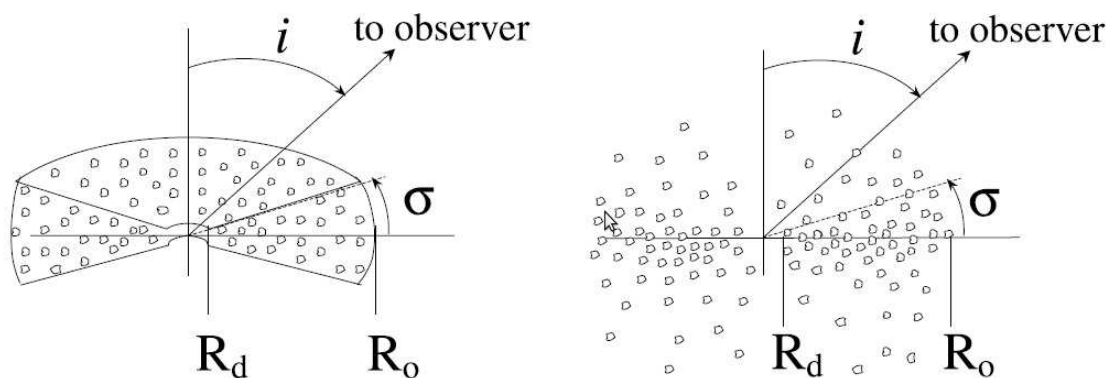


Figura 1.2: Representação esquemática de dois tipos de modelos para o toróide de poeira, com um raio que vai do raio de sublimação de poeira (R_d) até o raio externo ao toro (R_o) (Nenkova et al., 2008).

Na distribuição de nuvens, existem várias nuvens individuais e ópticamente espessas espaçadas entre si. Nesta distribuição, a poeira de cada nuvem pode ter temperatura igual estando a uma distância diferente da fonte de energia, ou também pode ter temperatura diferente estando a uma mesma distância desta fonte. Isto se deve ao fato da face iluminada da nuvem que recebe a luminosidade possuir uma temperatura maior, ao passo que a face não iluminada possui uma temperatura menor. Assim uma nuvem com a face iluminada e mais distante da região central, pode ter a mesma temperatura da face não iluminada de outra nuvem que está bem próxima da região central. Na figura 1.2 apresentamos uma representação das duas morfologias diferentes para o toróide de poeira.

Na figura da esquerda, a representação é em função do raio com uma densidade contínua de nuvens de poeira ao redor da BLR, se assemelham gravitacionalmente a uma “rosquinha”. Na figura da direita temos a distribuição de nuvens, onde há várias nuvens distribuídas, de maneira não uniforme. A densidade de nuvens diminui com a altura em relação ao disco. Nestas representações, R_d é o raio de sublimação da poeira, sendo que nas regiões mais próximas da fonte central as temperaturas são altas e os grãos de poeira sublimam. Desta forma para raios muito pequenos o toro de poeira não existe. R_o representa o raio externo do toróide.

1.3 Espectroscopia IFU no Infravermelho próximo de AGNs

Nesta seção apresentam-se os principais resultados obtidos a partir de espectroscopia de campo integral (IFU - Integral Field Unit) no infravermelho próximo da região central das galáxias ativas, utilizando grandes telescópios.

Em Davies et al. (2007), é feita uma análise sobre a formação de estrelas em torno de 9 AGNs, a partir de observações nas bandas H e K, com resoluções espectrais de $R \approx 4.000$ e $R \approx 1.500$, e resolução espacial de ~ 10 pc, para a maioria dos objetos. Os dados foram obtidos com o instrumento SINFONI (Spectrograph for Integral Field Observations in the Near Infrared), acoplado ao telescópio VLT (Very Large Telescope). Os principais resultados obtidos são apresentados a seguir.

Há grandes evidências de formação estelar recente, nos últimos 10 a 300×10^6 anos, entretanto não são *starbursts* ativos, o que implica que o tempo de formação estelar é curto, da ordem de algumas dezenas de milhões de anos. Enquanto os *starbursts* estavam ativos, as taxas de formação de estrelas foram muito maiores do que as taxas atuais, chegando a $1.000 M_{\odot} \text{ kpc}^{-2}$ em poucas dezenas dos parsecs centrais. Devido a elevada eficiência de formação estelar, os *starbursts* também teriam esgotado seu suprimento de gás em um curto intervalo de tempo, indicando que os *starbursts* nucleares são de natureza episódica. Parece haver um atraso de 50 a 100 milhões de anos (e em alguns casos, talvez mais), entre o início da formação estelar e o início da atividade do AGN. Isto é interpretado como uma indicação de que a formação estelar tem um impacto significativo sobre o combustível para o buraco negro central.

Riffel et al. (2008) mapearam escoamentos do gás molecular em direção ao núcleo da galáxia Seyfert NGC 4051, a partir de observações na banda K com o instrumento NIFS cobrindo $\sim 130 \times 180 \text{ pc}^2$ centrais com resolução espacial de 4,5 pc. Foram usadas as absorções do CO em $2,3 \mu\text{m}$ para obter a cinemática estelar. A curva de rotação obtida apresenta velocidade máxima a apenas ≈ 55 pc do núcleo, revelando a alta concentração do potencial gravitacional. A dispersão de velocidades estelar do bojo é de 60 km s^{-1} implicando em um buraco negro nuclear de massa $10^6 M_{\odot}$. Regiões de baixa dispersão de velocidades sugerem a presença de regiões de formação estelar recente. A emissão

da linha $\text{Br}\gamma$ é originada por gás localizado acima do plano da galáxia. A emissão coronal da linha CO [Ca VIII] é compacta, mas resolvida, estendendo-se a 75 pc. Ela apresenta altos *blueshifts*, de até 250 km s^{-1} , e altas dispersões de velocidade, sendo interpretado como *outflows* do núcleo ativo, com uma origem próxima ao mesmo. As estruturas cinemáticas mais impressionantes em NGC 4051 são dois braços espirais nucleares observados em H_2 . Um é observado em *blueshift* a nordeste e o outro observado em *redshift* a sudeste do núcleo. Essas estruturas foram interpretadas como *inflows* em direção ao núcleo, com taxa de *inflow* de gás molecular de $\approx 4 \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{ano}$, um valor ~ 100 vezes menor do que a taxa de acreção necessária para fornecer energia ao núcleo ativo. Isso pode ser entendido pelo fato de que a H_2 mapeia apenas o gás quente e os *inflows* são dominados por gás frio.

Em Müller Sánchez et al. (2009), são relatadas as primeiras observações diretas de *inflows* de gás molecular na galáxia NGC 1068 em escalas $< 30 \text{ pc}$, usando o instrumento SINFONI, com uma resolução angular de $0,075''$. O mapa de fluxo para a linha de emissão $\text{H}_2 2,12\mu\text{m}$ mostra duas estruturas lineares principais ao norte e ao sul do AGN. A cinemática do gás é dominada por movimentos não circulares e indica que o material está fluindo em direção ao núcleo em trajetórias elípticas ou parabólicas, cuja orientação é compatível com o plano do disco da galáxia. A taxa de *inflow* total estimada é $\sim 15M_{\odot}/\text{ano}$.

Storchi-Bergmann et al. (2009) apresentam resultados para NGC 4151 onde foram mapeadas as intensidades das linhas de emissão e razões de linhas na NLR, nas bandas Z, J, H e K com o instrumento NIFS. São apresentadas distribuições de fluxos em 14 linhas de emissão, que mostram três comportamentos distintos. O primeiro é que a maior parte das distribuições de fluxo do gás ionizado é estendido a até $\approx 100 \text{ pc}$ do núcleo ao longo da região coberta pelo *outflow* bicônico (com ângulo de posição, $\text{PA} = 60\text{-}240^\circ$), observado previamente, consistente com a origem deste *outflow*. O segundo é que as linhas de emissão do H_2 mostram distribuições de fluxo completamente distintas, evitando a região do bicone, estendendo-se de $\approx 10 \text{ pc}$ a $\approx 60 \text{ pc}$ do núcleo, aproximadamente ao longo da barra da galáxia e quase perpendicular ao eixo do bi-cone. Esta morfologia apoia uma origem para a emissão do H_2 no plano da galáxia. O terceiro é que as linhas coronais mostram um perfil de fluxo íngreme, com emissão resolvida apenas no caso do [Si VII], sugerindo sua origem no interior da NLR.

Davies et al. (2009) usaram observações com ótica adaptativa dos 320 parsecs centrais da galáxia NGC 1097, com o instrumento SINFONI do VLT, nas bandas H e K, com resolução espectral de $R \sim 1.500$. O contínuo estelar mostra 3 braços espirais que se estendem para o interior de 100 pc. A cinemática do gás molecular mostra movimentos não circulares associados aos braços espirais, interpretados como *inflow* ao longo dos mesmos. Usando modelos hidrodinâmicos de espirais nucleares, os autores obtiveram uma taxa de *inflow* de matéria ao longo dos braços de $\sim 1,2M_{\odot}/\text{ano}$. A espiral nuclear representa um mecanismo que pode transportar gás para os parsecs centrais da galáxia, com

inflow de gás sustentável por 10^9 anos.

Friedrich et al. (2010) observaram a galáxia Seyfert NGC 2992 com o instrumento SINFONI do VLT, usando observações feitas no infravermelho médio com o Satélite Spitzer. Inicialmente esta galáxia foi classificada como uma Seyfert 2, mas posteriormente teve sua classificação alterada para uma Seyfert 1 intermediária, com bases largas para a componente de $H\alpha$, e não possuindo a componente $H\beta$ em seu espectro nuclear. No referido trabalho, foram encontradas evidências para um breve episódio de formação estelar a $(40 - 50) \times 10^6$ anos. A partir das larguras equivalentes e luminosidades das linhas estreitas de emissão no infravermelho próximo e dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs), detectados nas bandas N e Q, foi possível estimar a taxa de formação estelar nuclear para uma região central $0,5''$ de $4,3 M_{\odot}/\text{ano}$, para uma idade de 50×10^6 anos. A luminosidade é dominada pelo AGN com uma contribuição de apenas 10% a 20% de regiões de formação estelar nuclear. O campo de velocidades observado em H_2 para a NGC 2992 pode ser interpretado como uma sobreposição de um disco em rotação e um *outflow* cônico com velocidade constante.

Storchi-Bergmann et al. (2010), apresentaram resultados para a cinemática do gás em NGC 4151, utilizando os mesmos dados que Storchi-Bergmann et al. (2009). O gás ionizado possui três componentes cinemáticas. A primeira é observada com a velocidade sistêmica, tendo interpretação como sendo originária do disco da galáxia. Na segunda, observa-se um *outflow* ao longo do bi-cone, com velocidades entre -600 e 600 km s^{-1} e com emissão mais intensa em ± 100 a 300 km s^{-1} . A terceira é uma componente devida à interação do jato rádio com o gás ambiente. O gás molecular mostra cinemáticas distintas em relação ao gás ionizado. Sua emissão surge em regiões aproximadamente perpendiculares ao eixo do bi-cone e ao longo do eixo da barra estelar da galáxia, sendo consistentes com emissão de gás em um disco em rotação no plano da galáxia.

Em Schartmann et al. (2010) apresentam-se observações, no infravermelho próximo usando óptica adaptativa, com o instrumento SINFONI do VLT, para uma amostra de galáxias Seyfert. É mostrada a existência de aglomerados de estrelas jovens nos núcleos destas galáxias. Com a ajuda de simulação hidrodinâmica em três dimensões, seguiu-se as evoluções dos aglomerados, especialmente focando na perda de massa estelar, alimentando com gás o meio interestelar. A maioria dos parâmetros de entrada da simulação são limitados pelas observações disponíveis para a galáxia Seyfert 2 NGC 1068. Esta galáxia possui um starburst nuclear de 250 milhões de anos e as simulações produzem tamanhos de disco da ordem de $0,8$ a $0,9 \text{ pc}$ com massa de $10^6 M_{\odot}$ e taxas de transferência de massa (*inflows*) de $0,025 M_{\odot}/\text{ano}$, através da borda interna do disco.

Engel et al. (2010) realizaram um trabalho sobre a formação de estrelas e dinâmica da galáxia em interação NGC 6240, com o instrumento SINFONI do telescópio VLT, na banda K com resolução de 60 pc e imagens de interferometria para o CO (2-1). Apesar da clara assinatura de rotação, a

cinemática estelar nos dois núcleos é dominada pela dispersão de velocidades. É usado o modelo de Jeans, para derivar as massas e a relação massa-luminosidade do núcleo. Apenas 1/3 do contínuo nuclear na banda K está associado com o episódio mais recente de formação estelar e com menos de 30% da luminosidade bolométrica do sistema e 9% da massa estelar devido a *starbursts*. O estudo das populações estelares dos núcleos indica que os mesmos são remanescentes de bojos das galáxias progenitoras, uma vez que se observam populações velhas.

Em Müller-Sánchez et al. (2011) é analisada a cinemática do gás emissor de linhas estreitas e linhas coronais em sete galáxias Seyfert. As galáxias estudadas são observadas utilizando ótica adaptativa com os instrumentos SINFONI/VLT e OSIRIS/Keck. Os dados do SINFONI são observados numa faixa espectral de 1,95 a 2,45 μm , com resolução espectral de ~ 4.000 . São reveladas assinaturas cinemáticas de rotação e *outflows* na NLR e CLR (região de linhas coronais). A cinemática do gás da NLR pode ser vista com três grupos bem identificados: (1) campos de velocidade dominados por rotação, (b) padrões de rotação perturbados, e (c) campos de velocidade dominados por movimentos não circulares. Para galáxias com campos de velocidade dominados por rotação, as velocidades para a NLR e o campo de velocidade estelar são semelhantes e indicam que a maior parte do gás está distribuído no disco. Os mapas de velocidades e dispersão de velocidades da NLR e CLR nas amostras de galáxias são semelhantes, com uma tendência para o gás de baixa ionização ser melhor traçado como componente do disco, enquanto que o gás de alta ionização apresenta um desvio maior com os campos de velocidades dominados por movimentos não circulares. Diversas evidências sugerem que os movimentos não circulares observados nos campos de velocidades da NLR e CLR correspondem a *outflows*. Com relação a componente rotacional, os dados mostram claramente que os discos de baixa e alta ionização de gás são espacialmente coincidentes com os discos internos de gás molecular, o que sugere que os três tipos de gases coexistem espacialmente.

Müller-Sánchez et al. (2013) apresentam observações com o SINFONI da estrutura central de gás molecular em três LINERs, com resoluções espaciais de 50 a 150 pc. A distribuição espacial e cinemática do gás molecular é consistente com um disco fino em rotação, onde a razão entre a velocidade e a dispersão de velocidades excede a unidade. No entanto, na zona interna a 50 pc as observações revelam uma estrutura geométrica e opticamente espessa de gás molecular, que é provavelmente associada à parte exterior do toróide de poeira sugerido pelo modelo unificado de AGNs. Em contraste com as galáxias Seyfert, o gás molecular em LINERs tem uma razão entre a velocidade e a dispersão de velocidades < 1 em uma área que é ~ 9 vezes menor e com densidades de coluna que são ~ 3 vezes menor. Esses resultados são interpretados como evidências de um desaparecimento gradual do toróide em LINERs. Neste contexto os AGNs de baixa luminosidade podem representar o final da fase de acreção em teorias atuais da evolução do toróide.

Storchi-Bergmann et al. (2012) apresentam resultados de síntese de populações estelares nos

180 pc centrais de NGC 1068, com dados nas bandas J, H e K obtidos com o instrumento NIFS. Dois episódios de formação estelar recentes dominam a contribuição de população estelar: Os primeiros ocorreram a 300×10^6 anos atrás, estendendo-se sobre a maior parte da região nuclear. O segundo ocorreu apenas a 30×10^6 anos atrás, em uma estrutura em forma de anel em ≈ 100 pc do núcleo, coincidente com a emissão de H_2 em um anel em expansão. No interior do anel, onde há uma diminuição da dispersão de velocidade estelar, a população estelar dominante é de idade de 300×10^6 anos. No interior de 35 pc, a componente mais antiga (idade $\geq 2 \times 10^9$ anos) domina a massa, enquanto que o fluxo é dominado por componentes de emissão tipo corpo negro, com temperaturas que estão entre $700 \leq T \leq 800K$, sendo atribuídas ao toro de poeira. Também foram encontradas contribuições de componentes de corpo negro e lei de potência fora do núcleo atribuídas a emissão de poeira e o espalhamento da luz, respectivamente.

Em Riffel, Storchi-Bergmann e Winge (2013), apresenta-se um estudo detalhado da galáxia Seyfert 1 Mrk 79 a partir de observações com o instrumento NIFS nas bandas J e K com resolução espacial de ≈ 100 pc. O H_2 apresenta uma baixa dispersão de velocidade $\sigma \approx 50 \text{ km s}^{-1}$ e é dominado por rotação no disco da galáxia. Para o H_2 , a distribuição de fluxos apresenta dois braços espirais que se estendem por ≈ 700 pc, um ao norte e outro ao sul do núcleo, com excitação do gás devido a aquecimento por raios-X a partir da fonte central. *Blueshifts* são observados ao longo do braço espiral no lado distante da galáxia e *redshifts* no braço espiral no lado próximo da galáxia, sugerindo que os braços espirais representam caminhos para o escoamento de gás em direção ao centro da galáxia, com uma taxa de *inflow* de $\approx 4 \times 10^{-3} M_{\odot}/\text{ano}$ (em H_2 quente), sendo uma ordem de grandeza menor do que a taxa de acreção de massa necessária para alimentar o AGN da Mrk 79. A emissão do gás ionizado (traçado pelas linhas de emissão Pa β e [Fe II] λ 2,1218 μm) está correlacionada com o jato rádio e com a emissão do [O III]. A cinemática do gás ionizado mostra rotação e *outflows* para o norte e sul do núcleo. A taxa de *outflow* em gás ionizado é $\approx 3,5 M_{\odot}/\text{ano}$, que é muito maior do que a taxa de acreção do AGN, indicando que a maior parte do gás em *outflow* se origina no meio interestelar e que é empurrado pelo jato nuclear.

Em Hicks et al. (2013) uma amostra combinada de 26 galáxias Seyfert e Normais é estudada com dados do VLT com o instrumento SINFONI, nas bandas H e K. As cinemáticas do gás estelar e do gás molecular são simultaneamente examinadas em escalas < 1 kpc, com o objetivo de identificar os processos dinâmicos nesta região. Foram encontradas várias diferenças dentro de um raio de 500 pc que estão correlacionadas com o tipo de objeto. As Seyferts possuem: (1) concentração estelar nuclear mais compacta, com brilho superficial e luminosidades estelares mais baixas, em um raio > 100 pc; (2) menor dispersão de velocidade estelar, dentro de um raio de 200 pc; (3) intensa emissão de H_2 para um raio de pelo menos 250 pc. Estas diferenças observadas podem ser interpretadas como uma evidência da existência de uma estrutura nuclear dinamicamente fria para galáxias Seyfert quando comparada com o bojo, composta por uma significativa reserva de gás e uma população estelar

relativamente jovem. Esta estrutura não é detectada em galáxias normais, possivelmente não existindo nelas.

Em Raimundo et al. (2013) são apresentadas observações da galáxia MCG-6-30-15, com o instrumento SINFONI do VLT. Os dados estudados da banda H com resolução espectral de $R \sim 3000$, cobrem uma região central de 500 pc da galáxia. A cinemática estelar desta galáxia pode ser caracterizada por uma baixa velocidade de rotação $\sim 40 \text{ km s}^{-1}$, com dispersão de velocidade de 80 a 140 km s^{-1} , sendo maior para raios maiores e próximo ao eixo maior da galáxia, diminuindo quando se aproxima da posição central. Existe uma alteração na direção da rotação estelar quando são comparadas regiões internas ($r < 0,8''$) com regiões exteriores. A dinâmica do gás traçada pela linha de emissão do [Fe II] mostra uma distribuição assimétrica no interior de $r < 0,8''$, com uma intensidade mais elevada e dispersão de velocidades maior no lado oeste do núcleo. Mostra também um gradiente de velocidades com *blueshifts* de -30 km s^{-1} no lado oeste, e *redshifts* de 120 km s^{-1} no lado leste do núcleo. A cinemática e distribuições de fluxo do [Fe II] sugerem que sua emissão tem origem em choques devido a ventos de supernova. Os autores sugerem ainda a presença de *outflows* de gás e *inflows* em direção ao núcleo e argumentam que apenas 1% de gás é usado para formar estrelas, com base na taxa de explosões de supernovas calculadas.

Riffel e Storchi-Bergmann (2011c) apresentam um estudo para a galáxia ativa Mrk 1157, nas bandas J e K obtidas com o instrumento NIFS, com resolução espacial de $\approx 35 \text{ pc}$. Os autores mapearam a cinemática estelar e do gás, bem como as distribuições de fluxo para as principais linhas de emissão para uma região interna a $\approx 450 \text{ pc}$ de raio do núcleo. A cinemática do gás apresenta duas componentes, uma devido ao gás localizado no plano da galáxia e em rotação semelhante a observada para as estrelas, e a outra devido a um *outflow*. A emissão do H_2 e $\text{Pa}\beta$ é dominada por gás em rotação no plano da galáxia, enquanto que o gás em *outflow* é observado predominantemente na emissão de [Fe II]. A emissão de [Fe II] tem origem no gás que está sendo empurrado pelo jato rádio, que destrói os grãos de poeira liberando o Fe. A partir das velocidades do *outflow* e de sua geometria, foi estimado uma taxa de *outflow* de $M_{\text{out}} \approx 6 M_{\odot}/\text{ano}$ para o gás ionizado.

Em Riffel et al. (2011) apresenta-se a síntese de populações estelares em Mrk 1157, usando os mesmos dados de Riffel e Storchi-Bergmann (2011c). Estrelas com idades intermediárias são observadas coespacialmente com um anel de baixa dispersão de velocidades estelar. Uma população estelar velha, com idade $\gtrsim 5 \times 10^9$ anos é dominante no interior $\approx 130 \text{ pc}$ que é atribuída ao bojo da galáxia. Além desta região, até as fronteiras do campo de observação, a emissão é dominada por estrelas de idades intermediárias (de $0,1$ a $0,7 \times 10^9$ anos). Existe uma correlação espacial entre a componente de idade intermediária e o anel parcial de baixas dispersões de velocidade estelar, revelando que este é originado por estrelas de idade intermediária. Essa idade é consistente com um cenário em que a origem das baixas dispersões de velocidade em anéis é um evento passado

que formou estrelas, as quais ainda mantêm a cinemática de gás frio, da qual foram formados. Este cenário é o mesmo proposto para a galáxia Mrk 1066 em Riffel et al. (2010b).

Mazzalay et al. (2013a) apresentam um estudo para a região de emissão de linhas coronais para a galáxia Seyfert 2 NGC 1068, nas bandas J e K com dados obtidos com o instrumento NIFS, com alta resolução espectral em uma região interna a ≈ 300 pc. Foram estudadas as emissões das linhas de emissão coronais [Ca VIII], [Si VII], [Al IX] e [S IX]. Observaram complexas estruturas em termos de campos de velocidades e distribuição de fluxos das linhas de emissão. A emissão das linhas coronais ocorre predominantemente ao longo da direção Nordeste - Sudoeste, com emissão de maior intensidade localizada na direção Nordeste do núcleo. As linhas coronais são emitidas por gás, cobrindo velocidades de *blueshifts/redshifts* de $\sim -1600/1000$ km s⁻¹. Há tendência de que o gás localizado no lado Nordeste do núcleo esteja de *blueshifts*, enquanto que gás localizado na direção Sudoeste em *redshift*. Mapas de razões de linhas sugerem que o jato rádio tem um papel importante na estrutura da região de linhas coronais deste objeto e possivelmente na da cinemática.

Mazzalay et al. (2013b) analisaram as propriedades do gás molecular em regiões nucleares de uma amostra de seis galáxias próximas, obtidas na banda K, com o instrumento SINFONI do VLT para uma região interna a ≈ 300 pc. Foi realizado mapeamento em 2D de gás molecular quente e gás ionizado, das linhas de emissão H₂, Br γ e He I presentes no espectro das galáxias, onde foram encontradas diferentes morfologias, incluindo barras e distribuições em forma de anel. As morfologias do gás molecular e ionizado não são necessariamente coincidentes. As razões entre as linhas de emissão, sugerem que o principal mecanismo de excitação de H₂ em regiões circum-nucleares das galáxias são processos térmicos, independente da presença de um núcleo ativo. A amostra de galáxias contém grande quantidade de gás molecular em seus centros, com uma massa total de $\approx 10^5$ a 10^8 M $_{\odot}$. Porém essa massa corresponde a menos de 3 por cento da massa estelar, para as galáxias dentro dessas regiões, indicando que a presença de gás não deveria afetar as massas estimadas para os buracos negros, baseado em um modelo dinâmico. Os valores da largura equivalente do Br γ e das razões He I/Br γ , sugerem surtos de formação estelar ocorrendo por todo o anel (com raio de ≈ 270 pc) em NGC 4536, recentemente em $6,5 \times 10^6$ anos.

Mazzalay et al. (2014) estudaram a cinemática de H₂, para o interior de 4" de raio, das mesmas seis galáxias espirais próximas (Mazzalay et al., 2013b). Quatro das seis galáxias da amostra, mostram campos de velocidades de H₂ consistente com gás movimentando-se no plano da galáxia e rotacionando na mesma direção das estrelas. Os campos de velocidades podem ser classificados dentro de quatro tipos diferentes, ordenados por ordem de complexidade: 1) movimento circular no disco (NGC 3351); 2) movimento elíptico no plano da galáxia (NGC 3627 e NGC 4536); 3) espalhamento e movimento circular (NGC 4501); e 4) movimento e espalhamento desordenado (NGC 4569 e NGC 4579). A dispersão de velocidades para H₂ na galáxia é geralmente alta, maior que 50 km s⁻¹ no

interior de 1 a 2 parsecs de raio. Os baixos valores para a razão v/σ , poderiam ser um indicativo de um disco espesso em regiões mais internas das galáxias.

Os estudos citados anteriormente mostram que os gases molecular (H_2) e ionizado apresentam distribuições de fluxos e cinemáticas distintas na região central de galáxias ativas. O gás molecular em geral está restrito ao plano da galáxia e sua cinemática é dominada por uma componente de disco em rotação, embora em alguns casos, observam-se inflows de gás em direção ao núcleo. Já o gás ionizado se estende a altas latitudes acima do plano da galáxia, apresentando uma contribuição importante de emissão devida a gás em outflow a partir do núcleo. Em muitos casos este outflow está relacionado com a interação do jato rádio com o gás da NLR.

1.3.1 A Galáxia Mrk 1066

Mrk 1066 é uma galáxia do tipo SB0+ contendo um núcleo do tipo Seyfert 2. Está localizada a uma distância de 48,6 Mpc³, para a qual 1'' corresponde a 235 pc na galáxia. Imagens de banda estreita obtidas com o telescópio espacial Hubble mostram uma estrutura em “forma de jato” na emissão de [O III]+H β estendendo-se a 1,4'' do núcleo ao longo do ângulo de posição PA=315°, enquanto que a imagem de H α + [N II] é estendida para ambos os lados do núcleo (Bower et al., 1995). Imagens rádio contínuo em 3,6, 6 e 20 cm de Mrk 1066 mostram emissão estendida até 1,5'' do núcleo aproximadamente ao longo do mesmo PA da emissão das linhas óticas (Ulvestad; Wilson, 1989; Nagar et al., 1999). Observações espectroscópicas de fenda longa mostram que a emissão de linhas no infravermelho próximo é estendida até a 5'' do núcleo ao longo do PA=135/315° com distribuições de fluxos diferentes para as linhas do H_2 , [Fe II] e de recombinação do H, sugerindo diferentes processos de emissão para estas linhas (Knop et al., 2001).

Em Riffel, Storchi-Bergmann e Nagar (2010a) apresenta-se uma análise da emissão contínua e de linhas da região central da Mrk 1066, utilizando observações com o instrumento NIFS com resolução espacial de ≈ 35 pc. Com a alta resolução, foi possível observar uma concentração de poeira não resolvida com massa de $1,4 \times 10^{-2} M_{\odot}$, bem reproduzida para um corpo negro, com temperatura de ~ 830 K, sendo possivelmente parte do toro nuclear. Os mapas de fluxo para as linhas de emissão, exceto para as linhas H, apresentam maior emissão para noroeste do que para sudeste do núcleo, associado a uma estrutura observada em rádio. A emissão de H é mais intensa para o sudeste, onde é encontrada uma grande região de formação estelar. A forte correlação entre a emissão rádio e os maiores fluxos das linhas de emissão indicam que o jato rádio tem um papel fundamental na origem da emissão das linhas no infravermelho. Em fluxos mais baixos, esta correlação desaparece, sugerindo uma contribuição de emissão de gás localizado no plano da galáxia. O fluxo de H_2 é mais uniformemente

³Distância listada na base de dados NASA/IPAC Extragalactic Database (NED – <http://nedwww.ipac.caltech.edu>)

distribuído em todo o campo do NIFS e tem uma temperatura de excitação de ≈ 2.100 K. Sua origem parece ser de gás circum-nuclear aquecida pelos raios-X oriundos do núcleo ativo central. A emissão de [Fe II] também é consistente com o aquecimento por raios-X, mas sua correlação espacial com o jato de rádio e a emissão [OIII] indicam emissão adicional devido à excitação por choques devido ao jato rádio.

Em Riffel et al. (2010b), é relatada a primeira síntese de populações estelares bidimensional no infravermelho próximo para região nuclear da galáxia Mrk 1066 utilizando os mesmos dados acima. Uma componente de população estelar velha (idade $\gtrsim 5 \times 10^9$ anos) é dominante no interior de ≈ 160 pc, a qual é atribuída ao bojo da galáxia. Em uma região de ~ 300 pc, dominam as idades de 0,3 a $0,7 \times 10^9$ anos. É encontrada uma correlação espacial entre esta componente de idade intermédia e um anel parcial de baixa dispersão de velocidade estelar (σ_*). Estes anéis de baixa σ_* nuclear têm sido observados em outras galáxias ativas e resultados para Mrk 1066 sugerem que eles são formados por estrelas de idades intermediárias. Esta idade é consistente com uma origem de regiões de baixa σ_* em anéis, em um evento passado que desencadeou um *inflow* de gás e formou estrelas que ainda mantêm a cinemática mais fria do gás em comparação com o bojo a partir do qual elas foram formadas. Para o núcleo, foram detectadas duas componentes não resolvidas, sendo a fonte compacta no infravermelho com uma origem na emissão de poeira quente com uma massa de $\approx 1,9 \times 10^{-2} M_\odot$, e uma pequena contribuição no contínuo de uma lei de potência crescendo para o azul, com apenas 15% do fluxo em $2,12 \mu\text{m}$, atribuída a emissão do AGN.

Riffel e Storchi-Bergmann (2011a) apresentam um estudo sobre a cinemática do gás em Mrk 1066 a partir de dados obtidos com o NIFS, nas bandas J e K. O campo de velocidade estelar é dominado por rotação no plano do disco da galáxia mostrando uma distorção em forma de S ao longo do eixo menor da galáxia, originada possivelmente pela barra nuclear (estrutura oval) vista no contínuo. Ao longo desta estrutura oval, entre 170 e 280 pc a partir do núcleo é encontrado um anel parcial com baixa dispersão de velocidade estelar $\sigma_* \approx 50 \text{ km s}^{-1}$ atribuída a uma população estelar mais jovem do que as estrelas do bojo. A dispersão de velocidades estelar do bojo é $\sigma_* \approx 90 \text{ km s}^{-1}$ implicando em um buraco negro supermassivo com massa de $\approx 5,4 \times 10^6 M_\odot$. Os campos de velocidades para todas as linhas de emissão são dominadas por rotação semelhantes ao observado para as estrelas, apresentando distorções atribuídas a um disco compacto em rotação com raio $r \approx 70$ pc e *outflows* de matéria ao longo do jato rádio que é orientado aproximadamente ao longo do eixo maior da galáxia. O disco compacto é mais visível na cinemática do H_2 , apresentando os menores valores para σ ($\leq 70 \text{ km s}^{-1}$) e com padrão de rotação mais claro apoiando uma localização no plano da galáxia. A massa de gás para este disco é estimada em $\sim 10^7 M_\odot$. A cinemática do H_2 sugere que o disco nuclear está se alimentado com gás proveniente das regiões externas. O *outflow* é mais visível para o [Fe II], que apresenta os maiores valores σ (até 150 km s^{-1}). A taxa de *outflow* de gás ionizado foi estimada como sendo de $\approx 6 \times 10^{-2} M_\odot/\text{ano}$.

Na figura 1.3 (extraída de Riffel e Storchi-Bergmann (2011a)) é apresentada uma ilustração para o cenário físico proposto para a região central da galáxia Mrk 1066, com linhas de emissão de alta ionização, tais como as linhas óticas [OIII], originárias de gás em *outflow* ao longo da orientação bi-cone e do eixo do rádio (PA $\approx 135/315^\circ$), com um ângulo de abertura de $\approx 20^\circ$. O disco compacto é representado por ND (Nuclear Disk) nesta figura. A maior parte da emissão de linhas no infravermelho próximo tem origem num disco em rotação, com eixo maior coincidente com o disco estelar (linha tracejada em branco ao longo de PA = 128°).

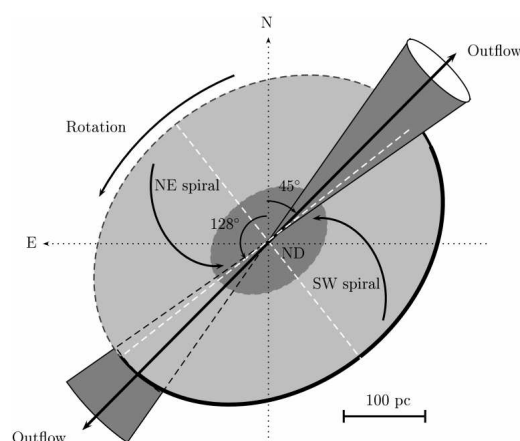


Figura 1.3: Cenário físico para a região “circumnuclear” de Mrk 1066. Extraído de Riffel e Storchi-Bergmann (2011a).

1.4 Justificativa e Objetivos do trabalho

A técnica PCA (Principal Component Analysis) busca identificar padrões e correlações em um grande conjunto de dados. Esta técnica permite que possamos observar detalhes não vistos com outras técnicas. Com esta finalidade aplicamos a Tomografia PCA, para as bandas J e K da galáxia Mrk 1066, buscando identificar novas informações, e mesmo confirmar aquilo que já foi estudado anteriormente.

Os objetivos deste trabalho são:

- Identificar, primeiramente, fatos inéditos em relação a estas galáxias, e também confirmar determinados eventos e fenômenos físicos já verificados em outras técnicas;
- Estudar detalhes da região central da galáxia Mrk 1066;
- Buscar por detalhes de cinemática e distribuição de gás molecular e ionizado não vistos anteriormente;

- Comparar resultados obtidos da Tomografia PCA com resultados obtidos por técnicas tradicionais.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: O capítulo 2 apresenta uma descrição básica da matemática e estatística envolvendo a Tomografia PCA, sendo mostrado também a importância do uso do filtro Butterworth para os dados da banda J. O capítulo 3 apresenta os resultados obtidos após a aplicação da Tomografia PCA para os cubos de dados das bandas J e K para Mrk 1066. No capítulo 4 apresentamos as discussões dos principais resultados obtidos com a Tomografia PCA em contexto com resultados obtidos com o uso de outras técnicas. O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e perspectivas.

Capítulo 2

Tomografia PCA

2.1 A técnica

A Análise de Componentes Principais (PCA - Principal Component Analysis) já é conhecida há mais de um século (Pearson, 1901; Hotelling, 1933), mas o cálculo envolvendo um grande número de variáveis somente foi possível com a evolução dos computadores. Um dos objetivos do uso da técnica está em reduzir um número grande de dados, de forma a não haver perda significativa de informações e ao mesmo tempo facilitar a extração destas informações. A PCA é uma técnica estatística multivariada, ela identifica as maiores variações nos resultados, transformando um conjunto inicial de variáveis em outro conjunto e ao mesmo tempo eliminando variáveis com informações de menor importância. As variáveis originais são reescritas em novas variáveis que são chamadas de componentes principais através de uma transformação de coordenadas. A componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais, sendo cada uma independente entre si (Vicini, L., 2005).

O modo de como funciona a PCA não é de difícil compreensão. Podemos analisar um exemplo básico do funcionamento dessa técnica para uma amostra de dados, representados por pixels espaciais e espectrais com uma dimensão para cada pixel desta amostra. Para efeitos de entendimento, supomos que estes pixels estejam representados tridimensionalmente com eixos ortogonais entre si. A primeira análise a ser feita é saber qual a direção de maior variância destes dados e após buscaremos encontrar a segunda direção de maior variabilidade. Na figura 2.1 temos uma representação com pontos para amostras de dados que são representados por pixels. Essas amostras estão distribuídas em torno dos eixos x , y , z . Buscamos fazer uma rotação nesses eixos para que as amostras possam ser descritas em um novo sistema de coordenadas. Este novo sistema deve ser de tal forma, que a componente principal aponte para a direção de maior variância. Após a rotação, a segunda componente deve possuir a segunda maior variância ou variabilidade dos dados e ao mesmo tempo ser ortogonal à

direção da primeira componente. Dessa forma, a terceira componente irá apontar para a terceira direção de maior variância e deve ser ortogonal às duas primeiras componentes. Na figura 2.1 temos a representação dos dois eixos: o eixo com os dados iniciais da amostra e o novo eixo de coordenadas, obtido após o giro do sistema de coordenadas antigo.

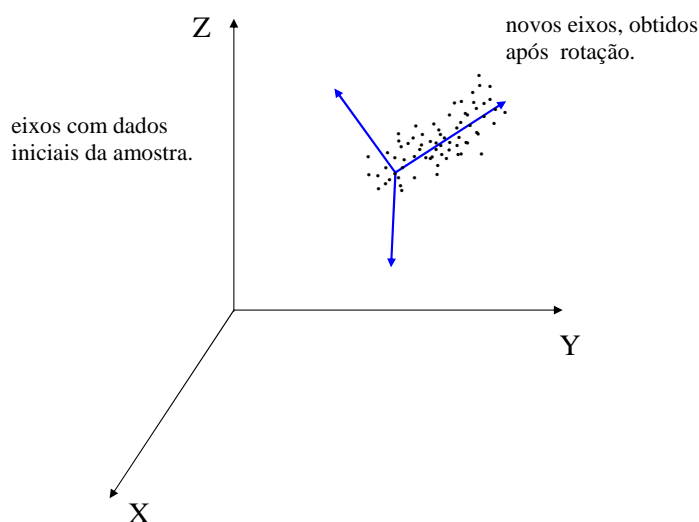


Figura 2.1: Pixeis espaciais e espectrais geometricamente representados no espaço tridimensional. A componente principal é traçada na direção de maior variância para os dados da amostra.

Após a rotação é obtida a direção de segunda maior variância. Inicialmente foram obtidas 3 componentes principais que estão representadas na figura 2.1 (a direção das componentes principais é determinada pelos autovetores, após a rotação matricial), e os novos valores são projetados em um espaço bidimensional, ou seja, os valores das duas primeiras componentes principais, havendo assim uma redução no número de dimensões (figura 2.2). Este processo acarreta na perda de algumas informações, mas, somente àquelas onde os pontos (dados da amostra) possuem uma menor variação na direção da componente principal. Dessa forma esses dados não são relevantes, não implicando em perdas importantes de informação, ou seja, ocorre uma simplificação dos dados.

Uma das características da técnica consiste na redução do número de dimensões para dados da amostra, facilitando para que sejam encontrados padrões e/ou correlações nesses dados. Outra característica é a transformação de um sistema de coordenadas inicialmente correlacionadas em um sistema de coordenadas não correlacionadas (a ortogonalidade das novas componentes é fundamental

para a distinção de fenômenos físicos diferentes), sendo a primeira componente principal a de maior variância e a segunda a de segunda maior variância e assim por diante. A técnica busca redistribuir a variação nas variáveis (eixos originais) de forma a obter o conjunto ortogonal de eixos não correlacionados (Vicini, L., 2005; Regazzi, 2001).

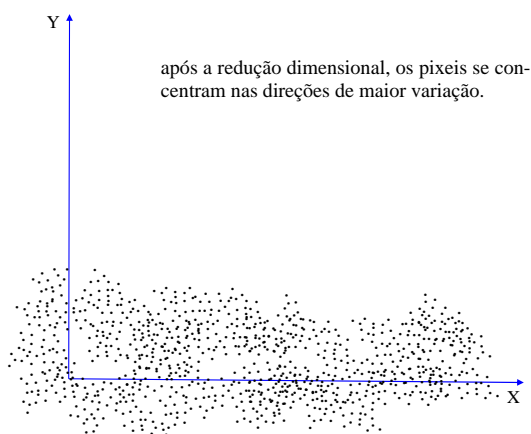


Figura 2.2: Pixels espaciais e espectrais representados geometricamente no plano bidimensional após a redução dimensional.

Na PCA ocorre uma análise do cálculo de autovalores e seus respectivos autovetores de uma matriz de variâncias-covariâncias ou de uma matriz de correlação. No final serão escritas as combinações lineares, que são as novas variáveis, descritas como componentes principais. Na figura 2.3 uma representação dos passos na análise de componentes principais, onde a matriz de variância-covariância é Σ e a matriz de correlação é R .

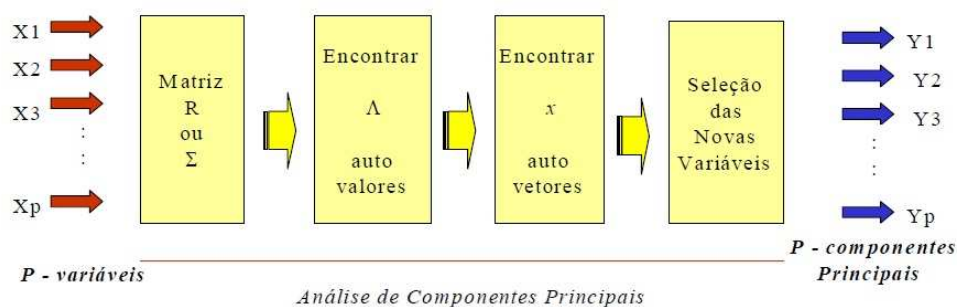


Figura 2.3: Esquema de representação para a análise das componentes principais (Vicini, L., 2005; Souza, A. M., 2000).

Nessa análise, as novas variáveis são combinações lineares das variáveis iniciais. As novas variáveis são as componentes principais e não são correlacionadas. A técnica pode ser aplicada a qualquer área de estudo, com grande importância para a análise em grandes conjuntos de dados.

A tomografia PCA consiste na aplicação dessa técnica a cubos de dados astrofísicos, onde tem-se duas direções espaciais e a terceira direção é dada pelos espectros do objeto de estudo (Steiner et al., 2009). Na tomografia PCA, o cubo será convertido para uma matriz, onde será realizado o tratamento estatístico/matemático, que é abordado nessa dissertação. O cubo de dados é composto de duas dimensões espaciais e uma dimensão espectral, onde as colunas da matriz corresponderão aos pixels espaciais e as linhas aos pixels espectrais. Os autovetores encontrados na matriz de dados se parecem com espectros, pois estão em função de comprimento de onda. Pela similaridade dos autovetores com espectros, estes são comumente chamados de auto-espectros. Os pixels espaciais correspondem às imagens do objeto observado, sendo que projeções dos dados sobre os autovetores representam essas imagens em um novo sistema de coordenadas. Essas imagens são chamadas de tomogramas.

2.1.1 Descrição matemática da PCA

Na figura 2.3 observamos as variáveis iniciais $X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$, que pertencem a matriz inicial dos dados de formato $n \times p$, a qual deve ser convertida para uma matriz quadrada. Quanto maior o número de variáveis e quanto maior sua interdependência, mais fácil será de comparar indivíduos, com base nos valores das variáveis originais (Vicini, L., 2005; Regazzi, 2001). Essa interdependência é representada pela matriz de variância-covariância Σ . Segundo (Vicini, L., 2005), a descrição matemática para a análise de componentes principais, é apresentada a seguir.

Para a matriz Σ associada ao vetor aleatório $\vec{X} = [X_1, X_2, \dots, X_p]$, onde os autovalores e autovetores são representados por $(\hat{\Lambda}_1, \vec{x}_1), (\hat{\Lambda}_2, \vec{x}_2), \dots, (\hat{\Lambda}_p, \vec{x}_p)$ sendo $\hat{\Lambda}_1 \geq \hat{\Lambda}_2 \geq \dots \geq \hat{\Lambda}_p \geq 0$, com o i -ésimo componente principal dado por: $\vec{Y}_i = \vec{x}_i \mathbf{X} = \vec{x}_{i1} X_1 + \dots + \vec{x}_{ip} X_p$, onde $i = 1, 2, \dots, p$. A matriz utilizada para esta análise é a de variância-covariância, representada daqui em diante por S , mas os resultados obtidos seriam os mesmos se a matriz fosse a de correlação. As variâncias e covariâncias são de forma que:

$$Var(Y_i) = \vec{x}_i^t S \vec{x}_i = \hat{\Lambda}_i \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (2.1)$$

$$Cov(Y_i, Y_k) = \vec{x}_i^t S \vec{x}_k = 0 \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (2.2)$$

A equação (2.1) informa que a variância é igual ao autovalor. Ainda de acordo com (Vicini, L., 2005), para calcularmos a matriz de variâncias e covariâncias, devemos primeiro verificar se as variáveis tem correlação ou não umas em relação as outras (existem testes que podem verificar o quanto as correlações são significativas). Mais detalhes sobre estes testes podem ser encontrados em Vicini, L. (2005), Ferreira, D. F. (1996), Regazzi (2001).

O próximo passo é escolher o número de componentes que melhor irá explicar as variáveis originais e posteriormente encontrar os autovetores para compor as combinações lineares, formando assim as novas variáveis. O último passo é a normalização e ortogonalização dos autovetores para que as componentes principais tenham solução única e também para que elas sejam não correlacionadas. O passo inicial é o cálculo da matriz S de variâncias-covariâncias, onde as variáveis $\vec{X} = [X_1, X_2, \dots, X_p]$, na matriz de variância-covariância podem ser representadas na matriz S :

$$S = \begin{bmatrix} \text{Vâr}(X_1) & \text{Côv}(X_1, X_2) & \dots & \text{Côv}(X_1, X_p) \\ \text{Côv}(X_1, X_2) & \text{Vâr}(X_2) & \dots & \text{Côv}(X_2, X_p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{Côv}(X_1, X_p) & \text{Côv}(X_2, X_p) & \dots & \text{Vâr}(X_p) \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

Os valores encontrados para variância e covariância, podem ser representados por:

$$S = \begin{bmatrix} S_1^2 & S_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & S_{1p} \\ & S_2^2 & \cdot & \cdot & \cdot & S_{2p} \\ & & \cdot & \cdot & \cdot & S_{3p} \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & \cdot & \cdot \\ & & & & & S_p^2 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

A matriz S é a matriz de variância-covariância das p variáveis, onde os termos de (S_{ij}) são as covariâncias e os termos (S_i^2) da diagonal principal são as variâncias. As variâncias e covariâncias são dadas por:

$$\text{Vâr}(X_j) = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n X_{ij'}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X_{ij'})^2}{n} \right], \quad (2.5)$$

$$c\hat{ov}(X_j, X_{j'}) = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n X_{ij} X_{ij'} - \frac{(\sum_{i=1}^n X_{ij})(\sum_{i=1}^n X_{ij'})}{n} \right]. \quad (2.6)$$

A covariância indica qual o grau de interdependência entre as variáveis. Um exemplo para o cálculo da matriz de variâncias e covariâncias conforme Vicini, L. (2005), é demonstrado com o uso da tabela 2.1, com os valores para as variáveis X e Y de uma amostra de cinco observações.

Tabela 2.1: Tabela com variáveis X e Y , referente a observações em cinco indivíduos

Observações	Método X	Método Y
1	10,0	10,7
2	10,4	9,8
3	9,7	10,0
4	9,7	10,1
5	11,7	11,5

A nova matriz S é quadrada e simétrica, sendo $S_{ij} = S_{ji}$. Ela é obtida a partir do cálculo da matriz de variâncias-covariâncias, de acordo com os dados da tabela 2.1.

$$V\hat{ar}(x) = \frac{1}{5-1} \left[533,23 - \frac{530,45}{5} \right] = 0,69 \quad (2.7)$$

$$V\hat{ar}(y) = \frac{1}{5-1} \left[544,79 - \frac{542,88}{5} \right] = 0,48 \quad (2.8)$$

$$C\hat{ov}(x,y) = \frac{1}{5-1} \left[538,44 - \frac{51,5.52,1}{5} \right] = 0,45 \quad (2.9)$$

Os valores obtidos em 1.9, 1.10 e 1.11 constituem a nova matriz S , dada por:

$$S = \begin{bmatrix} 0,69 & 0,45 \\ 0,45 & 0,48 \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Para o cálculo das componentes principais, deve-se primeiramente encontrar os autovalores e autovetores a partir da matriz S . O autovalor é o escalar $\hat{\Lambda}$ e o vetor \vec{x} , o autovetor. Sendo S a matriz

quadrada de variância-covariância e I a matriz identidade, sendo os autovalores $\hat{\Lambda}_1, \hat{\Lambda}_2, \dots, \hat{\Lambda}_p$ a solução da seguinte equação:

$$|S - \hat{\Lambda}I| = 0. \quad (2.11)$$

Sendo \vec{X} uma matriz pxp de todos os autovetores, S a matriz de variâncias-covariâncias pxp , e $\hat{\Lambda}$ a matriz pxp de todos os autovalores, temos que:

$$S\vec{X} = \hat{\Lambda}\vec{X}, \quad (2.12)$$

Então \vec{x} é dito autovetor ou vetor característico da matriz S , associada com o valor $\hat{\Lambda}$. Assim para o cálculo das componentes principais temos que encontrar os autovetores a partir dos autovalores que são a solução da equação (2.11). O autovetor pode ser representado por:

$$\vec{x}_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \cdot \\ \cdot \\ x_{ip} \end{bmatrix}.$$

Para a determinação das componentes principais, segue-se alguns procedimentos. Inicialmente resolve-se a equação (2.11) para a determinação dos autovalores. São estabelecidas restrições para que as componentes principais sejam independentes e também para que o sistema tenha solução única. A primeira restrição para o sistema ter solução única, é a condição para normalizar, dada por:

$$\sum_{j=1}^p x_{ij}^2 = 1, \text{ onde } \vec{x}_i^T \cdot \vec{x}_i = 1.$$

Para as componentes principais serem independentes, aplica-se a segunda restrição que é a condição de ortogonalidade: $\sum_{j=1}^p x_{ij}x_{kj} = 0 \ i \neq k$ ou $(\vec{x}_i^T \cdot \vec{x}_k = 0 \ i \neq k)$.

O próximo passo é determinar o autovetor normalizado \vec{x}_i , onde para cada autovalor $\hat{\Lambda}_i$ determina-se \vec{x}_i conforme solução da seguinte equação:

$$|S - \hat{\Lambda}I| \vec{x}_i = 0. \quad (2.13)$$

Para normalizar o autovetor tem-se:

$$\vec{x}_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \cdot \\ \cdot \\ x_{ip} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{x_{i1}^2 + x_{i2}^2 + \dots + x_{ip}^2}} \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \cdot \\ \cdot \\ x_{ip} \end{bmatrix} = \frac{\vec{x}_i}{\|\vec{x}_i\|} \vec{x}_i = 1. \tag{2.14}$$

Tem-se ainda que o i-ésimo componente principal é dado por:

$$Y_i = x_{i1}X_1 + \dots + x_{i2}X_2 + \dots + x_{ip}X_p.$$

E que:

- A variância é igual ao autovalor - $V\hat{a}r(Y_i) = \hat{\Lambda}_i$ sendo $V\hat{a}r(Y_1) > V\hat{a}r(Y_2) > \dots > V\hat{a}r(Y_p)$;
- A variância total é igual ao total dos autovalores - $\sum V\hat{a}r(X_i) = \sum V\hat{\Lambda}_i = \sum V\hat{a}r(Y_i)$;
- $C\hat{o}v(Y_i, Y_j) = 0$, se $\sum_{j=i}^p X_{ij}X_{kj} = 0$.

Para se saber a importância das variáveis originais X_1, X_2, \dots, X_p deve-se verificar a influência de cada variável sobre a componente principal. Para a componente principal Y_1 , a importância de cada variável pode ser dada por:

$$\frac{V\hat{a}r(X_{11})}{\sqrt{V\hat{a}r(X_1)}}, \frac{x_{12}}{\sqrt{V\hat{a}r(X_2)}}, \dots, \frac{x_{1p}}{\sqrt{V\hat{a}r(X_p)}}. \tag{2.15}$$

A obtenção de todas as componentes principais é dada pela combinação linear das variáveis originais, dessa forma tem-se que:

$$\begin{aligned} Y_{11} &= x_{11}X_{11} + x_{12}X_{12} + \dots + x_{1p}X_{1p} \\ Y_{21} &= x_{21}X_{21} + x_{22}X_{22} + \dots + x_{2p}X_{2p} \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \dots \quad \cdot \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \dots \quad \cdot \\ Y_{n1} &= x_{n1}X_{n1} + x_{n2}X_{n2} + \dots + x_{np}X_{np}. \end{aligned}$$

Estas serão as componentes principais obtidas, após o tratamento matemático. O número de componentes principais a ser utilizada irá depender da necessidade de explicação dos dados, ou seja, cada

componente tem uma fração da variância, sendo a primeira com a maior variância, a segunda com a segunda maior e assim por diante. Quanto mais componentes forem usadas, maior a percentagem total dos dados é explicada. Para saber a percentagem que cada componente explica, sendo PEPC (Percentagem de Explicação da Primeira Componente), PEPC+1 (Percentagem de Explicação das Duas Primeiras Componentes) e T_S (traço da matriz S) podemos fazer:

$$PEPC = \frac{\hat{\Lambda}_1}{T_S} 100 e T_S = \sum_i \hat{\Lambda}_i \quad (2.16)$$

$$PEPC + 1 = \frac{\hat{\Lambda}_1 + \hat{\Lambda}_2}{T_S} 100. \quad (2.17)$$

De acordo com o que foi analisado, podemos dizer que a variância total em uma matriz de variâncias-covariâncias, pode ser obtida com a soma das variâncias de cada variável, elas situam-se na diagonal principal da matriz. Somando todas as variâncias da diagonal principal (traço da matriz) é encontrada a variação total e posteriormente a contribuição total de cada variável. Mas a soma da diagonal principal também é igual a soma dos autovalores dessa matriz que mostra a variação total e a contribuição de cada autovalor em termos dessa variabilidade. Os autovalores representam os eixos principais ou componentes principais, com o primeiro autovalor correspondendo ao vetor de maior comprimento, o segundo ao segundo maior comprimento e assim por diante. A variância total desejada é escolhida dependendo do número de componentes principais utilizadas.

Utilizando a multiplicação da matriz de autovetores pela matriz original, é obtida uma matriz em que os dados foram transformados e representam projeções de pontos das componentes principais. A matriz com os dados finais, após a transformação com o uso da PCA, é representada conforme a equação (2.18).

$$T = AB. \quad (2.18)$$

onde:

T = a matriz final com os novos dados, após encontrado o novo sistema de coordenadas.

A = matriz ($n \times m$) com os dados originais.

B = matriz ($m \times m$) dos autovetores pertencentes as Componentes Principais encontradas.

2.2 Reconstrução do cubo de dados

O cubo de dados pode ser reconstruído para um autovetor ou vários autovetores após a aplicação da tomografia PCA. A reconstrução do cubo de dados é feita geralmente para eliminar autovetores que apresentem ruídos e/ou possuem menor importância. São considerados assim, apenas os autovetores relevantes para a análise dos dados. De acordo com Menezes, R. B. (2012), para a reconstrução do cubo de dados usando todos os autovetores após a aplicação da tomografia PCA, deve-se primeiramente inverter a equação (2.18)

$$A = B^{-1}T, \quad (2.19)$$

sendo a inversa de uma matriz ortogonal igual à sua transposta $E^{-1} = E^T$, tem-se que:

$$A = B^T T, \quad (2.20)$$

onde a partir de A , obtem-se o cubo de dados original. Conforme Menezes, R. B. (2012), para a reconstrução do cubo de dados com poucos autovetores, deve-se considerar apenas os autovetores escolhidos. A equação (2.20) fica da seguinte forma:

$$A'(\leq r) = [B(\leq r)]^T \cdot T(\leq r), \quad (2.21)$$

onde r representa o número máximo de autovetores e k os escolhidos, sendo $k \leq r$. Assim temos:

$A'(\leq r)$ = matriz reconstruída.

$B(\leq r)$ = matriz dos autovetores com $k \leq r$.

$T(\leq r)$ = matriz T obtida na equação (2.18), considerando para $k \leq r$.

Após encontrada a matriz A' , pode-se fazer a reconstrução do cubo de dados, com os k autovetores escolhidos. A equação (2.21) também pode ser escrita da seguinte forma:

$$A'(k) = [B(k)]^T \cdot T(k). \quad (2.22)$$

Se $k = 1$, então o cubo de dados terá apenas um autovetor. Nesse caso a matriz $B(k)$ terá apenas o autovetor escolhido para a reconstrução do cubo de dados. A reconstrução do cubo de dados a partir do autovetor de interesse é importante para melhor ressaltar certos fenômenos físicos.

2.3 Resultados prévios usando tomografia PCA

Steiner et al. (2009) apresentam a técnica e aplicaram a tomografia PCA para mostrar como extrair informações de um cubo de dados. A análise é realizada para a região central da galáxia NGC 4736 com núcleo LINER. O cubo de dados foi obtido com a IFU do instrumento GMOS do telescópio Gemini Norte, com uma resolução espectral $R = 2.900$ e um intervalo espectral de 4.700 \AA a 6.800 \AA . Na análise do segundo autoespectro e tomograma, observa-se um padrão de rotação claro para o gás emissor de linhas. Com o uso da tomografia PCA é proposto pelos autores responder à seguinte pergunta: Existe um BNS no núcleo LINER na região central da galáxia NGC 4736? A pergunta é respondida com a análise do terceiro autovetor. Existe uma componente larga para a linha $H\alpha$ e esta componente é típica de galáxias Seyfert 1 (ou LINER tipo 1), que é geralmente considerada como uma evidência clara da presença de um BNS. Também é observado que as linhas de emissão estreitas estão correlacionadas entre si ($[O \text{ I}]$, $[N \text{ II}]$ e $[S \text{ II}]$ e $H\alpha$). Na análise do quarto autoespectro e tomograma, novamente são observadas correlações entre linhas estreitas, mas agora estas estão anti-correlacionadas com a componente larga do $H\alpha$.

Menezes et al. (2010) analisaram a região central da galáxia NGC 4579, que possui um AGN do tipo LINER, em um intervalo espectral de 4.700 \AA a 6.900 \AA e com o uso da tomografia PCA. O cubo de dados foi obtido com a IFU do instrumento GMOS. Através da análise do segundo autovetor, é revelada a presença de um AGN do tipo 1 nesta galáxia. São observadas asas largas para a linha de emissão $H\alpha$. Outras linhas tipicamente presentes em LINERs também são detectadas. Observa-se também que o AGN não está localizado no centro do bojo estelar, ficando a uma distância de $0,3''$.

Schnorr Müller et al. (2011) obtiveram resultados com o uso da tomografia PCA para a região nuclear da galáxia M81, que possui um AGN do tipo LINER/Seyfert 1. O cubo de dados foi obtido com a IFU do instrumento GMOS do telescópio Gemini Norte, com uma resolução espectral de $R = 2.000$ e um intervalo espectral de 5.600 \AA a 7.000 \AA . No segundo tomograma observa-se uma anti-correlação entre a emissão do núcleo e do bojo estelar. No autoespectro correspondente observa-se a emissão de linhas (valores positivos) anti-correlacionada com o contínuo da emissão estelar (valores negativos). Observa-se também as linhas de absorção estelar dos elementos Ca I e Fe I no autoespectro 2 e no autoespectro 1, mas, vista de forma invertida nos autoespectros. No interior de $4'' \times 4''$, são observados picos duplos nas linhas de emissão de $H\alpha + [N \text{ II}] \lambda\lambda 6548, 6583$, com os picos azuis e vermelhos deslocados em $\approx \pm 80 \text{ km s}^{-1}$ em relação a velocidade sistêmica. O fato de os dois picos estarem correlacionados, significa que eles são espacialmente coincidentes, isto é, eles provêm da mesma região e não estão espacialmente resolvidos. Isto pode ser interpretado como emissão de gás em um *outflow* bipolar compacto ou emissão de gás em um disco em rotação. Os autoespectros e tomogramas 3, 4 e 5 mostram picos associados as linhas de emissão $H\alpha + [N \text{ II}] \lambda\lambda 6548, 6583$.

Nos autoespectros 3 e 4, nessas linhas, as asas azuis possuem anti-correlação com as asas vermelhas. Alguns padrões associados aos tomogramas podem ser explicados por gás em rotação no disco ou por *outflow* de gás ionizado. São observadas também duas estruturas com eixos aproximadamente ortogonais uma à outra, podendo isto ser explicado por um modelo simples de um disco em rotação, com um *outflow* associado ao disco ou por um *inflow* interno ao disco, o qual não é resolvido. No autoespectro 3 a emissão de [O I] $\lambda 6300$ é vista em correlação com um contínuo azulado, enquanto que no autoespectro 5, esta emissão está correlacionada com um contínuo avermelhado. Provavelmente eles estão associados a duas regiões afetadas por diferentes avermelhamentos devido a poeira e/ou propriedades distintas de espalhamento de luz. O autoespectro e tomograma 6 mostram uma componente larga não resolvida de $H\alpha$, que está espacialmente anti-correlacionada, com linhas estreitas de emissão.

Ricci, Steiner e Menezes (2011) aplicaram a tomografia PCA para a região central da galáxia NGC 7097, com um AGN do tipo LINER. Os dados foram obtidos com a IFU do instrumento GMOS, do telescópio Gemini Sul. Os espectros cobrem um intervalo espectral de 4.228 Å a 7.120 Å com uma resolução espectral de 1,8 Å. Na análise do segundo autoespectro e tomograma, as linhas de emissão $H\beta$, [O III] $\lambda\lambda 4959, 5007$, [O I] $\lambda 6300$, $H\alpha$, [N II] $\lambda\lambda 6548, 6583$, e [S II] $\lambda\lambda 6714, 6732$ estão correlacionadas entre si e apresentam intensidades relativas típicas de LINERs, com razões: [O III] $\lambda 5009/H\beta \sim 1,5$, [N II] $\lambda 6584/H\alpha \sim 1,2$ e [O I] $\lambda 6300/H\alpha \sim 0,34$ (Osterbrock; Ferland, 2006). Também são observadas correlações entre essas linhas, com um contínuo vermelho e anti-correlacionadas com a linha de absorção interestelar de Na I $\lambda 5891$. No terceiro autoespectro, são observadas anti-correlações entre as asas azuis e vermelhas das linhas de emissão. No respectivo tomograma é observado que o gás localizado a sudoeste do núcleo está se aproximando (asa azul no autoespectro) e o gás localizado a nordeste está se afastando de nós (asa vermelha no autoespectro). O terceiro autoespectro e seu tomograma são compatíveis com gás em rotação em um disco. No quarto autoespectro e tomograma, são observadas linhas de emissão típicas de LINERs, mas correlacionadas com um contínuo azul e com ausência de absorção interestelar de Na I. Na análise do autoespectro e tomograma 2, observa-se que o contínuo está crescendo para o vermelho no autoespectro, e no respectivo tomograma observa-se que o núcleo está um pouco deslocado do centro da galáxia. Para o autoespectro e tomograma 4, observa-se que o núcleo localiza-se no centro do tomograma, e no correspondente autoespectro o contínuo cresce para o azul (mas com um crescimento menos acentuado do que o observado no autoespectro 2, para o vermelho). De acordo com estas características os autores concluem que no autoespectro e tomograma 2 observa-se a reflexão da luz no cone de ionização. No autoespectro e tomograma 4 observa-se de forma direta o núcleo, ou seja, sem a reflexão no cone de ionização. A análise dos autoespectros e tomogramas 2, 3, 4 e 5, revelam um disco de gás em rotação em torno do AGN, com um bi-cone de ionização.

Sanmartim, Storch-Bergmann e Brotherton (2013) usaram a tomografia PCA para análise no in-

terior de 1,5 kpc do QUASAR Pós-*Starburst* SDSS J0210-0903. É usada espectroscopia de campo integral óptica com a IFU do instrumento GMOS, cobrindo um intervalo espectral de 4.400 Å a 5.600 Å e resolução espacial de $\approx 0,5$ kpc. Na análise do primeiro autoespectro e tomograma é observada uma correlação entre as linhas de emissão, indicando que elas são todas geradas na mesma região espacial. A razão $[O III]\lambda 5007/H\beta \lambda 4861$ observada no autoespectro é típica de ionização devido ao AGN, para uma região interna a $0,3''$ do núcleo. No segundo autoespectro e tomograma é observado que o contínuo (componente estelar) e a linha $H\beta \lambda 4861$ estão anti-correlacionados com as linhas de $[O III] \lambda\lambda 4959, 5007$. A análise do tomograma indica que as emissões se originam em regiões diferentes: $[O III]$ concentra-se em uma região interna a $0,3''$ do núcleo, enquanto que o $H\beta$ e a população estelar dominam a região circundante. A interpretação proposta é que, embora o autoespectro e tomograma 1 mostram que a maior parte da emissão de $H\beta$ é devida ao AGN, há alguma emissão de $H\beta$ com origem diferente. Esta emissão é gerada possivelmente por estrelas jovens que ionizam o gás, indicando a presença de formação estelar recente em torno do núcleo. Na análise do autoespectro e tomograma 4, observa-se que a emissão de $[O III]$ no autoespectro 4 tem uma parte do perfil em *redshift* (asa vermelha) e uma parte em *blueshift* (asa azul) anti-correlacionadas entre si. A parte em *redshift* se origina numa estrutura compacta a sudoeste do núcleo, a qual se curva e se estende para o sul, enquanto que a parte do *blueshift* se origina em uma região compacta para o nordeste do núcleo.

Em Menezes, Steiner e Ricci (2013) foram analisados dados da galáxia Sombrero (M104), obtidos com a IFU do instrumento GMOS do telescópio Gemini Sul, relatando a descoberta de colimação e espalhamento da emissão do AGN, em uma região circumnuclear da galáxia. A galáxia possui um AGN do tipo LINER. O intervalo espectral é de 4.470 Å a 7.340 Å, com resolução espectral de $R = 2.600$. No segundo autoespectro há correlações com os comprimentos de onda associados a componente larga da linha de emissão $H\alpha$ com largura total a intensidade zero (FWZI - Full Width at Zero Intensity) $\approx 5.120 \text{ km s}^{-1}$, com a asa vermelha mais intensa do que a asa azul, sendo estas características correlacionadas com a emissão do AGN. No autoespectro 3 são observadas anti-correlações entre as principais linhas de emissão com as principais linhas de absorção. De acordo com a morfologia do tomograma, parece existir uma possível rotação do disco estelar/gás em torno do núcleo de M104. Entretanto algumas distorções, principalmente nas áreas periféricas do campo de visão, segundo os autores podem indicar a presença de mais do que um fenômeno cinemático (como um *outflow* de gás, por exemplo). No autoespectro 4 observa-se uma anti-correlação entre a região azul do autoespectro e a região vermelha. Na análise do tomograma e autoespectro 4, é observada emissão típica de AGN (componente larga de $H\beta$), com um contínuo azul provavelmente representando um *featureless continuum*. Uma possível explicação é de que os fenômenos revelados pelo autoespectro e seu tomograma, correspondem a emissão do AGN (provavelmente colimada por uma estrutura de toro/disco) espalhadas por poeira, moléculas ou elétrons, concluem os autores.

2.4 Metodologia

A Tomografia PCA, como já mencionado anteriormente, é a Análise de Componentes Principais aplicada ao cubo de dados astrofísico. Nesse trabalho foi utilizado um *script* desenvolvido em python pelo professor Fabrício Ferrari da FURG, que é colaborador do nosso grupo, com o objetivo de realizar a Análise de Componentes Principais aos cubos de dados das bandas J e K da galáxia Mrk 1066. Os arquivos gerados pelo *script* resultam em várias Componentes Principais (conjunto de autovetor ou autoespectro e tomograma), com ordem decrescente de variância. Os autoespectros possuem no eixo das ordenadas o peso e no eixo das abscissas os comprimentos de onda representados por pixels espectrais, enquanto que os tomogramas representam em pixels espaciais a região central da galáxia.

2.4.1 Filtro Butterworth

A filtragem espacial Butterworth é um processo de filtragem aplicado para as frequências espaciais. No caso desse trabalho, o objetivo foi de usar o filtro Butterworth, para eliminar as componentes de frequências mais altas de imagem do cubo de dados da banda J. A necessidade de se utilizar algum tipo de filtro foi clara para autovetores de números maiores que 3, os quais são dominados por assinaturas instrumentais. O primeiro procedimento foi de encontrar a frequência de corte mais apropriada para aplicar ao cubo de dados da banda J e logo após usar esse cubo de dados para realizar a Tomografia PCA, sendo que para a banda K não foi notada diferença na utilização do filtro.

Para usar a filtragem espacial butterworth é necessária a aplicação da transformada de Fourier para que uma determinada função possa ser analisada em relação as suas componentes de frequência, eliminando assim (no caso desse trabalho) as componentes de frequências mais altas, ou seja, eliminando ruídos existentes. Após esse processo, aplica-se a transformada de Fourier inversa e novamente a função retorna para o domínio espacial. Além do filtro Butterworth, existem outros tipos de filtros que podem ser utilizados, como por exemplo o filtro gaussiano e o filtro ideal. Para cada um desses, existem os filtros passa-baixa e os filtros passa-alta. Os filtros passa-baixa eliminam os componentes de frequência que estão acima da frequência de corte D_0 , escolhida no uso do filtro, eliminando assim os componentes de alta frequência de imagem. Os filtros passa-alta por sua vez, eliminam os componentes de frequência que estão acima da frequência de corte D_0 , ou seja, os componentes de baixa frequência de imagem. Neste trabalho optou-se pelo filtro Butterworth, pois o mesmo se mostrou eficiente na remoção de ruídos.

O filtro passa-baixa de Butterworth pode ser representado pela equação:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left[\frac{D(u, v)}{D_0} \right]^{2n}}, \quad (2.23)$$

onde $D(u, v)$ é a distância entre os pontos (u, v) no domínio de frequências e o centro da função de frequência $(0, 0)$. O valor de n , corresponde a ordem do filtro, que indica uma maior suavidade para valores de n menores, enquanto que para valores maiores de n , corresponde a uma remoção mais agressiva dos componentes de alta frequência. A vantagem de se utilizar valores de n maiores, está em uma remoção maior das frequências mais altas, mas podendo trazer desvantagens na qualidade final da imagem.

Para a escolha do filtro mais apropriado, foram feitos vários testes, sendo escolhida uma ordem baixa de n , $n=1$ e uma frequência de corte $D_0 = 0,3$ Ny. Os motivos para essa escolha estão em eliminar os componentes de alta frequência e ao mesmo tempo não diminuir a qualidade da imagem, de forma a não prejudicar a interpretação da mesma. A figura 2.4 apresenta três imagens, referente a escolha do filtro usado. Em a) a imagem do contínuo, centrado em $1,25\mu\text{m}$, em b) a imagem após o uso do filtro butterworth e em c) a imagem do resíduo referente as componentes de frequências altas.

Foram analisadas várias imagens de resíduos; conforme a frequência e a ordem do filtro utilizada, a filtragem seria mais apropriada ou menos apropriada para a remoção de ruídos existentes. Os resíduos observados na imagem da direita da figura 2.4, mostra uma boa remoção de ruídos, enquanto que os resíduos da figura 2.5 mostra que há remoção de ruídos, mas também de outras componentes de imagem que estão associadas a perdas de informação, devido ao uso de um filtro com uma frequência de corte não apropriada.

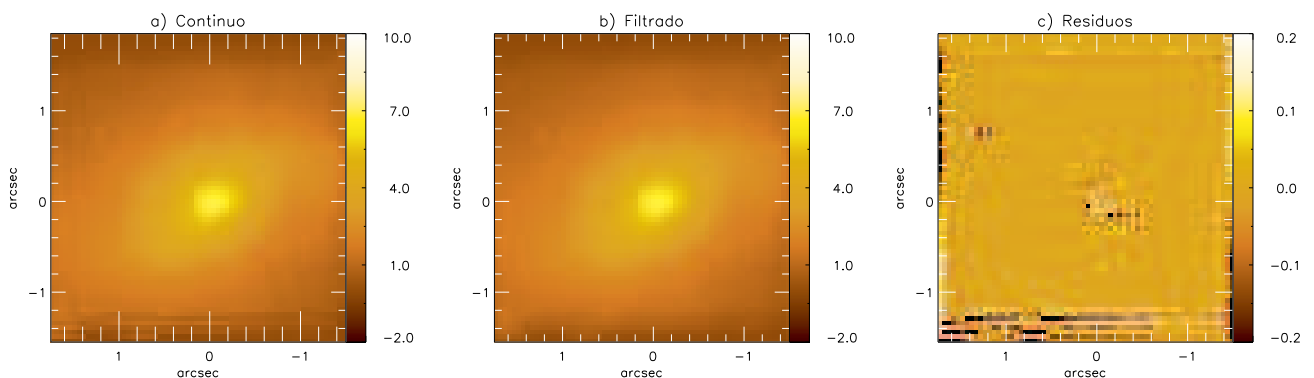


Figura 2.4: a) Imagem do contínuo centrado em $1,25\mu\text{m}$ obtido do cubo original b) Imagem de contínuo após o uso do filtro Butterworth, de ordem 1 e frequência de corte $0,3$ Ny c) Imagem referente aos resíduos subtraídos de a).

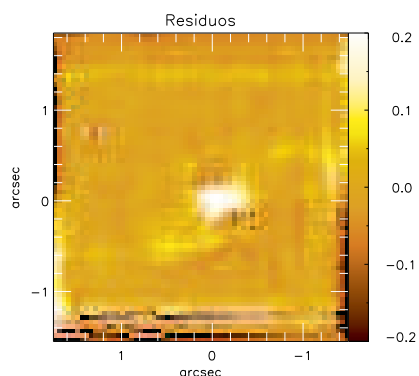


Figura 2.5: Imagem referente aos resíduos subtraídos do contínuo, após o uso do filtro butterworth de ordem 1 e frequência de corte 0,2 Ny.

A figura 2.6 mostra o autovetor e tomograma 5, após a aplicação da Tomografia PCA para o cubo de dados original da banda J. Já a figura 2.7, mostra o mesmo autovetor e tomograma após o uso do filtro Butterworth. A comparação destas figuras evidencia a importância na remoção de ruídos nestes dados.

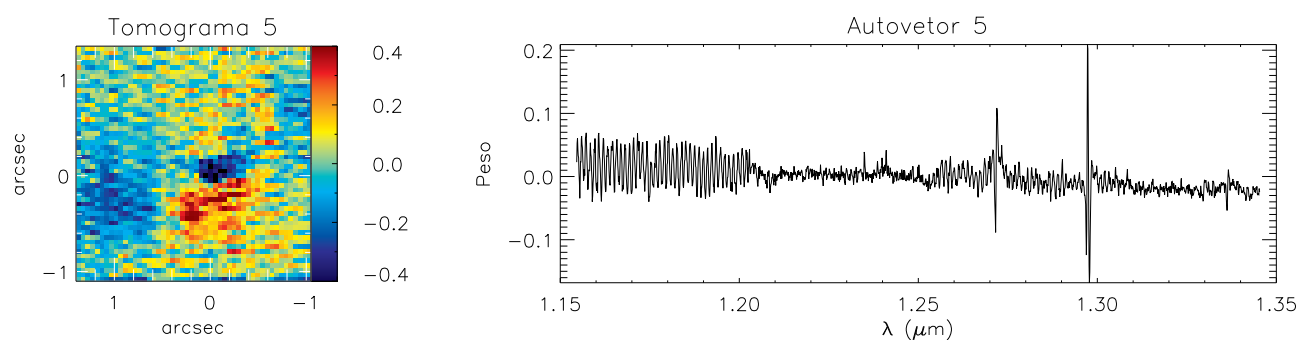


Figura 2.6: Tomograma e autovetor 5 para a banda J, sem o uso do filtro de Butterworth.

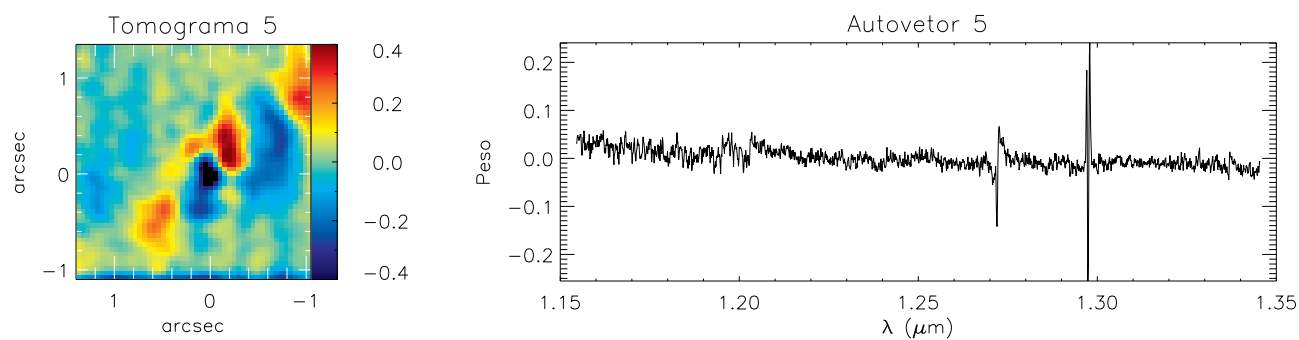


Figura 2.7: Tomograma e autovetor 5, com o uso do filtro de butterworth de ordem 1 e frequência de corte 0,3 Ny.

Capítulo 3

Resultados

Utilizamos espectroscopia de campo integral da região central da galáxia Mrk 1066 obtida com o instrumento NIFS (Near-Infrared Integral Field Spectrograph), instalado no Telescópio Gemini Norte, localizado no Havai. As observações foram realizadas nas bandas J e K e a resolução espacial dos dados é de aproximadamente 35 pc. Mrk 1066 é uma galáxia Seyfert do tipo 2, localizada a uma distância de 48,6Mpc, e como consequência $1''$ corresponde a 235pc na galáxia. O NIFS foi orientado de forma que o norte ficasse para cima, perpendicular ao eixo de orientação das slices. Os dados utilizados aqui já foram publicados anteriormente por nosso grupo (Riffel; Storchi-Bergmann; Nagar, 2010a; Riffel et al., 2010b; Riffel; Storchi-Bergmann, 2011a)

A Tomografia PCA foi aplicada de forma a analisar regiões espaciais e espectrais diferentes para a galáxia. Para a região espacial, buscou-se eliminar os pixels das bordas dos cubos de dados, pois não apresentavam informações relevantes nos tomogramas e também apresentavam ruídos. A tomografia PCA também foi aplicada para algumas regiões espectrais, com o intuito de investigar regiões onde determinadas linhas de emissão/absorção estavam presentes. Foi usado o filtro Butterworth para os cubos de dados da banda J, com o objetivo de remover ruídos de alta frequência espacial.

3.1 Banda K

O cubo de dados da galáxia Mrk 1066 na banda K possui para a região espacial, 63 pixels no eixo das abscissas e 65 pixels no eixo das ordenadas. A dimensão espectral possui 2.040 pixels. Dessa forma o cubo de dados possui $63 \times 65 \times 2.040 = 8.353.800$ pixels. Cada pixel espacial corresponde a um tamanho angular de $0,05'' \times 0,05''$. Assim o eixo das abscissas possui $3,25''$ e o eixo das ordenadas $3,15''$. A região espacial do cubo de dados em que é realizada a Análise de Componentes Principais, está entre 10 a 60 pixels para o eixo das abscissas e de 10 a 55 pixels para o eixo das ordenadas, correspondendo a $2,5'' \times 2,25''$ centrais da galáxia. As bordas do cubo foram eliminadas

pois continham espectros muito ruidosos. O intervalo espectral dos dados da banda K vai de $2,1\mu\text{m}$ a $2,5\mu\text{m}$ (como observado na figura 3.1) e a amostragem espectral é de $2,18 \text{ \AA}/\text{pixel}$.

Como mencionado anteriormente, a galáxia Mrk 1066 já foi objeto de estudos com trabalhos publicados pelo nosso grupo. É importante uma identificação prévia das linhas de emissão/absorção presentes no espectro antes da aplicação da Tomografia PCA. Na figura 3.1 apresentamos um espectro típico da Mrk 1066 na banda K, obtido para uma abertura de $0,05'' \times 0,05''$, em uma região da galáxia próxima do núcleo, a $0,2''$ a leste do mesmo. As linhas de emissão são identificadas como: $\text{Br}\gamma$ λ $2,1661\mu\text{m}$, H_2 λ ($2,12183$, $2,15420$, $2,22344$, $2,24776$, $2,40847$, $2,41367$, $2,42180$, $2,43697$ e $2,45485$) μm , He I λ $2,14999\mu\text{m}$ e $[\text{Ca VIII}]$ λ $2,32204\mu\text{m}$. As bandas de absorção estelar do CO em torno de $2,3\mu\text{m}$ também são bastante proeminentes.

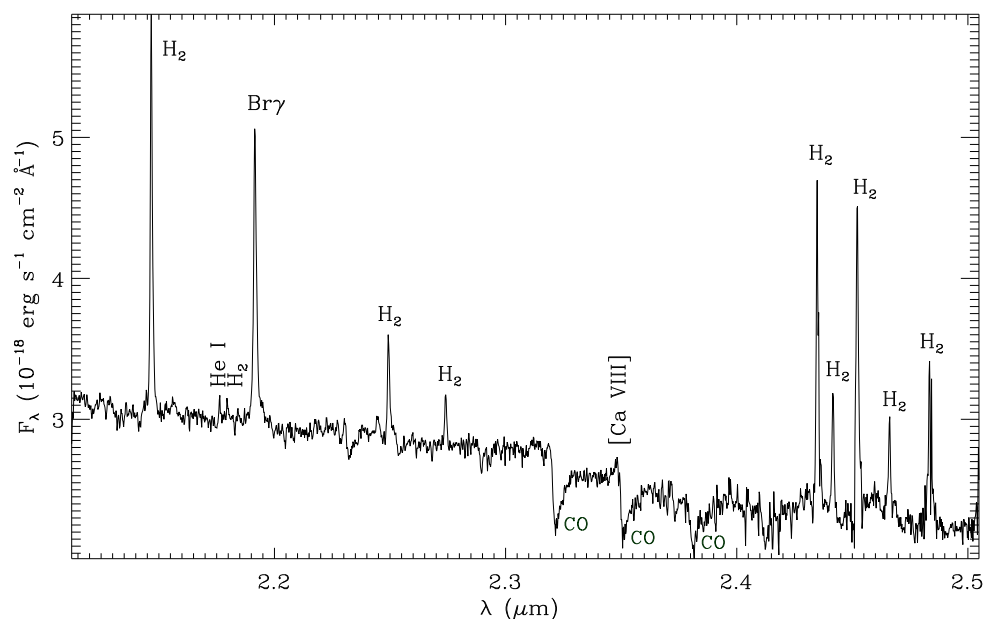


Figura 3.1: Espectro na banda K da galáxia Mrk 1066 de uma região a $0,2''$ a leste do núcleo, com uma abertura de $0,05'' \times 0,05''$.

3.1.1 Região espectral: $2,1\mu\text{m}$ a $2,47\mu\text{m}$

Em um primeiro momento aplicamos a tomografia PCA para o intervalo espectral de $2,1\mu\text{m}$ a $2,47\mu\text{m}$, que corresponde a praticamente todo o intervalo espectral das observações. Foram eliminados somente os primeiros e últimos pixels, que apresentaram ruídos.

A figura 3.2 mostra os primeiros autovetores e seus respectivos tomogramas após a Análise de Componentes Principais do cubo de dados da banda K.

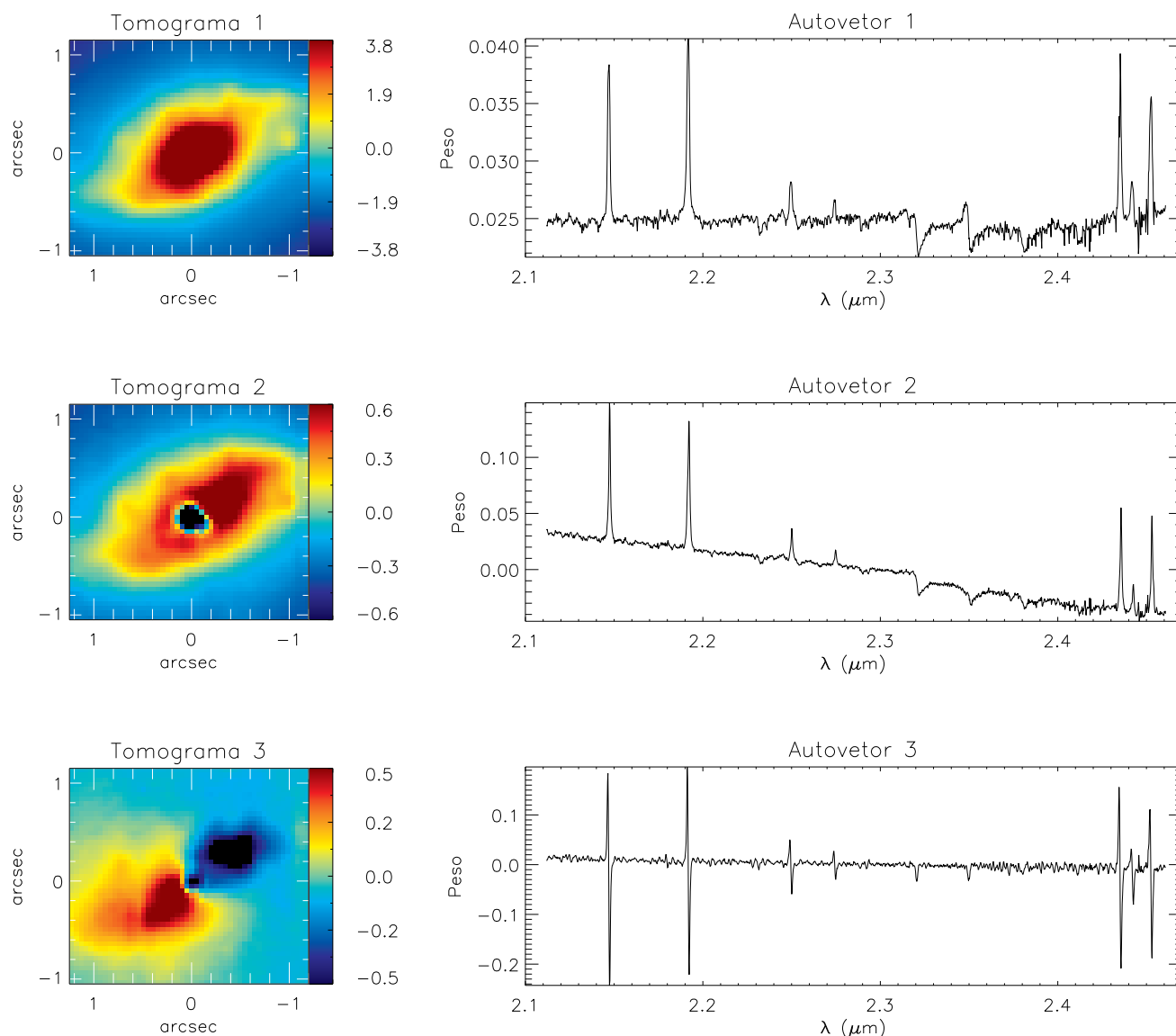


Figura 3.2: Autovetores e tomogramas 1, 2 e 3 da banda K, para região de $2,1\mu\text{m}$ a $2,47\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,25''$ da região central da galáxia.

O primeiro autovetor apresenta correlações entre os comprimentos de onda das linhas de H_2 , $\text{Br}\gamma$, $[\text{Ca VIII}]$ e He I , que corresponde à emissão da região central da galáxia, sendo representada pela parte vermelha observada no tomograma. A identificação de absorção de CO estelar em torno de $2,3\mu\text{m}$, indica que o contínuo observado é devido as estrelas do bojo da galáxia. O autovetor e tomograma 1 possuem a maior fração da variância dos dados. A tabela 3.1 mostra a variância que corresponde cada componente principal (cada conjunto de autovetor e tomograma).

O segundo autovetor novamente apresenta correlações entre os comprimentos de onda das linhas

de emissão e também uma anti-correlação entre a parte azul e a parte vermelha do autovetor, com um contínuo crescendo para o azul. Como a análise realizada deve ser principalmente identificando correlações e anti-correlações, poderíamos também multiplicar por (-1) o autovetor e tomograma, sem mudar as correlações dos dados e dizer que o contínuo cresce para o vermelho, invertendo também as cores observadas no tomograma 2, ou seja, a parte mais vermelha corresponderia a parte azul e vice-versa. O contínuo crescendo para o azul pode ser associado a estrelas jovens, enquanto que o contínuo crescendo para o vermelho, poderia ser associado a emissão de poeira. Esta segunda interpretação é apoiada pelo modelo unificado de AGNs, que prevê a existência de um toroide de poeira em torno do disco de acreção e pelo fato de este comportamento estar associado a uma estrutura não resolvida no núcleo da galáxia no tomograma. A presença de emissão de poeira já foi primeiramente encontrada em Riffel, Storchi-Bergmann e Nagar (2010a), Riffel et al. (2010b)

O terceiro autovetor apresenta as asas azuis das linhas de emissão anti-correlacionadas com as asas vermelhas. A parte azul no tomograma corresponde a emissão de gás que origina as asas azuis no autovetor, enquanto que a parte vermelha corresponde aos comprimentos de onda das linhas que possuem asas vermelhas. A região no tomograma ao longo da parte azul e vermelha, localizam-se ao longo do eixo maior da galáxia, sugerindo que sua origem é de emissão de gás em um disco em rotação.

O autovetor 4 da figura 3.3, apresenta correlações entre as linhas de emissão do H₂ e do Brγ. No tomograma correspondente observa-se uma boa correlação entre a emissão da linha e o jato rádio, representado pelos contornos brancos.

Autovetor	Variância em %
1	98,4
2	0,91
3	0,33
4	0,07
5	0,04
6	0,02
7	0,02
8	0,01
9	0,01

Tabela 3.1: Tabela de variância dos dados da banda K, para região de 2,1 μ m a 2,47 μ m no interior de 2,5'' \times 2,25'' da região central da galáxia

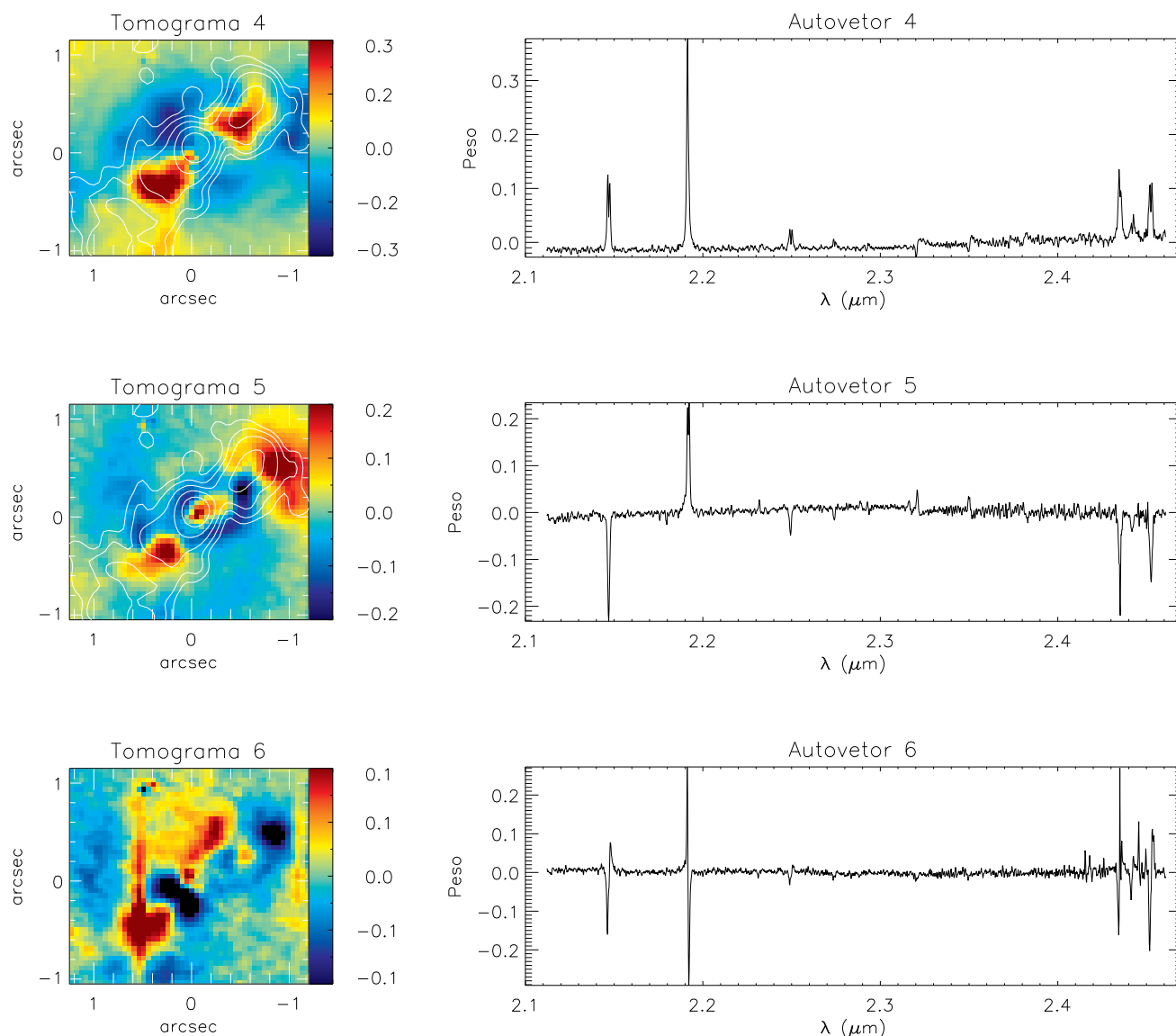


Figura 3.3: Autovetores e tomogramas 4, 5 e 6 da banda K, para região de $2,1\mu\text{m}$ a $2,47\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,25''$ da região central da galáxia.

O quinto autovetor, mostrado na figura 3.3, apresenta as linhas de emissão do H_2 e do $\text{Br}\gamma$, anti-correlacionados. No tomograma a parte vermelha corresponde a emissão de $\text{Br}\gamma$. A parte azul no tomograma corresponde principalmente a H_2 . A análise conjunta do autovetor e tomograma, indica que o $\text{Br}\gamma$ está presente principalmente ao longo do jato rádio (contornos brancos) e o H_2 está associado à estruturas que formam braços espirais que se originam em um anel em torno do núcleo.

No sexto autovetor são observadas anti-correlações entre as asas azuis e vermelhas das linhas do hidrogênio molecular e observa-se que as asas azuis do H_2 estão correlacionadas com a asa vermelha

do $\text{Br}\gamma$. A parte azul no tomograma, corresponde as linhas observadas no autovetor abaixo de 0 e a parte vermelha corresponde as linhas acima de 0. As anti-correlações entre as asas azuis e vermelhas das linhas de gás, são de uma cinemática complexa, indicando uma origem de emissão no respectivo tomograma, que pode estar associada com uma rotação e/ou *outflow*.

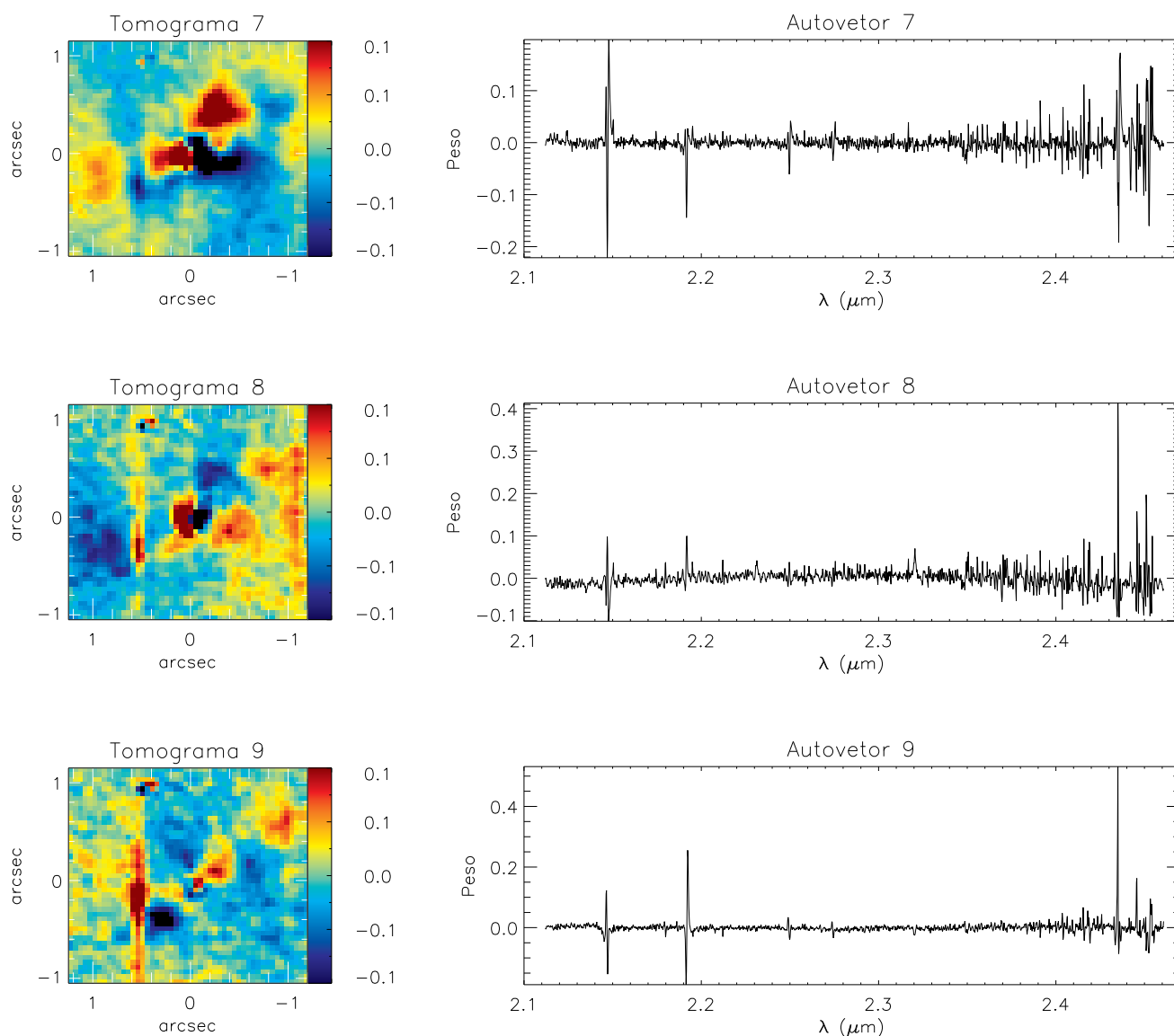


Figura 3.4: Autovetores e tomogramas 7, 8 e 9 da banda K, para região de $2,1\mu\text{m}$ a $2,47\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,25''$ da região central da galáxia.

Os autovetores e tomogramas 7, 8 e 9 representados na figura 3.4, possuem uma interpretação similar e apresentam a menor fração de variância dos dados para essa região. No autovetor 9 é possível identificar correlações dos comprimentos de onda das asas azuis de algumas linhas do hidrogênio

molecular com a asa azul do comprimento de onda da linha do Bry, assim como anti-correlações com os comprimentos de onda correspondentes às asas vermelhas das mesmas. Os autovetores e tomogramas da figura 3.4 parecem estar relacionados a fenômenos cinemáticos do gás existente na região, com a parte azul nos tomogramas associados à *blueshifts* e a parte vermelha associada à *redshift*.

3.1.2 Região espectral: $2,13\mu\text{m}$ a $2,2\mu\text{m}$

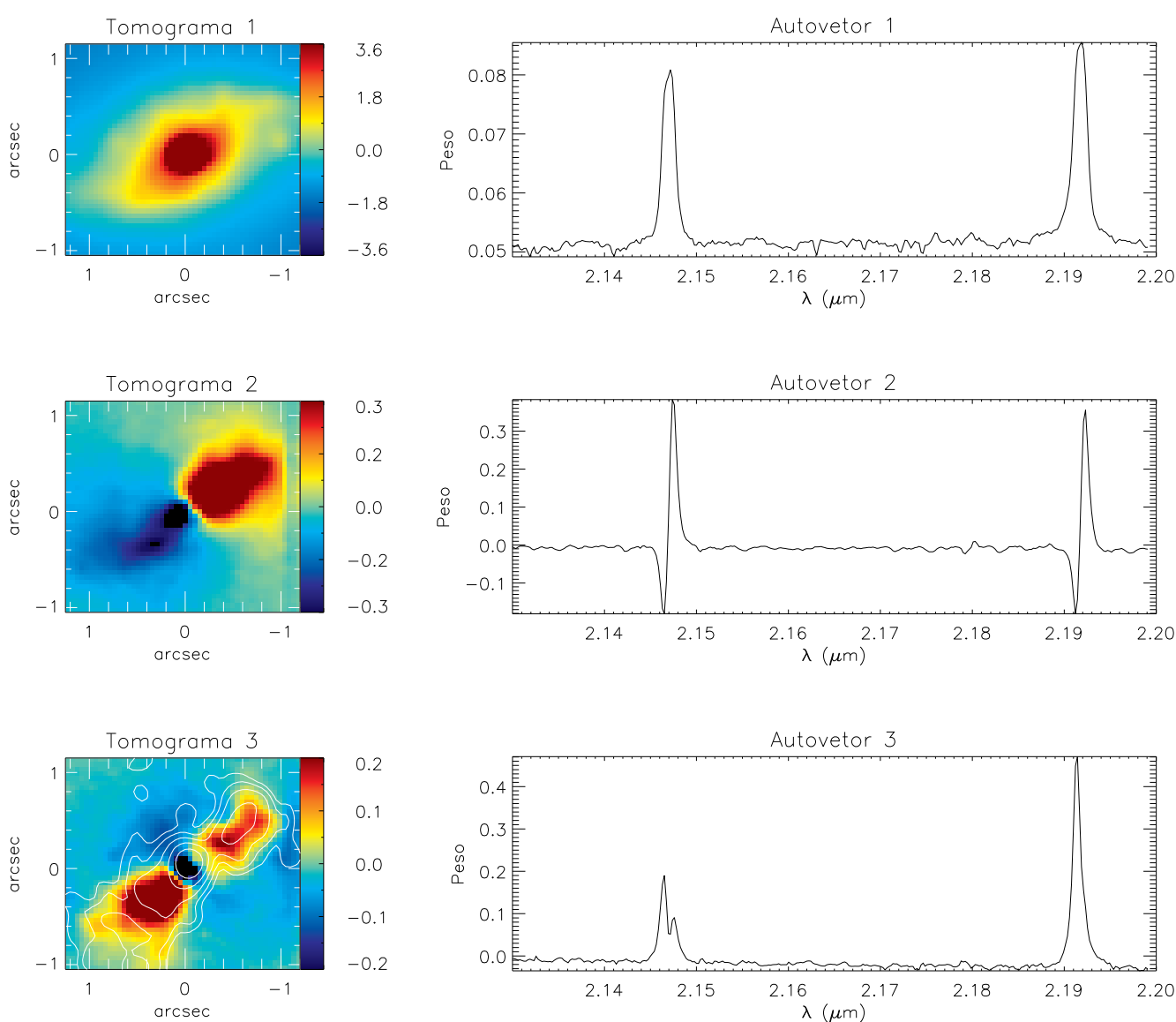


Figura 3.5: Autovetores e tomogramas 1, 2 e 3 da banda K, para região de $2,13\mu\text{m}$ a $2,2\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,25''$ da região central da galáxia.

Com o objetivo de melhor estudar a emissão H_2 e Bry , aplicamos a Tomografia PCA para o intervalo espectral entre $2,13\mu m$ a $2,2\mu m$ que compreende principalmente as linhas de emissão do Bry $\lambda 2,1661\mu m$ e do H_2 $\lambda 2,12183\mu m$. A figura 3.5 apresenta os primeiros três autovetores e tomogramas. No autovetor 1, as linhas de emissão estão correlacionadas e representam a parte vermelha no tomograma, correspondendo a emissão da região central da galáxia.

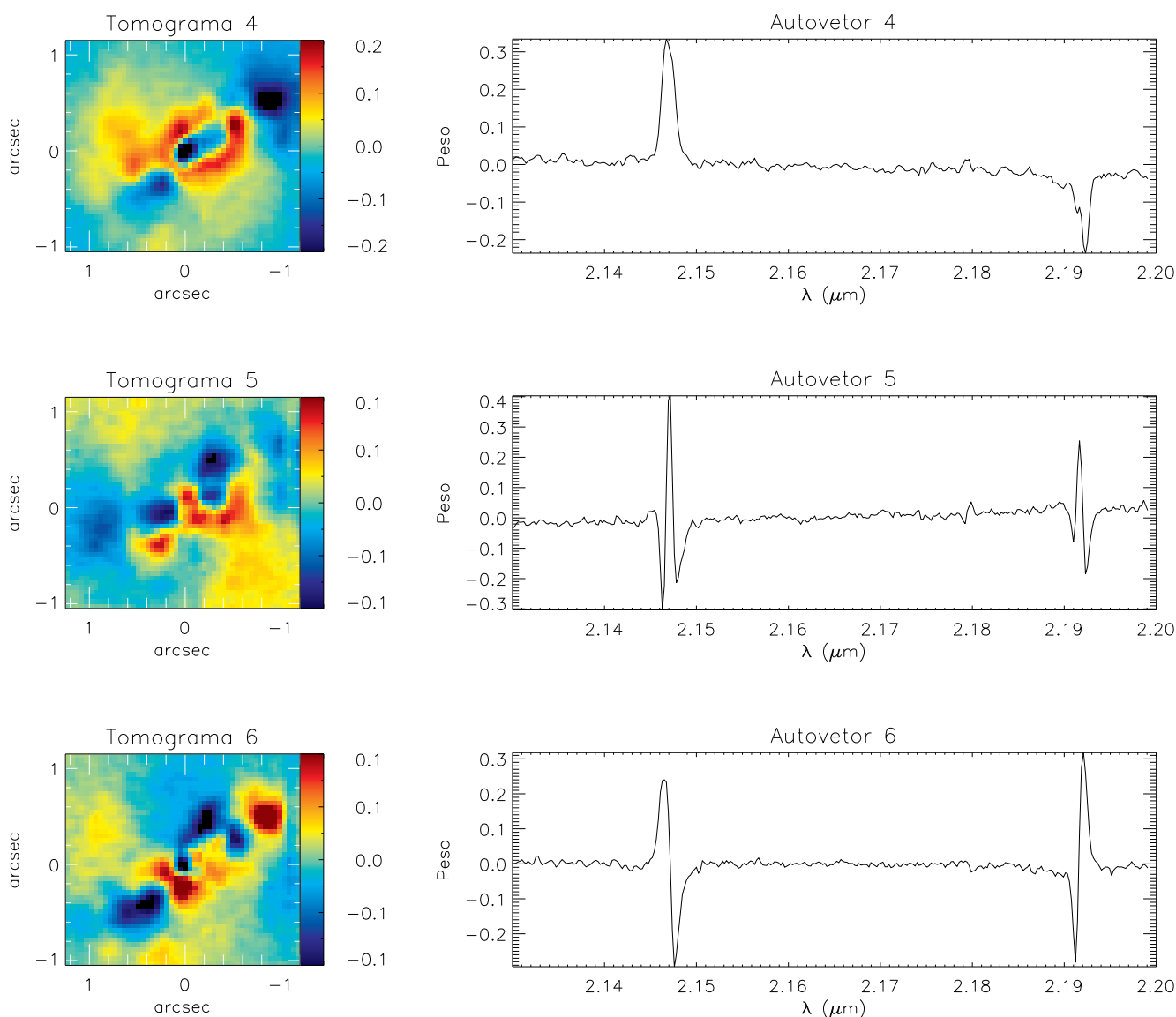


Figura 3.6: Autovetores e tomogramas 4, 5 e 6 da banda K, para região de $2,13\mu m$ a $2,2\mu m$ no interior de $2,5'' \times 2,25''$ da região central da galáxia.

No segundo autovetor são observadas anti-correlações entre as asas azuis e as asas vermelhas das linhas de H_2 e de Bry . Os comprimentos de onda das linhas que possuem asas azuis no autovetor,

correspondem a região azul observada no tomograma 2, enquanto que os comprimentos de onda das linhas que possuem asas vermelhas, correspondem a região vermelha observada no tomograma. A comparação dos autovetores e tomogramas 1 e 2 com os obtidos para o intervalo espectral maior (da figura 3.2) mostra que eles são semelhantes aos autovetores e tomogramas 1 e 3 para aquele intervalo espectral, sendo atribuídos a emissão de gás do bojo na região central e a emissão de gás em um disco em rotação, respectivamente.

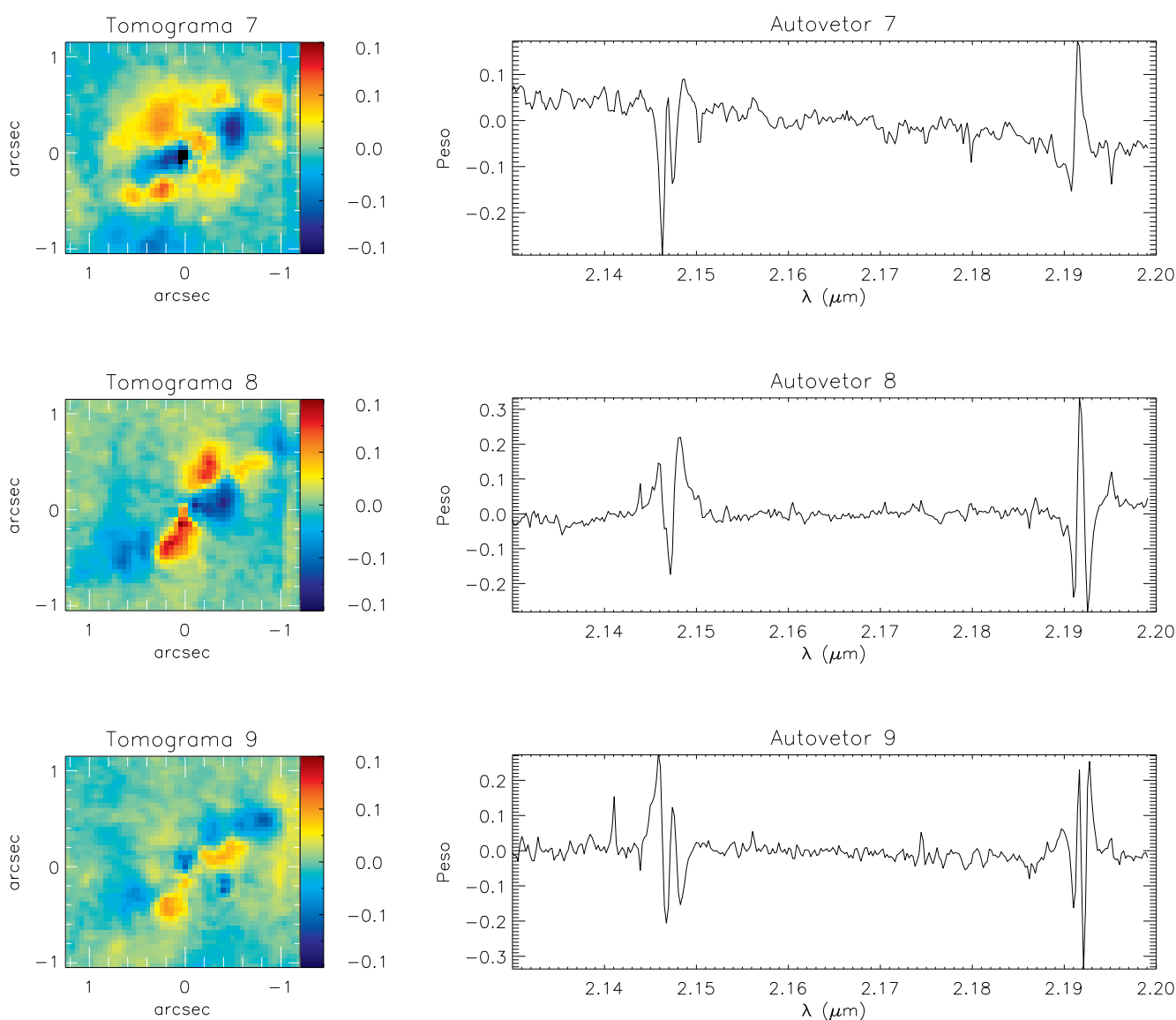


Figura 3.7: Autovetores e tomogramas 7, 8 e 9 da banda K, para região de 2,13 μm a 2,2 μm no interior de 2,5'' \times 2,25'' da região central da galáxia.

No autovetor 3 observa-se um duplo pico para a linha do H_2 λ 2,12183 μm e uma leve assimetria

na linha do Br γ , indicando que parte da matéria está vindo em nossa direção e parte da matéria está se afastando de nós. No tomograma 3 a parte vermelha está relacionada com as linhas de emissão do Br γ e do hidrogênio molecular. As linhas de emissão possuem correlação e são observadas ao longo do jato rádio, que também está ao longo do eixo maior da galáxia. Uma possível interpretação para esse autovetor e tomograma, é que existe gás em emissão devido a interação do jato rádio com o meio interestelar, uma vez que a maior parte da emissão está correlacionada com estruturas rádio.

O autovetor 4 da figura 3.6, apresenta as linhas de emissão do hidrogênio molecular e do Br γ , mas agora anti-correlacionados. O respectivo tomograma apresenta a região circum-nuclear da galáxia, com hidrogênio molecular em torno do núcleo central, localizado principalmente ao longo do eixo maior da galáxia e em uma estrutura de anel circundando o núcleo, somente vista no tomograma 5 da figura 3.3. No tomograma o Br γ corresponde a parte azul e está relacionado à emissões da região central da galáxia. Os autovetores e tomogramas 5 e 6, apresentam características semelhantes e indicam a presença de algum fenômeno cinemático. No autovetor 5 são observadas anti-correlações entre as asas e o pico da linha de emissão, com indicativo de haver dispersão de velocidades. O autovetor 6 apresenta asas azuis anti-correlacionadas com asas vermelhas, como movimento de rotação ou *outflow* de matéria. A tabela 3.2 apresenta a fração da variância que cada autovetor e tomograma representa para essa região, sendo que o autovetor 1 corresponde a mais de 98% da variância dos dados.

Autovetor	Variância em %
1	98,45
2	0,87
3	0,35
4	0,09
5	0,03
6	0,04
7	0,01
8	0,01
9	0,01

Tabela 3.2: Tabela de variância dos dados da banda K, para região de $2,13\mu\text{m}$ a $2,2\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,25''$ da região central da Mrk 1066.

A figura 3.7 apresenta os autovetores e tomogramas 7, 8 e 9 que possuem uma fração menor da variância dos dados para essa região. Em particular no autovetor 8, observa-se que a região de mais alta velocidade das linhas (as asas) está anti-correlacionada com a região de mais baixa velocidade (o

centro da linha). A análise conjunta dos tomogramas e autovetores, sugere que eles se originam de emissão de gás com cinemática complexa.

3.1.3 Região espectral: $2,123\mu\text{m}$ a $2,167\mu\text{m}$

A figura 3.8 apresenta uma região espectral que compreende principalmente o hidrogênio molecular em $\lambda 2,12183\mu\text{m}$. O primeiro autovetor e tomograma, estão relacionados à emissão da região central da galáxia, como nos casos anteriores.

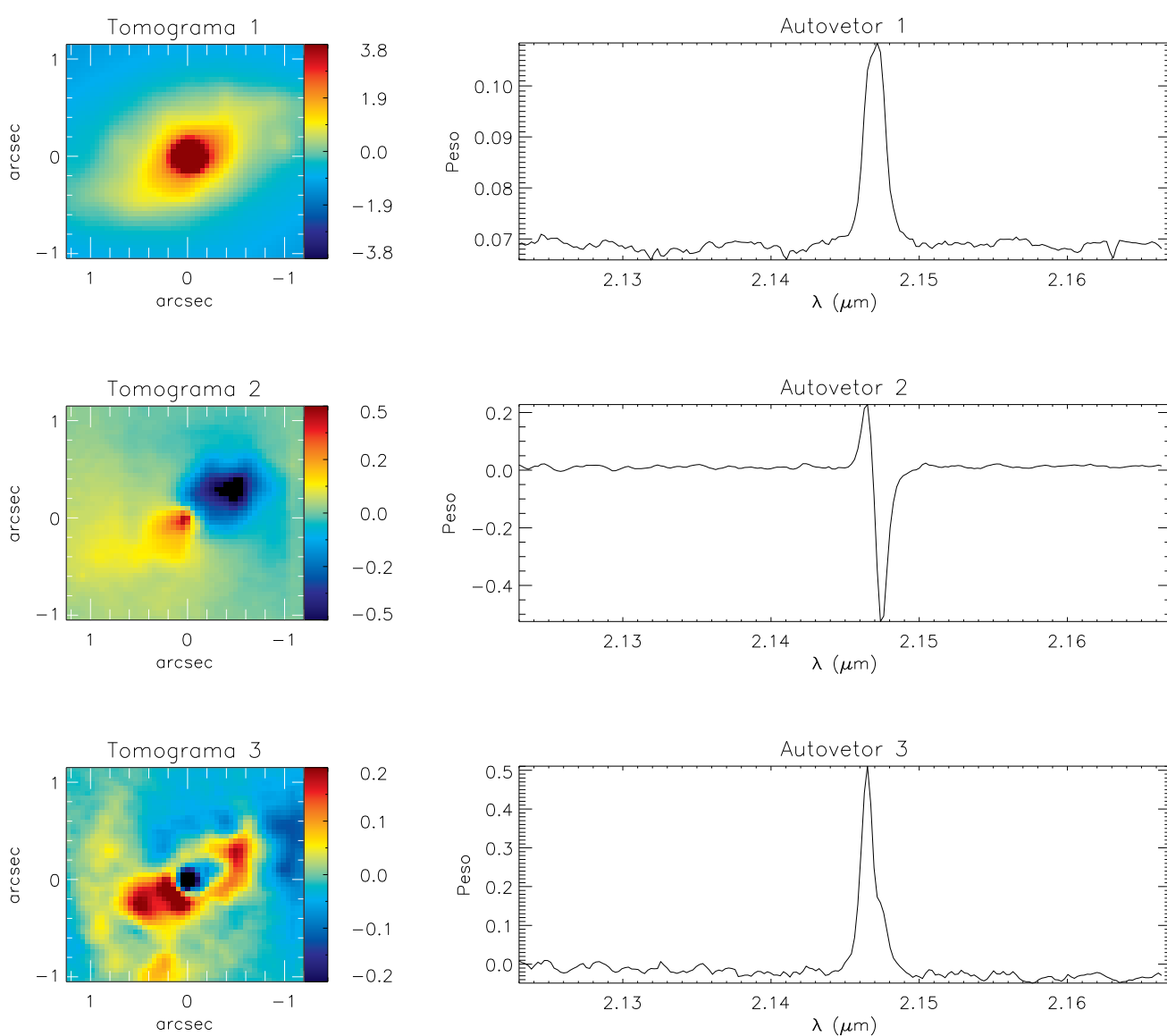


Figura 3.8: Autovetores e tomogramas 1, 2 e 3 da banda K, para região de $2,123\mu\text{m}$ a $2,167\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,25''$ da região central da galáxia.

O segundo autovetor apresenta uma anti-correlação entre a asa azul e a asa vermelha da linha, semelhante ao observado para os outros intervalos espectrais, sugerindo rotação de gás no plano.

O autovetor 3 apresenta uma base mais alargada, para a linha de emissão $\text{H}_2 \lambda 2,12183 \mu\text{m}$. O respectivo tomograma apresenta uma região circum-nuclear de hidrogênio molecular, que corresponde a parte vermelha. O autovetor e tomograma 3 apresenta as mesmas características do autovetor e tomograma 4 da figura 3.6 embora a base larga não esteja emitente lá. O autovetor e tomograma 3 confirmam a presença de um anel de hidrogênio molecular em torno da região central da galáxia.

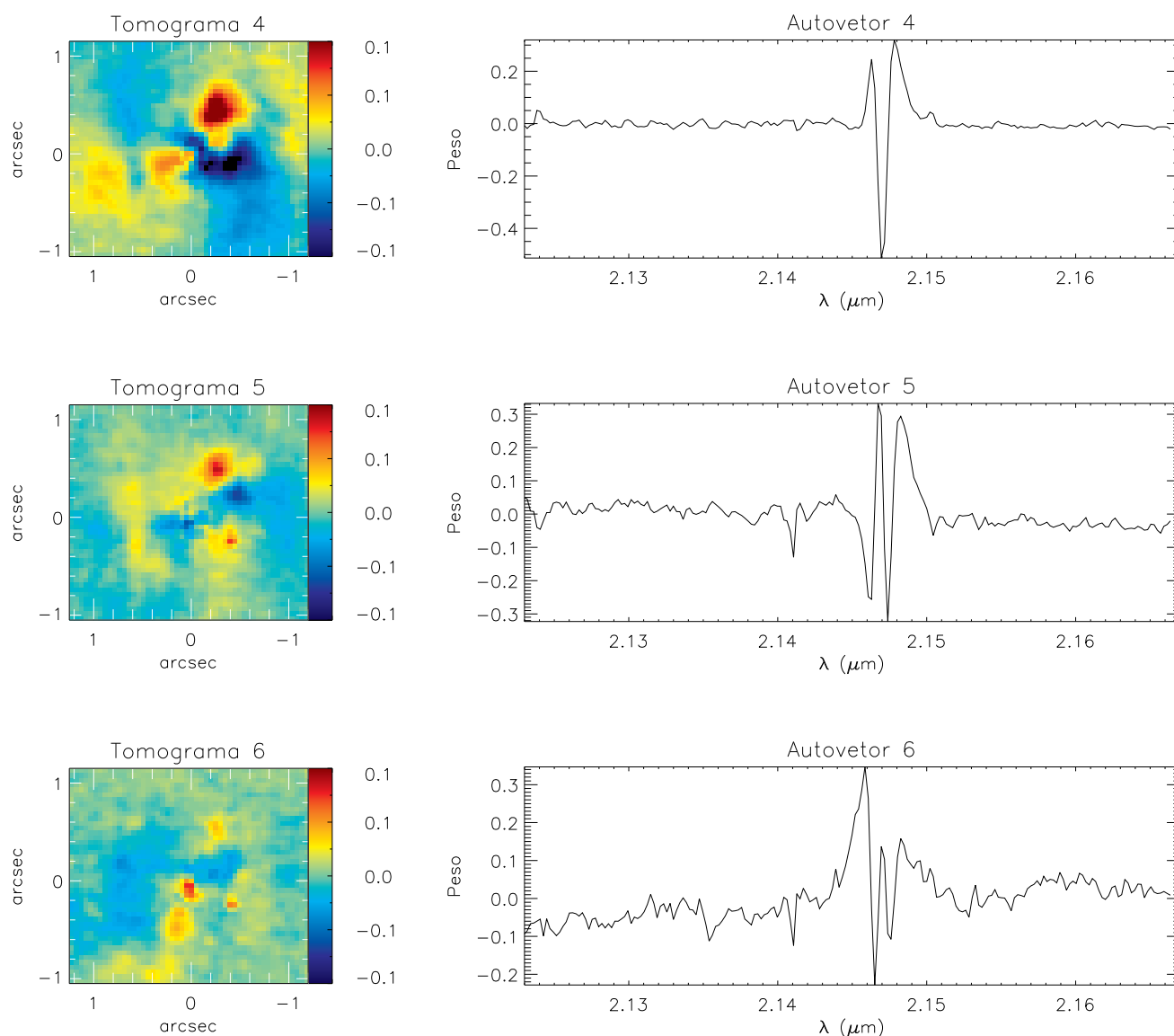


Figura 3.9: Autovetores e tomogramas 4, 5 e 6 da banda K, para região de $2,123 \mu\text{m}$ a $2,167 \mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,25''$ da região central da galáxia.

A figura 3.9 apresenta os autovetores e tomogramas 4, 5 e 6. Nos autovetores são observadas anti-correlações entre as asas e o pico da linha de emissão. A interpretação conjunta com os tomogramas é de fenômenos cinemáticos. A tabela 3.3 apresenta a fração da variância dos dados para essa região.

Autovetor	Variância em %
1	98,73
2	0,88
3	0,19
4	0,05
5	0,01
6	0,01

Tabela 3.3: Tabela de variância dos dados da banda K, para região de $2,123\mu\text{m}$ a $2,167\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,25''$ da região central da Mrk 1066

3.2 Banda J

O cubo de dados da banda J, possui para a região espacial 66 pixels no eixo das abscissas e 69 pixels no eixo das ordenadas, com 2.040 pixels para região espectral. Assim o cubo de dados possui $66 \times 69 \times 2.040 = 9.290.160$ pixels. Assim como para a banda K, cada pixel espacial corresponde a um tamanho angular de $0,05'' \times 0,05''$. Dessa forma a região espacial para o eixo das abscissas possui $3,3''$ e o eixo das ordenadas $3,45''$. A região espacial do cubo de dados em que é realizada a Análise de Componentes Principais, está entre 8 a 58 pixels para o eixo das abscissas e para o eixo das ordenadas, correspondendo a uma região central da galáxia de $2,5'' \times 2,5''$. O intervalo espectral dos dados é de $1,1\mu\text{m}$ a $1,35\mu\text{m}$ e a amostragem espectral dos dados é de $1,06 \text{ \AA}/\text{pixel}$.

Na figura 3.10 apresentamos o espectro de núcleo da galáxia, integrado em uma abertura de $0,05'' \times 0,05''$, com os comprimentos de onda das principais linhas de emissão do espectro identificadas como: [P II] $\lambda(1,14713 \text{ e } 1,18861)\mu\text{m}$, [Fe II] $\lambda(1,25702, 1,27912, 1,29462, 1,29812, 1,32092 \text{ e } 1,32814)\mu\text{m}$, Pa β $\lambda 1,2822\mu\text{m}$, He II $\lambda 1,16296\mu\text{m}$ e a linha coronal [S IX] $\lambda 1,25235\mu\text{m}$ [S IX] $\lambda 1,25235\mu\text{m}$ (Riffel; Storchi-Bergmann, 2011b).

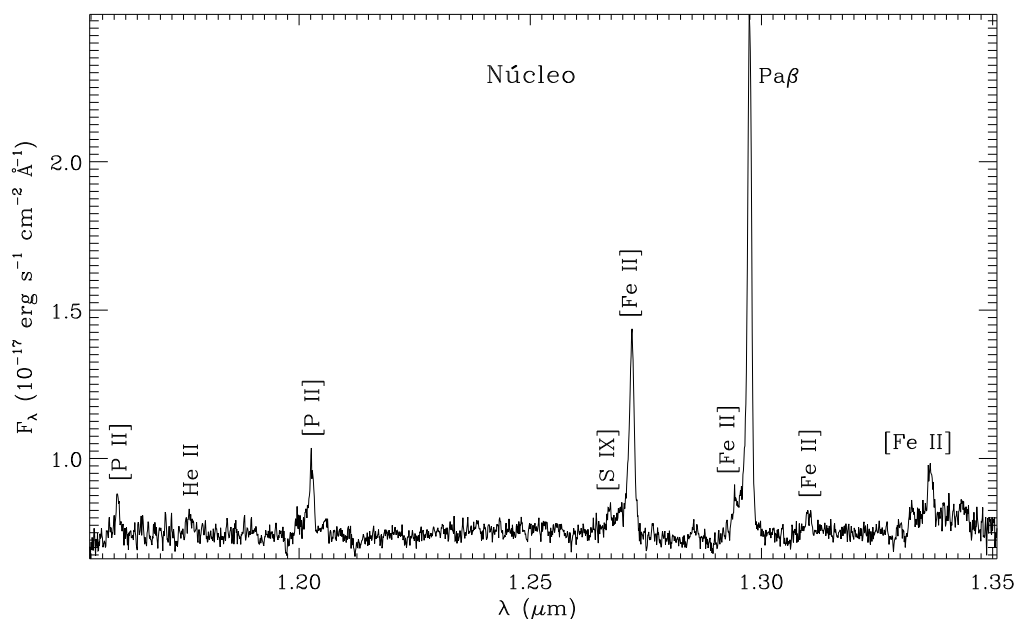


Figura 3.10: Espectro da banda J, para galáxia Mrk 1066 da região nuclear com uma abertura de $0,05'' \times 0,05''$.

3.2.1 Região espectral: $1,15\mu\text{m}$ a $1,35\mu\text{m}$

Autovetor	Variância em %
1	96,00
2	1,75
3	0,74
4	0,13
5	0,04
6	0,05
7	0,04
8	0,03
9	0,02

Tabela 3.4: Tabela de variância dos dados da banda J, para região de $1,15\mu\text{m}$ a $1,35\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,5''$ da região central da Mrk 1066

Da mesma forma que para a banda K, em um primeiro momento, aplicamos a Tomografia PCA em todo o intervalo espectral, excluindo-se somente as bordas do espectro. A figura 3.11 mostra

os primeiros autovetores e seus respectivos tomogramas, após a Análise de Componentes Principais no cubo de dados da banda J. No autovetor 1 são observadas correlações entre as linhas de emissão identificadas no espectro da figura 3.10 para a região central da galáxia, correspondendo a parte vermelha observada no tomograma 1, contribuindo com a maior fração da variância dos dados. A tabela 3.4 mostra a fração da variância dos dados para essa região.

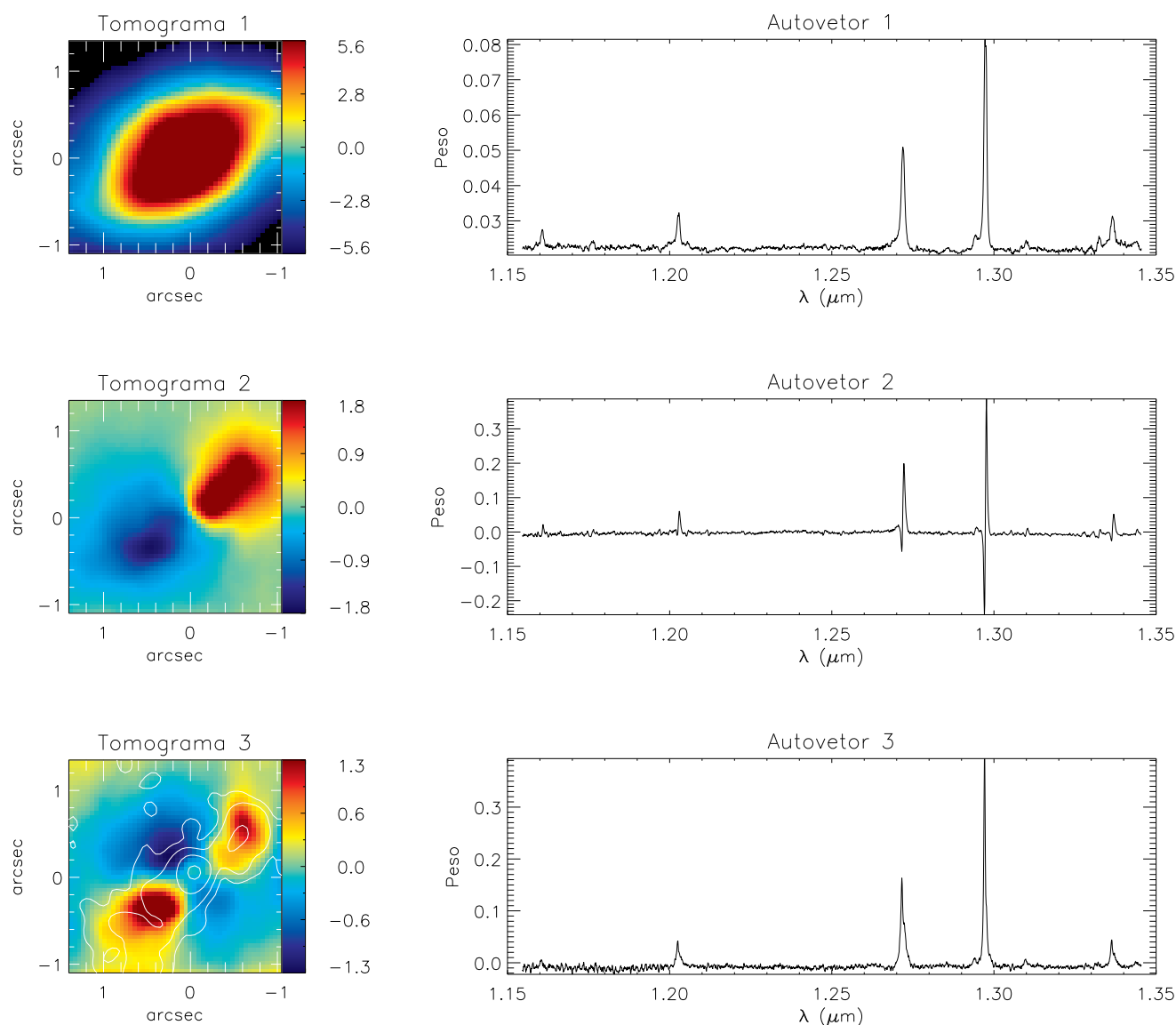


Figura 3.11: Autovetores e tomogramas 1, 2 e 3 da banda J, para região de $1,15\mu\text{m}$ a $1,35\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,5''$ da região central da galáxia.

O segundo autovetor mostra que as linhas de emissão mais intensas $[\text{Fe II}] \lambda 1,25702\mu\text{m}$ e $\text{Pa}\beta \lambda 1,2822\mu\text{m}$ possuem asas azuis anti-correlacionadas com as asas vermelhas. No tomograma, a parte

vermelha corresponde as asas vermelhas no autovetor, enquanto que a parte azul corresponde às asas azuis. A interpretação para este tomograma e autovetor é que tenha origem em um gás em rotação num disco, como já visto para a banda K.

O terceiro autovetor apresenta linhas de emissão correlacionadas. Essas emissões estão ao longo do jato rádio, indicando alguma interação de jato com o meio interestelar, como já observado para a banda K.

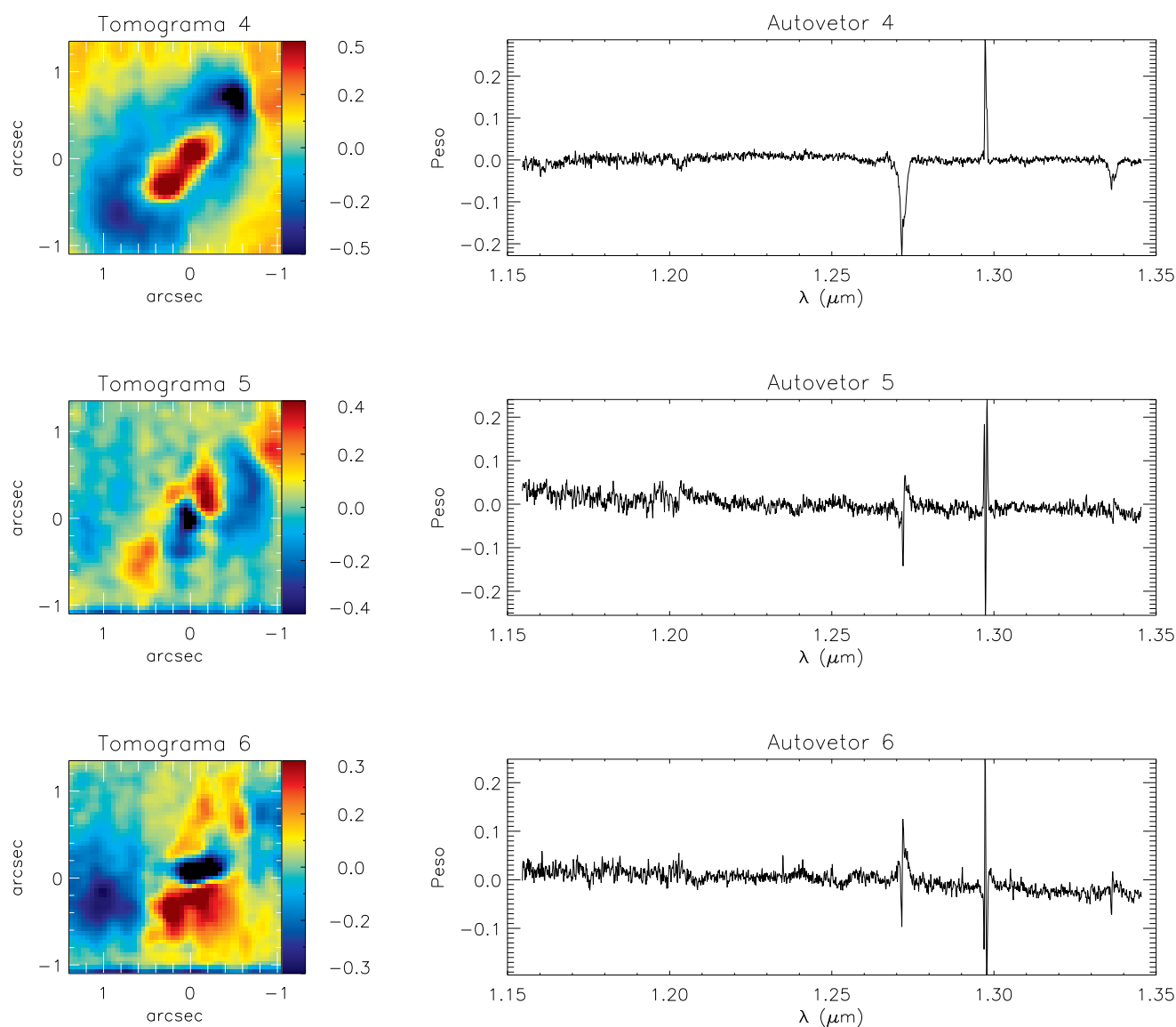


Figura 3.12: Autovetores e tomogramas 4, 5 e 6 da banda J, para região de 1,15 μm a 1,35 μm no interior de 2,5" \times 2,5" da região central da galáxia.

O autovetor 4 da figura 3.12 apresenta as linhas do [Fe II] $\lambda(1,25702, 1,32092 \text{ e } 1,32814)\mu\text{m}$ anti-correlacionadas com a linha do Pa β $\lambda 1,2822\mu\text{m}$. No respectivo tomograma a emissão de [Fe II] corresponde a parte vermelha, enquanto que a emissão de Pa β corresponde a parte azul.

Nos autovetores 5 e 6 é possível observar ruído espacial e espectral e também erros devido a *fingerprints*. A análise conjunta com os respectivos tomogramas, indica fenômenos cinemáticos.

Na figura 3.13, são observados novamente erros devido a *fingerprints*, nos autovetores 7, 8 e 9. A interpretação é também de fenômenos cinemáticos.

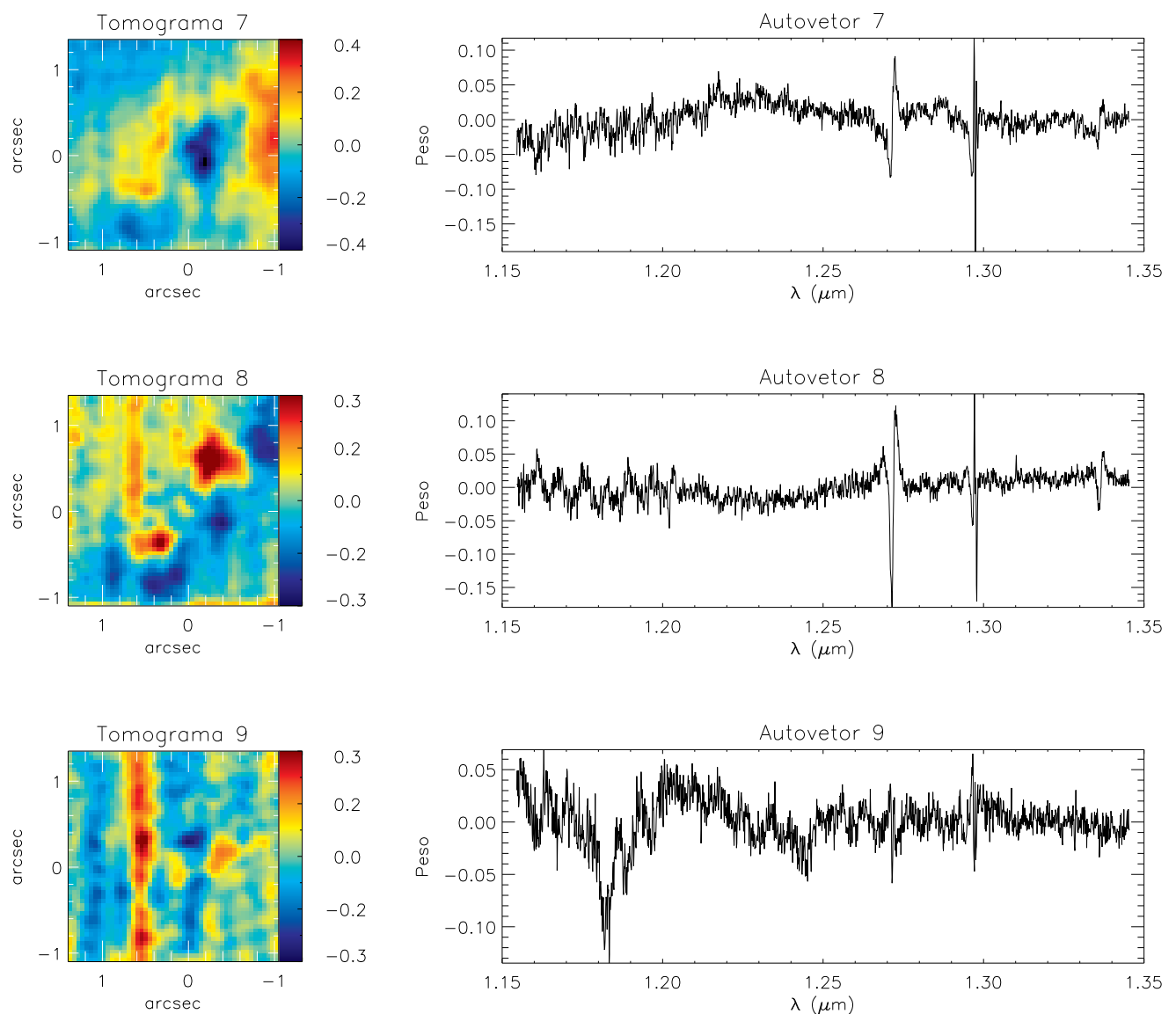


Figura 3.13: Autovetores e tomogramas 7, 8 e 9 da banda J, para região de $1,15\mu\text{m}$ a $1,35\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,5''$ da região central da galáxia.

3.2.2 Região espectral: $1,26\mu\text{m}$ a $1,30\mu\text{m}$

A análise dessa região espectral tem por objetivo investigar o intervalo que compreende principalmente as linhas do $[\text{Fe II}] \lambda 1,25702\mu\text{m}$ e do $\text{Pa}\beta \lambda 1,2822\mu\text{m}$. Na figura 3.14, no primeiro autovetor observa-se uma linha, próxima a do $\text{Pa}\beta \lambda 1,2822\mu\text{m}$, que provavelmente é a linha do $[\text{Fe II}] \lambda 1,27912\mu\text{m}$ identificada no espectro da figura 3.10. A análise do tomograma e autovetor 1 não traz novos resultados, as linhas de emissão estão correlacionadas com emissão vinda da região central da galáxia. O mesmo ocorre para o segundo conjunto autovetor/tomograma que tem origem de gás em rotação no plano da galáxia.

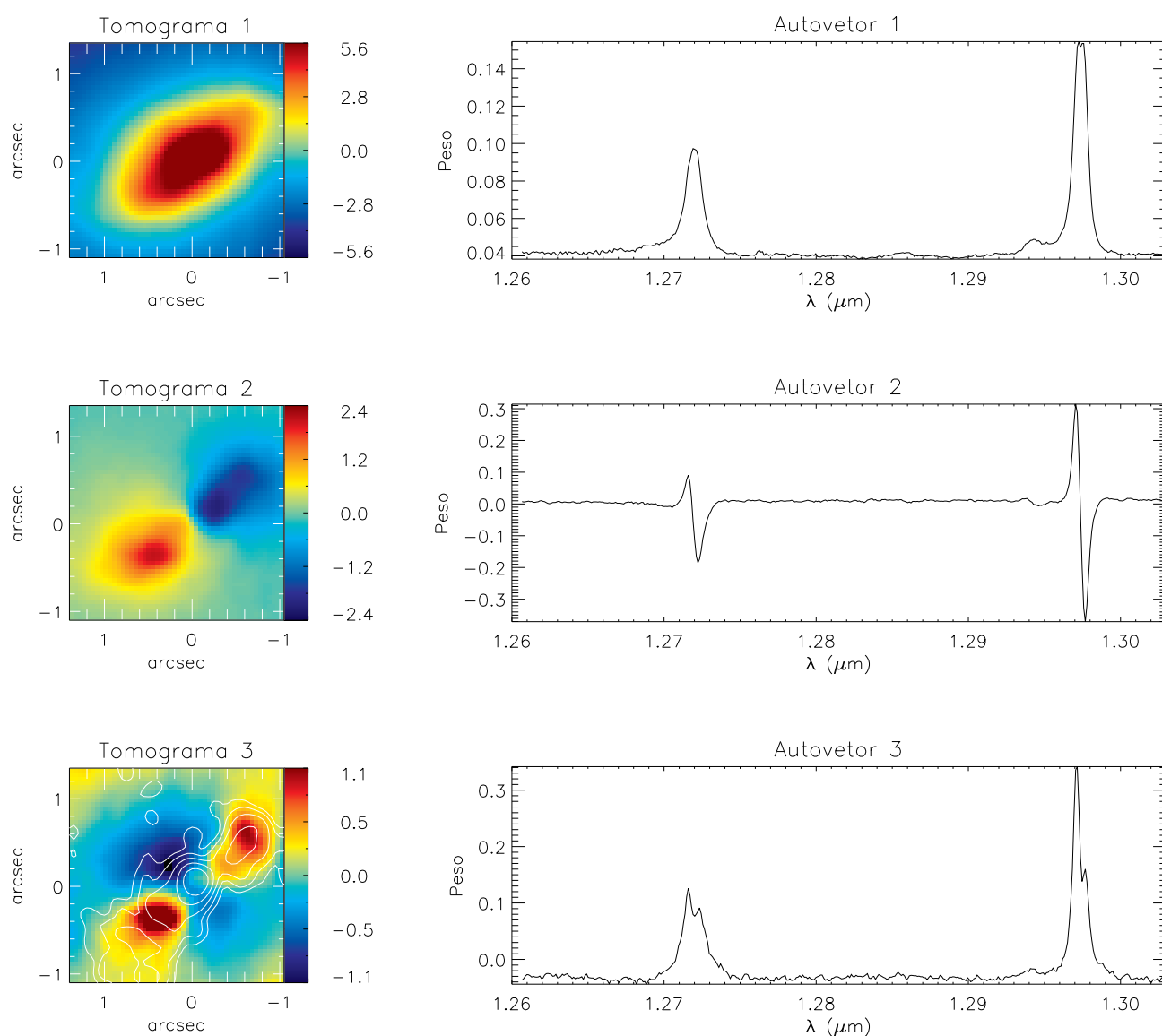


Figura 3.14: Autovetores e tomogramas 1, 2 e 3 da banda J, para região de $1,26\mu\text{m}$ a $1,30\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,5''$ da região central da galáxia.

No terceiro autovetor, os comprimentos de onda das linhas de emissão do [Fe II] e do Pa β possuem duplos picos, indicando que há matéria vindo em nossa direção e matéria se afastando de nós. É observado também o contínuo anti-correlacionado com as linhas de emissão. No tomograma 3 o jato rádio está localizado ao longo dessas emissões. Estes duplos picos associados a emissão rádio indicam interação de jato rádio com o gás que origina estas linhas.

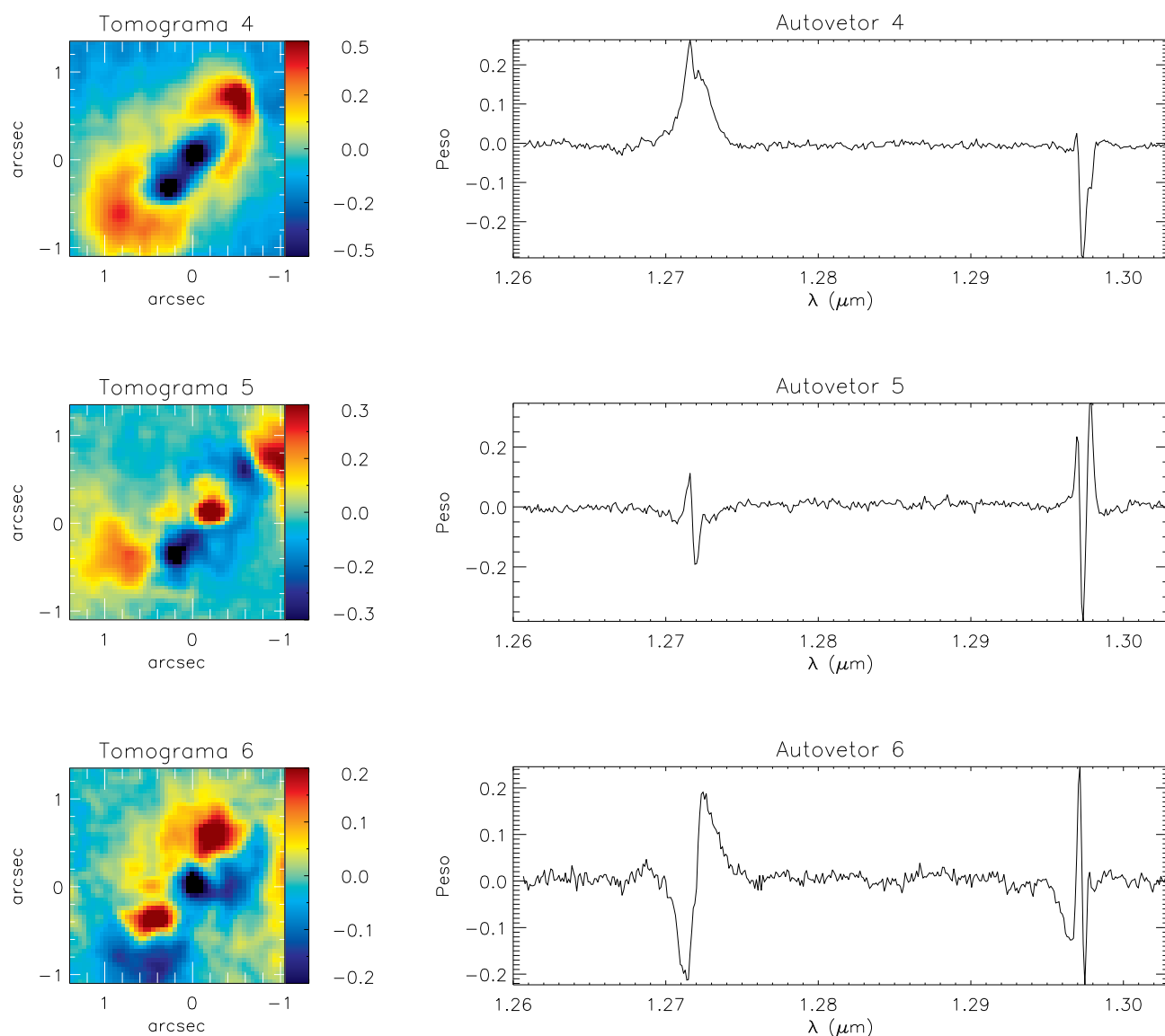


Figura 3.15: Autovetores e tomogramas 4, 5 e 6 da banda J, para região de $1,26\mu\text{m}$ a $1,30\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,5''$ da região central da galáxia.

Na figura 3.15, o autovetor 4 apresenta uma anti-correlação entre o [Fe II] e Pa β . Há semelhanças entre os autovetores e tomogramas das figuras 3.15 e 3.12, porém agora as linhas apresentam clara-

mente duas componentes.

Nos autovetores e tomogramas 5 e 6 são observadas correlações e anti-correlações entre diferentes partes dos perfis das linhas (asas e pico), indicando a presença de fenômenos cinemáticos complexos.

Na figura 3.16 observamos os autovetores e tomogramas 7, 8 e 9 que possuem uma fração menor da variância dos dados. Esses autovetores e tomogramas revelam pouca informação, possuindo também um contínuo ruidoso e erros devido ao instrumento utilizado. A interpretação é também de fenômenos cinemáticos. A tabela 3.5 mostra a fração da variância dos dados para essa região.

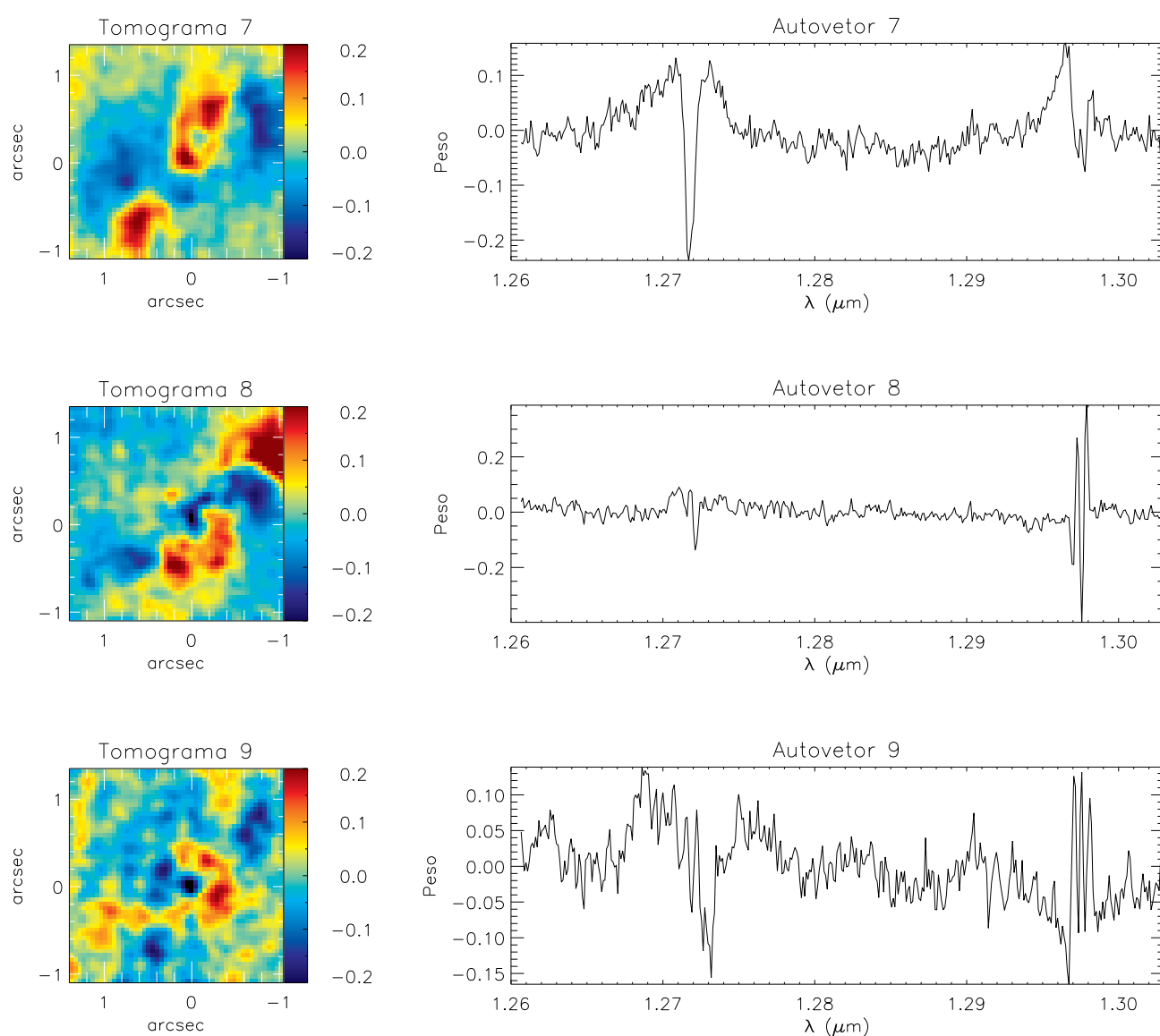


Figura 3.16: Autovetores e tomogramas 7, 8 e 9 da banda J, para região de $1,26\mu\text{m}$ a $1,30\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,5''$ da região central da galáxia.

Autovetor	Variância em %
1	91,76
2	5,25
3	1,65
4	0,35
5	0,13
6	0,09
7	0,05
8	0,03
9	0,02

Tabela 3.5: Tabela de variância dos dados da banda J, para região de $1,26\mu\text{m}$ a $1,30\mu\text{m}$ no interior de $2,5'' \times 2,5''$ da região central da Mrk 1066

Capítulo 4

Discussões

A galáxia Mrk 1066 já foi objeto de vários estudos, inclusive por nosso grupo utilizando os mesmos dados do presente trabalho. A aplicação da Tomografia PCA para essa galáxia, tem como objetivo o uso de uma técnica poderosa e ao mesmo tempo não tradicional ao cubo de dados, para encontrar novos resultados e até mesmo confirmação de resultados já obtidos.

Riffel, Storchi-Bergmann e Nagar (2010a) descrevem que pela primeira vez nessa galáxia foi observada uma concentração de poeira não resolvida no núcleo, de massa $1,4 \times 10^{-2} M_{\odot}$, sendo sua emissão bem reproduzida para a função de Planck, com temperatura de $\sim 830\text{K}$ e possivelmente fazendo parte de um toróide de poeira nuclear. Essa possibilidade pode ser confirmada, de acordo com a interpretação do autovetor e tomograma 2 da figura 3.2 do capítulo 3.1.1, cujo autovetor apresenta uma anti-correlação entre a parte vermelha e a parte azul do espectro, sendo que a emissão da parte vermelha é localizada em uma região não resolvida no centro da galáxia. Duas possíveis interpretações para este autovetor são: 1) Associado a estrelas jovens que apresentam um espectro com maiores fluxos em comprimentos de onda menores. Isso poderia ser originado por aglomerados estelares jovens localizados no núcleo, tais como vistos em outras galáxias (Davies et al., 2007); 2) Emissão de poeira localizada no núcleo como esperado pelo modelo unificado de AGNs (Antonucci; Miller, 1985).

Em Riffel et al. (2010b) apresenta-se a primeira síntese de população estelar para a região nuclear dessa galáxia, a partir de dados obtidos com o instrumento NIFS com resolução espacial de $\approx 35\text{pc}$. Os autores mostram que a população estelar dominante no núcleo é de estrelas velhas (idades $> 2\text{G}$ anos). Esta população é atribuída ao bojo da galáxia e domina a emissão em distâncias $r < 160\text{pc}$ do núcleo. Para distâncias maiores, a população dominante é a de idade intermediária. Os resultados da síntese de populações estelares de Riffel et al. (2010b) também revelam a presença de emissão de poeira não resolvida no núcleo, concordando com os resultados de Riffel, Storchi-Bergmann e Nagar (2010a). Dessa forma interpretamos o autoespectro 2 da figura 3.2 como sendo devido a emissão de

poeira no núcleo, provavelmente devido ao toróide previsto pelo modelo unificado. A análise conjunta do tomograma e autovetor 4 da figura 3.3, também apoia essa interpretação que está relacionada ao modelo unificado de AGNs, com a observação de uma agente colimador na ejeção de matéria do núcleo da galáxia, sendo caracterizado como um toróide de poeira.

Riffel, Storchi-Bergmann e Nagar (2010a) apresentam mapas de fluxo para as linhas de emissão, observando uma emissão maior para a direção noroeste da galáxia do que para a direção sudeste, com exceção das linhas de hidrogênio, que são intensas na direção sudeste, sendo observada uma grande região de formação estelar nesta região. Após a aplicação da Tomografia PCA, foi investigado o fluxo de algumas linhas de emissão e do contínuo do cubo reconstruído, buscando fazer comparações com resultados já obtidos para essa galáxia.

A figura 4.1 mostra o fluxo em unidades de $10^{-19} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ das linhas de emissão do $\text{H}_2 \lambda 2,12183 \mu\text{m}$, do $\text{Br}\gamma$ e da emissão do contínuo centrado em $2,3 \mu\text{m}$ na banda K. O fluxo do contínuo foi obtido a partir da média de regiões espectrais, sem linhas de emissão em um cubo reconstruído usando-se somente o autovetor 2, com o objetivo de realçar a emissão do toróide. O fluxo da linha de H_2 foi medido em um cubo reconstruído a partir somente do autovetor 4, com o objetivo de realçar as estruturas espirais e o anel observado no tomograma correspondente. O fluxo de $\text{Br}\gamma$ foi medido em um cubo reconstruído usando-se somente o autoespectro 5, para realçar a emissão das linhas de emissão.

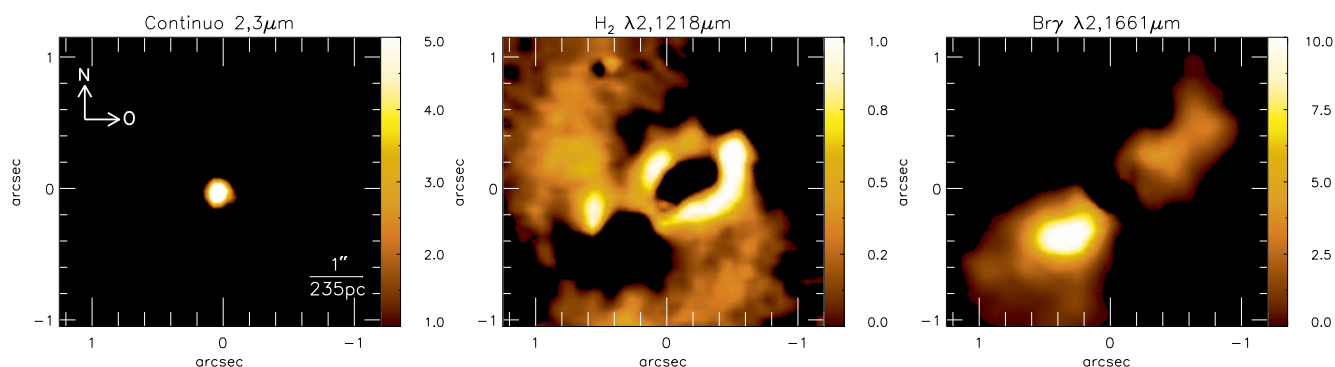


Figura 4.1: Mapas de fluxo em unidades de $10^{-19} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ para o contínuo centrado em $2,3 \mu\text{m}$ (imagem à esquerda), e para as linhas de emissão do $\text{H}_2 \lambda 2,12183 \mu\text{m}$ (imagem central) e do $\text{Br}\gamma$ (imagem à direita). A imagem da esquerda realça a emissão do toróide de poeira, como discutido acima.

Riffel e Storchi-Bergmann (2011a) apresentam um estudo da cinemática do gás e das estrelas na região central desta galáxia. Reportam a detecção de um disco composto de gás molecular com massa de $\sim 10^7 M_\odot$ e raio $r \sim 70 \text{ pc}$. O mapa de fluxo para a linha $\text{H}_2 \lambda 2,12183 \mu\text{m}$ da figura 4.1, mostra claramente uma emissão em forma de anel, a qual está relacionada com a estrutura encontrada previamente. Medindo o eixo maior e menor deste anel, encontramos uma inclinação de 46° . Este

valor é semelhante ao observado para o disco desta galáxia (Bower et al., 1995; Riffel; Storchi-Bergmann, 2011a).

Um anel de emissão de H_2 , semelhante ao visto para Mrk 1066, é observado também para a galáxia NGC 1068, com um raio de ~ 100 pc (Riffel et al., 2014). Uma possível interpretação para o anel visto em Mrk 1066 é que este represente um precursor de um anel de regiões de formação estelar circum-nuclear, como vistos em diversas galáxias (Kennicutt JR., 1998). Neste cenário, o gás molecular representaria o material necessário para dar origem a novas estrelas.

Dors Jr. et al. (2008) realizaram uma análise sobre as idades e metalicidades em regiões circum-nucleares de formação estelar, indicando vários trabalhos onde foram realizados estudos sobre essas regiões. Um desses trabalhos é o de Knapen (2005) que utilizou uma amostra de 57 galáxias espirais com imagens $H\alpha$, onde os resultados mostram que em aproximadamente 20% das galáxias espirais existem regiões circum-nucleares de formação estelar, com ocorrência predominante em galáxias que hospedam um AGN. Outro ponto importante é que a formação estelar em regiões circum-nucleares em galáxias barradas provavelmente é devida a *inflows* de gás ao longo de barras para o centro da galáxia.

Além do anel, observa-se também braços espirais para nordeste e sudoeste do núcleo conectados ao anel (figura 4.1). Estes braços podem representar o caminho para fluxos de gás para o núcleo de Mrk 1066 para assim alimentar o anel e possivelmente o BNS. Escoamentos de gás ao longo dos braços espirais foram vistos para outras galáxias (Fathi et al., 2006; Riffel et al., 2008, 2013). O painel da direita mostra que a emissão de $B\gamma$ é bem colimada e tem forma de bi-cone. Esta emissão paralelamente está sendo colimada pelo toróide de poeira e é co-espacial com o jato rádio. Riffel e Storchi-Bergmann (2011a) reportam a detecção de *outflows* de gás nesta região. Dessa forma, interpretamos o tomograma e autoespectro 5 como sendo originado por emissão de gás em *outflows* em um bi-cone.

A figura 4.2 apresenta a sobreposição das imagens da figura 4.1, que representa o cenário físico para a região central. Em vermelho é observada a emissão da linha do $B\gamma$, que representa o painel da direita da figura 4.1, com emissão ao longo do eixo do bi-cone e ao longo do eixo maior da galáxia, sendo co-espacial com o jato rádio. Em verde é observada a emissão da linha do $H_2 \lambda 2,12183\mu m$, que representa o painel central da figura 4.1, representando o anel de hidrogênio molecular, com dois braços em espirais. Em azul temos a representação da emissão de poeira no núcleo da Mrk 1066, conforme painel esquerdo da figura 4.1, com a emissão do contínuo centrado em $2,3\mu m$.

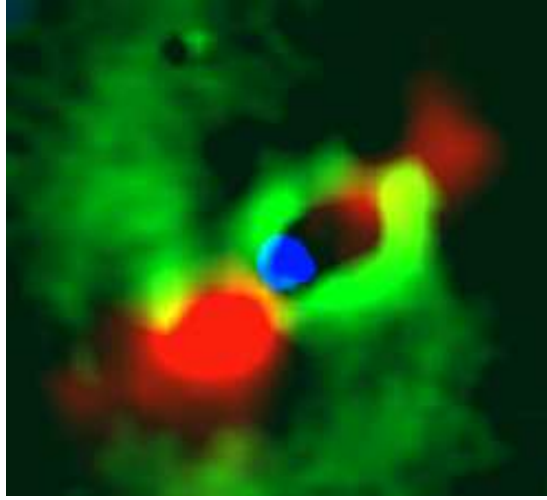


Figura 4.2: Imagem de RGB da sobreposição das imagens da figura 4.1. Na figura, o azul representa o núcleo da galáxia, o verde representa o anel e os braços espirais em H_2 e o vermelho representa o jato rádio.

A conexão AGN-*starburst* está relacionada ao fato de haver a necessidade de *inflows* de gás para alimentar o BNS, assim como para regiões de formação estelar nucleares. Realizaremos pedido de tempo para o observatório ALMA (Atacama Large Millimeter Array), com o objetivo de investigar a existência de gás frio na região do anel e verificar se a quantidade de gás é suficientemente grande para formar estrelas.

A razão $[Fe II]\lambda 1,257\mu m / [P II]\lambda 1,1886\mu m$ é usada para investigar a origem das linhas de emissão do $[Fe II]$, com altos valores correspondendo a uma maior contribuição da excitação do $[Fe II]$ por choques. Riffel, Storchi-Bergmann e Nagar (2010a) investigam a razão entre as linhas do $[Fe II]\lambda 1,25702\mu m$ e $Pa\beta$, onde de acordo com Rodríguez-Ardila et al. (2004) os valores de $[Fe II]/Pa\beta \lesssim 0,6$, indicam que a excitação do $[Fe II]$ está relacionada a galáxias *starburst* e para valores maiores que 2 (em que o mecanismo de excitação em maior parte se dá por choques), a emissão do $[Fe II]$ está relacionada a supernovas.

A figura 4.3 mostra os mapas de fluxo em unidades de $10^{-19} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ das linhas de emissão do $Pa\beta$ e do $[Fe II] \lambda 1,25702\mu m$, obtidos do cubo reconstruído usando a quarta componente principal (quarta maior fração da variância), após o uso da Tomografia PCA no cubo de dados da banda J. Riffel, Storchi-Bergmann e Nagar (2010a) apresentam mapas de fluxo para a região central da Mrk 1066, para as linhas de emissão do $Pa\beta$ e do $[Fe II] \lambda 1,25702\mu m$, com uma emissão maior na direção noroeste do que para o sudeste do núcleo. Este resultado está de acordo com o apresentado para os mapas de fluxo correspondentes na figura 4.3, que apresenta um fluxo crescendo para a direção noroeste, tanto para o $Pa\beta$, quanto para o $[Fe II]$.

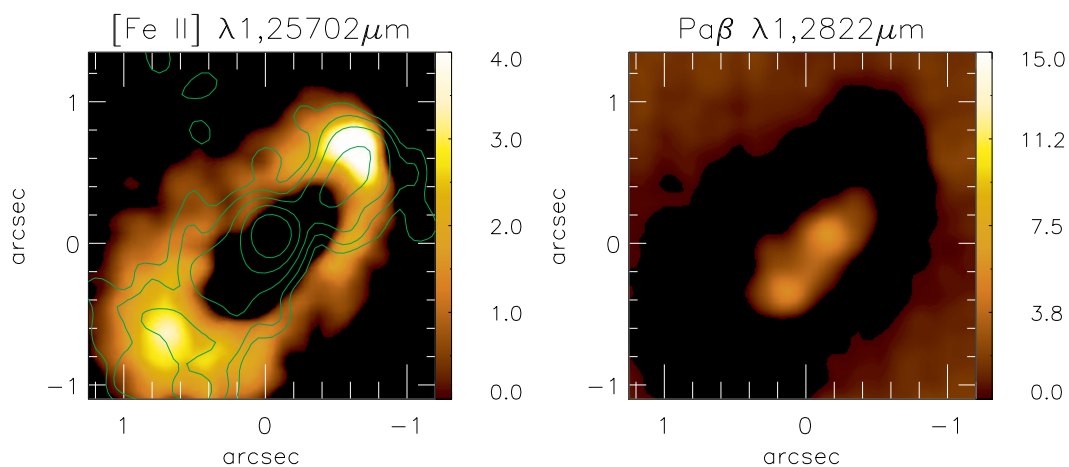


Figura 4.3: Mapas de fluxo em unidades de $10^{-19}\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ da linha de emissão do $[\text{Fe II}] \lambda 1,25702\mu\text{m}$, com contornos em verde representando o jato rádio (imagem à esquerda) e da linha de emissão do $\text{Pa}\beta$ (imagem à direita).

É interessante notar que os mapas de fluxo para o $[\text{Fe II}]$ e $\text{Pa}\beta$ apresentam morfologias diferentes. A maior parte da emissão do $\text{Pa}\beta$ ocorre próximo ao núcleo, enquanto que a maior emissão do $[\text{Fe II}]$ ocorre nas bordas do jato rádio. Interpretamos essa diferença como uma evidência de excitação do $[\text{Fe II}]$ por choques ocasionados pelo jato rádio, enquanto que a emissão do $\text{Pa}\beta$ se deve a emissão de gás fotoionizado pelo AGN central.

A figura 4.4, mostra a imagem composta (RB), onde a emissão do $[\text{Fe II}]$ é mostrada em azul e a do $\text{Pa}\beta$ em vermelho, deixando evidente as diferentes origens.

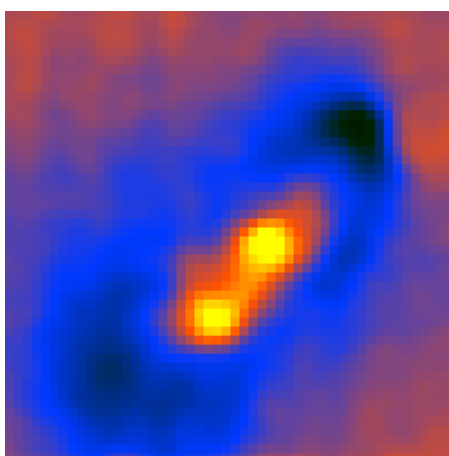


Figura 4.4: Imagem de RB, da sobreposição das imagens da figura 4.3. O azul representa a emissão do $[\text{Fe II}]$ e o vermelho o mapa de fluxo para o $\text{Pa}\beta$.

Riffel, Storchi-Bergmann e Nagar (2010a) discutem a excitação para o $[\text{Fe II}]$ da região central

da Mrk 1066 e prevêem que a emissão de [Fe II] possui consistência com o aquecimento por raios-X, mas a correlação espacial com o jato rádio e a emissão [O III] indicam haver emissão adicional de [Fe II] devido à excitação causada por choques com o jato rádio. São encontrados valores típicos de Seyferts para esta galáxia que estão entre 0,6 a 1,5 para a relação [Fe II]/Pa β , embora também sejam encontrados valores \lesssim 0,6. Para Mrk 1066 obtivemos [Fe II] λ 1,25702 μ m/Pa β \approx 0,87, a partir de medidas no autoespectro 3 (figura 3.11), indicando valores típicos de Seyferts.

Outra relação usada para investigar a origem da emissão do [Fe II] é [Fe II] λ 1,257 μ m/[P II] λ 1,1886 μ m, onde valores maiores que 2 indicam que os choques destroem os grãos de poeira e liberam o Fe, aumentando assim a sua abundância e consequentemente os fluxos das linhas de emissão de [Fe II] (Oliva et al., 2001). Para a razão [Fe II] λ 1,257 μ m/[P II] λ 1,1886 μ m é encontrado o valor de 4,2, usando para essa análise a terceira componente principal (autovetor 3 da figura 3.11). Esse valor indica uma contribuição de choques do jato rádio com grãos de poeira liberando assim o Fe. Esse resultado vai ao encontro com o observado em alguns tomogramas e autovetores (conforme mencionado anteriormente) mostrando que o jato rádio está em uma mesma direção co-espacial da emissão correspondente ao [Fe II] λ 1,257 μ m.

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 Conclusões

Aplicamos a técnica da tomografia PCA (Steiner et al. 2009) a cubos de dados para a região central da galáxia Seyfert 2 Mrk1066 a partir de observações realizadas com o instrumento NIFS do telescópio Gemini norte nas bandas J e K do infravermelho próximo. Comparamos os resultados obtidos por esta técnica com resultados previamente publicados na literatura. As principais conclusões deste trabalho são:

- Detectamos um anel de gás molecular com raio de ~ 75 pc em torno do núcleo da galáxia. Este anel não havia sido detectado em estudos prévios baseados em ajustes das linhas de emissão do gás. Utilizando os tamanhos do eixo maior e menor do anel, encontramos que o mesmo possui uma inclinação de $\sim 45^\circ$, consistente com a inclinação observada para o disco da galáxia;
- Dois braços espirais se originam no anel de gás molecular e se estendem até as bordas do campo de visão observado. Estes anéis podem representar os “caminhos” para escoamentos de gás molecular em direção ao centro da galáxia, formando assim o anel e possivelmente alimentando o buraco negro no centro de Mrk 1066;
- Investigamos a origem da emissão da linha do [Fe II] em 1,2570 μ m a partir de razões de linhas ($[\text{Fe II}]_{1,2570\mu\text{m}}/P_{\text{ab}} = 0,9$ e $[\text{Fe II}]_{1,2570\mu\text{m}}/[\text{P II}]_{1,1886\mu\text{m}} = 4,2$), que apresentam valores que sugerem uma contribuição de choques para a excitação do [FeII]. Esta conclusão é apoiada pela forte correlação encontrada entre a emissão do gás ionizado e o jato rádio;
- Detectamos emissão de poeira em uma estrutura central não resolvida espacialmente, a qual interpretamos como sendo relacionada a presença do toróide de poeira previsto pelo modelo unificado de AGNs, de acordo com resultados obtidos previamente para este objeto;
- Detectamos movimentos de gás em rotação no disco da galáxia, de acordo com resultados obti-

dos previamente;

- Alguns tomogramas e autovetores sugerem a presença de *outflows* de gás ionizado, associados ao jato rádio;
- A análise de tomogramas e autovetores que contribuem pouco para a variância dos dados revela a presença de fenômenos cinemáticos complexos, não interpretados neste trabalho.

5.2 Perspectivas

Pretendemos ampliar o estudo realizado para Mrk 1066 para outros objetos, cujos dados já estão disponíveis e foram analisados seguindo técnicas tradicionais por nosso grupo.

Para Mrk 1066, elaboraremos uma proposta de observação para o rádio interferômetro ALMA (Atacama Large Millimeter Array) com o objetivo de investigar a existência de gás molecular frio na região onde observamos um anel de gás molecular quente (que emite as linhas do H₂ no infravermelho próximo).

Referências Bibliográficas

- Antonucci, R. Unified models for active galactic nuclei and quasars. **ARA&A**, v. 31, p. 473–521, 1993.
- Antonucci, R. R. J.; Miller, J. S. Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068. **ApJ**, v. 297, p. 621–632, out. 1985.
- Bower, G.; Wilson, A.; Morse, J. A.; Gelderman, R.; Whittle, M.; Mulchaey, J. Radio and Emission-Line Jets in the Type 2 Seyfert Galaxy Markarian 1066 (UGC 2456). **ApJ**, v. 454, p. 106, nov. 1995.
- Davies, R. I.; Maciejewski, W.; Hicks, E. K. S.; Tacconi, L. J.; Genzel, R.; Engel, H. Stellar and Molecular Gas Kinematics Of NGC 1097: Inflow Driven by a Nuclear Spiral. **ApJ**, v. 702, p. 114–128, set. 2009.
- Davies, R. I.; Müller Sánchez, F.; Genzel, R.; Tacconi, L. J.; Hicks, E. K. S.; Friedrich, S.; Sternberg, A. A Close Look at Star Formation around Active Galactic Nuclei. **ApJ**, v. 671, p. 1388–1412, dez. 2007.
- Dors JR., O. L.; Storchi-Bergmann, T.; Riffel, R. A.; Schimdt, A. A. Ages and metallicities of circumnuclear star formation regions from Gemini IFU observations. **A&AP**, v. 482, p. 59–65, abr. 2008.
- Engel, H.; Davies, R. I.; Genzel, R.; Tacconi, L. J.; Hicks, E. K. S.; Sturm, E.; Naab, T.; Johansson, P. H.; Karl, S. J.; Max, C. E.; Medling, A.; van der Werf, P. P. NGC 6240: merger-induced star formation and gas dynamics. **A&A**, v. 524, p. A56, dez. 2010.
- Fathi, K.; Storchi-Bergmann, T.; Riffel, R. A.; Winge, C.; Axon, D. J.; Robinson, A.; Capetti, A.; Marconi, A. Streaming Motions toward the Supermassive Black Hole in NGC 1097. **ApJL**, v. 641, p. L25–L28, abr. 2006.
- Ferrarese, L.; Merritt, D. A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. **ApJL**, v. 539, p. L9–L12, ago. 2000.
- Ferreira, D. F. **Análise Multivariada**. 1996. Tese (Doutorado) — Universidade federal de Lavras - UFLA, 1996.

- Frank, J.; King, A.; Raine, D. J. **Accretion Power in Astrophysics: Third Edition**. [S.l.: s.n.], 2002.
- Friedrich, S.; Davies, R. I.; Hicks, E. K. S.; Engel, H.; Müller-Sánchez, F.; Genzel, R.; Tacconi, L. J. Adaptive optics near infrared integral field spectroscopy of NGC 2992. **A&A**, v. 519, p. A79, set. 2010.
- Gebhardt, K.; Bender, R.; Bower, G.; Dressler, A.; Faber, S. M.; Filippenko, A. V.; Green, R.; Grillmair, C.; Ho, L. C.; Kormendy, J.; Lauer, T. R.; Magorrian, J.; Pinkney, J.; Richstone, D.; Tremaine, S. A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. **ApJL**, v. 539, p. L13–L16, ago. 2000.
- Hicks, E. K. S.; Davies, R. I.; Maciejewski, W.; Emsellem, E.; Malkan, M. A.; Dumas, G.; Müller-Sánchez, F.; Rivers, A. Fueling Active Galactic Nuclei. I. How the Global Characteristics of the Central Kiloparsec of Seyferts Differ from Quiescent Galaxies. **ApJ**, v. 768, p. 107, maio 2013.
- Hotelling, H. Analysis of a Complex of Statistical Variables Into Principal Components. **Journal of Educational Psychology**, v. 24, p. 417–441 e 498–520, 1933.
- Kennicutt JR., R. C. Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence. **ARA&A**, v. 36, p. 189–232, 1998.
- Knapen, J. H. Structure and star formation in disk galaxies. III. Nuclear and circumnuclear H α emission. **A&A**, v. 429, p. 141–151, jan. 2005.
- Knop, R. A.; Armus, L.; Matthews, K.; Murphy, T. W.; Soifer, B. T. Spatially Resolved Near-Infrared Spectroscopy of the Seyfert 2 Galaxies Markarian 1066, NGC 2110, NGC 4388, and Markarian 3. **AJ**, v. 122, p. 764–791, ago. 2001.
- Krolik, J. H.; Begelman, M. C. Molecular tori in Seyfert galaxies - Feeding the monster and hiding it. **ApJ**, v. 329, p. 702–711, jun. 1988.
- Mazzalay, X.; Maciejewski, W.; Erwin, P.; Saglia, R. P.; Bender, R.; Fabricius, M. H.; Nowak, N.; Rusli, S. P.; Thomas, J. Molecular gas in the centre of nearby galaxies from VLT/SINFONI integral field spectroscopy - II. Kinematics. **MNRAS**, v. 438, p. 2036–2064, mar. 2014.
- Mazzalay, X.; Rodríguez-Ardila, A.; Komossa, S.; McGregor, P. J. Resolving the coronal line region of NGC 1068 with near-infrared integral field spectroscopy. **MNRAS**, v. 430, p. 2411–2426, abr. 2013.
- Mazzalay, X.; Saglia, R. P.; Erwin, P.; Fabricius, M. H.; Rusli, S. P.; Thomas, J.; Bender, R.; Opitsch, M.; Nowak, N.; Williams, M. J. Molecular gas in the centre of nearby galaxies from VLT/SINFONI integral field spectroscopy - I. Morphology and mass inventory. **MNRAS**, v. 428, p. 2389–2406, jan. 2013.

- Menezes, R. B. **Espectroscopia 3D de núcleos ativos de galáxias: tratamento e análise de dados no óptico e infravermelho próximo**. 2012. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP, 2012.
- Menezes, R. B.; Steiner, J. E.; Ricci, T. V. Collimation and Scattering of the Active Galactic Nucleus Emission in the Sombrero Galaxy. **ApJL**, v. 765, p. L40, mar. 2013.
- Menezes, R. B.; Steiner, J. E.; Ricci, T. V.; Oliveira, A. S. The Active Nucleus in NGC 4579. In: Peterson, B. M.; Somerville, R. S.; Storchi-Bergmann, T. (Ed.). **IAU Symposium**. [S.l.: s.n.], 2010. (IAU Symposium, v. 267), p. 123–123.
- Müller Sánchez, F.; Davies, R. I.; Genzel, R.; Tacconi, L. J.; Eisenhauer, F.; Hicks, E. K. S.; Friedrich, S.; Sternberg, A. Molecular Gas Streamers Feeding and Obscuring the Active Nucleus of NGC 1068. **ApJ**, v. 691, p. 749–759, jan. 2009.
- Müller-Sánchez, F.; Prieto, M. A.; Hicks, E. K. S.; Vives-Arias, H.; Davies, R. I.; Malkan, M.; Tacconi, L. J.; Genzel, R. Outflows from Active Galactic Nuclei: Kinematics of the Narrow-line and Coronal-line Regions in Seyfert Galaxies. **ApJ**, v. 739, p. 69, out. 2011.
- Müller-Sánchez, F.; Prieto, M. A.; Mezcuca, M.; Davies, R. I.; Malkan, M. A.; Elitzur, M. The Central Molecular Gas Structure in LINERs with Low-luminosity Active Galactic Nuclei: Evidence for Gradual Disappearance of the Torus. **ApJL**, v. 763, p. L1, jan. 2013.
- Nagar, N. M.; Wilson, A. S.; Mulchaey, J. S.; Gallimore, J. F. Radio Structures of Seyfert Galaxies. VIII. A Distance- and Magnitude-Limited Sample of Early-Type Galaxies. **ApJS**, v. 120, p. 209–245, fev. 1999.
- Nenkova, M.; Sirocky, M. M.; Nikutta, R.; Ivezić, Ž.; Elitzur, M. AGN Dusty Tori. II. Observational Implications of Clumpiness. **ApJ**, v. 685, p. 160–180, set. 2008.
- Oliva, E.; Marconi, A.; Maiolino, R.; Testi, L.; Mannucci, F.; Ghinassi, F.; Licandro, J.; Origlia, L.; Baffa, C.; Checcucci, A.; Comoretto, G.; Gavryushev, V.; Gennari, S.; Giani, E.; Hunt, L. K.; Lisi, F.; Lorenzetti, D.; Marcucci, G.; Miglietta, L.; Sozzi, M.; Stefanini, P.; Vitali, F. NICS-TNG infrared spectroscopy of NGC 1068: The first extragalactic measurement of [P II] and a new tool to constrain the origin of [Fe II] line emission in galaxies. **A&A**, v. 369, p. L5–L8, abr. 2001.
- Osterbrock, D. E. Observational Model of the Ionized Gas in Seyfert and Radio-Galaxy Nuclei. **Proceedings of the National Academy of Science**, v. 75, p. 540–544, fev. 1978.
- _____. Seyfert galaxies with weak broad H alpha emission lines. **ApJ**, v. 249, p. 462–470, out. 1981.
- _____. Book-Review - Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei. **SKYTEL**, v. 78, p. 491, nov. 1989.
- Osterbrock, D. E.; Ferland, G. J. **Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei**. [S.l.: s.n.], 2006.

- Pearson, K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. **Journal of Educational Psychology**, v. 2 no 11, p. 559–572, 1901.
- Peterson, M. B. Book Review: An introduction to active galactic nuclei / Cambridge U Press, 1997. **The Observatory**, v. 117, p. 314, out. 1997.
- Raimundo, S. I.; Davies, R. I.; Gandhi, P.; Fabian, A. C.; Canning, R. E. A.; Ivanov, V. D. The black hole and central stellar population of MCG-6-30-15. **MNRAS**, v. 431, p. 2294–2306, maio 2013.
- Regazzi, A. J. **Análise multivariada**. [S.l.: s.n.], 2001.
- Ricci, T. V.; Steiner, J. E.; Menezes, R. B. NGC 7097: The Active Galactic Nucleus and its Mirror, Revealed by Principal Component Analysis Tomography. **ApJL**, v. 734, p. L10, jun. 2011.
- Riffel, R.; Riffel, R. A.; Ferrari, F.; Storchi-Bergmann, T. Intermediate-age stars as the origin of low stellar velocity dispersion nuclear rings: the case of Mrk 1157. **MNRAS**, v. 416, p. 493–500, set. 2011.
- Riffel, R.; Rodríguez-Ardila, A.; Aleman, I.; Brotherton, M. S.; Pastoriza, M. G.; Bonatto, C.; Dors, O. L. Molecular hydrogen and [Fe II] in active galactic nuclei - III. Low-ionization nuclear emission-line region and star-forming galaxies. **MNRAS**, v. 430, p. 2002–2017, abr. 2013.
- Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T. Compact molecular disc and ionized gas outflows within 350 pc of the active nucleus of Mrk 1066. **MNRAS**, v. 411, p. 469–486, fev. 2011.
- _____. Compact molecular disc and ionized gas outflows within 350 pc of the active nucleus of Mrk 1066. **MNRAS**, v. 411, p. 469–486, fev. 2011.
- _____. Feeding and feedback in the active nucleus of Mrk 1157 probed with the Gemini Near-Infrared Integral-Field Spectrograph. **MNRAS**, v. 417, p. 2752–2769, nov. 2011.
- Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T.; Nagar, N. M. Near-infrared dust and line emission from the central region of Mrk1066: constraints from Gemini NIFS. **MNRAS**, v. 404, p. 166–179, maio 2010a.
- Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T.; Riffel, R.; Pastoriza, M. G. Intermediate-age Stars as Origin of the Low-velocity Dispersion Nuclear Ring in Mrk 1066. **ApJ**, v. 713, p. 469–474, abr. 2010b.
- Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T.; Winge, C. Feeding versus feedback in AGNs from near-infrared IFU observations: the case of Mrk 79. **MNRAS**, v. 430, p. 2249–2261, abr. 2013.
- Riffel, R. A.; Storchi-Bergmann, T.; Winge, C.; McGregor, P. J.; Beck, T.; Schmitt, H. Mapping of molecular gas inflow towards the Seyfert nucleus of NGC4051 using Gemini NIFS. **MNRAS**, v. 385, p. 1129–1142, abr. 2008.
- Rodríguez-Ardila, A.; Pastoriza, M. G.; Viegas, S.; Sigut, T. A. A.; Pradhan, A. K. Molecular hydrogen and [Fe II] in Active Galactic Nuclei. **A&A**, v. 425, p. 457–474, out. 2004.

- Sanmartin, D.; Storchi-Bergmann, T.; Brotherton, M. S. 2D stellar population and gas kinematics of the inner 1.5 kpc of the post-starburst quasar SDSS J0210-0903. *MNRAS*, v. 428, p. 867–881, jan. 2013.
- Schartmann, M.; Burkert, A.; Krause, M.; Camenzind, M.; Meisenheimer, K.; Davies, R. I. Gas dynamics of the central few parsec region of NGC 1068 fuelled by the evolving nuclear star cluster. *MNRAS*, v. 403, p. 1801–1811, abr. 2010.
- Schmidt, M.; Green, R. F. Quasar evolution derived from the Palomar bright quasar survey and other complete quasar surveys. *ApJ*, v. 269, p. 352–374, jun. 1983.
- Schnorr Müller, A.; Storchi-Bergmann, T.; Riffel, R. A.; Ferrari, F.; Steiner, J. E.; Axon, D. J.; Robinson, A. Gas streaming motions towards the nucleus of M81. *MNRAS*, v. 413, p. 149–161, maio 2011.
- Souza, A. M. **Monitoração e ajuste de realimentação em processos produtivos multivariados**. 2000. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2000.
- Steiner, J. E.; Menezes, R. B.; Ricci, T. V.; Oliveira, A. S. PCA Tomography: how to extract information from data cubes. *MNRAS*, v. 395, p. 64–75, maio 2009.
- Storchi-Bergmann, T.; Lopes, R. D. S.; McGregor, P. J.; Riffel, R. A.; Beck, T.; Martini, P. Feeding versus feedback in NGC4151 probed with Gemini NIFS - II. Kinematics. *MNRAS*, v. 402, p. 819–835, fev. 2010.
- Storchi-Bergmann, T.; McGregor, P. J.; Riffel, R. A.; Simões Lopes, R.; Beck, T.; Dopita, M. Feeding versus feedback in NGC4151 probed with Gemini NIFS - I. Excitation. *MNRAS*, v. 394, p. 1148–1166, abr. 2009.
- Storchi-Bergmann, T.; Riffel, R. A.; Riffel, R.; Diniz, M. R.; Borges Vale, T.; McGregor, P. J. Two-dimensional Mapping of Young Stars in the Inner 180 pc of NGC 1068: Correlation with Molecular Gas Ring and Stellar Kinematics. *ApJ*, v. 755, p. 87, ago. 2012.
- Ulvestad, J. S.; Wilson, A. S. Radio structures of Seyfert galaxies. VII - Extension of a distance-limited sample. *ApJ*, v. 343, p. 659–671, ago. 1989.
- Urry, C. M.; Padovani, P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. *PASP*, v. 107, p. 803, set. 1995.
- Vicini, L. **Análise Multivariada da Teoria a Prática**. 2005. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2005.