

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

Louise Maria Giansante Martins

Outflows e uma bolha quente no centro de
M81

São Paulo

2015

Louise Maria Giansante Martins

Outflows e uma bolha quente no centro de
M81

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

Área de Concentração: Astronomia

Orientador: Prof. Dr. João E. Steiner

São Paulo

2015

À minha mãe, Sônia.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer muito ao professor João Steiner pela dedicação e pela paciência em ensinar tudo o que eu aprendi ao longo de três anos. Agradeço pela oportunidade de trabalhar com o grupo e pela força e exemplo que serão levados para toda a vida.

Agradeço também ao tutor Tiago Ricci pela calma e pelo bom humor com que sempre me recebeu e me ensinou, não só com relação ao trabalho de iniciação, mas também por toda a ajuda com os cálculos, físicas e com as mais diversas crises sobre a vida.

Agradeço aos professores e funcionários do IAG que foram fundamentais na minha formação. Especialmente, gostaria de agradecer às professoras Jane e Vera pela proximidade, por se dedicarem tanto a cada aluno e por terem resolvido tantos problemas encontrados ao longo do nosso caminho.

Agradeço também à FAPESP, pelo apoio financeiro sob o projeto 2011-20224/5.

Não posso deixar de agradecer aos meus amigos e colegas da Astro: Ana, André, Breno, Brisa, Coruja, Docinho, Elvis, Fabrício, Neiva, Paulo, Porteiro, Roberto, Rodrigo, Stephan. Aos grandes amigos dos outros cursos do IAG, que também sempre estiveram comigo: Gil, Knorre, Ju, Marcela, Nine. Muitas foram as vezes que quisemos desistir e cada risada, cada conversa no corredor ou mesmo em uma mesa de estudos foi importante para mim e me fazia continuar. Ao Ale e ao Renato, gostaria de agradecer por tantos sorrisos, especialmente nesse último ano. À Ina e ao Jorge, por terem tornado a Astronomia mais bonita.

Ao meu namorado, Thiago, agradeço muito pela paciência. Por ter me acompanhado em praticamente toda a minha graduação e, ainda assim, acreditar em mim mais do que eu mesma. Pelo incentivo, pelo carinho, pelo ombro nas horas difíceis e por comemorar cada semestre que acabava e cada uma das minhas conquistas.

Ao meu pai, Márcio (*in memoriam*) que, apesar de não estar aqui fisicamente, sei que me acompanhou de alguma forma.

Ao meu irmão tão querido, Marcinho, agradeço por tanta confiança, pela torcida e, acima de tudo, pelo apoio. Agradeço por também ter acreditado em mim, por ter aguentado meu estresse, por todas as conversas que tivemos.

Agradeço muito ao meu padrasto, Gilberto, pelo incentivo, pela ajuda e pelos conselhos. Por ter acompanhado minha trajetória desde a época do vestibular e por estar sempre preocupado e presente.

Finalmente, agradeço imensamente e dedico este trabalho à minha mãe, Sônia. Por ser o meu exemplo de força, dedicação e persistência sem o qual eu não teria conseguido chegar até aqui. Pela calma e serenidade ao aguentar o estresse de todas as minhas provas finais, sem nunca deixar de acreditar em mim. Pelo apoio e pelo amor incondicionais.

“It was, at times, a long, difficult road. But I’m glad it was long and difficult because if I hadn’t gone through hell to get there, the lesson might not have been as clear.”

Ted Mosby

Resumo

Um LINER (*Low-ionization nuclear emission-line region*) é uma região compacta e brilhante, que está presente no núcleo da maioria das galáxias próximas e apresenta linhas em emissão de baixa ionização. Embora a fotoionização por AGN de baixa luminosidade seja uma das possíveis fontes de excitação de LINERs, ondas de choque e populações estelares quentes também são consideradas possíveis fontes. Neste trabalho fez-se a reanálise do cubo de dados da região central de M81 obtido com o IFU-GMOS (integral field unit - Multi-Object Spectrograph) do telescópio Gemini Norte. M81 é uma galáxia espiral SA(s)ab, localizada a 3.5 Mpc de distância, cujo núcleo possui um LINER associado a um AGN do tipo 1 e que apresenta emissão em rádio devido a um núcleo compacto e um jato unilateral. O núcleo de M81, devido à sua distância, é um importante objeto para se estudar as propriedades das linhas em emissão e seu estudo pode ser feito com boa resolução espacial. O objetivo desse trabalho é utilizar novas técnicas de análise de dados e tratamento de ruído, como a Filtragem de Butterworth, a Tomografia PCA e a Deconvolução de Richardson-Lucy, a fim de melhorar a qualidade da imagem para obtenção de novas informações. Com a Tomografia PCA em um intervalo espectral de 6200 – 6700 Å, identificou-se um *outflow* cuja componente em *blueshift* tem a mesma direção do jato em rádio. Considerando um intervalo espectral de 5600 – 6700 Å, observou-se emissão intensa na linha [NII] λ 5755, que é sensível a altas temperaturas do gás ionizado, na terceira componente obtida com a Tomografia PCA. Nessa mesma componente se detectou uma região quente deslocada 0.8'' sul do núcleo. A análise dos fluxos das linhas em emissão mostrou que o máximo da razão [OI]/H α não era proveniente do AGN, mas também estava deslocada do núcleo na mesma região detectada com a Tomografia PCA. Fez-se, então, o mapa da temperatura dessa região e o resultado obtido foi de $T > 43500K$. Valores tão

altos de temperatura associados a um alto valor da razão $[OI]/H\alpha$ não podem ser causados por fotoionização. Propõe-se, então, que o gás nessa região seja ionizado/excitado pelo aquecimento por ondas de choque provenientes da combinação de ventos de estrelas jovens ($t \sim 1 - 5$ milhões de anos) ou restos de supernovas de estrelas massivas ($t < 70$ milhões de anos).

Abstract

A LINER (low-ionization nuclear emission-line region) is a brilliant and compact region at the center of most of the nearby galaxies with low-ionization emission lines. Although the photoionization by low luminous AGN is one of the possible sources for LINERs' excitation, shock waves and hot stellar population are also considered as possible sources. In this work we reanalysed the data cube of the central region of M81, obtained with the IFU-GMOS (integral field unit - Multi-Object Spectrograph) on the North-Gemini Telescope. M81 is a spiral galaxy SA(s)ab at a distance of 3.5 Mpc, which hosts a LINER associated with a type 1 AGN and it presents radio emission because of a compact core and a one-sided nuclear jet. Because of its proximity, M81 nucleus has been an important object for studying the emission lines properties and it can be done with good spatial resolution. The goal of this work is to use additional techniques of analysis and noise treatment, like Butterworth filtering, PCA Tomography and Richardson-Lucy deconvolution, in order to improve the image quality and obtain new information. With the PCA Tomography applied to the 6200 – 6700 Å spectral range, an *outflow* whose *blueshifted* component was the same as the radio jet has been identified. With the PCA Tomography applied to the 5600 – 6700 Å spectral range, a strong emission of the line [NII] λ 5755, which is sensitive to high temperatures of the ionized gas, has been observed in the third component obtained with the PCA Tomography. In the same component, a hot region located 0.8'' southbound of the nucleus has been detected. The emission line fluxes analysis showed that the highest values of the [OI]/H α ratio weren't associated with the AGN, but it was also located southbound of the nucleus. Then, the temperature map of the gas in this region has been done and the result was $T > 43500$ K. Such high values can not be caused by photoionization. It is proposed, so, that the gas in this region has been ionized by shock

heating from young stellar winds ($t \sim 1 - 5$ My) combined with supernova remnants of massive stars ($t < 70$ My).

Lista de Figuras

1.1	Espectros de três LINERs evidenciando as principais linhas em emissão no óptico (figura de Ho, 2008).	21
2.1	Perfil radial da componente de $H\alpha$ e do contínuo estelar, após a deconvolução de Richardson-Lucy.	28
2.2	Exemplo de <i>fingerprint</i>	29
3.1	<i>Scree test</i> realizado para se determinar quais tomogramas e autoespectros apresentam resultados relevantes.	31
3.2	Quatro primeiros tomogramas e autoespectros, resultantes da aplicação da Tomografia PCA no cubo de dados após o tratamento de ruído.	32
3.3	Terceira componente resultante da aplicação da Tomografia PCA ao cubo de dados com intervalo espectral de $6200 - 6700 \text{ \AA}$	34
3.4	Quarta componente resultante da aplicação da Tomografia PCA ao cubo de dados com intervalo espectral de $6200 - 6700 \text{ \AA}$	34
3.5	Espectro extraído da região nuclear.	36
3.6	Ajuste gaussiano no sistema $[\text{NII}] + H\alpha$	37
3.7	Ajuste gaussiano no duplete de $[\text{OI}]$	38
3.8	Velocidade radial e dispersão de velocidades do gás.	40
3.9	Fluxos das linhas $H\alpha$, $[\text{NII}] \lambda 6583$ e $[\text{OI}] \lambda 6300$	40
3.10	Razões entre as linhas $[\text{NII}] \lambda 6583$ e $H\alpha$ e entre as linhas $[\text{OI}]$ e $H\alpha$	41
3.11	Razões de linhas como função da temperatura. (figura de Osterbrock & Ferland, 2006).	41
3.12	Razão $[\text{NII}] \lambda 6548 + [\text{NII}] \lambda 6583 / [\text{NII}] \lambda 5755$ e mapa de temperatura.	42

3.13	Espectro extraído do núcleo do objeto e da região que apresenta emissão extensa e alta temperatura.	43
3.14	Associação de imagens do HST, razão entre [OI] e $H\alpha$ e mapa de temperatura.	44
A.1	Cinemática estelar: dispersão de velocidades, velocidade radial, assimetria e curtose.	56

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros obtidos com o ajuste gaussiano às linhas em emissão	39
-----	--	----

Sumário

1. <i>Introdução</i>	19
1.1 AGN	19
1.2 LINER	20
1.3 M81	22
1.4 Organização da monografia	22
2. <i>Metodologia</i>	23
2.1 Observações e Redução de dados	23
2.2 Tratamento de ruído	25
2.2.1 Filtragem de Butterworth no Espaço de Fourier	26
2.2.2 Deconvolução de Richardson-Lucy	27
2.2.3 Tomografia PCA	27
3. <i>Resultados e Análise</i>	31
3.1 Tomografia PCA	31
3.2 Cubo de gás	34
3.2.1 Síntese espectral: o STARLIGHT	34
3.2.2 Linhas em emissão	36
3.2.2.1 Motivação	36
3.2.2.2 Aplicações	36
3.2.2.3 Cinemática	39
3.2.2.4 Fluxos e razões	40
3.3 Mapa de Temperatura	41

4. Conclusões	45
Referências	49
Apêndice	53
A. Cinemática Estelar	55
A.1 Motivação	55
A.2 Aplicações	56
B. Artigo submetido à <i>Astronomy & Astrophysics</i>	57

Introdução

1.1 AGN

Núcleos ativos de galáxias (*active galactic nuclei: AGN*) são regiões compactas e brilhantes localizadas no centro de galáxias. Seu brilho não é proveniente apenas de estrelas e pode ser observado em diversos comprimentos de onda: óptico, rádio, microondas, infravermelho, raios-X, raios gama e ultravioleta. Tratam-se dos objetos mais brilhantes do universo e, por isso, podem ser utilizados em descobertas de objetos mais distantes. Uma galáxia hospedeira de um AGN é considerada ativa e acredita-se que a radiação emitida por ele se origina de um buraco negro supermassivo em acreção de massa localizado no núcleo da galáxia. Não se sabe com clareza, entretanto, a natureza do mecanismo associado a esse processo (Schnorr Müller et al. [28]). Alguns estudos mostram que há uma relação direta entre a evolução do buraco negro e a da galáxia como um todo (Granato et al. [10]; Hopkins e Hernquist [15]).

A classificação de AGNs é dada a partir de medidas espectrais e fotométricas, dividindo-os em Quasares, QSOs, Seyferts, LINERs, rádio galáxias, BL Lacs, entre outros. Quasares e QSOs são os mais luminosos e mais distantes do universo. Apresentam um espectro contínuo com forte emissão no óptico e em raios-X, podendo apresentar ou não emissão em rádio sendo, assim, chamados de *radio-loud* ou *radio-quiet*. As galáxias hospedeiras desse tipo de objeto podem ser espirais, irregulares ou elípticas e há uma relação direta entre o tamanho da galáxia e a luminosidade do quasar: quanto maior a massa da galáxia hospedeira, mais luminoso o quasar. Galáxias de Seyferts apresentam menor luminosidade e a principal diferença com relação aos quasares é a possibilidade de se distinguir a galáxia hospedeira. As linhas em emissão são altamente ionizadas e todos os objetos

nessa classificação são *radio-quiet*. Elas podem ser divididas em dois grupos: Seyfert 1, cujo espectro apresenta forte emissão de linhas largas, e Seyfert 2, que apresentam apenas emissão de linhas estreitas. As galáxias hospedeiras desse objeto são, em sua maioria, espirais. As rádio galáxias são semelhantes às galáxias de Seyfert, porém apresentam emissão intensa em rádio (*radio-loud*) e suas galáxias hospedeiras são elípticas. BL Lacs apresentam rápida variabilidade e emissão polarizada no óptico, rádio e raio-X. Esses objetos não possuem linhas em emissão no óptico, de forma que seu *redshift* é determinado a partir de características do espectro de sua galáxia hospedeira. LINERs (*Low Ionization Nuclear Emission-Line Regions*) apresentam baixa taxa de acreção (Ho [12]) e seus espectros apresentam linhas em emissão com baixa ionização. São muito comuns em galáxias mais próximas (80% de galáxias Sab, de acordo com Keel [16]) e frequentemente apresentam espectro que possuem largas linhas em emissão.

1.2 LINER

Um LINER (*Low-ionization nuclear emission-line region*) é uma região compacta e brilhante no núcleo da maioria das galáxias próximas. Seu espectro possui linhas em emissão de baixa ionização e propõe-se que um AGN de baixa luminosidade seja responsável pela emissão espectral dessa região. Essa categoria foi descoberta por Heckman [11] em 1980 e ele definiu uma forma de se identificar esse tipo de objeto a partir das linhas proibidas do oxigênio; porém, um problema encontrado com essa classificação se refere ao grande intervalo espectral necessário para a observação, além de tornar difícil a distinção entre LINERs e objetos de transição. Atualmente, a classificação mais aceita é baseada nas relações entre os fluxos das linhas e foram obtidas por Osterbrock e Ferland [22] (2006). São dadas por 1.1 e 1.2:

$$\frac{[OIII]\lambda 5007}{H\beta} < 3 \quad \frac{[OI]\lambda 6300}{H\alpha} > 0.05 \quad (1.1)$$

$$\frac{[SII]\lambda 6716 + [SII]\lambda 6731}{H\alpha} > 0.4 \quad \frac{[NII]\lambda 6583}{H\alpha} > 0.5 \quad (1.2)$$

Para este trabalho, devido ao intervalo espectral utilizado, são de interesse apenas as razões $[OI]/H\alpha$ e $[NII]/H\alpha$.

Também é característica deste tipo de AGN a presença de largas linhas em emissão, normalmente nas linhas da série de Balmer do hidrogênio. De acordo com a presença ou não

dessa componente, esses objetos são classificados em LINER do tipo 1 ou 2. A componente larga de $H\alpha$ de M81 foi descoberta por Peimbert e Torres-Peimbert [25]. As linhas em emissão largas são formadas na *Broad Line Region* (Região de Linhas Largas - BLR) do objeto, que fica ao redor do disco de acreção do buraco negro supermassivo e possuem largura (FWHM) de aproximadamente 5000 km/s. Nessa região não se observam linhas proibidas, pois ela contém gás de alta densidade. A observação de componentes largas nas linhas em emissão não é trivial. Muitas vezes, elas são fracas e podem ser confundidas com o contínuo estelar; mesmo com a sua subtração adequada, ainda se deve separar os sinais do sistema $[\text{NII}] + H\alpha$, que são linhas fortemente associadas (Ho [12]). Já a *Narrow Line Region* (Região de Linhas Estreitas - NLR) é externa à BLR e forma as linhas estreitas do espectro, com larguras entre 200 km/s e 900 km/s. Essa região possui densidade menor do que a BLR e é possível se observar linhas proibidas. Observa-se, ainda, que essa região é bem mais extensa do que a BLR.

A figura 1.1 apresenta os espectros de três galáxias cujos núcleos são classificados como LINERs (NGC 4203, NGC 4450 e NGC 4579), em um intervalo espectral de 6260 – 6800 Å. Esses espectros evidenciam as principais linhas em emissão observadas no óptico, assim como a componente larga de $H\alpha$. As observações foram feitas com o *Hubble Space Telescope* e a figura foi obtida de Ho [12].

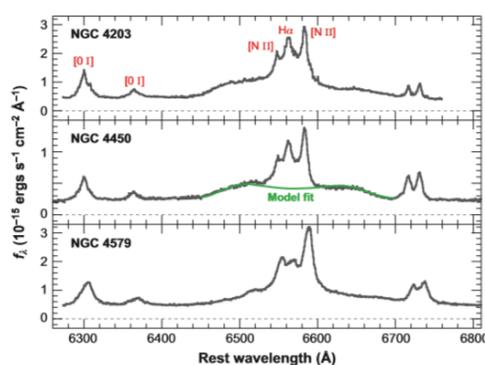


Figura 1.1: Espectros de três LINERs evidenciando as principais linhas em emissão no óptico. Deve-se observar a componente larga da linha $H\alpha$, presente nos três espectros. Essas linhas foram descobertas em observações com o *Hubble Space Telescope*. No espectro de NGC 4450, ajustou-se um modelo (em verde) na componente larga. As linhas em emissão que não foram marcadas correspondem às linhas $[\text{SII}] \lambda\lambda 6716, 6731$ (figura de Ho [12]).

1.3 M81

Neste trabalho são apresentados resultados referentes à reanálise do cubo de dados da região central de M81 obtido com o IFU-GMOS do telescópio Gemini Norte e publicado por Schnorr Müller et al. [28] (2011). A reanálise foi feita com o objetivo de se aplicar novas técnicas de análise que melhorassem o sinal/ruído para obtenção de mais informações. M81 é uma galáxia espiral cuja classificação de Hubble é SA(s)ab e está localizada a 3.5 Mpc de distância (Paturel et al. [24]), sendo a galáxia mais próxima conhecida por possuir um LINER associado a um AGN do tipo 1 (Peimbert e Torres-Peimbert [25]) em seu núcleo. Seu estudo é importante pois, devido à sua proximidade, pode ser feito com boa resolução espacial e foi realizado por diversos autores.

Observações em rádio (Bietenholz et al. [1]; Martí-Vidal et al. [19]), por exemplo, mostraram a presença de um jato unilateral no núcleo de M81. Page et al. [23] fizeram observações em ultravioleta e raio-X. Maoz et al. [18] fizeram observações com o HST - ACS¹ e detectaram variabilidade em ultravioleta. Essa interpretação foi consistente com a de Ho et al. [13], que detectaram um fraco contínuo em ultravioleta. Davidge e Courteau [5], a partir de observações com o HST, identificaram uma contribuição não termal de 20% na banda K a 0.5'' do centro de M81.

1.4 Organização da monografia

O presente trabalho está dividido como se segue: no capítulo 2 apresenta-se uma descrição sobre os dados utilizados e a metodologia de redução de dados e tratamento de ruído. No capítulo 3 apresenta-se uma descrição e análise dos resultados obtidos, assim como comparações com resultados obtidos em trabalhos anteriores. No capítulo 4 apresenta-se as conclusões. Após o capítulo 4, apresenta-se as referências citadas e utilizadas durante essa pesquisa. No apêndice A descreve-se aspectos obtidos a partir da análise da cinemática estelar; esses não foram relevantes na interpretação dos principais resultados obtidos no capítulo 3 e, portanto, apresenta-se apenas uma descrição do procedimento e das aplicações. Por último, segue em anexo o *paper* submetido à revista *Astronomy & Astrophysics* com os principais resultados desse trabalho.

¹ Hubble Space Telescope - Advanced Camera for Surveys: www.stsci.edu/hst/acs

Metodologia

2.1 Observações e Redução de dados

Este trabalho consiste na reanálise dos dados de M81 obtidos com o IFU-GMOS (*Integral Field Unit – Gemini Multi-Object Spectrograph*) do telescópio Gemini Norte e publicados por Schnorr Müller et al. [28] no modo duas fendas. Neste modo, há 1500 microlentes localizadas no plano focal do telescópio e dessas, 1000 captam o sinal do objeto estudado e 500 captam o sinal do céu. A imagem do objeto é repartida pelas microlentes em pedaços de 0.2 segundo de arco (*arcsec*); essas microlentes estão acopladas a um arranjo de fibras ópticas, que são organizadas na localização nominal da fenda do espectrógrafo. Os 1000 espectros são, então, alinhados horizontalmente em 3 CCDs. Dessa forma, tem-se como resultado três cubos de dados que compreendem a região central do objeto de dimensão $7'' \times 5'' \text{arcsec}^2$ e posição angular (PA) de 150° . A faixa espectral observada foi de $5600 - 6700 \text{ \AA}$, o que permitiu a análise das linhas de $\text{H}\alpha + [\text{NII}] \lambda\lambda 6548, 6583$, $[\text{OI}] \lambda 6300$ e $[\text{NII}] \lambda 5755$. As linhas de $[\text{SII}] \lambda\lambda 6716, 6731$, embora importantes na análise de objetos do tipo LINER, coincidiram com um dos *gaps* entre os CCDs e não foram consideradas.

A primeira etapa necessária para que seja possível analisar os cubos de dados é a redução, a fim de eliminar efeitos que não são característicos do objeto. A redução compreendeu a subtração de *bias*, correção de *flat-field*, calibração em comprimento de onda e em fluxo, subtração do céu e remoção de raios cósmicos, feitas a partir de tarefas específicas do pacote *gemini.gmos* do *IRAF*¹. Também fez-se a correção dos *gaps* entre os CCDs e correção da refração atmosférica diferencial.

¹ IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatory, which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) under cooperative agreement with the National Science Foundation

- Subtração de *bias*

As imagens de *bias* são obtidas com um tempo de exposição nulo e contém características do instrumento de detecção. A subtração é feita, então, para se reduzir esse efeito nos dados a serem analisados.

- Correção de *flat-field*

As imagens de *flat-field* são obtidas a partir da exposição do CCD a uma tela branca iluminada por uma lâmpada ou ao céu após o pôr-do-sol ou antes de o sol nascer. Com essas imagens, geralmente, pode-se corrigir as diferenças de resposta dos pixels do CCD. No caso do GMOS, entretanto, elas são utilizadas para corrigir as diferenças de resposta das fibras ópticas.

- Calibração em comprimento de onda

Em um primeiro momento, o espectro observado possui linhas cujas intensidades estão em função da posição no CCD ou dos pixels. Esses valores devem ser corrigidos para os comprimentos de onda reais das linhas a partir de um espectro de calibração, que é obtido a partir da observação direta de um objeto cujo espectro é conhecido para, posteriormente, aplicá-lo ao espectro do objeto.

- Calibração em fluxo

Após a calibração em comprimento de onda no espectro, tem-se o número de contagem de fótons em função do comprimento de onda. Para se obter a relação entre o número de contagens e o fluxo associado, utiliza-se uma estrela espectrofotométrica a respeito da qual se conhece os fluxos absoluto e instrumental; estes determinam a sensibilidade do detector em função do comprimento de onda. Desta forma, a partir desta relação, pode-se obter o espectro calibrado em fluxo.

- Extração do céu

O céu noturno emite fótons que podem contaminar a imagem do objeto. Para corrigir esse efeito, faz-se a observação do céu na ausência de objetos celestes e essa imagem é subtraída da imagem do objeto que se quer analisar.

- Remoção de raios cósmicos

Raios cósmicos são partículas altamente energéticas e penetrantes, que podem atravessar a atmosfera. Quando um raio cósmico atinge o CCD, forma-se na imagem um ponto que pode ser confundido com uma estrela. Comparando algumas imagens sobre a mesma região, pode-se fazer a distinção entre raios cósmicos e estrelas e, por meio da mediana, é possível eliminá-los. Neste trabalho foi obtida a mediana dos três cubos de dados e a mesma foi utilizada em toda a análise.

- Correção da refração atmosférica diferencial

A luz incidente na Terra sofre refração devido à atmosfera, de acordo com cada comprimento de onda. Isso altera a sua direção de propagação e, assim, as observações astronômicas realizadas por telescópios localizados na superfície da Terra são prejudicadas. Para corrigir esse efeito, utilizou-se algoritmo desenvolvido por João E. Steiner e implementado em linguagem *IDL*² por Roberto B. Menezes e Tiago V. Ricci. (Menezes [20])

2.2 Tratamento de ruído

Após a redução dos dados, alguns procedimentos foram adotados para se minimizar o ruído, utilizando a mediana dos três cubos de dados. Para a redução de ruídos de alta frequência³ espacial e espectral utilizou-se a **Filtragem de Butterworth**, que é aplicada no domínio de frequências espaciais e espectrais e elimina esses ruídos a partir de Transformadas de Fourier: todas as estruturas que possuem frequência acima da resolução espectral ou acima da *Point Spread Function* (PSF) são ruídos e devem ser removidos. Após a filtragem de Butterworth, aplicou-se a **Deconvolução de Richardson-Lucy** a fim de reverter o efeito de uma convolução. Para a remoção de *fingerprints* instrumentais, utilizou-se a **Tomografia PCA**, que é uma técnica utilizada para análise de cubos de dados, muito eficiente em identificar padrões e correlações. Estas técnicas serão descritas brevemente nas subseções abaixo.

² Linguagem de programação avançada e de alto nível, principalmente utilizada para se extrair informações de um conjunto complexo de dados. Foi desenvolvida por David Stern e *ITT Visual Information Solutions*.

³ Trata-se de frequência amostral e não de frequência associada a um dado comprimento de onda.

2.2.1 Filtragem de Butterworth no Espaço de Fourier

A transformada de Fourier é a representação de uma função como uma soma de senos e cossenos. O espectro de potências utilizado mostra o peso que cada frequência possui na função original.

Para que o cubo de dados seja submetido à filtragem de Butterworth no espaço de Fourier, faz-se a transformada discreta do cubo (2.1),

$$\hat{I}(u, v, \lambda) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I(x, y, \lambda) e^{-2\pi i(ux/M + vy/N)} \quad (2.1)$$

em que (x, y, λ) são, respectivamente, as coordenadas espaciais e espectral e (u, v) as coordenadas em frequência; I é a intensidade do pixel (x, y, λ) e \hat{I} sua transformada no pixel (u, v, λ)

Em (2.2), tem-se o filtro de Butterworth espacial:

$$B(u, v) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{u}{a} \right)^2 + \left(\frac{v}{b} \right)^2 \right]^{2n}} \quad (2.2)$$

em que (a, b) são as frequências de corte nos eixos (u, v) . Por se tratar de um filtro passa-baixa, todas as frequências acima de (a, b) são minimizadas. Os valores de (a, b) são escolhidos de forma que apenas os ruídos cujas frequências são maiores do que a PSF sejam removidos. Os filtros de Butterworth são construídos de modo que se tenha uma função com o mínimo de oscilações tanto na banda passante quanto na banda de corte.

Da equação (2.2), vê-se que quanto maior o valor de n , mais rápido o filtro decai; os ruídos de alta frequência são, então, removidos com mais eficiência. Entretanto, isso pode gerar diversos anéis nas imagens, cortando também as altas frequências da PSF. Um baixo valor de n pode não ser tão eficiente em remover os ruídos de alta frequência, mas não gera anéis. Utilizou-se, em um primeiro momento, o valor de $n = 6$. Entretanto, na análise dos fluxos das linhas de emissão, observou-se a presença de anéis em torno do núcleo. Para evitá-los, utilizou-se $n = 2$ na filtragem espacial e os resultados serão apresentados nas próximas seções.

O filtro de Butterworth espectral é o equivalente espacial em uma dimensão e pode ser expresso de acordo com a equação (2.3):

$$B(u) = \frac{1}{1 + \left[\frac{|u|}{a}\right]^{2n}} \quad (2.3)$$

Assim, a imagem filtrada é dada pela convolução do filtro, dado por (2.2) e (2.3), com a imagem (2.1) (para mais detalhes sobre esse processo, ver Gonzales e Woods [9]; Ricci et al. [26] e Menezes et al. [21]).

2.2.2 Deconvolução de Richardson-Lucy

Sabe-se que a imagem observada de qualquer objeto astronômico a partir da superfície da Terra corresponde à imagem original desse objeto convoluída com uma PSF devida principalmente à atmosfera terrestre. É essa convolução que faz com que a imagem de um objeto puntual (como uma estrela, por exemplo) vista a partir da superfície da Terra apresente um diâmetro aparente (*seeing*). Considerando $O(x, y)$ a imagem original do objeto observado e $P(x, y)$ a PSF da atmosfera terrestre, então, a imagem $I(x, y)$ observada desse objeto é dada por:

$$I(x, y) = (P \otimes O)(x, y) + N(x, y) \quad (2.4)$$

em que $N(x, y)$ é um ruído aditivo.

A deconvolução é um procedimento que visa reverter o efeito de uma convolução. Neste trabalho, adotou-se a **Deconvolução de Richardson-Lucy** (Richardson [27]; Lucy [17]), que consiste em um processo iterativo que torna mais nítida a PSF da imagem.

$$O(x, y) = \left[\frac{I(x, y)}{P \otimes O^n(x, y)} \right] \otimes O^n(x, y) \quad (2.5)$$

Em que O^n é o n -ésimo passo da imagem. Foram utilizadas 10 iterações e uma PSF gaussiana com $FWHM = 0.98''$, derivada da componente larga de $H\alpha$. Após a deconvolução, a PSF passou a ter $FWHM$ de $0.89''$. A figura 2.1 mostra o perfil dessa componente e do contínuo estelar.

2.2.3 Tomografia PCA

Um cubo de dados é caracterizado por possuir três dimensões: duas dimensões espaciais e uma espectral (x, y, λ) . Para análise do cubo, utilizou-se a metodologia de Tomografia PCA (Steiner et al. [29]).

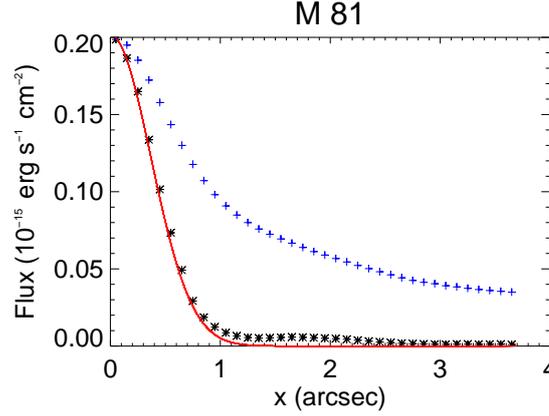


Figura 2.1: Perfil radial da componente de H α (em vermelho) e contínuo estelar (em azul), após a deconvolução.

Além de sua eficiência na identificação de padrões e correlações nos dados, trata-se de uma técnica que é capaz de reduzir a dimensão dos dados sem perda de informação, o que é essencial em se tratando de dados de grandes dimensões. Matematicamente, o PCA consiste em uma transformação linear que organiza os dados correlacionados em um novo sistema ortogonal de coordenadas não-correlacionadas, ordenadas de forma que o primeiro autovetor explica a maior parte da variância (autovalor), seguido pelo segundo autovetor e assim sucessivamente.

Assume-se que o cubo de dados possui $n = \mu \times \nu$ pixels espaciais e m pixels espectrais. Cada pixel do cubo possui uma intensidade $I_{ij\lambda}$, em que i e j correspondem aos pixels espaciais. Primeiro, transforma-se o cubo em uma matriz $I_{\beta\lambda}$, em que $\beta = \mu(i - 1) + j$, e é na análise dessa matriz que consiste a metodologia.

A base de coordenadas que corresponde ao PCA é dada pelo conjunto de autovetores da matriz de covariância (matriz $I_{\beta\lambda}$), que possui m linhas e m colunas (Fukunaga [7]), é simétrica e se define como:

$$C_{cov} = \frac{[I_{\beta\lambda}]^T \cdot I_{\beta\lambda}}{n - 1} \quad (2.6)$$

Essa matriz possui m autovetores (E_k), cada um associado a um autovalor (Λ_k). Assim, E_k é o novo sistema de coordenadas anticorrelacionadas e k é a ordem do autovetor ($k = 1, \dots, m$). A transformada que corresponde ao PCA é:

$$T_{\beta k} = I_{\beta\lambda} \cdot E_{\lambda k} \quad (2.7)$$

Na equação (2.7), $T_{\beta k}$ são os dados no novo sistema de coordenadas.

A matriz de covariância na base dos autovetores é diagonal:

$$D_{cov} = \frac{[T_{\beta k}]^T \cdot T_{\beta k}}{n - 1} \quad (2.8)$$

Os elementos da diagonal dessa matriz são os autovalores. A projeção dos dados nessas novas coordenadas produz imagens que passam a ser chamadas de tomogramas e representam fatias dos dados no novo espaço de autovetores. Para aplicar essa metodologia, foi utilizado um algoritmo implementado em linguagem *IDL* (cf. Steiner et al. [29])

Uma das aplicações do PCA no cubo de dados de M81 é a identificação e redução dos *fingerprints* instrumentais, que é a assinatura em baixa frequência espacial e espectral causada pelo instrumento. Reduzir este tipo de ruído é fundamental para se extrair mais informações do objeto. Um exemplo de *fingerprint*, encontrado no quarto tomograma e autoespectro, pode ser visto na figura (2.2), à esquerda, e o respectivo tomograma e autoespectro corrigidos, à direita:

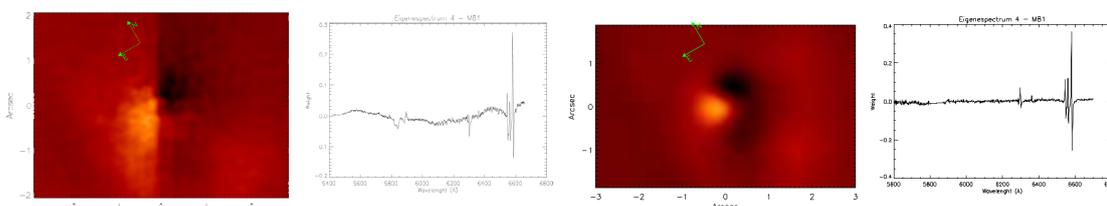


Figura 2.2: À esquerda: exemplo de *fingerprint*, evidente após a aplicação da Tomografia PCA. À direita: mesmo tomograma e autoespectro após a correção.

Para a redução desse tipo de ruído, corta-se do espectro do objeto as linhas em emissão e absorção mais acentuadas, restando apenas o contínuo estelar da galáxia. Faz-se um ajuste com uma função *spline* de baixa frequência espectral nos autoespectros afetados pelo *fingerprint* assumindo os ajustes como os autoespectros. Para tanto, utiliza-se o *Feature Suppression and Enhancement*, que consiste em enfatizar ou minimizar determinada estrutura a partir de uma reconstrução do cubo de dados correspondente apenas ao *fingerprint* instrumental, o qual é subtraído do cubo de dados original.

Resultados e Análise

Após o tratamento dos ruídos, algumas metodologias de análise foram aplicadas nos dados para obtenção de outras informações e resultados. A análise dos resultados será descrita a seguir.

3.1 Tomografia PCA

Em um primeiro momento, aplicou-se novamente a Tomografia PCA no cubo já tratado a fim de se verificar as características reveladas pelos tomogramas e autoespectros. A escolha de quais deles apresentavam resultados relevantes, isto é, em quais deles não havia ruído predominante, foi realizada a partir de um "scree test" (cf. Steiner et al. [29]).

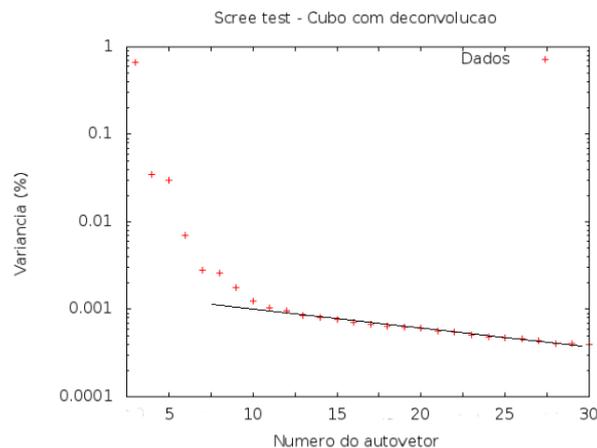


Figura 3.1: Scree test realizado para se determinar quais tomogramas e autoespectros apresentam resultados relevantes.

A partir do *scree test*, vê-se que há sinal até o tomograma e autoespectro 8, ou seja, a partir dessa componente há predominância de ruído. Embora tenha sinal nas componentes

5, 6 e 7, os resultados são complexos e de difícil interpretação. Assim, para este trabalho foram selecionados os quatro primeiros tomogramas e autoespectros (figura 3.2).

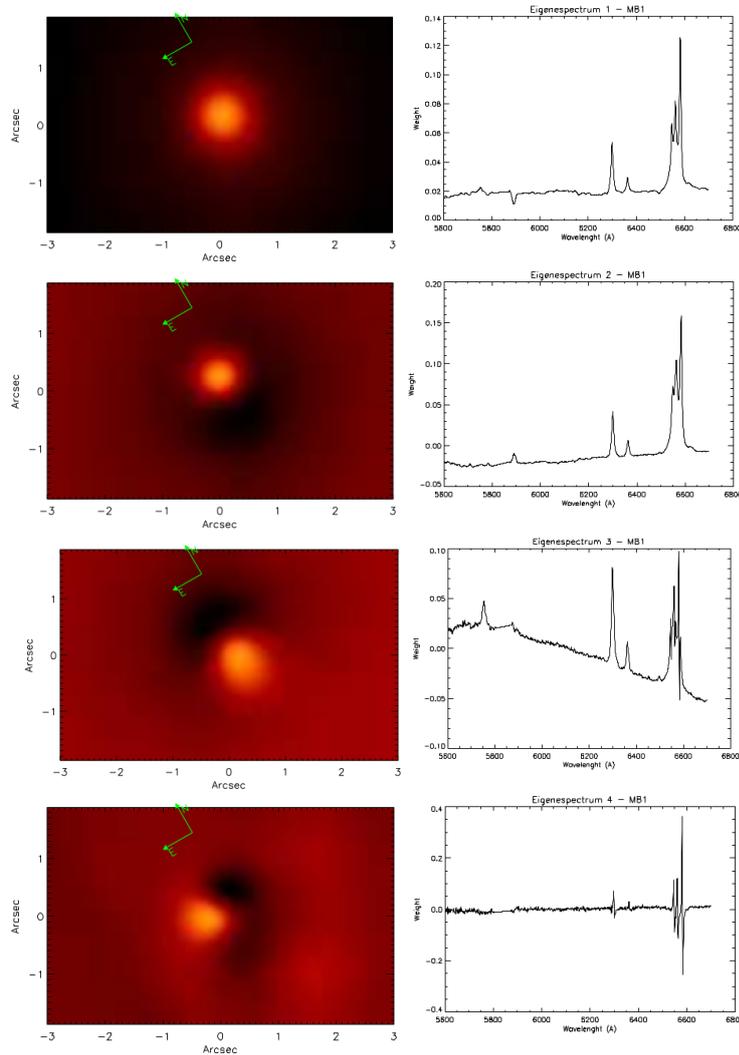


Figura 3.2: Quatro primeiros tomogramas e autoespectros, resultantes da aplicação da Tomografia PCA no cubo de dados já tratado.

A primeira componente contribui com 93.5% da variância e, portanto, mostra as características básicas do espectro e da imagem do objeto como um todo. O autoespectro 2 contribui com 5.7% da variância e mostra correlações entre as linhas em emissão [NII] λ 5755, [OI] λ 6300, 6363 e $H\alpha$ + [NII] λ 6548, 6583. No tomograma, observa-se um objeto puntiforme associado a essas linhas em emissão, localizado na região central do bojo estelar. Interpreta-se tal resultado como o AGN de M81. O autoespectro 3 representa 0.66% da variância. Nesse autoespectro nota-se a presença de uma intensa linha [NII] λ 5755, que é sensível a altas temperaturas do gás ionizado. Nesse autoespectro também pode-

se observar uma correlação entre as linhas [NII] $\lambda 5755$, [OI] $\lambda \lambda 6300, 6363$ e $H\alpha + [NII] \lambda \lambda 6548, 6583$, associadas à região azul do contínuo. Analisando o tomograma associado a esse autoespectro, observa-se um objeto a $0.8''$ sul do núcleo relacionado a essas linhas em emissão, que deve ser mais quente e mais azul do que a maioria das componentes estelares presentes no campo. Finalmente, o autoespectro 4 contribui com 0.3% da variância e, neste caso, observa-se que as asas azul e vermelha das linhas em emissão estão anticorrelacionadas. No tomograma, vê-se duas estruturas: a mais brilhante está associada à asa azul e a região escura está associada à asa vermelha. Essa característica foi interpretada como a cinemática de um disco de gás, que é compatível com a interpretação de Schnorr Müller et al. [28] para esta galáxia e com a interpretação de Ricci et al. [26] para outras.

Posteriormente, o intervalo espectral do cubo de dados foi reduzido para $6200 - 6700 \text{ \AA}$ e aplicou-se novamente a Tomografia PCA. Esse intervalo espectral é o mesmo analisado por Schnorr Müller et al. [28] e esse procedimento foi adotado para fins de comparação, pois a orientação espacial adotada naquele trabalho foi reinterpretada neste. Dessa forma, os quatro primeiros autoespectros obtidos foram os mesmos: o primeiro autoespectro apresenta linhas em emissão que correspondem ao bojo galáctico, enquanto o segundo autoespectro foi interpretado como o AGN de M81. A diferença na orientação espacial afetou apenas as terceira e quarta componentes. Na terceira, Schnorr Müller et al. [28] interpretou que a estrutura bipolar do tomograma está associada a um disco de gás. Embora essa interpretação seja compatível, o valor obtido para a posição angular do disco neste trabalho foi de $-3^\circ \pm 1^\circ$. Assim como na terceira componente na figura 3.2, pode-se observar ainda que além da cinemática do disco associada às linhas $H\alpha + [NII] \lambda \lambda 6548, 6583$, há uma forte correlação entre as linhas [OI] e o lado do disco que está em *blueshift*. Além disso, há um contínuo azulado relacionado a essa característica. O terceiro tomograma e autoespectro estão na figura 3.3.

A quarta componente também se refere ao movimento do gás, porém a direção desse movimento é quase perpendicular ao disco (posição angular de $-103^\circ \pm 4^\circ$). Isso foi interpretado como um *ouflow*, já que, no tomograma, observa-se que o jato de rádio aponta para a mesma direção da estrutura que está em *blueshift* com relação ao núcleo (posição angular: 65° de acordo com Martí-Vidal et al. [19]). Embora Schnorr Müller et al. [28] também tenham interpretado o quarto autoespectro como um *ouflow*, o jato de rádio aponta para a estrutura em *redshift*, o que provavelmente foi causado devido ao erro na orientação

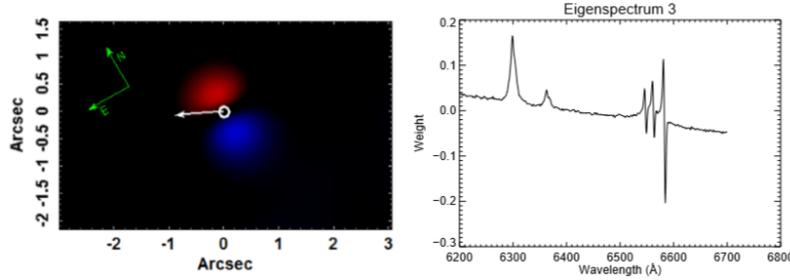


Figura 3.3: Terceira componente resultante da aplicação da Tomografia PCA ao cubo de dados com intervalo espectral de 6200 – 6700 Å. A anticorrelação entre as asas azul e vermelha das linhas [NII] e H α e a associação às estruturas do tomograma são características de cinemática do disco de gás, cuja posição angular é de $-3^\circ \pm 1^\circ$. O círculo indica a posição do AGN e a seta indica a posição do jato, cuja posição angular é de 65° de acordo com Martí-Vidal et al. [19]

espacial. O quarto tomograma e autoespectro estão na figura 3.4.

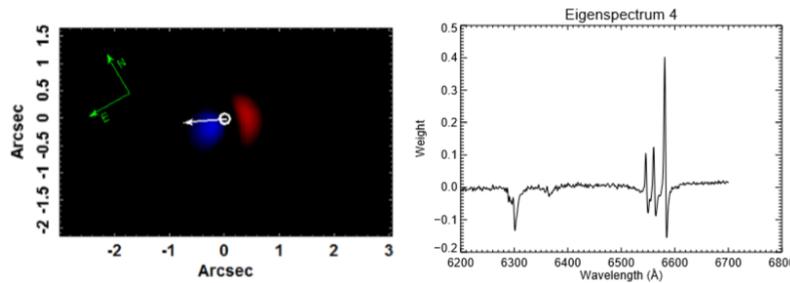


Figura 3.4: Quarta componente resultante da aplicação da Tomografia PCA ao cubo de dados com intervalo espectral de 6200 – 6700 Å. A cinemática do gás foi associada a um *outflow*. O jato de rádio está na mesma direção da componente em *blueshift* do *outflow*.

3.2 Cubo de gás

3.2.1 Síntese espectral: o STARLIGHT

O STARLIGHT (Cid Fernandes et al. [4]) é um software que foi utilizado para se fazer a síntese espectral do objeto. Sua função é ajustar o espectro de um determinado objeto com um modelo formado pela soma de espectros de diferentes populações estelares (espectros de base, que podem ser observados ou obtidos a partir de modelos teóricos). Em outras palavras, o STARLIGHT realiza uma síntese espectral a partir de um conjunto de espectros de base a fim de se ajustar a componente estelar presente no espectro da galáxia.

Se o número de espectros de populações estelares presentes na base e que estão dis-

poníveis para o ajuste com o STARLIGHT é igual a N , então, o modelo M_λ obtido por esse software pode ser dado por:

$$M_\lambda = M_{\lambda_0} \left(\sum_{j=1}^{N^*} x_j b_{j,\lambda} r_\lambda \right) \otimes G(v_*, \sigma_*) \quad (3.1)$$

em que $M_{\lambda_0,j}$ é o fluxo sintético da componente estelar normalizado em λ_0 , x_j representa a fração da população estelar $b_{j,\lambda}$, r_λ é o termo de avermelhamento e $G(v_*, \sigma_*)$ é uma gaussiana que descreve a cinemática da componente estelar. A equação (3.1) mostra que o espectro da componente estelar da galáxia é dada por uma combinação de modelos de populações estelares.

Para encontrar o modelo mais adequado de ajuste para o espectro observado, busca-se a minimização do χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{\lambda} [O_\lambda - M_\lambda] \cdot w_\lambda^2 \quad (3.2)$$

em que O_λ é o espectro observado, $w_\lambda = \frac{1}{e_\lambda}$ e e_λ é o erro associado ao espectro observado (cf. Cid Fernandes et al. [4]).

A base utilizada foi a proposta por Walcher et al. [30], que contém 120 populações estelares, com idades entre 3 e 12 Gy , abundâncias $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5, -0.25, 0.0$ e 0.2 e $[\alpha/\text{Fe}] = 0.0, 0.2$ e 0.4 . Do resultado do STARLIGHT tem-se contínuos estelares sintéticos, que são subtraídos de todos os espectros originais do cubo de dados. Assim, o cubo resultante possui apenas a componente gasosa do objeto e seu espectro, apenas as linhas de emissão. Dessas linhas, estuda-se de forma detalhada a componente gasosa do objeto.

Para se aplicar a síntese espectral do software STARLIGHT em cubos de dados, foram necessárias algumas etapas de preparação. Em um primeiro momento, fez-se a correção da extinção devida à Via Láctea em todos os espectros do cubo, utilizando-se um programa escrito em linguagem *IDL*. Para tanto, foi utilizada a curva de avermelhamento de Cardelli e o valor do avermelhamento foi obtido no NED¹. Em seguida, todos esses espectros foram extraídos do cubo e corrigidos em relação ao *redshift*, ou seja, passados para um referencial de repouso.

¹ <http://ned.ipac.caltech.edu/>

3.2.2 Linhas em emissão

3.2.2.1 Motivação

Uma das maneiras de se identificar um AGN é a partir da observação de seu espectro: o espectro de um AGN pode apresentar características específicas, como linhas em emissão intensas e largas, um contínuo azulado e forte emissão em raios-X ou rádio. Em galáxias próximas, entretanto, a luminosidade do núcleo costuma ser menor quando comparada à galáxia como um todo, de forma que para se detectar as linhas em emissão mais fracas, deve-se fazer medições com uma boa resolução espacial. A medida das intensidades das linhas em emissão é importante pois, a partir de razões entre essas intensidades, pode-se determinar se a linha é originada por uma região HII ou por atividade nuclear. (Ho [12])

3.2.2.2 Aplicações

O espectro deste objeto compreende apenas a radiação visível e as linhas de interesse são $H\alpha$ ($\lambda 6562.80 \text{ \AA}$), $[NII]$ ($\lambda\lambda 6548, 6583 \text{ \AA}$), $[NII]$ ($\lambda 5755 \text{ \AA}$) e $[OI]$ ($\lambda\lambda 6300, 6363 \text{ \AA}$). Para se obter os perfis destas linhas, faz-se a extração do espectro nuclear a partir de uma rotina em linguagem *IDL*. Os parâmetros considerados são a posição e a FWHM da PSF do cubo de gás; a PSF foi medida a partir de uma imagem da componente larga de $H\alpha$, que é puntiforme e proveniente do AGN.

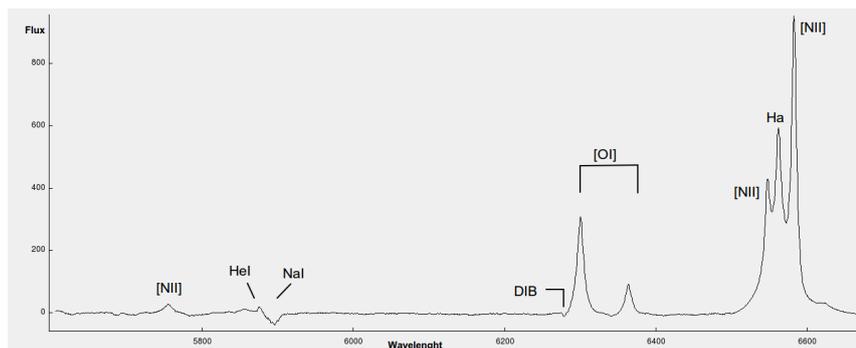


Figura 3.5: Espectro extraído da região nuclear. No eixo das abscissas tem-se o comprimento de onda (em Ångströms) e no eixo das ordenadas tem-se o fluxo (em $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). A linha de absorção imediatamente anterior à linha de $[OI]$ pertence ao meio interestelar do objeto (área assinalada como DIB: *Diffuse Interstellar Band*). Deve-se notar também a presença da linha de $[NII]$ $\lambda 5755$ nessa região.

Os perfis das linhas em emissão foram descritos como uma soma de funções Gaussianas

ajustadas com o algoritmo de Gauss-Newton, dentro do software R². Este algoritmo ajusta funções não-lineares utilizando-se o método de mínimos quadrados. Como resultado, tem-se uma tabela com os principais parâmetros da cinemática, obtidos da comparação entre o comprimento de onda do pico da gaussiana com o comprimento de onda em repouso da linha em emissão, os fluxos das linhas, obtidos por integração dos ajustes realizados e os valores de FWHM, que são os valores das larguras das gaussianas.

Em um primeiro momento, aplica-se o programa para as linhas de [NII] + H α . O ajuste dessas linhas torna evidente uma componente larga na linha de H α , como já foi visto em trabalhos anteriores (Peimbert e Torres-Peimbert [25], Schnorr Müller et al. [28], Bower et al. [2]). De acordo com Ho et al. [13], sua FWHM é de aproximadamente 3000 km/s e sua luminosidade é de 2×10^{39} ergs/s. Também foram fixados para o procedimento os valores teóricos [NII] λ 6583/[NII] λ 6548 = 3.06 e [OI] λ 6300/[OI] λ 6363 = 3.0 (Osterbrock e Ferland [22]). O resultado do ajuste se encontra na figura 3.6.

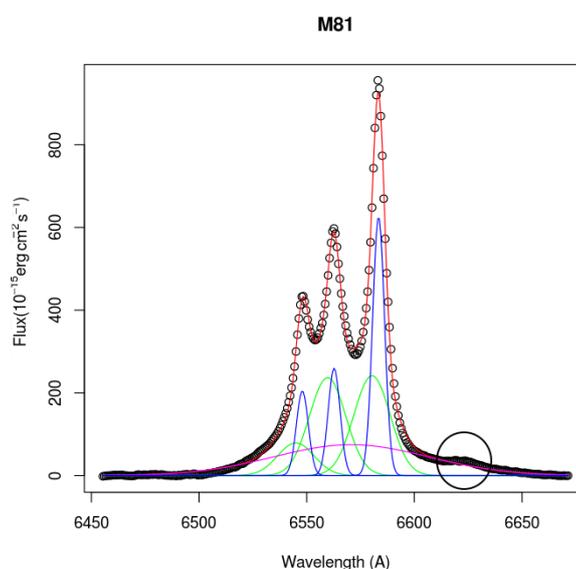


Figura 3.6: Ajuste gaussiano no sistema [NII] + H α . No eixo das abscissas tem-se o comprimento de onda (em Ångströms) e no eixo das ordenadas tem-se o fluxo (em 10^{-15} erg cm⁻² s⁻¹). Em magenta, tem-se a componente larga da linha de H α e em vermelho tem-se a soma das linhas verde e azul. A área assinalada com um círculo não foi ajustada por nenhuma gaussiana e apresenta uma velocidade radial de 2770(90) km s⁻¹ com relação à linha de H α .

Posteriormente, o programa transfere os dados da cinemática e dos comprimentos de

² R é uma linguagem de programação e um ambiente de desenvolvimento integrado, utilizado para cálculos estatísticos e gráficos. Foi desenvolvido por Robert Gentleman e Ross Ihaka e atualmente é resultado do trabalho de diversos colaboradores.

onda do ajuste anterior para ajustar o dubleto de [OI]. Observou-se, entretanto, que neste objeto as cinemáticas das linhas de [OI] e [NII] + H α estão desacopladas e o ajuste foi feito com esse cuidado. Além disso, fez-se a eliminação da linha do meio interestelar, ajustando-se uma função *spline*. O resultado do ajuste se encontra na figura 3.7.

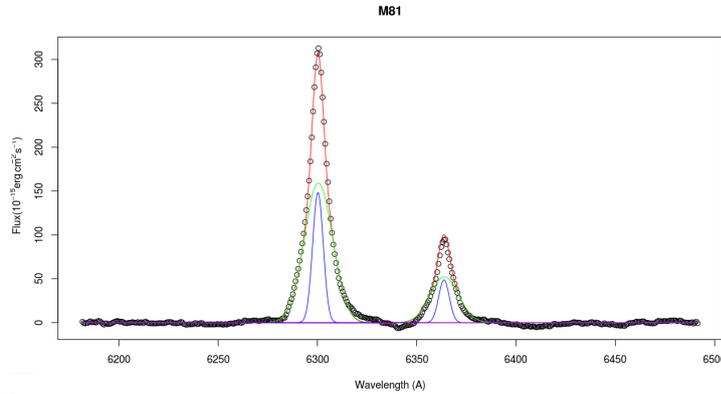


Figura 3.7: Ajuste gaussiano no dubleto de [OI]. No eixo das abscissas tem-se o comprimento de onda (em Ångströms) e no eixo das ordenadas tem-se o fluxo (em $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Neste caso, não se observa componente larga. Em vermelho tem-se a soma das linhas verde e azul.

Pode-se acrescentar que este tipo de análise já foi feita por outros autores. No trabalho de Ho et al. [13] foram feitos ajustes gaussianos em diversos AGNs de baixa luminosidade no sistema [NII] + componente estreita de H α utilizando-se como modelo o perfil do dubleto de [SII] $\lambda\lambda 6716,6731 \text{ \AA}$. No trabalho de Schnorr Müller et al. [28], fez-se o ajuste de uma componente estreita, uma componente larga (para a linha de H α) e a soma de ambos os ajustes.

Finalmente, foram determinados os valores das razões entre os fluxos das linhas: [NII]/H α = 1.40(4) e [OI]/H α = 0.62(2). Os valores obtidos para essas razões são compatíveis com a classificação deste AGN como um LINER. Nas referências citadas no parágrafo anterior encontram-se alguns resultados para os mesmos parâmetros; entretanto, os valores não podem ser comparados porque tratam de diferentes regiões. Também foram determinados os valores de velocidade radial e FWHM para essas linhas em emissão e os resultados estão dispostos na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros obtidos com o ajuste gaussiano às linhas em emissão

Parâmetro	$[NII]_n$	$[NII]_b$	$[OI]_n$	$[OI]_b$	$H\alpha_n$	$H\alpha_b$	$H\alpha(BLR)$
v_r ($km\,s^{-1}$)	-0.80(9)	-135(6)	-2.4(9)	8(2)	-2.7(9)	-140(6)	330(30)
FWHM ($km\,s^{-1}$)	300(3)	910(15)	300(3)	790(7)	300(3)	910(15)	3970(110)

A velocidade radial (v_r) e a largura a meia altura (FWHM) são calculadas separadamente para cada gaussiana do ajuste: os índices n e b referem-se, respectivamente, às gaussianas estreita e larga em cada ajuste (azul e verde nas figuras 3.6 e 3.7). Para a linha de $H\alpha$ são ajustadas duas gaussianas estreitas e uma larga, que corresponde à *Broad Line Region* (BLR). Como a cinemática da componente $[OI]_b$ não está acoplada às demais, vê-se que o valor de sua FWHM e de sua velocidade radial não são compatíveis com as componentes respectivas de $[NII]$ e de $H\alpha$ ($[NII]_b$ e $H\alpha_b$).

Para dar continuidade ao estudo da cinemática das linhas em emissão, fez-se o mapeamento da velocidade radial e da dispersão de velocidades. Também fez-se o mapeamento dos fluxos das linhas e de razões entre elas, para comparação com o que se espera para este objeto.

3.2.2.3 Cinemática

Para fazer os mapeamentos dos parâmetros das cinemáticas das linhas em emissão ao longo da região nuclear do objeto, utiliza-se a mesma rotina utilizada na seção anterior. Os parâmetros de entrada considerados são o cubo de gás e o cubo estelar (obtido quando se subtrai o cubo de gás do cubo do objeto) e o ajuste gaussiano nas linhas em emissão é realizado em todos os espectros do cubo de dados. Como resultado, tem-se o mapeamento da velocidade radial, dispersão de velocidades, largura equivalente e fluxos das linhas (esses serão apresentados nas próximas seções).

Novamente, aplica-se o programa para as linhas de $[NII] \lambda\lambda 6548, 6583 + H\alpha$ para, usando o resultado desse ajuste, aplicá-lo no dubleto de $[OI]$. Cabe ressaltar, entretanto, a presença da componente larga na linha de $H\alpha$ desse objeto; para fazer os mapeamentos, deve-se excluir essa componente. Como as cinemáticas das linhas em emissão estão relacionadas, apresenta-se na figura 3.8 os mapas de velocidade radial e dispersão de velocidades para o sistema $[NII] + H\alpha$ para representar a cinemática do gás. O ajuste é feito nas duas linhas para se reduzir a incerteza.

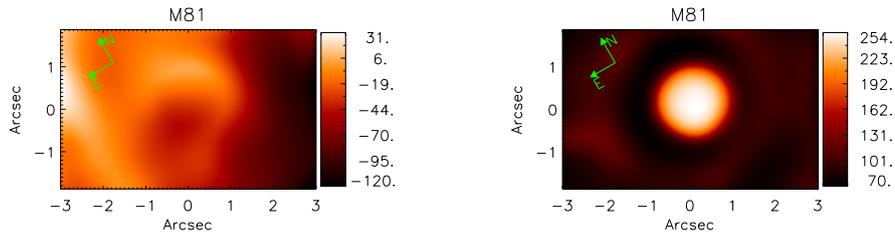


Figura 3.8: Esquerda: Mapa de velocidade radial do gás obtidas com as linhas de [NII] + $H\alpha$ (km/s). Direita: Mapa de dispersão de velocidades do gás (km/s).

3.2.2.4 Fluxos e razões

Posteriormente, fez-se o mapeamento das linhas em emissão, a partir da integração do ajuste gaussiano. Obtém-se, então, as relações entre essas linhas, nas quais se baseiam a classificação dos AGNs. Os resultados obtidos para os fluxos das linhas $H\alpha$, [NII] $\lambda 6583$ e [OI] $\lambda 6300$ estão na figura 3.9.

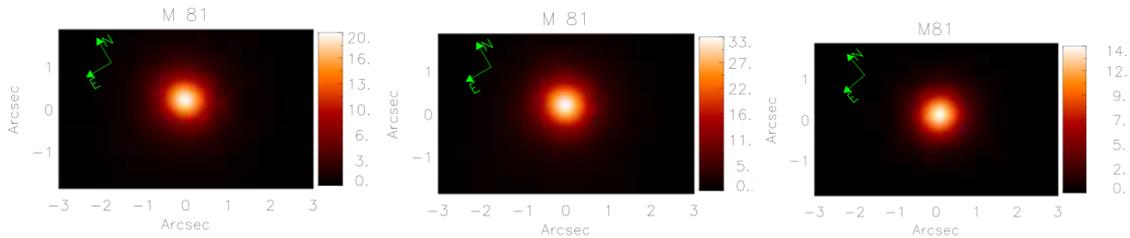


Figura 3.9: Esquerda: fluxo de $H\alpha$. Centro: fluxo de [NII] $\lambda 6583$. Direita: fluxo de [OI] $\lambda 6300$. Os fluxos estão em $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

A partir desses fluxos, obteve-se a razão entre as linhas [NII] $\lambda 6583$ e $H\alpha$, e entre as linhas [OI] $\lambda 6300$ e $H\alpha$, como pode ser observado na figura 3.10.

Na figura 3.10, nota-se que o máximo da razão entre [OI] e $H\alpha$ está deslocado na direção sul com relação à posição do AGN. Schnorr Müller et al. [28] identificou uma estrutura deslocada com relação ao AGN nessa mesma razão, porém em direção diametralmente oposta.

Considerando esse alto valor da razão entre [OI] e $H\alpha$ e a presença da linha de [NII] $\lambda 5755$ no autoespectro 3 (seção 3.1) relacionada à mesma região, fez-se um **mapa de temperatura** da região nuclear com o objetivo de identificar os valores de temperatura na região extensa e deslocada do núcleo. O procedimento é descrito a seguir.

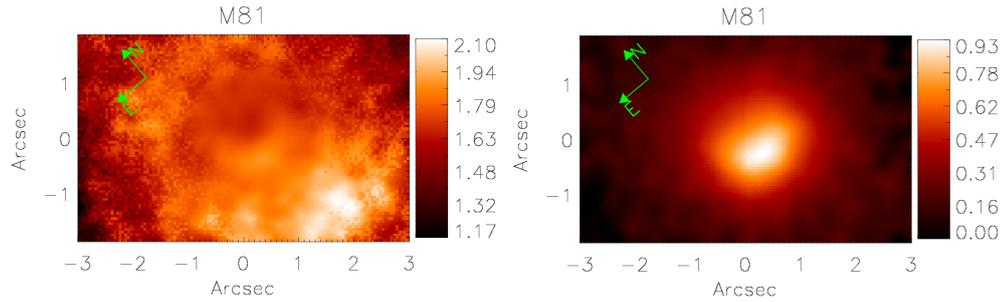


Figura 3.10: Esquerda: $[NII]/H\alpha$. Direita: $[OI]/H\alpha$. Deve-se notar que o AGN está em $(x = 0, y = 0)$.

3.3 Mapa de Temperatura

De acordo com Osterbrock e Ferland [22], alguns íons possuem estrutura de níveis de energia que resultam em linhas em emissão com diferentes energias de excitação na mesma região observável do espectro. Como as transições tem forte dependência com a temperatura, a intensidade relativa das linhas emitidas pode ser usada na determinação da temperatura eletrônica.

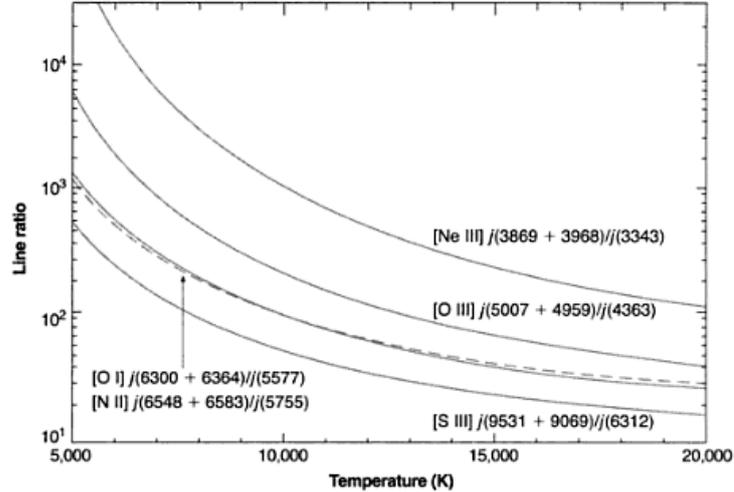


Figura 3.11: Razões de linhas como função da temperatura. Observar que as linhas referentes às razões de $[NII]$ e $[OI]$ são praticamente coincidentes, devido à proximidade de seus potenciais de excitação. (figura de Osterbrock & Ferland, 2006).

No caso deste trabalho, a presença da linha $[NII] \lambda 5755$ possibilitou, junto com as demais linhas $[NII]$ a construção de um mapa de temperatura do campo. Para tanto, é utilizada a seguinte equação para as linhas $[NII]$,

$$[NII] \frac{j_{\lambda 6548} + j_{\lambda 6583}}{j_{\lambda 5755}} = \frac{8.23 \exp(2.50 \times 10^4/T)}{1 + 4.4 \times 10^{-3} n_e / T^{1/2}} \quad (3.3)$$

em que n_e é a densidade eletrônica, T é a temperatura e j são os coeficientes de emissão. Equações análogas são obtidas para as linhas [NeIII] e [SIII]. Essas equações formam a base para medidas de temperatura em nebulosas gasosas; como elas são opticamente finas em radiações de linha proibida, as taxas das integrais dos coeficientes de emissão são obtidas pela observação direta das intensidades das linhas.

Fez-se, então o mapa da razão [NII] $\lambda 6548 + [NII] \lambda 6583/[NII] \lambda 5755$ e utilizando-se a equação 3.3, pôde-se determinar a temperatura do gás ionizado ao longo do campo. Para se determinar o fluxo da linha [NII] $\lambda 5755$, assume-se que as linhas [NII] $\lambda 5755$ e [OI] $\lambda 6300$ possuem as mesmas velocidade radial e dispersão de velocidades para aplicação do programa utilizado para fazer o mapeamento dos fluxos. Embora produzidas por diferentes regiões, essas linhas não apresentam sinal/ruído suficiente para que seja ajustado um perfil razoável. Na figura 3.12 tem-se o mapa da razão [NII] $\lambda 6548 + [NII] \lambda 6583/[NII] \lambda 5755$ e a região marcada com o contorno vermelho possui temperatura de aproximadamente 43500 K.

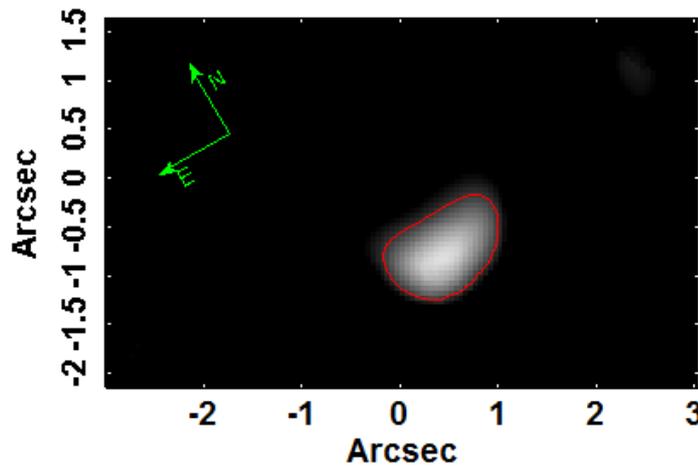


Figura 3.12: Razão [NII] $\lambda 6548 + [NII] \lambda 6583/[NII] \lambda 5755$. A região marcada com o contorno vermelho apresenta temperatura de, aproximadamente, 43500 K.

A temperatura de 43500 K foi obtida com o valor de 14.3 para a razão entre as linhas [NII] na equação 3.3. Essa temperatura aumenta nas regiões mais internas do contorno. O valor adotado para a densidade eletrônica n_e foi de $n_e \sim 1000 \text{ cm}^{-3}$, calculado por Schnorr

Müller et al. [28]. Neste trabalho, não há informação sobre as linhas de [SII] $\lambda\lambda 6716, 6731$, necessárias para se determinar a densidade eletrônica, porque essas linhas coincidiram com um dos *gaps* entre os CCDs. Assim, utilizando-se $n_e \sim 1000 \text{ cm}^{-3}$ e 14.3 para a razão, obtém-se o valor de 43500 K para essa região mais quente. Vê-se que sua posição coincide com a do objeto encontrado pela Tomografia PCA no tomograma e autoespectro 3 da figura 3.2.

Na figura 3.13, tem-se o espectro extraído do núcleo do objeto e da região de gás quente deslocado do núcleo. Deve-se notar um aumento na intensidade das linhas [NII] $\lambda 5755$ e [OI] com relação ao espectro do núcleo, indicando que a razão [OI]/ $H\alpha$ é mais alta nessa região do que no núcleo.

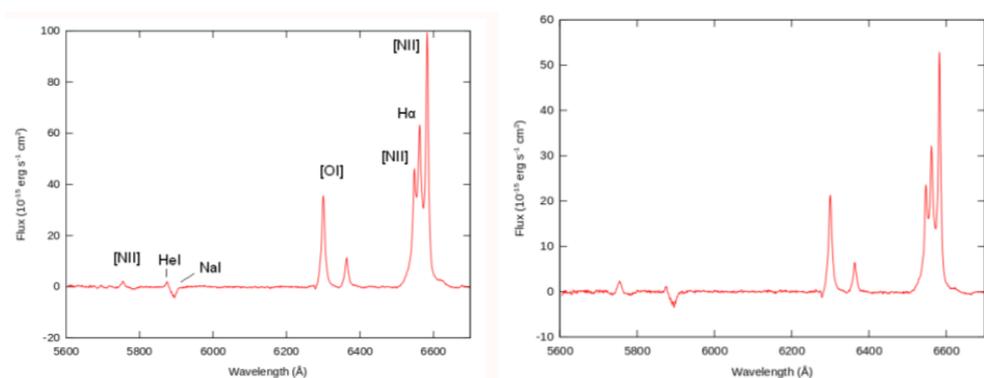


Figura 3.13: Esquerda: espectro extraído do núcleo. Direita: espectro extraído da região a $0.8''$ sul do núcleo. Neste último, notar um aumento nas linhas de [NII] $\lambda 5755$ e [OI] com relação à linha de $H\alpha$.

Baseando-se no trabalho de Devereux et al. [6], trabalhou-se com as imagens de $H\alpha$ + [NII] $\lambda\lambda 6548, 6583$ obtidas com o WFC - ACS³ do HST (*Hubble Space Telescope*). Acrescentando na imagem a BLR, que representa a posição do AGN, a razão entre [OI] e $H\alpha$ e o mapa de temperatura, obteve-se o resultado apresentado na figura 3.14.

³ Wide Field Camera (WFC) - Advanced Camera for Surveys: <http://www.stsci.edu/hst/acs/>

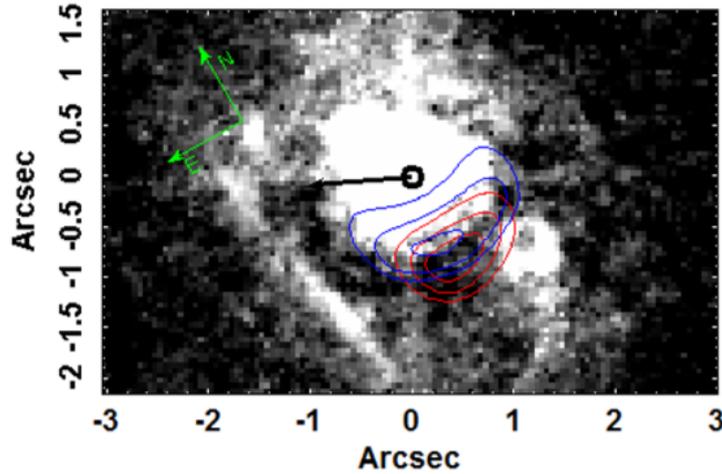


Figura 3.14: Imagem obtida com o HST. Pode-se observar que o pico da emissão coincide com a posição do núcleo. Em vermelho, tem-se os contornos das isotemperaturas. O contorno externo corresponde a $T \sim 43500$ K e a temperatura aumenta nos contornos internos. Os contornos azuis estão associados à razão $[OI]/H\alpha$, com valores de 0.6, 0.7 e 0.8, de fora para dentro.

A figura 3.14 mostra que as temperaturas mais altas estão associadas ao máximo da razão $[OI]/H\alpha$, a $0.8''$ sul do núcleo. Valores tão altos de temperatura nessa região não podem ser produzidos por fotoionização, mas podem ser produzidos por ondas de choque. A razão $[OI]/H\alpha = 0.8$ é extremamente alta, mesmo para LINERS (Ho et al. [14]); essa razão é maior do que a obtida no núcleo de M81, em que $[OI]/H\alpha = 0.6$. De acordo com Osterbrock e Ferland [22], linhas em emissão de baixa ionização são fortes em regiões ionizadas por colisão. Assim, a razão $[OI]/H\alpha$ deve ser alta em regiões ionizadas por choques causados, por exemplo, por restos de supernova ou por ventos estelares. Outra alternativa seria uma onda de choque produzida por um super-vento induzido por um AGN. Entretanto, essa interpretação não é coerente com a orientação do jato; a bolha quente está localizada perpendicularmente ao jato, o que indica que ela não está associada aos *outflows* provenientes do AGN.

Conclusões

Este trabalho consistiu na reanálise do cubo de dados da galáxia LINER M81, estudado por Schnorr Müller et al. [28]. O campo utilizado para análise compreendeu a região central do objeto, com dimensões de $7'' \times 5'' \text{arcsec}^2$ e PA de 150° . Não foram consideradas as linhas [SII] $\lambda\lambda 6716, 6731$ por terem coincido com um dos *gaps* entre os CCDs. O objetivo era a aplicação de novas técnicas de análise para obtenção de resultados que pudessem ser comparados ao trabalho de Schnorr Müller et al. [28] e a outros encontrados na literatura, pois devido à sua proximidade, o núcleo de M81 foi amplamente estudado. As técnicas descritas no capítulo 2 foram fundamentais na redução do ruído e de efeitos que não são característicos do objeto, melhorando a qualidade e a nitidez das imagens. Com isso, foi possível se estudar detalhadamente a região nuclear e se extrair grande quantidade de informação.

Com relação à Tomografia PCA, a primeira análise compreendeu um intervalo espectral de $5600 - 6700 \text{ \AA}$. Posteriormente, utilizou-se um intervalo espectral de $6200 - 6700 \text{ \AA}$. Este último foi o mesmo utilizado por Schnorr Müller et al. [28] e devido a um provável erro na orientação espacial obtida por esses autores, a interpretação da terceira e quarta componente são diferentes. Na terceira (figura 3.3), observa-se um disco de gás e a nova posição angular medida foi de $-3^\circ \pm 1^\circ$. A cinemática do disco está associada às linhas $H\alpha + [\text{NII}] \lambda\lambda 6548, 6583$ e há também uma forte correlação entre as linhas [OI] e o lado do disco que está em *blueshift*. Na quarta componente (figura 3.4), a interpretação de Schnorr Müller et al. [28] foi a ocorrência de um *outflow* na região central dessa galáxia. Embora nesse trabalho a interpretação seja compatível, a posição angular também difere. A direção da componente em *blueshift* do *outflow* é mostrada na figura 3.4, que é a mesma direção em que foi detectado um jato unilateral em observações em rádio, de acordo com

Bietenholz et al. [1] e Martí-Vidal et al. [19]. A assimetria do jato unilateral é explicada pelo efeito Doppler.

A análise do cubo de dados em $5600 - 6700 \text{ \AA}$ evidenciou uma emissão intensa na linha [NII] $\lambda 5755$, que é sensível a altas temperaturas do gás ionizado e permitiu a detecção de uma região quente deslocada de $0.8''$ do núcleo. Nesse caso, a estrutura observada com a Tomografia PCA, na terceira componente da figura 3.2, é compatível com a estrutura observada com os mapeamentos dos fluxos e razões entre as linhas [OI]/ $H\alpha$ e entre as linhas [NII]. Utilizando-se a relação proposta por Osterbrock e Ferland [22] (equação 3.3) com o valor da densidade eletrônica $n_e \sim 1000 \text{ cm}^{-3}$ calculado por Schnorr Müller et al. [28] e de 14.3 para a razão entre as linhas [NII], a temperatura estimada para essa região foi de aproximadamente $T > 43500 \text{ K}$ para o gás. Valores tão altos de temperatura associados a um alto valor da razão entre [OI] e $H\alpha$ são característicos de ionização por colisão, causados por ondas de choque produzidos por restos de supernova ou ventos estelares (Osterbrock e Ferland [22]).

A estrutura observada em M81 é semelhante, porém em larga escala, ao aglomerado estelar Arches da Via Láctea (Yusef-Zadeh et al. [31]), localizado a 30 pc do centro, ou ao aglomerado estelar jovem associado ao IRS16, mais perto do centro da Via Láctea (Genzel et al. [8]). Em particular, ao redor do aglomerado Arches há uma estrutura formada por gás frio e, ao mesmo tempo, foi detectado gás quente dentro do aglomerado a partir de emissão em raio-X. Isso foi interpretado como uma combinação de ondas de choque provenientes de ventos estelares de estrelas jovens ($t \sim 1 - 5$ milhões de anos), de acordo com Yusef-Zadeh et al. [31]. Assim como nesse aglomerado, a bolha encontrada no centro de M81 possui filamentos de gás frio ao seu redor, de acordo com a figura 3.14. Nesse caso, a população estelar jovem encontrada na terceira componente obtida com a aplicação do PCA (figuras 3.2 e 3.3) pode estar associada a um aglomerado mais massivo ou a uma combinação de aglomerados. Além disso, pode haver também nessa região ondas de choque provenientes de restos de supernova de populações estelares mais velhas ($t < 70$ milhões de anos).

A proximidade de M81 em conjunto com as técnicas de análise adotadas permitiram a detecção de duas regiões quentes e com altos valores para a razão [OI]/ $H\alpha$. Foi possível perceber a importância da ionização causada por ondas de choque, mesmo na presença de um AGN no núcleo. Em galáxias mais distantes, por exemplo, ambas as regiões poderiam não ser resolvidas e o núcleo seria classificado apenas como um AGN do tipo LINER, sem

qualquer ocorrência de ondas de choque. Assim, pode-se inferir que ondas de choque são importantes em LINERs, mesmo que eles sejam ionizados por um AGN ou estrelas pAGB.

Referências Bibliográficas

Bietenholz M. F., Bartel N., Rupen M. P., A Stationary Core with a One-sided Jet in the Center of M81, *ApJ*, 2000, vol. 532, p. 895

Bower G. A., Wilson A. S., Heckman T. M., Richstone D. O., Double-Peaked Broad Emission Lines in the Nucleus of M81, *AJ*, 1996, vol. 111, p. 1901

Capellari M., Emsellem E., Parametric Recovery of Line-of-Sight Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra of Galaxies via Penalized Likelihood, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2004, vol. 116, p. 138

Cid Fernandes R., Mateus A., Sodré L., Stasinska G., Gomes J. M., Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2005, vol. 358, p. 363

Davidge T. J., Courteau S., The Central Regions of M81, *AJ*, 1999, vol. 117, p. 2781

Devereux N., Ford H., Jacoby G., Hubble Space Telescope Imaging of the Central 1 Kilo-parsec of M81, *ApJ*, 1997, vol. 481, p. L71

Fukunaga K., *Statistical Pattern Recognition*. 2nd edn. Academic Press, New York, 1990, 100 p.

Genzel R., Eisenhauer F., Gillessen S., The Galactic Center massive black hole and nuclear star cluster, *Reviews of Modern Physics*, 2010, vol. 82, p. 3121

Gonzales R., Woods R., *Digital Imaging Processing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2008, 100 p.

Granato G. L., De Zotti G., Silva L., Bressan A., Danese L., A Physical Model for the Coevolution of QSOs and Their Spheroidal Hosts, *ApJ*, 2004, vol. 600, p. 580

Heckman T. M., An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies - Activity in normal galactic nuclei, *A&A*, 1980, vol. 87, p. 152

Ho L. C., Nuclear Activity in Nearby Galaxies, *ARA&A*, 2008, vol. 46, p. 475

Ho L. C., Filippenko A. V., Sargent W. L. W., New Insights into the Physical Nature of LINERs from a Multiwavelength Analysis of the Nucleus of M81, *ApJ*, 1996, vol. 462, p. 183

Ho L. C., Filippenko A. V., Sargent W. L. W., A Search for “Dwarf” Seyfert Nuclei. III. Spectroscopic Parameters and Properties of the Host Galaxies, *ApJS*, 1997, vol. 112, p. 315

Hopkins P. F., Hernquist L., Fueling Low-Level AGN Activity through Stochastic Accretion of Cold Gas, *ApJS*, 2006, vol. 166, p. 1

Keel W. C., An H-alpha forbidden N II survey of the nuclei of a complete sample of spiral galaxies, *ApJS*, 1983, vol. 52, p. 229

Lucy L. B., An iterative technique for the rectification of observed distributions, *AJ*, 1974, vol. 79, p. 745

Maoz D., Nagar N. M., Falcke H., Wilson A. S., The Murmur of the Sleeping Black Hole: Detection of Nuclear Ultraviolet Variability in LINER Galaxies, *ApJ*, 2005, vol. 625, p. 699

Martí-Vidal I., Marcaide J. M., Alberdi A., Pérez-Torres M. A., Ros E., Guirado J. C., Detection of jet precession in the active nucleus of M 81, *A&A*, 2011, vol. 533, p. A111

Menezes R. B., Espectroscopia 3D de núcleos ativos de galáxias: tratamento e análise de dados no óptico e infravermelho próximo, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2012, Tese de Doutorado, p. 128

Menezes R. B., Steiner J. E., Ricci T. V., A treatment procedure for Gemini North/NIFS data cubes: application to NGC 4151, *MNRAS*, 2014, vol. 438, p. 2597

- Osterbrock D. E., Ferland G. J., *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*, 2006
- Page M. J., Breeveld A. A., Soria R., Wu K., Branduardi-Raymont G., Mason K. O., Starling R. L. C., Zane S., X-ray emission line gas in the LINER galaxy M 81, *A&A*, 2003, vol. 400, p. 145
- Paturel G., Teerikorpi P., Theureau G., Fouqué P., Musella I., Terry J. N., Calibration of the distance scale from galactic Cepheids. II. Use of the HIPPARCOS calibration, *A&A*, 2002, vol. 389, p. 19
- Peimbert M., Torres-Peimbert S., Physical conditions in the nucleus of M81, *ApJ*, 1981, vol. 245, p. 845
- Ricci T. V., Steiner J. E., Menezes R. B., Integral field unit spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei - I. Principal component analysis Tomography and nuclear activity, *MNRAS*, 2014, vol. 440, p. 2419
- Richardson W. H., Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration, *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*, 1972, vol. 62, p. 55
- 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*, 2011, vol. 413, p. 149
- Steiner J. E., Menezes R. B., Ricci T. V., Oliveira A. S., PCA Tomography: how to extract information from data cubes., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, vol. 395, p. 64
- Walcher C. J., Coelho P., Gallazzi A., Charlot S., Differential stellar population models: how to reliably measure [Fe/H] and [α /Fe] in galaxies, *MNRAS*, 2009, vol. 398, p. L44
- Yusef-Zadeh F., Law C., Wardle M., Wang Q. D., Fruscione A., Lang C. C., Cotera A., Detection of X-Ray Emission from the Arches Cluster near the Galactic Center, *ApJ*, 2002, vol. 570, p. 665

Apêndice

Cinemática Estelar

A.1 Motivação

Para análise da cinemática estelar do objeto, são necessárias determinações precisas da distribuição de velocidades ao longo da linha de visada (*line-of-sight velocity distribution* – *LOSVD*) do espectro. Neste trabalho, isso foi feito a partir de parametrizações de Gauss-Hermite, utilizando-se o *pPXF: Penalized Pixel Fitting* (Capellari e Emsellem [3]). Para tanto, um modelo para esse espectro é criado através da convolução de um espectro *template* com uma função representativa da *LOSVD*, dada por uma série de Gauss-Hermite. Os parâmetros mais adequados para a *LOSVD* são determinados com a minimização do χ^2 , que mede a concordância entre o modelo criado $G_{mod}(x)$ e o espectro observado $G(x)$, ao longo dos N pixels espectrais considerados no ajuste:

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^N r_n^2 \quad r_n = \frac{G_{mod}(x_n) - G(x_n)}{\Delta G(x_n)} \quad (\text{A.1})$$

Entretanto, espectros com baixas razões S/N podem apresentar problemas porque, nessas situações, as estruturas mal definidas dos espectros tornam os ajustes instáveis e os parâmetros finais não são confiáveis. Nessas circunstâncias, é preferível utilizar ajustes gaussianos. Dessa forma, O processo do *pPXF* consiste na aplicação de um termo de penalização na expressão do χ^2 para que em espectros com altas razões S/N , a solução do ajuste mantenha todos os detalhes da expansão de Gauss-Hermite e em espectros com baixas razões S/N , a solução se aproxime a uma gaussiana.

O χ^2 penalizado é dado por:

$$\chi_p^2 = \chi^2(1 + \lambda^2 D^2) \quad (\text{A.2})$$

Da aplicação do pPXF, tem-se os mapas da velocidade radial, dispersão de velocidades e os momentos de Gauss-Hermite h_3 e h_4 (assimetria e curtose, respectivamente) (cf. Menezes [20]; Capellari e Emsellem [3]).

A.2 Aplicações

Da aplicação do *pPXF* tem se os resultados dispostos na figura A1.

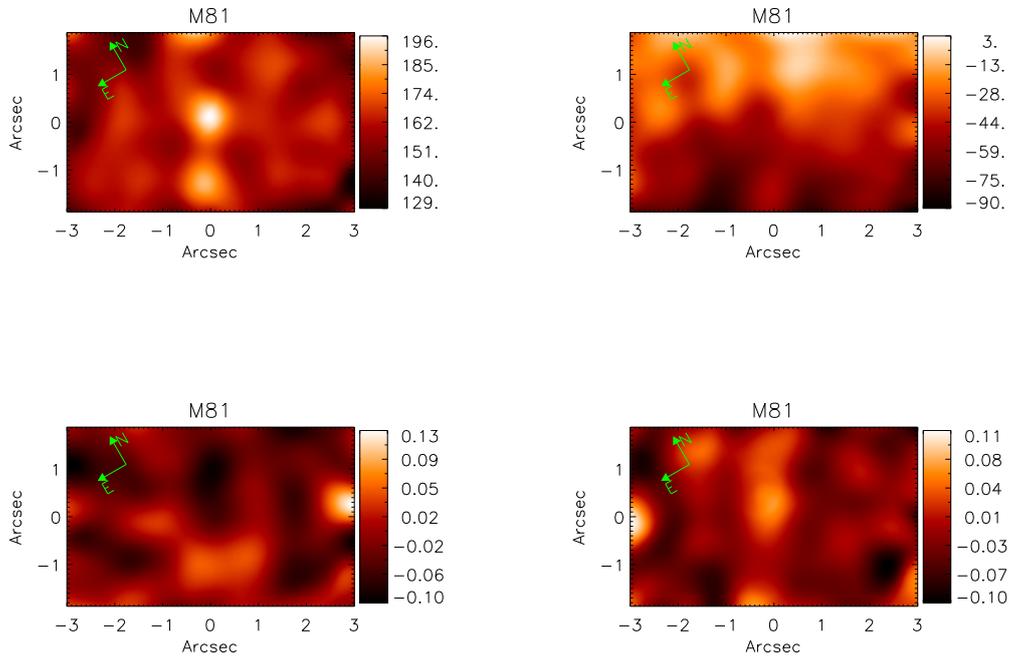


Figura A.1: Em cima: à esquerda, tem-se o mapa de dispersão de velocidades (km/s). À direita, tem-se o mapa de velocidade radial (km/s). Embaixo: à esquerda, tem-se o momento de Gauss-Hermite h_3 e à direita, tem-se o momento de Gauss-Hermite h_4 .

Do mapa de velocidade radial, vê-se que a velocidade aumenta do sudeste para o noroeste, em direção diametralmente oposta à obtida por Schnorr Müller et al. [28] (naquele trabalho, observou-se um aumento de sudoeste para nordeste). O mapa de dispersão de velocidades mostra que o valor mais alto está na região do núcleo (a posição do AGN é $x = 0, y = 0$), com um valor de aproximadamente 189 km/s . Os momentos de Gauss-Hermite h_3 e h_4 são a assimetria e a curtose da distribuição de velocidades na LOSVD e são compatíveis com ruído.

Apêndice B

Artigo submetido à *Astronomy & Astrophysics*

A seguir, apresenta-se um *Research Note* submetido à revista *Astronomy & Astrophysics* com os principais resultados desse trabalho.

Outflows and a hot bubble at the centre of M81 (Research Note)

T.V. Ricci, J.E. Steiner, and L. Giansante

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 05508-900, São Paulo, SP, Brasil
e-mail: tvricci@iag.usp.br, joao.steiner@iag.usp.br, louise.martins@usp.br

Received <date> / Accepted <date>

ABSTRACT

Context. M81 has the nearest active nucleus with broad H α emission. A detailed study of this galaxy's centre is important for understanding the innermost structure of the AGN phenomenon.

Aims. Our goal is to reanalyse a data cube obtained GMOS-IFU installed on the Gemini North telescope (Schnorr Müller et al. 2011) with sophisticated techniques in order to search for previously undetected structures.

Method. We analysed the data cube with techniques of noise reduction, spatial deconvolution, starlight subtraction and PCA Tomography and comparison with HST images.

Results. We found that the structures identified as outflows in Schnorr Müller et al. (2011) are inverted in the x dimension. This implies that the blueshifted cone nearly coincides with the radio jet, as expected. We also identified a hot bubble with $T > 43500$ K that is associated with a strong emission of [O I] $\lambda 6300\text{\AA}$ and [N II] $\lambda 5755\text{\AA}$ as well as with a bluish continuum, surrounded by a thin shell of H α + [N II] emission.

Conclusions. We interpret the hot bubble as likely to be caused by a post starburst event that left one or more clusters of young stars, somewhat similar to the ones found at the centre of the Milky Way, like the Arches and IRS 16 clusters. Shocked structures from combined young stellar winds or supernova remnants are probably the cause of this hot gas and the low ionization emission.

1. Introduction

M81 (NGC3031) is an SA(s)ab galaxy, known to host a low ionization nuclear emission region (LINER - Heckman 1980) associated with a type 1 active galactic nucleus - AGN (Peimbert & Torres-Peimbert 1981). At a distance of 3.5 Mpc, makes it the closest case of a known type 1 AGN. Radio emission in the form of a compact core plus a nuclear jet (Bietenholz et al. 2000; Martí-Vidal et al. 2011) and also a with a nuclear X-ray emission (Young et al. 2007) were associated with this AGN.

Although photoionization by an AGN is among the possible sources of excitation for LINERs (Ferland & Netzer 1983; Halpern & Steiner 1983), shocks (Heckman 1980) and hot old stellar populations (Binette et al. 1994) have also been proposed as potential sources. Given its distance, this is, thus an important object for studying its emission line properties with high spatial resolution.

In this research note we reanalyse a data cube of M81 (Schnorr Müller et al. 2011) obtained with the integral field unit (IFU) Multi-Objetct Spectrograph (GMOS) on the Gemini North telescope. We report the detection of hot ($T > 40000$ K) gas, located ~ 0.8 arcsec southbound from the nucleus of this galaxy. We also reinterpret the spatial orientation of the nuclear gaseous disc and outflow reported by Schnorr Müller et al. (2011).

2. Observations and data reduction

M81 was observed with the Gemini North telescope on 2006 December 31 (programme GN-2006B-Q-94). The GMOS-IFU in two-slit mode was used in the observations. Three exposures of 530s covered the central region of M81. The field-of-view (FOV) is 7×5 arcsec². The R400 grating was used, which resulted in an observed wavelength range of $5600\text{-}7000\text{\AA}$ and a

spectral resolution $R \sim 1800$. The raw data were reduced with the standard Gemini package under the IRAF environment. Bias, flat-fields, calibration lamps and spectrophotometric standards were obtained for the overall corrections and calibrations of the data. Cosmic rays were removed with the LACOS algorithm (van Dokkum 2001). Finally, three flux calibrated data cubes were created with a spatial sampling of 0.05 arcsec.

In addition to the basic reduction steps, we also adopted additional procedures in order to improve the quality of the data cubes (Ricci et al. 2014; Menezes et al. 2014). First we corrected each data cube for the effects of the differential atmospheric refraction (DAR) with an algorithm developed by us. After this, we calculated the median of the three data cubes in order to avoid bad pixels and cosmic rays that were not properly removed by LACOS. Then, we removed high-frequency noise from the spatial dimension by convolving each image of the median data cube with a Butterworth low-pass filter (Gonzales & Woods 2008) with a spatial-frequency cut of $0.2F_{NY}$, where $F_{NY} = 0.5$ spaxels⁻¹ is the Nyquist frequency and $n = 2$ (see Ricci et al. 2014 for more details on the Butterworth filtering process). Instrumental fingerprints were removed with Principal Component Analysis (PCA) Tomography (Steiner et al. 2009) in a similar way that was performed in Ricci et al. (2014). Finally, we deconvolved each image of the median data cube using the Richardson-Lucy algorithm (Richardson 1972; Lucy 1974), with 10 iterations and assuming a Moffat Point Spread Function (PSF) with a full width at half maximum (FWHM) of 1.0 arcsec and $\beta = 2.9$. The resulting PSF is described by a Gaussian function with FWHM = 0.89 arcsec, as measured in the image of the broad component of the H α emission line.

It is important mentioning that there is an error in the orientation of the x-axis in the images related to the data cube of M81 in Schnorr Müller et al. (2011). In our figures, the x-axis of

those authors corresponds to $-x$ and this clearly affects some of the interpretations, as we will see later.

3. PCA Tomography

PCA Tomography (Steiner et al. 2009) consists of applying PCA to data cubes with the aim of extracting useful information and removing instrumental fingerprints (see e.g. Ricci et al. 2011; Menezes et al. 2013; Ricci et al. 2014; Menezes et al. 2014). With PCA Tomography, a set of eigenvectors (or eigenspectra) is produced as a combination of each spectral pixel. They are ordered by importance of the variance, i.e., the eigenspectrum associated with the highest variance of the original data is called Eigenspectrum 1, Eigenspectrum 2 corresponds to the second highest variance associated with the original data and so on. Basically, each eigenspectrum shows correlations between the wavelengths which are associated with a physical phenomenon or related to instrumental problems, as reported in Section 2. Tomograms are related to the projection of a given eigenspectrum in the data cubes and reveals where the correlation between the wavelengths occurs on the spatial dimension of the data cubes.

We first applied PCA Tomography to the data cube of M81 in the 6200-6700 Å spectral range. This was the same spectral range analysed with PCA Tomography by Schnorr Müller et al. (2011). As a consequence, we obtained the same results for the first four eigenspectra as these authors. The first eigenspectrum corresponds mainly to the galactic bulge plus emission lines along the FOV and the second eigenspectrum is related to the AGN of M81. Both results are discussed in details by Schnorr Müller et al. (2011) and we refer the reader to this paper for more information, since the interpretation of these two eigenspectra is not affected by the error in the spatial orientation of the FOV.

However, the correct spatial orientation changes the scenario when analysing eigenspectra 3 and 4. Schnorr Müller et al. (2011) argued that the bipolar structure seen in the tomogram related to the third eigenspectra is associated with a gas disc. We agree with their interpretation, but the P.A. of the bipolar structure is now $-3^\circ \pm 1^\circ$ (east of north of the structure in redshift relative to the nucleus) for this gas disc, measured as the angle of the line that connects the position of minimum and maximum weights of the tomogram. We show the tomogram and the eigenspectrum related to the gas disc in Fig. 1. It is worth noticing that, in addition to the disc-like kinematics associated with the $H\alpha$ + $[N II]$ lines, one can also see a strong correlation of $[O I]$ lines with the blueshifted side of the disc, to the south of the nucleus. Moreover, a significant bluish continuum is also related to this feature. Such correlations have not been seen in other disc-like kinematics in early-type galaxies (Ricci et al. 2014).

Tomogram and eigenspectrum 4, shown in Fig. 2, also suggest a motion of the gas, but the direction of this kinematic feature is almost perpendicular to the gas disc (P.A. = $-103^\circ \pm 4^\circ$). This is probably related to an outflow, since a nuclear radio jet is pointing to the same direction as the component that is in blueshift relative to the nucleus (P.A. = 65° ; Martí-Vidal et al. 2011). Although Schnorr Müller et al. (2011) have also proposed that the fourth eigenspectrum is related to an outflow, the nuclear radio jet was pointing to the structure that is in redshift relative to the nucleus of M81 because of the wrong spatial orientation of the FOV in their study.

We also applied PCA Tomography to the 5675-6700 Å spectral range. The main difference here is that we are including the $[N II]\lambda 5755$ emission line in the analysis, which is sensitive to high temperatures of the ionized gas. Again, the first and second eigenspectra are related to the galactic bulge and the AGN,

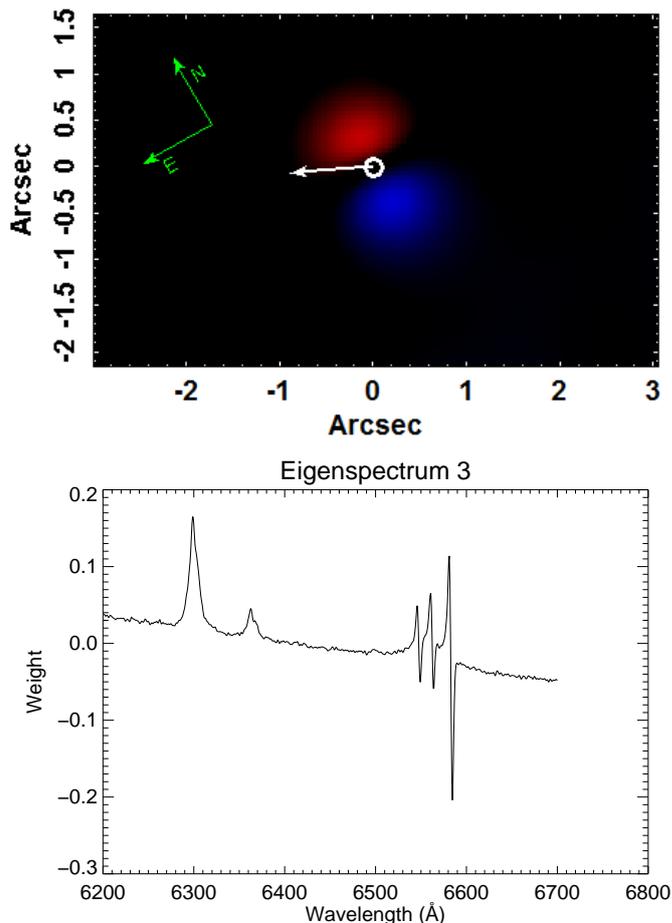


Fig. 1. Tomogram and eigenspectrum 3 of the PCA Tomography applied to the 6200-6700 Å spectral range. The anti-correlation between the red and the blue wings of the $[N II]$ and $H\alpha$ emission lines associated with a bipolar structure seen in the tomogram is a typical signature of gas kinematics. In the tomogram, the structure in blue (red) corresponds to the blue (red) wings of the $[N II]$ and $H\alpha$ emission lines. In this case, we interpreted this kinematics as a gas disc with a P.A. = $-3^\circ \pm 1^\circ$. The white circle marks the position of the AGN, as given by the image of the broad component of $H\alpha$ and the white arrow correspond to the direction of a resolved nuclear radio jet with a P.A. = 65° (Martí-Vidal et al. 2011)

respectively. However, the third eigenspectrum, shown in Fig. 3, reveals a correlation between the $[N II]\lambda 5755$, $[O I]\lambda\lambda 6300$, 6363 and $H\alpha$ + $[N II]\lambda\lambda 6548, 6583$ emission lines. These lines are also correlated with the blue region of the continuum. The tomogram related to this eigenspectrum, also shown in Fig. 3, reveals a region associated with these emission lines southbound of the nucleus, again coinciding with the blueshifted side of the gaseous disc. The interpretation is that this region is composed of very hot gas and its continuum is bluer than the overall stellar component along the FOV.

4. Emission line properties

In order to study emission lines along the FOV, we subtracted the stellar components of each spectrum of the data cube with the spectral synthesis technique. To do so, we used the software STARLIGHT (Cid Fernandes et al. 2005) with the stellar population basis proposed by Walcher et al. (2009), which contains 120 stellar populations with ages between 3 and 12 Gyr, abun-

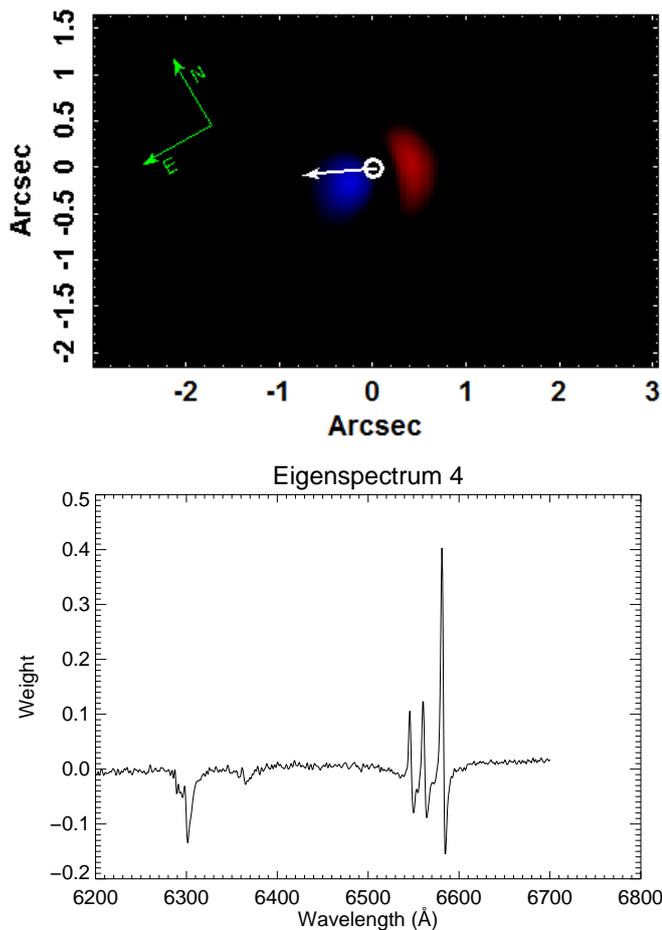


Fig. 2. Tomogram and eigenspectrum 4 of the PCA Tomography applied to the 6200-6700 Å spectral range. In this case, the gas kinematics is probably associated with outflows. Note that the bipolar structure is almost perpendicular to the gas disc (P.A. = $-103^\circ \pm 4^\circ$). Besides, the nuclear radio jet is in the same direction as the component of the outflow that is in blueshift relative to the nucleus of M81.

dances $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5, -0.25, 0.0$ and 0.2 and $[\alpha/\text{Fe}] = 0.0, 0.2$ and 0.4 . The result of the subtraction between the spectra of the data cube and the solutions of the spectral synthesis for each spaxel is a gas cube, i.e., a data cube containing only the gas component.

We have measured the $[\text{O I}]\lambda 6300/\text{H}\alpha$ and $[\text{N II}]\lambda 5755/[\text{N II}]\lambda\lambda 6548+6584$ line ratios along the FOV. To do so, we adjusted the profile of each line with a Gauss-Newton algorithm to fit non-linear functions. For each spaxel, we assumed that the $[\text{O I}]$, $[\text{N II}]$ and $\text{H}\alpha$ lines have the same velocity and FWHM. In Fig. 4 we show the $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$ line ratio map. We also show the gas temperature derived from the $[\text{N II}]\lambda 5755/[\text{N II}]\lambda\lambda 6548+6584$ (Osterbrock & Ferland 2006), assuming a low gas density regime. The outermost isothermal curve (red line in Fig. 4) corresponds to $T_e = 43500$ K. Such hot temperatures are not reproduced in photoionization models for AGNs unless under very special circumstances.

In Fig. 4 we also show the ratio of archival images of the narrow $\text{H}\alpha + [\text{N II}]\lambda\lambda 6548+6584$ filter (namely F658N) to that of the I band obtained with the Wide Field Camera (WFC) of the Advanced Camera for Surveys (ACS) of Hubble Space Telescope - HST. This ratio shows the strong emission of the $\text{H}\alpha + [\text{N II}]\lambda\lambda 6548+6584$ lines and its peak is taken as the centre of the FOV as it presumably indicates the position of the AGN. For the

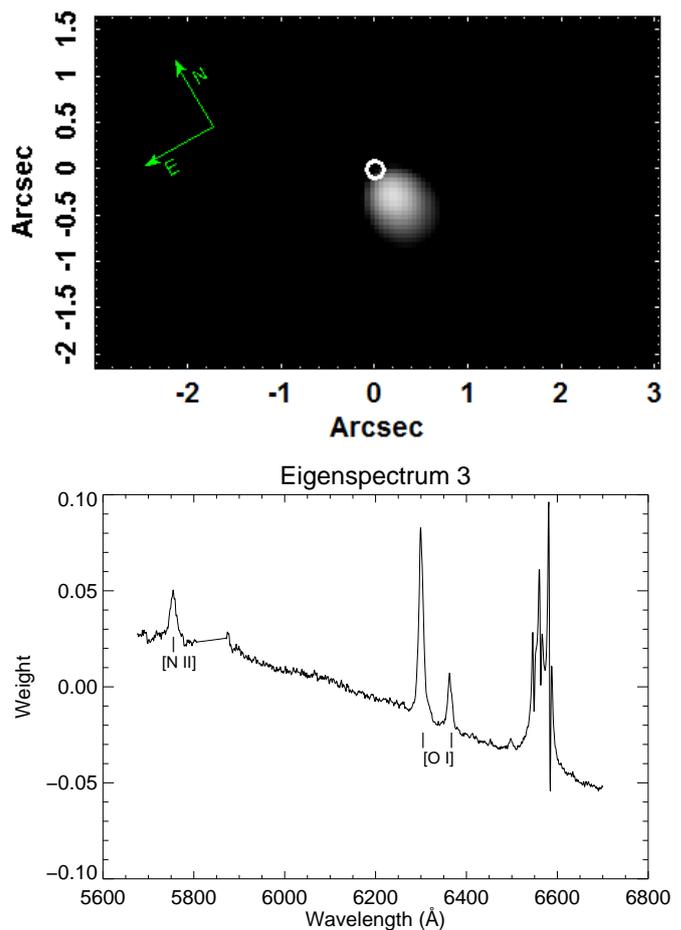


Fig. 3. Tomogram and eigenspectrum 3 of the PCA Tomography applied to the 5675-6700 Å spectral range. This range includes the $[\text{N II}]\lambda 5755$ emission line, which is sensitive to high temperatures of the ionized gas. The eigenvector reveals a correlation between all emission lines and the blue component of the continuum. In the tomogram, the object associated with the emission lines is located $\sim 0.8''$ southbound from the nucleus. We interpret this as a hot-spot which is bluer than the overall stellar component along the FOV.

GMOS frame we assume the centre as derived from the broad $\text{H}\alpha$ red wing. With this assumption we can overlay images of both the HST and Gemini. In addition to the AGN, a faint shell of emission nearly encircling the region of hot gas is also seen in the HST image.

5. Discussions and conclusions

In this work we reanalyse the data cube of M81 already studied by Schnorr Müller et al. (2011). These authors found that the object has a gaseous disc as well as an outflow associated to the AGN. We found that their x-axis is inverted from what it should be and therefore the position angles of these gaseous features are quite distinct. In particular the radio jet observed by Bietenholz et al. (2000) seems to be associated to the redshifted cone/outflow structure (ionization cone) detected in Schnorr Müller et al. (2011); for this to make sense one has to assume that a hypothetical counter-jet does not exist.

With our new orientation of the FOV, we define a new P.A. for each extended gaseous structure. In particular, the blueshifted cone/outflow is co-aligned with the radio jet, for which we as-

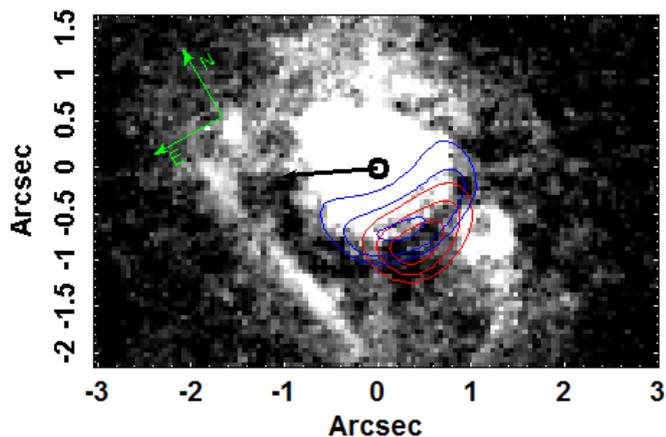


Fig. 4. $(H\alpha+[N II])/I$ ratio using images from the ACS on board of the HST. Note that the peak of the emission coincides with the position of the nucleus. The red contours are curves of isotemperatures. The outer contour has $T_e \sim 43500\text{K}$ and the temperature increases inwards. The blue contours are associated with the $[O I]/H\alpha$ ratio, with values of 0.6, 0.7 and 0.8 from outside to inside. A very hot region associated with high values of $[O I]/H\alpha$ is probably related to shock-heated regions, since photoionization models cannot produce such a high temperature.

sume a new PA, given by Martí-Vidal et al. (2011) and shown in Fig. 2. The asymmetry of only one-sided radio jet is now naturally explained by the Doppler boosting effect.

When we analysed the data cube with the $[N II]\lambda 7555\text{\AA}$ line (not included in the Schnorr Müller et al. 2011 study), we detected a unresolved hot spot, located 0.8 arcsec southbound of the nucleus. We estimate a temperature $T_e > 43500\text{ K}$ for the gas in this region. The line ratio $[O I]/H\alpha = 0.8$ is exceptionally high, even for LINERs (Ho et al. 1997); it is also higher than on the nucleus of M81, where the ratio is $[O I]/H\alpha = 0.6$. High temperatures, associated to high $[O I]/H\alpha$, are typical signatures of mechanical heating such as occurs in shock waves produced, for example, in supernova remnants or shocked stellar winds (Osterbrock & Ferland 2006). An alternative would be a shock wave produced by a super-wind induced by the AGN. This interpretation, however, seems to be at odds with the jet orientation. The bubble is located perpendicular to the jet direction; this suggests that the bubble is not associated to outflows from the AGN.

This structure detected in M81 may be similar, but on a larger scale, to the structure known as the Arches Cluster (Yusef-Zadeh et al. 2002) located at about 30 pc from the centre of the Milky Way or the young stellar cluster associated to IRS 16, even closer to the centre of our Galaxy (see Genzel et al. 2010 for a review). In particular, the Arches Cluster shows a structure of cold gas around it. At the same time, hot intracluster gas is detected by its X-ray emission and it is interpreted as a combined shock of stellar winds from young (1 - 3 Myr) stars (Yusef-Zadeh et al. 2002). Like in the case of the Arches Cluster, in M81 the hot bubble is also encircled by a filament of coller gas emission (Fig. 4). Here, young stellar populations revealed by PCA Tomography may be associated with a more massive cluster or, perhaps, a combination of many of them. In addition to the shocked gas from young stellar winds, shock waves from supernovae remnants from somewhat older ($T < 70\text{ Myr}$) populations may also be at play.

Since M81 is a very close galaxy, it is possible to discuss the importance of shocks in LINERs even when an AGN is clearly

detected. Because of the proximity of M81, we were able to resolve the AGN and a region dominated by shocks. If this scenario applies to relative far galaxies, both regions would be unresolved and probably classified as a pure LINER-like AGN, i.e. with no occurrence of shocks. This case of M81 suggests that shocks may have an important role even in LINERs that are clearly ionized by other sources, as, for example, AGNs or post-AGB stars.

Acknowledgements. Based on observations obtained at the Gemini Observatory acquired through the Gemini Science Archive and processed using the Gemini IRAF package, which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under a cooperative agreement with the NSF on behalf of the Gemini partnership: the National Science Foundation (United States), the National Research Council (Canada), CONICYT (Chile), the Australian Research Council (Australia), Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Brazil) and Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (Argentina). This work is also based on observations made with the NASA/ESA Hubble Space Telescope, and obtained from the Hubble Legacy Archive, which is a collaboration between the Space Telescope Science Institute (STScI/NASA), the Space Telescope European Coordinating Facility (ST-ECF/ESA) and the Canadian Astronomy Data Centre (CADAC/NRC/CSA). T.V. Ricci and L.Giansante also acknowledge FAPESP for financial support under grants 2012/21350-7 (T.V.R.) and 2011/20224-5 (L.G.)

References

- Bietenholz, M. F., Bartel, N., & Rupen, M. P. 2000, *ApJ*, 532, 895
 Binette, L., Magris, C. G., Stasińska, G., & Bruzual, A. G. 1994, *A&A*, 292, 13
 Cid Fernandes, R., Mateus, A., Sodré, L., Stasińska, G., & Gomes, J. M. 2005, *MNRAS*, 358, 363
 Ferland, G. J. & Netzer, H. 1983, *ApJ*, 264, 105
 Filippenko, A. V. 1982, *PASP*, 94, 715
 Genzel, R., Eisenhauer, F., & Gillessen, S. 2010, *Reviews of Modern Physics*, 82, 3121
 Gonzales, R. & Woods, R. 2008, *Digital Image Processing*
 Halpern, J. P. & Steiner, J. E. 1983, *ApJ*, 269, L37
 Heckman, T. M. 1980, *A&A*, 87, 152
 Ho, L. C., Filippenko, A. V., & Sargent, W. L. W. 1997, *ApJS*, 112, 315
 Lucy, L. B. 1974, *AJ*, 79, 745
 Martí-Vidal, I., Marcaide, J. M., Alberdi, A., et al. 2011, *A&A*, 533, A111
 Menezes, R. B., Steiner, J. E., & Ricci, T. V. 2013, *ApJ*, 765, L40
 Menezes, R. B., Steiner, J. E., & Ricci, T. V. 2014, *MNRAS*, 438, 2597
 Osterbrock, D. E. & Ferland, G. J. 2006, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei* (2nd. ed. by D.E. Osterbrock and G.J. Ferland. Sausalito, CA: University Science Books, 2006)
 Peimbert, M. & Torres-Peimbert, S. 1981, *ApJ*, 245, 845
 Ricci, T. V., Steiner, J. E., & Menezes, R. B. 2011, *ApJ*, 734, L10
 Ricci, T. V., Steiner, J. E., & Menezes, R. B. 2014, *MNRAS*, 440, 2419
 Richardson, W. H. 1972, *Journal of the Optical Society of America* (1917-1983), 62, 55
 Schnorr Müller, A., Storchi-Bergmann, T., Riffel, R. A., et al. 2011, *MNRAS*, 413, 149
 Steiner, J. E., Menezes, R. B., Ricci, T. V., & Oliveira, A. S. 2009, *MNRAS*, 395, 64
 van Dokkum, P. G. 2001, *PASP*, 113, 1420
 Walcher, C. J., Coelho, P., Gallazzi, A., & Charlot, S. 2009, *MNRAS*, 398, L44
 Young, A. J., Nowak, M. A., Markoff, S., Marshall, H. L., & Canizares, C. R. 2007, *ApJ*, 669, 830
 Yusef-Zadeh, F., Law, C., Wardle, M., et al. 2002, *ApJ*, 570, 665

Appendix A: The orientation of the data cube

This data cube was already analysed by Schnorr Müller et al. (2011). Although the P.A. of the FOV is 150° (lowest spatial dimension counterclockwise of north) for this paper and for Schnorr Müller et al. (2011), their orientation is probably wrong. This may have affected some of their conclusions. If we had assumed a wrong spatial orientation, the DAR correction would have not worked. If an object is observed with a zenith distance different from zero, the blue light is more shifted towards the zenith than the red light (Filippenko 1982). If one knows the position of the object in the moment of the observation and the local coordinates of the telescope, it is possible to estimate the direction of the zenith in the FOV by measuring the shift of the object's centroid along the wavelengths that is caused by DAR effects and, thus, to infer the correct spatial orientation.