

TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS OBSERVACIONAIS DO TELESCÓPIO ESPACIAL JAMES WEBB

Lucas Teni Ragonha¹; Roberto Bertoldo Menezes²

¹ Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

² Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. O Telescópio Espacial James Webb (JWST) e seu instrumento NIRSpec, operando no modo Unidade de Campo Integral (IFU), fornecem cubos de dados tridimensionais essenciais para o estudo da evolução de galáxias. Este trabalho foca na galáxia Markarian 273 (Mrk 273), uma Galáxia Infravermelha Ultra-Luminosa (ULIRG) em fusão, com o objetivo de desenvolver e aplicar uma metodologia de tratamento de dados para aprimorar a análise cinemática e espectroscópica de suas regiões nucleares. A metodologia incluiu reamostragem espacial, filtragem de Butterworth e deconvolução de Richardson-Lucy, resultando em uma melhora significativa na qualidade dos dados. A análise subsequente confirmou a presença de três núcleos e revelou duas descobertas cruciais: a detecção inédita de um disco de gás molecular em rotação ao redor do núcleo SW e fortes evidências da presença de um terceiro Núcleo Ativo de Galáxia (AGN) no núcleo SE. Estes resultados confirmam Mrk 273 como um sistema triplo de buracos negros supermassivos, oferecendo um laboratório único para o estudo da retroalimentação em fusões de galáxias.

Introdução

O lançamento do Telescópio Espacial James Webb (JWST) representou um marco para a astrofísica moderna, inaugurando uma nova era de descobertas no universo infravermelho. Com sua sensibilidade e resolução sem precedentes, o JWST permite o estudo detalhado de fenômenos que antes eram inobserváveis. Um de seus instrumentos mais poderosos, o Espectrógrafo de Infravermelho Próximo (NIRSpec), possui um modo de observação por Unidade de Campo Integral (IFU) que é particularmente revolucionário. Esta técnica produz "cubos de dados", que são conjuntos de dados tridimensionais que combinam informações espaciais (duas dimensões) com informações espectrais (uma terceira dimensão, o comprimento de onda). Dessa forma, é possível analisar imagens de uma mesma região espacial de um objeto em diferentes comprimentos de onda, assim como também é possível obter espectros de diferentes regiões espaciais do objeto.



Figura 1- Telescópio Espacial James Webb

Um dos campos que mais se beneficia desta tecnologia é o estudo da evolução de galáxias, um processo complexo impulsionado por eventos como as fusões de galáxias (*galaxy mergers*). Estas colisões cósmicas são eventos transformadores que podem desencadear surtos intensos de formação estelar (*starbursts*) e canalizar gás para as regiões centrais das galáxias, alimentando seus buracos negros supermassivos. Este processo de acreção de matéria a buracos negros centrais dá origem aos Núcleos Ativos de Galáxias (*Active Galactic Nuclei*; AGNs), os fenômenos mais energéticos do universo, que por sua vez impactam profundamente a galáxia hospedeira através de ventos e jatos, regulando a formação de novas estrelas. A interação entre a atividade do AGN e o *starburst* em galáxias em fusão é uma área de intensa pesquisa, fundamental para a compreensão de como as galáxias se formam e evoluem.

Neste contexto, a galáxia Markarian 273 (Mrk 273) emerge como um laboratório astrofísico excepcional. Localizado a aproximadamente 500 milhões de anos-luz, esse objeto é classificado como uma Galáxia Infravermelha Ultra-Luminosa (*Ultra Luminous Infrared Galaxy*; ULIRG), que é uma categoria de galáxias caracterizadas pelo seu elevado brilho na região espectral do infravermelho. As ULIRGs costumam estar associadas a *starbursts* e/ou AGNs (Sanders & Mirabel 1996) e acredita-se que esse tipo de objeto, em geral, resulte de *mergers* de galáxias ricas em gás (Lonsdale *et al.*, 2006). Foram identificados três núcleos, resultantes de *mergers* anteriores, na região central de Mrk273. A presença de um AGN foi detectada no núcleo ao norte, núcleo N, daqui para frente (Knapen *et al.*, 1997; Liu *et al.*, 2019) e no núcleo ao sudoeste, núcleo SW, daqui para frente (Iwasawa *et al.*, 2011). No núcleo ao sudeste, núcleo SE, daqui para frente, a presença de um AGN foi apenas sugerida por Rodríguez Zaurín *et al.* (2014). Com toda essa rica morfologia na sua região central, Mrk 273 é um alvo ideal para investigar a coexistência e a retroalimentação entre múltiplos buracos negros supermassivos e a formação estelar em um ambiente extremo.

Apesar da qualidade extraordinária dos dados do JWST, os cubos de dados, assim como os de outros telescópios, podem apresentar artefatos instrumentais e ruídos de alta frequência, que comprometem a análise científica. Portanto, o tratamento e a correção desses dados são etapas cruciais para maximizar seu potencial científico. Este projeto tem como objetivo principal desenvolver e aplicar uma metodologia de tratamento para cubos de dados do instrumento NIRSpec, utilizando como objeto de estudo a galáxia Mrk 273. Ao aprimorar a qualidade dos dados, busca-se obter uma visão mais clara da cinemática estelar e do gás, bem como das condições de excitação do gás nas regiões nucleares deste sistema complexo, contribuindo para o entendimento dos processos físicos que governam a evolução das galáxias em fusão.

Material e Métodos

O cubo de dados da região central da galáxia Mrk 273, utilizado nesse trabalho, está disponível publicamente no banco de dados do JWST (<https://mast.stsci.edu/search/ui/#/jwst>). A metodologia de análise e tratamento de dados empregada neste projeto baseia-se em técnicas avançadas de processamento de cubos de dados espectroscópicos, desenvolvidas e aprimoradas em pesquisa científica apresentada em Menezes *et al.*, 2014, Menezes *et al.*, 2015 e Menezes *et al.*, 2019. O trabalho foi dividido em duas etapas principais: o tratamento dos cubos de dados, para remoção de ruídos e melhoria da resolução espacial, e a análise espectroscópica, para determinação da cinemática estelar e do gás, bem como dos mecanismos de excitação.

O tratamento do cubo de dados do Mrk 273, obtido com o instrumento NIRSpec do JWST, iniciou-se com a reamostragem espacial (*spatial re-sampling*). Nessa etapa, dobrou-se o número de pixels espaciais (*spaxels*) ao longo dos eixos horizontal e vertical das imagens do cubo de dados. Esse aumento na amostragem espacial foi de grande importância para a otimização do tratamento de dados, tendo considerável impacto sobretudo na aplicação da deconvolução de Richardson-Lucy, embora introduza componentes de alta frequência espacial, que são tratadas na etapa seguinte.

Em seguida, foi aplicada a filtragem espacial de Butterworth (*Butterworth Spatial Filtering*), uma técnica de processamento de imagens no domínio da frequência, para remover os ruídos de alta frequência espacial introduzidos pela reamostragem e também aqueles já presentes nos dados brutos. Para cada imagem do cubo de dados, o procedimento consistiu nas seguintes etapas: cálculo da Transformada de Fourier da imagem; multiplicação da Transformada de Fourier pela imagem correspondente ao filtro de Butterworth; cálculo da Transformada de Fourier inversa do produto obtido na etapa anterior. O filtro de Butterworth, preferido por sua transição suave que minimiza artefatos de anel (Gonzalez & Woods, 2002), foi utilizado com uma ordem $n=1.0$, para evitar distorções. A frequência de corte ideal foi determinada empiricamente, variando-se o valor em passos de 0.01 Ny (Ny = frequência de Nyquist) e monitorando a variação do *Full Width at Half Maximum* (FWHM) da estrutura central. O critério de parada foi atingido quando a variação do FWHM entre passos consecutivos foi inferior a 0.2 spaxels . O valor de frequência de corte ideal encontrado e utilizado foi de 0.21 Ny . Esta mesma filtragem foi aplicada ao cubo de dados da *point spread function* (PSF) da observação. Tal cubo foi obtido com um script em linguagem Python, elaborado a partir do pacote STPSF (<https://stpsf.readthedocs.io/en/latest/>), desenvolvido pela equipe do telescópio JWST. Vale ressaltar que a PSF fornece a resolução espacial da observação e depende tanto das condições climáticas quanto do instrumento utilizado.

A deconvolução de Richardson-Lucy (RL) foi aplicada para reverter o borramento causado pela PSF da observação, melhorando a resolução espacial dos dados (Richardson, 1972; Lucy, 1974). O algoritmo RL, que maximiza a verossimilhança, requer o conhecimento prévio da PSF (previamente filtrada) e é um procedimento iterativo. Neste trabalho, a deconvolução foi aplicada com 10 iterações, o que se mostrou o número ideal para otimizar o resultado, sem introduzir artefatos excessivos.

Após o tratamento, a análise espectroscópica foi realizada. A cinemática estelar foi determinada utilizando o método pPXF (*penalized Pixel-Fitting*) (Cappellari & Emsellem, 2004). Este algoritmo ajusta o espectro estelar observado de um determinado objeto com uma combinação linear de espectros de populações estelares de uma determinada base, permitindo a determinação dos parâmetros cinemáticos (velocidade radial e dispersão de velocidade) e também uma série de outras propriedades (como idade e metalicidade) das populações estelares presentes. O pPXF resulta em um espectro estelar sintético, correspondente ao ajuste obtido, que pode ser subtraído do espectro original, resultando em um espectro contendo apenas linhas de emissão (ou seja, a emissão do gás). Essa subtração do contínuo estelar também foi aplicada nesse trabalho, visando a análise detalhada do espectro de emissão.

Foi estudada a cinemática do gás molecular, através do ajuste de uma função gaussiana à linha de emissão de $\text{H}_2 \lambda 2.1218 \mu\text{m}$. A velocidade radial do gás foi calculada a partir do deslocamento do centro da gaussiana em relação ao comprimento de onda de repouso, utilizando a relação de Doppler. A análise do mapa de velocidades resultante permite identificar padrões cinemáticos complexos, como rotação e *outflows*.

Por fim, a análise de razões de linhas (*line ratio analysis*) foi utilizada como ferramenta de diagnóstico para determinar os mecanismos físicos que excitam o gás. As razões entre os fluxos de diferentes linhas de emissão são sensíveis à temperatura, densidade e ao estado de ionização do gás. Nesse caso, utilizando-se tais razões, é possível avaliar se a emissão detectada é devida à fotoionização do gás causada por AGNs ou por estrelas jovens e quentes, associadas a surtos de formação estelar (*starbursts*) (Colina *et al.*, 2015).

Resultados e Discussão

A aplicação da metodologia de tratamento e análise espectroscópica ao cubo de dados do Mrk 273, obtidos com o instrumento NIRSpec do JWST, resultou em uma série de descobertas que aprimoram significativamente a compreensão da dinâmica e dos mecanismos de excitação do gás nessa galáxia Ultra-Luminosa Infravermelha (ULIRG). Os resultados são

apresentados e discutidos a seguir. O tratamento de dados, que incluiu a reamostragem espacial, a filtragem de Butterworth e a deconvolução de Richardson-Lucy, foi fundamental para aprimorar a qualidade dos cubos de dados, sendo a deconvolução crucial para a melhoria da resolução espacial e a separação dos núcleos próximos. A Figura 2 mostra imagens do intervalo espectral $2.32\mu\text{m} - 2.37\mu\text{m}$ dos cubos de dados não tratado e tratado de Mrk 273. A orientação em todas as imagens desse relatório é norte para cima e leste para a esquerda. A presença dos três núcleos, mencionados anteriormente, na região central dessa galáxia é evidente. No entanto, essas estruturas aparecem de forma muito mais clara, e com melhor resolução espacial, na imagem do cubo de dados tratado. O núcleo N é o mais brilhante e possui uma morfologia mais estendida. Os núcleos SW e SE (sendo esse último o menos brilhante) possuem morfologias consideravelmente mais compactas.

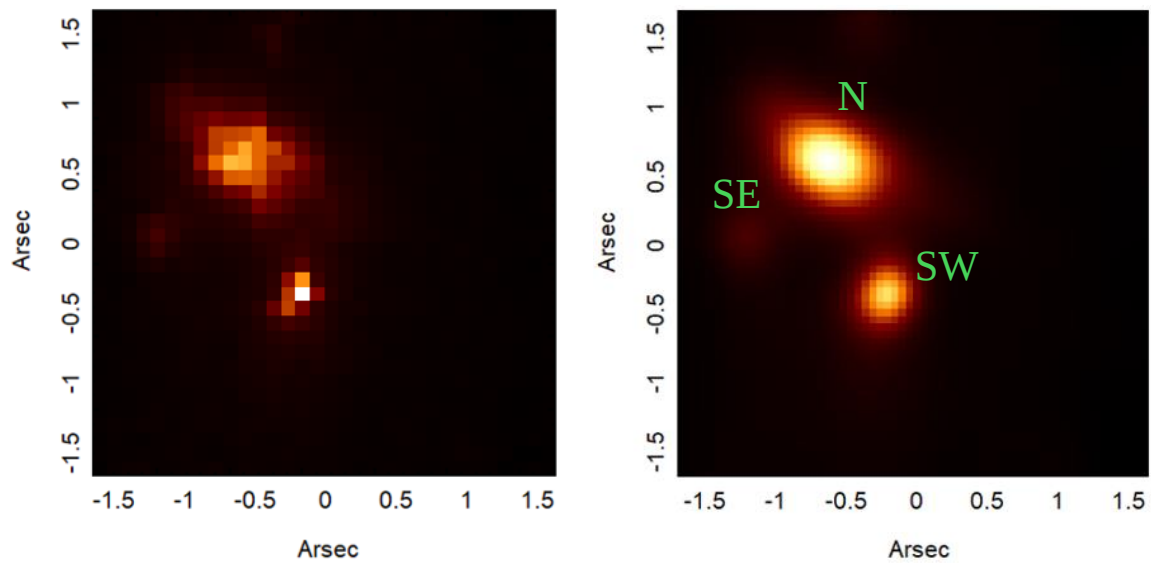


Figura 2 – Imagens dos cubos de dados não tratado (esquerda) e tratado (direita) de Mrk 273, obtidas a partir do intervalo espectral $2.32\mu\text{m} - 2.37\mu\text{m}$. A identificação dos três núcleos nessa galáxia é mostrada na imagem à direita.

A Figura 3 mostra espectros extraídos de uma mesma região espacial, próxima ao núcleo SW, dos cubos de dados tratado e não tratado de Mrk 273. O espectro não tratado apresenta um padrão oscilatório artificial, causado por um processo de reamostragem do cubo de dados, aplicado pela equipe do JWST, durante o processamento dos dados (vale ressaltar que o cubo de dados obtido a partir do banco de dados do JWST já havia passado por esse processamento, ou seja, já apresentava esse padrão). Tal padrão é reportado em vários estudos já publicados (e.g. Dumont *et al.* 2025). Pode-se notar que essa oscilação artificial foi completamente removida pelo processo de tratamento de dados, não sendo detectável no espectro tratado.

A cinemática estelar foi determinada através do ajuste dos espectros de absorção estelar com o método pPXF. Como esse procedimento foi aplicado ao espectro correspondente a cada *spaxel* do cubo de dados, foram obtidos mapas da velocidade radial estelar e da dispersão de velocidades estelar, os quais são mostrados na Figura 4. Esses mapas fornecem informações cruciais sobre o potencial gravitacional e a distribuição de massa no centro da galáxia. De cada mapa, foi extraída uma curva de valores, ao longo do chamado eixo cinemático, o qual passa pelos pontos de máxima e mínima velocidade radial. As curvas extraídas são mostradas na Figura 5.

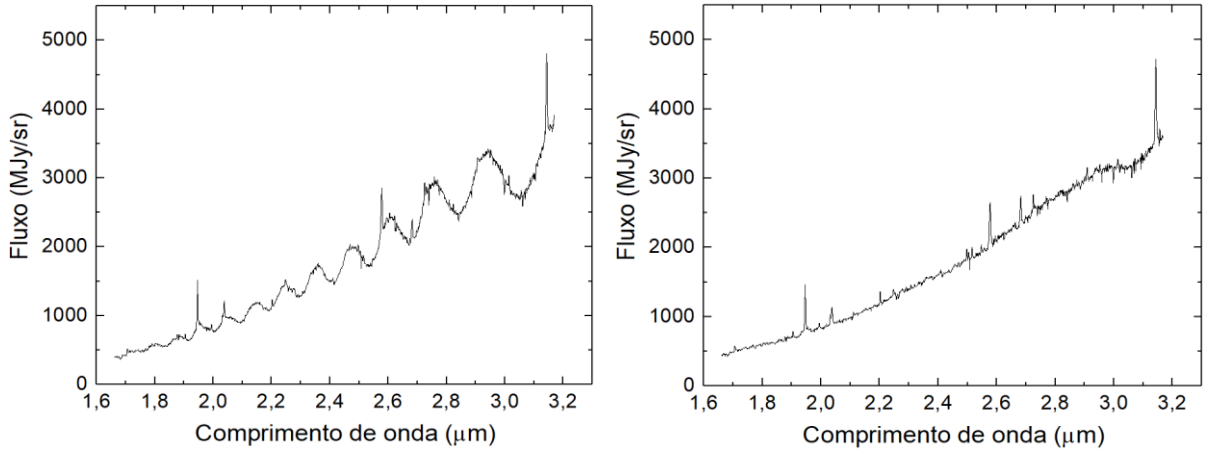


Figura 3 – Espectros de uma região espacial, próxima ao núcleo SW, extraídos dos cubos de dados não tratado (esquerda) e tratado (direita) de Mrk 273.

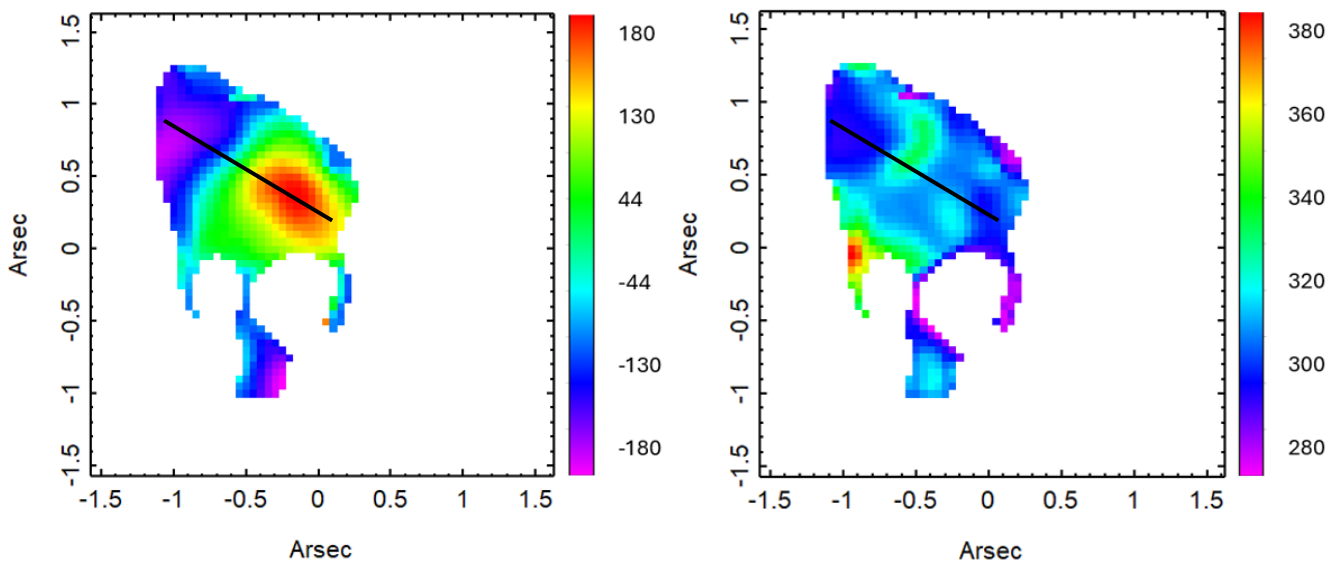


Figura 4 – Mapas da velocidade radial estelar (esquerda) e da dispersão de velocidades estelar (direita), obtidos com a aplicação do método do pPXF ao cubo de dados de Mrk 273. Em cada mapa, a linha preta corresponde ao eixo cinemático (ao longo do qual foi extraída uma curva de valores). Os valores estão em km/s.

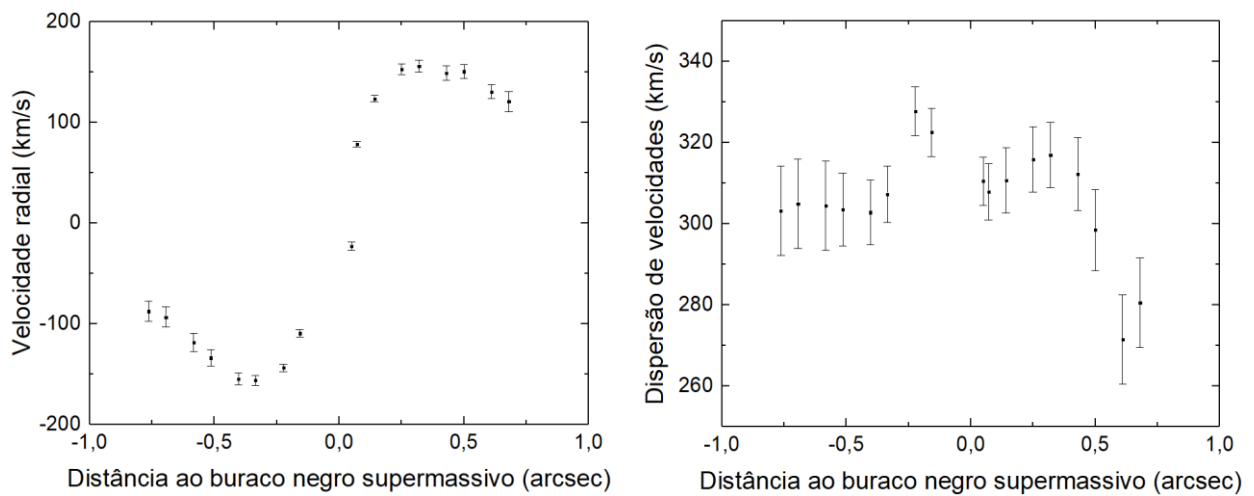


Figura 5 – Curvas da velocidade radial estelar (esquerda) e da dispersão de velocidades estelar (direita) extraídas ao longo do eixo cinemático mostrado nos mapas da Figura 4.

As Figuras 4 e 5 revelam a presença de um disco estelar em rotação ao redor do buraco negro supermassivo presente no núcleo N. A existência de tal disco já era conhecida, a partir de estudos anteriores (U *et al.* 2013); no entanto, as metodologias de tratamento de dados aplicadas nesse trabalho permitiram que essa estrutura fosse visualizada de uma forma muito mais nítida do que em outros trabalhos.

Os espectros estelares sintéticos fornecidos pelo pPXF foram subtraídos dos espectros originais, resultando em um cubo de dados contendo apenas linhas de emissão. A partir desse cubo, foram construídas as imagens correspondentes ao fluxo integrado das seguintes linhas de emissão (ou seja, foram calculadas as integrais das linhas de emissão): Br γ λ 2.166, [Fe II] λ 1.644, H $_2$ λ 2.121, [Si VI] λ 1.964, [Ca VIII] λ 2.322 e [Si VII] λ 2.480. As imagens obtidas são mostradas na Figura 6. Também foram extraídos os espectros de regiões circulares, centradas em cada um dos três núcleos dessa galáxia. Os espectros extraídos são mostrados na Figura 7.

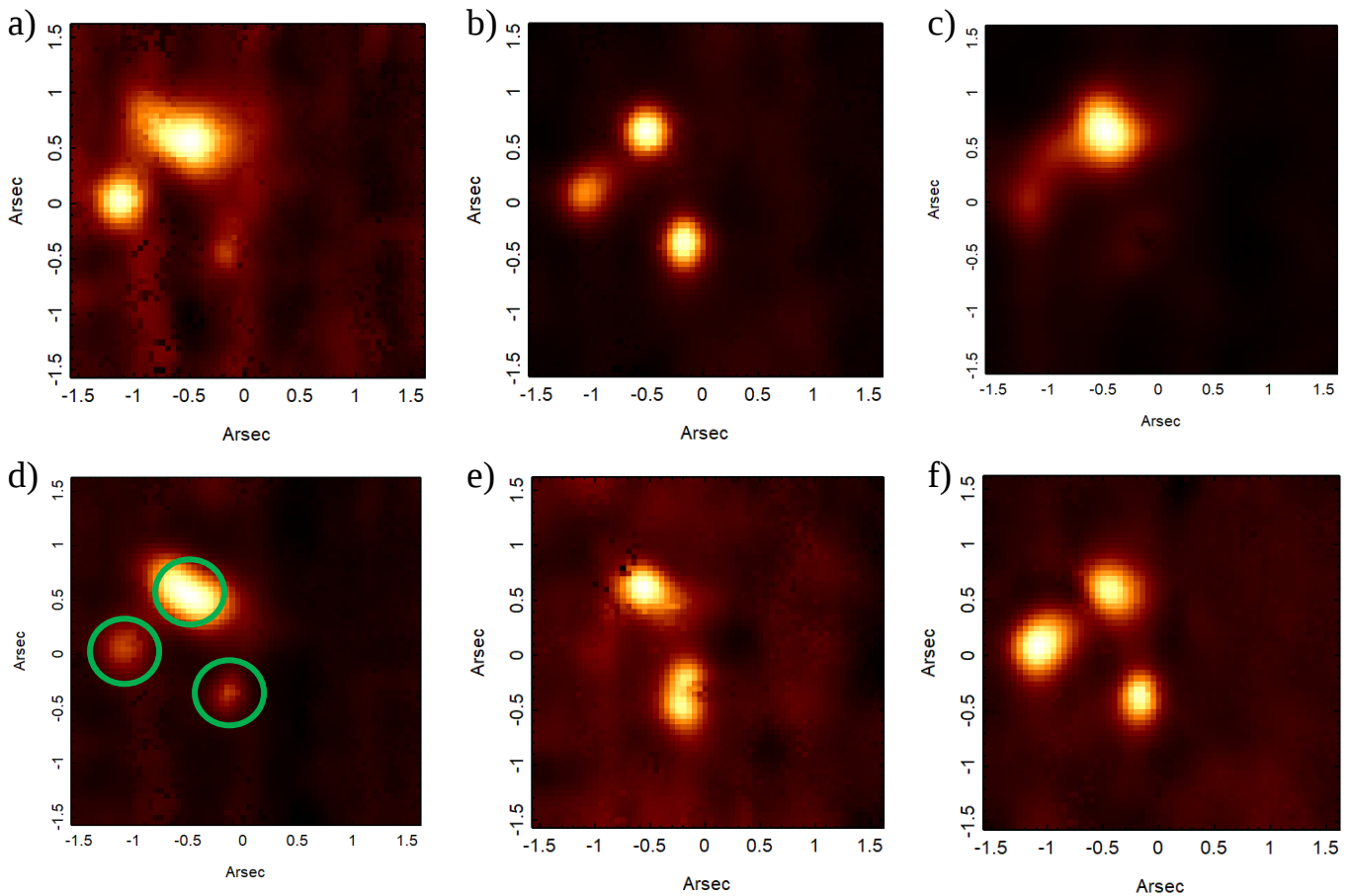


Figura 6 – Imagens das seguintes linhas de emissão do cubo de dados de Mrk 273 (após a subtração do contínuo estelar): a) [Fe II] λ 1.644, b) [Si VI] λ 1.964, c) H $_2$ λ 2.121, d) Br γ λ 2.166, e) [Ca VIII] λ 2.322 e f) [Si VII] λ 2.480. Na imagem de Br γ λ 2.166 estão superpostos círculos correspondentes às regiões de onde foram extraídos os espectros mostrados na Figura 7.

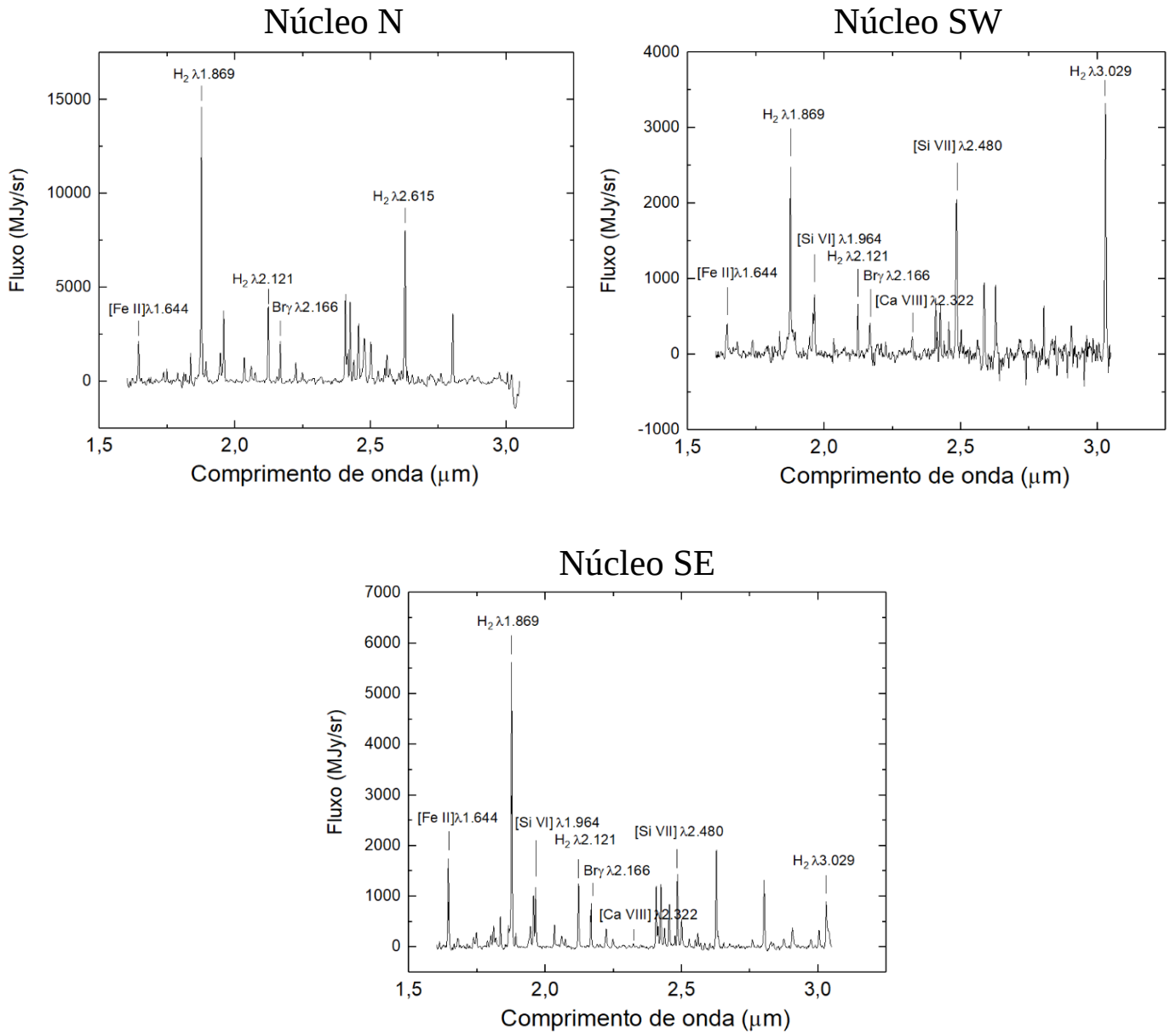


Figura 7 – Espectros extraídos dos núcleos N, SW e SE no cubo de dados de Mrk 273, após a subtração do contínuo estelar.

As imagens de linhas de emissão específicas fornecem um diagnóstico espacial dos diferentes componentes do gás e dos mecanismos de excitação. A maioria das imagens na Figura 6 mostra claramente os três núcleos na região central de Mrk 273. Levando em conta as informações fornecidas pelas Figuras 6 e 7, pode-se fazer a seguinte análise a respeito dos núcleos N, SW e SE: o espectro do núcleo N é dominado pela emissão de gás molecular (H₂), o que é consistente com o conhecimento prévio de um AGN ali (Knapen *et al.*, 1997; Liu *et al.*, 2019), mas fortemente obscurecido. O espectro do núcleo SW apresenta, além das linhas de H₂, linhas de gás altamente ionizado ([Si VI], [Si VII], [Ca VIII]). A presença dessas linhas, que geralmente são emitidas nas proximidades de um AGN, e o aspecto de fonte compacta nas imagens dessas linhas (especialmente [Si VII]), indicam fortemente a presença de um AGN no núcleo SE, que também já era conhecido (Iwasawa *et al.*, 2011). Por fim, o espectro do núcleo SE, cuja natureza havia sido apenas sugerida em trabalhos anteriores (Rodríguez Zaurín *et al.*, 2014), revelou fortes evidências da presença de um AGN. O espectro extraído, com linhas de emissão de alta ionização ([Si VI], [Si VII], [Ca VIII]), juntamente com o aspecto de fonte compacta nas imagens dessas linhas, constituem a descoberta inédita de um terceiro AGN neste

sistema. Conforme mencionado anteriormente, um AGN é gerado pela acreção de matéria em um buraco negro supermassivo; dessa forma, conclui-se que Mrk 273 possui um sistema triplo desses buracos negros na sua região central. Tais sistemas são extremamente raros e representam um estágio crucial na evolução de galáxias em fusão.

Para complementar o diagnóstico, foram calculadas as seguintes razões de linhas de emissão, ao longo de todo o campo de visão: $H_2 \lambda 2.121/B\gamma$ e $[Fe II] \lambda 1.644/B\gamma$. Os valores obtidos foram todos consistentes com a fotoionização causada por AGNs. Este resultado reforça a conclusão de que a atividade nuclear é o principal motor de ionização e aquecimento do gás nas regiões centrais do Mrk 273.

Para finalizar a análise, foi construído o mapa de velocidades radiais do gás molecular, a partir da linha de emissão de $H_2 \lambda 2.121$. O mapa obtido é mostrado na Figura 8. Uma análise detalhada revela a presença de dois discos de gás molecular em rotação distintos: um ao redor do buraco negro supermassivo no núcleo N e outro ao redor do buraco negro supermassivo no núcleo SW. O disco no núcleo N já era conhecido na literatura (U *et al.*, 2013), mas a detecção de um disco de gás em rotação no núcleo SW é uma descoberta nova deste trabalho. As curvas de rotação extraídas ao longo dos eixos cinemáticos desses dois discos (Figura 9) fornece a evidência dinâmica para a presença dos buracos negros supermassivos nessas áreas.

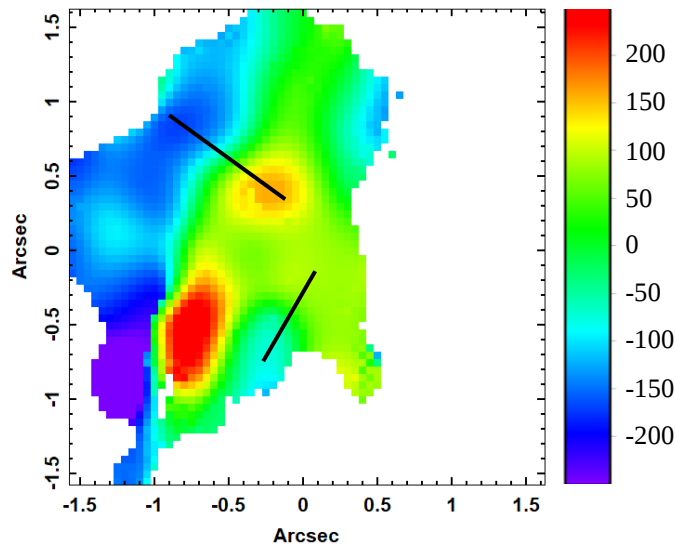


Figura 8 – Mapa da velocidade radial do gás molecular, obtido a partir da linha de emissão de $H_2 \lambda 2.121$, no cubo de dados de Mrk 273, após a subtração do contínuo estelar. As linhas pretas correspondem aos eixos cinemáticos (ao longo dos quais foram extraídas curvas de valores). Os valores estão em km/s.

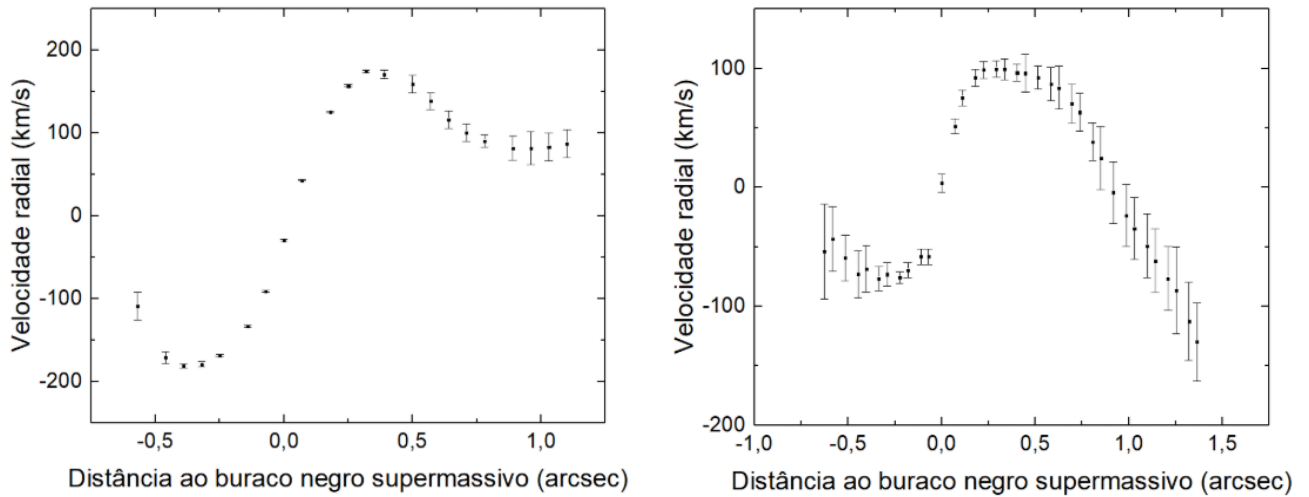


Figura 9 – Curvas da velocidade radial do gás molecular extraídas dos eixos cinemáticos dos discos em rotação ao redor dos buracos negros supermassivos no núcleo N (esquerda) e no núcleo SW (direita).

A análise detalhada da cinemática do gás molecular e a identificação de três AGNs em Mrk 273 fornecem um laboratório único para o estudo da retroalimentação (*feedback*) de múltiplos buracos negros supermassivos em um ambiente de fusão de galáxias. A descoberta do segundo disco de gás em rotação e a confirmação do terceiro AGN abrem novas perspectivas para a modelagem da evolução dinâmica e química de ULIRGs.

Conclusões

O presente trabalho demonstrou a importância crítica de uma metodologia robusta de tratamento de dados para a maximização do potencial científico de observações complexas, como os cubos de dados do NIRSpec/JWST. A aplicação de técnicas como a reamostragem espacial, a filtragem de Butterworth e a deconvolução de Richardson-Lucy foi fundamental para remover ruídos de alta frequência e artefatos instrumentais, resultando em uma melhora significativa na qualidade dos dados. Sem esse aprimoramento, a obtenção dos resultados científicos apresentados teria sido dificultada.

A análise morfológica e espectroscópica subsequente permitiu a clara identificação dos três núcleos presentes na galáxia Mrk 273. A cinemática estelar e do gás molecular (H_2) foi investigada em detalhe. Nossos resultados confirmaram a presença de um disco estelar e de um disco gasoso (gás molecular) em rotação ao redor do núcleo N, um resultado já conhecido na literatura.

No entanto, o trabalho apresentou duas descobertas significativas: a primeira foi a detecção inédita de um disco de gás molecular em rotação ao redor do núcleo SW. A segunda, e mais crucial, foi a obtenção de fortes evidências da presença de um terceiro AGN no núcleo SE. Enquanto estudos anteriores já haviam detectado AGNs nos núcleos N e SW, a confirmação da atividade nuclear no núcleo SE, baseada em assinaturas espectrais de alta ionização e morfologia compacta, representa um resultado de grande impacto.

Em suma, Mrk 273 é confirmada como um sistema triplo de buracos negros supermassivos em fusão, um cenário extremamente raro que fornece um laboratório único para o estudo da co-evolução de galáxias e seus buracos negros centrais. Os resultados abrem novas perspectivas para a modelagem da evolução dinâmica e química de galáxias Ultra-Luminosas Infravermelhas.

Referências Bibliográficas

- Cappellari, M. & Emsellem, E. 2004, PASP, 116, 138
- Colina, L., Piqueras, López, J., Arribas, S., Riffel, R., Riffel, R. A., et al. 2015, A&A, 578, 48
- Dumont, A., Neumayer, N. & Seth, A. C. 2025, A&A, 703, 54
- Gonzalez R. C., Woods R. E., 2002, Digital Image Processing, 2nd edn. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ
- Iwasawa, K., Mazzarella, J. M., Surace, J. A., Sanders, D. B., Armus, L., et al. 2011, A&A, 528, 137
- Knapen, J. H., Laine, S., Yates, J. A., Robinson, A., Richards, A. M. S., et al. 1997, ApJ, 490, 29
- Liu, W., Veilleux, S., Iwasawa, K., Rupke, D. S. N., Teng, S., et al. 2019, ApJ, 872, 39
- Lonsdale, C. J., Farrah, D. & Smith, H. E. 2006, ASUP, 285
- Lucy L. B., 1974, AJ, 79, 745
- Menezes, R. B., Ricci, T. V., Steiner, J. E., da Silva, P., Ferrari, F., et al. 2019, MNRAS, 483, 3700
- Menezes, R. B., da Silva, P., Ricci, T. V., Steiner, J. E., May, D., et al. 2015, MNRAS, 450, 369
- Menezes, R. B., Steiner, J. E. & Ricci, T. V. 2014, 438, 2597
- Richardson W. H., 1972, J. Opt. Soc. Am., 62, 55
- Rodríguez Zaurín, J., Tadhunter, C. N., Rupke, D. S. N., Veilleux, S., Spoon, H. W. W., et al. 2014, A&A, 571, 57
- Sanders, D. B. & Mirabel, I. F. 1996, ARA&A, 34, 749
- U, V., Medling, A., Sanders, D., Max, C., Armus, L., et al. 2013, ApJ, 775, 115