



Modelagem da Extinção em Galáxias Starburst: Impacto nas Emissões de Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

Vitor Avelaneda^{1*}; Julia Fischer¹; Dinalva A. Sales¹; Carla M. Canelo¹
Emanuel Silva-Ruiz¹

Resumo: Neste estudo, investigamos os efeitos da extinção causada por grãos de poeira em espectros do infravermelho médio de galáxias dominadas por formação estelar (*Starburst-dominated*). Essas galáxias são caracterizadas por intensas emissões atribuídas a Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (PAHs), moléculas de grande interesse astroquímico, mas que podem ser altamente sensíveis às características espectroscópicas de extinção. Utilizamos espectros de quatro galáxias Starburst (NGC 4385, NGC 5953, MRK 0609 e MRK 1034 NED01) disponíveis na base de dados IDEOS, nos quais modelamos diferentes cenários de profundidade óptica ($\tau_{9,7}$) e decompomos esses modelos utilizando a ferramenta PAHFIT para investigarmos os efeitos da extinção. Nossos resultados mostram que as emissões das moléculas de PAHs sofrem mudanças significativas, refletindo diferentes características físico-químicas sob o diagrama diagnóstico utilizado. Buscamos discutir a eficiência desse diagrama na análise de objetos e ambientes obscurecidos por poeira, fornecendo uma compreensão mais profunda dos processos de extinção em galáxias com formação estelar.

Palavras-chave: Poeira interestelar; PAHs; Extinção; Starburst-dominated; Astroquímica.

*avelaneda.vitor@gmail.com

¹Universidade Federal do Rio Grande - Rio Grande, RS, Brazil.

1 INTRODUÇÃO

A poeira astrofísica está presente em todo o meio interestelar (ISM), desempenhando um papel crucial na formação e evolução das galáxias e estrelas. A composição básica dos grãos dessa poeira é carbonácea, incluindo uma diversidade de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), além do grafite e silicato (Salim e Narayanan, 2020).

Esta poeira contribui para o resfriamento do gás interestelar, absorvendo de forma eficiente parte da energia emitida pelas estrelas jovens nos comprimentos de onda menores e reemitindo essa radiação predominantemente no infravermelho médio (MIR). Essa absorção e dispersão da luz estelar pode afetar as observações e interpretação dos espectros das galáxias. Esse fenômeno, conhecido como extinção, refere-se à quantidade de luz que é absorvida e dispersa ao longo da linha de visada. Ele é determinado pela distribuição do tamanho e pelas propriedades ópticas dos grãos de poeira, que, por sua vez, dependem da composição química desses grãos (Salim e Narayanan, 2020). A extinção cresce com o aumento da densidade da coluna de poeira, tornando necessário o uso de modelos e correções para estudar as propriedades desses objetos.

Neste estudo, o foco recai sobre galáxias Starburst, ambientes ricos em poeira e com intensa formação estelar, cujo espectro no MIR é dominado por fortes características de emissão atribuídas aos PAHs. No MIR, esses aromáticos possuem bandas muito fortes em comparação com o continuum de grãos de poeira subjacente e até mesmo com a emissão bolométrica reprocessada de grãos de poeira maiores (Smith *et al.*, 2007). Nessa faixa espectral as moléculas de PAHs podem ser responsáveis por até 50% da luminosidade emitida, com bandas mais intensas em 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 e 12.7 μm (Li, 2003). A presença de PAHs na poeira é fonte de inúmeros estudos, pois suas emissões fornecem informações valiosas sobre as condições físicas e químicas das regiões interestelares (Draine e Li, 2001).

Os PAHs podem ser ionizados quando expostos a intensas radiações ou por colisões, e essa ionização está relacionada a intensidade da banda em que são detectados (Allamandola, Hudgins, e Sandford, 1999; Draine, 2003 e Draine e Li, 2001). Há fortes indícios de que a fração ionizada para neutra dessas moléculas pode ser estimada usando a razão da banda de 11.3 μm /7.7 μm , que é sensível ao tipo de atividade nuclear, e vai diminuir de Starbursts para galáxias que possuem núcleo ativo (e.g. Gordon *et al.*, 2008; Sales, Pastoriza, e Riffel, 2010; Sales *et al.*, 2011, 2013, 2015 e Smith *et al.*, 2007). Isso devido a emissão de PAHs ionizados ser mais intensa no intervalo de 6 a 9 μm , por suas características vibrações de estiramento C–C e de PAHs neutros ser predominante entre 10 e 13 μm devido a oscilações C–H fora do plano da molécula (Allamandola, Hudgins, e Sandford, 1999; Draine e Li, 2001 e Peeters *et al.*, 2002).

Quanto ao tamanho molecular, alguns autores verificam aumento significativo nas emissões em 7.7 μm e 8.6 μm em moléculas maiores, e observam que a banda de 6.2 μm se torna muito proeminente em relação as demais em moléculas pequenas. Com isso foi proposto o diagrama diagnóstico por Draine e Li (2001) para caracterizar as moléculas de PAHs a partir das razões de 6.2 μm /7.7 μm e 11.3 μm /7.7 μm .

No presente trabalho, modelos espectrais foram desenvolvidos para diferentes cenários de extinção, aplicando variações nos valores de profundidade óptica dos objetos estudados. Por meio de diagramas diagnósticos, as moléculas de PAHs foram caracterizadas, permitindo analisar o impacto da poeira nas emissões desses compostos aromáticos e nas suas classificações moleculares em ambientes altamente obscurecidos.

2 METODOLOGIA

Nessa seção será apresentada a metodologia utilizada no trabalho e está organizada da seguinte forma, em 2.1 é discutida a base de dados e amostra utilizada, e em 2.2 é discutida a modelagem da amostra.

2.1 Seleção de amostra

Neste estudo, foram utilizados dados do Infrared Database of Extragalactic Observables from Spitzer (IDEOS), que disponibiliza mais de 3000 espectros no MIR de galáxias, observadas no modo de baixa resolução do Espectrógrafo Infravermelho (IRS; Houck *et al.*, 2004), a bordo do Telescópio Espacial Spitzer (SST; Werner *et al.*, 2004). Além dos espectros, o IDEOS fornece informações sobre diversos observáveis medidos, como fluxos de PAH e suas larguras equivalentes, a força da característica de silicato em $9.7\ \mu\text{m}$, fluxos de linhas de emissão e características de estado sólido na faixa de $5.5\text{--}36\ \mu\text{m}$, fluxos de continuum no quadro de repouso e fotometria sintética. Para detalhes adicionais sobre as observações e a redução dos dados IDEOS, é recomendada a leitura de Hernán-Caballero *et al.* (2015) e Spoon *et al.* (2022).

Os critérios para a seleção da amostra utilizada foram baseados nas informações contidas no portal IDEOS e seguem os seguintes parâmetros:

- Classificação no MIR (MIDIRCLASS) igual a 1C.
- Força de Silicato em $9.7\ \mu\text{m}$ (SILSTRENGTH) entre -0.15 e $0\ \mu\text{m}$.
- Sinal-ruído em $6.6\ \mu\text{m}$ (SNR66) superior a 10.

O primeiro critério garante que apenas objetos dominados por Starbursts sejam selecionados, o segundo assegura que apenas espectros com baixa absorção de silicato sejam incluídos, e o terceiro elimina objetos com sinal-ruído muito baixo. Com isso, a amostra foi restringida para 55 objetos. Contudo, apenas quatro tem valores da banda K (em $2.2\ \mu\text{m}$) disponíveis no catálogo do projeto Spitzer/IRS ATLAS (doravante ATLAS; Hernán-Caballero e Hatziminaoglou, 2011). Na tabela 1, são apresentadas as fontes selecionadas, na tabela 2, os valores da banda K para cada fonte.

Tabela 1: Fontes e suas respectivas informações extraídas do IDEOS, incluindo nome da fonte, identificador IDEOS, ascensão reta, declinação e redshift.

Fonte	IDEOS	RA [hms]	Dec [dms]	<i>z</i>
NGC 4385	3753216_0	12:25:42.74	+00:34:20.5	0.0071
NGC 5953	4343808_0	15:34:32.36	+15:11:37.5	0.0066
MRK 0609	10870528_0	03:25:25.31	-06:08:38.5	0.0345
MRK 1034 NED01	20320512_1	02:23:18.96	+32:11:18.3	0.0336

Tabela 2: Fontes e suas respectivas informações do fluxo da banda K (em $2.2 \mu\text{m}$) retirados do ATLAS.

Fonte	Fluxo [mJy]	Erro [mJy]
NGC 4385	82.00	3.55
NGC 5953	145.00	2.42
MRK 0609	33.90	1.01
MRK 1034 NED01	23.90	0.86

2.2 Modelagem da amostra

Para investigar os efeitos da extinção na amostra, foram seguidos os procedimentos descritos no fluxograma da figura 1.

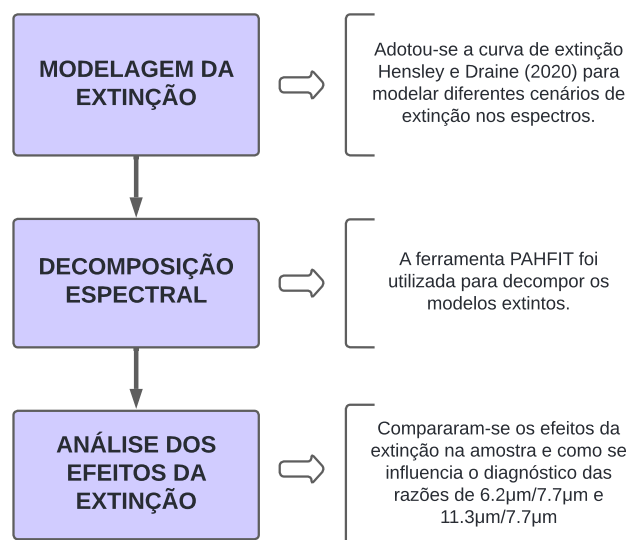


Figura 1: Fluxograma dos processos realizados durante a modelagem da amostra. As caixas em roxo representam os processos, as setas pretas verticais indicam a sequência dos passos, e as setas brancas horizontais fornecem uma breve descrição de cada etapa.

O primeiro passo foi a modelagem da extinção, seguindo o método descrito por Canelo *et al.* (2021) para a galáxia Mrk 52 (neste trabalho nomeada como NGC 4385), que incorpora a curva de extinção de Hensley e Draine (2020), normalizada para a banda

K (2.2 μm). Este método permite modelar as diferentes intensidades de extinção nos espectros, conforme a equação 1:

$$F_{ext}(\lambda) = \frac{F}{F_{2.2}}(\lambda) e^{-\tau_{norm}(\lambda) \times \tau_{9.7}}, \quad (1)$$

$$\tau_{norm}(\lambda) = \frac{\tau(\lambda)}{\tau(9.7)}, \quad (2)$$

onde $F_{ext}(\lambda)$ é o espectro modelado com o componente de extinção adicionado; $\frac{F}{F_{2.2}}(\lambda)$ é o espectro observado normalizado pela banda K (ver tabela 2); $\tau_{norm}(\lambda)$ é a curva de extinção ($\tau(\lambda)$; Hensley e Draine, 2020) normalizada em 9.7 μm ; $\tau_{9.7}$ é o fator de escala da extinção, variado entre 0 e 5.

A figura 2 apresenta os espectros resultantes das galáxias MRK 1034 NED01 e MRK 0609, juntamente com as respectivas curvas de extinção, no intervalo espectral de 5-15 μm .

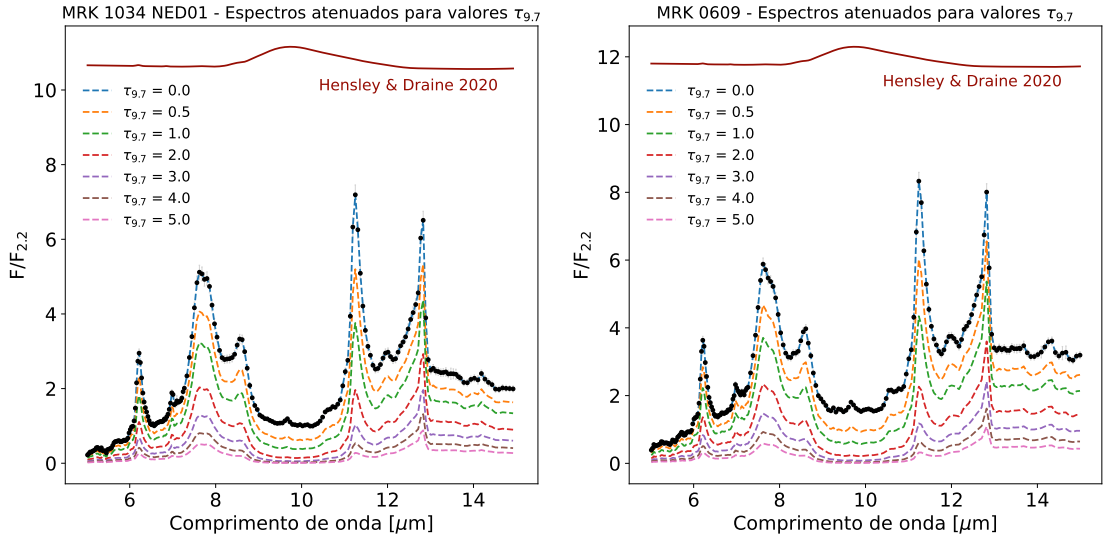


Figura 2: Espectros atenuados das galáxias MRK 1034 NED01 (esquerda) e MRK 0609 (direita). Os pontos pretos representam os dados observados, enquanto as linhas tracejadas correspondem aos modelos com extinção aplicada. A curva de extinção de Hensley e Draine (2020) é exibida em vermelho na parte superior de cada painel.

O segundo procedimento adotado foi a decomposição espectral, visando medir os fluxos das bandas de PAHs, utilizando a ferramenta PAHFIT (Smith *et al.*, 2007). Essa ferramenta realiza uma decomposição detalhada, levando em consideração componentes como o contínuo estelar, emissões térmicas, absorção por silicatos e emissões de linhas iônicas e moleculares.

A equação 3 apresenta a formulação do modelo utilizado:

$$I_{\nu} = \left[\tau_{*} B_{\nu}(T_{*}) + \sum_{m=1}^M \tau_m \frac{B_{\nu}(T_m)}{\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2} + \sum_{i=1}^{N_{PAH}} I_i^{PAH}(\nu) + \sum_{i=1}^{N_{Lines}} I_i^{Line}(\nu) \right] \frac{(1 - e^{-\tau_{\lambda}})}{\tau_{\lambda}} \quad (3)$$

onde I_ν é a intensidade do fluxo; τ_* é o coeficiente de amplitude do contínuo estelar; $B_\nu(T_*)$ é a função de corpo negro para o contínuo estelar a temperatura T_* ; τ_m e T_m são a amplitude e temperatura do contínuo de poeira, respectivamente; τ_λ é a opacidade da poeira.

As emissões de linhas atômicas e moleculares, como as transições rovibracionais do H_2 , são descritas pela equação 4, enquanto as bandas de emissão de PAHs seguem um perfil de Drude, conforme a equação 5.

$$I_\nu^{(i),Line} = b_i e^{-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_i)^2}{\gamma_i^2}} \quad (4)$$

$$I_\nu^{(i),PAH} = \frac{b_i \gamma_i^2}{(\lambda/\lambda_i - \lambda_i/\lambda)^2 + \gamma_i^2} \quad (5)$$

Nas equações 4 e 5, os termos são definidos da seguinte forma: b_i é a intensidade no comprimento de onda central; λ_i é o comprimento de onda central; γ_i é a largura à meia altura (FWHM).

Os ajustes foram realizados utilizando os parâmetros padrão do PAHFIT, com T_* fixado em 5000K e as temperaturas padrão de 300, 200, 135, 90, 65, 50, 40 e 35K para T_m . Durante o início dos ajustes, foi verificada a necessidade de adicionar uma temperatura de 500 K para melhorar a representação do contínuo da amostra.

Após a primeira decomposição dos modelos com $\tau_{9.7} = 0$, foram identificados os componentes de linhas atômicas e de PAHs presentes, sendo fixados para evitar que a extinção introduzisse, de forma equivocada, linhas ausentes no espectro original.

A figura 3 apresenta a decomposição espectral do modelo com $\tau_{9.7} = 0$ para a galáxia NGC 5953, gerada utilizando o PAHFIT. Na figura, são exibidos os perfis de emissão de PAHs, as linhas espectrais, o contínuo — que representa a soma do contínuo estelar com o contínuo da poeira — e o modelo total, resultante da soma de todas as componentes decompostas.

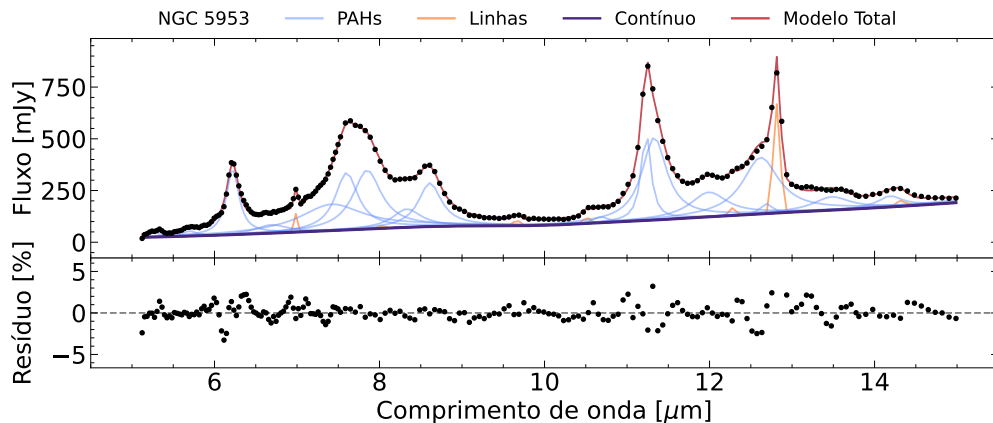


Figura 3: Decomposição espectral da galáxia NGC 5953 com PAHFIT. A figura exibe os dados observacionais (pontos pretos), o modelo total ajustado (linha vermelha sólida), o modelo das linhas atômicas e H_2 (linha laranja sólida), o modelo das bandas de PAHs (linha azul sólida) e o contínuo (linha roxa sólida).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da análise espectral dos dados observacionais, focando na caracterização das emissões de PAHs sob diferentes cenários de extinção.

Uma das decomposições realizadas com o PAHFIT, para a galáxia NGC 4385 está apresentada na figura 4.

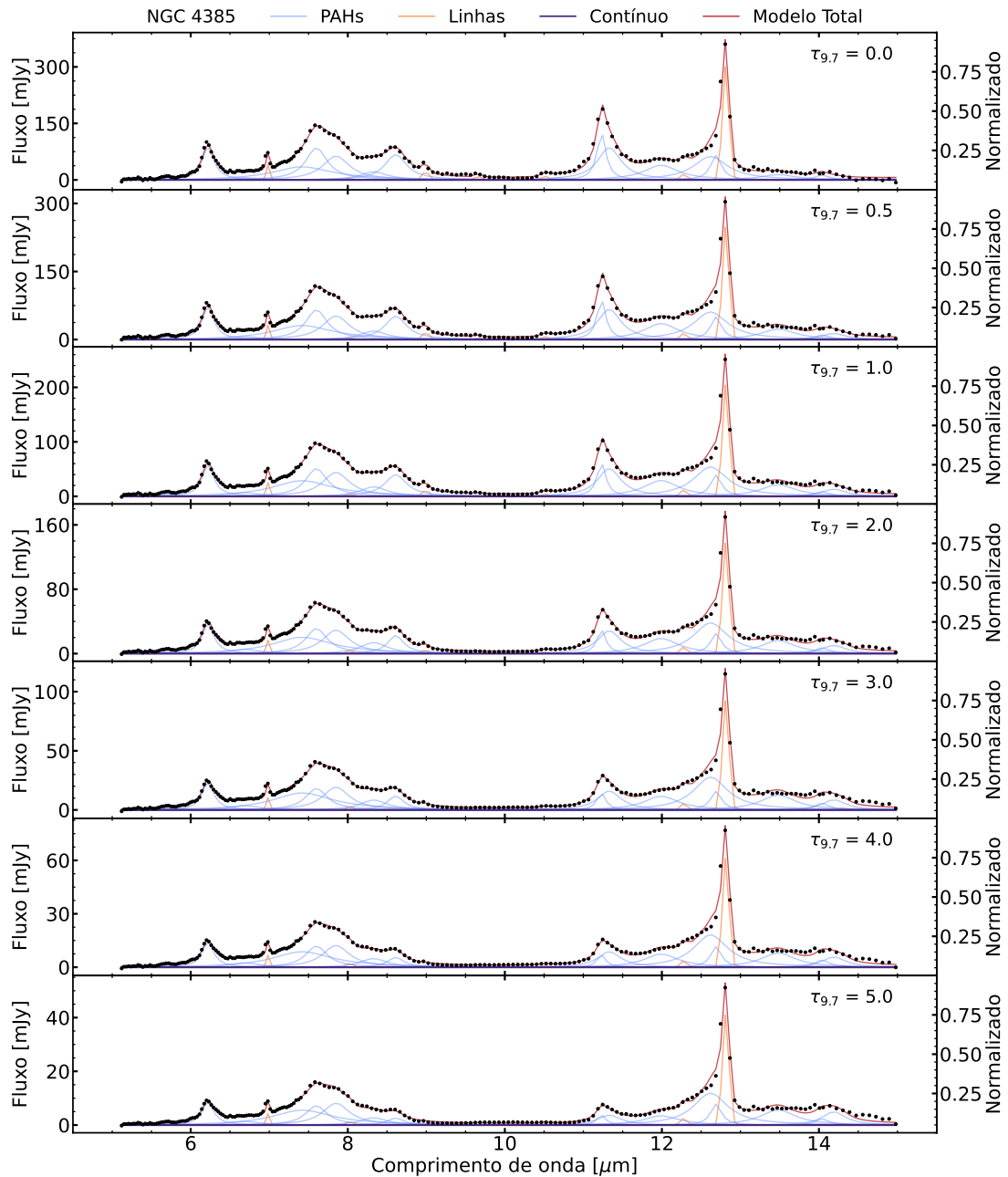


Figura 4: Decomposição espectral da galáxia NGC 4385 para os sete cenários de atenuação. Os círculos pretos representam os dados observados, a linha vermelha o modelo total com melhor ajuste, as linhas laranjas representam as linhas atômicas, as linhas azuis as emissões moleculares de PAHs e a linha roxa o contínuo total.

Observa-se que a intensidade do fluxo do espectro decai rapidamente em resposta as variações da profundidade óptica.

Em função da absorção de silicato, que domina a região em torno de $9.7 \mu\text{m}$ na curva de extinção utilizada, as bandas espectrais não são impactadas de maneira uniforme. A banda de $11.3 \mu\text{m}$, que inicialmente apresenta uma intensidade de $\sim 200 \text{ mJy}$, sofre uma redução significativa de quase 95% em $\tau_{9.7} = 5$. Apesar de ser a banda mais intensa nesse espectro, também é a que sofre maior impacto devido a extinção, seguida pela banda de $8.6 \mu\text{m}$ que se torna quase insignificante às demais com a acresção de poeira.

Nos modelos espectrais com $\tau_{9.7} = 2$ e 3, constatou-se que a opacidade da poeira já suprime a intensidade da banda de $11.3 \mu\text{m}$ em comparação com as bandas menores de PAHs. Esse efeito pode mudar as proporções das razões diagnósticas, o que pode impactar diretamente a análise das propriedades físico-químicas dessas moléculas.

Também foi observada uma variação relativa nas componentes dos complexos de 7.7 e $11.3 \mu\text{m}$, com suas componentes mais intensas em $7.6 \mu\text{m}$ e $11.2 \mu\text{m}$ sendo notavelmente mais atenuadas que as demais, podendo alterar características do perfil das moléculas emissoras.

Prosseguindo com a análise, foi construído o diagrama diagnóstico sugerido por Draine e Li, 2001, entre as razões de PAHs de $6.2 \mu\text{m}/7.7 \mu\text{m}$ e $11.3 \mu\text{m}/7.7 \mu\text{m}$, que pode ser visto na figura 5.

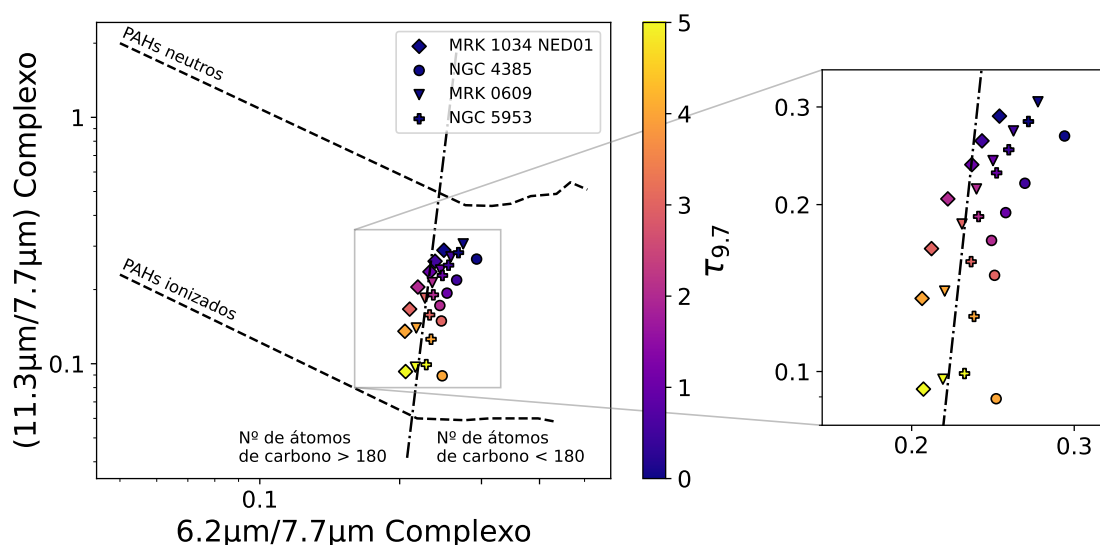


Figura 5: Diagrama diagnóstico entre as razões de PAHs de $6.2 \mu\text{m}/7.7 \mu\text{m}$ e $11.3 \mu\text{m}/7.7 \mu\text{m}$. As linhas tracejadas representam as intensidades teóricas de PAHs neutros e ionizados (Draine e Li, 2001), enquanto a linha composta por traços e pontos corresponde à posição de moléculas contendo 180 átomos de carbono. A coloração do diagrama varia conforme os valores de $\tau_{9.7}$. Os losangos correspondem à galáxia MRK 1034 NED01, os círculos à NGC 4385, os triângulos à MRK 0609 e as cruzeiras à NGC 5953.

Por meio do diagrama, foi possível analisar a distribuição dos resultados calculados para a amostra, observando as variações na profundidade óptica em comparação com as intensidades teóricas de PAHs neutros e ionizados presentes na literatura. Também

foi verificada a consistência dos resultados com o tamanho molecular estimado pelo diagrama.

Identificou-se que o tamanho molecular não sofre mudanças significativas até $\tau_{9.7} = 2$, com os resultados indicando uma emissão predominante de moléculas compostas por mais de 180 átomos de carbono. Entretanto, a partir de $\tau_{9.7} = 3$, os valores medidos nos modelos começam a se deslocar, sugerindo pequenas alterações nas características moleculares estimadas.

Analisando a razão $11.3 \mu\text{m}/7.7 \mu\text{m}$, que está associada ao grau de ionização das moléculas emissoras, observa-se uma variação significativa nos resultados. À medida que a profundidade óptica aumenta, a razão diminui gradualmente em todos os objetos analisados. Nos modelos com menor quantidade de poeira, as emissões calculadas apresentam características semelhantes às de moléculas de PAHs neutras. Em contraste, à medida que a atenuação aumenta, simulando ambientes mais obscurecidos por poeira, as emissões tendem a ser dominadas por moléculas de PAHs predominantemente ionizadas.

A banda de $11.3 \mu\text{m}$, por sua alta sensibilidade à presença de poeira, pode apresentar variações na análise do potencial de ionização molecular. Esse comportamento sugere que, em regiões com maior densidade de poeira, as emissões de PAHs são potencialmente suprimidas devido à destruição ou ionização dessas moléculas. No entanto, a correção da extinção pode resultar em uma subestimação dos fluxos dessas bandas.

O estudo de Hernán-Caballero *et al.*, 2020 explora essa significativa extinção na banda de $11.3 \mu\text{m}$ e propõe uma abordagem para recuperar sua luminosidade intrínseca, utilizando a razão entre as componentes de $12.7 \mu\text{m}$ e $11.2 \mu\text{m}$, bem como suas larguras equivalentes, que são menos afetadas pela extinção, independentemente da natureza das fontes ionizantes. Nesse contexto, o trabalho de Shannon, Stock, e Peeters, 2016 sugere que a razão entre os fluxos dessas bandas pode ser usada como um indicativo da carga das moléculas de PAHs, pois é o principal fator que impulsiona sua variação.

Utilizando trabalhos como este, é sugerido que futuramente esse estudo seja aprimorado, investigando a empregabilidade de outras razões ou modelos de extinção para construção de diagramas diagnósticos que permitam uma melhor estimativa da natureza da ionização em ambientes ricos em poeira, além de proporcionar uma reconstrução mais precisa dos fluxos dessas bandas essenciais.

4 CONCLUSÕES

Com base nos modelos espectrais e no diagrama diagnóstico analisado, constatou-se que a extinção pela poeira tem um impacto significativo sobre as emissões de PAHs, especialmente nas bandas de $11.3 \mu\text{m}$ e $8.6 \mu\text{m}$. Dentro dos complexos de PAHs, observou-se que as componentes de $7.6 \mu\text{m}$ e $11.2 \mu\text{m}$ são as mais afetadas. Esses resultados sugerem que a análise das propriedades físico-químicas dessas moléculas pode ser comprometida quando métodos de correção da extinção não recuperam adequadamente as intensidades dos fluxos, já que as bandas não sofrem o mesmo grau de atenuação.

Além disso, notaram-se mudanças significativas no perfil das moléculas emissoras em ambientes mais obscurecidos pela poeira, com destaque para a alteração no grau de ionização das moléculas, o que pode complicar as análises em regiões com intensa formação estelar, como as galáxias Starburst.

Diante disso, a perspectiva futura é investigar novas razões alternativas para caracterizar o potencial de ionização dessas moléculas em ambientes com maior extinção ou trabalhar com métodos diferentes para reconstruir a luminosidade desses ambientes.

Por fim, os resultados apontam para a necessidade de ajustes nas metodologias de correção de extinção aplicadas ao estudo de PAHs, especialmente em ambientes com alta densidade de poeira. Ao sugerir a adoção de novas razões diagnósticas, como a $12.7\ \mu\text{m}/11.2\ \mu\text{m}$, espera-se contribuir para uma caracterização mais precisa das propriedades físico-químicas dessas moléculas, permitindo avanços significativos na compreensão dos processos de formação estelar e evolução galáctica em cenários altamente obscurecidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). V. Avelaneda e J. Fischer agradecem ao financiamento pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001 e D.A. Sales à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), Brasil.

REFERÊNCIAS

- Allamandola, L., D. Hudgins, e S. Sandford (1999). “Modeling the unidentified infrared emission with combinations of polycyclic aromatic hydrocarbons”. Em: *The Astrophysical Journal* 511.2, p. L115.
- Canelo, C. M., D. A. Sales, A. C. S. Friaça, M. Pastoriza, e K. Menéndez-Delmestre (2021). “Profile comparison of the 6–9 μm polycyclic aromatic hydrocarbon bands in starburst-dominated galaxies”. Em: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 507.4, pp. 6177–6195. DOI: 10.1093/mnras/stab2552. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2552>.
- Draine, B. T. (2003). “Interstellar dust grains”. Em: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 41.1, pp. 241–289.
- Draine, B. e A. Li (2001). “Infrared emission from interstellar dust. I. Stochastic heating of small grains”. Em: *The Astrophysical Journal* 551.2, p. 807.
- Gordon, K. D., C. W. Engelbracht, G. H. Rieke, K. A. Misselt, J. Smith, e R. C. Kennicutt Jr. (2008). “The Behavior of the Aromatic Features in M101 H II Regions: Evidence for Dust Processing”. Em: *The Astrophysical Journal* 682, pp. 336–354. DOI: 10.1086/589567.

- Hensley, B. S. e B. T. Draine (2020). “Detection of PAH Absorption and Determination of the Mid-infrared Diffuse Interstellar Extinction Curve from the Sight Line toward Cyg OB2-12”. Em: *The Astrophysical Journal* 895.1, 38, p. 38. DOI: 10.3847/1538-4357/ab8cc3.
- Hernán-Caballero, A., H. W. Spoon, A. Alonso-Herrero, E. Hatziminaoglou, G. E. Magdis, P. G. Pérez-González, M. Pereira-Santaella, S. Arribas, I. Cortzen, A. Labiano, *et al.* (2020). “Extinction in the 11.2 μm PAH band and the low L 11.2/L IR in ULIRGs”. Em: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 497.4, pp. 4614–4625.
- Hernán-Caballero, A. e E. Hatziminaoglou (2011). “An atlas of mid-infrared spectra of star-forming and active galaxies”. Em: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 414.1, pp. 500–511. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.18413.x. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18413.x>.
- Hernán-Caballero, A., H. W. W. Spoon, V. Lebouteiller, D. S. N. Rupke, e D. P. Barry (2015). “The infrared database of extragalactic observables from Spitzer – I. The redshift catalogue”. Em: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 455.2, pp. 1796–1806. DOI: 10.1093/mnras/stv2464. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2464>.
- Houck, J. R., T. L. Roellig, J. Van Cleve, W. J. Forrest, T. Herter, C. R. Lawrence, K. Matthews, H. J. Reitsema, B. T. Soifer, D. M. Watson, *et al.* (2004). “The infrared spectrograph* (IRS) on the Spitzer space telescope”. Em: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 154.1, p. 18.
- Li, A. (2003). “Interaction of nanoparticles with radiation”. Em: *arXiv preprint astro-ph/0311066*.
- Peeters, E, S Hony, C Van Kerckhoven, A. Tielens, L. Allamandola, D. Hudgins, e C. Bauschlicher (2002). “The rich 6 to 9 μm spectrum of interstellar PAHs”. Em: *Astronomy & Astrophysics* 390.3, pp. 1089–1113.
- Sales, D. A., M. G. Pastoriza, e R. Riffel (2010). “Polycyclic Aromatic Hydrocarbon and Emission Line Ratios in Active Galactic Nuclei and Starburst Galaxies”. Em: *The Astrophysical Journal* 725.1, pp. 605–614. DOI: 10.1088/0004-637X/725/1/605.
- Sales, D. A., M. G. Pastoriza, R. Riffel, C. Winge, A. Rodríguez-Ardila, e A. C. Carciofi (2011). “The Compton-thick Seyfert 2 Nucleus of NGC 3281: Torus Constraints from the 9.7 μm Silicate Absorption”. Em: *The Astrophysical Journal* 738, 109, p. 109. DOI: 10.1088/0004-637X/738/1/109.
- Sales, D. A., M. G. Pastoriza, R. Riffel, e C. Winge (2013). “Polycyclic aromatic hydrocarbon in the central region of the Seyfert 2 galaxy NGC 1808”. Em: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 429.3, pp. 2634–2642. DOI: 10.1093/mnras/sts542.
- Sales, D. A., A. Robinson, D. J. Axon, J. Gallimore, P. Kharb, R. L. Curran, C. O’Dea, S. Baum, M. Elitzur, e R. Mittal (2015). “An Embedded Active Nucleus in the OH Megamaser Galaxy IRAS16399-0937”. Em: *The Astrophysical Journal* 799.1, 25, p. 25. DOI: 10.1088/0004-637X/799/1/25.
- Salim, S. e D. Narayanan (2020). “The dust attenuation law in galaxies”. Em: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 58.1, pp. 529–575.

- Shannon, M., D. Stock, e E Peeters (2016). “Interpreting the subtle spectral variations of the 11.2 and 12.7 μm polycyclic aromatic hydrocarbon bands”. Em: *The Astrophysical Journal* 824.2, p. 111.
- Smith, J.-D. T., B. Draine, D. A. Dale, J Moustakas, R. Kennicutt Jr, G Helou, L Armus, H Roussel, K Sheth, G. Bendo, *et al.* (2007). “The mid-infrared spectrum of star-forming galaxies: global properties of polycyclic aromatic hydrocarbon emission”. Em: *The Astrophysical Journal* 656.2, p. 770.
- Spoon, H. W. W., A. Hernán-Caballero, D. Rupke, L. B. F. M. Waters, V. Lebouteiller, A. G. G. M. Tielens, T. Loredó, Y. Su, e V. Viola (2022). “The Infrared Database of Extragalactic Observables from Spitzer. II. The Database and Diagnostic Power of Crystalline Silicate Features in Galaxy Spectra”. Em: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 259.2, 37, p. 37. DOI: 10.3847/1538-4365/ac4989.
- Werner, M. W., T. Roellig, F. Low, G. H. Rieke, M Rieke, W. Hoffmann, E Young, J. Houck, B Brandl, G. Fazio, *et al.* (2004). “The Spitzer space telescope mission”. Em: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 154.1, p. 1.