

Estudo do gás difuso ionizado em galáxias edge-on

Janayna de Souza Mendes e Natalia Vale Asari

Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo

Um dos principais componentes de uma galáxia é o gás, que pode ser encontrado em diferentes densidades e ionizado por diferentes fontes. O gás difuso ionizado (DIG) extraplanar, aquele com menor densidade localizado fora do plano, ainda não tem suas principais fontes de ionização bem compreendidas, sendo este o objetivo deste estudo. Utilizando dados de espectroscopia de campo integral de oito galáxias vistas de lado obtidos com o instrumento *Multi-Unit Spectroscopic Explorer* no *Very Large Telescope* (MUSE/VLT), analisamos o comportamento das razões de linhas de emissão em função da distância z ao plano galáctico. Nosso objetivo é investigar duas principais fontes de ionização do DIG extraplanar: escape de radiação proveniente de regiões com formação estelar, e estrelas quentes evoluídas de baixa massa (HOLMES, do inglês *Hot Low-Mass Evolved Stars*). Dentre a nossa amostra, fizemos uma análise preliminar do DIG extraplanar da galáxia ESO157-49. Os valores de largura equivalente de $H\alpha$ deste objeto caem com a distância ao plano, indicando que o escape de fótons tem um papel menor nessa região. Além disso, razões de linhas como $[N II]/H\alpha$ e $[S II]/H\alpha$ aumentam para grandes alturas, e se aliadas a elevados valores de $[O III]/H\beta$, sugere a existência de fontes ionizantes mais duras tais como as HOLMES. Para quantificar a contribuição de cada uma das fontes ionizantes propostas, compararemos nossas medidas observacionais de linhas de emissão com modelos teóricos de fotoionização.

Abstract

One of the main components of a galaxy is gas, which can be found in different densities and ionized by different sources. The extraplanar diffuse ionized gas (DIG), the one with the lowest density located outside the plane, does not yet have its main sources of ionization well understood, which is the objective of this study. Using full-field spectroscopy data from eight edge-on galaxies obtained with the *Multi-Unit Spectroscopic Explorer* instrument on the *Very Large Telescope* (MUSE/VLT), we analyze the behavior of emission line ratios in function of the distance z to the galactic plane. Our objective is to investigate two main sources of ionization in the extraplanar DIG: escaping radiation from regions with star formation, and hot low-mass evolved stars (HOLMES). Among our sample, we carried out a preliminary analysis of the extraplanar DIG of the galaxy ESO157-49. The $H\alpha$ equivalent width values of this object fall with distance from the plane, indicating that photon escape plays a smaller role in this region. Furthermore, line ratios such as $[N II]/H\alpha$ and $[S II]/H\alpha$ increase to great heights, and if combined with high values of $[O III]/H\beta$, suggests the existence of harder ionizing sources such as HOLMES. To quantify the contribution of each of the proposed ionizing sources, we will compare our observational measurements of emission lines with theoretical models of photoionization.

Palavras-chave: astrofísica, fotoionização, gás difuso ionizado

Keywords: astrophysics, photoionization, diffuse ionized gas

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44959](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44959)

1 Introdução

Galáxias são corpos extensos e muito luminosos, formados essencialmente por gás, poeira e estrelas. De acordo com o esquema de Hubble [1,2] para classificação morfológica, podemos separá-las em três tipos: irregulares, elípticas e espirais. Estas últimas têm como principal característica a presença de braços espirais em seu disco, região esta que possui uma maior densidade de gás e poeira. Quando vistas de frente no céu (em inglês, *face-on*), como no desenho

esquemático inferior da Figura 1, podemos ver claramente a estrutura formada pelos braços espirais. No entanto, quando vemos tais objetos posicionados de lado (em inglês, *edge-on*), não conseguimos observar estas estruturas, mas destaca-se o seu extenso e fino disco, como visto no desenho superior da Figura 1. Assim, para analisarmos o comportamento de alguns parâmetros físicos com relação à distância ao disco, observamos galáxias espirais vistas de lado.

O principal componente do meio interestelar é o gás, composto predominantemente por hidrogênio

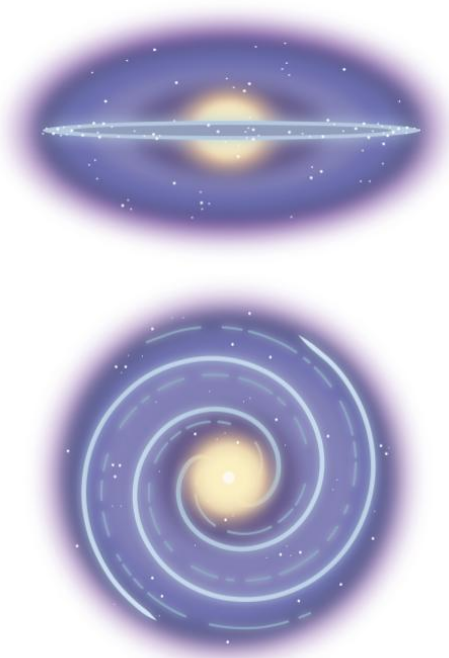


Figura 1: Esquema ilustrativo representando a forma de uma galáxia espiral quando vista no céu por diferentes linhas de visada: De cima para baixo, temos a galáxia espiral vista de lado (em inglês *edge-on*) e de frente (em inglês *face-on*), respectivamente. Em amarelo temos a região do bojo, em azul claro, estrutura do disco (acima) e dos braços espirais (abaixo), e em roxo, do halo da galáxia. Imagens: NASA [3] [4]

(aproximadamente 91%), hélio (9%) e demais elementos (0.1%) [5], e pode ser encontrado em diferentes densidades e temperaturas ao longo da galáxia. Considerando especialmente o gás morno ionizado, podemos dividi-lo em duas principais fases de diferentes densidades: regiões de formação estelar, intituladas de regiões H II, que estão localizadas no disco ao longo dos braços espirais – apresentam maior densidade e maior presença de poeira, contendo em seu interior principalmente estrelas jovens; regiões menos densas, intituladas de gás difuso ionizado (DIG, do inglês *diffuse ionized gas*), que não estão restritas ao disco – podem ser encontradas entre os braços espirais (e.g. Zurita et al. [6]) ou na região extraplanar [7], e são permeadas por estrelas mais velhas. Na Figura 2, temos uma analogia entre dois tipos de nuvens da atmosfera terrestre com diferentes densidades (cumulus e cirrus) e as regiões H II e de DIG presentes na galáxia NGC1566.

Para entender a diferença entre estrelas jovens e velhas na ionização do meio interestelar, é necessário compreender como algumas propriedades variam

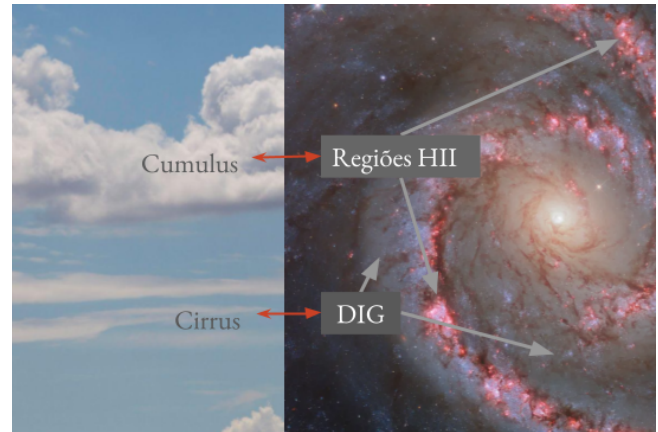


Figura 2: Analogia entre regiões de maior e menor densidade em uma galáxia (regiões H II e DIG, respectivamente) com nuvens da atmosfera terrestre (cumulus e cirrus, respectivamente). Imagens: Freepik.com [8] (à esquerda), ESA/Hubble & NASA, D. Calzetti, LEGUS team, R. Chandar [9] (à direita).

em diferentes estágios da evolução de uma estrela, desde o momento em que esta é formada até a sua morte. Assim, dada as condições iniciais necessárias, a partir de nuvens densas e frias de gás e poeira formam-se o que conhecemos como aglomerados de estrelas, devido ao efeito da atração gravitacional. Nestes aglomerados, estrelas de mesma composição química mas com diferentes massas iniciais são formadas, sendo este último parâmetro o que ditará como será a evolução de cada uma delas. Isto porque algumas propriedades como temperatura e luminosidade estão estritamente relacionadas com sua massa inicial e o estágio evolutivo em que se encontra. Estrelas que nasceram de uma mesma nuvem de gás e ainda estão no início de suas vidas vão pertencer ao grupo da sequência principal, em que permanecerão por um longo período de tempo. Em especial, as estrelas mais quentes e luminosas pertencentes a esse grupo, chamadas de estrelas tipo OB, se formam em menor quantidade e são também as mais massivas, deixando este estágio mais rapidamente. Já estrelas de baixa massa, quando evoluem e caminham para seus estágios finais, se tornam nebulosas planetárias, para, enfim, se tornarem anãs brancas. Objetos que se encontram nesses últimos estágios são denominadas HOLMES (do inglês *HOt Low-Mass Evolved Stars*) [10] [11]: são mais quentes que as estrelas OB, sendo assim responsáveis pela emissão de fótons muito energéticos, e são muito abundantes no Universo. Também são encontradas fora das regiões H II, povoando a região extraplanar das galáxias, onde não há presença significativa de estrelas jovens.

Sendo assim, uma das possíveis formas de se ionizar o meio interestelar é a partir da emissão de fótons ionizantes por estrelas. É sabido, por exemplo, que as estrelas OB são as principais responsáveis pela ionização das regiões H II, por estarem localizadas majoritariamente no interior dessas regiões. No entanto, para o DIG extraplanar não há ainda um consenso: Apesar de também ser considerada uma possível fonte ionizante o escape de fótons vindos do interior das regiões de formação estelar, somente isso não é suficiente para explicar o que é observado. Assim, nossa proposta é de que a fonte de ionização do DIG extraplanar seja uma combinação de escape de fótons emitidos por estrelas jovens e quentes juntamente da ionização por estrelas HOLMES. Para isso, vamos analisar uma amostra de galáxias espirais vistas de lado e comparar os dados observacionais com modelos de fotoionização desenvolvidos por Flores-Fajardo et al. [10], a fim de quantificar a contribuição dessas duas possíveis fontes ionizantes do DIG.

2 Processamento de dados

Para esta análise, contamos com oito galáxias observadas pelo instrumento MUSE (*Multi-Unit Spectroscopic Explorer*) [12] (Figura 3) no *Very Large Telescope*, um dos telescópios pertencentes ao ESO (*European Southern Observatory*). Obtidos por Comeron et al. [13], estes dados já se encontram públicos e reduzidos, e tratam-se de espectroscopia de campo integral, conhecidos como cubo de dados – para cada coordenada espacial do objeto temos um espectro na faixa da luz visível (4750 a 9300 Å), como ilustra a Figura 4.

O espectro observado é resultado da emissão de luz de tudo o que compõe as galáxias; no entanto, estamos interessadas apenas na contribuição do gás. Para isso, utilizamos o código STARLIGHT [15], um programa que utiliza do método Markov Chain Monte Carlo para realizar a síntese de população estelar, identificando assim a contribuição espectral proveniente das estrelas para que possamos, enfim, obter apenas a contribuição nebulosa. Na Figura 5, temos o espectro observado, sintético (após passar pelo STARLIGHT) e residual (diferença entre o observado e o sintético) em preto, amarelo e roxo, respectivamente, para o píxel (50, 50) da galáxia ESO469-15.

Com a síntese de população estelar, obtemos algumas informações que, juntamente com o espectro ob-

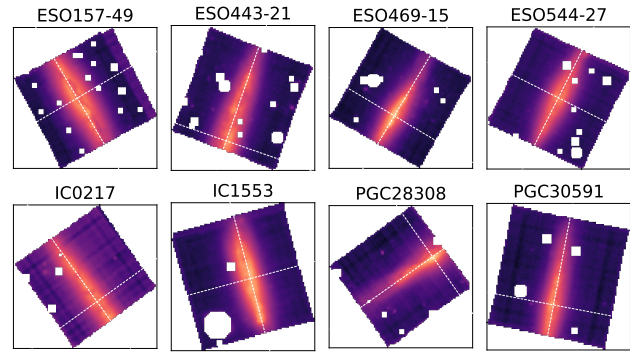


Figura 3: Mapa do fluxo no comprimento de onda 5635 Å de cada uma das galáxias da amostra. Os espaços em branco são objetos não pertencentes à amostra que foram mascarados, e as linhas tracejadas brancas indicam a posição dos eixos paralelo e perpendicular ao plano de cada galáxia.

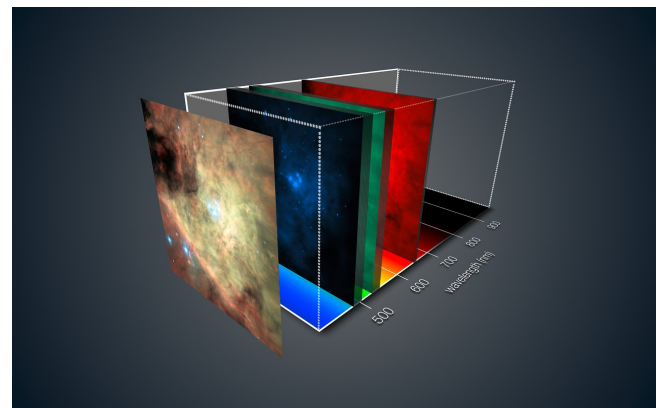


Figura 4: Representação esquemática de um cubo de dados do MUSE. No esquema, temos a imagem da nebulosa de Orion à esquerda, e sua decomposição em diferentes comprimentos de onda (em nm) à direita. Imagem: ESO/MUSE consortium/R. Bacon/L. Calçada [14]

servado, nos ajudam a identificar alguns objetos presentes no cubo não pertencentes às galáxias da amostra, tais como estrelas da Via Láctea e outras galáxias, sendo necessário mascará-los. Por fim, finalizamos a preparação dos dados para a análise realizando a medida do fluxo das linhas de emissão de nosso interesse com o programa DOBBY [16]. Os modelos de fotoionização utilizados foram feitos por Flores-Fajardo et al. [10], utilizando o código CLOUDY [17], e estão incluídos na *Mexican Million Models database* [18]. Os modelos utilizados foram feitos para a galáxia NGC891, sendo talvez necessário adaptá-los para a nossa amostra, e em sua elaboração foram consideradas duas fontes ionizantes: estrelas OB e HOLMES.

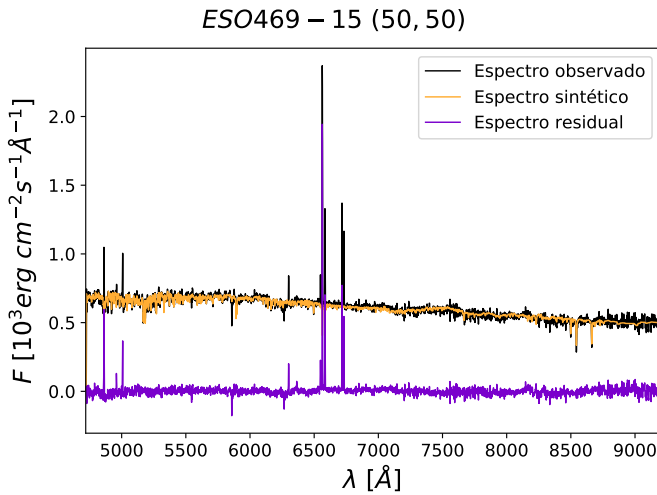


Figura 5: Fluxo F ($10^3 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$) por comprimento de onda λ (\AA). Em preto, amarelo e roxo temos, respectivamente, os espectros observado, sintético e residual para o píxel (50, 50) da galáxia ESO469-15.

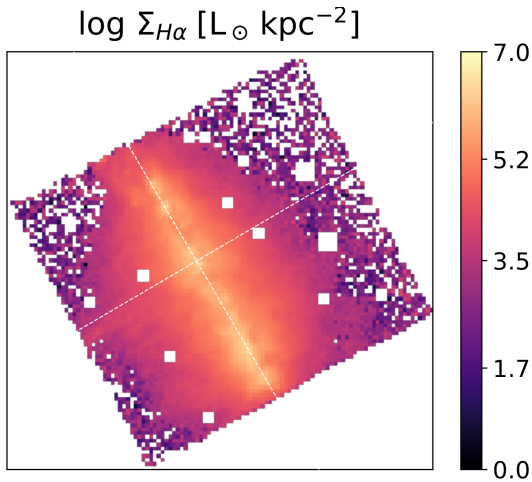


Figura 6: Mapa da densidade superficial de $\text{H}\alpha$ para a galáxia ESO157-49.

3 Resultados preliminares

A seguir, serão discutidos alguns dos resultados obtidos até o momento sobre o DIG extraplanar presente na galáxia ESO157-49. A detecção de fluxo da linha de emissão por recombinação $\text{H}\alpha$ é um dos possíveis indicativos de que há fotoionização daquele gás [5]. Assim, a Figura 6 mostra o mapa de densidade superficial da luminosidade em $\text{H}\alpha$, e nele vemos que a região do disco consiste na região de maior densidade de luminosidade, mas sem ter a emissão em $\text{H}\alpha$ restrita a esta região. Ou seja, regiões extraplanares apresentam densidade de luminosidade menor, indicando a ionização de um gás mais difuso distante do plano.

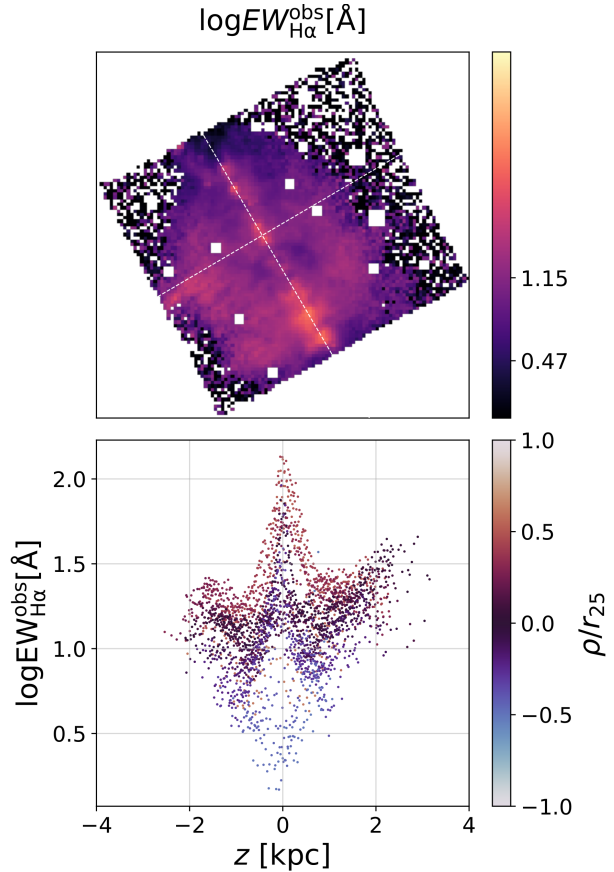


Figura 7: De cima para baixo, temos o mapa do logaritmo da largura equivalente de $\text{H}\alpha$ ($\text{EWH}\alpha$) e o gráfico do $\log \text{EWH}\alpha$ contra a distância ao plano z , respectivamente. Os pontos do painel inferior estão coloridos pela razão entre o raio da galáxia e o seu respectivo raio isofotal (ρ/r_{25}).

A linha $\text{H}\alpha$ também nos permite diagnosticar qual a principal fonte ionizante de uma região através da sua medida de largura equivalente ($\text{EWH}\alpha$). No entanto, é necessária cautela em utilizar este critério, pois este é válido apenas em caso de a fonte ionizante e a nebulosa ionizada estarem contidas na mesma região espacial observada. Segundo Lacerda et al. [19], regiões com $\text{EWH}\alpha < 3 \text{ \AA}$ têm as HOLMES como principal responsável pela sua ionização, enquanto que para valores maiores do que 14 \AA é identificada como principal fonte ionizante as estrelas OB. Na figura 7 temos o mapa e o gráfico do logaritmo de $\text{EWH}\alpha$ com relação à distância ao plano z , respectivamente, cujos pontos estão coloridos com relação à distância ao centro do plano ρ ponderada pelo raio isofotal r_{25} . Com base em ambos os painéis, podemos ver que a $\text{EWH}\alpha$ é maior que 3 \AA mesmo fora do plano, indicando, portanto, que a ionização da região extraplanar não é apenas ocasionada por HOLMES.

Para identificar variações na temperatura eletrô-

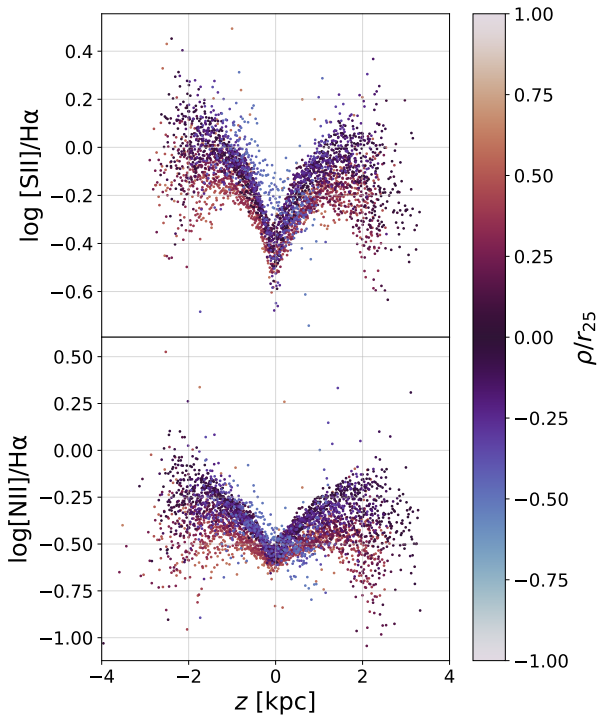


Figura 8: Gráficos do logaritmo do fluxo das razões de linhas de [S II]/H α (acima) e [N II]/H α (abaixo) contra a distância ao plano z . Os pontos em ambos os gráficos estão coloridos de acordo com a distância ao centro da galáxia ρ/r_{25} .

nica do gás podemos utilizar a razão dos fluxos entre linhas de excitação colisional e de recombinação, tais como [N II]/H α e [S II]/H α presentes na Figura 8. O aumento observado dessas razões com relação a z pode indicar um parâmetro de ionização mais baixo, ou, se associado juntamente a valores elevados de [O III]/H β , a necessidade de uma fonte ionizante mais energética que o escape de fótons provenientes das regiões H II para o DIG extraplanar. Dentre as possíveis fontes mais duras estão as HOLMES, propostas neste trabalho como possíveis fontes ionizantes da região difusa do gás.

Por fim, para que possamos quantificar a contribuição das HOLMES e estrelas OB como as principais fontes ionizantes do DIG extraplanar vamos comparar modelos de fotoionização com os dados observacionais, etapa esta que ainda se encontra em andamento. Na Figura 9 temos as razões de linhas [N II]/H α e [O III]/H β nos eixos x e y , respectivamente, com os pontos representando os valores observados e as linhas pretas, os modelos de fotoioni-

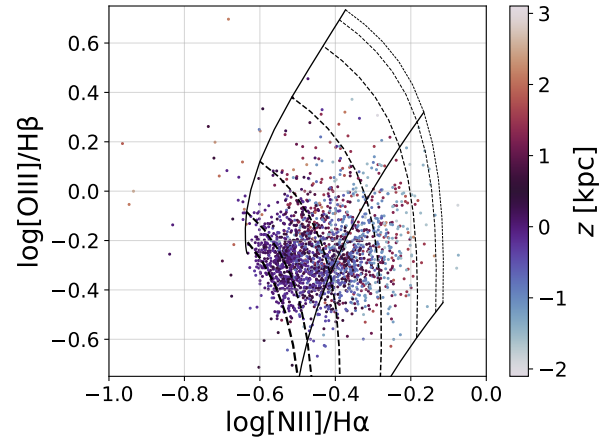


Figura 9: Diagrama de razões de linhas de [O III]/H β contra [N II]/H α . Os pontos são as medidas observacionais para a galáxia ESO157-49, cuja cor está relacionada com a distância ao plano z . As curvas pretas sólidas e tracejadas representam os modelos de fotoionização com o parâmetro de ionização $\log U$ e o fluxo de fótons superficial médio de fótons ionizantes emitidos por estrelas OB $\log \Phi_{OB}$ constantes, respectivamente. O aumento da espessura das linhas tracejadas representa o aumento de Φ_{OB} , indicando que as regiões com maior contribuição das estrelas OB coincide com a região próxima ao plano.

zação selecionados para $\log O/H = -3.3$. As linhas tracejadas e sólidas representam os modelos com valores constantes do fluxo superficial médio de fótons ionizantes emitidos por estrelas OB ($\log \Phi_{OB}$) e do parâmetro de ionização ($\log U$), respectivamente, e os pontos estão coloridos pela distância ao plano z . A espessura das linhas tracejadas aumenta para modelos com maiores valores de Φ_{OB} . Assim, vemos que os modelos cobrem quase toda a região de pontos observados, e também que os pontos mais distantes do plano apresentam menores valores de Φ_{OB} , indicando assim uma maior contribuição das HOLMES (Φ_{HOLMES}) nessa região. Quantificando, será possível verificar a parcela de contribuição das HOLMES com relação às estrelas OB (Φ_{HOLMES}/Φ_{OB}) para cada pixel, e conseqüentemente, se também existem tendências desse parâmetro com a altura extraplanar z .

4 Conclusão

Neste estudo pudemos identificar a presença do DIG na região extraplanar de galáxias espirais vistas de lado através da análise do objeto ESO157-49 observada com o VLT/MUSE. Com os valores da largura equivalente de H α para regiões fora do

plano, uma outra fonte de ionização além de HOLMES, como escape de fótons provenientes de regiões H II, tem papel relevante na ionização do DIG. No entanto, medidas de $[N II]/H\alpha$ e $[S II]/H\alpha$ para este objeto se mostram elevadas nas regiões mais distantes do plano, o que, se combinadas com valores elevados de $[O III]/H\beta$, podem indicar a existência de uma fonte de ionização mais dura, tais como as HOLMES. Os modelos com maior Φ_{OB} estão localizados na região de pontos de pequeno $|z|$, indicando possivelmente uma contribuição mais significativa das HOLMES para regiões mais distantes do plano. Para, enfim, quantificar a contribuição de cada uma dessas duas fontes, iremos comparar as medidas das razões de linha de cada ponto com os modelos de fotoionização.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). JSM agradece à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pela infraestrutura oferecida e também à organização do evento *As Astrocientistas - II Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres da Astrofísica, Gravitação e Cosmologia* pela oportunidade de apresentar o meu trabalho. NVA agradece o apoio da Royal Society e do Newton Fund através da Royal Society–Newton Advanced Fellowship (NAFR1\180403).

Sobre as autoras

Janayna de Souza Mendes é bacharela e mestra em física pela Universidade Federal de Santa Catarina, onde atualmente realiza seu doutorado (jana-mendesfsc@gmail.com). Ao longo de sua trajetória trabalhou com análise de cubos de dados em diferentes projetos. Ao fim de sua graduação iniciou o seu estudo sobre o gás difuso ionizado, o que levou ao tema de sua dissertação de mestrado. Ainda em andamento, trabalha neste projeto durante o início de seu doutorado.

Natalia Vale Asari é professora no Departamento de Física da UFSC desde 2014 e subcoordenadora do Programa de Pós-Graduação em Física da UFSC desde 2021. Recebeu o Prêmio Carolina Nemes da

Sociedade Brasileira de Física em 2019. Sua pesquisa, em colaboração com colegas na França, México, Polônia e Escócia, é voltada para populações estelares e abundâncias químicas de galáxias.

Referências

- [1] E. P. Hubble, *Extragalactic nebulae.*, *The Astrophysical Journal* **64**, 321 (1926).
- [2] G. de Vaucouleurs et al., *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (1991).
- [3] *Spiral Galaxy (Side View, Purple)*, <https://universe.nasa.gov/resources/198/spiral-galaxy-side-view-purple/>, accessed: 2023-11-19.
- [4] *Spiral Galaxy (Purple)*, <https://universe.nasa.gov/resources/200/spiral-galaxy-purple/>, accessed: 2023-11-19.
- [5] L. M. Haffner et al., *The warm ionized medium in spiral galaxies*, *Reviews of Modern Physics* **81**(3), 969 (2009). [ArXiv:0901.0941](https://arxiv.org/abs/0901.0941).
- [6] A. Zurita, M. Rozas e J. E. Beckman, *The origin of the ionization of the diffuse interstellar medium in spiral galaxies. I. Photometric measurements*, *Astronomy & Astrophysics* **363**, 9 (2000).
- [7] F. Hoyle e G. R. A. Ellis, *On the Existence of an Ionized Layer about the Galactic Plane*, *Australian Journal of Physics* **16**, 1 (1963).
- [8] *Nublado, paisagem no céu*, https://br.freepik.com/fotos-gratis/nublado-no-papel-de-parede-da-paisagem-do-ceu_19380998.htm, accessed: 2023-11-19.
- [9] *NGC1566 Hubble Tangos with a Dancer in Dorado*, <https://science.nasa.gov/missions/hubble/hubble-tangos-with-a-dancer-in-dorado/>, accessed: 2023-11-19.
- [10] N. Flores-Fajardo et al., *Ionization of the diffuse gas in galaxies: hot low-mass evolved stars at work*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **415**(3), 2182 (2011). [ArXiv:1104.0525](https://arxiv.org/abs/1104.0525).

- [11] G. Stasińska, M. Trevisan e N. Vale Asari, *Planetary Nebulae and the Ionization of the Interstellar Medium in Galaxies*, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **9**, 913485 (2022).
- [12] R. Bacon et al., *The MUSE second-generation VLT instrument*, in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III*, editado por I. S. McLean, S. K. Ramsay e H. Takami (2010), vol. 7735 de *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 773508. [ArXiv:2211.16795](https://arxiv.org/abs/2211.16795).
- [13] S. Comerón et al., *The kinematics of local thick discs do not support an accretion origin*, *Astronomy & Astrophysics* **623**, A89 (2019). [ArXiv:1901.10294](https://arxiv.org/abs/1901.10294).
- [14] *MUSE data-cube schematic representation*, <https://www.eso.org/public/blog/the-many-faces-of-galaxies/>, accessed: 2023-11-19.
- [15] R. Cid Fernandes et al., *Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **358**(2), 363 (2005). [ArXiv:astro-ph/0412481](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0412481).
- [16] T. Z. Flórido, *Análise de linhas de emissão em galáxias: O gás difuso ionizado nas galáxias do MaNGA*, Dissertação de Mestrado, UFSC (2018).
- [17] G. J. Ferland et al., *CLOUDY 90: Numerical Simulation of Plasmas and Their Spectra*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **110**(749), 761 (1998).
- [18] C. Morisset, *The Mexican Million Models database: a virtual observatory for gaseous nebulae*, *Mem. Societa Astronomica Italiana* **80**, 397 (2009). [ArXiv:0909.3313](https://arxiv.org/abs/0909.3313).
- [19] E. A. D. Lacerda et al., *Diffuse ionized gas in galaxies across the Hubble sequence at the CALIFA resolution*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **474**(3), 3727 (2018). [ArXiv:1711.07844](https://arxiv.org/abs/1711.07844).