

O gás difuso ionizado: modelos de fotoionização

M. E. Ramos Pedro e N. Vale Asari

Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo

Neste projeto, investigamos as altas taxas de ionização observadas no gás difuso de galáxias por meio de modelos de fotoionização. Para isso, construímos nove modelos simples com o código *Cloudy* que nos permitiram compreender os primeiros conceitos sobre ionização de nebulosas.

Abstract

In this project, we investigate the high ionization rates observed in the diffuse gas of galaxies using photoionization models. To do this, we built nine simple models with the *Cloudy* code that allowed us to understand the first concepts about nebula ionization.

Palavras-chave: astrofísica, fotoionização, gás difuso

Keywords: astrophysics, photoionization, diffuse gas

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44985](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44985)

1 Introdução

Em galáxias espirais, além das regiões H II [1], com temperaturas de 10,000 K e densidades de 1,0 a 10^2 partículas cm^{-3} , também existe um gás menos denso, o gás difuso ionizado (DIG, do inglês *diffuse ionized gas*). Localizado no halo e no meio interestelar, e distante das principais fontes de ionização de uma galáxia, como estrelas quentes e jovens, o DIG [2] tem temperatura próxima a 10,000 K e densidade de cerca de 0,1 partículas cm^{-3} .

A alta taxa de ionização neste gás instiga discussões acerca das fontes de ionização necessárias para a formação das linhas espectrais observadas no DIG [3]. Já existem alguns candidatos – choques, raios cósmicos ou emissões fotoelétricas por grãos –, mas que não são suficientes para solucionar este enigma. Por isso, suspeita-se da contribuição de uma classe de estrelas: as estrelas quentes de baixa massa [4], ou HOLMES (*Hot Low-Mass Evolved Stars*), localizadas nos discos, bojos e halos das galáxias, em regiões comuns à presença do DIG.

O DIG é uma peça fundamental para entender a composição química do gás das galáxias, e que, por sua vez, nos permite estudar a evolução dos elementos químicos em galáxias – provenientes da reciclagem de elementos químicos formados por nucleossíntese estelar. O estudo do DIG envolve técnicas de

simulação e observação, a partir da comparação de modelos com dados espectrais de galáxias. Nas simulações, utilizamos modelos de fotoionização, que permitem simular diversos parâmetros em uma nuvem de gás e poeira (nebulosa). Nesta etapa, o objetivo foi construir nove modelos de fotoionização simples para investigar a contribuição de diferentes estrelas, assim como as HOLMES, na ionização do DIG.

2 Desenvolvimento

Existem diferentes códigos para criar modelos de fotoionização. Neste trabalho, usamos o código de fotoionização *Cloudy* [5] e a biblioteca do Python *pyCloudy* [6]. Nos modelos aqui configurados, montamos nebulosas a partir de quatro informações de entrada:

1. Temperatura do corpo negro (T): temperatura da fonte ionizante no centro da nuvem (que arrancará elétrons dos átomos ou íons da nebulosa);
2. Luminosidade, ou taxa de emissão de fótons capazes de ionizar o hidrogênio ($q(\text{H})$);
3. Densidade do hidrogênio (H_{den}): soma das densidades do elemento em todas as suas formas: iônica (H^+), neutra (H^0) ou molecular (H_2);

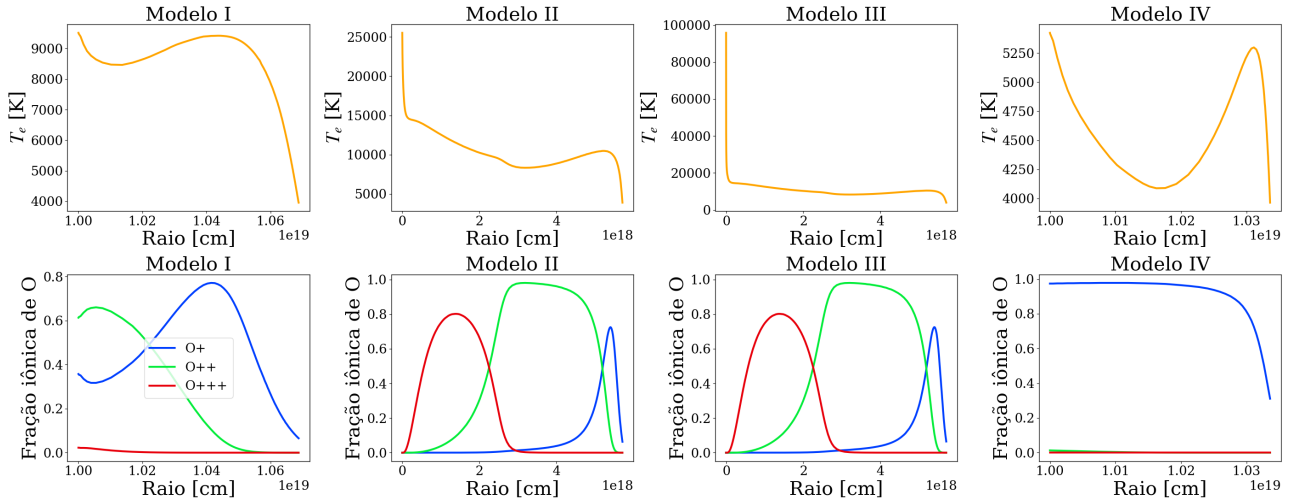


Figura 1: Temperatura eletrônica e fração iônica do oxigênio em função do raio, para quatro dos oito modelos de nebulosas. Os gráficos correspondem verticalmente aos mesmos modelos. As configurações dos modelos estão de acordo com o mostrado na Tabela 1.

4. Raio da nebulosa: deve possuir dimensão interna e externa (r_{out} e r_{in}), considerando uma geometria esférica.

Os dados de saída do *Cloudy* nos permitem entender o comportamento físico da nebulosa resultante.

3 Resultados

Criamos nove modelos de nebulosas, variando seu raio interno e as temperaturas de corpo negro de suas fontes ionizantes (representativas de temperaturas de estrelas OB, HOLMES, e de núcleos ativos de galáxias). A densidade (n_{H}) foi mantida constante e igual a 10^2 cm^{-3} , assim como $q(\text{H}) = 10^{48.30} \text{ fótons s}^{-1}$ e o raio externo da nebulosa. O valor de $q(\text{H})$ tende a variar com o tipo da estrela, mas foi mantido constante e igual ao valor esperado para uma estrela do tipo O com temperatura específica [7] de 30,231 K. Os valores de temperatura e raio interno variaram como mostrado na Tabela 1. O modelo VII foi removido dos gráficos por possuir uma única zona.

A partir dos parâmetros configurados, o *Cloudy* determina, por exemplo, a *fração de ionização*, as *linhas de emissão* de diferentes elementos químicos, e a *temperatura eletrônica*. Na análise dos modelos resultantes, iremos focar nessas três saídas mencionadas. Mais detalhes sobre os cálculos feitos pelo *Cloudy* podem ser encontrados no manual *Hazy 1* [8].

Tabela 1: Configurações dos modelos feitos.

Nome do modelo	Temperatura	Raio interno
Modelo I	100,000 K	10^{19} cm
Modelo II	100,000 K	10^{16} cm
Modelo III	100,000 K	10^{13} cm
Modelo IV	50,000 K	10^{19} cm
Modelo V	50,000 K	10^{16} cm
Modelo VI	50,000 K	10^{13} cm
Modelo VII	20,000 K	10^{19} cm
Modelo VIII	20,000 K	10^{16} cm
Modelo IX	20,000 K	10^{13} cm

3.1 Temperatura eletrônica

A temperatura eletrônica está ligada à energia cinética dos elétrons livres na nebulosa. O *Cloudy* leva em conta o balanço térmico da nebulosa e calcula a temperatura eletrônica em várias zonas dentro da nebulosa (cada zona representa um ponto nos gráficos das Figuras 1 e 2).

Mesmo para nebulosas ionizadas por uma fonte de mesma temperatura, suas temperaturas eletrônicas podem ser diferentes. Isso fica claro ao compararmos os modelos I e II, cuja única diferença é o menor raio interno da nebulosa no modelo II (o que implica que a nebulosa está mais próxima da fonte ionizante). As temperaturas eletrônicas em I são menores que as em II, girando em torno de 7,500 K e 12,000 K, respectivamente. Isto ocorre pois a temperatura eletrônica

não depende somente da densidade da nebulosa e da temperatura da fonte ionizante, mas também da densidade de fótons que chega na nebulosa (e, portanto, do raio interno). Futuramente, poderemos comparar a temperatura observada no DIG com as temperaturas dos modelos de fotoionização.

3.2 Fração iônica

A fração iônica é a razão de um determinado íon de um elemento químico pela sua abundância em todas as formas (molecular, neutra e ionizada). Ainda na Figura 1, mostramos as diferentes frações iônicas para o elemento oxigênio ao longo da nuvem. Nota-se que, para o modelo I, temos uma nuvem praticamente sem O^{+++} , o que indica que não há muitos fótons ionizantes duros. Esta nebulosa também tem menores temperaturas eletrônicas porque os fótons que arrancam os elétrons do hidrogênio são de menor energia e, portanto, resta menos energia cinética para os elétrons livres no plasma. Em contraste, temos o modelo II e que tem uma ionização mais alta, com a presença de O^{+++} , e maiores temperaturas eletrônicas, ambas consequências da maior taxa de fótons ionizantes mais energéticos atingindo a nebulosa.

3.3 Linhas de emissão

As linhas de emissão podem ser geradas pela liberação de energia em forma de um fóton na recombinação de um elétron com um íon do elemento, ou ainda pela desexcitação radiativa de elétrons entre os diferentes níveis eletrônicos. As razões de linha $[S II]\lambda 6716/H\alpha$ e $[N II]/H\alpha$, por exemplo, podem auxiliar na identificação do DIG, visto que as linhas produzidas por colisões excitacionais, como $[N II]$ e $[S II]\lambda 6716$, são mais altas em relação à linha de recombinação $H\alpha$. Portanto, essas razões de linhas são importantes para estudar a influência das HOLMES no DIG, visto que a energia cinética dos elétrons tende a ser mais alta em gases ionizados por este tipo de estrela [3].

O diagrama mostrado na Figura 2 é usado para identificar as diferentes fontes da ionização do gás, separando zonas dominadas por fontes mais duras, como HOLMES ou núcleos ativos, das de formação estelar dominadas fontes menos duras, como estrelas O ou B. A linha cinza é uma linha das linhas desenvolvidas com a proposta para separar formação estelar [9] de outras fontes. Nota-se que os modelos ionizados por fontes mais quentes são os que conseguem

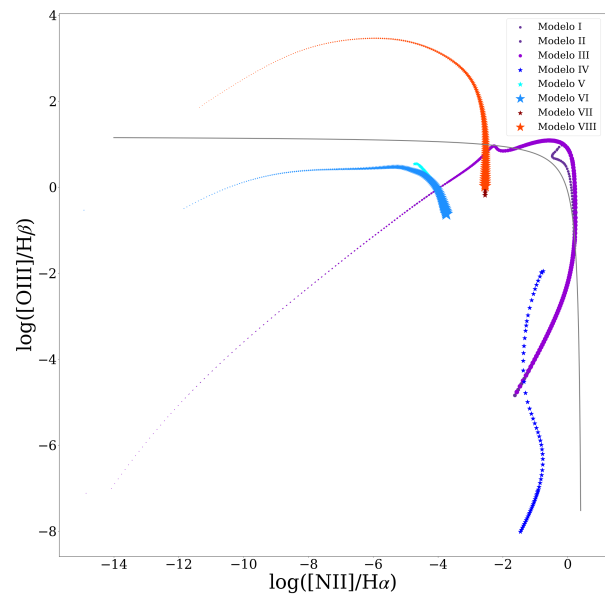


Figura 2: Razões de linhas de emissão $[O III]/H\beta$ em função de $[N II]/H\alpha$. A linha cinza separa a ionização do gás [9] por antigos modelos de atmosferas de estrelas OB de outras fontes ionizantes. Os símbolos de estrelas representam os modelos com temperaturas de estrelas O e B. Já os tamanhos dos pontos foram organizados de acordo com a localização do ponto no raio nebulosa; pontos menores estão localizadas a distâncias menores da fonte de ionização.

ultrapassar essa linha cinza e atingir maiores valores das razões das linhas $[O III]/H\beta$ e $[N II]/H\alpha$.

4 Conclusão

O gás difuso ionizado é um gás com baixa densidade, e alta temperatura e ionização. O objetivo final deste trabalho será quantificar a contribuição de estrelas quentes de baixa massa, as HOLMES [4], estrelas que estão localizadas nos discos e halos das galáxias.

Como um passo inicial para o estudo do DIG e dos modelos de fotoionização, construímos nove modelos com o código *Cloudy* [5]. Nesses modelos, verificamos que fontes mais duras produzem nebulosas com maiores razões de linhas de emissão $[O III]/H\beta$ em função de $[N II]/H\alpha$, e que nebulosas mais distantes da fonte ionizadora têm menores temperaturas eletrônicas. Durante as próximas etapas do projeto, aperfeiçoaremos os modelos para compará-los a dados observacionais de galáxias.

Sobre as autoras

Maria Eduarda Ramos Pedro é estudante de Física Bacharelado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (mariaramosrpp@gmail.com). É bolsista de iniciação científica na área de Astrofísica, com ênfase no estudo do gás extragaláctico. Também é participante do Mulheres na Ciência, um projeto de divulgação científica.

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] F. Galliano, *A nearby galaxy perspective on interstellar dust properties and their evolution* (2022). [ArXiv:2202.01868](https://arxiv.org/abs/2202.01868).
- [2] 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).
- [3] N. Vale Asari e G. Stasińska, *The importance of the diffuse ionized gas for interpreting galaxy spectra*, [*Proceedings of the International Astronomical Union* **15**\(S359\), 371–380 \(2019\)](#).
- [4] 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).
- [5] G. J. Ferland et al., *The 2017 Release Cloudy*, [*Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica* **53**, 385 \(2017\)](#). [ArXiv:1705.10877](https://arxiv.org/abs/1705.10877).
- [6] C. Morisset, *pyCloudy: Tools to manage astronomical Cloudy photoionization code*, [Astrophysics Source Code Library, record ascl:1304.020 \(2013\)](#). [ArXiv:1304.020](https://arxiv.org/abs/1304.020).
- [7] F. Martins, D. Schaerer e D. J. Hillier, *A new calibration of stellar parameters of Galactic O stars*, [*Astronomy & Astrophysics* **436**\(3\), 1049 \(2005\)](#). [ArXiv:astro-ph/0503346](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0503346).
- [8] G. Ferland, *Hazy a Brief Introduction to CLOUDY C17 1. Introduction and commands* 368 (2019).
- [9] L. J. Kewley et al., *Theoretical Modeling of Starburst Galaxies*, [*The Astrophysical Journal* **556**\(1\), 121 \(2001\)](#). [ArXiv:astro-ph/0106324](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0106324).