

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**Condições Físicas e Abundâncias Químicas em Nebulosas Planetárias: Diagnóstico Espectral com PyNeb**Stela Levi Schmeiske de Souza (IC), Oscar Cavichia de Moraes (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá**Palavras-chave:** Abundância. Emissão. Ionização. Gás. Temperatura.**Introdução**

Esta pesquisa tem como tema a determinação de abundâncias químicas em nebulosas planetárias, que constituem estruturas astrofísicas originadas a partir da evolução de estrelas com massas compreendidas entre 0,8 e 8 massas solares, sendo o estudo realizado por meio da utilização do pacote computacional PyNeb (LURIDIANA; MORISSET; SHAW, 2015), desenvolvido na linguagem Python. Os objetivos centrais deste trabalho consistem, primeiramente, na determinação das condições físicas de um conjunto de 22 objetos selecionados e, em seguida, no cálculo das abundâncias iônicas e elementares correspondentes a esses mesmos objetos. A relevância deste trabalho justifica-se pela aplicação de ferramentas computacionais precisas que permitem a análise espectroscópica detalhada e sistemática de nebulosas planetárias, sendo este um passo essencial para a compreensão aprofundada da evolução química no meio interestelar.

A metodologia adotada fundamentou-se na espectroscopia de emissão, com posterior análise de dados realizada de maneira automatizada, permitindo a execução de diagnósticos das NP. O procedimento computacional iniciou-se com dados fornecidos pelo orientador de observações passadas, foram então inseridos no pacote PyNeb, o qual possibilitou a execução dos diagnósticos de plasma, consistindo na determinação das temperaturas e densidades eletrônicas a partir de razões de linhas específicas previamente selecionadas para cada nebulosa. Por fim, com as condições físicas estabelecidas e validadas, o mesmo pacote foi empregado para o cálculo das abundâncias iônicas e elementares, por meio da aplicação dos fatores de correção de ionização (ICFs) adequados, garantindo, dessa forma, a consistência, a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos neste estudo.

Metodologia

O PyNeb é um pacote computacional desenvolvido em Python, especificamente voltado para a análise de espectros de nebulosas e regiões de gás ionizado. Ele fornece ferramentas para calcular propriedades físicas, como temperatura e densidade eletrônicas, a partir de razões de linhas de emissão, e também permite determinar abundâncias iônicas e elementares de diferentes espécies químicas. Baseado em modelos atômicos detalhados e em dados experimentais de transições eletrônicas, o PyNeb possibilita análises precisas e consistentes de nebulosas planetárias, integrando funções de diagnóstico físico e correções de ionização em um ambiente programático flexível e altamente customizável. Com base nesse pacote, a metodologia adotada nesta pesquisa fundamenta-se na análise minuciosa de linhas de emissão espectral, visando à determinação das condições físicas e das abundâncias químicas em nebulosas planetárias. O conjunto de dados considerado, que compreende 57 exposições espectrais de 22 nebulosas planetárias (NPs) distintas, foi obtido no Observatório Pico dos Dias (LNA/MCTI) entre os anos de 2006 e 2007. As observações foram realizadas com o espectrógrafo Cassegrain e uma rede de 300 l/mm, o que resultou em uma dispersão média de 0.2 nm/pixel, assegurando assim uma representatividade adequada das diversas características espectrais e das variações entre os objetos estudados. (MORAES, 2008). Para promover a padronização e a consistência das medidas obtidas, as intensidades dos fluxos foram normalizadas em relação à linha de recombinação H β (λ 4861 Å).

Com o intuito de eliminar efeitos introduzidos pela extinção interestelar e assegurar que os fluxos analisados refletissem de forma correta as condições físicas dos astros, foi aplicada a correção interestelar utilizando a razão H α /H β , associada à lei de extinção proposta por Fitzpatrick (1999). Essa etapa preparatória é fundamental, pois garante que os fluxos empregados nos cálculos subsequentes estejam adequadamente prontos, permitindo a obtenção de resultados robustos e confiáveis.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Na etapa seguinte, procedeu-se ao cálculo detalhado das condições físicas do plasma, utilizando diagnósticos clássicos baseados em razões de linhas de emissão, de forma a determinar simultaneamente a temperatura eletrônica e a densidade eletrônica. Para a zona de baixa ionização, a análise priorizou as razões envolvendo os íons [N II] e [S II], enquanto, para as zonas de média ionização, foram utilizadas as razões associadas aos íons [O III] e [Ar IV], permitindo uma caracterização segmentada e precisa das distintas regiões de ionização presentes em cada nebulosa. As funções de diagnóstico disponibilizadas pelo PyNeb foram aplicadas individualmente a cada objeto, possibilitando a atribuição de valores específicos para as zonas de ionização baixa, média (não havia linhas que fornecessem dados para a zona de alta ionização).

Quando os diagnósticos físicos não puderam ser calculados devido à ausência de linhas espectrais ou à presença de fluxos nulos, foram adotados valores padrão para as razões espectrais, garantindo, assim, pelo menos uma estimativa inicial para cada zona de ionização e permitindo a continuidade dos cálculos subsequentes de forma consistente e confiável. Após a definição das condições físicas do plasma em cada região, procedeu-se ao cálculo das abundâncias iônicas, definindo os íons no PyNeb correspondentes a cada espécie química relevante, juntamente com a aplicação das funções internas do pacote, que relacionam as emissividades lineares à razão entre a linha analisada e a linha de referência H β .

A classificação de cada elemento em zonas de baixa ou média ionização seguiu rigorosamente os critérios estabelecidos por Shaw & Dufour (1995), considerando os diagnósticos específicos obtidos para cada zona e para cada exposição individual. A abundância de cada íon foi inicialmente determinada a partir da análise das linhas espectrais correspondentes, assegurando que cada transição disponível contribuisse de forma ponderada para a estimativa final. Em seguida, realizou-se o cálculo de uma média ponderada, utilizando os fluxos das linhas correspondentes como pesos, o que permitiu uma quantificação mais precisa e robusta da abundância iônica, minimizando o impacto de linhas com menor intensidade ou maior incerteza experimental.

Posteriormente, foram obtidos, a partir do próprio acervo do PyNeb, os fatores de correção de ionização (ICFs) para cada elemento, assim como as fórmulas necessárias para o cálculo das abundâncias

elementares a partir dos valores previamente obtidos das abundâncias iônicas. Cada equação foi cuidadosamente selecionada com base na literatura especializada (fornecida pelo próprio Pyneb), combinada com os dados de fluxos medidos, garantindo que mesmo nos casos em que algum objeto não apresentasse a abundância de determinado íon, fosse possível estimar de forma confiável a abundância total do elemento.

Por fim, foram calculadas as médias e o desvio padrão das abundâncias iônicas e elementais de cada objeto, considerando todas as exposições correspondentes, de modo a fornecer valores representativos e estatisticamente consistentes para cada nebulosa planetária analisada, permitindo assim uma avaliação completa e rigorosa da composição química e das condições físicas de cada região estudada.

Resultados e discussão

Na espectroscopia de nebulosas tradicional, as propriedades físicas do plasma nebuloso, como temperatura e densidade eletrônica, são determinadas analisando as linhas de emissão e usando as razões de fluxo das linhas espectrais para diagnósticos (OSTERBROCK; FERLAND, 2006). Ao aplicar essa técnica aos dados analisados, as temperaturas eletrônicas médias encontradas foram totalmente compatíveis com os valores esperados na literatura para áreas de baixa e média ionização.

Foram elaborados gráficos com o objetivo de proporcionar uma visualização clara e didática do diagnóstico físico de cada exposição, permitindo a inspeção detalhada das relações entre as intensidades das linhas de emissão e as propriedades do gás, além de facilitar a identificação de eventuais padrões ou variações significativas nos dados obtidos. Como ilustração, a Figura 1 apresenta a variação das densidades e temperaturas obtidas pelos respectivos íons mostrando o comportamento do gás nestas condições.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Diagrama de Diagnóstico - Vd15_1

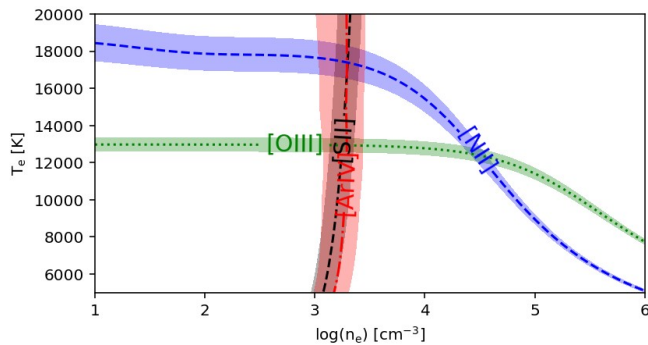


Figura 1 - Diagrama de diagnóstico para uma das exposições de Vd 1-5. A partir da interseção das curvas de diagnóstico para diferentes íons, determinamos a temperatura e a densidade eletrônica do objeto.

Embora a determinação exata das abundâncias elementares ainda esteja em andamento, os resultados iniciais apontam que a heterogeneidade física do gás é um fator essencial, afetando diretamente a interpretação da composição química, conforme apontado por Delgado-Inglada, Morisset e Stasińska em 2014. A pesquisa enfatiza a forte relação entre as condições físicas não homogêneas do plasma e sua composição química, ressaltando que a continuidade do estudo permitirá confirmar quantitativamente essas observações.

Conclusão

O presente estudo buscou identificar as características físicas e os componentes químicos de uma amostra de nebulosas, utilizando a análise das intensidades de suas linhas espectrais (KWOK, 2007). O principal achado foi que a grande variação nos valores de densidade eletrônica, calculados a partir das informações espectrais, aponta para uma falta de uniformidade no plasma nebuloso. Mesmo que as temperaturas eletrônicas se alinhem com os valores encontrados na literatura, essa diversidade física, provavelmente com mudanças significativas na densidade, mostrou ser o principal fator que afeta todos os resultados seguintes.

Uma consequência imediata dessa falta de homogeneidade física é a sua influência nos padrões de abundância química estimados a partir da emissão. Embora a determinação exata das abundâncias dos

elementos ainda esteja em andamento, a variabilidade nos parâmetros físicos do gás é um fator crucial, que afeta diretamente a interpretação da composição química (GARNETT, 1992). A pesquisa destaca que as relações entre as condições físicas e a composição química precisam ser levadas em conta, e a continuidade do estudo permitirá a confirmação quantitativa dessas observações.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me dar força e discernimento ao longo desta jornada. Expresso minha mais profunda gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Oscar Cavichia de Moraes, por sua orientação precisa, pelo conhecimento compartilhado e pela paciência dedicada a este trabalho. Sua contribuição foi fundamental para o meu desenvolvimento acadêmico e para a conclusão desta pesquisa.

Agradeço à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pela infraestrutura e pelo ambiente de aprendizado proporcionado, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo fomento à pesquisa através da bolsa de Iniciação Científica que me foi concedida.

Por fim, dedico um agradecimento especial à minha mãe e à minha avó, pelo amor, apoio incondicional e incentivo em todos os momentos. Aos meus amigos, pela companhia, pelas palavras de estímulo e pela leveza trazida aos dias de estudo intenso.

Referências

- KWOK, S. *Origin and evolution of planetary nebulae*. [s.l.] Cambridge Univ Press, 2007.
- MORAES, O. *Abundâncias químicas de nebulosas planetárias na conexão bojo-disco*. Dissertação—Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas: [s.n.], 2006.
- GARNETT, D. R. *Electron Temperature Variations and the Measurement of Nebular Abundances*. *Astron. J.*, v. 103 (4), abr. 1992.
- DELGADO-INGLADA, G.; MORISSET, C.; STASIŃSKA, G. Ionisation correction factors for planetary nebulae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 440, n. 1, p. 536–556,

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

2014.

SHAW, R. A. A spectroscopic atlas of planetary nebulae. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, v. 107, n. 715, p. 896-911, set. 1995.

OSTERBROCK, D. E.; FERLAND, G. J. Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei. 2nd ed. Sausalito, CA: University Science Books, 2006.

LURIDIANA, V.; MORISSET, C.; SHAW, R. A. PyNeb: a new tool for analyzing emission lines: I. Code description and validation of results. Astronomy & Astrophysics, v. 573, A42, p. 1-14, 2015.