
ATENUAÇÃO POR POEIRA EM GALÁXIAS

AS ASTROCIENTISTAS

 **Natalia Vale Asari**

Departamento de Física–CFM, Universidade Federal de Santa Catarina,
Florianópolis, 88040-900, Brasil,
natalia@astro.ufsc.br

RESUMO

O espectro de galáxias com formação estelar está repleto de linhas de emissão produzidas por transições eletrônicas em suas nebulosas ionizadas. A linha espectral de $H\alpha$, do hidrogênio, é especialmente importante, porque está ligada à taxa com que estrelas estão se formando em uma dada galáxia. A poeira no meio interestelar de cada galáxia, no entanto, absorve e espalha parte dos fótons que deveriam chegar aos nossos telescópios. Fótons de menor comprimento de onda são mais facilmente afetados; por isso, o decremento de Balmer $H\alpha/H\beta$ é usado para corrigir a luminosidade de $H\alpha$ pela atenuação por poeira. No entanto, uma correção feita com $H\alpha/H\beta$ medida em um espectro global resulta em valores sistematicamente menores da luminosidade de $H\alpha$ do que uma correção feita ponto a ponto. Mostramos esse fato analiticamente, e quantificamos empiricamente o efeito a partir de cubos de dados espectrais do Mapping Nearby Galaxies at APO (MaNGA) e do Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE). Concluímos que o efeito sistemático é maior para galáxias com maior contribuição de gás difuso ionizado.

Palavras-chave evolução de galáxias, meio interestelar, atenuação por poeira

1 Introdução

Grande parte da matéria bariônica de uma galáxia está em seu gás e em suas estrelas. O gás pode estar disperso em grandes nebulosas difusas, ou mais condensado em nebulosas um pouco mais frias e densas. Quando o gás esfria o suficiente, a gravitação pode vencer a agitação térmica e resultar em estrelas de diferentes tamanhos. Ao longo das suas vidas, estrelas criam novos elementos químicos por fusão nuclear, cuja energia as sustenta contra o colapso gravitacional. Quando não há mais elementos leves em seu núcleo, a estrela chega ao fim da sua vida – as de maior massa explodindo em supernovas – e pode devolver vários dos seus elementos químicos para o meio interestelar da galáxia. O gás enriquecido pode formar então novas estrelas na galáxia. O ciclo de vida e morte de estrelas tem uma ligação fundamental com o enriquecimento químico de uma galáxia.

A poeira interestelar pode parecer um detalhe nesse ciclo grandioso de gás e estrelas, mas ela também tem um papel fundamental. Primeiro, ela é formada a partir desses elementos químicos mais pesados oriundos da nucleossíntese estelar: silício, carbono, ferro, oxigênio, magnésio, etc.; parte é formada em estrelas e parte no meio interestelar [1]. Isso implica que a composição química e os tipos de grãos de poeira dependem da evolução da galáxia. Além disso, a poeira tem um papel fundamental no resfriamento das nuvens de gás, dissipando energia e auxiliando na formação de novas estrelas. Portanto, a poeira está intimamente ligada com a história de formação de estrelas e a evolução química de uma galáxia.

Além da importância para a evolução de galáxias, a poeira também reprocessa grande parte da luz ali emitida. Apesar de somente 10^{-6} – 10^{-5} da matéria do Universo estar em grãos de poeira [2], $\sim 50\%$ da luz das estrelas é absorvida por poeira e reemitida como radiação térmica [3]. Esse é o efeito que vamos discutir nesse trabalho: como corrigir as observações da luz de uma galáxia pelo efeito da poeira? Este trabalho revisa os principais resultados de um artigo recente do meu grupo [4]. Explica-se como se corrigem luminosidades de linhas de emissão pela atenuação por poeira em espectros globais de galáxias. Mostra-se, tanto de forma analítica quanto empírica, a correção feita em espectros globais na maioria dos casos subestima o efeito da atenuação por poeira.

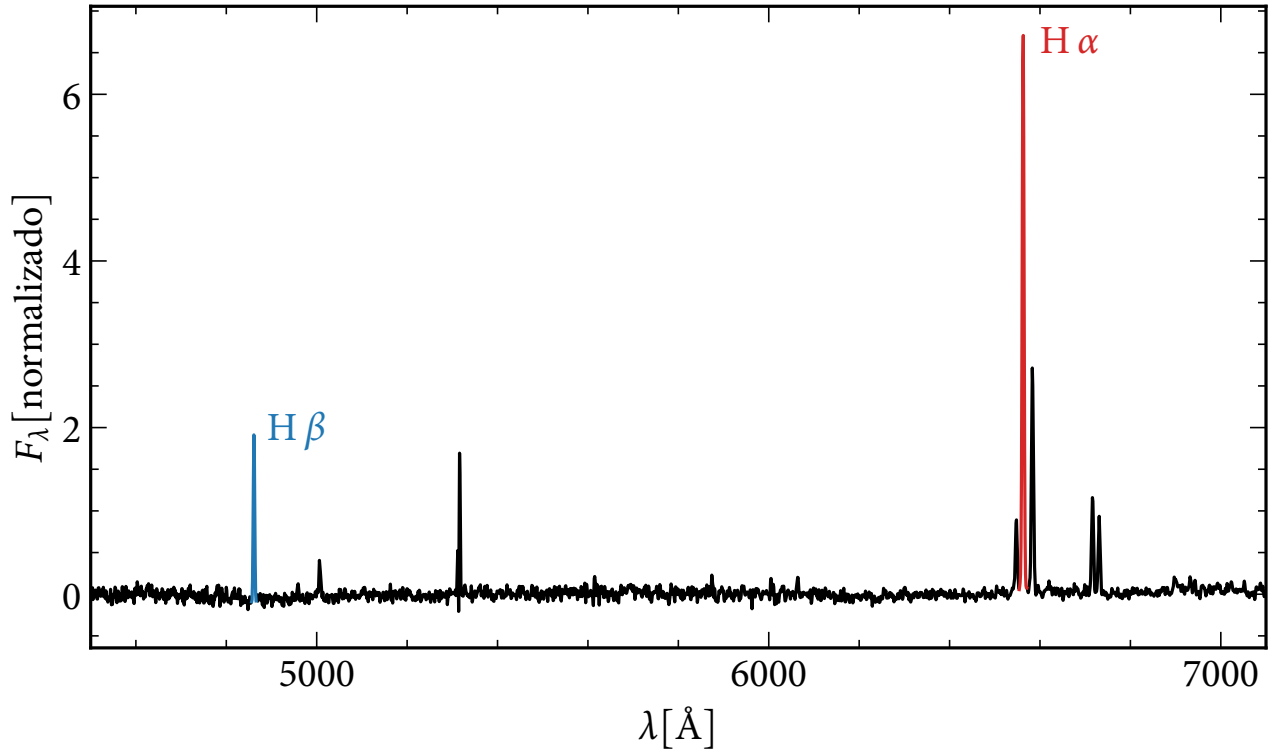


Figura 1: Exemplo de espectro puramente nebular. Em destaque estão as linhas de $H\beta$ e $H\alpha$, que são produzidas pela transição eletrônica em um átomo de hidrogênio quando um elétron cai do quarto para o segundo, e do terceiro para o segundo nível eletrônico, respectivamente. (Espectro central da galáxia 8247-12704 observada no levantamento MaNGA, obtido pela subtração do espectro observado e do contínuo estelar modelado.)

2 A microfísica das nebulosas

Vamos nos concentrar no efeito da poeira na luminosidade de $H\alpha$, que é usada como indicador de formação estelar recente em galáxias [5]. $H\alpha$ é uma linha espectral emitida por uma nebulosa ionizada. Um exemplo de nebulosa ionizada são regiões $H\text{II}$, assim chamadas porque quase todo o hidrogênio está ionizado (em notação espectral, I indica o elemento neutro, II o elemento uma vez ionizado, e assim por diante). Regiões $H\text{II}$ são regiões de formação estelar recente; estrelas O e B, de alta massa e vida curta, emitem muitos fótons ionizantes que arrancam elétrons da nuvem de gás ao seu redor.

Em uma nebulosa em equilíbrio, a taxa com que os fótons ionizantes arrancam elétrons de hidrogênios neutros é igual à taxa com que os íons H^+ do gás se recombinam com os elétrons livres. Os elétrons livres cascateiam pelos níveis eletrônicos do hidrogênio, e podem, por exemplo, ir parar na quarta camada eletrônica, depois na segunda, e depois no nível fundamental. A cada queda para uma camada inferior, o elétron perde energia, emitindo um fóton de energia igual à diferença de energia entre o nível eletrônico superior e o inferior. Como a energia de um fóton e o seu comprimento de onda são inversamente proporcionais, as transições entre níveis eletrônicos devido à recombinação de elétrons com H^+ chegam até nós como emissões brilhantes em comprimentos de onda específicos.

A Figura 1 mostra um exemplo de espectro de emissão nebular. Destaco as linhas $H\alpha$ e $H\beta$, que correspondem respectivamente à transições do nível 3 e 4 para o nível 2 do hidrogênio. A proporção entre as luminosidades de $H\alpha$ e $H\beta$ depende muito fracamente da temperatura e da densidade eletrônica das nebulosas astrofísicas, e é dada basicamente pelas probabilidades de transições eletrônicas calculadas pela mecânica quântica. Portanto, espera-se que a razão $H\alpha/H\beta$, conhecida como decremento de Balmer, esteja aproximadamente entre 2,7 e 3,1 para nebulosas astrofísicas [6].

No espectro da Figura 1, podemos estimar a olho que $H\alpha/H\beta \sim 4$ (com uma medida mais cuidadosa, acha-se $H\alpha/H\beta = 4,36$). Essa aparente contradição entre as medidas e a previsão da mecânica quântica é causada pela atenuação por poeira. Uma característica importante do espalhamento e absorção de luz pelos grãos de poeira é que fótons de menores comprimentos de

onda são mais eficientemente afetados. Como $H\beta$ é um fóton mais azul do que $H\alpha$, ele será mais efetivamente espalhado e absorvido pela poeira, e, portanto, a razão $H\alpha/H\beta$ observada será em geral ≥ 3 . Quanto maior ela for, maior o efeito da atenuação por poeira. O decremento de Balmer $H\alpha/H\beta$, portanto, é frequentemente usado para corrigir as luminosidades das linhas emissão de nebulosas.

3 Atenuação por poeira no gás ionizado

Vamos formalizar a maneira de corrigir pela atenuação por poeira usando $H\alpha/H\beta$. Suponhamos que temos um único espectro de uma nebulosa, e que medimos as luminosidades de $H\alpha$ e $H\beta$ (L_α^{obs} e L_β^{obs}). Queremos obter as luminosidades intrínsecas L_α e L_β na ausência de atenuação por poeira.

No nosso modelo simples, a poeira atenua a luz por um fator $e^{-\tau_\lambda}$, onde τ_λ é a profundidade óptica em um dado comprimento de onda λ . Podemos reescrever τ_λ como a multiplicação entre um fator de escala e um termo que descreve a dependência com λ :

$$e^{-\tau_\lambda} = e^{-\tau_\alpha q_\lambda}, \quad (1)$$

onde τ_α é a atenuação por poeira em $H\alpha$, e q_λ é a forma da curva de atenuação por poeira, definida de tal forma que $q = 1$ em $\lambda = 6563 \text{ \AA}$, que é comprimento de onda de um fóton $H\alpha$. A forma de q_λ é dada por leis empíricas, como a lei de extinção de Cardelli et al. [7] e a lei de atenuação de Calzetti [8], que são adequadas para diferentes tipos de galáxias com diferentes geometrias [ver por exemplo 9].

Podemos escrever então a luminosidade de $H\alpha$ e de $H\beta$ observadas em termos das luminosidades intrínsecas,

$$L_\alpha^{\text{obs}} = L_\alpha e^{-\tau_\alpha}; \quad (2)$$

$$L_\beta^{\text{obs}} = L_\beta e^{-\tau_\alpha q}, \quad (3)$$

onde $q \equiv q_\beta$. Dividindo uma expressão pela outra e isolando τ_α ,

$$\tau_\alpha = -\frac{1}{1-q} \ln \frac{L_\alpha^{\text{obs}}/L_\beta^{\text{obs}}}{L_\alpha/L_\beta}. \quad (4)$$

Portanto, se escolhermos uma lei de atenuação por poeira adequada (q_λ), medirmos o decremento de Balmer observado ($L_\alpha^{\text{obs}}/L_\beta^{\text{obs}}$), e tomarmos um valor para L_α/L_β (por exemplo, 2,87, que é o valor para uma nebulosa de 10 000 K de baixa densidade e opticamente espessa para fótons Lyman; [6]), podemos inferir τ_α . Invertendo as eqs. (2) e (3), podemos então calcular as luminosidades intrínsecas de L_α , L_β , ou, com o valor de q_λ apropriado, para qualquer outra linha de emissão da nebulosa¹.

As expressões que escrevemos até agora descrevem a correção por poeira para uma única nebulosa. Em geral, quando obtemos um espectro integrado de uma galáxia, temos uma única medida global para $H\alpha$ e para $H\beta$, que é a soma das luminosidades atenuadas por poeira de todas as nebulosas da galáxia. A luminosidade de $H\alpha$ intrínseca para esse espectro global (G) é calculada, portanto, como

$$L_G = L_G^{\text{obs}} e^{+\tau_G}, \quad (5)$$

e a profundidade óptica efetiva global é

$$\tau_G = -\frac{1}{1-q} \ln \frac{L_{G,\alpha}^{\text{obs}}/L_{G,\beta}^{\text{obs}}}{L_\alpha/L_\beta}. \quad (6)$$

No entanto, se τ_α varia ponto a ponto, o decremento de Balmer observado será dominado pelas regiões menos atenuadas e mais brilhantes. Se temos uma observação de espectroscopia de campo integral (IFS, do inglês *integral field spectroscopy*), que obtém um espectro para cada ponto em uma galáxia, podemos corrigir a luminosidade de $H\alpha$ ponto a ponto:

$$L_{\text{IFS}} = \sum_{j=1}^N l_j = \sum_j l_j^{\text{obs}} e^{+\tau_j}, \quad (7)$$

onde τ_j é a profundidade óptica em $H\alpha$ para cada região j :

$$\tau_j = -\frac{1}{1-q_j} \ln \frac{l_{j,\alpha}^{\text{obs}}/l_{j,\beta}^{\text{obs}}}{L_\alpha/L_\beta}. \quad (8)$$

¹Neste link há um exemplo prático em python para corrigir linhas de emissão em nebulosas pela atenuação por poeira: https://github.com/nvasari/SIGNALS2020_dust

Definindo um peso em luminosidade para cada região j como

$$w_j \equiv \frac{l_{j,\alpha}^{\text{obs}}}{\sum_j l_{j,\alpha}^{\text{obs}}}, \quad (9)$$

e notando que

$$L_{G,\alpha}^{\text{obs}} = \sum_j l_{j,\alpha}^{\text{obs}}, \quad (10)$$

podemos mostrar então que

$$\frac{L_{\text{IFS}}}{L_G} = \frac{\sum_j w_j e^{+\tau_j}}{\left[\sum_j w_j e^{+\tau_j(1-q_j)} \right]^{1/(1-q)}}. \quad (11)$$

Supondo que $q_j = q$, isto é, que a lei de atenuação é mesma em qualquer ponto, chegamos a uma média ponderada elevada a uma potência tanto no numerador e quanto no denominador. Como detalhado no nosso trabalho [10], isso implica que

$$\frac{L_{\text{IFS}}}{L_G} \geq 1 \quad (12)$$

para valores típicos de q .

A nossa **previsão analítica**, portanto, é que $L_{\text{IFS}} \geq L_G$, isto é, que **a luminosidade obtida corrigindo a poeira ponto a ponto é sempre maior ou igual àquela corrigida em um espectro global**. Uma analogia ao resultado acima é a assimetria entre a média dos quocientes (similar a L_{IFS}) e o quociente das médias (similar a L_G) [como discute 11].

4 Cubos de dados de galáxias

Cubos de dados espectrais nos permitem verificar se a nossa previsão analítica de que $L_{\text{IFS}} \geq L_G$ confirma-se na natureza. As observações são feitas de modo que cada pixel da imagem contenha um espectro – por isso, chama-se cada elemento de spaxel (do inglês *spectral pixel*). Os dados que usamos aqui são do levantamento Mapping Nearby Galaxies at APO (MaNGA; [12]) e de NGC 628, uma galáxia próxima de tipo Sc, observada com o instrumento Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE; [13]) no Very Large Telescope. A Figura 2 mostra exemplos desses dados. A resolução espacial típica das galáxias do MaNGA é 1–2 kpc, e a amostragem espacial dos dados do MUSE para NGC 628 que usamos é de 36 pc.

Os detalhes da seleção da amostra e do processamento de dados estão no nosso artigo [10]. Resumidamente, selecionamos 156 galáxias com formação estelar com espectros de alta qualidade dentre as 4824 observações do MaNGA do 15º lançamento de dados do SDSS [14]. Os dados de NGC 628 são compostos por 12 cubos do MUSE cobrindo um campo de $1' \times 1'$. Para dar uma ideia do volume de dados, apenas para NGC 628 obtivemos 62 175 spaxels com alta qualidade. O tempo para processar todos os dados foi de cerca de dois meses em 30 nós de um cluster.

Todos os cubos foram processados da mesma maneira. Primeiro, modelamos o contínuo estelar usando o código STARLIGHT [15] na região de 3600–8900 Å. Obtemos o espectro puramente nebuloso subtraindo o contínuo estelar modelado do espectro observado. Usamos o código DOBBY² [16] para modelar cada linha de emissão com um perfil gaussiano no espectro residual. Um detalhe crucial é estabelecer vínculos cinemáticos entre linhas do mesmo íon e fornecer ao código uma boa estimativa para a dispersão instrumental. Com isso, conseguimos medir com qualidade $H\beta$ (que é mais suscetível ao ruído do que $H\alpha$) com confiança em muito mais spaxels. Além do fluxo total F de cada linha obtido pela integração de cada perfil gaussiano, obtemos larguras equivalentes W calculando $W \equiv F/C$, onde C é a densidade de fluxo no contínuo ao redor de uma determinada linha de emissão.

5 Resultados: A poeira escondida em dados integrados

Com os cubos dados processados, calculamos então L_G , a luminosidade de $H\alpha$ corrigida pelo decremento de Balmer do espectro global, e L_{IFS} , a luminosidade de $H\alpha$ corrigida ponto a ponto. A Figura 3 mostra L_{IFS}/L_G em função de $W_{H\alpha}$. Destacamos os nossos principais resultados:

- Nota-se que $L_{\text{IFS}}/L_G \geq 1$ para quase todas as galáxias (153 das 156 considerando a incerteza nas medidas). Os valores médios de L_{IFS}/L_G para o primeiro e último quartil variam entre 1,04 e 1,02, o que implica que L_G está subestimada por 4 a 2%.

²DOBBY é parte do pacote PYCASSO2, disponível em <https://bitbucket.org/streeto/pycasso2>.

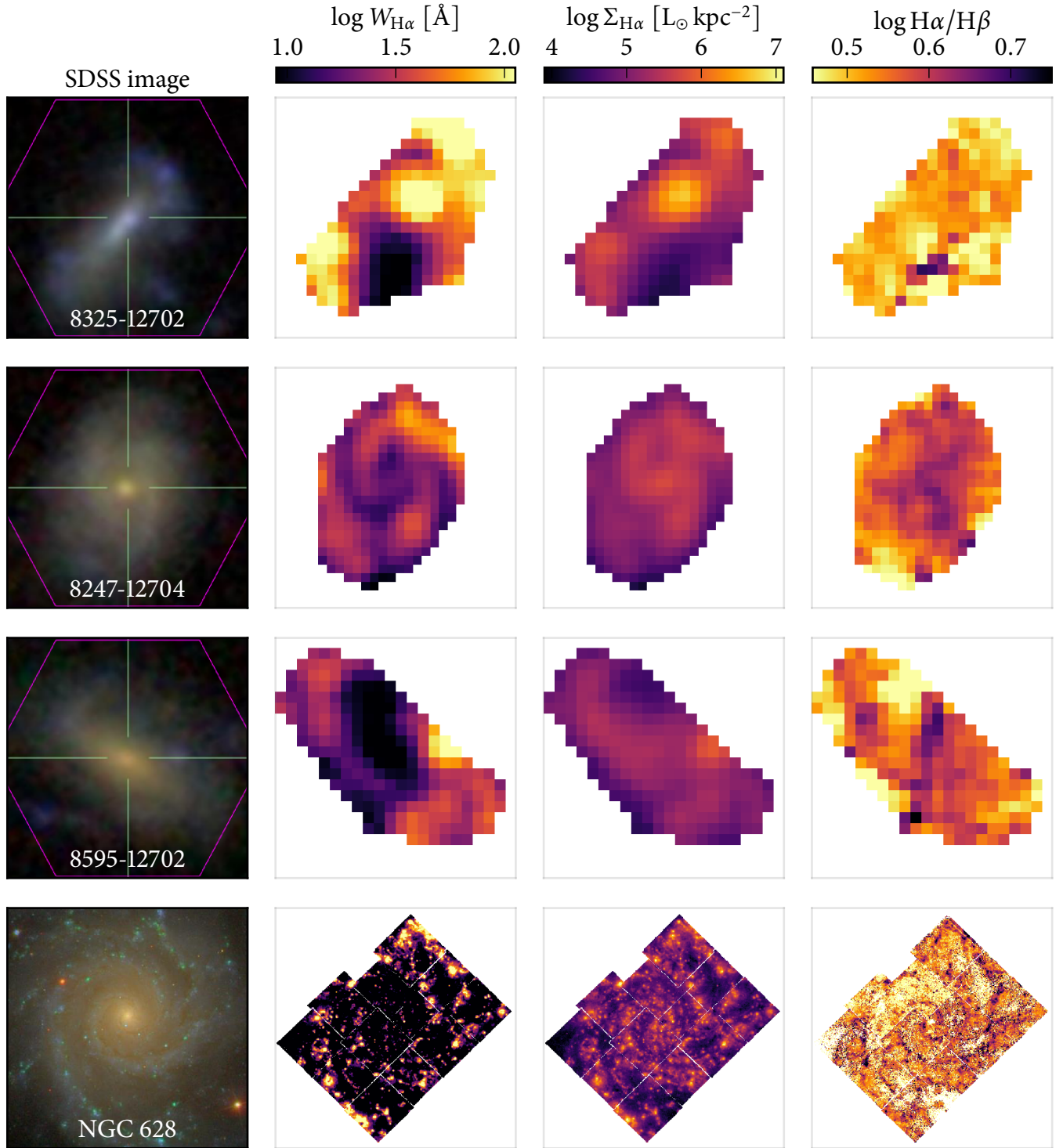


Figura 2: Três primeiras linhas: exemplos de galáxias do MaNGA. Última linha: galáxia NGC 628 observada em 12 apontamentos do MUSE. A resolução espacial dos dados do MaNGA é de 1–2 kpc, e a amostragem espacial dos cubos do MUSE de NGC 628 que usamos é de 36 pc. A primeira coluna mostra a imagem óptica do SDSS, a segunda um mapa da largura equivalente de $H\alpha$, a terceira um mapa da densidade superficial de $H\alpha$, e a quarta a distribuição de $H\alpha/H\beta$. É notável como $H\alpha/H\beta$, que indica a profundidade óptica efetiva, varia ponto a ponto. Além disso, pode-se ver uma estrutura muito mais complexa nas observações do MUSE de maior resolução espacial. Reprodução da figura 1 de Vale Asari et al. [10].

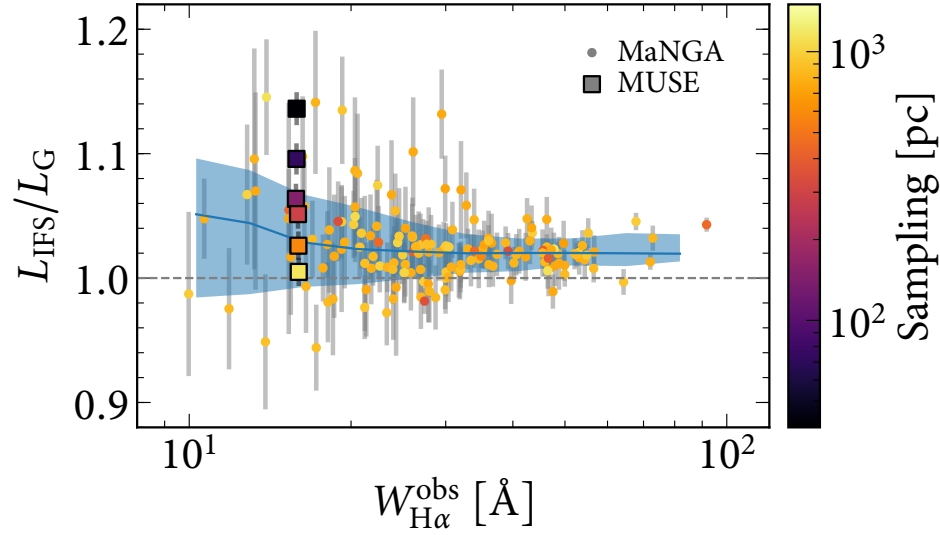


Figura 3: Quociente entre a luminosidade de $H\alpha$ corrigida por atenuação por poeira ponto a ponto (L_{IFS}) e a corrigida pelo valor global de $H\alpha/H\beta$ (L_G) em função da largura equivalente de $H\alpha$ ($W_{H\alpha}$) do espectro global. $W_{H\alpha}$ está correlacionada com a taxa de formação estelar específica de uma galáxia, e também anti-correlacionada com a quantidade de gás difuso ionizado. As 156 galáxias com formação estelar e dados de alta qualidade do MaNGA são mostrados como pontos. As barras mostram as incertezas das medidas obtidas pela propagação formal dos erros. As diferentes cores representam a amostragem espacial dos spaxels. Os quadrados mostram os resultados para os dados do MUSE para a galáxia NCG 628. A amostragem espacial original de 36 pc está em preto; dobramos a amostragem para cada quadradinho até o valor de 1,1 kpc para o quadrado amarelo. A linha e superfície azuis mostram a mediana e percentis 16 e 84 móveis (calculados a cada 0,1 década com um kernel de 0,5 década) para os dados do MaNGA. A linha horizontal tracejada marca $L_{\text{IFS}}/L_G = 1$; todos os pontos, exceto três, estão acima dessa linha dentro de um sigma de incerteza. Reprodução da figura 2 Vale Asari et al. [10].

- A diferença entre L_{IFS} e L_G parece ser maior para galáxias de menor $W_{H\alpha}$. Testes estatísticos [detalhes na referência [10]] mostram que esse resultado é robusto, e parece estar ligado à quantidade de gás difuso ionizado [ver por exemplo [17], [4]] e também à variação da lei de atenuação por poeira ponto a ponto.
- Para as observações do MUSE com a maior resolução espacial que analisamos (quadrado preto), L_{IFS}/L_G é bem maior do que os valores obtidos para galáxias do MaNGA de mesma $W_{H\alpha}$, e vale ~ 1.14 (isto é, L_G está subestimada por 14%). Para comparação, diminuímos a resolução espacial dos cubos do MUSE e recalculamos L_{IFS}/L_G , obtendo os outros quadrados, coloridos de acordo com a amostragem espacial. O quadrado laranja tem uma resolução parecida com a média das galáxias do MaNGA, e o seu valor de L_{IFS}/L_G também é similar à média dessa amostra.
- No apêndice do nosso trabalho [10], mostramos o comportamento de L_{IFS}/L_G em função de vários parâmetros, como massa em estrelas, idade das populações estelares e densidade superficial de massa estelar. O único parâmetro com o qual vemos correlações significativas além de $W_{H\alpha}$ é a densidade superficial de massa estelar, que separa galáxias dominadas por um bojo ou por um disco, o que é bem correlacionado com a importância do gás difuso em cada galáxia.

6 Conclusão

A principal mensagem deste estudo é que $L_{\text{IFS}}/L_G \geq 1$ para a maioria das galáxias, como previmos analiticamente. Isso implica que a luminosidade de $H\alpha$ obtida a partir da correção por poeira em espectros **globais** está **subestimada**. Além disso, o valor de L_{IFS} **aumenta à medida em que a resolução espacial aumenta**, como indicam os experimentos com o MUSE. Os dados do MaNGA têm uma resolução espacial baixa, o que implica que, ponto a ponto, cada espectro no cubo de dados ainda tem, internamente, o mesmo problema de variações de τ_α . Portanto, para quantificar o efeito da correção global por poeira, será necessário uma amostra de galáxias com uma resolução espacial mais alta do que a amostra do MaNGA.

Agradecimentos

Agradeço pelo apoio à Royal Society e do Newton Fund através da Royal Society–Newton Advanced Fellowship (NAFR1\180403), à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina (FAPESC) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Agradeço também ao SOC pela organização do evento Astrocientistas e desses anais e pela atenção ao texto na revisão por pares.

As Figuras 2 e 3 foram reproduzidas aqui sem necessidade de permissão especial de acordo com as regras do Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: https://academic.oup.com/mnras/pages/rights_and_new_business_development.

Referências

- [1] B. T. Draine. Interstellar Dust Models and Evolutionary Implications. In T. Henning, E. Grün, & J. Steinacker, editor, *Cosmic Dust - Near and Far*, volume 414 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 453, December 2009.
- [2] L. Giovannini, F. Matteucci, and F. Calura. The cosmic dust rate across the Universe. *MNRAS*, 471(4):4615–4627, November 2017.
- [3] G. Lagache, J.-L. Puget, and H. Dole. Dusty Infrared Galaxies: Sources of the Cosmic Infrared Background. *ARA&A*, 43:727–768, September 2005.
- [4] N. Vale Asari. The role of the diffuse ionized gas in metallicity calibrations. *arXiv e-prints*, page arXiv:2108.00076, July 2021.
- [5] R. C. Kennicutt, Jr. Large scale star formation and the interstellar medium. In H. A. Thronson Jr. & J. M. Shull, editor, *The Interstellar Medium in Galaxies*, volume 161 of *Astrophysics and Space Science Library*, pages 405–435, 1990.
- [6] D. E. Osterbrock and G. J. Ferland. *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*. 2006.
- [7] J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. *ApJ*, 345:245–256, October 1989.
- [8] D. Calzetti, A. L. Kinney, and T. Storchi-Bergmann. Dust extinction of the stellar continua in starburst galaxies: The ultraviolet and optical extinction law. *ApJ*, 429:582–601, July 1994.
- [9] J. Chevallard, S. Charlot, B. Wandelt, and V. Wild. Insights into the content and spatial distribution of dust from the integrated spectral properties of galaxies. *MNRAS*, 432:2061–2091, July 2013.
- [10] N. Vale Asari et al. Less than the sum of its parts: the dust-corrected $H\alpha$ luminosity of star-forming galaxies explored at different spatial resolutions with MaNGA and MUSE. *MNRAS*, 498(3):4205–4221, August 2020.
- [11] Simon Brown. Averaging ratios: characteristics of the error of approximation. *World Applied Programming*, 1:288, 12 2011.
- [12] K. Bundy et al. Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory. *ApJ*, 798:7, January 2015.
- [13] R. Bacon et al. The MUSE second-generation VLT instrument. In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III*, volume 7735 of *Proc. SPIE*, page 773508, July 2010.
- [14] D. S. Aguado, R. Ahumada, A. Almeida, S. F. Anderson, B. H. Andrews, B. Anguiano, E. Aquino Ortíz, A. Aragón-Salamanca, M. Argudo-Fernández, M. Aubert, and et al. The Fifteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release of MaNGA-derived Quantities, Data Visualization Tools, and Stellar Library. *ApJS*, 240:23, February 2019.
- [15] R. Cid Fernandes, A. Mateus, L. Sodré, G. Stasińska, and J. M. Gomes. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method. *MNRAS*, 358:363–378, April 2005.
- [16] Thomas Zerrenner Flórido. Análise de linhas de emissão em galáxias: O gás difuso ionizado nas galáxias do manga. Master's thesis, UFSC, Sep 2018.
- [17] L. M. Haffner, R.-J. Dettmar, J. E. Beckman, K. Wood, J. D. Slavin, C. Giammanco, G. J. Madsen, A. Zurita, and R. J. Reynolds. The warm ionized medium in spiral galaxies. *Reviews of Modern Physics*, 81:969–997, July 2009.