

**Exame de qualificação de doutorado:
Poeira, metalicidade e formação
estelar: estimando fração de gás.**

Eduardo Alberto Duarte Lacerda

Orientador:

Prof. Dr. Roberto Cid Fernandes Jr.

Coorientadora:

Rosa M. Gonzalez Delgado

• • •

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro de Ciências Físicas e Matemáticas
Programa de Pós-Graduação em Física

Florianópolis (SC) – 3 de janeiro de 2018

Resumo

Neste trabalho estamos estudando a conversão do coeficiente de extinção por poeira em densidade superficial de massa de gás em discos de galáxias espirais. Para tal finalidade estamos utilizando uma amostra de 184 galáxias do projeto CALIFA, um *survey* astronômico de espectroscopia de campo integrado (*Integral Field Spectroscopy* - IFS). Utilizando as medidas de linhas de emissão provenientes dos espectros residuais da síntese de populações estelares, calculamos o coeficiente de extinção através do decremento de Balmer (τ_V^{neb}) de maneira a compará-lo com aquele proveniente da síntese (τ_V^*). Construímos um objeto em PYTHON que organiza essas medidas, facilitando a utilização desses resultados juntamente com os resultados da síntese.

Selecionamos apenas zonas pertencentes aos discos de galáxias e que possuam formação estelar, juntamente com um controle de qualidade. Neste processo, o corte mais brusco em nossa amostra é devido a baixa relação sinal-ruído da linha de [O III] ($S/N_{[\text{O III}]} < 3$) em 91142 zonas. Nossa amostra final engloba 16479 zonas reamostradas em ~ 4500 anéis radiais (elípticos) em uma unidade natural da galáxia (raio no qual abarca metade da luz - HLR).

Em paralelo estamos trabalhando em duas frentes. Na primeira estamos buscando o sentido real de τ_V^* utilizando um modelo proposto juntamente com τ_V^{neb} de maneira que possamos encontrar os coeficientes diretamente ligados ao meio interestelar e às nuvens formadoras de estrelas (regiões HII). A segunda, de certa forma, depende da primeira, pois estamos fazendo a conversão de poeira em gás, portanto τ_V influencia diretamente nosso resultado. Nessa etapa investigamos relação entre formação estelar e poeira, de maneira a reproduzir uma relação como a de Kennicutt-Schmidt (KS), encontrando uma correlação entre ambos. Através dos resíduos desta relação (que neste trabalho chamamos de *pseudo* KS) vimos que algumas propriedades estão correlacionadas com o espalhamento desta relação, na qual, a mais forte parece ser com a densidade superficial de massa estelar (μ_*). Também utilizamos tanto τ_V^* quanto τ_V^{neb} para calcular Σ_{gas} , elemento que nos falta para calcular frações de gás, ingrediente muito importante na evolução química de galáxias.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	O todo e as partes	2
1.2	O GAS-UFSC e o IAA-CSIC	2
1.3	De poeira para gás	4
1.4	Este trabalho	5
	Referências Bibliográficas	I

Lista de Figuras

Capítulo 1

Introdução

A única forma empírica de estudarmos galáxias é através da luz emitida pelos seus constituintes. Mais precisamente, das imagens e da distribuição espectral de energia (SED¹) que chegam até nossos telescópios, em terra ou no espaço. Diferentes componentes e eventos os modificam, nos possibilitando a busca de padrões e criação de modelos que se propõem a explicar sua constituição, formação e dinâmica. Atualmente, existem diversos projetos astronômicos de levantamento de informações ou mapeamento de regiões do céu, chamados de *surveys*, formando uma rede de gigantescos bancos de dados de imagens, espectros e metainformação. Com diferentes faixas espectrais (desde raios- γ até micro-ondas), diferentes fontes de dados (espectros de galáxias integradas, espectroscopia de campo, imagens, monitoramento temporal de eventos) e diferentes objetivos, os *surveys* astronômicos permeiam por diferentes fenômenos astrofísicos. Através dessa criação e difusão em massa de informações, nossa forma de enxergar o mundo vem se tornando cada vez mais acurada quanto ao Universo. Além de estarem formando um imenso legado de informações para futuros astrofísicos, são basilares para o desenvolvimento de novas ideias e resolução dos desafios atuais da área. Neste capítulo faço uma introdução do atual cenário de exploração dos *surveys* e um breve resumo dos avanços que nosso grupo de astrofísica (GAS-UFSC) têm obtido através desses levantamentos.

¹*Spectral energy distribution* - quantidade de energia em cada comprimento de onda.

1.1 O todo e as partes

Galáxias são formadas por uma complexa mistura de gás, poeira, estrelas e matéria escura, distribuídas em discos, bulbos e halos. Os primeiros levantamentos de dados espectrais tratavam galáxias como uma fonte puntual de energia, conhecido com espectroscopia de uma fibra (*single-fiber spectroscopy*²). Apesar dessa limitação, muito se aprendeu (e ainda se aprende) sobre a formação e evolução das galáxias. Entretanto, esse é um dos mais significantes problemas desse tipo de *survey*. (!⦿j⦿! **Figura SDSS abertura + espectro?**). Ao estimar a metalicidade nebular, por exemplo, devemos levar em conta apenas os fótons gerados nas regiões de formação estelar (SF³), isolando-os daqueles que vêm de outros regimes nebulares, como o gás ionizado difuso (DIG⁴), fotoionização pelo núcleo ativo ou estrelas velhas. Também podemos perceber que qualquer propriedade que varie em função da posição dentro da galáxia será erroneamente estimada quando temos apenas um espectro representando a galáxia inteira. Para um estudo mais preciso das propriedades derivadas dos espectros integrados e, por consequência, do viés causado por sua natureza é necessário um melhor entendimento desses efeitos.

Um grande passo nessa direção foi dado com a criação dos *surveys* de espectroscopia de campo (IFS⁵). Através da IFS podemos desvencilhar essa mistura de partes distintas, já que nessa técnica de observação temos espectros para cada parte da galáxia (!⦿j⦿! **Figura CALIFA + espectro de uma zona?**). Dessa forma, para cada par espacial (x, y) temos uma dimensão espectral λ . Quanto mais precisos sejam x , y (resolução espacial) e λ (resolução espectral) teremos uma melhor definição da localização e da assinatura espectral de cada uma das partes. Diversos *surveys* IFS já estão finalizados e com seus dados disponíveis publicamente (**CALIFA**, **PINGs**), muitos outros ainda estão em fase de observação (**MaNGA**, **MUSE**) ou ainda em fase de projeto.

1.2 O GAS-UFSC e o IAA-CSIC

Nos últimos anos nosso grupo de Astrofísica (GAS-UFSC) aqui na Universidade Federal de Santa Catarina vem trabalhando com dados de diversos *surveys*. Nosso grupo foi pioneiro no estudo das propriedades físicas das populações estelares de aproximadamente um milhão

²Um espectro formado apenas de uma determinada área de abertura observada.

³*Star-forming*.

⁴*diffuse ionized gas*

⁵*integral field spectroscopy*

de galáxias do SDSS através do projeto SEAGal/STARLIGHT⁶ publicando diversos artigos importantes e amplamente citados (e.g., Cid Fernandes et al. 2005; ?, Stasińska et al. 2006; ?, 2008; Cid Fernandes et al. 2011).

Desde antes e durante esse trabalho, participamos de um projeto entre nosso grupo de populações estelares aqui no GAS com pesquisadores do Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), na cidade de Granada, Comunidade autônoma de Andalucía, ao sul da Espanha. Esse instituto pertence ao *Consejo Superior de Investigaciones Científicas* (CSIC), o maior órgão público (estatal) de pesquisas científicas na Espanha, e o terceiro maior da Europa. Conta com pesquisadores participantes do CALIFA (Sánchez et al. 2012), funcionando como centro físico do projeto. A pesquisadora Rosa M. González Delgado, coorientadora deste trabalho, uma das principais líderes do projeto e que também atua como Pesquisadora Visitante Especial (PVE-CsF) aqui na UFSC; Rubén García Benito, que faz parte do grupo de redução dos dados do *survey*; e Enrique Pérez, do grupo de populações estelares, já trabalham em nossa parceria e possuem conhecimento e domínio das técnicas exploradas por nosso projeto, além de participarem ativamente do desenvolvimento do CALIFA. Durante os últimos cinco anos nosso grupo de populações estelares no CALIFA publicou diversos artigos (e.g., Pérez et al. 2013; González Delgado et al. 2014b,a, 2015, 2016; de Amorim et al. 2017; González Delgado et al. 2017; García-Benito et al. 2017; Lacerda et al. 2017). Paralelamente participamos de diversos congressos e conferências publicando nossos resultados.

Utilizando a síntese de populações estelares aplicada às galáxias do CALIFA poderíamos estimar Σ_{gas} através de uma equação como (??) mas, além de não ser uma maneira independente de Σ_{SFR}^* , esta equação foi parametrizada para valores integrados de galáxias, diferente da área típica das regiões que estamos observando (regiões de galáxias com tamanhos típicos de $\sim 1\text{kpc}$). Com a síntese é possível também obter a história de formação estelar através da fração de populações estelares com distintas idades (?), não necessitando assim prender-se às zonas das galáxias onde o espectro tenha relação sinal ruído (S/N) suficiente para a medida de todas as linhas espectrais necessárias para os cálculos sobre o gás e poeira. Nos falta, porém, uma medida da quantidade de gás de forma independente da formação estelar, o que nos levou a buscar uma conversão que utilize uma ou mais propriedades provenientes da síntese com o STARLIGHT.

⁶<http://starlight.ufsc.br>

1.3 De poeira para gás

Dentro da astrofísica extragaláctica, um dos grandes temas ainda incômodo é a determinação de massas de gás. A quantidade de gás de uma galáxia define o processo de formação estelar, portanto, é peça fundamental no entendimento da sua evolução. O gás atômico (formado majoritariamente por átomos de hidrogênio) geralmente está nas partes de fora das regiões de formação estelar, aonde a temperatura já está alta o suficiente para quebrar a ligação entre os hidrogênios. O gás molecular é associado diretamente com a formação estelar, porém a molécula de H_2 não possui um observável direto. A baixa massa da molécula não permite que nenhum grau de liberdade rotacional seja excitado, pois a temperatura nessas regiões é muito baixa, necessitando ser traçado através de outros elementos presentes ali. Geralmente o que se usa são as transições entre os níveis energéticos do monóxido de carbono (CO) pois suas linhas são bem fortes (fácil de observar). (?) revisam o tema mostrando um panorama geral sobre a conversão de intensidade da linha de CO e a densidade superficial do gás.

Avermelhamento (medido através de índices de cores) e extinção da luz das estrelas são temas discutidos e utilizados como evidência da existência de “*núvens interestelares*”. (?), através da análise de imagens dos objetos Messier 8, 17 e 18, discute a presença de “buracos ou manchas” entre as estrelas, e a existência de estrelas no meio de “nebulosidades”. Esse artigo foi escrito inclusive antes da famosa discussão de Sharpley e Curtis em 1920, e do artigo de (?) que definiu que as “nebulosas espirais” eram objetos que estavam a distâncias muito maiores que a dimensão da Via Láctea. Atualmente, trabalhos como a revisão de (?) nos ajudam a entender as propriedades físicas, a natureza dos grãos de poeira e de como ela afeta a luz que a atravessa.

Uma das formas de se mapear e determinar quantidades de gás em galáxias é utilizando a presença de poeira. Devido a presença de poeira nas regiões de formação estelar, podemos utilizá-la como maneira indireta de estimar a densidade superficial do gás oculto através da introdução de um fator de conversão:

$$\Sigma_{\text{gas}} = \frac{\Sigma_{\text{gas}}}{\Sigma_d} \times \Sigma_d = \kappa \times \Sigma_d. \quad (1.1)$$

O índice d designa poeira (*dust*, em inglês) e as densidades superficiais são dadas em $M_\odot pc^{-2}$. Diversos artigos discutem a calibração e os *caveats* deste tipo de conversão e também problemas de degenerescência na conversão CO- H_2 (????), mas quase todos eles utilizam medidas de infravermelho (IR) para estimar Σ_d , onde os grãos de poeira geralmente re-emitem a luz absorvida em outras frequências. Já Brinchmann et al. (2013, BR13 daqui em diante) de-

envolvem uma conversão de poeira para gás utilizando medidas da poeira em absorção, e não em emissão, como os estudos em IR, para as galáxias formadoras de estrelas⁷ do sétimo lançamento público de dados (*data release*) do SDSS (?, DR7). Segundo BR13, esse método é sensível ao gás total da galáxia (soma do gás molecular com o gás atômico). Na busca por traçadores de gás, escolhemos a poeira em absorção (na faixa do espectro óptico) para tal objetivo pois é uma quantidade à qual temos acesso, tanto via síntese espectral como por meio de linhas de emissão.

1.4 Este trabalho

Nessa primeira etapa do doutorado estamos procurando entender melhor a natureza das propriedades físicas estelares e nebulares e suas diferenças nas galáxias do CALIFA. No Cap. ?? descrevemos o processo de medidas das propriedades nebulares. A seleção das amostras, suas ressalvas e exemplos de perfis radiais são discutidos no Cap. ?. Comparações entre algumas das propriedades nebulares e àquelas provenientes da síntese são discutidas no Cap. ?. De maneira a melhor entender a relação entre o coeficiente de extinção proveniente da síntese e do decremento de Balmer e suas relações com a extinção do meio interestelar (*interstellar medium* - ISM) e das núvens formadoras de estrelas (*birth-clouds* - BC) desenvolvemos uma discussão mais pontualmente no Cap. ?. Por fim, no Cap. ?, desenvolvemos a conversão de poeira em absorção para gás utilizando o método de BR13, juntamente com algumas proposições para os próximos passos deste projeto. Permeando os capítulos, quando pertinente, descrevo minha participação em artigos nestes últimos dois anos.

⁷Galáxias *star-forming* (SF) - com formação estelar ativa.

Referências Bibliográficas

- Brinchmann, J., Charlot, S., Kauffmann, G., Heckman, T., White, S. D. M., & Tremonti, C. 2013, MNRAS, 432, 2112
- Cid Fernandes, R., Mateus, A., Sodré, L., Stasińska, G., & Gomes, J. M. 2005, MNRAS, 358, 363
- Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Mateus, A., & Vale Asari, N. 2011, MNRAS, 413, 1687
- de Amorim, A. L., García-Benito, R., Cid Fernandes, R., Cortijo-Ferrero, C., González Delgado, R. M., Lacerda, E. A. D., López Fernández, R., Pérez, E. et al. 2017, MNRAS, 471, 3727
- García-Benito, R., González Delgado, R. M., Pérez, E., Cid Fernandes, R., Cortijo-Ferrero, C., López Fernández, R., de Amorim, A. L., Lacerda, E. A. D. et al. 2017, ArXiv e-prints
- González Delgado, R. M., Cid Fernandes, R., García-Benito, R., Pérez, E., de Amorim, A. L., Cortijo-Ferrero, C., Lacerda, E. A. D., López Fernández, R. et al. 2014a, ApJ, 791, L16
- González Delgado, R. M., Cid Fernandes, R., Pérez, E., García-Benito, R., López Fernández, R., Lacerda, E. A. D., Cortijo-Ferrero, C., de Amorim, A. L. et al. 2016, A&A, 590, A44
- González Delgado, R. M., García-Benito, R., Pérez, E., Cid Fernandes, R., de Amorim, A. L., Cortijo-Ferrero, C., Lacerda, E. A. D., López Fernández, R. et al. 2015, A&A, 581, A103
- González Delgado, R. M., Pérez, E., Cid Fernandes, R., García-Benito, R., de Amorim, A. L., Sánchez, S. F., Husemann, B., Cortijo-Ferrero, C. et al. 2014b, A&A, 562, A47
- González Delgado, R. M., Pérez, E., Cid Fernandes, R., García-Benito, R., López Fernández, R., Vale Asari, N., Cortijo-Ferrero, C., de Amorim, A. L. et al. 2017, A&A, 607, A128
- Lacerda, E. A. D., Cid Fernandes, R., Couto, G. S., Stasinska, G., Garcia-Benito, R., Vale Asari, N., Perez, E., Gonzalez Delgado, R. M. et al. 2017, ArXiv e-prints

- Pérez, E., Cid Fernandes, R., González Delgado, R. M., García-Benito, R., Sánchez, S. F., Husemann, B., Mast, D., Rodón, J. R. et al. 2013, *ApJ*, 764, L1
- Sánchez, S. F., Kennicutt, R. C., Gil de Paz, A., van de Ven, G., Vílchez, J. M., Wisotzki, L., Walcher, C. J., Mast, D. et al. 2012, *A&A*, 538, A8
- Stasińska, G., Cid Fernandes, R., Mateus, A., Sodré, L., & Asari, N. V. 2006, *MNRAS*, 371, 972
- Stasińska, G., Vale Asari, N., Cid Fernandes, R., Gomes, J. M., Schlickmann, M., Mateus, A., Schoenell, W., Sodré, Jr., L. et al. 2008, *MNRAS*, 391, L29