

# Projeto de doutorado

Formação estelar, gás e poeira nas galáxias do Projeto CALIFA *Survey*

Aluno: Eduardo Alberto Duarte Lacerda

Orientador: Roberto Cid Fernandes Jr. (Universidade Federal de Santa Catarina)

Co-orientador: Rosa M. González Delgado (Instituto de Astrofísica de Andalucía)

## 1 Introdução

Hoje temos disponível uma enorme quantidade de informações sobre nosso Universo através dos grandes levantamentos astronômicos. Esses *surveys*, que são mapeamentos de regiões do céu utilizando telescópios com diversas tecnologias, produziram, e seguem produzindo, quantidades de dados antes inimagináveis, servindo como base para toda a ciência em astrofísica. Nos últimos 15 anos entramos numa era de *mega-surveys*, iniciada com projetos como o SDSS (York et al., 2000), 2dFGRS (Colless, 1999) e 2MASS (Skrutskie et al., 2006), e que seguirá com projetos como o LSST (Ivezic et al., 2008) e JPAS (Benitez et al., 2014).

Exemplos de utilização de *mega-surveys* podem ser vistos nos resultados obtidos pelo Grupo de Astrofísica da UFSC (GAS) (e.g., Asari et al., 2007; Vale Asari et al., 2009; Cid Fernandes et al., 2007; Mateus et al., 2006) através da aplicação do código STARLIGHT, desenvolvido por Cid Fernandes et al. (2005), a quase um milhão de espectros de galáxias do SDSS. Esse código decompõe um espectro observado de uma galáxia (dados) em termos de populações estelares de distintas idades e metalicidades (modelos) em um processo conhecido como síntese espectral. Com a síntese obtemos diversas propriedades estelares (e.g., idade, massa, metalicidade, extinção)

Dentre os grandes *surveys* em andamento, projetos como o *Calar Alto Legacy Integral Field spectroscopy Area survey*<sup>1</sup> (CALIFA; Husemann et al., 2013) estão mudando a nossa maneira de pensar e interpretar as galáxias, através da IFS. Com os espectrógrafos de campo passamos a obter resolução espacial juntamente com espectral, assim resultando num conjunto de espectros, onde cada um representa uma diferente posição em uma galáxia. O CALIFA produz cerca de 4000 espectros por galáxia observada transformando cada uma em uma amostra estatística *per se*.

Utilizando esses cubos (duas dimensões espaciais e uma espectral) de dados podemos então realizar a síntese de populações estelares para diferentes partes da galáxia, de modo que o que era feito anteriormente para diversas galáxias possa ser feito para diferentes regiões da mesma galáxia. Este tipo de estudo vem sendo realizado por pesquisadores do nosso grupo de astrofísica (GAS-UFSC; André Luiz de Amorim, Natália Vale Asari, Roberto Cid Fernandes) e do Instituto de Astrofísica de Andalucía, na Espanha (IAA; Enrique Pérez, Rosa González Delgado, Rubén García-Benito). Aspectos técnicos e incertezas são discutidos em Cid Fernandes et al. (2013) e Cid Fernandes et al. (2014), enquanto Pérez et al. (2013) e González Delgado et al. (2014b) apresentam resultados astrofísicos dessa análise.

---

<sup>1</sup><http://www.caha.es/CALIFA/>

## 2 Objetivos

Galáxias são formadas por uma complexa mistura de gás, poeira, estrelas e matéria escura, distribuída em disco, bulbos e halos. O gás é o combustível da formação estelar. As nuvens de gás molecular, formadas pelo esfriamento de gás do meio interestelar, se fragmentam formando estruturas menores e cada vez mais densas, que são chamadas cúmulos. Nos caroços desses acumulados de gás, através de um colapso no balanceamento energético entre pressão e gravidade, acontece a formação estelar. Essas regiões, que podem ser pequenas ou se estenderem a gigantes berçários estelares, estão geralmente cobertas por uma densa camada de poeira. Gerada pelo próprio processo de formação estelar, a poeira funciona como uma cortina que modifica a energia dos fótons que chegam até nossos detectores. Isso acontece pois os grãos de poeira absorvem e reemitem radiação em diferentes energias, modificando o espectro observado. Esse processo é chamado de extinção por poeira. Apesar de modificar o espectro, a poeira pode também ser usada como sinalizadora de regiões aonde há intensa formação estelar. No final do ciclo de vida das estrelas, diversos elementos são jogados no meio interestelar através das explosões de supernovas, alterando assim a composição do gás disponível para produção de novas estrelas. Nesse projeto de doutorado propomos estudar ligações entre o gás, a poeira e suas dependências com a formação estelar e a metalicidade, utilizando como base as galáxias do Projeto CALIFA *Survey*.

Schmidt (1959) foi o primeiro a propor a existência de uma lei de potências que liga a taxa de formação estelar (SFR - *star formation rate*) e o gás. Anos depois, Kennicutt (1998) estuda essa relação para diversos indicadores de formação estelar em diferentes faixas espectrais. Em seu trabalho Kennicutt estabelece ligações entre as densidades superficiais de gás e da SFR. Hoje em dia essas são comumente chamadas de relações de Kennicutt-Schmidt (KS). Utilizando a síntese de populações estelares já aplicada às galáxias do CALIFA também podemos estudar algumas propriedades do gás interestelar. Os mapas de regiões formadores de estrelas juntamente com os espectros residuais, resultados da subtração entre os espectros observados e os resultantes da síntese, contém informações sobre as estrelas, o gás e a poeira dessas distintas regiões. Ainda com a síntese é possível obter a história de formação estelar através da fração de populações estelares com distintas idades (Asari et al., 2007), 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. Na Fig. 1 podemos ver a comparação entre a densidade superficial da SFR ( $\Sigma_{SFR}$ ) obtida com dados estelares e dados nebulares para 182234 zonas de 239 galáxias do projeto CALIFA. Esse é um resultado preliminar, mas que já nos mostra que com processos distintos conseguimos medir a mesma propriedade. Outro resultado para a mesma amostra de galáxias, também muito interessante mas ainda preliminar, pode ser visto na Fig.2. Nesta figura cada uma das 239 galáxias da amostra foi dividida em 20 anéis elípticos que vão do centro até 2 vezes a distância onde a intensidade da luz de cada galáxia cai pela metade (HLR - *half light radius*). Dentro de cada anel elíptico foi feita a média de  $\Sigma_{SFR}$  e da extinção por poeira  $\tau_V$  que resulta da síntese. Esse resultado nos mostra que a poeira correlaciona muito bem com a formação estelar, portanto, buscamos uma relação entre a poeira e o enriquecimento químico do gás, que é resultado direto da formação estelar.

González Delgado et al. (2014a) analisa a evolução química das galáxias através das relações entre massa e metalicidade estelares, mostrando que a metalicidade estelar ( $Z_*$ ) correlaciona com a massa estelar ( $M_*$ ) e com a densidade superficial de massa estelar ( $\mu_*$ ), de maneira e em posições distintas das galáxias, mostrando que a relação entre massa e

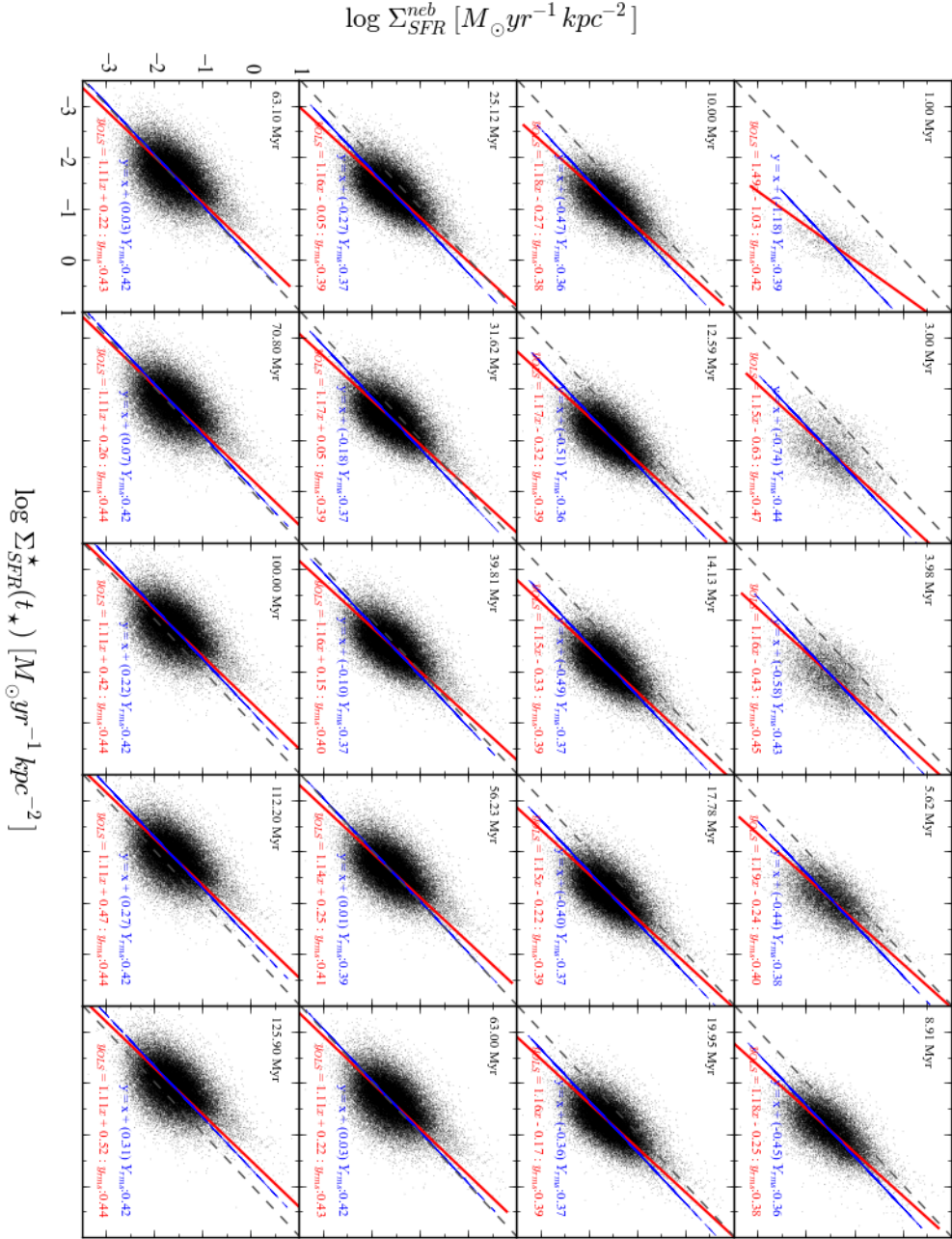


Figura 1: Mosaico de comparação entre a densidade superficial de taxa de formação estelar ( $\Sigma_{SFR}$ ) obtida através de indicadores nebulares e estelares para 182234 zonas de 239 galáxias do Projeto CALIFA Survey.  $\Sigma_{SFR}^{*}$  é calculada através da síntese com STARLIGHT usando a massa em estrelas formada em cada zona até a idade marcada no canto superior esquerdo de cada gráfico, razão pela qual o número de pontos varia em cada um deles. Para o indicador nebulare utilizamos a linha de emissão de  $H\alpha$  presente em cada espectro de cada zona. Em cada um dos gráficos há também dois tipos de regressão linear: OLS bisector, em vermelho, e mínimos quadrados forçando a inclinação ser 1 (45 graus), em azul. Por final, a linha tracejada identifica a reta identidade.

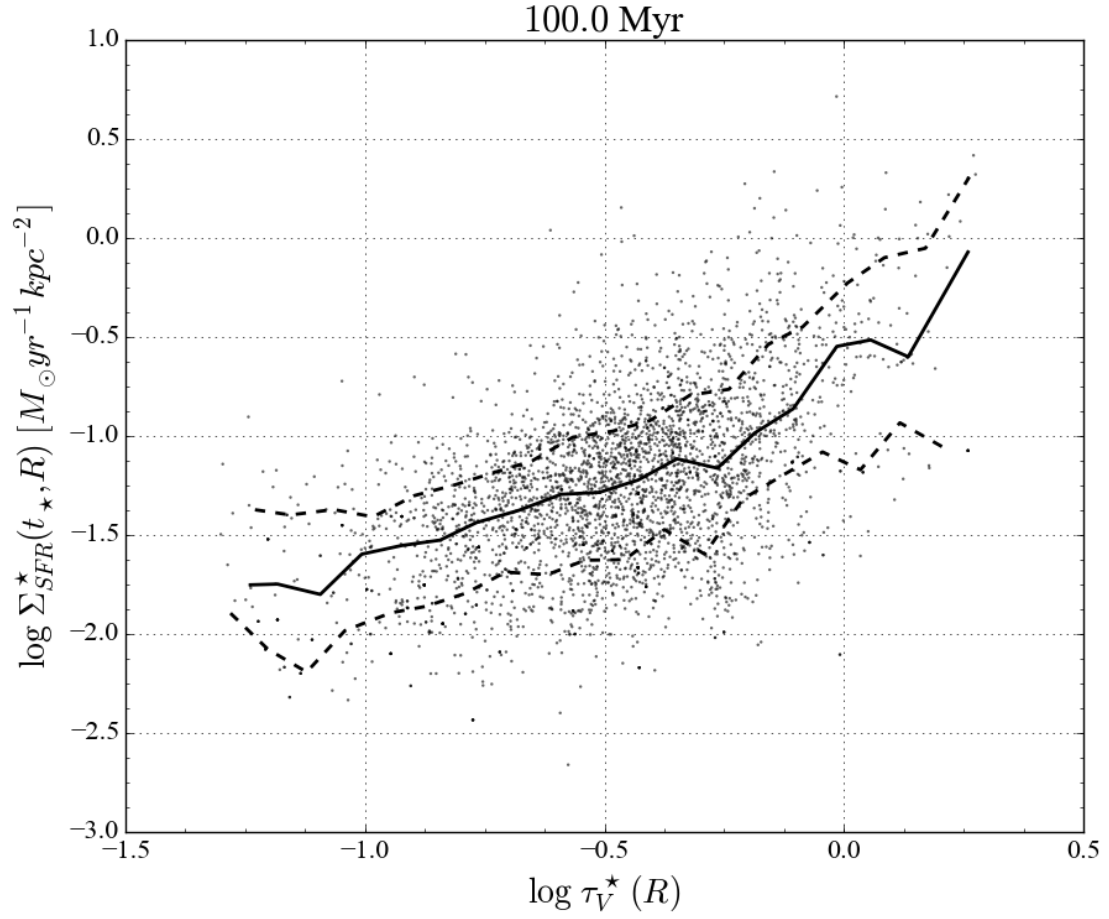


Figura 2: Extinção por poeira ( $\tau_V^*$ ) contra a densidade superficial de taxa de formação estelar  $\Sigma_{SFR}^*$  nos últimos 100 milhões de anos, ambas produtos da síntese de populações estelares para 239 galáxias do Projeto CALIFA Survey. Para cada uma das galáxias são feitos médias em 20 anéis elípticos concêntricos até 2 vezes a distância onde a intensidade da luz da galáxia cai pela metade.

metallicidade é guiada por parâmetros diferentes ( $M_*$  ou  $\mu_*$ ) em diferentes locais da galáxia. Com propriedades medidas do gás podemos obter relações entre as medidas estelares e como a fração existente de gás em uma galáxias, sua evolução química e qual o seu impacto na formação estelar. Esse tipo de análise já foi feita por nosso grupo em alguns dos resultados citados anteriormente mas nunca utilizando dados do projeto CALIFA *Survey*. Nesse projeto temos a chance de realizar esses estudos com resolução espacial em cada galáxia, podendo assim verificar efeitos locais nos processos de formação estelar e ao mesmo tempo, observar como esses efeitos e propriedades influenciam em propriedades globais das galáxias.

Durante os dois primeiros anos, no qual abarca um ano de estágio no IAA, na Espanha, participaremos ativamente na construção de ferramentas para tal estudo além de construção de um arcabouço teórico sobre o tema proposto. Nos dois anos seguintes estão reservados a análise, discussão e publicação dos resultados obtidos. Pretendemos:

- Trabalhar em conjunto com os membros do Projeto CALIFA para desenvolver ferramentas computacionais necessárias para tal estudo, além de realizar pequenos cursos teóricos no IAA sobre os temas envolvidos neste projeto.
- Calibrar relações entre os indicadores de formação estelar através de propriedades do gás e também através da utilização da síntese de populações estelares.
- Verificar as relações existentes entre as medidas das propriedades do gás, poeira e a SFR.
- Explorar essas relações de modo que nos auxiliem na compreensão do processo formação estelar e evolução química das galáxias.
- Produção de artigos com os resultados obtidos.

### 3 Metodologia

Através de nossa parceria com os pesquisadores do IAA, possuímos um ambiente perfeito para o desenvolvimento desse projeto. Descrevemos aqui nossa metodologia proposta para tal fim.

#### 3.1 O projeto CALIFA e o Instituto de Astrofísica de Andalucía

O CALIFA foi concebido para que seu legado seja abrangente, possibilitando diversos tipos de estudos em variadas áreas. Para esta finalidade, está observando  $\sim 600$  galáxias, cada uma em campo de visão de  $\sim 1.3 \text{ arcmin}^2$ , em duas configurações que cobrem a janela espectral de 3650-7000 Å. Sua amostra cobre o diagrama cor-magnitude (ver Figura 3) e diversos tipos morfológicos. Existem alguns poucos *surveys* de IFU e todos com, além de poucos objetos e campo de visão menor que o CALIFA, focos de estudo mais estreitos, dificultando o legado do *survey* para pesquisas científicas mais abrangentes (SAURON; de Zeeuw et al., 2002, região central de 72 galáxias com  $z < 0.01$ .) (PINGS; Rosales-Ortega et al., 2010, algumas galáxias muito próximas ( $\sim 10 \text{ Mpc}$ ) e o estudo atual de 70 (U)LIRGs com  $z < 0.26$ ) (VENGA; Blanc et al., 2010, 30 galáxias espirais) (ATLAS<sup>3D</sup>; Cappellari et al., 2011, 260 galáxias *early-type*

próximas). Outros *surveys* IFU ainda estão por vir, como SAMI (Croom et al., 2012) e MaNGA (Bundy et al., 2015).

A participação dos pesquisadores da UFSC e do IAA dentro do projeto CALIFA é direta e intensa. O IAA é o ambiente propício para levar adiante este estudo, com laboratórios próprios e *hardware* suficientes para o avanço de nosso projeto. Neste Instituto se encontram muitos pesquisadores participantes do Projeto CALIFA, portanto, funciona como centro físico do projeto, além de contar com a pesquisadora Rosa M. González Delgado, uma das principais líderes do projeto 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 CALIFA, 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 *Survey*.

### 3.2 PyCASSO e PCALIFA

A síntese espectral de uma galáxia do CALIFA gera um número muito grande de resultados. Cada espectro de entrada para a síntese pertence a uma posição determinada (*spaxel*<sup>2</sup>) da galáxia, resultando assim em propriedades físicas e medidas de extinção estelares com dimensão espacial. Para organização desses resultados, que necessitam ser armazenadas com as informações originais dos cubos, André L. de Amorim, juntamente com outros colaboradores de nosso grupo e do projeto CALIFA, construiu o programa PyCASSO (*Python CALIFA STARLIGHT Synthesis Organizer*, descrito na sec. 4 de Cid Fernandes et al. (2013)) para tal função. O PyCASSO organiza os resultados da síntese de populações estelares e demais dados provenientes de outros programas pertencentes ao *pipeline* do CALIFA. Esses programas fazem a redução dos espectros, definição de máscaras espaciais e espectrais (remoção de objetos espúrios, marcação de *spaxels* problemáticos), entre outros. Este programa facilita muito toda a ciência exploratória nos cubos de espectros do CALIFA.

Na dissertação de mestrado de Lacerda (2014) desenvolvemos um programa chamado de PCALIFA, que utiliza o PyCASSO como biblioteca e os cubos de espectros do CALIFA para o cálculo das componentes principais e dos tomogramas PCA. Encontramos diversas correlações entre a distribuição espacial das componentes e os tomogramas PCA. As ferramentas de análise já criadas e o fato de já termos produzidos diversos resultados com os dados do Projeto CALIFA Survey em nossa parceria criam ambiente perfeito para a execução deste projeto proposto.

## Referências

- Asari, N. V., Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Torres-Papaqui, J. P., Mateus, A., Sodré, L., Schoenell, W., & Gomes, J. M. 2007, MNRAS, 381, 263
- Benitez, N., Dupke, R., Moles, M., Sodre, L., Cenarro, J., Marin-Franch, A., Taylor, K., Cristobal, D. et al. 2014, ArXiv e-prints
- Blanc, G. A., Gebhardt, K., Heiderman, A., Evans, II, N. J., Jogee, S., van den Bosch, R., Marinova, I., Weinzirl, T. et al. 2010, in Astronomical Society of the Pacific Conference

---

<sup>2</sup>*Spaxel* vem de *Spectral pixel*. Um *spaxel* é um píxel com três dimensões (x, y,  $\lambda$ )

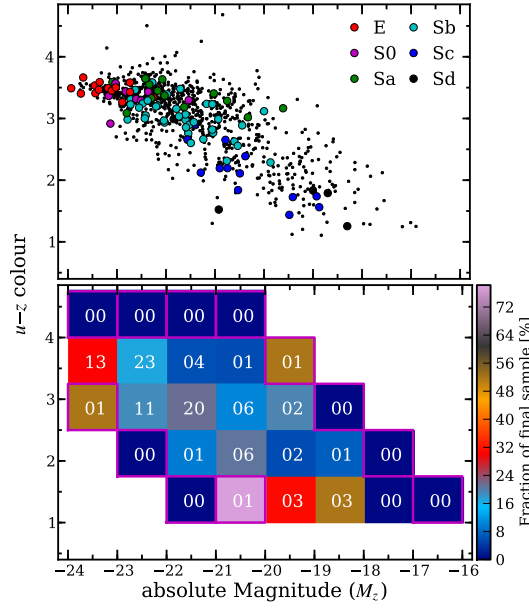


Figura 3: Distribuição das galáxias do CALIFA no diagrama cor magnitude  $u - z$  vs.  $M_z$ . *Painel superior*: Em pontos pretos estão as galáxias pertencentes a amostra-mãe e em cores as galáxias presentes no CALIFA DR1. As diferentes cores representam os diferentes tipos morfológicos. *Painel inferior*: A fração de galáxias observadas pelo DR1 em relação a amostra-mãe. Retirado de Husemann et al. (2013).

Series, Vol. 432, New Horizons in Astronomy: Frank N. Bash Symposium 2009, ed. L. M. Stanford, J. D. Green, L. Hao, & Y. Mao, 180

Bundy, K., Bershadsky, M. A., Law, D. R., Yan, R., Drory, N., MacDonald, N., Wake, D. A., Cherinka, B. et al. 2015, ApJ, 798, 7

Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnović, D., McDermid, R. M., Scott, N., Verdoes Kleijn, G. A., Young, L. M., Alatalo, K. et al. 2011, MNRAS, 413, 813

Cid Fernandes, R., Asari, N. V., Sodré, L., Stasińska, G., Mateus, A., Torres-Papaqui, J. P., & Schoenell, W. 2007, MNRAS, 375, L16

Cid Fernandes, R., González Delgado, R. M., García Benito, R., Pérez, E., de Amorim, A. L., Sánchez, S. F., Husemann, B., Falcón Barroso, J. et al. 2014, A&A, 561, A130

Cid Fernandes, R., Mateus, A., Sodré, L., Stasińska, G., & Gomes, J. M. 2005, MNRAS, 358, 363

Cid Fernandes, R., Pérez, E., García Benito, R., González Delgado, R. M., de Amorim, A. L., Sánchez, S. F., Husemann, B., Falcón Barroso, J. et al. 2013, A&A, 557, A86

Colless, M. 1999, in Large-Scale Structure in the Universe, ed. G. Efstathiou & et al., 105

Croom, S. M., Lawrence, J. S., Bland-Hawthorn, J., Bryant, J. J., Fogarty, L., Richards, S., Goodwin, M., Farrell, T. et al. 2012, MNRAS, 421, 872

- de Zeeuw, P. T., Bureau, M., Emsellem, E., Bacon, R., Carollo, C. M., Copin, Y., Davies, R. L., Kuntschner, H. et al. 2002, MNRAS, 329, 513
- 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., 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
- Husemann, B., Jahnke, K., Sánchez, S. F., Barrado, D., Bekeraït\*error\*è, S., Bomans, D. J., Castillo-Morales, A., Catalán-Torrecilla, C. et al. 2013, A&A, 549, A87
- Ivezic, Z., Tyson, J. A., Acosta, E., Allsman, R., Anderson, S. F., Andrew, J., Angel, R., Axelrod, T. et al. 2008, ArXiv e-prints
- Kennicutt, Jr., R. C. 1998, ARA&A, 36, 189
- Lacerda, E. A. D. 2014, Master's thesis, Curso de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Santa Catarina
- Mateus, A., Sodré, L., Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Schoenell, W., & Gomes, J. M. 2006, MNRAS, 370, 721
- 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
- Rosales-Ortega, F. F., Kennicutt, R. C., Sánchez, S. F., Díaz, A. I., Pasquali, A., Johnson, B. D., & Hao, C. N. 2010, MNRAS, 405, 735
- Schmidt, M. 1959, ApJ, 129, 243
- Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., Weinberg, M. D., Schneider, S., Carpenter, J. M., Beichman, C., Capps, R. et al. 2006, AJ, 131, 1163
- Vale Asari, N., Stasińska, G., Cid Fernandes, R., Gomes, J. M., Schlickmann, M., Mateus, A., & Schoenell, W. 2009, MNRAS, 396, L71
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, Jr., J. E., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., Bakken, J. A., Barkhouser, R. et al. 2000, AJ, 120, 1579



---

Roberto Cid Fernandes Jr. (Orientador)



---

Eduardo Alberto Duarte Lacerda (Aluno)

Florianópolis, 16 de fevereiro de 2015.