

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Astronomia

Kethelin Parra Ramos

**Propriedades fotométricas de grupos e  
aglomerados de galáxias**

São Paulo

2020

Kethelin Parra Ramos

# Propriedades fotométricas de grupos e aglomerados de galáxias

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica

Orientador: Prof. Dr. Gastão B. Lima Neto (IAG/USP)

São Paulo

2020

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a minha mãe por sempre estar ao meu lado e nunca ter me deixado desistir. Agradeço ao Daniel por seu companheirismo e incentivo.

Agradeço às minhas amigas Bárbara Reis e Sthefany Brunner, amigas da escola para a vida toda. Agradeço às minhas amigas Fernanda Nogueira e Melissa de Andrade Nunes, sem o nosso trabalho em equipe e apoio mútuo durante essa jornada, nunca teríamos chegado tão longe. Agradeço aos meus amigos Guilherme Limberg, Helena Casimiro, Julia Massucato, Giovanna Tocuti e Paulo Lombardi por serem os meus parceiros de fofoca nos corredores do IAG.

Agradeço ao Prof. Dr. Gastão B. Lima Neto pelos ensinamentos e por ter me guiado durante a minha graduação.

*“God, please, forgive those who doubt me, forgot about me  
Then throw them down into the flames”*

Bad Omens - The Hell I Overcame

## Resumo

A luz difusa intra-aglomerado/intra-grupo é uma componente formada por estrelas arrancadas de galáxias por efeito de maré e está intimamente associada ao processo de formação da galáxia central do aglomerado/grupo de galáxias. O principal objetivo deste trabalho é estudar o perfil radial de brilho superficial da galáxia central dos grupos e aglomerados de galáxias selecionados e, através de técnicas de fotometria bidimensional, determinar a contribuição da luz difusa intra-aglomerado/intra-grupo.

Neste trabalho, selecionamos três grupos e um aglomerado de galáxias, observados nas bandas  $r$  e  $g$  pela MegaCAM/CFHT. Nós usamos dois métodos para estudar o perfil radial de brilho superficial das galáxias selecionadas, primeiro com o programa GALFIT e segundo com a ferramenta `ellipse`/IRAF. Detectamos um excesso de brilho em dois grupos de nossa amostra, sendo que a natureza deste ainda é incerta. Mostramos que o cenário *stellar stripping* pode ser o principal mecanismo de formação da luz difusa intra-aglomerado/intra-grupo em A1991 e UGC 846. Em NGC 1132 e NGC 7556, a luz difusa intra-grupo pode ter sido formada a partir das estrelas arrancadas durante fusões de galáxias. Entretanto, é muito cedo para chegar a um consenso a respeito dos processos de formação desta componente.

O uso de dados da próxima geração de telescópios e uma análise quantitativa rigorosa para que, de fato, seja determinada a contribuição da luz difusa intra-aglomerado/intra-grupo na amostra selecionada, são perspectivas para um futuro trabalho.

# Abstract

The intracluster/intragroup light is a component formed by galaxies' stripped stars from tidal effect and it is intimately linked to the cluster's/group's central galaxy formation process. This project's main objective is to study the radial surface brightness profile of the central galaxies from the selected groups and clusters and, through two-dimensional photometric techniques, determine the intracluster/intragroup light contribution to the central galaxy's brightness.

In this work, we have selected three groups and one galaxy cluster, each observed in  $r$  and  $g$  bands through MegaCAM/CFHT. We have used two methods to study the radial profile of surface brightness of the selected galaxies, firstly with GALFIT and secondly with the `ellipse`/IRAF task. We have detected a brightness excess in two groups of our sample, which has an unknown nature yet. We have shown that the stellar stripping scenario can be the dominant mechanism in forming intragroup/intracluster light in A1991 and UGC 846. In NGC 1132 and NGC 7559, the intragroup light might have been formed from the stripped stars during mergers. Nonetheless, it is early to reach a consensus in regard of the formation processes of this component.

The access to the next generation telescopes data and a rigorous quantitative analysis are expectations for a future work that must be done to determine, in fact, the intracluster/intragroup light contribution on the selected sample.

# Lista de Figuras

2.1	Exemplo do efeito do <i>Astronomical seeing</i> . . . . .	13
3.1	Filtros da MegaCAM. Fonte: CFHT. . . . .	15
5.1	NGC 1132 nas bandas $r$ (acima) e $g$ (abaixo). . . . .	22
5.2	NGC 7556 nas bandas $r$ (acima) e $g$ (abaixo). . . . .	22
5.3	Perfil radial de brilho superficial de A1991, UGC842, NGC1132 e NGC7556. . . . .	25
5.4	Perfil radial de brilho superficial de A1991, UGC842, NGC1132 e NGC7556. . . . .	26
6.1	Perfil radial de cor $g - r$ das galáxias centrais dos grupos e aglomerados selecionados. . . . .	28
B.1	A1991 nas bandas $r$ (acima) e $g$ (abaixo). . . . .	37
B.2	UGC842 nas bandas $r$ (acima) e $g$ (abaixo). . . . .	38
C.1	Presença de estruturas de conchas de baixo brilho superficial em NGC 1132 . . . . .	39

# Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros da função de Moffat, elipticidade e <i>background</i> da banda <i>r</i> . . .	19
4.2	Parâmetros da função de Moffat, elipticidade e <i>background</i> da banda <i>g</i> . . .	19
5.1	Parâmetros obtidos dos ajustes da função <b>sersic</b> do GALFIT nas galáxias centrais dos grupos e aglomerados estudados (banda <i>r</i> ). . . . .	23
5.2	Parâmetros obtidos dos ajustes da função <b>sersic</b> do GALFIT nas galáxias centrais dos grupos e aglomerados estudados (banda <i>g</i> ). . . . .	23
5.3	Resultados dos parâmetros do ajuste da convolução da PSF com o perfil de Sérsic nas galáxias centrais dos grupos e aglomerados estudados. . . . .	24

# Sumário

1. <i>Introdução</i> . . . . .	10
2. <i>Brilho Superficial de Galáxias</i> . . . . .	12
2.1 Perfil Radial de Brilho Superficial de Galáxias Elípticas . . . . .	12
2.2 <i>Seeing</i> . . . . .	13
2.2.1 Convolução da PSF . . . . .	14
3. <i>Amostra de dados</i> . . . . .	15
3.1 MegaCAM/CFHT . . . . .	15
3.2 Aglomerados . . . . .	16
3.2.1 A1991 . . . . .	16
3.3 Grupos fósseis . . . . .	16
3.3.1 NGC 1132 . . . . .	17
3.3.2 UGC 842 . . . . .	17
3.3.3 NGC 7556 . . . . .	17
4. <i>Fotometria bi-dimensional</i> . . . . .	18
4.1 Máscaras e ajuste da PSF . . . . .	18
4.2 GALFIT . . . . .	19
4.3 IRAF/STSDAS . . . . .	19
5. <i>Perfil Radial de Brilho Superficial</i> . . . . .	21
5.1 Ajuste do Perfil Radial de Brilho Superficial com o GALFIT . . . . .	21
5.2 Ajuste do Perfil Radial de Brilho Superficial - ELLIPSE/IRAF . . . . .	24

6. Luz difusa intra-aglomerado . . . . .	27
7. Conclusões . . . . .	29
Referências . . . . .	31
Apêndice . . . . .	34
A. Dedução de Equações . . . . .	35
A.1 Parâmetro $b_n$ . . . . .	35
B. Resultados GALFIT . . . . .	37
B.1 Imagens do ajuste . . . . .	37
C. Estrutura de Conchas em NGC 1132 . . . . .	39

## Introdução

As galáxias podem ser encontradas em grupos e aglomerados, sendo que os aglomerados de galáxias são as últimas, maiores e mais massivas estruturas a colapsarem no Universo. Os aglomerados se formaram nas regiões de maior densidade de matéria em larga escala do Universo, que evoluíram hierarquicamente, aumentando o seu tamanho devido ao acréscimo de estruturas menores até chegar na estrutura que observamos atualmente.

Os grupos de galáxias podem alcançar até  $\sim 50$  membros, enquanto os aglomerados de galáxias ricos podem ter milhares de galáxias e possuir uma massa total de  $\sim 1 - 10 \times 10^{14} M_{\odot}$  (Sarazin, 1988). Apesar do nome e do fato das galáxias dominarem a aparência do aglomerado/grupo no comprimento de onda do visível, a massa contida nas galáxias contribui apenas com uma pequena fração da massa total. A maior parte da massa total está na forma de Matéria Escura Fria.

A maior contribuinte da massa bariônica total está na forma de um gás muito quente e difuso, com temperaturas típicas de  $\sim 10^7 - 10^8 K$ , que preenche o meio intra-aglomerado (ICM, do inglês *intracluster medium*). Uma das possíveis formas de detectar esse gás é por meio de observações em raios-X, graças a um processo físico onde elétrons livres, ao interagirem com núcleos atômicos, são espalhados e perdem energia, emitindo fótons na frequência de raios-X (efeito conhecido como *Bremsstrahlung* térmico).

Zwicky (1951) foi o primeiro a propor a existência de uma componente difusa formada por estrelas arrancadas de galáxias por efeito de maré que preenche o meio intra-aglomerado, chamada luz difusa intra-aglomerado ou *intracluster light* (ICL). A sua origem está associada à formação da BCG (*brightest cluster galaxy*) localizada no centro dos aglomerados e muitas vezes é confundida com o halo estelar estendido da mesma. Seu brilho superficial é muito baixo, da ordem de  $27.5 - 30 \text{ mag}_r/\text{arcsec}^2$  (Zibetti et al., 2005), sendo

---

difícil de ser detectada. Por conta disto, a contribuição do ICL para a luminosidade total e, conseqüentemente, para a massa estelar e fração de bárions ( $\Omega_b/\Omega_m$ ) em aglomerados de galáxias, tem sido bem estudada apenas nas últimas décadas (e.g., Budzynski et al., 2013). No caso de grupos de galáxias, existem poucos estudos sobre a sua presença.

O objetivo desse trabalho é estudar o brilho superficial das galáxias mais brilhantes dos grupos e aglomerados selecionados (BCGs/BGGs) e, através de técnicas de fotometria bidimensional, determinar a contribuição da luz difusa intra-aglomerado/intra-grupo (ICL/IGL). No Capítulo 2 mostramos o modelo utilizado para descrever o perfil radial de brilho superficial de galáxias elípticas e discutimos algumas influências da *point spread function* neste perfil. Nos Capítulos 3, 4 e 5 foram apresentados, respectivamente, a amostra de dados, a metodologia e os resultados deste trabalho. Discutimos sobre a possível detecção da luz difusa intra-aglomerado/intra-grupo no Capítulo 6. Por fim, a conclusão deste trabalho de graduação se encontra no Capítulo 7.

## Brilho Superficial de Galáxias

O brilho superficial é uma medida da intensidade da luz por unidade de área que é emitida por um objeto extenso. A distribuição de brilho superficial revela importantes informações sobre a estrutura interna da galáxia. Na literatura são encontrados diferentes perfis radiais que as descrevem para cada tipo específico de galáxia, por exemplo, o disco de galáxias espirais pode ser descrito por um perfil exponencial. Neste trabalho estudamos as galáxias mais brilhantes de grupos e aglomerados (BCGs) que são classificadas morfológicamente, em sua grande maioria, como galáxias elípticas. Portanto, neste capítulo foram descritos o perfil radial de brilho superficial destas galáxias, assim como os efeitos da turbulência atmosférica e imperfeições do telescópio no mesmo.

### 2.1 Perfil Radial de Brilho Superficial de Galáxias Elípticas

No caso das galáxias elípticas, a sua distribuição de brilho superficial pode ser descrita pela lei de  $r^{1/4}$  (de Vaucouleurs, 1948) ou por sua generalização, conhecida como perfil de Sérsic (Sérsic, 1963):

$$\Sigma(R) = \Sigma_0 \exp \left[ - \left( \frac{R}{R_0} \right)^{\frac{1}{n}} \right], \quad (2.1)$$

onde  $\Sigma_0$  é o brilho superficial central,  $R_0$  é o fator de escala e  $n$  é o índice de Sérsic, parâmetro que determina o formato do perfil.

Na literatura esse perfil também pode ser encontrado da seguinte forma:

$$\Sigma(R) = \Sigma(R_e) \exp \left\{ -b_n \left[ \left( \frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \right\}, \quad (2.2)$$

onde  $R_e$  é o raio efetivo (raio que possui metade da luminosidade total),  $\Sigma(R_e)$  é o brilho superficial neste raio e  $b_n \approx 1.999n - 0.327$  ( $n > 1$ ). Para qualquer valor de  $n$ , o parâmetro

$b_n$  pode ser obtido resolvendo numericamente a equação:

$$\Gamma(2n) = 2\gamma(2n, b_n), \quad (2.3)$$

onde  $\Gamma(2n)$  é a função gama e  $\gamma(2n, b_n)$  é a função gama incompleta. A dedução desta relação se encontra no Apêndice A.

## 2.2 *Seeing*

Devido à turbulência atmosférica e às imperfeições no sistema óptico de um telescópio, a imagem de um objeto astronômico produzida sofre uma perda de resolução, fenômeno conhecido como *Astronomical seeing*.

Como mostrado em Trujillo et al. (2001), as regiões mais internas de uma galáxia são mais afetadas por este efeito, resultando numa intensa redução de seu brilho e, consequentemente, os parâmetros do perfil de Sérsic são alterados. A elipticidade das isofotas, curvas de brilho superficial constante, também é afetada. Se todas as isofotas do perfil possuírem a mesma elipticidade, as curvas internas do perfil se tornam mais circulares. Um exemplo da ação deste efeito é mostrado na Figura 2.1, onde a região central do perfil radial de brilho superficial de duas galáxias elípticas é menos brilhante do que o previsto.

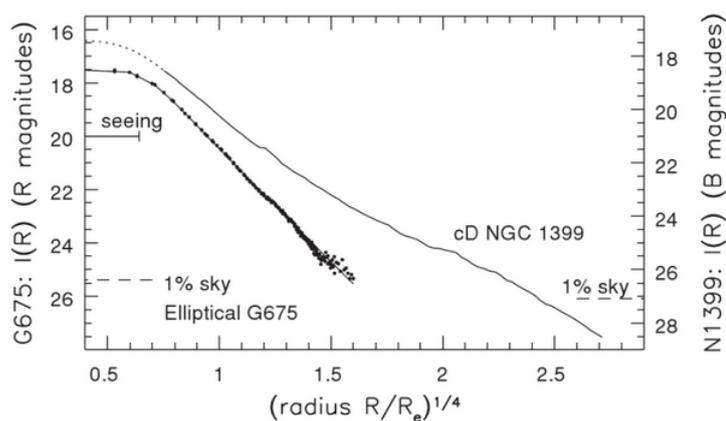


Figura 2.1: Exemplo do efeito do *Astronomical seeing* na região central da distribuição de brilho superficial de duas galáxias elípticas (G675 e NGC 1399). Figura retirada de Sparke & Gallagher (1975).

Deve-se levar em consideração este efeito no ajuste do perfil radial de brilho superficial, e para isto precisamos utilizar os parâmetros da PSF (*point spread function*), que é a função que descreve a distribuição de luz de objetos pontuais, na convolução da PSF com o perfil de Sérsic (Subseção 2.2.1). Neste trabalho, usamos a função de Moffat (Moffat,

1969) para descrever a PSF:

$$\text{PSF}(r) = \frac{\beta - 1}{\pi\alpha^2} \left[ 1 + \left( \frac{r}{\alpha} \right)^2 \right]^{-\beta}, \quad (2.4)$$

onde  $\beta$  e  $\alpha$  são parâmetros associados ao formato da função. O parâmetro  $\alpha$  pode ser calculado analiticamente a partir da largura à meia altura (FWHM, do inglês *full width at half maximum*). Como  $\text{PSF}(\text{FWHM}/2) = 0.5 \text{PSF}(0)$ , então:

$$\left[ 1 + \left( \frac{r}{\alpha} \right)^2 \right]^{-\beta} = \frac{1}{2} \rightarrow \left[ 1 + \left( \frac{r}{\alpha} \right)^2 \right]^{\beta} = 2$$

$$\left( \frac{r}{\alpha} \right)^2 = 2^{1/\beta} - 1 \rightarrow r = \alpha \sqrt{2^{1/\beta} - 1}$$

Substituindo  $r = \text{FWHM}/2$ , temos que a largura à meia altura é  $\text{FWHM} = 2\alpha\sqrt{2^{1/\beta} - 1}$ .

Portanto, o parâmetro  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\text{FWHM}}{2\sqrt{2^{1/\beta} - 1}}. \quad (2.5)$$

### 2.2.1 Convolução da PSF

O brilho superficial observado nas isofotas de uma galáxia elíptica em um determinado raio  $R$  é dado por:

$$\Sigma_{obs}(R) = \Sigma_c(R) + \text{background}, \quad (2.6)$$

onde  $\Sigma_c(R)$  é a convolução da PSF com o perfil de Sérsic e o *background* é a contribuição do brilho do fundo das imagens. O trabalho de Trujillo et al. (2001) mostra que esta convolução, em coordenadas elípticas, é dada por:

$$\Sigma_c(\xi, \theta) = (1 - \epsilon) \int_0^\infty \xi' \Sigma(\xi') d\xi' \int_0^{2\pi} d\theta' \text{PSF}(\xi', \theta', \xi, \theta), \quad (2.7)$$

onde  $\epsilon = 1 - (b/a)$  é a elipticidade da isofota, sendo que  $a$  e  $b$  são respectivamente os semi-eixos maior e menor. O termo  $\Sigma(\xi')$  é o perfil de Sérsic (Equação 2.2) e  $\text{PSF}(\xi', \theta', \xi, \theta)$  é a função de Moffat em coordenadas elípticas dada por:

$$\text{PSF}(\xi', \theta', \xi, \theta) = \frac{\beta - 1}{\pi\alpha^2} \left[ 1 + \frac{\xi^2 + \xi'^2 - 2\xi\xi' \cos(\theta - \theta') + (\epsilon^2 - 2\epsilon)(\xi' \sin \theta' - \xi \sin \theta)^2}{\alpha^2} \right]^{-\beta}.$$

Neste trabalho supomos que a elipticidade é constante e adotamos  $\theta = 0$  (semi-eixo maior) para ajustar o perfil radial.

## Amostra de dados

Selecionamos alguns grupos fósseis e aglomerados de galáxias, observadas pela MegaCAM/CFHT<sup>1</sup> (*Canada France Hawaii Telescope*) nas bandas  $r$  e  $g$ , com o propósito de estudar as propriedades fotométricas de suas galáxias centrais e, se for possível, encontrar indícios da presença da luz difusa intra-aglomerado/intra-grupo. Neste capítulo se encontra uma breve revisão bibliográfica dos grupos e aglomerados estudados, além de algumas especificações técnicas da MegaCAM.

### 3.1 MegaCAM/CFHT

O telescópio *Canada France Hawaii Telescope* (CFHT) é localizado em um observatório instalado no topo de Mauna Kea, Havaí. A MegaCAM é um instrumento que atua no

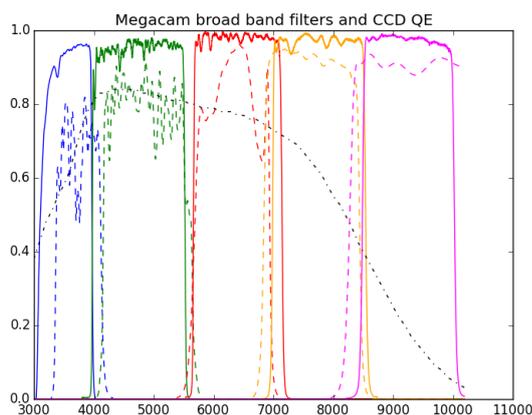


Figura 3.1: Filtros da MegaCAM. Fonte: CFHT.

óptico e infravermelho próximo (Figura 3.1), composto 40 CCDs (*charge coupled device*)

<sup>1</sup> <https://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Imaging/Megacam/>

de  $2048 \times 4612$  pixels que permite uma resolução de  $0.187''/\text{pixel}$ . Os comprimentos de onda centrais das bandas fotométricas utilizadas,  $r$  e  $g$ , são iguais a 640 nm e 475 nm, respectivamente. As imagens deste trabalho foram “binadas”, isto é, passaram por um processo onde um conjunto de pixels foram mesclados a fim de transformá-los em um pixel maior ( $3 \times 3$  pixels). Desta maneira, a escala de placa das imagens é igual a  $0.561''/\text{pixel}$ .

## 3.2 Aglomerados

Nesta seção podem ser encontradas algumas informações da literatura sobre o aglomerado selecionado neste trabalho (A1991).

### 3.2.1 A1991

A presença da intensa emissão de raios-X próxima à região central de Abell 1991 e o depósito de massa de  $\sim 25 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$  (Sharma et al., 2004) podem estar associados a um fenômeno conhecido como *cooling-flow*, caracterizado pelo resfriamento do gás localizado na região central de aglomerados devido à perda de energia pela emissão de radiação, resultando num fluxo de matéria em direção ao núcleo do aglomerado (Fabian, 1994). Contudo, o cenário mais aceito para descrever este sistema é o “*cool-core*”, devido à existência de mecanismos de reaquecimento que controlam a perda radiativa (Pandge et al., 2013), como *feedback* de AGN (*active galactic nuclei*). Além disto, o pico de emissão de raios-X de A1991 possui um deslocamento de 11 kpc em relação ao norte da BCG (Hamer et al., 2012).

## 3.3 Grupos fósseis

Grupos fósseis são grupos onde o seu brilho é dominado por uma galáxia elíptica gigante localizada em sua região central e, por conta disso, aparentam ser isoladas. O que as diferencia de galáxias isoladas é a alta emissão em raios-X graças à presença de um gás muito quente ao redor da galáxia central com luminosidade de  $L_{X,bol} \geq 10^{42} h_{50}^{-2} \text{ erg s}^{-1}$ . A diferença de magnitude total absoluta na banda  $R$  entre as galáxias mais brilhantes do grupo deve estar respeitando o limite de  $\Delta m_{12} \geq 2.0 \text{ mag}$  (Jones et al., 2003). O cenário de formação mais provável, apresentadas em Ponman et al. (1994) e Jones et al. (2003), é de que a galáxia central é resultado de uma fusão de galáxias que pertenciam a um grupo

normal e a maior evidência disso é a presença do halo estendido de raios-X. Se este cenário estiver correto, estes grupos são muito antigos.

Nesta seção podem ser encontradas algumas informações da literatura sobre as galáxias centrais (NGC1132, UGC842 e NGC7556) dos grupos fósseis selecionados.

### 3.3.1 NGC 1132

Alguns trabalhos (e.g., Mulchaey & Zabludoff, 1999) mostram que a galáxia elíptica NGC 1132 é membro de um grupo fóssil que possui um halo de raios-X que se estende em até  $\sim 250 \text{ kpc } h^{-1}$ , e que este também é composto por algumas galáxias anãs que estão próximas à galáxia central. Kim et al. (2018) mostram que a morfologia do gás quente observado em raios-X é bastante perturbada e assimétrica. Uma das possíveis explicações discutidas para este raro fenômeno é que ele seria causado por uma recente fusão com uma galáxia pequena com baixo parâmetro de impacto.

### 3.3.2 UGC 842

Existem poucas informações a respeito de UGC 842 na literatura, mas sabe-se que este pertence a um grupo fóssil (Voevodkin et al., 2008). Lopes de Oliveira et al. (2010) mostraram, a partir da distribuição de velocidades das galáxias, que o grupo em questão, na realidade, seria composto pela superposição de dois grupos diferentes (S1 e S2), contrariando os resultados de Voevodkin et al. (2008). Por fim, este trabalho concluiu que a estrutura UGC 842/S1 pode ser classificada como um grupo fóssil de baixa massa, sendo este um caso excepcional.

### 3.3.3 NGC 7556

Sendo este outro caso com poucas informações na literatura, NGC 7556 é uma galáxia massiva ( $M_{\star} \cong 10^{11.5} M_{\odot}$ ) membro do grupo fóssil RXC J2315.7-0222 que apresenta um envoltório estelar esferoidal, em contraste com a classificação morfológica anterior (S0), e uma população estelar centralmente concentrada de idade intermediária (Corsini et al., 2018).

## Fotometria bi-dimensional

Neste capítulo descrevemos as duas técnicas de fotometria bi-dimensional utilizadas para o estudo do brilho superficial das galáxias centrais de grupos e aglomerados, assim como o procedimento prévio que foi realizado nas imagens das galáxias antes de ajustar o perfil radial de brilho superficial. Escolhemos o programa SAOImage DS9 (versão 7.5) para fazer a visualização das imagens dos grupos/aglomerados.

### 4.1 Máscaras e ajuste da PSF

Primeiramente, precisamos ocultar as estrelas da Via Láctea, as galáxias de primeiro plano e de fundo que atrapalham a análise da distribuição de brilho superficial, causando uma contaminação na luz da galáxia selecionada. A ferramenta *regions* do SAOImage DS9 permitiu escolher os locais das imagens onde continham estes objetos indesejados. Para facilitar esta tarefa, usamos *scripts* para automatizar o carregamento de algumas *regions* (usando os catálogos disponíveis no programa) e para criar o arquivo da imagem final contendo as “máscaras”.

Também é preciso levar em consideração os efeitos da PSF (Seção 2.2), e para isto selecionamos por volta de 20–30 estrelas não saturadas. Esta tarefa foi realizada utilizando o programa SAOImage DS9 e a ferramenta *imexamine* do IRAF, que ajusta e permite a visualização do perfil radial de brilho (função de Moffat) das estrelas escolhidas. A média dos parâmetros  $\beta$  e FWHM (Tabelas 4.1 e 4.2) foram utilizadas, posteriormente, no ajuste da convolução da PSF com o perfil de Sérsic.

Excepcionalmente, o GALFIT permite ajustar a função de Moffat para gerar uma imagem simulada da PSF, que será usada no ajuste do perfil radial de brilho superficial da

Tabela 4.1 - Parâmetros da função de Moffat, elipticidade e *background* da banda *r*.

Nome	$\beta$	FWHM [px]	$\epsilon$	<i>background</i> [ADU/px <sup>2</sup> ]
A1991	$3.6 \pm 0.1$	$1.91 \pm 0.01$	$0.30 \pm 0.03$	$715.4 \pm 4.1$
NGC 1132	$3.6 \pm 0.1$	$1.31 \pm 0.01$	$0.37 \pm 0.02$	$766.9 \pm 4.2$
NGC 7556	$3.8 \pm 0.3$	$1.34 \pm 0.02$	$0.31 \pm 0.02$	$1006.3 \pm 4.4$
UGC 842	$2.7 \pm 0.1$	$2.15 \pm 0.01$	$0.30 \pm 0.03$	$633.6 \pm 3.2$

Tabela 4.2 - Parâmetros da função de Moffat, elipticidade e *background* da banda *g*.

Nome	$\beta$	FWHM [px]	$\epsilon$	<i>background</i> [ADU/px <sup>2</sup> ]
A1991	$3.2 \pm 0.1$	$2.38 \pm 0.01$	$0.29 \pm 0.03$	$523.1 \pm 2.8$
NGC 1132	$3.7 \pm 0.1$	$1.72 \pm 0.01$	$0.36 \pm 0.02$	$339.1 \pm 2.3$
NGC 7556	$3.3 \pm 0.2$	$2.12 \pm 0.02$	$0.31 \pm 0.02$	$468.8 \pm 2.6$
UGC 842	$2.5 \pm 0.1$	$3.34 \pm 0.01$	$0.30 \pm 0.04$	$388.9 \pm 1.1$

galáxia. Portanto, neste caso não é necessário inserir os dados das Tabelas 4.1 e 4.2 no programa.

## 4.2 GALFIT

GALFIT (Peng et al., 2002) é um programa que possui ferramentas para extrair informações de diversos tipos de objetos astronômicos, por exemplo, galáxias. Ele se baseia em ajustes bi-dimensionais de modelos analíticos, permitindo diversos ajustes simultâneos, levando em consideração a *point spread function* e o fundo (*background*) das imagens. Neste trabalho foi utilizada a função **sersic** para ajustar o brilho superficial das galáxias selecionadas e a função **sky** para calcular a contribuição do brilho do fundo.

Deve-se inserir parâmetros de entrada no GALFIT antes de executá-lo, por exemplo, o centro da imagem, a escala de placa, a imagem da PSF etc. Ao finalizar o ajuste, o programa retorna os parâmetros de saída, a galáxia modelada e uma imagem residual, que foi feita a partir da subtração da galáxia modelada na imagem original, permitindo a visualização de possíveis estruturas internas resultadas de diferentes processos astrofísicos.

## 4.3 IRAF/STSDAS

O IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*) é um *software* composto por diversos pacotes com o objetivo de redução e análise de dados astronômicos (Tody, 1986), desenvol-

vido no *National Optical Astronomy Observatories* (NOAO). Uma alternativa para estudar o perfil radial de brilho superficial é a utilização da ferramenta `ellipse` do IRAF/STSDAS, que se baseia no ajuste de isofotas ao longo da galáxia selecionada.

Alguns parâmetros foram fixados nos dados do perfil extraídos com o `ellipse`, a fim de simplificar o ajuste da convolução da PSF com o perfil de Sérsic. No caso da elipticidade das isofotas, tomamos a média dos valores calculados pelo `ellipse`, excluindo os seis primeiros dados (região mais afetada pelo *seeing*). Os parâmetros da função de Moffat e o *background*, ambos calculados com o IRAF, também foram fixados no ajuste. Todos estes valores podem ser encontrados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Os dados foram inseridos em um programa escrito em *Python* para realizar o ajuste da convolução (Equação 2.6), onde utilizamos o método dos mínimos quadrados (MMQ). Para minimizar o chi-quadrado usamos o algoritmo desenvolvido por Nelder & Mead (1965), que é aplicado em problemas de otimização não-lineares que não possuem derivada conhecida.

Como a linguagem *Python* é interpretada e não compilada, ao utilizá-la em trabalhos que envolvem cálculo numérico, o tempo de execução de algoritmos pode levar horas para ser finalizado. Uma forma de reduzir o tempo de execução é otimizando o código, para isto parte dele foi escrito em *Cython*<sup>1</sup> (Behnel et al., 2011).

---

<sup>1</sup> *Cython* é uma linguagem de programação compilada que converte códigos do *Python* em C/C++, permitindo que o programa tenha um alto desempenho semelhante ao que se obteria com o código escrito originalmente em C/C++. Disponível em <https://cython.org/>.

## Perfil Radial de Brilho Superficial

Consideramos que o brilho residual resultante da subtração do modelo com os dados observacionais da galáxia central seria um indicativo da presença da luz difusa intra-aglomerado/intra-grupo. Além disso, esta metodologia também permite a identificação de estruturas internas peculiares da galáxia central, originadas de processos astrofísicos específicos. Neste capítulo são apresentados os resultados do ajuste do perfil radial de brilho superficial na galáxia central dos grupos/aglomerados selecionados, conforme os métodos descritos no Capítulo 4.

### 5.1 Ajuste do Perfil Radial de Brilho Superficial com o GALFIT

Em alguns casos, o ajuste de apenas uma componente da função `sersic` não modelou a região central das galáxias de forma satisfatória. Para resolver este problema, optamos por utilizar duas componentes. Os resultados do ajuste, nas bandas  $r$  e  $g$ , estão listados nas Tabelas 5.1 e 5.2, onde o parâmetro  $n$  é o índice de Sérsic,  $R_e$  é o raio efetivo e  $m_T$  é a magnitude aparente total na banda indicada (nas galáxias em que utilizamos duas componentes, este valor é a “soma” das magnitudes aparentes de cada).

De modo geral, os valores do chi-quadrado reduzido ( $\chi_{red}^2$ ), definido como a razão entre o chi-quadrado e número de graus de liberdade, são próximos de 1. Isto indica que o modelo teórico é compatível com os dados observados. A presença de contaminação de luz, provenientes de fontes luminosas que não foram devidamente cobertas, pode explicar os casos em que este valor é um pouco elevado ( $\sim 2$ ). No caso de A1991 (banda  $g$ ), o  $\chi_{red}^2$  está um pouco abaixo do esperado e isto pode ter sido ocasionado pela maneira que o GALFIT estimou as incertezas dos *pixels* da imagem.

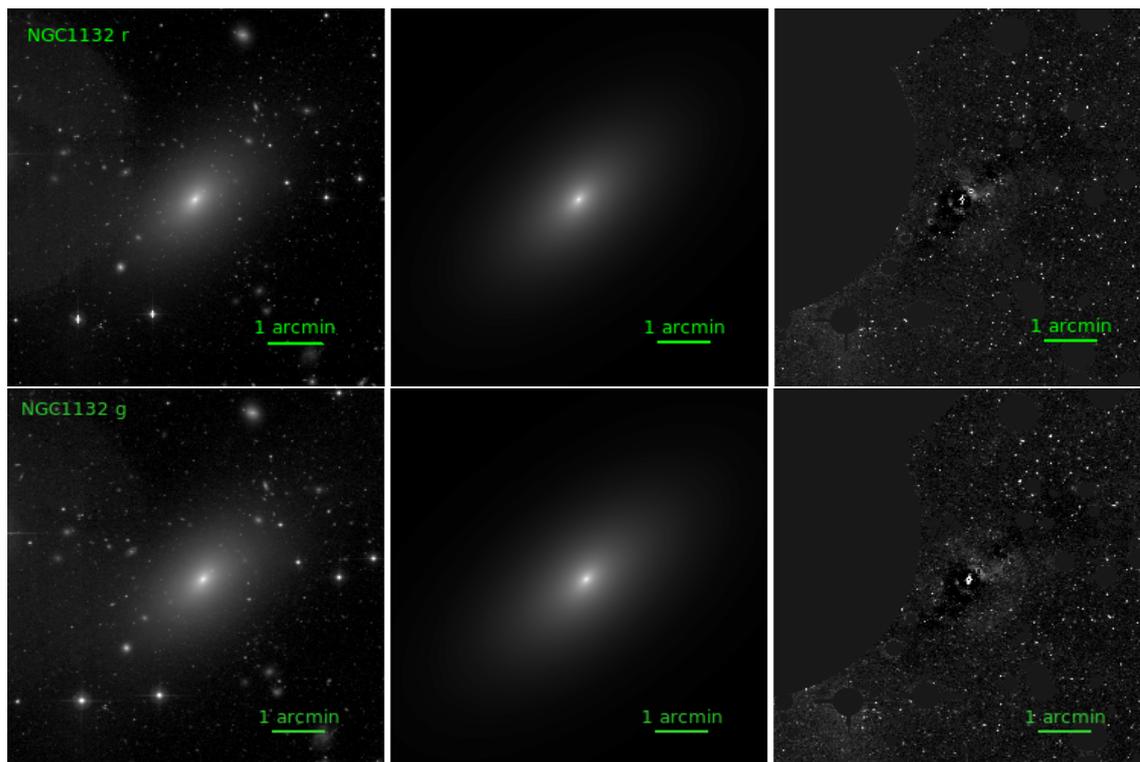


Figura 5.1: NGC 1132 nas bandas  $r$  (acima) e  $g$  (abaixo). À esquerda: imagem de NGC 1132 no visível. No meio: resultado do ajuste do perfil de Sérsic utilizando o programa GALFIT. À direita: imagem residual do ajuste contendo as máscaras.

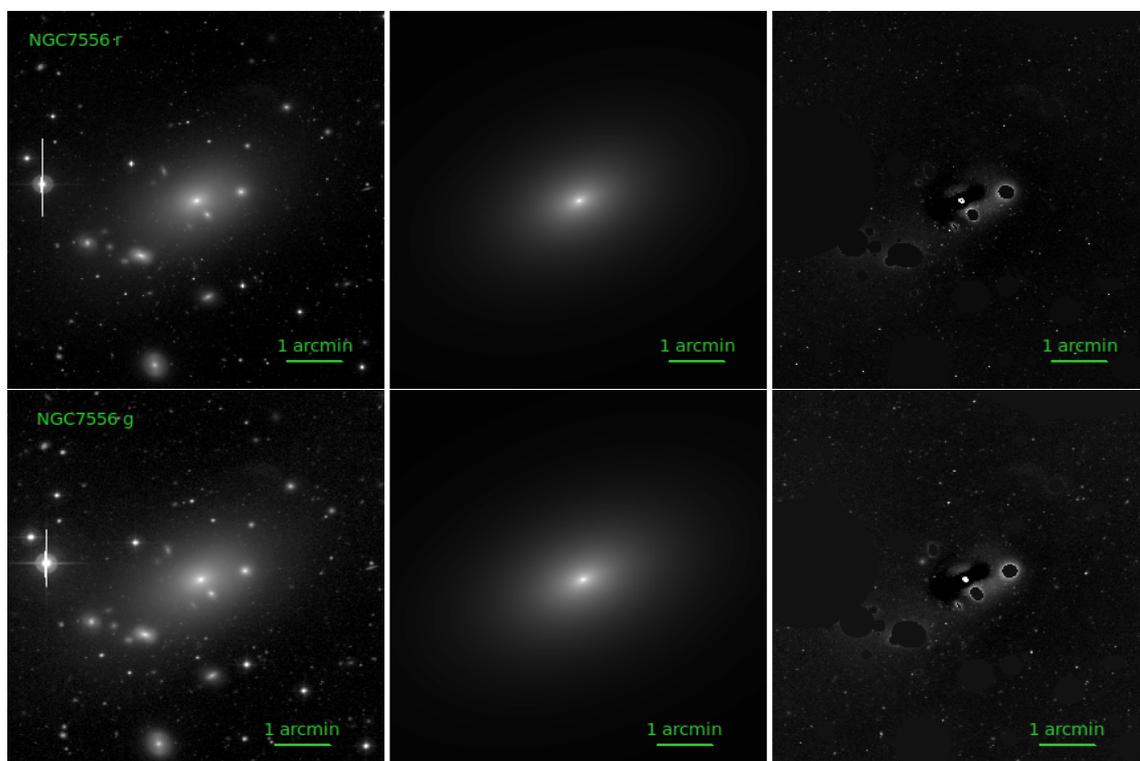


Figura 5.2: NGC 7556 nas bandas  $r$  (acima) e  $g$  (abaixo). À esquerda: imagem de NGC 7556 no visível. No meio: resultado do ajuste do perfil de Sérsic utilizando o programa GALFIT. À direita: imagem residual do ajuste contendo as máscaras.

Tabela 5.1 - Parâmetros obtidos dos ajustes da função `sersic` do GALFIT nas galáxias centrais dos grupos e aglomerados estudados (banda  $r$ ).

Nome	$m_T$ [mag]	$n$	$R_e$ [arcmin]	$n$	$R_e$ [arcmin]	$\chi_{red}^2$
A1991	$13.12 \pm 0.01$	$3.34 \pm 0.02$	$0.241 \pm 0.004$	$2.12 \pm 0.02$	$1.10 \pm 0.01$	1.2
NGC1132	$11.712 \pm 0.004$	$1.31 \pm 0.01$	$1.464 \pm 0.005$	$2.77 \pm 0.01$	$0.217 \pm 0.001$	1.7
NGC7556	$11.416 \pm 0.001$	$4.98 \pm 0.01$	$1.098 \pm 0.002$	-	-	2.0
UGC842	$12.945 \pm 0.001$	$4.17 \pm 0.01$	$0.391 \pm 0.001$	-	-	1.8

Tabela 5.2 - Parâmetros obtidos dos ajustes da função `sersic` do GALFIT nas galáxias centrais dos grupos e aglomerados estudados (banda  $g$ ).

Nome	$m_T$ [mag]	$n$	$R_e$ [arcmin]	$n$	$R_e$ [arcmin]	$\chi_{red}^2$
A1991	$13.93 \pm 0.01$	$3.35 \pm 0.02$	$0.24 \pm 0.01$	$1.83 \pm 0.01$	$0.97 \pm 0.01$	0.98
NGC1132	$12.456 \pm 0.003$	$1.183 \pm 0.005$	$1.573 \pm 0.004$	$2.95 \pm 0.01$	$0.276 \pm 0.002$	1.0
NGC7556	$12.210 \pm 0.001$	$4.486 \pm 0.005$	$0.979 \pm 0.002$	-	-	1.8
UGC842	$13.749 \pm 0.001$	$4.21 \pm 0.01$	$0.420 \pm 0.001$	-	-	1.0

Observamos a presença de um excesso de brilho na região inferior esquerda das imagens residuais de NGC 1132 ( $\sim 150''$  na Figura 5.1) e NGC 7556 ( $\sim 100''$  na Figura 5.2), que pode estar associado à contaminação de luz das estrelas de primeiro plano na região ou pode ser um indício da presença da luz difusa intra-grupo. No entanto, uma análise mais rigorosa, através de uma minuciosa identificação de possíveis fontes luminosas que possam ter contaminado a amostra e a utilização de imagens de outros telescópios, deve ser realizada para concluir algo de forma efetiva. Além disso, o excesso de brilho na região central de NGC 7556 pode ser explicado pela contaminação de luz das galáxias satélites presentes na região.

De forma contrária, nenhuma estrutura foi detectada em UGC 846 e A1991, porém, isto não significa que a luz difusa intra-grupo/intra-aglomerado não exista nesses sistemas. Isto pode estar tanto relacionado com as limitações instrumentais quanto com a própria definição do ICL/IGL. Alguns autores (e.g., Iodice et al., 2019) sugerem que o halo estelar estendido da galáxia central e o ICL podem ter a mesma origem. Por fim, as imagens destas galáxias e os detalhes sobre a detecção de estruturas de “conchas” em NGC 1132 podem ser consultados nos Apêndices B e C.

Tabela 5.3 - Resultados dos parâmetros do ajuste da convolução da PSF com o perfil de Sérsic nas galáxias centrais dos grupos e aglomerados estudados.

	<b>Banda</b>	$\Sigma(R_e)_{[\text{ADU}/\text{pixel}^2]}$	$R_e$ [arcmin]	$n$	$\chi_{red}^2$
Abell 1991	<i>r</i>	$89 \pm 21$	$0.44 \pm 0.07$	$3.5 \pm 0.2$	1.6
	<i>g</i>	$27 \pm 13$	$0.60 \pm 0.21$	$3.8 \pm 0.4$	0.3
NGC 1132	<i>r</i>	$747 \pm 45$	$0.27 \pm 0.01$	$2.57 \pm 0.05$	8.0
	<i>g</i>	$320 \pm 29$	$0.30 \pm 0.02$	$2.65 \pm 0.08$	3.1
NGC 7556	<i>r</i>	$737 \pm 54$	$0.25 \pm 0.01$	$2.8 \pm 0.1$	16
	<i>g</i>	$266 \pm 33$	$0.31 \pm 0.03$	$3.1 \pm 0.1$	6.5
UGC 842	<i>r</i>	$44 \pm 13$	$0.84 \pm 0.16$	$5.9 \pm 0.3$	0.62
	<i>g</i>	$12 \pm 8$	$1.14 \pm 0.49$	$6.7 \pm 0.8$	0.14

## 5.2 Ajuste do Perfil Radial de Brilho Superficial - ELLIPSE/IRAF

Os resultados do ajuste da convolução da PSF com o perfil de Sérsic + *background* nos dados extraídos com o ELLIPSE/IRAF podem ser vistos nas Figuras 5.3 e 5.4. Abaixo de cada gráfico se encontram os resíduos reduzidos (normalizado pela incerteza de cada dado).

Os parâmetros do perfil de Sérsic obtidos no ajuste da convolução estão listados na Tabela 5.3, onde o parâmetro  $\Sigma(R_e)$  é o brilho superficial neste raio. Apesar dos valores do chi-quadrado reduzido serem muito baixos em alguns casos, devido às incertezas superestimadas, o modelo reproduziu todo o perfil de forma satisfatória. O comportamento “oscilatório” visto nos resíduos reduzidos pode ser apenas um artefato do ajuste. De modo geral, nenhum excesso significativo de brilho foi detectado.

O  $\chi_{red}^2$  elevado em alguns casos, que coincidem com as galáxias onde observamos excesso de brilho com o GALFIT, pode ser explicado pelo modelo escolhido que talvez seja inadequado para descrever o perfil destas galáxias. Devido a isto, a região externa do perfil pode ter sido “falsamente” bem ajustada. É provável que o modelo precise de mais uma componente Sérsic, mas faremos isto em um futuro trabalho.

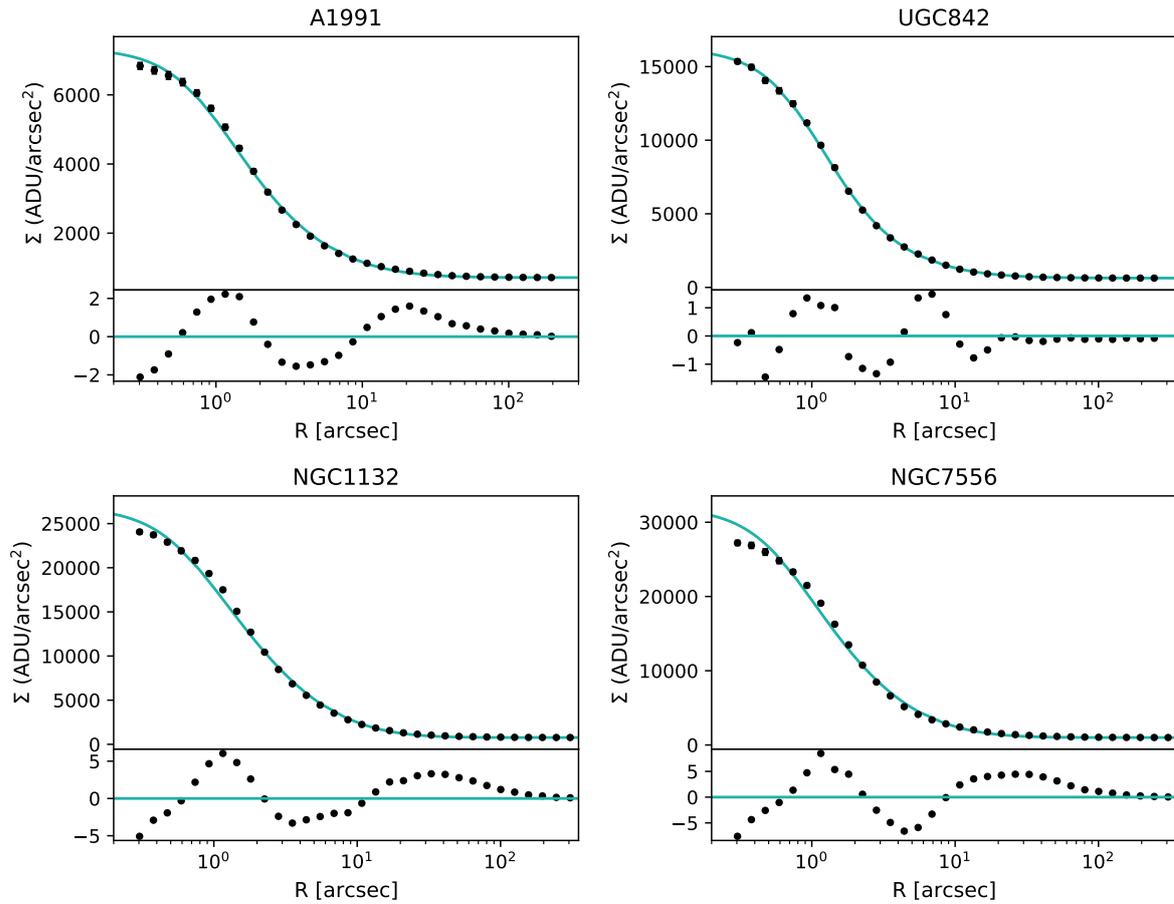


Figura 5.3: Perfil radial de brilho superficial de A1991, UGC842, NGC1132 e NGC7556, na banda  $r$ , em unidades de *Analog-to-Digital Unit*/pixel<sup>2</sup>. A linha sólida verde representa o ajuste da convolução da PSF com o perfil de Sérsic + *background*. Abaixo de cada gráfico estão os resíduos reduzidos.

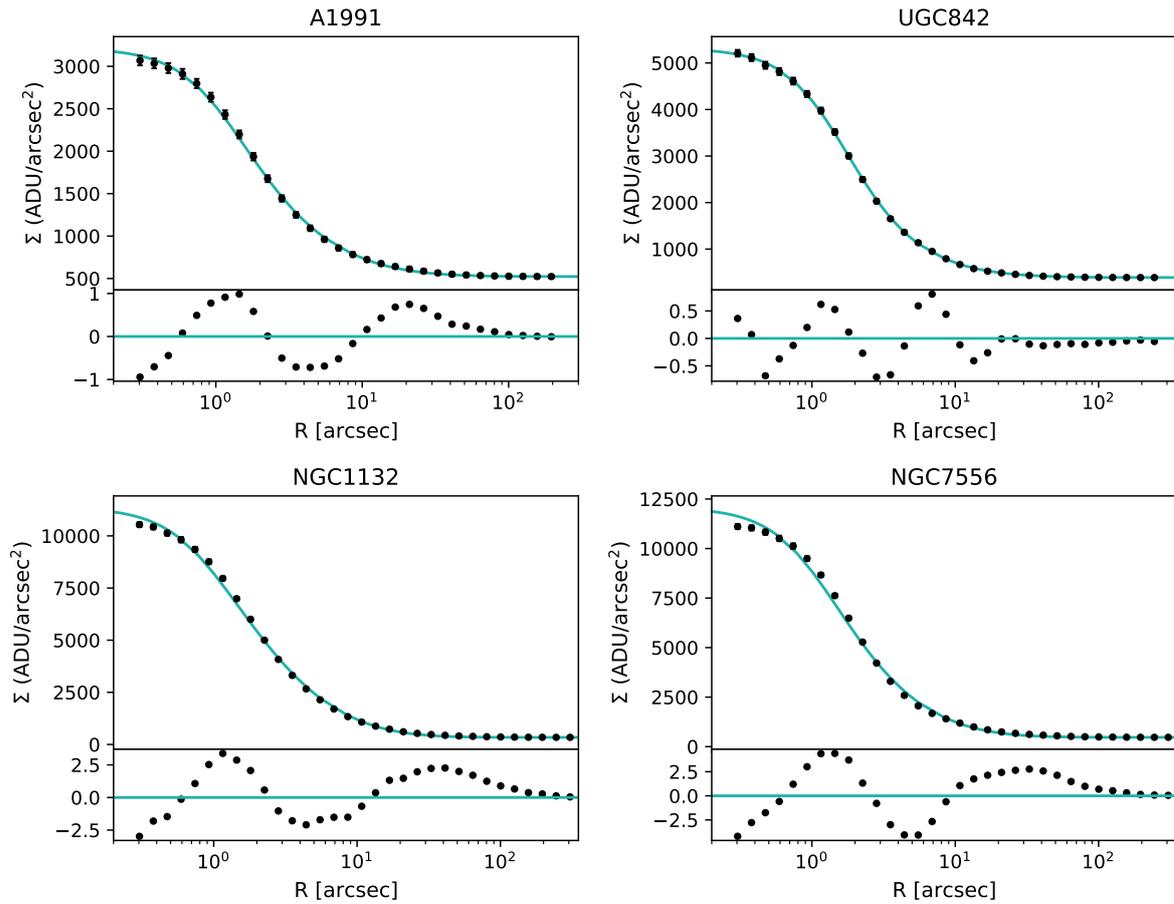


Figura 5.4: Perfil radial de brilho superficial de A1991, UGC842, NGC1132 e NGC7556, na banda  $g$ , em unidades de *Analog-to-Digital Unit*/pixel<sup>2</sup>. A linha sólida verde representa o ajuste da convolução da PSF com o perfil de Sérsic + *background*. Abaixo de cada gráfico estão os resíduos reduzidos.

## Luz difusa intra-aglomerado

A luz difusa intra-aglomerado (daqui em diante, ICL) é definida como uma componente difusa de estrelas, ligada ao potencial do aglomerado, que preenche o meio intra-aglomerado e está intimamente associada ao processo de formação da galáxia central. A separação entre esta componente e o halo estelar estendido da galáxia central é praticamente indistinguível. O halo estelar estendido, em tese, está ligado à galáxia central, mas existe a possibilidade deste compartilhar a mesma origem que o ICL, em outras palavras, podem ser a mesma componente. Por conta disto, muitos trabalhos utilizam uma abordagem de estudo que consiste em analisar o ICL sem separá-lo da galáxia central (e.g., Pillepich et al., 2018; Zhang et al., 2019).

Sua contribuição para a luminosidade total do aglomerado varia de  $\sim 4\% - 20\%$  (e.g., Feldmeier et al., 2004; Zibetti et al., 2005; Krick & Bernstein, 2007), refletindo na contribuição da massa estelar e fração de bárions do aglomerado. Além disso, estudos recentes mostram que o ICL pode ser utilizado como traçador da distribuição de matéria escura de um aglomerado (e.g., Montes & Trujillo, 2018; Deason et al., 2020) e, portanto, pode ser um estimador de sua massa total (Alonso Asensio et al., 2020). Por ser uma componente de baixo brilho superficial ( $> 27 \text{ mag/arcsec}^2$ ), a nova geração de telescópios (e.g., *James Webb Space Telescope*) permitirá uma melhor detecção desta estrutura.

Com o intuito de entender a natureza do excesso de brilho observado em alguns grupos de nossa amostra, estudamos o perfil radial de cor  $g - r$  das galáxias, a partir dos dados da magnitude aparente extraídos com o ELLIPSE/IRAF. Na Figura 6.1 mostramos que o perfil de cor de A1991/UGC842 e NGC1132/NGC7556 são semelhantes entre si. No último caso, observamos que há um excesso de cor vermelha no intervalo  $\sim 50'' - 400''$ , que coincide com a região do excesso de brilho notificado na Seção 5.1.

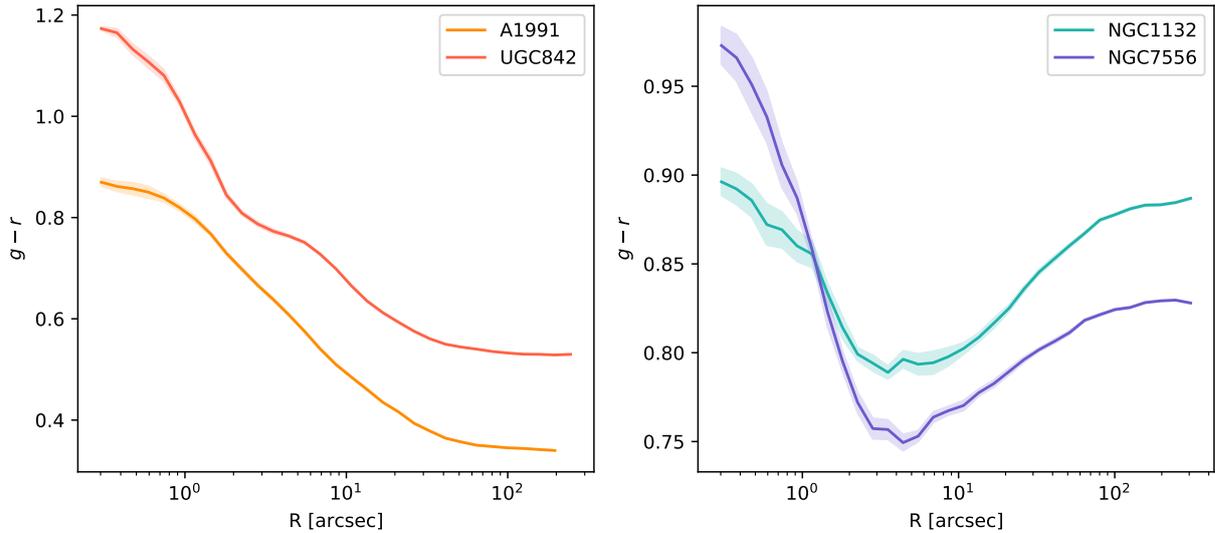


Figura 6.1: Perfil radial de cor  $g-r$  das galáxias centrais dos grupos e aglomerados selecionados, agrupados pela semelhança entre os perfis. A região colorida preenchida em cada curva indica  $3\sigma$  de incerteza.

Na literatura são encontradas simulações de diversos cenários que podem explicar a formação da luz difusa intra-aglomerado, como fusões de galáxias, *stellar stripping* (estrelas arrancadas das partes externas de galáxias satélites devido ao efeito de maré), formação estelar, entre outros (e.g., Contini et al., 2014; Puchwein et al., 2010).

O modelo semi-analítico de formação de galáxias, apresentado por Contini et al. (2019), prevê que os mecanismos de formação do ICL refletem, por exemplo, em sua cor e metalicidade. É previsto que, se o principal mecanismo de formação do ICL é o *stellar stripping*, um gradiente de cor deve ser observado e a região mais externa (onde se concentra a maior parte do ICL) deve ser mais azulada que a BCG. De forma contrária, caso o mecanismo principal seja fusões de galáxias, o perfil não deve apresentar um gradiente de cor, pois as populações estelares são misturadas durante o processo da fusão.

Os nossos resultados, apresentados na Figura 6.1, indicam que a região mais externa de A1991/UGC 842 é mais azulada. Se considerarmos que o ICL e o halo estelar estendido da galáxia central são a mesma componente, o cenário *stellar stripping* como principal mecanismo de formação é favorecido. Nos casos de NGC 1132 e NGC 7556, se o excesso de brilho detectado não for causado pela contaminação de luz, a luz difusa intra-grupo pode ter sido formada a partir das estrelas arrancadas durante fusões de galáxias.

## Conclusões

Neste trabalho de graduação estudamos a distribuição de brilho superficial das galáxias centrais de grupos e aglomerados, através de dois métodos distintos de fotometria bi-dimensional, com o objetivo de detectar a presença da luz difusa intra-aglomerado ou intra-grupo.

Não detectamos excesso significativo de brilho nos ajustes da convolução da PSF com o perfil de Sérsic nos dados extraídos com a ferramenta `ellipse` do IRAF/STSDAS. Apesar dos valores do chi-quadrado reduzido serem um pouco baixos em alguns casos, o ajuste reproduziu bem a região mais externa do perfil. Os resultados com chi-quadrado reduzido elevado podem ser explicados pela escolha do modelo para descrever o perfil. É possível que este problema seja resolvido ao adicionarmos mais uma componente Sérsic no ajuste.

Em particular, verificamos a existência de um excesso de brilho na região mais externa ( $R \sim 150''$ ) de NGC 1132 e ( $R \sim 100''$ ) de NGC 7556 com o GALFIT, sendo que a natureza deste ainda é incerta. Levantamos a hipótese de ser um indício da existência da luz difusa intra-grupo, interferência do brilho do halo das estrelas de primeiro plano ou algum outro tipo de contaminação de luz.

Para entender a natureza do excesso de brilho detectado em alguns grupos da amostra, estudamos o perfil radial de cor  $g - r$  das galáxias, a partir dos dados da magnitude aparente extraídos com o `ellipse`/IRAF. Mostramos que o cenário *stellar stripping* pode ser o principal mecanismo de formação da luz difusa intra-aglomerado/intra-grupo em A1991 e UGC 846. Nos casos de NGC 1132 e NGC 7556, a luz difusa intra-grupo pode ter sido formada a partir das estrelas arrancadas durante fusões de galáxias.

Entretanto, é muito cedo para chegar a um consenso a respeito dos processos de formação desta componente. O uso de dados observacionais da próxima geração de te-

---

lescópios e uma análise quantitativa (estimativa da luminosidade do ICL/IGL) para que, de fato, seja determinada a contribuição da luz difusa intra-aglomerado/intra-grupo na amostra selecionada, são perspectivas para um futuro trabalho.

## Referências Bibliográficas

- Alamo-Martínez K. A., et al., 2012, *A&A*, 546, A15
- Alonso Asensio I., Dalla Vecchia C., Bahé Y. M., Barnes D. J., Kay S. T., 2020, *MNRAS*, 494, 1859
- Behnel S., Bradshaw R., Citro C., Dalcin L., Seljebotn D. S., Smith K., 2011, *Computing in Science and Engg.*, 13, 31–39
- Budzynski J. M., Koposov S. E., McCarthy I. G., Belokurov V., 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437, 1362
- Contini E., De Lucia G., Villalobos Á., Borgani S., 2014, *MNRAS*, 437, 3787
- Contini E., Yi S. K., Kang X., 2019, *The Astrophysical Journal*, 871, 24
- Corsini E. M., et al., 2018, *A&A*, 618, A172
- Deason A. J., et al., 2020, *arXiv e-prints*, p. arXiv:2010.02937
- Fabian A. C., 1994, *ARA&A*, 32, 277
- Feldmeier J. J., Mihos J. C., Morrison H. L., Harding P., Kaib N., Dubinski J., 2004, *ApJ*, 609, 617
- Hamer S. L., Edge A. C., Swinbank A. M., Wilman R. J., Russell H. R., Fabian A. C., Sanders J. S., Salomé P., 2012, *MNRAS*, 421, 3409
- Iodice E., et al., 2019, *A&A*, 623, A1

- 
- Jones L. R., Ponman T. J., Horton A., Babul A., Ebeling H., Burke D. J., 2003, *MNRAS*, 343, 627
- Kim D.-W., et al., 2018, *ApJ*, 853, 129
- Krick J. E., Bernstein R. A., 2007, *AJ*, 134, 466
- Lopes de Oliveira R., Carrasco E. R., Mendes de Oliveira C., Bortoletto D. R., Cypriano E., Sodré L. J., Lima Neto G. B., 2010, *AJ*, 139, 216
- Moffat A. F. J., 1969, *A&A*, 3, 455
- Montes M., Trujillo I., 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 482, 2838
- Mulchaey J. S., Zabludoff A. I., 1999, *ApJ*, 514, 133
- Nelder J. A., Mead R., 1965, *The Computer Journal*, 7, 308
- Pandge M. B., Vagshette N. D., Sonkamble S. S., Patil M. K., 2013, *Ap&SS*, 345, 183
- Peng C. Y., Ho L. C., Impey C. D., Rix H.-W., 2002, *AJ*, 124, 266
- Pillepich A., et al., 2018, *MNRAS*, 475, 648
- Ponman T. J., Allan D. J., Jones L. R., Merrifield M., McHardy I. M., Lehto H. J., Luppino G. A., 1994, *Nature*, 369, 462
- Puchwein E., Springel V., Sijacki D., Dolag K., 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 406, 936
- Sarazin C. L., 1988, *X-ray emission from clusters of galaxies*. Cambridge University Press
- Sérsic J. L., 1963, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía*, 6, 41
- Sharma M., et al., 2004, *ApJ*, 613, 180
- Sparke L. S., Gallagher J. S., 1975, *Galaxies in the Universe: An introduction*. Cambridge University Press
- Tody D., 1986, *The IRAF Data Reduction and Analysis System*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series Vol. 627

---

Trujillo I., Aguerri J. A. L., Cepa J., Gutiérrez C. M., 2001, MNRAS, 328, 977

Voevodkin A., Miller C. J., Borozdin K., Heitmann K., Habib S., Ricker P., Nichol R. C.,  
2008, ApJ, 684, 204

Zhang Y., et al., 2019, ApJ, 874, 165

Zibetti S., White S. D. M., Schneider D. P., Brinkmann J., 2005, MNRAS, 358, 949

Zwicky F., 1951, PASP, 63, 61

de Vaucouleurs G., 1948, Annales d'Astrophysique, 11, 247

# Apêndice

## Dedução de Equações

### A.1 Parâmetro $b_n$

O termo  $b_n$  pode ser escrito em função do raio efetivo  $R_e$  e do fator de escala  $R_0$ . Para isto, devemos igualar as equações do perfil de Sérsic (Eqs. 2.1 e 2.2):

$$\Sigma_0 \exp \left[ - \left( \frac{R}{R_0} \right)^{\frac{1}{n}} \right] = \Sigma(R_e) \exp \left\{ -b_n \left[ \left( \frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \right\}.$$

Substituindo a definição do brilho superficial central ( $\Sigma_0 = \Sigma_e e^{b_n}$ ) na relação anterior, temos que:

$$\exp \left[ - \left( \frac{R}{R_0} \right)^{\frac{1}{n}} \right] = \exp \left[ -b_n \left( \frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \rightarrow \left( \frac{R}{R_0} \right)^{\frac{1}{n}} = b_n \left( \frac{R}{R_e} \right)^{\frac{1}{n}}.$$

Portanto

$$b_n = \left( \frac{R_e}{R_0} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (\text{A.1})$$

Partindo da definição da luminosidade integrada numa área circular de raio  $R$  e do perfil de Sérsic (Eq. 2.1):

$$\begin{aligned} L(R) &= \int_0^R \int_0^{2\pi} \Sigma(R') R' d\theta dR' = 2\pi \int_0^R \Sigma(R') R' dR' \\ \therefore L(R) &= 2\pi \Sigma_0 \int_0^R e^{-\left(\frac{R'}{R_0}\right)^{\frac{1}{n}}} R' dR'. \end{aligned}$$

As definições das funções gama e gama incompleta são respectivamente:

$$\Gamma(s) = \int_0^\infty t^{s-1} e^{-t} dt \quad \text{e} \quad \gamma(s, x) = \int_0^x t^{s-1} e^{-t} dt, \quad (\text{A.2})$$

onde  $\Gamma(s) = \lim_{x \rightarrow \infty} \gamma(s, x)$ .

Utilizando a definição da função gama incompleta e realizando uma mudança de variáveis  $u = (R'/R_0)^{1/n}$  com  $dR' = nR'u^{-1}du$  na integral da luminosidade:

$$L(R) = 2\pi\Sigma_0 n R_0^2 \int_0^{(R/R_0)^{1/n}} u^{2n-1} e^{-u} du = 2\pi\Sigma_0 n R_0^2 \gamma(2n, [R/R_0]^{1/n}). \quad (\text{A.3})$$

O raio efetivo  $R_e$  é definido como o raio que possui a metade da luminosidade total, ou seja,  $L(R_e) = L_{tot}/2$ . Usando as Equações A.1 e A.3:

$$L(R_e) = 2\pi\Sigma_0 n R_0^2 \gamma(2n, [R_e/R_0]^{1/n}) = 2\pi\Sigma_0 n R_0^2 \gamma(2n, b_n);$$

$$L_{tot} = \lim_{R \rightarrow \infty} L(R) = 2\pi\Sigma_0 n R_0^2 \lim_{R \rightarrow \infty} \gamma(2n, [R/R_0]^{1/n}) = 2\pi\Sigma_0 n R_0^2 \Gamma(2n).$$

Temos que  $2\pi\Sigma_0 n R_0^2 \gamma(2n, b_n) = \pi\Sigma_0 n R_0^2 \Gamma(2n)$ . Portanto, finalmente obtemos a relação:

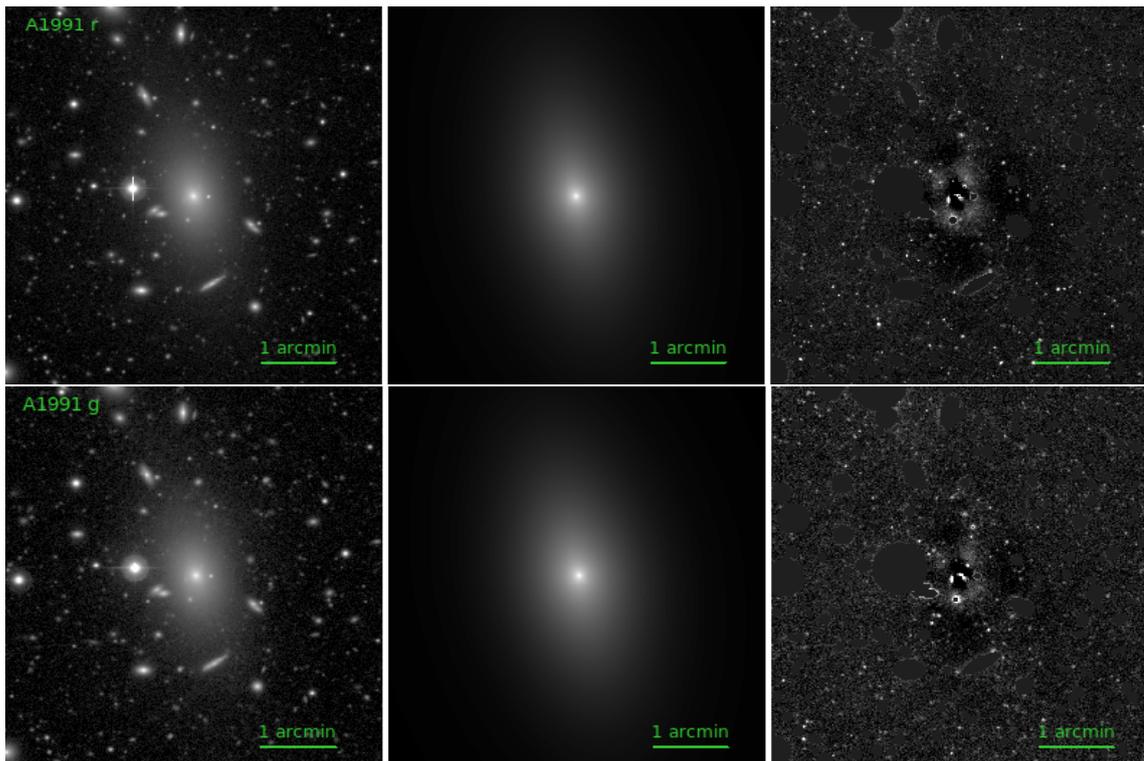
$$\Gamma(2n) = 2\gamma(2n, b_n), \quad (\text{A.4})$$

onde  $b_n$  é solução desta igualdade.

## Resultados GALFIT

### B.1 Imagens do ajuste

As imagens de A1991 e UGC 842 nas bandas  $r$  e  $g$ , o resultado da modelagem e a imagem residual se encontram, respectivamente, nas Figuras B.1 e B.2.



*Figura B.1:* A1991 nas bandas  $r$  (acima) e  $g$  (abaixo). À esquerda: imagem de A1991 no visível. No meio: resultado do ajuste do perfil de Sérsic utilizando o programa GALFIT. À direita: imagem residual do ajuste contendo as máscaras.

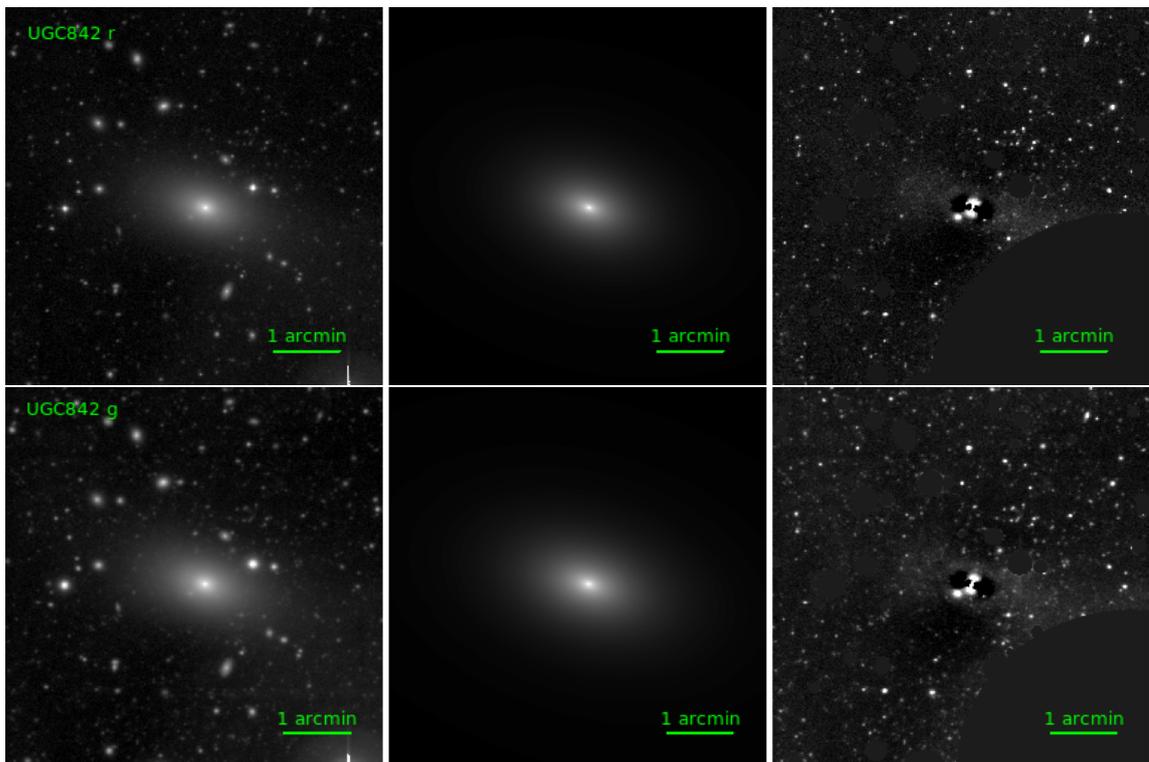


Figura B.2: UGC842 nas bandas  $r$  (acima) e  $g$  (abaixo). À esquerda: imagem de UGC842 no visível. No meio: resultado do ajuste do perfil de Sérsic utilizando o programa GALFIT. À direita: imagem residual do ajuste contendo as máscaras.

## Estrutura de Conchas em NGC 1132

Detectamos a presença de estruturas de “conchas” (*shells*) de baixo brilho superficial ao longo da região interna da galáxia NGC 1132 (Fig. C.1), reportadas pela primeira vez em Alamo-Martínez et al. (2012). Simulações numéricas preveem que estas estruturas internas podem surgir em decorrência de um “recente” processo de fusão de galáxias (*mergers*), que causa grandes perturbações no sistema.

Outra evidência que favorece o cenário de fusão está na morfologia assimétrica e perturbada do gás observado em raios-X pelo telescópio *Chandra*, que pode ter sido ocasionada pela queda de uma pequena galáxia próxima a região oeste de NGC 1132 (Kim et al., 2018). Além das *shells*, Alamo-Martínez et al. (2012) também detectaram presença de poeira na região central que pode estar associada a uma recente fusão. No entanto, estas peculiaridades observadas nestes dois trabalhos podem estar associadas a fusões distintas.

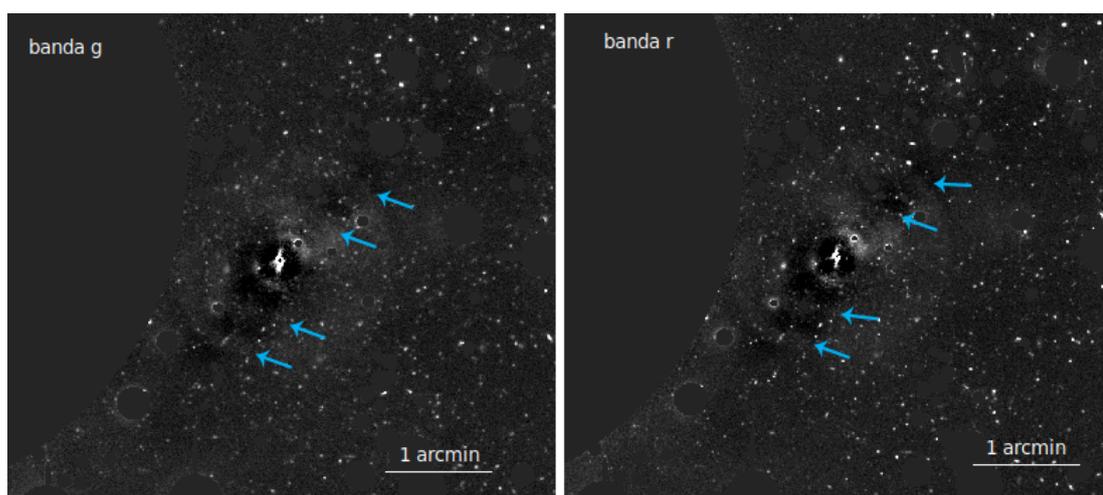


Figura C.1: Presença de estruturas de conchas de baixo brilho superficial em NGC 1132, nas bandas *g* (esquerda) e *r* (direita), indicadas em azul.