

1.04.04 – Astronomia/Astrofísica Extragaláctica.

PROPRIEDADES FOTOMÉTRICAS DE GRUPOS E AGLOMERADOS DE GALÁXIASKethelin P. Ramos^{1*}, Gastão B. Lima Neto²

1. Estudante do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP)
2. Professor do IAG-USP – Departamento de Astronomia/Orientador

Resumo

A luz difusa intra-aglomerado é uma componente formada por estrelas arrancadas de galáxias por efeito de maré que preenche o meio intra-aglomerado. Os principais mecanismos de formação desta estrutura ainda são alvo de debate na literatura, não havendo consenso até mesmo sobre sua própria definição. A sua origem está associada à formação da *brightest cluster galaxy* localizada geralmente no centro dos aglomerados, sendo impossível distinguir completamente esta componente do halo estelar estendido da galáxia central. Isto se deve às limitações instrumentais e, retornando ao problema da definição, também é possível que se trate da mesma estrutura. Nós estudamos o perfil radial de brilho superficial da galáxia central de grupos e aglomerados de galáxias, observados nas bandas fotométricas *r* e *g* da MegaCAM/CFHT, com o programa GALFIT e a *task* ELLIPSE/IRAF, a fim de detectar indícios da presença da luz difusa intra-aglomerado e extrair informações essenciais para a reconstrução da história de formação e evolução de grupos e aglomerados de galáxias. Nós detectamos excesso de brilho na região externa da galáxia central de dois grupos de nossa amostra. É possível que seja uma estrutura real, mas também não podemos descartar a possibilidade de contaminação de luz proveniente de outras fontes luminosas. A partir do perfil de cor *g-r*, mostramos que o cenário *stellar stripping* pode ser o principal mecanismo de formação da luz difusa intra-aglomerado/grupo em A1991 e UGC846. No entanto, o perfil de cor de NGC1132 e NGC7556 apresenta um gradiente de cor muito fraco, indicando que as populações estelares destes sistemas foram perturbadas devido a recentes fusões de galáxias. Os dados de observações profundas da nova geração de telescópios como o *James Webb Space Telescope* (JWST), *Large Synoptic Survey Telescope* (LSST) e *Giant Magellan Telescope* (GMT) são promessas para os futuros estudos sobre as estruturas de baixo brilho superficial como a luz difusa intra-aglomerado.

Palavras-chave: *brightest cluster galaxy*, *intracluster light*, meio intra-aglomerado.

Apoio financeiro: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Trabalho selecionado para a JNIC: USP.

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 ~ 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. Na realidade, 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).

A luz difusa intra-aglomerado ou *intracluster light* (daqui em diante, ICL) seria uma componente difusa de estrelas, ligada ao potencial do aglomerado, que preenche o meio intra-aglomerado, sendo que a sua existência foi proposta inicialmente por Zwicky (1951). Os principais mecanismos de formação desta componente ainda são alvo de debate na literatura (como os processos físicos e tipos de galáxias que tiveram papel principal em sua formação), havendo pouco consenso até mesmo sobre a sua própria definição (e.g., excesso de brilho acima do perfil de Vaucouleurs (1948) ou de Sérsic (1963), brilho residual resultante do corte de brilho superficial ou de luminosidade, etc). Todavia, há consenso entre diversos autores que esta estrutura estaria intimamente associada à formação da *brightest cluster galaxy* (BCG). A separação entre o ICL — que, em princípio, não está ligado a nenhuma galáxia — e o halo estelar estendido da galáxia central é praticamente

indistinguível. Isto se deve às limitações instrumentais ou, como citado anteriormente, pode ser que exista um problema de definição, tanto dinâmico quanto observacional. O halo estelar estendido, em tese, está ligado à galáxia central, mas existe a possibilidade deste compartilhar a mesma origem que o ICL (Iodice et al., 2019), em outras palavras, podem ser a mesma componente. Por ser uma componente de baixo brilho superficial ($> 27,5 \text{ mag}_r/\text{arcsec}^2$), a sua detecção e estudo têm sido um desafio.

O objetivo desse trabalho é estudar o brilho superficial das galáxias mais brilhantes dos grupos e aglomerados selecionados (BGGs/BCGs) e, através de técnicas de fotometria bidimensional, encontrar evidências da presença da luz difusa intra-aglomerado/intra-grupo, visando a extração de informações essenciais para a construção da história da formação e evolução de grupos e aglomerados de galáxias.

Metodologia

A nossa amostra de dados é composta por um aglomerado e alguns grupos fósseis — grupos em que o seu brilho é dominado por uma galáxia elíptica gigante que seria o resultado das fusões entre as galáxias de um grupo “normal”, estes grupos possuem alta emissão em raios-X com $L_{X,bol} \geq 10^{42} h_{50}^{-2} \text{ erg s}^{-1}$ e a diferença de magnitude entre as duas galáxias mais brilhantes é $\Delta m_{12} \geq 2.0 \text{ mag}$ (Jones et al., 2003) — que foram observados nas bandas fotométricas r e g da MegaCAM/CFHT (*Canada France Hawaii Telescope*), telescópio localizado em um observatório instalado no topo de Mauna Kea, Havaí. Devido à turbulência atmosférica e às imperfeições no sistema óptico do telescópio, as imagens produzidas sofreram uma perda de resolução, fenômeno conhecido como *Astronomical seeing*. Desta maneira, precisamos levar em consideração os efeitos da *point spread function*, função que descreve a distribuição de luz de objetos pontuais, dada pela função de Moffat (1969).

O perfil radial de brilho superficial da galáxia central dos grupos e aglomerados de nossa amostra é o principal objeto de interesse em nosso estudo. Desta maneira, precisamos ocultar quaisquer fontes luminosas “intrusas” na imagem — como as estrelas da Via Láctea, as galáxias de primeiro plano e de fundo — que contaminam a luz da galáxia selecionada e, por consequência, atrapalham a análise da distribuição de seu brilho. Com a ferramenta *regions* do programa SAOImage ds9, escolhemos os locais das imagens que continham estes objetos indesejados e, para facilitar esta tarefa, usamos *scripts* tanto para automatizar a seleção das regiões (usando os catálogos disponíveis no programa) quanto para a criação do arquivo da imagem contendo as “máscaras”.

Para estudar a distribuição de brilho superficial das galáxias centrais, nós usamos o programa GALFIT (Peng et al., 2002) que se baseia em ajustes bidimensionais de modelos analíticos, permitindo diversos ajustes simultâneos, levando em consideração a *point spread function* (PSF) e o fundo (*background*) das imagens. Neste trabalho, usamos a função *sersic* para ajustar o brilho superficial das galáxias selecionadas e a função *sky* para calcular a contribuição do brilho do fundo.

Alternativamente, nós também utilizamos o IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*), software composto por diversos pacotes com o objetivo de redução e análise de dados astronômicos, para estudar a distribuição de brilho superficial das galáxias centrais. O pacote STSDAS disponibiliza a *task* ELLIPSE, a qual se baseia no ajuste de isofotas ao longo da galáxia selecionada, permitindo a extração dos dados do perfil radial. Os dados foram inseridos em um programa escrito em *Python* para realizar o ajuste da convolução da PSF com o perfil de Sérsic (1963), como descrito no trabalho de Trujillo et al. (2001).

Neste trabalho, consideramos que o brilho residual resultante da subtração do modelo nos dados observacionais da galáxia central seria um indicativo da presença do ICL. Além disso, esta metodologia também permite a identificação de estruturas internas peculiares da galáxia central, originadas de processos astrofísicos específicos.

Resultados e Discussão

Nós detectamos a presença de um excesso de brilho na região inferior esquerda das imagens residuais (Figura 1) de NGC1132 ($R \sim 150''$) e NGC7556 ($R \sim 100''$) obtidas com o GALFIT, que pode ser um indicio da presença da luz difusa intra-grupo (IGL). No entanto, não podemos descartar a possibilidade da existência de fontes luminosas que possam ter contaminado a amostra. 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 UGC846 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.

De modo geral, nenhum excesso significativo de brilho foi detectado no ajuste dos dados extraídos com o ELLIPSE/IRAF. O chi-quadrado reduzido (χ_{red}^2 , definido como a razão entre o chi-quadrado e número de graus de liberdade) elevado em alguns ajustes, 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, impedindo a detecção do excesso de brilho. É provável que o modelo precise de mais uma componente Sérsic. Além disso, devemos levar em consideração a possibilidade da existência de uma série de efeitos sistemáticos que possam ter interferido em nossos resultados (e.g., PSF, subtração superestimada do *background* etc.).

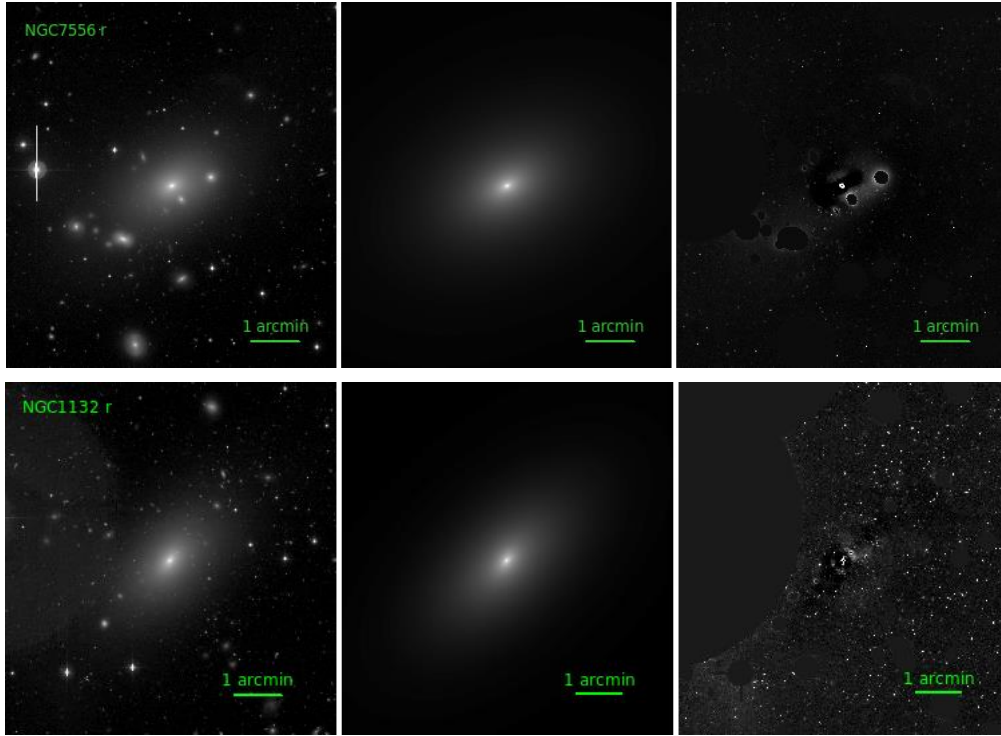


Figura 1: NGC 7556 (acima) e NGC1132 (abaixo) na banda r . À esquerda: imagem da galáxia central no visível. No meio: resultado do ajuste do perfil de Sérsic utilizando o programa GALFIT. À direita: imagem residual do ajuste contendo as máscaras.

Para entendermos a natureza do excesso de brilho observado em alguns grupos, estudamos o perfil radial de cor $g-r$ das galáxias centrais. Curiosamente, notamos que os perfis de cor de A1991/UGC 842 e NGC 1132/NGC7556 são semelhantes entre si (Figura 2). No último caso, observamos que há um excesso de cor vermelha no intervalo de $\sim 50'' - 400''$, que coincide com a região do excesso de brilho notificado anteriormente.

Na literatura podemos encontrar simulações de diversos cenários que buscam 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., 2019; 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 (região central). De forma contrária, caso o mecanismo principal seja fusões de galáxias, o perfil não deve apresentar um gradiente de cor, pois as populações estelares devem se misturar durante o processo da fusão.

Como não detectamos excesso de brilho em A1991 e UGC 842, consideramos que o ICL e o halo estelar estendido da galáxia central se tratam da mesma estrutura. Podemos notar que os nossos resultados, apresentados na Figura 2, indicam que a região mais externa desses sistemas é mais azulada, resultado compatível com diversos estudos encontrados na literatura (e.g., Zhang et al., 2019; DeMaio et al., 2018). Desta maneira, o cenário *stellar stripping* como principal mecanismo de formação do ICL é favorecido nesses sistemas.

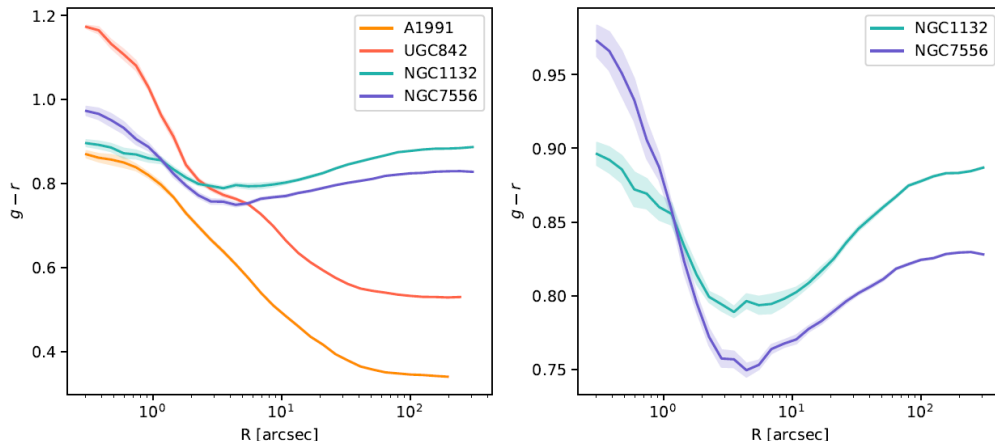


Figura 2: Perfil radial de cor $g-r$ das galáxias centrais dos grupos e aglomerados selecionados. À direita: perfil radial de cor $g-r$ de NGC1132 e NGC7556. A região colorida preenchida em cada curva indica 3σ de incerteza.

Interessantemente, o perfil de cor de NGC 1132 e NGC 7556 torna-se gradativamente mais avermelhado a partir de $R \sim 30''$. É intuitivo pensar que perturbações no sistema causadas por fusões de galáxias possam ter gerado este perfil inusitado. Existem diversas evidências de que NGC 1132 tenha passado por recentes fusões (e.g., Alamo-Martínez et al., 2012; Kim et al., 2018), contudo, o mesmo não pode ser dito sobre NGC 7556 (existem poucas informações na literatura). É possível que o ICL possa ter se formado a partir das estrelas arrancadas por efeito de maré durante fusões de galáxias, entretanto, ainda não podemos descartar a possibilidade de contaminação de brilho nestes sistemas ou da presença de outro fenômeno astrofísico.

Conclusões

Neste trabalho, empregamos duas metodologias para estudar a distribuição de brilho superficial das galáxias centrais de grupos e aglomerados, que se baseavam no mesmo princípio: a subtração do modelo nos dados observacionais a fim de encontrar indícios da presença da luz difusa intra-aglomerado/intra-grupo e extrair informações para o entendimento de sua formação e evolução.

Não detectamos excesso significativo de brilho nos ajustes realizados nos dados extraídos com a ferramenta ELLIPSE do IRAF/STSDAS. 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 que seja um indício da existência da luz difusa intra-grupo ou que talvez seja resultado de algum 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. Independente da definição de ICL inicialmente adotada, mostramos que o cenário *stellar stripping* pode ser o principal mecanismo de formação do ICL/IGL (ou do halo estelar estendido) em A1991 e UGC 846. Nos casos de NGC 1132 e NGC 7556, a luz difusa intra-grupo poderia ter se formado a partir das estrelas arrancadas durante fusões de galáxias, ou a partir de algum outro processo astrofísico ainda desconhecido. Entretanto, ainda não podemos descartar a possibilidade de contaminação de brilho nestes sistemas.

A análise de um maior número de grupos e aglomerados de galáxias em diferentes *redshifts* permitirá o estudo da evolução do ICL ao longo do tempo. Além disso, os dados de observações profundas da nova geração de telescópios como o *James Webb Space Telescope* (JWST), *Large Synoptic Survey Telescope* (LSST) e *Giant Magellan Telescope* (GMT) são promessas para os futuros estudos sobre as estruturas de baixo brilho superficial como a luz difusa intra-aglomerado.

Referências bibliográficas

- Alamo-Martínez K. A., et al., 2012, A&A, 546, A15
- Contini E., Yi S. K., Kang X., 2019, The Astrophysical Journal, 871, 24
- DeMaio T., Gonzalez A. H., Zabludo_ A., Zaritsky D., Connor T., Donahue M., Mulchaey J. S., 2018, MNRAS, 474, 3009
- 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
- Moffat A. F. J., 1969, A&A, 3, 455
- Peng C. Y., Ho L. C., Impey C. D., Rix H.-W., 2002, AJ, 124, 266
- Puchwein E., Springel V., Sijacki D., Dolag K., 2010, MNRAS, 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
- Trujillo I., Aguerri J. A. L., Cepa J., Gutiérrez C. M., 2001, MNRAS, 328, 977
- de Vaucouleurs G., 1948, Annales d'Astrophysique, 11, 247
- Zhang Y., et al., 2019, ApJ, 874, 165
- Zwicky F., 1951, PASP, 63, 61