

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

Tatiana Andrea Zapata Pichinao

**Formação estelar nas galáxias mais
brilhantes de aglomerados de galáxias**

São Paulo

2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Tatiana Andrea Zapata Pichinao

Formação estelar nas galáxias mais brilhantes de aglomerados de galáxias

Dissertação apresentada ao Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Astronomia

Orientador: Prof. Dr. Gastão B. Lima Neto

São Paulo

2010

A todos meus “enanos” com carinho

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço à meus pais César e Tatiana pelo apoio incondicional em todas minhas novas metas. À meus irmãos César, Pamela e Iván por todos aqueles maravilhosos momentos em família, apoio e infinitas risadas, à meu sobrinho Vicente por antecipar seu nascimento para me-conhecer, à meus primos e tios, e à minha amiga Karina que é quase uma irmã. Obrigada por dar-me as forças quando mais precisava e por perdoar-me não estar com vocês quando precisavam.

À meus queridos amigos no Chile e chilenos no mundo. Obrigada por me permitir seguir sendo parte de suas vidas, e pelas contribuições anímicas e astronômicas a distância.

Agradeço muito especialmente aos meus colegas e amigos Thaís, Reinaldo, Fefi, Compadre, Chiquitito, Greg, Crianzinha, Vinicius B., Tiago J., Oscar, Gustavo, Sergio, Aiara e Xavier, por fazer meu mestrado mais agradável, pelas ajudas em assuntos acadêmicos, mas especialmente pelos bons momentos: os cafés, sorvetes, passeios... pelas mais agradáveis quintas-feiras!, e por me entender e acompanhar nos momentos difíceis.

Aos meus colegas de sala Felipe e Rogério, pela agradável convivência durante estes dois anos, e por responder minhas infinitas dúvidas de português.

A todos meus colegas do IAG, secretarias e pessoal de informática, pela enorme amabilidade, pelas diversas ajudas e por tentar entender meu português.

À comunidade Chilena na USP, pelas festas à chilena, as conversações em *chilensis*, por compartilhar um grande amor por nosso país, e principalmente pelas lindas amizades.

Às equipes UBC e BAFEFI, por me receber de braços abertos e dar-me a oportunidade de me desenvolver como desportista num grato ambiente.

Agradeço ao meu orientador, o professor Gastão B. Lima Neto, pela orientação neste trabalho.

Aos pesquisadores Roberto Cid Fernandes, Natalia V. Asari e Abilio Mateus pela ajuda com o código STARLIGHT.

Finalmente, agradeço à FAPESP pelo apoio financeiro, sob o projeto n°: 2008/01608-4.

*“Eu conheço um planeta onde há um sujeito vermelho, quase roxo.
Nunca cheirou uma flor. Nunca olhou uma estrela. Nunca amou ninguém.
Nunca fez outra coisa senão somas.
E o dia todo repete como tu:
”Eu sou um homem sério! Eu sou um homem sério!”
e isso o faz inchar-se de orgulho.
Mas ele não é um homem; é um cogumelo. ”*

O Pequeno Príncipe
de Antoine de Saint-Exupéry

Resumo

As evidências de formação estelar nas galáxias mais brilhantes de aglomerados (BCG) serviram de motivação a diversos autores, para procurar relações entre tal processo e o ambiente denso em que se encontram. Estas galáxias se localizam próximas do fundo do poço de potencial, e no caso de aglomerados com fluxo de resfriamento *cooling-flow*, recebem gás proveniente do gás intra-aglomerado. A motivação é entender até que ponto o gás caindo no centro afeta a formação estelar em BCGs e que mecanismos regulam o *cooling-flow* de aglomerados.

Neste trabalho, através da ferramenta STARLIGHT, usamos síntese de populações estelares das BCGs para estimar sua história de formação estelar. Usamos espectros do SDSS-DR7 de 70 BCGs em aglomerados com observações prévias em raios-X.

Definindo a população jovem como estrelas que foram formadas durante o último Gano, procuramos relações entre a fração de luz correspondente a estas populações e propriedades globais do aglomerado hospedeiro determinadas a partir de observações em raios-X.

Nós encontramos que a formação estelar em BCGs é independente de algumas propriedades do ambiente como luminosidade em raio-X, raio de core e parâmetro β do perfil de brilho superficial do aglomerado em que se encontram. Adicionalmente vemos que o processo é independente de propriedades internas da galáxia, como massa (dispersão de velocidades estelares) e luminosidade.

Ao analisar a metalicidade da população estelar jovem, vemos que não tem relação direta com a metalicidade da população já existente na galáxia, sendo necessária uma fonte externa de gás para fornecer pelo menos parte do gás para formar as novas estrelas.

Segundo os ajustes, aglomerados frios (temperatura do gás intra-aglomerado) sempre possuem BCGs com taxas de formação estelar mais elevadas. Entretanto a anti-correlação

em que aglomerados mais massivos tenham pouca formação estelar é estatisticamente fraca.

Diferente ao esperado, processos de formação estelar em BCGs acontecem indistintamente em aglomerados CC e NCC. O fator dinâmico parece ser mais importante: a distância entre a BCG e o pico de emissão em raios-X do aglomerado em primeiro lugar, confirma que aglomerados CC são dinamicamente mais relaxados, apresentando sempre distâncias $\lesssim 20h^{-1}$ kpc . BCGs muito próximas do centro de emissão em raios-X, em aglomerados com *cooling-flow* apresentam frações de populações estelares jovens mais importantes, confirmando a idéia de que a galáxia central está recebendo material do ICM, e usando-o para formar novas estrelas. Entretanto aglomerados sem evidências de *cooling-flow* têm BCGs afastadas de seus centros, sem indicar alguma tendência a maior ou menor formação estelar. Como é necessária uma fonte externa de gás é provável que interações recentes entre galáxias tenham originado os processos de formação estelar observados nos aglomerados sem *cooling-flow*.

Abstract

Evidence of star formation in the brightest cluster galaxies (BCG) was a motivation for several authors to look for relations between this process and the dense environment of these galaxies. These galaxies are located near the center of the potential well and, in cool core clusters, are receiving gas from the ICM (Intra-Cluster Medium). Our aim is to understand how important is the effect of infalling gas on the star formation process and the mechanism that is regulating the cooling-flow in clusters.

We use the publicly available code STARLIGHT to perform stellar population synthesis of BCGs in order to estimate their star formation history. We use SDSS-DR7 spectra of 70 BCGs in clusters with X-ray observations.

We look for relations between the light fraction from the young stellar population (age ≤ 1 Gyr) and host cluster global X-ray properties.

We found that star formation in BCGs is independent of some environment properties, such as X-ray luminosity, core radius and β parameter from surface brightness profile of the host cluster. Additionally, we also see independence from internal galaxy properties, such as mass (velocity dispersion) and luminosity.

Analyzing the young population metallicity, we do not detect any direct relation with the old population metallicity, indicating the need of an external gas source to form new stars.

According to fits of STARLIGHT, cold clusters (ICM temperature) always host BCGs with significant star formation rate. However the trend that hot clusters have BCGs with little star formation is statically weak.

Contrary to expectation, star formation process in BCGs takes place in cool core and non-cool core clusters. A dynamical factor seems to be a more important factor: the

offset between the X-ray peak and the BCG position confirms that CC clusters are more dynamically relaxed, with offsets $\lesssim 20h^{-1}$ kpc . Smaller offsets in CC clusters generally have BCGs with significant young stellar population fraction, confirming that the central galaxy is receiving gas from the ICM and using it to form stars.

However, NCC clusters have greater offsets without any trend to high or low star formation rates. Because of the need of an external gas source, it is probable that recent interactions between galaxies have originated the observed star formation processes.

Lista de Figuras

3.1	Diagrama BPT, a linha pontilhada vermelha representa a curva de Kauffmann et al. (2003) usadas para separar atividade tipo AGN de NSF. Stasińska et al. (2006) nota que a curva de Kauffmann et al. (2003) inclui um 3 % de AGNs como NSF e propõe a linha continua verde. A linha horizontal azul separa LINERs de Seyferts.	37
3.2	NGC2484: Na esquerda se mostra o espectro óptico da galáxia normalizado em $\lambda = 4020\text{Å}$, onde se apreciam as linhas largas características de tipo Seyfert I. Na direita, a imagem em raios-X (0.3-7.0 keV) do arquivo público de <i>Chandra</i> , onde se aprecia uma emissão de pouca extensão comparável á PSF do instrumento, sugerindo que não se trata de emissão de um aglomerado o grupo de galáxias. O círculo verde tem um raio de 3 arcsec.	38
3.3	Distribuição de redshift da amostra: em preto todos os aglomerados da amostra; a região laranja mostra a distribuição em redshift dos aglomerados <i>cool core</i> (CC) e a região hachurada representa os aglomerados <i>non-cool core</i> (NCC)	39
3.4	distribuição da dispersão de velocidades das BCGs	42
3.5	Posições (J2000) dos 74 aglomerados da amostra. A região verde corresponde à área espectroscópica coberta pelo SDSS.	43

4.1	Caminhos evolutivos no diagrama HR: em preto os modelos de Padova 2008; cinza representa os caminhos evolutivos nos limites de altas e baixas massas; vermelho representa a curta fase de pulsações termais na rama assintótica das gigantes, a qual é adicionada no modelo CBep; em azul é representada a fase post-AGB. Referência: S. Charlot 2008, no workshop “Theory in the Virtual Observatory”, Garching, Alemanha.	48
4.2	Distribuição de metalicidade para 3 diferentes bibliotecas de espectros estelares. STELIB apresenta um bias para metalicidades tipo solar, o qual é levemente resolvido para a biblioteca MILES. Referencia: S. Charlot 2008, no workshop “Theory in the Virtual Observatory”, Garching, Alemanha.	49
4.3	Historia de formação estelar média para nossa amostra de 74 galáxias.	50
5.1	Resultado de Starlight: Porcentagem de luz correspondente à população jovem da galáxia (idade $< 10^9$ anos) usando a base BC03–S em cor rosa, e CBep–M em azul. A biblioteca MILES faz com que o ajuste indique mais população jovem do que com a biblioteca STELIB.	54
5.2	Espectro de galáxias que são ajustadas por uma importante contribuição de população estelar jovem. Em vermelho se mostra o espectro ajustado pelo STARLIGHT com a base CBep–M como exemplo. Em cada espectro se indica o aglomerado ao que pertence a galáxia	55
5.3	Imagens ópticas das galáxias que ajustam uma importante contribuição de população jovem. As imagens foram tomadas do SDSS e a ordem é a mesma que na figura 5.2.	56
5.4	Fração de população jovem na BCG em função da luminosidade em raios-X (0.1-2.4 keV) do gás intra-aglomerado. O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03–S e o inferior com a base CBep–M.	59
5.5	Fração de população jovem na BCG em função da temperatura da componente quente do gás intra-aglomerado (a partir de um modelo de duas temperaturas, assumindo um <i>core</i> frio). O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03–S e o inferior com a base CBep–M.	60

5.6	Fração de população jovem na BCG em função da temperatura média do gás intra-aglomerado. O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03–S e o inferior com a base CBep–M.	62
5.7	Fração de população jovem na BCG em função da temperatura média do gás intra-aglomerado. O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03–S e o inferior com a base CBep–M.	63
5.8	Determinação do centro dos aglomerados a partir de observações com o satélite <i>Chandra</i> . Na esquerda, o aglomerado CC MS1358.4+6245 e na direita, o aglomerado NCC A1995.	64
5.9	Fração de população jovem na BCG em função da distância entre a BCG e o pico de emissão em raios-X. O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03–S e o inferior com a base CBep–M. . . .	66
5.10	Distribuição do parâmetro YPF que quantifica formação estelar em BCGs para aglomerados com <i>cool-core</i> (linha contínua em azul) e sem (linha pontilhada em vermelho). O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03–S e o inferior com a base CBep–M.	68
5.11	Historia de formação estelar média em BCGs para aglomerados com <i>cool-core</i> (linha contínua em azul) e sem (linha pontilhada em vermelho). O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03–S e o inferior com a base CBep–M.	68
5.12	Resultado de Starlight: Metalicidade da população jovem (idade < 10 ⁹ anos) vs metalicidade da população antiga (idade > 10 ⁹ anos). O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03–S e o inferior com a base CBep–M.	70
5.13	Resultado de Starlight: Metalicidade da população jovem (idade < 10 ⁹ anos) vs metalicidade media da galáxia. O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03–S e o inferior com a base CBep–M. . . .	71
5.14	Resultado de Starlight: Metalicidade da população jovem (idade < 10 ⁹ anos) vs metalicidade do gás intra-aglomerado. O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03–S e o inferior com a base CBep–M.	72

5.15	Velocidade de dispersão das BCGs em função da porcentagem de população jovem nela.	73
5.16	Magnitude absoluta na banda r das BCGs em função da porcentagem de população jovem nela.	74
A.1	Relação entre o parâmetro YPF e as cores (u-r) na esquerda e (g-r) na direita, no centro da galáxia (<i>fiber magnitude</i> do SDSS). O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03-S e o inferior com a base CB07-M.	94
A.2	Fração de população jovem na BCG em função da luminosidade da linha de emissão $H\alpha$. Pontos correspondem às galáxias com $S/N > 3.0$ na linha de $H\alpha$ e quadrados representam as galáxias com AGN (segundo o diagrama BPT). O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03-S e o inferior com a base CB07-M.	96

Lista de Tabelas

3.1	Lista com os 74 aglomerados da amostra, apresentando a posição no sistema equatorial de coordenadas (J2000), redshift, e indicando o catálogo de onde foram recolhidos os dados em raios-X.	39
-----	---	----

Sumário

1. <i>Introdução</i>	21
2. <i>Aglomerados de Galáxias</i>	23
2.1 <i>Cooling-Flow</i>	24
2.2 Galáxias e BCG	26
2.3 Relação ICM/galáxias-BCGs	27
3. <i>Base de dados</i>	31
3.1 Catálogos de aglomerados em raios-X	31
3.1.1 HIFLUGCS	32
3.1.2 RASS-SDSS Galaxy Cluster Survey	32
3.1.3 Maughan 2008	33
3.2 SDSS-DR7 e espectros ópticos da BCG	34
3.3 Seleção da BCG	34
3.4 Determinação de AGNs	35
3.5 Limite em redshift	37
3.6 Dispersão de velocidades estelares das BCGs	38
4. <i>Análise</i>	45
4.1 Síntese Espectral de Galáxias usando o Starlight	45
4.1.1 Base Espectral	46
4.2 Definição da População Jovem	50

5. Resultados	53
5.1 Fração de população jovem nas BCGs (YPF)	53
5.2 Relação da formação estelar em BCGs com propriedades globais do aglomerado.	57
5.2.1 Luminosidade em raios-X.	58
5.2.2 Temperatura do gás intra-aglomerado.	58
5.2.3 Parâmetro β do perfil de brilho superficial e raio de caroço.	61
5.2.4 Distância entre a BCG e o pico de emissão em raios-X.	62
5.2.5 Relação com o <i>cooling-flow</i>	67
5.3 Metalicidade da População jovem	67
5.4 Dependências com propriedades internas da BCG	72
6. Discussão e Conclusões	77
6.1 Perspectivas do Trabalho	80
Referências	81
Apêndice	91
A. Testes dos ajustes para a determinação da YPF	93
A.1 Fotometria das galáxias	93
A.2 Linhas de emissão	94

Introdução

Os aglomerados de galáxias são as maiores estruturas virializadas do Universo. Um aglomerado pode conter desde dezenas até milhares de galáxias dentro de um raio de cerca de 3 Mpc e sua massa total está entre 10^{14} e $10^{15} M_{\odot}$, com densidades típicas médias entre 50 e 200 vezes a densidade crítica do Universo (Sarazin, 1988). A maior componente da massa bariônica destas estruturas corresponde ao gás intra-aglomerado, responsável pela intensa e difusa emissão em raios-X dos aglomerados. Esta grande perda de energia no centro, faz com que alguns núcleos de aglomerados esfriem tão rapidamente (em relação à sua idade) que se torna impossível manter o equilíbrio hidrostático, dando lugar ao chamado *cooling-flow* que deve depositar gás frio no centro.

As galáxias membro são em sua maioria tipo precorre (*early type*) e, geralmente, próximo ao centro, temos uma galáxia elíptica gigante (muitas vezes de tipo cD), extremamente brilhante, genericamente chamadas de BCG (*Brightest Cluster Galaxies*). Acredita-se que estas galáxias de características unicamente observadas no centro de aglomerados, são fortemente influenciadas pelo ambiente relativamente denso em que se encontram. A idade das BCGs é praticamente a idade do aglomerado (p. ex., Dubinski, 1998) e, portanto, sua população estelar é muito antiga. Entretanto, nas últimas décadas, vários autores têm observado indícios de formação estelar em BCGs de aglomerados com *cooling-flow* (Johnstone et al., 1987; Crawford et al., 1999; Edge, 2001; Edwards et al., 2007; Bildfell et al., 2008, entre outros). A grande maioria destes autores associam estes surtos de formação estelar ao ambiente em que se encontram estas galáxias e, em particular, à fonte de gás externo que é depositado através do processo de *cooling-flow*.

Entretanto, a maioria destes trabalhos foram baseados em evidências de presença de

formação estelar, sem quantificar dito processo (p. ex., excessos em ultravioleta ou infravermelho, núcleos das galáxias azuis, presença de linhas de emissão e gás molecular). Nesse contexto, a síntese de populações estelares é uma poderosa técnica para estudar com mais detalhes, o conteúdo estelar das galáxias.

A ferramenta STARLIGHT desenvolvida para decompor um espectro de galáxia numa combinação linear de populações estelares, é usado para determinar a historia de formação estelar e evolução química de uma galáxia, permitindo nos quantificar a formação estelar recente nela. Nosso objetivo é usar esta ferramenta nas galáxias centrais de aglomerados para poder procurar por relações entre a taxa de formação estelar nelas e as propriedades físicas do meio intra-aglomerado em que se encontram. Os espectros ópticos das BCGs foram tirados do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), enquanto as propriedades sobre a estrutura global dos aglomerados, são obtidas a partir de observações em raios-X do gás intra-aglomerado.

A seguir, no capítulo 2 apresento uma revisão das características físicas de aglomerados de galáxias, as características morfológicas e espectroscópicas das BCGs e como estas são relacionadas ao ambiente em que se encontram. A base de dados usada para esta análise é detalhada no capítulo 3, e a descrição da análise espectral é explicada no capítulo 4. Já no capítulo 5 se apresentam resultados referentes às relações entre a formação estelar na BCG e as propriedades dos aglomerados, finalizando com conclusão e perspectivas para trabalho futuro no capítulo 6.

Aglomerados de Galáxias

Aglomerados de galáxias são considerados uma importante ferramenta cosmológica, devido ao fato que são estruturas suficientemente pequenas para atingir equilíbrio durante a idade do universo, e suficientemente grandes como para ter uma amostra considerável dos materiais que constituem o Universo.

O modelo padrão atualmente aceito do Universo é chamado Λ CDM, dominado por alguma forma de “energia escura” ou constante cosmológica e por matéria escura fria. Seguindo este modelo, é sabido que a massa de um aglomerado é dominada pela matéria escura fria, constituindo $\sim 80\%$ da massa total do aglomerado. Este material só é detectado por seu efeito gravitacional sobre a matéria luminosa ou bariônica, através de lentes gravitacionais ou equilíbrio dinâmico.

O restante de massa está composta por matéria bariônica, a qual pode ser dividida em duas componentes, os bárions frios que formam estrelas e o meio inter-estelar de galáxias e correspondem a $\sim 3\%$ da massa total, e os bárions quentes que correspondem aos $\sim 17\%$ restantes e compõem o gás intra-aglomerado (ICM, *Intra Cluster Medium*) que foi detectado pela primeira vez em 1966 no aglomerado de Virgo como fonte de raios-X (Sarazin, 1988).

Este gás que alcança temperaturas de $\sim 10^8$ K, e de baixa densidade ($n \sim 10^{-3}$ íons/cm³ no centro) é a fonte da intensa e extensa emissão observada na banda de raios-X (0.1–10 keV), convertendo-se na segunda fonte mais luminosa nessa banda no Universo, superada só por *quasars*.

Seguindo o modelo de formação hierárquico ou *bottom-up*, onde pequenas estruturas vão se fusionando para formar as maiores, estas grandes estruturas resultam ser dinamicamente bastante jovens; aglomerados ricos podem ter se formado em $z \lesssim 1$, enquanto os mais

pobres, no máximo foram formados em $z \lesssim 2$. O estado dinâmico do aglomerado é uma forma de determinar se o aglomerado foi formado recentemente ou não. Aglomerados que tiveram tempo suficiente desde sua formação para relaxar, apresentam um perfil de brilho superficial aproximadamente simétrico. Entretanto, aglomerados mais jovens tiveram suas últimas fusões recentemente, apresentando subestruturas ou assimetrias tanto na emissão de raios-X como na distribuição de galáxias, indicando um estado dinâmico jovem ou possivelmente ainda em formação.

2.1 Cooling-Flow

Devido a sua alta temperatura, a radiação em raios-X é produzida principalmente por emissão *Bremsstrahlung* térmica (ou espalhamento livre-livre) dos íons presentes no gás altamente ionizado. A luminosidade depende basicamente da densidade e temperatura do meio, e pode ser expressada de forma simples como

$$L_X \propto n_e^2 T^{1/2}, \quad (2.1)$$

onde n_e é a densidade de elétrons e T a temperatura do gás. A luminosidade em raios-X dos aglomerados de galáxias, é da ordem de $L_X \sim 10^{44} - 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$ e corresponde ao principal mecanismo de perda de energia do ICM.

O tempo que demora em esgotar toda sua energia térmica, é chamado de tempo de resfriamento (t_{cool} , *cooling time*) e pode ser estimado como:

$$t_{cool} \approx \frac{E}{dE/dt}, \quad (2.2)$$

onde $E = (3/2)nkT$, é a energia do ICM se o consideramos como um gás ideal.

No caso de um aglomerado dinamicamente relaxado, teremos uma morfologia regular da emissão em raios-X, próxima a simetria radial. O perfil de brilho superficial pode ser ajustado a um modelo isotérmico hidrostático conhecido como *modelo β* (Jones e Forman, 1984), cuja expressão matemática é dada por:

$$\Sigma(r) = \Sigma_0 \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-3\beta+0.5}, \quad (2.3)$$

onde r_c é o raio de caroço (*core*) da distribuição do gás intra-aglomerado e o parâmetro β representa a inclinação assintótica para $r \gg r_c$ do perfil de brilho superficial.

Em alguns aglomerados o tempo de resfriamento no centro é menor que a idade do Universo (ou tempo de Hubble), nesse caso, o core do ICM resfria tanto que não é possível manter o equilíbrio hidrostático em que se encontra o gás, o peso das camadas externas comprime as internas, originando-se um fluxo de material para o centro do poço de potencial gravitacional; este processo de escoamento da matéria é conhecido como *cooling-flow* (Fabian e Nulsen, 1977; Cowie e Binney, 1977). Aglomerados que sofrem este processo são chamados *cool-core clusters* – Aglomerados CC - por apresentarem uma temperatura mais fria no core em relação à temperatura de equilíbrio hidrostático (temperatura do virial).

Nestes aglomerados, o perfil de brilho superficial apresenta um pico central muito mais intenso que o esperado pelo modelo β , sendo necessário um novo modelo para ajustar o perfil. Um dos modelos usados é o chamado “modelo duplo beta”, no qual uma segunda componente modela o brilho superficial do centro do aglomerado. O modelo Sérsic (Sersic, 1968), usado originalmente para ajustar perfis de brilho superficial de galáxias elípticas, também é usado para a emissão em raios-X do ICM de aglomerados CC (Demarco et al., 2003).

O modelo clássico de *cooling-flow* prediz uma taxa de deposição de massa que pode alcançar até $1000 M_{\odot}/\text{ano}$, mas os satélites de alta resolução espectral, *Chandra* e *XMM-Newton*, tem mostrado que essa taxa é menor por um fator de 10 ou mais (Peterson et al., 2003), nascendo a necessidade de haver um mecanismo não gravitacional de aquecimento do gás para balancear a perda de energia radiativa.

Existem vários mecanismos propostos na literatura que pretendem explicar porque o gás intra-aglomerado não resfria na região central:

(I) O *feedback* de supernovas é uma importante fonte de aquecimento, mas foi demonstrado que só é suficiente para balancear a perda de energia de galáxias elípticas de baixa luminosidade (Mathews e Brighenti, 2003).

(II) Condução de calor das regiões de um envelope quente para o centro mais frio. Voigt e Fabian (2004) mostraram que embora o mecanismo é eficiente para evitar o resfriamento das partes mais quentes ($T \gtrsim 5 \text{ keV}$), a parte central da região de resfriamento não é maiormente afeitada.

(III) Mecanismos dinâmicos (colisão, fusão de aglomerados).

(IV) Mecanismo ligado às galáxias centrais que aqueça o gás. Em particular, o aquecimento

a partir de AGN radio-fontes (*radio-loud active galactic nucleus*) associadas à galáxia central (Voit e Donahue, 2005; Roychowdhury et al., 2004; Churazov et al., 2002; Binney e Tabor, 1995).

Atualmente, o mecanismo mais aceito é o de *feedback* auto-regulado de AGN, no qual a acreção de ICM frio colapsando num buraco negro central inicia a atividade no núcleo, e este devolve uma fração da energia ao ICM. Este cenário é favorecido devido a vários fatos observacionais, por um lado a presença de quantidades moderadas de formação estelar e gás frio (McNamara e O’Connell, 1992; Edge et al., 2002, respectivamente) e por outro lado, observações em raio-X revelam bolhas e cavidades (regiões de baixa densidade) no ICM de alguns aglomerados, que coincidem perfeitamente com “radio jets” e lóbulos (Böhringer et al., 1993; Carilli et al., 1994; Fabian et al., 2000; Blanton et al., 2001).

Por completeza, mencionamos outras duas formas importantes em que são estudados os aglomerados de galáxias: lentes gravitacionais e a observação em rádio/micro-ondas do efeito Sunyaev-Zel’dovich. A trajetória da luz proveniente de corpos distantes é desviada ao passar próximo de um objeto massivo como, por exemplo, um aglomerado de galáxias, fazendo o papel de lente. Medindo as deformações das imagens dos objetos distantes é possível estimar a massa do aglomerado de forma precisa e independente do estado dinâmico. O efeito Sunyaev-Zel’dovich se refere à distorção do espectro da radiação cósmica de fundo (CMB) que, ao passar pelo gás quente do aglomerado, sofre espalhamento Compton inverso, ganhando energia. Este efeito é independente do redshift, tornando-se num ótimo método para detectar aglomerados de galáxias na banda de rádio.

Outra aplicação importante de aglomerados de galáxias, é a possibilidade de determinar constantes cosmológicas como Ω_M ou σ_8 que dão vínculo aos modelos de formação de estruturas no Universo.

2.2 Galáxias e BCG

Aglomerados de galáxias servem de laboratórios para estudar as propriedades das galáxias em função da densidade do ambiente. Um efeito de segregação morfológica de galáxias é observado desde a época de Hubble (Hubble e Humason, 1931), indicando que a fração de galáxias *early type* aumenta com a densidade local de galáxias. Este efeito foi quantificado mais tarde por Dressler (1980). Sendo assim, os aglomerados de galáxias têm

uma população preferencialmente formada de galáxias elípticas e lenticulares.

A distribuição das galáxias dentro do aglomerado deu origem a diversas classificações, sendo a mais geral a separação entre regulares e irregulares. Aglomerados regulares apresentam uma marcada simetria esférica aumentando a concentração de gás e galáxias membros para o centro, subestruturas são ausentes ou de pouca importância e geralmente são dominados por uma ou duas galáxias elípticas gigantes. Aglomerados irregulares tem importantes subestruturas sem um núcleo marcado (classificação de Abell (1965)).

Os modelos recentes de formação de galáxias sugerem que o tipo morfológico final de uma galáxia depende das características do ambiente e da evolução secular da galáxia (p. ex., Park et al., 2007; Lee et al., 2010). Um caso especial são as galáxias mais brilhantes dos aglomerados, as BCG, que são em geral, galáxias extremamente luminosas, alcançando cerca de 5 a 10 % da luminosidade total de um aglomerado massivo (Lin e Mohr, 2004).

Geralmente, as BCGs estão situadas próximas ao pico da emissão em raios-X (Jones e Forman, 1984; Beers e Tonry, 1986; Rhee e Latour, 1991) e suas velocidades são muito próximas da velocidade média das galáxias (Quintana e Lawrie, 1982; Zabludoff et al., 1990; Oegerle e Hill, 2001), sugerindo que estão situadas ao fundo do poço de potencial gravitacional do aglomerado. É comum vermos que estas galáxias são associadas a fontes de rádio (Burns, 1990).

As BCGs são muitas vezes classificadas como tipo cD. Esta classe de galáxias foi definida por Matthews, Morgan e Schmidt (1964) por ter um núcleo de uma galáxia elíptica muito luminosa com um envelope estelar extenso. Estes objetos dominam o fim de alta massa da função de luminosidade. Suas propriedades peculiares são influenciadas tanto pelo ambiente em que residem quanto por sua grande massa. Estas influências são complicadas de se separar por ser muito difícil achar galáxias tão massivas no campo. Além do fato de se ter este tipo de galáxias só em centros de aglomerados de galáxias ou subestruturas de alta densidade local (Beers e Geller, 1983), foram constatadas algumas correlações fracas entre a luminosidade do envelope e propriedades globais do aglomerado (Schombert, 1988), o que apontam a que este tipo de objeto é claramente o resultado de processos dinâmicos e evolutivos no aglomerado. Finalmente, é provável que estas galáxias gigantes também afetam o meio intra-aglomerado, enriquecendo em metais ou afetando a temperatura através da AGN em seu centro.

2.3 Relação ICM/galáxias-BCGs

Antes de formar as galáxias, o gás proveniente do Universo primordial estava composto quase que exclusivamente de Hidrogênio e Hélio. Observações espectroscópicas em raios-X do ICM revela a presença de linhas de emissão de Fe altamente ionizado (Fe XXV e Fe XXVI), alcançando em média, metalicidades de $Z_{\odot}/3$. As supernovas (SNe, *Supernovae*) são as principais responsáveis pela produção dos metais, os que podem ser distribuídos no ICM por diferentes processos: ventos galácticos produzidos por uma alta taxa de SNe (Heckman et al., 2000; Springel e Hernquist, 2003), desprendimento via pressão de arraste do gás das galáxias que entram no aglomerado (*ram pressure stripping*, Kapferer et al., 2007) ou por núcleos ativos de galáxias (Moll et al., 2007).

A relação entre as BCGs e as propriedades físicas do gás intra-aglomerado foi tratada por diversos autores: uma correlação entre a luminosidade óptica da BCG e a luminosidade e a temperatura do gás, sugere uma relação na formação destas estruturas (Schombert, 1987; Edge, 1991). Brough et al. (2002) mostra uma independência da luminosidade da BCG na banda K com a luminosidade em raios-X do aglomerado para $z < 0,1$. Nelson et al. (2002) mostram que para $z > 0,6$, BCGs em aglomerados de baixa luminosidade em raios-X, são menos luminosas que as que estão em aglomerados luminosos em raios-X. Katayama et al. (2003) argumenta que a luminosidade extrema da BCG foi determinada antes do colapso e não é devida a evolução no centro do aglomerado.

Como já foi mencionado, BCGs são geralmente galáxias elípticas e portanto, com populações estelares muito antigas. Entretanto nas últimas duas décadas vários autores mostraram evidências de formação estelar recente em BCGs de aglomerados CC (Johnstone et al., 1987; McNamara e O'Connell, 1989, 1992; Allen et al., 1992; Donahue e Voit, 1997; Cardiel et al., 1998; Crawford et al., 1999; Edge, 2001; Edge et al., 2002; Goto, 2005; McNamara et al., 2006; Wilman et al., 2006; Bildfell et al., 2008; Rafferty et al., 2008; O'Dea et al., 2008; Sanderson et al., 2009; Pipino et al., 2009; O'Dea et al., 2010). Nesses estudos foram utilizados diferentes indicadores de formação estelar, como excesso no IR, gradiente de cor azul no centro da galáxia, excesso de emissão UV, linhas de emissão ópticas e presença de gás molecular, encontrando-se em alguns casos, uma correlação fraca entre a força do indicador de formação estelar e a taxa de acreção de massa do *cooling-flow* (Johnstone et al., 1987; McNamara, 1997). A fonte do gás frio requerido para formar

estrelas é ainda incerto, é possível que seja gás proveniente do *cooling-flow* ou depositado durante um evento de *merger* (Poole et al., 2006). O’Dea et al. (2008) mostram que a taxa de formação estelar estimada pela luminosidade em IR nas BCGs de aglomerados CC, é maior quando o tempo de resfriamento do gás é menor e quando a taxa de acreção de massa \dot{M}_X é maior. Outros estudos afirmam que todas as BCGs que apresentam alguma evidência de formação estelar recente se encontram a menos de $\sim 10\text{--}20$ kpc do centro de emissão em raios-X, relacionando-o ao processo de *cooling* no centro do aglomerado (Bildfell et al., 2008; Rafferty et al., 2008). Sanderson et al. (2009) com uma amostra de 65 galáxias conclui que todas as BCGs com linhas de emissão $H\alpha$ residem a menos de 15 kpc do centro do aglomerado.

Resumindo, a presença de formação estelar em estas galáxias elípticas gigantes situadas nos centros de aglomerados CC, incentivou a procura de relações entre este processo e o *cooling-flow* do aglomerado. Entretanto, a grande maioria destes estudos não incluía uma quantificação da formação estelar, baseando-se só em evidências de presença do processo. O objetivo deste trabalho é quantificar, a través de síntese espectral, a taxa de formação estelar, e como esta se relaciona com fenômenos do ambiente.

Base de dados

Nosso trabalho se centra em relacionar propriedades globais dos aglomerados com propriedades das BCGs. Como vimos, os aglomerados de galáxias são caracterizados pela emissão em raios-X do ICM, a partir dela é possível medir ou estimar propriedades físicas do aglomerado. Por exemplo, a partir de imagens em raios-X é possível medir a luminosidade e o perfil de brilho superficial, ajustando os parâmetros β e raio de core. Análise espectral permite ajustar temperaturas médias (ou perfis de temperatura se o número de contagem de fótons permite) e abundâncias químicas do gás.

No caso da galáxia mais brilhante, é possível obter diferentes parâmetros dependendo da banda de observação, neste caso utilizaremos espectros ópticos para realizar síntese espectral e poder obter principalmente sua história de formação estelar.

Assim, a amostra será definida com o propósito de ter aglomerados de galáxias com parâmetros do ICM proveniente de observações em raios-X e com espectro óptico da sua BCG disponível no *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). Entretanto, é necessário fazer outra série de restrições e/ou classificações para obter uma amostra com um amplo intervalo de massas, com e sem *cooling-flow* e com presença ou não de linhas de emissão ópticas da BCG.

3.1 Catálogos de aglomerados em raios-X

Os dados em raios-X foram obtidos da literatura, principalmente de observações com ROSAT e Chandra, e foram escolhidos de 3 catálogos que descrevemos a seguir:

3.1.1 HIFLUGCS

HIFLUGCS (HIghest X-ray FLUX Galaxy Cluster Sample, Reiprich & Böhringer, 2002) é uma amostra completa dos aglomerados de galáxias mais brilhantes do céu. Os aglomerados são selecionados pelo fluxo em raios-X baseado em 9 catálogos precedentes (REFLEX, NORAS, NORAS II, BCS, XBACs, entre outros).

A partir de observações no *Rosat All Sky Survey* (RASS, Trümper, 1993; Voges et al., 1999), foram selecionados 63 aglomerados com fluxo $f_X(0.1 - 2.4\text{keV}) \geq 2.0 \times 10^{-11}$ erg s⁻¹ cm⁻², excluindo as regiões do aglomerado de Virgo, as nuvens de Magalhães e o plano galáctico da Via Láctea. Além desta amostra limitada por fluxo, foi publicada uma extensão da amostra com 43 aglomerados para análises que não precisem estarem completos em fluxo. No nosso caso, tendo como objetivo chegar até o limite de baixas massas, usaremos a amostra estendida de 106 aglomerados. O intervalo de redshift desse catálogo é $z \lesssim 0.17$.

Deste catálogo e dos estudos posteriores deste catálogo (Chen et al., 2007; Hudson et al., 2009), temos propriedades dos aglomerados determinadas a partir das observações em raios-X, como por exemplo: raio de caroço (core), parâmetro β , temperatura do gás, densidade central e tempo de resfriamento.

Do HIFLUGCS foram selecionados 15 aglomerados por terem suas BCGs espectros ópticos no SDSS. Estes aglomerados são apresentados na Tabela 3.1.

3.1.2 RASS-SDSS Galaxy Cluster Survey

Este catálogo (Popesso et al., 2004) foi feito com o fim de procurar relações entre as duas componentes bariônicas de um aglomerado, estudando as galáxias no óptico através do SDSS, e o gás intra-aglomerado através de observações em raios-X feitas pelo *ROSAT All Sky Survey* (RASS).

Os aglomerados selecionados cobrem um amplo intervalo de massas, desde grupos de $10^{12.5}M_\odot$ até aglomerados massivos de $10^{15}M_\odot$. O intervalo em redshift é de 0.002 até 0.45.

O catálogo contém um total de 114 grupos e aglomerados com observações no SDSS e ROSAT. Deles, 86 são aglomerados de massa intermédia e alta dos catálogos REFLEX, NORAS e NORAS 2, os quais selecionam aglomerados a partir de raios-X. No caso de grupos e aglomerados de baixa massa, são escolhidos dos catálogos ACC (ASCA Cluster

Catalog, de Horner et al., 2001) e GS (Groups Sample de Mulchaey et al., 2003.), aqueles que sejam detectados em raios-X, mesmo que eles foram selecionados a partir de outras bandas.

Neste catálogo foram determinadas a partir de observações em raios-X algumas propriedades do gás intra-aglomerado, como luminosidade, raio de core, raio total (extrapolado do perfil de King) e o parâmetro β do perfil de brilho superficial.

Na procura por espectros das BCGs no SDSS, temos 42 aglomerados para fazer a análise da sua população estelar. Estes aglomerados são apresentados na Tabela 3.1.

Observações com ROSAT:

O ROentgen SATellit foi lançado em 1990 com o propósito de realizar um mapeamento completo do céu em raios-X e o estudo detalhado de algumas fontes selecionadas. A banda de energia coberta é de 0.1 a 2.5 keV. O campo de visão é de $38' \times 38'$, com uma resolução espacial de aproximadamente 25 arcsec (no eixo óptico).

3.1.3 Maughan 2008

Com o objetivo de apresentar um catálogo de propriedades de aglomerados ricos determinadas com uma alta resolução, Maughan e colaboradores constroem este catálogo com observações do arquivo público (até novembro do 2006) do satélite Chandra (Maughan et al. 2008).

Este catálogo contém 115 aglomerados de galáxias observadas com o detector ACIS-I e com redshift $0,1 < z < 1,3$. O limite inferior em redshift, assegura que toda a emissão dentro do raio R_{500} do aglomerado pode ser observada no campo de visão do satélite Chandra (raio onde a densidade é 500 vezes a densidade crítica do universo).

Para nossa amostra foram selecionados 17 aglomerados deste catálogo com espectro da BCG no SDSS.

Observações com Chandra:

O telescópio espacial *Chandra*, em orbita desde o ano 1999, possui um arquivo publico grande de observações em raios-X, cobrindo entre 0.1 e 10 keV de energia. Sua alta resolução espacial, de aproximadamente 1 arcsec, e amplo campo de $16' \times 16'$ (do detetor ACIS-I, para imageamento), permite um mapeamentos detalhados de emissões extensas como as dos aglomerados de galáxias.

Observações espectroscópicas também são de alta qualidade, alcançando resoluções de $E/\Delta E \sim 50$.

3.2 SDSS-DR7 e espectros ópticos da BCG

O *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS, York et al. 2000) é um dos maiores surveys ópticos feitos na superfície da Terra. O SDSS produziu um mapa detalhado de aproximadamente um quarto do céu, contendo imagens de milhões de objetos e quase um milhão de espectros de galáxias.

O telescópio usado pelo SDSS, de 2.5 m de diâmetro, se encontra a 2788 m sobre o nível do mar, no *Apache Point Observatory (APO)* em Sunspot, New Mexico, EUA. Possui uma câmera imageadora de campo amplo, abarcando o óptico e o infra-vermelho próximo com cinco bandas fotométricas, u' , g' , r' , i' e z' .

A espectroscopia é feita com os dois espectrógrafos multi-objetos instalados no telescópio. Cada um dos espectrógrafos recebe a luz de 320 de um total de 640 fibras, e coleta os espectros em dois CCDs cobrindo a faixa espectral de 3800 a 9100 Å (blue: 3800 a 6100 Å, e red: 5900 a 9100 Å). A resolução espectral varia entre $\lambda/\Delta\lambda=1850$ e 2200.

Por ser um telescópio terrestre, a região do céu coberta é limitada (ver Fig. 3.5), portanto, dos catálogos em raios-X, só alguns dos aglomerados estão na região coberta pelo SDSS e não todos eles tem dados espectroscópicos da BCG. Nosso análise é baseado no *Data Release 7* (DR7, Abazajian et al. 2009) do SDSS, cuja amostra principal contem espectro de quase 930.000 galáxias com $m_r < 17,77$.

Com a ferramenta *SQL search* do SDSS, podemos localizar todas as BCGs com espectro dos aglomerados dos catálogos descritos anteriormente. Com isso, obtemos um total de 74 aglomerados com observações em raios-X e espectro óptico disponível da sua BCG. Todos eles são apresentados na Tabela 3.1.

3.3 Seleção da BCG

A seleção da BCG é crucial para este trabalho. No caso de aglomerados contendo galáxias tipo cD no centro, a identificação da galáxia mais brilhante é óbvia, mas em alguns casos, existem 2 ou 3 galáxias candidatas e precisamos de outros critérios para a

sua seleção.

Quando falamos de BCG ou galáxia mais brilhante do aglomerado, não só nos referimos à essa característica, muitas vezes o termo “galáxia central” resulta ser um sinônimo. Em geral, próximo ao centro do aglomerado encontramos a galáxia mais brilhante e mais massiva, então para selecionar a BCG de cada aglomerado, não só usaremos seu brilho, mas também sua localização no aglomerado.

A BCG de cada aglomerado foi escolhida primeiramente através da ferramenta *SQL search* do SDSS, escolhendo as galáxias mais brilhantes na banda *r* e próximas das coordenadas do centro da emissão em raios-X (obtida dos catálogos). Em segundo lugar, fizemos uma inspeção visual onde codificamos as BCGs segundo a facilidade da sua identificação (seguindo os critérios usados por Bildfell et al. 2008):

1: Não existe ambigüidade na identificação (galáxia tipo cD).

2: Ambigüidade moderada: escolhemos a galáxia mais influenciada pelo potencial gravitacional do aglomerado durante sua história evolutiva. Para isso, precisamos da imagem em raios-X para identificar a galáxia brilhante mais próxima ao centróide da emissão em raios-X do aglomerado. No caso de aglomerados duplos (ex. Aglomerado de Coma), foi escolhida uma das galáxias brilhantes próximas ao pico de emissão em raios-X e que possua espectro disponível no SDSS.

3: Ambigüidade forte: Um critério individual deve ser usado em cada aglomerado para identificar a BCG. Aglomerados com estas BCGs ambíguas foram eliminados da amostra.

Para este estudo, só usamos as BCGs com códigos 1 e 2 por serem galáxias dominantes no sistema, com características singulares á respeito do resto das galáxias da vizinhança, seja por seu intenso brilho e tamanho ou pela posição privilegiada dentro do aglomerado. No caso de aglomerados com BCGs codificadas como tipo 3, várias galáxias na região central são candidatas muito similares, e se tiver alguma influencia do ambiente, nenhuma delas seria especialmente afeitada.

3.4 Determinação de AGNs

Para determinar a historia de formação estelar nas BCGs vamos usar espectros ópticos do SDSS. Estes espectros são obtidos através de fibra na região central da galáxia, permitindo a análise só numa região de aproximadamente $3''$ de diâmetro. Por esse motivo,

devemos ter em conta que muitas vezes uma outra forma de atividade nuclear da galáxia pode ser confundida com este fenômeno. É o caso das galáxias de núcleo ativo (AGNs, *Active Galactic Nucleus*), as quais podem apresentar fortes linhas de emissão (p. ex., $H\alpha$) ou um espectro azulado, características importantes na hora de determinar formação estelar numa região.

Para espectros com linhas de emissão, foi usado o *diagrama BPT* (Baldwin, Phillips & Terlevich, 1981) o qual usa razões de fluxos em linhas de emissão ($[OIII]\lambda 5007\text{\AA}/H\beta\lambda 4861$ em função de $[NII]\lambda 6584\text{\AA}/H\alpha\lambda 6563\text{\AA}$) para separar as regiões de surtos de formação estelar (Normal Star Forming, NSF) de AGNs.

Na figura 3.1, mostramos o diagrama BPT para todas as BCGs com linhas de emissão da nossa amostra, nele podemos separar entre galáxias com linhas de emissão provenientes de núcleo ativo (AGN) ou de formação estelar (NSF). Neste caso usamos duas curvas empíricas que definem atividade tipo AGN se:

$$y > \frac{0.61}{x - 0.05} + 1.3, \quad (3.1)$$

$$y > (-30.787 + 1.1358x + 0.27297x^2) \times \tanh(5.7409x) - 31.093, \quad (3.2)$$

segundo Kauffmann et al. (2003) e Stasińska et al. (2006) respectivamente, sendo $y = \log([OIII]/H\beta)$ e $x = \log([NII]/H\alpha)$. Ambas as curvas indicam que todas as galáxias com linhas de emissão da nossa amostra são AGNs. Na Fig. 3.1 vemos também 19 das galáxias tem atividade tipo LINER (*Low Ionization Nuclear Emission-line Region*) e só uma tipo Seyfert.

No caso de síntese espectral com o software livre STARLIGHT (ver seção 4.1 para uma descrição detalhada), só o espectro azul não estelar das galáxias tipo Seyfert I podem afeitar a detecção de população estelar jovem na BCG (Roberto Cid Fernandes, comunicação privada). Por inspeção visual, a BCG *NGC 2484*, com atividade nuclear tipo Seyfert segundo o diagrama BPT, apresentam um espectro com linhas largas sendo classificadas como Seyfert I. Por outro lado, uma inspeção mais detalhada da imagem em raios-X, revela que a emissão nessa banda é pouco extensa (raio de $\sim 3''$), podendo ser emissão da galáxia e não do ICM. Considerando isso, o aglomerado foi tirado da amostra. O espectro de *NGC2484* e sua imagem em raios-X com *Chandra* são mostrados na Fig. 3.2.

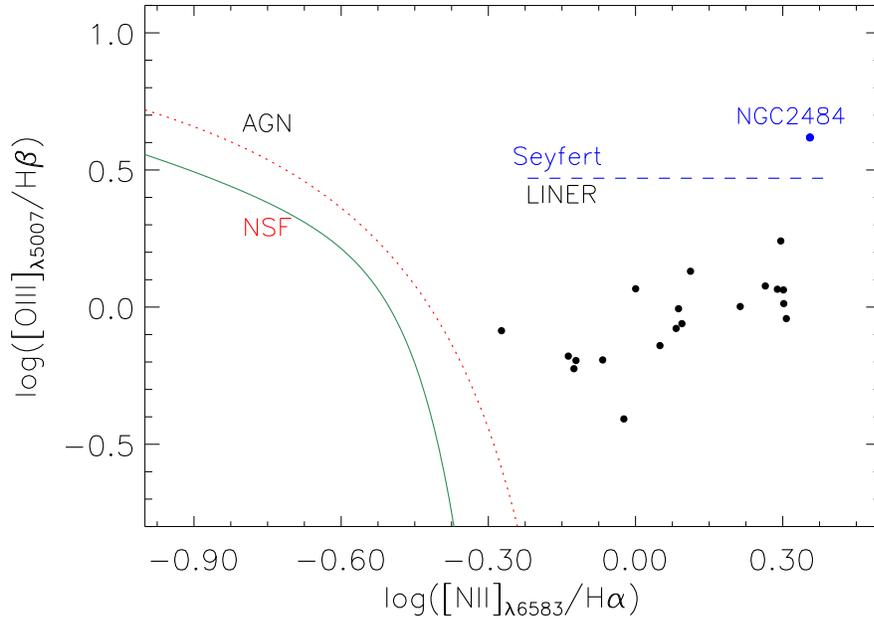


Figura 3.1: Diagrama BPT, a linha pontilhada vermelha representa a curva de Kauffmann et al. (2003) usadas para separar atividade tipo AGN de NSF. Stasińska et al. (2006) nota que a curva de Kauffmann et al. (2003) inclui um 3 % de AGNs como NSF e propõe a linha contínua verde. A linha horizontal azul separa LINERs de Seyferts.

3.5 Limite em redshift

Nosso limite em redshift vai estar dado não só pela dificuldade observacional de atingir espectros de alto redshift, mas para poder identificar AGNs através do diagrama BPT (ver seção 3.4), no mínimo precisamos da faixa espectral em que se encontram as quatro linhas usadas (NII, H α , OIII e H β) dentro da faixa espectral do SDSS (3800 à 9200 Å). Assim o maior redshift que podemos ter na nossa amostra é $z = 0,39$, correspondente ao deslocamento da linha NII $_{\lambda 6584\text{Å}}$ até 9200Å. A distância correspondente a este redshift ainda nos permite ter uma qualidade de espectro onde é possível fazer uma síntese espectral satisfatória.

Com este limite, o aglomerado mais distante se encontra a $z = 0,35$ e a distribuição em redshift é mostrada na Fig. 3.3, onde podemos ver, que como toda amostra observacional existem dificuldades em atingir objetos distantes fracos, diminuindo a quantidade de aglomerados a maiores redshifts.

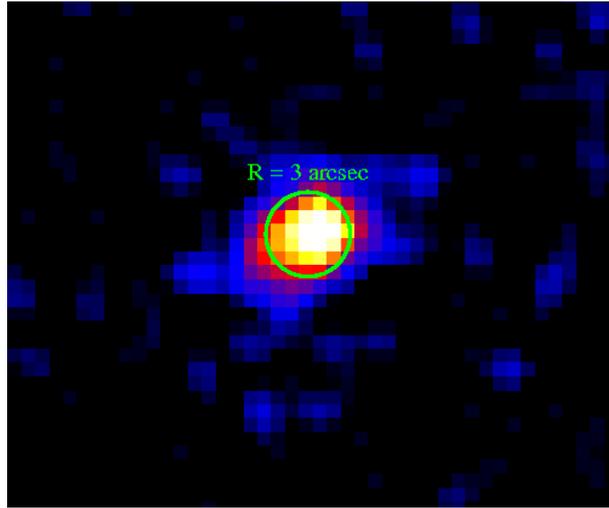
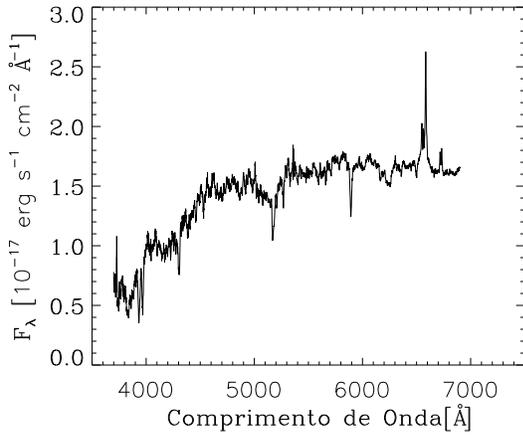


Figura 3.2: NGC2484: Na esquerda se mostra o espectro óptico da galáxia normalizado em $\lambda = 4020\text{\AA}$, onde se apreciam as linhas largas características de tipo Seyfert I. Na direita, a imagem em raios-X (0.3-7.0 keV) do arquivo público de *Chandra*, onde se aprecia uma emissão de pouca extensão comparável á PSF do instrumento, sugerindo que não se trata de emissão de um aglomerado o grupo de galáxias. O círculo verde tem um raio de 3 arcsec.

3.6 Dispersão de velocidades estelares das BCGs

O espectro da galáxia é composto basicamente pela superposição de espectros estelares, onde cada componente estelar tem um desvio por efeito Doppler devido a seu movimento próprio dentro da galáxia. A superposição produz um alargamento das linhas de absorção/emissão que o STARLIGHT consegue medir, ajustando o valor da dispersão de velocidades da galáxia.

Segundo o teorema do Virial, a dispersão de velocidades de uma galáxia pode ser usada para estimar a massa dela. Numa amostra geral de galáxias a distribuição está centrada em aproximadamente 150 km/s (Cid Fernandes et al., 2005), mas como trabalhamos com as galáxias mais massivas do Universo a distribuição é diferente. Na Fig. 3.4 podemos apreciar esta distribuição onde vemos que o centro é por volta de 300 km/s.

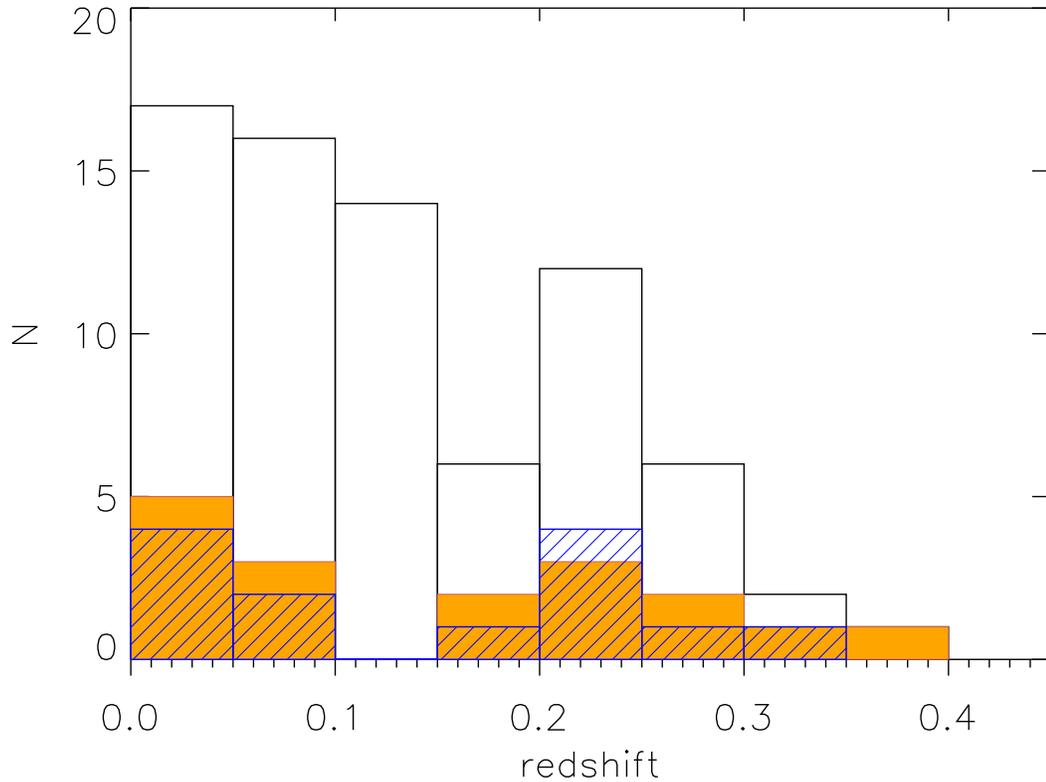


Figura 3.3: Distribuição de redshift da amostra: em preto todos os aglomerados da amostra; a região laranja mostra a distribuição em redshift dos aglomerados *cool core* (CC) e a região hachurada representa os aglomerados *non-cool core* (NCC)

Tabela 3.1 - Lista com os 74 aglomerados da amostra, apresentando a posição no sistema equatorial de coordenadas (J2000), redshift, e indicando o catálogo de onde foram recolhidos os dados em raios-X.

id	Nome Aglomerado	Redshift	RA	Dec	Catalogo
1	RXCJ1415.2-0030	0.14	213.81	-0.50	RASS-SDSS
2	RXCJ1309.2-0136	0.08	197.32	-1.61	RASS-SDSS
3	A2255	0.07	258.14	64.07	HIFLUGCS
4	RXCJ1718.1+5639	0.11	259.54	56.67	RASS-SDSS
5	NGC6338	0.03	258.84	57.41	RASS-SDSS
6	A2631	0.28	354.41	0.27	MAUGHAN08
7	A0267	0.23	28.18	1.01	MAUGHAN08
8	A0175	0.13	19.91	14.89	RASS-SDSS
9	RXCJ0747.0+4131	0.03	116.75	41.53	RASS-SDSS
10	A0655	0.13	126.37	47.12	RASS-SDSS

Continua na próxima página...

Tabela 3.1 - Continuação

id	Nome Aglomerado	Redshift	RA	Dec	Catalogo
11	RXCJ0953.6+0142	0.10	148.42	1.71	RASS-SDSS
12	MKW4	0.02	181.11	1.90	HIFLUGCS
13	A1437	0.13	180.10	3.33	RASS-SDSS
14	ZwCl1215	0.08	184.42	3.66	HIFLUGCS
15	NGC4636	0.00	190.71	2.69	HIFLUGCS
16	RXCJ1327.0+0211	0.26	201.77	2.20	RASS-SDSS
17	A1835	0.25	210.26	2.88	RASS-SDSS
18	NGC5846	0.01	226.62	1.61	HIFLUGCS
19	RXCJ1511.5+0145	0.04	227.89	1.76	RASS-SDSS
20	RXCJ0810.3+4216	0.06	122.59	42.27	RASS-SDSS
21	RXCJ0828.1+4445	0.14	127.03	44.76	RASS-SDSS
22	Zw3146	0.29	155.91	4.19	MAUGHAN08
23	A1942	0.22	219.59	3.67	MAUGHAN08
24	MKW8	0.03	220.16	3.47	HIFLUGCS
25	A1704	0.22	198.60	64.58	RASS-SDSS
26	MS1358.4+6245	0.33	209.96	62.52	RASS-SDSS
27	A1995	0.32	223.24	58.05	RASS-SDSS
28	A2149	0.06	240.34	53.91	RASS-SDSS
29	RXCJ1656.3+3916	0.06	254.08	39.28	RASS-SDSS
30	A2670	0.08	358.56	-10.41	RASS-SDSS
31	A0085	0.05	10.46	-9.30	HIFLUGCS
32	RXCJ2157.4-0747	0.06	329.36	-7.79	RASS-SDSS
33	RXCJ2155.6+1231	0.19	328.92	12.53	RASS-SDSS
34	A0611	0.29	120.24	36.06	RASS-SDSS
35	A0773	0.22	139.47	51.73	MAUGHAN08
36	RXCJ0947.1+5428	0.05	146.79	54.48	RASS-SDSS
37	A1544	0.15	186.96	63.38	RASS-SDSS
38	RXCJ1529.2+5250	0.07	232.30	52.84	RASS-SDSS
39	A2192	0.03	246.85	42.68	RASS-SDSS
40	A2197	0.03	246.92	40.92	RASS-SDSS
41	NGC6173	0.03	247.42	40.82	RASS-SDSS
42	RXCJ1144.0+0548	0.10	176.02	5.80	RASS-SDSS
43	A0697	0.28	130.74	36.37	MAUGHAN08
44	A0990	0.14	155.92	49.13	RASS-SDSS
45	RXCJ0809.6+3455	0.08	122.42	34.93	RASS-SDSS
46	RXCJ0952.8+5153	0.22	148.20	51.88	RASS-SDSS
47	RXCJ1058.4+5647	0.14	164.61	56.79	RASS-SDSS
48	A1750S	0.09	202.71	-1.87	RASS-SDSS
49	RXJ1504-0248	0.22	226.03	-2.81	MAUGHAN08
50	RXCJ1512.8-0128	0.12	228.21	-1.48	RASS-SDSS
51	RXCJ1114.3+5823	0.21	168.60	58.39	RASS-SDSS
52	A1744	0.15	201.46	59.32	RASS-SDSS
53	RXCJ1121.6+4803	0.11	170.40	48.06	RASS-SDSS

Continua na próxima página...

Tabela 3.1 - Continuação

id	Nome Aglomerado	Redshift	RA	Dec	Catalogo
54	RXCJ1134.8+4903	0.03	173.71	49.06	RASS-SDSS
55	A2244	0.10	255.68	34.06	HIFLUGCS
56	RXJ1720.1+2638	0.16	260.04	26.62	MAUGHAN08
57	RXJ2129.6+0005	0.23	322.42	0.09	MAUGHAN08
58	RXCJ1332.6+5419	0.11	203.16	54.32	RASS-SDSS
59	RXCJ1611.2+3657	0.07	242.82	36.96	RASS-SDSS
60	RXJ1234.2+0947	0.23	188.57	9.77	MAUGHAN08
61	A1914	0.17	216.51	37.82	HIFLUGCS
62	RXJ1532.9+3021	0.36	233.22	30.35	MAUGHAN08
63	A2142	0.09	239.58	27.23	HIFLUGCS
64	A2111	0.23	234.92	34.42	MAUGHAN08
65	A1682	0.22	196.71	46.56	MAUGHAN08
66	A2069	0.11	231.04	29.89	MAUGHAN08
67	MS0906.5+1110	0.18	137.30	10.98	MAUGHAN08
68	MKW3s	0.04	230.47	7.71	HIFLUGCS
69	A2147	0.04	240.57	15.97	HIFLUGCS
70	A2151w	0.04	241.15	17.72	HIFLUGCS
71	Coma	0.02	194.95	27.94	HIFLUGCS
72	A1204	0.17	168.33	17.59	MAUGHAN08
73	A1367	0.02	176.19	19.70	HIFLUGCS
74	A2261	0.22	260.61	32.13	MAUGHAN08

A distribuição espacial destes aglomerados pode ser visualizado na Fig. 3.5, onde vemos a posição dos 74 aglomerados da amostra.

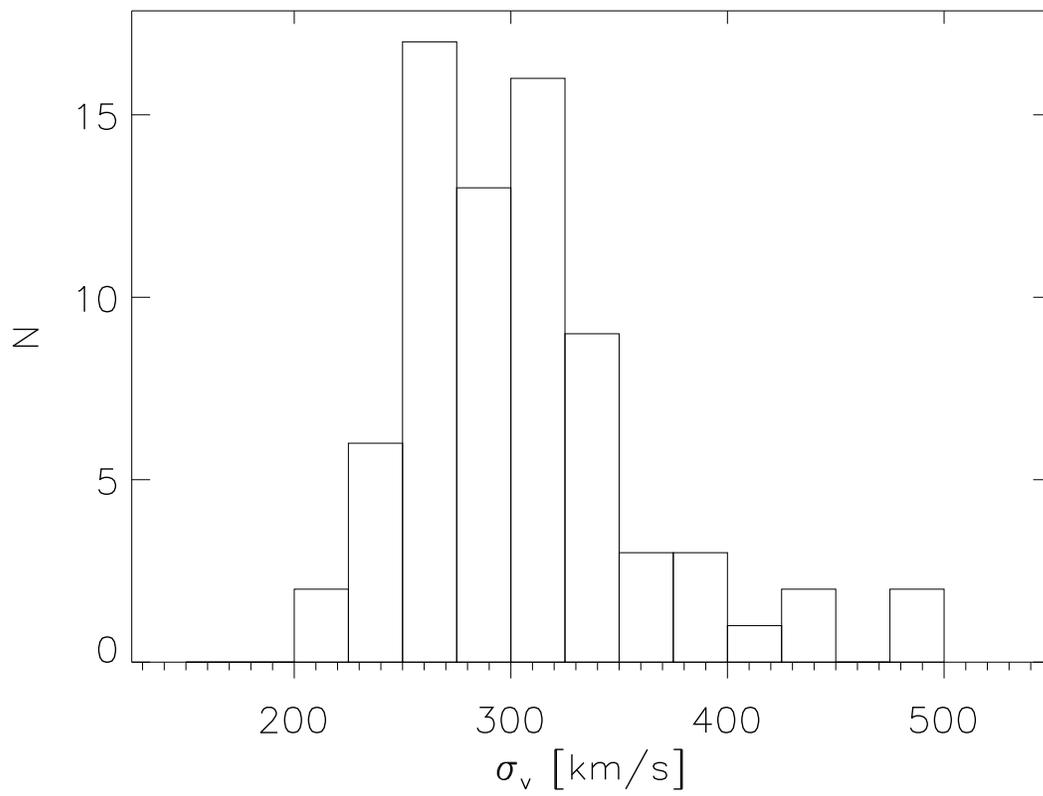


Figura 3.4: distribuição da dispersão de velocidades das BCGs

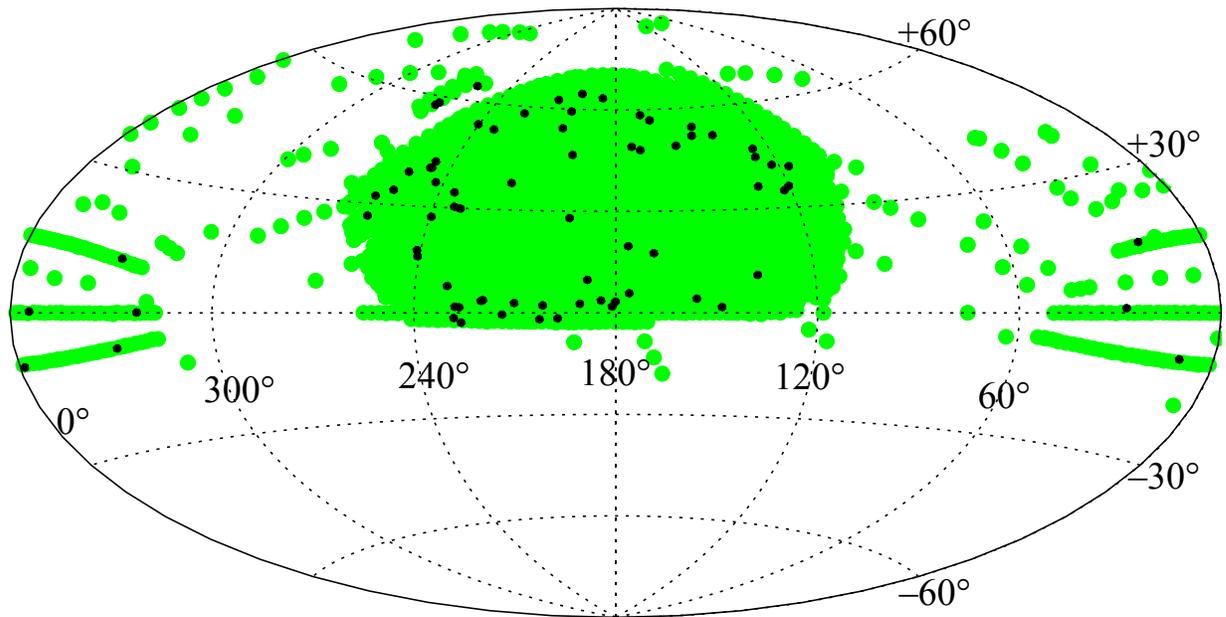


Figura 3.5: Posições (J2000) dos 74 aglomerados da amostra. A região verde corresponde à área espectroscópica coberta pelo SDSS.

Análise

4.1 Síntese Espectral de Galáxias usando o Starlight

Para nossa análise espectral das BCGs usaremos o software livre STARLIGHT, um código desenvolvido pelo grupo SEAGal (Semi Empirical Analysis of Galaxies) que serve para fazer síntese espectral de galáxias e assim obter propriedades físicas delas (Cid Fernandes et al. 2005).

Síntese espectral é a decomposição do espectro observado em termos de uma combinação linear de espectros, empíricos ou teóricos, de populações estelares de idades e metalicidades bem definidas. O resultado da síntese, nos permite conhecer a história de formação estelar e a evolução química da galáxia e, mais importante para nosso estudo, as características da população estelar que se formou recentemente.

O pacote STARLIGHT usa uma combinação de ferramentas estatísticas e numéricas para ajustar o espectro observado de uma galáxia, O_λ , à uma superposição de N_\star espectros de populações estelares. O ajuste tem $N_\star+4$ parâmetros livres para ajustar: por um lado, o vetor de população $[x_1, \dots, x_j, \dots, x_{N_\star}]$ nos fornece a fração da luz total da galáxia devido à componente j , de metalicidade Z_j e idade t_j definidas e, por outro lado, o código também ajusta o valor da extinção intrínseca global, A_V , a extinção “seletiva”, A_V^Y (usada só se assumimos cada componente com diferente extinção, o que não foi considerada em nosso trabalho), e opcionalmente os parâmetros cinemáticos, velocidade do movimento radial, v_\star e dispersão de velocidades, σ_\star . Nós usamos a lei de extinção de Cardelli et al. (1989) com $R_V=3.1$ para ajustar a extinção intrínseca de cada galáxia, assumindo uma casca uniforme de poeira ao redor da galáxia (p. ex., Mateus et al., 2006).

O modelo de espectro para ajustar é dado por:

$$M_\lambda = M_{\lambda_0} \left(\sum_{j=1}^{N_\star} x_j b_{j,\lambda} r_\lambda \right) \otimes G(v_\star, \sigma_\star), \quad (4.1)$$

onde $b_{j,\lambda}$ é o espectro da j -ésima componente normalizada em λ_0 (em nosso trabalho adotamos $\lambda_0 = 4020 \text{ \AA}$), $r_\lambda \equiv 10^{-0.4(A_\lambda - A_{\lambda_0})}$ é o termo de avermelhamento e M_{λ_0} é o fluxo sintético no comprimento de onda de normalização. A convolução pelo termo $G(v_\star, \sigma_\star)$ serve para modelar os movimentos estelares, alargando as linhas de absorção através de uma função gaussiana centrada em v_\star e com dispersão σ_\star .

Para obter o melhor ajuste dos parâmetros, se introduz a função χ^2 a ser minimizada:

$$\chi^2 \equiv \chi^2(\vec{x}; A_V; A_V^Y v_\star; \sigma_\star) = \sum_\lambda [(O_\lambda - M_\lambda) w_\lambda]^2, \quad (4.2)$$

onde w_λ^{-1} é a incerteza em O_λ . Regiões em torno das linhas de emissão, pixels defeituosos ou resíduos do céu não são considerados no ajuste, sendo assinado o valor $w_\lambda=0$. Para realizar o melhor ajuste é necessário uma serie de algoritmos para varrer completamente o espaço de parâmetros e procurar o mínimo da função, misturando assim, “*simulated annealing*”+esquemas de Metrópolis Monte Carlo para uma varredura eficiente do espaço, e cadeias de Markov para achar a região de maior probabilidade dentro do espaço de parâmetros.

4.1.1 Base Espectral

A base de espectros usada nesse trabalho para fazer a síntese espectral, corresponde a populações estelares simples (SSP), ou seja, um conjunto de estrelas formadas num único *burst* a partir de uma nuvem de gás de composição química homogênea como, por exemplo, um aglomerado estelar. Para gerar estas populações estelares é necessário basicamente três ingredientes:

1. **Função de Massa Inicial (IMF):** define a distribuição de massa das estrelas formadas. A função $\xi(\log m_\star)$ indica a quantidade de estrelas com massa no intervalo logarítmico $[\log m_\star, \log(m_\star + dm_\star)]$. Nesse trabalho usaremos populações estelares criadas a partir da IMF do Chabrier (2003b):

$$\xi(\log m_\star) = \frac{dn}{d(\log m_\star)} \propto \begin{cases} \exp\left[-\frac{(\log m_\star - \log m_c)^2}{2\sigma^2}\right] & , \text{se } m_\star \leq 1M_\odot \\ m_\star^{-1.3} & , \text{se } m_\star > 1M_\odot \end{cases} \quad (4.3)$$

onde $m_c = 0.08M_\odot$ e $\sigma = 0.69$.

2. **Caminhos Evolutivos:** se refere ao percurso no diagrama Hertzsprung-Russel (HR) de cada estrela segundo a teoria de evolução estelar. Este percurso é determinado principalmente pela massa inicial da estrela. Neste trabalho usaremos dois modelos:

- *Bruzual & Charlot 2003 (BC03)*: que utiliza os caminhos evolutivos de Padova 1994 (Alongi et al. 1993; Bressan et al. 1993; Fagotto et al. 1994a,b; Girardi et al. 1996).
- *Charlot & Bruzual (CBep, em preparação)*: usa os modelos de Padova 1994, mas adicionando um tratamento especial para a evolução de AGBs (*Asymptotic Giant Branch*) na fase TP-AGB (*Thermally Pulsing - AGB*) (Marigo & Girardi 2007).

Na figura 4.1 mostramos a fase TP-AGB (em vermelho) inserida no diagrama HR. Esta fase faz sua maior contribuição no infravermelho, logo não esperamos maiores diferenças na faixa espectral usada para nossos ajustes. Na tese de doutorado do Jean M. Gomes da UFSC, foram apresentadas comparações de ajustes espectrais usando o STARLIGHT com os modelos de BC03 e CBep para espectros do SDSS, constatando-se que não há efeitos significativos devido ao uso de um o outro modelo evolutivo.

3. **Bibliotecas Estelares:** Finalmente, sabendo a massa e estágio de cada estrela, recorreremos ao arquivo de espectros estelares observados ou teóricos, correspondentes a distintos tipos espectrais, abundâncias químicas, temperaturas efetivas e classes de luminosidades, varrendo completamente o diagrama de Hertzsprung-Russel (HR). Em nosso estudo, vamos a usar duas bibliotecas:

- *STELIB (Stellar Library)*: é uma biblioteca homogênea, contendo 249 espectros estelares empíricos, cobrindo vários tipos espectrais, classes de luminosidade e um relativamente largo intervalo de metalicidades. Os espectros estão na faixa visível (3200 à 9500 Å) e tem uma resolução espectral intermédia de $\lesssim 3 \text{ \AA}$ (FWHM) com re-amostragem de 1 em 1 Å (Le Borgne et al. 2003).
- *MILES (Medium resolution INT Library of Empirical Spectra)*: é um conjunto homogêneo de 985 espectros estelares empíricos, cobrindo um grande intervalo

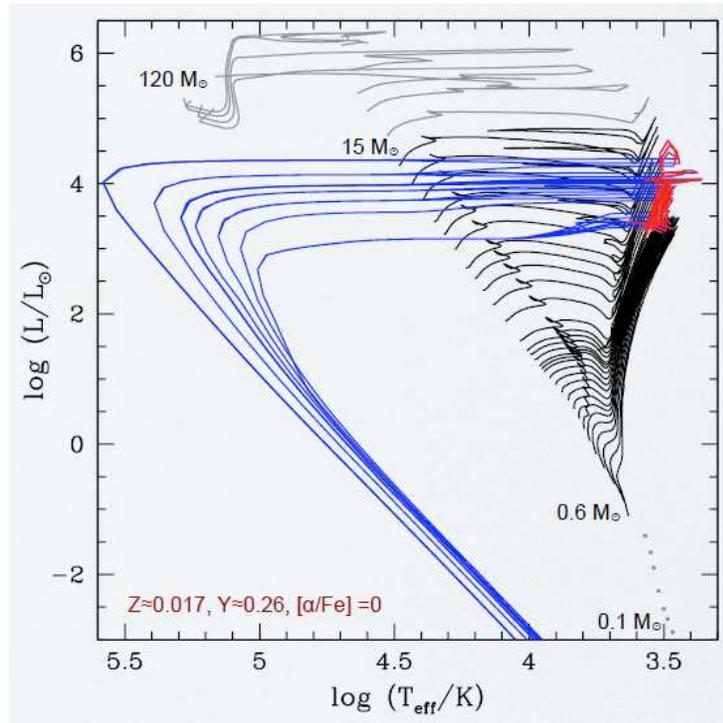


Figura 4.1: Caminhos evolutivos no diagrama HR: em preto os modelos de Padova 2008; cinza representa os caminhos evolutivos nos limites de altas e baixas massas; vermelho representa a curta fase de pulsações termais na rama assintótica das gigantes, a qual é adicionada no modelo CBep; em azul é representada a fase post-AGB. Referência: S. Charlot 2008, no workshop “Theory in the Virtual Observatory”, Garching, Alemanha.

de parâmetros atmosféricos (T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$). Os espectros foram obtidos no telescópio INT (Isaac Newton Telescope) e cobrem a faixa espectral de 3525 à 7500 Å com resolução espectral (FWHM) de $\sim 2,3$ Å (Sánchez-Blázquez et al. 2006).

Todas as bibliotecas baseadas em espectros empíricos têm um viés observacional devido à impossibilidade de se obter espectros de alta qualidade de estrelas distantes. Este problema fica em evidência, por exemplo, ao vermos a distribuição de metalicidades das populações estelares de cada biblioteca, onde podemos apreciar o claro viés para composições químicas de estrelas da vizinhança solar (ver figura 4.2). A biblioteca MILES melhora parcialmente este problema com uma melhor cobertura de metalicidades, maior número de estrelas gigantes e outros aspectos técnicos como calibrações de fluxo e comprimento de onda.

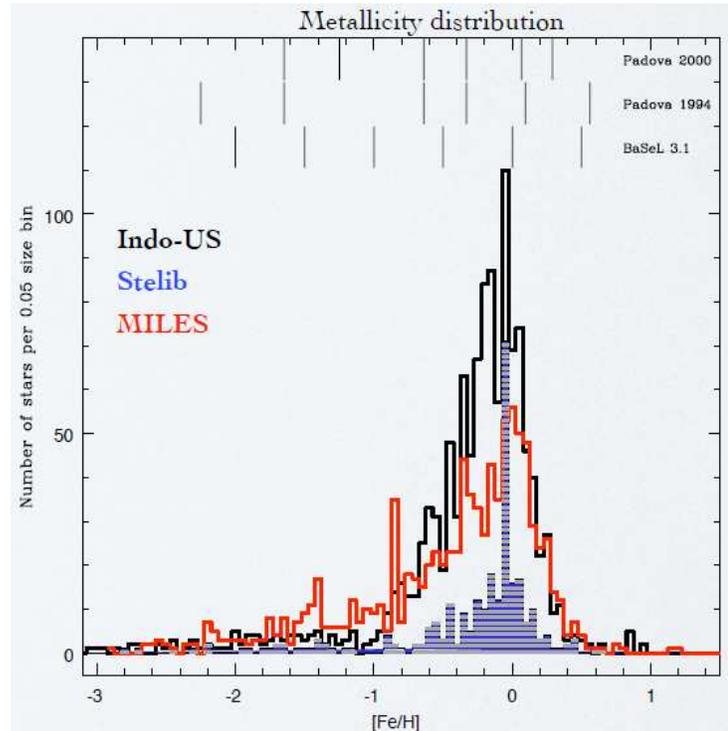


Figura 4.2: Distribuição de metalicidade para 3 diferentes bibliotecas de espectros estelares. STELIB apresenta um bias para metalicidades tipo solar, o qual é levemente resolvido para a biblioteca MILES. Referência: S. Charlot 2008, no workshop “Theory in the Virtual Observatory”, Garching, Alemanha.

Jean M. Gomes, na sua tese de doutorado, compara estas duas bibliotecas para duas amostras de galáxias, *star-forming* e *early-type*, achando importantes diferenças no resultado da síntese espectral com STARLIGHT, principalmente para galáxias elípticas, que são objetos de nossa análise. Com a biblioteca MILES, as galáxias elípticas aparecem com populações estelares sistematicamente mais jovens (0.1 dex em idade média) e mais metálicas (0.2 dex em metalicidade média) em comparação ao resultado obtido com STELIB.

Para efeito de comparação, vamos fazer as análises com duas bases:

BC03–S: Modelo evolutivo de Bruzual & Charlot 2003 + biblioteca STELIB.

CBep–M: Modelo evolutivo de Charlot & Bruzual 2007 + biblioteca MILES.

Ambas as bases usam a mesma IMF de Chabrier 2003 e contêm a mesma grade de populações estelares a serem ajustadas. Isso é 150 espectros de SSP correspondentes a 25 idades diferentes, entre 1 Manos e 18 Ganos, e 6 metalicidades diferentes: $Z = 0.005, 0.02,$

0.2, 0.4, 1.0 e 2.5 Z_{\odot} (definindo a metalicidade em termos da fração de massa em metais, como é a convenção usada em estudos de evolução estelar, onde $Z_{\odot} = 0.02$).

4.2 Definição da População Jovem

O software STARLIGHT nos fornece a distribuição em idade e metalicidade da população estelar que compõe cada galáxia. Se considerarmos só a idade, então a história de formação estelar em galáxias deste tipo (elípticas gigantes na maioria dos casos) é, geralmente, como ilustra a Fig. 4.3, onde apresentamos a história de formação estelar média das 74 galáxias da amostra com as duas bases espectrais.

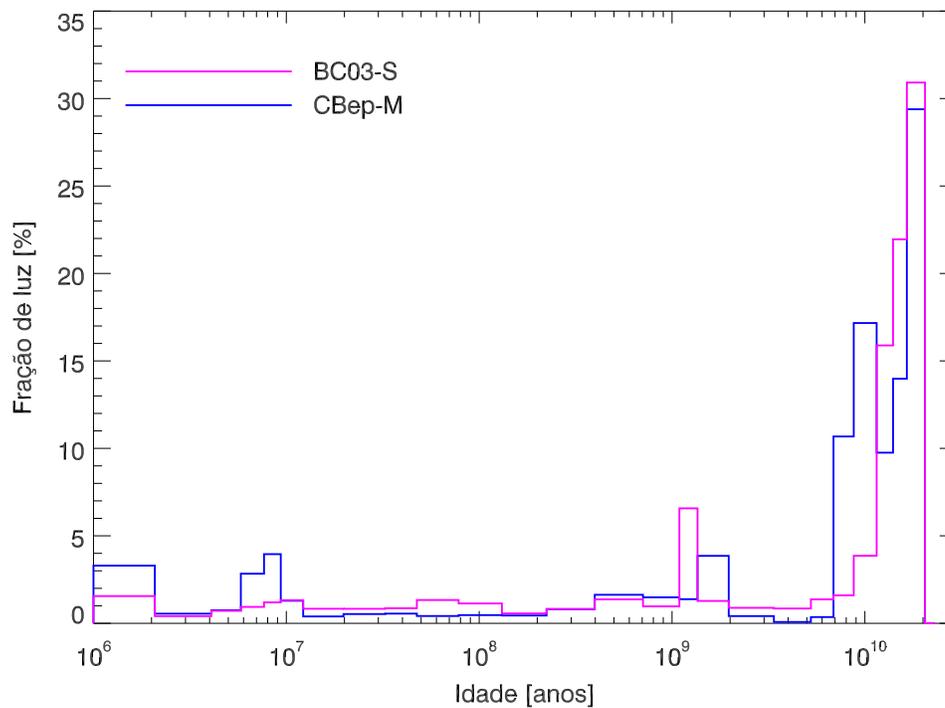


Figura 4.3: História de formação estelar média para nossa amostra de 74 galáxias.

Esta imagem é representativa do que acontece nas BCGs e outras galáxias elípticas gigantes, onde uma grande fração das estrelas foram formadas há muito tempo, tendo idades próximas da idade do universo. Entretanto pequenos surtos de formação estelar nas épocas mais recentes são derivados da síntese espectral, tal como já tinha sido concluído por diversos autores mediante outras evidencias observacionais (Johnstone et al., 1987;

McNamara e O’Connell, 1992; Donahue e Voit, 1997; Crawford et al., 1999; Edge, 2001; Edge et al., 2002; McNamara et al., 2006; Bildfell et al., 2008; O’Dea et al., 2008; Sanderson et al., 2009; Pipino et al., 2009; O’Dea et al., 2010, entre outros).

Quanto a diferenças entre os dois ajustes, CBep–M mostra um período de formação da população velha mais extenso que com BC03–S. Existem dois picos sistemáticos em todas as galáxias *early type*, em $\sim 10^9$ anos para BC03–S e $\sim 10^7$ anos para CBep–M que já foram mostrados em Cid Fernandes et al. (2009) e acredita-se que correspondem a artefatos das bases espectrais usadas.

O fato de haver galáxias tão antigas com um processo de formação estelar atual, fenômeno que não é comum em galáxias elípticas de campo, faz pensar que este processo deve ter relação com o ambiente em que se encontram, em particular com as características físicas do aglomerado a que pertencem. O nosso objetivo é procurar por estas relações através de diferentes parâmetros que caracterizam o gás intra-aglomerado e as propriedades espectroscópicas das BCGs.

Para nossa análise, precisamos definir o que entendemos por formação estelar recente. Em Cid Fernandes et al. (2005) a população estelar é dividida em 3 faixas etárias: jovem ($t < 10^8$ anos), intermediária ($10^8 < t < 10^9$ anos) e antiga ($t > 10^9$ anos). Mas no nosso caso, como vemos na figura 4.3, temos basicamente duas etapas: um intenso processo de formação estelar nos primórdios da galáxia e, em alguns casos, algum evento menor de formação estelar numa etapa posterior.

Uma das interrogações atuais frente à formação estelar nas BCGs é a natureza da fonte de gás que está atualmente formando estrelas, pois são galáxias que já converteram a maior parte do gás em estrelas. De Lucia e Blaizot (2007) propõe uma formação hierárquica da BCG, na qual fusões consecutivas formam a galáxia, mas estas fusões são muito próximas a não dissipativas, e não são associadas a formação estelar significativa. Explosões de SNe poderiam estimular formação estelar nas galáxias, mas novamente a falta de gás disponível nestas galáxias impede que seja esse o mecanismo. Sendo assim, o processo de formação estelar pode estar associado a um efeito de ambiente que tentaremos provar neste trabalho.

Alguns autores tem associado a fonte de gás da formação estelar ao ICM resfriando (p. ex., Bildfell et al., 2008), o qual usaremos como argumento para definir a população estelar jovem. Dado que $\sim 50\%$ dos aglomerados possuem *cool-core*, é pensado que este

processo alem de comum deve ser duradouro, podendo estar acontecendo no aglomerado há ~ 1 Gano atrás (ver Fabian, 1994, para uma revisão). Com isto, tal como em Cid Fernandes et al. (2005), definimos como estrelas velhas as com idade superior a 1 Gano, isto é, estrelas de tipo espectral O, B e A. A partir deste limite, vamos considerar qualquer evento de formação estelar como recente e possivelmente associado à algum fenômeno do ambiente atual:

$$\text{Idade}_{Pop.Jovem} \leq 1 \times 10^9 \text{ anos.} \quad (4.4)$$

Definimos também a fração de luz proveniente da população jovem da galáxia (YPF, *Young Population Fraction*) como:

$$\text{YPF} = \sum_{Pop.Jovem} x_i \quad (4.5)$$

onde x_i representa a porcentagem de luz correspondente a i -ésima componente da base, com idade t_i e metalicidade Z_i .

Podemos ainda definir a metalicidade média da população estelar da galáxia $\langle Z \rangle_L$, e a metalicidade da população jovem $\langle Z_{yp} \rangle_L$, onde ambas as quantidades são ponderadas pela fração de luz correspondente a cada componente:

$$\langle Z \rangle_L = \frac{\sum_{i=0}^{N_*} Z_i x_i}{\sum_{i=0}^{N_*} x_i}, \quad (4.6)$$

$$\langle Z_{yp} \rangle_L = \frac{\sum_{yp} Z_i x_i}{\sum_{yp} x_i}. \quad (4.7)$$

O pacote STARLIGHT, fornece também, uma transformação da percentagem de luz em percentagem de massa, usando uma razão $(L/M)_j$ correspondente a cada componente espectral. O vetor $\vec{\mu} = [\mu_1, \dots, \mu_j, \dots, \mu_{N_*}]$ representa as contribuições em massa de cada componente à massa estelar total da galáxia. Neste trabalho só usamos a fração de luz, pois é o observável direto e independente da calibração por fluxo dos espectros.

Resultados

5.1 Fração de população jovem nas BCGs (YPF)

O parâmetro YPF, como definido na Eq. (4.4) é o parâmetro que usaremos para quantificar a formação estelar no último Gano. Na Fig. 5.1 vemos a distribuição deste parâmetro, calculado a partir dos ajustes com STARLIGHT, usando as duas bases espectrais descritas na seção 4.1.1. Nela podemos apreciar duas distribuições claramente diferentes, onde o ajuste feito com a base CBep–M fornece em média uma maior porcentagem de população jovem que com a base BC03–S.

É importante ressaltar se a YPF é real ou artefato do código. Como primeira observação, a porcentagem excessivamente alta de população jovem de quatro galáxias da amostra ($YPF > 50\%$ com ajustes das duas bases) poderia indicar um erro no ajuste espectral destas galáxias. Galáxia elípticas são caracterizadas por sua cor vermelho e ter preferencialmente populações estelares antigas. Entanto uma galáxia elíptica no centro de um aglomerado, devido às condições especiais do ambiente, poderia ter maiores taxas de formação estelar, mas devemos ter em conta, que mesmo encontrando-se num local privilegiado para a recepção de gás, este nunca vai ser suficiente para gerar estrelas que aportem mais do 50% da luz da galáxia.

Existem duas possibilidades como fonte de grandes quantidades de gás. As taxas de deposição de massa por *cooling-flow* nos aglomerados, estimadas por espectroscopia com satélites de ultima geração, não alcançam ordens de grandeza suficientes para estas cifras. As fusões com galáxias da vizinhança não poderiam contribuir com grandes quantidades de gás, pois todas as galáxias próximas ao centro do aglomerado transformaram todo seu gás em estrelas há muito tempo ou foi perdido por pressão de arrastre quando passaram a

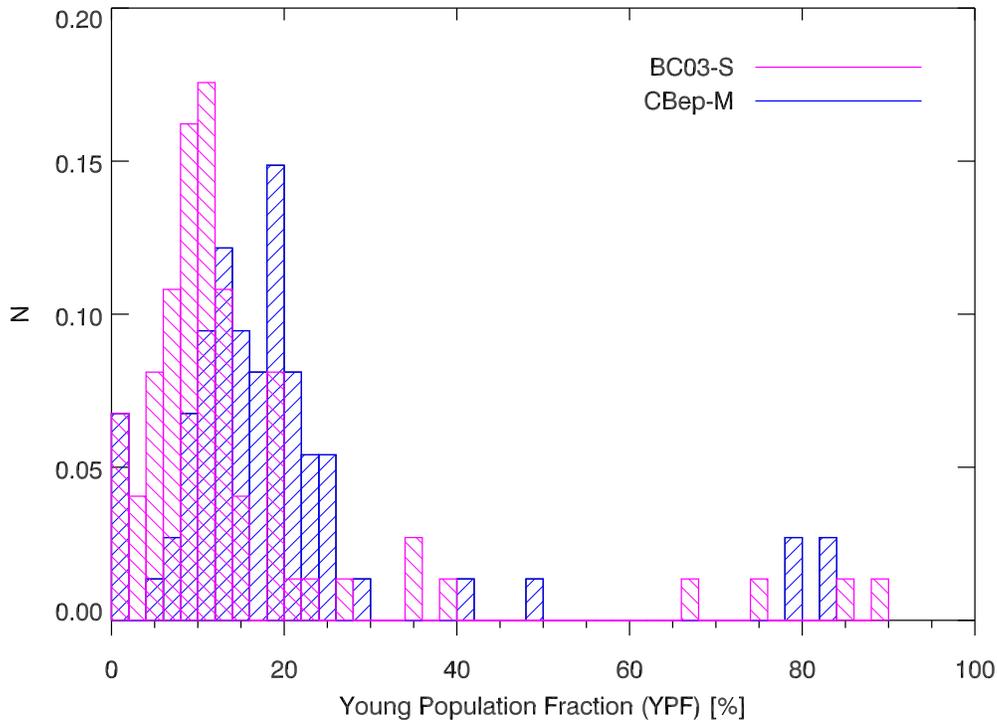


Figura 5.1: Resultado de Starlight: Porcentagem de luz correspondente à população jovem da galáxia (idade $< 10^9$ anos) usando a base BC03-S em cor rosa, e CBep-M em azul. A biblioteca MILES faz com que o ajuste indique mais população jovem do que com a biblioteca STELIB.

formar parte do aglomerado.

Para procurar se há ou não um problema com a análise, vemos na Fig. 5.2 os espectros ópticos destas quatro galáxias, superpostos com os ajustes do STARLIGHT em vermelho (como exemplo, ajuste feito com a base CBep-M). Estas quatro galáxias possuem espectros com linhas de emissão extremamente intensas e são todas classificadas como LINERs segundo o diagrama BPT. As linhas largas são consistentes com atividade tipo AGN.

A Fig. 5.3 mostra as imagens ópticas destas quatro galáxias (tiradas também do SDSS), confirmando a peculiaridade desses objetos. São galáxias mais azuis que o resto das BCGs, de cores $1.5 < (u - r) < 2.2$ e com a região central (ou posição da fibra óptica) mais azul ainda ($1.2 < (u - r)_{fib} < 1.5$).

Dado o fato de que galáxias de tipo LINER têm espectros facilmente confundíveis com processos de *starburst* (p. ex., Ho, 2008) e a falta de gás suficiente para gerar tão alta

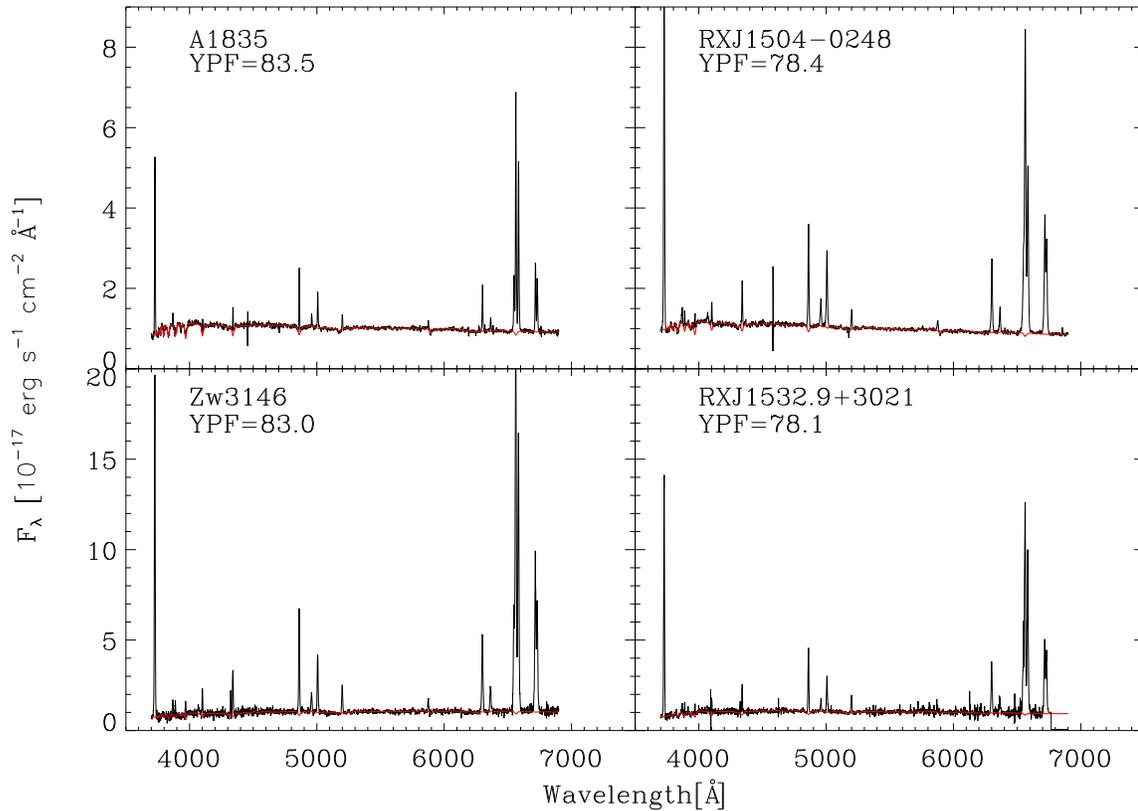


Figura 5.2: Espectro de galáxias que são ajustadas por uma importante contribuição de população estelar jovem. Em vermelho se mostra o espectro ajustado pelo STARLIGHT com a base CBep–M como exemplo. Em cada espectro se indica o aglomerado ao que pertence a galáxia

taxa de formação estelar, é válido pensar que estas quatro galáxias podem ter sofrido uma alteração do contínuo do espectro devido ao núcleo ativo, induzindo a um erro no ajuste espectral. Assim sendo, optamos por excluir estas quatro galáxias da amostra.

Já trabalhando com a amostra reduzida de 70 aglomerados, devemos ter em conta também, algumas dificuldades em relação às duas bases espectrais na hora de identificar a população jovem das galáxias. Ambas as bibliotecas carecem de um tratamento da população velha azul associada ao ramo horizontal (BHB, Blue Horizontal Branch).

Estrelas BHB são estrelas quentes de população II que já passaram pela etapa de gigante vermelha, se encontram consumindo He no seu núcleo e são de cor azul. Por sua posição no diagrama HR, tipicamente são de tipo espectral B3 a A0, possuindo linhas intensas de hidrogênio e fracas de outros elementos. Suas características espectrais são típicas de

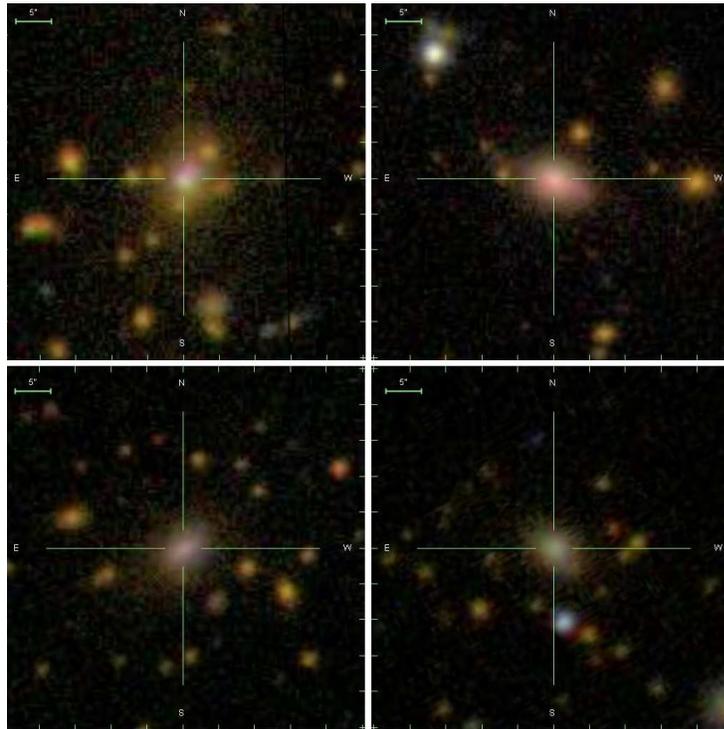


Figura 5.3: Imagens ópticas das galáxias que ajustam uma importante contribuição de população jovem. As imagens foram tomadas do SDSS e a ordem é a mesma que na figura 5.2.

populações estelares de idades jovens/intermediárias, podendo ser facilmente confundidas na hora de se fazer ajustes espectrais (Moehler, 2001; de Freitas Pacheco e Barbuy, 1995; Lee et al., 2000; Maraston e Thomas, 2000).

Usando aglomerados globulares de idades e metalicidades conhecidas através de métodos independentes, Koleva et al. (2008) testou ajustes espectrais para determinar idade e metalicidade destes. Nesse estudo, ao comparar idades ajustadas com as estimadas a partir de diagramas cor-magnitude (CMD, *Colour-Magnitude Diagram*), a diferença entre elas é maior para aglomerados globulares que possuem estrelas BHB do que para aglomerados sem esta população estelar.

A presença deste tipo de estrelas tem dependência com a metalicidade da população, dado que a maioria dos aglomerados pobres em metais apresentam uma maior extensão azul do ramo horizontal (p. ex., Sandage e Wallerstein, 1960). Assim, ao estimar a idade de uma população estelar de baixa metalicidade, temos uma precisão menor do que no caso de termos uma população rica em metais.

Este efeito é de grande importância em galáxias elípticas, como as de nossa amostra, por terem principalmente população velha. Sendo assim, provavelmente o intervalo de metalicidades mais estreito da biblioteca STELIB (ver Fig. 4.2) pode produzir um bias sistemático maior do que os ajustes feitos com MILES.

Alem disso, segundo resultados de Cid Fernandes et al. (2009) e na tese de doutorado de Gomes (2009), a biblioteca MILES tem um comportamento mais realista com galáxias passivas/elípticas, corrigindo algumas patologias dos ajustes, como a distribuição no plano $\bar{t} - \bar{Z}$ e A_V negativo em galáxias de tipo precoce (*early-type*).

5.2 Relação da formação estelar em BCGs com propriedades globais do aglomerado.

No ano de 2003, Peterson e colaboradores contradizem o modelo clássico de *cooling-flow* o que traria importantes mudanças no entendimento dos aglomerados de galáxias. Através de espectroscopia de alta resolução com o satélite XMM-Newton, em aglomerados CC de temperaturas intermediárias e baixas, se observam linhas de emissão consistentes com *cooling-flow*, mas a ausência de linhas como Fe XVII-XXI ou O VIII, indicam que a temperatura central do aglomerado não é tão baixa quanto predita pelos modelos de resfriamento.

Sendo assim, algum processo não gravitacional deve estar se produzindo no centro dos aglomerados que contrabalança a perda de energia por radiação, impedindo que o gás emissor de raios-X alcance temperaturas muito baixas. O mecanismo mais aceito atualmente é o de *feedback* de AGN na galáxia central. Existem modelos que asseguram que este mecanismo, é suficientemente eficiente para deter totalmente o resfriamento. Entretanto, outros modelos propõem que se o mecanismo de aquecimento não é eficiente suficiente, permite uma quantidade significativa de gás frio disponível para formar estrelas.

Se o resfriamento nos aglomerados não é detido, a perda de equilíbrio hidrostático origina um fluxo de material ao fundo do poço de potencial deste, que em geral é muito próximo à posição da BCG. Isto poderia mudar algumas propriedades ópticas destas galáxias e é por isso que vamos procurar por relações entre a formação estelar estimada nas BCGs a través de seus espectros e propriedades globais dos aglomerados estimadas a partir

de observações em raios-X. Para isso, nossa amostra é escolhida com a maior cobertura de massas possíveis, incluindo aglomerados com e sem *cooling-flow* e BCGs com e sem linhas de emissão.

5.2.1 Luminosidade em raios-X.

As luminosidade foram tiradas da literatura. Os dados dos aglomerados do catálogos de Maughan 2008 correspondem a observações com o satélite *Chandra* (Maughan et al., 2008) e os dos aglomerados dos catálogos RASS-SDSS e HIFLUGCS são obtidos a partir de observações com o satélite ROSAT (Chen et al., 2007; Popesso et al., 2004, respectivamente).

A Fig. 5.4 mostra a luminosidade em raios-X dos aglomerados em função da fração de luz de estrelas jovens na BCG (YPF). Embora um processo de formação estelar em galáxias *early type* não seja comum e portanto, formação estelar em BCGs é pensado por ter relação com as características do meio denso em que se encontram, não é possível ver nenhuma correlação entre o parâmetro YPF e a luminosidade em raios-X.

Este resultado é consistente com o obtido por Crawford et al. (1999), que não encontram evidência de aumento na frequência de linhas de emissão ópticas com a luminosidade em raios-X do aglomerado em que se encontram. Nesse estudo é usada uma amostra de aglomerados selecionados por raios-X e as linhas de emissão ópticas (em particular, $H\alpha$ ou $[NII]\lambda 6548,6584$) são relacionadas à formação estelar na galáxia central. Nós podemos confirmar esse resultado com a Fig.5.4, onde todas nossas BCGs com linhas de emissão são classificadas como tipo LINER segundo o diagrama BPT e se encontram demarcadas com um quadrado; na figura estas galáxias se apresentam tanto em aglomerados de baixa luminosidade como de alta luminosidade em raios-X.

5.2.2 Temperatura do gás intra-aglomerado.

Estamos interessados em usar a temperatura do aglomerado como uma característica global do aglomerado, em particular, como uma estimativa da massa deste. Em alguns aglomerados (CC), a região central tem uma temperatura do ordem de 2 a 3 vezes menor que a região mais externa (Ikebe et al., 2002) o que diminui a determinação da temperatura global. Para evitar este efeito nos aglomerados CC, o espectro em raios-X é ajustado

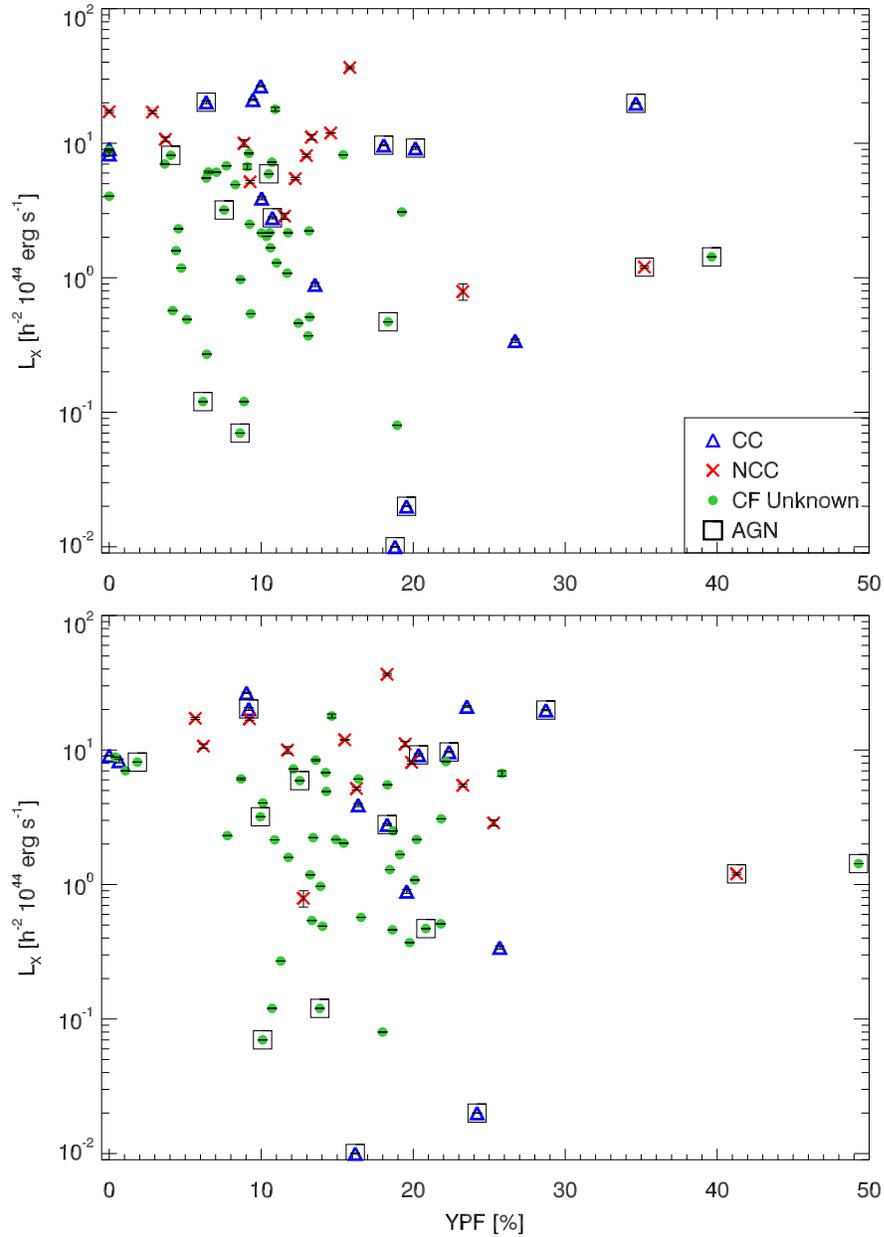


Figura 5.4: Fração de população jovem na BCG em função da luminosidade em raios-X (0.1-2.4 keV) do gás intra-aglomerado. O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03-S e o inferior com a base CBep-M.

a um modelo de duas temperaturas assumindo uma pequena região central mais fria; a temperatura da região mais quente (região externa), T_h , resulta ser mais representativa do aglomerado.

Os dados de temperatura T_h são extraídos da literatura (Maughan et al., 2008; Hudson

et al., 2009; Fukazawa et al., 2004; Baldi et al., 2007; Andersson et al., 2009; Sanderson et al., 2009; Zhang et al., 2006; Chen et al., 2007), e na Fig. 5.5 se apresenta em função do parâmetro YPF.

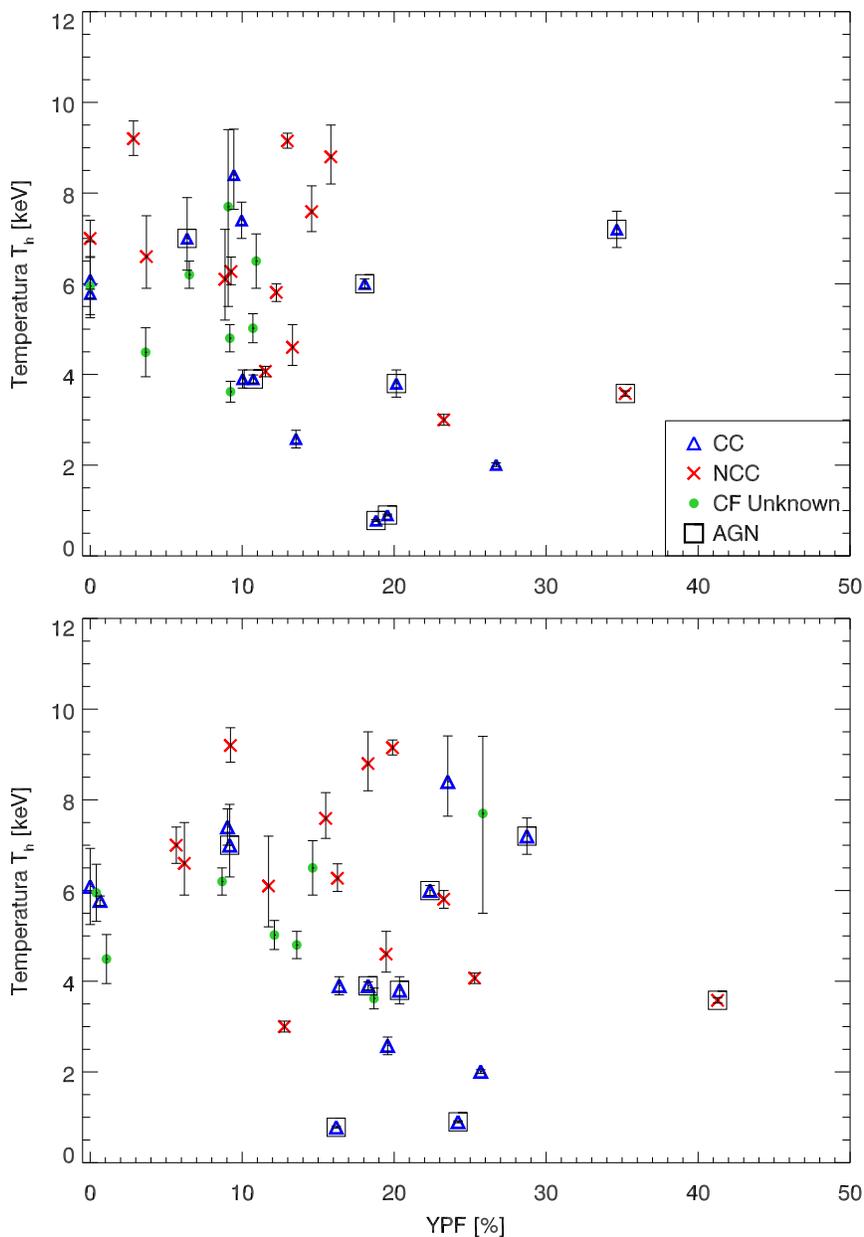


Figura 5.5: Fração de população jovem na BCG em função da temperatura da componente quente do gás intra-aglomerado (a partir de um modelo de duas temperaturas, assumindo um *core* frio). O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03-S e o inferior com a base CBep-M.

Segundo os ajustes do STARLIGHT, podemos ver que aglomerados frios ou menos massivos, apresentam sempre uma maior taxa de formação estelar ($Y_{PF} \gtrsim 15\%$), enquanto aglomerados massivos tem um espalhamento maior em relação à formação estelar. No caso da biblioteca BC03–S (painel superior) uma fraca anti-correlação pode ser observada, a qual vamos testar mais adiante.

Em estatística não paramétrica (ou de distribuição livre), pode ser usado o coeficiente de correlação de Spearman (ρ) para testar a dependência entre duas variáveis. Este coeficiente toma valores desde $\rho = -1$ para anti-correlação perfeita, até $\rho = 1$ para correlação perfeita, onde $\rho = 0$ corresponde a variáveis independentes.

Usando o ajuste feito com a biblioteca BC03–S, no caso da relação $Y_{PF}-T_h$ para todas as BCGs obtemos $\rho = -0.38$, o qual é aumentado (em módulo) para $\rho = -0.42$ se não consideramos as duas BCGs que tem $Y_{PF} > 30\%$. Estas duas galáxias são conhecidas rádio-fontes com linhas de emissão no óptico, e é possível que a atividade nelas seja puramente de AGN, afeitando o contínuo e induzindo a erros nos ajustes espectrais. Com isso, através de estatística não-paramétrica podemos concluir que os ajustes de STARLIGHT com a base BC03–S fornece uma fraca anti-correlação, ou seja, sugere que aglomerados massivos tendem a ter menor formação estelar na galáxia central. Este resultado é consistente com Laganá et al. (2008), que encontram uma maior eficiência para formar estrelas em galáxias de aglomerados frios e pequenos.

Entretanto, a base CBep–M fornece resultados mais fracos ainda: $\rho = -0.21$ e $\rho = -0.15$ para todas as BCGs e as com $Y_{PF} < 30\%$ respectivamente.

5.2.3 Parâmetro β do perfil de brilho superficial e raio de caroço.

Estes dois parâmetros estão associados ao perfil de densidade do ICM. Pequenos raios de caroço indicam uma alta densidade central, e são associado regularmente a aglomerados CC. Isto fica claro nos trabalhos de Allen (1998) e Peres et al. (1998) que encontram uma bimodalidade onde aglomerados CC apresentam raios de core pequenos, sendo o máximo da distribuição em ~ 100 kpc. Aglomerados sem fluxo de resfriamento (NCC, *Non-cool core*) apresentam uma distribuição do raio de caroço mais larga alcançando usualmente valores acima dos 300 kpc.

As Figs. 5.6 e 5.7 mostram uma total independência entre a formação estelar e o

parâmetro β e raio de core respectivamente. Os coeficientes de Spearman para estas relações apontam a independência das variáveis, sendo em todos os casos $|\rho| \lesssim 0.1$.

Sendo assim, podemos concluir que a formação estelar na galáxia central de um aglomerado, não tem relação com o perfil de densidade do gás intra-aglomerado, resultado consistente com a dependência muito fraca também, encontrada por Loubser et al. (2009).

5.2.4 Distância entre a BCG e o pico de emissão em raios-X.

Segundo a Eq. (2.1), a emissão em raios-X de um aglomerado depende fortemente da densidade, portanto, próximo ao fundo do poço de potencial gravitacional, vamos ter uma maior emissão comparada às regiões mais afastadas devido a maior densidade do gás. Dada a curta escala de tempo de relaxação do plasma intra-aglomerado, o pico de emissão em raios-X deve ser um bom indicador da posição do fundo do poço de potencial ou ponto de máxima densidade. Este ponto é considerado como o centro do aglomerado em catálogos de raios-X. Note que se houver uma AGN, não exatamente no centro, com uma forte emissão em raios-X, pode haver um erro nesta determinação da posição do fundo do poço de potencial gravitacional.

Entretanto, no caso de catálogos ópticos, o centro da distribuição das galáxias ou, as vezes mesmo a própria BCG, definem o centro do aglomerado. Quando um aglomerado teve tempo suficiente para relaxar dinamicamente, o centro em raios-X e a posição da BCG devem coincidir. O objetivo de calcular a distância entre estes dois “centros” é, por um lado, estimar o estado dinâmico dos aglomerados, e por outro lado, em caso de aglomerados CC, ver a possibilidade de que a galáxia central receba gás do ICM.

Para obter com maior precisão a distância entre o pico de emissão em raios-X e o centro da BCG, vamos só considerar aqueles aglomerados com imagens no arquivo público do *Chandra*, as quais tem uma ótima resolução espacial (~ 1 arcsec). Re-determinamos o centro dos aglomerados dos catálogos RASS-SDSS e HIFLUGCS, que foram publicados a partir de observações de baixa resolução com o telescópio ROSAT.

No caso de aglomerados com fortes *cool cores*, onde a inclinação do perfil de brilho superficial é grande, a procura do pico da emissão em raios-X resulta uma tarefa fácil, mas no caso de distribuições mais homogêneas (com gradientes de brilho superficial fracos) é necessário traçar de forma aproximada uma isofota circular externa, cujo centro é conside-

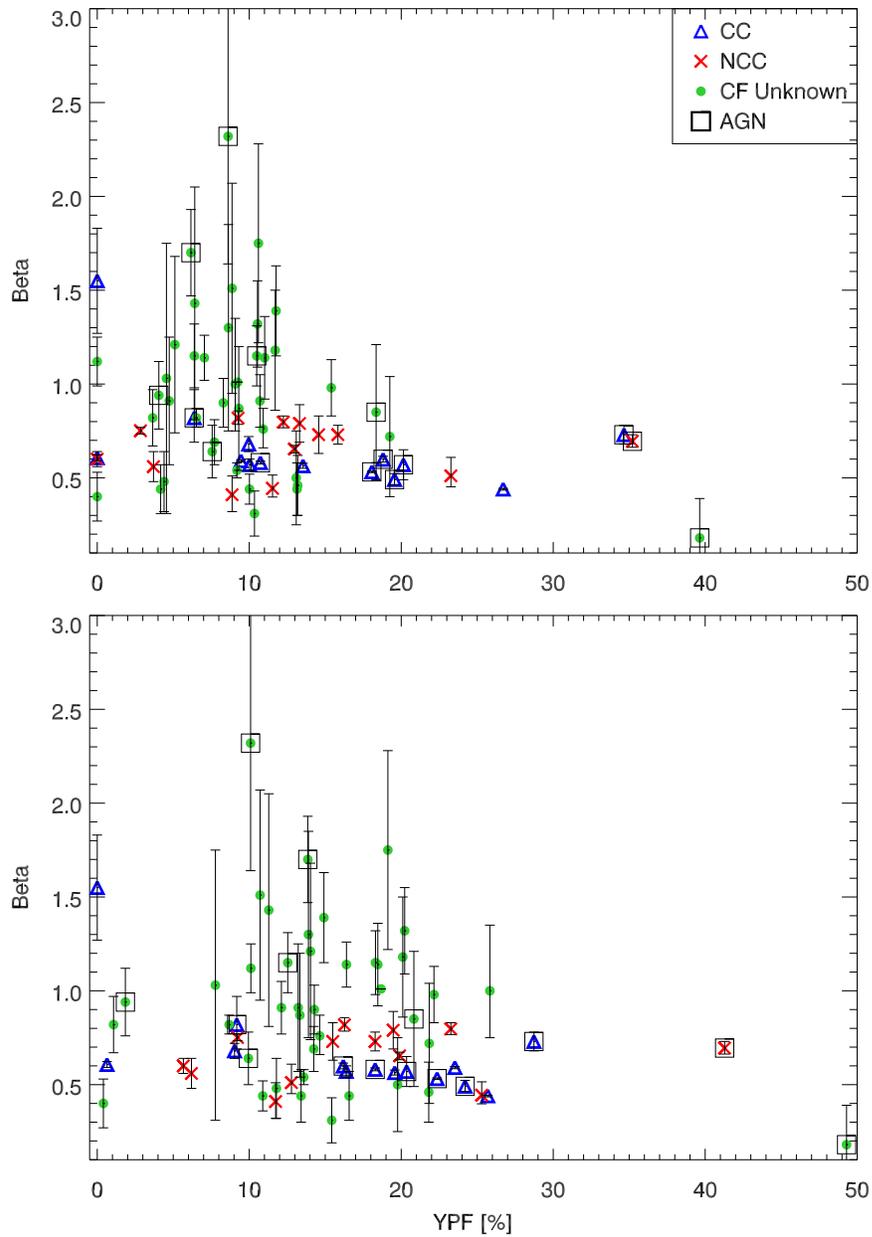


Figura 5.6: Fração de população jovem na BCG em função da temperatura média do gás intra-aglomerado. O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03-S e o inferior com a base CBep-M.

rado como o pico da emissão e centro do aglomerado. Um exemplo de esta determinação é mostrada na Fig. 5.8, onde se apresentam um aglomerado CC e um NCC.

A posição das BCGs é considerada como a posição da fibra óptica do espectrógrafo. Além de ser sempre bem próxima ao centro da galáxia, é a região onde estamos estimando

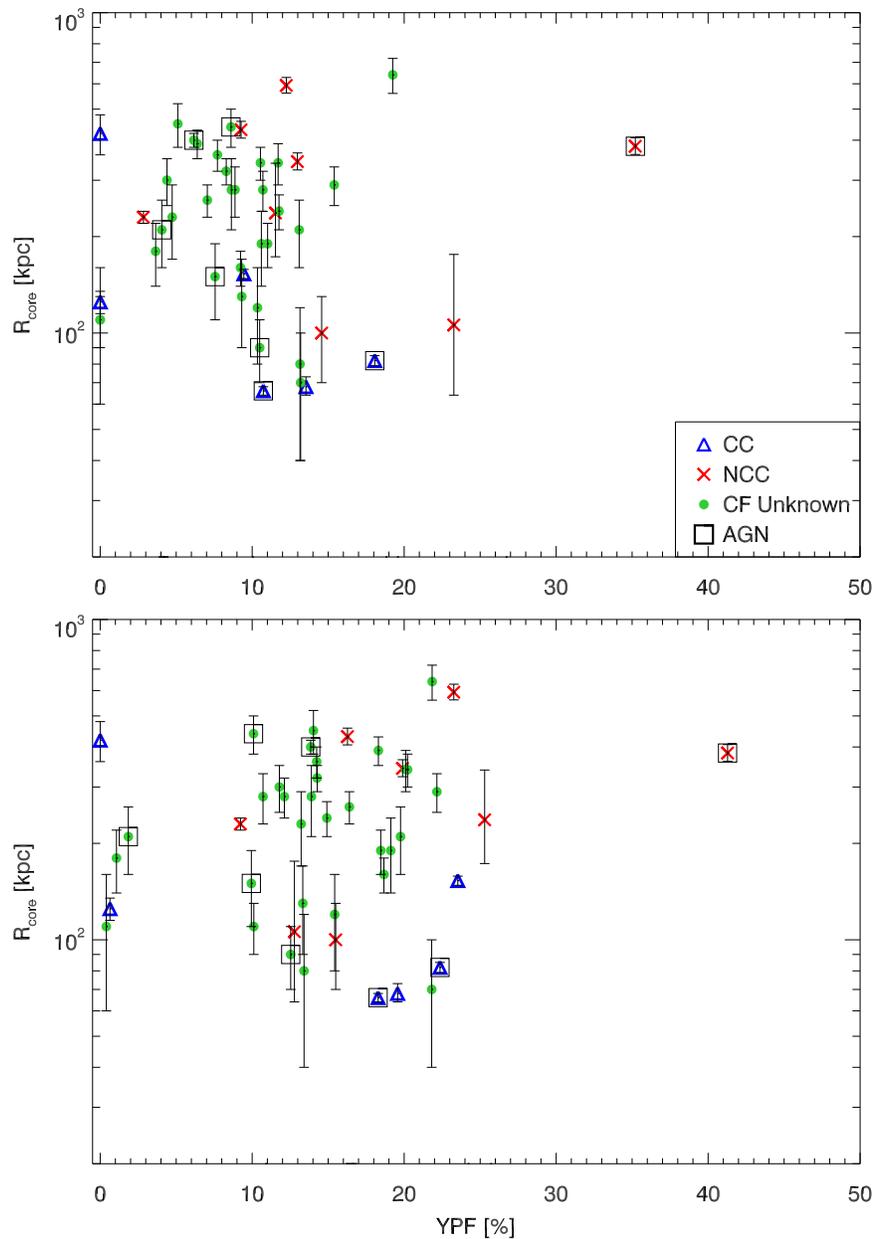


Figura 5.7: Fração de população jovem na BCG em função da temperatura média do gás intra-aglomerado. O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03–S e o inferior com a base CBep–M.

a formação estelar e queremos ver como este processo está sendo influenciado pelo que acontece no centro gravitacional do aglomerado. A distância projetada entre estes dois pontos do aglomerado, foi calculada usando o redshift da BCG (medido com maior precisão no espectro óptico do SDSS) e cosmologia padrão ($\Omega_M = 0.3$ e $\Omega_\Lambda = 0.7$).

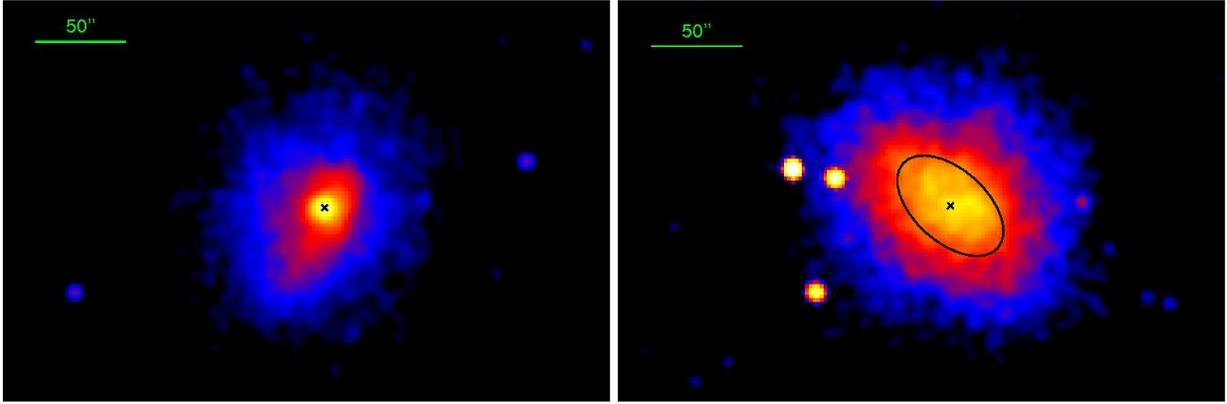


Figura 5.8: Determinação do centro dos aglomerados a partir de observações com o satélite *Chandra*. Na esquerda, o aglomerado CC MS1358.4+6245 e na direita, o aglomerado NCC A1995.

Na Fig. 5.9 vemos o comportamento do parâmetro YPF em função da distância entre a BCG e o centro do aglomerado. A primeira observação, é que aglomerados com *cool core* têm sempre a BCG próxima ao centro, sugerindo, como é esperado, um estado dinâmico relaxado. Isso é consistente com o perfil de brilho superficial destes aglomerados, o qual em geral mostra uma morfologia regular e sem indícios de interação recente, o que poderia produzir perturbações na distribuição de galáxias respeito ao centro do aglomerado.

Allen (1998) e Peres et al. (1998) também confirmam isto através de uma mostra de aglomerados observados com ROSAT, onde a distancia entre a BCG e o centro gravitacional é maior para aglomerados NCC.

A partir da Fig. 5.9 é possível apreciar também, uma tendência fraca indicando que, quanto mais próxima a BCG está do centro do aglomerado, maior é a taxa de formação estelar na dita galáxia. Isto é um pouco mais evidente no ajuste feito com a base CBep–M. Este resultado, embora seja estatisticamente fraco, é consistente com estudos prévios que concluem por exemplo, que BCGs com um núcleo azul, correspondente a formação estelar central, ficam sempre numa distância $\lesssim 10 \text{ kpc } h^{-1}$ (Bildfell et al., 2008; Rafferty et al., 2008), assim como Sanderson et al. (2009) que afirmam que BCGs com linhas de emissão $H\alpha$ se localizam próximas ao pico da emissão de raios-X.

Considerando isso, vemos como distâncias menores a $10 \text{ kpc } h^{-1}$, se apresentam praticamente só em aglomerados CC e na maioria dos casos, existe um processo de formação

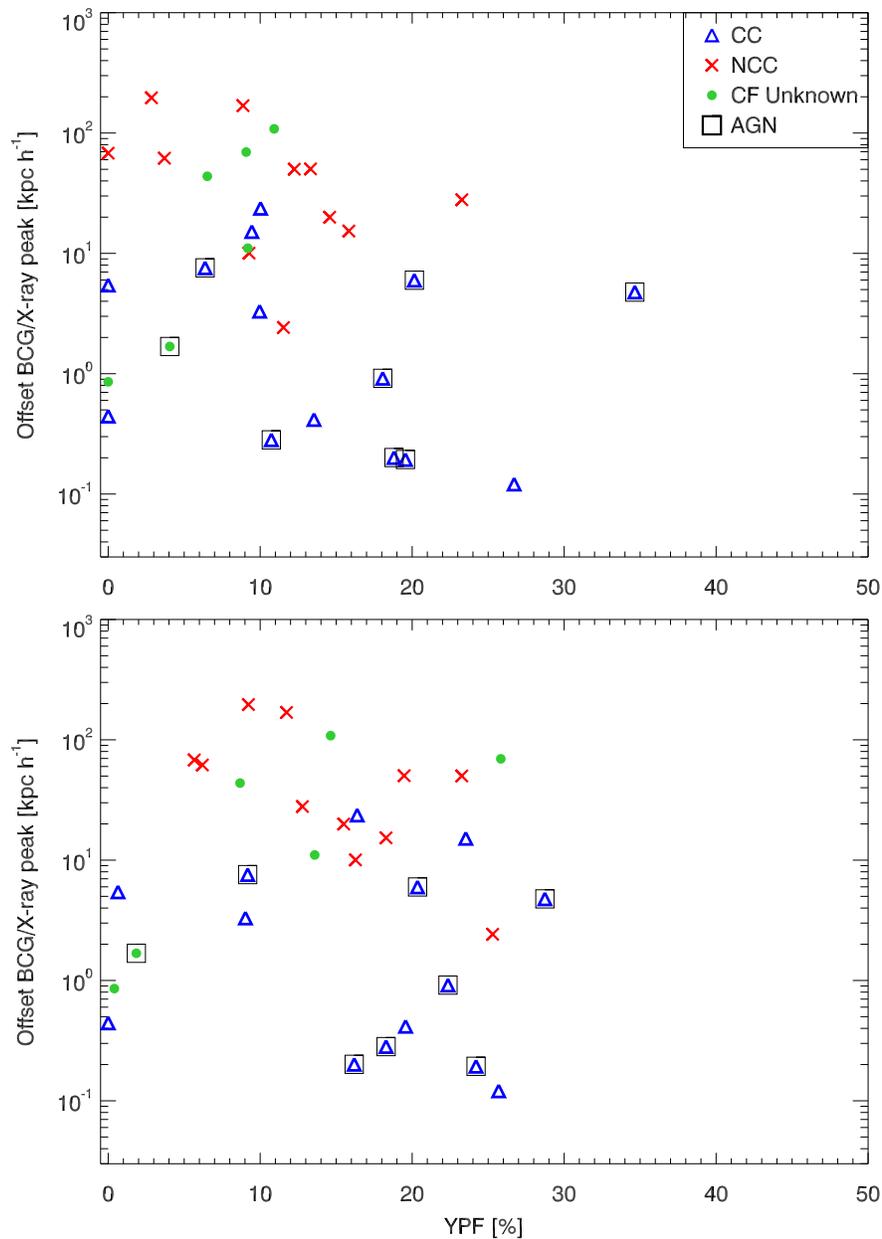


Figura 5.9: Fração de população jovem na BCG em função da distância entre a BCG e o pico de emissão em raios-X. O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03-S e o inferior com a base CBep-M.

estelar recente significativo. Um cenário possível seria que, se o *cooling-flow* esta acontecendo num aglomerado, as únicas galáxias que poderiam ser influenciadas por este processo, são as que se encontram próximas ao fundo do poço de potencial porque receberiam material do ICM. Este material poderia ser a fonte de gás necessário para o incremento na

formação estelar no centro da galáxia.

Dois casos de aglomerados CC e com a BCG a menos de 10 kpc h^{-1} apresentam pouca ou quase nada de formação estelar no último Gano. Em particular, chama a atenção o aglomerado A2244, cuja BCG é uma galáxia elíptica vermelha, dominante no aglomerado e que se encontra a menos de 6 kpc h^{-1} do pico de emissão em raios-X. Segundo STARLIGHT, esta galáxia não apresenta formação estelar recente, mas da literatura sabemos que possui uma radio-fonte que poderia estar regulando o resfriamento do ICM, e que o valor da entropia central ($K_0 = 57.1 \pm 5.8 h^{-1/3}$ keV cm² Hudson et al., 2009) supera o limite superior para formação estelar determinado por Rafferty et al. (2008).

Entretanto, para as BCGs mais afastadas, mesmo se o aglomerado tivesse fluxo de material do ICM para o centro, ele não seria depositado no centro da galáxia, e por tanto qualquer medição de formação estelar no centro da BCG não teria relação com a presença ou não de *cool core*. As BCGs também podem receber material através de *merger* ou acreção; o fato da BCG ficar afastada do centro gravitacional do aglomerado (pico de emissão em raios-X), poderia ser produto de algum evento de fusão relativamente recente, o qual poderia ser a sua vez, a fonte do gás necessário para que algumas destas BCGs tenham uma alta porcentagem de população jovem.

5.2.5 Relação com o *cooling-flow*

Diversos estudos prévios tem relacionado a formação estelar em BCGs ao processo de *cooling-flow* no aglomerado em que se encontram (p. ex., Edwards et al., 2007; O’Dea et al., 2008; Bildfell et al., 2008; Loubser et al., 2009; Wang et al., 2010). Usando diferentes evidências para formação estelar, a conclusão comum de todos estes trabalhos é que BCGs com taxas altas de formação estelar se encontram preferentemente em aglomerados com fortes *cooling-flow*.

Vamos testar esta afirmação usando os resultados de síntese espectral obtidos com STARLIGHT. Na Fig. 5.10 se mostra a distribuição do parâmetro YPF para aglomerados CC e NCC, nela podemos ver, com os ajustes de ambas as bases, que não existe uma tendência clara a ter maior formação estelar quando o aglomerado tem *cool-core*. No caso da base BC03-S, o valor médio de YPF tem um leve aumento de 1.5 % quando consideramos aglomerados CC; com a base CBep-M, em tanto, o valor médio diminui em 0.6 %.

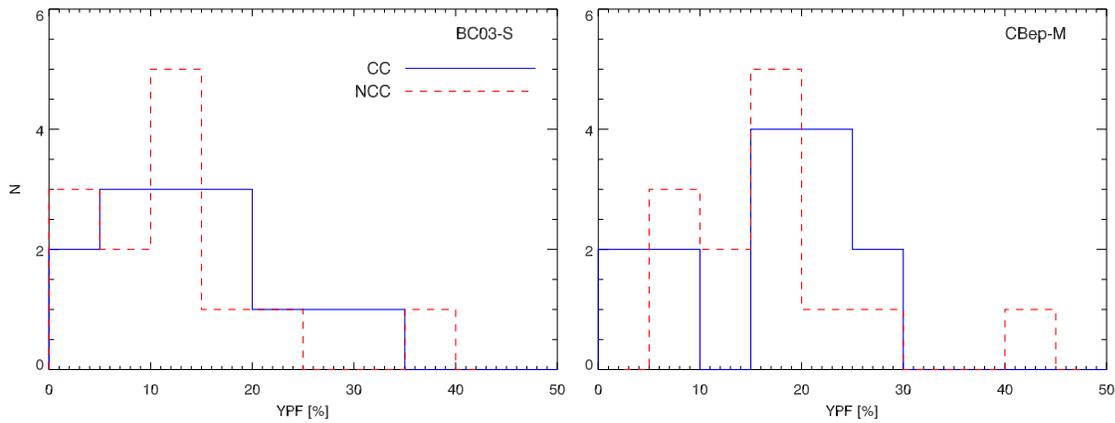


Figura 5.10: Distribuição do parâmetro YPF que quantifica formação estelar em BCGs para aglomerados com *cool-core* (linha contínua em azul) e sem (linha pontilhada em vermelho). O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03-S e o inferior com a base CBep-M.

Para observar em detalhe as diferenças existentes entre estas duas subamostras, vemos na Fig. 5.11, a história de formação estelar nas BCGs no último Gano (considerado como população jovem neste estudo). Nessa figura não é possível ver diferenças evidentes entre as duas subamostras.

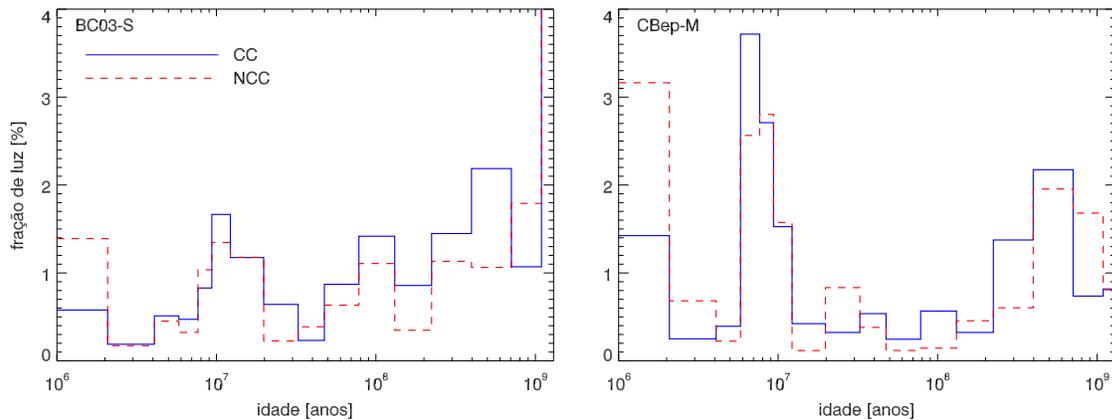


Figura 5.11: História de formação estelar média em BCGs para aglomerados com *cool-core* (linha contínua em azul) e sem (linha pontilhada em vermelho). O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03-S e o inferior com a base CBep-M.

5.3 Metalicidade da População jovem

Além da idade da população estelar, o ajuste com o STARLIGHT nos dá informação sobre a metalicidade. Em particular, usaremos a metalicidade da população jovem ponderada por luz para procurar a origem do gás que está formando estrelas no centro das BCGs.

Em primeiro lugar, vamos comparar a metalicidade da população jovem com a população já existente na galáxia no momento de sua formação (idade $> 10^9$ anos) e a metalicidade média da população estelar da galáxia (ver Fig. 5.12 e Fig. 5.13, respectivamente). Se a reciclagem do gás (gás devolvido ao meio a través de explosões de supernovas) fosse eficiente, esperaríamos que as estrelas formadas recentemente tenham metalicidade maior do que a população antiga, pois foram formadas com gás enriquecido com os metais sintetizados nas estrelas que já evoluíram e explodiram como supernovas. Nas duas figuras vemos uma total independência das variáveis para ambos os ajustes. Isto pode ser interpretado descartando a possibilidade de haver formação estelar com gás reciclado da mesma galáxia e precisando necessariamente de uma fonte externa de gás para poder ter o processo de formação observado.

Esta interpretação deixa duas opções para a fontes de gás da população estelar formada recentemente: gás proveniente de uma outra galáxia que sofreu uma fusão com a BCG do aglomerado (Poole et al. 2006). Como já discutimos, isto tem o problema da pouca quantidade de gás nas galáxias próximas ao centro, pois, elas já perderam grande parte do seu gás ao cair no centro do aglomerado através de pressão de arrastre. Outra possível fonte de gás para o caso de aglomerados com *cool-core*, é o fluxo de material proveniente do ICM para o centro do aglomerado que, na maioria dos casos, é próximo ou coincidente com a posição da BCG.

Das figuras 5.12 e 5.13 podemos notar também que nenhuma diferença aparente se aprecia para aglomerados CC ou NCC. A metalicidade da população jovem abarca um grande intervalo de metalicidades diferente do que acontece com a metalicidade do ICM que em média tem um intervalo bem restrito por volta de 1/3 metalicidade solar, mesmo incluindo aglomerados CC que tem uma maior metalicidade na região central (De Grandi e Molendi, 2001).

A partir desta observação, analisaremos a metalicidade da população jovem em função da metalicidade do gás intra-aglomerado. Os dados de metalicidade do gás foram tomados

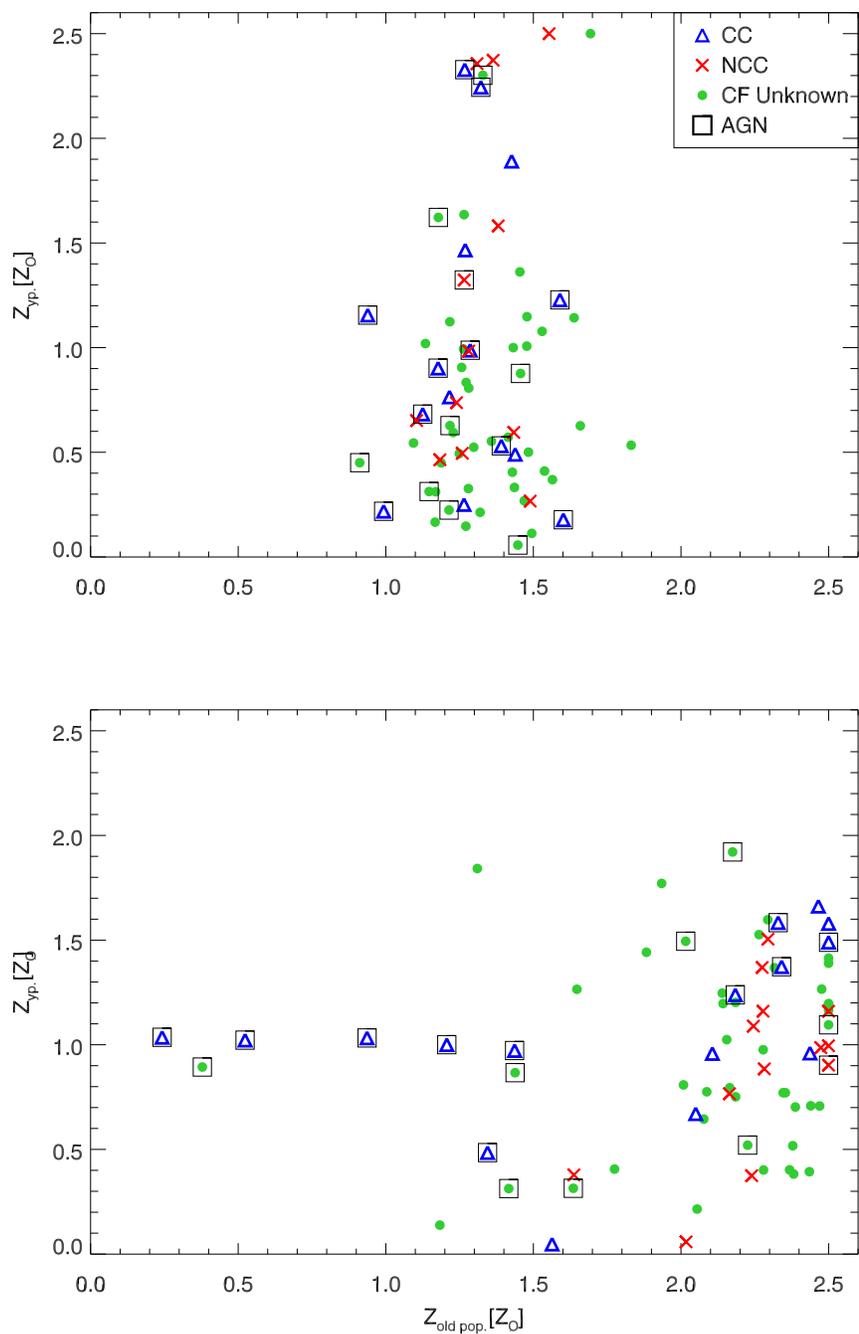


Figura 5.12: Resultado de Starlight: Metalicidade da população jovem (idade $< 10^9$ anos) vs metalicidade da população antiga (idade $> 10^9$ anos). O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03-S e o inferior com a base CBep-M.

da literatura (Maughan et al., 2008; Andersson et al., 2009), só nos casos em que foi calculada sem excluir a região central do aglomerado. Esta metalicidade é medida através

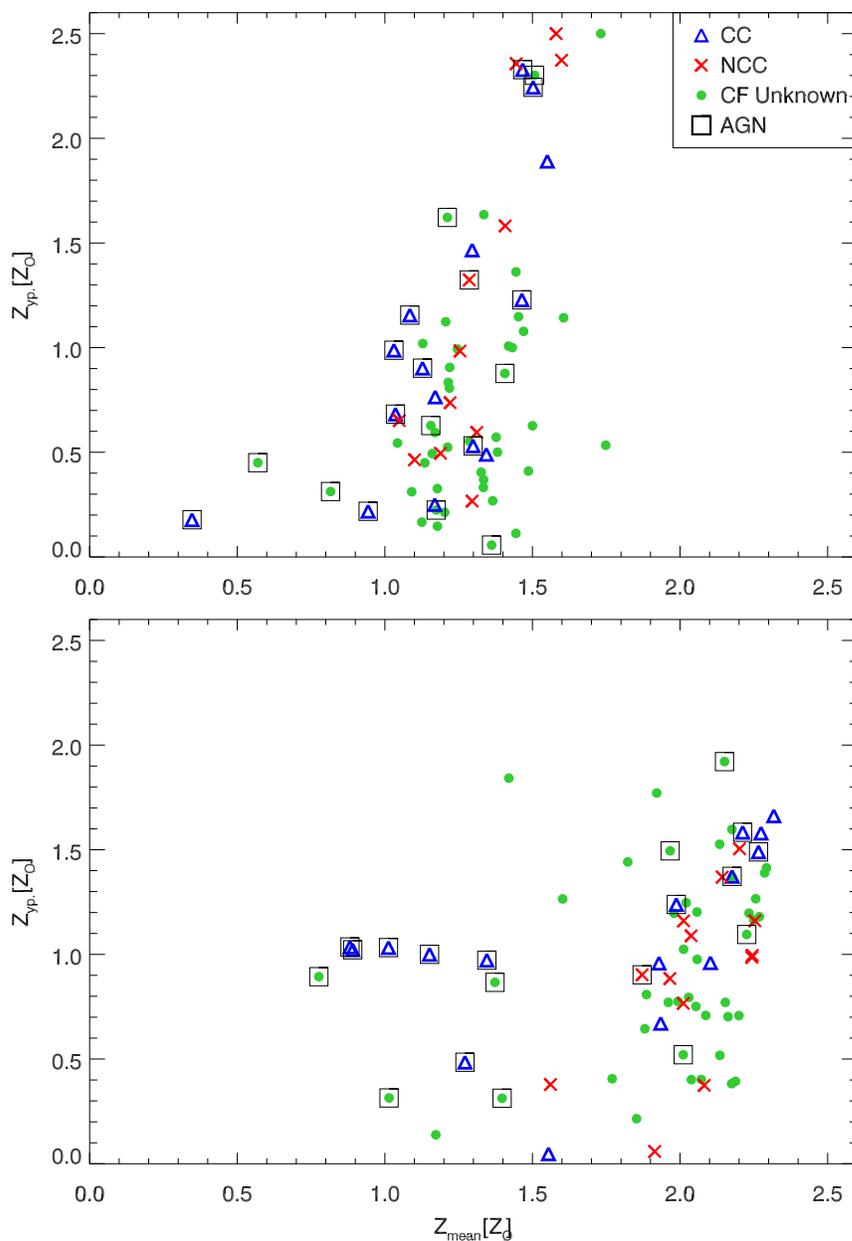


Figura 5.13: Resultado de Starlight: Metalicidade da população jovem (idade $< 10^9$ anos) vs metalicidade media da galáxia. O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03-S e o inferior com a base CBep-M.

de observações espectroscópicas na faixa de raios-X, particularmente sensível à linha do Fe em $6.7/(z+1)$ keV.

A Fig. 5.14 mostra como nenhum dos ajustes fornece metalicidades das estrelas jovens próximas à metalicidade do gás, como seria o caso se o gás do ICM fosse a fonte da

matéria-prima para os processos de formação estelar recente, mesmo se consideramos só aglomerados com *cool-core*.

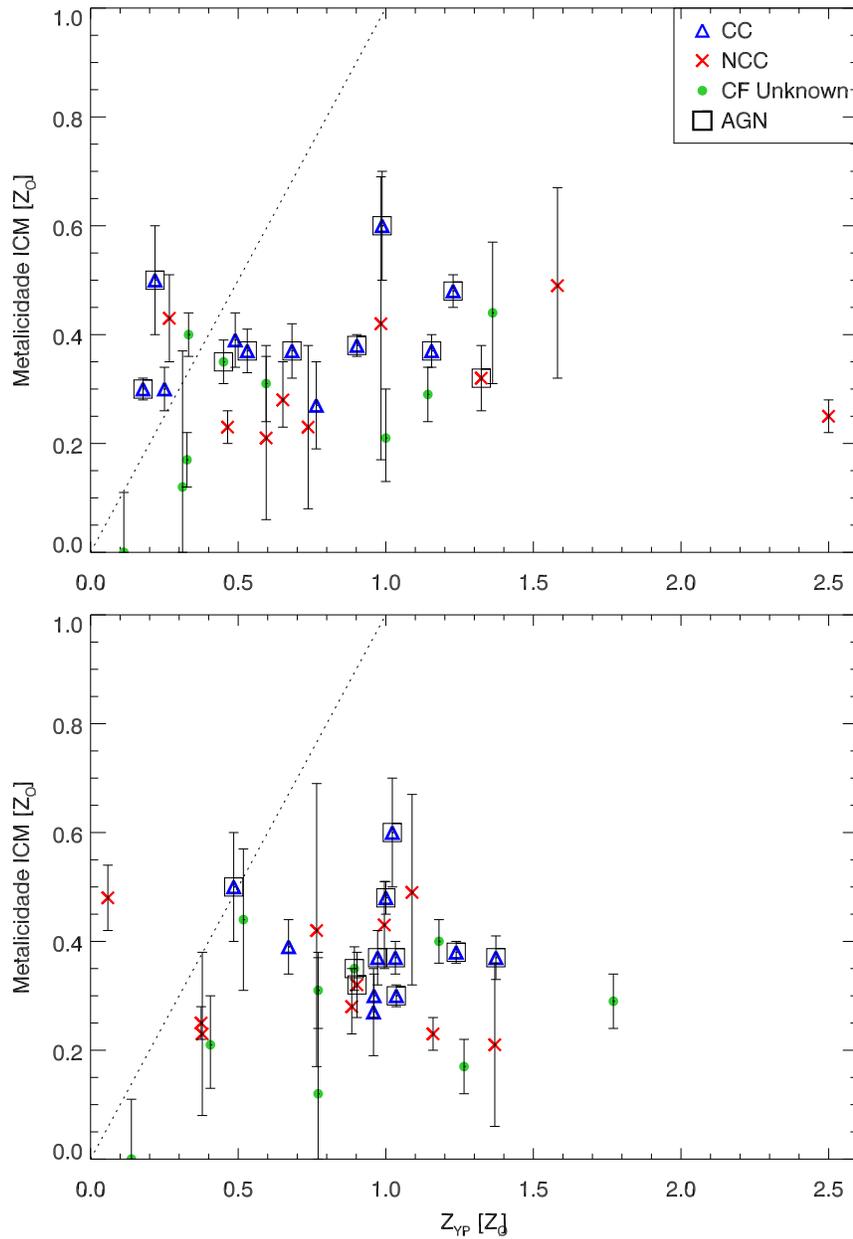


Figura 5.14: Resultado de Starlight: Metallicidade da população jovem (idade $< 10^9$ anos) vs metalicidade do gás intra-aglomerado. O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03-S e o inferior com a base CBep-M.

Cabe notar que o ajuste realizado com a base BC03-S apresenta metalicidades médias e da população velha (que corresponde a uma alta porcentagem do total) num intervalo

bem restrito e próximo à metalicidade solar. Isto é basicamente devido ao bias produzido pela cobertura estreita de metalicidades da biblioteca STELIB, o qual faz com que qualquer ajuste com esta biblioteca subestime a metalicidade da população (Koleva et al. (2008); González Delgado e Cid Fernandes (2010)). A biblioteca MILES, entretanto, por ter uma melhor cobertura de metalicidades produz ajustes com um maior espalhamento da abundância de metais, tendendo a metalicidades maiores que com STELIB (aproximadamente uma diferença de 0.2 dex em média).

5.4 Dependências com propriedades internas da BCG

As propriedades especiais das BCGs poderiam ser produto não só da sua localização no aglomerado, mas também da sua alta massa. Se for assim, o processo de formação estelar observado poderia não estar relacionado unicamente aos efeitos do ambiente, mas também às propriedades internas da BCG.

A dispersão de velocidades de um sistema é comumente usado como estimativa de massa deste (usando o Teorema do Virial). Na Fig. 5.15 vemos a dispersão de velocidades das BCGs em função da porcentagem de população jovem na galáxia. Nela é possível apreciar a dependência nula entre o processo de formação estelar, parametrizado por YPF e a massa da galáxia. O mesmo acontece com a luminosidade na banda r (magnitude absoluta) como se mostra na Fig. 5.16.

Este resultado descarta dependência entre a processo de formação estelar na BCG e a massa desta galáxia. Isto é consistente com resultados prévios de Loubser et al. (2009) quem usando índices de Lick encontra uma dependência muito pequena entre os parâmetros da população estelar nas BCGs e a massa e luminosidade dessas galáxias.

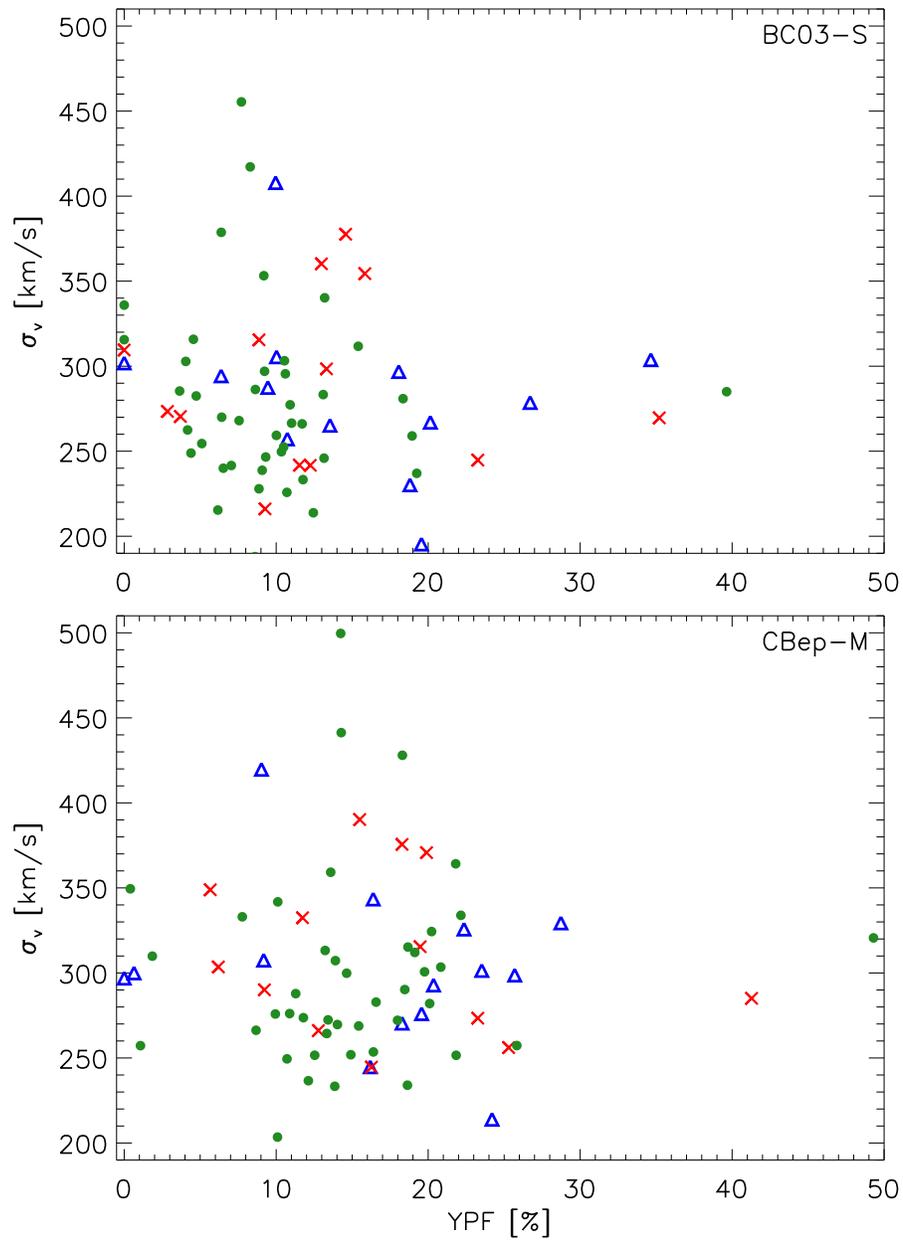


Figura 5.15: Velocidade de dispersão das BCGs em função da porcentagem de população jovem nela.

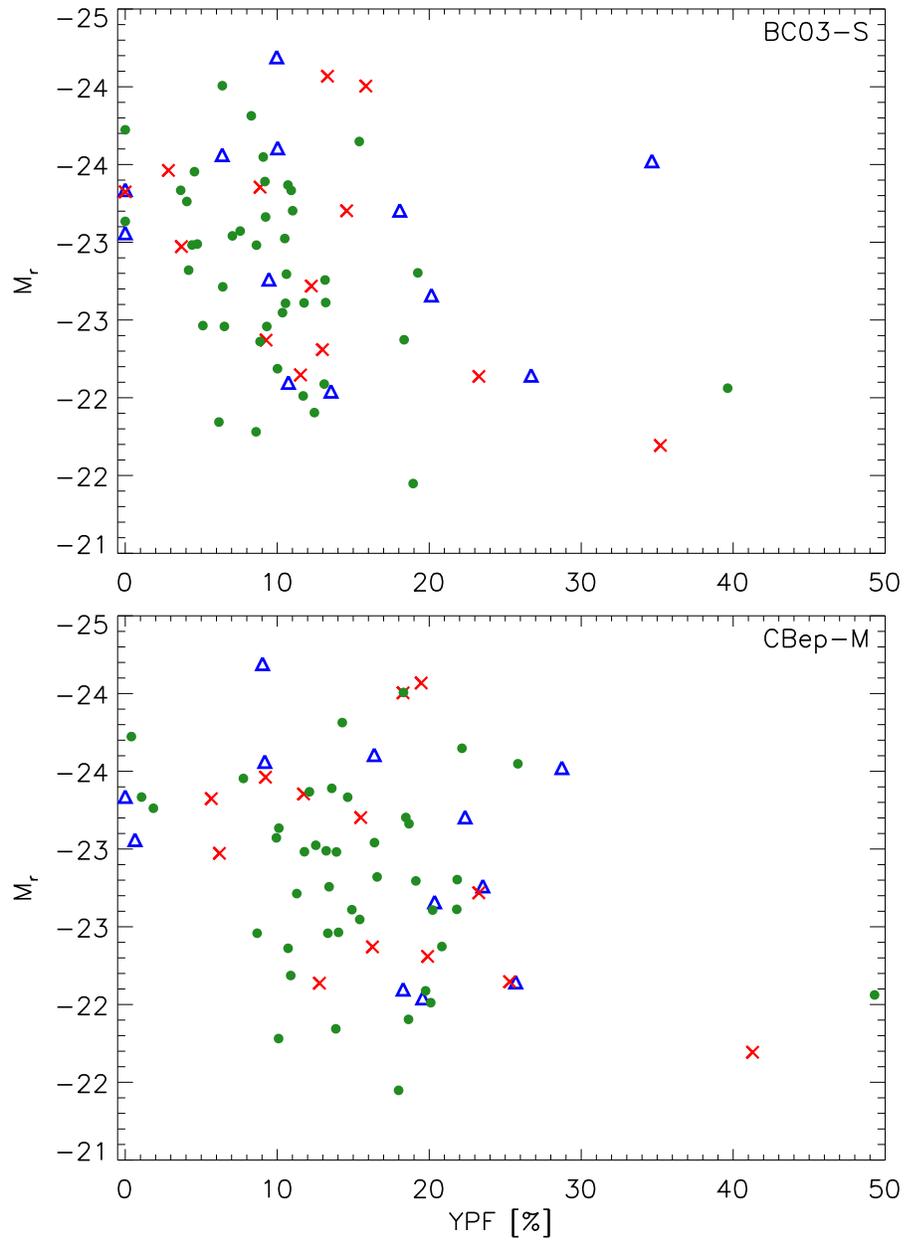


Figura 5.16: Magnitude absoluta na banda r das BCGs em função da porcentagem de população jovem nela.

Discussão e Conclusões

Nosso principal objetivo foi a procura de relações entre a formação estelar na galáxia mais brilhante de aglomerados e as propriedades globais do aglomerado. Em particular, verificar se devido a efeitos do ambiente, estas galáxias teriam processos mais intensos de formação estelar que outras galáxias de massa e estrutura similar que não estão localizadas nos centros de aglomerados, como foi pensado desde os primeiros indícios de formação estelar descobertos nas BCGs (p. ex., Johnstone et al., 1987).

Amostras de aglomerados de galáxias selecionados por raios-X geralmente apóiam esta teoria (p. ex., O’Dea et al., 2008; Rafferty et al., 2008; Bildfell et al., 2008; Sanderson et al., 2009; Hicks et al., 2009). Por outro lado, estudos em amostras de aglomerados opticamente selecionados, não conseguem encontrar uma relação significativa entre a formação estelar em BCGs e o ambiente. Neste contexto, estudos de linhas de emissão ópticas em BCGs não encontram relação entre a fração de galáxias com linhas e a luminosidade em raios-X do aglomerado (Crawford et al., 1999) ou a dispersão de velocidades do aglomerado (estimador de massa Edwards et al., 2007).

von der Linden et al. (2007) estuda BCGs de grupos e aglomerados do SDSS e compara com outras galáxias elípticas (mas não BCGs) de massa similar, encontrando populações estelares de idade similar e metalicidade média para ambas as amostras (onde a idade é determinada a partir da medição de D4000 e a metalicidade a partir do índice espectral [Mg Fe]). Entretanto, as BCGs são caracterizadas por terem mais altas abundâncias de elementos- α (C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca e Ti, sintetizados principalmente por supernovas tipo II) que galáxias elípticas de massa similar.

Usando índices espectrais de Lick, Loubser et al. (2009) confirma as maiores razões

α/Fe para BCGs comparada com elípticas não BCGs no mesmo intervalo de massas. Nesse trabalho são encontradas dependências muito fracas entre parâmetros da população estelar na BCG e a massa e densidade do aglomerado.

Nossos resultados são consistentes com estes estudos prévios. Em primeiro lugar, nosso parâmetro de formação estelar, YPF ou fração de luz correspondente a estrelas jovens (idade $< 10^9$ anos) é independente da luminosidade em raios-X do aglomerado em que se encontra. Dita fração de população jovem apresenta uma fraca anti-correlação com a temperatura média do ICM (calculada excluindo a região fria relacionada com um *cool-core*), sugerindo que aglomerados menos massivos (ou mais frios) apresentam maiores taxas de formação estelar na galáxia central. Enquanto a densidade, o raio de core e parâmetro β do perfil de brilho superficial não mostram nenhuma dependência com YPF.

Todos estes trabalhos, inclusive o nosso, são baseados em observações espectrais da BCG feitos com fibra óptica. Isto traz a desvantagem de que qualquer medição de população estelar ou outras propriedades corresponderão unicamente à região central da galáxia. No caso de espectros do SDSS, o tamanho da fibra óptica do espectrógrafo, cobre uma área de aproximadamente $3''$ de raio. Então as conclusões devem ser claras a respeito de que estamos medindo formação estelar numa região reduzida da galáxia.

Uma das mais importantes questões a serem consideradas, é a base espectral usada para os ajustes. Ambas as bases utilizadas (BC03+STELIB e CBep+MILES) não contam com tratamento da população estelar correspondente à extensão azul do ramo horizontal, conhecida como estrelas BHB (*Blue Horizontal Branch*). Esta população é de idade avançada, e por tanto pode ser considerável em galáxias antigas como as BCGs. Seu espectro azulado é facilmente confundido com estrelas jovens, podendo induzir a erros nos ajustes espectrais realizados com STARLIGHT. Trager et al. (2005) estuda a importância de incluir estas populações nos modelos para estimar idades e metalicidades através de índices de Lick: a estimação da idade é significativamente afetada só para galáxias com populações muito velhas (idade > 10 Ganos) e ricas em metais, enquanto a metalicidade é sempre maior quando se inclui estrelas BHB nos modelos. A presença desta população aumenta levemente a razão α/Fe , que é outra deficiência da base espectral.

As bases não contam com espectros com diferentes abundâncias de elementos- α . Tem-se demonstrado que a razão α/Fe é maior em BCGs que em outras elípticas (von der Linden

et al., 2007; Loubser et al., 2009), portanto um ajuste de estas características espectrais seria mais adequado. Este incremento na razão α/Fe pode ser interpretado como uma indicação de que a formação estelar em BCGs acontece numa escala de tempo mais curta (Granato et al., 2004)

Entretanto, todos os estudos prévios coincidem em que formação estelar é mais intensa em aglomerados CC, e aumenta quando a BCG está próxima do pico de emissão em raios-X. Em resumo, estudos prévios mostram que BCGs com núcleos azuis e com linhas de emissão $\text{H}\alpha$, se encontram preferencialmente em aglomerados CC, e a análise da idade média da população estelar em BCGs através de índices de Lick, sugere que galáxias no centro de aglomerados com *cool-core* têm populações mais jovens. Contudo, ao quantificarmos esta formação estelar através de síntese espectral com o código STRALIGHT, não foi possível detectar diferenças significativas na história de formação estelar no último Gano. BCGs de aglomerados CC e NCC apresentam basicamente a mesma história de formação estelar recente.

Sendo assim, é necessária uma procura da origem do gás fonte para este processo. Mostramos que BCGs afastados do pico de emissão em raios-X e sem *cooling-flow* apresentam também, quantidades significativas de estrelas jovens. Nesse caso, temos aglomerados dinamicamente não relaxados e portanto uma fusão recente é provável. No caso de aglomerados CC, observamos o ICM sem indícios de uma interação recente. Nesse caso, a fonte de gás mais provável é o gás do ICM que está sendo depositado no centro do aglomerado através do *cooling-flow*. Finalmente concluímos que, segundo nossos resultados com STARLIGHT, os processos de formação estelar observados em aglomerados CC e NCC são excitados por diferentes mecanismos. Cada um destes mecanismos fornece por sua vez, o gás necessário para a formação de novas estrelas.

Simulações atuais de formação e evolução de BCGs não prevêm um processo ativo de formação estelar nestas galáxias. No modelo de De Lucia e Blaizot (2007), as estrelas que formam parte das BCGs foram formadas há muito tempo em pequenas galáxias que foram se fusionando hierarquicamente até formar as galáxias massivas observadas hoje. Devido a que estas galáxias contêm pouco gás, neste modelo as fusões não excitariam novos processos de formação estelar, não afeitando a idade da população estelar das BCGs. Este modelo assume também um eficiente *feedback* de AGN que suprime completamente o

resfriamento do ICM. Tem se demonstrado que BCGs tem maiores probabilidades de conter *radio-loud AGN* que outras galáxias de massa estelar similar, e tal atividade origina jatos que coincidem com cavidades no ICM (observadas em raios-X), sugerindo a transferência de energia ao gás (p. ex., Jones et al., 2002).

Entretanto nossos resultados apontam a que mesmo tendo um AGN na galáxia central (detetado opticamente), existem altas percentagens de estrelas jovens nas BCGs. Seria bom testar com modelos semi-analíticos, um cenário que inclua regulamento do fluxo de resfriamento a través de *feedback* de AGNs e galáxias com frações moderadas de gás, necessárias para a ativar formação estelar numa fusão de galáxias.

6.1 *Perspectivas do Trabalho*

Várias coisas devem ser melhoradas para aumentar a confiabilidade de nossos resultados. Principalmente as bases espectrais usadas devem ser mais propícias para galáxias tipo precore, ou seja, populações velhas devem conter um tratamento das estralal velhas e azuis que populam o fim do ramo horizontal (BHB) pois, possuem características espectrais confundíveis com estrelas jovens. Estudos prévios indicam que BCGs tem mais altas razões α/Fe , portanto as bibliotecas espectrais deveriam conter também um tratamento das abundâncias de elementos α . Dadas as restrições observacionais destas melhorias, o correto seria usar bases espectrais teóricas, mesmo que adicionemos erros associados aos modelos de formação e evolução de populações estelares.

É sabido que BCGs são mais propensas a hospedar radio-AGNs que outras galáxias de similar massa e que estes AGNs são o principal regulador do fluxo de resfriamento. Um estudo em radio seria de grande ajuda para a detecção de *radio-loud AGN* nas BCGs que poderiam estar contrabalançando o resfriamento do ICM e portanto impedindo a formação estelar em BCGs de aglomerados CC. Isto seria de grande importância para procurar se existe correlação entre o balanço entre resfriamento e aquecimento do ICM de aglomerados CC e a formação estelar em suas BCGs.

Referências Bibliográficas

- Abell G. O., Clustering of Galaxies, *ARA&A*, 1965, vol. 3, p. 1
- Allen S. W., Resolving the discrepancy between X-ray and gravitational lensing mass measurements for clusters of galaxies, *MNRAS*, 1998, vol. 296, p. 392
- Allen S. W., Edge A. C., Fabian A. C., Boehringer H., Crawford C. S., Ebeling H., Johnstone R. M., Naylor T., Schwarz R. A., Optical spectroscopy of the ROSAT X-ray brightest clusters, *MNRAS*, 1992, vol. 259, p. 67
- Andersson K., Peterson J. R., Madejski G., Goobar A., Characterizing the Properties of Clusters of Galaxies as a Function of Luminosity and Redshift, *ApJ*, 2009, vol. 696, p. 1029
- Baldi A., Ettori S., Mazzotta P., Tozzi P., Borgani S., A Chandra Archival Study of the Temperature and Metal Abundance Profiles in Hot Galaxy Clusters at $0.1 < z < 0.3$, *ApJ*, 2007, vol. 666, p. 835
- Beers T. C., Geller M. J., The environment of D and cD galaxies, *ApJ*, 1983, vol. 274, p. 491
- Beers T. C., Tonry J. L., Density cusps in clusters of galaxies, *ApJ*, 1986, vol. 300, p. 557
- Bildfell C., Hoekstra H., Babul A., Mahdavi A., Resurrecting the red from the dead: optical properties of BCGs in X-ray luminous clusters, *MNRAS*, 2008, vol. 389, p. 1637
- Binney J., Tabor G., Evolving Cooling Flows, *MNRAS*, 1995, vol. 276, p. 663

- Blanton E. L., Sarazin C. L., McNamara B. R., Wise M. W., Chandra Observation of the Radio Source/X-Ray Gas Interaction in the Cooling Flow Cluster Abell 2052, *ApJ*, 2001, vol. 558, p. L15
- Böhringer H., Voges W., Fabian A. C., Edge A. C., Neumann D. M., A ROSAT HRI study of the interaction of the X-ray-emitting gas and radio lobes of NGC 1275, *MNRAS*, 1993, vol. 264, p. L25
- Brough S., Collins C. A., Burke D. J., Mann R. G., Lynam P. D., Evolution of brightest cluster galaxies in X-ray clusters, *MNRAS*, 2002, vol. 329, p. L53+
- Burns J. O., The radio properties of cD galaxies in Abell clusters. I - an X-ray selected sample, *AJ*, 1990, vol. 99, p. 14
- Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S., The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction, *ApJ*, 1989, vol. 345, p. 245
- Cardiel N., Gorgas J., Aragon-Salamanca A., Spectral gradients in central cluster galaxies: further evidence of star formation in cooling flows, *MNRAS*, 1998, vol. 298, p. 977
- Carilli C. L., Perley R. A., Harris D. E., Observations of Interaction Between Cluster Gas and the Radio Lobes of Cygnus-A, *MNRAS*, 1994, vol. 270, p. 173
- Chen Y., Reiprich T. H., Böhringer H., Ikebe Y., Zhang Y., Statistics of X-ray observables for the cooling-core and non-cooling core galaxy clusters, *A&A*, 2007, vol. 466, p. 805
- Churazov E., Sunyaev R., Forman W., Böhringer H., Cooling flows as a calorimeter of active galactic nucleus mechanical power, *MNRAS*, 2002, vol. 332, p. 729
- Cid Fernandes R., Mateus A., Sodr e L., Stasińska G., Gomes J. M., Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method, *MNRAS*, 2005, vol. 358, p. 363
- Cid Fernandes R., Schoenell W., Gomes J. M., Asari N. V., Schlickmann M., Mateus A., Stasińska G., Sodr e Jr. L., Torres-Papaqui J. P., The Star Formation Histories of Galaxies: A tour through the STARLIGHT-SDSS database. In *Revista Mexicana de*

- Astronomia y Astrofisica Conference Series , vol. 35 of Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, 2009, p. 127
- Cowie L. L., Binney J., Radiative regulation of gas flow within clusters of galaxies - A model for cluster X-ray sources, *ApJ*, 1977, vol. 215, p. 723
- Crawford C. S., Allen S. W., Ebeling H., Edge A. C., Fabian A. C., The ROSAT Brightest Cluster Sample - III. Optical spectra of the central cluster galaxies, *MNRAS*, 1999, vol. 306, p. 857
- de Freitas Pacheco J. A., Barbuy B., Horizontal branch morphology and $H\beta$ indices of globular clusters., *A&A*, 1995, vol. 302, p. 718
- De Grandi S., Molendi S., Metallicity Gradients in X-Ray Clusters of Galaxies, *ApJ*, 2001, vol. 551, p. 153
- De Lucia G., Blaizot J., The hierarchical formation of the brightest cluster galaxies, *MNRAS*, 2007, vol. 375, p. 2
- Demarco R., Magnard F., Durret F., Márquez I., A study of dark matter halos and gas properties in clusters of galaxies from ROSAT data, *A&A*, 2003, vol. 407, p. 437
- Donahue M., Voit G. M., Emission Line Nebulae in Cluster Cooling Flows. In Galactic Cluster Cooling Flows , vol. 115 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1997, p. 48
- Dressler A., Galaxy morphology in rich clusters - Implications for the formation and evolution of galaxies, *ApJ*, 1980, vol. 236, p. 351
- Dubinski J., The Origin of the Brightest Cluster Galaxies, *ApJ*, 1998, vol. 502, p. 141
- Edge A. C., On the relation between the X-ray properties of clusters of galaxies and their brightest cluster member, *MNRAS*, 1991, vol. 250, p. 103
- Edge A. C., The detection of molecular gas in the central galaxies of cooling flow clusters, *MNRAS*, 2001, vol. 328, p. 762

- Edge A. C., Wilman R. J., Johnstone R. M., Crawford C. S., Fabian A. C., Allen S. W.,
A survey of molecular hydrogen in the central galaxies of cooling flows, *MNRAS*, 2002,
vol. 337, p. 49
- Edwards L. O. V., Hudson M. J., Balogh M. L., Smith R. J., Line emission in the bright-
est cluster galaxies of the NOAO Fundamental Plane and Sloan Digital Sky Surveys,
MNRAS, 2007, vol. 379, p. 100
- Fabian A. C., Cooling Flows in Clusters of Galaxies, *ARA&A*, 1994, vol. 32, p. 277
- Fabian A. C., Nulsen P. E. J., Subsonic accretion of cooling gas in clusters of galaxies,
MNRAS, 1977, vol. 180, p. 479
- Fabian A. C., Sanders J. S., Ettori S., Taylor G. B., Allen S. W., Crawford C. S., Iwasawa
K., Johnstone R. M., Ogle P. M., Chandra imaging of the complex X-ray core of the
Perseus cluster, *MNRAS*, 2000, vol. 318, p. L65
- Fukazawa Y., Makishima K., Ohashi T., ASCA Compilation of X-Ray Properties of Hot
Gas in Elliptical Galaxies and Galaxy Clusters: Two Breaks in the Temperature Depen-
dences, *PASJ*, 2004, vol. 56, p. 965
- Gomes J. M., Síntese espectral de galáxias: Modelos de populações estelares simples e com-
postas, ajustes, calibrações e aplicações, Florianópolis: Universidade Federal de Santa
Catarina, 2009, Tese de Doutorado, 1000 p.
- González Delgado R. M., Cid Fernandes R., Testing spectral models for stellar populations
with star clusters - II. Results, *MNRAS*, 2010, pp 102–+
- Goto T., Velocity dispersion of 335 galaxy clusters selected from the Sloan Digital Sky
Survey: statistical evidence for dynamical interaction and against ram-pressure stripping,
MNRAS, 2005, vol. 359, p. 1415
- Granato G. L., De Zotti G., Silva L., Bressan A., Danese L., A Physical Model for the
Coevolution of QSOs and Their Spheroidal Hosts, *ApJ*, 2004, vol. 600, p. 580
- Heckman T. M., Lehnert M. D., Strickland D. K., Armus L., Absorption-Line Probes of
Gas and Dust in Galactic Superwinds, *ApJS*, 2000, vol. 129, p. 493

- Hicks A., Mushotzky R. F., Donahue M., Tracing Star Formation in Cool Core Clusters with GALEX, ArXiv e-prints, 2009
- Ho L. C., Nuclear Activity in Nearby Galaxies, *ARA&A*, 2008, vol. 46, p. 475
- Hubble E., Humason M. L., The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae, *ApJ*, 1931, vol. 74, p. 43
- Hudson D. S., Mittal R., Reiprich T. H., Nulsen P. E. J., Andernach H., Sarazin C. L., What is a Cool-Core Cluster? A Detailed Analysis of the Cores of the X-ray Flux-Limited HIFLUGCS Cluster Sample, ArXiv e-prints, 2009
- Ikebe Y., Reiprich T. H., Böhringer H., Tanaka Y., Kitayama T., A new measurement of the X-ray temperature function of clusters of galaxies, *A&A*, 2002, vol. 383, p. 773
- Johnstone R. M., Fabian A. C., Nulsen P. E. J., The optical spectra of central galaxies in southern clusters Evidence for star formation, *MNRAS*, 1987, vol. 224, p. 75
- Jones C., Forman W., The structure of clusters of galaxies observed with Einstein, *ApJ*, 1984, vol. 276, p. 38
- Jones C., Forman W., Vikhlinin A., Markevitch M., David L., Warmflash A., Murray S., Nulsen P. E. J., Chandra Observations of NGC 4636-an Elliptical Galaxy in Turmoil, *ApJ*, 2002, vol. 567, p. L115
- Kapferer W., Kronberger T., Weratschnig J., Schindler S., Domainko W., van Kampen E., Kimeswenger S., Mair M., Ruffert M., Metal enrichment of the intra-cluster medium over a Hubble time for merging and relaxed galaxy clusters, *A&A*, 2007, vol. 466, p. 813
- Katayama H., Hayashida K., Takahara F., Fujita Y., Properties of the Brightest Cluster Galaxy and Its Host Cluster, *ApJ*, 2003, vol. 585, p. 687
- Kauffmann G., Heckman T. M., Tremonti C., Brinchmann J., Charlot S., White S. D. M., Ridgway S. E., Brinkmann J., Fukugita M., Hall P. B., Ivezić Ž., Richards G. T., Schneider D. P., The host galaxies of active galactic nuclei, *MNRAS*, 2003, vol. 346, p. 1055

- Koleva M., Prugniel P., Ocvirk P., Le Borgne D., Soubiran C., Spectroscopic ages and metallicities of stellar populations: validation of full spectrum fitting, *MNRAS*, 2008, vol. 385, p. 1998
- Laganá T. F., Lima Neto G. B., Andrade-Santos F., Cypriano E. S., Star formation efficiency in galaxy clusters, *A&A*, 2008, vol. 485, p. 633
- Lee H., Yoon S., Lee Y., The $H\beta$ Index as an Age Indicator of Old Stellar Systems: The Effects of Horizontal-Branch Stars, *AJ*, 2000, vol. 120, p. 998
- Lee J. H., Lee M. G., Park C., Choi Y., The nature of the Sloan Digital Sky Survey galaxies in various classes based on morphology, colour and spectral features - III. Environments, *MNRAS*, 2010, vol. 403, p. 1930
- Lin Y., Mohr J. J., K-band Properties of Galaxy Clusters and Groups: Brightest Cluster Galaxies and Intracluster Light, *ApJ*, 2004, vol. 617, p. 879
- Loubser S. I., Sánchez-Blázquez P., Sansom A. E., Soechting I. K., Stellar populations in the centres of brightest cluster galaxies, *MNRAS*, 2009, vol. 398, p. 133
- Maraston C., Thomas D., Strong Balmer Lines in Old Stellar Populations: No Need for Young Ages in Ellipticals?, *ApJ*, 2000, vol. 541, p. 126
- Mateus A., Sodré L., Cid Fernandes R., Stasińska G., Schoenell W., Gomes J. M., Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - II. The bimodality of the galaxy population revisited, *MNRAS*, 2006, vol. 370, p. 721
- Mathews W. G., Brighenti F., Rapid Cooling of Dusty Gas in Elliptical Galaxies, *ApJ*, 2003, vol. 590, p. L5
- Matthews T. A., Morgan W. W., Schmidt M., A Discussion of Galaxies Identified with Radio Sources., *ApJ*, 1964, vol. 140, p. 35
- Maughan B. J., Jones C., Forman W., Van Speybroeck L., Images, Structural Properties, and Metal Abundances of Galaxy Clusters Observed with Chandra ACIS-I at $0.1 < z < 1.3$, *ApJS*, 2008, vol. 174, p. 117

- McNamara B. R., Optical Properties of Cooling Flow Central Cluster Ellipticals. In Galactic Cluster Cooling Flows , vol. 115 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1997, p. 109
- McNamara B. R., O'Connell R. W., Star formation in cooling flows in clusters of galaxies, *AJ*, 1989, vol. 98, p. 2018
- McNamara B. R., O'Connell R. W., Color gradients in cooling flows in clusters of galaxies, *ApJ*, 1992, vol. 393, p. 579
- McNamara B. R., Rafferty D. A., Birzan L., Steiner J., Wise M. W., Nulsen P. E. J., Carilli C. L., Ryan R., Sharma M., The Starburst in the Abell 1835 Cluster Central Galaxy: A Case Study of Galaxy Formation Regulated by an Outburst from a Supermassive Black Hole, *ApJ*, 2006, vol. 648, p. 164
- Moehler S., Hot Stars in Globular Clusters: A Spectroscopist's View, *PASP*, 2001, vol. 113, p. 1162
- Moll R., Schindler S., Domainko W., Kapferer W., Mair M., van Kampen E., Kronberger T., Kimeswenger S., Ruffert M., Simulations of metal enrichment in galaxy clusters by AGN outflows, *A&A*, 2007, vol. 463, p. 513
- Nelson A. E., Simard L., Zaritsky D., Dalcanton J. J., Gonzalez A. H., Constraints on the Size Evolution of Brightest Cluster Galaxies, *ApJ*, 2002, vol. 567, p. 144
- O'Dea C. P., Baum S. A., Privon G., Noel-Storr J., Quillen A. C., Zufelt N., Park J., Edge A., Russell H., Fabian A. C., Donahue M., Sarazin C. L., McNamara B., Bregman J. N., Egami E., An Infrared Survey of Brightest Cluster Galaxies. II. Why are Some Brightest Cluster Galaxies Forming Stars?, *ApJ*, 2008, vol. 681, p. 1035
- O'Dea K., Quillen A., Snios B., O'Dea C., Tremblay G., Baum S., Edge A., Donahue M., Voit M., HST Ultraviolet Observations of Star Formation in Seven Brightest Cluster Galaxies in Cooling Flows. In *Bulletin of the American Astronomical Society* , vol. 41 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2010, p. 388
- Oegerle W. R., Hill J. M., Dynamics of cD Clusters of Galaxies. IV. Conclusion of a Survey of 25 Abell Clusters, *AJ*, 2001, vol. 122, p. 2858

- Park C., Choi Y., Vogeley M. S., Gott III J. R., Blanton M. R., Environmental Dependence of Properties of Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey, *ApJ*, 2007, vol. 658, p. 898
- Peres C. B., Fabian A. C., Edge A. C., Allen S. W., Johnstone R. M., White D. A., A ROSAT study of the cores of clusters of galaxies - I. Cooling flows in an X-ray flux-limited sample, *MNRAS*, 1998, vol. 298, p. 416
- Peterson J. R., Kahn S. M., Paerels F. B. S., Kaastra J. S., Tamura T., Bleeker J. A. M., Ferrigno C., Jernigan J. G., High-Resolution X-Ray Spectroscopic Constraints on Cooling-Flow Models for Clusters of Galaxies, *ApJ*, 2003, vol. 590, p. 207
- Pipino A., Kaviraj S., Bildfell C., Babul A., Hoekstra H., Silk J., Evidence for recent star formation in BCGs: a correspondence between blue cores and UV excess, *MNRAS*, 2009, vol. 395, p. 462
- Poole G. B., Fardal M. A., Babul A., McCarthy I. G., Quinn T., Wadsley J., The impact of mergers on relaxed X-ray clusters - I. Dynamical evolution and emergent transient structures, *MNRAS*, 2006, vol. 373, p. 881
- Popesso P., Böhringer H., Brinkmann J., Voges W., York D. G., RASS-SDSS Galaxy clusters survey. I. The catalog and the correlation of X-ray and optical properties, *A&A*, 2004, vol. 423, p. 449
- Quintana H., Lawrie D. G., On the Determination of Velocity Dispersions for CD Clusters of Galaxies, *AJ*, 1982, vol. 87, p. 1
- Rafferty D. A., McNamara B. R., Nulsen P. E. J., The Regulation of Cooling and Star Formation in Luminous Galaxies by Active Galactic Nucleus Feedback and the Cooling-Time/Entropy Threshold for the Onset of Star Formation, *ApJ*, 2008, vol. 687, p. 899
- Rhee G. F. R. N., Latour H. J., An X-ray optical study of 26 Abell clusters, *A&A*, 1991, vol. 243, p. 38
- Roychowdhury S., Ruszkowski M., Nath B. B., Begelman M. C., Entropy “Floor” and Effervescent Heating of Intracluster Gas, *ApJ*, 2004, vol. 615, p. 681

- Sandage A., Wallerstein G., Color-Magnitude Diagram for Disk Globular Cluster NGC 6356 Compared with Halo Clusters., *ApJ*, 1960, vol. 131, p. 598
- Sanderson A. J. R., Edge A. C., Smith G. P., LoCuSS: the connection between brightest cluster galaxy activity, gas cooling and dynamical disturbance of X-ray cluster cores, *MNRAS*, 2009, vol. 398, p. 1698
- Sarazin C. L., X-ray emission from clusters of galaxies, 1988
- Schombert J. M., The structure of brightest cluster members. II - Mergers, *ApJS*, 1987, vol. 64, p. 643
- Schombert J. M., The structure of brightest cluster members. III - cD envelopes, *ApJ*, 1988, vol. 328, p. 475
- Sersic J. L., Atlas de galaxias australes, 1968
- Springel V., Hernquist L., The history of star formation in a Λ cold dark matter universe, *MNRAS*, 2003, vol. 339, p. 312
- Stasińska G., Cid Fernandes R., Mateus A., Sodré L., Asari N. V., Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - III. How to distinguish AGN hosts, *MNRAS*, 2006, vol. 371, p. 972
- Trager S. C., Worthey G., Faber S. M., Dressler A., Hot stars in old stellar populations: a continuing need for intermediate ages, *MNRAS*, 2005, vol. 362, p. 2
- Voigt L. M., Fabian A. C., Thermal conduction and reduced cooling flows in galaxy clusters, *MNRAS*, 2004, vol. 347, p. 1130
- Voit G. M., Donahue M., An Observationally Motivated Framework for AGN Heating of Cluster Cores, *ApJ*, 2005, vol. 634, p. 955
- von der Linden A., Best P. N., Kauffmann G., White S. D. M., How special are brightest group and cluster galaxies?, *MNRAS*, 2007, vol. 379, p. 867
- Wang J., Overzier R., Kauffmann G., von der Linden A., Kong X., The UV-optical colours of brightest cluster galaxies in optically and X-ray selected clusters, *MNRAS*, 2010, vol. 401, p. 433

Wilman R. J., Edge A. C., Swinbank A. M., Integral field spectroscopy of H α emission in cooling flow cluster cores: disturbing the molecular gas reservoir, MNRAS, 2006, vol. 371, p. 93

Zabludoff A. I., Huchra J. P., Geller M. J., The kinematics of Abell clusters, ApJS, 1990, vol. 74, p. 1

Zhang Y., Böhringer H., Finoguenov A., Ikebe Y., Matsushita K., Schuecker P., Guzzo L., Collins C. A., X-ray properties in massive galaxy clusters: XMM-Newton observations of the REFLEX-DXL sample, A&A, 2006, vol. 456, p. 55

Apêndice

Testes dos ajustes para a determinação da YPF

Aqui apresentamos alguns testes dos resultados do STARLIGHT para determinar a consistência de nossos resultados.

A.1 Fotometria das galáxias

A fotometria de uma galáxia ou região do céu pode ser usada como primeira estimativa da idade da população estelar, bastando medir a cor da região (diferença entre as magnitudes de duas bandas espectrais) em questão. Estrelas massivas de sequência principal, populam o extremo azul e quente do diagrama cor-magnitude (CMD), elas evoluem muito rápido, explodindo como SNe em pouco tempo. Sendo assim, estrelas azuis correspondem geralmente a estrelas jovens, exceptuando as estrelas pouco comuns da chamada *Blue Horizontal Branch* (BHB), que são de idade avançada. Enquanto que estrelas mais vermelhas correspondem a estrelas menos massivas e com tempos de vida muito mais longos. Portanto a maioria das estrelas velhas serão vermelhas.

Regiões azuis em geral são associadas a regiões de formação estelar. Para isso é usada uma cor fotométrica que defina a quantidade de radiação azul em relação a outra banda, e pode ser usada para estimar se tem radiação considerável de estrelas jovens ou não. Em nosso caso, trabalhando com as bandas ópticas do SDSS, usamos as cores $(u - r)$ e $(g - r)$ na região central da galáxia, correspondente à região onde foi estimada a história de formação estelar através de STARLIGHT (usamos as magnitudes calculadas a partir do fluxo contido dentro da abertura da fibra espectroscópica de $3''$ de diâmetro).

A Fig. A.1 mostra como galáxias com centros mais azuis ($(u - r)$ ou $(g - r)$ menor) são ajustadas a populações estelares mais jovens, apresentando uma maior porcentagem da luz

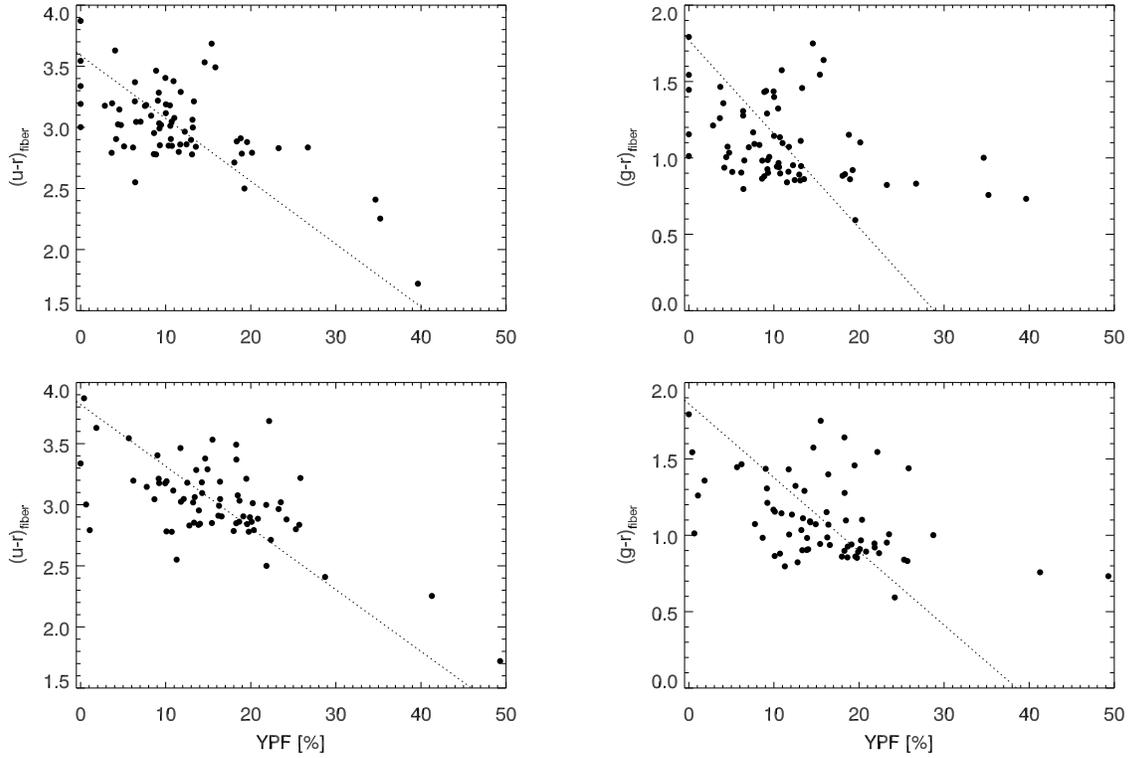


Figura A.1: Relação entre o parâmetro YPF e as cores (u-r) na esquerda e (g-r) na direita, no centro da galáxia (*fiber magnitude* do SDSS). O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03-S e o inferior com a base CB07-M.

proveniente de estrelas com idade $\lesssim 1$ Gyr correspondente a estrelas de tipos espectrais O, B e A.

Entretanto, estas anti-correlações não são tão claras quanto gostaríamos, mostrando uma falta de precisão nos resultados de STARLIGHT com espectros de galáxias de tipo precoce (*early type*). Calculando o coeficiente de Spearman para correlações não paramétricas, obtemos $\rho \sim -0.41$ para as duas cores com os ajustes feitos com as bases BC03-S e CB07-M. O ajuste mostrado na fig. A.1 é feito através do método *Bootstrap bisector*.

A.2 Linhas de emissão

Uma outra característica de regiões de formação estelar, são as linhas de emissão $H\alpha$.

O código STARLIGHT faz um ajuste do espectro de galáxias incluindo só linhas de absorção e o contínuo. Além disso, as regiões de linhas de emissão foram mascaradas

manualmente, ficando assim, o resultado obtido com o programa, totalmente independente do fluxo das linhas de emissão.

Usamos então, a modo de teste dos resultados, o fluxo na linha espectral $H\alpha$ ($\lambda = 6563\text{\AA}$) das galáxias com linhas de emissão ($S/N > 3.0$) e comparamos com a fração de luz correspondente à população estelar jovem (ver Fig. A.2).

Embora o resultado é estatisticamente fraco, é possível ver que galáxias com altas percentagens de população jovem (segundo o ajuste de STARLIGHT) possuem intensas linhas de $H\alpha$, indicando de fato, a presença de formação estelar.

Finalmente concluímos que, mesmo sem ter correlações fortes entre o parâmetro YPF e outros indícios observacionais de formação estelar, os valores ajustados são consistentes com maiores taxas de formação estelar em galáxias com centros azuis e com mais fortes linhas de emissão.

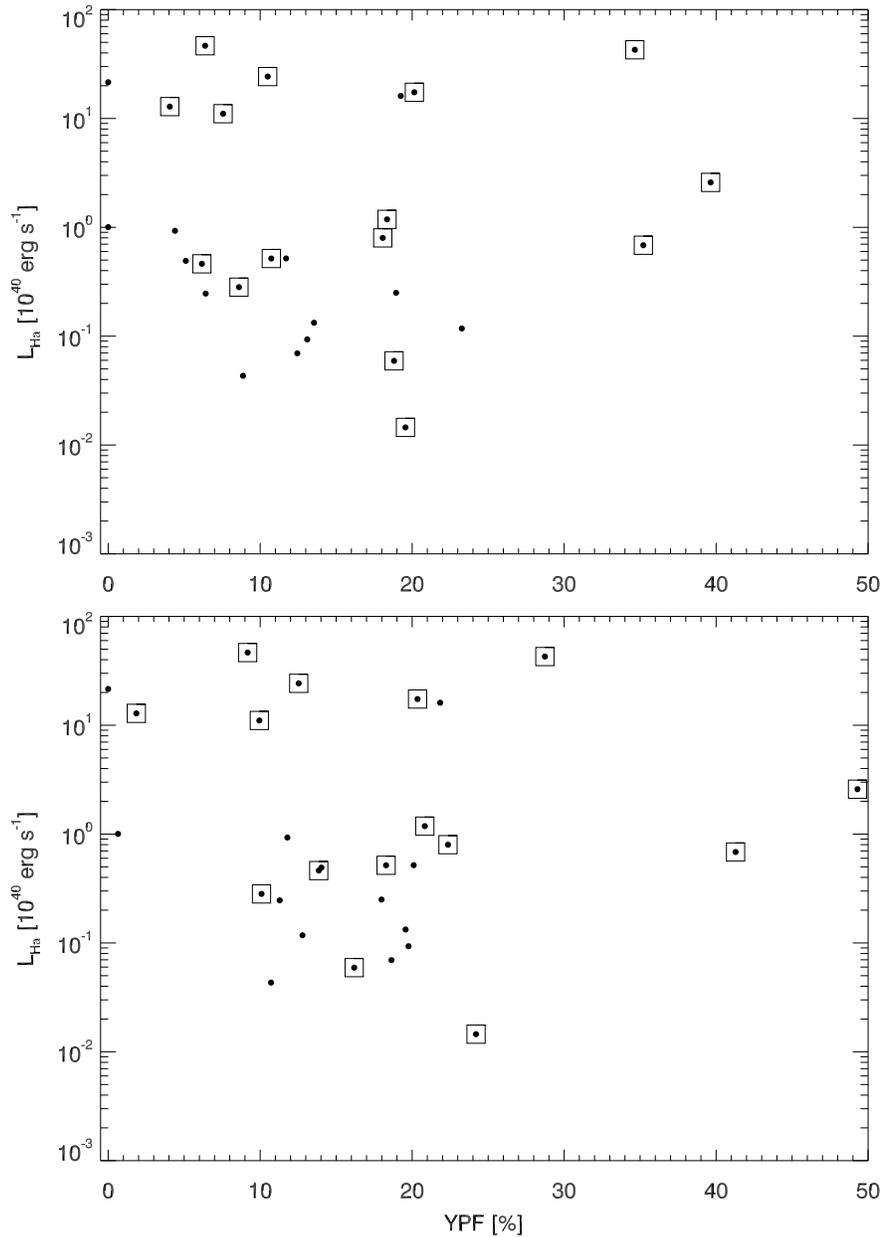


Figura A.2: Fração de população jovem na BCG em função da luminosidade da linha de emissão H α . Pontos correspondem às galáxias com S/N > 3.0 na linha de H α e quadrados representam as galáxias com AGN (segundo o diagrama BPT). O painel superior mostra os resultados a partir do ajuste com a base BC03-S e o inferior com a base CB07-M.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)