

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA

**Os Sistemas de Aglomerados Estelares nas
Galáxias *Early-Type* Luminosas
NGC 5846 e NGC 1380 ***

Ana Leonor Chies Santiago Santos

Dissertação realizada sob orientação do Dr. Basílio Xavier Santiago e co-orientação da Dra. Miriani Griselda Pastoriza e apresentada ao Instituto de Física da UFRGS em preenchimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Física.

Porto Alegre

Maio, 2007

*Trabalho financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

Aos meus pais, Jô e Diógenes.

Agradecimentos

Ao longo desses anos no IF-UFRGS, desde a iniciação científica na graduação até o mestrado, convivi com muitas pessoas que me ajudaram a crescer em muitos aspectos. A essas devo meu sincero agradecimento:

★ À Miriani que me ensinou a dar os primeiros passos em Astronomia e que me entusiasmou com as primeiras questões. Muito obrigado por não ter me deixado desistir, hoje sei que é isso que quero e sou muito grata a ti por estar aqui!

★ Ao Basílio por tanto me ensinar programas, macros e a lidar de maneira prática com os problemas que deveria resolver. Muito obrigado por tanto me fazer crescer.

★ Ao Charles por todas as perguntas respondidas e por toda a ajuda.

★ Ao Fabrício por me ensinar o mais elementar da astrofísica das galáxias *early-type* e me introduzir ao IRAF.

★ Ao Rogério pelos conselhos e por me ajudar a resolver problemas de natureza computacional.

★ Aos demais integrantes do Departamento de Astronomia pela agradável convivência diária: Bica, Horácio, Kepler, Ducati, Thaisa, Fátima, Luziane, Tibério, Rogemar, Tiago, Carlos, Ramiro, Gustavo, Liliane, Patrícia, Eduardo P., Bárbara, Leandro, Daniela, Jules, Fausto, Ângela, Oli, Maurício, Renato, Eduardo B., Ângelo, Mauro, Sandro R., Sandro J. e Rodrigo.

★ Aos meus colegas e amigos da física pelo companheirismo, em especial: Carla, Elizandra, Luiza, Maurício, Rodrigo e Jefferson.

Agradeço ao CNPq pelo auxílio financeiro.

Por fim, agradeço especialmente à minha família pelo apoio e entusiasmo com todas as minhas decisões: a minha mãe Jô, ao meu pai Diógenes, a minha irmã Mariana, aos meus avós Genny e Ivo, a Dida e ao Miro.

Ana Leonor Chies Santiago Santos

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Mai 2007

Resumo

Estudamos os sistemas de aglomerados estelares de duas galáxias *early-type*: NGC 5846 e NGC 1380 com a finalidade de encontrar características que possam vincular suas histórias evolutivas. Utilizamos imagens da *Wide Field and Planetary Camera 2* do arquivo público do Telescópio Espacial Hubble, nos filtros *V* e *I* para a primeira e *B* e *V* para a segunda.

A galáxia NGC 5846 é uma elíptica gigante centro de um grupo de galáxias, com $(m - M) = 32.32$. Seu sistema de aglomerados globulares foi previamente estudado por Forbes et al. (1996, 1997b). Ela contém uma alta porcentagem de aglomerados vermelhos. Criamos um modelo da distribuição de luz das partes mais internas da galáxia e o subtraímos das imagens observadas. Identificamos e estudamos os aglomerados globulares localizados nas regiões centrais da NGC 5846, medindo magnitudes, cores e distâncias projetadas ao centro da galáxia. Detectamos 23 aglomerados não conhecidos previamente. Combinamos os objetos aqui medidos com a amostra de Forbes et al. (1996, 1997b) resultando num total de 777 objetos e tentamos medir tamanhos para todos eles, tendo sucesso para apenas 61. Seus raios efetivos típicos estão no intervalo de 3 – 5 pc. Observamos que os maiores aglomerados parecem estar localizados na região central. Sete aglomerados globulares têm contrapartidas em raios-X, estas fontes estão entre as mais luminosas da galáxia com $4.2 \times 10^{38} < L_X(\text{erg s}^{-1}) < 9.2 \times 10^{39}$. Os aglomerados aos quais pertencem são opticamente muito luminosos, compactos, têm preferência de se localizarem nas regiões mais centrais e pertencem à subpopulação vermelha.

A galáxia NGC 1380 é uma lenticular localizada próxima ao centro do aglomerado de Fornax, com $(m - M) = 31.4$. Seu sistema de aglomerados estelares foi previamente estudado apenas por telescópios localizados na Terra. Estudos recentes de galáxias *early-type* similares a esta mostram a existência de aglomerados estelares que quebram, aparentemente, a dicotomia tradicional aglomerado aberto/globular. Selecionamos uma amostra de candidatos a aglomerados estelares na NGC 1380 através de uma análise de magnitudes, cores, tamanhos e distâncias projetadas ao centro da galáxia. Construimos diagramas cor-magnitude e analisamos sua distribuição de cores. Estimamos as probabilidades dos aglomerados selecionados serem globulares típicos como os encontrados na Via Láctea baseados em sua localização no diagrama tamanho-luminosidade. Um total de 570 aglomerados estelares foi encontrado na NGC 1380 até $V \lesssim 26.5$. Medimos tamanhos para aproximadamente 200 destes. A distribuição de cores tem aparentemente três picos: $(B - V) \simeq 0.8, 1.1, 1.5$. O mesmo parece ser verdadeiro para a distribuição de tamanhos, que apresenta dois picos bem definidos em $R_{eff} \sim 3$ e 5 pc e alguns objetos com $7.5 < R_{eff} < 13$ pc. Identificamos a população de aglomerados menores como sendo típica de globulares enquanto que os mais estendidos têm menor probabilidade de serem tais objetos. Diferentes correlações entre magnitudes absolutas, tamanhos, cores e localização ao centro da galáxia foram obtidas para estas subpopulações de aglomerados. A maior parte dos aglomerados grandes ($R_{eff} > 4$ pc) compartilham das propriedades dos aglomerados estelares difusos, encontrados em galáxias *early-type* do aglomerado de Virgo, como o baixo brilho superficial e magnitudes mais fracas que $M_V \sim -8$. Encontramos um pequeno grupo de aglomerados com $R_{eff} \simeq 10$ pc, $-8 < M_V < -6$, vermelhos e localizados próximos ao centro da NGC 1380. Estes objetos podem ser interpretados como *Faint Fuzzies*, encontrados recentemente nas galáxias lenticulares NGC 1023, NGC 3384 e NGC 5195.

Abstract

We studied the globular cluster systems of two *early-type* galaxies: NGC 5846 and NGC 1380 with the purpose of finding features that can constrain their evolutionary histories. We used *Wide Field and Planetary Camera 2* images from the *Hubble Space Telescope* public archive, in the *V* and *I* filters for the former and in *B* and *V* filters for the latter.

NGC 5846 is a giant elliptical located in the centre of a galaxy group, with $(m - M) = 32.32$. Its globular cluster system was previously studied by (Forbes et al., 1996, 1997b). It contains a remarkably high fraction of red globular clusters. We modelled the central light distribution and subtracted it from the observed images. We identified and studied the globular clusters located towards the center of the galaxy measuring magnitudes, colours and projected galactocentric distances. We detected 23 new clusters. By combining the objects measured here with the sample of Forbes et al. (1996, 1997b) we obtained a total of 777 globular clusters. We tried to measure sizes for all of them, having succeeded for only 61. Their typical effective radii are in the range 3 – 5 pc. We note that the largest clusters tend to be located in the central regions. We found 7 X-ray counterparts to the globular clusters, these sources are among the most luminous of NGC 5846 with $4.2 \times 10^{38} < L_X(\text{erg s}^{-1}) < 9.2 \times 10^{39}$. The globular clusters to which they belong are optically luminous, compact, tend to inhabit the most central regions and belong to the red subpopulation.

NGC 1380 is a lenticular galaxy located near the centre of the Fornax Cluster, with $(m - M) = 31.4$. The globular cluster system of this galaxy was previously studied only from the ground. Recent studies of similar early-type galaxies reveal the existence of star clusters that apparently break up the traditional open/globular cluster dichotomy. To select a sample of star clusters in NGC 1380 we measured magnitudes, colours, sizes and projected distances to the center of the host galaxy. We built colour-magnitude diagrams and analysed its colour distribution. Based on their location in the luminosity-size diagram we estimated probabilities of them being typical globular clusters as those found in the Galaxy. A total of about 570 cluster candidates were found down to $V = 26.5$. We measured sizes for approximately 200 of them. The observed colour distribution has three apparent peaks: $(B - V) \simeq 0.8, 1.1, 1.5$. Likewise for the size distribution which shows two well defined peaks at $R_{eff} \sim 3$ e 5 pc and some objects with $7.5 < R_{eff} < 13$ pc. We identified the smaller population as being mainly typical globular clusters, while the more extended objects have small probabilities of being such objects. Different correlations between absolute magnitudes, sizes, colours and location were inferred for these cluster subpopulations. Most extended clusters ($R_{eff} > 4$ pc) share similar properties to the diffuse star clusters reported to inhabit luminous early-type galaxies in the Virgo galaxy cluster such as having low surface brightness and magnitudes fainter than $M_V \simeq -8$. We also report on a small group of $R_{eff} \simeq 10$ pc, $-8 < M_V < -6$, red clusters located near the centre of NGC 1380, which may be interpreted as *Faint Fuzzies* which were recently found in the lenticulars NGC 1023, NGC 3384 and NGC 5195.

Notação

Neste trabalho adotamos a notação inglesa para a separação de casas decimais, na qual se utiliza um ponto para separar a parte inteira dos números. As seguintes siglas, grandezas e unidades são utilizadas no decorrer desta dissertação e significam:

ACS - *Advanced Camera for Surveys*

CMD - Diagrama cor-magnitude

DSCs - Aglomerados estelares difusos

DSS - *Digital Sky Survey*

FFs - *Faint Fuzzies*

GCs - Aglomerados globulares

HST - Telescópio Espacial Hubble

LMXB - Binária de raios-X de baixa massa

SSP - População estelar simples/única

WFPC2 - *Wide Field and Planetary Camera 2*

YMC - Aglomerados jovens e massivos

Mano - 10^6 anos

Gano - 10^9 anos

pc - parsecs

kpc - 10^3 parsecs

Mpc - 10^6 parsecs

Sumário

Agradecimentos	ii
Sumário	vi
Lista de Tabelas	viii
Lista de Figuras	ix
1 Introdução	1
1.1 Galáxias <i>Early-Type</i>	1
1.1.1 Formação de Galáxias <i>Early-Type</i>	2
1.2 Aglomerados Estelares Extragalácticos	3
1.2.1 Aglomerados Globulares	3
1.2.2 Aglomerados Estelares Estendidos	9
1.3 O Presente Trabalho	11
2 O Sistema Central de GCs da NGC 5846	12
2.1 Dados e Fotometria	14
2.2 A Distribuição de Cor Central	19
2.3 Tamanhos	21
2.4 Aglomerados Globulares e Fontes Pontuais de Raios-X	24
3 O Sistema de Aglomerados Estelares da NGC 1380	28
3.1 Dados	29
3.2 Cores	31
3.3 Tamanhos	32
3.3.1 A Contaminação por Galáxias de Fundo	33
3.3.2 Distribuições de Tamanho e Luminosidade	35
3.3.3 Gradientes Espaciais	40

4	Discussão e Conclusões	45
4.1	NGC 5846	45
4.2	NGC 1380	47
4.3	Considerações Finais e Perspectivas	50
	Apêndice A Tamanhos de Aglomerados Extragalácticos	51
	Apêndice B Artigos Publicados	53
	Referências Bibliográficas	54

Lista de Tabelas

2.1	Diário de observações WFPC2/HST para a NGC 5846.	15
2.2	Aglomerados coincidentes com as fontes pontuais de raios-X.	26
3.1	Diário de observações WFPC2/HST para a NGC 1380.	30
3.2	Tamanhos dos aglomerados estelares separados por cor.	41
3.3	Subconjunto de aglomerados estendidos, candidatos a <i>Faint Fuzzies</i>	42

Lista de Figuras

1.1	Diagrama de Hubble	2
2.1	Imagem do <i>Sloan Digital Sky Survey</i> da NGC 5846	13
2.2	Imagem do <i>Digital Sky Survey</i> da NGC 5846 com apontamentos WFPC2/HST sobrepostos.	15
2.3	Imagem da PC na banda <i>V</i> do apontamento central e seu modelo de distribuição de luz.	16
2.4	Resultado da subtração do modelo da imagem <i>V</i> da PC do apontamento central.	17
2.5	CMD da região interna da NGC 5846.	18
2.6	Diferenças fotométricas entre o presente trabalho e o de Forbes et al. (1996, 1997b).	19
2.7	Distribuição de cor nas regiões centrais da NGC 5846.	21
2.8	Tamanhos intrínsecos <i>vs.</i> magnitude aparente na banda <i>V</i> e relação entre raios efetivos estimado por modelos de King com $c = 5$ e 100	23
2.9	Tamanho em função da razão χ^2/χ_0^2	24
2.10	Tamanho em função da cor.	25
2.11	Distribuição de fontes pontuais raios-X e GCs na direção da NGC 5846.	27
3.1	Imagem ACS da NGC 1380.	29
3.2	Imagem <i>Digital Sky Survey</i> de NGC 1380 com o apontamento WFPC2/HST sobreposto.	30
3.3	CMD para todas fontes detectadas.	32
3.4	Evolução de SSPs Bruzual & Charlot (2003).	33
3.5	Distribuição de cor da amostra fotométrica.	34
3.6	Distribuição no céu da amostra resolvida e dos supostos contaminantes.	35
3.7	Razão entre aglomerados resolvidos e prováveis galáxias de fundo em relação à amostra fotométrica, como função da cor.	36
3.8	Distribuição de tamanhos da amostra de aglomerados resolvidos.	37
3.9	Distribuição de luminosidade para a amostra de aglomerados resolvidos.	38

3.10	R_{eff} em função da M_V	39
3.11	R_{eff} como função da cor ($B - V$).	41
3.12	R_{eff} em função da distância galactocêntrica.	42
3.13	Imagem WFPC2/HST com os candidatos a <i>Faint Fuzzies</i>	43
3.14	Cor em função da distância galactocêntrica.	44

Capítulo 1

Introdução

1.1 Galáxias *Early-Type*

Os diferentes tipos de galáxias foram classificados por Edwin Hubble em 1936 numa seqüência que vai de elípticas e lenticulares (as galáxias *early-type*) até espirais (as galáxias *late-type*). As elípticas são constituídas por um grande componente esferoidal, o bojo, e são subclassificadas de acordo com a sua elipticidade. As lenticulares, além do componente bojo, possuem um componente plano, o disco. As espirais, além do bojo e do disco, possuem braços espirais, podendo ou não ter barras. Na figura 1.1 mostramos o diagrama de Hubble para a classificação das galáxias. Estima-se que as elípticas representem $\sim 25\%$ da matéria luminosa observada enquanto que todos os esferóides juntos (incluindo, além das elípticas, as lenticulares e os bojos das espirais) constituem $\sim 75\%$ da matéria visível (Fukugita et al., 1998). Os discos, as galáxias anãs e as irregulares contribuiriam para o restante da matéria luminosa observada. Muitas propriedades das galáxias *early-type* dependem do ambiente em que elas se encontram. As de campo parecem ser $\simeq 1$ Gano mais jovens em média que aquelas pertencentes a aglomerados de galáxias (Renzini, 2006). As galáxias elípticas gigantes, como as cDs, localizam-se mais para o centro dos aglomerados de galáxias, enquanto que as espirais tendem a se localizar mais para a parte externa dos aglomerados. As lenticulares, por sua vez, são encontradas principalmente em aglomerados e grupos de galáxias. Acredita-se que elas se formaram a partir de galáxias espirais no processo em que grupos e aglomerados de galáxias se virializaram (Dressler et al., 1997) e as espirais perderam seu meio interestelar devido ao efeito de interação com o meio interaglomerado (Moore et al., 1996).

Por muito tempo, pensou-se que as galáxias *early-type* eram objetos simples com aparência explicada através de isofotas elípticas e com uma distribuição de brilho dada pela lei de de Vaucouleurs $r^{1/4}$. Com telescópicos maiores e instrumentos e detectores cada vez

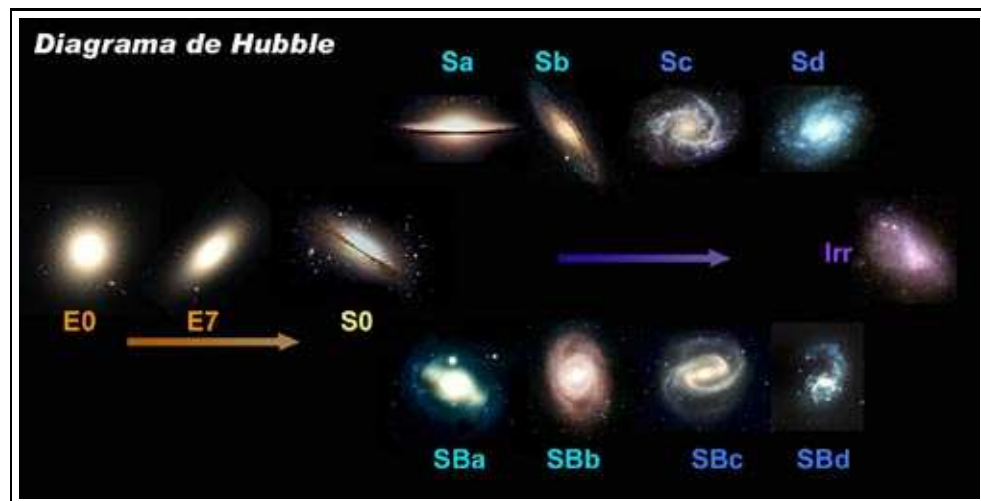


Figura 1.1: Diagrama de Hubble para a classificação das galáxias. Crédito: <http://www.caosyciencia.com/img/hubble.jpg>, mantido pelo Instituto de Astrofísica das Canárias (IAC).

mais eficientes foi possível obter uma visão mais clara e detalhada destes sistemas (McDermid et al., 2006). Mostrou-se que suas isofotas exibem variações pequenas, mas mensuráveis, de um sistema puramente elíptico. Geralmente, as galáxias *early-type* subdividem-se em “boxy” e “disky” de acordo com expansões de Fourier dos resíduos ao redor da melhor elipse ajustada (Bender, 1988).

Gradientes de cor e metalicidade foram observados, sugerindo que galáxias *early-type* não são compostas de populações estelares simples ou únicas (SSPs, do inglês *Simple/Single Stellar Populations*). Com o estudo das linhas de absorção dos elementos presentes nas atmosferas estelares, efeitos de idade e metalicidade puderam ser desacoplados, outrora com efeitos de degerescência em cores (McDermid et al., 2006). Através das larguras equivalentes, comparando diversas linhas de absorção com modelos de populações estelares, observou-se que galáxias *early-type* são geralmente dominadas por SSPs velhas (~ 10 Ganos) (Bica, 1988, Rickes et al., 2004, Milone et al., 2007) mas às vezes apresentam populações estelares intermediárias ($\sim 3 - 5$ Ganos) tanto no Universo Local (Rickes et al., 2007) quanto em *redshifts* maiores ($z = 0.7$) (Rembold & Pastoriza, 2007).

1.1.1 Formação de Galáxias *Early-Type*

Entender como se deu a formação e a evolução de galáxias *early-type* é um dos problemas fundamentais da astrofísica moderna. No Universo local, podemos estudá-las em muito detalhe, observando características que fossilizam sua história de formação estelar (Renzini, 2006) e retrazando os passos ao longo do caminho evolutivo da galáxia. Neste ambiente, estudos de populações estelares indicam que a maior parte de suas estrelas se formou em

redshifts (z) maiores que 2; enquanto que estudos em altos *redshifts* sugerem que a maioria das *early-type* mais massivas já estavam formadas em $z \simeq 1$ (Renzini, 2006, Scarlata et al., 2007).

As observações das últimas décadas indicam dois cenários principais para a formação de galáxias *early-type*. O primeiro seria o colapso monolítico (Eggen et al., 1962, Larson, 1974, Arimoto & Yoshii, 1987, Bressan et al., 1994) onde ocorreria a contração violenta de uma nuvem proto-galáctica com altíssima taxa de formação estelar e dissipação de energia e subsequente evolução passiva. O segundo cenário propõe que as galáxias *early-type* seriam o resultado de fusões, o chamado *merger* hierárquico (White & Rees, 1978).

O primeiro cenário permite a formação de um disco se as condições físicas locais forem apropriadas, isto é, disponibilidade de gás para ser acregado do ambiente. Normalmente nesse cenário os esferoides precedem os discos, já no *merger* hierárquico os esferoides são precedidos pelos discos na maioria das vezes (Renzini, 2006).

1.2 Aglomerados Estelares Extragalácticos

Acredita-se que o primeiro evento de formação estelar nas galáxias é dominado pela formação de sistemas estelares muito massivos, os aglomerados globulares (GCs, do inglês *Globular Clusters*). Estes estão entre os objetos mais velhos e brilhantes do Universo, com massas típicas entre $10^4 - 10^6 M_{\odot}$, luminosidades $-5 \lesssim M_V \lesssim -10$ e tamanhos de $R_{eff} \simeq 4$ pc (Brodie & Strader, 2006). Aglomerados estelares massivos se formam durante todos os eventos significativos de formação estelar (Schweizer, 2001) e o número de aglomerados formados parece estar correlacionado com a quantidade de gás envolvida na interação (Kissler-Patig et al., 1998). Pensa-se que muitos GCs se formaram muito cedo na história do Universo, logo similaridades e diferenças em sistemas de globulares de diferentes galáxias contribuiriam para um melhor entendimento da formação e evolução inicial das galáxias onde eles se encontram (Larsen et al., 2001).

1.2.1 Aglomerados Globulares

O entendimento de sistemas de aglomerados globulares começa com os estudos de Shapley (1918) para a Via-Láctea e se estende para galáxias além das Nuvens de Magalhães no trabalho de Hubble (1932). Este último, identifica 140 objetos nebulosos na galáxia M31 (Harris & Racine, 1979). Suas formas, estruturas, cores, luminosidades e dimensões os identificam como prováveis aglomerados globulares. Em meados da década de 50, foi observado que galáxias elípticas gigantes como M87 (Baum, 1955) hospedavam populações muito ricas em aglomerados globulares. A partir dos anos 1980, com o advento de detectores CCDs sensíveis o suficiente, o estudo mais detalhado de GCs em galáxias fora do Grupo Local

tornou-se possível. Harris (1991) define um sistema de aglomerados globulares como o conjunto de todos os aglomerados estelares velhos (com tempo de vida maior que 10 Ganos) encontrados no bojo e no halo de uma dada galáxia. Nessa época começavam-se a estudar sistemas de aglomerados em galáxias além do Grupo Local, concentrando-se em galáxias com distâncias próximas às dos aglomerados de Virgo e de Fornax ($\simeq 19$ Mpc). Sistemas de aglomerados globulares foram estudados até a data presente em todos os tipos de galáxias, de gigantes a anãs.

Aglomerados globulares individuais podem ser bem resolvidos em seus componentes estelares apenas em galáxias do Grupo Local, mais próximas que 1 Mpc e com extrema dificuldade em galáxias um pouco mais distantes ($\simeq 4$ Mpc) como NGC 5128 (Harris, 2001). Assim, estudar sistemas de globulares se tornou uma tarefa estatística. Identificamos GCs contra galáxias de fundo e estrelas combinando magnitudes e cores, e a eliminação de contaminantes só se dá de forma precisa com medidas de velocidades radiais *. Um número limitado de informações pode ser extraído de estudos de GCs extragalácticos e o quanto mais longe os estudamos, mais pobre fica a qualidade dos dados. Mesmo assim seu estudo tem grande importância por muitas razões, dentre as quais podemos destacar o fato de poderem ser identificados em galáxias através do Universo, uma vez que são concentrações densas de $\sim 10^6$ estrelas e podem representar as histórias evolutivas de suas galáxias hospedeiras. Podemos estudar: o número de aglomerados presentes na galáxia hospedeira, a função de luminosidade do sistema, as cores, as metalicidades e os tamanhos de cada aglomerado individual e suas distribuições espaciais e velocidades radiais; com a qualidade dos dados só tendendo a melhorar com a nova geração de telescópios. A seguir, as principais características dos sistemas de aglomerados globulares.

Função de Luminosidade dos Aglomerados Globulares

A função de luminosidade dos globulares (GCLF, do inglês *globular cluster luminosity function*) é uma das propriedades que parece permanecer inalterada, independente do sistema de aglomerados globulares observado. A GCLF em praticamente todas as galáxias estudadas até agora é muito bem ajustada por uma função gaussiana[†], com uma *turn-over magnitude*, $M_V \sim -7.5$ e uma dispersão de $\sigma \sim 1.2$ (Harris, 1991, Ashman & Zepf, 1998). Assim, ela pareceu ser universal durante muitos anos. Entretanto, poucos estudos atingiram magnitudes mais profundas que ~ 1 mag mais fraca que a *turn-over magnitude*. Alguns destes estudos que foram mais profundamente em magnitude têm suas GCLFs melhor ajustadas

* com a comprovação de que eles pertencem cinematicamente a uma galáxia ou no caso de aglomerados *intracluster*, a um aglomerado de galáxias.

[†] $\frac{dN}{dm} \sim \exp\left[-\frac{(m - m_0)^2}{2\sigma^2}\right]$, onde dN é o número de GCs com magnitude aparente entre m e $m + dm$, e m_0 a *turn-over magnitude*.

por um função t_5 † como é o caso da Via-Láctea e da M31 (Secker, 1992). A função t_5 entretanto, não apresenta uma grande melhora no ajuste quando graficada em unidades de magnitudes, somente quando graficada em unidades de luminosidade.

A Bimodalidade em Cor e os Cenários de Formação

Na última década, um dos mais importantes resultados foi a comprovação de que os sistemas de aglomerados globulares em quase todas galáxias gigantes são bimodais em cor, indicando a presença de duas subpopulações de GCs (Ostrov et al., 1993, Elson & Santiago, 1996). Estas populações seriam originadas em diferentes fases do processo de formação e evolução química de suas galáxias hospedeiras (Ashman & Zepf, 1992). Pensou-se que a diferença em cor seria devida à idade ou à metalicidade, mas na maioria dos casos é uma combinação das duas devido à degenerescência idade-metalicidade (Worthey, 1994, Brodie & Strader, 2006).

Há várias correlações entre as propriedades das subpopulações azul e vermelha de globulares e de suas galáxias hospedeiras. Algumas serão discutidas mais adiante. Do ponto de vista de cenários recentes de formação de sistemas de GCs, duas correlações envolvendo a massa das hospedeiras vêm adquirindo maior importância: tanto a metalicidade da subpopulação azul (van den Bergh, 1975) quanto a sua eficiência de formação aumentam com a massa da hospedeira (Rhode et al., 2005).

Muitos cenários foram propostos para explicar a bimodalidade em cor. Nenhum deles é universal, no sentido de valer para toda e qualquer galáxia que observamos, mas sim complementares, no sentido de que ao estudarmos um determinado sistema de GCs, devemos escolher o cenário que melhor explique as características particulares observadas.

Um dos primeiros cenários propostos foi o de fusão de espirais (Ashman & Zepf, 1992), que previu a bimodalidade em cor em galáxias elípticas antes mesmo dela ser observada (Brodie & Strader, 2006). Ashman & Zepf (1992) desenvolveram a idéia de que as elípticas se formaram pela fusão de galáxias disco ricas em gás (Toomre & Toomre, 1972, Schweizer, 1987) e que novos GCs poderiam se formar em grandes quantidades durante esse processo de fusão (Schweizer, 1987). Os aglomerados pobres em metais viriam das galáxias disco e os ricos em metais seriam formados durante a fusão. Quando aglomerados jovens massivos (YMC, do inglês *young massive clusters*) foram descobertos em galáxias como Antennae (Whitmore & Schweizer, 1995) esse modelo tornou-se muito popular.

Em virtude do modelo de Ashman & Zepf (1992) não conseguir explicar o número de aglomerados globulares observados nem suas cores, Forbes et al. (1997a) sugeriram que a bimodalidade poderia surgir de um colapso monolítico em múltiplas fases. Os GCs pobres

† $\frac{dN}{dm} \sim \frac{1}{\sigma} \left[1 + \frac{(m - m_0)^2}{5\sigma^2} \right]^{-3}$, onde dN é o número de GCs com magnitude aparente entre m e $m + dm$, e m_0 a *turn-over magnitude* (Richtler, 2003).

em metais se formariam nas primeiras fases de criação da galáxia, e a formação de GCs seria então truncada em alto *redshift*. Depois de alguns Ganos começaria a segunda fase de formação de GCs, agora ricos em metais, e a maior parte das estrelas de campo da galáxia. Forbes et al. (1997a) sugeriram que o gás expulso dos *clumps* primordiais esfriaria e recolapsaria em potenciais gravitacionais galácticos até que as condições locais fossem renovadas para recomeço da formação estelar. Santos (2003) sugeriu a reionização cósmica § como mecanismo para truncar a formação de GCs pobres em metais.

Outro cenário interessante é o de acreção proposto por Côté et al. (1998), no qual os GCs ricos em metais se formariam juntamente com “a semente” de sua galáxia, enquanto os pobres em metais seriam acretados sem dissipação de energia de galáxias vizinhas de menor massa e de menor metalicidade.

Os cenários mencionados acima são os chamados cenários clássicos e todos eles sugerem que a maioria dos GCs se formaram em alto *redshift*; assim, tais objetos têm grande importância no contexto cosmológico (Brodie & Strader, 2006).

Beasley et al. (2002) simularam a formação de GCs num modelo semi-analítico com a formação dos GCs pobres em metais truncada em $z > 5$ para o aparecimento da bimodalidade. Estes autores concluíram que os GCs ricos em metais traçam a história de fusões de sua galáxia hospedeira e a formação estelar em tempos posteriores. Com o sucesso da cosmologia Λ CDM ¶ e do paradigma de fusões hierárquicas, Strader et al. (2005) e Rhode et al. (2005) propõem modelos de formação de GCs à luz de tais teorias.

Strader et al. (2005) tentam explicar a relação da massa da galáxia hospedeira com a metalicidade dos GCs pobres em metais. No cenário de Côté et al. (1998) é proposto que os GCs pobres em metais das galáxias massivas vêm de galáxias anãs acretadas, entretanto as metalicidades dos GCs pobres em metais das galáxias mais massivas são superiores a dos GCs pobres em metais das galáxias anãs. Strader et al. (2005), para contornar essa evidência observacional, propõem um cenário que sintetiza propriedades dos modelos de Forbes et al. (1997a) e Côté et al. (1998). Eles sugerem que as galáxias anãs que estão em sobre-densidades destinadas a virarem galáxias elípticas colapsam primeiro (e acretam mais gás) do que aquelas na periferia. Considerando que a formação desses GCs pobres em metais cesse devido a reionização, as anãs que colapsam primeiro podem produzir GCs pobres em metais com maior metalicidade (elas têm mais tempo de processar gás acretado ou acretar ainda mais gás) do que os das anãs que colapsam depois. Esses halos mais concentrados seriam acretados ao halo principal com seus GCs formando a população pobre em metais.

§Na cosmologia do Big Bang a reionização é a época em que o hidrogênio do meio intergaláctico é reionizado pelas intensas fontes UV resultantes da formação dos primeiros objetos luminosos (galáxias com formação estelar ou núcleos ativos) (Fan et al., 2006).

¶*Lambda Cold Dark Matter*, cenário cosmológico que melhor reproduz as observações da radiação cósmica de fundo, estrutura em grande escala e expansão acelerada do Universo com o modelo do Big Bang

Alguns dos halos periféricos sobreviveriam e virariam as galáxias anãs observadas hoje, com GC pobres em metais menos metálicos.

Para explicar porque o número de aglomerados globulares azuis cresce com a massa da galáxia hospedeira Rhode et al. (2005) sugerem que as galáxias mais massivas de hoje começaram a agregar suas partes num tempo anterior e portanto tiveram mais tempo de formar mais GCs pobres em metais do que as galáxias de menor massa.

Ambos trabalhos (Strader et al., 2005, Rhode et al., 2005) sugerem que os GCs pobres em metais se formaram em halos de matéria escura de baixa massa em $z \sim 10 - 15$, com os halos em ambientes mais densos colapsando primeiro. Os GCs ricos em metais se formariam mais tarde em fusões que criam a galáxia hospedeira, juntamente com a maior parte das estrelas de campo. Assim, para a formação dos GCs pobres em metais um cenário de formação de GCs com viés (Kaiser, 1984, West, 1993) volta à tona (Brodie & Strader, 2006). Apenas as maiores sobre-densidades, acima de um certo valor limite, ($\sim 10^6 M_\odot$, exatamente a massa esperada de um GC) formariam GCs. Estes seriam os GCs pobres em metais. Com o enriquecimento químico vindo dos estágios finais das estrelas massivas, esse limite aumentaria causando um aumento do valor limite e ocasionando o fim da formação dos GCs pobres em metais.

Yoon et al. (2006), entretanto, mostram que uma única população de aglomerados com uma ampla distribuição de metalicidades pode ter uma distribuição bimodal em cor. Isso pode ser verdadeiro porque a relação entre cor e metalicidade no óptico é não linear. Estes autores sugerem que uma mudança dependente de metalicidade na estrutura do ramo horizontal dos GCs resulta num ponto de inflexão na relação entre cor óptica e metalicidade, de tal maneira que poucos GCs tenham cores intermediárias, causando uma queda artificial nas bandas ópticas. Kundu & Zepf (2007) descartam totalmente esta possibilidade para a M87 baseados em cores $(I - H)$ ^{||} e $(B - I)$. Eles concluem que a bimodalidade em cor para GCs em galáxias elípticas é traçadora da bimodalidade em metalicidade. Strader et al. (2007) mostram que não linearidades do tipo Yoon et al. (2006) não são as principais causas da bimodalidade na NGC 4472, mas não descartam a possibilidade de contribuírem para o resultado total.

Frequência Específica

Harris & van den Bergh (1981) introduziram a frequência específica dos globulares (S_N), o número de aglomerados por unidade de luminosidade total no visual da galáxia hospedeira. A S_N é representativa da população total de aglomerados globulares em uma galáxia e é definida como:

$$S_N = N_{GC} \times 10^{0.4(M_V + 15)}, \quad (1.1)$$

^{||}bandas não sensíveis à estrutura do ramo horizontal dos GCs.

onde M_V é a magnitude absoluta na banda V da galáxia hospedeira. A S_N tem sido amplamente utilizada em modelos com o intuito de analisar a eficiência de formação de aglomerados globulares em diferentes tipos de galáxias. O número de GCs (N_{GC}) era originalmente calculado dobrando o número de aglomerados mais brilhantes que a *turn-over magnitude* para contornar a incompletude do extremo fraco da GCLF (Brodie & Strader, 2006). Os valores de S_N para os sistemas de GCs observados ainda parecem muito incertos devido à incompletude na cobertura amostral das galáxias estudadas. Muitos estudos com fotometria precisa extrapolam o número de GCs a partir de números obtidos nas regiões centrais, como é o caso dos estudos com o telescópio espacial Hubble (HST, do inglês *Hubble Space Telescope*) (e.g. Kundu & Whitmore, 2001, Larsen et al., 2001). Os estudos que cobrem as galáxias inteiras, feitos com telescópios em terra (e.g. Rhode & Zepf, 2004), têm fotometria não muito precisa, não indo muito profundamente em magnitude e sofrendo ainda mais com contaminações que os estudos com o HST. Além disso, um pequeno erro em M_V acarreta uma enorme variação na S_N . Comparar frequências específicas de diferentes sistemas de aglomerados globulares exige que as galáxias hospedeiras tenham a mesma razão massa/luminosidade. Assim, Zepf & Ashman (1993) introduziram a quantidade T , o número de GCs por $10^9 M_\odot$ de massa estelar da galáxia. Em elípticas, anãs e lenticulares $2 < S_N < 6$, as elípticas de campo têm $S_N \sim 3$ enquanto que as de aglomerados de galáxias possuem $S_N \sim 6$. Já as cDs encontradas em centros de aglomerados de galáxias têm $10 < S_N < 20$ e as galáxias espirais e irregulares têm $S_N \sim 1$ (Brodie & Strader, 2006).

Distribuições Radiais

As distribuições espaciais projetadas de GCs são geralmente ajustadas por uma lei de potência e são geralmente mais planas para galáxias mais luminosas (Ashman & Zepf, 1998). A maioria das distribuições radiais de GCs possuem núcleos e se tornam mais íngremes nas partes mais externas. Na maioria dos casos, os GCs possuem uma distribuição espacial mais estendida do que a das estrelas de sua galáxia hospedeira (Brodie & Strader, 2006). Geisler et al. (1996) estudando a elíptica gigante de Virgo, NGC 4472, mostraram que os gradientes de cor de sistemas de GCs eram devidos somente às distribuições radiais das diferentes subpopulações. Bassino et al. (2006) mostram na elíptica gigante de Fornax NGC 1399 que a população de GCs rica em metais está distribuída de maneira muito semelhante à luz da galáxia hospedeira, sugerindo que se formaram concomitantemente. Na maioria dos casos estudados até hoje, ambas populações de GCs têm propriedades, tais como elipticidades e ângulos de posição, similares aos esferóides de sua galáxia hospedeira. Entretanto em algumas galáxias, a subpopulação rica em metais segue a elipticidade da galáxia hospedeira melhor do que a subpopulação pobre em metais (Forbes et al., 2001b, Brodie & Strader, 2006).

Distribuições de Metalicidade

Estudos diretos de metalicidade como Strader et al. (2005) indicam que a bimodalidade em cor é o resultado da diferença de metalicidade entre duas subpopulações velhas. Kuntschner et al. (2002), estudando a S0 NGC 3115, mostram que os GCs em ambas populações rica e pobre em metais são velhos. A maioria dos estudos do começo desta década, como por exemplo Forbes et al. (2001a), Brodie & Larsen (2002) em galáxias elípticas e lenticulares concluíram que em seus sistemas de GCs existe pelo menos uma pequena fração de GCs jovens ou de idade intermediária, com idade < 6 Ganos (Brodie & Strader, 2006).

Velocidades Radiais e Dinâmica

Os sistemas de GCs com velocidades radiais estudados até agora são poucos e concentram-se nas elípticas gigantes, centros de aglomerados ou grupos de galáxias e nenhum dos sistemas se parece entre si (Brodie & Strader, 2006). Richtler et al. (2004) e Zepf et al. (2000), Côté et al. (2003) observam que as dispersões de velocidade dos GCs pobres em metais são levemente maiores que as dos ricos em metais nas galáxias NGC 1399 e NGC 4472 respectivamente. Estes autores encontram 290 km/s para os pobres em metais e 255 km/s para os ricos em metais da NGC 1399; para a NGC 4472 estes valores são respectivamente 340 km/s e 265 km/s. Já para a M87 esta característica se inverte (Côté et al., 2001). Nesta galáxia as dispersões de velocidade são 365 km/s para os pobres e 395 km/s para os ricos em metais. Na NGC 1399 as dispersões de velocidade não parecem variar com o raio galactocêntrico, possuindo os GCs órbitas isotrópicas. Em lenticulares há evidência de forte rotação como em NGC 3115 (Kuntschner et al., 2002).

Tamanhos

Tamanhos de aglomerados globulares extragalácticos são geralmente expressos pelo raio efetivo (R_{eff}) (ou raio à meia luz) e só podem ser extraídos com suficiente qualidade das câmeras do HST através do modelamento da *Point Spread Function* (PSF). Kundu & Whitmore (1998) estão entre os primeiros a medirem raios à meia luz para GCs extragalácticos. Estes autores encontram raios à meia luz ~ 2 pc para a galáxia lenticular NGC 3115. Eles reportam pela primeira vez que os GCs azuis são em média 20% maiores que os vermelhos. Outros autores encontraram tal diferença média de tamanho para mais galáxias, como NGC 4472 (Puzia et al., 1999), e uma amostra de galáxias *early-type* (Larsen et al., 2001).

1.2.2 Aglomerados Estelares Estendidos

Historicamente, pensou-se que aglomerados estelares em galáxias massivas eram essencialmente de dois tipos como na Via Láctea: os aglomerados abertos, relativamente jovens, que contêm $10^2 - 10^4$ estrelas e estão distribuídos em um disco; e suas contrapartidas mais

populosas: os aglomerados globulares velhos do bojo e do halo. Esse cenário surgiu em virtude das limitações técnicas que restringiam as observações de aglomerados estelares à Via Láctea, ao Grupo Local e a algumas galáxias próximas às distâncias de Virgo e de Fornax. Como conseqüência, parâmetros como raios e magnitudes de aglomerados em galáxias externas não estavam disponíveis ou eram de qualidade baixíssima. Com o advento do telescópio espacial Hubble, particularmente com a *Wide Field and Planetary Camera 2* (WFPC2) e a *Advanced Camera for Surveys* (ACS) tornou-se possível medir tamanhos intrínsecos de aglomerados extragalácticos, inclusive os dos mais difusos. Novas classes de aglomerados foram então propostas no começo desta década para explicar o que as observações estavam mostrando.

Uma dessas classes, os *Faint Fuzzies* (FFs) são objetos caracterizados por tamanhos maiores e com magnitudes mais fracas do que GCs normais. FFs foram encontrados em uma estrutura anelar em galáxias lenticulares como NGC 1023 (Larsen & Brodie, 2000, Brodie & Larsen, 2002) e possivelmente NGC 3384 (Burkert et al., 2005). FFs tem $R_{eff} \sim 7 - 15$ pc, metalicidades moderadamente altas $[Fe/H] \sim -0.6$, e magnitude absoluta na banda V, M_V variando de -5 a -7. Eles estão espacialmente e cinematicamente associados com discos e são velhos (idade $\gtrsim 7-8$ Ganos). Estes FFs colocaram em prova a universalidade da GCLF, uma vez que não se ajustam à GCLF padrão. É também sabido que os aglomerados globulares mais estendidos do halo da Via Láctea são normalmente mais fracos e não compartilham da GCLF padrão (van den Bergh, 1982, 1996). Assim, estudar a ponta mais fraca da GCLF é necessária para explicar se estes aglomerados pouco luminosos e estendidos são comuns a mais galáxias, ou apenas à NGC 3384 e NGC 1023 (Larsen et al., 2001), sendo então formados em um evento raro.

Num *survey* de galáxias *early-type* no aglomerado de galáxias de Virgo com a ACS, Peng et al. (2006) detectaram uma população de aglomerados estelares difusos, (DSCs do inglês *Diffuse Star Clusters*), encontrados em sua maioria em lenticulares. Os DSCs têm luminosidades baixas ($M_V > -8$), cobrem um amplo intervalo em tamanho ($3 < R_{eff}(\text{pc}) < 30$), têm cores médias mais vermelhas que os GCs galácticos mais ricos em metais e conseqüentemente podem ser velhos ($\sim 5-13$ Ganos), ou ricos em metais ou ambos. Diferentemente dos GCs, cujos tamanhos não escalonam com a luminosidade, os DSCs apresentam brilho superficial constante. Eles aparentam estar espacialmente alinhados com a distribuição de luz de sua galáxia hospedeira e alguns parecem estar associados a discos de lenticulares. Nesse contexto, FFs são uma sub classe de DSCs, mais limitados no plano Raio vs. M_V .

1.3 O Presente Trabalho

Neste trabalho estudamos duas galáxias de tipos morfológicos diferentes e localizadas em ambientes de alta densidade: a NGC 5846 e a NGC 1380. A primeira é uma E0, elíptica gigante localizada no centro de um grupo de galáxias. A segunda é uma S0 localizada próxima ao centro do aglomerado de galáxias de Fornax, a nordeste de sua cD, NGC 1399.

O objetivo deste trabalho é investigar os sistemas de aglomerados estelares das galáxias NGC 5846 e NGC 1380 usando dados do arquivo público HST/WFPC2 para encontrar vínculos que descrevam suas histórias evolutivas. Em especial focalizaremos no sistema central de aglomerados globulares da NGC 5846, combinando-o com os estudos prévios de Forbes et al. (1996, 1997b), medindo seus tamanhos e procurando por fontes de raios-X de Trinchieri & Goudfrooij (2002) coincidentes com os GCs. À luz dos aglomerados estendidos, os *Faint Fuzzies* e DSCs, estudaremos o sistema de aglomerados estelares da galáxia NGC 1380 pela primeira vez com dados do telescópio espacial Hubble, medindo magnitudes, cores e tamanhos.

Com esta finalidade, as unidades desta dissertação estão estruturadas da seguinte forma. No Capítulo 2 apresentamos o estudo do sistema central de GCs da NGC 5846. O Capítulo 3 trata do estudo do sistema de aglomerados estelares da NGC 1380. No Capítulo 4 listamos os resultados dos respectivos estudos e os discutimos, comparando-os entre si e aos modelos de formação de GCs. Mencionamos então as considerações finais e perspectivas para trabalhos futuros. No apêndice A discutimos o procedimento de medir tamanhos de aglomerados estelares extragalácticos e no apêndice B anexamos os artigos que resultaram desta dissertação. Por fim estão listadas as referências bibliográficas utilizadas.

Capítulo 2

O Sistema Central de GCs da NGC 5846

Capítulo baseado no artigo Chies-Santos, A.L., Pastoriza, M.G., Santiago, B.X. & Forbes, D.A. 2006, A&A, 455, 453 (Chies-Santos et al., 2006b)

A Galáxia NGC 5846 é uma elíptica gigante no centro de um grupo de galáxias. De acordo com a classificação de Hubble é uma E0 com um raio efetivo de 11.6 Kpc (Bender et al., 1992). Suas coordenadas equatoriais são ascensão reta $AR = 15 : 06 : 29.3$ e declinação $Dec = 01 : 36 : 20$ (J2000) (NED[†]). Ela possui uma velocidade radial de $1714 \pm 5 \text{ km s}^{-1}$ (NED[†]) e magnitude absoluta na banda B , $M_B = -21.30$ (HyperLeda[‡]). Possui magnitude absoluta na banda V , $M_V = -22.60$ (Faber et al., 1989) e seu módulo de distância é $(m - M) = 32.32 \pm 0.23$, o que a coloca a aproximadamente 13 Mpc do aglomerado de Galáxias de Virgo (Forbes et al., 1996). Na figura 2.1 mostramos uma imagem do *Sloan Digital Sky Survey* da NGC 5846.

Ela é classificada como um AGN (galáxia de núcleo ativo, do inglês *Active Galactic Nuclei*) de transição por Merrifield (2004). Seu sistema de aglomerados globulares foi estudado previamente por Forbes et al. (1996, 1997b). Estes autores encontraram que a NGC 5846 tem uma frequência específica de GCs muito mais baixa que qualquer outra elíptica dominante de grupos de galáxias. Harris & van den Bergh (1981) estimaram seu número total de aglomerados globulares em $N_{GC} = 2200 \pm 1300$. A estimativa de Faber et al. (1989), para a magnitude absoluta, $M_V = -22.6$ resulta numa frequência específica de aglomerados globulares $S_N = 2.0 \pm 1.2$ (Forbes et al., 1997b). Harris & van den Bergh (1981), utilizando $M_V = -21.7$, encontram $S_N = 4.5 \pm 2.6$. Ambas estimativas mostraram

[†]NASA/IPAC Extragalactic Database - <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>

[‡]Database for physics of galaxies - <http://leda.univ-lyon1.fr/>



Figura 2.1: Imagem mosaico *gri* Sloan Digital Sky Survey da NGC 5846. Escala: $6' \times 8'$ ($1' = 6.6$ Kpc); crédito: Michael R. Blanton & David W. Hogg 2006.

que a NGC 5846 possui uma S_N média ou abaixo da média, se comparada a outras galáxias elípticas luminosas como a NGC 4472, com $S_N = 5.6$ (Geisler et al., 1996), e a NGC 3923 com $S_N = 6.4$ (Zepf et al., 1995). Estudos mais recentes de S_N em diferentes ambientes (Brodie & Strader, 2006) mostram que $2 < S_N < 6$ em elípticas e lenticulares, sendo a média $S_N = 3$ para as de campo e $S_N = 6$ para as de aglomerados de galáxias. Assim os valores estimados por Harris & van den Bergh (1981) e Forbes et al. (1997b) são plausíveis.

Similarmente a muitas outras galáxias *early-type*, seu sistema de aglomerados globulares apresenta distribuição de cor bimodal. Forbes et al. (1996, 1997b) encontraram que os picos azul e vermelho desta distribuição estão localizados em $(V - I) = 0.96$ e 1.17 , respectivamente, que corresponde às metalicidades $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.2$ e -0.2 ; sendo a razão entre aglomerados vermelhos e azuis muito alta. Estes autores também encontram um gradiente radial no sentido de que a fração relativa de aglomerados azuis cresce para fora, o que também tem sido observado em outras galáxias. A região central da NGC 5846 é um ambiente difícil de detectar GCs, mesmo com imagens do telescópio espacial Hubble, dada a presença de poeira e o alto brilho superficial central. Contrariamente a outras galáxias (Larsen et al., 2001, Jordán et al., 2005) não existem estimativas prévias de tamanhos para os aglomerados da NGC 5846.

Hempel et al. (2003) estudaram o sistema de GCs da NGC 5846 com dados no óptico e no infravermelho próximo do *Very Large Telescope* (VLT) e reportaram a existência

de uma população de idade intermediária. A subpopulação rica em metais contém duas subpopulações que diferem em idade por alguns Ganos.

Observações do Chandra da NGC 5846 revelam uma morfologia em raios-X do gás quente muito complexa. Estas imagens de alta resolução confirmam a semelhança entre a distribuição de raios-X e a de $H\alpha + [NII]$, indicando que o gás quente ($\sim 10^7$ K) e o gás emissor de linhas ópticas ($\sim 10^4$ K) estão conectados (Trinchieri & Goudfrooij, 2002). O núcleo em raios-X coincide com o núcleo rádio observado com o VLA, mas está um pouco afastado do núcleo óptico (Filho et al., 2004). Uma população de 41 fontes pontuais de raios-X foi observada por Trinchieri & Goudfrooij (2002), com luminosidades em raios-X (L_X) no intervalo de 3×10^{38} a $2 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$. A distribuição de luminosidade destas fontes parece ser mais inclinada do que a de qualquer outra galáxia já estudada. Na nossa galáxia, 10% das fontes luminosas de raios-X estão associadas com aglomerados globulares e estes podem hospedar binárias de raios-X (Verbunt & Hut, 1987). Uma grande fração das fontes de raios-X encontradas em galáxias *early-type* tem grande chance de serem binárias de raios-X de baixa massa (LMXB, do inglês *Low Mass X-Ray Binaries*). Angelini et al. (2001) encontraram que aproximadamente 70% das LMXBs na NGC 1399 estão associadas espacialmente com aglomerados globulares, para a NGC 4697 esta fração decresce para 20% (Sarazin et al., 2001).

Nosso principal objetivo nessa parte do trabalho é investigar as regiões centrais da NGC 5846 através de imagens públicas do telescópio espacial Hubble, procurando por novos candidatos a aglomerados globulares que podem não ter sido detectados, e investigar suas propriedades ópticas. Queremos também medir tamanhos e encontrar possíveis contrapartidas em raios-X de Trinchieri & Goudfrooij (2002) para os GCs.

2.1 Dados e Fotometria

Utilizamos imagens WFPC2 do arquivo público do telescópio espacial Hubble do programa de observação G0-5920, para três apontamentos da WFPC2 (norte, central e sul) nos filtros F555W e F814W. Estes são filtros HST/WFPC2 que correspondem respectivamente a V e I no sistema Johnson-Cousins. Na figura 2.2 os apontamentos WFPC2 estão mostrados sobrepostos a uma imagem do *Digital Sky Survey* da galáxia. O diário de observações está na tabela 2.1.

A WFPC2 é composta de uma câmera de campo amplo (WFC, do inglês *Wide Field Camera*) com três CCDs e uma câmera planetária (PC, do inglês *Planetary Camera*). A PC possui uma resolução espacial de $0.046'' \text{ pixel}^{-1}$ e seu campo atinge $37'' \times 37''$. Já a WFC possui uma escala de $0.1'' \text{ pixel}^{-1}$, com cada CCD correspondendo a um campo de $80'' \times 80''$. Para redução dos dados utilizamos o software *Image Reduction and Analysis Facility* (IRAF).

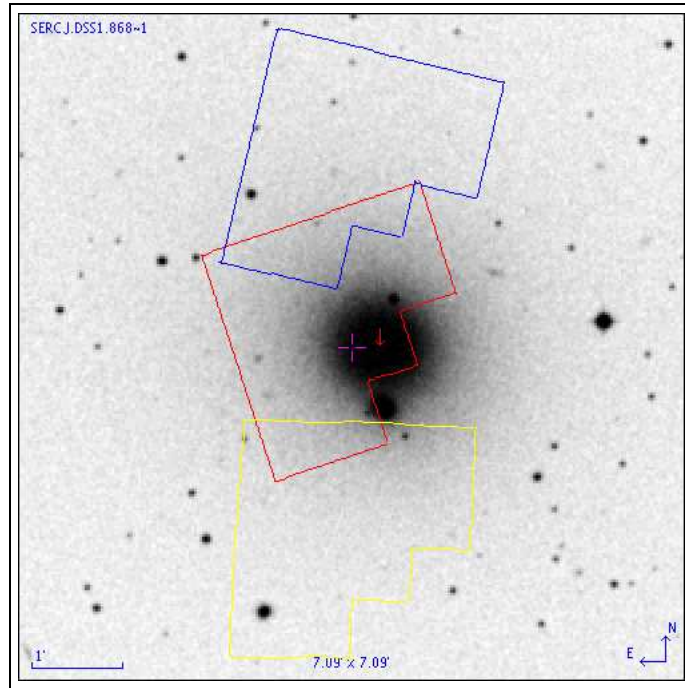


Figura 2.2: Imagem de telescópio em terra da NGC 5846 (*Digital Sky Survey*) com os apontamentos HST/WFPC2 utilizados neste trabalho sobrepostos. O apontamento em azul corresponde ao norte, o vermelho ao central e o amarelo ao sul, de acordo com a tabela 2.1.

nome-raíz	filtro	apontamento	tempo de exposição (s)
U36J0401T	F555W	Central	900
U36J0402T	F555W	”	1300
U36J0403T	F814W	”	900
U36J0404T	F814W	”	1400
U36J0501T	F555W	Norte	900
U36J0502T	F555W	”	1300
U36J0503T	F814W	”	900
U36J0504T	F814W	”	1400
U36J0601T	F555W	Sul	900
U36J0602T	F555W	”	1300
U36J0603T	F814W	”	900
U36J0604T	F814W	”	1400

Tabela 2.1: Diário de observações WFPC2/HST: F555W e F814W são filtros HST/WFPC2 que correspondem respectivamente a V e I no sistema Johnson-Cousins.

As imagens listadas na tabela 2.1 já haviam sido reduzidas e utilizadas para estudar o sistema de aglomerados globulares por Forbes et al. (1996, 1997b). Estes autores mediram posições no CCD, magnitudes V e I e cores para uma amostra de aproximadamente 1000 GCs. O nosso objetivo aqui é estudar as propriedades dos GCs nas partes mais internas da NGC 5846. Procedemos com uma análise detalhada das imagens da PC do apontamento central. Os pares de exposições individuais com o mesmo filtro foram alinhados e combinados com a tarefa *gcombine* do STSDAS. Para identificar os aglomerados globulares na região central da galáxia fizemos fotometria superficial da galáxia hospedeira. Construímos um modelo de distribuição de luminosidade da galáxia usando a tarefa *ellipse* do STSDAS para cada filtro. Estes modelos foram então subtraídos das imagens da PC que resultaram da tarefa *gcombine*. Na figura 2.3 mostramos a imagem V *gcombinada* da PC do apontamento central (à esquerda) e o modelo resultante da tarefa *ellipse* para esta imagem (à direita). Os resultados da subtração revelam filamentos de poeira e muitos objetos compactos e brilhantes. A seleção da amostra foi feita a olho na imagem V subtraída.

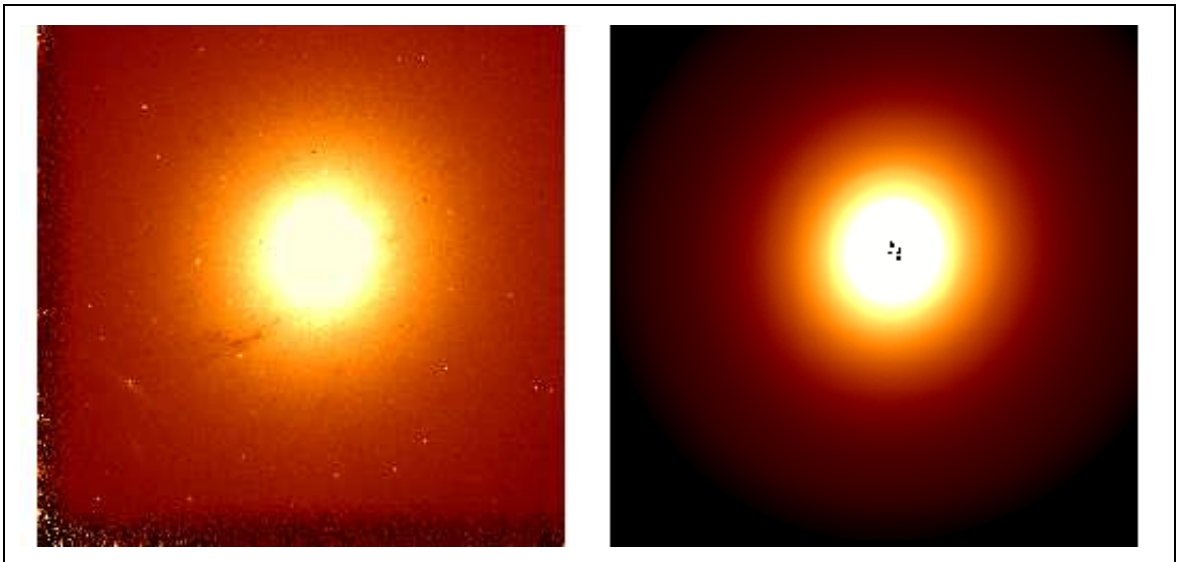


Figura 2.3: *Esquerda*: Imagem da PC do apontamento central na banda V *gcombinada*; *Direita*: modelo de distribuição de luz da imagem mostrada à esquerda.

A figura 2.4 mostra a imagem subtraída da PC do apontamento central do modelo na banda V (figura 2.3). Os objetos visualmente selecionados estão marcados na imagem. Seleccionamos um total de 196 fontes na imagem subtraída, 31 das quais são comuns à amostra de Forbes et al. (1996, 1997b). Mesmo seleccionando as fontes muito cuidadosamente, esse número é provavelmente apenas uma fração do total, uma vez que é muito difícil detectar aglomerados globulares extragalácticos contra o fundo brilhante da região central de suas galáxias hospedeiras.

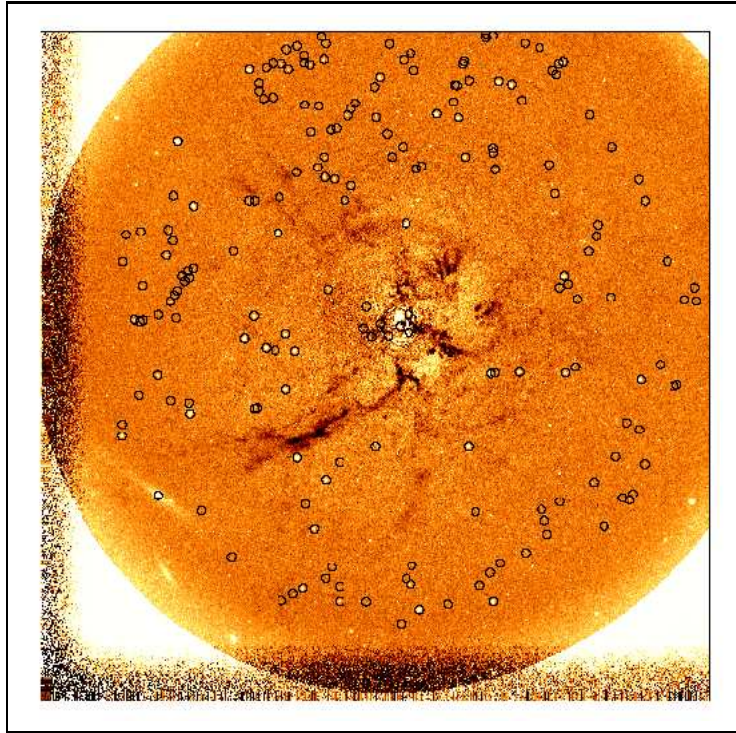


Figura 2.4: O resultado da subtração do modelo da imagem V *gcombinada*, $37''$ de lado. Os candidatos a GCs estão indicados como círculos. O norte está a aproximadamente 70 graus a partir da vertical em direção anti-horária.

A partir da galáxia subtraída, notamos que a poeira está muito concentrada nas partes mais internas, tendo uma distribuição assimétrica. Nesta parte rica em poeira da galáxia, objetos estelares parecem completamente ausentes. Forbes et al. (1997b) sugeriram que esta poeira é o resultado de um evento de fusão ou de acreção de uma galáxia rica em gás e seria o combustível para seu núcleo rádio compacto.

Tendo as posições dadas no cabeçalho da imagem (as posições CCD), medimos as magnitudes usando o pacote PHOT.APPHOT, em ambas imagens *gcombinadas* e também nas que tiveram a luz da galáxia subtraída. Na figura 2.5 temos o diagrama cor magnitude (CMD, do inglês *colour magnitude diagram*) para todos os objetos compactos selecionados visualmente em ambas as imagens. Ambos CMDs exibem um locus bem definido de GCs no intervalo $22.5 < V < 27.5$ e $0.5 < (V - I) < 1.9$. A cor $(V - I)$ média é ~ 1 , típica de GCs. Um total de 68 candidatos a GCs encontram-se nesse intervalo no CMD. Esse locus de GCs vai mais para o azul em magnitudes mais fracas, como resultado de um efeito de seleção, uma vez que a amostra foi visualmente selecionada na banda V . A dispersão em cor também se torna maior para $V > 26.5$ em virtude dos erros fotométricos. Notem que a dispersão em cor tende a ser menor na imagem subtraída da luz da galáxia, mostrando a precisão fotométrica maior que é atingida quando imagens subtraídas são utilizadas para tal

propósito. Assim, utilizamos a imagem subtraída para a fotometria e cortamos a amostra em $V = 26.5$.

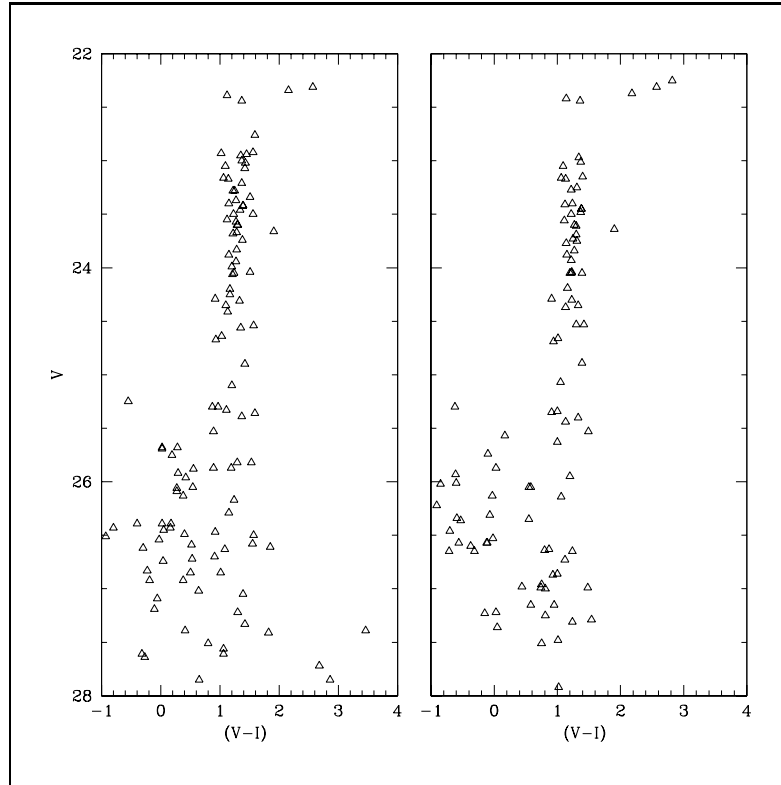


Figura 2.5: *Painel esquerdo*: CMD para a imagem *gcombinada*; *painel direito*: CMD para a imagem subtraída.

Para as medidas fotométricas ficarem consistentes com as de Forbes et al. (1996), adotamos procedimentos similares a estes autores. Utilizamos um raio de abertura de 2 pixels, as correções fotométricas para um raio de abertura de $0.5''$ foram 0.39 mag para F555W e 0.54 mag para F814W. Estes valores foram baseados na tabela 2 de Holtzman et al. (1995b). Para converter para o sistema fotométrico padrão de Johnson-Cousins V , I (para um ganho de 7) seguimos a tabela 7 de Holtzman et al. (1995a). Finalmente, os dados foram corrigidos por extinção Galáctica: $A_V = 0.11$ e $A_I = 0.05$ (Faber et al., 1989), para serem consistentes com Forbes et al. (1996, 1997b). Os valores de Schlegel et al. (1998) são $A_V = 0.182$ e $A_I = 0.107$.

Como o objetivo final para a NGC 5846 é combinar a amostra de GCs interna medida aqui com a amostra de Forbes et al. (1996, 1997b), as magnitudes em ambos filtros foram comparadas para os objetos em comum. Um pequeno desvio de $\simeq 0.1$ mag foi encontrado para ambos filtros. Nossas magnitudes calibradas foram convertidas para o sistema fotométrico de Forbes et al. (1996) ajustando uma relação linear do tipo $m_{FBH96} = am_{nossa} + b$, onde m_{FBH96} é a magnitude medida por Forbes et al. (1996) e

m_{nossa} é a medição correspondente feita aqui. Os coeficientes da banda V são $a = 0.984$ e $b = 0.287$; e os da banda I , $a = 0.947$ e $b = 1.232$. Esses ajustes foram aplicados apenas para GCS com qualidade fotométrica ($V < 26.5$). Na figura 2.6 temos a diferença residual como função da magnitude para ambos filtros após a conversão de nossas magnitudes para o sistema FBH96. O espalhamento dos resíduos é de ± 0.07 para a banda V e ± 0.08 para a banda I .

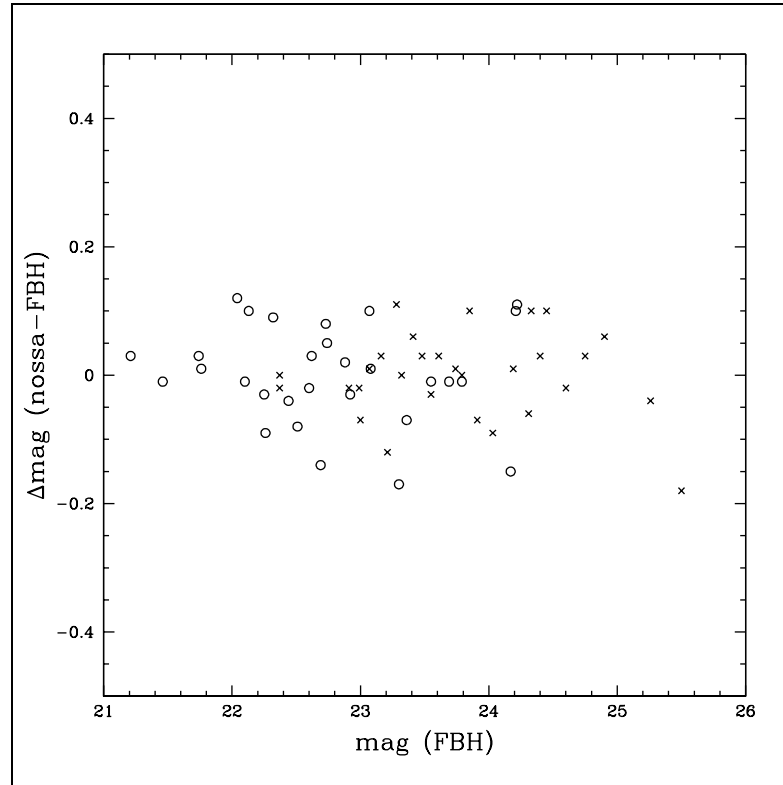


Figura 2.6: Diferenças fotométricas entre os objetos aqui medidos e os de Forbes et al. (1996, 1997b), depois da correção pelo ajuste linear. Círculos: banda V ; cruzes: banda I .

2.2 A Distribuição de Cor Central

Distribuições de cores são de grande utilidade para caracterizar populações de GCS. Tais distribuições são geralmente bimodais em galáxias *early-type*, tanto em aglomerados de galáxias como em galáxias de campo (Elson & Santiago, 1996, Rhode & Zepf, 2004). A NGC 5846 não é um caso especial, apresentando tal comportamento como já mencionado por Forbes et al. (1996, 1997b). Esses autores também encontram variação na distribuição de cor dos GCS em função da distância galactocêntrica, o que é interpretado como um gradiente de metalicidade, no sentido da metalicidade decrescente para fora. Aqui, com a

vantagem do aumento da amostra na região central, revisamos a distribuição de cor desta região.

Na figura 2.7 temos a distribuição de GCs com $V < 26.5$ para dois diferentes raios a partir do centro. Ambas distribuições são dominadas por cores de GCs típicas, no intervalo de $0.6 \leq (V - I) \leq 1.5$, mostrando que a amostra de GCs não está muito contaminada. A população mais interna está deslocada levemente para cores mais azuladas relativamente à população localizada um pouco mais para fora do centro da galáxia.

Pode-se pensar que a poeira poderia tornar os GCs nas regiões mais externas mais vermelhos. Mesmo que haja poeira nessa região, como revelado pelos filamentos mais claros na figura 2.4 (porque as cores estão invertidas na figura), esses filamentos são claramente mais pronunciados mais para o centro da galáxia, e portanto deveriam estar afetando mais os GCs das regiões mais internas ($r < 20''$) do que os localizados nas regiões mais externas ($20'' < r < 40''$). Logo a correção para o efeito de poeira aumentaria a diferença de cor entre essas regiões que estão sendo comparadas.

As regiões mais internas possuem $\langle (V - I) \rangle = 1.17 \pm 0.04$ comparada a $\langle (V - I) \rangle = 1.24 \pm 0.07$ no bin radial seguinte. Essa diferença ($\delta(V - I) = 0.07$) é pequena o suficiente para colocar ambas regiões na subpopulação de GCs rica em metais e é apenas marginalmente significativa. Os dados originais de Forbes et al. (1997b) também indicavam um azulamento nas partes mais centrais da NGC 5846 ($r < 2$ Kpc), como indicado em sua figura 5. Se tal azulamento for verdadeiro, seria devido a uma combinação de efeitos idade e/ou metalicidade. Os GCs mais internos poderiam ser um pouco mais jovens ou um pouco mais pobres em metais. É difícil testar essas possibilidades sem espectros de alta razão sinal/ruído desses objetos mais internos, entretanto é possível utilizar modelos de SSPs (Bruzual & Charlot, 2003, e.g) para testar efeitos de idade e metalicidade. Instrumentos como Keck/LRIS e VLT/FORS podem ser usados para a futura obtenção dos espectros.

Assumindo uma população velha, de 12 Ganos e $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.4$, o esperado para GCs vermelhos, pode-se investigar as diferenças de idade/metalicidade necessárias para reproduzir o azulamento $\delta(V - I) = 0.07$ aqui observado. Se as diferenças de cor forem puramente devidas à idade, então os GCs mais internos seriam aproximadamente 5 Ganos mais jovens. Se puramente devido à metalicidade, os GCs mais internos seriam mais pobres em metais por aproximadamente 0.25 dex. Tais diferenças poderiam ser facilmente detectáveis com espectros de alto sinal ruído. Na prática, as cores mais azuis são provavelmente uma combinação de diferenças entre idade e metalicidade.

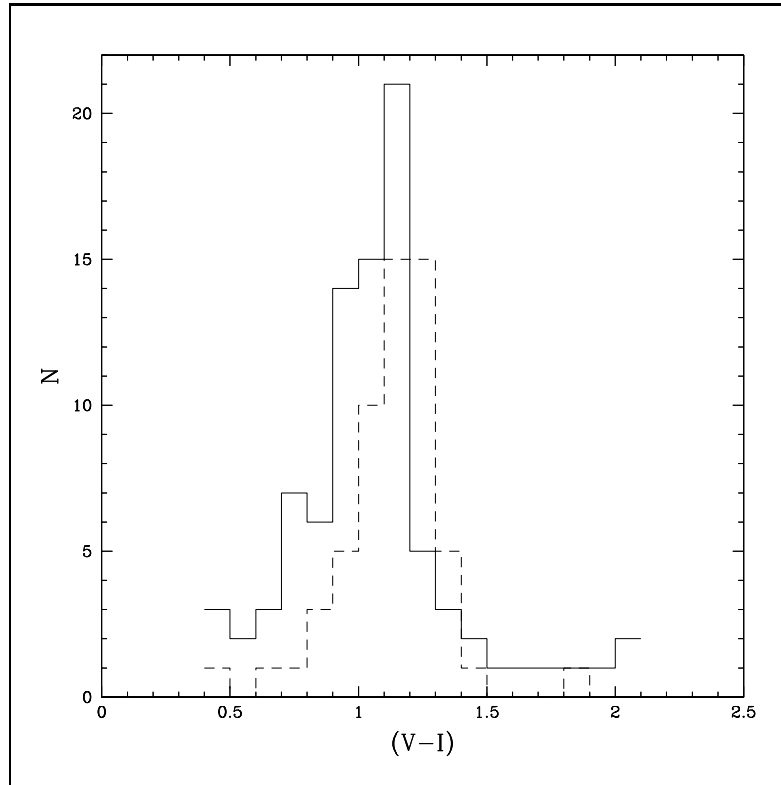


Figura 2.7: Distribuição de cor nas regiões centrais da NGC 5846. Linha Sólida: $r < 20''$; linha tracejada: $20'' < r < 40''$.

2.3 Tamanhos

A determinação de tamanhos de aglomerados extragalácticos é extremamente difícil, mesmo com dados HST, devido a suas dimensões muito pequenas comparadas às distâncias extragalácticas. Kundu & Whitmore (1998) estudando a galáxia lenticular NGC 3115 encontraram que seus GCs azuis são em média $\sim 20\%$ maiores que os GCs vermelhos. Essa diferença de tamanho tem sido encontrada em muitos sistemas como na galáxia NGC 4472 por (Puzia et al., 1999), na M31 por (Barmby et al., 2002) e em amostras de galáxias *early-type* por Larsen et al. (2001) e Jordán et al. (2005). Duas possibilidades foram propostas para explicar a diferença de tamanhos entre GCs azuis e vermelhos. Larsen & Brodie (2003) propõem que ela pode surgir de um efeito de projeção combinado às diferentes distribuições espaciais dos GCs azuis e vermelhos. Levando em conta o resultado observacional que os GCs vermelhos concentram-se nas partes mais centrais de suas galáxias hospedeiras e considerando que todos os GCs do sistema seguem uma relação entre distância galactocêntrica e tamanho similar à dos GCs da Via-Láctea, efeitos de projeção podem levar os GCs vermelhos a parecerem menores em média. Isto porque eles estão, em média, fisicamente mais próximos ao centro da galáxia.

Alternativamente, Jordán (2004) propõe que essa diferença é uma consequência da segregação de massa em GCs individuais combinada com uma dependência em metalicidade no tempo de vida das estrelas. Este autor supõe que o raio à meia massa de um globular é independente da metalicidade e encontra que o raio à meia luz, a uma idade fixa, deve ser diferente para metalicidades diferentes. A uma idade fixa, as estrelas que dominam a luz dos GCs, serão mais massivas em aglomerados ricos em metais (vermelhos), e assim mais centralmente concentradas Jordán et al. (2005), tornando os aglomerados vermelhos menores. A explicação para as estrelas mais brilhantes em aglomerados ricos em metais serem mais massivas do que as correspondentes em aglomerados pobres vem do fato de que um gás rico em metais evolui de forma mais lenta; a uma mesma idade as estrelas mais massivas de um aglomerado pobre em metais já estão numa fase subsequente da evolução se comparadas com as estrelas mais massivas de um aglomerado de alta metalicidade.

Estudos de tamanhos de aglomerados estão até agora concentrados em galáxias próximas ($(m - M) \lesssim 31.5$). Aqui, a proposta é medir tamanhos de aglomerados para a NGC 5846 ($(m - M) \simeq 32.32$), mais distante.

Utilizamos o código ISHAPE de Larsen (1999) para medir os tamanhos dos aglomerados estelares. Esse código convolveu a PSF da WFPC2/HST com modelos de King em 2 dimensões. A imagem resultante é então comparada a aglomerados reais e é derivado um χ^2 do ajuste, bem como uma estimativa intrínseca do tamanho do aglomerado. Para construir a PSF utilizamos uma imagem rica em estrelas da mesma época daquelas listadas na tabela 2.1. Fizemos uso das tarefas IRAF DAOPHOT.PSF e DAOPHOT.SEEPSF para este propósito. Processamos objetos das imagens da PC e da WFC, mesmo que os detectados com a segunda tenham menor resolução. Para maiores informações sobre este processo veja o apêndice A.

Quando os dados da NGC 5846 foram analisados, testamos a sensibilidade dos tamanhos intrínsecos ao parâmetro de concentração do modelo, rodando o ISHAPE para uma amostra reduzida de objetos detectados com a PC, com $c = 5$ e $c = 100$, os valores extremos disponíveis no modelo. Na figura 2.8 temos o R_{eff} (em pc) em função da magnitude V para ambos valores de c no painel superior. Comparamos também os valores resultantes de R_{eff} no painel inferior. Não existem grandes correlações entre tamanho e magnitude, independente do modelo de King (1962) utilizado. Entretanto, uma pequena tendência é vista no sentido de que aglomerados mais brilhantes são também os maiores, quando $V \lesssim 24$. Os valores de R_{eff} se correlacionam muito bem um com o outro, exceto em raios grandes ($R_{eff} > 5$ pc), quando $c = 5$ começa a saturar. Assim, adotamos $c = 100$ para os aglomerados da NGC 5846.

Na figura 2.9 mostramos os tamanhos dos GCs em função de χ^2/χ_0^2 , onde χ_0^2 é o resultado do ajuste de uma função pontual aos objetos (delta de Dirac) ao invés de um perfil de King. Essa razão quantifica a melhora obtida por um modelo de King em relação a uma

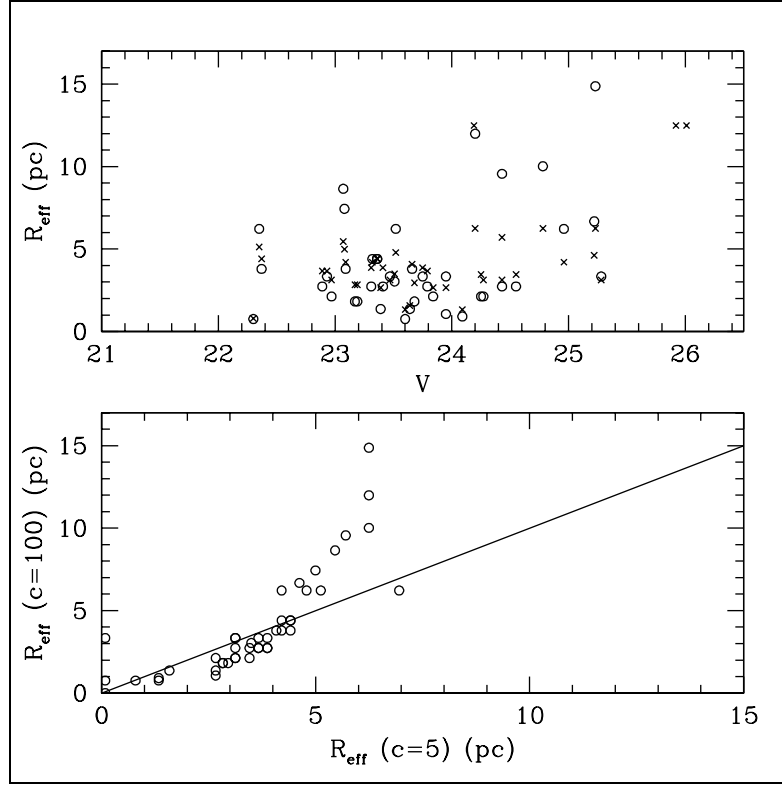


Figura 2.8: *Painel superior*: tamanhos intrínsecos *vs.* magnitude aparente na banda V para $c = 5$ (x) e para $c = 100$ (círculos). *Painel inferior*: relação entre raios efetivos estimado por ambos modelos de King com c extremos.

fonte não resolvida. Todos objetos da amostra, dos três apontamentos, estão mostrados em painéis diferentes. Notamos que quanto maior a razão χ^2/χ_0^2 , menor se torna o raio, como resultado de não se resolver o GC de uma fonte pontual. Em particular, objetos com $\chi^2/\chi_0^2 > 0.8$ são essencialmente não resolvidos, como mostrado por seus R_{eff} sistematicamente menores. Logo, cortamos a amostra em $\chi^2/\chi_0^2 \leq 0.8$.

Agora, exploramos a possibilidade de uma relação tamanho-cor, similar à encontrada por outros autores. Na figura 2.10 mostramos os tamanhos dos GCs, cortados em $\chi^2/\chi_0^2 < 0.8$, em função da cor ($V - I$), novamente separando os diferentes apontamentos HST/WFPC2 em diferentes painéis. Mesmo que um pequeno número de GCs esteja disponível (especialmente azuis), dado o critério de seleção, não existe nenhuma correlação óbvia entre cor e tamanho nos nossos dados. Notem que os maiores GCs são encontrados no apontamento central, especialmente os da PC central: apenas alguns GCs com $R_{eff} > 5$ pc são encontrados nos apontamentos Sul e Norte, que estão localizados a $\sim 2'$ do centro.

Por fim, o tamanho típico dos nossos GCs resolvidos está entre 3 e 5 pc, com apenas alguns maiores que 10 pc. Esses valores são tipicamente maiores que o tamanho médio dos GCs encontrados por Larsen et al. (2001) em seu estudo de galáxias próximas. Essa

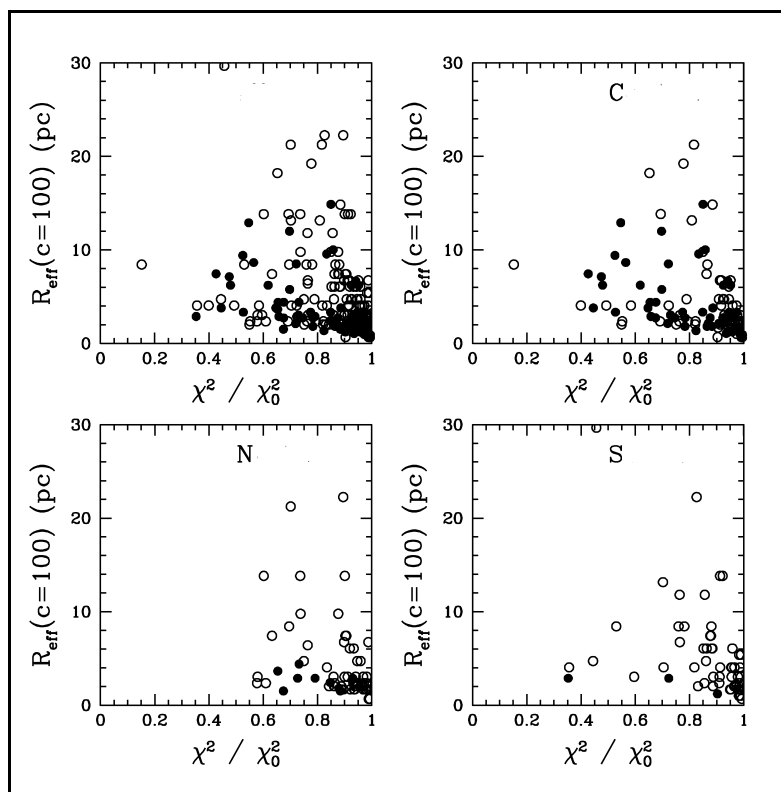


Figura 2.9: Tamanho em função da razão χ^2/χ_0^2 . Símbolos sólidos representam objetos dos *chips* da PC, e símbolos abertos são dos *chips* das WFC. *Painel superior esquerdo*: a amostra completa; *Painel superior direito*: apontamento central; *Painel inferior esquerdo*: apontamento norte; *Painel inferior direito*: apontamento sul.

diferença é provavelmente devida a efeitos de seleção, dado o grande módulo de distância da NGC 5846.

2.4 Aglomerados Globulares e Fontes Pontuais de Raios-X

Mais de trinta fontes luminosas de raios-X associadas espacialmente com aglomerados globulares Galácticos foram observadas com os satélites Einstein, ROSAT, XMM-Newton e Chandra desde 1975 até agora (Verbunt & Lewin, 2004). Observações de alta resolução feitas com ROSAT e Chandra em galáxias elípticas e espirais como NGC 4697, NGC 4472, M31 e NGC 4594, mostram fontes de raios-X associadas com GCs. Irwin et al. (2004) classificam fontes de raios-X ultra luminosas (ULX, do inglês *ultra luminous X-ray sources*) como tendo $L_X = 1 - 2 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ e fontes de raios-X muito ultra luminosas (VULXs, do inglês *very ultraluminous X-ray sources*) como tendo $L_X > 2 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$. Na galáxia *early-type* NGC 1399 mais de duzentas fontes foram identificadas numa região de $8'' \times 8''$;

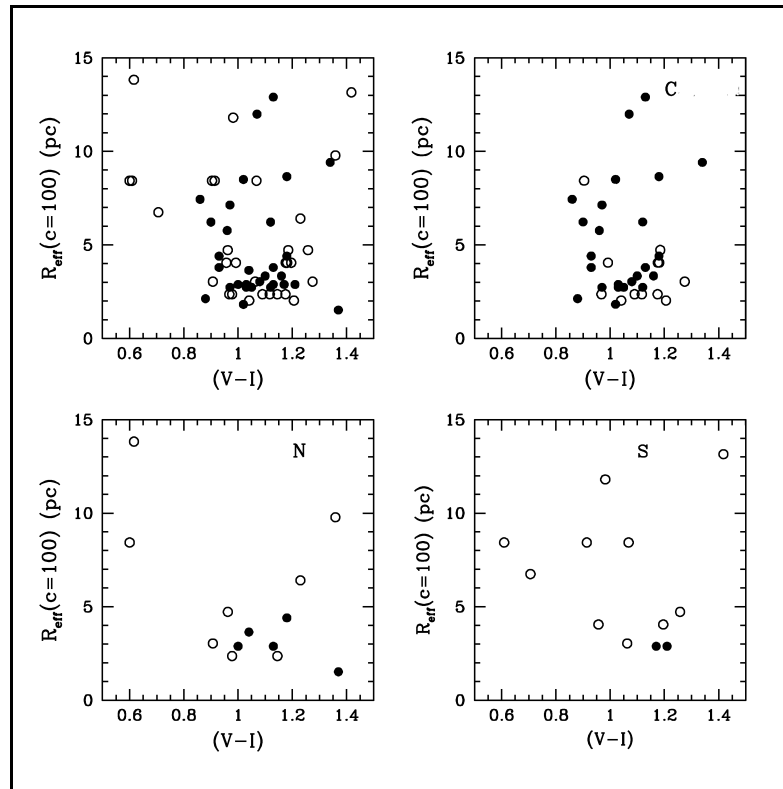


Figura 2.10: Tamanho em função da cor, para todos os 3 apontamentos separados e para o apontamento combinado. Círculos fechados são GCs da PC e círculos abertos são GCs da WFC.

destas 45 estão associadas com GCs e duas tem $L_X > 2 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ (Angelini et al., 2001), logo são VULXs.

Na NGC 5846, 41 fontes individuais de raios-X foram observadas por Trinchieri & Goudfrooij (2002), todas com $L_X > 3 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$. Estes valores de L_X estão acima ou próximos da luminosidade de Eddington para um objeto acretor de $1.4 M_\odot$ (Sarazin et al., 2003), sugerindo que, se causada por uma única binária de raios-X, são devidos à acreção por um buraco negro, ao invés de uma estrela de nêutrons. Entretanto, no caso de aglomerados globulares, mais de uma LMXB pode estar presente, tornando o efeito das VULX menor.

Aqui testamos a hipótese de que algumas das fontes pontuais encontradas por Trinchieri & Goudfrooij (2002) estão associadas com aglomerados globulares nos campos da WFPC2/HST estudados. Coordenadas equatoriais (J2000) foram obtidas das imagens WFPC2 com a tarefa IRAF STSDAS *xy2rd*. A solução astrométrica pode estar sistematicamente afastada da posição do Chandra por um valor desconhecido. Para isso, procuramos por contrapartidas de raios-X para os nossos GCs ao mesmo tempo que encontramos a

Fonte	AR (J2000)	Dec (J2000)	V (mag)	$(V - I)$ (mag)	L_X (erg s^{-1})
8	15:06:29.15	+01:36:28.7	22.8	1.12	9.32×10^{39}
9	15:06:29.19	+01:37:47.9	25.23	2.42	4.2×10^{38}
11	15:06:29.25	+01:36:06.5	23.39	1.17	1.77×10^{39}
15	15:06:30.68	+01:35:57.8	23.62	1.29	4.2×10^{38}
16	15:06:31.05	+01:37:30.4	23.23	1.12	1.22×10^{39}
17	15:06:31.31	+01:37:28.1	24.32	1.26	6.5×10^{38}
24	15:06:34.8	+01:35:08.6	23.16	1.15	7.8×10^{38}

Tabela 2.2: Aglomerados coincidentes com as fontes pontuais de raios-X.

melhor estimativa para este afastamento. Fizemos isto encontrando deslocamentos em ascensão reta e declinação que maximizavam o número de contrapartidas. Os deslocamentos correspondentes foram de $0.8''$ em AR e $0.2''$ em Dec. Estes valores são consistentes com outras comparações astrométricas entre WFPC2 e Chandra (Jordàn, 2004, Xu et al., 2005).

Encontramos fontes GC/raios-X nos 3 apontamentos, embora a maior parte delas estejam localizadas no apontamento central da WFPC2. Na figura 2.11 mostramos a distribuição de aglomerados globulares e fontes de raios-X, com posições já compensadas pelos deslocamentos sistemáticos descritos anteriormente. Encontramos que as coincidências posicionais tendem a se concentrar nas partes mais internas da galáxia. Na tabela 2.2 listamos as principais características das fontes GC/raios-X. As posições são aquelas de Trinchieri & Goudfrooij (2002). Suas cores mostram que eles pertencem à população vermelha, sem exceção. Este resultado concorda com o de Angelini et al. (2001) para a NGC 1399. Notamos também que a magnitude V de 5 dos objetos é mais brilhante que 23.6 mag, o que significa que as fontes GCs/raios-X são mais brilhantes que a média, como previamente encontrado por Sarazin et al. (2003), Kundu et al. (2002) para outras galáxias elípticas luminosas. Considerando seus tamanhos intrínsecos, apenas 3 das coincidências GC/fontes foram resolvidas pelo ISHAPE, duas delas marginalmente; todos três GCs/raios-X são menores que $R_{eff} = 2.8 \text{ pc}$, portanto objetos brilhantes e compactos.

Em termos de propriedades em raios-X, os GCs/raios-X estão entre os objetos mais brilhantes da galáxia hospedeira. A fonte 16 é uma ULX e as fontes 17 e 24 têm L_X próxima de $10^{39} \text{ erg s}^{-1}$, estando no quartil superior em luminosidade das fontes de raios-X da NGC 5846. Estas fontes podem ser uma única binária acretando a um buraco negro ou muitas LMXBs próximas de, ou no limite de Eddington, como discutido por Angelini et al. (2001). Além disso, as fontes 8 e 11 foram classificadas por Trinchieri & Goudfrooij (2002) como regiões estendidas e poderiam, alternativamente, ser compostas de muitas fontes de origens diferentes. Como possuem luminosidades totais $L_X > 2 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$, a contrapartida do GC ainda poderia ser uma ULX.

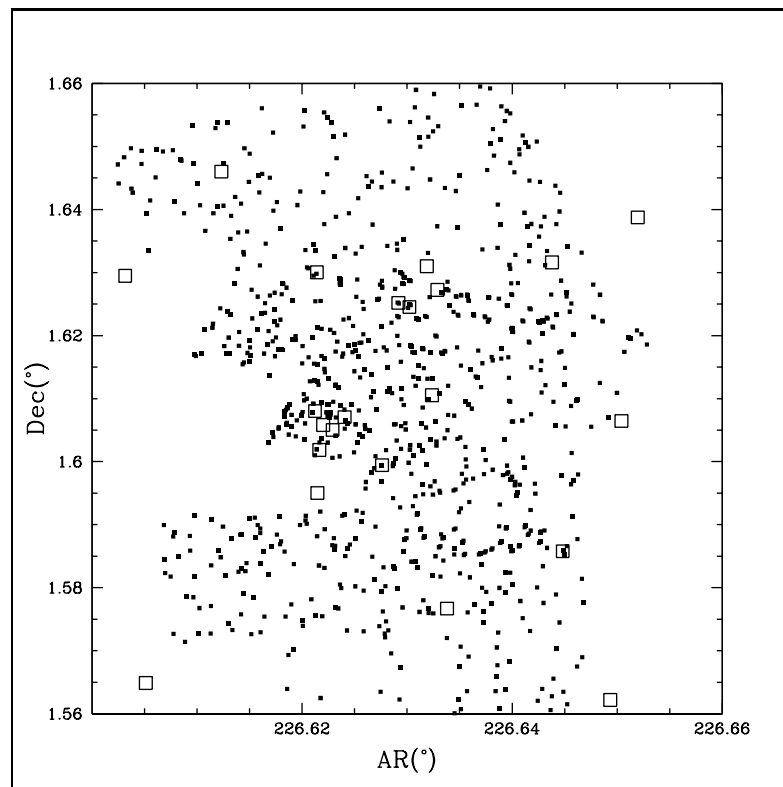


Figura 2.11: Distribuição de raios-X e GCs na direção da NGC 5846. Os pequenos pontos representam os GCs e os quadrados maiores correspondem às fontes pontuais Chandra.

Notamos que a NGC 5846 foi descrita como um objeto complexo em raios-X por Filho et al. (2004). Estes autores reportam que o núcleo rádio VLA e o núcleo em raios-X coincidem, correspondendo a este último a fonte 12 de Trinchieri & Goudfrooij (2002). Esta fonte é uma dentre as muitas outras fontes brilhantes em raios-X. Nós aqui observamos que esta fonte não coincide com o centro óptico.

Capítulo 3

O Sistema de Aglomerados Estelares da NGC 1380

*Capítulo baseado no artigo Chies-Santos, A.L.,
Santiago, B.X. & Pastoriza, M.G. 2007, A&A in press
(Chies-Santos et al., 2007a)*

A NGC 1380 é uma galáxia lenticular (S0) localizada próxima ao centro do aglomerado de galáxias Fornax, a nordeste da NGC 1399, a cD deste aglomerado. Suas coordenadas equatoriais, ascensão reta $AR = 03 : 36 : 27.6$ e declinação $Dec = -34 : 58 : 34$ (J2000). Ela possui uma velocidade radial de 1877 km s^{-1} (NED[†]), um módulo de distância $(m - M) = 31.37 \pm 0.20$ (Ferrarese et al., 2000) e magnitude absoluta na banda B , $M_B = -21.02$ (HyperLeda[‡]). Uma imagem ACS da NGC 1380 é mostrada na figura 3.1. Seu sistema de aglomerados globulares só foi até agora estudado a partir de telescópios em solo (Kissler-Patig et al., 1997b). Estes autores encontram duas populações velhas de aglomerados globulares: uma azul ($(B - V) = 0.65$), similar aos GCs do halo da Via Láctea, e uma população vermelha ($(B - V) = 0.94$), que segue a luz das estrelas da galáxia em elipticidade e em ângulo de posição e está associada com o bojo e o disco da NGC 1380. O estudo de Kissler-Patig et al. (1997b) cobre quase toda a galáxia NGC 1380, encontrando um total de 560 ± 30 GCs. Estes autores, adotando um módulo de distância $(m - M) = 31.35 \pm 0.16$ (della Valle et al., 1998) e uma magnitude absoluta na banda V , $M_V = -21.44 \pm 0.21$, encontram que a frequência específica de seus globulares é $S_N = 1.5 \pm 0.5$. A galáxia S0 NGC 1387, vizinha à NGC 1380 em Fornax, têm $S_N = 3.2 \pm 1.1$ (Kissler-Patig et al., 1997a). Como já mencionado anteriormente a S_N varia de 2 a 6 em elípticas e lenticulares. Assim, a NGC 1380 parece ter uma S_N baixa, mas assim mesmo normal, dentro dos erros esperados para uma S0 pertencente a um aglomerado de galáxias.

[†]NASA/IPAC Extragalactic Database - <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>

[‡]Database for physics of galaxies - <http://leda.univ-lyon1.fr/>

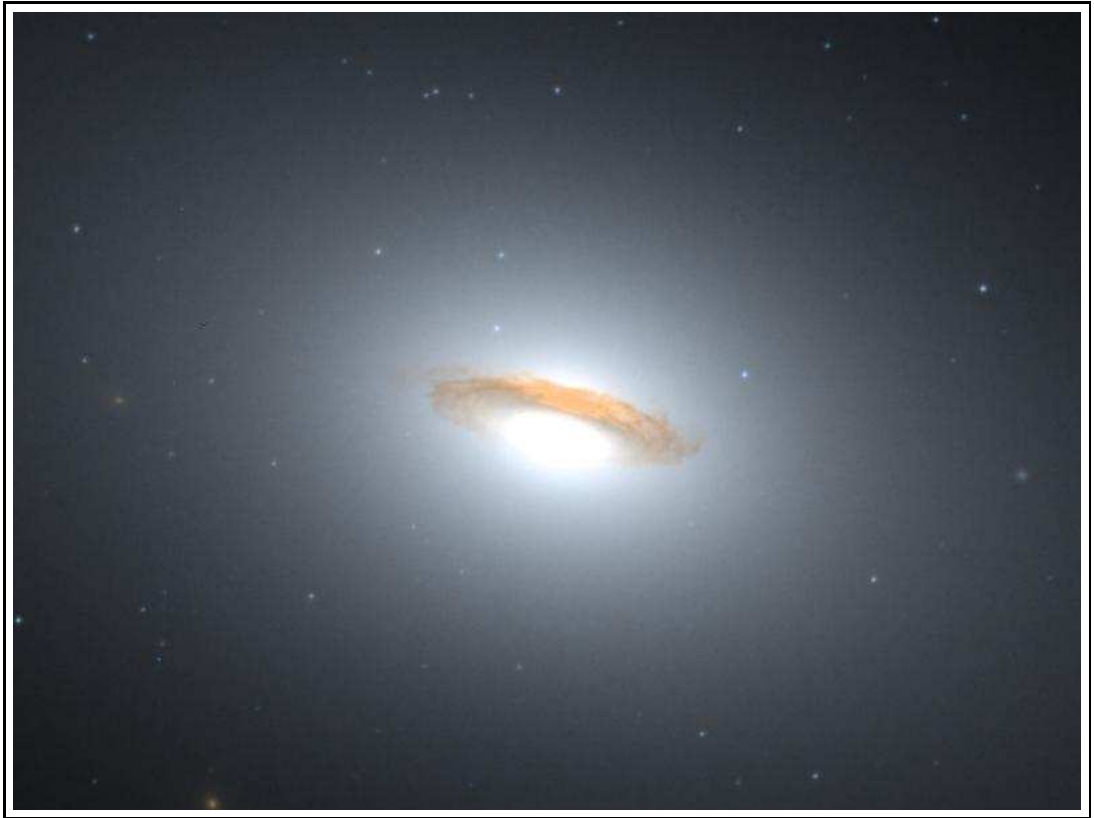


Figura 3.1: Imagem ACS da NGC 1380; campo: 30" de altura por 40" de largura ($1'' = 92 \text{ pc}$); crédito: Andreas Jordán. O norte está a aproximadamente 45 graus a partir da vertical em direção anti-horária.

Nesta parte do trabalho, estudamos o sistema de aglomerados estelares da NGC 1380 com imagens profundas nas bandas B e V da WFPC2/HST. Procuramos por candidatos a aglomerados estelares *Faint Fuzzies*, DSCs e GCs, obtendo magnitudes, cores e medindo tamanhos.

3.1 Dados

Utilizamos imagens da WFPC2 do arquivo público do Telescópio Espacial Hubble do programa de observação 5480. Este programa visava estudar a SN1992A e seus dados nunca foram utilizados para estudar aglomerados globulares. Na figura 3.2 mostramos o campo WFPC2 superposto à imagem DSS da NGC 1380.

Depois de alinharmos as 4 exposições individuais tomadas com cada filtro, as combinamos com a tarefa STSDAS *gcombine* utilizando o algoritmo *ccdrej* para eliminação de pixels espúrios e raios cósmicos. As imagens resultantes combinadas estavam quase livres de raios cósmicos. Utilizamos então a tarefa IRAF DAOPHOT *daofind* para detectar

nome-raíz	filtro	tempo de exposição (s)
U2BB0701T	F439W	1200
U2BB0702T	F555W	900
U2BB0703T	F439W	1200
U2BB0704T	F555W	900
U2BB0705T	F439W	1200
U2BB0706T	F555W	900
U2BB0707T	F439W	1200
U2BB0708T	F555W	900

Tabela 3.1: Observações WFPC2/HST: F439W e F555W são filtros WFPC2/HST que correspondem respectivamente a B e V no sistema Johnson-Cousins.

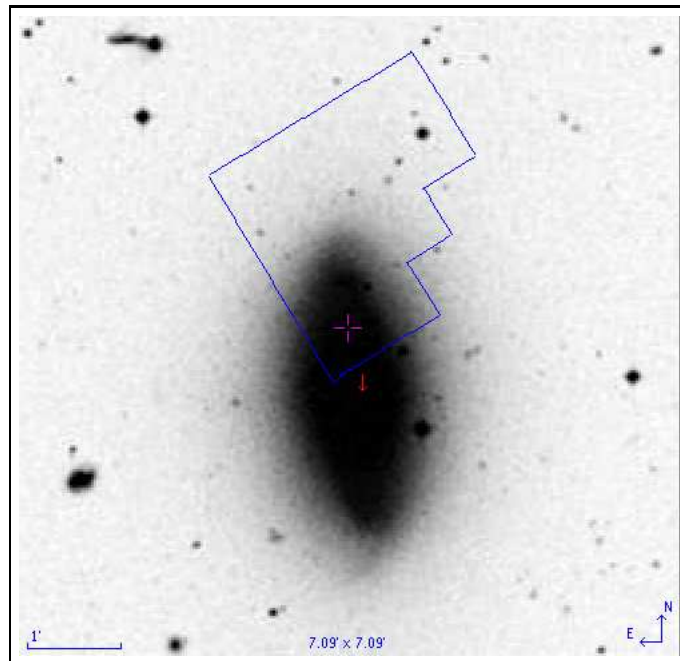


Figura 3.2: Imagem do *Digital Sky Survey* da NGC 1380 com o apontamento WFPC2/HST utilizado neste trabalho sobreposto.

fontes com um limite de 5σ acima do fundo do céu, nas imagens da banda V . Aqui, não construímos um modelo de galáxia para subtrair das imagens originais como no caso da NGC 5846. Isto porque, como não estamos observando o centro da galáxia, não existe tanta contaminação por poeira e o efeito da luz da galáxia não é tão grande. Tendo posições no CCD das fontes detectadas, fizemos fotometria por abertura através da tarefa DAOPHOT *phot*. Adotamos um raio de abertura de 2 pixels e aplicamos uma correção por abertura padrão para um raio de $0.5''$. As correções por abertura foram de 0.31 mag (PC) e 0.18 (WFC) para o filtro F438W. Para o filtro F555W as correções foram de 0.39 mag (PC) e 0.19 mag (WFC). Esses valores foram baseados na Tabela 2 de Holtzman et al. (1995b) .

Seguimos a Tabela 7 de Holtzman et al. (1995a) para converter as magnitudes instrumentais ao sistema padrão de Johnson-Cousins B , V , para um ganho de 7. Corrigimos então por extinção Galáctica adotando valores de Schlegel et al. (1998), $A_B = 0.075$ e $A_V = 0.058$. Um total de 823 fontes foram detectadas e medidas em ambas imagens, nos dois filtros. Na figura 3.3 mostramos o CMD para todas as fontes detectadas. Notem a concentração de fontes no intervalo $0 < (B - V) < 2$. Esse locus torna-se mais espalhado em magnitudes mais fracas devido ao aumento no erro fotométrico.

3.2 Cores

Modelos de populações estelares únicas como Bruzual & Charlot (2003) podem nos dar uma estimativa do intervalo esperado em cor para os candidatos a aglomerados estelares (figura 3.4). Assumimos um amplo intervalo de idades: 1 - 15 Ganos; o limite superior de idade assume que a NGC 1380 sofreu pouca ou nenhuma formação estelar recente. Isso é consistente com sua cor vermelha (Buta & Williams, 1995) e a ausência de gás. Também consideramos um amplo intervalo em metalicidade. O correspondente intervalo em cor é $0.2 < (B - V) < 1.2$. Kissler-Patig et al. (1997b) encontram que os GCs da NGC 1380 têm cores no intervalo $0.4 < (B - V) < 1.2$, e que objetos com $(B - V) > 1.3$ são provavelmente galáxias de fundo. Entretanto, estudos recentes indicam que as cores de DSCs e FFs podem diferir significativamente de GCs típicos. Logo, um intervalo mais flexível de cores é o mais indicado. Cortamos a amostra em cor em $-0.1 < (B - V) < 1.8$ e também aplicamos um corte em magnitude, $V < 26.5$, para não contaminarmos a amostra com objetos com grandes erros fotométricos. Esta seleção acomoda não somente o intervalo em cor esperado para diferentes SSPs mas também o espalhamento causado por erros fotométricos e a possível existência de extinção interna em NGC 1380. Com essas restrições, temos 570 candidatos a aglomerados estelares, os quais são chamados daqui por diante de amostra fotométrica.

Na figura 3.5 temos a distribuição em cor da amostra fotométrica. Notem a presença de três picos: $(B - V) \simeq 0.8, 1.1, 1.5$. Os primeiros dois podem estar associados às duas populações de aglomerados globulares encontrados por Kissler-Patig et al. (1997b), uma pobre em metais ($(B - V) \sim 0.65$) e a outra rica em metais ($(B - V) \sim 0.94$). A diferença em cor dos picos encontrada aqui com as de Kissler-Patig et al. (1997b) é $\delta(B - V) \sim 0.15$. Esta diferença pode ser perfeitamente explicada pelo claro gradiente de cor em NGC 1380 combinado com o fato das regiões estudadas por Kissler-Patig et al. (1997b) e as do presente trabalho não serem as mesmas. Este ponto será tratado mais adiante.

Seguindo a figura 3.4 podemos vincular as idades e metalicidades que correspondem a diferentes subpopulações de aglomerados de acordo com as cores $(B - V)$. Entretanto, esta

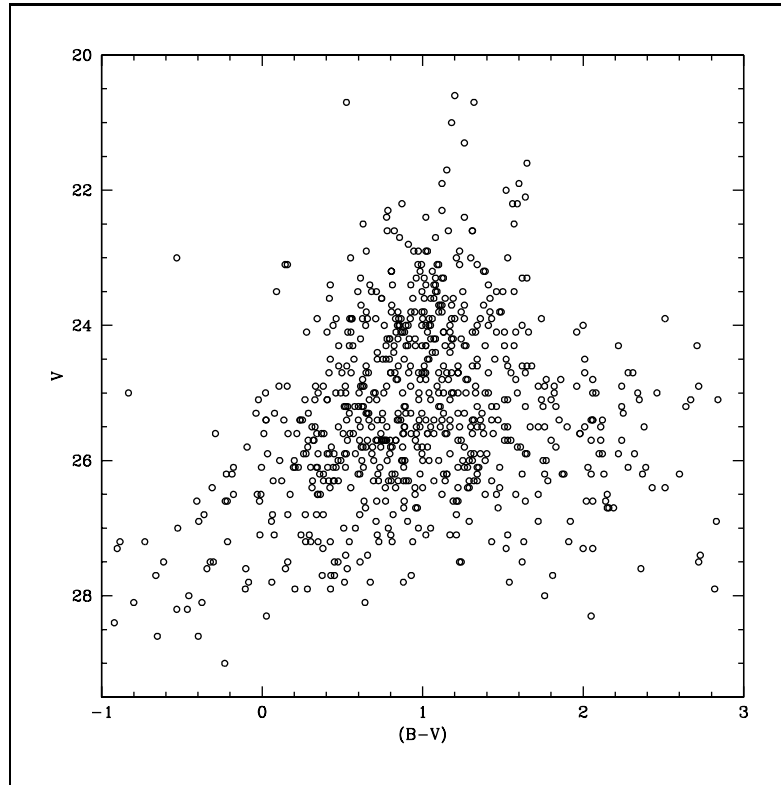


Figura 3.3: Diagrama cor magnitude para todas as fontes detectadas e medidas nas imagens WFPC2/HST.

análise é muito afetada pela degenerescência entre efeitos de variação de idade e metalicidade. Por exemplo, o primeiro pico da figura 3.5, $(B - V) = 0.8$ poderia ser uma população rica em metais ($[Fe/H] = 0.5595$) com 1.3 Ganos bem como uma população de metalicidade subsolar ($[Fe/H] = -0.6392$) com 10 Ganos. O segundo e terceiro picos são definitivamente devidos à uma população velha com metalicidade supersolar, talvez também afetados pela extinção interna.

3.3 Tamanhos

Para medir tamanhos dos candidatos a aglomerados estelares, procedemos de maneira semelhante aos GCs da NGC 5846, aplicando o código ISHAPE de Larsen (1999) a uma das imagens V da tabela 3.1. No Apêndice A encontram-se informações relevantes a este procedimento. Empregamos a mesma PSF WFPC2/HST que utilizamos para a NGC 5846. Comparações desse modelo de PSF com outros construídos de imagens WFPC2 de outras épocas mostram que a PSF é estável com o tempo. Logo, não há problema em tal procedimento.

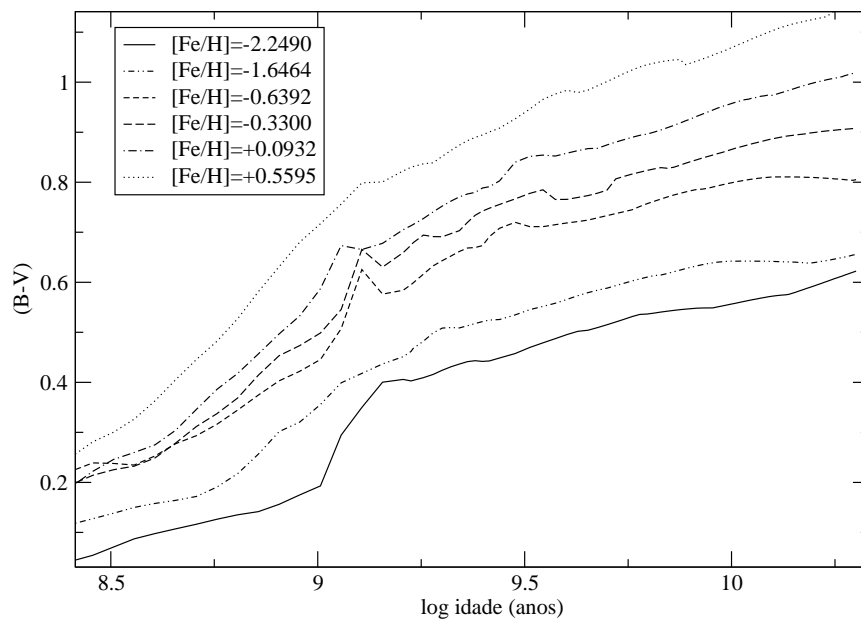


Figura 3.4: Evolução de SSPs Bruzual & Charlot (2003).

Para derivar o melhor ajuste a partir do ISHAPE, aplicamos o código para modelos de King com parâmetros de concentração diferentes: $c = 5, 30, 100$. Conseguimos medir tamanhos para 302 fontes de um total de 823. Aplicando os cortes em cor e magnitudes definidos anteriormente, medimos tamanhos para 198 candidatos a aglomerados estelares. Os ajustes foram obtidos para os três valores de c e por fim adotamos o valor que minimizava χ^2 . Na maioria dos casos este valor correspondia a $c = 100$. Não executamos o ISHAPE nas imagens *gcombinadas*, e sim na imagem de única exposição U2BB0708T, ver tabela 3.1, mesmo perdendo S/N com isto. A razão para tal, é que ao combinarmos as imagens acabamos por degradar a resolução, aumentando os tamanhos aparentes de fontes pontuais. Isso levaria a um aumento artificial no tamanho dos aglomerados medidos com o ISHAPE.

3.3.1 A Contaminação por Galáxias de Fundo

A nossa amostra de objetos resolvidos, i.e, para os quais conseguimos medir tamanhos deve estar contaminada por galáxias de fundo. Esse efeito deve ser quantificado. Os contaminantes mais prováveis são galáxias *early-type* perto do limite de detecção de nossa fotometria, uma vez que essas são mais fáceis de serem tomadas como objetos estelares ou quase estelares. Estimamos o número de galáxias contaminantes contando o número de elípticas e lenticulares na amostra morfológica de Abraham et al. (1996). Estes autores disponibilizam morfologia de galáxias no *Hubble Deep Field* até $I = 25$ ($V \simeq 26$). Aproximadamente

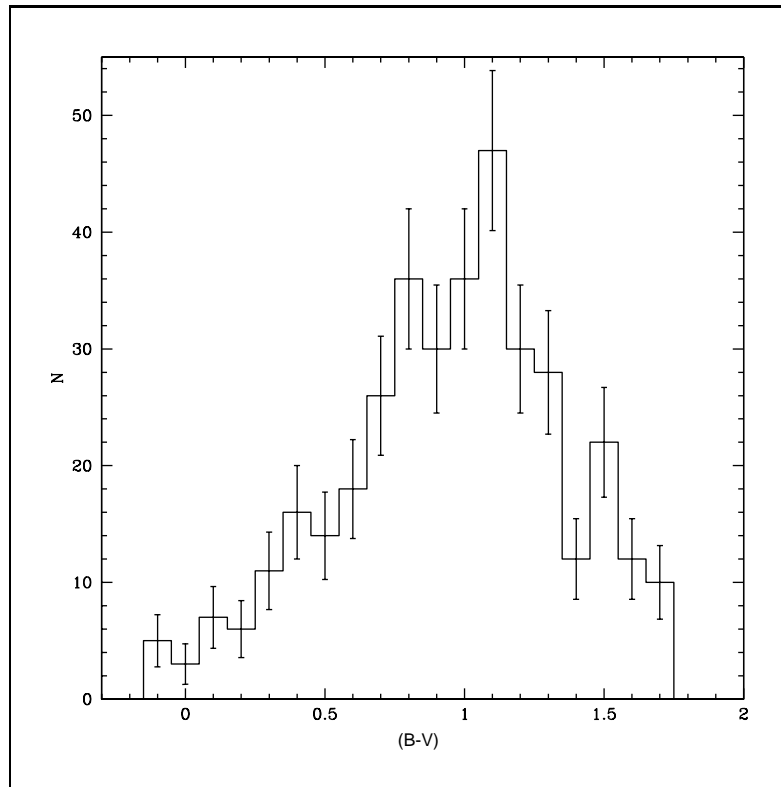


Figura 3.5: Distribuição de cor da amostra fotométrica de candidatos a aglomerados estelares.

$4 \times 10^4 \text{ grau}^{-2}$ das galáxias E/S0 são esperadas no intervalo $23 < I < 25$, que corresponde aproximadamente a $24 < V < 26$. Escalonando para o ângulo sólido da WFPC2, isso corresponde a aproximadamente 40 galáxias da nossa amostra. Este número é muito semelhante ao de fontes com $R_{eff} > 15 \text{ pc}$ à distância da NGC 1380 ($0.16''$) que encontramos, assumindo que estejam localizadas à distância da NGC 1380. Assim, tais objetos são consistentes com galáxias *early-type* brilhantes, mais do que com aglomerados intrinsecamente grandes pertencentes a NGC 1380. Cortamos então a amostra em $R_{eff} < 15 \text{ pc}$ para manter o estudo concentrado na população de aglomerados estelares. Chamamos esses objetos de amostra resolvida de aglomerados. Na figura 3.6 mostramos a distribuição no céu da amostra de aglomerados resolvida bem como dos objetos identificados como galáxias de fundo. Notem que enquanto os primeiros aparentam um claro gradiente de densidade em direção ao centro da galáxia (para baixo), os últimos não mostram tal efeito tão pronunciado.

Esta maneira de remover galáxias de fundo recai na hipótese de que elas tendem a ser aparentemente mais estendidas que os aglomerados estelares. Algumas galáxias *early-type* distantes ainda podem permanecer na amostra de aglomerados estelares, e alguns dos objetos com $R_{eff} > 15 \text{ pc}$ podem ser galáxias anãs pertencentes ao aglomerado de Fornax.

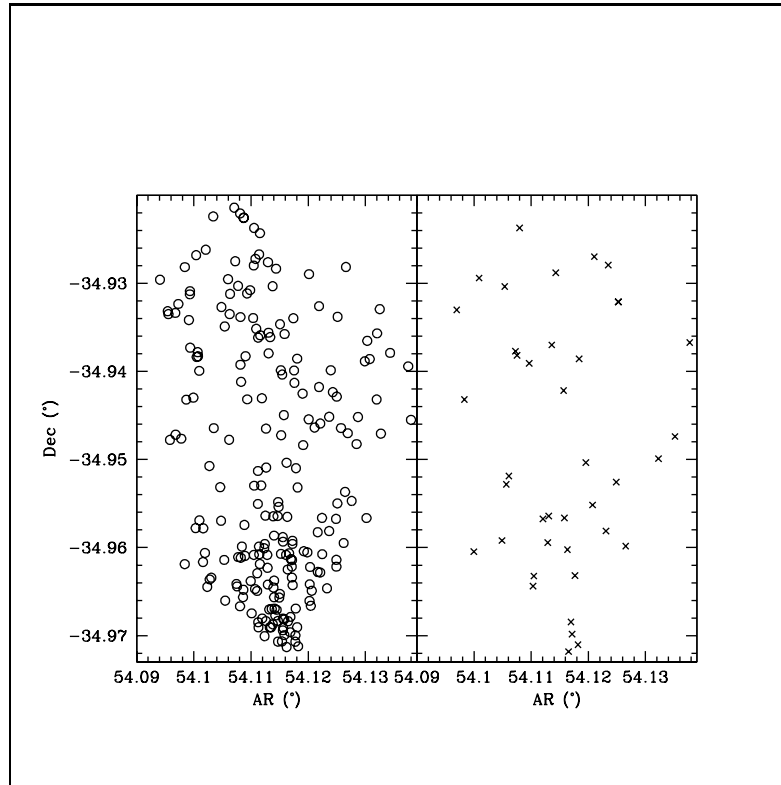


Figura 3.6: *Painel esquerdo*: distribuição no céu da amostra resolvida de aglomerados ($R_{eff} < 15$ pc). *Painel direito*: distribuição no céu dos supostos contaminantes ($R_{eff} > 15$ pc).

Na figura 3.7 graficamos a razão da amostra de aglomerados resolvidos e galáxias de fundo em relação à amostra fotométrica como função da cor. Podemos observar que essa fração é menor para a subpopulação de aglomerados azuis, de fato resultando na eliminação do pico $(B - V) \simeq 0.8$ visto na figura 3.5. Em outras palavras, uma fração maior de aglomerados azuis é não resolvida e portanto cai fora da amostra com tamanhos medidos com sucesso. Este resultado aponta para uma tendência de aglomerados vermelhos serem maiores que aglomerados azuis. Isto será discutido mais tarde. Notem também que objetos com $R_{eff} > 15$ pc cobrem um amplo intervalo em cor, mas possuem uma contribuição proporcionalmente maior de candidatos a aglomerados muito vermelhos, no intervalo de $1.35 < (B - V) < 1.7$. Já no intervalo $0.4 < (B - V) < 1.3$ eles representam $\sim 10\%$ da amostra.

3.3.2 Distribuições de Tamanho e Luminosidade

Na figura 3.8 plotamos a distribuição dos 159 aglomerados resolvidos (objetos com $R_{eff} < 15$ pc) pertencentes a NGC 1380. Essa distribuição claramente mostra dois picos distintos. O primeiro, com $R_{eff} \sim 3$ pc claramente corresponde ao tamanho típico de GCs, como

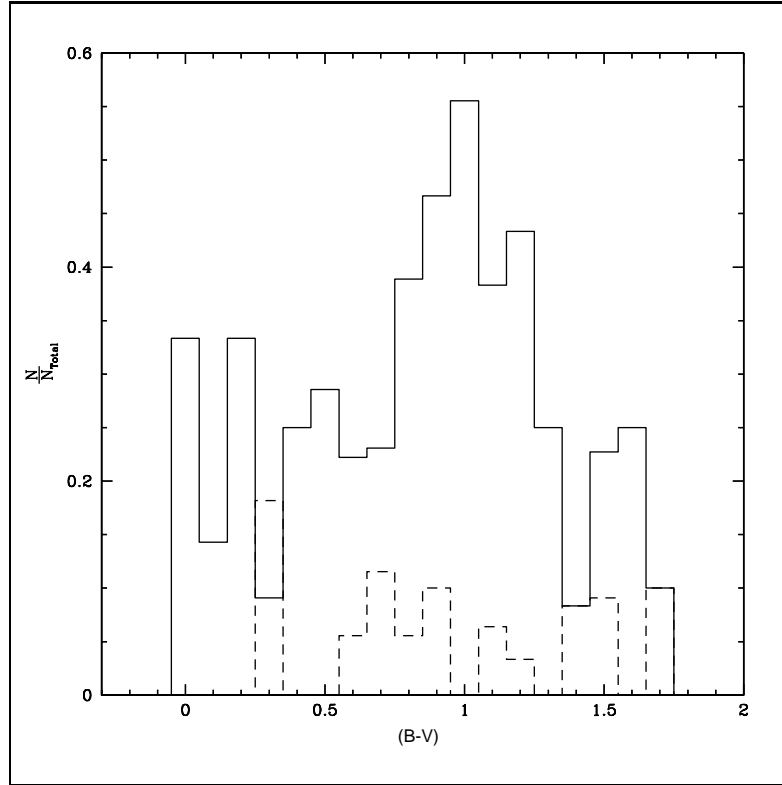


Figura 3.7: Razão entre aglomerados resolvidos ($R_{eff} < 15$ pc, linha sólida) e prováveis galáxias de fundo ($R_{eff} > 15$ pc, linha tracejada) em relação à amostra fotométrica, como função da cor.

visto pela curva sólida, que é a distribuição de tamanhos dos GCs da Galáxia, veja abaixo. O segundo pico está em $R_{eff} \sim 5$ pc; este pode ser a população de DSCs. Existem alguns objetos com $7.5 < R_{eff} < 13$ pc que também poderiam ser os aglomerados difusos descritos por Peng et al. (2006) ou os *Faint Fuzzies*.

É muito importante caracterizar as possíveis famílias de aglomerados estelares presentes na NGC 1380 baseado em suas magnitudes, cores, tamanhos e localização espacial. Um dos nossos principais objetivos é procurar por possíveis DSCs e FFs nesta galáxia.

Assim, comparamos as distribuições de luminosidade e tamanho dos nossos aglomerados com as distribuições conhecidas de GCs típicos em função desses parâmetros. Adotamos as distribuições paramétricas de luminosidade e tamanho de GCs dadas por C. Bonatto & E. Bica (comunicação privada). Neste trabalho os autores ajustam funções gaussianas para a distribuição de raio à meia luz e de magnitude absoluta, M_V , para a amostra total observada até a presente data (Bica et al., 2006) de aglomerados globulares Galácticos. Eles encontram

$$N = (40.1 \pm 9.2) \exp - \frac{1}{2} \left[\frac{R_{eff} - (2.85 \pm 0.18)}{0.95 \pm 0.14} \right]^2, \quad (1)$$

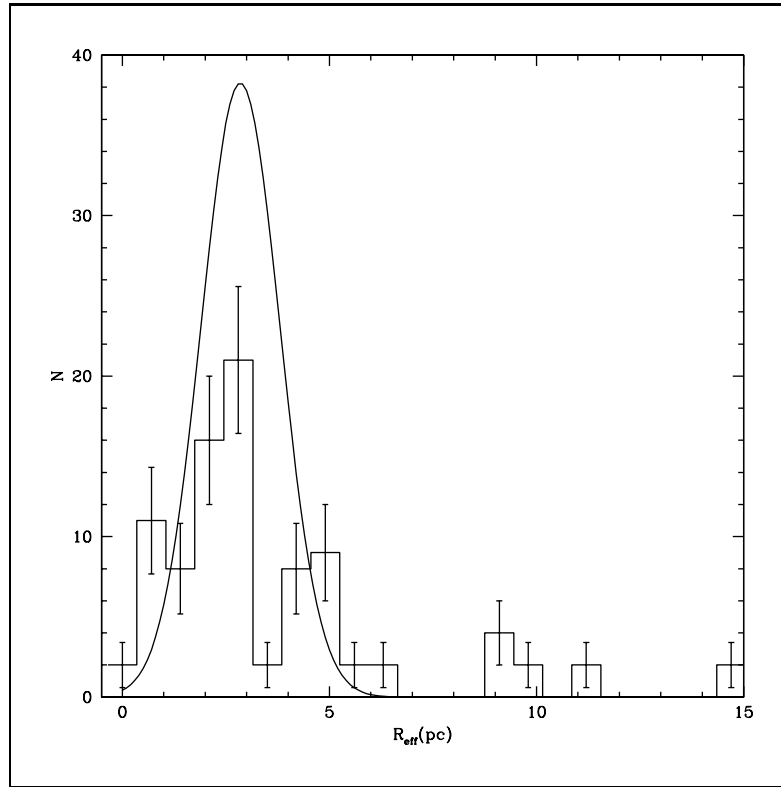


Figura 3.8: Distribuição de tamanho da amostra de aglomerados resolvidos ($R_{eff} < 15$ pc). A gaussiana representa a distribuição de aglomerados globulares Galácticos (C. Bonatto & E. Bica, comunicação privada)

para a primeira distribuição, e

$$N = (19.66 \pm 1.77) \exp - \frac{1}{2} \left[\frac{M_0 + (7.74 \pm 0.1)}{1.35 \pm 0.08} \right]^2, \quad (2)$$

para a segunda.

A distribuição gaussiana de tamanhos ajustada por estes autores está sobreposta à distribuição dos aglomerados da NGC 1380 na figura 3.8. É claro da figura que os picos com $R_{eff} = 5$ pc e $7 < R_{eff} < 13$ pc não são bem representados pela distribuição dos GCs Galácticos. O pico em $R_{eff} = 5$ pc está na ponta da distribuição gaussiana e o outro cai bem longe disso.

Na figura 3.9 temos a distribuição de luminosidade de aglomerados globulares Galácticos (C. Bonatto & E. Bica, comunicação privada) normalizada ao número de aglomerados estelares da NGC 1380 com $R_{eff} < 4$ pc mostrada sobre a distribuição de luminosidade da amostra resolvida de aglomerados estelares separadas por diferentes intervalos de R_{eff} . É claro pela figura que os aglomerados mais extensos aparentam luminosidades mais baixas do que aqueles com tamanhos típicos de GCs ($R_{eff} < 4$ pc). Estes últimos, que compõem

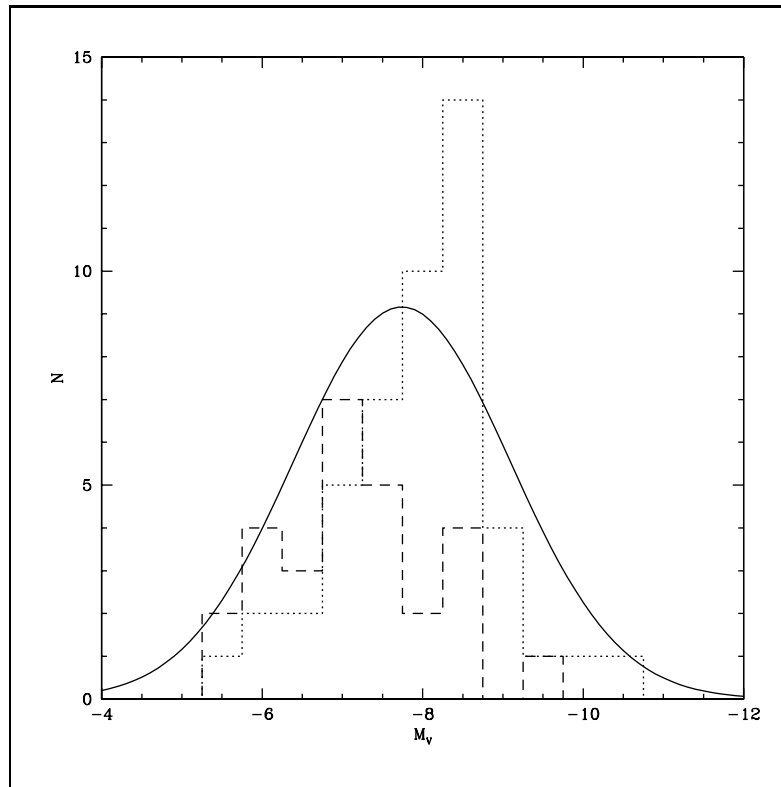


Figura 3.9: Distribuição de luminosidade para a amostra de aglomerados resolvida com $R_{eff} < 4$ pc (linha pontilhada) e $4 < R_{eff} < 15$ pc (linha tracejada). A gaussiana representa a distribuição de aglomerados globulares Galácticos (C. Bonatto & E. Bica, comunicação privada) normalizada ao histograma pontilhado.

o principal pico na distribuição de tamanhos são provavelmente a amostra de GCs genuínos desta galáxia. Notem que nenhuma das distribuições mostradas na figura é perfeitamente descrita pelo ajuste de C. Bonatto & E. Bica (comunicação privada). Os prováveis GCs aparentam um pico mais pronunciado e uma dispersão menor em relação às contrapartidas Galácticas. Existe também uma falta de aglomerados luminosos nessas distribuições, relativa ao que é encontrado na Galáxia. Isto pode ser um efeito de seleção devido à segregação de massa; i.e os aglomerados maiores, e mais luminosos deveriam estar localizados mais para o centro da NGC 1380 e não estão portanto sendo amostrados na imagem WFPC2.

Utilizamos as informações de luminosidade e tamanho disponíveis para os nossos aglomerados, juntamente com as distribuições conhecidas de GCs em função desses parâmetros, para estimar a probabilidade de um candidato a aglomerado estelar ser um aglomerado globular. Adotamos as distribuições paramétricas de luminosidade e tamanho dadas por C. Bonatto & E. Bica (comunicação privada).

Assim, sob a hipótese de que os GCs na galáxia NGC 1380 possuem as mesmas distribuições intrínsecas, é então fácil de computar uma probabilidade relativa de cada

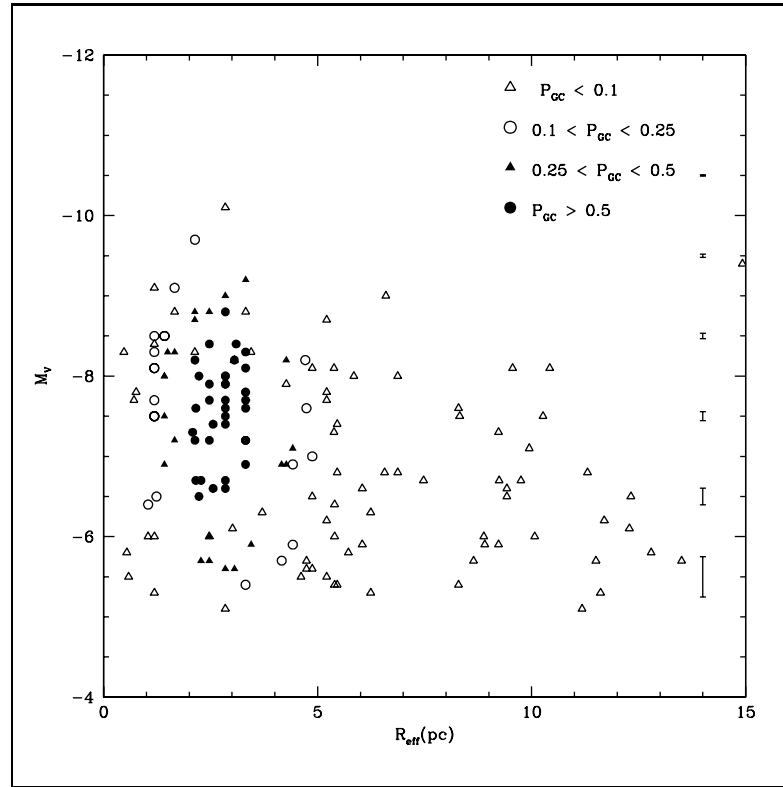


Figura 3.10: R_{eff} em função da M_V . Símbolos diferentes indicam diferentes probabilidades de serem GCs, como indicado. As barras de erro indicam o erro médio em M_V .

aglomerado ser um GC, P_{GC} , cujo valor será $P_{GC} = 1$ para aglomerados com $R_{eff} = \overline{R_{eff,MW}} = 2.85$ pc e $M_V = \overline{M_{V,MW}} = -7.74$.

Na figura 3.10 plotamos R_{eff} como função da M_V . Os três picos distintos vistos na distribuição de tamanhos são também claramente vistos aqui, com espaços vazios em $R_{eff} \simeq 4$ pc e $R_{eff} \simeq 7 - 8$ pc. Para pequenos raios, $R_{eff} < 3$ pc, o ISHAPE encontra soluções discretas, talvez pela dificuldade de atribuir um tamanho para objetos tão pequenos. Os símbolos diferentes indicam diferentes valores de P_{GC} . Objetos com a maior probabilidade de serem GCs $P_{GC} > 0.5$, estão localizados em $R_{eff} \sim 2.5$ pc e $M_V \sim -7.5$, como esperado. Mesmo que não existam grandes correlações entre tamanho e luminosidade, o limite superior em luminosidade varia como função do R_{eff} , no sentido de que aglomerados mais estendidos, com baixos valores de P_{GC} , tendem a ser menos luminosos. Notem que o limite inferior em luminosidade ($M_V \sim -5$) é devido ao corte em $V < 26.5$ mas os limites superiores são físicos. Uma pequena tendência para aglomerados de $R_{eff} \simeq 5$ pc se concentrarem em luminosidades mais baixas do que as típicas, esperadas para GCs, é também observada e já foi discutida acima.

Como já mencionado anteriormente, estudos prévios, Larsen et al. (2001), Jordán et al. (2005) encontraram que a subpopulação de GCs azuis é em média $\sim 20\%$ maior em

R_{eff} do que a subpopulação vermelha. Na figura 3.11 mostramos o R_{eff} em função da cor ($B - V$). Essa tendência aparente entre tamanho e cor é vista da figura, mas parece ser devida à contribuição dos aglomerados com $R_{eff} > 5$ pc e $P_{GC} < 50\%$. Notem a existência de um conjunto distinto de aglomerados vermelhos ($(B - V) > 1$) e com $R_{eff} > 9$ pc que se afastam por completo dessa tendência, estes serão discutidos mais adiante.

Considerando todos os aglomerados estelares com $R_{eff} < 15$ pc, os azuis são de fato $\sim 20\%$ maiores que os vermelhos. Quando separamos a amostra em intervalos de tamanhos, essa tendência é invertida: para o intervalo $0 < R_{eff} < 4$ pc os GCs vermelhos são $\sim 5\%$ maiores que os azuis; para o intervalo $4 < R_{eff} < 8$ pc os aglomerados vermelhos são $\sim 3\%$ maiores e para $8 < R_{eff} < 15$ pc os vermelhos são $\sim 5\%$ maiores. A média ponderada da amostra separada em intervalos de tamanhos é a mesma que a média de toda a amostra. Essas diferenças entretanto, não são estatisticamente significativas. A estatística detalhada da relação tamanho-cor para os aglomerados da NGC 1380 está mostrada na tabela 3.2, onde tamanhos médios e dispersões em torno da média são mostrados para os diferentes intervalos de cor e tamanho. É importante notar que dentre os aglomerados menores ($R_{eff} < 4$ pc), tipicamente globulares os azuis são menos numerosos em comparação com os vermelhos.* Ao analisarmos os aglomerados mais estendidos ($4 < R_{eff} < 15$ pc), não-globulares, os azuis já são mais numerosos que os vermelhos. Assim, a tendência geral dos aglomerados azuis serem $\sim 20\%$ maiores que os vermelhos, encontrada por diversos autores (Kundu & Whitmore, 1998, Larsen et al., 2001) é provavelmente devida a inclusão de aglomerados estendidos, não-globulares em suas amostras e também a não amostragem de muitos dos aglomerados tipicamente globulares azuis (os menores). Temos que ter muito cuidado ao analisarmos tais diferenças devido aos baixos números envolvidos.

3.3.3 Gradientes Espaciais

Agora consideramos possíveis tendências nas propriedades dos aglomerados em função da distância galactocêntrica projetada. Na figura 3.12 plotamos o R_{eff} como função deste parâmetro. Objetos com $P_{GC} > 0.5$ são ligeiramente mais concentrados em direção ao centro da galáxia, enquanto que aglomerados com menor probabilidade de serem GCs estão espalhados nas partes mais externas. Isto pode ser causado pelo fato de que aglomerados menores têm preferência a se localizarem próximos ao centro, como já observado em outras galáxias Larsen & Brodie (2003), Jordán et al. (2005). Notem que há uma tendência geral nos limites superiores de tamanhos como função da distância galactocêntrica (< 10 kpc) no sentido de que o limite superior cresce quando vamos mais para fora, em distância galactocêntrica. Isto é o que seria esperado por efeitos de maré. Por outro lado, existe um

*A partir da figura 3.7 concluímos que uma fração maior de aglomerados azuis é não resolvida em comparação com vermelhos, logo eles tendem a ser menores. Assim, os menores aglomerados azuis não estão sendo amostrados.

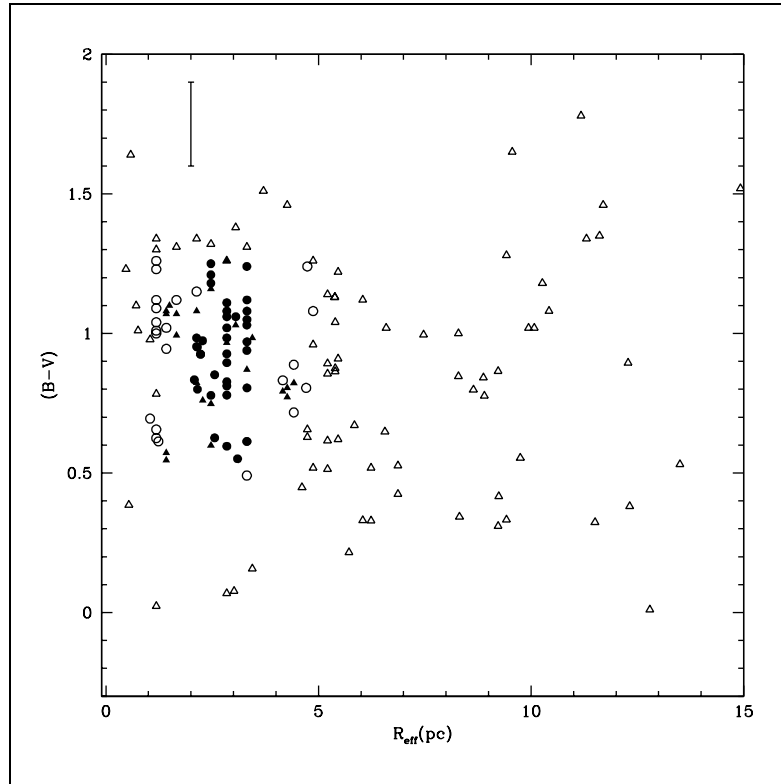


Figura 3.11: R_{eff} como função da cor $(B - V)$. Símbolos diferentes indicam diferentes probabilidades de serem GCs, como na figura 3.10. A barra de erro corresponde a um erro típico em cor.

Azuis: $-0.1 < (B - V) < 0.9$			
	$\overline{R_{eff}}$ (pc)	$\sigma_{R_{eff}}$	NP
Todos	4.25	3.36	87
$0 < R_{eff} < 4$	1.70	1.23	45
$4 < R_{eff} < 8$	5.23	0.83	27
$8 < R_{eff} < 15$	10.15	1.79	15
Vermelhos: $0.9 < (B - V) < 1.8$			
	$\overline{R_{eff}}$ (pc)	$\sigma_{R_{eff}}$	NP
Todos	3.38	3.23	99
$0 < R_{eff} < 4$	1.78	1.13	73
$4 < R_{eff} < 8$	5.43	0.82	14
$8 < R_{eff} < 15$	10.72	1.66	12

Tabela 3.2: Tamanhos dos aglomerados estelares separados por cor, NP é o número de pontos.

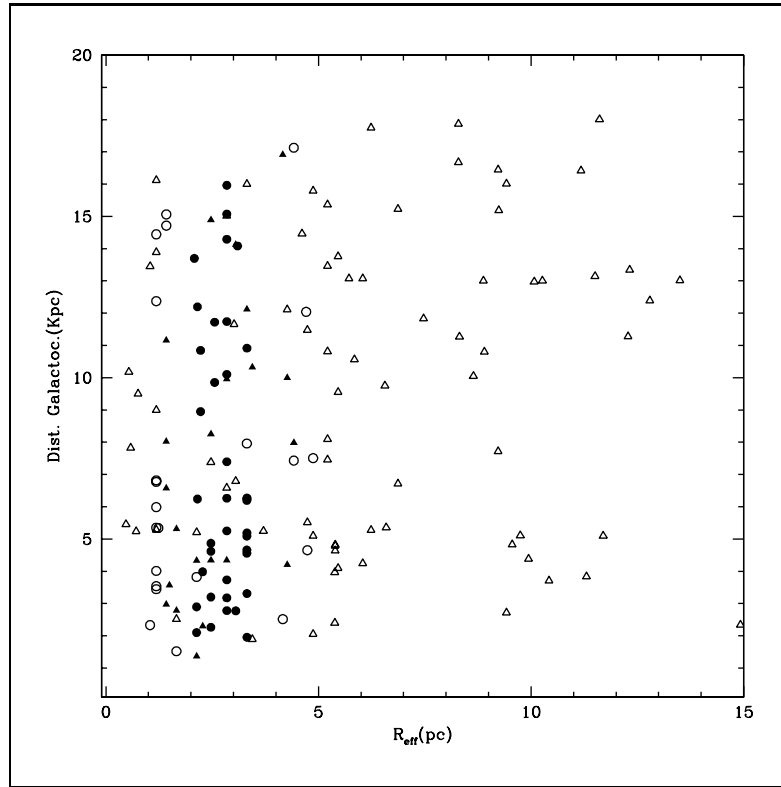


Figura 3.12: R_{eff} em função da distância galactocêntrica. Símbolos diferentes indicam diferentes probabilidades de serem GCs, como na figura 3.10.

grupo de sete aglomerados na parte inferior direita da figura que viola essa tendência geral. Estes ainda compartilham de características comuns: todos menos um são aglomerados vermelhos, vistos na parte superior direita da figura 3.11. Eles também estão muito próximos um do outro em termos de distâncias projetadas, caindo no mesmo *chip* WFPC2. Suas posições na imagem são mostradas na figura 3.13 e suas características constam na tabela 3.3.

AR(deg)	Dec(deg)	V	B	$(B - V)$	R_{eff} (pc)
54.1171570	-34.9621773	24.325	25.328	1.020	9.94
54.1123238	-34.9600945	25.196	26.636	1.458	11.70
54.1128502	-34.9608421	23.344	24.982	1.656	9.55
54.1206474	-34.9649086	24.643	25.966	1.340	11.30
54.1172905	-34.9642792	23.288	24.355	1.084	10.42
54.1082268	-34.9611702	24.749	25.285	0.553	9.75
54.1145058	-34.9670792	24.809	26.070	1.277	9.42

Tabela 3.3: Subconjunto de aglomerados estendidos da figura 3.13.

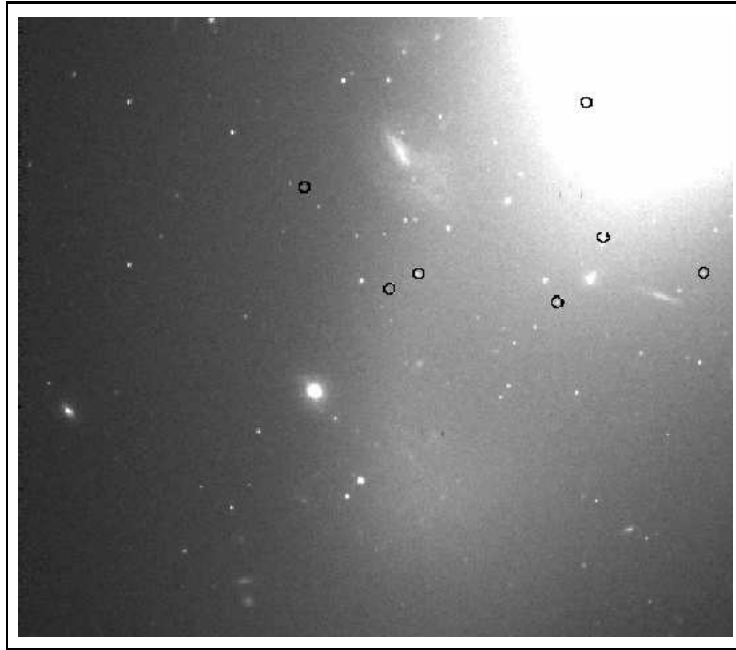


Figura 3.13: *Chip 4* WFPC2/HST. Os círculos representam os 7 candidatos a *Faint Fuzzies*.

Finalmente, na figura 3.14 encontramos uma correlação entre cor e distância galactocêntrica no sentido de que os aglomerados azuis estão localizados preferencialmente nas partes mais externas da galáxia. Esse efeito pode refletir ou um gradiente de metalicidade (aglomerados mais internos são mais ricos em metais) ou a possibilidade da formação estelar na galáxia ter sido mais tardia no disco do que na parte esferoidal. A primeira hipótese tem o suporte de que muitos estudos de galáxias *early-type* indicam um excesso de elementos pesados (Fe, Mg) no centro em relação ao hidrogênio (Rickes et al., 2004). Este gradiente de cor ajuda fortemente a explicar as diferenças de cor entre os nossos picos de cor e os encontrados por Kissler-Patig et al. (1997b), uma vez que este último trabalho usa imagens em Terra que se estendem muito além do centro da NGC 1380, assim amostrando na média objetos mais azuis do que os dados HST que usamos aqui.

Parece que ambas distribuições de cor e tamanho são bimodais, possivelmente trimodais. A bimodalidade em cor é bem conhecida (Brodie & Strader, 2006) e provavelmente reflete diferentes eventos de formação estelar ao longo da história da galáxia hospedeira. Como mencionado anteriormente, a bimodalidade nos tamanhos pode ser interpretada como evidência de populações de GCs, FFs/DSCs. Os últimos tendem a ser menos luminosos e mais estendidos. Entretanto, as duas subpopulações não são claramente distintas em termos de cor, mesmo que o espalhamento nas cores pareça maior para a subpopulação FF/DSC (baixa P_{GC}) do que na subpopulação de GCs (alta P_{GC}) (figura 3.14).

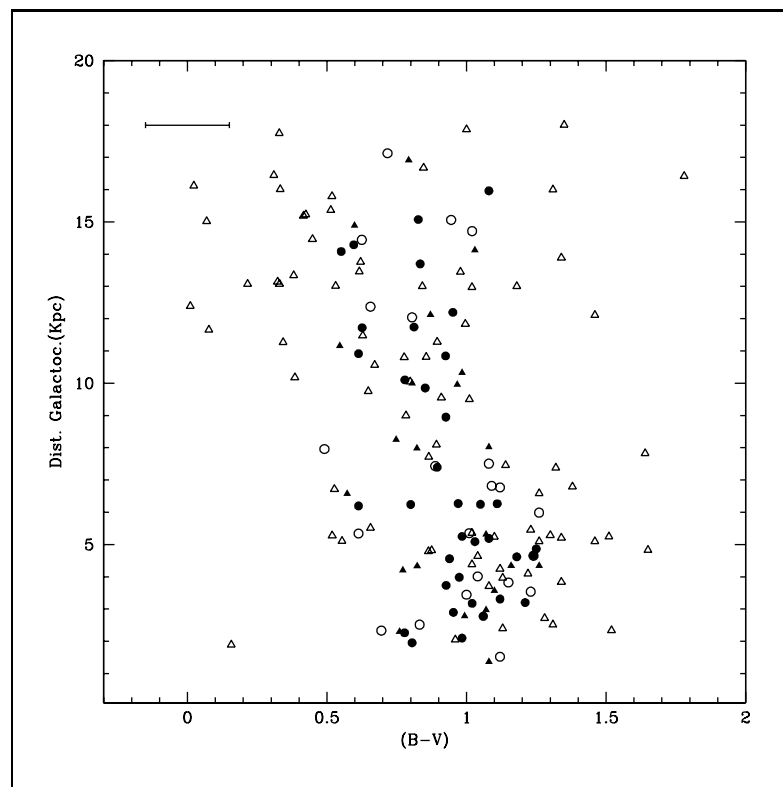


Figura 3.14: Cor em função da distância galactocêntrica. Símbolos diferentes indicam diferentes probabilidades de serem GCs, como na figura 3.10. A barra de erro corresponde a um erro típico em cor.

Capítulo 4

Discussão e Conclusões

Com o objetivo de contribuir para o melhor entendimento de galáxias *early-type* estudamos o sistema de aglomerados estelares de duas delas: da E0 NGC 5846 e da S0 NGC 1380. Aglomerados globulares são os exemplos mais claros de SSPs e vinculam a idade e metalicidade de sua galáxia hospedeira de forma mais simples do que estudos de luz integrada.

Na primeira parte deste trabalho estudamos o sistema de aglomerados globulares da parte central da NGC 5846. Nesta etapa, trabalhamos com uma galáxia elíptica gigante além do aglomerado de Virgo, o que tornou o estudo dos tamanhos dos aglomerados um pouco difícil. Foi a primeira vez que alguém tentou medir tamanhos para aglomerados em uma galáxia com tal distância. Aqui não tínhamos conhecimento de artigos sobre aglomerados mais estendidos (Brodie & Larsen, 2002, Burkert et al., 2005, Peng et al., 2006).

Quando começamos a analisar a NGC 1380, vimos que os aglomerados em galáxias *early-type* podiam ser de outros tipos, não apenas globulares. Como os *Faint Fuzzies* são subpopulações de aglomerados encontradas em galáxias lenticulares, começamos a estudar o sistema de aglomerados da NGC 1380 à luz de tal subpopulação. Logo Peng et al. (2006) publicaram seu estudo de aglomerados estendidos em galáxias *early-type* do *Virgo Cluster Survey* e vimos que o sistema de aglomerados que estávamos estudando compartilhava de características semelhantes a tais aglomerados difusos.

Nas próximas subseções listamos e discutimos os resultados obtidos. As características observadas aqui são também analisadas sob a perspectiva dos modelos de formação de aglomerados estelares.

4.1 NGC 5846

Com imagens WFPC2 V e I do arquivo público do HST detectamos 68 aglomerados globulares na câmera planetária ($r \leq 2kpc$); 23 dos quais identificados pela primeira vez. Combinamos a nossa amostra central com a de Forbes et al. (1996, 1997b) e revisamos as propriedades dessa amostra central. Como o número de objetos adicionados à amostra é

pequeno, não coube, no presente trabalho revisar propriedades gerais como a frequência específica dos globulares. Obtivemos coordenadas e fotometria para os novos GCs e tentamos medir os tamanhos intrínsecos para todos os GCs da amostra combinada. Para muitos, estimativas úteis de raio foram obtidas, especialmente dos objetos da PC. Essa informação está dada em duas tabelas eletrônicas (Chies-Santos et al., 2006a). Também procuramos por contrapartidas em raios-X para os GCs na amostra de Trinchieri & Goudfrooij (2002).

A distribuição de cor se torna mais azulada nas partes mais internas da galáxia, este efeito vai contra o gradiente de metalicidade encontrado para a maioria das galáxias elípticas.

A maioria dos GCs com tamanhos estimados possuem $R_{eff} > 3$ pc; os GCs maiores tendem a ser vistos nas partes mais centrais. De fato, apenas alguns GCs com $R_{eff} > 5$ pc estão localizados fora desse apontamento central. Isto é o oposto ao encontrado por van den Bergh et al. (1991) para os GCs Galácticos. Todas as três galáxias *early-type* analisadas por Larsen et al. (2001) com extensa cobertura espacial apresentam um aumento no R_{eff} médio dos GCs no bin radial mais central, especialmente para a sub-população mais azul. O apontamento central é também o que possui o maior número de aglomerados globulares, então, se os GCs maiores são a ponta da distribuição de tamanhos dos GCs, assim deveríamos esperar um excesso estatístico desses GCs maiores onde existem mais GCs. Entretanto, o excesso de GCs maiores no apontamento central persiste mesmo após corrigirmos por este efeito: os campos mais externos têm aproximadamente 0.4 vezes o número de GCs do apontamento central.

Não existe relação clara entre tamanho e cor, diferentemente do encontrado na NGC 1380 e em Larsen et al. (2001). Mas isso é possivelmente um efeito de seleção uma vez que a NGC 5846 é a galáxia mais distante para a qual tentou-se medir tamanhos, logo medimos tamanhos para poucos aglomerados com tamanhos intrínsecos pequenos, e também nossa amostra possui poucos aglomerados azuis. Por outro lado, Harris et al. (2002) também não encontraram relação cor-tamanho para uma amostra de GCs em NGC 5128.

Comparando posições ópticas de aglomerados globulares com as de fontes de raios-X, encontramos 7 coincidências GC/raios-X. A maioria está localizada na parte central da galáxia. Opticamente, estas contrapartidas tendem a ser brilhantes ($V \leq 23.5$) e compactas, uma vez que apenas uma delas foi claramente resolvida pelo ISHAPE. Todas têm $(V - I) > 1.1$, o que as coloca como membros da subpopulação vermelha. Suas luminosidades em raios-X estão também entre as mais altas da amostra do Chandra, com três delas possuindo $L_X > 10^{39}$ erg s $^{-1}$, outras duas estando entre as fontes 25% mais luminosas e duas estando em complexos da região central com $L_X > 10^{39}$ erg s $^{-1}$.

Os aglomerados globulares com fontes de raios-X aqui encontrados são tipicamente mais luminosos em raios-X que os encontrados em outras galáxias *early-type*. Por exemplo, Angelini et al. (2001) encontraram que 70% das fontes pontuais de raios-X na direção da

NGC 1399 estavam localizadas na mesma posição de GCs, mas todas com $L_X < 10^{39}$ erg s⁻¹. Nossa baixa detecção de GC/raios-X em comparação com a deles, associada à alta fração de fontes luminosas, sugere que o sistema de aglomerados globulares da NGC 5846 é composto de poucas fontes de raios-X, entretanto muito luminosas.

Esta conclusão é mantida quando comparamos a NGC 5846 a outras elípticas, muito luminosas como NGC 4472, ou mais típicas como NGC 4697 (Kundu et al., 2002, Sarazin et al., 2000). Na parte mais luminosa da função de luminosidade em raios-X, Trinchieri & Goudfrooij (2002) encontraram 3 ULXs e 4 regiões estendidas, com alta L_X , de um total de 41 fontes.

Por fim poderíamos especular como se deu a formação da NGC 5846 através das seguintes características aqui observadas: aglomerados maiores e mais azuis sendo encontrados mais para o centro da galáxia. O fato de serem mais azuis pode ser explicado como o resultado de uma fusão rica em gás, formando GCs, semelhante ao cenário proposto por Ashman & Zepf (1992). Nesse caso, a população central e azul ter-se-ia originado durante a fusão dissipativa, sendo a cor então um efeito de idade. Essa possibilidade é corroborada pela descoberta de GCs de idade intermediária na NGC 5846 por Hempel et al. (2003). Alternativamente, essa subpopulação azul no centro da NGC 5846 pode ser de mais baixa metalicidade resultante, por exemplo, da acreção de galáxias anãs, normalmente mais pobres em metais (portanto mais azuis) que as galáxias de maior massa. Acrescente-se que para esta hipótese contribui também o cenário de *Mass Down-Sizing* (Cowie et al., 1996), pelo qual a formação estelar é mais estendida no tempo em galáxias de menor massa. Dessa forma a subpopulação azul em questão pode também ser mais jovem. Já a tendência de serem maiores na região central favorece que esses aglomerados tenham se formado mais recentemente, de forma que efeitos de dinâmica como segregação de massa e efeitos de maré não tenham tido tempo de atuar de forma significativa. Vale notar que a complexa estrutura de emissão em raios-X pode estar associada a um evento recente de fusão ou acreção. A explicação como um efeito de idade é consistente com os resultados de que YMCs (Larsen, 1999), tendem a ter tamanhos um pouco maiores que GCs típicos, chegando até a 20 pc.

4.2 NGC 1380

Analisamos imagens profundas WFPC2/HST da NGC 1380 nas bandas B e V, de onde um total de 570 candidatos a aglomerados estelares foram obtidos. Sua distribuição de cor contém três picos distintos, dois dos quais já haviam sido observados em estudos prévios a partir de imagens em terra (Kissler-Patig et al., 1997b). Para melhor caracterizar tais sub-populações de aglomerados tentamos medir seus tamanhos. Identificamos também três picos na distribuição resultante de tamanhos, o principal deles sendo de aglomerados globulares típicos, os outros dois correspondendo a aglomerados mais estendidos. Comparamos

as distribuições de luminosidade e tamanho de nossa amostra as contrapartidas Galácticas: os aglomerados estendidos da NGC 1380 não são bem ajustados pela distribuição de tamanhos dos GCs Galácticos; eles também tendem a ser menos luminosos que GCs típicos da Galáxia. Designamos uma probabilidade para cada aglomerado estelar de nossa amostra ser um globular, P_{GC} . Procuramos então por correlações entre luminosidade, tamanhos, cores, localização e P_{GC} . Nenhuma correlação forte de M_V versus R_{eff} foi encontrada, embora o limite superior em luminosidade varie em função do tamanho no sentido de que as subpopulações mais estendidas raramente chegam a $M_V \leq -8$. Para a relação tamanho-cor confirmamos que objetos azuis tendem a ser maiores que os vermelhos. Entretanto, tal resultado aplica-se somente à amostra completa de aglomerados deixando de ser válido quando aglomerados globulares ($R_{eff} < 4$ pc) são analisados separadamente. Nenhuma relação tamanho-cor é vista quando as subpopulações estendidas são analisadas separadamente. De fato, observamos que uma fração maior de GCs azuis na amostra fotométrica deixa de pertencer à amostra quando tamanhos são medidos, indicando que entre os aglomerados globulares, um efeito inverso é observado: GCs azuis sendo menores.

Também exploramos correlações com a distância galactocêntrica projetada. Observamos que os GCs ($P_{GC} > 0.5$) estão mais concentrados na parte central da galáxia. Outro fato é que o limite superior em tamanho cresce com a distância ao centro da galáxia. Estes resultados são consistentes com estudos anteriores que encontram que aglomerados estelares menores estão preferencialmente localizados perto do centro, algo que deveria resultar de efeitos de maré crescentes para o centro. Também observamos a tendência de cores mais azuladas com distância galactocêntrica maior. Isto refletiria ou um gradiente de metalicidade ou um gradiente de idade. Esta característica é mais pronunciada para os aglomerados globulares ($P_{GC} > 0.5$), e para as outras subpopulações existe um grande espalhamento nessa relação.

É muito importante interpretar os nossos resultados à luz das novas populações de aglomerados estelares como *Faint Fuzzies* e DSCs, que foram recentemente propostos na literatura. Em particular, notamos que os aglomerados mais estendidos ($R_{eff} > 4$ pc) compartilham de propriedades similares aos DSCs encontrados nas galáxias *early-type* de Virgo por Peng et al. (2006): estão localizados no locus $\mu_V < 20$ mag arcsec⁻² do diagrama M_V vs. R_{eff} . Eles também estão no limite superior de luminosidade em $M_V \simeq -8$. Por outro lado, os candidatos encontrados aqui não são necessariamente mais vermelhos que os GCs mais vermelhos, como sugerido para os DSCs por Peng et al. (2006).

Também descobrimos um subconjunto de aglomerados com $R_{eff} \simeq 10$ pc, $-8 < M_V < -6$, $(B - V) > 1$ localizados nas partes mais internas da NGC 1380 ($2 < R < 5$ Kpc), onde R é a distância galactocêntrica projetada. Estes compartilham de características similares aos FFs descobertos em outras galáxias lenticulares por Larsen & Brodie.

As principais características da amostra de aglomerados estelares resolvidos estão disponíveis em formato eletrônico em Chies-Santos et al. (2007b).

Finalmente, podemos aqui também interpretar os resultados observados e especular como se deu a formação da NGC 1380. A formação e evolução de galáxias lenticulares é um tópico ainda muito nebuloso. Acredita-se que elas sejam o resultado da evolução de galáxias espirais que não tenham mais gás disponível para a formação estelar (Dressler, 1980, Aragón-Salamanca et al., 2006) ou que sofreram interações com outras galáxias, o que transformou sua morfologia de *late-type* para *early-type* (Abraham & van den Bergh, 2001). O fato de encontrarmos muitos aglomerados com tamanhos e luminosidades distintas de globulares típicos nos leva a procurar por explicações evolutivas. Porque estes aglomerados mais estendidos tem preferência por se localizarem em galáxias lenticulares (Peng et al., 2006, Brodie & Larsen, 2002, Chies-Santos et al., 2007a)? Uma pista para encontrarmos uma resposta para essa pergunta está no fato de lenticulares serem encontradas preferencialmente em regiões de alta densidade de galáxias. * Dessa forma, eventos de fusão e/ou interação entre galáxias podem ter um papel relevante. Muitos estudos nas galáxias que contêm *Faint Fuzzies*: NGC 1023, NGC 3384 e mais recentemente NGC 5195 (Hwang & Lee, 2006) sugerem que a formação desses aglomerados estelares difusos deve estar associada à interação dessas galáxias com suas vizinhas (Brodie & Larsen, 2002), entretanto esses encontros devem ter ocorrido muito antes do intervalo de idades dos FFs (Hwang & Lee, 2006). Para as galáxias que contêm DSCs (Peng et al., 2006) apenas duas possuem vizinhas próximas. Fellhauer & Kroupa (2002) através de simulações de N-corpos propõem que os FFs encontrados na NGC 1023 seriam formados através de fusões de aglomerados estelares até virarem super aglomerados estelares. Estes últimos, mesmo sofrendo de forças de maré extremamente fortes, sobrevivem e alcançam idades semelhantes aos FFs.

A correlação entre cor e distância galactocêntrica, no sentido de que os aglomerados azuis estão localizados preferencialmente nas partes mais externas da galáxia é o oposto do encontrado na NGC 5846 e pode refletir um gradiente de metalicidade; os aglomerados mais internos sendo mais ricos em metais. Esta hipótese está de acordo com muitos estudos espectroscópicos de luz integrada em galáxias *early-type* que indicam um excesso de elementos pesados (Fe, Mg) em relação ao hidrogênio no centro (Rickes et al., 2004). Entretanto, pode também refletir a possibilidade da formação estelar na galáxia ter sido mais tardia no disco do que na parte esferoidal (halo).

*Seguindo a relação morfologia-densidade (Dressler, 1980) sabemos que a medida que a densidade aumenta, aumenta a fração de galáxias *early-type* e diminui à de galáxias *late-type*. Dentre as *early-type*, a fração de galáxias lenticulares aumenta ainda mais que a fração de elípticas.

4.3 Considerações Finais e Perspectivas

Espectroscopia de alta resolução nos aglomerados centrais da NGC 5846 seria interessante para comprovar se a diferença em cor entre os mais internos e os um pouco mais afastados do centro seria devida à idade ou à metalicidade. Também seria importante observar espectroscopicamente os candidatos a *Faint Fuzzies* da NGC 1380 para comprovar pela sua dinâmica e metalicidade se eles são mesmo tais objetos.

Deste trabalho resultaram dois artigos publicados na revista *Astronomy & Astrophysics*, um referente à NGC 5846 e outro à NGC 1380, estes encontram-se anexados no final desta dissertação. As referências são respectivamente Chies-Santos et al. (2006b, 2007a).

Apêndice A

Tamanhos de Aglomerados Extragalácticos

Quando falamos em tamanhos de aglomerados estelares extragalácticos nos referimos a raios efetivos (R_{eff}) ou raios à meia luz (R_h). Por R_{eff} subentende-se uma abertura circular que contém metade da luz projetada integrada total do objeto. Para extrair este raio de imagens digitais utilizamos o código ISHAPE de Larsen (1999).

O ISHAPE é utilizado para determinar parâmetros associados à forma de objetos extensos em uma imagem digital através de uma PSF conhecida. A PSF, do inglês, *point spread function*, é uma função que descreve analiticamente a imagem de uma fonte pontual formada por um telescópio/instrumento qualquer. A imagem formada não é pontual devido à interação da luz com os componentes ópticos do sistema telescópio/detector. A PSF é convoluída com perfis analíticos de King (1962) e o resultado é comparado com o perfil observado do objeto cujo tamanho se deseja estimar. Este código é designado para o domínio de objetos ligeiramente extensos, i.e objetos com tamanhos aproximadamente iguais ou maiores que a PSF. Assim, podemos medir tamanhos para aglomerados estelares em galáxias externas que normalmente possuem diâmetros angulares da ordem de décimos de segundos de arco. O ISHAPE assume que o tamanho de um objeto possa ser medido através de alguns perfis analíticos disponíveis (Larsen, 1999). Os parâmetros são derivados por uma minimização iterativa de uma função χ^2 , começando com um estimativa inicial de FWHM, elipticidade, orientação, amplitude e posição. O produto da convolução é subtraído da imagem observada da fonte e o χ^2 é calculado. Quando um χ^2 mínimo for encontrado, o programa converge e uma imagem FITS contendo a fonte, o produto da convolução e os resíduos da subtração é gerada. Para os trabalhos desta dissertação, utilizamos a função analítica de King (1962).

Os perfis de brilho superficial da maior parte dos aglomerados globulares e de alguns aglomerados abertos podem ser ajustados por um modelo de King (1962). Este modelo

aproxima aglomerados estelares por esferas isotérmicas. Ele assume que as estrelas de um aglomerado têm velocidades que são independentes, ou quase independentes, de sua posição no aglomerado.

O modelo de King, adaptado para o ISHAPE e para um modelo circularmente simétrico é dado pela seguintes equações:

$$f(z) = \begin{cases} \left(\frac{1}{\sqrt{1+z^2}} - \frac{1}{\sqrt{1+c^2}} \right)^2 & \text{para } z < c \\ 0 & \text{para } z \geq c \end{cases}, \quad (\text{A.1})$$

$$c = r_t/r_c, \quad (\text{A.2})$$

$$z = r/r_c, \quad (\text{A.3})$$

Onde f é o brilho superficial, c é o chamado parâmetro de concentração, r_c é o raio de *core* e r_t é o raio de maré. O r_c é o raio no qual o perfil de densidade sofre uma inflexão, de forma que a densidade de estrelas é aproximadamente constante para $r < r_c$ e cai rapidamente para $r > r_c$. O r_t é distância ao centro do aglomerado no qual a densidade de estrelas se torna nula.

C é uma constante (a expressão do lado direito da equação A.5).

Como o nosso objetivo final é a obtenção do R_{eff} e não existe expressão analítica simples que relacione R_{eff} com r_c ou a FWHM utilizamos as seguintes expressões, que têm uma precisão de 96% e são válidas para $2 < c < 100$.

$$R_{eff}/r_c \approx 0.547c^{0.486}, \quad (\text{A.4})$$

$$FWHM/r_c = 2 \left[\left(\sqrt{1/2} + \frac{1 - \sqrt{1/2}}{\sqrt{1+c^2}} \right)^{-2} - 1 \right]^{1/2}, \quad (\text{A.5})$$

Apêndice B

Artigos Publicados

The globular cluster system of NGC 5846 revisited: colours, sizes and X-ray counterparts[★]

A. L. Chies-Santos¹, M. G. Pastoriza¹, B. X. Santiago^{1,2}, and D. A. Forbes²

¹ Departamento de Astronomia, Instituto de Física, UFRGS. Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, RS, Brazil
e-mail: ana.leonor@ufrgs.br

² Centre for Astrophysics & Supercomputing, Swinburne University, Hawthorn VIC 3122, Australia

Received 15 September 2005 / Accepted 21 April 2006

ABSTRACT

Context. NGC 5846 is a giant elliptical galaxy with a previously well studied globular cluster system (GCS), known to have a bimodal colour distribution with a remarkably high red fraction.

Aims. Here we revisit the central galaxy regions searching for new globular cluster (GC) candidates, and measure magnitudes, colours and sizes for them. We also search for their X-ray counterparts.

Methods. We use archival Hubble Space Telescope WFPC2 images, from which we modelled and subtracted the host light distribution to increase the available sample of GCs. We performed photometry on the central objects, and measured sizes and coordinates for the entire GC system known in this galaxy.

Results. We detect two dozen previously unknown GC candidates in the central regions. Reliable sizes are obtained for about 60 GCs; their typical effective radii are in the range 3–5 pc. The largest clusters are located in the central regions. We find 7 X-ray counterparts to GCs, most of them in the central region. They are among the most luminous X-ray sources in NGC 5846. They are also optically luminous, compact and belong to the red subpopulation.

Conclusions. The GCS of NGC 5846 is composed of relatively luminous X-ray sources.

Key words. galaxies: individual: NGC 5846 – galaxies: star clusters – X-rays: galaxies

1. Introduction

NGC 5846 is a giant elliptical galaxy at the center of a large group of galaxies. It has a radial velocity of $1714(\pm 5)$ km s⁻¹, a distance modulus of $(m - M) = 32.32(\pm 0.23)$ and $M_V = -21.57$ (Forbes et al. 1996). It is classified as a transition AGN by Merrifield (2004). The globular cluster system (GCS) of this galaxy was studied by Forbes et al. (1996, 1997a) (FBH1 and FBH2 respectively, or simply FBH when we refer to both papers at once). It was found that NGC 5846 has a much lower specific frequency of globular clusters (GCs) than other dominant ellipticals. On the other hand, similarly to many other luminous early-type galaxies, its GCS has a bimodal colour distribution. The blue and red peaks of the distribution are located at $V - I = 0.96$ and 1.17 , respectively, which roughly corresponds to a metallicity of $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.2$ and -0.2 . This behaviour is often interpreted as the result of several episodes of star formation or merging contributing to the GCS formation (e.g. Ashman & Zepf 1992; Forbes et al. 1997b; Côté et al. 1998). Interestingly, FBH found a very high ratio of red to blue GCs. They also observed a smooth radial colour gradient in the sense that the relative fraction of blue GCs increases outwards, something that has also been observed in other galaxies. The central region of NGC 5846, however, is a difficult environment for detecting GCs, even in Hubble Space Telescope (HST) images, given the presence of dust and the high central optical surface brightness. Contrary to other galaxies (e.g. Larsen et al. 2001;

Jordán et al. 2005), no GC size determinations are so far available for NGC 5846.

Chandra observations of NGC 5846 reveal a complex X-ray morphology of the hot gas. These high resolution images confirm the previously reported similarity between the distribution of X-ray and the H α + [NII] emission, indicating that hot and warm gases are linked (Trinchieri & Goodfrooij 2002). The hard X-ray nucleus is coincident with the radio core observed with the VLA, but is displaced relative to the optical centre (Filho et al. 2004). A population of 41 individual X-ray sources was also observed by Trinchieri & Goodfrooij (2002), with X-ray luminosities (L_X) in the range of $3 \times 10^{38} - 2 \times 10^{39}$ erg s⁻¹. The luminosity distribution of these sources appears steeper than in any other early type galaxy studied to date. In our Galaxy about 10% of the luminous X-ray sources are found to be associated with globular clusters, which may harbour X-ray binaries (Verbunt & Hut 1987). A large fraction of the resolved X-ray point sources in early-type galaxies are likely to be low mass X-ray binaries (LMXBs). Angelini et al. (2001) found that about 70% of LMXBs in NGC 1399 have a spatial connection with GCs. For NGC 4697 this fraction decreases to 20% (Sarazin et al. 2001).

The main goal of this paper is to revisit the central regions of NGC 5846 using archival HST images, searching for new GC candidates which may have gone undetected, and investigating their optical properties. We also aim to measure GC sizes and to find any possible link between GCs and X-ray point sources detected by Trinchieri & Goodfrooij (2002). This paper is organized as follows: in Sect. 2 we summarize the observations and basic data reduction. In Sect. 3 we present the photometry and discuss the colour distribution of the central GCs. In Sect. 4

[★] Tables 3 and 4 are only available in electronic form at the CDS via anonymous ftp to cdsarc.u-strasbg.fr (130.79.128.5) or via <http://cdsweb.u-strasbg.fr/cgi-bin/qcat?J/A+A/455/453>

Table 1. Journal of observations – HST/WFPC2 images.

Rootname	Filter	Pointing	Exposure Time (s)
U36J0401T	<i>F555W</i>	Central	900
U36J0402T	<i>F555W</i>		1300
U36J0403T	<i>F814W</i>		900
U36J0404T	<i>F814W</i>		1400
U36J0501T	<i>F555W</i>	North	900
U36J0502T	<i>F555W</i>		1300
U36J0503T	<i>F814W</i>		900
U36J0504T	<i>F814W</i>		1400
U36J0601T	<i>F555W</i>	South	900
U36J0602T	<i>F555W</i>		1300
U36J0603T	<i>F814W</i>		900
U36J0604T	<i>F814W</i>		1400

we determine the sizes of the GCs, assessing the reliability of these measurements. In Sect. 5 we compare the coordinates of the X-ray point sources and the GCs. We present our summary and concluding remarks in Sect. 6.

2. Observations and data reduction

Archival HST *V* and *I* images from program G0-5920 were used to identify and study in detail GC candidates. The images were obtained with the Wide Field Planetary Camera 2 (WFPC2) in the *F555W* and *F814W* filters. There are three different pointings, corresponding to 4 images in each pointing, 2 for each filter, resulting in a total of 12 images, see Table 1.

The spatial scale is $0.046'' \text{ pixel}^{-1}$ and the field is of $37'' \times 37''$ for the planetary camera (PC). For the Wide Field Camera (WFC) the scale is $0.1'' \text{ pixel}^{-1}$, corresponding to a $80'' \times 80''$ field. The images listed in Table 1 had been previously reduced and used to study the GCS by FBH. These authors measured CCD positions, *V*, *I* magnitudes and colours for a sample of a little less than 1000 GC. Our main goal in this work was to investigate in more detail the GC properties in the inner regions of NGC 5846. We therefore carried out a careful analysis of the PC images of the central pointing. The initial data reduction process was similar to that of FBH1. We aligned the pairs of individual exposures with each filter and then combined them using the STSDAS task *gcombine*. In order to identify the GCs in the central region of the galaxy, we carried out detailed surface photometry of the host galaxy. We first built a model of the luminosity distribution of the galaxy using the STSDAS task *ellipse* for each filter. We then subtracted these models from the *V* and *I* PC images that resulted from *gcombine*. The results of the subtraction reveal a very conspicuous filamentary dust morphology as well as numerous bright compact objects. The sample selection was made by eye using the *V* subtracted image.

Figure 1 shows the model subtracted image in the *V*-band. The visually selected objects are marked on the image. We selected a total of 196 sources on the subtracted image, 31 of which are in common with FBH. Despite our careful selection, this number is likely to be only a fraction of the total, since it is very complex to determine the exact number of extragalactic globular clusters because of the difficulty to detect them against the bright background of the central regions of their host galaxies.

From the subtracted image we notice that the dust is strongly concentrated in the very center of the galaxy, having an asymmetric distribution. In this dusty part of the galaxy the stellar objects appear completely absent. FBH2 suggested that the dust is the result of a past merger or accretion of a gas-rich galaxy and

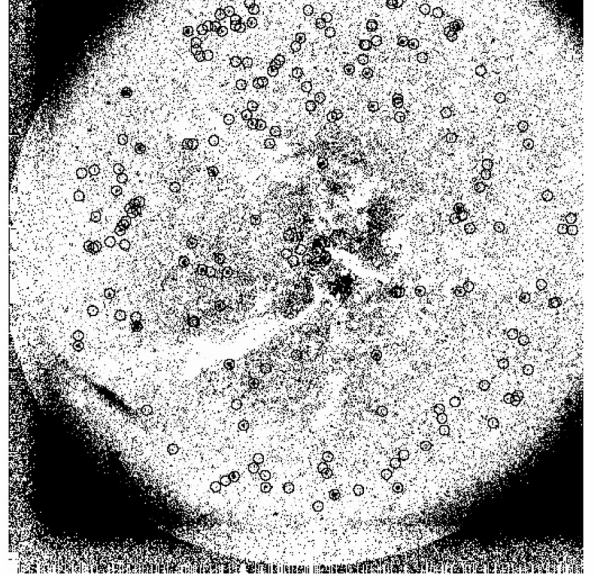


Fig. 1. The result of the subtraction of the model from the *gcombined V* image in grey scale, $37''$ on a side. The eye selected GCs candidates are indicated by circles. North is at about 70° from the vertical going counterclockwise.

provides the fuel to the compact radio core, which can be seen in both *V* and *I* images.

3. Photometry

Having CCD positions we then measured magnitudes using the APPHOT task *phot*, in both *gcombined* images and the galaxy subtracted ones. In Fig. 2 we show the *V*, *I* colour magnitude diagrams (CMD) for all visually selected compact objects obtained from both images. Both CMDs exhibit a well defined locus of GCs spanning the range $22.5 < V < 27.5$ and $0.5 < V - I < 1.9$. The mean $V - I$ colour of ~ 1 is typical of GCs. A total of 68 GC candidates are within these CMD limits. This GC locus shifts blueward at fainter magnitudes as a selection effect, since the sample was visually selected in the *V* image. Also, the colour dispersion increases substantially for $V > 26.5$ due to photometric errors. Notice that the dispersion in colours tends to be smaller in the subtracted images, attesting to the higher photometric precision achieved when subtracted images are used. We therefore used the subtracted images for our photometry and cut the GC sample at $V = 26.5$.

In order to have photometric measurements as consistent as possible with those from FBH1, our photometry was carried out in a similar way; we adopted a 2 pixel aperture radius, the aperture corrections to a $0.5''$ radius were of 0.39 mag (for *F555W*) and 0.54 mag (*F814W*). These values were based on Table 2 of Holtzman et al. (1995a). To convert to the standard Johnson-Cousins *V*, *I* system for a gain ratio of 7 we followed Table 7 of Holtzman et al. (1995b). We finally corrected for Galactic extinction: $A_V = 0.11$ and $A_I = 0.05$ (Faber et al. 1989), in order to be consistent with FBH previous work (the Schlegel et al. 1998 values are $A_V = 0.182$ and $A_I = 0.107$).

Since our final goal is to combine our inner GC sample with the larger sample by FBH we compared our magnitudes in both filters for the common objects. A small offset of ≈ 0.1 mag was found for both filters. Our final calibrated magnitudes were converted to the FBH1 photometric system by fitting a linear

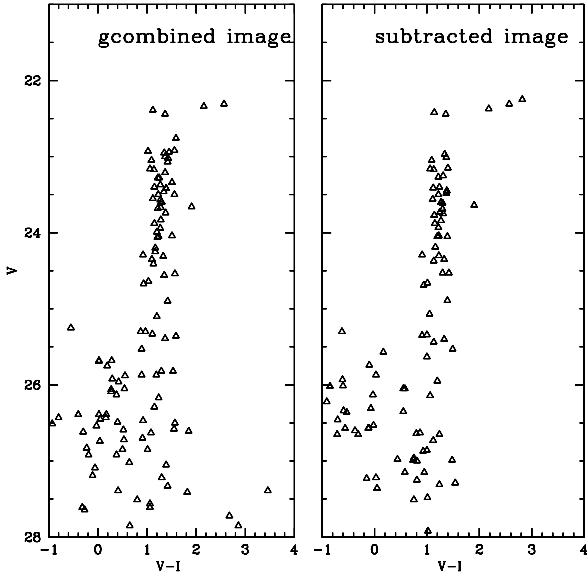


Fig. 2. Left panel: CMD for the *gcombined* image; right panel: CMD for the subtracted image.

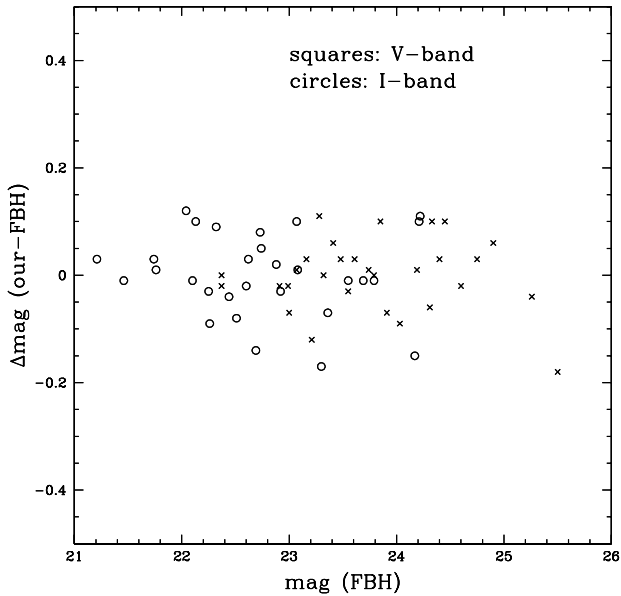


Fig. 3. Photometric differences after comparison between our photometry and that of FBH, after correcting for the fitted linear relation (see text).

relation of the type $m_{\text{FBH1}} = am_{\text{our}} + b$, where m_{FBH1} is the magnitude as measured by FBH1 and m_{our} is our corresponding measurement. For the *V*-band coefficients we obtained $a = 0.984$ and $b = 0.287$; for the *I*-band coefficients we found $a = 0.947$ and $b = 1.232$. The fits were carried out only for GC candidates with quality photometry ($V < 26.5$). In Fig. 3 we show the residual differences as a function of magnitude for both filters. The scatter of the residuals are ± 0.07 for the *V*-band and ± 0.08 for the *I*-band.

3.1. Central colour distribution

Colour distributions are very useful for characterizing GC populations. They have been observed to display a bimodal pattern in large early-type galaxies either in clusters or in the field (Elson & Santiago 1996 and Rhode & Zepf 2004). NGC 5846

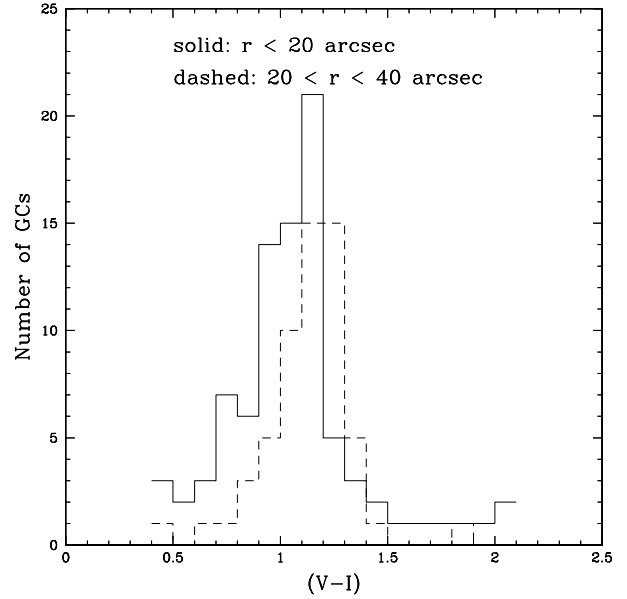


Fig. 4. Colour distributions at the central parts of NGC 5846. Solid line: $r < 20''$; dashed line: $20'' < r < 40''$.

also presents this behaviour, as already pointed out by FBH. These authors also find a variation in the GC colour distribution as a function of galactocentric distance, which they interpret as a metallicity gradient, in the sense that metallicity decreases outwards. Here we take advantage of the increased data sample in the inner regions of the same galaxy and review the GC colour distribution.

Figure 4 shows the colour distribution of GCs with $V < 26.5$ for two different rings from the center. Both colour distributions shown are dominated by typical GC colours, ranging from $0.6 \leq (V - I) \leq 1.5$, showing that the GC sample is not strongly contaminated. The inner population is shifted slightly towards bluer colours relative to the one located further out from the center of the galaxy.

One might think that dust could be making the GCs in the outer regions redder. Even though there is dust in this region, as revealed by the lighter spots in Fig. 1 (since its colour is inverted), these spots are clearly more pronounced close to the centre, and therefore should be affecting the inner ($r < 20''$) GCs more than the ones in the outer regions ($20'' < r < 40''$). Thus, correction for dust would actually increase the colour difference between the two regions being compared.

The inner regions have a mean $(V - I) = 1.17 \pm 0.04$ compared to $(V - I) = 1.24 \pm 0.07$ in the next radial bin. Thus the difference ($\delta(V - I) = 0.07$) is small enough to place both regions within the metal-rich GC subpopulation and it is of only marginal statistical significance. We note that the original data of FBH also had a hint for bluer colours at the very center of NGC 5846 ($r < 2$ kpc), as indicated in their Fig. 5. If real it could be due to a combination of age and/or metallicity effects. The inner GCs could be slightly younger or slightly more metal-poor. It is difficult to test either possibility without high signal-to-noise spectra of these inner GCs, although we may use an SSP model (e.g. Bruzual & Charlot 2003) to assess age and metallicity effects. Assuming an old population of 12 Gyrs and $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.4$ (i.e. similar to that expected for red GCs), we can investigate the age/metallicity differences needed to reproduce a $\delta(V - I) = 0.07$ bluer colour. If the colour difference is purely due to age, then the inner GCs are about 5 Gyrs younger. If purely due to metallicity,

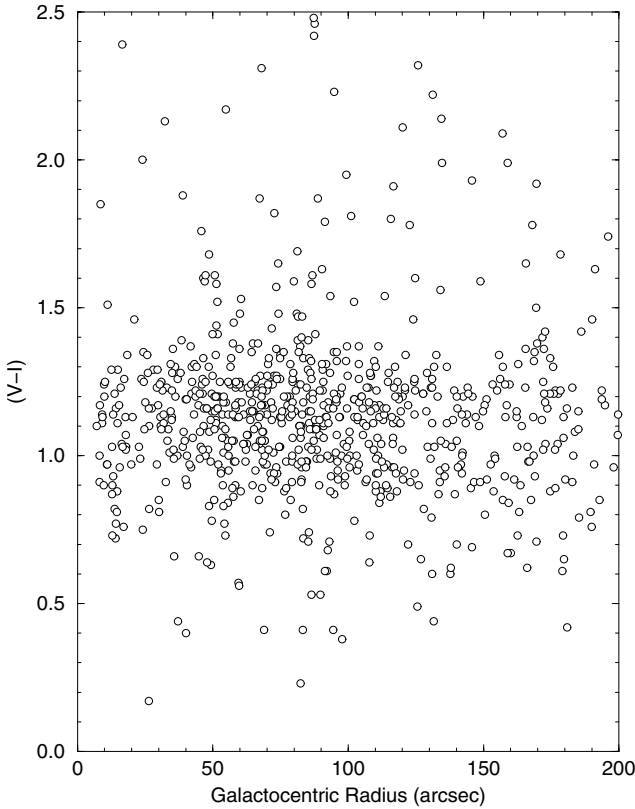


Fig. 5. $(V - I)$ colour of GCs vs Galactocentric radius.

the inner GCs would be more metal-poor by about 0.25 dex. Such large differences would be easily detectable with high S/N spectra. In practice, the bluer colour is likely to be a combination of age and metallicity differences. In Fig. 5 we show a plot of $(V - I)$ as a function of galactocentric radius.

In Table 3 we list the positions and photometry for the entire GCS of NGC 5846.

4. GCs sizes

The determination of extragalactic GC sizes is extremely difficult, even in HST data, given their extremely small sizes compared to the extragalactic distances. Larsen & Brodie (2003) find that the blue GCs are, on average, larger than the red ones. Red GCs are generally smaller than blue GCs by about 20% (Larsen et al. 2001). In the central parts of galaxies this difference is well pronounced. The effect may, at least in part, arise from a GC size against 3D distance relation, combined with different radial distributions between blue and red GCs (Larsen & Brodie 2003). Studies of GC sizes are so far largely concentrated on nearby galaxies ($m - M \simeq 31.5$ or less). In this section we attempt to derive sizes for the NGC 5846 ($m - M \simeq 32.32$) GCs.

We use the ISHAPE code described in Larsen (1999). This code convolves the WFPC2/HST point spread function (PSF) with model King profiles in 2 dimensions. The resulting model image is then compared to the real GCs and a χ^2 is derived from the fit, along with an estimate of the GC's intrinsic size. We have used an image taken at about the same time as those listed in Table 1 to construct the PSFs for the PC and WFC. We used DAOPHOT.PSF and DAOPHOT.SEEPSF tasks for this purpose. We processed both PC and WFC objects, despite the lower resolution and stronger undersampling of the latter. We tested the sensitivity of the intrinsic sizes to the model concentration

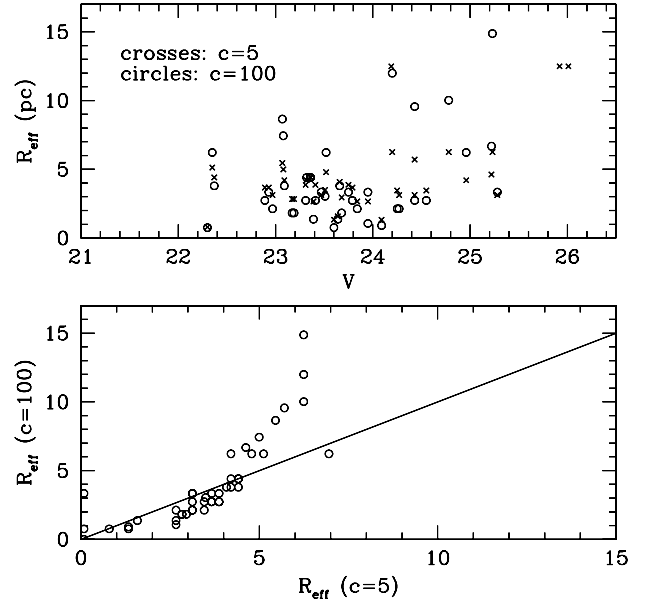


Fig. 6. Upper panel: intrinsic size vs. V -band magnitude relation; Lower panel: relation between effective radii as estimated from two extreme King models.

parameter by running ISHAPE for the PC sample both with $c = 5$ and $c = 100$, which are the extreme values available in the code. In Fig. 6 we show the effective radii (R_{eff}) in parsecs as a function of V magnitude for both c values. We also compare the resulting R_{eff} values. We see that there is no strong trend between size and magnitudes regardless of the King model chosen. However, a slight trend in the sense that brighter GCs are also larger ones is seen brighter than $V \simeq 24$. Also notice that the R_{eff} values correlate with one another, except at large radii where the $c = 5$ models start to saturate. We therefore adopt the $c = 100$ model in this paper.

In Fig. 7 we plot the sizes of GCs as a function of χ^2/χ_0^2 , where χ_0^2 is the result of fitting a point source (delta function) rather than a King profile to the objects. Thus, this ratio quantifies the improvement obtained with the King model relative to an unresolved source. All objects in the sample from the three pointings are shown in the different panels. We note that the larger the χ^2/χ_0^2 the smaller becomes the radius, as an effect of not resolving the GC from a point source. In particular, objects with $\chi^2/\chi_0^2 > 0.8$ are essentially unresolved as attested by their systematically small R_{eff} . We therefore cut the sample at $\chi^2/\chi_0^2 \leq 0.8$.

Next we explore the possibility of a size-colour relation similar to that found by previous authors. In Fig. 8 we plot the sizes of GCs, cut at $\chi^2/\chi_0^2 < 0.8$, as a function of $(V - I)$ colour, again separating the different pointings in different panels. Even though a relatively small number of GCs is available (especially blue GCs), given our selection criteria, there is no obvious trend in our data for a relation between size and colour. Notice, however, that the larger GCs are seen in the central pointing, specially at the central PC: only a couple of GCs with $R_{\text{eff}} > 5$ pc are seen in the South or North pointings, which are located $\sim 2'$ from the center.

Finally, the typical size of our resolved GCs is between 3 and 5 pc, with only a handful being larger than 10 pc. These values are typically larger than the median GC sizes found by Larsen et al. (2001) in their study of nearby galaxies. The difference is likely caused by selection effects, given the larger distance

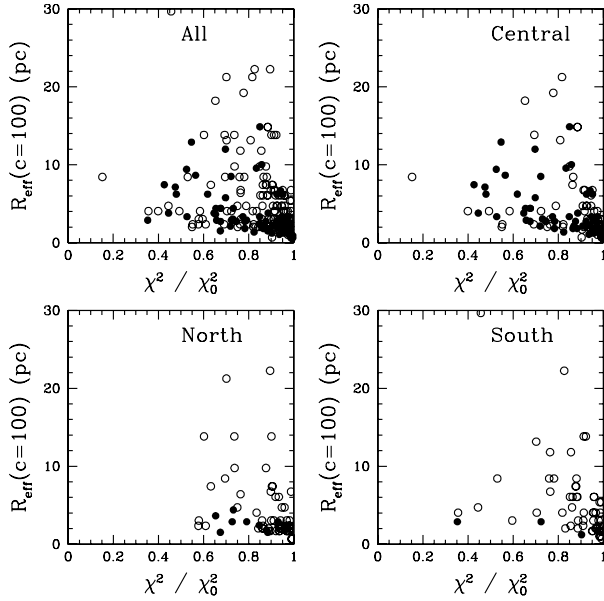


Fig. 7. Size as a function of χ^2/χ_0^2 . Solid symbols represent objects located in the PC chips, whereas open symbols are for WFC chips. *Upper left:* the entire sample; *upper right:* central pointing; *lower left:* north pointing; *lower right:* south pointing.

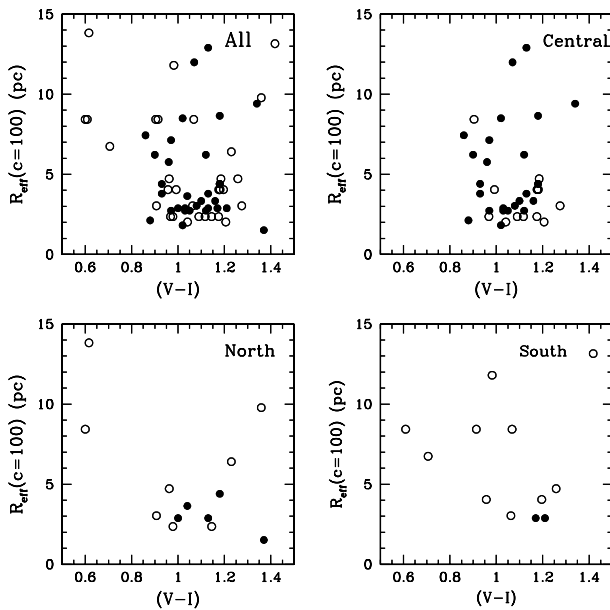


Fig. 8. Size as a function of colour for all 3 individual pointings and for the combined pointing. Open circles are PC GCs and closed ones are WFC GCs.

modulus of NGC 5846. We note that there is still some debate in the literature as to whether such size differences are due to projection effects (e.g. Larsen & Brodie 2003; Forbes et al. 2005; Spitzer et al. 2006) or mass segregation (Jordan 2004).

Table 4 lists the sizes and related parameters for those GCs which were successfully measured by ISHAPE.

5. Comparing the GCs and the X-ray point sources

More than thirty luminous X-ray sources associated with Galactic globular clusters have been observed with Einstein, ROSAT, XMM-Newton and Chandra, since 1975 and up to this

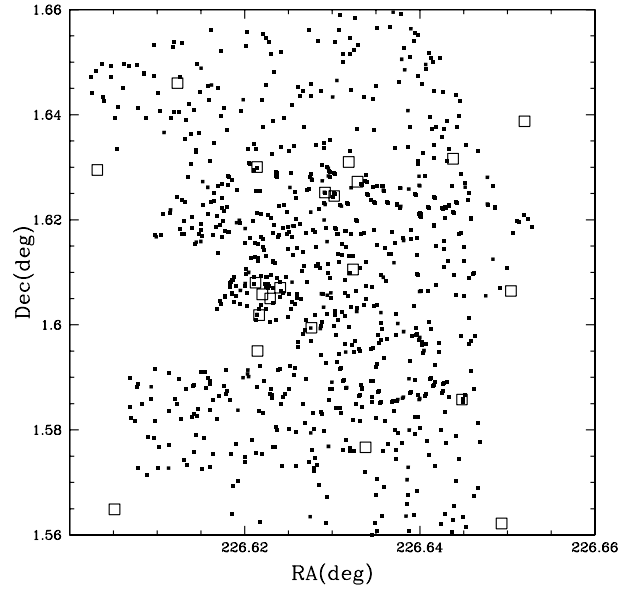


Fig. 9. On-sky map of X-ray sources and GCs in the direction of NGC 5846. The small points represent the GCs and the large squares correspond to the Chandra point sources.

date (Verbunt & Lewin 2001). On the other hand, high resolution observations made by ROSAT and Chandra in elliptical and spiral galaxies, such as NGC 4697, NGC 4472, M 31 and NGC 4594, reveal X-ray sources associated with GCs. Irwin, Bregman & Athey (2004) classify ultraluminous X-ray sources (ULXs) as having $L_X = 1-2 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ and very ultraluminous X-ray sources (VULXs) as having $L_X > 2 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$. In the early type galaxy NGC 1399 more than two hundred sources were resolved in a $8'' \times 8''$ region, of which 45 were found to be associated with globular clusters and two were found to have $L_X > 2 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ (Angelini et al. 2001), therefore being VULXs. In NGC 5846 forty one individual X-ray sources were observed with Chandra X-ray Observatory (Trinchieri & Goodfroiij 2002). All of them have $L_X > 3 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$. These L_X values are above or close to the Eddington luminosity for a 1.4 solar mass accreting object (Sarazin et al. 2003), suggesting that, if caused by a single X-ray binary, they are accreting onto a black hole, rather than a neutron star. On the other hand, in the case of a globular cluster, more than one LMXBs may be present, mimicking the effect of VULXs.

Here we test the hypothesis that some of these point sources found by Trinchieri & Goodfroiij (2002) (Table 1 of their paper), are associated with globular clusters in the field of view of HST/WFPC2 studied here. Equatorial coordinates (J2000) were obtained from the WFPC2 images with the STSDAS *xy2rd* IRAF task. This astrometric solution, however, may be systematically offset from the Chandra positions by some unknown amount. Therefore we searched for X-ray counterparts of our GCs at the same time as we found the best estimate for these offsets. We did this by finding the offsets in RA and Dec that maximized the number of matches between optical and X-ray sources. A total of 7 such matches resulted. The corresponding offsets were of $0.8''$ in RA and $0.2''$ in Dec. These values are consistent with previous astrometric comparisons between HST/WFPC2 and Chandra (Jordán et al. 2004; Xu et al. 2005).

We have found GC/X-Ray sources in all three pointings, although most matches are located in the central WFPC2 field. In Fig. 9 we show the on-sky distribution of both optical and X-ray objects, with positions already compensated for the

Table 2. The globular clusters coincident with Chandra X-ray sources.

Source	α (J2000)	δ (J2000)	V (mag)	$(V-I)$ (mag)	L_x (erg s^{-1})
8	15:06:29.15	+01:36:28.7	22.8	1.12	9.32×10^{39}
9	15:06:29.19	+01:37:47.9	25.23	2.42	4.2×10^{38}
11	15:06:29.25	+01:36:06.5	23.39	1.17	1.77×10^{39}
15	15:06:30.68	+01:35:57.8	23.62	1.29	4.2×10^{38}
16	15:06:31.05	+01:37:30.4	23.23	1.12	1.22×10^{39}
17	15:06:31.31	+01:37:28.1	24.32	1.26	6.5×10^{38}
24	15:06:34.8	+01:35:08.6	23.16	1.15	7.8×10^{38}

offsets mentioned above. We find that the matched objects tend to concentrate to the inner parts of the galaxy. In Table 2 we list the main properties of these GC/X-ray objects. The listed positions are those from Trinchieri & Goodfrooij (2002). Their colours show that they belong to the red population, with no exception. This result is in agreement to what Angelini et al. (2001) found for NGC 1399. We also notice that the V magnitudes of 5 matched objects are brighter than 23.6, which means that the X-ray emitting GCs are usually brighter than average, as previously found by Sarazin et al. (2003) and Kundu et al. (2002) for other luminous ellipticals. Considering their intrinsic sizes, only three of the matched objects were resolved with the ISHAPE code (Sect. 4), but 2 of them were marginally resolved; all three are smaller than $R_{\text{eff}} = 2.8$ pc, being therefore bright but compact GCs.

In terms of X-ray properties, several of our matched GCs lie among the most luminous objects in the host galaxy. Source 16 is a ULX and sources 17 and 24 have measured L_x close to 10^{39} erg s^{-1} , being among the 25% brightest X-ray sources in NGC 5846. They are therefore likely to be either a single binary system accreting onto a black hole or several LMXBs at or near the Eddington luminosity, as discussed in Angelini et al. (2001). Besides, the X-ray sources 8 and 11 have been classified by Trinchieri & Goodfrooij (2002) as extended regions. Alternatively, they could be composed of several overlapping sources having different origins. Because they have total luminosity of $L_x > 2 \times 10^{39}$ erg s^{-1} , the corresponding GC match may still be a ULX.

We note that NGC 5846 has been described as a complex X-ray object by Filho et al. (2004). They find a coincidence between the VLA radio core and the X-ray nucleus of the galaxy; this latter position is where source number 12, according to classification of Trinchieri & Goodfrooij (2002), is located. Notice that this is one among several other luminous X-ray sources. Also, we observe that the position of source 12 is not coincident with the optical center.

Since VULXs are found to be associated with late rather than early-type galaxies, NGC 5846 seems to be an exception along with NGC 1399.

6. Summary and concluding remarks

With V and I WFPC2 images taken from the Hubble Space Telescope public archive we have detected 68 central globular clusters within the PC ($r \leq 2$ kpc); 23 of these are previously undetected objects. We combined our inner sample with the larger data set by FBH and revisited the properties of this central sample. We have determined the coordinates and photometry for all GCs in the combined sample and also attempted to measure their intrinsic sizes. For several dozens, useful estimates of the effective radius were obtained, especially in the

PC image. This information is given in two electronic tables. We also searched for X-ray counterparts to the GCs in the Chandra sample of Trinchieri & Goodfrooij (2002).

Our main results are:

1. The colour distribution shows a hint of becoming bluer in the very central galaxy regions.
2. Most GCs with reliable size estimates have $R_{\text{eff}} > 3$ pc; larger GCs tend to be seen in the central region of the host galaxy. In fact, only a few GCs with $R_{\text{eff}} > 5$ pc are located outside the central pointing. This is opposite to the behaviour found by van den Bergh et al. (1991) for the Milky Way GCs. We note however, that all three early-type galaxies with extensive spatial coverage in the sample of Larsen et al. (2001) show an increase in median GC R_{eff} in the most central radial bin, especially for the blue sub-population. The central pointing also has the largest total number of GCs, so if the large GCs are just the tail of the GC size distribution, then one would expect an statistical excess of these large GCs where there are more GCs in general. However, the excess of large GCs in the central pointing remains after we correct for this effect: the outer fields have about 0.4 times the number of GCs in the central pointing, but they have fewer GCs with $R_{\text{eff}} > 5$ pc.
3. No clear evidence for a size-colour relation is found. This result does not seem to agree with the findings of Larsen et al. (2001), who observed that the blue clusters are generally larger than the red ones by about 20%. However this is possibly a selection effect as NGC 5846 is more distant their more nearby galaxies (for which smaller intrinsic sizes could be measured) and our sample has very few blue GCs.
4. From a positional match between optical and X-ray coordinates, we found 7 GC/X-ray matches, most of which are located in the central parts. Optically, they tend to be bright ($V \leq 23.5$) and compact, since only one was clearly resolved. All of them have $(V-I) > 1.1$, which places them as members of the red sub-population. Their X-ray luminosities are also among the highest in the Chandra sample, with 3 of them being among the 25% most luminous and 2 other matches lying in complex central regions with $L_x > 10^{39}$ erg s^{-1} .

The X-ray emitting GCs are typically more luminous in X-rays than those found in other early-type galaxies. For instance Angelini et al. (2001) found that 70% of the X-ray point sources in the direction of NGC 1399 were located within GCs, but almost all of them have $L_x < 10^{39}$ erg s^{-1} . Our lower detection rate of GC/X-rays in comparison to theirs, associated with a higher fraction of luminous sources, suggests that the GCS of NGC 5846 is composed of relatively few, although very luminous X-ray sources.

This conclusion also seems to hold when NGC 5846 is compared to other ellipticals, either very luminous ones, such as NGC 4472, or more typical, such as NGC 4697 (Kundu et al. 2002; Sarazin et al. 2000). At the high end of the L_x luminosity function, Trinchieri & Goodfrooij (2002) found 3 ULXs and 4 extended regions, with high total L_x out of 41 X-ray point like sources, where around 2 would be expected to be foreground/background sources (Irwin et al. 2004). NGC 5846 displays an extended and complex structure in X-ray emission, described by Filho et al. (2004), something that is also observed in other early-types, like NGC 1600 (Sivakoff et al. 2004). We are currently analysing images obtained from the New Technology Telescope (NTT) and HST archive of NGC 1600 in order to

check if there is any similarity to NGC 5846. A correlation between the overall galactic X-ray properties and the GCS would provide useful additional constraints to the processes that govern the formation of both GCs and their host galaxy.

Acknowledgements. We acknowledge the financial support of CNPq and the comments and suggestions of an anonymous referee. DF thanks the ARC for financial support. We thank J. Irwin for comments and suggestions that helped improve the paper.

7. References

References

- Angelini, L., Loewenstein, M., & Mushotzky, R. F. 2001, *ApJ*, 557, L35
Ashman, K. M., & Zepf, S. E. 1992, *ApJ*, 384, 50
Bruzual, G., & Charlot, S. 2003, *MNRAS*, 344, 1000
Côté, P., Marzke, R. O., & West, M. J. 1998, *ApJ*, 501, 554
Elson, R. A. W., & Santiago, B. X. 1996, *MNRAS*, 280, 971
Faber, S. M., Wegner, G., Burstein, D., et al. 1989, *ApJS*, 69, 763
Filho, M. E., Fraternali, F., Markoff, S., et al. 2004, *A&A*, 418, 429
Forbes, D. A., Brodie, J. P., & Huchra, J. 1996, *AJ*, 112, 2448
Forbes, D. A., Brodie, J. P., & Huchra, J. 1997a, *AJ*, 113, 887
Forbes, D. A., Brodie, J. P., & Grillmair 1997b, *AJ*, 113, 1652
Forbes, D. A., et al. 2005, *MNRAS*, in press
Hempel, M., & Kissler-Patig, M. 2004, *A&A*, 428, 459
Holtzman, J. J., Hester, J. J., Casertano, S., et al. 1995a, *PASP*, 107, 156
Holtzman, J. J., Burrows, C. J., Casertano, S., et al. 1995b, *PASP*, 107, 1065
Irwin, J. A., Bregman, J. N., & Athey, A. E. 2004, *ApJ*, 601, L1431
Jordán, A. 2004, *ApJ*, 613, L117
Jordán, A., Côté, P., Ferrarese, L., et al. 2004, *AJ*, 613, 279
Jordán, A., Côté, P., Blakeslee, J. P., et al. 2005, *ApJ*, 634, 1002
Kundu, A., Maccarome, T., & Zepf, S. 2002, *ApJ*, 574, L5
Larsen, S. S. 1999, *A&AS*, 139, 393
Larsen, S. S., & Brodie, J. P. 2003, *ApJ*, 593, 340
Larsen, S. S., Brodie, J. P., Huchra, J. P., Forbes, D. A., & Grillmair, C. J. 2001, *AJ*, 121, 2974
Merrifield, M. R. 2004, *MNRAS*, 353, L13
Rhode, K. L., & Zepf, E. Z. 2004, *AJ*, 127, 302
Sarazin, C. L., Irwin, J. A., & Bregman, J. N. 2000, *ApJ*, 544, 101
Sarazin, C. L., Irwin, J. A., & Bregman, J. N. 2001, *ApJ*, 556, 533
Sarazin, C. L., Kundu, A., Irwin, J. A., et al. 2003, *ApJ*, 595, 743
Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, *ApJ*, 500, 525
Sivakoff, G. R., Sarazin, C. L., & Carlin, J. L. 2004, *ApJ*, 617, 262
Spitzer, L., et al. 2006, *AJ*, submitted
Trinchieri, G., & Goodfroom, P. 2002, *A&A*, 386, 472
van den Bergh, S., Morbey, C., & Pazder, J. 1991, *ApJ*, 375, 594
Verbunt, F., & Hut, P. 1987, in *The Origin and Evolution of Neutron Stars*, ed. D. Helfand, & J.-H. Huang (Dordrecht: Reidel), IAU Symp., 125, 187
Verbunt, F., & Lewin, W. H. G. 2004 [[arXiv:astro-ph/0404136](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0404136)]
Xu, Y., Xu, H., Zhang, Z., et al. 2005, *ApJ*, 631, 809

Data: Thu, 01 Mar 2007 11:55:53 +0100
De: aanda.paris@obspm.fr
Endereço para Resposta (Reply-To): aanda.paris@obspm.fr
Assunto: AA/2006/6546: paper sent to language-editor
Para: ana.leonor@ufrgs.br

01/03/2007

Miss Ana Leonor Chies Santos
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves 9500
Caixa Postal 15051
91501-970 Porto Alegre, RS
BRAZIL

ana.leonor@ufrgs.br

Our Ref. : AA/2006/6546

Dear Miss Chies Santos,

We are very glad to inform you that your paper, "High resolution imaging of the early-type galaxy NGC 1380: an insight into the nature of extended extragalactic star clusters", has been accepted for publication in *Astronomy and Astrophysics*, section 4. Extragalactic astronomy. The official date of acceptance is 27/02/2007.

The paper is being sent to our language editor and the annotated copy will be forwarded to you if significant changes are required. We will contact you again as soon as possible.

Sincerely yours,

C. Bertout
Editorial Office Paris

High resolution imaging of the early-type galaxy NGC 1380: an insight into the nature of extended extragalactic star clusters^{*}

A. L. Chies-Santos, B. X. Santiago, and M. G. Pastoriza

Departamento de Astronomia, Instituto de Física, UFRGS. Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, RS, Brazil
e-mail: ana.leonor@ufrgs.br

Received 11 October 2006 / Accepted 27 February 2007

ABSTRACT

Context. NGC 1380 is a lenticular galaxy located near the centre of the Fornax Cluster, northeast of NGC 1399. The globular cluster system of this galaxy has hitherto only been studied from the ground. Recent studies of similar early-type galaxies, specially lenticular ones, reveal the existence of star clusters that apparently break up the traditional open/globular cluster dichotomy.

Aims. With higher quality photometry from HST/WFPC2 we study the star clusters in NGC 1380, measuring their magnitudes, colours, sizes and projected distances from the centre of the galaxy.

Methods. We used deep archival HST/WFPC2 in the B and V bands. We built colour magnitude diagrams from which we selected a sample of cluster candidates. We also analysed their colour distribution and measured their sizes. Based on their location in the luminosity-size diagram we estimated probabilities of them being typical globular clusters as those found in the Galaxy.

Results. A total of about 570 cluster candidates were found down to $V = 26.5$. We measured sizes for approximately 200 of them. The observed colour distribution has three apparent peaks. Likewise for the size distribution. We identified the smaller population as being mainly typical globular clusters, while the more extended objects have small probabilities of being such objects. Different correlations between absolute magnitudes, sizes, colours and location were inferred for these cluster sub-populations.

Conclusions. Most extended clusters ($R_{\text{eff}} > 4$ pc) share similar properties to the diffuse star clusters reported to inhabit luminous early-type galaxies in the Virgo galaxy cluster such as being of low surface brightness and fainter than $M_V \simeq -8$. We also report on a small group of ($R_{\text{eff}} \simeq 10$ pc), $-8 < M_V < -6$, red clusters located near the centre of NGC 1380, which may be interpreted as faint fuzzies.

Key words. galaxies: individual: NGC 1380 – galaxies: star clusters

1. Introduction

The study of extragalactic star clusters has proven to be one of the key tools for understanding the formation and evolution of galaxies. By studying star cluster systems one can constrain the star formation history and the way the galaxies we observe today formed, merged or grew by accretion.

NGC 1380 is an S0 galaxy in the Fornax cluster ($(m - M) = 31.4$ e.g. Ferrarese et al. 2000), whose globular cluster system (GCS) has only been studied from the ground (Kissler-Patig et al. 1997). The authors find two old populations of globular clusters (GCs): a blue population ($(B - V) = 0.65$) similar to the halo GCs of the Milky Way, which is spherically distributed around the galaxy; and a red population ($(B - V) = 0.94$), which follows the stellar light in ellipticity and position angle associated with the bulge and disk of NGC 1380.

It is now well known that globular cluster systems of massive galaxies have a bimodal colour distribution, indicating two sub-populations of GCs (e.g. Brodie & Strader 2006). These colour differences can be caused by age and/or metallicity differences, due to the well known age-metallicity degeneracy. Recent spectroscopic studies suggest that the colour bimodality is a result of metallicity differences between two old subpopulations (e.g.

Strader et al. 2005). Their existence indicates at least two major star-forming events in the history of most massive galaxies.

Faint Fuzzy Clusters (FFs) were discovered in the nearby lenticular galaxies NGC 1023 and NGC 3384 (e.g. Larsen & Brodie 2000; Brodie & Larsen 2002). They are different from normal globular clusters and open clusters in many ways. While the effective radius (R_{eff}) for globular and open clusters is in the range of 2–3 pc, the R_{eff} for FFs varies from 7–15 pc. They tend to have moderately rich metallicities $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.6$ with luminosities in the range of $-7 < M_V < -5$ and are thought to be old. Furthermore, it has been shown that the FFs of NGC 1023 lie in a fast-rotating, ring-like structure within the disk (Burkert et al. 2005).

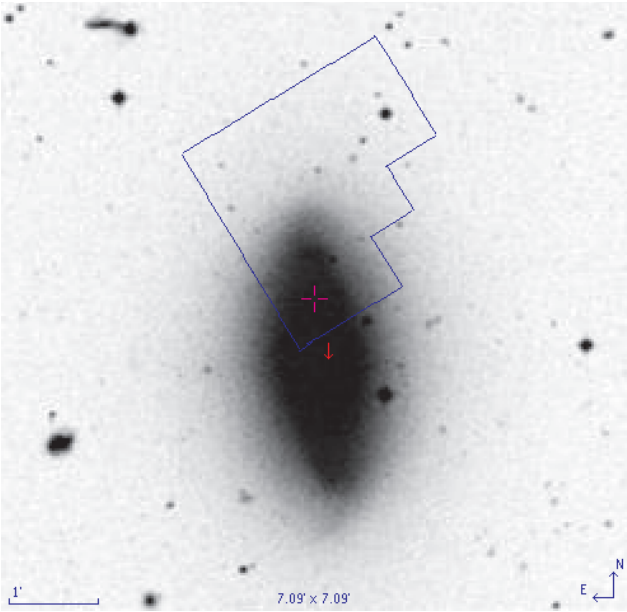
Diffuse Star Clusters (DSCs) have been found in Virgo Cluster early-type galaxies (Peng et al. 2006). These objects span a wide range in effective radii $3 < R_{\text{eff}} < 30$ pc, and have low luminosities ($M_V > -8$). Their median colours are redder than the red globular cluster subpopulation. They often match the colour of their host galaxy.

In this research we looked at the star cluster system of the S0 galaxy NGC 1380 using deep archival Hubble Space Telescope Wide Field Planetary Camera 2 (HST/WFPC2) B and V images. We searched for star cluster candidates, obtaining magnitudes, colours and measuring sizes. The article consists of six sections: in Sect. 2 we describe the observations and data reduction. In Sect. 3 we present the procedure we followed to obtain the photometry and discuss the colour magnitude diagrams

^{*} Table 4 is only available in electronic form at the CDS via anonymous ftp to cdsarc.u-strasbg.fr (130.79.128.5) or via <http://cdsweb.u-strasbg.fr/cgi-bin/qcat?J/A+A/vol/page>

Table 1. Journal of observations – HST/WFPC2 images.

Rootname	Filter	Exposure time (s)
U2BB0701T	<i>F439W</i>	1200
U2BB0702T	<i>F555W</i>	900
U2BB0703T	<i>F439W</i>	1200
U2BB0704T	<i>F555W</i>	900
U2BB0705T	<i>F439W</i>	1200
U2BB0706T	<i>F555W</i>	900
U2BB0707T	<i>F439W</i>	1200
U2BB0708T	<i>F555W</i>	900

**Fig. 1.** A ground-based image of NGC 1380 overlaid with the HST/WFPC2 pointing we used in the present study.

as well as the colour distribution. In Sects. 4 and 5 we describe the procedure applied to obtain sizes and discuss correlations among relevant quantities such as R_{eff} , M_V , $(B - V)$ colour, and distance to the centre. In Sect. 6 we present a summary and some concluding remarks.

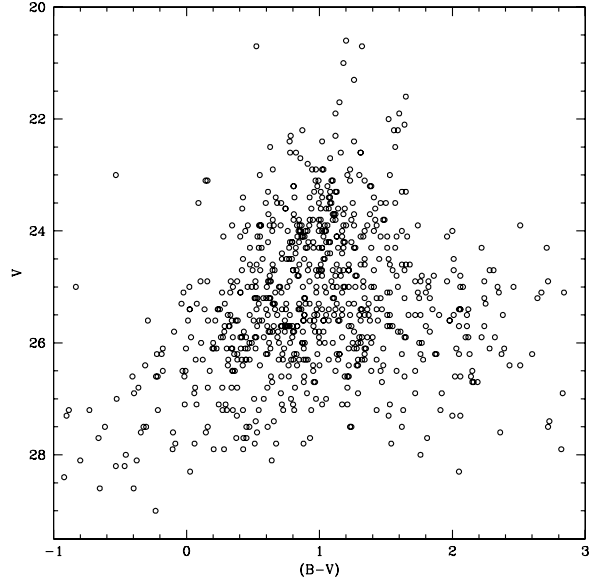
2. Observations and data reduction

We used archival B and V images from the HST Proposal 5480, taken with the purpose of studying supernovae SN1992A. The images were obtained with the Wide Field Planetary Camera 2 (WFPC2) in the $F439W$ and $F555W$ filters. There is one pointing and 4 exposures for each filter, see Table 1. The spatial scale is $0.046'' \text{ pixel}^{-1}$ and the field is of $37'' \times 37''$ for the planetary camera (PC). For the Wide Field Camera (WFC) the scale is $0.1'' \text{ pixel}^{-1}$, corresponding to a $80'' \times 80''$ field.

In Fig. 1 we show the WFPC2 field of view which we were restricted for this research.

3. Photometry

After aligning the four individual exposures taken with each filter, we combined them with the STSDAS task *gcombine*. The resulting combined images were almost completely free of cosmic rays. We then used the IRAF DAOPHOT task *daofind* to detect sources with a threshold of 5σ above the background on the V images. Having CCD positions of the detected sources we

**Fig. 2.** Colour-magnitude diagram for all sources detected and measured in the image.

used the DAOPHOT task *phot* to perform aperture photometry. We adopted a two-pixel aperture radius and applied an aperture correction to a $0.5''$ radius. The aperture corrections were 0.31 mag (PC) and 0.18 (WFC) for $F439W$. For $F555W$ the corrections were 0.39 mag (PC) and 0.19 mag (WFC). These values were based on Table 2 of Holtzman et al. (1995a). We followed Table 7 of Holtzman et al. (1995b) to convert the instrumental magnitudes to the standard Johnson-Cousins B , V system, for a gain ratio of 7. We then corrected for galactic extinction adopting the values from Schlegel et al. (1998), namely $A_B = 0.075$ and $A_V = 0.058$. A total of 823 sources were detected and measured on both images. In Fig. 2 we show the CMD for all these sources. Notice a strong concentration of sources in the $0 < (B - V) < 2$ range. This locus also spreads out in colour at fainter magnitudes because of the increasing photometric errors.

3.1. Colours

Simple stellar population models (SSPs), such as Bruzual & Charlot (2003), can give us an estimate of the expected range in colour of the star cluster candidates (Fig. 3). We assume a wide range in age of 1–15 Gyr; the lower age limit assumes that NGC 1380 has suffered little or no recent star formation. This is consistent with its red colours and paucity of gas. We also consider a wide range in metallicity. The corresponding range in colour is $0.2 < (B - V) < 1.2$. Kissler-Patig et al. (1997) found that NGC 1380 GCs have $0.4 < (B - V) < 1.2$, and that objects with $(B - V) > 1.3$ are most likely background galaxies. However, recent results indicate that the colours of DSCs or FFs may differ from those of typical GCs. Therefore, a more flexible colour selection is advisable. We cut the sample in colour at $-0.1 < (B - V) < 1.8$ and also apply a cut in magnitude at $V < 26.5$, to prevent objects with excessive photometric errors or spurious sources from contaminating the sample. This colour selection criterion accommodates not only the expected colour range for different SSPs but also the spread caused by photometric errors and the possible existence of significant internal extinction in NGC 1380. With these restrictions we have

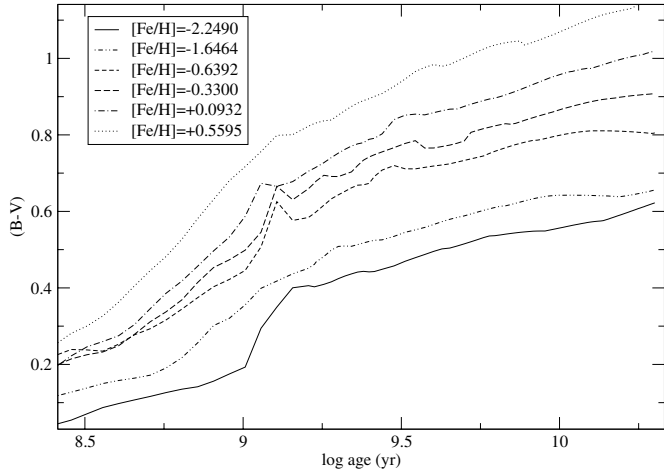


Fig. 3. Evolution of Bruzual & Charlot (2003) SSPs.

570 star cluster candidates. We call these objects as the photometric sample.

In Fig. 4 we plot the colour distribution of the photometric sample. Note that there are three peaks at $(B - V) \simeq 0.8, 1.1, 1.5$. The first two peaks may be associated with the two different populations of globular clusters found by Kissler-Patig et al. (1997), one metal-poor ($(B - V) \sim 0.65$) and the other metal-rich ($(B - V) \sim 0.94$). The difference in colour between the peaks shown here and those of Kissler-Patig et al. (1997) is $\Delta(B - V) \sim 0.15$. It can be explained by the clear colour gradient in NGC 1380 combined with the different regions studied. We will return to this point in Sect. 5. As for the third and very red peak, we also leave its discussion for later.

Following Fig. 3 one can attempt to constrain the ages and metallicities that correspond to the distinct cluster sub-populations according to their $(B - V)$ colours. However, this analysis is strongly affected by the degeneracy between the effects of varying age and metallicity. For example, the first colour peak with $(B - V) = 0.8$ could be a metal-rich population ($[Fe/H] = 0.5595$) with 1.3 Gyr as well as a sub-solar metallicity population ($[Fe/H] = -0.6392$) with 10 Gyr. The second and third peaks are definitely due to an old population with super-solar metallicity, perhaps also affected by internal extinction.

4. Sizes

In order to measure sizes of the star cluster candidates we use the ISHAPE code described in Larsen (1999) and apply it to one of the V images listed in Table 2. This code convolves the point spread function (PSF) with model King profiles in two dimensions. The resulting model image is then compared to the two-dimensional profiles of the real star cluster candidates. We used the same HST/WFPC2 PSF as in Chies-Santos et al. (2006). Comparison of this PSF model to those built from WFPC2 images at other epochs shows that the PSF is stable with time. In order to derive the best fit from ISHAPE we ran the code for King models with three different concentration parameter values: $c = 5, 30$ and 100 . We managed to measure sizes for 302 detected sources (out of 823). Applying the previously defined cuts in colour and magnitude yields measured sizes for 198 star cluster candidates. As a rule, successful fits were obtained with the three values of the parameter c . We then adopted for each source the King model which minimised χ^2 . In most cases this model corresponded to $c = 100$. It is worth stressing that we did not run ISHAPE on the *gcombined* images; instead we ran it on the

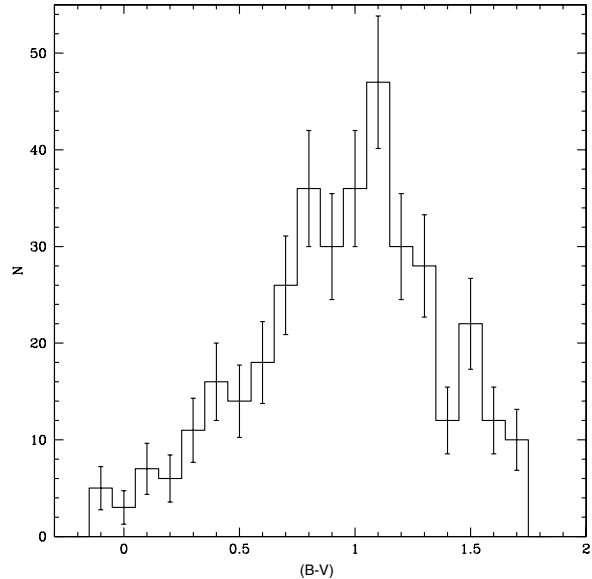


Fig. 4. Colour distribution of the photometric sample of star cluster candidates.

single exposure U2BB0708T, see Table 1, even though we lose S/N by doing so. The reason is that, in the process of image combining, we end up degrading the image resolution by broadening the sizes of point sources. This would inevitably lead to over-estimates of cluster sizes with ISHAPE.

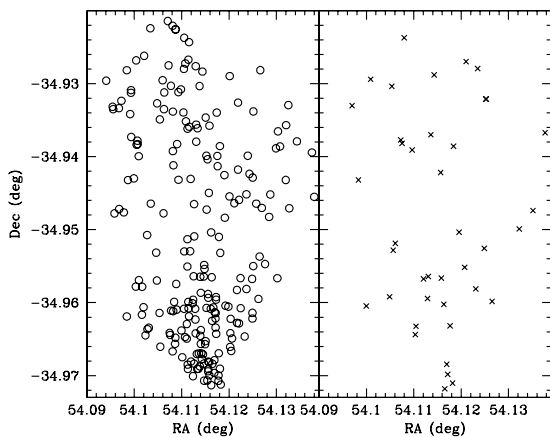
4.1. Galaxy contamination

Our sample of resolved objects (i.e., for which we could measure sizes) should be contaminated by background galaxies. This effect needs to be quantified. The most likely contaminants will be early-type galaxies close to the detection limit of our photometry, since these are more likely to be taken as stellar or nearly stellar objects. We therefore estimate their numbers by scaling down the number of E/S0 galaxies in the morphological sample of Abraham et al. (1996). These authors provide morphology of galaxies in the Hubble Deep Field down to $I = 25$ ($V \simeq 26$). About $4 \times 10^4 \text{ deg}^{-2}$ E/S0 galaxies are expected within the $23 < I < 25$ range, which in turn corresponds roughly to $24 < V < 26$. Scaling to the WFPC2 solid angle, this corresponds to about 40 galaxies in our sample. Interestingly, this is very similar to the number of sources with $R_{\text{eff}} > 15$ pc we find, assuming that they are located at the distance of NGC 1380. Thus, such objects are consistent with being background early-type galaxies rather than intrinsically very large clusters belonging to NGC 1380. We therefore cut the sample at $R_{\text{eff}} < 15$ pc in order to concentrate on the cluster population. We refer to this set of objects as the resolved cluster sample. In Fig. 5 we show the on-sky distribution of the resolved cluster sample as well as of the objects identified as background galaxies. Notice that while the former objects display a significant gradient towards the centre of the galaxy (towards the bottom) the latter do not show this effect so clearly.

Notice that this approach of removing background galaxies relies on the assumption that they tend to be apparently more extended than stellar clusters. A few very distant early-type galaxies may therefore be still left in our star cluster sample. We also point out that some of the objects with $R_{\text{eff}} > 15$ pc could be dwarf galaxies belonging to the Fornax cluster.

Table 2. The sizes of the star cluster candidates separated by colours.

Blue: $-0.1 < (B - V) < 0.9$			
	$\overline{R_{\text{eff}}}$ (pc)	$\sigma_{R_{\text{eff}}}$	NP
all	4.25	3.36	87
$0 < R_{\text{eff}} < 4$	1.70	1.23	45
$4 < R_{\text{eff}} < 8$	5.23	0.83	27
$8 < R_{\text{eff}} < 15$	10.15	1.79	15
Red: $0.9 < (B - V) < 1.8$			
	$\overline{R_{\text{eff}}}$ (pc)	$\sigma_{R_{\text{eff}}}$	NP
all	3.38	3.23	99
$0 < R_{\text{eff}} < 4$	1.78	1.13	73
$4 < R_{\text{eff}} < 8$	5.43	0.82	14
$8 < R_{\text{eff}} < 15$	10.72	1.66	12

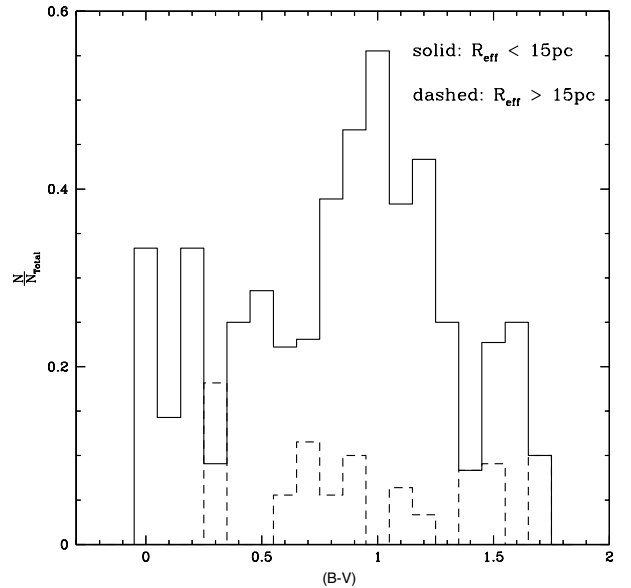
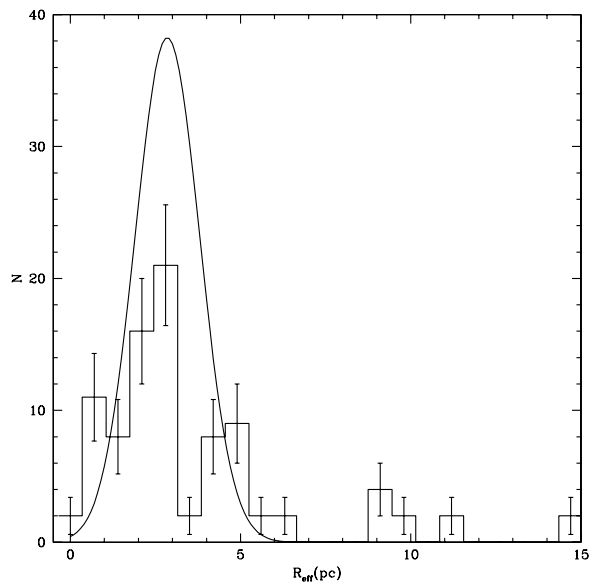
**Fig. 5.** *Left panel:* distribution on the sky of the resolved cluster sample ($R_{\text{eff}} < 15$ pc). *Right panel:* distribution on the sky of the supposedly background contaminants ($R_{\text{eff}} > 15$ pc).

In Fig. 6 we plot the number ratio of the resolved cluster and background galaxies to the photometric sample, as a function of colour. One can see that this fraction is somewhat smaller for the blue cluster sub-population, in fact resulting in the elimination of the $B - V \simeq 0.8$ peak seen in Fig. 4. In other words, a larger fraction of blue clusters are unresolved and therefore drop out of the sample with successfully measured sizes. This result points to a size-colour trend in the sense that redder GCs tend to be larger than the bluer ones. This issue will be discussed in more detail later. Also notice that objects with $R_{\text{eff}} > 15$ pc cover a wide colour range, but make a proportionally larger contribution to the very red population of cluster candidates in the range $1.35 < (B - V) < 1.7$. In the $0.4 < (B - V) < 1.3$ range they account for $\sim 10\%$ of the sample.

4.2. Size and luminosity distributions

In Fig. 7 we plot the distribution of the 159 resolved clusters (objects with $R_{\text{eff}} < 15$ pc) belonging to NGC 1380. This distribution features distinct peaks. The first peak, at $R_{\text{eff}} \sim 3$ pc, closely matches typical GC sizes, as attested by the solid curve, which corresponds to the distribution of sizes of GCs in the Galaxy (see below). The second peak is at $R_{\text{eff}} \sim 5$ pc; this may be the population of DSCs. There are some objects with $7.5 < R_{\text{eff}} < 13$ pc that could also be the diffuse star clusters reported in Peng et al. (2006) or FFs.

It is very important to characterise the possible families of stellar clusters present in NGC 1380 based on their magnitudes,

**Fig. 6.** Ratio between resolved star clusters and galaxies to the photometric sample as a function of colour. The dashed line corresponds to the objects with $R_{\text{eff}} > 15$ pc while the solid line to the objects with $R_{\text{eff}} < 15$ pc.**Fig. 7.** The distribution of the resolved star cluster sample ($R_{\text{eff}} < 15$ pc). Overlaid is the size distribution of galactic GCs (Bonatto et al. 2006).

colours, sizes and spatial location. In particular, one of our goals is to search for possible examples of DSCs or FFs in this galaxy.

Thus, we now compare the available luminosity and size distributions of our clusters with the known distributions of typical GCs as a function of these parameters. We adopt the parametric GC luminosity and size distributions given by Bonatto et al. (2006). In this work the authors fit Gaussian functions both to the distribution of half-light radii and of absolute magnitudes, M_V , for the whole sample of Galactic globular clusters. They find

$$N = (40.1 \pm 9.2) \exp -\frac{1}{2} \left[\frac{R_{\text{eff}} - (2.85 \pm 0.18)}{0.95 \pm 0.14} \right]^2, \quad (1)$$

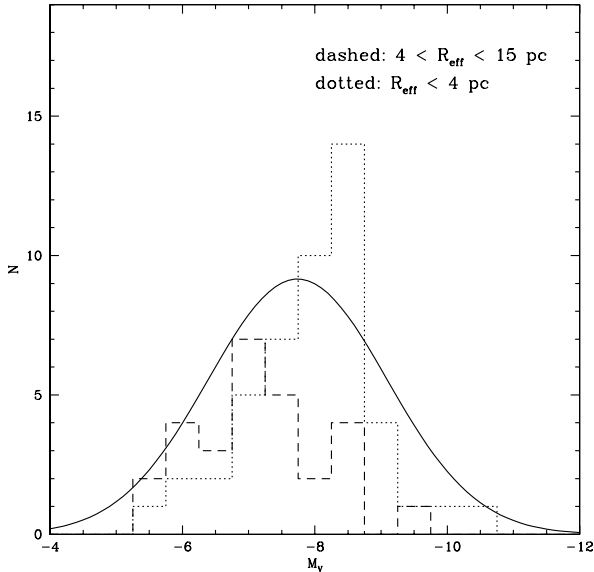


Fig. 8. Luminosity distribution for the resolved cluster sample for objects with $R_{\text{eff}} < 4$ pc and $4 < R_{\text{eff}} < 15$ pc. Overlaid is the distribution of galactic GCs (Bonatto et al. 2006) normalised to the dotted histogram.

for the first and

$$N = (19.66 \pm 1.77) \exp -\frac{1}{2} \left[\frac{M_0 + (7.74 \pm 0.1)}{1.35 \pm 0.08} \right]^2, \quad (2)$$

for the second.

The size distribution fitted by those authors is plotted over the distribution of NGC 1380 clusters in Fig. 7. The curve has been re-normalised to the number of star cluster candidates in NGC 1380. It is clear from the figure that the secondary peaks at $R_{\text{eff}} = 5$ pc and $7 < R_{\text{eff}} < 13$ pc are not well accounted for by the distribution of Galactic GCs. The $R_{\text{eff}} = 5$ pc peak is at the tail of the normal curve and the latter peak lies well outside it.

In Fig. 8 we plot the luminosity distribution of the resolved star cluster sample separated by different intervals in R_{eff} . Overlaid is the luminosity distribution of the galactic globular clusters (Bonatto et al. 2006) normalised to the number of star clusters of NGC 1380 with $R_{\text{eff}} < 4$ pc. It is clear from the figure that the more extended clusters tend to have lower luminosities than those with typical GC sizes ($R_{\text{eff}} < 4$ pc). The latter, which make up the main peak in the size distribution, are likely to be the genuine sample of GCs in this galaxy. Notice that neither of the distributions shown in the figure is perfectly described by the fit from Bonatto et al. (2006). The GC-like clusters display a more pronounced peak and smaller dispersion relative to the Galactic counterparts. There is also a lack of luminous clusters in these distributions relative to what is seen in the Galaxy. This may be a selection effect due to mass segregation; i.e. the largest, and thus most luminous, clusters should be located towards the centre of NGC 1380 and are therefore not sampled in the image.

We used the available luminosity and size information for our clusters, coupled with the known distribution of GCs as a function of these parameters, to estimate the probability of a star cluster candidate being a globular cluster. We adopted the parametric GC luminosity and size distributions given by Bonatto et al. (2006).

Thus, under the assumption that the GCs in NGC 1380 follow the same intrinsic distributions, it is easy to compute the relative probability of each cluster being a GC, P_{GC} . The value

of this will be $P_{\text{GC}} = 1$ for clusters with $R_{\text{eff}} = \overline{R_{\text{eff},\text{MW}}} = 2.85$ pc and $M_V = \overline{M_{V,\text{MW}}} = -7.74$.

In Fig. 9 we plot the R_{eff} as a function of M_V . The three distinct peaks seen in the size distribution are also clearly seen here, with noticeable gaps at $R_{\text{eff}} \approx 4$ pc and $R_{\text{eff}} \approx 7-8$ pc. For small radii, $R_{\text{eff}} < 3$ pc, ISHAPE finds somewhat discretised solutions for the sizes. The different symbols indicate different values of P_{GC} . Objects with the greatest probabilities of being a GC, $P_{\text{GC}} > 0.5$, are located at $R_{\text{eff}} \sim 2.5$ pc and $M_V \sim -7.5$, as expected. Even though there is no strong correlation between size and luminosity, the upper-limit in luminosity varies as a function of R_{eff} , in the sense that the more extended clusters, with low P_{GC} values, tend to be less luminous. Note that the lower limit in luminosity ($M_V \sim -5$) is due to the cut at $V < 26.5$ but the upper limits are physical. A slight tendency of the $R_{\text{eff}} \approx 5$ clusters to concentrate at lower luminosities than typical GCs is also observed and has been discussed before.

Previous studies (e.g. Larsen et al. 2001; Jordán et al. 2005) have found that the GC bluer population is $\sim 20\%$ larger than the red population. This fact has been interpreted as the result of projection effects, mass-segregation or the dependence of stellar lifetimes on metallicity (Larsen & Brodie 2003; Jordán 2004). In Fig. 10 we plot the R_{eff} as a function of $(B - V)$ colour. This apparent correlation between size and colour is readily seen from the figure, but seems to be largely due to the contribution of clusters with $R_{\text{eff}} > 5$ pc and $P_{\text{GC}} < 50\%$. Considering all the star clusters with $R_{\text{eff}} < 15$ pc, the blue clusters are in fact $\sim 20\%$ larger than the red ones. When we split the sample into size intervals the trend is reversed: for $0 < R_{\text{eff}} < 4$ pc the red GCs are $\sim 5\%$ larger than the blue ones; for $4 < R_{\text{eff}} < 8$ pc the red clusters are $\sim 3\%$ larger and from $8 < R_{\text{eff}} < 15$ pc the red ones are $\sim 5\%$ larger¹. However, these differences are not statistically significant, suggesting that the effect of blue clusters being larger than red ones stems from the fact that they are more common among the extended objects, with low P_{GC} values. The detailed statistics on the colour-size relation for the NGC 1380 clusters is shown in Table 2, where mean sizes and dispersions around these means are shown for different colour and size bins. One has to be very cautious when analysing the observed differences due to the small numbers often involved.

We also notice the existence of a separate set of red clusters ($(B - V) > 1$) with $R_{\text{eff}} > 9$ pc, which is clearly an outlier with respect to the trend just mentioned. We discuss them in the next section.

5. Spatial gradients

We now consider possible trends in cluster properties as a function of projected galactocentric distance. In Fig. 11 we plot the R_{eff} as a function of this parameter. Objects with $P_{\text{GC}} > 0.5$ are slightly more concentrated towards the centre, whereas clusters with the least probability of being GCs are spread over the outer parts of the galaxy. This might be caused by the fact that smaller clusters are located preferentially towards the centre, as observed in other galaxies (Larsen & Brodie 2003; Jordán et al. 2005). Note that there is a general trend in the upper limit of the sizes as a function of galactocentric distance (< 10 kpc): the upper size limit increases with galactocentric distance. This is what should be expected due to tidal effects. On the other hand, there is a group of seven clusters at the bottom right side of the figure that violates the general trend. Interestingly, they share other

¹ The weighted average of the sample split in size bins is the same as the average of the entire sample.

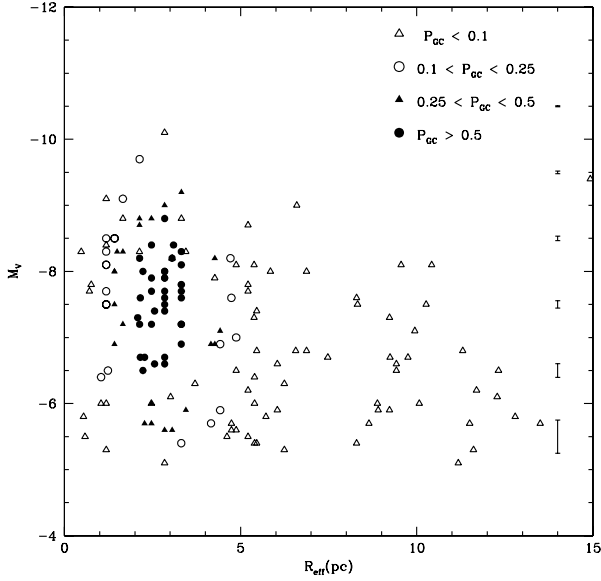


Fig. 9. R_{eff} as a function of M_V . Different symbols indicate different GC probabilities, as indicated. The error bars indicate mean errors in M_V .

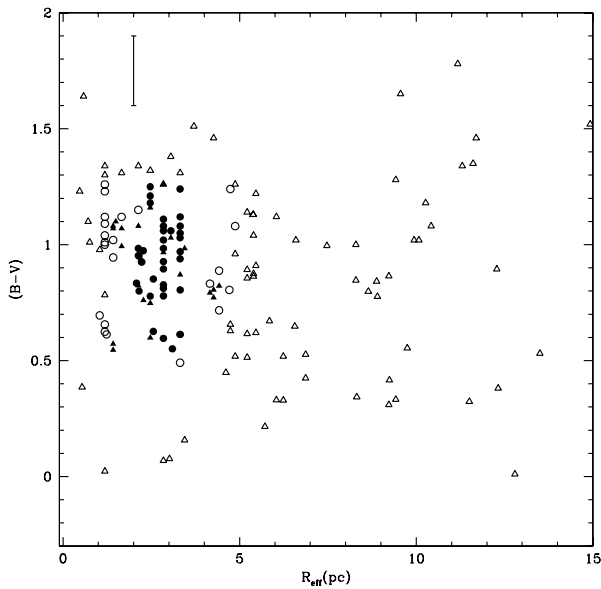


Fig. 10. R_{eff} as a function of $(B-V)$ colour. Different symbols indicate different GC probabilities as in Fig. 9. The error bar corresponds to a typical colour error.

common properties: all but one of them are red clusters, seen at the top right part of Fig. 10. They are also very near each other in terms of projected distance, falling at the same WFPC2 chip. Their positions on the image are shown in Fig. 13. Their main properties are listed in Table 3.

Finally, in Fig. 12 we find a trend between colour and galactocentric distance in the sense that the bluer star clusters are located towards the outer parts of the galaxy. This trend can either reflect a metallicity gradient (inner clusters are more metal-rich) or the possibility of star formation occurring later on a disk than on the spheroidal part of the galaxy. The first hypothesis is supported by the fact that many studies of early-type galaxies indicate an excess of heavier elements (Fe, Mg) in relation to hydrogen in the centre (e.g. Rickes et al. 2004). Notice that this colour gradient may go a long way towards explaining the colour

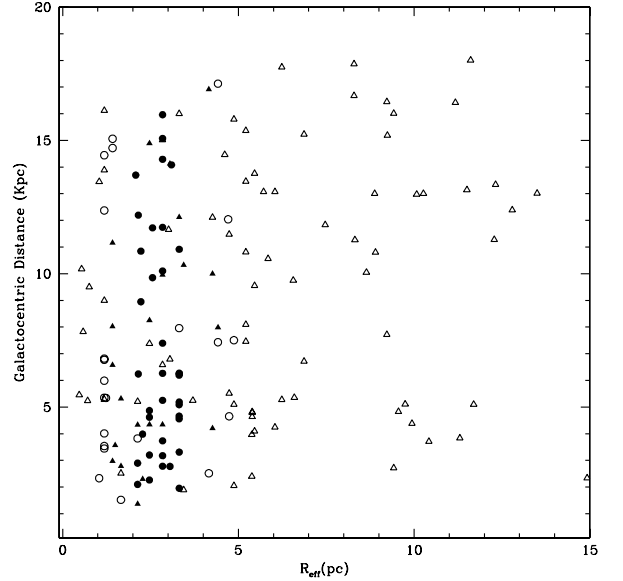


Fig. 11. R_{eff} as a function of the galactocentric distance. Different symbols indicate different GC probabilities as in Fig. 9.

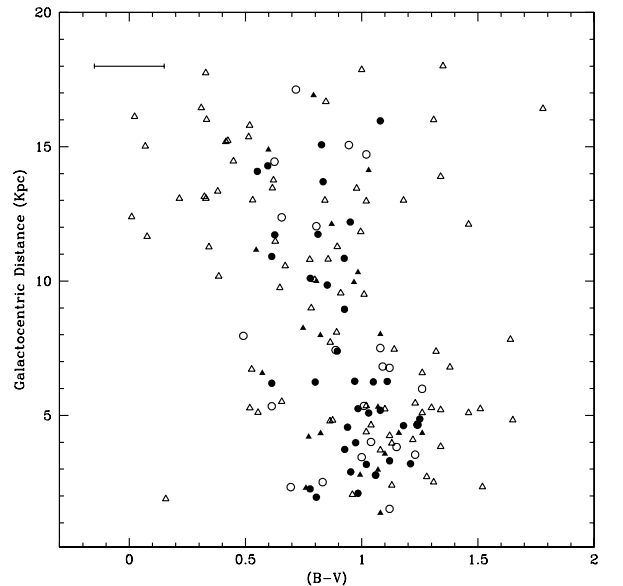


Fig. 12. Colour as a function of the galactocentric distance. Different symbols indicate different GC probabilities as in Fig. 9. The error bar corresponds to a typical colour error.

differences between our colour peaks and those found by Kissler-Patig et al. (1997), since the latter use ground-based images extending much further away from the centre of NGC 1380, therefore sampling bluer objects on average.

It seems that both the colour and size distributions are bimodal, possibly trimodal. The colour bimodality is well known (e.g. Brodie & Strader 2006) and likely reflects different events of star formation in the course of the history of the host galaxy. As mentioned earlier, the bimodality in the sizes may be interpreted as evidence of the GC and FF/DSC populations. The latter objects tend to be less luminous and more extended. But the two populations are not clearly distinct in terms of colours, although the spread in colours seems larger in the FF/DSC population (low P_{GC}) than in the GC population (high P_{GC}) (Fig. 12).

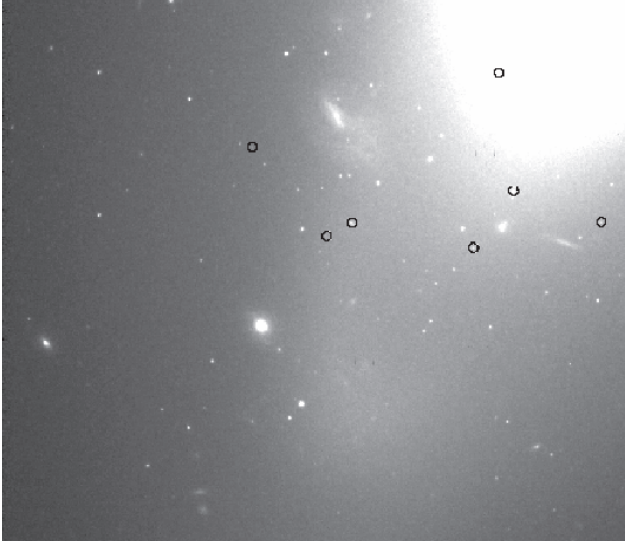


Fig. 13. HST/WFPC2 ch4. White circles are the 7 FF candidates.

Table 3. The subset of extended clusters in Fig. 13.

RA (deg)	Dec (deg)	V	B	$(B - V)$	R_{eff} (pc)
54.1171570	-34.9621773	24.325	25.328	1.020	9.94
54.1123238	-34.9600945	25.196	26.636	1.458	11.70
54.1128502	-34.9608421	23.344	24.982	1.656	9.55
54.1206474	-34.9649086	24.643	25.966	1.340	11.30
54.1172905	-34.9642792	23.288	24.355	1.084	10.42
54.1082268	-34.9611702	24.749	25.285	0.553	9.75
54.1145058	-34.9670792	24.809	26.070	1.277	9.42

6. Summary and concluding remarks

We have analysed deep WFPC2/HST images of NGC 1380 in the B and V filters, from which a sample of about 570 star cluster candidates was drawn. The colour distribution contains three distinct peaks, two of which have been observed in previous ground-based work (Kissler-Patig et al. 1997). In order to better characterise these cluster subpopulations we attempted to measure sizes. We also identified three distinct peaks in the resulting size distribution, the largest of them being similar to typical globular clusters, whereas the other two correspond to more extended clusters. We compared both the luminosities and sizes of our sample to the Galactic counterparts: the extended NGC 1380 clusters do not provide a close fit to the Galactic clusters size distribution; the extended clusters also tend to be less luminous than typical GCs in the Galaxy. We assigned a probability to each cluster in our sample of being a GC, P_{GC} . We then searched for correlations among luminosities, sizes, colours, location and P_{GC} . No strong M_V versus R_{eff} correlation was found, although the upper luminosity limit varies as a function of size in the sense that the extended sub-populations rarely reach $M_V < -8$. As for the size-colour relation we confirm that bluer objects tend to be larger than redder ones. However, this result applies to the entire cluster sample; it ceases to be true when GC-like ($R_{\text{eff}} < 4$ pc) clusters are considered separately. No size-colour relation is seen when the extended sub-populations are analysed alone. In fact, we observe that a larger fraction of blue

GC-like clusters in the photometric sample drop out when sizes are measured, indicating that among GCs an inverse trend (bluer clusters being smaller) should hold.

We also explored correlations with projected galactocentric distance. We observe that GC-like objects ($P_{\text{GC}} > 0.5$) are more concentrated towards the central regions. Also, the observed upper limit in size increases with distance from the centre. These results are consistent with previous studies that find that smaller clusters are preferentially located closer to the centre, something that may result from tidal effects. We also observe a trend of bluer colours with increasing galactocentric distance. This could reflect either a metallicity gradient or an age gradient. The trend is more pronounced for the GC-like objects ($P_{\text{GC}} > 0.5$), whereas for the other sub-populations there is a larger spread in this correlation.

It is very important to interpret our results in the light of the new star cluster populations, such as the FFs and DSCs, the existence of which has recently been proposed in the literature. In particular we note that most of the extended clusters ($R_{\text{eff}} > 4$ pc) share similar properties to the DSCs found in Virgo early-type galaxies by Peng et al. (2006): they are located at the $\mu_V < 20$ mag arcsec $^{-2}$ locus in the M_V vs. R_{eff} diagram. They are also upper bounded in luminosity at $M_V \simeq -8$. On the other hand, the candidates found here are not necessarily redder than the redder GCs, as has been previously claimed for DSCs (Peng et al. 2006).

We also discovered a subset of $R_{\text{eff}} \simeq 10$ pc, $-8 < M_V < -6$, $(B - V) > 1$ clusters located in the inner regions of NGC 1380 ($2 < R < 5$ Kpc, where R is the projected galactocentric distance). These share similar properties to the FFs found in other lenticular galaxies by other authors. The resolved sample is presented in Table 4 – available in electronic format.

Acknowledgements. We acknowledge the financial support of CNPq. We thank Charles Bonatto and Eduardo Bica for useful discussions and the anonymous referee for the report.

References

- Abraham, R. G., Tanvir, N. R., Santiago, B. X., et al. 1996, *ApJ*, 279, L47
 Bonatto, C., Bica, E. D., Chies-Santos, A. L., Santiago, B. X., & Pastoriza, M. G. 2006, private communication
 Brodie, J., & Larsen, S. 2002, *AJ*, 124, 1410
 Brodie, J., & Strader, J. 2006, *ARA&A*, 44, 193
 Bruzual, G., & Charlot, S. 2003, *MNRAS*, 344, 1000
 Burkert, A., Brodie, J., & Larsen, S. 2005, *ApJ*, 628, 231
 Chies-Santos, A. L., Pastoriza, M. G., Santiago, B. X., & Forbes, D. A. 2006, *A&A*, 455, 453
 Holtzman, J. J., Hester, J. J., & Casertano, S. 1995a, *PASP*, 107, 156
 Holtzman, J. J., Burrows, C. J., & Casertano, S. 1995b, *PASP*, 107, 1065
 Ferrarese, L., Mould, J. R., Kennicutt, R. C., Jr., et al. 2000, *ApJ*, 529, 745
 Jordán, A. 2004, *ApJ*, 613, 117
 Jordán, A., Côté, P., Blakeslee, J. P., et al. 2005, *ApJ*, 634, 1002
 Kissler-Patig, M., Richtler, T., Storm, J., & Della Valle, M. 1997, *A&A*, 327, 503
 Larsen, S. S. 1999, *A&AS*, 139, 393
 Larsen, S., & Brodie, J. 2000, *AJ*, 120, 2938
 Larsen, S., & Brodie, J. 2003, *ApJ*, 593, 340
 Larsen, S. S., Brodie, J. P., Huchra, J. P., Forbes, D. A., & Grillmair, C. J. 2001, *AJ*, 121, 2974
 Peng, E. W., Côté, P., Jordán, A., et al. 2006, *ApJ*, 639, 838
 Ricketts, M. G., Pastoriza, M. G., & Bonatto, C. 2004, *A&A*, 419, 449
 Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, *ApJ*, 500, 525
 Strader, J., Brodie, J. P., Cenarro, A. J., Beasley, M. A., & Forbes, D. A. 2005, *AJ*, 130, 1315

Referências Bibliográficas

- [1] ABRAHAM, R. G.; TANVIR, N. R.; SANTIAGO, B. X.; ELLIS, R. S.; GLAZEBROOK, K.; VAN DEN BERGH, S. Galaxy morphology to I=25 mag in the Hubble Deep Field. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 279, p. L47–L52, Apr. 1996.
- [2] ABRAHAM, R. G.; VAN DEN BERGH, S. The Morphological Evolution of Galaxies. **Science**, v. 293, p. 1273–1278, Aug. 2001.
- [3] ANGELINI, L.; LOEWENSTEIN, M.; MUSHOTZKY, R. F. The X-Ray Globular Cluster Population in NGC 1399. **Astrophysical Journal Letters**, v. 557, p. L35–L38, Aug. 2001.
- [4] ARAGÓN-SALAMANCA, A.; BEDREGAL, A. G.; MERRIFIELD, M. R. Measuring the fading of S0 galaxies using globular clusters. **Astronomy and Astrophysics**, v. 458, p. 101–105, Oct. 2006.
- [5] ARIMOTO, N.; YOSHII, Y. Chemical and photometric properties of a galactic wind model for elliptical galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 173, p. 23–38, Feb. 1987.
- [6] ASHMAN, K. M.; ZEPF, S. E. The formation of globular clusters in merging and interacting galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 384, p. 50–61, Jan. 1992.
- [7] ASHMAN, K. M.; ZEPF, S. E. **Globular Cluster Systems: Globular cluster systems / Keith M. Ashman, Stephen E. Zepf. Cambridge, U.K.; New York : Cambridge University Press, 1998. (Cambridge astrophysics series ; 30) QB853.5 .A84 1998 (\$69.95), May 1998.**
- [8] BARMBY, P.; HOLLAND, S.; HUCHRA, J. P. M31 Globular Clusters in the Hubble Space Telescope Archive. II. Structural Parameters. **Astronomical Journal**, v. 123, p. 1937–1952, Apr. 2002.

- [9] BASSINO, L. P.; FAIFER, F. R.; FORTE, J. C.; DIRSCH, B.; RICHTLER, T.; GEISLER, D.; SCHUBERTH, Y. Large-scale study of the NGC 1399 globular cluster system in Fornax. **Astronomy and Astrophysics**, v. 451, p. 789–796, Jun. 2006.
- [10] BAUM, W. A. The Distribution of Luminosity in Elliptical Galaxies. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 67, p. 328–+, Oct. 1955.
- [11] BEASLEY, M. A.; BAUGH, C. M.; FORBES, D. A.; SHARPLES, R. M.; FRENK, C. S. On the formation of globular cluster systems in a hierarchical Universe. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 333, p. 383–399, Jun. 2002.
- [12] BENDER, R. Velocity anisotropies and isophote shapes in elliptical galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 193, p. L7–L10, Mar. 1988.
- [13] BENDER, R.; BURSTEIN, D.; FABER, S. M. Dynamically hot galaxies. I - Structural properties. **Astrophysical Journal**, v. 399, p. 462–477, Nov. 1992.
- [14] BICA, E. Population synthesis in galactic nuclei using a library of star clusters. **Astronomy and Astrophysics**, v. 195, p. 76–92, Apr. 1988.
- [15] BICA, E.; BONATTO, C.; BARBUY, B.; ORTOLANI, S. Globular cluster system and Milky Way properties revisited. **Astronomy and Astrophysics**, v. 450, p. 105–115, Apr. 2006.
- [16] BRESSAN, A.; CHIOSI, C.; FAGOTTO, F. Spectrophotometric evolution of elliptical galaxies. 1: Ultraviolet excess and color-magnitude-redshift relations. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 94, p. 63–115, Aug. 1994.
- [17] BRODIE, J. P.; LARSEN, S. S. New Members of the Cluster Family in Nearby Lenticular Galaxies. **Astronomical Journal**, v. 124, p. 1410–1417, Sep. 2002.
- [18] BRODIE, J. P.; STRADER, J. Extragalactic Globular Clusters and Galaxy Formation. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 44, p. 193–267, Sep. 2006.
- [19] BRUZUAL, G.; CHARLOT, S. Stellar population synthesis at the resolution of 2003. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 344, p. 1000–1028, Oct. 2003.
- [20] BURKERT, A.; BRODIE, J.; LARSEN, S. Faint Fuzzies and the Formation of Lenticular Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 628, p. 231–235, Jul. 2005.
- [21] BUTA, R.; WILLIAMS, K. L. Total and effective colors of 501 galaxies in the Cousins VRI photometric system. **Astronomical Journal**, v. 109, p. 543–557, Feb. 1995.

- [22] CHIES-SANTOS, A. L.; PASTORIZA, M. G.; SANTIAGO, B. X.; FORBES, D. A. Globular Cluster System of NGC5846 (Chies-Santos+, 2006). **VizieR Online Data Catalog**, v. 345, p. 50453–+, May 2006a.
- [23] CHIES-SANTOS, A. L.; PASTORIZA, M. G.; SANTIAGO, B. X.; FORBES, D. A. The globular cluster system of NGC 5846 revisited: colours, sizes and X-ray counterparts. **Astronomy and Astrophysics**, v. 455, p. 453–459, Aug. 2006b.
- [24] CHIES-SANTOS, A. L.; SANTIAGO, B. X.; PASTORIZA, M. G. High resolution imaging of the early-type galaxy NGC 1380: an insight into the nature of extended extragalactic star clusters. **ArXiv Astrophysics e-prints**, Feb. 2007a.
- [25] CHIES-SANTOS, A. L.; SANTIAGO, B. X.; PASTORIZA, M. G. The Star Clusters of NGC 1380 with HST. **VizieR Online Data Catalog**, v. , p. –, 2007b.
- [26] CÔTÉ, P.; MCLAUGHLIN, D. E.; COHEN, J. G.; BLAKESLEE, J. P. Dynamics of the Globular Cluster System Associated with M49 (NGC 4472): Cluster Orbital Properties and the Distribution of Dark Matter. **Astrophysical Journal**, v. 591, p. 850–877, Jul. 2003.
- [27] CÔTÉ, P.; MCLAUGHLIN, D. E.; HANES, D. A.; BRIDGES, T. J.; GEISLER, D.; MERRITT, D.; HESSER, J. E.; HARRIS, G. L. H.; LEE, M. G. Dynamics of the Globular Cluster System Associated with M87 (NGC 4486). II. Analysis. **Astrophysical Journal**, v. 559, p. 828–850, Oct. 2001.
- [28] COWIE, L. L.; SONGAILA, A.; HU, E. M.; COHEN, J. G. New Insight on Galaxy Formation and Evolution From Keck Spectroscopy of the Hawaii Deep Fields. **Astronomical Journal**, v. 112, p. 839–+, Sep. 1996.
- [29] CÔTÉ, P.; MARZKE, R. O.; WEST, M. J. The Formation of Giant Elliptical Galaxies and Their Globular Cluster Systems. **Astrophysical Journal**, v. 501, p. 554–+, Jul. 1998.
- [30] DELLA VALLE, M.; KISSLER-PATIG, M.; DANZIGER, J.; STORM, J. Globular cluster calibration of the peak brightness of the Type IA supernova 1992A and the value of H_0 . **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 299, p. 267–276, Aug. 1998.
- [31] DRESSLER, A. Galaxy morphology in rich clusters - Implications for the formation and evolution of galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 236, p. 351–365, Mar. 1980.
- [32] DRESSLER, A.; OEMLER, A. J.; COUCH, W. J.; SMAIL, I.; ELLIS, R. S.; BARGER, A.; BUTCHER, H.; POGGIANTI, B. M.; SHARPLES, R. M. Evolution since

- $Z = 0.5$ of the Morphology-Density Relation for Clusters of Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 490, p. 577–+, Dec. 1997.
- [33] EGGEN, O. J.; LYNDEN-BELL, D.; SANDAGE, A. R. Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed. **Astrophysical Journal**, v. 136, p. 748–+, Nov. 1962.
- [34] ELSON, R. A. W.; SANTIAGO, B. X. The M87 globular cluster system revisited. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 280, p. 971–976, Jun. 1996.
- [35] FABER, S. M.; WEGNER, G.; BURSTEIN, D.; DAVIES, R. L.; DRESSLER, A.; LYNDEN-BELL, D.; TERLEVICH, R. J. Spectroscopy and photometry of elliptical galaxies. VI - Sample selection and data summary. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 69, p. 763–808, Apr. 1989.
- [36] FAN, X.; CARILLI, C. L.; KEATING, B. Observational Constraints on Cosmic Reionization. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 44, p. 415–462, Sep. 2006.
- [37] FELLHAUER, M.; KROUPA, P. The Possible Origin of the Faint Fuzzy Star Clusters in NGC 1023. **Astronomical Journal**, v. 124, p. 2006–2011, Oct. 2002.
- [38] FERRARESE, L.; MOULD, J. R.; KENNICUTT, R. C., JR.; HUCHRA, J.; FORD, H. C.; FREEDMAN, W. L.; STETSON, P. B.; MADORE, B. F.; SAKAI, S.; GIBSON, B. K.; GRAHAM, J. A.; HUGHES, S. M.; ILLINGWORTH, G. D.; KELSON, D. D.; MACRI, L.; SEBO, K.; SILBERMANN, N. A. The Hubble Space Telescope Key Project on the Extragalactic Distance Scale. XXVI. The Calibration of Population II Secondary Distance Indicators and the Value of the Hubble Constant. **Astrophysical Journal**, v. 529, p. 745–767, Feb. 2000.
- [39] FILHO, M. E.; FRATERNALI, F.; MARKOFF, S.; NAGAR, N. M.; BARTHEL, P. D.; HO, L. C.; YUAN, F. Further clues to the nature of composite LINER/H II galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 418, p. 429–443, May 2004.
- [40] FORBES, D. A.; BEASLEY, M. A.; BRODIE, J. P.; KISSLER-PATIG, M. Age Estimates for Globular Clusters in NGC 1399. **Astrophysical Journal Letters**, v. 563, p. L143–L146, Dec. 2001a.
- [41] FORBES, D. A.; BRODIE, J. P.; GRILLMAIR, C. J. On the Origin of Globular Clusters in Elliptical and cD Galaxies. **Astronomical Journal**, v. 113, p. 1652–+, May 1997a.

- [42] FORBES, D. A.; BRODIE, J. P.; HUCHRA, J. Globular Cluster Luminosity Functions and the Hubble Constant from WFPC2 Imaging: The Dominant Group Elliptical NGC 5846. **Astronomical Journal**, v. 112, p. 2448–+, Dec. 1996.
- [43] FORBES, D. A.; BRODIE, J. P.; HUCHRA, J. Hubble Space Telescope Imaging of the Globular Cluster System Around NGC 5846. **Astronomical Journal**, v. 113, p. 887–+, Mar. 1997b.
- [44] FORBES, D. A.; GEORGAKAKIS, A. E.; BRODIE, J. P. Keck imaging of the globular cluster systems in the early-type galaxies NGC 1052 and 7332. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 325, p. 1431–1440, Aug. 2001b.
- [45] FUKUGITA, M.; HOGAN, C. J.; PEEBLES, P. J. E. The Cosmic Baryon Budget. **Astrophysical Journal**, v. 503, p. 518–+, Aug. 1998.
- [46] GEISLER, D.; LEE, M. G.; KIM, E. Washington Photometry of the Globular Cluster System of NGC 4472.I. Analysis of the Metallicities. **Astronomical Journal**, v. 111, p. 1529–+, Apr. 1996.
- [47] HARRIS, W. E. Globular cluster systems in galaxies beyond the Local Group. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 29, p. 543–579, 1991.
- [48] HARRIS, W. E. Globular cluster systems. In: SAAS-FEE ADVANCED COURSE 28: STAR CLUSTERS, Labhardt, L.; Binggeli, B., editores, p. 223–+, 2001.
- [49] HARRIS, W. E.; HARRIS, G. L. H.; HOLLAND, S. T.; MCLAUGHLIN, D. E. Structural Parameters for Globular Clusters in NGC 5128. **Astronomical Journal**, v. 124, p. 1435–1451, Sep. 2002.
- [50] HARRIS, W. E.; RACINE, R. Globular clusters in galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 17, p. 241–274, 1979.
- [51] HARRIS, W. E.; VAN DEN BERGH, S. Globular clusters in galaxies beyond the local group. I - New cluster systems in selected northern ellipticals. **Astronomical Journal**, v. 86, p. 1627–1642, Nov. 1981.
- [52] HEMPEL, M.; HILKER, M.; KISSLER-PATIG, M.; PUZIA, T. H.; MINNITI, D.; GOUDFROOIJ, P. Extragalactic globular clusters in the near infrared III. NGC 5846 and NGC 7192. Quantifying the age distribution of sub-populations. **Astronomy and Astrophysics**, v. 405, p. 487–497, Jul. 2003.
- [53] HOLTZMAN, J. A.; BURROWS, C. J.; CASERTANO, S.; HESTER, J. J.; TRAUGER, J. T.; WATSON, A. M.; WORTHEY, G. The Photometric Performance and

Calibration of WFPC2. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 107, p. 1065–+, Nov. 1995a.

- [54] HOLTZMAN, J. A.; HESTER, J. J.; CASERTANO, S.; TRAUGER, J. T.; WATSON, A. M.; BALLESTER, G. E.; BURROWS, C. J.; CLARKE, J. T.; CRISP, D.; EVANS, R. W.; GALLAGHER, J. S., III; GRIFFITHS, R. E.; HOESSEL, J. G.; MATTHEWS, L. D.; MOULD, J. R.; SCOWEN, P. A.; STAPELFELDT, K. R.; WESTPHAL, J. A. The performance and calibration of WFPC2 on the Hubble Space Telescope. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 107, p. 156–178, Feb. 1995b.
- [55] HUBBLE, E. Nebulous Objects in Messier 31 Provisionally Identified as Globular Clusters. **Astrophysical Journal**, v. 76, p. 44–+, Jul. 1932.
- [56] HWANG, N.; LEE, M. G. The Spatial Distribution of Faint Fuzzy Star Clusters in NGC 5195. **Astrophysical Journal Letters**, v. 638, p. L79–L82, Feb. 2006.
- [57] IRWIN, J. A.; BREGMAN, J. N.; ATHEY, A. E. The Lack of Very Ultraluminous X-Ray Sources in Early-Type Galaxies. **Astrophysical Journal Letters**, v. 601, p. L143–L146, Feb. 2004.
- [58] JORDÁN, A.; CÔTÉ, P.; BLAKESLEE, J. P.; FERRARESE, L.; MCLAUGHLIN, D. E.; MEI, S.; PENG, E. W.; TONRY, J. L.; MERRITT, D.; MILOSAVLJEVIĆ, M.; SARAZIN, C. L.; SIVAKOFF, G. R.; WEST, M. J. The ACS Virgo Cluster Survey. X. Half-Light Radii of Globular Clusters in Early-Type Galaxies: Environmental Dependencies and a Standard Ruler for Distance Estimation. **Astrophysical Journal**, v. 634, p. 1002–1019, Dec. 2005.
- [59] JORDÁN, A. A Possible Explanation for the Size Difference of Red and Blue Globular Clusters. **Astrophysical Journal Letters**, v. 613, p. L117–L120, Oct. 2004.
- [60] KAISER, N. On the spatial correlations of Abell clusters. **Astrophysical Journal Letters**, v. 284, p. L9–L12, Sep. 1984.
- [61] KING, I. The structure of star clusters. I. an empirical density law. **Astronomical Journal**, v. 67, p. 471–+, Oct. 1962.
- [62] KISSLER-PATIG, M.; FORBES, D. A.; MINNITI, D. Constraints on the merger models of elliptical galaxies from their globular cluster systems. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 298, p. 1123–1132, Aug. 1998.
- [63] KISSLER-PATIG, M.; KOHLE, S.; HILKER, M.; RICHTLER, T.; INFANTE, L.; QUINTANA, H. Globular cluster systems of early-type galaxies in Fornax. **Astronomy and Astrophysics**, v. 319, p. 470–480, Mar. 1997a.

- [64] KISSLER-PATIG, M.; RICHTLER, T.; STORM, J.; DELLA VALLE, M. Halo and bulge/disk globular clusters in the S0 galaxy NGC 1380. **Astronomy and Astrophysics**, v. 327, p. 503–512, Nov. 1997b.
- [65] KUNDU, A.; MACCARONE, T. J.; ZEPF, S. E. The Low-Mass X-Ray Binary-Globular Cluster Connection in NGC 4472. **Astrophysical Journal Letters**, v. 574, p. L5–L9, Jul. 2002.
- [66] KUNDU, A.; WHITMORE, B. C. Wide Field Planetary Camera 2 Imaging of the Globular Cluster System of the S0 Galaxy NGC 3115. **Astronomical Journal**, v. 116, p. 2841–2853, Dec. 1998.
- [67] KUNDU, A.; WHITMORE, B. C. New Insights from Hubble Space Telescope Studies of Globular Cluster Systems. II. Analysis of 29 S0 Systems. **Astronomical Journal**, v. 122, p. 1251–1270, Sep. 2001.
- [68] KUNDU, A.; ZEPF, S. E. Bimodal Infrared Colors of the M87 Globular Cluster System: Peaks in the Metallicity Distribution. **ArXiv Astrophysics e-prints**, Mar. 2007.
- [69] KUNTSCHNER, H.; ZIEGLER, B. L.; SHARPLES, R. M.; WORTHEY, G.; FRICKE, K. J. VLT spectroscopy of NGC 3115 globular clusters. **Astronomy and Astrophysics**, v. 395, p. 761–777, Dec. 2002.
- [70] LARSEN, S. S. Young massive star clusters in nearby galaxies. II. Software tools, data reductions and cluster sizes. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 139, p. 393–415, Oct. 1999.
- [71] LARSEN, S. S.; BRODIE, J. P. Hubble Space Telescope Observations of Star Clusters in NGC 1023: Evidence for Three Cluster Populations? **Astronomical Journal**, v. 120, p. 2938–2949, Dec. 2000.
- [72] LARSEN, S. S.; BRODIE, J. P. On the Size Difference between Red and Blue Globular Clusters. **Astrophysical Journal**, v. 593, p. 340–351, Aug. 2003.
- [73] LARSEN, S. S.; BRODIE, J. P.; HUCHRA, J. P.; FORBES, D. A.; GRILLMAIR, C. J. Properties of Globular Cluster Systems in Nearby Early-Type Galaxies. **Astronomical Journal**, v. 121, p. 2974–2998, Jun. 2001.
- [74] LARSON, R. B. Dynamical models for the formation and evolution of spherical galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 166, p. 585–616, Mar. 1974.

- [75] MCDERMID, R. M.; BACON, R.; KUNTSCHNER, H.; EMSELLEM, E.; SHAPIRO, K. L.; BUREAU, M.; CAPPELLARI, M.; DAVIES, R. L.; FALCÓN-BARROSO, J.; KRAJNOVIĆ, D.; PELETIER, R. F.; SARZI, M.; DE ZEEUW, T. Stellar kinematics and populations of early-type galaxies with the SAURON and OASIS integral-field spectrographs. **New Astronomy Review**, v. 49, p. 521–535, Jan. 2006.
- [76] MERRIFIELD, M. R. Nuclear activity and the dynamics of elliptical galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 353, p. L13–L16, Sep. 2004.
- [77] MILONE, A. D. C.; RICKES, M. G.; PASTORIZA, M. G. The elliptical galaxies NGC 1052 and NGC 7796: stellar populations and abundance alpha/Fe ratio. **ArXiv Astrophysics e-prints**, Mar. 2007.
- [78] MOORE, B.; KATZ, N.; LAKE, G.; DRESSLER, A.; OEMLER, A. Galaxy harassment and the evolution of clusters of galaxies. **Nature**, v. 379, p. 613–616, Feb. 1996.
- [79] OSTROV, P.; GEISLER, D.; FORTE, J. C. The metallicity gradient and distribution function of globular clusters around NGC 1399. **Astronomical Journal**, v. 105, p. 1762–1778, May 1993.
- [80] PENG, E. W.; CÔTÉ, P.; JORDÁN, A.; BLAKESLEE, J. P.; FERRARESE, L.; MEI, S.; WEST, M. J.; MERRITT, D.; MILOSAVLJEVIĆ, M.; TONRY, J. L. The ACS Virgo Cluster Survey. XI. The Nature of Diffuse Star Clusters in Early-Type Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 639, p. 838–857, Mar. 2006.
- [81] PUZIA, T. H.; KISSLER-PATIG, M.; BRODIE, J. P.; HUCHRA, J. P. The Age Difference between the Globular Cluster Subpopulations in NGC 4472. **Astronomical Journal**, v. 118, p. 2734–2750, Dec. 1999.
- [82] REMBOLD, S. B.; PASTORIZA, M. G. The cluster of galaxies LCDCS-S001: basic spectroscopic data and stellar population. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 374, p. 1056–1066, Jan. 2007.
- [83] RENZINI, A. Stellar Population Diagnostics of Elliptical Galaxy Formation. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 44, p. 141–192, Sep. 2006.
- [84] RHODE, K. L.; ZEPF, S. E. The Globular Cluster Systems of the Early-Type Galaxies NGC 3379, NGC 4406, and NGC 4594 and Implications for Galaxy Formation. **Astronomical Journal**, v. 127, p. 302–317, Jan. 2004.

- [85] RHODE, K. L.; ZEPF, S. E.; SANTOS, M. R. Metal-poor Globular Clusters and the Formation of Their Host Galaxies. **Astrophysical Journal Letters**, v. 630, p. L21–L24, Sep. 2005.
- [86] RICHTLER, T. The Globular Cluster Luminosity Function: New Progress in Understanding an Old Distance Indicator. In: LNP VOL. 635: STELLAR CANDLES FOR THE EXTRAGALACTIC DISTANCE SCALE, Alloin, D.; Gieren, W., editores, p. 281–305, 2003.
- [87] RICHTLER, T.; DIRSCH, B.; GEBHARDT, K.; GEISLER, D.; HILKER, M.; ALONSO, M. V.; FORTE, J. C.; GREBEL, E. K.; INFANTE, L.; LARSEN, S.; MINNITI, D.; REJKUBA, M. The Globular Cluster System of NGC 1399. II. Kinematics of a Large Sample of Globular Clusters. **Astronomical Journal**, v. 127, p. 2094–2113, Apr. 2004.
- [88] RICKES, M. G.; PASTORIZA, M. G.; BONATTO, C. The elliptical galaxy NGC 5044: Stellar population and ionized gas. **Astronomy and Astrophysics**, v. 419, p. 449–458, May 2004.
- [89] RICKES, M. G.; PASTORIZA, M. G.; BONATTO, C. Star Formation, metallicity gradient and ionized gas: clues to the star formation of the elliptical galaxies NGC 6868 and NGC 5903. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. , p. –, 2007.
- [90] SANTOS, M. R. Extragalactic Globular Cluster Systems. In: EXTRAGALACTIC GLOBULAR CLUSTER SYSTEMS, Kissler-Patig, M., editor, 2003.
- [91] SARAZIN, C. L.; IRWIN, J. A.; BREGMAN, J. N. Resolving the Mystery of X-Ray-faint Elliptical Galaxies: Chandra X-Ray Observations of NGC 4697. **Astrophysical Journal Letters**, v. 544, p. L101–L105, Dec. 2000.
- [92] SARAZIN, C. L.; IRWIN, J. A.; BREGMAN, J. N. Chandra X-Ray Observations of the X-Ray Faint Elliptical Galaxy NGC 4697. **Astrophysical Journal**, v. 556, p. 533–555, Aug. 2001.
- [93] SARAZIN, C. L.; KUNDU, A.; IRWIN, J. A.; SIVAKOFF, G. R.; BLANTON, E. L.; RANDALL, S. W. Low-Mass X-Ray Binaries and Globular Clusters in Early-Type Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 595, p. 743–759, Oct. 2003.
- [94] SCARLATA, C.; CAROLLO, C. M.; LILLY, S. J.; FELDMANN, R.; KAMPCZYK, P.; RENZINI, A.; CIMATTI, A.; HALLIDAY, C.; DADDI, E.; SARGENT, M. T.; KOEKEMOER, A.; SCOVILLE, N.; KNEIB, J.; LEAUTHAUD, A.; MASSEY, R.;

- RHODES, J.; TASCA, L.; CAPAK, ; MCCRACKEN, H. J.; MOBASHER, B.; TANIGUCHI, Y.; THOMPSON, D.; AJIKI, M.; AUSSEL, H.; MURAYAMA, T.; SANDERS, D. B.; SASAKI, S.; SHIOYA, Y.; TAKAHASHI, M. The redshift evolution of early-type galaxies in COSMOS: Do massive early-type galaxies form by dry mergers? **ArXiv Astrophysics e-prints**, Jan. 2007.
- [95] SCHLEGEL, D. J.; FINKBEINER, D. P.; DAVIS, M. Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. **Astrophysical Journal**, v. 500, p. 525–+, Jun. 1998.
- [96] SCHWEIZER, F. Star formation in colliding and merging galaxies. In: NEARLY NORMAL GALAXIES. FROM THE PLANCK TIME TO THE PRESENT, Faber, S. M., editor, p. 18–25, 1987.
- [97] SCHWEIZER, F. Galaxy Interactions: Overview. In: BULLETIN OF THE AMERICAN ASTRONOMICAL SOCIETY, p. 830–+, May 2001.
- [98] SECKER, J. A statistical investigation into the shape of the globular cluster luminosity distribution. **Astronomical Journal**, v. 104, p. 1472–1481, Oct. 1992.
- [99] SHAPLEY, H. Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. VI. On the determination of the distances of globular clusters. **Astrophysical Journal**, v. 48, p. 89–124, Sep. 1918.
- [100] STRADER, J.; BEASLEY, M. A.; BRODIE, J. P. Globular Cluster Metallicity Subpopulations in NGC 4472. **ArXiv Astrophysics e-prints**, Jan. 2007.
- [101] STRADER, J.; BRODIE, J. P.; CENARRO, A. J.; BEASLEY, M. A.; FORBES, D. A. Extragalactic Globular Clusters: Old Spectroscopic Ages and New Views on Their Formation. **Astronomical Journal**, v. 130, p. 1315–1323, Oct. 2005.
- [102] TOOMRE, A.; TOOMRE, J. Galactic Bridges and Tails. **Astrophysical Journal**, v. 178, p. 623–666, Dec. 1972.
- [103] TRINCHIERI, G.; GOUDFROOIJ, P. The peculiar small-scale X-ray morphology of NGC 5846 observed with Chandra. **Astronomy and Astrophysics**, v. 386, p. 472–486, May 2002.
- [104] VAN DEN BERGH, S. Stellar populations in galaxies. **araa**, v. 13, p. 217–255, 1975.
- [105] VAN DEN BERGH, S. Does the galaxy contain two populations of globular clusters. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 94, p. 640–+, Aug. 1982.

- [106] VAN DEN BERGH, S. Some Integrated Properties of Galactic Globular Clusters. **Astronomical Journal**, v. 112, p. 2634–+, Dec. 1996.
- [107] VAN DEN BERGH, S.; MORBEY, C.; PAZDER, J. Diameters of Galactic globular clusters. **Astrophysical Journal**, v. 375, p. 594–599, Jul. 1991.
- [108] VERBUNT, F.; HUT, P. The Globular Cluster Population of X-Ray Binaries. In: IAU SYMP. 125: THE ORIGIN AND EVOLUTION OF NEUTRON STARS, Helfand, D. J.; Huang, J.-H., editores, p. 187–+, 1987.
- [109] VERBUNT, F.; LEWIN, W. H. G. Globular Cluster X-ray Sources. **ArXiv Astrophysics e-prints**, Apr. 2004.
- [110] WEST, M. J. Biased Globular Cluster Formation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 265, p. 755–+, Dec. 1993.
- [111] WHITE, S. D. M.; REES, M. J. Core condensation in heavy halos - A two-stage theory for galaxy formation and clustering. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 183, p. 341–358, May 1978.
- [112] WHITMORE, B. C.; SCHWEIZER, F. Hubble space telescope observations of young star clusters in NGC-4038/4039, 'the antennae' galaxies. **Astronomical Journal**, v. 109, p. 960–980, Mar. 1995.
- [113] WORTHEY, G. Comprehensive stellar population models and the disentanglement of age and metallicity effects. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 95, p. 107–149, Nov. 1994.
- [114] XU, Y.; XU, H.; ZHANG, Z.; KUNDU, A.; WANG, Y.; WU, X.-P. Chandra Study of X-Ray Point Sources in the Early-Type Galaxy NGC 4552 (M89). **Astrophysical Journal**, v. 631, p. 809–819, Oct. 2005.
- [115] YOON, S.-J.; YI, S. K.; LEE, Y.-W. Explaining the Color Distributions of Globular Cluster Systems in Elliptical Galaxies. **Science**, v. 311, p. 1129–1132, Feb. 2006.
- [116] ZEPF, S. E.; ASHMAN, K. M. Globular Cluster Systems Formed in Galaxy Mergers. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 264, p. 611–+, Oct. 1993.
- [117] ZEPF, S. E.; ASHMAN, K. M.; GEISLER, D. Constraints on the formation history of the elliptical galaxy NGC 3923 from the colors of its globular clusters. **Astrophysical Journal**, v. 443, p. 570–577, Apr. 1995.

- [118] ZEPF, S. E.; BEASLEY, M. A.; BRIDGES, T. J.; HANES, D. A.; SHARPLES, R. M.; ASHMAN, K. M.; GEISLER, D. Dynamical Constraints on the Formation of NGC 4472 and Its Globular Clusters. **Astronomical Journal**, v. 120, p. 2928–2937, Dec. 2000.