

Anna Bárbara de Andrade Queiroz

**Aplicação de um método estatístico
para detecção de
populações estelares**

Porto Alegre

2015

Anna Bárbara de Andrade Queiroz

**Aplicação de um método estatístico
para detecção de
populações estelares**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
no Instituto de Física da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, a fim de preencher os
requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Física com ênfase em Astrofísica.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Instituto de Física

Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia

Orientador: Basílio Xavier Santiago

Porto Alegre

2015

*“Astronomy is one of the
sublimest fields of human investigation.
The mind that grasps its facts
and principles receives something
of the enlargement and grandeur
belonging to the science itself.
It is a quickener of devotion”
(Horace Mann)*

Agradecimentos

A minha mãe, Neusa, que me ensinou a sempre lutar pelos meus sonhos e nunca desistir deles.

Ao meu orientador Prof. Basílio, por me ensinar a fazer o meu melhor pela profissão que amo.

Aos meus irmãos Douglas e Rafael, por todo o carinho, zelo e conforto.

Ao meu padrasto José Juan, por ter me ensinado o pensamento científico.

Ao meu pai Renato, por me fazer ver as pequenas coisas da vida que realmente valem a pena.

A todos os meus colegas/amigos de curso, especialmente a Ivanessa, Felipe, Gustavo, Laís, Thayse e Rafael, que estiveram comigo em ambos os momentos difíceis e divertidos da graduação.

Aos meus colegas de pesquisa, Eduardo, Elmer, Adriano e Marina, por me aconselharem e me ajudarem sempre que necessário.

A todos os professores com que tive contato ao longo do curso, por todos os ensinamentos e conselhos.

Especialmente agradeço ao Elmer Luque, pela contribuição de grande parte do trabalho apresentado aqui.

Resumo

O estudo em detalhe do processo de evolução e formação da Via Láctea cobre diversos aspectos astrofísicos e necessita de observações fotométricas e espectroscópicas profundas e em grandes volumes Galácticos. Um mecanismo importante proposto para a evolução das galáxias é pela acreção de matéria por atração gravitacional, ou seja, pequenas estruturas estelares entram em órbita ou são completamente fundidas à nossa Galáxia ao longo de sua história. Grandes levantamentos fotométricos, como o Sloan Digital Sky Survey (SDSS) e o Dark Energy Survey (DES), vêm nos dando a oportunidade de detectar e fazer um censo dessas estruturas estelares que ainda se encontram nos limites da Via Láctea, o halo Galáctico.

Inspirados por essas questões e pelos recentes levantamentos fotométricos, desenvolvemos o algoritmo SparSEx, um método para detecção de novas subestruturas estelares. O método é uma combinação da técnica de matched filter com um simulador de populações estelares simples e um detector sistemático de sobredensidades. O método foi validado pela busca de subestruturas já conhecidas, tais como aglomerados estelares, galáxias anãs e correntes estelares, em regiões cobertas pelo Baryon Oscillation Spectroscopy Survey (BOSS) e pelo SDSS. Nós recuperamos com sucesso todos os aglomerados e anãs conhecidas com alta significância, além de também recuperarmos a cauda de maré da galáxia anã de Sagitário.

Após a validação do método, aplicamos o algoritmo aos dados dos dois primeiros anos do DES, materializados pelos catálogos de uso interno chamados respectivamente de Y1A1 e Y2Q1. Essa aplicação nos revelou 17 candidatos a galáxias anãs nunca antes detectados. Muitas dessas subestruturas estão próximas do sistema de Magalhães e têm baixa luminosidade. Esses resultados, obtidos em conjunto com colaboração do DES, foram publicados em fevereiro e agosto deste ano.

Esperamos que o algoritmo SparSEx possa ser usado em dados futuros do DES e também em novos levantamentos fotométricos, como, por exemplo, o Large Synoptic Survey Telescope, aumentando nosso conhecimento e acurácia sobre as subestruturas existentes no halo Galáctico e, por conseguinte, nosso conhecimento sobre a evolução da Via Láctea.

Palavras-chave: Via Láctea. Subestruturas. Halo Galáctico.

Abstract

The detailed study of the Milk Way process of formation and evolution covers a wide range of astrophysical aspects and needs deep photometric and spectroscopic observations on large Galactic volumes. A suggested important mechanism for the evolution of galaxies is through the matter accretion due to gravitational attraction. In other words, small stellar structures come into orbiting or are completely consumed by our Galaxy on the course of its history. Wide photometric surveys, such as Sloan Digital Survey (SDSS) and the Dark Energy Survey (DES), give us the new opportunity to detect and complete the census of these stellar structures that are still in the limits of the Milk Way, in the Galactic halo.

Inspired by these questions and by the recent photometric surveys, we developed the SparSEx algorithm, a method for detecting new stellar substructures. The method is a combination of the matched filter technique with a simulator of simple stellar population and a systematic detector of over-densities. The method was validated by the search for known substructures, as globular clusters, dwarf galaxies and stellar streams, on regions covered by the Baryon Oscillation Spectroscopy Survey (BOSS) and by SDSS. We successfully recover all the known globular clusters and dwarf galaxies with high significance. We also recovered the Sagittarius dwarf stellar stream.

After the method validation, we applied the algorithm to the data of the two first years of DES, which are contained in the internal collaboration called respectively by Y1A1 and Y2Q1. This application revealed 17 dwarf galaxy candidates never detected before. Many of these substructure are near the Magellanic clouds, and are poor stellar populations. These results, which were obtained by our method and also by other methods inside the DES collaboration, were published in February and August of this year.

We hope that the SparSEx algorithm can be used on future data from DES and also new photometric surveys, like, for example, the Large Synoptic Survey Telescope. This will increase our knowledge and accuracy about the existing substructures that are located in the Galactic halo, and therefore our knowledge about the Milk way evolution.

Keywords: Milk Way. Substructures. Galactic Halo.

Lista de abreviaturas e siglas

VL	Via Láctea
DES	Dark Energy Survey
Y1A1	Catálogo referente aos dados do primeiro ano do Dark Energy Survey
Y2Q1	Catálogo referente aos dados do segundo ano do Dark Energy Survey
SDSS	Sloan Digital Sky Survey
BOSS	Baryon Oscillation Spectroscopy Survey
2MASS	Two Micron All Sky Survey
MF	Matched Filter
CMD	Diagrama Cor Magnitude
SSP	Populações Estelares Simples
PDF	Função distribuição de probabilidade
IMF	Função de massa inicial
CTIO	Cerro Tololo Inter-American Observatory
DESDM	Dark Energy Survey Data Management

Sumário

	Introdução	8
	Objetivos	12
I	METODOLOGIA	14
1	DADOS	15
1.1	Sloan Digital Sky Survey	15
1.2	Dark Energy Survey	16
2	MATCHED FILTER	19
3	SIMULAÇÕES	21
4	IDENTIFICAÇÃO DOS CANDIDATOS	23
II	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	25
5	VALIDAÇÃO	26
6	APLICAÇÃO NOS DADOS DO DES	37
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS	44

Introdução

Chamamos de satélites da Via Láctea (VL) galáxias anãs e aglomerados globulares que se encontram nos limites do halo Galáctico e estão gravitacionalmente ligados a VL. Estes sistemas são em geral velhos, pobres em metal e as galáxias anãs também são ricas em matéria escura. Por essas características, esses satélites carregam ricas informações sobre a formação e evolução da nossa Galáxia. Dentre as muitas aplicações para a detecção dos satélites estão: o modelamento do componente esferoidal da Galáxia, descrição dos episódios iniciais de acreção de massa e até mesmo a natureza das partículas de matéria escura. Muitas das recentes descobertas de satélites incluem estruturas com raios, massas, luminosidades e brilho superficial bem pequenos em comparação a outras galáxias ou mesmo a aglomerados globulares, o que também nos permite estender as relações de escala para esses parâmetros.

Antes do advento de grandes surveys como o Sloan Digital Sky Survey (SDSS)¹, o Two Micron All Sky Survey (2MASS)² e o Dark Energy Survey (DES)³, conhecíamos somente alguns satélites, cerca de 12 galáxias anãs (McConnachie, 2012) incluindo a pequena e grande nuvem de Magalhães, que podem ser avistadas a olho nu, e cerca de 50 aglomerados globulares (Harris, 1996). O censo dessas subestruturas mudou drasticamente nos últimos quinze anos devido a esses grandes levantamentos (Willman, 2005; Zucker et al., 2006; Belokurov et al., 2010; Vidrih et al., 2007). Já podemos contabilizar, Levando em conta as mais novas descobertas do DES, cerca de 36 galáxias anãs e 57 aglomerados globulares. Diversos outros aglomerados estelares foram descobertos durante os últimos anos, porém a sua classificação como galáxia anã ou aglomerado globular ainda não é clara (Belokurov et al., 2010; Balbinot et al., 2013; Willman et al., 2005; Kim et al., 2015a; Kim et al., 2015b). Algumas características que distinguem galáxias anãs de aglomerados globulares são: a dispersão de metalicidades indicando múltiplas gerações de formação estelar, potencial gravitacional profundo o suficiente para reter ejeções de supernova, seu local no espaço de luminosidade X raio físico e também ser um sistema rico em matéria escura (Willman; Strader, 2012).

Foi no último ano que 17 candidatos a galáxias anãs foram detectadas através do DES (Bechtol et al., 2015; The DES Collaboration et al., 2015). Desses 17 candidatos, 5 estão em local ambíguo no espaço luminosidade X raio físico para distinção entre galáxia anã e aglomerado globular. Até o momento 3 dos 17 candidatos foram confirmados como galáxias anãs através de observações espectroscópicas que mostram suas assinaturas

¹ <<http://www.sdss.org/>>

² <<http://www.ipac.caltech.edu/2mass/>>

³ <<http://www.darkenergysurvey.org/>>

cinemáticas e químicas são consistentes com os de uma galáxia (Koposov et al., 2015b; Kirby; Simon; Cohen, 2015).

Na Figura 0.0.1 ⁴ vemos um mapa Galáctico com a distribuição espacial de todas as galáxias anãs conhecidas até o momento, inclusive os novos candidatos detectados com os dados dos dois primeiros anos do DES, chamamos de Y1A1 os dados referentes ao primeiro ano e Y2Q1 os dados referentes ao segundo ano. O DES ainda está coletando dados observacionais com a Dark Energy Camera (DECam) acoplada ao Blanco 4-meter Telescope que se situa no sítio observacional de Cerro Tololo. Portanto espera-se que o DES revele ainda mais alguns satélites da VL. Em fato (Tollerud et al., 2008) previu que seriam descobertos de 19 a 37 objetos no DES, assumindo que as características de detecção desse levantamento são parecidas com as do SDSS.

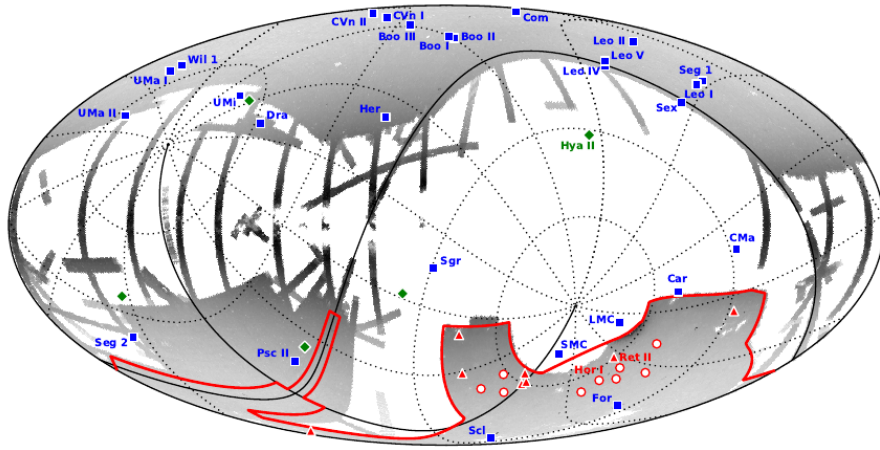


Figura 0.0.1 – Mapa com a distribuição dos satélites da VL. O footprint do DES está representado pelo delineamento vermelho, os triângulos vermelhos (Willman; Strader, 2012) representam os 8 candidatos à galáxias anãs detectados com os dados do Y1A1, os círculos vermelhos (Bechtol et al., 2015; The DES Collaboration et al., 2015) representam os 9 candidatos detectados com os dados do Y2Q1, outras cinco recentes descobertas fora do footprint do DES estão marcadas por losangos verdes (Laevens et al., 2015b; Martin et al., 2015; Kim et al., 2015a; Laevens et al., 2015a) e os quadrados azuis (McConnachie, 2012) representam galáxias já detectadas antes de 2015. A figura está em coordenadas Galácticas, com a grade pontilhada mostrando a projeção das coordenadas equatoriais. O mapa mostra a densidade logarítmica de estrelas em escala de cores cinza.

Alguns dos satélites da VL estão sofrendo perda de massa: devido a processos dinâmicos e gravitacionais de interação com a Via Láctea (VL), as estrelas são jogadas para fora de suas galáxias, formando correntes estelares no interior da VL (White; Frenk, 1991). Fazendo-se um modelamento de correntes estelares é possível determinar potencial

⁴ A Figura 0.0.1 foi retirada de (Bechtol et al., 2015; The DES Collaboration et al., 2015)

gravitacional da Galáxia (Bonaca et al., 2014). Para um modelamento não tendencioso é importante termos os dados de várias correntes estelares. É bastante provável que alguns dos progenitores já tenham sido totalmente consumidos pela VL, completando o processo de acreção de massa pela Galáxia. A corrente estelar de Virgo é um desses exemplos, detectada através de observações espectroscópicas de estrelas RR Lyraes (Duffau et al., 2006), acredita-se que esta corrente pertenceu a uma galáxia anã esferoidal satélite da VL que já foi completamente consumida (Carlin et al., 2012). Outro exemplo é a corrente estelar de Sagitário, galáxia esferoidal que está em processo de ruptura (Ibata et al., 2001). A corrente de Sagitário se estende em uma órbita polar dando uma volta completa em torno da Galáxia.

O surto dessas descobertas também é acompanhado pela descoberta de sistemas com bem baixa luminosidade ($-3.0 \leq M_v \leq 0$) e pequenos raios a meia luz ($\leq 10\text{pc}$), sendo mais consistentes com aglomerados globulares (Koposov et al., 2007; Belokurov et al., 2010; Fadely et al., 2011; Balbinot et al., 2013). Muitos dos aglomerados do halo Galáctico, podem ter sido formados em galáxias anãs que estão em órbita ou foram acretadas pela VL. Isto é reforçado pelo fato de que vários aglomerados são encontrados perto da corrente estelar de Sagitário e do sistema magalânico (Law; Majewski, 2010; Deason et al., 2015). Porém essas recentes descobertas, que varrem luminosidades muito baixas, deixam a distinção entre aglomerados globulares e galáxias anãs cada vez menos clara. Por esse motivo é importante persistir em um censo completo dos satélites mais tênues da Galáxia e caracterizá-los em termos de estrutura, população estelar e quantidade de matéria escura. Extrapolações dos resultados do SDSS, sobre a função de luminosidade dos satélites indicam que esse censo ainda está bem incompleto (Tollerud et al., 2008; Hargis; Willman; Peter, 2014).

Descrevemos nesse trabalho um método para detecção de populações estelares resolvidas, como galáxias anãs, correntes estelares e aglomerados globulares. O método consiste na aplicação da técnica de matched filter (MF). O MF faz uma comparação estatística entre uma dada população de estrelas e a amostra observacional, realçando as estrelas que são mais compatíveis com a população. O cálculo estatístico é feito em um espaço binado de posição e Diagrama Cor Magnitude (CMD). Esta técnica de MF é uma extensão do código Sparse, construído para a detecção da corrente estelar do aglomerado globular NGC 2298, (Balbinot et al., 2011). A maioria dos autores tem usado a técnica do MF para detectar estrelas pertencentes a uma população estelar previamente conhecida, (Grillmair, 2012; Davenport; Sandquist, 2009). Para procurar por uma estrutura não conhecida precisamos de uma grade de diferentes populações estelares, variando em um intervalo largo de idades, metalicidades e distâncias. Para essa tarefa usamos um simulador de populações estelares simples (SSP), o GenCMD, que utiliza modelos de evolução estelar de Padova (Bressan et al., 2012) para simular as diferentes idades e metalicidades.

A aplicação do MF não nos dá as coordenadas dos candidatos a subestrutura diretamente, ele só gera um mapa onde tais candidatos podem ser localizados posteriormente. Para então encontrarmos as coordenadas dos candidatos, podemos fazer uma inspeção visual ou usarmos um código de busca sistemática por sobredensidades. Como aplicamos o MF para uma grande quantidade de modelos de SSP, a primeira opção se torna muito demorada devido ao grande tempo gasto na inspeção visual. Decidimos então aplicar o código de busca por sobredensidade Sextractor (Bertin; Arnouts, 1996). Chamamos o algoritmo de detecção de subestruturas de SparSEx, sendo este portanto a combinação dos códigos Sparse e Sextractor. Descrevemos também a validação deste método por meio da recuperação de subestruturas já conhecidas. Tanto galáxias anãs, aglomerados globulares e correntes estelares foram recuperados com sucesso nos dados do SDSS. Por fim o método foi aplicado nos dados do DES, Y1A1 e Y2Q1, onde combinado com outros dois métodos de busca de dentro da colaboração, foram encontradas os 16 satélites da VL e o aglomerado estelar DES-1 (Bechtol et al., 2015; The DES Collaboration et al., 2015; Luque et al., 2015).

Objetivos

As principais metas a serem atingidas com o trabalho apresentado aqui são:

1. *O manuseio de ferramentas estatísticas e sistemáticas para detecção de populações estelares:*

Muitos dos satélites da Via Láctea (VL), inicialmente, foram encontrados com uma simples análise visual em mapas de densidade estelar. Porém, devido à evolução das técnicas de observações fotométricas, os novos levantamentos alcançam limites de magnitude cada vez mais fracos, ou seja, é possível observar estrelas cada vez mais distantes. Como consequência, o volume de dados também cresce e torna o seu manuseio mais difícil e a procura por subestruturas mais distantes se torna mais complexa. Por esses motivos, é importante termos em mão ferramentas computacionais e estatísticas para analisar esses dados eficientemente na procura de subestruturas. Este é então nosso principal objetivo, o desenvolvimento de um método sistemático e estatístico capaz de fazer uma busca por subestruturas eficiente e confiável.

2. *Validação do método por meio dos dados do Sloan Digital Sky Survey (SDSS):*

Após o desenvolvimento do método, necessitamos validá-lo. A validação será por meio da recuperação de subestruturas já conhecidas. Faremos isto aplicando o método desenvolvido nos dados do SDSS, que cobre áreas onde se encontram galáxias anãs e aglomerados globulares conhecidos. O SDSS também cobre boa parte da corrente estelar da galáxia anã de Sagitário. Temos como meta então, detectar essas diferentes estruturas com alta significância a partir do nosso método.

3. *Aplicação do método nos dados do Dark Energy Survey (DES) e SDSS em busca de novas subestruturas:*

Uma vez que o método estiver validado, usaremos este na busca de novas subestruturas da VL. A busca será feita nos dados do SDSS, especificamente na área coberta pelo Baryon Oscillation Spectroscopy Survey (BOSS) e nos dados do DES.

4. *Caracterização dos candidatos:*

Após a detecção dos candidatos, temos que ter certeza que estes se tratam de objetos físicos e não falsos positivos, criados por irregularidades e defeitos do catálogo. Para isso analisaremos o Diagrama Cor Magnitude (CMD) dos candidatos, seu mapa de significância e perfis de densidade. A partir dessa análise, podemos

confirmar os candidatos que são consistentes com populações estelares e sabermos suas características.

Parte I

Metodologia

1 Dados

1.1 Sloan Digital Sky Survey

O SDSS (York et al., 2000) é um levantamento fotométrico e espectroscópico que cobre mais de 10000 graus² de área no céu. O SDSS usa um telescópio de 2.5 metros, situado no Apache Point Observatory em Novo México (USA), equipado com uma câmera de largo campo de imageamento (Gunn et al., 1998), com 24 2048 x 2048 CCDs no plano focal com 0".396 pixels. A câmera foi preparada para imagear o céu em um sistema de filtros em cinco bandas ópticas u,g,r,i,z. Estes filtros têm os respectivos comprimentos de onda: 3550 , 4770, 6230, 7620, e 9130 Å (Fukugita et al., 1996). A profundidade em magnitude atingida pelo levantamento, para 5σ e 1" de seeing, nos cinco filtros é de $u = 22.3$, $g = 23.3$, $r = 23.1$, $i = 22.3$, $z = 20.8$.

A coleta de dados começou no ano 2000, e o imageamento final cobre cerca de 35%do céu, com observações fotométricas de cerca de 500 milhões de objetos.

O SDSS foi separado em três fases de observação, SDSS-I (2000 a 2005), SDSS-II (2005 a 2008) e o SDSS-III¹ (2008 a 2014). Nós usamos os dados do SDSS-III, especificamente os dados fotométricos do Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS), no hemisfério sul galáctico, que cobre cerca de 2000 graus² e faz parte do Data Release 8 (DR8) do SDSS (Aihara et al., 2011). Também usamos dados do SDSS em volta de galáxias anãs e aglomerados globulares conhecidos. Os catálogos foram obtidos através do Sky Server, sistema online com os dados públicos do SDSS. Esses catálogos são produzidos a partir dos pipelines de redução de dados do SDSS. Para mais detalhes veja (Lupton et al., 2001; York et al., 2000; Stoughton et al., 2002). A separação estrela galáxia foi feita usando a classificação dada pelos catálogos reduzidos do SDSS. Selecionamos todas as fontes classificadas como pontuais. Essa classificação é feita usando a diferença entre magnitude cmodel e PSF (Stoughton et al., 2002). Para garantirmos a qualidade fotométrica dos dados, selecionamos apenas fontes com magnitude ≤ 23.0 nos 4 filtros g,r,i,z e também só selecionamos fontes com FLAG ≤ 3 . O Skyserver também nos fornece com magnitudes corrigidas para extinção, usando mapas de (Schlegel; Finkbeiner; Davis, 1998). Mostramos na figura 1.1.1² o footprint do SDSS-III.

¹ <<https://www.sdss3.org/>>

² Créditos da imagem: <<https://www.sdss3.org/dr9/>>

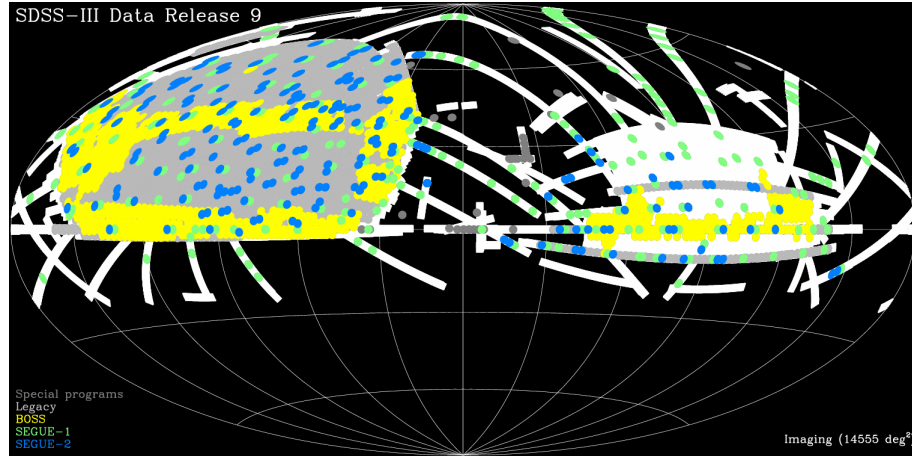


Figura 1.1.1 – *Footprint do SDSS-III em coordenadas equatoriais, para os dados lançados até o data release 9 (DR9). Os dados do BOSS estão representados pela cor amarela no mapa.*

1.2 Dark Energy Survey

O DES (The Dark Energy Survey Collaboration, 2005) é um levantamento fotométrico que cobre cerca de 5000 graus² do hemisfério sul Galáctico. O projeto tem como principal objetivo melhor caracterizar o componente da energia escura, responsável pela expansão acelerada do Universo.

As observações são possíveis através da Dark Energy Camera (DECam), câmera CCD de 3 graus² montada no foco primário do telescópio Blanco, de 4 metros, que fica localizado no Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO) (Flaugher et al., 2015). Na figura 1.2.1³ mostramos a área do céu, que esperamos ser imageada ao longo das observações do DES.

Os principais componentes da DECam, são uma câmera óptica CCD de 519 megapixels, um detector óptico de campo largo (2.2 graus de visão de campo) e um sistema de filtros de 5 bandas grizY. Mostramos na figura 1.2.2⁴ as funções de transmissão desses filtros. O plano focal da câmera consiste de sessenta e dois CCDs (0.27"/pixel), arranjados em um hexágono, cobrindo uma área de imageamento de 3 graus².

As observações do DES começaram em agosto de 2013, o levantamento de dados será completado após 525 noites de observação, ao longo de cinco anos. Espera-se atingir os limites em magnitude de: $g = 24.6$, $r = 24.1$, $i = 24.3$ e $z = 23.9$. Estes são limites de 10σ em 1.5" de abertura, assumindo um seeing de 0.9". As imagens produzidas pela DECam são reduzidas pelo grupo DES Data Management (DESDM), que desenvolveu um algoritmo para o processamento de dados, desde exposições únicas e correções instrumentais até a

³ Créditos da imagem: Apresentação Josh Frieman DES-PAC Janeiro de 2014

⁴ Créditos da imagem: CTIO/NOAO/AURA/NSF

calibração de imagens co-adicionadas.

Neste trabalho nós usamos dados do primeiro e segundo ano do DES. Especificamente os catálogos co-adicionados dos releases internos Y1A1 (referente ao ano 1) e Y2Q1 (referente a dados prévios do ano 2). Para maiores detalhes e referências sobre a redução de dados do DESDM veja, (Sevilla et al., 2011; Mohr et al., 2012). Para selecionarmos uma amostra estelar, usamos os parâmetros dados pelo SExtractor FLAGS, SPREAD MODEL e magnitudes PSF (Bertin; Arnouts, 1996; Desai et al., 2012). Os critérios que usamos para garantir a qualidade da fonte foram $FLAGS \leq 3$, sobre os três filtros $g r i$. Também selecionamos magnitudes entre 17mag e 23mag, para cortarmos fontes muito brilhantes que podem saturar a imagem e fontes com espúrias. Para selecionarmos uma amostra pura de estrelas, usamos o SPREAD MODEL na banda i como separador estrela/galáxia, selecionamos fontes do catálogo com $|SPREAD \text{ MODEL } i| \leq 0.003$, que são mais consistentes com fontes pontuais. Para evitar fontes pontuais com cores extremas (incluindo anãs vermelhas do disco Galáctico) também fizemos um corte em cor de $-0.5 \leq g - r \leq 1.2$.

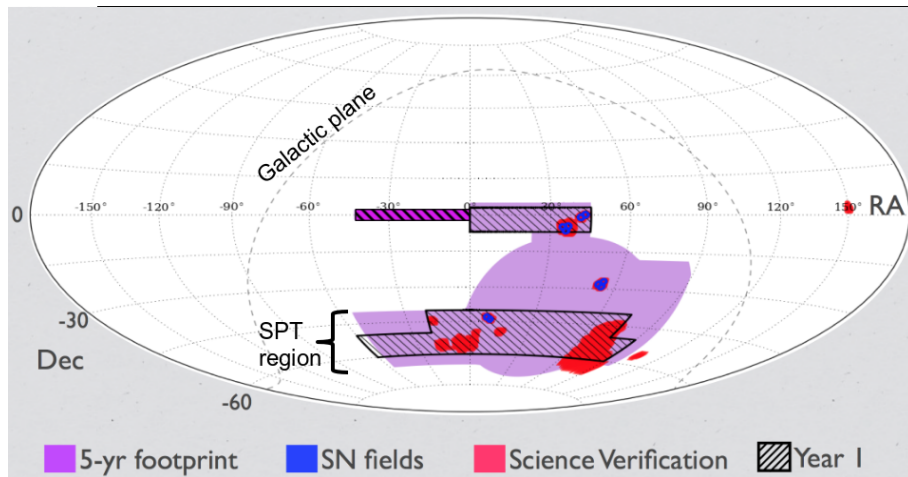


Figura 1.2.1 – *Footprint do DES em coordenadas equatoriais, área lilás representa a área total a ser coberta pelo DES, as áreas em azul representam filtros de super nova, áreas em rosa representam dados de verificação e as áreas rachuradas representam os dados cobertos pelo ano 1.*

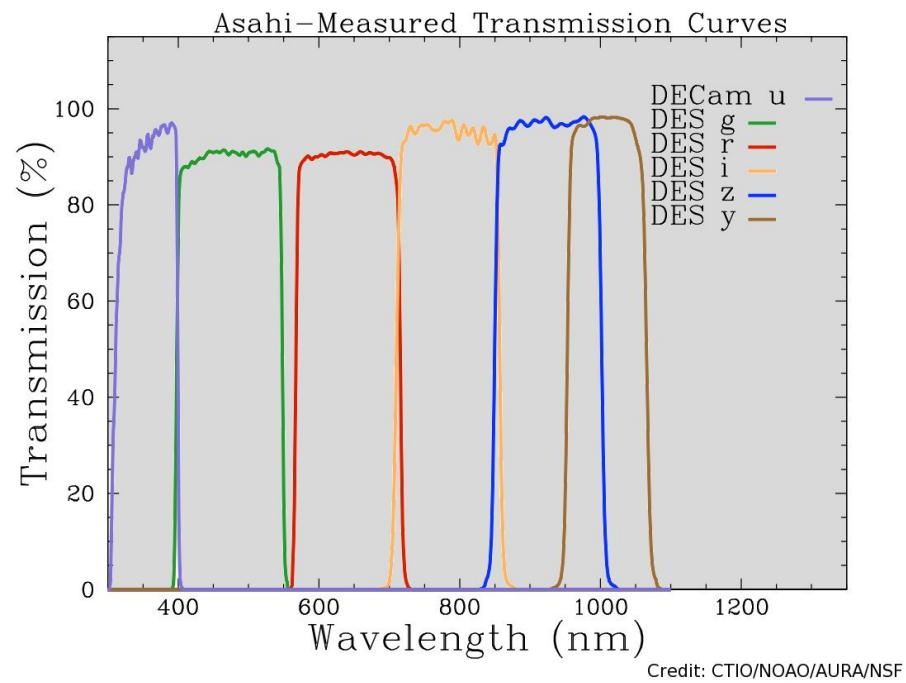


Figura 1.2.2 – *Transmissão medida para os filtros ugrizY do DES.*

2 Matched Filter

O Matched Filter (MF) é uma técnica com diversas aplicações para processamento de sinais. No contexto da astronomia, vem sendo usado principalmente para detectar Populações Estelares Simples (SSP)s de baixa densidade em dados de imageamento (Grillmair, 2012; Davenport; Sandquist, 2009). Aqui usamos o MF como parte do algoritmo SparSEx para detecção dos satélites da VL e também de correntes estelares seguindo o trabalho de (Balbinot et al., 2011).

O número de estrelas como função da posição no céu (α, δ) e também da cor (c) e magnitude (m) pode ser escrito como:

$$N(\alpha, \delta, c, m) = N_{cl}(\alpha, \delta, c, m) + N_{bg}(\alpha, \delta, c, m) \quad (2.1)$$

O primeiro termo no lado direito da equação corresponde à contribuição do sistema estelar que queremos descobrir (cl), enquanto que o segundo termo corresponde à contribuição das estrelas de campo (bg). Ambas as quantidades podem ser separadas em um termo de normalização e uma função de distribuição de probabilidade (PDF). Por definição, uma SSP é descrita por uma única distribuição no espaço de cor magnitude, mas a densidade numérica das suas estrelas pode variar em função da sua posição. Sendo assim podemos escrever:

$$n_{cl}(\alpha, \delta, c, m) = \xi_{cl}(\alpha, \delta) f_{cl}(c, m) \quad (2.2)$$

Onde ξ_{cl} e f_{cl} são respectivamente, a normalização do número de estrelas da SSP e sua PDF, no espaço do CMD. Para as estrelas de campo da nossa Galáxia, sabemos que ambos o número de estrelas e o CMD variam como função da posição através do céu. Sendo assim, escrevemos:

$$n_{bg}(\alpha, \delta, c, m) = \xi_{bg}(\alpha, \delta) f_{bg}(\alpha, \delta, c, m) \quad (2.3)$$

Note que as funções f_{cl} e f_{bg} são funções estatísticas que descrevem a probabilidade de uma estrela, randomicamente selecionada, pertencer à SSP ou ao campo, dado sua posição no CMD.

Considerando todas as premissas citadas a cima, a equação 2.1 pode ser reescrita da forma:

$$N(\alpha, \delta, c, m) = \xi_{cl}(\alpha, \delta) f_{cl}(c, m) + \xi_{bg}(\alpha, \delta) f_{bg}(\alpha, \delta, c, m) \quad (2.4)$$

Nós construímos as PDFs, f_{cl} e f_{bg} , por meio de diagramas de Hess em bins de 0.01 em cor e 0.1 em magnitude. Por questões práticas de notação, vamos nos referir ao CMD usando o índice j . O céu também é dividido em bins que escolhemos ter uma área de 1×1

arcmin^2 . Os bins no espaço de posição são representados pelo índice i . Podemos então, transformar as equações n_{cl} e n_{bg} em funções discretas.

$$n(i, j) = \xi_{cl}(i)f_{cl}(j) + \xi_{bg}(i)f_{bg}(i, j) \quad (2.5)$$

O lado esquerdo representa o número observado de estrelas em uma dada posição do céu e do CMD. Se o número de estrelas observadas no catálogo é $N(i, j)$, podemos então construir a variância entre este número e o número esperado da SSP para cada bin espacial:

$$S^2(i) = \sum_j \frac{[N(i, j) - \xi_{cl}(i)f_{cl}(j) - \xi_{bg}(i)f_{bg}(i, j)]^2}{\xi_{bg}(i)f_{bg}(i, j)} \quad (2.6)$$

O termo do denominador expressa a flutuação poissonica esperada na contagem de estrelas, que, por simplicidade, nós tomamos por ser dominada pelas estrelas de campo. Minimizando essa equação e resolvendo para $\xi_{cl}(i)$, temos o número de estrelas observadas em cada direção no céu que, de acordo com o modelo dado pela equação 2.4, são mais consistentes com o modelo de SSP.

$$\xi_{cl}(i) = \frac{\sum_j N(i, j)f_{cl}(j)/f_{bg}(i, j)}{\sum_j f_{cl}^2(j)/f_{bg}(i, j)} - \frac{\xi_{bg}(i)}{\sum_j f_{cl}^2(j)/f_{bg}(i, j)} \quad (2.7)$$

No final, como saída do código, temos um mapa de densidade estelar fornecida pela matriz $\xi_{cl}(i)$. Em prática, nós modelamos a PDF do campo, $f_{bg}(i, j)$, usando amostras tiradas diretamente do catalogo estelar onde se faz a busca. Nós fazemos isso sob a suposição de que a contaminação pelas SSPs a serem detectadas são insignificantes. Para a PDF da SSP, nós fazemos uso de simulações baseadas em modelos de evolução estelar que será explicada adiante.

3 Simulações

Como explicado na sessão anterior, o MF funciona como uma modelagem do número de estrelas esperado, em cada direção do céu, para as estrelas de campo e de uma SSP. Para fazermos uma busca por satélites da Galáxia, de cujas características não temos informação prévia, necessitamos simular uma grade de diferentes SSPs. Para essa tarefa usamos o código GenCMD. O GenCMD usa isócronas de PADOVA (Bressan et al., 2012) e randomicamente seleciona massas estelares seguindo uma função de massa inicial (IMF) pré-definida. Nós decidimos adotar uma IMF do tipo Kroupa (Kroupa, 2001) nas simulações. Para cada massa estelar, interpolamos as isócronas para obter as magnitudes absolutas nos filtros desejados.

Para transformar essas magnitudes absolutas (M) em magnitudes aparentes (m) procedemos da seguinte maneira, esse processo é feito para cada um dos filtros: Primeiro, aplicamos à magnitude absoluta erros fotométricos gaussianos $err(M)$, usando incertezas em magnitude correspondentes ao SDSS e ao DES.

$$M_e = M + err(M) \quad (3.1)$$

Segundo, adicionamos M_e ao módulo de distância, correspondente a uma distância $d[\text{pc}]$ adotada.

$$(m)_0 = 5 * \log_{10} d - 5 + M_e \quad (3.2)$$

Terceiro, aplicamos o avermelhamento, A_ν , de acordo com os mapas de poeira de Schlegel (Schlegel; Finkbeiner; Davis, 1998).

$$m = (m)_0 + A_\nu \quad (3.3)$$

Por fim, as posições no céu foram simuladas de acordo com o perfil de densidade Hubble modificado (Rood et al., 1972).

Nós usamos cada um desses modelos simulados como entrada na aplicação do MF. A grade descrita na tabela 3.0.1 foi usada nos dados do BOSS, com o objetivo de detectar, principalmente, aglomerados estelares. Enquanto que a grade descrita na tabela 3.0.2 foi usada em outras áreas do SDSS, com o propósito de recuperar galáxias anãs e aglomerados conhecidos.

Tabela 3.0.1 – *Grade de Parâmetros usada simulações de SSPs, para busca de aglomerados estelares no BOSS. A grade inclui um total de 1485 modelos.*

Parâmetros	Limite inferior	Limite superior	passos
$\text{Log}(\tau)$	9.0	10.1	0.1
Z	0.001	0.019	0.002
$d(kpc)$	10	40	2

Tabela 3.0.2 – *Grade de parâmetros usados na simulação de SSPs para procura de satélites no SDSS e outros surveys. A grade inclui um total de 228 modelos.*

Parâmetros	Limite inferior	Limite superior	passos
$\text{Log}(\tau)$	9.0	10.2	0.3
Z	0.0002	0.001	0.007
$d(kpc)$	10	200	10

4 Identificação dos candidatos

Após a aplicação do MF em cada SSP simulada, temos que analisar todos os mapas de densidade resultantes em busca dos candidatos a satélite da VL. Porém o número de mapas pode ser muito grande para fazermos uma busca visual. Por exemplo, a grade representada na tabela 3.0.1 resulta em 1485 mapas para serem analisados. E mesmo após o processo do MF, a análise visual pode deixar “escapar” alguns candidatos, por terem sinal baixo.

Para solucionar esse problema usamos o código SExtractor, (Bertin; Arnouts, 1996), que sistematicamente procura por picos de densidade em cada um dos mapas. Para cada mapa de densidade, correspondente a uma dada SSP usada no MF, aplicamos kernels gaussianos de convolução que variam em tamanhos de $\{\sigma = 0' \text{ (semconvolução)} \text{ à } \sigma = 9'\}$, para podermos realçar estruturas com escalas típicas de aglomerados globulares e galáxias anãs. Essa suavização é feita como uma ferramenta do próprio SExtractor.

Para cada um dos mapas convoluídos, o SExtractor detecta picos de densidade, e os coloca em uma lista, correspondente ao tamanho do kernel utilizado. Note que um mesmo objeto pode ser detectado em mapas de diferentes SSPs, ou seja, o mesmo objeto pode ser detectado em mais de um mapa analisado pelo SExtractor. Portanto, é necessário verificar as ocorrências de repetições nas listas dadas pelo SExtractor. Ao fazer essa verificação contabilizamos o número de vezes que certo objeto foi detectado. Em outras palavras, determinamos o número de modelos que detectou o mesmo objeto pelo MF em todos os N modelos simulados. É a partir desse número de repetições, que organizamos o nosso arquivo final com os candidatos por ordem de importância. Quanto maior o número de repetições, mais provável que o candidato seja um sistema real.

As listas finais organizadas por repetição serão então o resultado final do algoritmo SparSEx. Para uma melhor compreensão do método, mostramos na figura 4.0.3 um fluxograma do processo de simulações \Rightarrow MF \Rightarrow determinação dos candidatos.

Nem todos os objetos detectados pelo SExtractor são reais. Existem, é claro, defeitos no catálogo, objetos extensos e complexos (como galáxias próximas) ou flutuações na contagem de estrelas de campo que podem ser detectados como falsos positivos. Para termos certeza de que os candidatos são mesmo reais, precisamos checar se o seus CMDs e seus perfis de densidade são consistentes com os de uma população estelar. Este procedimento é o último passo na busca por subestruturas da Galáxia.

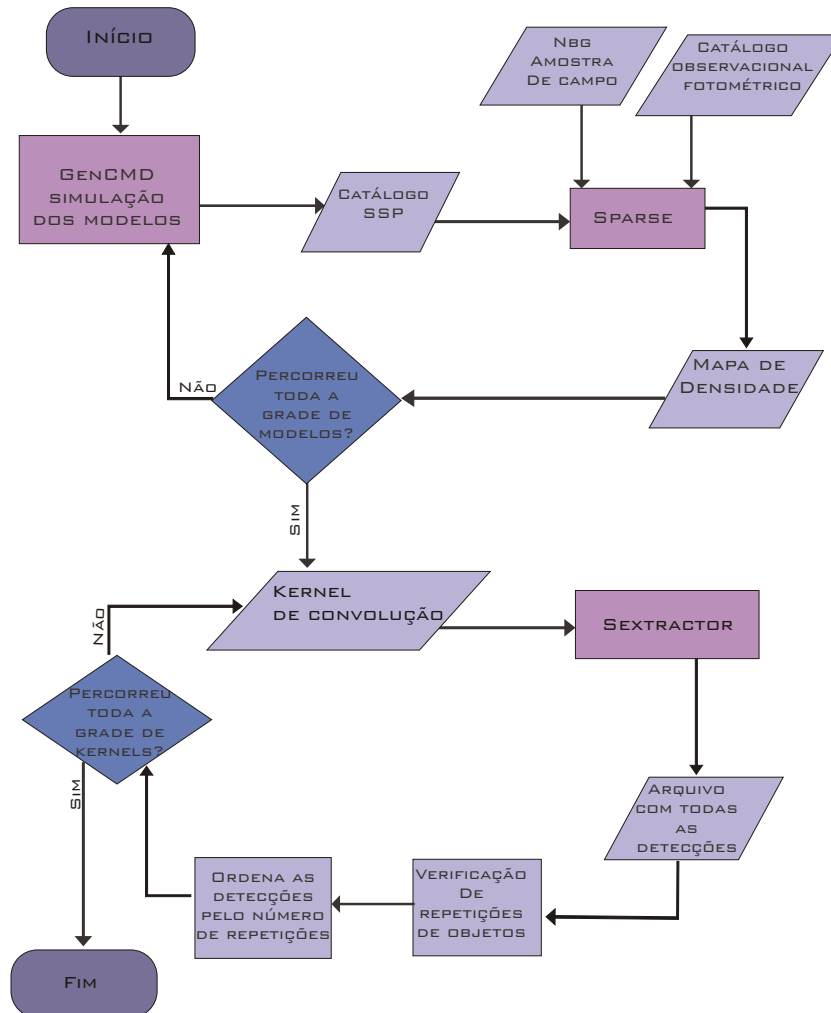


Figura 4.0.3 – Fluxograma do algoritmo SparSEx: primeiramente é simulado um modelo de SSP, este serve como entrada do MF, juntamente com o catálogo observacional e uma amostra de campo. O processamento do MF gera, como resultado, uma mapa de densidade com as estrelas consistentes com a SSP. Após aplicarmos o MF a todos os modelos, aplica-se um kernel de convolução gaussiana em todos os mapas resultantes do MF. Após este, o SExtractor faz a busca por picos de densidades nos mapas, provendo uma lista de candidatos. Por fim, faz-se a verificação de repetições na lista e o ordenamento dos objetos pelo número de repetições. Após a grade de kernels ser completada, o SparSEx termina.

Parte II

Desenvolvimento do trabalho

5 Validação

Para validar o SparSEx, usamos os dados do SDSS, como teste para encontrar galáxias anãs e aglomerados globulares conhecidos. Aplicamos o método, em média, em áreas de 9 graus², em torno desses alvos. Todos os sistemas que foram usados como teste, foram recuperados como candidatos muito prováveis a populações estelares, ou seja, obtiveram um alto ranqueamento na lista final de candidatos resultante do SparSEx. Mostramos na tabela 5.0.3 os sistemas recuperados e seus parâmetros resultantes da aplicação do SparSEx.

Tabela 5.0.3 – *Objetos conhecidos detectados pelo SparSEx, e seus parâmetros de saída: N° de modelos, usados pelo MF, com que se recuperou a estrutura; Ranqueamento: classificação baseada em N° de modelos; Convolução (FWHM-SE): parâmetro do SExtractor usado como a FWHM da convolução gaussiana, para suavizar os mapas de densidade, ao qual os parâmetros anteriores (Ranqueamento e N° de modelos) se referem; N° de estrelas/pixel: densidade do objeto detectado.*

Galáxias Anãs	N° de modelos	Ranqueamento	Convolução FWHM-SE(pixels)	N° de estrelas/pixel
Canes Venatici I	106	1	5	≈ 14.0
Canes Venatici II	16	1	1.5	≈ 14.0
Coma	28	1	5.0	≈ 15.0
Hercules	10	1	2.5	≈ 42.5
Leo IV	30	3	3.0	≈ 10.5
Leo V	11	3	4.0	≈ 7.0
Leo T	84	1	2.5	≈ 9.5
Segue I	16	3	4.0	≈ 11.5
Segue II	10	2	4.0	≈ 7.0
Ursa Maior I	17	3	3.0	≈ 6.3
Willman I	81	1	5.0	≈ 6.5
Aglomerados globulares				
Balbinot I	510	1	Sem Conv.	≈ 15.8
Koposov I	62	1	Sem Conv.	≈ 13.5
Koposov II	13	1	1.5	≈ 26.6
Palomar 13	1192	1	Sem Conv	≈ 17.0
Segue 3	1071	1	Sem Conv	≈ 16.6
Whiting I	1154	1	Sem Conv	≈ 17.5

Além dos parâmetros mostrados na tabela 5.0.3, a lista de parâmetros de saída do SparSEx também inclui as posições e eixo maior dos candidatos. No começo estávamos usando esses parâmetros para construir CMDs automaticamente. Mas como podemos ver

na figura 5.0.4, a posição central do objeto Koposov II está um pouco deslocada.

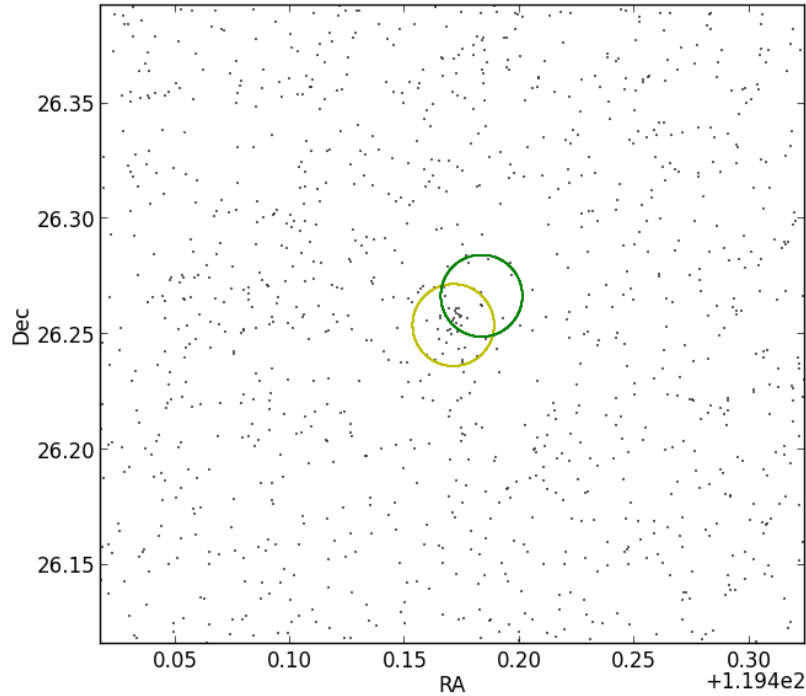


Figura 5.0.4 – *Distribuição espacial de estrelas, em coordenada equatoriais, em torno de Koposov II. O círculo verde indica a posição do aglomerado dado pelo SExtractor. Nós ajustamos o centro do aglomerado, visualmente, e indicamos a nova posição pelo círculo amarelo.*

Na sequência mostramos os resultados para duas galáxias anãs, Canes Venatici e Hercules, e para o aglomerado globular Koposov II. Primeiro mostramos nas figuras 5.0.5 ,5.0.6 e 5.0.7 os mapas de densidade resultantes da aplicação do MF, com um modelo que recuperou o objeto com o maior sinal. Podemos ver claramente nessas figuras as sobredensidades detectadas posteriormente pelo SExtractor.

Após a detecção desses objetos nós plotamos os perfis de densidade e os ajustamos a um perfil de king (King, 1962) para as três subestruturas, figuras 5.0.8, 5.0.9 e 5.0.10. Fizemos estes ajustes com o intuito de obter seus raios de core e por fim, construir seus CMDs em uma área com dimensões próximas aos tamanhos dos objetos. Mostramos os CMD das subestruturas nas figuras 5.0.11, 5.0.12 e 5.0.13. Os CMDs foram construídos dentro de um círculo com raio igual ao raio de core do objeto. Plotamos também, ao lado dos CMDs dos candidatos, as estrelas de campo de uma área próxima aos objetos. No CMD de Canes Venatici I, figura 5.0.11, podemos ver o ramo de gigantes, o ramo horizontal e o turn off de estrelas. Todavia, para os CMDs de Hercules e Koposov II,

figuras 5.0.12 e 5.0.13, é preciso de uma análise mais cuidadosa para ver a consistência desses CMDs com os de uma população estelar. Estes CMDs são compatíveis com os dos artigos de descoberta de Hercules, Canes Venatici (Belokurov et al., 2007) e Koposov II (Koposov et al., 2007).

Outra validação muito importante do SparSEx é recuperação da corrente estelar da galáxia anã de Sagitário. Ao aplicar o SparSEx em uma área de 40×40 graus² no footprint do BOSS, especificamente na área em torno da corrente estelar de sagitário, obtemos uma lista com as posição de todos os candidatos a SSP nessa área. Ao plotar todas as posições dessa lista observamos algo curioso. Pela figura 5.0.14, podemos ver claramente que a maioria dos candidatos delineam a estrutura da cauda da anã de sagitário. Uma vantagem desse método para detecção de correntes estelares é que ele é composto de várias SSPs com diferentes distâncias e metalicidades, e usualmente as correntes estelares têm uma variação em distância e/ou populações ao longo de sua extensão. Na figura 5.0.14 também podemos observar na parte superior do gráfico, detecções no entorno da galáxia de Andrômeda (M31) e da galáxia Triângulo (M33).

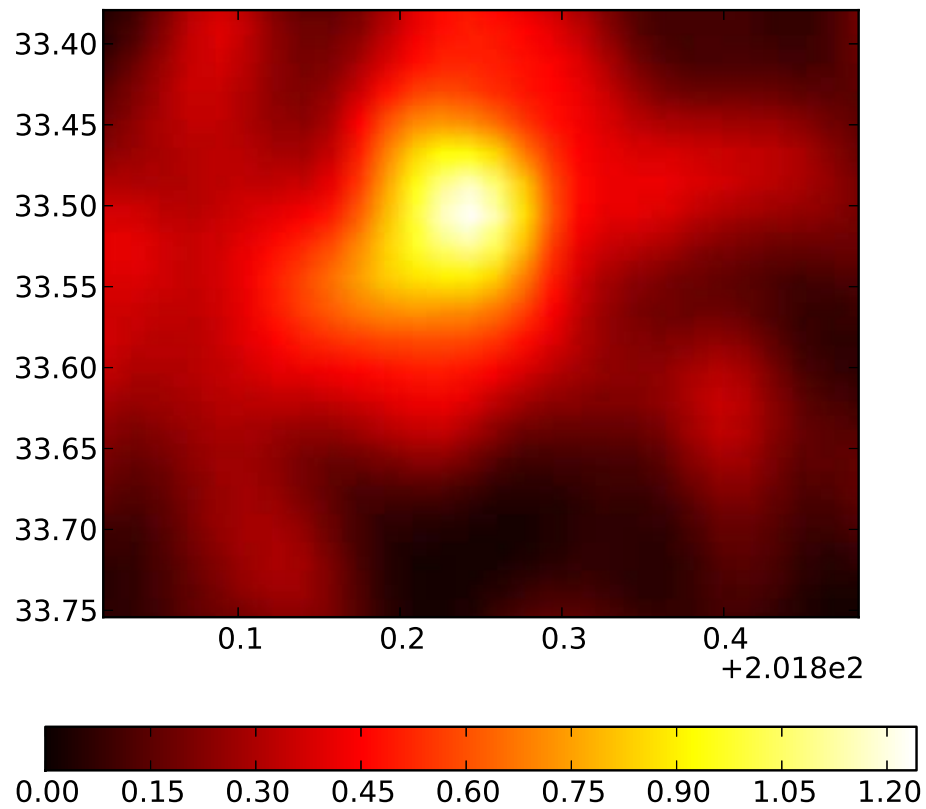


Figura 5.0.5 – Mapa de densidade de Canes Venatici I, resultante da aplicação do MF com um modelo de: 10 kpc de distância, 9.9 anos e 0.001z. Este mapa foi suavizado com uma FWHM de 5'.0 pelo SExtractor.

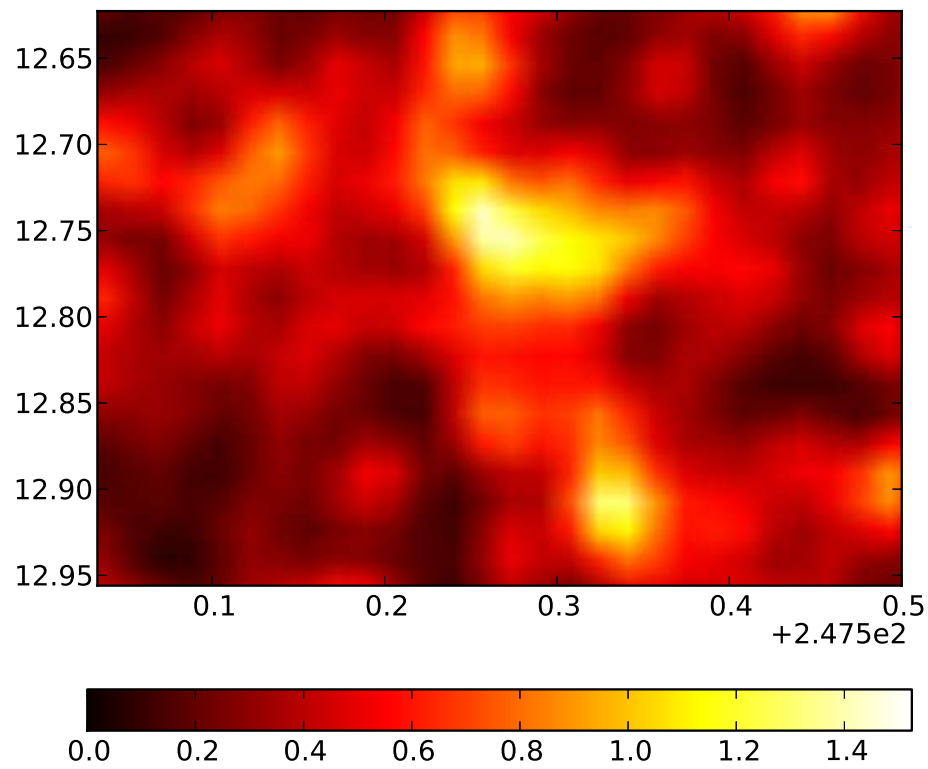


Figura 5.0.6 – Mapa de densidade de Hercules, resultante da aplicação do MF com um modelo de: 10 kpc de distância, 10.20 Loganos e 0.001z. Este mapa está suavizado com um FWHM 2'.5. Podemos ver que a sobredensidade de Hercules não é tão clara como a de Canes Venatici I.

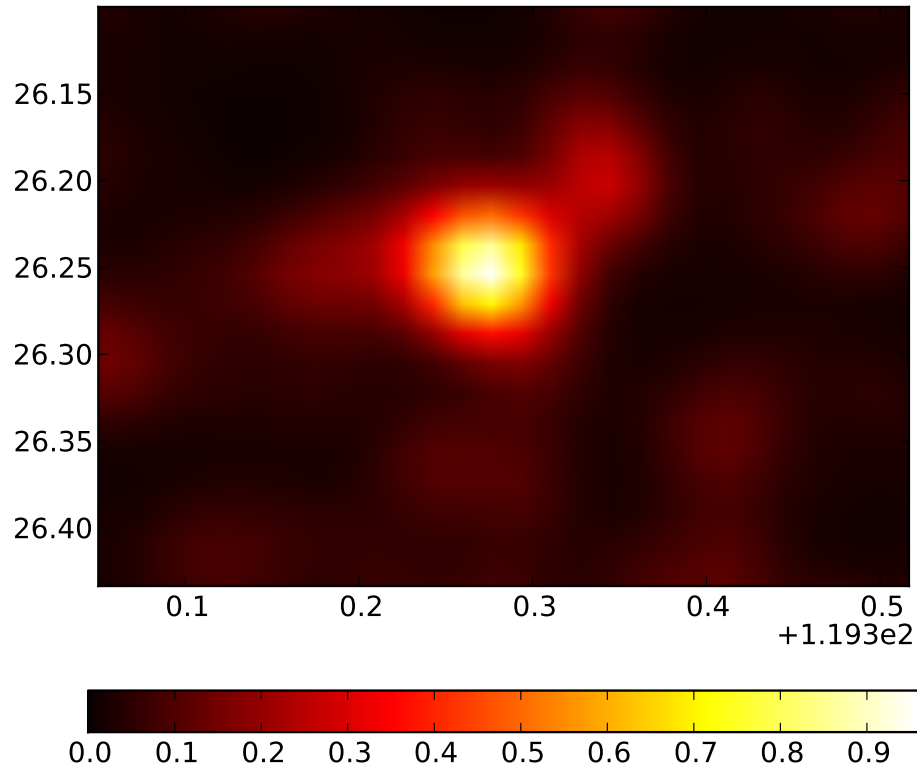


Figura 5.0.7 – Mapa de densidade do aglomerado globular Koposov II, resultante da aplicação do MF com um modelo de: 170 kpc de distância, 9.30 Loganos e 0.002z. Este mapa está suavizado com um FWHM 1'.5. Podemos ver que a sobredensidade compacta é consistente com a de um aglomerado globular.

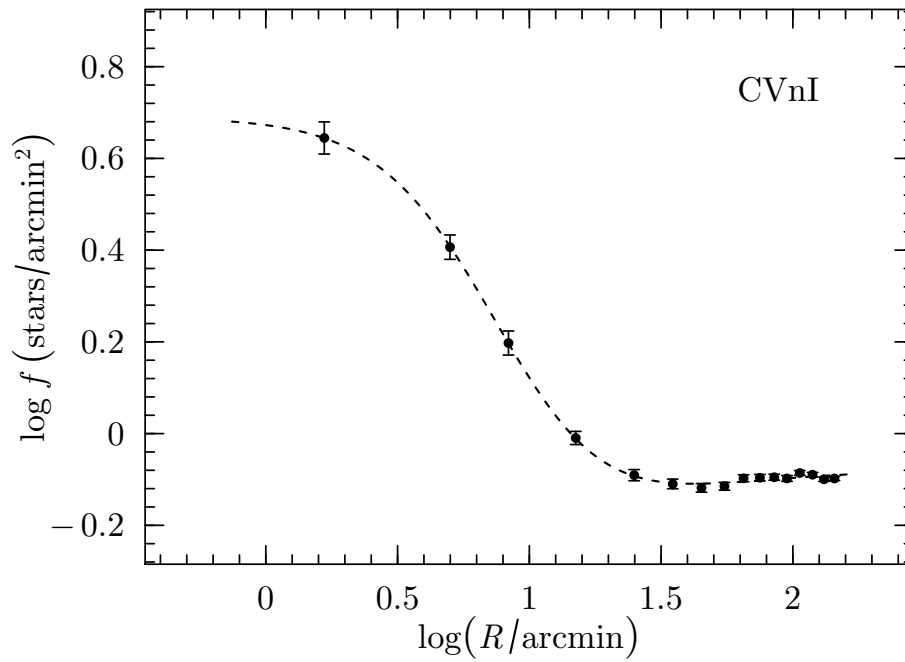


Figura 5.0.8 – Perfil de densidade radial para Canes Venatici I. A linha tracejada representa o melhor ajuste para o perfil de King. Desse ajuste obtivemos um raio de core de $r_c = 4'.86 \pm 0'.07$

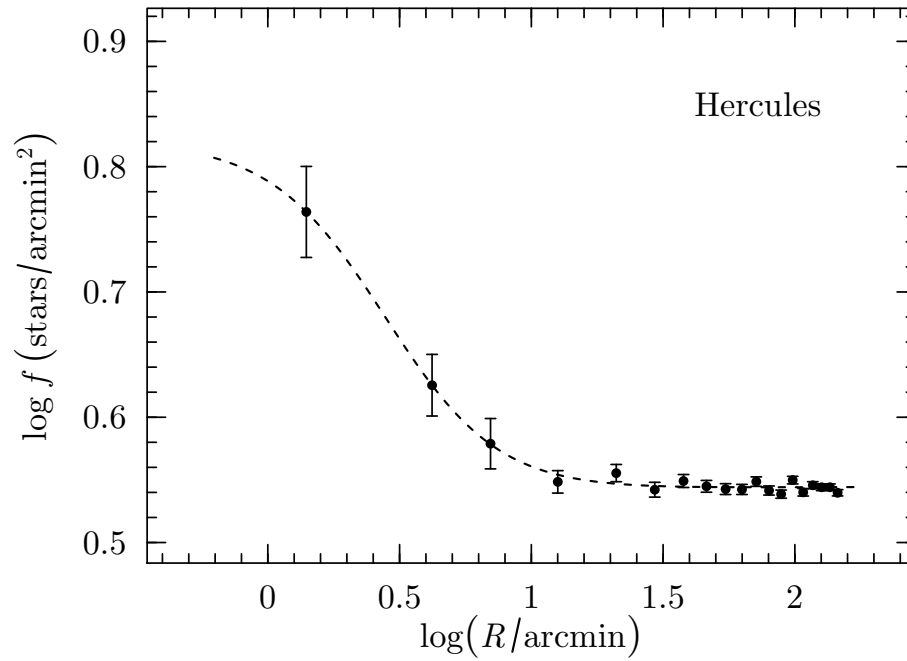


Figura 5.0.9 – Perfil de densidade radial para a galáxia anã Hercules. A linha tracejada representa o melhor ajuste para o perfil de King. Desse ajuste obtivemos um raio de core de $r_c = 2'.41 \pm 0'.16$

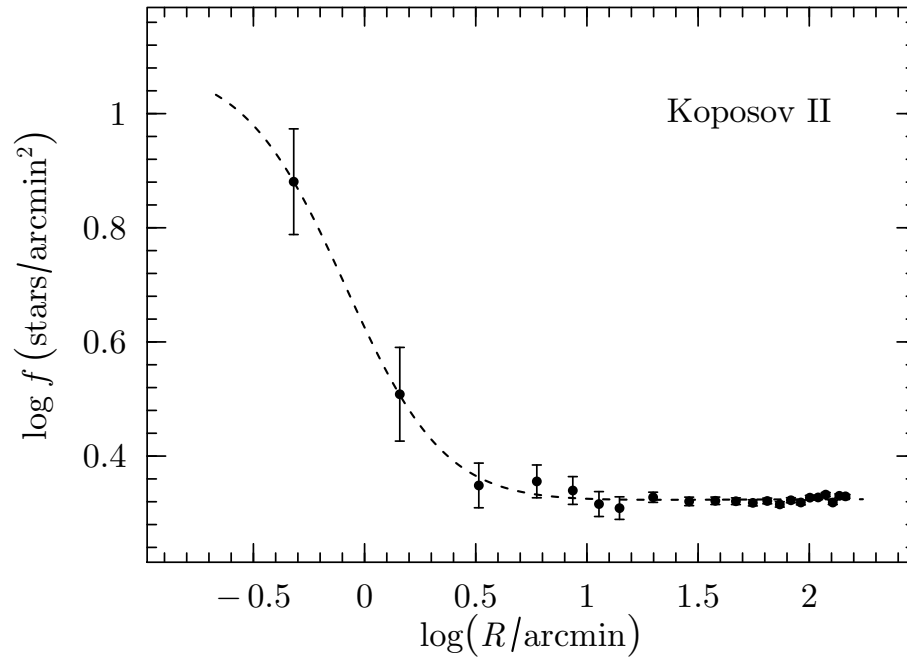


Figura 5.0.10 – Perfil de densidade radial para o aglomerado globular Koposov II. A linha tracejada representa o melhor ajuste para o perfil de King. Desse ajuste obtivemos um raio de core de $r_c = 0'.53 \pm 0'.05$

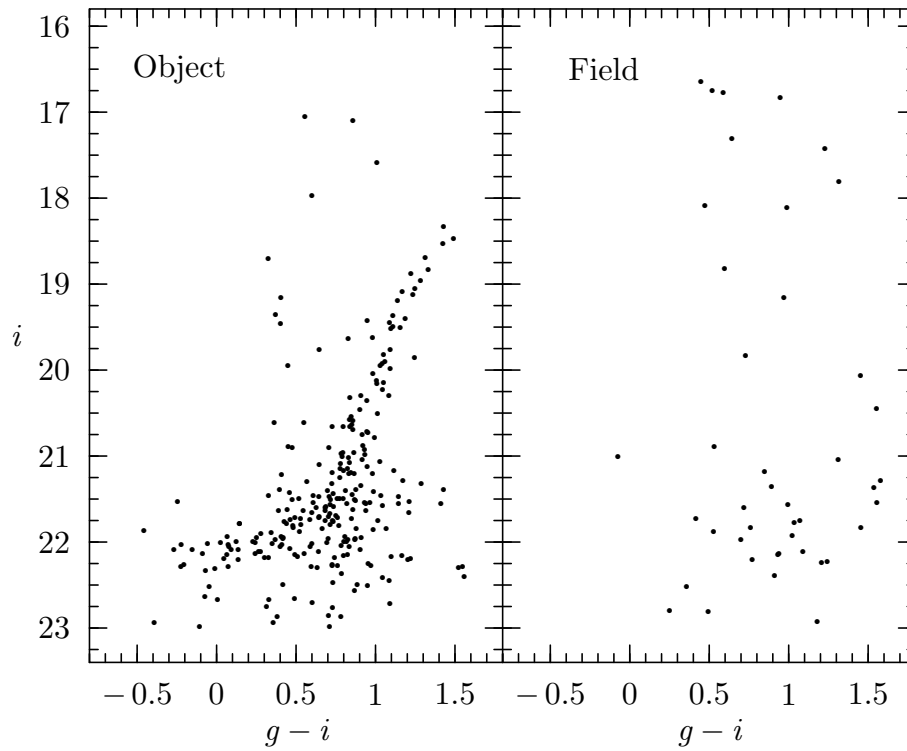


Figura 5.0.11 – *Painel esquerdo: CMD de Canes Venatici I. Podemos ver, claramente, o seu ramo de gigante, o seu ramo horizontal e o turn off de estrelas; Painel direito: CMD das estrelas de campo próximas a Canes Venatici I. Vemos que a população estelar desta galáxia é bem evidente em relação à população de campo.*

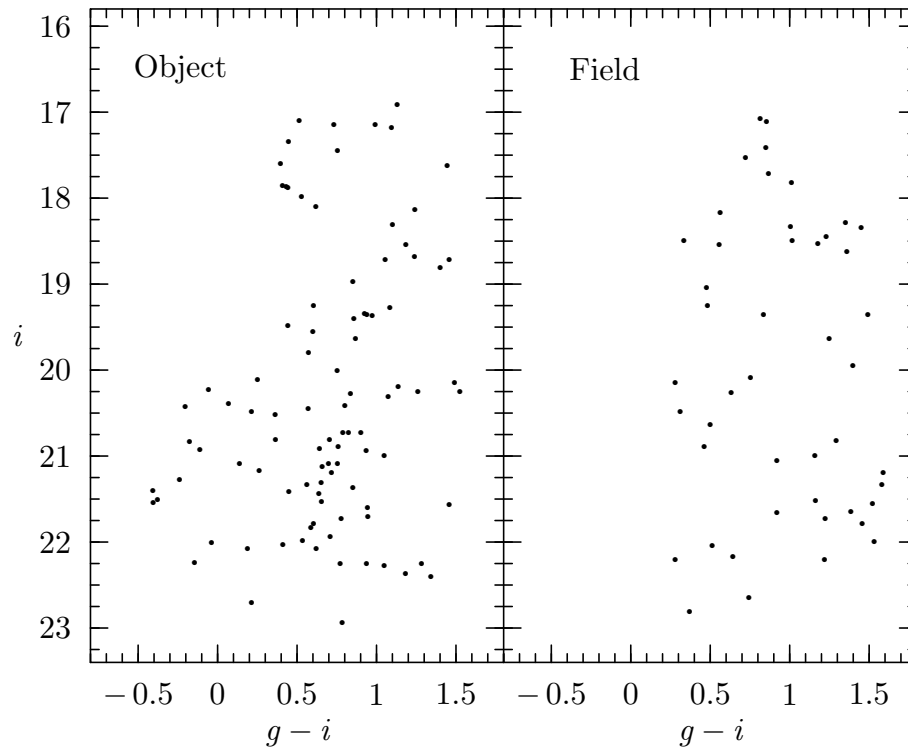


Figura 5.0.12 – *Painel esquerdo: CMD de Hercules. Não é muito fácil ver as características de uma SSP nesse CMD; Painel direito: CMD das estrelas de campo próximas a Hercules. Nesse caso o CMD do objeto não difere muito em densidade do CMD do campo, uma descontaminação das estrelas de campo é recomendável para essa situação.*

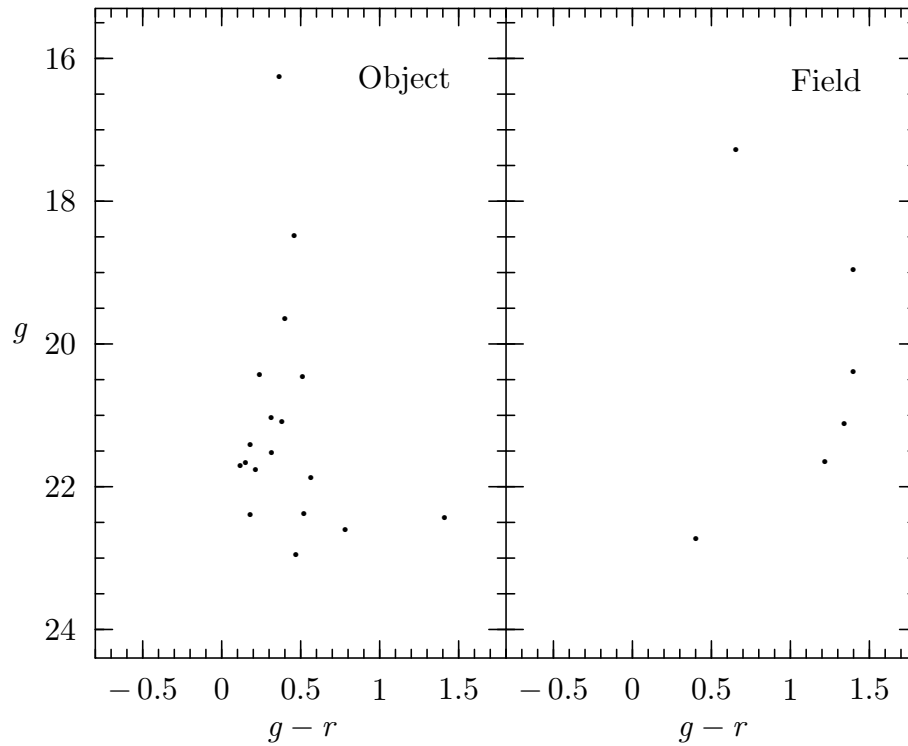


Figura 5.0.13 – Painel esquerdo: CMD do aglomerado globular Koposov II. Não é muito fácil ver as características de uma SSP nesse CMD; Painel direito: CMD das estrelas de campo próximas a Koposov II. Nesse caso o CMD não difere muito em densidade do CMD do campo. Uma descontaminação das estrelas de campo é mais complexa nesse caso, pois a amostra de estrelas é pequena para aplicação de métodos estatísticos. Seria necessário observações de follow-up para aumentarmos a amostra de estrelas e confirmarmos este como população estelar (Koposov et al., 2007)

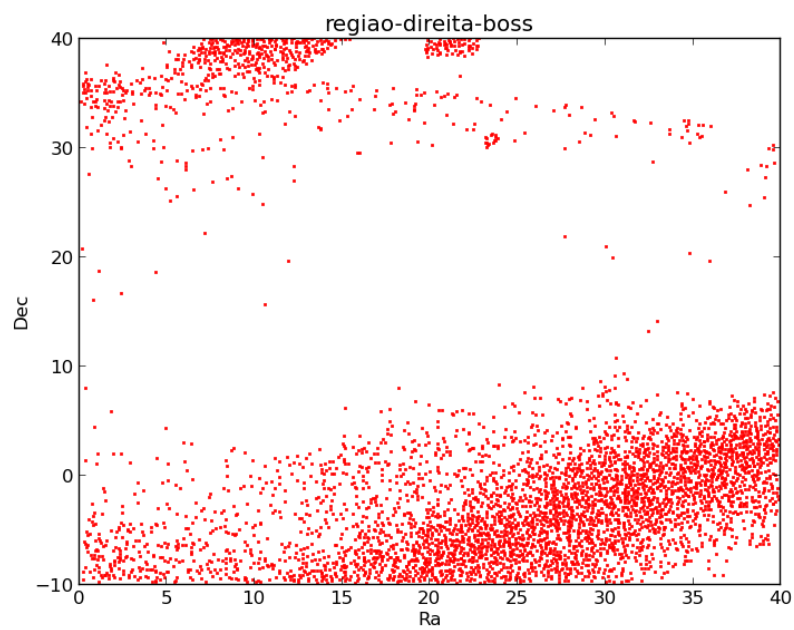


Figura 5.0.14 – *Plot da posição dos candidatos encontrados pelo SparSEx em parte do footprint do BOSS. Vemos que os candidatos formam a estrutura da corrente estelar da galáxia anã de Sagitário (Ibata et al., 2001), no canto inferior do gráfico. A concentração de pontos na parte superior do gráfico é devida às galáxias do grupo local M31 e M33, visto que M31 tem um grande sistema de galáxias satélites.*

6 Aplicação nos dados do DES

Nos últimos dois anos, tralhamos juntamente com o grupo de Milky Way (MW) do Dark Energy Survey na busca de subestruturas da VL. Para essa tarefa, utilizamos três diferentes métodos para detecção de populações estelares. Um deles é o SparSEx. Para detalhes dos outros métodos de detecção veja: (The DES Collaboration et al., 2015). Em março desse ano publicamos a descoberta de 8 novos satélites da VL (Bechtol et al., 2015) e em agosto publicamos a descoberta de outros 8 satélites (The DES Collaboration et al., 2015). Mostramos na tabela 6.0.4 as posições equatoriais e as principais características dessas novas estruturas.

Esses objetos foram obtidos de uma união dos candidatos indicados pelos três métodos. Comparamos as posições dos candidatos encontrados com listas de aglomerados e galáxias anãs conhecidas (Gunn et al., 1998; McConnachie, 2012) e também com listas de objetos que podem produzir falsos positivos, como galáxias próximas ou aglomerados de galáxias. A caracterização dos objetos foi determinada por uma análise de verossimilhança de Markov Chain Monte Carlo (MCMC), usando isócronas de PADOVA (Bressan et al., 2012). Os melhores valores ajustados e incertezas são determinadas pelos picos da distribuição posterior e os 90% maiores intervalos de densidade da posterior.

Tabela 6.0.4 – *Características dos novos satélites da Via Láctea descobertos com os dados no ano1 (Y1A1) e do ano2 (Y2Q1) do DES. Os melhores parâmetros são ajustados a partir da análise de máxima verossimilhança, assumindo os modelos de PADOVA (Bressan et al., 2012). As incertezas são providas pelos maiores intervalos de densidade da posterior.*

Nome	α (graus)	δ (graus)	d (kpc)	τ (Ganos)	Z
DES J0335.6-5403 (Ret II)	53.92	-54.05	32	10.08±0.21	≤ 0.0003
DES J0344.3-4331 (Eri II)	56.09	-43.53	330	10.10±0.23	≤ 0.0006
DES J2251.2-5836 (Tuc II)	343.06	-58.57	58	—	—
DES J0255.4-5406 (Hor I)	43.87	-54.11	87	9.96±0.21	≤ 0.0005
DES J2108.8-5109 (Ind I)	317.20	-51.16	69	—	—
DES J0443.8-5017 (Pic I)	70.95	-50.28	126	10.00±0.16	≤ 0.0004
DES J2339.9-5424 (Phe II)	354.99	-54.41	95	—	—
DES J0222.7-5217 (Eri III)	35.69	-52.28	95	—	—
DES J22044626 (Gru II)	331.02	-46.44	53±5	12.5	0.0002
DES J23565935 (Tuc III)	359.15	-59.60	25±2	10.9	0.0001
DES J05312801 (Col I)	82.86	-28.03	182±18	—	—
DES J00026051 (Tuc IV)	0.73	-60.85	48±4	11.6	0.0001
DES J03456026 (Ret III)	56.36	-60.45	92±13	—	—
DES J23376316 (Tuc V)	354.35	-63.27	55±9	10.9	0.0003
DES J20384609 (Ind I)	309.72	-46.16	214±16	—	—
DES J01171725 (Cet II)	19.47	-17.42	30±3	10.9	0.0002

Na figura 6.0.15¹, mostramos a distribuição do raio a meia luz versus a magnitude absoluta para os aglomerados globulares da VL (Gunn et al., 1998) e as galáxias do Grupo Local (McConnachie, 2012). Vemos que todos os sistemas descobertos pelo Y2Q1 e Y1A1 caem no locus esperado para galáxias próximas. Muitos dos novos candidatos possuem brilho superficial mais baixo do que qualquer outra galáxia do grupo local confirmada. Isso sugere que o aparente limiar no brilho superficial das galáxias, pode ser um efeito de seleção observacional. Aglomerados globulares geralmente tem pequena elipticidade, enquanto que galáxias anãs são normalmente mais elípticas (van den Bergh, 2008). Porém ainda não temos elipticidades determinadas com boa confiabilidade para os candidatos do DES. A distribuição espacial dos satélites sugere uma associação com o sistema magalhânico, a Grande e Pequena nuvem de Magalhães, e também sugere um grupo de satélites associados na constelação de Tucana DES J00026051, DES J23376316 e DES J2251.25836 (Tuc II).

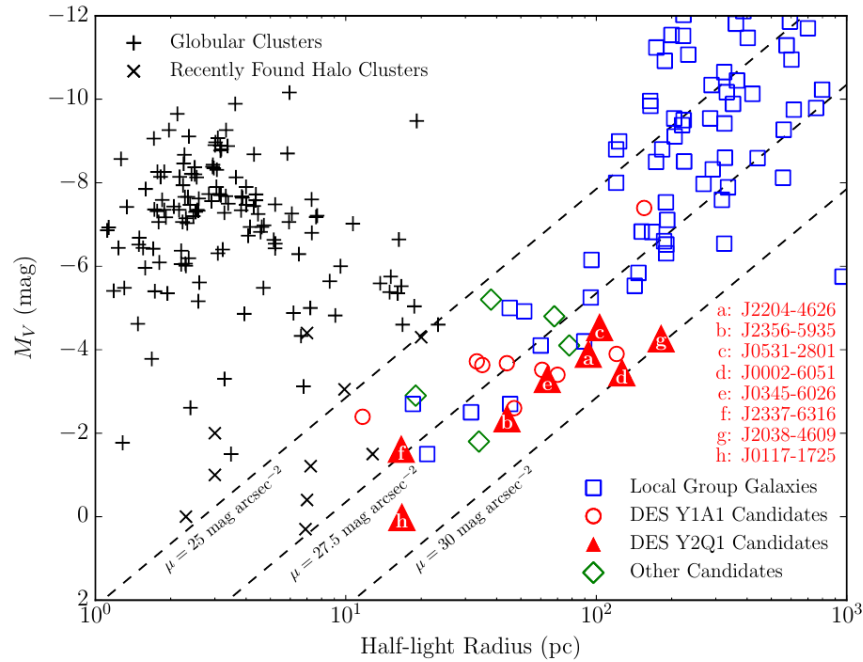


Figura 6.0.15 – Galáxias do Grupo Local e aglomerados globulares ocupam regiões distintas no plano de raio a meia luz e magnitude absoluta. A maioria dos candidatos a satélite da Galáxia (círculos e triângulos vermelhos) são mais consistentes com o locus de galáxias anãs do Grupo Local (quadrados azuis) do que com o locus de aglomerados globulares (cruzes pretas). Outras recentes descobertas de candidatos a galáxias anãs estão representadas pelos losangos verdes. Sistemas com identificação ambígua estão marcados pelo x (Balbinot et al., 2013; Luque et al., 2015)

Outra descoberta, liderada pelo nosso grupo de pesquisa, foi a detecção do objeto

¹ Créditos da imagem (The DES Collaboration et al., 2015)

compacto DES 1 (Luque et al., 2015). Este objeto é diretamente visto como sobredensidade de fontes azuis nas imagens coadd do DES figura 6.0.16². Na figura 6.0.17³, painéis superiores, mostramos a densidade de estrelas em torno do objeto, no painel esquerdo mostramos todas as fontes classificadas como estrelas, como descrito no capítulo 1, no painel central mostramos somente as estrelas que estão próximas da isócrona ajustada, veja figura 6.0.18⁴. Uma sobredensidade clara e compacta pode ser vista em ambos os painéis. No painel superior direito temos o perfil de significância de Poisson, que mostra um pico de densidade bem pronunciado para cerca de $1'.0$ do centro do objeto. O perfil de significância de Poisson é construído a partir do número de estrelas internas ao raio r e em excesso ao número de estrelas de campo (N_{bgd}), (N_{obj}), contra a flutuação esperada no campo. Os painéis inferiores da figura 6.0.17 mostram que não há sobredensidade de galáxias na posição de DES 1. Sendo, portanto, pouco provável que galáxias classificadas erroneamente possam ter contribuído para sobredensidade de DES 1.

Mostramos o CMD ajustado para DES 1 no painel esquerdo da figura 6.0.18. Foram plotadas somente estrelas dentro do raio correspondente ao pico do perfil de densidade de Poisson, 6.0.17. O painel central da figura 6.0.18 mostra o CMD para as estrelas de campo. As estrelas deste CMD foram selecionadas como pertencentes a um anel, de área igual ao CMD de DES 1 e centrado neste objeto, com um raio interno 10x maior que o raio de DES1. Mostramos também na 6.0.18 a melhor isócrona de PADOVA ajustada (Bressan et al., 2012), correspondente a um índice de ferro de $[Fe/H] = 1.88 \pm 0.25$, uma idade de $Log(anos) = 10.00 \pm 0.09$ e módulo de distância de $(m - M) = 19.70 \pm 0.36$.

² Créditos da imagem (Luque et al., 2015)

³ Créditos da imagem (Luque et al., 2015)

⁴ Créditos da imagem (Luque et al., 2015)

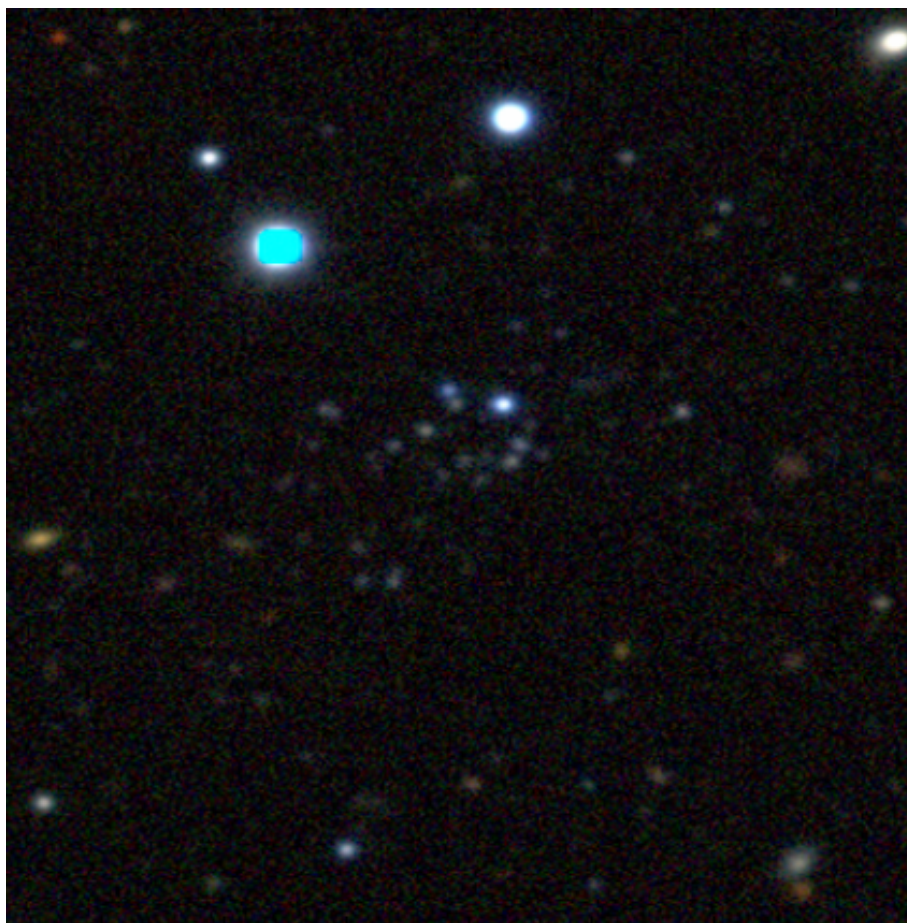


Figura 6.0.16 – *imagem coadd do DES, cortada em torno de DES 1. Esta imagem foi obtida através do Science portal do DES. A imagem tem dimensões de 1.'781.'78 e está centrada no objeto DES 1. A imagem é uma combinação dos filtros g, r e i.*

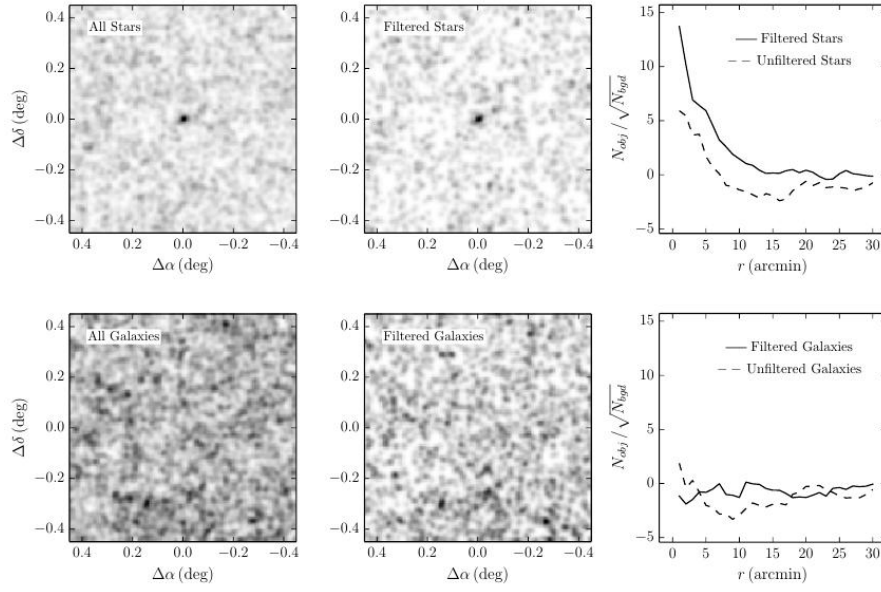


Figura 6.0.17 – Painel esquerdo superior: mapa da densidade numérica de fontes estelares em torno de DES 1. Painel superior central: mapa de densidade numérica das estrelas consistentes com o ajuste de isócrona para DES 1 6.0.18. Painel superior direito: Significância como função radial a partir do centro de DES 1. A linha sólida corresponde a todas as estrelas e a tracejada às estrelas próximas da isócrona ajustada. Os painéis inferiores mostram os mesmos plots usando a distribuição de fontes classificadas como galáxias. Estes mapas foram suavizados com um kernel gaussiano de desvio padrão igual à 0.03 .

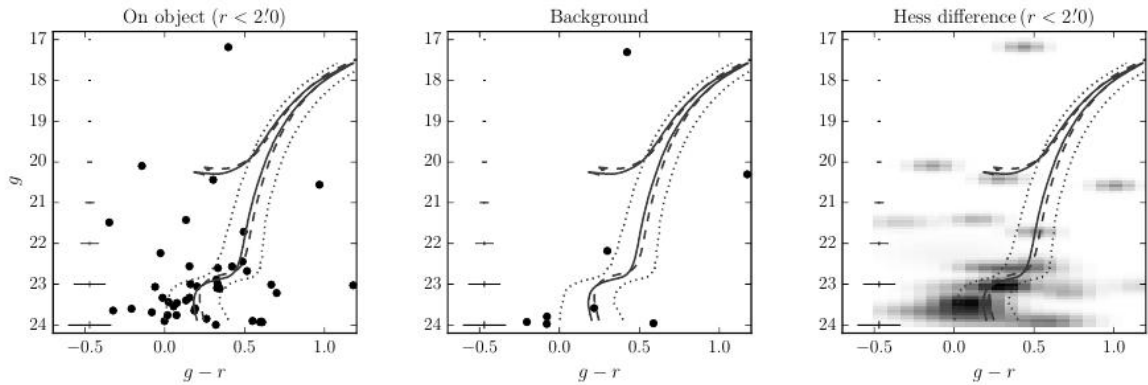


Figura 6.0.18 – Painel esquerdo CMD das estrelas dentro de $2'0$ do centro de DES 1. As isócronas com o melhor ajuste exponencial (linha sólida) e o melhor ajuste de perfil de King (linha tracejada) são mostradas, também mostramos linhas pontilhadas definindo os membros mais prováveis da população. Painel central: CMD das estrelas de campo, em uma área igual ao painel esquerdo. Painel direito: Diagrama de Hess para a diferença entre os CMDs dos painéis esquerdo e o central.

7 Considerações finais

Segundo os resultados apresentados no capítulo 5 e 6, podemos afirmar que o método SparSEx é capaz de encontrar subestruturas da Galáxia como, galáxias anãs, aglomerados globulares e também correntes estelares. Foram recuperadas nos dados do SDSS 11 galáxias anãs (Belokurov et al., 2007; Zucker et al., 2006), 4 aglomerados globulares (Koposov et al., 2007; Whiting; Hau; Irwin, 2002; Belokurov et al., 2010) e 2 objetos com classificação ambígua (Balbinot et al., 2011; Belokurov et al., 2010). Todos estes objetos foram detectados pelo SparSEx com um ranqueamento alto, ou seja, de todos os candidatos a subestrutura encontrados pelo método, estes foram os mais prováveis. A detecção da corrente estelar da galáxia anã de Sagitário também é bem clara. E traz vantagens em relação aos métodos que usam somente uma SSP, pois geralmente correntes estelares cobrem diferentes distâncias ao longo de sua extensão e algumas apresentam também diferentes metalicidades e idades (Koposov et al., 2012).

Podemos dizer, portanto, que o SparSEx é um método bem geral na busca de subestruturas, já que ele é capaz de detectar estruturas sem informação prévia da população estelar e também pode detectar objetos com características estruturais bem distintas, como correntes estelares e aglomerados globulares.

Também reportamos a descoberta de 17 satélites da Galáxia que foram detectados pelo SparSEx e por outros dois métodos de dentro da colaboração do DES (Bechtol et al., 2015; The DES Collaboration et al., 2015; Luque et al., 2015). Essa busca foi feita nos dados correspondentes aos dois primeiros anos do DES, projeto que ainda coletará dados até 2018. A maioria desses objetos tem características consistentes com galáxias anãs, como brilhos superficiais baixos e tamanhos físicos $\geq 40pc$. Um follow-up espectroscópico é necessário para termos certeza sobre a classificação desses objetos. A maioria dos satélites está concentrada perto das nuvens de Magalhães, configuração que pode ter resultado da sua formação concomitante com essas galáxias (satélites de satélites). Além disso, constatamos a existência de um grupo de satélites aglomerados na constelação de Tucana, com cada satélite posicionado a $\leq 10kpc$ do centróide do grupo.

Mostramos também a descoberta do satélite DES 1, que tem uma densidade estelar significativa na sua distribuição espacial e no seu CMD. Os ajustes de isócronas, feitos a partir de dois métodos diferentes, resultaram em uma população velha e pobre em metal, como é de se esperar para estruturas que habitam o halo Galáctico. Ajustes do perfil King usando máxima verossimilhança resultaram em um raio de core de $r_c \approx 0'.8$ que a uma distância de 77.6kpc nos leva a um raio físico de $\approx 9.88pc$. A magnitude absoluta de DES 1, foi determinada de formar similar a de (Koposov et al., 2015a), resultando em um

valor de $M_v \approx -3.05$. Esse valor de magnitude absoluta e de tamanho físico para DES 1, o coloca no locus ocupado por aglomerados globulares de baixa luminosidade. DES 1 seria um dos aglomerados globulares mais distantes do Sol, de acordo com a sua distância estimada.

Desenvolvemos o SparSEx com o intuito de aplicações em grandes levantamentos de dados como o SDSS e o DES. Mostramos a partir da validação e detecção de objetos, que esse método tem grande potencial para ser aplicado nesses levantamentos. Os próximos anos de observação do DES não irão crescer significativamente em área do céu. Porém, ainda haverá um considerável aumento na profundidade dos dados, o que resulta em um volume efetivo maior coberto. Portanto pretendemos fazer aplicações do SparSEx nas próximas temporadas do DES e também em futuros levantamentos fotométricos como o LSST, descobrindo assim satélites mais fracos, mais distantes e com brilho superficial mais baixo.

Referências

- Aihara, H. et al. The Eighth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Data from SDSS-III. , v. 193, p. 29, abr. 2011. Citado na página 15.
- Balbinot, E. et al. A New Milky Way Halo Star Cluster in the Southern Galactic Sky. , v. 767, p. 101, abr. 2013. Citado 3 vezes nas páginas 8, 10 e 38.
- Balbinot, E. et al. The tidal tails of NGC 2298. , v. 416, p. 393–402, set. 2011. Citado 3 vezes nas páginas 10, 19 e 42.
- Bechtol, K. et al. Eight New Milky Way Companions Discovered in First-year Dark Energy Survey Data. , v. 807, p. 50, jul. 2015. Citado 5 vezes nas páginas 8, 9, 11, 37 e 42.
- Belokurov, V. et al. Big Fish, Little Fish: Two New Ultra-faint Satellites of the Milky Way. , v. 712, p. L103–L106, mar. 2010. Citado 3 vezes nas páginas 8, 10 e 42.
- Belokurov, V. et al. Cats and Dogs, Hair and a Hero: A Quintet of New Milky Way Companions. , v. 654, p. 897–906, jan. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 42.
- Bertin, E.; Arnouts, S. SExtractor: Software for source extraction. , v. 117, p. 393–404, jun. 1996. Citado 3 vezes nas páginas 11, 17 e 23.
- Bonaca, A. et al. Milky Way Mass and Potential Recovery Using Tidal Streams in a Realistic Halo. , v. 795, p. 94, nov. 2014. Citado na página 10.
- Bressan, A. et al. PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code. , v. 427, p. 127–145, nov. 2012. Citado 4 vezes nas páginas 10, 21, 37 e 39.
- Carlin, J. L. et al. The Origin of the Virgo Stellar Substructure. , v. 753, p. 145, jul. 2012. Citado na página 10.
- Davenport, J. R. A.; Sandquist, E. L. A Matched Filter Analysis of the Open Cluster M67 with SDSS Photometry. In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts #213*. [S.l.: s.n.], 2009. (Bulletin of the American Astronomical Society, v. 41), p. 442.17. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 19.
- Deason, A. J. et al. Satellites of LMC-mass dwarfs: close friendships ruined by Milky Way mass haloes. , v. 453, p. 3568–3574, nov. 2015. Citado na página 10.
- Desai, S. et al. The Blanco Cosmology Survey: Data Acquisition, Processing, Calibration, Quality Diagnostics, and Data Release. , v. 757, p. 83, set. 2012. Citado na página 17.
- Duffau, S. V. et al. Confirmation of Halo Substructure using Quest RR Lyrae Data: The New Virgo Stellar Stream (VSS). In: *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*. [S.l.: s.n.], 2006. (Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, v. 26), p. 70–71. Citado na página 10.
- Fadely, R. et al. Segue 3: An Old, Extremely Low Luminosity Star Cluster in the Milky Way's Halo. , v. 142, p. 88, set. 2011. Citado na página 10.

- Flaugher, B. et al. The Dark Energy Camera. , v. 150, p. 150, nov. 2015. Citado na página 16.
- Fukugita, M. et al. The Sloan Digital Sky Survey Photometric System. , v. 111, p. 1748, abr. 1996. Citado na página 15.
- Grillmair, C. J. A Matched Filter Analysis of SDSS DR8 Photometry in the Vicinity of the Cetus Polar Stream. In: Aoki, W. et al. (Ed.). *Galactic Archaeology: Near-Field Cosmology and the Formation of the Milky Way*. [S.l.: s.n.], 2012. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 458), p. 219. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 19.
- Gunn, J. E. et al. The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera. , v. 116, p. 3040–3081, dez. 1998. Citado 3 vezes nas páginas 15, 37 e 38.
- Hargis, J. R.; Willman, B.; Peter, A. H. G. Too Many, Too Few, or Just Right? The Predicted Number and Distribution of Milky Way Dwarf Galaxies. , v. 795, p. L13, nov. 2014. Citado na página 10.
- Harris, W. E. A Catalog of Parameters for Globular Clusters in the Milky Way. , v. 112, p. 1487, out. 1996. Citado na página 8.
- Ibata, R. et al. Galactic Halo Substructure in the Sloan Digital Sky Survey: The Ancient Tidal Stream from the Sagittarius Dwarf Galaxy. , v. 547, p. L133–L136, fev. 2001. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 36.
- Kim, D. et al. A Heros Dark Horse: Discovery of an Ultra-faint Milky Way Satellite in Pegasus. , v. 804, p. L44, maio 2015. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.
- Kim, D. et al. Discovery of a Faint Outer Halo Milky Way Star Cluster in the Southern Sky. , v. 803, p. 63, abr. 2015. Citado na página 8.
- King, I. The structure of star clusters. I. an empirical density law. , v. 67, p. 471, out. 1962. Citado na página 27.
- Kirby, E. N.; Simon, J. D.; Cohen, J. G. Spectroscopic Confirmation of the Dwarf Galaxies Hydra II and Pisces II and the Globular Cluster Laevens 1. , v. 810, p. 56, set. 2015. Citado na página 9.
- Koposov, S. et al. The Discovery of Two Extremely Low Luminosity Milky Way Globular Clusters. , v. 669, p. 337–342, nov. 2007. Citado 4 vezes nas páginas 10, 28, 35 e 42.
- Koposov, S. E. et al. The Sagittarius Streams in the Southern Galactic Hemisphere. , v. 750, p. 80, maio 2012. Citado na página 42.
- Koposov, S. E. et al. Beasts of the Southern Wild : Discovery of nine Ultra Faint satellites in the vicinity of the Magellanic Clouds. , v. 805, p. 130, jun. 2015. Citado na página 42.
- Koposov, S. E. et al. Kinematics and Chemistry of Recently Discovered Reticulum 2 and Horologium 1 Dwarf Galaxies. , v. 811, p. 62, set. 2015. Citado na página 9.
- Kroupa, P. On the variation of the initial mass function. , v. 322, p. 231–246, abr. 2001. Citado na página 21.

- Laevens, B. P. M. et al. Sagittarius II, Draco II and Laevens 3: Three New Milky Way Satellites Discovered in the Pan-STARRS 1 3 Survey. , v. 813, p. 44, nov. 2015. Citado na página 9.
- Laevens, B. P. M. et al. A New Faint Milky Way Satellite Discovered in the Pan-STARRS1 3 π Survey. , v. 802, p. L18, abr. 2015. Citado na página 9.
- Law, D. R.; Majewski, S. R. Assessing the Milky Way Satellites Associated with the Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy. , v. 718, p. 1128–1150, ago. 2010. Citado na página 10.
- Lupton, R. et al. The SDSS Imaging Pipelines. In: Harnden JR., F. R.; Primini, F. A.; Payne, H. E. (Ed.). *Astronomical Data Analysis Software and Systems X*. [S.l.: s.n.], 2001. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 238), p. 269. Citado na página 15.
- Luque, E. et al. Digging deeper into the Southern skies: a compact Milky-Way companion discovered in first-year Dark Energy Survey data. *ArXiv e-prints*, ago. 2015. Citado 4 vezes nas páginas 11, 38, 39 e 42.
- Martin, N. F. et al. Hydra II: A Faint and Compact Milky Way Dwarf Galaxy Found in the Survey of the Magellanic Stellar History. , v. 804, p. L5, maio 2015. Citado na página 9.
- McConnachie, A. W. The Observed Properties of Dwarf Galaxies in and around the Local Group. , v. 144, p. 4, jul. 2012. Citado 4 vezes nas páginas 8, 9, 37 e 38.
- Mohr, J. J. et al. The Dark Energy Survey data processing and calibration system. In: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. [S.l.: s.n.], 2012. (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, v. 8451), p. 0. Citado na página 17.
- Rood, H. J. et al. The Structure of the Coma Cluster of Galaxies. , v. 175, p. 627, ago. 1972. Citado na página 21.
- 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. , v. 500, p. 525–553, jun. 1998. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 21.
- Sevilla, I. et al. The Dark Energy Survey Data Management System. *ArXiv e-prints*, set. 2011. Citado na página 17.
- Stoughton, C. et al. Sloan Digital Sky Survey: Early Data Release. , v. 123, p. 485–548, jan. 2002. Citado na página 15.
- The Dark Energy Survey Collaboration. The Dark Energy Survey. *ArXiv Astrophysics e-prints*, out. 2005. Citado na página 16.
- The DES Collaboration et al. Eight Ultra-faint Galaxy Candidates Discovered in Year Two of the Dark Energy Survey. *ArXiv e-prints*, ago. 2015. Citado 6 vezes nas páginas 8, 9, 11, 37, 38 e 42.
- Tollerud, E. J. et al. Hundreds of Milky Way Satellites? Luminosity Bias in the Satellite Luminosity Function. , v. 688, p. 277–289, nov. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

- van den Bergh, S. The luminosity-diameter relations for globular clusters and dwarf spheroidal galaxies. , v. 390, p. L51–L53, out. 2008. Citado na página 38.
- Vidrih, S. et al. New ultracool and halo white dwarf candidates in SDSS Stripe 82. , v. 382, p. 515–525, dez. 2007. Citado na página 8.
- White, S. D. M.; Frenk, C. S. Galaxy formation through hierarchical clustering. , v. 379, p. 52–79, set. 1991. Citado na página 9.
- Whiting, A. B.; Hau, G. K. T.; Irwin, M. The Southern Dwarf Hunt: Local Group Dwarf Candidates in the Southern Sky. , v. 141, p. 123–146, jul. 2002. Citado na página 42.
- Willman, B. Two New Milky Way Companions. *ArXiv Astrophysics e-prints*, jun. 2005. Citado na página 8.
- Willman, B. et al. A New Milky Way Companion: Unusual Globular Cluster or Extreme Dwarf Satellite? , v. 129, p. 2692–2700, jun. 2005. Citado na página 8.
- Willman, B.; Strader, J. "Galaxy," Defined. , v. 144, p. 76, set. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.
- York, D. G. et al. The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. , v. 120, p. 1579–1587, set. 2000. Citado na página 15.
- Zucker, D. B. et al. A New Population of Ultra-faint Local Group Galaxies. In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. [S.l.: s.n.], 2006. (Bulletin of the American Astronomical Society, v. 38), p. 178.05. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 42.