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

Ana Cecília Soja

O Aglomerado de Galáxias RXC J1504 -0248

São Paulo

2012

Ana Cecília Soja

O Aglomerado de Galáxias RXC J1504 -0248

Versão corrigida da dissertação apresentada
ao Departamento de Astronomia do Instituto
de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
da Universidade de São Paulo. Original encontra-
se disponível na unidade.

Área de Concentração: Astronomia

Orientador: Prof. Dr. Laerte Sodré Jr.

São Paulo

2012

À Laerte Sodré Jr.

Agradecimentos

Aos meus pais, por todo o apoio.

Ao meu orientador, Laerte Sodré Jr., por todo apoio e confiança, e sobretudo pelos elogios e broncas nas horas certas.

Ao professor Eduardo Serra Cypriano que, apesar de seu humor sarcástico, sempre me auxiliou, e foi fundamental para a realização desse trabalho.

Ao professor Gastão Lima Neto, meu relator, por seus comentários precisos, que muito me ajudaram.

À Alexandra, César, Denise, Giovanni, Guilherme, Mariana, Mariane, Rodrigo e Tatiane por todos os dias e noites que passamos estudando e, especialmente, pelo companheirismo ao superarmos o curso de física.

À Luciene e Andressa, por aguentarem dividir sala comigo nesses dois anos.

À Rogério, por estar ao meu lado em todas as situações, e suportar discussões sobre essa dissertação em muitos momentos.

À Danilo, pelas dúvidas de IDL sanadas em qualquer dia ou horário.

À Marcus Vinicius, pela ajuda com o Latex, e também por suas dicas sempre muito úteis.

À Rafael, pelas conversas e pelos doces, sem os quais essa dissertação não seria possível.

À Felipe, Felipe e Josué, por aturarem com bom humor minhas frequentes visitas à sala deles.

À todos os meus colegas do IAG, que propiciaram um excelente ambiente de trabalho.

Aos técnicos da informática, Marco e Luis, por sempre atenderem prontamente meus pedidos de socorro.

Às meninas da secretaria, Marina, Conceição, Aparecida e Regina, por perdoarem meus

lapsos de obrigações burocráticas.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

*“It’s been a long road
Getting from there to here
It’s been a long time
But my time is finally near
[...]*

*And I will see my dreams come alive at last
I will touch the sky”*

Rod Stewart

Resumo

O objetivo deste trabalho foi determinar a massa do aglomerado de galáxias RXC J1504-0248, localizado em $z = 0.215$, através da análise de lentes fracas, e comparar os resultados com aqueles obtidos em trabalhos anteriores através da análise de raios-X.

Imagens do aglomerado foram obtidos nas bandas r' , g' e i' com o detector GMOS do telescópio Gemini Sul. A partir dessas imagens, contruímos um catálogo de objetos no campo usando o software Sextractor (SE) (Bertin e Arnouts, 1996). Este software também foi utilizado para classificá-los como galáxias ou estrelas. Foram identificadas 172 galáxias neste campo, que também foram detectadas no *Data Release 7* do Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Estas galáxias foram então usadas para obter uma calibração fotométrica das imagens, comparando as magnitudes instrumentais e do SDSS nas mesmas bandas. Após a calibração fotométrica, e através da comparação com imagens do CFHTLS obtidas em cores semelhantes, as galáxias foram classificadas como membros de cluster, *foreground* ou *background*, a partir de sua posição nos diagramas cor-cor e cor-magnitude.

A reconstrução da massa do aglomerado através da análise de lentes gravitacionais foi realizada em duas etapas. Na primeira, foi utilizado o software IM2SHAPE, desenvolvido por Bridle et al. (1998), que modela os objetos, adicionando até três gaussianas, cada uma definida por seis parâmetros: as coordenadas do centro do objeto, x_0 e y_0 , a elipticidade e , o ângulo de posição θ , o produto dos semi-eixos maior e menor ab , e a amplitude A . Inicialmente, o programa foi executado apenas para as estrelas do campo, com o objetivo de se obter uma estimativa da distribuição da PSF. A estimativa foi então utilizado como entrada para a análise das galáxias. Na segunda etapa, para estimar a massa do aglomerado foi utilizado o programa LENSENT, desenvolvido por Marshall et al. (2002), cujos parâmetros de entrada são a elipticidade das galáxias de fundo e seus erros.

Na técnica de lentes gravitacionais fracas, a dependência radial da deformação das galáxias de fundo permite determinar o perfil de massa do aglomerado. Para estimar a massa, ajustamos um perfil de uma Esfera Isotérmica Singular (SIS, na sigla em inglês), e determinamos o valor da massa dentro de um raio de 3Mpc, $1.3 \pm 0.6 \times 10^{15} M_{\odot}$. O resultado é consistente com o obtido por [Böhlinger et al. \(2005\)](#) $1.7 \times 10^{15} M_{\odot}$, através da análise em raios-X.

Comparando o mapa de distribuição de luminosidade e da emissão de raios-X concluímos que eles são muito semelhantes à distribuição superficial de massa, resultado que indica equilíbrio.

Abstract

In this work we studied the galaxy cluster RXC J1504-0248, at $z=0.215$, from images in the bands r' , g' and i' obtained with Gemini South telescope. The photometric calibration was performed by comparison with field objects identified in the Sloan Digital Sky Survey (SDSS). From the analysis of color-color and color-magnitude diagrams, galaxies in the field were then divided into cluster members, background and foreground objects. We determined the PSF using the IM2SHAPE program [Bridle et al. \(1998\)](#). These results enabled us to obtain the cluster projected mass distribution through a weak lensing analysis performed with the LENSENT program [Marshall et al. \(2002\)](#). We also shown that the cluster luminosity distribution and the X-ray emission are consistent with the mass map. Using a SIS model, we estimated the mass of the cluster, obtaining $1.3 \times 10^{15} M_{\odot}$, consistent with the mass obtained in a previous X-ray analysis, $1.7 \times 10^{15} M_{\odot}$, by [Böhlinger et al. \(2005\)](#).

Lista de Figuras

1.1	Imagem colorida do aglomerado RXC J1504-0248.	26
2.1	FWHM dos objetos da amostra em função da magnitude instrumental na banda r. No retângulo vermelho encontram-se destacados os objetos classificados como estrelas.	32
2.2	Parâmetro CS do SExtractor em função da magnitude instrumental na banda r'; em vermelho os objetos classificados como estrelas a partir da Figura (2.1). A linha contínua representa o limite superior dos objetos que foram classificados como galáxias.	33
2.3	Erro fornecido pelo programa SExtractor em função da magnitude instrumental dos objetos. A região delimitada representa a escolhida para a calibração.	35
2.4	Magnitude calculada em função da magnitude fornecida pelo SDSS para objetos dessa amostra. A reta vermelha é do tipo $x=y$ e tem o objetivo de auxiliar na visualização da correspondência entre as magnitudes.	37
2.5	Número de objetos detectados em cada banda por intervalo de magnitude. A magnitude de completeza é representada por uma linha preta.	38
2.6	Diagrama cor-magnitude das galáxias do campo. A região delimitada pelo trapézio vermelho corresponde à região da Sequência vermelha, e os objetos marcados em vermelhos àqueles correspondentes num região delimitada do diagrama cor-cor.	39
2.7	Diagrama cor-cor das galáxias do campo. Os objetos vermelhos correspondem àqueles identificados na região da Sequência Vermelha do aglomerado.	40

2.8	Diagrama cor-cor para as galáxias do campo que não pertencem ao aglomerado, divididas nos intervalos de magnitudes relacionados na tabela (2.6).	42
2.9	Diagrama cor-cor para as galáxias do catálogo Terapix4 produzido pelo CFHT, divididas nos intervalos de <i>redshift</i> fotométricos relacionados na tabebla (2.7).	43
2.10	Comparação entre o diagrama cor-cor obtido por Medezinski et al. (2010) para o aglomerado A1703, a <i>redshift</i> $z=0.258$ (2.10b) com o obtido para as galáxias do campo observado (2.10a). Em ambos os diagramas, os pontos verdes representam as galáxias classificadas como membro do aglomerado e os rosas como pertencentes ao <i>foreground</i> . As galáxias do nosso campo classificadas como <i>background</i> estão plotadas em preto, e correspondem aos objetos vermelhos e azuis da figura de Medezinski et al. (2010), os quais estão divididos em duas populações.	45
2.11	Distribuição dos objetos classificados como membros do aglomerado (2.11a), <i>foreground</i> (2.11b) e <i>background</i> (2.11c).	46
3.1	Representação da geometria de uma lente gravitacional. Para um observador em O , a fonte localizada no ponto S é vista na posição I , e seu raio de luz é defletido por um ângulo $\hat{\alpha}$. Os ângulos β e θ representam as separações angulares entre a fonte e a imagem a partir do eixo óptico, respectivamente. D_s é a distância do observador à fonte, D_d é a distância do observador à lente e D_{ds} é a distância da lente à fonte. Figura obtida de Narayan e Bartelmann (1996).	48
3.2	Raio de luz sendo defletido de um ângulo $\hat{\alpha}$, após atingir a distribuição de massa a uma distância ξ . Extraído de Narayan e Bartelmann (1996).	49
3.3	Representação dos efeitos da convergência κ e do cizalhamento sobre uma fonte representada com o formato circular. A convergência magnifica a imagem isotropicamente enquanto que o cizalhamento γ a deforma numa elipse. Extraído de Narayan e Bartelmann (1996).	52

4.1	Distribuição da elipticidade antes e após o clipping das estrelas do campo. O traço azul no extremo superior direito representa uma elipticidade $\varepsilon = 0.01$ e $\theta = 0$, a título de referência	59
4.2	Valores da elipticidade antes e após o clipping das estrelas do campo. A linha tracejada representa a média.	59
4.3	Valores de ab antes e após o clipping das estrelas do campo. A linha tracejada representa a média.	60
4.4	Distribuição dos valores das médias de elipticidade, inclinação (θ) e ab das cinco estrelas mais próximas de cada galáxia.	61
4.5	Distribuição da forma das galáxias que compõem o <i>background</i> a partir de ε e θ . O traço azul no extremo superior direito representa uma elipticidade $\varepsilon = 0.01$ e $\theta = 0$, a título de referência	62
4.6	Média de ε e θ dentro de quadrantes da imagem. O traço azul no extremo superior direito representa uma elipticidade $\varepsilon = 0.1$ e $\theta = 0$, a título de referência.	63
4.7	Valores de ε nas direções tangencial (pontos vermelhos) e projetada a 45° (pontos azuis). As barras horizontais representam o espaço onde os objetos considerados encontram-se, e as barras verticais representam o erro. A linha contínua representa o zero, e a linha lilás tracejada o ajuste SIS aos dados.	63
4.8	Regiões delimitadas como <i>background</i> no diagrama do aglomerado.	65
4.9	Identificação no CFHT das duas regiões delimitadas como <i>background</i> na nossa amostra, para galáxias que estejam no mesmo limite de magnitude. Na legenda encontra-se o valor médio do <i>redshift</i> obtido nas duas regiões.	66
4.10	O parâmetro evidência em função da suavização para mapas de 32 e 64 pixels.	68
4.11	Reconstrução da distribuição de massa do aglomerado a partir da análise de lentes gravitacionais, com diferentes tamanhos. A caixa azul corresponde à representação do campo.	69
4.12	Sobreposição dos contornos da distribuição de massa obtida com o programa LensEnt2 à imagem colorida do aglomerado RXC J1504-0248.	69
4.13	Mapa da distribuição da luminosidade das galáxias do aglomerado	70

4.14 Sobreposição dos contornos do mapa de distribuição de luminosidade do aglomerado sobre a imagem do mesmo.	71
4.15 Mapas dos contornos das distribuições de massa, emissão em raios-X e luminosidade sobrepostos à imagem do aglomerado de galáxias RXC J1504 0248.	72
4.16 Contornos da distribuição de massa (ciano) comparados com os contornos da densidade de luminosidade (amarelo) obtidos para o aglomerado RXC J1504-0248.	73

Lista de Tabelas

2.1	Propriedades dos filtros do GMOS-S utilizados na fotometria.	30
2.2	Tempo de exposição e <i>seeing</i> obtidos para a imagem combinada de cada banda.	30
2.3	Região do SDSS selecionada.	34
2.4	Valores para a constante de calibração entre as magnitudes do SE e do SDSS.	36
2.5	Magnitude limite adotada para cada banda.	38
2.6	Intervalos de magnitudes na banda r' para galáxias que compõem ou o <i>foreground</i> ou o <i>background</i>	41
2.7	Intervalos de <i>redshift</i> para galáxias do CFHT.	43
4.1	Intervalos de <i>redshift</i> para galáxias do CFHT.	67
A.1	Objetos do SDSS que encontram-se no campo, com suas respectivas magnitudes nas bandas de interesse.	85

Sumário

1. <i>Introdução</i>	21
1.1 Aglomerados de Galáxias	21
1.2 Determinação da Massa de Aglomerados de Galáxias	22
1.2.1 Teorema do Virial	23
1.2.2 Análise de Raios X	23
1.2.3 Análise de Lentes Gravitacionais	24
1.3 O Aglomerado RX J1504-0248	25
1.4 Resumo dos capítulos	27
2. <i>Base de Dados</i>	29
2.1 Amostra e Observações	29
2.2 Extração e Classificação dos Objetos	30
2.2.1 Separação Estrela - Galáxia	32
2.3 Calibração Fotométrica	33
2.3.1 Identificação dos Objetos no SDSS	33
2.3.2 Completeza	36
2.4 Classificação das Galáxias	39
3. <i>Introdução à determinação de massas de aglomerados via lentes fracas</i>	47
3.1 Introdução à Análise de lentes gravitacionais fracas	47
3.1.1 A equação da Lente	47
3.1.2 Lentes Fracas	52
3.1.3 Esfera Isotérmica Singular	54

3.2	Aplicações na determinação da massa	56
4.	<i>Determinação da massa do Aglomerado de Galáxias RXC J1504-0248 via lentes gravitacionais fracas</i>	57
4.1	Análise de Elipticidade	57
4.1.1	Estrelas	58
4.1.2	Galáxias	60
4.1.3	Estimativa da massa a partir de um perfil do tipo SIS	62
4.2	Reconstrução da Distribuição de Massa	66
4.3	Construção do mapa de luz	68
4.4	Comparação das distriuições de massa, emissão raios-X e luminosidade .	71
5.	<i>Conclusões e Perspectivas</i>	75
	<i>Referências</i>	79
	<i>Apêndice</i>	83
A.	<i>Tabelas de Objetos do SDSS</i>	85

Introdução

Como este trabalho é dedicado ao estudo do aglomerado de galáxias RXC J1504-0248, primeiro fazemos uma revisão da física de aglomerados de galáxias, descrevendo seus principais componentes. A seguir, discutimos as técnicas usuais para determinação da massa de aglomerados de galáxias: pelo Teorema do Virial, através da análise do perfil em raios-X e por lentes gravitacionais. Por fim, detalhamos as principais características do aglomerado de galáxias RXC J1504-0248, incluindo resultados encontrados na literatura, e um resumo do conteúdo de cada capítulo de análise.

1.1 *Aglomerados de Galáxias*

A primeira provável referência a aglomerados de galáxias foi feita por Messier, no século XVIII, ao observar uma concentração de *nebulosas* na região de Virgo. Com o passar do tempo e a consolidação dos estudos extragalácticos, verificou-se que a maioria das galáxias do Universo são encontradas em algum tipo de associação, que pode ser desde pares e grupos ($\sim 10 - 20$ galáxias) até aglomerados ricos que contêm milhares de galáxias. A princípio, essas aglomerações foram tratadas apenas como uma sobredensidade de galáxias em relação à média de distribuição de galáxias no espaço, mas com o desenvolvimento das pesquisas percebeu-se que tratavam-se de estruturas complexas, com diversos componentes e muitas vezes com subestruturas, sendo o estudo dessas componentes e estruturas é essencial para a compreensão da origem e evolução dos aglomerados.

Quase 200 anos após as observações de Messier, Abell publicou seu catálogo ([Abell, 1958](#)), onde reuniu e analisou milhares de aglomerados; este trabalho impulsionou o estudo sistemático dos aglomerados, e seu catálogo é um dos mais utilizados até hoje. Abell

considerou como aglomerados conjuntos de galáxias que possuíssem ao menos 30 membros brilhantes num raio de $1.5h^{-1}Mpc$, o raio de Abell.

Um aglomerado típico é composto por três componentes: a matéria escura, que corresponde a cerca de 80 - 85 % da massa, o gás intraglomerado e as galáxias, compostos por matéria bariônica e responsáveis pela matéria restante. É interessante analisar cada um desses componentes mais cuidadosamente:

- **Matéria escura:** corresponde a matéria que não se comporta como a matéria bariônica, e é detectada apenas indiretamente, através de suas interações gravitacionais. Atualmente muitos estudos concentram-se em determinar sua natureza e propriedades. O paradigma cosmológico atual é o da CDM: Matéria Escura Fria (*Cold Dark Matter*, na sigla em inglês). É a componente responsável por $\sim 80\%$ da massa do aglomerado. Para uma revisão ver ?.
- **Meio intraglomerado:** (ICM, na sigla em inglês, *intracluster medium*) é a parcela de matéria bariônica que encontra-se no meio entre as galáxias, e corresponde a cerca de 10 - 15 % da massa total do aglomerado. A maior parte dos bárions de um aglomerado está neste gás intergaláctico. Tipicamente, é bastante quente ($10^7 - 10^8 K$) e rarefeito ($\sim 10^{-2} - 10^{-3}$ partículas/ cm^3) (e.g. [Lima-Neto \(2011\)](#)), emitindo principalmente em raios-X (por *bremhsstralung*). Para um revisão ver [Molendi \(2010\)](#).
- **Galáxias:** As galáxias são compostas por estrelas, gás e poeira, e são o componente utilizado na classificação de aglomerados, geralmente devido ao seu tipo e distribuição. Aglomerados regulares são quase totalmente compostos por galáxias do tipo E e S0 ([Dressler, 1980](#)), estando as galáxias mais brilhantes concentradas no centro. Esse efeito proporciona um importante método para a identificação das galáxias pertencentes a um aglomerado, visto que elas são geralmente avermelhadas, tendo propriedades fotométricas bem definidas.

1.2 Determinação da Massa de Aglomerados de Galáxias

Nesta seção, serão analisados separadamente os três principais métodos utilizados na determinação da massa de aglomerados, com suas hipóteses, vantagens e desvantagens.

1.2.1 Teorema do Virial

O Teorema do Virial postula que dado um sistema gravitacional em equilíbrio, o módulo da sua energia potencial é equivalente a duas vezes sua energia cinética (equação 1.1).

$$2K + U = 0 \quad (1.1)$$

Para um sistema gravitacionalmente ligado, a equação 1.1 pode ser reescrita em função da média das velocidades dos elementos do sistema v e do raio gravitacional r_g , definido como $\frac{GM}{U}$, como mostrado abaixo:

$$2K + U = \frac{1}{M} \sum m_i v_i^2 - \frac{GM}{r_g} = 0 \quad (1.2)$$

Considerando que a somatória das massas é igual à massa total, tem-se:

$$M = \frac{r_g \bar{v}^2}{G} \quad (1.3)$$

No entanto, r_g e $\bar{v}^2$ não são medidos diretamente, e para obter-se a massa de aglomerados a partir desse teorema são necessárias diversas considerações a respeito do raio gravitacional (que pode ser aproximado como o raio efetivo - aquele que contém 50 % da luminosidade do aglomerado) e da distribuição de velocidades. Outra desvantagem é que é necessária a hipótese de equilíbrio para a determinação da massa do aglomerado. Por outro lado, esse é um método simples, que proporciona uma estimativa da massa a partir de um único parâmetro.

Veja [Aceves e Perea \(1999\)](#) para uma apresentação de alguns estimadores de massa e [Biviano \(2006\)](#) para uma discussão sobre a eficiência e confiabilidade de estimativas de massas de aglomerados com o Teorema do Virial.

1.2.2 Análise de Raios X

Aglomerados de galáxias emitem fortemente em raios-X, principalmente devido à emissão térmica via *bremssstrahlung* do gás quente e rarefeito que permeia o meio intraglomerado. A emissividade do gás encontra-se definida na equação 1.4, onde é assumida uma distribuição maxwelliana de velocidades:

$$\epsilon_\nu = \frac{dE}{dV dt d\nu} = 6,842 \times 10^{-38} Z^2 n_e n_i T^{-1/2} e^{-h\nu/kT} g(E, T) \text{ergs}^{-1} \text{cm}^{-3} \text{Hz}^{-1} \quad (1.4)$$

onde n_e e n_i são as densidades numéricas de elétrons e íons, Z é o número atômico médio, T a temperatura e $g(E, T)$ o *fator de gaunt*, que considera os efeitos quânticos e relativísticos do plasma.

Considerando que o mesmo encontra-se em equilíbrio, ele deve obdecer à equação de Euler do equilíbrio hidrostático:

$$\frac{1}{\rho} \nabla P = - \nabla \Phi \quad (1.5)$$

onde ρ é a densidade do gás e Φ seu potencial gravitacional. Considerando simetria esférica, a derivada do potencial Φ pode ser definida em função da força gravitacional, como mostrado abaixo:

$$\frac{d\Phi}{dr} = \frac{GM(r)}{r^2} \quad (1.6)$$

onde $M(r)$ é a massa dentro de uma esfera de raio r . Utilizando a aproximação de um gás ideal $PV = NkT$ e combinando com a equação 1.6, é possível obter uma estimativa para o perfil de massa radial do aglomerado a partir da densidade e temperatura do gás do meio intraglomerado:

$$M(r) = -\frac{kT}{G\mu m_H} r \left(\frac{d \ln \rho}{d \ln r} + \frac{d \ln T}{d \ln r} \right) \quad (1.7)$$

Novamente, a grande desvantagem dessa técnica é a necessidade da hipótese de equilíbrio, a qual nem sempre é adequada.

1.2.3 Análise de Lentes Gravitacionais

O fenômeno de lentes gravitacionais consiste no resultado do desvio sofrido por um raio de luz ao passar por um objeto massivo. Esse fenômeno é uma das consequências da Teoria da Relatividade Geral. Em 1919, durante um eclipse solar, ele foi observado ao medir-se a deflexão sofrida pela luz das estrelas que estavam atrás do Sol, tornando-se uma das evidências observacionais da Teoria. (Dyson et al., 1920)

Nas décadas seguintes muito foi discutido sobre outros usos possíveis do fenômeno de lentes gravitacionais, principalmente na Astronomia, aventando-se a possibilidade do uso de objetos astronômicos como lentes, para diversos fins. No entanto, apesar das especulações teóricas, pairava a dúvida sobre a viabilidade da precisão necessária para tais observações.

Com o desenvolvimento tecnológico dos telescópios, essa precisão tornou-se realidade e o quasar QSO 0957+561A,B a primeira observação de uma lente gravitacional, em 1979 (Walsh et al., 1979). Desde então, a técnica e as observações vêm sendo aprimoradas e amplamente utilizadas na Astrofísica, desde microlentes que auxiliam na detecção de exoplanetas até o estudo de lentes na Estrutura do Universo em Larga Escala, com o objetivo de determinar de forma independente e precisa parâmetros cosmológicos como, por exemplo, a Constante de Hubble (e.g. Paraficz e Hjorth, 2010).

Uma das maiores vantagens do estudo de Lentes Gravitacionais é a independência de hipóteses com relação à natureza da luz ou do objeto estudado, visto que o fenômeno deve-se somente a interações gravitacionais. Em particular, esta técnica não exige que o aglomerado esteja em equilíbrio. Essa é a principal maneira de obter vínculos sobre matéria escura, visto que esta não apresenta nenhum tipo de interação além da gravitacional.

Esta técnica é discutida em detalhes no capítulo 3.

1.3 O Aglomerado RX J1504-0248

Uma das maneiras de estudar as questões pertinentes aos processos que inibem os fluxos de resfriamento e os mecanismos de equilíbrio do gás no meio intraglomerado é analisar aglomerados onde são esperados, mas não observados, fluxos de resfriamento massivos.

Este é caso do aglomerado RXC J1504-0248, mostrado na Figura 1.1. Ele está no redshift $z = 0.215$, é muito quente e luminoso ($kT = 10,1 \text{ keV}$, $LX = 4.3 \times 10^{45} \text{ ergs}^{-1}$), conforme demonstrado por Böhringer et al. (2005), ao observá-lo com o telescópio CHANDRA. Ao ajustar um modelo para a emissão em raios-X, eles obtiveram uma estimativa da taxa de deposição de massa no modelo clássico de *cooling flow* de $\sim 1500 - 1900 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$. Eles também determinaram a massa, usando a técnica de raios-X descrita anteriormente, obtendo $1.7 \times 10^{15} h_{70}^{-1} M_{\odot}$ dentro de $3 h_{70} \text{ Mpc}$, o que indica que ele é muito massivo.

Ogrian et al. (2010) o classificaram como o mais proeminente *cool-core* com redshift < 0.3 ; neste mesmo trabalho eles estimaram a taxa de gás resfriando como $80 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$,

Figura 1.1: Imagem colorida do aglomerado RXC J1504-0248.

compatível com a taxa de formação estelar observada no ultravioleta, de $\sim 140 M_{\odot} \text{ano}^{-1}$. Giacintucci et al. (2011) descobriram uma fonte difusa de rádio no aglomerado RXC J1504-0248, classificada como um minihalo, detectada usando GMRT a 327MHz, e confirmado com dados do VLA a 1.46GHz.

Na ausência de uma fonte de aquecimento, o cenário clássico de fluxo de resfriamento prevê uma taxa de deposição de massa muito grande, $\sim 1900 M_{\odot} / \text{ano}$. O aglomerado tem uma morfologia muito regular, indicativa de relaxamento. No entanto, a temperatura de seu ICM é muito alta, o que pode ser uma indicação de atividade de colisões ou fusões com outros aglomerados e grupos (Cypriano et al., 2004).

Devido a estas características, este aglomerado é ideal para a realização de estudos com o objetivo de investigar a conexão entre os *cool-cores* e a dinâmica do aglomerado.

Cypriano et al. (2004) mostraram que a comparação entre massas determinadas via lentes fracas e via raios-X (ou com o teorema do virial) provêm um método eficiente para avaliar o estado de equilíbrio de um aglomerado. Pode-se estimar a massa do aglomerado pelo Teorema do Virial supondo-se que as galáxias estão em equilíbrio no potencial do aglomerado, ou via raios-X, supondo-se que o gás quente está em equilíbrio hidrostático no potencial do aglomerado. O método de lentes gravitacionais fracas, por outro lado, é uma abordagem eficiente e confiável para mapear a distribuição de massa independentemente destas estruturas estarem ou não em equilíbrio (Schneider, 1996). Se as massas obtidas por lentes e por raios-X ou Virial concordarem, poderemos concluir que o aglomerado está

em equilíbrio (ou quase) e que o aquecimento do ICM não é produzido pela atividade dinâmica, sendo necessário recorrer a outros mecanismos (como *feedback* por AGN, discutido anteriormente) para fornecer a energia requerida para aquecer o gás e inibir o enorme fluxo de acréscimo de massa sobre a galáxia central.

1.4 Resumo dos capítulos

O objetivo dessa dissertação é estimar a massa do aglomerado RXC J1504-0241 pela técnica de lentes gravitacionais fracas e avaliar seu grau de equilíbrio. O trabalho foi dividido em duas etapas: criação de um catálogo de objetos do campo, e análise de lentes fracas dos objetos desse catálogo classificados como *background*, conforme descrito a seguir.

No segundo capítulo encontram-se descritos os dados fotométricos e o procedimento de análise: a identificação dos objetos da imagem, a calibração fotométrica através da comparação com valores obtidos pelo *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) e a separação dos objetos em estrelas e galáxias. Essas últimas também foram classificadas em membros do aglomerado, galáxias de fundo (*background*) e galáxias de frente (*foreground*) através da identificação da sequência vermelha em diagramas cor-magnitude e cor-cor e também com a comparação entre os diagramas cor-cor obtidos para a amostra com outros construídos a partir do catálogo Terapix4 (Coupon et al., 2009), para objetos de mesma magnitude, com *redshift* conhecido.

No terceiro capítulo apresentamos detalhadamente a teoria da determinação de massa de aglomerados via análise de lentes gravitacionais, com ênfase nas aproximações utilizadas para lentes fracas, que são o foco do trabalho. Destacamos os princípios utilizados nesse trabalho.

No quarto capítulo, discutimos a análise de lentes gravitacionais do aglomerado RXC J1504-0248. Primeiramente, descrevemos a aplicação do código IM2SHAPE, desenvolvido por Bridle et al. (1998), para a análise da elipticidade das galáxias que compõem o *background*, identificadas no capítulo 2. A seguir, tratamos da reconstrução da distribuição de massa do aglomerado utilizando o programa LENSENT2, desenvolvido por Marshall (2006), e da comparação dessa com as distribuições da densidade de luminosidade das galáxias e da emissão em raios-X, e quais as implicações desses resultados para a explicação do estado dinâmico do aglomerado.

No último capítulo analisamos os resultados obtidos em cada etapa e apresentamos um resumo das conclusões obtidas com esse trabalho, bem como as perspectivas de continuidade que elas proporcionam.

Base de Dados

Neste capítulo descreveremos os dados analisados nessa dissertação.

Inicialmente, estão descritas as observações feitas com o Telescópio Gemini Sul, nas bandas g', r' e i'. Para análise desses dados, foi criado um catálogo dos objetos do campo utilizando o programa SExtractor, e eles foram classificados em estrelas e galáxias.

Fizemos então a calibração fotométrica desses objetos a partir da comparação com observações do SDSS para o mesmo campo nas mesmas bandas fotométricas. Por fim, foram estudados diagramas cor-cor e cor-magnitude com o objetivo de separar as galáxias do campo como membros do aglomerado, *foreground* e *background*. Para testar os resultados, repetimos a análise para uma amostra de galáxias obtidas pelo CFHT em condições semelhantes, mas com *redshifts* conhecidos.

2.1 Amostra e Observações

O interesse pelo estudo de aglomerados onde um fluxo massivo de resfriamento é esperado motivou a escolha do aglomerado de galáxias RXC J15041-0248; observações em raios-X (Böhringer et al., 2005) indicavam que ele é muito massivo ($1.7 \times 10^{15} h_{70}^{-1} M_{\odot}$) e luminoso ($L_x = 4.3 \times 10^{45} \text{ergs}^{-1}$), e trata-se do mais proeminente *cool core* conhecido no Hemisfério Sul (Ogrea et al., 2010; Giacintucci et al., 2011, e.g.).

Para seu estudo foram obtidas imagens multicores da região central do aglomerado nas bandas g', r' e i' com o detector GMOS do telescópio Gemini Sul (GS-2009A-Q-5; PI: L. Sodré). Algumas propriedades das bandas utilizadas são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Propriedades dos filtros do GMOS utilizados na fotometria. (Dados fornecidos pelo Gemini Observatory)

Filtro	$\lambda_{central}(nm)$	Intervalo (nm)
g'	475	398-552
r'	630	562-698
i'	780	710-850

Estudos mostram que para a determinação da distribuição de massa em aglomerados de galáxias utilizando-se a técnica de lentes gravitacionais em imagens obtidas com grandes telescópios é recomendável que duas condições sejam satisfeitas (Cypriano et al., 2004, 2005, e.g.):

- 1) as imagens devem ser obtidas em condições de bom seeing (melhor que $\sim 0,8$ arcsec),
- 2) as imagens devem ser profundas o suficiente para que um grande número de galáxias de fundo sejam detectadas.

Para satisfazer essas exigências, as imagens foram obtidas em boas condições de seeing (Tabela 2.2) e foram realizadas 3 exposições de 600 segundos cada para as três bandas utilizadas, obtendo-se uma amostra completa de galáxias até $r' \sim 24.0$.

Tabela 2.2 - Tempo de exposição e *seeing* obtidos para a imagem combinada de cada banda.

Banda	Tempo de Exposição (s)	<i>seeing</i> (arcsec)
g'	1800	0.78
r'	1800	0.65
i'	1800	0.81

2.2 Extração e Classificação dos Objetos

Para criar um catálogo dos objetos presentes na amostra foi utilizado o programa Sextractor (Bertin e Arnouts, 1996). Ele detecta objetos em uma imagem identificando

seu fluxo acima de um limiar sobre o fluxo de fundo de céu, e produz um catálogo desses objetos com várias opções de parâmetros.

Para otimizar os resultados, foram realizados testes para definir os parâmetros de entrada do programa mais convenientes. O primeiro a ser analisado foi o `BACK_SIZE`, que define a resolução com a qual o fundo de céu será determinado, que consiste no limite a partir do qual os objetos serão detectados. Variando os valores possíveis e analisando as imagens-testes fornecidas pelo próprio programa, verificou-se que o valor mais adequado para esse parâmetro é 64, ou seja, esse é o valor para o qual tem-se um fundo de céu mais homogeneizado. Outro parâmetro analisado com cuidado foi o `DETECT_MINAREA`, definido como o número mínimo de pixels necessário para que o programa considere uma elevação relativa ao fluxo do fundo de céu um objeto; devido à sua importância, foram realizados diversos testes, verificados visualmente, até que fosse decidido que o valor mais adequado seria 5 pixels, ou seja, esse é o valor correspondente à detecção de mais objetos, com interferência minimizada de falsas detecções. Por fim, há o parâmetro `ANALYSIS_THRESH`, que define o valor mínimo de fluxo sobre o fundo de céu necessário para que um pixel seja considerado de um objeto, utilizou-se 1.5σ , onde σ é o ruído médio no nível de intensidade do fundo de céu.

Os parâmetros de saída selecionados para a confecção desse catálogo foram `Id` (identificação) do objeto, posição, magnitudes instrumentais com respectivos erros, a `FWHM` (*Full Width at Half Maximum*) dos objetos e o parâmetro de estelaridade `CS`. Este último é utilizado na classificação estrela/galáxia e determinado a partir da `PSF` e consiste num número entre 0 e 1, sendo que números próximos a 1 correspondem a estrelas.

Com o objetivo de garantir que os catálogos criados para as três imagens sejam correspondentes entre si, é necessário que as imagens estejam alinhadas, ou seja, que a posição de um determinado objeto seja a mesma em todas elas. As três imagens foram alinhadas utilizando a task *imalign* do programa de redução de dados IRAF.

Partindo das imagens alinhadas, é necessário definir uma imagem de referência. No caso, executou-se o programa independentemente para as três bandas, obtendo-se 1511 objetos na banda r' , 1052 na banda g' e 1450 na banda i' . A banda r' foi escolhida como referência, por conter o maior número de objetos, e executou-se o programa em modo duplo para as outras duas imagens.

Dentre as cinco opções de magnitude oferecidas pelo programa, as duas mais indicadas para fotometria são a magnitude *magISOCOR*, obtida da contagem acima de um limite isofotal mínimo e corrigida por um perfil gaussiano e a magnitude *magAUTO*, obtida a partir de uma abertura elíptica flexível de Kron. Optou-se por utilizar a *magAUTO*, segundo orientação do próprio manual do programa SExtractor.

2.2.1 Separação Estrela - Galáxia

Construídos os catálogos, a próxima etapa foi classificar os objetos em estrelas ou galáxias. Para identificar as estrelas presentes na imagem, foram utilizados dois métodos combinados. Primeiramente, utilizou-se o parâmetro FWHM fornecido pelo SExtractor. Na Figura (2.1), na qual está representada a FWHM em função da magnitude instrumental na banda *r* (padrão), ambos parâmetros fornecidos pelo programa SExtractor. É possível perceber uma região distinta das demais, caracterizada por menores magnitudes e FWHM. Essa região é definida como o braço das estrelas, e aqui foi limitada como a região compreendida entre $-15 < mag_{AUTO} < -12.5$ e com $FWHM < 4.0$, correspondente à região destacada da Figura.

Figura 2.1: FWHM dos objetos da amostra em função da magnitude instrumental na banda *r*. No retângulo vermelho encontram-se destacados os objetos classificados como estrelas.

Para comparação, foi feito um gráfico do parâmetro CS do SExtractor (que separa

galáxias de estrelas) em função da magnitude instrumental r_{SE} , mostrado na Figura (2.2), onde os objetos pertencentes à região destacada na Figura (2.1) encontram-se em vermelho.

Figura 2.2: Parâmetro CS do SExtractor em função da magnitude instrumental na banda r'; em vermelho os objetos classificados como estrelas a partir da Figura (2.1). A linha contínua representa o limite superior dos objetos que foram classificados como galáxias.

Os objetos da região selecionada da Figura 2.1 que possuísem $CS > 0.7$ foram classificados como estrelas, e os demais objetos com $CS < 0.7$ como galáxias.

2.3 Calibração Fotométrica

A calibração fotométrica das imagens foi realizada através da comparação entre as magnitudes fotométricas das galáxias observadas pelo Sloan Digital Sky Survey (SDSS) para o mesmo campo, identificadas no nosso catálogo e suas respectivas magnitudes instrumentais obtidas pelo programa SExtractor.

2.3.1 Identificação dos Objetos no SDSS

Para obter a amostra de objetos observados pelo SDSS no campo do aglomerado, utilizou-se o aplicativo CasJobs (<http://cas.sdss.org/CasJobs/>), o qual permite a seleção de objetos através de uma *query* na linguagem SQL, onde são descritos os limites da busca

e os parâmetros desejados. Na nossa busca, foi limitada uma região de céu mostrada na Tabela (2.3), correspondente aos limites da imagem, e foram selecionados como parâmetros de saída as coordenadas do objeto e as magnitudes fotométricas nos filtros *ugriz*. Utilizamos o *Data Release 7* (DR7) do SDSS.

Tabela 2.3 - Região do SDSS selecionada.

$\alpha(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$
226.0021 a 226.03321	-2.8514 a -2.805

O resultado dessa busca foi a obtenção de 193 objetos, dos quais 172 foram identificados nas imagens aqui estudadas e encontram-se listados juntamente com suas magnitudes no SDSS na Tabela (A.1), no Apêndice A. A *query* utilizada na busca também encontra-se reproduzida no Apêndice A.

Dentre os 46 objetos classificados como estrelas pelos métodos descritos na seção anterior, apenas 6 foram encontrados no banco de dados do SDSS; devido ao pequeno número desses objetos, a calibração ficaria muito imprecisa. Assim, optou-se por utilizar as galáxias listadas na Tabela (A.1), as quais foram identificados em cada um dos catálogos *r'*, *g'* e *i'* do campo. Para definir um intervalo confiável para a calibração construíram-se os gráficos do erro estimado pelo SExtractor em função da magnitude instrumental para cada banda; na Figura 2.3 encontra-se delimitada a região selecionada. Escolheu-se essa região por ser o limite onde o erro em função da magnitude instrumental apresentava um comportamento linear; a partir desse limite a função tem um comportamento do tipo exponencial, e os erros são maiores e mais dispersos.

No cálculo da calibração foi utilizado:

$$r' = r'_{SE} + \Delta m \quad (2.1)$$

onde o valor Δm corresponde ao valor médio da diferença entre as magnitudes calibradas do SDSS e as magnitudes instrumentais obtidas com o SExtractor:

Figura 2.3: Erro fornecido pelo programa SExtractor em função da magnitude instrumental dos objetos. A região delimitada representa a escolhida para a calibração.

$$\Delta m = \langle r'_{SDSS} - r'_{SE} \rangle \quad (2.2)$$

Para melhor precisão da calibração utilizou-se o seguinte método, conhecido como *σ -clipping*: foi calculada a média e a dispersão para os valores de Δm em cada banda, descartaram-se os valores com desvios da média maiores que 3σ e repetiu-se o método com os valores restantes, e assim sucessivamente até se obter a convergência, foram necessárias quatro iterações em cada banda. A média foi calculada então a partir desses valores selecionados; os resultados para cada banda encontram-se na Tabela (2.4). As incertezas $\langle \sigma_m \rangle$ são menores que os erros associados às magnitudes do SDSS/DR7 (~ 0.1).

Tabela 2.4 - Valores para a constante de calibração entre as magnitudes do SE e do SDSS.

Banda	Δm	# de objetos	σ_m
g'	34.860	87	0.010
r'	34.876	79	0.011
i'	34.615	100	0.007

Para avaliar os resultados da calibração para todos os objetos da amostra, foi feito o gráfico (Figura 2.4) da magnitude calibrada em função da fornecida pelo SDSS, onde é possível ver uma correlação satisfatória entre esses valores, principalmente para objetos com magnitude r' entre 18 e 20, correspondentes ao intervalo escolhido para a calibração.

2.3.2 Completeza

O próximo passo foi estimar a magnitude de completeza das imagens, ou seja, a magnitude máxima até onde os catálogos podem ser considerados estatisticamente completos. Para tanto, examinou-se a distribuição das magnitudes em cada banda. Espera-se que com o aumento da magnitude ocorra um aumento no número de objetos, então a magnitude de completeza é próxima do pico onde se encontra o maior número de objetos. Na Figura (2.5) o parâmetro adotado está destacado com uma linha tracejada no histograma da magnitude dos objetos em cada banda, e o valor estimado encontra-se listado na Tabela (2.5).

Figura 2.4: Magnitude calculada em função da magnitude fornecida pelo SDSS para objetos dessa amostra. A reta vermelha é do tipo $x=y$ e tem o objetivo de auxiliar na visualização da correspondência entre as magnitudes.

Figura 2.5: Número de objetos detectados em cada banda por intervalo de magnitude. A magnitude de completeza é representada por uma linha preta.

Os valores estão de acordo com aqueles obtidos por Carrasco et al. (2007) para observações semelhantes no mesmo telescópio.

Tabela 2.5 - Magnitude limite adotada para cada banda.

Banda	Magnitude
g'	24.50 ± 0.02
r'	24.00 ± 0.04
i'	23.50 ± 0.03

Verificou-se, no entanto, que os objetos que foram detectados em r' mas não em g' ou i' pelo SExtractor estavam presentes em ambas as bandas. Considerando que a análise de lentes gravitacionais depende fortemente do número de objetos, optou-se por não descartar esses objetos, e atribuir-lhes a magnitude de completeza nas respectivas bandas.

2.4 Classificação das Galáxias

Para a análise de lentes gravitacionais é necessário classificar as galáxias de acordo com a sua relação com o aglomerado, ou seja, se estão atrás dele (*background*), na frente (*foreground*) ou se pertencem ao aglomerado.

Como não possuímos uma estimativa do *redshift* das galáxias do campo, com exceção da BCG, a solução encontrada foi separá-las de acordo com suas propriedades fotométricas.

Para a identificação das galáxias membro do aglomerado usou-se a relação cor-magnitude das galáxias vermelhas no diagrama $(g'-r') \times r'$ (e.g. [Mayen e Soucail, 2000](#)) de todas as galáxias detectadas na banda r' pelo SExtractor com erro menor que 0.1. Nele é possível perceber a região da sequência vermelha do aglomerado, correspondente à região de destaque na Figura (2.6).

Os objetos que se encontravam nessa região limitada foram identificados no diagrama cor-cor $((g'-r') \times (r'-i'))$, reproduzido na Figura (2.7), onde ocupam uma região bastante definida. Dessa forma, os objetos pertencentes simultaneamente às duas regiões foram classificados como galáxias membro do aglomerado.

O próximo procedimento foi a divisão das galáxias remanescentes em *background* e *foreground*. Uma alternativa para essa separação é avaliar a posição das galáxias no diagrama cor-cor a partir de suas magnitudes, considerando que as galáxias mais brilhantes devem estar mais próximas e as mais fracas, mais distantes. Foram definidos quatro intervalos de magnitude, listados na Tabela (2.6) tomando como referência o valor na banda r' .

Analisando os diagramas, reproduzidos na Figura (2.8), percebe-se uma tendência de os objetos mais brilhantes concentrarem-se na região delimitada por $0.5 < r' - i' < 1.0$ e $0.0 < g' - r' < 1.0$, o que pode ser uma tendência dos objetos pertencentes ao *foreground*.

Para aprofundar a análise das tendências observadas nesses diagramas divididos por intervalos de magnitude, tentou-se então uma nova abordagem, que consistiu na comparação da distribuição das galáxias do nosso campo no diagrama cor-cor com os resultados obti-

Figura 2.6: Diagrama cor-magnitude das galáxias do campo. A região delimitada pelo trapézio vermelho corresponde à região da Sequência vermelha, e os objetos marcados em vermelhos àqueles correspondentes num região delimitada do diagrama cor-cor.

Figura 2.7: Diagrama cor-cor das galáxias do campo. Os objetos vermelhos correspondem àqueles identificados na região da Sequência Vermelha do aglomerado.

dos para uma grande amostra de galáxias com *redshift* determinado. A amostra escolhida foi a do catálogo Terapix4, do quarto *survey* do Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) (Coupon et al., 2009). Neste *survey* foram observados quatro campos de um grau quadrado e três campos correspondentes a 35 graus quadrados nas bandas *ugriz*. Do total da amostra, 300 000 objetos foram classificados como galáxias, sendo que aproximadamente 60% desses possuíam *redshift* fotométrico determinado.

A proposta seria identificar uma separação entre galáxias mais distantes que o aglomerado RXC J1504-0248, ou seja, com *redshift* superior a 0.215 daquelas que se encontram na frente, com *redshift* inferior a 0.215, esperando-se encontrar um padrão semelhante ao observado na separação por magnitudes. Tais gráficos encontram-se reproduzidos a seguir (Figura 2.9), sendo os intervalos de *redshift* relacionados na Tabela (2.7), juntamente com o número de objetos em cada intervalo. É necessário observar as restrições realizadas no catálogo; foram retirados todos os objetos:

- classificados como estrelas ou indeterminados;
- que não possuísem uma das magnitudes g' , r' ou i' determinada;
- que não tinham *redshift* determinado.
- que possuísem um valor para as magnitudes g' , r' ou i' superior à magnitude de completeza respectiva adotada no nosso catálogo.

Tabela 2.6 - Intervalos de magnitudes na banda r' para galáxias que compõem ou o *foreground* ou o *background*

Intervalo	r'
1	15.3 - 18
2	18 - 20.5
3	20.5 - 23
4	23 - 24.5

É interessante observar que foi introduzido um intervalo a mais entre o *redshift* do aglomerado até o limite máximo a fim de verificar a presença de uma tendência particular,

Figura 2.8: Diagrama cor-cor para as galáxias do campo que não pertencem ao aglomerado, divididas nos intervalos de magnitudes relacionados na tabela (2.6).

que indicasse que a maioria das galáxias de fundo do campo estudado encontravam-se aproximadamente nesse intervalo; tal fato não foi observado, e a distribuição segue a mesma tendência da observada para os *redshifts* maiores.

Tabela 2.7 - Intervalos de *redshift* para galáxias do CFHT.

Intervalo	<i>redshift</i>	n ⁰ de objetos
1	0 - 0.21	6 953
2	0.21 - 0.22	951
3	0.22 - 0.4	21 965
4	0.4 - ∞	175 325

Comparando os dois resultados, percebe-se uma semelhança entre o *locus* das galáxias mais brilhantes do campo com o *locus* das galáxias do catálogo Terapix4 que possuem *redshift* compreendido nos intervalos 1 e 2 (Tabela 2.7), o que possibilita delimitar uma região onde é provável que concentrem-se as galáxias de frente. Assim, o restante foi classificado como *background*.

Essa separação está ilustrada na Figura (2.10), onde destacam-se as galáxias de fundo, de frente e as pertencentes ao aglomerado. É interessante verificar que esse resultado é semelhante àquele obtido por Medezinski et al. (2010) para o aglomerado A1703 ($z=0.258$), cujo *redshift* é próximo ao do aglomerado aqui estudado, ao fazer análise semelhante, nas mesmas bandas. Nesse trabalho ele destaca a eficiência desse método, que faz uso de mais de uma cor para a separação das galáxias, considerando-o a maneira mais eficiente de classificação na ausência de *redshifts* determinados.

Como último teste, foi analisada a distribuição das galáxias de acordo com a classificação. Espera-se que as galáxias do aglomerado concentrem-se na região central, próxima da BCG; por outro lado, o *background* deve estar uniformemente distribuído, a exceção da região central, devido ao grande número de galáxias do aglomerado; e, por fim, o *foreground* não deve apresentar nenhum padrão. Todas essas características podem ser observadas nos gráficos de densidade (Figura 2.11), o que indica que as proposições feitas ao longo da análise foram coerentes e satisfatórias.

Figura 2.9: Diagrama cor-cor para as galáxias do catálogo Terapix4 produzido pelo CFHT, divididas nos intervalos de *redshift* fotométricos relacionados na tabela (2.7).

Figura 2.10: Comparação entre o diagrama cor-cor obtido por Medezinski et al. (2010) para o aglomerado A1703, a *redshift* $z=0.258$ (2.10b) com o obtido para as galáxias do campo observado (2.10a). Em ambos os diagramas, os pontos verdes representam as galáxias classificadas como membro do aglomerado e os rosas como pertencentes ao *foreground*. As galáxias do nosso campo classificadas como *background* estão plotadas em preto, e correspondem aos objetos vermelhos e azuis da figura de Medezinski et al. (2010), os quais estão divididos em duas populações.

Figura 2.11: Distribuição dos objetos classificados como membros do aglomerado (2.11a), *foreground* (2.11b) e *background* (2.11c).

Introdução à determinação de massas de aglomerados via lentes fracas

Apresentamos neste capítulo uma breve introdução ao método de determinação de massa de aglomerados via lentes gravitacionais, e destacamos as hipóteses adotadas para o regime de lentes fracas.

3.1 Introdução à Análise de lentes gravitacionais fracas

Nessa seção encontra-se uma introdução a teoria de lentes gravitacionais fracas, e a descrição de sua aplicação para a determinação da massa de aglomerados de galáxias.

3.1.1 A equação da Lente

Um modo fácil de visualizar o fenômeno de deflexão da luz devido a um aglomerado de galáxias é através do diagrama abaixo (Fig 3.1), que representa a deflexão sofrida por um raio de luz proveniente de uma fonte a uma distância D_s de seu observador ao passar por uma distribuição de massa que age como uma lente. Deve-se observar que nesta situação, a distância entre o observador e a fonte não necessariamente é equivalente à soma da distância entre o observador e a lente (D_d) e da fonte à lente (D_{ds}), ou seja, $D_s \neq D_d + D_{ds}$.

Através de considerações geométricas da figura, deduz-se que o ângulo de deflexão pode ser escrito por:

$$\vec{\alpha} = \frac{D_{ds}}{D_s} \vec{\hat{\alpha}} \quad (3.1)$$

e

Figura 3.1: Representação da geometria de uma lente gravitacional. Para um observador em O , a fonte localizada no ponto S é vista na posição I , e seu raio de luz é defletido por um ângulo $\hat{\alpha}$. Os ângulos β e θ representam as separações angulares entre a fonte e a imagem a partir do eixo óptico, respectivamente. D_s é a distância do observador à fonte, D_d é a distância do observador à lente e D_{ds} é a distância da lente à fonte. Figura obtida de [Narayan e Bartelmann \(1996\)](#).

$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\alpha}(\vec{\theta}) \quad (3.2)$$

onde escrevemos as variáveis como vetores, de forma a abranger toda a complexidade da geometria do sistema formado pelo observador, lente e fonte.

A equação 3.2 é chamada *Equação da Lente*; deve-se notar que ela não é linear no caso geral, ou seja, é possível uma única fonte gerar múltiplas imagens, sendo o número delas dependente da posição da fonte em relação à lente.

Imaginando uma deflexão como a ilustrada na Figura (3.2), e caracterizando a distribuição de massa no plano da lente como mostrado na equação 3.3 abaixo,

$$\Sigma(\vec{\xi}) = \int \rho(\vec{\xi}, z) dz \quad (3.3)$$

conclui-se que a deflexão α é a soma das deflexões devidas a todos elementos de massa no plano:

$$\vec{\hat{\alpha}}(\vec{\xi}) = \frac{4G}{c^2} \int \frac{(\vec{\xi} - \vec{\xi}') \Sigma(\vec{\xi}')}{|\vec{\xi} - \vec{\xi}'|^2} d^2 \xi' \quad (3.4)$$

Figura 3.2: Raio de luz sendo defletido de um ângulo $\hat{\alpha}$, após atingir a distribuição de massa a uma distância ξ . Extraído de [Narayan e Bartelmann \(1996\)](#).

Assumindo que a lente tem simetria circular, pode-se simplificar o resultado acima do seguinte modo:

$$\hat{\alpha}(\xi) = \frac{4GM(\xi)}{c^2\xi}, \quad (3.5)$$

sendo $M(\xi)$ a massa contida num raio ξ , definida por:

$$M(\xi) = 2\pi \int_0^\xi \Sigma(\xi') \xi' d\xi'. \quad (3.6)$$

Para ilustrar, é interessante considerar um caso especial com uma densidade superficial de massa constante. Aplicando essa condição na equação 3.5, tem-se o ângulo:

$$\alpha(\theta) = \frac{D_{ds}}{D_s} \frac{4g}{c^2\xi} (\Sigma\pi\xi^2) = \frac{4\pi G\Sigma}{c^2} \frac{D_d D_{ds}}{D_s} \theta \quad (3.7)$$

onde $\xi = D_d\theta$ (geometria da Figura 3.1). Relacionando esse resultado com a equação da lente (3.2), é possível definir uma densidade superficial de massa crítica:

$$\Sigma_{crit} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_s}{D_d D_{ds}} \quad (3.8)$$

Para o caso de lentes gravitacionais no contexto de aglomerados de galáxias, trata-se a distribuição de massas como bidimensional, visto que no cenário de distâncias extragalácticas, as distâncias dentro do aglomerado são, a princípio, desprezíveis.

Vamos analisar o potencial escalar $\psi(\vec{\theta})$, definido abaixo:

$$\psi(\vec{\theta}) = \frac{D_{ds}}{D_d D_s} \frac{2}{c^2} \int \Phi(D_d \vec{\theta}) dz. \quad (3.9)$$

o qual consiste numa projeção em duas dimensões do potencial newtoniano do objeto que atuará como lente. A definição foi escolhida de maneira conveniente de forma a possuir características úteis, como o fato do gradiente de ψ em relação a θ ser o próprio ângulo de deflexão $\vec{\alpha}$:

$$\vec{\nabla}_{\theta} \psi = D_d \nabla_{\xi} \psi = \frac{2}{c^2} \frac{D_{ds}}{D_s} \int \nabla_{\perp} \Phi dz = \vec{\alpha}. \quad (3.10)$$

e o Laplaciano ser proporcional à densidade superficial de massa Σ ; utilizando a equação de Poisson para relacioná-lo com a densidade de massa:

$$\vec{\nabla}_{\theta}^2 \psi = \frac{2}{c^2} \frac{D_d D_{ds}}{D_s} \int \nabla_{\xi}^2 \Phi dz = \frac{2}{c^2} \frac{D_d D_{ds}}{D_s} 4\pi G \Sigma = 2 \frac{\Sigma(\vec{\theta})}{\Sigma_{cr}} \equiv 2\kappa(\vec{\theta}). \quad (3.11)$$

A grandeza κ , definida acima como a razão entre a densidade superficial de massa e seu valor crítico é chamada de *convergência*:

$$\psi(\vec{\theta}) = \frac{1}{\pi} \int \kappa(\vec{\theta}') \ln |\vec{\theta} - \vec{\theta}'| d^2\theta' \quad (3.12)$$

Se o potencial escalar ψ satisfizer a equação de Poisson $\nabla_{\theta}^2 \psi = 2\kappa$, o potencial efetivo e o ângulo de deflexão podem ser escritos em função da convergência (equações 3.12 e 3.13, respectivamente).

$$\vec{\alpha}(\vec{\theta}) = \vec{\nabla} \psi = \frac{1}{\pi} \int \kappa(\vec{\theta}') \frac{\vec{\theta} - \vec{\theta}'}{|\vec{\theta} - \vec{\theta}'|^2} d^2\theta' \quad (3.13)$$

As propriedades locais do mapa de lentes são descritas pela matriz jacobiana $\mathcal{A}$ (equação 3.14), que é chamada matriz de magnificação inversa:

$$\mathcal{A} \equiv \frac{\partial \vec{\beta}}{\partial \vec{\theta}} = \left(\delta_{ij} - \frac{\partial \alpha_i(\vec{\theta})}{\partial \theta_j} \right) = \left(\delta_{ij} - \frac{\partial^2 \psi(\vec{\theta})}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right) = \mathcal{M}^{-1}. \quad (3.14)$$

Para simplificar, pode-se introduzir a notação definida por:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \equiv \psi_{ij}, \quad (3.15)$$

Como o Laplaciano equivale a duas vezes a convergência (equação 3.11), ela pode ser reescrita como:

$$\kappa = \frac{1}{2}(\psi_{11} + \psi_{22}) = \frac{1}{2} \text{tr } \psi_{ij}. \quad (3.16)$$

Novamente, para facilitar os cálculos, é interessante definir-se outras duas combinações lineares de ψ_{ij} (equação 3.17), que são as componentes do chamado cisalhamento:

$$\begin{aligned} \gamma_1(\vec{\theta}) &= \frac{1}{2}(\psi_{11} - \psi_{22}) \equiv \gamma(\vec{\theta}) \cos[2\phi(\vec{\theta})] \\ \gamma_2(\vec{\theta}) &= \psi_{12} = \psi_{21} \equiv \gamma(\vec{\theta}) \sin[2\phi(\vec{\theta})] \end{aligned} \quad (3.17)$$

Com essas definições, é possível reescrever a matriz Jacobiana (equação 3.14) de maneira simplificada, conforme mostrado na equação 3.18, e dependente apenas da convergência e do cisalhamento, que são as grandezas básicas para reconstrução da distribuição de massa em duas dimensões, visto que são as grandezas possíveis de serem determinadas a partir de observações:

$$\mathcal{A} = \begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{pmatrix} = (1 - \kappa) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \gamma \begin{pmatrix} \cos 2\phi & \sin 2\phi \\ \sin 2\phi & -\cos 2\phi \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

Isoladamente, o resultado da convergência é uma magnificação isotrópica da imagem, ou seja, ela permanece com a mesma forma, mas se apresenta num tamanho maior que o real. Já o cisalhamento introduz uma anisotropia, sendo que $\gamma = (\gamma_1^2 + \gamma_2^2)^{1/2}$ descreve a magnitude desse efeito e o ângulo ϕ sua orientação (ver 3.14).

A figura 3.3 mostra um exemplo da atuação destes efeitos sobre uma fonte inicialmente circular e de raio unitário, que é transformada numa elipse de semi-eixos maior (a) e menor (b), definidos abaixo:

$$a = (1 - \kappa - \gamma)^{-1}, b = (1 - \kappa + \gamma)^{-1} \quad (3.19)$$

Figura 3.3: Representação dos efeitos da convergência κ e do cizalhamento sobre uma fonte representada com o formato circular. A convergência magnifica a imagem isotropicamente enquanto que o cizalhamento γ a deforma numa elipse. Extraído de [Narayan e Bartelmann \(1996\)](#).

3.1.2 Lentes Fracas

Como o interesse desse estudo é a análise de lentes gravitacionais no regime de lentes fracas, é interessante analisar algumas de suas características, derivadas do caso geral descrito na seção anterior. No regime fraco, a magnificação e a distorção das galáxias de fundo do aglomerado é muito pequena, de maneira que não pode ser detectada em objetos individuais. É necessário, pois, uma análise estatística da distorção causada na população de fundo ([Mellier, 1999](#)), destacando que o interesse de se basear a análise na determinação observacional do cizalhamento advém do fato de essa grandeza ser relativamente fácil de determinar ([Kaiser et al., 1995](#)).

A elipticidade de um objeto pode ser definida a partir de sua dimensão e sua inclinação, como mostrado na equação 3.20, onde $r \equiv \frac{b}{a}$ e ϕ é o ângulo de posição da elipse:

$$\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2 = \frac{1-r}{1+r}e^{2i\phi}, \quad (3.20)$$

Da equação 3.19, a elipticidade média induzida pelo regime é aquela definida na equação 3.21 abaixo, sendo que essa média se refere a uma área finita do céu:

$$\langle \epsilon \rangle = \left\langle \frac{\gamma}{1-\kappa} \right\rangle \quad (3.21)$$

No limite de lentes fracas, tem-se $\kappa \ll 1$ e $|\gamma| \ll 1$, de modo que a elipticidade média é uma medida direta do cisalhamento:

$$\langle \gamma_1(\vec{\theta}) \rangle \approx \langle \epsilon_1(\vec{\theta}) \rangle, \quad \langle \gamma_2(\vec{\theta}) \rangle \approx \langle \epsilon_2(\vec{\theta}) \rangle. \quad (3.22)$$

As elipticidades $\langle \epsilon_1(\vec{\theta}) \rangle$ e $\langle \epsilon_2(\vec{\theta}) \rangle$ devem ser medidas a partir de uma boa quantidade de galáxias de fundo afetadas pelo efeito de lente. Deve-se considerar também que o cisalhamento medido não é apenas devido aos efeitos de lente, mas também está associado ao formato original do objeto; advém dessa característica a necessidade de se medir um grande número de objetos e se assumir que as elipticidades intrínsecas estão distribuídas aleatoriamente.

Para recuperar a distribuição da massa em 2-D, utiliza-se a técnica de [Kaiser e Squires \(1993\)](#), que parte do princípio que tanto a convergência quanto o cisalhamento são combinações lineares de derivadas segundas do potencial efetivo. Dessa forma, da transformada de Fourier das equações 3.16, e 3.17, tem-se novas relações para $\hat{\kappa}(\vec{\kappa})$, $\hat{\gamma}_1(\vec{\kappa})$ e $\hat{\gamma}_2(\vec{\kappa})$ (equação 3.25), onde o circunflexo denota as transformadas e $\vec{k} = (k_1, k_2)$ é o vetor de posição no espaço de Fourier:

$$\tilde{\gamma}_1(\vec{k}) = -\frac{1}{2}(k_1^2 - k_2^2)\tilde{\psi}(\vec{k}) \quad (3.23)$$

$$\tilde{\gamma}_2(\vec{k}) = -k_1 k_2 \tilde{\psi}(\vec{k}) \quad (3.24)$$

$$\tilde{\kappa}(\vec{k}) = -\frac{1}{2}(k_1^2 + k_2^2)\tilde{\psi}(\vec{k}) \quad (3.25)$$

Combinando-se os resultados, é possível eliminar o potencial escalar $\tilde{\psi}(\vec{k})$ dessas equações:

$$\tilde{\gamma}_1(\vec{k}) = \frac{k_1^2 - k_2^2}{|\vec{k}|^2} \tilde{k}(\vec{k}) \quad (3.26)$$

$$\tilde{\gamma}_2(\vec{k}) = \frac{2k_1 k_2}{|\vec{k}|^2} \tilde{k}(\vec{k}). \quad (3.27)$$

Fazendo a transformada inversa de Fourier e escrevendo $\gamma = \gamma_1 + i\gamma_2$, chega-se a:

$$\gamma(\theta) = \frac{1}{\pi} \int D(\theta - \theta') \kappa(\theta^2 \theta') d\theta' \quad (3.28)$$

onde D é o *kernel*, dado por:

$$D(\theta) = \frac{\theta_2^2 - \theta_1^2 - 2i\theta_1\theta_2}{|\theta^4|}. \quad (3.29)$$

Invertendo a equação 3.28, obtém-se a convergência em função do cizalhamento,

$$\kappa(\theta) = \frac{1}{\pi} \int \Re[D^*(\theta - \theta') \gamma(\theta')] d^2\theta' + \kappa_0 \quad (3.30)$$

sendo que $\Re$ denota a parte real.

Essa metodologia permite a reconstrução do mapa de distribuição da massa projetada a partir da distribuição das elipticidades das galáxias de fundo.

3.1.3 Esfera Isotérmica Singular

Existem diversos modelos que podem ser ajustados à distribuição do cizalhamento, com o objetivo de quantificar a massa do aglomerado. Dentre eles, um dos mais simples é a Esfera Isotérmica Singular (SIS, *singular isothermal sphere*, na sigla em inglês), deduzida a partir da equação de equilíbrio hidrostático. Considerando a equação de estado:

$$p = \frac{\rho k T}{m} \quad (3.31)$$

para o caso de aglomerado de galáxias, ρ é a densidade de massa, m a massa das galáxias, T a temperatura (proporcional à dispersão de velocidades das galáxias) e k a constante de Boltzmann. Numa situação de equilíbrio, a energia cinética das partículas é equivalente a sua energia térmica, conforme mostrado abaixo:

$$m\sigma_v^2 = kT \quad (3.32)$$

onde σ_v^2 é a dispersão de velocidade das galáxias do aglomerado. Assumindo que essa dispersão de velocidades é constante, ou seja, não varia ao longo do aglomerado, pode-se escrever a equação de equilíbrio hidrostático como:

$$\frac{p'}{\rho} = -\frac{GM(r)}{r^2}, M'(r) = 4\pi r^2 \rho \quad (3.33)$$

onde $M(r)$ é a massa no interior de um raio r , G é a constante da Gravitação Universal e o índice p' representa derivada dessa função em relação a r . Combinando as equações 3.31, 3.32 e 3.33, tem-se a distribuição de massa chamada de SIS, conforme definido abaixo:

$$\rho(r) = \frac{\sigma_v^2}{2\pi G} \frac{1}{r^2} \quad (3.34)$$

É interessante definir agora o chamado *raio de Einstein* (3.35), que representa, para alguns modelos, o limite da posição da fonte para que sejam formadas múltiplas imagens ou não. Além disso, no caso de múltiplas imagens, sua separação típica é da ordem de $2\theta_E$.

$$\theta_E = \frac{4GM(\theta_E)}{c^2} \frac{D_{ds}}{D_d D_s} \quad (3.35)$$

Assumindo que a densidade é inversamente proporcional ao quadrado do raio nesse modelo, e que, portanto, a massa aumenta proporcionalmente ao raio, pode-se escrever as velocidades de rotação das galáxias num potencial gravitacional como uma constante relacionada à sua massa:

$$v_{rot}^2(r) = \frac{GM(r)}{r} = 2\sigma_v^2 \quad (3.36)$$

Relacionando as equações 3.35 e 3.36, obtém-se o raio de Einstein da SIS:

$$\theta_E = 4\pi \frac{\sigma_v^2}{c^2} \frac{D_{ds}}{D_s} \quad (3.37)$$

Definindo a distância angular θ como:

$$\theta = \frac{r}{D_d} \quad (3.38)$$

é possível escrever a convergência em função do raio de Einstein:

$$\kappa(\theta) = \frac{1}{2} \frac{\theta_E}{\theta} \quad (3.39)$$

3.2 Aplicações na determinação da massa

Para a reconstrução da distribuição de massa projetada, utiliza-se a elipticidade das galáxias de fundo (equação 3.21), a qual pode ser aproximada como o cizalhamento (equação 3.22). Esse é o parâmetro observacional utilizado na solução da equação 3.30, a qual recupera a distribuição da massa projetada que está causando a deformação. Também é necessária uma estimativa de Σ_c , que depende dos *redshifts* das fontes e da lente.

O método utilizado para encontrar a solução da equação 3.30 que mais se adeque aos dados foi o da Máxima Entropia, aplicado por Marshall et al. (2002) para a reconstrução de massa a partir de lentes fracas. Nessa aplicação, eles consideram o cizalhamento de cada galáxia de fundo como um estimador independente do cizalhamento reduzido e incorporam à função de verossimilhança uma suavização da reconstrução.

Para se determinar a massa de um aglomerado dentro de um certo raio, frequentemente se usa um enfoque paramétrico. Analisando a elipticidade média das galáxias de fundo, tem-se que a média estatística pode ser aproximada como κ . Dessa maneira, é possível modelar a convergência em função da distância ao centro, como mostrado na equação 3.39, e assim obter uma estimativa para o valor de θ_E .

Com esse resultado e uma estimativa da massa crítica dada pela equação 3.8, tem-se a distribuição de $\Sigma(\theta)$, conforme mostrado na equação 3.11. Integrando esse resultado no raio desejado, obtém-se a quantidade de massa contida nele (equação 3.6).

Determinação da massa do Aglomerado de Galáxias RXC J1504-0248 via lentes gravitacionais fracas

Neste capítulo apresentamos os resultados obtidos com a aplicação da técnica de lentes gravitacionais fracas na determinação da massa do aglomerado de galáxias RXC J1504-0248 a partir das imagens do Gemini Sul, e descrevemos os métodos utilizados na sua aplicação. Também descrevemos a construção dos mapas de distribuição de massa e densidade de luminosidade, e os comparamos entre si e com o mapa da emissão em raios-X.

4.1 *Análise de Elipticidade*

Para a análise da forma das galáxias que compõem o *background* utilizamos o programa IM2SHAPE, desenvolvido por [Bridle et al. \(1998\)](#), o qual modela objetos através da soma de até três gaussianas, sendo cada uma definida por seis parâmetros: as coordenadas do centro do objeto, x_0 e y_0 , a elipticidade ϵ , o ângulo de posição θ , o produto dos semi eixos maior e menor ab e a amplitude A . O programa usa o Método de Monte Carlo para minimizar os resíduos entre a imagem e o modelo, obtendo assim a melhor estimativa dos parâmetros que modelam as gaussianas. A partir dessas gaussianas ele retorna a forma original das galáxias através de técnicas de deconvolução, tendo como entrada um catálogo das posições cartesianas dos objetos e um modelo de PSF inicial também modelado por duas gaussianas.

A análise com o IM2SHAPE foi realizada em duas etapas separadas: primeiramente para as estrelas do campo e depois para as galáxias. Tal divisão tem como objetivo utilizar as estrelas para mapear a distribuição da PSF ao longo do campo, e utilizar esse resultado

como *input* da análise das galáxias.

4.1.1 Estrelas

Considerando-se que estrelas podem ser aproximadas como objetos pontuais, pode-se concluir que toda sua PSF é devida a efeitos atmosféricos e instrumentais; determinando-a tem-se uma boa aproximação da PSF geral da imagem, a qual poderá ser utilizada como estimativa na reconstrução das formas originais das galáxias.

Para estimar a PSF das estrelas através do IM2SHAPE foi utilizado o catálogo com as 46 estrelas do campo, identificadas a partir dos métodos descritos no capítulo 2, e uma PSF inicial do tipo delta de Dirac, com ε , θ e ab nulos e A unitário. Dentre os resultados fornecidos pelo programa, são de especial interesse os parâmetros elípticos $e1$ e $e2$, e seus respectivos erros; combinados conforme descrito nas equações (4.1) e (4.2), eles fornecem a elipticidade ε e inclinação θ do objeto, respectivamente. Para o parâmetro ab utilizou-se o valor fornecido pelo programa.

$$\varepsilon = \sqrt{(e1 \times e1) + (e2 \times e2)} \quad (4.1)$$

$$\theta = 0.5 \times \left(\text{atan} \left[\frac{e2}{e1} \right] \right) \quad (4.2)$$

O resultado obtido encontra-se reproduzido na figura (4.1a), onde o centro de cada linha representa a posição da estrela, o tamanho da linha representa a dimensão da elipticidade ε e sua inclinação o ângulo θ .

Para refinar os resultados, foram selecionados os objetos que estavam de acordo com o comportamento geral, ou seja, descrevessem uma PSF uniforme, retirando-se os que estavam diferentes da média, pois provavelmente continham erros que não são interessantes para a análise. O método utilizado para essa seleção foi o σ -clipping, já descrito, utilizando um fator de clipping de 3σ , nos parâmetros ε e ab . Os histogramas iniciais e finais (antes e após a aplicação do método) de ε e ab são reproduzidos em (4.2) e (4.3), respectivamente. Após a seleção, restaram 42 estrelas, e a nova distribuição no campo está representada na figura (4.1b).

Figura 4.1: Distribuição da elipticidade antes e após o clipping das estrelas do campo. O traço azul no extremo superior direito representa uma elipticidade $\varepsilon = 0.01$ e $\theta = 0$, a título de referência

Figura 4.2: Valores da elipticidade antes e após o clipping das estrelas do campo. A linha tracejada representa a média.

Figura 4.3: Valores de ab antes e após o clipping das estrelas do campo. A linha tracejada representa a média.

4.1.2 Galáxias

Na análise das galáxias, ao invés de um delta de Dirac, utilizaram-se parâmetros de entrada individuais para cada galáxia, sendo os mesmos as médias de ε , θ e ab das cinco estrelas mais próximas, e A unitário. A variação das médias desses parâmetros em cada galáxia pode ser apreciada na figura (4.4). Cada objeto foi modelado como uma soma de duas gaussianas, com os parâmetros x , y , ε e θ iguais, variando-se apenas sua amplitude.

Um efeito importante que deve ser considerado na análise dos resultados das galáxias é a centralização do objeto. O IM2SHAPE delimita uma caixa, cujo tamanho é determinado pelo usuário, e analisa o objeto dentro desse espaço. Para evitar influências de outros objetos, é interessante que a galáxia selecionada esteja no centro dessa caixa. No caso, a caixa delimitada tinha o tamanho de 20 pixels, assim é interessante que o *offset*, ou seja, a posição do objeto em relação ao início da caixa seja da ordem de 10 pixels, o que indica um objeto bem centralizado. Assim, foi definido um limite de 15 % em relação ao centro, e os objetos que estavam fora desse limite foram retirados da amostra.

Por fim, fez-se um mapa da distribuição da forma das galáxias ao longo do campo (figura 4.5), a partir de ε e θ , calculados novamente com os parâmetros $e1$ e $e2$, fornecidos pelo IM2SHAPE, através das equações (4.1) e (4.2). Analisando o resultado, percebe-se regularidades nessa distribuição, o que é esperado, visto que atribui-se a ela a interferência do aglomerado.

Figura 4.4: Distribuição dos valores das médias de elipticidade, inclinação (θ) e ab das cinco estrelas mais próximas de cada galáxia.

Figura 4.5: Distribuição da forma das galáxias que compõem o *background* a partir de ε e θ . O traço azul no extremo superior direito representa uma elipticidade $\varepsilon = 0.01$ e $\theta = 0$, a título de referência

Para uma melhor visualização de como esses parâmetros encontram-se relacionados com a massa do aglomerado, dividiu-se o campo em 5×5 quadrantes; percebe-se que a elipticidade descreve uma espécie de contorno em torno do centro da figura, coincidente com o centro do aglomerado. (figura 4.6).

4.1.3 Estimativa da massa a partir de um perfil do tipo SIS

Outra maneira de avaliar o cizalhamento das galáxias do *background* em relação ao aglomerado é analisar o perfil de cizalhamento médio a partir da distância ao centro. Espera-se que quanto mais próximo da região central, mais acentuado ele seja, que é o comportamento visto na figura (4.7), para os pontos vermelhos. Por outro lado, espera-se que as galáxias não estejam sob nenhum outro viés, ou seja, que a elipticidade projetada a 45° seja compatível com zero e não apresente nenhuma tendência, o que é observado nos pontos azuis da figura (4.7), que representam a elipticidade projetada.

É interessante ressaltar que essa é uma boa forma também de verificar a classificação das galáxias como *background*. Num primeiro teste, fez-se o mesmo gráfico para uma seleção de galáxias onde havia uma pequena parcela de objetos fracos que, pelo diagrama cor-cor,

Figura 4.6: Média de ε e θ dentro de quadrantes da imagem. O traço azul no extremo superior direito representa uma elipticidade $\varepsilon = 0.1$ e $\theta = 0$, a título de referência.

Figura 4.7: Valores de ε nas direções tangencial (pontos vermelhos) e projetada a 45° (pontos azuis). As barras horizontais representam o espaço onde os objetos considerados encontram-se, e as barras verticais representam o erro. A linha contínua representa o zero, e a linha lilás tracejada o ajuste SIS aos dados.

deveriam ser classificados como *foreground*. Comparando esse resultado teste com o obtido para a seleção verdadeira, verificou-se que apesar do número de galáxias do primeiro ser maior, o que aumenta o sinal e diminui o erro, o resultado não era tão satisfatório, ou seja, não havia evidência nítida da variação da elipticidade média correlacionada com a distância ao centro. Tal fato demonstra a sensibilidade do resultado à identificação correta dos objetos que compõem o *background*.

Ajustando um perfil do tipo SIS, definido pela equação 3.39 aos dados, obteve-se um raio de Einstein de $12.6'' \pm 0.5$. Com esse resultado é possível obter uma estimativa da distribuição superficial de massa (Σ) a partir da equação 3.6. Antes, porém, é necessário calcular o valor de Σ_{crit} , através da equação 3.8.

Como não possuímos uma estimativa de *redshift* das galáxias de fundo, uma alternativa para estimar valores das distâncias D_s e D_{ds} (respectivamente, as distâncias entre o observador e a média das galáxias de *background* e entre as lentes e elas) foi tentar compará-los com os resultados obtidos com a amostra do CFHT (Coupon et al., 2009), já utilizada nestre trabalho, a qual possui *redshift* fotométrico. Para essa comparação, foram delimitadas duas regiões do diagrama cor-cor da nossa amostra, aqui classificadas como *loci* das galáxias de fundo, conforme mostrado na Figura 4.8. Foram selecionadas galáxias do mesmo catálogo do CFHT utilizado no capítulo anterior, limitando-o a uma magnitude máxima na banda r' igual à magnitude limite aqui adotada e que estivessem compreendidas em alguma dessas duas regiões; tal seleção encontra-se representada na Figura 4.9. Fez-se então a média do *redshift* das galáxias nessas duas regiões, obtendo-se o valor de 0.80 ± 0.43 , usado como uma estimativa do *redshift* médio do nosso *background*.

Para o cálculo das distâncias, partimos do conceito de distância comóvel de um objeto no *redshift* z (Hogg, 1999, e.g.):

$$D_c = D_H \int_0^z \frac{dz'}{E(z')} \quad (4.3)$$

onde D_H é a distância de Hubble (equação 4.4) e $E(z')$ uma função dependente dos parâmetros Ω_M , Ω_k e Ω_Λ :

$$D_H = 3000h^{-1}Mpc \quad (4.4)$$

Figura 4.8: Regiões delimitadas como *background* no diagrama do aglomerado.

$$E(z) \equiv \sqrt{\Omega_M(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_\Lambda} \quad (4.5)$$

A partir dessas definições, é possível determinar a distância comóvel transversal D_M , a qual depende do modelo de curvatura do espaço, representado pelo parâmetro k ; essa dependência é mostrada na equação 4.6.

$$D_M = \begin{cases} D_H \frac{1}{\sqrt{\Omega_k}} \sinh\left[\sqrt{\Omega_k} \frac{D_c}{D_H}\right] \rightarrow \text{para } \Omega_k > 0 \\ D_c \rightarrow \text{para } \Omega_k = 0 \\ D_H \frac{1}{\sqrt{\Omega_k}} \sin\left[\sqrt{\Omega_k} \frac{D_c}{D_H}\right] \rightarrow \text{para } \Omega_k < 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

Para o cálculo da distância relativa entre dois objetos em diferentes *redshifts* z_1 e z_2 , a distância entre eles é dada por:

$$D_{A12} = \frac{1}{1+z_2} \left[D_{M2} \sqrt{1 + \Omega_k \frac{D_{M1}^2}{D_H^2}} - D_{M1} \sqrt{1 + \Omega_k \frac{D_{M1}^2}{D_H^2}} \right] \quad (4.7)$$

No caso, adotamos o modelo de Universo com $k=0$ (Λ CDM), e a equação 4.7 fica:

$$D_{A12} = \frac{1}{1+z_2} [D_{M2} - D_{M1}] \quad (4.8)$$

Figura 4.9: Identificação no CFHT das duas regiões delimitadas como *background* na nossa amostra, para galáxias que estejam no mesmo limite de magnitude. Na legenda encontra-se o valor médio do *redshift* obtido nas duas regiões.

Utilizando a equação 4.8, foram calculadas as distâncias D_s , D_l e D_ls , os resultados encontram-se na Tabela 4.1, juntamente com o valor de Σ_{crit} .

Substituindo o valor encontrado na equação 3.6, e escolhendo um raio de 3Mpc, igual ao utilizado no cálculo de Böhringer et al. (2005) através do método de lentes gravitacionais, obteve-se uma massa de $1.3 \pm 0.6 \times 10^{15} M_{\odot}$ dentro desse raio.

4.2 Reconstrução da Distribuição de Massa

Para a reconstrução da massa do aglomerado via análise de lentes gravitacionais utilizamos o programa LENSENT2, desenvolvido por (Marshall et al., 2002). Os dados de entrada do programa são a posição dos objetos, suas elipticidades e_1 e e_2 e seus respectivos erros e uma estimativa de Σ_{crit} (equação 3.8); a partir desses dados e utilizando o Método da Máxima Entropia, ele resolve a equação 3.30, obtendo os melhores valores de κ e $\vec{\gamma}$, com os quais ele reconstrói um mapa de $2N$ pixels, sendo que o número N é escolhido de maneira que se tenha aproximadamente uma galáxia por pixel.

Em nossa análise, foram utilizados os valores para posição e elipticidades e_1 e e_2 obtidos com o programa IM2SHAPE para as galáxias classificadas como *background*. Para o erro, é interessante introduzir também uma estimativa das dispersões intrínsecas das elipticidades das galáxias. Esse valor é normalmente estimado como 25 %, e somado quadraticamente ao erro associado às incertezas das medidas, conforme mostrado na equação abaixo:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{obs}^2 + \sigma_{intr}^2} \quad (4.9)$$

onde σ_{obs} é o erro associado às incertezas das observações, e σ_{intr} àquele associado à dispersão intrínseca das elipticidades.

Dentre as opções de parâmetros que o programa LensEnt2 dispõe para a reconstrução do mapa de massa, merece destaque o parâmetro de suavização (*smoothing*) e o tamanho do mapa, ambos importantes para a determinação da resolução mais adequada. Para escolha do parâmetro de suavização, fez-se o gráfico do parâmetro evidência (*evidence*), o qual caracteriza probabilisticamente a semelhança do mapa obtido com a distribuição real. Quanto maior o valor da evidência, mais preciso o mapa é, mas existe um ponto onde ele não é mais tão influenciado pela suavização, ou seja, ele tende a se estabilizar; optamos por adotar tal valor para o parâmetro de suavização. Para nossa análise foi feito um gráfico da evidência em função da suavização para dois tamanhos de mapa, 32 e 64 pixel (Figura 4.10), no qual é possível perceber que a partir de uma suavização de, aproximadamente, 2 arcmin há pouca diferença na evidência, optando-se por esse valor.

Tabela 4.1 - Intervalos de *redshift* para galáxias do CFHT.

D_s (Mpc)	D_l (Mpc)	D_{ls} (Mpc)	Σ_c ($M_\odot pc^{-2}$)
775.93	1669.15	1145.34	3126.81

Na escolha do mapa, é interessante escaloná-lo de maneira que se tenha uma galáxia por pixel, sendo o número de pixels potência de dois. Da Figura 4.10 percebe-se que a evidência é pouco sensível para os dois tamanhos de mapa adotados. Assim, foram feitos dois mapas da distribuição de massa, com tamanho de 32 e 64 pixels (figuras 4.11a e 4.11b, respectivamente), com a evidência de 2 arcmin. Percebe-se que há uma "*pixelização*" do

Figura 4.10: O parâmetro evidência em função da suavização para mapas de 32 e 64 pixels.

resultado na figura 4.11a em relação à figura 4.11b, optando-se pela segunda opção, ou seja, um tamanho de 64 pixels.

Definidas essas duas variáveis, foi obtido o mapa da distribuição de massa do aglomerado RXC J1504-0248. Ajustando-o ao tamanho da imagem do GEMINI, foi possível fazer a sobreposição dos contornos na imagem colorida do aglomerado, conforme mostrado na Figura 4.12. Nessa figura, observamos que os contornos são concêntricos, centrados na BCG, com uma pequena elongação na direção SW.

4.3 Construção do mapa de luz

Uma maneira interessante de avaliar o mapa da distribuição de massa obtido através da análise de lentes gravitacionais é compará-lo com um mapa da distribuição da luminosidade do aglomerado.

Para caracterizar a distribuição de luminosidade das galáxias do aglomerado, utilizou-se o método de campo de densidades, no qual a imagem é dividida numa grade com células de tamanho definido, onde é determinada a densidade luminosa a partir de:

Figura 4.11: Reconstrução da distribuição de massa do aglomerado a partir da análise de lentes gravitacionais, com diferentes tamanhos. A caixa azul corresponde à representação do campo.

Figura 4.12: Sobreposição dos contornos da distribuição de massa obtida com o programa LensEnt2 à imagem colorida do aglomerado RXC J1504-0248.

$$D(\vec{r}) = \sum_{i=1}^N K(\vec{r} - \vec{r}_i, \sigma) L_i W_i, \quad (4.10)$$

onde $D(\vec{r})$ representa a somatória da luminosidade L_i dos N objetos de coordenada r_i contidos numa esfera de raio σ , ponderadas pelo fator W_i (que equivale ao inverso da

função de seleção, definida como sendo a razão entre o número de galáxias efetivamente observadas e o número real de galáxias; no nosso caso, trabalhamos com uma amostra suposta completa e portanto $W = 1$) e multiplicadas pelo *kernel* de *Epanechnikov*, que é definido como

$$K(\vec{r} - \vec{r}_i, \sigma) = \begin{cases} \frac{3}{4} \left[1 - \left(\frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{\sigma} \right)^2 \right], & \vec{r} - \vec{r}_i \leq \sigma \\ 0, & \vec{r} - \vec{r}_i > \sigma. \end{cases} \quad (4.11)$$

Os cálculos das densidades foram feitos com o programa desenvolvido por Marcus Vinícius Costa-Duarte (Costa-Duarte et al., 2011). Para a construção dos mapas de luminosidade e de densidade em formato **fits**, adotamos $\sigma = 60 \text{ arcsec}$ e $l = 1.46'' \text{ arcsec}$, que corresponde a 10 vezes o valor do pixel da imagem do GEMINI. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 4.13.

Figura 4.13: Mapa da distribuição da luminosidade das galáxias do aglomerado

Também foi criado um arquivo com os contornos, que foram sobrepostos à imagem colorida do aglomerado, conforme mostrado na Figura 4.14.

Figura 4.14: Sobreposição dos contornos do mapa de distribuição de luminosidade do aglomerado sobre a imagem do mesmo.

4.4 Comparação das distriuições de massa, emissão raios-X e luminosidade

Os dois mapas obtidos, de massa e de densidade de luminosidade, podem ser comparados entre si e com o mapa da emissão em raios-X, todos sobrepostos à imagem colorida do aglomerado, conforme mostrado na Figura 4.15. O gás do meio intergaláctico pode ser analisado pelo mapa da emissão em raios-X (Figura 4.15c), construído a partir dos dados disponíveis do XMM para o aglomerado.

Para facilitar a comparação, sobrepusemos apenas os contornos de massa e densidade de luminosidade, respeitando-se as dimensões, a uma imagem vazia (Figura 4.16). Nessa figura, destaca-se a simetria radial dos contornos, bem centralizados e coerentes com aquela observada em raios-X. Esse centro corresponde à BCG, como pode ser visto na Figura 4.15. Na Figura 4.16 é evidente a elongação na direção SW presente nos dois mapas; tal tendência também é observada no mapa de raios-X, no entanto, é menos pronunciada que nos outros dois mapas.

(a) massa

(b) luminosidade

(c) raios-X

Figura 4.15: Mapas dos contornos das distribuições de massa, emissão em raios-X e luminosidade sobrepostos à imagem do aglomerado de galáxias RXC J1504 0248.

Figura 4.16: Contornos da distribuição de massa (ciano) comparados com os contornos da densidade de luminosidade (amarelo) obtidos para o aglomerado RXC J1504-0248.

A partir da observação dessas características, pode-se afirmar que os três resultados são coerentes entre si, o que é um indicativo do estado relaxado do aglomerado, o que é esperado nesse caso.

Conclusões e Perspectivas

Neste capítulo apresentamos as principais conclusões do trabalho, e as perspectivas de continuidade.

Na determinação da massa de aglomerados de galáxias a partir do método de lentes gravitacionais uma série de cuidados foram tomados, de forma a garantir o melhor resultado possível.

O primeiro deles foi a otimização da seleção da amostra de galáxias de fundo (*background*). Procurou-se realizar uma seleção cuidadosa dessas galáxias, separando-as das demais do campo através da análise combinada das cores desses objetos, nos diagramas cor-cor e cor-magnitude, tendo por base o trabalho recente de [Medezinski et al. \(2010\)](#), como mostrados nas Figuras 2.10 e 2.10b. Como teste, foi feita a mesma análise numa amostra de objetos do CFHTLS ([Coupon et al., 2009](#)), com os mesmos limites. A compatibilidade entre esses dois resultados nos permitiu considerar a classificação satisfatória.

Criado o catálogo de objetos de *background*, o próximo passo foi analisar a deformação sofrida pela imagem de cada galáxia, quando os feixes de luz dela oriundos fossem desviados pelo aglomerado, conforme esperado no fenômeno de lentes gravitacionais. Essa análise foi realizada em duas etapas com o programa IM2SHAPE, desenvolvido por [Bridle et al. \(1998\)](#). Na primeira etapa, analisou-se as deformações sofridas pelas estrelas, que são objetos pontuais, ou seja, tais deformações devem-se somente à fenômenos atmosféricos e instrumentais. Foram retiradas as estrelas que apresentavam um comportamento muito destoante da maioria, de forma a uniformizar o resultado. A deformação média fornecida por essa análise foi subtraída das galáxias, de maneira que restassem apenas as deformações devidas à interações do tipo de lentes gravitacionais. A regularidade observada na dis-

tribuição das elipticidades das galáxias, exemplificada na Figura 4.5, é uma evidência de que a mesma deve-se a um fator comum, no caso, a influência do aglomerado.

Para estimar o valor da massa do aglomerado através do método de lentes gravitacionais, deve-se escolher um modelo que descreva a distribuição de massa. No caso, escolheu-se o modelo de SIS, por ser um modelo simples e de fácil aplicação, condizente com o tipo de dado obtido. Foi feito um ajuste desse modelo à distribuição da elipticidade das galáxias em função da sua distância ao aglomerado, usando o método de menor χ^2 . Apesar desse modelo ter alguns problemas, como, por exemplo, não ser apropriado para as regiões centrais, ele fornece uma boa estimativa. Obtivemos uma massa de $1.3 \pm 0.6 \times 10^{15} M_{\odot}$, próximo ao valor obtido por Böhringer et al. (2005), $1.7 \times 10^{15} M_{\odot}$, através da análise de raios-X, a partir de observações com o telescópio CHANDRA.

Utilizando o programa LenSent2, desenvolvido por Marshall et al. (2002), o qual analisa a distribuição do cisalhamento e a partir dele recupera a distribuição de massa projetada, obtivemos um mapa da massa do aglomerado, que foi sobreposto à imagem colorida do aglomerado (Figura 4.12). Para comparação, também determinamos a distribuição da densidade de luminosidade (Figura 4.14) das galáxias pertencentes ao aglomerado, e sobrepusemos esse resultado aos contornos de massa, retirando a imagem do aglomerado ao fundo, para facilitar a comparação, conforme mostrado na Figura 4.16. Nessa última figura percebemos que ambas distribuições são bastante similares, estando centralizadas na mesma região - a galáxia central -, e igualmente apresentam uma elongação na direção SW. Tal elongação também é visível, mas menos pronunciada, nos contornos em raios-X, obtidos com o satélite XMM, e esta distribuição também encontra-se centrada na BCG.

O principal resultado desse trabalho foi a estimativa da massa do aglomerado, e a sua compatibilidade com a obtida anteriormente pela análise em raios-X. Esse resultado, aliado à comparação dos mapas de distribuição de massa e luminosidade, permitiu a conclusão de que o aglomerado possivelmente encontra-se relaxado. Nesse caso, há uma forte evidência de que o aquecimento do gás intraglomerado, o qual o caracteriza especificamente como um aglomerado do tipo *cool core*, não pode ser explicado através de considerações que envolvam hipóteses de não equilíbrio, sendo necessárias outras explicações.

Uma possível continuidade do trabalho é a determinação da massa do aglomerado a partir do estudo de lentes gravitacionais fortes. Como identificamos arcos e arclets nas

nossas imagens, os quais podem ser utilizados nessa análise, foi pedido tempo no Telescópio Gemini Sul para observações espectrográficas das galáxias do nosso campo. Os dados já foram obtidos, e encontram-se em processo de redução. Com esses dados, espera-se também obter o *redshift* das galáxias, e assim verificar a eficácia da separação realizada no presente trabalho. Outra possibilidade é a determinação da massa do aglomerado através do método do Teorema do Virial, para o qual são necessárias as velocidades radiais das galáxias. Esse resultado poderá ser utilizado como mais um indicativo do estado dinâmico do aglomerado.

Referências Bibliográficas

- Abell G. O., The Distribution of Rich Clusters of Galaxies., ApJS, 1958, vol. 3, p. 211
- Aceves H., Perea J., Estimating Masses in Clusters of Galaxies. In Observational Cosmology: The Development of Galaxy Systems , vol. 176 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1999, p. 198
- Bertin E., Arnouts S., SExtractor: Software for source extraction., A&AS, 1996, vol. 117, p. 393
- Biviano A., Tracing the mass profiles of galaxy clusters with member galaxies. In EAS Publications Series , vol. 20 of EAS Publications Series, 2006, p. 171
- Böhringer H., Burwitz V., Zhang Y., Schuecker P., Nowak N., Chandra Reveals Galaxy Cluster with the Most Massive Nearby Cooling Core: RXC J1504.1-0248, ApJ, 2005, vol. 633, p. 148
- Bridle S. L., Hobson M. P., Lasenby A. N., Saunders R., A maximum-entropy method for reconstructing the projected mass distribution of gravitational lenses, MNRAS, 1998, vol. 299, p. 895
- Carrasco E. R., Cypriano E. S., Neto G. B. L., Cuevas H., Sodré Jr. L., de Oliveira C. M., Ramirez A., Witnessing the Formation of a Galaxy Cluster at $z = 0.485$: Optical and X-Ray Properties of RX J1117.4+0743 ([VMF 98] 097), ApJ, 2007, vol. 664, p. 777
- Costa-Duarte M. V., Sodré Jr. L., Durret F., Morphological properties of superclusters of galaxies, MNRAS, 2011, vol. 411, p. 1716

- Coupon J., Ilbert O., et al. K., Photometric redshifts for the CFHTLS T0004 deep and wide fields, *A&A*, 2009, vol. 500, p. 981
- Cypriano E. S., Lima Neto G. B., Sodré Jr. L., Kneib J., Campusano L. E., Gemini and Chandra Observations of Abell 586, A Relaxed Strong-lensing Cluster, *ApJ*, 2005, vol. 630, p. 38
- Cypriano E. S., Sodré Jr. L., Kneib J., Campusano L. E., Weak-Lensing Mass Distributions for 24 X-Ray Abell Clusters, *ApJ*, 2004, vol. 613, p. 95
- Dressler A., Galaxy morphology in rich clusters - Implications for the formation and evolution of galaxies, *ApJ*, 1980, vol. 236, p. 351
- Dyson F. W., Eddington A. S., Davidson C., A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919, *Royal Society of London Philosophical Transactions Series A*, 1920, vol. 220, p. 291
- Giacintucci S., Markevitch M., Brunetti G., Cassano R., Venturi T., A radio minihalo in the extreme cool-core galaxy cluster RXC J1504.1-0248, *A&A*, 2011, vol. 525, p. L10+
- Hogg D. W., Distance measures in cosmology, *ArXiv Astrophysics e-prints*, 1999
- Kaiser N., Squires G., Mapping the dark matter with weak gravitational lensing, *ApJ*, 1993, vol. 404, p. 441
- Kaiser N., Squires G., Broadhurst T., A Method for Weak Lensing Observations, *ApJ*, 1995, vol. 449, p. 460
- Lima-Neto G., Apostila do Curso de Astrofísica Extragaláctica. IAG-USP, 2011, 242 p.
- Marshall P., Physical component analysis of galaxy cluster weak gravitational lensing data, *MNRAS*, 2006, vol. 372, p. 1289
- Marshall P. J., Hobson M. P., Gull S. F., Bridle S. L., Maximum-entropy weak lens reconstruction: improved methods and application to data, *MNRAS*, 2002, vol. 335, p. 1037

- Mayen C., Soucail G., Depletion curves in cluster lenses: simulations and application to the cluster MS1008-1224, *A&A*, 2000, vol. 361, p. 415
- Medezinski E., Broadhurst T., Umetsu K., Oguri M., Rephaeli Y., Benítez N., Detailed cluster mass and light profiles of A1703, A370 and RXJ1347-11 from deep Subaru imaging, *MNRAS*, 2010, vol. 405, p. 257
- Mellier Y., Probing the Universe with Weak Lensing, *ARA&A*, 1999, vol. 37, p. 127
- Molendi S., The Intra-cluster medium: recent results and future prospects, *X-ray Astronomy 2009; Present Status, Multi-Wavelength Approach and Future Perspectives*, 2010, vol. 1248, p. 261
- Narayan R., Bartelmann M., Lectures on Gravitational Lensing, *ArXiv Astrophysics e-prints*, 1996
- Ogorean G. A., Hatch N. A., Simionescu A., Böhringer H., Brüggén M., Fabian A. C., Werner N., Central galaxy growth and feedback in the most massive nearby cool core cluster, *MNRAS*, 2010, vol. 406, p. 354
- Paraficz D., Hjorth J., The Hubble Constant Inferred from 18 Time-delay Lenses, *ApJ*, 2010, vol. 712, p. 1378
- Schneider P., Detection of (dark) matter concentrations via weak gravitational lensing, *MNRAS*, 1996, vol. 283, p. 837
- Walsh D., Carswell R. F., Weymann R. J., 0957 + 561 A, B - Twin quasistellar objects or gravitational lens, *Nature*, 1979, vol. 279, p. 381

Apêndice

Apêndice A

Tabelas de Objetos do SDSS

Neste apêndice encontra-se uma tabela dos objetos correspondentes à nossa amostra obtidos no banco de dados do Sloan Digital Sky Survey (SDSS), no DR7, com suas coordenadas e magnitudes nas bandas g', r' e i', resultados da busca feita com a seguinte *query*:

```
SELECT objID,ra,dec,u,g,r,i,z into mydb.MyTable5
from PhotoObj
WHERE ra between 226 and 226.05
and dec between -2.9 and -2.8
```

Tabela A.1 - Objetos do SDSS que encontram-se no campo, com suas respectivas magnitudes nas bandas de interesse.

$\alpha(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	g'	r'	i'
225.98682	-2.77139	21.73941	20.75428	20.86850
225.98625	-2.79237	20.26881	19.10866	18.59909
225.98575	-2.80158	25.16821	21.40224	20.37446
225.99054	-2.79726	19.68111	18.42340	17.93364
225.98866	-2.82219	22.56637	21.63522	21.28196
225.99097	-2.81631	21.86810	21.91562	21.69729
225.99570	-2.79745	19.64478	18.91588	18.54749
225.99302	-2.80471	21.02427	20.49958	20.13639
225.99470	-2.82379	21.73342	21.20390	20.73211
225.99740	-2.83114	20.81483	19.49075	19.05571
225.99456	-2.82937	24.85978	20.34619	20.10147
225.99516	-2.82793	22.62941	21.76594	21.92226
225.99757	-2.81840	19.33486	19.15219	18.92528
225.99741	-2.81403	21.69686	20.45824	20.09548

Continua na próxima página. . .

Tabela A.1 - Continuação

$\alpha(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	g'	r'	i'
225.99604	-2.80633	22.76078	21.65539	21.08606
225.99830	-2.76614	21.45119	20.06870	19.59445
225.99829	-2.75512	21.47076	21.00544	20.48252
225.99824	-2.82591	23.26239	21.72568	21.78675
225.99816	-2.77413	22.60636	21.92647	20.96407
225.99985	-2.77400	21.73073	20.40962	19.95706
226.00166	-2.75475	20.92929	19.56172	19.01934
225.99996	-2.80634	22.38163	21.18838	21.04660
226.00193	-2.80903	21.98029	20.27806	19.95105
226.00534	-2.82126	21.56793	19.98566	19.60030
226.00369	-2.78181	22.64933	21.57755	21.55955
226.00776	-2.82021	19.85543	18.68034	18.21948
226.00791	-2.81690	20.61858	19.30339	18.76954
226.00566	-2.76167	22.09836	20.55116	20.04169
226.00607	-2.82972	22.70157	21.51015	20.98158
226.00819	-2.79352	21.30159	20.27667	19.74186
226.01085	-2.81406	20.02675	18.65066	18.13155
226.00809	-2.81280	21.12851	20.02502	19.52544
226.00890	-2.80817	23.65240	21.70908	22.14370
226.01192	-2.81945	20.33683	18.81175	18.29118
226.01363	-2.80779	19.76074	18.41322	17.91352
226.01237	-2.78915	21.05964	19.81031	19.25360
226.01170	-2.79003	20.78804	19.66390	19.21684
226.01121	-2.77419	21.16586	20.29809	19.90170
226.01144	-2.75722	22.85244	21.62680	21.72731
226.01409	-2.81910	21.12522	19.66276	19.24428
226.01501	-2.81454	21.04042	19.64722	19.07780
226.01453	-2.80448	21.64195	19.69435	19.19669
226.01427	-2.81157	22.86882	20.71474	19.52960
226.01276	-2.77668	22.41973	21.43304	21.35176
226.01352	-2.82005	22.95168	21.72453	20.80149
226.01391	-2.82762	22.66018	20.96474	20.94645
226.01850	-2.80509	19.97691	18.98128	18.54599
226.01668	-2.81721	21.66924	20.44781	19.93665
226.01734	-2.82014	21.39768	20.60153	20.16927
226.01987	-2.77643	22.28984	20.87822	20.49431
226.01808	-2.82360	21.51649	20.23897	19.72778
226.01818	-2.81257	19.19946	18.62341	18.35985
226.01737	-2.77184	22.62053	21.09684	20.82437
226.01924	-2.77126	21.18013	19.96105	19.48621
226.03130	-2.80461	16.52032	15.98363	15.47973
226.01916	-2.79947	22.39335	21.51516	20.89773
226.02583	-2.80470	19.63134	18.22532	17.69176

Continua na próxima página. . .

Tabela A.1 - Continuação

$\alpha(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	g'	r'	i'
226.02047	-2.79261	21.44228	19.89521	19.40841
226.01919	-2.75740	22.23141	21.77550	21.90454
226.02082	-2.82026	23.32210	21.80513	20.64527
226.02254	-2.80257	20.83168	20.41495	20.14372
226.02085	-2.76710	23.35093	21.53226	21.40233
226.02323	-2.80601	22.36274	21.34452	20.90402
226.02331	-2.76419	22.70262	21.73652	21.00238
226.02708	-2.80102	19.88861	18.67324	18.16543
226.02435	-2.78758	22.70069	21.49191	21.31339
226.02605	-2.77918	21.82751	20.84319	20.37127
226.02724	-2.78253	20.56392	19.51188	19.09282
226.02725	-2.81370	21.00170	19.73916	19.24397
226.02853	-2.78941	21.57068	20.75344	20.63422
226.02938	-2.81055	20.50884	19.22111	18.69319
226.02808	-2.77782	20.60973	20.04817	19.84307
226.02791	-2.77526	22.86433	21.58654	21.60715
226.03133	-2.81318	20.10333	18.77583	18.31545
226.03032	-2.80278	20.86239	19.43789	18.90008
226.02870	-2.79693	21.50010	20.19613	19.70632
226.02970	-2.78761	21.35049	20.59649	20.54988
226.02911	-2.76571	22.33719	20.78903	19.73692
226.02932	-2.80847	22.22125	21.51931	21.51904
226.02961	-2.76967	22.89869	21.31000	20.85707
226.02976	-2.77415	22.41313	21.50752	20.93003
226.02981	-2.80748	23.19619	21.82569	21.26843
226.03193	-2.77161	22.22554	21.37686	20.58124
226.03189	-2.76983	22.53216	20.99039	20.39715
226.03310	-2.79954	22.14619	21.24730	20.95456
226.03332	-2.80440	20.80031	19.40788	19.72311
226.03264	-2.80111	22.70143	21.40228	21.51396
226.03435	-2.75940	21.29840	20.34832	20.11461
226.03296	-2.76251	22.26645	21.63016	21.21904
226.03286	-2.76595	23.18594	21.69806	20.69177
226.03397	-2.80331	23.22951	21.81451	20.98516
226.03543	-2.82927	22.12230	20.61033	19.85696
226.03535	-2.82199	20.51685	19.21605	18.71895
226.03466	-2.78537	21.03935	19.62324	19.14930
226.03449	-2.79639	22.55173	21.66820	20.93032
226.03567	-2.78489	23.03085	21.43141	20.96767
226.03706	-2.78309	22.74835	21.46069	20.53488
226.03758	-2.77624	22.46653	21.65777	21.10892
226.03688	-2.83025	21.75336	21.45185	21.22268
226.03588	-2.80368	23.81084	21.77411	21.06723

Continua na próxima página. . .

Tabela A.1 - Continuação

$\alpha(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	g'	r'	i'
226.03638	-2.79476	22.71631	21.56845	20.38939
226.03831	-2.79019	20.66058	19.20189	18.71772
226.03959	-2.79154	21.51847	19.95712	19.48619
226.07773	-2.76484	22.99072	21.01918	20.41020
226.07598	-2.76799	20.24704	18.94473	18.51662
226.06945	-2.82623	23.49990	21.52796	21.34708
226.06889	-2.78014	22.28267	20.60405	19.68380
226.05888	-2.81319	21.27860	19.74781	19.05218
226.06652	-2.79337	19.57578	18.14520	17.59915
226.06529	-2.76282	22.03817	21.44421	21.10620
226.06388	-2.77205	23.24549	21.07499	20.58569
226.05153	-2.81435	23.97240	21.34720	20.33698
226.06616	-2.75926	22.18033	21.75806	21.84038
226.06050	-2.81162	17.82760	17.26076	16.91401
226.05257	-2.78554	22.31841	21.45106	20.84703
226.05424	-2.76179	23.26839	21.60321	21.29458
226.06245	-2.81103	20.28497	19.73570	19.02271
226.06240	-2.80748	20.19192	18.86834	18.26430
226.06170	-2.80834	20.25498	19.47407	19.19522
226.06107	-2.75886	22.51511	21.81987	21.35508
226.04707	-2.80065	20.67620	19.33214	18.83135
226.05809	-2.78028	21.84335	20.88137	20.44558
226.05624	-2.80812	22.23972	21.45778	21.33094
226.05820	-2.78961	21.30955	20.94594	20.65676
226.05566	-2.77310	22.41300	21.63092	21.85643
226.04800	-2.80629	19.31586	19.04295	18.75156
226.05660	-2.76883	21.09468	19.80053	19.27549
226.05311	-2.79952	20.54011	19.32840	18.82908
226.05586	-2.77669	23.40358	21.68259	20.81950
226.05189	-2.81393	21.73247	20.90542	20.75778
226.05471	-2.78063	22.96494	21.98022	21.31236
226.05417	-2.80163	20.98395	19.69807	19.16192
226.05334	-2.80075	21.07596	19.92666	19.33425
226.05149	-2.81173	23.26673	21.47523	20.41437
226.04990	-2.78202	21.83546	20.72150	20.24269
226.04362	-2.81237	21.83860	21.21375	21.13087
226.05783	-2.80997	22.07848	21.62168	20.87823
226.04802	-2.78940	22.03018	20.63044	20.23569
226.04744	-2.79804	23.87469	21.51192	20.62965
226.04653	-2.77518	20.62346	19.53452	19.03317
226.04406	-2.79592	21.21562	19.94473	19.41989
226.04610	-2.79102	22.20193	20.94723	20.48141
226.04498	-2.82654	22.21207	21.28002	21.42165

Continua na próxima página. . .

Tabela A.1 - Continuação

$\alpha(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	g'	r'	i'
226.04356	-2.77029	21.83829	20.69713	20.32028
226.04134	-2.79748	20.21850	18.80097	18.26004
226.04290	-2.80374	21.62077	20.27674	19.90215
226.04249	-2.78167	21.89400	20.60008	20.22894
226.04271	-2.79480	23.07260	21.76977	21.24217
226.04154	-2.78889	21.87314	21.33158	21.16084
226.03984	-2.77307	22.66199	20.61152	19.81130
226.03967	-2.80505	20.74835	19.46401	18.98754
226.03989	-2.80236	21.72988	20.56605	19.96133
226.03957	-2.82612	20.95509	20.49220	20.13811
226.03936	-2.79571	22.06903	21.18955	21.03983
226.03931	-2.81084	23.11168	21.72814	21.21583
226.03917	-2.80362	21.97559	20.97374	20.55211
226.03897	-2.76244	22.45765	21.65229	22.02077
226.03872	-2.81254	22.04599	20.86147	20.43337
226.07541	-2.75950	20.92381	20.24175	19.88268
226.07192	-2.78776	22.95757	20.78520	20.29327
226.07685	-2.81054	23.03279	21.15349	20.11287
226.07179	-2.79192	22.38336	21.90857	21.78516
226.07442	-2.77622	22.96229	20.90064	20.71048
226.07439	-2.75840	21.56955	20.81231	20.56833
226.07488	-2.77995	23.96845	21.93427	20.72870
226.07435	-2.81391	22.23356	20.65764	20.25283
226.05099	-2.75656	22.38773	20.90753	20.40076
226.06931	-2.79902	21.85973	20.44802	20.12013
226.06773	-2.82490	19.71566	18.36321	17.87765
226.05207	-2.76753	21.93943	20.83088	20.50470
226.06669	2.80039	22.39215	21.16394	20.95383
226.06636	-2.82578	22.59284	21.44939	20.91649