

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Observatório do Valongo



Simulação de catálogo de QSOs para o Dark Energy Survey

Aluna: Fernanda Ostrovski Dutra
Orientador: Marcio Antonio Geimba Maia

Projeto de Conclusão para a obtenção do título de Astrônomo
Rio de Janeiro, Brasil

25 de Fevereiro de 2011

Ao Pedro, por acreditar

Agradecimentos

Agradeço a meus pais, Carlos Henrique e Stella, por todo o carinho, amor, cuidado, e apoio que recebi durante toda a minha graduação e minha vida. Desde pequena desejava me tornar uma astrônoma e sempre recebi encorajamento de todas as formas. Foram meus pais que me deram meu primeiro livro sobre o Sistema Solar, me presentearam com minha primeira luneta, me levaram no meio da noite ao Planetário para observar as luas de Júpiter e os anéis de Saturno e me acompanharam na inscrição do vestibular. A eles serei eterna e imensuravelmente grata.

Ao restante da minha família, em especial a minha irmã, Juliana, ao lado de quem pude dar boas risadas e ter momentos de descontração, e a minha avó Elisa, que sempre torceu para que eu obtivesse sucesso. Agradeço também à Dona Sandra, por toda ajuda que dela recebi.

Agradeço ao meu orientador de iniciação científica Marcio Maia, que por 4 anos dividiu comigo sua experiência e sabedoria, me guiando nos caminhos da profissão, me oferecendo desafios e me proporcionando oportunidades que jamais poderia imaginar. Desejo continuar aprendendo com seu inestimável conhecimento.

A Paulo Pellegrini e Luiz Nicolaci de cujas orientações também pude desfrutar. Oferecendo conselhos, sugestões e fazendo questionamentos, eles ajudaram a tornar esse trabalho possível.

A Beatriz Ramos, Fernando Simoni, Bruno Rosseto e Ricardo Ogando, cuja ajuda e paciência foram indispensáveis durante esse três anos. Cada um deles sempre reservou tempo para me estender a mão quando tive dúvidas em meu projeto.

Agradeço também aos meninos da informática, que ainda estão presentes e que já seguiram seus caminhos, por nunca rirem de mim quando meu computador não colaborava e eu me desesperava e por terem sempre oferecido pronta ajuda para religar o mouse ou para matar as aranhas do banheiro, enquanto dividíamos a casa.

Um enorme obrigado a Rosane e a Silvia, amigas sempre constantes que tornaram os almoços e os dias de trabalho mais divertidos. Agradeço pelo carinho e pelas festas surpresa de aniversário que elas me deram.

Aos professores da UFRJ, em especial aos Professores Hélio Jaques, ao Gustavo Porto de Mello e ao Raimundo Rocha, pelos desafios, pelo estímulo acadêmico, por terem acreditado em meu potencial e por terem me passado o conhecimento que adquiri em cinco

anos de curso, me preparando para a profissão. Obrigada também às Professoras Lilia Arany-Prado e Yara do Amaral que, além de tudo isso, ainda me ofereceram conselhos e uma mão amiga quando precisei. E também, um enorme agradecimento a Professora Silvia Lorenz Martins que foi a melhor orientadora acadêmica que eu poderia ter.

Ao CNPq pelos 50 meses de bolsa que nunca se atrasou.

Ao Eduardo, amigo com quem passei tantas horas na Linha Amarela em congestionamentos gigantescos, ao João Paulo, com quem dividi aulas e sala de IC, ao Loloano, a Tati e a todos os meus amigos e colegas de Valongo que junto vivenciamos comigo todos esses árduos anos de 485, integração do metrô, van Fundão-Centro e, principalmente, de ladeira Pedro Antônio.

Aos meus mais fiéis amigos: Caroline e Leticia, por todas as Girl's Night Out e Girl's Night In; a Monique, por todos os emails que mostraram para mim que a distância não separa uma verdadeira amizade; a Carol, que sempre ficou do meu lado mesmo quando eu escolhi mudá-lo; ao Rick, que nunca deixou de me ouvir e me apoiar.

Finalmente, agradeço o Pedro, que com seu amor me ensinou tanto na vida. Ele foi meu companheiro durante toda essa jornada, ficando ao meu lado, me oferecendo ajuda e me atrapalhando também para que eu pudesse parar e rir um pouco. Com ele dividi sorrisos, lágrimas, derrotas e vitórias. Por tudo, serei para sempre grata.

Resumo

QSOs são objetos primordiais e importantes no estudo da evolução das galáxias e do Universo jovem. Os novos grandes levantamentos que cobrem grandes áreas e profundidades irão permitir o melhor estudo desses objetos bem como irão estender os limites do Universo observável com a descoberta dos primeiros QSOs de desvio para o vermelho superior a 7. O Dark Energy Survey (DES) é um exemplo dos levantamentos que estão por vir. Ele irá observar uma área de 5000 graus quadrados nas bandas g , r , i , z e Y .

O objetivo deste trabalho é, através da simulação de um catálogo de QSOs, testar ferramentas de análise a serem usadas com os dados provenientes do DES. Para essa tarefa, desenvolvemos uma suíte de algoritmos, o AddQSO, que permite simular um catálogo de QSOs baseado em uma função de luminosidade (LF) para esses objetos aliado a um conjunto de distribuições espectrais de energia (SEDs).

Integramos a LF descrita por Richards et al. (2006) para obtermos os desvios para o vermelho e a magnitude aparente i . A partir desses dados, geramos as magnitudes nas outras bandas através da convolução entre os filtros e as SEDs. Além disso, acrescentamos as seguintes correções ao fluxo: absorção pela Floresta de Lyman α e atenuação por extinção interna.

Para validarmos o AddQSO, simulamos dados na área e com os filtros do SDSS a serem comparados com a literatura. Nossos resultados mostram conformidade entre nossa simulação e a literatura nas contagens das bandas i e r , e uma discrepância nas contagens das bandas g e z . Os diagramas cor-cor apresentam uma defasagem devido em parte à falta de um mecanismo mais eficaz de avermelhamento e um espalhamento devido aos vários valores de E_{B-V} utilizados.

Realizamos também uma simulação para 880 graus quadrados de área nos filtros do DES. Os resultados mostraram distribuições de desvio para o vermelho e contagens na banda i coerentes. Os diagramas cor-cor apresentaram o mesmo espalhamento observado no teste de validação, porém mostram uma evolução de cor com o aumento do desvio para o vermelho condizente com dados reais.

Concluimos que o AddQSO prevê corretamente distribuições de desvio para o vermelho e contagens nas banda i , necessitando de melhorias no mecanismo de estimativa de magnitudes e cores em outras bandas, que podem estar relacionados com avermelhamento e na seleção das SEDs, bem como efeitos de seleção nas amostras observadas.

Palavras-chave: QSOs: função de luminosidade, levantamentos, SEDs, simulações

Abstract

QSOs are primordial objects and are very important in the study of galaxy evolution and of the young Universe. The new great surveys that plan to cover large areas and deep magnitude limits will allow a better study of these objects as well as extend the boundaries of the observable Universe by the discovery of the first QSOs with redshifts superior to 7. The Dark Energy Survey (DES) is an example of the surveys to come. It will make observations in a 5000 square degree area using the g , r , i , z and Y filters.

The aim of this work is, through the simulation of a QSO catalog, test analysis tools to be use with data provided by DES. For this task, we have developed a suite of algorithms, the AddQSO, that allows the simulation of a QSO catalog based on a luminosity function (LF) of these objects, along with a set of spectral energy distributions (SEDs).

We integrated the LF described by Richards et al. (2006) in order to obtain the redshift and the apparent magnitude i . From that data, we generated the magnitudes on other bands through the convolution with filters and SEDs. We have also added the following corrections to flux: absorbtion by Lyman α Forest and attenuation by internal extinction.

To validate AddQSO, we simulated data using the area and filters of SDSS to be compared with the results available in the literature. The results show conformity between our simulation and the literature on the i and r bands number counts as well as a discrepancy on the g and z bands number counts. The color-color diagrams present an offset partially due to the lack of a more efficient reddening mechanism and a spreading of the points due to the several E_{B-V} values adopted.

We have also run a simulation for 880 square degrees and DES filters. The results showed coherent redshift distributions and i band number counts. The color-color diagrams showed the same dispersion observed on the validation test, though they have also showed a color-redshift evolution consistent with real data.

We have concluded that AddQSO predicts redshift distributions and i band number counts accurately, still requiring improvements on the magnitude and color estimation mechanism in other bands, which could be related to reddening and SED selection, as well as sample selection effects in the real data.

Keywords: QSOs: luminosity function, surveys, SEDs, simulations

Índice

1	Introdução	1
2	AddQSO	14
2.1	A Função de Luminosidade dos QSOs	15
2.2	Filtros e SEDs	17
2.3	Correções: Floresta de Lyman α e Extinção interna	18
3	Metodologia da simulação	23
3.1	A integração da Função de Luminosidade	23
3.2	A geração de magnitudes para outras bandas	24
4	Resultados e Discussão	27
4.1	Testes com o SDSS	27
4.2	DES - previsão para uma área de 880 graus quadrados	35
5	Conclusões e Perspectivas	40
	Referências	43

Lista de Figuras

1.1	Mapa de localização da contrapartida óptica da fonte 3C48, demarcada pelas linhas. B e D são duas estrelas padrões da vizinhança da fonte (Matthews & Sandage 1963).	2
1.2	Espectro do QSO 3C273 em comparação com o espectro de uma galáxia elíptica não-ativa de tipo morfológico cD. A radiação da galáxia está concentrada em uma estreita região de frequências, enquanto que a emissão do QSO é observada em quase toda a extensão do espectro eletromagnético e a energia por intervalo de frequência logarítmica é quase constante (Schneider, 2006).	4
1.3	Espectro óptico de diversos tipos de AGNs e de uma galáxia (NGC 3368) que não apresenta núcleo ativo. Todos os objetos sofreram desvios para que fossem mostrados em seus referenciais de repouso, ou seja, com $z = 0$ (crédito da imagem: http://www.astr.ua.edu/keel/agn/spectra.html).	6
1.4	O modelo unificado de núcleos ativos de galáxias. Ao redor do buraco negro supermassivo está orbitando um disco de acreção de gás e poeira. Frequentemente, há a presença de jatos de partículas alinhados com o eixo de rotação do buraco negro. O tipo de AGN a ser observado da Terra depende do ângulo de visada que é diferente para quasares radioquiescentes e radiosonoros (crédito da imagem: NASA apud Pierre Auger Observatory - http://www.auger.org/news/PRagn/about_AGN.html).	7
1.5	Crescimento no número de quasares conhecidos como função do tempo nos maiores catálogos homogêneos (sólido) e heterogêneos (tracejado), que contém, além de QSOs, outros tipos de AGNs (Richards et al 2009).	10
1.6	Curva de transmissão de cada um dos filtros DES considerando a extinção atmosférica e a eficiência quântica dos CCDs.	12

2.1	Função de luminosidade para diferentes intervalos de desvio para o vermelho. A função usada está representada pela linha ciano ponto-tracejada. Os quadrados e a linha tracejada vermelha representam outros tipos de QLF exploradas pelo trabalho: uma função binada e um ajuste de máxima verossimilhança para uma função cujo regime não varia com z . A linha cinza representa a curva que melhor se ajusta aos quadrados no corte onde $z = 2.01$ e foi reproduzida para comparação. (Richards et al. 2006).	17
2.2	Eficiência quântica de cada um dos filtros SDSS considerando a extinção atmosférica.	18
2.3	Oito SEDs presentes na biblioteca de modelos e separadas em quatro classes. As linhas finas e grossas presentes em cada painel representam modelos obtidos através de diferentes parâmetros iniciais. Linhas de emissão fortes em QSOs têm suas posições no espectro de repouso demarcadas nos painéis. Também é mostrada a curva da lei de potência equivalente a $f_\lambda \propto \lambda^{-1.5}$ na forma de uma linha tracejada por motivos de comparação entre as classes (Budavári et al. 2001).	19
2.4	Distribuição de desvio para o vermelho em cada uma das classes de SEDs após o ajuste de modelos a uma amostra de QSOs do SDSS (Budavári et al. 2001).	20
2.5	Fator de transmissão médio de acordo com o desvio para o vermelho. Os pontos são dados em Songaila (2004) e o ajuste da curva é dado pela equação 2.5.	21
3.1	Distribuição de E_{B-V} obtida com o algoritmo LePHARE como o melhor ajuste para os objetos do catálogo de QSOs V do SDSS. Apenas os objetos que obtiveram $ (spec - z) - (foto - z) \leq 0.3$ foram considerados.	25
4.1	Distribuição de desvio para o vermelho obtida com a simulação AddQSO para o SDSS.	28
4.2	Comparação entre as contagens de QSOs na banda i obtidas do catálogo R09 (círculos azuis) e a média e desvio padrão de dez realizações do AddQSO (quadrados vermelhos).	29
4.3	Distribuições de desvio para o vermelho obtida com o AddQSO após o corte em magnitude aparente i (painel a) e de desvio para o vermelho fotométrico dado pelo catálogo em R09 (painel b).	30
4.4	Comparação entre as contagens em m_g (painel a), m_r (painel b) e m_z (painel c) obtidas com o AddQSO (vermelho) e as do R09 (azul).	31

4.5	Diagramas cor-cor dos dados do catálogo R09 (vermelho) e dos QSOs simulados pelo AddQSO nas condições do SDSS sem atenuação por extinção. Os objetos gerados pela simulação foram agrupados de acordo com seus desvios para o vermelho e separados pelas diferentes cores.	32
4.6	Diagrama cor-cor $g - r \times r - i$ dos objetos do catálogo de QSOs IV do SDSS separados em intervalos de desvios para o vermelho. As cruzes pretas sinalizam as cores médias em cada intervalo de z e o desvio padrão.	33
4.7	Diagramas cor-cor dos dados do catálogo R09 (vermelho) e dos QSOs simulados pelo AddQSO nas condições do SDSS com atenuação por extinção (azul).	34
4.8	Média e desvio padrão para as cores simuladas pelo AddQSO nas condições do SDSS sem a correção de extinção (azul), com correção de extinção (verde) e as cores provenientes de uma amostra representativa de R09 (vermelho).	34
4.9	Diagramas cor-cor dos dados do catálogo R09 (vermelho) e dos QSOs simulados pelo AddQSO nas condições do SDSS com atenuação por extinção (azul). Os dados simulados mostram apenas três valores de $E_{B-V} = \{0.25, 0.30, 0.35\}$, que melhor coincidem com os dados de R09.	35
4.10	Distribuição de desvio para o vermelho obtida com a simulação AddQSO para o 880 graus quadrados do DES.	36
4.11	Contagens na banda i para a simulação AddQSO para o 880 graus quadrados do DES.	37
4.12	Contagens nas bandas g (painel a), r (painel b), z (painel c) e Y (painel d) para a simulação AddQSO para o 880 graus quadrados do DES.	38
4.13	Diagramas cor-cor obtidos com a simulação AddQSO para o DES. Os pontos azuis representam objetos de pequeno desvio para o vermelho ($z \leq 2.5$) e os pontos roxos representam QSOs de grande z ($z > 2.5$).	39

Lista de Tabelas

2.1	Constantes e valores de melhor ajuste obtidos por Richards et al. (2006) para a Função de Luminosidade na forma de uma lei de potência variável. Aqui, Φ tem unidade de $\text{pc}^{-3} \text{mag}^{-1}$, e M^* e z_{ref} não são parâmetros livres; de fato, eles têm os valores indicados na tabela.	16
4.1	Média e desvio padrão para as cores simuladas pelo AddQSO nas condições do SDSS sem a correção de extinção e as cores provenientes de uma amostra representativa de R09.	30
4.2	Média e desvio padrão para as cores simuladas pelo AddQSO nas condições do SDSS com a correção de extinção.	32
4.3	Identificações em intervalos de z em cada uma das bandas do DES.	39

Capítulo 1

Introdução

A descoberta dos quasares data da década de 60. Nessa época, foi feito um levantamento em rádio denominado Third Cambridge Catalogue of Radio Sources (3C - Edge et al. 1959), com observações na faixa de 158 MHz que posteriormente foi ampliado levando em conta novas observações em 178 MHz. As observações nessa nova faixa de rádio deram origem ao catálogo de radiofontes Third Cambridge Catalogue of Radio Sources Revised (3CR - Bennett 1962). O 3CR possui fontes ao norte ($\delta > -5^\circ$) com densidade de fluxo superior a $S_{min} = 9$ Jy. Contudo, a baixa resolução angular resultava numa grande incerteza na posição, o que tornava a identificação de contrapartidas ópticas muito difícil. A identificação óptica completa do catálogo 3CR só foi finalizada nos anos 90, com o aumento em resolução angular devido a técnicas de interferometria.

Apesar das dificuldades de identificação, em 1963, Thomas Matthews e Allan Sandage mostraram que a fonte 3C48 era pontual com magnitude $V \cong 16$ (Matthews & Sandage 1963). Na figura 1.1 vemos o mapa de localização original do artigo de 1963 da contrapartida óptica do objeto 3C48, com a indicação de duas estrelas padrões. O espectro dessa fonte consiste de um contínuo azul e linhas de emissão fortes e largas que não foram relacionadas a transições atômicas na faixa do óptico. Ainda nesse ano, Maarten Schmidt fez uso de uma ocultação da fonte 3C273 pela Lua para determinar sua posição exata e, conseqüentemente, a relacionou com uma fonte pontual no óptico que também apresentava espectro de características nunca antes vistas naqueles comprimentos de onda (Schmidt, 1963). Schmidt identificou as fortes linhas de emissão como a série de Balmer, o que significava que a fonte deveria apresentar um desvio para o vermelho, z , de $z \cong 0.16$. O objeto 3C48 teve seu desvio para o vermelho posteriormente calculado como $z = 0.3675$ por Greenstein & Matthews (1963).

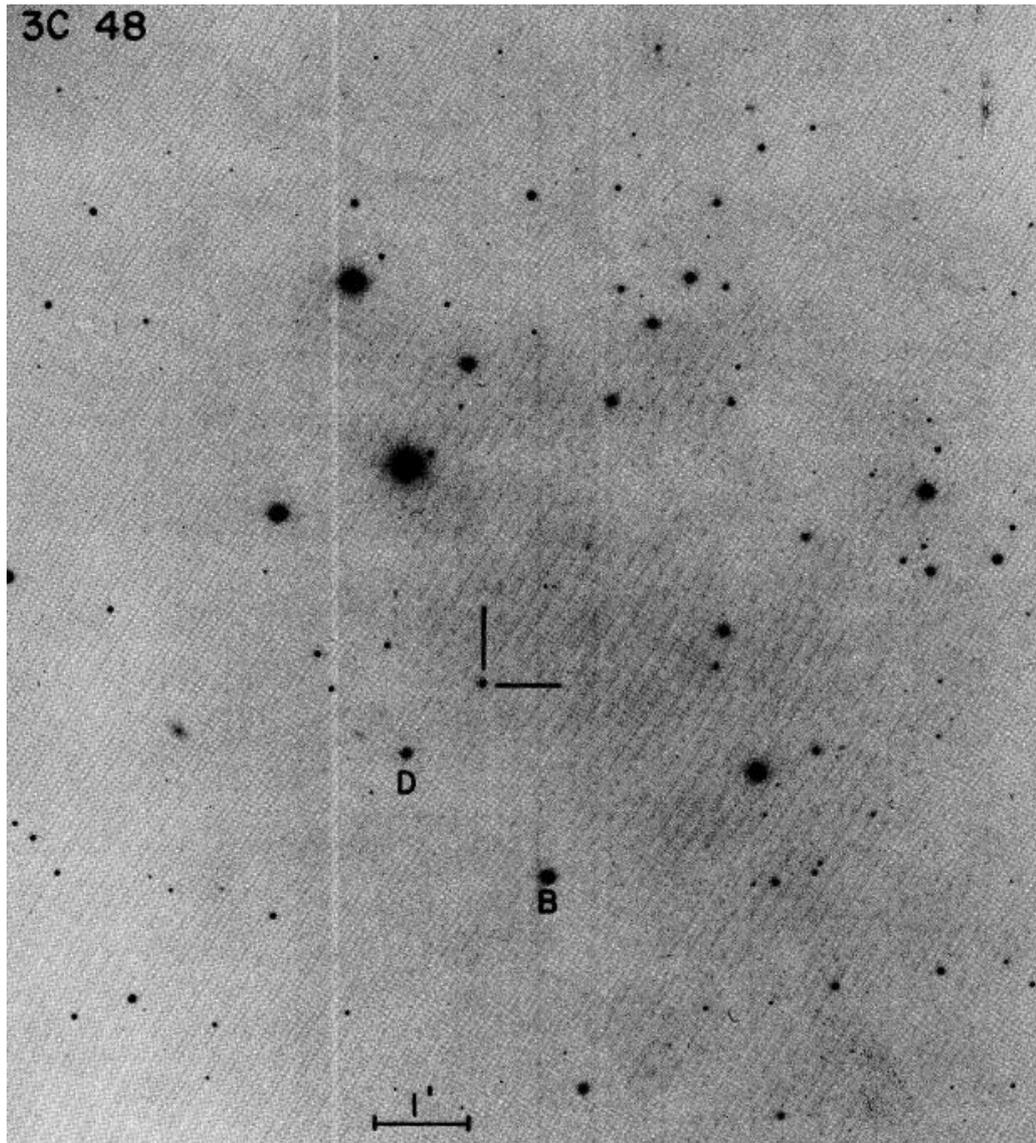


Figura 1.1: Mapa de localização da contrapartida óptica da fonte 3C48, demarcada pelas linhas. B e D são duas estrelas padrões da vizinhança da fonte (Matthews & Sandage 1963).

Após este resultado e com a melhora na determinação da posição de fontes rádio, outros espectros que permaneciam com linhas não identificadas foram associados a objetos com grande desvio para o vermelho. Esses objetos deviam estar ainda mais distantes que outras rádiogaláxias já estudadas e ser pelo menos 100 vezes mais brilhantes no óptico que galáxias espirais normais. Seu aspecto estelar e a escala de variabilidade existente nas faixa óptica e no rádio, sugeriam que a radiação deveria ser emitida a partir de uma pequena região espacial. Inicialmente chamados de "superestrelas", eles foram renomeados de *quasi-stellar radio sources* e em 1964 o termo "quasares" foi criado por Hong-Yee Chiu em um artigo publicado na *Physics Today* (Hong-Yee Chiu, 1964).

Com a descoberta dos quasares, levantamentos ópticos a procura de objetos pontiformes com índices de cor $U - B$ muito azulados começaram a ser feitos. Isso levou à descoberta de fontes que apresentavam, além de uma distribuição de energia com excesso na parte azul do espectro, linhas de emissão fortes e largas e grandes desvios para o vermelho e que eram, portanto, muito similares aos quasares exceto por uma propriedade: não apresentavam emissão em rádio. Esses objetos, que são mais numerosos que os quasares por um fator de pelo menos 10, passaram a ser conhecidos como quasares "*radio-quiet*", radioquiescentes (enquanto que os quasares que tinham contrapartidas em rádio receberam a nomenclatura "*radio-loud*", radiossonoros) ou, simplesmente, QSOs (quasi-stellar objects). Hoje em dia, porém, essa terminologia foi abandonada, uma vez que até mesmo QSOs apresentam emissão em rádio quando observados com sensibilidade suficientemente alta e a separação quiescente/sonoro não é mais considerada. Sendo assim, o termo "QSO" passou a englobar tanto os quasares radiossonoros quanto os radioquiescentes (Schneider, 2006).

O modelo mais aceito atualmente para QSOs é o mesmo adotado para os núcleos ativos de galáxias (AGN). Há um grupo de galáxias, chamadas de galáxias ativas, que mostram uma distribuição de energia que se estende por mais comprimentos de onda do que galáxias normais. De uma pequena região central dessas galáxias, denominada AGN, é observada uma emissão que pode englobar comprimentos de onda rádio até os raios-X e até mesmo o regime dos raios gama. Na figura 1.2, de Schneider (2006), vemos uma comparação entre os espectros do QSO 3C273 e o de uma galáxia elíptica não-ativa, onde fica claro a emissão do QSO é observada em todo o intervalo da radiação eletromagnética, enquanto que a radiação da galáxia elíptica tem sua radiação concentrada numa pequena faixa. Acredita-se que galáxias ativas compõem uma família de diferentes tipos de AGN que diferem em suas propriedades espectrais, suas luminosidades e a razão entre a luminosidade do núcleo e da luz gerada pelas estrelas que compõe a galáxia. Essas diferenças, segundo o modelo unificado de AGN podem ser explicadas por efeitos de geometria ou de projeção. AGNs têm em comum fortes emissões de radiação não térmica (o que é sugerido pela extensão da faixa de radiação) no núcleo da galáxia hospedeira. Esses objetos são separados em diferentes classes que refletem a aparência das fontes. Em consequência disso, o comprimento de onda no qual se observam as fontes afetam a classificação. No entanto, podemos separar os AGNs em quatro grandes classes: galáxias

Seyfert, radiogaláxias, blazares e QSOs. As características gerais dessas três primeiras classes serão descritas a seguir de acordo com Schneider (2006).

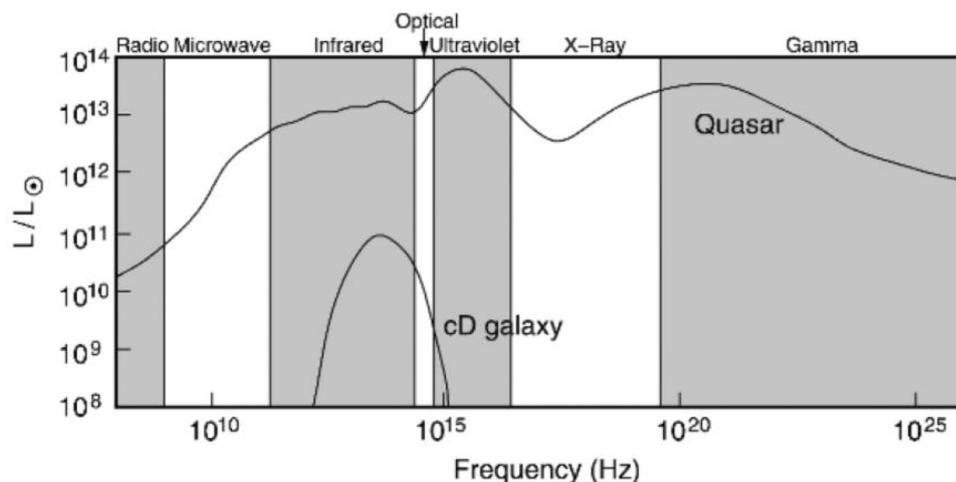


Figura 1.2: Espectro do QSO 3C273 em comparação com o espectro de uma galáxia elíptica não-ativa de tipo morfológico cD. A radiação da galáxia está concentrada em uma estreita região de frequências, enquanto que a emissão do QSO é observada em quase toda a extensão do espectro eletromagnético e a energia por intervalo de frequência logarítmica é quase constante (Schneider, 2006).

Galáxias Seyfert são fontes são identificadas na faixa de radiação óptica como galáxias espirais com núcleos muito brilhantes e cujo espectro apresenta linhas de emissão fortes e largas. Elas são separadas em tipos 1 e 2, sendo que o primeiro engloba galáxias com linhas de emissão tanto largas quanto estreitas e o segundo engloba apenas galáxias com linhas de emissão estreitas.

As radiogaláxias, por sua vez, são identificadas como galáxias elípticas com núcleo ativo. Assim como as galáxias Seyfert, elas são separadas em dois tipos: as "broad-line radio galaxies", que apresentam linhas de emissão largas; e as "narrow-line radio galaxies", cujos espectros apresentam linhas de emissão mais estreitas. Como exemplos dessa classe de AGN podemos citar as galáxias M87 (Cygnus A) e Centaurus A.

Já os blazares são uma classe que engloba dois tipos de objetos: os "Optically Violent Variables" e os BL Lacs. Em ambos os tipos é observada uma variação rápida e muito forte da radiação óptica, além de uma variação no grau de polarização da luz nessa mesma faixa. Todos os blazares são radiofontes e além da variabilidade violenta na faixa óptica, apresentam variação na radiação gama. A diferença entre esses objetos está nas linhas de emissão e absorção, que são fortes nos "Optically Violent Variables" e não aparecem de forma expressiva nos BL Lacs.

Finalmente, temos os QSOs, que são os objetos mais luminosos do Universo e muitos já foram encontrados a grandes distâncias¹. Schneider (2006) e Sparke & Gallagher (2007) mencionam que quase todos os QSOs excedem suas galáxias hospedeiras em brilho e apenas nos mais próximos e fracos podemos vê-las. A grande largura de suas linhas de emissão correspondem a desvios Doppler equivalentes a velocidades de ≈ 10000 km/s e sua luminosidade é proveniente de uma região com raio menor que 1 pc. A distribuição espectral de energia desses objetos se estende, como mencionado anteriormente, por todas as faixas do espectro e o fluxo varia em todos os comprimentos de onda a diferentes taxas e escalas de tempo dependendo do comprimento de onda². O espectro de um QSO é basicamente composto por um contínuo, que pode ser representado por uma lei de potência, com fortes linhas de emissão e absorção.

Na figura 1.3 podemos observar espectros de: um objeto BL Lac; Seyferts 1 e 2; uma LINER, que é uma galáxia Seyfert 2 que apresenta atividade de formação estelar (starburst); rádiogaláxias de linhas de emissão largas e estreitas; uma média de espectros de QSOs e uma galáxia considerada "normal", ou seja, sem a presença de um núcleo ativo. É possível identificar algumas das características descritas, como a diferença nas espessuras das linhas de emissão entre as galáxias Seyfert 1 e 2 e entre os dois tipos de rádiogaláxias e a presença do contínuo que pode ser aproximado por uma lei de potência no exemplo de QSO. Nota-se também a falta de linhas no espectro do BL Lac, que é uma característica desses objetos. Por último, observa-se a diferença entre AGNs e galáxias "normais" que não apresentam fortes linhas de emissão, porém mostram bastante linhas de absorção.

A energia dos AGNs é provida pela energia potencial cedida pelo gás quando ele cai no buraco negro supermassivo (Super-massive black holes - SMBHs) existente no centro da galáxia hospedeira. Schneider (2006) explica que pelo princípio de acreção, um gás caindo em um objeto compacto como um SMBH cede energia potencial primeiramente na forma de energia cinética. Contudo, devido à conservação de momento angular do gás, este não pode cair diretamente no SMBH. Assim, através da fricção com outras partículas do gás, e com a subsequente transferência de momento, o gás irá assumir a forma de um disco perpendicular a direção do vetor momento angular. Uma vez que a força gravitacional

¹O QSO mais distante encontrado até a presente data possui $z = 6.43$ (Willott et al. 2007).

²Em geral, a amplitude da variação aumenta e a escala do tempo diminui conforme se observa comprimentos de onda menores.

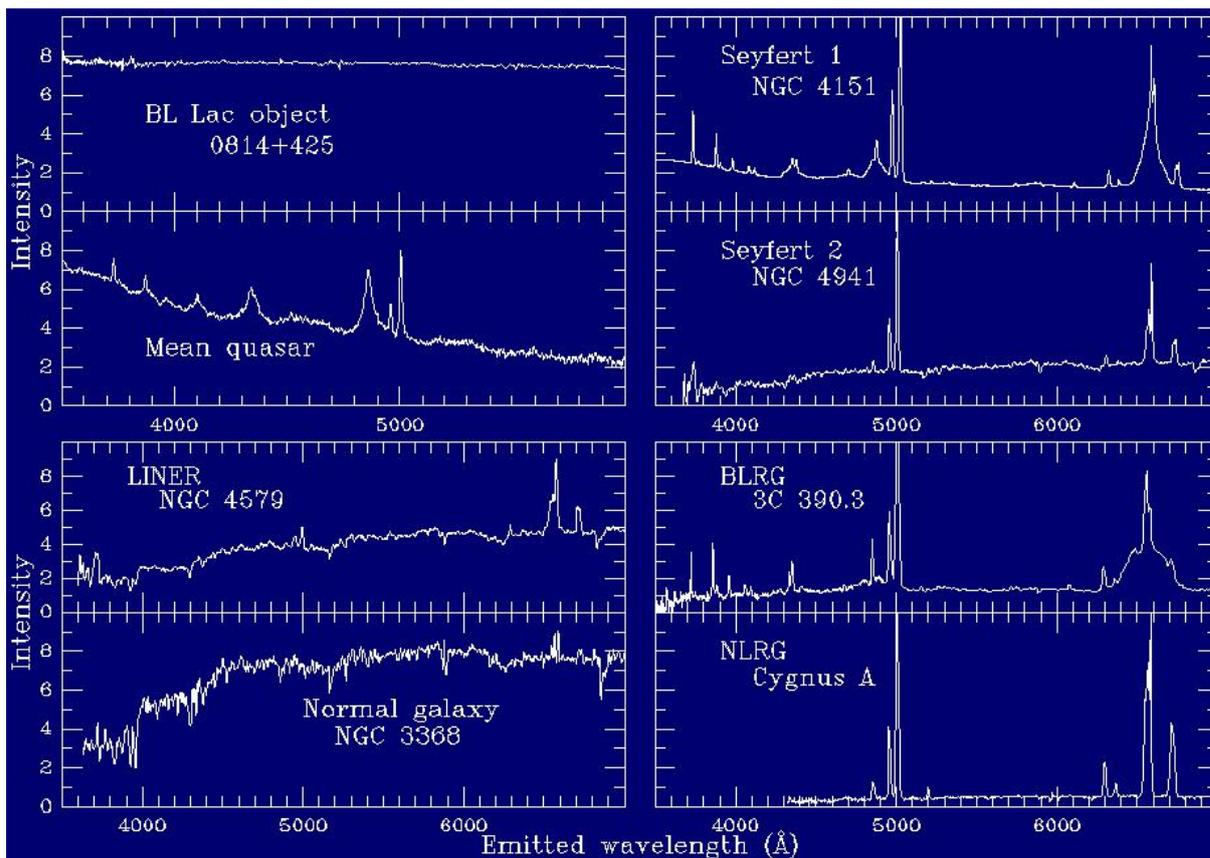


Figura 1.3: Espectro óptico de diversos tipos de AGNs e de uma galáxia (NGC 3368) que não apresenta núcleo ativo. Todos os objetos sofreram desvios para que fossem mostrados em seus referenciais de repouso, ou seja, com $z = 0$ (crédito da imagem: <http://www.astr.ua.edu/keel/agn/spectra.html>).

exercida pelo SMBH é muito superior às forças de fricção no gás, o disco irá rotacionar seguindo aproximadamente um movimento kepleriano. A fricção no gás irá ocasionar dois efeitos: o aquecimento do gás no disco por fricção interna, devido à rotação diferencial; uma pequena desaceleração da velocidade de rotação, fazendo com que o gás se mova para dentro. Esse movimento em direção ao interior é a fonte de energia para o aquecimento do gás no disco: a energia potencial é convertida em energia cinética pelo movimento, e é então convertida em calor pela fricção. De acordo com o teorema do virial, metade da energia potencial liberada é convertida em energia cinética (no caso, a energia de rotação do disco), enquanto que a outra metade pode ser convertida em energia interna (calor).

A figura 1.4 mostra um esquema do modelo unificado de AGN e as linhas de visada através das quais os QSOs e os outros tipos de AGN são observados. Comum a todos os AGNs é a presença de um SMBH no centro da galáxia hospedeira e um disco de acreção que está provendo combustível ao buraco negro. A presença de jatos relativísticos

é comum na faixa da radiação rádio, podendo também ser observada em comprimentos de onda menores, como é o caso do QSO 3C273 que apresenta jatos no óptico.

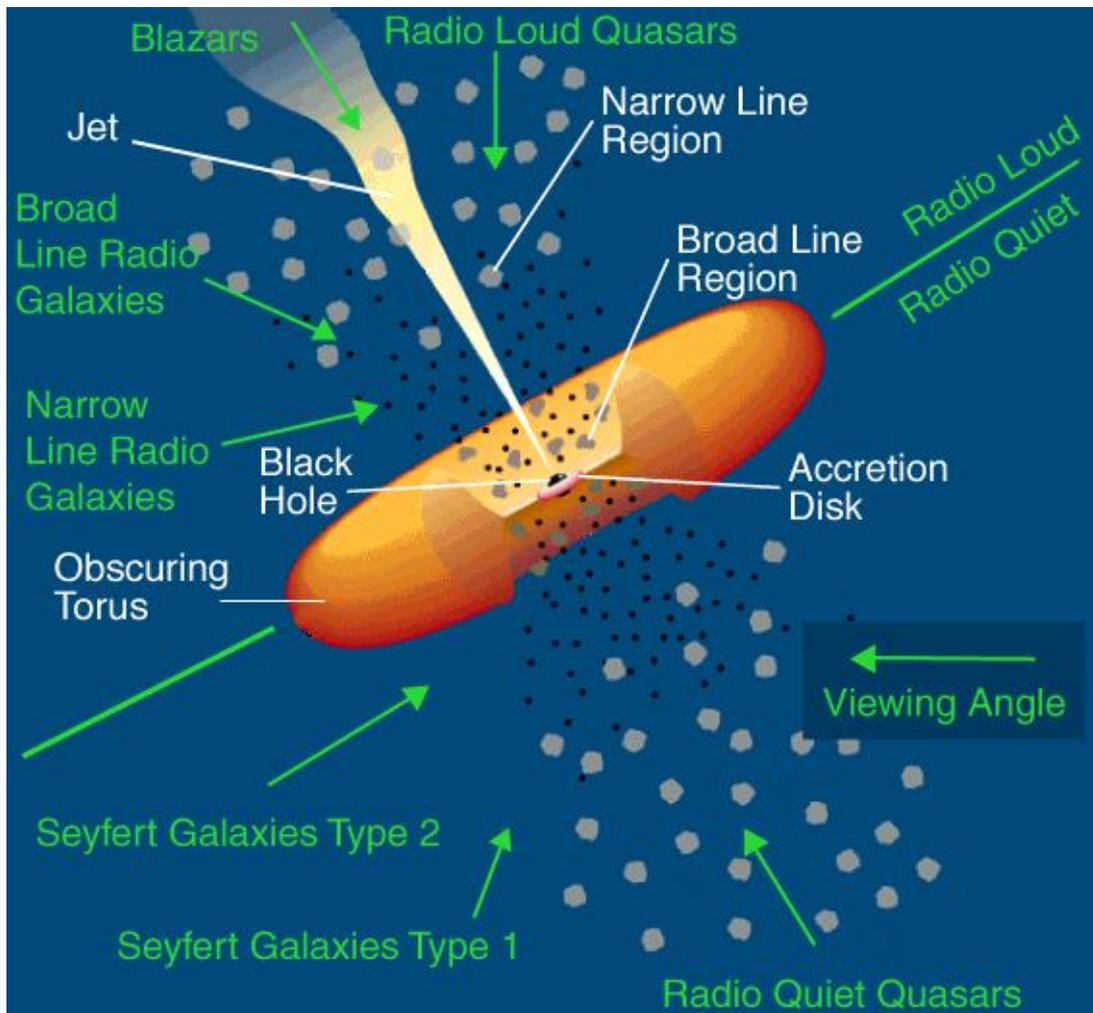


Figura 1.4: O modelo unificado de núcleos ativos de galáxias. Ao redor do buraco negro supermassivo está orbitando um disco de acreção de gás e poeira. Frequentemente, há a presença de jatos de partículas alinhados com o eixo de rotação do buraco negro. O tipo de AGN a ser observado da Terra depende do ângulo de visada que é diferente para quasares radioquiescentes e radiosonoros (crédito da imagem: NASA apud Pierre Auger Observatory - http://www.auger.org/news/PRagn/about_AGN.html).

Uma das formas de estudarmos os QSOs, é através da distribuição de suas luminosidades determinando a chamada função de luminosidade (LF). A primeira determinação de uma LF para os QSOs foi feita por Schmidt (1968), baseada nos dados do levantamento rádio 3CR. Entre os trabalhos que se seguiram, podemos citar, por exemplo: Schmidt & Green (1983), um dos primeiros a explorar a LF utilizando uma amostra de QSOs opticamente selecionados; Koo & Kron (1988); Boyle, Shanks & Peterson (1988), que encontraram em suas análises o efeito de uma evolução em luminosidade no intervalo

$0.3 < z < 2.2$; e Hewett, Foltz & Chaffee (1993), que encontram em seus dados evidências de uma evolução em z . Entre trabalhos que avaliam a LF em intervalos de desvios para o vermelho maiores ($z > 3$), podemos incluir: Warren, Hewett & Osmer (1994), que utilizou o intervalo $2.0 \leq z < 4.5$; Schmidt, Schneider & Gunn (1995), que usou a emissão da $\text{Ly}\alpha$ para identificar QSOs no Palomar Transit Grism Survey (Schneider et al. 1994); Kenefick, Djorgovski & de Carvalho (1995), que discutem a descoberta e a LF de QSOs com $z > 4$ com dados do Second Palomar Observatory Sky Survey (POSS II; Reid et al. 1991); Fan et al. (2001), que usam dados do Sloan Digital Sky Survey (SDSS; York et al. 2000) para avaliar a LF em grandes z através de três diferentes métodos; Fontanot et al. (2007), que estuda a LF no intervalo $3.5 < z < 5.2$, utilizando dados do Great Observatories Origins Deep Survey (GOODS; Giavalisco et al. 2004) e do SDSS; e Richards et al. (2006), que utilizam dados do SDSS.

O estudo de QSOs e de sua LF permite o conhecimento de suas propriedades intrínsecas e de sua evolução. Eles também podem ser usados na exploração das propriedades do Universo jovem. De acordo com Mortlock et al. (2008) e Venemans et al. (2007), o fato de esses objetos serem não-transientes e a possibilidade de seus espectros poderem ser obtidos com alta razão sinal/ruído confere a oportunidade de avaliação do material que preenche o espaço percorrido pela luz emitida pelo QSO. Com isso, podemos determinar o conteúdo de matéria bariônica e leptônica, a metalicidade, a temperatura, o grau de ionização, entre outras propriedades físicas do meio intergaláctico. Além disso, ainda de acordo com Venemans et al. (2007), o levantamento da densidade espacial de QSOs com grandes desvios para o vermelho, seus ambientes e suas galáxias hospedeiras (que possivelmente ainda estão em formação e provavelmente ocorrem em ambientes mais densos da distribuição de matéria do Universo) permite impor vínculos aos modelos de crescimento das estruturas em grande escala, na formação das primeiras galáxias e na criação e desenvolvimento de SMBHs.

Medições da LF de QSOs mostram que quasares luminosos são mais frequentes em $z \cong 2-3$. Esse intervalo de desvio para o vermelho é conhecido como "época dos quasares", onde os QSOs eram mais ativos (Croom et al. 2009). Uma questão recorrente no estudo da LF diz respeito ao tipo de evolução sofrida pela população de QSOs: a evolução pode ser em densidade ou em luminosidade. Trabalhos da década de 90, como, por exemplo, Boyle et al. (1990), mostraram evidências de uma evolução puramente em luminosidade,

um indicativo de que a forma da LF era a mesma, que evoluía para luminosidades maiores em grandes desvios para o vermelho. Dessa forma, o fato de QSOs luminosos próximos serem raros seria resultado de uma população de QSOs fixa, que se torna menos luminosa com o tempo. No entanto, trabalhos posteriores que avaliaram a parte mais brilhante da LF dos QSOs (ex: Hewett et al. 1993; Goldschmidt & Miller 1998; Richards et al. 2006) sugerem que a evolução desses objetos não segue perfeitamente um modelo de evolução puramente em luminosidade: a partir de aproximadamente $z > 2.5$ há um declínio na densidade espacial de QSOs (ex: Osmer 1982; Warren, Hewett & Osmer 1994; Schmidt, Schneider & Gunn 1995; Fan et al. 2001).

Dado que a maioria das galáxias massudas contém um SMBH (ex: Kormendy & Richstone 1995) e que há correlação entre a massa do buraco negro e as propriedades da galáxia hospedeira (ex: Tremaine et al. 2002) pode-se sugerir duas coisas: um modelo no qual QSOs são processos de curta duração que ocorrem na maioria das galáxias; e que o processo de crescimento dos buracos negros e das galáxias devem estar conectados (ex: Sanders et al. 1988). Enquanto que a escala de tempo para ocorrer uma fusão entre galáxias é de $\approx 10^9$ anos, pela maior parte desse tempo a acreção no SMBH estaria obscurecida pela poeira. Quando o AGN expelle o gás e a poeira, ele brilha como um QSO óptico por um breve período de $\approx 10^8$ antes de exaurir o combustível disponível (ex: Di Matteo, Springel & Hernquist 2005), deixando de ser uma galáxia ativa. Esse *feedback* de energia do AGN na galáxia hospedeira também aquece e expelle o gás na galáxia, o que suprime a formação estelar (Croom et al. 2009). Esse fenômeno, conhecido como *star formation quenching* é considerado um passo importante na evolução de galáxias e ainda está sendo estudado.

O modelo proposto por Hopkins et al. (2005) propõe que a parte mais fraca da LF de QSOs seria composta majoritariamente não por SMBHs de massa menor acretando matéria próximo à taxa de Eddington³ e sim por SMBHs de grande massa, acretando abaixo dessa taxa. Isso significa que a parte fraca da LF reflete a duração da atividade dos QSOs com uma taxa de acreção relativamente baixa, enquanto que a parte mais brilhante da LF oferece informação sobre as propriedades intrínsecas da população de QSOs durante a época em que os buracos negros estavam aumentando em massa mais

³A taxa de acreção de Eddington é aquela na qual o buraco negro irradia a quantidade de energia máxima possível, denominada luminosidade de Eddington ($L_{Edd} = 1.3 \times 10^{38} (M/M_{\odot})$ ergs/s). Neste regime, a pressão de radiação é contrabalançada pela força gravitacional.

rapidamente (Croom et al. 2009). Contudo, amostras que atingem magnitudes cada vez menos brilhantes são necessárias para melhor vincular a forma da parte fraca da LF de QSOs.

O avanço nos últimos anos no que diz respeito à descoberta de QSOs tem sido enorme. Esse progresso foi atingido graças a levantamentos como o Two Degree Field QSO Redshift Survey (2QZ, ex: Boyle et al. 2000), o Sloan Digital Sky Survey (SDSS; York et al. 2000), cujo catálogo mais recente de QSOs espectroscopicamente confirmados contém mais de 100000 objetos (Schneider et al. 2010), o Canada France High-z Quasar Survey (CFHQS; ex: Willott et al. 2007), entre outros. Conforme pode ser visto na figura 1.5, houve um contínuo crescimento no número de descobertas de QSOs em catálogos homogêneos (que contém apenas QSOs e não outros tipos de AGNs) até o ano 2004, quando a marca dos 100000 objetos foi quebrada antes do esperado pela extrapolação da tendência do gráfico (linha sólida). No trabalho de Richards et al. (2009) com dados do SDSS é apresentado um catálogo de um milhão de quasares.

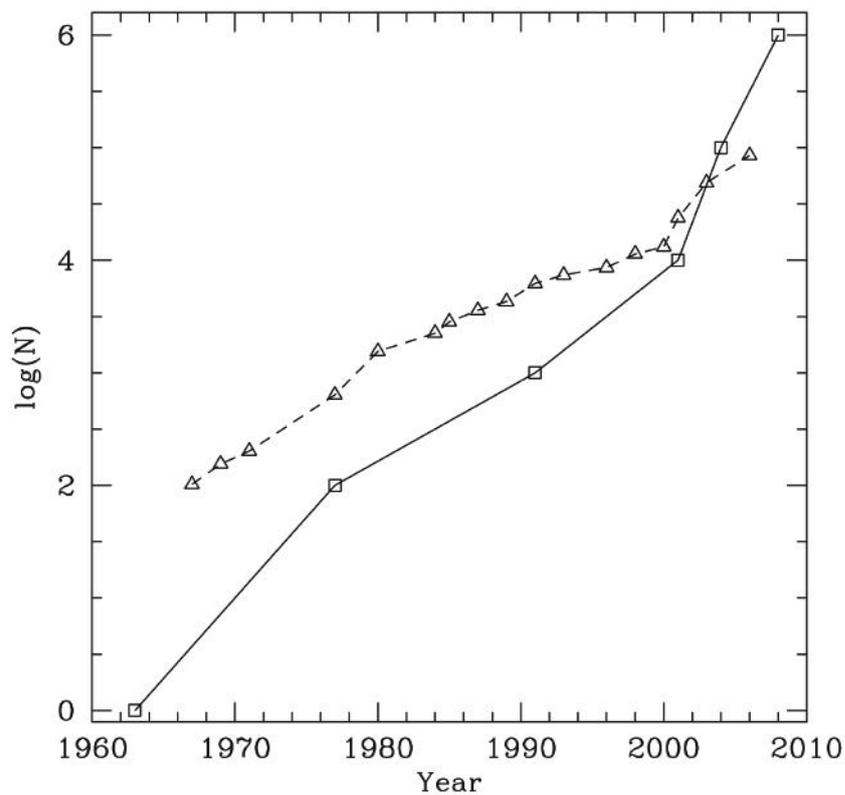


Figura 1.5: Crescimento no número de quasares conhecidos como função do tempo nos maiores catálogos homogêneos (sólido) e heterogêneos (tracejado), que contém, além de QSOs, outros tipos de AGNs (Richards et al 2009).

Contudo, para que o avanço na área continue a ocorrer, duas barreiras devem ser quebradas: a descoberta de QSOs com $z > 7$ e a identificação de objetos sem o uso da espectroscopia. A primeira questão envolve a dificuldade de observação no óptico: fótons emitidos por objetos com $z > 6.0$ e comprimentos de onda menores que a quebra de Lyman em $\lambda = 1216 \text{ \AA}$ são absorvidos pelo hidrogênio neutro presente no caminho entre o QSO e o observador, o que causa nas fontes uma perda no fluxo para comprimentos de onda menores que $\lambda \cong [0.85 + 0.12(z - 6)] \mu m$ (Mortlock et al. 2008). Portanto, a necessidade de informação nas bandas do infravermelho próximo para identificação de QSOs de grande desvio para o vermelho é evidente.

Em relação ao segundo problema, temos o fato de que mesmo espectrógrafos capazes de observar milhares de objetos por grau quadrado de uma única vez, conseguem explorar apenas uma pequena área do céu e necessitam de grandes tempos de exposição. Isso significa, segundo Richards et al. (2009), que para atender aos objetivos científicos que exigem amostras cada vez maiores como, por exemplo, o estudo de aglomeração de quasares, métodos de identificação de objetos utilizando apenas dados fotométricos devem ser desenvolvidos. Os levantamentos futuros que serão responsáveis pelas descobertas da próxima década não serão baseados em espectroscopia, como é o caso do Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS; Kaiser et al. 2002), do Dark Energy Survey (DES - Abbott et al. 2005) e do Large Synoptic Survey Telescope (LSST; Tyson 2002).

Em particular, o Dark Energy Survey é um levantamento fotométrico que se estenderá do óptico ao infravermelho próximo utilizando as bandas g , r , i , z e Y . As curvas de transmissão dos cinco filtros podem ser vistas na figura 1.6. A proposta do levantamento é de, através do uso de quatro experimentos distintos e independentes, testar as propriedades da energia escura, bem como sua densidade e evolução no tempo. Os experimentos são: abundância e distribuição espacial de aglomerados de galáxias, lenteamento fraco, estudo da distribuição de galáxias em grande escala e supernovas tipo Ia (Annis et al. 2005).

O DES planeja cobrir 5000 graus quadrados da calota galáctica sul (Abbott et al. 2005) e, em adição aos filtros mencionados, o levantamento VISTA Hemisphere Survey (VHS) irá prover dados nas bandas J , H e K_s . Além disso, aproximadamente 4000 graus quadrados da região observada irão se sobrepor à região do levantamento South Pole

Telescope Sunyaev-Zel'dovich (Ruhla et al. 2004).

O equipamento usado será uma nova câmera CCD que cobre uma área de céu equivalente a 3 graus quadrados, a DECam, montada no telescópio Blanco de 4 metros localizado no Cerro Tololo Inter-American Observatory - CTIO. De acordo com o planejamento, o levantamento terá 525 noites de observações distribuídas por cinco anos nos períodos de setembro a fevereiro (Abbott et al. 2005). As profundidades esperadas em cada banda ao fim do levantamento são: $g = 25.4$, $r = 24.9$, $i = 24.6$, $z = 23.8$ e $Y = 21.7$.

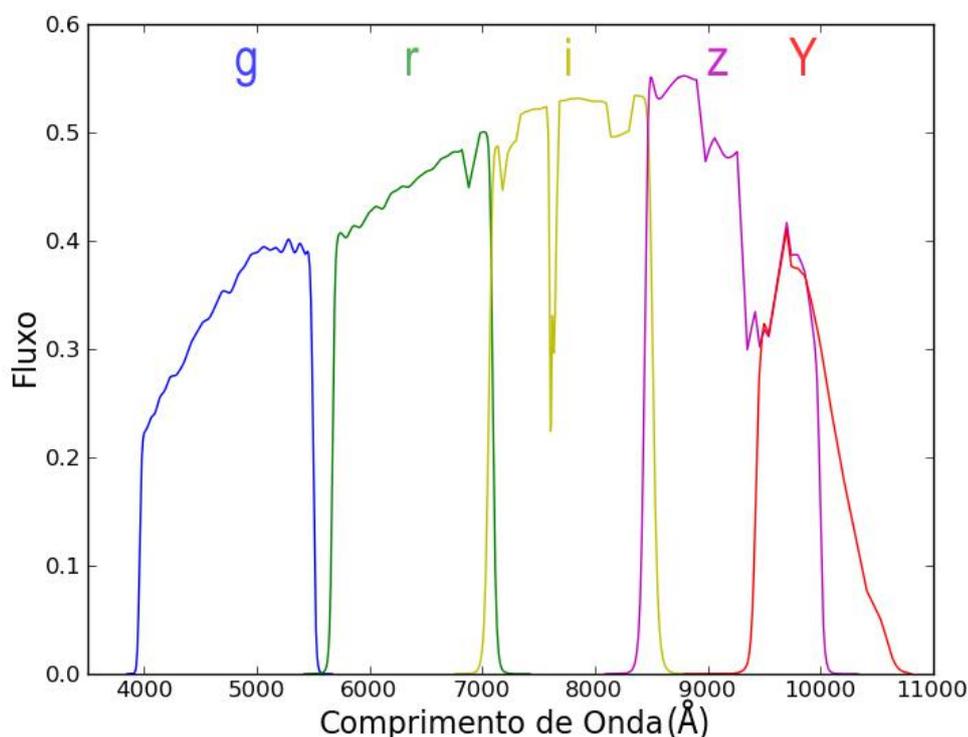


Figura 1.6: Curva de transmissão de cada um dos filtros DES considerando a extinção atmosférica e a eficiência quântica dos CCDs.

A grande área, a profundidade e a alta sensibilidade nas bandas mais vermelhas do DES irão permitir a detecção de um enorme número de QSOs com $z > 4$, o que é útil em estudos demográficos como a ocorrência de aglomeração entre esses objetos. Haverá ainda uma amostra substancial de QSOs com $z > 6$, que são extremamente raros. Além disso, o acréscimo das informações no infravermelho do VHS tornará possível a seleção de candidatos a QSOs com $z = 7$, o que irá ampliar a fronteira do Universo observável. Os objetos descobertos com o DES irão ajudar a responder as perguntas de vanguarda dos campos de estudo de QSOs, incluindo: como surgiram os primeiros buracos negros com $10^9 M_{\odot}$ em QSOs com $z > 6$; o *feedback* dos SMBHs na formação de galáxias; as condições do meio intergaláctico próximo à época de reionização e a coevolução dos SMBHs com

seus respectivos halos de matéria escura.

A análise dos dados para que esses estudos possam ser feitos requer um conjunto de ferramentas que devem estar prontas com o início do levantamento. Assim, uma vez que os dados estiverem reduzidos, será possível selecionar candidatos a QSOs através de diferentes métodos tais como separação por cor e ajuste de modelo de distribuição espectral de energia e planejar missões de *follow up*. É por isso que o trabalho com simulações se torna importante: para fazer previsões dos dados a serem coletados e preparar e testar ferramentas de análise.

Neste trabalho iremos descrever um conjunto de algoritmos, o AddQSO, capaz de simular um catálogo de QSOs sintéticos baseado numa LF e em distribuições espectrais de energia. Apesar de o AddQSO ser capaz de gerar um catálogo sob diversas condições de área e bandas observadas, nosso objetivo é fazer previsões sobre a população de QSOs para o DES. Uma vez que todos os ajustes tenham sido feitos, pretendemos disponibilizar o AddQSO em um portal científico para os membros da colaboração.

No capítulo 2, apresentamos mais detalhes sobre o AddQSO, a LF, os filtros e as distribuições espectrais de energia utilizadas, bem como sobre algumas correções que se fazem necessárias. No capítulo 3, descrevemos mais detalhadamente a metodologia da simulação. No capítulo 4, apresentamos os resultados e uma discussão sobre eles e, finalmente, no capítulo 5, enumeramos nossas conclusões e apontamos possíveis melhorias e extensões deste trabalho.

Capítulo 2

AddQSO - Um algoritmo para simular catálogos de QSOs

Seguindo a tendência dos grandes levantamentos e dos trabalhos desenvolvidos em outras áreas no DES, tornou-se indispensável a criação de uma ferramenta para geração de amostras de QSOs sintéticos que possam ser usados nas grandes simulações de imagens esperadas pela DECam. Estas simulações permitirão testar algoritmos como os de classificação de objetos, cálculo de desvio para o vermelho fotométrico (foto- z), entre outros.

Para obtermos um catálogo de QSOs com magnitudes nos filtros DES, desenvolvemos um conjunto de algoritmos em FORTRAN e em Python. A geração desse catálogo está dividida em três etapas básicas:

- A integração de uma função de luminosidade dos QSOs para gerar objetos num dado volume com magnitude absoluta i (M_i), magnitude aparente i (m_i), e desvio para o vermelho (z) - tarefa realizada pelo chamado algoritmo 1;
- A geração de magnitudes aparentes em diferentes bandas a partir de distribuições espectrais de energia (SED) - tarefa realizada pelo algoritmo 2;
- A distribuição em ascensão reta, RA, e declinação, Dec, de forma uniforme na área dada - tarefa a ser implementada.

Fontanot et al. (2007), por exemplo, utilizaram um método similar para combinar dois catálogos e determinar uma função de luminosidade de QSOs (QLF) para objetos de grande z . Fan (1999) também realizou uma simulação de QSOs no espaço de cores

do SDSS através de um processo semelhante. O método de Fan (1999) foi utilizado por Richards et al. (2006) para quantificar a fração de objetos selecionados em função da magnitude e desvio para o vermelho pelo código de seleção de alvos e encontrar a completude da amostra de QSOs a ser utilizada na geração da QLF.

2.1 A Função de Luminosidade dos QSOs

A integração da QLF resulta no número de objetos em dados intervalos de magnitude absoluta e de desvio para o vermelho. Para gerarmos um catálogo de QSOs que simule um grande levantamento como o DES, precisamos de uma função de luminosidade que se estenda por um grande intervalo de desvios para o vermelho. Para esse trabalho, optamos pela utilização da QLF obtida Richards et al. (2006), que compreende regimes de pequeno desvio para o vermelho até valores mais altos ($z \approx 5$).

A função de luminosidade de Richards et al. (2006) utiliza um ajuste de máxima verossimilhança a uma forma parametrizada da função descrita pela equação 2.1:

$$\Phi = \Phi^* 10^{\mu[A_1 + A_2(z-2.45)]} \quad (2.1)$$

onde,

$$\mu = M - (M^* + B_1\xi + B_2\xi^2 + B_3\xi^3), \quad (2.2)$$

e

$$\xi = \log\left(\frac{1+z}{1+z_{ref}}\right). \quad (2.3)$$

Nessas equações, os parâmetros Φ^* , A_1 , A_2 , B_1 , B_2 e B_3 são livres, enquanto que z_{ref} e M^* foram fixados em 2.45 e -26 respectivamente. As constantes e valores de melhor ajuste estão listados na tabela 2.1.

Na figura 2.1, figura 18 de Richards et al. (2006), a QLF é representada em ciano para diferentes intervalos de desvio para o vermelho. A escolha de uma função que varia com z foi motivada por trabalhos na literatura como os de Schmidt et al. (1995) e Fan et al. (2001), que encontraram um achatamento na inclinação da curva da QLF para grandes desvios para o vermelho. Esse efeito também foi observado por Richards et al.

z	A_1	A_2	B_1	B_2	B_3	M^*	z_{ref}	$\log(\Phi^*)$
$z \leq 2.4$	0.84	0.00	1.43 ± 0.04	36.63 ± 0.10	34.39 ± 0.26	-26	2.45	-5.70
$z > 2.4$	0.83 ± 0.01	-0.11 ± 0.01	1.43 ± 0.04	36.63 ± 0.10	34.39 ± 0.26	-26	2.45	-5.70

Tabela 2.1: Constantes e valores de melhor ajuste obtidos por Richards et al. (2006) para a Função de Luminosidade na forma de uma lei de potência variável. Aqui, Φ tem unidade de $\text{pc}^{-3} \text{mag}^{-1}$, e M^* e z_{ref} não são parâmetros livres; de fato, eles têm os valores indicados na tabela.

(2006) na determinação de sua QLF. Apesar de a QFL escolhida apresentar um extenso regime de desvio para o vermelho, uma extrapolação da função ainda é necessária para $z > 5$.

Observa-se que na figura 2.1, a QLF está descrita em termos de $\Phi(M_i[z = 2])$. Para obtermos $\Phi(M_i[z = 0])$ precisamos fazer a seguinte correção na magnitude absoluta:

$$\begin{aligned} M_i(z = 0) &= M_i(z = 2) + 2.5(1 + \alpha_\nu) \log(2 + 1) \\ &= M_i(z = 2) + 0.596. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Essa equação, onde $\alpha_\nu = -0.5$ representa a inclinação do contínuo da lei de potência, é análoga a uma correção K para esse contínuo: $K_{cont} = -2.5(1 + \alpha_\nu) \log(1 + z)$. Correções K são transformações entre as fotometrias observadas e aquelas no sistema de referência de repouso da fonte, em geral definido como aquele onde $z = 0$. Porém, uma vez que QSOs com pequenos valores de z são raros, é mais conveniente fazer a correção K em relação a um valor de desvio para o vermelho mais próximo ao z médio da distribuição de QSOs, $z \approx 2$. Isso significa que para obtermos $M_i(z = 2)$, medimos o fluxo na banda i , e corrigimos esse valor de forma que tenhamos o fluxo equivalente que seria extraído no caso da fonte em questão estar em $z = 2$. Essa correção foi necessária no processo de geração da QLF por Richards et al. (2006), porém não precisa ser contabilizada durante a integração da função, uma vez que a equação 2.1 é descrita em termos da magnitude absoluta do objeto em sua real posição. No trabalho de Richards et al. (2006), a correção foi necessária para comparar as diferentes QLF sendo mostradas na figura e para fazer correções na amostra utilizada na geração das funções.

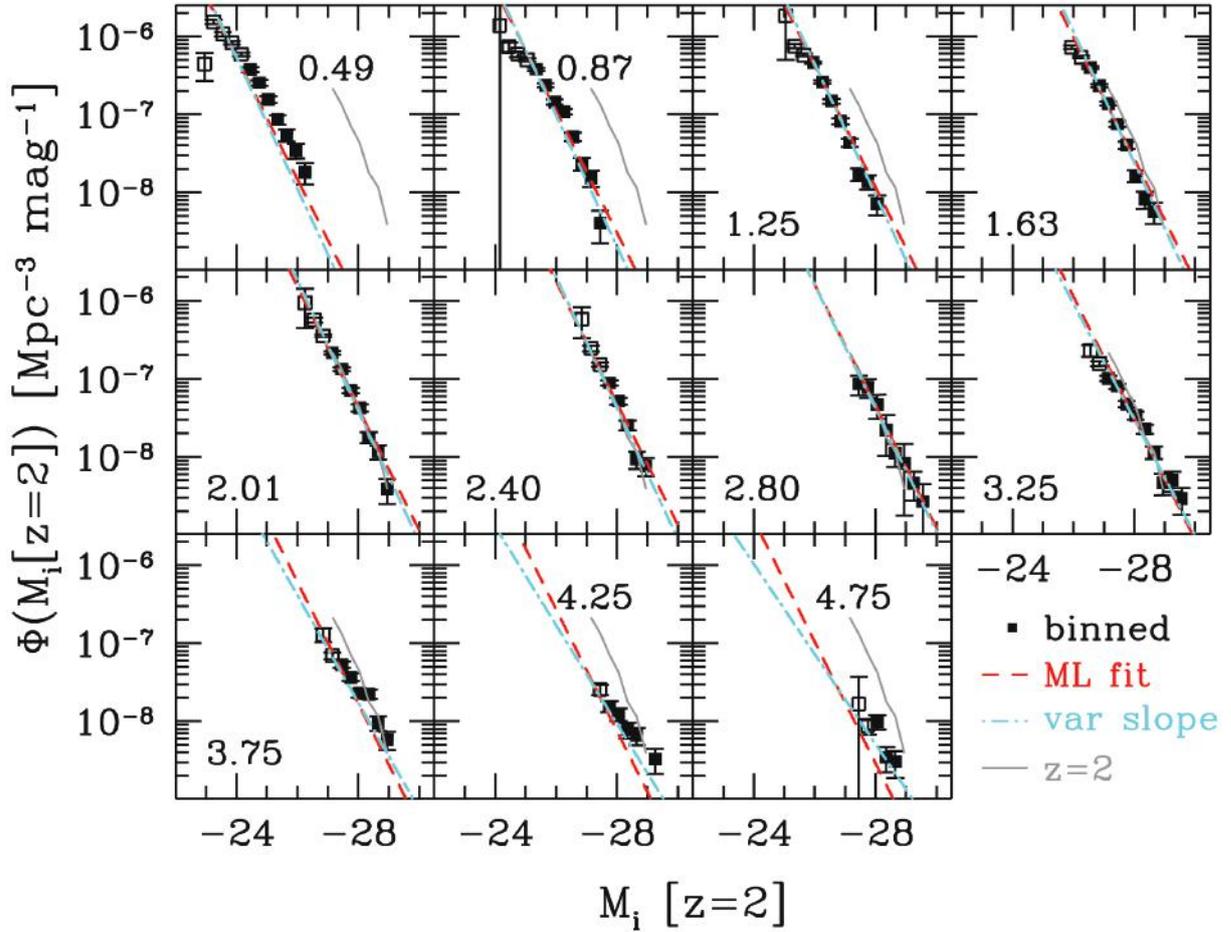


Figura 2.1: Função de luminosidade para diferentes intervalos de desvio para o vermelho. A função usada está representada pela linha ciano ponto-tracejada. Os quadrados e a linha tracejada vermelha representam outros tipos de QLF exploradas pelo trabalho: uma função binada e um ajuste de máxima verossimilhança para uma função cujo regime não varia com z . A linha cinza representa a curva que melhor se ajusta aos quadrados no corte onde $z = 2.01$ e foi reproduzida para comparação. (Richards et al. 2006).

2.2 Filtros e SEDs

Para realizarmos as simulações, especificamente durante a etapa de geração de magnitudes, dois conjuntos de filtros foram usados: um referente às bandas g , r , i , z e Y do DES e o outro referente às bandas g , r , i e z do SDSS, dependendo das condições dos levantamentos a serem simulados. Ambos os conjuntos continham extinção atmosférica e a eficiência quântica dos CCDs, podendo ser vistos nas figuras 1.6 para o DES, e 2.2 para o SDSS.

A biblioteca de SEDs contém 8 modelos descritos em Budavári et al. (2001) apresentados na figura 2.3 (equivalente à figura 5 do trabalho de Budavári et al.), onde a posição das linhas mais fortes do espectro dos QSOs estão demarcadas. As SEDs podem

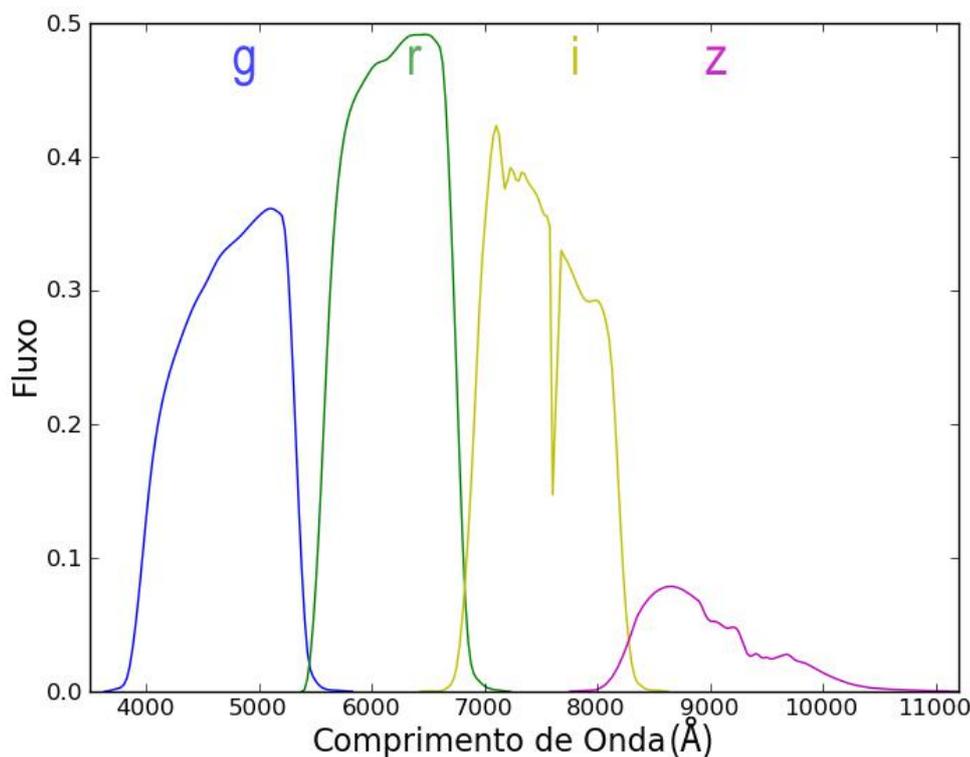


Figura 2.2: Eficiência quântica de cada um dos filtros SDSS considerando a extinção atmosférica.

ser separadas em quatro "classes" e podemos vê-las agrupadas duas a duas de acordo. Essas classes surgiram do método descrito por Budavári et al. (2001) para gerar as SEDs cuja idéia básica é separar QSOs em classes coerentes de modelos espectrais baseados em suas fotometrias e desvios para o vermelho espectroscópicos (spec-z). No trabalho de Budavári et al. (2001), três fatores parecem causar uma preferência por determinadas classes: desvio para o vermelho, como podemos ver na figura 2.4 onde temos a distribuição de desvio por vermelho por classe de SED obtida por Budavári et al. (2001) com sua amostra de QSOs do SDSS; QSOs com linhas de absorção largas (BALs); e QSOs de baixo z e pouca luminosidade com contaminação pela galáxia hospedeira. No entanto, esses fatores não foram levados em conta neste trabalho.

2.3 Correções: Floresta de Lyman α e Extinção interna

Para reproduzir os efeitos observados em QSOs reais, precisamos aplicar algumas correções às SEDs. A primeira delas diz respeito à absorção causada pela presença de hidrogênio neutro no meio intergaláctico na linha de visada. A presença desse elemento causa linhas de absorção no espectro e, conseqüentemente, uma diferença na transmissão:

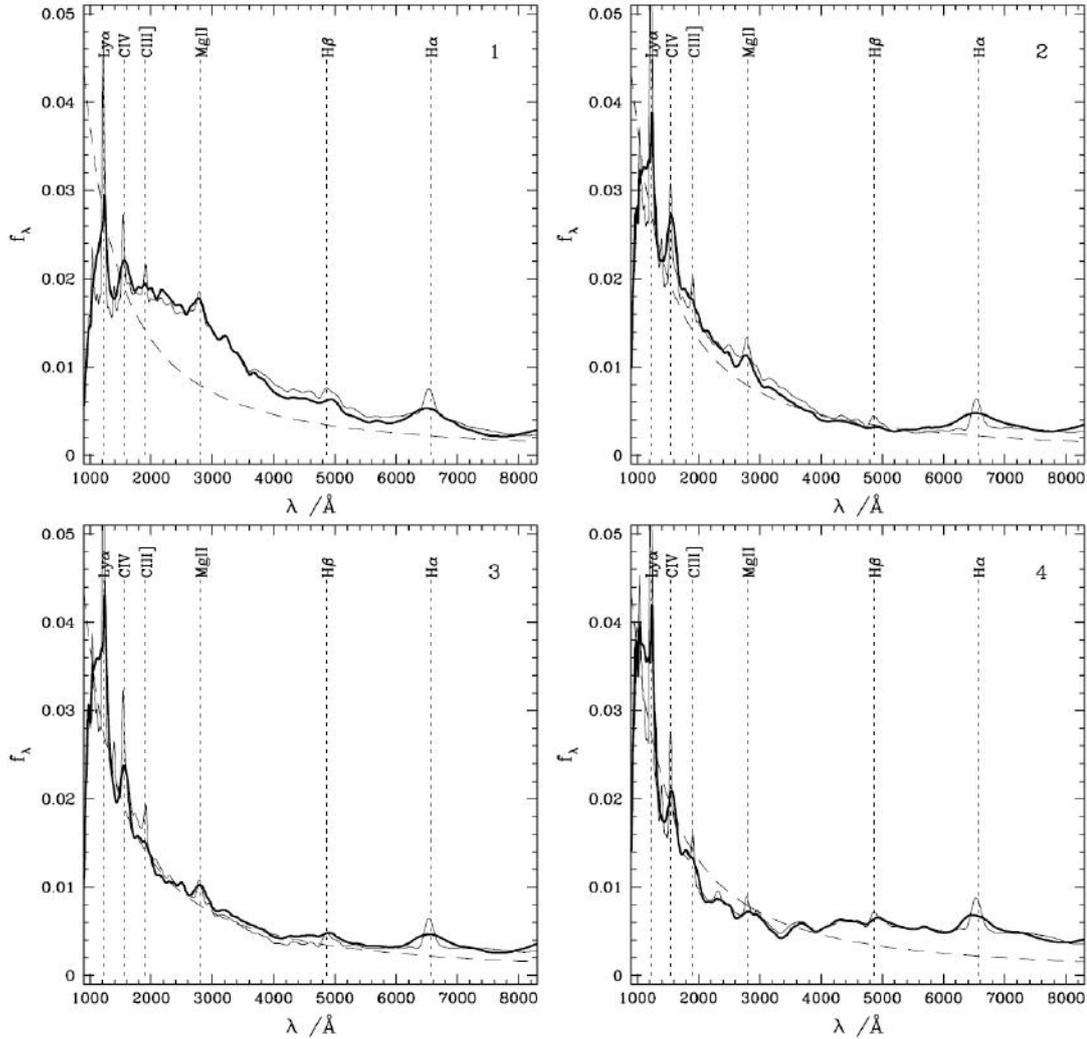


Figura 2.3: Oito SEDs presentes na biblioteca de modelos e separadas em quatro classes. As linhas finas e grossas presentes em cada painel representam modelos obtidos através de diferentes parâmetros iniciais. Linhas de emissão fortes em QSOs têm suas posições no espectro de repouso demarcadas nos painéis. Também é mostrada a curva da lei de potência equivalente a $f_\lambda \propto \lambda^{-1.5}$ na forma de uma linha tracejada por motivos de comparação entre as classes (Budavári et al. 2001).

a chamada floresta de Lyman α que é significativa principalmente em $z \geq 2.4$, quando começa a afetar o fluxo na banda g . Por isso, ao utilizarmos um modelo de SED para calcular magnitudes, precisamos levar em conta uma correção que acrescente esse efeito de absorção ao modelo. Essa correção se faz necessária somente para comprimentos de onda menores que $\lambda = 1200 \text{ \AA}$ e para objetos na faixa de z relevante.

Nos algoritmos, a correção é feita baseada no ajuste de um polinômio de 3^o grau aos dados obtidos por Songaila (2004):

$$f(z) = 0.02z^3 - 0.30z^2 + 1.0z - 0.20. \quad (2.5)$$

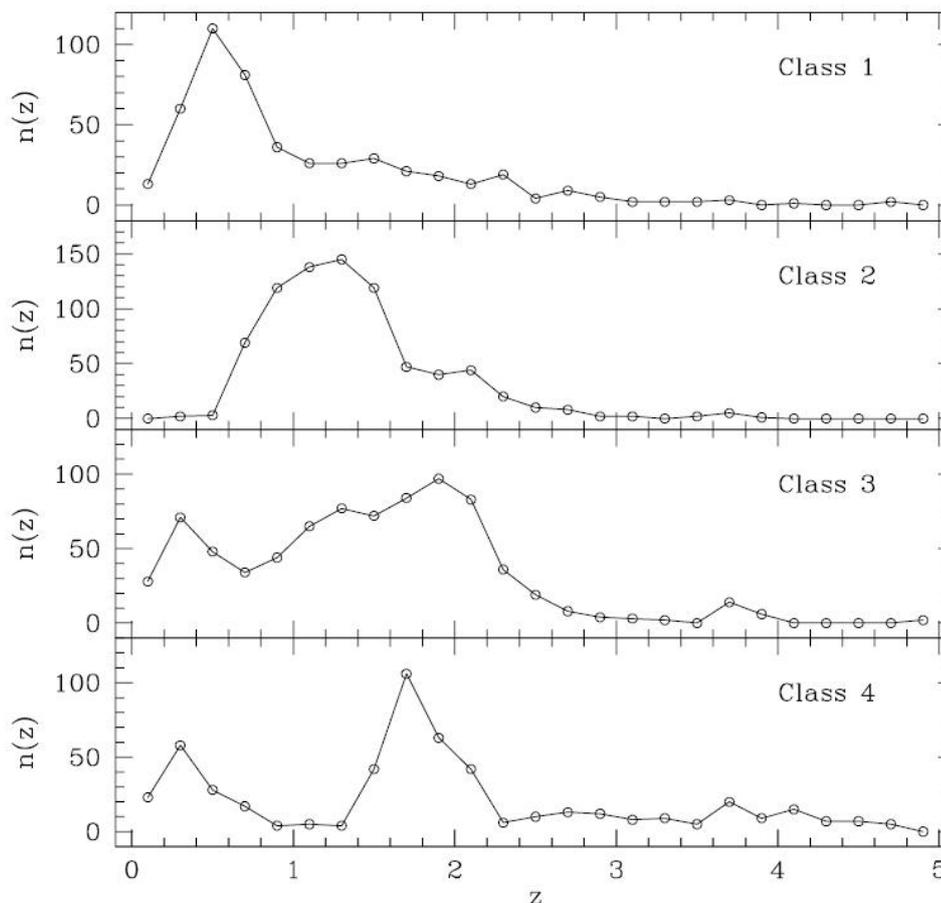


Figura 2.4: Distribuição de desvio para o vermelho em cada uma das classes de SEDs após o ajuste de modelos a uma amostra de QSOs do SDSS (Budavári et al. 2001).

A curva ajustada e os pontos estão expostos na figura 2.5. Songaila (2004) utilizou espectros de alta razão sinal/ruído e alta resolução para investigar a evolução da transmissão do meio intergaláctico entre os desvios para o vermelho $z = 2$ e $z = 6.3$. Os pontos representam a transmissão média da parte do espectro mais azul que a linha de Lyman α para dados valores de desvio para o vermelho entre $2.4 \leq z \leq 6.05$. A floresta de Lyman α causa uma diminuição na luminosidade total recebida devido a absorções no meio intergaláctico que se tornam significativas a partir de $z \approx 2.4$. Fica claro da figura que quanto maior o desvio para o vermelho da fonte, maior será a absorção da radiação e, portanto, menor será o fator de transmissão médio.

A segunda correção a ser feita decorre de recentes descobertas de uma população bastante avermelhada de QSOs selecionados por emissões na faixa rádio (ex: Gregg et al. 2002; White et al. 2003) unidas a estudos da distribuição de cores desses objetos (ex: Webster et al. 1995; Francis, Whiting & Webster 2000; Brotherton et al. 2001), que sugerem a existência de uma população significativa de QSOs vermelhos. Apesar de não

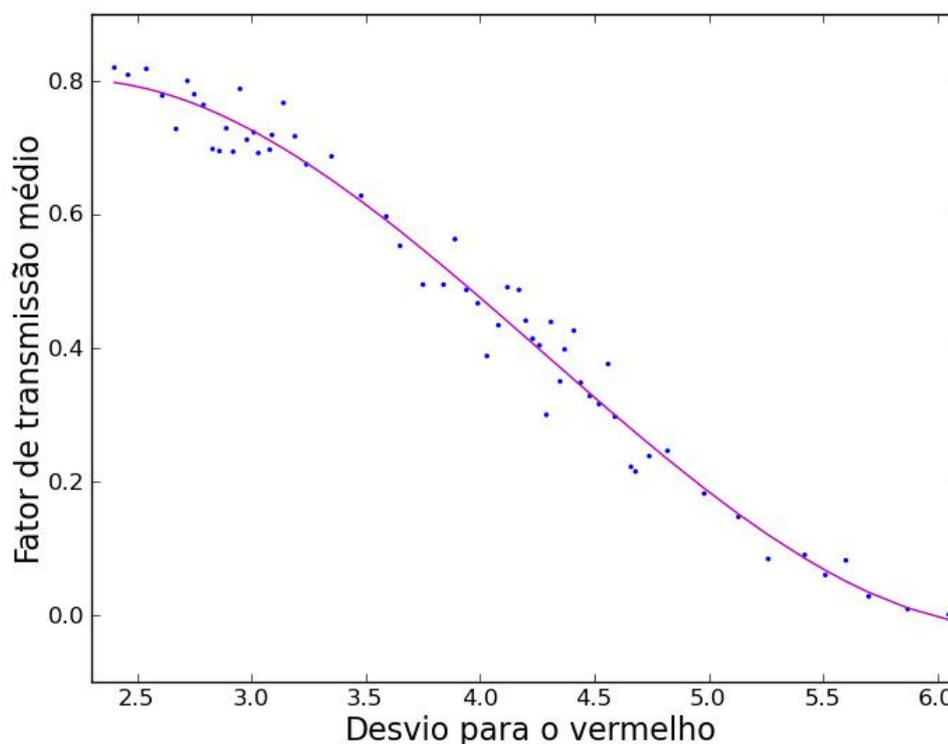


Figura 2.5: Fator de transmissão médio de acordo com o desvio para o vermelho. Os pontos são dados em Songaila (2004) e o ajuste da curva é dado pela equação 2.5.

se saber ao certo qual de fato é o tamanho da contribuição dos QSOs muito vermelhos à população total desses objetos, uma série de mecanismos pode ser responsável por esse efeito: um contínuo intrinsecamente vermelho; um excesso de emissão síncrotron no vermelho; absorção por galáxias na linha de visada; e extinção interna causada pela galáxia hospedeira ou pelo próprio mecanismo central do QSO (Hopkins et al. 2004). A frequência com que cada um desses mecanismos se faz presente é incerta. No entanto, para esse trabalho, decidimos adotar a extinção interna como mecanismo de avermelhamento das cores dos QSOs.

Resultados encontrados por Richards et al. (2003) e Hopkins et al. (2004) mostram que a curva de extinção da Pequena Nuvem de Magalhães (SMC; Prévot et al. 1984 e Bouchet et al. 1985) é capaz de reproduzir o avermelhamento devido a poeira da maior parte dos QSOs vermelhos com $z < 2.2$. Já para QSOs com maiores desvios para o vermelho, o trabalho de Gallerani et al. (2010), que analisou 33 QSOs com $3.9 \leq z \leq 6.4$, mostra que a curva de extinção média difere daquela da SMC, com uma tendência a ficar mais achatada em $\lambda \leq 2000 \text{ \AA}$. No entanto, a diferença entre as curvas de extinção é mais significativa para BALs, que não estão sendo considerados por esse trabalho. Sendo

essa uma primeira aproximação, adotamos modelo de extinção interna da SMC em nossas correções.

A aplicação da atenuação devido à extinção sofrida pelas SEDs é descrita em mais detalhes no próximo capítulo.

Capítulo 3

Metodologia da simulação

3.1 A integração da Função de Luminosidade

O algoritmo ao qual nos referimos no capítulo 2 como algoritmo 1 tem o propósito de fazer a integração da QLF, levando em conta a área e intervalos de magnitude absoluta e desvio para o vermelho do levantamento considerado. Como foi dito anteriormente, estamos utilizando a função de luminosidade de Richards et al (2006) e, portanto, a magnitude absoluta de referencia é a da banda i .

Precedendo a integração da QLF, precisamos definir as constantes cosmológicas a serem utilizadas: $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $h = 0.7$ (ex: Richards et al 2006) e $W = -1.0$; e também algumas constantes gerais: área do céu a ser simulada, valores mínimo e máximo de desvio para o vermelho (determinando o tamanho do intervalo total de z) e valores mínimo e máximo de magnitude absoluta i (determinando o tamanho do intervalo total de M_i).

Para integrarmos a QLF, utilizamos faixas discretas de z dentro das quais consideramos valores de M_i pequenos o suficiente para serem considerados constantes. Dividimos o regime total de M_i em pequenos intervalos cujos limites são utilizados para definir uma variável global mag . Essa variável representa o valor médio de M_i a ser utilizado como o valor de magnitude constante para a integração. Na prática, dentro da faixa de z selecionada, fazemos várias integrações da QLF com diferentes valores de M_i até que todo o regime da variável magnitude seja completado. Depois, repetimos o processo para a próxima faixa de z .

Como resultado de cada integração em uma faixa de z , obtém-se o número de QSOs por unidade de área por unidade de magnitude que então deve ser multiplicado pela área

e pela largura do pequeno intervalo de M_i para obter o número total de objetos dentro daquela faixa de z e daqueles limites de M_i . A partir daí, dois cenários são possíveis, uma vez que esse número total de objetos pode ou não ser maior que um. Caso ele seja, temos uma quantidade x de objetos dentro daquela área do céu que apresenta M_i e desvio para o vermelho conforme os limites de integração. É possível, então, sortear aleatoriamente valores dentro desses limites para determinar z e M_i para cada objeto e posteriormente calcular m_i .

Por outro lado, se a integração da QLF no intervalo considerado apresentar valor inferior à unidade, faz-se necessário aumentar os intervalos de integração. Primeiramente, aumentamos o limite de magnitude absoluta, tornando-o inicialmente duas vezes maior, e continuando progressivamente, sempre redefinindo a variável global *mag*. Se o limite total de M_i for atingido, é então necessário estender o intervalo de z e refazer a integração. O aumento do intervalo de z é feito de forma progressiva (assim como foi feito previamente com o intervalo de M_i) até que o número total de objetos supere 1. Então, se torna possível realizar o sorteio dos valores de z e M_i e determinar m_i . Quando isso acontece, o algoritmo retorna ao comportamento inicial.

No final dessa etapa, o resultado é uma lista de objetos com z , M_i e m_i , que serve como entrada para o algoritmo 2.

3.2 A geração de magnitudes para outras bandas

O algoritmo 2 é o responsável por, a partir do resultado do algoritmo 1 e das distribuições espectrais de energia, gerar os valores para as magnitudes em outros filtros. Porém, antes de calcularmos o fluxo em cada banda, precisamos aplicar a correção para extinção interna mencionada no capítulo 2. Esta correção no fluxo é descrita pela equação:

$$F_{atn} = F_{int} \times 10^{-0.4k(\lambda)E_{B-V}}, \quad (3.1)$$

onde F_{atn} é o fluxo atenuado, F_{int} é o fluxo intrínseco, $k(\lambda)$ é a curva de extinção e $E_{B-V} = (B - V)_{atn} - (B - V)_{int}$.

Para obtermos uma distribuição de E_{B-V} próxima à realidade, utilizamos o algoritmo LePHARE (Ilbert et al. 2006). Apesar de ser voltado para o cálculo de foto- z , podemos utilizar a minimização do χ^2 feita pelo LePHARE para avaliar o ajuste de ou-

tros parâmetros, sendo a extinção interna um deles. Utilizando o catálogo de QSOs V do SDSS (Schneider et al. 2010), que contém ≈ 100000 objetos confirmados espectroscopicamente, e considerando o mesmo regime de extinção $0.00 \leq E_{B-V} \leq 0.80$ em intervalos de 0.05 que foi utilizado em testes realizados por Hopkins et al. (2004), obtivemos a distribuição mostrada na figura 3.1. Nela, apresentamos a quantidade de objetos onde o módulo da diferença entre o espec-z e o foto-z calculado pelo LePHARE não superava 0.3, que obtiveram o melhor ajuste com um dado valor de E_{B-V} . Os coeficientes de correlação linear entre E_{B-V} e os parâmetros foto-z, espec-z e SED melhor ajustada pelo LePHARE são, respectivamente: -0.265 , -0.263 e -0.024 . Sendo assim, decidimos não levar em conta nenhuma relação entre esses fatores.

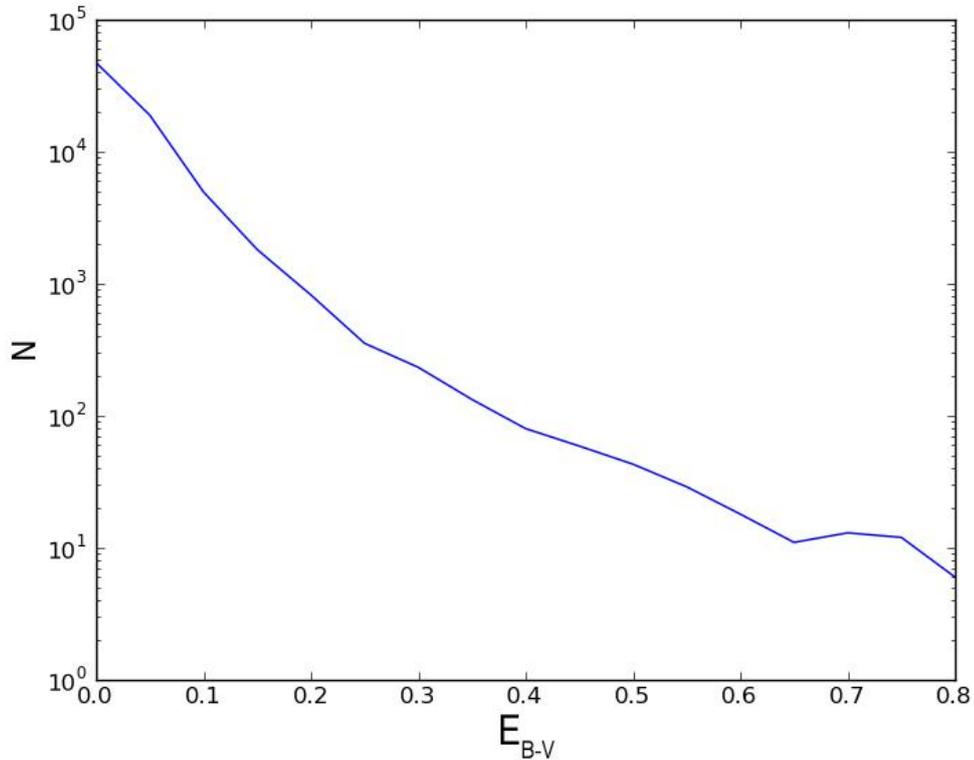


Figura 3.1: Distribuição de E_{B-V} obtida com o algoritmo LePHARE como o melhor ajuste para os objetos do catálogo de QSOs V do SDSS. Apenas os objetos que obtiveram $|(espec - z) - (foto - z)| \leq 0.3$ foram considerados.

A aplicação da correção exigiu a criação de 136 arquivos onde cada uma das 8 SEDs sofria a atenuação por extinção com cada um dos 17 valores de E_{B-V} . Cada objeto contendo valores de desvio para o vermelho e m_i provenientes do resultado com o algoritmo 1 tem uma SED sorteada aleatoriamente e um valor de E_{B-V} sorteado de acordo com a distribuição da figura 3.1. A SED atenuada é desviada para o vermelho de acordo com o valor de z e, quando necessário, tem a correção da absorção da floresta

de Lyman α aplicada a ela. Depois disso, uma *spline* é calculada para essa SED que é, então, convoluída com cada um dos filtros. Sendo assim, é possível integrar e calcular o fluxo para cada banda. Uma vez que o valor de referência é o da banda i , todos os valores de fluxo obtidos após a integração são multiplicados pela área do filtro i e divididos pela área do filtro onde o fluxo está sendo calculado.

Utilizando o valor do fluxo medido para a banda i , podemos calcular a m_i e fazê-la corresponder ao valor obtido pela integração da QLF com o algoritmo 1. Para isso, utilizamos a equação:

$$m_0 = m_i + 2.5 \log(flux_i), \quad (3.2)$$

na qual definimos a magnitude de ponto zero a ser utilizada no cálculo de todas as magnitudes para um dado objeto. É possível calcular as outras magnitudes conforme a equação:

$$m_x = m_0 - 2.5 \log(flux_x) \quad (3.3)$$

para uma dada banda x . As magnitudes obtidas estão no sistema AB.

O resultado obtido é um catálogo que contém desvio para o vermelho, E_{B-V} e magnitudes aparentes.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1 Testes com o SDSS

Apesar de o objetivo do trabalho ser o de gerar um catálogo de QSOs que simule os resultados esperados para o levantamento DES, é necessário verificarmos o correto funcionamento dos algoritmos. Para tal, comparamos os resultados obtidos usando o AddQSO para as condições do levantamento SDSS como área e filtros, com o catálogo de aproximadamente um milhão de QSOs obtido por Richards et al. (2009) (a partir daqui, R09). O teste foi realizado para uma área de 8417 graus quadrados, com limites de magnitude absoluta $-29.5 \leq M_i \leq -24.0$ e intervalo de desvio para o vermelho $0.3 \leq z \leq 7.0$ (algoritmo 1), e gerou z , M_i e m_i para aproximadamente 7.6×10^6 objetos. O histograma da distribuição de desvio para o vermelho pode ser visto na figura 4.1 que mostra, conforme esperado, que a densidade de objetos aumenta até atingir seu valor máximo por volta de $z \approx 2.2$. Também podemos observar que, dentro das condições impostas, são gerados objetos com $z > 5$, um total de mais de 2000 QSOs, onde o maior valor atingido é $z = 6.74$. Porém, para compararmos o resultado, é necessário fazer um corte em magnitude aparente: seguindo o critério de seleção usado por R09, todos os objetos com $m_i > 21.3$ foram retirados, o que deixou um conjunto de aproximadamente 2 milhões de objetos.

A diferença de fator 2 entre o número total de objetos em R09 e os objetos remanescentes após o corte em magnitude aparente no catálogo gerado pelo AddQSO pode ser atribuída à diminuição na completeza sofrida pelo catálogo R09. Em nossos dados simulados, o corte em magnitude aparente é feito posteriormente e é isento de limitações observacionais como erros fotométricos na parte mais fraca da distribuição de magnitudes,

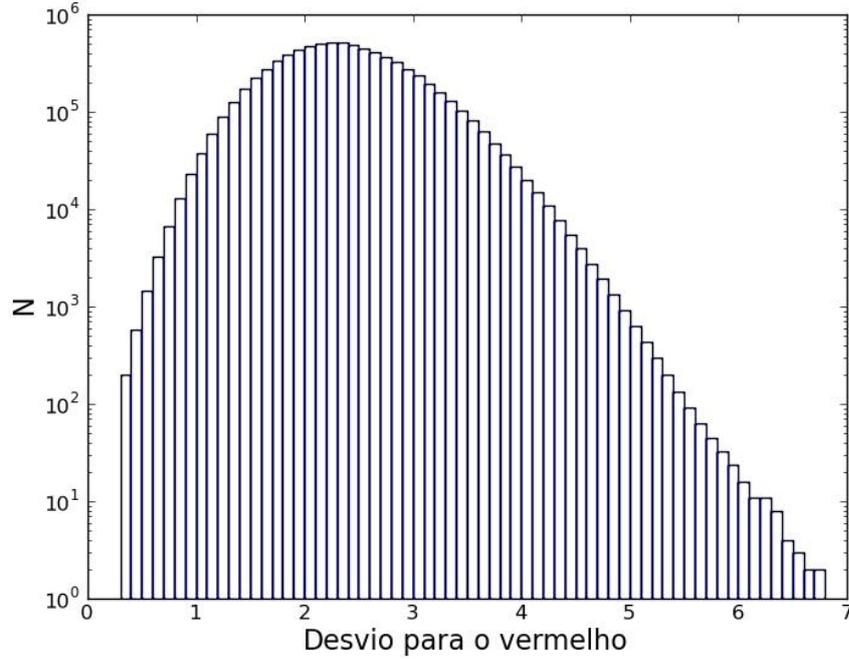


Figura 4.1: Distribuição de desvio para o vermelho obtida com a simulação AddQSO para o SDSS.

efeitos de contaminação por estrelas e galáxias, entre outros. Isso fica aparente na figura 4.2 que mostra uma comparação das contagens para a banda i entre o AddQSO e R09. Nesta figura, os dados provenientes do AddQSO mostram a média e o desvio padrão para dez realizações. Estes dados, não apresentam a tendência de diminuição de contagens a partir de $m_i \approx 19.3$ que é verificada nos dados do catálogo R09. A discrepância para contagens de QSOs mais brilhantes, onde os dados do AddQSO mostram um menor número de objetos em relação aos do R09, pode ser explicada pela falta de objetos com $z < 0.3$ na simulação, dado que esse regime não foi considerado na integração da QLF.

Para comparação dos desvios para o vermelho entre AddQSO e R09, podemos observar a figura 4.3, que mostra a distribuição de z obtida com o AddQSO após o corte em magnitude aparente (painel a) e a do catálogo R09 (painel b). O desvio para o vermelho de R09, fornecido pelo próprio catálogo, é fotométrico e foi obtido utilizando o método descrito por Weinstein et al. (2004). Na distribuição de R09, não observamos o pico em densidade em $z \approx 2.2$, porém temos uma quantidade significativa de objetos com $z > 5$ que seriam *dropouts* na banda i dado o limite do SDSS. Esses efeitos são reflexo de contaminação por outros objetos, erros e problemas decorrentes do cálculo de foto- z , o que leva à distribuição cujo comportamento não se assemelha ao esperado em uma amostra representativa de QSOs. Além disso, o catálogo R09 sofre de efeitos de seleção como, por

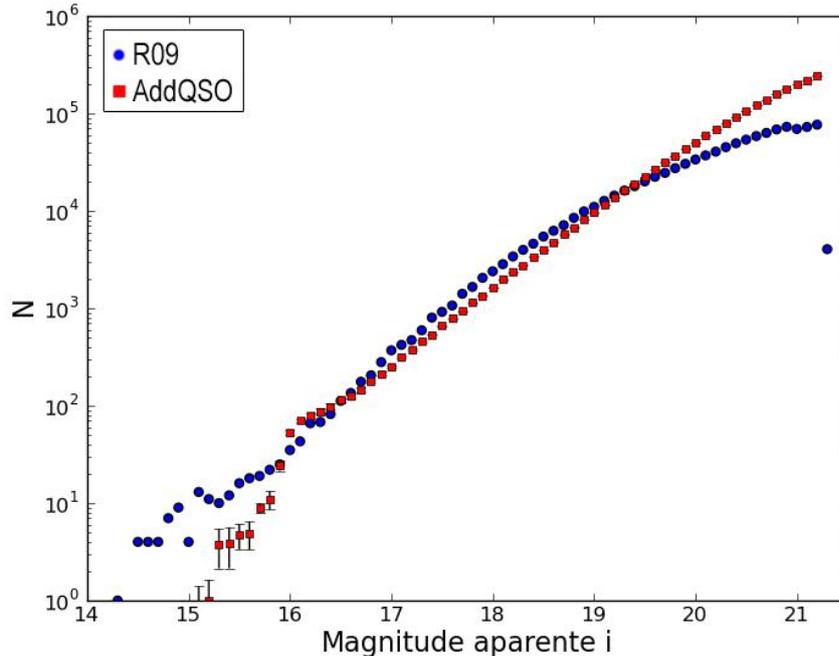


Figura 4.2: Comparação entre as contagens de QSOs na banda i obtidas do catálogo R09 (círculos azuis) e a média e desvio padrão de dez realizações do AddQSO (quadrados vermelhos).

exemplo, perdas de objeto com $z < 0.7$ e $2.5 < z < 3.0$.

Utilizando o resultado do algoritmo 1 limitado em magnitude aparente i ($m_i \leq 21.3$) e os filtros SDSS da figura 2.2, foram geradas as outras magnitudes aparentes: m_g , m_r e m_z . As contagens para essas magnitudes comparadas àquelas presentes em R09 podem ser vistas na figura 4.4. Podemos notar que, enquanto as contagens na banda r apresentam uma boa concordância, há uma visível discrepância nas contagens das bandas g e z : o AddQSO superestima a contagem de QSOs brilhantes em magnitudes azuis e subestima sua mesma contagem nas magnitudes vermelhas. Esse efeito pode ter várias causas. A primeira delas, já mencionada anteriormente, são os efeitos observacionais presentes nos dados de R09, como problemas de completeza e de contaminação. Galáxias ativas como Seyferts 1 não são QSOs clássicos e podem causar um aumento na quantidade de objetos principalmente no regime mais brilhante das contagens. A segunda causa decorre do processo de seleção que gerou o catálogo R09, que não necessariamente resultou em uma amostra representativa da população de QSOs. Conforme discutido, isso é corroborado pela distribuição de desvios para o vermelho fotométricos apresentados na figura 4.3. Outras causas que gerem o comportamento observado nas contagens estão sendo estudadas.

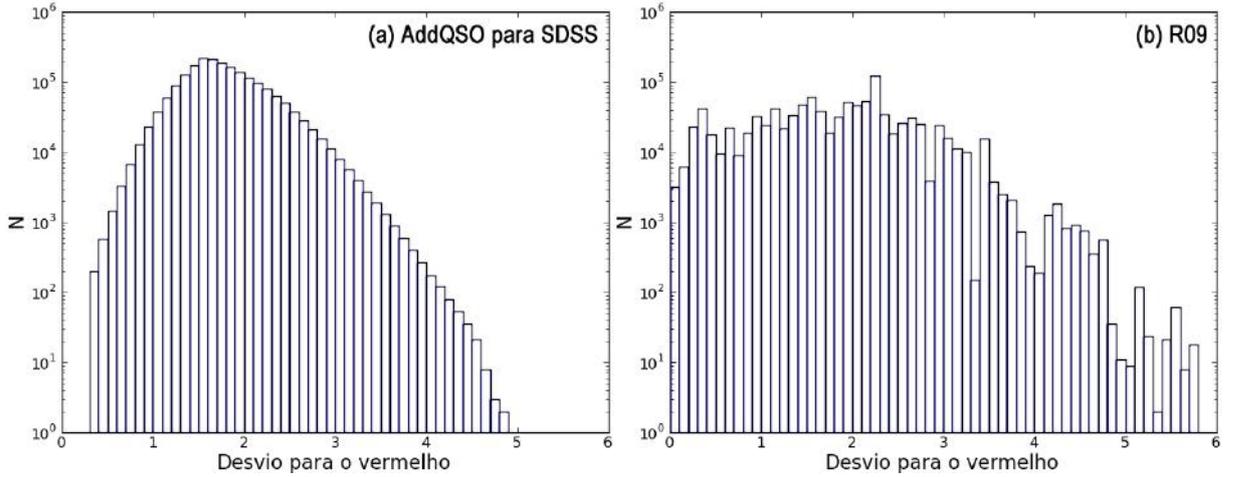


Figura 4.3: Distribuições de desvio para o vermelho obtida com o AddQSO após o corte em magnitude aparente i (painel a) e de desvio para o vermelho fotométrico dado pelo catálogo em R09 (painel b).

Para avaliarmos se os resultados do AddQSO reproduzem os efeitos observados no catálogo R09, também comparamos os diagramas cor-cor obtidos. A figura 4.5 mostra dois diagramas nos quais as cores obtidas com a simulação AddQSO para o SDSS não levam em conta a correção de extinção interna mencionada na seção 2.3 e descrita na seção 3.2. Os resultados da simulação foram agrupados de acordo com o desvio para o vermelho dos objetos. Em comparação com uma subamostra representativa do catálogo R09 com aproximadamente 5000 objetos, sem a correção de extinção há uma clara diferença de patamares entre as duas distribuições. Para quantificar a diferença de ponto zero, apresentamos na tabela 4.1 a média e o desvio padrão de cada uma das cores de R09 e daquelas simuladas pelo AddQSO sem a atenuação por extinção. O comportamento discreto dos pontos gerados pelo AddQSO decorre da falta de uma distribuição de erros fotométricos incorporados às cores. Para a geração de imagens simuladas da observação da DECam, isto é feito na hora da construção das imagens.

	R09		AddQSO	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio Padrão
$g - r$	0.24	0.06	-0.38	0.04
$r - i$	0.16	0.03	-0.24	0.01
$i - z$	0.10	0.04	-0.27	0.02

Tabela 4.1: Média e desvio padrão para as cores simuladas pelo AddQSO nas condições do SDSS sem a correção de extinção e as cores provenientes de uma amostra representativa de R09.

Apesar da diferença de ponto-zero, o comportamento geral dos objetos de acordo com

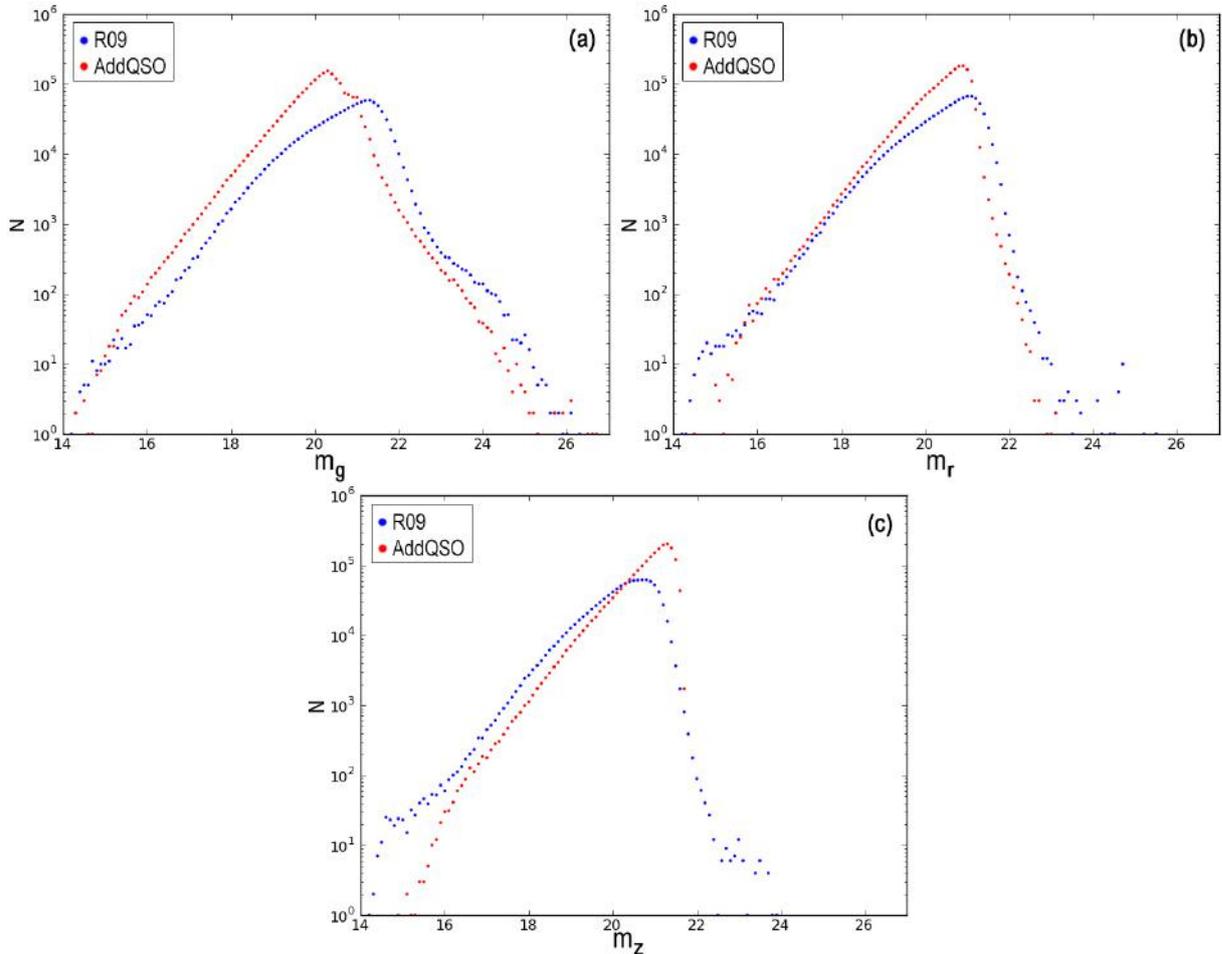


Figura 4.4: Comparação entre as contagens em m_g (painel a), m_r (painel b) e m_z (painel c) obtidas com o AddQSO (vermelho) e as do R09 (azul).

o desvio para o vermelho está satisfatório. Isso pode ser concluído através da observação da figura 4.6, que mostra o diagrama $g - r \times r - i$ para os objetos do catálogo de QSOs IV do SDSS (Schneider et al. 2007). Nessa figura podemos observar a evolução das cores com z e percebemos a concordância com os resultados obtidos com o AddQSO.

Após o resultado da figura 4.5, buscamos um mecanismo de avermelhamento para tentar resolver a diferença de ponto zero. Assim, aplicamos a correção de extinção interna e refizemos os diagramas cor-cor. Utilizamos apenas os objetos do AddQSO que estavam dentro dos limites de magnitude do SDSS, a saber: $m_g < 22.2$, $m_r < 22.2$, $m_i < 21.3$ e $m_z < 20.5$. Isso significa que no diagrama $g - r \times r - i$, por exemplo, todos os QSOs têm m_g , m_r e m_i dentro dos limites, porém nenhuma imposição foi feita sobre m_z . A imposição de magnitudes limites nas diversas bandas fez com que o número total de objetos decrescesse 1% no caso do diagrama $g - r \times r - i$ e 78.5% no diagrama $r - i \times i - z$. O resultado pode ser visto na figura 4.7.

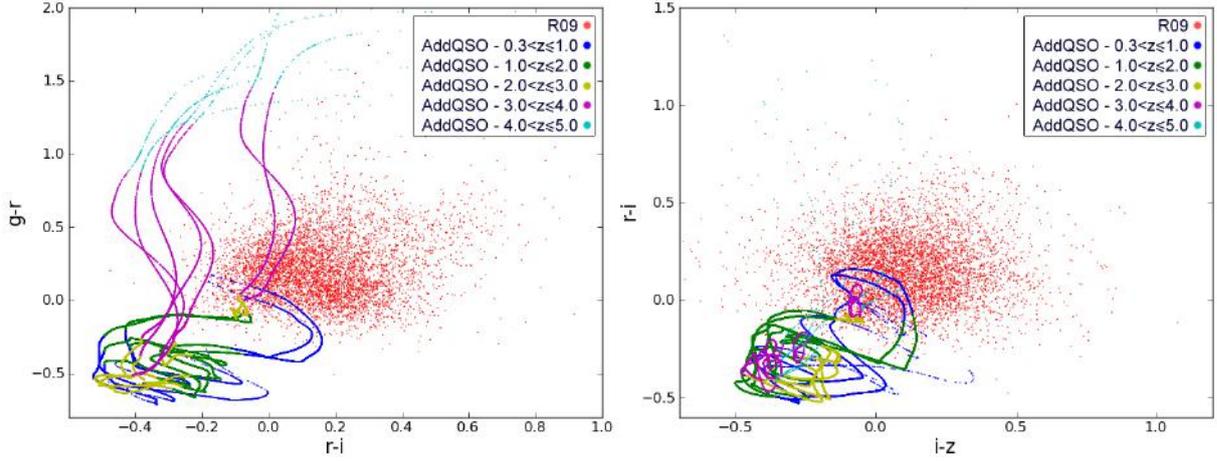


Figura 4.5: Diagramas cor-cor dos dados do catálogo R09 (vermelho) e dos QSOs simulados pelo AddQSO nas condições do SDSS sem atenuação por extinção. Os objetos gerados pela simulação foram agrupados de acordo com seus desvios para o vermelho e separados pelas diferentes cores.

O acréscimo da extinção interna causa um espalhamento nos índices de cor obtidos com o AddQSO. Na figura 4.7, verifica-se que a forma básica observada nos diagramas que não apresentam a correção se repete em direção a índices mais vermelhos conforme o valor de E_{B-V} aumenta. Para quantificar a diferença causada pela atenuação por extinção interna, novamente calculamos a média e o desvio padrão para as cores do AddQSO. O resultado pode ser observado na tabela 4.2. Há dois valores para a cor $r - i$, pois há quantidades diferentes de objetos nos diagramas $g - r \times r - i$ (o que gerou a média $r - i^*$) e $r - i \times i - z$ (que gerou a média $r - i^{**}$). Na figura 4.8, resumimos o resultado das tabelas 4.1 e 4.2 e mostramos a média e desvio padrão de cada conjunto de dados (R09, AddQSO sem correção de extinção e AddQSO com correção de extinção) em ambos os diagramas cor-cor para melhor avaliarmos a evolução dos resultados. Nota-se alguma melhora em relação ao resultado sem correção de extinção, porém ainda há uma diferença entre as médias do AddQSO e de R09.

	AddQSO	
	Média	Desvio Padrão
$g - r$	-0.30	0.06
$r - i^*$	-0.19	0.02
$r - i^{**}$	-0.22	0.03
$i - z$	-0.18	0.04

Tabela 4.2: Média e desvio padrão para as cores simuladas pelo AddQSO nas condições do SDSS com a correção de extinção.

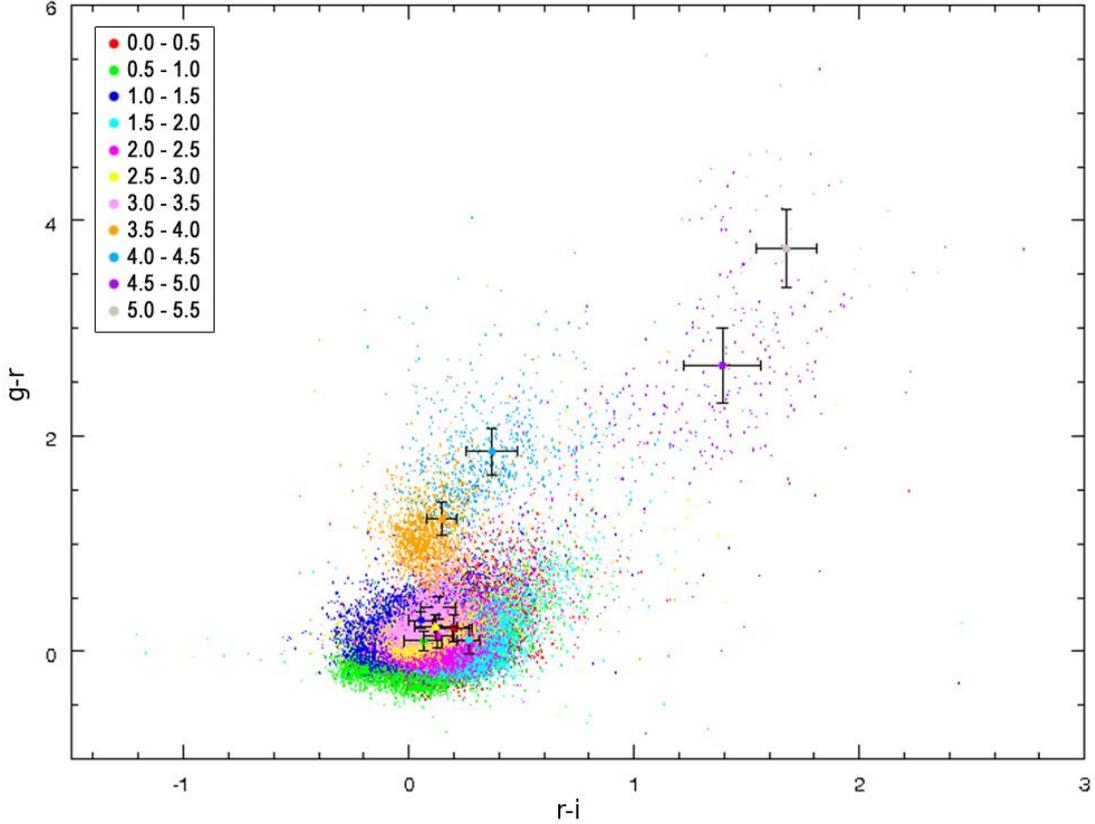


Figura 4.6: Diagrama cor-cor $g - r \times r - i$ dos objetos do catálogo de QSOs IV do SDSS separados em intervalos de desvios para o vermelho. As cruzes pretas sinalizam as cores médias em cada intervalo de z e o desvio padrão.

Se considerássemos a extinção interna como único fator de avermelhamento nos QSOs, teríamos que afirmar após a observação dos resultados com o AddQSO que, em média, QSOs apresentam extinção por volta de $E_{B-V} \approx 0.30$. Isso fica claro na figura 4.9 que mostra apenas os valores de $E_{B-V} = \{0.25, 0.30, 0.35\}$ presentes anteriormente na figura 4.7, que melhor coincidem com a mostra de R09. Apesar disso, a própria distribuição obtida com o algoritmo LePHARE para o catálogo de QSOs V do SDSS e mostrada na figura 3.1 contradiz a sugestão de que QSOs possuem extinções significativas, uma vez que a maioria (63%) dos objetos daquela amostra apresenta $E_{B-V} \approx 0.00$.

Um resultado importante sobre amostras de QSOs com extinção interna foi apresentado por Richards et al. (2003) que afirmam que o SDSS é sensível apenas a QSOs com extinção interna com $E_{B-V} < 0.50$, quando se considera uma curva de extinção similar a da SMC. Conclusão similar foi obtida por Hopkins et al. (2004). No trabalho de Richards et al. (2003) estima-se, inclusive, que $\approx 15\%$ dos objetos com pequeno desvio para o vermelho e $M_i < -25.61$ ficam fora de uma amostra do SDSS devido à extinção.

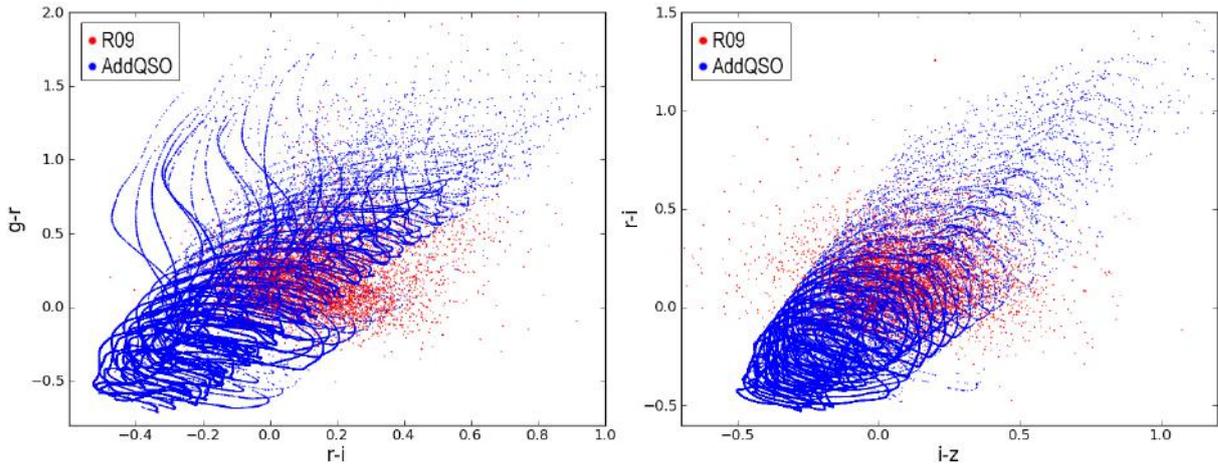


Figura 4.7: Diagramas cor-cor dos dados do catálogo R09 (vermelho) e dos QSOs simulados pelo AddQSO nas condições do SDSS com atenuação por extinção (azul).

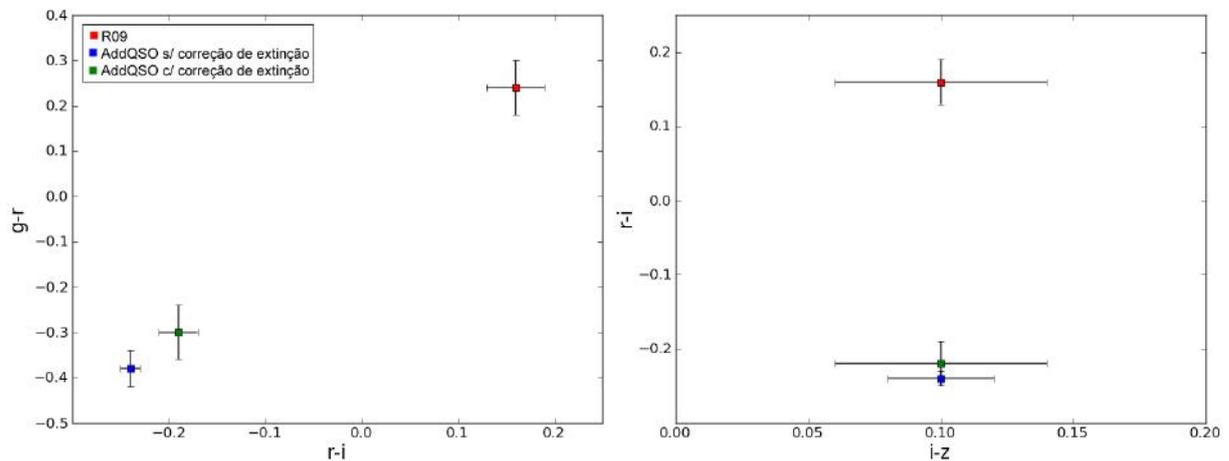


Figura 4.8: Média e desvio padrão para as cores simuladas pelo AddQSO nas condições do SDSS sem a correção de extinção (azul), com correção de extinção (verde) e as cores provenientes de uma amostra representativa de R09 (vermelho).

Esse resultado irá se refletir tanto no levantamento que produziu a amostra de R09, que estamos usando como comparação, como na amostra que gerou a distribuição de E_{B-V} , que também pertence ao SDSS e sofre limites ainda maiores de seleção, uma vez que todos os objetos são espectroscopicamente confirmados e que portanto não representam uma amostra representativa da população de QSOs. Portanto, as cores do catálogo R09 e do catálogo de QSOs V devem refletir critérios de seleção e, adicionalmente, o limite imposto sobre a banda i propicia a seleção de objetos menos avermelhados.

Contudo, se considerármos que no catálogo R09 temos apenas objetos de menor extinção e que, de acordo com a distribuição da figura 3.1 a maioria desses objetos apresenta $E_{B-V} = 0.00$, o problema de ponto zero não é resolvido apenas acrescentando uma

extinção média de $E_{B-V} \approx 0.30$, que não tem nenhuma motivação oferecida pelos dados reais. Independentemente de QSOs com menor extinção serem preferidos no catálogo de R09, seu locus no diagrama cor-cor não iria coincidir com o locus dos QSOs de mesmo índice E_{B-V} obtidos com o AddQSO. A hipótese é de que eles seriam mais vermelhos, o que significaria uma permanência do problema de ponto-zero da cor. Sendo assim, duas possibilidades para explicar a defasagem observada na distribuição de cor sem a correção de extinção interna são: a falta de acréscimo de outros mecanismos de avermelhamento; e um problema na geração das magnitudes m_g , m_r e m_z .

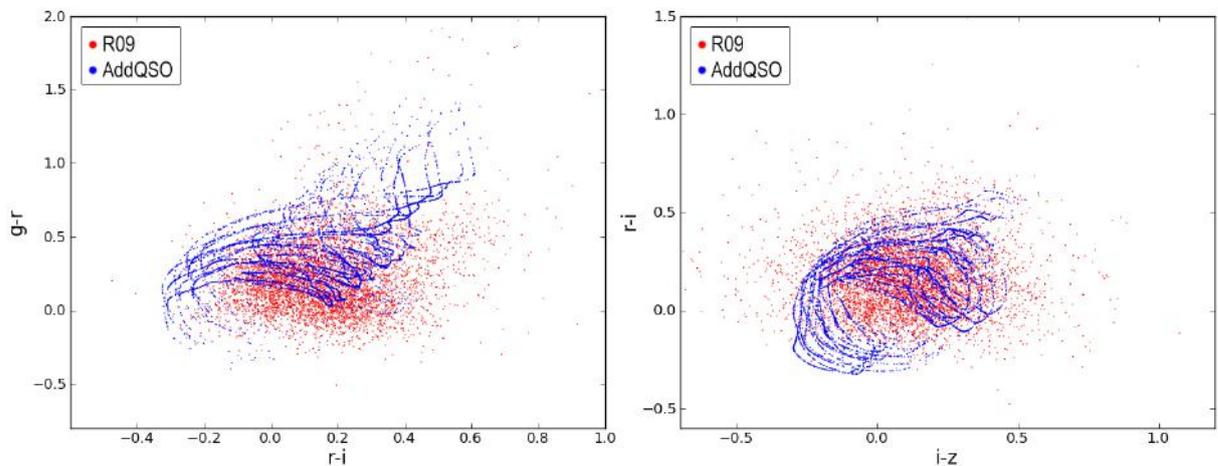


Figura 4.9: Diagramas cor-cor dos dados do catálogo R09 (vermelho) e dos QSOs simulados pelo AddQSO nas condições do SDSS com atenuação por extinção (azul). Os dados simulados mostram apenas três valores de $E_{B-V} = \{0.25, 0.30, 0.35\}$, que melhor coincidem com os dados de R09.

4.2 DES - previsão para uma área de 880 graus quadrados

Uma vez completo, o DES terá observado 5000 graus quadrados de céu. Porém, como primeira simulação, consideramos uma área de 880 graus quadrados, que é compatível com a área utilizada pelas simulações da colaboração até o momento. As condições adotadas nesta simulação envolvem intervalos de magnitudes absolutas e desvios para o vermelho de $-30.0 \leq M_i \leq -23.5$ e $0.3 \leq z \leq 9.0$, respectivamente. O intervalo escolhido de M_i foi baseado no limite da própria QLF de Richards et al. (2006). Na literatura surgem outros limites para a magnitude dos QSOs menos brilhantes. No trabalho de Croom et al. (2009), é calculada a QLF para pequenos desvios para o vermelho, considerado um limite

de magnitude absoluta na banda g de $M_g(z = 2) = -21.5$. Utilizando as conversões entre magnitudes descritas em Richards et al. (2006), concluímos que esse limite equivale, na banda i , a $M_i(z = 0) = -21.16$. Já no trabalho de Fontanot et al. (2007), é medida a QLF para grandes desvios para o vermelho e o limite inferior de magnitude absoluta em 1450 \AA é tal que $M_{145} = -21$. Novamente usando as conversões de Richards et al. (2006), obtemos um valor limite equivalente a $M_i(z = 0) = -21.89$. Sendo assim, a extrapolação do intervalo de magnitude absoluta, apesar de não utilizada neste trabalho, não deve ser descartada em outros testes.

Com o algoritmo 1, obtivemos z , M_i e m_i para $\approx 2.1 \times 10^6$ objetos. O desvio para o vermelho máximo obtido no teste foi $z = 6.53$ e a distribuição desse parâmetro pode ser vista na figura 4.10. Assim como na simulação AddQSO para o SDSS, novamente vemos o comportamento da densidade de QSOs que aumenta até $z \approx 2.2$, voltando a diminuir depois desse patamar. As contagens na banda i podem ser vistas na figura 4.11 e nela podemos observar que foram gerados objetos acima do limite observacional do DES de $i = 24.6$. O máximo da distribuição se deu em $m_i \approx 22.5$.

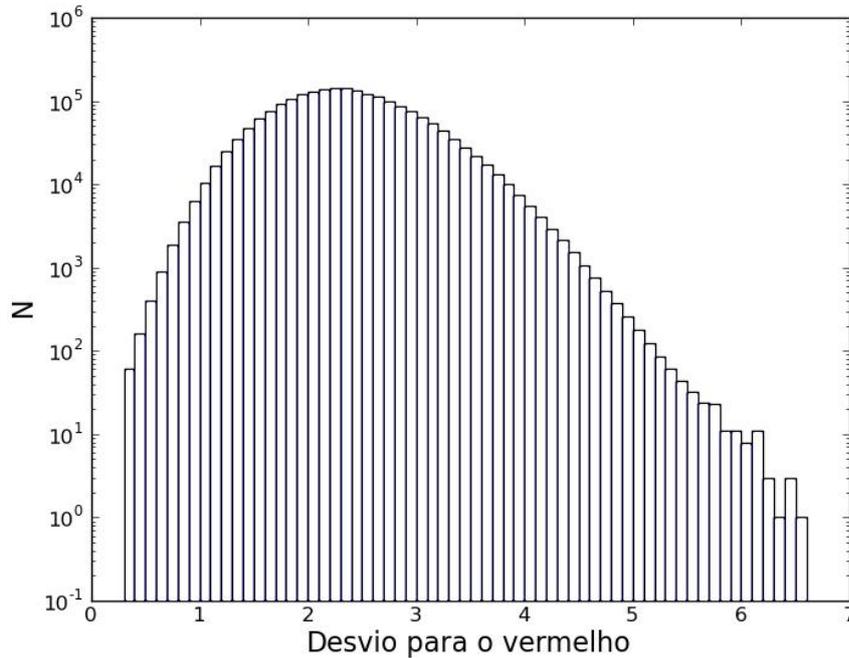


Figura 4.10: Distribuição de desvio para o vermelho obtida com a simulação AddQSO para o 880 graus quadrados do DES.

Apesar de termos QSOs gerados com $m_i > 24.6$, utilizamos todos os objetos como entrada para o algoritmo 2 e a geração das magnitude m_g , m_r , m_z e m_Y , associadas aos filtros apresentados na figura 1.6. As contagens nessas bandas podem ser vistas na figura

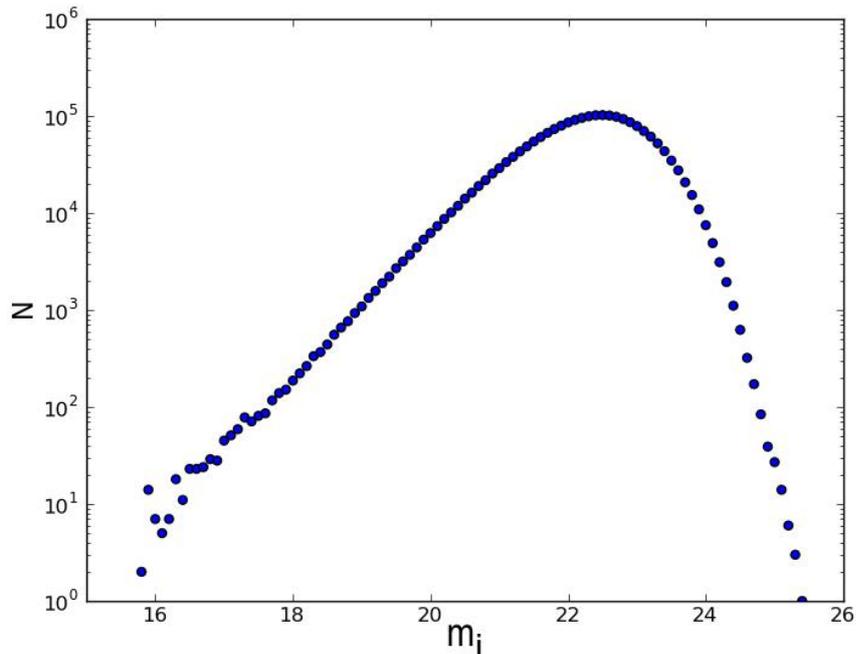


Figura 4.11: Contagens na banda i para a simulação AddQSO para o 880 graus quadrados do DES.

4.12 e novamente podemos observar que foram geradas, em cada uma das bandas, objetos acima do limite observacional do levantamento. Na tabela 4.3 temos o número de objetos que seriam observáveis em cada uma das cinco bandas dentro de diferentes intervalos de z . Um QSO observável numa dada banda não necessariamente será identificado em uma outra banda, uma vez que elas têm profundidades diferentes e que o espectro do QSO segue diferentes SEDs. Além disso, objetos com maiores desvios para o vermelho não são identificados nas bandas mais azuis, porém o são nas bandas mais vermelhas. Isso é esperado, pois a grandes desvios para o vermelho, a floresta de Lyman α sofre um desvio que a coloca em comprimentos de onda consistentes com, por exemplo, os das bandas g e r , tornando os QSOs *dropouts* nessas bandas. Essa tendência é esboçada na tabela 4.3 para o intervalo de desvio para o vermelho $5.0 \leq z < 6.0$, onde não há objetos identificados na banda g , apenas 11 objetos identificados na banda r e mais de 300 na banda i . De forma similar, em $z \geq 6.0$, onde não há objetos nas bandas g e r , mas há na banda i . Um dos motivos pelo qual os números não continuam a aumentar nas bandas z e Y é justamente a profundidade dessas bandas, que é menor que a da banda i .

Assim como nos testes do SDSS na seção anterior, também fizemos diagramas cor-cor com resultados do AddQSO para as condições observacionais do DES, que podem ser vistos na figura 4.13. Novamente deve ser chamada atenção ao fato das cores não

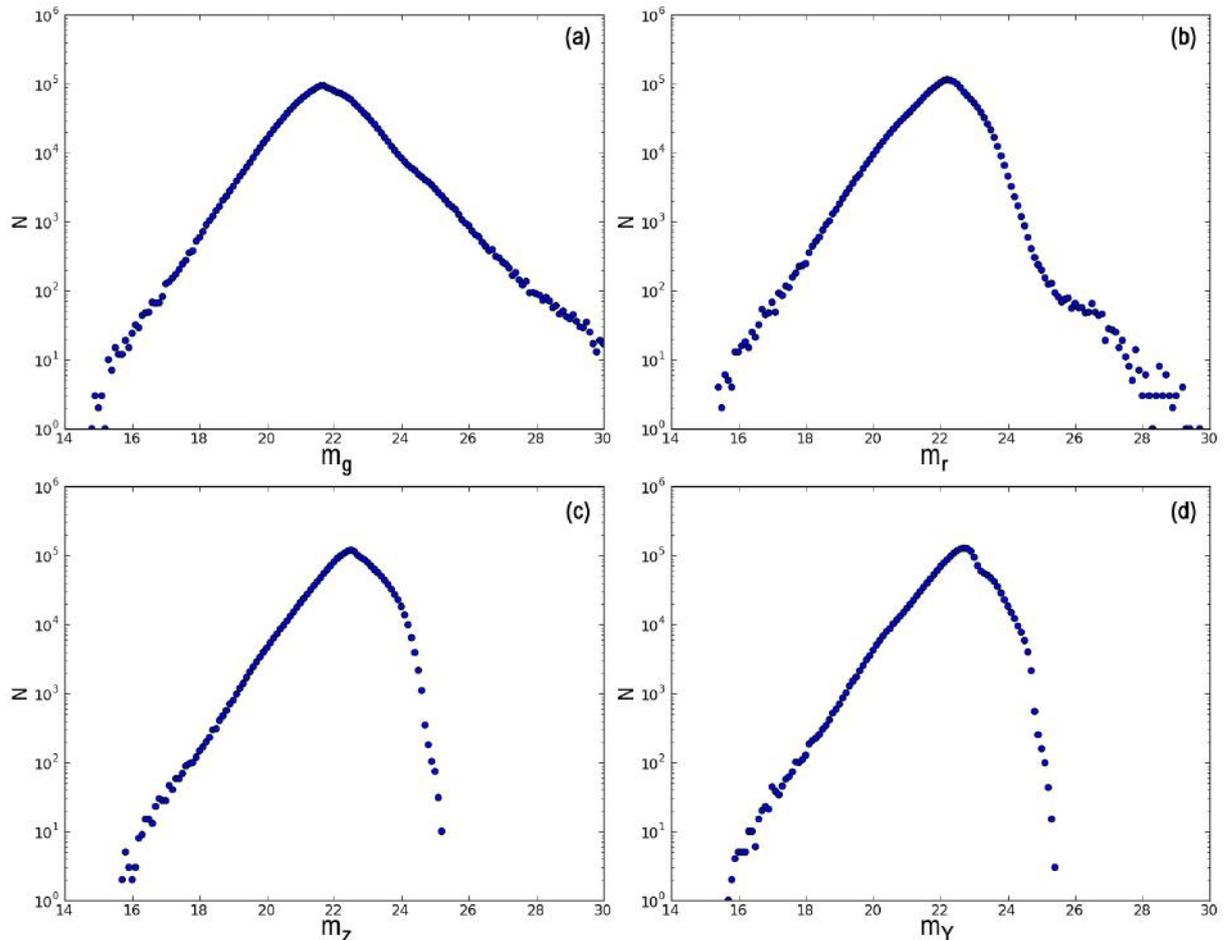
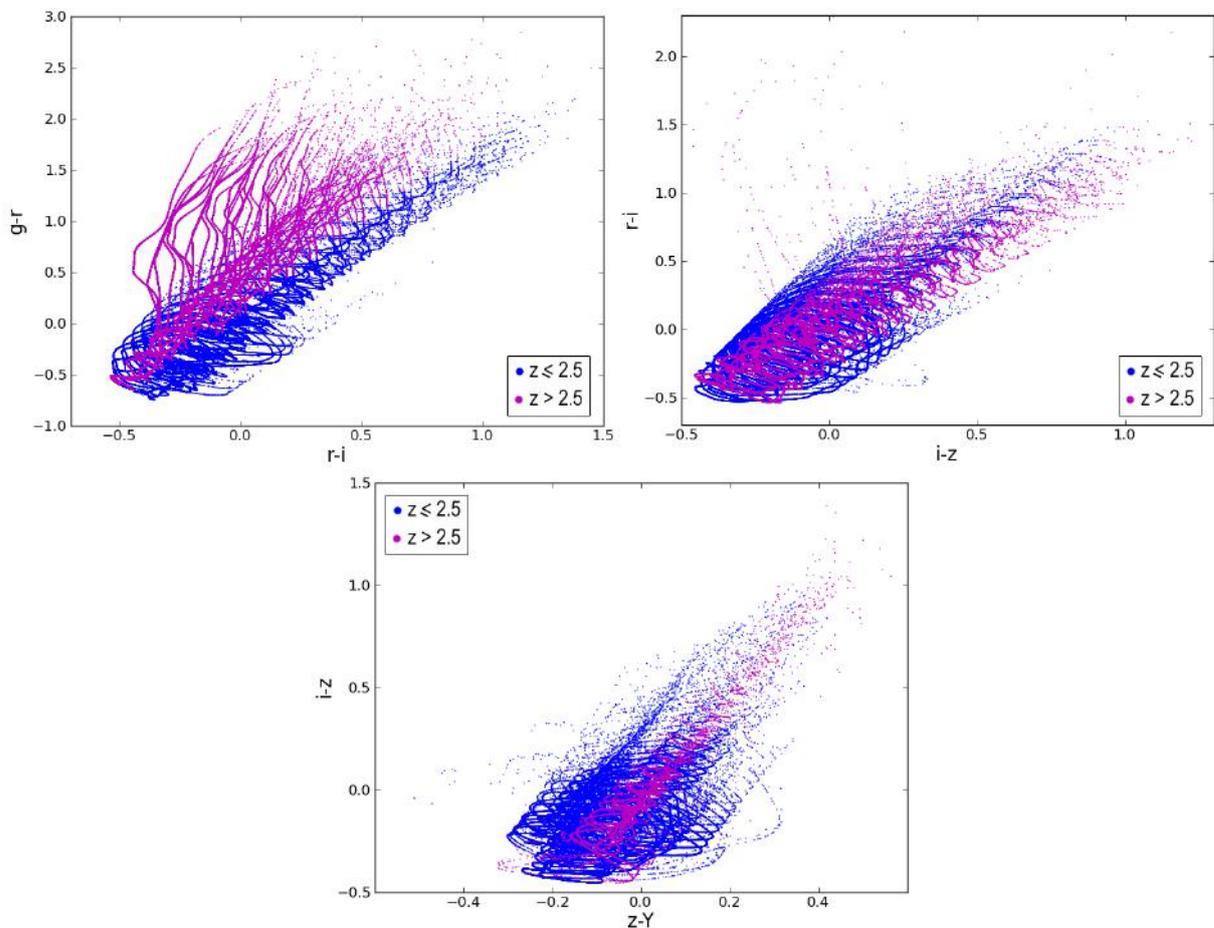


Figura 4.12: Contagens nas bandas g (painel a), r (painel b), z (painel c) e Y (painel d) para a simulação AddQSO para o 880 graus quadrados do DES.

apresentarem erros fotométricos e que, portanto, temos uma distribuição relativamente discreta na qual se pode distinguir o uso de diferentes SEDs e valores de E_{B-V} . Como consequência da aplicação da correção de extinção surge, aqui também, grande espalhamento dos pontos. Nos diagramas, como na seção 4.1, há apenas pontos dentro dos limites de magnitude nas cores utilizadas. Apesar do espalhamento, o comportamento geral dos objetos de acordo com o desvio para o vermelho está de acordo com o observado na figura 4.6. Podemos perceber a concordância entre os dados do SDSS com os resultados obtidos com o AddQSO mesmo levando em conta pequenas diferenças nas características dos filtros para estes dois levantamentos.

Intervalo de z	Total	$g \leq 25.4$	$r \leq 24.9$	$i \leq 24.6$	$z \leq 23.8$	$Y \leq 21.7$
$0.3 \leq z < 1.0$	1.32×10^4					
$1.0 \leq z < 2.0$	5.88×10^5	2.04×10^5				
$2.0 \leq z < 3.0$	1.17×10^6	7.94×10^4				
$3.0 \leq z < 4.0$	2.92×10^5	2.88×10^5	2.92×10^5	2.92×10^5	2.02×10^5	3.92×10^3
$4.0 \leq z < 5.0$	1.91×10^4	8.81×10^3	1.78×10^4	1.87×10^4	4.70×10^3	110
$5.0 \leq z < 6.0$	593	0	11	321	110	0
$z \geq 6.0$	27	0	0	2	9	4
Total (aprox.)	2.09×10^6	2.07×10^6	2.09×10^6	2.09×10^6	1.98×10^6	3.00×10^5

Tabela 4.3: Identificações em intervalos de z em cada uma das bandas do DES.Figura 4.13: Diagramas cor-cor obtidos com a simulação AddQSO para o DES. Os pontos azuis representam objetos de pequeno desvio para o vermelho ($z \leq 2.5$) e os pontos roxos representam QSOs de grande z ($z > 2.5$).

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas

Com os dados do Dark Energy Survey, um grande avanço poderá ser feito no estudo de QSOs, em especial naqueles de grandes desvios para o vermelho. Antes do levantamento começar, no entanto, é importante que todas as ferramentas de análise estejam prontas de forma a permitir a seleção de candidatos a QSO e o cálculo de parâmetros como, por exemplo, o desvio para o vermelho fotométrico. Para testar essas ferramentas e fazer previsões dos dados a serem coletados, foi desenvolvido o algoritmo AddQSO que simula um catálogo de QSOs baseado em uma função de luminosidade e em distribuições espectrais de energia desses objetos.

Para a validação do AddQSO, fizemos uma simulação com filtros e parâmetros do SDSS a ser comparada com os resultados de Richards et al. (2009). Com esse teste, pudemos concluir:

- as contagens na banda i apresentam uma boa concordância entre o catálogo simulado e o catálogo real, sugerindo que a geração da magnitude m_i está com funcionamento correto;
- as contagens na banda r também mostraram boa concordância entre os catálogos;
- as contagens das bandas g e z discrepantes do catálogo R09. Entre as causas podemos citar efeitos observacionais e problemas de seleção em R09. Outros testes e a geração de erros devem ser feitas para que possamos confirmar a real causa das discrepâncias;
- nos diagramas cor-cor, observamos uma defasagem no ponto zero causada pela adoção de um mecanismo pouco eficaz de avermelhamento;

- a distribuição de desvios para o vermelho dos QSOs simulados segue a tendência evolutiva com os índices de cor, o que mostra que a discrepância nos diagramas cor-cor é apenas de ponto zero;
- ainda nos diagramas cor-cor, ocorreu um espalhamento nas cores simuladas decorrente dos diferentes valores de E_{B-V} .

Também realizamos uma simulação para obter previsões para uma área de 880 graus quadrados do DES. Apesar de uma comparação com a literatura não ter sido apresentada, podemos concluir com este teste:

- o comportamento da distribuição de desvio para o vermelho, com a presença do pico de densidade em $z \approx 2.2$ está de acordo com o esperado dado o que sabemos sobre o comportamento dos QSOs;
- as contagens em m_i foram satisfatórias, porém um aumento nos limites de integração da QLF impostos sobre a magnitude absoluta i deve tornar a magnitude aparente mais profunda;
- a falta de objetos com $z > 6.5$ não é de todo estranha, uma vez que utilizamos uma área relativamente pequena e que a banda i não é a ideal para identificar tais objetos;
- as cores geradas nessa simulação apresentaram o mesmo espalhamento visto no teste de validação com o SDSS, o que reforça a necessidade de um mecanismo mais adequado de avermelhamento;
- o comportamento dos QSOs de pequeno e grande desvio para o vermelho, assim como nos testes de validação, segue a tendência evolutiva com os índices de cor.

No futuro, nosso foco será voltado para a resolução da questão de avermelhamento e diferença no patamar das cores. Devemos adicionar ao programa novos efeitos de avermelhamento como, por exemplo, a presença de um contínuo intrinsecamente vermelho e a absorção intergaláctica. Também se torna crucial levar em consideração efeitos de seleção de SEDs. Budavári et al. (2001) menciona fatores que aparentemente causam preferência por determinadas SEDs e, além disso, a própria distribuição de E_{B-V} obtida com o

LePHARE para o catálogo de QSOs V do SDSS deve ser melhor avaliada, buscando-se outros tipos de relação como, por exemplo, entre E_{B-V} e magnitudes.

Há também a necessidade de acrescentarmos aos QSOs gerados pelo AddQSO parâmetros de posição, RA e Dec, de acordo com a área do DES ou do levantamento sendo simulado. Adicionalmente, se torna imprescindível a geração de erros fotométricos a serem acrescentados às magnitudes geradas para que tenhamos uma distribuição de cor mais realista (que não seja tão discreta como foi observado) e para que possamos fazer uma previsão mais precisa dos números a esperados pelo DES.

Para as futuras implementações do AddQSO, há planos de testarmos outras QLF, como uma união da função de pequeno desvio para o vermelho de Croom et al. (2009) com a de grande z de Fontanot et al. (2007). Além disso, consideramos acrescentar outros modelos à biblioteca de SEDs como, por exemplo, aqueles presentes no pacote do algoritmo LePHARE. Em breve, também deveremos implementar os filtros do VHS no infravermelho.

Finalmente, devemos desenvolver um método de seleção de QSOs dentro de uma amostra de objetos pontuais que irá conter contaminantes como estrelas e galáxias compactas. A seleção de objetos será uma etapa decisiva na obtenção de candidatos a QSOs e na descoberta de novos objetos e provavelmente será feita através da união de vários métodos como seleção por cor, ajuste de distribuição espectral de energia, etc.

Em 2011 estarão disponíveis, para os membros da colaboração do DES, dados obtidos com o levantamento da PreCam. A PreCam é uma câmera que utiliza os CCDs da DECam montada no telescópio Curtis-Schmidt, localizado no CTIO. Este levantamento servirá como calibrador fotométrico primário para o DES. A PreCam seguirá o footprint do DES, porém será mais rápido e só atingirá os limites de magnitude de $g = 20.9$, $r = 20.7$, $i = 20.5$, $z = 20.1$ e $Y = 18.5$ e será capaz de detectar QSOs de desvios para o vermelho pequenos e intermediários ($z \approx 4$). Faremos simulações atendendo às condições observacionais do levantamento PreCam.

Ainda em 2011, durante o segundo semestre, se iniciará a fase de comissionamento do DES. A partir de 2012, teremos dados do levantamento principal disponíveis, inclusive uma área pequena onde a profundidade atingida será a do DES ao final do levantamento. Esperamos identificar os QSOs nesta região.

Referências

- Abbott, T., Aldering, G., Annis, J. et al. 2005, arXiv:astro-ph/0510346
- Annis, J., Bridle, S., Castander, F. J. et al. 2005, arXiv:astro-ph/0510195v1
- Bennett, A. S. 1962, *Mem. R.A.S.*, 68, 163
- Bouchet, P., Lequeux, J., Maurice, E., Prévot, L., Prévot-Burnichon M.L. 1985, *A&A*, 149, 330
- Boyle, B. J., Fong R., Shanks T., Peterson B. A. 1990, *MNRAS*, 243, 1
- Boyle, B. J., Shanks, T., Croom, S. M. et al. 2000, *MNRAS*, 317, 1014
- Boyle, B. J., Shanks, T., Peterson, B. A. 1988, *MNRAS*, 235, 935
- Brotherton, M. S., Tran, H. D., Becker, R. H. et al. 2001, *ApJ*, 546, 775
- Budavári, T., Csabai, I., Szalay, A. S., et al. 2001, *AJ*, 122, 1163
- Croom, S. M., Richards, G. T., Shanks, T. et al. 2009, *MNRAS*, 399, 1755
- Di Matteo, T., Springel V., Hernquist L. 2005, *Nature*, 433, 604
- Edge, D. O., Shakeshaft, J. R., McAdam, W. B., Baldwin, J. E., Archer, S. 1959, *Mem. R.A.S.*, 68, 37
- Fan, X. 1999, *AJ*, 117, 2528
- Fan, X., Strauss, M. A., Schneider, D. P., et al. 2001, *AJ*, 121, 54
- Fontanot, F., Cristiani, S., Monaco, P. et al. 2007, *A&A*, 461, 39
- Francis, P. J., Whiting, M. T., Webster, R. L. 2000, *Publ. Astron. Soc. Australia*, 17, 56
- Gallerani, S., Maiolino, R., Juarez, Y. et al. 2010, *A&A*, 523, A85
- Giavalisco, M., Ferguson, H. C., Koekemoer, A. M., et al. 2004, *ApJ*, 600, L93
- Greenstein, J. L., Matthews, T. A. 1963, *AJ*, 68, 280
- Goldschmidt, P., Miller L., 1998, *MNRAS*, 293, 107
- Gregg, M. D., Lacy, M., White, R. L. et al. 2002, *ApJ*, 564, 133
- Hewett, P. C., Foltz, C. B., Chaffee, F. H. 1993, *ApJ*, 406, L43
- Hong-Yee Chiu 1964, *Phys. Today*, 17

- Hopkins, P. F., Strauss, M. A., Hall, P. B. et al. 2004, AJ, 128, 1112
- Hopkins, P. F., Hernquist, L., Cox, T. J. et al. 2005, ApJ, 630, 716
- Ilbert, O., Arnouts, S., McCracken, H.J., et al. 2006, A&A, 457, 841
- Kaiser, N., Aussel, H., Burke, B. E. et al. 2002, in Proc. SPIE 4836, Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries, ed. J. A. Tyson & S. Wolff (Bellingham, WA: SPIE), 154
- Kauffmann, G., Haenelt, M. 2000 MNRAS, 311, 576
- Kennefick, J. D., Djorgovski, S. G., de Carvalho, R. R. 1995, AJ, 110, 2553
- Koo, D. C., Kron, R. G. 1988, ApJ, 325, 92
- Kormendy, J., Richstone D., 1995, ARA&A, 33, 581
- Matthews, T. A., Sandage, A. R. 1963, AJ, 138, 30
- Mortlock, D. J., Patel, M., Warren, S. J. et al 2008, arXiv:0810.3859v1
- Osmer, P., 1982, ApJ, 253, 28
- Prévot, M. L., Lequeux, J., Prévot, L., Maurice, E., Rocca-Volmerange, B. 1984, A&A, 132, 389
- Reid, I. N., Brewer, C., Brucato, R. J. et al. 1991, PASP, 103, 661
- Richards, G. T., Hall, P. B., Vanden Berk, D. E. et al. 2003, AJ, 126, 1131
- Richards, G. T., Myers, A. D., Gray, A. G. et al. 2009, ApJS, 180, 67
- Richards, G. T., Strauss, M. A., Fan, X. et al. 2006, AJ, 131, 2766
- Ruhla, J. E., Adeb, P. A. R., Carlstrom, J. E. et al. 2004, arXiv:astro-ph/0411122v1
- Sanders, D. B., Soifer B. T., Elias J. H., Neugebauer G., Matthews K., 1988, ApJ, 328, L35
- Schmidt, M. 1963, Nature, 197, 1040
- Schmidt, M. 1968, ApJ, 151, 393
- Schmidt, M., Green, R. F. 1983, ApJ, 269, 352
- Schmidt, M., Schneider, D. P., Gunn, J. E. 1995, AJ, 110, 68
- Schneider, D. P., Hall, P. B., Richards, G. T. et al. 2007, AJ, 134, 102
- Schneider, D. P., Richards, G. T., Hall, P. B. et al. 2010, AJ, 139, 2360
- Schneider, D. P., Schmidt M., Gunn, J. E. 1994, AJ, 107, 1245
- Schneider, Peter (2006), *Extragalactic astronomy and cosmology : an introduction*. Berlin: Springer.
- Songaila, A. 2004, AJ, 127, 2598

Sparke, Linda e Gallagher, John (2007), *Galaxies in the Universe: an introduction*. New York: Cambridge University Press.

Tremaine, S., Gebhardt, K., Bender, R. et al., 2002, ApJ, 574, 740

Tyson, J. A. 2002, in Proc. SPIE 4836, Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries, ed. J. A. Tyson & S. Wolff (Bellingham, WA: SPIE), 10

Venemans, B. P., McMahon, R. G., Warren, S. J. et al. 2007, MNRAS, 376, L76

Warren, S. J., Hewett, P. C., Osmer, P. S. 1994, ApJ, 421, 412

Webster, R. L., Francis, P. J., Peterson, B. A. et al 1995, Nature, 375, 469

Weinstein, M. A., Richards, G. T., Schneider, D. P. et al 2004, ApJS, 155, 243

Willott, C. J., Delorme, P., Omont, A. et al. 2007, AJ, 134 2435

White, R. L., Helfand, D.J., Becker, R. H. et al. 2003, AJ, 126, 706

York, D. G., Adelman, J., Anderson, J. E. Jr. et al. 2000, AJ, 120, 1579