

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMIA

**Testando as Propriedades Físicas
do Modelo Unificado de Galáxias
de Núcleo Ativo**

Anelise Audibert

Monografia realizada sob orientação do Prof. Dr. Rogério Riffel e apresentada ao curso de Graduação em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Física.

Porto Alegre, RS, Brasil

Dezembro de 2012

Poets say science takes away from the beauty of the stars — mere globs of gas atoms. Nothing is "mere". I too can see the stars on a desert night, and feel them. But do I see less or more? The vastness of the heavens stretches my imagination — stuck on this carousel my little eye can catch one-million-year-old light. A vast pattern — of which I am a part... What is the pattern or the meaning or the why? It does not do harm to the mystery to know a little more about it.

Richard P. Feynmann

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente à minha mãe, Silvia, que sempre apoiou as minhas escolhas e esteve ao meu lado nos períodos mais confusos e difíceis. Muito obrigada por acreditar em mim, tu és a minha inspiração e serei sempre grata à ti. Também agradeço à minha avó, Saldira, pelo amor e carinho. Vocês são um exemplo em minha vida!

Quero agradecer à minha família, por ser sempre tão acolhedora, e que contribuiu para esta etapa da minha vida, apesar da distância.

Agradeço ao meu namorado, Jonas, que mesmo não sabendo, teve grande importância na minha opção pelo curso de Física. Quando conversávamos sobre experimentos, teorias e explicações da natureza, meus olhos brilhavam de motivação.

Agradeço ao meu amigo e orientador, professor Dr. Rogério Riffel, pelas imensas discussões sobre o trabalho e por acreditar em mim. Este trabalho é fruto do incentivo e motivação que sempre dedicaste ao longo desses 2 anos. Obrigada pela compreensão e pelo companheirismo.

E agradeço também aos meus amigos, que ajudam a colorir a minha vida, e se fazem presentes tanto nos momentos de alegria quanto nos mais precisos.

Resumo

De acordo com o Modelo Unificado (MU), a energia das Galáxias de Núcleo Ativo (AGNs) é gerada através da acreção de matéria por um buraco negro supermassivo. O MU ainda propõe que o buraco negro supermassivo e a região de linhas largas estão envoltos por um toroide de poeira e que as diferentes classes de AGNs são resultado da visualização da estrutura toroidal por diferentes ângulos de visada. Estudos recentes contestam a formulação do MU no que se refere às propriedades físicas e geométricas do toróide, se sua geometria é o tradicional “donut” de gás e poeira ou se o material constituinte do toroide é distribuído em forma de nuvens. O objetivo do nosso trabalho é fazer uma análise estatística dos parâmetros físicos do toroide para uma amostra de ~ 100 galáxias Seyfert utilizando dados públicos do telescópio Spitzer no infravermelho médio ($5.2 - 38\mu m$). As distribuições espectrais de energia (SEDs) das galáxias Seyfert foram comparadas com SEDs teóricas ($\sim 10^6$) do modelo CLUMPY, que consideram que o toróide é formado por nuvens de poeira. Apresentamos os resultados para os seguintes 8 parâmetros: ângulo de inclinação do observador, i , número de nuvens no equador toroidal, N_0 , número de nuvens ao longo da linha de visada, N_{obs} , profundidade óptica individual das nuvens, τ_V , índice da lei de potência para a distribuição espacial das nuvens, q , abertura angular do toroide, σ , extensão radial, Y , e a extinção visual produzida pelo toroide ao longo da linha de visada, A_V . Aparentemente o ângulo de inclinação é similar para as Seyfert 1 (Sy 1, $\bar{i}=76^\circ\pm 9^\circ$) e Seyfert 2 (Sy 2, $\bar{i}=71^\circ\pm 16^\circ$). Encontramos diferenças nos parâmetros geométricos do toroide, $\bar{\sigma}(\text{Sy 2})=59^\circ\pm 7^\circ$ e $\bar{Y}(\text{Sy 2})=55\pm 22$, $\bar{\sigma}(\text{Sy 1})=50^\circ\pm 10^\circ$ e $\bar{Y}(\text{Sy 1})=42\pm 20$, indicando que as Sy 2 podem ter um toroide ligeiramente maior. Esses 3 resultados não são esperados pelo MU tradicional, mas por outro lado, em concordância com o MU, obtivemos valores de A_V maiores para Sy 2 que para Sy 1. Os demais parâmetros, N_0 , N_{obs} , τ_V e q são praticamente os mesmos para ambas as classes, implicando que a estrutura toroidal é aproximadamente igual.

Abstract

According to the Unified Model (UM), the energy from Active Galactic Nuclei (AGN) is provided by the accretion of matter into a supermassive black hole (SMBH). The UM also suggests that different AGNs classes are due to the presence of a dusty torus, which under different view angles can obscure the SMBH and the broad line region. Recent studies contest the UM on the physical and geometrical properties of the torus, i. e., the traditional “donut” or if the matter is distributed in a clumpy medium arranged in a toroidal structure. Our goal is to study and to analyze statistically the physical parameters of a sample of about 100 Seyfert galaxies using public data from Spitzer telescope in the mid infrared ($5.2\text{-}38\ \mu\text{m}$). We compare the spectral energy distributions (SEDs) with $\sim 10^6$ theoretical SEDs which consider that the torus is formed by dusty clouds. We present the results for the following 8 parameters: the observers viewing angle, i , the number of clouds in the torus equatorial plane, N_0 , the number of clouds along the viewing angle, N_{obs} , the clouds individual optical depth, τ_V , the power law index for the spatial distribution of the clouds, q , the torus angular width, σ , the radial extension of the clumpy distribution, Y and the optical extinction produced by the torus along the line of sight, A_V . Apparently, the viewing angle is almost the same for Seyfert 1 (Sy 1, $\bar{i}=76^\circ\pm 9^\circ$) and Seyfert 2 (Sy 2, $\bar{i}=71^\circ\pm 16^\circ$). We found differences in the following geometrical parameters, $\bar{\sigma}(\text{Sy } 2)=59^\circ\pm 7^\circ$ and $\bar{Y}(\text{Sy } 2)=55\pm 22$, $\bar{\sigma}(\text{Sy } 1)=50^\circ\pm 10^\circ$ and $\bar{Y}(\text{Sy } 1)=42\pm 20$, indicating that Sy 2 galaxies may have a slightly larger torus. These 3 results are not expected by the traditional UM, on the other hand, in agreement with the UM we found A_V higher for Sy 2 than Sy 1. The other parameters, N_0 , N_{obs} , τ_V and q , are practically the same for both types and these results imply that the torus structures are nearly equal.

Abreviaturas

- AGN: Núcleo ativo de galáxias (*Active Galactic Nuclei*).
- BLR: Região de Linhas Largas (*Broad Line Region*).
- C_T : Fator de Preenchimento (*Covering Factor*).
- HST: Telescópio Espacial Hubble (*Hubble Space Telescope*).
- IRS: Espectrógrafo no Infravermelho (*Infrared Spectrograph*).
- LL: Fenda Longa de Baixa Resolução (*Long-Low*).
- MIR: Infravermelho Médio (*Mid-Infrared*).
- MU: Modelo Unificado de AGNs (*Unified Model for AGNs*).
- NED: Base de Dados da NASA/IPAC (*NASA/IPAC Extragalactic Database*).
- NRL: Região de Linhas Estreitas (*Narrow Line Region*).
- SED: Distribuição Espectral de Energia (*Spectral Energy Distribution*).
- SL: Fenda Curta de Baixa Resolução (*Short-Low*).
- SMBH: Buraco Negro Supermassivo (*Supermassive Black Hole*).
- UV: Ultravioleta (*Ultraviolet*).

Conteúdo

Conteúdo	VI
Lista de Figuras	1
1 Introdução	2
1.1 Núcleo Ativo de Galáxias	2
1.2 Galáxias Seyfert	3
1.3 Modelo Unificado de Galáxias de Núcleo Ativo	5
1.4 Motivação e Objetivos	8
2 Metodologia	9
2.1 Dados	9
2.2 Descrição do Modelo de Nuvens para o Toroide	11
2.3 Procedimentos	13
3 Resultados e Discussão	16
3.1 Análise dos Histogramas de Frequência	18
3.2 Fator de Preenchimento	24
3.3 Testes: Modelo CLUMPY como o Modelo Unificado Tradicional	27
4 Considerações Finais	32
4.1 Perspectivas	33
Bibliografia	34

Lista de Figuras

1.1	Espectro do quasar 3C273 em comparação ao espectro de uma galáxia elíptica.	3
1.2	Imagens em três tempos de exposição da galáxia NGC4151.	4
1.3	Esquematisação do Modelo Unificado de AGNs.	7
2.1	Espectros obtidos com o IRS no intervalo 5.2-38 μ m.	10
2.2	Distribuição da estrutura toroidal do modelo de <i>clumpiness</i>	12
2.3	Seleção dos intervalos equivalente à emissão do contínuo.	15
3.1	Soluções ajustadas ao espectro de Mrk662 para diferentes variações do χ^2	17
3.2	Comparação dos histogramas para diferentes tolerâncias para Seyfert 1 e Seyfert 2.	19
3.3	Histogramas para o ângulo de inclinação i	19
3.4	Histogramas para o número de nuvens no equador N_0	20
3.5	Histogramas para o número de nuvens observadas N_{obs}	20
3.6	Histogramas para o índice do perfil de densidade q	20
3.7	Histogramas para a profundidade óptica individual das nuvens τ_V	21
3.8	Histogramas para a extensão radial do toroide Y	21
3.9	Histogramas para a abertura angular toroidal σ	21
3.10	Histogramas para a extinção visual A_V	22
3.11	Gráfico de σ versus N_0 retirado de Ramos Almeida et al. (2011)	25
3.12	Gráfico de σ versus N_0 para as galáxias individuais.	26
3.13	Histogramas dos valores de χ^2 com restrição em i	28
3.14	Histogramas dos parâmetros físicos ao restringir i	29
3.15	Histogramas dos parâmetros físicos ao restringir i	30

Capítulo 1

Introdução

1.1 Núcleo Ativo de Galáxias

Núcleos ativos de galáxias (AGNs, do inglês *Active Galactic Nucleus*) são regiões compactas no centro de galáxias, que possuem luminosidade $L \geq 10^{11} L_{\odot}$ (Peterson, 1997). Sua distribuição espectral de energia (SED, do inglês *Spectral Energy Distribution*) pode abranger todo o intervalo espectral, desde comprimentos de onda de rádio até raios gama, ao contrário do observado em SEDs de galáxias normais, conforme podemos ver na Fig. 1.1. Em geral, as SEDs de galáxias normais se estendem numa estreita faixa de energia (de ~ 4000 - 20000 \AA) e sua maior contribuição é devida aos processos de fusão nuclear que ocorrem nos interiores estelares, ou seja, podemos considerar seus espectros como uma superposição de espectros estelares descritos pela função de Planck, cujas temperaturas superficiais das estrelas são da ordem de $3000 \leq T \leq 40000 \text{ K}$. Por outro lado, as SEDs de galáxias que possuem AGN apresentam luminosidades que podem alcançar valores 10^{10} vezes maiores do que a luminosidade típica de galáxias normais, portanto, os fenômenos físicos ocorrentes na região nuclear não podem ser explicados como sendo provenientes de processos térmicos, ou seja, ocorrentes dos núcleos estelares. Hoje, a maioria dos astrofísicos acreditam que a energia dos AGNs é de origem gravitacional e gerada a partir da acreção de matéria por um buraco negro supermassivo (SMBH, do inglês *supermassive black hole*, Antonucci & Miller, 1985).

Os AGNs são caracterizados por (Krolik, 1999, Peterson, 1997, Kitchin, 2007):

- Aparência estelar do núcleo, que pode emitir até $L \sim 10^{14} L_{\odot}$. Os AGNs podem emitir cerca de 100 vezes mais radiação do que a galáxia hospedeira inteira;

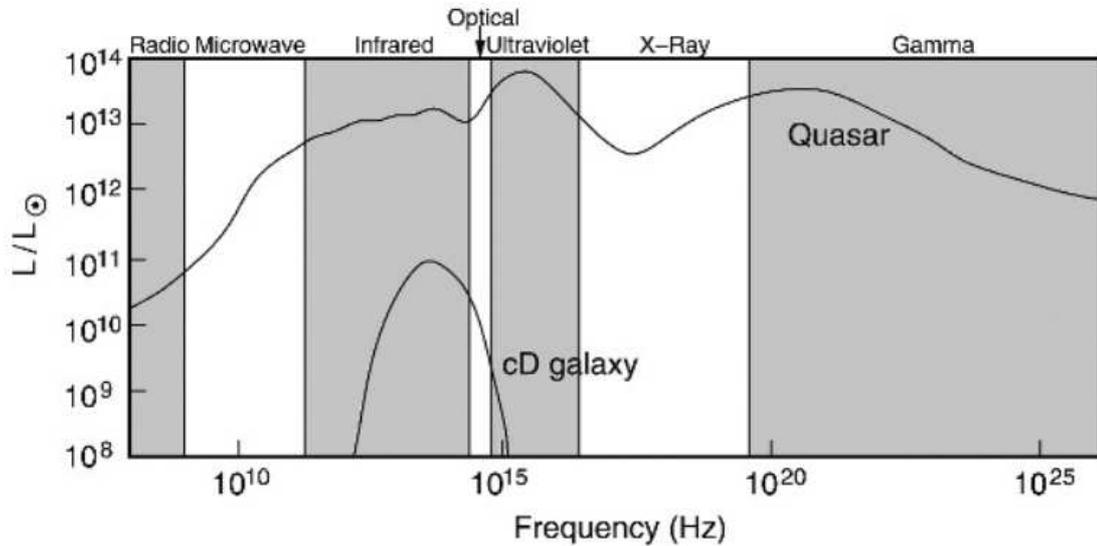


Figura 1.1: A emissão do quasar pode ser observada em todo o intervalo espectral, enquanto o espectro da galáxia cD concentra-se numa curta faixa de frequências. (Figura retirada do livro *Extragalactic Astronomy and Cosmology*, Peter Schneider.)

- Presença de forte emissão no ultravioleta (UV, do inglês *ultraviolet*), conhecida como *big blue bump*;
- Variabilidade no contínuo e nas linhas de emissão;
- Podem apresentar ejeção de material em altas velocidades em forma de jatos que se estendem desde 10^{-5} pc até cerca de 100 Kpc;
- Linhas de emissão intensas e muito alargadas (larguras de até $\sim 10000 \text{ km s}^{-1}$) no óptico.

Devido às diferenças apresentadas em galáxias ativas, tais como luminosidade, propriedades espectrais, variabilidade e contraste de brilho entre o núcleo e a galáxia hospedeira, podemos classificá-las em diferentes classes de objetos: quasares, galáxias Seyfert, blazares e rádio-galáxias. Dentre as diferentes classes de AGNs, nosso trabalho tem como objeto de estudo as galáxias Seyfert e resumiremos suas principais características na seção seguinte.

1.2 Galáxias Seyfert

As galáxias Seyferts foram os primeiros AGNs estudados. Durante seu estudo de espectros de regiões nucleares de algumas das até então chamadas “nebulosas es-

pirais” no Observatório de Lick, Fath (1908) encontrou em NGC 1068 seis intensas linhas de emissão, ao contrário do observado na maioria das outras nebulosas, que apresentavam linhas de absorção devido às estrelas presentes na região central. Uma dessas linhas de emissão era $H\beta$, presente nas nebulosas gasosas, como por exemplo, regiões H II e nebulosas planetárias. As outras cinco linhas estão associadas a transições proibidas e são: $[O II]\lambda 3727$, $[Ne III]\lambda 3869$ e $[O III]\lambda 4363, 4959, 5007$.

Anos mais tarde, em 1943, Carl K. Seyfert reparou que uma pequena fração de galáxias, incluindo NGC 1068, apresentavam linhas de emissão altamente ionizadas na região nuclear e estas eram mais alargadas que as linhas de absorção presentes em galáxias normais (Seyfert, 1943). Galáxias que apresentam componentes de emissão largas provenientes do núcleo de aparência estelar com altos índices de ionização definem os objetos que hoje denominamos **Galáxias Seyfert**.

São um dos objetos mais estudados entre as classes de AGNs e caracterizados pelo grande contraste de brilho entre o núcleo e a galáxia hospedeira (veja figura 1.2) e em geral, porém não unicamente, são encontradas em galáxias de tipo morfológico espiral. Entretanto, são uma pequena parcela, quando comparadas com galáxias normais (representam cerca de $\sim 5\%$ das espirais conhecidas, Ryden et al., 2010). Assim como em outras classes de AGNs, as galáxias Seyfert apresentam variabilidade temporal no contínuo em praticamente toda região do espectro. As escalas de tempo variam entre meses e anos, e observa-se que a amplitude da variabilidade aumenta conforme observamos regiões do espectro com menores comprimentos de onda. A amplitude da variabilidade pode variar entre 0.2 a 1 magnitudes (Unsoeld & Baschek, 2001).

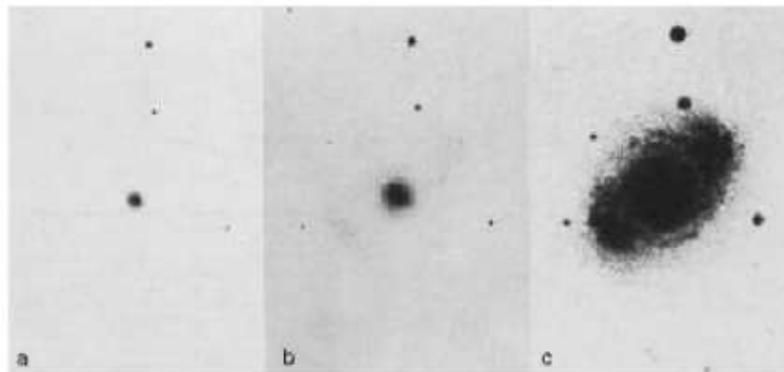


Figura 1.2: Três imagens com diferentes tempos de exposição da galáxia Seyfert NGC 4151. Na imagem à esquerda, com menor tempo de exposição, o núcleo aparenta ser uma fonte pontual. (Figura retirada do livro *Extragalactic Astronomy and Cosmology*, Peter Schneider.)

Devido às diferenças na largura das linhas de emissão do espectro, as galáxias Seyferts podem ser subdivididas em duas classificações propostas por Khachikian & Weedman (1974):

- **Galáxias Seyfert 1 (Sy 1):** Apresentam tanto a componente larga quanto a estreita em suas linhas de emissão. A componente larga é associada às linhas permitidas, como H I, He I e He II e suas larguras podem chegar a ordem de $1-5 \times 10^3 \text{ km s}^{-1}$, enquanto a componente estreita está associada às linhas proibidas, por exemplo [O III] λ 4959, 5007, e possuem larguras típicas de $\sim 500 \text{ km s}^{-1}$.
- **Galáxias Seyfert 2 (Sy 2):** As linhas de emissão permitidas e proibidas apresentam somente a componente estreita¹ e possuem larguras de aproximadamente 500 km s^{-1} .

1.3 Modelo Unificado de Galáxias de Núcleo Ativo

Como já mencionado anteriormente, a radiação proveniente da região nuclear de galáxias ativas envolve processos físicos muito mais energéticos dos que os encontrados em galáxias normais. Woltjer (1959) foi o primeiro a notar a natureza dos AGNs. Para tanto, ele supôs que a matéria constituinte do núcleo estava em interação gravitacional e, sabendo que o núcleo não é resolvido espacialmente, ele conseguiu estimar a massa no núcleo em $M \geq 10^9 M_{\odot}$, assumindo para aquela região a validade do Teorema do Virial aplicado a sistemas gravitacionais e usando as medidas de dispersão de velocidades detectadas nas componentes largas das linhas de emissão das galáxias Seyfert.

Tendo em vista que as diversas classes de AGNs compartilham várias características, propõe-se que a fonte de energia desses objetos seja intrinsecamente a mesma. O Modelo Unificado de AGNs (MU) sugerido por Antonucci e Miller em 1985 sugere que radiação da fonte central seja proveniente da acreção de matéria por um SMBH de massa $M \gtrsim 10^8 M_{\odot}$. O MU ainda propõe que o SMBH e a região em torno do disco de acreção, conhecida como região de linhas largas (BLR, do inglês *Broad Line Region*), estão envoltos por um toroide de poeira e que as classes de AGNs são resultado da visualização da estrutura toroidal por diferentes ângulos de visada.

¹É importante ressaltar que a largura da componente estreita em AGNs é maior do que as larguras encontradas nas linhas de emissão de galáxias normais ($\sim 200 \text{ km s}^{-1}$).

Segundo o MU, as linhas de emissão alargadas presentes nos espectros dos AGNs seriam produzidas na BLR por nuvens de gás de alta densidade ($n_e \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) cujas temperaturas podem chegar até 20000 K. Essas nuvens extremamente quentes e densas seriam responsáveis por dispersões de velocidades da ordem $1-10 \times 10^3 \text{ km s}^{-1}$ e estariam distribuídas em uma região não resolvida ($r < 1 \text{ pc}$) em volta do disco de acreção. Por outro lado, as linhas de emissão estreitas seriam geradas na chamada região de linhas estreitas (NLR, do inglês *Narrow Line Region*) de densidades $n_e \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ responsáveis tanto pela emissão de linhas proibidas como permitidas, cujas larguras são em torno de $200-1000 \text{ km s}^{-1}$. Diferentemente da compacta BLR, a NLR se estende por uma região muito maior, de algumas dezenas de pc até $\sim 1 \text{ Kpc}$, revelando uma simetria axial em ambas as direções polares. A classificação dos AGNs pelo MU pode se resumir em duas amplas classes de objeto (excluindo os blazares):

- **Tipo 1:** quando vistos em ângulos próximos ao eixo polar, *face-on*, visualizamos diretamente a região central (BLR) e também a NLR, o que assinala um AGN de tipo 1.
- **Tipo 2:** se observamos a estrutura toroidal em ângulos de visada próximos ao plano equatorial do toroide, *edge-on*, a BLR está obscurecida pelo toroide e vemos apenas a NLR, o que classifica esses objetos como AGNs de tipo 2 (na figura 1.3 encontra-se uma representação esquemática do MU para as principais classes de AGN).

A primeira evidência observacional da existência de uma estrutura toroidal foi realizada através de observações espectropolarimétricas da galáxia Sy 2 NGC 1068 por Antonucci & Miller (1985), que revelaram linhas de emissão largas ocultas, características de galáxias Sy 1, através da reflexão causada pelo material obscurecedor. O mesmo indicativo da existência da BLR também foi observado no espectro de emissão polarizada em diversos outros AGNs de Tipo 2 (Tran et al., 1992). O fato de Sy 2 serem menos luminosas que Sy 1 no UV e em raios-X também pode ser explicado pela presença de um toroide de poeira, pois os grãos de poeira absorvem essa radiação e a re-emitem no IR (motivo pelo qual observa-se um excesso na região do IR em galáxias Sy 2). Outro fator contribuinte para o MU é a evidência de diversas nuvens em uma distribuição bi-cônica da NLR da galáxia NGC 4151 em imagens de alta resolução do HST (*Hubble Space Telescope*), revelando que a NLR se estende até $\sim 63 \text{ pc}$ para este objeto (Kaiser et al., 2000). A presença de uma geometria toroidal também explica a presença de cones de ionização (Storchi-Bergmann et al., 1992,

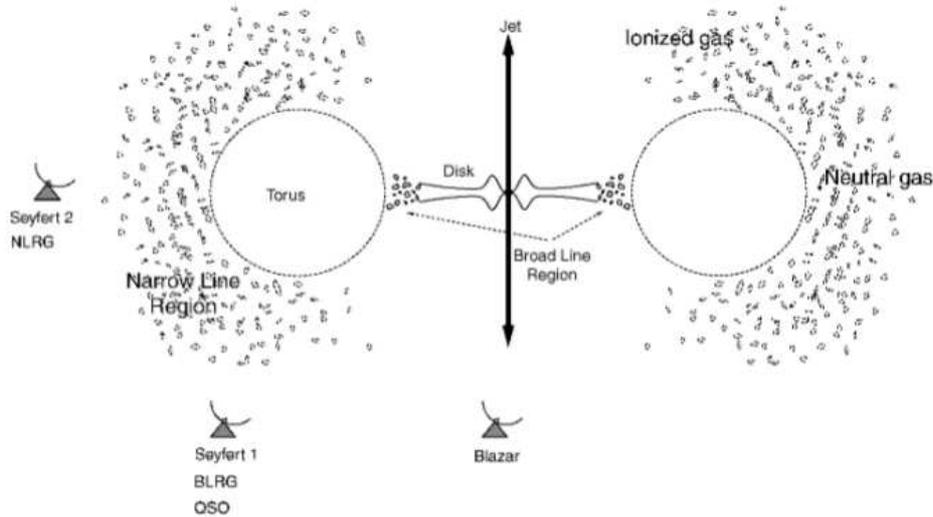


Figura 1.3: O disco de acreção e a BLR são envoltos por um denso toroide de poeira que obscure a região central quando observados em uma linha de visada próxima ao plano equatorial, caracterizando um objeto de tipo 2 (Sy 2 e NLRG-*Narrow Lines Radio Galaxies*). Em objetos de tipo 1 (Sy 1 e BLRG-*Broad Lines Radio Galaxies*) visualizamos ambas BLR e NLR. O modelo ainda propõe que se o observador encontra-se na direção dos jatos, vemos então um blazar. *Figura retirada de Schneider (2006)*.

Storchi-Bergmann & Bonatto, 1991, Pogge, 1988) e as altas densidades colunares de hidrogênio observadas em raios-X em AGNs de Tipo 2 ($N_H \sim 10^{22}$ - 10^{25} cm^{-2} , Shi et al., 2006).

Diversos trabalhos vem explorando a distribuição da matéria no toroide desde a proposta do MU por Antonucci & Miller (1985), fazendo uso de diferentes métodos computacionais para a resolução da equação de transporte radiativo para o meio toroidal. Pier & Krolik (1992) sugeriram um modelo para emissão da poeira em uma estrutura toroidal em forma de anel com densidade uniforme. Outros trabalhos também utilizam distribuições de densidade semelhantes, modificando o perfil e formato do toroide (Granato & Danese, 1994, Efstathiou & Rowan-Robinson, 1995, Dullemond & van Bemmelen, 2005, Fritz et al., 2006). Outra abordagem para a distribuição da poeira é considerando que esta está aglomerada em forma de nuvens na estrutura toroidal. O primeiro modelo de nuvens (CLUMPY) foi desenvolvido por Nenkova et al. (2002), que considera o toroide formado por nuvens de poeira e reproduz SEDs teóricas a partir do cálculo de transferência radiativa das nuvens distribuídas na forma de toroide, levando em conta a absorção, emissão e espalhamento dos fótons devidos aos grãos de poeira, que trataremos mais detalhadamente na seção

2.2. Vale ressaltar que, conforme a capacidade computacional aumenta, ambos os tratamentos para a geometria toroidal vem reproduzindo bons resultados, quando comparados com as SEDs observadas dos AGNs (Stalevski et al., 2012).

1.4 Motivação e Objetivos

Uma maneira de testarmos os modelos desenvolvidos para a emissão do toroide é através de observações de AGNs no infravermelho médio (MIR, do inglês *mid infrared*). Espera-se que a radiação proveniente da fonte central seja absorvida pela poeira existente no toroide e re-emitada na região do infravermelho. Essa poeira basicamente é composta por silicatos e grafite e, no intervalo do MIR, podemos ver o perfil de absorção/emissão do silicato em $9.7\mu\text{m}$. Uma preocupação dos modelos atuais é reproduzir esse comportamento.

Motivados pelo debate existente sobre a geometria toroidal (o tradicional *donut* x distribuição em nuvens) e resultados encontrados em estudos recentes, como por exemplo Ramos Almeida et al. (2011, 2012) e Alonso-Herrero et al. (2011), que contestam a premissa do MU que os AGNs são intrinsecamente o mesmo objeto, o objetivo do presente trabalho é estudar uma amostra de aproximadamente 100 galáxias Seyfert próximas, com *redshifts* ≤ 0.01 , para analisarmos estatisticamente os parâmetros físicos do toroide. Utilizamos o modelo CLUMPY de Nenkova et al. (2002), que considera a distribuição do toroide em nuvens (*clumpiness*) como mencionado acima e utilizamos dados de arquivos públicos do telescópio espacial Spitzer da NASA, nos módulos *Long-Low* e *Short-Low*, que cobrem o intervalo espectral de $5.2\text{--}38\mu\text{m}$ correspondente ao MIR. As linhas de emissão no MIR já foram estudadas anteriormente por Sales et al. (2010) e os espectros apresentados em Wu et al. (2009) e Gallimore et al. (2010). Até o momento, não há nenhum estudo na literatura que faça uma análise estatística comparando uma amostra considerável de objetos com os modelos de nuvens utilizando dados espectroscópicos.

Capítulo 2

Metodologia

2.1 Dados

Nossa amostra conta com 44 Sy 2 e 54 Sy 1, obtidos de arquivos de dados públicos do *Spitzer Space Telescope* da NASA. As observações foram realizadas com o instrumento IRS (do inglês *Infrared Spectrograph*) acoplado ao telescópio, em dois módulos de baixa resolução espectral ($R \sim 60-128$): Short-Low (SL) e Long-Low (LL). A abertura SL possui escala de $1.8''/\text{pixel}$ e cobre o intervalo de $5.2-14.5\mu\text{m}$ e a abertura LL varia entre $14-38\mu\text{m}$ e escala de imagem de $5.1''/\text{pixel}$. Dentre toda a amostra, 15 objetos são do trabalho de Sales et al. (2010) e o restante foi retirado de Gallimore et al. (2010). Os processos de redução de dados podem ser encontrados de maneira mais detalhada nestes trabalhos. A classificação da maior parte dos objetos foi obtida em Wu et al. (2009), que considerou a classificação espectral no óptico para as galáxias Seyfert (Rush et al., 1993). Para as galáxias não presentes em Wu et al. (2009), consideramos a classificação da base de dados NED (*NASA/IPAC Extragalactic Database*).

Em cada fenda do IRS há duas sub-fendas, resultando em 4 arquivos para o espectro, cada um com uma parte do espectro total: SL1 - de 5.2 a $7.7\mu\text{m}$ -, SL2 - 7.4 a $14.5\mu\text{m}$ -, LL1 - $14-21.3\mu\text{m}$ - e LL2 - 19.5 a $38\mu\text{m}$ -. Esses dados foram agrupados em um único espectro e corrigidos por *redshift*. Na maior parte dos objetos da nossa amostra encontramos um desnível nos valores de fluxo na intersecção das fendas SL e LL que foram corrigidos manualmente para cada espectro, multiplicando todo o fluxo do espectro da fenda SL por um fator proporcional ao do fluxo LL a fim de nivelar o espectro. Na Fig 2.1 podemos ver um exemplo de espectros obtidos pelo IRS para as galáxias Sy 1 NGC 4151 e NGC 4051 já corrigidos por *redshift*.

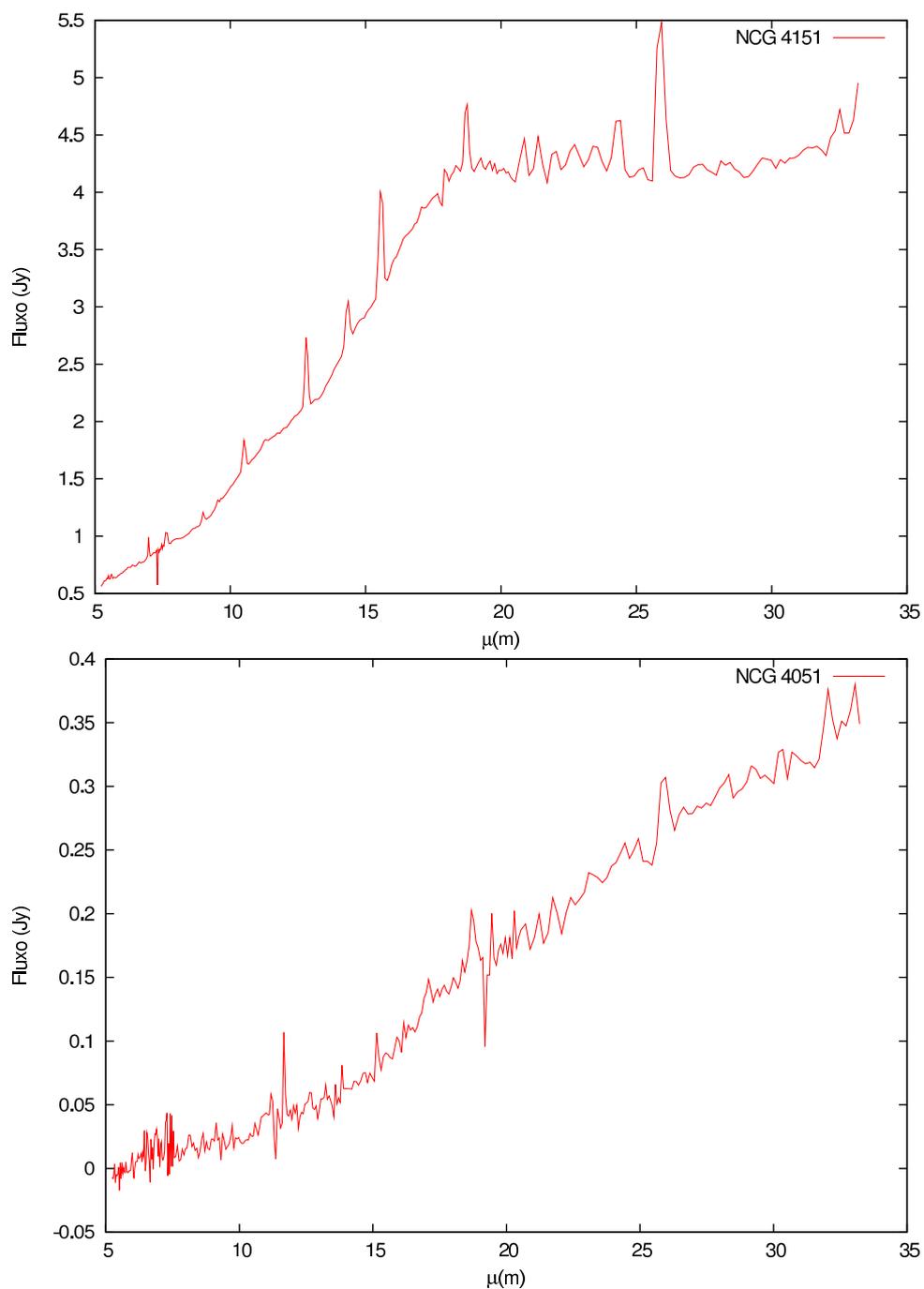


Figura 2.1: No topo temos o espectro para a galáxia NGC 4151 e na base, o espectro da NGC 4051. Ambos espectros foram corrigidos por *redshift*, $z=0.003$ e $z=0.002$ respectivamente.

2.2 Descrição do Modelo de Nuvens para o Toroide

Atualmente, uma solução para algumas das questões observadas em AGNs que não podem ser explicadas unicamente pelo MU padrão, como por exemplo a presença de silicatos em emissão em Sy 2 e em absorção em Sy 1, pode ser encontrada se considerarmos o toroide distribuído em nuvens de poeira. Embora em seu trabalho Pier & Krolik (1992) tenham desenvolvido um modelo que consiste nos grãos de poeira em uma distribuição uniforme ao longo da estrutura toroidal, já se argumentava que esses grãos deveriam estar aglomerados, pois de maneira contrária, não sobreviveriam à intensa radiação proveniente do AGN. Para resolver então este problema, nos últimos anos diversos modelos foram desenvolvidos para a geometria do toroide e trabalhos recentes consideram que os grãos de poeira devem estar aglomerados em forma de nuvens (por exemplo: Nenkova et al., 2002, Hönig et al., 2006, Schartmann et al., 2008).

Nosso trabalho utiliza os modelos públicos¹ desenvolvidos por Nenkova et al. (2002, 2008a,b), que consideram nuvens de poeira distribuídas em uma geometria toroidal² conforme mostra a figura 2.2. O modelo utiliza o código DUSTY (uma descrição detalhada do código pode ser encontrada em Ivezić et al., 1999), que calcula o problema da transferência radiativa em um meio composto por poeira em todas as possíveis orientações, incluindo efeitos de absorção, emissão e espalhamento dos fótons. No modelo de *clumpiness* considera-se cada nuvem como uma fonte pontual de intensidade e a radiação que chega ao observador depende da probabilidade do fóton não ser absorvido em determinada direção, P_{esc} , que por sua vez, depende do número de nuvens em uma determinada direção e de suas profundidades ópticas na banda V (τ_V).

Para reproduzir um meio altamente absorvedor (tal como esperado pelo fato de Sy 2 serem menos luminosas em raios-X devido à alta densidade colunar de hidrogênio do toroide), assume-se que as nuvens são opticamente espessas ($\tau_V \gtrsim 60$) e por simplicidade, Nenkova et al. (2002) assumiram que todas as nuvens do toroide possuem a mesma τ_V para um modelo. Os parâmetros de saída do código CLUMPY são:

¹Disponíveis em: <http://www.pa.uky.edu/clumpy>.

²No trabalho de Nenkova et al. (2008b) houve a preocupação de testar diferentes distribuições para as nuvens no toroide, experimentando uma distribuição com limitações nas bordas e nuvens espalhadas uniformemente e uma distribuição com bordas suavizadas (representação à esquerda e à direita na figura 2.2, respectivamente). Uma das conclusões encontradas por eles é que esta última distribuição representa melhor as SEDs observadas.

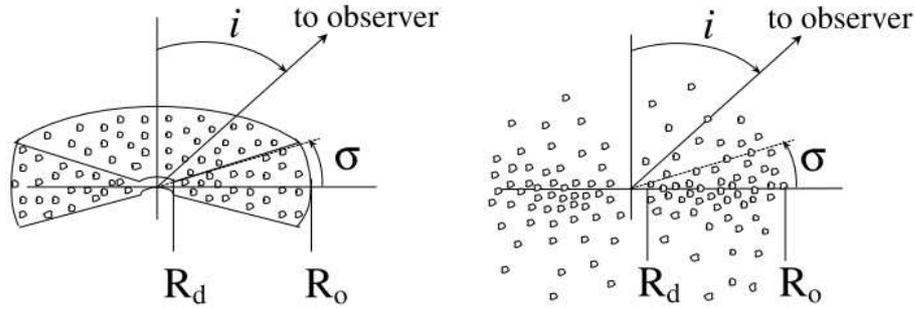


Figura 2.2: Acima, consideram-se as nuvens de poeira distribuídas no volume do toroide, determinado pelo raio interno R_d (definido pela luminosidade bolométrica do AGN e pela temperatura de sublimação dos grãos de poeira) até o raio externo R_o . O ângulo de inclinação i relativo ao observador é determinado a partir do eixo polar do toroide e a distribuição angular está relacionada com a largura angular σ . À esquerda, é mostrada uma distribuição angular para bordas limitadas e uma distribuição semelhante a uma gaussiana à direita.

- i : ângulo de inclinação do plano normal ao equador toroidal relativo à linha de visada do observador. Pode variar entre 0° e 90° , sendo 90° um objeto visto completamente *edge-on*, ou seja, uma Sy 2;
- N_0 : número de nuvens ao longo do raio equatorial do toroide, que conforme o modelo pode assumir valores de 1 à 15 nuvens;
- τ_V : profundidade óptica na banda V de cada nuvem. O modelo é bem representado para valores de $\tau_V \gtrsim 60$, ou seja, nuvens opticamente espessas;
- q : índice da lei de potência que descreve o perfil de densidade radial do toroide, $\propto r^{-q}$;
- Y : extensão radial do toroide, definida por $Y = R_o/R_d$, onde R_o é o raio externo e R_d é o raio interno. R_d é definido pela temperatura de sublimação dos grãos de poeira ($T \sim 1400$ K) pela relação:

$$R_d \simeq 0.4 \left(\frac{L}{10^{45} \text{erg s}^{-1}} \right)^{1/2} \left(\frac{1500 \text{K}}{T_{\text{sub}}} \right)^{2.6} \text{ pc}$$

- σ : largura da distribuição angular do toroide e pode assumir valores entre 15° e 80° .

O projeto produziu $\sim 10^6$ SEDs teóricas disponibilizadas para a comunidade que são as soluções da equação de transferência radiativa em uma dimensão para

determinado valor do ângulo de inclinação i , mantendo os outros cinco parâmetros livres. As vantagens de usar um modelo de *clumpiness* é que as SEDs geradas conseguem reproduzir o espectro observado no IR e também a ausência da assinatura de silicatos em emissão em $10\mu\text{m}$ encontradas em algumas Sy 1 e, ao contrário do esperado pelo MU, pode explicar a presença do silicato em absorção (Hao et al., 2007). Para que o silicato seja observado em absorção em Sy 1 a condição suficiente é que tenhamos uma nuvem na direção de visada *face-on* que seja opticamente espessa para poder absorver os fótons.

Dois outros parâmetros de relevância para nosso trabalho são: o número de nuvens na direção do observador e a extinção visual. O número de nuvens na linha de visada do observador, N_{obs} , pode ser calculado assumindo que as nuvens seguem uma distribuição semelhante a uma distribuição gaussiana pela equação:

$$N_{obs}(i) = N_0 \exp\left(-\left(\frac{90-i}{\sigma}\right)^2\right) \quad (2.1)$$

Já a extinção na banda V, A_V , produzida pelo toroide ao longo da linha de visada (também dependente do número de núvens observadas), pode ser obtida através da equação:

$$A_V = 1.086 N_{obs} \tau_V = 1.086 N_0 \tau_V \exp\left(-\left(\frac{90-i}{\sigma}\right)^2\right) \quad (2.2)$$

Os modelos CLUMPY tem ganhado fortes sustentações nos últimos anos com o avanço em poder de resolução dos telescópios. Observações interferométricas com o VLTI (*Very Large Telescope Interferometer*) indicam fortes evidências de uma estrutura em forma de nuvens ou filamentos no AGN da galáxia Circinus (Tristram et al., 2007), enquanto observações no MIR mostram que os modelos descrevem bem o comportamento da emissão do toroide devida à poeira neste intervalo (Mason et al., 2006, Nikutta et al., 2009, Sales et al., 2011).

2.3 Procedimentos

Para realizarmos a análise e a comparação dos espectros com as SEDs do modelo CLUMPY, tivemos que descartar as linhas de emissão/absorção (exceto as bandas do silicato em $9.7\mu\text{m}$, pois justamente essas são fundamentais para a resolução do problema em questão) e os dados espúrios dos espectros mostrados na seção 2.1, pois o modelo CLUMPY reproduz apenas o contínuo emitido pela poeira e a componente em emissão ou absorção do silicato em $\sim 10\mu\text{m}$. Devido a proble-

mas referentes aos efeitos de borda na extremidade direita do módulo LL do IRS, selecionamos o contínuo até $\sim 30\mu\text{m}$. Um ponto importante para a comparação dos espectros foi a determinação do ponto de normalização. Tivemos o cuidado de não selecionar pontos em linhas de emissão baseados na figura 2 do trabalho de Sales et al. (2010) e nos certificamos de que o ponto estivesse dentro dos intervalos selecionados no passo anterior. Escolhemos então normalizar os espectros à unidade em $\lambda=13.5\mu\text{m}$. Um exemplo das regiões selecionadas do espectro é mostrado na figura 2.3 novamente para as galáxias M-2-33-34 e NGC 1194.

Comparamos cada espectro da presente amostra com as $\sim 10^6$ SEDs teóricas buscando encontrar a melhor solução através da minimização da equação de χ^2 reduzido³:

$$\chi^2_{red} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{F_{obs,\lambda_i} - F_{mod,\lambda_i}}{\sigma_{\lambda_i}} \right)^2 \quad (2.3)$$

onde N é o número de pontos no espectro, F_{obs,λ_i} e F_{mod,λ_i} são o fluxo observado e teórico, respectivamente, normalizados à unidade em $\lambda = 13.5\mu\text{m}$ e σ_{λ_i} é a incerteza associada às medidas de fluxo.

O código lista todos os valores de χ^2 calculados para os conjuntos de valores dos parâmetros das SEDs teóricas, possibilitando uma posterior análise.

Uma vez que foram calculadas todas as soluções para os 8 parâmetros físicos do modelo (no código foram incluídos os cálculos do número de nuvens na direção do observador N_{obs} e da extinção visual A_V através das equações 2.1 e 2.2, respectivamente), desenvolvemos um script em PYTHON para realizarmos testes com alguns desses parâmetros e podermos testar o modelo CLUMPY aos nossos dados para diferentes valores de tolerância do χ^2 . Dessa forma, podemos fazer uma estatística para comparar os melhores resultados de cada parâmetro obtidos para as galáxias Sy 1 e Sy 2.

³O código foi desenvolvido por Rogério Riffel e utilizado também em Sales et al. (2011).

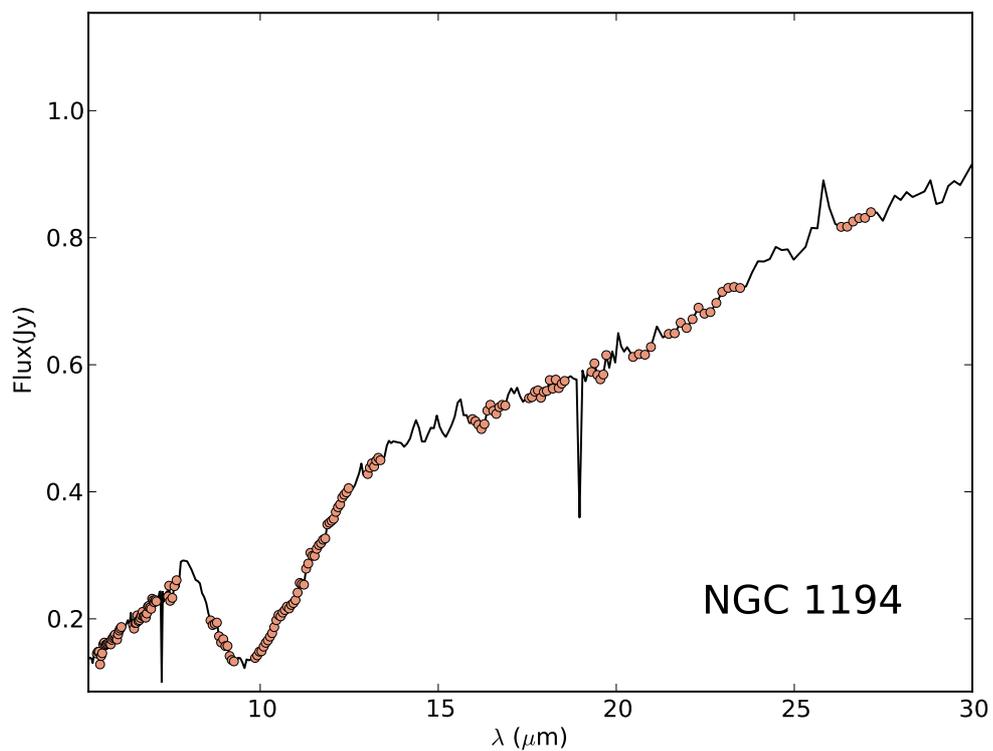
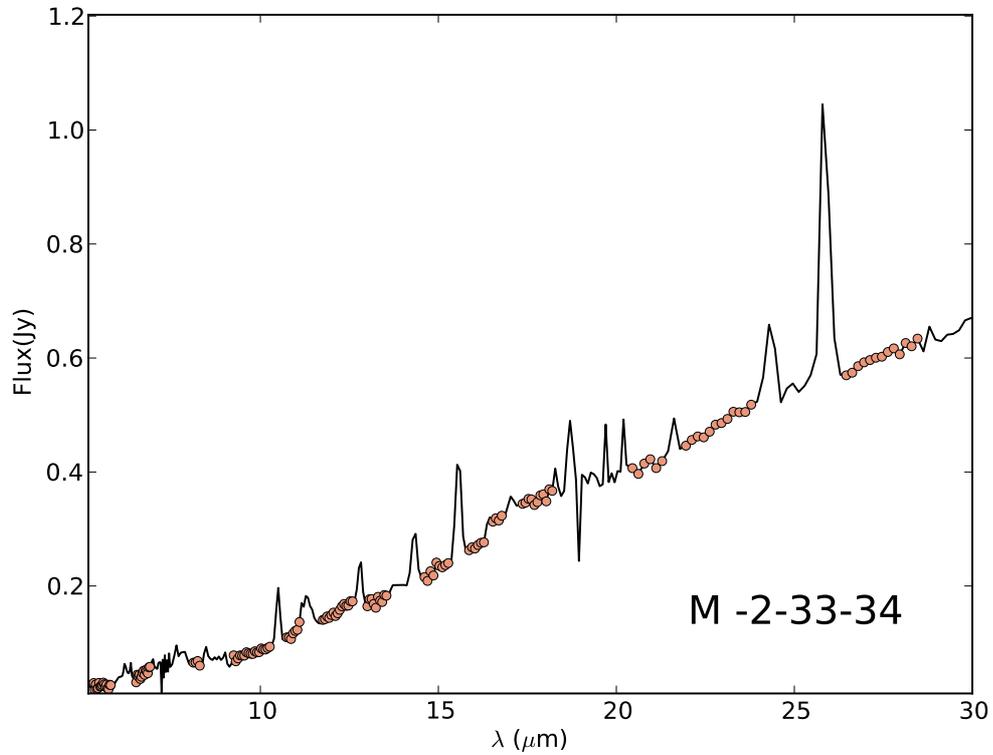


Figura 2.3: *Topo*: os pontos coloridos representam o intervalo do contínuo para a Sy 1 M2-33-34. *Base*: o contínuo e a banda de absorção em $\sim 10\mu\text{m}$ foram selecionados para a Sy 2 NGC 1194.

Capítulo 3

Resultados e Discussão

A partir das soluções encontradas pela minimização da equação de χ^2 dada pela equação 2.3, dividimos nossa análise entre Sy 1 e Sy 2, a fim de extrairmos os parâmetros físicos que melhor representam o toroide para cada tipo de atividade. Foram calculados os parâmetros referentes a melhor solução ajustada a cada espectro da amostra (valores para o menor χ^2), como podemos ver no exemplo da figura 3.1, a curva vermelha representa a melhor solução sobreposta ao espectro para a galáxia Mrk 622 e as demais soluções estão representadas em cinza para diferentes variações do melhor χ^2 .

Para aprofundarmos nossa análise, também consideramos as SEDs teóricas dentro de tolerâncias próximas a melhor SED ajustada, no intuito de investigarmos se a flexibilidade das soluções influencia no valor médio de cada parâmetro físico do toroide para cada classe de objeto. Para tanto, consideramos os modelos ajustados com desvios de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 70% relativos ao menor χ^2 . Na tabela 3.1 estão listados os valores médios obtidos para Sy 1 e Sy 2. O cálculo das médias para cada classe foi feito levando em conta os valores médios individuais dos parâmetros de cada galáxia com diferentes tolerâncias e a média sobre o melhor ajuste de cada galáxia é mostrada na coluna 2 das tabelas.

Uma tendência que pode ser observada desses resultados é que, em geral, quanto maior a tolerância das soluções, mais os valores dos parâmetros tendem a se concentrar, i.e., os desvios padrões são menores conforme aumentamos o número de soluções. Esperávamos que, uma vez que aumentássemos a tolerância, permitiríamos soluções mais variadas para os parâmetros e verificamos que estes tem a tendência de se aproximarem mais dos valores de média, sugerindo que a melhor solução é uma boa representação para os parâmetros, ou seja, uma solução robusta. Podemos ver

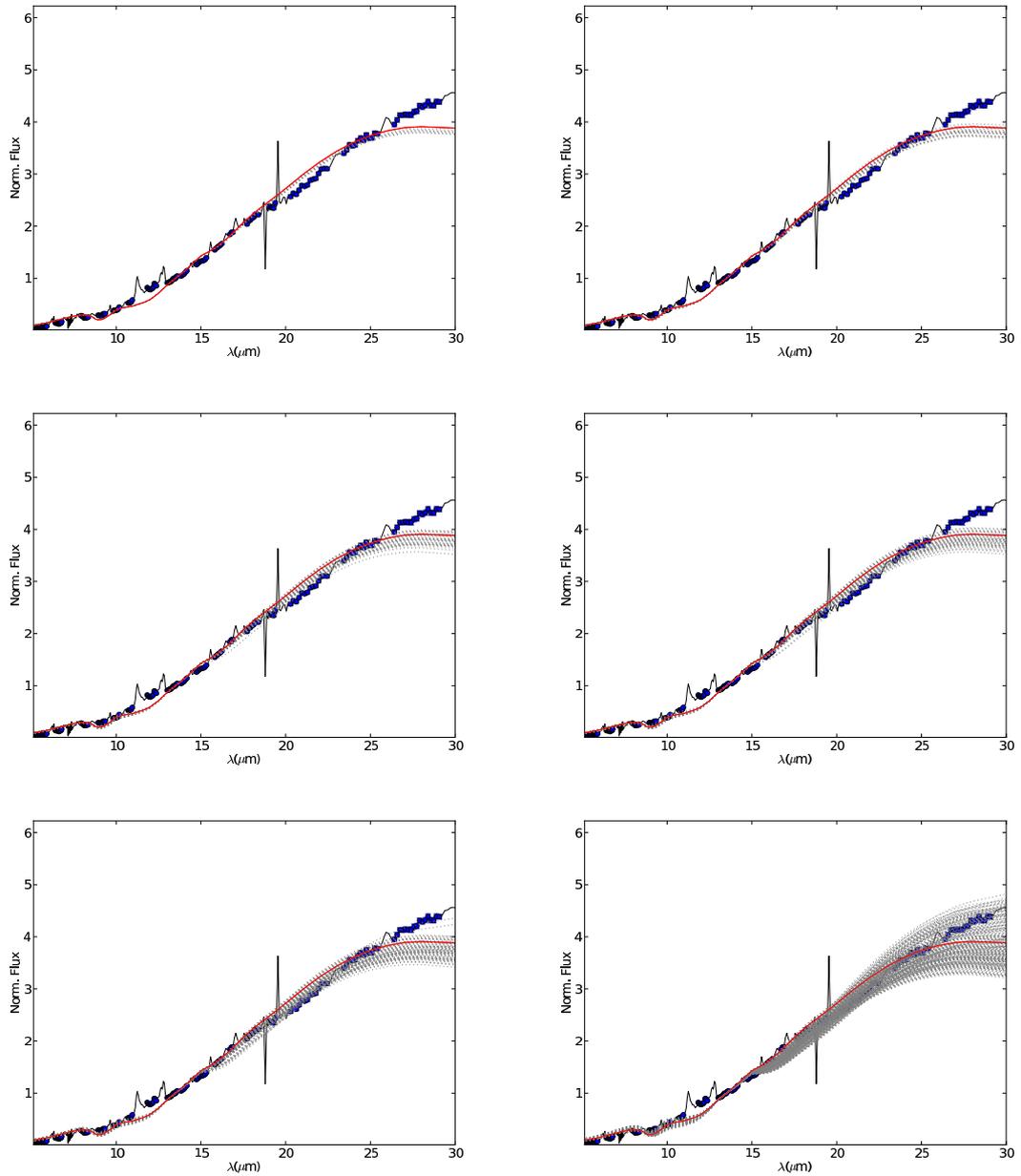


Figura 3.1: Espectros e soluções teóricas encontradas para a galáxia Mrk 622 com variações de 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 70% do menor χ^2 .

esse resultado também se compararmos a distribuição em torno da média para os histogramas de frequência mostrados na figura 3.2, onde ilustramos apenas a extensão radial do toroide em ambas as classes. Nos demais parâmetros o comportamento é similar.

Tabela 3.1: Valores médios dos parâmetros para a melhor solução e valores médios para variações de χ^2 iguais a 5%, 10%, 15%, 20%, 30% e 70%.

Parâmetro	Melhor Ajuste	5%	10%	15%	20%	30%	70%
SEYFERT 1							
i	$76^\circ \pm 13^\circ$	$75^\circ \pm 11^\circ$	$76^\circ \pm 9^\circ$	$75^\circ \pm 8^\circ$	$75^\circ \pm 7^\circ$	$75^\circ \pm 6^\circ$	$75^\circ \pm 4^\circ$
N_0	13 ± 2	13 ± 2	12 ± 2	12 ± 2	12 ± 2	12 ± 1	12 ± 1
N_{obs}	11 ± 3	11 ± 3	10 ± 3	10 ± 3	10 ± 2	10 ± 2	10 ± 2
q	0.57 ± 0.53	0.55 ± 0.49	0.53 ± 0.45	0.59 ± 0.42	0.63 ± 0.40	0.64 ± 0.37	0.73 ± 0.28
τ_V (mag)	143 ± 20	143 ± 20	143 ± 19	145 ± 13	146 ± 11	145 ± 10 mag	144 ± 9
Y	43 ± 22	43 ± 21	42 ± 20	42 ± 19	43 ± 18	45 ± 17	50 ± 13
σ	$48^\circ \pm 11^\circ$	$49^\circ \pm 10^\circ$	$50^\circ \pm 10^\circ$	$51^\circ \pm 10^\circ$	$51^\circ \pm 9^\circ$	$51^\circ \pm 9^\circ$	$51^\circ \pm 8^\circ$
A_V (mag)	1655 ± 497	1615 ± 463	1587 ± 454	1579 ± 420	1585 ± 402	1573 ± 371	1543 ± 309
SEYFERT 2							
i	$72^\circ \pm 20^\circ$	$70^\circ \pm 18^\circ$	$71^\circ \pm 16^\circ$	$72^\circ \pm 15^\circ$	$72^\circ \pm 15^\circ$	$71^\circ \pm 13^\circ$	$71^\circ \pm 10^\circ$
N_0	14 ± 2	13 ± 1					
N_{obs}	12 ± 3	11 ± 3	11 ± 2				
q	0.67 ± 0.52	0.69 ± 0.49	0.70 ± 0.46	0.69 ± 0.44	0.69 ± 0.42	0.66 ± 0.38	0.68 ± 0.30
τ_V (mag)	139 ± 25	140 ± 21	139 ± 22	139 ± 22	138 ± 22	138 ± 23	136 ± 22
Y	52 ± 24	53 ± 23	55 ± 22	55 ± 21	55 ± 20	55 ± 19	57 ± 15
σ	$58^\circ \pm 8^\circ$	$59^\circ \pm 8^\circ$	$59^\circ \pm 7^\circ$	$60^\circ \pm 7^\circ$	$60^\circ \pm 7^\circ$	$60^\circ \pm 7^\circ$	$60^\circ \pm 6^\circ$
A_V (mag)	1741 ± 566	1719 ± 515	1705 ± 501	1695 ± 491	1681 ± 481	1656 ± 461	1610 ± 408

3.1 Análise dos Histogramas de Frequência

Uma maneira de compararmos os nossos resultados é através dos histogramas de frequência para Sy 1 e Sy 2. Como mostrado acima, os resultados não variam consideravelmente com o aumento percentual de tolerância, então mostraremos os histogramas dos resultados para tolerância de 10% do melhor ajuste, valor comumente utilizado na literatura (Nikutta et al., 2009). Deste modo, cada galáxia contribui para o histograma da sua classe com o seu respectivo valor médio dos parâmetros calculados em até 10% do melhor χ^2 .

Nas figuras 3.3 à 3.10, apresentamos os histogramas de frequência para os 6 parâmetros do modelo CLUMPY: i , N_0 , q , τ_V , Y e σ ; e adicionamos os parâmetros N_{obs} e A_V calculados conforme as equações 2.1 e 2.2, respectivamente.

Com o objetivo de comparar os nossos resultados com os disponíveis na literatura, faremos uma breve revisão do uso dos modelos CLUMPY por outros grupos. Por exemplo, em Ramos Almeida et al. (2011) foram utilizados dados fotométricos de 7 Sy 1, 11 Sy 2 e 3 Seyfert de tipo intermediário e além dos modelos eles utilizam um código de aproximação Bayesiana para inferir o máximo de informação sobre o espectro a partir dos pontos fotométricos, calculando parâmetros intermediários por interpolação dos dados. O mesmo procedimento é adotado em Ramos Almeida et al. (2012), com uma amostra menor (7 Sy 1 e 9 Sy 2) e em ambos os trabalhos são apre-

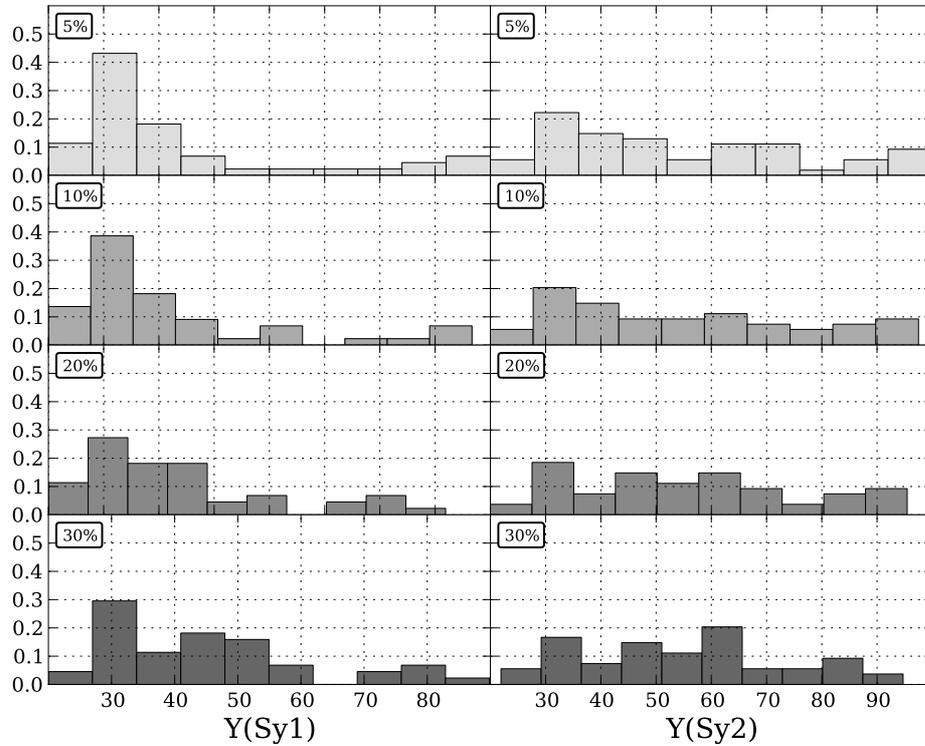


Figura 3.2: Os histogramas da extensão radial Y para as tolerâncias mostradas nos retângulos: 5%, 10%, 20% e 30% de cima para baixo. À esquerda estão representadas as Sy 1 e à direita as Sy 2. Nota-se que os valores para tolerâncias maiores tendem a se concentrar mais em torno da média.

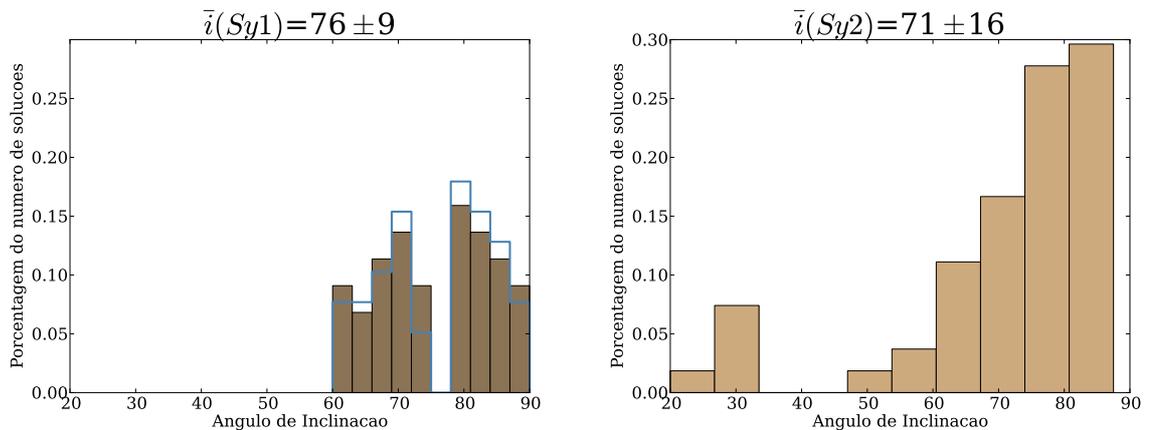


Figura 3.3: À esquerda temos o histograma de frequência do ângulo de inclinação i para as Sy 1 da amostra e à direita para as galáxias Sy 2 dentro de uma tolerância de 10% do melhor χ^2 . Para as Sy 1 também é mostrado em azul o histograma quando retiramos as 5 Sy 1 que apresentam absorção de silicato em $9.7\mu\text{m}$ (seção 3.3).

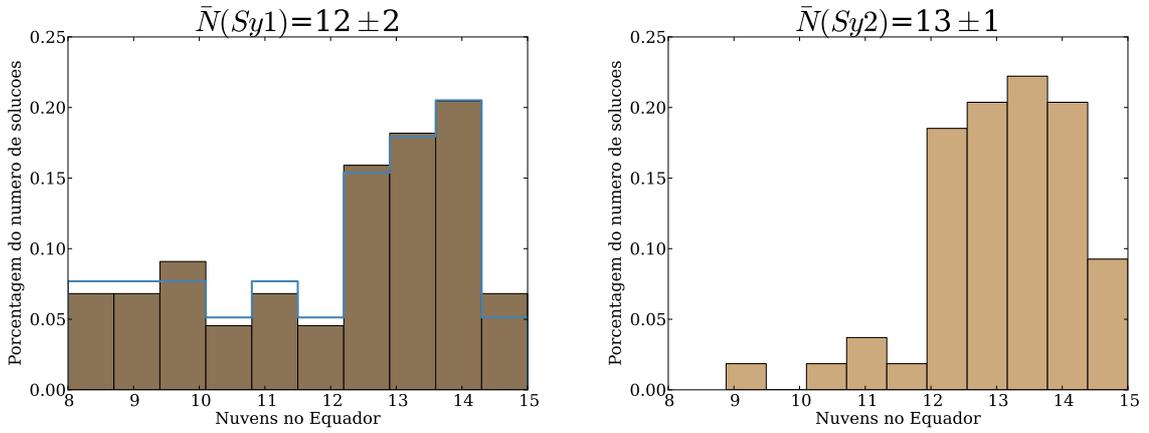


Figura 3.4: O mesmo da figura 3.3 para o número de nuvens no equador, N_0 .

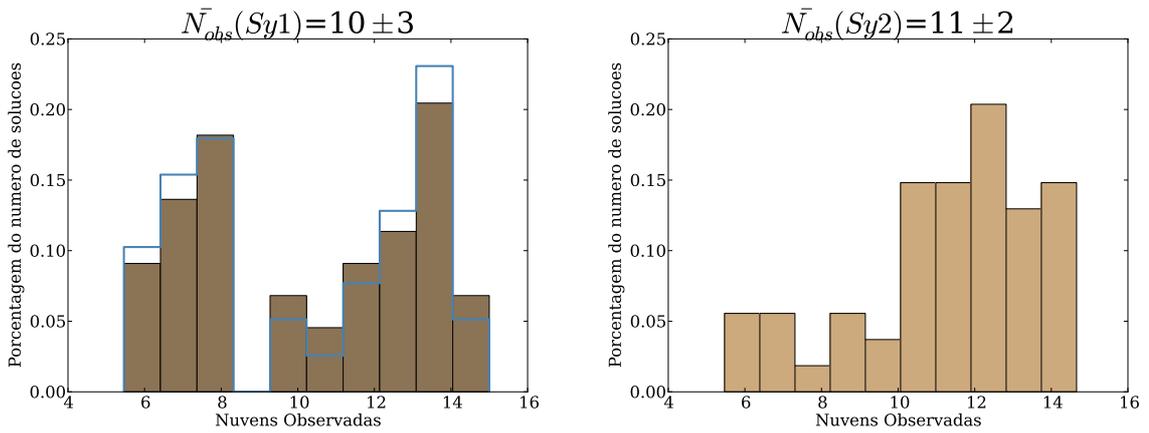


Figura 3.5: O mesmo da figura 3.3 para o número de nuvens observadas, N_{obs} .

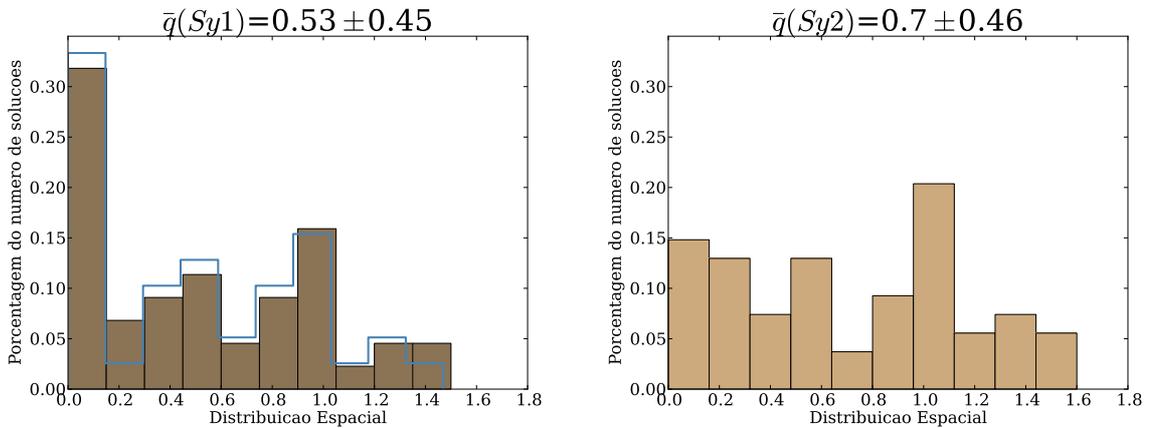


Figura 3.6: O mesmo da figura 3.3 para o índice da lei de potência do perfil de distribuição das nuvens, q .

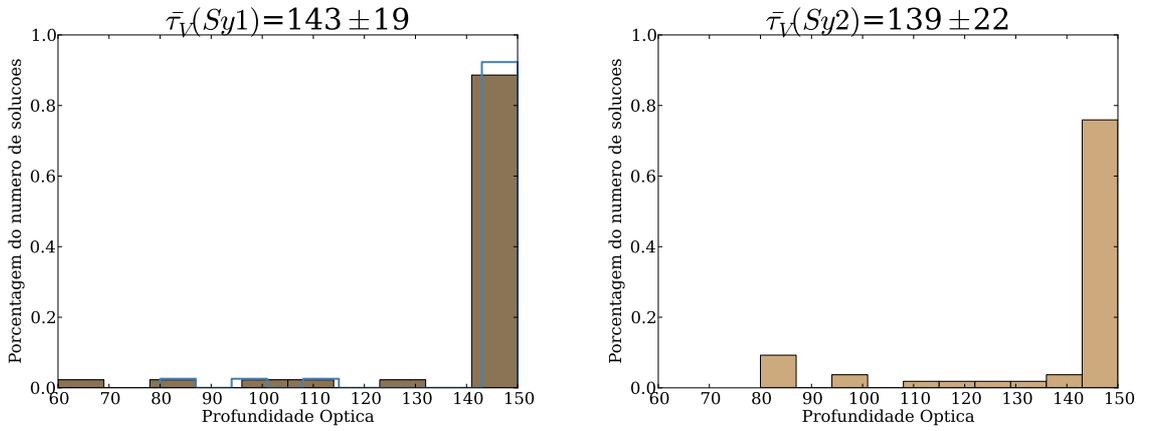


Figura 3.7: O mesmo da figura 3.3 para a profundidade óptica individual das nuvens, τ_V .

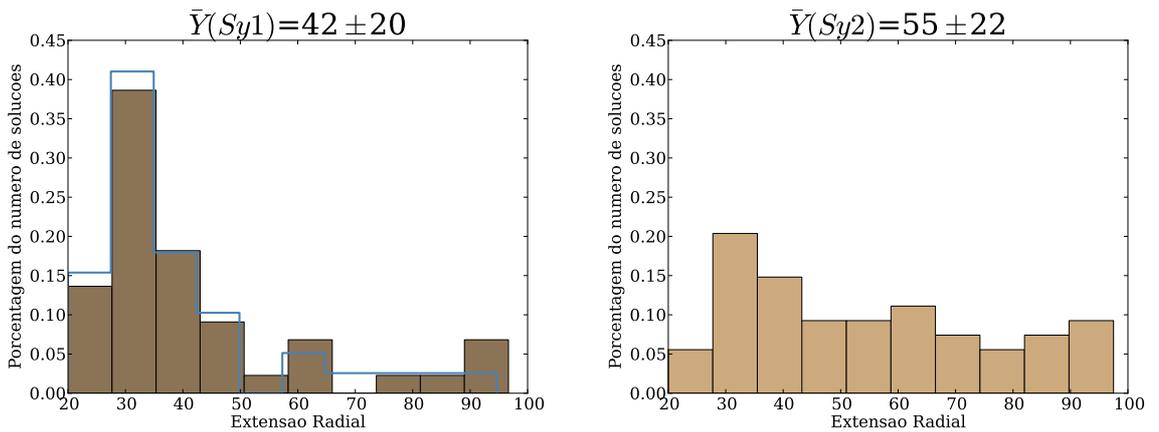


Figura 3.8: O mesmo da figura 3.3 para a extensão radial do toroide, Y .

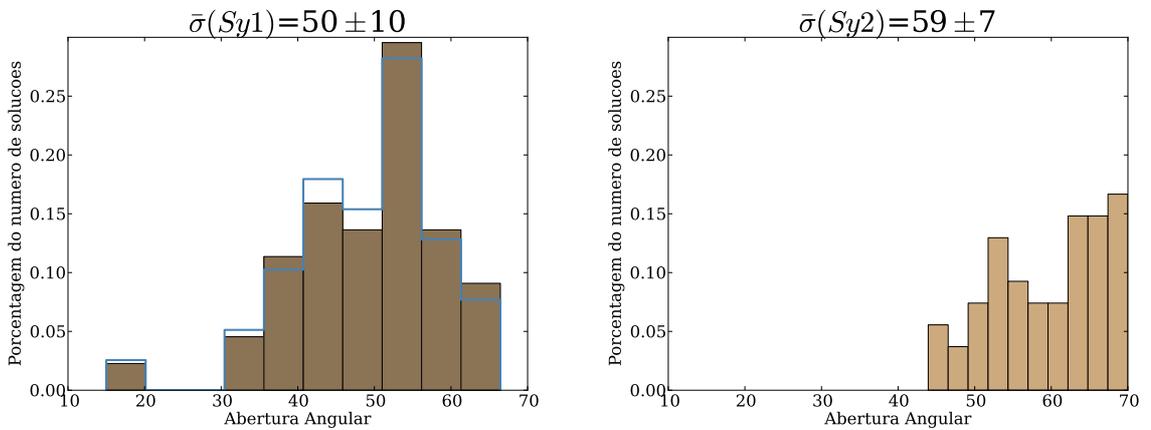


Figura 3.9: O mesmo da a figura 3.3 para a abertura angular toroidal, σ .

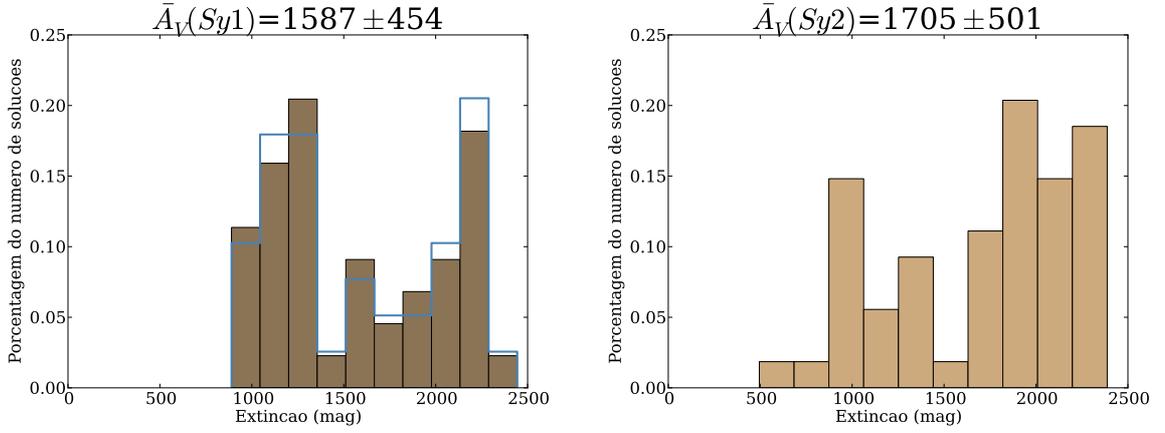


Figura 3.10: O mesmo da figura 3.3 para a extinção visual, A_V .

sentadas as estatísticas dos parâmetros, porém com um número limitado de objetos. A fim de comparar nossos resultados com os dos trabalhos citados, mostramos na tabela 3.2 os valores das medianas para os parâmetros da nossa amostra em uma grande tolerância (70%, visto que em Ramos Almeida et al. (2011, 2012) os valores das medianas são para um intervalo de até 68% de confiança).

Tabela 3.2: Valores das medianas no intervalo de tolerância de 70% do melhor χ^2 referente aos 6 parâmetros do modelo CLUMPY para as Sy 1 e Sy 2.

Tipo	i		N_0		q		τ_V		Y		σ	
	Sy1	Sy2	Sy1	Sy2	Sy1	Sy2	Sy1	Sy2	Sy1	Sy2	Sy1	Sy2
Mediana	80±5	80±11	12±1	13±1	1±0.4	0.8±0.4	150±10	150±25	45±15	50±18	50±9	60±7

Pela estatística aplicada à amostra para Sy 1 e Sy 2 utilizando os modelos CLUMPY, apresentada na tabela 3.1 e nos histogramas acima, obtivemos os seguintes (principais) resultados:

1. **Ângulo de Inclinação:** o ângulo de inclinação relativo ao observador é praticamente o mesmo para ambas as classes de Seyfert. Para uma tolerância de 70%, encontramos os valores das medianas em $i(\text{Sy } 1)=80\pm 5$ para as Sy 1 e $i(\text{Sy } 2)=80\pm 11$ para as galáxias Sy 2, diferentemente do resultado de Ramos Almeida et al. (2012), que encontra uma distinção, embora não tão pronunciada, entre as medianas de Sy 1 ($i=47\pm 7$) e Sy 2 ($i=54\pm 10$). Ao contrário do previsto, as soluções para a nossa amostra estão apontando apenas ângulos de inclinação relativamente próximos ao equador do toroide, o que pelo MU caracteriza objetos de Tipo 2.

2. **Nuvens no Equador:** encontramos para ambas as classes um valor elevado para o número de nuvens no equador, N_0 , com medianas em $N_0(\text{Sy 1})=12$ e $N_0(\text{Sy 2})=13$. Porém, pelos histogramas da figura 3.4 podemos notar que as Sy 2 tendem a valores mais altos de N_0 , com poucas soluções para valores menores que 12. Porém a distribuição das Sy 1 parece ser mais espalhada em torno do valor médio. Esses parâmetros também estão relacionados com a distribuição espacial das nuvens, q .
3. **Nuvens na Linha de Visada:** os histogramas para o número de nuvens ao longo da linha de visada, N_{obs} , mostram uma certa bimodalidade nas Sy 1, enquanto nas Sy 2 concentram-se mais em valores maiores que 10. Vale lembrar que este parâmetro depende de i e de σ , conforme indicado na equação 2.1.
4. **Índice do Perfil Radial:** o parâmetro q , que representa o índice da lei de potência do perfil de distribuição das nuvens, pode ser interpretado com um fator de “concentração” das nuvens. Porém pelos nossos resultados, $\bar{q}(\text{Sy 1})=0.53\pm 0.45$ e $\bar{q}(\text{Sy 2})=0.7\pm 0.46$, não podemos extrair informações físicas relevantes dele.
5. **Profundidade Óptica:** os resultados encontrados para a profundidade óptica τ_V , cujos valores para 10% de tolerância são: $\bar{\tau}_V(\text{Sy 1})=143\pm 19$ e $\bar{\tau}_V(\text{Sy 2})=139\pm 22$, estão de acordo com os primeiros cálculos de Nenkova et al. (2002), que obteve bons ajustes das SEDs teóricas para valores de $\tau_V \gtrsim 60$, condição para que se tenha nuvens opticamente espessas. A τ_V também está relacionada com a presença da absorção ou emissão do silicato em $\sim 10\mu\text{m}$, porém, como podemos ver na figura 6 de Nenkova et al. (2008b), quando combinado com o número de núvens ao longo do equador, a presença da absorção é bem proeminente para $N_0 \sim 10-15$.
6. **Extensão Radial:** conforme já mencionado, a extensão radial Y é definida como a razão entre o raio externo R_0 e interno R_d , ou seja, $Y=R_0/R_d$. Sendo R_d dependente da luminosidade do AGN e da temperatura de evaporação dos grãos de poeira, por Y podemos estimar o tamanho do toroide, a menos que tenhamos grandes diferenças na luminosidade da fonte central. Encontramos para Sy 1 valores médios de $\bar{Y}(\text{Sy 1})=42\pm 19$ e $\bar{Y}(\text{Sy 2})=54\pm 21$ para as Sy 2, indicando que o R_0 é maior em Sy 2, ou seja, o toroide das Sy 2 é mais extenso. Esse mesmo resultado foi encontrado por Ramos Almeida et al. (2011, 2012), onde eles contestam a premissa do MU notando que a classificação em Tipo

1 e Tipo 2 depende mais das propriedades do toroide do que do ângulo de inclinação do observador, sugerindo que esses objetos não são intrinsecamente os mesmos, ou seja, Sy 1 e Sy 2 possuem propriedades físicas distintas e diferem não somente por questões de orientação.

7. **Abertura Angular:** a abertura angular toroidal é ligeiramente maior em Sy 2, para a qual obtivemos os valores médios de $\bar{\sigma}(\text{Sy } 2)=59^\circ\pm 7^\circ$, enquanto que para Sy 1 $\bar{\sigma}(\text{Sy } 1)=49^\circ\pm 9^\circ$. Este resultado nos diz que o toroide em Sy 2 é mais largo, além de ser também mais extenso, mais uma vez de acordo com o resultado encontrado por Ramos Almeida et al. (2012).
8. **Extinção Visual:** no gráfico 3.10 podemos perceber que as Sy 2 possuem valores para a extinção na banda V maiores que em Sy 1. Esse fato pode estar relacionado com o resultado encontrado para Y, pois por ser o toroide das Sy 2 mais extenso, a radiação eletromagnética é mais espalhada/absorvida. Esse resultado está de acordo com o MU tradicional, pois para Sy 2 a linha de visada possui mais poeira obscurecendo a fonte central.

Em linhas gerais, nossos resultados também concordam com o trabalho de Alonso-Herrero et al. (2011), que utiliza o mesmo método de inferência bayesiana adotado por Ramos Almeida et al. (2011), para uma amostra de 13 galáxias. Um fato importante de salientar, é que estes dois trabalhos, utilizando o mesmo método, encontram parâmetros diferentes para as galáxias que possuem em comum em suas amostras. Comparamos os valores médios que obtivemos para cada galáxia individualmente com as mesmas galáxias de Ramos Almeida et al. (2011) (das 21 galáxias que eles analisaram individualmente, 12 estão presentes em nossa amostra) e de Alonso-Herrero et al. (2011) (9 em comum, das 13 estudadas por eles) e, em geral, nossos resultados são mais semelhantes aos encontrados por este último. Porém, os 3 estudos chegam ao mesmo resultado: as Seyferts não são intrinsecamente o mesmo objeto, sendo o toroide das Sy 2 ligeiramente maior que o das Sy 1.

3.2 Fator de Preenchimento

Uma propriedade importante da distribuição toroidal em torno do AGN é o chamado fator de preenchimento (C_T , do inglês *covering factor*), que pode ser definido como a fração do céu que cobre a fonte central com um material obscurecedor, ou de acordo com Nenkova et al. (2008a), a fração de observadores distribuídos aleatoriamente,

cuja visão do centro do AGN é bloqueada, ou seja, que enxerga um objeto de Tipo 2. A partir dos modelos CLUMPY, podemos calcular C_T através da equação:

$$C_T = 1 - \int_0^{2\pi} e^{N_{obs}(\beta)} \cos(\beta) d\beta \quad (3.1)$$

Onde β é definido como $\beta = \pi/2 - i$, N_{obs} é o número de nuvens ao longo da linha de visada e definido anteriormente pela equação 2.1 e i é o ângulo de inclinação do observador. Na figura 3.12 mostramos o gráfico de σ versus N_0 para a média das soluções em 10% das melhores soluções dos dois parâmetros para cada galáxia de nossa amostra. As curvas em cinza foram obtidas através do gráfico da figura 3.11 e correspondem a diferentes valores de C_T , variando de 0.2-0.9. Inicialmente notado por Ramos Almeida et al. (2011), na figura 3.11 mostramos um resultado da literatura: as Sy 1 se encontram *preferenciavelmente* em valores menores de C_T e Sy 2 em valores maiores, ou seja, AGN de Tipo 1 e Tipo 2 ocupam diferentes regiões no plano σ - N_0 . Porém esse resultado não é nitidamente encontrado utilizando os dados da nossa amostra, conforme vemos na figura 3.12, há uma leve concentração de Sy 2 em maiores valores de C_T , mas essa diferença não é tão pronunciada.

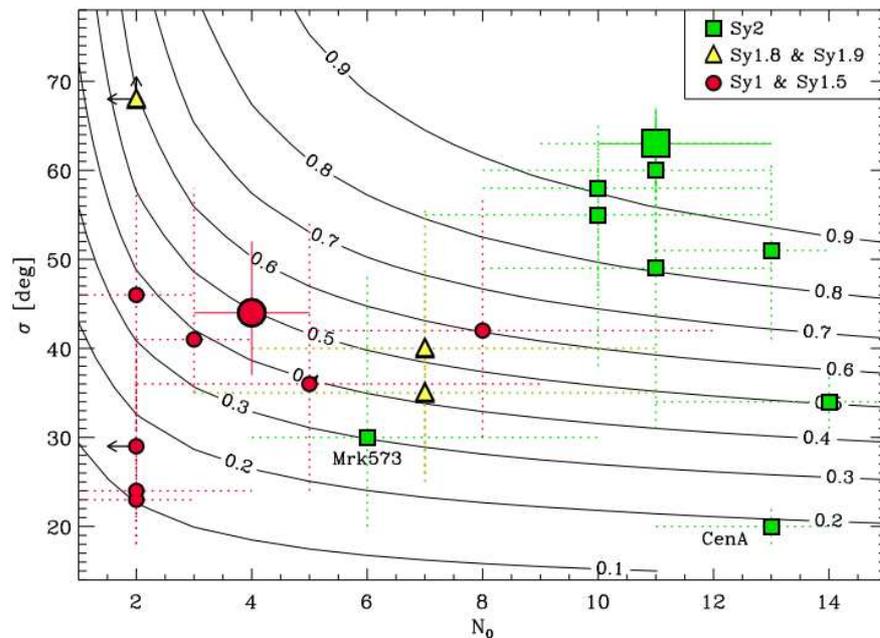


Figura 3.11: As diferentes marcações representam os valores de σ e N_0 obtidos na amostra de Ramos Almeida et al. (2011). As curvas representam as combinações de σ - N_0 que reproduzem os valores de C_T . *Figura retirada de Ramos Almeida et al. (2011).*

Por ser uma propriedade intrínseca do AGN e independente da observação,

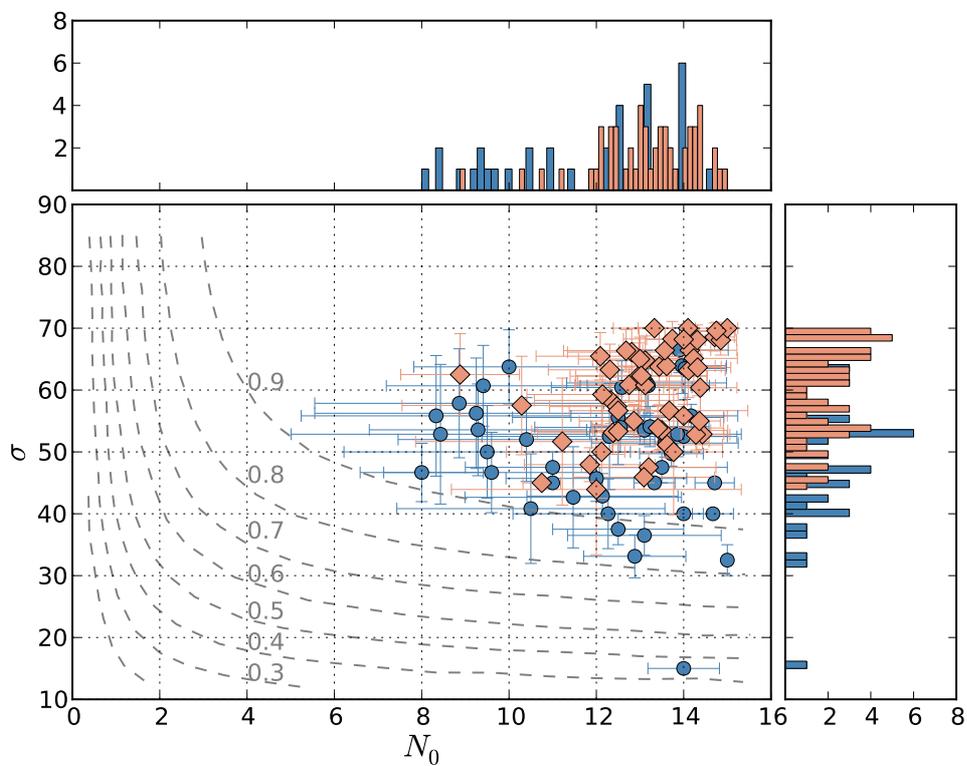


Figura 3.12: Graficamos σ versus N_0 para as soluções em até 10% do melhor χ^2 . Os círculos em azul mostram as Sy 1 e os losangos em rosa correspondem às galaxias Sy 2 da amostra. As curvas em cinza representam diferentes valores do fator de preenchimento, de 0.2 (mais inferior) à 0.9 (curva superior). Os histogramas seguem o mesmo padrão de cor do gráfico.

Elitzur (2012) argumenta que estudos estatísticos de AGNs não podem ser considerados completamente verdadeiros, uma vez que ainda não sabemos a real distribuição do fator de preenchimento.

3.3 Testes: Modelo CLUMPY como o Modelo Unificado Tradicional

Tendo em vista que nossos resultados para o ângulo de inclinação i apontam para uma indistinguidade entre os AGNs Tipo 1 e Tipo 2 (aparentemente esse parâmetro não possui relevância estatística ao se tratar de uma amostra considerável de objetos), contrariando as previsões do MU, optamos por realizar alguns testes de restrição sobre esse parâmetro. Grosseiramente, restringimos as soluções para cada classe de objeto: estamos interessados somente nas soluções para um ângulo de inclinação $i \leq 30$ para as galáxias Sy 1 e $i \geq 30$ para as Sy 2, de acordo com o argumento de Schneider (2006): a cada 3 galáxias Seyfert, encontramos 2 Sy 2 e 1 Sy 1, então o toroide das Sy 2 ocupa $\frac{2}{3}$ do ângulo sólido total. Para termos um controle de como nossas soluções modificaram-se com esta imposição, analisamos os valores de χ^2 das melhores soluções para cada classe de objeto antes e depois de implementarmos o teste. Como podemos perceber na figura 3.13, os valores de χ^2 apresentam valores maiores apenas para as Sy 1, e para as Sy 2 permanecem praticamente iguais. Ou seja, ao restringirmos este parâmetro para as Sy 1, os modelos teóricos tendem a se afastar mais dos espectros observados.

Com intuito de reproduzirmos os resultados esperados pelo MU para o ângulo de inclinação, mostramos nas figuras 3.14 e 3.15 os histogramas e as estatísticas para os demais parâmetros físicos, quando impomos a restrição $i(\text{Sy } 1) < 30$ e $i(\text{Sy } 2) > 30$.

Como era de se esperar, os valores médios dos 8 parâmetros para as Sy 2 permanecem praticamente inalterados. O interessante é que para as Sy 1, mesmo restringindo bruscamente as soluções ao limitarmos o ângulo de inclinação em $i < 30^\circ$, basicamente os únicos parâmetros que se alteraram foram o número de nuvens na linha de visada, N_{obs} , e a extinção visual, A_V , mas isto só deve ao fato de que esses parâmetros estão diretamente relacionados com i (ver equações 2.1 e 2.2). Outro fato curioso, é que todas as soluções para a profundidade óptica são iguais, $\tau_V = 150$ mag. Isso nos mostra que, mesmo tentando reproduzir os valores esperados pelo MU tradicional, nossas soluções apontam para os mesmos resultados que encontramos anteriormente.

Como nossa amostra possui cerca de 5 Sy 1 que apresentam absorção em $9.7\mu\text{m}$

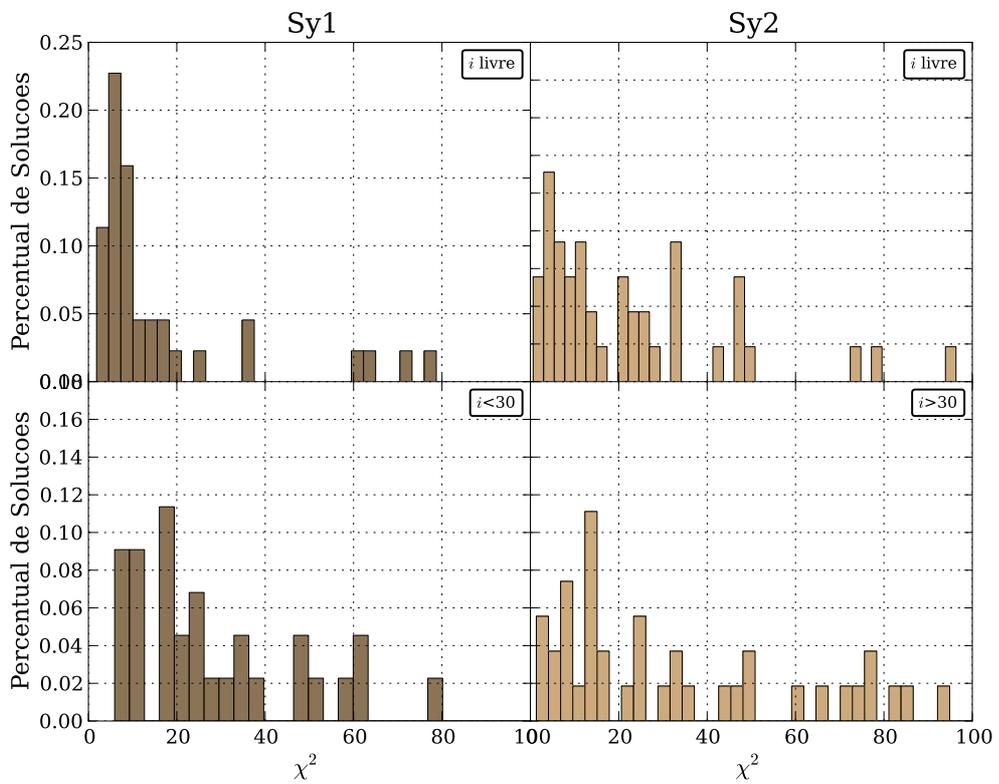


Figura 3.13: Nos gráficos superiores estão os valores dos melhores χ^2 para cada classe, e na parte inferior os valores do melhor χ^2 ao restringirmos o ângulo de inclinação $i \leq 30$ para Sy1 (painéis à esquerda) e $i \geq 30$ para Sy2 (painéis à direita).

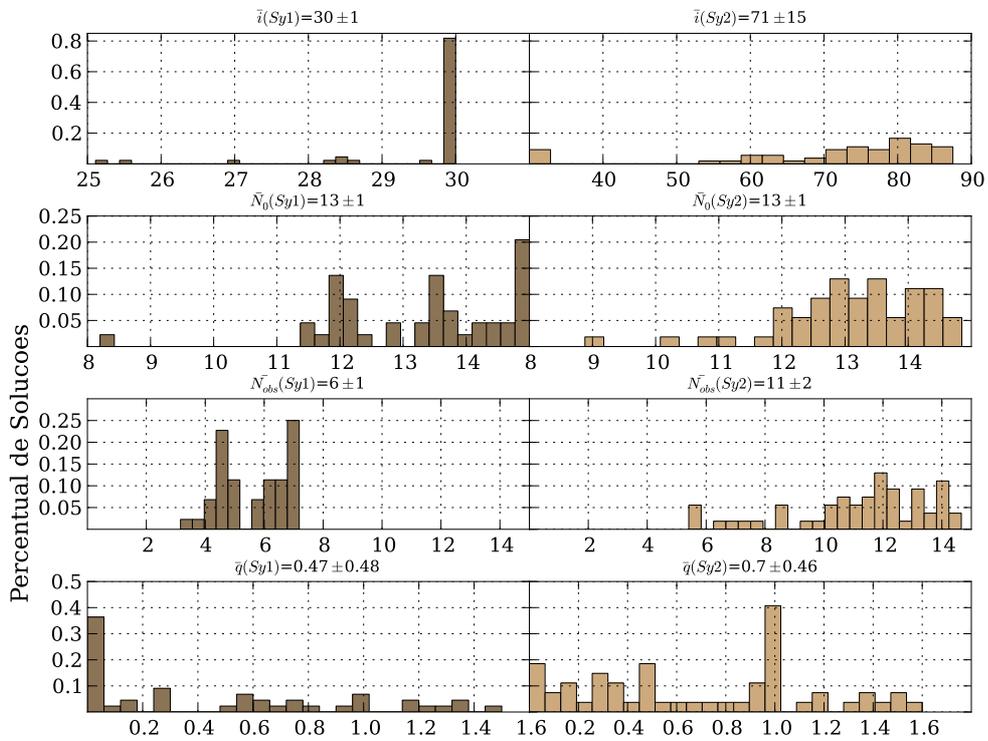


Figura 3.14: Histogramas de frequência para os parâmetros i , N_0 , N_{obs} e q com tolerância de 10% do melhor χ^2 ao restringirmos o ângulo de inclinação $i \leq 30$ para Sy1 (histogramas à esquerda) e $i \geq 30$ para Sy2 (histogramas à direita).

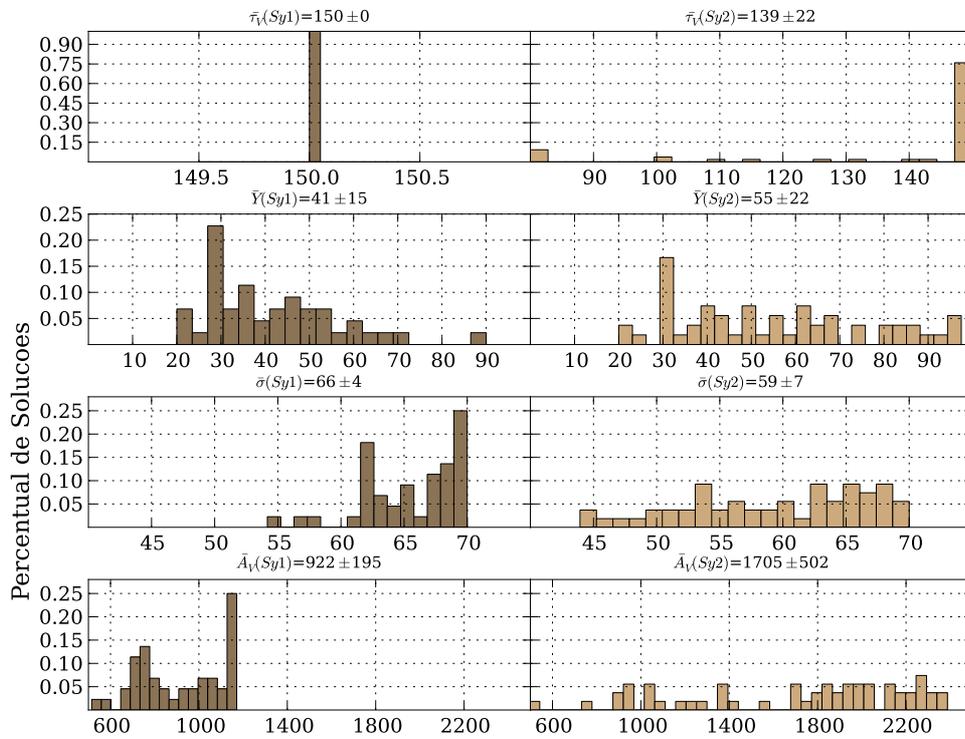


Figura 3.15: Histogramas de frequência para os parâmetros τ_V , Y , σ e A_V com tolerância de 10% do melhor χ^2 ao restringirmos o ângulo de inclinação $i \leq 30$ para Sy1 (histogramas à esquerda) e $i \geq 30$ para Sy2 (histogramas à direita).

(aproximadamente 11% das Sy 1 da amostra), nos preocupamos em testar como fica a estatística sem a interferência dessas 5 galáxias, que por terem a assinatura do silicato em absorção poderiam se comportar como uma Sy 2 frente ao modelo CLUMPY. Mostramos os novos resultados para as Sy 1 sobrepostos aos histogramas das figuras 3.3 à 3.10 em azul. Era de se esperar que elas estivessem contribuindo com valores maiores para N_0 , porém sem elas ainda encontramos os dois máximos de probabilidade. De uma maneira geral, a remoção dessas 5 galáxias não altera a estatística significativamente.

Capítulo 4

Considerações Finais

Nosso trabalho teve como objetivo realizar uma análise estatística dos parâmetros físicos do toroide para uma amostra de ~ 100 galáxias Seyfert, utilizando dados públicos do telescópio Spitzer no infravermelho médio ($5.2 - 38\mu\text{m}$). Comparamos as SEDs da nossa amostra com SEDs teóricas ($\sim 10^6$) do modelo CLUMPY, que consideram que o toroide é formado por nuvens de poeira. O MU propõe que as diferenças constatadas em algumas propriedades nas SED das diversas classes de AGNs são meramente ocasionadas pela orientação do observador. Portanto, esperava-se que em nosso trabalho, o ângulo de inclinação do observador i relativo ao plano equatorial do toroide fosse o principal parâmetro na distinção entre os objetos de Tipo 1 e Tipo 2. Porém, esse parâmetro não teve relevância estatística em nossa amostra. Encontramos para ambas as classes Sy 1 e Sy 2 ângulos próximos ao equador toroidal (~ 76 para Sy 1 e ~ 71 para Sy 2), apontando que as duas classes são vistas *edge-on*.

Obtivemos os valores médios $\bar{Y}(\text{Sy } 1)=42$ e $\bar{Y}(\text{Sy } 2)=55$, o que indica que o raio externo R_d das Sy 2 é maior. Para a abertura angular dada por uma distribuição semelhante à gaussiana, encontramos $\bar{\sigma}(\text{Sy } 1)=50^\circ$ e $\bar{\sigma}(\text{Sy } 2)=59^\circ$, ou seja, o toroide nas Sy 1 é ligeiramente menor. Esses resultados põem em prova a premissa do MU, que diz que os AGNs são intrinsicamente iguais e concorda com resultados da literatura. O parâmetro que parece definir a classificação conforme o conceito do MU é a extinção visual, A_V , que apresenta valores maiores para as Sy 2 da nossa amostra (médias em $\bar{A}_V(\text{Sy } 1)=1587$ e $\bar{A}_V(\text{Sy } 2)=1705$).

Nossos resultados sugerem que as galáxias Seyfert não são intrinsicamente o mesmo tipo de objeto, cujas propriedades observadas seriam apenas um efeito de orientação e este fato pode ser devido a dois fatores: i) os modelos baseados no MU, como neste caso o CLUMPY, estão errados ou ii) o próprio princípio geral do MU que deve ser revisto. Vale lembrar que por mais sofisticado que os novos modelos

sejam, ainda há muitos fatores a se considerar para torná-los mais realísticos. Por exemplo, o CLUMPY resolve o problema da transferência radiativa em uma dimensão apenas, e também não considera um meio absorvedor/espalhador entre as nuvens, bem como a interação com os jatos de raio-X.

4.1 Perspectivas

Para investigarmos mais profundamente os por quês das discrepância entre nossos resultados e a teoria, pretendemos analisar os seguintes aspectos com maior cautela:

- o motivo dos modelos não ajustarem bem para $\sim 30\mu\text{m}$ (provavelmente é devido à contribuição da população estelar, cujo comportamento não é incluído no modelo CLUMPY);
- decompor as componentes de corpo negro da poeira e da população estelar com o código PAHFIT para os espectros da nossa amostra;
- obter mais objetos para a amostra e revisar a redução dos dados;
- desenvolver simulações de toroide mais realísticas;
- vincular os nossos resultados com explicações físicas para o natureza do toroide.

Bibliografía

- [1] ALONSO-HERRERO, A., RAMOS ALMEIDA, C., MASON, R., ASENSIO RAMOS, A., ROCHE, P. F., LEVENSON, N. A., ELITZUR, M., PACKHAM, C., RODRÍGUEZ ESPINOSA, J. M., YOUNG, S., DÍAZ-SANTOS, T., PÉREZ-GARCÍA, A. M. Torus and Active Galactic Nucleus Properties of Nearby Seyfert Galaxies: Results from Fitting Infrared Spectral Energy Distributions and Spectroscopy. **Astrophysical Journal**, v. 736, p. 82, August 2011.
- [2] ANTONUCCI, R. R. J., MILLER, J. S. Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068. **Astrophysical Journal**, v. 297, p. 621–632, October 1985.
- [3] DULLEMOND, C. P., VAN BEMMEL, I. M. Clumpy tori around active galactic nuclei. **Astronomy and Astrophysics**, v. 436, p. 47–56, June 2005.
- [4] EFSTATHIOU, A., ROWAN-ROBINSON, M. Dusty discs in active galactic nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 273, p. 649–661, April 1995.
- [5] ELITZUR, M. On the Unification of Active Galactic Nuclei. **Astrophysical Journal Letters**, v. 747, p. L33, March 2012.
- [6] FATH, E. A. Bulletin Number 149 - The spectra of some spiral nebulae and globular star clusters. **Lick Observatory Bulletin**, v. 5, p. 71–77, 1908.
- [7] FRITZ, J., FRANCESCHINI, A., HATZIMINAOGLOU, E. Revisiting the infrared spectra of active galactic nuclei with a new torus emission model. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 366, p. 767–786, March 2006.
- [8] GALLIMORE, J. F., YZAGUIRRE, A., JAKOBOSKI, J., STEVENOSKY, M. J., AXON, D. J., BAUM, S. A., BUCHANAN, C. L., ELITZUR, M., ELVIS, M., O'DEA, C. P., ROBINSON, A. Infrared Spectral Energy Distributions of

- Seyfert Galaxies: Spitzer Space Telescope Observations of the 12 μm Sample of Active Galaxies. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 187, p. 172–211, March 2010.
- [9] GRANATO, G. L., DANESE, L. Thick Tori around Active Galactic Nuclei - a Comparison of Model Predictions with Observations of the Infrared Continuum and Silicate Features. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 268, p. 235, May 1994.
- [10] HAO, L., WEEDMAN, D. W., SPOON, H. W. W., MARSHALL, J. A., LEVENSON, N. A., ELITZUR, M., HOUCK, J. R. The Distribution of Silicate Strength in Spitzer Spectra of AGNs and ULIRGs. **Astrophysical Journal Letters**, v. 655, p. L77–L80, February 2007.
- [11] HÖNIG, S. F., BECKERT, T., OHNAKA, K., WEIGELT, G. Radiative transfer modeling of three-dimensional clumpy AGN tori and its application to NGC 1068. **Astronomy and Astrophysics**, v. 452, p. 459–471, June 2006.
- [12] IVEZIĆ, Ž., NENKOVA, M., ELITZUR, M. User Manual for DUSTY. **ArXiv Astrophysics e-prints**, October 1999.
- [13] KAISER, M. E., BRADLEY, L. D., II, HUTCHINGS, J. B., CRENSHAW, D. M., GULL, T. R., KRAEMER, S. B., NELSON, C. H., RUIZ, J., WEISTROP, D. The Resolved Narrow-Line Region in NGC 4151. **Astrophysical Journal**, v. 528, p. 260–275, January 2000.
- [14] KHACHIKIAN, E. Y., WEEDMAN, D. W. An atlas of Seyfert galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 192, p. 581–589, September 1974.
- [15] KITCHIN, C. **Galaxies in Turmoil**: 2007.
- [16] KROLIK, J. H. **Active galactic nuclei : from the central black hole to the galactic environment**: Active galactic nuclei : from the central black hole to the galactic environment / Julian H. Krolik. Princeton, N. J. : Princeton University Press, c1999., 1999.
- [17] MASON, R. E., GEBALLE, T. R., PACKHAM, C., LEVENSON, N. A., ELITZUR, M., FISHER, R. S., PERLMAN, E. Spatially Resolved Mid-Infrared Spectroscopy of NGC 1068: The Nature and Distribution of the Nuclear Material. **Astrophysical Journal**, v. 640, p. 612–624, April 2006.

- [18] NENKOVA, M., IVEZIĆ, Ž., ELITZUR, M. Dust Emission from Active Galactic Nuclei. **Astrophysical Journal Letters**, v. 570, p. L9–L12, May 2002.
- [19] NENKOVA, M., SIROCKY, M. M., IVEZIĆ, Ž., ELITZUR, M. AGN Dusty Tori. I. Handling of Clumpy Media. **Astrophysical Journal**, v. 685, p. 147–159, September 2008a.
- [20] NENKOVA, M., SIROCKY, M. M., NIKUTTA, R., IVEZIĆ, Ž., ELITZUR, M. AGN Dusty Tori. II. Observational Implications of Clumpiness. **Astrophysical Journal**, v. 685, p. 160–180, September 2008b.
- [21] NIKUTTA, R., ELITZUR, M., LACY, M. On the $10\ \mu\text{m}$ Silicate Feature in Active Galactic Nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 707, p. 1550–1559, December 2009.
- [22] PETERSON, B. M. **An Introduction to Active Galactic Nuclei**: An introduction to active galactic nuclei, Publisher: Cambridge, New York Cambridge University Press, 1997 Physical description xvi, 238 p. ISBN 0521473489, February 1997.
- [23] PIER, E. A., KROLIK, J. H. Infrared spectra of obscuring dust tori around active galactic nuclei. I - Computational method and basic trends. **Astrophysical Journal**, v. 401, p. 99–109, December 1992.
- [24] POGGE, R. W. A extended ionizing radiation cone from the nucleus of the Seyfert 2 galaxy NGC 1068. **Astrophysical Journal**, v. 328, p. 519–522, May 1988.
- [25] RAMOS ALMEIDA, C., LEVENSON, N. A., ALONSO-HERRERO, A., ASENSIO RAMOS, A., RODRÍGUEZ ESPINOSA, J. M., PÉREZ GARCÍA, A. M., PACKHAM, C., MASON, R., RADOMSKI, J. T., DÍAZ-SANTOS, T. Testing the Unification Model for Active Galactic Nuclei in the Infrared: Are the Obscuring Tori of Type 1 and 2 Seyferts Different? **Astrophysical Journal**, v. 731, p. 92, April 2011.
- [26] RAMOS ALMEIDA, C., LEVENSON, N. A., ALONSO-HERRERO, A., ASENSIO RAMOS, A., RODRÍGUEZ ESPINOSA, J. M., PÉREZ GARCÍA, A. M., PACKHAM, C., MASON, R., RADOMSKI, J. T., DÍAZ-SANTOS, T. Testing the AGN Unification Model in the Infrared. **Journal of Physics Conference Series**, v. 372, n. 1, p. 012004, July 2012.

- [27] RUSH, B., MALKAN, M. A., SPINOGLIO, L. The extended 12 micron galaxy sample. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 89, p. 1–33, November 1993.
- [28] RYDEN, B., PETERSON, B. M., DEMIANSKI, M. Foundations of Astrophysics. **American Journal of Physics**, v. 78, p. 127–127, January 2010.
- [29] SALES, D. A., PASTORIZA, M. G., RIFFEL, R. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon and Emission Line Ratios in Active Galactic Nuclei and Starburst Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 725, p. 605–614, December 2010.
- [30] SALES, D. A., PASTORIZA, M. G., RIFFEL, R., WINGE, C., RODRÍGUEZ-ARDILA, A., CARCIOFI, A. C. The Compton-thick Seyfert 2 Nucleus of NGC 3281: Torus Constraints from the 9.7 μm Silicate Absorption. **Astrophysical Journal**, v. 738, p. 109, September 2011.
- [31] SCHATTMANN, M., MEISENHEIMER, K., CAMENZIND, M., WOLF, S., TRISTRAM, K. R. W., HENNING, T. Three-dimensional radiative transfer models of clumpy tori in Seyfert galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 482, p. 67–80, April 2008.
- [32] SCHNEIDER, P. **Extragalactic Astronomy and Cosmology**: 2006.
- [33] SEYFERT, C. K. Nuclear Emission in Spiral Nebulae. **Astrophysical Journal**, v. 97, p. 28–+, January 1943.
- [34] SHI, Y., RIEKE, G. H., HINES, D. C., GORJIAN, V., WERNER, M. W., CLEARY, K., LOW, F. J., SMITH, P. S., BOUWMAN, J. 9.7 μm Silicate Features in Active Galactic Nuclei: New Insights into Unification Models. **Astrophysical Journal**, v. 653, p. 127–136, December 2006.
- [35] STALEVSKI, M., FRITZ, J., BAES, M., NAKOS, T., POPOVIĆ, L. Č. 3D radiative transfer modelling of the dusty tori around active galactic nuclei as a clumpy two-phase medium. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 420, p. 2756–2772, March 2012.
- [36] STORCHI-BERGMANN, T., BONATTO, C. J. Detection of a forbidden O III 5007-A radiation cone in the nuclei of NGC 1365 and 7582. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 250, p. 138–143, May 1991.

- [37] STORCHI-BERGMANN, T., WILSON, A. S., BALDWIN, J. A. The ionization cone, obscured nucleus, and gaseous outflow in NGC 3281 - A prototypical Seyfert 2 galaxy? **Astrophysical Journal**, v. 396, p. 45–61, September 1992.
- [38] TRAN, H. D., MILLER, J. S., KAY, L. E. Detection of obscured broad-line regions in four Seyfert 2 galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 397, p. 452–456, October 1992.
- [39] TRISTRAM, K. R. W., MEISENHEIMER, K., JAFFE, W., SCHATTMANN, M., RIX, H.-W., LEINERT, C., MOREL, S., WITTKOWSKI, M., RÖTTGERING, H., PERRIN, G., LOPEZ, B., RABAN, D., COTTON, W. D., GRASER, U., PARESCE, F., HENNING, T. Resolving the complex structure of the dust torus in the active nucleus of the Circinus galaxy. **Astronomy and Astrophysics**, v. 474, p. 837–850, November 2007.
- [40] UNSOELD, A., BASCHEK, B. **The new cosmos : an introduction to astronomy and astrophysics**: 2001.
- [41] WOLTJER, L. Emission Nuclei in Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 130, p. 38, July 1959.
- [42] WU, Y., CHARMANDARIS, V., HUANG, J., SPINOGLIO, L., TOMMASIN, S. Spitzer/IRS 5-35 μm Low-resolution Spectroscopy of the 12 μm Seyfert Sample. **Astrophysical Journal**, v. 701, p. 658–676, August 2009.