



Universidade Estadual de Feira de Santana  
Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada

# Modelagem da extinção interestelar na direção de supernovas do Tipo Ia

Tereza Cristina Santos Torres

Feira de Santana

2018



Universidade Estadual de Feira De Santana  
Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada

Tereza Cristina Santos Torres

**Modelagem da extinção interestelar na direção de  
supernovas do Tipo Ia**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Feira de Santana como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Brescansin de Amôres

Coorientador: Prof. Dr. Vladan Arsenijevic

Feira de Santana

2018

**Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS**

T649m Torres, Tereza Cristina Santos  
Modelagem da extinção interestelar na direção de supernovas do Tipo Ia  
/Tereza Cristina Santos Torres. - Feira de Santana, 2018.  
96f.: il.

Orientador: Eduardo Brescansin de Amôres.

Coorientador: Vladan Arsenijevic

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana,  
Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, 2018.

1. Supernovas. 2. Extinção interestelar. 3. Modelagem computacional. I.  
Amôres, Eduardo Brescansin de, orient. II. Arsenijevic, Vladan, coorient.  
III. Universidade Estadual de Feira de Santana. IV. Título.

CDU: 524.352:004

Tereza Cristina Santos Torres

**Modelagem da extinção interestelar na direção de supernovas do  
Tipo Ia**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Feira de Santana como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Feira de Santana, 18 de junho de 2018

**BANCA EXAMINADORA**

*Eduardo Brescansin de Amôres*

---

Dr. Eduardo Brescansin de Amôres (Orientador)  
Universidade Estadual de Feira de Santana

*Carlos A. Rodrigues*

---

Dr. Carlos Alberto Rodrigues  
Universidade Estadual de Feira de Santana

*Kilder L. Ribeiro*

---

Dr. Kilder Leite Ribeiro  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia



# Abstract

The accuracy and precision of cosmological results obtained from studies of Type Ia supernovae (SNe Ia) strongly depend on the control of systematic uncertainties. The modeling of both Galactic and the host galaxy extinction is a critical step in characterizing supernovae effects, thus its improvement can provide a significantly better way of their usage. Using the Cardelli, Clayton & Mathis (CCM) extinction law we have elaborated a method for reproducing the observed SN spectra by adjusting five parameters, namely  $A_v$  and  $R_v$  for both Milky Way and SN host galaxy, also the SN *redshift*. In this manner, the fine tuning for both Galactic and the host galaxy extinction is achieved. We have used two different SNe Ia *templates* and the Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) supernova catalogue with more than 2600 SNe Ia observed spectra. The comparisons of the modeled spectra with the observed ones are presented, and the obtained parameters are thoroughly discussed. We have estimated parameters for 80 SNe Ia, covering 1080 spectra with epochs ranging from -20 to 50 days.

**Keywords:** supernovae, computational modeling, interstellar extinction, global optimization methods.

# Resumo

A precisão de resultados cosmológicos obtidos a partir de estudos de supernovas Tipo Ia (SNas Ia) dependem fortemente do controle de incertezas sistemáticas. Tanto a modelagem da extinção Galáctica quanto da galáxia hospedeira é algo fundamental na caracterização dos efeitos observados em supernovas, portanto, o seu bom modelamento pode proporcionar uma maneira mais adequada de compreendermos os aspectos físicos envolvidos. Usando a lei de extinção de Cardelli, Clayton e Mathis (CCM) foi elaborado um método para reproduzir os espectros observados de supernovas por meio do ajuste de cinco parâmetros, a extinção total ( $A_V$ ) e a razão entre a extinção total e a seletiva ( $R_V$ ), tanto para a Via Láctea como para a galáxia hospedeira da SNa, assim como o *redshift* da SNa. Dessa forma, foram encontrados os melhores valores da extinção e do *redshift* para reproduzir o espectro observado. Foram utilizados dois *templates* diferentes de SNas Ia (Hsiao e SALT) e o Catálogo de supernovas Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) com mais de 2600 espectros observados de SNas Ia. As comparações dos espectros modelados com os observados são apresentadas e os parâmetros obtidos são discutidos de forma detalhada. Foram obtidos os parâmetros para 80 SNas Ia, abrangendo 1080 espectros com épocas variando entre -20 a 50 dias. A comparação com os valores disponíveis na literatura mostram uma concordância entre os resultados obtidos no presente trabalho e os obtidos por outros autores.

**Palavras-chave:** supernovas, modelagem computacional, extinção interestelar, métodos de otimização global.

# Prefácio

Esta dissertação de mestrado foi submetida a Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Computação Aplicada.

A dissertação foi desenvolvida dentro do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada (PGCA) tendo como orientador o Prof. Dr. Eduardo Brescansin de Amôres e coorientador o Prof. Dr. Vladan Arsenijevic.

Esta pesquisa foi financiada pela Fapesb (processo de N<sup>o</sup> BOL0614/2015).

# Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Eduardo Brescansin de Amôres pela amizade, confiança e pela preciosa orientação neste trabalho e nas atividades de um modo geral.

Ao Prof. Dr. Vladan Arsenijevic pela coorientação e comprometimento com este trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Rodrigues pelos preciosos comentários feitos no trabalho no Exame de Qualificação.

Aos docentes do Departamento de Física por minha formação acadêmica.

Aos docentes da Pós-graduação em Computação Aplicada

Ao prof. José Carlos Silva dos Santos pelo companheirismo.

À minha família pelo apoio incondicional.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Astrofísica (INCT-A) –Laboratório de Astroinformática - LAi (IAG-USP), pelo acesso as máquinas.

This work has made use of the computing facilities of the Laboratory of Astroinformatics (IAG/USP, NAT/Unicsul), whose purchase was made possible by the Brazilian agency FAPESP (grant 2009/54006-4) and the INCT-A.

À Fapesb pelo apoio financeiro.

# Sumário

Abstract	i
Resumo	ii
Prefácio	iii
Agradecimentos	iv
Sumário	v
Lista de Tabelas	vii
Lista de Figuras	viii
<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Relevância e motivação.....	3
1.2 Objetivos .....	4
1.3 Organização do Trabalho.....	5
<b>2. Revisão sobre a extinção interestelar e supernovas</b>	<b>6</b>
2.1 A extinção interestelar.....	6
2.2 A extinção em galáxias .....	8
2.3 Curvas de extinção .....	9
2.4 Modelos e mapas para a extinção interestelar.....	16
2.5 Supernovas .....	18
2.6 O <i>redshift</i> .....	22
<b>3. O conjunto de dados</b>	<b>23</b>
3.1 Catálogo de Blondin .....	23
3.2 Seleção de espectros e análise de suas características.....	23
3.3 Elaboração da base de dados para uso no modelo .....	30
3.4 Os <i>templates</i> sintéticos.....	32
<b>4. O método</b>	<b>34</b>
4.1 Os Algoritmos Genéticos .....	34
4.2 O Modelo para o ajuste dos espectros de supernovas .....	36
<b>5. Discussão dos resultados</b>	<b>44</b>
5.1 Parâmetros usados.....	44
5.2 Resultados usando os espectros sintéticos Hsiao e SALT.....	48

6. Conclusões e Perspectivas	56
7. Referências Bibliográficas	58
8. Simulação e comparação entre os espectros modelados com o <i>template</i> Hsiao e os observados	65
9. Comparação entre os espectros modelados com o <i>template</i> SALT e os observados	71
10. Imagens do SDSS de supernovas e suas galáxias hospedeiras	77

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Distribuição do <i>seeing</i> para os espectros utilizados. Fonte: Catálogo de Blondin et al. (2012).....	25
Tabela 3.2: Relação entre o número de espectros usados com observações no Telescópio/Instrumento. Fonte: Catálogo de Blondin et al. (2012).....	25
Tabela 3.3: Distribuição do tamanho da fenda dos espectros observados. Fonte: Catálogo de Blondin et al. (2012).....	26
Tabela 3.4: Estrutura do arquivo <i>Hsiao_v2.dat</i> que contém os dados dos espectros sintéticos de Hsiao et al. (2007).....	30
Tabela 3.5: Estrutura do arquivo <i>SALT2_template_0.dat</i> que contém os dados dos espectros sintéticos de Guy et al. (2007).....	31
Tabela 3.6: Estrutura do arquivo <i>blondin_obs_1190.dat</i> que contém os dados referentes (Blondin et al. 2012) aos espectros observados e de interesse no presente estudo.....	31
Tabela 3.7: Estrutura do arquivo <i>all_avs.dat</i> , que contém as estimativas das medidas de extinção interestelar em nossa Galáxia. ....	31
Tabela 3.8: Informações sobre cada um dos 1190 espectros do Catálogo de Blondin et al. (2012). ....	32
Tabela 4.1: Controladores do PIKAIA, descrição e valores usados. Parte da tabela foi adaptada de Charbonneau (1995).....	37
Tabela 5.1: Faixa dos parâmetros usados nas simulações para ambos os <i>templates</i> Hsiao e SALT. Para maiores detalhes, ver o texto. ....	45

# Lista de Figuras

Figura 2.1: Ilustração da extinção interestelar (linha representada em vermelho) entre uma supernova na Galáxia vizinha M51 e um observador no Sistema Solar. Fonte: As imagens das galáxias foram obtidas de <a href="http://www.cosmotography.com/index.html">http://www.cosmotography.com/index.html</a> . .9	
Figura 2.2: Curva de extinção média ( $E\lambda - VEB - V$ versus $\lambda - 1$ ) para comprimentos de onda de 0.1 à 5 $\mu$ m. Fonte: Whittet, 1992; Savage e Mathis, 1979. Adaptado de Amôres (2000). . . . . 10	10
Figura 2.3: Curva de extinção no ultravioleta (pontos) para a Pequena Nuvem de Magalhães. A média para a Via Láctea (linha pontilhada) também é mostrada para efeitos de comparação. Adaptado de Whittet (2003). . . . . 15	15
Figura 2.4: Distribuição do HI para todo céu, em coordenadas Galácticas (longitude, latitude), tendo como base os dados do levantamento LAB. Os valores da intensidade estão disponíveis na tabela de cores na parte superior da figura. Adaptado de Amôres (2011). . . . . 18	18
Figura 2.5: Esquema da evolução estelar para diferentes faixas de massa. Fonte: <a href="http://www.if.ufrgs.br/~fatima/figuras/evolucao_estelar_versao2.jpg">http://www.if.ufrgs.br/~fatima/figuras/evolucao_estelar_versao2.jpg</a> . . . . . 19	19
Figura 2.6: Formação do disco de acreção em volta da anã branca que recebe massa da estrela companheira. Fonte: <a href="http://astro.if.ufrgs.br/evol/node51.htm">http://astro.if.ufrgs.br/evol/node51.htm</a> . . . . . 20	20
Figura 3.1: Distribuição do número de espectros por supernova. . . . . 26	26
Figura 3.2: Distribuição do número de espectros por época. . . . . 27	27
Figura 3.3: Distribuição da métrica da distância obtida por meio de medidas de diferentes autores por meio do <i>NED</i> . . . . . 28	28
Figura 3.4: Distribuição do <i>redshift</i> das 80 supernovas. . . . . 29	29
Figura 3.5: Distribuição em coordenadas Galácticas das 80 supernovas selecionadas do Catálogo de Blondin et al. (2012). . . . . 29	29
Figura 4.1: Fluxograma mostrando o esquema geral do método utilizado para ajuste dos espectros. . . . . 40	40
Figura 4.2: Fluxograma da função de usuário. . . . . 41	41
Figura 4.3 Comparação entre um espectro observado e os ajustados pelo Modelo usando os <i>templates</i> SALT (SALT2) e Hsiao. . . . . 42	42
Figura 4.4 Exemplo de parte de um arquivo de saída do modelo apresentando basicamente as informações gerais para um dado espectro assim como parte das soluções para respectivas rodadas do Modelo. . . . . 43	43



Figura 5.1: Página do GALExtin disponível usada na presente pesquisa.....	47
Figura 5.2: Valores da mediana para a extinção interestelar com base nos modelos de Burstein & Heiles (1978,1982), Schlegel et al. (1998) e Schlafly et al. (2011), Drimmel et al. (2003) e Amôres & Lépine (2005, 2007). .....	48
Figura 5.3: O $R_V$ Galáctico na direção das supernovas para as simulações utilizando os espectros sintéticos Hsiao e SALT. ....	49
Figura 5.4: Comparação entre os valores da mediana da extinção de modelos/mapas .....	50
Figura 5.5: Comparação entre os valores da mediana da extinção de modelos/mapas .....	51
Figura 5.6: Comparação entre a extinção da Via Láctea obtida usando ambos os <i>templates</i> .....	51
Figura 5.7: Comparação entre o <i>redshift</i> observado e o obtido pelo Modelo usando os <i>templates</i> Hsiao (painel superior) e SALT (painel inferior).....	52
Figura 5.8: Distribuição do $R_{V_{\text{host}}}$ para as simulações utilizando os espectros sintéticos Hsiao (sim-1) e SALT (sim-2).....	53
Figura 5.9: Distribuição do $A_{V_{\text{host}}}$ para ambas as simulações (sim-1: Hsiao e sim-2: SALT) em comparação com, parte superior: Catálogo de Jha et al. (2007), parte inferior: Malcolm et al. (2009). .....	55
Figura A.1: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no <i>template</i> Hsiao comparados ao observado para a SNa 1998bu. ....	66
Figura A.2: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no <i>template</i> Hsiao comparados ao observado para a SNa 1999aa.....	67
Figura A.3: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no <i>template</i> Hsiao comparados ao observado para a SNa 2004as. ....	68
Figura A.4: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no <i>template</i> Hsiao comparados ao observado para a SNa 2006lf. ....	69
Figura A.5: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no <i>template</i> Hsiao comparados ao observado para a SNF200805.....	70
Figura B.1: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no <i>template</i> SALT comparados ao observado para a SNa 2002bo. ....	72
Figura B.2: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no <i>template</i> SALT comparados ao observado para a SNa 2003cg.....	73
Figura B.3: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no <i>template</i> SALT comparados ao observado para a SNa 2006gr.....	74
Figura B.4: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no <i>template</i> SALT comparados ao observado para a SNa 2006le.....	75
Figura B.5: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo	

com base no template SALT comparados ao observado para a SNa 2008z..... 76

Figura C. 1: Imagens das supernovas: SN 1994d, SN 1994ae, SN 1995al, SN 1996x, SN 1997bp, SN 1997bq, SN 1997bc, SN 1997en, SN 1997do, SN 1998ab, SN 1998aq, SN 1998bp, SN 1998bn, SN 1998aq, SN 1998dh, SN 1998dm e SN 1999aa, em suas galáxias hospedeiras. .... 78

Figura C. 2: Imagens das supernovas: SN 1999ac, SN 1999by, SN 1999cl, SN 1999dq, SN 1999gh, SN 2000fa, SN 2001v, SN 2001ay, SN 2001eh, SN 2001ep, SN 2002bf, SN 2002bo, SN 2002bz, SN 2002ed, SN 2002de e SN 2002fk, em suas galáxias hospedeiras. .... 79

Figura C. 3: Imagens das supernovas: SN 2002jy, SN 2002kf, SN 2003w, SN 2003eg, SN 2003eh, SN 2003dn, SN 2003fa, SN 2003fd, SN 2003it, SN 2003iu, SN 2003kf, SN 2004l, SN 2004as, SN 2004at, SN 2004ef e SN 2004gs, em suas galáxias hospedeiras. 80

Figura C. 4: Imagens das supernovas: SN 2005am, 2005cc, 2005cf, 2005hk, 2005ke, 2006h, 2006n, 2006x, 2006ae, 2006ep, 2006gr, 2006gz, 2006le, 2006lf e 2007f, em suas galáxias hospedeiras..... 81

Figura C. 5: Imagens das supernovas: SN 2007s, SN 2007af, SN 2007bm, SN 2007ci, SN 2007eo, SN 2007hj, SN 2007kk, SN 2007le, SN 2007qe, SN 2008<sup>a</sup>, SN 2008z, SN 2008ar, SN 2008bf, SNF 20080514, SNF 20080522 e SNF 20080522, em suas galáxias hospedeiras. .... 82

# Capítulo 1

## Introdução

*“A ciência humana de maneira nenhuma nega a existência de Deus. Quando considero quantas e quão maravilhosas coisas o homem compreende, pesquisa e consegue realizar, então reconheço claramente que o espírito humano é obra de Deus, e a mais notável.”*  
--Galileu Galilei

As supernovas (SNas) são extremamente importantes no sentido da reciclagem de elementos em galáxias, assim como no conteúdo do meio interestelar e de sua evolução química. O que faz as SNas serem tão atrativas é a sua luminosidade, que pode ser tão brilhante como toda uma galáxia. As SNas do Tipo Ia, são uma classe de SNas que são extremamente homogêneas, e cuja magnitude absoluta em seu máximo é praticamente constante, podendo ser usadas como velas cósmicas para o cálculo de distâncias cosmológicas (Arsenijevic et al. 2008).

Elas vêm desempenhando um importante papel desde a descoberta da expansão acelerada do Universo por meio do uso de SNas do Tipo Ia, o que foi feito há aproximadamente 20 anos (Riess et al. 1998; Perlmutter et al. 1999). Esse fato levou Saul Perlmutter, Adam G. Riess e Brian P. Schmidt a receberem o Prêmio Nobel de Física em 2011. Entretanto, segundo Arsenijevic (2011) ainda há um espalhamento no pico da distribuição para alguns eventos de SNas (aproximadamente 40%). Para reduzir essa dispersão uma calibração adicional nas curvas de luz de supernovas faz-se necessária, o que fornece duas relações empíricas entre o pico da luminosidade e a sua

taxa de redução.

A primeira relação pode ser explicada pela física das SNas e depende da massa de Níquel (Ni) e da energia de explosão. A segunda relação depende da definição de cor adotada (normalmente definida como  $B_{\max} - V_{\max} + \text{constante de calibração}$ ). Depois dessas correções, a dispersão pode ser reduzida em 0.12 magnitudes, o que corresponde a uma precisão de 6% nas medidas de distâncias (Hicken et al. 2009; Folatelli et al. 2010; Conley et al. 2011).

Recentemente, os estudos de SNas Tipo Ia, apontam que o parâmetro  $R_V^1$ , situa-se na faixa de 1.5 até 2.5 (Astier et al. 2006; Hicken et al. 2009; Kessler et al. 2009; Wang et al. 2009; Sullivan et al. 2011). Isso implica na dependência do comprimento de onda com a extinção interestelar sendo mais proeminente em supernovas do Tipo Ia em galáxias hospedeiras do que na Via Láctea.

Outro aspecto, é que os valores de  $R_V$  menores do que dois não são válidos na parametrização na curva de extinção de Cardelli, o que sugere dois pontos, ou a poeira nas galáxias hospedeiras tem diferentes propriedades quando comparadas com a poeira da Via Láctea, ou as variações intrínsecas entre as SNas tem efeito além dos efeitos medidos nas cores.

Existem objetos que apresentam maiores expansões de velocidade da característica de SiII, que são intrinsecamente vermelhos (Foley et al. 2011), assim como os mais altamente avermelhados como proposto por Arsenijevic (2011) e Mandel et al. (2011), especialmente na direção de baixos  $R_V$ . De outra forma, Chotard et al. (2011) obtiveram uma lei de extinção consistente com a lei de Cardelli após a correção de variabilidade intrínseca no CaII H&K e SiII.

Alguns estudos como os realizados por Bronder et al. (2008); Arsenijevic et al. (2008) mostraram que o espectro de SNas são similares em relação ao *redshift* no qual são observados, sugerindo que a composição química das SNas do Tipo Ia é incomum, reduzindo dessa forma a possibilidade de evolução das propriedades com o *redshift*. Indicadores espectrais como larguras equivalentes, não são dependentes da extinção na galáxia hospedeira, e são usados para quantificar as variações de cores intrínsecas de

---

<sup>1</sup>razão entre a extinção total ( $A_V$ ) e a seletiva,  $E(B-V)$ .

SNas do Tipo Ia, conforme indicado nos artigos Nordin et al. (2011); Blondin et al. (2011); Chotard et al. (2011); Foley et al. (2011); Silverman et al. (2012).

Jha et al. (2010) usando uma amostra com 64 galáxias do Catálogo 2MASS de galáxias (Jarrett et al. 2003) simularam o efeito da extinção na magnitude nos filtros  $J$ ,  $H$  e  $K$  por meio de dois métodos, o primeiro consiste em um método otimizado que fornece uma correção mais precisa, e o segundo uma correção em termos estatísticos que tem melhores resultados em direções com baixos valores de extinção.

O primeiro método oferece melhores resultados, enquanto que para o segundo é necessário um bom conhecimento de valores da extinção na direção das galáxias. Esses resultados são particularmente importantes no estudo de galáxias no plano Galáctico, onde temos estruturas como o Grande *Atractor*, o Muro de Norma todos na direção da *Zona de Avoidance*, uma região que espera-se uma grande concentração de galáxias, mas devido à extinção interestelar e ao grande número de estrelas as galáxias são de difícil identificação (Amôres et al. 2012).

Cikota et al. (2016) por meio do método de Monte Carlo realizaram simulações em que são usados modelos com espectros de SNas Ia em galáxias KINGFISH para estimar o efeito da poeira interestelar nos espectros. O principal objetivo desta simulação é criar gráficos da probabilidade do excesso de cor de SNe Ia em função da distância do centro das galáxias, assim como estimar as incertezas sobre o excesso de cor para diferentes tipos morfológicos de galáxias.

A estatística gerada com a simulação de Monte Carlo é utilizada para determinar os valores da extinção na galáxia anfitriã assim como seu valor de  $R_V$ . Cikota et al. (2018) estudaram a relação entre a extinção e a polarização para uma amostra de 17 estrelas em nossa Galáxia na direção de regiões com alta extinção.

## 1.1 Relevância e motivação

O estudo da extinção interestelar na direção de supernovas é de grande valia e impacto, entre outros aspectos na determinação de distâncias cosmológicas e suas implicações. A melhor compreensão das questões da extinção na direção das SNas poderá levar a um melhor conhecimento das propriedades de SNas que são usadas como velas

cósmicas, para o cálculo de distâncias cosmológicas. Cabe ressaltar, que não existem muitas estimativas, por exemplo, da extinção na galáxia hospedeira.

Por outro lado, existem poucos trabalhos que realizaram a modelagem sistemática de espectros de supernovas, tal modelagem pode trazer aspectos interessantes não somente sobre as propriedades do meio no qual as supernovas estão hospedadas, de algumas de suas propriedades, mas também de nosso meio interestelar.

Apesar de existirem várias estimativas da extinção interestelar Galáctica na direção dessas supernovas, conhecer essa variação e a forma como esta pode afetar os espectros é de grande valia.

Esse trabalho utiliza-se de uma base grande de espectros e pode ser ampliado para estudos futuros, conforme descrito nas Conclusões e Perspectivas; e faz parte de esforços iniciais que pretendem levar à melhora da modelagem de leis da extinção para as galáxias nas quais supernovas do Tipo Ia residem, podendo levar à determinação de uma nova lei empírica da extinção da poeira.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral é realizar um estudo sistemático de supernovas (SNas) do Tipo Ia por meio de uma base de dados de espectros que corresponde ao Catálogo de Blondin et al. (2012), de forma a melhorar a modelagem dos espectros observados por meio do ajuste dos parâmetros da lei de extinção de Calzetti et al. (1994), na direção de supernovas em suas galáxias hospedeiras, o que poderá resultar em uma revisão nas leis para as curvas de extinção e seu impacto em medidas cosmológicas, o que está relacionado à determinação do  $R_V$  o qual também é abordado nesse trabalho.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Estudar a distribuição da extinção interestelar na direção de SNas;
- Verificar a relação e modelar a extinção nas galáxias hospedeiras das SNas.

### 1.3 Organização do Trabalho

Esse trabalho está organizado da seguinte forma. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre a extinção interestelar, supernovas, *redshift* e a extinção em galáxias. No Capítulo 3 é apresentado o conjunto de dados utilizados, que tem como base o Catálogo de Blondin et al. (2012) e as tabelas que foram compiladas com base nesses dados, assim como uma breve descrição dos *templates* de espectros sintéticos Hsiao e SALT. No Capítulo 4 é apresentado o método para ajustar os espectros de supernovas que utiliza um Algoritmo Genético. No Capítulo 5 são apresentados os resultados e a sua discussão. Por fim no Capítulo 6 são apresentadas as Conclusões e as Perspectivas Futuras para o trabalho. Nos apêndices A e B são apresentadas figuras com alguns exemplos dos espectros ajustados para os dois *templates* utilizados no trabalho, Hsiao e SALT, em relação aos observados; e finalmente no Apêndice C são apresentadas as figuras das supernovas em suas galáxias hospedeiras, tendo como base as imagens do SDSS.

## Capítulo 2

# Revisão sobre a extinção interestelar e supernovas

O capítulo aborda uma revisão de alguns pontos básicos da pesquisa, tais como a extinção interestelar e suas respectivas curvas, e uma breve descrição de como a extinção está distribuída em galáxias. Devido ao fato de que o principal objetivo de estudo na Dissertação são as supernovas, é feita uma breve descrição sobre os estágios de evolução estelar assim como a formação de supernovas do Tipo Ia.

### 2.1 A extinção interestelar

A existência da poeira interestelar foi primeiramente estudada por Trumpler (1930). Muito do conhecimento da poeira interestelar continua a basear-se em estudos da dependência do comprimento de onda, desta atenuação, muitas vezes referida como avermelhamento.

A extinção interestelar é causada basicamente por grãos de poeira interestelar, compostos por grafite, carbono, silicato, etc. De uma forma geral existe uma mistura de grãos de poeira com composição de silicato e carbono, sendo que a distribuição da população de grãos é descrita por Weingartner & Draine (2001). Ainda segundo os autores, outra componente, composta de partículas muito pequenas são as moléculas de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs), que estão misturadas ao grafite.

Esse método tem sido utilizado para medir curvas de extinção de muitas linhas de visada, ao longo de uma gama de comprimentos de onda que se estendem a partir do infravermelho próximo ao ultravioleta (Draine, 2003).



Os grãos de poeira de uma forma geral estão concentrados principalmente no plano Galáctico e nuvens interestelares (Whittet, 1992; Amôres, 2000; Amôres e Lépine, 2005; entre outros) tendo como efeito a redução da intensidade da luz das estrelas.

O processo é causado basicamente por dois processos físicos, a absorção, na qual a energia absorvida do fóton é convertida em energia interna do grão acarretando o seu aquecimento e a reemissão no infravermelho; e o espalhamento no qual o fóton é defletido da linha de visada. Dessa forma, a poeira interestelar reduz o brilho dos objetos que observamos no céu. Tradicionalmente, a extinção é quantificada pela relação  $A_X$ , onde  $X$  refere-se à um determinado filtro e tem seu valor dado em magnitudes.

Dessa forma a poeira interestelar reduz o brilho dos objetos que observamos no céu. Tradicionalmente, a extinção é quantificada pela relação  $A_X$ , onde  $X$  refere-se à um determinado filtro e tem seu valor dado em magnitudes.

Duas importantes quantidades relacionadas à extinção interestelar são o excesso de cor,  $E(B - V)$ , o qual é a diferença entre o excesso de cor observado ( $B - V$ ) e o intrínseco  $(B - V)_0$  de um dado objeto, por exemplo, uma estrela. Sendo que a razão da extinção total em relação ao excesso de cor, na região do óptico, é chamada de extinção seletiva ( $R_V$ ). A relação é dada por:

$$R_V = A_V / E(B - V) \quad (2.1)$$

na qual  $A_V$  é a extinção total na banda visual.

Para os grãos de poeira interestelar distribuídos em nuvens difusas na Via Láctea, seu valor médio é de 3.1 (Whittet, 1992). Os processos físicos que afetam o crescimento e coagulação dos grãos, podem alterar a sua forma e tamanho. Dessa maneira, espera-se que em diferentes linhas de visada, o valor de  $R_V$  varie. De fato, as observações apontam para uma tendência de encontrar grandes valores de  $R_V$ , aproximadamente igual a seis, em regiões com grande concentração de poeira, por exemplo, no centro de densas nuvens moleculares (Draine, 2003; Fitzpatrick, 2004).

Outro aspecto importante reside no fato de que a extinção é inversamente proporcional ao comprimento de onda, sendo que no filtro  $K_S$  no infravermelho próximo, ela é

aproximadamente 10% da observada no visível (Rieke & Lebovsky, 1985, entre outros).

## 2.2 A extinção em galáxias

Estudos de outras galáxias podem fornecer uma imagem qualitativa da distribuição, em larga escala da poeira em galáxias espirais típicas como a Via Láctea, a poeira é mais evidente no disco (Whittet, 1992).

Conforme discutido no presente capítulo, a concentração de poeira no disco Galáctico dificulta seriamente a investigação da estrutura e dinâmica da Via Láctea. Outra implicação, é que é extremamente difícil de detectar novas, supernovas e galáxias no disco da Via Láctea (Amôres et al. 2012, entre outros).

Estudos de galáxias externas sugerem que a taxa média esperada de supernovas em espirais que seguem o diagrama de Hubble, semelhante à Via Láctea é de aproximadamente uma a cada 50 anos, com uma incerteza de cerca de um fator de dois (Bergh, 1991).

A aparente discrepância é atribuída também à existência da extinção interestelar. Explosões de supernovas presumivelmente ocorrem na Via Láctea aproximadamente à taxa esperada, mas muitas estão escondidas pela poeira, para sistemas externos, nosso ângulo de visão é geralmente mais favorável (Huang et al. 2017).

Os primeiros estudos da poeira interestelar em galáxias externas foram realizados na Pequena e Grande Nuvem de Magalhães (Clayton et al. 1985), cujas abreviações em inglês são *SMC* e *LMC*, respectivamente. A maioria das linhas de visada nessas galáxias apresenta diferentes curvas de extinção do valor médio na Via Láctea. Em alguns casos extremos, a curva cresce de forma linear e aprofundada no ultravioleta, sem a característica observada em  $2175\text{Å}$ , conhecida, como o *Bump* de  $2175\text{Å}$  (Prevot et al. 1984; Clayton et al. 1985).

Gordon et al. (2003) sugeriram que todas as curvas de extinção na *SMC* e *LMC* podem ser interpretadas como uma sequência de eventos, a partir de regiões de quiescência e de regiões na galáxia com maior atividade. Em particular, eles encontraram que as relações na *SMC* e *LMC* não seguem as curvas de extinção de Cardelli (Calzetti et al. 2000).

A extinção interestelar até o limite de Lyman (122 nm) é tema de estudos por diversas razões. Em comprimentos de onda menores do que  $1200\text{Å}$ , a extinção aumenta fortemente, e as diferenças entre os ambientes de galáxias parecem aumentar. Isso significa, que as correções para fluxos observados são potencialmente muito sensíveis a quantidade e tipo de extinção interestelar. Isto é importante para a compreensão do consumo de energia de galáxias com populações estelares jovens, e em altos *redshifts* na identificação da população total de galáxias jovens (Whittet, 1992).

No caso da Figura 2.1, a luz da SNa além de sofrer extinção devido aos grãos de poeira na galáxia onde está localizada, sofrerá também a extinção causada pela Via Láctea, a extinção no meio intergaláctico, ou seja, entre as bordas da Via Láctea e da galáxia anfitriã é considerada nula.



Figura 2.1: Ilustração da extinção interestelar (linha representada em vermelho) entre uma supernova na Galáxia vizinha M51 e um observador no Sistema Solar. Fonte: As imagens das galáxias foram obtidas de <http://www.cosmotography.com/index.html>.

## 2.3 Curvas de extinção

De uma forma geral, uma curva de extinção corrige o fluxo dos efeitos da extinção devido aos grãos interestelares para uma dada faixa de comprimento de onda (Figura 2.2), pois ela afeta de maneira diferente um espectro, dependendo do comprimento de onda considerado.

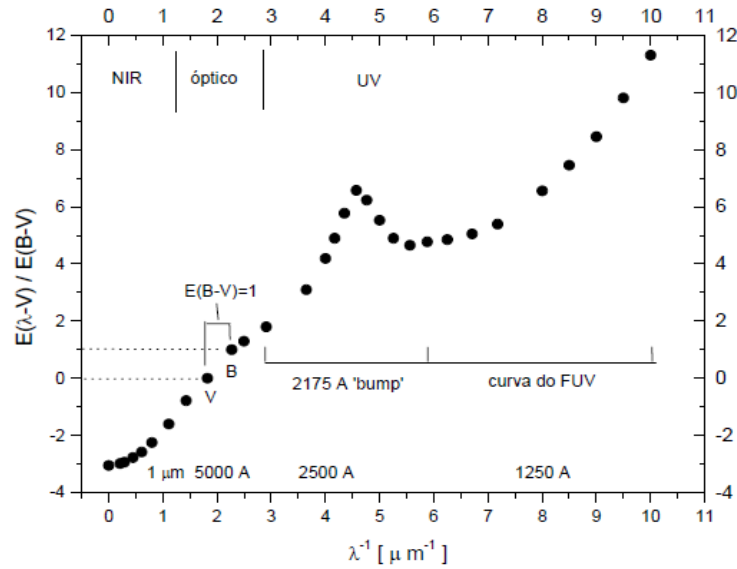


Figura 2.2: Curva de extinção média ( $E_{\lambda-V}/E_{B-V}$  versus  $\lambda^{-1}$ ) para comprimentos de onda de 0.1 à  $5\mu\text{m}$ . Fonte: Whittet, 1992; Savage e Mathis, 1979. Adaptado de Amôres (2000).

A forma da curva de extinção na região do óptico está diretamente relacionada ao tamanho dos grãos de poeira interestelar, como por exemplo, detalhado nos trabalhos de Li e Draine (2001) e Weingartner & Draine (2001), entre outros.

As curvas de extinção também são usadas em cosmologia observacional, e é geralmente assumido que as variações de  $R_V$  reproduzem as variações na curva de extinção. Argumenta-se que os erros sistemáticos em escalas de distância, obtidos a partir de estudos de supernovas do Tipo Ia e Cefeidas podem ter sido subestimados (Nataf et al. 2016).

Cardelli, Clayton & Mathis (1989), daqui por diante CCM mostraram que existe uma forte relação entre a forma das leis de extinção no óptico e no ultravioleta para linhas de visada levando em conta a extinção modelada por Fitzpatrick & Massa (1986, 1988, daqui por diante, FM86 e FM88, respectivamente). Eles modelaram as leis de extinção usando apenas um parâmetro, o  $R_V$ , conforme descrito a seguir.

Na lei de CCM, o comprimento de onda dependente dos coeficientes  $a(x)$  e  $b(x)$ , sendo considerado um polinômio em  $x$  com unidades de  $\mu\text{m}^{-1}$ ,  $A(\lambda)$  e  $A(V)$  são a extinção para um dado comprimento de onda qualquer  $\lambda$  e em  $V$ , respectivamente. A lei da extinção média de CCM é dependente de  $R_V$ , como mostra a Equação (2.2):

$$\langle A(\lambda)/A(V) \rangle = a(x) + b(x)/R_V \quad ( 2.2 )$$

A divisão em segmentos da curva completa tem a sua praticidade, na medida em que muitas vezes temos diferentes instrumentos para cada segmento do espectro eletromagnético. As faixas de comprimento e os valores dos coeficientes no infravermelho e no óptico são apresentados nas equações de 2.3 a 2.6.

- Infravermelho:  $0.3\mu m^{-1} \leq x \leq 1.1\mu m^{-1}$ ;

$$a(x) = 0.574x^{1.61}; \quad ( 2.3 )$$

$$b(x) = 0.527x^{1.61}; \quad ( 2.4 )$$

- Óptico / NIR:  $1.1\mu m^{-1} \leq x \leq 3.3\mu m^{-1}$  e  $y = (x - 1.82)$ ;

$$a(x) = 1 + 0.17699y - 0.504447y^2 - 0.02427y^3 + 0.72085y^4 - 0.01979y^5 + 0.77530y^6 + 0.32999y^7 \quad ( 2.5 )$$

$$b(x) = 1.41338y + 2.28305y^2 + 1.07233y^3 - 5.3843y^4 - 0.62251y^5 + 5.30260y^6 + 2.09002y^7 \quad ( 2.6 )$$

No contexto de efetuar a correção dos efeitos da poeira interestelar na distribuição espectral de energia, do inglês *Spectral Energy Distribution* (SED), de galáxias, Calzetti et al. (1994) deduziram uma lei para galáxias com surto de formação estelar, tendo como base os dados do *International Ultraviolet Explorer* (IUE) e os espectros ópticos de 39 galáxias compactas azuladas.

Com o objetivo de obter a lei de extinção extragaláctica, os autores utilizaram seis *templates* suavizados em *bins* de  $50\text{\AA}$  os quais foram relacionados com os valores médios

da profundidade óptica<sup>2</sup> de Balmer,  $\tau_B^l = 0.05, 0.16, 0.32, 0.48, 0.59, 0.70$ , respectivamente. O *Template* 1 (com o primeiro valor de  $\tau_B^l$ ) foi utilizado como espectro de referência, em relação ao qual os outros cinco foram comparados (Calzetti et al. 1994).

A intensidade observada para o caso simples, de uma camada uniforme de poeira entre a fonte de intensidade  $I_\lambda^0$  e o observador pode ser definida (Calzetti et al. 1994):

$$I_\lambda = I_\lambda^0 e^{-\tau(\lambda)} \quad (2.7)$$

na qual  $\tau(\lambda)$  é a espessura óptica e todas as quantidades dependem do comprimento de onda,  $\lambda$ . A partir da Equação 2.7 pode-se definir a Equação (2.8):

$$\tau_n(\lambda) = -\ln \frac{F_n(\lambda)}{F_1(\lambda)} \quad (2.8)$$

na qual  $\tau_n(\lambda)$  é a profundidade óptica da poeira correspondente ao *template*  $n$  com fluxo,  $F_n(\lambda)$ . A profundidade óptica de Balmer (diferença de profundidade óptica entre as linhas de emissão nebulosa  $H\alpha$  e  $H\beta^3$ ),  $\tau_B^l$  parametriza os *templates*. Assim, define-se uma profundidade óptica redimensionada,  $Q_n(\lambda)$ , como sendo:

$$Q_n(\lambda) = \frac{\tau_n(\lambda)}{\delta\tau_{Bn}^l} \quad (2.9)$$

$$\delta\tau_{Bn}^l = \tau_{Bn}^l - \tau_{B1}^l \quad (2.10)$$

$\delta\tau_{Bn}^l$  é a diferença entre as profundidades ópticas Balmer do *template*  $n$  e 1. As diferenças entre as profundidades ópticas de Balmer são  $\delta\tau_{Bn}^l = 0.11, 0.27, 0.43, 0.54, 0.65$  para os *templates*  $n = 2, 3, 4, 5, 6$ , respectivamente.

Para minimizar a contribuição de flutuações espectrais, os autores consideraram apenas

<sup>2</sup> Fator de atenuação do logaritmo da intensidade da radiação ao passar por uma camada de material opaco.

<sup>3</sup>  $H\alpha$  e  $H\beta$  representam a emissão no comprimento de onda 6563Å e 4861Å, respectivamente (Oliveira e Saraiva, 2014).

$Q_n(\lambda)$  com  $n = 3, 4, 5, 6$ . No caso do *Template 2*, a diferença  $\delta\tau_{Bn}^l = 0.11$  é pequena, e as flutuações dominam a tendência.

Os *templates* representam as médias espectrais de galáxias localizadas a diferentes distâncias e luminosidades. A Equação 2.9 fornece informações sobre a extinção seletiva, mas não sobre a extinção total, o que implica que o ponto de zero  $Q_n(\lambda)$  é arbitrário. Foi escolhido como ponto zero  $Q_n(5500) = 0.0$  e, após a ponderação de cada função pelo seu associado  $\delta\tau_{Bn}^l$ , temos em média o  $Q_n(\lambda)$  para produzir  $Q_e(\lambda)$ , que será chamada de lei extinção efetiva.

O uso de  $Q_n(\lambda)$  com  $n = 3, 4, 5, 6$  apresenta uma boa concordância, não só na região do UV<sup>4</sup> mas também em comprimentos de onda no óptico, o que segundo Calzetti et al. (1994) confirmam que:

- é um parâmetro apropriado para caracterizar a extinção efetiva;
- a amostra de galáxias utilizadas é grande o suficiente para produzir *templates*, para galáxias com populações estelares médias.

A lei de extinção efetiva  $Q_e(\lambda)$  foi analisada no intervalo de 1250 - 8000Å, usando-se um polinômio de terceiro grau como uma função de  $x = 1/\lambda$  ( $\mu\text{m}^{-1}$ ):

$$Q_e(x) = -2.156 + 1.509x - 0.198x^2 + 0.011x^3 \quad (2.11)$$

Chevallard et al. (2013) apresentaram uma nova relação para corrigir a *SED* das galáxias do efeito da atenuação da poeira e mostraram que tanto o efeito da geometria e orientação alteram as cores no óptico por um fator de até 0.4 magnitudes.

As curvas de extinção UV discutidas por Fitzpatrick e Massa (1990) são normalizadas por  $E(B - V)$ . Para construir essas curvas foi selecionada uma estrela de comparação levemente avermelhada. Uma curva de extinção é então construída pela relação de Fitzpatrick e Massa (1990):

---

<sup>4</sup>Ultravioleta (UV) é a radiação eletromagnética mais energética e emite no comprimento de onda de 2000 a 4000Å (Oliveira e Saraiva, 2014).

$$k(\lambda - V) \equiv \frac{E(\lambda - V)}{E(B - V)} = \frac{m(\lambda - V) - m(\lambda - V)_{std}}{(B - V) - (B - V)_{std}}, \quad (2.12)$$

Na qual  $m(\lambda - V)$  e  $B - V$  são as cores visuais, e  $(\lambda - V)_{std}$  e  $(B - V)_{std}$  são as cores avermelhadas do fluxo padrão. A função parametrizada completa é dada por:

$$k(x - V) = c_1 + c_2 + c_3 D(x; \gamma, x_0) c_4 F(x), \quad (2.13)$$

com

$$D(x; \gamma, x_0) = \frac{x^2}{(x^2 - x_0^2)^2 + x^2 \gamma^2}, \quad (2.14)$$

e

$$F(x) = \begin{cases} 0.5392(x - 5.9)^2 + 0.05644(x - 5.9)^3 & \text{para } x \geq 5.9 \mu\text{m}^{-1}, \\ 0 & \text{para } x < 5.6 \mu\text{m}^{-1}. \end{cases} \quad (2.15)$$

Para determinar os valores de  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$ ,  $\gamma$  e  $x_0$ , ajusta-se uma curva de extinção por meio da Equação (2.13).

Martin e Whittet (1990) aproximaram a curva de extinção média, que cobre o infravermelho próximo e parte do médio (0.7 a 5  $\mu\text{m}$ ) por uma lei de potência cuja expressão é dada por:

$$\frac{E_{\lambda - V}}{E_{B - V}} = 1.19\lambda^{-1.84} - 3.05 \quad (2.16)$$

A aparência da curva de extinção para comprimentos de onda  $\lambda^{-1} > 2.0 \mu\text{m}^{-1}$  é apresentada na Figura 2.2, sendo caracterizada basicamente por três efeitos (Whittet 1992):

- variação na curva do azul até o ultravioleta próximo de 2 até 3  $\mu\text{m}^{-1}$ ;
- variação na intensidade e largura do pico em 4.6 (bump de 2175  $\text{Å}$ );



- mudanças na curva no ultravioleta distante começam a surgir em  $\lambda^{-1} > 6\mu\text{m}^{-1}$ .

A lei de extinção na faixa espectral entre  $0.7 - 5.0 \mu\text{m}$  é essencialmente invariante. Em comprimentos de onda mais curtos, não se observa diferença significativa entre diferentes regiões da vizinhança do Sistema Solar, ou entre a Via Láctea e as Nuvens de Magalhães.

As diferenças nas proporções do excesso de cor  $E_{V-\lambda}/E_{B-V}$ , onde  $\lambda$  corresponde a um comprimento de onda no infravermelho ou em um dado filtro, são devido à mudança na inclinação da lei de extinção na região do azul, afetando a extinção diferencial entre  $B$  e  $V$ .

Essas variações nas proporções do excesso de cor desaparecem, caso o  $R_V$  seja determinado e as curvas de extinção normalizadas para a extinção absoluta  $A_\lambda/A_V$ . A convergência da lei de extinção no infravermelho pode nos dizer algo fundamental sobre a extinção. A curva da *SMC* apresentada na Figura 2.3 exibe um contínuo íngreme e uma absorção extremamente fraca ou ausente (Whittet, 2003).

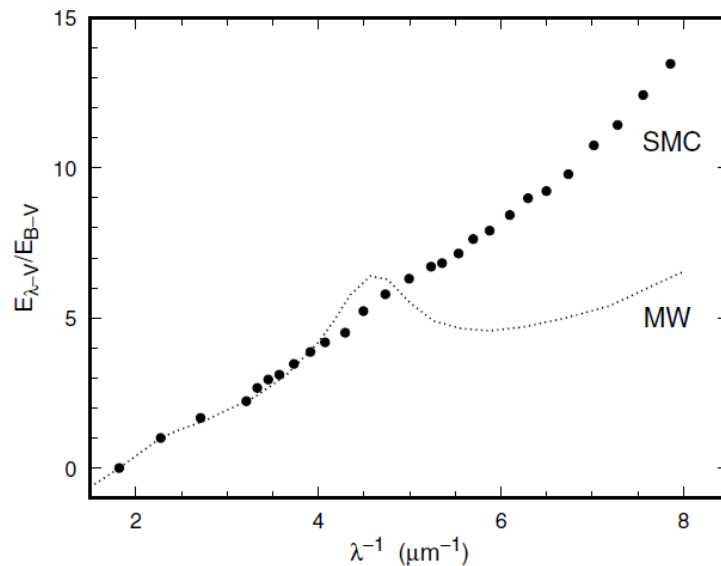


Figura 2.3: Curva de extinção no ultravioleta (pontos) para a Pequena Nuvem de Magalhães. A média para a Via Láctea (linha pontilhada) também é mostrada para efeitos de comparação. Adaptado de Whittet (2003).

## 2.4 Modelos e mapas para a extinção interestelar

Apesar da distribuição da poeira interestelar ser muito irregular, é possível por meio de modelos e da elaboração de mapas estimar o seu valor para uma dada linha de visada.

De forma geral, temos modelos que fornecem a extinção na Via Láctea em três dimensões, ou seja, dada as coordenadas Galácticas (ou equatoriais) do objeto e a sua distância, do Sol até uma estrela, por exemplo, pode-se inferir a extinção interestelar na direção desse objeto, considerando-se três dimensões. A extinção interestelar por definição da Terra até o Sol é considerada zero.

Os mapas em duas dimensões são muito úteis quando desejamos a extinção total ao longo da linha de visada, no caso são consideradas as coordenadas e uma distância fixa que varia de mapa para mapa. Isso é particularmente necessário quando do estudo de objetos extragalácticos (Amôres et al. 2012, entre outros), ou seja, fora da Via Láctea, ou quando desejamos conhecer a contribuição total da extinção da Via Láctea para uma dada direção, esse valor também é conhecido como extinção integrada.

Os modelos em três dimensões por sua vez também podem ser usados nessa tarefa, considerando-se, uma distância, por exemplo, de 20 kpc, na qual, os modelos de extinção Galácticos, geralmente começam a fornecer, dependendo da direção, uma extinção plana a partir desse ponto.

Schlegel, Finkbeiner & Davis (1998, SFD) elaboraram um mapa para a extinção interestelar em todo o céu tendo como base os mapas do experimento DIRBE/CORBE<sup>5</sup> no infravermelho. Esses mapas fornecem bons valores para a extinção fora do plano da Via Láctea, na qual falham devido a algumas simplificações feitas pelos autores, em regiões com grande densidade de poeira e variação de temperatura. Posteriormente, Schlafly et al. (2010, 2011) tendo como base a curva de extinção de Fitzpatrick & Massa (1999) e os dados do SDSS sugeriram uma recalibração nos dados do mapa de SFD em aproximadamente 20%, que é válida para todo o céu.

O trabalho de SFD possui mais de 10 mil citações<sup>6</sup> e acabaram substituindo o mapa de extinção usado até então elaborado por Burstein & Heiles (1978, 1982) tendo como

<sup>5</sup>[https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/dirbe\\_overview.cfm](https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/dirbe_overview.cfm)

<sup>6</sup><http://adsabs.harvard.edu/abs/1998ApJ...500..525S>

base a emissão do hidrogênio neutro e de contagens de galáxias.

Drimmel et al. (2003) apresentaram um modelo tridimensional para descrever a extinção Galáctica. Com este modelo, a extinção ( $A_V$ ) para qualquer ponto dentro do disco Galáctico é obtida usando um conjunto de grades cartesianas tridimensionais, derivadas com base em dados no infravermelho próximo.

Amôres & Lépine (2005) elaboraram dois modelos para a extinção interestelar na Galáxia, que são baseados na hipótese de que a poeira interestelar está bem misturada ao gás, com uma razão constante, e, que a extinção é proporcional à densidade da coluna do gás.

No primeiro modelo, é assumido que a Galáxia é axissimétrica. A densidade do gás no disco é uma função do raio Galáctico e da distância perpendicular ao plano Galáctico, e a extinção interestelar é proporcional a densidade da coluna do gás. No segundo modelo é levada em conta a estrutura espiral da Galáxia, neste caso, a extinção aumenta em passos, a cada vez que um braço espiral é atravessado, e aumenta de maneira gradual nas regiões inter-braços.

Para ter-se uma ideia da distribuição da poeira interestelar por todo o céu, podemos usar os dados do hidrogênio neutro (HI), o qual está bem misturado com a poeira.

A Figura 2.4 apresenta a distribuição do HI para todo o céu (Amôres, 2011) na qual podemos notar que a maior concentração do gás, encontra-se no plano de nossa Galáxia, ou seja, valores de latitude Galáctica (ordenada da figura), menores do que aproximadamente 10 graus em módulo. Nas partes mais externas com longitudes em módulo, superiores a 90 graus, nota-se a presença de estruturas que são devido ao *warp* e *flare* do disco Galáctico (Amôres et al. 2017, entre outros).

Os dados dos mapas e modelos descritos acima serão os usados como estimativas para a extinção interestelar na direção das supernovas e serão descritos com detalhe nos capítulos 4 e 5.

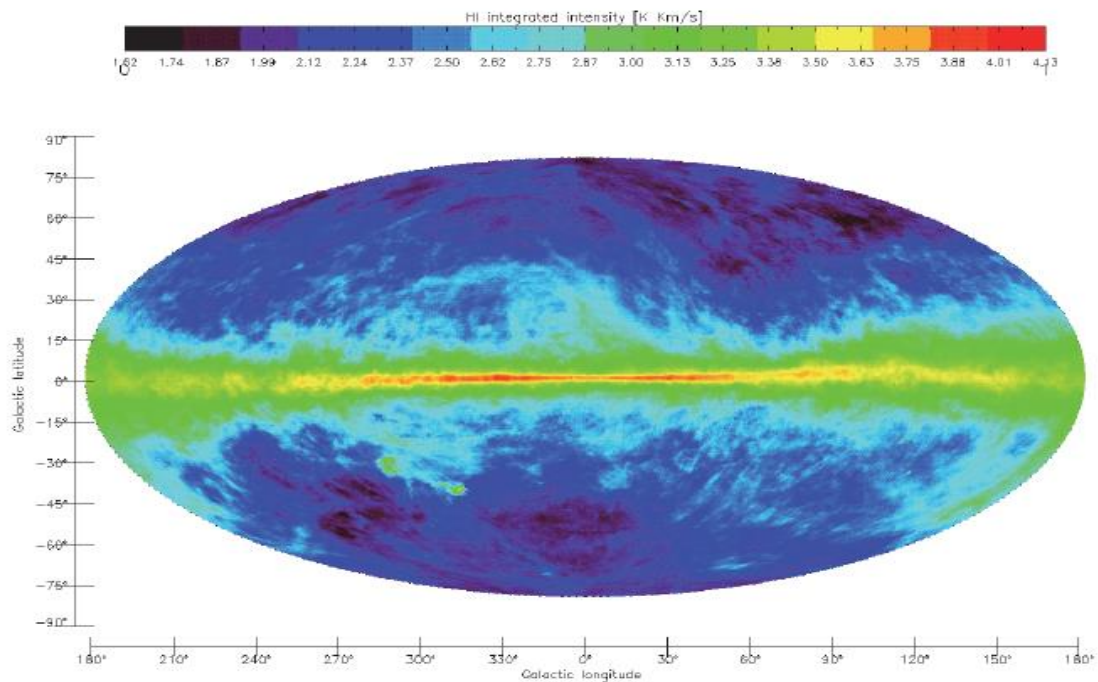


Figura 2.4: Distribuição do HI para todo céu, em coordenadas Galácticas (longitude, latitude), tendo como base os dados do levantamento LAB. Os valores da intensidade estão disponíveis na tabela de cores na parte superior da figura. Adaptado de Amôres (2011).

## 2.5 Supernovas

As estrelas nascem basicamente em nuvens moleculares, e passam a maior parte de sua vida na sequência principal, ou seja, transformando hidrogênio em hélio pela fusão nuclear, e posteriormente em elementos mais pesados (Oliveira & Saraiva, 2014).

A evolução final das estrelas depois de ter consumido o seu combustível nuclear, vai depender de dois fatores principais: se ela faz parte de um sistema binário ou múltiplo e de sua massa inicial. Quando a estrela faz parte de um sistema binário ou múltiplo, a sua evolução depende tanto da massa quanto da distância entre elas (Oliveira & Saraiva, 2014).

Quando uma nuvem molecular se contrai, formando uma proto-estrela, e o seu núcleo ganha temperatura suficiente para iniciar reações nucleares estáveis, a proto-estrela torna-se uma estrela da sequência principal. A partir daí sua evolução varia de acordo com a sua massa inicial (Oliveira & Saraiva, 2014).

A Figura 2.5 mostra um esquema da evolução estelar, desde o nascimento da estrela

até o seu estágio final. Nota-se no esquema, as várias fases da evolução estelar, como os elementos químicos envolvidos e as várias fases da evolução estelar de acordo com a massa da estrela ( $M$ ) em comparação com a massa ( $M_{\odot}$ ) do Sol.

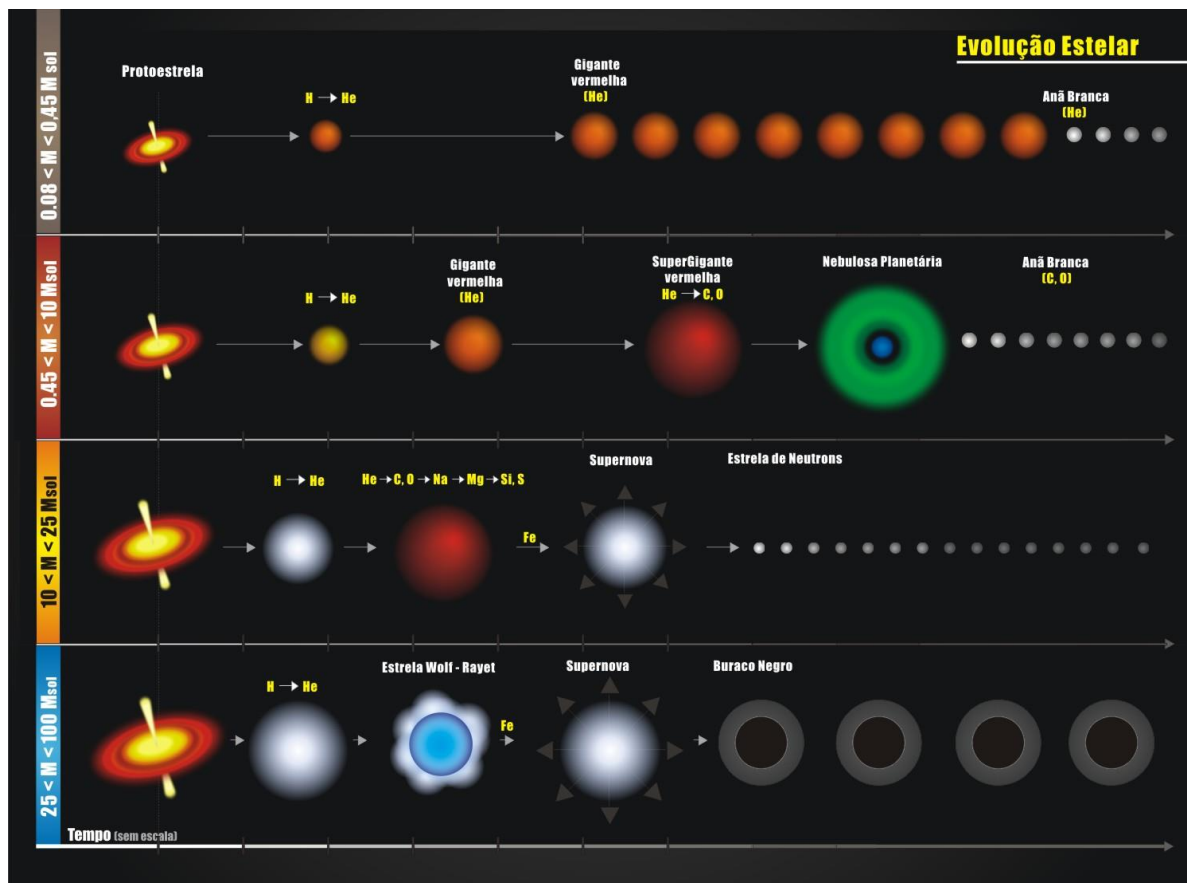


Figura 2.5: Esquema da evolução estelar para diferentes faixas de massa. Fonte: [http://www.if.ufrgs.br/~fatima/figuras/evolucao\\_estelar\\_versao2.jpg](http://www.if.ufrgs.br/~fatima/figuras/evolucao_estelar_versao2.jpg).

As SNas têm sido observadas por seres humanos há milhares de anos, no entanto, apenas cerca de um século atrás por volta do ano de 1885, quando Hartwig descobriu uma SNa perto do centro da galáxia de Andrômeda, que se iniciaram as pesquisas relacionadas a este assunto. Lundmark (1921) foi o primeiro a associar a supernova observada por astrônomos chineses em 1054 com a nebulosa do Caranguejo (Hillebrandt, 2000).

SNas são um dos estágios de evolução final das estrelas e elas podem ocorrer de várias formas, uma delas, são as SNas de colapso de núcleo, que é a morte explosiva de estrelas

massivas ( $M > 8M_{\odot}$ ) que ocorrem quando o seu núcleo de ferro colapsa tornando-se estrelas de nêutrons ou buracos negros; outra forma, são as SNas termonucleares que surgem quando uma anã branca “rouba” material de uma estrela companheira (Figura 2.6) até que ele atinja uma massa crítica, a massa de Chandrasekhar, que leva a uma explosão termonuclear, que ejeta toda a sua massa. Esses fenômenos constituem eventos extremamente luminosos por um período relativamente curto de tempo (alguns segundos) que duram até algumas semanas após a explosão. Esses eventos são os responsáveis pelo enriquecimento de elementos pesados no Meio Interestelar (*MIS*) e, por conseguinte, o Universo (Whittet, 1992).

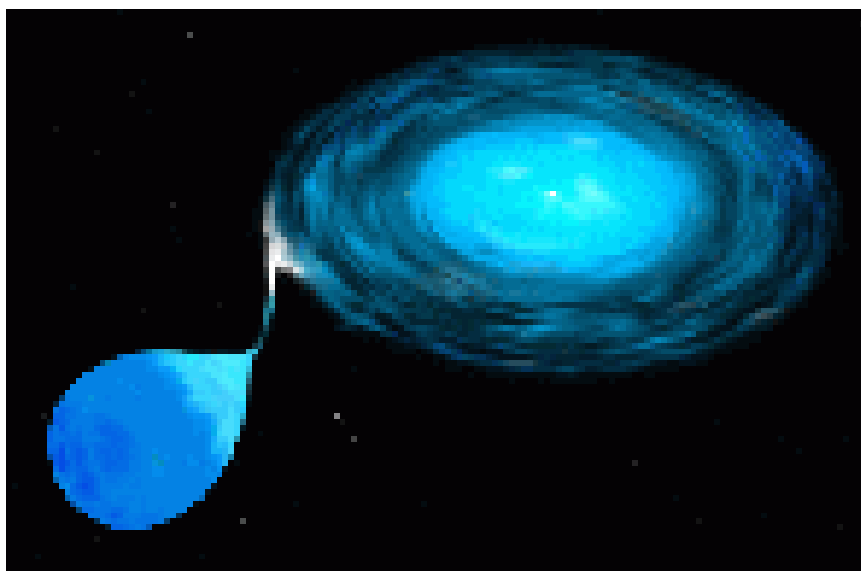


Figura 2.6: Formação do disco de acreção em volta da anã branca que recebe massa da estrela companheira. Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/evol/node51.htm>.

O *MIS* é um importante componente das galáxias, fornecendo, por exemplo, o material para formar estrelas e eventualmente mudar a formação estelar, contribuindo também para a emissão em rádio e no infravermelho de galáxias. No óptico, ultravioleta e altas energias, a poeira interestelar absorve, espalha e/ou polariza a emissão oriunda das estrelas nas galáxias.

As supernovas são classificadas conforme as suas curvas de luz e as linhas de absorção dos elementos químicos de seus espectros. A supernova que possui as linhas de hidrogênio é classificada como Tipo II, a que não possui é do Tipo I. A presença de

outros elementos subdivide estes Tipos. As supernovas do Tipo I, podem se subdividir em (Cappellaro e Turatto, 2000):

- Ia – apresenta linhas isoladas de Silício ionizado (Si II);
- Ib – apresenta linha de hélio não ionizado (He I);
- Ic – apresenta linha fraca de hélio ou nem uma linha de hélio.

Tanto as supernovas do Tipo Ib quanto as do Tipo Ic, possuem fraca característica de absorção de silício ou nenhuma. As supernovas do Tipo II (Cappellaro e Turatto, 2000) se subdividem em:

- IIb – o espectro evolui, e dessa forma este Tipo torna-se Ib;
- II-p – possui pico em sua curva de luz que se assemelha a um planalto;
- II-L – possui uma certa linearidade em sua curva de luz.

As SNas que não se enquadram nos Tipos I e II são classificadas (Zwicky, 1964) como Tipo III (possui curva de luz máxima e largas linhas de Balmer de hidrogênio), IV (sua curva de luz se assemelha ao Tipo II-P) e V (com aumento de brilho muito lenta, com duração de meses).

A presente Dissertação aborda a natureza da poeira interestelar e da emissão da poeira de origem extragaláctica, de SNas de Tipo Ia, a qual será descrita de forma resumida a seguir.

### 2.5.1 Supernova do Tipo Ia

As supernovas do Tipo Ia são as explosões de estrelas anãs brancas que ao atingirem a massa de Chandrasekhar,  $M_{chan} \approx 1.39M_{\odot}$ , tem-se o início da queima de carbono e oxigênio em níquel (Oliveira & Saraiva, 2014). Os principais argumentos (Hillebrandt et al. 2000) em favor dessa interpretação incluem:

- aparente falta de estrelas de nêutrons em algumas das supernovas galáctica histórica (por exemplo SN1006, SN 1572, SN1604);
- aparência homogênea desta subclasse;

- excelentes acessos às curvas de luz, que podem ser obtidos a partir da simples suposição de que alguns décimos de uma massa solar de  $^{56}\text{Ni}$  é produzido durante a explosão;
- boa concordância com o espectro observado típico de supernovas de Tipo Ia.

As SNas Ia são classificadas com base em características espectroscópicas, tais como a ausência de linhas de absorção de hidrogênio, o que diferencia das do Tipo II, e a presença de fortes linhas de silício no início e no final do espectro (Wheeler, 1990).

## 2.6 O *redshift*

O *redshift* termo em inglês que significa desvio para o vermelho, acontece quando vemos a linha de determinado objeto deslocada em relação ao que conhecemos da dada linha no referencial terrestre. O *redshift* possui várias causas, tais como: o efeito Doppler, o campo gravitacional da fonte e a expansão do Universo, entre outras (Lineweaver, 2005).

O Efeito Doppler ocorre quando uma fonte de luz está afastando-se de um observador. O *redshift* devido ao campo gravitacional da fonte acontece quando ocorre a dilatação do tempo dentro de um poço gravitacional, e é explicado pela Teoria da Relatividade Geral.

O *redshift* devido a expansão do Universo é explicado pela lei de Hubble da correlação entre *redshift* e distâncias, o qual é corroborado por modelos de cosmologia derivados da relatividade geral que têm uma métrica de expansão do espaço (Odenwald et al. 1993). A forma como é feita a correção do comprimento de onda devido ao *redshift* é apresentada no Capítulo 4.



# Capítulo 3

## O conjunto de dados

Neste capítulo serão apresentados o conjunto de dados e os espectros sintéticos utilizados na Dissertação, assim como as propriedades básicas de ambos, e a seleção dos espectros selecionados para o presente estudo, a sua cobertura, resolução, distribuição de época e justificativa para o seu uso.

### 3.1 Catálogo de Blondin

Esse Catálogo foi publicado por Blondin et al. (2012) cujo título é *The Spectroscopic Diversity of Type Ia Supernovae*. No catálogo são apresentados 2603 espectros de 462 supernovas com baixo *redshift* do Tipo Ia, incluindo 2065 espectros não publicados até então, que foram obtidos durante os anos 1993 a 2008 por meio do Programa Supernova<sup>7</sup>. No catálogo original existem ao menos 313 SNas com ao menos 8 espectros sendo que as SNas com a menor quantidade de espectros têm ao menos dois espectros.

### 3.2 Seleção de espectros e análise de suas características

Do total de 2603 espectros existentes no Catálogo de Blondin et al. (2012) foi feita uma seleção, de forma a evitar espectros observados, cuja época de observação estivesse fora do intervalo,  $-20 \text{ dias} < \text{época} < +50 \text{ dias}$ , a época negativa significa a quantidade de dias antes do evento, e a positiva significa quantidades de dias depois do evento.

Esse procedimento foi necessário devido ao fato de que os espectros sintéticos Hsiao e

---

<sup>7</sup><https://www.cfa.harvard.edu/>

SALT (ver Seção 3.3) que foram utilizados para modelar os espectros das supernovas, possuem dados que estão restritos a essas faixas de época. Após essa seleção foram eliminados 228 espectros da amostra original.

Outro aspecto, reside no fato que de um total de 462 SNas, a grande maioria delas contém poucos espectros, o que dificulta uma análise estatística dos resultados obtidos. Tendo esse ponto em vista restringiu-se a amostra, para que as supernovas tivessem uma quantidade mínima de espectros observados.

Com o propósito de ter-se uma quantidade razoável no número de espectros observados e de supernovas, a serem estudadas, foi adotado um critério onde cada supernova tivesse ao menos dez espectros observados. Após essa etapa, a amostra foi reduzida para 1190 espectros que estão distribuídos para 80 supernovas. Existem 1166 espectros com resolução na faixa entre 4.5" e 7.5".

A Tabela 3.1 mostra a distribuição do *seeing*, que de uma forma geral, representa a medida da qualidade dos espectros devido às variações na atmosfera (quanto menor melhor a qualidade do espectro), e que pode variar significativamente na mesma noite.

Para os nossos propósitos, um ótimo valor para o *seeing* pode ser considerado menor do que 1 segundo de arco, e bons e aceitáveis valores, na faixa entre 1-2 segundos de arco. A maioria dos espectros disponíveis no Catálogo de Blondin foram obtidos com o espectrógrafo FAST no *Fred Whipple Observatory* com um telescópio de 1.5 m (Tabela 3.2) de uma maneira consistente, fazendo com que a amostra seja adequada para estudos de SNa Ia (Blondin et al. 2012).

A Tabela 3.3 mostra a distribuição da largura da fenda. Nota-se que a maioria dos espectros possuem largura de fenda, entre 1.0" e 3.0", o que também é adequado ao nosso tipo de estudo.

A Figura 3.1 apresenta a distribuição da quantidade de espectros por supernova, vemos que a maior parte possui entre 10 e 15 espectros. As SNas que contém mais do que 25 espectros são a menor quantidade, representando apenas três.

Tabela 3.1: Distribuição do *seeing* para os espectros utilizados. Fonte: Catálogo de Blondin et al. (2012).

Número de espectros	<i>Seeing</i> (s)
70	.....
85	1
200	2
45	3
3	4
6	5
1	6
1	24
651	1-2
5	1-3
85	2-3
3	2-4
4	3-4
7	3-5
3	4-5
1	5-10
2	1.1-5
3	Fair

Tabela 3.2: Relação entre o número de espectros usados com observações no Telescópio/Instrumento. Fonte: Catálogo de Blondin et al. (2012).

Número de espectros	Instrumento/Telescópio
1141	FAST
1	IMACS
2	LDSS2
5	LDSS3
35	MMTblue
2	MMTred

Tabela 3.3: Distribuição do tamanho da fenda dos espectros observados. Fonte: Catálogo de Blondin et al. (2012).

Número de espectros	Tamanho da fenda
25	.....
15	1.0
2	1.5
6	2.0
1135	3.0

A Figura 3.2 apresenta o número de espectros por época, nota-se que 613 espectros possuem época na faixa entre  $\pm 10$  dias. A partir de 10 dias observa-se que a quantidade de supernovas observadas, já é menor, o que deve-se ao fato de que decorridos a primeira e segunda dezena de dias, os principais aspectos físicos da uma explosão de supernova já foram contemplados nesse período. Outro aspecto limitante é o tempo disponível de telescópio para o acompanhamento dos demais períodos.

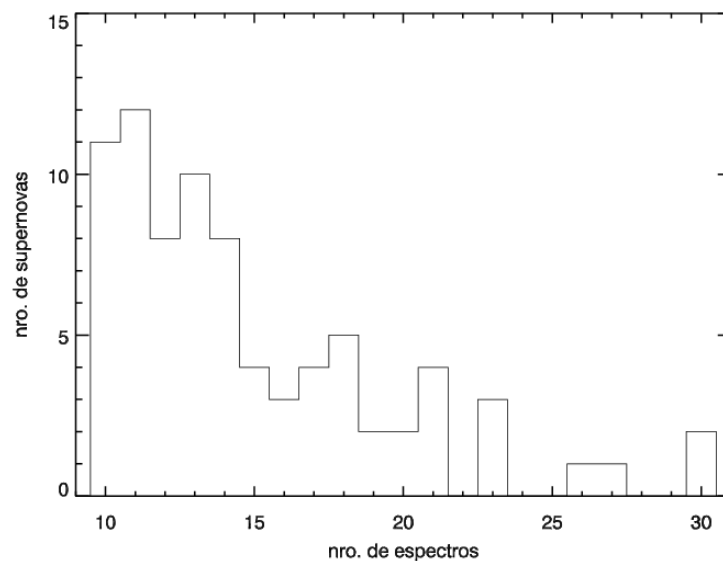


Figura 3.1: Distribuição do número de espectros por supernova.

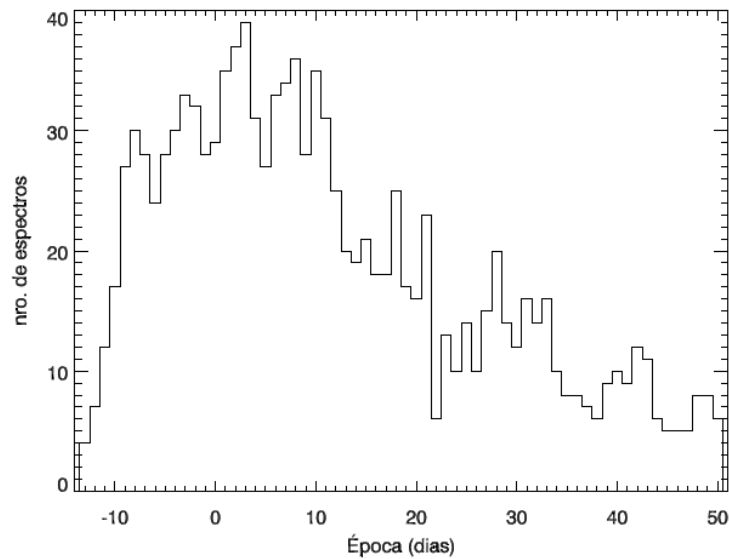


Figura 3.2: Distribuição do número de espectros por época.

Tendo como base os nomes e as coordenadas das 80 SNas selecionadas, foi realizada uma busca por meio das ferramentas do *NED*<sup>8</sup> (que é uma base de dados da *NASA/IPAC* dedicada à armazenar e permitir rápido acesso à dados de objetos extragalácticos), dados de suas galáxias anfitriãs, tais como o *redshift* e o valor de suas distâncias, as quais foram determinadas por diversos autores com diferentes métodos.

O *NED* faz uma estimativa do valor médio ( $d_{mean}$ ) dessas distâncias assim como seu respectivo desvio padrão ( $d_{std}$ ), o que é apresentado na Figura 3.3. Nota-se que as SNas de nossa amostra estão localizadas até distâncias de 180 Mpc (aproximadamente 550 milhões de anos-luz), sendo que a maior concentração de SNas, está distribuída na faixa que compreende 30 e 50 Mpc.

A Figura 3.4 apresenta a distribuição dos *redshifts* ( $z$ ) para as 80 SNas de nossa amostra, e vemos que por serem objetos de nosso Universo Local, possuem um baixo *redshift*, em nosso caso particular, estão distribuídos até  $z \sim 0.06$ ; nota-se que o pico da distribuição é de  $z \sim 0.005$ .

A Figura 3.5 apresenta a distribuição em coordenadas Galácticas das 80 supernovas selecionadas do Catálogo de Blondin et al. (2012). Nota-se claramente que a grande maioria dos objetos está fora do plano da Via Láctea, o qual é compreendido para

<sup>8</sup><https://ned.ipac.caltech.edu/>

latitudes Galácticas ( $|b| < 10^\circ$ ).

Conforme mencionado no capítulo anterior, o plano Galáctico por concentrar a maior parte do material da Via Láctea tanto estelar quanto de gás e poeira, constituiu-se em severo obstáculo para observações de objetos extragalácticos em sua direção (Amôres & Lépine, 2005; Amôres et al. 2012, entre outros).

A SNa2006lf que está dentro da galáxia UGC 3108 localizada na direção do anti-centro Galáctico possui coordenadas Galácticas (em  $l, b$ ) = (159.9213, - 1.9340), ou seja, está localizada em baixas latitudes Galácticas. Por tratar-se de uma região do plano Galáctico, a sua extinção é alta, conforme será discutido posteriormente, esse é o objeto com maior extinção Galáctica de nossa amostra.

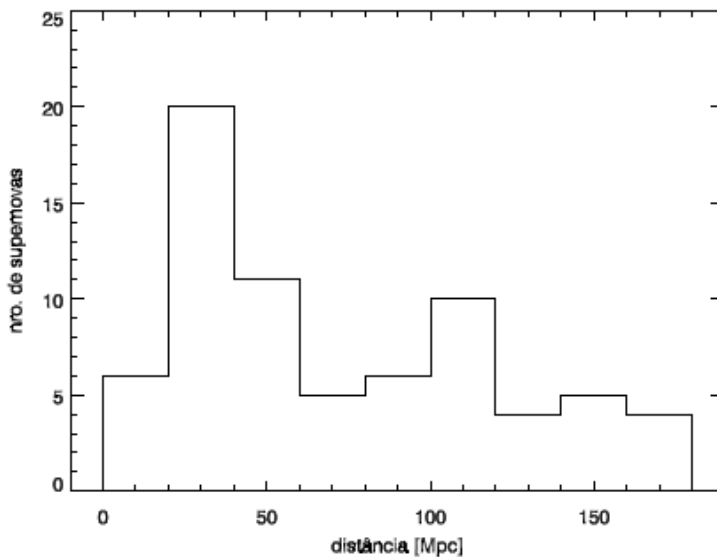


Figura 3.3: Distribuição da métrica da distância obtida por meio de medidas de diferentes autores por meio do *NED*.

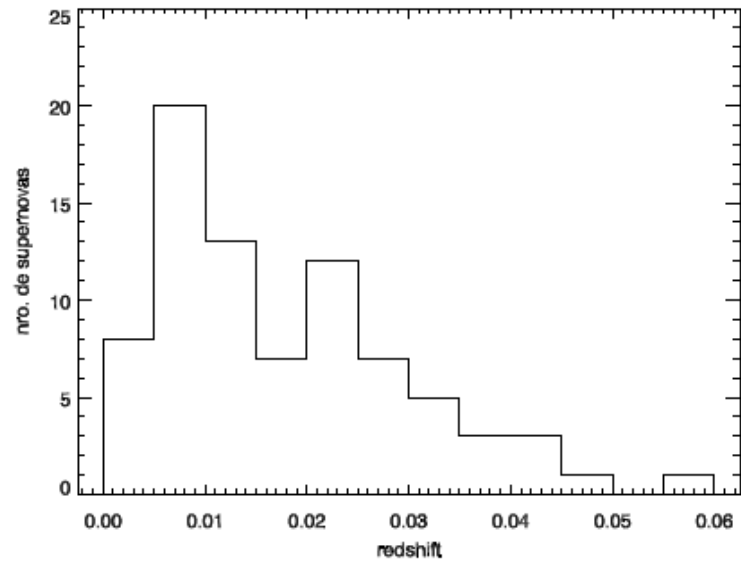


Figura 3.4: Distribuição do *redshift* das 80 supernovas.

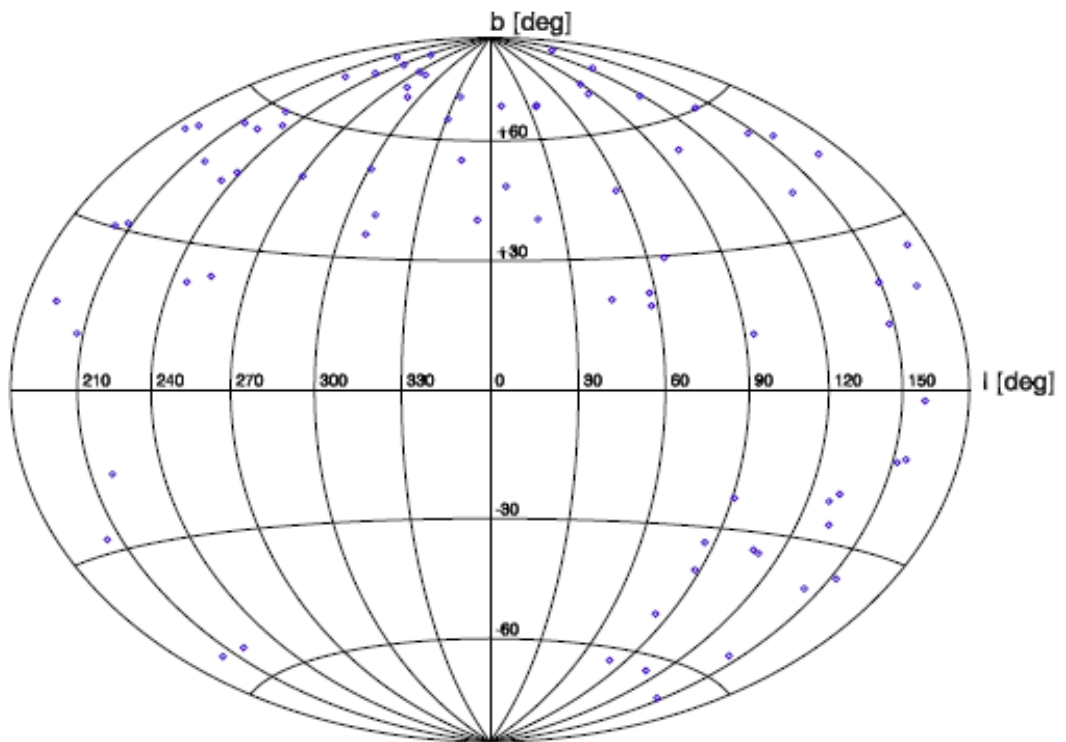


Figura 3.5: Distribuição em coordenadas Galácticas das 80 supernovas selecionadas do Catálogo de Blondin et al. (2012).

### 3.3 Elaboração da base de dados para uso no modelo

Nesta seção apresentamos a estrutura dos arquivos de dados usados no modelo, as quais foram compiladas tendo como base os espectros sintéticos e os dados do Catálogo de Blondin et al. (2012). As tabelas 3.4 e 3.5 representam os espectros sintéticos (Seção 3.4) referentes aos trabalhos de Hsiao e SALT, sendo que cada época (em dias) representa um espectro diferente.

Os espectros observados e compilados por Blondin et al. (2012) foram armazenados em um arquivo, cuja estrutura é apresentada na Tabela 3.6. Uma informação importante é o erro, no fluxo; quando o mesmo não é fornecido estimamos um erro médio de aproximadamente 5% em relação ao fluxo observado para um dado comprimento de onda.

Os valores para a extinção interestelar, assim como a forma como foram obtidas as suas estimativas, serão descritos em detalhes no Capítulo 5, sendo que os valores armazenados para cada autor são descritos na Tabela 3.7.

As informações referentes a cada espectro, tais como o comprimento de onda inicial e final, época, tempo de exposição, *seeing* estimado na noite de observação, entre outras propriedades são descritas na Tabela 3.8. Cabe ressaltar, que a época do espectro é uma informação chave, sendo que a partir de uma determinada época observada, é buscado o seu respectivo espectro sintético, de forma que as comparações de nosso modelo sejam feitas com a mesma época de observação e sintética.

Tabela 3.4: Estrutura do arquivo *Hsiao\_v2.dat* que contém os dados dos espectros sintéticos de Hsiao et al. (2007).

Nome	Tipo	Tamanho	Significado
Época	int	3	Dias da observação (o zero significa a explosão da SNa)
Lambda	float	7.1	Comprimento de onda
Fluxo	float	15.4	Fluxo sintético



Tabela 3.5: Estrutura do arquivo *SALT2\_template\_0.dat* que contém os dados dos espectros sintéticos de Guy et al. (2007).

Nome	Tipo	Tamanho	Significado
Época	int	3	Dias da observação
Lambda	float	7.1	Comprimento de onda
Fluxo	float	15.4	Fluxo sintético

Tabela 3.6: Estrutura do arquivo *blondin\_obs\_1190.dat* que contém os dados referentes (Blondin et al. 2012) aos espectros observados e de interesse no presente estudo.

Nome	Tipo	Tamanho	Significado
Nro	int	4	Número do espectro
Lambda	float	7.1	Comprimento de onda
Fluxo	float	15.4	Fluxo sintético
Erro	float	15.4	Erro no fluxo observado

Tabela 3.7: Estrutura do arquivo *all\_avs.dat*, que contém as estimativas das medidas de extinção interestelar em nossa Galáxia.

Nome	Tipo	Tamanho	Significado
egl	float	9.4	Longitude Galáctica
egb	float	9.4	Latitude Galáctica
eal	float	6.2	E(B-V) do Modelo de Amôres & Lépine (2005)
esfd	float	6.2	E(B-V) de Schlegel et al. (1998) corrigido usando a relação proposta por Schafly et al. (2010)
ebh	float	6.2	E(B-V) de BH
edri	float	6.2	E(B-V) de Drimmel et al. (2003)
EBV med	float	6.2	E(B-V) médio
EBV std	float	6.2	Desvio padrão dos E(B-V)

Tabela 3.8: Informações sobre cada um dos 1190 espectros do Catálogo de Blondin et al. (2012).

Nome	Tipo	Tamanho	Significado
mesp	float	4	Número do espectro
msn	float	3	Número da supernova
fldate	strmid	10	Data da observação
hjd	strmid	10	Data Juliana
inst	strmid	9	Instrumento usado na observação
spepoc	ceil(float(strmid))	5	Época da observação
lini	float(strmid)	5	Comprimento de onda inicial
lfim	float(strmid)	5	Comprimento de onda final
slit	float(strmid)	4	Largura da fenda
<i>seeing</i>	strmid	5	Valor do <i>seeing</i>
exposure	strmid	12	Tempo de exposição

### 3.4 Os *templates* sintéticos

Foram utilizados como *templates* sintéticos, os espectros de Hsiao et al. (2007) e Guy et al. (2007), denominado por SALT2 (daqui por diante SALT), pois esses espectros não exibem qualquer linha de emissão descontínua ou pequenas características que comprometem a qualidade do espectro. Os espectros sintéticos armazenados nas tabelas 3.4 e 3.5 foram todos binados com resolução de  $10\text{\AA}$ , sendo considerados comprimentos de onda na faixa de  $3.500$  até  $9.000\text{\AA}$ .

O *Template* Hsiao é composto por espectros com cores de referência, portanto, não assume quaisquer variações de cores intrínsecas entre SNas Ia. O método de correção de cor permite, simultaneamente, o ajuste de várias cores de forma contínua e consistente com a comparação entre as características espectrais dos espectros. É considerada a região espectral na banda *V*. Cada espectro é caracterizado por nove medidas de intensidade (Hsiao et al. 2007).

Por outro lado, o SALT combina espectros e curvas de um conjunto de treinamento para prova. Embora cada nova atualização do conjunto de treinamento melhore o *template* atual, o SALT não tem qualquer consideração sobre as cores intrínsecas na SNa, nem tampouco tenta distinguir extinção por poeira de variações de cores

intrínsecas de SNas.

O *template* é constituído de um grande conjunto de dados, incluindo curvas de luz e espectros de SNas. Foram derivadas a sequência espectral média de supernovas de Tipo Ia e seus principais componentes de variabilidade, incluindo uma lei de variação de cores. O *template* permite medir módulos com incertezas calculáveis, incluindo os decorrentes de variabilidade das características espectrais (Guy et al. 2007).

# Capítulo 4

## O método

No presente capítulo é descrito o método para o ajuste dos espectros de SNas, o qual faz o uso dos Algoritmos Genéticos por meio do ajuste dos parâmetros da extinção interestelar em nossa Galáxia, e na galáxia anfitriã da supernova, assim como do *redshift*. Também serão descritos em detalhes cada parâmetro e as relações envolvidas.

### 4.1 Os Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AGs) representam uma classe de técnicas de busca de melhores parâmetros para um dado problema, inspiradas no processo biológico da evolução por meio da seleção natural. Eles podem ser usados para a elaboração de técnicas de otimização numérica que de forma robusta obtém parâmetros para problemas que envolvam um grande conjunto de dados e parâmetros<sup>8</sup>.

Uma abordagem dos AGs para uma dada tarefa de otimização pode ser considerada como uma forma de modelagem moderna. De um modo geral, essa técnica tem vantagens e desvantagens.

Dentre as vantagens destacam-se, que os valores dos parâmetros ajustados não precisam passar por outros cálculos; não existe diferença se a relação entre o modelo e seus parâmetros é linear ou não linear. As desvantagens são que na maioria das aplicações reais, o modelo terá de ser avaliado, ou seja, dado um conjunto de parâmetros e dados sintéticos (gerados a partir de dados brutos) necessita ser calculado e sua eficiência associada ao ajuste; muitas vezes, essa avaliação é computacionalmente

cara, e esse tipo de abordagem de modelagem pode se tornar inviável (Charbonneau, 2002).

No presente trabalho, foi utilizado o software PIKAIA, que foi desenvolvido em 1995 por Paul Charbonneau e Barry Knapp. A versão 1.2 foi lançada em 2002. O PIKAIA, desenvolvido originalmente em FORTRAN, é uma sub-rotina com base em um AG, sendo um software de domínio público, disponível eletronicamente a partir do sítio arquivo do *High Altitude Observatory*<sup>9</sup>.

O PIKAIA incorpora apenas dois operadores básicos genéticos uniformes, um ponto de cruzamento e um ponto de mutação. Ao contrário de muitos pacotes de AGs comercialmente disponíveis ou de domínio público, a codificação dentro do PIKAIA baseia-se num alfabeto decimal feita dos 10 inteiros simples (de 0 a 9), o que ocorre devido ao fato de que operações binárias são normalmente realizadas por meio de funções dependentes de plataforma escritas em FORTRAN.

Estão disponíveis dois planos de reprodução, a substituição de gerações completas ou da pior geração, ou seja, *Steady-State-Delete-Random* e a *Steady-State-Delete-Worst*, respectivamente. A taxa de mutação pode ser controlada dinamicamente por verificação do  $\chi^2$  (Qui Quadrado) entre a solução atual e a que possui melhor solução dentro de uma dada população (Charbonneau, 1995).

Os AGs têm sido aplicados com bastante frequência em problemas de Astrofísica para um resumo atualizado, ver Amôres et al. (2017) que usaram o PIKAIA para ajustar 20 parâmetros do Modelo de Besançon da Galáxia (Robin et al. 2003) obtendo entre outros resultados, pela primeira vez na literatura que a escala de tamanho da Via Láctea e os componentes do *warp* e *flare* do disco Galáctico variam com a idade das estrelas.

---

<sup>9</sup><http://www.hao.ucar.edu/modeling/pikaia/pikaia.php>

## 4.2 O Modelo para o ajuste dos espectros de supernovas

Usaremos um Modelo que tem por finalidade ajustar os espectros sintéticos de supernovas (SNas) aos observados (Blondin et al. 2012). Esse método foi elaborado em uma etapa anterior (Arsenijevic e Amôres, 2011) sendo aplicado para 367 espectros (Matheson et al. 2008) de 32 SNas próximas, apresentando bons resultados; entretanto a amostra é reduzida e por essa razão esse projeto tem como uma das finalidades estender essa análise para 80 SNas, perfazendo um total de 1190 espectros (Blondin et al. 2011).

O modelo consiste em ajustar os espectros sintéticos (reproduzidos a partir dos dados de espectros) de SNas, tendo como parâmetros, a extinção e o  $R_V$  da galáxia anfitriã da SNa, da Via Láctea, e o *redshift*. O modelo tem a finalidade de ajustar os espectros sintéticos de SNas aos observados, corrigindo dos efeitos da poeira interestelar, a qual é a responsável pelo fenômeno da extinção interestelar (ver Capítulo 2).

Os parâmetros da extinção são usados na curva de extinção de Cardelli et al. (1989) primeiramente corrigindo dos efeitos da extinção interestelar em nossa Galáxia e posteriormente na galáxia anfitriã.

Tabela 4.1: Controladores do PIKAIA, descrição e valores usados. Parte da tabela foi adaptada de Charbonneau (1995).

Controladores principais	Valores utilizados	Descrição
<i>Ng</i>	100	Número de indivíduos em uma população
<i>Ngen</i>	100	Número de gerações sobre a qual a solução deve evoluir
<i>Nd</i>	4	Número de dígitos significativos
<i>Crossover</i>	0.85	Probabilidade de cruzamento
		Modo de mutação: 1 - mutação de um ponto, taxa fixa; 2 - taxa de um ponto ajustável baseado no melhor valor do ajuste;
		3 - taxa de um ponto, ajustável com base na distância; 4 - um ponto + creep, taxa fixa;
		5 - um ponto + creep, taxa ajustável baseado no melhor valor de ajuste;
		6 - um ponto + rastreamento, taxa ajustável com base na distância
<i>Mut</i>	2	
<i>Imut</i>	0.005	Taxa de mutação inicial
<i>Pmutmn</i>	0.0005	Taxa mínima de mutação
<i>Pmutmx</i>	0.25	Taxa máxima de mutação
		Plano de reprodução: 1 - geracional total; 2- estado estacionário, substituição aleatória;
<i>Fdif</i>	1.0	
<i>Irep</i>	3	3 - substitui o pior estado (sem escolha)
<i>Ielite</i>	0	escolha: 1 = ligado, 0 = desligado

A curva de extinção é caracterizada por um polinômio e têm como parâmetros, o  $A_V$  e o  $R_V$ , que correspondem à extinção total e a seletiva. O método é desenvolvido em linguagem de programação IDL (Linguagem Interativa de Dados) fazendo uso do AG denominado de PIKAIA (Charbonneau, 1995). A Tabela 4.1 apresenta os controladores de fluxo do PIKAIA assim como uma descrição sobre cada um e os valores usados, e que foram obtidos de Amôres et al. (2017), os quais após alguns testes iniciais se mostraram também adequados para o nosso problema.

Para estimar a extinção foram empregados os espectros de uma amostra de SNas Ia (apresentados na Seção 3.3). A correção para ambos, a Via Láctea e a extinção da galáxia hospedeira implica em dois pares de parâmetros livres ( $A_{V\_MW}$ ,  $R_{V\_MW}$ ) e ( $A_{V\_host}$ ,  $R_{V\_host}$ ), respectivamente, além do parâmetro,  $z_{extra}$ , que inclui o efeito do *redshift* da galáxia hospedeira da SNa. Portanto, cinco parâmetros são usados de modo a se ajustar

o espectro sintético com o observado. Os quatro primeiros parâmetros afetam notadamente o fluxo do espectro, sendo que o *redshift* atua diretamente no comprimento de onda. Maiores detalhes sobre os parâmetros serão abordados no Capítulo 5.

O esquema geral do método que compreende a leitura das bases de dados, a preparação para a chamada função de usuário (ou função de otimização), o retorno das soluções, a sua normalização, a verificação das soluções e a elaboração de um arquivo de saída com os resultados são apresentados na Figura 4.1.

A Figura 4.2 apresenta um fluxograma da função de usuário, a qual também é descrita em forma de itens a seguir:

- (i) Incluir a contribuição da extinção Galáctica no espectro sintético, o qual não possui extinção, isso é feito usando a lei de extinção de Cardelli et al. (1989, CCM), sendo que o  $E(B - V)_{MW}$  fornecido para correção pode ser calculado da forma a seguir:

$$E(B - V)_{MW} = A_{V\_MW} \times (-1.0) / R_{V\_MW}; \quad (4.1)$$

- (ii) obter o comprimento de onda e o seu respectivo fluxo, corrigindo do efeito do *redshift* por meio do parâmetro designado como  $z_{extra}$  (o novo comprimento de onda):

$$\lambda = \lambda_{obs}(1 + z + z_{extra}); \quad (4.2)$$

- (iii) rebinar o espectro com o novo comprimento de onda  $\lambda$  em relação ao comprimento de onda observado ( $\lambda_{obs}$ );

- (iv) calcular o valor do  $E(B - V)$  para a galáxia anfitriã dado por:

$$E(B - V)_{host} = A_{V\_host} \times (-1.0) / R_{V\_host}; \quad (4.3)$$

- (v) incluir no espectro sintético o efeito da extinção da galáxia hospedeira levando



em conta a lei de extinção de CCM;

(vi) a normalização do espectro sintético usando a mediana do observado

$$C_{norm} = \langle \text{espectro}_{model} / \text{espectro}_{obs} \rangle; \quad (4.4)$$

(vii) calcular a qualidade do ajuste usando a fórmula:

$$\chi^2 = \sum_{\lambda} \frac{(\text{espectro}_{obs}(\lambda) - \text{espectro}_{model}(\lambda))^2}{(\text{espectro}_{obs}(\lambda) + \text{espectro}_{model}(\lambda))}, \quad (4.5)$$

nas quais,  $\text{espectro}_{obs}$  e  $\text{espectro}_{model}$  correspondem respectivamente aos espectros observados e os modelados.

Essa fórmula para  $\chi^2$  fornece melhores resultados, uma vez que a diferença relativa evita contribuições de comprimentos de onda com fluxos elevados, mas sem necessariamente significativa diferença entre o espectro observado e o modelado, o que pode levar a uma solução prematura ou a um mínimo local.

A faixa de parâmetros para a extinção na Galáxia anfitriã é mantida o mais aberta possível (ver Tabela 4.2), enquanto que para a extinção Galáctica, permitimos uma procura do melhor valor no espaço de parâmetros, levando em conta um valor médio dos modelos de extinção de Schlegel, Finkbeiner & Davis, 1998 (corrigida por Schlafly 2011); Drimmel, Cabrera-Lavers & López-Corredoira, 2003; Amôres & Lépine (2005); Burstein & Heiles (1978, 1982), ver Seção 5.1.

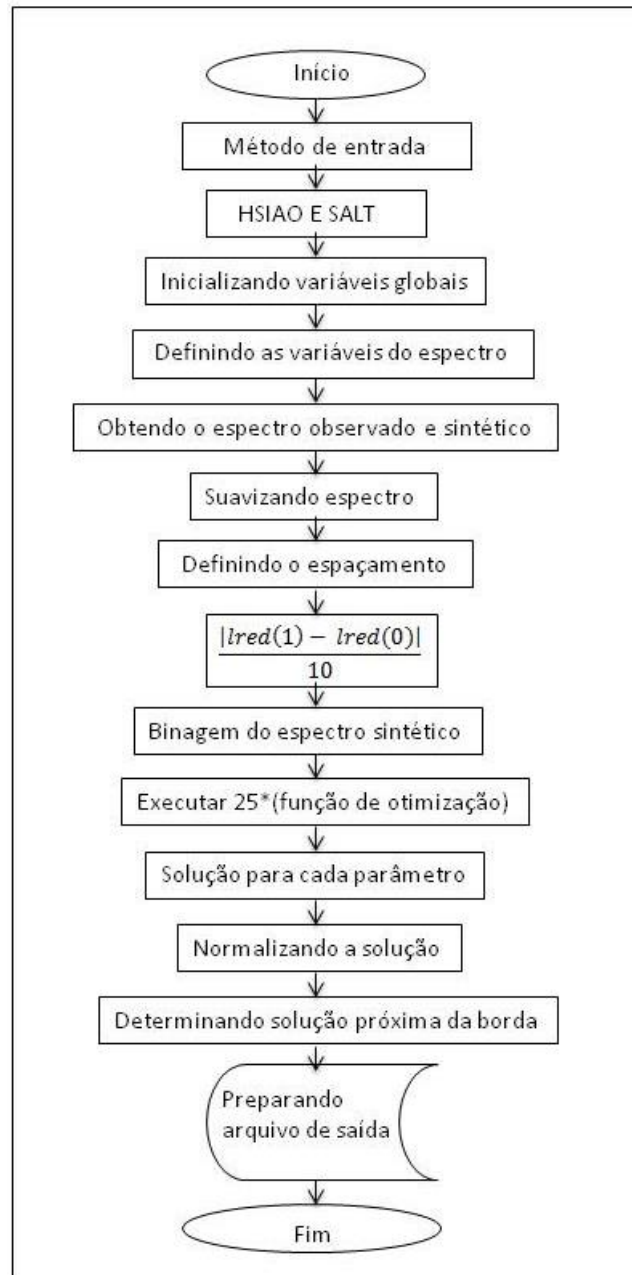


Figura 4.1: Fluxograma mostrando o esquema geral do método utilizado para ajuste dos espectros.

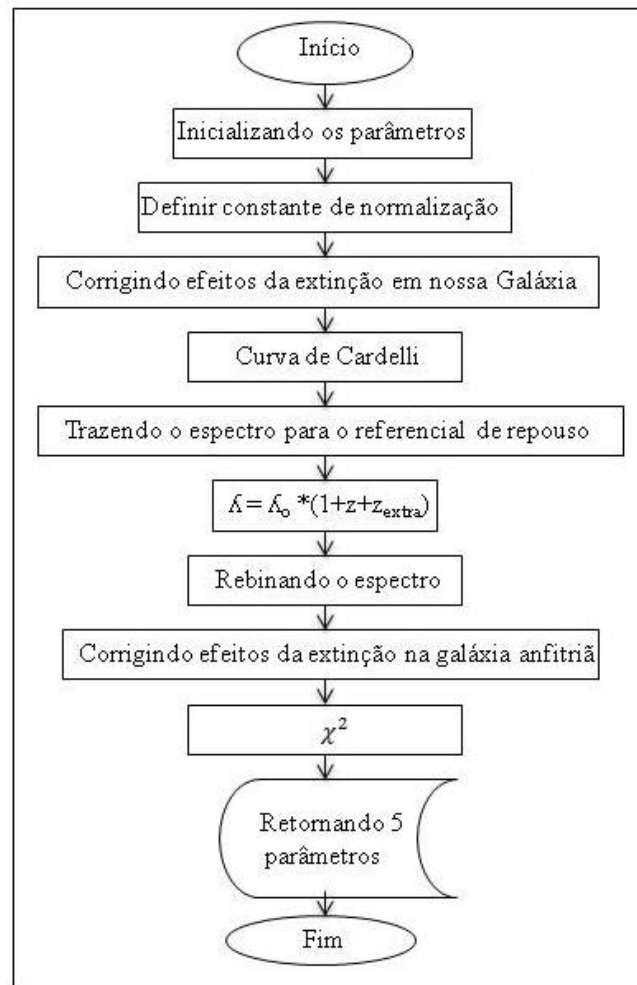


Figura 4.2: Fluxograma da função de usuário.

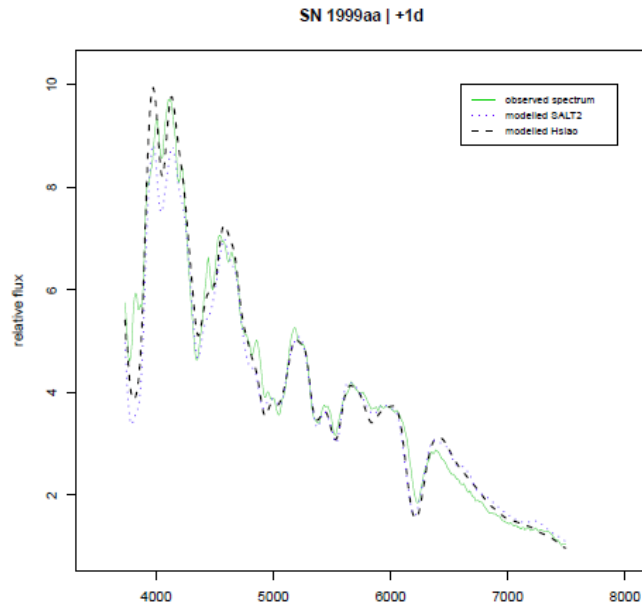


Figura 4.3 Comparação entre um espectro observado e os ajustados pelo Modelo usando os *templates* SALT (SALT2) e Hsiao.

A Figura 4.3 apresenta o espectro observado para a SN 1999a, com época de um dia, e a comparação com dois espectros ajustados por meio de nosso método e do uso dos *templates* Hsiao e SALT. Nota-se que o ajuste usando o espectro do *template* Hsiao é melhor até aproximadamente  $5000\text{\AA}$ , enquanto que para comprimentos de onda maiores o melhor ajuste é obtido com o *template* SALT. Os apêndices A e B apresentam os espectros ajustados para cada supernova para ambos os *templates*.

Para executar o código são usados recursos computacionais (software e hardware) do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Astronomia (INCT-A) da qual o orientador deste projeto faz parte. A discente também possui uma conta para poder rodar o Modelo.

O tempo total de execução no cluster (com 2048 cores) para o ajuste dos dois conjuntos de espectros, perfazendo um total é de 2380 espectros, é de aproximadamente vinte horas.

O Modelo produz um arquivo (*log*) com os resultados do ajuste que contém os valores dos cinco parâmetros ajustados, assim como o erro associado à determinação, o qual é calculado tendo como base os valores obtidos em 25 execuções independentes do Modelo.

A Figura 4.4 apresenta parte de um arquivo de saída contendo os resultados das simulações efetuadas para um dado espectro de uma dada supernova (SN 1999gh), sendo informados o tipo de instrumento, a época, o *redshift*, as coordenadas da SNa, o nome da galáxia que hospeda a supernova, entre outros aspectos (Figura 4.4). Para efeito de visualização da figura, é apresentada parte dos resultados para cada rodada do Modelo e as suas respectivas soluções com os valores normalizados para os parâmetros ajustados, para os quais são calculados os valores da mediana e o respectivo desvio padrão.

Caso uma dada rodada tenha algum parâmetro que consideramos saturado, ou seja, muito próximo das bordas (inferior ou superior) da faixa de parâmetros, esse(s) parâmetro(s) são automaticamente mostrados na última coluna, ou seja, a coluna sem nenhum parâmetro apresentado significa que nenhum parâmetro está próximo da borda (Figura 4.4).

Para o ajuste de um dado espectro ser considerado válido e ter utilizado os valores ajustados no cálculo dos valores médios dos parâmetros para uma supernova, o mesmo deve possuir ao menos 10 soluções para as quais nenhum parâmetro está próximo da borda. Foi elaborado também um código para ler esses resultados para cada espectro e realizar os respectivos cálculos dos valores dos parâmetros para cada supernova.

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
Spectrum file....:          sn1999gh-19991206.53-fast.flm
Gal. name....:   NGC2986
Gal. type....:   XXX To be included XXX
optimization program elapsed time (in s)....:          4377.4918
SN....:   1999gh
spectrum flag....:   FAST
Spectrum number....:          316          626.000
days....:          6.00000
z.....:   0.00770000
gal. coordinates          255.0478   23.7361
Av (+/- error) models/maps, SFD, DRI, BH, AL....:   0.181   0.045   0.177   0.196   0.122   0.229
          AvMW          RvMW          EBV_MW          AvHost          RvHost          EBV_Host          zextra          Xi2          seed
0   0.15984   3.74997   0.04262   1.37226   2.28677   0.60009   0.00838   2.346195E+13   26516.0 0
1   0.17569   2.26245   0.07766   1.05176   1.90254   0.55282   0.00764   2.374790E+13   22734.0 0
2   0.12597   4.43768   0.02839   0.90774   1.86352   0.58058   0.00759   2.370389E+13   8531.0 0
3   0.19486   2.23473   0.08529   0.87548   1.52083   0.57565   0.00818   2.457622E+13   5934.0 1
4   0.26942   4.39283   0.06133   0.91916   1.58836   0.57869   0.00757   2.385543E+13   11416.0 1
5   0.23936   2.15640   0.11100   0.92516   2.20453   0.41966   0.00810   2.260324E+13   30907.0 0
6   0.25890   3.23989   0.07991   1.54203   2.84289   0.54242   0.00693   2.295103E+13   31646.0 0
7   0.15599   2.74117   0.05691   1.15611   1.87443   0.61678   0.00690   2.396414E+13   19338.0 0
8   0.11143   2.59395   0.04912   1.25492   1.92486   0.65195   0.00709   2.367227E+13   10048.0 0
9   0.14193   4.20313   0.03374   0.98750   1.58489   0.62307   0.00665   2.439584E+13   12617.0 0
10  0.12947   2.81784   0.04595   1.78166   3.11434   0.57208   0.00635   2.267479E+13   21747.0 0
11  0.16132   2.22913   0.07237   1.00610   1.89200   0.53177   0.00629   2.388019E+13   12042.0 0
12  0.25359   4.33365   0.05852   1.14988   1.87884   0.61202   0.00703   2.381563E+13   4935.0 0
13  0.22298   3.97872   0.05604   1.23211   2.13496   0.57711   0.00787   2.351050E+13   7881.0 0
14  0.14386   2.25218   0.06388   0.78548   1.52232   0.51598   0.00659   2.372136E+13   29644.0 1
15  0.10986   3.16765   0.03468   1.25608   2.16452   0.58030   0.00681   2.360186E+13   5009.0 0
16  0.14276   2.76717   0.05159   1.46844   2.38098   0.61674   0.00865   2.355025E+13   1519.0 0
17  0.11338   3.09990   0.03658   0.91859   1.60999   0.57055   0.00700   2.401330E+13   11172.0 0
18  0.22521   3.70887   0.06073   0.91020   1.59693   0.56997   0.00636   2.420163E+13   31434.0 0
19  0.16190   4.04722   0.04000   0.98732   1.60851   0.61381   0.00713   2.430932E+13   1414.0 0

```

Figura 4.4 Exemplo de parte de um arquivo de saída do modelo apresentando basicamente as informações gerais para um dado espectro assim como parte das soluções para respectivas rodadas do Modelo.

# Capítulo 5

## Discussão dos resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com nosso Modelo por meio de simulações fazendo uso dos dois *templates*. Serão apresentados os resultados para cada parâmetro assim como a sua discussão e a comparação com os valores disponíveis na literatura, bem como a descrição dos parâmetros e sua faixa de variação.

### 5.1 Parâmetros usados

Foram realizadas duas simulações, utilizando os espectros sintéticos Hsiao e SALT, as quais serão representadas por sim-1 e sim-2, respectivamente. Cada simulação contém 1190 espectros para um conjunto de 80 supernovas conforme mencionado no Capítulo 3.

A faixa para os cinco parâmetros empregados nos ajustes é apresentada na Tabela 5.1. Conforme mencionado anteriormente, dois pares de parâmetros incluem a extinção para a Via Láctea e a da galáxia hospedeira,  $(A_{V\_MV}, R_{V\_MV})$  e  $(A_{V\_host}, R_{V\_host})$  respectivamente, os valores do  $R_V$  tanto para a nossa Galáxia como para a hospedeira, possuem valores extremos relativamente conhecidos, ver referências no Capítulo 2, e por essa razão foram adotados valores para a faixa de ajustes compatíveis com os mesmos.

Cabe nesse ponto ressaltarmos, que o espectro sintético das supernovas são compilados e se diferem, em nosso caso, pela época da supernova. Cabe destacar, que todos os espectros sintéticos são elaborados considerando-se que as supernovas em questão não possuem *redshift* e a extinção tanto devido à emissão da poeira em nossa Galáxia quanto a da galáxia hospedeira são consideradas zero.

Dessa forma, os parâmetros ajustados atuam para que esses espectros sintéticos reproduzam o observado levando em conta os aspectos (extinção e *redshift*) que são intrínsecos à localização da supernova, e que, portanto, variam de acordo com a supernova.

Tabela 5.1: Faixa dos parâmetros usados nas simulações para ambos os *templates* Hsiao e SALT. Para maiores detalhes, ver o texto.

Parâmetros	Simulações
$A_{V\_MW}$	$[0; 1.0] * \delta A_V + A_{V_0}$
$R_{V\_MW}$	$[2.0; 4.5]$
$A_{V\_host}$	$[0.05; 4.05]$
$R_{V\_host}$	$[1.5; 4.5]$
$z_{extra}$	$[0; 1.0] * \delta z + \delta z_0$

O parâmetro  $z_{extra}$  é o responsável por realizar a inclusão do *redshift* no espectro sintético da SNa, sendo que a sua faixa varia em até +/- 20% do valor original do  $z$  disponível na literatura (em nosso caso do NED – ver Capítulo 3) , o que é muito útil e em alguns casos para um bom ajuste no valor do *redshift*, o  $\delta z$  é a variação permitida para o *redshift*,  $\delta z_0$  é o valor mínimo do *redshift*. Ambos os valores são calculados previamente e variam de acordo com a supernova.

A título de exemplo, considere que o *redshift* observado para uma dada supernova é de  $z = 0.05$ ; os valores para  $\delta z$  e  $\delta z_0$  (última linha da Tabela 5.1) serão 0.02 e de 0.04; respectivamente, ou seja, para essa supernova o *redshift* ajustado ( $z_{extra}$ ) poderá variar entre 0.04 e 0.06, a depender se o valor ajustado pelo PIKAIA estiver entre 0 e 1.

Tal ajuste é importante pois mesmo pequenos valores podem introduzir um “desvio” relativamente grande no comprimento de onda, além de alguns valores medidos do *redshift* conterem o erro devido as características da observação.

De forma semelhante é feito para o parâmetro ( $A_{V\_MW}$ ), que ajusta a extinção em nossa Galáxia, definimos, o  $\delta A_V$  como o valor da variação da extinção determinado com base no desvio padrão entre os valores de extinção obtidos dos modelos e mapas de extinção utilizados (ver a seguir), de forma a não termos uma faixa de parâmetros restrita, permitimos a variação em +/- 20% no valor do desvio padrão. O  $A_{V_0}$  é o valor mínimo da extinção também obtido dos valores dos modelos.

Como a extinção interestelar na Via Láctea pode ser determinada de maneira adequada com uma faixa de erro razoável, não é conveniente deixar seu valor variar de maneira arbitrária, ou seja, fizemos uso dos modelos e mapas descrito na Seção 2.3 para obter um valor da mediana para a extinção interestelar e com base no desvio padrão determinar a variação dos parâmetros, que é determinada multiplicando-se por dois, o valor do desvio padrão, sendo que a variação ocorre tendo como centro o valor da mediana.

As estimativas de extinção interestelar considerados no presente estudo foram os de Burstein & Heiles (1978,1982), Schlegel et al. (1998) corrigido por Schlafly et al. (2011), Drimmel et al. (2003) e Amôres & Lépine (2005, 2007).

O acesso aos mapas e modelos para a extinção está disponível por meio de programas escritos em linguagem C, FORTRAN, IDL, entre outros e em alguns casos de arquivos com tabelas que os mapas utilizam. Para um usuário que não possui familiaridade com essas linguagens, é muito útil uma ferramenta que disponibiliza o valor da extinção para pares de coordenadas e distância.

Com esse propósito, utilizamos o GALExtin<sup>10</sup>, uma ferramenta pioneira (Amôres et al. 2012b) que disponibiliza o valor da extinção para diferentes modelos. Foi utilizada uma versão Beta apenas disponível para alguns usuários e será disponibilizada em breve para a comunidade em geral. O trabalho faz parte da Dissertação de outro discente Ricardo Moreira de Jesus do Grupo de Astrofísica de Grandes Levantamentos.

---

<sup>10</sup><http://www.galexextin.org>



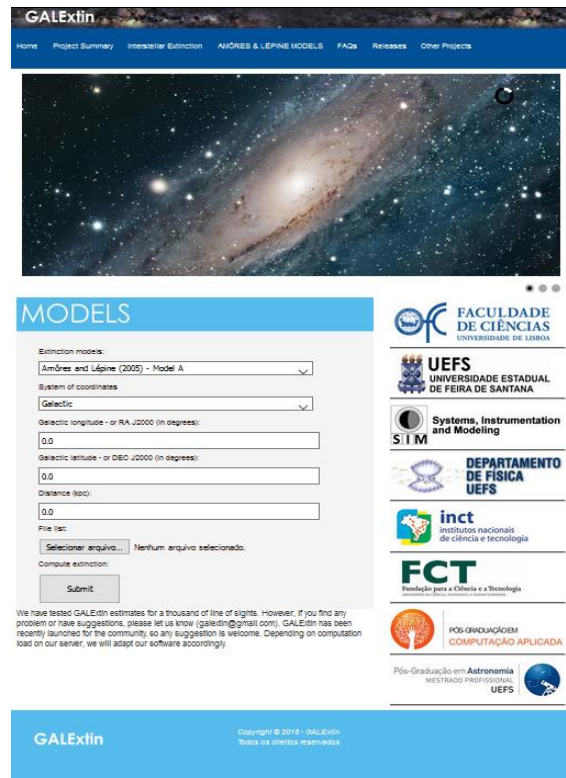


Figura 5.1: Página do GALExtin disponível usada na presente pesquisa.

A Figura 5.1 apresenta a tela principal do GALExtin de onde foram obtidos os valores de extinção interestelar. O usuário pode obter a extinção para um simples par de coordenadas e/ou distância, ou informar uma lista de direções. Com base nas coordenadas das 80 SNas e escolhendo cada um dos modelos, obtivemos valores para a extinção.

O valor da mediana para os quatro mapas/modelos descritos acima é apresentado na Figura 5.2 e também foi calculado o desvio padrão, que é utilizado como faixa de variação do parâmetro da extinção Galáctica (primeira linha da Tabela 5.1). Os valores para as diferentes faixas de  $A_V$  são de aproximadamente 50 para  $0.05 < A_V \leq 0.1$  e de 30 para  $A_V > 0.2$ . Esses valores são compatíveis com regiões de baixa extinção interestelar.

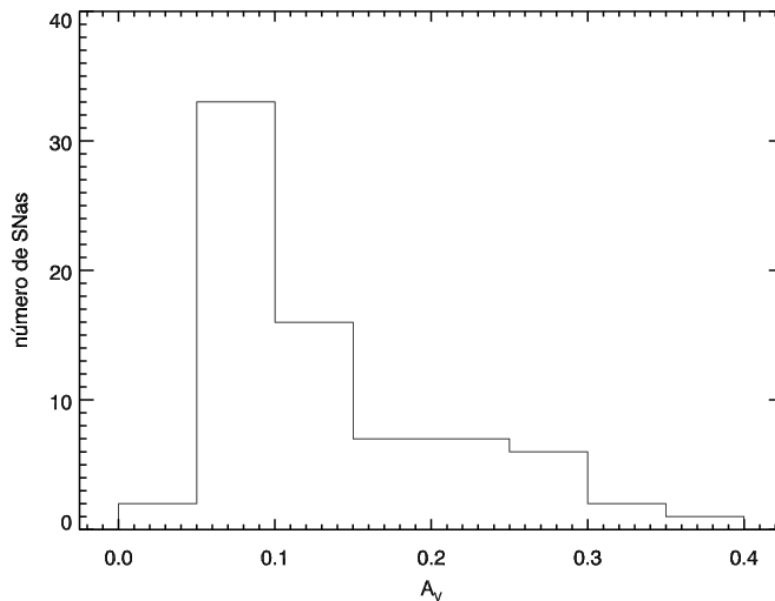


Figura 5.2: Valores da mediana para a extinção interestelar com base nos modelos de Burstein & Heiles (1978,1982), Schlegel et al. (1998) e Schlafly et al. (2011), Drimmel et al. (2003) e Amôres & Lépine (2005, 2007).

## 5.2 Resultados usando os espectros sintéticos Hsiao e SALT

Como mencionado no Capítulo 4, para cada espectro foram realizadas 25 rodadas independentes de nosso Modelo, cada qual com um valor diferente de semente (parâmetro gerador de solução), escolhido de forma aleatória. Para as soluções em que qualquer um dos cinco parâmetros, esteja próximo da borda superior ou inferior da faixa de parâmetros em 2%, a solução é descartada, um espectro é considerado válido para uma etapa posterior, caso tenha ao menos dez soluções fora do limite de 2% da faixa de parâmetros.

Os Apêndices A e B, conforme mencionado anteriormente, apresentam os espectros ajustados para algumas supernovas para os espectros sintéticos Hsiao e SALT em comparação com os observados por Blondin et al. (2012).

Existem apenas 51 espectros para o *template* Hsiao e 64 para o SALT de um total de 1190 espectros que estão fora desse limite, algo em torno de 5% do número de espectros. Como perspectiva futura, está sendo avaliado esse procedimento de descarte das soluções de forma a verificar a distribuição do  $\chi^2$  e descartar as soluções que estão fora de 2-3  $\sigma$  da distribuição.

Dessa forma para cada espectro, foi calculado o valor da mediana para os cinco parâmetros para as soluções válidas. O número de espectros disponíveis varia podendo até ter duas dezenas de espectros para uma dada supernova. Foram utilizados os valores das medianas dos parâmetros para cada espectro para determinar seus valores medianos.

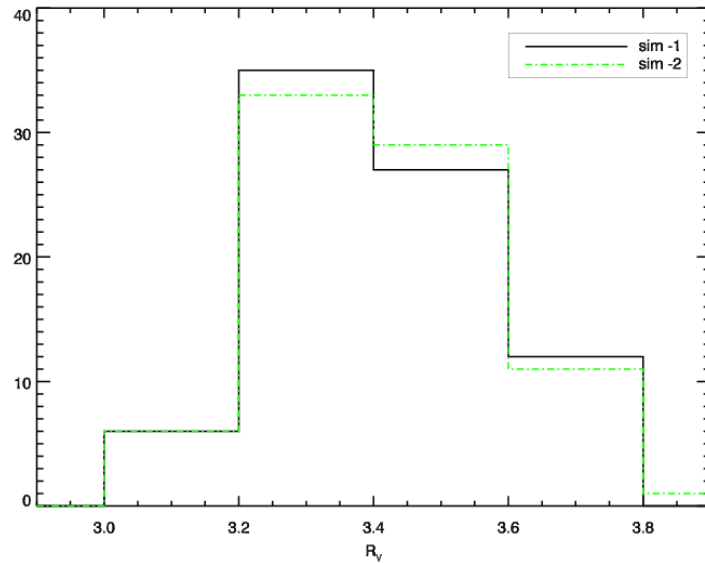


Figura 5.3: O  $R_V$  Galáctico na direção das supernovas para as simulações utilizando os espectros sintéticos Hsiao e SALT.

A Figura 5.3 apresenta o  $R_V$  Galáctico na direção das supernovas, em ambas as simulações nota-se que os valores da mediana são de aproximadamente  $R_V = 3.4$  com desvio padrão de aproximadamente 0.2. Conforme, mencionado na Seção 2.1, esses valores estão compatíveis com o encontrado no meio interestelar da Via Láctea, ou seja,  $R_V = 3.1$ .

A Figura 5.4 apresenta a comparação entre os valores das medianas da extinção de modelos/mapas com as obtidas pelo modelo usando o *Template* Hsiao. Percebe-se que até o valor de  $A_V \sim 0.5$  obtém-se boa concordância para os valores de  $A_V$  para nossa Galáxia e os valores disponíveis.

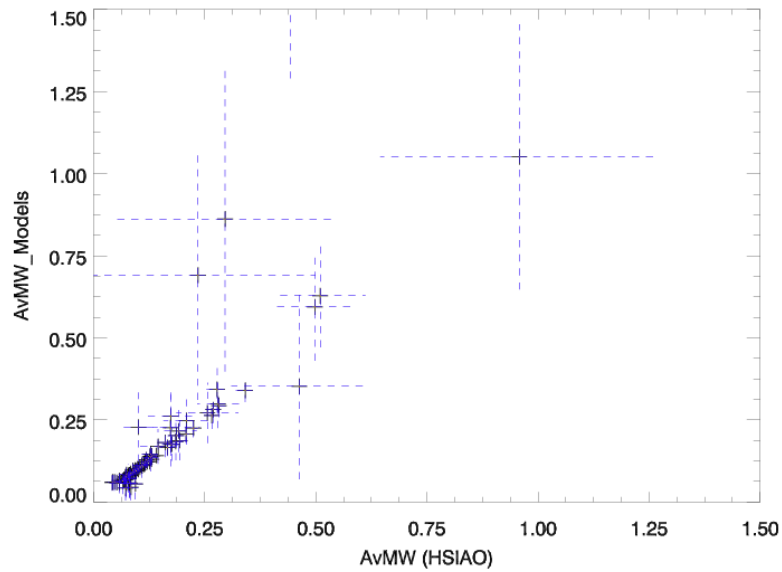


Figura 5.4: Comparação entre os valores da mediana da extinção de modelos/mapas e as obtidas por nosso modelo usando o *templates* Hsiao.

Existem duas supernovas para as quais os valores modelados para o *template* são da ordem de  $A_V \sim 0.25$  e com valor da mediana dos modelos/mapas de aproximadamente 0.7 e 0.9, respectivamente. Entretanto, nota-se que considerando o desvio nas medidas, os valores não são tão discrepantes.

Para ambos os casos, o valor da extinção de *SFD* usado também como estimativa de extinção interestelar é o mais discrepante entre os fornecidos, provavelmente, devido ao fato de estar localizado em regiões onde não prevê bons resultados de extinção, notadamente em nuvens moleculares densas.

Para valores obtidos por nosso modelo de  $A_V \sim 0.4$  vemos uma linha de pontos tracejados que é devida ao valor do desvio dos modelos da SNa 2006lf, esse objeto possui um grande valor da dispersão no modelo de SFD por estar em uma região localizada no plano Galáctico.

A Figura 5.5 apresenta a comparação entre os valores das medianas da extinção de modelos/mapas e as obtidas por nosso modelo usando o *template* SALT. Percebe-se que até o valor de  $A_V \sim 0.5$  obtém-se boa concordância entre o modelo e o *template* usado, da mesma forma que o *Template* Hsiao.

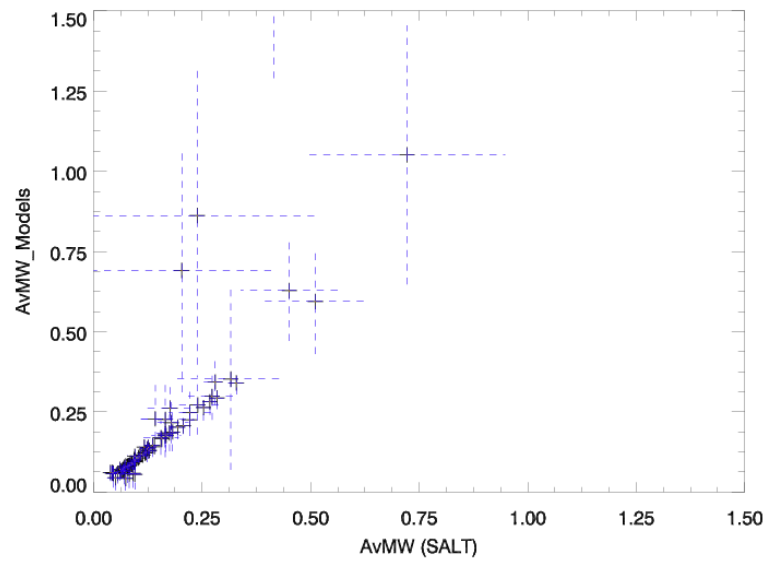


Figura 5.5: Comparação entre os valores da mediana da extinção de modelos/mapas e as obtidas por nosso modelo usando o *templates* SALT.

Uma comparação entre os valores de extinção da Via Láctea obtida usando nosso modelo para ambos os *templates* é apresentada na Figura 5.6. Nota-se que os resultados para ambos os *templates* possuem boa concordância. Temos que o coeficiente de correlação de Pearson é de 0.98 o que indica uma correlação muito forte entre os valores de extinção para a nossa Galáxia obtido com os dois *templates*.

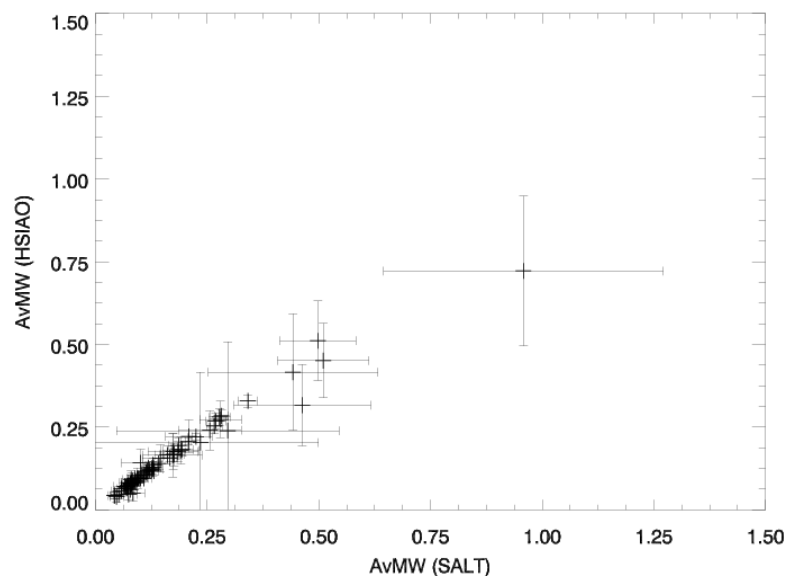


Figura 5.6: Comparação entre a extinção da Via Láctea obtida usando ambos os *templates*.

A Figura 5.7 (topo e inferior) apresentam a comparação entre o *redshift* observado e o obtido usando os *templates* Hsiao e SALT para ambos nota-se que até o valor de *redshift* aproximadamente 0.037 obtém-se boa concordância entre o observado e os *templates* usados.

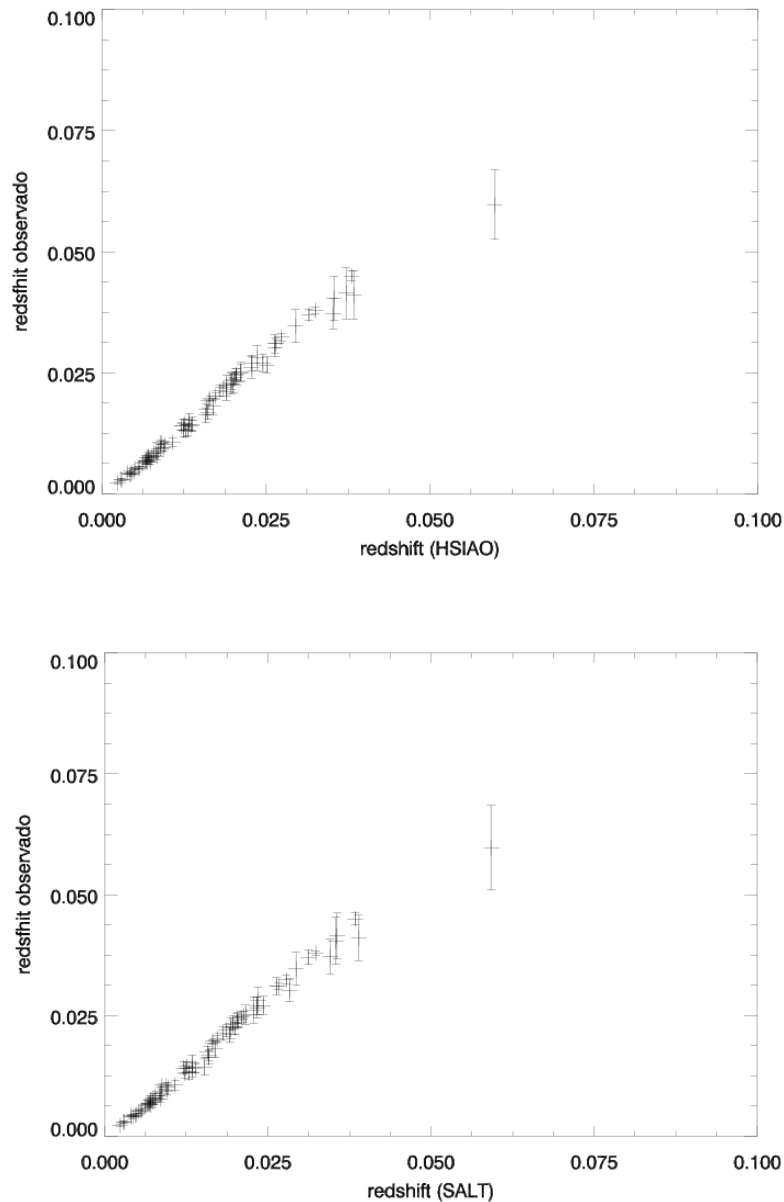


Figura 5.7: Comparação entre o *redshift* observado e o obtido pelo Modelo usando os *templates* Hsiao (painel superior) e SALT (painel inferior).

A Figura 5.8 apresenta a distribuição do  $R_{\text{Vhost}}$  para as simulações utilizando os espectros sintéticos Hsiao e SALT, respectivamente. Calculamos o coeficiente de

correlação de Pearson e encontramos o valor 0.91 para o  $R_{V_{\text{host}}}$  obtido com o ajuste dos dois *templates*.

Na Figura 5.8 nota-se essencialmente a presença de dois picos, com valores de  $R_{V_{\text{host}}} = 2.1$  e 3.4; respectivamente. Conforme discutido anteriormente, a existência de  $R_V$  na galáxia anfitriã inferior ao de nossa Galáxia, é bem aceito na literatura (Arsenijevic 2011, entre outros), autores como Holwerda (2008), Gordon et al. (2003) e Krisciunas et al. (2006) argumentam que a taxa de formação estelar pode modificar as propriedades características da extinção, propiciando um valor menor para o  $R_V$ .

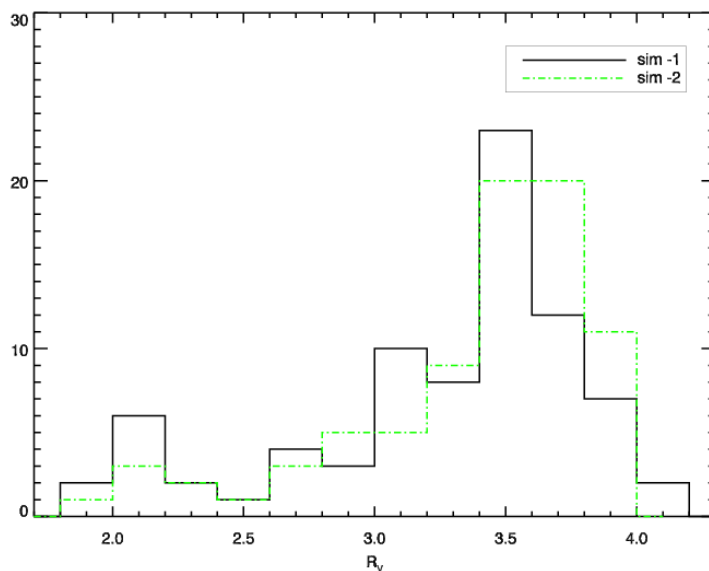


Figura 5.8: Distribuição do  $R_{V_{\text{host}}}$  para as simulações utilizando os espectros sintéticos Hsiao (sim-1) e SALT (sim-2).

Com o propósito de efetuar a comparação com os valores de  $A_{V_{\text{Host}}}$  obtidos para ambos os *templates*, realizamos uma procura na literatura para verificar se existiam valores disponíveis de  $A_{V_{\text{Host}}}$  para as supernovas de nossa amostra. Foram encontrados dois catálogos com os valores determinados por meio de análise dos dados, os quais são descritos brevemente a seguir.

Jha et al. (2007) elaboraram um método para obter a variação intrínseca e a extinção de supernovas do Tipo Ia, o método também inclui curvas de luz no filtro  $U$ . O número total de supernovas usados no método é de 133, os autores também fornecem valores para o  $A_{V_{\text{Host}}}$ .

Malcolm et al. (2009) realizaram campanhas observacionais em multi-banda de 185

supernovas do Tipo Ia totalizando 11500 observações determinando em outras propriedades as cores das supernovas, distâncias assim como melhor modelando a contribuição da extinção na galáxia anfitriã.

Foram encontradas 29 supernovas para o catálogo de Jha et al. (2007) e 41 para o catálogo de Malcolm et al. (2009), respectivamente. Foi feita uma análise nos valores do  $A_{V_{\text{Host}}}$  obtidos pelos autores e encontramos para muitas supernovas um grande valor no erro das determinações, devido à esse fato preferiu-se no presente trabalho fazer uma apresentação geral das propriedades das extinções obtidas em nossa pesquisa em comparação com esses dois outros trabalhos, o que é apresentado na Figura 5.9.

Nota-se de uma forma geral que nossos valores estão distribuídos para diferentes faixas de extinção, notadamente para  $A_{V_{\text{Host}}} < 0.5$ , enquanto que para os dois autores a concentração é maior para  $A_{V_{\text{Host}}} < 0.5$  do que para outros valores de  $A_{V_{\text{Host}}}$ .

A principal diferença entre os autores reside no fato de que para Jha et al. (2007) apesar da concentração para  $A_{V_{\text{Host}}} < 0.5$ , ainda existe uma quantidade não desprezível para outras faixas de extinção, ao contrário de Malcolm et al. (2009). Apesar de nosso modelo para ambos os *templates* determinar bons valores para os outros parâmetros, como etapa futura é necessário fazer alguns testes restringindo a variação do  $A_{V_{\text{Host}}}$ .



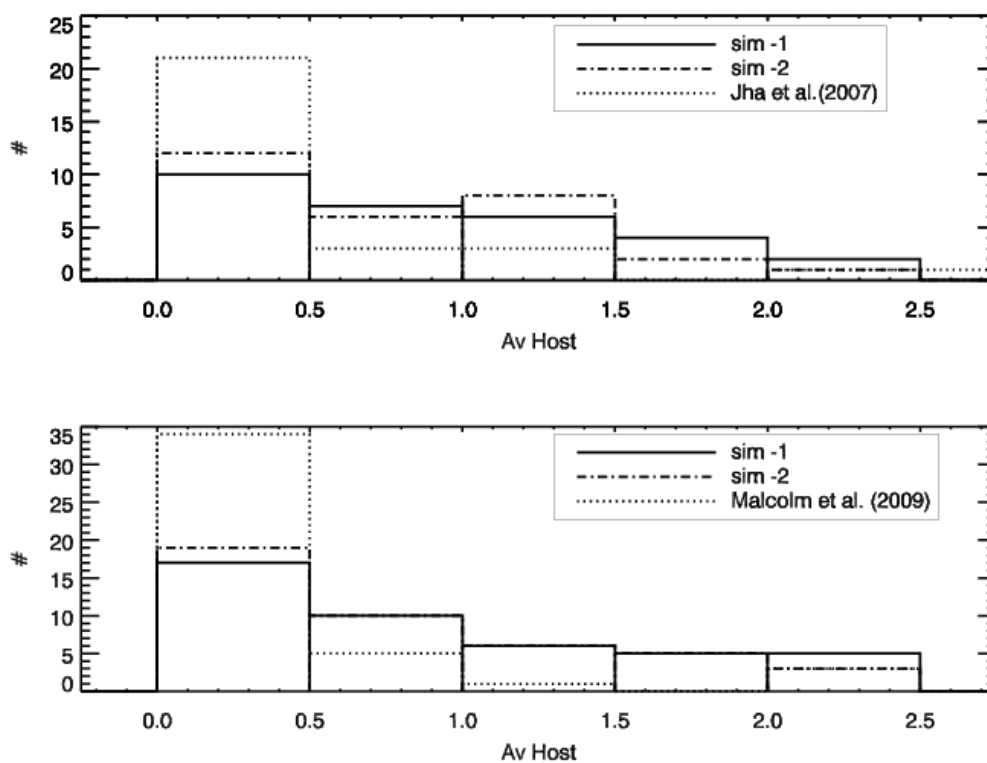


Figura 5.9: Distribuição do  $A_{Vhost}$  para ambas as simulações (sim-1: Hsiao e sim-2: SALT) em comparação com, parte superior: Catálogo de Jha et al. (2007), parte inferior: Malcolm et al. (2009).

# Capítulo 6

## Conclusões e Perspectivas

Na presente Dissertação apresenta-se um Modelo para realizar o ajuste de espectros sintéticos de supernovas (Hsiao e SALT) tendo como base o ajuste de um conjunto composto por cinco parâmetros, quatro relacionados à extinção interestelar em nossa Galáxia e da galáxia hospedeira da supernova ( $A_{V\_MW}$ ,  $R_{V\_MW}$ ,  $A_{V\_host}$ ,  $R_{V\_host}$ ,  $z_{extra}$ ) além do *redshift*. O nosso Modelo se utiliza do método de otimização global dos Algoritmos Genéticos.

Foi usado um catálogo que contém 1190 espectros de 80 supernovas do Tipo Ia, de um total de 2603 espectros de 462 SNas do Tipo Ia existentes no Catálogo de Blondin et al. (2012). Esta seleção foi feita para evitar espectros observados, cuja época de observação, esteja fora do período, época  $< -20.0$  e época  $> 50.0$  dias e também foram removidas as SNas que contêm poucos espectros.

As extinções encontradas para a Via Láctea estão em concordância com os valores médios obtidos por diferentes mapas e modelos de extinção com alto coeficiente de correlação. O valor do  $R_V$  Galáctico na direção das supernovas para as simulações, utilizando os espectros sintéticos Hsiao e SALT é de aproximadamente 3.1, o que é compatível ao esperado para regiões com emissão difusa regular no meio interestelar.

Os valores ajustados para o *redshift* também estão em boa concordância com o observado apesar de termos permitido uma faixa de variação bem flexível para esse parâmetro.

Apesar de encontrarmos dois picos para o parâmetro  $R_{V_{host}}$  (Figura 5.8), o Modelo ainda precisa ser confrontado com mais dados no tocante à modelagem da extinção na galáxia hospedeira. Os valores encontrados para o parâmetro  $R_{V_{host}}$  são de 2.1 e 3.4 respectivamente, que são inferiores ao da Via Láctea, o que segundo Arsenijevic (2011) é bem aceito.

Algumas das perspectivas são descritas a seguir:

- i) fazer uma alteração no Modelo de forma com que ele faça o ajuste de todos os espectros para uma dada supernova de forma simultânea;
- ii) incluir os espectros para as demais supernovas aumentando dessa forma nossa amostra e com mais galáxias com  $A_{V_{\text{Host}}}$  disponível;
- iii) fazer análises descartando espectros cujo valor do *seeing* ultrapasse uma dada faixa de valores;
- iv) aumentar a nossa base de dados de extinção em galáxias hospedeiras de supernovas;
- v) levar em conta aspectos geométricos na modelagem do  $A_{V_{\text{Host}}}$  de acordo com a extinção na galáxia;
- vi) restringir a faixa de parâmetros para o  $A_{V_{\text{Host}}}$ ;
- vii) cálculo de correlações entre os parâmetros;
- viii) uso de outras leis de extinção.

# Referências Bibliográficas

Amôres, E. B., (2000). Modelos para a Extinção Interestelar na Galáxia. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de Astronomia) – Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Amôres, E. B.; Lépine, J. R. D., (2005). Models for Interstellar Extinction in the Galaxy. *The Astronomical Journal*, 130(2), 659-673.

Amôres, E. B.; Lépine, J. R. D., (2007). Comparing Extinction Models with a Sample of Elliptical Galaxies, Star Clusters, and the Extinction at the Galactic Center. *The Astronomical Journal*, 133(4), 1519-1527.

Amôres, E. B. et al (2012) Galaxies Behind the Galactic Plane: First Results and Perspectives from the VVV Survey. *The Astronomical Journal*, 144, 127.

Amôres et al., (2012b). GALExtin: A VO-Service for Estimating Galactic Interstellar Extinction. *Springer-Verla Berlin Heidelberg*, pp. 93.

Amôres et al., (2013). The long bar as seen by the VVV Survey. *Astronomy and Astrophysics*. 559, A11.

Amôres, E. B. et al., (2017). Evolution over time of the Milky Way's disc shape. *Astronomy & Astrophysics*, 602, 18.

Amôres, E. B. et al., (2018). Em preparação.

Arsenijevic, V. et al., (2011). Diversity of supernovae Ia determined using equivalent widths of Si II 4000. *Astronomy and Astrophysics*, 492(2), 535-544.

Arsenijevic, V., (2011). A new insight into the classification of Type Ia supernovae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414, 1617-1624.

Astier, P. et al., (2006). The Supernova Legacy Survey: measurement of  $\Omega_M$ ,  $\Omega_\Lambda$  and  $w$  from the first year data set. *Astronomy and Astrophysics*, 447, 31-48.

Bergh, S. V. D., (1991). Supernova Rates: A progress Reporter. *Physics Report*, 204, 6, 385-4000.

Bergh, S. V. D. e Tammann, G. A., (1991). Galactic and extragalactic supernova rates. *Annual review of astronomy and astrophysics*. 29, 363-407.

- Blondin, S. et al., (2011). The Spectroscopic Diversity of Type Ia Supernovae. *Astronomy and Astrophysics*, 526, pp.81.
- Blondin, S. et al., (2012). The Spectroscopic Diversity of Type Ia Supernovae. *The Astronomical Journal*, v.143, n2, p.126, 2012
- Bronder, T. J. et al., (2008). SNLS spectroscopy: testing for evolution in type Ia supernovae. *Astronomy and Astrophysics*, v.477, p.717-734, 2008.
- Burstein, D. e Heiles, C., (1978). H I, galaxy counts, and reddening - Variation in the gas-to-dust ratio, the extinction at high galactic latitudes, and a new method for determining galactic reddening. *The Astrophysical Journal*, 225, 40-55.
- Burstein, D. e Heiles, C., (1982). Reddenings derived from H I and galaxy counts - Accuracy and maps. *The Astronomical Journal*, 87, 1165-1186.
- Calzetti, D. et al., (1994). Dust extinction of the stellar continua in starburst galaxies: The ultraviolet and optical extinction law. *The Astrophysical Journal*, 429, 582-601.
- Calzetti et al., (2000). The dust content and opacity of actively star-forming galaxies. *The Astrophysical Journal*, 533, 682-695.
- Calzetti, D., (2001). The Impact of Dust on Measures of Star Formation. American Astronomical Society, 198th AAS Meeting. American Astronomical Society, 33, 888.
- Cappellaro, E. e Turatto, M., (2000). Supernova types and rates. arXiv : astro-ph / 0012455
- Cardelli, J. A. et al., (1989). The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. *The Astrophysical Journal*, 345, 245-256.
- Charbonneau, P., (1995). Genetic Algorithms in Astronomy and Astrophysics. *Astrophysical Journal Supplement*. 101, 309.
- Charbonneau, P., (2002). An Introduction to Genetic Algorithms for Numerical Optimization, *NCAR Technical Note 450+IA*
- Chevallard, J. et al., (2013). Insights into the content and spatial distribution of dust from the integrated spectral properties of galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, 432, 2061-2091.
- Chotard, N. et al., (2011). The reddening law of type Ia supernovae: separating intrinsic variability from dust using equivalent widths. *Astronomy and Astrophysics*, 529, L4.
- Cikota, A. et al., (2016). Determining type Ia supernovae host galaxy extinction probabilities and a statistical approach to estimating the absorption-to-reddening ratio  $R_V$ . *The Astrophysical Journal*, 819, 2.
- Cikota, A. et al., (2018). Testing the magnetar scenario for superluminous supernovae with circular polarimetry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 477, 4.

- Clayton, G. C. e Martin, P.G., (1985). Interstellar dust in the Large Magellanic Cloud, *The Astrophysical Journal*, 288, 558-268.
- Conley, A. et al., (2011). Supernova constraints and systematic uncertainties from the first three years of the supernova legacy survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 192, 1(29).
- Draine, B. T., (2003). Interstellar dust grains. *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 41, 241-289.
- Drimmel, R. et al., (2003). A three-dimensional Galactic extinction model. *Astronomy and Astrophysics*, 409, 205-216.
- Fitzpatrick, E. L. e Massa, D., (1986). An analysis on the shapes of ultraviolet extinction curves. I - The 2175 Å bump. *Astrophysical Journal*, 307, 286-294.
- Fitzpatrick, E. L. e Massa, D., (1988). An Analysis of the Shapes of Ultraviolet Extinction Curves.II. the Far-Uv Extinction, *Astrophysical Journal*, 328, 734-746.
- Fitzpatrick, E. L. e Massa, D., (1990). An analysis of the shapes of ultraviolet extinction curves. III - an atlas of ultraviolet extinction curves. *Astrophysical Journal Supplement*, 72, 163-189.
- Fitzpatrick, E. L., (2004). Interstellar Extinction in the Milky Way Galaxy. *Astronomical Society of the Pacific Conference*, v.309, p.33. 2004.
- Foley, R. J. et al., (2008). Constraining Cosmic Evolution of Type Ia Supernovae. *The Astrophysical Journal*, 684, 68-87.
- Foley, R. J. et al., (2011). Velocity Evolution and the Intrinsic Color of Type Ia Supernovae. *The Astrophysical Journal*, 742, 89-109.
- Folatelli, G. et al., (2010). The Carnegie Supernova Project: Analysis of the First Sample of Low-Redshift Type-Ia Supernovae. *The Astronomical Journal*, 139, 120-144.
- Folatelli, G. et al., (2014). A blue point source at the location of supernova 2011dh. *The Astrophysical Journal*, 793, L22.
- Fosmire, M. e Kolah, D., (2012). Science Librarians Analysis of the 2011 Nobel Prize in Physics: The Work of Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, and Adam G. Riess. Purdue University.
- Galbany, L. et al., (2012). Type Ia Supernova Properties as a Function of the Distance to the Host Galaxy in the SDSS-II SN Survey. *The Astrophysical Journal*, 755, 125.
- Gordon, K. D. et al., (2003). A Quantitative Comparison of the Small Magellanic Cloud, Large Magellanic Cloud, and Milky Way Ultraviolet to Near-Infrared Extinction Curves A. *The Astronomical Journal*, 594, 279-293.

- Goudfrooij P. et al., (1994). Interstellar Matter in Elliptical Galaxies - Part Three - Properties of Dust Extinction. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 271, 833-851.
- Guy, J. et al., (2007). SALT2: using distant supernovae to improve the use of type Ia supernovae as distance indicators. *Astronomy and Astrophysics*, 466, 11-21.
- Hicken, M. et al., (2009). CfA3: 185 Type Ia Supernova Light Curves from the CfA. *The Astrophysical Journal*, 700, 331-357.
- Hillebrandt, W. e Niemeyer, J. C., (2000). Type Ia Supernova Explosion Models. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 38, 191-230.
- Hjorth, J. et al., (2013). On Inferring Extinction Laws in  $z \sim 6$  Quasars as Signatures of Supernova Dust. *The Astrophysical Journal*, 768, 173.
- Holwerda, B.W. et al., (2008). Host galaxy extinction of Type Ia supernovae: co-evolution of interstellar medium structure and the extinction law with star formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 386, 1.
- Holwerda, B.W. et al., (2015). SN Ia Host Galaxy Properties and the Dust Extinction Distribution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 446, 4, 3768-3775.
- Hopkins, P. F. et al., (2004). Dust Reddening in Sloan Digital Sky Survey Quasars. *The Astronomical Journal*, 128, 1112-1123.
- Hsiao, E. et al., (2007). K-corrections and spectral templates of type Ia supernovae. *The Astrophysical Journal*, 663, 1187-1200.
- Huang, H. et al., (2017). The extinction properties of and distance to the highly reddened type ia supernova SN 2012cu. *arXiv*: 1701.01422, v1.
- Jarret T. H. et al., (2003). The 2MASS Large Galaxy Atlas. *The Astronomical Journal*, 125, 2, 525-554.
- Jha, S. et al., (2007). Improved distances to type Ia supernovae with multicolor light-curve shapes: MLCS2k2. *The Astrophysical Journal*, 659, 122-148.
- Jha, S. et al., (2010). Coherent control of atomic excitation using off-resonant strong few-cycle pulses. *Physical Review A*, 82, 4.
- Johansson, J. et al., (2013). Herschel limits on far-infrared emission from circumstellar dust around three nearby Type Ia supernovae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 431, 43-47.
- Kessler, R. et al., (2009). First-Year Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Results: Hubble Diagram and Cosmological Parameters. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 185, 32-84.
- Krisciunas K. et al., (2006). Photometry of the Type Ia Supernovae 1999cc, 1999cl, and

- 2000cf. *The Astronomical Journal*, 131, 3, 1639-1647.
- Lépine, J. R. D.; Amôres, E. B., (2000). How to build a 3D extinction model of the Galaxy. *Highlights of Astronomy*, 15, 200-201.
- Li, A. e Draine B. T., (2000). Infrared Emission from Interstellar Dust. II. The Diffuse Interstellar Medium. *The Astrophysical Journal*, 554, 778-802.
- Li, A. e Draine B. T., (2001). Do the Infrared Emission Features Need UV Excitation? The PAH Model in UV-poor Reflection Nebulae. *American Astronomical Society*, 33, 1451.
- Lineweaver, C. H., (2005). Inflation and the Cosmic Microwave Background. *World Scientific Publishing Co.* 31-65.
- Malcolm, A E., et al., (2009). Seismic imaging and illumination with internal multiplex. *Geophysical Journal*, 176, 3, 847-864.
- Mandel, K. S. et al. (2011), Type Ia supernova light curve inference: hierarchical models in the optical and near-infrared. *The Astrophysical Journal*, 731, 120.
- Martin, P. G. e Whittet, D. C. B., (1990). Interstellar extinction and polarization in the infrared. *Astrophysical Journal*. 357, 113-124.
- Matheson, T. et al., (2008). Optical spectroscopy of type Ia supernovae. *The Astronomical Journal*, 135, 1598-1615.
- Mathis J. S., (1990). Interstellar dust and extinction. *Astronomical Society of the Pacific*. 63-77.
- Nataf, D. M. et al., (2016). Interstellar extinction curve variations towards the inner Milky Way: a challenge to observational cosmology. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 456(3), 2692-2706.
- Nordin, J. et al., (2011). Spectral properties of type Ia supernovae up to  $z$  0.3. *Astronomy and Astrophysics*, 526, A119.
- Odenwald, S. e Fienberg, R. T., (1993). Galaxy *redshifts* reconsidered. *Sky & Telescope* (ISSN 0037-6604), 85(2), 31-35.
- Oliveira, K. e Saraiva, M. F., (2014). *Astronomia e Astrofísica*. Ed. Saraiva, São Paulo.
- Perlmutter, S. et al., (1999). Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 High-Redshift Supernovae. *The Astrophysical Journal*, 517, 565-586.
- Phillips, M. M. et al., (1999). The reddening-free decline rate versus luminosity relationship for type Ia supernovae. *The Astronomical Journal*, 118, 1766-1776.
- Prevot, L. et al., (1984). The typical interstellar extinction in the Small Magellanic Cloud. *Astronomy and Astrophysics*, 132, 389-392.



- Reiss, A. G. et al., (1998). Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *The Astronomical Journal*, 116, 1009-1038.
- Rieke, G. H. e Lebofsky, M. J., (1985). The interstellar extinction law from 1 to 13 microns. *Astrophysical Journal*, 288, 618-621.
- Robin, A. C. et al., (2003). A synthetic view on structure and evolution of the Milky Way. *Astronomy and Astrophysics*, 409, 523-540.
- Rodrigues, C. V. et al., (1997). Dust in the Small Magellanic Cloud: Interstellar Polarization and Extinction. *The Astrophysical Journal*, 485, 618-637.
- Savage, B. D. e Mathis, J. S., (1979). Observed properties of interstellar dust. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 17, 73-111.
- Schlafly, E. F. et al., (2011). Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD. *The Astrophysical Journal*, 737, 2, 13.
- Schlafly, E. F. et al., (2010). The Blue Tip of the Stellar Locus: Measuring Reddening with the Sloan Digital Sky Survey. *The Astrophysical Journal*. 725, 1, 1175-1191.
- Schlegel, D. J. et al., (1998). Maps of dust infrared emission for use in estimation of reddening and cosmic microwave background radiation foregrounds. *The Astrophysical Journal*, 500, 525-553.
- Schmidt, B. P. et al., (1998). The High-Z Supernova Search: measuring cosmic deceleration and global curvature of the universe using type ia supernovae. *The Astrophysical Journal*, 507, 46-63.
- Silverman, J. M. et al., (2012). Berkeley Supernova Ia Program – I. Observations, data reduction and spectroscopic sample of 582 low-*redshift* Type Ia supernovae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 425, 1789-1818.
- Silverman, J. M. et al., (2012). Berkeley Supernova Ia Program – III. Spectra near maximum brightness improve the accuracy of derived distances to Type Ia supernovae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 425, 1889-1916.
- Sullivan, M. et al., (2011). The Subluminous and Peculiar Type Ia Supernova PTF 09dav. *The Astrophysical Journal*, 732, 2, 118, 13.
- Tripp, R. e Branch, D., (1999). Determination of the Hubble constant using a two-parameter luminosity correction for type Ia supernovae. *The Astrophysical Journal*, 525, 209-214.
- Trumpler, R. J., (1930). Spectrophotometric Measures of Interstellar Light Absorption. *The Astronomical Society of the Pacific*. 42, 249, 267.
- Voshchinnikov, N. V. et al, (2013). Systematic variations of interstellar linear polarization and growth of dust grains. *Astronomy Letters (in press)*, *arXiv*: 1303, 1033.

Zwicky, F., (1964). NGC 1058 and its Supernova 1961. *Astrophysical Journal*, 139, 514.

Wang, B. et al., (2009). Companion stars of type Ia supernovae and hypervelocity stars. *Astronomy and Astrophysics*, 508, 2, L27-L30.

Weingartner, J. C. e Draine, E. B., (2001). Electron-Ion Recombination on Grains and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *American Astronomical Society*, 33, 1324.

Wheeler, J. C. e Harkness R. P., (1990). Type I supernovae. *Reports on Progress in Physics*, 53, 1467.

Whittet, D. C. B., (2003). Dust in the galactic environment. *Astronomy and Astrophysics*, ed. 2. Bristol: Institute of Physics Publishing.

Whittet, D. C. B., (1992). Dust in the Galactic Environment. London: Institute of Physics Publishing.

## Apêndice A

# Simulação e comparação entre os espectros modelados com o *template* Hsiao e os observados

Nesta seção são apresentados alguns exemplos dos espectros ajustados para as SNas 1998bu, 1999aa, 2004as, 2006lf, F200805, levando em conta os espectros sintéticos Hsiao. Estes ajustes estão ilustrados nas Figuras de A.1 a A.5 respectivamente. As linhas em cor preta são os espectros observados, em verde os espectros ajustados. Os números que aparecem no painel à direita de cada ajuste são os valores da mediana para as várias soluções, as que têm os valores escritos em azul são os espectros que possuem mais do que 10 soluções fora dos 2% da borda para todos os parâmetros, os escritos em vermelhos são os que não satisfazem essa condição.

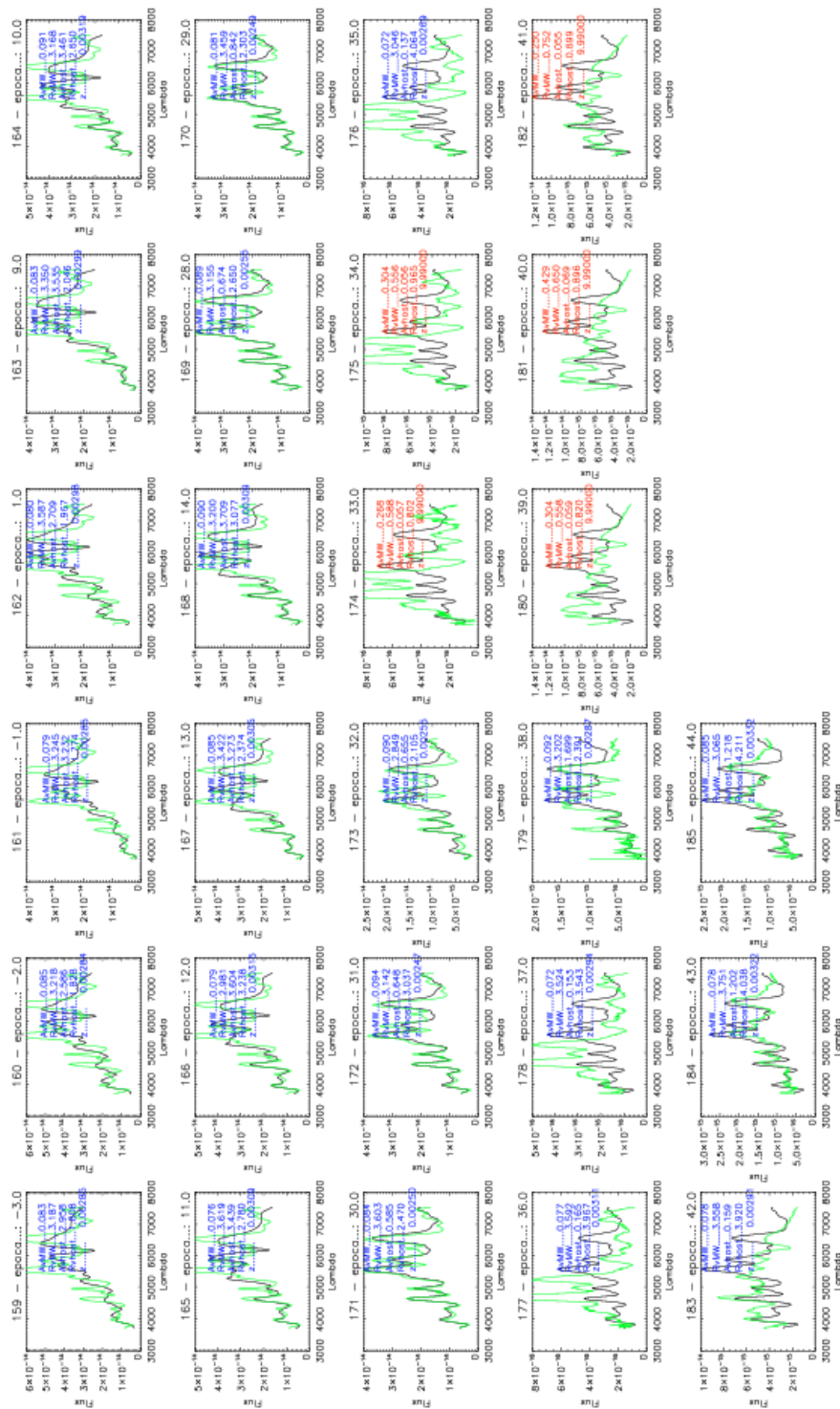


Figura A.1: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no *template* Hsiao comparados ao observado para a SNa 1998bu.

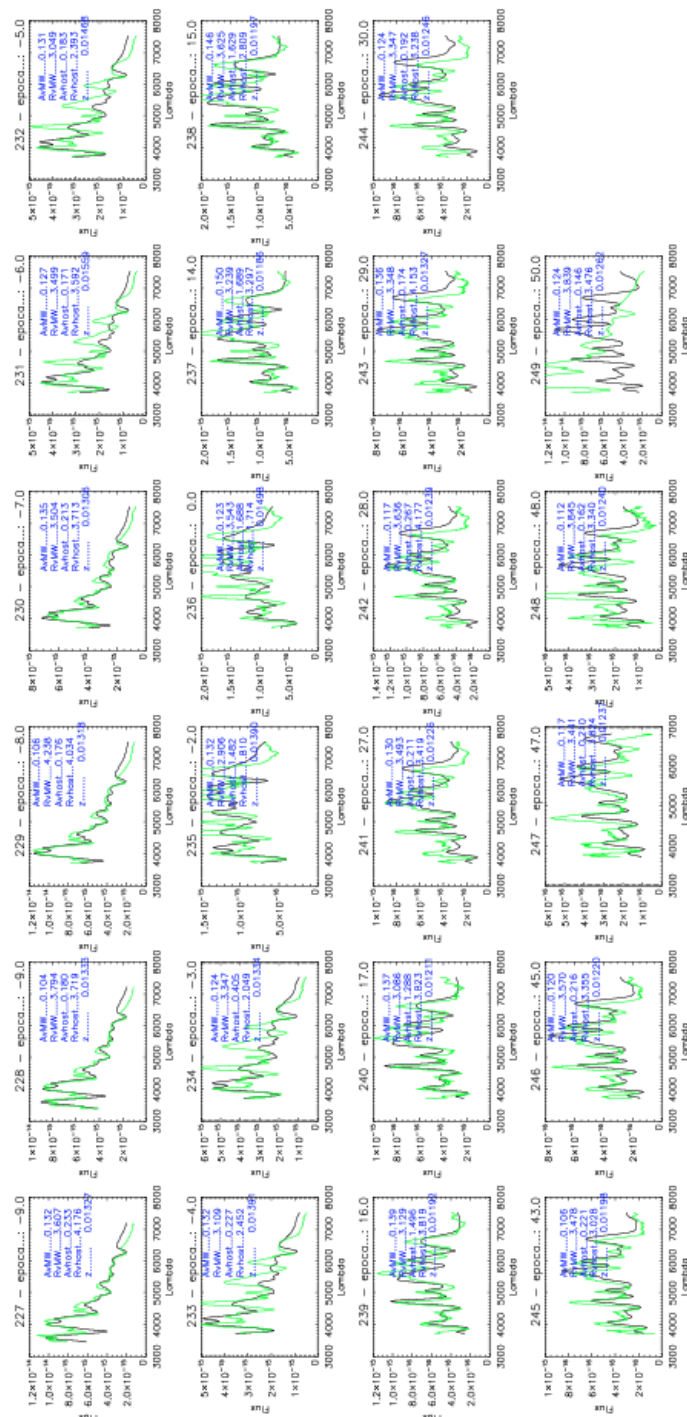


Figura A.2: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no *template* Hsiao comparados ao observado para a SNa 1999aa.

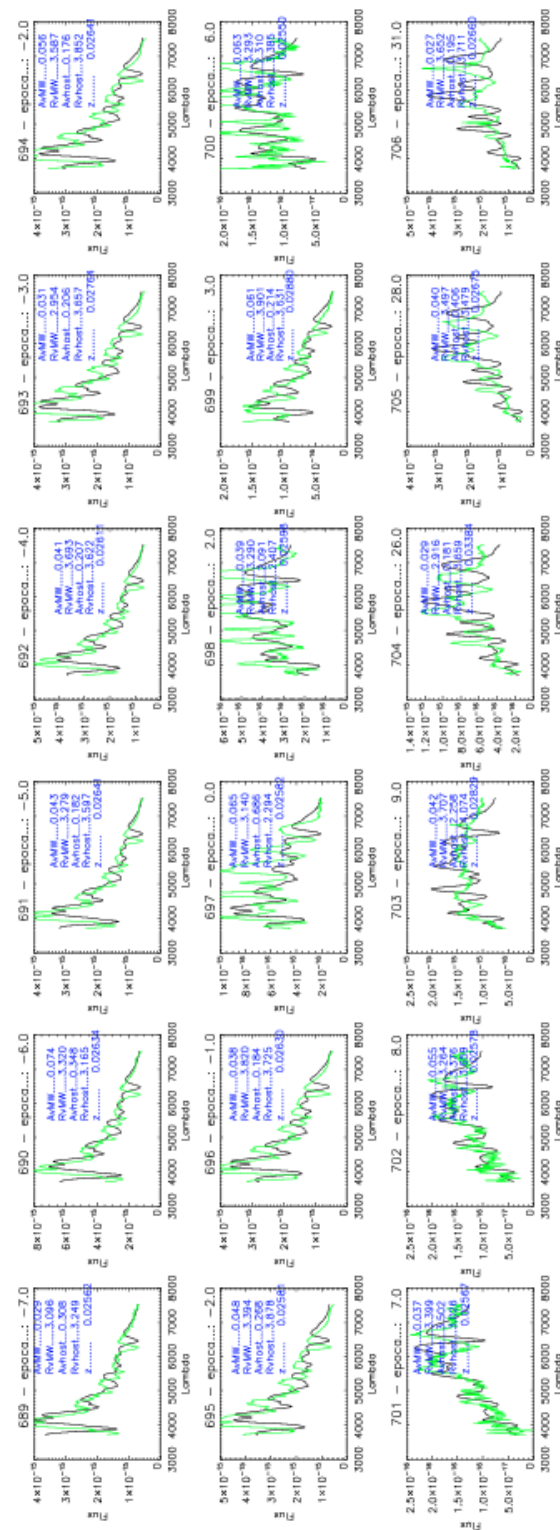


Figura A.3: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no *template* Hsiao comparados ao observado para a SNa 2004as.

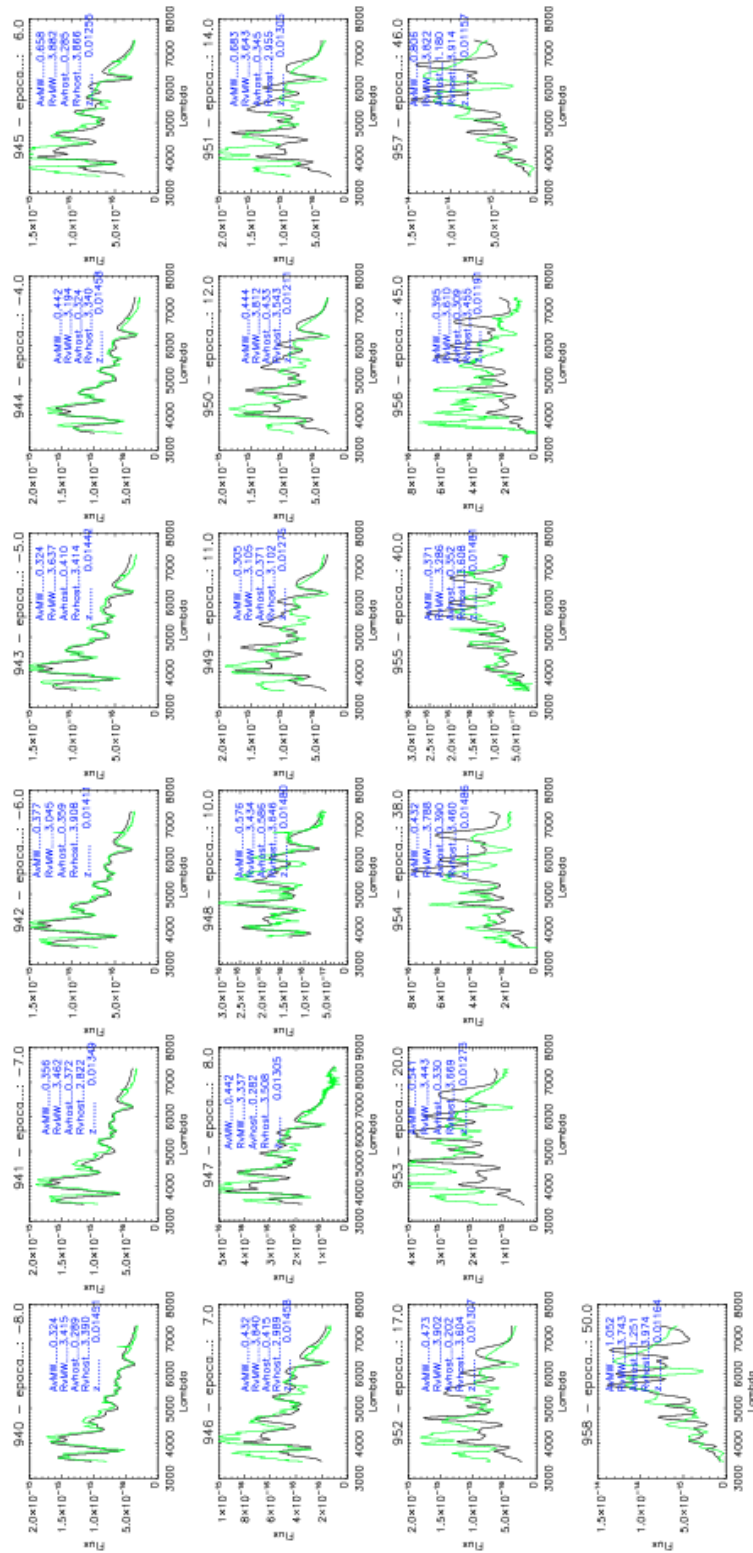


Figura A.4: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no *template* Hsiao comparados ao observado para a SNa 2006lf.

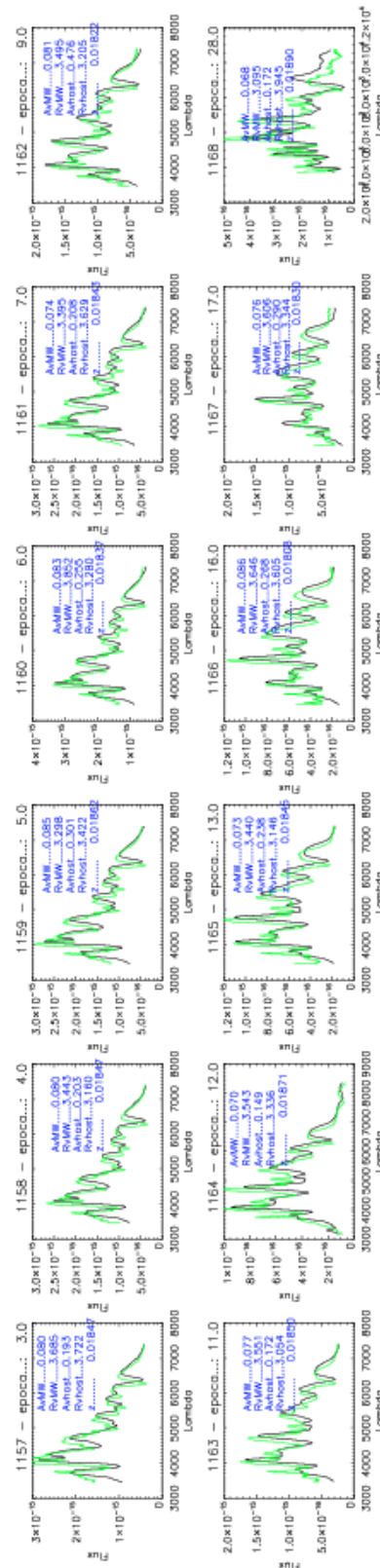


Figura A.5: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no *template* Hsiao comparados ao observado para a SNF200805.



## Apêndice B

# Comparação entre os espectros modelados com o *template* SALT e os observados

Nesta seção são apresentados alguns exemplos dos espectros ajustados para as SNas 2002bo, 2003cg, 2006gr, 2006le, 2008z, levando em conta os espectros sintéticos SALT. Estes ajustes estão ilustrados nas Figuras B.1 a B.5 respectivamente.

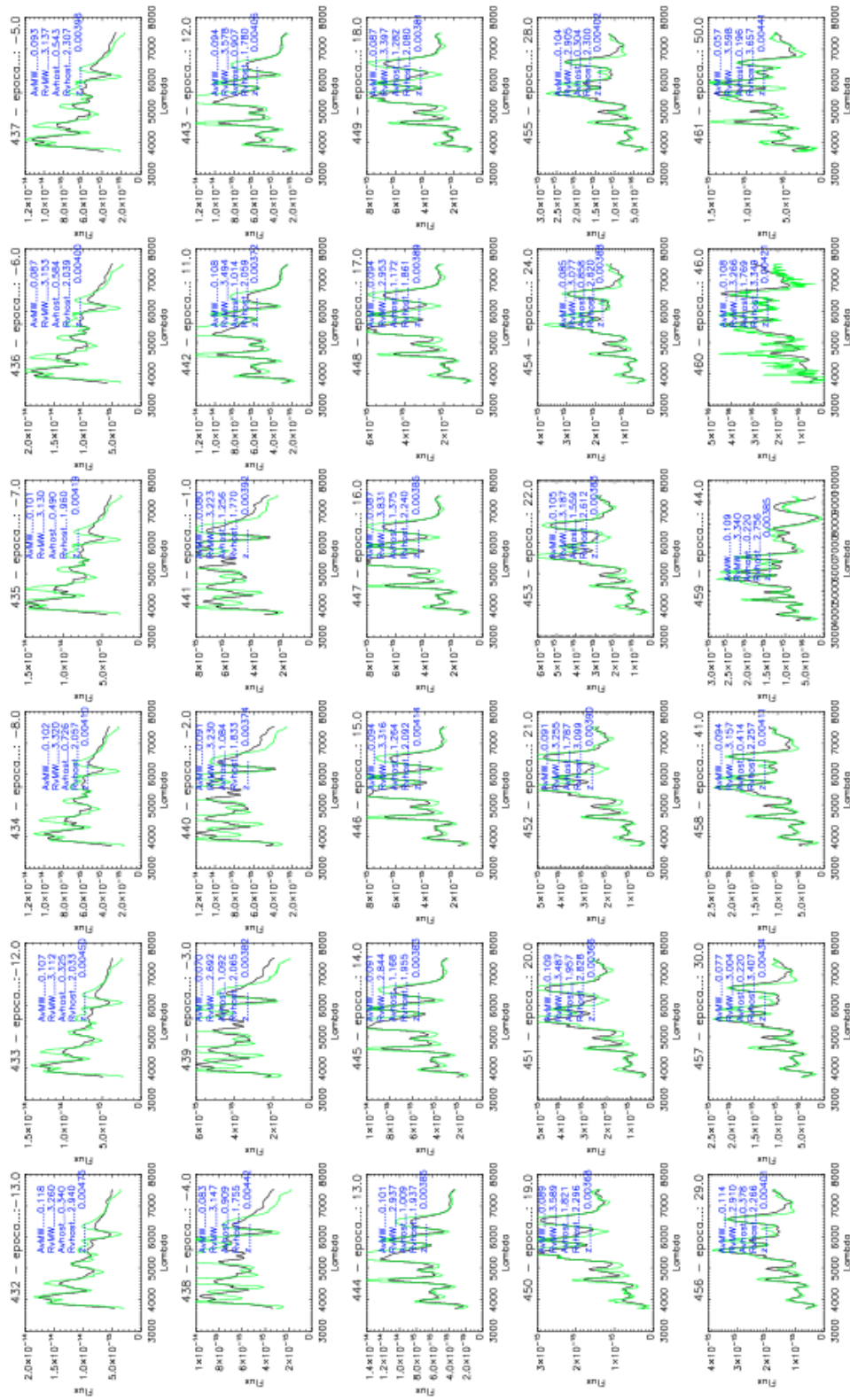


Figura B.1: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no *template* SALT comparados ao observado para a SNIa 2002bo.

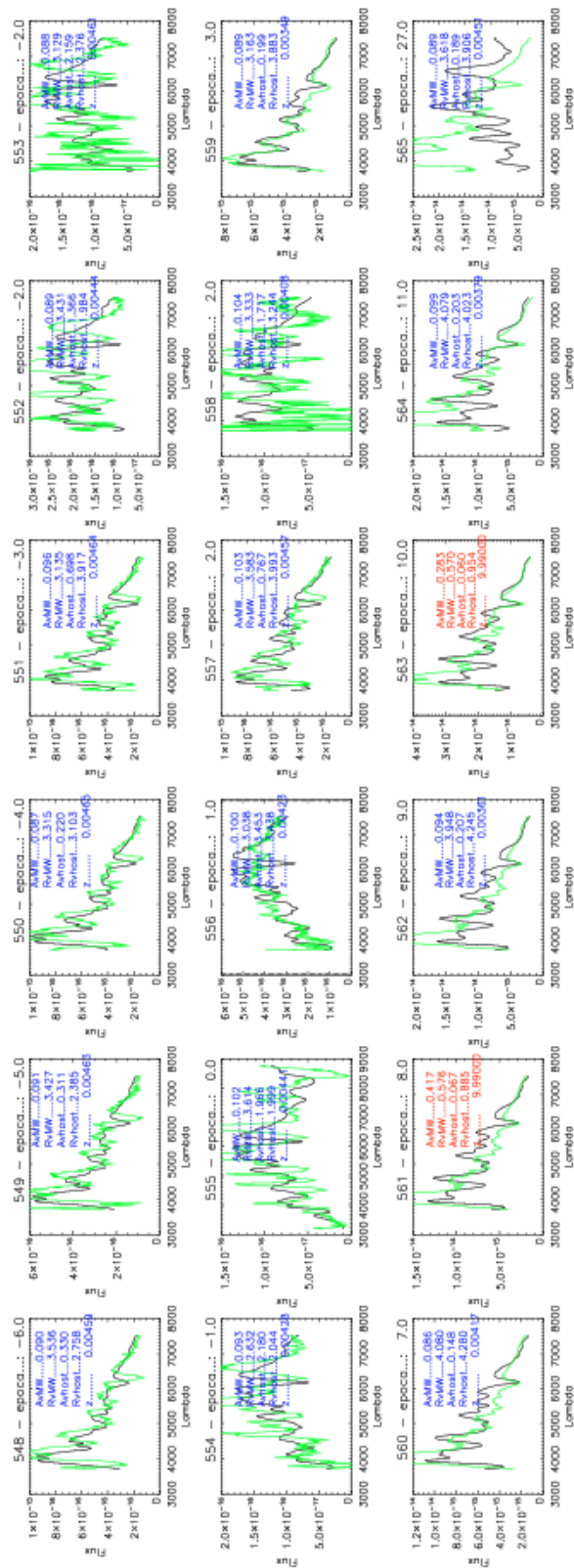


Figura B.2: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no *template* SALT comparados ao observado para a SNa 2003cg.

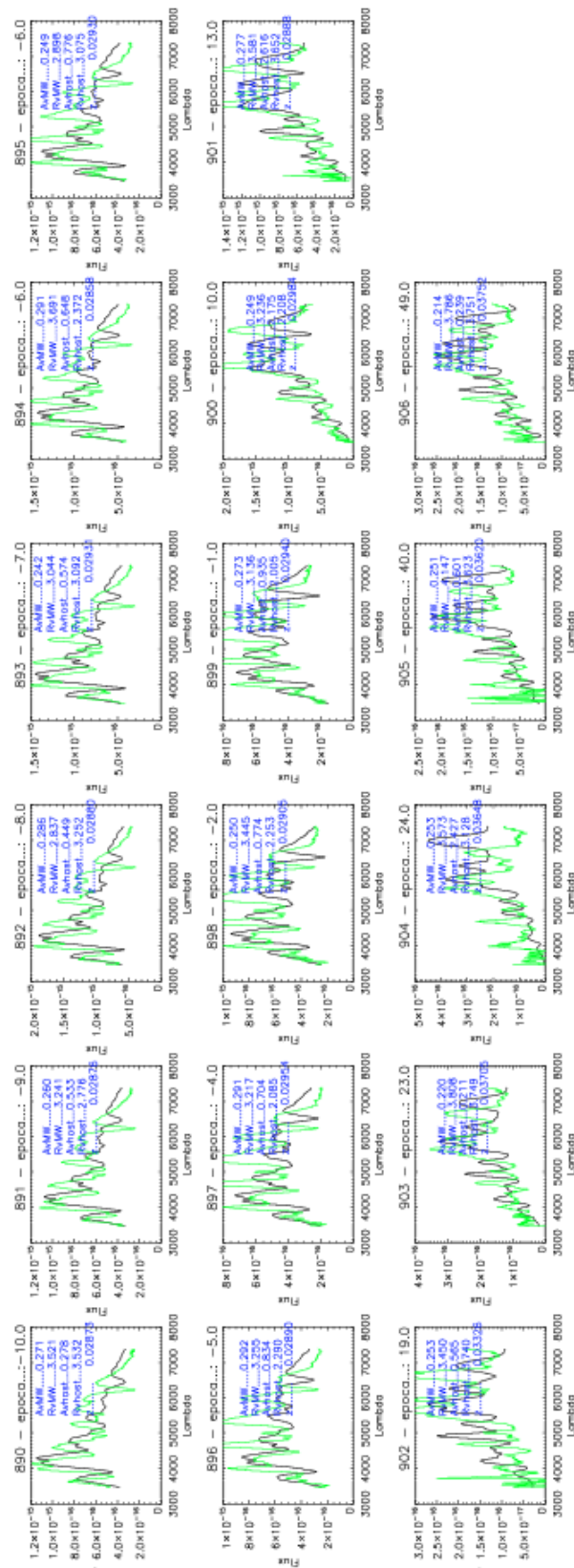


Figura B.3: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no *template* SALT comparados ao observado para a SNa 2006gr.

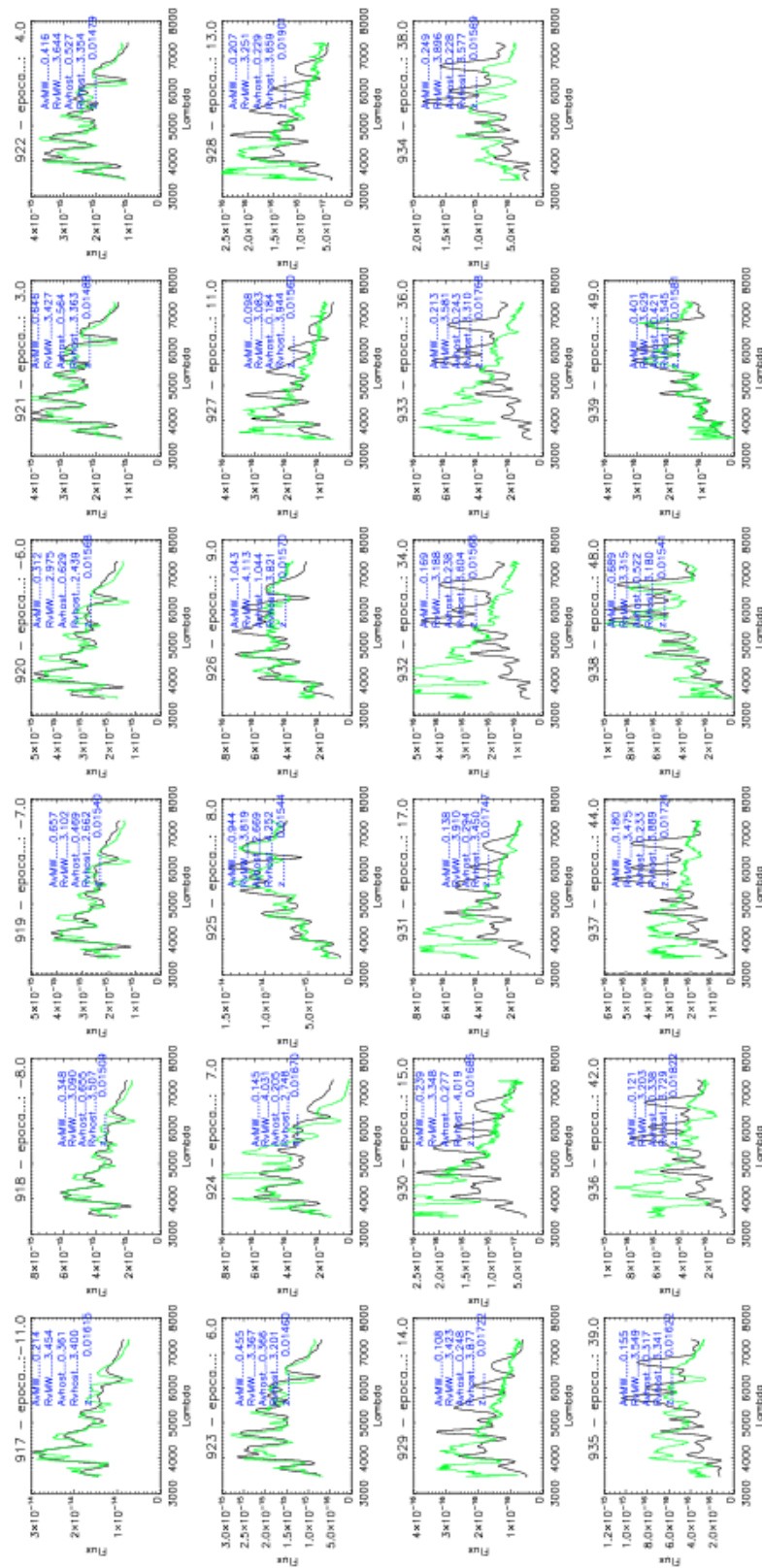


Figura B.4: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no *template* SALT comparados ao observado para a SNa 2006le.

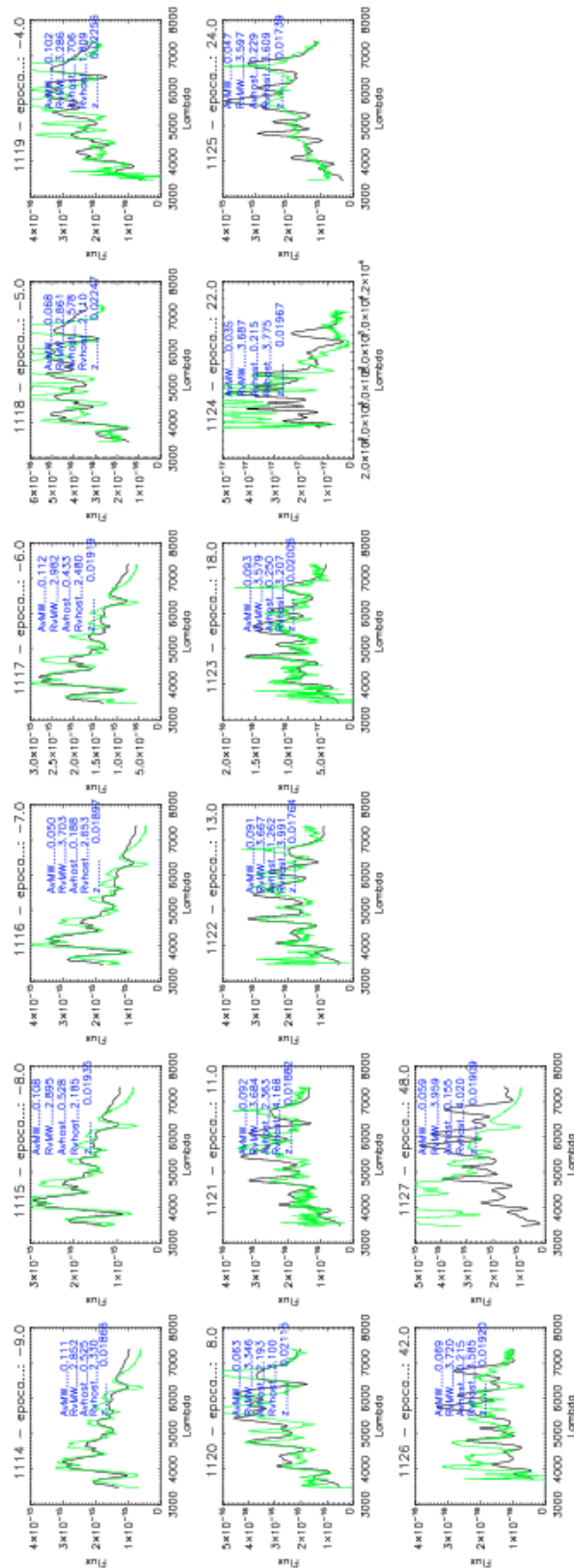


Figura B.5: Ajuste dos espectros sintéticos após os ajustes dos parâmetros do modelo com base no *template* SALT comparados ao observado para a SNa 2008z.

## Apêndice C

# Imagens do SDSS de supernovas e suas galáxias hospedeiras

Esta seção contém as imagens das supernovas em suas galáxias hospedeiras. A cruz na imagem da galáxia, representa a posição da SNa. As imagens foram obtidas através do Aladin<sup>11</sup>, que é um atlas de céu leve executado no navegador.

---

<sup>11</sup> <http://aladin.u-strasbg.fr/AladinLite>



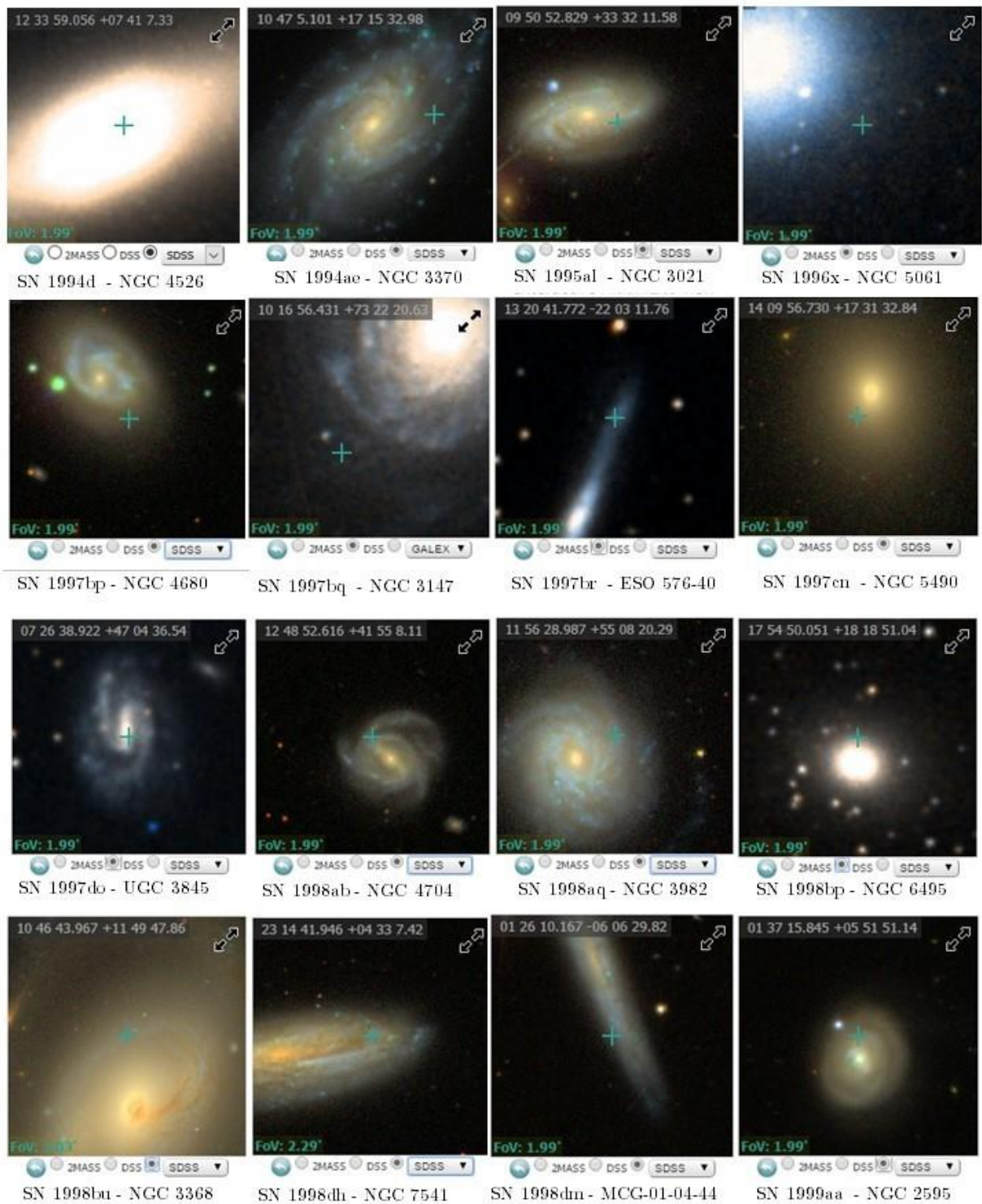


Figura C. 1: Imagens das supernovas: SN 1994d, SN 1994ae, SN 1995al, SN 1996x, SN 1997bp, SN 1997bq, SN 1997bc, SN 1997en, SN 1997do, SN 1998ab, SN 1998aq, SN 1998bp, SN 1998bn, SN 1998aq, SN 1998dh, SN 1998dm e SN 1999aa, em suas galáxias hospedeiras.



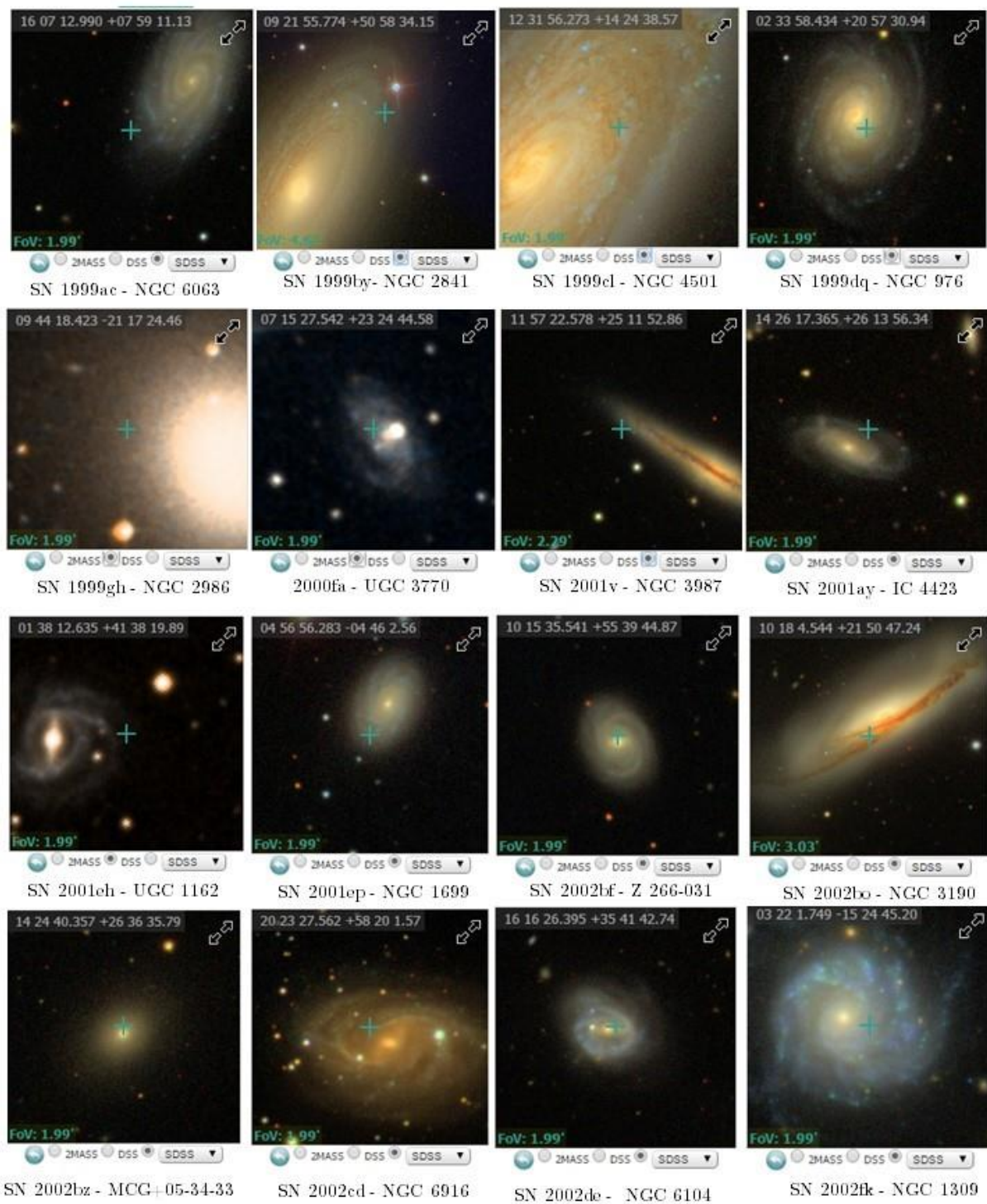


Figura C. 2: Imagens das supernovas: SN 1999ac, SN 1999by, SN 1999cl, SN 1999dq, SN 1999gh, SN 2000fa, SN 2001v, SN 2001ay, SN 2001eh, SN 2001ep, SN 2002bf, SN 2002bo, SN 2002bz, SN 2002ed, SN 2002de e SN 2002fk, em suas galáxias hospedeiras.

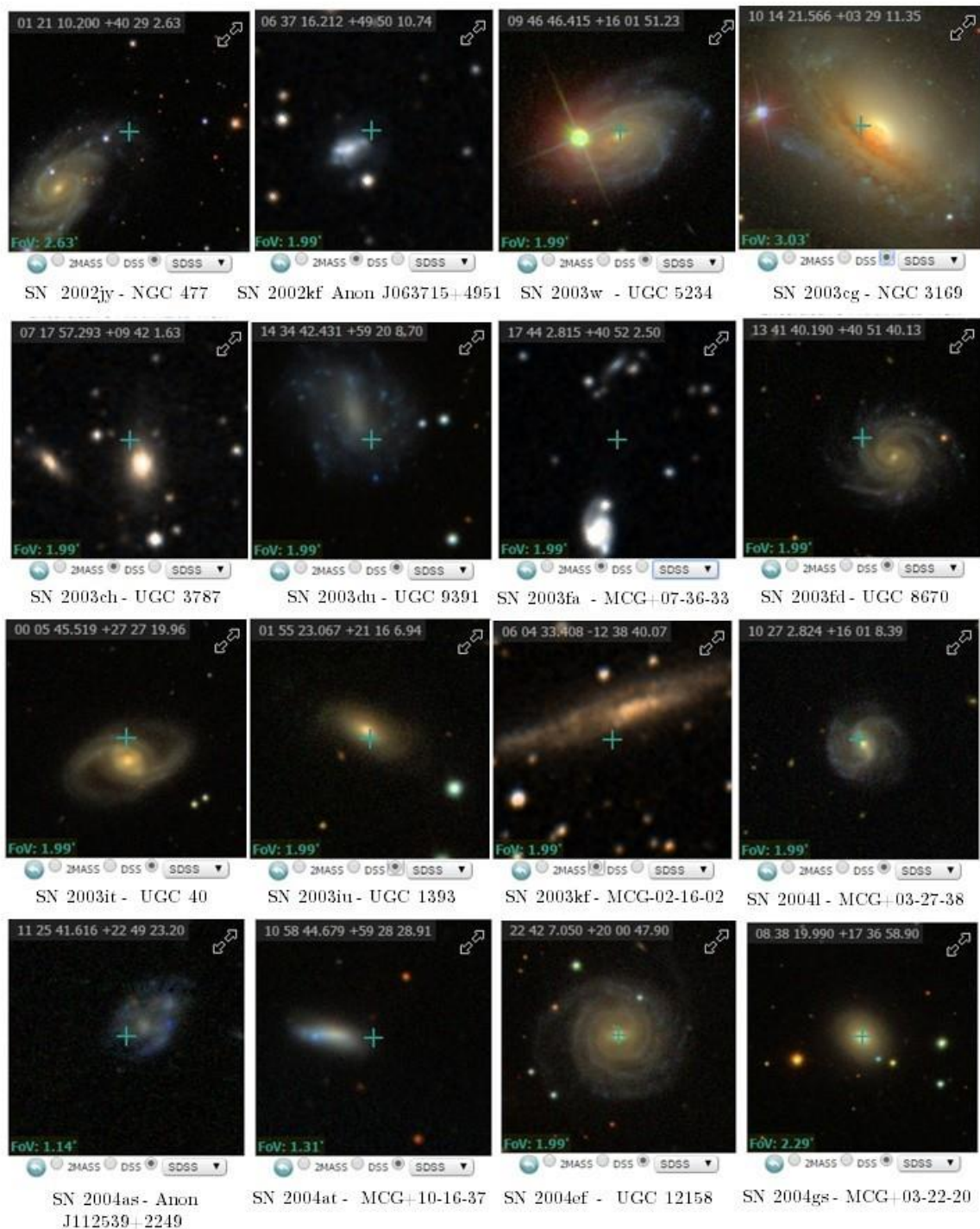


Figura C. 3: Imagens das supernovas: SN 2002jy, SN 2002kf, SN 2003w, SN 2003eg, SN 2003eh, SN 2003dn, SN 2003fa, SN 2003fd, SN 2003it, SN 2003iu, SN 2003kf, SN 2004l, SN 2004as, SN 2004at, SN 2004ef e SN 2004gs, em suas galáxias hospedeiras.



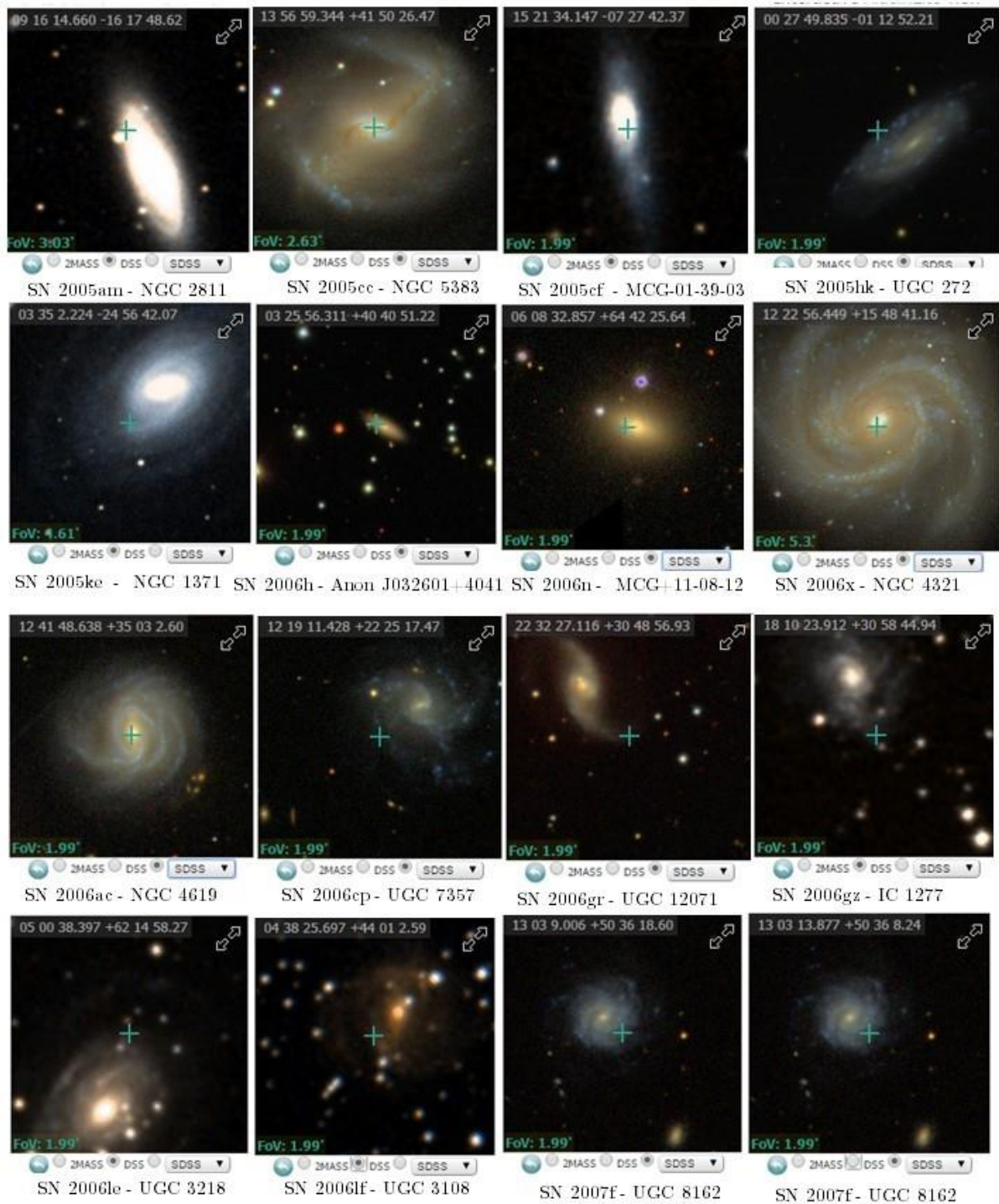


Figura C. 4: Imagens das supernovas: SN 2005am, 2005cc, 2005cf, 2005hk, 2005ke, 2006h, 2006n, 2006x, 2006ae, 2006ep, 2006gr, 2006gz, 2006le, 2006lf e 2007f, em suas galáxias hospedeiras.

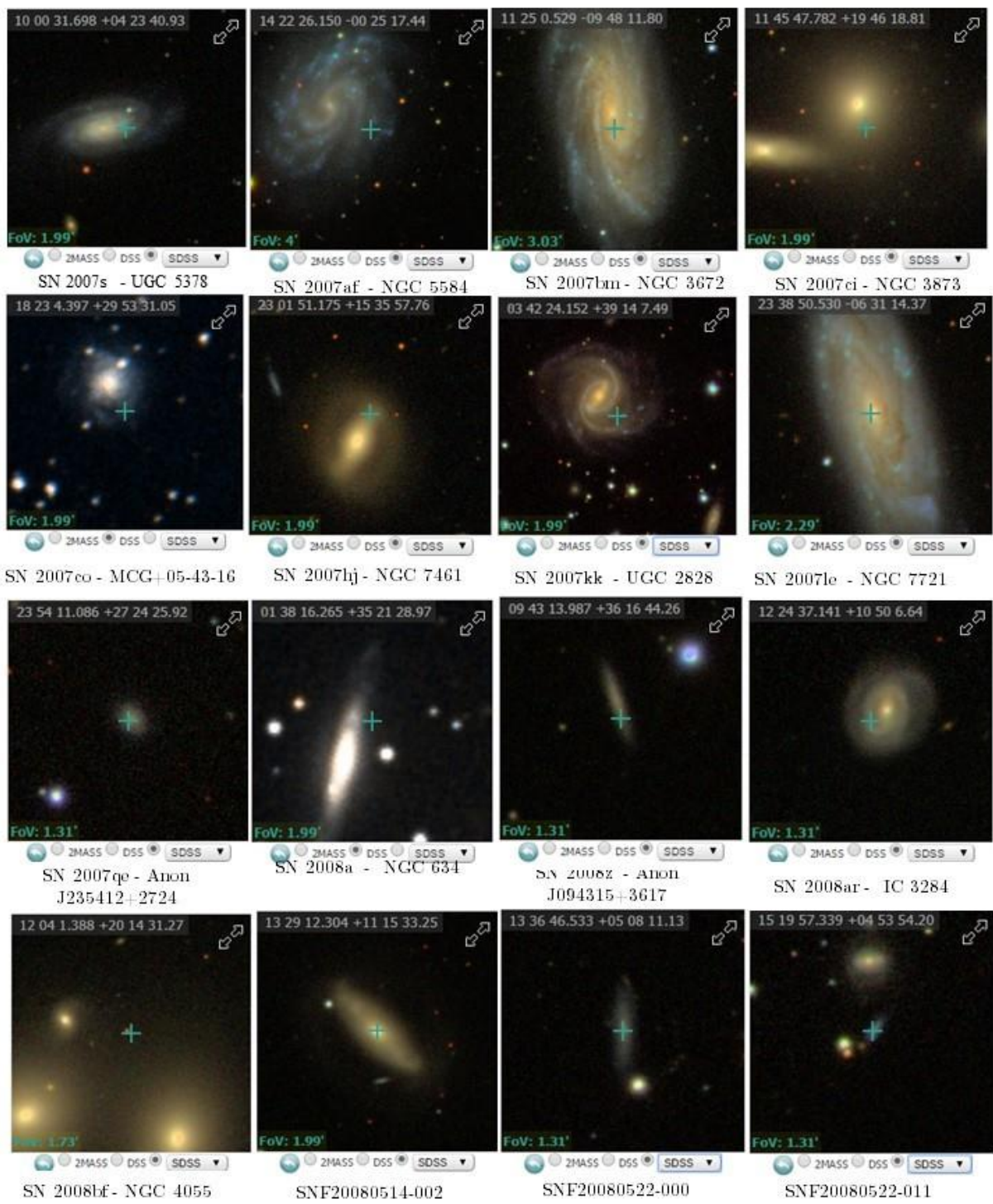


Figura C. 5: Imagens das supernovas: SN 2007s, SN 2007af, SN 2007bm, SN 2007ci, SN 2007eo, SN 2007hj, SN 2007kk, SN 2007le, SN 2007qe, SN 2008<sup>a</sup>, SN 2008z, SN 2008ar, SN 2008bf, SNF 20080514, SNF 20080522 e SNF 20080522, em suas galáxias hospedeiras.