



Dissertação de Mestrado

**CATÁLOGO DE INTENSIDADES DE LINHAS  
DE EMISSÃO DE REMANESCENTES DE  
SUPERNOVAS E APLICAÇÕES**

Diogo Pauletti

PPGFísica

Santa Maria, RS, Brasil

2011



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

Programa de Pós-Graduação em Física

**CATÁLOGO DE INTENSIDADES DE LINHAS  
DE EMISSÃO DE REMANESCENTES DE  
SUPERNOVAS E APLICAÇÕES<sup>‡</sup>**

**Diogo Pauletti**

Dissertação realizada sob a orientação do Prof. Dr. Marcus Vinicius Fontana Copetti, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da USFM, em preenchimento parcial dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Física.

Santa Maria, RS, Brasil

2011

---

<sup>‡</sup>Trabalho financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

P326c Pauletti, Diogo  
Catálogo de intensidades de linhas de emissão de remanescentes de supernovas e aplicações / por Diogo Pauletti. – 2011.  
104 f. ; il. ; 30 cm

Orientador: Marcus Vinicius Fontana Copetti  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Física, RS, 2011

1. Intensidades de linhas de emissão 2. Remanescentes de supernovas  
3. Diagramas de diagnóstico 4. Ultravioleta I. Copetti, Marcus Vinicius Fontana  
II. Título.

CDU 524.352

Ficha catalográfica elaborada por Cláudia Terezinha Branco Gallotti – CRB 10/1109  
Biblioteca Central UFSM

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**CATÁLOGO DE INTENSIDADES DE LINHAS DE EMISSÃO DE  
REMANESCENTES DE SUPERNOVAS E APLICAÇÕES**

elaborada por  
**Diogo Pauletti**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Física**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Marcus Vinicius Fontana Copetti, Dr.**  
**(Orientador)**

**Zulema Abraham, Dra. (USP)**

**Rogemar André Riffel, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 30 de Junho de 2011.



## Dedicatória

*Aos meus pais, Boaventura e Geni,  
e meus irmãos, Emerson e Vagner.*





# Agradecimentos

Agradeço a todos que participaram de alguma forma da minha formação, e em especial:

- ao professor Dr. Marcus Vinicius Fontana Copetti, pela orientação, atenção e disponibilidade;
- aos demais professores do Laboratório de Análise Numérica e Astrofísica;
- aos demais professores dos cursos de Física e PG-Física;
- aos meus pais, Boaventura e Geni, e meus irmãos, Emerson e Vagner, pela motivação e confiança;
- à Silvana, pelo carinho e compreensão;
- aos colegas de sala, Aline, Hélio, Igor, Marcio e Vinícius, pelas conversas instrutivas e o bom ambiente de trabalho;
- aos amigos das conversas descontraídas durante o almoço, e também ao Josué, pelo companheirismo desde a graduação;
- aos demais familiares, pela consideração;
- ao pessoal da pensão onde moro, pelo ambiente agradável e familiar;
- ao CNPq pelo apoio financeiro.



*“O conhecimento é irresistível.”*

**Canal Futura**



# Resumo

As intensidades de linhas de emissão de nebulosas ionizadas constituem uma importante fonte de informação sobre esses objetos. São numerosos os dados que podem ser encontrados em diferentes artigos da literatura referentes a intensidades de linhas emitidas por remanescentes de supernovas. Porém, esses dados podem ser mais eficientemente utilizados se disponibilizados em conjunto e de maneira organizada, ou seja, na forma de um catálogo. Com base nisso, foi construído um catálogo de intensidades de linhas de emissão de remanescentes de supernovas com dados extraídos da literatura, incluindo linhas no intervalo espectral de 900 Å até 100  $\mu m$ . Cerca de 300 remanescentes de supernovas e mais de 25 000 intensidades de linhas de emissão foram catalogadas, incluindo informações adicionais associadas ao objeto e à observação. Como demonstração de aplicação do catálogo, foram construídos diagramas de diagnóstico com intensidades de linhas de emissão de remanescentes de supernovas e de regiões HII, utilizando as razões de intensidades de linhas [O III]  $\lambda 5007/H\beta$ , [N II]  $\lambda 6583/H\alpha$ , [O II]  $\lambda 3727/H\beta$ , [S II]  $(\lambda 6716+\lambda 6730)/H\alpha$  e [O I]  $\lambda 6300/H\alpha$ . Além desses diagramas tradicionais, a grande quantidade de dados do catálogo permitiu construir novos diagramas utilizando linhas relativamente fracas, raramente medidas. Os diagramas mostraram-se eficientes para a classificação e distinção dessas classes de objetos. Também verificou-se os valores das razões [O III]  $\lambda 5007/\lambda 4959$  e [N II]  $\lambda 6584/\lambda 6548$ , retornando valores em concordância com outros publicados. Por fim, considerando os avanços na espectroscopia ultravioleta das últimas décadas, apresenta-se um histórico da instrumentação utilizada e da evolução de sua performance, considerando também alguns tópicos que mostram a importância dos estudos espectroscópicos na faixa do ultravioleta em remanescentes de supernovas. Construiu-se uma lista com todas as linhas de emissão do ultravioleta já medidas em remanescentes de supernovas até o ano de 2010, fazendo-se um comparativo com as linhas medidas até o ano de 1996. Verificou-se que várias novas linhas foram detectadas e que alguns multipletos passaram a ser resolvidos. Essas 142 linhas são identificadas pelo seu comprimento de onda, pelo íon e por parâmetros das transições que as geram, e são listados os remanescentes de supernovas em que cada linha foi medida. Essa tabela pode ser utilizada como referência na identificação das linhas em futuros estudos de remanescentes de supernovas.

Palavras-chave: intensidades de linhas de emissão; remanescentes de supernovas; diagramas de diagnóstico; ultravioleta.



# Abstract

Emission line intensities from ionized nebulae are an important information source about these objects. There are many data on line intensities emitted from supernova remnants scattered in the literature. However, these data can be more efficiently used if available in the form of an electronic data base. Based on this, it was made a catalog of emission line intensities of supernova remnants with data obtained from the literature, including lines in the spectral range of 900 Å to 100 μm. About 300 supernova remnants and more than 25 000 emission line intensities were cataloged, including additional information associated to the objects and the observations. As a demonstration of the applicability of this catalog, diagnostic diagrams were made with emission line intensities from supernova remnants and from H II regions, using the line ratios [O III] λ5007/Hβ, [N II] λ6583/Hα, [O II] λ3727/Hβ, [S II] (λ6716+λ6730)/Hα and [O I] λ6300/Hα. Besides these traditional diagrams, the large amount of data in the catalog allowed the construction of others diagrams using relatively weak lines, rarely measured. The diagrams were effective for the classification and discrimination of these classes of objects. It was also verified the values of the ratios [O III] λ5007/λ4959 and [N II] λ6584/λ6548, which returned results in agreement with some others published. Moreover, considering the ultraviolet spectroscopy advances in recent decades, it is presented an history of the instrumentation and its performance evolution, regarding some topics that show the importance of the studies about the ultraviolet spectra of supernova remnants. Finally, a list of all ultraviolet emission lines already measured in supernova remnants until 2010 was made, and compared with a similar list created in 1996. It was found that many new lines were detected and some multiplets became resolved since then. Each one of the 142 lines was identified by its wavelength, the ion and parameters of the transition that generates it. This table may be used as a reference for identifying emission lines in supernova remnants in future studies.

Key words: emission line intensities; supernova remnants; diagnostic diagrams; ultraviolet.





# Lista de Figuras

1.1	Nebulosa do Caranguejo . . . . .	16
1.2	Espectro da supernova SN 1986J, obtido em 5 de setembro de 1989. Adaptado de Leibundgut <i>et al.</i> (1991). . . . .	18
1.3	Espectro do remanescente de supernova N132D. O símbolo $\oplus$ indica que a linha é geocoronal, ou seja, sua emissão tem como origem a atmosfera terrestre. Adaptado de Blair <i>et al.</i> (2000). . . . .	19
1.4	Esquema do modelo padrão para a evolução de remanescentes de supernovas .	21
1.5	Estrutura básica para o modelo do remanescente de supernova em expansão contra o meio interestelar (fora de escala) . . . . .	23
1.6	Seção de choque do evento de fotoionização dos elementos e íon H I, He I e He II. Adaptado de Osterbrock & Ferland (2006). . . . .	25
1.7	Estrutura de ionização de uma região H II para os elementos H, He, O e S (fora de escala) . . . . .	27
1.8	Espectro de um remanescente de supernova na região espectral que contém linhas importantes na distinção entre objetos fotoionizados e ionizados por choque	28
1.9	Espectro de uma região H II na faixa espectral que contém as linhas importantes na distinção entre objetos fotoionizados e ionizados por choque . . . . .	28
2.1	Tela inicial do programa <i>incat</i> - dados bibliográficos. . . . .	36
2.2	Segunda tela do programa <i>incat</i> - remanescentes de supernovas e seções. . . . .	36
2.3	Tela complementar do programa <i>incat</i> - dados da seção, da observação e das intensidades. . . . .	37
2.4	Parte da lista de acrônimos de telescópios. A primeira coluna é o acrônimo, a segunda o diâmetro (em metros) e a terceira o indicador do observatório. . . . .	40



2.5	Exemplo da simbologia utilizada na associação de informações de mesmas observações em diferentes campos. . . . .	41
2.6	Exemplo da simbologia utilizada quando há informações comuns a apenas algumas observações de uma mesma seção. . . . .	41
2.7	Arquivo <bibcode>.txt gerado a partir de três seções adicionadas . . . . .	41
2.8	Terceira tela do programa <i>incat</i> - inclusão das linhas de emissão. . . . .	42
2.9	Tela final do programa <i>incat</i> - adição dos valores das intensidades. . . . .	43
2.10	Exemplo do formato do arquivo <bibcode>.vbt. . . . .	44
3.1	Diagrama [O III] $\lambda 5007/H\beta$ vs. [N II] $\lambda 6583/H\alpha$ . Os pontos de SNRs mais isolados são identificados pelos nomes dos SNRs e pelas referências das medidas. . . . .	49
3.2	Diagrama [O III] $\lambda 5007/H\beta$ vs. [O I] $\lambda 6300/H\alpha$ . . . . .	50
3.3	Diagrama [O III] $\lambda 5007/H\beta$ vs. [O II] $\lambda 3727/H\beta$ . . . . .	51
3.4	Diagrama [O III] $\lambda 5007/H\beta$ vs. [S II] ( $\lambda 6716+\lambda 6730$ )/ $H\alpha$ . . . . .	51
3.5	Diagrama [O III] $\lambda 5007/H\beta$ vs. [N II] $\lambda 6583/H\alpha$ incluindo medidas de candidatos a SNRs, cujos nomes e referências são identificados. . . . .	52
3.6	Diagrama [O III] $\lambda 5007/H\beta$ vs. [O I] $\lambda 6300/H\alpha$ incluindo candidatos a SNRs. . . . .	53
3.7	Diagrama [O III] $\lambda 5007/H\beta$ vs. [O II] $\lambda 3727/H\beta$ incluindo candidatos a SNRs. . . . .	54
3.8	Diagrama [O III] $\lambda 5007/H\beta$ vs. [S II] ( $\lambda 6716+\lambda 6730$ )/ $H\alpha$ incluindo candidatos a SNRs. . . . .	54
3.9	Diagrama [O III] $\lambda 5007/H\beta$ vs. [N II] $\lambda 6583/H\alpha$ para galáxias normais e AGNs. A escala em cinza representa o número de galáxias por pixel (os pixels mais escuros são os mais populosos). As curvas a e b são linhas divisórias propostas por Kewley <i>et al.</i> (2001) e Kauffmann <i>et al.</i> (2003), respectivamente, para classificação de galáxias. Adaptado de Stasińska <i>et al.</i> (2006). . . . .	55
3.10	Diagramas [O III] $\lambda 5007/H\beta$ vs. [N II] $\lambda 6583/H\alpha$ deste trabalho e de Stasińska <i>et al.</i> (2006) sobrepostos. Esta figura evidencia a coincidência na distribuição de pontos de regiões H II com as galáxias normais e dos SNRs com os AGNs. . . . .	56
3.11	Diagrama [S III] ( $\lambda 9068+\lambda 9530$ )/ $H\alpha$ vs. [S II] ( $\lambda 6716+\lambda 6730$ )/ $H\alpha$ . . . . .	57
3.12	Diagrama [O III] $\lambda 5007/H\beta$ vs. [Ne III] $\lambda 3868/H\gamma$ . . . . .	58



3.13	Diagrama [O III] $\lambda 5007/H\beta$ vs. [O III] $\lambda 4363/H\beta$ . . . . .	58
3.14	Diagrama [S II] ( $\lambda 6716+\lambda 6730$ )/ $H\alpha$ vs. [O III] $\lambda 4363/H\beta$ . . . . .	59
3.15	Histograma dos valores da razão [O III] $\lambda 5007/\lambda 4959$ . . . . .	61
3.16	Ajuste linear das razões do íon O III. . . . .	62
3.17	Histograma dos valores da razão [N II] $\lambda 6584/\lambda 6548$ . . . . .	63
3.18	Ajuste linear das razões do íon N II. . . . .	63
4.1	Espectro UV distante do remanescente de supernova <i>Cygnus Loop</i> obtido com o telescópio espacial FUSE . . . . .	66
4.2	Espectro UV próximo do remanescente de supernova N123D obtido com o telescópio espacial Hubble . . . . .	66



# Lista de Tabelas

1.1	Potenciais de ionização de alguns átomos e íons presentes em regiões H II . . .	25
2.1	Lista de referências do catálogo . . . . .	45
4.1	Linhas do UV medidas em SNRs . . . . .	69





# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>13</b>
1.1	Supernovas e remanescentes de supernovas . . . . .	14
1.1.1	Origem das supernovas . . . . .	14
1.1.2	Processos físicos em remanescentes de supernovas . . . . .	17
1.1.3	Sensores de densidade e temperatura eletrônica . . . . .	19
1.1.4	Estrutura e evolução dos remanescentes de supernovas . . . . .	20
1.1.5	Diferenças espectroscópicas entre objetos fotoionizados e objetos ionizados por choque . . . . .	22
1.1.6	Busca e identificação de remanescentes de supernovas . . . . .	28
1.2	Motivação e objetivos deste trabalho . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Catálogo</b>	<b>31</b>
2.1	Processo de catalogação . . . . .	32
2.1.1	Busca de artigos . . . . .	32
2.1.2	Conteúdo e organização do catálogo . . . . .	33
2.2	Estatísticas e futuro do catálogo . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Aplicações</b>	<b>47</b>
3.1	Diagramas BPT . . . . .	47
3.1.1	Diagramas tradicionais . . . . .	47
3.1.2	Novos diagramas . . . . .	56
3.2	Análise das razões [O III] $\lambda 5007/\lambda 4959$ e [N II] $\lambda 6584/\lambda 6548$ . . . . .	59



3.2.1	Linhas do O III . . . . .	59
3.2.2	Linhas do N II . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Linhas de emissão no ultravioleta</b>	<b>63</b>
4.1	Histórico e importância das observações de SNRs no UV . . . . .	64
4.2	Lista de linhas . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>83</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>85</b>
	<b>Apêndice A – Simbologia para as classes dos objetos catalogados</b>	<b>99</b>
	<b>Apêndice B – Siglas para os observatórios</b>	<b>101</b>



# 1 Introdução

A explosão de uma supernova (SN) é um dos eventos mais energéticos do universo. Nos instantes posteriores à explosão, o objeto pode tornar-se mais luminoso do que toda a galáxia que o hospeda, brilhando o equivalente a 10 bilhões de estrelas como o Sol. Esse tipo de evento fornece uma fração significativa da energia que aquece o material do meio interestelar e, ainda, possibilita a formação de átomos de número atômico maior que o do ferro, tornando as SNs responsáveis pela formação de boa parte dos elementos pesados existentes no universo.

Há dois meios básicos através dos quais uma SN pode surgir: o colapso gravitacional de uma estrela gigante vermelha com massa maior que oito massas solares, cujo combustível para a fusão se torna escasso, ou a explosão de uma estrela anã branca pertencente a um sistema binário, que recebe material de sua companheira e explode quando sua massa superar o limite de Chandrasekhar ( $1,44 M_{\odot}$ ) (Smartt, 2009).

A explosão da estrela ejeta parte do material que a formava, o qual se expande a velocidades de até aproximadamente  $30\,000 \text{ km s}^{-1}$ . Em até algumas centenas de anos após a explosão da SN o material ejetado na explosão colide com o material mais denso do meio interestelar. Quando a massa do meio interestelar varrida pela onda de choque da SN for igual à massa ejetada pela própria SN, o objeto passa por uma transição, passando a ser chamado de remanescente de supernova (SNR).

SNs e SNRs são objetos de interesse para a ciência, pois relacionam vários campos da física com a astrofísica, como a termodinâmica, hidrodinâmica, magnetohidrodinâmica, mecânica quântica, estrutura da matéria e física de partículas. Além disso, abrangem condições físicas em intensidades e escalas inatingíveis em laboratórios terrestres. Um motivo em especial que faz dos SNRs objetos merecedores de atenção científica é a sua peculiaridade em relação a outras nebulosas ionizadas. Sua principal fonte de energia não é uma estrela ionizante, como no caso de regiões H II e nebulosas planetárias, mas a energia cinética associada à expansão do gás em colisão com o material do meio interestelar.

A análise de uma grande amostra de SNRs é necessária para a construção de modelos que descrevam essa classe de objetos. Certas faixas do espectro (rádio, infravermelho, visível e raios-X) são utilizadas para realizar buscas de candidatos a SNRs e também para verificar sua classificação. Porém, localizar e identificar SNRs pode não ser uma tarefa simples, tanto que, geralmente, é necessária uma combinação de dois ou mais métodos para se estabelecer uma classificação definitiva.

## 1.1 Supernovas e remanescentes de supernovas

Nebulosas ionizadas compreendem objetos cuja estrutura principal é formada por gás ionizado (plasma), composto basicamente de hidrogênio e hélio. O gás se mantém ionizado graças à existência de uma fonte de energia, geralmente uma estrela que emite fótons ionizantes ou a energia cinética de partículas de uma onda de choque, de modo que a nebulosa se torne visível devido à radiação emitida pelo gás.

Muitos dos processos físicos que ocorrem em nebulosas ionizadas são comuns aos seus diferentes tipos, sendo alguns processos predominantes em um ou em outro. Isso faz com que os espectros de linhas de emissão das nebulosas de diferentes classes tenham particularidades e, conseqüentemente, torna-se possível a distinção entre elas.

### 1.1.1 Origem das supernovas

Toda estrela chegará um dia ao fim de sua existência. Inicialmente, uma estrela se mantém viva devido à fusão de átomos em seu núcleo, motivada pela pressão causada pelas porções externas da estrela, que são atraídas gravitacionalmente, e pela temperatura elevada do núcleo. Inevitavelmente, o combustível irá escassear-se. O destino final de uma estrela isolada depende de sua massa. Se sua massa for inferior a  $8 M_{\odot}$ , o gás das camadas mais externas da estrela será ejetado, restando no seu centro uma estrela anã branca, que irá ionizar este gás. O objeto passa, então, a ser chamado de nebulosa planetária. Caso a massa seja maior que  $8 M_{\odot}$ , haverá uma explosão tão poderosa que praticamente todo o material que formava a estrela será desmembrado em uma nuvem de gás (uma supernova), podendo ainda restar um buraco negro, uma estrela de nêutrons ou simplesmente nada além do gás ejetado.

Um sistema binário de estrelas composto por uma gigante vermelha e uma anã-branca também pode propiciar o surgimento de uma supernova. Se a gigante vermelha tem seu lóbulo

de Roche<sup>1</sup> preenchido por matéria, ela pode fornecer massa para a anã-branca, que explodirá quando sua massa exceder o limite de Chandrasekhar (aproximadamente  $1,44 M_{\odot}$ ).

Na figura 1.1 está ilustrado o remanescente de supernova galáctico conhecido como Nebulosa do Caranguejo. A figura é formada pela composição de imagens obtidas em diferentes bandas do espectro. A emissão raios-X evidencia o pulsar<sup>2</sup> presente no interior do remanescente. Nos remanescentes em que há um pulsar, a energia cinética associada à onda de choque não é a única fonte de energia do remanescente. Devido ao campo magnético do pulsar, os elétrons altamente energéticos estarão espiralando em torno das linhas de campo e emitindo radiação sincrotrônica.



Figura 1.1: Nebulosa do Caranguejo, um dos remanescentes de supernovas galácticos mais estudados. As cores distinguem as regiões pela emissão em diferentes faixas do espectro. A emissão em raios-X representada em azul (satélite *Chandra*) indica a existência de um pulsar no centro da nebulosa, enquanto a emissão no óptico ilustra em amarelo e vermelho a estrutura filamentar da nebulosa (telescópio *Hubble*). A radiação infravermelha emitida principalmente pela poeira em praticamente toda a extensão do remanescente é apresentada na cor púrpura (telescópio *Spitzer*). Disponível em <http://www.spitzer.caltech.edu/images/2857-sig09-009-NASA-s-Great-Observatories-View-of-the-Crab-Nebula>.

<sup>1</sup>Superfície que delimita até onde o material de um objeto está ligado gravitacionalmente a ele.

<sup>2</sup>Uma estrela de nêutrons que gira rapidamente em torno de si e possui um intenso campo magnético, emitindo pulsos.

## Espectros de SNs e SNRs

Ao se comparar o espectro de linhas de emissão de uma supernova com o de um remanescente de supernova, é possível notar porque há a necessidade de reclassificar uma supernova como sendo um remanescente na medida que ela evolui. Os espectros de supernovas de diferentes tipos possuem distinções, mas em geral apresentam linhas de emissão largas decorrentes da alta velocidade de expansão, de modo que várias linhas aparecem como *blends*<sup>3</sup>. Por outro lado, os remanescentes possuem velocidades de expansão relativamente moderadas e espectros com linhas estreitas e bem definidas.

Uma supernova reduz seu brilho em oito magnitudes em menos de dois anos após ter atingido seu máximo (Leibundgut *et al.*, 1991), mas o processo de evolução de uma supernova desde sua explosão até tornar-se um remanescente de supernova não possui uma duração exata. Stockdale *et al.* (2001) apontaram que, em modelos para a emissão em rádio de supernovas, se sugere um mínimo de 100 anos para a formação do remanescente da supernova SN 1970G. Eles ainda constataram, baseados em seus estudos em rádio desta supernova, a primeira detectada nesta banda do espectro (Gottesman *et al.*, 1972), que a transição de uma supernova para a fase de remanescente de supernova se daria no momento em que a onda de choque da supernova colide com o denso material do meio interestelar, ou seja, quando a velocidade de expansão é reduzida e quando se estabelece um dos principais mecanismos de excitação do gás dos remanescentes de supernovas, o choque.

A excitação do gás na fase de supernova ocorre também devido ao choque, mas não com o material do meio interestelar, e sim com o material do ambiente circunstelar, provavelmente ejetado pelo vento estelar da estrela progenitora antes de sua explosão. Quedas abruptas na emissão em rádio da SN, seguidas de um período de emissão constante, indicam que a onda de choque da supernova estaria encontrando uma região densa no meio interestelar.

Em um trabalho mais recente, Immler & Kuntz (2005) construíram um gráfico da luminosidade em raios-X *versus* idade, com medidas de várias supernovas e remanescentes. Usando este gráfico juntamente com observações em raios-X da SN 1970G, os autores concluíram que a onda de choque da supernova, com 35 anos na época, ainda não havia colidido com o material do meio interestelar, o que provavelmente aconteceria em um estágio posterior, entre aproximadamente 50 e 100 anos.

A figura 1.2 apresenta o espectro óptico da supernova SN 1986J, obtido quatro anos após

---

<sup>3</sup>Linhas para as quais a resolução espectral não é suficientemente boa para permitir a medida isolada de suas intensidades.



sua explosão por Leibundgut *et al.* (1991).

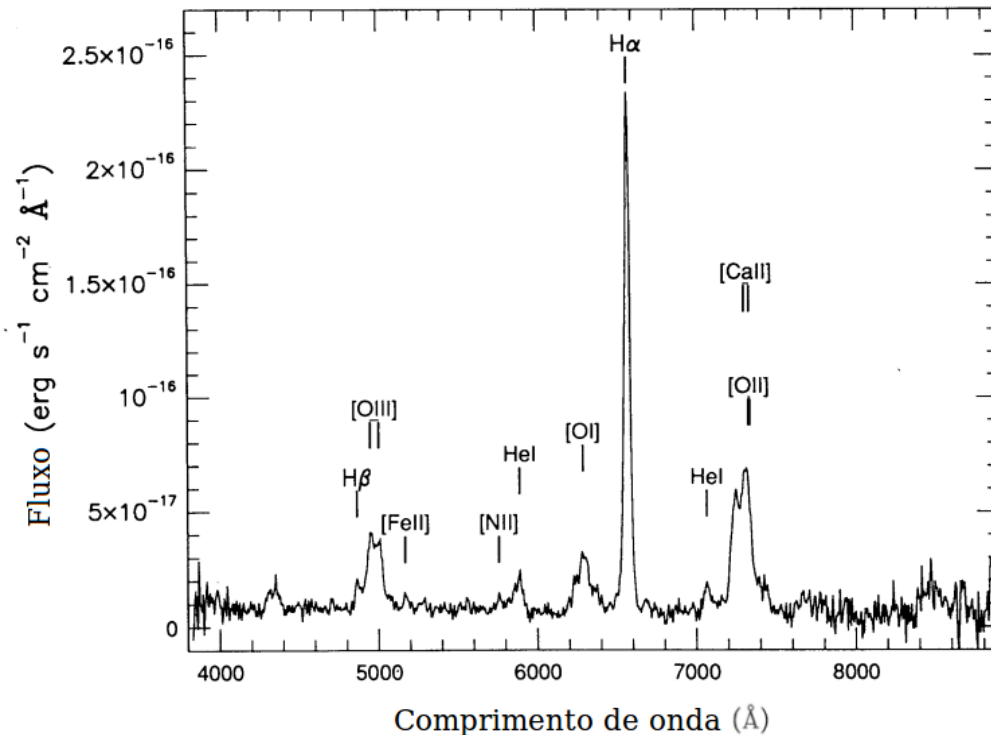


Figura 1.2: Espectro da supernova SN 1986J, obtido em 5 de setembro de 1989. Adaptado de Leibundgut *et al.* (1991).

O espectro do remanescente de supernova N132D, obtido por Blair *et al.* (2000) com o telescópio espacial *Hubble*, é ilustrado na figura 1.3. Ao compará-lo com o espectro da figura 1.2, as diferenças espectrais entre as supernovas e os remanescentes de supernovas ficam evidenciadas pelas linhas estreitas e bem definidas no espectro do remanescente, com poucos multipletos não resolvidos, diferentemente do espectro da supernova.

### 1.1.2 Processos físicos em remanescentes de supernovas

Como mencionado anteriormente, há processos físicos comuns aos diferentes tipos de nebulosas de emissão, sendo que em certos tipos há processos predominantes. Os principais são: *fotoionização*, *recombinação*, *excitação colisional*, *desexcitação radiativa* e *colisões elásticas* entre elétrons livres.

Na *fotoionização*, um fóton é absorvido por um átomo que libera um elétron. Este terá energia cinética igual à diferença entre a energia do fóton absorvido e a energia de ionização do átomo no estado em que se encontrava. É um processo bastante comum em nebulosas ioni-

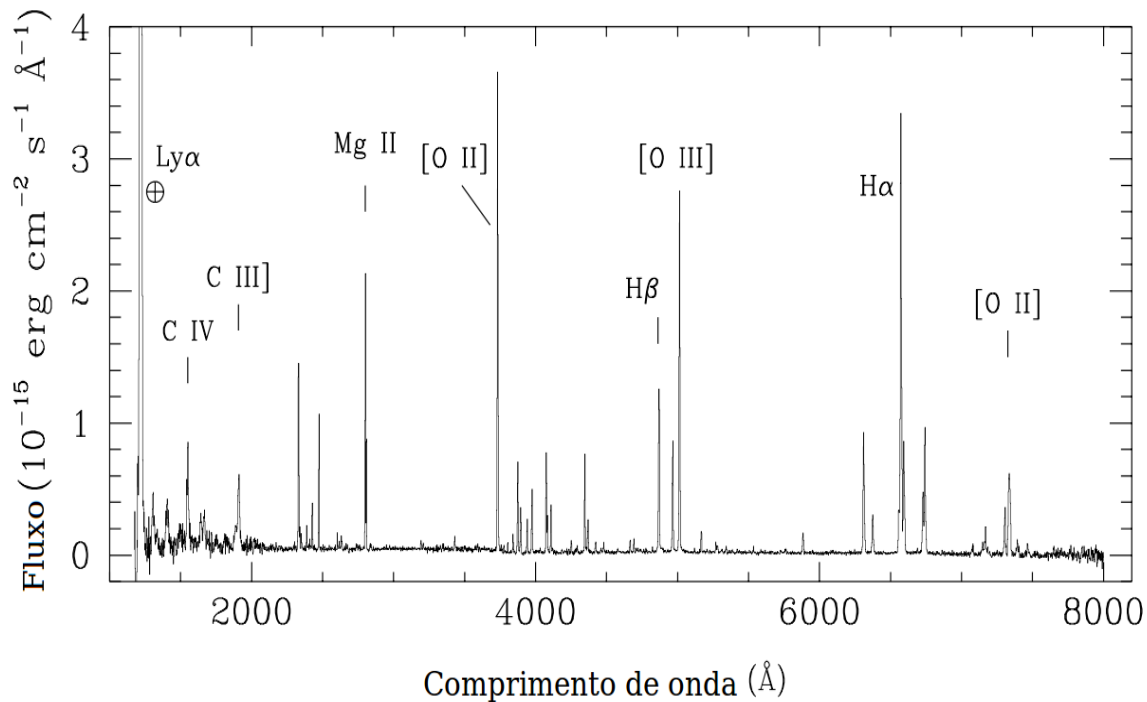


Figura 1.3: Espectro do remanescente de supernova N132D. O símbolo  $\oplus$  indica que a linha é geocoronal, ou seja, sua emissão tem como origem a atmosfera terrestre. Adaptado de Blair *et al.* (2000).

zadas ordinárias e remanescentes de supernovas que possuem uma estrela de nêutrons, a qual possibilita a existência de radiação sincrotrônica no remanescente.

A *recombinação* é o processo inverso à fotoionização, em que um elétron é absorvido por um íon e o átomo libera fótons. Ao ser absorvido, o elétron passa por estados de energias cada vez menores até chegar ao estado fundamental, emitindo, ao longo deste processo, fótons que formarão as linhas conhecidas como linhas de recombinação. Casos típicos são as linhas do hidrogênio e do hélio. A soma das energias de todos os fótons emitidos é igual a energia de ionização do átomo mais a energia cinética inicial do elétron capturado.

No caso da *excitação colisional*, um elétron livre colide com um átomo e lhe transfere energia suficiente para elevar um elétron ligado a um nível superior. A excitação pode ocorrer para um estado meta-estável cuja transição para um estado de menor energia, a *desexcitação radiativa*, é pouco provável e leva segundos para acontecer, enquanto as transições da recombinação ocorrem em intervalos de tempo da ordem de  $10^{-4}$  a  $10^{-8}$  s (Osterbrock & Ferland, 2006). As desexcitações radiativas de níveis meta-estáveis são transições que se destacam em um meio rarefeito (da ordem de  $10^{-4}$   $\text{cm}^{-3}$ ), pois em um meio não rarefeito, o átomo transferiria coli-

sionalmente a energia acumulada para alguma partícula do meio e o elétron efetuará a transição para o nível inferior de uma maneira não radiativa. O processo de excitação colisional é dominante nos remanescentes de supernovas e, por isso, a intensidade de linhas proibidas<sup>4</sup> em relação às linhas de recombinação é maior que nas outras nebulosas ionizadas. É o caso das linhas dos íons O III, N II e S II.

Há elétrons livres em regiões H II e nebulosas planetárias devido à fotoionização e, nos remanescentes, à ionização dos átomos pela onda de choque. Ocorrem *colisões elásticas* entre estes elétrons, que assumem uma distribuição Maxwelliana de velocidades através da qual se pode associar uma temperatura à nebulosa, chamada de temperatura eletrônica.

### 1.1.3 Sensores de densidade e temperatura eletrônica

#### Densidade eletrônica

É possível estimar a densidade eletrônica em uma nebulosa a partir de intensidades de linhas de emissão provenientes de excitações colisionais. Considera-se duas linhas emitidas por um mesmo íon, com energias de excitação próximas, e diferentes probabilidades de transição radiativa e taxas de desexcitação. A chance de ocorrer uma excitação colisional, que leve o átomo a emitir uma linha ou outra, é pouco dependente da temperatura eletrônica, uma vez que a energia cinética de um elétron necessária para ambas as excitações é praticamente a mesma. Deste modo, a população relativa destes níveis e, conseqüentemente, a razão das intensidades de linhas são dependentes principalmente da densidade eletrônica, pois esta influenciará nos eventos de transição radiativa e desexcitação colisional de maneira diferente em cada linha. Como as linhas são de um mesmo íon, a sua abundância não importará no cálculo. Alguns exemplos mais comuns de razões de intensidades de linhas sensíveis à densidade eletrônica são [S II]  $\lambda 6717/\lambda 6731$  e [O II]  $\lambda 3729/\lambda 3726$  (Osterbrock & Ferland, 2006).

#### Temperatura eletrônica

A temperatura eletrônica também pode ser estimada com base em intensidades de linhas de excitação colisional. Porém, neste caso, deve-se buscar linhas de um mesmo íon cuja transição ocorra entre níveis com energias consideravelmente diferentes. Esta condição torna a razão das intensidades das linhas escolhidas sensível à temperatura. A excitação colisional para um dos níveis será mais frequente, de acordo com a energia cinética dos elétrons e com a energia

<sup>4</sup>As linhas provenientes de transições com baixa probabilidade de ocorrência.

entre os níveis de cada transição, de modo que a linha emitida na transição posterior será mais intensa em relação à outra (Osterbrock & Ferland, 2006). Uma das razões de intensidades de linhas comumente usadas é  $[\text{O III}] (\lambda 5007 + \lambda 4959) / \lambda 4363$ .

### 1.1.4 Estrutura e evolução dos remanescentes de supernovas

Ao se analisar a estrutura de um remanescente de supernova e o modelo padrão para a sua evolução, o qual considera apenas fenômenos hidrodinâmicos da expansão em um meio uniforme, percebe-se que alguns processos físicos são dominantes em certos estágios. Woltjer (1970) estabelece quatro fases para a evolução de um remanescente, que estão esquematizadas na figura 1.4.

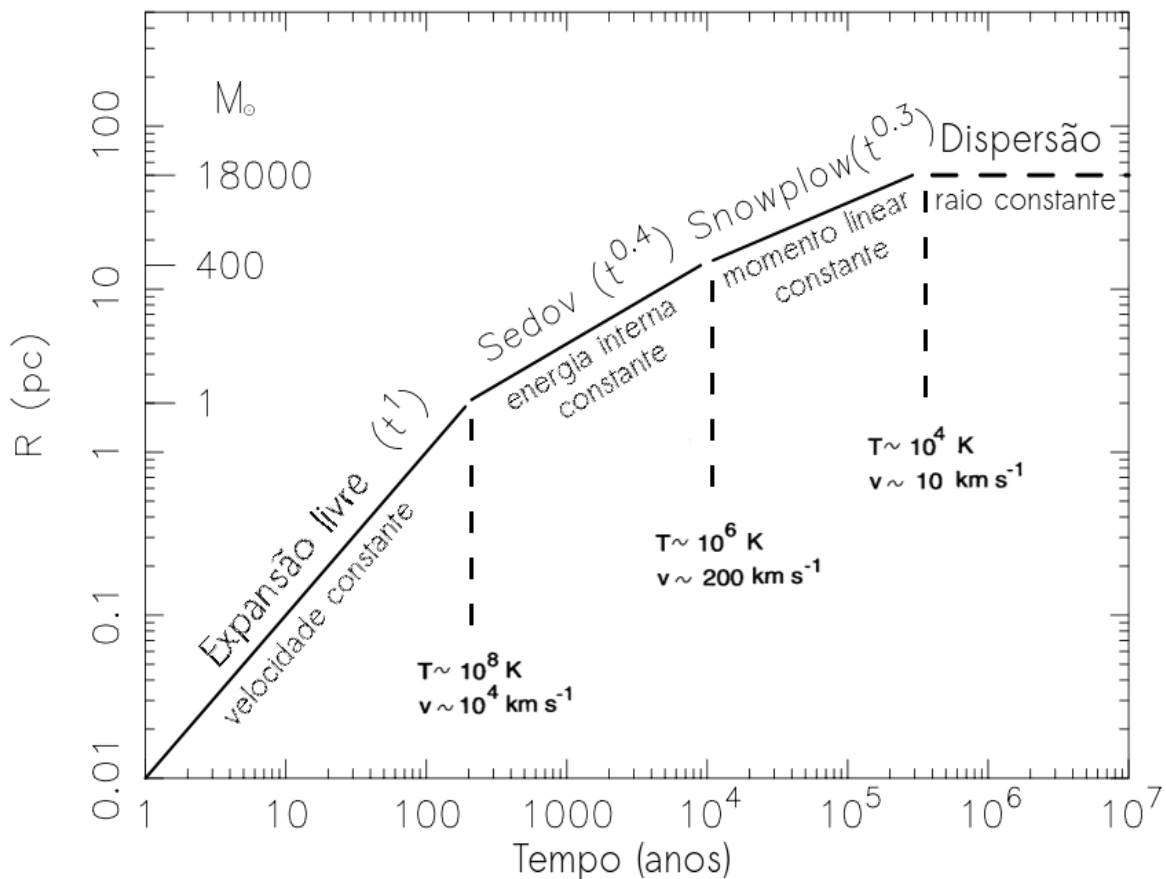


Figura 1.4: Esquema do modelo padrão para a evolução de remanescentes de supernovas. O eixo vertical contém o raio (em parsec) e a massa (em unidades de massa solar) do remanescente. O eixo horizontal contém o tempo (ou idade) do remanescente (em anos). São apresentadas também a temperatura ( $T$ ) e a velocidade ( $v$ ) nos instantes de transição de fase, assim como a dependência do raio com o tempo ( $t$ ) durante cada fase. Figura adaptada de (Brinkmann *et al.* 1993).

A primeira fase, chamada de *ejecta-dominated* ou *expansão livre*, consiste na expansão do gás contra um meio que, por ser pouco denso, não oferece resistência à expansão. Sendo assim, a velocidade de expansão é constante e o raio do objeto cresce linearmente com o tempo.

O início da próxima fase é definido quando a massa do material do meio interestelar, varrido pela onda de choque, for igual à massa ejetada na explosão. Nesta fase, identificada como *expansão adiabática* ou *fase de Sedov*<sup>5</sup>, a expansão é considerada adiabática, pois a energia liberada através da radiação é muito pequena comparada com a energia inicial da explosão. A velocidade de expansão reduz à medida que a onda de choque se expande contra o meio interestelar. Estas duas primeiras fases se destacam por serem pouco radiativas, frequentemente referidas como não-radiativas.

Na terceira fase, nomeada *snowplow* ou *fase da conservação do momento*, o resfriamento radiativo<sup>6</sup> torna-se um fenômeno importante na redução da energia da onda de choque. Desse modo, o material que passou pela onda de choque, agora mais denso, resfria rapidamente através de desexcitações radiativas e recombinações dos íons. A energia interna diminui, assim como a intensidade de forças associadas à pressão, e o momento linear da casca em expansão é tido como constante.

Desde o final da fase de Sedov, a estrutura básica do choque em remanescentes de supernovas começa a ficar completa, tal como ilustrado na figura 1.5. O material deixado para trás nas fases de expansão livre e de Sedov permanece a altas temperaturas, sem resfriar consideravelmente pela radiação, enquanto o varrido pela onda de choque na terceira fase está quase totalmente ionizado, produzindo grande parte da radiação detectada no remanescente. Esta região, logo atrás da frente de choque, produz fótons ionizantes com energia maiores que 13,6 eV que pré-ionizam o material na frente da onda de choque, além de manter a ionização em regiões ainda mais internas (Osterbrock & Ferland, 2006).

A *dispersão* é a quarta e última fase. Nela, o módulo da velocidade de expansão é reduzido ao das velocidades das partículas do meio interestelar, ou seja, da velocidade associada à sua temperatura (da ordem de  $10 \text{ km s}^{-1}$ ). A densidade do remanescente reduz gradativamente enquanto ele se dispersa no meio interestelar, tornando-se parte dele.

---

<sup>5</sup>Sedov (1959) fornece uma solução de similaridade que se aplica este tipo de expansão em remanescentes de supernovas.

<sup>6</sup>Processo em que um sistema perde energia interna através da emissão de radiação.

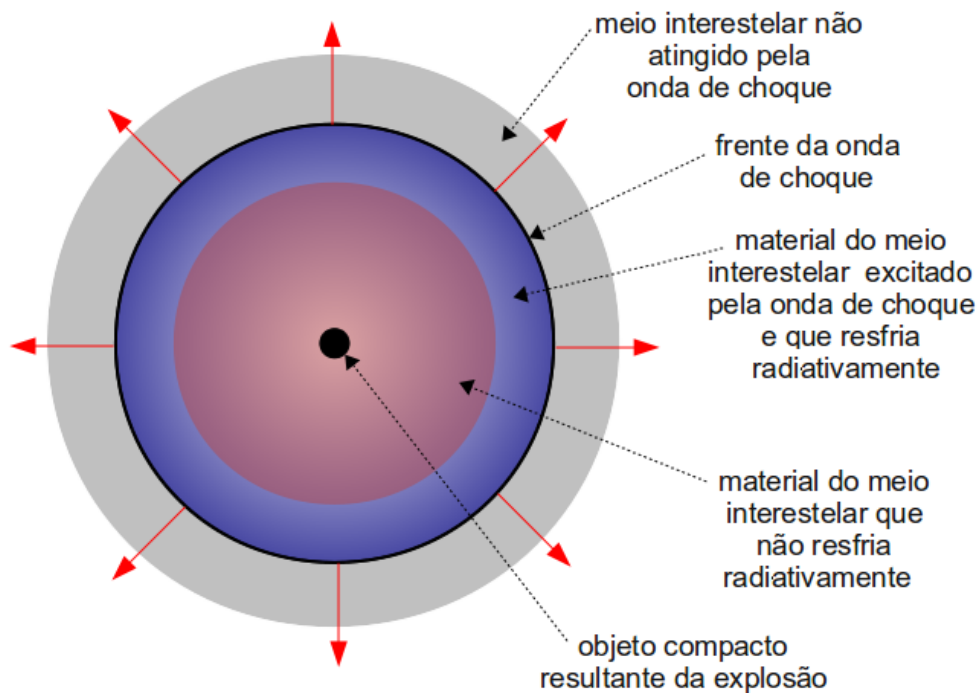


Figura 1.5: Estrutura básica para o modelo do remanescente de supernova em expansão contra o meio interestelar (fora de escala). O objeto compacto localiza-se no centro da explosão, onde se fixa o referencial na análise da expansão. O material do meio interestelar na região que não resfria radiativamente foi percorrido pela onda de choque durante as duas primeiras fases. Na terceira fase, a onda de choque atinge uma camada mais densa do meio interestelar, que posteriormente passa a se resfriar radiativamente. Na fase seguinte, o material da onda de choque se dispersa no meio interestelar a medida que se expande lentamente.

### 1.1.5 Diferenças espectroscópicas entre objetos fotoionizados e objetos ionizados por choque

Os diferentes mecanismos de excitação predominantes em cada tipo de nebulosa ionizada implicam em particularidades em seus espectros. É o caso da distinção entre remanescentes de supernovas (excitação por choque) e de regiões H II (fotoionização).

Por exemplo, os fótons de altas energias ( $h\nu > 100$  eV) presentes nos remanescentes de supernovas propiciam a existência de elementos em altos níveis de ionização, como C IV, N V, O VI, S VI, Ar V, Ca V e Fe XIV. Essas linhas são comumente encontradas em espectros de remanescentes de supernovas, mas raramente nos de regiões H II.

A ocorrência de linhas de emissão de um dado elemento requer que ele esteja na fase gasosa. Átomos de alguns elementos (especialmente cálcio, alumínio e ferro) tendem a se agrupar em grãos, de modo que uma parcela de suas abundâncias não contribui para a intensidade de suas linhas de emissão. Este fenômeno é mais predominante nas regiões H II do que em remanescentes de supernovas. Nos remanescentes, a onda de choque, além de ionizar e excitar os átomos, aumenta a fração gasosa desses elementos ao desmanchar significativamente os grãos (Osterbrock & Ferland, 2006).

Além desses discriminantes, os objetos ionizados por choque e os fotoionizados diferenciam-se quanto a intensidades de linhas provenientes de transições com baixa energia de excitação. Em se tratando de composição, a região mais radiativa do remanescente (figura 1.5) consiste em uma camada de matéria aquecida e parcialmente ionizada, efeito da passagem da onda de choque. Nesta região, os íons H II, O II, S II e S III estão recombinando-se com elétrons até formarem átomos neutros. Porém, a ionização é mantida pelos fótons produzidos logo atrás da onda de choque, como explicado na seção anterior. Desta forma, esta região conterá quantidades consideráveis de O I, S II e de elétrons livres dos íons H II a uma temperatura propícia para as excitações colisionais cujas transições geram linhas intensas, tais como [O I]  $\lambda\lambda 6300, 6363$  e [S II]  $\lambda\lambda 6717, 6731$  (Osterbrock & Ferland, 2006). As intensidades destas linhas relativas às linhas do hidrogênio são bem menores em regiões H II. Para entender o porquê disso, é preciso analisar um modelo básico para a estrutura de ionização de uma região H II, baseado em uma nebulosa esférica com densidade e abundâncias uniformes (Peimbert *et al.*, 1974).

A emissão de fótons pela estrela (ou do grupo de estrelas) ionizante de uma região H II geralmente abrange muitos fótons com energia entre 13,6 eV e 24,6 eV, e uma quantia relativamente menor com maiores energias. Estes fótons rapidamente ionizam os átomos nas vizinhanças da estrela, composta basicamente por H (90%), He (9%) e outros elementos pesados, como S e O (1%). Os átomos são preferencialmente ionizados de acordo com seu potencial de ionização e com a energia dos fótons ou, mais precisamente, com a seção de choque do evento (que depende de ambos). A figura 1.6 apresenta um gráfico da seção de choque para a ionização dos elementos mais abundantes nas regiões H II em função da energia do fóton. Pode-se verificar, por exemplo, que para fótons com energia igual ou pouco maior que 24,6 eV (potencial de ionização do He I), a seção de choque para a ionização do He I é quase dez vezes maior que para a ionização do H I, e se mantém maior para fótons ainda mais energéticos.

Este tipo de análise aplicada também aos elementos S e O permite construir uma estrutura de ionização mais completa para uma região H II, que possibilitará a compreensão da distinção espectral em questão. A tabela 1.1 lista valores de potenciais de ionização para alguns átomos

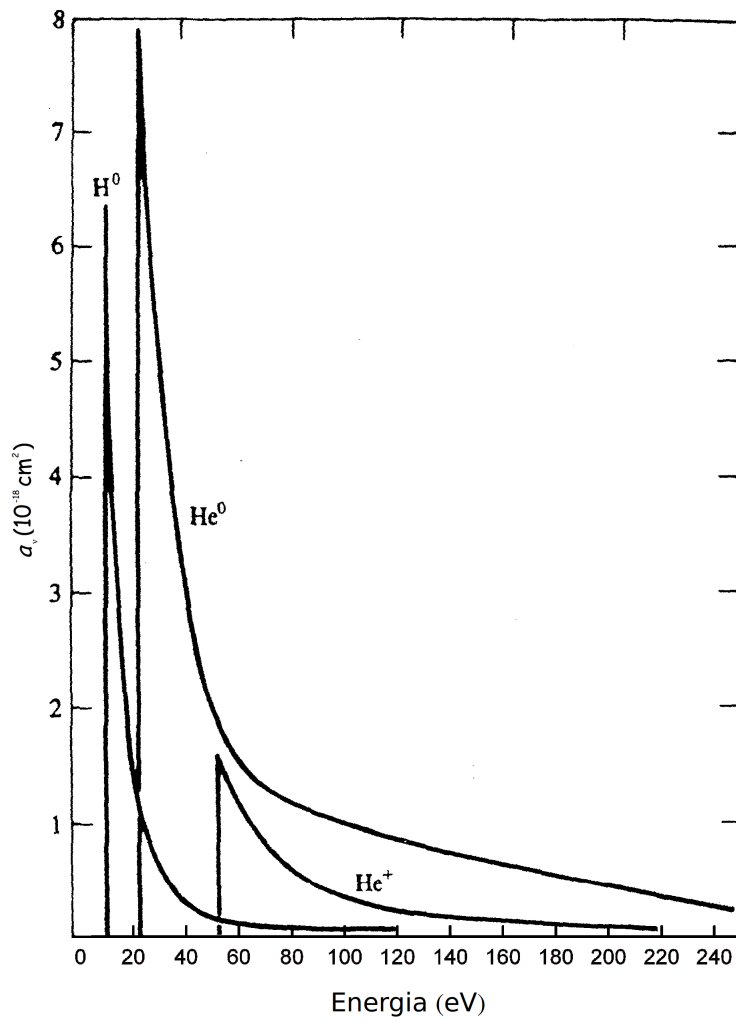


Figura 1.6: Seção de choque do evento de fotoionização dos elementos e íon HI, He I e He II. Adaptado de Osterbrock & Ferland (2006).

e íons.

Tabela 1.1: Potenciais de ionização de alguns átomos e íons presentes em regiões H II

Átomo/íon	Pot. de ion. (eV)
HI	13,6
He I	24,6
He II	54,4
O I	13,6
O II	35,1
S I	10,4
S II	23,3
S III	34,8



Os fótons de diversas energias são produzidos a uma taxa aproximadamente constante e ionizam os átomos em torno da estrela. Estes átomos ionizados logo se recombinam com os elétrons livres do meio e, por isso, uma quantidade limitada do gás é mantida ionizada. Cada fóton ionizante emitido pela estrela se desloca radialmente até ser absorvido, de modo que a partir de um dado raio não restarão mais fótons suficientemente energéticos para ionizar um átomo ou íon específico.

Com base nessas informações, é possível definir porções na estrutura da região H II que são dominadas por um ou outro átomo ou íon, tal como apresentado na figura 1.7, que ilustra esquematicamente a distribuição radial de cada um dos elementos H, He, O e S em diferentes graus de ionização<sup>7</sup>. As bordas dos círculos sobrepostos e em escala de cinza (A, B, C e D) representam as máximas distâncias radiais onde átomos receberão fótons com as energias indicadas em cada círculo. Por exemplo, os íons O II e S III devem absorver fótons com um mínimo de energia aproximadamente igual (ver tabela 1.1) para se ionizarem mais uma vez. Logo, os íons resultantes dessas ionizações (O III e S IV) praticamente deixarão de existir a partir de uma mesma distância do centro da nebulosa, ou seja, a partir do limiar da existência de fótons com energia maior que  $\sim 35 \text{ eV}$ <sup>8</sup> (região A da figura 1.7). Já os íons O II e S III deixarão de existir a partir dos limiares de energia  $\sim 13 \text{ eV}$  (região C) e  $\sim 24 \text{ eV}$  (região B), respectivamente, e sucessivamente até restarem apenas átomos neutros. A mesma análise se aplica aos elementos H e He.

A letra E na figura 1.7 indica a região que não recebe fótons ionizantes para os elementos apresentados. Isso quer dizer que a região D é a última que contém íons, os S II, pois podem ser ionizados por fótons menos energéticos (mínimo de  $10,4 \text{ eV}$ ).

A implicação desta estrutura na fraca intensidade das linhas [O I]  $\lambda\lambda 6300, 6363$  e [S II]  $\lambda\lambda 6717, 6731$  em relação à intensidade da linha  $H\alpha$  está na pobreza das condições para a formação destas linhas, que são quantidades significativas de O I e S II coexistindo com elétrons livres. A principal fonte de elétrons livres é a ionização do H e do He. Desse modo, até a região C, elétrons livres estariam coexistindo com íons S II, porém estes são rapidamente capturados no processo de recombinação, e contribuem pouco para a excitação colisional desse íon. O caso do O I é ainda mais crítico pois, por possuir praticamente o mesmo potencial de ionização que o H I, ele passa a existir a partir da região C, onde elétrons livres dos íons H II deixam

<sup>7</sup>As abundâncias são consideradas uniformes, isto é, os diferentes elementos existem em toda a nebulosa. Porém, as distribuições radiais dos íons de cada elemento são ilustradas separadamente para melhor visualização.

<sup>8</sup>Os valores aproximados de energia se referem apenas aos limites (distâncias radiais) na nebulosa que recebem fótons com, no mínimo, a energia indicada. Diferente das energias mínimas dos fótons ionizantes para os diferentes elementos, que são exatas.

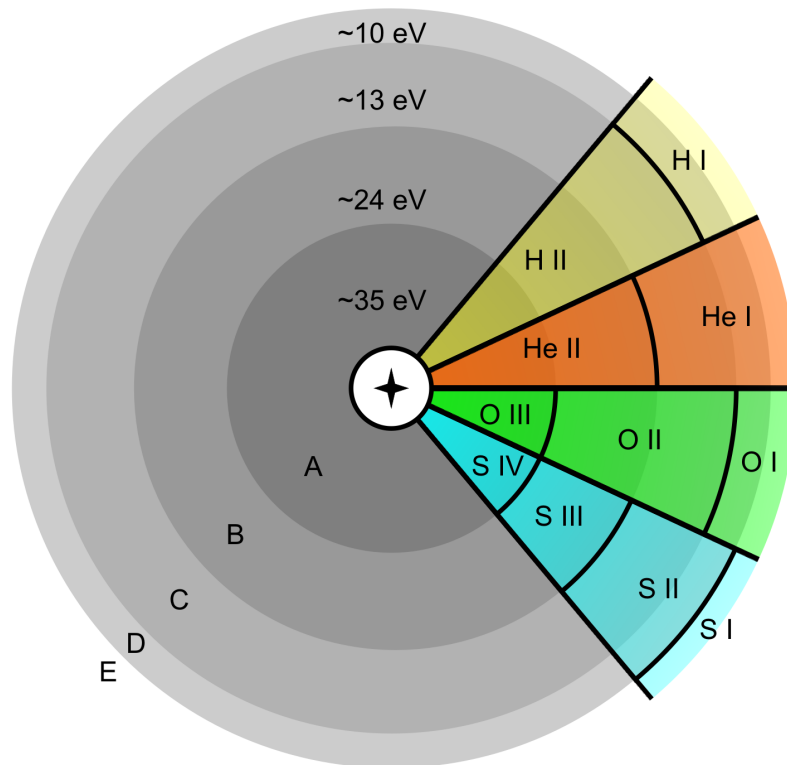


Figura 1.7: Estrutura de ionização de uma região H II para os elementos H, He, O e S (fora de escala). Destaca-se pelas letras A até D as regiões que contêm fótons com energias superiores às indicadas na figura e a região E que não contém fótons ionizantes para os elementos analisados.

de existir. Em outras palavras, além da região C a densidade eletrônica é muito baixa e não há condições propícias para as excitações colisionais desses elementos. A fraca emissão destas linhas se dá principalmente na zona de transição entre hidrogênio ionizado e neutro, cuja largura é aproximadamente um livre caminho médio<sup>9</sup> de um fóton ionizante. Nesta estreita região os elétrons liberados pelo hidrogênio permanecem mais tempo livres, coexistindo com O I e S II a uma temperatura adequada para as excitações colisionais.

As figuras 1.8 e 1.9 ilustram espectros de um remanescente de supernova e de uma região H II, respectivamente. Ambos abrangem a faixa espectral que contém as linhas discutidas e quantificam a diferença espectral explicada.

A diferença entre a razão das intensidades  $([S II]\lambda 6717 + \lambda 6731)/H\alpha$  é notável. Mathewson *et al.* (1973) foram os primeiros a utilizar essa razão de intensidades de linhas na distinção de objetos fotoionizados, para a qual se assume valores maiores que 0,45 para remanescentes e

<sup>9</sup>Livre caminho médio de uma partícula é a distância média que ela percorre livremente antes de participar de um evento. No caso do fóton ionizante, até ser absorvido por um átomo.

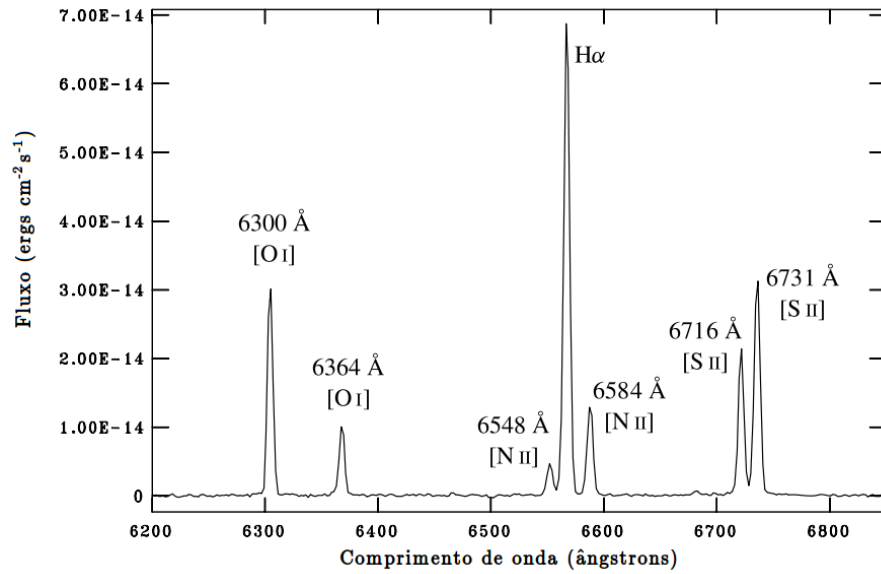


Figura 1.8: Espectro de um remanescente de supernova na região espectral que contém linhas importantes na distinção entre objetos fotoionizados e ionizados por choque. Adaptado de Blair *et al.* (2000).

aproximadamente iguais a 0,1 para regiões H II . As linhas do O I são tão fracas em regiões H II que podem acabar não sendo detectadas, como no exemplo apresentado.

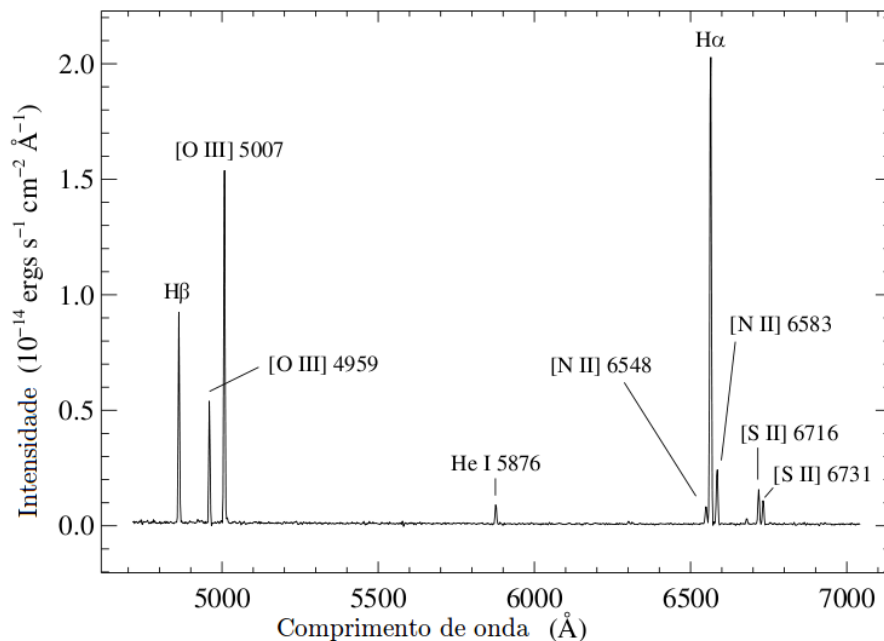


Figura 1.9: Espectro de uma região H II na faixa espectral que contém as linhas importantes na distinção entre objetos fotoionizados e ionizados por choque. Adaptado de Matonick *et al.*, (1997).

### 1.1.6 Busca e identificação de remanescentes de supernovas

Em uma busca por novos remanescentes de supernovas, partir diretamente para a obtenção de espectros para quaisquer nebulosas localizadas não é a alternativa mais eficiente. Há alguns métodos, além dos comentados na seção anterior, que permitem identificar os remanescentes ou, pelo menos, nebulosas candidatas a serem um deles. Estes métodos podem oferecer, no mínimo, um indício para a classificação de um objeto como remanescente, a partir do qual se torna viável a utilização de métodos mais elaborados para a confirmação de sua classe.

Remanescentes de supernovas galácticos têm sido frequentemente identificados utilizando-se observações em rádio. O catálogo de SNRs galácticos de Green (2009) indica que apenas 16 SNRs dos 274 catalogados não foram detectados ou são fracamente definidos em rádio. Nesta faixa do espectro, os remanescentes de supernovas consistem em fontes não térmicas de radiação<sup>10</sup>, normalmente modeladas por uma lei de potência simples, pois o mecanismo de emissão dominante nesta faixa do espectro é a emissão sincrotrônica. Isto é verificado através da medida do índice espectral  $\alpha$  da emissão em rádio ( $S_\nu \sim \nu^{-\alpha}$ , em que  $S_\nu$  é a densidade de fluxo na frequência  $\nu$ ), que varia entre aproximadamente 0,3 e 0,7 em remanescentes de supernovas (Urošević *et al.*, 2007). Este tipo de detecção é muito comum em remanescentes de supernovas galácticos, pois a radiação desta faixa do espectro fica menos sujeita aos efeitos da extinção interestelar em comparação às radiações de faixas mais energéticas do espectro. Com a construção de melhores telescópios (*Very Large Array*, por exemplo) a observação em rádio pode ser utilizada também na detecção de remanescentes extragalácticos.

A emissão em raios-X ( $\sim 0,1-10$  nm) é uma assinatura dos remanescentes. O choque pode acelerar partículas a velocidades relativísticas que geram a radiação sincrotrônica, ou aquecer o gás até temperaturas de milhões de kelvins e provocar a emissão de raios-X por *bremsstrahlung* térmico, formando uma fonte estendida de emissão em raios-X. Em SNRs do tipo *Crab-like* (Matsui *et al.*, 1988) a emissão é ainda mais intensa em uma região compacta central, como no exemplo da figura 1.1, o que evidencia a radiação emitida por elétrons altamente energéticos, os quais contornam as linhas de campo magnético do pulsar no interior da nebulosa.

No óptico, a razão das intensidades das linhas [S II]  $\lambda\lambda 6717, 6731$  em relação à intensidade da linha  $H\alpha$ , obtidas através de uma espectroscopia, assume valores acima de 0,45. Imagens também podem ser utilizadas em buscas por SNRs. Duas imagens são obtidas separadamente com os filtros de banda estreita que permitem detectar a radiação das linhas do [S II] isolada da radiação da linha  $H\alpha$ . Uma comparação entre ambas revela os SNRs como pontos relativamente

<sup>10</sup>Um espectro de uma fonte de radiação não térmica é diferente do espectro previsto para um corpo negro.

brilhantes na imagem obtida em [S II] quando comparado à obtida em  $H\alpha$ . Esse tipo de busca tem sido muito efetivo para SNRs em outras galáxias (NGC 2403 Matonick *et al.*, 1997; NGC 5204, NGC 5585, NGC 6946, M81, M101 Matonick & Fesen, 1997; M33 Gordon *et al.*, 1998; NGC 300, NGC 7793 Blair & Long, 1997), pois algumas estão face-a-face com a Via Láctea, e a radiação emitida pelos seus SNRs não percorre grandes distâncias ao longo do plano de nossa galáxia, minimizando o efeito da extinção interestelar.

A poeira do meio interestelar, varrida e aquecida pela onda de choque do remanescente de supernova, é a grande responsável por sua emissão térmica na faixa do infravermelho. Quando obtido o espectro infravermelho do SNR, linhas intensas do  $H_2$  (hidrogênio molecular) são detectadas. Além disso, os SNRs são os únicos objetos entre as nebulosas ionizadas nos quais a linha [Fe II]  $1,6435 \mu\text{m}$  é bem mais brilhante que a linha do hidrogênio  $Br_\gamma$   $2,1655 \mu\text{m}$  (Oliva *et al.*, 1989).

## 1.2 Motivação e objetivos deste trabalho

Estudar individualmente os remanescentes de supernovas é importante para o entendimento da complexa interação entre os SNRs e o meio interestelar. Porém, grandes amostras de SNRs são necessárias quando se quer entender sua evolução, seus mecanismos energéticos, a taxa de formação de supernovas e qualquer outra propriedade global dos remanescentes.

As intensidades de linhas de emissão de remanescentes de supernovas são frequentemente utilizadas para ambas as finalidades. Vários trabalhos na literatura contêm estas medidas para alguns SNRs específicos, mas estas informações só serão realmente úteis para estudos gerais dos SNRs se forem organizadas coletivamente.

O objetivo principal desse trabalho é a construção de um catálogo de intensidades de linhas emitidas por remanescentes de supernovas. Além disso, demonstrar a aplicabilidade desse catálogo através de alguns exemplos.

O catálogo contém, inclusive, informações úteis sobre a observação, telescópio, identificação do objeto (listados por completo no capítulo seguinte), entre outros. A sua organização do banco de dados permite que buscas sejam feitas a partir de qualquer informação. Por exemplo, pode-se desejar obter todas as intensidades de linhas de emissão medidas em SNRs da galáxia M33. Ou então, as intensidades relativas de linhas específicas, como [S II]  $\lambda\lambda 6717, 6731$  e  $H\alpha$ , em todos os remanescentes do catálogo. Além disso, o catálogo se torna uma base para informações sobre observações espectroscópicas dos objetos em particular, permitindo saber o

que já consta na literatura sobre as linhas de emissão de um objeto que se pretende observar.

Outras aplicações imediatas do catálogo são demonstradas no restante deste trabalho. A construção de diagramas de diagnóstico, um recurso muito útil na classificação e distinção de objetos com linhas de emissão, é apresentada no capítulo 3. Uma lista de todas as linhas de emissão do ultravioleta já medidas em SNRs e publicadas em artigos até o final de 2010 foi elaborada e comparada com um trabalho similar, do ano de 1996, e está listada no capítulo 4. Um resumo dos principais resultados e considerações finais são apresentados no capítulo 5.

## 2 Catálogo

Uma grande quantidade de informação espalhada em diversas fontes bibliográficas poderá ser utilizada mais eficientemente quando organizada de maneira metódica, simples, precisa e de fácil acesso. Por isso, os catálogos são ferramentas poderosas frequentemente utilizadas na astronomia.

Jaschek (1984) realizou um estudo sobre catálogos astronômicos e estabeleceu a classificação destes em quatro categorias: *catálogos observacionais*, *catálogos de compilação bibliográfica*, *catálogos de compilação crítica* e *catálogos de compilação geral*.

A classe dos *catálogos observacionais* compreende os catálogos ou listas das próprias observações do autor. É o caso do catálogo de Hipparchus, o mais antigo catálogo de estrelas existente, no qual se apresenta medidas de posições de estrelas realizadas por ele por volta de 130 a.C.

A segunda espécie apresentada, na qual se inclui o catálogo deste trabalho, são os *catálogos de compilação bibliográfica*. Estes contêm informações de natureza comum obtidas de diversas fontes. Um exemplo é o catálogo de velocidades de expansão de nebulosas planetárias construído por Sabbadin (1984).

Os *catálogos de compilação crítica* e os *catálogos de compilação geral*, diferentemente dos anteriores, não apresentam as informações em si. Os da primeira categoria contêm uma avaliação crítica das observações obtidas, enquanto os da segunda trazem valores médios dos parâmetros medidos.

Intensidades de linhas de emissão são amplamente aplicáveis em estudos estatísticos relacionados a propriedades do próprio objeto emissor, do meio em que se hospedam e até em estudos de física atômica. A necessidade da construção de um catálogo sobre elas fica explícita, uma vez que estes estudos geralmente requerem um grande número de dados.

Atualmente, há na literatura apenas alguns catálogos de intensidades de linhas de emis-

são. Kaler (1976) construiu um catálogo deste tipo contendo 18 554 intensidades de linhas de emissão de nebulosas planetárias e de regiões H II. Este mesmo catálogo foi posteriormente atualizado (Kaler *et al.*, 1997) tomando apenas os dados de nebulosas planetárias, totalizando aproximadamente 70 000 intensidades. Rauber (2009) compilou um catálogo de intensidades de linhas de emissão de regiões H II com cerca de 36 000 intensidades. O catálogo de intensidades de linhas de emissão apresentado neste trabalho é o único sobre remanescentes de supernovas e possui mais de 25 000 intensidades de linhas.

## 2.1 Processo de catalogação

Basicamente, a construção deste catálogo consistiu nos processos de busca de artigos e posterior digitalização organizada das informações relevantes, intercalados por atualizações e melhorias nos seus procedimentos. Cada um desses processos será detalhado nas seções que seguem.

### 2.1.1 Busca de artigos

Os artigos que compõem o catálogo foram obtidos da literatura, em sua maioria de artigos disponíveis no banco do *Astrophysics Data System* (ADS) da NASA. Demais fontes incluem artigos impressos disponíveis na Biblioteca Central da UFSM.

Inicialmente, a busca por artigos consistia em uma procura por títulos de trabalhos (maneira básica como o ADS apresenta uma lista de artigos) que indicassem a existência de medidas de intensidades de linhas de emissão, ou seja, os que possuíssem termos relacionados diretamente ao espectro de linhas de emissão ou a estudos de propriedades físicas de remanescentes de supernovas associadas às intensidades. Essa busca era seguida da leitura dos artigos e da constatação de quais realmente eram úteis para o catálogo. Algumas buscas eram baseadas, também, no nome de certos autores que frequentemente produziam artigos com linhas de emissão de SNRs. As referências bibliográficas citadas nos artigos catalogados eram inspecionadas e incluídas na catalogação se continham medidas originais de intensidades de linhas.

Quando a quantidade de artigos catalogados tornou-se numerosa, alguns artigos já catalogados muitas vezes retornavam à busca durante a procura por novos, dificultando o processo. Outros, ainda, possuíam títulos semelhantes e deixavam dúvidas quanto ao seu estado em relação ao catálogo. Para evitar esse problema, foi construído um programa simples, porém extremamente útil, que tornou rápida e eficiente a identificação de novos artigos. Através do



*bibcode*<sup>1</sup> dos artigos, uma lista inicial de artigos novos era criada e comparada à lista de artigos já verificados (artigos com intensidades catalogadas mais os artigos inspecionados e descartados), de modo que só os realmente novos eram relistados, e a existência de intensidades de linhas de emissão era posteriormente verificada. Deste modo, a varredura de artigos tornou-se mais rápida e eficiente.

A ordem cronológica dos artigos foi priorizada na catalogação, visando organizar a busca de modo que todos os artigos úteis fossem encontrados. A varredura e catalogação geral são assumidas como completas para artigos até o ano de 1992 e parcialmente completas a partir daí. Artigos com intensidades de linhas de emissão no ultravioleta também foram priorizados tendo em vista sua importância, de modo que a catalogação destes é considerada completa até o final do ano de 2010. Vale salientar que o número de artigos verificados (no mínimo quanto ao seu título) passa dos 10 000.

## 2.1.2 Conteúdo e organização do catálogo

O foco do catálogo são as intensidades relativas de linhas de emissão de remanescentes de supernovas. Porém, várias outras informações importantes associadas às intensidades são adicionadas. A organização estrutural dos dados catalogados é feita através do programa *in-cat*, desenvolvido pelo professor Dr. Marcus V. F. Copetti para a criação deste catálogo e do catálogo de regiões H II de Rauber (2009). Este programa permite a uniformidade e a máxima completude nas informações, como se pode notar na sua descrição.

Cada artigo catalogado gera três arquivos de texto finais, além de um arquivo (*<bibcode>.log*) com o histórico das alterações salvas durante sua catalogação, que é útil para recuperação de dados perdidos. O primeiro arquivo gerado (*<bibcode>.bib*) contém apenas informações bibliográficas do artigo catalogado. O segundo arquivo (*<bibcode>.txt*) possui informações sobre os objetos cujas intensidades de linhas foram medidas, sobre as observações e também sobre as intensidades. O último arquivo (*<bibcode>.vbt*) traz as intensidades propriamente ditas.

A nomenclatura dos objetos neste catálogo está cruzada com a nomenclatura do *Simbad*<sup>2</sup> (*Set of Identifications, Measurements, and Bibliography for Astronomical Data*). O valor dos comprimentos de onda das linhas de emissão foram obtidos de catálogos específicos, como o

---

<sup>1</sup>Código bibliográfico utilizado por sistemas de informações de astronomia para especificar referências bibliográficas.

<sup>2</sup>Disponível em <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

*NIST*<sup>3</sup> (*National Institute of Standards and Technology*) e o *The Atomic Line List*<sup>4</sup>. Isso valoriza a padronização da catalogação em si e a associação com informações de outras fontes.

O primeiro passo para a catalogação de um artigo através do programa é completar as informações requeridas na tela inicial (figura 2.1), que são as informações bibliográficas. Quando se referem a artigos contidos no ADS, é possível obter diretamente de lá um arquivo no formato *<bibcode>.bib*, o qual completa automaticamente os campos desta janela, que são:

- *authors* - nomes do(s) autor(es) da publicação;
- *title* - título da publicação;
- *journal* - revista em que foi publicada;
- *volume/page/year* - volume, intervalo de páginas e ano da publicação;
- *type of publication* - seleciona o tipo de publicação (geralmente *article*).

A primeira tela ainda mostra o *bibcode* do artigo. À medida em que as informações seguintes são adicionadas, é gerado ou atualizado um arquivo de recuperação *<bibcode>.log*, no qual se armazena passo-a-passo todos os dados já incluídos, indicando ainda o instante da operação e quem a realizou.

Posteriormente, a segunda janela fornece as opções necessárias à inclusão dos objetos ou seções<sup>5</sup> de objetos que tiveram suas intensidades de linhas medidas (figura 2.2). Adiciona-se no campo *object name* o nome do objeto tal como está no artigo e em *number of sections* o número de seções observadas deste mesmo objeto, sendo que cada linha na caixa abaixo corresponde a uma seção adicionada. Nesta tela existem ainda algumas opções de seleção úteis para as tarefas que seguem (por isso há também o indicador *text to select* junto ao campo do nome do objeto). Estas informações são salvas em um arquivo *<bibcode>.txt*, juntamente com as adicionadas na tela seguinte.

O próximo passo é completar as informações da tela complementar (figura 2.3). Nela são adicionadas várias informações referentes às seções, à instrumentação utilizada e às medidas. Alguns campos são acompanhados de uma janela com opções pré-definidas. Outros são completados com valores que possuem unidades. Há uma unidade definida como padrão para cada

<sup>3</sup>Disponível em <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines-form.html>

<sup>4</sup>Disponível em <http://www.pa.uky.edu/peter/newpage/>

<sup>5</sup>Entende-se por seção de um objeto qualquer segmento do objeto que tenha sido observado separadamente de outros segmentos. Ainda, vários conjunto de medidas obtidas de um mesmo segmento consistem em seções diferentes.

incat 1.7.0.6 (compiled: 14/6/2010 19:44:54)

CATALOGUE OF EMISSION LINE INTENSITIES OF HII REGIONS Filled by Diogo Pauletti on 7/11/2010

authors ( Fulano, A.B.C. + Ciclano, D. + Beltrano, E.F. + etc )

title

journal

volume

page

year

type of publication  
 article  
 in proceedings  
 Ph.D. thesis  
 MSc. thesis  
 report

Bibcode

save load quit clear page previous page next page

Figura 2.1: Tela inicial do programa *incat* - dados bibliográficos.

incat 1.7.0.6 (compiled: 14/6/2010 19:44:54) - set object

CATALOGUE OF EMISSION LINE INTENSITIES OF HII REGIONS Filled by Diogo Pauletti on 7/11/2010

object name or text to select  number of sections  field for selection  delete/insert field  ins del

description of sections  Uneven fields  Simbad Id Section tag  Set sec. tag

```

1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/Cassiopeia A=SNR G111.7-02.1/1/[O III]/Ga
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/Cassiopeia A=SNR G111.7-02.1/2/KB 33/Gal
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/Cassiopeia A=SNR G111.7-02.1/3/Filament :
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/Cassiopeia A=SNR G111.7-02.1/4/KB 61/Gal
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/Cassiopeia A=SNR G111.7-02.1/5/KB 115/Gal

```

save add delete edit quit clear page previous page next page

Figura 2.2: Segunda tela do programa *incat* - remanescentes de supernovas e seções.

um destes, mas quando forem listados em outra, estarão acompanhados de um símbolo que especifique tal unidade. Estes casos são explicados a seguir, juntamente com a descrição de cada campo:

incat 1.7.0.6 (compiled: 14/6/2010 19:44:54) - input supplementary data abc

CATALOGUE OF EMISSION LINE INTENSITIES OF HII REGIONS Filled by Diogo Pauletti on 7/11/2010

bibcode 1979ApJ...233..154C	right ascension 23 21 12	intensity scale linear	aperture shape circ	telescope acronym 4-m Magall
object Cassiopeia A	declination +58 32 24	relative int. type in energy units	aperture length (") 5.3	telescope dia. (m) 4.00
Simbad id c Cassiopeia A=SNI	epoch 1950.0	obs. int. ref. line 4958.91 [O III]	aperture width (") 	observatory KPNO
class SNR	East offset (") +64.3	obs. ref. intensity 22.0	pos. angle (degree) 	technique 
host galaxy c Galaxy	North offset (") +8.7	cor. int. ref. line 4958.91 [O III]	exposure time (s) 4400;1600	detector type 
section number 1	C(H $\beta$ ) 	cor. ref. intensity 23.0	flux unit 	spectral res. (Å) 20
section name c [O III]	other extinction Av=4.3	obs flux ref. line c 5.4e-15 erg cm-2	comments 	spectral range 4000-7500;3500-;
ref. pos. name Cassiopeia A's ce	existing data 01010	cor. flux ref. line c		

section: accept clear previous next

set to selected?  yes  no

Format and test? return

Figura 2.3: Tela complementar do programa *incat* - dados da seção, da observação e das intensidades.

- *bibcode* - código bibliográfico do artigo;
- *object* - nome do objeto no artigo;
- *Simbad id* - identificador(es) do objeto segundo a base Simbad. O identificador principal do Simbad é sempre adicionado e, geralmente, mais alguns dos outros identificadores quando estes forem bastante conhecidos ou bem próximos ao apresentado no artigo;
- *class* - classe do objeto catalogado. A janela de opções fornece a simbologia listada no apêndice A:
- *host galaxy* - galáxia hospedeira do objeto. A lista de opções contém simplesmente o nome de várias galáxias;
- *section number* - número da seção do objeto;

- *section name* - nome atribuído no artigo à seção do objeto;
- *ref. pos. name* - nome da posição de referência (em relação à qual os *offsets* seguintes indicarão o centro da detecção). É o nome do objeto que indica esta posição no artigo e/ou no *Simbad*;
- *right ascension* - ascensão reta da posição de referência;
- *declination* - declinação da posição de referência;
- *epoch* - época em que estão as coordenadas equatoriais;
- *East offset* - *offset* ao leste em relação à posição de referência. A unidade padrão é segundo de arco ("). É indicado com um símbolo após o valor quando medida em minutos de arco (') ou em graus (d);
- *North offset* - *offset* ao norte em relação à posição de referência. A unidade segue o mesmo padrão do campo *East offset*;
- $C(H\beta)$  - medida extinção logarítmica em  $H\beta$ ;
- *other extinction* - extinção em medida diferente da anterior. Neste caso, o valor é precedido do indicador da medida (por exemplo,  $E(B-V)=0.08$  ou  $A_V=0.79$ );
- *existing data* - estabelece quais informações em relação às intensidades das linhas existem no artigo, que serão adicionadas posteriormente. Os números 1 e 0 indicam, respectivamente, a existência ou não da informação a que cada um dos cinco campos se refere (ver descrição da figura 2.9);
- *intensity scale* - define a escala da intensidade em linear (0)<sup>6</sup> ou logarítmica (1);
- *relative int. type* - tipo das intensidades relativas. Diferencia entre medidas em unidades de energia (0), em contagens (1) e até se forem estimativas grosseiras feitas a olho (2);
- *obs. int. ref. line* - linha de referência das intensidades observadas;
- *obs. ref. intensity* - intensidade observada da linha de referência;
- *cor. int. ref. line* - linha de referência das intensidades corrigidas;
- *cor. ref. intensity* - intensidade corrigida da linha de referência;

---

<sup>6</sup>Os números entre parênteses mostram como são salvas as informações no arquivo <*bibcode*>.txt exemplificado na figura 2.7.

- *obs. flux ref. line* - fluxo observado da linha de referência. Medidas com erros são apresentadas separadas do valor do fluxo pelo símbolo  $\pm$ ;
- *cor. flux ref. line* - fluxo corrigido da linha de referência. Medidas com erros são apresentadas separadas do valor do fluxo pelo símbolo  $\pm$ ;
- *aperture shape* - forma da abertura. Pode ser retangular (*rect*), circular (*circ*), oval (*oval*) e global (*global*);
- *aperture length* - comprimento da abertura. A unidade segue o mesmo padrão do campo *East offset*;
- *aperture width* - largura da abertura. A unidade segue o mesmo padrão do campo *East offset*;
- *pos. angle* - ângulo ds posição da janela de extração (fenda) da observação, medida do norte para o leste em graus;
- *exposure time* - duração da exposição. A unidade padrão é o segundo (s). É especificado quando for expresso em minutos (m) ou horas (h);
- *flux unit* - campo auxiliar para adição da unidade aos fluxos observados e corrigidos. Exemplos:  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $\text{photons cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{ster}^{-1}$ ,  $\text{W cm}^{-2} \text{arcsec}^{-2}$ ;
- *comments* - campo destinado a qualquer comentário relevante;
- *telescope acronym* - acrônimo do telescópio utilizado (como ele é geralmente referido). Uma vez selecionado o observatório (no campo *observatory* posteriormente citado), uma lista de acrônimos de telescópios de vários observatórios (parte da lista é apresentada na figura 2.4) é filtrada, de modo que somente os pertencentes ao observatório selecionado são listados;
- *telescope dia.* - diâmetro do telescópio em metros. É selecionado automaticamente com o acrônimo do telescópio;
- *observatory* - observatório utilizado. Uma lista de vários observatórios e suas siglas é apresentada no apêndice B;
- *technique* - técnica de observação utilizada. Exemplos: espectroscopia de fenda (*slit spec.*) e espectroscopia de escaneamento (*scanner spec.*);

MMT 6.5-m		6.50		MMTO
200-in Hale		5.08		PO
MMT 6x1.8-m		4.70		MMTO
4-m Blanco		4.00		CTIO
4-m Mayall		4.00		KPNO
AAT		3.90		AAO
3.8-m UKIRT		3.80		MKO
3.6-m		3.60		ESO-LS
3.5-m		3.50		CAHA
120-in Shane		3.05		Lick

Figura 2.4: Parte da lista de acrônimos de telescópios. A primeira coluna é o acrônimo, a segunda o diâmetro (em metros) e a terceira o indicador do observatório.

- *detector type* - tipo de detector do telescópio. Exemplos: CCD (*Charge Coupled Device*) e IPCS (*Image Photon Counting Device*);
- *spectral res.* - resolução espectral. A unidade padrão é o angstrom. É especificado quando apresentada em nanômetros (nm), micrometros ( $\mu\text{m}$ ), através da velocidade ( $200 \text{ km s}^{-1}$ , por exemplo), do poder de resolução  $R = \lambda / \Delta\lambda$  ( $R=500$ , por exemplo) ou do seu inverso ( $R^{-1}=0.02$ , por exemplo);
- *spectral range* - intervalo espectral da observação. A unidade padrão também é o angstrom e segue a mesma simbologia para outros comprimentos de onda que o campo *spectral res.*

Esta etapa geralmente requer bastante dedicação e atenção, pois além de serem muitas informações diferentes, há casos em que as observações de uma mesma seção são feitas repetidas vezes, tendo alguma pequena diferença instrumental entre uma e outra, variando ou não o intervalo espectral, a resolução, e assim por diante. Desta forma, dois ou mais campos desta janela de uma mesma seção conterão informações de várias observações, sendo necessário associá-las de modo que se possa entender posteriormente como cada uma das observação ocorreu.

A simbologia utilizada para fazer tal associação está exemplificada nas figuras 2.5 e 2.6. Quando há mais de um valor em um mesmo campo, eles são separados por “;”. Dados de uma mesma observação são identificados nos diferentes campos pela letra minúscula entre parênteses que os seguem. No caso da figura 2.5, a seção foi observada com a posição angular da fenda igual a 12 graus durante 150 minutos e igual a 357 graus durante 123 minutos. Os parâmetros dos campos que não possuem a associação com a letra entre parênteses são comuns a todas as observações. Isso significa que, para ambas as observações exemplificadas anteriormente, o detector utilizado foi um CCD, a técnica utilizada foi a espectroscopia de fenda (*slit spec.*), e assim por diante. Quando há valores comuns a duas ou mais observações e diferentes de outras,

coloca-se que o identificador das observações comuns dentro dos mesmos parênteses, como na figura 2.6. Nesse caso, três observações foram feitas com diferentes durações (2h, 30min e 1h), mas as duas primeiras tiveram a mesma posição angular da fenda ( $90^\circ$ ).

aperture width (")	observatory
10	IUE
pos. angle (degree)	technique
12(a);357(b)	slit spec.
exposure time (s)	detector type
150m(a);123m(b)	CCD

Figura 2.5: Exemplo da simbologia utilizada na associação de informações de mesmas observações em diferentes campos.

aperture width (")	observatory
2	AAO
pos. angle (degree)	technique
90(ab);0(c)	slit spec.
exposure time (s)	detector type
2h(a);30m(b);1h(c)	IPCS(ab);CCD

Figura 2.6: Exemplo da simbologia utilizada quando há informações comuns a apenas algumas observações de uma mesma seção.

A forma como os dados são armazenados no arquivo *<bibcode>.txt* pode ser vista na figura 2.7 para um caso onde há três objetos. Cada campo é separado pelo símbolo “/” e a informação de cada campo segue a ordem da listagem feita na apresentação dos campos da figura 2.3, com exceção do campo auxiliar *flux unit*.

```
1990ApJS...74...93R/N19/LHA 115-N 19W=SNR B0045-73.4/1//SMC/SNR/
/00 4524.1/-73 24 32/1950/0/0/0.14////rect/230///1700(a);3000(b)
/AAT/3.90/AAO/slit spec./IPCS(a);CCD(b)//3200-7600(a);5200-10900
(b)/0/4861.33 H I/4861.33 H I/100.00/100.0/0/12/
1990ApJS...74...93R/SNR 0104-723/SNR B0104-72.3/1//SMC/SNR//01 0
4 35.2/-72 21 57/1950/0/0/0.15////rect/230///3000(a);2102(a);100
0(b);550(b)/AAT/3.90/AAO/slit spec./IPCS(a);CCD(b)//3200-5590(a)
;4745-7200(a);5200-10900(b);5200-10900(b)/0/4861.33 H I/4861.33
H I/100.00/100.0/0/12/
1990ApJS...74...93R/N49/LHA 120-N 49=SNR B0525-66.1/1//LMC/SNR//
05 26 00.4/-66 07 42/1950/0/0/0.38////rect/230///2000(a);2000(b)
/AAT/3.90/AAO/slit spec./IPCS(a);CCD(b)//3200-7600(a);5200-10900
(b)/0/4861.33 H I/4861.33 H I/100.00/100.0/0/12/
```

Figura 2.7: Arquivo *<bibcode>.txt* gerado a partir de três seções adicionadas. Neste arquivo, cada linha corresponde a uma única seção, e vice-versa. Algumas quebras-de-linha foram feitas para permitir a visualização. As reais só existem no final de cada seção.

Completada esta parte, o próximo passo exibe a janela apresentada na figura 2.8, onde as linhas de emissão observadas são definidas. O intervalo espectral informado na tela anterior define nesta quais as linhas, contidas em um arquivo auxiliar do programa (apresentadas no apêndice A de Rauber, 2009), serão listadas no quadro à esquerda. As linhas podem ser filtradas selecionando o íon, o tipo de transição (permitida ou proibida) ou entre sublistas (linhas comuns



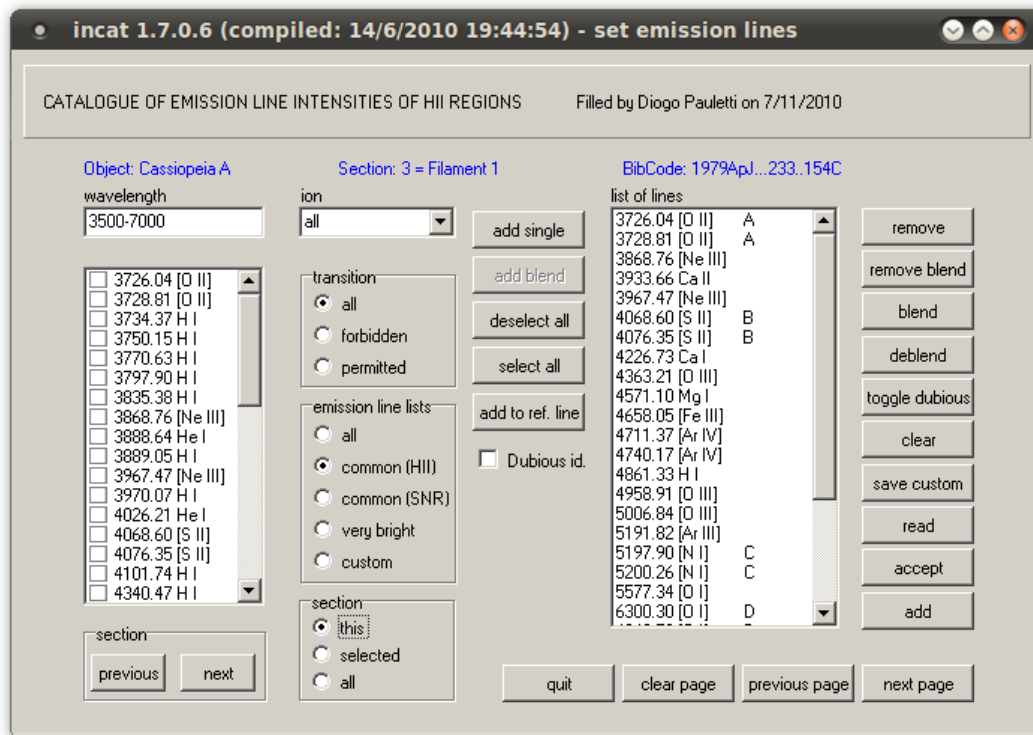


Figura 2.8: Terceira tela do programa *incat* - inclusão das linhas de emissão.

em regiões H II, em remanescentes de supernovas, linhas muito brilhantes ou ainda uma lista customizada). A lista de linhas prestes a ser adicionada à uma ou mais seções aparece no quadro *list of lines* da mesma figura.

As linhas não resolvidas, isto é, linhas para as quais a resolução espectral não foi suficiente para permitir a medida isolada de suas intensidades (*blends*), são agrupadas através de letras. As linhas com identificação duvidosa (por parte do autor do artigo) são sinalizadas com um ponto de interrogação. Há ainda nesta tela opções úteis em relação à seleção de seções às quais serão adicionadas as linhas listadas para posterior catalogação de suas intensidades.

Por fim, o processo de catalogação requer as intensidades das linhas de emissão, a serem adicionadas na tela final (figura 2.9) juntamente com suas incertezas e o comprimento de onda observado. As linhas componentes de *blends* possuem a mesma intensidade, que corresponde à soma das intensidades de cada uma. A sequência dos dados apresentados em cada coluna é: comprimento de onda observado, intensidade observada, erro na intensidade observada, intensidade corrigida e erro na intensidade corrigida. Se o comprimento de onda possuir erro em sua medida, este é adicionado no próprio campo do comprimento de onda observado, separado dele pelo símbolo “±”.

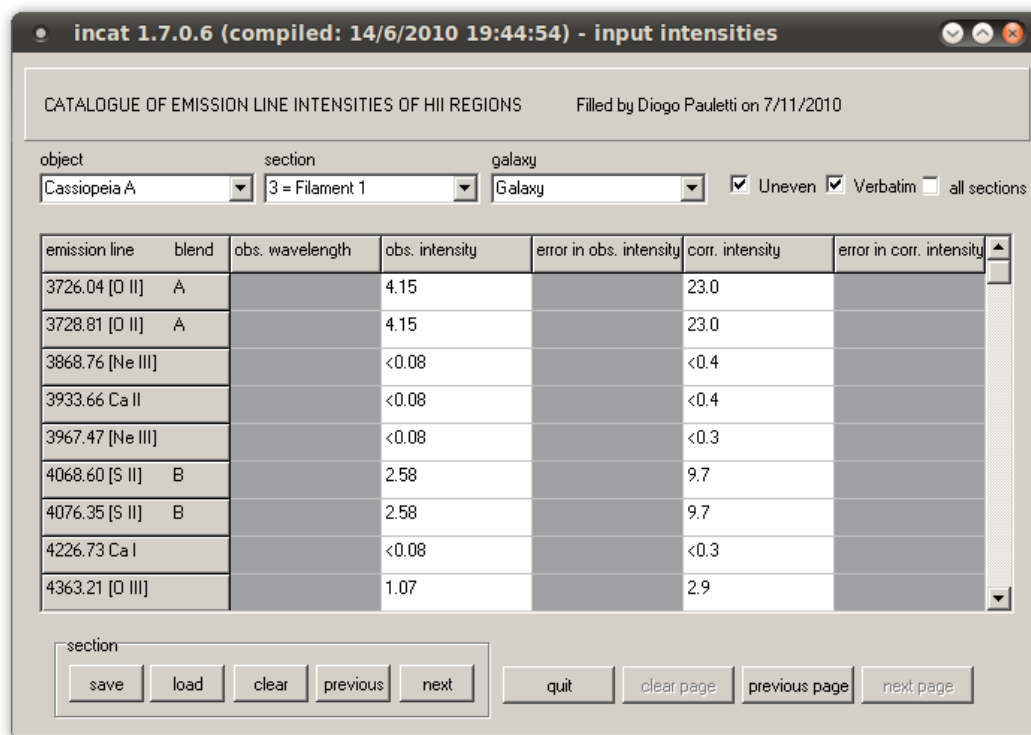


Figura 2.9: Tela final do programa *incat* - adição dos valores das intensidades.

Alguns símbolos adicionais são utilizados a fim de manter a informação sobre as intensidades. Quando um valor representa um limite superior para a intensidade real, este é precedido pelo símbolo “<”, enquanto os valores de intensidades com imprecisão maior que 40% são seguidos do símbolo “:”. Quando, por exemplo, um campo não existe para uma linha e existe para as demais, o espaço vazio é completado pelo símbolo "ne" (não existe).

As informações desta janela e da anterior são salvas em um arquivo *<bibcode>.vbt*. Um exemplo é apresentado na figura 2.10. Os campos são separados pelo símbolo “/”, e correspondem às seguintes informações: *<bibcode> / nome do objeto / seção / identificação duvidosa / blend / íon / comprimento de onda de laboratório / comprimento de onda observado / intensidade observada / erro na intensidade observada / intensidade corrigida / erro na intensidade corrigida*.

O formato de saída dos arquivos é bastante simples. Assim, o reavimento dos dados pode ser facilmente realizado construindo um programa simples que interprete os campos dos arquivos segundo o que foi explicado nesta seção.

```

1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1//A/[O II]/3726.04//7.5//42.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1//A/[O II]/3728.81//7.5//42.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///[Ne III]/3868.76//<7.0//<33.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///Ca II/3933.66//<7.0//<33.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///[Ne III]/3967.47//<7.0//<29.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1//B/[S II]/4068.60//<1.3//<5.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1//B/[S II]/4076.35//<1.3//<5.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///Ca I/4226.73//<1.3//<5.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///[O III]/4363.21//<1.3//<4.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///Mg I/4571.10//<1.3//<2.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///[Fe III]/4658.05//<1.3//<2.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///[Ar IV]/4711.37//<1.3//<2.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///[Ar IV]/4740.17//<1.3//<2.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///H I/4861.33//<1.3//<1.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///[O III]/4958.91//22.0//23.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///[O III]/5006.84//78.0//77.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///[Ar III]/5191.82//<1.3//<1.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1//C/[N I]/5197.90//<1.3//<1.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1//C/[N I]/5200.26//<1.3//<1.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///[O I]/5577.34//<1.3//<1.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///[O I]/6300.30//11.0//3.0/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1///[O I]/6363.78//5.0//1.5/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1//D/[Ar V]/6432.00//<1.5//<0.3/
1979ApJ...233..154C/Cassiopeia A/1//D/[Ar V]/6435.10//<1.5//<0.3/

```

Figura 2.10: Exemplo do formato do arquivo <bibcode>.vbt.

## 2.2 Estatísticas e futuro do catálogo

A tabela 2.1 lista os artigos que fazem parte do catálogo em ordem cronológica de publicação.

Tabela 2.1: Lista de referências do catálogo

Osterbrock 1957	Woltjer 1958	Osterbrock 1958
Parker 1964	Westerlund e Mathewson 1966	Parker 1967
Milne 1968	Trimble 1970	Peimbert e van den Bergh 1971
Miller 1973	Osterbrock e Dufour 1973	Danziger e Dennefeld 1974
Miller 1974	Kirshner 1974	Sabbadin 1976
D'Odorico e Sabbadin 1977	Dopita <i>et al.</i> 1977	Davidson 1978
Miller 1978	Schweizer e Lasker 1978	Fesen <i>et al.</i> 1978
Sabbadin 1979	Davidson 1979	Shemansky <i>et al.</i> 1979*
Chevalier e Kirshner 1979	Danziger <i>et al.</i> 1979	Goss <i>et al.</i> 1979
Benvenuti <i>et al.</i> 1979*	Dodorico <i>et al.</i> 1980*	Kirshner e Blair 1980
Angerhofer <i>et al.</i> 1980	Dopita <i>et al.</i> 1980	Benvenuti <i>et al.</i> 1980*
Raymond <i>et al.</i> 1980*	Blair <i>et al.</i> 1980	Fesen e Kirshner 1980
Kirshner e Chevalier 1980	Zealey <i>et al.</i> 1980	Danziger <i>et al.</i> 1980*
Shuder <i>et al.</i> 1980	Dennefeld 1980	Hua e Llebaria 1981
Dennefeld e Andriolat 1981	Ruiz 1981	Lasker 1981a
Raymond <i>et al.</i> 1981*	Fesen <i>et al.</i> 1981	Blair <i>et al.</i> 1981
Dopita <i>et al.</i> 1981	Blair e Kirshner 1981	Lasker 1981b
Dennefeld 1982	Davidson <i>et al.</i> 1982	Blair <i>et al.</i> 1982
Fesen e Kirshner 1982	Fesen <i>et al.</i> 1982	Dennefeld e Pequignot 1983
Ruiz 1983a	Seward <i>et al.</i> 1983	Ruiz 1983b
Fesen 1983	Blair <i>et al.</i> 1983	Hester <i>et al.</i> 1983
Raymond <i>et al.</i> 1983*	Gilmozzi <i>et al.</i> 1983	Leibowitz e Danziger 1983
Henry <i>et al.</i> 1984	Blair <i>et al.</i> 1984a	Fesen 1984
Gallagher III <i>et al.</i> 1984	Dopita e Tuohy 1984	Blair <i>et al.</i> 1984b
Blair e Kirshner 1985	Fesen <i>et al.</i> 1985	Fesen e Itoh 1985
Winkler e Kirshner 1985	Danziger e Leibowitz 1985	Chu e Kennicutt Jr. 1986
Rupen <i>et al.</i> 1987	Davidson 1987	Blair <i>et al.</i> 1988
Raymond <i>et al.</i> 1988*	Henry e Fesen 1988	Fesen <i>et al.</i> 1988
Peimbert <i>et al.</i> 1988	Oliva <i>et al.</i> 1989	Blair <i>et al.</i> 1989*
Hester e Kulkarni 1989	Kirshner <i>et al.</i> 1989	MacAlpine <i>et al.</i> 1989
Goodrich <i>et al.</i> 1989	Whitehead <i>et al.</i> 1989	Oliva <i>et al.</i> 1990

Tabela 2.1: (continuação)

Graham <i>et al.</i> 1990	Hudgins <i>et al.</i> 1990	Teske 1990
Long <i>et al.</i> 1990	Russell e Dopita 1990	Wallerstein e Balick 1990
Blair <i>et al.</i> 1991a	Fesen e Becker 1991	Leibundgut <i>et al.</i> 1991
Long <i>et al.</i> 1991	Blair <i>et al.</i> 1991b	Hollis <i>et al.</i> 1991
Blair <i>et al.</i> 1991c*	Greenhouse <i>et al.</i> 1991	Raymond <i>et al.</i> 1991*
Teske 1991	Winkler e Reipurth 1992	Vancura <i>et al.</i> 1992*
Long <i>et al.</i> 1992a	Blair <i>et al.</i> 1992*	Long <i>et al.</i> 1992b*
Vancura <i>et al.</i> 1992*	Braun e Walterbos 1993	Winkler <i>et al.</i> 1993
Smith <i>et al.</i> 1993	Vancura <i>et al.</i> 1993*	Gordon <i>et al.</i> 1993
Blair e Davidsen 1993	Hester <i>et al.</i> 1994*	Blair <i>et al.</i> 1994*
Blair e Fesen 1994	MacAlpine <i>et al.</i> 1994	Blair <i>et al.</i> 1995a*
Levenson <i>et al.</i> 1995	Fesen e Hurford 1995	Fesen <i>et al.</i> 1995
Raymond <i>et al.</i> 1995*	Blair <i>et al.</i> 1995b*	Hurford e Fesen 1996
Fesen e Gunderson 1996	Fesen e Hurford 1996	Raymond <i>et al.</i> 1997*
Blair e Long 1997	Matonick e Fesen 1997	Matonick <i>et al.</i> 1997
Lozinskaya <i>et al.</i> 1998	Gordon <i>et al.</i> 1998	Mavromatakis <i>et al.</i> 2000
Bocchino <i>et al.</i> 2000*	Sankrit <i>et al.</i> 2000*	Blair <i>et al.</i> 2000a*
Blair <i>et al.</i> 2000b*	Mavromatakis <i>et al.</i> 2001	Danforth <i>et al.</i> 2001*
Sankrit <i>et al.</i> 2001*	Mavromatakis e Strom 2002	Mavromatakis <i>et al.</i> 2002a
Boumis <i>et al.</i> 2002	Mavromatakis <i>et al.</i> 2002b	Mavromatakis <i>et al.</i> 2002c
Sankrit e Blair 2002*	Blair <i>et al.</i> 2002*	Mavromatakis 2003a
Mavromatakis <i>et al.</i> 2003	Mavromatakis 2003b	Raymond <i>et al.</i> 2003*
Sankrit <i>et al.</i> 2003*	Mavromatakis <i>et al.</i> 2004a	Mavromatakis <i>et al.</i> 2004
Sankrit <i>et al.</i> 2004*	Korreck <i>et al.</i> 2004*	Mavromatakis <i>et al.</i> 2005
Sasaki <i>et al.</i> 2006*	Nishikida <i>et al.</i> 2006*	Seon <i>et al.</i> 2006*
Blair <i>et al.</i> 2006*	Sankrit <i>et al.</i> 2007*	Ghavamian <i>et al.</i> 2007*
Kim <i>et al.</i> 2007*	Shinn <i>et al.</i> 2007*	Stupar <i>et al.</i> 2007
Gerardy e Fesen 2007	Payne <i>et al.</i> 2008	France <i>et al.</i> 2009*
Kim <i>et al.</i> 2010*		

\*Artigos com medidas no UV.

Ainda restam informações na literatura a serem catalogadas, principalmente em trabalhos de épocas mais recentes. Porém, os 178 artigos catalogados e listados na tabela 2.1, com cerca de 300 remanescentes de supernovas e mais de 25 000 intensidades de linhas de emissão, contêm informações suficientes para algumas aplicações, tais como as apresentadas nos capítulos

seguintes. Baseando-se na taxa de publicações contendo intensidades de linhas de emissão de SNRs a partir de 1992, estima-se que alguns meses ainda são necessários para tornar o catálogo completo e atualizado. Quando esta meta for atingida, uma nova etapa a ser realizada será a disponibilização *on-line* dos dados do catálogo, juntamente com alguns *scripts* que auxiliem na obtenção dos dados e até mesmo na realização de algumas aplicações diretas.

## 3 Aplicações

Neste capítulo são apresentadas algumas das possíveis aplicações do banco de dados deste catálogo. Uma delas é a construção de diagramas de diagnóstico, que têm o objetivo de distinguir classes de objetos analisando a razão entre certas intensidades de linhas de emissão. Também foram realizados estudos das razões [O III]  $\lambda 5007/\lambda 4959$  e [N II]  $\lambda 6584/\lambda 6548$ , indicadores da qualidade das medidas.

### 3.1 Diagramas BPT

Em seu trabalho sobre parâmetros de classificação para o espectro de linhas de emissão de diferentes objetos extragalácticos, Baldwin *et al.* (1981) mostraram que é possível classificar tais espectros em grupos correspondentes ao mecanismo de excitação predominante nos objetos de cada grupo. Para isto, utilizaram construções gráficas, chamadas de posteriormente de *diagramas de diagnóstico* ou *diagramas BPT*<sup>1</sup>. Cada um destes envolve duas razões entre pares das intensidades das linhas de emissão mais fortes, influenciadas por características do nível de ionização de cada objeto. Os pares de linhas utilizados foram: [N II]  $\lambda 6584/H\alpha$ , [O III]  $\lambda 5007/H\beta$ , [O II]  $\lambda 3727/H\beta$ , [S II]  $(\lambda 6717+\lambda 6730)/H\alpha$  e [O I]  $\lambda 6300/H\alpha$ . A utilização de outras linhas possivelmente úteis na discriminação quanto à classe dos objetos, como [Ne III]  $\lambda 3869$ , [O III]  $\lambda 4363$  e  $H\gamma$  ( $\lambda 4340$ ), é apenas sugerida no trabalho de 1981, pois raramente são intensas o suficiente para serem detectadas ou medidas isoladamente. Levenson *et al.* (1995) sugerem a utilização da razão de linhas [S III]  $(\lambda 9069+\lambda 9531)/H\alpha$ .

#### 3.1.1 Diagramas tradicionais

Os diagramas apresentados na sequência foram construídos a partir de dados de remanescentes de supernovas do catálogo deste trabalho, juntamente com os dados de regiões H II do

<sup>1</sup>Sigla associada aos nomes dos autores de Baldwin *et al.* (1981): Baldwin, Phillips e Terlevich.

catálogo de Rauber 2009. A escolha das linhas foi baseada nas considerações do trabalho de Baldwin *et al.* (1981), que consistem basicamente em utilizar linhas com comprimentos de onda próximos, minimizando erros na correção dos efeitos de extinção e erros de calibração, e optar por linhas intensas que são medidas em vários objetos. Também foram consideradas as informações apresentadas na seção 1.1.5, isto é, a utilização das razões de linhas do O I e do S II em relação à linha  $H\alpha$ , as quais serão mais intensas nos SNRs do que em regiões H II devido à diferença nas estruturas de ionização dos objetos dessas classes.

Além do trabalho de Baldwin *et al.* (1981), Veilleux & Osterbrock (1987) contribuíram para a escolha dos melhores diagramas. Baseando-se nestes trabalhos, pode-se definir os diagramas  $[O III] \lambda 5007/H\beta$  vs.  $[N II] \lambda 6583/H\alpha$ ,  $[O III] \lambda 5007/H\beta$  vs.  $[O II] \lambda 3727/H\beta$ ,  $[O III] \lambda 5007/H\beta$  vs.  $[S II] (\lambda 6716+\lambda 6730)/H\alpha$  e  $[O III] \lambda 5007/H\beta$  vs.  $[O I] \lambda 6300/H\alpha$  como tradicionais. Foram construídos diagramas desses tipos com os dados do catálogo e são apresentados nesta seção.

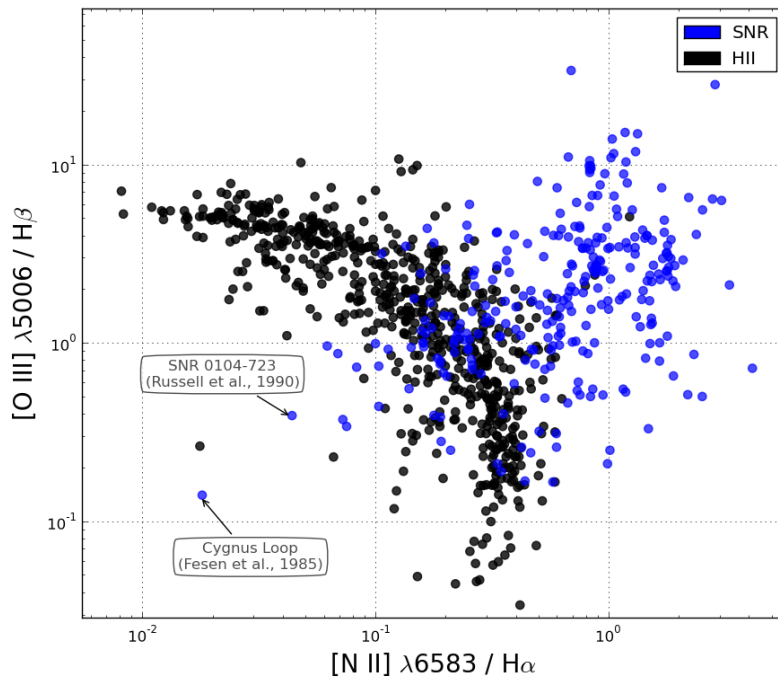


Figura 3.1: Diagrama  $[O III] \lambda 5007/H\beta$  vs.  $[N II] \lambda 6583/H\alpha$ . Os pontos de SNRs mais isolados são identificados pelos nomes dos SNRs e pelas referências das medidas.

Somente as intensidades corrigidas por extinção interestelar foram utilizadas na construção dos diagramas. Estes são apresentados nas figuras 3.1 a 3.4 e demonstram a eficiência deste recurso na distinção de SNRs e regiões H II. É possível definir nestes regiões em que há forte predominância de pontos correspondentes ao par de razões de intensidades de linhas de objetos



de uma ou outra classe.

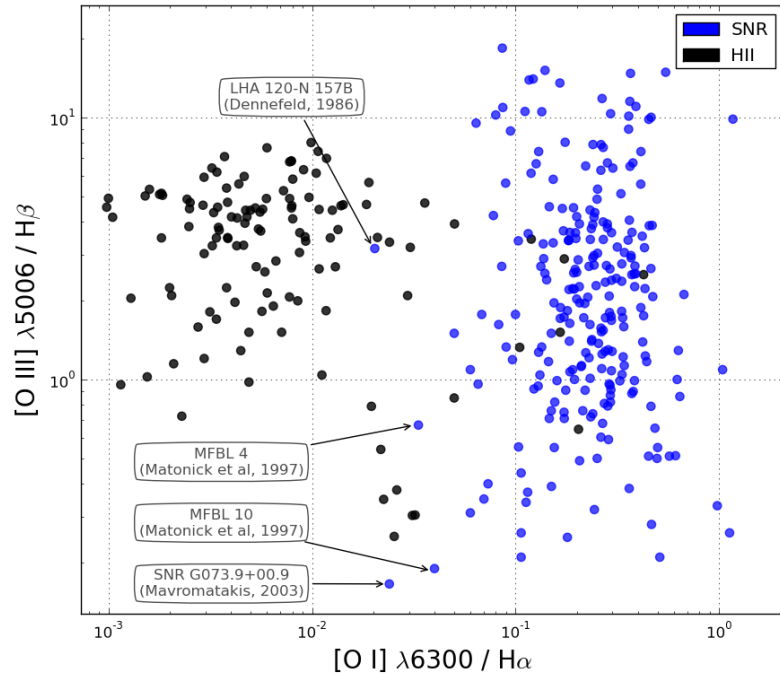


Figura 3.2: Diagrama  $[O\ III] \lambda 5006 / H\beta$  vs.  $[O\ I] \lambda 6300 / H\alpha$ .

A utilização deste recurso para a classificação de novos objetos é simples. Basta obter do novo objeto as medidas das linhas de emissão e verificar em que regiões dos diagramas os pontos ficam, permitindo inferir a classe do objeto com maior certeza quanto maior for o número de diagramas contendo o ponto em uma região que diferencie bem as classes.

É notável que alguns pontos dos diagramas estão fora das regiões de predominância de objetos da sua classe. Alguns destes pontos foram identificados. É uma proposta futura testar a classificação destes SNRs. E ainda, nos casos em que a classificação do SNR for inquestionável (confirmada em muitos trabalhos), entender as razões físicas das particularidades nas medidas que geram inconsistências nos diagramas, considerando-se o estágio de evolução do objeto e a inhomogeneidade da sua estrutura. Por exemplo, o isolamento dos pontos correspondentes ao SNR *Cygnus Loop* identificados nos diagramas 3.1 e 3.3 tem uma explicação adequada. Os espectros destes casos foram obtidos de regiões específicas para o estudo do choque não radiativo e, por isso, caracterizam uma fonte de emissão diferente.

Para exemplificar o uso dos diagramas na classificação de novos objetos, medidas de intensidades de linhas de emissão de objetos interpretados como candidatos a SNRs foram obtidas

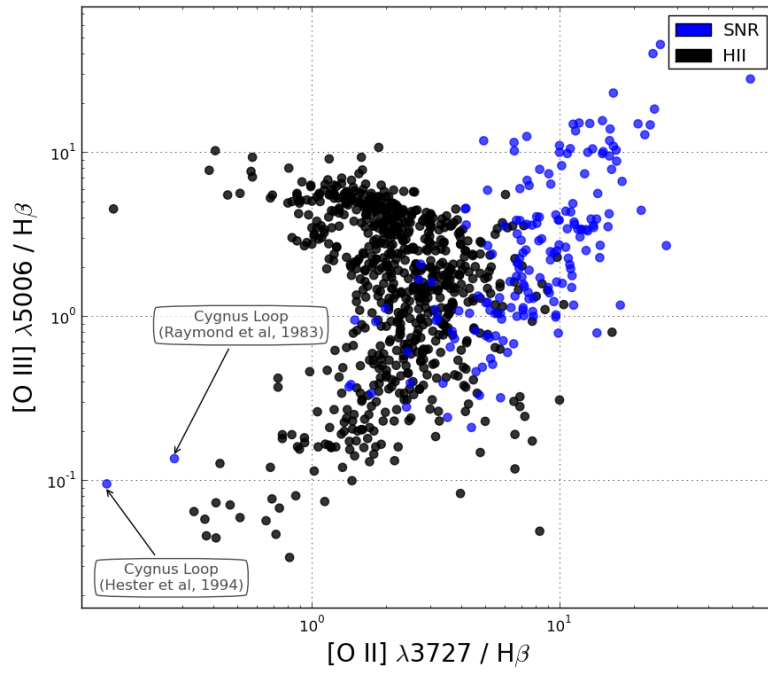


Figura 3.3: Diagrama  $[O\ III] \lambda 5007/H\beta$  vs.  $[O\ II] \lambda 3727/H\beta$ .

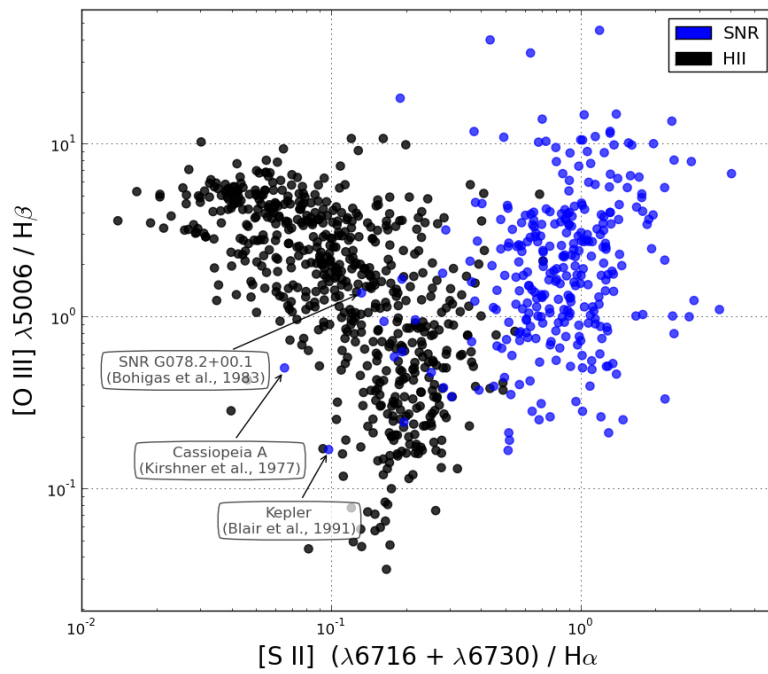


Figura 3.4: Diagrama  $[O\ III] \lambda 5007/H\beta$  vs.  $[S\ II] (\lambda 6716+\lambda 6730)/H\alpha$ .

da literatura. Os diagramas que incluem tais objetos são apresentados nas figuras 3.5 a 3.8. Atualmente, RCW 86 é um SNR confirmado. Porém, as medidas no trabalho de Dopita *et al.* (1980) foram realizadas antes da confirmação de sua classe, e estão apresentadas no diagramas como medidas de um candidato a SNR para demonstrar como os diagramas seriam úteis se disponíveis naquela época. O mesmo vale para BA 474 (Blair *et al.* 1981).

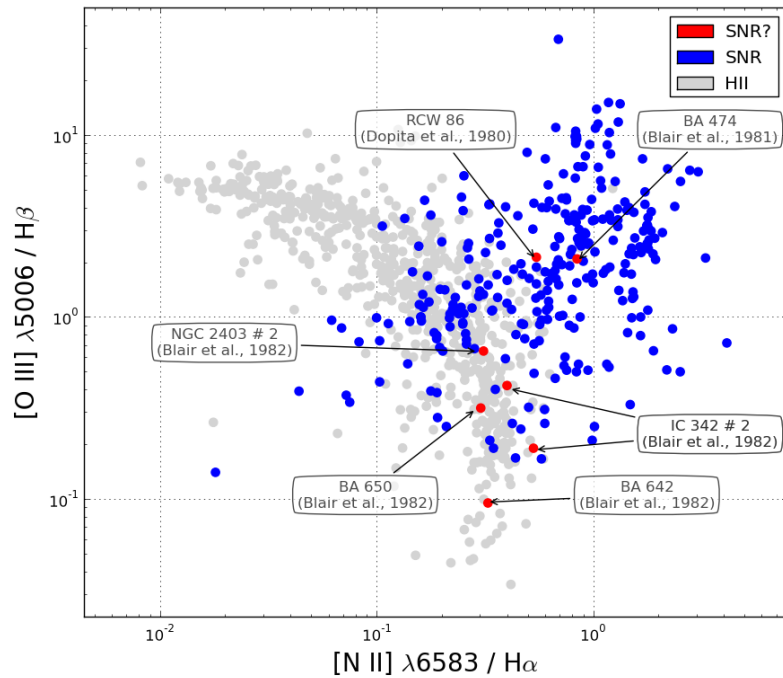


Figura 3.5: Diagrama  $[O\ III] \lambda 5006 / H\beta$  vs.  $[N\ II] \lambda 6583 / H\alpha$  incluindo medidas de candidatos a SNRs, cujos nomes e referências são identificados.

Stasińska *et al.* (2006) também utilizaram diagramas de diagnóstico para distinguir objetos com linhas de emissão, no caso, galáxias normais e galáxias com núcleos ativos (AGNs). As intensidades de linhas de 20 000 galáxias foram obtidas do SDSS (*Sloan Digital Sky Survey Data Release 2*). O diagrama  $[O\ III] \lambda 5006 / H\beta$  vs.  $[N\ II] \lambda 6583 / H\alpha$  é apresentado na figura 3.9. Galáxias cujos núcleos possuem baixo nível de atividade, conhecidos como LINERs (*Low Ionization Nuclear Emission Line Region*), formam grande parte do grupo dos AGNs. O espectro destas galáxias é dominado por linhas decorrentes de transições em baixos níveis de excitação (Heckman, 1980), e alguns espectros são bem explicados utilizando-se modelos baseados no aquecimento por choque (como em SNRs). A emissão nas galáxias normais provém principalmente de regiões HII ionizadas por estrelas massivas. Por isso, percebe-se uma semelhança na distribuição dos pontos nos diagramas  $[O\ III] \lambda 5006 / H\beta$  vs.  $[N\ II] \lambda 6583 / H\alpha$  deste trabalho

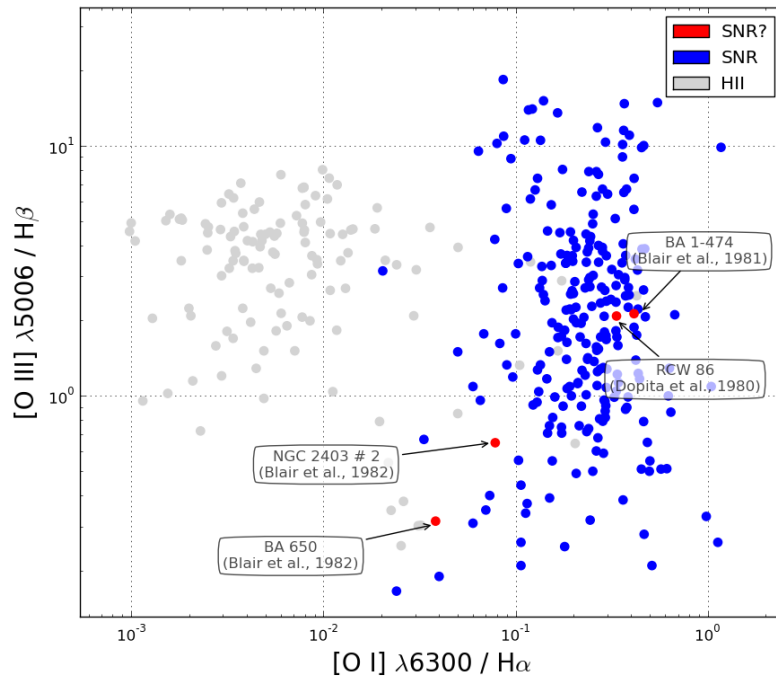


Figura 3.6: Diagrama  $[O III] \lambda 5007/H\beta$  vs.  $[O I] \lambda 6300/H\alpha$  incluindo candidatos a SNRs.

(figura 3.1) e do trabalho de Stasińska *et al.* (2006) (figura 3.9). Esta equivalência fica mais evidente quando os diagramas são sobrepostos, tal como apresenta a figura 3.10.

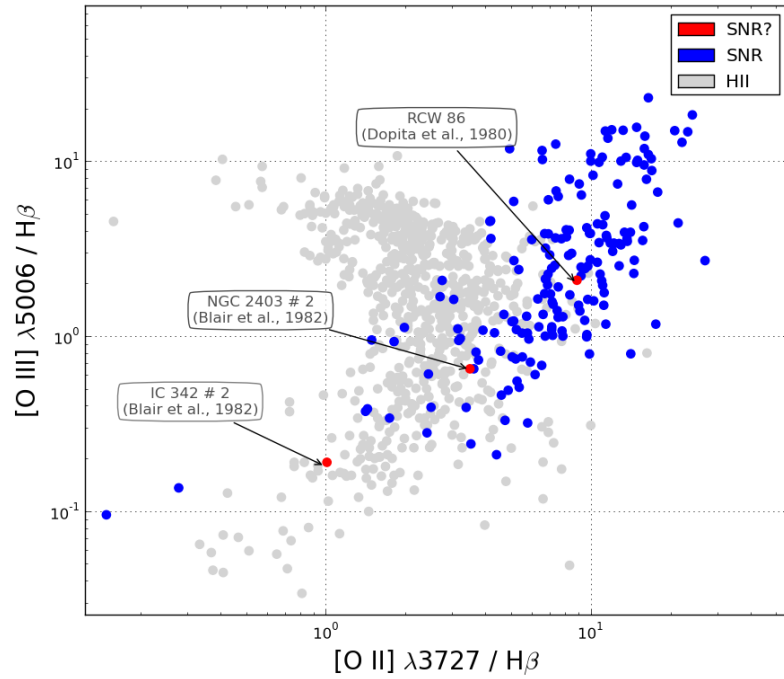


Figura 3.7: Diagrama  $[O III] \lambda 5007/H\beta$  vs.  $[O II] \lambda 3727/H\beta$  incluindo candidatos a SNRs.

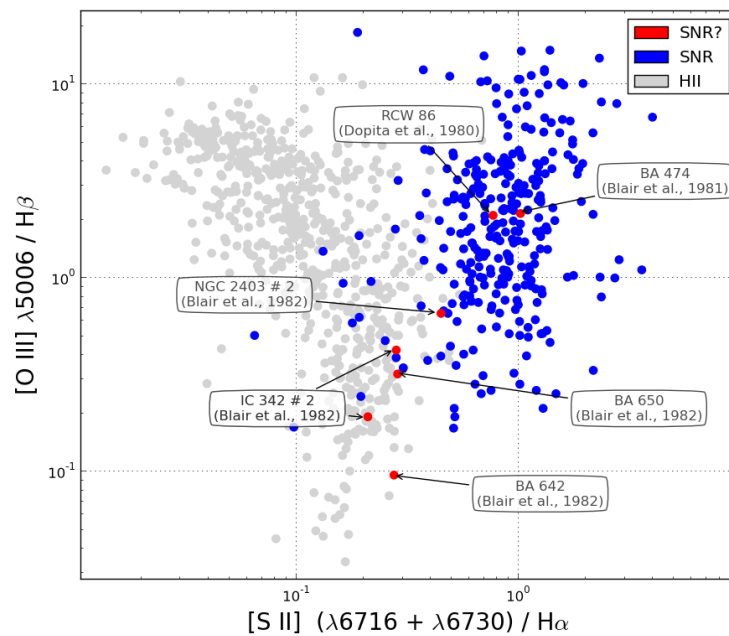


Figura 3.8: Diagrama  $[O III] \lambda 5007/H\beta$  vs.  $[S II] (\lambda 6716 + \lambda 6730)/H\alpha$  incluindo candidatos a SNRs.

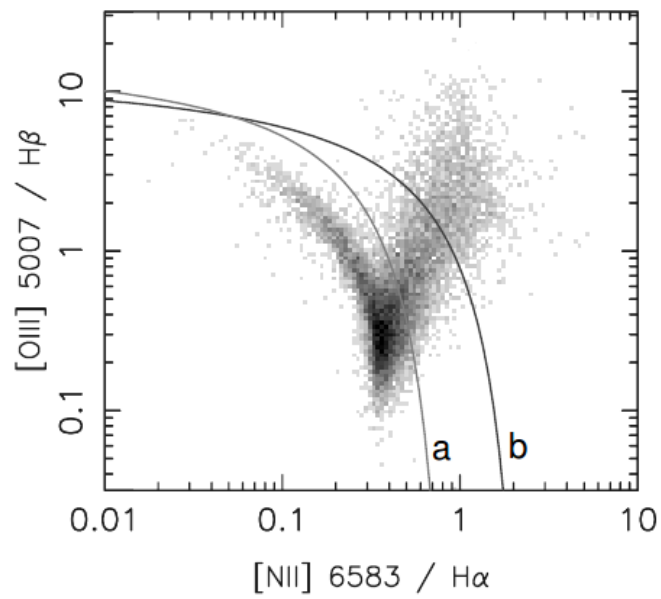


Figura 3.9: Diagrama  $[O\ III] \lambda 5007/H\beta$  vs.  $[N\ II] \lambda 6583/H\alpha$  para galáxias normais e AGNs. A escala em cinza representa o número de galáxias por pixel (os pixels mais escuros são os mais populosos). As curvas a e b são linhas divisórias propostas por Kewley *et al.* (2001) e Kauffmann *et al.* (2003), respectivamente, para classificação de galáxias. Adaptado de Stasińska *et al.* (2006).

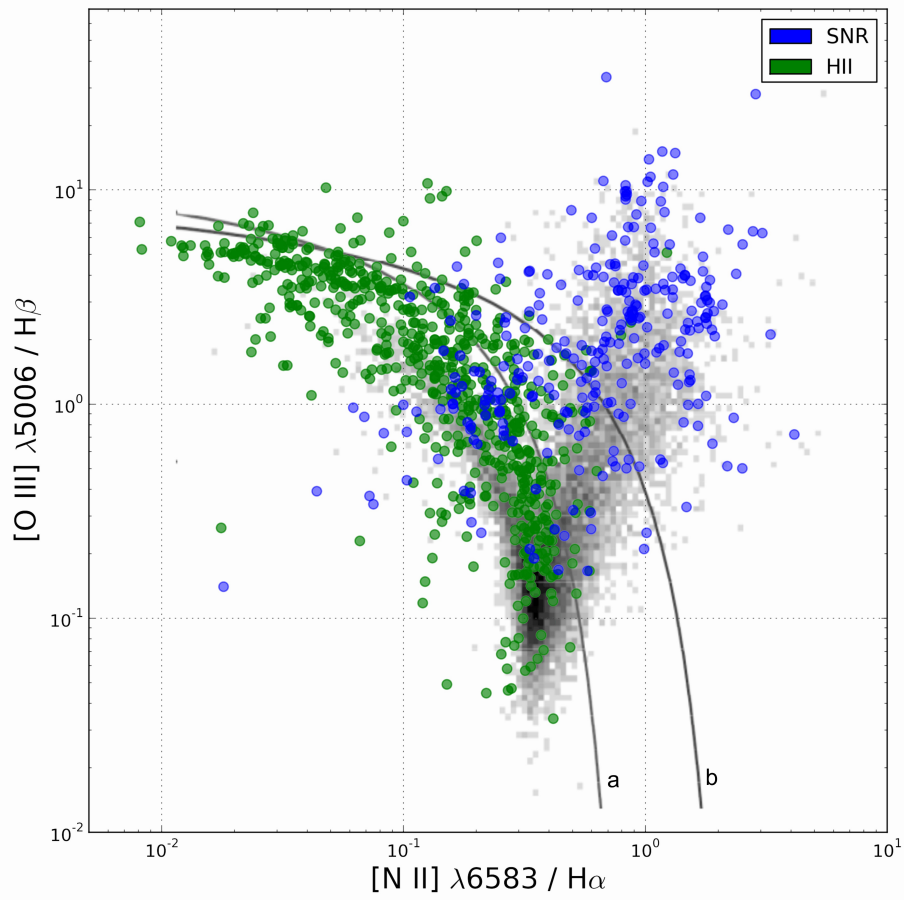


Figura 3.10: Diagramas  $[O III] \lambda 5007/H\beta$  vs.  $[N II] \lambda 6583/H\alpha$  deste trabalho e de Stasińska *et al.* (2006) sobrepostos. Esta figura evidencia a coincidência na distribuição de pontos de regiões H II com as galáxias normais e dos SNRs com os AGNs.

### 3.1.2 Novos diagramas

A utilização de novas razões de linhas para a construção de diagramas, como as razões  $[S\ III] (\lambda 9068 + \lambda 9530) / H\alpha$  e  $[Ne\ III] \lambda 3868 / H\gamma$ , geralmente inviável devido à pouca quantidade de dados, torna-se possível com grande número de intensidades contidas no catálogo. Apesar de ainda serem poucas as seções que contêm todas as linhas nestes diagramas e, conseqüentemente, formarem diagramas com poucos pontos, a eficiência destes diagramas na distinção dos objetos também é notável.

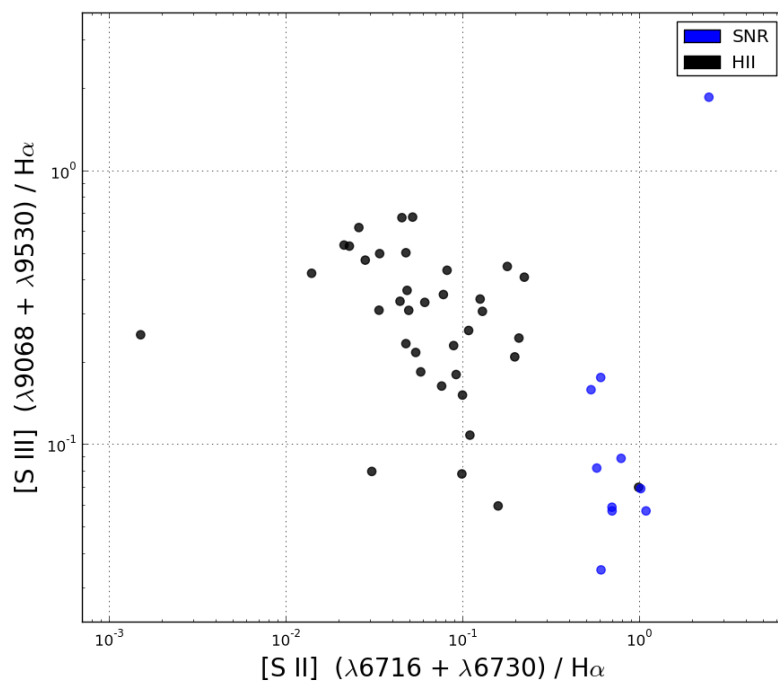


Figura 3.11: Diagrama  $[S\ III] (\lambda 9068 + \lambda 9530) / H\alpha$  vs.  $[S\ II] (\lambda 6716 + \lambda 6730) / H\alpha$ .



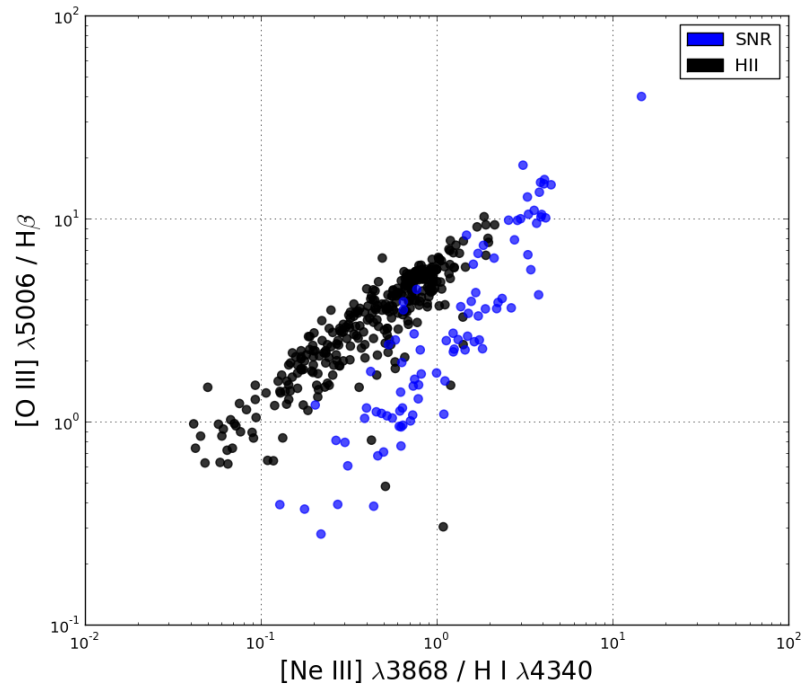


Figura 3.12: Diagrama  $[\text{O III}] \lambda 5007/\text{H}\beta$  vs.  $[\text{Ne III}] \lambda 3868/\text{H}\gamma$ .

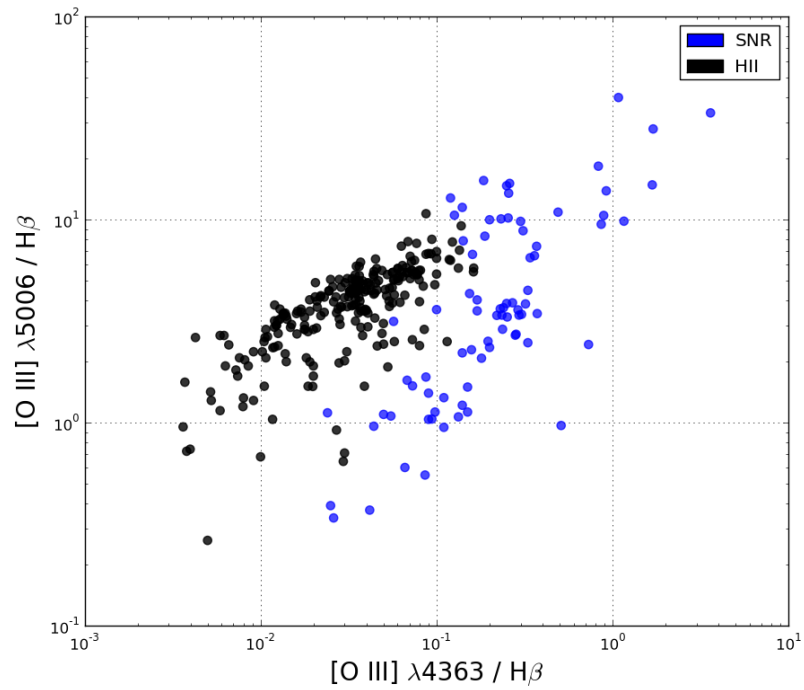


Figura 3.13: Diagrama  $[\text{O III}] \lambda 5007/\text{H}\beta$  vs.  $[\text{O III}] \lambda 4363/\text{H}\beta$ .

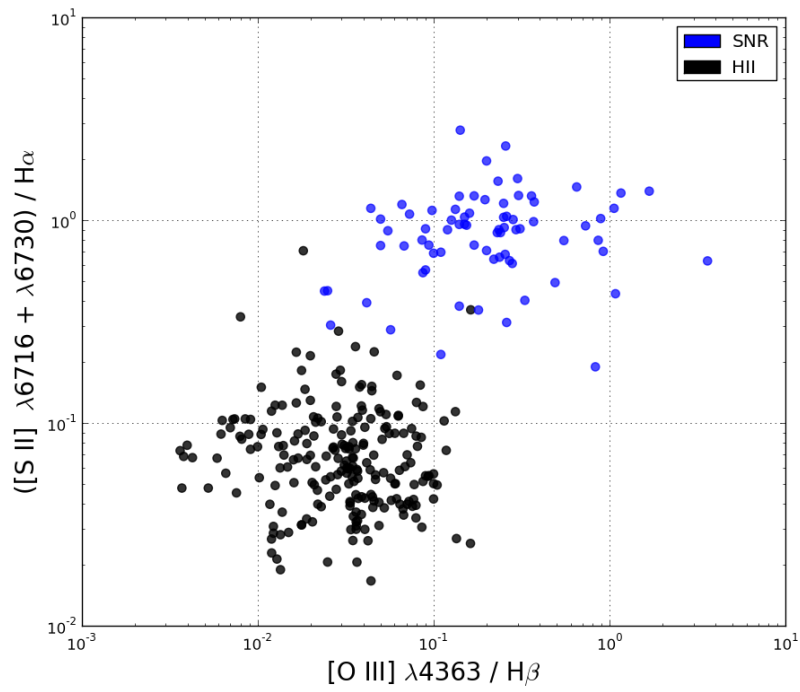


Figura 3.14: Diagrama  $[S II] (\lambda 6716 + \lambda 6730) / H\alpha$  vs.  $[O III] \lambda 4363 / H\beta$ .

## 3.2 Análise das razões [O III] $\lambda 5007/\lambda 4959$ e [N II] $\lambda 6584/\lambda 6548$

Observações astronômicas frequentemente têm fornecido informações sobre parâmetros atômicos. É o caso dos trabalhos de Copetti & Witzl (2002), Pradhan *et al.* (2006) e Kisielius *et al.* (2009), nos quais as forças de colisão para as transições das linhas [O II]  $\lambda 3726$  e [O II]  $\lambda 3729$  foram investigadas e reavaliadas. As razões de linhas [O III]  $\lambda 5007/\lambda 4959$  e [N II]  $\lambda 6584/\lambda 6548$  também podem ser utilizadas nos estudos de parâmetros atômicos, pois seus valores em nebulosas pouco dependem da temperatura eletrônica e da densidade eletrônica. Vários estudos foram realizados nas últimas décadas na obtenção de valores teóricos e observacionais para a razão [O III]  $\lambda 5007/\lambda 4959$ . Alguns dos primeiros valores teóricos foram 2,88 (Mendoza, 1983) e 2,89 (Galavis *et al.*, 1997), os quais discordavam dos valores observacionais, que eram  $3,03 \pm 0,03$  (Rosa, 1985),  $3,17 \pm 0,04$  (Iye *et al.*, 1987) e  $3,00 \pm 0,08$  (Leisy & Dennefeld, 1996). Storey & Zeippen (2000) obtiveram um valor teórico de 2,98 considerando correções relativísticas do operador dipolo magnético, que está de acordo com o valor observacional  $2,993 \pm 0,014$ , recentemente obtido por Dimitrijević *et al.* (2007) em núcleos ativos de galáxias. Rauber (2009) realizou regressões lineares a partir de dados de seu catálogo de dados espectroscópicos de regiões HII e obteve valores da ordem de 2,99, que reforçam os últimos resultados.

Os dados do catálogo deste trabalho possibilitam realizar análises destas razões de linhas em remanescentes de supernovas. Estas análises, feitas através de histogramas e de regressões lineares, são apresentadas nas seções seguintes.

### 3.2.1 Linhas do O III

Uma primeira análise foi feita a partir do histograma dos valores de [O III]  $\lambda 5007/\lambda 4959$  (figura 3.15), para os quais foram utilizados os dados de intensidades corrigidas do catálogo de SNRs deste trabalho. Para simplificar a notação, as grandezas no eixo das abscissas e no das ordenadas nos histogramas e gráficos serão respectivamente referidas por  $x$  e  $f(x)$ .

O ajuste gaussiano, dado pela equação

$$f(x) = A e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.1)$$

retorna os parâmetros  $A = 36,10$ ,  $x_0 = 3,000$  e  $\sigma = 0,263$ . A Gaussiana escrita desta forma, quando normalizada ( $A = 1/\sigma\sqrt{2\pi}$ ), é a função densidade de probabilidade de uma variável

aleatoriamente distribuída com valor esperado igual a  $x_0$  e variância igual a  $\sigma^2$ . O valor esperado obtido está de acordo com a maioria dos dados observacionais apresentados anteriormente, inclusive com o obtido no trabalho mais recente ( $2,993 \pm 0,014$ ). Porém, está acima do último valor teórico previsto (2,98).

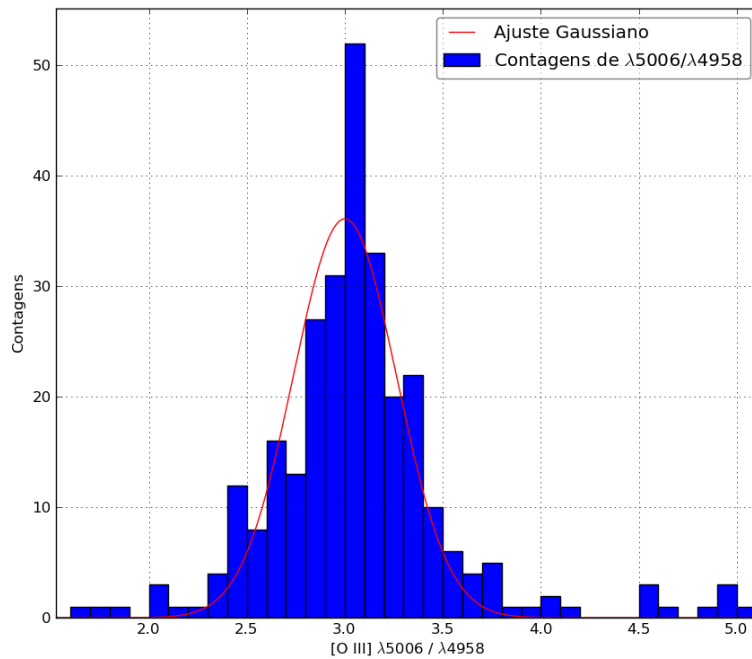


Figura 3.15: Histograma dos valores da razão [O III]  $\lambda 5007 / \lambda 4959$ .

Também foram realizadas duas regressões lineares através do diagrama [O III]  $\lambda 5007 / H\beta$  vs. [O III]  $\lambda 4959 / H\beta$  (figura 3.16), sendo que um dos ajustes força a reta a passar pela origem. As equações que descrevem as retas dos ajustes são

$$f(x) = (3,057 \pm 0,016)x - 0,013 \pm 0,036 \quad (3.2)$$

e

$$f(x) = (3,053 \pm 0,013)x. \quad (3.3)$$

Os coeficientes angulares das retas dão uma estimativa para o valor da razão de intensidades [O III]  $\lambda 5007 / \lambda 4959$ , que ainda estão de acordo com alguns dos valores observacionais dos trabalhos citados e acima dos valores teóricos.

A média ( $M$ ) e a mediana ( $Md$ ) dos valores de todas as razões [O III]  $\lambda 5007 / \lambda 4959$  para as

intensidades corrigidas também foram calculadas. Os resultados obtidos foram  $M = 3,117 \pm 0,039$  ( $1\sigma$ ) e  $Md = 3,051$ .

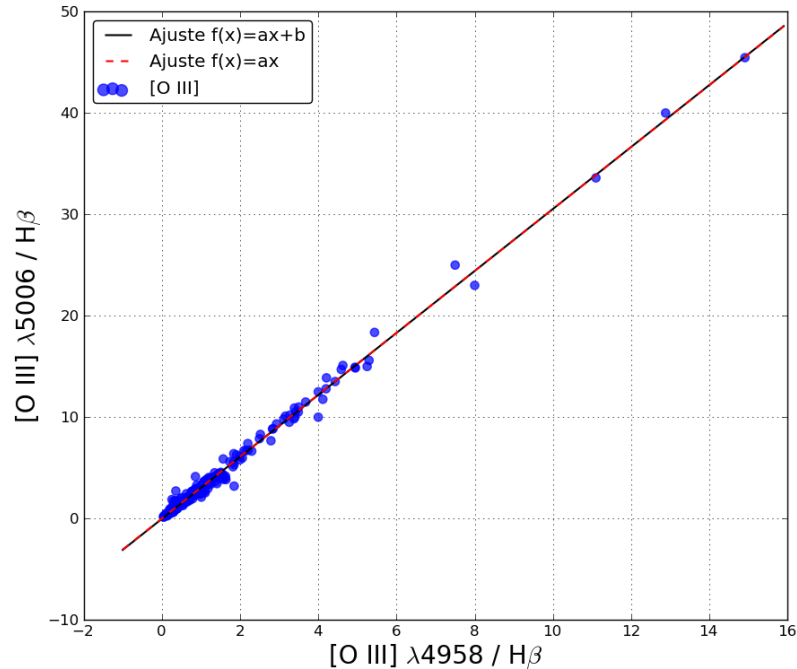


Figura 3.16: Ajuste linear das razões do íon O III.

### 3.2.2 Linhas do N II

As mesmas verificações foram feitas para a razão dos valores de  $[N II] \lambda 6584 / \lambda 6548$ . O ajuste gaussiano (equação 3.1) no histograma da figura 3.17 retorna os parâmetros  $A = 32,93$ ,  $x_0 = 2,941$  e  $\sigma = 0,250$ . As retas dos ajustes apresentados na figura 3.18 são descritas pelas equações

$$f(x) = (3,027 \pm 0,029)x - 0,054 \pm 0,032 \quad (3.4)$$

e

$$f(x) = (2,991 \pm 0,018)x. \quad (3.5)$$

Os valores da média e da mediana para as razões  $[N II] \lambda 6584 / \lambda 6548$  das intensidades corrigidas foram  $M = 2,920 \pm 0,043$  ( $1\sigma$ ) e  $Md = 2,997$ .

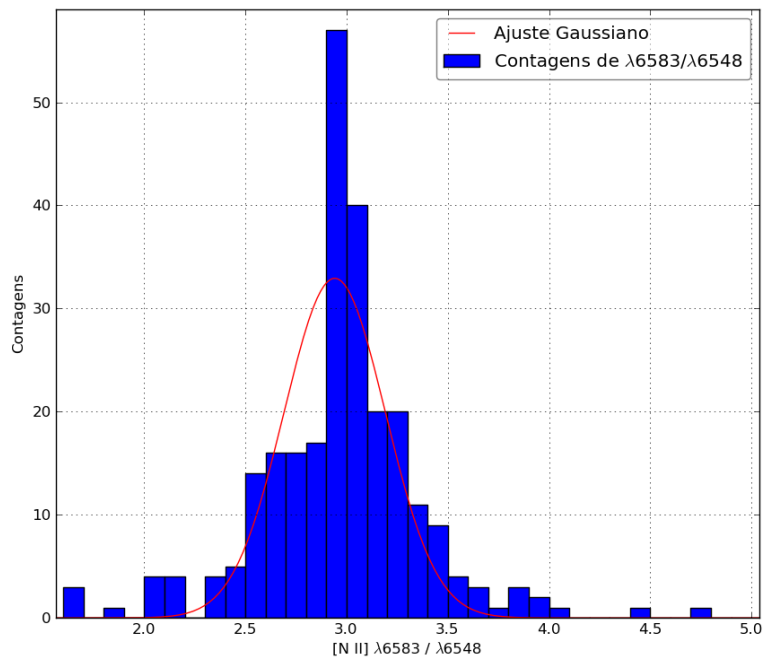


Figura 3.17: Histograma dos valores da razão  $[N II] \lambda 6584 / \lambda 6548$ .

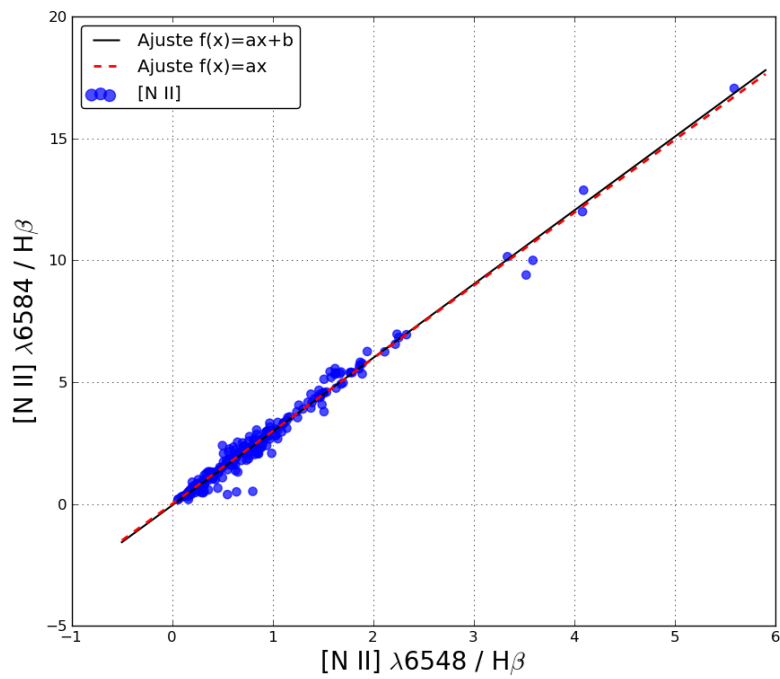


Figura 3.18: Ajuste linear das razões do íon N II.

## 4 Linhas de emissão no ultravioleta

O estudo de intensidades de linhas emitidas por remanescentes de supernovas na faixa do ultravioleta é recente quando comparado com o estudo destas medidas na faixa do espectro óptico. Isso se deve principalmente à necessidade de telescópios espaciais para a observação no ultravioleta, uma vez que a radiação nesta faixa do espectro é bastante retida pela atmosfera terrestre.

Embora possa se dizer que atualmente são publicados trabalhos com linhas de emissão no ultravioleta e no óptico em quantidades equivalentes, devido a um recente aumento no número de telescópios disponíveis para observação no UV, o número total de publicações com linhas de emissão no ultravioleta ainda é bem menor do que no óptico. Por isso, realizou-se um estudo da identificação de novas linhas e da separação de linhas antes não resolvidas (*blends*) na banda UV para remanescentes de supernovas.

Em 1996, Fesen & Hurford (daqui em diante FH96) publicaram um catálogo de linhas de emissão identificadas em remanescentes de supernovas. Este contém linhas do ultravioleta, óptico e infravermelho próximo, e seu conteúdo no ultravioleta é o mais recente publicado. Contudo, o total de linhas até então identificadas nesta faixa era menor do que 70, sendo que hoje, segundo nosso trabalho, essa quantia é igual a 142, além de muitos *blends* terem sido resolvidos. Analogamente, o número de remanescentes com espectros UV obtidos aumentou de 13 para 30.

Além dos tópicos comentados acima, este capítulo tratará da importância das observações UV para diagnósticos de algumas propriedades. Também será feita uma descrição da instrumentação utilizada, paralela a um histórico das observações realizadas.

## 4.1 Histórico e importância das observações de SNRs no UV

Elementos como carbono, magnésio e silício possuem linhas intensas no ultravioleta mas, no óptico, as linhas de emissão desses elementos são muito fracas ou nem são detectadas. Além disso, linhas do oxigênio, nitrogênio e neônio são encontradas no UV em estágios de ionização mais altos que no óptico (como O IV  $\lambda\lambda$  1038, 1032; N V  $\lambda\lambda$  1239, 1243 e [Ne IV]  $\lambda\lambda$  2422, 2424). Informações sobre a velocidade, densidades e abundâncias de elementos importantes, como o carbono que não possui linhas brilhantes no óptico, podem ser obtidas a partir de observações no espectro ultravioleta.

A emissão óptica e ultravioleta em remanescentes provém principalmente de regiões onde ocorre o choque *radiativo*, isto é, regiões mais densas da nebulosa em que o choque converte efetivamente a energia interna do gás aquecido em radiação. Mais especificamente, em uma zona estreita logo atrás da onda de choque, os elementos passam por sucessivos estágios de ionização e são excitados colisionalmente, emitindo um espectro dominado por linhas proibidas e de intercombinação<sup>1</sup>, como a C III]  $\lambda$ 1909. Por outro lado, o choque será *não-radiativo* quando um gás pouco denso for atingido pela onda de choque e não tiver tempo para produzir muita radiação durante a passagem dela. No óptico esse tipo de choque é visto como filamentos pouco brilhantes, emitindo essencialmente linhas da série de Balmer, e no ultravioleta emitindo linhas de ressonância<sup>2</sup> dos íons de C, N e O com mesmo número de elétrons que o Li, além da linha He II 1640. Essa é principal fonte de linhas permitidas e semi-proibidas que são comuns no espectro UV de remanescentes de supernovas (figuras 4.1 e 4.2), diferentemente do espectro óptico.

A primeira detecção da emissão ultravioleta de um SNR foi apresentada no trabalho de Carruthers & Page (1976). A observação foi realizada de uma câmera espectrográfica operada em solo lunar durante a missão *Apollo 16* em 1972, através da qual se obtiveram imagens de algumas nebulosas em um campo de 20°, sendo duas delas regiões H II e a outra o remanescente de supernova Nebulosa do Véu (*Cygnus Loop*). Shemansky *et al.* (1979) foram os primeiros a identificar linhas de emissão no espectro UV de um remanescente de supernova. Para isso, utilizaram o *Voyager 2 UV spectrometer*, um espectrógrafo com cobertura espectral de 500 - 1700 Å e resolução espectral  $\sim 30$  Å para obter um espectro da Nebulosa do Véu.

<sup>1</sup>Linhas do espectro emitidas a partir de uma transição entre níveis com diferentes valores do número quântico de *spin*  $S$  ( $\Delta S \neq 0$ ), ou seja, de uma transição entre estados de diferentes multiplicidades. Em astrofísica, são chamadas de linhas semi-proibidas.

<sup>2</sup>Linhas do espectro com o maior comprimento de onda associado a uma transição entre um estado excitado e o fundamental.



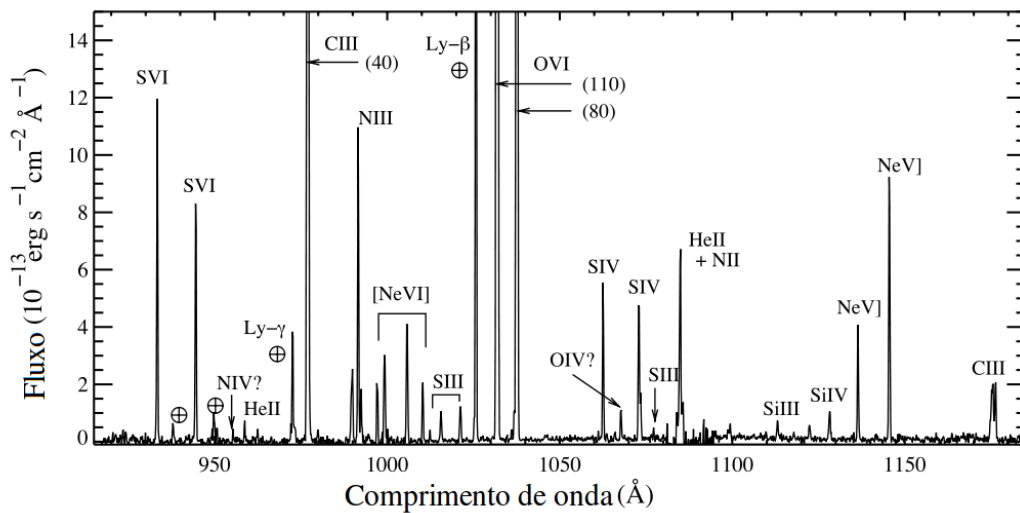


Figura 4.1: Espectro UV distante do remanescente de supernova *Cygnus Loop* obtido com o telescópio espacial FUSE. O símbolo  $\oplus$  indentifica as linhas geocoronais. Adaptado de Sankrit *et al.* (2007).

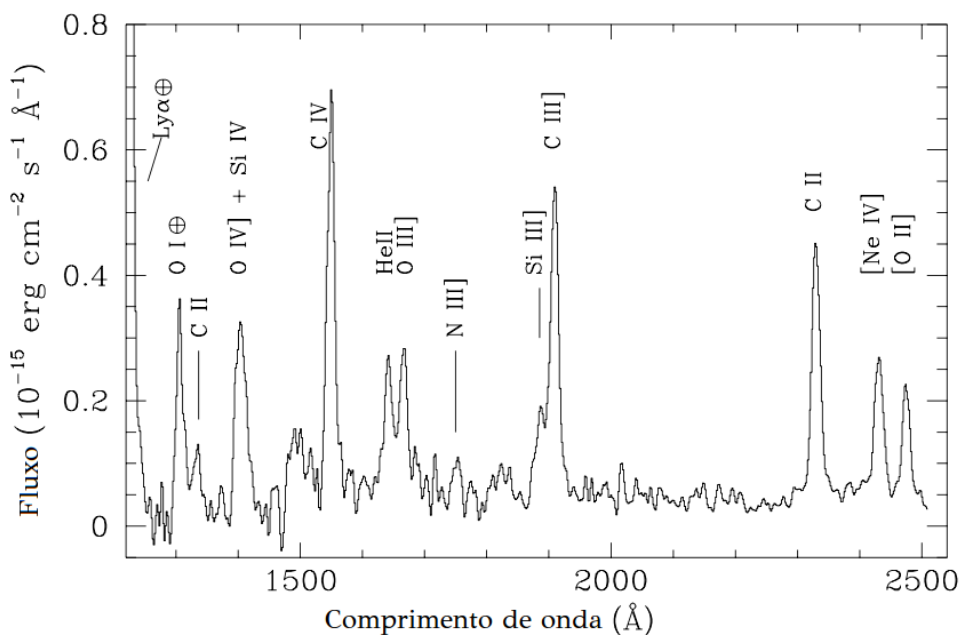


Figura 4.2: Espectro UV próximo do remanescente de supernova N123D obtido com o telescópio espacial Hubble. O símbolo  $\oplus$  indentifica as linhas geocoronais. Adaptado de Blair *et al.* (2000).

O trabalho de Benvenuti *et al.* (1980) teve um avanço significativo na identificação das linhas com a utilização do *International Ultraviolet Explorer* (IUE), disponibilizado a partir de 1978. Por possuir uma fenda grande ( $10'' \times 20''$ ), proporcionou uma excelente sensibilidade. Aliando isso à sua cobertura espectral adequada, o IUE foi o primeiro espectrógrafo ultravioleta

de uso geral capaz de observar SNRs com boa resolução, sendo utilizado em vários trabalhos até o fim de sua missão em 1996. O IUE possuía dois espectrógrafos para diferentes faixas espectrais do UV (*Short Wavelength Prime* - SWP, cobertura espectral de 1850 a 3300 Å e *Long Wavelength Prime* - LWP, cobertura espectral de 1150 a 2000 Å). Cada espectrógrafo possuía dois modos de dispersão, de alta e baixa resolução, fornecendo resoluções espectrais de 0,1 a 0,3 Å e 6 a 7 Å, respectivamente.

Outro telescópio espacial extremamente importante na evolução dos estudos UV de remanescentes de supernovas foi o *Hopkins Ultraviolet Telescope* (HUT). Passou a ser utilizado a partir de sua missão de lançamento em dezembro de 1990, a bordo do ônibus espacial *Astro-1*. Juntamente com o *Ultraviolet Imaging Telescope* (UIT) e o *Wisconsin Ultraviolet Photo-Polarimeter Experiment* (WUPPE), o HUT foi um dos instrumentos mais importantes que compunham o *Astro Observatory*, um observatório acoplado ao compartimento de carga do ônibus espacial. Obteve espectros do ultravioleta distante (1220-2000 Å) com resolução de aproximadamente 3 Å (Blair *et al.*, 1991). O mesmo telescópio voltou ao espaço em março de 1995 durante a missão *Astro-2*, com melhorias que aumentaram sua sensibilidade por um fator de 2,3 (Raymond *et al.*, 1995).

O telescópio espacial *Hubble* (HST) também foi utilizado em observações de remanescentes de supernovas na faixa do ultravioleta de comprimentos de onda maiores. Lançado em 25 de abril de 1990 através do ônibus espacial *Discovery*, opera até hoje após passar por cinco missões para reparos. Com um espelho primário de 2,4 m, seria considerado um telescópio de médio porte em terra. Porém, a combinação de sua qualidade óptica, sua localização acima da atmosfera e ótimos controles de estabilidade e apontamento permitem mais do que compensar seu pequeno tamanho em relação aos demais telescópios existentes em terra. É conhecido por fornecer imagens de alta qualidade de diversos objetos espaciais, mas possibilita também a obtenção de espectros, sendo o único telescópio a operar do UV ao infravermelho próximo com o mesmo espectrógrafo. É o caso do trabalho de Blair *et al.* (2000), que obtiveram espectros no intervalo espectral de 1000-8000 Å. Este tipo de espectro é importante na comparação de intensidades de linhas de diferentes bandas, o que geralmente é feito a partir de razões teóricas entre intensidades de certas linhas. Em um estudo mais recente, France *et al.* (2009) obtiveram resultados surpreendentes com a utilização do HST, resolvendo todas as linhas até então detectadas no intervalo de 1330 a 1670 Å.

Posteriormente, o satélite *Far Ultraviolet Space Explorer* (FUSE) foi lançado, em junho de 1999, através do foguete *Delta II*, e operou até outubro de 2008, quando seu sistema de apontamento começou a falhar. O FUSE operava utilizando quatro canais independentes, cada

um subdividido em dois segmentos, os quais cobriam diferentes faixas do espectro UV. Era capaz de detectar a radiação na região espectral de 905-1187 Å, atingindo resolução espectral de 0,34 Å e até 0,045 Å, dependendo do seu modo de operação (Sankrit *et al.*, 2001).

Lançado em setembro de 2003 no satélite coreano *STSAT-1*, o *Spectroscopy of Plasma Evolution from Astrophysical Radiation* ou *Far-Ultraviolet Imaging Spectrograph* (SPEAR/FIMS) possui dois espectrógrafos UV, cobrindo as faixas espectrais de 900-1175 Å (*Short Wavelength Band* - SWB, resolução de 1,8 Å) e 1335-1750 Å (*Long Wavelength Band* - LWB, resolução de 3,0 Å). Ainda em operação, ele possibilita obter imagens que otimizam a observação de regiões difusas (Sasaki *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2010).

## 4.2 Lista de linhas

A tabela 4.1 lista as linhas de emissão do ultravioleta cujas intensidades já foram medidas em remanescentes de supernovas pelo menos uma vez. A identificação de cada linha é feita através do seu comprimento de onda de laboratório (coluna  $\lambda$ ), do íon que a emite (coluna *Íon*), da configuração eletrônica (coluna *Configuração*), dos termos (coluna *Termos*) e dos parâmetros  $J_i$  e  $J_k$  (coluna  $J_i - J_k$ ) de sua transição. Além disso, é feito um comparativo quanto à existência ou não da linha no trabalho de FH96, considerando também os casos em que a linha passou a ser resolvida. Este comparativo é apresentado na coluna *Resolvida*, que indica se a linha foi (S) ou não (N) medida isoladamente ao menos uma vez até 1996 (subcoluna *FH96*) e também até o final de 2010 (subcoluna *Presente*). Algumas linhas desta lista são construídas a partir de médias do comprimento de onda de várias linhas de multipletos, ou simplesmente linhas do mesmo íon com comprimento de onda bastante próximos. Nesses casos, o comprimento de onda médio representa as linhas listadas na sua sequência (linha 948.40 N IV, por exemplo). Alguns casos com multipletos de muitas linhas têm a configuração apresentada resumidamente, apresentando apenas as informações comuns entre as configurações das linhas do multipletto e indicando com o símbolo "\*" as incomuns (linha 958.70 He II, por exemplo). O símbolo "-" na subcoluna *FH96* indica que a linha não havia sido medida até 1996.

Pode-se notar que são numerosas as novas linhas e também as resolvidas a partir de 1996. Além de demonstrar os avanços na espectroscopia UV dos SNRs, a tabela 4.1 pode ser utilizada como referência na identificação de linhas de emissão em trabalhos futuros. A coluna *SNRs* apresenta, ainda, uma listagem dos SNRs em que cada linha teve a intensidade medida. Para as linhas medidas em mais de 6 SNRs, por simplificação, apenas a contagem dos SNRs é indicada.

Tabela 4.1: Linhas do UV medidas em SNRs

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
933.38	S VI	$2p^6 3s - 2p^6 3p$	$^2S - ^2P^o$	$1/2 - 3/2$	N	S	Cygnus Loop; N49; Vela
935.19	O I	$2s^2 2p^4 - 2s^2 2p^3 (2D^o \ 3/2) 4s$	$^1D - ^1D^o$	$2 - 2$	N	N	Cygnus Loop
944.52	S VI	$2p^6 3s - 2p^6 3p$	$^2S - ^2P^o$	$1/2 - 1/2$	-	S	Cygnus Loop; N49; Vela
948.40	N IV				N	N	Cygnus Loop
948.15		$1s^2 2s 3p - 1s^2 2s 4d$	$^3P^o - ^3D$	$0 - 1$			
948.24		$1s^2 2s 3p - 1s^2 2s 4d$	$^3P^o - ^3D$	$1 - 2$			
948.29		$1s^2 2s 3p - 1s^2 2s 4d$	$^3P^o - ^3D$	$1 - 1$			
948.54		$1s^2 2s 3p - 1s^2 2s 4d$	$^3P^o - ^3D$	$2 - 3$			
948.56		$1s^2 2s 3p - 1s^2 2s 4d$	$^3P^o - ^3D$	$2 - 2$			
948.61		$1s^2 2s 3p - 1s^2 2s 4d$	$^3P^o - ^3D$	$2 - 1$			
949.33	He II				N	N	Cygnus Loop
949.30		$2p - 10d$	$^2P^* - ^2D$				
949.30		$2s - 10p$	$^2S - ^2P^*$				
949.33		$2p^+ - 10d^+$	$^2P^* - ^2D$				
949.35		$2p - 10d$	$^2P^* - ^2D$				
955.33	N IV	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2p^2$	$^1P^o - ^1S$	$1 - 0$	N	S	Cygnus Loop
958.70	He II	$2* - 9*$			N	S	Cygnus Loop
972.11	He II	$2* - 8*$			N	N	Cygnus Loop

Tabela 4.1: (continuação)

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
972.54	H I				–	S	SNR B0505-67.9; SNR B0519-69.0
972.54		$1s - 4s$	$2S - 2S$	$1/2 - 1/2$			
972.54		$1s - 4p$	$2S - 2P^o$	$1/2 - 3/2$			
972.54		$1s - 4p$	$2S - 2P^o$	$1/2 - 1/2$			
977.03	C III	$1s^2 2s^2 - 1s^2 2s 2p$	$1S - 1P^o$	$0 - 1$	S	S	(medida em 19 SNRs)
989.79	N III	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^o - 2D$	$1/2 - 3/2$	N	S	Cygnus Loop; Puppis A
991.54	N III				N	S	Cygnus Loop; Puppis A; Vela
991.51		$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^o - 2D$	$3/2 - 3/2$			
991.58		$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^o - 2D$	$3/2 - 5/2$			
992.36	He II	$2* - 7*$			N	N	Cygnus Loop
993.01	Ne VI]	$2s^2 2p - 2s^2 p$	$2P^o - 4P$	$1/2 - 3/2$	–	N	Cygnus Loop
997.40	Ne VI]	$2s^2 2p - 2s^2 p$	$2P^o - 4P$	$1/2 - 1/2$	–	S	Cygnus Loop
999.50	O I	$2s^2 2p^4 - 2s^2 2p^3 (2P^o) 3s$	$1D - 1P^o$	$2 - 1$	N	N	Cygnus Loop
999.60	Ne VI]	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^o - 4P$	$3/2 - 5/2$	N	S	Cygnus Loop
1006.06	Ne VI]	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^o - 4P$	$3/2 - 3/2$	N	S	Cygnus Loop; N49; Vela
1010.57	Ne VI]	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^o - 4P$	$3/2 - 1/2$	N	S	Cygnus Loop; N49
1012.49	S III	$3s^2 3p^2 - 3s 3p^3$	$3P - 3P^o$	$0 - 1$	–	S	Cygnus Loop; Vela
1015.61	S III				–	S	Cygnus Loop; Vela

Tabela 4.1: (continuação)

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
1015.50		$3s^2 3p^2 - 3s3p^3$	$^3P - ^3P^o$	1-0			
1015.57		$3s^2 3p^2 - 3s3p^3$	$^3P - ^3P^o$	1-1			
1015.78		$3s^2 3p^2 - 3s3p^3$	$^3P - ^3P^o$	1-2			
1021.21	S III				-	S	Cygnus Loop; Vela
1021.11		$3s^2 3p^2 - 3s3p^3$	$^3P - ^3P^o$	2-1			
1015.32		$3s^2 3p^2 - 3s3p^3$	$^3P - ^3P^o$	2-2			
1025.72	H I	$1s - 3p$	$^2S - ^2S$	1/2-1/2	S	S	Cygnus Loop; Puppis A; SN 1006; SNR B0505-67.9; SNR B0509-67.5; SNR B0519-69.0
1031.91	O VI	$1s^2 2s - 1s^2 2p$	$^2S - ^2P^o$	1/2-3/2	S	S	(medida em 26 SNRs)
1036.16	N IV	$2s3d - 2s4f$	$^3D - ^3F^o$	2-3	N	N	Cygnus Loop
1036.68	C II				N	N	Cygnus Loop
1036.34		$2s^2 2p - 2s2p^2$	$^2P^o - ^2S$	1/2-1/2			
1037.02		$2s^2 2p - 2s2p^2$	$^2P^o - ^2S$	3/2-1/2			
1037.00	Ne V]	$2s^2 2p(^2Po)3d - 2s2p^2(^4P)3d$	$^1F^o - ^3F$	3-4	-	S	Cygnus Loop
1037.61	O VI	$1s^2 2s - 1s^2 2p$	$^2S - ^2P^o$	1/2-1/2	S	S	(medida em 24 SNRs)
1062.66	S IV	$3s^2 3p - 3s3p^2$	$^2P^o - ^2D$	1/2-3/2	-	S	Cygnus Loop; Vela
1067.85	O IV				-	S	Cygnus Loop

Tabela 4.1: (continuação)

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
1067.77		$2s^23d - 2s^24f$	$^2D - ^2F^\circ$	$3/2 - 5/2$			
1067.83		$2s^23d - 2s^24f$	$^2D - ^2F^\circ$	$5/2 - 7/2$			
1067.96		$2s^23d - 2s^24f$	$^2D - ^2F^\circ$	$5/2 - 5/2$			
1072.96	S IV	$3s^23p - 3s3p^2$	$^2P^\circ - ^2D$	$3/2 - 5/2$	-	N	Cygnus Loop; Vela
1073.51	S IV	$3s^23p - 3s3p^2$	$^2P^\circ - ^2D$	$3/2 - 3/2$	-	S	Cygnus Loop; Vela
1077.14	S III	$3s^23p^2 - 3s^23p3d$	$^1D - ^1D^\circ$	$2 - 2$	-	S	Cygnus Loop; Vela
1083.99	N II	$2s^22p^2 - 2s2p^3$	$^3P - ^3D^\circ$	$0 - 1$	N	S	Cygnus Loop ; Puppis A; N49; Vela
1084.94	He II	$2* - 5*$			S	S	Crab; Cygnus Loop; Puppis A; N49; Vela
1108.37	Si III	$3s3p - 3s3d$	$^3P^\circ - ^3D$	$0 - 1$	-	N	Vela
1109.95	Si III	$3s3p - 3s3d$	$^3P^\circ - ^3D$	$1 - 2$	-	N	Vela
1113.20	Si III	$3s3p - 3s3d$	$^3P^\circ - ^3D$	$2 - 3$	-	S	Cygnus Loop; Vela
1122.49	Si IV				-	S	Cygnus Loop; Vela
1122.49		$2p^63p - 2p^63d$	$^2P - ^2D$	$1/2 - 3/2$			
1122.50		$2p^63p - 2p^63d$	$^2P - ^2D$	$1/2 - 5/2$			
1128.33	Si IV				-	S	Cygnus Loop; Vela
1128.33		$2p^63p - 2p^63d$	$^2P^\circ - ^2D$	$3/2 - 3/2$			
1128.34		$2p^63p - 2p^63d$	$^2P^\circ - ^2D$	$3/2 - 5/2$			

Tabela 4.1: (continuação)

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
1134.52	NI	$2s^2 2p^3 - 2s^2 2p^2(^3P)9d$	$^2D^\circ - ^4P$	$3/2 - 1/2$	-	S	Antlia
1135.60	Ne VI]	$2s^2 2p(^2P^\circ)4p - 2s^2 2p(^2P^\circ)5d$	$^3D - 1F^\circ$	$2 - 3$	-	S	Cygnus Loop; N49; Vela
1145.40	Ne V]	$2s^2 2p(^2P^\circ)4p - 2s^2 2p(^2P^\circ)5d$	$^3D - 1F^\circ$	$3 - 3$	S	S	Cygnus Loop; N49; Vela
1175.42	C III	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2p^2$	$^3P^\circ - ^3P$		-	S	Cygnus Loop; Vela
1193.90	Si II				N	N	Cygnus Loop
1190.42		$3s^2 3p - 3s 3p^2$	$^2P^\circ - ^2P$	$1/2 - 3/2$			
1193.20		$3s^2 3p - 3s 3p^2$	$^2P^\circ - ^2P$	$1/2 - 1/2$			
1194.50		$3s^2 3p - 3s 3p^2$	$^2P^\circ - ^2P$	$3/2 - 3/2$			
1197.39		$3s^2 3p - 3s 3p^2$	$^2P^\circ - ^2P$	$3/2 - 1/2$			
1206.51	Si III	$2p^6 3s^2 - 3s 3p$	$^1S - ^1P^\circ$	$0 - 1$	N	N	Cygnus Loop
1227.06	[S II]	$3s 3p^2 - 3s 3p(^3P^\circ)3d$	$^4P - ^4D^\circ$		N	N	Cygnus Loop
1228.66	NI				N	N	Cygnus Loop
1228.41		$2s^2 2p^3 - 2s^2 2p^2(^3P)4d$	$^2P^\circ - ^2P$	$1/2 - 1/2$			
1128.41		$2s^2 2p^3 - 2s^2 2p^2(^3P)4d$	$^2P^\circ - ^2P$	$3/2 - 1/2$			
1128.79		$2s^2 2p^3 - 2s^2 2p^2(^3P)4d$	$^2P^\circ - ^2P$	$1/2 - 3/2$			
1128.79		$2s^2 2p^3 - 2s^2 2p^2(^3P)4d$	$^2P^\circ - ^2P$	$5/2 - 3/2$			
1233.80	[S II]				N	N	Cygnus Loop
1233.44		$3s^2 3p^3 - 3s^2 3p^2(^3P)3d$	$^2P^\circ - ^2P$	$1/2 - 3/2$			



Tabela 4.1: (continuação)

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
1234.15	N V	$3s^2 3p^3 - 3s^2 3p^2(^3P)3d$	$2P^{\circ} - ^2P$	$3/2 - 3/2$			
1238.82	N V	$1s^2 2s - 1s^2 2p$	$2S - ^2P^{\circ}$	$1/2 - 3/2$	N	S	(medida em 9 SNRs)
1240.09	Mg II				–	N	Cygnus Loop; N63A; N49
1239.93		$2p^6 3s - 2p^6 4p$	$2S - ^2P^{\circ}$	$1/2 - 3/2$			
1240.40		$2p^6 3s - 2p^6 4p$	$2S - ^2P^{\circ}$	$1/2 - 1/2$			
1242.80	N V	$1s^2 2s - 1s^2 2p$	$2S - ^2P^{\circ}$	$1/2 - 1/2$	N	S	(medida em 9 SNRs)
1263.05	Si III]				–	S	1E 0102.2-7219
1262.97		$3s3d - 3s7p$	$1D - ^3P^{\circ}$	$2 - 2$			
1263.13		$3s3d - 3s7p$	$1D - ^3P^{\circ}$	$2 - 1$			
1263.39	Si II				N	N	Cygnus Loop
1260.42		$3s^2 3p - 3s^2 3d$	$2P^{\circ} - ^2D$	$1/2 - 3/2$			
1264.72		$3s^2 3p - 3s^2 3d$	$2P^{\circ} - ^2D$	$3/2 - 5/2$			
1265.00		$3s^2 3p - 3s^2 3d$	$2P^{\circ} - ^2D$	$3/2 - 3/2$			
1302.17	O I	$2s^2 2p^4 - 2s^2 2p^3(^4S^{\circ})3s$	$3P - ^3S^{\circ}$	$2 - 1$	–	N	1E 0102.2-7219; N132D
1304.86	O I	$2s^2 2p^4 - 2s^2 2p^3(^4S^{\circ})3s$	$3P - ^3S^{\circ}$	$1 - 1$	–	N	1E 0102.2-7219; N132D
1306.03	O I	$2s^2 2p^4 - 2s^2 2p^3(^4S^{\circ})3s$	$3P - ^3S^{\circ}$	$0 - 1$	–	N	1E 0102.2-7219; N132D
1306.82	Si II				N	N	Cygnus Loop
1304.37		$3s^2 3p - 3s3p^2$	$2P^{\circ} - ^2S$	$1/2 - 1/2$			

Tabela 4.1: (continuação)

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
1309.27		$3s^2 3p - 3s 3p^2$	$2P^\circ - ^2S$	$3/2 - 1/2$			
1334.53	C II	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^\circ - ^2D$	$1/2 - 3/2$	N	S	(medida em 8 SNRs)
1335.68	C II						(medida em 8 SNRs)
1335.66		$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^\circ - ^2D$	$3/2 - 3/2$			
1335.71		$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^\circ - ^2D$	$3/2 - 5/2$			
1338.61	O IV]	$2s^2 p 2 - 2p^3$	$2P - ^2D^\circ$	$1/2 - 3/2$	-	S	N132D
1355.60	O I]	$2s^2 2p^4 - 2s^2 2p^3(^4S^\circ) 3s$	$3P - ^5S^\circ$	$2 - 2$	N	S	1E 0102.2-7219; N132D
1358.51	O I]	$2s^2 2p^4 - 2s^2 2p^3(^4S^\circ) 3s$	$3P - ^5S^\circ$	$1 - 2$	-	S	1E 0102.2-7219; N132D
1371.29	O V	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2p^2$	$1P^\circ - ^1D$	$1 - 2$	S	S	Cygnus Loop; Puppis A; N132D; Vela
1387.46	[S IV]	$3s^2 3p - 3s 3p^2$	$2P^\circ - ^4P$	$1/2 - 5/2$	S	S	Cygnus Loop
1393.76	Si IV	$2p^6 3s - 2p^6 3p$	$2S - ^2P^\circ$	$1/2 - 3/2$	N	S	(medida em 8 SNRs)
1397.23	O IV]	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^\circ - ^4P$	$1/2 - 3/2$	N	S	(medida em 8 SNRs)
1398.04	S IV]	$3s^2 3p - 3s 3p^2$	$2P^\circ - ^4P$	$1/2 - 3/2$	N	N	Cygnus Loop; N63A; N49
1399.78	O IV]	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^\circ - ^4P$	$1/2 - 1/2$	N	S	(medida em 8 SNRs)
1401.16	O IV]	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^\circ - ^4P$	$3/2 - 5/2$	N	S	(medida em 8 SNRs)
1401.32	O IV				N	N	Cygnus Loop
1401.15		$2s 2p(^1P^\circ) 3s - 2s 2p(^3P^\circ) 4p$	$2P - ^2S$	$1/2 - 1/2$			
1401.35		$2s 2p(^1P^\circ) 3s - 2s 2p(^3P^\circ) 4p$	$2P - ^2S$	$3/2 - 1/2$			

Tabela 4.1: (continuação)

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
1401.47		$2s^24f - 2s2p(^3P^o)4p$	$^2F^o - ^2D$	$3/2 - 3/2$			
1402.77	Si IV	$2p^63s - 2p^63p$	$^2S - ^2P^o$	$1/2 - 1/2$	N	S	(medida em 7 SNRs)
1404.81	O IV]	$2s^22p - 2s2p^2$	$^2P^o - ^4P$	$3/2 - 3/2$	N	S	(medida em 8 SNRs)
1405.20	O IV				N	N	Cygnus Loop
1405.02		$2s^24d - 2s2p(^1P^o)3d$	$^2D - ^2P^o$	$3/2 - 3/2$			
1405.11		$2s^24d - 2s2p(^1P^o)3d$	$^2D - ^2P^o$	$5/2 - 3/2$			
1405.46		$2s^24d - 2s2p(^1P^o)3d$	$^2D - ^2P^o$	$3/2 - 1/2$			
1406.01	S IV]	$3s^23p - 3s^3p^2$	$^2P^o - ^4P$	$3/2 - 5/2$	N	N	Cygnus Loop; N63A; N49
1407.39	O IV]	$2s^22p - 2s2p^2$	$^2P^o - ^4P$	$3/2 - 1/2$	N	S	(medida em 8 SNRs)
1483.32	[N IV]	$1s^22s^2 - 1s^22s2p$	$^1S - ^3P^o$	$0 - 2$	N	S	IE 0102.2-7219 ; Crab; Cygnus Loop; Puppis A; N132D; Vela
1486.50	N IV]	$1s^22s^2 - 1s^22s2p$	$^1S - ^3P^o$	$0 - 1$	N	S	(medida em 8 SNRs)
1526.72	Si II	$s^23p - 3s^24s$	$^2P^o - ^2S$	$1/2 - 1/2$	N	N	Cygnus Loop
1533.45	Si II	$s^23p - 3s^24s$	$^2P^o - ^2S$	$1/2 - 1/2$	N	S	Antlia; Cygnus Loop; Monogem Ring
1548.20	C IV	$1s^22s - 1s^22p$	$^2S - ^2P^o$	$1/2 - 3/2$	N	S	(medida em 12 SNRs)
1550.77	C IV	$1s^22s - 1s^22p$	$^2S - ^2P^o$	$1/2 - 1/2$	N	S	(medida em 12 SNRs)
1574.77	[Ne V]	$2s^22p^2 - 2s^22p^2$	$^3P - ^1S$	$1 - 0$	S	S	Cygnus Loop
1601.59	[Ne IV]				N	S	Cygnus Loop; Puppis A; Vela

Tabela 4.1: (continuação)

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
1601.50		$2s^2 2p^3 - 2s^2 2p^3$	$4S - 2P^o$	$3/2 - 3/2$			
1601.68		$2s^2 2p^3 - 2s^2 2p^3$	$4S - 2P^o$	$3/2 - 1/2$			
1640.40	He II	$2* - 3*$			S	S	(medida em 11 SNRs)
1660.81	O III]	$2s^2 2p^2 - 2s2p^3$	$3P - 5S^o$	$1 - 2$	N	S	(medida em 10 SNRs)
1661.24	O III]	$2s2p^2(^4P)3p - 2s2p^2(^4P)4s$	$5P^o - 5P$	$2 - 3$	-	N	Cygnus Loop
1664.12	O III]				-	S	N132D
1664.04		$2s2p^2(^4P)3p - 2s2p^2(^4P)4s$	$5P^o - 5P$	$3 - 3$			
1664.21		$2s2p^2(^4P)3p - 2s2p^2(^4P)4s$	$5P^o - 5P$	$1 - 2$			
1665.80	O III]	$2s2p^2(^4P)3p - 2s2p^2(^4P)4s$	$5P^o - 5P$	$2 - 2$	-	N	Vela
1666.15	O III]	$2s^2 2p^2 - 2s2p^3$	$3P - 5S^o$	$2 - 2$	N	S	(medida em 10 SNRs)
1667.72	O III]	$2s2p^2(^4P)3p - 2s2p^2(^4P)4s$	$5P^o - 5P$	$1 - 1$	-	S	N132D
1669.31	O III]	$2s2p^2(^4P)3p - 2s2p^2(^4P)4s$	$5P^o - 5P$	$2 - 1$	-	S	N132D
1670.79	Al II	$2p^6 3s^2 - 3s^3 p$	$1S - 1P^o$	$0 - 1$	N	S	Antlia; Cygnus Loop; N63A; N49
1729.24	N III]	$2s2p(^3P^o)3d - 2s2p(^3P^o)4f$	$4F^o - 4G$	$5/2 - 7/2$	S	S	Cygnus Loop
1746.82	N III]	$2s^2 2p - 2s2p^2$	$2P^o - 4P$	$1/2 - 3/2$	N	N	(medida em 8 SNRs)
1748.65	N III]	$2s^2 2p - 2s2p^2$	$2P^o - 4P$	$1/2 - 1/2$	N	N	(medida em 8 SNRs)
1749.67	N III]	$2s^2 2p - 2s2p^2$	$2P^o - 4P$	$3/2 - 5/2$	N	N	(medida em 8 SNRs)
1752.16	N III]	$2s^2 2p - 2s2p^2$	$2P^o - 4P$	$3/2 - 3/2$	N	N	(medida em 8 SNRs)

Tabela 4.1: (continuação)

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
1753.99	N III]	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^\circ - 4P$	$3/2 - 1/2$	N	N	(medida em 8 SNRs)
1807.31	S I	$3s^2 3p 4 - 3s^2 3p^3 ({}^4S^\circ) 4s$	$3P - 3S^\circ$	2-1	N	N	Cygnus Loop; N63A; N49
1808.00	Si II	$3s^2 3p - 3s 3p^2$	$2P^\circ - 2D$	$1/2 - 3/2$	N	N	Cygnus Loop; N63A; N49
1817.19	Si II				N	S	Cygnus Loop; N63A; N49
1816.93		$3s^2 3p - 3s 3p^2$	$2P^\circ - 2D$	$3/2 - 5/2$			
1817.45		$3s^2 3p - 3s 3p^2$	$2P^\circ - 2D$	$3/2 - 3/2$			
1820.34	S I	$3s^2 3p 4 - 3s^2 3p^3 ({}^4S^\circ) 4s$	$3P - 3S^\circ$	1-1	N	N	Cygnus Loop; N63A; N49
1822.00	Si II	sem referência			S	S	Cygnus Loop
1882.71	[Si III]	$3s^2 - 3s 3p$	$1S - 3P^\circ$	0-2	-	S	Cygnus Loop; N132D; Vela
1892.03	Si III]	$3s^2 - 3s 3p$	$1S - 3P^\circ$	0-1	S	S	IE 0102.2-7219; Cygnus Loop; N63A; N132D; N49; Vela
1906.68	[C III]	$1s^2 2s^2 - 1s^2 2s^2 p$	$1S - 3P^\circ$	0-2	N	S	IE 0102.2-7219; Cygnus Loop; N63A; N132D; N49; Vela
1908.73	C III]	$1s^2 2s^2 - 1s^2 2s^2 p$	$1S - 3P^\circ$	0-1	N	S	IE 0102.2-7219; Cygnus Loop; N63A; N132D; N49;
2296.87	C III	$1s^2 2s 2p - 1s^2 2p^2$	$1P^\circ - 1D$	1-2	-	S	N132D
2320.95	[O III]	$2s^2 2p 2 - 2s^2 2p^2$	$3P - 1S$	1-0	N	N	Cygnus Loop

Tabela 4.1: (continuação)

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
2323.50	C II]	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^\circ - ^4P$	$1/2 - 3/2$	N	N	1E 0102.2-7219; Cygnus Loop; N132D; N49; Vela
2324.21	Si II	$3s^2 4p - 3s^2 9s$	$2P - ^2S$	$3/2 - 1/2$	-	N	Cygnus Loop
2324.69	C II]	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^\circ - ^4P$	$1/2 - 1/2$	N	N	1E 0102.2-7219; Cygnus Loop; N132D; N49; Vela
2325.40	C II]	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^\circ - ^4P$	$3/2 - 5/2$	N	N	1E 0102.2-7219; Cygnus Loop; N132D; N49; Vela
2326.93	C II]	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^\circ - ^4P$	$3/2 - 3/2$	N	N	1E 0102.2-7219; Cygnus Loop; N132D; N49; Vela
2328.12	C II]	$2s^2 2p - 2s 2p^2$	$2P^\circ - ^4P$	$3/2 - 1/2$	N	N	1E 0102.2-7219; Cygnus Loop; N132D; N49; Vela
2331.40	[O III]	$2s^2 2p 2 - 2s^2 2p^2$	$^3P - ^1S$	$2 - 0$	N	N	Cygnus Loop
2332.51	Si II]				-	S	N132D
2328.52		$3s^2 3p - 3s 3p^2$	$2P^\circ - ^4P$	$1/2 - 3/2$			
2334.41		$3s^2 3p - 3s 3p^2$	$2P^\circ - ^4P$	$1/2 - 1/2$			
2334.61		$3s^2 3p - 3s 3p^2$	$2P^\circ - ^4P$	$3/2 - 3/2$			
2343.49	Fe II	$3d^6(^5D)4s - 3d^6(^5D)4p$	$a^6 D d - ^2^6 P^\circ$	$9/2 - 7/2$	-	S	N132D
2372.52	[O III]				-	N	N132D

Tabela 4.1: (continuação)

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
2372.22		$2s^2 2p(^2P^o) 3d - 2s^2 2p(^2P^o) 4p$	$^3F^o - ^3D$	3 - 3			
2372.83		$2s^2 2p(^2P^o) 3d - 2s^2 2p(^2P^o) 4p$	$^3F^o - ^3D$	2 - 2			
2378.89	[O III]	$2s^2 2p(^2P^o) 3d - 2s^2 2p(^2P^o) 4p$	$^3F^o - ^3D$	2 - 1	-	N	N132D
2383.10	[O III]				-	N	N132D
2382.29		$2s^2 2p(^2P^o) 3d - 2s^2 2p(^2P^o) 4p$	$^3F^o - ^3D$	4 - 3			
2383.92		$2s^2 2p(^2P^o) 3d - 2s^2 2p(^2P^o) 4p$	$^3F^o - ^3D$	3 - 2			
2421.77	[Ne IV]	$2s^2 2p^3 - 2s^2 2p^3$	$4S^o - ^2D^o$	3/2 - 3/2	N	N	1E 0102.2-7219; N132D; N49; Vela
2424.41	[Ne IV]	$2s^2 2p^3 - 2s^2 2p^3$	$4S^o - ^2D^o$	3/2 - 5/2	N	N	1E 0102.2-7219; N132D; N49; Vela
2431.00	H I	sem referência			-	N	N132D
2470.28	[O II]	$2s^2 2p^3 - 2s^2 2p^3$	$4S^o - ^2P^o$	3/2 - 1/2	S	S	1E 0102.2-7219; N132D; N49; Vela
2471.03	[O II]				N	N	Cygnus Loop; Vela
2470.97		$2s^2 2p^3 - 2s^2 2p^3$	$4S^o - ^2P^o$	3/2 - 1/2			
2471.09		$2s^2 2p^3 - 2s^2 2p^3$	$4S^o - ^2P^o$	3/2 - 3/2			
2599.40	Fe II	$3d^6(^5D) 4s - 3d^6(^5D) 4p$	$a^6D - z^6D^o$	9/2 - 9/2	N	S	1E 0102.2-7219; N132D
2613.82	Fe II	$3d^6(^5D) 4s - 3d^6(^5D) 4p$	$a^6D - z^6D^o$	3/2 - 1/2	-	S	N132D

Tabela 4.1: (continuação)

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
2620.08	Fe II				–	S	Cygnus Loop
2619.08		$3d^6(^3F2)4s - 3d^6(^3H)4p$	$b^4F - z^4G^\circ$	9/2 – 9/2			
2620.17		$3d^6(^3F2)4s - 3d^6(^3P2)4p$	$b^4F - z^2D^\circ$	5/2 – 5/2			
2620.41		$3d^6(^3F2)4s - 3d^6(^3H)4p$	$a^6D - z^6D^\circ$	3/2 – 3/2			
2620.70		$3d^6(^3F2)4s - 3d^6(^3H)4p$	$b^4F - z^4G^\circ$	7/2 – 7/2			
2626.35	[Ti III]?	$3p^63d^2 - 3p^63d4s$	$^3F - ^3D$	2 – 1	S	S	N49
2628.29	Fe II	$3d^6(^5D)4s - 3d^6(^5D)4p$	$a^6D - z^6D^\circ$	1/2 – 3/2	–	S	N132D
2670.48	[Al II]				S	S	Cygnus Loop
2669.16		$2p^63s^2 - 3s3p$	$^1S - ^3P^\circ$	0 – 1			
2671.81		$3p^2 - 3s14p$	$^1S - ^1P^\circ$	0 – 1			
2795.53	Mg II	$2p^63s - 2p^63p$	$^2S - ^2P^\circ$	1/2 – 3/2	N	S	1E 0102.2-7219; Cygnus Loop; N132D; N49
2802.70	Mg II	$2p^63s - 2p^63p$	$^2S - ^2P^\circ$	1/2 – 1/2	N	S	1E 0102.2-7219; Cygnus Loop; N132D; N49
2965.70	C I]	$2s^22p^2 - 2s2p^3$	$^3P - ^5P^\circ$	1 – 2	–	S	1E 0102.2-7219
2976.00	[Ne V]	$2s^22p^2 - 2s^22p^2$	$^1D - ^1S$	2 – 0	–	S	1E 0102.2-7219; N132D
3187.74	He I	$1s2s - 1s4p$	$^3S - ^3P^\circ$	1 – 1	N	S	N132D
3203.10	He II	$3* - 5*$			N	S	N132D



Tabela 4.1: (continuação)

$\lambda$	Íon	Configurações	Termos	$J_i - J_k$	Resolvida		SNRs
					FH96	Presente	
3342.50	[Ne III]	$2s^2 2p^4 - 2s^2 2p^4$	$^1D - ^1S$	2-0	N	N	1E 0102.2-7219
3345.82	[Ne V]	$2s^2 2p^2 - 2s^2 2p^2$	$^3P - ^1D$	1-2	N	N	1E 0102.2-7219
3425.88	[Ne V]	$2s^2 2p^2 - 2s^2 2p^2$	$^3P - ^1D$	2-2	S	S	1E 0102.2-7219; Cygnus Loop; N132D



## 5 Conclusões

Apresentou-se um catálogo de intensidades de linhas de emissão de remanescentes de supernovas. Este é, atualmente, o único catálogo que compreende intensidades de linhas de SNRs. Foram catalogados mais de 25 000 intensidades de linhas de emissão medidas em cerca de 300 remanescentes de supernovas. 472 linhas diferentes tiveram intensidades catalogadas. S VI 933.38 Å e [O III] 88.3564  $\mu m$  são as linhas com o menor e o maior comprimento de onda presentes no catálogo, respectivamente. Os 178 artigos catalogados constituem grande parte dos trabalhos disponíveis na literatura que contêm dados úteis ao catálogo. A catalogação de artigos com linhas de emissão no ultravioleta é considerada completa até o ano de 2010, enquanto a catalogação geral é assumida como completa até o ano de 1992 e parcialmente completa a partir desse ano.

A aplicabilidade do catálogo foi exemplificada, primeiramente, com a construção dos diagramas de diagnóstico para remanescentes de supernovas e regiões H II. Além dos quatro diagramas tradicionais com as razões [O III]  $\lambda 5007/H\beta$ , [N II]  $\lambda 6583/H\alpha$ , [O II]  $\lambda 3727/H\beta$ , [S II]  $(\lambda 6716+\lambda 6730)/H\alpha$  e [O I]  $\lambda 6300/H\alpha$ , outros quatro novos diagramas foram construídos com as razões [S III]  $(\lambda 9068+\lambda 9530)/H\alpha$ , [Ne III]  $\lambda 3868/H\gamma$  e [Ne III]  $\lambda 4363/H\beta$ . Todos eles mostraram-se eficientes para o seu propósito.

Verificou-se os valores das razões [O III]  $\lambda 5007/\lambda 4959$  e [N II]  $\lambda 6584/\lambda 6548$  através de ajustes lineares nos diagramas [O III]  $\lambda 5007/H\beta$  vs. [O III]  $\lambda 4959/H\beta$  e [N II]  $\lambda 6584/H\beta$  vs. [N II]  $\lambda 6548/H\beta$ , de ajustes gaussianos aos histogramas das razões [O III]  $\lambda 5007/\lambda 4959$  e [N II]  $\lambda 6584/\lambda 6548$  e também com o cálculo da média e da mediana dos valores das razões. Em geral, os valores obtidos concordaram com os apresentados na literatura.

O catálogo possibilitou ainda a construção de uma tabela contendo todas as 143 linhas do ultravioleta já medidas em remanescentes de supernovas até o ano de 2010. Um comparativo com o equivalente até o ano de 1996 mostrou como a utilização de telescópios espaciais com melhor tecnologia colaborou para o desenvolvimento da espectroscopia UV em remanescentes de supernovas. A descrição das linhas e a identificação dos objetos em que cada uma foi medida

faz da tabela uma referência para a identificação das linhas em novas espectroscopias UV de SNRs.

Terminada a etapa de catalogação, pretende-se disponibilizar o catálogo *on-line* e mantê-lo atualizado.

## Referências Bibliográficas

- Angerhofer, P. E.; Mould, J. R.; Wilson, A. S. The central radio source in the peculiar supernova remnant CTB 80. **Astrophysical Journal**, v. 236, p. 143–152, fev. 1980.
- Baldwin, J. A.; Phillips, M. M.; Terlevich, R. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 93, p. 5–19, fev. 1981.
- Benvenuti, P.; Dodorico, S.; Dopita, M. A. UV spectrum of supernova remnant reveals carbon depletion in the interstellar medium. **Nature**, v. 277, p. 99–102, jan. 1979.
- Benvenuti, P.; Dopita, M.; Dodorico, S. Far-ultraviolet spectrophotometry of supernova remnants - Observations and astrophysical interpretation. **Astrophysical Journal**, v. 238, p. 601–613, jun. 1980.
- Blair, W. P.; Davidsen, A. F. Resolved structure in M33 supernova remnants. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 105, p. 494–500, maio 1993.
- Blair, W. P.; Fesen, R. A. The optical counterpart to the luminous X-ray supernova remnant in NGC 6946. **Astrophysical Journal Letters**, v. 424, p. L103–L106, abr. 1994.
- Blair, W. P.; Fesen, R. A.; Becker, R. H. The electron temperature and optical emission structure of the central component of CTB 80. **Astrophysical Journal**, v. 96, p. 1011–1018, set. 1988.
- Blair, W. P. *et al.* An optical investigation of the peculiar supernova remnant CTB 80. **Astrophysical Journal**, v. 282, p. 161–163, jul. 1984.
- Blair, W. P. *et al.* Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Survey of Magellanic Cloud Supernova Remnants. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 165, p. 480–511, ago. 2006.
- Blair, W. P.; Kirshner, R. P. Optical spectrum of the unusual supernova remnant G109.1-1.0. **Nature**, v. 291, p. 132–133, maio 1981.
- Blair, W. P.; Kirshner, R. P. Improved optical spectrophotometry of supernova remnants in M33. **Astrophysical Journal**, v. 289, p. 582–597, fev. 1985.
- Blair, W. P.; Kirshner, R. P.; Chevalier, R. A. Supernova Remnants in M31. **Astrophysical Journal**, v. 247, p. 879–893, ago. 1981.
- Blair, W. P.; Kirshner, R. P.; Chevalier, R. A. Abundance gradients in M31 - Comparison of results from supernova remnants and H II regions. **Astrophysical Journal**, v. 254, p. 50–69, mar. 1982.

- Blair, W. P.; Kirshner, R. P.; Winkler JR., P. F. The extraordinary extragalactic supernova remnant in NGC 4449. II - X-ray and optical investigations. **Astrophysical Journal**, v. 272, p. 84–91, set. 1983.
- Blair, W. P.; Long, K. S. Identification of Supernova Remnants in the Sculptor Group Galaxies NGC 300 and NGC 7793. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 108, p. 261–277, jan. 1997.
- Blair, W. P.; Long, K. S.; Vancura, O. A detailed optical study of Kepler's supernova remnant. **Astrophysical Journal**, v. 366, p. 484–494, jan. 1991.
- Blair, W. P. *et al.* Discovery of a fast radiative shock wave in the Cygnus Loop using the Hopkins Ultraviolet Telescope. **Astrophysical Journal Letters**, v. 379, p. L33–L36, set. 1991.
- Blair, W. P. *et al.* Far-ultraviolet mapping of the Cygnus Loop with the Voyager 2 Ultraviolet Spectrometer. **Astrophysical Journal**, v. 374, p. 202–211, jun. 1991.
- Blair, W. P. *et al.* Far-ultraviolet observations of the Crab Nebula using the Hopkins Ultraviolet Telescope. **Astrophysical Journal**, v. 399, p. 611–620, nov. 1992.
- Blair, W. P. *et al.* Hubble Space Telescope Observations of Oxygen-rich Supernova Remnants in the Magellanic Clouds. II. Elemental Abundances in N132D and 1E 0102.2-7219. **Astrophysical Journal**, v. 537, p. 667–689, jul. 2000.
- Blair, W. P. *et al.* The ultraviolet spectrum of an oxygen-rich supernova remnant in the Small Magellanic Cloud. **Astrophysical Journal**, v. 338, p. 812–823, mar. 1989.
- Blair, W. P. *et al.* Ultraviolet observations of the peculiar supernova remnant in NGC 4449. **Astrophysical Journal**, v. 279, p. 708–713, abr. 1984.
- Blair, W. P.; Raymond, J. C.; Long, K. S. IUE spectra and optical imaging of the oxygen-rich supernova remnant N132D. **Astrophysical Journal**, v. 423, p. 334–343, mar. 1994.
- Blair, W. P. *et al.* A Far-Ultraviolet Spectrum of the Puppis A Supernova Remnant Using the Hopkins Ultraviolet Telescope. **Astrophysical Journal Letters**, v. 454, p. L35–L38, nov. 1995.
- Blair, W. P. *et al.* Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Observations of the Supernova Remnant N49 in the Large Magellanic Cloud. **Astrophysical Journal Letters**, v. 538, p. L61–L64, jul. 2000.
- Blair, W. P.; Sankrit, R.; Tulin, S. Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer and Hopkins Ultraviolet Telescope Observations of Radiative Shocks in the Cygnus Loop. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 140, p. 367–388, jun. 2002.
- Blair, W. P. *et al.* The discovery of optical emission from the SNR G126.2 + 1.6. **Astrophysical Journal**, v. 242, p. 592–595, dez. 1980.
- Blair, W. P.; Vancura, O.; Long, K. S. Voyager 2 UVS Spectra of the VELA Supernova Remnant. **Astrophysical Journal**, v. 110, p. 312–317, jul. 1995.
- Bocchino, F. *et al.* Multi-wavelength observations and modelling of shock-cloud interaction regions in the Vela Supernova Remnant. **Astronomy and Astrophysics**, v. 359, p. 316–336, jul. 2000.

- Boumis, P.; Mavromatakis, F.; Paleologou, E. V. First optical light from the supernova remnant G 17.4-2.3. **Astronomy and Astrophysics**, v. 385, p. 1042–1048, abr. 2002.
- Braun, R.; Walterbos, R. A. M. An atlas of supernova remnant candidates in Messier 31. **Astronomy and Astrophysics Supplement**, v. 98, p. 327–364, abr. 1993.
- Brinkmann, W. *et al.* Physical Processes in Hot Cosmic Plasma. **Space science reviews**, 1993.
- Carruthers, G. R.; Page, T. Far-ultraviolet brightness of nebulae in Cygnus. **Astrophysical Journal**, v. 205, p. 397–404, abr. 1976.
- Chevalier, R. A.; Kirshner, R. P. Abundance inhomogeneities in the Cassiopeia A supernova remnant. **Astrophysical Journal**, v. 233, p. 154–162, out. 1979.
- Chu, Y.; Kennicutt JR., R. C. Kinematic detection of supernova remnants in giant H II regions. **Astrophysical Journal**, v. 311, p. 85–97, dez. 1986.
- Copetti, M. V. F.; Writzl, B. C. Study of electron density in planetary nebulae. A comparison of different density indicators. **Astronomy and Astrophysics**, v. 382, p. 282–290, jan. 2002.
- Danforth, C. W.; Blair, W. P.; Raymond, J. C. A Detailed Analysis of a Cygnus Loop Shock-Cloud Interaction. **Astrophysical Journal**, v. 122, p. 938–953, ago. 2001.
- Danziger, I. J.; Dennefeld, M. Spectroscopy of supernova remnants. **Astronomy and Astrophysics**, v. 36, p. 149–152, nov. 1974.
- Danziger, I. J.; Leibowitz, E. M. Optical spectrophotometric study of supernova remnants in the Large Magellanic Cloud. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 216, p. 365–384, set. 1985.
- Danziger, I. J. *et al.* Spectra of supernova remnants in M33. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 186, p. 555–562, fev. 1979.
- Danziger, I. J.; Wood, R.; Clark, D. H. Ultraviolet spectroscopy of the VELA supernova remnant. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 192, p. 83P–86P, set. 1980.
- Davidson, K. Some remarkable spectra in the outskirts of the Crab Nebula. **Astrophysical Journal**, v. 220, p. 177–185, fev. 1978.
- Davidson, K. Emission-line spectra of condensations in the Crab Nebula. **Astrophysical Journal**, v. 228, p. 179–190, fev. 1979.
- Davidson, K. Spectrophotometry of the Crab Nebula as a whole. **Astrophysical Journal**, v. 94, p. 964–971, out. 1987.
- Davidson, K. *et al.* The ultraviolet spectrum of the Crab Nebula. **Astrophysical Journal**, v. 253, p. 696–706, fev. 1982.
- Dennefeld, M. The Spectrum of the Supernova Remnant MSH:15-5/6 - G326.3-1.8. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 92, p. 603–605, out. 1980.
- Dennefeld, M. A spectrophotometric study of Kepler supernova remnant. **Astronomy and Astrophysics**, v. 112, p. 215–222, ago. 1982.

Dennefeld, M.; Andrillat, Y. Near-infrared spectroscopy of northern supernova-remnants. **Astronomy and Astrophysics**, v. 103, p. 44–49, nov. 1981.

Dennefeld, M.; Pequignot, D. The Crab Nebula. II - Near-infrared spectrophotometry of a bright filament. **Astronomy and Astrophysics**, v. 127, p. 42–48, out. 1983.

Dimitrijević, M. S. *et al.* The flux ratio of the [OIII]  $\lambda\lambda 5007, 4959$  lines in AGN: comparison with theoretical calculations. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 374, p. 1181–1184, jan. 2007.

Dodorico, S. *et al.* Astrophysical interpretation of the 1200–7300 Å emission line spectrum of a filament in the Cygnus Loop supernova remnant. **Astronomy and Astrophysics**, v. 92, p. 22–25, dez. 1980.

D’Odorico, S.; Sabbadin, F. A spectroscopic survey of supernova remnant candidates in the  $\lambda\lambda 6000\text{--}6800$  Å spectral region: The observations. **Astronomy and Astrophysics Supplement**, v. 28, p. 439–452, jun. 1977.

Dopita, M. A.; Dodorico, S.; Benvenuti, P. Optical emission from shocks. VI - Abundance gradient in M33 from supernova remnants. **Astrophysical Journal**, v. 236, p. 628–644, mar. 1980.

Dopita, M. A. *et al.* N70 - A mass-loss bubble within a massive collapsing H I cloud. **Astrophysical Journal**, v. 250, p. 103–115, nov. 1981.

Dopita, M. A.; Mathewson, D. S.; Ford, V. L. Optical emission from shock waves. III. Abundances in supernova remnants. **Astrophysical Journal**, v. 214, p. 179–188, maio 1977.

Dopita, M. A.; Tuohy, I. R. Spectrophotometry of young supernova remnants. **Astrophysical Journal**, v. 282, p. 135–141, jul. 1984.

Fesen, R. A. Discovery of large radial velocities in the supernova remnant 3C 58. **Astrophysical Journal Letters**, v. 270, p. L53–L57, jul. 1983.

Fesen, R. A. The nature of the filaments northeast of the supernova remnant IC 443. **Astrophysical Journal**, v. 281, p. 658–664, jun. 1984.

Fesen, R. A.; Becker, R. H. New clues to the Cassiopeia A supernova progenitor. **Astrophysical Journal**, v. 371, p. 621–625, abr. 1991.

Fesen, R. A.; Becker, R. H.; Goodrich, R. W. Highest velocity ejecta of Cassiopeia A. **Astrophysical Journal Letters**, v. 329, p. L89–L92, jun. 1988.

Fesen, R. A.; Blair, W. P.; Kirshner, R. P. Spectrophotometry of the Cygnus Loop. **Astrophysical Journal**, v. 262, p. 171–188, nov. 1982.

Fesen, R. A.; Blair, W. P.; Kirshner, R. P. Optical emission-line properties of evolved galactic supernova remnants. **Astrophysical Journal**, v. 292, p. 29–48, maio 1985.

Fesen, R. A. *et al.* The optical emission from the supernova remnant CTA 1. **Astrophysical Journal**, v. 247, p. 148–151, jul. 1981.



- Fesen, R. A. *et al.* Optical and Radio Emission from the Galactic Supernova Remnant HB 3(G132.6 +1.5). **Astrophysical Journal**, v. 110, p. 2876–2884, dez. 1995.
- Fesen, R. A.; Gunderson, K. S. Optical Spectroscopy and Imaging of the Northeast Jet in the Cassiopeia A Supernova Remnant. **Astrophysical Journal**, v. 470, p. 967–980, out. 1996.
- Fesen, R. A.; Hurford, A. P. Optical Images and Spectra of the Galactic Supernova Remnant G109.1-1.0. **Astrophysical Journal**, v. 110, p. 747–752, ago. 1995.
- Fesen, R. A.; Hurford, A. P. A Catalog of Ultraviolet, Optical, and Near-Infrared Emission Lines Identified in Supernova Remnants. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 106, p. 563–578, out. 1996.
- Fesen, R. A.; Itoh, H. A two-dimensional spectrum of a nonradiative shock filament in the Cygnus Loop. **Astrophysical Journal**, v. 295, p. 43–50, ago. 1985.
- Fesen, R. A.; Kirshner, R. P. Spectrophotometry of the supernova remnant IC 443. **Astrophysical Journal**, v. 242, p. 1023–1040, dez. 1980.
- Fesen, R. A.; Kirshner, R. P. The Crab Nebula. I - Spectrophotometry of the filaments. **Astrophysical Journal**, v. 258, p. 1–10, jul. 1982.
- Fesen, R. A.; Kirshner, R. P.; Chevalier, R. A. Spectroscopy of the Crab nebula. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 90, p. 32–35, fev. 1978.
- France, K. *et al.* Cosmic Origins Spectrograph Observations of the Chemical Composition of SNR LMC N132D. **Astrophysical Journal Letters**, v. 707, p. L27–L31, dez. 2009.
- Galavis, M. E.; Mendoza, C.; Zeippen, C. J. Atomic data from the IRON Project. XXII. Radiative rates for forbidden transitions within the ground configuration of ions in the carbon and oxygen isoelectronic sequences. **Astronomy and Astrophysics Supplement**, v. 123, p. 159–171, maio 1997.
- Gallagher III, J. S.; Hunter, D. A.; Mould, J. A probable supernova remnant in the dwarf elliptical galaxy NGC 185. **Astrophysical Journal Letters**, v. 281, p. L63–L65, jun. 1984.
- Gerardy, C. L.; Fesen, R. A. Discovery of extensive optical emission associated with the X-ray bright, radio faint Galactic SNR G156.2+5.7. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 376, p. 929–938, abr. 2007.
- Ghavamian, P. *et al.* The Detection of Far-Ultraviolet Line Emission from Balmer-Dominated Supernova Remnants in the Large Magellanic Cloud. **Astrophysical Journal**, v. 664, p. 304–321, jul. 2007.
- Gilmozzi, R. *et al.* Velocity and spectrum of the supernova remnant 30 DOR B. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 202, p. 927–934, mar. 1983.
- Goodrich, R. W. *et al.* SN 1961V - an extragalactic ETA Carinae analog. **Astrophysical Journal**, v. 342, p. 908–916, jul. 1989.
- Gordon, S. M. *et al.* The Discovery of a Supernova Remnant Embedded in a Giant H II Region of M33. **Astrophysical Journal**, v. 418, p. 743–748, dez. 1993.

- Gordon, S. M. *et al.* A New Optical Sample of Supernova Remnants in M33. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 117, p. 89–133, jul. 1998.
- Goss, W. M. *et al.* Optical identification and spectrum of the supernova remnant G292.0+1.8. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 188, p. 357–363, ago. 1979.
- Gottesman, S. T. *et al.* First-Epoch Radio Observations of Supernova 1970g. **Astrophysical Journal**, v. 174, p. 383–388, jun. 1972.
- Graham, J. R.; Wright, G. S.; Longmore, A. J. Infrared spectroscopy and imaging of the Crab Nebula. **Astrophysical Journal**, v. 352, p. 172–183, mar. 1990.
- Green, D. A. A revised Galactic supernova remnant catalogue. *Bulletin of the Astronomical Society of India*, v. 37, p. 45–61, mar. 2009.
- Greenhouse, M. A. *et al.* Near-infrared forbidden Fe II emission of M82 supernova remnants - Implications for tracing the supernova content of galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 383, p. 164–173, dez. 1991.
- Henry, R. B. C.; Fesen, R. A. Forbidden NI II emission in gaseous nebulae and Seyfert galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 329, p. 693–701, jun. 1988.
- Henry, R. B. C.; MacAlpine, G. M.; Kirshner, R. P. Near-infrared spectrophotometry of Crab Nebula filaments. **Astrophysical Journal**, v. 278, p. 619–629, mar. 1984.
- Hester, J. J.; Kulkarni, S. R. Optical imagery and spectrophotometry of CTB 80. **Astrophysical Journal**, v. 340, p. 362–378, maio 1989.
- Hester, J. J.; Parker, R. A. R.; Dufour, R. J. Digital analysis of narrow-band imagery of the Cygnus Loop. **Astrophysical Journal**, v. 273, p. 219–242, out. 1983.
- Hester, J. J.; Raymond, J. C.; Blair, W. P. The Balmer-dominated northeast limb of the Cygnus loop supernova remnant. **Astrophysical Journal**, v. 420, p. 721–745, jan. 1994.
- Hollis, J. M. *et al.* Ultraviolet and optical spectroscopy of the R Aquarii symmetrical jet. **Astrophysical Journal**, v. 377, p. 227–234, ago. 1991.
- Hua, C. T.; Llebaria, A. Optical Spectrum of the Filamentary HII Region North of the Carina Complex. **Astronomy and Astrophysics**, v. 94, p. 12–15, jan. 1981.
- Hudgins, D.; Herter, T.; Joyce, R. J. The Ni/Fe ratio in the Crab Nebula. **Astrophysical Journal Letters**, v. 354, p. L57–L60, maio 1990.
- Hurford, A. P.; Fesen, R. A. Reddening Measurements and Physical Conditions for Cassiopeia A from Optical and Near-Infrared Spectra. **Astrophysical Journal**, v. 469, p. 246–254, set. 1996.
- Immler, S.; Kuntz, K. D. Discovery of X-Ray Emission from Supernova 1970G with Chandra: Filling the Void between Supernovae and Supernova Remnants. **Astrophysical Journal Letters**, v. 632, p. L99–L102, out. 2005.
- Iye, M.; Ulrich, M.; Peimbert, M. High resolution spectrum of the starburst galaxy Tololo 1924-416 (=ESO 338-IG04). **Astronomy and Astrophysics**, v. 186, p. 84–94, nov. 1987.

- Jaschek, C. Astronomical Catalogues - Definition Elements and Afterlife. **ROYAL ASTRON. SOC. QUART. JRN**, v. 25, p. 259–266, set. 1984.
- Kaler, J. B. A catalog of relative emission line intensities observed in planetary and diffuse nebulae. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 31, p. 517–688, ago. 1976.
- Kaler, J. B.; Shaw, R. A.; Browning, L. An Electronic Emission-Line Catalog for Planetary Nebulae. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 109, p. 289–291, mar. 1997.
- Kauffmann, G. *et al.* The host galaxies of active galactic nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 346, p. 1055–1077, dez. 2003.
- Kewley, L. J. *et al.* Theoretical Modeling of Starburst Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 556, p. 121–140, jul. 2001.
- Kim, I. *et al.* Far-Ultraviolet Observations of the Monogem Ring. **Astrophysical Journal Letters**, v. 665, p. L139–L142, ago. 2007.
- Kim, I. *et al.* Far-ultraviolet Emission-line Morphologies of the Supernova Remnant G65.3+5.7. **Astrophysical Journal**, v. 722, p. 388–394, out. 2010.
- Kirshner, R. P. Spectrophotometry of the Crab Nebula. **Astrophysical Journal**, v. 194, p. 323–328, dez. 1974.
- Kirshner, R. P.; Blair, W. P. The extraordinary extragalactic supernova remnant in NGC 4449. **Astrophysical Journal**, v. 236, p. 135–142, fev. 1980.
- Kirshner, R. P.; Chevalier, R. A. Spectrophotometry of W50 the Supernova Remnant around SS433. **Astrophysical Journal Letters**, v. 242, p. L77–L81, dez. 1980.
- Kirshner, R. P. *et al.* The penultimate supernova in the Large Magellanic Cloud - SNR 0540-69.3. **Astrophysical Journal**, v. 342, p. 260–271, jul. 1989.
- Kisielius, R. *et al.* Electron-impact excitation of OII fine-structure levels. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 397, p. 903–912, ago. 2009.
- Korreck, K. E. *et al.* Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Observation of the Nonradiative Collisionless Shock in the Remnant of SN 1006. **Astrophysical Journal**, v. 615, p. 280–285, nov. 2004.
- Lasker, B. M. Spectra and internal motions of supernova remnants and ring nebulae in the Magellanic Clouds. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 93, p. 422–427, ago. 1981.
- Lasker, B. M. Spectroscopy of the remnant of supernova 1006. **Astrophysical Journal**, v. 244, p. 517–519, mar. 1981.
- Leibowitz, E. M.; Danziger, I. J. Spectrophotometry in the galactic supernova remnants RCW 86, 103 and Kepler. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 204, p. 273–287, jul. 1983.

- Leibundgut, B. *et al.* Spectra of two very old supernovae - SN 1986J and SN 1980K. **Astrophysical Journal**, v. 372, p. 531–544, maio 1991.
- Leisy, P.; Dennefeld, M. Planetary nebulae in the Magellanic Clouds. I. Carbon abundances and Type I PNe. **Astronomy and Astrophysics Supplement**, v. 116, p. 95–116, mar. 1996.
- Levenson, N. A. *et al.* On the Propinquity of Shock-Excited and Photoionized Plasma: The Supernova Remnant and the H II Region of N63A. **Astrophysical Journal**, v. 110, p. 739–746, ago. 1995.
- Long, K. S. *et al.* An atlas of confirmed and candidate supernova remnants in M33. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 72, p. 61–73, jan. 1990.
- Long, K. S. *et al.* W28 and 3C 400.2 - Two shell-like radio supernova remnants with centrally peaked X-ray morphologies. **Astrophysical Journal**, v. 373, p. 567–578, jun. 1991.
- Long, K. S. *et al.* Spectroscopy of a Balmer-dominated filament in the Cygnus Loop with the Hopkins Ultraviolet Telescope. **Astrophysical Journal**, v. 400, p. 214–221, nov. 1992.
- Long, K. S.; Winkler, P. F.; Blair, W. P. A rapid decline in the optical emission from SN 1957D in M83. **Astrophysical Journal**, v. 395, p. 632–636, ago. 1992.
- Lozinskaya, T. A. *et al.* Resolving the Source of X-Rays in the Local Group Dwarf IC 1613: X-Ray, Radio, and Optical Observations of a Luminous Supernova Remnant. **Astrophysical Journal**, v. 116, p. 2328–2340, nov. 1998.
- MacAlpine, G. M. *et al.* Extraordinary line-emitting knots in the Crab Nebula. **Astrophysical Journal Letters**, v. 432, p. L131–L134, set. 1994.
- MacAlpine, G. M. *et al.* The geometry, composition, and mass of the Crab Nebula. **Astrophysical Journal**, v. 342, p. 364–378, jul. 1989.
- Mathewson, D. S.; Clarke, J. N. Supernova remnants in the Large Magellanic Cloud. **Astrophysical Journal**, v. 180, p. 725–738, mar. 1973.
- Matonick, D. M.; Fesen, R. A. Optically Identified Supernova Remnants in the Nearby Spiral Galaxies: NGC 5204, NGC 5585, NGC 6946, M81, and M101. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 112, p. 49–107, set. 1997.
- Matonick, D. M. *et al.* An Optical Search for Supernova Remnants in NGC 2403. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 113, p. 333–352, dez. 1997.
- Matsui, Y.; Long, K. S.; Tuohy, I. R. X-ray imaging observation of the supernova remnant PKS 1209-52 and its central compact X-ray source. **Astrophysical Journal**, v. 329, p. 838–848, jun. 1988.
- Mavromatakis, F. Deep optical observations of the supernova remnant G 78.2+2.1. **Astronomy and Astrophysics**, v. 408, p. 237–243, set. 2003.
- Mavromatakis, F. Optical line emission from the supernova remnant G 73.9+0.9. **Astronomy and Astrophysics**, v. 398, p. 153–158, jan. 2003.

- Mavromatakis, F. *et al.* Multi-wavelength study of the {G 82.2+5.3} supernova remnant. **Astronomy and Astrophysics**, v. 415, p. 1051–1063, mar. 2004.
- Mavromatakis, F.; Boumis, P.; Goudis, C. D. The faint supernova remnant G 34.7-0.4 (W44). **Astronomy and Astrophysics**, v. 405, p. 591–596, jul. 2003.
- Mavromatakis, F.; Boumis, P.; Paleologou, E. V. Imaging and spectroscopy of the faint remnant G 114.3+0.3. **Astronomy and Astrophysics**, v. 383, p. 1011–1017, mar. 2002.
- Mavromatakis, F.; Boumis, P.; Paleologou, E. V. Optical observations of the supernova remnant G 69.4+1.2. **Astronomy and Astrophysics**, v. 387, p. 635–641, maio 2002.
- Mavromatakis, F. *et al.* Deep optical observations of G 65.3+5.7. **Astronomy and Astrophysics**, v. 388, p. 355–362, jun. 2002.
- Mavromatakis, F. *et al.* The faint supernova remnant G 116.5+1.1 and the detection of a new candidate remnant. **Astronomy and Astrophysics**, v. 435, p. 141–149, maio 2005.
- Mavromatakis, F. *et al.* Optical CCD imaging of the supernova remnant CTA 1. **Astronomy and Astrophysics**, v. 353, p. 371–379, jan. 2000.
- Mavromatakis, F. *et al.* The supernova remnants G 67.7+1.8, G 31.5-0.6 and G 49.2-0.7. **Astronomy and Astrophysics**, v. 370, p. 265–272, abr. 2001.
- Mavromatakis, F.; Strom, R. G. A new candidate supernova remnant in Cygnus. **Astronomy and Astrophysics**, v. 382, p. 291–300, jan. 2002.
- Mavromatakis, F.; Xilouris, E.; Boumis, P. The supernova remnant G 6.4-0.1 and its environment. **Astronomy and Astrophysics**, v. 426, p. 567–575, nov. 2004.
- Mendoza, C. Recent advances in atomic calculations and experiments of interest in the study of planetary nebulae. In: D. R. Flower (Ed.). *Planetary Nebulae*. [S.l.: s.n.], 1983. (IAU Symposium, v. 103), p. 143–172.
- Miller, J. S. Reddening of the Crab Nebula from Observations of [s II] Lines. **Astrophysical Journal Letters**, v. 180, p. L83–L87, mar. 1973.
- Miller, J. S. Photoelectric Spectrophotometry of the Cygnus Loop. **Astrophysical Journal**, v. 189, p. 239–248, abr. 1974.
- Miller, J. S. Spectrophotometry of filaments in the Crab Nebula. **Astrophysical Journal**, v. 220, p. 490–493, mar. 1978.
- Milne, D. K. The optical spectrum of Vela X. *Australian Journal of Physics*, v. 21, p. 501–509, ago. 1968.
- Nishikida, K. *et al.* Far-Ultraviolet Spectral Images of the Vela Supernova Remnant. **Astrophysical Journal Letters**, v. 644, p. L171–L174, jun. 2006.
- Oliva, E.; Moorwood, A. F. M.; Danziger, I. J. Infrared spectroscopy of supernova remnants. **Astronomy and Astrophysics**, v. 214, p. 307–320, abr. 1989.

Oliva, E.; Moorwood, A. F. M.; Danziger, I. J. Infrared spectroscopy of supernova remnants. II - A detailed study of RCW 103. **Astronomy and Astrophysics**, v. 240, p. 453–466, dez. 1990.

Osterbrock, D. E. Electron Densities in the Filaments of the Crab Nebula. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 69, p. 227–230, jun. 1957.

Osterbrock, D. E. Electron Densities in Filamentary Nebulae. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 70, p. 180–184, abr. 1958.

Osterbrock, D. E.; Dufour, R. J. The Emission-Line Spectrum of N49 . . **Astrophysical Journal**, v. 185, p. 441–452, out. 1973.

Osterbrock, D. E.; Ferland, G. J. *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*. [S.l.: s.n.], 2006.

Parker, R. A. R. Physical Conditions in the Cygnus Loop and Some Other Possible Supernova Remnants. **Astrophysical Journal**, v. 139, p. 493–513, fev. 1964.

Parker, R. A. R. A Model for the "filaments" in the Cygnus Loop. **Astrophysical Journal**, v. 149, p. 363–372, ago. 1967.

Payne, J. L.; White, G. L.; Filipović, M. D. Long-slit optical spectroscopy of Large Magellanic Cloud radio supernova remnants. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 383, p. 1175–1194, 2008.

Peimbert, M.; Bohigas, J.; Torres-Peimbert, S. On the supernova remnant S8 and other gaseous nebulae in IC 1613. **Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica**, v. 16, p. 45–54, jun. 1988.

Peimbert, M.; Rodriguez, L. F.; Torres-Peimbert, S. Ionization Structure of Gaseous Nebulae: Sulphur, Nitrogen and Helium. **Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica**, v. 1, p. 129–142, nov. 1974.

Peimbert, M.; van den Bergh, S. Optical Studies of Cassiopeia a.IV. Physical Conditions in the Gaseous Remnant. **Astrophysical Journal**, v. 167, p. 223–234, ago. 1971.

Pradhan, A. K. *et al.* [OII] line ratios. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 366, p. L6–L9, fev. 2006.

Rauber, A. B. *Catálogo de Dados Espectroscópicos de Regiões HII e Estudos Aplicados*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal De Santa Maria, Brasil, 2009.

Raymond, J. C. *et al.* Ultraviolet emission of the VELA supernova remnant and the Cygnus Loop. **Astrophysical Journal**, v. 246, p. 100–109, maio 1981.

Raymond, J. C. *et al.* The structure and emission spectrum of a nonradiative shock wave in the Cygnus Loop. **Astrophysical Journal**, v. 275, p. 636–644, dez. 1983.

Raymond, J. C.; Blair, W. P.; Long, K. S. Detection of Ultraviolet Emission Lines in SN 1006 with the Hopkins Ultraviolet Telescope. **Astrophysical Journal Letters**, v. 454, p. L31–L34, nov. 1995.

- Raymond, J. C. *et al.* The Ultraviolet Spectrum of a Face-on Shock Wave in the VELA Supernova Remnant. **Astrophysical Journal**, v. 482, p. 881–890, jun. 1997.
- Raymond, J. C. *et al.* Far-Ultraviolet Spectra of a Nonradiative Shock Wave in the Cygnus Loop. **Astrophysical Journal**, v. 584, p. 770–781, fev. 2003.
- Raymond, J. C. *et al.* Ultraviolet observations of the Cygnus Loop. **Astrophysical Journal**, v. 238, p. 881–885, jun. 1980.
- Raymond, J. C. *et al.* Spatial and spectral interpretation of a bright filament in the Cygnus Loop. **Astrophysical Journal**, v. 324, p. 869–892, jan. 1988.
- Raymond, J. C.; Wallerstein, G.; Balick, B. Evidence for a thermally unstable shock wave in the VELA supernova remnant. **Astrophysical Journal**, v. 383, p. 226–232, dez. 1991.
- Rosa, M. A Possible Nonlinearity in IDS / Image Dissector Scanner / Data. *The Messenger*, v. 39, p. 15–16, mar. 1985.
- Ruiz, M. T. Spectroscopy of RCW 86 - A young supernova remnant. **Astrophysical Journal**, v. 243, p. 814–816, fev. 1981.
- Ruiz, M. T. PL 1547.3-5612 - A pure nitrogen ring nebula. **Astrophysical Journal Letters**, v. 268, p. L103–L109, maio 1983.
- Ruiz, M. T. Spectrophotometry of the optical emission from RCW103 and Milne 23. **Astrophysical Journal**, v. 88, p. 1210–1221, ago. 1983.
- Rupen, M. P. *et al.* Observations of SN 1986J in NGC 891. **Astrophysical Journal**, v. 94, p. 61–70, jul. 1987.
- Russell, S. C.; Dopita, M. A. Abundances of the heavy elements in the Magellanic Clouds. II - H II regions and supernova remnants. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 74, p. 93–128, set. 1990.
- Sabbadin, F. Spectroscopic observations of filamentary nebulae in the Cygnus X region. **Astronomy and Astrophysics**, v. 51, p. 159–162, ago. 1976.
- Sabbadin, F. Supernova remnants in M 33. **Astronomy and Astrophysics**, v. 80, p. 212–217, dez. 1979.
- Sabbadin, F. A catalogue of expansion velocities in planetary nebulae. **Astronomy and Astrophysics Supplement**, v. 58, p. 273–285, nov. 1984.
- Sankrit, R.; Blair, W. P. FUSE Observations of the Cygnus Loop: O VI Emission from a Non-radiative Shock. **Astrophysical Journal**, v. 565, p. 297–303, jan. 2002.
- Sankrit, R. *et al.* Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Spectroscopy of the XA Region in the Cygnus Loop Supernova Remnant. **Astrophysical Journal**, v. 133, p. 1383–1392, abr. 2007.
- Sankrit, R.; Blair, W. P.; Raymond, J. C. Optical and Far-Ultraviolet Spectroscopy of Knot D in the Vela Supernova Remnant. **Astrophysical Journal**, v. 589, p. 242–252, maio 2003.

Sankrit, R.; Blair, W. P.; Raymond, J. C. FUSE Spectroscopy of the Large Magellanic Cloud Supernova Remnant N49. **Astrophysical Journal**, v. 128, p. 1615–1622, out. 2004.

Sankrit, R. *et al.* Hubble Space Telescope STIS Observations of the Cygnus Loop: Spatial Structure of a Nonradiative Shock. **Astrophysical Journal**, v. 120, p. 1925–1932, out. 2000.

Sankrit, R. *et al.* Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Observations of an X-Ray Bright Region in the Vela Supernova Remnant. **Astrophysical Journal**, v. 549, p. 416–424, mar. 2001.

Sasaki, M. *et al.* Far-Ultraviolet and X-Ray Observations of the Reverse Shock in the Small Magellanic Cloud Supernova Remnant 1E 0102.2-7219. **Astrophysical Journal**, v. 642, p. 260–269, maio 2006.

Schweizer, F.; Lasker, B. M. On the peculiar spectrum of the optical remnant of supernova A.D. 1006. **Astrophysical Journal**, v. 226, p. 167–171, nov. 1978.

Seon, K. *et al.* Far-Ultraviolet Spectral Images of the Cygnus Loop. **Astrophysical Journal Letters**, v. 644, p. L175–L179, jun. 2006.

Seward, F. D. *et al.* MSH 15-52 - A supernova remnant containing two compact X-ray sources. **Astrophysical Journal**, v. 267, p. 698–710, abr. 1983.

Shemansky, D. E.; Sandel, B. R.; Broadfoot, A. L. Voyager spectral observations of the Cygnus Loop nebula, 600–1700 Å. **Astrophysical Journal**, v. 231, p. 35–47, jul. 1979.

Shinn, J. *et al.* Far-Ultraviolet Cooling Features of the Antlia Supernova Remnant. **Astrophysical Journal**, v. 670, p. 1132–1136, dez. 2007.

Shuder, J. M.; Hatfield, B. F.; Cohen, R. D. The optical spectrum of W50. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 92, p. 259–261, jun. 1980.

Smartt, S. J. Progenitors of Core-Collapse Supernovae. **Annual review of astronomy and astrophysics**, v. 47, p. 63–106, set. 2009.

Smith, R. C. *et al.* Optical emission-line properties of M33 supernova remnants. **Astrophysical Journal**, v. 407, p. 564–578, abr. 1993.

Stasińska, G. *et al.* Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - III. How to distinguish AGN hosts. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 371, p. 972–982, set. 2006.

Stockdale, C. J. *et al.* The Continuing Radio Evolution of SN 1970G. **Astrophysical Journal Letters**, v. 559, p. L139–L142, out. 2001.

Storey, P. J.; Zeippen, C. J. Theoretical values for the [Oiii] 5007/4959 line-intensity ratio and homologous cases. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 312, p. 813–816, mar. 2000.

Stupar, M.; Parker, Q. A.; Filipović, M. D. G315.1+2.7: a new Galactic supernova remnant from the AAO/UKST H $\alpha$  survey. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 374, p. 1441–1448, fev. 2007.



- Teske, R. G. Forbidden coronal iron emission in the Cygnus Loop. **Astrophysical Journal**, v. 365, p. 256–260, dez. 1990.
- Teske, R. G. Forbidden iron emission on the north rim of IC 443. **Astrophysical Journal**, v. 383, p. 233–242, dez. 1991.
- Trimble, V. Ionization and Excitation in the Crab Nebula. **Astrophysical Journal**, v. 75, p. 926–932, out. 1970.
- Urošević, D.; Pannuti, T. G.; Leahy, D. An Analysis of the Broadband (22–3900 MHz) Radio Spectrum of HB 3 (G132.7+1.3): The Detection of Thermal Radio Emission from an Evolved Supernova Remnant? **Astrophysical Journal Letters**, v. 655, p. L41–L44, jan. 2007.
- Vancura, O. *et al.* A multiwavelength study of the supernova remnant N49 in the Large Magellanic Cloud. **Astrophysical Journal**, v. 394, p. 158–173, jul. 1992.
- Vancura, O. *et al.* Far-ultraviolet observations of the supernova remnant N49 using the Hopkins Ultraviolet Telescope. **Astrophysical Journal**, v. 401, p. 220–225, dez. 1992.
- Vancura, O. *et al.* A Far-Ultraviolet Study of the Cygnus Loop Using the Voyager Ultraviolet Spectrometers. **Astrophysical Journal**, v. 417, p. 663–670, nov. 1993.
- Veilleux, S.; Osterbrock, D. E. Spectral classification of emission-line galaxies. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 63, p. 295–310, fev. 1987.
- Wallerstein, G.; Balick, B. Long Slit Observations of Emitting Gas in the VELA Supernova Remnant. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 245, p. 701–712, ago. 1990.
- Westerlund, B. E.; Mathewson, D. S. Supernova remnants in the large Magellanic Cloud. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 131, p. 371–381, 1966.
- Whitehead, M. J.; Meaburn, J.; Clayton, C. A. Optical observations of the morphology and kinematics of the compact core of the peculiar supernova remnant CTB 80. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 237, p. 1109–1125, abr. 1989.
- Winkler, P. F.; Kirshner, R. P. Discovery of fast-moving oxygen filaments in Puppis A. **Astrophysical Journal**, v. 299, p. 981–986, dez. 1985.
- Winkler, P. F.; Olinger, T. M.; Westerbeke, S. A. CCD mosaic images of the supernova remnant 3C 400.2. **Astrophysical Journal**, v. 405, p. 608–613, mar. 1993.
- Winkler, P. F.; Reipurth, B. G203.2 - 12.3 - A new optical supernova remnant in Orion. **Astrophysical Journal Letters**, v. 389, p. L25–L28, abr. 1992.
- Woltjer, L. The Crab nebula. **Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands**, v. 14, p. 39–80, jan. 1958.
- Woltjer, L. Supernovae and the Interstellar Medium. In: H. J. Habing (Ed.). *Interstellar Gas Dynamics*. [S.l.: s.n.], 1970. (IAU Symposium, v. 39), p. 229–235.
- Zealey, W. J.; Dopita, M. A.; Malin, D. F. The interaction between the relativistic jets of SS433 and the interstellar medium. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 192, p. 731–743, set. 1980.



## APÊNDICE A – Simbologia para as classes dos objetos catalogados

HII – região H II;

HIIC – complexo de regiões H II (mais de uma);

HIIN – região H II nuclear;

CHII – região H II compacta;

DHII – região H II difusa;

PN – nebulosa planetária;

SNR – remanescente de supernova;

WRN – nebulosa *Wolf-Rayet*;

BbN – nebulosa *Bubble*;

H2G – galáxia H II;

AGN – núcleo ativo de galáxia;

LIN – *LINER*;

SyG – galáxia Seyfert;

Sy1 – galáxia Seyfert 1;

Sy2 – galáxia Seyfert 2;

QSO – quasar;

EmG – galáxia de linha de emissão;

RNe – nebulosa de reflexão;

HH – objeto *Herbig-Haro*;

PN? – candidato a nebulosa planetária;

SNR? – candidato a remanescente de supernova;

PoG – parte de uma galáxia;

YSO – objeto estelar jovem;

SEj – objeto estelar.

## APÊNDICE B – Siglas para os observatórios

AAO – Anglo-Australian Observatory, Australia

AP0 – Apache Point Observatory, U.S.A.

BA0 – Byurakan Astrophysical Observatory,

BGSU0 – Bowling Green State Univ Observatory, U.S.A.

BIRT – Ballon-borne Infrared Telescope, Japan

BM0 – Black Moshannon Observatory, U.S.A.

CAHA – Calar Alto Observatory, Spain

CASLE0 – Complejo Astronomico El Leoncito, Argentina

CFH0 – Canada-France-Hawaii Observatory, Hawaii, U.S.A.

C0 – Catalina Observatory, U.S.A.

CrAO – Crimean Astrophysical Observatory, Ukraine

CSSAI – Crimean Station of the Sternberg Astronomical Institute, Crimea CrAO?

CTI0 – Cerro Tololo Interamerican Observatory, Chile

DA0 – Dominion Astrophysical Observatory, Canada

EABA – Estacion Astrofisica Bosque Alegre, Argentina

EO-UW0 – Elginfield Observatory, University of Western Ontario, Canada

ESO-LS – European Southern Observatory, La Silla, Chile

ESO-PA – European Southern Observatory, Paranal, Chile

FLW0 – Fred Lawrence Whipple Observatory, U.S.A.

FM0 – Fan Mountain Observatory, U.S.A.

IRTF – NASA Infrared Telescope Facility, U.S.A.

IUE – International Ultraviolet Explorer satellite

KA0 – Kuiper Airborne Observatory, U.S.A.

KPNO – Kitt Peak National Observatory, U.S.A.

LC0 – Las Campanas Observatory, Chile

Lick – Lick Observatory, U.S.A.

LMcC0 – Leander McCormick Observatory

LNA – Laboratorio Nacional de Astrofisica, Brazil

Lowell – Lowell Observatory, U.S.A.

MBFS – Mount Bingar Field Station, Australia

McD0 – McDonald Observatory, U.S.A.

MDM0 – Michigan-Dartmouth-MIT Observatory, U.S.A.

MK0 – Mauna Kea Observatory, U.S.A.

ML0F – Mount Lemmon Observing Facility, USCD-UM, U.S.A.

MMT0 – MMT Observatory, U.S.A.

MS0 – Mount Stromlo Observatory, Australia

MW0 – Mount Wilson Observatory, U.S.A.

NLJ0 – NASA Lear Jet Observatory, U.S.A.

NA0-R – National Astronomical Observatory Rozhen, Bulgaria

NOA – National Observatory of Athens, Greece

NOV – National Observatory of Venezuela

OAA – Osservatorio Astrofisico di Asiago, Italy

0A0 – Okayama Astrophysical Observatory, Japan

0AUFGRS – Observatorio Astronomico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brazil

0HL – Observatorium Hoher List, Germany

0HP – Observatoire de Haute-Provence, France.

0AME – Osservatorio Astronomico di Monte Ekar

0AN-SPM – Observatorio Astronomico Nacional, San Pedro Martir, Mexico

0AN-T – Observatorio Astronomico Nacional, Tonantzintla, Mexico

0PM – Observatoire du Pic du Midi, France

0RM – Observatorio del Roque de los Muchachos, La Palma, Spain

0R0 – Oak Ridge Observatory, U.S.A.

0T – Observatorio del Teide, Tenerife, Spain

PB0 – Pine Bluff Observatory, U.S.A.

PL0 – Portage Lake Observatory, U.S.A.

P0 – Palomar Observatory, U.S.A.

Pr0 – Prairie Observatory, University of Illinois, U.S.A.

RG0 – Royal Greenwich Observatory, U.K.

R0 – Radcliffe Observatory, South Africa (Till 1974)

SAA0 – South African Astronomical Observatory

S0-MB – Steward Observatory, Mount Bigelow, AZ

S0-ML – Steward Observatory, Mount Lemmon, AZ

S0-KP – Steward Observatory, Kitt Peak, AZ

SS0 – Siding Spring Observatory, Australia

TIRGO – Italian infrared telescope TIRGO located at Gornergrat, Switzerland

UM0 – University of Michigan Observatory, U.S.A.

UWLAFPS – University of Wisconsin Large-Aperture Fabry-Perot Spectrometer, U.S.A.

X0 – Beijing XingLong Observatory, China

Y0 – Yerkes Observatory, U.S.A.

VBO – Vainu Bappu Observatory, India

WMKO – W.M. Keck Observatory, U.S.A.

W0 – Whitin Observatory, Wellesley College, U.S.A.