

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

Paulo Jakson Assunção Lago

**Parâmetros Físicos e Abundâncias de
Nebulosas Planetárias Extensas**

São Paulo

2013

Paulo Jakson Assunção Lago

Parâmetros Físicos e Abundâncias de Nebulosas Planetárias Extensas

Dissertação apresentada ao Departamento de
Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica
e Ciências Atmosféricas da Universidade de
São Paulo como requisito parcial para a obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Astronomia

Orientador: Prof. Dr. Roberto Dell’Aglío
Dias da Costa

**Versão Corrigida. O original encontra-
se disponível na Unidade**

São Paulo

2013

Aos meus pais.

Agradecimentos

Aos meus pais pelo amor e apoio incondicionais;

A todos os familiares que me apoiaram;

Ao professor Roberto D. Dias da Costa (Orientador), pela paciência e apoio;

À Círia Lima Dias, pela compreensão, carinho e apoio em momentos importantes;

Ao colega Daniel Moser Faes pelas longas discussões e assessoria com os scripts de redução;

Aos amigos Reinaldo Lima, Felipe Navarete, Fellipy Silva, Daryel Manreza, Diana Gama e aos amigos que fiz na pensão que morei durante a redação deste trabalho, por me fazerem sentir mais em “casa” em São Paulo.

Ao amigo Renan Garcia pela ajuda com a revisão textual;

À CAPES pelo apoio financeiro parcial;

À FAPESP pelo financiamento do projeto 2011/01579-7;

A todos os bons professores que tive na vida, cujo papel foi crucial para que eu chegasse até aqui;

A todos os funcionários da USP, cujo trabalho silencioso torna a pesquisa científica possível.

Aos funcionários do Observatório do Pico dos Dias (LNA/MCT) pelo apoio nas missões sem as quais esse projeto não seria possível.

“Vi veri veniversum vivus vici”

The Tragical History of Doctor Faustus (Christopher Marlowe)

Resumo

Nebulosas planetárias são o resultado do processo de evolução estelar de estrelas com massas que vão de 0.8 a 8 M_{\odot} ; seu estudo possibilita uma melhor compreensão dos mecanismos de enriquecimento do meio interestelar por parte destas estrelas e a sua influência direta na evolução química da Galáxia.

O uso da espectroscopia de campo integral possibilita o estudo da distribuição angular de propriedades como a densidade, as abundâncias iônicas, o perfil de ionização entre outras; já a espectroscopia de alta dispersão permite um estudo detalhado do campo de velocidades destes objetos, com velocidades típicas de expansão de 25 km/s . Este trabalho é baseado nestas duas técnicas, com o objetivo de se obter a distribuição de diversos parâmetros físicos, apresentados aqui na forma de mapas e de diagramas, para uma amostra de nebulosas planetárias austrais.

Os dados foram adquiridos utilizando a instrumentação do Observatório do Pico dos Dias (MCT/LNA), em duas missões realizadas em 2011 e 2012, usando respectivamente os espectrógrafos Eucalyptus e Coudé. Os resultados mostram a distribuição angular da densidade eletrônica, do fluxo das linhas do [SIII](6311Å) e $H\alpha$, e também a distribuição da razão [SIII](6311Å)/[SII](6717 + 6731Å). Estes resultados salientam as regiões com maior grau de ionização, gradientes de ionização e inomogeneidades. Diagramas de diagnóstico são também mostrados a fim de complementar a análise e classificar os objetos.

Os perfis cinemáticos também obtidos permitiram o estudo morfológico da amostra, detalhando suas estruturas. Os campos de velocidades foram usados para o cálculo da idade cinemática assim como a distância de uma das nebulosas da amostra.

Os resultados obtidos são bons dados de entrada para futuras simulações morfo-cinemáticas que podem ser feitas utilizando softwares como o SHAPE, além de também serem

possíveis simulações com códigos de fotoionização para a obtenção de modelos complementares. Os resultados em si são importantes tendo em vista a falta de informações a respeito da estrutura de planetárias austrais, já que não há nenhum grande levantamento morfológico como os existentes para as nebulosas boreais.

Abstract

Planetary nebulae are the result of the stellar evolution process for stars from 0.8 to 8 M_{\odot} ; their study allows a better understanding of the enrichment mechanisms of interstellar medium by these stars, and their influence to the chemical evolution of the Galaxy.

The use of integral field spectroscopy allows the study of the angular distribution of properties like density, chemical abundances and ionization profiles among others; on the other hand, high dispersion spectroscopy allows a detailed study of the velocity fields of these objects, with typical expansion velocity of 25 km/s . This work is based on these two techniques; and aims to obtain the distribution of several physical parameters, presented here in the format of maps and diagrams.

Data were acquired using the instrumentation from Pico dos Dias Observatory (MCT/LNA), in two missions performed in 2011 and 2012, using respectively the Eucalyptus and Coudé spectrographs. The results show the angular distribution of the electronic density, the flux of [SIII](6311Å) and H α lines, and the distribution of the [SIII](6311Å)/[SII](6717+6731Å) ratio. These results highlight the regions with higher degree of ionization, ionization gradients and inhomogeneities. Diagnostics diagrams are shown too, aiming to complement the analysis and classify the objects.

Kinematic profiles were also obtained and allowed the morphological study of the sample, detailing the structure of the objects. The velocity fields were used to calculate the kinematical age as well as the distance of one nebula of the sample.

These results are a good start for future morpho-kinematic simulations. They can be used in softwares like SHAPE, and also in simulations with photoionization codes to obtain additional models. The results are also important in view of the rarity of information about structure of southern planetary nebulae, since there is no large survey such as those existing

to the northern planetary nebulae.

Lista de Figuras

1.1	Diagramas de diagnóstico, Sabbadin et al. (1977).	27
1.2	Valores das razões de linha em função do raio da nebulosa planetária. Os círculos representam as planetárias do tipo B e os triângulos, as do tipo C.	31
1.3	Diagramas de diagnóstico de Sabbadin et al. (1977) com a amostra de planetárias usada por Riesgo e López (2006) e elipses de densidade encontradas por eles.	32
2.1	Imagens dos objetos observados em maio de 2011.	34
2.2	Imagens dos objetos observados em maio de 2011(continuação).	35
2.3	Representação do caminho dos fótons desde a imagem formada sobre a matriz de microlentes da IFU até os espectros captados sobre o CCD. Por conveniência na representação, colocamos o CCD no lado oposto ao das fibras (o que não ocorre no espectrógrafo Eucalyptus) e exageramos no grau de colimação dos feixes de cada fibra, ignorando sua abertura de dispersão.	37
2.4	Representação simplificada do espectrógrafo Eucalyptus	38
2.5	Identificação das posições de fenda usadas.	40
2.6	Representação simplificada do espectrógrafo Coudé	42
2.7	Exemplo de resultado obtido com o espectrógrafo Coudé, para NGC6302, à esquerda tem-se a imagem do espectro sem tratamento e à direita, o espectro reduzido.	43
2.8	Exemplo de resultado obtido com o espectrógrafo Eucalyptus, em cima tem-se a imagem reconstruída do objeto com quatro elementos de resolução marcados aos quais se referem os espectros mostrados embaixo.	44

3.1	Dependência da razão do duplete do S^+ e O^+ com a densidade, (Osterbrock 2006).	48
3.2	A figura mostra a imagem em alta resolução obtida pela câmera planetária do HST (topo) para NGC3918, assim como os mapas de fluxo, $H\alpha$, dado em contagens, (meio esquerda), $[SIII](6311\text{\AA})$, também em contagens, (meio direita), $[SIII](6311\text{\AA})/[SII](6717 + 6731\text{\AA})$, logaritmo decimal da razão das contagens, (abaixo esquerda) e densidade, e^-/cm^{-3} , (abaixo direita).	57
3.3	A figura mostra os três diagramas de diagnóstico construídos para NGC3918, diagrama I (topo), diagrama II (meio) e diagrama III (abaixo).	58
3.4	A figura mostra a imagem em alta resolução obtida pela câmera planetária do HST (topo) para NGC6818, os mapas de fluxo estão dispostos de forma análoga à figura 3.2.	59
3.5	A figura mostra os três diagramas de diagnóstico construídos para NGC6818, diagrama I (topo), diagrama II (meio) e diagrama III (abaixo).	60
3.6	A figura mostra a imagem em alta resolução obtida pela câmera planetária do HST (topo) para NGC6302, os mapas de fluxo estão dispostos de forma análoga à figura 3.2.. . . .	61
3.7	A figura mostra os três diagramas de diagnóstico construídos para NGC6302, diagrama I (topo), diagrama II (meio) e diagrama III (abaixo).	62
3.8	A figura mostra a imagem do DSS (topo) para Hen 2-112, os mapas de fluxo estão dispostos de forma análoga à figura 3.2.	63
3.9	A figura mostra os três diagramas de diagnóstico construídos para Hen 2-112, diagrama I (topo), diagrama II (meio) e diagrama III (abaixo)	64
3.10	A figura mostra a imagem do DSS (topo) para Hen 2-103, os mapas de fluxo estão dispostos de forma análoga à figura 3.2.	65
3.11	A figura mostra os três diagramas de diagnóstico construídos para Hen 2-103, diagrama I (topo), diagrama II (meio) e diagrama III (abaixo)	66
4.1	Vista superior do eixo de simetria (linha preta contínua) da nebulosa NGC 6302. Pode-se ver claramente o efeito geométrico sobre as velocidades observadas V_{obs} , nos distintos lóbulos. Sabe-se que o valor de θ é de 12.8 ± 2 graus.	71

4.2	Representação gráfica do campo de velocidades de NGC6302, (Szyszka et al., 2011), obtido através da comparação direta de imagens de alta resolução obtidas com as câmeras planetárias do telescópio espacial Hubble, sendo as setas os vetores velocidade mensurados em quadrados de 4.1 por 4.1 <i>arcseg</i> , cujo comprimento é proporcional à velocidade. As setas vermelhas mostram os dados de maior confiabilidade, as amarelas mostram velocidades com medidas em um dos eixos duvidosa, as caixas vazias possuem medidas consideradas ruins. A coloração das caixas está relacionada com a qualidade da relação dos pontos com o comportamento linear esperado. As caixas verdes mostram os pontos que melhor se encaixam, as vermelhas, os pontos de qualidade mediana e as azuis os piores pontos. O erro típico de velocidade é de 5 <i>mas/yr</i>	74
4.3	Gráfico com ajuste linear para a velocidade V_x em função da distância. . .	75
4.4	Imagens obtidas com a WFPC2 do Telescópio Espacial Hubble para os filtros de $656nm$, direita e $658nm$, esquerda. Deve-se perceber o grande contraste entre as subestruturas na imagem em $658nm$, onde a camada externa é fortemente destacada.	78
4.5	Mapas cinemáticos relativos ao íon N^+ , construídos para as diferentes posições de fenda, para NGC6302, A em cima, B meio e D embaixo. Os pontos azuis representam a componente da linha que sofre blueshift, os vermelhos representam as componentes com redshift. As barras de erros representam a moda dos erros de velocidade em cada caso.	80
4.6	Mapas cinemáticos relativos ao íon S^+ , construídos para as diferentes posições de fenda, para NGC6302, A em cima, B meio e D embaixo. Os pontos azuis representam a componente da linha que sofre blueshift, os vermelhos representam as componentes com redshift. As barras de erros representam a moda dos erros de velocidade em cada caso.	81
4.7	Mapas cinemáticos relativos aos íons N^+ S^+ , para NGC3918. Os pontos azuis representam a componente da linha que sofre blueshift, os vermelhos representam as componentes com redshift. As barras de erros representam a moda dos erros de velocidade em cada caso.	82

Lista de Tabelas

1.1	<i>Comparação entre nebulosas planetárias e Regiões HII, (Maciel, 2002)</i> . . .	25
2.1	<i>Características das nebulosas planetárias observadas na missão de maio de 2011, o termo SO é usado quando não há observação naquele comprimento de onda.</i>	36
2.2	<i>Características gerais do espectrógrafo Eucalyptus, usando rede de 1800 l/mm.</i>	37
2.3	<i>Características do CCD 098.</i>	39
2.4	<i>Características gerais do espectrógrafo Coudé.</i>	41
2.5	<i>Características gerais do espectrógrafo Coudé para a primeira ordem de difração direta.</i>	41

Sumário

1. <i>Introdução</i>	21
1.1 Histórico e características gerais	21
1.1.1 Mecanismos físicos	22
1.2 Os diagramas de diagnóstico	25
1.3 Morfologia e cinemática das nebulosas planetárias	28
1.4 Motivação	30
2. <i>Observações e redução dos dados</i>	33
2.1 Observações	33
2.2 Redução dos dados do Eucalyptus	34
2.2.1 O espectrógrafo Eucalyptus	34
2.2.2 A redução	36
2.3 Espectros de alta resolução	40
2.3.1 O espectrógrafo Coudé	41
3. <i>Análise dos Dados de IFU</i>	45
3.1 Mapas de Fluxo	45
3.2 Cálculo das densidades	46
3.3 Diagramas de Diagnóstico	47
3.3.1 NGC 3918	48
3.3.2 NGC 6818	50
3.3.3 NGC 6302	52
3.3.4 Hen 2-112	54

3.3.5	Hen 2-103	55
4.	<i>Análise dos Dados de Espectroscopia de Alta Resolução</i>	67
4.1	NGC 6302	67
4.1.1	Os “Hubble-like outflows”	69
4.1.2	Os mapas cinemáticos	69
4.1.3	Cálculo da Distância	73
4.2	NGC3918	76
4.2.1	Os mapas cinemáticos	77
4.2.2	Cálculo da idade cinemática	78
5.	<i>Conclusões</i>	83
5.1	Perspectivas	86
	<i>Referências</i>	89

Introdução

1.1 Histórico e características gerais

Nebulosas planetárias resultam do processo evolutivo sofrido por estrelas num intervalo de massas de 0.8 a 8 M_{\odot} . Estas estrelas irão, nos estágios finais de evolução, passar pela fase AGB. Ao final desta fase a estrela perde massa, de forma gradual, através da ejeção de seu envelope na forma de cascas gasosas, estas cascas em interação com o campo de radiação da estrela remanescente formarão a nebulosa planetária. Elas são nebulosas isoladas, que podem ou não possuir algum grau de simetria bilateral, (Osterbrock e Ferland, 2006).

O advento da Astronomia no infravermelho e em comprimentos de onda milimétricos tornou possível, através da observação direta, saber que taxas de perda de massa da ordem de $10^{-5} M_{\odot} yr^{-1}$ são comumente encontradas em estrelas na fase AGB tardia, (Kwok, 2000), a perda de massa nesta fase também pode ser constatada através de observações de emissões moleculares tais como a do íon OH.

A devida compreensão do lugar das nebulosas planetárias dentro do cenário da evolução estelar foi estabelecida aos poucos; já se pensou que estes objetos constituíam estrelas muito jovens devido à alta temperatura apresentada. O cenário teórico só começou a mudar através de estudos da distribuição de velocidades das planetárias, estudos estes realizados por Curtis (1918) que estabeleceu uma maior semelhança entre as Planetárias e estrelas tardias.

Shklovsky (1957) sugeriu que as planetárias na verdade eram descendentes das gigantes vermelhas e progenitoras das anãs brancas, hipótese esta apoiada por Abell e Goldreich (1966), que relacionaram a velocidade de expansão das Planetárias com a velocidade de escape das gigantes vermelhas além de posteriormente estimarem a taxa de formação de

nebulosas planetárias, notando que este número é bastante próximo do número estimado da taxa de estrelas que deixam a sequência principal anualmente.

Como dito anteriormente, as nebulosas planetárias são formadas das cascas gasosas ejetadas nas fases finais da evolução estelar, estes objetos mostram uma estrutura altamente ionizada devido ao campo de radiação da estrela remanescente, com temperatura característica de $T = 5 \times 10^4 K$, estrelas muito quentes, com temperaturas superiores às de estrelas do tipo O, porém menos luminosas devido ao seu tamanho reduzido. Estes objetos continuam a se expandir com velocidades supersônicas típicas de 25 km/s . Devido a esta expansão a densidade da nebulosa cairá continuamente até que seu brilho superficial seja tão baixo ao ponto de não permitir a observação da mesma. O tempo de vida médio de uma nebulosa planetária é da ordem de 10^4 anos.

1.1.1 Mecanismos físicos

As nebulosas planetárias possuem uma distribuição espectral de energia que abrange, principalmente, o intervalo que vai do infravermelho ao ultravioleta. A emissão no infravermelho é, em sua maior parte, causada pela poeira aquecida difusa na Planetária que emitirá no contínuo; a emissão no óptico vem dos processos de transição eletrônica, de estados excitados colisionalmente ou por recombinação e no ultravioleta a emissão vem dos processos de fotoionização.

A estrela central é quente o suficiente para emitir boa parte de sua energia na região do ultravioleta, esses fótons UV serão os responsáveis por moldar a estrutura de ionização da planetária, ionizando os átomos e fornecendo energia cinética aos elétrons antes ligados. Estes elétrons serão responsáveis pelas excitações colisionais de átomos mais pesados tais como Carbono, Nitrogênio e Oxigênio. A composição do espectro desses objetos será feita então pelas linhas de emissão provenientes do decaimento radiativo dos estados colisionalmente excitados e fotoexcitados, superpostas a um contínuo de fluxo bem inferior. As linhas do Hidrogênio serão praticamente todas geradas por recombinação devido às condições físicas presentes nas planetárias que fazem com que o Hidrogênio excitado colisionalmente tenha emissão irrelevante.

Mesmo as nebulosas planetárias sendo menos ricas em metais do que em Hidrogênio, as linhas de emissão dos mesmos têm suas intensidades comparáveis com as linhas do

Hidrogênio. Isso é justificado pela diferença nas taxas de recombinação e decaimento de estados colisionalmente excitados, a recombinação é muito mais lenta de forma a compensar a baixa abundância de metais, justificando fluxos então comparáveis.

A presença de linhas proibidas geradas por processos colisionais é uma característica marcante dos espectros de planetárias, porém, apesar de mais intensas, estas não são as únicas linhas presentes derivadas de processos colisionais, uma grande quantidade de linhas permitidas excitadas colisionalmente também está presente, tais como as linhas do CII, CIV, NV, MgI e MgII, que são basicamente observadas na região do ultravioleta próximo.

As linhas proibidas, excitadas colisionalmente, são tratadas como transições de dipolo magnético e quadrupolo elétrico e possuem muita importância dentro do levantamento de propriedades físicas de plasmas, tais como temperatura e densidade eletrônica, sendo sensíveis a variações nessas propriedades.

A fim de estimar a densidade das planetárias, pode-se fazer uso de linhas (dupletos) com configuração eletrônica externa do tipo np^3 , pois estas linhas apresentarão comportamentos bem distintos dependendo da densidade do meio. Considerando um sistema de dois níveis, podemos escrever a equação de equilíbrio estatístico na forma, (Kwok, 2000):

$$n_2(A_{21} + n_e C_{21}) = n_1 n_e C_{12} \quad (1.1)$$

que possui a seguinte solução,

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{n_e C_{12}}{A_{21}} \left(\frac{1}{1 + \frac{n_e C_{21}}{A_{21}}} \right) \quad (1.2)$$

Onde os n 's representam as respectivas densidades de cada estado, n_e é a densidade eletrônica e A é o coeficiente de Einstein que dá a probabilidade de transição, fornecendo o número de transições de um estado j para um estado i por segundo. O coeficiente C , por sua vez, corresponde à taxa de excitação colisional dos elétrons a uma temperatura específica, que pode ser encontrado através da integral:

$$C_{ji}(T_e) = \int_{v_{min}}^{\infty} v \sigma_{ji}(v) f(v) dv \quad (1.3)$$

A expressão acima nada mais é que a média para uma amostra de elétrons com distribuição de velocidades. Onde σ é a seção de choque colisional, escrita em termos de:

$$\sigma_{ji}(v) = \left(\frac{\pi h^2}{4\pi^2 m_e^2 v^2} \right) \frac{\Omega_{ji}}{g_j} \quad (1.4)$$

$f(v)$ corresponde à função distribuição e v à velocidade, $v_{min} = (2E_{ij}/m_e)^{1/2}$, o Ω é chamado de força de colisão. Para maiores detalhes ver Kwok (2000).

Como já dito anteriormente, os regimes de densidades podem ser aferidos usando os dupletos anteriormente citados, considerando cada linha do dupletos como gerada por um decaimento de estado excitado de dois sistemas de dois níveis com as seguintes condições aproximadas, $E_2 = E_3$, $\nu_{31} = \nu_{21}$, não havendo decaimento entre os níveis. Dois exemplos destes dupletos são o [SII] $\lambda 6717\text{\AA}/6731\text{\AA}$ e o [OII] $\lambda 3726\text{\AA}/3728\text{\AA}$. Usando como exemplo o dupletos do [OII] $3726\text{\AA}/3728\text{\AA}$ pode-se escrever que:

$$\frac{I(3726\text{\AA})}{I(3728\text{\AA})} = \frac{n_3 A_{31}}{n_2 A_{21}} \quad (1.5)$$

que com auxílio da equação 1.2 pode ser reescrita na forma:

$$\frac{I(3726\text{\AA})}{I(3728\text{\AA})} = \frac{C_{13}}{C_{12}} \left(\frac{1 + n_e C_{21}/A_{21}}{1 + n_e C_{31}/A_{31}} \right) \quad (1.6)$$

Deve-se salientar aqui que o parâmetro de comparação a ser adotado é a densidade crítica. Nesta densidade a taxa de desexcitação radiativa é igual a taxa de desexcitação colisional e pode ser definida como $n_c = A_{ji}/C_{ji}$, cujo valor numérico ditará o papel de cada um dos dois processos físicos estudados.

No limite de baixas densidades, onde $A_{ji} \gg n_e C_{ji}$, temos que a equação 1.6 se reduzirá a:

$$\frac{I(3726\text{\AA})}{I(3728\text{\AA})} = \frac{C_{13}}{C_{12}} = 2/3 \quad (1.7)$$

Onde o valor numérico é correspondente ao exemplo dado. Para o limite de altas densidades teremos a situação oposta, sendo assim a equação 1.6 se reduz a:

$$\frac{I(3726\text{\AA})}{I(3728\text{\AA})} = \frac{C_{13} C_{21}/A_{21}}{C_{12} C_{31}/A_{31}} = 3.3 \quad (1.8)$$

Desta forma pode-se perceber a grande diferença no valor da razão de linhas citadas para os dois extremos de densidade, exemplificando como o diagnóstico do gás pode ser feito através do uso de dados desta natureza. Porém, deve-se ressaltar que existem razões

de linha adequadas para distintos intervalos de densidades e condições de ionização. O [OII], por exemplo, reproduz bem as densidades nas regiões de baixa excitação, as regiões mais externas das nebulosas Planetárias de uma forma geral.

Tabela 1.1 - Comparação entre nebulosas planetárias e Regiões HII, (Maciel, 2002)

	Regiões HII	Nebulosas planetárias
Tipo Espectral	O,B	O,W
Temperatura Efetiva	30000-50000 K	30000-300000
População	I Jovem	I Velha - II
Temperatura Eletrônica	$10^4 K$	$10^4 K$
Densidade Eletrônica	$10 - 10^2$	$10^2 - 10^4$
Massa Total	$10^2 - 10^4 M_{\odot}$	$0.01 - 1 M_{\odot}$
Dimensão Típica	$10 pc$	$\lesssim 0.5 pc$
Estado do H	H^+	H^+
Estado do He	He^+	He^+, He^{++}
Elementos Pesados	Ionizados	Ionizados
Velocidade Típica	$10 km/s$ (Térmica)	$25 km/s$ (Expansão)

1.2 Os diagramas de diagnóstico

Os diagramas de diagnóstico constituem uma ferramenta importante no estudo das nebulosas planetárias, já que outros tipos de nebulosas fotoionizadas tais como as regiões HII e remanescentes de supernova, que possuem origens bastante distintas em relação às planetárias, têm em seus espectros características bastante similares. A tabela 1.1 apresenta uma comparação entre as nebulosas planetárias e as regiões HII.

A caracterização das condições físicas dos objetos de estudo é um ponto crucial deste trabalho, para tal fim são utilizados os diagramas de diagnósticos de plasmas introduzidos por Sabbadin et al. (1977).

Os diagramas de diagnóstico são gráficos construídos através da comparação de razões de linha que caracterizam o gás em diferentes aspectos. Estes diagramas foram concebidos com o intuito de caracterizar o objeto Sharpless 176, objeto este que possuía um aspecto

visual similar ao de um remanescente de supernova, sendo também sugerida a possibilidade do mesmo ser uma nebulosa de reflexão (Felli e Perinotto, 1974).

Com o intuito de pôr um fim no impasse envolvendo tal objeto, Sabbadin et al. (1977) criam diagramas classificatórios, usando as razões de linha $H\alpha/[NII](6548+6584\text{Å})$, $H\alpha/[SII](6717+6731\text{Å})$ e $[SII]/[SII](6717\text{Å}/6731\text{Å})$. São comparados os valores destas razões para um conjunto de objetos com natureza estabelecida, cujas condições físicas e aspecto podem causar confusão na classificação. D esta forma os diagramas têm o intuito de distinguir nebulosas planetárias, remanescentes de supernova e regiões HII.

Para a elaboração dos diagramas de diagnóstico, Sabbadin et al. (1977) fizeram uso dos dados disponibilizados por Kaler (1976), para nebulosas planetárias e regiões HII, e Sabbadin e D'Odorico (1976) para os remanescentes de supernova. Os diagramas de diagnóstico são então elaborados através da definição de regiões em cada diagrama para cada classe de objeto, a figura 1.1 apresenta os três diagramas de diagnóstico introduzidos no artigo citado, que sugere também a existência de uma relação entre as razões de linha e o estágio evolutivo dentro das classes.

Minello e Sabbadin (1977) realizaram um estudo direcionado à relação entre as razões de linha citadas e o estágio evolutivo das nebulosas planetárias. Para isso foi verificado como o raio das nebulosas planetárias provocava a variação das razões de linha. Tal variação foi avaliada para nebulosas do tipo B e C, de acordo com a classificação de Greig (1971).

Nebulosas planetárias do tipo B são nebulosas com forte estrutura filamentar e linhas proibidas intensas relativas a $H\alpha$, as do tipo C possuem um maior brilho na região central e linhas proibidas mais fracas. Para um conjunto de nebulosas foi feito o gráfico do raio versus as razões de linha, os raios foram obtidos por Perek e Kohoutek (1967) e as intensidades das razões de linha por Kaler (1976).

A figura 1.2 apresenta os resultados obtidos, mostrando diferentes comportamentos para as duas classificações de nebulosas, B e C, de forma a justificar o deslocamento dentro dos diagramas de diagnóstico não só pela classe a qual pertence o objeto mas também pelo seu estágio evolutivo.

Após os trabalhos citados anteriormente, os diagramas de diagnóstico desenvolvidos nestes mostraram-se poderosas ferramentas de classificação e análise das condições físicas envolvendo as nebulosas planetárias, sendo citados em inúmeras publicações. Porém a

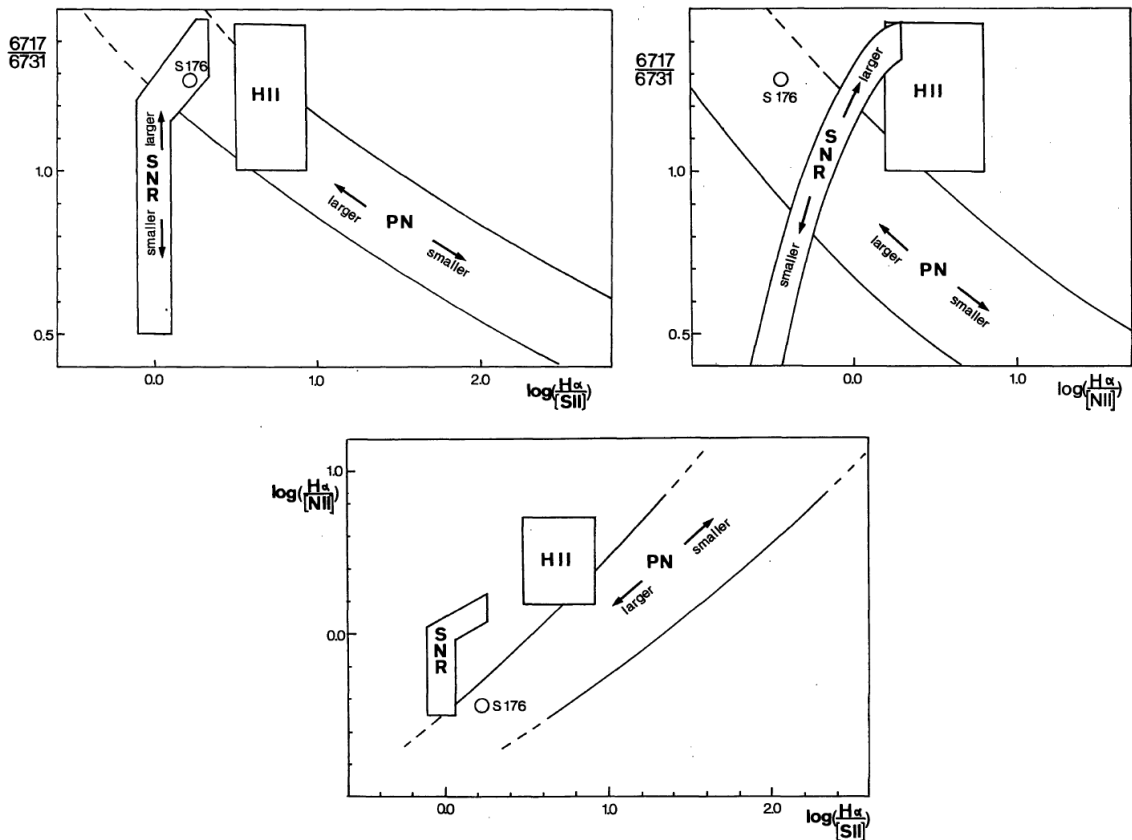


Figura 1.1: Diagramas de diagnóstico, Sabbadin et al. (1977).

limitação da amostra utilizada por Sabbadin et al. (1977) introduz dúvidas na confiabilidade das regiões classificatórias destes, pois como mostrado por Minello e Sabbadin (1977), a etapa evolutiva na qual se encontra a nebulosa provoca variação nos seus valores de razões de linha.

O uso dos diagramas de diagnóstico não garante a classificação correta dos objetos de estudo, sendo possível que objetos mesmo fora das zonas de classificação pertençam a uma classe específica.

A fim de estabelecer uma região nos mesmos diagramas com maior confiabilidade na classificação das PNe, Riesgo e López (2006) usaram uma amostra maior de planetárias conhecidas, pertencentes ao catálogo SCGPN II, desta vez sendo usados apenas dados de PNe, desta forma o trabalho citado não tem o objetivo de reformular os diagramas de Sabbadin e sim estabelecer regiões classificatórias mais confiáveis dentro destes.

Foram utilizados dados a respeito de 613 nebulosas, enquanto que no trabalho de Sab-

badin et al. (1977) foi usado menos de um décimo desta quantidade. A nova amostra foi colocada nos diagramas de diagnóstico e dentro deles foram traçadas novas regiões baseadas nas elipses de densidade obtidas, tais elipses foram calculadas para que 85% dos objetos estejam dentro destas regiões. Estes resultados podem ser visualizados na figura 1.3.

As elipses citadas são bons indicadores gráficos da correlação entre as razões de linha envolvidas em cada diagrama, a excentricidade de cada elipse está diretamente ligada à correlação entre as razões de linha, há uma tendência de colapso (estreitamento) da elipse à medida que a correlação entre as grandezas se aproxima do valor unitário. O oposto acontece caso a correlação se distancie do valor unitário de forma a “engordar” a elipse.

Cada um dos diagramas mostrou uma correlação diferente como mostrado na fig 1.3, porém deve-se ter em mente que há influência direta de incertezas observacionais e, como já citado, do espalhamento intrínseco devido à distribuição de distintos estágios evolutivos (Minello e Sabbadin, 1977).

1.3 *Morfologia e cinemática das nebulosas planetárias*

Nebulosas planetárias se apresentam com variadas formas e estruturas e o advento do imageamento em alta resolução revelou também uma riqueza grande em microestruturas. Estas duas características marcantes estão diretamente relacionadas com a origem e evolução dinâmica destes objetos.

Uma classificação morfológica consiste simplesmente em classificar as nebulosas planetárias no que diz respeito à sua forma. Uma classificação pioneira nestes moldes foi realizada por Curtis (1918) para uma amostra de 78 nebulosas planetárias, onde estas eram classificadas como elípticas, anelares, discos, amorfas e estelares. Outros realizaram classificações similares, tais como Perek e Kohoutek (1967), Greig (1971), Westerlund e Henize (1967) e Balick (1987). Khromov e Kohoutek (1968) levam as subestruturas em consideração na classificação morfológica de planetárias assim como Greig (1971) viria a considerar o estudo da estrela central das nebulosas classificadas por ele, sugerindo uma relação entre a morfologia e características da estrela central.

Estudos relacionados à posição da estrela central das nebulosas planetárias no diagrama H-R, como feito por Stanghellini et al. (1993), revelaram diferentes distribuições de massa destas estrelas para diferentes morfologias. Porém apenas estudos que permitissem

a eliminação das influências de ângulos de projeção poderiam ser considerados conclusivos quanto a essa questão. Neste aspecto, o uso de modelos estruturais é essencial para que isso seja possível, estudos realizados por Zhang e Kwok (1998), por exemplo, fazem uso desta abordagem e concluem que morfologias bipolares extremas são o fruto de progenitoras mais massivas e de idade mais avançada.

A classificação morfológica das nebulosas planetárias esbarra em uma série de dificuldades técnicas que podem torná-la inadequada. A escolha da espécie química na qual a planetária será imageada fará toda a diferença, cada espécie possui um diferente potencial de ionização e verificar uma morfologia específica para uma espécie, [SII] por exemplo, não garante que a estrutura revelada por outra espécie seja concordante; tal afirmação pode ser constatada no perfil bastante diferente apresentado nos mapas de fluxo já que estes mostram diferentes perfis para diferentes espécies como mostrado para cada objeto no capítulo três.

A dependência da aparência do objeto na imagem com a sensibilidade do detector é um fator de muita importância, pois se a exposição for inadequada, a ausência de detalhes pode gerar erros de classificação.

A interpretação da morfologia das planetárias hoje tem duas principais vertentes: as planetárias teriam de uma forma geral a mesma estrutura básica, o que variaria seria a linha de visada, com que elas são observadas. Outra vertente possível seria a organização das planetárias em termos de suas estruturas de forma que estas apresentassem uma sequência evolutiva.

Independente de interpretação, as morfologias das planetárias têm uma origem complexa, moldada pela ejeção de gás de sua estrela progenitora passada pela fase AGB e a interação deste gás com os ventos da mesma.

A cinemática observada revela muitas informações a respeito da morfologia e evolução dinâmica das planetárias em estudo, pois pode indicar a presença de múltiplas camadas de gás em expansão, juntamente com suas velocidades, assim como a idade dinâmica da planetária.

1.4 Motivação

As nebulosas planetárias permitem o estudo da contribuição para o enriquecimento químico do meio interestelar por parte de estrelas com massas de 0.8 a $8M_{\odot}$, progenitoras destas; sendo assim, o estudo das planetárias contribui para o melhor conhecimento da evolução química da Galáxia. O estudo destes objetos proporciona também uma melhor compreensão dos estágios finais da evolução estelar de suas progenitoras.

A maioria das nebulosas planetárias da Galáxia está localizada no hemisfério sul celeste, porém poucos objetos desta região têm informações sobre estrutura interna, morfologia e campos de velocidades. Informações desta natureza são em sua maioria referentes às planetárias do hemisfério norte. Nenhuma iniciativa semelhante às de López et al. (2012); Richer et al. (2009) existe para as planetárias do sul.

Seria então muito enriquecedor estudar a estrutura das planetárias austrais. Para isto pode-se utilizar a instrumentação astronômica totalmente brasileira disponível no observatório Pico do Dias (MCT/LNA). Os equipamentos escolhidos para este trabalho foram o espectrógrafo Eucalyptus, que faz espectroscopia de campo integral, e o espectrógrafo Coudé, que faz espectroscopia de fenda longa de alta resolução. Na maioria dos casos os espectros dos objetos da amostra são inéditos, assim como o mapeamento usando espectroscopia de campo integral, o que garante a relevância do trabalho.

Este trabalho tem como objetivo obter, utilizando dois tipos distintos de dados, os parâmetros físicos de uma amostra de nebulosas planetárias austrais angularmente resolvidas; os parâmetros a ser obtidos são a densidade, o perfil cinemático, abundâncias iônicas, a idade cinemática e o perfil de ionização.

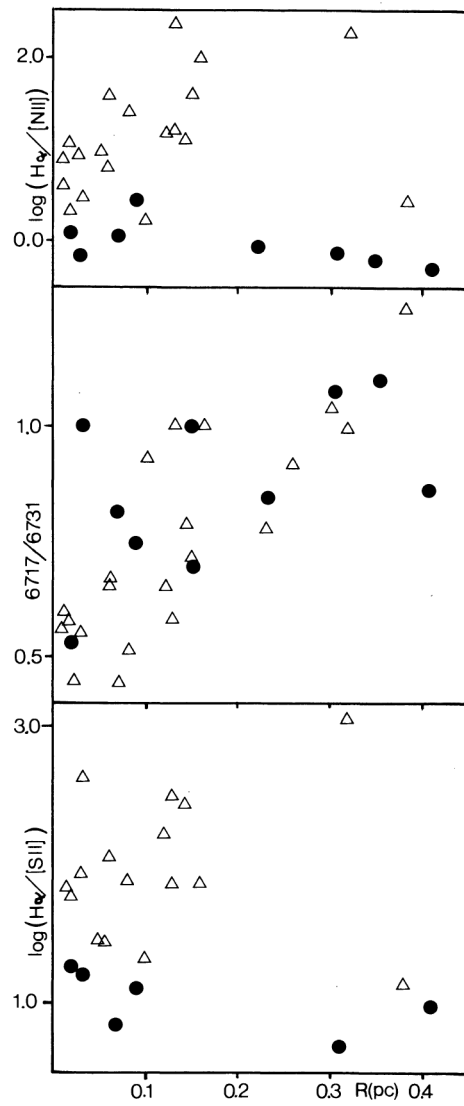


Figura 1.2: Valores das razões de linha em função do raio da nebulosa planetária. Os círculos representam as planetárias do tipo B e os triângulos, as do tipo C.

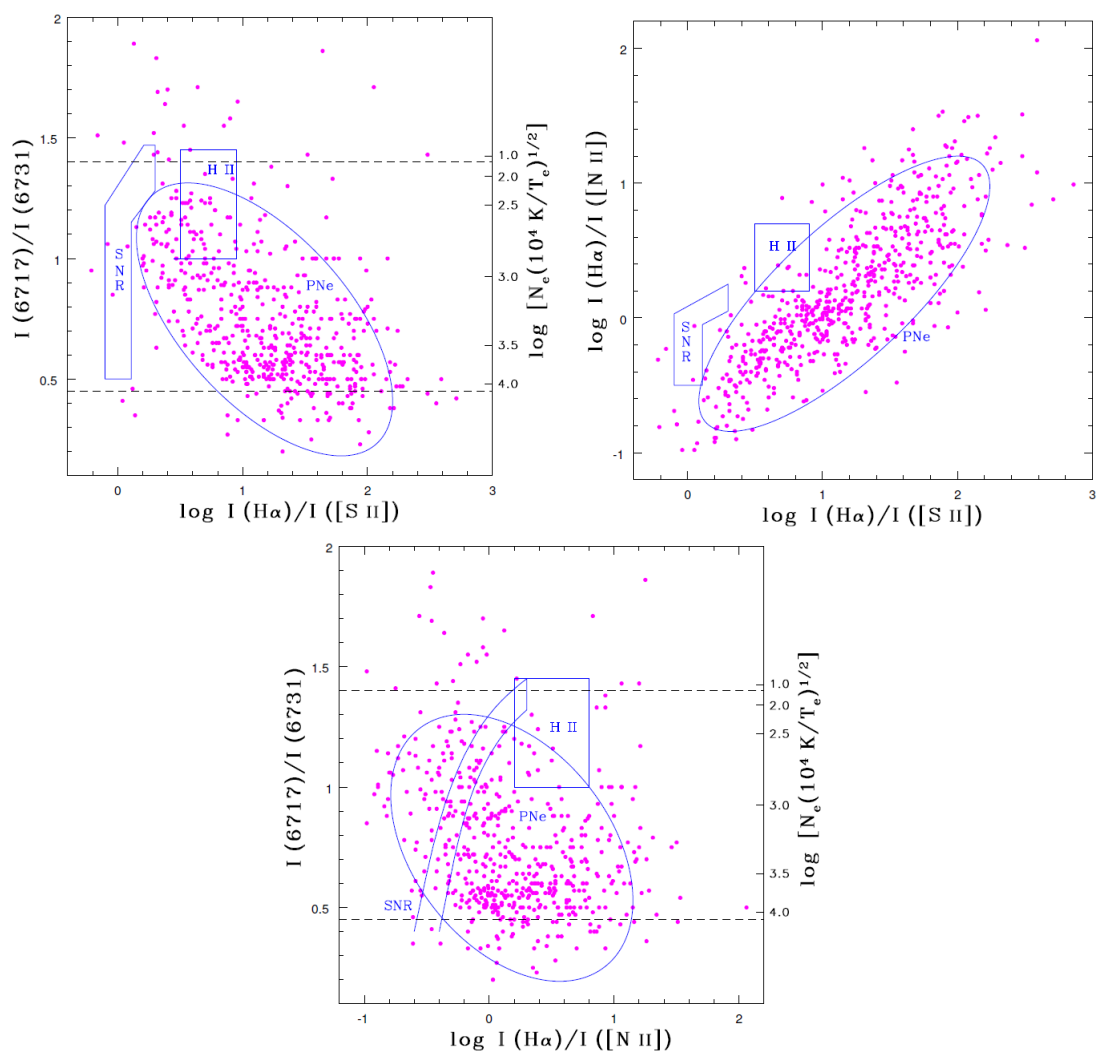


Figura 1.3: Diagramas de diagnóstico de Sabbadin et al. (1977) com a amostra de planetárias usada por Riesgo e López (2006) e elipses de densidade encontradas por eles.

Observações e redução dos dados

2.1 Observações

Em Maio de 2011, foi realizada uma missão observacional usando a instrumentação do Observatório Pico dos Dias LNA/MCT, com o objetivo de mapear características físicas de um grupo de nebulosas planetárias austrais. A lista dos objetos observados com algumas características dos mesmos estão sumarizadas na tabela 2.1, assim como suas imagens estão nas figuras 2.1 e 2.2.

Na missão foi utilizado o telescópio Perkin-Elmer de 1.6 m, associado com o espectrógrafo Eucalyptus, que constitui um instrumento de espectroscopia de campo integral. O uso desta técnica torna possível a obtenção de um espectro para cada elemento de resolução, limitado aqui pela resolução angular de cada microlente da matriz.

O uso de espectroscopia de campo integral produz resultados muito interessantes se aplicada a objetos angularmente resolvidos, permitindo o estudo de propriedades espectroscópicas por toda a extensão do objeto (imagem projetada). A técnica referida possui a desvantagem de não permitir a calibração em fluxo dos espectros; isso se deve ao fato de cada fibra ótica ter uma resposta diferente à luz, o que é irrelevante para os objetivos da pesquisa em questão, já que estamos interessados nas razões de linha. A tabela 2.1 mostra que foram obtidos espectros na região do azul, porém os mesmos não foram utilizados neste trabalho devido ao S/R ruim potencializado pelo CCD utilizado, otimizado para a região do vermelho.

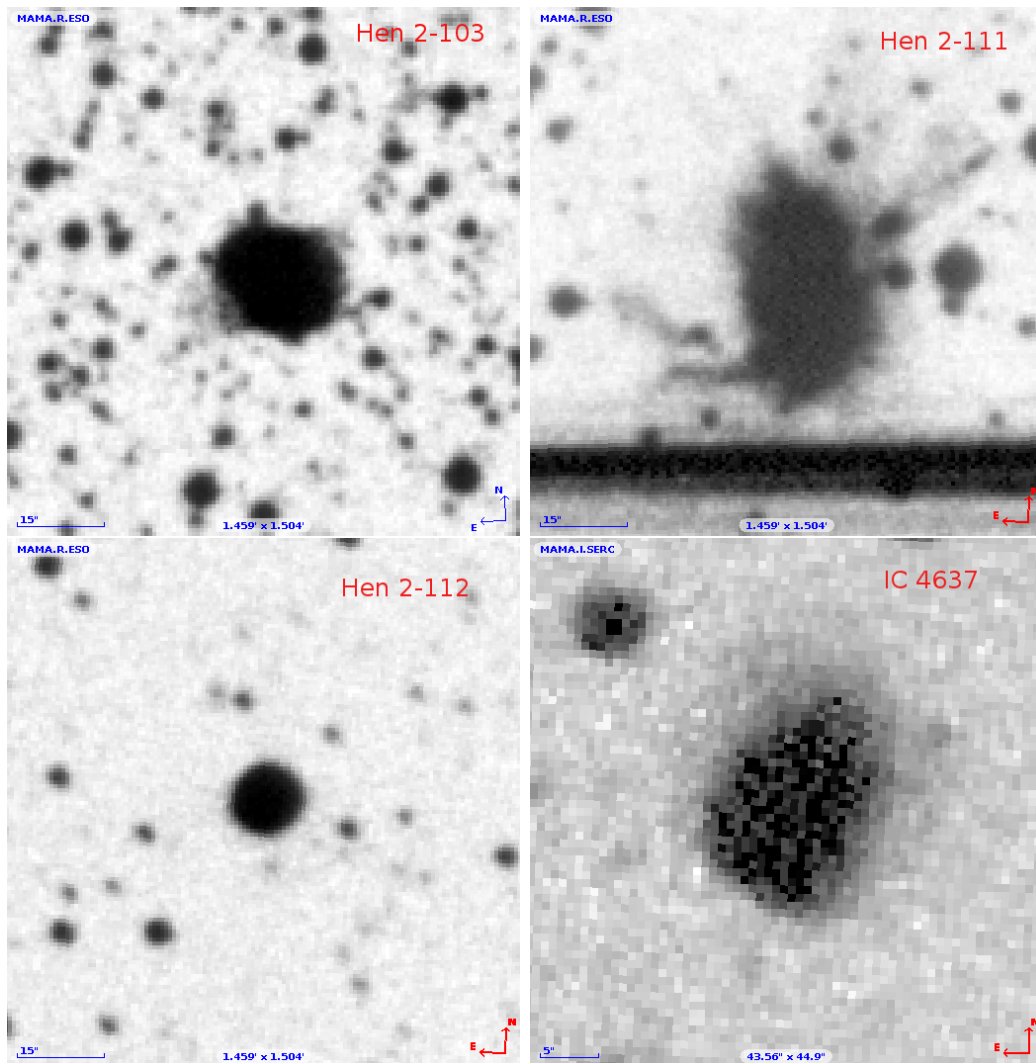


Figura 2.1: Imagens dos objetos observados em maio de 2011.

2.2 Redução dos dados do Eucalyptus

2.2.1 O espectrógrafo Eucalyptus

O espectrógrafo Eucalyptus foi concebido no intuito de ser um protótipo para o espectrógrafo SIFS do telescópio SOAR de 4.2m. Hoje o Eucalyptus se encontra descomissionado, sendo este trabalho um dos últimos realizados com o mesmo.

Um espectrógrafo IFU é um espectrógrafo comum que possui uma unidade de campo integral associada, a mesma constitui-se numa matriz de microlentes ligadas ao restante do instrumento por um feixe de fibras óticas. A unidade de campo integral é adaptada ao telescópio através da óptica de entrada (*fore optics*), cujo objetivo é dimensionar uma

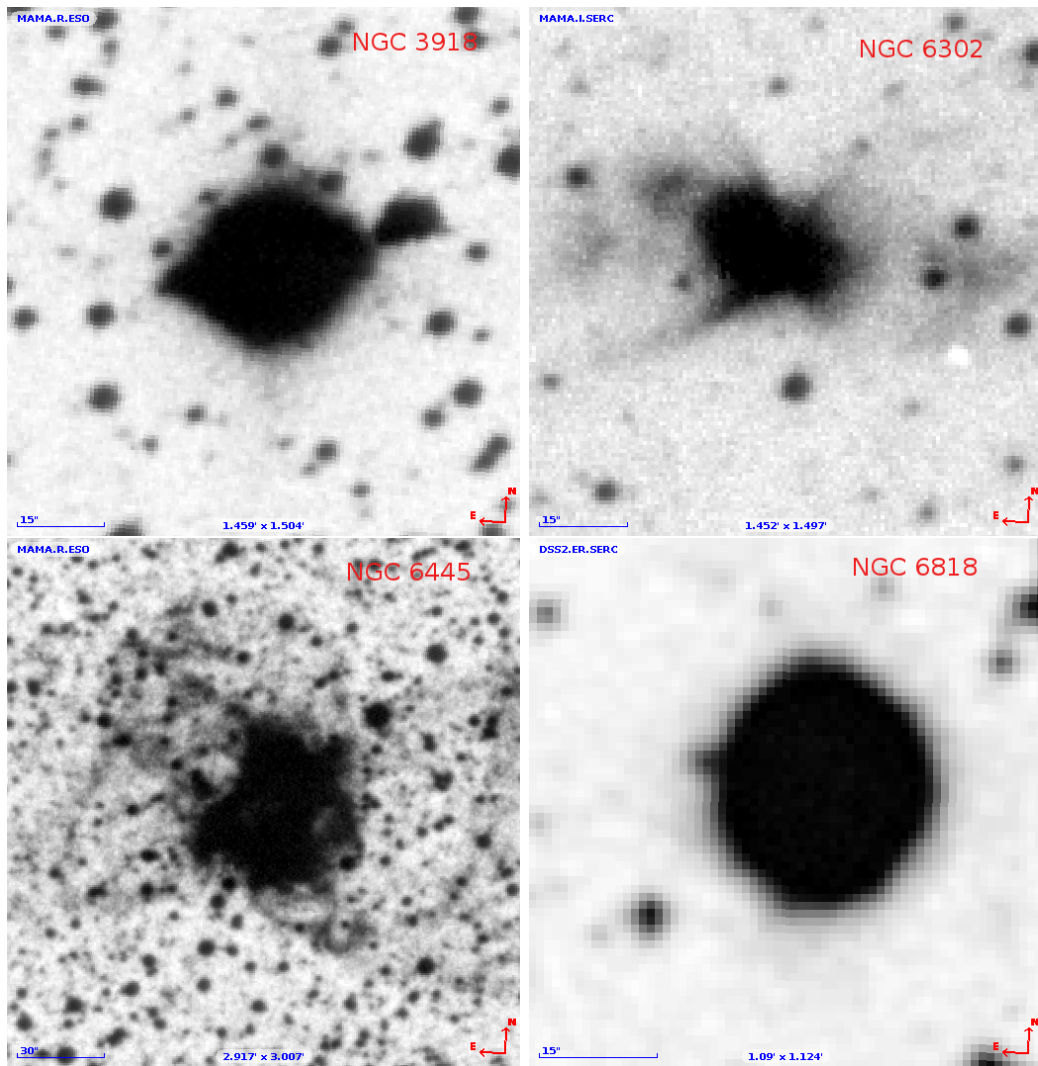


Figura 2.2: Imagens dos objetos observados em maio de 2011(continuação).

fração de imagem que chega ao plano focal do telescópio para a matriz de microlentes.

A matriz de microlentes constitui num conjunto de lentes com 16 elementos de altura e 32 de largura num total de 512 fibras. Cada microlente tem o formato quadrado com 1mm de lado e tem o campo de aproximadamente $0.93''$ de lado, o que confere ao Eucalyptus um campo de 15×30 segundos de arco. Cada fibra ótica possui $50\ \mu\text{m}$ de “core”, as fibras óticas usadas funcionam com otimização de transmissão no azul, sendo assim, o instrumento pode operar na faixa de $3500\text{-}9000\text{\AA}$.

As fibras são separadas em 16 grupos de 32 fibras que são dispostos na vertical a fim formar espectros sucessivos e organizados sobre o detector. A modelagem é ilustrada na figura 2.3, tal arranjo é o que permite a reconstrução da imagem do objeto de estudo e

Tabela 2.1 - Características das nebulosas planetárias observadas na missão de maio de 2011, o termo *SO* é usado quando não há observação naquele comprimento de onda.

Nome	$\lambda_{central}$ (Å)	Integrações	Coordenadas Galáticas (J2000)
Hen 2-111	6563-4750	4x1200-3x1200	315.0313 -00.3704
Hen 2-112	6563-4750	3x1200-3x1200	319.2144 +06.8066
Hen 2-155	6563-4750	3x1200-3x1200	338.8042 +05.6811
NGC 3242	6563-4750	3x900-3x1200	261.0509 +32.0499
IC 4637	6563-4750	2x1200-3x1200	345.4794 +00.1402
mZ 1	6563-4750	3x1200-3x1200	322.4918 -02.6116
Hen 2-103	6563-4750	3x1200-3x1200	310.7587 -02.9448
Hen 2-99	6563-4750	1x1200-(SO)	309.0027 -04.2415
NGC 3918	6563-4750	3x1200-3x1200	294.6895 +04.7076
NGC 6302	6563-4750	3x900-3x1200	349.5075 +01.0557
NGC 6445	6563-4750	3x1200-3x1200	008.0757 +03.9050
NGC 6778	6563-4750	3x1200-2x1200	034.5900 -06.7296
NGC5315	6563-4750	(SO)-3x1200	309.1132 -04.3955
NGC 6818	6563-4750	3x1200-3x1200	025.8587 -17.9126

para tanto um mapeamento detalhado das fibras é importantíssimo para o sucesso desta tarefa. Durante a construção do instrumento já estavam mapeadas duas fibras “mortas” e no decorrer do uso do instrumento este número aumentou.

Podem ser utilizadas duas redes de difração, a de 600 l/mm que fornece uma resolução espectral $R = 4000$ ou a rede de 1800 l/mm que fornece uma resolução $R = 12000$. Nas observações referentes a esse trabalho foi usada a rede de 1800 l/mm de forma que as características apresentadas pelo instrumento estão listadas na tabela 2.2.

O detector usado foi o CCD 098, cujas as características gerais estão listadas na tabela 2.3; um esquema completo da ótica do Eucalyptus pode ser visto na figura 2.4.

2.2.2 A redução

A fim de analisar os espectros em questão é necessário que as imagens obtidas passem por um processo de pré-redução que visa corrigir ruídos e erros instrumentais a fim de

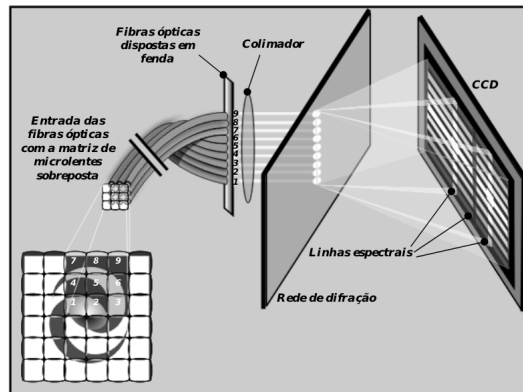


Figura 2.3: Representação do caminho dos fótons desde a imagem formada sobre a matriz de microlentes da IFU até os espectros captados sobre o CCD. Por conveniência na representação, colocamos o CCD no lado oposto ao das fibras (o que não ocorre no espectrógrafo Eucalyptus) e exageramos no grau de colimação dos feixes de cada fibra, ignorando sua abertura de dispersão.

Tabela 2.2 - Características gerais do espectrógrafo Eucalyptus, usando rede de 1800 l/mm.

Cobertura espacial total	15x30"
Número de microlentes	510
Cobertura de cada microlente	0.93"
Dispersão espectral	0.3Å/pixel
Cobertura espectral	630Å

deixar as imagens a ser trabalhadas o mais livre possível de contaminação.

Para a redução típica de qualquer dado espectroscópico fazem-se necessárias algumas imagens de correção e calibração, tais como os *bias*, *flatfields*, estrelas padrão e lâmpadas de calibração. Para a técnica utilizada, espectroscopia IFU, fazem-se necessárias também as imagens das máscaras e do chamado *flatfield* interno.

Para a redução das imagens foi utilizado o pacote de redução IRAF, *Image Reduction and Analysis Facility* (NOAO), disponibilizado na internet como software *open source*, além de rotinas especialmente desenvolvidas para o instrumento por Antônio Kanaan (UFSC) e César Strauss (IAG-USP) ¹.

Pode-se enumerar a redução das imagens como uma sequência de passos que constituem em: fazer a correção instrumental das imagens, extrair os espectros e calibrá-los em com-

¹ Para maiores detalhes, <http://www.lna.br/opd/instrum/manual/Manual-eucalyptus.pdf>.

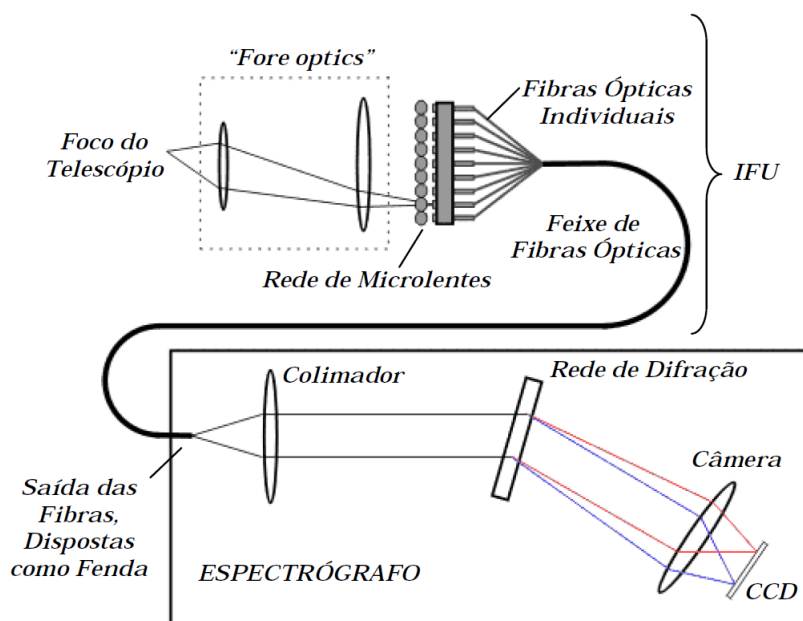


Figura 2.4: Representação simplificada do espectrógrafo Eucalyptus

primento de onda. Como foi dito anteriormente, a calibração em fluxo é inviável para a técnica em questão, pois não é possível iluminar todas as fibras com uma estrela padrão, além do mais, não se pode estabelecer qual a fração de fluxo observada por cada fibra.

A correção instrumental é realizada pela tarefa *ccdproc* e consiste numa sequência de operações sobre as imagens: inicialmente é realizada a correção de *bias*, corrigindo assim o ruído de leitura que é resultado da descarga do CCD e que constitui uma flutuação do tipo Poisson. As imagens *bias* são obtidas com o obturador da câmera fechado em curtas exposições, para uma boa estatística são tiradas de 15 a 20 imagens com sua média servindo como valor de correção.

A seguir, deve-se corrigir as imagens fazendo uso da imagem *flatfield*, que permite avaliar pixel a pixel a resposta a uma mesma luminosidade, estas imagens são obtidas iluminando de maneira uniforme o detector, seja fazendo uso da luz de uma lâmpada incandescente projetada em uma tela uniformemente branca ou usando o céu durante o crepúsculo. Várias imagens são obtidas (na missão referida foram cinco) e é utilizado o *flatfield* médio para a correção. Um ponto importante nesta etapa é que, para o caso dos dados IFU, este *flatfield* tem a função de avaliar a resposta de cada fibra à iluminação. As variações pixel a pixel ficam a cargo do *flat* interno, que é obtido através da iluminação

Tabela 2.3 - Características do CCD 098.

Tipo	Marconi CCD42-90-0-941, fino
Tamanho da Imagem	2048x4608 pixels
Tamanho do Píxel	13.5x13.5 μm^2
Sentido de Iluminação	back-illuminated
Controlador	WI Mark2e
Corrente de escuro	10 ⁻⁴ e ⁻ /pixel
Saturação	1.15x10 ⁵ e ⁻ /pixel
Ruído de leitura	2.4e ⁻ rms (modo lento), 4.7e ⁻ rms (modo rápido)

direta do CCD com um aparato uniformemente iluminado.

Fazendo uso da tarefa *mask*, são extraídas imagens de uma série de máscaras codificadas, o que permitirá a extração dos espectros para cada fibra e como consequência a remontagem adequada da imagem do objeto. Foram obtidas imagens das máscaras em cinco posições diferentes, três imagens por posição sendo adotada a mediana como valor de referência. Para maiores detalhes sobre o uso das máscaras, ver o manual do instrumento.

O resultado combinado das cinco máscaras possibilita a extração do espectro de cada fibra do instrumento. Este procedimento corresponde ao mais delicado da redução deste tipo de dado, um mapeamento prévio das fibras é indispensável para o sucesso da etapa e possível reconstrução da imagem.

O último passo da redução é a calibração em comprimento de onda, realizada com a tarefa *identify*, fazendo uso das imagens das lâmpadas de He-Ar ou Ne-Ar, dependendo do comprimento de onda central. Essa calibração consiste em ajustar uma escala de comprimento de onda relacionada à escala da imagem dada em pixels.

Após a redução padrão listada no manual do espectrógrafo foi usado um pacote de redução e análise, *pnpack*, desenvolvido em ambiente IRAF e disponibilizado por Faes (2011), a fim de realizar a medida dos fluxos das linhas de emissão presentes no espectro em cada fibra. Os fluxos foram calculados através de ajuste gaussiano, a resolução espectral era suficientemente alta para tornar *deblends* desnecessários. Para maiores informações a respeito da obtenção dos fluxos ver Faes (2011).

Com as tabelas de fluxos foi possível obter as razões de linha para cada fibra, tornando

possível então a montagem dos diagramas de diagnóstico, além dos mapas de intensidade e densidade. Um exemplo de resultado obtido com o espectrógrafo Eucalyptus é mostrado na figura 2.8.

2.3 Espectros de alta resolução

Em Maio de 2012 foi executada uma missão observacional com o objetivo de fazer-se espectroscopia de alta resolução para uma amostra de nebulosas planetárias. Foram obtidos espectros de alta resolução com a técnica de espectroscopia de fenda longa, usando o espectrógrafo Coudé do Observatório do Pico dos Dias MCT/LNA, associado ao telescópio de 1.6m. O uso deste equipamento possibilita o estudo da cinemática das nebulosas, sua resolução espectral na configuração que adotamos permite a detecção de velocidades de até 11km/s . A figura 2.5 mostra as posições de fenda usadas sobre cada objeto, o tempo de exposição foi de 1800s para NGC3918 e 1200s para NGC6302. Foram concedidas cinco noites para a missão, porém devido a condições climáticas inadequadas apenas a última noite foi aproveitada, desta forma apenas dados para as nebulosas NGC 3918 e NGC 6302 foram obtidos.

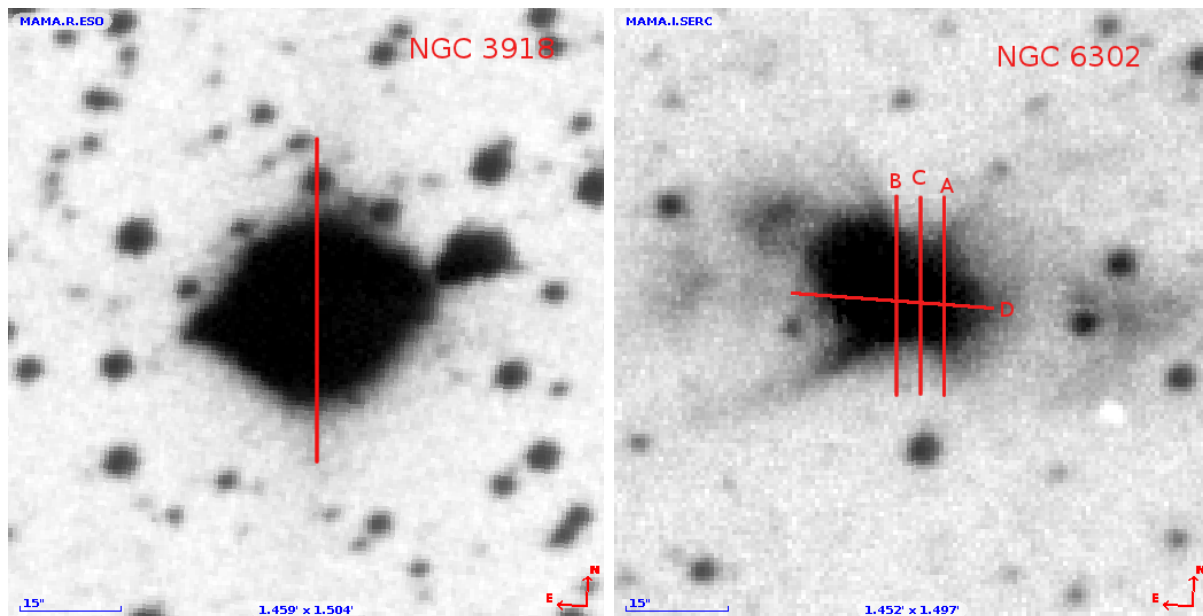


Figura 2.5: Identificação das posições de fenda usadas.

Assim como no caso dos dados de IFU, para a redução das imagens foram usadas ima-

gens *bias* e *flats* para correção da iluminação e do ruído de leitura das imagens. O *flat* em questão foi um *flat* de cúpula que tem para o caso desta instrumentação a função exatamente análoga à do *flat* interno descrito anteriormente. A correção de *bias* é exatamente idêntica ao caso já descrito para os dados IFU.

Devido à alta dispersão espectral do instrumento, a lâmpada de calibração usada foi de Th-Ar. Com o uso desta, os espectros puderam ser calibrados em comprimento de onda de forma análoga ao caso dos dados IFU.

Tabela 2.4 - Características gerais do espectrógrafo Coudé.

Distância focal do colimador (F2)	713cm
Distância focal da câmara (F3)	91.4cm
Escala no plano focal, na fenda	4.13" /mm

Tabela 2.5 - Características gerais do espectrógrafo Coudé para a primeira ordem de difração direta.

Rede $l/mm - \lambda_c(\text{nm})$	CCD	Cobertura (nm)	Dispersão (nm/pixel)	Resolução (FWHM, Å)
0600-650	098	113	0.025	0.50
1800-650	098	35.3	0.008	0.20

2.3.1 O espectrógrafo Coudé

O espectrógrafo Coudé é um instrumento em uso no Observatório Pico dos Dias com o telescópio Perkin-Elmer de 1.6m. Este instrumento possibilita a observação de espectros com resoluções relativamente altas, o esquema mostrado na figura 2.6 apresenta, de maneira simplificada, a óptica deste instrumento.

Os números na figura representam respectivamente a lente de conversão (f/150 para f/31.2), o espelho 5, a fenda, o colimador (f/31.2), a rede, o corretor Schmidt, o espelho da câmara (f/4) e por último, o detector. Deve-se atentar que o colimador foi omitido assim como o espelho entre 7 e 8.

Este espectrógrafo pode ser utilizado com uma das redes de difração, uma de 600 l/mm e outra holográfica com 1800 l/mm. Neste trabalho todas as observações foram

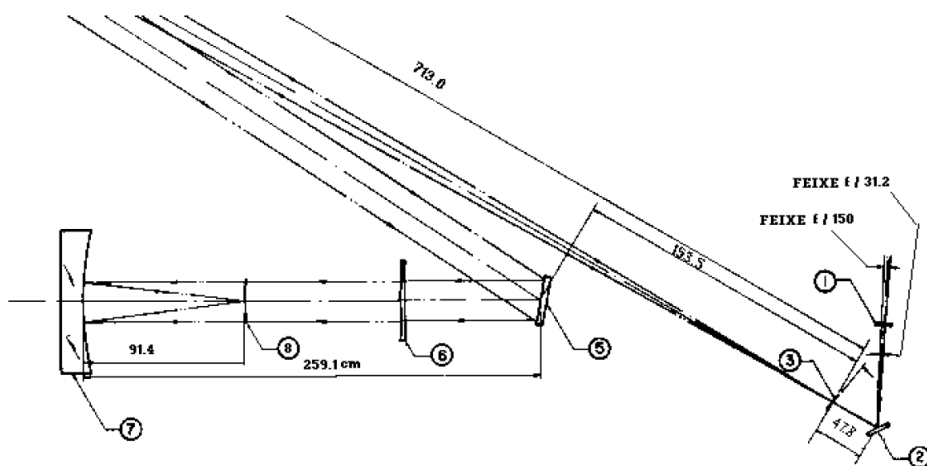


Figura 2.6: Representação simplificada do espectrógrafo Coudé

feitas usando a de 1800 l/mm, sendo utilizada a primeira ordem direita a fim aproveitar ao máximo possível a luz dos alvos, de forma conciliada à grande resolução espectral desejada.

A tabela 2.4 tem informações gerais a respeito do instrumento, e a tabela 2.5 mostra características do espectrógrafo para diferentes configurações de rede. Um exemplo de resultado obtido com o espectrógrafo Coudé é mostrado na figura 2.7.

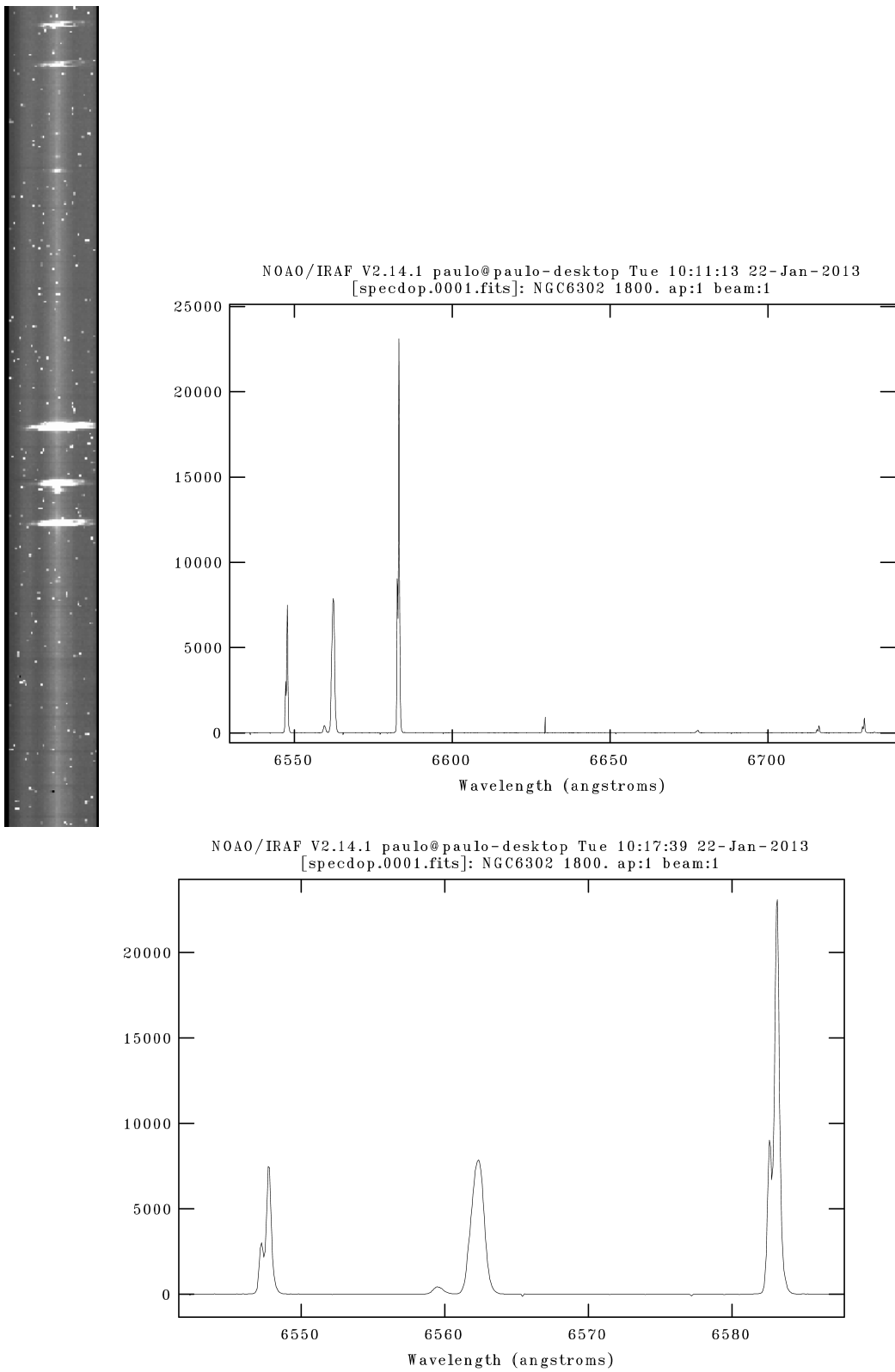


Figura 2.7: Exemplo de resultado obtido com o espectrógrafo Coudé, para NGC6302, à esquerda tem-se a imagem do espectro sem tratamento e à direita, o espectro reduzido.

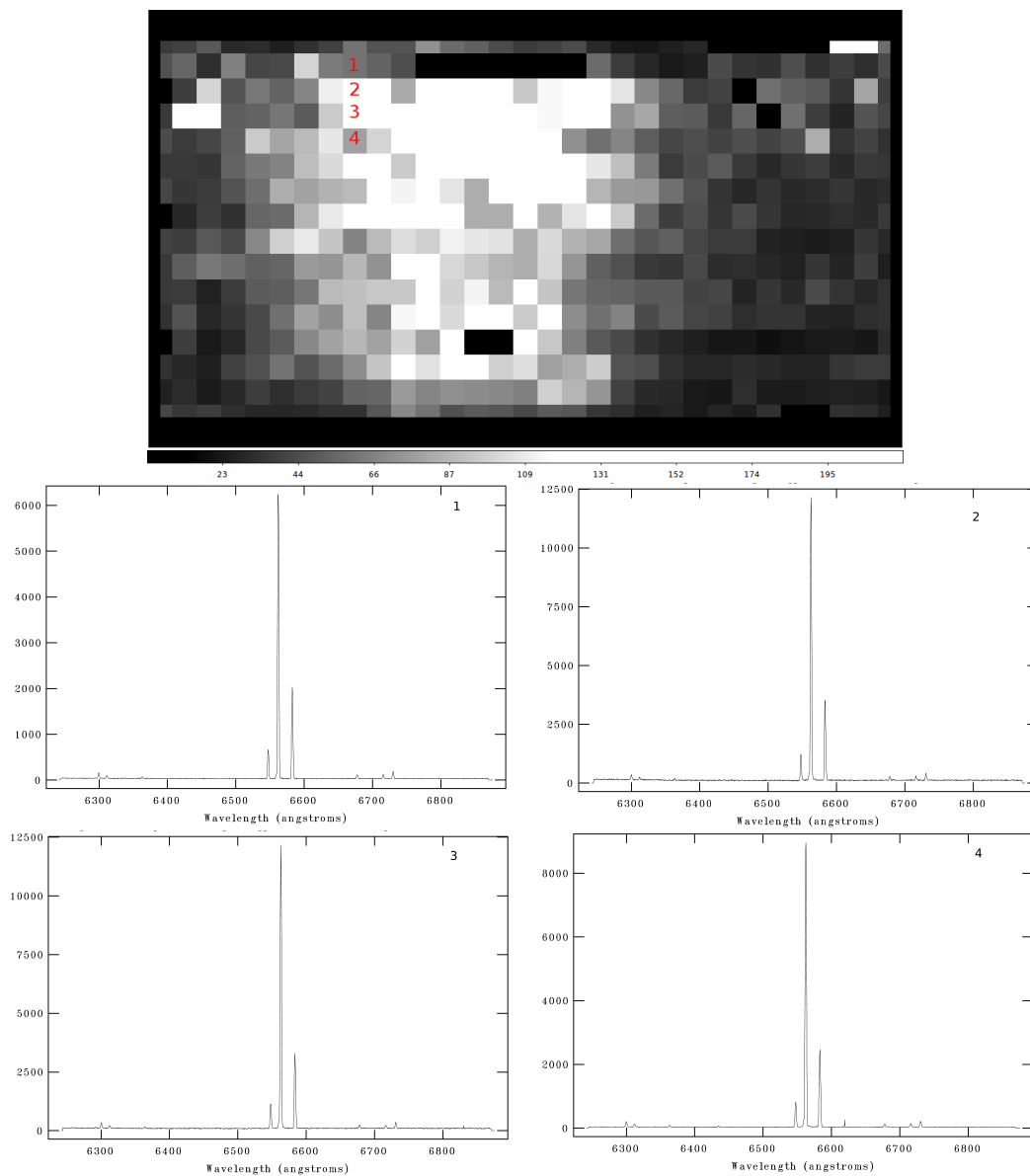


Figura 2.8: Exemplo de resultado obtido com o espectrógrafo Eucalyptus, em cima tem-se a imagem reconstruída do objeto com quatro elementos de resolução marcados aos quais se referem os espectros mostrados embaixo.

Análise dos Dados de IFU

Após a redução e obtenção das tabelas de fluxo das imagens obtidas em maio de 2011, foram construídos os mapas de fluxo e diagramas de diagnóstico para o grupo de PNe já descrito. Neste capítulo são descritas as propriedades físicas obtidas com o uso da técnica de espectroscopia de campo integral. Os resultados descrevem de forma geral a distribuição angular destas propriedades, mostradas nos mapas de fluxo, são evidenciadas também as correlações entre as abundâncias relativas, os diagramas de diagnóstico, com o objetivo de evidenciar inhomogeneidades nas planetárias estudadas além de classificar estes objetos e caracterizar as propriedades físicas deles.

3.1 Mapas de Fluxo

Os mapas de fluxo foram obtidos com o objetivo de mostrar de forma clara a distribuição angular das propriedades físicas nas regiões centrais das nebulosas. Os mapas são baseados nos fluxos das linhas dos espectros de cada objeto, que foram obtidas para cada elemento de resolução.

Os mapas de fluxo aqui apresentados são:

Mapas em $H\alpha$, $[\text{SIII}](6311\text{\AA})$, $[\text{SIII}](6311\text{\AA})/[\text{SII}](6717 + 6731\text{\AA})$ e densidades. Os mapas de $H\alpha$ mostram a imagem de cada objeto neste comprimento de onda, assim como o mapa em $[\text{SIII}](6311\text{\AA})$, porém deve-se salientar aqui que estes mapas mostrarão características distintas do objeto.

O mapa em $H\alpha$ mostrará um panorama global das emissões permitidas, originadas da recombinação do Hidrogênio, sendo assim estes mapas são pouco dependentes das condições físicas do meio. Contrastando com o caso anterior, o mapa em $[\text{SIII}](6311\text{\AA})$ evidenciará as

regiões com mais alta excitação, logo este mapa proporciona a localização da região mais próxima ao núcleo da planetária, onde está o remanescente estelar, devido ao potencial de excitação relativamente alto da linha citada.

O mapa de $[\text{SIII}](6311\text{\AA})/[\text{SII}](6717 + 6731\text{\AA})$ tem como objetivo mostrar o contraste entre as regiões de alta e baixa excitação, usando a linha proibida disponível com maior potencial de ionização e uma de menor potencial. Os mapas de densidade foram construídos usando o duplete do enxofre, $[\text{SII}](6717\text{\AA})$ e $[\text{SII}](6731\text{\AA})$, pois estas linhas são sensíveis à variação da densidade, como já mostrado na introdução e salientado a seguir.

3.2 Cálculo das densidades

Assim como mostrado na introdução, certas linhas excitadas colisionalmente, as linhas proibidas, são sensíveis às condições físicas do meio emissor, por isso para o cálculo da densidade, pode-se fazer uso de linhas de um mesmo íon porém com pequenas diferenças de potencial de excitação, pois a razão destas linhas será sensível à densidade. Muitos pares de linhas podem ser utilizados para tal fim, como $[\text{SII}]$, $[\text{NI}]$, $[\text{Cl III}]$, $[\text{ArIV}]$ e $[\text{K V}]$, todas elas na região do ótico. Devido ao domínio espectral escolhido, o par a ser usado será o do $[\text{SII}]$. O vínculo entre a razão do duplete utilizado e a densidade é fornecido pela curva mostrada na figura 3.1 (Osterbrock 2006).

Segundo a equação 1.6 não existe uma dependência direta da densidade com a temperatura, porém a taxa de excitação colisional, C , apresenta uma forte dependência desse parâmetro. Em consequência, como não possuíamos informação espectral que permitisse o cálculo da temperatura, foi necessário fixar arbitrariamente um valor para a mesma, $10000K$.

Caso tivéssemos informação espectral complementar poderíamos ter utilizado o algoritmo descrito a seguir, utilizado por Faes (2011) sendo que o código que o implementa é de autoria do mesmo. Este algoritmo usa $10000K$ como valor de temperatura inicial, calculando para este valor as densidades; o resultado obtido é confrontado com o valor esperado para as taxas de excitação colisional do $[\text{NII}]$, de forma que a operação é repetida inúmeras vezes até que o valor da densidade convirja, dentro de uma aproximação aceitável. Este algoritmo limita também as densidades que podem ser encontradas de acordo com a física do problema, sendo assim o limite inferior é de 50 cm^{-3} e superior é 20000 cm^{-3} para as

densidades trabalhadas.

Foram construídos mapas de densidade para as nebulosas da amostra, que tem como objetivo evidenciar variações locais de densidade, que podem constituir na realidade microestruturas. Para uma visualização adequada destas microestruturas, estas devem ter no mínimo o tamanho de cada elemento de resolução, de forma que é esperado que microestruturas menores sejam invisíveis nos mapas. Portanto é esperado que as menores nebulosas da amostra não apresentem muitas estruturas em consequência da limitação instrumental.

Deve-se salientar também que S^+ é um bom íon para o cálculo da densidade eletrônica, porém o método apresenta limitações, esse íon, de forma geral, é um traçador melhor para regiões mais externas ou mais densas da nebulosa, regiões onde o grau de ionização é menor (Osterbrock 2006), de forma que a representatividade das densidades de toda a nebulosa deve ser analisada com muito cuidado. O método usado geralmente se aplica às nebulosas como um todo, sendo calculada a densidade eletrônica média. O que é feito neste trabalho é pouco encontrado na literatura de forma que há poucas fontes para comparação, pois neste caso obtivemos a densidade para cada elemento de resolução do IFU.

É importante notar o perfil apresentado na figura 3.1 para o íon S^+ . Deve-se atentar para a tendência da curva de atingir valores constantes de densidade para determinadas faixas de valores da razão do duplete do S^+ , sendo assim deve-se ter em mente que para determinados valores da razão citada, há uma baixa sensibilidade à variável física em questão. Nestes casos, os valores derivados e mostrados a seguir nos mapas são um limite superior para o valor das densidades e podem apresentar discrepâncias em relação aos valores apresentados na literatura. Os erros associados e a consequente confiabilidade atribuída aos valores encontrados são apresentados nos próprios mapas, sendo calculados com o *pnpack*.

3.3 Diagramas de Diagnóstico

Usando os fluxos medidos, foram construídos três diferentes diagramas de diagnóstico, já apresentados na introdução:

$-\log(H\alpha/[SII]6725\text{\AA}) \times \log(H\alpha/[NII](6548+6584)\text{\AA})$ que mostra a relação entre a emissão do S^+ com o N^+ ambos relacionados com o $H\alpha$, mostrando a relação entre as abundâncias relativas entre os dois íons.

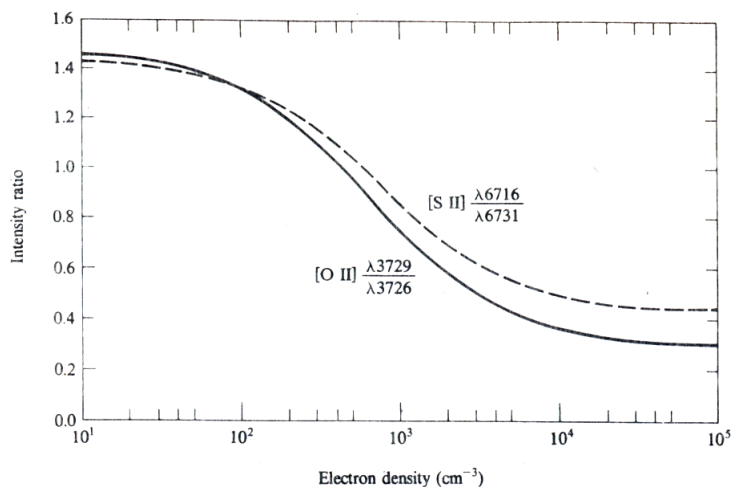


Figura 3.1: Dependência da razão do duplete do S^+ e O^+ com a densidade, (Osterbrock 2006).

-A razão das linhas do [SII] ($6717\text{\AA}/6731\text{\AA}$) é relacionada a $\log(H\alpha/[SII]6725\text{\AA})$ e a $\log(H\alpha/[NII]6548 + 6584\text{\AA})$, esta relação vincula as densidades às abundâncias relativas do S^+ e N^+ .

É muito importante notar as diferentes funções dos diagramas de diagnóstico e dos mapas de fluxo. Os mapas de fluxo têm o objetivo de mostrar de forma direta as variações nos parâmetros físicos derivados das razões de linha ou da medida direta dos fluxos das linhas. Os diagramas de diagnóstico, por sua vez, mostram a correlação entre as razões de linha e tem o objetivo de classificar objetos usando o fluxo integrado destes. Os diagramas de diagnóstico serão usados para um propósito diferente do usual, pois os pontos relativos a cada elemento de resolução serão colocados nos diagramas a fim de entender e vincular estes pontos aos parâmetros físicos de interesse.

3.3.1 NGC 3918

Dentre os objetos estudados, a nebulosa NGC 3918 apresenta a melhor relação sinal ruído, S/R, sendo o objeto com maior brilho superficial, a presença das linhas de emissão nebulosa é marcante nos espectros por toda a extensão da nebulosa. Praticamente todas as linhas de emissão presentes nestes espectros foram utilizadas na análise, com exceção da linha HeI(6678\AA), por dois motivos, seu baixo fluxo e sua proximidade à linha de Balmer

$H\alpha$.

A figura 3.2 mostra a imagem em alta resolução de NGC 3918, assim como os mapas de fluxo, a figura 3.3 mostra os diagramas de diagnóstico construídos. Deve-se atentar para a posição e tamanho do campo do espectrógrafo Eucalyptus marcado por uma caixa azul. Os mapas de $H\alpha$ e $[SIII](6311\text{\AA})$ podem ser vistos na figura e com eles pode-se ver a imagem em $H\alpha$ que evidencia a região da nebulosa com maior brilho superficial, o mapa de $[SIII](6311\text{\AA})$ mostra a região com maior grau de excitação localizando de forma geral a região central da planetária.

O próximo mapa de fluxo é o de $[SIII](6311\text{\AA})/[SII](6717 + 6731\text{\AA})$, que mostra claramente o contraste da região de alta e baixa excitação, o perfil é regular e esperado. A planetária aparenta possuir um aspecto esférico nos mapas, com a região interna mostrando um maior grau de ionização e excitação, em contraste as regiões externas seriam menos ionizadas.

O mapa que mostra o resultado mais interessante a respeito de NGC 3918 é o de densidade, este revelou um interior pouco denso, o que concorda com o tamanho relativamente grande da região de alta excitação, mostrada no mapa de $[SIII](6311\text{\AA})$, já que o gás teria uma opacidade menor em virtude da densidade, esta conclusão é embasada por Clegg et al. (1987), que afirmam que o objeto é opticamente fino.

Deve-se notar que a razão dos $[SII]6717/6731$ não é um bom meio de calcular a densidade em regiões pouco densas ou com graus de excitação alto, logo os resultados encontrados acima devem ser examinados com cautela. O que se pode seguramente afirmar, de acordo com os outros mapas é o moderado grau de excitação encontrado, que infelizmente não pode ser melhor caracterizado devido à ausência de informação a respeito de linhas de alta excitação, tais como $[Cl III]$, $[ArIV]$ e $[K V]$, que permitiriam também o cálculo adequado da densidade nesta região.

Os diagramas de diagnóstico obtidos revelarão informações a respeito das abundâncias relativas dos íons N^+ e S^+ além da correlação entre eles. As abundâncias propriamente ditas não puderam ser calculadas neste trabalho pois não há informação espectral suficiente.

Os três diagramas de diagnóstico mostram perfis regulares e concentrados, sendo assim não há um grande gradiente na abundância dos íons N^+ e S^+ , a distribuição dos pontos nos diagramas representa justamente a variação das abundâncias iônicas dentro da planetária,

o que é facilmente visualizado no diagrama I.

Os diagramas II e III apresentam maiores dispersões nos pontos, porém ainda preservam a tendência do diagrama I. O ponto a ser notado é que a razão $[SII]6717/6731$ caracteriza duas regiões distintas da planetária, uma região interna com um valor médio bem definido e outra com poucos pontos mais espalhados, pontos esses associados a ruído. O mesmo efeito pode ser observado no mapa de densidades.

Deve-se notar também que as regiões estabelecidas por Riesgo e López (2006) coincidem com aquelas estudadas neste trabalho sendo que certamente o valor médio para o mesmo pertence às regiões citadas.

3.3.2 NGC 6818

A nebulosa NGC 6818 não apresenta um sinal ruído tão bom quanto o caso anterior, porém as observações têm qualidade suficiente para a análise desejada. A figura 3.4 mostra a imagem em alta resolução assim como os mapas de fluxo obtidos, a imagem em alta resolução mostra uma riqueza em subestruturas, mostrando claramente uma segmentação em duas camadas gasosas concêntricas. O mapa em $H\alpha$ mostra claramente o mesmo; com semelhança muito grande à imagem de alta resolução. O mapa de $[SIII](6311\text{\AA})$ em contrapartida mostra a região central da planetária, pode-se ver até o remanescente estelar, assim como uma estrela de campo, visíveis devido ao baixo fluxo em $[SIII](6311\text{\AA})$ desta nebulosa.

O mapa da razão $[SIII](6311\text{\AA})/[SII](6717 + 6731\text{\AA})$ mostra um perfil mais uniforme que em NGC 3918, mostrando o moderado grau de excitação da nebulosa. Pode-se ver um filamento com menor grau de excitação, o que pode refletir apenas um efeito de projeção, já que o mesmo pode estar mais distante do remanescente estelar daí se justificaria a menor excitação. Não faz sentido esta região ser mais densa já que a mesma não aparece no mapa de densidade, que mostra um perfil uniforme, com densidade média para a camada interna no intervalo de 14000 a 19000 cm^{-3} . Deve-se perceber que a granulação observada nas bordas do mapa de densidade é gerada por baixo sinal ruído para as linhas de enxofre nesta região, e não tem significado físico. Ao contrário de NGC 3918, os resultados podem ser considerados representativos, já que a nebulosa não apresenta nenhum dos fatores limitantes à técnica usada, tais como baixa densidade e alta ionização.

Hyung et al. (1999), apresentam um valor para a densidade da planetária estudada, o valor proposto é da ordem de 2000 cm^{-3} , calculado usando as linhas C^{++} e outros íons, incluindo o próprio S^+ . Deve-se notar que o valor apresentado nesse artigo de forma alguma desmente o valor encontrado neste trabalho, nosso resultado é um limite superior e está de acordo com o valor de prévio, além do mais, vários íons não estão presentes simultaneamente nas mesmas regiões da planetária, representando densidades locais, como o próprio C^{++} .

Os diagramas de diagnóstico apresentados, figura 3.5, mostram um perfil bem uniforme. Pode-se ver nos três diagramas pontos espalhados fora da região estabelecida para as planetárias, estes pontos são associados em sua maior parte ao baixo sinal/ruído nas bordas. Nos diagramas II e III, esta dispersão está principalmente associada à razão $[SII](6717\text{Å})/[SII](6731\text{Å})$, pois em algumas regiões da imagem a emissão do S^+ está no nível do ruído. No caso do íon N^+ isto não ocorre já que seu fluxo é bem maior.

Para o diagrama I a dispersão dos pontos vem da variação local das abundâncias relativas. O diagrama I relaciona as abundâncias relativas dos íons S^+ e N^+ , nele pode-se perceber que NGC 6818 possui menor abundância relativa de ambos os íons em relação a NGC 3918, percebe-se também um maior espalhamento dos pontos o que revela uma distribuição maior de abundâncias, o que pode ser reflexo da estrutura de ionização mais intrincada, pois usando os mapas de fluxo, principalmente o de $[SIII](6311\text{Å})$, pode-se ver algo como frentes de ionização, regiões nas bordas da camada analisada que apresentam maior brilho superficial em $[SIII](6311\text{Å})$.

Os diagramas II e III relacionam a densidade com as abundâncias iônicas relativas mostrando uma correlação maior entre as variações de abundâncias e a densidade, o que mostra uma dependência maior da opacidade com a densidade. Isto não é observado da mesma forma em NGC 3918, a dependência menor neste caso deve de fato estar relacionada a uma menor densidade. Deve-se notar que essa é uma análise simplificada, outros fatores podem influenciar diretamente na opacidade do gás além da densidade eletrônica, tal como a quantidade de poeira imersa na planetária, porém uma análise nestes moldes foge aos objetivos deste trabalho.

Mais uma vez as regiões estabelecidas por Riesgo e López (2006) contemplaram bem os pontos de forma que seu valor médio estaria dentro das elipses citadas, a planetária de

forma geral mostrou-se menos homogênea que o caso anterior estudado, NGC 3918.

3.3.3 NGC 6302

A nebulosa NGC 6302, é o objeto de maior extensão angular trabalhado, fato que pode ser constatado ao visualizar sua imagem de alta resolução juntamente com o campo do Eucalyptus destacado na mesma imagem, figura 3.6. Esta nebulosa possui um excelente sinal ruído assim como um rico espectro, vários estudos a respeito desta já foram realizados, porém nenhum com a natureza pretendida aqui.

A figura 3.6 apresenta, além da imagem em alta resolução já citada, os mapas de fluxo, análogos aos mostrados para as outras nebulosas. O mapa em $H\alpha$ exhibe claramente a região com maior brilho superficial, esta região é quase análoga à região mostrada no mapa do $[SIII](6311\text{\AA})$, porém o fluxo do segundo é muito inferior, deve-se salientar também que não é possível ver o remanescente estelar. É muito clara a bipolaridade do objeto estudado e deve-se lembrar que se acredita numa correlação entre a bipolaridade de planetárias e a presença de uma binária central, Schwarz (2000).

O mapa de $[SIII](6311\text{\AA})/[SII](6717 + 6731\text{\AA})$ mostra um pequeno gradiente de excitação na região observada, deve notar que a uniformidade observada é esperada, pois só está sendo observada uma pequena porção central da nebulosa. A nebulosa tratada é conhecida na literatura, vide Feibelman (2001), pela presença marcante de linhas de alta excitação, tais como $[SiVI]$, $[NeV]$ e $[NeVI]$ no infravermelho (Casassus et al., 2000), assim como $[SiVII]$ também no infravermelho (Ashley e Hyland, 1988) e outras observadas em outros comprimentos de onda como o ultravioleta. Logo o $[SIII](6311\text{\AA})$ não funcionará aqui como um indicador da região central tão bom quanto para os casos anteriores, devido ao extremo de excitação apresentado.

Como já dito, o duplete do enxofre não é bom para medir a densidade em regiões rarefeitas nem com graus altos de excitação, porém o resultado encontrado para as medidas revelou uma regularidade e consistência bastante satisfatória, o que leva a concluir que estas densidades não representam a região com maior grau de excitação mas de uma região mais externa concêntrica, responsável majoritária da emissão desse íon. A emissão em S^{++} também deve ser associada a esta região, daí o fluxo relativamente baixo do íon S^{++} seria justificado, em contraste por exemplo do caso de NGC 3918.

Devido ao perfil extremamente regular apresentado no mapa de densidade, pode-se supor que a densidade típica do gás caracterizado é da ordem de 20000 cm^{-3} , resultado que está de certa forma em concordância com os cálculos de Feibelman (2001), realizados para as regiões de alta excitação, assim como os valores obtidos de simulações com códigos de fotoionização (Wright et al., 2011), pois o valor que foi encontrado em nossos resultados é praticamente o mesmo encontrado para os *outflows* na citada simulação. Existem algumas flutuações mínimas no mapa referido, a maior e central deve estar associada a algum componente, tal como uma microestrutura da planetária, menos denso e mais afastado na mesma linha de visada, os outros podem ser associados a estruturas ainda menores e ruído.

Os diagramas de diagnóstico podem ser observados na figura 3.7, estes diagramas possuem um perfil muito concentrado e regular, fato este que realça a homogeneidade da região estudada que corresponde a uma pequena fração da nebulosa.

O diagrama I relaciona as abundâncias relativas dos íons N^+ e S^+ . A primeira conclusão que pode ser tirada da observação direta deste diagrama é o excesso de N^+ nesta nebulosa em comparação aos casos já estudados. Percebe-se também uma riqueza mais moderada mas marcante de S^+ . Deve-se notar que essa riqueza dos íons citados deslocará os pontos para regiões inferiores no diagrama, de modo que essa planetária não seria classificada como tal por Minello e Sabbadin (1977), porém mais uma vez a reformulação dos diagramas clássicos por Riesgo e López (2006) se mostrou mais eficiente e o objeto foi classificado como PN.

O diagrama II mostra a correlação entre a densidade e a abundância relativa do íon N^+ . Deve-se notar a mesma tendência de localização dos pontos já citada para o diagrama I: o excesso de N^+ mais uma vez deslocará bastante os pontos dentro do diagrama, neste caso, de acordo com o diagrama clássico, Minello e Sabbadin (1977), esta nebulosa poderia ser confundida com um remanescente de supernova, fato este muito coerente já que se trata de uma nebulosa com alto grau de excitação, que são características típicas dos remanescentes de supernova, apesar da física envolvida em ambos os casos ser um pouco diferente, pois nos remanescentes o papel da ionização/excitação por choques será muito mais relevante.

O diagrama III apresenta a mesma tendência já citada e mostra também um perfil concentrado. Diferentemente da associação feita para o caso de NGC 6818, a densidade aqui pode não ser diretamente correlacionada à opacidade. Deve-se perceber poucos pontos

não correlacionados com a maioria, isso nos três diagramas, fora mesmo até das regiões associadas às planetárias. Associa-se a esses pontos ruído provocado por fibras com baixa transmissão, ocasionando um baixo sinal/ruído nestes pontos.

3.3.4 *Hen 2-112*

A nebulosa Hen 2-112 é a única da amostra que tem toda sua extensão coberta pelo campo do espectrógrafo Eucalyptus, esta nebulosa aparenta ter um formato esférico, de acordo com a imagem do DSS, figura 3.8. Nesta mesma figura pode-se ver os mapas de fluxo construídos.

O mapa em $H\alpha$ mostra claramente a região de maior brilho superficial, o mapa referido não apresenta nenhum detalhe a respeito das subestruturas desta nebulosa, não foram encontradas em bancos de dados imagens que pudessem revelar tais detalhes. De forma geral as imagens disponíveis eram semelhantes à mostrada no DSS, não há imagens em alta resolução obtidas com telescópios espaciais, ao contrário dos casos já estudados.

O mapa em $[SIII](6311\text{\AA})$ revela um fluxo uniforme e baixo, sendo assim esse mapa não fornece a localização do remanescente estelar, porém devido à simetria relativamente simples pode-se assumir que o mesmo se localiza no centro da distribuição esférica de fluxo. Esta afirmação é meramente especulação, estudos do campo de velocidades desta nebulosa seriam necessários para saber se esta aparência não é apenas produto da linha de visada.

O mapa de $[SIII](6311\text{\AA})/[SII](6717 + 6731\text{\AA})$, mostra um gradiente muito grande de excitação nesta nebulosa, de forma que a região onde se localiza o remanescente estelar fica saliente neste mapa como a única região onde há maior fluxo em S^{++} que em S^+ . De forma geral pode-se dizer que esta nebulosa apresenta um perfil geral de baixo grau de excitação. Deve-se atentar para os pontos nos mapas que não tem significado físico, visíveis nas bordas dos mesmos, estes pontos são relativos ao ruído relativo às medições de fluxo do S^+ , devido ao S/R baixo na periferia da nebulosa. Este efeito também será visível no mapa de densidade e nos diagramas de diagnóstico, porém é facilmente identificado, pois tais pontos possuem valores muito variáveis, sendo assim pode-se caracterizar o objeto sem grandes problemas.

O mapa de densidade mostra um perfil muito regular, mostrando irregularidades apenas associadas ao ruído, deve-se salientar que o mesmo é maximizado devido ao baixo fluxo do

S^+ .

Os diagramas de diagnóstico mostram um perfil de pontos mais espalhados que os outros vistos até então. Isto é esperado devido o fato de estar-se analisando a nebulosa como um todo e não apenas a região central, algo que não era possível para as outras estudadas devido ao tamanho do campo do Eucalyptus.

O diagrama I revela a correlação entre as abundâncias relativas e mostra o perfil mais concentrado dos três, este mesmo diagrama revela também uma alta abundância nos íons S^+ e N^+ , o que é compatível com o baixo grau de excitação da nebulosa. Usando o diagrama de Minello e Sabbadin (1977), pode-se ver que os pontos caem em sua maioria na região estabelecida para as planetárias, os pontos com desvios maiores estão relacionados com o ruído.

Os diagramas II e III mostram a correlação entre as abundâncias relativas e a densidade, diretamente relacionada à razão dos enxofres, em ambos os casos há um espalhamento considerável dos pontos, fato este associado a gradientes internos de abundâncias e densidades.

Globalmente, para os diagramas II e III, as elipses de Riesgo e López (2006) contemplam bem os pontos de forma que o valor médio destes estaria certamente nas regiões citadas.

3.3.5 *Hen 2-103*

A nebulosa Hen 2-103 é mostrada na figura 3.10. A razão S/R das observações realizadas é relativamente ruim, porém suficiente para que os objetivos propostos sejam atingidos. Pode-se ver juntamente com a imagem os mapas de fluxo construídos. A região com maior brilho superficial é vista observando o mapa em $H\alpha$. O mapa em $[SIII](6311\text{\AA})$ é bem uniforme e ruidoso, o que pode indicar que esta nebulosa possui um baixo grau de excitação, mas também pode ser um efeito instrumental.

O mapa de $[SIII](6311\text{\AA})/[SII](6717+6731\text{\AA})$ apenas confirma a tendência já observada, deve-se atentar para o ruído nas bordas, mas os pontos centrais apresentam informação bastante coerente, porém seria desejável obter pontos com melhor razão S/R e informação espectral mais rica de modo a fornecer informações mais precisas a respeito do estado de excitação da planetária.

A mesma figura 3.10 apresenta também o mapa de densidade, onde se pode ver que a região com maior densidade está diretamente relacionada com a região com maior brilho

superficial. Pode-se perceber que a centralização do objeto estudado no campo do IFU não foi feita de forma precisa, isso se deve principalmente ao brilho superficial relativamente baixo deste objeto, o que dificultou seu posicionamento adequado no campo durante a observação.

A figura 3.11 apresenta os diagramas de diagnóstico construídos para a nebulosa estudada. O diagrama I mostra um perfil bem regular, praticamente todos os pontos estão localizados na região definida por Minello e Sabbadin (1977), mostrando apenas poucos pontos relativos ao ruído. As duas abundâncias, iônicas, S^+ e N^+ , mostram uma boa correlação, o que é sempre esperado já que seus potenciais de ionização têm valores próximos.

Os diagramas II e III mostram claramente uma distribuição vertical de valores, isso está diretamente ligado ao ruído associado à razão $[SII](6717\text{Å})/[SII](6731\text{Å})$, logo é complicado estabelecer relação entre os parâmetros físicos medidos e os pontos apresentados já que é complicado separar pontos atribuídos ao sinal do objeto do ruído associado.

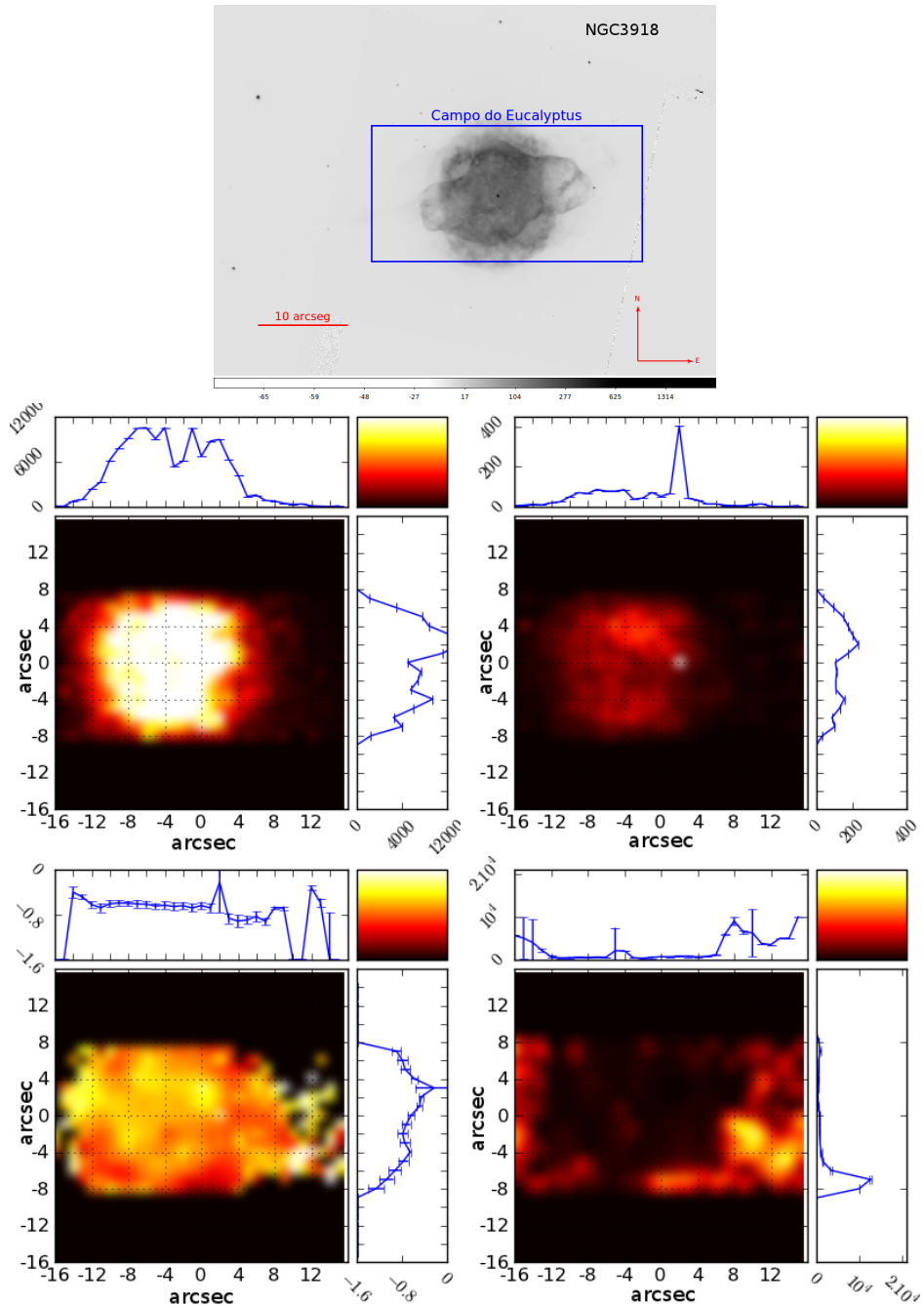


Figura 3.2: A figura mostra a imagem em alta resolução obtida pela câmera planetária do HST (topo) para NGC3918, assim como os mapas de fluxo, $H\alpha$, dado em contagens, (meio esquerda), $[SIII](6311\text{\AA})$, também em contagens, (meio direita), $[SIII](6311\text{\AA})/[SII](6717 + 6731\text{\AA})$, logaritmo decimal da razão das contagens, (abaixo esquerda) e densidade, e^-/cm^{-3} , (abaixo direita).

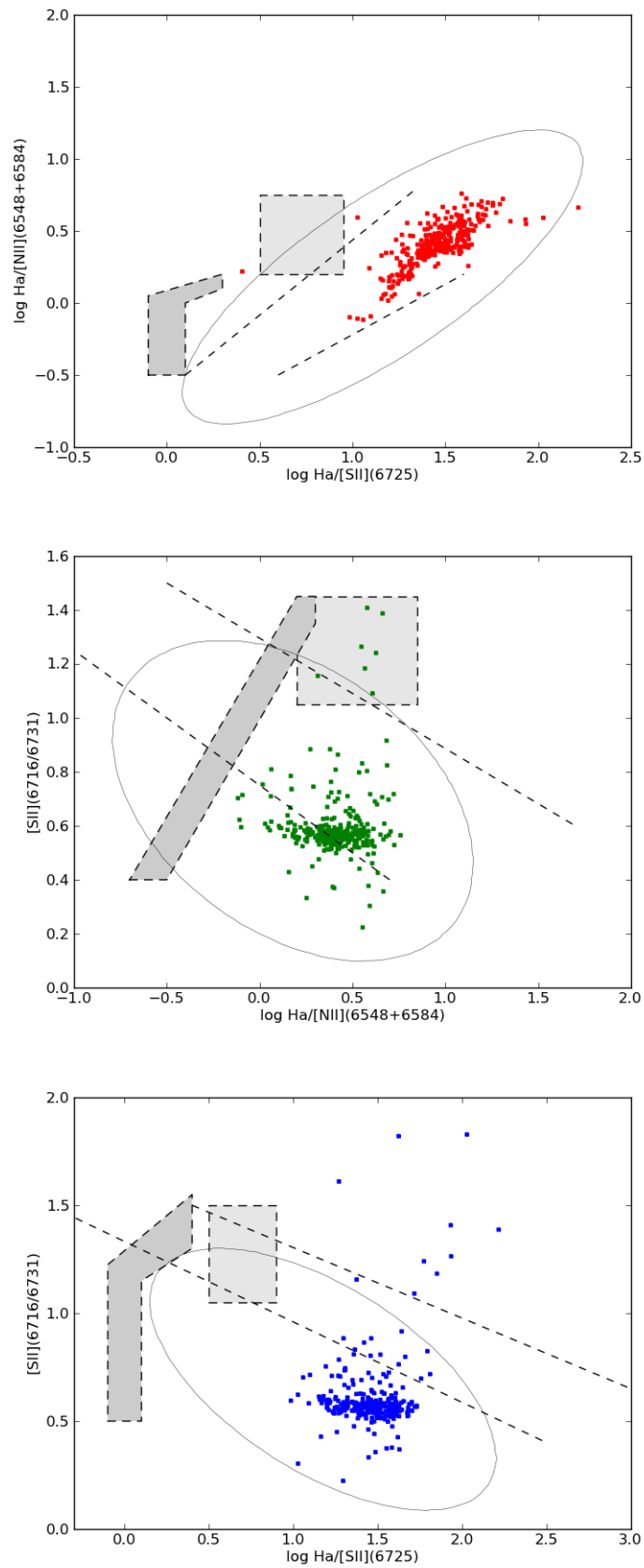


Figura 3.3: A figura mostra os três diagramas de diagnóstico construídos para NGC3918, diagrama I (topo), diagrama II (meio) e diagrama III (abaixo).

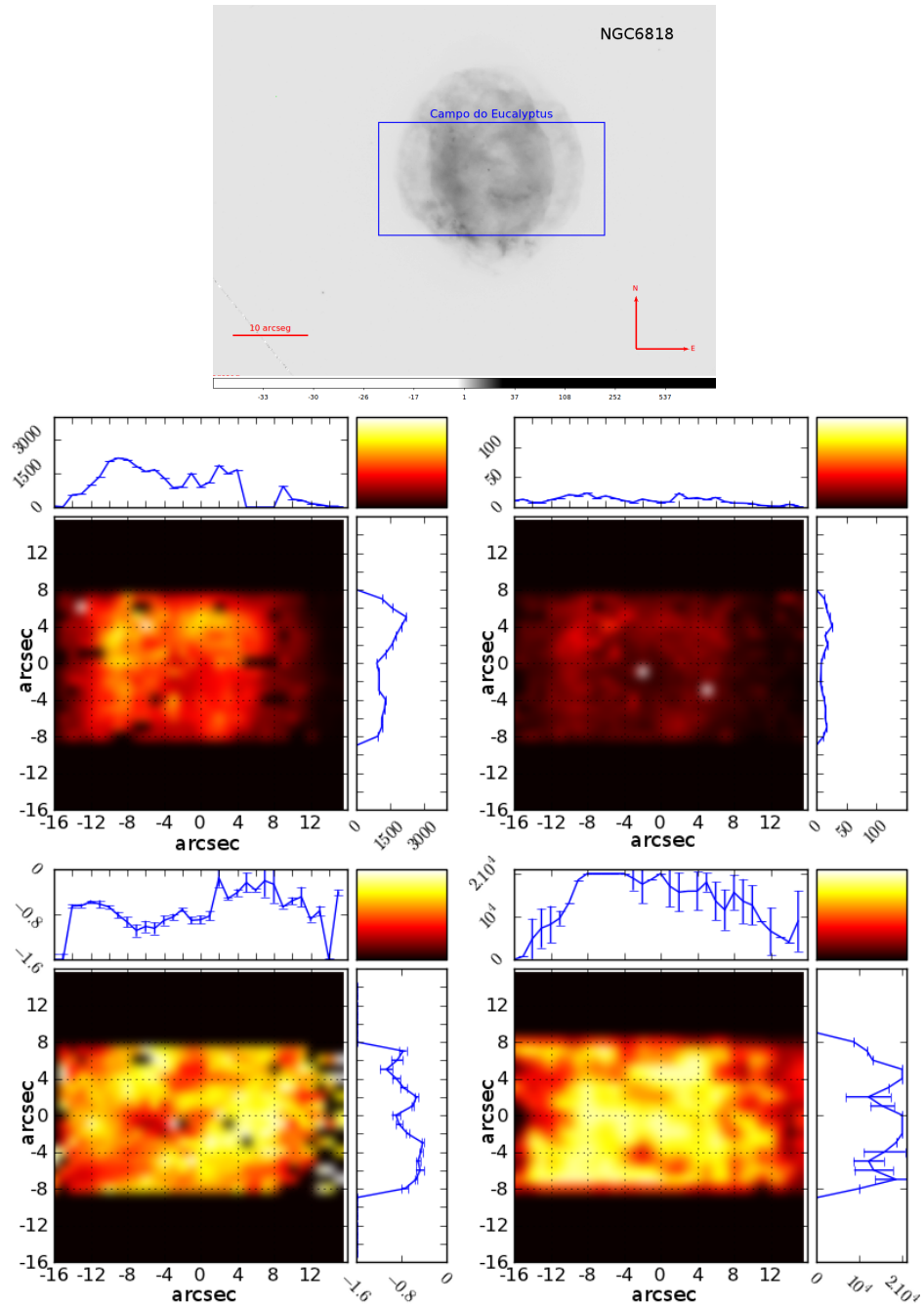


Figura 3.4: A figura mostra a imagem em alta resolução obtida pela câmera planetária do HST (topo) para NGC6818, os mapas de fluxo estão dispostos de forma análoga à figura 3.2.

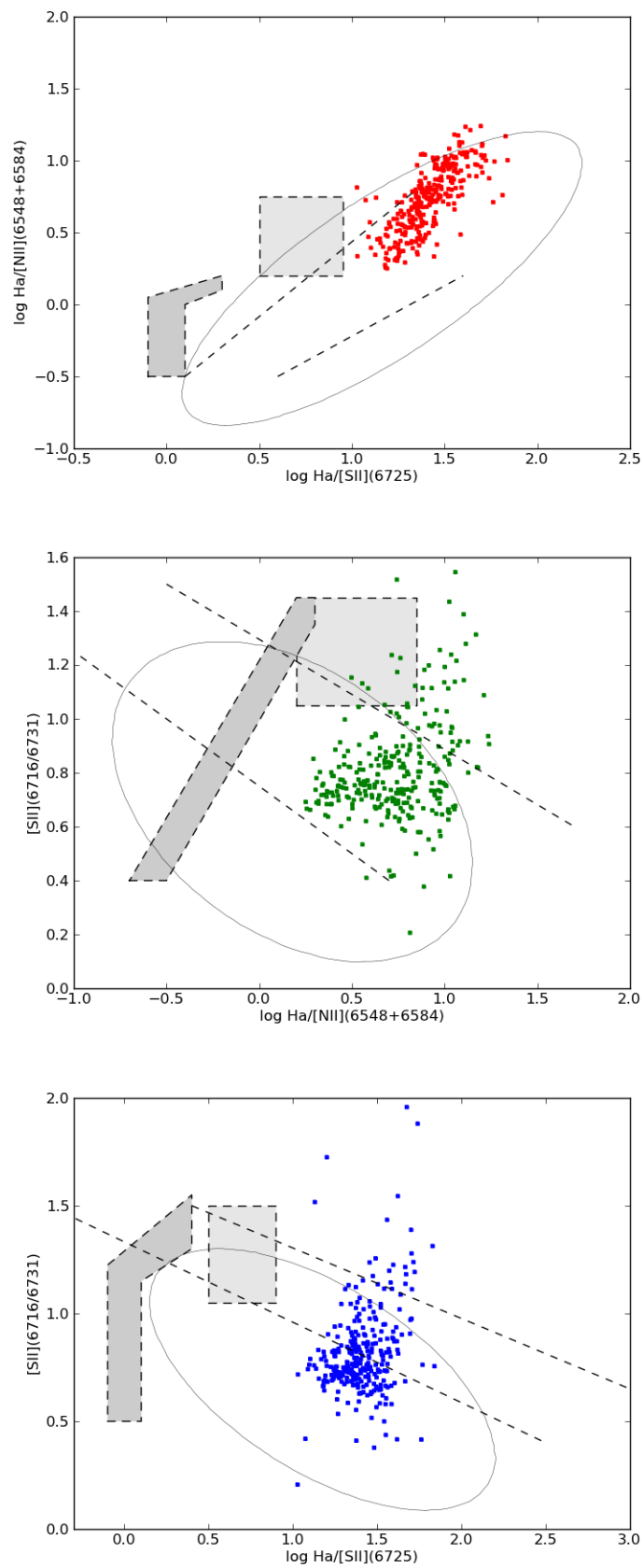


Figura 3.5: A figura mostra os três diagramas de diagnóstico construídos para NGC6818, diagrama I (topo), diagrama II (meio) e diagrama III (abaixo).

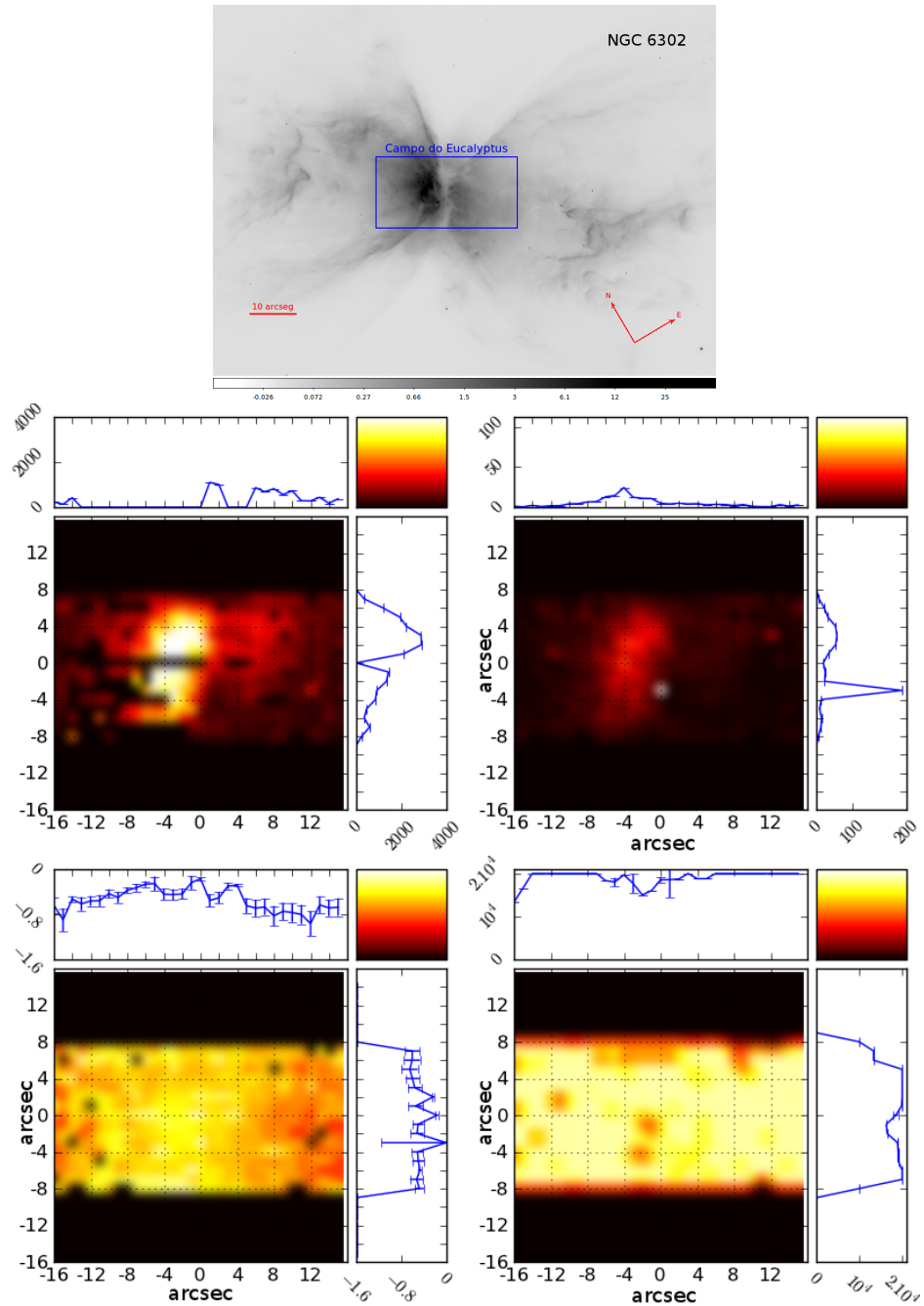


Figura 3.6: A figura mostra a imagem em alta resolução obtida pela câmera planetária do HST (topo) para NGC6302, os mapas de fluxo estão dispostos de forma análoga à figura 3.2..

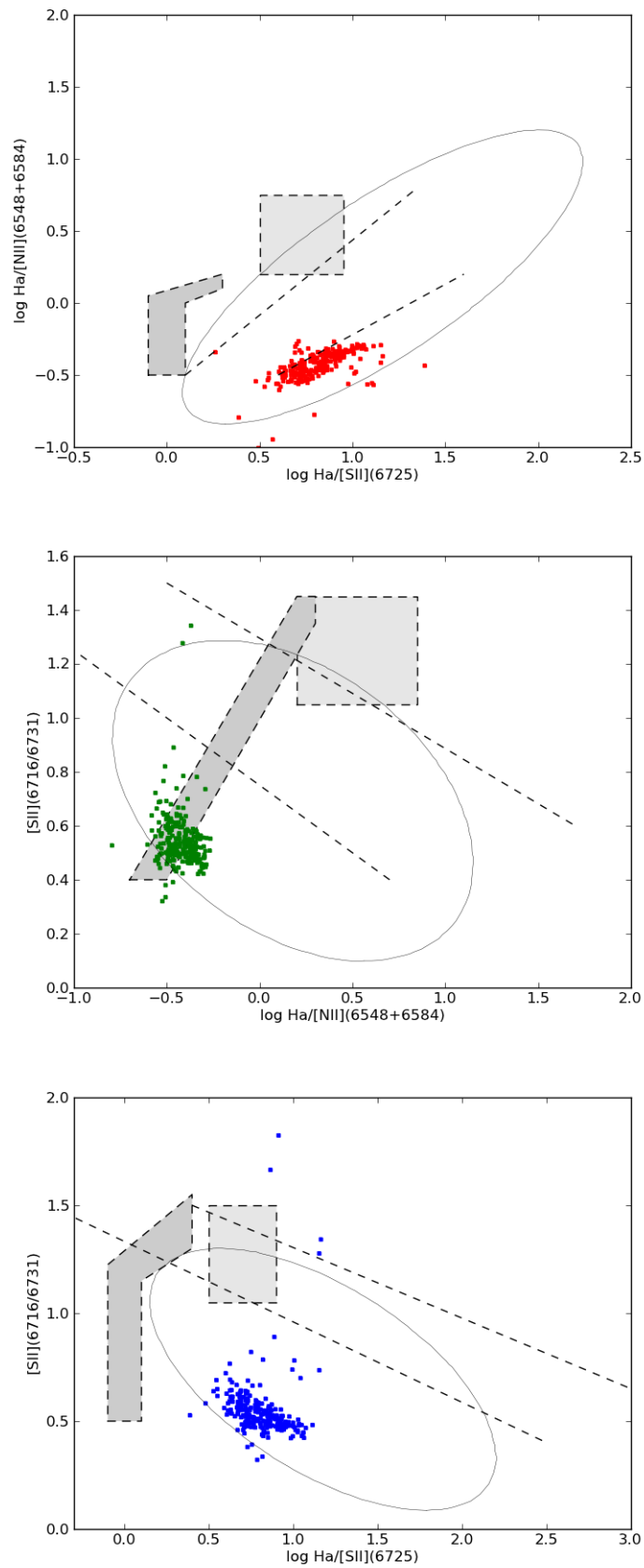


Figura 3.7: A figura mostra os três diagramas de diagnóstico construídos para NGC6302, diagrama I (topo), diagrama II (meio) e diagrama III (abaixo).

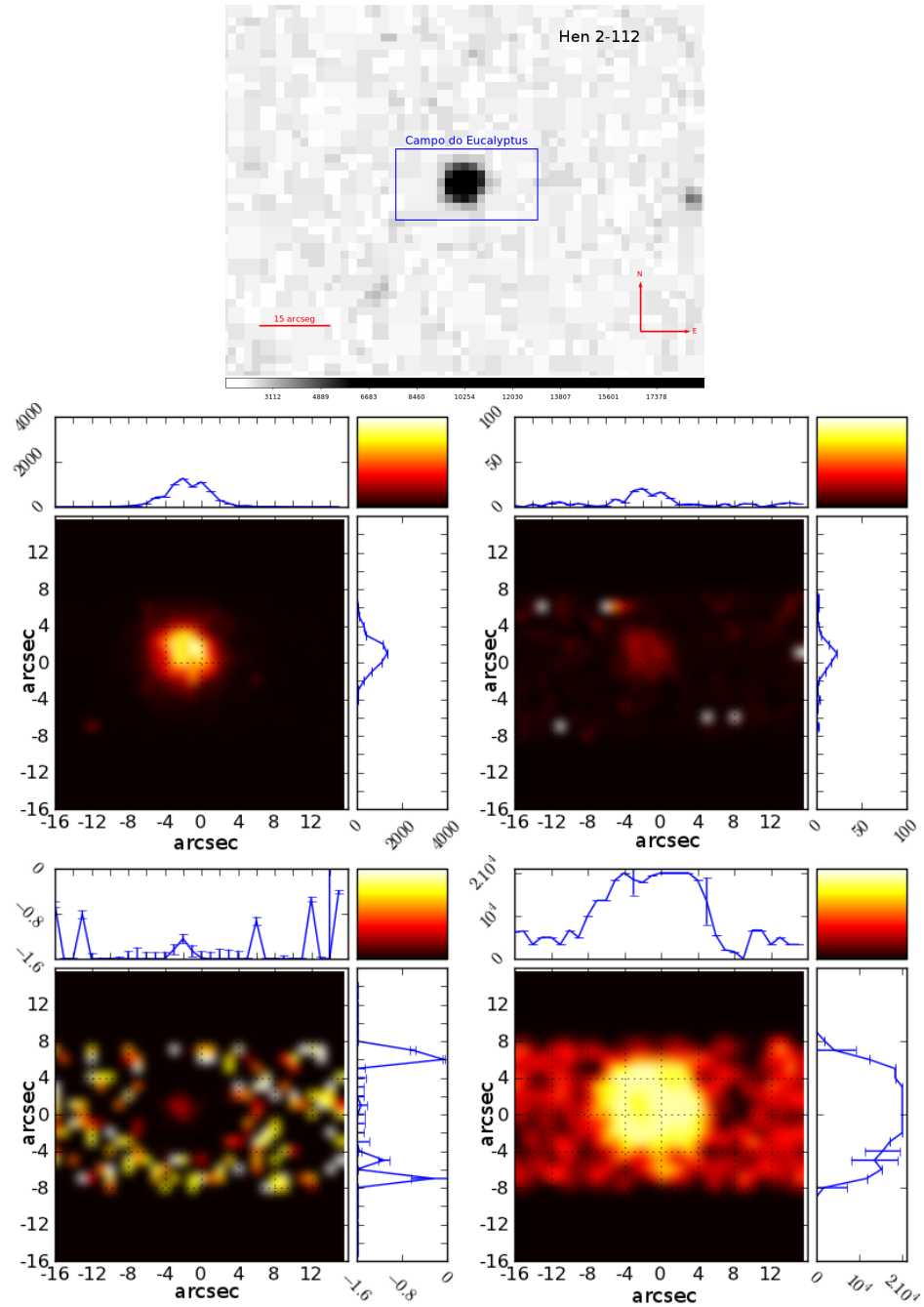


Figura 3.8: A figura mostra a imagem do DSS (topo) para Hen 2-112, os mapas de fluxo estão dispostos de forma análoga à figura 3.2.

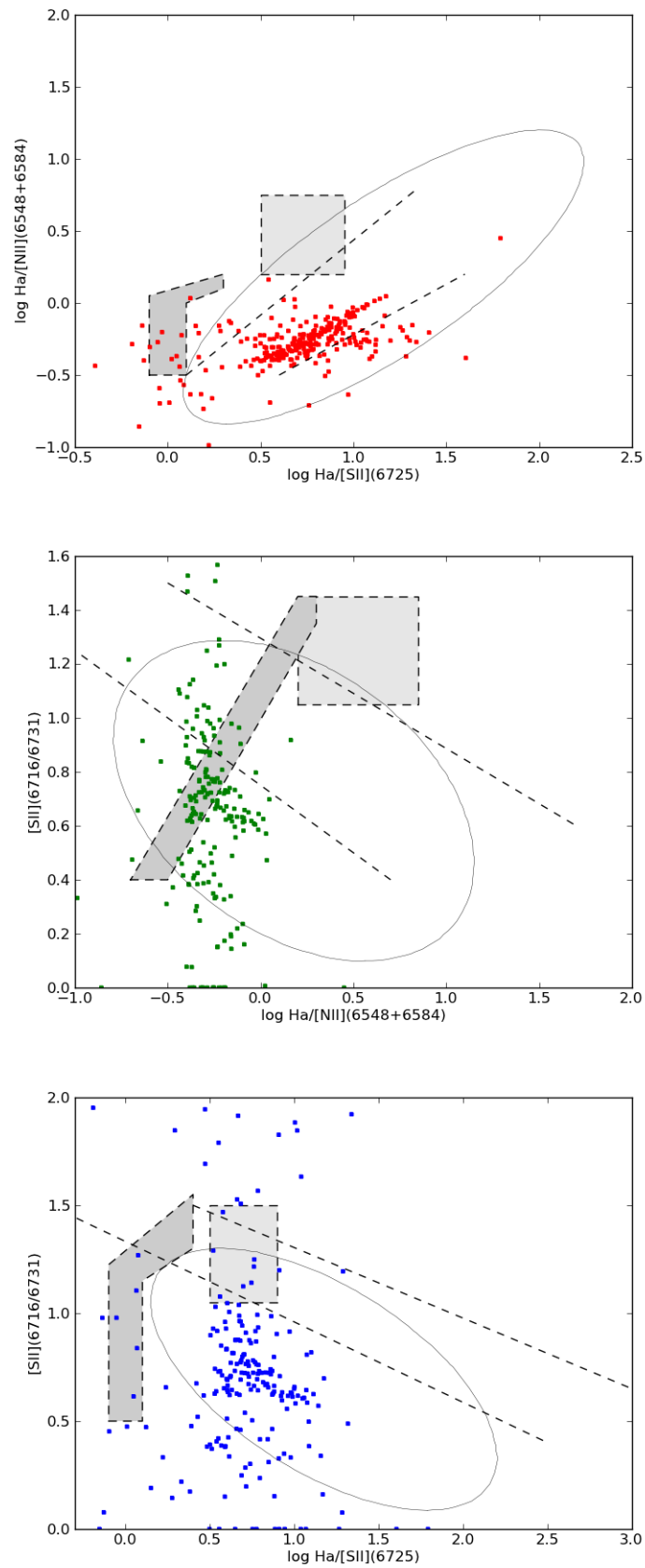


Figura 3.9: A figura mostra os três diagramas de diagnóstico construídos para Hen 2-112, diagrama I (topo), diagrama II (meio) e diagrama III (abaixo)

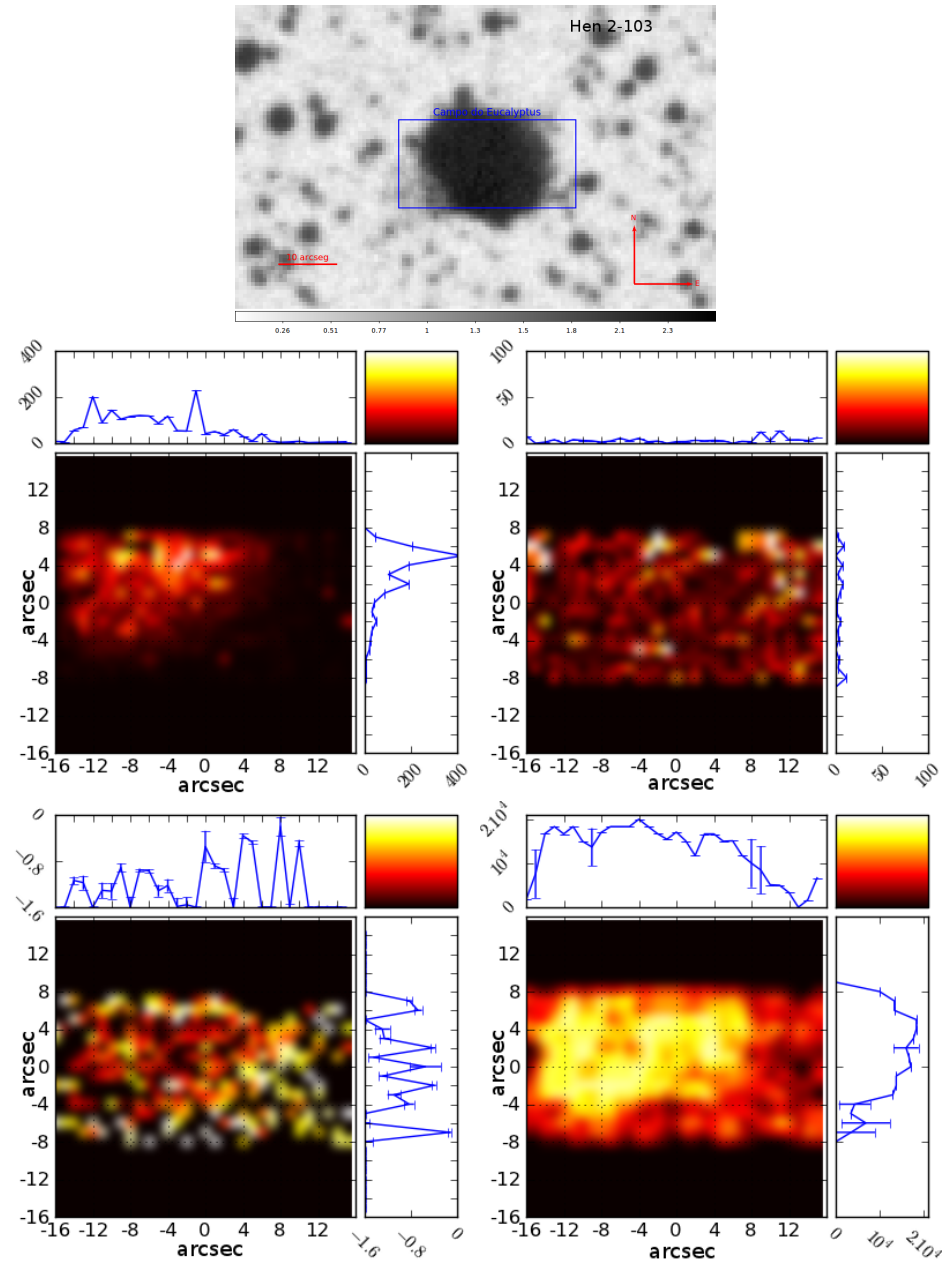


Figura 3.10: A figura mostra a imagem do DSS (topo) para Hen 2-103, os mapas de fluxo estão dispostos de forma análoga à figura 3.2.

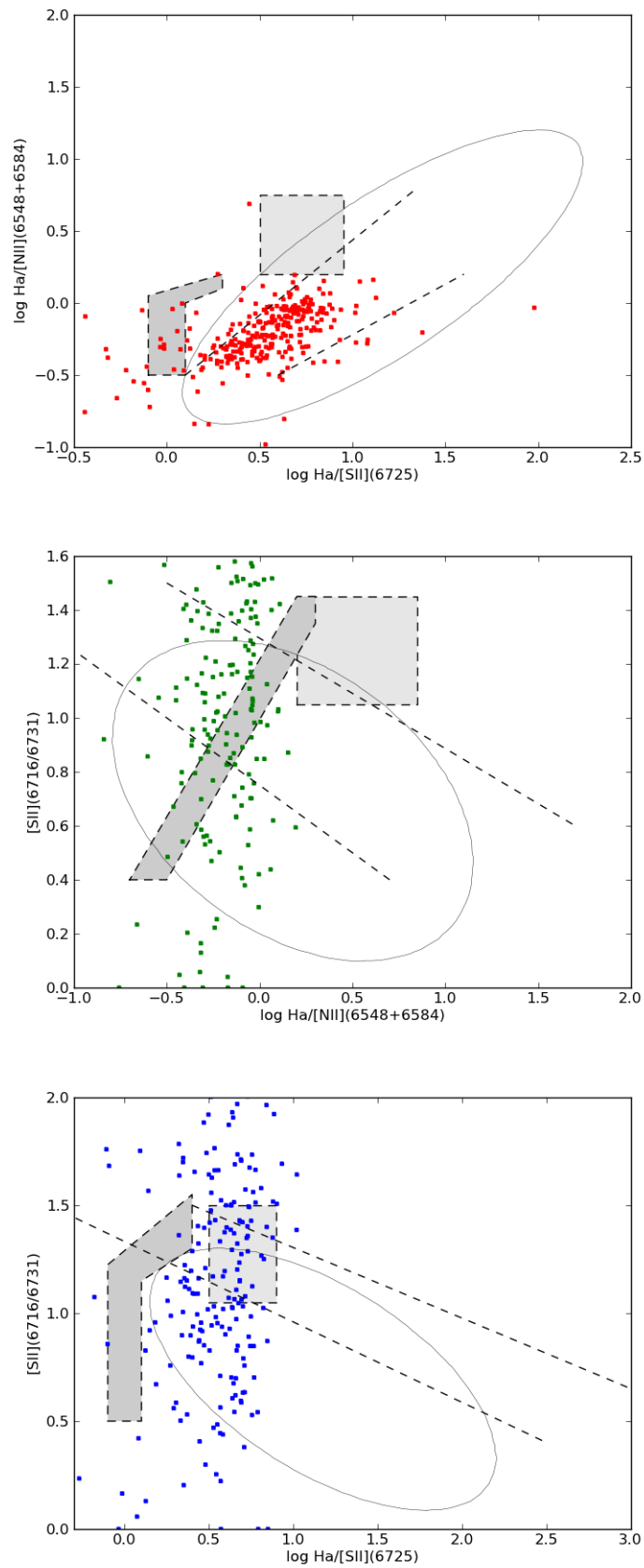


Figura 3.11: A figura mostra os três diagramas de diagnóstico construídos para Hen 2-103, diagrama I (topo), diagrama II (meio) e diagrama III (abaixo)

Análise dos Dados de Espectroscopia de Alta Resolução

Este capítulo tem o objetivo de apresentar e discutir os resultados obtidos através da análise dos dados medidos com o espectrógrafo Coudé, além de discutir os erros calculados para as propriedades derivadas aqui.

Usando os dados já descritos serão aqui expostos os mapas cinemáticos das nebulosas, com o objetivo de estudar a distribuição de velocidades. Com a informação disponível serão calculados os efeitos da inclinação do eixo de simetria das planetárias em relação ao plano do céu de forma simples e puramente geométrica. Será calculada também a idade cinemática, fazendo uso de informações já presentes na literatura, comparando os resultados obtidos com informações já disponíveis quando possível.

Deve-se notar que a missão relacionada a estes dados teve apenas uma noite útil devido às condições climáticas, de forma que só foram obtidos espectros para NGC6302 e NGC3918.

4.1 NGC 6302

Esta nebulosa é relativamente bem conhecida na literatura, Feibelman (2001) realizou um estudo relacionado à emissão relativa a alta excitação neste objeto, estudo este baseado em observações feitas no ultravioleta. A origem da sua bipolaridade é atribuída à presença de uma companheira associada a progenitora da nebulosa, Schwarz (2000). Esta nebulosa planetária é rica em subestruturas, isso pode ser visualizado na imagem em alta resolução mostrada na figura 3.6. Feibelman (2001) estudou a presença de perfis P Cyg nas linhas de emissão, e com as linhas que possuíam tal característica foi calculada a velocidade terminal dos ventos, chegando à conclusão de ventos estelares modestos de -500km s^{-1} com erro de

40%, medidos a partir do CIV λ 1548Å, e ventos de -200 km s^{-1} para o [Ne V] $\lambda\lambda$ 2970Å, 2974Å, valores coerentes com os encontrados por Gomez et al. (1989).

Um estudo feito a partir do espectro associado à alta excitação é apropriado às condições físicas extremas apresentadas por esta nebulosa, de forma que as velocidades radiais obtidas por Feibelman (2001) serão os valores de comparação para os valores obtidos neste trabalho, porém com ressalvas. Em momento algum o trabalho de Feibelman (2001) leva em consideração o efeito de projeção, deve-se reparar também que há uma grande dispersão nas velocidades, íons diferentes revelam velocidades bastante distintas no trabalho citado.

Sabe-se também que esta nebulosa é constituída por três componentes: os lóbulos, um toróide central visível também na figura 3.6 e a região ionizada interna do toróide. Este toróide apresenta uma forte emissão no CO sendo que sua massa é estimada em aproximadamente $2M_{\odot}$ com uma velocidade de expansão típica de 8 km/s (Matsuura et al., 2005) e (Peretto et al., 2007). O mesmo é responsável pela ocultação do núcleo da planetária.

Meaburn et al. (2005, 2008) estimaram o ângulo de inclinação desta planetária com o plano do céu em 12.8 ± 2 graus, estes mesmos autores também estimaram a distância deste objeto, $1170 \pm 140 \text{ pc}$, usando um método baseado em modelos cinemáticos e comparações diretas de imagens, obtidas respectivamente em 1956 e 2002. Nestes mesmos trabalhos assume-se uma idade cinemática de 2200 anos para o objeto.

A idade cinemática deste objeto é bem conhecida hoje, 2250 ± 35 anos, (Szyszka et al., 2011) e foi calculada a partir de medidas diretas da velocidade de expansão dos lóbulos do mesmo. As medidas de velocidade foram realizadas através da comparação direta de imagens de alta resolução obtidas pelo Telescópio Espacial Hubble, com uma defasagem de dez anos. As velocidades foram obtidas através da medida do deslocamento das microestruturas de um dos lóbulos, uma lei de expansão foi definida e a partir desta foi calculada a idade já citada. Efeitos de projeção não foram considerados no cálculo mas estes tem efeito reduzido devido à abordagem usada, de forma que só seriam relevantes se o ângulo de projeção fosse grande.

Szyszka et al. (2011) descrevem também o histórico de perda de massa desta nebulosa, estabelecendo uma diferença temporal de ejeção entre o toróide e os lóbulos, contudo de acordo com Szyszka et al. (2009) sabe-se que os lóbulos e o toróide tem a mesma origem cinemática. Estudos desta natureza são muito importantes para a compreensão das etapas

finais da evolução estelar e enriquecimento do meio interestelar.

4.1.1 Os “Hubble-like outflows”

A nebulosa planetária NGC6302 possui uma interessante característica cinemática, observada tanto no toróide molecular, (Peretto et al., 2007) quanto nos lóbulos (Meaburn et al., 2005). A velocidade de expansão apresenta um perfil linear e cresce em função da distância da estrela central de modo análogo à lei de Hubble. Com base no perfil apresentado pode-se afirmar que a origem do *outflow* é balística, o gás ejetado a uma maior distância da estrela faz isso com velocidades maiores, (Meaburn et al., 2008). Este perfil pode estar relacionado a eventos rápidos de ejeção, (Huggins, 2007), ou mudanças subitas no campo de velocidades do *outflow* (Zijlstra et al., 2001).

4.1.2 Os mapas cinemáticos

Os mapas cinemáticos foram construídos através da medição do deslocamento Doppler das linhas dos íons S^+ e N^+ já utilizadas neste trabalho para a confecção dos diagramas de diagnóstico, de forma que foram construídos dois mapas para cada posição da fenda, estes mapas são mostrados nas figuras 4.5 e 4.6 descritas posteriormente. Para a construção adequada de todos os mapas cinemáticos aqui mostrados, fez-se necessária a correção relativa ao movimento próprio da nebulosa em estudo, NGC6302, sendo adotada a velocidade heliocêntrica de $-35.7Kms^{-1}$, (Wilson, 1953).

Devido ao semelhante potencial de ionização apresentado pelos íons, seus mapas cinemáticos apresentam perfis muito parecidos. O mapa relativo à região central da planetária não é mostrado, pois nesta região as velocidades medidas são baixas ou inexistentes com exceção de alguns pontos. A posição de fenda B, ver a figura 2.5, mostra um perfil similar ao descrito anteriormente como *Hubble-like outflow*, apresentando um perfil aparentemente linear com crescimento da velocidade em função da distância ao centro dos lóbulos. Pode-se ver também uma pobreza de pontos em um dos lados, isto está relacionado a regiões com velocidades não bem definidas ou inexistentes. Um perfil parecido pode ser observado na posição de fenda A, para a qual as considerações feitas para a posição B também são válidas, porém deve-se reparar que neste caso o perfil de um dos lados da distribuição de velocidade é ainda mais irregular.

Os mapas cinemáticos A e B evidenciam também que o comportamento linear é apresentado radialmente, respeitando a condição de velocidade proporcional à distância, evidenciando que a expansão do lóbulo é homogênea de certa forma, porém a geometria destes lóbulos é consequência da presença do toróide molecular. Estes mapas mostram também regiões próximas ao centro com velocidades irregulares, fora da tendência esperada, estas regiões não são bem descritas no contexto dos *Hubble-like outflows* ou tem o comportamento de regiões distintas como será mostrado mais adiante.

Os mapas que mostram as informações mais interessantes são relacionados à posição de fenda D, na qual estes mapas apresentam claramente o perfil linear já descrito, mostrando o comportamento da planetária na direção de crescimento dos lóbulos. O deslocamento das regiões que apresentam velocidade nula em relação ao centro mostrado nos mapas pode levar à interpretação errônea do deslocamento do centro nos mapas apresentados. Isto deve ser analisado com cautela pois as regiões centrais já mostraram comportamento irregular nos mapas relacionados às posições de fenda B e A, logo as regiões que apresentam velocidades nulas não representam, no mapa relativo à posição D da fenda, as regiões centrais da planetária.

As barras de erro mostradas em cada um dos mapas representam o erro típico associado à determinação das velocidades, este erro foi calculado usando como base a FWHM (*Full width at half maximum*) para um ajuste de linha gaussiano, pois esta grandeza fornece o erro associado à determinação do centro da linha espectral assumido como metade da FWHM. Deve-se notar que não são apresentados os erros de posição, de fato seria esperado que esse erro fosse associado ao *seeing* da observação porém esta estimativa não foi feita. O *seeing* típico do OPD é da ordem de $1.5''$, o que não implica em erros de posição significativos.

Pode-se ver claramente o comportamento linear associado às velocidades ao longo de ambos os lóbulos, este comportamento caracteriza a cinemática dos lóbulos dentro do comportamento dos *Hubble-like outflows*. Deve-se enfatizar também que nos espectros de diferentes posições pode-se ver, além do perfil dominante de linhas duplas associadas ao *redshift* e *blueshift* cinemáticos, linhas com fluxos muito menores relacionadas ao mesmo íon, porém com cinemática distinta, isso evidencia a presença de múltiplas camadas gasosas, algo que pode ser visualizado diretamente na região central na imagem de alta resolução

mostrada na figura 3.6. O estudo destas estruturas não foi possível neste trabalho devido às limitações dos dados disponíveis, em poucos espectros a sua presença era de fato marcante, sendo assim com os dados usados aqui não foi possível traçar mapas cinemáticos específicos destas regiões.

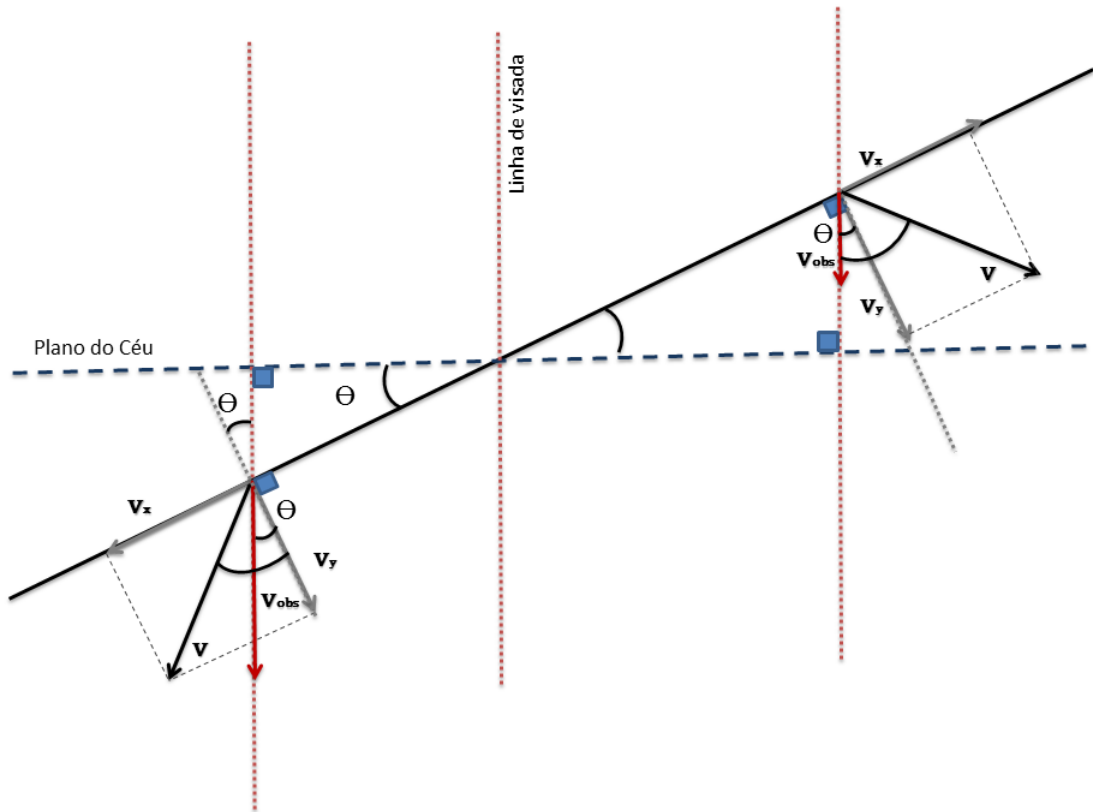


Figura 4.1: Vista superior do eixo de simetria (linha preta contínua) da nebulosa NGC 6302. Pode-se ver claramente o efeito geométrico sobre as velocidades observadas V_{obs} , nos distintos lóbulos. Sabe-se que o valor de θ é de 12.8 ± 2 graus.

Os dados cinemáticos obtidos neste trabalho foram usados para a derivação de propriedades físicas relativas a NGC6302, propriedades impossíveis de serem obtidas com o espectrógrafo Eucalyptus. Como já dito anteriormente a idade cinemática deste objeto é conhecida com uma precisão muito boa, logo o perfil cinemático de um dos lóbulos é definido de forma precisa no contexto dos *Hubble-like outflows*, sendo assim será utilizado este modelamento e os dados deste trabalho para estimar a distância do objeto referido.

A figura 4.1 descreve a geometria adotada para a estimativa de distância da nebulosa. Observando as figuras 4.5 e 4.6 pode-se ver que há uma assimetria relacionada aos mapas

cinemáticos da posição D da fenda, sendo que há uma diferença de velocidades nos lóbulos esquerdo e direito, que não deveria existir. Porém pode-se ver facilmente na figura 4.1 que esta diferença é uma consequência direta a inclinação do eixo de simetria da planetária em relação ao plano do céu, de forma que um dos lóbulos está voltado para nós e o outro se encontra de forma oposta. Sabe-se que a inclinação citada é de 12.8 ± 2 graus, (Meaburn et al., 2008).

Deve-se atentar que o efeito Doppler está relacionado à componente de V em nossa linha de visada como mostrado na figura 4.1 onde se observa a projeção deste vetor sobre a linha de visada. A fim de estudar a expansão dos lóbulos pode-se decompor V em duas componentes perpendiculares, como mostrado na figura 4.1, sendo que uma destas componentes, V_x , é paralela ao eixo de simetria da planetária.

Desta forma pode-se escrever o módulo das velocidades observadas em função das componentes de V como:

$$V_{obsI} = V_y \cos(\theta) + V_x \cos(90 - \theta); V_{obsI} = V_y \cos(\theta) + V_x \sin(\theta) \quad (4.1)$$

$$V_{obsII} = V_y \cos(\theta) + V_x \cos(90 + \theta); V_{obsII} = V_y \cos(\theta) - V_x \sin(\theta) \quad (4.2)$$

As equações são coerentes com a geometria do problema, caso o ângulo θ seja zero as equações se equivalem e a velocidade observada passa a ser a própria componente ortogonal ao eixo de simetria da planetária.

Como se está interessado na componente paralela ao eixo de simetria, pode-se facilmente escrever a componente em termos das velocidades observadas, de forma que o resultado independe de V_y .

$$V_{obsI} - V_{obsII} = 2V_x \sin(\theta) \quad (4.3)$$

O trabalho de Szyszka et al. (2011) descreve com precisão o perfil linear do campo de velocidades do lóbulo SW da planetária, este perfil, como já dito, será adotado para a nebulosa como um todo. A figura 4.2 descreve o campo de velocidades do lóbulo já citado e é o resultado do trabalho referido anteriormente; pode-se ver nesta figura que as velocidades encontradas para a posição D da fenda estão de acordo com o mapa de Szyszka

et al. (2011), confirmando o que já havia sido dito a respeito das velocidades nulas neste mapa não representarem o centro da planetária.

Fazendo uso dos dados do espectrógrafo Coudé foi possível traçar os perfis lineares para os lóbulos, $V_x \times$ distância do centro da planetária, sendo que isso foi feito para os íons S^+ e N^+ . Todos os pontos obtidos foram usados para obter-se o ajuste linear através do método dos mínimos quadrados. É muito importante ressaltar que todos os erros computados para as velocidades foram devidamente propagados através da equação 4.4, sendo que as barras de erro apresentadas na figura 4.3 são o resultado deste processo.

$$\sigma_A = \sqrt{\sum_{i=1}^j \left(\frac{\partial A}{\partial n_i} \right)^2 \sigma_{n_i}^2} \quad (4.4)$$

Nesta equação os n_i são as variáveis independentes da função A e os σ representam os erros associados a cada grandeza medida. Esta equação será utilizada novamente para encontrar o erro da distância.

O resultado do ajuste é mostrado na figura 4.3, sendo que os parâmetros da equação tipo $y(x) = a'x + b'$ são mostrados abaixo, assim como os erros associados aos parâmetros a' e b' .

$$V_x(x) = 1.7x + 14, (\sigma_{a'} = 0.3 \text{ kms}^{-1} \text{ arcsec}^{-1}, \sigma_{b'} = 5.5 \text{ kms}^{-1}) \quad (4.5)$$

4.1.3 Cálculo da Distância

Através dos resultados anteriores foi determinado o perfil linear de crescimento da velocidade, porém este perfil ainda não corresponde ao movimento próprio das subestruturas de NGC6302 descrito por Szyszka et al. (2011):

$$V(x) = 0.455x + 0.58, (\sigma_a = 0.01 \text{ mas/yr arcsec}^{-1}, \sigma_b = 0.51 \text{ mas/yr}) \quad (4.6)$$

Deve-se ter em mente que $V_x(x)$ é a componente de V sobre eixo da planetária. Para que haja equivalência das equações 4.5 e 4.6, a equação 4.5 deve ser multiplicada por um fator de conversão, β , este fator é fortemente relacionado à distância desta planetária, de forma que β é dado por:

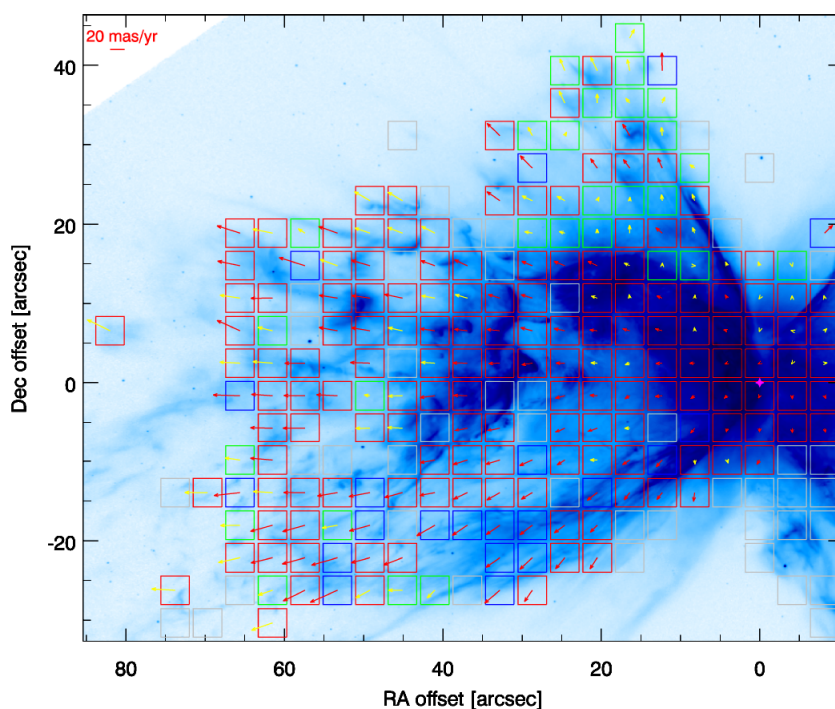


Figura 4.2: Representação gráfica do campo de velocidades de NGC6302, (Szyszka et al., 2011), obtido através da comparação direta de imagens de alta resolução obtidas com as câmeras planetárias do telescópio espacial Hubble, sendo as setas os vetores velocidade mensurados em quadrados de 4.1 por 4.1 *arcsec*, cujo comprimento é proporcional à velocidade. As setas vermelhas mostram os dados de maior confiabilidade, as amarelas mostram velocidades com medidas em um dos eixos duvidosa, as caixas vazias possuem medidas consideradas ruins. A coloração das caixas está relacionada com a qualidade da relação dos pontos com o comportamento linear esperado. As caixas verdes mostram os pontos que melhor se encaixam, as vermelhas, os pontos de qualidade mediana e as azuis os piores pontos. O erro típico de velocidade é de 5 *mas/yr*.

$$\beta = \frac{210.8}{d} \quad (4.7)$$

sendo d a distância da planetária dada em parsecs, o fator numérico é atribuído à definição de parsec e a conversão de unidades métricas e de tempo. Pode-se usar os coeficientes a e b da equação 4.5 para os cálculos de distância, sendo que a distância pode ser escrita como:

$$d = 210.8 \frac{a'}{a}, d = 210.8 \frac{b'}{b} \quad (4.8)$$

sendo os coeficientes marcados com linha aqueles encontrados neste trabalho. Usando a equação 4.8 foi encontrada uma distância de $805 \pm 143 pc$, deve-se ressaltar que o coeficiente

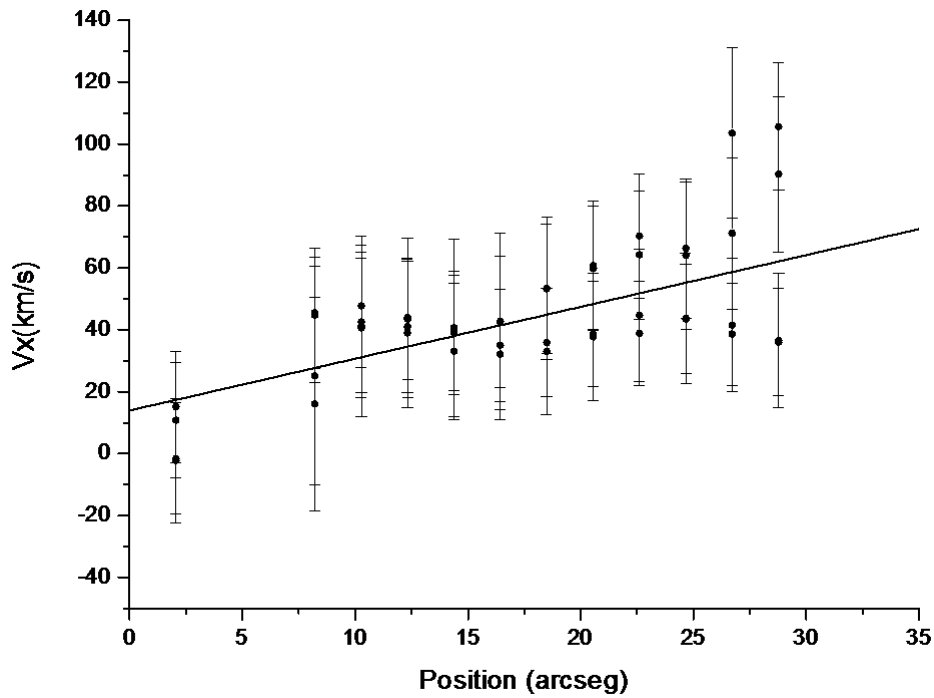


Figura 4.3: Gráfico com ajuste linear para a velocidade V_x em função da distância.

a foi escolhido em virtude de seu menor erro. É importante também lembrar que erros associados à distância ao centro da planetária não puderam ser estimados, sendo assim foram desconsiderados. Os resultados estão de total acordo com a literatura disponível e o mesmo foi obtido usando metodologia distinta. Pode-se comparar este resultado a Meaburn et al. (2008), $1170 \pm 140 pc$ e Stanghellini et al. (2008), $741 \pm 600 pc$, sendo que este trabalho tem um erro menor que o último citado.

O valor encontrado para a distância é adequado, porém deve-se lembrar dos principais fatores de influência neste resultado. Assumir a simetria dos lóbulos é apenas uma aproximação e seria desejável utilizar um método onde cada um deles fosse estudado separadamente, como é feito por Meaburn et al. (2008) e Szyszka et al. (2011), pois podem existir assimetrias que fazem com que as leis de expansão dos lóbulos sejam diferentes. Deve-se ressaltar também que uma característica marcante deste objeto descrita por Feibelman (2001) é a grande dispersão de velocidades relativas a diferentes íons, ainda não se sabe ao certo a origem deste fenômeno, porém o mesmo pode influenciar diretamente o resultado encontrado.

Pode-se perceber na figura 4.3 que há dois conjuntos distintos de pontos, estes conjun-

tos são relacionados com as diferentes componentes, a que sofre “redshift” e a que sofre “blueshift”. A existência de dois conjuntos deve-se ao fato que o objeto é visualizado pelo lado que sofre “blueshift”, em contrapartida a componente com “redshift” é ocultada pelas componentes à frente e o resultado disto é que a componente com “redshift” tem a contribuição majoritária das regiões mais próximas ao eixo de simetria (com menor velocidade) de forma a gerar o efeito observado nas figuras 4.5 e 4.6. Além disso esta emissão sofrerá também toda a influência do espalhamento e absorção propiciadas pelo gás a sua frente. Este mesmo efeito justifica também o maior alargamento destas linhas, tal efeito é pequeno, porém perceptível principalmente em algumas regiões específicas.

Seria interessante estudar os perfis cinemáticos de diferentes íons analisando suas curvas de velocidade versus posição a fim de tentar compreender a origem da discrepância nas velocidades encontradas com o objetivo de encontrar os mecanismos físicos responsáveis.

4.2 NGC3918

A nebulosa planetária NGC3918 é um objeto amplamente estudado, Clegg et al. (1987) apresentam um estudo detalhado do objeto realizado em diferentes comprimentos de onda usando diversos tipos de instrumentação a fim de estudar o objeto e suas características de forma específica. O trabalho citado apresenta abundâncias e outras propriedades físicas tais como a densidade eletrônica e sua distribuição na nebulosa, além de estudar efeitos de avermelhamento e propriedades ópticas deste objeto. Neste mesmo trabalho é feito o modelamento do objeto usando um modelo bicônico, é derivada também uma idade cinemática de 3000 anos para NGC3918.

Observando a figura 3.2 pode-se ver claramente a morfologia complexa de NGC3918, que possui uma camada gasosa aparentemente esférica mais externa e também existe uma camada interna com expansão preferencialmente polar. A camada interna é modelada no trabalho de Corradi et al. (1999) usando o modelo empírico de Solf e Ulrich (1985), onde se quer descrever a cinemática desta componente. Neste trabalho afirma-se também que os espectros de Corradi et al. (1999) estão de acordo com modelos assimétricos de Mellema (1993), comportamento previsto pelo modelo de ventos interagentes.

A camada externa, remanescente do vento AGB, é associada à ejeção de gás e não é sujeita a choques, este componente possui um brilho superficial menor que a camada

interna que possui também uma inclinação associada à nossa linha de visada.

4.2.1 Os mapas cinemáticos

Assim como os mapas cinemáticos apresentados para NGC6302, os mapas apresentados para NGC3918 foram construídos usando as linhas dos íons S^+ e N^+ , de forma que o valor adotado para cada ponto foi a média das velocidades encontradas para as duas linhas do duplete, o erro típico é baseado mais uma vez na FWHM que está diretamente relacionada com o erro da medida do centro da linha espectral em questão e é apresentado na forma de uma barra de erro.

Os mapas obtidos são apresentados na figura 4.7. Percebe-se claramente que o perfil dos mapas cinemáticos é distinto do apresentado por NGC6302, o objeto anterior apresentava um crescimento linear da velocidade com a distância ao centro da planetária, NGC3918 apresenta um perfil cinemático mais simples com velocidades maiores no centro do objeto, havendo uma queda pouco acentuada nas bordas.

Observando a figura 3.2 pode-se ver a estrutura complexa da planetária, vê-se claramente uma camada interna com maior brilho superficial e com crescimento polar pronunciado. Externamente pode-se ver uma camada aparentemente elíptica/esférica que é atravessada pela camada interna em seus polos.

Neste trabalho é calculada de forma simples a idade cinemática da camada externa, considerando que a mesma se expande com velocidade constante. Não é possível, usando os dados disponíveis, descrever a cinemática da camada interna de forma consistente, pois com a posição de fenda adotada a camada interna não tem seus polos observados. Os polos são a componente cinemática mais rica em informação e a ausência desta impede a caracterização adequada desta componente.

O perfil cinemático é associado à morfologia do objeto, sendo que as duas componentes se expandem com velocidades distintas. A camada externa possui uma maior idade, porém possui uma menor velocidade de expansão, mostrada nos pontos mais distantes do centro na figura 4.7. A camada interna possui uma expansão mais rápida, porém menos idade e a esta estão associados os pontos centrais nos mapas cinemáticos.

4.2.2 Cálculo da idade cinemática

A fim de calcular a idade cinemática de NGC3918 foi primeiramente necessário fazer a correção relativa ao movimento próprio deste objeto, a velocidade radial adotada para esta correção foi de -16.4 km s^{-1} , Wilson (1953).

O cálculo da idade cinemática foi feito utilizando uma abordagem simplificada, onde a camada gasosa externa de NGC3918 foi admitida como uma esfera com velocidade de expansão uniforme, seu tamanho angular foi medido usando a ferramenta de visualização de imagens astronômicas, DS9 (<http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/site/Documentation.html>), fazendo uso das imagens obtidas pelo telescópio espacial Hubble, disponibilizadas na rede já astrometrizadas.

As imagens utilizadas foram obtidas com a WFPC2 do Hubble com o filtro de 658 nm no ano de 2000. Esta imagem foi escolhida por privilegiar a camada gasosa externa, o comprimento de onda central é muito próximo da linha do $[\text{NII}](6584 \text{ \AA})$, de forma que a componente interna tem emissão mais baixa nesta linha que a externa, o que revela uma riqueza maior em nitrogênio da componente externa, pois no capítulo três mostrou-se que a nebulosa é óticamente fina e a baixa emissão interna não pode ser atribuída à absorção. A figura 4.4 mostra imagens de NGC 3918 nos filtros de 656 nm e 658 nm .

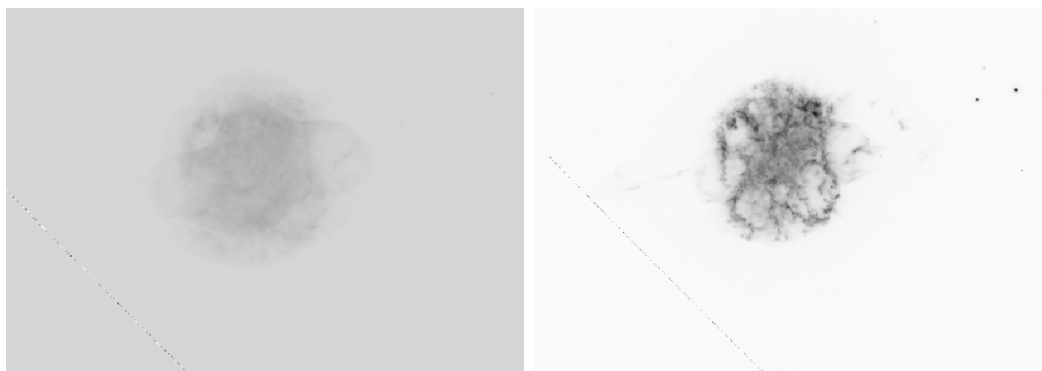


Figura 4.4: Imagens obtidas com a WFPC2 do Telescópio Espacial Hubble para os filtros de 656 nm , direita e 658 nm , esquerda. Deve-se perceber o grande contraste entre as subestruturas na imagem em 658 nm , onde a camada externa é fortemente destacada.

Fazendo uso da imagem já citada foi medido o raio da camada externa da planetária, com o valor obtido, fixando a distância em 1.5 kpc (Clegg et al., 1987) e admitindo-se uma velocidade constante de expansão de 20 km/s que é a velocidade típica de expansão,

foi calculado o valor de 3111 anos para a idade desta camada gasosa. O resultado está de total acordo com os valores encontrados na literatura, 3000 anos, admitindo-se uma mesma distância. Clegg et al. (1987), mostram também que esta idade concorda com a possível idade do remanescente estelar.

Deve-se atentar que nesta seção não são discutidos os erros associados às grandezas calculadas, isso acontece porque os erros associados à distância não foram publicados nos artigos citados, logo o erro associado à idade cinemática aqui derivada não pôde ser estimado.

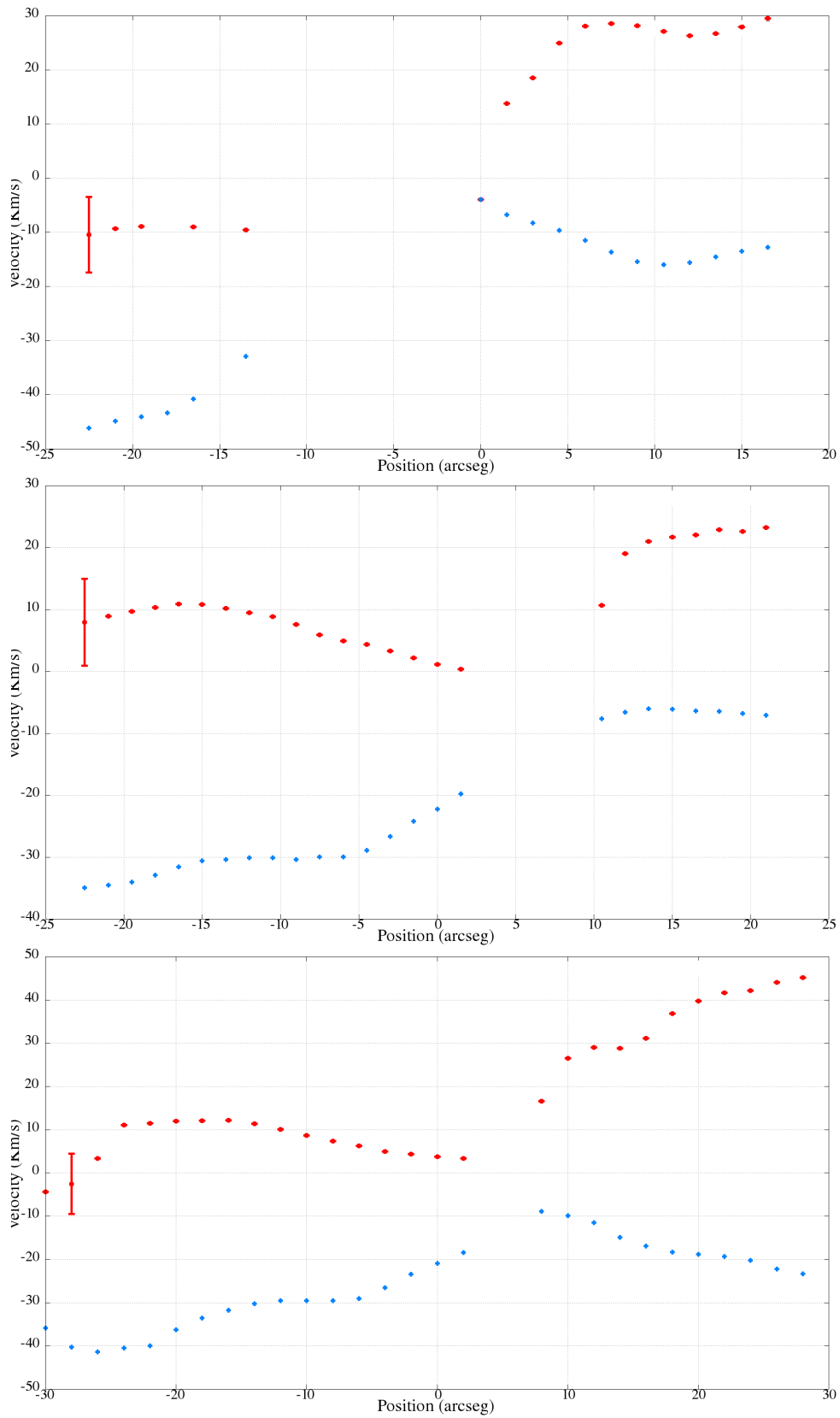


Figura 4.5: Mapas cinemáticos relativos ao íon N^+ , construídos para as diferentes posições de fenda, para NGC6302, A em cima, B meio e D embaixo. Os pontos azuis representam a componente da linha que sofre blueshift, os vermelhos representam as componentes com redshift. As barras de erros representam a moda dos erros de velocidade em cada caso.

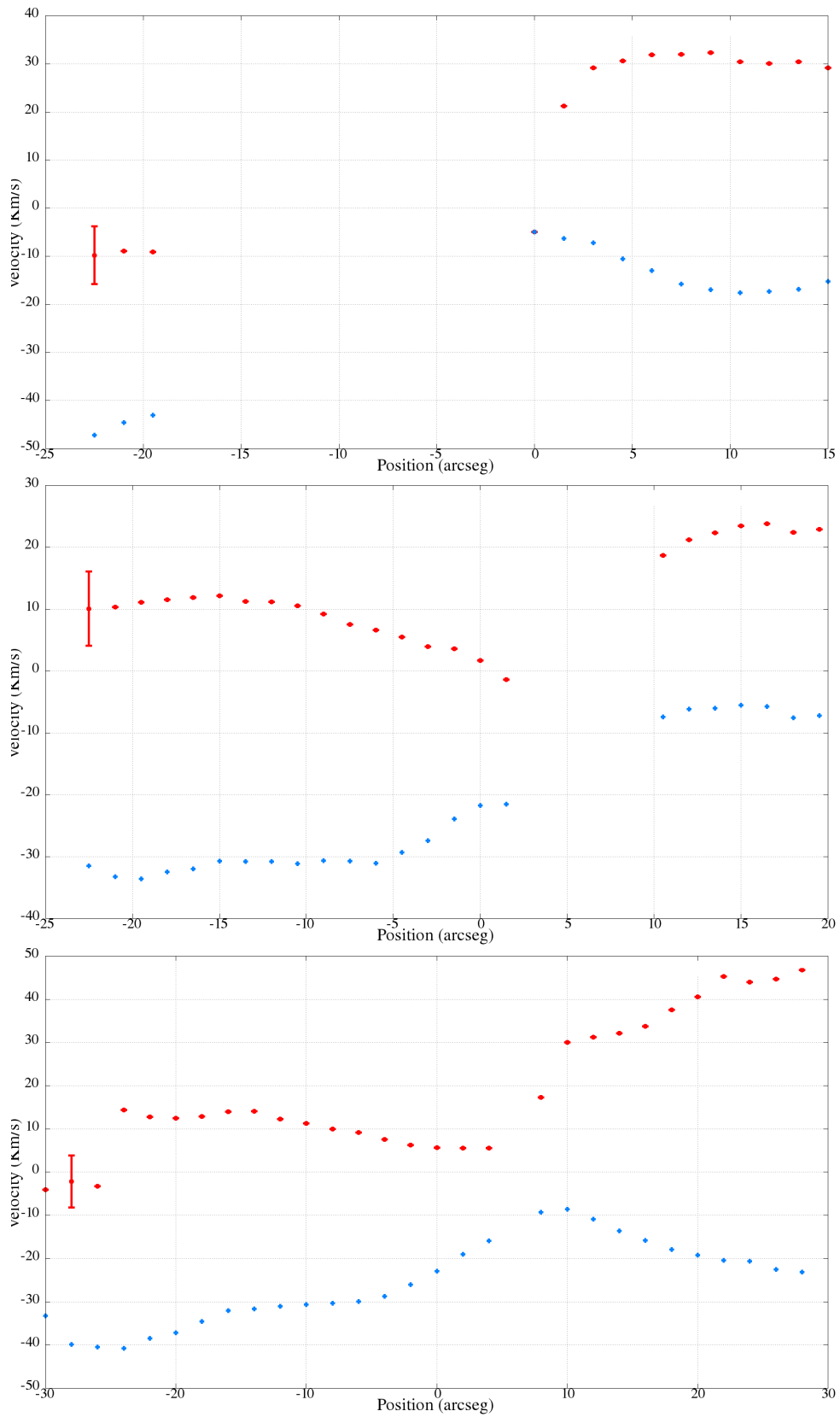


Figura 4.6: Mapas cinemáticos relativos ao íon S^+ , construídos para as diferentes posições de fenda, para NGC6302, A em cima, B meio e D embaixo. Os pontos azuis representam a componente da linha que sofre blueshift, os vermelhos representam as componentes com redshift. As barras de erros representam a moda dos erros de velocidade em cada caso.

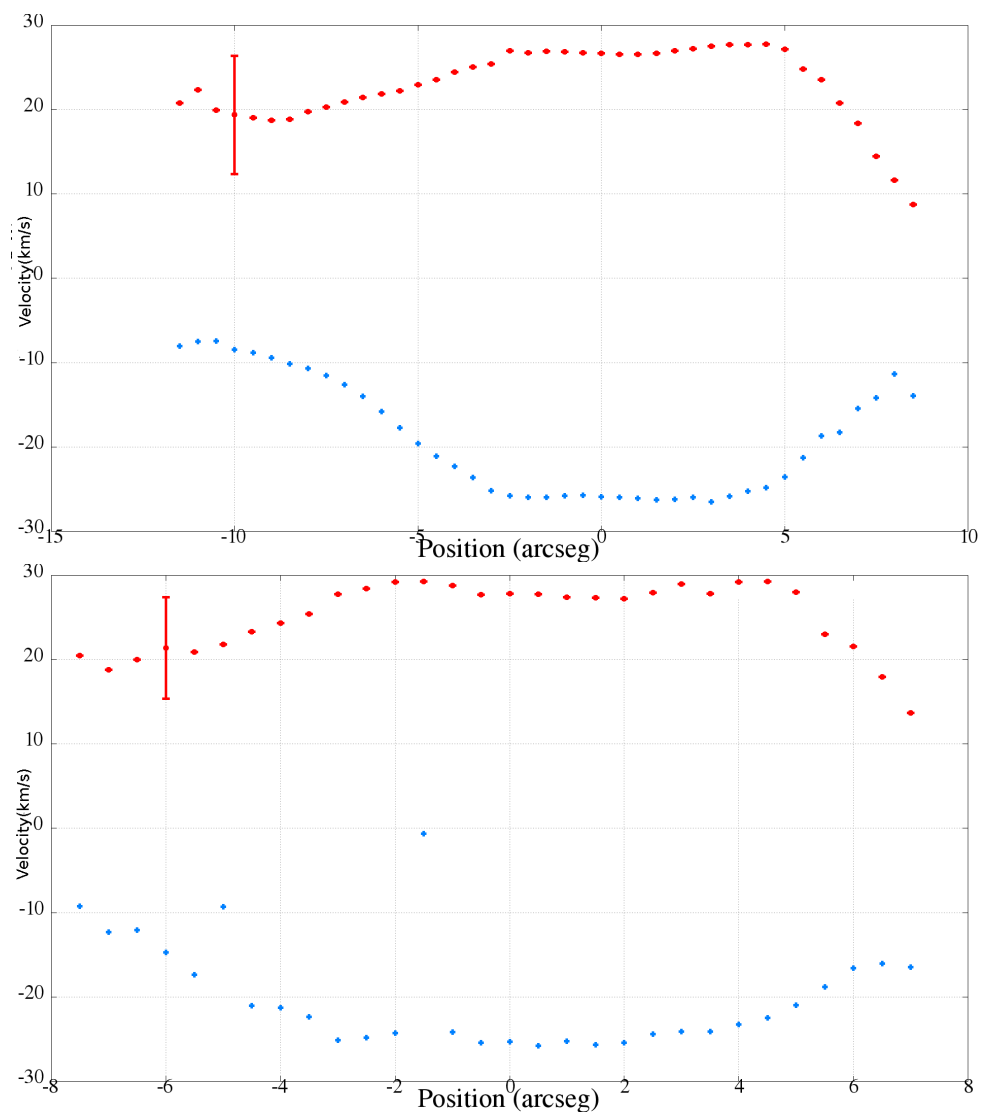


Figura 4.7: Mapas cinemáticos relativos aos íons N^+ S^+ , para NGC3918. Os pontos azuis representam a componente da linha que sofre blueshift, os vermelhos representam as componentes com redshift. As barras de erros representam a moda dos erros de velocidade em cada caso.

Conclusões

Os resultados apresentados nos capítulos três e quatro são satisfatórios e cumprem a proposta estabelecida na introdução. Utilizando os dados disponíveis, foi extraído o maior número possível de parâmetros físicos relacionados com a amostra de nebulosas planetárias estudada.

Utilizando os dados obtidos com espectroscopia IFU foi estudada a distribuição angular dos parâmetros físicos de um conjunto de nebulosas planetárias, os parâmetros estudados foram a densidade eletrônica, abundâncias relativas dos íons N^+ e S^+ e também o perfil de ionização dos objetos, utilizando o íon S^{++} . Os resultados são apresentados na forma gráfica de mapas de fluxos e diagramas de diagnóstico.

Este estudo teve como objetivo caracterizar as planetárias da amostra, destacando a presença de inhomogeneidades, fazendo isso dentro das limitações da instrumentação utilizada. Assim foi concluído que NGC3918 possui um moderado grau de excitação associado à baixa opacidade apresentada; a nebulosa é opticamente fina, fato este de total acordo com a literatura. Para a nebulosa citada os valores de densidade encontrados devem ser analisados com cautela, pois esta planetária não apresenta condições físicas ideais para a análise usando as linhas do íon S^+ . Os diagramas diagnósticos confirmaram as constatações dos mapas e mostraram uma baixa variação nas abundâncias dos íons estudados.

NGC6302 teve apenas região central estudada devido a seu grande tamanho angular; como é conhecido na literatura, esta planetária é caracterizada como um objeto com alto grau de excitação/ionização de forma que o mapa para o íon S^{++} não caracterizará esta planetária da mesma forma que as outras da amostra. Os mapas de forma geral mostram um perfil uniforme, o que é esperado devido à região analisada que corresponde apenas à

região central do objeto. Foi encontrada uma densidade de 20000 cm^{-3} valor este em total acordo com a literatura. Os diagramas de diagnóstico mostram uma riqueza em N^+ por parte desta nebulosa além de relacionar variações de densidade a regiões com diferentes graus de excitação. É importante notar que esta nebulosa é um excelente exemplo da relevância da reformulação dos diagramas de diagnóstico originais de Sabbadin (1977) feita por Riesgo e López (2006), pois na versão original dos mesmos esta planetária não seria corretamente caracterizada.

A planetária NGC6818 mostra em seus mapas de fluxo uma estrutura de ionização mais intrincada, apresentando uma estrutura segmentada em pelo menos duas camadas concêntricas, fato constado também com imagens de alta resolução, como mostrado na figura 3.4. O mapa baseado no íon S^{++} mostra o que seriam supostas frentes de ionização, estas frentes seriam fontes de emissão associada a choques, daí o alto brilho superficial observado; de forma geral a nebulosa apresenta um grau de ionização moderado. Os diagramas de diagnóstico corroboram as conclusões já citadas e estabelecem também uma relação entre a opacidade desta nebulosa e sua densidade, relação esta não percebida nos objetos estudados anteriormente, porém deve-se lembrar que nesta conclusão não foram levados em conta fatores como a poeira difusa nestes objetos, além de outros fatores que poderiam também contribuir para a opacidade desta planetária.

O objeto Hen 2-112 possui o menor tamanho angular da amostra, de forma que este foi o único totalmente mapeado usando o espectrógrafo Eucalyptus, a planetária possui uma simetria aparentemente esférica, de forma que a região interna possui maior grau de excitação como esperado. Devido ao tamanho angular reduzido em comparação ao restante da amostra esta nebulosa foi observada em menor detalhe, seu mapa de densidade mostrou-se extremamente regular, como mostrado na figura 3.10. Os diagramas de diagnóstico mostraram que os pontos estão na região esperada, porém o estabelecimento de relações entre as grandezas é mais complicado devido à contribuição maior do ruído.

O objeto Hen 2-103 apresenta a pior relação S/R dos objetos analisados, de forma que a conclusão mais relevante a respeito deste é seu baixo grau de excitação/ionização, a centralização do objeto no campo do espectrógrafo Eucalyptus ficou a desejar devido ao baixo brilho superficial da nebulosa, sendo assim a região analisada não foi a região central como seria desejado. Os diagramas de diagnóstico não mostram relações claras entre as

grandezas neles relacionadas, devido ao baixo sinal ruído.

Utilizando os dados de IFU foram obtidas as distribuições angulares dos parâmetros físicos citados. Além disso, utilizando os dados de espectroscopia de alta resolução obtidos com o espectrógrafo Coudé, foram extraídas informações a respeito da cinemática dos objetos, com o objetivo de estabelecer relações entre as informações dos campos de velocidades obtidos e características morfológicas destes. Condições climáticas inadequadas provocaram uma redução drástica no número de objetos observados comparando com o esperado; em condições ideais teriam sido obtidos mapas cinemáticos para cada planetária para qual foram obtidos dados de IFU, mas em consequência disto só foram obtidos espectros para NGC 6302 e NGC3918.

NGC6302 mostrou um perfil cinemático extremamente regular, perfil este conhecido na literatura como “Hubble-like outflow”, a velocidade de expansão da planetária apresenta crescimento linear com a distância do remanescente estelar. Uma clara diferença de velocidades pode ser notada quando os dois lóbulos são comparados, esta diferença é uma consequência da geometria relacionada à linha de visada em que a planetária é observada, como mostrado na figura 4.1.

Fazendo uso da lei de expansão de um dos lóbulos foi calculada uma distância de 805 ± 143 pc para NGC6302, valor que está totalmente de acordo com a literatura relacionada. Alguns pontos importantes de influência neste resultado devem ser ressaltados; a planetária é observada pelo lado do lóbulo que sofre “blueshift”, o lado oposto é observado com a absorção e espalhamento desses componentes à frente, logo é totalmente esperado que haja uma diferença nas velocidades de “blueshift” e “redshift”, assimetrias entre os lóbulos provocariam também discrepâncias. Deve-se lembrar que a idade cinemática da planetária não foi calculada, pois já era previamente conhecida com precisão.

Os mapas cinemáticos proporcionaram também uma análise qualitativa do objeto, ficou clara a existência de uma componente gasosa alheia aos lóbulos, nos espectros de algumas posições ao longo da fenda podia-se ver claramente uma outra componente cinemática; esta componente não pôde, utilizando nossos dados, ser devidamente caracterizada.

A nebulosa planetária NGC3918 apresentou perfis cinemáticos mais simples em comparação com o caso anterior, mostrando o típico perfil em “U” apresentado para a maioria das planetárias. Os mapas cinemáticos construídos não mostraram detalhamento algum

da estrutura interna do objeto, apenas que o mesmo é claramente segmentado em duas camadas gasosas. Desta forma, admitindo uma simetria esférica para a camada gasosa externa foi calculada a idade cinemática do objeto em questão, resultando num valor de 3111 anos.

Tendo em vista os resultados obtidos pode-se dizer que os métodos aplicados mostraram-se eficazes, o uso da espectroscopia de campo integral revelou detalhes muito interessantes e na maioria das vezes nunca publicados. Os resultados deste trabalho obtidos usando a técnica citada mostraram que os melhores resultados são obtidos quando há uma correspondência entre o tamanho do campo do instrumento e o tamanho angular da fonte.

Como já dito anteriormente as imagens oriundas do espectrógrafo Eucalyptus usadas neste trabalho possuem uma relação S/R que possibilita a análise mostrada, as exceções são devidamente justificadas.

Os objetos com pouca informação na literatura tiveram limitada ou nenhuma comparação com resultados de outras fontes e técnicas. Seria interessante utilizar dados em outros comprimentos de onda para a maior confirmação e embasamento dos resultados aqui obtidos. Deve-se ressaltar o caráter inédito dos vários resultados apresentados neste trabalho.

Para o caso da espectroscopia de alta dispersão, os resultados obtidos eram conhecidos da literatura, porém os mesmos têm uma importância ímpar para a pesquisa desenvolvida, pois foram ótimos testes de metodologia para a sequência deste projeto; deve-se lembrar que a proposta inicial era a obtenção de perfis cinemáticos para todas as nebulosas da amostra, pretensão que não pode ser cumprida devido condições climáticas.

A sistemática para a observação utilizando o espectrógrafo Coudé requer uma especial atenção; a fenda do instrumento é fixa, logo para que seja observado um objeto com diferentes orientações no céu deve-se aguardar a rotação do campo, as observações de NGC6302 contaram com um intervalo de tempo de seis horas para que fosse possível obter o espectro na posição de fenda D mostrada na figura 2.4.

5.1 *Perspectivas*

Inicialmente quer-se obter o perfil cinemático para todas as nebulosas da atual amostra, para isto será novamente utilizado o espectrógrafo Coudé do Observatório Pico dos Dias;

esta missão observacional será realizada em julho de 2013 em cinco noites já concedidas.

Utilizando os resultados de IFU aqui apresentados, assim como os dados de espectroscopia de alta resolução, quer-se modelar morfo-cinematicamente as planetárias usando o software SHAPE Steffen e López (2006), que permite a reconstrução da estrutura morfo-cinématica baseando-se em perfis espectrais, mapas cinemáticos e imagens monocromáticas. O SHAPE é uma evolução do código de Steffen et al. (1996); em sua versão mais atual foi adotada uma nova roupagem baseada em softwares comerciais para renderização e modelagem 3D; este software permite a introdução de parâmetros físicos tais como a distribuição das densidades e temperaturas. Deve-se atentar que o SHAPE foi desenvolvido especialmente para nebulosas planetárias e passa por constantes testes, onde seus resultados são comparados aos obtidos por outros tipos de simulação.

O objetivo mais almejado é que possam ser obtidos resultados semelhantes aos de López et al. (2012); Richer et al. (2009), cujo levantamento de propriedades de planetárias do hemisfério norte é extenso. Esta proposta é muito importante, tendo em vista que a maioria das planetárias está no hemisfério celeste sul e até hoje nenhuma iniciativa comparável foi proposta.

Pode-se usar de maneira complementar aos modelos do SHAPE, modelos de fotoionização obtidos com o código *Cloudy*, código que existe há décadas e vem sendo aprimorado constantemente.

O telescópio espacial Hubble possui um vasto banco de dados com imagens de alta resolução de domínio público, do qual constam varias nebulosas planetárias; seria muito interessante utilizá-las de forma semelhante ao feito por Szyszka et al. (2011), obtendo-se assim o campo de velocidades de maneira muito detalhada com uma resolução espacial melhor que a oferecida pelo espectrógrafo Coudé.

Referências Bibliográficas

- Abell G. O., Goldreich P., On the Origin of Planetary Nebulae, *PASP*, 1966, vol. 78, p. 232
- Ashley M. C. B., Hyland A. R., Detection of highly ionized silicon in the planetary nebulae NGC 6302 and NGC 6537, *ApJ*, 1988, vol. 331, p. 532
- Balick B., The evolution of planetary nebulae. I - Structures, ionizations, and morphological sequences, *AJ*, 1987, vol. 94, p. 671
- Casassus S., Roche P. F., Barlow M. J., The coronal line regions of planetary nebulae NGC 6302 and 6537: 3-13 μ m grating and echelle spectroscopy, *MNRAS*, 2000, vol. 314, p. 657
- Clegg R. E. S., Harrington J. P., Barlow M. J., Walsh J. R., The planetary nebula NGC 3918, *ApJ*, 1987, vol. 314, p. 551
- Corradi R. L. M., Perinotto M., Villaver E., Mampaso A., Gonçalves D. R., Jets, Knots, and Tails in Planetary Nebulae: NGC 3918, K1-2, and Wray 17-1, *ApJ*, 1999, vol. 523, p. 721
- Curtis H. D., The planetary nebulae., *Publications of Lick Observatory*, 1918, vol. 13, p. 55
- Faes D. M., Modelagem de nebulosas planetárias com morfologia bipolar, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2011, Dissertação de Mestrado, 122 p.

- Feibelman W. A., Electron Densities, Radial and Terminal Wind Velocities for the Planetary Nebula NGC 6302 and Its O VI-Type Binary Nucleus, *ApJ*, 2001, vol. 550, p. 785
- Felli M., Perinotto M., On the Nature of Some Non-Radio Emitting Sharpless H II Regions, *Ap&SS*, 1974, vol. 26, p. 115
- Gomez Y., Rodriguez L. F., Moran J. M., Garay G., The distance to NGC 6302, *ApJ*, 1989, vol. 345, p. 862
- Greig W. E., The morphological classification of symmetrical nebulae., *A&A*, 1971, vol. 10, p. 161
- Huggins P. J., Jets and Tori in Proto-Planetary Nebulae, *ApJ*, 2007, vol. 663, p. 342
- Hyung S., Aller L. H., Feibelman W. A., Spectroscopic Observations of the Planetary Nebula NGC 6818, *ApJ*, 1999, vol. 514, p. 878
- Kaler J. B., A catalog of relative emission line intensities observed in planetary and diffuse nebulae, *ApJS*, 1976, vol. 31, p. 517
- Khromov G. S., Kohoutek L., Morphological Study of Planetary Nebulae. In *Planetary Nebulae*, vol. 34 of IAU Symposium, 1968, p. 227
- Kwok S., *The Origin and Evolution of Planetary Nebulae*. Cambridge University Press, 2000
- López J. A., Richer M. G., García-Díaz M. T., Clark D. M., Meaburn J., Riesgo H., Steffen W., Lloyd M., The San Pedro Mártir Kinematic Catalogue of Galactic Planetary Nebulae, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 2012, vol. 48, p. 3
- Maciel W. J., *Astrofísica do Meio Interestelar*. São Paulo: edusp, 2002
- Matsuura M., Zijlstra A. A., Molster F. J., Waters L. B. F. M., Nomura H., Sahai R., Hoare M. G., The dark lane of the planetary nebula NGC 6302*†, *MNRAS*, 2005, vol. 359, p.383

-
- Meaburn J., Lloyd M., Vaytet N. M. H., López J. A., Hubble-type outflows of the high-excitation poly-polar planetary nebula NGC 6302 - from expansion proper motions, *MNRAS*, 2008, vol. 385, p. 269
- Meaburn J., López J. A., Steffen W., Graham M. F., Holloway A. J., The Hubble-Type Outflows from the High-Excitation, Polypolar Planetary Nebula NGC 6302, *AJ*, 2005, vol. 130, p. 2303
- Mellema G., Numerical models for the formation of aspherical planetary nebulae., Ph. D. thesis, University of Leiden, (1993), 1993, Tese de Doutorado
- Minello S., Sabbadin F., The evolution of line intensity ratios in planetary nebulae, *A&A*, 1977, vol. 58, p. L29
- Osterbrock D. E., Ferland G. J., *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei..* 2. Sausalito, California: University Science Books, 2006
- Perek L., Kohoutek L., Catalogue of galactic planetary nebulae., Publ. House Czech. Acad. Sci., 1967, pp 1–276
- Peretto N., Fuller G., Zijlstra A., Patel N., The massive expanding molecular torus in the planetary nebula NGC 6302, *A&A*, 2007, vol. 473, p. 207
- Richer M. G., Báez S.-H., López J. A., Riesgo H., García-Díaz M. T., What Can We Learn About the Kinematics of Bright Extragalactic Planetary Nebulae?, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 2009, vol. 45, p. 239
- Riesgo H., López J. A., Revised Diagnostic Diagrams for Planetary Nebulae, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 2006, vol. 42, p. 47
- Sabbadin F., D'Odorico S., Spectroscopic observations of the supernova remnant candidates 3C 400.2 and S91., *A&A*, 1976, vol. 49, p. 119
- Sabbadin F., Minello S., Bianchini A., Sharpless 176: a large, nearby planetary nebula., *A&A*, 1977, vol. 60, p. 147

- Schwarz H. E., Conference Impression. In *Asymmetrical Planetary Nebulae II: From Origins to Microstructures*, vol. 199 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2000, p. 457
- Shklovsky I. S., On the nature of planetary nebulae Discussion. In *Non-stable stars*, vol. 3 of *IAU Symposium*, 1957, p. 83
- Solf J., Ulrich H., The structure of the R Aquarii nebula, *A&A*, 1985, vol. 148, p. 274
- Stanghellini L., Corradi R. L. M., Schwarz H. E., The correlations between planetary nebula morphology and central star evolution, *A&A*, 1993, vol. 279, p. 521
- Stanghellini L., Shaw R. A., Villaver E., The Magellanic Cloud Calibration of the Galactic Planetary Nebula Distance Scale, *ApJ*, 2008, vol. 689, p. 194
- Steffen W., Holloway A. J., Pedlar A., Jets and the emission-line spiral structure in IRAS 04210+0400, *MNRAS*, 1996, vol. 282, p. 130
- Steffen W., López J. A., Morpho-kinematic modeling of planetary nebulae. In *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, vol. 26 of *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, vol. 27, 2006, p. 30
- Szyszka C., Walsh J. R., Zijlstra A. A., Tsamis Y. G., Detection of the Central Star of the Planetary Nebula NGC 6302, *ApJ*, 2009, vol. 707, p. L32
- Szyszka C., Zijlstra A. A., Walsh J. R., The expansion proper motions of the planetary nebula NGC 6302 from Hubble Space Telescope imaging, *MNRAS*, 2011, vol. 416, p. 715
- Westerlund B. E., Henize K. G., Dimensions of Southern Planetary Nebulae, *ApJS*, 1967, vol. 14, p. 154
- Wilson R. E., General catalogue of stellar radial velocities., *Carnegie Institute Washington D.C. Publication*, 1953, p. 0
- Wright N. J., Barlow M. J., Ercolano B., Rauch T., A 3D photoionization model of the extreme planetary nebula NGC 6302, *MNRAS*, 2011, vol. 418, p. 370

Zhang C. Y., Kwok S., A Morphological Study of Planetary Nebulae, *ApJS*, 1998, vol. 117, p. 341

Zijlstra A. A., Chapman J. M., te Lintel Hekkert P., Likkell L., Comeron F., Norris R. P., Molster F. J., Cohen R. J., Bipolar outflows in OH/IR stars, *MNRAS*, 2001, vol. 322, p. 280