

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

Paulo Jakson Assunção Lago

**Processos físicos e propriedades cinemáticas
em nebulosas planetárias extensas**

São Paulo

2017

Paulo Jakson Assunção Lago

Processos físicos e propriedades cinemáticas em nebulosas planetárias extensas

Tese 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 Doutor em Ciências. **Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.**

Área de Concentração: Astronomia

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

São Paulo

2017

À Marilene e a Círia, duas grandes mulheres na minha vida!

Agradecimentos

Aos meus pais pelo amor e apoio incondicionais;

À Círia Lima Dias, pela compreensão, carinho e apoio em momentos importantes, tornando meu mundo um lugar mais cálido.

A todos os familiares que me apoiaram;

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

À CAPES pelo apoio financeiro parcial;

Ao CNPq pelo financiamento do projeto de tese, processo 140803/2014-9;

Aos amigos Renan, Evandro, Eliana, Beto e Nestor; morar na república foi uma experiência inesquecível.

Aos amigos que fiz no IAG-USP;

A Stavros Akras, N. Clyne e a Denise Gonçalves pelas discussões e sugestões. Além do auxílio com o uso do SHAPE.

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

À 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.

*“A vida é uma simples sombra que passa (...); é uma história contada por um idiota,
cheia de ruído e de furor e que nada significa”*

Macbeth (William Shakespeare)

Resumo

Nebulosas Planetárias (PNe) são consequência do processo de evolução estelar de estrelas de massa intermediária e se formam devido à ejeção de massa da estrela na fase pós-AGB; a interação entre o gás de diferentes episódios de ejeção forma objetos com diferentes morfologias, como descrito pela teoria dos ventos interagentes. A diversidade morfológica das PNe ainda é um assunto de intensa discussão, os cenários de formação ainda estão em aberto e as simulações hidrodinâmicas são ainda de pouca utilidade na discussão de um alvo, em particular neste caso a reconstrução da estrutura tridimensional assim como da cinemática são de grande valia. Utilizando dados espectroscópicos e imagens fotométricas a estrutura de uma amostra de PNe é reconstruída com o software SHAPE. Os dados observacionais são modelados o que permite uma série de inferências a respeito do objeto, inclusive sobre seu cenário de formação. Usando dados obtidos no OPD assim como de dados do levantamento SPM foram construídos modelos para cinco PNe. O papel dos choques nos mecanismos de ionização e excitação também foi estudado, baseado nos modelos de choques disponíveis na literatura.

Os modelos são baseados em estruturas simples e na maioria das vezes simétricas, todos os campos de velocidade utilizados são lineares e a distribuição de densidade visa reproduzir o brilho superficial de cada objeto. Os dados espectroscópicos reproduzidos são os diagramas P-V (posição - velocidade). NGC 6818, NGC 6153 e NGC 3211 foram modeladas e os diagramas P-V obtidos no OPD foram adequadamente reproduzidos. Constatou-se que os choques em NGC 6818 e NGC 6153 são bastante relevantes, o que não era esperado. NGC 2440 foi reproduzida como uma PN com duas componentes bipolares, sua região central apresenta uma estrutura toroidal fragmentada em, no mínimo, três pedaços. Utilizando a cinemática desta região foi obtida uma distância de 1,8 kpc para a mesma; um halo esférico

não concêntrico envolve toda a sua estrutura os choques são o mecanismo dominante nas bordas deste objeto. NGC 6445 foi modelada como uma PN octopolar, possuindo um toróide na região central. Concluimos que o retângulo central visível nas imagens deste objeto é fruto de um efeito de sobreposição, e que os choques são dominantes no mesmo. Dentro deste cenário, acompanhado da análise dos choques em NGC 6302, sugere-se que os choques nas nebulosas planetárias do tipo I precisam ser considerados para um cálculo adequado das abundâncias, já que podem ter impacto sobre os fatores de correção de ionização.

Abstract

Planetary Nebulae (PNe) are consequence of the stellar evolution process of intermediate mass stars, they form due the mass-ejection at the post-AGB phase. The interaction of the ejected gas in different mass-loss episodes shapes their morphology, as described by the interacting winds theory. The morphological diversity of PNe remains a subject of intense debate, their formation scenarios are still opened and hydrodynamical simulations still have little use. For a particular target, structure reconstruction and description of the kinematics are very useful.

By using images and spectroscopical data, structures for a sample of PNe are reconstructed, the observational data are modeled, what allows a series of conclusions about the objects, including their formation scenarios. Using data from OPD (Pico dos Dias Observatory), as well as from the SPM survey, we constructed models for five PNe, the role of shocks in the ionization and excitation mechanisms were studied as well, based on the models for shocks available in the literature.

Our models are based on simple structures, most of them symmetrical. All velocity fields are linear and density distributions aim to reproduce the surface brightness. The reproduced data are P-V (position - velocity) diagrams. We modeled NGC 6818, NGC 6153 and NGC 3211, reproducing their P-V diagrams appropriately. For NGC 6818 e NGC 6153, we found that shocks are relevant, what was not expected. NGC 2440 was reproduced with two bipolar components, its central region consists in a torus fragmented in at least three pieces. By using the kinematical properties of the central region, a distance of 1.8 kpc was derived to this nebula. A non-concentrical spherical halo involves the whole structure, and the shocks dominate the ionization and excitation process at the rims of this object. NGC 6445 was modeled as a multipolar PN with four bipolar components,

a central toroidal structure completes the model. We conclude that the central rectangle visible in the images of this object is a consequence of an overlap of structures.

Within this scenario for NGC 6445, combined with the analysis of shocks in NGC 6302, we suggest that the shocks have to be considered in abundance estimates of type I PNe, since they may have an impact on the ionization correction factors.

Lista de Figuras

2.1	Esquema do caminho óptico do espectrógrafo Coudé (OPD).	33
2.2	Exemplo de espectro obtido com o instrumento ajustado na forma utilizada neste trabalho, retirado de Lago (2013).	34
2.3	Curva de eficiência quântica do CCD 098.	38
3.1	Diversidade morfológica de 20 PNe reproduzidas a partir de uma PN multipolar (Chong et al., 2012).	45
3.2	Fluxograma de trabalho de uma modelagem utilizando o SHAPE (Steffen et al., 2011)	53
4.1	Imagem do DSS para NGC 6818, as posições de fenda B e D utilizadas para a construção de nossos diagramas P-V são mostradas. Para a posição B o PA da fenda é de 270° e para D o PA é de 0°	57
4.2	Comparação entre o diagrama P-V, linha [NII] 6548\AA , observado para a posição de fenda B (esquerda) e o obtido do nosso modelo (direita), para NGC 6818	59
4.3	Comparação entre o diagrama P-V, linha [NII] 6548\AA , observado para a posição de fenda D (esquerda) e o obtido do nosso modelo (direita), para NGC 6818	60
4.4	Comparação entre imagem obtida com o HST(esquerda), imagem renderizada usando o SHAPE (direita) e o modelo de malha utilizado (parte inferior).	61
4.5	Imagem do DSS com as posições de fenda utilizadas no estudo de NGC 6153. O PA das posições A, B e C é de 270° e da posição D é de 180°	64

4.6	Comparação entre os diagramas P-V, linha [NII] 6548Å, observados (esquerda) e modelados (direita) para a posição de fenda A da PN NGC 6153.	65
4.7	Comparação entre os diagramas P-V, linha [NII] 6548Å, observados (esquerda) e modelados (direita) para a posição de fenda B da PN NGC 6153.	66
4.8	Comparação entre os diagramas P-V, linha [NII] 6548Å, observados (esquerda) e modelados (direita) para a posição de fenda C da PN NGC 6153.	67
4.9	Comparação entre os diagramas P-V, linha [NII] 6548Å, observados (esquerda) e modelados (direita) para a posição de fenda D da PN NGC 6153.	68
4.10	Comparação entre a imagem de alta resolução do HST (composta) e o modelo de malha.	68
4.11	Imagem (Górny et al., 1999) com as posições de fenda utilizadas no estudo de NGC 3211.	69
4.12	Comparação entre os diagramas P-V, linha [NII] 6584Å, observados (esquerda) e modelados (direita) para a posição de fenda A da PN NGC 3211.	69
4.13	Comparação entre os diagramas P-V, linha [NII] 6584Å, observados (esquerda) e modelados (direita) para a posição de fenda B da PN NGC 3211.	70
4.14	Comparação entre a imagem de NGC 3211 (Górny et al., 1999) (esquerda), imagem produzida pelo modelo (direita) e o modelo de malha (embaixo). .	71
5.1	Morfologia de NGC 2440 ilustrada por López et al. (1998).	75
5.2	Posições de fenda que possuem diagramas P-V disponíveis no catálogo SPM, imagem retirada do mesmo.	76
5.3	Imagem do HST (F658n) para a linha do [NII] (esquerda) e modelo construído (direita).	77
5.4	Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda <i>a</i> , <i>b</i> e <i>c</i>	79
5.5	Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda <i>d</i> , <i>e</i> e <i>f</i>	80
5.6	Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda <i>g</i> , <i>h</i> e <i>i</i>	81
5.7	Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda <i>j</i> , <i>k</i> e <i>l</i>	82

5.8	Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda m , n e o	83
5.9	Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda p e q	84
5.10	O halo com sua estrutura destacada, círculo vermelho, sobreposta à imagem de NGC 2440, observada pelo HST para o filtro F656N. Os centros são destacados com o objetivo de salientar sua separação.	87
5.11	Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda i e j , incluindo o halo.	88
5.12	Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda q e r , incluindo o halo.	89
5.13	Posições de fenda observadas disponíveis no catálogo SPM, figura retirada do mesmo.	91
5.14	Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita) para as posições de fenda a e b	92
5.15	Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita) para as posições de fenda f e h	92
5.16	Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita) para as posições de fenda i e g	93
5.17	Modelo de malha construído.	95
5.18	Mapa cinemático para NGC 6445, cedido cordialmente pela professora Dra Claudia Lucia Mendes de Oliveira. Vale enfatizar que a estrutura do toróide é claramente visível e concorda com nosso modelo, vide figura 5.17, a componente do toróide em recessão está marcada pela letra B, a em aproximação é marcada pela letra A; o código de cores mostra as componentes em aproximação (em azul) e em recessão (em vermelho).	96
6.1	Diagramas de diagnóstico para NGC 2440.	103
6.2	Diagramas de diagnóstico para NGC 6302, os diferentes símbolos e cores representam distintos lóbulos da PN.	105

Lista de Tabelas

2.1	Características das redes do espectrógrafo Coudé.	35
2.2	Informações relativas às observações.	36
2.3	Características gerais do CCD 098.	37
2.4	Características de leitura do CCD 098.	37
5.1	Parâmetros dos campos de velocidade para o modelo de NGC 2440.	78
5.2	Parâmetros utilizados no modelo para NGC 6445. Inclinação (Inc) é medida em relação à linha de visada.	94
6.1	Parâmetros utilizados e resultados obtidos em nosso estudo dos choques para NGC 6818 e NGC 6153.	101
6.2	Parâmetros utilizados e resultados obtidos em nosso estudo dos choques para NGC 6445.	106

Sumário

1. <i>Introdução</i>	21
1.1 PNe como componentes do meio interestelar	21
1.2 Diversidade morfológica	24
1.3 Objetivos	28
2. <i>Dados</i>	29
2.1 Visão geral	29
2.2 Observações	30
2.2.1 Observatório do Pico dos Dias	30
2.2.2 Redução dos dados e os diagramas P-V	38
2.3 O <i>Survey</i> SPM	40
2.4 O SAM Fabry-Perot	41
3. <i>Modelagem</i>	43
3.1 Considerações iniciais	43
3.2 O processo de modelagem	46
3.3 Os campos de velocidades lineares são uma boa aproximação?	50
4. <i>Nebulosas com geometria simplificada</i>	55
4.1 NGC6818	56
4.2 NGC 6153	62
4.3 NGC 3211	65

5. <i>Nebulosas com geometria multipolar</i>	73
5.1 NGC 2440	74
5.1.1 Características da nebulosa	74
5.1.2 O modelo	76
5.1.3 Resultados	78
5.1.4 Halo	86
5.1.5 O cenário de formação de NGC 2440.	87
5.2 NGC 6445	90
5.2.1 Morfologia	90
5.2.2 Modelo e resultados	91
5.2.3 Cinemática	93
6. <i>Mecanismos de fotoexcitação das linhas</i>	97
6.1 O papel dos choques na excitação e ionização das PNe	98
6.2 NGC 6818 e NGC 6153	101
6.3 Nebulosas tipo I	102
6.3.1 NGC 2440	102
6.3.2 NGC 6302	104
6.3.3 NGC 6445	106
6.4 Consequência dos choques para o cálculo das abundâncias.	107
7. <i>Conclusões e perspectivas</i>	109
<i>Referências</i>	115
<i>Apêndice</i>	123
A. <i>NGC 2440: A MORPHO-KINEMATICAL MODEL</i>	125

Introdução

1.1 PNe como componentes do meio interestelar

Ao observar o céu noturno os objetos que mais se destacam são os componentes de nosso Sistema Solar e as estrelas; ao observar essas estrelas em diferentes regiões do céu pode-se perceber a distribuição heterogênea delas, algumas regiões apresentam maiores concentrações e em contrapartida outras regiões parecem vazias. Várias destas regiões possuem nuvens escuras posicionadas na direção das estrelas, observações como esta indicam a existência de uma matéria que permeia as estrelas: o meio interestelar (ISM).

Galáxias espirais apresentam uma clara concentração de gás no disco, nas galáxias posicionadas de perfil em relação à nossa linha de visada, pode-se ver ainda uma clara faixa escura, constituída de poeira. Estas componentes são alguns dos constituintes do meio interestelar. Sabemos hoje que este meio é tênue em comparação com as próprias densidades astronômicas, o ISM possui uma densidade de partículas que pode variar, sendo dividido em ISM denso e difuso, as maiores densidades se apresentam em nuvens moleculares, as menores no gás coronal que envolve a Via-Láctea, porém suas densidades são inferiores à do vácuo produzido em laboratório (Maciel, 2002).

As componentes principais do ISM são basicamente o campo de radiação das estrelas, gás e associado ao gás estão os grãos sólidos (poeira) e também partículas de alta energia provenientes de diversas fontes, conhecidas como raios cósmicos. Deve-se ressaltar a existência de outras componentes como a radiação cósmica de fundo, que pode ser caracterizada como um campo de radiação de baixa energia, além de componentes associadas a fenômenos locais como jatos e condensações.

Basicamente, devido à distribuição e como interage com a radiação estelar o gás do

ISM pode apresentar diferentes fases. A temperatura e a densidade apresentadas serão diretamente ligadas aos processos físicos dominantes, nomenclaturas diferentes são adotadas para uma adequada distinção, como por exemplo as nuvens escuras associadas ao gás molecular frio, em contraste com as regiões HII que são compostas de gás ionizado pelo campo de radiação de estrelas jovens. Ambos os exemplos possuem basicamente a mesma composição química, mas a exposição a um campo de radiação é que molda seus processos físicos.

Uma das formas de estudar o ISM é através de sua influência nas observações de estrelas. Por exemplo, suas componentes alterarão os resultados observacionais e é desejável que esses efeitos sejam conhecidos e, quando possível, compensados. A poeira particularmente tem um papel muito relevante neste aspecto, devido ao espalhamento e extinção por parte dos grãos a luz sofre um efeito de avermelhamento ao atravessar o ISM. Este efeito só veio a ser razoavelmente conhecido no século XX.

Deve-se atentar também ao significado histórico confuso do termo “nebulosa”. Antes da década de 1920 o mesmo era utilizado inclusive para outras galáxias, pois era o termo vinculado a qualquer objeto difuso visto aos telescópios da época, apenas posteriormente este termo iria se referir apenas a objetos difusos, componentes do ISM.

Uma componente do ISM quente e pouco denso particularmente interessante é o que conhecemos como nebulosa planetária (PN), do inglês *planetary nebula*. Estes objetos ao serem observados com pequenos telescópios parecem com os planetas exteriores de nosso sistema Solar daí o termo nebulosa planetária. O termo é mantido por razões históricas apesar de sabermos hoje que é inadequado

Sabemos hoje que as PNe são formadas nos estágios finais de estrelas de massa intermediária ($0,8$ a $8 M_{\odot}$) e são formados em estágios anteriores à fase de anã branca de suas estrelas progenitoras. Suas estrelas centrais possuem altas temperaturas, da ordem de poucas centenas de milhares kelvins, sendo as estrelas mais quentes do Universo (Maciel, 2002). O gás ejetado durante a fase pós-AGB (*asymptotic giant branch*), em contato com o campo de radiação dessas estrelas, emite a radiação que caracteriza estes objetos. Espectros típicos observados na natureza são os relativos à radiação térmica. Max Planck é o primeiro a descrever matematicamente essa forma de emissão satisfatoriamente, basicamente essa radiação é relativa à temperatura do corpo e não depende da sua composição

química. PNe não possuem esse mecanismo como sua forma majoritária de emissão.

PNe são nebulosas ionizadas, desta forma o gás se encontra na forma de plasma. Os elétrons livres apresentam uma alta temperatura, pois a energia é injetada no sistema pelo campo de radiação da estrela. A emissão de radiação eletromagnética abrange uma grande faixa do espectro, sendo que cada região é relacionada a distintos processos físicos; a emissão em linhas no óptico é a característica mais marcante e é relativa ao gás atômico. O gás molecular apresenta também emissão em linhas, porém no infravermelho; estes objetos exibem um fraco contínuo estelar proveniente da luz refletida da estrela, assim como um contínuo no rádio proveniente da desaceleração dos elétrons.

A emissão em linhas no óptico das PNe é a mais antiga fonte de informação a respeito destes objetos. Historicamente foi feita uma confusão relativa a esta emissão, muitas das linhas observadas em fontes nebulares assim como em galáxias de núcleos ativos não são observadas em laboratório, só são observadas em fontes astronômicas devido à baixa densidade do gás nestes objetos. Linhas desconhecidas foram inicialmente associadas a novos elementos químicos, fato que foi retificado com a consideração das linhas proibidas.

Kwok (2000) e Osterbrock e Ferland (2006) apresentam uma descrição dos mecanismos de emissão em linhas das PNe. Esses mecanismos estão relacionados ao equilíbrio de fotoionização estabelecido no gás que interage com o campo de radiação do remanescente estelar. Como já dito, esse remanescente possui temperatura elevada emitindo aproximadamente como um corpo negro, as elevadas temperaturas fazem com que o pico de emissão seja no ultravioleta, desta forma os remanescentes estelares são uma fonte abundante de radiação ionizante.

Visando os objetivos deste trabalho detalharemos um pouco a fenomenologia associada ao espectro de linhas de emissão observado no óptico. Considerando que as PNe são formadas pela ejeção das camadas externas das estrelas na fase pós-AGB, uma característica das PNe herdada de suas progenitoras é a composição química. As PNe são majoritariamente formadas por hidrogênio e hélio e em menor quantidade estão elementos mais pesados como nitrogênio, oxigênio e enxofre, sintetizados ou não pela progenitora.

O gás ejetado é ionizado ao interagir com o campo de radiação. Os elétrons livres possuem uma determinada energia cinética e ao interagir com os outros átomos podem excitá-los. Este mecanismo é a excitação por choque e é o responsável pela excitação dos

estados metaestáveis dos átomos, esse processo constitui em um mecanismo de resfriamento do gás muito eficiente. Estes estados possuem um tempo de decaimento muito longo pois o gás precisa ser muito tênue para que a desexcitação radiativa aconteça, esta emissão se dá em linhas conhecidas como proibidas.

Os elétrons, ao se recombinarem emitem radiação associada às linhas permitidas, como as séries de Lyman, Balmer e Paschen no caso do hidrogênio. Como a energia é constantemente injetada no gás pelo campo de radiação assume-se uma situação de equilíbrio.

Devido à fenomenologia, a emissão em linhas no óptico das PNe é muito similar à de outras componentes do ISM quente. Apesar das diferentes origens, regiões HII e remanescentes de supernova emitem similarmente em linhas, a principal diferença está na fonte de radiação ionizante além do processo de formação. Regiões HII são formadas a partir das nuvens frias formadoras de estrelas, aquecidas e fotoionizadas pelas estrelas jovens do tipo espectral O e B. Os remanescentes de supernova, como o próprio nome define, são remanescentes dos colapsos de núcleos de estrelas de alta massa, nas quais os choques são uma importante fonte de energia para o gás devido ao processo violento de formação.

Sabbadin et al. (1977) sugerem diagramas de diagnóstico para o gás com o objetivo de separar estes três diferentes tipos de objetos baseando-se em razões de fluxo de linhas. Esta abordagem é até hoje amplamente utilizada, sendo que estes diagramas passaram por uma pequena atualização feita por Riesgo e López (2006).

As PNe são uma importante ferramenta no estudo da evolução química da Galáxia, fornecendo informações de como se dá o enriquecimento do ISM, uma vez que dispersam elementos pesados no mesmo. Estudos a respeito das abundâncias e composição química das PNe são vastos na literatura. Mais recentemente, devido ao contínuo desenvolvimento instrumental, foi possível estudar a morfologia das PNe em detalhe, um marco para este estudo foi o lançamento do telescópio espacial Hubble (HST); devido à capacidade deste instrumento, detalhes nas PNe nunca antes vistos foram observados, possibilitando estudos morfológicos cada vez mais detalhados.

1.2 *Diversidade morfológica*

As nebulosas planetárias apresentam-se em inúmeros formatos, mostrando distintos graus de simetria, desde o esférico ao multipolar; estes objetos são também ricos em su-

bestructuras, como nós, jatos e filamentos que no geral podem possuir diferente grau de ionização e cinemática distinta da nebulosa hospedeira (Gonçalves, 2004). A caracterização da cinemática das PNe é feita a partir da espectroscopia de média/alta resolução.

Numa PNe, o gás possui velocidade de expansão típica de 25km/s, velocidade esta supersônica já que a velocidade do som no meio interestelar é 10km/s (Vázquez, 2012); porém o gás não segue uma livre expansão térmica, como poderia-se esperar, e isto é constatado pela simples observação da diversidade morfológica das PNe.

A ejeção de massa na fase AGB é justificada pela transferência de momentum entre o campo de radiação e a poeira condensada na atmosfera (Kwok, 1975); formando o envelope que originará a planetária. A fim de explicar o mecanismo físico responsável pela deformação do envelope esférico foi desenvolvida a teoria dos ventos interagentes (ISW) por Kwok et al. (1978), na qual é caracterizado o período de transição entre a gigante vermelha e a nebulosa planetária. Neste período o núcleo da estrela é exposto através da constante perda de massa a diferentes ações simultâneas do vento da estrela e do seu núcleo, que possui um vento mais rápido e tênue. Esta interação seria então a responsável pela origem morfológica da planetária.

A teoria dos ventos interagentes se mostrou sólida no trato do problema da origem morfológica das PNe, porém a mesma não era suficiente para justificar algumas morfologias, como a elíptica e a bipolar. Balick (1987) inclui a possibilidade do acréscimo de densidade equatorial a fim de explicar estas duas morfologias; a teoria reformulada chama-se teoria dos ventos interagentes generalizada (GISW).

A compreensão a respeito dos diversos tipos de morfologia tem crescido desde então, em particular a morfologia bipolar é hoje associada à binaridade da estrela central (De Marco, 2009), sendo associada à interação entre a estrela progenitora e sua companheira. Porém este cenário ainda não é unânime, modelos diferentes ainda são considerados, como por exemplo os que consideram campos magnéticos na formação das PNe. Pode-se então associar o crescimento equatorial da densidade à presença de uma estrela companheira que recebe matéria da progenitora, enchendo o lóbulo de Roche e à ação de instabilidades térmicas geram um envelope comum que abriga as duas estrelas. Este envelope é mais denso no plano orbital e essa densidade excessiva na região equatorial limita o trânsito do vento mais rápido, fazendo com que a nebulosa planetária apresente uma morfologia

bipolar ou com simetria axial (Huckvale et al., 2013).

Jatos são observados em diversos objetos astronômicos, em diferentes graus de colimação e escalas. Jatos altamente colimados são um ponto de importante discussão na Astrofísica, suas origens e fenomenologias têm forte ligação com o objeto que os apresenta. Um tipo de objeto cujos jatos são muito bem estudados são os AGN — núcleos ativos de galáxias (do inglês *Active Galactic Nuclei*) — cujos jatos são observáveis em diversas faixas de energia; objetos estelares jovens também exibem jatos colimados visíveis no óptico.

Várias nebulosas apresentam jatos pouco colimados. Como proposto por Livio e Soker (1988), a formação do envelope comum, certamente associada à binaridade da estrela central, tem um importante papel para a formação destas estruturas. Outra característica em nebulosas elípticas é a presença de nós brilhantes e opostos associados ao eixo de simetria da PN, sendo associadas a uma estrutura tipo jato (Soker e Livio, 1994).

Soker e Livio (1994) investigam três cenários para a formação de jatos:

— O primeiro cenário sugere a acreção de material por parte de uma companheira compacta, a estrela que tem sua massa subtraída é a progenitora da PN. Neste cenário é a companheira que colima o jato, uma vez que o disco de acreção forma-se ao seu redor; os autores citam dois exemplos de PNe bipolares que se encaixam neste modelo que são He 2 -104 e BI Cru.

— Outro cenário sugerido é associado ao acréscimo de matéria em estágios tardios da PN, podendo portanto somente justificar jatos em estágios muito tardios das PN. A configuração do sistema proposto sugere o acréscimo de matéria por parte da estrela central diretamente da nebulosa. Deve-se atentar que de fato este tipo de jato não é o cenário mais propício para justificar certas estruturas em PNe, porém seria um mecanismo interessante para justificar anãs brancas enriquecidas com hidrogênio. Um flash de hélio tardio pode ser uma evidência deste fenômeno.

— Pode-se descrever a formação do jato com a saída da binária da fase de envelope comum. O contraste de densidade entre a região equatorial e os polos seria responsável por colimar o jato, efeitos inerciais poderiam formar jatos com grau de colimação moderado.

Posteriormente Lopez et al. (1995) discutem o caso da PN K_jPn 8, uma nebulosa muito extensa com tamanho angular de 14×4 minutos de arco, a maior PN identificada na época. Este objeto é discutido considerando imagens fotométricas, medidas de fluxo de

linhas e observações em 3,5 cm obtidas com o VLA. As características gerais do objeto que apresenta uma clara morfologia bipolar são discutidas no contexto dos *Bipolar, rotating, episodic jets* (BRETs). O mesmo grupo de pesquisa já havia abordado o tema no estudo da PN Fleming 1 (Lopez et al., 1993) e este fenômeno estaria ligado às PNe com binárias próximas e a fase de envelope comum teria um papel crucial para o favorecimento deste cenário.

Os BRETs são caracterizados pela presença de ejeções simétricas colimadas episódicas. Outra característica marcante é a produção de regiões excitadas por choques marcadas pela expansão destas ejeções, a distribuição espacial destas regiões evidencia a presença de rotação ou precessão do eixo de simetria relacionado ao jato episódico. O tamanho destas regiões pode exceder o da PN em si, nós simétricos são também um forte indício deste mecanismo (Lopez et al., 1995).

Os mesmos autores acima detalham ainda várias componentes morfológicas da nebulosa em questão, sua clara estrutura bipolar é associada a outras componentes, ejeções bipolares internas são associadas a regiões excitadas por choques, os extremos da maior estrutura parecem interagir com o ISM, porém os autores enfatizam a possibilidade de um efeito de projeção, não garantindo o choque observado nesta interação. A discussão a respeito da cinemática tem como foco os choques, não são apresentados outros dados relativos à mesma, as velocidades assumidas para a expansão do gás têm como base os modelos para os choques da época. Os diagramas clássicos de Sabbadin et al. (1977) são utilizados para classificar a emissão do gás, baseando-se nas razões de linha. Como é discutido no capítulo 6, são necessários outros vínculos para a caracterização dos choques; um ponto relevante é o papel dos choques relacionados ao mecanismo de BRET, problema que será abordado neste trabalho.

Os BRETs estão de acordo com o terceiro cenário de formação de ejeções em PNe apresentado por Soker e Livio (1994), posteriormente este cenário de formação seria novamente invocado com o objetivo de justificar a origem da PN NGC 2440. Nosso trabalho revisita essa questão, sendo este um ponto central de nossa discussão, uma vez que este cenário se encaixa na formação das PNe multipolares apresentadas aqui.

1.3 *Objetivos*

Considerando o contexto apresentado, este trabalho tem como objetivo central a investigação sistemática de características morfológicas e cinemáticas de PNe angularmente resolvidas. Começa neste trabalho a iniciativa de construção de um levantamento de dados morfo-cinemáticos, utilizando instrumentação brasileira, primeiramente com dados do Observatório do Pico dos dias (OPD) e posteriormente dados do telescópio SOAR. Os dados constituem-se em diagramas P-V. A obtenção e análise dos mesmos são descritas no capítulo 2, assim como os dados do catálogo SPM também utilizados neste trabalho.

Os resultados observacionais são utilizados para a construção de modelos da estrutura tridimensional dos objetos. Os detalhes sobre a ferramenta e o método estão no capítulo 3. Estes modelos fornecem informações a respeito da morfologia, cinemática e permitem a formulação de cenários de formação para o alvo, assim como da física relacionada ao mesmo, como comportamento do campo de velocidades e mecanismos relacionados a excitação/ionização do gás.

Estudos morfo-cinemáticos são pouco numerosos, principalmente quando focados em um objeto específico; desta forma apresentamos aqui diversas características inexploradas a respeito da nossa amostra, estes resultados são importantes uma vez que o cenário de formação das PNe precisa ser melhor entendido; tais modelos são uma importante ferramenta para entendimento dos cenários de formação, permitindo a formulação de uma teoria mais ampla que contemple o maior número de tipos morfológicos.

Visamos descrever o mecanismo de excitação das linhas de emissão mais claramente para nossa amostra. Utilizamos resultados recentes para caracterizar os choques e seu papel no fornecimento de energia para o gás. Isto só é possível devido aos campos de velocidade obtidos a partir dos modelos. Considerando o atual estado da arte esta contribuição é bastante interessante, apenas recentemente um diagnóstico observacional vem sendo desenvolvido, sendo assim este trabalho apresenta diversos resultados novos a este respeito.

Dados

2.1 Visão geral

Considerando os objetivos centrais do trabalho já citados na seção anterior, para os fins de modelagem desejados são necessários dados de duas naturezas: imagens fotométricas e espectroscopia com resolução espacial.

As imagens fotométricas têm a finalidade de referenciar a construção da estrutura tridimensional das nebulosas da amostra. Para que cumpram seu objetivo, as mesmas devem fornecer, como requisito mínimo, um número de contagens satisfatório quando comparadas aos dos outros dados, abrangendo toda a estrutura. Este trabalho utilizou, em sua maioria, limitando-se pela disponibilidade, imagens do telescópio espacial Hubble (HST, como será referido de agora em diante). As imagens do HST excedem em detalhes o necessário para a realização do trabalho; outras fontes foram também usadas e serão referidas no momento oportuno.

Os dados espectroscópicos podem ser de duas naturezas: diagramas posição-velocidade (P-V), obtidos usando um espectrógrafo de fenda longa, ou mapas de canais (*Channel maps*), obtidos utilizando algum espectrógrafo IFU (*Integral Field Unit*). A condição que damos ênfase — a fim de justificar a escolha da instrumentação — é que os espectros devem possuir resolução espacial, o que só é possível usando estas duas técnicas de espectroscopia. Espectrógrafos que usam fibra óptica substituindo a fenda como entrada de luz são inadequados; desta forma instrumentos como o MUSICOS (OPD) são inadequados ao trabalho, reduzindo o número de instrumentos que serviriam ao nosso objetivo.

Reiterando, deve-se ter em mente que quando observamos uma PN ou qualquer objeto extenso vemos sua projeção bidimensional no céu. O uso da espectroscopia é fundamen-

tal para a modelagem da estrutura tridimensional. O campo de velocidades carregará a informação relativa à dimensão suprimida, a profundidade, justamente devido ao deslocamento observado da linha em consequência do efeito Doppler, observado justamente na linha de visada o que permite a recuperação da informação.

O modelo é construído de tal forma que as imagens fotométricas e espectroscópicas são usadas e reconstruídas — resultado do modelo — de forma que ambas são o critério de avaliação da qualidade do mesmo.

Durante a confecção do projeto de tese havia a expectativa do comissionamento a tempo do espectrógrafo STELLES (SOAR), fato este não concretizado. Desta forma o único instrumento com tempo disponível para a comunidade brasileira que viabilizava este trabalho era do espectrógrafo Coudé do Observatório do Pico dos Dias (OPD) MCTI/LNA, considerando também a resolução em velocidades necessária para o trabalho, de aproximadamente 11km/s.

Devido às limitações dos instrumentos utilizados no OPD e considerando também sua baixa estatística de noites ideais de observação, utilizamos complementarmente dados do San Pedro Martir Survey (López et al., 2012), os detalhes serão apresentados adiante.

Durante as etapas finais da execução deste trabalho tivemos acesso, para o objeto NGC 6445, a dados de IFU do instrumento SAM-Fabry Perot do telescópio SOAR, ainda em seu período de teste. Os resultados mostraram-se excelentes e reiteram a robustez do método.

2.2 Observações

2.2.1 Observatório do Pico dos Dias

O Observatório do Pico dos Dias, OPD (MCTI/LNA), está localizado no sul do estado das Minas Gerais, entre os municípios de Brasópolis e Piranguçu. O OPD encontra-se em funcionamento desde a década de 1970, seu maior telescópio é um instrumento Perkin-Elmer com 1,60 m de diâmetro podendo ser utilizado com dois focos: um Coudé e outro Cassegrain. Diversos instrumentos podem ser utilizados bem como diversos detectores, juntamente com rodas de filtro e materiais para fotometria. O telescópio pode ser usado para fotometria, espectroscopia e polarimetria.

São disponíveis também dois telescópios de menor porte: um de 60cm Boller & Chivens

(IAG/USP) e outro também de 60 cm Zeiss. O telescópio IAG é majoritariamente utilizado em modo remoto sendo usado para fotometria e polarimetria. Diferentemente dos outros dois telescópios já brevemente descritos o Zeiss é um telescópio manual. Não há CCD para o rastreamento do alvo, sendo este telescópio utilizável apenas presencialmente. Neste trabalho o único instrumento utilizado foi o telescópio de 1,60m ¹.

O observatório encontra-se à altitude de 1864m — altimetria de 900m. Devida à sua altitude próxima a zona de inversão térmica da troposfera, juntamente com as características climáticas da região, o OPD apresenta uma baixa estatística de noites fotométricas. Porém devemos ressaltar que estas noites não são necessárias para o trabalho desenvolvido.

Esta tese nasceu de um projeto de construção de survey, similar ao construído utilizando o SPM, já referido anteriormente. O objetivo chave é a construção de diagramas P-V para o maior grupo possível de PNe austrais angularmente resolvidas; considerando que a velocidade típica de expansão destes objetos é de $\sim 25\text{km/s}$ o espectrógrafo Coudé com resolução em velocidades $\sim 11\text{km/s}$ seria adequado para nosso propósito.

O *survey* deveria possuir também um acervo apresentando diagramas P-V para diferentes posições de fenda — novamente aos moldes do SPM. Considerando então o objetivo citado vamos enumerar as principais limitações a serem consideradas para o projeto.

Primeiramente foram concedidas cinco noites por ano para a implementação do projeto. Considerando que são necessários, em média, 30 minutos por diagrama P-V e para cada posição de fenda sempre nós obtínhamos por garantia dois diagramas P-V; desta forma considerando idealmente seis posições de fenda por objeto, era possível amostrar dois objetos por noite, condição sensível às nuances do tempo e as estratégias de observação impostas pelo instrumento.

O tempo de integração assim como a seleção de alvos foi determinada pela razão focal do telescópio na configuração utilizada: $f/31,2$. Nestas condições as imagens formadas no detector apresentavam um baixo fator iluminação “J”²; desta forma se por um lado um céu com baixo contraste era um fator não limitante — o instrumento é praticamente cego à luz difusa da Lua, por exemplo — por outro somente objetos com alto brilho superficial eram bons alvos assim como os tempos de integração eram conseqüentemente

¹ Para maiores detalhes por favor veja: <http://www.lna.br/opd/telescop/telescop.html>

² Este fator é definido como energia por unidade de área da imagem sendo inversamente proporcional à última e sendo inversamente proporcional ao quadrado da razão focal.

altos. Notamos posteriormente que devido ao mesmo motivo várias PNe com alta variação de brilho superficial apresentavam partes invisíveis ao instrumento.

As estratégias de observação são, talvez, o ponto mais crucial do processo de obtenção de dados. A fenda do espectrógrafo Coudé é fixa, logo não pode ser rotacionada, simultaneamente o instrumento é acomodado em outra sala e não acoplado ao telescópio; como consequência o campo do instrumento gira. A única forma de realizar as desejadas observações é utilizar a rotação do campo de forma favorável. A estratégia de observação era definida de acordo com a posição do campo. Era feita a observação, o alvo era mudado e quando o campo do primeiro objeto estava na posição previamente calculada, era feita uma nova observação. Esta estratégia deixava a missão ainda mais suscetível ao clima e acarretava numa perda adicional de tempo de observação devida à mudança constante de alvo.

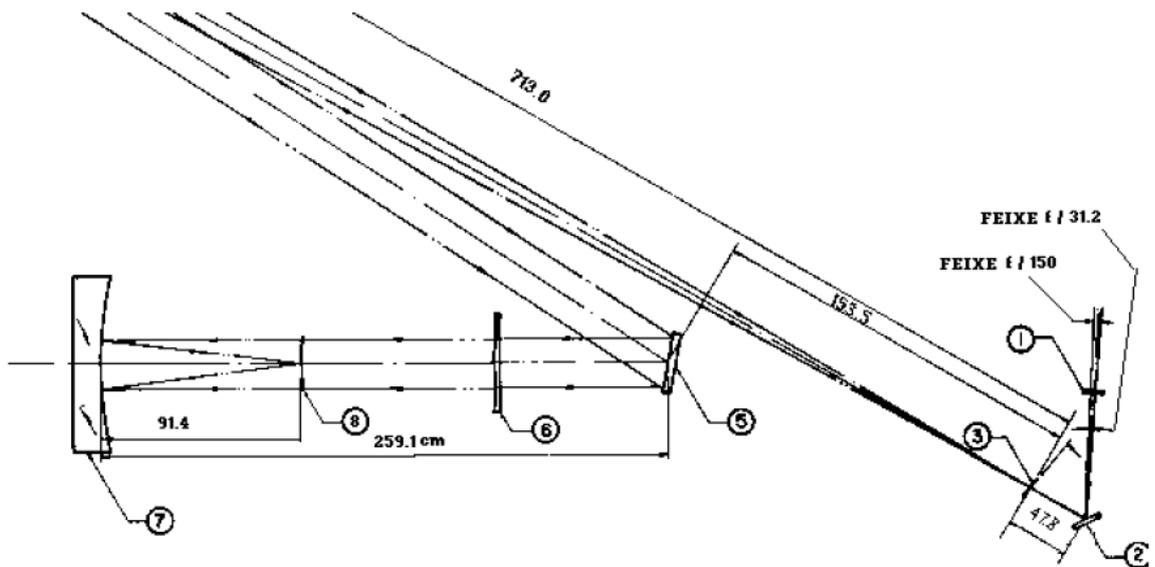
O espectrógrafo Coudé apresenta o caminho óptico mostrado na figura 2.1, retirada do manual do instrumento ³, a figura 2.2 mostra um exemplo de espectro obtido.

Utilizamos o instrumento configurado com a rede de difração de 1800 l/mm em primeira ordem direita. Realizamos conjuntos de observações em duas regiões espectrais: próximo à linha de recombinação do hidrogênio (656.3 nm , conhecida por $H\alpha$), e a linha proibida [OIII] $500,7 \text{ nm}$.

O *seeing* — que de forma grosseira pode ser definido como a resolução angular devida ao efeito da turbulência atmosférica — típico do OPD é da ordem de 2 segundos de arco, fato este que limitava nossa escolha de alvos uma vez que objetos muito pequenos teriam grande incerteza relativa aos seus tamanhos nos diagramas P-V. No caso das PNe de forma geral o alto brilho superficial das linhas citadas no azul está nas regiões mais internas do objeto, e as vezes muito pequenas, potencializando o efeito citado. Infelizmente, devido às condições impostas pelo tempo e pelo instrumento, o trabalho teve que se limitar à região vermelha.

O detetor utilizado nas missões foi o W98. Ao longo dos anos do trabalho de doutorado tivemos tempo concedido de cinco noites por ano, num total de vinte noites, porém devido ao clima tivemos aproximadamente 40% do tempo total aproveitado. Dentro deste cenário foram feitos alguns testes cujas conclusões foram a inviabilidade da obtenção de diagramas

³ Disponível em: http://www.lna.br/opd/instrum/manual/Manual_160mOPD_Cap3.pdf



O esquema óptico do espectrógrafo Coudé no telescópio de 1.6 m do OPD/LNA:

- 1 - Lente de conversão (f/150 - f/31.2)**
- 2 - Espelho 5**
- 3 - Fenda**
- 4 - Colimador (f/31.2)**
- 5 - Rede**
- 6 - Corretor Schmidt**
- 7 - Espelho da câmara (f/4)**
- 8 - Detector**

Figura 2.1: Esquema do caminho óptico do espectrógrafo Coudé (OPD).

P-V com qualidade suficiente para a região azul do espectro, já que o efeito do *seeing* é potencializado nesta região, além disso o CCD não pode ser substituído durante a missão e este CCD é melhor para a região vermelha do espectro, como será discutido adiante. Além dos motivos anteriores vale ressaltar também que os espelhos do espectrógrafo disponíveis na data oportuna eram menos eficientes para a região azul. Pode-se ver as características do espectrógrafo utilizando as redes disponíveis na tabela 2.1.

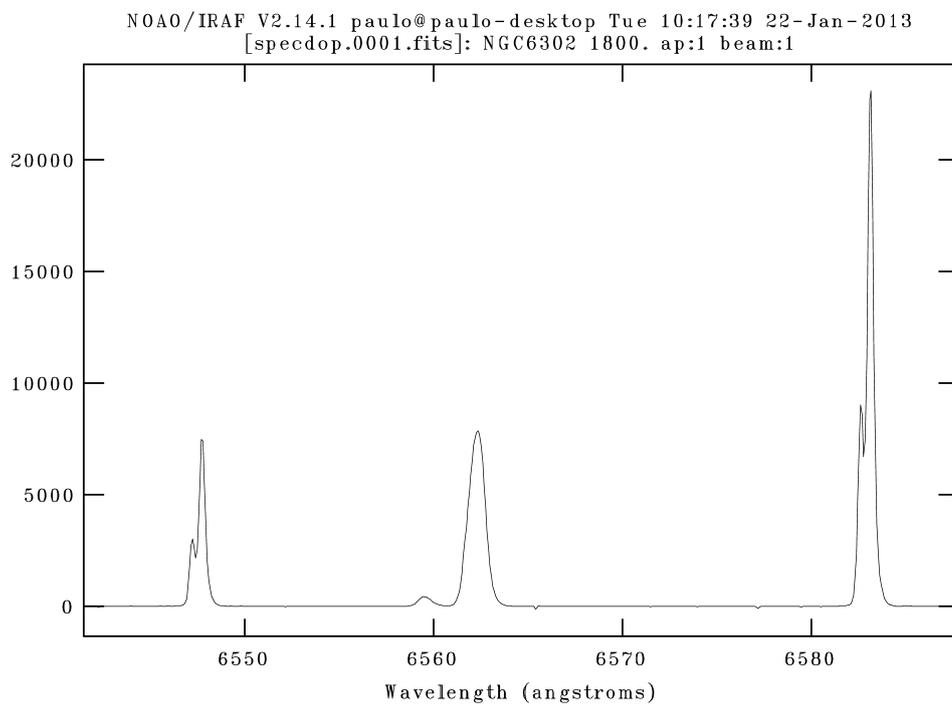


Figura 2.2: Exemplo de espectro obtido com o instrumento ajustado na forma utilizada neste trabalho, retirado de Lago (2013).

Tabela 2.1 - Características das redes do espectrógrafo Coudé.

Ordem	Rede $l/mm - \lambda_c (nm)$	CCD	Cobertura (nm)	Dispersão ($nm/pixel$)	Resolução (FWHM, Å)
Primeira ordem direta	0600 - 650	098	113,0	0,025	0,50
Primeira ordem direta	1800 - 650	098	35,3	0,008	0,20
Primeira ordem inversa	0600 - 650	098	99,7	0,022	0,22
Primeira ordem inversa	1800 - 650	098	22,1	0,005	0,12
Segunda ordem direta	0600 - 650	098	56,3	0,012	0,24
Quarta ordem inversa	0600 - 650	098	9,1	0,002	0,06

Tabela 2.2 - Informações relativas às observações.

Objeto	Número de PA de fendas	Tempo de exposição	Período
NGC 6818	2	1800 s	2013
NGC 6153	4	1800 s	2014 e 2015
NGC 3211	2	1800 s	2015

Finalmente, considerando nosso conjunto de dados foram feitos modelos para três nebulosas planetárias observadas no OPD, NGC 6818, NGC 6153 e NGC 3211. As posições de fenda escolhidas são mostradas na seção de resultados assim como os modelos obtidos, a tabela 2.2 sumariza as observações.

O número pequeno de dados aproveitados deve ser justificado:

Primeiramente devemos ressaltar que o instrumento foi utilizado em seu limite. Muitos de nossos objetos mostraram-se inadequados uma vez que possuíam uma grande variação de brilho superficial, desta forma muitas estruturas eram invisíveis ao instrumento; seu maior fluxo provinha de estruturas que inviabilizavam a modelagem, uma vez que estavam fora de contexto pois o restante da PN era inacessível ao instrumento.

Apesar de termos aproveitado o equivalente à 40 % do tempo total concedido, devemos lembrar que durante vários turnos de observação houve uma alta variabilidade das condições meteorológicas, sendo assim, devido às estratégias de observação já descritas, para muitos objetos perdemos muitas posições de fenda. Noites com *seeing* muito variável também complicavam muito a viabilidade da construção dos diagramas P-V pois o erro relativo ao tamanho de estruturas variava durante a noite, com isso observar objetos com pequenos tamanhos angulares tornava-se ainda mais difícil.

O CCD de guiagem teve um papel importantíssimo neste trabalho. Desta forma algumas considerações sobre o mesmo devem ser feitas. A instrumentação foi modificada, assim como o software, durante a execução do projeto; a primeira missão no ano de 2013 apresentava uma grande limitação, a baixa sensibilidade do CCD de guiagem. Por esta razão muitos objetos eram invisíveis, outros eram visíveis, porém devido ao baixo brilho superficial e à ausência de estrelas de campo, o acompanhamento era impossibilitado e a posição tinha de ser corrigida manualmente. A partir de 2014 a nova câmera, com sensibilidade

Tabela 2.3 - Características gerais do CCD 098.

Tamanho imagem [pixels]	2048 × 4608
Tamanho pixel [microns]	13,5 × 13,5
Corrente escuro [$e^-/pixel/s$]	$< 10^{-4}$
Saturação [$e^-/pixel$]	$1,15 \times 10^5$
Controlador	WI Mark2e

Tabela 2.4 - Características de leitura do CCD 098.

	modo lento	modo rápido
Ruído leitura [e^- rms]	2,4	4,7
Fator conversão [e^-/ADU] p/ ganho = 4	2,5	2,5

muito melhor, aumentou um pouco a amostra que poderia ser observada; independente da câmera utilizada perdemos tempo considerável de observação devido ao acompanhamento insatisfatório do instrumento que perdia o alvo, uma vez que tal funcionalidade foi desenvolvida inicialmente para objetos muito brilhantes e pontuais.

Considerando todas as limitações expostas deve-se destacar os resultados obtidos. Não haviam resultados da natureza deste trabalho já publicados a respeito das três nebulosas referidas e nosso número de diagramas P-V para estes objetos é superior ao de outras iniciativas, como o SPM survey, principalmente para NGC 3211 já que não haviam diagramas P-V publicados para este objeto. Os dados obtidos têm qualidade e este trabalho é fruto de seu uso e interpretação, porém para o objetivo inicial da confecção de um survey, faz-se necessário o comissionamento do espectrógrafo STELLES.

Finalizando a descrição da instrumentação, descrevemos brevemente o detetor, CCD W98: Marconi CCD42-90-0-941 (número serial 8351-20-03), fino, back-illuminated. Devido a suas especificações, este era o instrumento mais adequado aos nossos fins. Os detalhes do mesmo são apresentados nas tabelas 2.2 e 2.3, a curva de eficiência quântica é apresentada na figura 2.3 ⁴.

⁴ disponível em <http://www.lna.br/opd/instrum/ccd/ccd98.html>

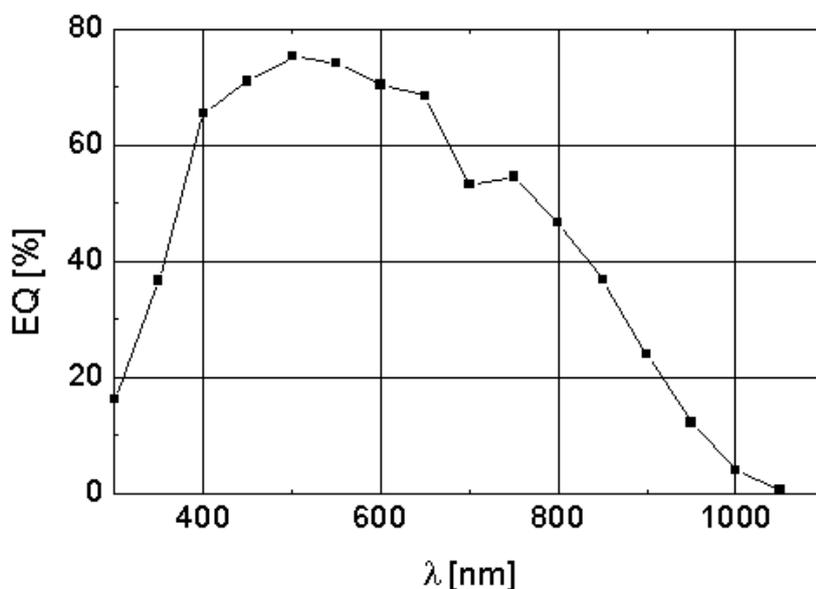


Figura 2.3: Curva de eficiência quântica do CCD 098.

2.2.2 Redução dos dados e os diagramas P-V

A redução das imagens obtidas no OPD foi realizada utilizando o pacote de redução IRAF⁵ (*Image Reduction and Analysis Facility*), os produtos finais de nossas observações eram os diagramas P-V. Estes diagramas — referidos neste trabalho — nada mais são que imagens do espectro de fenda longa de um objeto alvo. No CCD é vista a imagem da linha espectral, num dos eixos encontra-se a dimensão angular ao longo da fenda, no nosso caso o eixo vertical, e no outro a espectral, que é convertida em velocidades posteriormente.

O IRAF é um conjunto de softwares que reúne diversas rotinas de análise e redução de dados em astronomia, amplamente utilizado desde os anos 80 e possui um repertório que possibilita a rápida e uniforme redução de dados.

Descrevemos brevemente os passos para a redução dos dados obtidos. Primeiramente foi feita uma análise da resposta do CCD, no nosso caso quando as bordas apresentavam baixa resposta as imagens eram cortadas, para tal era utilizado a tarefa *ccdproc* do IRAF. Sequencialmente foi extraído o ruído instrumental de nossos dados; basicamente para isso eram utilizadas imagens *bias* e *flatfields*.

As imagens *bias* têm como objetivo fornecer uma referência para a correção do ruído

⁵ Disponível em <http://iraf.noao.edu/>

de leitura do instrumento. Este ruído é uma flutuação do tipo Poisson referente à descarga do detetor; obtemos as imagens *bias* com o obturador da câmera fechado realizando uma exposição com o menor tempo de integração possível. A cada noite da missão foram obtidas em média vinte imagens *bias*, as mesmas foram combinadas utilizando a tarefa *zerocombine* e a média das imagens é utilizada para a referida correção.

A correção utilizando as imagens *flatfield* tem a intenção de garantir uma iluminação uniforme do detetor — para tal objetivo é avaliada a resposta pixel a pixel do CCD. Por noite eram obtidas em média cinco imagens para este fim. Estas imagens foram obtidas utilizando uma tela branca uniformemente iluminada, *flat* de cúpula, como é conhecido. Os tempos de integração foram ajustados a fim de garantir aproximadamente contagens da ordem metade do máximo do CCD. Os *flats* foram combinados e normalizados a fim prover a correção das imagens; neste trabalho não foram utilizados *flatfield* de crepúsculo nem *flats* internos. Realizadas estas correções todo o ruído instrumental estava suprimido. Devemos salientar que devido à temperatura de operação do CCD não foram feitas correções utilizando imagens *dark*.

Tendo em mãos as imagens sem ruído instrumental foram utilizadas rotinas escritas por nós em Python para construir os diagramas P-V, a escala angular foi convertida de pixels para segundos de arco — baseando-se para isso nas características do instrumento — a dimensão de comprimento de onda foi convertida para velocidades. O centro da linha foi determinado visualmente, desta forma as velocidades heliocêntricas e sistêmicas são corrigidas. Os diagramas P-V obtidos são apresentados no capítulo 4, as posições de fenda relativas a cada diagrama são mostradas juntamente com os resultados a fim de facilitar a leitura da tese.

Raios cósmicos de baixa energia são uma fonte importante de contaminação. Geralmente estas partículas interagem com o detetor CCD provocando uma região pequena de saturação, região essa composta apenas por alguns pixels; a fim de evitar confusão destas fontes com microestruturas de nossos objetos os raios cósmicos foram retirados manualmente, uma vez que a região do detetor fica saturada eles são de fácil reconhecimento e extração.

2.3 O Survey SPM

Complementarmente foram utilizados neste trabalho dados do SPM (San Pedro Mártir) *Kinematic Catalogue* (López et al., 2012). Foram utilizados dados das nebulosas NGC 2440 e NGC 6445, ambas multipolares — os detalhes são expostos no capítulo cinco. A instrumentação disponível no OPD mostrou-se aquém das capacidades para a produção de diagramas P-V com qualidade para esses objetos, sendo imprescindível o uso dos dados citados.

O SPM survey é uma compilação de dados morfocinemáticos para nebulosas planetárias. Esta compilação é dividida em duas partes: uma destinada às nebulosas galáticas e outra às nebulosas extragaláticas (López et al., 2012; Richer et al., 2010). Neste trabalho utilizamos apenas dados das duas nebulosas já citadas, ambas Galáticas. As posições de fenda utilizadas são mostradas no capítulo cinco junto aos resultados, a fim de facilitar a leitura.

O survey é um extenso catálogo de dados cinemáticos para PNe produzido utilizando uma instrumentação especializada para o tipo de alvo. Os dados são diagramas P-V construídos a partir de espectros de fenda longa de alta resolução espectral e estão disponibilizados na internet ⁶. Como a configuração do instrumento não foi a mesma em todas as observações, é disponibilizada uma tabela de dados instrumentais juntamente um link para acesso do diagrama P-V desejado. Além da tabela o banco de dados disponibiliza também uma imagem onde as posições de fenda são mostradas.

Para a construção deste banco de dados foram utilizados dois telescópios: O telescópio anglo-australiano de 3,9 m (f/8) e o telescópio do observatório SPM com 2,1 m (f/7,5). O espectrógrafo utilizado foi o MES (*Manchester Echelle Spectrograph*), sendo que foram usados dois instrumentos idênticos em cada observatório. As resoluções em velocidades típicas apresentadas são — dependendo do brilho do objeto — 6; 11,5 e 22 km/s. Detalhes da instrumentação nas referências já citadas.

⁶ <http://kincatpn.astrosen.unam.mx/>

2.4 O SAM Fabry-Perot

Finalizando esta descrição da instrumentação utilizada no trabalho falaremos brevemente do SAM Fabry-Perot. É importante enfatizar que tivemos acesso a dados deste instrumento nos últimos seis meses de trabalho, sendo assim o modelo produzido, particularmente para NGC 6445, não tinha como objetivo obter mapas de canais sintéticos para comparação. A importância destes dados é testar e reiterar a robustez do método utilizado, uma vez que o modelo foi produzido utilizando dados de espectroscopia de fenda longa e, ainda assim, foi capaz de modelar estruturas e detalhes em total acordo com os dados do SAM.

O instrumento funciona em dois modos: um permitindo uma resolução $R = 11200$ e outra $R = 4100$, sendo formidável para a observação da cinemática de diversas fontes astronômicas tais como PNe, galáxias, objetos HH entre outros. A redução dos dados é bastante complexa, desta forma os dados já foram disponibilizados reduzidos.

O SAM FP ainda está na fase de testes, os dados utilizados neste trabalho foram disponibilizados pela equipe responsável pelo instrumento (C. Mendes de Oliveira, P. Amram, B. Quint). O instrumento foi adequado para a observação de NGC 6445, seu campo tem o tamanho de 3×3 minutos de arco e o tamanho da referida PN é ligeiramente menor do que isso.

Modelagem

3.1 *Considerações iniciais*

Hoje em dia é comum utilizar simulações computacionais para a validação de modelos; para as PNe não é diferente. Podem-se usar simulações hidrodinâmicas para este fim. O grande problema deste tipo de simulação é que se precisa ter muitos vínculos, o que exige um conhecimento extremamente detalhado do objeto estudado; conhecimento este que quase nunca temos. Devido a esta lacuna, as simulações hidrodinâmicas são, no geral, muito genéricas, não sendo muito aplicáveis a objetos específicos, além de muito caras computacionalmente.

Existem trabalhos que usam a simetria das PNe para reconstruir, automaticamente, sua estrutura tridimensional como Leahy e Volk (1994) e Lintu et al. (2007), porém são de difícil aplicação em objetos complexos, devida à falta de simetria; os efeitos de projeção devem também ser considerados, o que não é possível nestes modelos. Deve-se considerar também que não se tem informação direta da estrutura tridimensional da nebulosa, observa-se o objeto projetado no plano do céu, toda a informação obtida da sua estrutura tridimensional é fruto de observação indireta, associada à cinemática; logo é também sujeita a erros de interpretação, pois a análise pode ser uma tarefa difícil para PNe muito complexas.

A fim de modelar a estrutura e cinemática da nebulosa NGC 6302, Uscanga et al. (2014) realizaram uma simulação hidrodinâmica para a mesma. A referida nebulosa é um dos objetos desta classe que possui um campo de velocidades linear confirmado observacionalmente — este exemplo e característica serão discutidos adiante — porém mesmo considerando todo o conhecimento disponível e refinamento do modelo, o mesmo foi incapaz de reproduzir o campo de velocidades. Uma das conclusões dos autores é que justamente a

física que rege estes objetos, e seus diversos efeitos, precisam ser esclarecidos para, enfim, reproduzirem satisfatoriamente o objeto. Este exemplo demonstra toda a complexidade envolvendo nosso objeto de interesse e como simulações desta natureza são pouco usuais para objetos específicos.

Uma metodologia que tem se mostrado muito eficiente ao tratar esse problema foi desenvolvida por Steffen e López (2006) e Steffen et al. (2011); onde o problema é abordado em ordem contrária à metodologia tradicional das simulações hidrodinâmicas. Neste caso usa-se a informação extraída da cinemática para reconstruir a estrutura da nebulosa. Como dado de saída tem-se o perfil cinemático da linha de emissão desejada, informação que pode ser comparada à observação.

O custo computacional das simulações hidrodinâmicas é demasiadamente alto, ao contrário desta metodologia citada. Hoje, a mesma é implementada utilizando o *freeware* SHAPE (Steffen et al., 2011), este programa usa uma metodologia similar à utilizada em programas comerciais amplamente utilizados em computação gráfica. Estes programas são baseados em renderização, onde simula-se um ambiente 3D e projeta-se uma imagem de uma determinada linha de visada. O grande problema é que a física nestes programas não é respeitada, a iluminação, o transporte radiativo entre outras características não são fielmente reproduzidos pois, devido ao interesse artístico, basta que o resultado final seja a visualização desejada. O SHAPE tem abordagem idêntica, com a diferença de reproduzir fielmente a física do problema.

Como vantagem tem-se que podemos obter modelos muito flexíveis e altamente focados num objeto, onde a interpretação dos dados observacionais por parte do usuário será crítica na construção do modelo. Como dado de saída teremos a visualização da nebulosa planetária e do perfil de linha desejado, tudo isso obtido com pouca informação do objeto e baixo custo computacional já que o SHAPE usa recursos da placa gráfica e não dos processadores, o que permite uma implementação altamente paralelizada, muito bem otimizada, de forma que uma simulação do SHAPE pode ser rodada em apenas alguns minutos, ao contrário das demoradas simulações hidrodinâmicas.

Apenas para exemplificar e mostrar o potencial da técnica de interesse, destacamos dois artigos que inspiraram a nossa abordagem, principalmente a modelagem de NGC 6445, e têm talvez as conclusões mais relevantes para a morfologia de PNe utilizando esta técnica.

Chong et al. (2012), utilizando a morfologia de uma nebulosa multipolar — precisamente com três componentes bipolares — e variando o ângulo das componentes entre si assim como o ângulo de visada, reproduziram toda a diversidade morfológica das PNe, como é ilustrado na figura 3.1. A principal conclusão foi a constatação da subestimativa do número de nebulosas planetárias multipolares.

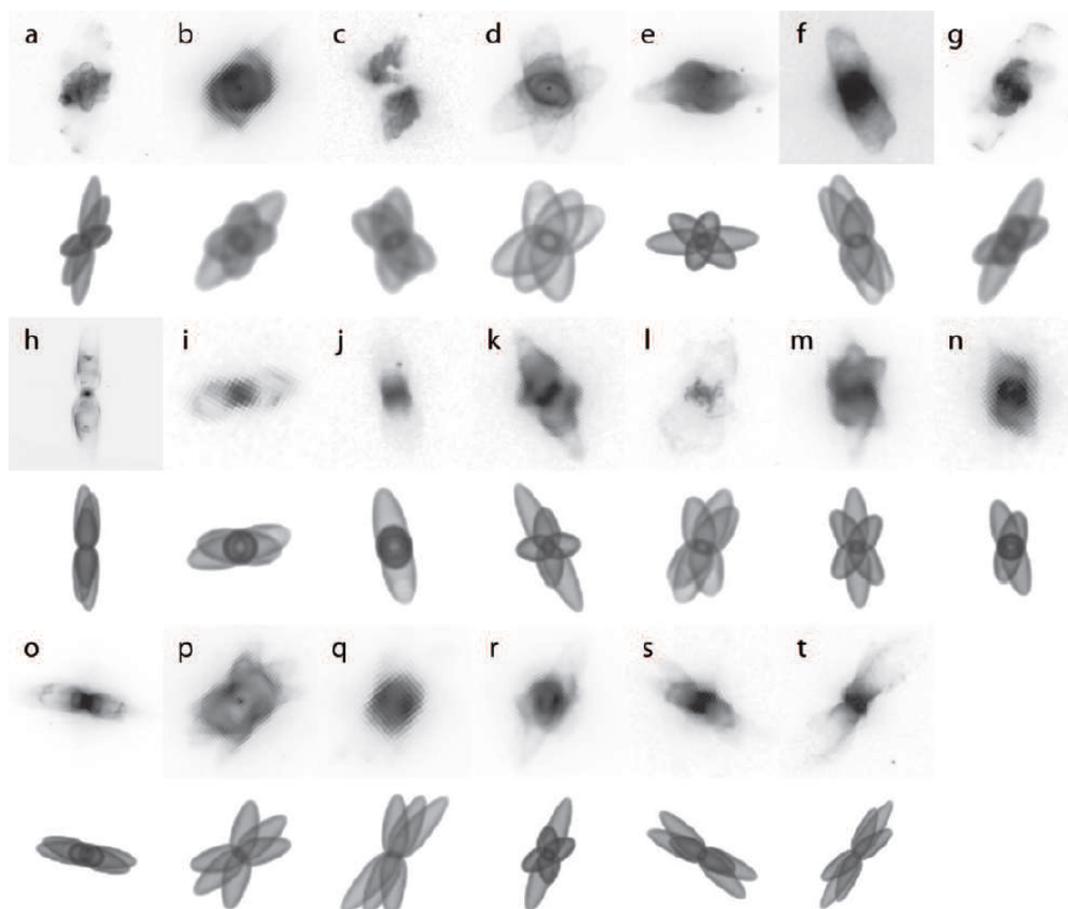


Figura 3.1: Diversidade morfológica de 20 PNe reproduzidas a partir de uma PN multipolar (Chong et al., 2012).

Outro trabalho demonstra que NGC 7009, NGC 2392 e NGC 6543 pertencem à mesma classe morfológica (García-Díaz et al., 2012), ambos apenas não compartilham o mesmo ângulo de visada. Os modelos do referido trabalho utilizam recursos mais sofisticados e reproduzem as PNe em grande detalhe.

3.2 O processo de modelagem

A partir de agora decreveremos o processo de modelagem, começando em uma abordagem geral e partindo posteriormente para discussão de pontos específicos, tidos como de maior relevância para a compreensão do trabalho. Este capítulo descreverá de forma generalista a modelagem, em certos casos particularidades serão retomadas na apresentação dos resultados.

Como já mencionado, o SHAPE¹ permite a construção de modelos flexíveis de maneira interativa e robusta, baseando-se para isso em dados observacionais. Diante do grande potencial desta ferramenta vale ressaltar que o objetivo deste trabalho foi a modelagem da estrutura e cinemática de PNe; outras funcionalidades tais como solução das equações de transporte radiativo e simulações hidrodinâmicas estão fora de nossos objetivos.

A primeira e certamente mais crucial etapa é a interpretação dos resultados observacionais. Munido com as imagens e diagramas P-V, esta interpretação baseará a construção interativa da estrutura do alvo a ser modelado. A grande virtude do método — seu alto grau de liberdade e interação com o pesquisador — poderá também consequentemente gerar uma ampla família de soluções ao final do processo.

Para exemplificar o que foi dito anteriormente pensemos no caso seguinte: uma nebulosa esférica com algumas subestruturas, nós, em sua região periférica. Não leve em consideração agora a forma do campo de velocidades, apenas a geometria, especificamente a posição dos nós. Relembre que quando observamos um objeto vemos apenas sua projeção no plano do céu, uma vez que estes nós destoam da cinemática da componente esférica. Como posicioná-los corretamente? Pode-se alterar parâmetros diferentes, obtendo modelos diferentes, conseguindo o mesmo resultado.

A figura 3.1 mostra como esse efeito é recorrente. Praticamente todas as morfologias de PNe são modeladas a partir de multipolares; tal abordagem é adequada e evidente para, por exemplo, os quadros *d*, *g* e *p*, porém nos quadros *h*, *j* e *o* apenas um componente bipolar não seria suficiente?

A única forma de reduzir o número de soluções possíveis é possuir um número maior

¹ Para detalhes a respeito do SHAPE ver o manual do mesmo disponível em: <http://www.astrosen.unam.mx/shape/v4/manual/v4.0/index.html> assim como a página: <http://www.astrosen.unam.mx/shape/v5/TUTORIALS/learning.html>

de dados observacionais, especificamente diagramas P-V. As questões levantadas aqui são respondidas por esses dados, porém ainda assim o número de soluções possíveis é reduzido não necessariamente tornando-se única. Essa redução torna-se viável devido ao aumento do número de vínculos observacionais.

Tendo em mente as considerações acima citadas pode-se iniciar a modelagem em si. A construção de um modelo de malha é a etapa inicial do processo; essa construção leva em consideração várias imagens fotométricas — usualmente com a melhor resolução angular possível, obtidas utilizando um filtro estreito relacionado à linha na qual foi construído o diagrama P-V, em nosso caso imagens do HST foram utilizadas recorrentemente.

O SHAPE permite carregar imagens de referência para facilitar esse processo. Deve-se ter em mente que os diagramas P-V devem ser utilizados conjuntamente, considerando o explicado anteriormente, uma vez que a imagem fotométrica é uma projeção do objeto no plano do céu. O programa permite utilizar como plano de fundo, no módulo de reconstrução 3D, as imagens de referência.

O modelo de malha é construído baseando-se, inicialmente, numa geometria simples, como uma esfera por exemplo, e essa geometria é alterada a fim de representar uma estrutura compatível com as imagens de referência. A chave para a modelagem das PNe é o uso de modificadores no SHAPE; de forma geral o modelo inicial é construído e alterado a partir da adição de modificadores ao modelo, esses modificadores podem modificar a geometria, transformando uma esfera em uma estrutura bipolar, por exemplo, ou adicionando parâmetros físicos à estrutura como o campo de velocidades. Dissertaremos a respeito do mesmo posteriormente. Os modelos de malha para cada nebulosa são apresentados na seção de resultados.

Nebulosas corriqueiramente são modeladas utilizando mais de uma componente devido à sua complexidade, cada componente é modelada separadamente podendo apresentar morfologia e cinemática distintas, proporcionando a possibilidade de construção de modelos de alta complexidade. O ajuste dos ângulos de inclinação de cada componente — relativos à linha de visada e aos outros componentes — é um processo bastante laborioso; a referida informação é melhor fornecida pelos diagramas P-V, sendo assim o modelo deve levar em consideração todos os diagramas P-V disponíveis reproduzindo-os da melhor maneira possível, sendo autoconsistente.

Vale ressaltar que o objetivo deste trabalho foi a reconstrução da cinemática priorizando os diagramas P-V, a morfologia foi reproduzida de maneira simplificada: foge aos nossos objetivos modelar microestruturas secundárias. Pequenas estruturas, com poucas exceções, estão ausentes em nossos modelos; não se quer reproduzir em detalhe as imagens fotométricas e sim partir de estruturas simples e modelar a cinemática de nossa amostra.

Como nossos modelos não visavam resolver as equações de transporte radiativo, desta forma a densidade em nossos modelos não possui significado físico. A densidade em nossos modelos possui o importante papel de fornecer informações relativas à distribuição do brilho superficial dos objetos — tanto nas imagens fotométricas quanto nos diagramas P-V. Esta densidade não está correlacionada com a distribuição da densidade eletrônica, por exemplo; para o cálculo desta seria necessário o uso de razões de linhas sensíveis à densidade eletrônica, além disso precisaríamos da distribuição espacial desta informação, algo similar a dados fornecidos por instrumentos IFU, dados esses que não possuímos.

Desta maneira, apesar do programa referir-se à densidade, é mais correto neste trabalho referir-se a uma distribuição de densidade. Em vários casos utilizamos uma distribuição de densidade uniforme; nos demais foi utilizada uma distribuição baseada no brilho superficial e ajustada manualmente, esta distribuição foi modelada utilizando coordenadas esféricas, cada componente foi multiplicada pelas outras resultando na distribuição final. A componente radial foi considerada constante, sendo sempre uma distribuição angular no final das contas.

Uma aproximação importante é assumida: os modelos assumem um meio opticamente fino. Fisicamente isso significa que basicamente o gás das PNe referidas é transparente à emissão em linhas dos íons de interesse (Steffen e López, 2006).

Foram utilizadas as linhas proibidas — especificamente as do íon N^+ , $\lambda 6548, 6584 \text{ \AA}$ — para a construção dos diagramas P-V. Considerando o processo de emissão destas linhas a aproximação é aceitável. As linhas proibidas são geradas a partir do decaimento de estados atômicos excitados metaestáveis, estes estados possuem um longo tempo de vida não sendo passíveis de reprodução em laboratório, uma vez que devido às condições de densidade estes estados decaem por interação colisional.

Os estados metaestáveis são excitados através do choque entre os íons e os elétrons livres, que são liberados dos átomos de hidrogênio devido à ação do intenso campo de

radiação da estrela central da PN. Os fótons liberados no decaimento dos estados citados têm um longo livre caminho médio, uma vez que dificilmente interagirão com átomos, restando apenas o espalhamento Thompson como via de interação, não contribuindo para uma opacidade relevante. A importância desta aproximação consiste em considerar que nenhuma parte da PN é mascarada nas imagens ou diagramas P-V, devido à opacidade do gás ao longo da linha de visada.

A modelagem da estrutura deve considerar os diagramas P-V disponíveis, logo é importante que conjuntamente à construção da estrutura seja adotado um campo de velocidades. Todos os campos de velocidades utilizados têm perfil de crescimento linear; seus componentes são apresentados junto aos resultados, nos capítulos quatro e cinco, para cada objeto da amostra. A adoção destes campos é uma etapa crucial no processo de modelagem, discutiremos na próxima seção de forma detalhada.

Possuindo então um modelo preliminar o mesmo deve ser validado através da comparação com o conjunto de dados observacionais. Caso a reprodução destes dados não seja satisfatória é necessário repensar a geometria inicial adotada, em casos de discrepância evidente a interpretação dos dados está equivocada e o modelo precisa ser refeito.

A comparação entre a saída do modelo e os dados é feita de forma visual. Uma abordagem automatizada seria desejável, o SHAPE possui até um módulo que testa esta competência porém a comparação visual ainda é a melhor abordagem. As PNe possuem uma distribuição complexa de brilho superficial, os modelos geralmente reproduzem de maneira simplificada essas nuances; sendo assim uma comparação via software é menos eficiente que a visual pois os parâmetros de comparação são difíceis de estabelecer. Os erros associados a medidas de ângulos são igualmente difíceis de determinar, a forma escolhida para estimá-los foi variar em torno do valor associado ao modelo ótimo até que essa variação introduzida tenha como consequência a perda do ajuste com as observações.

Os parâmetros relacionados às condições observacionais podem ser introduzidos no SHAPE a fim de obter resultados mais fidedignos às observações. O *seeing*, a abertura da fenda e a resolução em velocidades dos diagramas P-V podem ser simuladas; desta forma a semelhança com as imagens referência torna-se alta. Finalizado todo o processo temos os resultados do modelo; a figura 3.2 retirada de Steffen et al. (2011) sintetiza o processo de modelagem.

3.3 *Os campos de velocidades lineares são uma boa aproximação?*

Vários trabalhos publicados utilizando a mesma metodologia descrita anteriormente usam a aproximação de campos de velocidades lineares (Huckvale et al., 2013; Clyne et al., 2015; Akras et al., 2016). Este trabalho faz uso desta hipótese também. Porém quão satisfatória é essa aproximação? Esta pergunta é extremamente pertinente e nesta seção nos dedicaremos a esclarecê-la.

Primeiramente devemos pensar a respeito do significado físico desta aproximação. Um campo de velocidades linear presume uma expansão homóloga ², podemos definir tal expansão como a ausência de mudança do formato da PN ao longo do tempo ou da forma do seu campo de velocidades — exceto por um fator de escala, uma vez que a nebulosa cresce com o tempo.

A expansão homóloga é referente a uma expansão balística, esta expansão é um fenômeno que não está sujeito a resistências nem à gravidade, dependendo apenas da velocidade de ejeção; sendo esta proporcional à distância. A aproximação considera então que a PN referida formou-se a partir de uma explosão balística.

Esta aproximação torna o processo de modelagem muito mais simples, além de fornecer também uma aproximação segura devido às boas justificativas físicas para tal. Caso outra hipótese fosse feita, a escolha do campo de velocidades iria interferir diretamente no formato do diagrama P-V. Assumindo um campo linear o formato pode ser reproduzido a partir da escolha adequada de uma geometria para o objeto. Uma vez desconhecido o campo fica difícil separar componentes geométricos de efeitos puramente cinemáticos.

Steffen et al. (2009) comparam resultados de simulações hidrodinâmicas com a expansão homóloga, trabalho que tem também o intuito de validar o uso do SHAPE. Diversos resultados interessantes são obtidos, o mais relevante neste contexto são os desvios notados nos campos lineares resultantes das simulações hidrodinâmicas. De maneira geral percebe-se que além do componente radial — que notadamente não desvia muito da aproximação homóloga — uma componente poloidal aparece introduzindo desvios e diferenciando-se da expansão homóloga.

² Uma discussão é apresentada de forma compacta e interessante em: <https://3dastrophysics.wordpress.com/2015/01/13/i-wish-all-nebulae-were-expanding-homologously/#more-22>

Posteriormente Schönberner et al. (2014) novamente partindo de simulações hidrodinâmicas concluem que a expansão homóloga é uma aproximação equivocada, pois não é um comportamento observado em suas simulações. O referido trabalho usa simulações para reproduzir características de nebulosas elipsoidais. A interação entre as camadas de gás é considerada e a influência desta interação é notoriamente importante; a ideia intuitiva de que frentes de interação do gás sofrerão efeitos que desviarão da aproximação é verdadeira. O autor é categórico e afirma que a expansão homóloga é exceção e não regra.

Steffen (2016) volta ao tema e discute como assumir a expansão homóloga pode introduzir erros na modelagem da estrutura tridimensional das PNe. Argumentando com base em resultados obtidos por diversos autores é mostrado como o possível entendimento incorreto pode introduzir componentes inexistentes na PN analisada, por exemplo.

Tendo em mente o estado da arte voltemos à pergunta inicial. Considerando os desvios estudados nos diversos trabalhos citados, podemos assumir a aproximação da expansão homóloga como uma boa abordagem inicial e suficiente para os objetivos do trabalho.

Os trabalhos citados sugerem o desvio do perfil homólogo, porém qual é a relação com o tipo morfológico, o regime de velocidades e a presença de muitas componentes? Nenhum desses temas foi atacado de forma a estabelecer essas dependências. Utilizar simulações hidrodinâmicas para estabelecer esses desvios é algo complicado, as próprias possuem suas limitações e falham em simular vários aspectos das PNe, inclusive o campo linear de velocidades para NGC 6302, uma PN que sabidamente possui um campo que segue uma expansão homóloga (Uscanga et al., 2014).

Os questionamentos aqui apresentados são muito pertinentes. É evidente que a abordagem adotada precisará de refinamento posterior, porém o conhecimento a respeito dos mecanismos de formação das PNe necessita evoluir para que possamos fazê-lo. Como já foi dito, é fácil confundir desvios nas formas simétricas assumidas para a geometria do modelo com desvios no campo de velocidades, a interpretação dos dados torna-se muito difícil e em vários casos impossível — devido aos efeitos de projeção.

Um modelo produzido para a nebulosa do homúnculo em Eta Carinae (Steffen et al., 2014) modela cada lóbulo separadamente, um deles segue uma expansão homóloga e o outro possui um campo de velocidades praticamente linear. Dentro deste contexto como diminuir a degenerescência do modelo assim como a possibilidade de campos de velocidade?

Outro ponto importante é argumentar fisicamente sobre o campo escolhido; quais são os processos responsáveis por esse perfil?

Sendo assim, considerando o estágio atual da discussão, a falta de conhecimento mais detalhado do mecanismo de formação das PNe e a ausência de vínculos observacionais mais completos, mantemos a abordagem de assumir a expansão homóloga como primeira aproximação. Vários trabalhos utilizam essa abordagem e produzem modelos adequados para um maior entendimento da estrutura geral de uma PN.

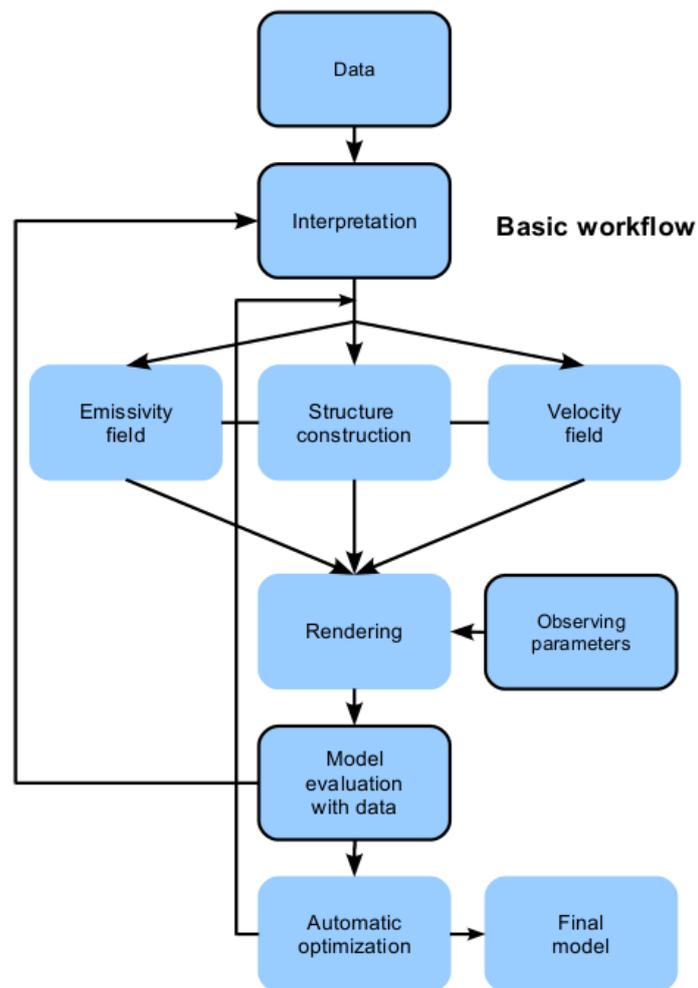


Figura 3.2: Fluxograma de trabalho de uma modelagem utilizando o SHAPE (Steffen et al., 2011)

Nebulosas com geometria simplificada

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para os modelos construídos utilizando dados do OPD. Devido às características da instrumentação, as nebulosas selecionadas para serem modeladas apresentam uma morfologia simplificada; além disso, o instrumento mostrou-se ineficiente para nebulosas com alta variação de brilho superficial, desta forma apenas nebulosas com brilho mais uniforme foram alvos considerados.

A simplicidade dos modelos foi uma característica preferida neste trabalho, como já foi dito. Os modelos são fortemente sujeitos à interpretação dos dados observacionais. Os modelos aqui apresentados sempre abordam os dados de forma a reproduzi-los contendo o menor número de estruturas possível, fato relativo também às PNe multipolares apresentadas no capítulo cinco.

Os resultados são analisados com base na comparação, quando possível, com a literatura atual; dados cinemáticos são diretamente confrontados de modo a contextualizar e validar nossa metodologia.

Posteriormente — no capítulo seis — os campos de velocidades aqui apresentados são utilizados para caracterizar os principais mecanismos de excitação do gás. Neste contexto estes campos servirão para a averiguação do papel dos choques como mecanismos de excitação do gás.

Os resultados mais importantes aqui apresentados são os campos de velocidade, a estrutura 3D construída, incluindo os ângulos das estruturas com a linha de visada e as deformações relativas à forma regular e a distribuição de densidade que é relacionada à variação do brilho superficial da PN.

4.1 NGC6818

NGC 6818 é um objeto bem estudado. Benetti et al. (2003) realizaram um modelamento da estrutura de ionização baseando-se em diversas linhas proibidas; sendo obtidas algumas informações morfo-cinemáticas. Existem diversos outros estudos, dedicados ou surveys, que revelam diversas características físicas deste objeto tais como sua temperatura eletrônica, densidade eletrônica, distância entre outras, para mais detalhes ver Hyung et al. (1999) e referências ali contidas.

Apenas Benetti et al. (2003) e Sabbadin (1984) têm resultados similares aos apresentados neste trabalho, deste modo apresentamos aqui o primeiro modelo morfo-cinemático desenvolvido com o SHAPE para NGC 6818.

Sabbadin (1984) apresenta uma análise cinemática para NGC 6818, utilizando uma técnica e uma instrumentação mais compatíveis com a nossa — diferentemente de trabalhos mais antigos (Wilson, 1950; Weedman, 1968) — o referido trabalho analisa os diagramas P-V e obtém uma série de resultados comparáveis aos nossos.

Benetti et al. (2003) utilizam uma técnica conhecida como *central star pixel line* (cspl) para caracterizar a cinemática da PN; de forma generalizada esta técnica consiste em comparar a cinemática de um pixel de referência — relacionado à estrela central — com as regiões externas da PN. O campo de velocidades considerado por esses autores possuía um perfil linear de crescimento assim como o de Sabbadin (1984). A lei de velocidades por eles obtida é apresentada a seguir na equação 4.1, a velocidade é dada em $km.s^{-1}$ e r está em segundos de arco. Deve-se ressaltar que no mesmo trabalho os autores encontram uma velocidade de expansão máxima de $35 km.s^{-1}$, valor este que difere de resultados anteriores da literatura apresentados pelos autores em sua tabela 1.

$$V(r) = 3.5(\pm 0.3) \times r \quad (4.1)$$

Globalmente NGC 6818 possui uma estrutura “simples” de dupla casca (*shell*), tal hipótese é razoável tendo em vista os dados observacionais, imagens de alta resolução angular, assim como os diagramas P-V apresentados por Benetti et al. (2003); este artigo apresenta também uma tabela com diferentes velocidades de expansão para diferentes íons (tabela 1 do artigo), os potenciais de ionização (IP’s) de cada um são também mostrados. Percebe-se que as velocidades decrescem com o potencial de ionização, o que salienta a

tendência de crescimento da velocidade de expansão com o raio, uma vez que íons com maior IP estariam distribuídos mais próximos da estrela central, devido à intensidade do campo de radiação.

A nebulosa mostra — em imagens de alta resolução angular provenientes do HST — ser rica em subestruturas. Os dados obtidos no OPD assim como os “echelogramas” de Benetti et al. (2003) mostram que a nebulosa é rica em filamentos, nós e arcos o que gera um perfil cinemático complexo.

A fim de simular a estrutura morfo-cinemática de NGC 6818 foi considerado que a mesma é uma planetária com uma *shell* de gás — tivemos de simplificar baseando-nos em nossos dados pois neles a estrutura dupla *shell* não é visível. O campo de velocidades foi considerado linear, aproximação que considera uma expansão balística, com direção de crescimento de dentro para fora.

As posições de fenda nas quais foram baseados o modelo são mostradas na figura 4.1. Os dados morfo-cinemáticos utilizados para a construção do modelo foram todos observados pelo autor no ano de 2013, vide tabela 2.2 do capítulo dois.

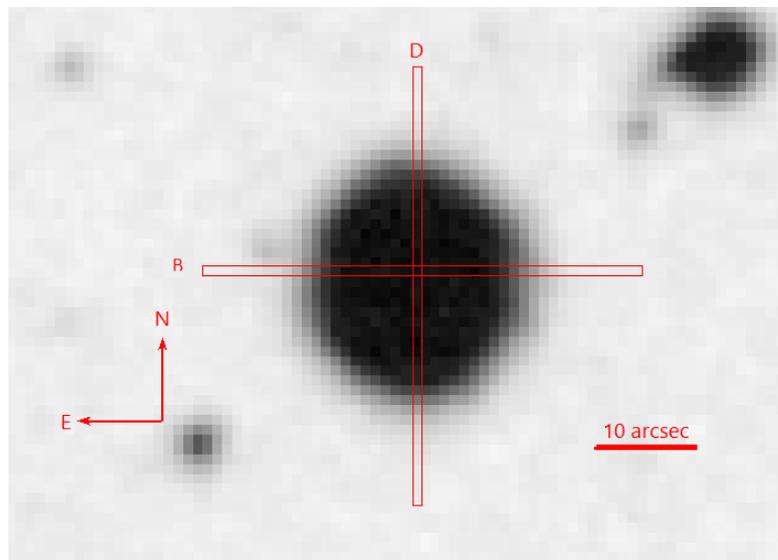


Figura 4.1: Imagem do DSS para NGC 6818, as posições de fenda B e D utilizadas para a construção de nossos diagramas P-V são mostradas. Para a posição B o PA da fenda é de 270° e para D o PA é de 0°

Todas as variações dos diagramas P-V — correspondentes a desvios do campo de velocidades linear — foram reproduzidas introduzindo deformações na estrutura, adotada inicialmente como a de um elipsoide regular. Deformações foram consideradas a fim de

reproduzir a real geometria da nebulosa, os tamanhos das mesmas foram ajustados iterativamente.

A distribuição de densidade não foi considerada uniforme. Os diagramas P-V, assim como as imagens de alta resolução espacial, mostram uma nebulosa rica em subestruturas; estas subestruturas foram, para nossos diagramas P-V simulados, assumidas como flutuações de densidade na casca gasosa; as subestruturas mostram ainda uma distribuição não homogênea. O perfil radial foi mantido constante e as distribuições angulares de densidade foram alteradas, as partes em *redshift* e *blueshift* foram modeladas separadamente devido ao grau de assimetria desta distribuição.

Mas como poderiam ser fisicamente justificadas as microestruturas observadas em NGC 6818, em especial para imagens e espectros das linhas [NII], 6548 e 6584 Å? Benetti et al. (2003) sugerem que as mesmas sejam provenientes de uma camada de gás mais densa no interior da casca gasosa.

Steffen et al. (2013) apresentam uma abordagem nova para explicar a morfologia de PNe multipolares com muitas componentes com baixa colimação, ao contrário de casos como NGC 2440, onde faz-se necessária a suposição de mecanismos tais como BRETs a fim de justificar a formação de múltiplas estruturas colimadas (Lopez et al., 1995). Nebulosas com muitas estruturas secundárias, nebulosas *starfish*, podem ser explicadas através da interação vento-casca, interação esta dentro do contexto da teoria dos ventos interagentes. Devido a flutuações na densidade da casca o vento conseguiria penetrar em regiões menos densas e modelaria as estruturas secundárias, dando o aspecto de multipolar, sem nenhuma componente bem colimada; tal hipótese está fundamentada em simulações hidrodinâmicas utilizando o SHAPE, (Steffen et al., 2013). Acreditamos que NGC 6818 poderia ter sua estrutura justificada por um mecanismo similar, porém o gás não conseguiu penetrar e gerar as componentes secundárias, gerando apenas as protuberâncias e microestruturas, tais como vazios e filamentos.

As figuras 4.2 e 4.3 apresentam os diagramas P-V para as posições de fenda B e D, juntamente com os diagramas P-V simulados. Nota-se que foram reconstruídos com êxito os diagramas P-V para as linhas do [NII], 6548 e 6584 Å, inclusive as subestruturas da nebulosa foram bem reproduzidas, comparando-se visualmente o aspecto dos diagramas observados e modelados.

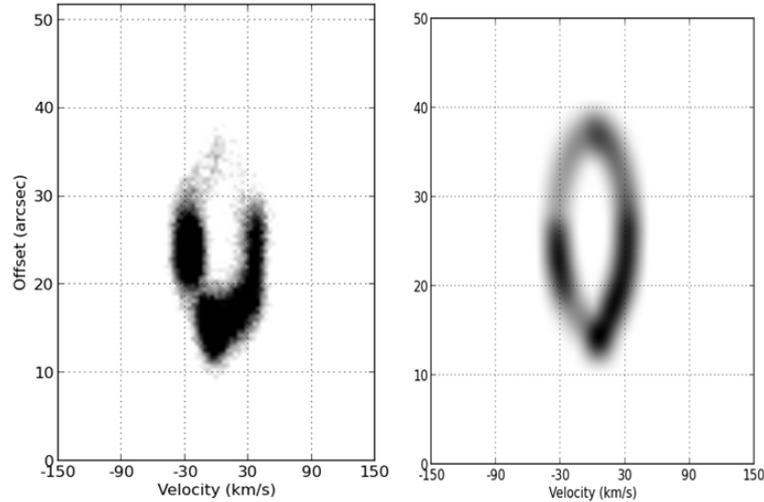


Figura 4.2: Comparação entre o diagrama P-V, linha [NII] 6548Å, observado para a posição de fenda B (esquerda) e o obtido do nosso modelo (direita), para NGC 6818

Como já dito, os diagramas P-V simulados reproduzem com êxito os diagramas observados. Deve-se ter em mente que o modelo é autoconsistente de forma que ambas posições de fenda são reproduzidas por um modelo único, o modelo apresentado foi o que melhor adaptou-se a ambas observações, o número pequeno de posições de fenda é o principal limitante de nosso modelo.

A imagem renderizada de NGC6818 também é compatível com as imagens de alta resolução do HST, o que evidencia a simulação adequada da estrutura tridimensional da PN, a imagem do HST, a imagem renderizada e o modelo de malha são comparadas na figura 4.4.

A imagem renderizada mostra-se adequada e sua aparência, não contendo microestruturas como nós e outras condensações, é esperada. Assim como nos diagramas P-V simulados. O resultado apresentado mostra um perfil mais regular e não fragmentado devido à pequena amostra de posições de fenda.

Ressaltamos aqui como os efeitos de projeção podem influenciar o aspecto da PN; tais simulações têm sido bastante importantes neste contexto, por exemplo García-Díaz et al. (2012) demonstraram utilizando a mesma técnica que as PNe NGC 2392 e NGC 7009 são muito similares, apesar de terem estruturas complexas, mostrando como o software SHAPE é eficiente no trato dos efeitos de projeção. NGC 6818 possui uma estrutura mais

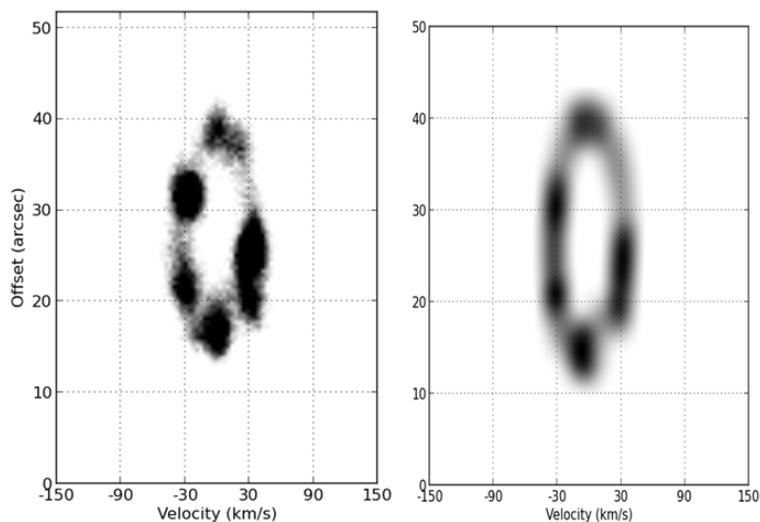


Figura 4.3: Comparação entre o diagrama P-V, linha [NII] 6548Å, observado para a posição de fenda D (esquerda) e o obtido do nosso modelo (direita), para NGC 6818

simples; porém mesmo assim efeitos de projeção são importantes, nosso modelo considera que o eixo de simetria é praticamente perpendicular à linha de visada.

O campo de velocidades linear mostrou-se adequado. O campo de velocidades obtido em nosso trabalho — modelo ótimo para NGC 6818 — é mostrado na equação 4.2, onde a velocidade é dada em $km.s^{-1}$.

$$V(r) = 32 \times r/12 \quad (4.2)$$

Reescrevendo a equação para compará-la com o trabalho de Benetti et al. (2003) temos:

$$V(r) = 2.7 \times r \quad (4.3)$$

Onde r é a distância ao centro dada em segundos de arco. A equação 4.2 apresenta o campo de velocidade na forma que é usualmente utilizada no SHAPE: $V(r) = k \times r/r_0$. r_0 é a dimensão da estrutura, no caso referente o semieixo menor do elipsoide usado para modelar NGC 6818.

Deve-se alertar que o modelo apresentado não utilizou os dados disponíveis na literatura — como tamanhos de estruturas e campos de velocidade — o modelo em si é consequência da interpretação de nossos diagramas P-V e das imagens fotométricas. O nível de concordância mostra-se excelente evidenciando a consistência do método.

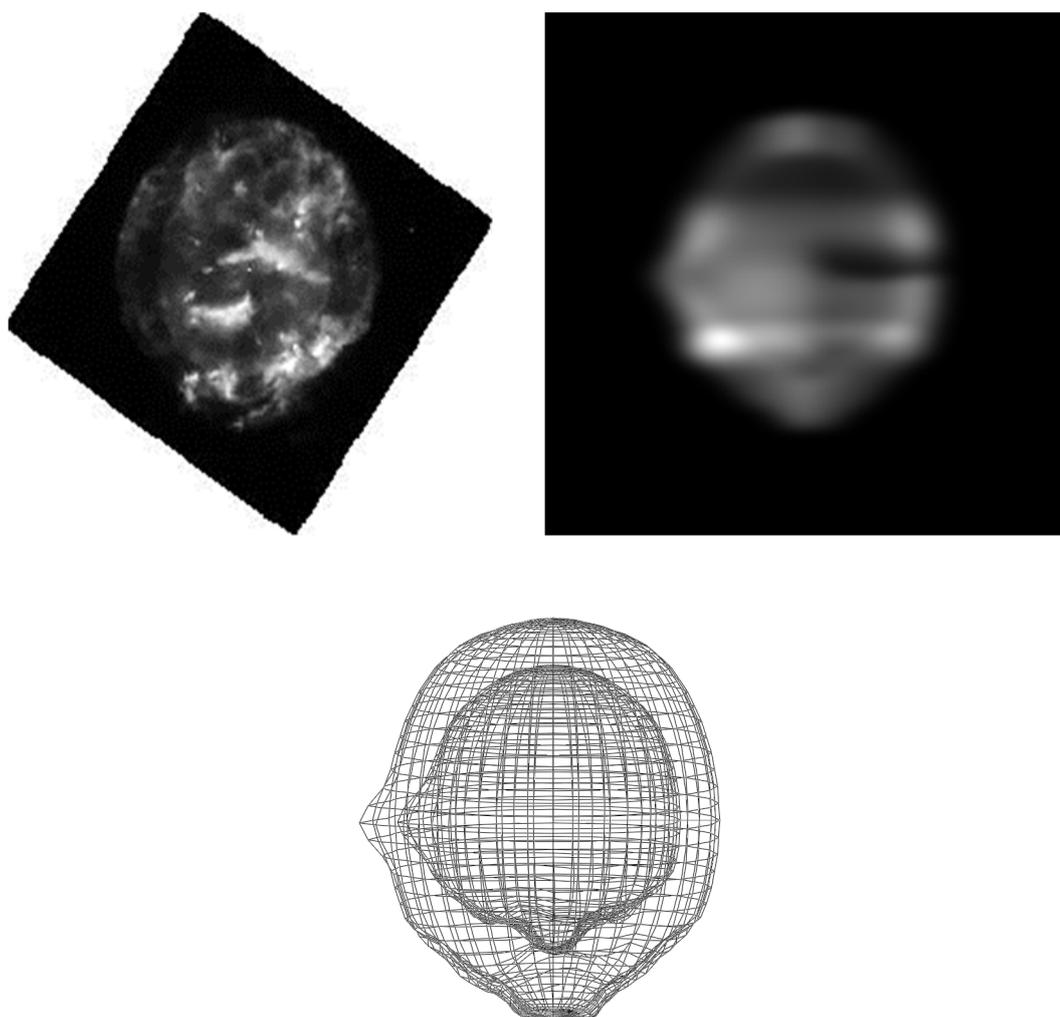


Figura 4.4: Comparação entre imagem obtida com o HST(esquerda), imagem renderizada usando o SHAPE (direita) e o modelo de malha utilizado (parte inferior).

Pode-se comparar diretamente nossos resultados com os obtidos por Benetti et al. (2003) e Sabbadin (1984). Comparando nosso coeficiente angular apresentado na equação 4.3 com o de Benetti et al. (2003) apresentado na equação 4.1 temos que o último é 30% maior que o encontrado neste trabalho, estando em bom acordo com o mesmo.

Certamente a discrepância entre os resultados é justificada pela técnica utilizada, o máximo de velocidades encontrado por Benetti et al. (2003) para o íon N^+ é o maior da literatura, 35 km.s^{-1} , sendo superior aos outros como Sabbadin (1984), que dá 32 km.s^{-1} , o que coincide com o encontrado neste trabalho. Outro resultado apresentado por Weedman (1968) para o campo de velocidades de NGC 6818 está em total discordância com este

trabalho, uma vez é praticamente o dobro do valor encontrado aqui; Benetti et al. (2003) já critica e aponta o possível erro metodológico do referido trabalho. Reforçamos esta crítica e aponto o que acredito ser um erro: o valor apresentado no artigo está provavelmente dobrado.

Outro parâmetro de nosso modelo que pode ser comparado com a literatura é o r_0 do campo de velocidades. Temos que este parâmetro coincide com o r_1'' apresentado por Sabbadin (1984), nosso valor difere em apenas 14% do referido. As principais fontes de discrepância são os parâmetros geométricos assumidos, mudando-se, por exemplo, a elipticidade da PN certamente os valores de r_0 variarão.

4.2 NGC 6153

Esta PN é um objeto de estudo bastante interessante uma vez que possui dados — imagens de alta resolução angular do HST — com excelente qualidade, uma boa amostragem de espectros para diferentes posições de fenda e nenhum estudo morfo-cinemático publicado.

Apenas os trabalhos de Yuan et al. (2011) e Anandarao e Banerjee (1988) fazem estudos dedicados a esta PN, em abordagens mais interessadas na determinação de parâmetros físicos. Yuan et al. (2011) apresentam um modelo de fotoionização para NGC 6153, Anandarao e Banerjee (1988) por sua vez apresentam os primeiros dados de espectroscopia de alta resolução para o objeto. Eles utilizam a análise dos perfis das linhas espectrais para fazer inferências a respeito da morfologia de NGC 6153. Deve-se resaltar a limitação do estudo devida à ausência de imagens da PN com qualidade adequada. A indisponibilidade de diagramas P-V também limita a análise — uma vez que o perfil de linha não é o dado mais adequado para a identificação de microestruturas e morfologia. O estudo sugere a possibilidade da existência de uma dupla casca ou de uma componente bipolar, hipótese última preferida.

O modelo de fotoionização 3D apresentado por Yuan et al. (2011) não tem a pretensão de fornecer uma simulação que permita o estudo morfo-cinemático; o modelo tenta reproduzir as abundâncias e estrutura de ionização da nebulosa, para isso é assumida uma estrutura simétrica e simples, sendo que o estudo que faz inferências a respeito da morfo-cinemática foi o citado anteriormente (Anandarao e Banerjee, 1988).

NGC 6153 é uma PN bem estudada no contexto de suas abundâncias, muitos trabalhos com este fim são encontrados na literatura (Liu, 1998; Liu et al., 2000, 2001; McNabb et al., 2016). Todavia não há um interesse na morfocinemática deste objeto até então, apenas Anandarao e Banerjee (1988); Liu et al. (2000); Torres-Peimbert et al. (2012) fazem algumas inferências a respeito de velocidades de expansão genéricas, de forma que os dados são de difícil uso para fins de comparação, uma vez que a morfologia nem sequer é considerada nas velocidades apresentadas.

Produzimos o primeiro modelo morfo-cinemático para NGC 6153. A construção do modelo assumiu uma estrutura de dupla casca, essa morfologia é baseada nos dados de espectroscopia e nas imagens do HST. A simples visualização destas imagens é suficiente para descartar a hipótese de bipolaridade, como sugerido por Anandarao e Banerjee (1988). A casca interna foi modelada assumindo simetria cilíndrica, para a externa foi assumida simetria esférica, baseada mais uma vez nas imagens do HST.

Variações da forma regular de ambas as cascas foram introduzidas, assim como para NGC 6818. A morfologia foi simulada de forma interativa a fim de reproduzir as imagens e os perfis morfológicos dos diagramas P-V.

O campo de velocidades foi admitido como linear, com crescimento de dentro para fora, similar ao que foi feito para NGC 6818. Baseando-se na literatura pode-se ver uma segregação de velocidades em relação aos íons com maiores potenciais de ionização (Anandarao e Banerjee, 1988).

Duas leis de expansão foram utilizadas, uma vez que cada casca foi considerada com velocidades distintas. A equação 4.4 apresenta a lei de expansão para a casca interna e a equação 4.5 apresenta a da casca externa, no mesmo formato que o apresentado para NGC 6818. Infelizmente não há nenhum modelo prévio apresentado na literatura, logo não será possível comparar as equações como fizemos para o caso anterior.

A casca interna foi considerada com uma inclinação de 25° em relação ao plano do céu, isso significa que o eixo maior da estrutura encontra-se inclinado em relação ao referido plano, essa hipótese é consequência direta da análise dos diagramas P-V.

$$V(r) = 28 \times r/8.1 \tag{4.4}$$

$$V(r) = 31 \times r/13.5 \quad (4.5)$$

A densidade não foi considerada uniforme e sua modelagem foi feita de forma análoga ao que foi feito para NGC 6818. As posições de fenda utilizadas no estudo são mostradas na figura 4.5.

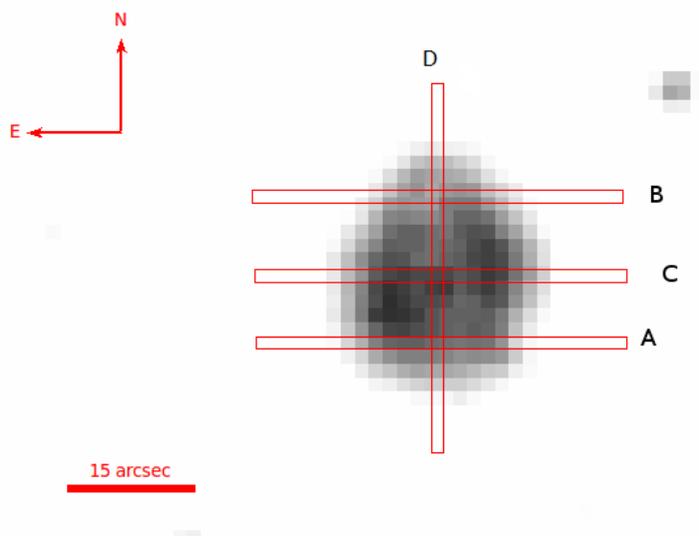


Figura 4.5: Imagem do DSS com as posições de fenda utilizadas no estudo de NGC 6153. O PA das posições A, B e C é de 270° e da posição D é de 180° .

A comparação entre os diagramas P-V simulados e observados pode ser vista nas figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9; a comparação da imagem do HST e o modelo de malha pode ser vista na figura 4.10. Devido à aparência filamentosa e segmentada desta PN a imagem fotométrica renderizada — proveniente de um modelo simplificado — não tem o intuito de reproduzir a primeira de forma fidedigna. Sendo assim, diferentemente do caso anterior, essa comparação não é feita.

Percebe-se que de forma geral o modelo reproduz bem as observações, constatação feita através da simples comparação dos diagramas; as regiões com maior brilho superficial nos diagramas P-V foram reproduzidas como regiões simplesmente mais densas na casca externa.

O campo de velocidades linear mostrou-se apropriado para a simulação da PN como um todo, apenas pequenos desvios são observados, desta forma é alterada a geometria da casca externa a fim de simular corretamente o diagrama P-V, como já explicado.

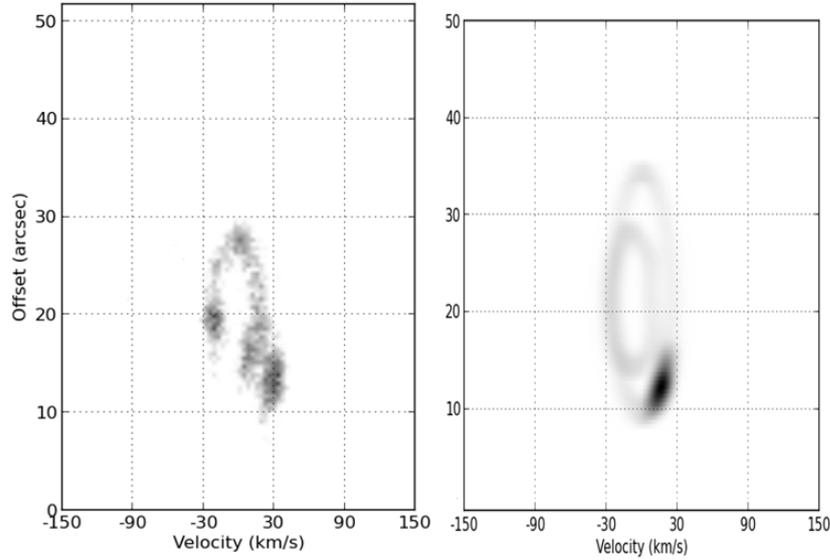


Figura 4.6: Comparação entre os diagramas P-V, linha [NII] 6548Å, observados (esquerda) e modelados (direita) para a posição de fenda A da PN NGC 6153.

Para reproduzir os dados da PN as microestruturas foram simuladas como regiões de mais alta densidade; a justificativa física para a origem de tais estruturas poderia ser a formação de condensações devida à interação da casca externa com o meio interestelar, porém tais condensações ainda estariam cinematicamente ligadas à casca externa não formando estruturas segmentadas tais como nós. Comparando o resultado das simulações com as observações, tal suposição se mostra razoável; em relação à simetria cilíndrica da casca interna temos, provavelmente, uma direção preferencial de expansão justificando esta morfologia assim como o observado em outras PNe, o motivo para esta característica nesta PN ainda está em discussão.

4.3 NGC 3211

Nenhum estudo dedicado relativo a NGC 3211 havia sido realizado até então. Há uma referência de um estudo com o objetivo de calcular a densidade eletrônica (Feibelman, 1981) que não faz referência à morfologia ou cinemática deste objeto.

Basurah et al. (2016) realizaram um estudo desta PN utilizando dados obtidos com um instrumento IFU, a resolução não é a mais adequada para a derivação do campo de velocidades e as velocidades de expansão apresentadas neste trabalho são valores genéricos

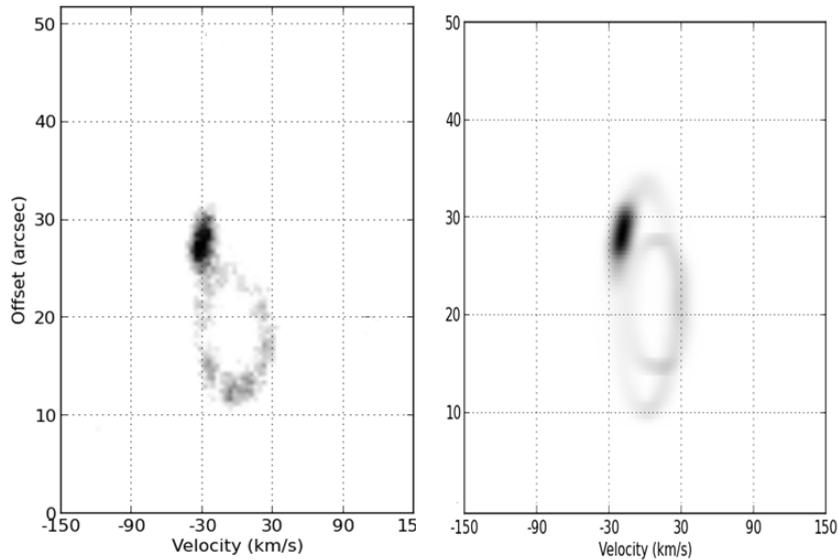


Figura 4.7: Comparação entre os diagramas P-V, linha [NII] 6548Å, observados (esquerda) e modelados (direita) para a posição de fenda B da PN NGC 6153.

para toda a PN, não sendo apresentado um valor adequado a um estudo morfocinemático.

A figura 4.11 mostra as posições de fenda utilizadas para a realização das simulações apresentadas neste trabalho. A fim de realizar a simulação foram utilizadas imagens de survey DSS. Recentemente foram publicadas imagens com melhor resolução (Basurah et al., 2016), porém devido às limitações da instrumentação do OPD optamos por utilizar as imagens do DSS como imagem de referência, pois julgamos que esta decisão não acarreta prejuízo ao modelo obtido.

A modelagem admitiu uma geometria inicial esférica, porém como os diagramas P-V observados não sustentavam tal hipótese a mesma foi alterada introduzindo deformações. Os diagramas P-V observados e simulados podem ser visualizados nas figuras 4.12 e 4.13.

Seguindo a linha dos modelos já apresentados, foi utilizado inicialmente um campo de velocidades linear, mais uma vez, com crescimento proporcional à distância do centro; tal hipótese foi mantida uma vez que as deformações introduzidas foram suficientes para simular bem os diagramas P-V observados, conclusão obtida da comparação dos diagramas observados e simulados; desta forma a fuga da simetria esperada é explicável utilizando apenas a geometria da nebulosa, não sendo necessário um comportamento mais complexo do campo de velocidades. A equação 4.6 apresenta o campo de velocidades adotado com

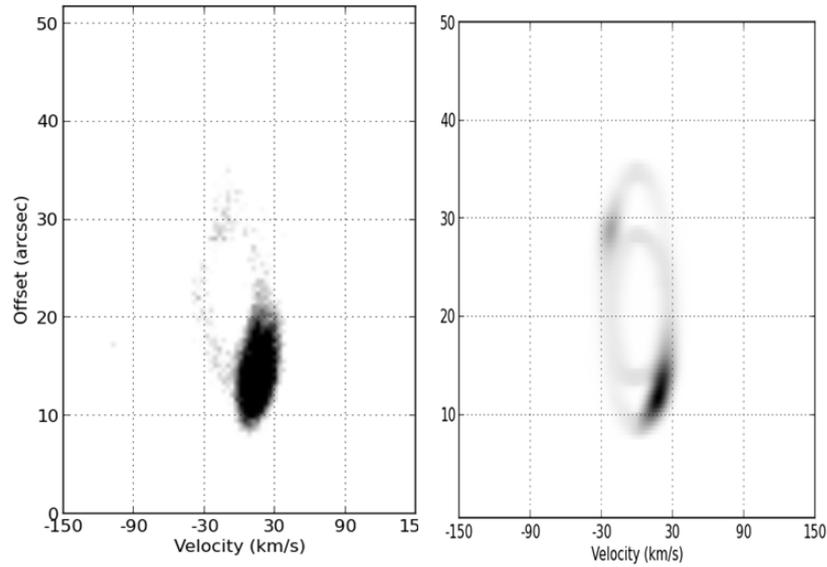


Figura 4.8: Comparação entre os diagramas P-V, linha [NII] 6548Å, observados (esquerda) e modelados (direita) para a posição de fenda C da PN NGC 6153.

unidades e formato iguais às anteriores.

$$V(r) = 45 \times r/8.6 \quad (4.6)$$

As duas características morfológicas marcantes, impostas pela imagem da nebulosa (figura 4.14a), são: o aspecto de disco, quando observado em nossa linha de visada, e duas regiões com maior brilho superficial para a linha do [NII] 6584 Å. O aspecto de disco foi reproduzido nas imagens de nossa simulação, assim como os diagramas P-V foram bem reproduzidos, como mostrado nas figuras 4.12 e 4.13. O perfil de brilho apresentado nos diagramas P-V simulados são bons, fato que pode ser constatado comparando-os com os dados observados.

A fim de reproduzir o perfil de brilho apresentado nos dados observados foi utilizada uma distribuição de densidade não uniforme, de maneira análoga ao que foi feito para NGC 6818 e NGC 6153. Acreditamos que o afastamento da simetria esférica seja provocada pelo choque do gás da PN em expansão — com o meio interestelar ou com uma ejeção anterior. Tal ejeção anterior não pôde ser observada em nossos diagramas P-V devido à sensibilidade da instrumentação utilizada.

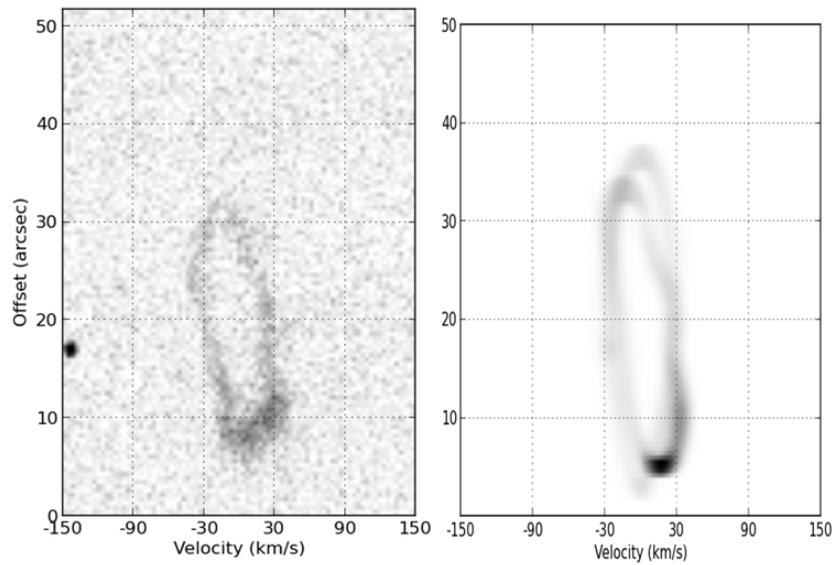


Figura 4.9: Comparação entre os diagramas P-V, linha [NII] 6548Å, observados (esquerda) e modelados (direita) para a posição de fenda D da PN NGC 6153.

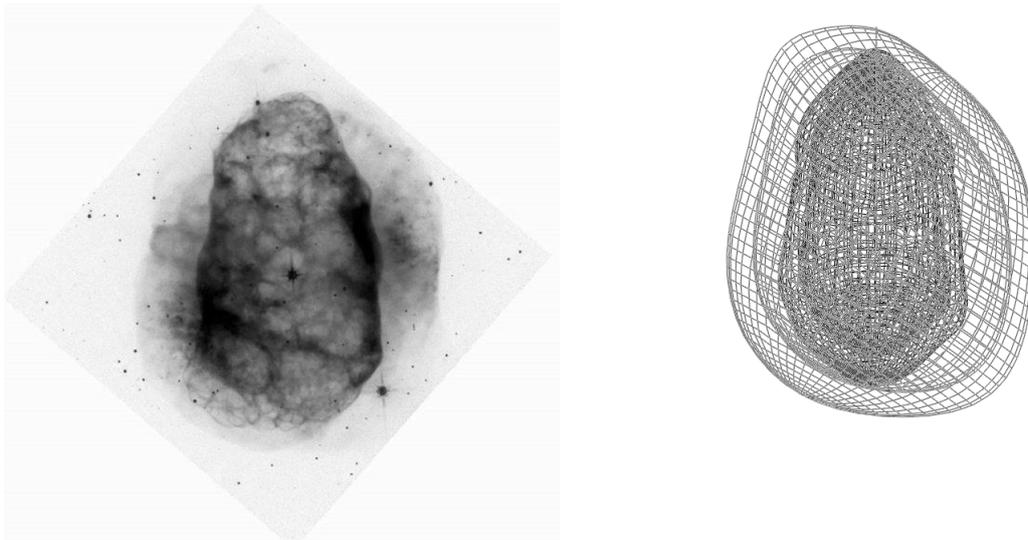


Figura 4.10: Comparação entre a imagem de alta resolução do HST (composta) e o modelo de malha.

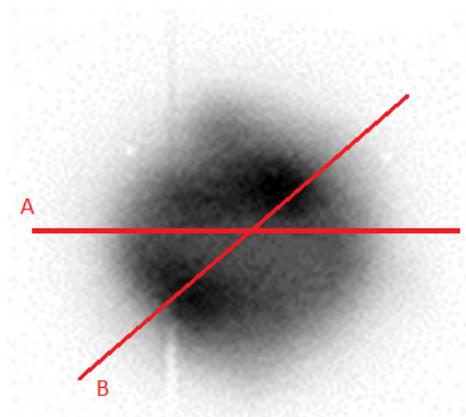


Figura 4.11: Imagem (Górny et al., 1999) com as posições de fenda utilizadas no estudo de NGC 3211.

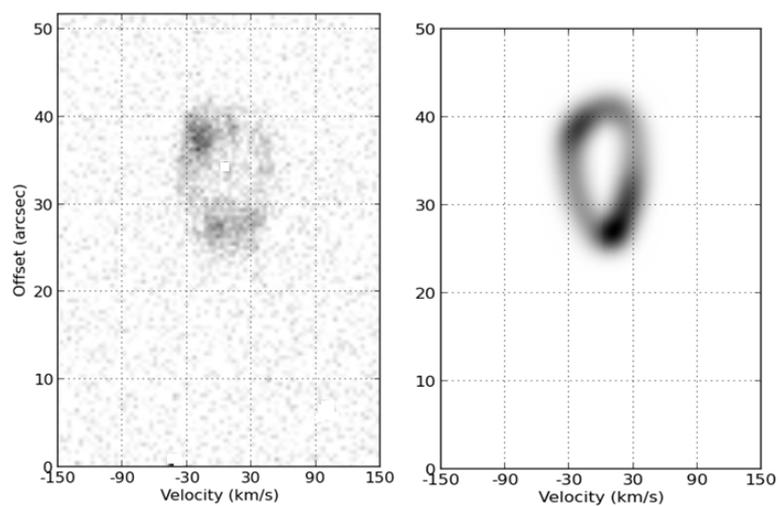


Figura 4.12: Comparação entre os diagramas P-V, linha [NII] 6584Å, observados (esquerda) e modelados (direita) para a posição de fenda A da PN NGC 3211.

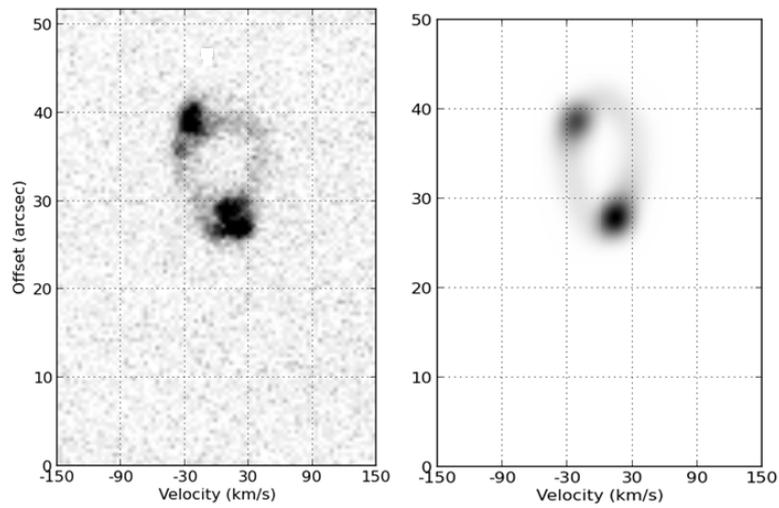


Figura 4.13: Comparação entre os diagramas P-V, linha [NII] 6584Å, observados (esquerda) e modelados (direita) para a posição de fenda B da PN NGC 3211.

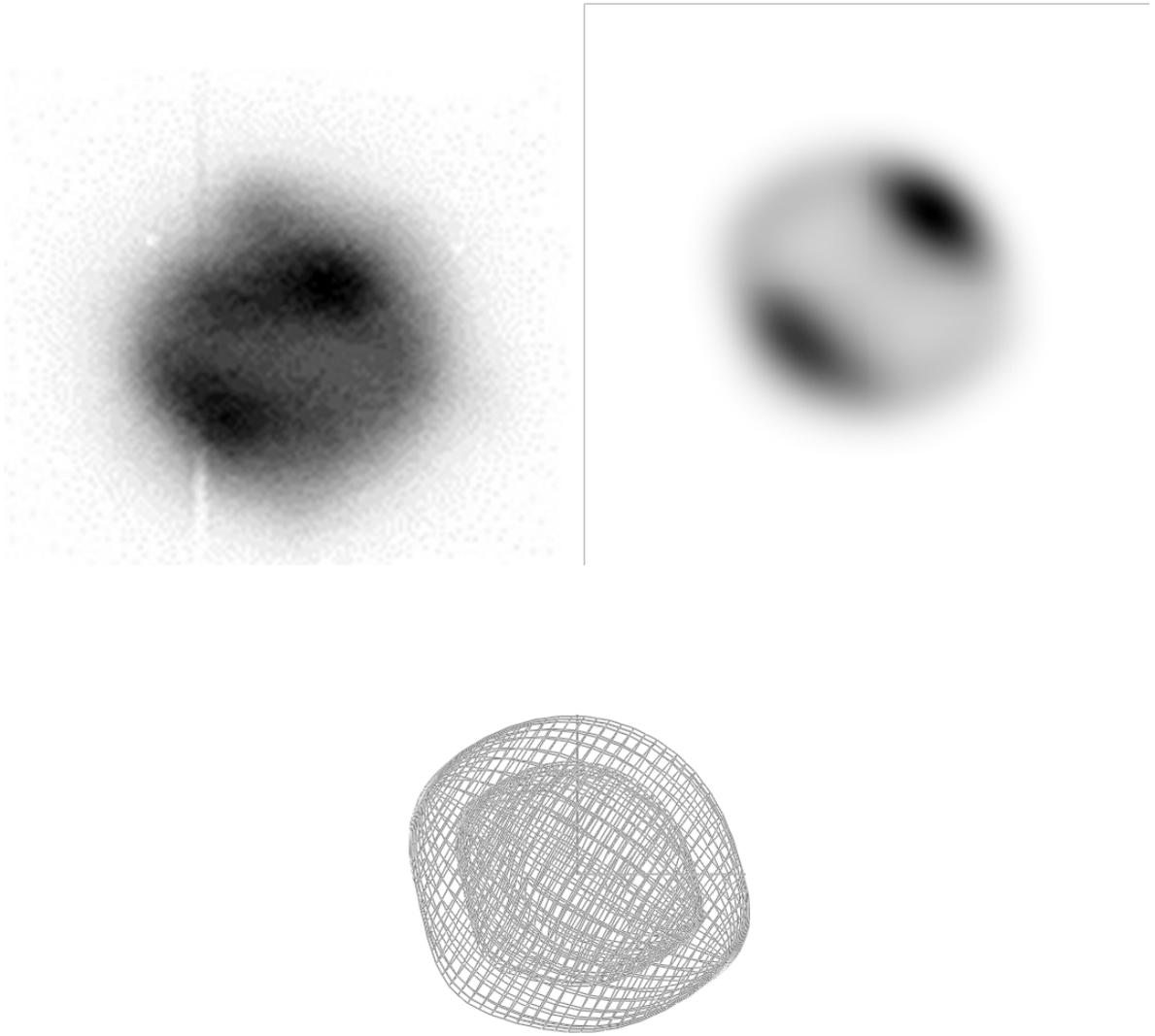


Figura 4.14: Comparação entre a imagem de NGC 3211 (Górny et al., 1999) (esquerda), imagem produzida pelo modelo (direita) e o modelo de malha (embaixo).

Nebulosas com geometria multipolar

Neste capítulo serão descritos os modelos e os resultados deles derivados para duas PNe, NGC 2440 e NGC 6445. Ambas são multipolares e classificadas como nebulosas do tipo I, de forma geral são dois objetos bem estudados porém a literatura enfatiza estudos de características associadas a parâmetros físicos tais como densidade, temperatura e abundâncias.

NGC 2440 já possui estudos dedicados à morfo-cinemática porém nenhum modelo capaz de descrever adequadamente este objeto foi desenvolvido até agora. Este trabalho supre esta lacuna. Um de seus produtos é um artigo (Lago e Costa, 2016) apresentando nosso modelo para esta PN, onde descrevemos toda a morfo-cinemática das grandes estruturas de NGC 2440. O referido artigo constitui o apêndice I deste trabalho. O modelo foi incrementado posteriormente à publicação com mais um elemento — um halo — que o torna completo, capaz de reproduzir todos os diagramas P-V utilizados em sua confecção. Estes resultados são parte de um novo artigo atualmente em preparação.

NGC 6445 é uma PN conhecida e de fácil observação devido ao seu grande tamanho angular assim como brilho superficial, porém possui pouquíssimos trabalhos dedicados a ela, nenhum descrevendo sua morfologia de forma minimamente detalhada. Devido às características mencionadas acima não são necessárias imagens do HST para a visualização de detalhes morfológicos, porém o alto grau de complexidade das estruturas desta PN torna seu modelamento um desafio.

Adiante, no capítulo 6, serão utilizados os campos de velocidades derivados de nossos modelos para caracterizar os mecanismos de ionização/excitação destes objetos.

5.1 NGC 2440

5.1.1 Características da nebulosa

Esta PN possui literatura vasta e um estudo completo referente a diferentes aspectos físicos; o estudo morfo-cinemático é o mais recentemente desenvolvido, onde é incluída a nossa contribuição. NGC 2440 é uma PN do tipo I; duas características são importantes e muito marcantes neste objeto (Peimbert e Torres-Peimbert, 1983): uma alta abundância de nitrogênio assim como uma estrutura pronunciadamente filamentosa. No capítulo 6 estas características serão detalhadas quando é investigado o papel dos choques na ionização/excitação desta PN.

López et al. (1998) são os primeiros a apresentar uma descrição morfo-cinemática detalhada, estes autores utilizam dados observacionais da mesma natureza dos utilizados nesta tese, os diagramas P-V. Munidos desses dados e de imagens com alta resolução angular — provenientes do HST — o artigo explora diversas características de NGC 2440 além de estabelecer o provável cenário relacionado à sua origem. O artigo descreve a estrutura global de NGC 2440 como composta por três componentes bipolares: um maior em extensão e com ângulo de colimação menor, com PA (*position angle*) de 85 graus; outro com tamanho similar ao primeiro porém com menor ângulo de colimação, com PA de 35 graus; e a última com PA de 60 graus. As duas primeiras são claramente visíveis em imagens da PN, a última — como dito pelos referidos autores — carece de evidências observacionais sendo sua existência especulativa. Complementarmente, vários nós são identificados na região central de NGC 2440 assim como em outras regiões, os nós mais destacados da PN são dois em posições opostas localizados nos extremos da componente bipolar com PA de 35 graus, nomeados de nó N e nó S, a morfologia da mesma é ilustrada na figura 5.1.

Finalizando a descrição das componentes, López et al. (1998) sugerem a presença de um toróide expandindo-se a velocidade constante na região central. Baseando-se nos dados de movimento próprio de Hajian e Terzian (1996), os autores derivam uma distância de 1,45 kpc para esta nebulosa. Eles fazem ainda uma sugestão para a origem da morfologia de NGC 2440, sugestão esta baseada em trabalhos anteriores do mesmo grupo (Lopez et al., 1995). A hipótese assumida é a de que a estrutura multipolar é devida à ação de um mecanismo de BRET, já referido na introdução. Este seria o mecanismo capaz de

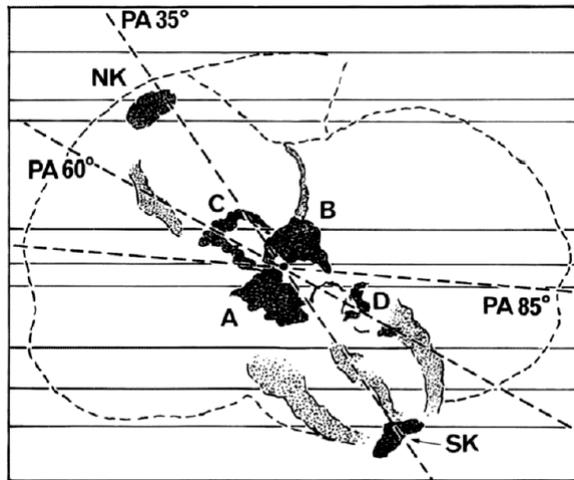


Figura 5.1: Morfologia de NGC 2440 ilustrada por López et al. (1998).

justificar a morfologia apresentada: uma estrela binária formaria um envelope comum, a sucessiva formação de uma região toroidal mais densa na região do plano da órbita da binária, juntamente com a precessão de sua órbita, formariam as componentes bipolares com diferentes orientações, relacionadas a diferentes eventos de ejeção.

Cuesta e Phillips (2000) estudaram diferentes parâmetros físicos tais como densidade eletrônica e razões de linhas, além de discutir características morfológicas. Eles apresentam a distribuição destes parâmetros obtidos através do imageamento de NGC 2440 utilizando filtros estreitos, possuindo o diferencial de apresentar dados com a qualidade de separar de forma aceitável as linhas do [NII] e do $H\alpha$. Os autores afirmam que o mecanismo de BRET não é suficiente para explicar a formação da PN, sugerindo mecanismos alternativos.

Os resultados de Cuesta e Phillips (2000) serão utilizados posteriormente neste trabalho; quando formos caracterizar o papel dos mecanismos de fotoionização/excitação. Os resultados de nosso estudo sobre os choques em NGC 2440 são apresentados no capítulo 6.

Uma última característica importante que deve ser ressaltada é que NGC 2440 possui uma emissão molecular característica, principalmente associada ao componente bipolar com PA de 35 graus. Wang et al. (2008) apresentam um estudo associado à emissão da molécula de CO neste objeto, cujos resultados são bastante interessantes e inspiraram nosso trabalho. Existe uma emissão coincidente à componente bipolar com PA 35 graus observada no óptico, seus picos de emissão estão posicionados nos extremos, sobre os nós; a emissão molecular aponta para a fragmentação da região central.

5.1.2 O modelo

O modelo para NGC 2440 foi construído baseado nos diagramas P-V disponíveis no catálogo cinemático SPM, referido no capítulo 2; as posições de fenda podem ser vistas na figura 5.2. O modelo de malha foi construído manualmente, analogamente aos outros objetos apresentados no capítulo anterior. Foram utilizadas imagens do HST a fim de basear a construção do modelo de malha, que pode ser visto ao lado da imagem do HST (F658n) para a linha do [NII] na figura 5.3.

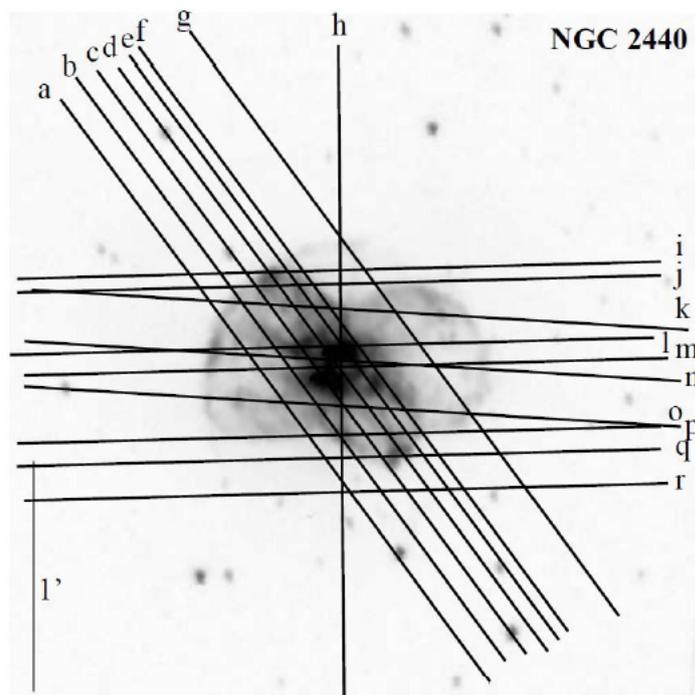


Figura 5.2: Posições de fenda que possuem diagramas P-V disponíveis no catálogo SPM, imagem retirada do mesmo.

Primeiramente foram construídas as duas componentes bipolares, a possível terceira componente especulada por López et al. (1998) não foi considerada. As imagens basearam a construção de forma que reproduzissem os diagramas P-V; as estruturas foram consideradas simétricas, de forma que a reprodução de pequenas assimetrias como cavidades, filamentos e pequenos nós fogem dos objetivos deste trabalho. As imagens do HST servirão apenas como referência para a construção do modelo pois, diferentemente das PNe modeladas anteriormente, NGC 2440 possui uma imagem extremamente complexa em microestruturas, sendo assim não tivemos o objetivo de produzir imagens renderizadas que

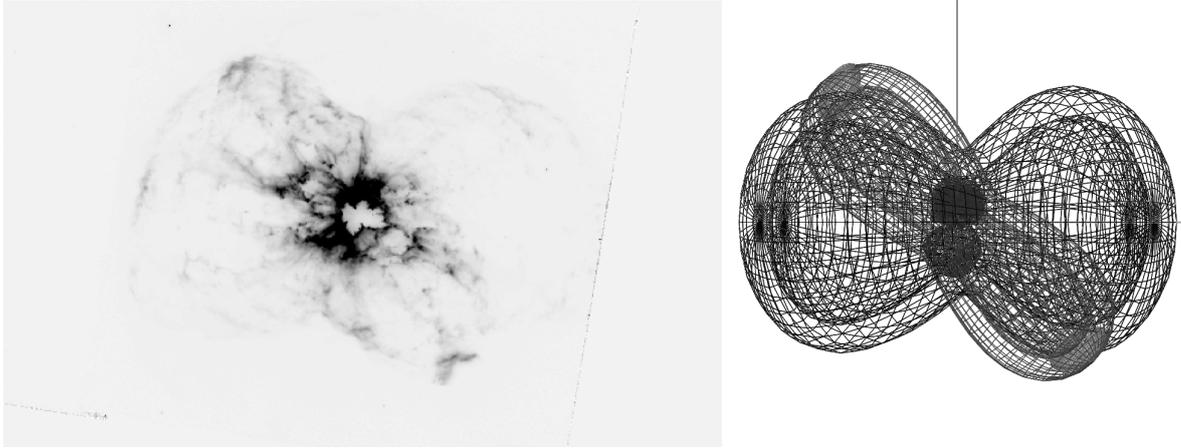


Figura 5.3: Imagem do HST (F658n) para a linha do [NII] (esquerda) e modelo construído (direita).

simulassem as imagens do HST.

Os ângulos relativos a cada componente bipolar com a linha de visada foram ajustados com o objetivo de modelar corretamente os diagramas P-V. Além das duas componentes bipolares, outras cinco estruturas foram utilizadas a fim de modelar o restante da PN: dois nós que são facilmente visíveis nas imagens do HST (nas extremidades do componente bipolar com PA de 35 graus); e a região central modelada como um toróide fragmentado em três pedaços não alinhados.

Posteriormente foi adicionado um halo esférico ao modelo, esta componente tem o objetivo de reproduzir uma parte difusa visível nos diagramas P-V de algumas posições de fenda. O halo é discutido numa seção à parte, assim como suas consequências para o cenário de formação de NGC 2440.

Os campos de velocidades assumidos são lineares, pelos motivos já foram discutidos no capítulo 3. O formato dos campos é apresentado na equação 5.1, onde r_0 é tipicamente o tamanho da estrutura (raio) em segundos de arco, k é uma constante e r é a distância do centro. Apenas nos casos dos nós é que r_0 é a distância da componente ao centro, não sendo seu tamanho.

$$V(r) = k.r/r_0 \quad (5.1)$$

A escolha adequada do campo de velocidades para os fragmentos do toróide é uma tarefa complicada. A fim de facilitar a escolha, uma hipótese foi feita: os fragmentos

foram posicionados próximos à região central da componente bipolar com PA de 35 graus, envolvendo-a, sendo assim a velocidade dos fragmentos e da componente bipolar coincidem nesta posição. Os parâmetros dos campos de velocidade para cada componente do modelo estão na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Parâmetros dos campos de velocidade para o modelo de NGC 2440.

Componente	$k(km.s^{-1})$	r_o (arcsec)
Bipolar PA 85	184	34.0
Bipolar PA 35	160	30.1
Nó N	80	29.4
Nó S	84	30.8
Segmento I do toróide	53	10.5
Segmento II do toróide	44	7.8
Segmento III do toróide	52	9.1

Finalmente descrevemos a distribuição de densidades para cada componente, de forma a reproduzir o perfil de brilho apresentado nos diagramas P-V. Deve-se ressaltar que esta distribuição de densidades não possui significado físico e que não temos o objetivo de reproduzir fidedignamente as imagens do HST para NGC 2440. Para a construção dos diagramas P-V modelados foi considerada uma velocidade radial de $65 km/s$ (López et al., 1998), com o objetivo de que as velocidades apresentadas representem a velocidade heliocêntrica assim como nos diagramas P-V observados.

5.1.3 Resultados

As figuras 5.4 a 5.9 apresentam os diagramas P-V observados à esquerda e os modelados na direita. Com exceção da posição de fenda r , todos os diagramas P-V foram reproduzidos neste primeiro momento, posteriormente mostraremos que o halo é suficiente para modelar este diagrama em particular.

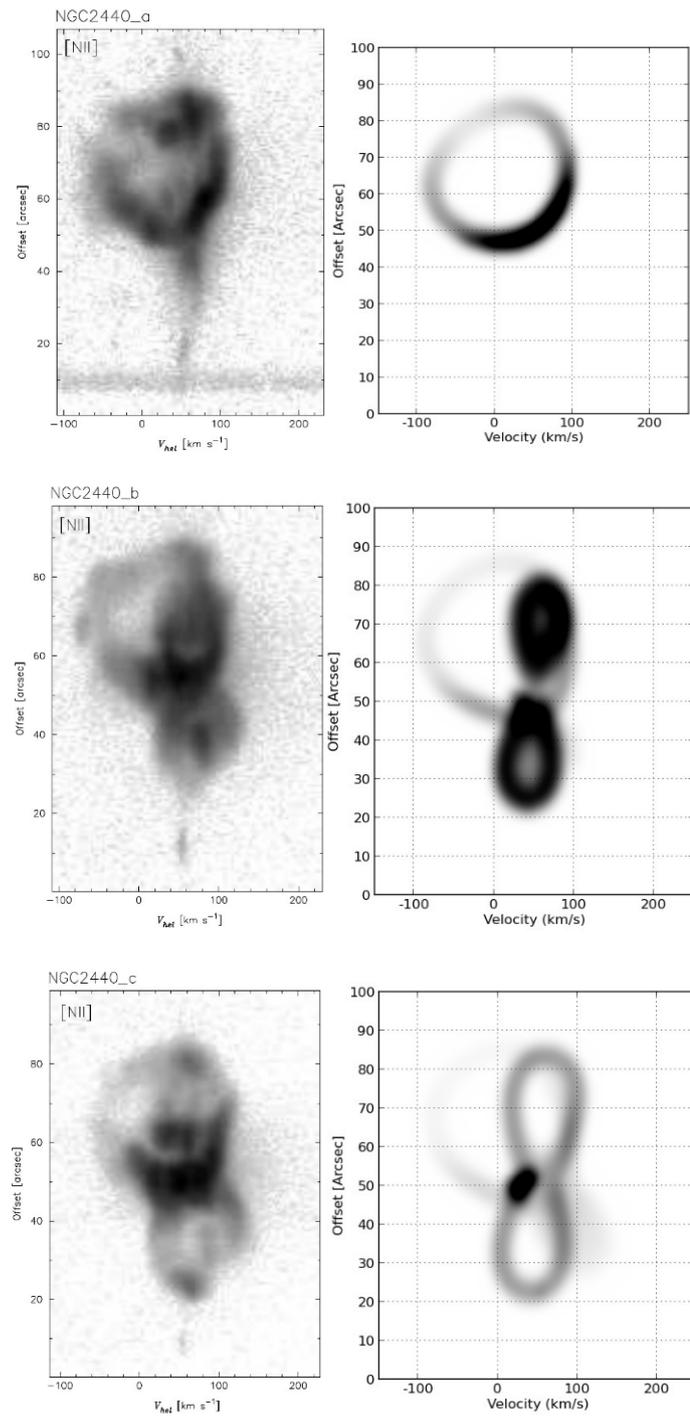


Figura 5.4: Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda *a*, *b* e *c*.

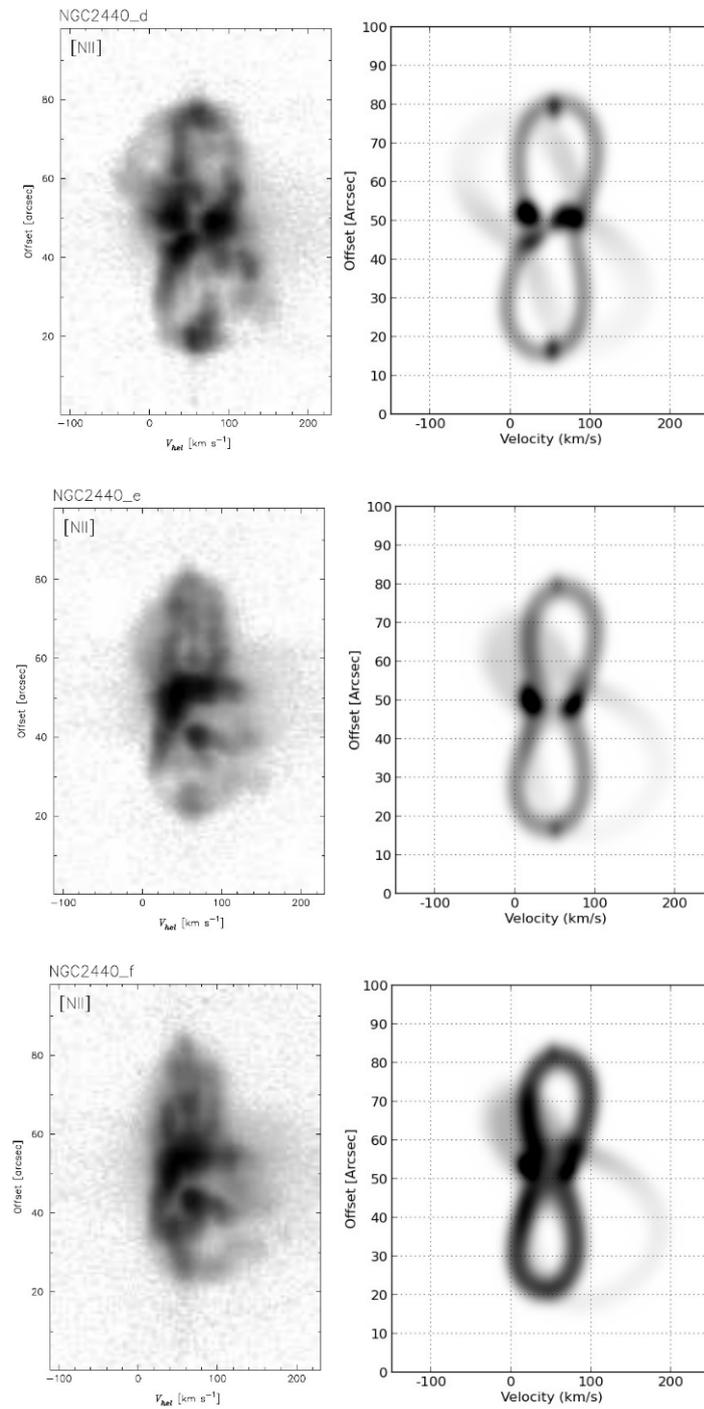


Figura 5.5: Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda *d*, *e* e *f*.

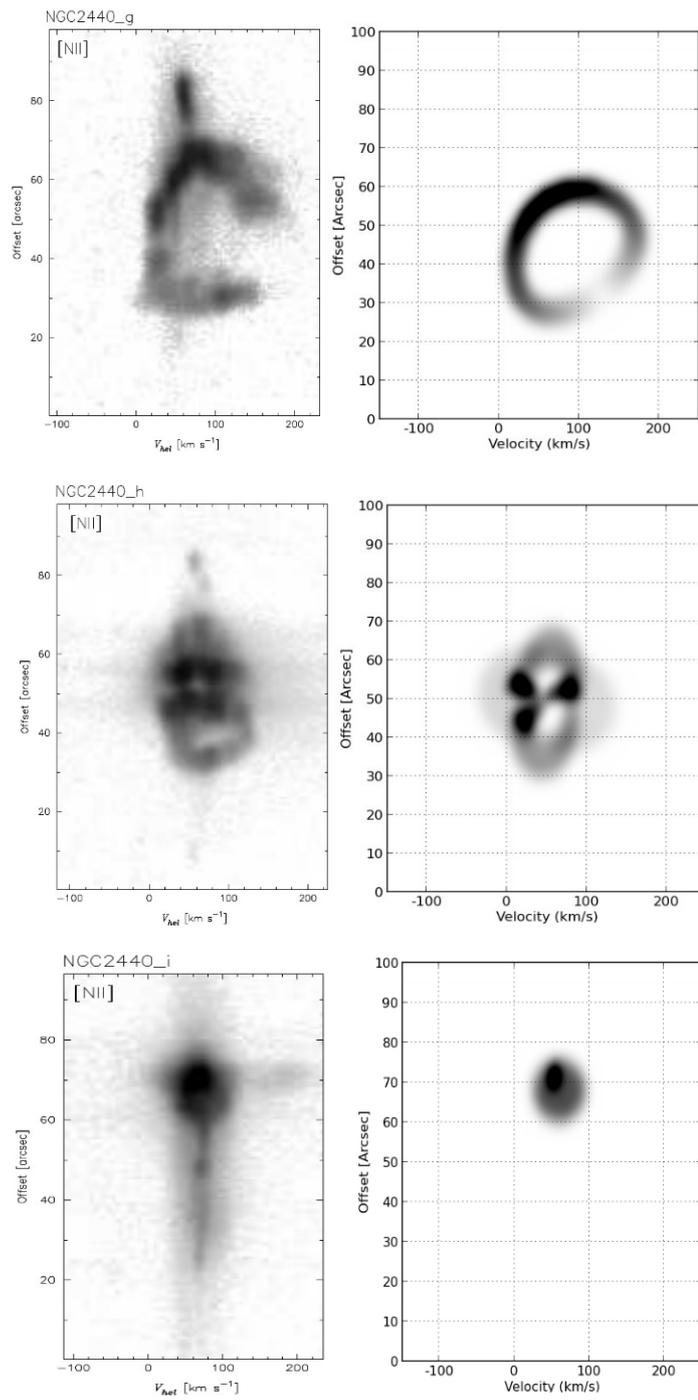


Figura 5.6: Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda *g*, *h* e *i*.

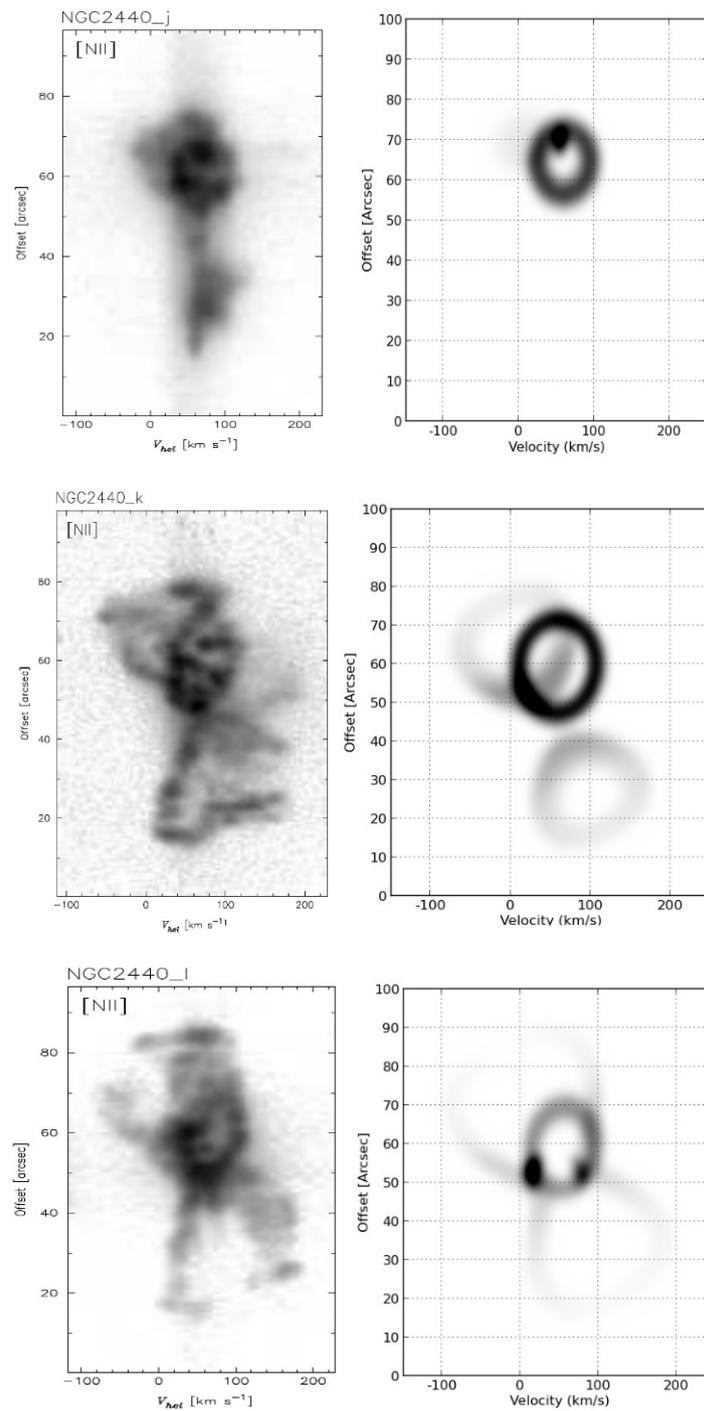


Figura 5.7: Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda j , k e l .

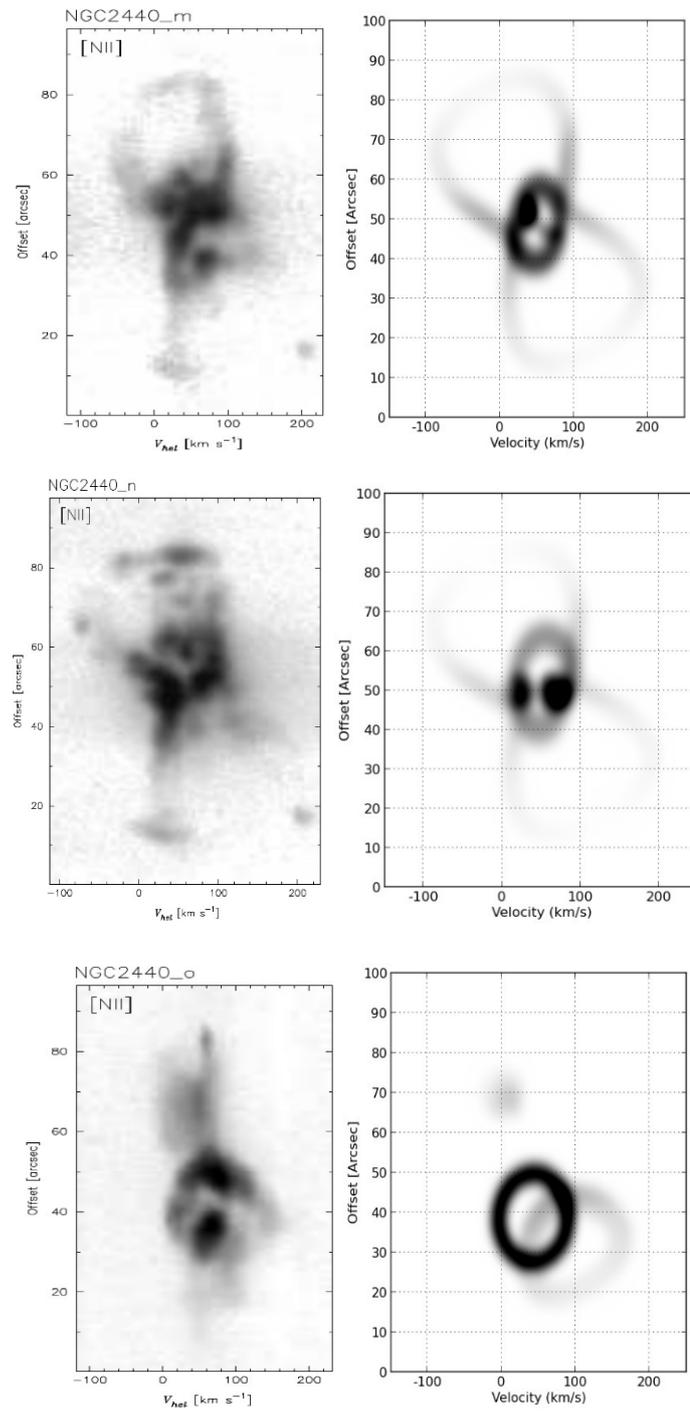


Figura 5.8: Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda m , n e o .

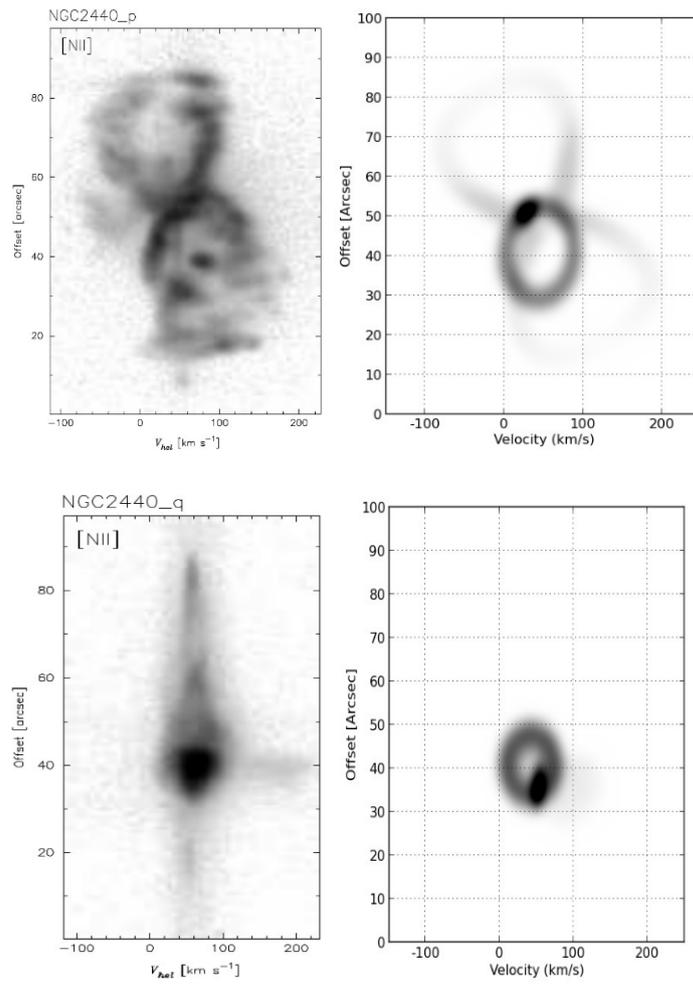


Figura 5.9: Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda p e q .

É clara a conformidade de nossos diagramas P-V modelados com os observados. O modelo é satisfatório e consegue reproduzir as estruturas principais do objeto alvo; a escolha do modelo ótimo foi feita visualmente e os erros de inclinação foram estimados variando manualmente este parâmetro em torno de um valor médio escolhido até o modelo tornar-se insatisfatório.

O modelo final apresenta inclinações para os eixos de simetria das componentes bipolares de 27 ± 5 e -5 ± 3 graus para as componentes com PA de 85 e 35 graus, respectivamente, resultados que estão de acordo com a literatura. Confirmamos que a componente com PA 35 graus está praticamente no plano do céu, porém a inclinação para a componente com PA 85 graus mostra uma diferença significativa. López et al. (1998) sugerem uma inclinação de 40 graus, porém este resultado não é obtido através da reconstrução da estrutura 3D e sim baseado na análise visual, sendo portanto menos preciso.

López et al. (1998) sugerem também a existência de uma terceira componente bipolar possuindo PA de 60 graus, porém nosso modelo reproduziu todos os diagramas P-V sem adotar essa hipótese. Assim sendo, entendemos que a mesma é desnecessária. A hipótese foi baseada na inspeção visual da estrutura extremamente fragmentada e complexa de NGC 2440 nas imagens do HST, os diagramas P-V não sustentam esta hipótese uma vez que esta componente não aparece nos diagramas.

A hipótese da estrutura toroidal fragmentada mencionada na seção 5.1.2 mostra-se adequada. As microestruturas observadas ao redor da região central — que nos diagramas P-V correspondem às posições de fenda d e e — da componente bipolar não podem ser descritas por uma estrutura inteiriça. Nosso modelo reproduziu com êxito esta região, desta forma temos que a região central de NGC 2440 é caracterizada por um toróide subdividido em, no mínimo, três pedaços. Devido à grande quantidade de subestruturas é complicado associar outras subestruturas visíveis nos diagramas P-V ao toróide.

Utilizando a medida de movimento próprio das estruturas centrais de NGC 2440 apresentado por Hajian e Terzian (1996) e nossos campos de velocidade, obtemos uma distância de $1,8 \pm 0,5$ kpc para NGC 2440. A distância derivada está de acordo com a literatura, Gathier et al. (1986) encontraram uma distância de $2,19 \pm 0,39$ kpc e Frew (2008) encontra a distância de 1,9 kpc.

Muitos diagramas P-V, como por exemplo para as posições de fenda g e h , apresen-

tam um perfil de brilho diferente do modelado ou estruturas não visíveis nos diagramas modelados; estes desvios são esperados considerando a estrutura repleta de filamentos e pequenos nós de NGC 2440, nosso modelo parte de estruturas simples com o objetivo de simular as estruturas principais, fazendo isso com êxito.

5.1.4 Halo

Olhando atentamente para os nossos diagramas P-V modelados, figuras 5.4 a 5.9, e comparando-os com as observações pode-se ver que, apenas para algumas posições de fenda, existe uma componente vertical, muito estreita e próxima à velocidade sistêmica do objeto nos diagramas. Esta componente pode ser observada com facilidade nos diagramas P-V para as posições de fenda i , j , q e r . O diagrama P-V da posição r é o único não modelado anteriormente.

As imagens do HST, em especial para o filtro F656N, mostram o que aparenta ser um halo ao redor de NGC 2440; esta hipótese é fundamentada na distribuição de filamentos ao redor da estrutura principal da PN. Os diagramas P-V para as posições de fenda referidas anteriormente corroboram esta hipótese; um halo tênue estaria envolvendo a PN possuindo uma baixa velocidade de expansão, sua aparência nos diagramas P-V indica uma componente esférica. Ramos-Larios e Phillips (2009) confirmam a existência de um halo através de observações no infravermelho médio.

Utilizando como referência a imagem do HST para o filtro F656N identificamos a estrutura do halo e a acrescentamos em nosso modelo, esta estrutura pode ser vista na figura 5.10.

O campo de velocidades escolhido para a componente foi linear, na forma $V(r) = 12.r/34$ no mesmo formato dos campos apresentados anteriormente. Os diagramas P-V observados e modelados são apresentados lado a lado nas figuras 5.11 e 5.12, para as quatro posições de fenda referidas anteriormente, i , j , q e r , incluindo agora o halo.

Uma característica muito interessante e facilmente notável é que o halo e a nebulosa não são concêntricos, a figura 5.10 destaca isto, mostrando os distintos centros de cada estrutura. O modelo sugere uma distância de 3,76 segundos de arco entre os dois centros. Assim, podemos obter a idade do halo fazendo a aproximação que o mesmo expande com velocidade constante de 12 km/s . Especulando que a separação dos dois sistemas iniciou-se

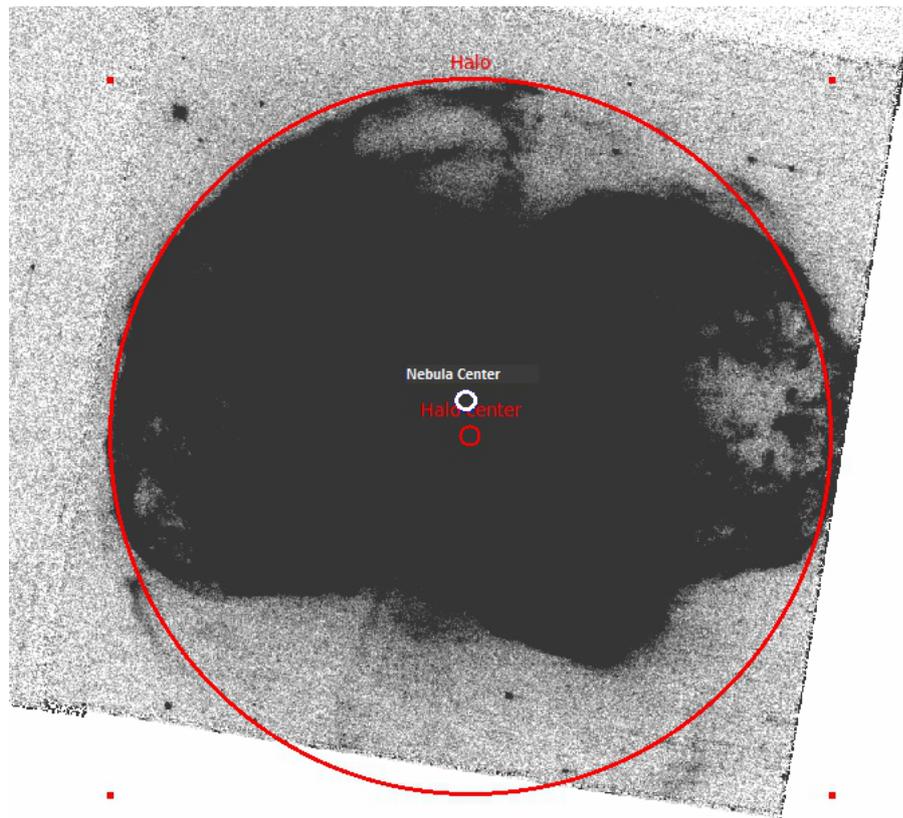


Figura 5.10: O halo com sua estrutura destacada, círculo vermelho, sobreposta à imagem de NGC 2440, observada pelo HST para o filtro F656N. Os centros são destacados com o objetivo de salientar sua separação.

na ejeção do halo podemos calcular uma velocidade não projetada de $1,3 \text{ km/s}$ do centro de NGC 2440 em relação ao halo. Devido ao seu baixo valor, esta velocidade não pode ser verificada observacionalmente, porém este halo tem consequências interessantes para o cenário de formação da PN.

O modelo de NGC 2440 mostra-se mais uma vez adequado e o halo o complementa bem, como pode ser visto comparando os dados modelados e as observações.

5.1.5 O cenário de formação de NGC 2440.

O cenário de formação de NGC 2440 é discutido na literatura, sendo que a binaridade da estrela central é um ponto comum nas diferentes abordagens apresentadas (López et al., 1998; Cuesta e Phillips, 2000). Recentemente (Lago e Costa, 2016) abordamos o mesmo tema; a hipótese de sucessivas ejeções aliadas ao BRET sustenta-se.

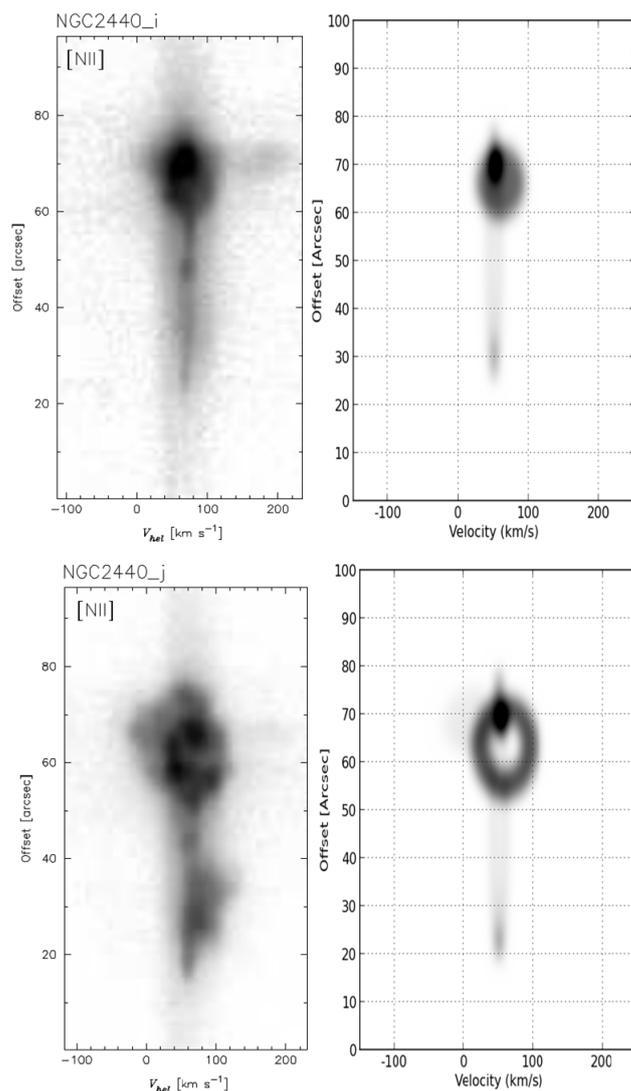


Figura 5.11: Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda i e j , incluindo o halo.

A existência do halo é evidente. Essa componente possui uma contrapartida clara nos diagramas P-V modelados neste trabalho; o movimento do halo em relação às outras partes da PN já é citado por Ramos-Larios e Phillips (2009) que, baseando-se em possíveis estruturas de interação, filamentos principalmente, sugerem o movimento na direção nordeste. Baseado em nosso modelo propomos uma velocidade de deslocamento do centro da nebulosa relativo do halo, porém devido ao baixo módulo e aos efeitos de projeção não possuímos meios observacionais para a confirmação do valor apresentado.

A existência do halo é uma evidência clara da inadequação do cenário de formação a partir de BRETs para NGC 2440. Considerando o halo como a componente mais velha,

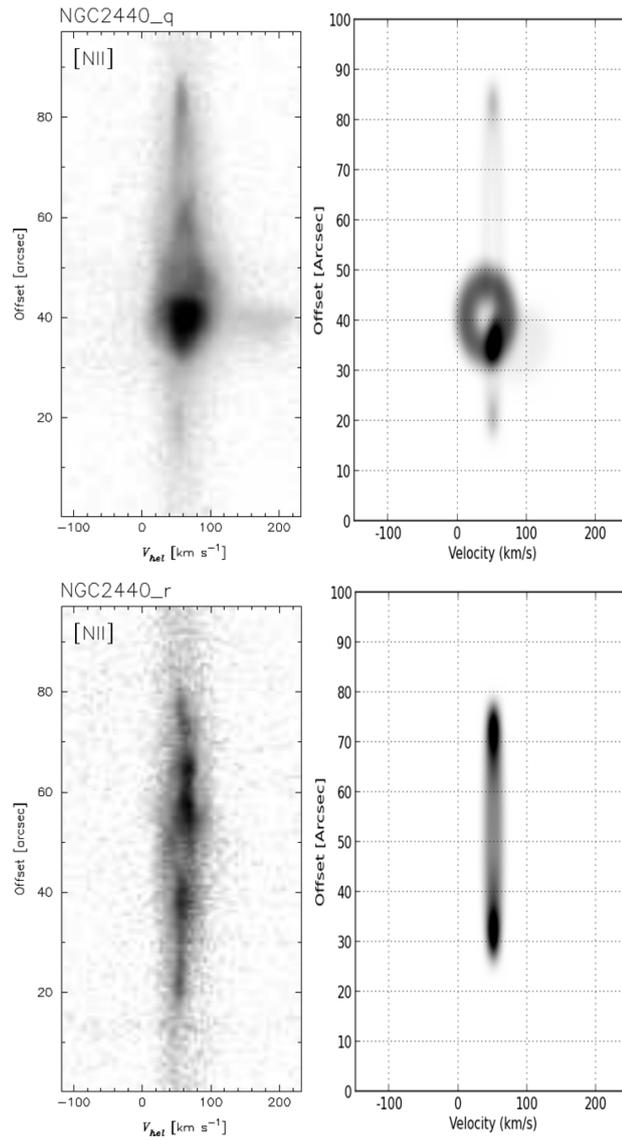


Figura 5.12: Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita), para as posições de fenda q e r , incluindo o halo.

certamente é necessário um rearranjo da dinâmica do sistema binário para que seja formado o envelope comum, condição para a posterior colimação da ejeção. A ejeção de um halo com simetria esférica mostra que não há proximidade inicial suficiente para a formação do envelope.

Especulamos que houve uma alteração na dinâmica do sistema binário de forma que esta formação via BRETs fosse possibilitada. Inicialmente o halo seria ejetado, devido à perda de massa por parte do sistema e consequente perda de momentum angular. As estrelas do sistema aproximariam-se permitindo a formação do envelope comum e o cenário

descrito inicialmente tornar-se-ia viável.

Obviamente podemos apenas especular a esse respeito; são necessárias simulações relativas à dinâmica orbital do sistema a fim de testar uma série de parâmetros que seriam necessários ao sistema para possibilitar esse cenário. Estas simulações estão totalmente fora dos objetivos deste trabalho e não são apresentadas aqui. Nossa sugestão é promissora porém existem cenários alternativos, Bear e Soker (2016) sugerem a existência de um sistema triplo, por exemplo, para a formação de diversas PNe.

5.2 NGC 6445

5.2.1 Morfologia

NGC 6445 possui uma morfologia bastante complexa, sua classificação morfológica é uma tarefa difícil considerando a intrincada distribuição de seu brilho superficial e estruturas de difícil identificação. A região central deste objeto apresenta uma estrutura em anel muito brilhante, como pode ser visto na figura 5.13; esta componente destaca-se facilmente do restante da nebulosa que por sua vez é rica em filamentos, cavidades e outras subestruturas. Vale a pena ressaltar a tendência observada de aumento do brilho nas regiões mais externas das estruturas.

A literatura nos apresenta três tentativas de classificar NGC 6445 feitas por Aller et al. (1973), Cuesta e Phillips (1999) e Benítez et al. (2005). A morfologia proposta para este objeto mudou de anel para bipolar e em seguida quadripolar; estas classificações são datadas, principalmente a mais antiga, devido à limitação instrumental das respectivas observações.

O conhecimento a respeito desse objeto é limitado. Poucos trabalhos são dedicados à estrutura do mesmo e nenhum debruça-se sobre suas características morfo-cinemáticas. O trabalho mais completo é o de Cuesta e Phillips (1999), nele há uma preocupação em descrever parâmetros físicos tais como densidade, razões de linha e explorar um pouco características morfológicas. Posteriormente Benítez et al. (2005) fizeram uma breve análise morfológica.

Considerando então o estado da arte atual, nosso trabalho mostra sua relevância. Pela primeira vez é apresentada uma descrição completa da morfologia e cinemática de NGC

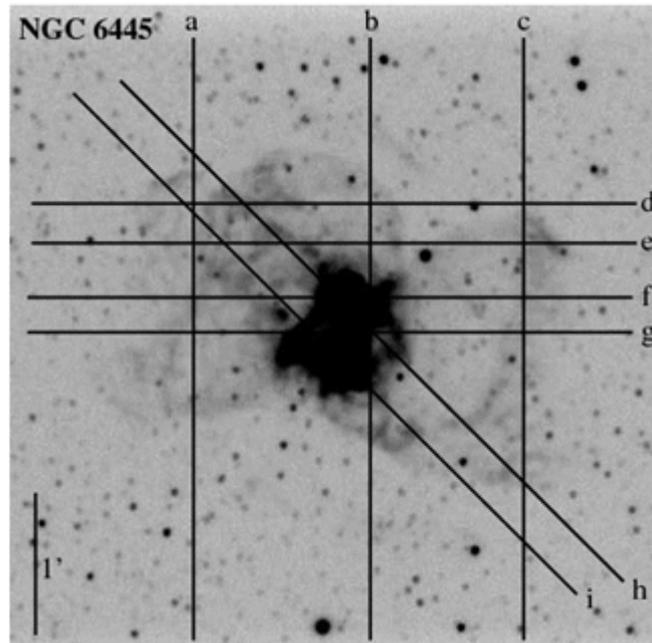


Figura 5.13: Posições de fenda observadas disponíveis no catálogo SPM, figura retirada do mesmo.

6445.

5.2.2 Modelo e resultados

Utilizando os dados do SPM, já descritos anteriormente, foi construído o modelo. Os diagramas P-V observados e os modelados são comparados, lado a lado, nas figuras 5.14, 5.15 e 5.16. O processo de modelagem mostrou-se desafiador em vista do alto grau de complexidade apresentado pelo objeto. Vários modelos foram testados, sendo que o modelo escolhido como ótimo foi aquele que melhor reproduziu as componentes morfológicas observadas.

Nosso modelo tem como componentes quatro estruturas bipolares e um toróide; os parâmetros utilizados no modelo, assim como o modelo de malha, são apresentados na tabela 5.2 e na figura 5.17.

O modelo partiu da hipótese de um campo de velocidades linear, já referido anteriormente. O coeficiente angular e o fator de escala são apresentados na tabela, assim como a inclinação e o PA de cada componente. Durante o processo de modelagem o número de componentes bipolares foi aumentado gradativamente, a fim de contemplar as estruturas observadas, ao final foi decidido o número mínimo de quatro. O trabalho de Chong et al.

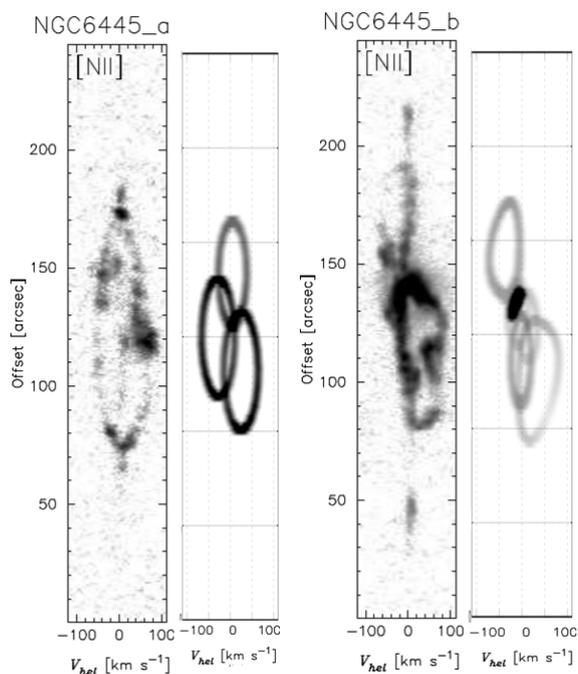


Figura 5.14: Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita) para as posições de fenda *a* e *b*.

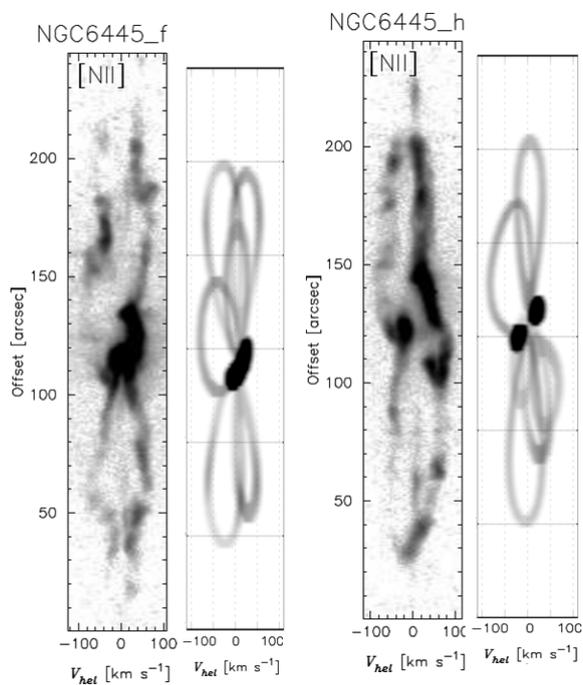


Figura 5.15: Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita) para as posições de fenda *f* e *h*.

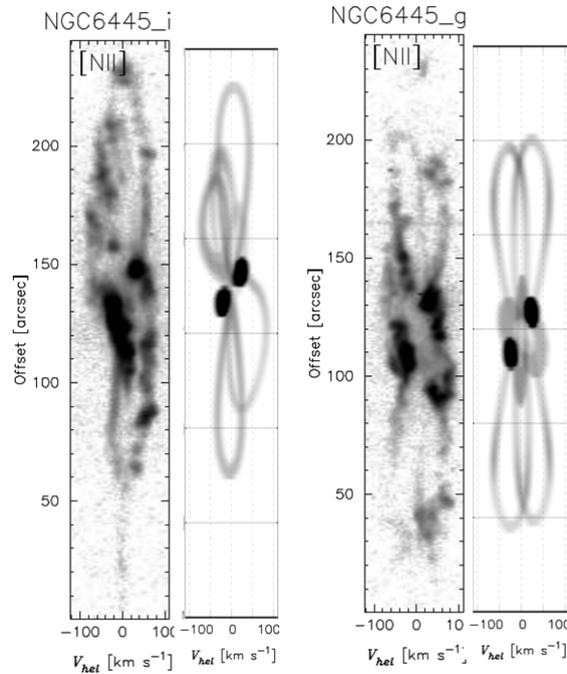


Figura 5.16: Comparação entre os diagramas P-V observados (esquerda) e modelados (direita) para as posições de fenda *i* e *g*.

(2012) nos inspirou essa abordagem, tendo em vista que nenhuma nebulosa octopolar é conhecida na literatura. No referido trabalho são utilizados três componentes bipolares para reproduzir as diversas morfologias observadas, tendo êxito nesta tarefa estes autores ressaltam a subestimativa de nebulosas multipolares. Outros parâmetros do modelo seguiram a linha dos utilizados para o modelo de NGC 2440.

Os diagramas P-V observados estão de acordo a morfologia do modelo. As observações das posições de fenda *b*, *h* e *g* evidenciam claras componentes bipolares distintas, com ângulos em relação à visada distintos; a posição *g* evidencia ainda duas componentes próximas em PA. O toróide é observado sob diversas posições de fenda mostrando-se adequado para descrever o anel central, sendo o modelo autoconsistente e adequado para reproduzir os resultados observacionais.

5.2.3 Cinemática

Nosso modelo concorda com a literatura em distintos trabalhos. Cuesta e Phillips (1999) especulam velocidades para a região externa do gás da ordem de 110 km/s devido aos mapas de excitação observados por eles, assim os campos de velocidade de nosso

Tabela 5.2 - Parâmetros utilizados no modelo para NGC 6445. Inclinação (Inc) é medida em relação à linha de visada.

Estrutura	PA (°)	Inc (°)	k (km/s)	r_0 (arcsec)
Bipolar I	94	105	145	87
Bipolar II	52	93	130	87
Bipolar III	80	71	130	87
Bipolar IV	13	52	95	58
Toróide	46	58	48	22

modelo mostram-se então de acordo com a literatura. Relacionado ao toróide, Benítez et al. (2005) propõem uma velocidade de expansão da ordem de 40 km/s totalmente de acordo com nosso trabalho, sendo nosso valor apenas 17% maior.

Tivemos ainda a oportunidade de trabalhar com alguns dados do SAM Fabry-Perot (SAM) do telescópio SOAR — obtidos entre os dias 30 de setembro e 03 de outubro de 2016 pela professora Dra. Claudia Lucia Mendes de Oliveira e colaboradores. Foram obtidos cubos de dados para este objeto, uma amostra pode ser vista na figura 5.18 onde o código de cores representa velocidades de aproximação (em azul) e recessão (em vermelho).

O SAM encontra-se ainda em fase de testes, em virtude disso possuímos apenas dados preliminares de NGC 6445; o processo de redução dos dados é complicado, não tendo sido realizado por nós, desta forma ainda não temos acesso aos dados na forma final de redução impossibilitando uma análise mais aprofundada. Possuímos apenas um mapa cinemático, onde a distribuição de velocidades é proporcional às cores.

Os dados preliminares do SAM corroboram nosso modelo. A componente mais interessante vista na figura 5.18 é o toróide, a imagem mostra-se claramente de acordo com o modelo apresentado. As distintas partes do toróide em aproximação (A) e em recessão (B) são marcadas nas figuras 5.17 e 5.18 a fim de destacá-las e facilitar a visualização. A estrutura do toróide é facilmente visível na figura 5.17; na figura 5.18 ela só é visível devido ao código de cores.

O modelo de malha pode ser visto na figura 5.17; a escolha da orientação para o toróide em nosso modelo não foi simples, imagens fotométricas enganam pois há uma superposição

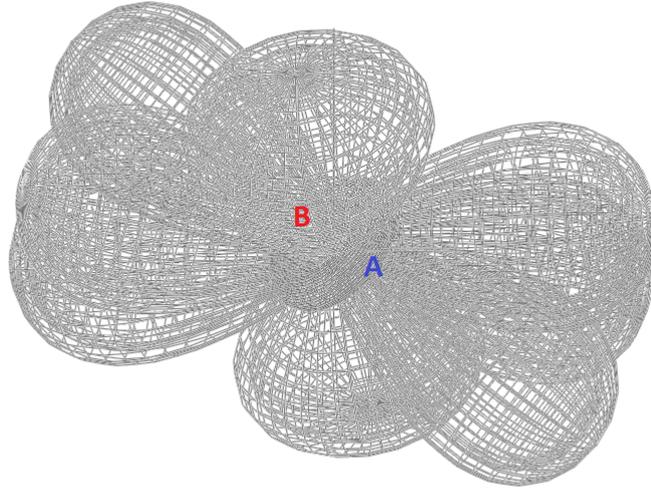


Figura 5.17: Modelo de malha construído.

das componentes bipolares com o toróide, dando a impressão de uma estrutura retangular. O mapa de cores deixa claro que tal superposição é ilusória, corroborando nosso modelo.

A grande quantidade de estruturas em afastamento ou aproximação corrobora também a hipótese da existência de um grande número de estruturas com diferentes orientações. Esta característica é evidente nos diagramas P-V, como já discutido, e reforçada aqui. Vale ressaltar que as quatro componentes bipolares formam um modelo mínimo para a descrição de NGC 6445, imagens deste objeto apresentam filamentos dispersos ao redor da PN, podendo indicar a presença de um halo, similar ao de NGC 2440, porém devido à ausência de dados observacionais essa hipótese é meramente especulativa.

O modelo apresentado reproduz a PN a partir de estruturas simétricas e simples. Não temos o objetivo de reproduzir as imagens fotométricas nem os cubos de dados. Posteriormente nosso modelo será melhorado, baseado nos dados do SAM, a fim de reproduzir os mapas de canais, podendo revelar detalhes ainda mais interessantes a respeito de NGC 6445. O modelo aqui apresentado teve o intuito de reproduzir os diagramas P-V, os dados do SAM possuem apenas objetivos de comparação.

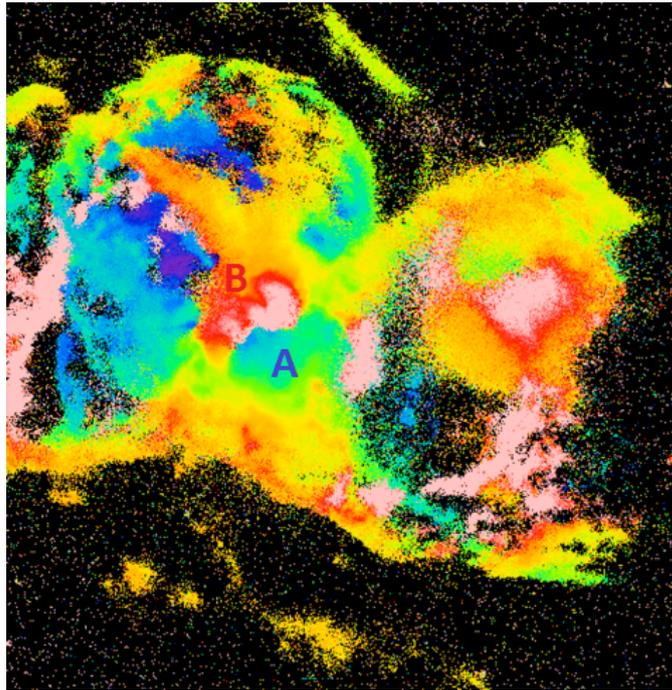


Figura 5.18: Mapa cinemático para NGC 6445, cedido cordialmente pela professora Dra Claudia Lucia Mendes de Oliveira. Vale enfatizar que a estrutura do toróide é claramente visível e concorda com nosso modelo, vide figura 5.17, a componente do toróide em recessão está marcada pela letra B, a em aproximação é marcada pela letra A; o código de cores mostra as componentes em aproximação (em azul) e em recessão (em vermelho).

Cuesta e Phillips (1999) já especulavam a respeito do papel dos choques, como mecanismo de excitação/ionização, em NGC 6445. A presença de extremidades brilhantes e deformadas parece corroborar a hipótese de choques e a existência de múltiplas estruturas bipolares levanta suspeitas a respeito do cenário de formação. O capítulo 6 aprofunda a discussão. O mecanismo de BRET pode ser apontado com possível cenário, porém, devido à falta de precedentes deste número de componentes, uma investigação a respeito faz-se necessária.

Mecanismos de fotoexcitação das linhas

Este trabalho apresentou até então o estudo da morfo-cinemática de um grupo de PNe, parte deste estudo foi desenvolvido com dados obtidos por nós utilizando o OPD e dados do catálogo cinemático SPM; a natureza dos dados é detalhada no capítulo 2. Os campos de velocidades foram obtidos, assim como foram feitas inferências a respeito de estruturas específicas, detalhando características até então inexploradas, relacionadas ao próprio campo de velocidades ou à origem morfológica do objeto alvo.

Questões pertinentes devem ser consideradas no estudo das PNe: as características morfo-cinemáticas são consequência de suas origens apenas? Ou tais características moldam os mecanismos de ionização/excitação do gás interferindo em sua dinâmica?

A fonte de energia do gás que compõe uma PN é geralmente associada a um campo de radiação, sua origem é a estrela que evolui lentamente, esfriando-se, e que num futuro posterior à diluição da PN atingirá o estágio de anã branca. Sabemos que a origem da diversidade morfológica apresentada pelas PNe é justificada pela interação de diferentes ejeções e ventos estelares — cenário estabelecido pela teoria dos ventos interagentes, já citada na introdução — porém essa interação pode influenciar na estrutura de ionização/excitação? A resposta é afirmativa. Cada vez mais estudos dedicam-se a entender como os choques que acontecem no gás podem injetar energia no mesmo, alterando o paradigma que apenas a fotoionização/foto-excitação participam do processo.

Os choques parecem ser mais relevantes quanto mais distante o gás se encontra da estrela, o regime de velocidades e densidades é muito importante também. Dentro deste contexto introduziremos o problema físico, fundamentando a fenomenologia associada aos choques através da apresentação dos modelos mais recentes. Posteriormente utilizaremos

estes modelos para caracterizar os choques nas PNe de nossa amostra.

Concentramos nossa atenção nas nebulosas multipolares, uma vez que as condições físicas apresentadas nestes objetos são mais favoráveis para a detecção do mecanismo, devido ao seu tamanho angular e regime de velocidades.

Neste capítulo exploramos estas questões, direcionando estas questões para as PNe de nossa amostra, abordando os choques de forma diferente do usualmente apresentado na literatura (Akras e Gonçalves, 2016) e citações aí contidas, não restringindo o mecanismo a pequenas subestruturas das PNe e sim pensando numa abordagem global.

6.1 O papel dos choques na excitação e ionização das PNe

Recentemente simulações numéricas (Riera e Raga, 2007; Raga et al., 2008), assim como diagramas de diagnóstico introduzidos pelos trabalhos citados reacenderam um tema bastante pertinente, no que diz respeito aos mecanismos de excitação/ionização das PNe que são os choques que ocorrem no gás que forma as PNe e sua relevância para a estrutura de ionização das mesmas.

Estruturas conhecidas como LIS, do inglês *low ionization structures* (estruturas de baixa ionização), são conhecidas pelo menos há vinte anos. Tais estruturas são descritas em detalhe em diversos artigos (Corradi et al., 1996; Balick et al., 1998; Gonçalves et al., 2001; Gonçalves, 2004) geralmente elas têm as mesmas propriedades cinemáticas do gás circundante e apresentam-se como sendo muito brilhantes em linhas de baixa excitação como [NII], [SII] e [OII]. As LIS são encontradas em todos os tipos morfológicos de PNe, não existindo nenhum contraste importante de temperatura eletrônica entre a nebulosa e a LIS e uma pequena, porém a ser considerada, variação na densidade eletrônica.

Existem estruturas semelhantes às LIS, as FLIERS, do inglês *fast low-ionization emission regions* (regiões rápidas de emissão em linhas de baixa ionização). As FLIERS diferem justamente no que diz respeito às propriedades cinemáticas, estas estruturas apresentam velocidades muito maiores que a de outras componentes da nebulosa hospedeira; descrições detalhadas são apresentadas por Balick et al. (1993, 1994). A morfologia destas estruturas pode ser dividida, de acordo com Gonçalves (2004), como LIS em forma de nós, filamentos, pares de jatos e estruturas tipo jato. Tais tipos são associados aos seus processos de formação, algumas destas estruturas constituem verdadeiros desafios para a teoria de

formação de planetárias, como mostram Gonçalves et al. (2001).

Os primeiros diagramas diagnósticos aplicados especificamente para as LIS possuíam o objetivo de classificação (Corradi et al., 1996). Nesta primeira abordagem as LIS foram estudadas em diversos tipos morfológicos de PNe, porém os choques não foram utilizados como justificativa para a alta intensidade de linhas de baixa ionização.

A fim de simular a física relativa à emissão das LIS, foi feita uma serie de simulações numéricas apresentadas na literatura. Foi feito um conjunto de onze simulações assimétricas, onde um projétil mais denso era simulado movendo-se dentro de um meio uniforme afastando-se da fonte do campo de radiação (Riera e Raga, 2007; Raga et al., 2008). As simulações diferiam nas características do projétil, assim como na temperatura da fonte do campo de radiação. Os resultados foram comparados com estruturas observadas, confrontando a distribuição do brilho superficial, como em choques em arco, sendo que uma gama grande de propriedades foi reproduzida corretamente considerando os choques como mecanismos de ionização/excitação.

Ainda no contexto das simulações devem-se considerar fatores importantes para a observação dos choques:

- Projéteis mais rápidos produzem choques mais intensos.
- A densidade do meio tem um papel importante.
- Regiões muito próximas da fonte do campo de radiação são dominadas pela fotoionização, porém os choques existem, são apenas de difícil detecção.

Os mesmos autores propõem ainda diagramas de diagnóstico, baseados nas razões de linhas de emissão, para caracterizar o processo de excitação/ionização. Inspirando-se nestes trabalhos, Akras e Gonçalves (2016) sugerem novos diagramas de diagnóstico, considerando agora um contexto maior, caracterizando as LIS e regiões excitadas por choques. Outros parâmetros são utilizados além das razões de linhas de emissão usualmente referidas, neste caso as razões: $[NII]/H\alpha$, $[OII]/[OIII]$, $[OII](372.7nm)/H\alpha$ e $[SII](672.5nm)/H\alpha$.

Uma nova razão é introduzida e tem como objetivo mensurar a relevância dos mecanismos de choques frente à fotoionização, razão esta escrita como f_{shock}/f_* definida na equação 6.1. O termo f_{shock} é derivado de F_{shock} , definido por sua vez por Dopita e Sutherland (1996), nas unidades de $erg\ cm^{-2}s^{-1}$, sendo V_s a velocidade e n_e a densidade eletrônica:

$$F_{shock} = 2.28 \times 10^{-3} \left(\frac{V_s}{100 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \times (n_e / \text{cm}^{-3}) \quad (6.1)$$

Considerando que se trata de um fluxo de energia, vamos agora transformá-lo em fluxo de fótons (f_{shock}), para isso vamos dividir o mesmo pela energia média dos fótons, emitido pela estrela, L/S_* , sendo L a luminosidade e S_* a taxa de emissão fótons.

Definindo agora o fluxo de fótons f_* para um ponto qualquer à distância d da fonte, temos:

$$f_* = \frac{S_*}{4\pi d^2} \quad (6.2)$$

Desta forma podemos escrever:

$$f_{shock}/f_* = 9.12 \times 10^{-3} \left(\frac{V_s}{100 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \times (n_e / \text{cm}^{-3}) \times \frac{\pi d^2}{L} \quad (6.3)$$

Considerando a razão citada, são definidos limites que estabelecem a relevância de cada mecanismo:

- $\log(f_{shock}/f_*) > -1$ região excitada por choque.
- $-2 < \log(f_{shock}/f_*) < -1$ Zona de transição.
- $\log(f_{shock}/f_*) < -2$ região fotoexcitada.

Com base nos diagramas de Akras e Gonçalves (2016), nos modelos construídos e mapas de densidade e fluxo disponíveis na literatura, foram investigados os mecanismos responsáveis pelo processo de excitação/ionização.

Algumas considerações devem ser feitas antes de estudarmos os objetos da amostra, especificamente. A equação 6.3 estabelece a relação entre a razão f_{shock}/f_* e parâmetros do gás em expansão, como a sua velocidade V_s , densidade de partículas n e distância da fonte do campo de radiação d , assim como parâmetros da estrela como sua luminosidade. Deve-se atentar que vários destes parâmetros possuem grandes incertezas ou valores discrepantes apresentados por diferentes autores, como a distância da fonte que possui uma dependência da distância da PN que geralmente possui um grande erro associado, assim como a luminosidade da estrela.

A transformação de F_{shock} em f_{shock} é feita por uma divisão do primeiro por parâmetros da estrela, mais especificamente pela energia média do fóton emitido. Ora, é de se esperar que as energias médias dos fótons emitidos pela estrela e pelo choque sejam diferentes,

afinal são oriundas de processos físicos diferentes. Consideramos que a energia média do fóton associado ao choque seja mais baixa, desta forma a equação 6.3 deve subestimar a energia injetada no gás devido ao choque.

Fizemos uma análise visando estabelecer o papel dos choques como mecanismo de ionização/excitação dos objetos de nossa amostra, incluindo também NGC 6302, cujo estudo cinemático foi feito por Lago (2013); esta PN apresenta muitos resultados para os parâmetros físicos assim como uma morfologia favorável para uma análise detalhada.

As imagens disponíveis observadas pelo HST não foram utilizadas nesta parte do trabalho porque os filtros associados às observações são muito largos e desta forma a contaminação nas medidas da linha de H_α é considerável, sendo assim quando disponível utilizamos mapas de razões de linha de outras fontes.

6.2 NGC 6818 e NGC 6153

As três nebulosas com geometria simplificada foram abordadas aqui numa visão geral. Não possuímos dados para todas, NGC 3211 não foi trabalhada devido aos limitados estudos disponíveis ao seu respeito, não tivemos como caracterizar os choques devido à falta de parâmetros.

Utilizando dados disponíveis na literatura para NGC 6818 (Benetti et al., 2003) e para NGC 6153 (Yuan et al., 2011), calculamos a razão f_{shock}/f_* . Os valores encontrados são apresentados na tabela 6.1, os parâmetros utilizados no cálculo são também apresentados. Consideramos os choques associados às regiões mais externas de ambas as nebulosas. As velocidades foram as mais altas apresentadas em nossos diagramas P-V.

Tabela 6.1 - Parâmetros utilizados e resultados obtidos em nosso estudo dos choques para NGC 6818 e NGC 6153.

Nebulosa	L (luminosidade)	Distância (kpc)	n_e (cm^{-3})	$\log(f_{shock}/f_*)$
NGC 6818	1260 L_\odot	1,7	1500	-1,57
NGC 6153	2034 L_\odot	1,5	3000	-1,53

Devido à indisponibilidade de mapas de densidades para ambas as PNe, foram adotados valores aproximados obtidos de Benetti et al. (2003) e Yuan et al. (2011). Devemos ressaltar

que não estudamos LIS nem FLIERS, nosso cálculo considera as condições para os choques nas cascas gasosas, o gás da casca foi considerado com densidade muito similar à sua vizinhança, caso contrário nossa abordagem não seria viável, pois não utilizamos flutuações de densidade para o cálculo. Certamente num outro regime de velocidades o valor da razão f_{shock}/f_* poderia ser bastante diferente.

Ambas as PNe apresentaram razões f_{shock}/f_* na zona de transição definida previamente. Os valores significam que o mecanismo de choque tem relevância na ionização e excitação de NGC 6818 e NGC 6153, mas indicam que a fotoionização é determinante também para ambas. O cenário é justificado pelas luminosidades das estrelas. Se as PNe fossem mais extensas os choques tenderiam a dominar nas regiões periféricas.

6.3 Nebulosas tipo I

6.3.1 NGC 2440

A morfologia desta PN foi discutida no capítulo 5, onde explicamos que o foco de nossos modelos morfo-cinemáticos não são as subestruturas e sim as principais componentes da nebulosa. Para o contexto da física de ionização/excitação do gás, a presença das subestruturas não deve ser simplesmente ignorada, uma vez que a presença de filamentos, nós e arcos são uma característica marcante, juntamente com a sobreabundância de nitrogênio das nebulosas tipo I (Peimbert e Torres-Peimbert, 1983).

Para caracterizar os mecanismos de ionização/excitação construímos diagramas de diagnóstico para a nebulosa, que são apresentados na figura 6.1. Para a confecção dos diagramas utilizamos dados de nosso modelo cinemático assim como nosso valor de distância; os fluxos e densidades foram obtidos de Cuesta e Phillips (2000), a luminosidade assumida para a estrela central foi de $2100 L_{\odot}$, valor este apresentado por Heap e Hintzen (1990).

As três regiões que definem os limites de referência dos processos de excitação por choque ou fotoexcitação, como definidos na seção 6.1, são marcadas por linhas verticais. Todos os pontos estão na região do diagrama onde os choques dominam, altas razões de linha são também um indicativo da presença de choques. Os pontos escolhidos são todos relativos a regiões periféricas e foram escolhidas por critérios morfológicos, sendo sempre bordas e nós, os nós N e S estão incluídos na amostragem.

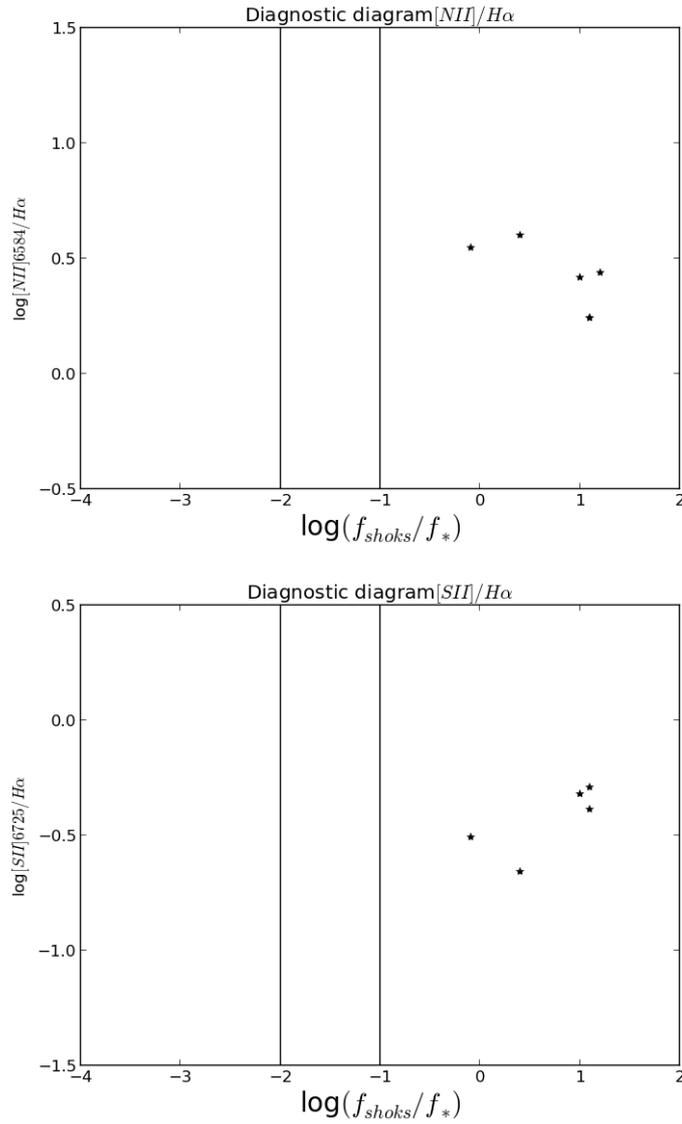


Figura 6.1: Diagramas de diagnóstico para NGC 2440.

Devido à classificação da PN como tipo I, é difícil associar os valores para as razões de linha diretamente aos choques. Os choques alteram esses fluxos, em especial para linhas de baixa excitação, porém as abundâncias destes elementos podem deslocar os valores destas razões; a tarefa de separar esses efeitos é complicada e neste caso inviável; este problema será abordado novamente no estudo do caso de NGC 6302.

6.3.2 NGC 6302

O objetivo específico de estudar esta PN é a possibilidade de mapear o papel dos choques ao longo de todo o eixo de simetria da nebulosa, que possui uma morfologia bipolar com o campo de velocidades bem estudado (Szyszka et al., 2011).

Foi feita uma análise detalhada das razões de linhas dos diagramas, pois é possível compará-las para regiões com diferentes regimes, sendo assim o efeito da abundância é separável do efeito dos choques nas linhas.

Utilizamos os resultados de Rauber et al. (2014) — mapa de densidade e de razões de linha — para construir os diagramas de diagnóstico apresentados na figura 6.2. O campo de velocidades utilizado foi o obtido por nós utilizando dados do OPD (Lago, 2013), a distância assumida foi de 1,17 *kpc* (Meaburn et al., 2008) e a luminosidade adotada para a estrela central foi de 5690 L_{\odot} (Wright et al., 2011) que consiste em um limite inferior calculado observacionalmente, considerando diversos comprimentos de onda.

Na figura 6.2 os símbolos de diferentes cores e formas representam distintos lóbulos da PN, cada ponto está à distância de 4 segundos de arco do próximo, de forma que toda a PN foi amostrada ao longo de seu eixo. Os dados disponíveis apresentam valores para a razão $[OII]/H_{\beta}$, a razão $[OII]/H_{\alpha}$ foi calculada utilizando o valor esperado para o decremento de Balmer $H_{\alpha}/H_{\beta} = 2,85$.

Os três diagramas apresentados mostram a mesma tendência: as razões de linha crescem dos pontos mais à esquerda para os mais à direita nos diagramas. O comportamento apresentado é coerente pois os choques tornam-se mais dominantes seguindo a mesma tendência. Podemos dizer que os lóbulos apresentam comportamentos praticamente simétricos, não apresentando discrepâncias consideráveis, o que também é esperado uma vez que o mapa de densidades mostra um comportamento similar.

O resultado mais interessante desta descrição diz respeito à descontinuidade nos valores das razões de fluxo para as distintas partes dos diagramas. Em todos os diagramas para NGC 6302 percebe-se o aumento da razão de linhas à medida que nos deslocamos para a direita no diagrama; como os pontos à esquerda representam as regiões dominadas por fotoionização, comparando-os aos da direita é possível separar o efeito das abundâncias e da estrutura de ionização daquele dos choques. Comparando os diagramas da figura 6.1 com os da figura 6.2 notamos que, devido às abundâncias de NGC 6302, pontos nos

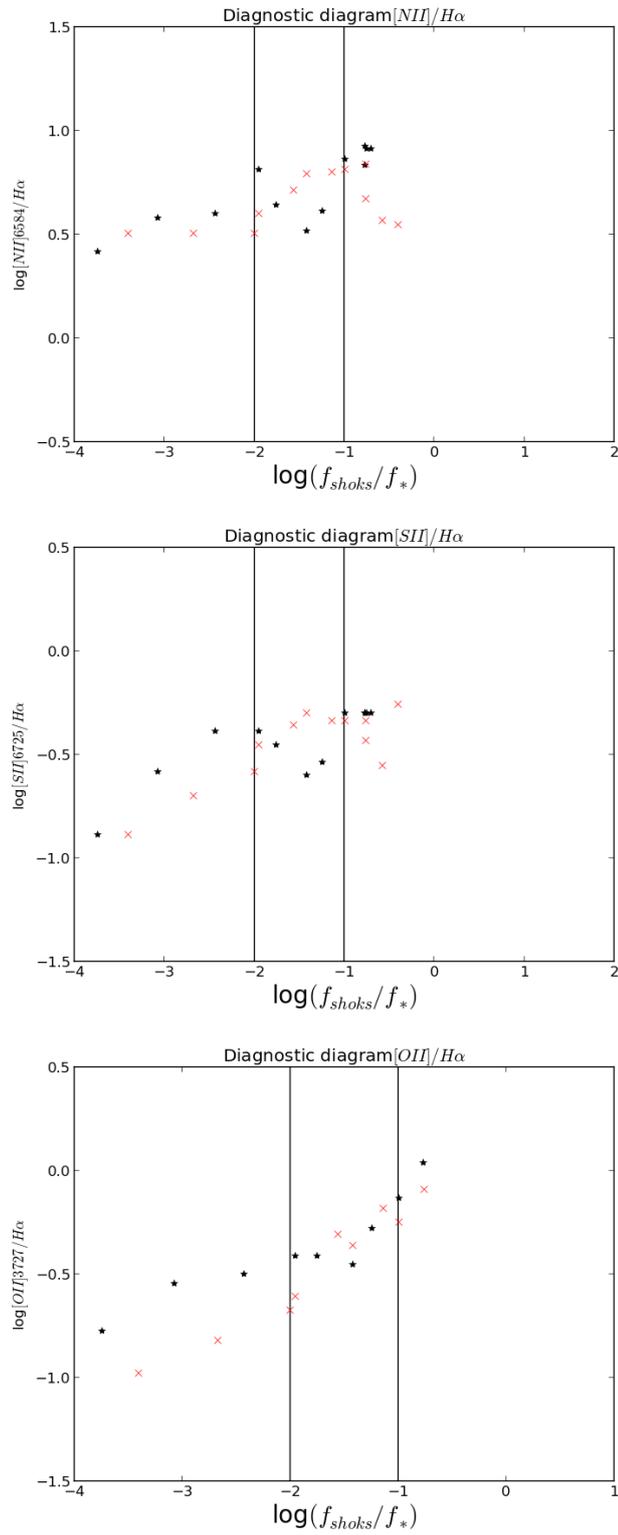


Figura 6.2: Diagramas de diagnóstico para NGC 6302, os diferentes símbolos e cores representam distintos lóbulos da PN.

Tabela 6.2 - Parâmetros utilizados e resultados obtidos em nosso estudo dos choques para NGC 6445.

NGC 6445	V_s (km/s)	Distância (kpc)	n_e (cm^{-3})	$\log(f_{shock}/f_*)$
Anel	48	1,37	1100	-0,71
Periferia	145	1,37	250	1,28

diagramas para a razão $[NII]/H\alpha$ nas regiões dominadas por fotoionização possuem razão de linhas superiores aos das regiões dominadas por choques de NGC 2440.

6.3.3 NGC 6445

Finalizamos apresentado os resultados associados à análise dos mecanismos de choque em NGC 6445, a morfologia desta PN foi discutida no capítulo 5, onde apresentamos um modelo morfo-cinemático para a mesma.

Como já dito no capítulo anterior, apesar de seu grande tamanho angular NGC 6445 não possui estudos muito detalhados no que se diz respeito à morfo-cinemática. Os mapas de fluxo são escassos na literatura; utilizamos os resultados de Cuesta e Phillips (1999) em nossa análise, o artigo apresenta um mapa de densidades para a região central desta PN, porém insuficiente para o mapeamento detalhado, como para NGC 6302 ou NGC 2440.

Cuesta e Phillips (1999) já suspeitavam da atuação dos choques nos mecanismos de ionização/excitação das linhas, considerando inclusive velocidades em concordância com o nosso modelo; sua suspeita é fundamentada nos altos valores — em regiões periféricas — para a razão $[SII]/H\alpha$, que atingem valores logarítmicos de até $-0,15$.

A literatura nos apresenta a distância de $1,37$ kpc (Cahn et al., 1992) para este objeto; dados sobre a estrela central são escassos, a luminosidade adotada foi de $933 L_{\odot}$ ¹, utilizamos dois valores de densidade (Cuesta e Phillips, 1999) e calculamos a razão f_{shock}/f_* para a região anelar central e para a periferia; as velocidades são derivadas de nosso modelo.

A tabela 6.2 apresenta os resultados obtidos. Podemos confirmar as suspeitas de Cuesta e Phillips (1999), de que a periferia de NGC 6445 é dominada por processos de excitação por choques. O mais surpreendente é o papel dos choques na região central, uma vez que,

¹ Valor apresentado no *Chandra Planetary Nebula Survey* <http://lama.cis.rit.edu/chanplans/sample.php?png = png008.0p03.9>

devido à baixa luminosidade da estrela, o gás encontra-se no mínimo saindo da região de transição.

6.4 Consequência dos choques para o cálculo das abundâncias.

Utilizar apenas as razões de linha para caracterizar os choques pode então ser considerada uma estratégia equivocada, a razão f_{shock}/f_* precisa ser usada. Sendo assim deve-se considerar o processo de choque nos cálculos de abundâncias, fatores de correção de ionização empíricos são comumente utilizados para estes cálculos, pois não é possível observar a emissão de todos os íons necessários. Como os choques alteram diretamente os fluxos das linhas, não considerá-los levará a um erro no cálculo das abundâncias.

Infelizmente, devido à nossa baixa amostragem não é possível sugerir uma correção para estes cálculos, são necessários estudos similares ao que apresentamos para NGC 6302 para uma amostra estatisticamente significativa de objetos. Estudando uma amostra maior talvez seja possível determinar uma correção empírica para os cálculos de abundâncias. Por isso podemos afirmar que a morfo-cinemática das PNe tem um papel muito mais ativo do que se imaginava para as condições físicas do gás, a negligência dos choques pode levar a interpretações incorretas de abundâncias locais ou globais, questão que já havia sido abordada no contexto das LIS por Gonçalves et al. (2006).

Reforçamos que os choques apresentam um papel importante nas três nebulosas do tipo I estudadas aqui. Um estudo detalhado faz-se necessário pois essas nebulosas podem exibir características marcantes relacionadas a esse mecanismo. Se for assim, as abundâncias devem ser corrigidas pois caso os choques sejam tão influentes como suspeitamos, as nebulosas do tipo I precisam de uma abordagem diferenciada no cálculo de abundâncias. Faz-se necessário também confirmar se os choques são marcantes nas PN tipo I ou se apenas em um subgrupo delas; o vínculo pode ser morfológico ou ligado a outra característica.

Conclusões e perspectivas

Modelamos cinco PNe utilizando o software SHAPE. Três delas possuem uma morfologia elipsoidal, e duas nebulosas restantes são multipolares, sendo seus modelos mais complexos. Para o primeiro grupo foram utilizados dados observados no OPD, para o segundo foram utilizados os dados do catálogo cinemático SPM.

Complementarmente, no capítulo 6 apresentamos uma discussão a respeito do papel dos choques em toda a amostra. NGC 3211 não foi abordada devido à falta de dados para a discussão. A análise foi realizada utilizando dados que se constituíam em mapas de densidade e fluxo de linhas, disponíveis na literatura, além de informações cinemáticas oriundas de nossos modelos.

A instrumentação utilizada do OPD, especificamente o espectrógrafo Coudé, tem um desempenho no patamar mínimo aceitável para a realização de um estudo morfo-cinemático de PNe. Devido às características do instrumento é possível fazer com o mesmo estudos morfo-cinemáticos de PNe muito brilhantes, assim como com tamanho angular moderado, da ordem de 10 segundos de arco. Deve-se notar que o sistema de acompanhamento não foi desenvolvido para objetos extensos, tornando difícil o uso deste equipamento para este fim.

Como o instrumento não é acoplado diretamente no telescópio, estando acomodado em um recinto à parte, o campo apresenta rotação. Uma vez que a fenda do espectrógrafo é fixa deve-se usar esta rotação de forma favorável pois sendo bem utilizada, a mesma possibilita obter espectros do alvo com distintas orientações, porém o tempo e a estratégia de observação demandam um cuidado especial. Enfatizamos a viabilidade de um estudo como o nosso utilizando este instrumento, porém alertamos para suas limitações e complicações

de manuseio.

Os modelos obtidos para NGC 6818, NGC 6153 e NGC 3211 reproduzem bem as observações e seus resultados estão de acordo com a literatura. Os campos de velocidade reproduzem igualmente bem as observações assim como a geometria adotada. Sugerimos que NGC 6818 pode ser uma PN em estágio intermediário entre as nebulosas *starfish* e elipsoidais, devido ao cenário de formação proposto. Esta PN provavelmente não possui as flutuações de densidade necessárias para a penetração do vento interno, mais rápido, na casca externa mais lenta, a ponto de formar as protuberâncias típicas das nebulosas *starfish*. Reproduzimos os diagramas P-V observados adotando um modelo de casca única.

Nossos modelos para NGC 6153 e NGC 3211 reproduzem os diagramas P-V observados; para NGC 6153 foram atribuídas duas estruturas, cada uma com um campo de velocidades particular, NGC 3211 foi reproduzida a partir de uma única casca no modelo. Devido à falta de outros estudos, comparações a respeito da cinemática de NGC 3211 foram impossibilitadas, desta forma os resultados apresentados aqui são os primeiros explorando especificamente características morfo-cinemáticas de NGC 3211.

Complementarmente, estudamos os choques e seu papel como mecanismo de ionização/excitação em NGC 6818 e NGC 6153. Novamente nosso estudo de NGC 3211 foi limitado pela falta de informação disponível, já que são necessários mapas de densidade assim como mapas de fluxo de linhas para este fim; como os mesmos não estavam disponíveis, os choques em NGC 3211 não foram analisados.

Como discutido no capítulo 6, os choques tendem a ser mais relevantes quanto mais afastada a região for da fonte do campo de radiação, bem como se a mesma fonte for pouco luminosa, sendo o choque mais intenso para maiores densidades e velocidades. Considerando estas condições podemos dizer que os resultados para as periferias de NGC 6818 e NGC 6153 são surpreendentes, seus pequenos tamanhos angulares assim como o baixo regime de velocidades advogariam a favor da fotoionização/fotoexcitação, porém nossos resultados mostram que o gás se encontra na zona de transição, entre a dominância do campo de radiação e dos choques. Apenas deve-se ressaltar que esses resultados são sensíveis aos valores de distância e densidades adotados, fazendo-se necessário um estudo dedicado, obtendo-se de mapas de densidade e fluxo de linhas, para uma análise completa.

Utilizando dados do catálogo cinemático SPM, modelamos duas nebulosas multipolares,

NGC 2440 e NGC 6445; nossos modelos são baseados em estruturas simples e simétricas, o intuito foi modelar a estrutura geral de ambas. Como são classificadas como PNe do tipo I, elas são ricas em microestruturas como filamentos, nós, arcos e bordas. Para NGC 2440 algumas destas estruturas foram incluídas no modelo, para NGC 6445 as mesmas foram suprimidas já que nenhuma se encontra em destaque.

O modelo produzido para NGC 2440 reproduziu todos os diagramas P-V observados disponíveis. A morfologia de NGC 2440 sugerida neste trabalho descreve a mesma com duas componentes bipolares, dois nós nas extremidades de uma das componentes, uma região central composta por uma estrutura toroidal fragmentada em três pedaços e um halo esférico. Devido aos resultados obtidos, a suspeita de um terceiro componente bipolar foi descartada, uma vez que todos os diagramas P-V observados foram reproduzidos sem invocar esta hipótese.

Esta morfologia está de acordo com a literatura, nossa principal contribuição reside na descrição da região central. A possibilidade de fragmentação desta região já havia sido levantada com base em observações da emissão molecular, porém estendemos a descrição para a região central observada nos diagramas P-V, o acoplamento do campo de velocidades destas estruturas com uma das componentes bipolares se mostrou adequada, fato este confirmado pela nossa estimativa de distância, que está em excelente acordo com a literatura.

O halo esférico adicionado a nosso modelo modela bem a estrutura faltante em nossos primeiros diagramas P-V modelados, a separação dos centros das estruturas e do halo, observada nas imagens do HST, evidencia um descolamento da estrela central em relação ao local da primeira ejeção. A velocidade derivada é demasiadamente pequena para observá-la nos diagramas P-V. Propomos um cenário de formação para esta PN a fim de justificar a diferença morfológica do halo em relação ao restante da PN: posteriormente à ejeção do halo o sistema binário sofre uma alteração dinâmica, desta forma as estrelas se aproximam havendo a formação do envelope comum, o que torna possível a formação de estruturas bipolares via BRET. Evidentemente este cenário é uma sugestão, é necessário que o mesmo seja verificado através de modelos hidrodinâmicos específicos.

NGC 2440 possui bordas dominadas por processos de ionização/excitação realizados pelos choques. As imagens do HST levantam essa suspeita que é confirmada pelos diagra-

mas apresentados neste trabalho, aparentemente há uma intensa interação entre o halo e o restante da PN. O regime de velocidades assim como o tamanho da PN e a luminosidade da estrela central favorecem este cenário, porém um mapeamento completo dos choques seria desejável a fim de caracterizar este mecanismo ao longo de toda a estrutura da PN.

Construímos um modelo usando o SHAPE para NGC 6445, sendo este o objeto com morfologia mais complexa apresentado neste trabalho. Este objeto possui diversas classificações morfológicas na literatura; devido à alta variação do brilho superficial das estruturas desta PN, sua classificação no passado foi fortemente afetada por limitações instrumentais, passando de nebulosa anelar a multipolar conforme novas e melhores imagens eram disponibilizadas.

Nossos resultados para NGC 6445 constituem uma de nossas maiores contribuições. Baseado em diagramas P-V observados, disponíveis no catálogo cinemático SPM, foi construído um modelo morfo-cinemático caracterizando NGC 6445 como uma nebulosa octopolar, ou seja possuindo quatro componentes bipolares. Uma estrutura toroidal central completa a descrição desta PN.

Os diagramas P-V modelados reproduzem as observações, estruturas bipolares com diferentes orientações deixam claro a adequação de nosso modelo como mostrado nos diagramas P-V. A região retangular central é na verdade uma composição do brilho do toróide acrescido do brilho das componentes bipolares sobrepostas na linha de visada. Dados do instrumento SAM, recém instalado no SOAR confirmam nosso modelo, seus dados preliminares deixam claro que de fato existe um toróide orientado similarmente ao representado em nosso modelo, as suas componentes de velocidade confirmam nossa escolha de inclinação para tal estrutura.

Finalizando nossa análise sobre NGC 6445, estudamos os choques e sua importância para a estrutura de ionização desta PN; utilizando os campos de velocidades de nosso modelo investigamos o papel dos choques na região do toróide e na periferia (borda). A literatura não apresentava mapas de densidades completos e muito menos mapas das razões das linhas, com isso tivemos de limitar nossa análise, mas mesmo assim vemos que os choques são dominantes nas bordas e na região do toróide, este fato é fortemente influenciado pela baixa luminosidade da estrela central, pelo grande tamanho e pelo regime de velocidades.

A fim de analisar ponto a ponto o papel dos choques, estudamos complementarmente NGC 6302, porém não foi construído um modelo morfo-cinemático para a mesma. A distribuição dos pontos em nossos diagramas evidencia a diferença nos valores das razões de linhas nos diferentes regimes de choque e fotoionização. A comparação entre os diagramas de diferentes objetos, NGC 2440 e NGC 6302, deixa claro que apenas as razões de linha são um indicativo ruim da presença dos choques, os valores para o fluxo das linhas de baixa excitação/ionização podem ser altos simplesmente devido a uma alta abundância inata, assim como uma estrutura de ionização diferente. Faz-se necessário um estudo dedicado, caracterizando os choques em toda a PN a fim de separar estes efeitos.

O cálculo de abundâncias em PNe com essas características precisa considerar os choques e como eles alteram o fluxo de certas linhas, ignorá-los pode levar a um erro nas abundâncias devido ao uso de fatores de correção de ionização incorretos. Nosso trabalho possui uma amostra muito pequena para ligar esse efeito à classificação de PNe tipo I ou alguma característica morfológica, porém suspeitamos que particularmente PNe do tipo I são propícias a este erro de cálculo. Estudos cobrindo amostras maiores se fazem necessários para estabelecer conclusões sobre este efeito.

Pretendemos utilizar o SAM no telescópio SOAR com o objetivo de obter os mapas de canais, para que possamos realizar o estudo ponto a ponto dos choques, assim como possibilitar um estudo ainda mais detalhado da cinemática. Particularmente NGC 6445 ainda pode ser muito explorada, seus mapas de razões de linha poderão ser obtidos aprofundando o estudo dos choques e sua influência, assim como para os outros objetos de nossa amostra que não têm estudos deste tipo disponíveis.

O estudo de um grande conjunto de PNe se faz necessário a fim de mensurar o impacto dos choques no cálculo de abundâncias. Queremos começar este estudo com as nebulosas tipo I, separar efeitos inatos ao objeto dos choques se faz necessário, novamente o SAM pode ser de grande valia.

Consideramos importante um modelo de choque mais adequado. Conforme o capítulo 6, seria interessante melhorar a descrição da energia média do fóton relacionado ao choque, talvez introduzindo uma correção empírica baseada em razões de linhas.

Finalmente queremos dar continuidade à ideia inicial de um levantamento de dados cinemáticos de PNe austrais, como feito no catálogo SPM. Queremos fazer o nosso levan-

tamento complementarmente às outras iniciativas de grupos distintos, incluído o SPM. O espectrógrafo STELLES será usado para tal fim. No OPD, o comissionamento do novo espectrógrafo tipo Echelle abrirá a possibilidade de aumentar a amostra de objetos observados.

Referências Bibliográficas

- Akras S., Clyne N., Boumis P., Monteiro H., Gonçalves D. R., Redman M. P., Williams S.,
Deciphering the bipolar planetary nebula Abell 14 with 3D ionization and morphological
studies, MNRAS, 2016, vol. 457, p. 3409
- Akras S., Gonçalves D. R., Low-ionization structures in planetary nebulae - I. Physical,
kinematic and excitation properties, MNRAS, 2016, vol. 455, p. 930
- Aller L. H., Czyzak S. J., Craine E., Kaler J. B., Spectrophotometric studies of gaseous
nebulae. XXII. The irregular ring nebula NGC 6445., ApJ, 1973, vol. 182, p. 509
- Anandarao B. G., Banerjee D. P. K., High resolution observations of the planetary nebulae
NGC 6153 and IC 4593, A&A, 1988, vol. 202, p. 215
- Balick B., The evolution of planetary nebulae. I - Structures, ionizations, and morphological
sequences, AJ, 1987, vol. 94, p. 671
- Balick B., Alexander J., Hajian A. R., Terzian Y., Perinotto M., Patriarchi P., FLIERs
and Other Microstructures in Planetary Nebulae. IV. Images of Elliptical PNs from the
Hubble Space Telescope, AJ, 1998, vol. 116, p. 360
- Balick B., Perinotto M., Maccioni A., Terzian Y., Hajian A., FLIERs and other micros-
tructures in planetary nebulae, 2, ApJ, 1994, vol. 424, p. 800
- Balick B., Rugers M., Terzian Y., Chengalur J. N., Fast, low-ionization emission regions
and other microstructures in planetary nebulae, ApJ, 1993, vol. 411, p. 778

- Basurah H. M., Ali A., Dopita M. A., Alsulami R., Amer M. A., Alruhaili A., Problems for the WELS classification of planetary nebula central stars: self-consistent nebular modelling of four candidates, *MNRAS*, 2016, vol. 458, p. 2694
- Bear E., Soker N., Planetary nebulae that might have been shaped by a triple stellar system, *ArXiv e-prints*, 2016
- Benetti S., Cappellaro E., Ragazzoni R., Sabbadin F., Turatto M., The 3-D ionization structure of NGC 6818: A Planetary Nebula threatened by recombination, *A&A*, 2003, vol. 400, p. 161
- Benítez G., Vázquez R., Zavala S., Blanco M. W., Ayala S., Miranda L. F., Guillén P. F., The Physical Structure of the Planetary Nebula NGC 6445. In *Planetary Nebulae as Astronomical Tools* , vol. 804 of American Institute of Physics Conference Series, 2005, p. 64
- Cahn J. H., Kaler J. B., Stanghellini L., A catalogue of absolute fluxes and distances of planetary nebulae, *A&AS*, 1992, vol. 94, p. 399
- Chong S.-N., Kwok S., Imai H., Tafuya D., Chibueze J., Multipolar Planetary Nebulae: Not as Geometrically Diversified as Thought, *ApJ*, 2012, vol. 760, p. 115
- Clyne N., Akras S., Steffen W., Redman M. P., Gonçalves D. R., Harvey E., A morpho-kinematic and spectroscopic study of the bipolar nebulae: M 2-9, Mz 3, and Hen 2-104, *A&A*, 2015, vol. 582, p. A60
- Corradi R. L. M., Manso R., Mampaso A., Schwarz H. E., Unveiling low-ionization microstructures in planetary nebulae., *A&A*, 1996, vol. 313, p. 913
- Cuesta L., Phillips J. P., The Density, Extinction, and Excitation Characteristics of NGC 6445, *AJ*, 1999, vol. 117, p. 974
- Cuesta L., Phillips J. P., The Density, Extinction, Temperature, and Excitation Structures of NGC 2440, *ApJ*, 2000, vol. 543, p. 754
- De Marco O., The Origin and Shaping of Planetary Nebulae: Putting the Binary Hypothesis to the Test, *PASP*, 2009, vol. 121, p. 316

- Dopita M. A., Sutherland R. S., Spectral Signatures of Fast Shocks. I. Low-Density Model Grid, *ApJS*, 1996, vol. 102, p. 161
- Feibelman W. A., Electron densities for six planetary nebulae and HM SGE derived from the C 3 lambda 1907/1909 ratio. In NASA Conference Publication , vol. 2171 of NASA Conference Publication, 1981
- Frew D. J., Planetary Nebulae in the Solar Neighbourhood: Statistics, Distance Scale and Luminosity Function, Department of Physics, Macquarie University, NSW 2109, Australia, 2008, Tese de Doutorado
- García-Díaz M. T., López J. A., Steffen W., Richer M. G., A Detailed Morpho-kinematic Model of the Eskimo, NGC 2392: A Unifying View with the Cat's Eye and Saturn Planetary Nebulae, *ApJ*, 2012, vol. 761, p. 172
- Gathier R., Pottasch S. R., Pel J. W., Distances to planetary nebulae. I - The reddening-distance method, *A&A*, 1986, vol. 157, p. 171
- Gonçalves D. R., Characterizing Low-Ionization Structures in PNe. In Asymmetrical Planetary Nebulae III: Winds, Structure and the Thunderbird , vol. 313 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2004, p. 216
- Gonçalves D. R., Corradi R. L. M., Mampaso A., Low-Ionization Structures in Planetary Nebulae: Confronting Models with Observations, *ApJ*, 2001, vol. 547, p. 302
- Gonçalves D. R., Ercolano B., Carnero A., Mampaso A., Corradi R. L. M., On the nitrogen abundance of fast, low-ionization emission regions: the outer knots of the planetary nebula NGC 7009, *MNRAS*, 2006, vol. 365, p. 1039
- Górny S. K., Schwarz H. E., Corradi R. L. M., Van Winckel H., An atlas of images of Planetary Nebulae, *A&AS*, 1999, vol. 136, p. 145
- Hajian A. R., Terzian Y., It's Planetary Nebulae Expansion Distances. III., *PASP*, 1996, vol. 108, p. 419
- Heap S. R., Hintzen P., CCD Imagery of Planetary Nuclei: The Properties of the Central Stars of NGC 2440 and NGC 7027, *ApJ*, 1990, vol. 353, p. 200

- Huckvale L., Prouse B., Jones D., Lloyd M., Pollacco D., López J. A., O'Brien T. J., Sabin L., Vaytet N. M. H., Spatio-kinematic modelling of Abell 65, a double-shelled planetary nebula with a binary central star, *MNRAS*, 2013, vol. 434, p. 1505
- Hyung S., Aller L. H., Feibelman W. A., Spectroscopic Observations of the Planetary Nebula NGC 6818, *ApJ*, 1999, vol. 514, p. 878
- Kwok S., Radiation pressure on grains as a mechanism for mass loss in red giants, *ApJ*, 1975, vol. 198, p. 583
- Kwok S., *The Origin and Evolution of Planetary Nebulae*. Cambridge University Press, 2000, 241 p.
- Kwok S., Purton C. R., Fitzgerald P. M., On the origin of planetary nebulae, *ApJ*, 1978, vol. 219, p. L125
- Lago P. J. A., *Parâmetros Físicos e Abundâncias de Nebulosas Planetárias Extensas*, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2013, Dissertação de Mestrado, 93p.
- Lago P. J. A., Costa R. D. D., NGC 2440 : A morpho-kinematical model, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 2016, vol. 52, p. 329
- Leahy D. A., Volk K., Image deprojection applied to the Einstein Cygnus Loop X-ray image, *A&A*, 1994, vol. 282, p. 561
- Lintu A., Lensch H. P. A., Magnor M., El-Abed S., Lee T.-H., Seidel H.-P., A Multi-wavelength-based Method to de-project Gas and Dust Distributions of several Planetary Nebulae. In *Asymmetrical Planetary Nebulae IV* , 2007
- Liu X.-W., Chemical Abundances of Planetary Nebulae: A UV to Far-IR Case Study of NGC 6153, *Ap&SS*, 1998, vol. 255, p. 499
- Liu X.-W., Luo S.-G., Barlow M. J., Danziger I. J., Storey P. J., Chemical abundances of planetary nebulae from optical recombination lines - III. The Galactic bulge PN M 1-42 and M 2-36, *MNRAS*, 2001, vol. 327, p. 141
- Liu X.-W., Storey P. J., Barlow M. J., Danziger I. J., Cohen M., Bryce M., NGC 6153: a super-metal-rich planetary nebula?, *MNRAS*, 2000, vol. 312, p. 585

-
- Livio M., Soker N., The common envelope phase in the evolution of binary stars, *ApJ*, 1988, vol. 329, p. 764
- López J. A., Meaburn J., Bryce M., Holloway A. J., The Morphology and Kinematics of the Complex Polypolar Planetary Nebula NGC 2440, *ApJ*, 1998, vol. 493, p. 803
- Lopez J. A., Meaburn J., Palmer J. W., Kinematical Evidence for a Rotating, Episodic Jet in the Planetary Nebula Fleming 1, *ApJ*, 1993, vol. 415, p. L135
- 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
- Lopez J. A., Vazquez R., Rodriguez L. F., The Discovery of a Bipolar, Rotating, Episodic Jet (BRET) in the Planetary Nebula KJPN 8, *ApJ*, 1995, vol. 455, p. L63
- Maciel W., *Astrofísica do Meio Interestelar*. São Paulo: edusp, 2002, 368 p.
- McNabb I. A., Fang X., Liu X.-W., Very Large Telescope deep echelle spectroscopy of Galactic planetary nebulae NGC 6153, M 1-42 and Hf 2-2, *MNRAS*, 2016, vol. 461, p. 2818
- 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
- Osterbrock D. E., Ferland G. J., *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei.. 2*. Sausalito, California: University Science Books, 2006, 461 p.
- Peimbert M., Torres-Peimbert S., Type I planetary nebulae. In *Planetary Nebulae*, vol. 103 of IAU Symposium, 1983, p. 233
- Raga A. C., Riera A., Mellema G., Esquivel A., Velázquez P. F., Line ratios from shocked cloudlets in planetary nebulae, *A&A*, 2008, vol. 489, p. 1141
- Ramos-Larios G., Phillips J. P., The haloes of planetary nebulae in the mid-infrared: evidence for interaction with the interstellar medium, *MNRAS*, 2009, vol. 400, p. 575

- Rauber A. B., Copetti M. V. F., Krabbe A. C., Spectroscopic mapping of the planetary nebula NGC 6302, *A&A*, 2014, vol. 563, p. A42
- Richer M. G., López J. A., Díaz-Méndez E., Riesgo H., Báez S.-H., García-Díaz M. T., Meaburn J., Clark D. M., Calderón Olvera R. M., López Soto G., Toledano Reboló O., The San Pedro Mártir Planetary Nebula Kinematic Catalogue: Extragalactic Planetary Nebulae, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 2010, vol. 46, p. 191
- Riera A., Raga A. C., Physical conditions of the shocked regions in collimated outflows of planetary nebulae. In *Asymmetrical Planetary Nebulae IV* , 2007
- Riesgo H., López J. A., Revised Diagnostic Diagrams for Planetary Nebulae, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 2006, vol. 42, p. 47
- Sabbadin F., Spatiokinematical models of five planetary nebulae, *MNRAS*, 1984, vol. 210, p. 341
- Sabbadin F., Minello S., Bianchini A., Sharpless 176: a large, nearby planetary nebula., *A&A*, 1977, vol. 60, p. 147
- Schönberner D., Jacob R., Lehmann H., Hildebrandt G., Steffen M., Zwanzig A., Sandin C., Corradi R. L. M., A hydrodynamical study of multiple-shell planetary nebulae. III. Expansion properties and internal kinematics: Theory versus observation, *Astronomische Nachrichten*, 2014, vol. 335, p. 378
- Soker N., Livio M., Disks and jets in planetary nebulae, *ApJ*, 1994, vol. 421, p. 219
- Steffen W., 3-D structures of planetary nebulae, *Journal of Physics Conference Series*, 2016, vol. 728, p. 032005
- Steffen W., García-Segura G., Koning N., Hydrodynamical Velocity Fields in Planetary Nebulae, *ApJ*, 2009, vol. 691, p. 696
- Steffen W., Koning N., Esquivel A., García-Segura G., García-Díaz M. T., López J. A., Magnor M., A wind-shell interaction model for multipolar planetary nebulae, *MNRAS*, 2013, vol. 436, p. 470

- Steffen W., Koning N., Wenger S., Morisset C., Magnor M., Shape: A 3D Modeling Tool for Astrophysics, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Volume 17, Issue 4, p.454-465, 2011, vol. 17, p. 454
- Steffen W., López J. A., Morpho-Kinematic Modeling of Gaseous Nebulae with SHAPE, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 2006, vol. 42, p. 99
- Steffen W., Teodoro M., Madura T. I., Groh J. H., Gull T. R., Mehner A., Corcoran M. F., Damineli A., Hamaguchi K., The Eta Carinae Homunculus in Full 3D with X-shooter and Shape, *The Messenger*, 2014, vol. 158, p. 26
- Szyszkla 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
- Torres-Peimbert S., Arrieta A., Georgiev L., Expansion velocities of selected PNe. In *IAU Symposium*, vol. 283 of *IAU Symposium*, 2012, p. 512
- Uscanga L., Velázquez P. F., Esquivel A., Raga A. C., Boumis P., Cantó J., Modelling the 3D morphology and proper motions of the planetary nebula NGC 6302, *MNRAS*, 2014, vol. 442, p. 3162
- Vázquez R., Bubbles and Knots in the Kinematical Structure of the Bipolar Planetary Nebula NGC 2818, *ApJ*, 2012, vol. 751, p. 116
- Wang M.-Y., Hasegawa T. I., Kwok S., The Detection of a Molecular Bipolar Flow in the Multipolar Planetary Nebula NGC 2440, *ApJ*, 2008, vol. 673, p. 264
- Weedman D. W., Observational Spatial and Kinematic Models of Planetary Nebulae, *ApJ*, 1968, vol. 153, p. 49
- Wilson O. C., A Survey of Internal Motions in the Planetary Nebulae., *ApJ*, 1950, vol. 111, p. 279
- 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

Yuan H.-B., Liu X.-W., Péquignot D., Rubin R. H., Ercolano B., Zhang Y., Three-dimensional chemically homogeneous and bi-abundance photoionization models of the ‘super-metal-rich’ planetary nebula NGC 6153, *MNRAS*, 2011, vol. 411, p. 1035

Apêndice

Apêndice A

NGC 2440: A MORPHO-KINEMATICAL MODEL

NGC 2440 : A MORPHO-KINEMATICAL MODEL

P.J.A. Lago and R.D.D. Costa

IAG, USP, Brazil

Received January 26 2016; accepted June 2 2016

RESUMEN

Modelamos la estructura en 3D y los diagramas posición-velocidad de NGC 2440, con el objeto de describir la morfología de este objeto, especialmente la de su región central. Empleamos espectros de alta resolución, imágenes del HST y diagramas P-V para reproducir la estructura en 3D de la nebulosa, usando SHAPE. El mejor modelo es un toro rasgado en tres sitios por la interacción con el medio circundante, ya sea vientos o campos radiativos. Se obtuvieron ángulos de orientación de 27 ± 5 y -5 ± 3 grados para las componentes bipolares situadas en ángulos de posición de 85 y 35 grados, respectivamente. No fueron necesarias otras componentes bipolares para modelar las características observadas. Con el campo de velocidades que derivamos se obtiene una distancia de 1.8 ± 0.5 kpc para esta nebulosa. Estos son los primeros resultados obtenidos para NGC 2440 mediante modelos en un entorno 3D.

ABSTRACT

The 3D structure and position-velocity (P-V) diagrams of NGC 2440 were modeled aiming to describe the morphology of this object, specially its core. High resolution spectra, HST images and P-V diagrams were used to reproduce the 3D structure of the nebula using SHAPE. The best model for the nebula is a torus torn apart in three pieces by interaction with the surrounding medium, either winds or the radiation field. Orientation angles of 27 ± 5 and -5 ± 3 degrees were derived for the bipolar components at PA of 85 and 35 degrees respectively. No additional bipolar lobes were required to model the observed features. Using our velocity field, a distance of 1.8 ± 0.5 kpc was derived for the nebula. These results are the first obtained for NGC 2440 from modeling in a 3D environment.

Key Words: ISM: kinematics and dynamics — methods: numerical — planetary nebulae: individual (NGC 2440) — techniques: spectroscopic

1. INTRODUCTION

The study of planetary nebulae morphology is the key to understand their formation process; using specific information for a given object, it is possible to apply a morpho-kinematical model, taking into account projecting effects and obtain physical properties such as kinematical age, that can be derived from the velocity field and the observed geometry. Morphological classification schemes for PNe started very early; the first one was developed using a sample of 78 PNe by Curtis (1918). The first schemes were based only on nebular shapes, later on other schemes were proposed, based on the central star position in the HR diagram, such as that by Stanghellini et al.

(1993). Present works consider also projection effects to better describe the morphological features of the objects.

Aiming to improve the understanding of projection effects on morphological classification, Zhang & Kwok (1998) have developed a modeling method that produces automatically, based on a set of parameters, possible scenarios for elliptical PNe. Similarly, Chong et al. (2012) have shown that multipolar PNe are more common than previously supposed. They based their results on a set of simulations, varying the angles between three identical bipolar components. A diversity of morphologies were generated by projection effects and relative po-

sition of each bipolar component, so their conclusion was that the quantity of multi-polar PNe had been underestimated.

The origin of multi-polar structures in planetary nebulae is, in general, associated to binarity of the central star, as described by Soker & Livio (1994). In this scenario the object is constituted by a close binary system whose members share a common envelope, and the mass ejections occur preferentially in the orbital plane. In view of this effect, densities in the orbital plane and at the poles are different, and when the hot core is exposed, a fast and diluted wind interacting with the medium shapes the nebula.

The multi-polar structure can be explained by multiple ejection episodes, with different axes of symmetry; in planetary nebulae this kind of ejection is described by a mechanism known as bipolar rotating episodic jets (BRET) that consist of a collimated flow that could produce shock-excited regions (Guerrero et al. 2013). These regions are associated to the front of the outflow, which in turn is episodic; observations of these phenomena suggest that there exists precession or rotation in the jet (Lopez et al. 1995).

There is, however, an alternative to explain a multi-polar structure without the BRET mechanism. Steffen et al. (2013) performed a numerical simulation aiming to create a multi-polar structure in a PN without BRET; their work showed the possibility of forming this kind of structure by the interaction of expanding shells, each one with a different density, with the outer shell containing a filamentary distribution of mass. Bipolar and starfish PNe are well reproduced using this technique, but it is important to point out that these two scenarios can coexist. The latter is more suitable to explain not well collimated structures, complementing the BRET hypothesis.

NGC 2440, a multi-polar object with at least two bipolar components, is a well known planetary nebula. López et al. (1998) described in great detail its main structure and some of the substructures. There are clearly two bipolar structures; the largest one has a position angle (PA) of 85 degrees, and the smallest a position angle of 35 degrees, so that they are tilted 50 degrees apart. A third bipolar component was also suggested but, due the lack of observational evidence, its existence remains speculative; this younger bipolar component would have a PA of 60 degrees, an inclination based on the position of two central knots, and would be tilted with respect to the other bipolar components.

An important feature of NGC 2440 is the molecular emission, in particular, that of the bipolar component with PA of 35 degrees. This emission, measured in CO J=3-2, coincides with the optical component, and the maximum line fluxes are associated to the knots at the extremity of the bipolar component, as described by Wang et al. (2008), who measured molecular outflows with different velocities. In the core region, the presence of fast CO components points to the destruction of a neutral and dense torus by the outflow at the moment of the formation of the lobes.

The central region is complex and rich in microstructures. An image analysis displays the core surrounded by a toroidal configuration, associated to many radial filaments (López et al. 1998), a description that agrees well with the results of Richer et al. (1991), that suggest the presence of dense and small clumps surrounded by an optically thinner medium.

The SHAPE modeling tool (Steffen et al. 2011) allows the reconstruction of the 3D structure of a planetary nebula in great detail, taking into account projection effects, and using high angular resolution images such as those from the Hubble Space Telescope (HST), and high resolution spectra. This kind of modeling has shown results in good agreement with observational data, revealing important morpho-kinematic features for many objects such as those described by García-Díaz et al. (2012), Steffen et al. (2014) and Rubio et al. (2015), among others.

The goal of the present work is to present the first model based on SHAPE for NGC 2440. This model attempts to reproduce the overall 3D structure of the nebula, improving current models for this object. In § 2 the observational data used in this work are described; in § 3 the setup of the modeling tool for the simulations is discussed; in § 4 and 5 the simulation results are compared to the observational data and the morphology of the nebula is discussed, and finally, in § 6 our conclusions are drawn.

2. OBSERVATIONAL DATA

The San Pedro Mártir (SPM) Kinematic Catalogue of Planetary Nebulae is a large and specialized survey of PNe, consisting of a database of high resolution long slit spectra of galactic and extragalactic PNe. The instruments used to get the data were the Anglo-Australian 3.9m and San Pedro Mártir 2.1m telescopes. Details of the survey are described by López et al. (2012) and the data are available on-

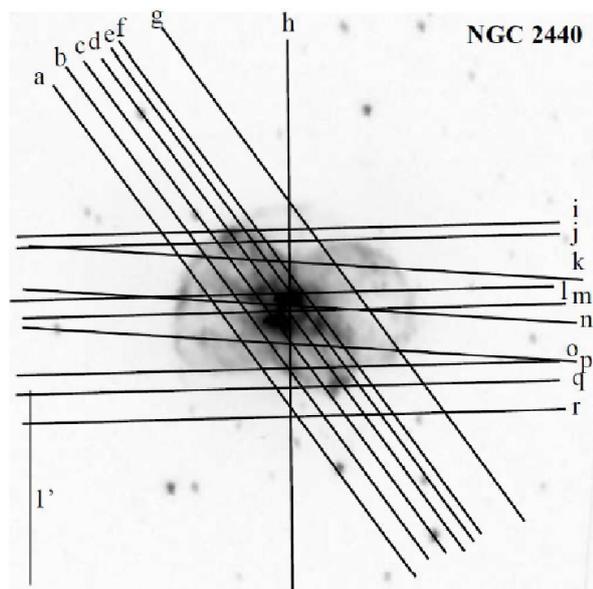


Fig. 1. Slit positions from SPM survey for NGC 2440.

line¹. This database is an excellent source in view of the high uniformity of the data, as well as its high instrumental sensibility.

To construct the P-V diagrams for NGC 2440, each frame was corrected by the systemic velocity, adopting the value of 65 km/s from López et al. (1998). Figure 1 shows the slit positions for NGC 2440 available in the SPM catalogue.

3. MODELING THE 3D STRUCTURE

The aim of the 3D morpho-kinematic model is to describe the structure of NGC 2440, taking into account the projection effects, and therefore improving previous results such as those by López et al. (1998), verifying the orientation angles, as well as describing in more detail the central region.

The SHAPE modeling tool allows to build a model, based on a mesh model inside a 3D environment, in order to analyse the morphology and kinematics of PNe taking into account projection effects. The structure is build manually, an approach similar to that used in graphical computation softwares, as described by Steffen et al. (2011). The construction of the structure is based on the interpretation of observational data: high resolution long slit spectra, and high angular resolution images. Note that SHAPE does not calculate the radiative transfer equation for the problem. The geometry of

NGC 2440 was established based on [NII] HST images. Figure 2 displays the HST image and the mesh model used in this work for comparison purposes.

The model is evaluated by comparing the observational data directly with the SHAPE output, which consists of two rendered images, one simulating the photometric image of nebula and the other simulating the P-V diagram derived from a long slit spectrum. The aim of our work was to reproduce the P-V diagrams from [NII] lines, the spectral range for which we have the best sampling. SHAPE also provides tasks that simulate the observational conditions, such as seeing and instrumental setup.

SHAPE modeling requires a mesh model and a set of physical parameters such as velocity fields and densities distributions, derived from the observational data. In general, the larger the database, the better the model, because of the increase of the number of independent constraints.

An important aspect of the present model is that it considers the nebula as formed by symmetrical structures. The reproduction of small asymmetries like cavities, filaments and small knots that can be seen in the optical images is out of the scope of this paper. The high angular resolution images required for the modeling of NGC 2440 were selected from the HST Wide Field Planetary Camera (WFPC2) archive, available in different filters³. It is important to emphasize that the HST images, in particular those acquired using filter F658N, were used only as reference for the construction of the mesh model. The reproduction of the photometric images in all their details, including the complex filamentary structures existing in this nebula, is not the goal of the present work, since our model mainly aims to describe the P-V diagrams.

The two bipolar components were considered to be symmetric and each position angle was adjusted in order to reproduce the reference image. Besides these two main components, five other features were also reproduced: two knots, clearly visible at the edges of the smaller bipolar component at PA 35 degrees, as already shown by López et al. (1998), and the central region subdivided in three, non aligned, torus pieces.

The choice of the velocity field was an important step of the modeling process since the shape of the P-V diagram will be affected by this parameter, and it should reproduce the observed data, in combination with the geometry, taking also into account the projection effect.

¹<http://kincatpn.astrosen.unam.mx/index>.

³<http://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html>

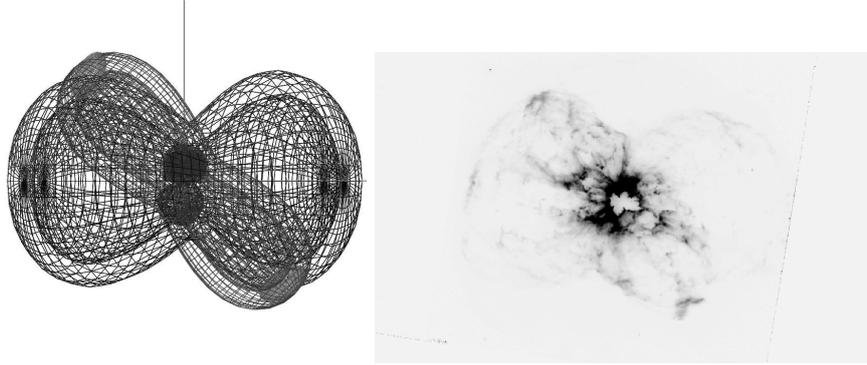


Fig. 2. Mesh model for NGC 2440 built with SHAPE (left) and reference HST image (right).

TABLE 1
MODEL VELOCITY FIELD PARAMETERS

Component	$k(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	r_o (arcsec)
lobe 85	184	34.0
lobe 35	160	30.1
knot N	80	29.4
knot S	84	30.8
torus piece I	53	10.5
torus piece II	44	7.8
torus piece III	52	9.1

The adopted velocity fields were linear, increasing with the distance to the core. Table 1 shows the list of parameters of each velocity field used for the different components, and the expression for the velocity field is shown in equation 1, where r is the distance to the center, r_o is the scale factor (in general, the size of structure) and k is a constant. It should be emphasized that for the knots r_o is the distance to the center, not the size of the structure.

We chose a linear field, which implies a ballistic outflow assumption, based not only in its simplicity but also on previous work (Akras & Steffen 2012, Huckvale et al. 2013, Clyne et al. 2015 and Akras et al. 2016), that uses the same approach. Steffen et al. (2014) use a non-linear velocity field to describe part of their target object (the Homunculus nebula in Eta Carinae), but in this case the field is almost linear and the aim is to describe in great detail the deviations from linear fields. Schönberner et al. (2014) conclude that the velocity fields are almost never linear, but in their specific case the expansion law is a consequence of hydrodynamical codes, which consider the time dependence of velocities. Therefore

the present work adopts, as a first approximation, a linear velocity field, in agreement with those observed for the expansion law in bipolar PNe, as described by Corradi (2004) and Szyszka et al. (2011).

Different density distributions were selected for each component in order to reproduce line contrasts in the P-V diagrams. As mentioned before, equation 1 below represents the expansion law.

$$v(r) = k \frac{r}{r_o} \quad (1)$$

4. RESULTS

Figures 3 to 8 show the kinematical profiles for different slit positions for the [NII] line displayed in Figure 1. In each figure the observed P-V diagram (left) is compared to the simulated one (right); the horizontal axis represents the heliocentric velocity. Since SHAPE produces a model in the reference frame of the PN, the horizontal axis represents the expansion velocity corrected by the proper motion, such that both observational and simulated data are on the same reference frame.

Comparing the results of the simulations and the observed kinematical line profiles, it can be seen that the main structures of NGC 2440 were reproduced, in a good agreement with the observational data. Optimization and choice of the best model were made by comparing the results and the observational data.

We found inclinations of the symmetry axes of the bipolar lobes with respect to the plane of the sky, respectively of 27 ± 5 and -5 ± 3 degrees for the lobes at PA 85 and PA 35 degrees.

The observational data, in particular for slit positions “d” and “e”, suggest the presence of a toroidal structure surrounding the core of the planetary nebula. This torus is inside the inner bipolar struc-

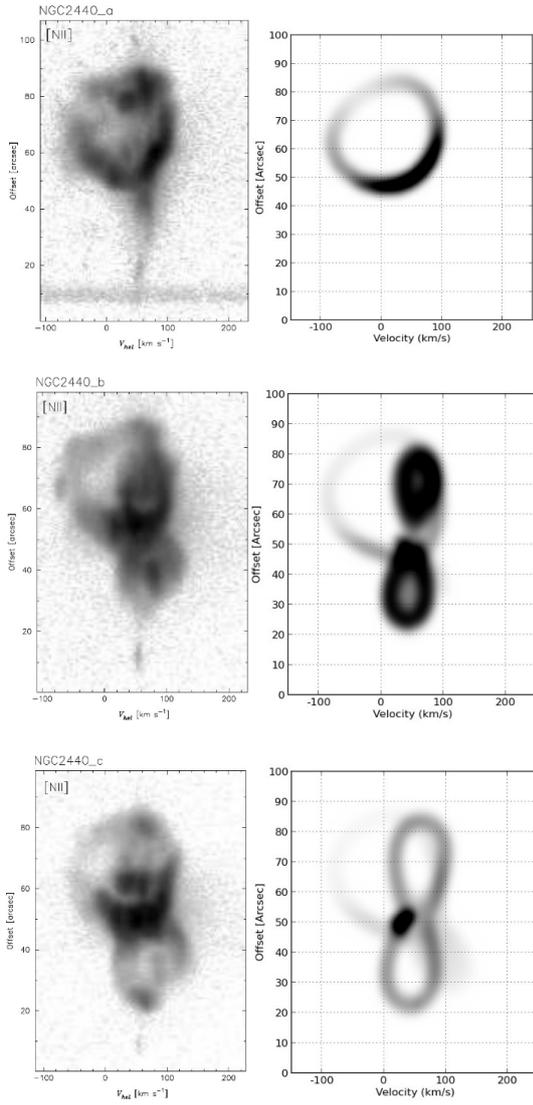


Fig. 3. P-V diagrams for slit positions a, b, c for NGC 2440. Left panel: observed profiles (from the SPM survey). Right panel: model outputs. For the observed diagrams, values on the horizontal axis represent the heliocentric velocity.

ture at PA 35 degrees. However, it is very hard to distinguish such a feature in the high angular resolution images from HST, as shown by López et al. (1998), as well in Figure 2, due to filaments and “secondary” morphological structures. Based on the observational data and on our model, we conclude that a toroidal structure is indeed there, and that it is strongly interacting with the environment or the radiation field. The torus is subdivided in at least three parts, as can be seen in Figure 4, the P-V diagram

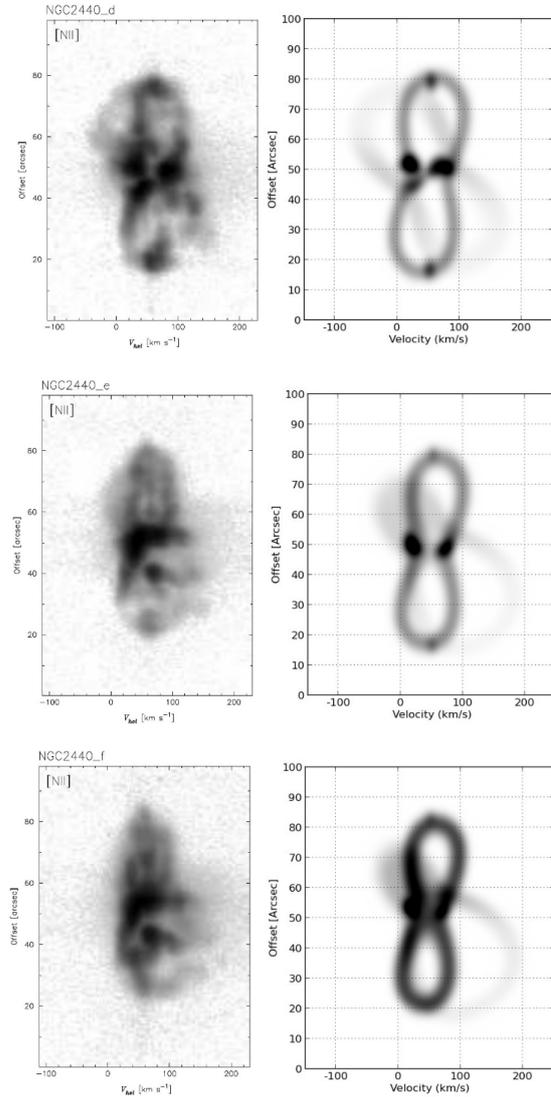


Fig. 4. Same as Figure 3, for slit positions d, e and f.

of slit position “d”. This scenario is suggested by the diagram since the three observed substructures cannot be explained by a simple torus, in agreement with the results derived by Wang et al. (2008).

Other small structures, such as filaments and small knots, mainly those close to the core, were disregarded in the model due the lack of a clear spectral signature in the kinematic profile and very complex and undefined borders in the HST images.

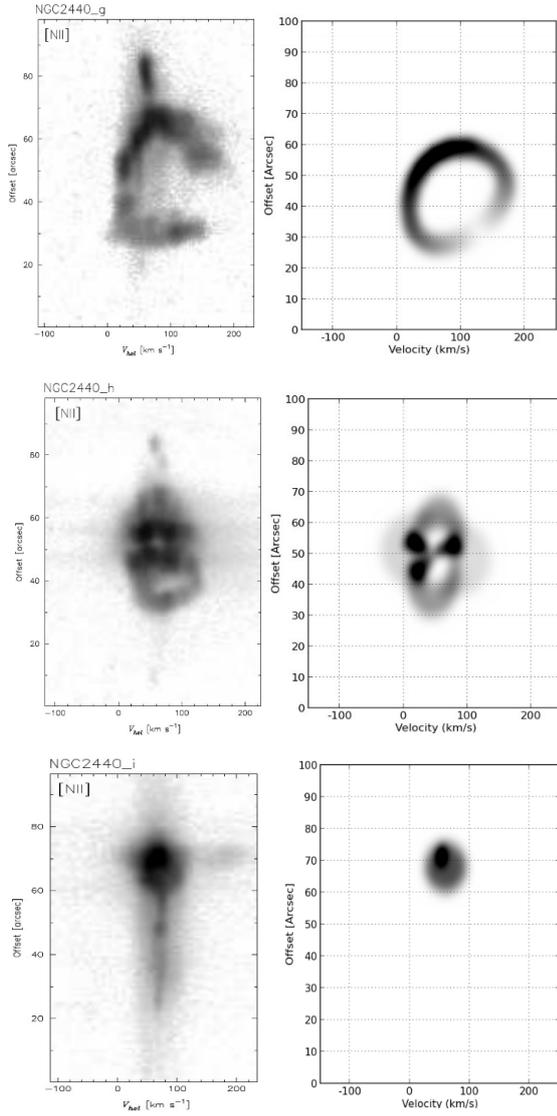


Fig. 5. Same as Figure 3, for slit positions g, h and i.

5. DISCUSSION

5.1. Nebular Structure

The orientation angles of the bipolar components were extracted directly from the 3D model and measured with respect to the plane of sky. We found inclinations of 27 ± 5 and -5 ± 3 degrees, for bipolar components with PA of 85 and 35 degrees respectively. The presented model confirms that the bipolar lobe with PA 35 is practically in the plane of the sky. These values are different from the previous values of 40 and 0 degrees derived by López et al. (1998). This difference is probably due to the fact

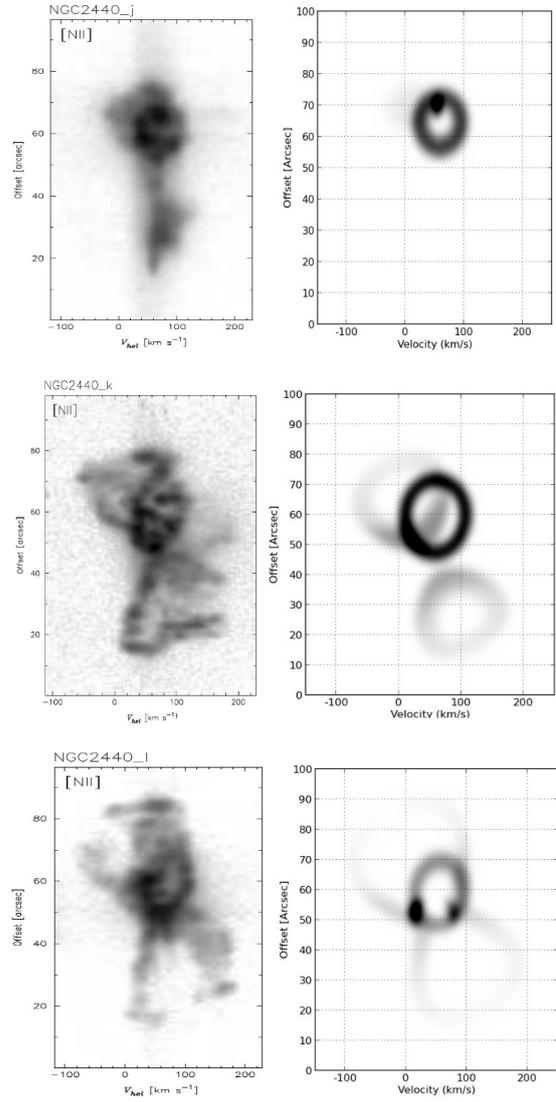


Fig. 6. Same as Figure 3, for slit positions j, k and l.

that previous results were derived directly from the images, and may be strongly affected by projection effects.

Looking at the big picture, excluding substructures like small knots and filaments, the model is able to reproduce the P-V diagrams for all the slit positions available in the SPM catalogue, as can be seen in Figures 3 to 8. All the spectral signatures of the main components are well reproduced in the simulated P-V diagrams. Slit position “h” shows, in the P-V diagram, some substructures that are not present in our results, which is probably due to the strong segmentation in the core region, rich in fila-

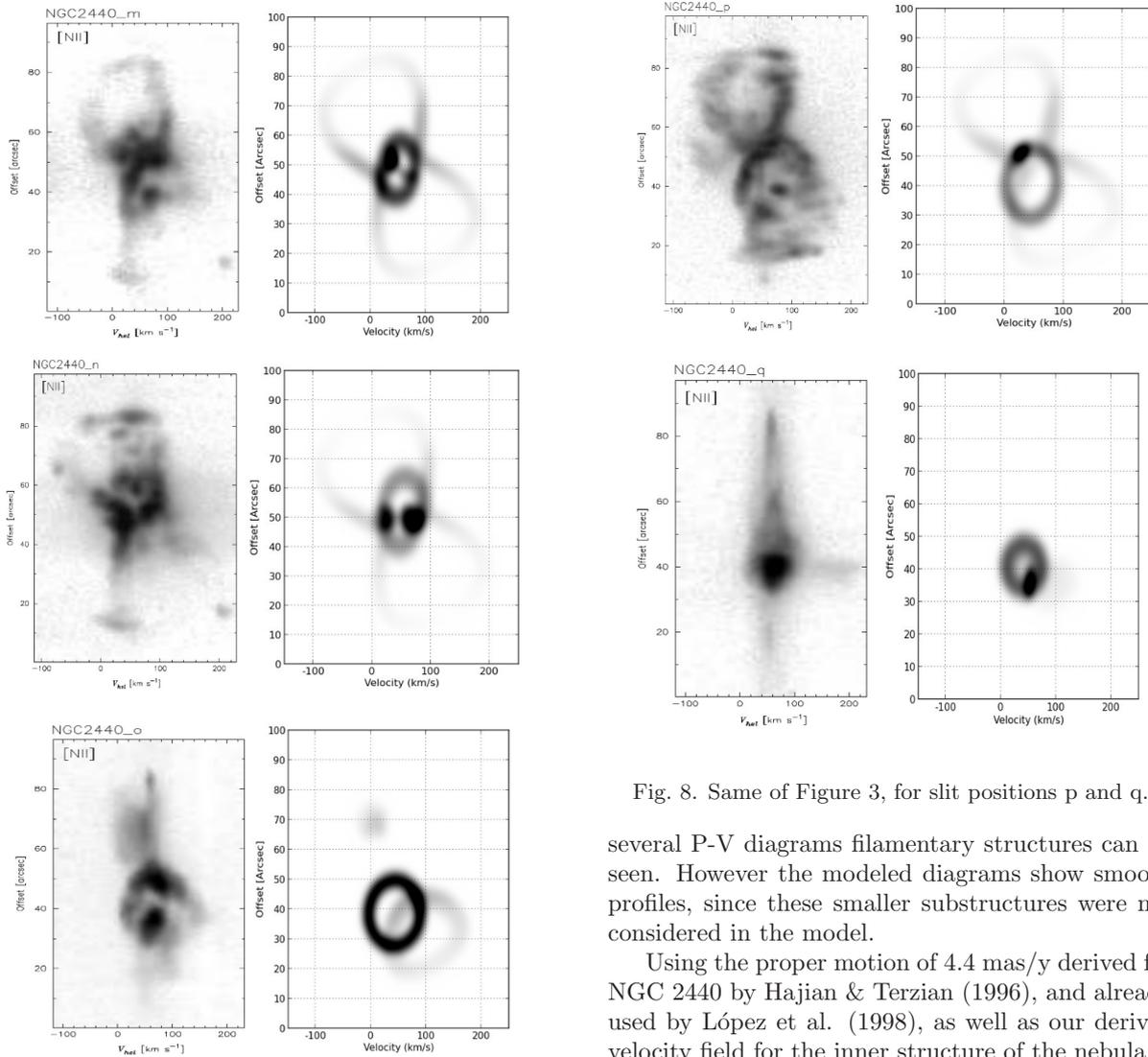


Fig. 7. Same of Figure 3, for slit positions m, n and o.

Fig. 8. Same of Figure 3, for slit positions p and q.

ments and other structures; these could have formed by the same processes responsible for the segmentation of the toroidal structure.

Comparing simulated and observed P-V diagrams, it is possible to see that the hypothesis of the segmented torus is in agreement with the data. However, it is not possible to speculate about small segments of this torus, due to the lack of observational evidence. Therefore, substructures of the core, in this scenario, could not be linked with the torus.

The observational data show some irregularities in the structure of the bipolar components, in particular that at PA 85 degrees, as can be seen in Figure 5 for the P-V diagram at slit position “g”. In

several P-V diagrams filamentary structures can be seen. However the modeled diagrams show smooth profiles, since these smaller substructures were not considered in the model.

Using the proper motion of 4.4 mas/y derived for NGC 2440 by Hajian & Terzian (1996), and already used by López et al. (1998), as well as our derived velocity field for the inner structure of the nebula, a distance of 1.8 ± 0.5 kpc to the nebula was estimated, based on equation 1 from Akras & Steffen (2012). This value agrees with the result from Gathier et al. (1986) who derived a distance of 2.19 ± 0.39 kpc for this nebula.

5.2. The Origin of the NGC2440 Morphology

As discussed in the Introduction, there are two theoretical scenarios to explain the origin of multipolar planetary nebulae, presented by Lopez et al. (1995) and Steffen et al. (2013). NGC 2440 shows at least two well defined bipolar components, and has other structures compatible with a BRET: (i) the torus and the relative position of the bipolar component at PA 35 to it; (ii) the possible presence of shock ionized structures, such as two knots. Moreover, according to Soker (1997) the central star is classi-

fied as binary, and all conditions for the formation of the nebular structure by BRET exist. Concerning the knots, low ionization lines such as [OI], [NII] and [SII] are strong indicators of shocks interaction (Cuesta & Phillips 2000). The high expansion velocities of these structures support this hypothesis.

Based on previous results, mainly those of López et al. (1998), and on the observational data combined with our models, it can be said that the BRET mechanism is still the best scenario to explain the origin of multipolar nebulae such as NGC 2440. The alternative scenario proposed by Steffen et al. (2013) is excellent to explain the formation of secondary lobes, reproducing structures such as the starfish nebulae or the bipolars with many secondary lobes. However, multipolar nebulae with some, or a high degree of symmetry, are beyond the scope of their work. Therefore, no other acceptable alternative has been proposed to explain the morphology of objects such as NGC 2440.

6. CONCLUSIONS

This work presents the first 3D model generated in a 3D environment for NGC 2440. According to our model, the orientation angles of the bipolar lobes of the nebula with respect to the line of sight are 27 ± 5 and -5 ± 3 degrees, respectively for the bipolar components with PA of 85 and 35 degrees. A distance of 1.8 ± 0.5 kpc to the nebula is derived.

From our models and the observational data we conclude that a segmented toroidal structure is a good description for the inner part of NGC 2440. The model based upon this hypothesis provides a good reproduction of the observed P-V diagrams; therefore, it can be said that a torus, segmented at least in three parts, is in good agreement with the observational data. This result agrees with that of Wang et al. (2008), who detected a molecular outflow in NGC 2440, aligned with the optical bipolar lobes.

The existence of a third bipolar lobe at a PA of 65 degrees, as suggested by López et al (1998) was not confirmed by our model, which was able to reproduce the global structure of the nebulae in a 3D simulation without invoking this additional component in order to reproduce the kinematical profile. However, we reinforce their suggestion that the BRET mechanism is the best alternative to explain the morphological origin of NGC 2440, because of its symmetry.

We wish to thank S. Akras, N. Clyne and D. Gonçalves for many fruitful discussions. We wish to thank also C. Morisset, the referee, whose comments helped us to considerably improve the quality

of the work. We also thank FAPESP for the financial support (Process 2010/18835-3). P.J.A. Lago acknowledges CAPES and CNPq (Process 140803/2014-9) for graduate scholarships.

REFERENCES

- Akras, S., Clyne, N., Boumis, P., Monteiro, H., Gonçalves, D. R., Redman, M. P., & Williams, S. 2016, *MNRAS*, 457, 3409
- Akras, S. & Steffen, W. 2012, *MNRAS*, 423, 925
- Chong, S.-N., Kwok, S., Imai, H., Tafoya, D., & Chibueze, J. 2012, *ApJ*, 760, 115
- Clyne, N., Akras, S., Steffen, W., Redman, M. P., Gonçalves, D. R., & Harvey, E. 2015, *A&A*, 582, A60
- Corradi, R. L. M. 2004, *ASPC* 313, *Asymmetrical Planetary Nebulae III: Winds, Structure and the Thunderbird*, ed. M. Meixner, J. H. Kastner, B. Balick, & N. Soker (San Francisco, CA: ASP) 148
- Cuesta, L. & Phillips, J. P. 2000, *ApJ*, 543, 754
- Curtis, H. D. 1918, *PLicO*, 13, 55
- García-Díaz, M. T., López, J. A., Steffen, W., & Richer, M. G. 2012, *ApJ*, 761, 172
- Gathier, R., Pottasch, S. R., & Pel, J. W. 1986, *A&A*, 157, 171
- Guerrero, M. A., Toalá, J. A., Medina, J. J., Luridiana, V., Miranda, L. F., Riera, A., & Velázquez, P. F. 2013, *A&A*, 557, A121
- Hajian, A. R. & Terzian, Y. 1996, *PASP*, 108, 419
- Huckvale, L., Prouse, B., Jones, D., Lloyd, M., Pollacco, D., López, J. A., O'Brien, T. J., Sabin, L., & Vaytet, N. M. H. 2013, *MNRAS*, 434, 1505
- López, J. A., Meaburn, J., Bryce, M., & Holloway, A. J. 1998, *ApJ*, 493, 803
- López, J.-A., Richer, M. G., García-Díaz, M.-T., Clark, D. M., Meaburn, J., Riesgo, H., Steffen, W., & Lloyd, M. 2012, *RMxAA*, 48, 3
- López, J. A., Vázquez, R., & Rodríguez, L. F. 1995, *ApJ*, 455, L63
- Richer, M. G., McCall, M. L., & Martin, P. G. 1991, *ApJ*, 377, 210
- Rubio, G., Vázquez, R., Ramos-Larios, G., Guerrero, M. A., Olguín, L., Guillén, P. F., & Mata, H. 2015, *MNRAS*, 446, 1931
- Schönberner, D., Jacob, R., Lehmann, H., Hildebrandt, G., Steffen, M., Zwanzig, A., Sandin, C., & Corradi, R. L. M. 2014, *AN*, 335, 378
- Soker, N. 1997, *ApJS*, 112, 487
- Soker, N. & Livio, M. 1994, *ApJ*, 421, 219
- Stanghellini, L., Corradi, R. L. M., & Schwarz, H. E. 1993, *A&A*, 279, 521
- Steffen, W., Koning, N., Esquivel, A., García-Segura, G., García-Díaz, M. T., López, J. A., & Magnor, M. 2013, *MNRAS*, 436, 470

- Steffen, W., Koning, N., Wenger, S., Morisset, C., & Magnor, M. 2011, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17, 454
- Steffen, W., Teodoro, M., Madura, T. I., et al. 2014, *Msngr*, 158, 26
- Szyszka, C., Zijlstra, A. A., & Walsh, J. R. 2011, *MNRAS*, 416, 715
- Wang, M.-Y., Hasegawa, T. I., & Kwok, S. 2008, *ApJ*, 673, 264
- Zhang, C. Y. & Kwok, S. 1998, *ApJS*, 117, 341