ESPECTROSCOPIA DE CAMPO INTEGRAL DO HOMÚNCULO DE η Carinae

Mairan Macedo Teodoro

Sob orientação do

Prof. Dr. Augusto Damineli Neto

Instituto de Astronomia,
Geofísica e Ciências Atmosféricas

Universidade de São Paulo

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

Maio 2005 (a.D.)

Ao meu pai,

Vianor Teodoro.

Resumo

Nesta dissertação são apresentados os resultados obtidos da espectroscopia de campo integral da nebulosa do Homúnculo. As observações foram feitas na banda J, no intervalo de 10620 Å até 12960 Å, utilizando o IFU (*Integral Field Unit*) do espectrógrafo CIRPASS (*Cambridge Infrared Panoramic Survey Spectrograph*), que possui 499 lentes hexagonais. A amostragem espacial é de 0,25"/lente e a resolução espectral, R=3200.

A linha do [Fe II] λ12567 permitiu a identificação de duas estruturas no lóbulo NW que ainda não haviam sido relatadas. Através da tomografia Doppler, essas estruturas indicaram a existência de uma região de baixa densidade localizada no lóbulo NW e que não é visível nas imagens feitas na região óptica. Além disso, o Pequeno Homúnculo também foi identificado através do mapeamento das componentes e também nos mapas de velocidade da linha do [Fe II] 12567.

As regiões polares da nebulosa do Homúnculo (onde ocorre a colisão mais intensa entre o vento da fonte central e a região interna dos lóbulos) são mais opacas do que as paredes dos mesmos. Isso é verificado pela diminuição na intensidade da linha do [Fe II] 12567 no lóbulo SE e pelo aumento desta na linha de visada do lóbulo NW.

O disco equatorial foi observado nas linhas da série do H (Pa β e Pa γ) e na linha do He I λ10830 como uma componente devido à emissões intrínsecas até distâncias superiores às dimensões aparentes do disco que é observado nas imagens feitas na faixa óptica. A linha do [Fe II] 12567 também apresenta uma componente associada ao disco equatorial.

Regiões de baixa densidade localizadas no toro que envolve a fonte central permitem que a radiação ultravioleta escape e excite o gás contido no disco equatorial. O melhor exemplo desse efeito foi detectado pela tomografia Doppler da linha do He I 10830, que revelou uma componente de emissão intrínseca que atinge distâncias superiores à borda aparente do lóbulo NW do Homúnculo, e que foi completamente mapeada pela primeira vez nesta dissertação.

Abstract

The *Homunculus* nebula was mapped using the integral field technique and the results are presented in this dissertation. The observations were obtained in the J band in the range from 10620 Å to 12960 Å using the CIRPASS's IFU, which contains 499 hexagonal lenses. The spatial sampling is 0,25"/lens and the spectral resolution, set to R=3200.

The [Fe II] λ12567 line allowed the identification of two structures in the NW lobe that had not been reported yet. Doppler tomography of this structures revealed a low density region placed in the NW lobe that is not seen in the optical images. Besides, the Little *Homunculus* was also detected both in the mapping of components of the [Fe II] 12567 and in its velocity maps.

In the *Homunculus* nebula, the polar regions (where the shock between the stellar bipolar wind and the internal wall of the lobes is stronger) are more opaque than the lobe walls. This can be verified by the decrease in the intensity of the [Fe II] 12567 in the SE lobe and the enhancement of this line emission in the NW lobe.

Emissions due to the equatorial disc were detected both in the H series (Paβ and Paγ) and the He Iλ10830 as an intrinsic component up to distances greater than the aparent dimensions of the disc seen in the images taken in the optical range. The [Fe II] 12567 also presents the component due to the equatorial emission.

Low density regions in the torus involving the central source allow a beam of radiation to escape to large radii and thereby excite the gas contained in the equatorial disc. The best example of this effect was detected in the Doppler tomography of the He I 10830 line, that revealed an intrinsic emission component which reaches distances larger than the aparent boundary of the NW lobe and was firstly mapped in this dissertation.

Agradecimentos

Quero agradecer, em primeiro lugar, ao meu pai e melhor amigo, Vianor Teodoro, uma pessoa muito carismática da qual eu tenho muito orgulho de ser filho. Obrigado, pai, por sempre estar ao meu lado quando preciso. Dedico esta dissertação integralmente a você, pai.

Agradeço, de maneira especial, a Augusto Damineli pela excelente orientação, pela amizade e pela paciência em responder todas as minhas questões, por mais leigas que fossem.

Agradeço à minha amada Pricila por mudar a minha vida para melhor e ao Muque e Bingu, que tornam as minhas horas de descanso muito mais divertidas. Amo vocês.

Obrigado a toda minha família pelo apoio: Pri, Tati, Zé Pedro, Paula e Marcelo, Bel e Joaquim, Rafa e Duda, Antônia e Baiano, Lúcia e Toninho, Zé e Vicentina, Tito e Vanda.

Aos professores do Depto. de Física da UNESP de Bauru: Vicente, Renato, Chico, Humberto, Sardella, Elisabete, João, Lígia, Momotaro, Pablo, Denise e Rosa. Agradeço à cada um pelo apoio que vocês me deram em uma fase essencial da minha vida.

Obrigado a Daniele, Fernanda, Júlio, Eloana, Alexandre e Lídia, Márcio e Cristiane, Hugo, Eraldo, Inêz, Douglas, Jeferson, Cristiano, Samuel, Bruna, Dani, Sandra e Edu. Vocês são grandes amigos. Nunca me esquecerei de nenhum de vocês.

Não poderia deixar de agradecer aos meus amigos do IAG que me ajudaram nessa empreitada. Obrigado: Tatiana, Aline, Cássio, Zé, Sérgio, Rodolfo, Alberto, Carlos, Leonardo, Fernando, Lys e Eduardo. Cada um de vocês foi essencial para conclusão desta dissertação.

Aos professores do IAG: Ruth, Walter, Laerte, Roberto, Amâncio, Zulema e Cláudia, meu muito obrigado. Aprendi muito com vocês.

Obrigado às funcionárias da Secretaria do Departamento de Astronomia, pela simpatia, rapidez e profissionalismo com que resolveram todos os problemas que lhes encaminhei.

Esta dissertação teve o apoio financeiro do CNPq.

Sumário

1 Introdução 1

1.1 Notas históricas sobre o brilho e o espectro de η Car 1

1.2 O ciclo de 5,5 anos e a natureza binária da fonte central 3

1.2.1 Sumário dos parâmetros conhecidos de η Car 4

1.3 A nebulosa do Homúnculo 5

1.3.1 Mapa do Homúnculo 6

2 Observações e Métodos de Redução 11

2.1 A unidade de campo integral do CIRPASS 11

2.2 Coleta dos dados 13

2.3 Processamento do cubo de dados 15

2.3.1 Leitura e combinação das extensões dos arquivos MEF 16

2.3.2 Identificação das fibras do IFU 16

2.3.3 Remoção de sinais espúrios no detector 17

2.3.4 O fundo de céu na banda J 17

2.3.5 Variações de sensibilidade e transmitância – *Flat fields* 18

2.3.6 A extração espectral 18

2.3.7 A calibração em comprimento de onda 19

2.3.8 Remoção das linhas telúricas 20

2.3.9 Montagem do cubo de dados 21

3 O modelo cinemático do Homúnculo 23

3.1 Descrição do modelo 23

3.2 Identificação das componentes 27

4 Regiões de excitação colisional e o Pequeno Homúnculo 32

4.1 Mecanismos de excitação do Fe II 32

4.2 Espectros típicos do Homúnculo e do material ao seu redor 34

4.3 A razão [Fe II] 12567/Paγ 40

4.3.1 Os ajustes gaussianos 40

4.3.2 Regiões de excitação colisional 42

4.4 Mapas de velocidade da linha [Fe II] 12567 54

4.5 Sobre a natureza da região denominada *Hole* 60

5 Estrutura do Vento de η Car e o '*Feixe*' do He I λ10830 67

5.1 Mecanismos de excitação do He I λ10830 67

5.2 Estrutura do Vento de η Car 68

5.2.1 Perfis ao longo do eixo de simetria ($\phi = 0^o$) 70

5.3 O *Feixe* do He I 10830 75

6 Discussão e Conclusão 80

6.1 Discussões 80

6.1.1 Sobre as regiões de colisão 80

6.1.2 Sobre o *Feixe* e a geometria do vento de η Car 82

6.1.3 Sobre a estrutura do Homúnculo 82

6.2 Conclusões 84

Lista de Figuras

1.1 *Curva de luz histórica de η Car (Humphreys* et al.*, 1999).* 2

1.2 *Variação da largura equivalente da linha do He I 10830 ao longo dos últimos 4 ciclos espectroscópicos (Damineli, comunicação privada).* 3

1.3 *Variabilidade em raios-X de η Car durante os eventos espectroscópicos de 1997,95 e 2003,48 observado pelo satélite RXTE (Corcoran, 2005).* 4

1.4 *Nebulosa do Homúnculo vista pelo telescópio espacial Hubble, utilizando a segunda Câmera Planetária de Campo Amplo (HST/WFPC2).* 6

1.5 *Regiões ao redor da fonte central de η Car e suas respectivas denominações (Morse* et al.*, 1998; Weis* et al.*, 2004). A estrutura identificada por 'difraction spike' é um efeito de difração produzido pelo suporte do espelho do telescópio.* 7

2.1 *Mapa das lentes do IFU do CIRPASS. Esse arranjo é posicionado no plano focal do telescópio. Cada lente coleta a luz de uma região de 0,25"×0,22", que corresponde a largura da lente ao longo do eixo maior e menor, respectivamente (vide texto). Os números relacionam a posição da lente nessa matriz com a posição da fibra na pseudo-fenda. As lentes que apresentam um × não estão ligadas a fibras.* 12

2.2 *Região coberta pelos mosaicos realizados com o IFU do CIRPASS, sobreposta à imagem de η Car obtida com o HST. A região de coleta dos dados relativa ao Homúnculo, delimitada pela linha pontilhada (preto) aparece assimétrica devido a um desalinhamento entre o quadrante Q1 e os demais quadrantes (vide texto). A linha contínua em branco delimita a região Q5. A posição da fonte central está indicada pela cruz no centro da imagem.* 14

2.3 *Regiões do quadrante Q1 e Q2. As barras horizontais e verticais indicam a posição aproximada da fonte central em cada quadrante. O desalinhamento entre o quadrante Q1 e Q2 é visível em (a). Para que a fonte central coincidisse em ambos quadrantes, foi necessário deslocar Q1 13 lentes para a esquerda. O resultado é mostrado em (b). O Norte está para cima e o Leste, para a esquerda.* 15

2.4 *Diferença entre o ajuste feito pelo polinômio durante a identificação das linhas da lâmpada de argônio e o valor obtido no banco de dados do NIST. O desvio médio quadrático é de 0,01 Å.* 20

2.5 *Espectro da estrela-padrão HD 303308 normalizado por um polinômio Chebyshev de ordem 3. (a) Identificação das linhas fotosféricas. (b) Resultado da subtração do ajuste de gaussianas às linhas fotosféricas.* 21

3.1 *Modelos para o Homúnculo: a) aparência projetada do modelo 1 (que se ajusta melhor às velocidades radiais observadas) sobreposta à imagem do HST/WFPC2. b) Mesmo que em a), mas para o modelo 2 (obtido a partir do ajuste à imagem aparente do Homúnculo).* 24

3.2 *Uma linha formada no ponto P, com coordenadas x e z, é detectada como uma emissão intrínseca, i.e., a velocidade radial observada depende apenas do movimento relativo entre o observador e o lóbulo onde a emissão é detectada. A velocidade radial observada para uma emissão refletida também depende do movimento relativo entre observador e lóbulo, entretanto, devido ao fato de ser formada próximo à fonte central, ela depende também do movimento relativo entre a região onde a linha foi formada e o lóbulo onde ela é refletida.* 25

3.3 *Resultados previstos pelo modelo intermediário. (a) Relação entre a posição ao longo do eixo maior e a latitude estelar para ambos os lóbulos. (b) A velocidade intrínseca de expansão dos lóbulos em função da latitude estelar está representada pela linha contínua, enquanto a velocidade radial observada no lóbulo SE e a observada no lóbulo NW estão representadas, respectivamente, pela linha tracejada e pontilhada. (c) A velocidade radial prevista para cada posição ao longo do eixo maior do Homúnculo.* 26

3.4 *Eixos escolhidos para extração espectral. O ângulo ϕ indicado em cada imagem é medido no sentido anti-horário a partir de P.A.=−41,1°. Nas imagens acima, o Norte está para cima e o Leste, para a esquerda.* 28

3.5 *Espectros extraídos dos pontos indicados no topo de cada gráfico, bem como o ângulo ϕ em relação ao eixo de simetria, que aumenta de cima para baixo, nesta figura. A coluna à esquerda apresenta os espectros extraídos do lóbulo SE, enquanto à direita estão os espectros do lóbulo NW.* 29

3.6 *Os símbolos indicam as velocidades radiais observadas ao longo de cada direção para a linha do [Fe II] 12567. As linhas cheias são as previsões do modelo intermediário para as componentes intrínsecas, enquanto as linhas pontilhadas são para as refletidas. Componentes com velocidades* ~ -1000 *km/s, vistas em ambos os lóbulos, são contaminações devido à linha do [Fe II] em 12521 Å.* 30

4.1 *Diagrama de Grotrian do [Fe II] para os 3 primeiros níveis acima do fundamental. As linhas pontilhadas indicam a transição entre os níveis que dão origem às linhas indicadas (12567 e 16435 Å). A linha 12567 Å é emitida na desexcitação do nível* a^4D_7 *para o nível* a^6D_9*, enquanto a linha 16435 Å é emitida a partir do mesmo nível superior, decaindo para o nível* a^4F_9. 33

4.2 *As posições mostradas nesta imagem correspondem às regiões de onde foram extraídos os espectros apresentados na Figura 4.3. Para as posições 0, 1, 2, 3, 5 e 6, a área de cada quadrado corresponde exatamente à área da qual o espectro extraído foi combinado, i.e., cada quadrado tem 0,5×0,5 arcsec, e o espectro extraído de cada um destes é a combinação de 4 lentes adjacentes. Nas posições 4 e 7, o espectro foi obtido somando-se 9 lentes (formando uma matriz de 3×3 lentes), e portanto a área ilustrada por estes quadrados não correspondem exatamente à area de extração.* 35

4.3 *Espectros típicos de algumas regiões.* (0), (1), (2), (3), (5) *e* (6) *foram obtidos ao longo do Homúnculo (*cf. *Figura 4.2). Os espectros apresentados em* (4) *e* (7) *foram extraídos de regiões localizadas fora da nebulosa do Homúnculo. As coordenadas da posição de onde foi obtido o espectro estão indicadas no alto de cada gráfico ($\Delta\alpha$ e $\Delta\delta$). Linhas não identificadas estão assinaladas com um ponto de interrogação, enquanto linhas sem nenhuma identificação são artefatos da subtração das linhas telúricas. A região espectral entre 11150 Å e 12000 Å foi omitida, porque nesta região existem muitas linhas telúricas de absorção e qualquer linha neste intervalo seria suspeita.* 36

4.4 *Largura equivalente das linhas (a) [Fe II] 12567 e (b) Pa γ ao longo do Homúnculo. Em (b), no lóbulo SE, a região delimitada pela linha tracejada (identificada por 'Persist.') apresenta uma queda brusca na largura equivalente. Este é um efeito instrumental conhecido como 'persistência' (vide texto). O quadrado preto no centro indica aproximadamente a região saturada. Para melhor visualização, o intervalo da grade de coordenadas é de 1". O Norte está para cima e o Leste, para a esquerda.* 41

4.5 *Razão entre as linhas [Fe II] 12567 e Paγ. A escala de cores foi escolhida de maneira a ressaltar as regiões onde a colisão é o mecanismo responsável pela excitação da linha [Fe II] 12567.* 42

4.6 *Identificação das regiões de colisão da Figura 4.5. Os quadrados indicam a área de onde foram extraídos os espectros apresentados na Figura 4.8 e 4.9.* 43

4.7 *Estrutura proposta por Smith et al. (2003) para os lóbulos e o disco equatorial. Protegido da colisão entre o vento bipolar da fonte central e a parede interna de cada lóbulo, o H_2 encontrar-se-ia na parte externa do Homúnculo, juntamente com a poeira fria ($\sim$ 140 K). Segundo este cenário, a temperatura na região de colisão é de cerca de 200 K. É aí que se localizaria o [Fe II] 12567. O material contido no plano equatorial conteria poeira quente (> 250 K).* 44

4.8 *Espectros da linha do [Fe II] 12567 extraídos das posições 1 e 4, indicados na Figura 4.6 (região R1 e R4, respectivamente). Cada componente da linha está identificada por um traço vertical, que indica a velocidade determinada a partir de ajustes gaussianos.* 46

4.9 *Espectros da linha do [Fe II] 12567 extraídos das posições 2 e 3, indicados na Figura 4.6 (região R2 e R3, respectivamente). Cada componente da linha está identificada por um traço vertical, que indica a velocidade determinada a partir de ajustes gaussianos (vide texto).* 47

4.10 *Identificação de algumas das regiões localizadas fora do Homúnculo e suas respectivas nomenclaturas.* 49

4.11 *Regiões de excitação colisional fora do Homúnculo. A escala de cores na imagem à direita foi calibrada de maneira a realçar as regiões onde o mecanismo responsável pela emissão é a colisão. Na imagem à esquerda estão sobrepostas as linhas de contorno das regiões identificadas na imagem à direita e as posições de onde foram extraídos os espectros da Figura 4.13. A área de cada quadrado indica exatamente a região de onde foram combinados os espectros (0,75"×0,75"). Em ambas as imagens, a posição da fonte central está marcada pela cruz. As duas imagens não estão na mesma escala.* . 50

4.12 *Contornos de fluxo de raios-X sobrepostos à imagem óptica de η Car (Weis* et al.*, 2004). As linhas correspondem à imagem obtida no intervalo de energia de 0,5 – 1,5 keV pelo CHANDRA ACIS-I. Um dos picos de emissão corresponde exatamente com a S Condensation (indicada pela linha tracejada).* 50

4.13 *Espectros extraídos das posições localizadas fora do Homúnculo indicados na imagem à direita na Figura 4.11. (a) e (b) SE cap; (c) e (d) S ridge; (e) S Cond.; (f) e (g) NW cap e (h) NN bow. Foram combinadas 9 lentes para aumentar o S/N. A coordenada de cada posição está indicada no topo de cada espectro.* 51

4.14 *Ajustes gaussianos aplicados às componentes detectadas fora do lóbulo SE, na região denominada SE cap. (a) Ajuste do espectro extraído da posição 1 na Figura 4.11. (b) Ajuste do espectro extraído da posição 2 da mesma figura. Nos painéis (a) e (b) são mostrados 3 gráficos: o espectro extraído da posição indicada por $\Delta\alpha$ e $\Delta\delta$ sobreposto ao ajuste (primeiro gráfico); cada uma das componentes ajustadas, mostradas separadamente e suas respectivas velocidades (segundo gráfico) e o resíduo do ajuste (terceiro gráfico), onde é apresentado também a variância (Var), o desvio padrão (StD) e o valor de χ^2 do ajuste. A coincidência do nome dado às componentes em posições diferentes não significa que sejam a mesma (e.g.: a componente A na posição 4 não é a mesma que a da posição 6 ou 7). A coordenada da posição está indicada no canto superior do primeiro gráfico.* 52

4.15 *Idem à Figura 4.14 mas aplicado às posições 6 e 7 da Figura 4.11.* 53

4.16 *Mapa bidimensional de velocidades da linha do [Fe II] 12567 ao longo do eixo maior de simetria do Homúnculo. As linhas pretas contínuas representam as velocidades radiais previstas pelo modelo discutido no Capítulo 3 para componentes originadas de emissões intrínsecas nos lóbulos. As linhas pretas pontilhadas representam as velocidades radiais das componentes provenientes de emissões refletidas nos lóbulos. As linhas brancas tracejadas representam 'cortes' feitos no cubo de dados em uma dada velocidade. O resultado obtido desses 'cortes' é mostrado na Figura 4.17, onde, para cada velocidade, pode-se observar a intensidade da linha em relação ao continuum local. A região coberta pela tarja preta está saturada (±1").* 55

4.17 *Mapas de velocidades radiais. O intervalo de velocidade entre uma imagem e a outra é um múltiplo de 54 km/s (1 pixel). A região bloqueada pelo quadrado preto está saturada.* 56

4.18 *Imagem da linha do [Fe II] 12567 em $\approx$ 0 km/s. O lóbulo SE do Pequeno Homúnculo está marcado com a linha amarela. A região delimitada pela linha preta tracejada está correlacionada com a Purple Haze (ver texto).* 58

4.19 *Largura equivalente da linha do [Fe II] 12567. A escala de cores está em Å. As regiões de colisão no lóbulo NW estão identificadas por EI (estrutura mais interna) e EE (estrutura mais externa, mas ainda dentro do Homúnculo).* 59

4.20 *Imagens obtidas por Smith* et al. *(1998) nos comprimentos de onda indicados. (a) e (b) Infravermelho próximo; (c) até (g) infravermelho médio e (h) imagem obtida pelo HST para comparação.* 61

4.21 *(a) Imagem do Homúnculo em 12,6 μm. A escala foi escolhida de modo que regiões com baixa emissão são azuis e as regiões com alta emissão, vermelhas. A região indicada como 'sombra' é, de fato, a projeção de uma sombra no lóbulo SE (vide texto). (b) Sobreposição da imagem obtida pelo HST e os contornos da imagem em 12,6 μm (Figura 4.20(f)). A região no lóbulo SE conhecida como hole coincide com a baixa emissão térmica em 12,6 μm. Os contornos indicam uma região homóloga no lóbulo NW que não é visível na imagem do HST.* 62

4.22 *Mapas de velocidade do [Fe II] 12567. A cruz marca a posição de onde seria o pólo do lóbulo SE segundo o modelo de Davidson* et al. *(2001). A região próxima à cruz, delimitada pela linha preta tracejada é a região conhecida como hole. A região bloqueada pelo quadrado preto está saturada.* 63

4.23 *Esquema do que é visto nos mapas de velocidade. Cada parte do Homúnculo possui uma determinada velocidade radial, que é a mesma velocidade medida em uma linha de emissão intrínseca como a do [Fe II] 12567.* 64

4.24 *Mapas de velocidade. O intervalo de velocidade entre uma imagem e a outra é de ≈54 km/s (1 pixel). A região bloqueada pelo quadrado preto está saturada.* 65

4.25 *Comparação entre a localização das regiões de baixa emissividade em 2 comprimentos de onda diferentes sobrepostas à imagem do HST. Os contornos feitos com linhas pretas contínuas foram obtidos da imagem de 12,6 μm, enquanto as linhas azuis contínuas indicam a posição onde não foi detectado colisão na linha do [Fe II] 12567 e cujas coordenadas foram determinadas a partir da imagem do HST. As linhas vermelhas tracejadas foram obtidas pela subtração/acréscimo de uma lente (0,25") às coordenadas da região delimitada pelas linhas azuis.* 66

5.1 *Diagrama de Grotrian do He I para os níveis 2, 3 e 4. As linhas pontilhadas indicam a transição entre os níveis que dão origem às linhas indicadas (em Å).* 68

5.2 *Modelo do Homúnculo segundo Davidson* et al. *(2001). A posição ao longo da nebulosa está relacionada com latitude estelar, medida em relação ao plano equatorial. Em (a) e (c), são mostradas as aparências do modelo visto sob um ângulo de inclinação $i = 90°$ e $i = 41°$, respectivamente. A relação entre a posição ao longo da fenda e a latitude estelar para cada ângulo de inclinação pode ser visto em (b) e (d). A linha contínua azul representa a posição da fenda ao longo do Homúnculo, enquanto a cruz vermelha (em (a) e (c)) e a linha tracejada (em (b) e (d)) marcam a posição da fonte central.* 69

5.3 *Perfil da linha do He I 10830, Pa γ, [Fe II] 12567 e Pa β ao longo do Homúnculo para as posições indicadas na imagem superior. ϕ é o ângulo de deslocamento do eixo de extração dos espectros em relação ao eixo maior de simetria (que são coincidentes nesta imagem). Os espectros tracejados estão saturados enquanto os que possuem a mesma latitude ($\approx 60^o$) estão indicados por uma linha mais grossa. A escala vertical é logarítmica.* 71

5.4 *Espectros extraídos a uma mesma latitude ($\approx 60^o$; c.f. Figura 5.2) para ambos os lóbulos NW (linha vermelha) e SE (linha azul). As linhas de reflexão (He I, Pa γ e Pa β) foram corrigidas pela velocidade de expansão do Homúnculo prevista pelo modelo de Davidson et al.. A linha tracejada indica que o pico da linha Pa β está saturado. A componente em emissão deslocada para o azul observada na linha do He I 10830 e a componente do [Fe II] 12567 identificada por um pequeno traço vertical (ambas detectadas apenas no lóbulo NW) serão discutidas na seção 5.3.* 72

5.5 *Razão entre o espectro do lóbulo NW e o obtido do lóbulo SE extraídos da mesma latitude estelar. O lado azul do perfil da linha do He I 10830 é influenciado pela componente em emissão do lóbulo NW, causando a falsa impressão de existir um excesso do lado azul da linha do He I no lóbulo NW.* 74

5.6 *Perfil da linha do He I 10830 ao longo do eixo maior de simetria no lóbulo NW. Os espectros em negrito (posição 0 até 14) foram extraídos do Homúnculo, enquanto os espectros com traçado mais fino foram obtidos da região externa ao lóbulo NW.* . . . 76

5.7 *Perfil da linha do He I 10830 extraído a 4"NW da fonte central. As componentes intrísecas estão identificadas por 1, 2 e 3. A componente 3 é emissão refletida no lóbulo NW. O 'ombro' vermelho na linha do He I é devido à emissão do [Fe II] 10863,10872, enquanto na Pa β, o 'ombro' é devido ao [Fe II] 12897.* 77

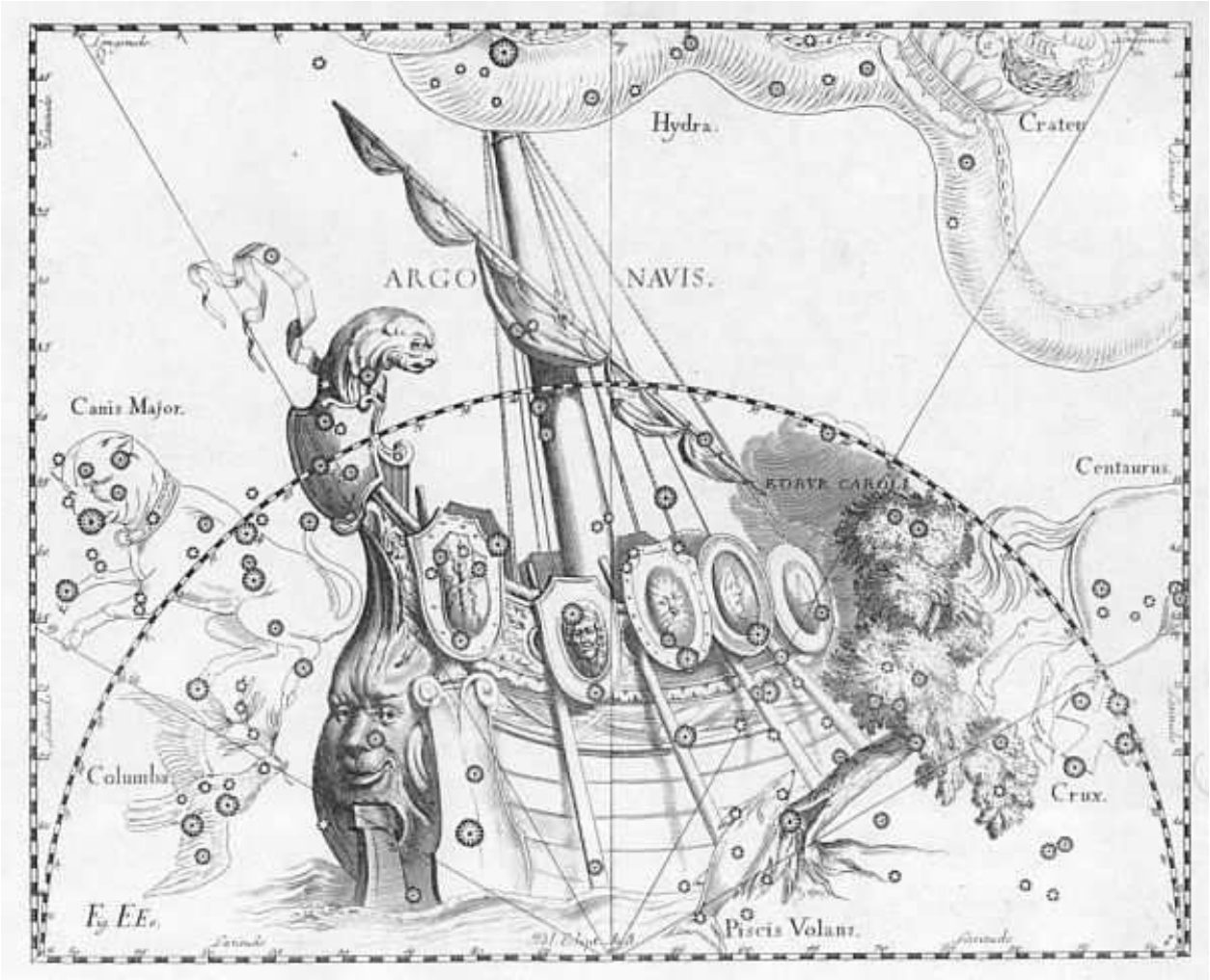
5.8 *Mapa de velocidades da linha do He I 10830. A linha contínua delimita a região do Paddle, enquanto a linha tracejada é a 'continuação' do Paddle, i.e., a linha tracejada delimita o ângulo compreendido pelo Paddle para distâncias maiores que a região visível deste.* 78

5.9 *Perfil de algumas linhas ao longo da região enumerada na imagem superior. A região coberta pelo ângulo de abertura do Paddle é ilustrada pela linha vermelha. A região delimitada pela linha violeta coincide com parte da Purple Haze, responsável pelo excesso de emissão ultravioleta observado nas imagens do HST (Morse* et al.*, 1998; Smith & Morse, 2004). A região onde o Feixe é observado está delimitada pela linha azul.* . . 79

6.1 *Estrutura proposta para o Homúnculo, segundo os resultados apresentados nesta dissertação. O vento estelar colide com a região polar de cada lóbulo da nebulosa com velocidades intrínsecas de 600 km/s até 1000 km/s, enquanto as paredes (linhas tracejadas) colidem com um vento mais lento (no máximo 500 km/s).* 83

"Jason asked Argus, a master shipbuilder,
to build him a great ship with fifty paddles.
Then he sent envoys to every palace in Greece,
asking for volunteers to help capture the Golden Fleece.
The ship was called the Argo, and the fifty volunteers,
called Argonauts."

Jason and the Argonauts



Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo farei uma abordagem sobre as observações históricas de η Car e também uma discussão sobre as regiões ao redor de η Car e suas respectivas nomenclaturas.

1.1 Notas históricas sobre o brilho e o espectro de η Car

A Figura 1.1 apresenta a curva de luz de η Car dos últimos 400 anos. Existem anotações sobre o brilho de η Car desde o ano de 1600. Entretanto, até as observações de John Herschell em 1837, as magnitudes não são muito precisas. A estrela parece ter oscilado entre a quarta e segunda magnitude entre 1600 e 1822. O naturalista inglês John Burchell, em visita ao Brasil, notou em 1827, que a estrela estava mais brilhante que nos registros anteriores e parecia variar fortemente. Suas anotações foram enviadas a John Herschell, na África do Sul, que iniciou uma série de observações visuais de boa precisão, com base em uma seqüência de estrelas de comparação. Esse registro inclui a chamada Grande Erupção de 1843, quando atingiu V≈ -1, tornado-se a segunda estrela mais brilhante no céu (Humphreys *et al.*, 1999). A idade cinemática do Homúnculo coincide, com excelente precisão, com o evento de 1843.

Após 1856, a magnitude de η Car diminuiu de V$\approx +0,3$ para V$\approx +7$, que corresponde a uma queda no fluxo por um fator $\sim$480 em relação ao fluxo logo após a Grande Erupção. Essa queda no fluxo foi atribuído à formação de poeira no Homúnculo. A diminuição no brilho durou cerca de 14 anos (desde 1856 até aproximadamente 1870), quando a estrela

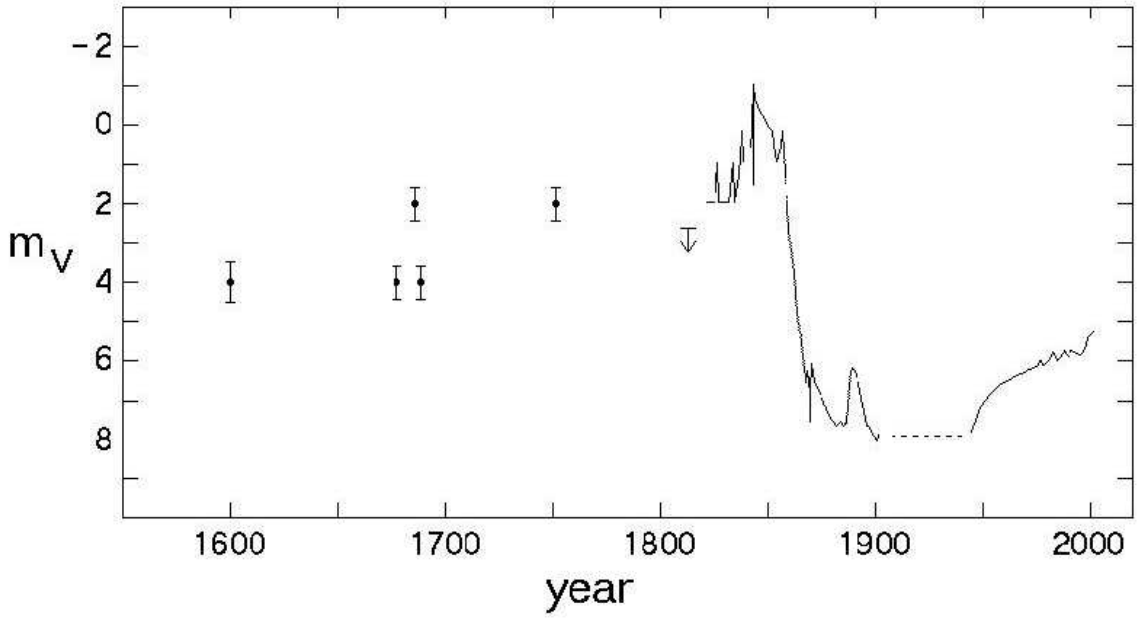


Figura 1.1 *Curva de luz histórica de η Car (Humphreys* et al.*, 1999).*

deixou de ser visível a olho nu. Entre 1887 e 1895, ocorreu uma erupção chamada de 'menor', quando a estrela aumentou de brilho para, logo em seguida, diminuir novamente. Na verdade, se corrigirmos a extinção pela poeira, a 'erupção menor' teria atingido V≈1, constituindo-se em uma outra erupção gigantesca.

Em 1870, Le Seuer descreve uma análise visual do espectro, consistindo de linhas de emissão do H I, He I e Fe II. Um espectro fotográfico tomado durante a 'erupção menor' mostrou um espectro mais 'frio', correspondente a uma supergigante F (Walborn & Liller, 1977). Ao longo dos 50 anos seguintes, o espectro voltou a apresentar as linhas do H I, He I e Fe II descritas por Le Seuer. Por volta de 1940, o brilho da estrela voltou a aumentar gradativamente.

Em 1944, os espectros tomados por Gaviola (1953), na Argentina, mostraram linhas de alta excitação, como [Ne III], [Fe III] e [Ar III], inexistentes anteriormente. Gaviola notou ainda, em 1948, o desaparecimento das linhas de alta excitação que aparentemente foi um evento rápido, pois em 1949 elas reapareceram no espectro. Essas linhas voltaram a desaparecer brevemente em 1965, em meados de 1981 e no início de 1987. Esses 'eventos espectroscópicos' foram atribuídos a ejeções de matéria (Zanella *et al.*, 1983) e acreditava-se serem devidos a pulsações do tipo S *Doradus*.

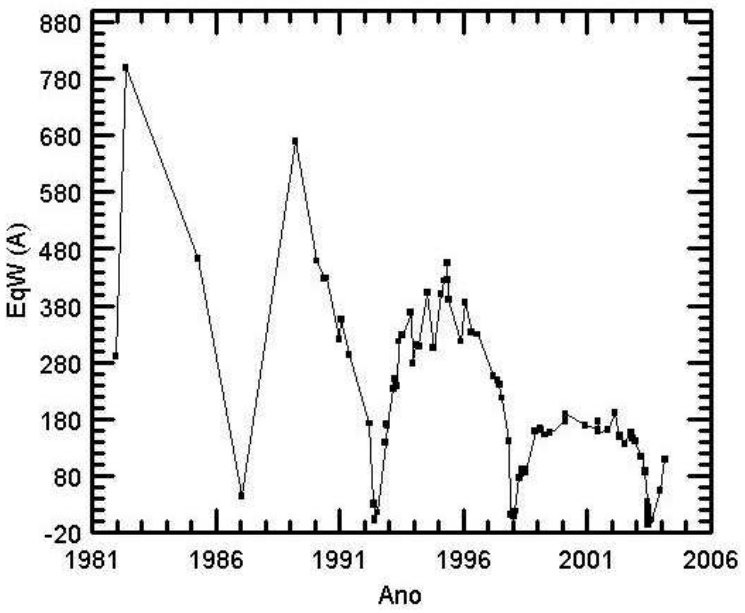


Figura 1.2 *Variação da largura equivalente da linha do He I 10830 ao longo dos últimos 4 ciclos espectroscópicos (Damineli, comunicação privada).*

1.2 O ciclo de 5,5 anos e a natureza binária da fonte central

Observações realizadas em 1992, no Observatório do Pico dos Dias (OPD), foram as primeiras a mapear com certo detalhe um evento espectroscópico. A análise de observações históricas levou Damineli (1996) a propor que os 'eventos' ocorriam em ciclos regulares e, portanto, não eram devidos a oscilações do tipo S *Doradus*, como se imaginava. A periodicidade foi confirmada por previsões subseqüentes, ocorridas em 1997,95 e 2003,48. A hipótese de que η Car é um sistema binário (Damineli *et al.*, 1997) tem hoje suporte firme, não só na periodicidade estrita, mas também na curva de luz em raios-X. O próximo evento está previsto para meados de Janeiro de 2009.

A Figura 1.2 mostra a variação da largura equivalente da linha do He I λ10830 em observações realizadas por Damineli entre 1989 e 1995, no OPD e em dados obtidos de Allen *et al.* (1985) e McGregor *et al.* (1988). As linhas de alta excitação ([Ne III], [Ar III], [S III] e [Fe III]) se comportam como a do He I 10830, ou seja, variam continuamente ao longo do ciclo de 5,52 anos, embora sejam relativamente constantes na fase de alta excitação. As de baixa excitação, como Fe II, [Fe II], [Ni II], *etc.*, permanecem quase invariáveis mesmo durante os eventos. As linhas de excitação intermediária, como

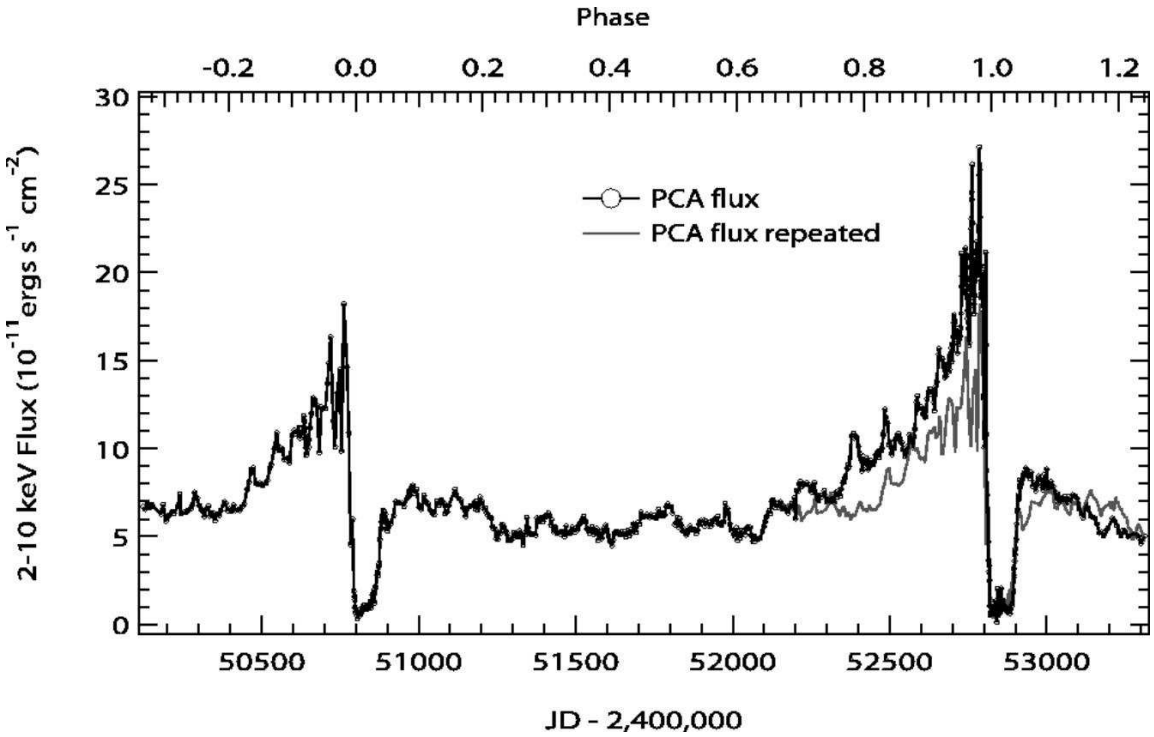


Figura 1.3 *Variabilidade em raios-X de η Car durante os eventos espectroscópicos de 1997,95 e 2003,48 observado pelo satélite RXTE (Corcoran, 2005).*

H I, têm variabilidade intermediária quando comparadas às de alta e baixa excitação (Damineli *et al.*, 1998). Outro aspecto importante é que as linhas de alta excitação e as componentes estreitas das linhas são confinadas às proximidades dos glóbulos de Weigelt. Somente as componentes largas das linhas do objeto central aparecem refletidas nas paredes do Homúnculo (Hillier & Allen, 1992).

A Figura 1.3 mostra o comportamento em raios-X de η Car durante o evento espectroscópico de 1997,95 e 2003,48. Antes de cada evento, o fluxo em raios-X cresce, passando por fortes instabilidades, atinge um máximo local e diminui bruscamente por um fator $\approx$30.

1.2.1 Sumário dos parâmetros conhecidos de η Car

Distância: de 2,2 a 2,3 kpc (Allen & Hillier, 1993; Davidson & Humphreys, 1997; Davidson *et al.*, 2001; Meaburn, 1999).

Luminosidade: $L = 5{\times}10^6\ L_\odot$ ($M_{bol} = -12$), determinada a partir de observações no infravermelho e milimétrico (Westphal & Neubebauer, 1969; Cox *et al.*, 1995).

Massa – O modelo de Damineli *et al.* (1997) indica que a massa inicial da estrela principal do sistema era de ≈ 120 $M_\odot$. A massa atual seria um pouco mais que a metade desse valor. Quanto à estrela secundária, sua massa é difícil de estimar. Sua luminosidade seria pelo menos 10 vezes menor que a primária, para não aparecer no espectro, mas não poderia ser muito menor que isso, para poder produzir a emissão em raios-X observada.

Taxa de perda de massa: $\sim 10^{-3}$ $M_\odot$/ano (White *et al.*, 1994; Cox *et al.*, 1995; Davidson *et al.*, 1995; Hillier *et al.*, 2001).

Estágio evolutivo: o material ao redor de η Car é rico em He e N mas pobre em O e C. A composição observada é compatível com a de material processado pelo ciclo CNO.

1.3 A nebulosa do Homúnculo

A Figura 1.4 mostra uma imagem de η Car obtida pelo telescópio espacial *Hubble* (HST). O nome Homúnculo foi cunhado por Gaviola (1950) devido à sua aparência ao telescópio. Considerando um ângulo de inclinação de $\approx 41°$, a nebulosa do Homúnculo possui um eixo maior de aproximadamente 18" de pólo a pólo, correspondendo a cerca de 0,20 pc ($\approx$ 40500 U.A.[1]), assumindo uma distância de 2250 pc (Davidson *et al.*, 2001).

A expansão da nebulosa do Homúnculo vem sendo observada ao longo de vários anos, permitindo, através da análise astrométrica, a determinação da época em que ela foi formada: 1843 (Thackeray, 1949; Gaviola, 1950; Ringuelet, 1958; Walborn *et al.*, 1978; Currie *et al.*, 1996). A velocidade de expansão no pólo de cada lóbulo, em relação a η Car, é de aproximadamente 650 km s^{-1}, considerando-se um ângulo de inclinação i, em relação à linha de visada, de $\approx 41^o$ (Davidson *et al.*, 2001) (no próximo capítulo discutirei o método para obter a velocidade de expansão através da observação da velocidade radial). Medidas polarimétricas e espectroscópicas (Thackeray, 1956; Visvanathan, 1967; Meaburn *et al.*, 1987; Hillier & Allen, 1992) mostraram que o Homúnculo é essencialmente uma nebulosa de reflexão, espalhando a luz proveniente da fonte central em várias direções. Esta característica permite uma oportunidade ímpar de se observar o vento da fonte central de diferentes ângulos e ver como este varia com a latitude estelar. A maior parte da luminosidade observada de η Car é reprocessada pela poeira do Homúnculo, que é aquecida até temperaturas $\sim$ 200–1000 K (Westphal & Neubebauer, 1969; Gehrz *et al.*, 1973; Harvey *et al.*, 1978; Meaburn *et al.*, 1993).

[1] U.A.: Unidade Astronômica. Definida como aproximadamente a distância média entre a Terra e o Sol, *i.e.*, $\approx 1,5 \times 10^{13}$ cm ou $\approx 4,9 \times 10^{-6}$ pc.

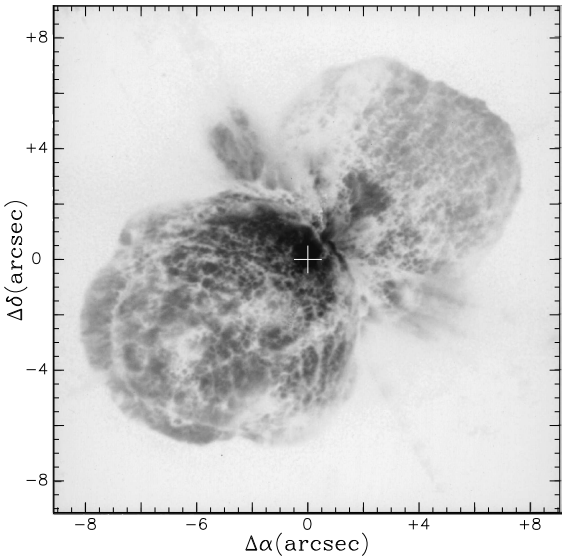


Figura 1.4 *Nebulosa do Homúnculo vista pelo telescópio espacial Hubble, utilizando a segunda Câmera Planetária de Campo Amplo (HST/WFPC2).*

Quanto à geometria do Homúnculo, os dados obtidos por Hackwell *et al.* (1986) no infravermelho já mostravam claramente dois pares de lóbulos vazios, *i.e.*, duas cascas quase esféricas. A primeira imagem publicada pelo *HST* foi inicialmente mal-interpretada devido ao fato de que houve saturação da região central (Hester *et al.*, 1991), impedindo a visualização de estruturas equatoriais, que só foram identificadas em imagens posteriores obtidas pelo HST (Ebbets *et al.*, 1993; Davidson, 1993). A primeira discussão sobre o material equatorial não foi produto das imagens do telescópio espacial, pois em 1985, Duschl *et al.* (1995) obtiveram imagens de alta resolução no visível e infravermelho, nas quais foram identificados o disco e os jatos equatoriais. Atualmente, os lóbulos são relativamente mais compreendidos do que o disco equatorial, devido ao fato de que neste o material possui múltiplas componentes de velocidade ainda não identificadas.

1.3.1 Mapa do Homúnculo

Na Figura 1.5 estão identificadas as regiões mais importantes de η Car. Pode-se dividir essas regiões em duas principais categorias: o próprio Homúnculo e a nebulosidade mais distante (*Outer Ejecta*). A partir desta seção, por Homúnculo subentende-se os dois lóbulos (SE e NW) e o material equatorial (*Skirt*). A *Outer Ejecta* refere-se a todo o material visto na Figura 1.5 que não seja o Homúnculo, *e.g.*, S *ridge*, NN *bow*, NN, NS, W e S *condensation* e *whiskers*. A seguir estão listadas as características de algumas destas regiões.

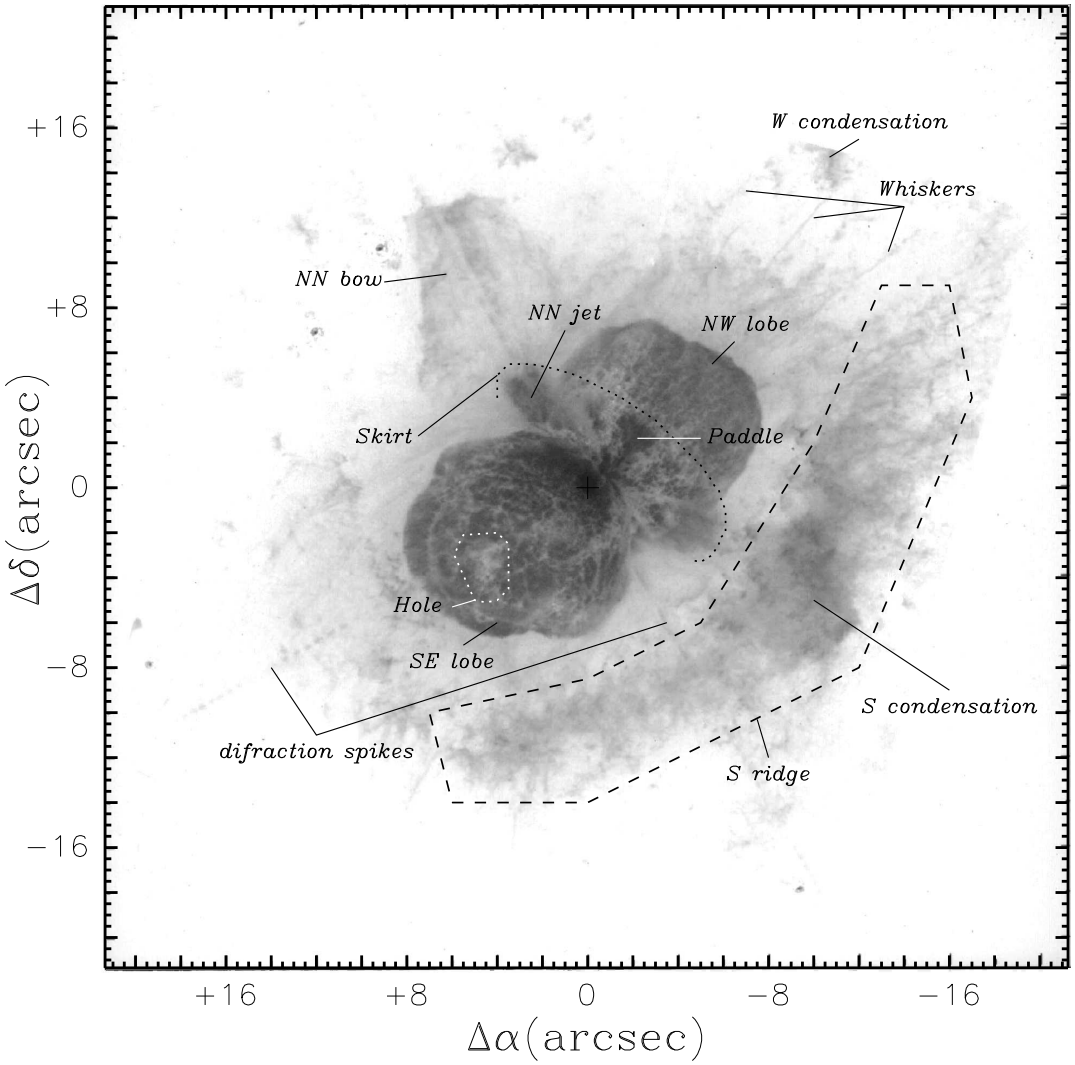


Figura 1.5 *Regiões ao redor da fonte central de η Car e suas respectivas denominações (Morse* et al.*, 1998; Weis* et al.*, 2004). A estrutura identificada por 'difraction spike' é um efeito de difração produzido pelo suporte do espelho do telescópio.*

Regiões do Homúnculo

SE lobe – Esta parte do Homúnculo se move na direção do observador, apresentando componentes deslocadas para o azul. Considera-se esse lóbulo como representativo da região polar, *i.e.*, o pólo do lóbulo NW deve possuir as mesmas características vistas no pólo do lóbulo SE. A região polar do lóbulo SE do Homúnculo é mais opaca que o outro lóbulo, devido, provavelmente, ao fato de que o vento da fonte central não é esférico, podendo ter ejetado uma maior quantidade de material na direção polar do que em outras direções (pois o primeiro compreende um ângulo sólido maior que o das paredes dos lóbulos).

NW lobe – Diferentemente do lóbulo SE, não é possível detectar a região polar do lóbulo NW. Por isso, considera-se que a parede do lóbulo SE seja semelhante a do NW. Devido ao motivo descrito anteriormente, a parede do lóbulo NW é opticamente mais fina do que as regiões polares, permitindo a observação de choques entre o vento da fonte central e o Homúnculo.

Skirt – Esta região também é conhecida como plano equatorial ou jato equatorial (entretanto, evitarei o uso do último termo devido à confusão que eventualmente possa ocorrer quando referir-me aos jatos vistos no plano equatorial). Várias estruturas radiais podem ser vistas nesta região, sendo que as mais proeminentes delas são conhecidas como NN *jet* e *Paddle*. A idade cinemática do plano equatorial ainda é uma questão em aberto.

NN jet – Esta estrutura foi detectada nas primeiras imagens do *HST* como uma região mais densa localizada na direção NE, acima do lóbulo SE, que foi interpretada como parte de um disco ou toro envolvendo o Homúnculo. Atualmente, sabe-se que esta estrutura faz parte do complexo de jatos equatoriais que formam o plano equatorial.

Paddle – Atualmente sabe-se que o *Paddle* é o resultado de um 'buraco', localizado na base do disco equatorial, que permite que um pouco de radiação ultravioleta escape criando uma zona 'iluminada' (Smith *et al.*, 1999, 2002). A interpretação que se tinha era de que o *Paddle* fosse uma condensação do material equatorial que seria responsável pela emissão observada nas imagens do HST. Nessa região, a linha do He I 10830 apresenta uma componente em emissão deslocada para o azul, que é explicada utilizando a idéia de que o *Paddle* é uma região excitada por radiação ultravioleta (a zona 'iluminada' citada anteriormente). De fato, um pouco da radiação ultravioleta proveniente da fonte central pode escapar pelo 'buraco' no disco equatorial e excitar alguns átomos de He I localizados no mesmo plano mas fora do Homúnculo.

Hole – Existem várias regiões ao longo do Homúnculo que aparecem escuras em imagens feitas na faixa óptica. Este efeito poderia ter 3 origens: (1) falta de material no lóbulo do Homúnculo; (2) material denso entre o observador e a nebulosa ou (3) a sombra projetada no lóbulo por material localizado entre a fonte central e a parede do lóbulo. No Capítulo 4 serão apresentados argumentos que corroboram a idéia de que o *hole* é, de fato, um buraco no lóbulo SE e que o lóbulo NW também apresenta uma região semelhante à essa.

NN bow – Segundo Morse *et al.* (2001), esta estrutura parece ser mais jovem do que o resto do material contido na *Outer Ejecta* e provavelmente foi formada durante a Grande Erupção. O espectro desta região é dominado por emissão refletida da fonte central do Homúnculo, indicando uma alta concentração de poeira (Smith & Morse, 2004). A aparência do NN *bow* lembra a de uma região de choque, onde material movendo-se rapidamente colide com o material mais lento. Apesar dessa semelhança, essa região não é uma das fontes detectadas por Weis *et al.* (2004) nas imagens de raios-X moles. De fato, nas imagens do $CHANDRA$, essa região aparece tão apagada quanto o próprio Homúnculo. Uma provável explicação para este efeito é que, toda esta estrutura apresenta uma grande quantidade de H I ($\sim 10^{22}$ cm^{-2}), que seria o responsável pela absorção do fluxo em raios-X proveniente da região localizada na mesma linha de visada, mas atrás do NN *bow* (Weis *et al.*, 2004). Sendo assim, a estrutura denominada NN *bow* seria o resultado da expansão de várias condensações em um meio menos denso. Desta maneira, não haveria material suficiente para parar a expansão e, conseqüentemente, não seria detectada emissão em raios-X.

Whiskers – Meaburn *et al.* (1996) sugeriram que as estruturas radiais filamentadas vistas na Figura 1.5, denominadas $whiskers$, seriam jatos colimados expelidos da fonte central e que apresentam alguma forma de aceleração ou variação direcional, *i.e.*, existe uma variação nas velocidade medidas ao longo dos $whiskers$ que somente são explicadas considerando que estes são, de alguma maneira, acelerados ou o efeito observado nas velocidades é devido ao ângulo de inclinação dos $whiskers$ em relação ao plano do céu. As dimensões desses objetos variam em comprimento (projetado) de 4,0" ($\approx$9000 U.A.) até 16" ($\approx$36500 U.A.) e, em largura, de 0,13" ($\approx$400 U.A.) até 0,23" ($\approx$500 U.A.) (Weis & Duschl, 1999). Estas estruturas não apresentam emissão em raios-X moles (Weis *et al.*, 2004).

W e S condensation e S ridge – Ao contrário do NN *bow*, estas regiões são notáveis fontes de emissão em raios-X moles. Em particular, a W *condensation* e a S *condensation* aparecem como *hot spots* nas imagens do $CHANDRA$. Nesta última região, aparentemente, a emissão se deve à colisão entre o material ejetado no plano equatorial durante a Grande Erupção e o material mais velho, ejetado antes da Grande Erupção (Smith & Morse, 2004). As imagens do *HST* revelaram que a S *condensation* é formada por várias condensações. O espectro dessa região apresenta linhas de emissão intrínseca relativamente intensas (*e.g.*: [Fe II] 12567, Paγ e Paβ), que indicam que esse

material já foi processado pelo ciclo do CNO no interior da fonte central do Homúnculo (Davidson *et al.*, 1982; Dufour, 1989; Smith & Morse, 2004). Juntas, W e S *condensation* e S *ridge* formam parte da estrutura que envolve o Homúnculo denominada *the hook*, que é a responsável pela maior parte da emissão X no intervalo de 0,6–1,2 keV.

Existem outras regiões de interesse localizadas na *Outer Ejecta*. Entretanto, não é o intuito desta dissertação descrever todas essas regiões, e sim, somente aquelas que estão, de alguma forma, relacionadas aos objetivos finais desta dissertação: a caracterização espacial do Homúnculo e do vento de η Car.

Capítulo 2

Observações e Métodos de Redução

No campo da espectroscopia, um importante passo foi dado com a construção dos espectrógrafos de campo integral, que permitem a obtenção da imagem e a coleta simultânea do espectro de diferentes regiões de um objeto em uma única exposição. O produto final da espectroscopia de campo integral (IFS - *Integral Field Spectroscopy*) é conhecido como "cubo de dados", uma vez que dele podem ser obtidas tanto a dimensão espacial (imagem), quanto a espectral, *i.e.*, o cubo de dados tem a dimensão espacial nos eixos x e y e a espectral em z.

Neste capítulo, farei uma breve discussão sobre a unidade de campo integral (IFU) do espectrógrafo CIRPASS (*Cambridge InfraRed PAnoramic Survey Spectrograph*), que foi utilizado para a aquisição dos dados apresentados nessa dissertação. Discutirei também a metodologia utilizada na obtenção dos dados e os métodos de redução utilizados para a montagem e análise do cubo de dados.

2.1 A unidade de campo integral do CIRPASS

Os dados do Homúnculo de η Carinae foram obtidos em Março de 2003, no telescópio Gemini Sul. O instrumento utilizado foi o espectrógrafo CIRPASS, um espectrógrafo que possui uma unidade de campo integral (IFU) com um total de 508 lentes hexagonais, das quais 499 funcionam efetivamente. As observações do Homúnculo de η Carinae foram realizadas com amostragem espacial de 0,25"/lente e espectral, R=3200, na faixa de

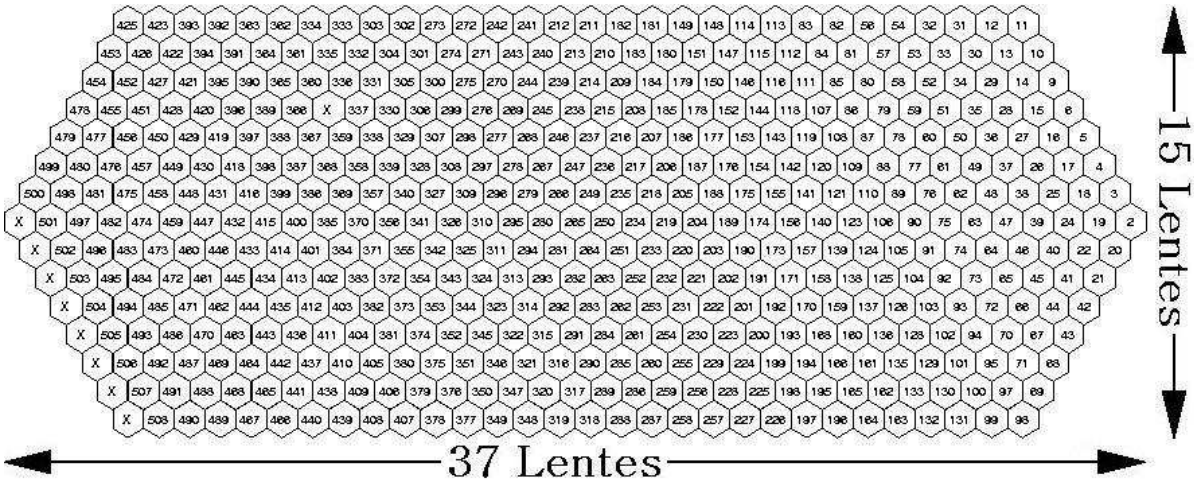


Figura 2.1 *Mapa das lentes do IFU do CIRPASS. Esse arranjo é posicionado no plano focal do telescópio. Cada lente coleta a luz de uma região de 0,25"×0,22", que corresponde a largura da lente ao longo do eixo maior e menor, respectivamente (vide texto). Os números relacionam a posição da lente nessa matriz com a posição da fibra na pseudo-fenda. As lentes que apresentam um × não estão ligadas a fibras.*

1,06 μm a 1,29 μm (banda J). A Figura 2.1 mostra, de maneira ilustrativa, a matriz de lentes do IFU do CIRPASS.

A característica única do CIRPASS é que sua unidade de campo integral contém lentes hexagonais. Isso permite ao espectrógrafo alcançar um fator de preenchimento (*filling factor*), *i.e.*, a fração geométrica do campo que transmite luz, de aproximadamente 95% (Parry *et al.*, 2004). Sendo asim, a área coletora efetiva de cada lente é maximizada. Devido a disposição das lentes, na direção do eixo menor do IFU a distância entre os centros de duas lentes consecutivas quaisquer é menor do que a distância entre os centros na direção do eixo maior do IFU. Em outras palavras, a 'altura' de cada lente ao longo do eixo do IFU que contém 15 lentes é menor que a 'largura' de cada lente ao longo do eixo maior. Considerando d_x como a distância entre os centros de duas lentes na direção do eixo maior ('largura'), teremos

$$d_y = \frac{\sqrt{3}}{2} \times d_x \tag{2.1}$$

onde d_y é a distância entre dois centros adjacentes ao longo do eixo menor ('altura') do IFU. Portanto, efetivamente, cada lente tem cerca de 0,25" ao longo do maior eixo e 0,22" ao longo do menor. Isso produz um campo de visão do IFU de 9,0"×3,3".

2.2 Coleta dos dados

A observação em 18/03/2003 da nebulosa do Homúnculo foi feita dividindo-a em cinco regiões: NE, SE, NW, SW e a região central, doravante denominados quadrantes Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, respectivamente. A estratégia observacional foi cobrir toda a região do Homúnculo fazendo exposições rápidas na região central e mais longas nas partes mais afastadas. Para o mapeamento do Q1 e Q2, o centro do campo do IFU foi alinhado com a fonte central e, em seguida, deslocado 3,88"E para o início do mapeamento. Para as imagens do Q3 e Q4, o IFU foi deslocado 7,76"W, desde a última exposição do Q2. Em seguida, a ascenção reta foi mantida constante e cada apontamento subseqüente era deslocado para o Sul de $\Delta\delta$=0,88", em declinação. Em cada posição, foram feitas duas exposições de 30 segundos cada. Assim, para cobrir todo o Homúnculo, realizaram-se 11 apontamentos (com duas exposições cada um) para cada uma das regiões (Q1, Q2, Q3 e Q4), totalizando 88 imagens. Uma vez que cada ponto do mosaico é coberto por 3 apontamentos sucessivos (exceto suas bordas), o tempo efetivo de exposição em cada ponto é de 180 segundos. Após a observação de cada quadrante, o telescópio foi deslocado $\approx$ 10"E para obter as imagens de céu, com o mesmo tempo de integração (30 segundos cada), realizando-se assim, um pontilhamento para compensar as lentes defeituosas. A Figura 2.2 mostra a região completa do Homúnculo de onde os dados apresentados nesta dissertação foram obtidos, sobreposta a uma imagem obtida pelo telescópio espacial Hubble (HST), em 1996.

Medidas astrométricas realizadas por Smith & Gehrz (1998) indicam que o lóbulo SE se expande a uma taxa média de 0,036"/ano, enquanto o lóbulo NW se expande a cerca de 0,049"/ano. Portanto, como os dados apresentados nesta dissertação foram obtidos em 2003 (7 anos depois da imagem do HST), o Homúnculo expandiu-se cerca de 0,6", *i.e.*, aproximadamente 2 lentes do IFU do CIRPASS. Dado que a função de espalhamento puntual (PSF) determinada a partir da observação de uma estrela-padrão é de 0,4", o erro introduzido pela expansão do Homúnculo não é muito significativo para o objetivo deste trabalho.

A Figura 2.3 ilustra um problema que foi encontrado após a montagem do mosaico final: utilizando-se as coordenadas indicadas no cabeçalho das imagens, a posição da fonte central não era coincidente entre o quadrante Q1 e o Q2 (c.f. Figura 2.3(a). Para resolver esta questão, foi necessário deslocar o quadrante Q1 de 13 lentes para a esquerda de Q2 (c.f. Figura 2.3(b).

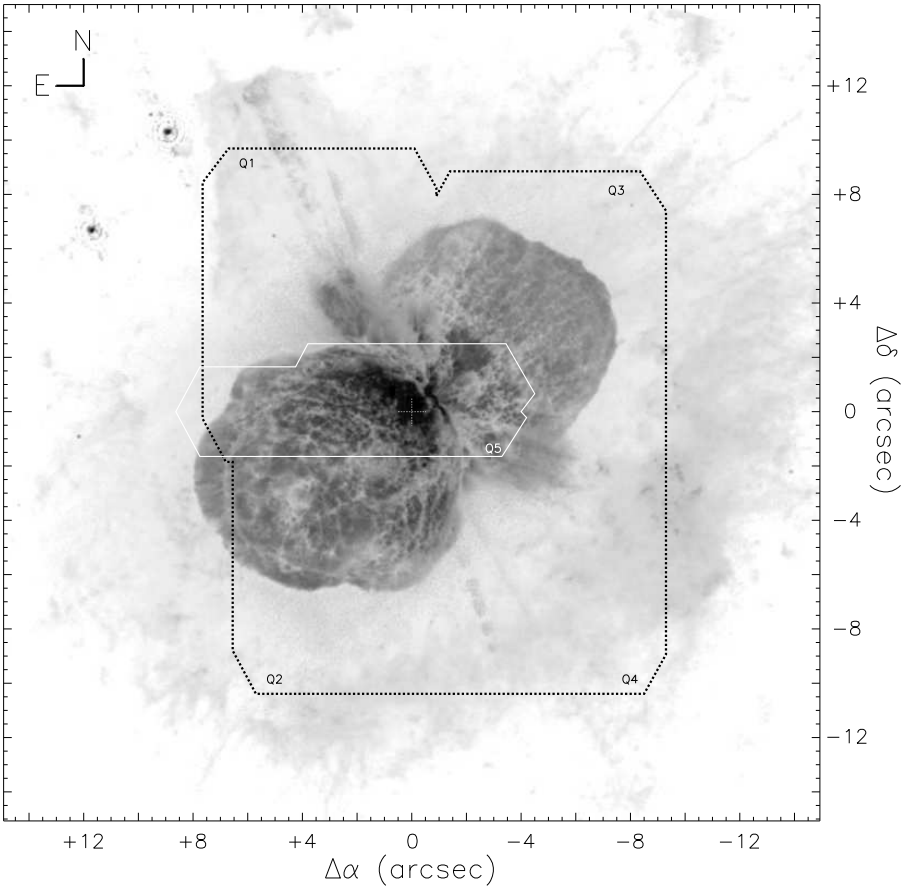


Figura 2.2 *Região coberta pelos mosaicos realizados com o IFU do CIRPASS, sobreposta à imagem de η Car obtida com o HST. A região de coleta dos dados relativa ao Homúnculo, delimitada pela linha pontilhada (preto) aparece assimétrica devido a um desalinhamento entre o quadrante Q1 e os demais quadrantes (vide texto). A linha contínua em branco delimita a região Q5. A posição da fonte central está indicada pela cruz no centro da imagem.*

Na região central foi feito um pontilhamento pelo mesmo motivo citado anteriormente, no entanto, nessa região, o tempo de integração foi de 7 segundos, na tentativa de evitar a saturação das regiões próximas à fonte central. Mesmo assim, as exposições da região central ficaram saturadas e, portanto, não foram utilizadas. A região coberta pelo mosaico central também é mostrada na Figura 2.2.

A estrela-padrão observada para remoção das linhas telúricas foi HD 303308, uma estrela de tipo espectral O3I. Ela foi observada na mesma noite da aquisição dos dados da nebulosa do Homúnculo, logo após a observação do céu do último quadrante. O método de remoção das linhas telúricas será discutido ainda neste capítulo, em outra seção.

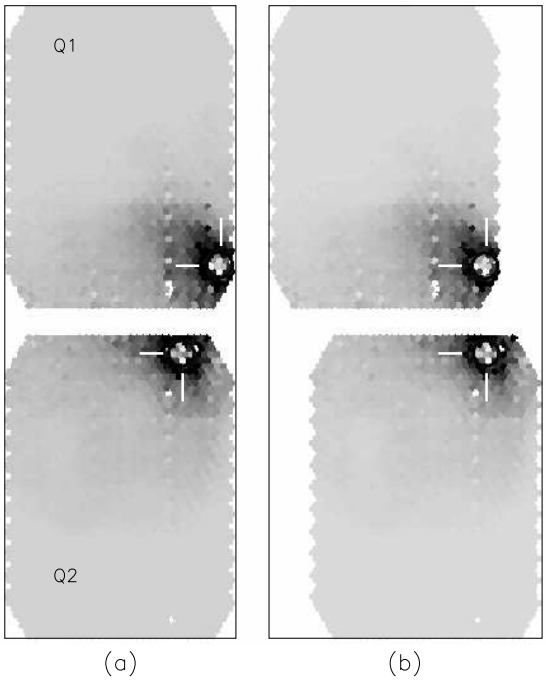


Figura 2.3 *Regiões do quadrante Q1 e Q2. As barras horizontais e verticais indicam a posição aproximada da fonte central em cada quadrante. O desalinhamento entre o quadrante Q1 e Q2 é visível em (a). Para que a fonte central coincidisse em ambos quadrantes, foi necessário deslocar Q1 13 lentes para a esquerda. O resultado é mostrado em (b). O Norte está para cima e o Leste, para a esquerda.*

2.3 Processamento do cubo de dados

A redução de todas as imagens e a montagem do cubo de dados foi feita combinando-se tarefas de uso comum do pacote *IRAF* (*Image Reduction and Analysis Facility*), tarefas escritas pela equipe do CIRPASS especificamente para as imagens adquiridas com esse espectrógrafo (esse pacote pode ser obtido no *site* www.ast.cam.ac.uk/∼optics/cirpass/docs.html) e programas desenvolvidos por Robert Sharp em IDL (*Interactive Data Language*). As imagens geradas pelo CIRPASS são ligeiramente diferentes dos arquivos FITS (*Flexible Image Transport System*) comuns, no sentido de que um arquivo do CIRPASS contém múltiplas extensões e cada uma contém um arquivo FITS. Esse tipo de arquivo é conhecido como arquivo MEF (*Multi-Extension FITS*) e permite o armazenamento de vários arquivos do tipo FITS em apenas um único arquivo. No CIRPASS, o arquivo MEF é obtido com a técnica de leitura não-destrutiva, na qual o detector, após a exposição, é lido 2 vezes e cada leitura é guardada em uma extensão do arquivo MEF para, durante a redução, serem combinadas com o intuito de diminuir o ruído de leitura na imagem final.

O processo de redução dos arquivos MEF é semelhante à redução de arquivos FITS normais e requer os mesmos procedimentos básicos: subtração do céu, remoção de raios cósmicos, *flat field* e remoção de linhas telúricas. No entanto, existem passos específicos a serem realizados quando se trata de cubo de dados, *e.g.*: a identificação das fibras, a remoção das variações de transmissão de cada lente e a identificação de lentes defeituosas são alguns desses passos. Os dados do Homúnculo foram processados da maneira descrita a seguir.

2.3.1 Leitura e combinação das extensões dos arquivos MEF

O formato MEF, como foi discutido anteriormente, armazena várias leituras do detector como um arquivo FITS comum em cada uma de suas extensões. Sendo assim, o primeiro passo do processamento é combinar as leituras de maneira a produzir uma imagem com ruído de leitura menor. A tarefa *DOGEMINI* (específica do pacote CIRPASS) realiza a leitura de cada extensão dos arquivos do CIRPASS e combina as extensões que contêm o espectro do objeto observado. Ao passar por essa etapa, o arquivo gerado será do tipo MEF e seu cabeçalho já contém o nome dos arquivos que serão utilizados para a redução efetiva do cubo de dados (arquivo de subtração do céu, de identificação das fibras e *dome flat*) e os passos a serem realizados pela tarefa de extração espectral.

2.3.2 Identificação das fibras do IFU

Primeiramente, deve-se fazer a identificação das fibras da pseudo-fenda[1]. Cada uma delas está conectada a uma lente do IFU e portanto se faz necessário conhecer a posição de cada uma para a reconstrução da imagem do campo do IFU. Uma máscara com furos é colocada na frente do IFU que, em seguida, é iluminado. Desta maneira, as fibras que não estão bloqueadas pela máscara e cujas posições no campo do IFU são conhecidas formarão uma imagem no detector. Este procedimento é realizado com outras duas máscaras que possuem furos em lugares diferentes entre si. Essas imagens são utilizadas pela tarefa *FIBCAL* (específica do CIRPASS), que calcula a posição de todas as fibras com base nas que foram encontradas, *i.e.*, esta tarefa utiliza um algorítmo que procura a posição em que ocorrem os picos de intensidade e relaciona-os com a posição da lente encontrada em um arquivo que

[1]Pseudo-fenda: as fibras que saem do IFU passam por dentro de um cabo até o interior do espectrógrafo, onde são alinhadas em uma única direção, assim como uma fenda.

contém tanto a posição quanto o espaçamento das lentes não cobertas (esse arquivo é distribuído juntamente com o pacote do CIRPASS e pode também ser encontrado no *site* www.ast.cam.ac.uk/~optics/cirpass/datared/measpos.list). Esta tarefa gera um arquivo, contendo a posição das fibras, que será utilizado na extração do espectro (realizada pela tarefa *DOTARGET*) e na montagem do mosaico final (cubo de dados).

2.3.3 Remoção de sinais espúrios no detector

A tarefa do IRAF conhecida como *COSMICRAYS* foi utilizada para remover sinais espúrios, como os raios cósmicos e pixels quentes, e também para criar um arquivo, contendo a posição de cada um destes sinais, que foi utilizado por outra tarefa (*DOTARGET*) para a extração espectral. A identificação é feita calculando-se o fluxo médio nas bordas de uma área de 5×5 pixels^2 e, dentro desta área, o pixel que apresentar um fluxo maior que 5 vezes a média local (fluxo médio no perímetro da área) será marcado como um candidato a pixel quente ou raio cósmico. O resultado final é a remoção destes candidatos e a criação de um arquivo com a posição de cada um.

2.3.4 O fundo de céu na banda J

No infravermelho próximo (NIR), o fundo de céu é predominantemente produzido pela excitação de radicais OH livres na alta atmosfera. As linhas de emissão destes radicais são observadas entre 0,61 e 2,62 μm, sendo as linhas mais intensas detectadas em comprimentos de onda maiores que 1,5 μm. Em uma noite sem lua, cerca de 92-98% da emissão do céu na banda J vêm de 53 linhas estreitas do OH, O_2 e N_2 (Herbst, 1994). Portanto, a remoção destas linhas, bem como as linhas de absorção, é essencial para a análise espectral e pode ser realizada utilizando-se filtros ou máscaras espectrais. O CIRPASS permite que as linhas de emissão do céu sejam removidas durante a observação ou depois, no processo de redução dos dados. Para a coleta dos dados do Homúnculo de η Car, a remoção foi feita durante a observação, fazendo uso das máscaras de OH, instaladas dentro do espectrógrafo, que suprimem as linhas de emissão dessas moléculas. Com a configuração utilizada para a aquisição dos dados do Homúnculo (R=3200 e unidade de resolução espectral de 2 pixels), a remoção das linhas de emissão do OH utilizando a técnica das máscaras é considerada otimizada (Martini & DePoy, 2000). Desta maneira, as imagens de céu serão utilizadas pela tarefa *DOTARGET* para remoção do *continuum* do fundo de céu.

2.3.5 Variações de sensibilidade e transmitância – *Flat fields*

Dois tipos de *flat field* são necessários quando pretende-se reduzir dados tridimensionais: um para o detector e outro para as fibras. O primeiro remove as variações de sensibilidade pixel a pixel do detector e é necessário para garantir a correta operação do programa de extração espectral. Esse tipo de *flat field* é obtido iluminando-se o IFU com uma lâmpada que não possua linhas de emissão/absorção em seu espectro. Entretanto, cada uma das fibras do IFU pode possuir uma transmitância diferente das demais e isto pode ser um problema quando as fibras do IFU possuem grandes variações na transmitância. No IFU do CIRPASS, aproximadamente 100% das fibras possuem uma transmitância uniforme de 75% e, portanto, a variação da sensibilidade de uma fibra à outra torna-se um fator irrelevante para a extração espectral, dado que o trabalho apresentado nesta dissertação não tem interesse em estudar o fluxo observado. Esta imagem será utilizada pela tarefa *DOTARGET*, que realizará a divisão do espectro do objeto já subtraído do *continuum* do fundo de céu.

2.3.6 A extração espectral

Para aproveitar ao máximo a resolução espacial oferecida pela espectroscopia de campo integral, são necessários programas que reconstruam, a partir do espectro do objeto sobre o detector, a imagem vista pelo campo do IFU. Para isso, o primeiro passo, como foi discutido anteriormente, é a identificação das fibras e a extração do espectro associado a cada uma. A utilização do máximo da área do detector para a coleta dos espectros sempre acarreta em uma sobreposição entre os espectros de lentes adjacentes na direção espacial. O perfil da dispersão das fibras do IFU do CIRPASS, na direção espacial, é muito bem ajustada por gaussianas com largura total à meia altura (FWHM) de aproximadamente 2 pixels na direção espacial e espectral, e a separação entre os centros das fibras ao longo da pseudo-fenda varia entre 1,25 e 2,75 pixels devido ao espaçamento físico entre as lentes na pseudo-fenda. Isso resulta em uma considerável sobreposição entre os espectros de cada fibra ($\approx$38%). Desta maneira, cada linha do detector não corresponde ao espectro de apenas uma fibra, tornando a tarefa de extração espectral mais trabalhosa. Em geral, a utilização de um algoritmo de extração ótima é suficiente para diminuir o efeito da sobreposição. Este algoritmo utiliza a informação contida em uma das extensões do arquivo MEF sobre a qualidade da imagem da qual será extraído o perfil espectral. Na verdade, esta informação é apenas uma imagem contendo o valor da variância no perfil espacial em cada pixel do detector. Este é um elemento importante para a rotina de

extração ótima, uma vez que a variância em cada pixel do detector é utilizada pelo polinômio como peso estatístico durante o ajuste do perfil espacial. Matematicamente, essa imagem é formada da seguinte maneira:

$$V_{y\lambda} = V_0 + \frac{|D_{y\lambda}|}{Q} \tag{2.2}$$

onde $V_{y\lambda}$ é a variância em um pixel com coordenadas espacial e espectral $(y;\lambda)$, respectivamente, V_0 é o valor do ruído de leitura, $D_{y\lambda}$ é a intensidade lida naquele pixel na imagem reduzida e Q é a quantidade efetiva de fótons detectados, conhecida como eficiência quântica (Horne, 1986). Os parâmetros V_0 e Q, que caracterizam o ruído do detector, são determinados empiricamente, analizando as flutuações do detector em uma ou mais imagens reduzidas com tempo de integração nulo ou *flat fields*. De qualquer maneira, esta informação deve ser utilizada durante a extração do espectro de modo a eliminar a sobreposição na direção espacial. De posse da imagem da variância (contida em uma das extensões do arquivo MEF do CIRPASS) e com a posição de cada fibra determinada (da maneira descrita anteriormente), a extração ótima do espectro é realizada pela tarefa *DOTARGET* (específica do CIRPASS). Esta tarefa lê a informação contida no cabeçalho de cada imagem (que foi atualizada pela tarefa *DOGEMINI*) e verifica quais são os passos escolhidos para redução dos dados. As imagens apresentadas nesta dissertação foram processadas por essa tarefa e de cada imagem isolada foi feita a subtração de *bias*, a subtração de céu, a divisão pelo *flat field* e a extração do espectro.

2.3.7 A calibração em comprimento de onda

Este passo foi realizado utilizando-se uma lâmpada de argônio e a mesma configuração instrumental das observações do Homúnculo. O tempo de exposição foi de 60 segundos. Primeiramente, as linhas de emissão do Ar foram identificadas utilizando o banco de dados do NIST *Atomic Spectra Database*[2]. Foi utilizado um polinômio de Chebyshev de ordem 3 para a correlação pixel/comprimento de onda. A Figura 2.4 mostra o resíduo obtido do ajuste do polinômio em relação ao valor encontrado no NIST. A ordem do polinômio foi escolhida de maneira que os resíduos ficassem distribuídos de maneira aleatória. Com um ajuste de ordem 2, estes apresentavam um padrão periódico, enquanto um ajuste de ordem 4 não influenciava significativamente no desvio quadrático médio. Por estes motivos, o polinômio escolhido foi de ordem 3, resultando em um desvio médio quadrático de 0,01 Å, valor bem menor que a resolução espectral do CIRPASS ($\Delta\lambda \simeq 4$ Å).

[2]physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/index.html

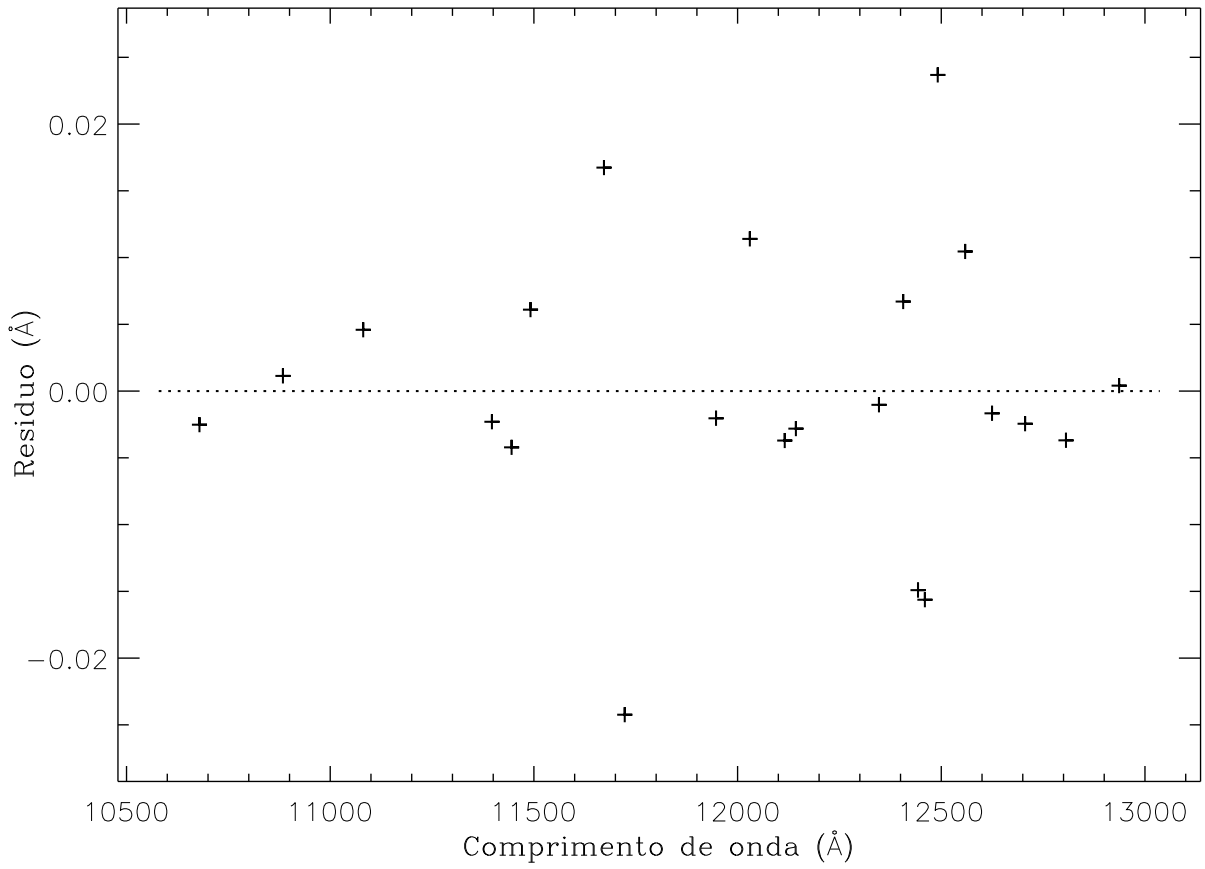


Figura 2.4 *Diferença entre o ajuste feito pelo polinômio durante a identificação das linhas da lâmpada de argônio e o valor obtido no banco de dados do NIST. O desvio médio quadrático é de 0,01 Å.*

2.3.8 Remoção das linhas telúricas

A estrela-padrão HD 303308 foi observada ao final das exposições do mosaico do Homúnculo, *i.e.*, após a obtenção de *todas* as imagens do mosaico. Nessa observação, foi feito um pontilhamento com 9 imagens tomadas em volta da estrela-padrão para compensar lentes defeituosas e aumentar o sinal-ruído (S/N) dos espectros. O tipo espectral e a classe de luminosidade dessa estrela é O3I (Simon *et al.*, 1982). Isto, aliado ao fato de que HD 303308 está localizada nas proximidades de η Car, torna-a uma ótima opção para a remoção das linhas telúricas dos espectros do Homúnculo. Utilizando a tarefa *DOTARGET*, as imagens da estrela-padrão foram reduzidas da mesma maneira que os dados da nebulosa de η Car. Foi feita a montagem do mosaico (conforme descrito na próxima seção) e extraído o espectro das lentes que continham a estrela. Estes espectros foram combinados pela mediana e as linhas de absorção da fotosfera estelar foram retiradas, através do ajuste de gaussianas a estas linhas e sua subseqüente subtração, restando apenas as linhas de absorção atmosférica. Este espectro foi normalizado pelo

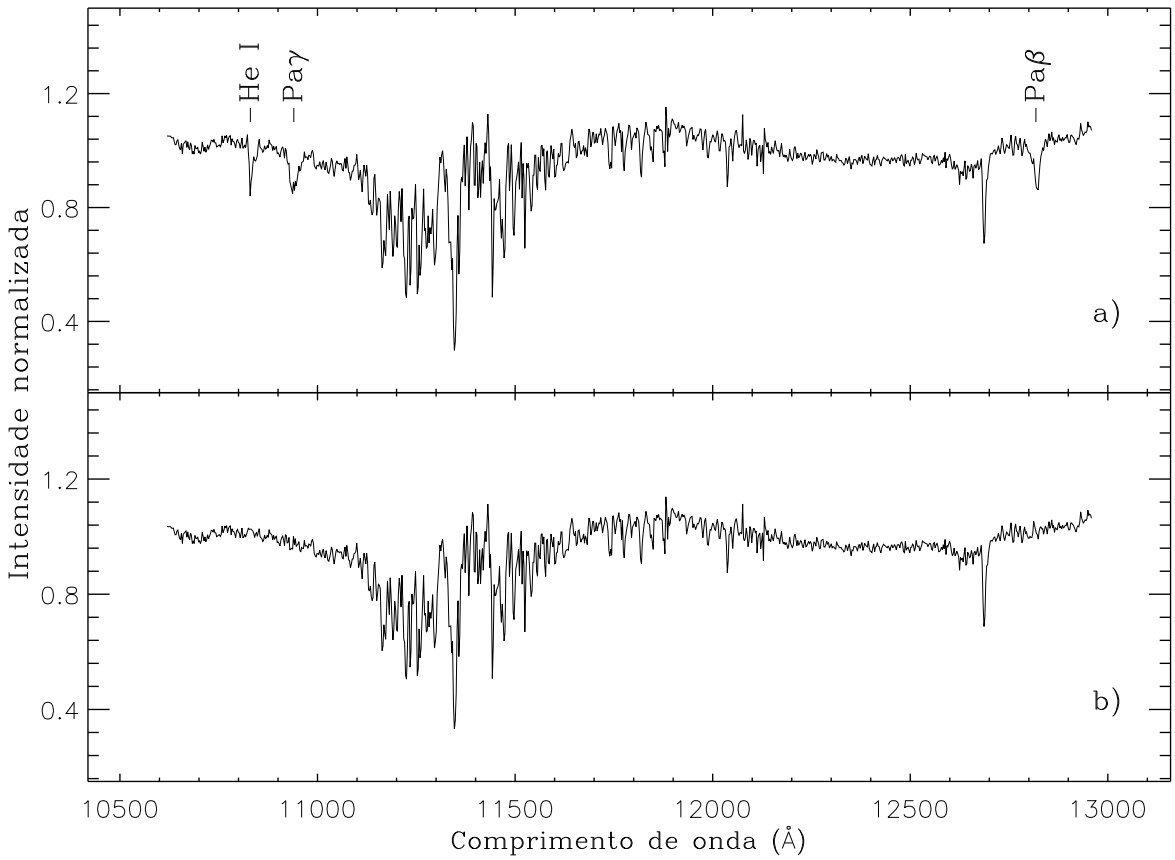


Figura 2.5 *Espectro da estrela-padrão HD 303308 normalizado por um polinômio Chebyshev de ordem 3. (a) Identificação das linhas fotosféricas. (b) Resultado da subtração do ajuste de gaussianas às linhas fotosféricas.*

continuum e em seguida foi feita a divisão de cada exposição do mosaico do Homúnculo por esse espectro, resultando na eliminação das linhas telúricas. No entanto, devido ao fato de que a estrela foi observada por último (após a obtenção de todas as imagens do mosaico), foi feito um escalonamento com a massa de ar média para a remoção das linhas telúricas de cada quadrante. O espectro resultante da estrela padrão é mostrado na Figura 2.5(a), onde ainda estão presentes as linhas fotosféricas. Após a remoção destas, o resultado é mostrado na Figura 2.5(b), que é o espectro que foi utilizado para eliminar as linhas telúricas do espectro da nebulosa do Homúnculo.

2.3.9 Montagem do cubo de dados

Esta parte da redução é exclusiva de observações feitas com IFU. Ela é realizada utilizando a informação sobre o deslocamento do campo do IFU em relação a um dado ponto. Essa informação está contida no cabeçalho de cada uma das imagens do objeto.

Após criar um arquivo contendo o deslocamento em α e δ e outro com o nome de cada imagem já reduzida e calibrada, a tarefa *CIRPASS_MOSAIC*, escrita em IDL por Robert Sharp e adaptada por mim para utilização nos dados do Homúnculo, utiliza esses dois arquivos para criar uma grade bidimensional (plano espacial do cubo de dados) com dimensões iguais à

$$W = \Delta\delta_{max} - \Delta\delta_{min} \tag{2.3}$$

$$H = \Delta\alpha_{max} - \Delta\alpha_{min} \tag{2.4}$$

onde W é a largura da grade, H, o comprimento, $\Delta\delta$ e $\Delta\alpha$, o deslocamento do IFU em relação à fonte central do Homúnculo em declinação e em ascensão reta, respectivamente, e os subscritos min e max, simbolizam o mínimo e o máximo destes deslocamentos em cada coordenada. Em seguida, cada imagem é colocada sobre esta grade e a posição de cada lente calculada. Como foi dito anteriormente, o mosaico foi feito de maneira a eliminar a maior parte das lentes defeituosas e aumentar a relação S/N dos espectros. Isto foi realizado combinando-se, pela mediana, os espectros das lentes que se sobrepunham em uma dada posição da grade. Ao final desta etapa, tem-se efetivamente o cubo de dados montado com um plano espacial e uma dimensão espectral. O espectro de cada ponto pode ser extraído especificando-se sua posição no plano espacial. Da mesma maneira, indicando-se um determinado intervalo espectral (em comprimento de onda ou velocidade), pode-se obter uma imagem monocromática.

Capítulo 3

O modelo cinemático do Homúnculo

Neste capítulo apresentarei o modelo do Homúnculo obtido por Davidson *et al.* (2001) com base em linhas proibidas do Ni, Fe e Ca. Nesta dissertação, esse modelo serve como um guia para identificação das componentes observadas em cada linha.

Ainda neste capítulo, apresento uma comparação entre as velocidades previstas pelo modelo e as velocidades medidas em diferentes ângulos de posição (também denominado P.A.).

3.1 Descrição do modelo

Utilizando as observações do HST/STIS com uma fenda alinhada ao longo do eixo maior, Davidson *et al.* (2001) propuseram 3 modelos para a estrutura espacial do Homúnculo com base na análise das linhas do [Ni II] λ7380, [Fe II] e [Ca II] $\lambda\lambda$4245–7455. O espectro foi tomado com uma fenda de 0,2"de abertura, de modo que representa um corte unidimensional ao longo do eixo maior do Homúnculo. Para obter a estrutura tridimensional, cada modelo unidimensional foi rotacionado em torno do eixo maior de simetria.

O primeiro modelo é obtido da tentativa de reproduzir as velocidades radiais observadas no lóbulo SE. Entretanto, esse modelo não se ajusta às velocidade observadas no lóbulo oposto, NW. Além disso, a aparência tridimensional do modelo 1 não reproduz a aparência da nebulosa observada nas imagens obtidas pelo HST/WFPC2 (c.f. Figura 3.1(a)).

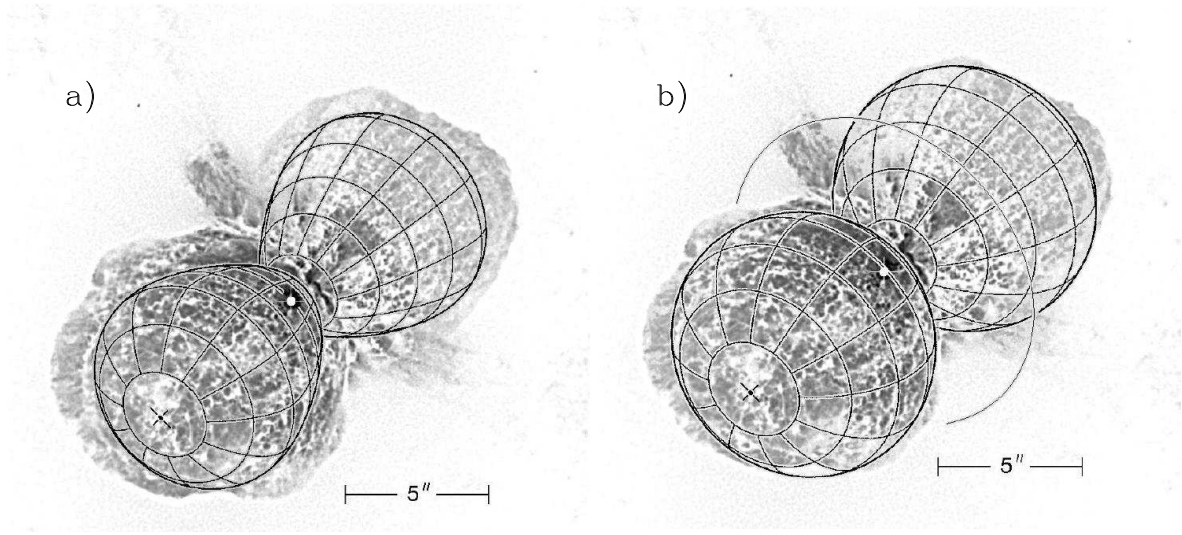


Figura 3.1 *Modelos para o Homúnculo: a) aparência projetada do modelo 1 (que se ajusta melhor às velocidades radiais observadas) sobreposta à imagem do HST/WFPC2. b) Mesmo que em a), mas para o modelo 2 (obtido a partir do ajuste à imagem aparente do Homúnculo).*

O segundo modelo tenta reproduzir a aparência observada do Homúnculo, gerando um modelo mais redondo que o primeiro (Figura 3.1(b)). No entanto, esse modelo não se ajusta às velocidades tão bem quanto o primeiro. Portanto, os autores decidiram por um modelo intermediário, que se ajuste às velocidades radiais observadas e também à estrutura aparente nas imagens do Homúnculo. Considerando coordenadas cilíndricas R e Z, onde R é o raio do lóbulo a uma distância Z da fonte central, e assumindo que Z é dado em segundos de arco equivalentes, *i.e.*, 1"= 2250 U.A., o modelo é descrito matematicamente por:

$$R = 4,25 - 0,14 \times (6,5 - Z)^{1,7} \quad \Longrightarrow \quad 1 < Z < 6,5 \tag{3.1}$$

$$R = 4,25 \times \sqrt{1 - 0,11 \times (Z - 6,5)^2} \quad \Longrightarrow \quad 6,5 < Z < 9,52 \tag{3.2}$$

Sendo assim, assumindo a geometria vista na Figura 3.2, a posição projetada em cada lóbulo, ao longo do eixo maior do Homúnculo, pode ser obtida por:

$$y_{NW} = \sqrt{R^2 + Z^2} \times sin(i + tg^{-1}(R/Z)) \tag{3.3}$$

$$y_{SE} = -\sqrt{R^2 + Z^2} \times sin(i - tg^{-1}(R/Z)) \tag{3.4}$$

onde i é o ângulo de inclinação do Homúnculo em relação à linha de visada. Portanto, a velocidade de expansão (v_{exp}) dos lóbulos e as velocidades radiais observadas (v_{obs}) em cada posição, ao longo do eixo maior, previstas pelo modelo são dadas por:

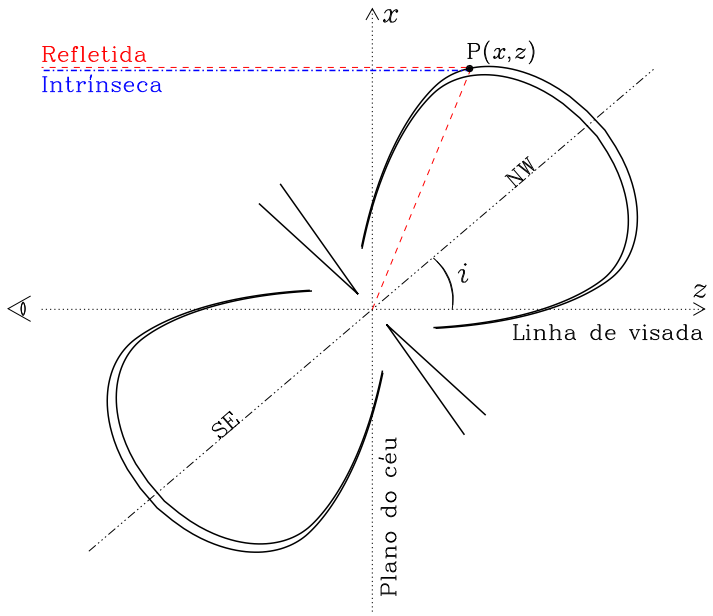


Figura 3.2 *Uma linha formada no ponto P, com coordenadas x e z, é detectada como uma emissão intrínseca, i.e., a velocidade radial observada depende apenas do movimento relativo entre o observador e o lóbulo onde a emissão é detectada. A velocidade radial observada para uma emissão refletida também depende do movimento relativo entre observador e lóbulo, entretanto, devido ao fato de ser formada próximo à fonte central, ela depende também do movimento relativo entre a região onde a linha foi formada e o lóbulo onde ela é refletida.*

$$v_{exp} = \frac{\sqrt{R^2 + Z^2}}{t} \tag{3.5}$$

$$v_{obs}^{int} = v_{exp} \times cos(i + tg^{-1}(R/Z)) \implies \text{válido para o lóbulo NW} \tag{3.6}$$

$$v_{obs}^{int} = v_{exp} \times cos(i - tg^{-1}(R/Z)) \implies \text{válido para o lóbulo SE} \tag{3.7}$$

$$v_{obs}^{ref} = v_{exp} + v_{obs}^{int} \implies \text{válido para ambos os lóbulos} \tag{3.8}$$

onde os sobrescritos int e ref referem-se, respectivamente, a emissão intrínseca e refletida nos lóbulos. A Figura 3.3 mostra os resultados previstos pelo modelo intermediário.

O modelo intermediário foi desenvolvido a partir da análise de velocidades radiais ao longo do eixo maior do Homúnculo e aplicado ao restante da nebulosa bipolar, através da rotação ao redor do eixo de simetria dos lóbulos (para isso assume-se que o Homúnculo possui simetria azimutal). Definindo ϕ como sendo o ângulo entre o eixo maior de simetria do Homúnculo e um outro eixo qualquer que passa pela posição projetada da estrela central, podemos ver como o modelo se adapta às velocidades observadas fora do eixo maior e, com isso, testar sua validade nestas condições.

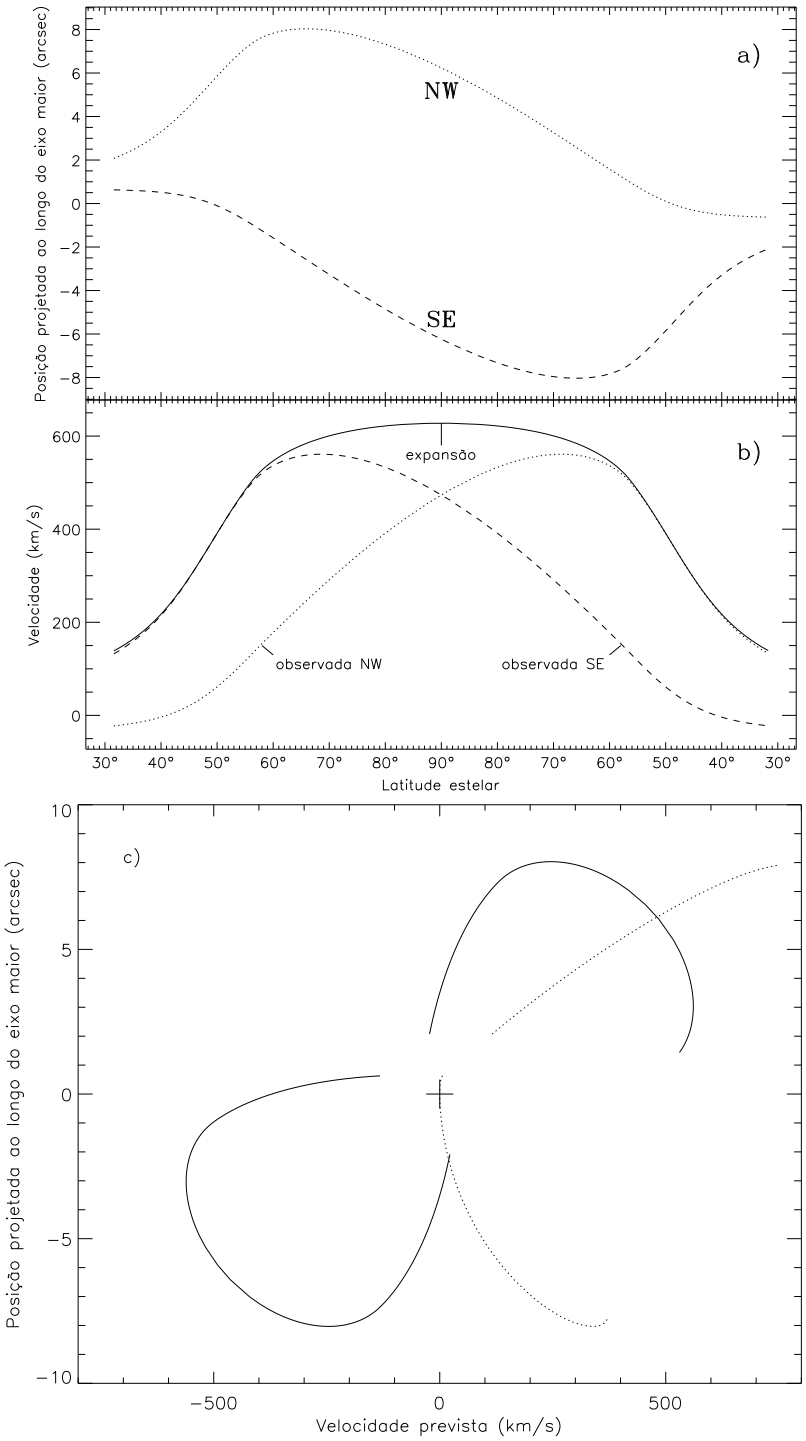


Figura 3.3 *Resultados previstos pelo modelo intermediário. (a) Relação entre a posição ao longo do eixo maior e a latitude estelar para ambos os lóbulos. (b) A velocidade intrínseca de expansão dos lóbulos em função da latitude estelar está representada pela linha contínua, enquanto a velocidade radial observada no lóbulo SE e a observada no lóbulo NW estão representadas, respectivamente, pela linha tracejada e pontilhada. (c) A velocidade radial prevista para cada posição ao longo do eixo maior do Homúnculo.*

A velocidade radial prevista em uma dada posição ao longo de um eixo que forma um ângulo ϕ em relação ao eixo maior de simetria do Homúnculo é dada pela projeção da velocidade de expansão do lóbulo na linha de visada, considerando-se o ângulo de inclinação do Homúnculo. Matematicamente, temos

$$v_{obs}^{int} = v_{exp} \times cos(i - tg^{-1}(R/Z)) \times cos(\phi) \Longrightarrow \text{ válido para o lóbulo NW} \tag{3.9}$$

$$v_{obs}^{int} = v_{exp} \times cos(i + tg^{-1}(R/Z)) \times cos(\phi) \Longrightarrow \text{ válido para o lóbulo SE} \tag{3.10}$$

$$v_{obs}^{ref} = v_{exp} + v_{obs}^{int} \Longrightarrow \text{ válido para o lóbulo NW} \tag{3.11}$$

$$v_{obs}^{ref} = v_{exp} - v_{obs}^{int} \Longrightarrow \text{ válido para o lóbulo SE} \tag{3.12}$$

cujos significados dos sobrescritos já foram apresentados anteriormente.

3.2 Identificação das componentes

Para testar a validade do modelo intermediário fora do eixo de simetria do Homúnculo, foram extraídos espectros a cada 0,5"ao longo de 4 direções, passando pela posição projetada da fonte central. O mesmo P.A. utilizado por Davidson *et al.* (2001) para o eixo maior de simetria do Homúnculo foi adotado neste capítulo para fins comparativos. A Figura 3.4 ilustra as posições de onde foram extraídos os espectros que serviram para medir a velocidade observada ao longo de cada eixo.

Na Figura 3.5, são apresentados espectros da linha do [Fe II] 12567 e do He I 10830, extraídos da posição e ângulo indicados em cada imagem. Posições negativas ao longo dos eixos significam que ela se localiza no lóbulo SE, caso contrário, está no lóbulo NW. Em quase todos os espectros mostrados na Figura 3.5 a linha do He I 10830 apresenta uma componente coincidente com a linha do [Fe II], a exceção acontece em (b) e (d), onde o [Fe II] apresenta apenas uma componente conspícua que não coincide com nenhuma componente do He I.

Utilizando as previsões do modelo intermediário e as velocidades radiais medidas e apresentadas neste trabalho, pode-se verificar qual componente é originada em emissão intrínseca e qual componente foi formada em outra região e refletida nos lóbulos. Isso foi feito para cada uma das 4 direções mostradas na Figura 3.4. O resultado é mostrado na Figura 3.6, que, conforme dito anteriormente, serve de base para a identificação das componentes observadas nos espectros.

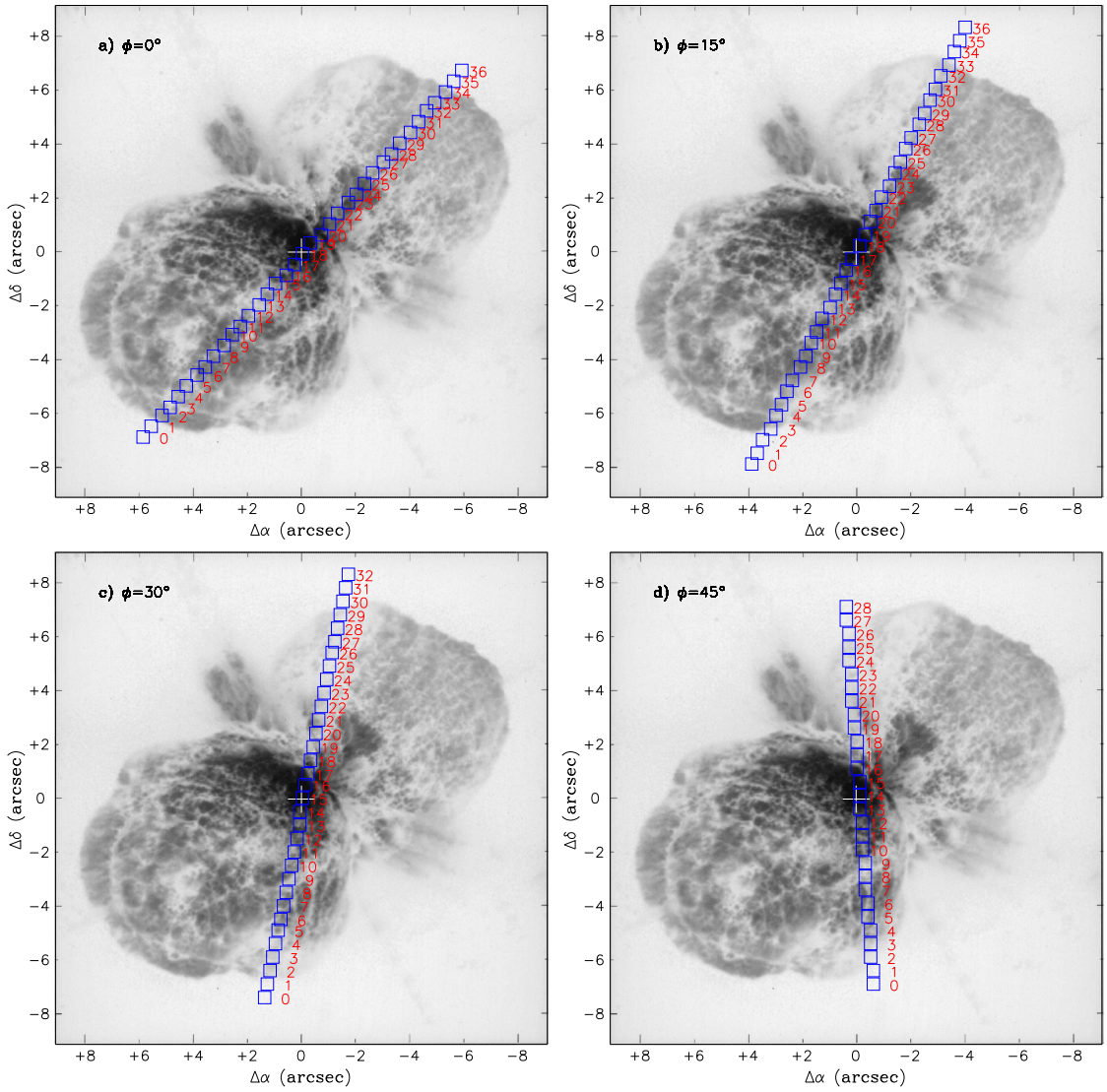


Figura 3.4 *Eixos escolhidos para extração espectral. O ângulo ϕ indicado em cada imagem é medido no sentido anti-horário a partir de P.A.=−41,1°. Nas imagens acima, o Norte está para cima e o Leste, para a esquerda.*

Na Figura 3.6, para ϕ=0°, o modelo prevê velocidades radiais maiores que as observadas na linha do [Fe II] para as emissões que se originam nos lóbulos. No caso desta linha, a emissão é devida ao choque do material ejetado pela estrela com os lóbulos. Provavelmente, esta colisão acontece na parte interna da nebulosa, onde a interação é mais intensa, causando a excitação do [Fe II] (Smith *et al.*, 2003). O desvio observado nas componentes em cada imagem da Figura 3.6 pode ser devido a erros sistemáticos, porém, o deslocamento necessário para corrigir tal efeito é cerca de 1/3 da resolução espectral, que é de 100 km/s. Isso significa que o ajuste das velocidades previstas e observadas não é substancialmente afetado por essa correção.

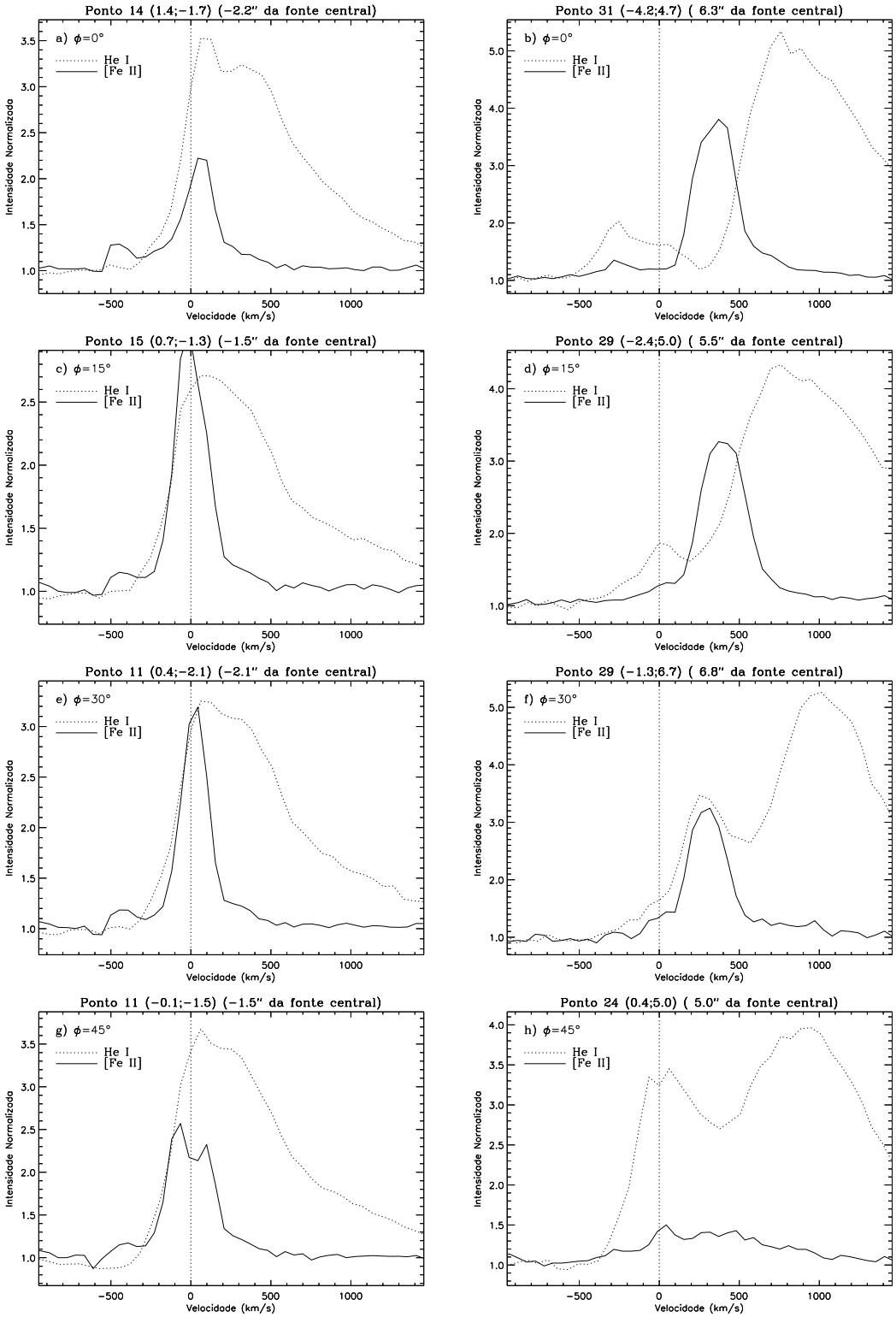


Figura 3.5 *Espectros extraídos dos pontos indicados no topo de cada gráfico, bem como o ângulo ϕ em relação ao eixo de simetria, que aumenta de cima para baixo, nesta figura. A coluna à esquerda apresenta os espectros extraídos do lóbulo SE, enquanto à direita estão os espectros do lóbulo NW.*

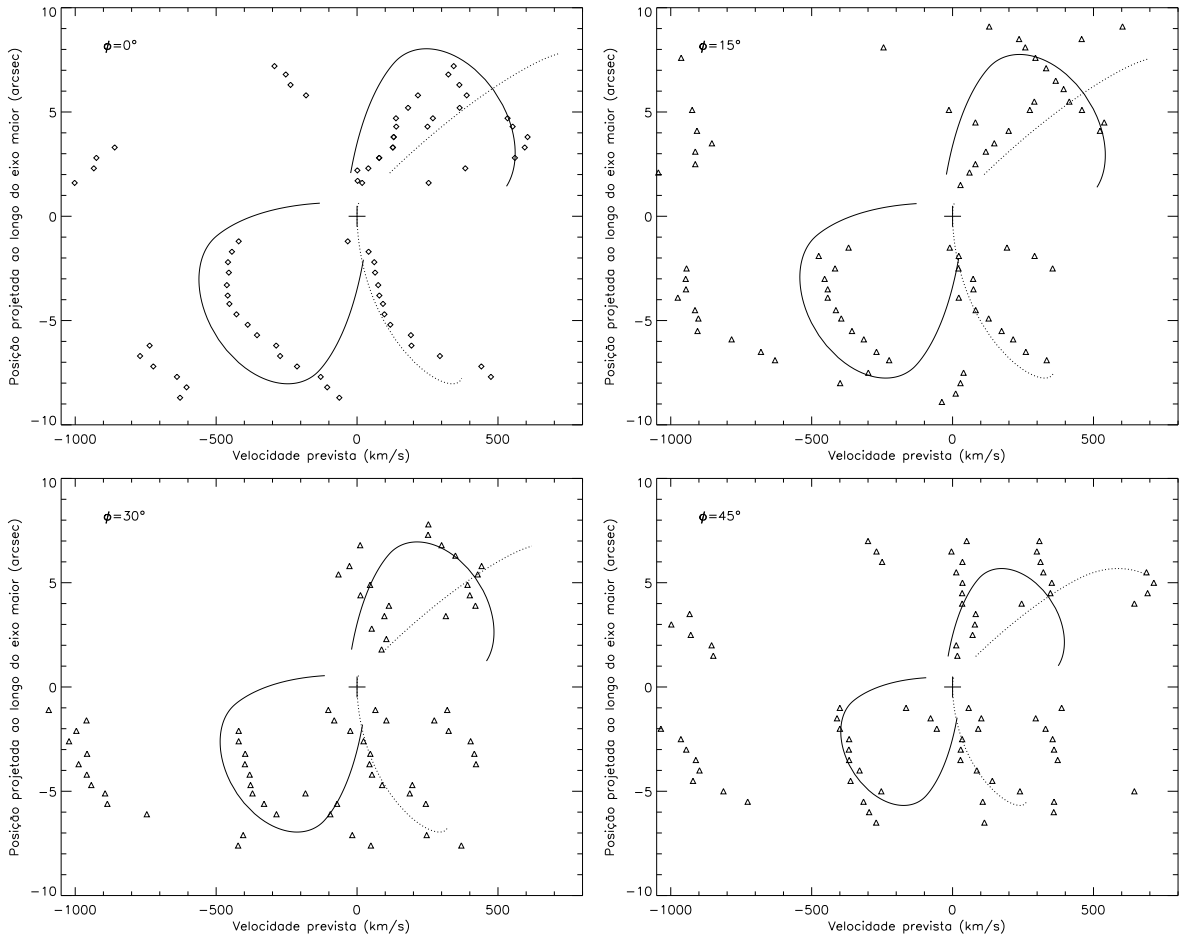


Figura 3.6 *Os símbolos indicam as velocidades radiais observadas ao longo de cada direção para a linha do [Fe II] 12567. As linhas cheias são as previsões do modelo intermediário para as componentes intrínsecas, enquanto as linhas pontilhadas são para as refletidas. Componentes com velocidades* ~ -1000 *km/s, vistas em ambos os lóbulos, são contaminações devido à linha do [Fe II] em 12521 Å.*

Ainda na Figura 3.6, ϕ=0°, as posições localizadas no lóbulo SE com velocidades entre -600 e -800 km/s coincidem com as velocidades medidas por Dorland *et al.* (2003) para a estrutura que eles denominaram *Ghost nebula*, que estaria localizada na frente do lóbulo SE, do lado de fora. Aparentemente, a *Ghost nebula* envolve toda a região polar do lóbulo SE, 'escorrendo' pelas laterais deste, conforme sugerido pelas observações da linha do [Ca II] (Davidson *et al.*, 2001). Dessa maneira, as velocidades observadas na Figura 3.6 e que se localizam em pontos fora da linha de visada dos lóbulos, provavelmente fazem parte da *Ghost nebula*. Entretanto, componentes com velocidades radiais ~ -1000 km/s observadas em ambos os lóbulos são devido à contaminação de uma outra linha do ferro em 12521 Å.

Ao longo dos eixos com ϕ=0° e 15°, o lóbulo NW não apresenta, em nenhuma das linhas, emissão intrínseca na parede lateral, apenas emissão refletida. A emissão intrínseca da linha do [Fe II] detectada neste lóbulo vem do choque do vento bipolar com a região polar do lóbulo NW. Entretanto, para ϕ=30° e 45°, a linha do He I 10830 apresenta uma segunda componente que não coincide com a emissão refletida na lateral do lóbulo NW. Provavelmente esta componente tem origem no material localizado no disco equatorial, que se estende na frente do lóbulo NW, principalmente quando ϕ=30°ou 45°, que proporcionam uma projeção maior do disco equatorial ao longo do eixo considerado. Este é o caso do espectro mostrado na Figura 3.5(h). A posição de onde este espectro foi extraído é muito próximo do plano equatorial que é visível nas imagens do HST. Provavelmente, próximo à fonte central, o disco equatorial apresenta várias regiões onde a densidade é relativamente baixa, permitindo que a radiação ultravioleta oriunda da fonte central escape, formando 'feixes de iluminação' visíveis apenas em linhas como He I 10830. Esse efeito será discutido no Capítulo 5.

Capítulo 4

Regiões de excitação colisional e o Pequeno Homúnculo

O Pequeno Homúnculo foi descoberto por Ishibashi *et al.* (2003) utilizando dados obtidos com o HST/STIS. Esses autores realizaram um mapeamento com fenda longa do Homúnculo na região espectral do Hα e Hβ. A partir do campo de velocidades, deduziram que o Pequeno Homúnculo se originou da erupção menor ocorrida em 1890.

Neste capítulo, discutirei a estrutura de emissão do Pequeno Homúnculo (designado também por PH – Pequeno Homúnculo) e as regiões de excitação colisional que existem ao longo do Homúnculo (às vezes citado como GH – Grande Homúnculo), com base em estudos da linha do [Fe II] 12567 Å, a segunda linha mais intensa do ferro no infravermelho próximo.

4.1 Mecanismos de excitação do Fe II

Apesar de ser essencialmente uma nebulosa de reflexão, o GH também apresenta regiões com emissão intrínseca. A maioria das linhas em emissão no espectro do GH são produzidas no vento da fonte central e refletidas na nebulosa em direção ao observador. Dessa maneira, o GH é considerado essencialmente uma nebulosa de reflexão. Entretanto, dois exemplos de linhas formadas por emissão intrínseca são as linhas do [Fe II] em $\lambda \approx$12567 Å e $\lambda \approx$16435 Å. Estas linhas são observadas no espectro do GH e são as duas linhas mais intensas no NIR depois das linhas do H e He (produzidas no vento da fonte central e refletidas no GH). Ambas originam-se do mesmo nível superior: a^4D, localizado

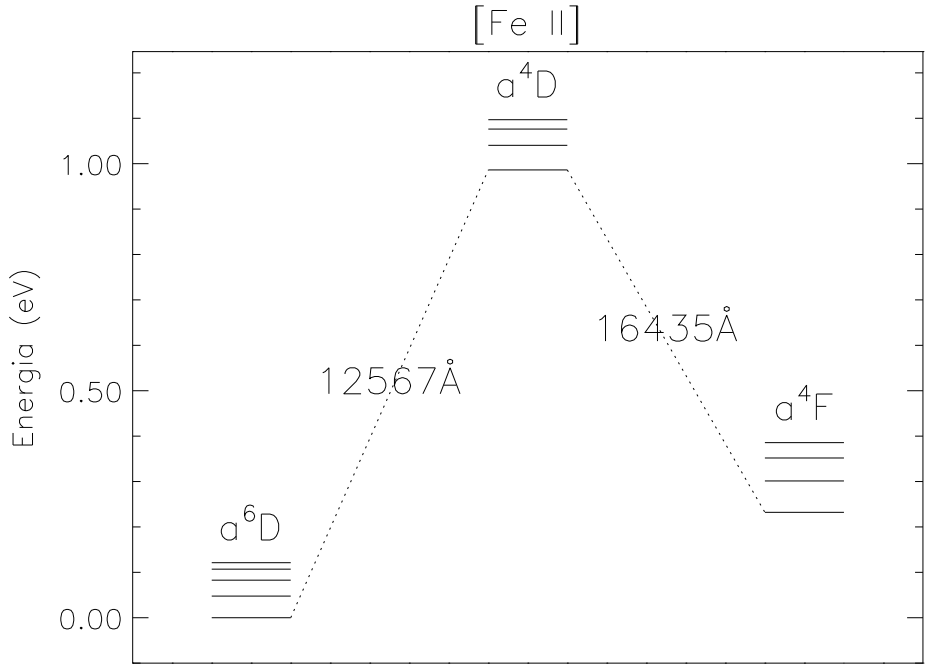


Figura 4.1 *Diagrama de Grotrian do [Fe II] para os 3 primeiros níveis acima do fundamental. As linhas pontilhadas indicam a transição entre os níveis que dão origem às linhas indicadas (12567 e 16435 Å). A linha 12567 Å é emitida na desexcitação do nível a^4D_7 para o nível a^6D_9, enquanto a linha 16435 Å é emitida a partir do mesmo nível superior, decaindo para o nível a^4F_9.*

a apenas 0,99 eV do estado fundamental (cf. Figura 4.1). No entanto, o mecanismo de desexcitação é diferente para as duas linhas: *quadrupolo elétrico* para a linha 16435 Å e *dipolo magnético* para a linha 12567 Å (Nussbaumer & Storey, 1980).

A excitação para o nível a^4D do Fe II pode se dar por colisão ou fotoionização. No entanto, um gás fotoionizado por uma estrela quente apresenta pouca ou nenhuma emissão oriunda deste nível, uma vez que o ferro estará em estágios superiores de ionização (Fe III, Fe IV, *etc*). Portanto, transições entre o termo a^4D e termos inferiores (próximos ao nível fundamental) têm maior probabilidade de provirem de excitação colisional. Quando a razão entre o pico das linhas de recombinação do H e linhas excitadas colisionalmente é maior que a unidade (*e.g.*: [Fe II] 12567/Pa$\beta > 1$), pode ser um sinal de que o gás esteja termalizado a aproximadamente 10^3 K (Smith *et al.*, 2002). Modelos de emissão infravermelha originadas em choques (McKee *et al.*, 1984; Seab *et al.*, 1984; Shull & Draine, 1987) prevêem linhas do [Fe II] 16435 muito mais intensas que as do hidrogênio (Smith *et al.*, 2002). Remanescentes de supernovas apresentam [Fe II] 16435/Br$\gamma \gtrsim 30$ (Graham *et al.*, 1987), enquanto as regiões HII, onde as linhas do H são formadas por recombinação, apresentam razões tipicamente $\lesssim 1$. Como o nível a^4D dá origem às

duas linhas, espera-se que o comportamento das duas seja semelhante, *i.e.*, o mecanismo responsável pela emissão da linha 16435 Å é o mesmo que emite a linha 12567 Å.

Em média, nas supernovas (SN) (Graham *et al.*, 1987; Oliva, 1987; Oliva *et al.*, 1987), ambas as linhas do ferro, 12567 e 16435 Å, são, pelo menos, 20 vezes *mais intensas* que a linha Brγ. Por outro lado, em uma região fotoionizada típica (Orion, nebulosas planetárias, *etc*), as mesmas linhas são cerca de 20 vezes *menos intensas* que a Brγ. Esta imensa diferença se deve essencialmente a dois motivos:

a) nas regiões HII e nebulosas planetárias a maior parte do ferro, como já foi dito anteriormente, está na forma de íons em altos estágios de ionização. Nestas condições, a abundância do Fe II é muito baixa. Em uma SN, onde o gás foi ionizado pela onda de choque e recombinado na região pós-choque, 90% do ferro está na forma do Fe II (Oliva, 1987);

b) a onda de choque associada à SN pode destruir uma fração significativa dos grãos de poeira, que é onde a maior parte do Fe está escondida. Os fótons UV, responsáveis por esculpir regiões fotoionizadas, são menos eficientes na destruição dos grãos.

Portanto, como a razão [Fe II]/Brγ depende fortemente do mecanismo de excitação, esta pode ser utilizada na identificação de regiões de choque, onde a excitação colisional é mais importante que a fotoionização. Devido ao fato que as linhas 12567 e 16435 Å do [Fe II] têm origem no mesmo nível superior, a razão [Fe II] 16435/Brγ é equivalente a [Fe II] 12567/Paβ. A relação entre ambas é dada por (Rodríguez-Ardila *et al.*, 2004)

$$\frac{[\mathrm{FeII}]12567}{\mathrm{Pa}\beta} \approx 0,23 \times \frac{[\mathrm{FeII}]16435}{\mathrm{Br}\gamma} \tag{4.1}$$

que é obtida a partir do fato de que a teoria prevê [Fe II] 12567/[Fe II] 16435=1,35 (Nussbaumer & Storey, 1988) e, assumindo o caso B, Brγ/Paβ=0,17 (Hummer & Storey, 1987).

4.2 Espectros típicos do Homúnculo e do material ao seu redor

A Figura 4.2 mostra os locais de onde foram extraídos os espectros apresentados na Figura 4.3. Nas posições 0, 1, 2, 3, 5 e 6 da Figura 4.2, a área de cada quadrado representa a área da qual foi extraído os espectros. Entretanto, para melhorar o S/N da região localizada fora do Homúnculo, foi utilizada a mediana de 9 lentes (3×3 lentes).

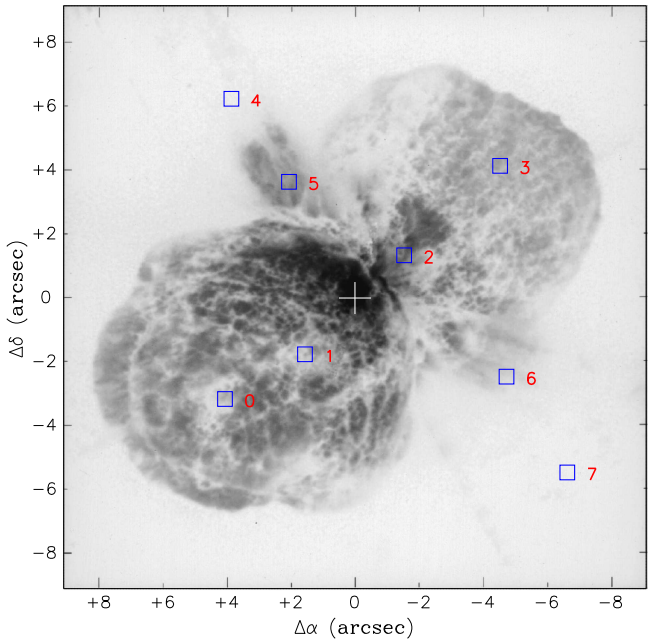


Figura 4.2 *As posições mostradas nesta imagem correspondem às regiões de onde foram extraídos os espectros apresentados na Figura 4.3. Para as posições 0, 1, 2, 3, 5 e 6, a área de cada quadrado corresponde exatamente à área da qual o espectro extraído foi combinado, i.e., cada quadrado tem 0,5×0,5 arcsec, e o espectro extraído de cada um destes é a combinação de 4 lentes adjacentes. Nas posições 4 e 7, o espectro foi obtido somando-se 9 lentes (formando uma matriz de 3×3 lentes), e portanto a área ilustrada por estes quadrados não correspondem exatamente à area de extração.*

Para cada espectro foi ajustado um *continuum* baseado em 3 regiões espectrais que não apresentam linhas em emissão: a primeira localiza-se entre 10620 e 10760 Å; a segunda, entre 11030 e 11080 Å e a terceira, entre 12105 e 12220 Å. Foi feito uma regressão linear simples (método de minimização do χ^2) e o resultado foi utilizado para normalização dos espectros. A regressão linear fornece uma boa primeira estimativa do *continuum*.

Na Figura 4.3(0), nota-se um perfil P Cyg na linha do He I 10830 (este perfil é observado também no gráfico (5)) e o aparecimento de uma outra componente à direita da linha do [Fe II] 12567. Neste gráfico, a linha indicada por um ponto de exclamação, próximo 12750 Å (à esquerda da base da linha Paβ) é um artefato inserido pela remoção das linhas telúricas. Em (1), nota-se claramente duas componentes da linha [Fe II] 12567 (uma devido à emissão intrínseca no lóbulo SE e outra refletida nesse mesmo lóbulo, na parte mais próxima do observador). Ainda nesta posição, as linhas do He I 10830 e Paβ apresentam um perfil composto por uma componente 'estreita' (vista como um pico extremamente fino) e outra mais 'alargada'. Provavelmente, estas componentes têm origem distintas, assim como as duas emissões da linha do [Fe II] 12567.

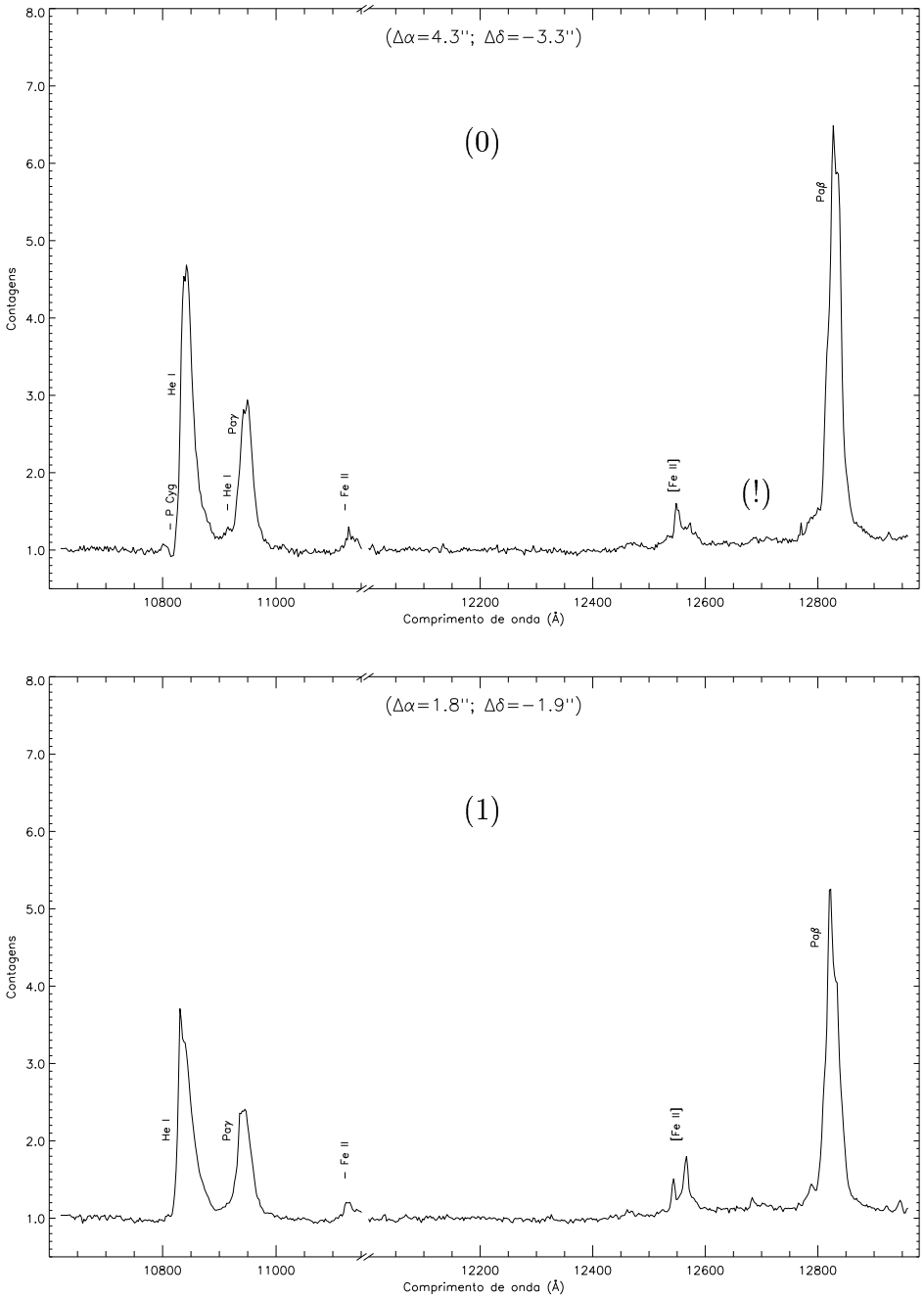
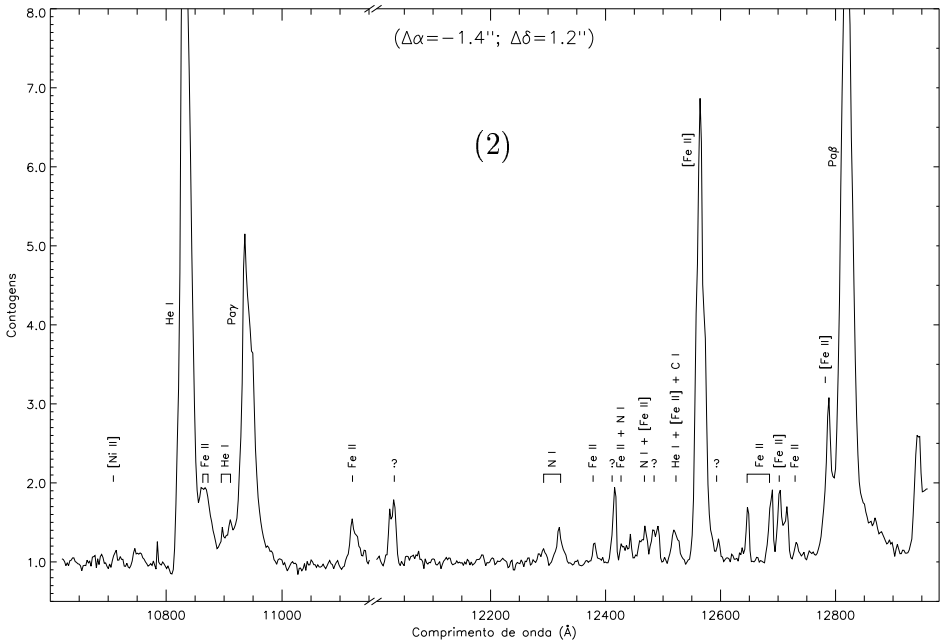
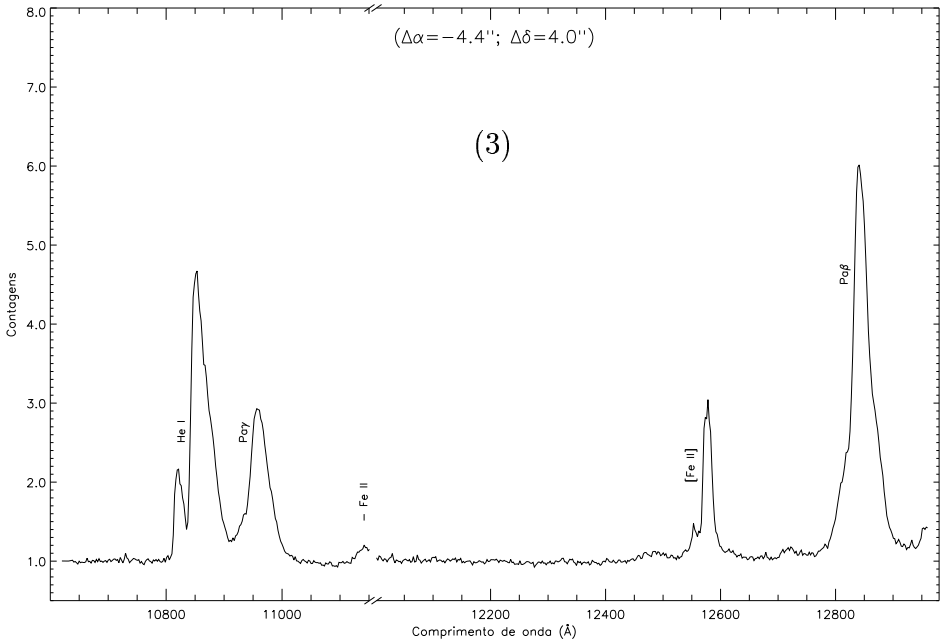


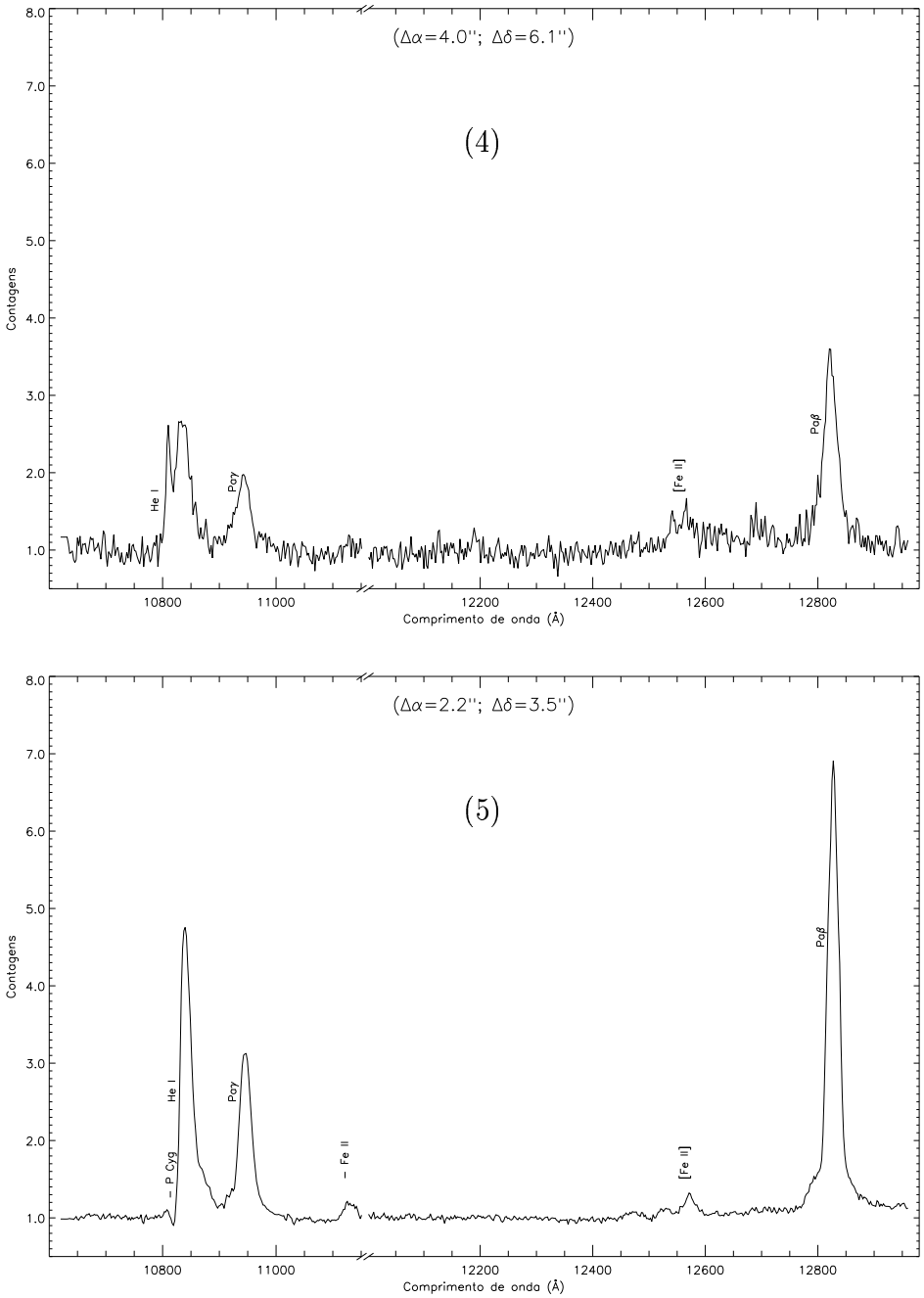
Figura 4.3 *Espectros típicos de algumas regiões.* (0), (1), (2), (3), (5) *e* (6) *foram obtidos ao longo do Homúnculo (*cf. *Figura 4.2). Os espectros apresentados em* (4) *e* (7) *foram extraídos de regiões localizadas fora da nebulosa do Homúnculo. As coordenadas da posição de onde foi obtido o espectro estão indicadas no alto de cada gráfico ($\Delta\alpha$ e $\Delta\delta$). Linhas não identificadas estão assinaladas com um ponto de interrogação, enquanto linhas sem nenhuma identificação são artefatos da subtração das linhas telúricas. A região espectral entre 11150 Å e 12000 Å foi omitida, porque nesta região existem muitas linhas telúricas de absorção e qualquer linha neste intervalo seria suspeita.*





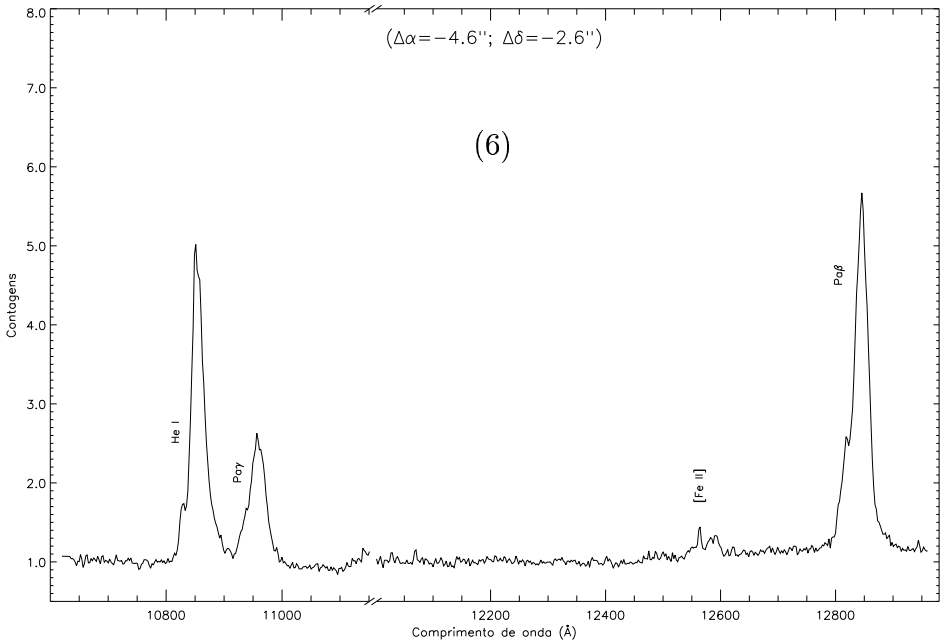
Continuação da Figura 4.3.

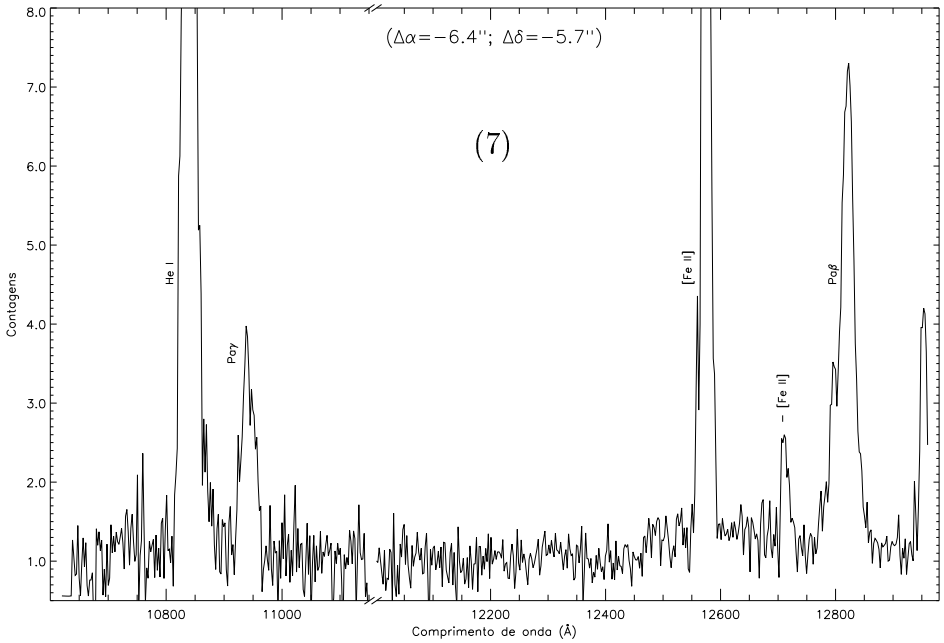
Na posição 2 da Figura 4.2, cujo espectro está apresentado no gráfico (2) da Figura 4.3, o espectro é extremamente diferente de qualquer outra região do Homúnculo (à exceção dos espectros obtidos próximos da fonte central, que apresentam o mesmo comportamento). Nesta posição, observa-se um aumento considerável no número de linhas do Fe II e [Fe II] e outras linhas de elementos como C, N e Ni. Esta região é conhecida por possuir um excesso em emissão ultravioleta (Morse *et al.*, 1998) e, portanto,



Continuação da Figura 4.3.

deve excitar um maior número de elementos (a maioria das linhas identificadas possui energia de excitação $\sim$ 1 eV). A linha do [Fe II] 12567 nesta região apresenta uma base larga e um pico estreito. Isto é devido ao fato de que há uma contribuição de duas componentes que não podem ser resolvidas (uma componente devido à região de alta excitação e outra devido ao PH, localizado na mesma linha de visada que a primeira região).





Continuação da Figura 4.3.

Uma segunda componente do He I 10830 pode ser observada na Figura 4.3(3). Esta aparece apenas em regiões específicas ao longo do lóbulo NW do Homúnculo e também é identificada em regiões fora dos lóbulos (Figura 4.3(6)). A linha do [Fe II] 12567 também apresenta uma segunda componente nesta mesma região (posição 3 da Figura 4.2). No próximo capítulo será discutido de maneira mais detalhada a origem desta segunda componente que é vista na linha do He I 10830 e na [Fe II] 12567.

Os espectros apresentados na Figura 4.3(4) e (7), foram obtidos de regiões localizadas fora do Homúnculo (da região conhecida como *S Condensation*). Em (4), nota-se a forte emissão do [Fe II] 12567 e do He I 10830, em relação às linhas de recombinação do H. Nesta região, a excitação destas linhas é predominantemente colisional, uma vez que radiação oriunda da fonte central provavelmente não a atinge. Outro fato que sustenta este argumento são as imagens em raios-X obtidas pelo satélite espacial *CHANDRA* (Seward *et al.*, 2001). Estas revelaram que a *S Condensation* é a região responsável por parte da emissão em raios-X moles (0,5 – 1,5 keV).

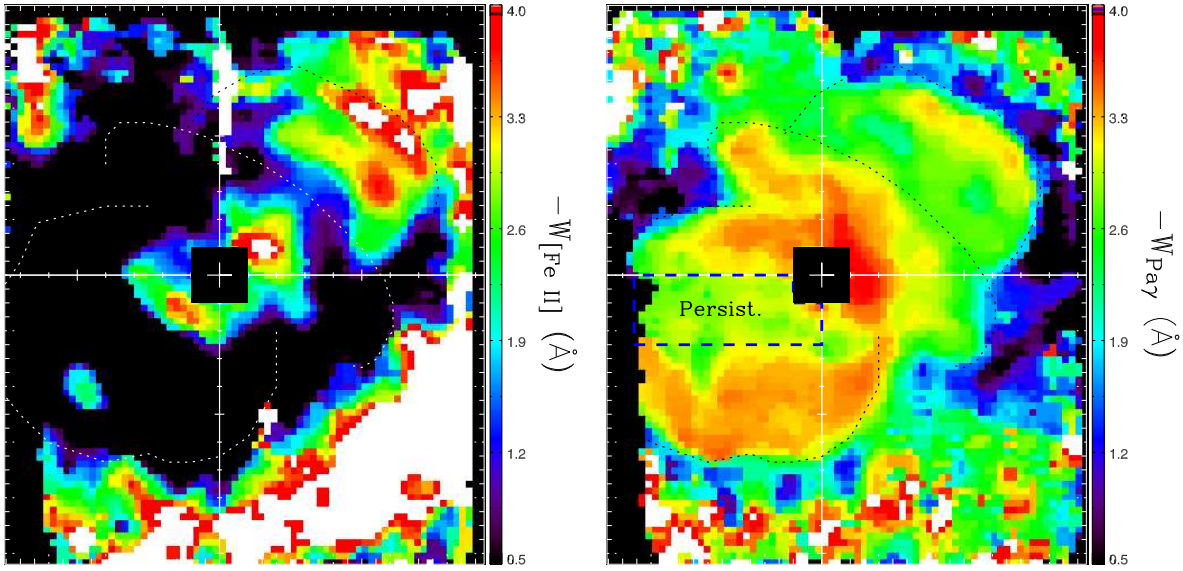
4.3 A razão [Fe II] 12567/Paγ

Nesta seção farei um estudo sobre as regiões de excitação colisional ao longo do Homúnculo e ao redor do mesmo com base nas linhas do [Fe II] 12567 e Paγ. O motivo pelo qual optei por usar a linha Paγ nos mapas de razão entre linhas em vez da Paβ é que em alguns lugares do Homúnculo a Paβ está saturada. Portanto, utilizar Paγ favorece o estudo das regiões onde Paβ está saturada e fornece a mesma informação que esta.

4.3.1 Os ajustes gaussianos

Para obter os parâmetros físicos, como largura equivalente, intensidades relativas, *etc.*, a metodologia utilizada foi o ajuste de perfis gaussianos a cada uma das duas linhas ([Fe II] 12567 e Paγ). Com essa finalidade, foi escrito (por este autor) um programa em IDL que lê o cubo de dados e, para cada lente, é extraído o espectro e combinado com o espectro adjacente para aumentar o S/N. A leitura e os ajustes são feitos ao longo das coordenadas em declinação (direção E–W). Os ajustes das gaussianas foram feitos restringindo-se os parâmetros livres: FHWM, área e centro da curva. Para cada linha foi ajustada uma gaussiana e em seguida foi feito outro ajuste com 3 (para a linha Paγ) ou 4 componentes (para a linha [Fe II] 12567) gaussianas.

A linha Paγ foi bem ajustada por uma única gaussiana na grande parte das regiões devido ao fato de que esta é larga e é uma linha refletida da fonte central. A Figura 4.4(b), apresenta um mapa da largura equivalente dessa linha espectral ao longo do GH ajustada por uma única gaussiana. Existe uma região localizada na frente do lóbulo SE que apresenta uma largura equivalente menor que a média deste lóbulo. Esse efeito pode ser visto na Figura 4.4(b) na região delimitada pela linha tracejada identificada como 'Persist.', que possui tamanho idêntico ao do campo do IFU do CIRPASS. Portanto, esse



(a) (b)

Figura 4.4 *Largura equivalente das linhas (a) [Fe II] 12567 e (b) Pa γ ao longo do Homúnculo. Em (b), no lóbulo SE, a região delimitada pela linha tracejada (identificada por 'Persist.') apresenta uma queda brusca na largura equivalente. Este é um efeito instrumental conhecido como 'persistência' (vide texto). O quadrado preto no centro indica aproximadamente a região saturada. Para melhor visualização, o intervalo da grade de coordenadas é de 1". O Norte está para cima e o Leste, para a esquerda.*

efeito não é real, tendo origem em uma característica de detectores infravermelhos: o efeito 'persistência', que ocorre toda vez que o detector é exposto a uma fonte muito brilhante e, logo em seguida, a um objeto mais fraco que esse, causando um aumento da corrente de escuro típica do detector que demora até 4 minutos para retornar ao nível normal (Finger *et al.*, 2004). De acordo com a seqüência em que foram feitas as observações do GH, antes de começar o mosaico, foi feito a observação da fonte central de η Car. Isto causou o efeito observado na Figura 4.4(b). Infelizmente é algo que não pode ser contornado durante a redução e tratamento das imagens.

A linha do [Fe II] 12567 é mais complicada de ser ajustada porque apresenta várias componentes ao longo do GH. Por isto, 4 gaussianas foram utilizadas no ajuste. Cada gaussiana foi restrita a um intervalo de velocidade para ajustar uma dada componente da linha. Além disso, foi feito um ajuste com uma única gaussiana para obter-se uma visão geral de onde ocorrem alargamentos devido às várias componentes (onde a gaussiana for mais larga, é sinal que existem mais de uma componente com intensidades semelhantes). Este ajuste é feito a partir do pico da componente mais intensa e então os parâmetros vão sendo ajustados de maneira a minimizar o valor do χ^2. O resultado é mostrado na

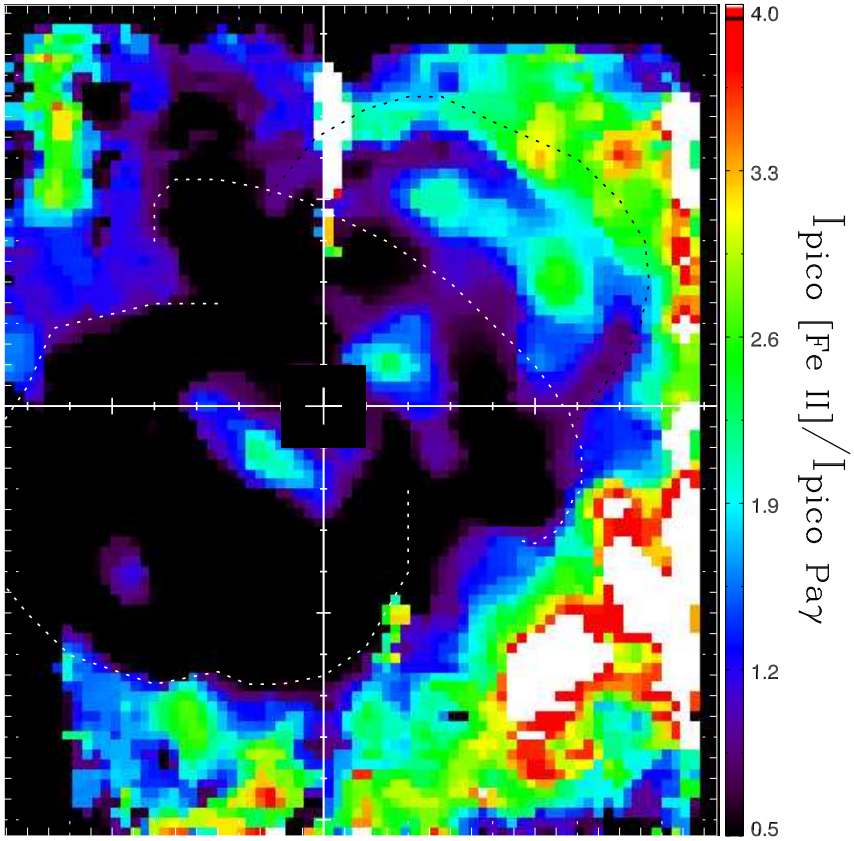


Figura 4.5 *Razão entre as linhas [Fe II] 12567 e Paγ. A escala de cores foi escolhida de maneira a ressaltar as regiões onde a colisão é o mecanismo responsável pela excitação da linha [Fe II] 12567.*

Figura 4.4(a), que mostra a largura equivalente da linha do [Fe II] 12567 no Homúnculo e na nebulosa externa. A região branca localizada na parte inferior desta imagem (especialmente à direita) é a região conhecida como *S Condensation*, onde a excitação das linhas se dá essencialmente por colisão.

4.3.2 Regiões de excitação colisional

A Figura 4.5 mostra o resultado da razão entre a intensidade do pico da linha do [Fe II] 12567 e Paγ, obtida com o ajuste de uma gaussiana ao perfil destas linhas.

Nessa imagem podem ser vistas as regiões onde a excitação é feita através de colisões. De acordo com a equação 4.1, existe uma relação entre a razão [Fe II] 12567/Paβ e [Fe II] 16435/Brγ. Entretanto, devido a motivos já explicados, utilizei a linha Paγ, que também está relacionada à intensidade da linha Brγ pela seguinte equação

$$\frac{[\mathrm{FeII}]12567}{\mathrm{Pa}\gamma} \approx 0,41 \times \frac{[\mathrm{FeII}]16435}{\mathrm{Br}\gamma} \,. \tag{4.2}$$

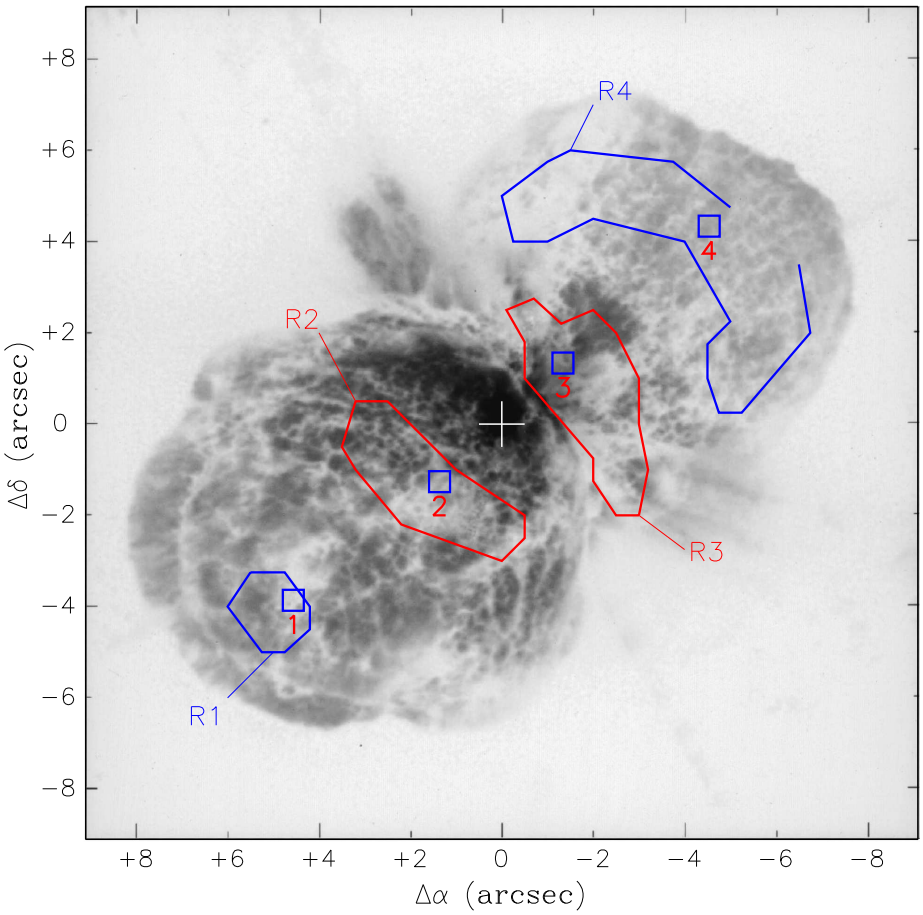


Figura 4.6 *Identificação das regiões de colisão da Figura 4.5. Os quadrados indicam a área de onde foram extraídos os espectros apresentados na Figura 4.8 e 4.9.*

Assim, para regiões onde o mecanismo de excitação é a fotoionização, deve-se esperar [Fe II] 12567/Pa$\gamma \lesssim 0,41$, dado que o valor típico nestas regiões é [Fe II] 16435/Br$\gamma \lesssim 1$. Portanto, a escala de cores da Figura 4.5 foi escolhida para realçar as regiões que apresentam emissão devido a colisões.

Identificação das regiões de colisão

A Figura 4.6 mostra as regiões de colisão identificadas na Figura 4.5 e suas respectivas denominações que serão utilizadas ao longo do texto.

As regiões R1 e R4

A região R4 localiza-se na região interna do lóbulo NW, ou seja, essa região é vista *através* da parede lateral do lóbulo NW. Isto implica que a emissão não é causada pelo

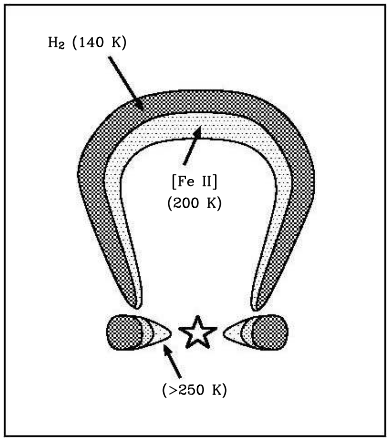


Figura 4.7 *Estrutura proposta por Smith et al. (2003) para os lóbulos e o disco equatorial. Protegido da colisão entre o vento bipolar da fonte central e a parede interna de cada lóbulo, o H_2 encontrar-se-ia na parte externa do Homúnculo, juntamente com a poeira fria ($\sim$ 140 K). Segundo este cenário, a temperatura na região de colisão é de cerca de 200 K. É aí que se localizaria o [Fe II] 12567. O material contido no plano equatorial conteria poeira quente ($>$ 250 K).*

choque entre a parede externa deste e o meio interestelar, ao invés disso, a emissão vem de *dentro* do lóbulo NW. De fato, no lóbulo SE não existe uma componente em emissão tão forte como a do lóbulo NW, que seria o esperado se o choque fosse causado pelo impacto dos lóbulos com o meio interestelar.

De acordo com Hillier & Allen (1992), os lóbulos do GH são essencialmente vazios, existindo apenas uma camada que delimita a região de dentro (que contém gás) da região de fora (meio interestelar). Davidson *et al.* (2001) argumentam que a opacidade dos lóbulos do GH é variável: suas paredes seriam opticamente mais finas que a região polar. Segundo esses autores, devido ao fato da região polar compreender um ângulo sólido maior do que o das paredes, a primeira deveria conter muito mais matéria que a segunda, contribuindo para o aumento da opacidade nesta região. Por isso, componentes refletidas na parede interna da região posterior do lóbulo SE[1] não seriam facilmente detectadas. Entretanto, existem buracos (regiões opticamente finas) no lóbulo SE que permitem o 'vazamento' de alguma radiação para o observador. Este é o caso da região R1, vista na Figura 4.6. Aparentemente esta é homóloga, no lóbulo SE, à região R4. Como R1 está *próximo* a um local onde a opacidade diminui (conhecido como *hole*), um pouco de radiação do choque interno escaparia por esta última região. Isto explicaria a origem da emissão detectada na região R1.

[1]Região posterior do lóbulo SE: esta é a parede lateral do lóbulo SE localizada na mesma linha de visada que a região polar e que não é visível por causa da grande opacidade deste último.

A detecção destas duas regiões, R1 e R4, dá apoio à hipótese de Smith *et al.* (2002), que está ilustrada na Figura 4.7. Segundo observações feitas por esse autor, existem duas regiões que constituem os lóbulos do GH: uma emitindo H_2 e outra emitindo [Fe II]. A primeira seria mais fria do que a última (≈ 140 K e ≈ 200 K, respectivamente). O [Fe II] é emitido pelo choque entre o vento bipolar da fonte central e a parede interna de cada lóbulo. O H_2 localiza-se em uma região entre o lóbulo e o meio interestelar, e vai acumulando-se na frente dos lóbulos à medida em que estes se expandem.

Identificação das componentes da linha do [Fe II] 12567 nas regiões R1 e R4

A identificação de cada uma das componentes da linha do [Fe II] 12567 foi feita com base no modelo intermediário de Davidson *et al.* (2001), que, conforme foi discutido no Capítulo 3, prevê quais as velocidades esperadas para emissões intrínsecas e refletidas em uma determinada posição.

O espectro apresentado na Figura 4.8(a) apresenta três componentes com velocidades ≈ -400 km/s (denominada FSE – mnemônico para Frente do lóbulo SE, oriunda da emissão intrínseca na parte anterior do lóbulo SE), ≈ -200 km/s (denominada ASE – Atrás do lóbulo SE, originada na emissão intrínseca da parede posterior do lóbulo SE) e ≈ -230 km/s (denominada ESE – Espalhada no lóbulo SE, proveniente da emissão refletida na parede anterior do lóbulo SE). A região de onde foi extraído este espectro é a R1, que, como foi dito anteriormente, apresenta uma queda na opacidade, permitindo que a radiação, oriunda do choque entre o vento bipolar da fonte central e a região polar do GH, escape. Como pode ser observado nessa figura, a componente mais intensa é aquela originada neste choque (FSE).

Devido à baixa opacidade a comprimentos de onda do infravermelho, a emissão oriunda da parte posterior do lóbulo SE pôde ser detectada pela primeira vez por Smith (2002). Esta região é a responsável pela componente identificada como ASE em nossos dados. Esta tem origem no choque entre o vento bipolar e a parede interna mais distante do lóbulo SE, que é muito menos intenso do que o choque com a região polar, tornando a detecção dessa componente extremamente difícil em outras posições onde a opacidade é maior.

A componente denominada ESE é formada por gás se movendo lentamente próximo ao centro de configuração do sistema, embora não seja o mesmo que o vento estelar da fonte central. Como os lóbulos estão em expansão em relação a esse gás, a radiação será espalhada pelo lado mais próximo de cada lóbulo, eventualmente chegando até o observador. Os detalhes matemáticos desse mecanismo foram discutidos no Capítulo 3.

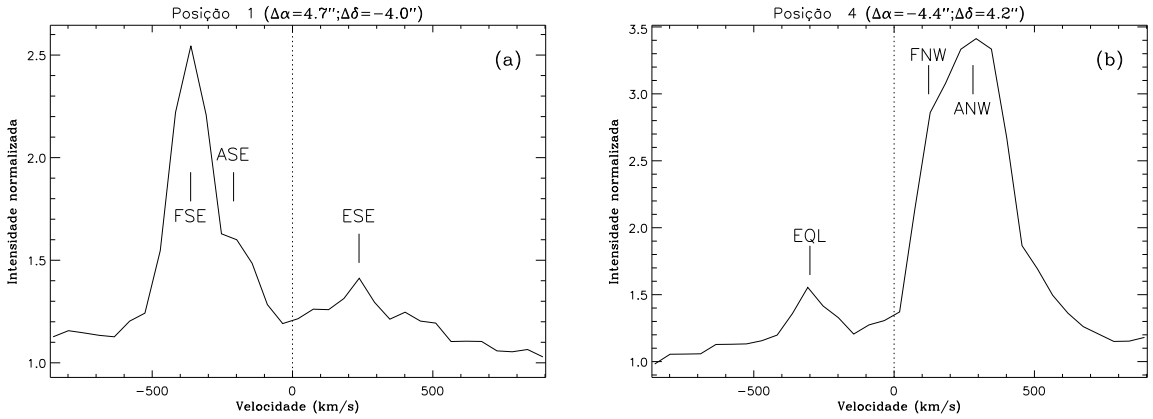


Figura 4.8 *Espectros da linha do [Fe II] 12567 extraídos das posições 1 e 4, indicados na Figura 4.6 (região R1 e R4, respectivamente). Cada componente da linha está identificada por um traço vertical, que indica a velocidade determinada a partir de ajustes gaussianos.*

Na Figura 4.8(b), nota-se uma componente em ≈ -300 km/s (doravante denominada EQL – material EQuatorial Lento) e outras duas que não estão completamente separadas: uma em ≈ 120 km/s (denominada FNW – Frente do lóbulo NW, emissão proveniente da parede da frente do lóbulo NW) e outra em ≈ 280 km/s (denominada ANW – Atrás do lóbulo NW, originada na parede posterior do lóbulo NW). A EQL está associada ao material que está localizado no plano equatorial, na linha de visada entre o observador e a parede mais próxima do lóbulo NW. Davidson *et al.* (2001) também encontraram esta componente presente na emissão do [Ni II] λ7380 e, fazendo uso do fato de que esta componente apresenta velocidades que aumentam a medida em que a distância até a fonte aumenta ($Hubble\ flow$), estimaram o ângulo de inclinação i do eixo do GH (através desse método, os autores determinaram $i = 40,7^o \pm 1,0^o$).

A componente denominada FNW tem sua origem na *parede* do lóbulo NW mais próxima do observador, *i.e.*, esta é uma emissão intrínseca associada ao choque entre um vento bipolar rápido oriundo da fonte central e a *parede* interna do lóbulo NW (Smith & Davidson, 2001). O mesmo mecanismo é responsável pela componente ANW, *i.e.*, o vento colidindo com o lóbulo NW. Entretanto, a região de colisão é diferente: a origem desta componente é a colisão com a parte interna da região *polar* do lóbulo NW.

R2, R3 e a identificação das componentes do [Fe II] 12567 destas regiões

Ishibashi *et al.* (2003) foram os primeiros a detectar uma nebulosa em emissão dentro do GH. Inicialmente referida como a 'nebulosa símbolo de integral' devido ao seu aspecto

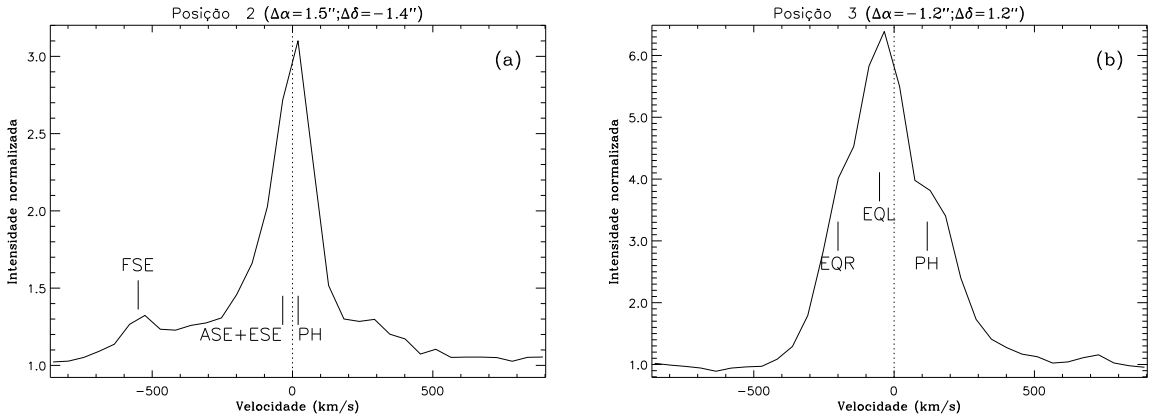


Figura 4.9 *Espectros da linha do [Fe II] 12567 extraídos das posições 2 e 3, indicados na Figura 4.6 (região R2 e R3, respectivamente). Cada componente da linha está identificada por um traço vertical, que indica a velocidade determinada a partir de ajustes gaussianos (vide texto).*

geométrico ($\oint$), hoje convencionou-se denominá-la Pequeno Homunculus (PH). De fato, o PH realmente possui uma semelhança com o GH: ambos possuem uma geometria bipolar. O PH estende-se por $\pm$ 2" da fonte central e aparentemente possui o mesmo eixo de simetria longitudinal que o GH. As análises realizadas por Ishibashi *et al.* sugerem que esta nebulosa foi ejetada na erupção ocorrida por volta de 1890 (cerca de 50 anos após o GH).

As regiões R2 e R3, na Figura 4.6, coincidem com a posição do PH. Entretanto, R3 aparentemente está obscurecida pela emissão oriunda do material contido no plano equatorial, dado que ambas estão na mesma linha de visada. Na Figura 4.9(a) nota-se que a linha é mais estreita que em 4.9(b). Neste último, o perfil pode ser ajustado por 3 componentes com velocidades de aproximadamente -200 km/s (denominada EQR – material EQuatorial Rápido), -52 km/s (denominada EQL) e 118 km/s (denominada PH – Pequeno Homúnculo).

As componentes EQR e EQL estão associadas ao material ejetado que está contido no plano equatorial (Davidson *et al.*, 2001). Smith (2005) sugere que estas componentes estejam associadas ao PH, mas, devido ao fato de que estas emissões estão na mesma linha de visada que o PH, é difícil dizer se elas estão relacionadas. O fato é que EQR e EQL possuem velocidades radiais que variam com a distância até a fonte central, sendo que, quanto mais distante, maior é a velocidade radial observada. Isto concorda com a suposição feita por alguns autores de que esse material possui um *Hubble flow* (Davidson *et al.*, 2001; Hillier & Allen, 1992), *i.e.*, a velocidade radial do material equatorial cresce à medida que a distância até a fonte central aumenta.

Na região de onde foi extraído o espectro apresentado na Figura 4.9(a) (posição 2 na Figura 4.6), as componentes devem originar-se, segundo o modelo de Davidson *et al.* (2001), de 2 regiões diferentes: da emissão intrínseca do lóbulo SE e no espalhamento nesse mesmo lóbulo da emissão proveniente do gás localizado no centro de configuração do sistema. Além disso, outra região também é responsável por uma das componentes detectadas nessa posição: o Pequeno Homúnculo, que não é previsto pelo modelo de Davidson *et al.* (2001). Nesta posição, a componente associada ao PH apresenta uma velocidade quase nula ($\approx$ 2 km/s). Infelizmente, com a resolução espectral de nossos dados ($\sim$100 km/s) é impossível saber se o PH também possui lóbulos vazios. Entretanto, Smith (2005), utilizando espectroscopia de alta-resolução ($\sim$ 5 km/s), pôde separar as paredes dos lóbulos do PH, verificando que este também é vazio (oco).

A componente identificada em –35 km/s e denominada ASE+ESE (o sinal de + significa uma superposição das linhas, conhecido como *blending*) foi utilizada para ajustar as emissões do gás no centro do GH (ESE) e a emissão intrínseca vinda da parede posterior do lóbulo SE. Isso porque nesta posição existe uma mistura entre a emissão do PH e do GH que só pode ser efetivamente resolvida com resolução espectral elevada. A componente ASE+ESE foi incluída no ajuste também porque somente duas componentes não dão conta do espectro observado nessa posição. A componente ASE é originada na parede de trás do lóbulo SE enquanto a componente ESE, como já foi dito, é a emissão do gás contido pelo GH espalhada na parede mais próxima do lóbulo SE.

Regiões exteriores ao Homúnculo e a emissão em raios-X

A Figura 4.10 mostra as regiões que se localizam fora do GH e suas denominações adotadas em discussões sobre η Car.

S *Condensation* e S *ridge* – estas regiões são responsáveis por parte da emissão em raios-X moles (Corcoran *et al.*, 1998; Weis *et al.*, 2001; Pittard & Corcoran, 2002; Weis *et al.*, 2004; Corcoran *et al.*, 2004) e podem ser observadas na Figura 4.11. Acredita-se que a S *Cond.* foi formada pela colisão entre o material ejetado na Grande Erupção e o material mais antigo, localizado na S *ridge*. A Figura 4.12 mostra que a estrutura de emissão em raios-X forma um 'arco' em volta do Homúnculo, resultado da combinação da velocidade do material ejetado e da densidade do meio interestelar ao redor de η Car (que deve ser suficientemente alta para produzir emissões detectáveis). Smith & Morse (2004) apresentaram resultados que indicam uma variação da composição química em diferentes posições do material exterior ao GH. Esses autores observaram que próximo

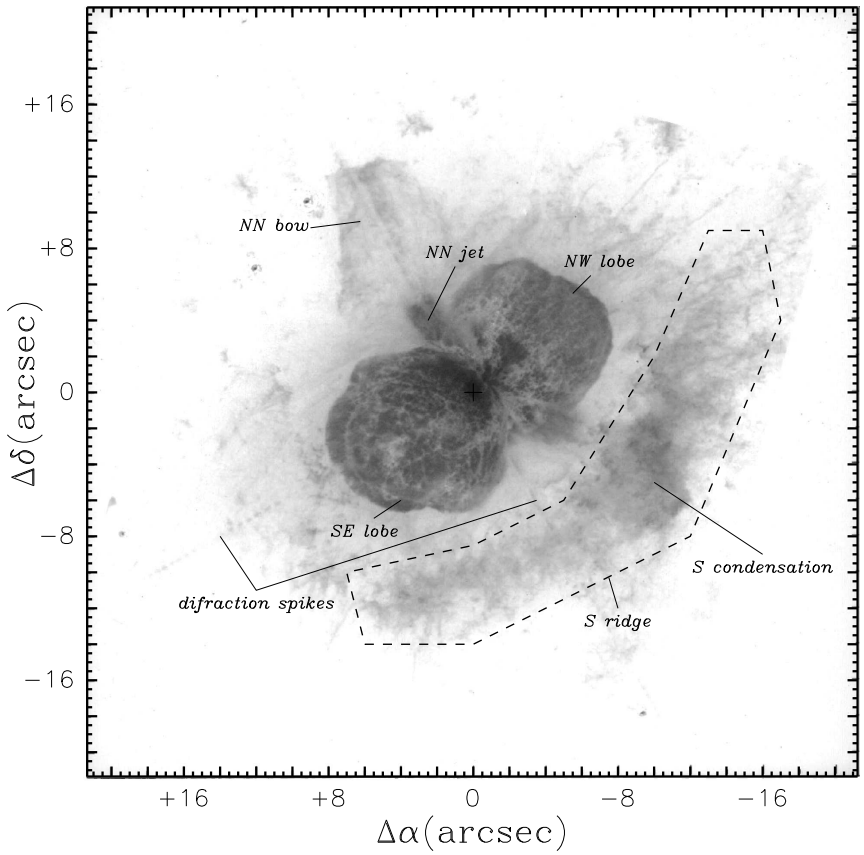


Figura 4.10 *Identificação de algumas das regiões localizadas fora do Homúnculo e suas respectivas nomenclaturas.*

à nebulosa do GH, as condensações apresentavam linhas fortes do N e pouca ou quase nenhuma linha do O. Entretanto, o contrário acontece quando se determina a composição do material localizado em uma região mais distante do GH. A explicação dada por esses autores para a emissão em raios-X é um cenário no qual a fonte central ejetou várias condensações ricas em N que estariam se movendo para longe do GH. Este envoltório, criado pela deposição de material do vento estelar mais antigo da fonte central, possuiria uma composição química normal. As colisões entre o material contido pelo envoltório e a parede interna do mesmo dariam origem à emissão em raios-X moles observada na Figura 4.12. A Figura 4.13(e) mostra o espectro extraído da S *Cond.*. Nota-se pelo menos duas componentes da linha do [Fe II] 12567 associadas ao material contido nessa região (uma componente em ≈ 50 km/s e outra em ≈ 300 km/s).

NN *bow* – esta estrutura apresenta velocidades radiais deslocadas para o azul (aproximadamente -420 km/s, c.f. Figura 4.13(h)), possivelmente uma indicação de que esta é uma extensão do disco equatorial. Nesta região, a razão [Fe II] 12567/Paγ é relativamente alta em relação ao material localizado na base do NN *jet*. Curiosamente o NN *bow* não

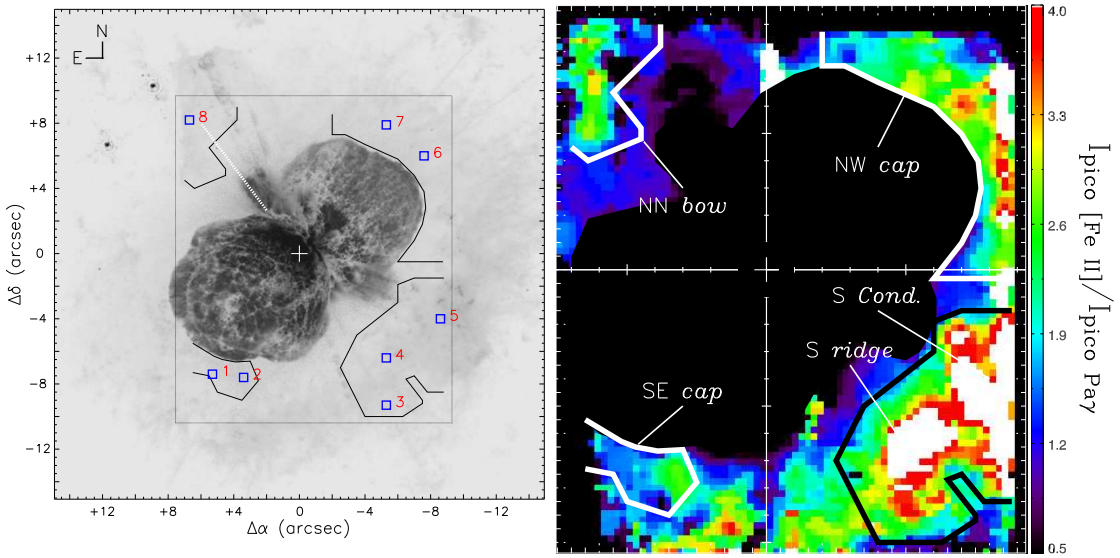


Figura 4.11 *Regiões de excitação colisional fora do Homúnculo. A escala de cores na imagem à direita foi calibrada de maneira a realçar as regiões onde o mecanismo responsável pela emissão é a colisão. Na imagem à esquerda estão sobrepostas as linhas de contorno das regiões identificadas na imagem à direita e as posições de onde foram extraídos os espectros da Figura 4.13. A área de cada quadrado indica exatamente a região de onde foram combinados os espectros (0,75"×0,75"). Em ambas as imagens, a posição da fonte central está marcada pela cruz. As duas imagens não estão na mesma escala.*

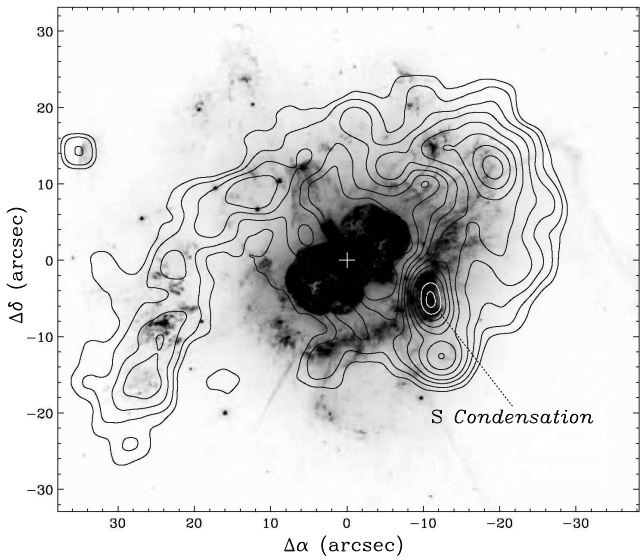


Figura 4.12 *Contornos de fluxo de raios-X sobrepostos à imagem óptica de η Car (Weis* et al.*, 2004). As linhas correspondem à imagem obtida no intervalo de energia de 0,5 – 1,5 keV pelo CHANDRA ACIS-I. Um dos picos de emissão corresponde exatamente com a S Condensation (indicada pela linha tracejada).*

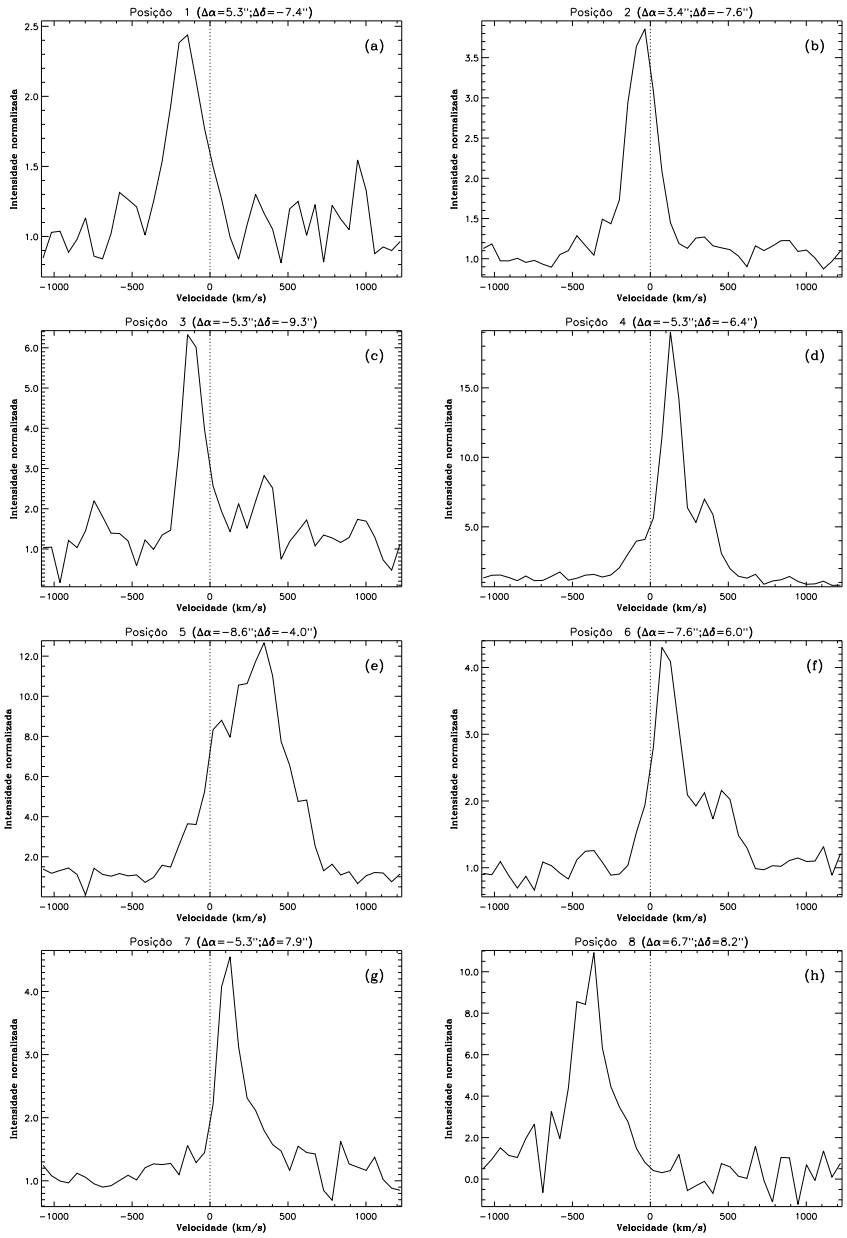
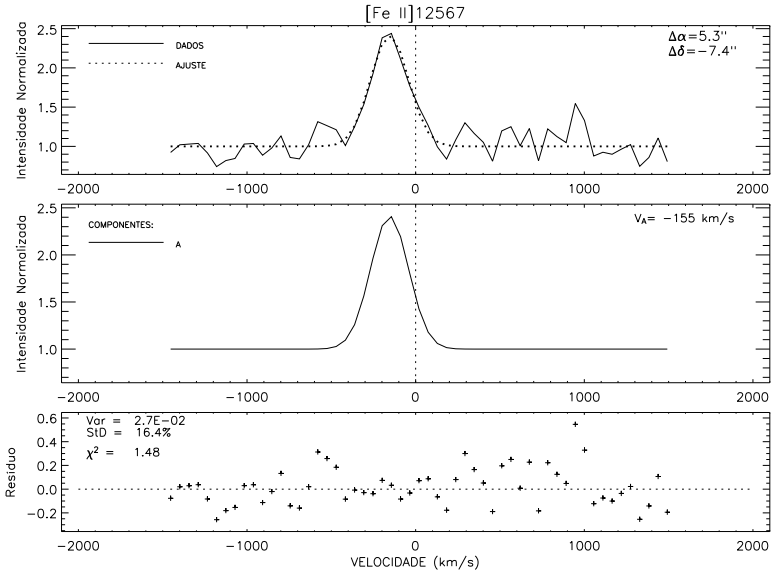
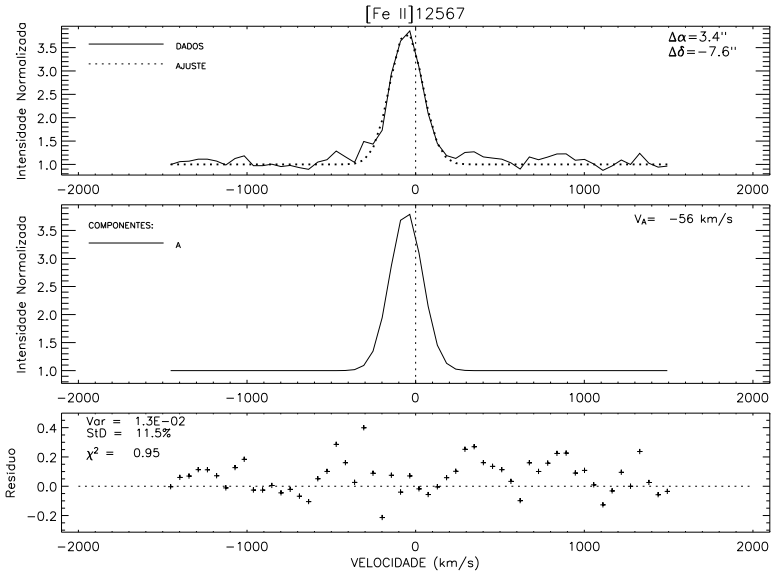


Figura 4.13 *Espectros extraídos das posições localizadas fora do Homúnculo indicados na imagem à direita na Figura 4.11. (a) e (b) SE cap; (c) e (d) S ridge; (e) S Cond.; (f) e (g) NW cap e (h) NN bow. Foram combinadas 9 lentes para aumentar o S/N. A coordenada de cada posição está indicada no topo de cada espectro.*

emite raios-X. Isto vai contra o que se espera de uma região como esta, que parece estar colidindo com o meio interestelar formando a estrutura observada. Na Figura 4.11 (painel esquerdo), nota-se que a emissão do [Fe II] 12567 não está alinhada com o NN *jet*, em vez disso, a linha branca pontilhada nessa figura parece indicar um alinhamento entre o material do disco equatorial e a emissão da linha do [Fe II] 12567 na posição 6.

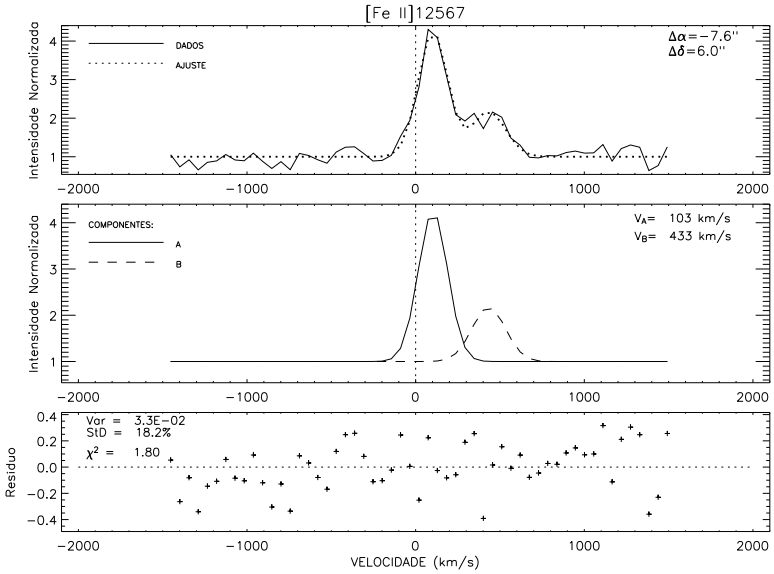


(a)

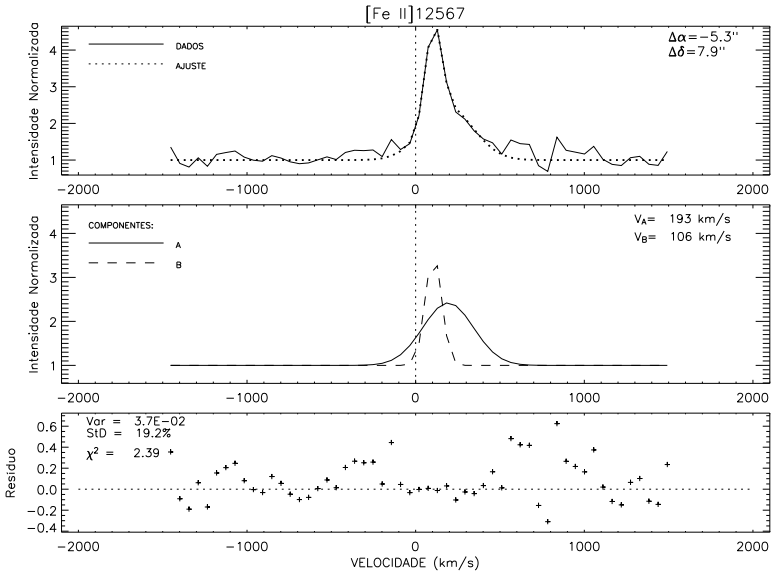


(b)

Figura 4.14 *Ajustes gaussianos aplicados às componentes detectadas fora do lóbulo SE, na região denominada SE cap. (a) Ajuste do espectro extraído da posição 1 na Figura 4.11. (b) Ajuste do espectro extraído da posição 2 da mesma figura. Nos painéis (a) e (b) são mostrados 3 gráficos: o espectro extraído da posição indicada por* $\Delta\alpha$ *e* $\Delta\delta$ *sobreposto ao ajuste (primeiro gráfico); cada uma das componentes ajustadas, mostradas separadamente e suas respectivas velocidades (segundo gráfico) e o resíduo do ajuste (terceiro gráfico), onde é apresentado também a variância (Var), o desvio padrão (StD) e o valor de* χ^2 *do ajuste. A coincidência do nome dado às componentes em posições diferentes não significa que sejam a mesma (e.g.: a componente A na posição 4 não é a mesma que a da posição 6 ou 7). A coordenada da posição está indicada no canto superior do primeiro gráfico.*



(a)



(b)

Figura 4.15 *Idem à Figura 4.14 mas aplicado às posições 6 e 7 da Figura 4.11.*

SE *cap* – esta região está localizadas na parte externa do lóbulos SE do Homúnculo e apresenta componente em emissão na linha do [Fe II] 12567, conforme pode ser visto na Figura 4.13(a) e (b). Com o intuito de determinar as velocidades das componentes das posições 1 e 2, que pertencem ao SE *cap*, foi feito um ajuste para as componentes desses espectros. O resultado é mostrado na Figura 4.14. Na posição 1, o espectro foi ajustado com uma gaussiana centrada em −56 km/s. Na posição 2, o melhor ajuste foi feito utilizando apenas uma componente em −155 km/s.

NW *cap* – na posição 7 da Figura 4.11, o espectro apresenta duas componentes que possuem 103 e 433 km/s (c.f. Figura 4.15, painel superior). Dado o fato que a emissão está deslocada para o vermelho e que esta posição localiza-se muito distante da extremidade do lóbulo NW, a origem das duas componentes é possivelmente o material ejetado em eventos anteriores ao da Grande Erupção e que se localiza atrás do pólo do lóbulo NW, mas distante deste. Na posição 6, notam-se também duas componentes com velocidades de 106 e 193 km/s. Estas têm, provavelmente, a mesma origem que as componentes da posição 7, mas em outra localização.

4.4 Mapas de velocidade da linha [Fe II] 12567

A maior vantagem de um cubo de dados é a possibilidade de se obter várias imagens monocromáticas em uma única observação do objeto. De fato, cada linha contida na região espectral escolhida pode eventualmente ser utilizada para gerar uma imagem integrada ou uma seqüência de imagens monocromáticas conhecida como *fly through*, técnica esta que permite a visualização de cada uma das estruturas do objeto e, conseqüentemente, sua distribuição de velocidades. Desta maneira, um cubo de dados é uma importante ferramenta para a visualização da estrutura tridimensional do objeto em estudo.

A linha do [Fe II] 12567, como já foi discutido anteriormente, é representativa de regiões de colisão entre estruturas. O Pequeno Homúnculo, por exemplo, revela-se quando é feita a razão entre intensidade do pico ou entre as larguras equivalentes do [Fe II] 12567 e Pa γ. Entretanto sua distribuição de velocidade não pode ser inferida desta maneira. Para obter esta informação, é necessário fazer um corte no cubo de dados na direção espectral (λ) e ver quais componentes aparecem no intervalo entre λ e $\lambda + \delta\lambda$. Se o cubo já estiver calibrado em comprimento de onda, a conversão para velocidade permite que o corte seja feito em uma dada velocidade.

Na Figura 4.16, o espectro da linha do [Fe II] 12567 apresentado nessa figura foi obtido ao longo do eixo de simetria do Homúnculo e normalizado pelo *continuum* local da linha. As linhas verticais brancas vistas na Figura 4.16 são 'cortes' feitos no cubo de dados em 4 velocidades diferentes: -253 km/s, -198 km/s, -89 km/s e -34 km/s. Para cada um desses 'cortes' em velocidade, pode-se obter a intensidade da linha em relação ao *continuum* para cada ponto do Homúnculo, tornando possível a visualização da estrutura de emissão do mesmo. O resultado é mostrado na Figura 4.16. Portanto, o 'fatiamento'

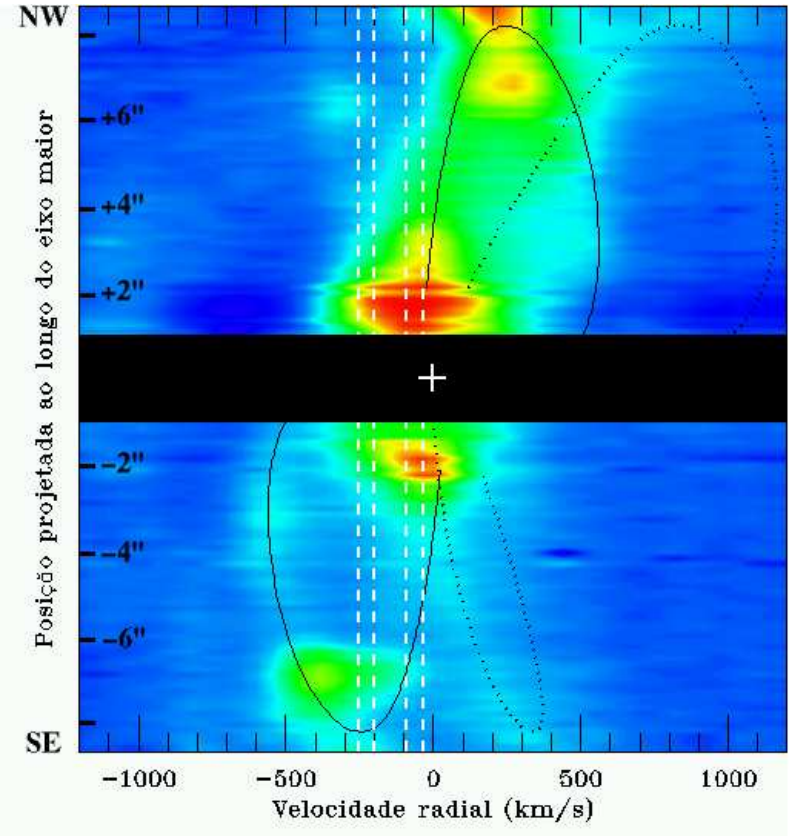


Figura 4.16 *Mapa bidimensional de velocidades da linha do [Fe II] 12567 ao longo do eixo maior de simetria do Homúnculo. As linhas pretas contínuas representam as velocidades radiais previstas pelo modelo discutido no Capítulo 3 para componentes originadas de emissões intrínsecas nos lóbulos. As linhas pretas pontilhadas representam as velocidades radiais das componentes provenientes de emissões refletidas nos lóbulos. As linhas brancas tracejadas representam 'cortes' feitos no cubo de dados em uma dada velocidade. O resultado obtido desses 'cortes' é mostrado na Figura 4.17, onde, para cada velocidade, pode-se observar a intensidade da linha em relação ao continuum local. A região coberta pela tarja preta está saturada (±1").*

do cubo de dados torna possível a visualização da dimensão espacial na linha de visada do objeto, *i.e.*, a profundidade, que sempre é perdida em imagens normais, onde só se obtém informação sobre duas dimensões: α (ascenção reta) e δ (declinação).

Smith (2005) fez o mapeamento do Pequeno Homúnculo utilizando 5 fendas alinhadas ao eixo maior do Homúnculo. De maneira equivalente, a seqüência apresentada na Figura 4.17 mostra a distribuição de velocidades das estruturas do Homúnculo, inclusive a do Pequeno Homúnculo, que é a estutura central que se estende por ±2" a partir da fonte central. A vantagem intrínseca do cubo de dados, como já foi dito anteriormente, é que juntamente com a distribuição de velocidades, obtém-se a distribuição espacial do objeto.

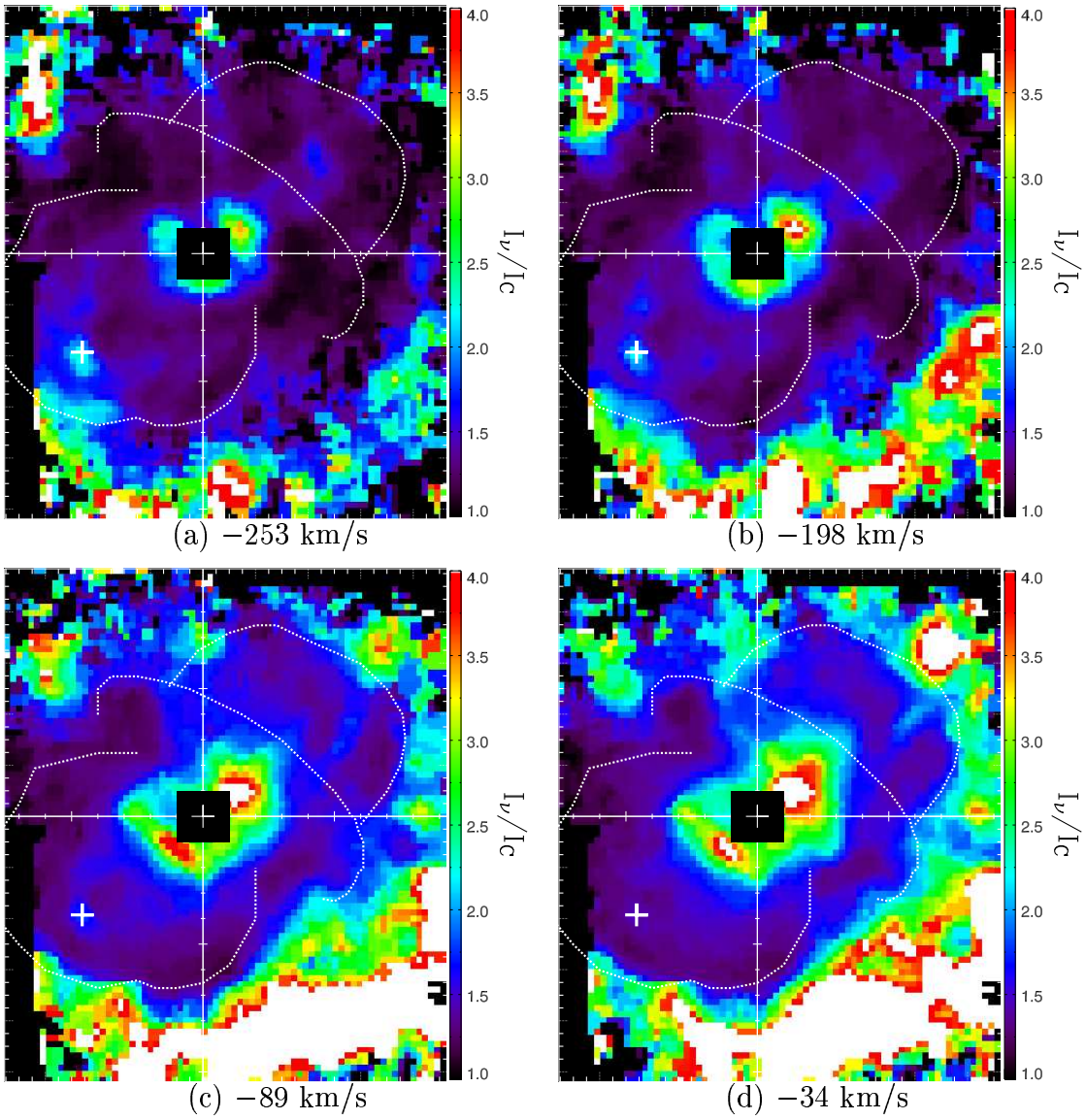
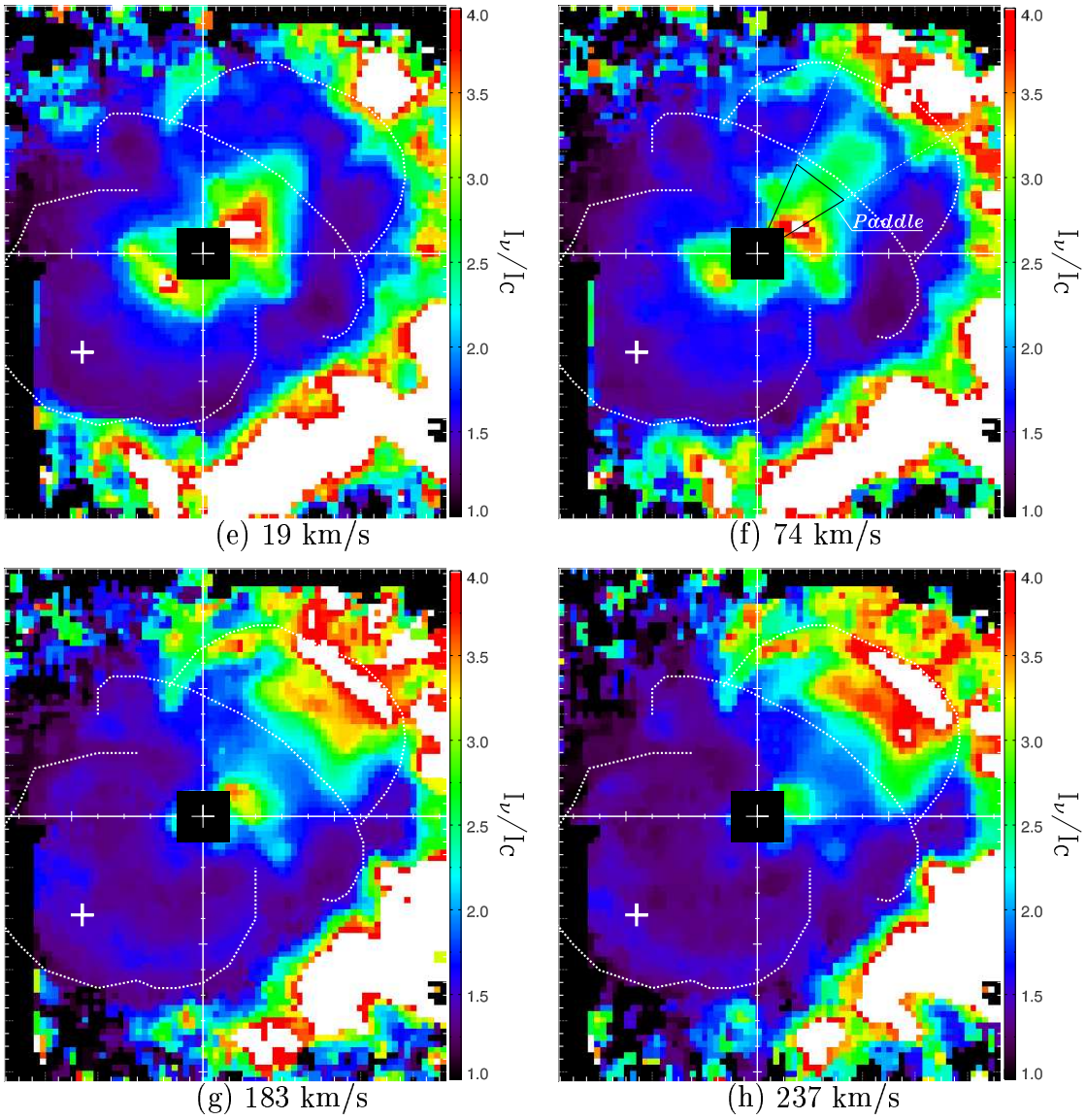


Figura 4.17 *Mapas de velocidades radiais. O intervalo de velocidade entre uma imagem e a outra é um múltiplo de 54 km/s (1 pixel). A região bloqueada pelo quadrado preto está saturada.*

Na Figura 4.17, cada imagem corresponde a uma dada velocidade. Portanto, em uma dada imagem, a informação que pode ser obtida é a distribuição espacial nessa velocidade. É o mesmo que obter o espectro em várias fendas ao longo do Homúnculo e depois tentar reconstruir a geometria do objeto colocando as imagens espectrais lado a lado, como feito por Smith (2005).

Para fazer uso de todo o poder oferecido pelo cubo de dados, seria necessário um programa que fosse capaz de obter o volume do Homúnculo a partir das imagens de iso-velocidade. Esta técnica é conhecida como *volume rendering* e existem vários *softwares* que possibilitam a criação de objetos tridimensionais a partir de cubo de



(e) 19 km/s (f) 74 km/s

(g) 183 km/s (h) 237 km/s

Continuação da Figura 4.17.

dados. Infelizmente isso não pôde ser feito nesta dissertação mas será realizado em trabalhos futuros.

Na seqüência apresentada na Figura 4.17, pode-se observar que a S *ridge* possui componentes se movendo com velocidades negativas (componente se aproximando do observador) e positivas (componente se afastando do observador). Esta região é extremamente irregular quanto ao brilho superficial. Portanto é de se esperar que existam componentes com velocidades radiais positivas e negativas nesta região. A maior velocidade radial negativa seria observada no material que se expande do Homúnculo o mais próximo da linha de visada possível. Uma vez que a S *ridge* não intercepta a linha de visada do Homúnculo, a região que apresenta o vetor velocidade de expansão mais

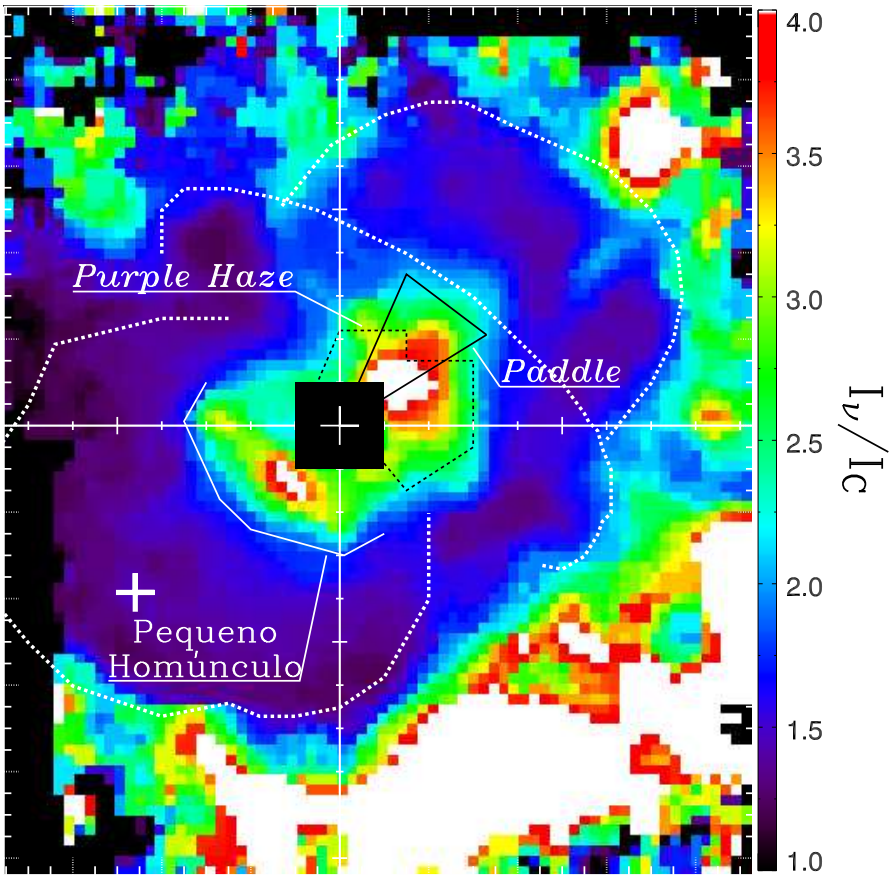


Figura 4.18 *Imagem da linha do [Fe II] 12567 em ≈ 0 km/s. O lóbulo SE do Pequeno Homúnculo está marcado com a linha amarela. A região delimitada pela linha preta tracejada está correlacionada com a Purple Haze (ver texto).*

próximo da linha de visada seria a parte sul da S *ridge*. Isto pode ser visualizado pela seqüência de imagens do cubo de dados (*e.g.*: Figura 4.17), que mostra que as emissões mais deslocadas para o azul estão localizadas na parte sul da S *ridge*. Ainda na Figura 4.17, em (d), começa a aparecer uma região localizada fora da borda projetada do lóbulo NW do Homúnculo com velocidade deslocada para o azul. A partir de (f), a emissão desta região se torna mais estendida, indicando que desta imagem em diante, o que está contribuindo para esta emissão deve ser o material localizado atrás e distante do lóbulo NW, possivelmente a colisão entre uma ejeção mais antiga com o material ao redor do Homúnculo (a *Outer Ejecta*).

O Pequeno Homúnculo está identificado na Figura 4.18, estendendo-se por ±2"ao longo do eixo maior do Homúnculo. O lóbulo SE deste é bem visível na Figura 4.17(c), (d) e (e). A tomografia Doppler realizada por Smith (2005) revelou que o Pequeno Homúnculo não possui uma distribuição espacial simétrica, apresentando um lado do

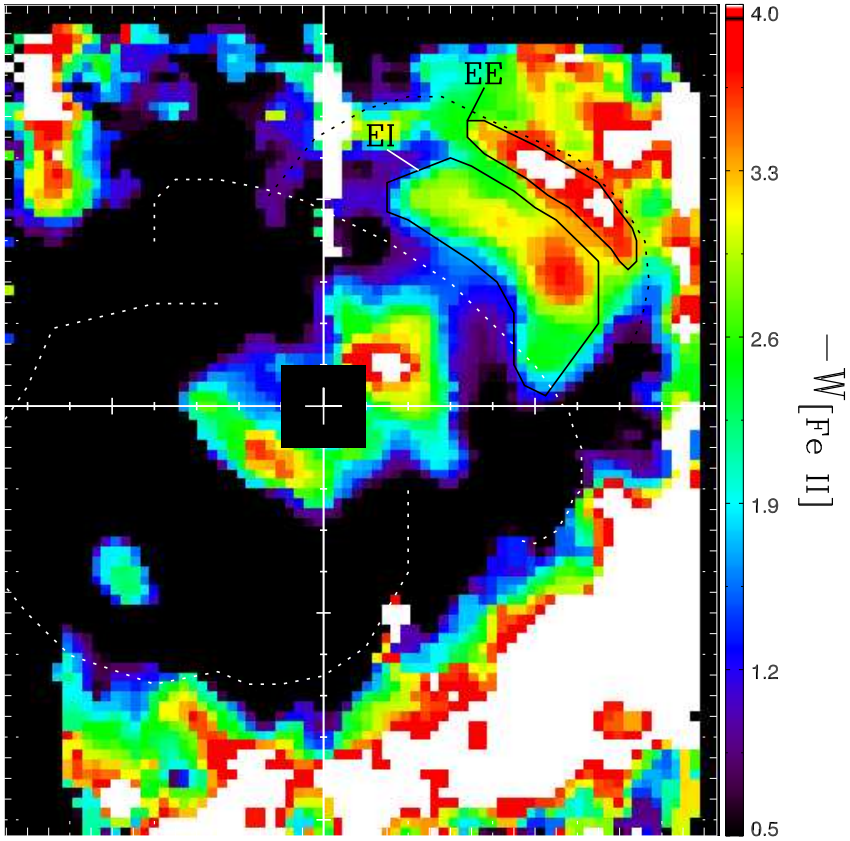


Figura 4.19 *Largura equivalente da linha do [Fe II] 12567. A escala de cores está em Å. As regiões de colisão no lóbulo NW estão identificadas por EI (estrutura mais interna) e EE (estrutura mais externa, mas ainda dentro do Homúnculo).*

lóbulo SE maior que o outro, *i.e.*, o lóbulo SE do Pequeno Homúnculo não possui simetria em relação ao eixo maior da nebulosa do Homúnculo. Este fato pode ser notado através da análise dos mapas de velocidade. Entretanto, a Figura 4.18 mostra um mapa do Homúnculo feito com velocidade radial $\approx$ 0 km/s, na qual nota-se que a parte NE do lóbulo SE do Pequeno Homúnculo é mais estendida do que a parte SW em relação ao eixo de simetria da nebulosa do Homúnculo.

A região onde se localiza o lóbulo NW do Pequeno Homúnculo fica na mesma linha de visada que outra região também interessante: a *Purple Haze* (Smith & Morse, 2004). Esta região apresenta um excesso de emissão ultravioleta, visível em imagens do *HST*. Além disso, a *Purple Haze* localiza-se na base da região conhecida como *Paddle* (ou *fan*), que, provavelmente, é o resultado de um buraco no disco equatorial. Esta configuração pode causar efeitos interessantes: a radiação UV da fonte central pode escapar pelo *Paddle* e excitar átomos localizados nesta direção. De fato, isto é observado na linha do He I 10830, que apresenta uma componente deslocada para o azul localizada na frente do lóbulo NW.

Na Figura 4.17(g) e (h), a tomografia Doppler revela duas regiões de choque separadas *dentro* do lóbulo NW. De acordo como o modelo de Davidson *et al.* (2001), ambas têm origem no choque entre o vento bipolar da fonte central e a região polar do lóbulo NW. Conforme pode ser visto na Figura 4.19, a estrutura mais interna (identificada como EI) tem uma largura projetada de cerca de 1,5"(3375 U.A., considerando uma distância até η Car de 2250 pc) e se estende por cerca de 7"(15750 U.A.). A estrutura mais externa (denominada EE, na Figura 4.19) possui 1"(2250 U.A.) de largura por 4,8"(10800 U.A.) de extensão.

4.5 Sobre a natureza da região denominada *Hole*

No capítulo 1, seção 1.3.1, foram descritas algumas características da região conhecida como *hole*. Nesta seção apresentarei resultados que confirmam que essa região é, de fato, um 'buraco' no lóbulo SE.

A Figura 4.20 mostra imagens obtidas por Smith *et al.* (1998). Em todas as imagens no intervalo de 2,15 μm até 12,8 μm, nota-se que o *hole* apresenta uma baixa emissividade em relação ao material ao redor, inclusive na imagem do HST. Entretanto, existem regiões ao longo dos lóbulos que apresentam uma emissividade que varia com o comprimento de onda, *i.e.*, essas regiões são brilhantes em alguns filtros e escuras em outros. Em particular, existe uma região no lóbulo SE (à direita do *hole*) que, nas imagens do HST, apresenta uma pequena diferença de brilho, parecendo levemente mais escura que o material ao redor. Além disso, o *continuum* dessa região diminui em relação às redondezas, enquanto emissões refletidas (nos lóbulos) provenientes do material circunstelar (*e.g.*, *Weigelt blobs*) continuam conspícuos (Smith *et al.*, 1998). Isso sugere que uma aglomeração de poeira intercepta a radiação estelar, projetando uma 'sombra' no lóbulo SE, visível na Figura 4.21(a). Note que essa região não aparece nas imagens (a) e (b) da Figura 4.20, sugerindo que ela seja formada por poeira mais fria devido ao bloqueio da radiação pela condensação no interior do lóbulo SE. Segundo Smith *et al.* (1998), para bloquear a visão da fonte central na posição onde a sombra é vista, sem interceptar a emissão dos *Weigelt blobs*, a aglomeração de poeira que produz a sombra deve ser compacta ($r \lesssim 200$ U.A.) e localizar-se próximo à fonte central ($d < 3500$ U.A.).

Na Figura 4.21 nota-se uma região no lóbulo NW, simétrica ao *hole*. Para diferenciá-las, a primeira será denominada HN (*hole* Norte) e a última, HS (*hole* Sul). A região de baixa emissividade do lóbulo NW *não* possui uma contrapartida óptica, como acontece com a HS, mas apresenta emissão em [Fe II], *i.e.*, nessa região do lóbulo NW, não há colisão do vento bipolar com a parte interna do lóbulo para excitar o [Fe II] 12567, o que confirma que ela também é um buraco.

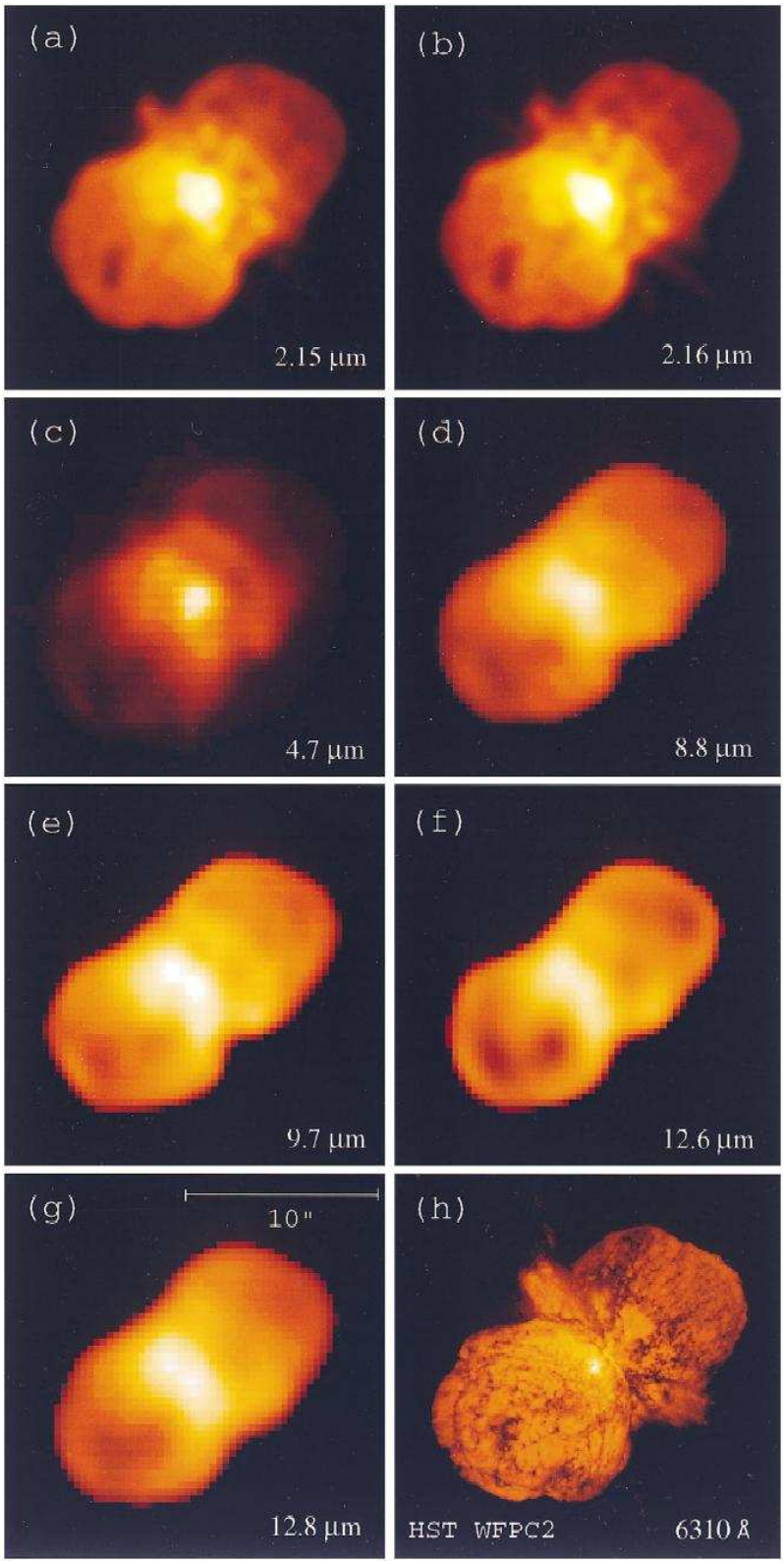
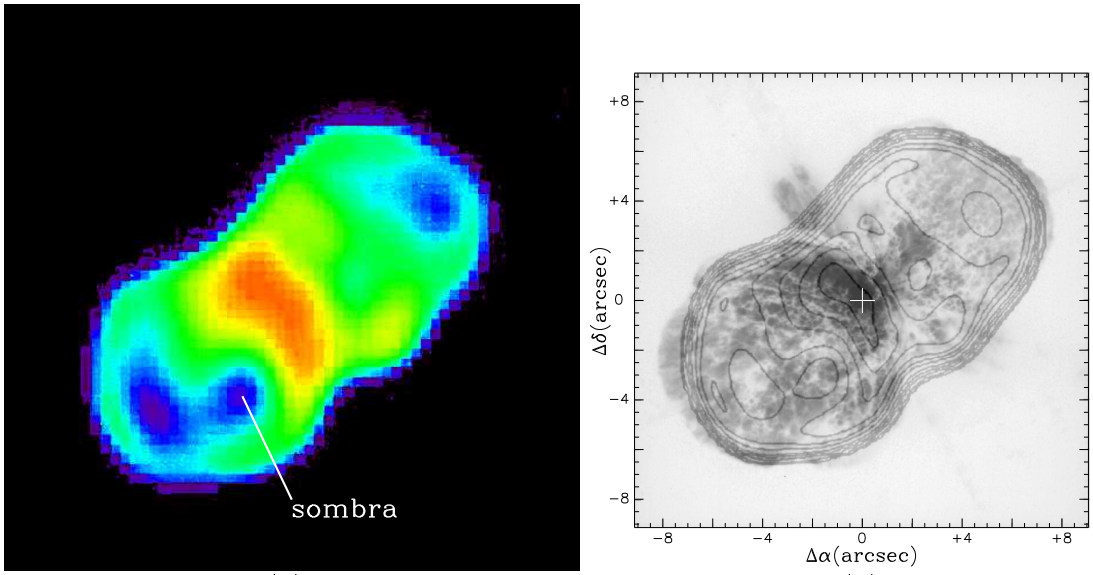


Figura 4.20 *Imagens obtidas por Smith* et al. *(1998) nos comprimentos de onda indicados. (a) e (b) Infravermelho próximo; (c) até (g) infravermelho médio e (h) imagem obtida pelo HST para comparação.*



(a) (b)

Figura 4.21 *(a) Imagem do Homúnculo em 12,6 μm. A escala foi escolhida de modo que regiões com baixa emissão são azuis e as regiões com alta emissão, vermelhas. A região indicada como 'sombra' é, de fato, a projeção de uma sombra no lóbulo SE (vide texto). (b) Sobreposição da imagem obtida pelo HST e os contornos da imagem em 12,6 μm (Figura 4.20(f)). A região no lóbulo SE conhecida como hole coincide com a baixa emissão térmica em 12,6 μm. Os contornos indicam uma região homóloga no lóbulo NW que não é visível na imagem do HST.*

A Figura 4.22 mostra os mapas de velocidade da linha do [Fe II] 12567 no intervalo de ≈ -630 km/s até ≈ -360 km/s. Nessa seqüência é mostrado a colisão do vento bipolar da fonte central com a parte interna do lóbulo SE. A escala de cores está entre 1 e 2 vezes a intensidade do *continuum* local da linha do [Fe II] 12567. Para entender o que é mostrado na Figura 4.22, é preciso ter em mente que os lóbulos são 'cascas' bipolares, *i.e.*, são ocos. Dessa maneira, a colisão mapeada pela linha do [Fe II] 12567 ocorre entre um vento rápido (600–1000 km/s) da fonte central e os lóbulos (Smith *et al.*, 2003). Entretanto, cada lóbulo possui uma determinada espessura que varia com a latitude estelar, sendo que nas regiões polares a densidade é relativamente maior do que nas paredes dos lóbulos (Davidson *et al.*, 2001). Portanto, é de se esperar que, onde o vento rápido encontra uma maior resistência nos lóbulos devido ao aumento da densidade, a colisão seja mais intensa e, conseqüentemente a emissão do [Fe II] 12567 aumente. Como o vento da fonte central possui dependência com a latitude (que será apresentada no próximo capítulo), as regiões dos lóbulos vistas a partir da fonte central sob latitudes baixas e intermediárias (entre 0° e 50°) emitem devido a colisão entre um vento mais lento (400–500 km/s) e uma região opticamente fina, fazendo com que a emissão devido

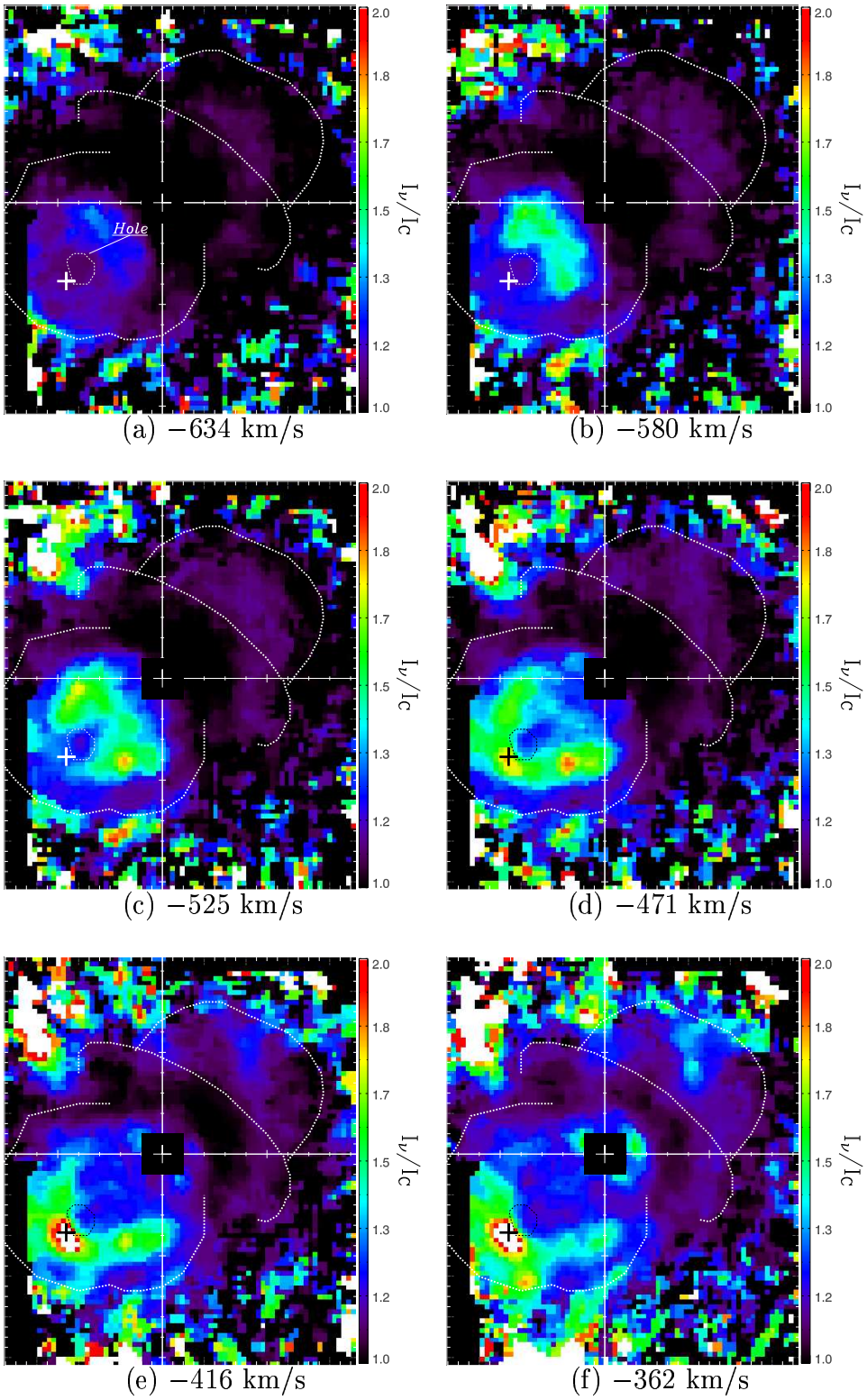


Figura 4.22 *Mapas de velocidade do [Fe II] 12567. A cruz marca a posição de onde seria o pólo do lóbulo SE segundo o modelo de Davidson* et al. *(2001). A região próxima à cruz, delimitada pela linha preta tracejada é a região conhecida como hole. A região bloqueada pelo quadrado preto está saturada.*

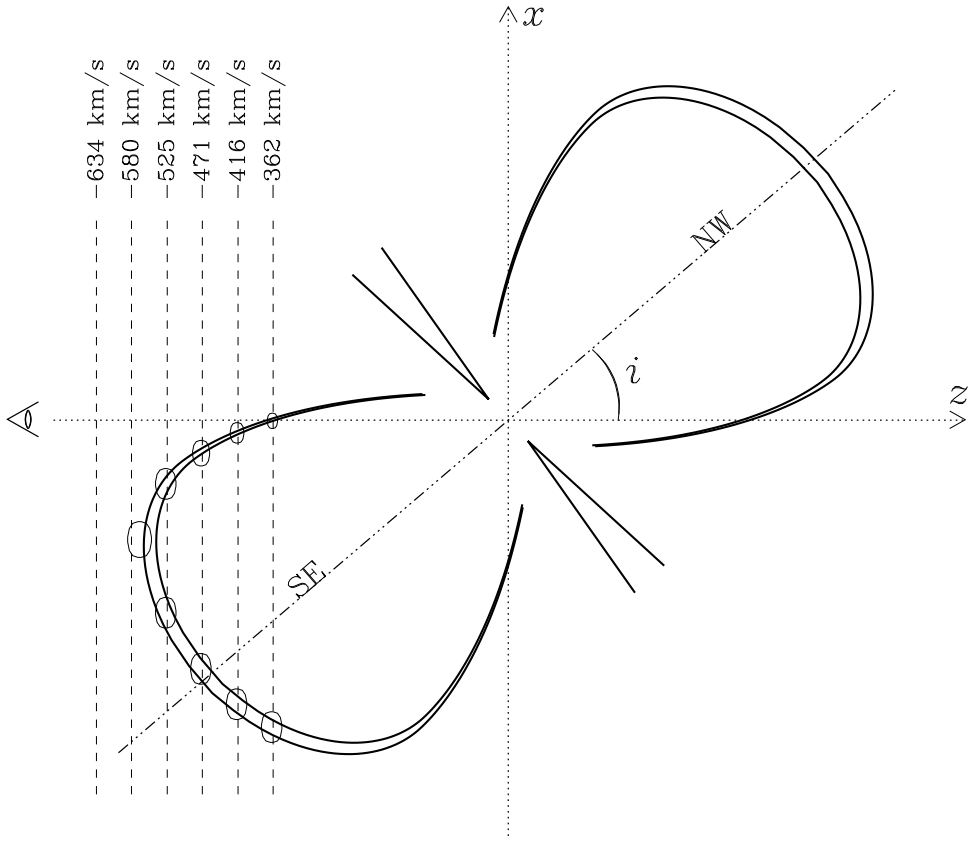


Figura 4.23 *Esquema do que é visto nos mapas de velocidade. Cada parte do Homúnculo possui uma determinada velocidade radial, que é a mesma velocidade medida em uma linha de emissão intrínseca como a do [Fe II] 12567.*

a essa colisão seja muito fraca. Portanto, a linha do [Fe II] 12567 mapeia essencialmente a colisão do vento rápido com a região polar dos lóbulos.

Na Figura 4.22 nota-se que, apesar do vento rápido colidir com a região polar do lóbulo SE, o HS não apresenta nenhuma emissão na linha do [Fe II]. A estrutura de emissão observada nessa seqüência de mapas é quase circular. Isso ocorre porque, ao fazer 'cortes' no cubo de dados para criar mapas de velocidade, cada mapa corresponde a emissão vinda de uma certa região do Homúnculo (desde que a emissão seja intrínseca). Por isso, cada mapa pode ser visualizado como um corte na própria estrutura tridimensional da nebulosa, conforme pode ser visto na Figura 4.23. Nesta figura, nota-se que todo material que move-se com uma dada velocidade (simbolizado pelas elipses na Figura 4.23) é visível nos mapas como círculos cujo raio aumenta conforme a velocidade escolhida.

A descontinuidade na estrutura de emissão do [Fe II] observada na Figura 4.22(c) coincide com o HS (levando em conta a incerteza na posição é de uma lente, *i.e.*, ±0,25"). Isso sugere que na região do *hole* a densidade é muito menor do que a média do lóbulo SE.

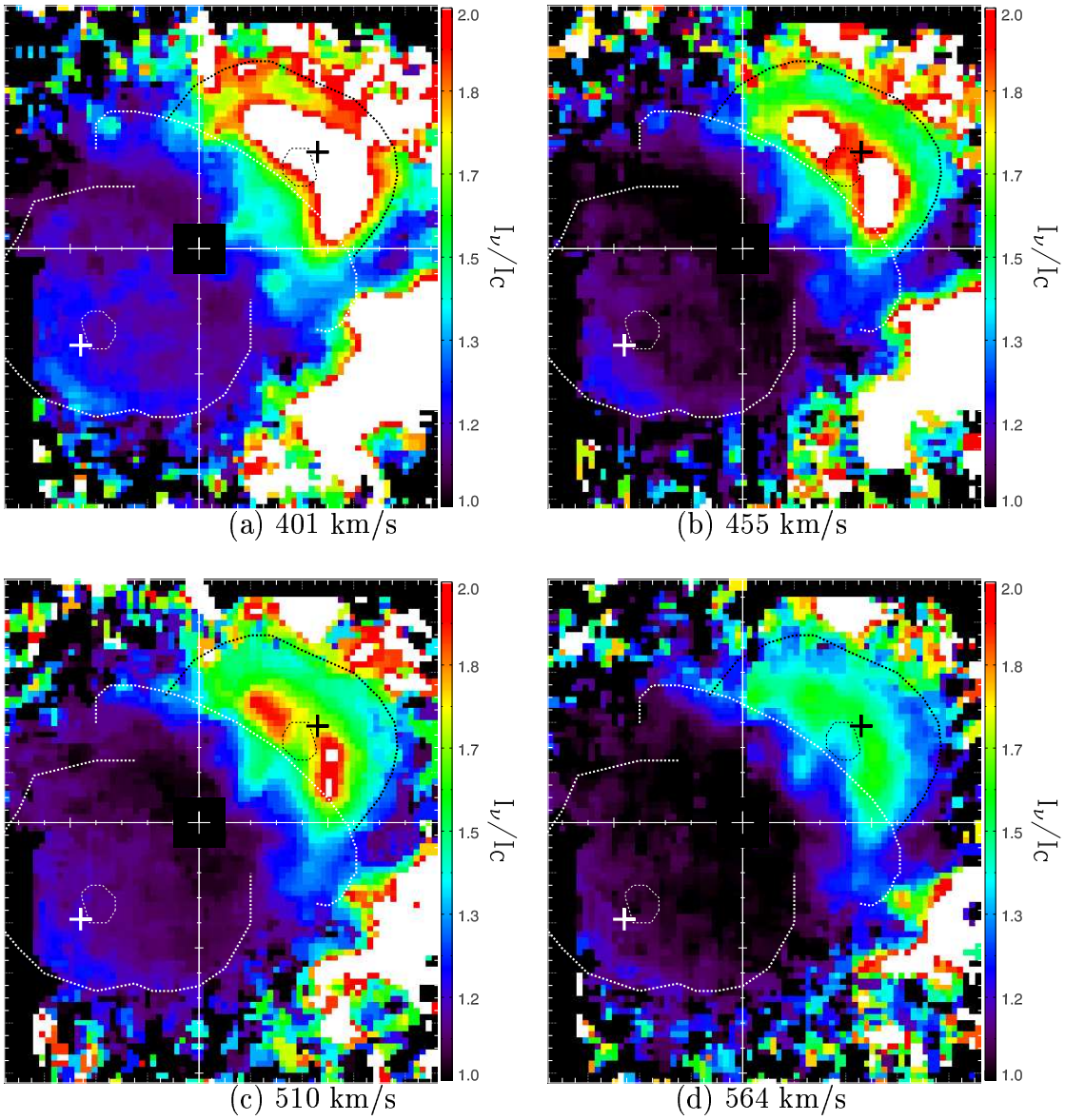


Figura 4.24 *Mapas de velocidade. O intervalo de velocidade entre uma imagem e a outra é de ≈54 km/s (1 pixel). A região bloqueada pelo quadrado preto está saturada.*

A mesma descontinuidade observada na linha do [Fe II] 12567 também foi observado na linha do H_2 1–0 S(1) ($\lambda = 2,1218\ \mu$m) por Smith *et al.* (2002). A Figura 4.24 mostra que o lóbulo NW também apresenta uma região de descontinuidade na emissão do [Fe II] 12567, que coincide com a posição esperada para uma região semelhante ao HS mas localizada no lóbulo NW. A determinação da posição esperada foi feita simplesmente invertendo os sinais das coordenadas do HS (posição espelhada em relação à fonte central). Conforme pode ser visto na seqüência de mapas de velocidade da Figura 4.24, a concordância entre a posição prevista para o HN e a região que não apresenta emissão na linha do [Fe II] 12567

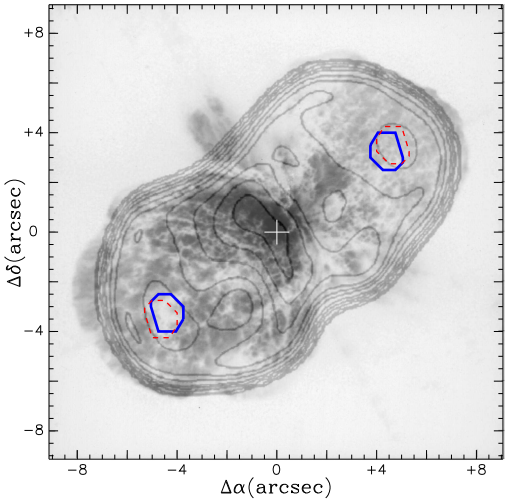


Figura 4.25 *Comparação entre a localização das regiões de baixa emissividade em 2 comprimentos de onda diferentes sobrepostas à imagem do HST. Os contornos feitos com linhas pretas contínuas foram obtidos da imagem de 12,6 μm, enquanto as linhas azuis contínuas indicam a posição onde não foi detectado colisão na linha do [Fe II] 12567 e cujas coordenadas foram determinadas a partir da imagem do HST. As linhas vermelhas tracejadas foram obtidas pela subtração/acréscimo de uma lente (0,25") às coordenadas da região delimitada pelas linhas azuis.*

no lóbulo NW está dentro do erro de 0,25".

A Figura 4.25 foi feita para comparar os resultados obtidos pelo imageamento térmico (Smith *et al.*, 1998) e o mapeamento de velocidades da linha do [Fe II] 12567 apresentado nesta dissertação. De fato, a região do HS no lóbulo SE possui um correspondente no lóbulo NW (HN), sugerindo que estas duas regiões formam um eixo fundamental do Homúnculo. Entretanto, a localização dos pólos segundo o modelo intermediário de Davidson *et al.* (2001) não coincide com a posição determinada nem com a prevista para o HS e o HN. Considerando que o eixo formado por HS e HN passa pelos pólos do Homúnculo, então o ângulo de inclinação i determinado por Davidson *et al.* (2001) ($\approx 41°$) é cerca de 15% maior que o valor determinado pelo alinhamento dos pólos do modelo com as regiões do HS e HN (que é de $\approx 35°$). Entretanto, é possível que a interação do Homúnculo com o meio interestelar tenha afetado o formato da nebulosa, fazendo com que os lóbulos não sejam mais tão simétricos quanto na época em que eles foram formados. Isso só poderia ser testado através do ajuste de um modelo não simétrico à imagem do HST, levando em conta a posição dos pólos determinada por HS e HN.

Capítulo 5

Estrutura do Vento de η Car e o '*Feixe*' do He I λ10830

Neste capítulo, farei uma breve discussão sobre os mecanismos de excitação da linha do He I λ10830, assim como um estudo sobre a estrutura de emissão do vento de η Car através da análise do perfil das linhas refletidas nos lóbulos.

5.1 Mecanismos de excitação do He I λ10830

Devido ao seu alto potencial de ionização, o He I vem sendo utilizado como um instrumento de investigação de ventos e ejeção de matéria em estrelas quentes (Edwards *et al.*, 2003), assim como para o estudo da cromosfera solar (Trujillo Bueno *et al.*, 2005). Em especial, o tripleto do He I 10830 é utilizado para estudar o efeito Zeeman em estrelas e até mesmo no Sol (Socas-Navarro *et al.*, 2004). Essa linha é formada na transição entre o singleto 2^3S_1 e o tripleto $2^3P_{2,1,0}$, sendo este o termo superior.

A emissão da linha do He I 10830 em nebulosas é feita essencialmente por recombinação e cascata até o termo 2^3S_1, que é um estado meta-estável radiativamente isolado do nível fundamental do He I. Portanto, a transição que dá origem à linha λ10830 pode ser considerada uma transição ressonante entre o nível superior $2^3P_{2,1,0}$ e o nível, considerado fundamental, 2^3S_1. Além da recombinação e cascata, existem outros 3 processos que afetam o espectro do He I:

a) *absorção a partir do estado* 2^3S_1: devido ao fato de que o termo 2^3S_1 está radiativamente isolado do estado fundamental do He I, haverá um povoamento

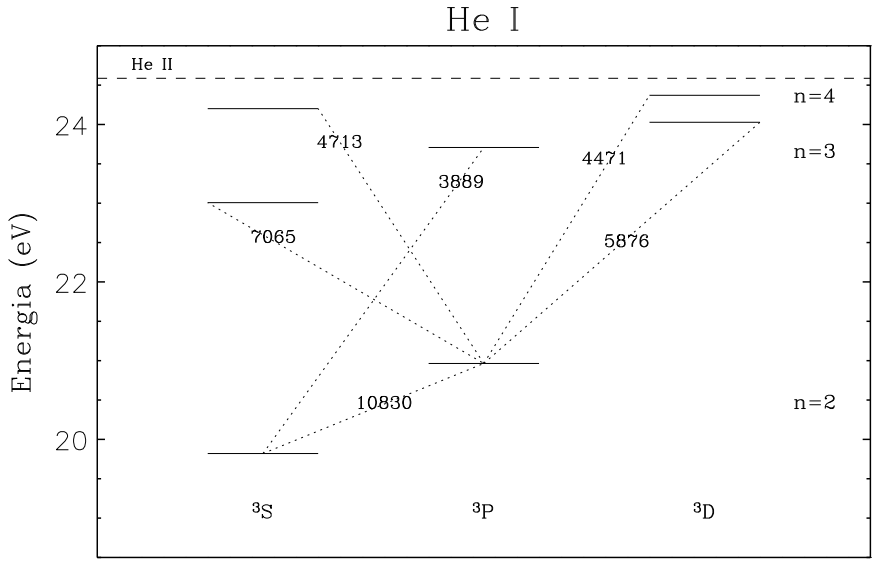


Figura 5.1 *Diagrama de Grotrian do He I para os níveis 2, 3 e 4. As linhas pontilhadas indicam a transição entre os níveis que dão origem às linhas indicadas (em Å).*

relativamente maior no nível 2^3S_1 do que em outros estados. Isso faz com que este nível torne-se um excelente candidato para formação de linhas em absorção (Edwards *et al.*, 2003).

b) *excitação colisional a partir do estado* 2^3S_1: este é, juntamente com a recombinação, um processo importante para a formação de linhas do He I. Os elétrons do nível 2^3S_1 podem ser excitados para níveis superiores em regiões onde a temperatura está acima de $\sim 10^4$ K (Athay, 1965; Jordan, 1975).

c) *absorção interna à nebulosa*: dentro de nebulosas, pequenas quantidades de poeira podem causar uma significativa absorção da radiação em linhas opticamente espessas, devido ao aumento do caminho percorrido pelos fótons (Peimbert & Torres-Peimbert, 1987).

5.2 Estrutura do Vento de η Car

A geometria proposta por Smith *et al.* (2003) para a estrutura de excitação do vento de η Car prevê duas regiões distintas: (1) uma região polar de alta densidade e baixa ionização onde ocorre a recombinação do H, causando o perfil P Cyg observado nas linhas da série do hidrogênio e (2) uma região equatorial de baixa densidade e alta ionização

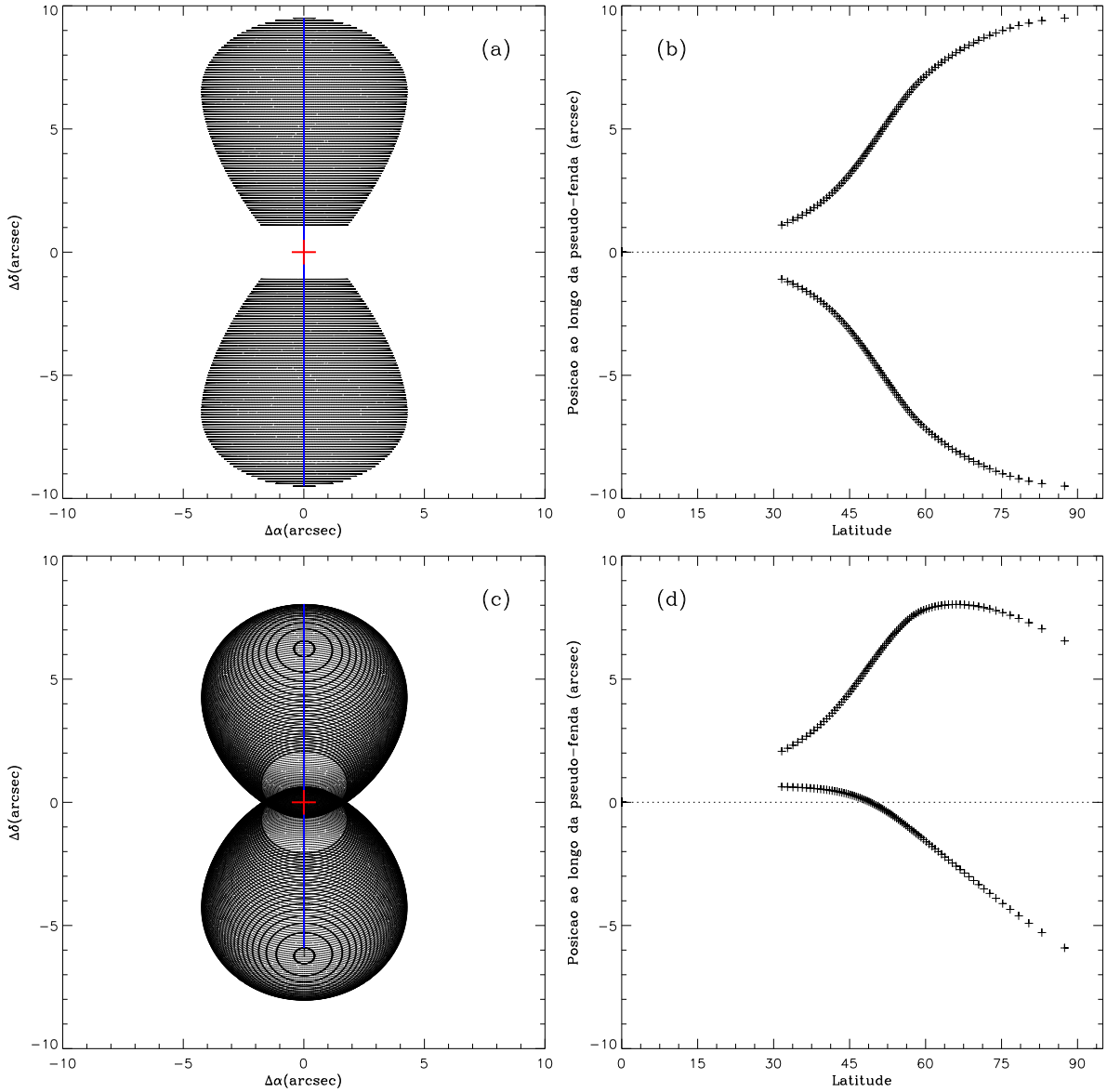


Figura 5.2 *Modelo do Homúnculo segundo Davidson* et al. *(2001). A posição ao longo da nebulosa está relacionada com latitude estelar, medida em relação ao plano equatorial. Em (a) e (c), são mostradas as aparências do modelo visto sob um ângulo de inclinação $i = 90°$ e $i = 41°$, respectivamente. A relação entre a posição ao longo da fenda e a latitude estelar para cada ângulo de inclinação pode ser visto em (b) e (d). A linha contínua azul representa a posição da fenda ao longo do Homúnculo, enquanto a cruz vermelha (em (a) e (c)) e a linha tracejada (em (b) e (d)) marcam a posição da fonte central.*

responsável pela emissão do He I e onde o H permanece ionizado. Além disso, o modelo prevê que, para latitudes próximas ao pólo, as velocidades intrínsecas medidas através do perfil P Cyg (600–1000 km/s) são maiores que as medidas em latitudes mais baixas (400–700 km/s).

Utilizando o modelo do Homúnculo de Davidson *et al.* (2001), a Figura 5.2 mostra a relação entre a posição ao longo da nebulosa (para ϕ=0°, *i.e.*, eixo maior de simetria) e a latitude estelar para dois diferentes ângulos de inclinação: $i = 41^o$ e $i = 90^o$. Dessa maneira, obtendo o espectro de uma dada posição projetada no céu, pode-se saber qual a latitude estelar correspondente e, assim, comparar a estrutura do vento de η Car ao longo da nebulosa.

Segundo esse modelo, os lóbulos apresentam um raio crescente (em coordenadas cilíndricas, onde o eixo Z coincide com o eixo maior de simetria do Homúnculo) até latitudes estelares próximas de 60°, formando as paredes de cada lóbulo. A partir dessa latitude, para valores superiores, o raio começa a diminuir, delineando a região polar do lóbulo. Com base nesse fato, define-se baixa latitude como o intervalo entre 0° e 30°. Latitudes intermediárias estão entre 30° e 60°, enquanto o intervalo entre 60° e 90° é definido como alta latitude. Sendo assim, a região representativa de baixas latitudes é o material localizado no plano equatorial, enquanto a parede do lóbulo NW exibe linhas refletidas em latitudes intermediárias (e também um pouco de linhas refletidas na região polar interna desse lóbulo). Já o lóbulo SE apresenta duas regiões representativas: a polar (de altas latitudes) e a linha de visada da fonte central (latitudes intermediárias). Dessa maneira foi feita uma análise do perfil da linha do He I 10830 e Pa β ao longo da nebulosa do Homúnculo com o intuito de testar a geometria do vento proposto por Smith *et al.* (2003).

5.2.1 Perfis ao longo do eixo de simetria ($\phi = 0^o$)

A Figura 5.3 apresenta o perfil de 4 linhas espectrais ao longo do eixo maior de simetria do Homúnculo. Destas, 3 linhas espectrais são formadas em uma região próxima à fonte central ($\sim$ 10 a 100 R$_*$; c.f. Hillier *et al.* (2001)) e refletidas nos lóbulos: He I 10830, Pa γ e Pa β. A linha do [Fe II] 12567 é formada nos lóbulos pelo choque entre o vento bipolar da fonte central e as paredes do Homúnculo, sendo, portanto, uma linha de emissão intrínseca. Entretanto, a linha do He I 10830 apresenta, em algumas regiões do lóbulo NW (apenas), componentes em emissão intrínsecas que provavelmente se sobrepõem à componente refletida dessa linha naquele lóbulo. Portanto, a correção pela velocidade de expansão do Homúnculo só vale para as componentes refletidas e não para as intrínsecas (que serão discutidas na seção 5.3). Os perfis corrigidos pela expansão dos lóbulos do Homúnculo (exceto a linha do [Fe II]) são apresentados na Figura 5.4.

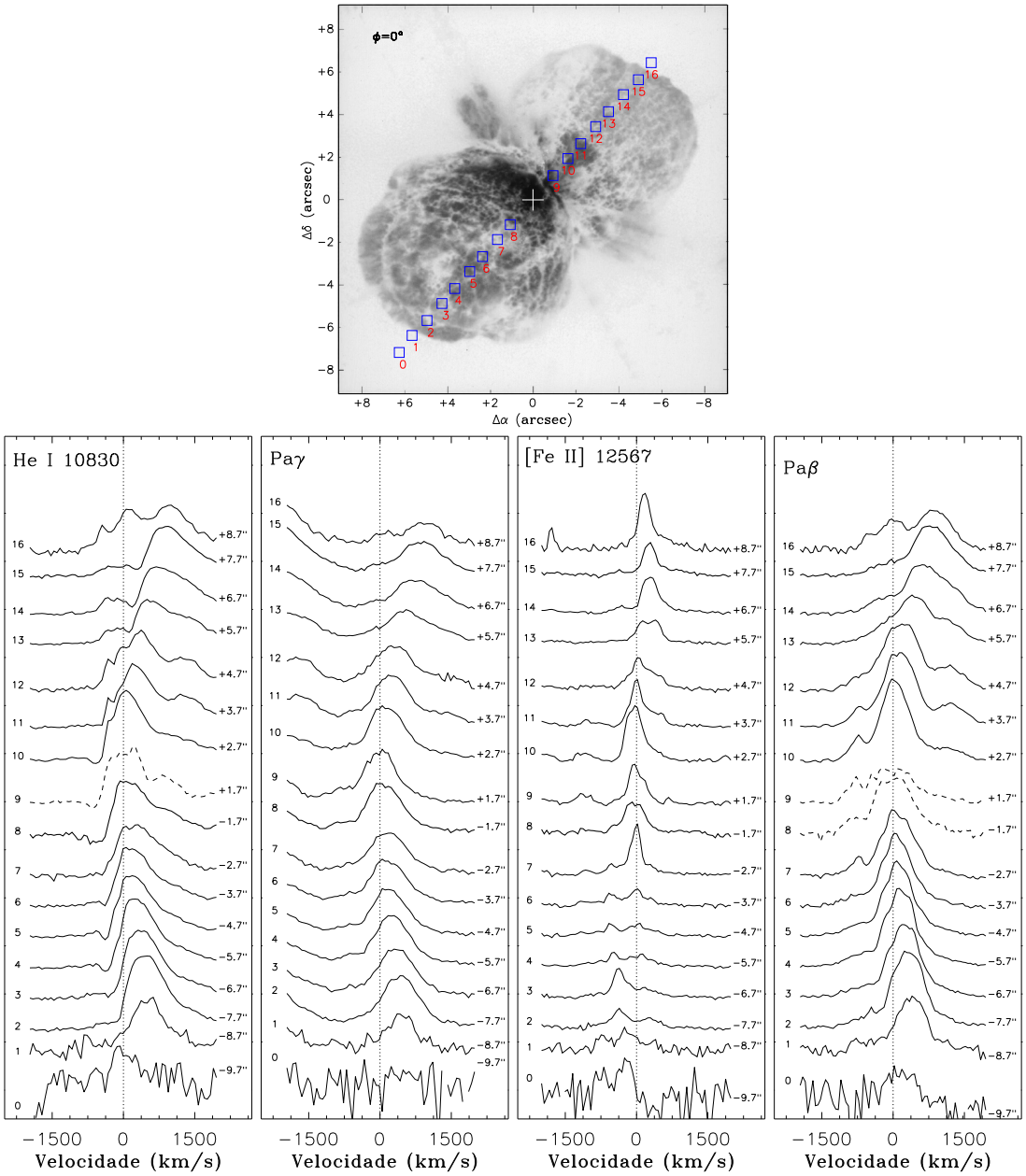


Figura 5.3 *Perfil da linha do He I 10830, Pa γ, [Fe II] 12567 e Pa β ao longo do Homúnculo para as posições indicadas na imagem superior. ϕ é o ângulo de deslocamento do eixo de extração dos espectros em relação ao eixo maior de simetria (que são coincidentes nesta imagem). Os espectros tracejados estão saturados enquanto os que possuem a mesma latitude ($\approx 60^o$) estão indicados por uma linha mais grossa. A escala vertical é logarítmica.*

Perfil da linha do He I 10830

Na Figura 5.4(a), a linha do He I 10830 apresenta um perfil P Cygni em absorção no lóbulo SE que não é observável no lóbulo NW. Isso se deve ao fato de que neste lóbulo

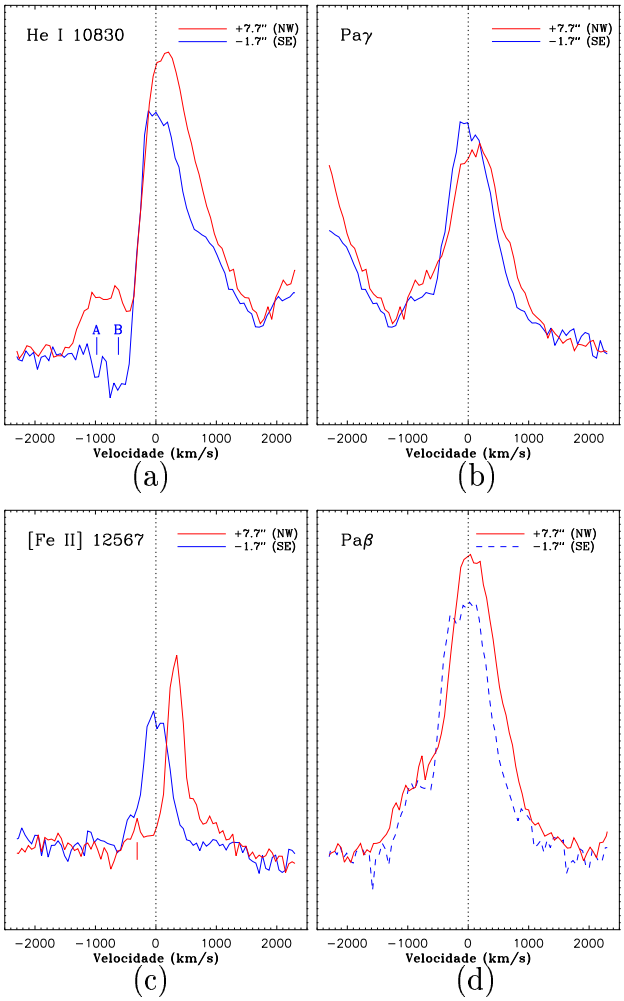


Figura 5.4 *Espectros extraídos a uma mesma latitude (≈ 60º; c.f. Figura 5.2) para ambos os lóbulos NW (linha vermelha) e SE (linha azul). As linhas de reflexão (He I, Pa γ e Pa β) foram corrigidas pela velocidade de expansão do Homúnculo prevista pelo modelo de Davidson et al.. A linha tracejada indica que o pico da linha Pa β está saturado. A componente em emissão deslocada para o azul observada na linha do He I 10830 e a componente do [Fe II] 12567 identificada por um pequeno traço vertical (ambas detectadas apenas no lóbulo NW) serão discutidas na seção 5.3.*

existe contaminação do material do plano equatorial que mascara o perfil P Cygni. Entre as latitudes 70º e 90º, a componente em absorção do perfil P Cyg é mais intensa (posições 4, 5 e 6 na Figura 5.3), chegando a 0,89 Å na posição 4. Este comportamento da linha do He I coincide com a região onde a componente do [Fe II] associada à colisão entre o vento rápido e a região polar do lóbulo se torna menos intensa. Como foi sugerido por Davidson *et al.* (2001), esse comportamento favorece a hipótese de que as regiões polares apresentam uma densidade maior que as paredes dos lóbulos. Como a absorção da linha do He I 10830 ocorre no vento da fonte central, o fato de que a componente em absorção

do perfil P Cygni é mais intensa nas regiões polares indica que o vento possui uma região polar relativamente mais densa que as regiões de latitude intermediária ou baixa.

Na Figura 5.4(a), no espectro do lóbulo SE, a linha do He I apresenta duas componentes em absorção. Para medir as velocidades de cada componente, foi feito um ajuste gaussiano para cada uma delas, cujo erro é inferior a 0,05 Å. A componente A (componente estreita, FWHM $\approx$ 3,5 Å) apresenta uma velocidade radial de -873 km/s, enquanto a da componente B (FWHM $\approx$ 12,1 Å) é de -516 km/s. Estas velocidades foram medidas sem a correção pela expansão dos lóbulos.

Efetuando a correção pela expansão do Homúnculo, a velocidade radial da componente A passa a ser de -978 km/s. Essa velocidade radial é semelhante à velocidade da componente NDC medida por Damineli *et al.* (1998). Entretanto, essa componente pode ter origem interestelar (Groh, comunicação privada) e, sendo assim, a correção pela expansão do Homúnculo não se aplica a ela.

A velocidade radial da componente B (-621 km/s – corrigida pela expansão dos lóbulos), é condizente com a velocidade prevista pela geometria proposta por Smith *et al.* (2003) para uma linha formada em latitudes superiores a 50° (região mais densa e de baixa ionização, segundo o modelo) no vento da fonte central.

A Figura 5.5 mostra a razão entre o espectro do lóbulo NW e o do lóbulo SE obtidos da mesma latitude estelar ($\approx 60^o$). Devido à contaminação das componentes intrínsecas, o fluxo do lado azul na linha do He I não pôde ser verificado para a latitude escolhida. Entretanto, o fluxo no lado vermelho e no pico da linha é maior no lóbulo NW do que no SE. Isso também é verificado na linha do [Fe II] 12567, cuja intensidade é maior no lóbulo NW do que no lóbulo SE. O comportamento da linha do [Fe II] 12567 pode ser explicado observando-se que a posição 15 na Figura 3.5 está na mesma linha de visada que a região polar do lóbulo NW, onde a colisão entre o vento bipolar rápido da fonte central e a região interna do lóbulo provavelmente é mais intensa do que nas paredes (posição 8). No entanto, a explicação para o comportamento da linha do He I não é imediata, dado que essa linha é formada no vento e refletida nos lóbulos. Aparentemente este é um problema resultante de algum tipo de assimetria localizada *no vento* da fonte central e não nos lóbulos do Homúnculo. Embora não exista motivo aparente para isso, talvez a região polar do vento NW seja opticamente mais transparente à linha do He I 10830 do que a região polar do vento SE. Outra possibilidade é que o modelo proposto por Smith *et al.* (2003) não seja válido para ambos os pólos do vento, *i.e.*, a estrutura do vento NW pode ser ligeiramente diferente do que foi sugerido por esses autores.

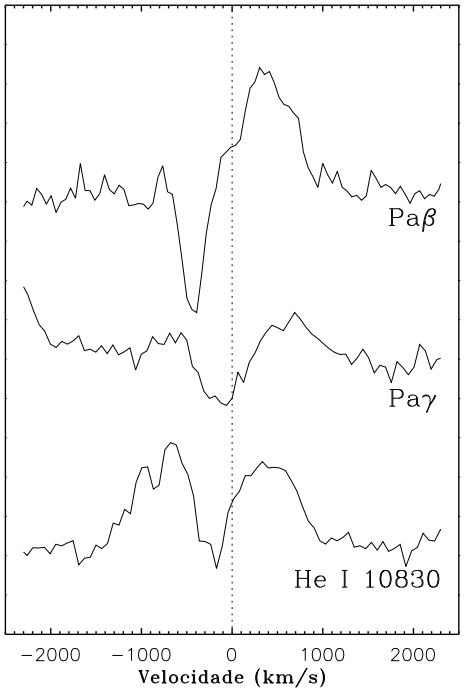


Figura 5.5 *Razão entre o espectro do lóbulo NW e o obtido do lóbulo SE extraídos da mesma latitude estelar. O lado azul do perfil da linha do He I 10830 é influenciado pela componente em emissão do lóbulo NW, causando a falsa impressão de existir um excesso do lado azul da linha do He I no lóbulo NW.*

Perfil das linhas da série do H (Pa γ e Pa β)

A linha Pa γ, após ser corrigida pela expansão dos lóbulos do Homúnculo, apresenta um perfil quase simétrico (o centróide da linha quase coincide com v_{radial}=0 km/s) no lóbulo SE, enquanto no NW, o perfil é mais deslocado para o vermelho (a velocidade radial do centróide é $v_{radial} \approx 100$ km/s). Além disso, a largura equivalente dessa linha no lóbulo SE é de aproximadamente –65 Å, enquanto no lóbulo NW esse valor aumenta em 9%.

Nas Figuras 5.4 e 5.5, pode-se notar que a intensidade do lado azul da linha Pa γ é menor no lóbulo NW do que no SE. O contrário acontece do lado vermelho: a intensidade no lóbulo NW torna-se maior que no SE. O mesmo comportamento é observado para a linha Pa β, embora nesta última, o pico esteja saturado. No caso desse excesso no lado vermelho do lóbulo NW ser causado por um erro sistemático, isso implicaria que as velocidades previstas pelo modelo de Davidson *et al.* (2001) utilizadas para corrigir a expansão dos lóbulos estão incorretas e conseqüentemente o próprio modelo mostrado na Figura 5.2 estaria errado.

No lóbulo SE, a linha Pa β apresenta um perfil extremamente assimétrico quando comparado com o obtido do lóbulo NW. O perfil assimétrico pode ser ajustado com 3

componentes gaussianas. A FWHM média da componente azul do perfil é de cerca de 9,6 Å, enquanto a da componente central e a do lado vermelho medem, respectivamente, 9,9 e 9,5 Å. Nenhuma outra linha do espectro apresenta tal comportamento. Além disso, Pa β apresenta um perfil P Cygni com uma componente em absorção extremamente fraca nas mesmas posições onde a absorção do He I é mais intensa (entre as posições 4, 5 e 6 na Figura 5.3), corroborando a idéia de que, para altas latitudes, o vento se torna mais denso. Emissões devido ao [Fe II] 12776,12787 são observadas do lado azul da linha Pa β em todas as posições de 7 até 11 e estão associadas ao Pequeno Homúnculo e à região do *Paddle*.

5.3 O *Feixe* do He I 10830

Smith *et al.* (2002), por meio da espectroscopia de fenda longa, observaram três componentes da linha do He I 10830, das quais apenas uma é de proveniente de emissão refletida. As outras duas componentes foram atribuídas à emissões intrínsecas que não são observadas no lóbulo SE. A Figura 5.6 mostra o perfil da linha do He I 10830 ao longo do eixo maior de simetria no lóbulo NW. Conforme pode ser visto nessa Figura, a linha divide-se em três componentes a partir da posição 2 até regiões localizadas fora da linha de visada do lóbulo NW (posição 14 até 20). Cada uma das componentes está identificada na Figura 5.7, que mostra a comparação do perfil da linha do He I 10830 com outras duas: [Fe II] 12567 e Pa β. A linha [Fe II] 12567 apresenta uma componente coincidente com a componente 2 do He I (cuja velocidade é a mesma em todas as posições), sugerindo que esta é devido à emissão intrínseca. Com a resolução utilizada, Pa β também apresenta uma componente devido à emissão intrínseca coincidente com a componente 2. Entretanto, nenhuma das duas linhas, [Fe II] 12567 ou Pa β, apresenta uma componente coincidente com a velocidade da componente 1. Isso sugere que a componente 1 deve ser proveniente de uma região diferente da 2. Esta componente se estende além da linha de visada do lóbulo NW (c.f. Figura 5.6), embora esteja confinada azimutalmente à linha de visada do Homúnculo.

A componente 1 apresenta um comportamento que aparentemente segue uma lei de *Hubble* ($v \propto d$, onde d é a distância). As velocidade deslocadas para o azul indicam que é uma região localizada entre o observador e o lóbulo NW. A distribuição espacial desta componente está ilustrada na seqüência de imagens da Figura 5.8, que mostra os mapas de velocidade da linha He I 10830. A estrutura formada pela componente 1 é visível a partir de -512 km/s, para velocidades radiais negativas. Uma possível explicação

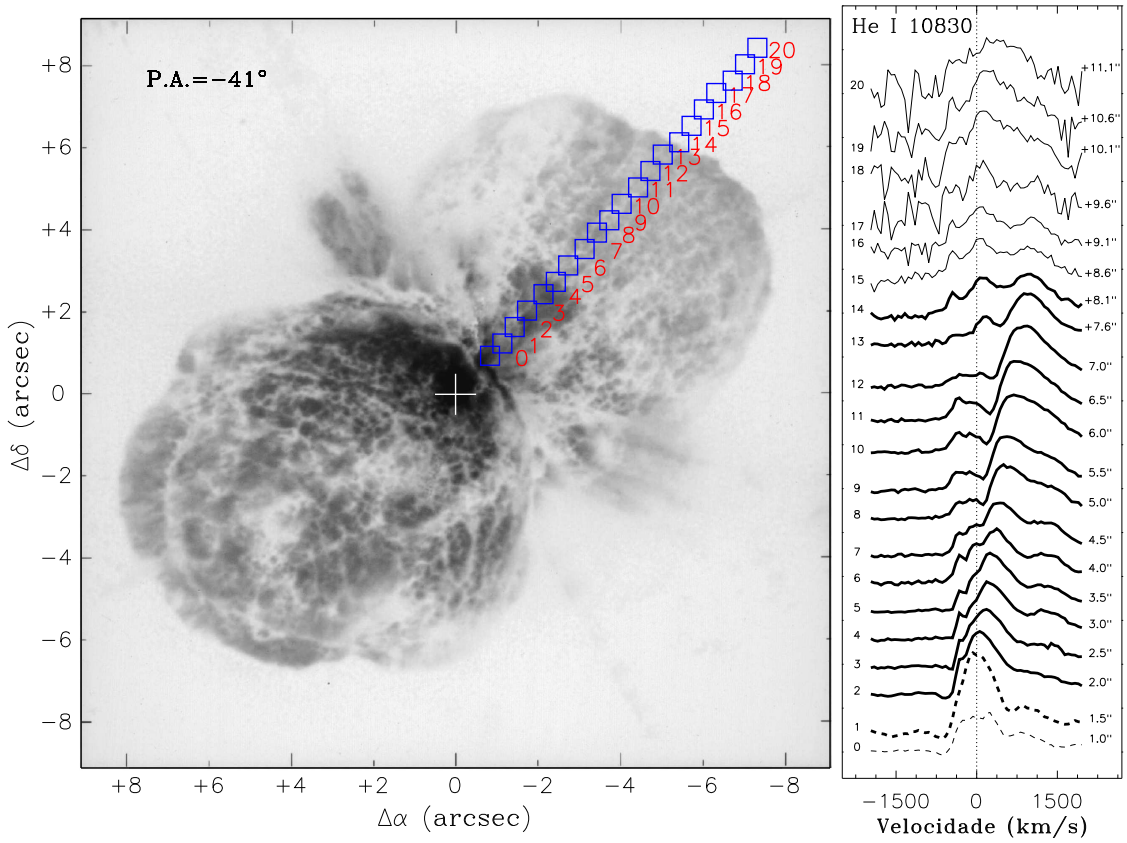


Figura 5.6 *Perfil da linha do He I 10830 ao longo do eixo maior de simetria no lóbulo NW. Os espectros em negrito (posição 0 até 14) foram extraídos do Homúnculo, enquanto os espectros com traçado mais fino foram obtidos da região externa ao lóbulo NW.*

para essa componente foi sugerida por Smith *et al.* (2002): devido ao fato de que o *Paddle* é resultado de um 'buraco' no material do plano equatorial, um pouco de radiação ultravioleta poderia estar escapando por essa região e excitando o He I localizado a distâncias maiores. Por isso, nesta dissertação, essa estrutura foi 'batizada' de '*Feixe* do He I 10830' ou simplesmente '*Feixe*'.

Para além da linha de visada do Homúnculo, *i.e.*, distâncias projetadas maiores que suas dimensões aparentes, a componente 2 se torna mais intensa que a componente do '*Feixe*', que só é bem visível até cerca de 9" da fonte central.

Algumas outras regiões também apresentam uma segunda componente de emissão intrínseca. A Figura 5.9 mostra o perfil das linhas ao longo das posições enumeradas. *Todas* as linhas de reflexão e a linha do [Fe II] 12567 apresentam uma componente com velocidade radial aproximadamente constante ($\approx$ 45 km/s). Provavelmente esta é a componente 2 observada nos espectros extraídos ao longo do eixo maior de simetria. Nesse caso, o disco equatorial é muito mais extenso do que aparenta nas imagens do HST.

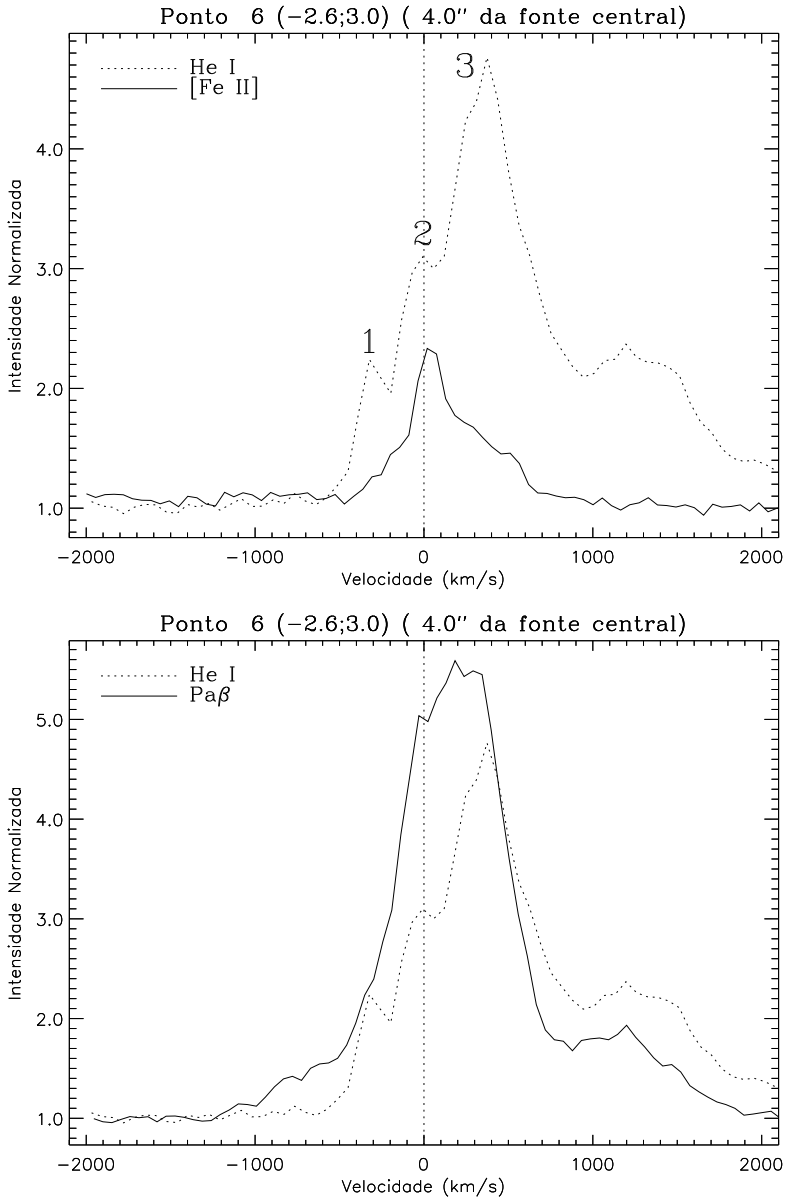


Figura 5.7 *Perfil da linha do He I 10830 extraído a 4"NW da fonte central. As componentes intrísecas estão identificadas por 1, 2 e 3. A componente 3 é emissão refletida no lóbulo NW. O 'ombro' vermelho na linha do He I é devido à emissão do [Fe II] 10863,10872, enquanto na Pa β, o 'ombro' é devido ao [Fe II] 12897.*

A distribuição do material do plano equatorial não parece ser uniforme, apresentando aglomerados de poeira em alguns lugares e 'buracos' em outros (Smith *et al.*, 2003). Isso pode ser observado em regiões como a mostrada na Figura 5.9 ou em regiões ao Norte e aparentemente mais distantes da fonte central. Ao lado do NN *jet*, existe mais uma região na qual as linhas da série do H e o He I 10830 apresentam componentes intrínsecas devido à contaminação sofrida pela emissão equatorial.

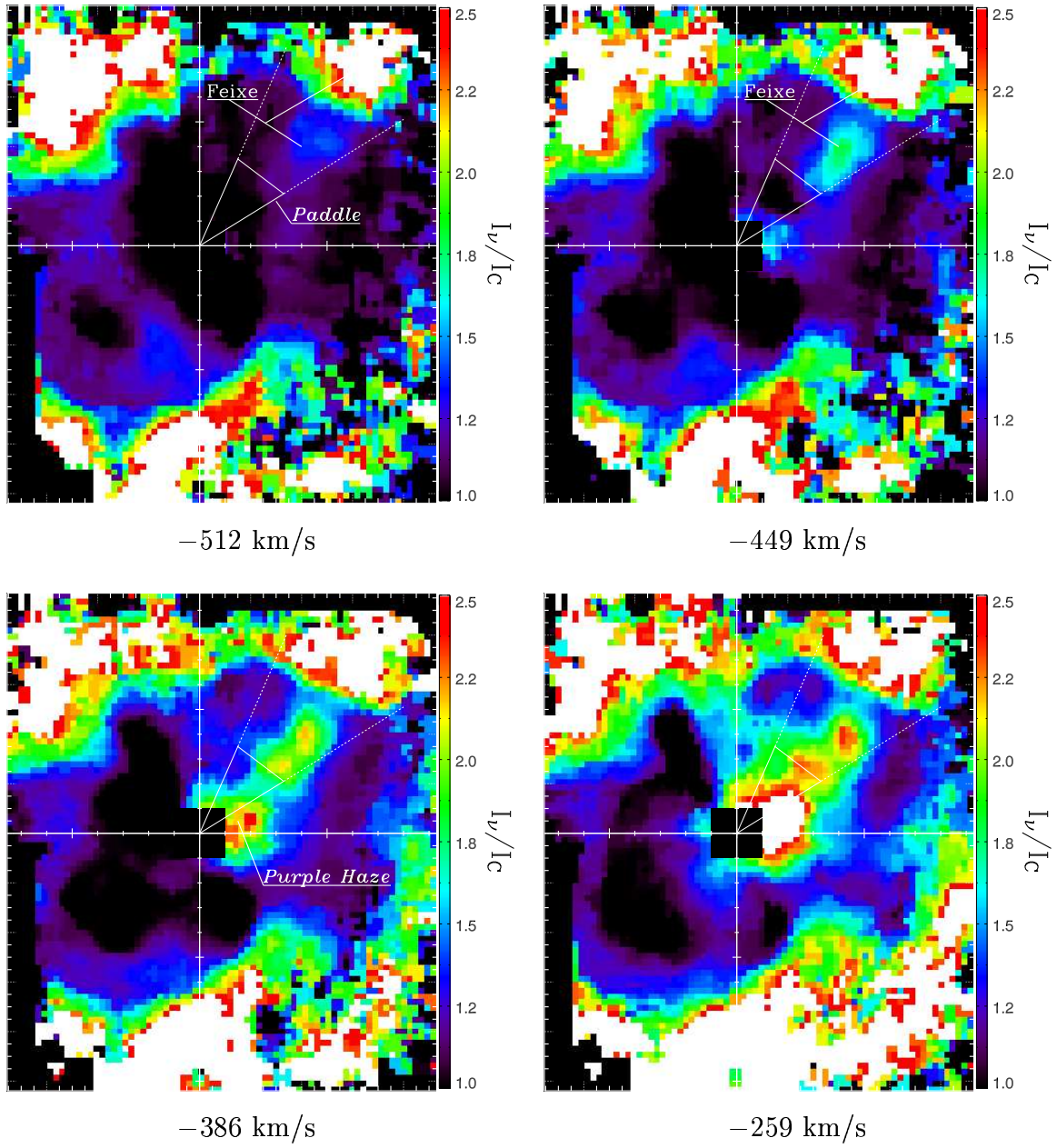


Figura 5.8 *Mapa de velocidades da linha do He I 10830. A linha contínua delimita a região do Paddle, enquanto a linha tracejada é a 'continuação' do Paddle, i.e., a linha tracejada delimita o ângulo compreendido pelo Paddle para distâncias maiores que a região visível deste.*

Segundo Smith *et al.* (2003, 1998), a fonte central do Homúnculo é cercada por um toro de poeira aquecida a temperaturas acima de 250 K e localizado a cerca de 2000 – 3000 U.A. da fonte central. Sendo assim, a explicação imediata para as regiões que apresentam uma segunda componente devido à emissão intrínseca é que elas são resultado de 'buracos' localizados no material situado nas proximidades da fonte central, *i.e.*, no toro.

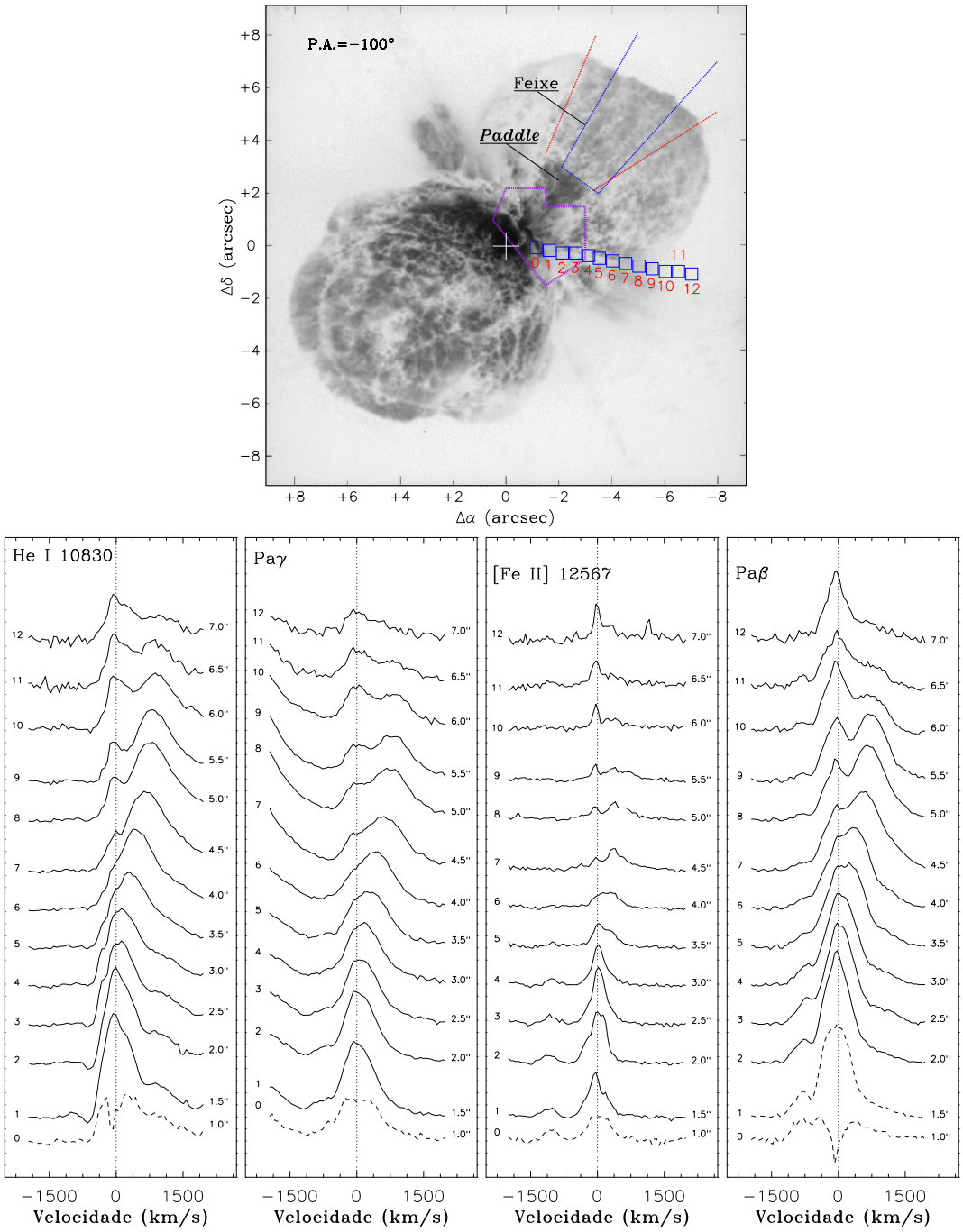


Figura 5.9 *Perfil de algumas linhas ao longo da região enumerada na imagem superior. A região coberta pelo ângulo de abertura do Paddle é ilustrada pela linha vermelha. A região delimitada pela linha violeta coincide com parte da Purple Haze, responsável pelo excesso de emissão ultravioleta observado nas imagens do HST (Morse* et al.*, 1998; Smith & Morse, 2004). A região onde o Feixe é observado está delimitada pela linha azul.*

Capítulo 6

Discussão e Conclusão

Neste capítulo, apresentarei os resultados obtidos nesta dissertação e discutirei cada ponto, apresentando as conclusões e perspectivas.

6.1 Discussões

6.1.1 Sobre as regiões de colisão

A linha do [Fe II] λ12567 revelou-se de grande valia para o mapeamento das estruturas intrínsecas da nebulosa do Homúnculo. Através do mapeamento dessa linha, foram detectadas estruturas que não haviam sido relatadas anteriormente, *e.g.*, as regiões denominadas EI e EE, localizadas no lóbulo NW e que provavelmente são causadas por colisões do vento rápido com a região polar de cada lóbulo. Entretanto, estudos mais detalhados dessas regiões em outras bandas podem esclarecer se o choque é sub ou supersônico, qual a energia envolvida, densidades, *etc.*.

O lóbulo SE do Pequeno Homúnculo foi detectado, indubitavelmente, na linha do [Fe II] 12567, enquanto o lóbulo NW deste não pôde ser separado da forte emissão proveniente da *Purple Haze* na mesma linha de visada. A colisão entre o vento da fonte central e o lóbulo SE do Pequeno Homúnculo é forte o suficiente para que a emissão seja observada através da região polar.

A tomografia Doppler da linha do [Fe II] 12567 revelou que as colisões do vento da fonte central são mais intensas nas regiões polares do que nas paredes (lados) dos lóbulos.

Isso se deve ao fato de que os pólos são, de fato, opticamente espessos, enquanto as paredes apresentam uma maior 'transparência'. Este resultado concorda com Davidson *et al.* (2001) mas nesta dissertação foram apresentados detalhes bidimensionais antes desconhecidos.

Através dos mapas de velocidade foi constatado que a região do lóbulo SE conhecida como *hole* é, de fato, uma região onde a densidade é menor do que a média do lóbulo. Nessa região, a emissão na linha do [Fe II] 12567 diminui consideravelmente, enquanto a linha do H_2 1–0 S(1) não apresenta emissão alguma. Além disso, as linhas da série do H e do He I 10830 também apresentam uma queda de emissão na região do *hole*. Outro fato que corrobora a idéia de que o *hole* é um 'buraco' no lóbulo SE (e conseqüentemente no lóbulo NW também) é a detecção da emissão do H_2 proveniente da parte posterior do lóbulo SE. Se fosse um efeito provocado por algum tipo de condensação entre o Homúnculo e o observador, toda a emissão na linha de visada do *hole* deveria ser suprimida. Entretanto, a parede posterior do lóbulo SE pode ser observada na linha do H_2 1–0 S(1).

O erro na determinação da posição do *hole* é de ±0,25", que corresponde ao tamanho de uma lente do campo do IFU. A comparação entre imagens térmicas e a tomografia Doppler levam à conclusão que o lóbulo NW também possui uma região de características semelhantes ao HS. A posição dessa região no lóbulo NW, detectada nos mapas de velocidade, coincide (dentro do erro de ±0,25") com a posição prevista para uma contrapartida simétrica do *hole*. Portanto, essas regiões devem constituir um eixo de simetria da nebulosa.

A posição dos pólos segundo o modelo cinemático proposto por Davidson *et al.* (2001) não coincide com a posição das regiões descritas acima (HS e HN). Isso pode ser devido à interações dos lóbulos com o meio interestelar, o que causaria uma assimetria na geometria dos mesmos. O ajuste entre a posição das regiões formadas pelo HS e HN com os pólos do modelo de Davidson *et al.* (2001) pode ajudar ainda mais na compreensão da geometria do Homúnculo, *i.e.*, alguns autores sugerem que a nebulosa apresenta um perfil do tipo banana (mais evidente quando se observa as imagens do HST de ponta-cabeça) que poderia ser ajustado através do alinhamento entre os pólos do modelo intermediário e as regiões do *hole* no lóbulo SE e NW.

6.1.2 Sobre o *Feixe* e a geometria do vento de η Car

Os mapas de velocidade radial revelaram uma estrutura na linha de visada do lóbulo NW, que apresenta velocidades deslocadas para o azul, sugerindo que ela se encontra na região equatorial. O *Feixe* é detectado em posições localizadas até cerca de 10,5"NW, superior à borda visível projetada do lóbulo NW ($\approx$ 8"). O P.A. dessa estrutura é de $\approx -47°$e a largura aparente é de $\approx 1,5$" (3375 U.A.). O *Feixe* é um efeito de iluminação da fonte central produzido quando a radiação ultravioleta passa por um possível 'buraco' no disco equatorial e excita o material (especialmente o gás) localizado no mesmo plano do disco. Considerando um ângulo de inclinação $i = 41^o$ (Davidson *et al.*, 2001), o *Feixe* estende-se até $\approx$ 17800 U.A. da fonte central. Esse valor salta para $\approx$ 19300 U.A. ao assumir $i = 35^o$, que é o valor encontrado quando os pólos do modelo intermediário de Davidson *et al.* (2001) são forçados a coincidir com as regiões do HS e HN. Um mapeamento mais detalhado da linha do He I 10830 no lóbulo NW com resolução espectral $\sim$ 15 km/s permitirá resolver a questão do ângulo de inclinação do disco equatorial e, conseqüentemente o ângulo de inclinação do eixo maior do Homúnculo, caso este seja realmente perpendicular ao disco equatorial.

O perfil P Cygni da linha He I 10830 revelou que as regiões polares do vento de η Car apresentam uma densidade relativamente maior do que as regiões de latitude baixa/intermediária. As velocidades radiais das linhas refletidas coincidem, dentro da resolução dos dados ($\sim$ 100 km/s), com as previstas pelo modelo proposto por Smith *et al.* (2003).

Na região conhecida como *Purple Haze*, a intensa radiação ultravioleta proveniente da fonte central produz um considerável aumento no número de linhas observadas do Fe II (tanto permitidas quanto proibidas). Esse comportamento dá suporte à idéia de que a região equatorial (baixas latitudes) é menos densa do que a região polar do vento da fonte central. Qualquer região menos densa do *disco equatorial* pode permitir que a radiação escape e crie efeitos como o *Feixe*, descrito acima. O mesmo mecanismo de produção do *Feixe* é responsável pelas componentes de emissão intrínseca observadas em outras regiões do disco equatorial.

6.1.3 Sobre a estrutura do Homúnculo

A Figura 6.1 apresenta uma representação esquemática da estrutura deduzida da análise dos dados apresentados nesta dissertação.

A linha do [Fe II] 12567 indica que o choque do vento com as calotas polares é mais

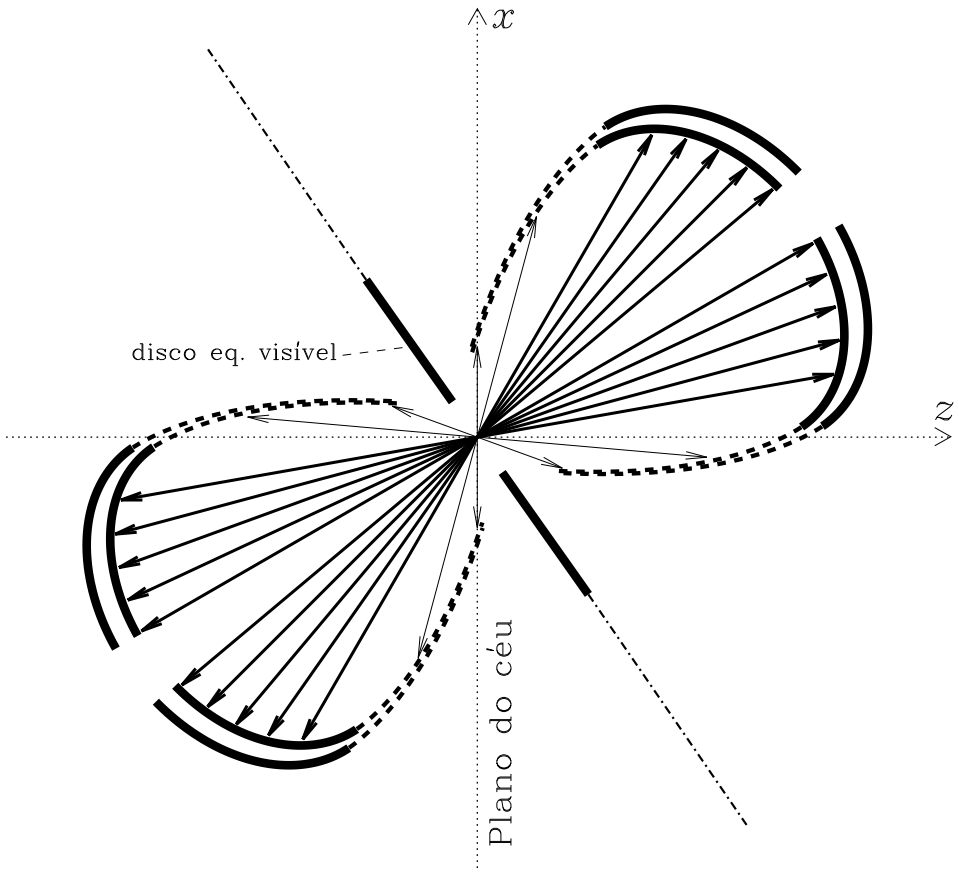


Figura 6.1 *Estrutura proposta para o Homúnculo, segundo os resultados apresentados nesta dissertação. O vento estelar colide com a região polar de cada lóbulo da nebulosa com velocidades intrínsecas de 600 km/s até 1000 km/s, enquanto as paredes (linhas tracejadas) colidem com um vento mais lento (no máximo 500 km/s).*

intenso do que com as paredes dos lóbulos. A região polar de cada lóbulo é opticamente mais espessa do que as paredes, mas a linha do [Fe II] 12567 revelou a existência de um eixo formado por duas regiões homólogas nos pólos de cada lóbulo. Essas duas regiões, denominadas HS e HN, não apresentam emissão na linha do [Fe II] 12567.

O disco equatorial é, aparentemente, muito mais extenso do que parece, atingindo distâncias projetadas maiores do que as dimensões aparentes do Homúnculo. Além disso, o disco equatorial deve ser formado por duas componentes distintas: gás e poeira. Esta última formaria o disco equatorial observado em imagens na faixa do visível (o disco equatorial visível indicado na Figura 6.1), enquanto o gás, varrido pelo vento da fonte central, localizar-se-ia a distâncias muito maiores.

Os modelos cinemáticos obtidos por Davidson *et al.* (2001) utilizando linhas proibidas não podem ser considerados como modelos que descrevem a estrutura dos lóbulos do

Homúnculo porque as emissões devido a transições proibidas originam-se no *interior* dos lóbulos. O *modelamento* de cada lóbulo deve ser feito de maneira independente, com a finalidade de reproduzir os desvios que cada lóbulo apresenta. Uma maneira grosseira de se obter esse modelo seria, como foi discutido anteriormente, através do ajuste do modelo de Davidson *et al.* (2001) ao eixo determinado pelo *hole* e sua contrapartida no lóbulo NW, permitindo, assim, a determinação das diferenças entre o modelo e o observado. Esse modelamento será o objetivo de trabalhos que serão realizados futuramente por nós.

6.2 Conclusões

As principais conclusões são:

• Os lóbulos da nebulosa do Homúnculo são, de fato, duas 'cascas' expandindo-se a uma velocidade intrínseca de ≈ 600 km/s;

• A região polar dos lóbulos possui uma quantidade maior de matéria do que as regiões laterais (paredes) dos mesmos;

• O *hole* (HS) é um buraco localizado no lóbulo SE e possui uma região homóloga no lóbulo NW (HN);

• O HS e o HN formam um eixo fundamental do Homúnculo;

• O *Paddle* é uma região causada por um buraco na base do disco equatorial que permite que a radiação UV alcance distâncias projetadas que vão além do tamanho aparente do lóbulo NW, causando um efeito de 'iluminação' que foi detectado na linha do He I 10830;

• O disco equatorial é muito mais extenso do que o que é visível nas imagens feitas na faixa óptica;

• O lóbulo SE do Pequeno Homúnculo apresenta uma distribuição espacial assimétrica em relação ao eixo maior de simetria do Grande Homúnculo;

• A colisão do vento estelar é mais intenso nas calotas polares;

• O vento estelar é mais rápido (600–1000 km/s) e mais opaco nos pólos, enquanto a região equatorial do mesmo é mais transparente e move-se com velocidades menores (400–500 km/s).

Referências Bibliográficas

Allen, D. A. & Hillier, D. J.: 1993, The Shape of the Homunchulus Nebula around Eta-Carinae, *Proceedings of the Astronomical Society of Australia* **10**, 338

Allen, D. A., Jones, T. J., & Hyland, A. R.: 1985, The near-infrared spectrum of Eta Carinae, *ApJ* **291**, 280

Athay, R. G.: 1965, Theoretical Line Intensities. III. Solar UV Lines and Continua of H, He I, and He II and the Chromospheric Model, *ApJ* **142**, 755

Corcoran, M. F.: 2005, X-Ray Monitoring of η Carinae: Variations on a Theme, *AJ* **129**, 2018

Corcoran, M. F., Hamaguchi, K., Gull, T., Davidson, K., Petre, R., Hillier, D. J., Smith, N., Damineli, A., Morse, J. A., Walborn, N. R., Verner, E., Collins, N., White, S., Pittard, J. M., Weis, K., Bomans, D., & Butt, Y.: 2004, Waiting in the Wings: Reflected X-Ray Emission from the Homunculus Nebula, *ApJ* **613**, 381

Corcoran, M. F., Petre, R., Swank, J. H., Drake, S. A., Koyama, K., Tsuboi, Y., Viotti, R., Damineli, A., Davidson, K., Ishibashi, K., White, S., & Currie, D.: 1998, The ASCA X-Ray Spectrum of eta Carinae, *ApJ* **494**, 381

Cox, P., Mezger, P. G., Sievers, A., Najarro, F., Bronfman, L., Kreysa, E., & Haslam, G.: 1995, Millimeter emission of eta Carinae and its surroundings, *A&A* **297**, 168

Currie, D. G., Dowling, D. M., Shaya, E. J., Hester, J., Scowen, P., Groth, E. J., Lynds, R., O'neil, E. J., & Wide Field/Planetary Camera Instrument Definition Team: 1996, Astrometric Analysis of the Homunculus of eta Carinae With the Hubble Space Telescope, *AJ* **112**, 1115

Damineli, A.: 1996, The 5.52 Year Cycle of Eta Carinae, *ApJ* **460**, L49+

Damineli, A., Conti, P. S., & Lopes, D. F.: 1997, Eta Carinae: a long period binary?, *New Astronomy* **2**, 107

Damineli, A., Stahl, O., Kaufer, A., Wolf, B., Quast, G., & Lopes, D. F.: 1998, Long-term spectroscopy of eta Carinae. I. The high and low excitation phases, *A&AS* **133**, 299

Davidson, K.: 1993, Unresolved Questions Regarding Massive Stars and Their Interaction with the ISM, em *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pp 483–+

Davidson, K., Ebbets, D., Weigelt, G., Humphreys, R. M., Hajian, A. R., Walborn, N. R., & Rosa, M.: 1995, HST/FOS spectroscopy of ETA Carinae: the star itself, and ejecta within 0.3 arcsec, *AJ* **109**, 1784

Davidson, K. & Humphreys, R. M.: 1997, Eta Carinae and Its Environment, *ARA&A* **35**, 1

Davidson, K., Smith, N., Gull, T. R., Ishibashi, K., & Hillier, D. J.: 2001, The Shape and Orientation of the Homunculus Nebula Based on Spectroscopic Velocities, *AJ* **121**, 1569

Davidson, K., Walborn, N. R., & Gull, T. R.: 1982, The remarkable spectrum of some material ejected by Eta Carinae, *ApJ* **254**, L47

Dorland, B. N., Currie, D. G., Kaufer, A., & Bacciotti, F.: 2003, The "Ghost Shell": Discovery of the Forward Shock from Colliding Winds about Eta Carinae, em *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, pp 70–70

Dufour, R. J.: 1989, Shell nebulae around luminous evolved stars, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica, vol. 18* **18**, 87

Duschl, W. J., Hofmann, K.-H., Rigaut, F., & Weigelt, G.: 1995, Morphology and Kinematics of Eta Carinae, em *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, pp 17–+

Ebbets, D., Malumuth, E., Davidson, K., White, R., & Walborn, N.: 1993, Proper Motions of the N Condensations of Eta Carinae, em *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pp 263–+

Edwards, S., Fischer, W., Kwan, J., Hillenbrand, L., & Dupree, A. K.: 2003, He I λ10830 as a Probe of Winds in Accreting Young Stars, *ApJ* **599**, L41

Finger, G., Dorn, R. J., Mehrgan, H., Meyer, M., Moorwood, A. F. M., & Steigmeier, J.: 2004, Test Results with 2Kx2K MCT Arrays, em *Scientific Detectors for Astronomy, The Beginning of a New Era*, pp 497–500

Gaviola, E.: 1950, Eta Carinae. I. The Nebulosity., *ApJ* **111**, 408

Gaviola, E.: 1953, Eta Carinae. II. The Spectrum., *ApJ* **118**, 234

Gehrz, R. D., Ney, E. P., Becklin, E. E., & Neugebauer, G.: 1973, The Infrared Spectrum and Angular Size of Eta Carinae, *Astrophys. Lett.* **13**, 89

Graham, J. R., Wright, G. S., & Longmore, A. J.: 1987, Infrared spectroscopy of the supernova remnant IC 443, *ApJ* **313**, 847

Hackwell, J. A., Gehrz, R. D., & Grasdalen, G. L.: 1986, The internal structure of the dust shell of Eta Carinae deduced from six channel 8-13 micron mapping, *ApJ* **311**, 380

Harvey, P. M., Hoffmann, W. F., & Campbell, M. F.: 1978, High Angular Resolution Observations of Eta Carinae from 35-175 Microns, *A&A* **70**, 165

Herbst, T. M.: 1994, Numerial evaluation of OH-suppression instruments, *PASP* **106**, 1298

Hester, J. J., Light, R. M., Westphal, J. A., Currie, D. G., Groth, E. J., Holtzmann, J. A., Lauer, T. R., & O'Neil, E. J.: 1991, Hubble Space Telescope imaging of Eta Carinae, *AJ* **102**, 654

Hillier, D. J. & Allen, D. A.: 1992, A spectroscopic investigation of Eta Carinae and the Homunculus Nebula. I - Overview of the spectra, *A&A* **262**, 153

Hillier, D. J., Davidson, K., Ishibashi, K., & Gull, T.: 2001, On the Nature of the Central Source in η Carinae, *ApJ* **553**, 837

Horne, K.: 1986, An optimal extraction algorithm for CCD spectroscopy, *PASP* **98**, 609

Hummer, D. G. & Storey, P. J.: 1987, Recombination-line intensities for hydrogenic ions. I - Case B calculations for H I and He II, *MNRAS* **224**, 801

Humphreys, R. M., Davidson, K., & Smith, N.: 1999, Eta Carinae's Second Eruption and the Light Curves of the eta Carinae Variables, *PASP* **111**, 1124

Ishibashi, K., Gull, T. R., Davidson, K., Smith, N., Lanz, T., Lindler, D., Feggans, K., Verner, E., Woodgate, B. E., Kimble, R. A., Bowers, C. W., Kraemer, S., Heap, S. R., Danks, A. C., Maran, S. P., Joseph, C. L., Kaiser, M. E., & Linsky, J. L.: 2003, Discovery of a Little Homunculus within the Homunculus Nebula of η Carinae, *AJ* **125**, 3222

Jordan, C.: 1975, The intensities of helium lines in the solar EUV spectrum, *MNRAS* **170**, 429

Martini, P. & DePoy, D. L.: 2000, Optimal resolutions for IR spectroscopy through the OH airglow, em *Proc. SPIE Vol. 4008, p. 695-702, Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors, Masanori Iye; Alan F. Moorwood; Eds.*, pp 695–702

McGregor, P. J., Hyland, A. R., & Hillier, D. J.: 1988, Atomic and molecular line emission from early-type high-luminosity stars, *ApJ* **324**, 1071

McKee, C. F., Chernoff, D. F., & Hollenbach, D. J.: 1984, Infrared spectroscopy of interstellar shocks, em *ASSL Vol. 108: Galactic and Extragalactic Infrared Spectroscopy*, pp 103–131

Meaburn, J.: 1999, The Extensive η Carinae Scattering and Emission-Line Nebulosities, em *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pp 159–+

Meaburn, J., Boumis, P., Walsh, J. R., Steffen, W., Holloway, A. J., Williams, R. J. R., & Bryce, M.: 1996, Highly supersonic motions within the outer features of the etaCarinae nebulosity, *MNRAS* **282**, 1313

Meaburn, J., Walsh, J. R., & Wolstencroft, R. D.: 1993, The outflowing dust around Eta Carinae, *A&A* **268**, 283

Meaburn, J., Wolstencroft, R. D., & Walsh, J. R.: 1987, Echelle and spectropolarimetric observations of the Eta Carinae nebulosity, *A&A* **181**, 333

Morse, J. A., Davidson, K., Bally, J., Ebbets, D., Balick, B., & Frank, A.: 1998, Hubble Space Telescope Wide Field Planetary Camera 2 Observations of eta Carinae, *AJ* **116**, 2443

Morse, J. A., Kellogg, J. R., Bally, J., Davidson, K., Balick, B., & Ebbets, D.: 2001, Hubble Space Telescope Proper-Motion Measurements of the η Carinae Nebula, *ApJ* **548**, L207

Nussbaumer, H. & Storey, P. J.: 1980, Atomic data for Fe II, *A&A* **89**, 308

Nussbaumer, H. & Storey, P. J.: 1988, Transition probabilities for forbidden Fe II infrared lines, *A&A* **193**, 327

Oliva, E.: 1987, Forbidden lines in the near infrared (1-5 micron) - Their application to the study of SN's and SNR's, *Memorie della Societa Astronomica Italiana* **58**, 215

Oliva, E., Moorwood, A. F. M., & Danziger, I. J.: 1987, A 1-5 micron infrared spectrum of SN 1987A, *The Messenger* **50**, 18

Parry, I., Bunker, A., Dean, A., Doherty, M., Horton, A., King, D., Lemoine-Busserole, M., Mackay, C. D., McMahon, R., Medlen, S., Sharp, R. G., & Smith, J.: 2004, CIRPASS: description, performance, and astronomical results, em *UV and Gamma-Ray Space Telescope Systems. Edited by Hasinger, Günther; Turner, Martin J. L. Proceedings of the SPIE, Volume 5492, pp. 1135-1144 (2004).*, pp 1135–1144

Peimbert, M. & Torres-Peimbert, S.: 1987, Collisional excitation of the 10830 A He I line and the population of the 2 ^{3}S He I state in gaseous nebulae, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica* **15**, 117

Pittard, J. M. & Corcoran, M. F.: 2002, In hot pursuit of the hidden companion of eta Carinae: An X-ray determination of the wind parameters, *A&A* **383**, 636

Ringuelet, A. E.: 1958, Note on the nebulosity around Eta Carinae. Mit 1 Textabbildung, *Zeitschrift fur Astrophysics* **46**, 276

Rodríguez-Ardila, A., Pastoriza, M. G., Viegas, S., Sigut, T. A. A., & Pradhan, A. K.: 2004, Molecular hydrogen and [Fe II] in Active Galactic Nuclei, *A&A* **425**, 457

Seab, C. G., Shull, J. M., & McKee, C. F.: 1984, Emission from Interstellar Shocks with Grain Destruction, *BAAS* **16**, 927

Seward, F. D., Butt, Y. M., Karovska, M., Prestwich, A., Schlegel, E. M., & Corcoran, M.: 2001, Early Chandra X-Ray Observations of η Carinae, *ApJ* **553**, 832

Shull, J. M. & Draine, B. T.: 1987, The physics of interstellar shock waves, em *ASSL Vol. 134: Interstellar Processes*, pp 283–319

Simon, K. P., Jonas, G., Kudritzki, R. P., & Rahe, J.: 1982, Non-LTE Analyses of the O3 Stars HD 93128, HD 93129A and HD 303308, *Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft Hamburg* **55**, 51

Smith, N.: 2005, Doppler tomography of the Little Homunculus: high-resolution spectra of [FeII] λ 16435 around Eta Carinae, *MNRAS* **357**, 1330

Smith, N. & Davidson, K.: 2001, The Shocking Near-Infrared Spectrum of the Homunculus Nebula Surrounding η Carinae, *ApJ* **551**, L101

Smith, N., Davidson, K., Gull, T. R., Ishibashi, K., & Hillier, D. J.: 2003, Latitude-dependent Effects in the Stellar Wind of η Carinae, *ApJ* **586**, 432

Smith, N. & Gehrz, R. D.: 1998, Proper Motions in the Ejecta of eta Carinae with a 50 Year Baseline, *AJ* **116**, 823

Smith, N., Gehrz, R. D., Hinz, P. M., Hoffmann, W. F., Hora, J. L., Mamajek, E. E., & Meyer, M. R.: 2003, Mass and Kinetic Energy of the Homunculus Nebula around η Carinae, *AJ* **125**, 1458

Smith, N., Gehrz, R. D., Hinz, P. M., Hoffmann, W. F., Mamajek, E. E., Meyer, M. R., & Hora, J. L.: 2002, A Disrupted Circumstellar Torus inside η Carinae's Homunculus Nebula, *ApJ* **567**, L77

Smith, N., Gehrz, R. D., & Krautter, J.: 1998, The Infrared Morphology of eta Carinae, *AJ* **116**, 1332

Smith, N., Gehrz, R. D., & Krautter, J.: 1999, Structure and Kinematics of the Equatorial Ejecta, em *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pp 31–+

Smith, N. & Morse, J. A.: 2004, Nitrogen and Oxygen Abundance Variations in the Outer Ejecta of η Carinae: Evidence for Recent Chemical Enrichment, *ApJ* **605**, 854

Socas-Navarro, H., Trujillo Bueno, J., & Landi Degl'Innocenti, E.: 2004, Signatures of Incomplete Paschen-Back Splitting in the Polarization Profiles of the He I λ10830 Multiplet, *ApJ* **612**, 1175

Thackeray, A. D.: 1949, Nebulosity surrounding eta Carinae, *The Observatory* **69**, 31

Thackeray, A. D.: 1956, Polarization of eta Carinae, *The Observatory* **76**, 154

Trujillo Bueno, J., Merenda, L., Centeno, R., Collados, M., & Landi Degl'Innocenti, E.: 2005, The Hanle and Zeeman Effects in Solar Spicules: A Novel Diagnostic Window on Chromospheric Magnetism, *ApJ* **619**, L191

Visvanathan, N.: 1967, Polarization in η carinae, *MNRAS* **135**, 275

Walborn, N. R., Blanco, B. M., & Thackeray, A. D.: 1978, Proper motions in the outer shell of Eta Carinae, *ApJ* **219**, 498

Walborn, N. R. & Liller, M. H.: 1977, The earliest spectroscopic observations of eta Carinae and its interaction with the Carina Nebula, *ApJ* **211**, 181

Weis, K., Corcoran, M. F., Bomans, D. J., & Davidson, K.: 2004, A spectral and spatial analysis of η Carinae's diffuse X-ray emission using CHANDRA, *A&A* **415**, 595

Weis, K. & Duschl, W. J.: 1999, The LBV Nebula around η CAR and Its Remarkable Features, em *ASP Conf. Ser. 179: Eta Carinae at The Millennium*, pp 155–+

Weis, K., Duschl, W. J., & Bomans, D. J.: 2001, High velocity structures in, and the X-ray emission from the LBV nebula around η Carinae, *A&A* **367**, 566

Westphal, J. A. & Neubebauer, G.: 1969, Infrared Observations of Eta Carinae to 20 Microns, *ApJ* **156**, L45+

White, S. M., Duncan, R. A., Lim, J., Nelson, G. J., Drake, S. A., & Kundu, M. R.: 1994, The radio source around Eta Carinae, *ApJ* **429**, 380

Zanella, R., Wolf, B., & Stahl, O.: 1983, The ETA Carinae Event 1981-1982, *Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft Hamburg* **60**, 303

Acrônimos e Neologismos Usados Nesta Dissertação

$\Delta\alpha$ deslocamento em ascensão reta

$\Delta\delta$ deslocamento em declinação

λ comprimento de onda

$\lambda\lambda$ intervalo de comprimento de onda

ANW componente devido à emissão intrínseca proveniente da parede posterior do lóbulo NW

ASE componente devido à emissão intrínseca proveniente da parede posterior do lóbulo SE

CIRPASS (*Cambridge Infrared Panoramic Survey Spectrograph*)

CHANDRA observatório espacial de raios-X

ESE componente devido à emissão proveniente do espalhamento da radiação na parede anterior do lóbulo SE

EQL componente devido à emissão intrínseca proveniente do material equatorial que se move a baixas velocidades

EQR componente devido à emissão intrínseca proveniente do material equatorial que se move a altas velocidades

FITS (*Flexible Image Transport System*) – sistema flexível de transporte de imagens

FNW componente devido à emissão intrínseca proveniente da parede anterior do lóbulo NW

FSE componente devido à emissão intrínseca proveniente da parede anterior do lóbulo SE

FWHM (*Full Width of Half Maximum*) - Largura à Meia-Altura

GH Grande Homúnculo

H I hidrogênio neutro

H II hidrogênio uma vez ionizado

HST (*Hubble Space Telescope*) – telescópio espacial Hubble

IDL (*Interactive Data Language*) – linguagem de programação

IFS (*Integral Field Spectroscopy*) – espectroscopia de campo integral

IFU (*Integral Field Unit*) – unidade de campo integral

IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*) – pacote de redução e análise de imagens

LBV (*Luminous Blue Variable*) – Variável Azul Luminosa

m_V magnitude aparente na banda V (5544 Å)

MEF (*Multi-extension FITS*) – arquivo FITS com múltiplas extensões

NIR (*Near InfraRed*) – Infravermelho Próximo

NIST (*National Institute of Standards and Technology*)

OPD Observatório Pico dos Dias

P.A. (*Position Angle*) – ângulo contado a partir do Norte no sentido anti-horário

pc parsec: $2{,}06\times10^5$ U.A. $= 3{,}09\times10^{18}$ cm

PH Pequeno Homúnculo

STIS (*Space Telescope and Imaging Spectrograph*)

U.A. unidade astronômica: $\approx 1,5 \times 10^{13}$ cm

UV UltraVioleta

V magnitude aparente na banda V (5544 Å)

WFPC (*Wide Field Planetary Camera*) – câmera planetária de campo amplo