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

Washington Roberto Lopes

Estudo das linhas de recombinação do H em η Carinae

São Paulo
2023

Washington Roberto Lopes

Estudo das linhas de recombinação do H em η Carinae

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica
Orientadora: Prof.ª Dr.ª Zulema Abraham

São Paulo
2023

Dedico este trabalho a todos aqueles que me apoiaram nesta jornada.

Agradecimentos

À minha família e especialmente a Patricia, minha mãe, por sempre acreditar em mim;

Às minhas amigas Jéssica Perreira e Stefany Saraiva que me apoiaram de diversas formas ao longo de toda a minha jornada e por acreditarem em mim, até quando eu mesmo duvidava;

À minha orientadora Zulema Abraham, por toda a paciência, disposição, dedicação e ensinamentos dispensados a mim no último ano;

A todos os professores da Universidade de São Paulo que contribuíram para a minha formação.

Agradeço especialmente ao bibliotecário Rodrigo Garcia, por sua paciência e apoio durante a minha longa passagem pela Biblioteca Brasiliana Guita e José Mindlin.

Agradeço também à Universidade de São Paulo que possibilitou a minha permanência na universidade através de seus programas de permanência estudantil.

Esta tese/dissertação foi escrita em LaTeX com a classe IAGTESE, para teses e dissertações do IAG.

"*Inspect every piece of pseudoscience and you will find a security blanket, a thumb to suck, a skirt to hold. What have we to offer in exchange? Uncertainty! Insecurity!*"

— Isaac Asimov

"*Cada um de nós é, sob uma perspectiva cósmica, precioso. Se um humano discorda de você, deixe-o viver. Em cem bilhões de galáxias, você não vai achar outro.*"

— Carl Sagan

Resumo

Neste trabalho apresentamos uma análise das observações das linhas de recombinação em ondas milimétricas (H30α, H35α, H40α e H50β) na direção de η Carinae obtidas, entre os anos 2000 e 2003, com o radiotelescópio SEST. Elas são comparadas com outras medidas destas linhas e do contínuo encontradas na literatura.

Os espectros aqui relatados são semelhantes aos encontrados na literatura com a presença das fortes linhas estreitas de H30α, H35α, H40α centradas em ~ -55 km s^{-1} e detecção das emissões estendidas e assimétricas, em velocidades positivas e negativas. As densidades de fluxo do contínuo mostraram que as intensidades sofreram grandes oscilações ao longo do período nas três frequências. Já as intensidades das RRLs H30α, H35α e H40α apresentaram comportamentos distintos: as linhas H30α e H40α mostram fortes oscilações ao longo do período orbital ao contrário da intensidade da linha H35α que apresentou um aumento da emissão ao longo do ciclo. Já a intensidade da linha H50β apresenta um comportamento constante e é detectada com velocidades V_{LSR} variando entre -56 e -51 km s^{-1}, no espectro de H40α.

É também apresentada uma breve introdução às linhas de recombinação em rádio e à transferência radiativa, além de um breve histórico sobre o radiotelescópio SEST.

Abstract

In this work we present an analysis of the observations of recombination lines in millimeter waves (H30α, H35α, H40α, and H50β) in the direction of η Carinae, obtained between the years 2000 and 2003, with the SEST radio telescope. They are compared with other measurements of the lines and continuums found in the literature.

The spectra reported here are similar to those found in the literature with the presence of strong narrow lines of H30α, H35α, H40α centered at ~ -55 km s^{-1} and detection of extended and asymmetric emissions, at positive and negative velocities. The continuum flux densities showed that the intensities underwent large oscillations over the period at the three frequencies. The intensities of the RRLs H30α, H35α and H40α showed different behaviors: the line H30α and H40α show strong oscillations along the orbital period along the contrary to the intensity of the H35α line, which showed an increase in emission throughout the cycle. The intensity of the line H50β presents a constant behavior and is detected with velocities V_{LSR} varying between -56 and -51 km s^{-1}, in the spectrum of H40α .

A brief introduction to radio recombination lines and radiative transfer is also presented, as well as a brief history of the SEST radio telescope.

Lista de Figuras

1.1 Este mosaico mostra a Nebulosa Carina (parte esquerda da imagem), local onde se encontra o sistema estelar Eta... 20

1.2 Imagem central: Imagem do *HST Wide Field Planetary Camera* do Homúnculo no filtro *F336W*... 22

3.1 Fotografia do Telescópio Submilimétrico Sueco-ESO (15 m). 28

4.1 Espectros médios observados nos dias 29 e 30 de maio de 2000. 32

4.2 Espectros médios observados nos dias 29 e 30 de maio de 2000 após a remoção da linha de base. 33

4.3 Linhas espectrais H30α, H35α e H40α e contínuo subjacente observados nos dias 06 e 07 de março de 2003. 35

4.4 Espectros médios observados nos dias 06 e 07 de março de 2003 após a remoção da linha de base. 35

4.5 Direita:Esquema mostrando as diferentes componentes detectadas nas imagens contínuas e... 36

4.6 Espectro da H30α com fluxo total, a curva de ajuste e as cinco componentes gaussianas. 37

4.7 Espectro da H35α com fluxo total, a curva de ajuste e as cinco componentes gaussianas. 38

4.8 Espectro da H40α com fluxo total, a curva de ajuste e as seis componentes gaussianas. 39

4.9 Gráfico com as medidas da densidade de fluxo observadas em diferentes épocas. 43

4.10 Gráficos da densidade de fluxo do contínuo pela frequência para cada uma das épocas. 45
4.11 Gráfico com as medidas da densidade de fluxo de diferentes épocas. 46

A.1 Uma região emissora vista através de uma nuvem intermediária. 57

B.1 Espectros médios observados nos dias 29 e 30 de maio de 2000. 63
B.2 Espectros médios observados no dia 19 de novembro de 2000. 63
B.3 Espectros médios observados no dia 17 de janeiro de 2001. 63
B.4 Espectros médios observados nos dias 17, 18 e 19 de maio de 2001. 64
B.5 Espectros médios observados no dia 06 de janeiro de 2002. 64
B.6 Espectros médios observados no dia 09 de março de 2002. 64
B.7 Espectros médios observados nos dias 02 e 03 de dezembro de 2002. 65
B.8 Espectros médios observados no dia 06 de dezembro de 2002. 65
B.9 Espectros médios observados nos dias 05 e 06 de janeiro de 2003. 65
B.10 Espectros médios observados nos dias 06 e 07 de março de 2003. 66

Lista de Tabelas

3.1 Parâmetros de Localização e Características do SEST. 29
3.2 Parâmetros do Feixe do SEST. 29
3.3 Parâmetros de Operação do SEST. 29

4.1 Intervalos e curvas ajustadas aos espectros das observações dos dias 29 e 30 de maio de 2000. 33
4.2 Densidade de Fluxo Máximo das *RRLs* do Hidrogênio 34
4.3 Densidade de Fluxo Médio do Contínuo 34
4.4 Resultados do ajuste das gaussianas para a linha de emissão H30α 38
4.5 Resultados do ajuste das gaussianas para a linha de emissão H35α 39
4.6 Resultados do ajuste das gaussianas para a linha de emissão H40α 40
4.7 Valores de densidade de fluxo máxima das linhas H30α, He30α, H35α, H40α e H50β 40
4.8 Densidade de Fluxo Máximo das *RRLs* do Hidrogênio Extraídos da Literatura 45
4.9 Densidade de Fluxo Médio do Contínuo Extraídos da Literatura 45

B.1 Intervalos e curvas ajustadas aos espectros das observações entre maio de 2000 e março de 2003 62

Sumário

1. Introdução 19

2. A física das Linhas de Recombinação em Rádio 25

3. Descrição das Observações 27

3.1 O SEST 27

3.2 Obtenção dos Dados 30

4. Análises e Resultados 31

4.1 Redução dos Dados 31

4.2 Comparação com os dados do ALMA de 2017 34

4.3 Discussão 41

4.3.1 Análise da Variabilidade das intensidade das linhas e do contínuo . 43

5. Conclusões 47

Referências 49

Apêndice 55

A. Transferência Radiativa 57

B. Gráficos e Tabelas 61

B.1 Tabelas 61

B.2 Espectros médios das *RRLs* H30α, H35α e H40α e contínuos subjacentes . 62

Capítulo 1

Introdução

A estrela HD 93308, conhecida como η Carinae (doravante η Car), tem sido objeto de estudo e fascínio dos astrônomos desde pelo menos o final da década de 30 do século XIX, quando passou por aumentos significativos em sua luminosidade (Herschel, 1838); em 1843 ficou tão luminosa quanto Sirius, de magnitude aparente -1,33. Nesse período, η Car ejetou entre 10-40 $M_\odot$ (Morris et al., 1999; Smith et al., 2003; Smith, 2013; Morris, 2015), período chamado de "Grande Erupção" por Davidson e Humphreys (1997). Esta ejecta se expandiu a velocidades de $\sim$ 650 km s^{-1} (Davidson et al., 2001), situada hoje a uma distância de 18″, formando o que foi nomeado por Gaviola (1950) de Nebulosa do Homúnculo. Ishibashi et al. (2003) detectaram uma estrutura interna ao Homúnculo a distâncias de $\pm$2″ do sistema binário e se expandindo a uma velocidade de $\sim$200 km s^{-1}, nomeada como Pequeno Homúnculo, formada devido a uma segunda erupção que ocorreu em $\sim$1890 (Humphreys et al., 1999). Abraham et al. (2014) observando η Car, com o observatório Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), no contínuo e em várias linhas de recombinação detectaram uma nuvem de gás ionizado de alta densidade não resolvida, denominando-a de Bebê Homúnculo ('*Baby Homunculus*') cuja dinâmica corresponderia a uma possível ejeção de matéria por volta de 1940, ano em que houve um pequeno e repentino aumento na luminosidade estelar de η Car, mas sem que seu brilho voltasse a diminuir nos anos seguintes.

η Car é um sistema binário que se localiza a uma distância 2,2-2,3 kpc do Sol (Allen e Hillier, 1993; Davidson e Humphreys, 1997; Meaburn, 1999; Davidson et al., 2001) com velocidade LSR (*Local Standard of Rest*) de -19.7 km s^{-1} (Smith, 2004). Ela faz parte do aglomerado aberto Trumpler 16 que abriga algumas das estrelas mais brilhantes da Galáxia, algumas de tipo espectral O3, um dos mais raros de serem encontrados, Wolf Rayet, entre

outros (Cox et al., 1995). η Car é uma das estrelas mais massivas e brilhantes conhecidas em nossa Galáxia, com uma massa de cerca de 120 $M_\odot$ e luminosidade bolométrica de $\sim 5\times10^6$ $L_\odot$ (Westphal e Neugebauer, 1969; Cox et al., 1995), classificada como uma Variável Luminosa Azul (LBV, *Luminus Blue Variable*) figurando entre as mais extremas desta classificação e candidata a uma explosão de supernova. Na Figura 1.1 pode-se visualizar η Car e a região em que ela se localiza em uma montagem criada por G. Weigelt.

Figura 1.1: Este mosaico mostra a Nebulosa Carina (parte esquerda da imagem), local onde se encontra o sistema estelar Eta Carinae. Esta parte da imagem foi observada com o instrumento Wide Field Imager montado no telescópio MPG/ESO de 2,2 metros no Observatório de La Silla do ESO. A parte central mostra o meio ao redor da estrela: a Nebulosa Homunculus, formada a partir de material ejetado pelo sistema Eta Carinae. Esta imagem foi obtida pelo instrumento infravermelho próximo de ótica adaptativa NACO montado no Very Large Telescope do ESO. A imagem da direita mostra a região mais interna do sistema observada com o Interferômetro do Very Large Telescope (VLTI). Trata-se da imagem com a maior resolução obtida até hoje deste objeto. **Crédito:** G. Weigelt/ESO. *Texto e Imagem extraídos de* `https://www.eso.org/public/brazil/images/eso1637a/`

Entender a natureza de η Car é um mistério que desafia os astrônomos desde o século XIX. Como está envolta por uma camada de gás e poeira, não se pode visualizar sua fotosfera, o que implica em uma grande dificuldade para desvendar o seu comportamento dramático. Na busca por respostas para a variação da linha He I λ10830, Damineli (1996) sugeriu que η Car possui uma estrela companheira que seria responsável pelo desaparecimento das linhas de alta excitação do espectro de η Car, e encontrou uma periodicidade para o ciclo destes eventos ($\sim$5,5 anos). Iping et al. (2005) utilizando observações com o satélite Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (FUSE), mostram que a companheira não

é visível, dado que está imersa nos fortes ventos da estrela primária. As observações em raios-X também revelaram a variabilidade periódica da curva de luz em raios-X, e esta emissão ocorre devido ao choque produzido pela colisão entre o vento da estrela primária e o vento da estrela companheira, confirmando ser um sistema altamente massivo e excêntrico ($e \sim 0.9$; Corcoran et al., 2017). Periodicidade também foi observada nos comprimentos de onda centimétricos e milimétricos (Cox et al., 1995; Abraham e Damineli, 1999; Abraham et al., 2003; Duncan e White, 2003).

Observações nos comprimentos de onda UV, óptico e IR da região a uma distância de $0,1 - 0,3''$ das estrelas, mas ainda sob a influência dos ventos, confirmaram que as regiões conhecidas como "blobs" ou glóbulos de Weigelt (Weigelt e Ebersberger, 1986; Weigelt et al., 1995; Abraham et al., 2020) emitem linhas espectrais de elementos altamente ionizados, tais como [Fe II] e [Fe III] (Gull et al., 2016 e suas referências). Essas são regiões densas de matéria ($n_e \sim 10^7$ cm^{-3} e $T_e \sim 10^4$ K).

Na Figura 1.2, extraída de Abraham et al. (2020), é apresentada a posição das várias componentes presentes no entorno de η Car que já foram descritas na literatura: o 'Leque' (*Fan*; Morse et al., 1998), a 'Saia Equatorial' (*Equatorial Skirt*; Smith et al., 1998), a 'Neblina Roxa' (*Purple Haze*; Smith et al., 2004), o 'Toro' (*Torus*) molecular (Smith et al., 2018; Bordiu e Rizzo, 2019) e a 'Nebulosa da Borboleta' (*Butterfly Nebula*; Chesneau et al., 2005).

A estrela primária do sistema binário perde massa através de um vento estelar denso a uma taxa de $\dot{M} \approx 10^{-3} M_\odot$ ano^{-1}, com velocidade de $\sim$ 500 km s^{-1} (Hillier et al., 2001; Groh et al., 2012). A explicação para a emissão em raios-X é que seria devida à colisão vento-vento em que a companheira também tem um vento forte, no entanto, menos denso causado por uma taxa de perda de massa de $\dot{M} \approx 10^{-5} M_\odot$ ano^{-1} e com velocidade muito mais alta de $\sim$ 3000 km s^{-1}(Corcoran et al., 2001). A fotosfera da primária ou a de sua companheira não podem ser observadas diretamente devido à alta perda de massa, portanto, as propriedades individuais das estrelas são inferidas por observações indiretas. Hillier et al. (2001) calcularam uma temperatura efetiva $T_{eff} \sim 30000$ K, raio estelar de $R \sim 60$ R$_\odot$ e uma taxa de fótons ionizantes fornecida pela estrela de $Q \sim 2 \times 10^{50}$ ph s^{-1} para a estrela primária, ajustando os espectros a modelos NLTE (*Non-Local Thermal Equilibrium*). Verner et al. (2005); Mehner et al. (2010) utilizando observações realizadas com o *Hubble Space Telescope Space Telescope Imaging Spectrograph* (HST STIS) ajusta-

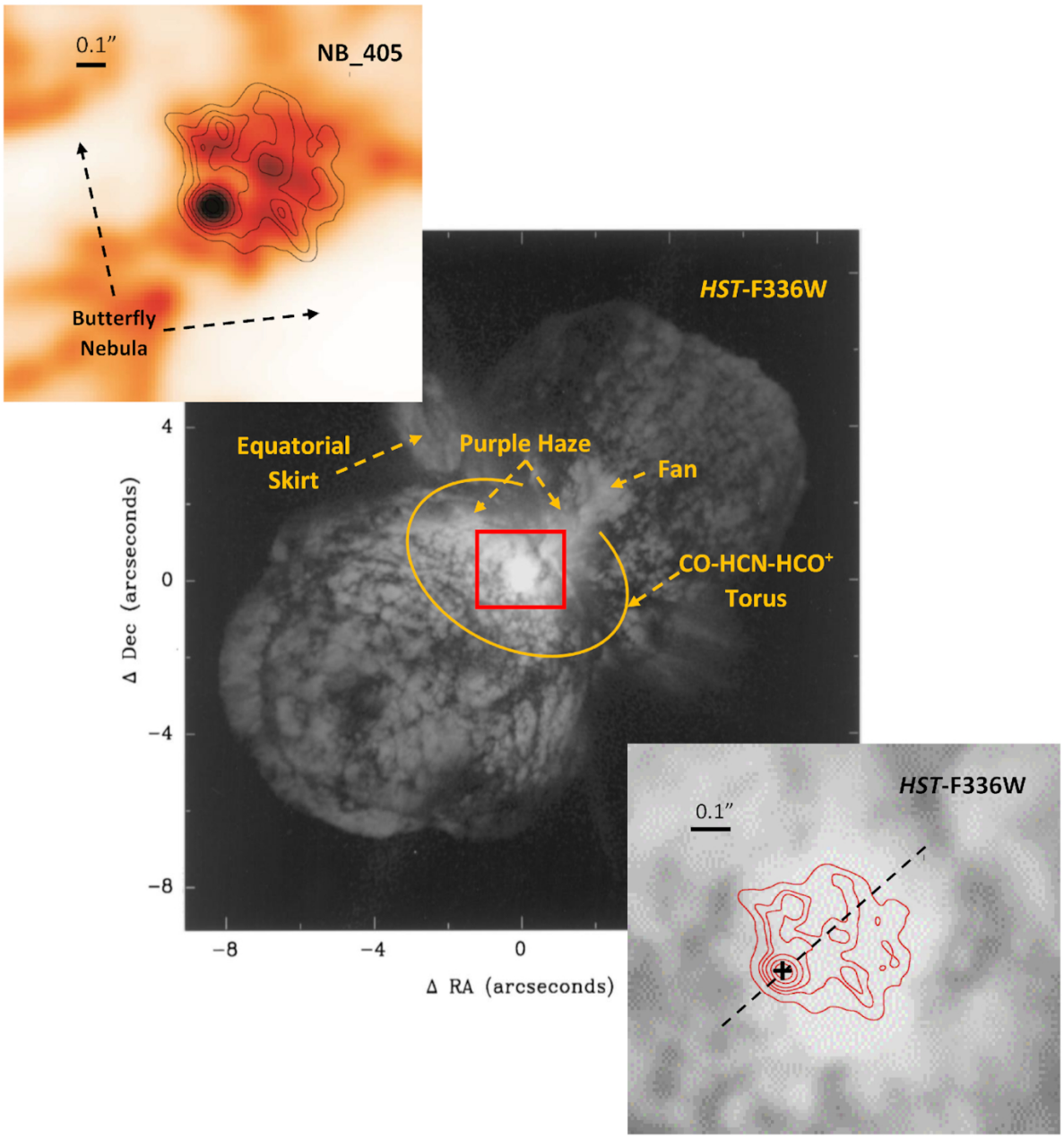


Figura 1.2: **Imagem central:** Imagem do *HST Wide Field Planetary Camera* do Homúnculo no filtro *F336W* centrada no comprimento de onda de 3342 Å (Morse et al., 1998); o retângulo vermelho delimita o tamanho e a posição da imagem no canto inferior direito; as principais características da nebulosa são identificadas. **Imagem inferior direita:** contornos contínuos de 230 GHz sobrepostos à imagem do *HST*; a cruz preta representa a posição de η Car e a linha tracejada preta mostra a direção do eixo do Homúnculo (43°). **Imagem superior esquerda:** Contornos contínuos de 230 GHz sobrepostos à imagem do filtro estreito *NB 405*, que inclui a linha Brα, obtida com o sistema *VLT Adaptive Optics NACO* (Chesneau et al., 2005). **Crédito:** Abraham et al. (2020). *Imagem e legenda adaptada extraídos de* Abraham et al. (2020).

ram modelos de transferência radiativa aos espectros dos glóbulos de Weigelt (B e D) e derivaram que suas densidades eletrônicas são de $\sim 10^6 - 10^7$ cm^{-3} e a taxa de fótons ionizantes Lyman da estrela secundária é $Q \sim 10^{49}$ ph s^{-1}, que corresponderia a tempera-

turas efetivas de ∼37000–40000 K. A massa da estrela companheira deve ser $\sim 30-40\,M_{\odot}$ dependendo do estado evolutivo (sequência principal, supergigante ou Wolf-Rayet).

η Car é a única fonte massiva de linhas de recombinação em rádio (RRLs, *Radio Recombination Lines*) além do sistema binário MWC349 localizado na constelação Cygnus (Gordon e Sorochenko, 2009). Cox et al. (1995) relataram as primeiras observações, feitas com o Telescópio Submilimétrico Sueco-ESO (SEST, *Swedish–European Sourthern Observatory Submillimetre Telescope*) das linhas de recombinação milimétricas (H40α, H30α, H29α, H50β e H37β) em η Car com velocidades de -50 km s^{-1}, coincidentes com as velocidades dos glóbulos de Weigelt. O perfil e intensidades destas linhas indicaram que elas não estão em Equilíbrio Termodinâmico Local (LTE, *Local Thermodynamic Equilibrium*) e que tem origem nas mesmas regiões dos glóbulos de Weigelt. Isto mostra a importância do estudo das *RRLs* em η Car para aprimorar a compreensão da estrutura das regiões em que se localizam os glóbulos de Weigelt, além de possibilitar o estudo do fenômeno das RRLs.

Observações realizadas com o SEST também revelaram que os mínimos das curvas de luz em rádio coincidem com os mínimos das curvas ópticas e de raios-X (Abraham et al., 2005). Durante o Ciclo 0 do rádio-observatório ALMA, foi realizada a primeira observação em altas frequências e alta resolução espacial de η Car. Além da observação do contínuo, também foram detectadas linhas de recombinação do H I e do He I (H21α, H28α, H30α, H40α, H42α e H50β) com frequências variando entre 100 a 660 GHz, e resolução variando entre 2,88″ a 0,45″. No entanto, a fonte não foi resolvida em nenhuma destas frequências (Abraham et al., 2014). A região só pode ser resolvida através de novas observações das linhas de recombinação H30α e He30α e no contínuo subjacente com resolução angular de cerca de 0,05″ realizadas com o ALMA durante o Ciclo 5 (Abraham et al., 2020), revelando pela primeira vez a estrutura ionizada em torno do sistema binário. Abraham et al. (2020) mostraram que há pelo menos 16 fontes não resolvidas, distribuídas dentro da fonte contínua, de linhas de recombinação com velocidades variando entre -30 e - 65 km s^{-1}.

Neste trabalho será apresentado um estudo de η Car nas linhas de recombinação H30α, H35α e H40α, assim como a radiação do contínuo nas frequências destas linhas, a partir de dados obtidos com o SEST entre os anos 2000 e 2003. Parte dos dados do contínuo em 3 e 1mm, coincidentes com o mínimo de 2003 já foram publicados por Abraham et al. (2005),

mas outra parte ainda precisa ser analisada, assim como as linhas de recombinação. A análise destes dados é importante porque permite não só avaliar a variação das linhas ao longo de mais de 1 período orbital; como também comparar a intensidade e a forma do perfil da linha H30α obtida com o SEST com os dados obtidos com ALMA em 2017, entre outras medidas presentes na literatura.

Capítulo 2

A física das Linhas de Recombinação em Rádio

A principal fonte de informações sobre os diversos objetos astronômicos que povoam o universo ainda é obtida através da radiação eletromagnética emitida por estes corpos. Esta radiação trás consigo toda a informação que dispomos sobre as características da maioria dos observáveis, assim como do meio interestelar pelo qual ela passou até ser interceptada pelos nossos telescópios e radiotelescópios.

As RRLs são linhas espectrais, que aparecem na faixa de comprimentos de onda do rádio, originadas após a recombinação de íons e elétrons formando átomos, o elétron capturado fica em níveis com números quânticos principais (n) elevados. As linhas são formadas pelas transições dos elétrons que descem para os níveis inferiores perdendo energia a cada transição. Portanto, as RRLs são linhas espectrais resultantes da transição dos elétrons entre níveis atômicos altamente excitados (Gordon e Sorochenko, 2009). Quando um elétron faz uma transição de $n+1 \rightarrow n$, a nomenclatura é $n\alpha$, se $n+2 \rightarrow n$ então a transição é designada como $n\beta$, e assim sucessivamente, de forma semelhante à série de Lyman (Lyα, Lyβ, etc). Como vamos investigar as linhas de recombinação do Hidrogênio em η Car, as RRLs são nomeadas com o símbolo do elemento seguida pela a nomenclatura da transição, ou seja, H30α, H35α e H40α, correspondendo às transições dos níveis $n_{31} \rightarrow n_{30}$, $n_{36} \rightarrow n_{35}$ e $n_{41} \rightarrow n_{40}$ no hidrogênio presente na região em torno de η Car.

Como os átomos presentes nestas regiões são fortemente influenciados por variações de densidade e temperatura, a emissão de RRLs nos fornece diversas informações sobre a composição e estrutura de seus ambientes; os perfis das RRLs são determinados pela combinação das velocidades e massa do gás da região emissora.

A equação a seguir nos fornece a frequência das linhas de Hidrogênio para transições

do estado n_2 para n_1,

$$\nu = 3.289842 \times 10^{15} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \left(1 + \frac{m_e}{M} \right)^{-1} \quad \text{Hz}, \tag{2.1}$$

onde 3.289842×10^{15} é a constante de Rydberg expressa em Hertz, m_e é massa do elétron e M é a massa atômica. Usa-se a frequência para identificar a linha por ser a grandeza mais apropriada para o espectro de rádio (Burke et al., 2019). As frequências das linhas H30α, H35α e H40α são respectivamente de 231,900 GHz, 147,047 GHz e 99,023 GHz. No Apêndice A apresentamos uma pequena introdução à transferência radiativa em condições *LTE*.

Capítulo 3

Descrição das Observações

3.1 O SEST

O SEST é um radiotelescópio de 15 m de diâmetro, que estava localizado no Observatório Europeu do Sul (ESO, *European Southern Observatory*) em La Silla e que esteve em operação entre 1987 e 2003. Foi o primeiro telescópio submilimétrico do Hemisfério Sul e estava equipado com receptores heteródinos que operavam na faixa de frequência de 70 a 365 GHz. Ainda contava com um bolômetro formado por uma matriz hexagonal com 37 canais, SIMBA (*SEST Imaging Bolometer Array*), que operava em um comprimento de onda de 1,2 mm. Projetado por engenheiros do Instituto de Radioastronomia Milimétrica (IRAM, *Institut de Radioastronomie Millimétrique*), nos andes chilenos a uma altitude de 2300 m, a pedido da colaboração entre o Conselho Sueco de Pesquisa em Ciências Naturais e ESO, com contribuições da Finlândia e da Austrália, o SEST era controlado pelo Observatório Espacial Onsala da Universidade de Tecnologia de Chalmers, que foi responsável pela construção e instalação dos primeiros receptores e pelos *softwares* de operação, e o ESO era responsável pela manutenção mecânica do telescópio, pelos *hardwares* e pelo edifício de controle.

A escolha do local para instalação da antena foi motivada pelas condições ambientais, pois durante o inverno o teor de vapor de água atmosférico acima de La Silla fica abaixo de 4 mm e em alguns dias abaixo de 1 mm, além de ser o primeiro grande telescópio a possibilitar observações submilimétricas abaixo de comprimentos de onde de 3 mm (Booth et al., 1987). O SEST possibilitou a investigação de uma ampla gama de objetos astronômicos tais como regiões HII, poeira interestelar, o centro galáctico, as Nuvens de Magalhães, quasares e rádio-galáxias no regime de ondas submilimétricas. Dentre suas contribuições

importantes estão as observações das linhas de recombinação de η Car e mostrar, em 1997, que a Nebulosa do Bumerangue tem uma temperatura inferior à radiação cósmica de fundo, configurando o local mais frio conhecido no universo (Sahai e Nyman, 1997). Na Figura 3.1 podemos ver uma fotografia do SEST no ano de sua inauguração.

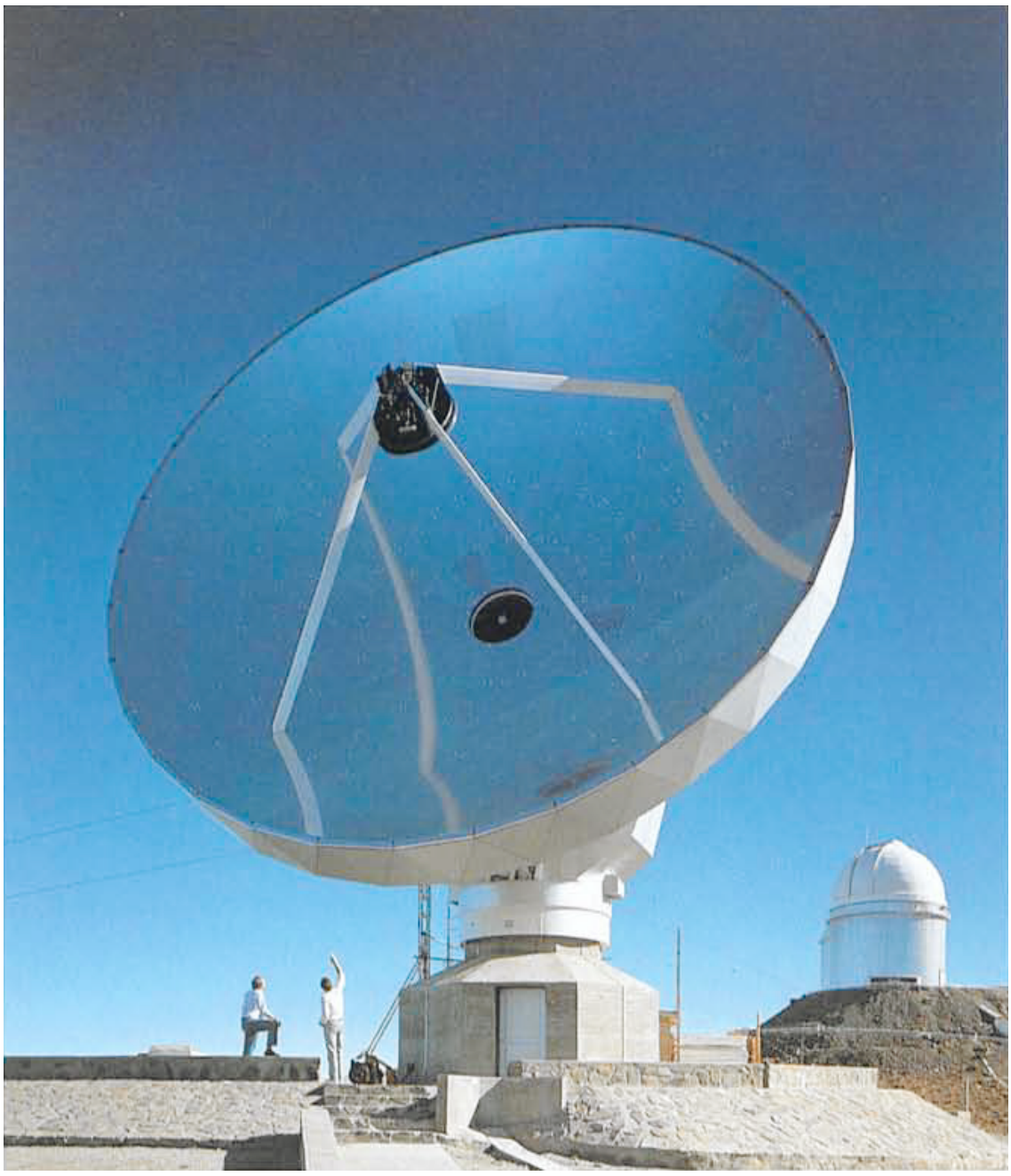


Figura 3.1: Fotografia do Telescópio Submilimétrico Sueco-ESO (15 m) publicada no ano da sua primeira luz. Imagem extraída de Booth et al. (1987).

Nas Tabelas 3.1 à 3.3 temos um resumo dos parâmetros do SEST.

Tabela 3.1 - Parâmetros de Localização e Características do SEST.

Posição Geográfica		
Longitude	**Latitude**	**Altitude**
70° 44′ 04″ (W)	-29° 15′ 34″	2300 m

O Telescópio		
Diâmetro	**Precisão da Superfície**	**Precisão de Apontamento**
15 m	70 μm (rms*)	3″ rms* em Azimute e Elevação

* Root mean square (raiz do valor quadrático médio)

Fonte: `https://www.apex-telescope.org/sest/html/telescope-instruments/telescope/index.html`

Tabela 3.2 - Parâmetros do Feixe do SEST.

	86 GHz	**115 GHz**	**147 GHz**	**230 GHz**	**346 GHz**
Largura de feixe de meia potência (FWHM)	57″	45″	34″	23″	15″
Eficiência do Feixe Principal	0,75	0,70	0,66	0,50	0,25
Eficiência de Abertura	0,62 (25 Jy/K)	0,58 (27 Jy/K)	0,53 (30 Jy/K)	0,38 (41 Jy/K)	0,16 (98 Jy/K)

Fonte: `https://www.apex-telescope.org/sest/html/telescope-instruments/telescope/index.html`

Tabela 3.3 - Parâmetros de Operação do SEST.

Eficiência da Lua	**100 GHz**	**230 GHz**
	0,90	0,90
Informações diversas	**Vento Operacional Máximo**	**Restrição solar**
	14 m/s	50°

Fonte: `https://www.apex-telescope.org/sest/html/telescope-instruments/telescope/index.html`

Em 2003 o SEST foi descomissionado e substituído pelos observatórios APEX (*Atacama Pathfinder Experiment*) e ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*), no Chajnantor. Na 4ª Conferência Anual sobre Astrofísica de Alta Energia na África Austral (HEASA, *High Energy Astrophysics in Southern Africa*) em 2017, foi discutida a viabilidade e benefícios da instalação de um telescópio de ondas milimétricas na África e incorporá-lo à rede de Interferometria de Longa Linha de Base (VLBI, *Very-Long-Baseline Interferometry*) do Telescópio de Horizonte de Eventos (EHT, *Event Horizon Telescope*). Em 2022 foi anunciado que o SEST seria reformado e realocado na África do Sul e renomeado como *Africa Millimetre Telescope*, numa colaboração entre a Universidade Windhoek da Namíbia e a Universidade Radboud Nijmegen da Holanda, além da participação do Observatório Europeu do Sul e da Escola de Pesquisa em Astronomia da Holanda (NOVA, *Ne-*

derlandse Onderzoekschool voor Astronomie), possibilitando uma nova fase de observações e descobertas.

3.2 Obtenção dos Dados

A observação das linhas de recombinação de hidrogênio H30α (231,900 GHz), H35α (147,047 GHz) e H40α (99,225 GHz) foram realizadas entre maio de 2000 e março de 2003, correspondendo a 10 dias de observações, com o radiotelescópio SEST. O radiotelescópio SEST estava equipado com receptores Supercondutor-Isolador-Supercondutor (SIS, *Superconductor-Insulator-Superconductor*) de 115, 150 e 230 GHz e um espectrômetro acústico-óptico com 1440 canais de $0,7$ MHz. A operação do radiotelescópio permitia a utilização simultânea de dois receptores SIS, alimentando cada receptor com uma polarização diferente. As observações das linhas espectrais aqui relatadas eram sempre realizadas aos pares, ou seja, geralmente coletava-se as linhas H30α e H40α num dia e no dia seguinte as linhas H35α e H40α.

Na frequência de 115 GHz, a resolução de velocidade foi de $\sim 2,1$ km s^{-1} e o tamanho do feixe do telescópio (FWHM, *Full Width Half Maximum*) de $45''$. A 147 GHz, a resolução de velocidade foi de $\sim 1,4$ km s^{-1} e o tamanho do feixe (FWHM) do telescópio de $34''$. A 230 GHz, a resolução de velocidade foi de $\sim 0,90$ km s^{-1} e o tamanho do feixe do telescópio (FWHM) de $23''$ com erros de apontamento de $3''$ rms. As eficiências de abertura e temperatura de antena estão resumidas na Tabela 3.2. Neste trabalho as intensidades das linhas são dadas em Jy.

As observações obtidas com o SEST são calibradas usando a técnica *chopper wheel*[1], calibradas com duas fontes de distintas temperaturas e corrigidas pela absorção atmosférica e depois transformadas em densidade de fluxo utilizando uma relação entre temperatura de antena e densidade de fluxo fornecida pelo observatório (vide: **Eficiência de Abertura** na Tabela 3.2). Em geral não é possível observar outras fontes de comparação, como se faz em óptica já que elas não existem. Por este motivo, no caso de ser observada variabilidade, como é o caso de η Car, devem ser utilizados outros métodos para verificar se a variabilidade é verdadeira conforme será discutido na Seção 4.3.1.

[1] Para maiores detalhes sobre a técnica veja Seção **5.3.3** do artigo do Wilson (2011)

Capítulo 4

Análises e Resultados

As observações foram realizadas em maio e novembro de 2000; janeiro e maio de 2001; janeiro, março e dezembro de 2002; janeiro e março de 2003. Considerando o período orbital de 2024 dias e a data de 01 de julho de 2014 (MJD 56850), passagem pelo periastro em 2014.59, como fase 0 do ciclo 13 (Groh e Damineli, 2004; Corcoran et al., 2017; Damineli et al., 2019), foram calculados o ciclo, a fase e o período orbital para cada uma das observações aqui reladas. Cada um dos dias de observação são compostos por várias séries de dados; e o tratamento e a redução de dados serão discutidos na Seção a seguir.

4.1 Redução dos Dados

Para obter os perfis médios de cada um dos espectros para cada um dos dias de observação foi calculada a média ponderada das medidas de cada um dos espectros de um dado dia utilizando a relação a seguir:

$$\bar{y} = \frac{\sum_i p_i y_i}{\sum_i p_i}, \tag{4.1}$$

onde y_i é a intensidade medida em cada uma das observações e p_i é o peso. E neste caso o peso é definido por $p_i = \frac{1}{(\mathrm{rms})^2}$ e o rms (root mean square) é dado por:

$$\mathrm{rms} = \left[\sum_{j=1}^{N} \frac{(y_j - y_m)^2}{N}\right]^{1/2} \tag{4.2}$$

e

$$y_m = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} y_j \tag{4.3}$$

onde y_m é o valor médio do intervalo, y_j é a medida de intensidade em cada canal do intervalo e N é o número medidas no intervalo.

Na Figura 4.1, apresenta-se como exemplo o espectro médio para cada uma das frequências observadas nos dias 29 e 30 de março de 2000.

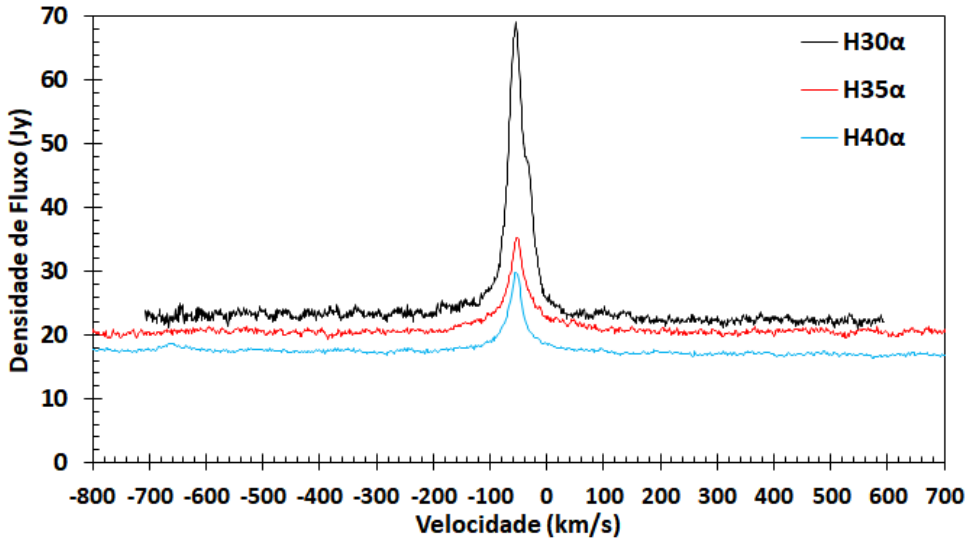


Figura 4.1: Espectros médios observados nos dias 29 e 30 de maio de 2000. Linhas espectrais H30α, H35α e H40α.

Para se obter o perfil da linha deve-se subtrair a contribuição do contínuo. Para tal, calculou-se a média dos valores de intervalos nos extremos dos espectros, por exemplo, foram realizadas quatro medições da linha H30α no dia 29 de maio de 2000, com tempos de integração variando entre 200 e 400 segundos no intervalo de velocidades variando de -707,46 a 594.6 km s^{-1} e resolução de 0,90 km s^{-1}. O valor médio foi calculado usando os valores da intensidade nos intervalos entre [-707,46, -600,70] e [300,5, 594,6] km s^{-1}. Com isso, pode-se obter os espectros médios e também determinar o nível contínuo subjacente dado pela Equação 4.3 que neste caso foi de 22,5 $\pm$ 0,5 Jy para a observação em 230 GHz. O mesmo foi realizado com as observações em 115 e 147 GHz utilizando intervalos extremos diferentes, obtendo-se como resultado os espectros médios nestas respectivas frequências e níveis do contínuo em 20,5 $\pm$ 0,6 Jy em 147 GHz e de 17,0 $\pm$ 0,2 Jy em 115 GHz para as observações realizadas nos dias 29 e 30 de maio de 2000. Para remover o contínuo subjacente dos espectros ajustou-se uma curva linear no intervalo utilizado para calcular y_m e depois subtraiu-se esta reta do espectro médio. Para o espectro em 115 GHz foi ajustada uma curva quadrática e no espectro em 147 GHz um polinômio de grau 3.

Na Tabela 4.1 pode-se visualizar os intervalos e ajustes realizados nos espectros da Figura 4.1. Os espectros médios das demais observações e a Tabela 4.1 completa podem ser visualizados no Apêndice B.

Tabela 4.1 - Intervalos e curvas ajustadas aos espectros das observações dos dias 29 e 30 de maio de 2000.

Data	Espectro	1º Intervalo	2º Intervalo	N	Ajuste da linha de base	R^{2*}
29 e 30/05/2000	H30α	[-707,46, -600,70]	[300,5, 594,6]	444	$y = -6,391 \times 10^4 x + 22,61$	0,264
	H35α	[-1083,4, -800,9]	[600,4, 970,0]	458	$y = 5,366 \times 10^7 x^2 - 6,585 \times 10^4 x + 19,91$	0,596
	H40α	[-1563,9, -800,5]	[1001,0, 1453,9]	582	$y = 1,410 \times 10^{-10} x^3 - 7,190 \times 10^{-8} x^2 - 2,392 \times 10^4 x + 17,08$	0,0592

* Coeficiente de Determinação

Na Figura 4.2 mostra-se os perfis dos espectros observados após a remoção do contínuo. Os gráficos com os demais perfis podem ser visualizados na Seção B.2 do Apêndice B.

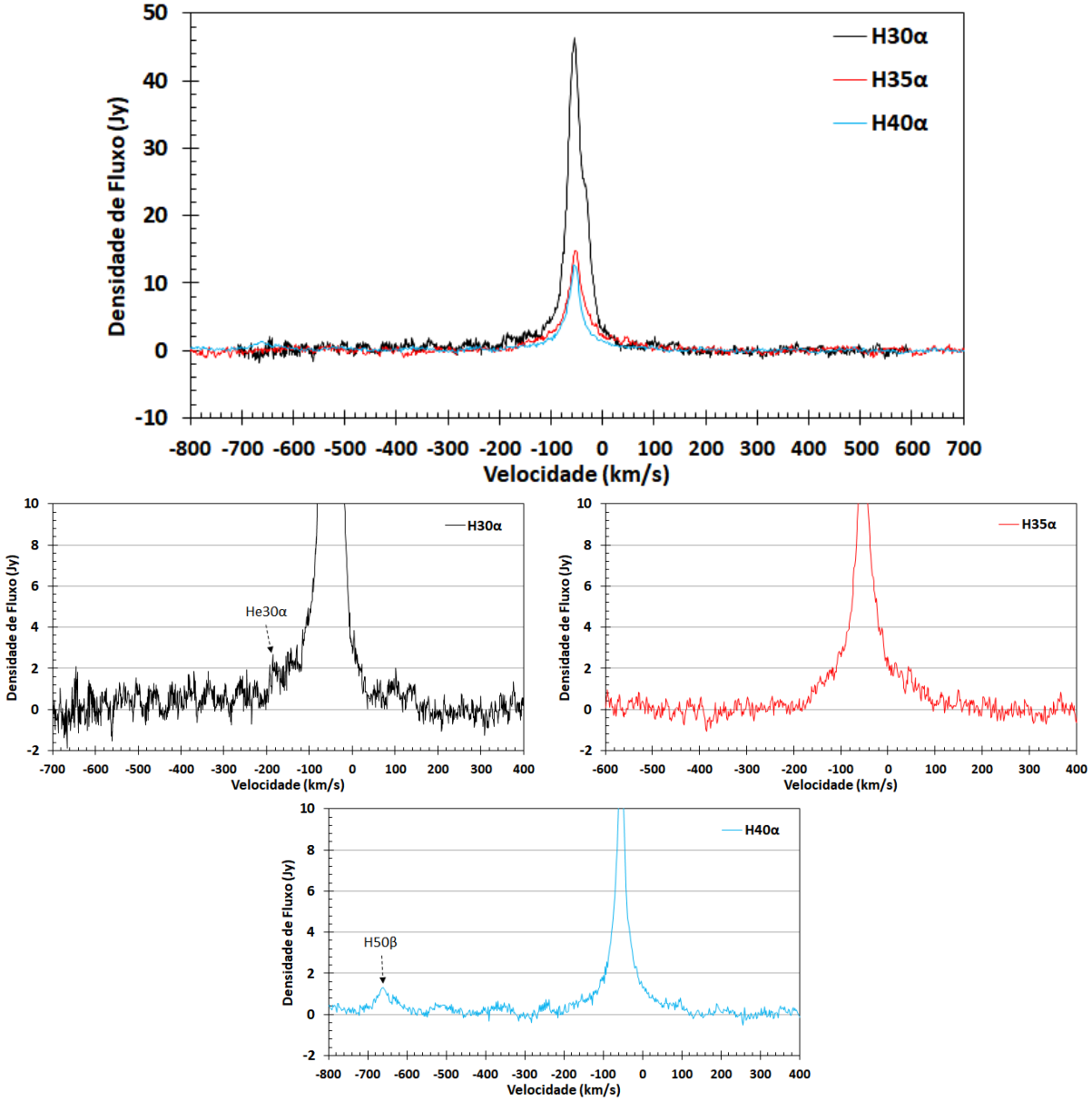


Figura 4.2: **Acima:** Espectros médios observados nos dias 29 e 30 de maio de 2000 após a remoção da linha de base. **Abaixo:** Ampliação para melhorar a visualização da base de cada um dos espectros.

Após realizar o procedimento em todo o conjunto de observações disponíveis coletou-se

os valores da densidade de fluxo máximo (**Fluxo Máx.**) para as *RRLs* H30α, H35α, H40α e H50β diretamente dos gráficos e os valores das velocidades (V_{LSR}) correspondentes, e dos níveis do contínuo subjacente. Nas Tabelas 4.2 e 4.3 podemos visualizar todas as medidas encontradas.

Tabela 4.2 - Densidade de Fluxo Máximo das *RRLs* do Hidrogênio

H30α		**H35α**		**H40α**		**H50β**		**Fase**	**Data**
Fluxo Máx. (Jy)	V_{LSR} (km s^{-1})	**Fluxo Máx. (Jy)**	V_{LSR} (km s^{-1})	**Fluxo Máx. (Jy)**	V_{LSR} (km s^{-1})	**Fluxo Máx. (Jy)**	V (km s^{-1})		
45,8 ± 0,4	-55,1 ± 0,9	14,9 ± 0,6	-51,7 ± 1,4	12,5 ± 0,4	-56 ± 2	1,5 ± 0,4	-664 ± 2	10,458 ± 0,007	29 e 30/05/00
58,6 ± 0,3	-52,6 ± 0,9	- -	- -	14,1 ± 0,2	-53 ± 2	1,33 ± 0,2	-665 ± 2	10,543 ± 0,007	19/11/00
40,2 ± 0,4	-56,0 ± 0,9	20,02 ± 0,03	-50,3 ± 1,4	11,7 ± 0,2	-54 ± 2	1,4 ± 0,2	-664 ± 2	10,573 ± 0,007	17/01/01
41,2 ± 0,4	-53,7 ± 0,9	21,6 ± 0,3	-55,7 ± 1,4	12,1 ± 0,1	-54 ± 2	1,43 ± 0,03	-666 ± 2	10,632 ± 0,007	17, 18 e 19/05/01
65,3 ± 0,5	-54,6 ± 0,9	32,0 ± 0,3	-54,7 ± 1,4	14,0 ± 0,2	-54 ± 2	1,25 ± 0,2	-664 ± 2	10,748 ± 0,007	06/01/02
60,16 ± 0,03	-55,5 ± 0,9	31,8 ± 0,6	-54,7 ± 1,4	13,4 ± 0,1	-54 ± 2	1,10 ± 0,1	-664 ± 2	10,778 ± 0,007	09/03/02
55,8 ± 0,2	-55,5 ± 0,9	31,0 ± 0,1	-54,8 ± 1,4	10,5 ± 0,2	-56 ± 2	0,79 ± 0,2	-667 ± 2	10,911 ± 0,007	02 e 03/12/02
58,8 ± 0,1	-53,7 ± 0,9	31,5 ± 0,1	-54,8 ± 1,4	12,3 ± 0,1	-51 ± 2	1,28 ± 0,1	-664 ± 2	10,913 ± 0,007	06/12/02
58,5 ± 0,4	-53,7 ± 0,9	29,6 ± 0,2	-54,8 ± 1,4	12,9 ± 0,4	-54 ± 2	1,2 ± 0,4	-665 ± 2	10,928 ± 0,007	05 e 06/01/03
66,1 ± 0,3	-54,6 ± 0,9	29,49 ± 0,04	-54,8 ± 1,4	14,2 ± 0,2	-54 ± 2	1,3 ± 0,2	-665 ± 2	10,957 ± 0,007	06 e 07/03/03

Tabela 4.3 - Densidade de Fluxo Médio do Contínuo

λ **1,3-mm**	λ **2,0-mm**	λ **2,9-mm**	**Fase**	**Data**
Fluxo Máx. (Jy)	**Fluxo Máx. (Jy)**	**Fluxo Máx. (Jy)**		
22,5 ± 0,5	20,5 ± 0,6	17,0 ± 0,2	10,458 ± 0,007	29 e 30/05/00
26,5 ± 0,5	- -	17,3 ± 0,2	10,543 ± 0,007	19/11/00
17,4 ± 0,7	16,0 ± 0,7	13,2 ± 0,2	10,573 ± 0,007	17/01/01
17,2 ± 0,3	16,7 ± 0,3	15,2 ± 0,2	10,632 ± 0,007	17, 18 e 19/05/01
24,6 ± 0,4	20,2 ± 0,4	15,5 ± 0,2	10,748 ± 0,007	06/01/02
24,2 ± 0,5	19,6 ± 0,3	14,7 ± 0,2	10,778 ± 0,007	09/03/02
19,1 ± 1,1	16,7 ± 0,4	10,4 ± 0,3	10,911 ± 0,007	02 e 03/12/02
21,1 ± 0,6	16,8 ± 0,2	12,7 ± 0,3	10,913 ± 0,007	06/12/02
19,9 ± 0,5	15,6 ± 0,2	12,8 ± 0,3	10,927 ± 0,007	05 e 06/01/03
21,6 ± 0,3	14,8 ± 0,2	13,4 ± 0,2	10,957 ± 0,007	06 e 07/03/03

4.2 Comparação com os dados do ALMA de 2017

Na Figura 4.3 temos o espectro médio para cada uma das frequências observadas. Linhas de base estáveis nos permitiram estimar o nível do contínuo em $13,1 \pm 0,2$ Jy para observação em 115 Ghz, $14,9 \pm 0,2$ Jy para 147 GHz e $20,4 \pm 0,3$ Jy para 230 GHz. Mostramos na Figura 4.4 os perfis das linhas observadas após a remoção do contínuo.

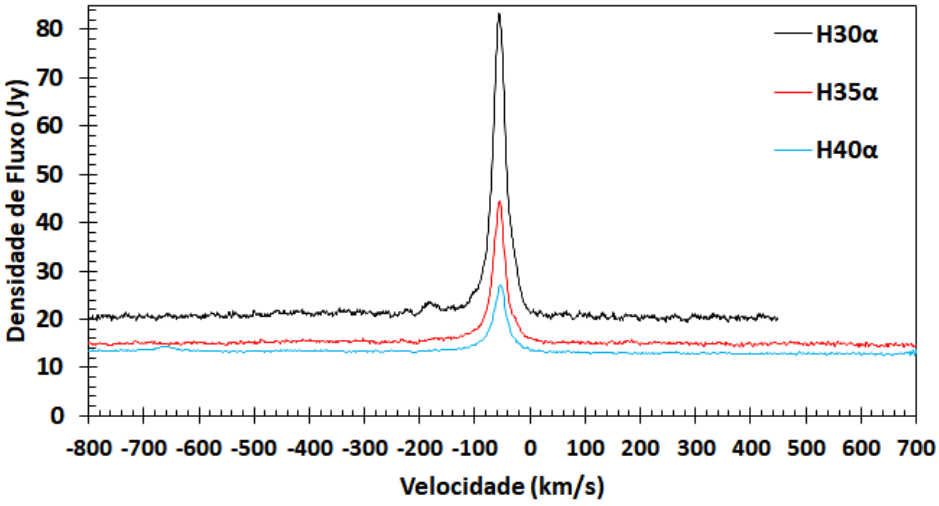


Figura 4.3: Linhas espectrais H30α, H35α e H40α e contínuo subjacente observados nos dias 06 e 07 de março de 2003.

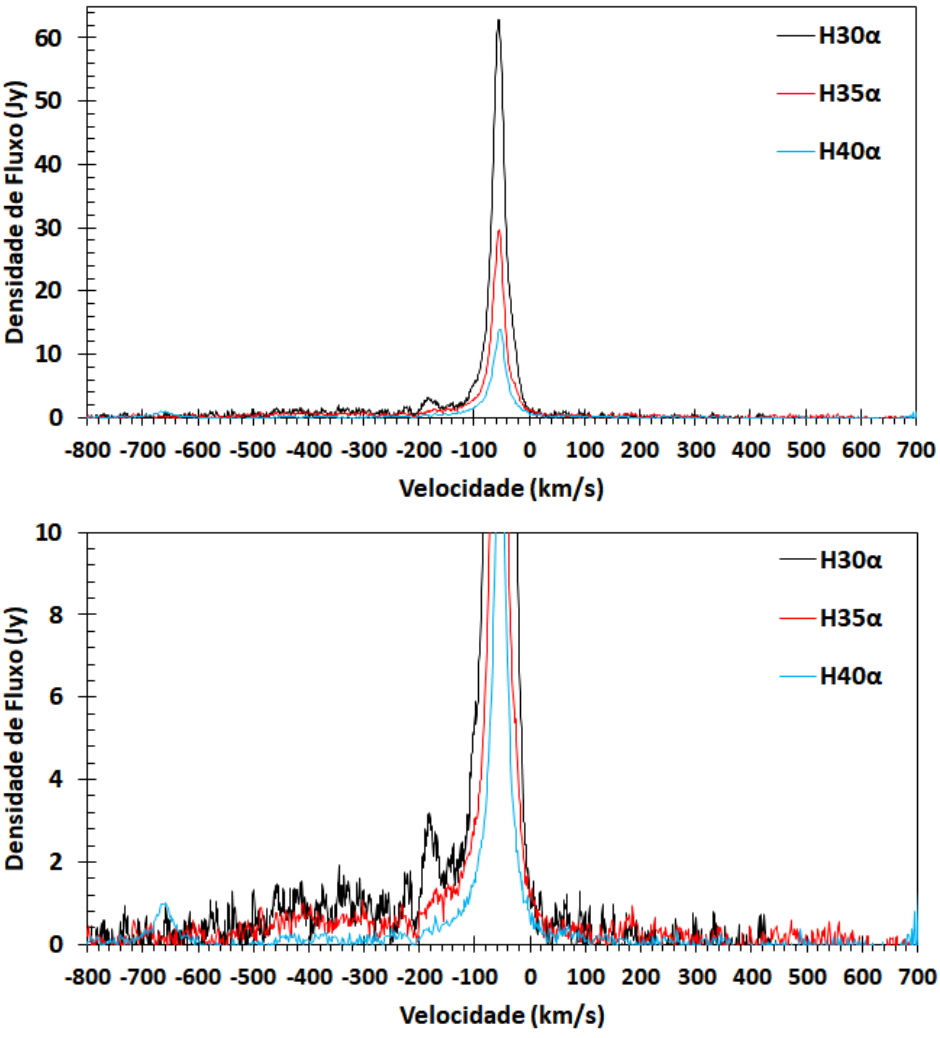


Figura 4.4: **Esquerda:** Espectros médios observados nos dias 06 e 07 de março de 2003 após a remoção da linha de base. **Direita:** Ampliação para melhorar a visualização da base de cada um dos espectros.

Observando a Figura 4.4 vemos que as linhas de recombinação estão sobre um platô assimétrico de baixa emissão e com aumento da emissão deslocado para o azul que se estende entre ~ -650 a ~ 100 km s^{-1}.

Para analisar os espectros foram ajustadas curvas aos espectros, compostas por cinco componentes gaussianas, que representariam os ventos de alta velocidade, negativos e positivos (G1 e G5), a linha He30α (G2), a barra H (G3) e a linha estreita do H30α; conforme relatado por Abraham et al. (2020) na análise da linha de recombinação emitida pela região compacta, de raio de 0,09″, centrada em η Car. Na Figura 4.5 apresentamos um esquema e um gráfico que foram extraídos do artigo de Abraham et al. (2020) onde pode-se ver um esquema das componentes supra citadas além dos ajustes realizados. As gaussianas são representadas sob a forma

$$S = S_L \exp\left[-\frac{(V - V_L)^2}{C^2}\right], \tag{4.4}$$

onde S é a densidade de fluxo total, S_L densidade de fluxo no centro da linha, V é a velocidade, V_L é a velocidade do centro da linha e a relação entre C e largura de meia potência (HPW, *Half-Power Width*) é dada por HPW$= 2 \cdot (\ln 2)^{1/2} C$.

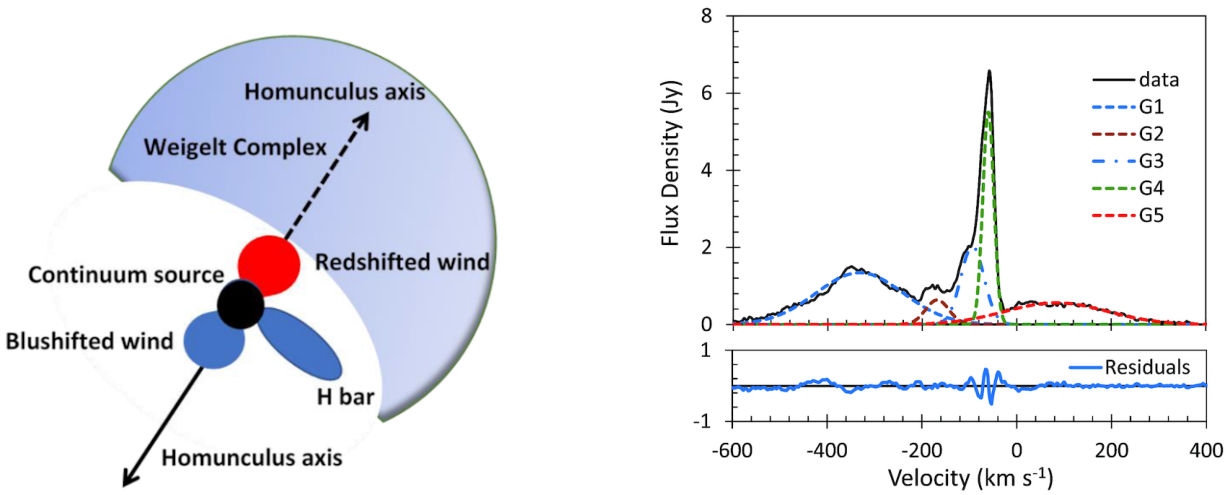


Figura 4.5: **Direita:** Esquema mostrando as diferentes componentes detectadas nas imagens contínuas e H30α de η Car. **Esquerda:** Espectro H30α da fonte central (integrado em uma região de raio de 90 mas) e os cinco componentes Gaussianos individuais que se encaixam na linha (veja o texto). **Crédito:** Abraham et al. (2020). *Imagens e legendas adaptadas extraídas de* Abraham et al. (2020).

.

Ajustamos primeiro a gaussiana a partir do pico mais intenso e determinamos o seu centro V_L. Calculamos a distância entre os picos das gaussianas ajustadas por Abraham et al. (2020) e determinamos que a distância entre os picos e a HPW nos espectros anali-

sados neste trabalho seriam as mesmas que as relatadas por Abraham et al. (2020). Após este procedimento, utilizamos a ferramenta Solver do Excel para ajustar simultaneamente as intensidades das gaussianas de modo a minimizar o χ^2 de uma curva de ajuste resultante da soma das componentes gaussianas.

Na Figura 4.6 pode-se visualizar a curva de ajuste ao espectro de H30α, as respectivas componentes gaussianas e os erros absolutos do ajuste.

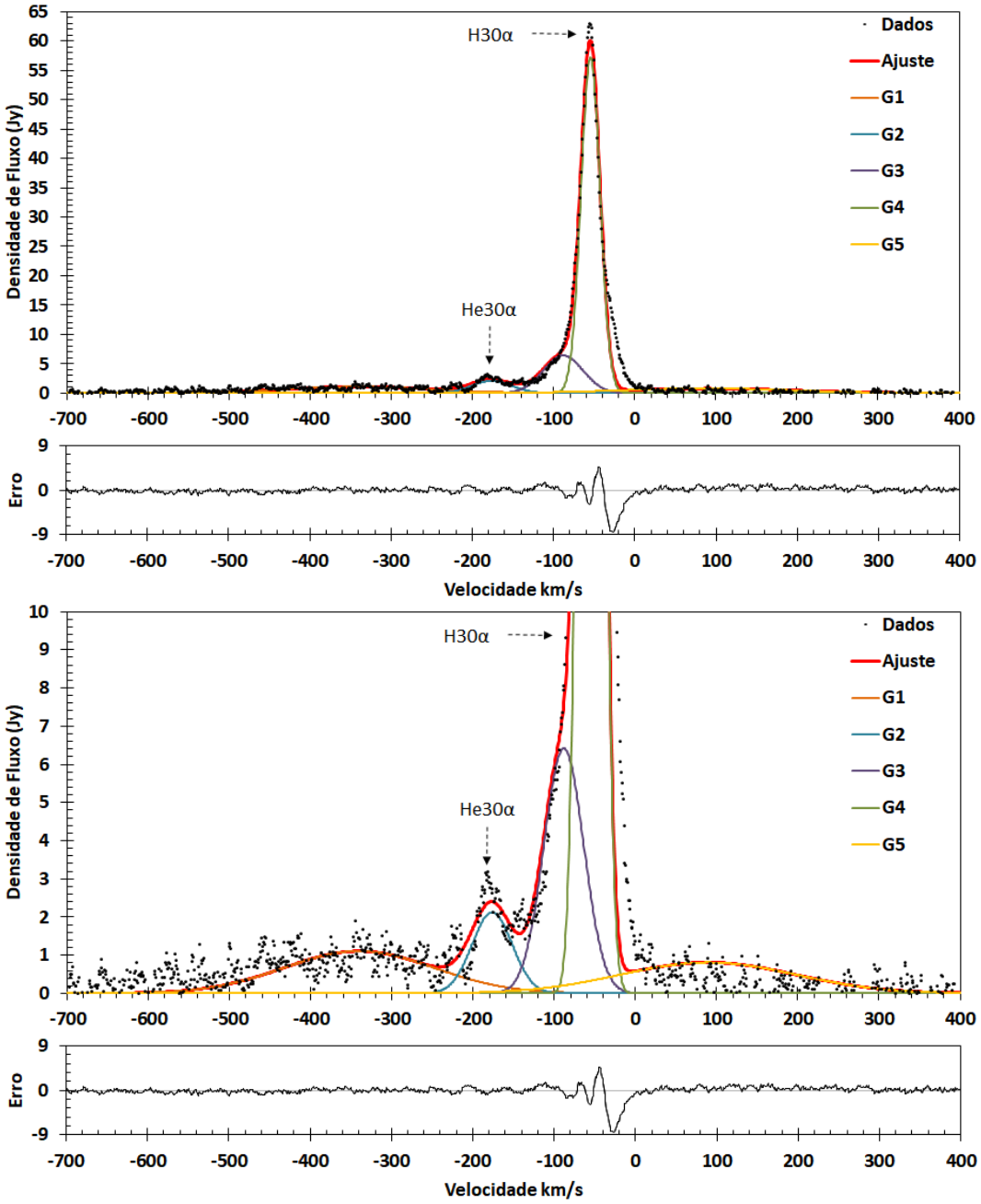


Figura 4.6: **Acima:** Espectro da H30α com fluxo total, a curva de ajuste e as cinco componentes gaussianas. **Abaixo:** Ampliação para melhorar a visualização das componentes gaussianas.

E na Tabela 4.4 apresentamos os resultados para os parâmetros do ajuste realizado.

Tabela 4.4 - Resultados do ajuste das gaussianas para a linha de emissão H30α

	V_L (Jy)	S_L (km s^{-1})	HPW (km s^{-1})	C (km s^{-1})
G1	-340,84	1,11	217,60	130,68
G2	-176,64	2,13	58,10	34,89
G3	-88,34	6,42	57,80	34,71
G4	-54,46	57,25	27,60	16,58
G5	89,36	0,81	254,00	152,54

Vê-se na Figura 4.7 a curva de ajuste ao espectro da H35α e na Tabela 4.5 apresentamos os resultados encontrados para os parâmetros.

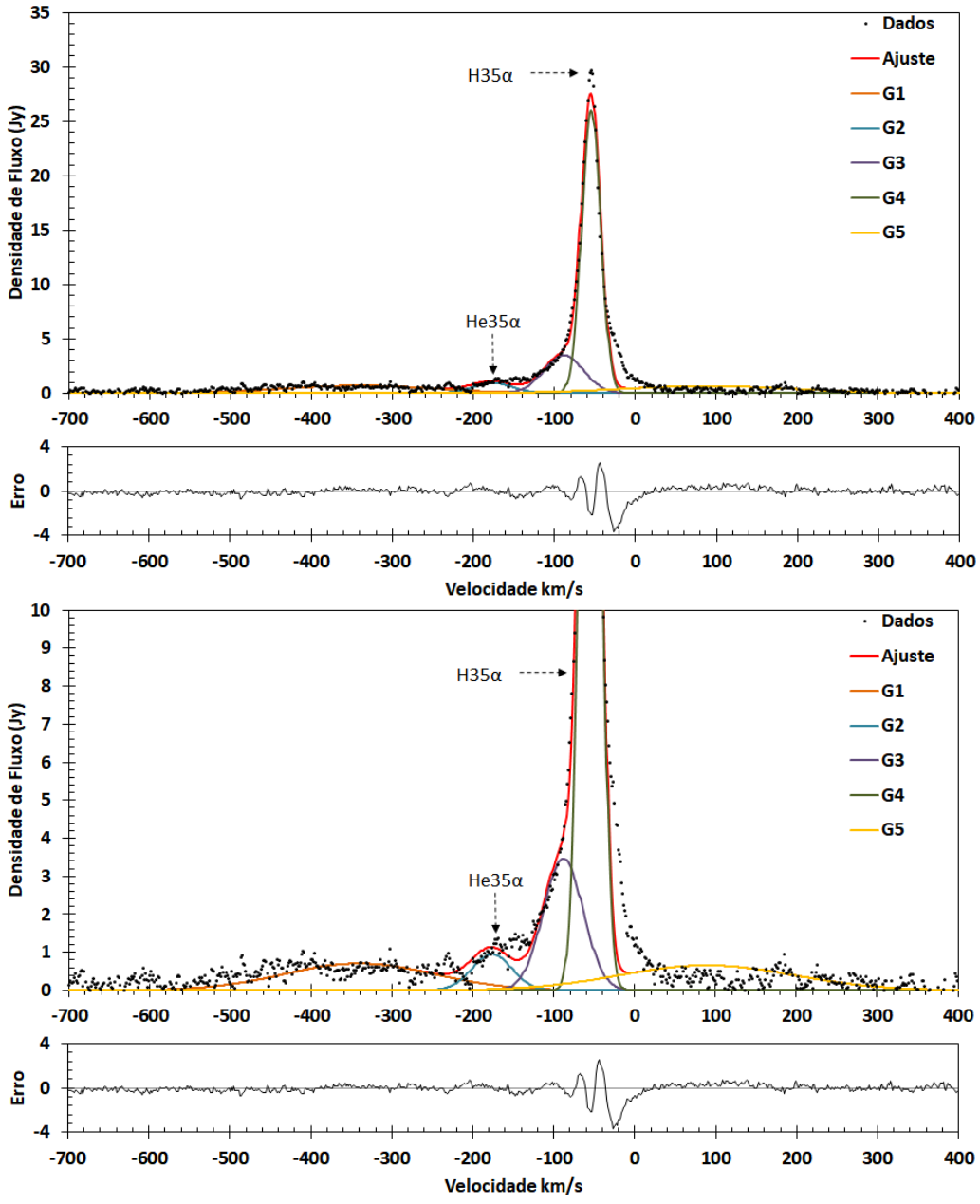


Figura 4.7: **Acima:** Espectro da H35α com fluxo total, a curva de ajuste e as cinco componentes gaussianas. **Abaixo:** Ampliação para melhorar a visualização das componentes gaussianas.

Tabela 4.5 - Resultados do ajuste das gaussianas para a linha de emissão H35α

	V_L (Jy)	S_L (km s^{-1})	HPW (km s^{-1})	C (km s^{-1})
G1	-340,84	0,71	217,60	130,68
G2	-176,64	0,95	58,10	34,89
G3	-88,34	3,47	57,80	34,71
G4	-54,64	25,84	27,60	16,58
G5	89,36	0,66	254,00	152,54

Na Figura 4.8 vê-se o ajuste das gaussianas ao espectro da H40α e na Tabela 4.6 apresentamos os resultados encontrados para os parâmetros.

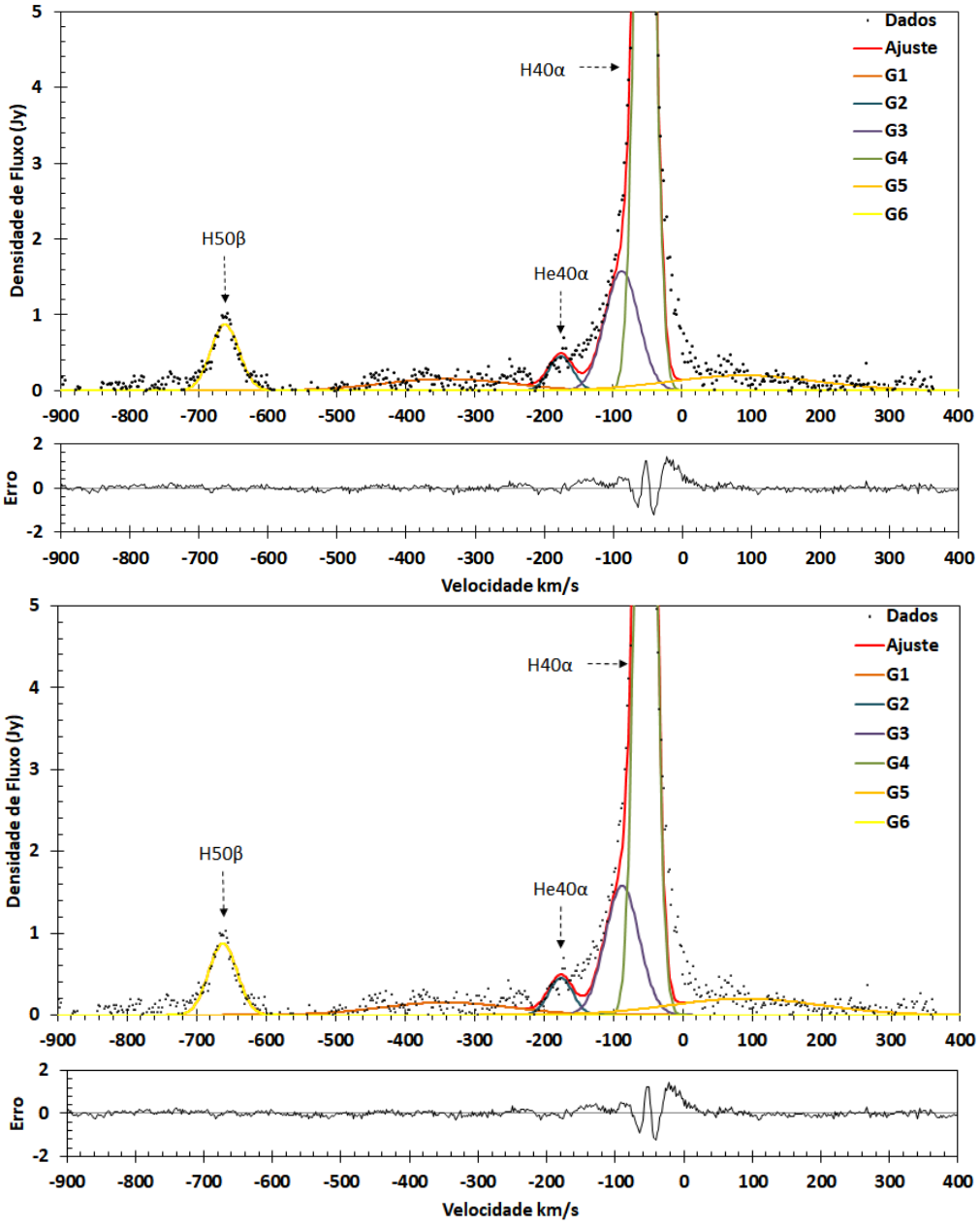


Figura 4.8: **Acima:** Espectro da H40α com fluxo total, a curva de ajuste e as seis componentes gaussianas. **Abaixo:** Ampliação para melhorar a visualização das componentes gaussianas.

Tabela 4.6 - Resultados do ajuste das gaussianas para a linha de emissão H40α

	V_L (Jy)	S_L (km s^{-1})	HPW (km s^{-1})	C (km s^{-1})
G1	-340,84	0,15	217,60	130,68
G2	-176,64	0,45	41,08	24,67
G3	-88,34	1,58	57,80	34,71
G4	-53,36	12,04	30,64	18,40
G5	89,36	0,20	254,00	152,54
G6	-661,93	0,88	48,10	28,89

Para o espectro da linha H40α adicionamos mais uma componente gaussiana (G6) que corresponde a linha separada de H40α por $\Delta\nu/\nu = -0,00204$ ou -612 km s^{-1}. Esta é a linha de recombinação H50β em 99 GHz. Neste caso, os parâmetros V e C desta linha (G6) foram tratados como parâmetros livres.

Como podemos ver pelos gráficos dos erros absolutos correspondentes às linhas de recombinação, o ajuste não descreve adequadamente o valor de emissão máxima de cada uma das linhas. Vê-se que os valores de S_L dados pelos ajustes estão subestimados. Logo, para que possamos avaliar o quanto estão subestimados, coletou-se os valores de densidade de fluxo máxima $S_{\rm L}$ para as linhas H30α, He30α, H35α, H40α e H50β diretamente dos gráficos e os valores de V_L correspondentes. Na Tabela 4.7 podemos visualizar os valores encontrados.

Tabela 4.7 - Valores de densidade de fluxo máxima das linhas H30α, He30α, H35α, H40α e H50β

Linhas	S_L (Jy)	V_L (km s^{-1})
H30α	62,5 ± 0,3	-55 ± 1
He30α	2,9 ± 0,2	-182 ± 3
H35α	29,1 ± 0,5	-55 ± 2
H40α	13,8 ± 0,2	-54 ± 2
H50β	0,98 ± 0,02	-662 ± 3

Como podemos ver na Figura 4.6, encontramos uma forte linha estreita para H30α, misturada com uma linha mais fraca centrada em ~ -90 km s^{-1}, e coletando diretamente do gráfico o valor de $62,5 \pm 0,3$ Jy para a densidade de fluxo máxima, cerca de 4% maior que relatada por Abraham et al. (2020) e 10% maior que o fornecido pelo ajuste. Já para a velocidade central encontramos o valor de -55 ± 1 km s^{-1}, correspondendo a uma diferença de $\sim 2,7$ km s^{-1} em relação ao artigo supra citado e de $\sim 0,5$ km s^{-1} comparado ao ajuste. Para a linha do He30α encontramos uma densidade de fluxo máxima de $2,9 \pm 0,2$

Jy centrada em -182 ± 3 km s^{-1}, ou seja, com densidade de fluxo da ordem de $\sim 26\%$ menor que a relatada no artigo, $\sim$50% maior que o valor fornecido pelo ajuste e a velocidade central ficou dentro de 3 sigmas de incerteza.

Observando os gráficos da Figura 4.7 vemos que o espectro da linha H35α é bastante semelhante ao da H30α, no entanto, com as intensidades diminuídas. A densidade de fluxo máxima foi de $29,1 \pm 0,5$ Jy, cerca de 13% maior que a fornecida pelo ajuste. Vemos que os ventos ainda estão presentes nas asas da linha assim como no espectro da H30α. Porém, o pico do He35α aparece sutilmente, quase como um platô, misturado com a linha centrada em ~ -90 km s^{-1}. Vê-se também que o ajuste para a emissão com velocidades acima de 0 km s^{-1} não é tão adequado, já que o ajuste está acima dos pontos do espectro.

Nos gráficos apresentados na Figura 4.8 vemos que os ventos continuam presentes, no entanto, a linha do He40α praticamente não pode ser vista e novamente o ajuste do lado positivo não se mostra adequado. A densidade de fluxo máxima para a linha foi de $13,8 \pm 0,2$ Jy, que é cerca de 1,4% menor que o valor dado em Abraham et al. (2014) e $\sim$15% maior que o fornecido pelo ajuste, centrada em -54 ± 2 km s^{-1}, para valores coletados diretamente do gráfico. Novamente, o valor dado pelo ajuste é subestimado comparado ao obtido diretamente do gráfico. Conforme relatado na Seção anterior, temos a detecção da linha H50β com densidade de fluxo de $0,98 \pm 0,02$ Jy aproximadamente 11% maior que o dado pelo ajuste, e velocidade centrada em -50 ± 3 km s^{-1} que é semelhante à velocidade encontrada para a H40α, e o HPW de 48,10 km s^{-1} dado pelo ajuste.

Comparando a velocidade V_L do centro das linhas Hα dados pela Tabela 4.7 vê-se que os valores são muito próximos, dentro de 1 sigma de incerteza quando comparados entre si e aos valores dados pelo ajuste.

4.3 Discussão

Inicialmente pretendeu-se fazer a análise das observações relatadas neste presente trabalho realizando o ajuste da linha H30α com curvas gaussianas que representariam os ventos de alta velocidade negativos e positivos (G1 e G5), a linha He30α (G2), a barra H (G3) e a linha estreita do H30α. No entanto, este ajuste não foi possível porque o perfil da linha H30α não pode ser ajustada por um perfil gaussiano, já que é afetada por afastamento do equilíbrio termodinâmico local (efeito maser). Sendo muito mais intensa que as

outras linhas, mesmo pequenas diferenças no seu perfil afetariam os resultados das outras linhas. Isso não aconteceu com os dados de ALMA, pois a região emissora da linha maser estava separada da região das outras linhas (Abraham et al., 2020). Portanto, estimamos apenas as medidas de intensidade máxima para as linhas H30α, H35α, H40α e H50β e as medidas do contínuo subjacente, e avaliou-se a sua variação ao longo dos ciclos orbitais.

Como pode-se ver na Figura 4.2 e nos demais gráficos na Seção B.2 do Apêndice B, encontra-se uma forte linha correspondente à emissão da H30α além das linhas H35α e H40α com intensidades menores. Também foi possível identificar a linha de recombinação do Hélio na maioria dos espectros da linha H30α, no entanto, não foi possível coletar com segurança o valor de sua emissão através do método aqui utilizado dado que em vários espectros a linha aparecia misturada com outras componentes. Vê-se que as linhas de recombinação estão sobre um platô assimétrico de baixa emissão e com aumento da emissão deslocado para o azul que se estende entre ~ -650 e ~ 100 km s^{-1}. Estrutura que se repete nos demais espectros e semelhante à relatada por Cox et al. (1995).

Analisando os valores encontrados para as velocidade do centro das linhas de recombinação H30α e H40α vê-se que são compatíveis com as medidas já relatadas na literatura (Cox et al., 1995; Abraham et al., 2014, 2020). Já as velocidades do centro da linha H50β aparecem com separações variando entre $\sim$ -614 e -610 km s^{-1} da linha H40α. Separação compatível dentro de até 3σ com -612 km s^{-1} ou $\Delta\nu/\nu = -0,00204$, correspondendo às velocidades reais de -56 a -51 km s^{-1} no LSR levando-se em conta este deslocamento de frequência, o que confirma que esta linha é de fato a *RRLs* H50β.

Para analisar as intensidades foram utilizadas as medidas da densidade de fluxo máximo das *RRLs* H30α, H35α, H40α e H50β e as medidas da densidade de fluxo do contínuo. Os valores são mostrados nas Tabelas 4.2 e 4.3 e nos gráficos apresentados na Figura 4.9.

Na Figura 4.9 pode-se visualizar as variações de intensidade das *RRLs* e do contínuo subjacente. Os gráficos da Figura 4.9 mostram que os fluxos do contínuo sofrem grandes oscilações. Já as medidas da densidade de fluxo máximo das linhas de recombinação apresentam um comportamento diferente, enquanto a intensidade da linha H30α sofre oscilações ao longo do período e a intensidade das linhas H35α e H40α mostram um comportamento livre de oscilações de intensidade. Também podemos observar que as intensidades das linhas tem uma tendência de crescimento ao longo do período de observação. Já a H50β parece não sofrer variações de intensidades.

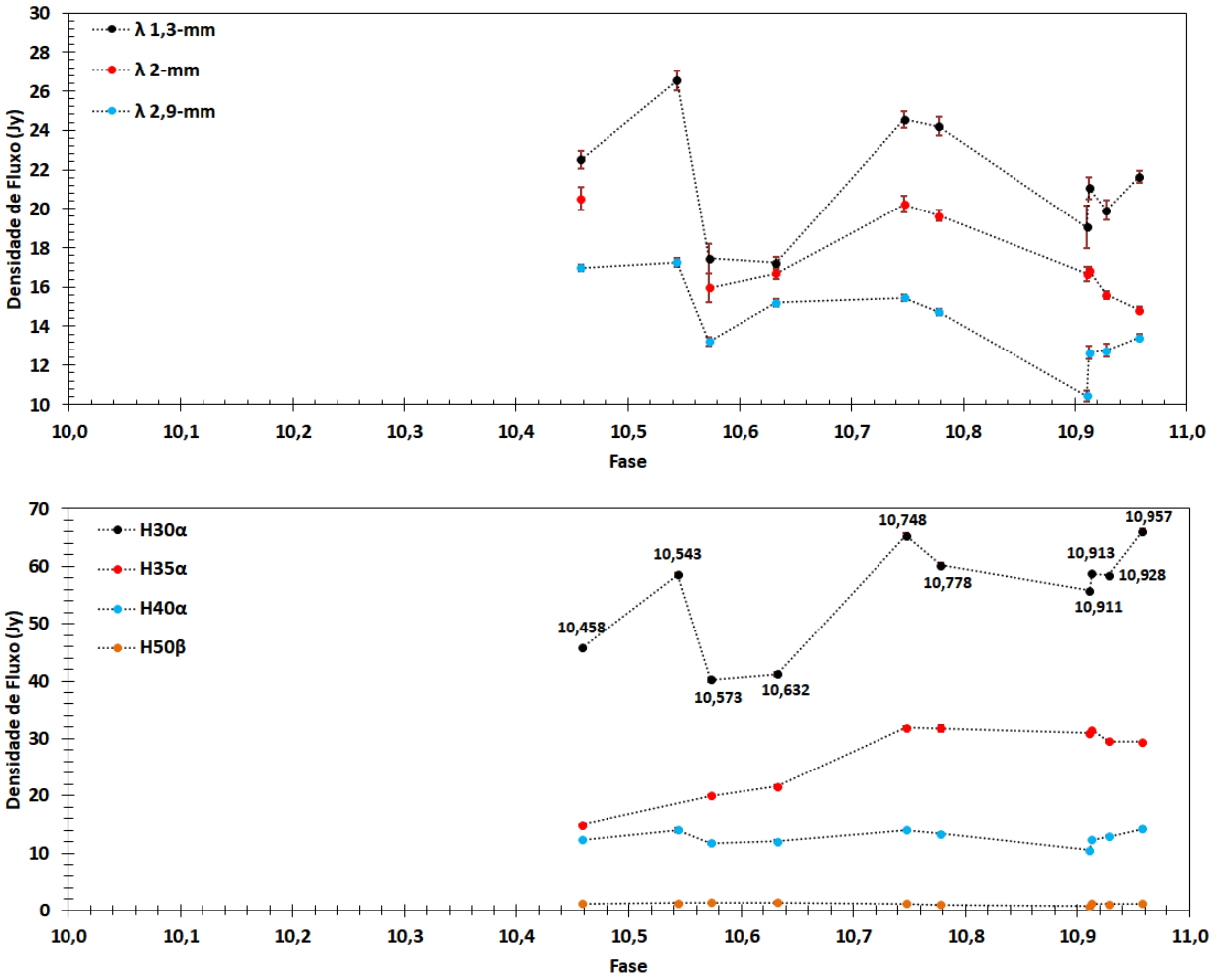


Figura 4.9: **Acima:** Valores da densidade de fluxo do contínuo observados em 230 GHZ, 147 GHz e 115 GHz. **Abaixo:** Valores da densidade de fluxo obtidos em diferentes épocas para as *RRLs* H30α, H40α e H50β. As linhas pontilhadas servem apenas para melhorar a visualização das variações da densidade de fluxo, não contém qualquer significado físico. Nos pontos onde não aparecem as barras de incerteza é porque são menores que o tamanho dos marcadores dos pontos.

4.3.1 Análise da Variabilidade das intensidade das linhas e do contínuo

Para analisar se a variabilidade das densidades de fluxo são verdadeiras ou se houveram erros na tomada das medidas, tais como erros de apontamento, calibração, entre outras fontes de erros fez-se o uso de conceitos básicos da física da transferência radiativa.

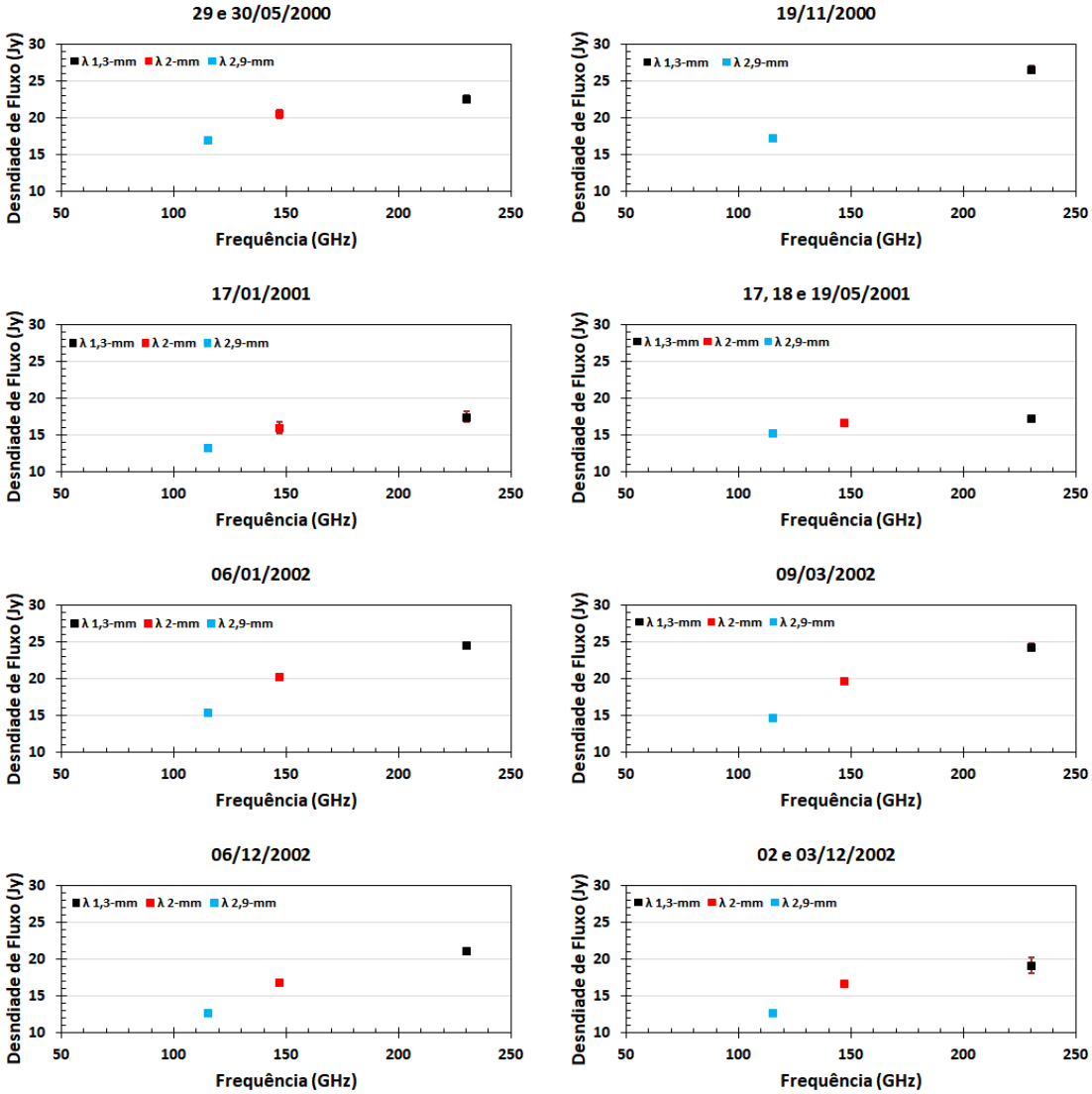
A seguir descrevemos um método relativamente simples que mostra que as variações observadas são verdadeiras. A avaliação da veracidade da variabilidade no caso das observações do contínuo em 115, 147 e 230 GHz e das linhas de recombinação H40α, H35α e H30α, pode ser feita baseada no fato de que o contínuo pode ser considerado opticamente espesso em 115 GHz e opticamente fino em 230 GHz, mas as linhas de recombinação são

sempre opticamente finas. Portanto, consideremos dois casos:

1. A densidade de elétrons diminui por um fator 2. Por consequência a intensidade das linhas H40α e H30α e o contínuo de 230 GHz diminuem por um fator 4, mas a intensidade do contínuo em 115 GHz, que é opticamente espesso e que só depende da temperatura, não irá variar.

2. O ganho do receptor de 230 GHz diminui por um fator 2. Nesse caso, a intensidade do contínuo em 230 GHz e da linha H30α diminuirão por fator 2, mas o contínuo de 115 GHz e a intensidade da linha H40α permanecerão constantes.

A partir dos argumentos acima e da avaliação dos gráficos da Figura 4.9 pode-se verificar que as variações nas observações aqui relatadas são verdadeiras. Na Figura 4.10 mostramos os espectros do contínuo (**intensidade** *versus* **frequência**) para cada uma das épocas aqui relatadas.



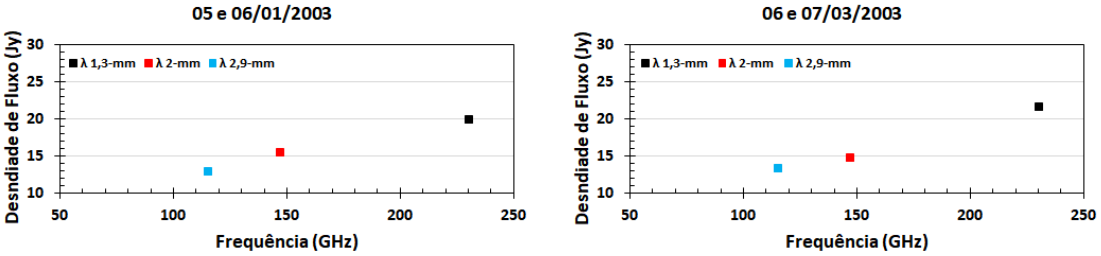


Figura 4.10: Gráficos da densidade de fluxo do contínuo pela frequência para cada uma das épocas.

Como o propósito deste trabalho é analisar a variação das *RRLs* e do contínuo subjacente ao longo de mais de 1 ciclo orbital do sistema η Car, fez o levantamento de medidas da densidade de fluxo, tanto das *RRLs* quanto do contínuo, encontrados nos principais artigos de referência deste trabalho. Também foi calculada a fase orbital e o ciclo correspondente a cada uma destas medidas relatadas na literatura. As Tabelas 4.8 e 4.9 compilam este levantamento.

Tabela 4.8 - Densidade de Fluxo Máximo das *RRLs* do Hidrogênio Extraídos da Literatura

H30α		**H40α**		**H50β**		**Fase**	**Data**
Fluxo Máx. (Jy)	V_{LSR} **(km s^{-1})**	**Fluxo Máx. (Jy)**	V_{LSR} **(km s^{-1})**	**Fluxo Máx. (Jy)**	V_{LSR} **(km s^{-1})**		
- -	- -	6	-55,9 ± 0,6	1	-54,0 ± 1,3	8,917 ± 0,007	nov/91*
43,5	-50,2 ± 0,3	- -	- -	- -	- -	9,368 ± 0,007	mai/94*
75 ± 0,5	- -	14,0 ± 0,5	- -	2,0 ± 0,5	- -	12,702 ± 0,007	nov/12**
60,4 ± 0,1	-57,8 -	- -	- -	- -	- -	13,612 ± 0,007	nov/17***

* Valores da densidade de fluxo extraído de Cox et al. (1995)

** Valores da densidade de fluxo extraído de Abraham et al. (2014)

*** Valores da densidade de fluxo extraído de Abraham et al. (2020)

Tabela 4.9 - Densidade de Fluxo Médio do Contínuo Extraídos da Literatura

λ 1,3-mm	**λ 2,9-mm**		
Fluxo Máx. (Jy)	**Fluxo Máx. (Jy)**	**Fase**	**Data**
24,1 ± 2,6	- -	8,872 ± 0,007	nov/91*
- -	9 ± 1	8,917 ± 0,007	nov/91*
15,8 ± 1,9	4,9 ± 0,9	9,068 ± 0,007	set/92**
25,8 ± 0,6	- -	9,233 ± 0,007	ago/93*
- -	12,5 ± 0,7	9,293 ± 0,007	dez/93*
- -	16,5 ± 1,5	9,368 ± 0,007	mai/94*
28,3 ± 0,5	- -	9,398 ± 0,007	jul/94*
41,2 ± 0,1	- -	12,702 ± 0,007	nov/12**
28,3 ± 0,1	- -	13,612 ± 0,007	nov/17***

* Valores da densidade de Fluxo extraído de Cox et al. (1995)

** Valores da densidade de fluxo extraído de Abraham et al. (2014)

*** Valores da densidade de fluxo extraído de Abraham et al. (2020)

No Figura 4.11 apresentamos os gráficos que compilam todos os valores da densidade de fluxo apresentados nas Tabelas 4.2, 4.3, 4.8 e 4.9. Com estes dados pode-se construir os dois gráficos em que pode-se visualizar as variações de intensidade das *RRLs* e do contínuo subjacente. Como se pode ver os fluxos do contínuo sofrem variações periódicas ao longo de cada ciclo. Também se vê que o fluxo do contínuo está com uma tendência de alta se considerarmos uma linha de tendência que passe pela observação mais antiga e pela mais recente, assim como a densidade de fluxo da linha H30α, H35α e H40α parecem também estar crescendo desde a primeira observação. Já a H50β apresenta um comportamento constante.

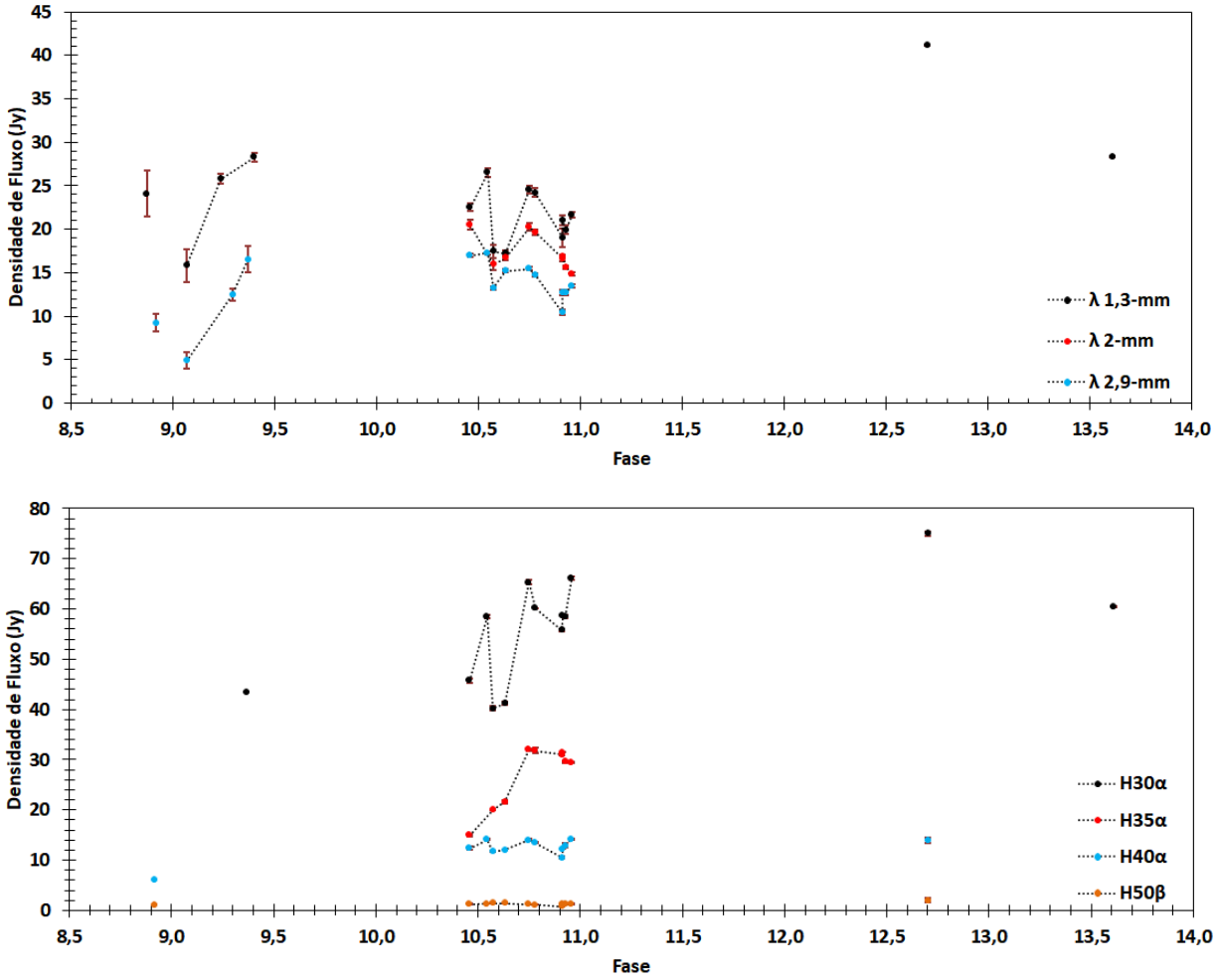


Figura 4.11: **Acima:** Valores da densidade de fluxo do contínuo observados em 230 GHZ, 147 GHz e 115 GHz em diferentes épocas. **Abaixo:** Valores da densidade de fluxo obtidos em diferentes épocas para as *RRLs* H30α, H40α e H50β. As linhas pontilhadas servem apenas para melhorar a visualização das variações da densidade de fluxo, não contém qualquer significado físico. Nos pontos onde não aparecem as barras de incerteza é porque são menores que o tamanho dos marcadores dos pontos.

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho foram analisadas as observações realizadas entre os anos 2000 e 2003, que corresponde a segunda metade do ciclo orbital 10 obtidas com radiotelescópio SEST do ESO, das linhas de recombinação em rádio do Hidrogênio H30α, H35α e H40α e a detecção da linha de recombinação H50β, além dos contínuos subjacentes.

As densidades de fluxo do contínuo compiladas na Tabela 4.3 mostram que as intensidades, nas três frequências, sofrem grandes oscilações ao longo do período relatado. Já as intensidades das RRLs H30α, H35α e H40α possuem comportamentos diferentes, ou seja, as intensidades da linha H30α apresentam fortes oscilações ao longo do período, ao contrário das intensidades da linha H35α que apresenta um aumento da emissão ao longo do ciclo. Já a intensidade da H40α acompanha as oscilações da H30α e o contínuo subjacente sofre leves variações de intensidade. Observou-se que as intensidades destas linhas possuem uma tendência de crescimento ao longo do ciclo. Fato que também foi constatado ao analisar o gráfico das *RRLs* da Figura 4.11 e que o aumento do fluxo tem aumentado ao longo dos ciclos orbitais. Já a intensidade da linha H50β apresenta um comportamento constante.

Os espectros são semelhantes aos relatados por Cox et al. (1995); Abraham et al. (2014, 2020) com a presença das fortes linhas estreitas de H30α, H35α, H40α centradas em ~ -55 km s^{-1} e detecção das emissões estendidas e assimétricas, em velocidades positivas e negativas.

A linha H50β é detectada com deslocamento de $\sim$-612 km s^{-1} ou $\Delta\nu/\nu = -0,00204$, com velocidades V_{LSR} variando entre -56 e -51 km s^{-1}, no espectro de H40α (99,225 GHz).

Perspectiva Futura

Análise dos dados para interpretar a variação do contínuo e das linhas de recombinação aplicando uma modelagem na qual varia a densidade de gás ionizado das componentes; com isso, a intensidade das distintas linhas variaria de forma diferente por não estar em LTE e, eventualmente, seria possível modelar a variação desta densidade e, portanto, do número de fótons ionizantes ao longo do período orbital do sistema binário.

Referências Bibliográficas

Abraham Z., Beaklini P. P. B., Cox P., Falceta-Gonçalves D., Nyman L.-Å., η Carinae: high angular resolution continuum, H30α and He30α ALMA images, MNRAS, 2020, vol. 499, p. 2493

Abraham Z., Damineli A., Variability of η Carinae at 7 mm. In Eta Carinae at The Millennium , vol. 179 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1999, p. 263

Abraham Z., Dominici T. P., Damineli A., Leister N., Levenhagen R., eta Carinae, IAU Circ., 2003, vol. 8162, p. 4

Abraham Z., Falceta-Gonçalves D., Beaklini P. P. B., η Carinae Baby Homunculus Uncovered by ALMA, ApJ, 2014, vol. 791, p. 95

Abraham Z., Falceta-Gonçalves D., Dominici T. P., Nyman L. Å., Durouchoux P., McAuliffe F., Caproni A., Jatenco-Pereira V., Millimeter-wave emission during the 2003 low excitation phase of η Carinae, A&A, 2005, vol. 437, p. 977

Allen D. A., Hillier D. J., The shape of the Homunculus Nebula around Eta Carinae., PASA, 1993, vol. 10, p. 338

Booth R. S., de Jonge M. J., Shaver P. A., The Swedish-ESO Submillimetre Telescope., The Messenger, 1987, vol. 48, p. 2

Bordiu C., Rizzo J. R., The peculiar chemistry of the inner ejecta of Eta Carina, MNRAS, 2019, vol. 490, p. 1570

Brocklehurst M., Leeman S., The Pressure Broadening of Radio Recombination Lines, Astrophys. Lett., 1971, vol. 9, p. 35

Brocklehurst M., Seaton M. J., On the interpretation of radio recombination line observations, MNRAS, 1972, vol. 157, p. 179

Burke B., Graham-Smith F., Wilkinson P., An Introduction to Radio Astronomy. Cambridge University Press, 2019

Chesneau O., Min M., Herbst T., Waters L. B. F. M., Hillier D. J., Leinert C., de Koter A., Pascucci I., Jaffe W., Köhler R., Alvarez C., van Boekel R., Brandner W., Graser U., Lagrange A. M., Lenzen R., Morel S., Schöller M., The sub-arcsecond dusty environment of Eta Carinae, A&A, 2005, vol. 435, p. 1043

Corcoran M. F., Liburd J., Morris D., Russell C. M. P., Hamaguchi K., Gull T. R., Madura T. I., Teodoro M., Moffat A. F. J., Richardson N. D., Hillier D. J., Damineli A., Groh J. H., The 2014 X-Ray Minimum of η Carinae as Seen by Swift, ApJ, 2017, vol. 838, p. 45

Corcoran M. F., Swank J. H., Petre R., Ishibashi K., Davidson K., Townsley L., Smith R., White S., Viotti R., Damineli A., The Chandra HETGS X-Ray Grating Spectrum of η Carinae, ApJ, 2001, vol. 562, p. 1031

Cox P., Martin-Pintado J., Bachiller R., Bronfman L., Cernicharo J., Nyman L. A., Roelfsema P. R., Millimeter recombination lines toward η Carinae., A&A, 1995, vol. 295, p. L39

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

Damineli A., The 5.52 Year Cycle of Eta Carinae, ApJ, 1996, vol. 460, p. L49

Damineli A., Fernández-Lajús E., Almeida L. A., Corcoran M. F., Damineli D. S. C., Gull T. R., Hamaguchi K., Hillier D. J., Jablonski F. J., Madura T. I., Moffat A. F. J., Navarete F., Richardson N. D., Ruiz G. F., Salerno N. E., Scalia M. C., Weigelt G., Distinguishing circumstellar from stellar photometric variability in Eta Carinae, MNRAS, 2019, vol. 484, p. 1325

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

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

Duncan R. A., White S. M., Radio evidence of recent mass ejection from η Carinae, MNRAS, 2003, vol. 338, p. 425

Gaviola E., Eta Carinae. I. The Nebulosity., ApJ, 1950, vol. 111, p. 408

Gordon M., Sorochenko R., Radio Recombination Lines: Their Physics and Astronomical Applications. Astrophysics and Space Science Library, Springer New York, 2009

Groh J. H., Damineli A., η Car recovering from the 2003.5 spectroscopic event, Information Bulletin on Variable Stars, 2004, vol. 5492, p. 1

Groh J. H., Hillier D. J., Madura T. I., Weigelt G., On the influence of the companion star in Eta Carinae: 2D radiative transfer modelling of the ultraviolet and optical spectra, MNRAS, 2012, vol. 423, p. 1623

Gull T. R., Madura T. I., Teodoro M., Clementel N., Corcoran M., Damineli A., Groh J. H., Hamaguchi K., Hillier D. J., Moffat A. F. J., Richardson N. D., Weigelt G., Lindler D., Feggans K., The fossil wind structures of Eta Carinae: changes across one 5.54-yr cycle, MNRAS, 2016, vol. 462, p. 3196

Herschel J. F. W. S., On the increase of magnitude in η Argus, MNRAS, 1838, vol. 4, p. 121

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

Humphreys R. M., Davidson K., Smith N., η Carinae's Second Eruption and the Light Curves of the η Carinae Variables, PASP, 1999, vol. 111, p. 1124

Iping R. C., Sonneborn G., Gull T. R., Massa D. L., Hillier D. J., Detection of a Hot Binary Companion of η Carinae, ApJ, 2005, vol. 633, p. L37

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., Roesler F., Weistrop D., Discovery of a Little Homunculus within the Homunculus Nebula of η Carinae, AJ, 2003, vol. 125, p. 3222

Meaburn J., An Up-dated Proper-Motion/Spectropolarimetric Distance to η Carinae. In Eta Carinae at The Millennium , vol. 179 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1999, p. 89

Mehner A., Davidson K., Ferland G. J., Humphreys R. M., High-excitation Emission Lines near Eta Carinae, and Its Likely Companion Star, ApJ, 2010, vol. 710, p. 729

Menzel D. H., Oscillator Strengths for High-level Transitions in Hydrogen, Nature, 1968, vol. 218, p. 756

Morris P. W., Measuring η Carinae's High Mass Ejecta in the Infrared and Sub-millimeter. In Wolf-Rayet Stars , 2015, p. 155

Morris P. W., Waters L. B. F. M., Barlow M. J., Lim T., de Koter A., Voors R. H. M., Cox P., de Graauw T., Henning T., Hony S., Lamers H. J. G. L. M., Mutschke H., Trams N. R., Discovery of a massive equatorial torus in the η Carinae stellar system, Nature, 1999, vol. 402, p. 502

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

Sahai R., Nyman L.-Å., The Boomerang Nebula: The Coldest Region of the Universe?, ApJ, 1997, vol. 487, p. L155

Smith N., The systemic velocity of Eta Carinae*, MNRAS, 2004, vol. 351, p. L15

Smith N., A model for the 19th century eruption of Eta Carinae: CSM interaction like a scaled-down Type IIn Supernova, MNRAS, 2013, vol. 429, p. 2366

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

Smith N., Gehrz R. D., Krautter J., The Infrared Morphology of eta Carinae, AJ, 1998, vol. 116, p. 1332

Smith N., Ginsburg A., Bally J., A disrupted molecular torus around Eta Carinae as seen in ^{12}CO with ALMA, MNRAS, 2018, vol. 474, p. 4988

Smith N., Morse J. A., Collins N. R., Gull T. R., The Purple Haze of η Carinae: Binary-induced Variability?, ApJ, 2004, vol. 610, p. L105

Storey P. J., Hummer D. G., Recombination line intensities for hydrogenic ions-IV. Total recombination coefficients and machine-readable tables for Z=1 to 8, MNRAS, 1995, vol. 272, p. 41

Verner E., Bruhweiler F., Gull T., The Binarity of η Carinae Revealed from Photoionization Modeling of the Spectral Variability of the Weigelt Blobs B and D, ApJ, 2005, vol. 624, p. 973

Weigelt G., Albrecht R., Barbieri C., Blades J. C., Boksenberg A., Crane P., Davidson K., Deharveng J. M., Disney M. J., Jakobsen P., Kamperman T. M., King I. R., Macchetto F., Mackay C. D., Paresce F., Baxter D., Greenfield P., Jedrzejewski R., Nota A., Sparks W. B., HST FOC Observations of Eta Carinae. In Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series , vol. 2 of Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, 1995, p. 11

Weigelt G., Ebersberger J., Eta Carinae resolved by speckle interferometry., A&A, 1986, vol. 163, p. L5

Westphal J. A., Neugebauer G., Infrared Observations of Eta Carinae to 20 Microns, ApJ, 1969, vol. 156, p. L45

Wilson T. L., Techniques of Radio Astronomy, arXiv e-prints, 2011, p. arXiv:1111.1183

Apêndice

Apêndice A

Transferência Radiativa

A transferência radiativa é a ferramenta que descreve como os astrônomos e físicos analisam as ondas eletromagnéticas que são emitidas pelos corpos celestes. Quando a radiação emitida por uma dada fonte passa por uma nuvem de gás que se localiza entre a fonte e o observador, a nuvem pode absorver ou espalhar a radiação incidente, havendo uma diminuição na intensidade da radiação ou, dependendo do seu estado termodinâmico, emitir energia e com isso aumentar a intensidade da radiação observada.

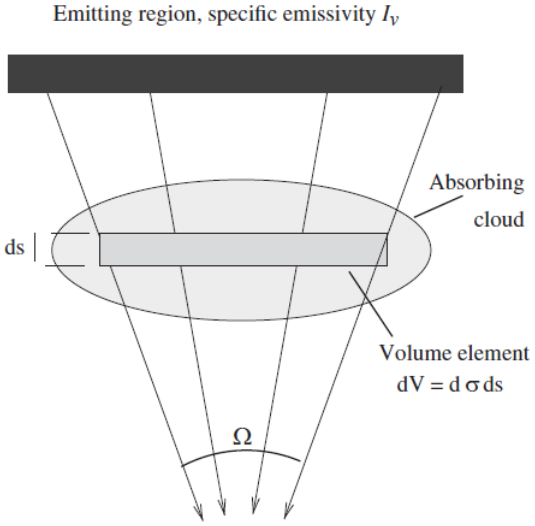


Figura A.1: Uma região emissora vista através de uma nuvem intermediária. O material na nuvem pode absorver a energia recebida e emitir e absorver sua própria energia. A absorção líquida leva a uma diminuição na intensidade específica ao longo do caminho. A emissão líquida leva a um aumento. O elemento de volume tem área de seção transversal dσ perpendicular à página. Reproduzido do livro de Burke et al. (2019).

Para que possamos entender os mecanismos de transferência radiativa, vamos desconsiderar a física microscópica das interações e nos ater apenas a uma descrição dos efeitos em termos da absorção macroscópica κ_ν e coeficientes de emissão j_ν.

Temos que a emissividade especifica j_ν é definida por

$$j_\nu = \frac{\mathrm{d}E}{\Omega \mathrm{d}\nu \mathrm{d}t \mathrm{d}V} \qquad [\text{ W m}^{-3}\text{ Hz}^{-1}\text{ sterad}^{-1}], \tag{A.1}$$

onde $\mathrm{d}E$ é a energia em watts (W), Ω é o ângulo sólido do feixe de recepção, ν é a frequência t é o tempo e V é o volume. Portanto, a potência adicionada à intensidade específica I_ν é dada por $j_\nu \mathrm{d}\nu \mathrm{d}\sigma \mathrm{d}s\Omega$.

Já o coeficiente de absorção linear κ_ν é definido por

$$\kappa_\nu = -\frac{\mathrm{d}I_\nu}{I_\nu \mathrm{d}s} \qquad [\text{ m}^{-1}], \tag{A.2}$$

onde I_ν é a intensidade específica e s a distância percorrida pela radiação na linha de visada. Portanto, a potência perdida pela intensidade específica I_ν é dada por $\kappa_\nu I_\nu \mathrm{d}\nu \mathrm{d}\sigma \mathrm{d}s\Omega$.

O aumento ou diminuição na intensidade específica será determinada em termos destes coeficientes, e a equação de potência assume a seguinte forma:

$$\mathrm{d}I_\nu \mathrm{d}\nu \mathrm{d}\sigma\Omega = j_\nu \mathrm{d}\nu \mathrm{d}\sigma \mathrm{d}s\Omega - \kappa_\nu I_\nu \mathrm{d}\nu \mathrm{d}\sigma \mathrm{d}s\Omega. \tag{A.3}$$

Simplificando a equação (A.3), chegamos na equação (A.4) de transferência radiativa que descreverá as perdas e ganhos que a radiação poderá sobre ao longo da linha de visada

$$\frac{\mathrm{d}I_\nu}{\mathrm{d}s} = j_\nu - \kappa_\nu I_\nu. \tag{A.4}$$

Dividindo (A.4) por κ_ν, obtemos

$$\frac{dI_\nu}{\kappa_\nu \mathrm{d}s} = \frac{j_\nu}{\kappa_\nu} - I_\nu. \tag{A.5}$$

Integrando a equação (A.4) temos duas soluções imediatas para o caso de um feixe de radiação de intensidade especifica I_ν^0 antes de passar pela nuvem de gás

$$I_\nu(s) = I_\nu^0 + \int_0^s j_\nu(s')\mathrm{d}s' \qquad \text{somente emissão,} \tag{A.6}$$

$$I_\nu(s) = I_\nu^0 \exp\left(-\int_0^s \kappa_\nu(s')\mathrm{d}s'\right) \qquad \text{somente absorção,} \tag{A.7}$$

onde I_ν^0 é a intensidade especifica na origem, e a integral dentro do termo exponencial é chamado de profundidade ótica τ_ν e assume a seguinte forma em termos de s (profundidade absorvedora):

$$\tau_\nu(s) = \int_0^s \kappa_\nu(s')\mathrm{d}s'. \tag{A.8}$$

Derivando a equação (A.8), vemos que $\mathrm{d}\tau_\nu = \kappa_\nu \mathrm{d}s$. Logo, a equação (A.5) fica

$$\frac{dI_\nu}{\mathrm{d}\tau_\nu} = \frac{j_\nu}{\kappa_\nu} - I_\nu. \tag{A.9}$$

Assumindo que a fonte esteja atrás de uma nuvem de gás isotérmica de temperatura T e profundidade óptica τ_ν, podemos integrar a equação (A.9) multiplicando-a por um fator de integração e^{τ_ν} e integrando por partes. A solução assume a seguinte forma

$$I_\nu = I_\nu^0 \exp(-\tau_\nu) + B_\nu[1 - \exp(-\tau_\nu)], \tag{A.10}$$

onde B_ν é chamada de função fonte e corresponde à intensidade específica de uma nuvem opticamente espessa à temperatura T. Em condições de equilíbrio termodinâmico local (LTE, *Local Thermal Equilibrium*) B_ν é dada pela função de Planck para um corpo negro.

Com isso, temos que a densidade de fluxo espectral é dada por

$$S_\nu \equiv \int_{\text{angulo solido}} I_\nu d\Omega, \tag{A.11}$$

onde Ω é o ângulo sólido da fonte emissora.

Conforme relatado por Cox et al. (1995), a emissão contínua em rádio da região centrada em η Car é devida ao bremsstrahlung térmico de um vento opticamente espesso e as razões entre as intensidades das RRLs observadas apresentavam desvio do equilíbrio termodinâmico local (NLTE, *Non-Local Thermal Equilibrium*). A densidade de fluxo é dada pela soma da densidade de fluxo do contínuo somada a densidade de fluxo da linha. Para resolver as equações de transferência radiativa neste caso é necessária a construção de modelos numéricos de transporte radiativo, o que foge ao escopo deste trabalho.

Abraham et al. (2014) assumiram que a densidade e temperatura eletrônica são contantes na região de emissão. Logo, temos que a densidade de fluxo do contínuo (S_ν^C) é dada por

$$S_\nu^C = \frac{2kT_e\nu^2}{c^2}[1 - \exp\left(-\tau_\nu^C\right)]\Omega, \tag{A.12}$$

onde T_e é a temperatura do elétron, ν a frequência, k a constante de Boltzmann, τ_ν^C a profundidade óptica para absorção livre-livre integrada ao longo da linha de visada.

A profundidade óptica pode ser escrita como $\tau_\nu^C = \kappa_\nu^C \ell$, onde ℓ é a profundidade da região absorvedora ao longo da linha de visada, e o coeficiente de absorção para radiação livre-livre κ_ν^C é dado por (Brocklehurst e Seaton, 1972)

$$\kappa_\nu^C = 6.94 \times 10^{-8} \frac{N_e N_i}{\nu^2} \left(\frac{10^4}{T_e}\right)^{3/2} g_{\text{ff}}\ \text{pc}^{-1}, \tag{A.13}$$

onde N_e e N_i são as densidades numéricas de elétrons e íons e $g_{\rm ff}$ é o fator de Gaunt, dado por

$$g_{\rm ff} = (4,69 + 1,5 \ln T_e - \ln \nu). \tag{A.14}$$

Temos que a densidade de fluxo total (contínua mais linha) S_ν^{L+C} pode ser obtida a partir de

$$S_\nu^{L+C} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT_e \Omega \int_0^\ell (\kappa_\nu^C + b_{n+m}\kappa_{\nu,\rm LTE}^L) \exp(-\tau_\nu^{L+C}) dz, \tag{A.15}$$

Onde

$$\tau_\nu^{L+C} = \int_0^z (b_n \beta_{n,n+m} \kappa_{\nu,\rm LTE}^L + \kappa_\nu^C) dz', \tag{A.16}$$

κ_ν^c é dado pela Equação (A.13), $\kappa_{\nu,\rm LTE}^L$ é o coeficiente de absorção da linha em LTE para a transição entre níveis com números quânticos n e $n+m$, e é dado por (Brocklehurst e Seaton, 1972)

$$\kappa_{\nu,\rm LTE}^L = 1.064 \times 10^{-12} \frac{N_e N_+}{\nu} \left(\frac{10^4}{T}\right)^{2.5} mk(m) \times \exp(\chi_n/kT)(\nu\phi_\nu),$$

onde N_+ é o número de íons (H_+ ou He_+), $mK(m)$ está relacionado à força do oscilador (Menzel, 1968), com valores de 0.1908 para $m = 1$ e 0.05266 para $m = 2$, χ_n é a energia do nível n, b_n é a população de nível n relativa à sua população em LTE, calculada por Storey e Hummer (1995) para vários valores de n, N_e e T_e,

$$\beta_{n,n+m} = \frac{1 - (b_{n+m}/b_n) \exp(-h\nu/kT)}{1 - \exp(-h\nu/kT)},$$

ϕ_ν é o perfil de linha normalizado, que pode ser calculado a partir de

$$\phi_\nu = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{\nu'}^D \, d\nu',$$

onde ϕ_ν^D representa o perfil de alargamento Doppler, dado por (Brocklehurst e Leeman, 1971)

$$\phi_\nu^D = \frac{\alpha}{\pi^{1/2}\nu_0} \exp\left[-\frac{\alpha(\nu - \nu_0)}{\nu_0}\right]^2,$$

com $\alpha = [m_i c^2/(2kT_D]^{1/2}$, onde m_i é a massa do íon e T_D é a temperatura Doppler, que inclui as velocidades térmica e turbulenta; ν_0 é a frequência de repouso da transição.

A largura da linha térmica pode ser calculada a partir de

$$(\Delta v)^D = 7.13 \times 10^{-5} c \left[\frac{m_H}{m_i}\left(\frac{T_D}{10^4}\right)\right]^{1/2},$$

que corresponde a 21 km s^{-1} para um plasma de H ionizado de 10^4 K.

Apêndice B

Gráficos e Tabelas

B.1 Tabelas

Na Tabela B.1 pode-se visualizar os intervalos e ajustes realizados nos espectros médios para retirar a linha de base de cada um dos espectros relatados neste trabalho, conforme descrito na Seção 4.1.

Tabela B.1 - Intervalos e curvas ajustadas aos espectros das observações entre maio de 2000 e março de 2003

Data	Espectro	1º Intervalo	2º Intervalo	N	Ajuste da linha de base	R^{2*}
29 e 30/05/2000	H30α	[-707,46, -600,70]	[300,5, 594,6]	444	$y = -6,391 \times 10^4 x + 22,61$	0,264
	H35α	[-1083,39, -800,86]	[600,39, 969,96]	458	$y = 5,366 \times 10^7 x^2 - 6,585 \times 10^4 x + 19,91$	0,5964
	H40α	[-1563,85, -800,49]	[1000,96, 1453,94]	582	$y = 1,410 \times 10^{-10} x^3 - 7,190 \times 10^{-8} x^2 - 2,392 \times 10^4 x + 17,08$	0,05923
19/11/2000	H30α	[-850,97, -600,53]	[300,89, 450,07]	444	$y = -7,625 \times 10^4 x + 26,30$	0,483
	H40α	[-1706,94, -801,52]	[600,63, 1309,04]	772	$y = 3,788 \times 10^{-10} x^3 + 1,076 \times 10^7 x^2 - 6,457 \times 10^4 x + 17,24$	0,517
17/01/2001	H30α	[-707,27, -600,34]	[300,39, 594,37]	444	$y = -2,673 \times 10^4 x + 17,48$	0,021
	H35α	[-1083,09, -800,64]	[600,19, 969,66]	458	$y = 7,041 \times 10^7 x^2 + 2,612 \times 10^4 x + 15,50$	0,08438
	H40α	[-1563,64, -800,38]	[600,31, 1453,73]	772	$y = 6,000 \times 10^{-11} x^3 + 1,427 \times 10^7 x^2 - 1,491 \times 10^4 x + 13,02$	0,2375
17, 18 e 19/05/2000	H30α	[-710,78, -600,51]	[300,64, 589,87]	444	$y = -3,607 \times 10^4 x + 17,28$	0,235
	H35α	[-1086,30, -801,22]	[601,37, 825,16]	359	$y = 9,343 \times 10^{-8} x^2 - 1,887 \times 10^4 x + 16,59$	0,6066
	H40α	[-1566,78, -801,86]	[600,14, 1308,47]	705	$y = 1,081 \times 10^{-10} x^3 - 9,025 \times 10^{-9} x^2 - 1,312 \times 10^4 x + 15,18$	0,2166
06/01/2002	H30α	[-850,23, -600,07]	[300,32, 449,33]	444	$y = -2,418 \times 10^4 x + 24,47$	0,065
	H35α	[-1225,45, -801,03]	[600,42, 824,03]	457	$y = -4,468 \times 10^7 x^2 - 6,350 \times 10^4 x + 20,36$	0,7018
	H40α	[-1704,21, -800,43]	[300,01, 1306,30]	915	$y = 2,123 \times 10^{-10} x^3 - 2,646 \times 10^{-8} x^2 - 3,819 \times 10^4 x + 15,55$	0,2456
09/03/2002	H30α	[-850,23, -600,07]	[300,32, 449,33]	444	$y = -2,489 \times 10^4 x + 24,13$	0,04698
	H35α	[-1225,48, -801,04]	[600,44 , 824,05]	457	$y = -1,294 \times 10^7 x^2 - 3,485 \times 10^4 x + 19,61$	0,47
	H40α	[-1704,24, -800,44]	[300,02, 1306,33]	914	$y = 2,162 \times 10^{-10} x^3 + 5,974 \times 10^{-8} x^2 - 3,900 \times 10^4 x + 14,72$	0,3513
02 e 03/03/2002	H30α	[-850,06, -600,87]	[300,19, 449,16]	444	$y = -5,329 \times 10^4 x + 18,90$	0,04515
	H35α	[-1225,18, -800,87]	[600,21, 823,76]	457	$y = -3,895 \times 10^7 x^2 - 4,729 \times 10^4 x + 16,80$	0,4207
	H40α	[-1704,24, -800,44]	[300,02, 1306,33]	914	$y = 2,577 \times 10^{-10} x^3 - 9,021 \times 10^{-8} x^2 - 6,109 \times 10^4 x + 10,65$	0,5933
06/12/2002	H30α	[-850,06, -600,87]	[300,19, 449,16]	444	$y = -1,219 \times 10^4 x + 21,01$	0,008898
	H35α	[-1225,18, -800,87]	[600,21, 823,76]	457	$y = -2,364 \times 10^7 x^2 - 2,808 \times 10^4 x + 16,93$	0,2388
	H40α	[-1704,24, -800,44]	[300,02, 1306,33]	914	$y = 3,088 \times 10^{-10} x^3 + 5,715 \times 10^{-8} x^2 - 5,007 \times 10^4 x + 12,76$	0,3211
05 e 06/01/2003	H30α	[-850,05, -600,87]	[300,18, 449,15]	444	$y = -1,022 \times 10^4 x + 19,89$	0,008037
	H35α	[-1225,17, -800,86]	[600,20, 823,75]	457	$y = 1,990 \times 10^7 x^2 + 4,178 \times 10^{-5} x + 15,46$	0,02779
	H40α	[-1704,24, -800,44]	[300,02, 1306,33]	914	$y = 3,136 \times 10^{-10} x^3 - 4,159 \times 10^{-8} x^2 - 6,052 \times 10^4 x + 13,13$	0,4225
06 e 07/03/2003	H30α	[-850,07, -600,87]	[300,19, 449,16]	444	$y = -1,042 \times 10^4 x + 21,59$	0,02449
	H35α	[-1225,19, -800,87]	[600,22, 823,76]	457	$y = -2,087 \times 10^7 x^2 - 1,803 \times 10^4 x + 14,92$	0,2127
	H40α	[-1703,38, -800,10]	[301,82, 1305,47]	914	$y = 1,367 \times 10^{-10} x^3 + 6,791 \times 10^{-8} x^2 - 2,888 \times 10^4 x + 13,37$	0,4145

* Coeficiente de Determinação

B.2 Espectros médios das RRLs H30α, H35α e H40α e contínuos subjacentes

Nas Figuras B.1 à B.10 tem-se os gráficos com os perfis dos espectros médios observados antes e após a remoção do linha de base (*contínuo*), conforme descrito na Seção 4.1.

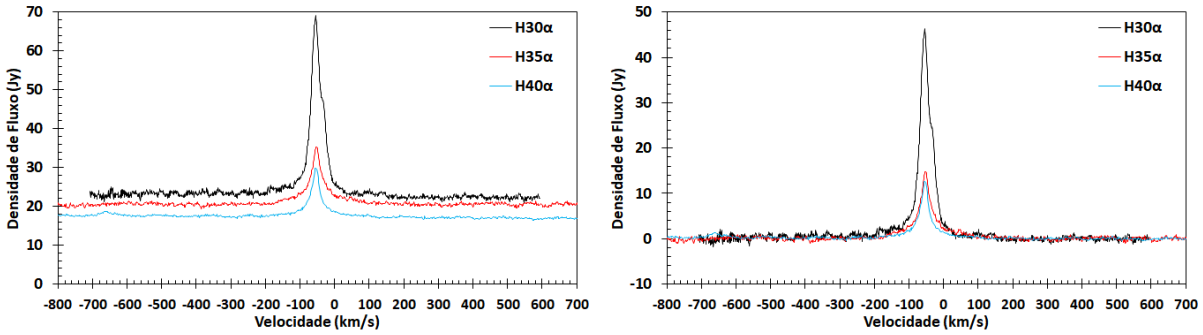


Figura B.1: **Esquerda:** Espectros médios observados nos dias 29 e 30 de maio de 2000. **Direita:** Espectros médios observados após a remoção da linha de base.

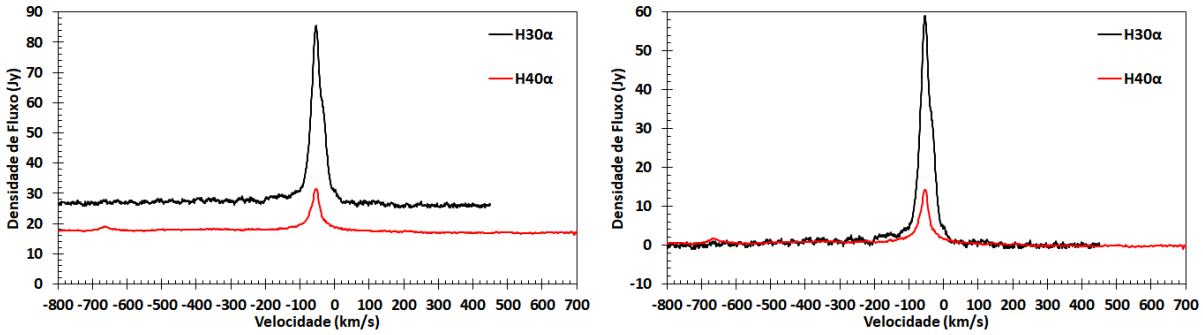


Figura B.2: **Esquerda:** Espectros médios observados no dia 19 de novembro de 2000. **Direita:** Espectros médios observados após a remoção da linha de base.

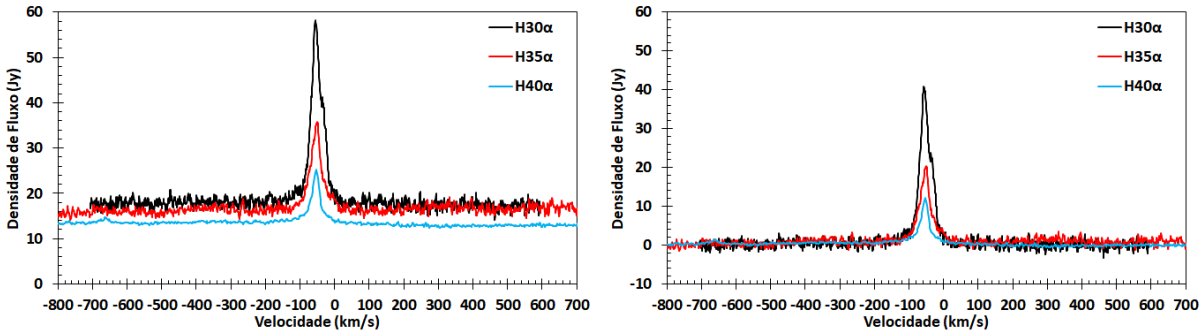


Figura B.3: **Esquerda:** Espectros médios observados no dia 17 de janeiro de 2001. **Direita:** Espectros médios observados após a remoção da linha de base.

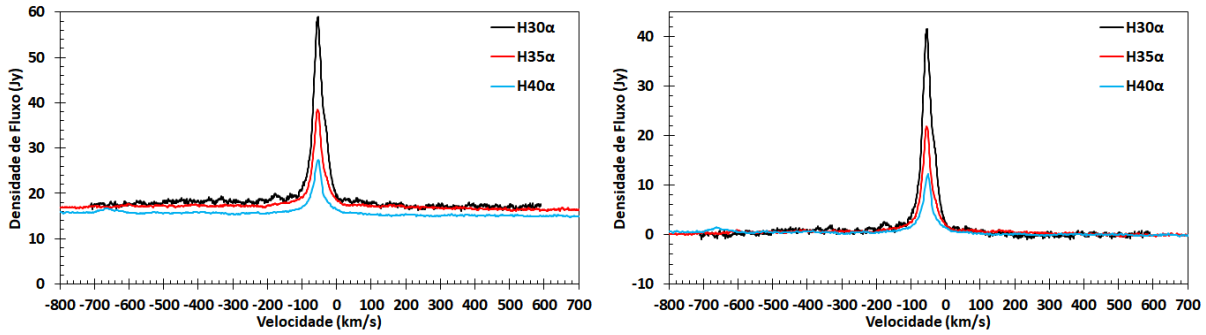


Figura B.4: **Esquerda:** Espectros médios observados nos dias 17, 18 e 19 de maio de 2001. **Direita:** Espectros médios observados após a remoção da linha de base.

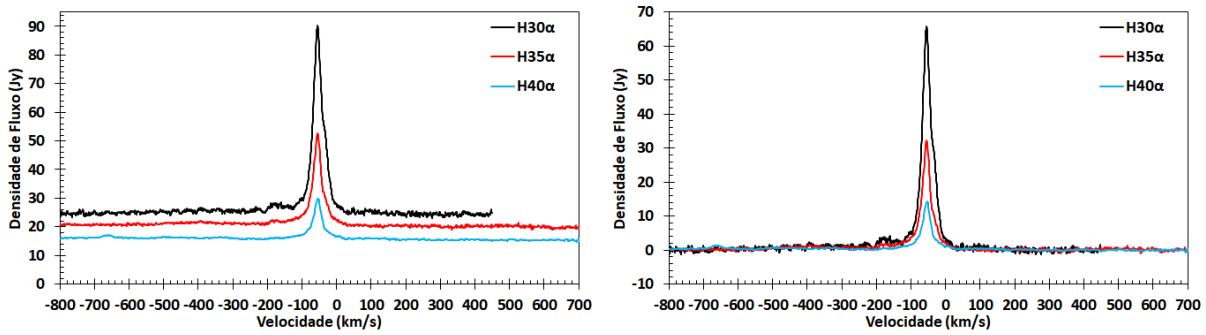


Figura B.5: **Esquerda:** Espectros médios observados no dia 06 de janeiro de 2002. **Direita:** Espectros médios observados após a remoção da linha de base.

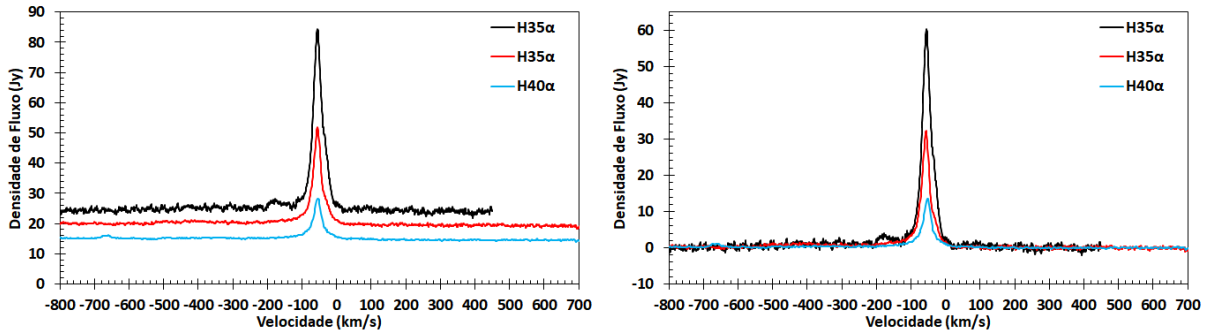


Figura B.6: **Esquerda:** Espectros médios observados no dia 09 de março de 2002. **Direita:** Espectros médios observados após a remoção da linha de base.

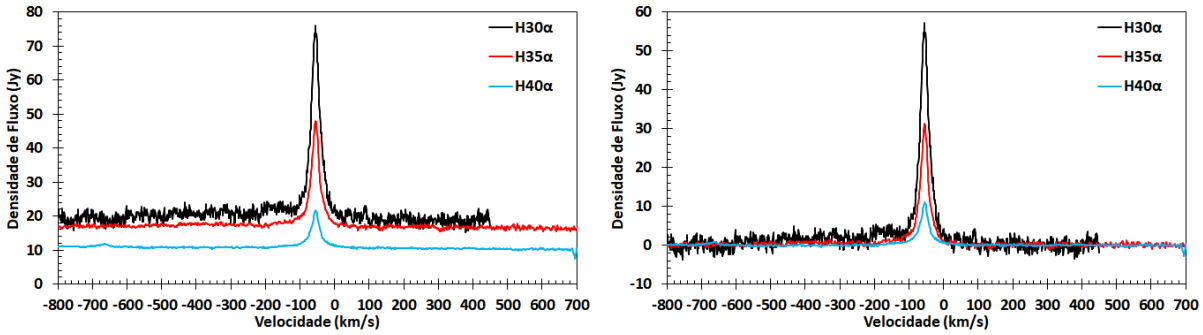


Figura B.7: **Esquerda:** Espectros médios observados nos dias 02 e 03 de dezembro de 2002. **Direita:** Espectros médios observados após a remoção da linha de base.

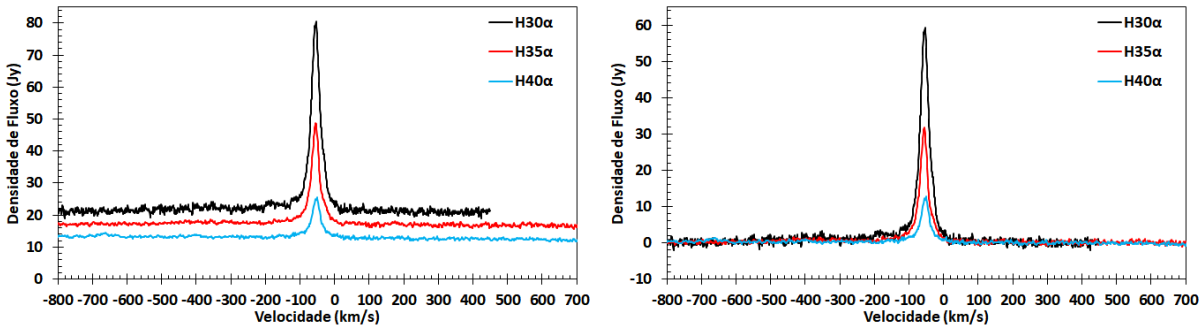


Figura B.8: **Esquerda:** Espectros médios observados no dia 06 de dezembro de 2002. **Direita:** Espectros médios observados após a remoção da linha de base.

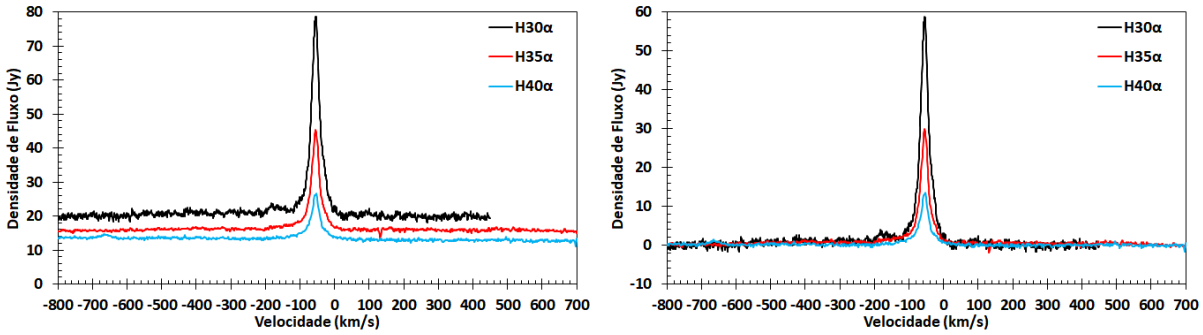


Figura B.9: **Esquerda:** Espectros médios observados nos dias 05 e 06 de janeiro de 2003. **Direita:** Espectros médios observados após a remoção da linha de base.

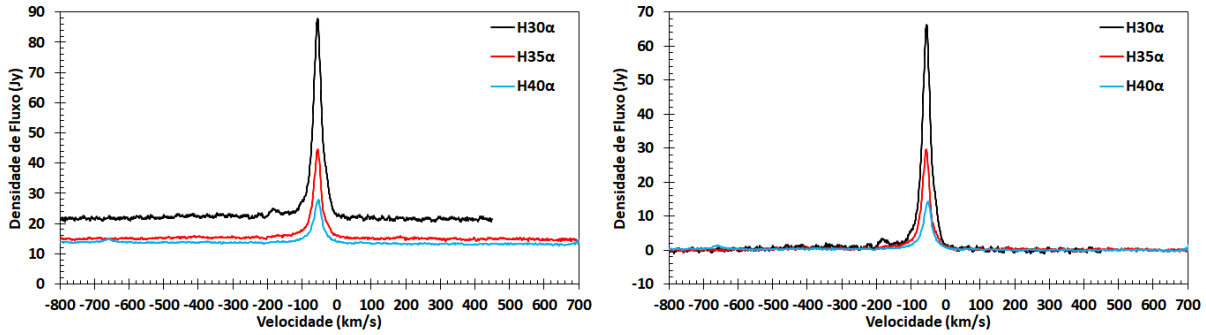


Figura B.10: **Esquerda:** Espectros médios observados nos dias 06 e 07 de março de 2003. **Direita:** Espectros médios observados após a remoção da linha de base.