

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

Pâmela Reis Querido

Uma Investigação de Eventos de Perda de Massa em Estrelas Be

São Paulo

2022

Pâmela Reis Querido

Uma Investigação de Eventos de Perda de Massa em Estrelas Be

Monografia apresentada ao Departamento de
Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica
e Ciências Atmosféricas da Universidade de
São Paulo como requisito parcial para a ob-
tenção do título de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica

Orientador: Prof. Dr. Alex Cavaliéri Carciofi

Co-orientador: Ms. André Luiz Figueiredo

São Paulo

2022

A todos os cientistas brasileiros, que nunca desistam de seus sonhos e sempre lutem para uma educação melhor em nosso país.

Agradecimentos

À minha família, por todo o suporte durante a minha caminhada acadêmica, me ensinando a priorizar a educação e possibilitando minha dedicação exclusiva aos estudos. Um agradecimento especial ao meu irmão, Luiz Henrique Reis Querido, que sempre foi meu maior apoiador;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alex Cavaliéri Carciofi, pela atenção, paciência e todo o conhecimento transmitido;

Ao meu co-orientador, Ms. André Luiz Figueiredo, por se tornar mais do que um guia de estudos acadêmicos, mas um verdadeiro amigo e conselheiro;

Aos colegas do grupo de pesquisa BeACon e, em especial, a Tajan Amorim, pelas diversas vezes em que me ajudou quando precisei, e cuja colaboração foi de suma importância para esse trabalho;

Ao meu companheiro, Pedro Hori Bueno, pelo apoio, encorajamento, carinho e amizade nos últimos anos, que me ajudaram a nunca desistir dos meus objetivos;

Aos colegas do Colégio Técnico de Campinas, em especial à Airton Cardoso Lana e Matheus Bulhões Barbosa, pela ajuda e apoio em uma época que foi tão importante na minha carreira acadêmica;

Aos colegas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP que se tornaram verdadeiros amigos, em especial a Mayara Miranda Silva pelo companheirismo e Francisco Junqueira por todas os apoios acadêmicas;

Ao CnPq, pelo apoio financeiro.

*“Durante toda a minha vida, as novas descobertas sobre a natureza me alegraram como
uma criança.”*

Marie Curie

“Not only do we live among the stars, the stars live within us.”

Neil DeGrasse Tyson

Resumo

As estrelas Be são encontradas na sequência principal e são famosas por produzir discos Keplerianos de decreção viscosa e por suas linhas de emissão. Algumas estrelas Be raras exibem discos muito estáveis que podem durar décadas. No entanto, para a maioria, o processo de perda de massa que forma o disco é errático; sendo possível observar a transição de B (sem disco) para Be (com disco) e de volta para B em escalas de tempo bastante curtas. Neste estudo, estamos interessados em investigar perdas de massa assimétricas, que constroem concentrações locais de matéria (blobs).

Em nossos modelos, variamos o ângulo de inclinação do observador, o tamanho (raio), a densidade e a fase orbital do blob. Assim, estudamos como esses diferentes fatores podem afetar as características espectrais da linha de emissão $H\alpha$ e da polarização. Nesta contribuição, relatamos o estado atual desse esforço contínuo.

A forte modulação de todos os observáveis com o período orbital é ressaltada ao longo desse trabalho, mostrando variações espectrais e polarimétricas passíveis de serem detectadas observacionalmente em alguns casos. Como era esperado, os sinais nos observáveis são maiores quanto maior for o blob e sua densidade. Os resultados sugerem um comportamento não linear entre as variações das grandezas espectroscópicas e polarimétricas com o tamanho (raio) do blob. A comparação dos resultados para diferentes densidades do blob indicou que, em nossos modelos, mesmo as menores sobredensidades exploradas são opticamente espessas nos comprimentos de onda do $H\alpha$, por não trazerem grandes diferenças nas quantidades relacionadas à espectroscopia.

Um passo fundamental que será dado futuramente no trabalho de pós-graduação da candidata será percorrer o caminho inverso: partindo de sinais observáveis procurar mapear as características das densificações locais que os produzem.

Abstract

Be stars are found on the main sequence and are famous for producing Keplerian viscous decay discs and for its emission lines. Some rare Be stars exhibit very stable disks that can last for decades. However, for most, the process of shedding the mass that forms the disc is erratic; it is possible to observe the transition from B (no disk) to Be (with disk) and back to B on very short timescales. This highly variable nature makes these stars ideal laboratories for studying viscous dynamical processes in action on a timescale compatible with the human lifespan. In this study, we are interested in investigating asymmetric mass losses, that build up local concentrations of matter (blobs).

In our models, we vary the observer's inclination angle, the size (radius), the density and the phase of the blob. This way, we study how these different factors can affect the $H\alpha$ emission line spectral characteristics and the level of polarization. In this contribution, we report the current state of this ongoing effort.

The strong modulation of all observables with the orbital period was highlighted throughout this work, showing spectroscopic and polarimetric observables that can be detected observationally in some cases. As expected, the signals in the observables are larger as the blob's radius and density increase. The results suggest a nonlinear behavior between the variations of the spectroscopic and polarimetric quantities with the blob's size (radius). The comparison of the results for different blob's densities indicates that, in our models, even the smallest overdensities explored are optically thick at $H\alpha$ wavelengths, as they do not bring significant differences in quantities related to spectroscopy.

A fundamental step that will be taken in the candidate's post-graduate work will be to go through the opposite way: starting from observable signals, try to map the characteristics of the local densifications that produce them.

Lista de Figuras

1.1	Vista esquemática dos diferentes perfis de $H\alpha$ e $H\beta$ para estrelas Be com diferentes ângulos de inclinação. Figura adaptada de Rivinius et al. 2013 - Fig1.	21
1.2	Linhas de perfil $H\alpha$ (esquerda) e $H\beta$ (direita) de HD6226 com tempo de observações no eixo y. Figura de Richardson et al. 2021 - Fig8.	21
2.1	À direita: mosaico mostrando imagens de uma estrela Be com disco+blob, em diferentes fases orbitais. À esquerda: perfis de $H\alpha$, correspondentes às mesmas fases das imagens. Os perfis mostram clara variação V/R, semelhante em amplitude ao mostrado na Fig. 1.1 e 1.2, indicando a presença de uma perturbação na densidade - causada por um blob. Os cálculos foram feitos pelo código HDUST (Carciofi e Bjorkman, 2006). Mais detalhes sobre esta simulação são apresentados no Cap. 3.	24
3.1	Perfis de desidade como função da distância ao centro da estrela, para duas simulações realizadas com o código HDUST. Esquerda: Estrela Be com um disco circunstelar simétrico. Direita: estrela Be com um disco e um blob. Neste último caso, linhas de diferentes cores representam cortes radiais em diferentes ângulos ϕ	26
3.2	A largura equivalente (EW) de uma linha espectral é definida como a largura de uma caixa (sombreada no gráfico) alcançando o contínuo que tem a mesma área que a linha espectral, de forma que $EW = \int \frac{F_c - F_\lambda}{F_c} d\lambda$. No caso de uma linha de emissão, onde o $H\alpha$ fica acima do contínuo, os valores da EW serão negativos. Figura de Carroll e Ostlie 2007.	28

4.1	Resultados gráficos para o modelo de referência (raio do blob $1.0R$ e densidade $10n$). O ângulo inclinação é $i = 50^\circ$. Os seis painéis superiores mostram quantidades vs. fase. A primeira fileira, apresenta os observáveis de espectrografia: Variação V/R , Separação de Picos e Largura Equivalente (respectivamente da esquerda para a direita). A segunda fileira, os observáveis de polarimetria: Polarização Linear, Ângulo de Polarização e Diagrama QU (respectivamente da esquerda pra a direita). Abaixo, à esquerda, são mostrados os perfis de $H\alpha$ para diferentes fases (indicadas por cores diferentes, ver legenda) e à direita imagens na região do $H\alpha$, para as mesmas fases.	30
4.2	Resultados gráficos para análise dos efeitos do ângulo de inclinação do observador. É mostrada a simulação de referência (raio do blob de $1.0R$ e densidade $10n$) para diferentes ângulos de inclinação ($i = 0^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ e 90°). Na primeira fileira, apresentamos os observáveis de espectrografia: Variação V/R , Separação de Picos e Largura Equivalente (respectivamente da esquerda para a direita). Na segunda fileira, os observáveis de polarimetria: Polarização Linear, Ângulo de Polarização e Diagrama QU (respectivamente da esquerda pra a direita).	32
4.3	Resultados gráficos para análise dos efeitos do tamanho do blob. Simulação com densidade $10n$ fixa, em um ângulo de inclinação $i = 50^\circ$ fixo, variando o raio do blob em $0.1R$, $0.5R$ e $1.0R$. Na primeira fileira, apresentamos os observáveis de espectrografia: Variação V/R , Separação de Picos e Largura Equivalente (respectivamente da esquerda para a direita). Na segunda fileira, os observáveis de polarimetria: Polarização Linear, Ângulo de Polarização e Diagrama QU (respectivamente da esquerda pra a direita).	34
4.4	Resultados gráficos para análise dos efeitos da densidade do blob. Simulação com raio $1.0R$ fixo, em um ângulo de inclinação $i = 50^\circ$ fixo, mostrando diferentes densidades do blob ($2n$ e $10n$). Na primeira fileira, apresentamos os observáveis de espectrografia: Variação V/R , Separação de Picos e Largura Equivalente (respectivamente da esquerda para a direita). Na segunda fileira, os observáveis de polarimetria: Polarização Linear, Ângulo de Polarização e Diagrama QU (respectivamente da esquerda pra a direita).	35

Lista de Tabelas

- 3.1 Características da estrela Be central utilizada nas simulações. Temos que W expressa a velocidade de rotação em unidades de velocidade crítica - $W = \frac{v_{rot}}{V_{orb}}$ 25
- 3.2 Parâmetros utilizados para as simulações dos adensamentos no sistema. . 27

Sumário

1. <i>Introdução</i>	19
2. <i>Objetivos</i>	23
2.1 <i>Motivação</i>	23
3. <i>Desenvolvimento</i>	25
4. <i>Resultados</i>	29
4.1 <i>Simulação de Referência</i>	29
4.2 <i>Efeitos do Ângulo de Inclinação</i>	31
4.3 <i>Efeitos do Tamanho do Blob</i>	33
4.4 <i>Efeitos da Densidade do Blob</i>	36
5. <i>Conclusões</i>	37
<i>Referências</i>	39

Introdução

Estrelas de sequência principal do tipo espectral B são aquelas entre 3 e 18 massas solares, muito luminosas e azuis, com linhas de hélio e hidrogênio neutros no espectro (Rivinius et al. 2013, Carroll e Ostlie 2007). Entretanto, aqui o objeto de estudo é mais complexo e intrigante: estrelas Be.

Existem duas formas de definir estrelas Be: teoricamente, apresentando as principais informações físicas entendidas ao longo das últimas décadas de estudo, e uma definição mais orientada para as características vistas observacionalmente. Segundo a primeira abordagem, as estrelas Be são do tipo espectral B na sequência principal, com pulsações não radiais e com taxas de rotação próximas das críticas. Essas características combinadas levam ao surgimento de um disco de decreção Kepleriano cuja evolução é controlada pela viscosidade. Por outro lado, a característica observacional mais notável desses objetos é sua variabilidade em todos os seus observáveis e para uma ampla gama de escalas de tempo (dias a décadas). Essa variabilidade está principalmente atrelada às variações do disco circunstelar, e um observador pode identificar estrelas Be como aquelas que apresentam linhas de Hidrogênio em emissão (sendo o $H\alpha$ a mais intensa), excesso no infravermelho e polarização não nula. Até o presente momento, esses objetos não tiveram campos magnéticos detectados de forma confiável (Rivinius et al., 2013).

As estrelas Be têm um disco Kepleriano de decreção viscosa alimentado pela perda de massa da própria estrela central. É importante mencionar um fator fundamental para que a perda de massa ocorra: a rotação extrema da estrela acelera a matéria o suficiente para diminuir a energia de ligação, tornando a gravidade efetiva do equador menor e assim o material fica mais fracamente ligado à estrela. A energia que falta para colocar o material em órbita é fornecida por pulsações não radiais, como sugere o trabalho de Labadie-Bartz

et al. (2022). Uma vez que o material é expelido pela estrela, processos viscosos entram em ação e se tornam responsáveis por controlar a dinâmica do disco e consequentemente sua evolução.

O processo de perda de massa é errático, o que se reflete no disco, alterando suas características. Foi observado que estrelas do tipo B começam a construir um disco, transformando-se em estrelas Be. O oposto também é possível: uma estrela Be interrompe sua perda de massa, o disco se dissipa e se transforma em uma estrela Be quiescente (tipo B). Essa natureza altamente variável torna essas estrelas os laboratórios ideais para estudar processos dinâmicos viscosos em ação em uma escala de tempo compatível com a duração da vida humana.

Para estudar variáveis erráticas, é necessário verificar diferentes observáveis ao mesmo tempo. A fotometria, por exemplo, pode nos ajudar a identificar quando a estrela está perdendo massa ativamente (Rímulo et al., 2018). A espectroscopia nos ajuda a detectar a existência de um disco circunstelar através das linhas de emissão. A polarimetria, por outro lado, fornece informações cruciais para delimitar a geometria do disco (Wood et al., 1997).

Hoje em dia é aceito que a pulsação não radial é o principal mecanismo físico responsável por colocar o material estelar em órbita (Labadie-Bartz et al., 2022), mas ainda há algumas questões em aberto sobre como isso ocorre exatamente. O que estamos especialmente interessados em investigar é a simetria da perda de massa: se esta é azimutalmente simétrica ou se ocorre em pontos específicos do equador estelar. É importante mencionar que foram observados eventos de perda de massa assimétrica, o que leva ao aparecimento de adensamentos locais. Tais adensamentos serão chamados de blob daqui para frente.

Assinaturas de blob foram observadas em estrelas Be principalmente por observações espectroscópicas. Na Fig. 1.1 apresentamos um gráfico esquemático para exemplificar como a linha $H\alpha$ e $H\beta$ em emissão é vista por observadores em diferentes ângulos de inclinação. A estrutura de duplo pico da linha torna-se mais clara à medida que consideramos ângulos de observação maiores, pois o efeito Doppler aumenta a separação entre os picos. Observe que o lado esquerdo da emissão é exatamente o mesmo do lado direito, característica que ocorre quando o disco é homogêneo.

Se uma estrela Be produz perturbações no disco interno, como um blob, esperamos ver um dos picos da linha mais intenso que o outro, em resposta a uma região mais densa.

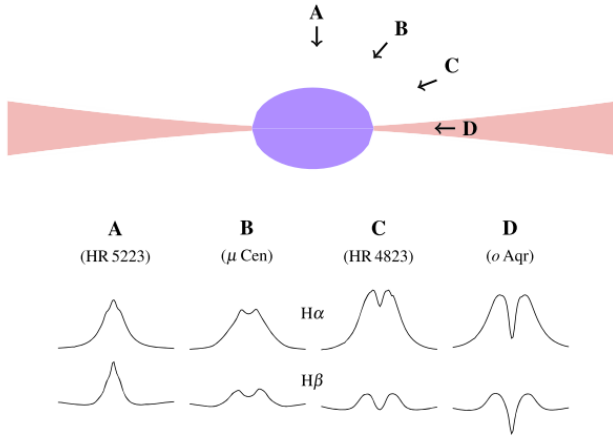


Figura 1.1: Vista esquemática dos diferentes perfis de $H\alpha$ e $H\beta$ para estrelas Be com diferentes ângulos de inclinação. Figura adaptada de Rivinius et al. 2013 - Fig1.

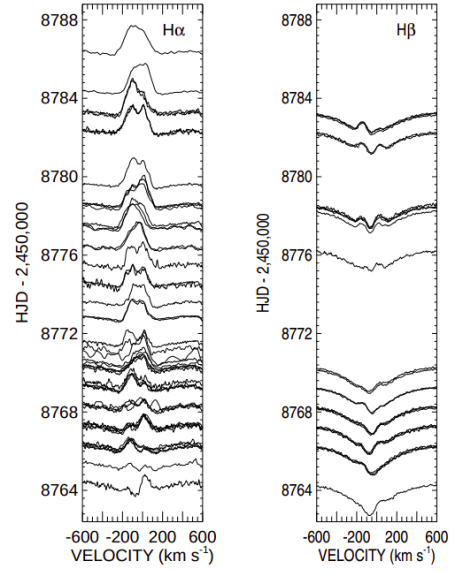


Figura 1.2: Linhas de perfil $H\alpha$ (esquerda) e $H\beta$ (direita) de HD6226 com tempo de observações no eixo y. Figura de Richardson et al. 2021 - Fig8.

Como a densificação está orbitando a estrela, os picos mais intensos alternam-se entre o lado vermelho (*redshift*) e o azul (*blueshift*) do perfil. Essas são as chamadas variações V/R observadas em estrelas Be. Para exemplificar este comportamento, mostramos na Fig. 1.2 os perfis de $H\alpha$ e $H\beta$ de HD6226, que tem uma orientação semelhante à mostrada pela letra ‘C’ na Fig. 1.1. É possível ver que, nos primeiros espectros para $H\alpha$, temos um pico vermelho na emissão, mas a parte violeta diminui. Cerca de dois dias depois ($HJD - 2,45 \times 10^6 = 8766$) é possível ver a configuração inversa com uma linha de emissão mais intensa no violeta. O mesmo comportamento é visto na linha $H\beta$, de forma menos pronunciada, indicando uma possível perturbação na densidade. Além das evidências espectroscópicas dos blobs, temos na literatura evidências polarimétricas também (Carciofi et al., 2007).

Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é estudar, de forma sistemática, como os observáveis astrofísicos de estrelas Be são impactados pelas diferentes características dos blobs. Nos modelos (Fig. 2.1), os blobs foram representados por densificações locais na presença de um disco simétrico circunstelar. Essas densificações foram caracterizadas por um tamanho físico (o raio do blob) e uma densidade (em função da densidade do disco da estrela).

Em cada simulação, emulamos o movimento orbital do blob calculando o espectro emergente para vários observadores com o mesmo ângulo de inclinação, mas com diferentes ângulos azimutais ϕ , conforme ilustrado na Fig. 2.1. Desta forma, pudemos prever a variação nos perfis de polarização e linhas de emissão. Com isso, simulamos, de forma aproximada, as ejeções de matéria que ocorrem em estrelas Be.

2.1 Motivação

A principal motivação para este trabalho é entender e desenvolver ligações entre as características físicas dos blobs e seus efeitos nos observáveis. Esses dados ajudarão em vários trabalhos em desenvolvimento e futuros que envolvam perda de massa em estrelas Be.

Um exemplo real de um trabalho em desenvolvimento que se beneficiará dos resultados aqui apresentados é a tese de doutorado da aluna Amanda Rubio, cuja proposta é construir discos de estrelas Be a partir de simulações hidrodinâmicas SPH (Okazaki et al., 2002). Como estes modelos não foram reportados anteriormente na literatura, espera-se que este trabalho ofereça importantes ferramentas para previsão do tamanho e densidade

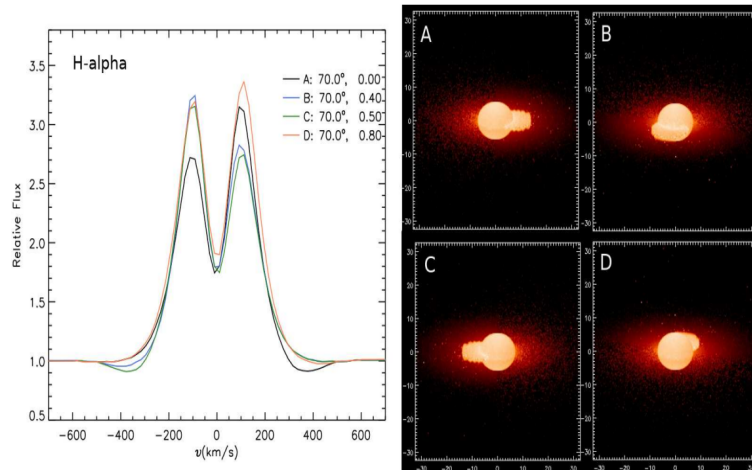


Figura 2.1: À direita: mosaico mostrando imagens de uma estrela Be com disco+blob, em diferentes fases orbitais. À esquerda: perfis de $H\alpha$, correspondentes às mesmas fases das imagens. Os perfis mostram clara variação V/R, semelhante ao mostrado na Fig. 1.1 e 1.2, indicando a presença de uma perturbação na densidade - causada por um blob. Os cálculos foram feitos pelo código HDUST (Carciofi e Bjorkman, 2006). Mais detalhes sobre esta simulação são apresentados no Cap. 3.

das densificações que precisam ser produzidas a fim de reproduzir o comportamento das observações, como as da Fig. 1.2.

Além disso, este projeto pode evoluir em estudos posteriores. Entre nossos objetivos futuros, gostaríamos de enfatizar a possibilidade de usar estes modelos para reproduzir simulações dinâmicas simplificadas em um estudo de como um blob evolui até ser agregado ao disco da estrela. Em resumo, este trabalho tem vários vínculos com trabalhos em andamento e potencial para continuação em um trabalho de pós-graduação.

Desenvolvimento

As simulações do sistema Estrela+Disco com blob são feitas a partir do código de transferência radiativa HDUST, desenvolvido pelo Prof. Dr. Alex C. Carciofi e amplamente utilizado com sucesso na modelagem de diferentes estrelas individuais (de Almeida et al. 2020 e Suffak et al. 2020 são apenas alguns exemplos recentes). Portanto, o estudo do código e suas principais entradas e saídas foram essenciais.

O código HDUST usa o método de Monte Carlo, considerando os efeitos da alta rotação estelar para resolver cálculos de transferência radiativa NLTE (do inglês *"non-local thermodynamic equilibrium"*) 3D (Carciofi e Bjorkman, 2006). Em outras palavras, a tarefa desse código é traduzir as informações físicas da estrela e do sistema de disco em observáveis, como: fluxo, polarização e imagens em diferentes regimes espectrais.

Para isso, são apresentados diversos arquivos contendo, como entrada, as diferentes características que definem o sistema a ser simulado. As principais características da estrela utilizadas nas simulações são definidas na Tabela 3.1. Adotamos uma estrela Be típica, de tipo espectral B2.

Outro parâmetro importante são as coordenadas dos observadores, definidas por um ângulo de inclinação (i) e uma posição azimutal (ϕ). Nas simulações para esse trabalho

Tabela 3.1 - Características da estrela Be central utilizada nas simulações. Temos que W expressa a velocidade de rotação em unidades de velocidade crítica - $W = \frac{v_{rot}}{V_{orb}}$

Massa (M)	$10.3 M_{\odot}$
Raio polar (R_p)	$5.4 R_{\odot}$
Raio equatorial (R)	$7.02 R_{\odot}$
Taxa de rotação (W)	0.775
Luminosidade	$7500 L_{\odot}$

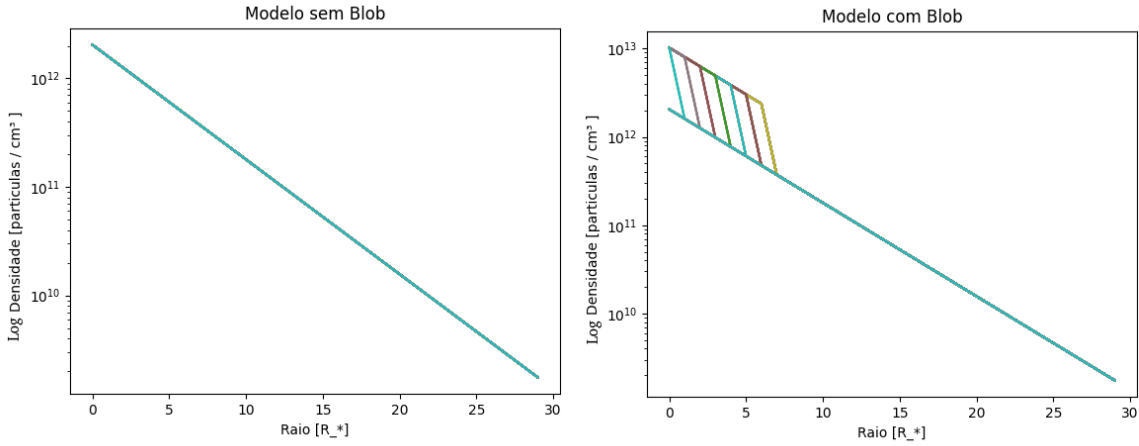


Figura 3.1: Perfis de densidade como função da distância ao centro da estrela, para duas simulações realizadas com o código HDUST. Esquerda: Estrela Be com um disco circunstelar simétrico. Direita: estrela Be com um disco e um blob. Neste último caso, linhas de diferentes cores representam cortes radiais em diferentes ângulos ϕ .

utilizamos 5 ângulos de inclinação ($i = 0^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ e 90°) e 24 ângulos azimutais no intervalo de 0° a 360° com passos de 15° . Nota-se que usamos os diferentes ângulos azimutais para simular a rotação do blob em torno da estrela.

Em todas as nossas simulações, adotou-se uma densidade do disco da forma

$$n = n_0 \left(\frac{r}{R} \right)^{-3.5},$$

típica de discos de estrela Be (Bjorkman e Carciofi, 2005) onde R é o raio do equador da estrela. Em todos os modelos, adotou-se $n_0 = 2.4 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-3}$, típica de discos de Be de densidade moderada (Vieira et al., 2017).

Em nossos modelos, o blob é descrito como uma sobredensidade, dada como um múltiplo da densidade local do disco. Apresentamos na Fig. 3.1 perfis de densidade que ilustram esta situação. No painel à esquerda é apresentada a densidade do modelo não perturbado, definido acima; à direita, mostramos o perfil de uma simulação com blob, que se mostra como um adensamento local nas regiões mais próximas da estrela. As linhas de diferentes cores representam cortes radiais para diferentes ângulos azimutais, por isso vemos o blob com diferentes extensões.

Definimos dois blocos de modelos de simulação alterando o raio do blob e sua densidade. Primeiramente rodamos modelos para os 3 raios de blob apresentados na Tab. 3.2 com uma sobredensidade de $10 \times n$, nos quais se baseia a maioria dos resultados apresentados abaixo.

Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados para as simulações dos adensamentos no sistema.

Raio do blob	Densidade do blob
0.1 R	10.0 n
0.5 R	2.0 n
1.0 R	

Visando explorar o limite de detectabilidade das perturbações, rodamos posteriormente modelos semelhantes com sobredensidades menores ($2 \times n$).

Os principais observáveis fornecidos pelo código HDUST são a distribuição espectral de energia (*spectral energy distribution*), os perfis de linhas de $H\alpha$ (exemplificados pelos perfis apresentados à esquerda da Fig. 2.1), e o fluxo polarizado. A partir desses, extraímos as seguintes quantidades, descritas abaixo:

Variação V/R das linhas de $H\alpha$ (V/R): Para cada observador, os fluxos dos picos do perfil de $H\alpha$ foram calculados pela função “spectools” da biblioteca pyhdust ¹. Foi feita a divisão do fluxo do pico em V pelo fluxo do pico em R determinando-se a razão V/R , que é uma medida da assimetria da região do disco onde se origina a emissão em $H\alpha$.

Separação de picos das linhas de $H\alpha$ (PS): Para cada observador, as velocidades dos picos do perfil de $H\alpha$ foram calculados pela função “spectools”. Foi feita a subtração da velocidade negativa da velocidade positiva, obtendo-se a separação de picos.

Largura equivalente das linhas de $H\alpha$ (EW): Para cada observador, a largura equivalente das linhas de $H\alpha$ foi calculada pela função “spectools”. A largura equivalente de uma linha de emissão está exemplificada na Fig. 3.2.

Polarização linear: Para cada observador foi calculada a polarização linear para os filtros V e B, através da convolução dos parâmetros de Stokes Q e U para os respectivos filtros. A partir destes parâmetros calculou-se ² $P_{\text{filtro}} = (Q_{\text{filtro}}^2 + U_{\text{filtro}}^2)^{1/2}$.

Ângulo de polarização: Da mesma forma que a polarização linear, calculou-se ³ o ângulo de polarização através de $\theta_{\text{filtro}} = 0.5 \arctan(U_{\text{filtro}}/Q_{\text{filtro}})$.

¹ Biblioteca PyHdust acessível em: <https://pyhdust.readthedocs.io/spectools.html>

² Eq. 2.8a de (Ramos, 2016)

³ Eq. 2.8b de (Ramos, 2016)

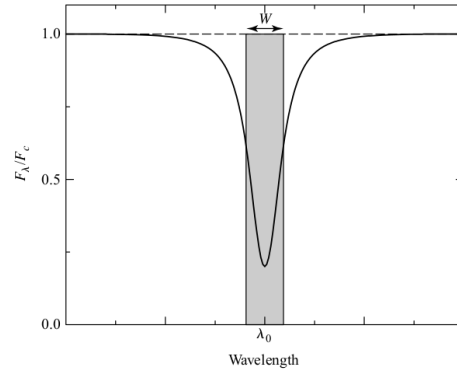


Figura 3.2: A largura equivalente (EW) de uma linha espectral é definida como a largura de uma caixa (sombreada no gráfico) alcançando o contínuo que tem a mesma área que a linha espectral, de forma que $EW = \int \frac{F_c - F_\lambda}{F_c} d\lambda$. No caso de uma linha de emissão, onde o $H\alpha$ fica acima do contínuo, os valores da EW serão negativos. Figura de Carroll e Ostlie 2007.

As figuras apresentadas na próxima seção mostram os observáveis analisados para os 5 ângulos de inclinação. Para $i = 0$ temos uma visão da estrela a partir do polo (*pole-on*). Da mesma forma, os demais ângulos de inclinação são $i = 30^\circ$ (exemplificado aproximadamente por B na Fig. 1.1), e assim sucessivamente para $i = 50^\circ$ e $i = 70^\circ$ até que para $i = 90^\circ$ temos uma visão equatorial (*edge-on*) da estrela (exemplificado por D na Fig. 1.1).

A maioria dos gráficos tem seus observáveis em função de fase orbital do blob, definida como

$$\text{fase} = 1 - \frac{\phi[^\circ]}{360^\circ}.$$

Quando fase = 0.75 o adensamento estará entre o observador e a estrela, já quando fase = 0.25 o adensamento estará atrás da estrela. Desta forma, o blob estará em quadratura para as fases 0 e 0.5.

Resultados

Nas seções a seguir apresentamos os resultados obtidos. Começamos analisando em detalhes um modelo que foi escolhido como referência. Em seguida, variamos os parâmetros deste modelo para entender o efeito de cada um nos observáveis.

4.1 *Simulação de Referência*

Os resultados analisados podem ser representados a partir de figuras como a Fig. 4.1, onde vemos os observáveis para uma simulação de referência ⁴. Foi escolhido um modelo com raio de blob de $1.0R$ e densidade $10.0n$, de forma a maximizar os efeitos nos observáveis.

A primeira linha na Fig. 4.1 apresenta os resultados para as três quantidades espectroscópicas definidas no capítulo anterior. Da esquerda para a direita temos a razão V/R , a separação de pico e a largura equivalente, todos em função da fase orbital do blob. O ângulo de inclinação é $i = 50^\circ$. Todos os observáveis apresentam forte modulação com a fase. Como esperado, a razão V/R tem seus extremos máximo e mínimo quando o blob está em quadratura, fase orbital em que a assimetria aparente é máxima. Para fase = 0 (0.5), $V/R < 1$ ($V/R > 1$) pois o blob está se afastando (aproximando) do observador, criando um excesso de emissão no pico vermelho (violeta). Para as fases em que o blob está alinhado com o observador e a estrela (0.25 e 0.75) a assimetria é nula e $V/R = 1$. Nota-se que o período de variação da razão V/R é igual ao período orbital.

Os outros 2 observáveis (separação de pico e EW) têm um comportamento diferente: a diferença entre dois mínimos (ou máximos) consecutivos é de meia fase orbital, contras-

⁴ No link existe um vídeo mostrando a modulação orbital do modelo de referência.

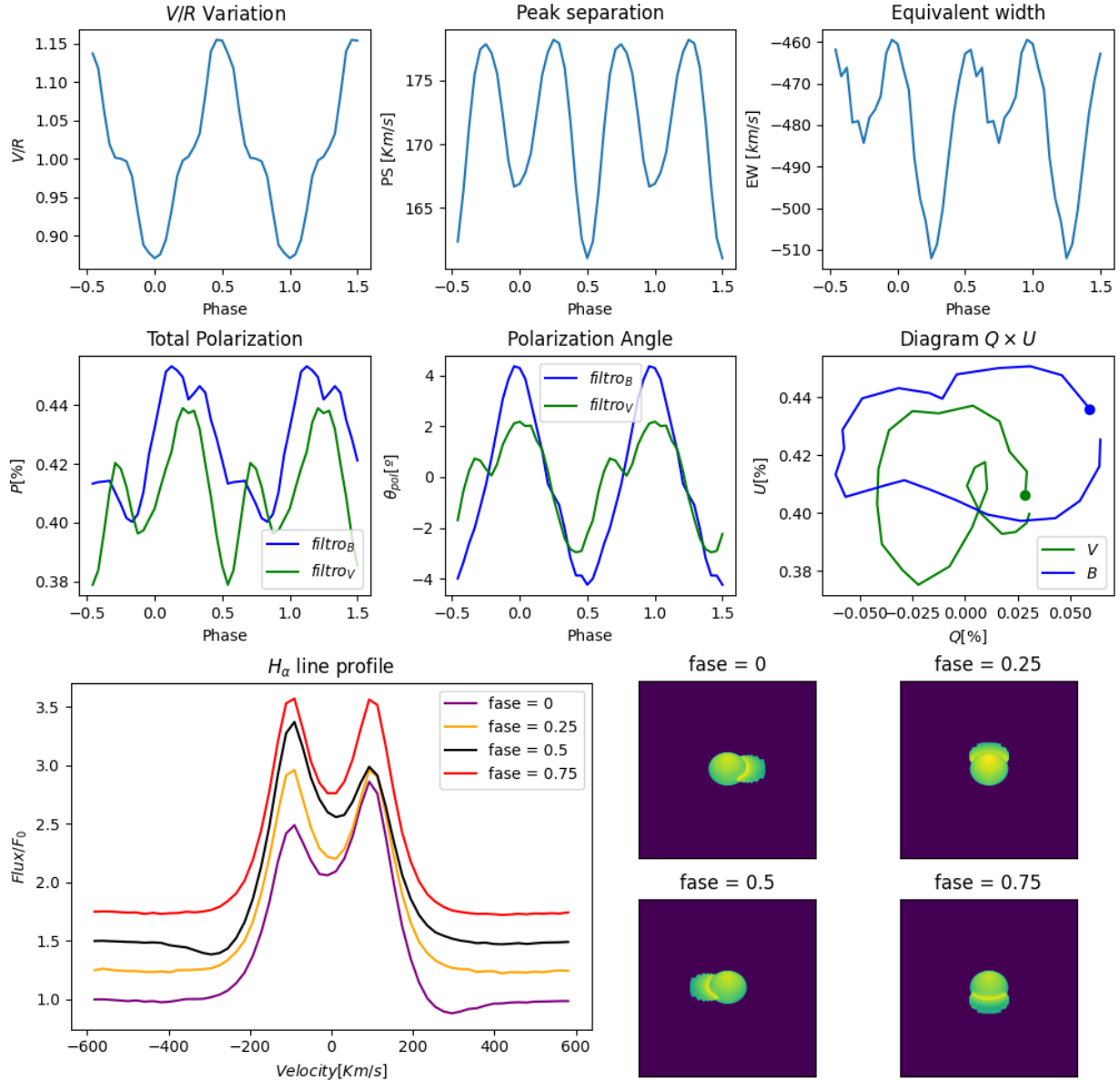


Figura 4.1: Resultados gráficos para o modelo de referência (raio do blob $1.0R$ e densidade $10n$). O ângulo inclinação é $i = 50^\circ$. Os seis painéis superiores mostram quantidades vs. fase. A primeira fileira, apresenta os observáveis de espectrografia: Variação V/R , Separação de Picos e Largura Equivalente (respectivamente da esquerda para a direita). A segunda fileira, os observáveis de polarimetria: Polarização Linear, Ângulo de Polarização e Diagrama QU (respectivamente da esquerda pra a direita). Abaixo, à esquerda, são mostrados os perfis de $H\alpha$ para diferentes fases (indicadas por cores diferentes, ver legenda) e à direita imagens na região do $H\alpha$, para as mesmas fases.

tando com o que é observado para a razão V/R . Para a largura equivalente, vale ressaltar que quanto mais negativa, mais intensa é a emissão, por convenção. Vemos um aumento de EW quando o blob está em quadratura (fases 0.25 e 0.75), quando a área emissora em $H\alpha$ fica maximizada. É importante ressaltar que a amplitude de variação para as três quantidades espectroscópicas é bastante alta, indicando que seriam facilmente detectadas

observacionalmente.

A segunda linha da Fig. 4.1 apresenta gráficos relativos à polarimetria. O primeiro (à esquerda) mostra a variação da polarização linear nas bandas B e V em função da fase. O segundo (ao centro) mostra o ângulo de polarização nas mesmas duas bandas e o último gráfico (à direita) apresenta o diagrama QU . É possível notar que os observáveis polarimétricos também modulam fortemente com a fase, sendo que tanto a polarização quanto o ângulo de polarização têm uma variação principal em um período orbital sobre a qual está sobreposta uma variação de meio período, criando padrões de variação complexos. Estes padrões se refletem na forma da curva no diagram QU , que podem ser aproximadamente elípticas ou mesmo com um formato de “pretzel”. Outro ponto interessante a observar são as diferenças quantitativas e qualitativas para as bandas B e V. Para entender o comportamento da modulação no nível de polarização, deve-se lembrar que, em um disco de Be, este aumenta com a densidade (pois cresce o número de espalhadores). Assim, espera-se que o máximo da polarização ocorra próximo às quadraturas dos blobs, o que realmente observamos. Na banda V, o menor valor de polarização é visto para a fase de 0.5, quando o blob é parcialmente ocultado pela estrela.

Vale observar que os valores de polarização (e sua variação) indicados nos gráficos são facilmente detectáveis pelos instrumentos utilizados atualmente. Por exemplo, o polarímetro IAGPOL, disponível no Observatório do Pico dos Dias (OPD/LNA) tem uma acurácia de 0.005% no nível de polarização e aproximadamente 0.4° no ângulo (Ramos, 2016).

Finalmente, a última linha de gráficos da Fig. 4.1 apresenta à esquerda os perfis de linha de $H\alpha$ para quatro fases orbitais (0, 0.25, 0.5 e 0.75). Já à direita, temos um mosaico com imagens fornecidas pelo HDUST representando posição do blob em cada uma dessas fases. Os perfis mostram claras assimetrias, que se refletem nos valores de V/R diferentes de 1 (gráfico acima e à esquerda na figura).

4.2 Efeitos do Ângulo de Inclinação

Tendo estudado o modelo de referência e identificado o comportamento dos observáveis em função da fase orbital, apresentamos a análise dos efeitos do ângulos de inclinação do observador em relação ao eixo de rotação da estrela para os diferentes observáveis. Para

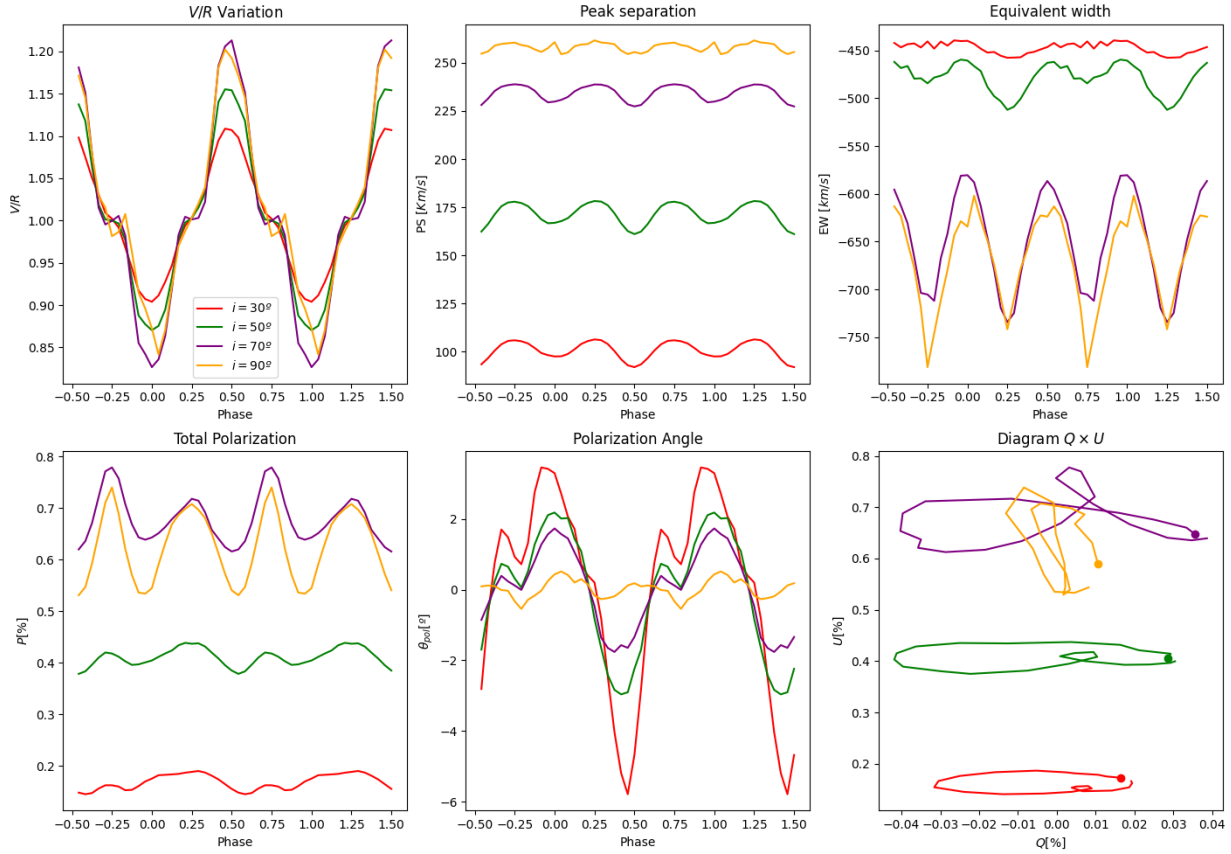


Figura 4.2: Resultados gráficos para análise dos efeitos do ângulo de inclinação do observador. É mostrada a simulação de referência (raio do blob de $1.0R$ e densidade $10n$) para diferentes ângulos de inclinação ($i = 0^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ e 90°). Na primeira fileira, apresentamos os observáveis de espectrografia: Variação V/R , Separação de Picos e Largura Equivalente (respectivamente da esquerda para a direita). Na segunda fileira, os observáveis de polarimetria: Polarização Linear, Ângulo de Polarização e Diagrama QU (respectivamente da esquerda pra a direita).

isso, mostra-se, na Fig. 4.2, o modelo de referência em diferentes ângulos de inclinação: $i = 30^\circ$, $i = 50^\circ$, $i = 70^\circ$ e $i = 90^\circ$ (*edge-on*).

Vale ressaltar que em $i = 0^\circ$ (*pole-on*) a linha de $H\alpha$ não apresentará a configuração de duplo pico (como ilustrado no perfil A da Fig. 1.1). Dessa forma, alguns dos observáveis referentes a essa linha – V/R e separação de pico – perdem o significado. Além disso, a polarização será muito pequena, embora não nula. Por esses motivos, os resultados para $i = 0^\circ$ não foram colocados na Fig. 4.2.

Vamos começar com as quantidades espectroscópicas. Nota-se que a forma da variação V/R não se altera com i , apenas sua amplitude, que aumenta com a inclinação, ou seja, a amplitude é máxima quando se observa o disco de lado. Por outro lado, para as demais quantidades (EW e separação de pico), o valor médio varia muito com i . O valor médio da separação de pico, por exemplo, aumenta com a inclinação devido ao aumento da velocidade

projetada do disco na direção da linha de visada. Isto é bastante evidente nos perfis da Fig. 1.1. Para além das variações nos valores médios com i para estes dois observáveis, vê-se uma modulação orbital em geral qualitativamente similar. Para a EW, a amplitude de variação cresce significativamente com i .

A polarização linear apresenta um comportamento muito semelhante ao da largura equivalente: tanto o valor médio quando a amplitude de P aumentam com i . O aumento do valor médio é um efeito bem conhecido em discos de Be, onde P cresce monotonicamente com i até por volta de 70° , quando cai ligeiramente (Wood et al., 1996). Nossos estudos mostram, pela primeira vez, que também a amplitude de variação cresce com i .

Curiosamente, o ângulo de polarização apresenta efeito contrário a todos os outros observáveis, pois neste caso a amplitude da variação creste significativamente à medida que i diminui. Este efeito é facilmente compreendido considerando a trajetória aparente do centro do blob no plano do céu: enquanto que para $i = 90^\circ$ esta trajetória é uma linha reta paralela ao plano do equador, para $i = 30^\circ$ ela é uma elipse com semi-eixo menor paralelo ao eixo de rotação da estrela. Os resultados se explicam, portanto, considerando-se que a variação do ângulo é uma medida da mudança da simetria aparente do sistema.

Nossos resultados para a polarização e ângulo são, portanto, ambíguos no que se refere à determinação da melhor estratégia observacional para detectar tais efeitos em objetos reais. Por um lado, a polarização linear sugere que buscas futuras desta quantidade nas observações devem priorizar estrelas vistas aproximadamente de lado. Entretanto, estrelas vistas aproximadamente de cima (*pole-on*) terão um sinal maior no ângulo de polarização.

4.3 Efeitos do Tamanho do Blob

Vamos agora explorar os efeitos do tamanho (raio) do blob. Para isso, comparamos simulações com a mesma sobredensidade ($10.0n$) e o mesmo ângulo de inclinação ($i = 50^\circ$), mas com diferentes raios de blob: $0.1R$, $0.5R$ e $1.0R$ com a Fig. 4.3. Todos os observáveis experimentam um aumento na amplitude de variação orbital, como esperado, com uma única exceção: a largura equivalente. Voltaremos a este ponto mais adiante.

Para grandezas espectroscópicas V/R e separação de pico, as diferenças entre os modelos de 0.1 e $0.5 R$ não são muito grandes, mas elas aumentam quando comparamos os modelos para 0.5 e $1 R$. Isto indica um comportamento fortemente não linear destas grandezas com

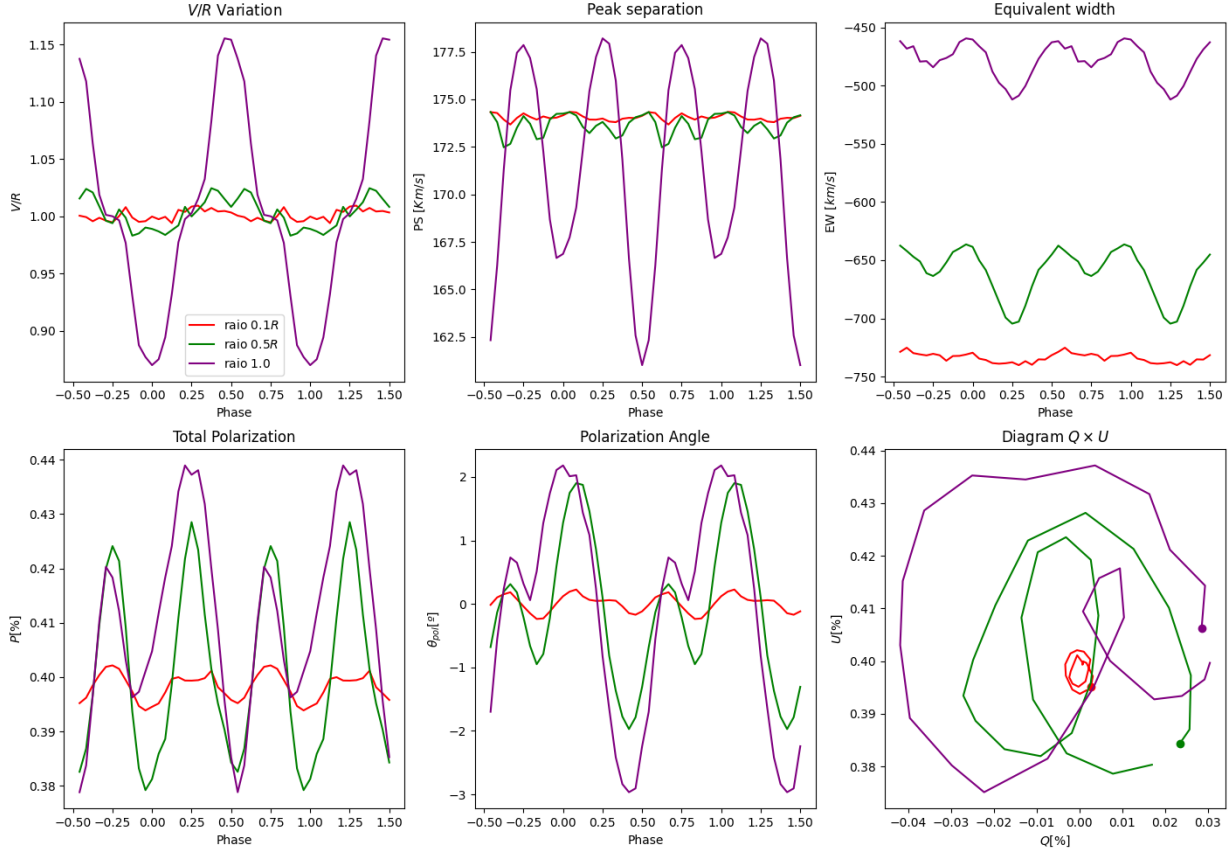


Figura 4.3: Resultados gráficos para análise dos efeitos do tamanho do blob. Simulação com densidade $10n$ fixa, em um ângulo de inclinação $i = 50^\circ$ fixo, variando o raio do blob em $0.1R$, $0.5R$ e $1.0R$. Na primeira fileira, apresentamos os observáveis de espectrografia: Variação V/R , Separação de Picos e Largura Equivalente (respectivamente da esquerda para a direita). Na segunda fileira, os observáveis de polarimetria: Polarização Linear, Ângulo de Polarização e Diagrama QU (respectivamente da esquerda pra a direita).

o tamanho do blob.

Uma situação oposta se vê para a polarização, tanto o nível quando o ângulo. Neste caso as maiores diferenças em amplitude de modulação se observam entre os modelos de 0.1 e $0.5R$ e apenas diferenças modestas entre os modelos de 0.5 e $1R$ são observadas. Novamente, como no caso anterior, isto sugere um comportamento não linear. O comportamento diferente observado entre as grandezas espectroscópicas e polarimétricas pode estar relacionado com a dependência da opacidade com a densidade. No caso da polarização, esta é controlada pela opacidade de espalhamento Thomson que depende linearmente da densidade. Já a emissividade da linha depende (aproximadamente) do quadrado da densidade. Entretanto, esta questão ainda precisa ser melhor compreendida e merece estudos mais aprofundados no futuro.

Como dissemos, a largura equivalente é uma exceção do padrão observado para os

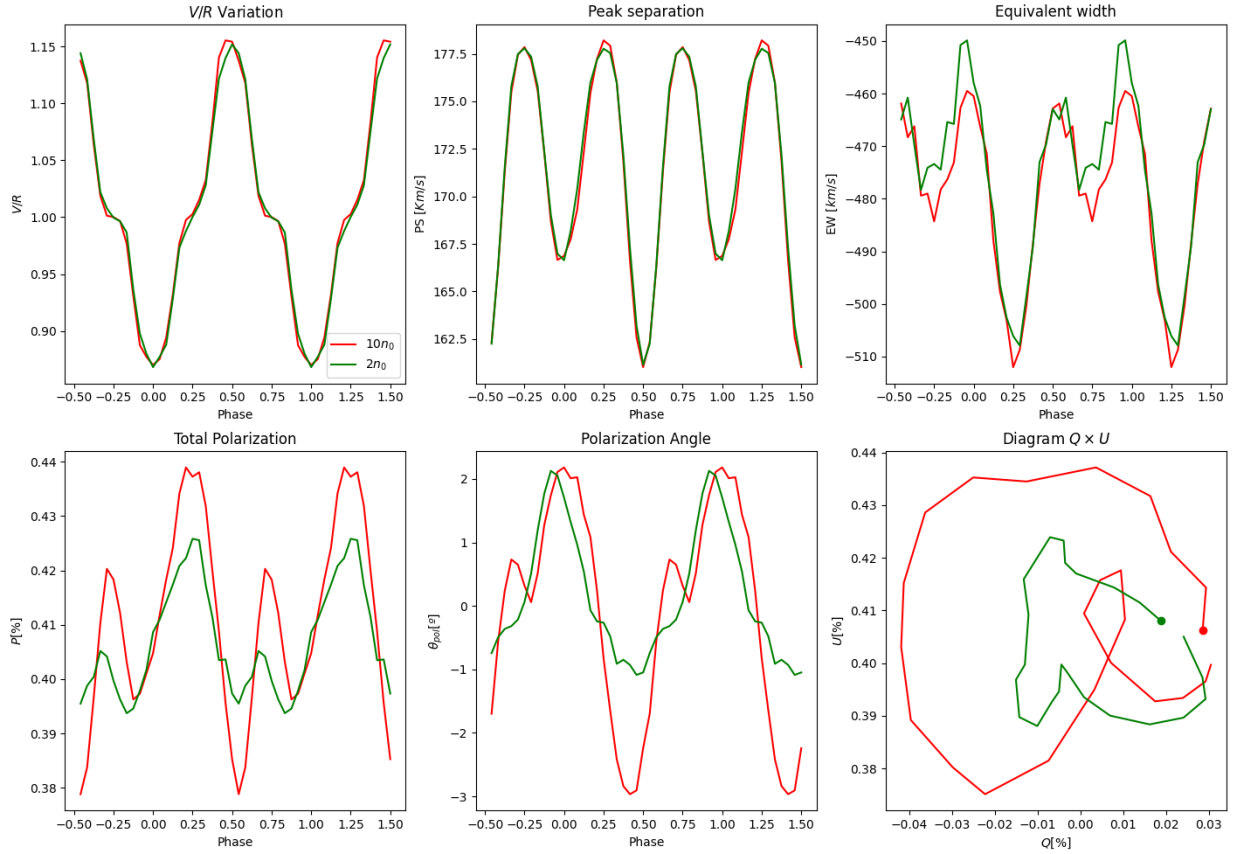


Figura 4.4: Resultados gráficos para análise dos efeitos da densidade do blob. Simulação com raio $1.0R$ fixo, em um ângulo de inclinação $i = 50^\circ$ fixo, mostrando diferentes densidades do blob ($2n$ e $10n$). Na primeira fileira, apresentamos os observáveis de espectrografia: Variação V/R , Separação de Picos e Largura Equivalente (respectivamente da esquerda para a direita). Na segunda fileira, os observáveis de polarimetria: Polarização Linear, Ângulo de Polarização e Diagrama QU (respectivamente da esquerda pra a direita).

demais observáveis, pois enquanto para estes a amplitude de variação aumenta com o tamanho de blob, para a EW a amplitude inicialmente aumenta para diminuir em seguida. Além disso, o valor médio da largura equivalente também diminui (em módulo) com o aumento do raio do blob. Este comportamento é contrário às nossas expectativas, pois a emissão da linha deveria aumentar com o tamanho da perturbação. Este resultado pode estar relacionado ao aumento da emissão no contínuo. Entretanto, como esta quantidade não foi analisada nesta monografia, não podemos afirmar no momento se este é o caso. Este é um ponto que precisará ser melhor estudado no futuro.

4.4 Efeitos da Densidade do Blob

O último dos parâmetros a ser explorado é a densidade do blob, cujo efeitos nos observáveis são mostrados na Fig. 4.4. Vemos uma diferença pouco expressiva nos resultados referentes à espectroscopia. Para a variação V/R e separação de pico os valores praticamente não mudam, enquanto que diferenças pequenas, da ordem de 10 km/s, são vistas para a largura equivalente, principalmente para a fase próxima a zero. Isto sugere o blob é opticamente espesso nos comprimentos de onda do $H\alpha$. Neste caso, a emissividade não é uma função de densidade, mas apenas da área do blob, que é mantida constante nestas simulações.

Para a polarimetria, temos diferenças mais relevantes. O nível da polarização linear apresenta variabilidade muito maior para o modelo mais denso, como esperado. O mesmo comportamento se vê para o ângulo de polarização, mas apenas para algumas fases.

Conclusões

Neste trabalho exploramos os efeitos observacionais de uma perda de massa assimétrica por estrelas Be que gera densificações locais e produz efeitos observáveis em linhas de emissão e na polarização. Na literatura, a existência destas assimetrias já foi postulada, mas este trabalho explora suas possíveis características físicas pela primeira vez.

Adotamos um modelo simplificado, que descreve o blob como uma esfera com centro no equador e dentro da qual a densidade local do disco é multiplicada por um certo fator. Exploramos o tamanho do blob e o fator de densificação, além de estudar o espectro emergente para diferentes ângulos de inclinação. Além disso, explorou-se a variação dos observáveis ao longo da fase orbital do blob.

Todos os observáveis têm forte modulação com a fase. Na análise da espectroscopia, vemos que a razão V/R tem valores máximos e mínimos nas fases orbitais em que a assimetria é máxima, ou seja, quando o blob está em quadratura. Já nas fases em que o blob está alinhado com o observador, $V/R = 1$. A maioria dos nossos modelos produziram variações espectroscópicas passíveis de serem detectadas observacionalmente.

Em discos de estrelas Be a polarização aumenta com a densidade do disco e com o seu grau de assimetria aparente. Desta forma, o máximo observado da variação no nível de polarização também se deu próximo às quadraturas dos blobs, como esperado.

A análise da influência do ângulo de inclinação do observador revelou que a razão V/R e EW têm a amplitude de variação aumentando com a inclinação, devido ao aumento da velocidade projetada na direção da linha de visada.

A polarização linear também tem o valor médio e amplitude aumentando com i . O aumento do valor médio é um efeito conhecido em discos de Be, já o aumento da amplitude de variação é visto pela primeira vez em nossos estudos.

O aumento do tamanho (raio) do blob afeta diretamente os valores dos observáveis, causando um aumento na amplitude de variação orbital. Para as grandezas espectroscópicas, temos V/R e a separação de picos com as maiores diferenças entre os modelos de 0.5 e 1 R , indicando comportamento não linear dessas quantidades com o tamanho do blob. Entretanto, na polarimetria, temos as maiores diferenças em amplitude de modulação entre os modelos de 0.1 e 1 R , indicando novamente um comportamento não linear. A diferença observada entre as grandezas espectroscópicas e polarimétricas deve ser melhor entendida com estudos mais aprofundados no futuro.

Finalmente, concluímos com a análise dos modelos com diferentes valores de sobre densidade ($2.0n$ e $10.0n$) que o blob é opticamente espesso nos comprimentos de onda do $H\alpha$, pois os observáveis da espectroscopia não apresentam grandes alterações de valor médio ou amplitude, sugerindo que a emissividade é uma função apenas da área do blob.

Nossos modelos apresentam um primeiro panorama de como as densificações locais em discos de estrelas Be podem afetar os observáveis. Naturalmente, a questão inversa se apresenta: dado um conjunto de observações, qual deve ser a natureza das densificações a ele associadas? Esta é uma questão fundamental que será explorada no futuro trabalho de pós-graduação da candidata.

Referências Bibliográficas

- Bjorkman J. E., Carciofi A. C., Modeling the Structure of Hot Star Disks. In The Nature and Evolution of Disks Around Hot Stars , vol. 337 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2005, p. 75
- Carciofi A. C., Bjorkman J. E., Non-LTE Monte Carlo Radiative Transfer. I. The Thermal Properties of Keplerian Disks around Classical Be Stars, ApJ, 2006, vol. 639, p. 1081
- Carciofi A. C., Magalhães A. M., Leister N. V., Bjorkman J. E., Levenhagen R. S., Acher-nar: Rapid Polarization Variability as Evidence of Photospheric and Circumstellar Ac-tivity, ApJ, 2007, vol. 671, p. L49
- Carroll B. W., Ostlie D. A., An Introduction to Modern Astrophysics 2nd (international) edn, 2007
- de Almeida E. S. G., Meilland A., Domiciano de Souza A., Stee P., Mourard D., Nardetto N., Ligi R., Tallon-Bosc I., Faes D. M., Carciofi A. C., Bednarski D., Mota B. C., Turner N., ten Brummelaar T. A., Visible and near-infrared spectro-interferometric analysis of the edge-on Be star o Aquarii, A&A, 2020, vol. 636, p. A110
- Labadie-Bartz J., Carciofi A. C., Henrique de Amorim T., Rubio A., Luiz Figueiredo A., Ticiani dos Santos P., Thomson-Paressant K., Classifying Be Star Variability With TESS. I. The Southern Ecliptic, AJ, 2022, vol. 163, p. 226
- Okazaki A. T., Bate M. R., Ogilvie G. I., Pringle J. E., Evolution of truncated decretion disks in Be/X-Ray binaries. In The Physics of Cataclysmic Variables and Related Objects , vol. 261 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2002, p. 519

- Ramos D. B., Polarimetria de estrelas Be próximas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - Universidade de São Paulo, 2016, Dissertação de Mestrado, 211
- Richardson N. D., Thizy O., Bjorkman J. E., Carciofi A., Rubio A. C., Thomas J. D., Bjorkman K. S., Labadie-Bartz J., Genaro M., Wisniewski J. P., et al., Outbursts and stellar properties of the classical Be star HD 6226, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, vol. 508, p. 2002
- Rímulo L. R., Carciofi A. C., Vieira R. G., Rivinius T., Faes D. M., Figueiredo A. L., Bjorkman J. E., Georgy C., Ghoreyshi M. R., Soszyński I., The life cycles of Be viscous decretion discs: fundamental disc parameters of 54 SMC Be stars, *MNRAS*, 2018, vol. 476, p. 3555
- Rivinius T., Carciofi A. C., Martayan C., Classical Be stars. Rapidly rotating B stars with viscous Keplerian decretion disks, *A&A Rev.*, 2013, vol. 21, p. 69
- Suffak M. W., Jones C. E., Tycner C., Henry G. W., Carciofi A. C., Mota B. C., Rubio A. C., The Large-scale Behavior in the Disk of δ Scorpii from 2000 to 2018, *ApJ*, 2020, vol. 890, p. 86
- Vieira R. G., Carciofi A. C., Bjorkman J. E., Rivinius T., Baade D., Rímulo L. R., The life cycles of Be viscous decretion discs: time-dependent modelling of infrared continuum observations, *MNRAS*, 2017, vol. 464, p. 3071
- Wood K., Bjorkman J. E., Whitney B., Code A., The Effect of Multiple Scattering on the Polarization from Axisymmetric Circumstellar Envelopes. II. Thomson Scattering in the Presence of Absorptive Opacity Sources, *ApJ*, 1996, vol. 461, p. 847
- Wood K., Bjorkman K. S., Bjorkman J. E., Deriving the Geometry of Be Star Circumstellar Envelopes from Continuum Spectropolarimetry. I. The Case of ζ Tauri, *ApJ*, 1997, vol. 477, p. 926