



Universidade Federal de Sergipe

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

Departamento de Física

Curso de Física: Astrofísica

Letícia Rocha Vasconcelos

**Um estudo do parâmetro de viscosidade do disco da estrela
Be ABE A26**

Trabalho de Conclusão de Curso

**São Cristóvão - SE
Brasil
2025**

Letícia Rocha Vasconcelos

Um estudo do parâmetro de viscosidade do disco da estrela Be ABE A26

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Física da Universidade Federal de Sergipe, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Física: Astrofísica

Orientador: Rodrigo Georgetti Vieira

Dedico este trabalho
À minha perseverança.
À minha família.
À meu orientador.
Aos meus amigos.

Agradecimentos

O caminho até o fim do curso e ao destino dos meus sonhos é árduo, e eu não teria conseguido chegar a esta etapa sem o apoio e a inspiração de pessoas muito importantes, pelas quais serei eternamente grata.

Inicialmente, quero agradecer à minha família, que sempre foi meu porto seguro. Às minhas tias Alana, Alessandra e Flávia, que me fazem sentir amada e me mostram que tenho um lugar especial no mundo desde pequena, agradeço também a seus cônjuges, Elson e Wesley. Agradeço à minha avó Tânia, que é uma das maiores fontes de inspiração e amor da minha vida. À minha avó Vera, que, apesar de não poder estar conosco neste momento, tornou possível minha educação de qualidade. Aos meus avôs, Clebio e Alexandre, agradeço por toda a sabedoria transmitida; o primeiro não pôde estar conosco nesta etapa, mas deixou grande impacto em minha vida. Agradeço também às minhas tias-avós, tanto por parte de pai quanto por parte de mãe. Ao meu irmão, agradeço por mudar minha forma de ver a vida com seu nascimento.

Em especial, deixo meus agradecimentos aos meus pais, Fábiana e Felipe, que, apesar de estarem distantes nesta etapa, desde o meu nascimento se esforçaram para que eu tivesse o melhor de tudo e alcançasse sucesso na vida. É impossível agradecer o suficiente.

Dedico um agradecimento especial a uma das pessoas mais importantes da minha vida e que foi vital para esta conquista: meu namorado, Pedro Ítalo. Obrigada por toda a ajuda nesta etapa, por cada ensinamento, pela motivação e pela paciência comigo. Agradeço também à sua mãe, Cleides Maria, e às suas irmãs, Perlla e Ana, que me acolheram como parte da família.

Agradeço aos meus amigos pelos momentos não só de apoio, mas também de distração. Alguns foram essenciais para a conquista desta etapa, como Georgiana, Kely, Katlyn, Laryssa, Amanda Letícia, Alexandre Silva, Isis, José Yuri, Eliz, Cameron, Sabrina, Emmanuel, Matheus Augusto, Arielly, Cinthya, Guilherme, Pedro Levi, Élcio e Amanda Araújo. Vocês são incríveis e os levarei no meu coração para a vida toda.

Por fim, agradeço ao meu orientador, Rodrigo Vieira, que há cinco anos me apresentou à melhor área da astrofísica e, desde então, tem sido uma grande fonte de inspiração e sabedoria.

Nunca conseguirei agradecer a todos vocês o suficiente!

“A esperança é a única coisa mais forte do que o medo.”

(Suzanne Collins)

Resumo

Embora a viscosidade desempenhe um papel fundamental na difusão de discos astrofísicos, ainda não somos capazes de deduzir suas propriedades a partir de primeiros princípios. Por isso, a busca por vínculos observacionais sobre o seu comportamento representa um passo importante para sua compreensão. Neste trabalho, investigamos o parâmetro de viscosidade (α) do disco da estrela Be ABE A26 (MWC 109) com o objetivo de impor vínculos empíricos sobre ele e verificar sua variabilidade temporal. Utilizamos a distribuição espectral de energia (SED) da estrela e dados fotométricos do projeto KELT. Através do ajuste da SED foi possível determinar os parâmetros estelares, tais como massa, razão entre raio equatorial e polar e distância. Esses ajustes forneceram valores compatíveis com valores apresentados na literatura, entre eles, massa de $10,0 \pm 1,0 M_{\odot}$ e razão entre o raio equatorial e polar de $1,36 \pm 0,20$. Modelamos a curva de luz de 6 diferentes momentos de formação/dissipação do disco com auxílio de cenários de disco simulados com o código hidrodinâmico *SINGLEBE*. Os principais resultados dessa etapa incluem valores de $\log \alpha$ entre 0,15 e 0,55, e valores de densidade de base do disco, $\log \Sigma_0 [g \text{ cm}^{-2}]$, entre $-0,40$ e $0,87$. Os valores encontrados para o parâmetro de viscosidade foram um pouco maiores do que os normalmente apresentados na literatura, sendo um possível resultado dos baixos valores de tempo de desenvolvimento do disco. Como perspectivas, pretendemos estudar os primeiros *outbursts* deste objeto observados pelo KELT, cujas magnitudes iniciais são menores que aquelas dos eventos investigados neste trabalho. Por fim, planejamos aplicar a metodologia aqui desenvolvida em toda a amostra de estrelas Be observadas pela missão KELT, e eventualmente para outras missões observacionais.

Palavras Chaves: Astrofísica, Estrelas, Discos, Viscosidade.

Abstract

Although viscosity plays a fundamental role in the diffusion of astrophysical disks, we are still unable to derive its properties theoretically from first principles. Therefore, the search for observational constraints on its behavior represents an important step towards its understanding. In this work, we investigated the viscosity parameter (α) of the disk around the Be star ABE A26 (MWC 109), to place empirical constraints on it and examine its temporal variability. We used the star's spectral energy distribution (SED) and photometric data from the KELT project. By fitting the SED, we determined stellar parameters such as mass, equatorial-to-polar radius ratio, distance, among other parameters relevant to disk modeling. These fits yielded values consistent with the literature, including a mass of $10.0 \pm 1.0 M_{\odot}$ and a radius ratio of 1.36 ± 0.20 . We then modeled the light curve at six different epochs of disk formation/dissipation using simulated disk scenarios with the hydrodynamic code *SINGLEBE*. The main results of this analysis include values of $\log \alpha$ between 0.15 and 0.55, and $\log \Sigma_0 [g \text{ cm}^{-2}]$ (disk base density) between -0.40 and 0.87 . The viscosity parameter values found are slightly higher than those typically reported in the literature, which may be a consequence of the short disk development timescales. As future work, we intend to study the initial outbursts of this object observed by KELT, whose early magnitudes are brighter than those of the events analyzed here. Finally, we plan to apply the methodology developed in this study to the full sample of Be stars observed by the KELT mission, and, eventually, to other observational surveys.

Keywords: Astrophysics, Stars, Disks, Viscosity.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Estrelas Be	1
1.2	O parâmetro de viscosidade	2
1.3	O caso de ABE A26	4
1.4	Objetivos	4
2	Metodologia	6
2.1	Dados observacionais	6
2.2	Ferramentas teóricas	7
2.2.1	Estrutura radial do disco	7
2.2.2	Disco fino estacionário	10
2.2.3	<i>SINGLEBE</i>	11
2.2.4	Transferência radiativa	11
2.3	A curva de luz de ABE A26	13
2.4	Método estatístico de <i>Markov Chain Monte Carlo</i>	13
3	Resultados e Discussão	16
3.1	Parâmetros estelares	16
3.2	Ajuste da curva de luz	17
3.3	Discussão	19
4	Conclusões	29
	Referências	31

Lista de Figuras

1.1	Curva de luz da estrela ω CMa na banda V indicando 4 episódios de construção e perda do disco circunstelar. A linha sólida demarca a evolução da magnitude de base (apenas da estrela, sem disco). Imagem feita por Ghoreyshi et al. (2018).	3
1.2	Curva de luz da estrela ABE A26, contendo 18 episódios de <i>outburst</i> . A linha preta sólida mostra a diminuição da magnitude aparente de base (apenas a estrela, sem disco) para os 4 primeiros episódios. O tempo se encontra em unidades de dia juliano modificado, JD-2450000.	4
2.1	Evolução temporal da densidade superficial do disco, cuja forma inicial era um anel. Para estes cálculos considerando o caso de uma viscosidade constante. No eixo x temos a razão entre R e R_0 e no eixo y temos a densidade superficial do disco. As diferentes cores do gráfico representam diferentes valores de τ	10
2.2	Eventos de <i>outburst</i> da estrela ABE A26 observados pela missão KELT. O número de cada evento se encontra no canto direito superior de cada painel. Os quatro primeiros eventos foram omitidos, por possuírem o patamar de brilho mínimo acima dos demais ($V > 8.4$). Em todos os gráficos, o eixo x representa o tempo, em dias julianos modificados, e o eixo y representa a magnitude V aparente em uma escala invertida.	14
3.1	Painel superior: ajuste de modelo da SED da estrela ABE A26. Os pontos pretos são os dados observacionais, a linha em azul corresponde ao ajuste do modelo, e o eixo y representa o fluxo em escala logarítmica. Painel inferior: Gráfico de resíduos (diferença entre SED observada e modelada) normalizado pela incerteza. As linhas pontilhadas horizontais representam a região de confiança de 1σ . Em ambos os painéis, o eixo x mostra o comprimento de onda em escala logarítmica.	17
3.2	Gráfico de correlação dos parâmetros da estrela ABE A26. Os contornos escolhidos para os gráficos de correlação correspondem aos intervalos de confiança de 1, 2 e 3 σ	18

3.3	Ajuste da curva de luz e gráfico de correlação dos parâmetros para o momento de <i>outburst</i> 5.	21
3.4	Ajuste da curva de luz e gráfico de correlação dos parâmetros para o momento de <i>outburst</i> 6.	22
3.5	Ajuste da curva de luz e gráfico de correlação dos parâmetros para o momento de <i>outburst</i> 9.	23
3.6	Ajuste da curva de luz e gráfico de correlação dos parâmetros para o momento de <i>outburst</i> 13.	24
3.7	Ajuste da curva de luz e gráfico de correlação dos parâmetros para o momento de <i>outburst</i> 16.	25
3.8	Ajuste da curva de luz e gráfico de correlação dos parâmetros para o momento de <i>outburst</i> 17.	26
3.9	Evolução temporal do parâmetro $\log \alpha$ ajustado. As estimativas de incerteza são menores do que os símbolos adotados.	27
3.10	Evolução temporal do parâmetro $\log \Sigma_o$ ajustado. As estimativas de incerteza são menores do que os símbolos adotados.	27
3.11	Gráfico com os valores obtidos para os parâmetros físicos do disco em cada um dos momentos de <i>outburst</i> . O eixo x está representando o parâmetro $\log \Sigma_0$, o eixo y está representando o parâmetro $\log \alpha$ e a escala de cor representa a evolução temporal. As estimativas de incerteza são menores do que os símbolos adotados.	28

Lista de Tabelas

- 3.1 Valores dos parâmetros estelares obtidos com o da SED. Na segunda coluna temos os valores encontrados com o ajuste original, enquanto na terceira estão os valores encontrados apenas para as soluções que reproduzem a magnitude de base da estrela. 17
- 3.2 Resultados do ajuste das curvas de luz dos 6 momentos de *outburst* da estrela ABE A26. O primeiro parâmetro representa a medida de viscosidade do disco. O segundo corresponde à densidade de base do disco. O terceiro representa o tempo de início da formação do disco nesse evento. O último corresponde à quantidade de dias entre o início da formação e o início da dissipação do disco. 19

1.1 Estrelas Be

Em 1866, o astrônomo e padre italiano Angelo [Secchi \(1866\)](#) descobriu a primeira estrela Be, Gamma Cassiopeiae, ao observar que seu espectro possuía linha de emissão. Esse foi o marco inicial para uma área de estudos que até hoje, quase 160 anos depois, nos gera tantas indagações.

As Be são estrelas de alta massa, pertencentes à sequência principal, com massas variando entre 3 e 20 vezes a massa do Sol e temperaturas efetivas de 10 a 30 mil Kelvin ([Habets & Heintze 1981](#)). Essas estrelas possuem ou já possuíram um disco circunstelar de gás quase Kepleriano, formado por material ejetado de sua superfície de forma episódica, cuja evolução dinâmica é governada por um processo de difusão viscosa ([Haubois et al. 2012](#)). Esses discos fazem com que elas apresentem linhas espectrais de emissão ([Collins et al. 1987](#); [Jaschek & Egret 1982](#)).

A rotação estelar próxima à velocidade crítica ([Rivinius 2013](#)) causa um achatamento, e é um dos responsáveis pela ejeção de matéria que eventualmente forma um disco. O estudo de estrelas Be fornece informações valiosas sobre a física de estrelas de alta massa, de alta velocidade de rotação e seus efeitos na evolução desses objetos.

A origem dos discos ainda é motivo de muito debate. Mas independentemente de como o material é ejetado, outro mecanismo é necessário para distribuir o material através do disco. O modelo de disco viscoso de decréscimo, sugerido primeiramente em 1991 ([Lee et al. 1991](#)), usa o transporte de momento angular por viscosidade turbulenta para levar matéria para órbitas maiores (mais afastadas), aumentando o tamanho do disco. A importância no entendimento da física dos discos está além desses objetos. Discos viscosos são comuns em outros ambientes astrofísicos, como ao redor de estrelas jovens em formação ou buracos negros que acretam matéria.

1.2 O parâmetro de viscosidade

A viscosidade (ν) é essencial para descrever como a matéria se move do objeto central para regiões externas do disco, ou seja, como esse fluido do disco é espalhado através do transporte de momento angular. Essencialmente, ela controla a *escala de tempo* da difusão do material ejetado da superfície estelar. Ela foi parametrizada por [Shakura & Sunyaev \(1973\)](#) como uma relação da escala de altura do disco (H), velocidade do som isotérmica (c_s) e α , que é um parâmetro livre adimensional, e que varia entre 0 e 1:

$$\nu = \alpha c_s H.$$

Os princípios físicos que determinam a viscosidade ainda não são totalmente compreendidos. Contudo, a imposição empírica de vínculos sobre seus valores constitui um passo importante para o seu entendimento. Por isso, ela é a peça-chave deste trabalho. A viscosidade já foi objeto de vários estudos anteriores, como os mencionados a seguir.

[Haubois et al. \(2012\)](#) estudaram os efeitos fotométricos das taxas de injeção de matéria variáveis na estrutura do disco, usando um modelo unidimensional dependente do tempo para discos viscosos, combinado com um código de transferência radiativa Monte Carlo. Esse trabalho foi o primeiro de uma série de trabalhos cujo objetivo foi estudar a possibilidade de inferir diversos parâmetros estelares e do disco ao acompanhar a evolução de diversas variáveis, como a densidade superficial do disco e a taxa de injeção de massa.

Em seguida, [Carciofi et al. \(2012\)](#) ajustaram modelos dinâmicos para a curva de uma estrela Be específica, ω CMa, em um episódio de construção e dissipação do disco que ocorreu no início dos anos 2000. Esse trabalho é de suma importância e vale a pena ser ressaltado por ser o primeiro a quantificar a viscosidade em discos de estrelas Be.

Em 2018, [Ghoreyshi et al. \(2018\)](#) publicaram um estudo significativo sobre a estrela Be ω CMa, usando quatro décadas de dados fotométricos de banda V para modelar quatro ciclos completos de formação e dissipação de seu disco circunstelar. Na Fig. 1.1 podemos observar a curva de luz dessa estrela. Esse trabalho simulou com sucesso o brilho variável da estrela usando um modelo hidrodinâmico baseado em disco de decréscimo viscoso (VDD), confirmando sua eficiência para descrever a evolução estrutural do disco. Esse estudo foi importante para a área de estrelas Be por alguns motivos, entre eles, que a viscosidade do disco não é constante entre os ciclos e dentro deles, com valores mais altos durante as fases de formação do disco. Finalmente, esses autores reportaram uma taxa de ejeção de massa que pode ser decomposta em duas componentes: uma de variação lenta, que altera os menores níveis de fluxo, e outra rápida, dominada por *outbursts* de formação e dissipação do disco. A variação lenta é indicada pela linha reta preta sobreposta à Figura 1.1.

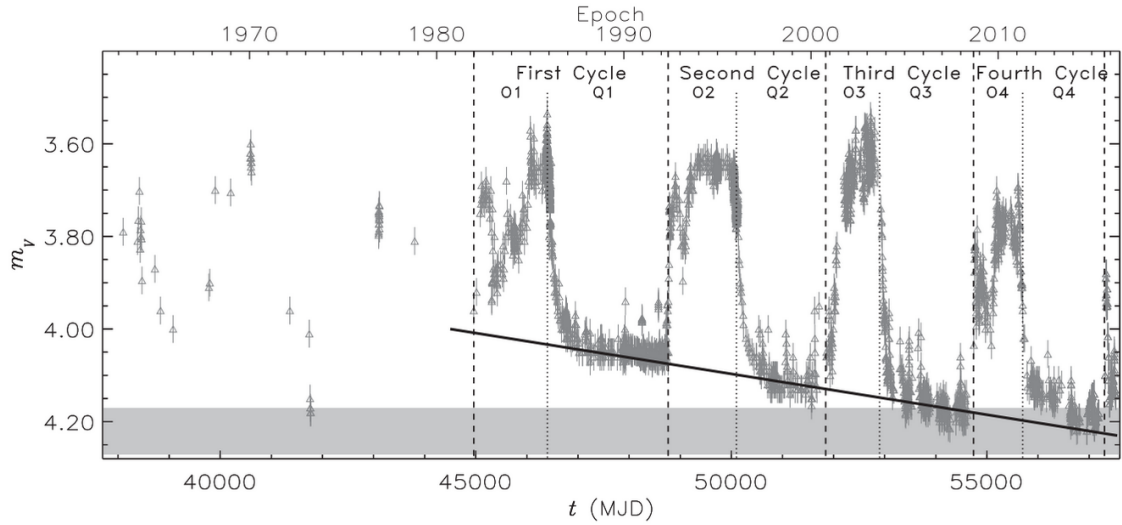


Figura 1.1: Curva de luz da estrela ω CMa na banda V indicando 4 episódios de construção e perda do disco circunstelar. A linha sólida demarca a evolução da magnitude de base (apenas da estrela, sem disco). Imagem feita por Ghoreyshi et al. (2018).

O trabalho de Labadie-Bartz et al. (2018), assim como os demais, focou no estudo de estrelas Be clássicas e seus episódios de *outburst*. Nele foram utilizados os dados gerados pela missão observacional KELTⁱ, que monitora a fotometria de estrelas brilhantes. Nesse trabalho, eles almejavam as estrelas da nossa galáxia e visaram compreender as propriedades gerais desses episódios e como os discos dessas estrelas crescem e se dissipam. Para isso, os autores analisaram curvas de luz e espectros. Alguns resultados foram bem importantes e valem a pena ser ressaltados, como: a tendência de maior duração (duas vezes maior) dos momentos de dissipação do disco do que dos de formação, e a propensão de que os momentos de dissipação nas regiões internas do disco sejam relativamente mais lentos para estrelas do tipo tardio.

Finalmente, mencionamos o trabalho de Rímulo et al. (2018). Seu objetivo foi oferecer pela primeira vez um estudo detalhado da evolução temporal de uma grande amostra de estrelas Be da Pequena Nuvem de Magalhães. Para atingir esse objetivo, os autores desse trabalho dividiram a metodologia em duas etapas principais. Na primeira, calcularam curvas de luz (evolução temporal da variação do brilho) sintéticas com a ajuda de modelos hidrodinâmicos e transferência radiativa. E na segunda, ajustaram curvas de luz reais com uma equação empírica desenvolvida por eles. Esse trabalho contribuiu para a compreensão de alguns aspectos importantes dos discos, como a diferença nos valores do parâmetro da viscosidade para o momento de formação e dissipação do disco.

ⁱ <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/KELT.html>

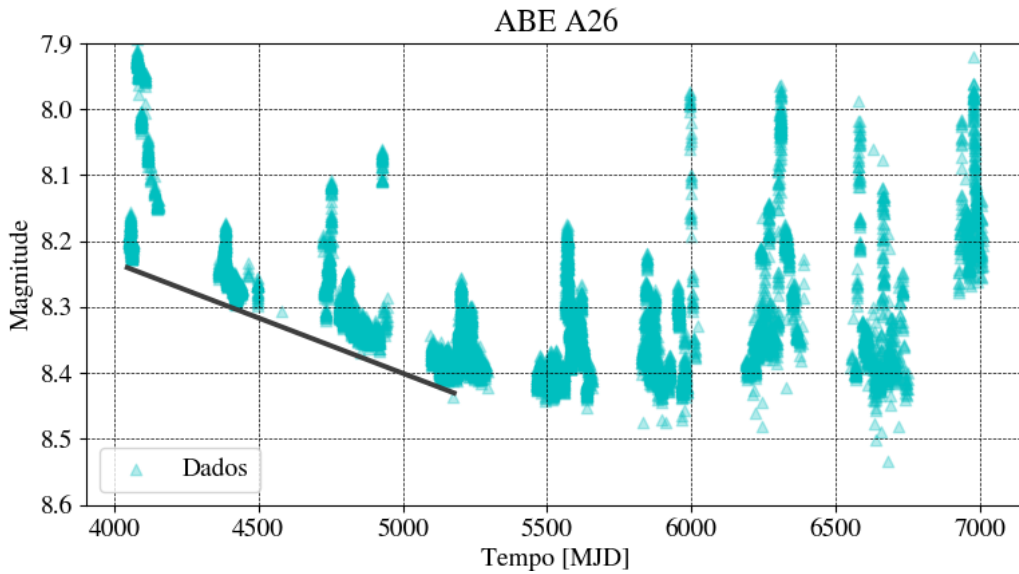


Figura 1.2: Curva de luz da estrela ABE A26, contendo 18 episódios de *outburst*. A linha preta sólida mostra a diminuição da magnitude aparente de base (apenas a estrela, sem disco) para os 4 primeiros episódios. O tempo se encontra em unidades de dia juliano modificado, JD-2450000.

1.3 O caso de ABE A26

A estrela ABE A26 (na nomenclatura do KELT), ou MWC 109, é uma estrela Be que se destaca pela alta variabilidade do seu disco. Dentro de um intervalo de aproximadamente 8 anos, ela passou por 18 eventos sucessivos de formação/dissipação (*outburst*) do disco (Labadie-Bartz et al. 2018). É possível observar esses eventos na Fig. 1.2. De 2006 a 2014 foram observados 40 eventos de *outburst*. Essa alta variabilidade a faz ser um ótimo candidato para estudarmos as propriedades da viscosidade do disco. Seu tipo espectral é B1.0II/IIIe e sua magnitude aparente de base (apenas a estrela) se encontra em torno de 8,4, chegando a alcançar $7,918 \pm 0,028$ em alguns de seus picos de brilho, no máximo da fase de formação de disco.

1.4 Objetivos

Os discos viscosos estão presentes em diversas áreas da astronomia, tais como, discos protoplanetários, discos ao redor de anãs brancas acrentantes e discos de acreção ao redor de buracos negros. Os discos de estrelas Be possuem uma variabilidade acessível para tempo de estudo, diferente de alguns dos outros discos citados, tornando o seu estudo uma escolha ótima.

O presente trabalho teve como objetivo explorar e estudar o parâmetro de viscosidade para o disco da estrela ABE A26, para assim impor vínculos empíricos sobre essa grandeza ainda fisicamente pouco compreendida. Ademais, pretendemos verificar a variabilidade do parâmetro de viscosidade, similar ao relatado para ω CMa por Ghoreyshi et al. (2018).

Finalmente, observamos que a escolha deste objeto específico se deve ao fato dele ter

apresentado o maior número de *outbursts* da amostra estudada por [Labadie-Bartz et al. \(2018\)](#). A riqueza de dados disponibilizados pela missão KELT para este objeto representa uma oportunidade valiosa para o estudo da viscosidade de discos ao redor de estrelas Be.

Nesse capítulo apresentamos os dados observacionais e as ferramentas que foram utilizadas neste trabalho. Para alcançar nossos objetivos, tivemos duas etapas principais em aspectos metodológicos: (i) ajuste da distribuição espectral de energia (SED) da estrela por modelos vindos de uma grade com mais de 20 mil SED's sintéticas; e (ii) ajuste das curvas de luz dos momentos de *outburst* com auxílio do código hidrodinâmico *SINGLEBE* em conjunto com um código de aplicação das equações de transferência radiativa e do método estatístico *Markov Chain Monte Carlo*.

2.1 Dados observacionais

Para atingir os propósitos deste trabalho foram utilizados dois tipos de conjunto de dados: curvas de luz e distribuições espectrais de energia (SED's). Foi utilizada a base de dados *VizieR*ⁱ, publicada por Labadie-Bartz, para ter acesso ao catálogo de curvas de luz do conjunto de observatórios do *KELT*. A justificativa da escolha deste telescópio específico, cujo objetivo é a descoberta de novos exoplanetas através do método de trânsito (Pepper 2007), está na sua eficácia em observar objetos muito brilhantes, que, como relatado na introdução deste trabalho, é uma das características das estrelas Be. Já para a obtenção das SED's foi utilizado o observatório virtual *VOSA*ⁱⁱ (Bayo et al. 2008). Ele combina grandes bases de dados, métodos estatísticos avançados e automação em uma interface acessível.

Diferentes tipos de orientação da estrela (com o polo em nossa direção, ou seja, *pole-on*; com o equador em nossa direção, ou seja, *edge-on*; ou em uma posição intermediária entre as duas) alteram o perfil da curva de luz. A orientação *pole-on* resulta em *bump*, num aumento do brilho à medida que o disco está sendo formado, e diminuição à medida que ele vai se dissipando. O contrário ocorre com a orientação *edge-on*, devido à ocultação de parte do disco pela própria estrela, tendo uma diminuição no brilho à medida que o disco está se formando e aumentando à medida que ele vai se dissipando.

ⁱ <https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR-3?-source=J/AJ/155/53/table3&-out.max=50&-out.form=HTML%20Table&-oc.form=sexa>

ⁱⁱ <http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/vosa/>

2.2 Ferramentas teóricas

Para entender o funcionamento do *SINGLEBE* apresentamos nesta seção algumas equações relacionadas a um disco viscoso. Essa revisão é baseada nos trabalhos de [Dominik \(2015\)](#), [Frank et al. \(2002\)](#) e [Bjorkman & Carciofi \(2005\)](#).

2.2.1 Estrutura radial do disco

Consideramos nesta discussão a dinâmica de um disco fino. Assumiremos as coordenadas cilíndricas (R, ϕ, z) nas deduções a seguir, e que a matéria se move com velocidade angular Ω em círculos ao redor da estrela, cuja massa é M e o raio é R_* . A velocidade angular Ω é considerada Kepleriana, tal que:

$$\Omega = \Omega_K(R) = \left(\frac{GM}{R^3} \right)^{1/2}. \quad (2.1)$$

Temos que a velocidade circular é dada por:

$$v_\phi = R\Omega_K(R). \quad (2.2)$$

É importante assumir também que o gás possui uma pequena velocidade radial de escoamento v_R , que será positiva perto da estrela central, devido ao fato da matéria estar fluindo de dentro para fora. O disco é caracterizado pela sua densidade superficial $\Sigma(R, t)$, que é massa por unidade de área do disco, e corresponde à integral da densidade do gás ρ na direção z .

$$\Sigma(R, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{gas}(R, z) dz \quad (2.3)$$

Um anel de material localizado entre R e $R + \Delta R$ tem massa total equivalente a $2\pi R \Delta R \Sigma$, e momento angular total de $2\pi R \Delta R \Sigma R^2 \Omega$. Temos que a mudança de ambos os valores é dada pelo fluxo de rede dos anéis vizinhos. Com isso, temos a variação da massa do anel:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (2\pi R \Delta R \Sigma) &= v_R(R, t) 2\pi R \Sigma(R, t) - v_R(R + \Delta R, t) \\ &\quad \times 2\pi (R + \Delta R) \Sigma(R + \Delta R, t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\cong -2\pi \Delta R \frac{\partial}{\partial R} (R \Sigma v_R). \quad (2.5)$$

No limite em que $\Delta R \rightarrow 0$, obtemos a equação da conservação da massa (equação de

continuidade):

$$R \frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial R}(R \Sigma v_R) = 0. \quad (2.6)$$

Seguindo a mesma lógica para o momento angular, apenas adicionando o torque viscoso, temos:

$$R \frac{\partial}{\partial t}(R^2 \Omega \Sigma) + \frac{\partial}{\partial R}(R^2 \Omega \cdot R \Sigma v_R) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial G}{\partial R}, \quad (2.7)$$

sendo $G(R, t)$ correspondente ao torque viscoso

$$G(R, t) = 2\pi R v \Sigma R^2 \Omega'. \quad (2.8)$$

Relembramos brevemente os conceitos de torque e torque viscoso para melhor entendimento. Uma força que age no centro de massa de um corpo irá causar um movimento retilíneo. Porém, se a mesma força agir em um ponto fora do centro de massa, o corpo irá começar a rotacionar ([Dominik 2015](#)).

Definindo o torque e a relação para v_R (velocidade radial do material) em termos de outras variáveis, é determinada a estrutura do disco na direção radial. Usando a Eq. 2.6 de conservação da massa, podemos simplificar a equação de conservação do momento angular

$$R \Sigma v_R (R^2 \Omega)' = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial G}{\partial R}, \quad (2.9)$$

onde podemos assumir $\partial \Omega / \partial t = 0$. Isso irá “segurar” a órbita em um potencial gravitacional fixo. Combinando a equação anterior com a Eq. 2.6 para eliminar a dependência com v_R , temos

$$R \frac{\partial \Sigma}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial R}(R \Sigma v_R) = - \frac{\partial}{\partial R} \left[\frac{1}{2\pi (R^2 \Omega)'} \frac{\partial G}{\partial R} \right]. \quad (2.10)$$

Nesse próximo passo, assumimos o caso de órbitas Keplerianas. Substituindo o G que foi descrito na Eq. (2.8) e usando a velocidade angular (2.1), obtemos finalmente

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left\{ R^{1/2} \frac{\partial}{\partial R} [v \Sigma R^{1/2}] \right\}. \quad (2.11)$$

Essa é a equação básica que governa a evolução do tempo da densidade de superfície de um disco Kepleriano. Por sua vez, v_R pode ser obtido a partir das equações (2.8) e (2.9):

$$v_R = -\frac{3}{\Sigma R^{1/2}} \frac{\partial}{\partial R} [v \Sigma R^{1/2}]. \quad (2.12)$$

Antes de prosseguir com as equações, é importante fazer alguns adendos quanto ao v , que descreve a viscosidade. Pelo fato de ser um parâmetro ainda pouco compreendido, nesse passo foi escolhida uma forma de simplificá-lo, de modo a facilitar os cálculos e nossa intuição sobre a física do problema. Primeiramente, notamos que a Eq.(2.11) é linear em Σ se v é independente de Σ . Além disso, se v for constante, a Eq.(2.11) pode ser resolvida por separação de variáveis. Dessa forma, a Eq.(2.11) pode ser reescrita como

$$\frac{\partial}{\partial t}(R^{1/2}\Sigma) = \frac{3v}{R} \left(R^{1/2} \frac{\partial}{\partial R} \right)^2 (R^{1/2}\Sigma). \quad (2.13)$$

Definindo $s = 2R^{1/2}$, a equação fica da seguinte forma

$$\frac{\partial}{\partial t}(R^{1/2}\Sigma) = \frac{12v}{s^2} \frac{\partial^2}{\partial s^2}(R^{1/2}\Sigma). \quad (2.14)$$

Como podemos escrever $R^{1/2}\Sigma = T(t)S(s)$, achamos

$$\frac{T'}{T} = \frac{12v}{s^2} \frac{S''}{S} = \text{constante} = -\lambda^2. \quad (2.15)$$

As funções separadas de T e S são exponenciais e funções de Bessel, respectivamente. É interessante encontrar a função de Green, que é por definição a solução para $\Sigma(R, t)$, tomando como distribuição de matéria inicial um anel de massa m em $R = R_0$:

$$\Sigma(R, t = 0) = \frac{m}{2\pi R_0} \delta(R - R_0) \quad (2.16)$$

onde $\delta(R - R_0)$ é a função delta de Dirac. Métodos padrão levam a

$$\Sigma(x, \tau) = \frac{m}{\pi R_0^2} \tau^{-1} x^{-1/4} \exp \left\{ -\frac{(1+x^2)}{\tau} \right\} I_{1/4}(2x/\tau) \quad (2.17)$$

onde $I_{1/4}(z)$ é uma função de Bessel modificada e foram usadas as variáveis adimensionais raio e tempo, $x = R/R_0$, $\tau = 12v t R_0^{-2}$.

A Figura 2.1 mostra $\Sigma(x, \tau)$ como uma função de x para vários valores de τ . Podemos ver na figura que a viscosidade tem o efeito de espalhar o anel original em uma escala de tempo típica:

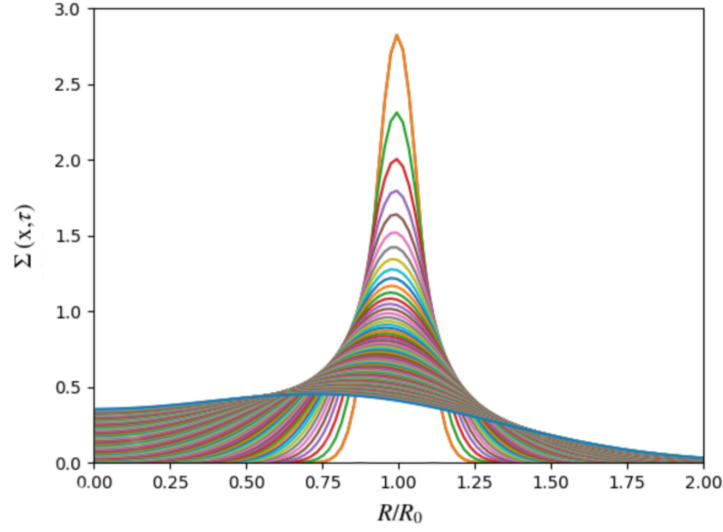


Figura 2.1: Evolução temporal da densidade superficial do disco, cuja forma inicial era um anel. Para estes cálculos considerando o caso de uma viscosidade constante. No eixo x temos a razão entre R e R_0 e no eixo y temos a densidade superficial do disco. As diferentes cores do gráfico representam diferentes valores de τ .

$$t_{\text{visc}} \sim R^2/\nu. \quad (2.18)$$

2.2.2 Disco fino estacionário

Para a situação de discos estacionários, assumiremos que $\partial\Sigma/\partial t = 0$, taxa de injeção de massa e parâmetro α independentes do tempo, ou seja, temos matéria alimentando o disco de maneira constante. Ao aplicar essas condições nas equações de conservação (2.6) e (2.7), temos:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial(R^2 \Omega R \Sigma \nu_R)}{\partial R} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(\nu \Sigma R^3 \frac{d\Omega}{dR} \right). \quad (2.19)$$

Ao integrarmos a equação anterior em relação a R , obtemos:

$$\nu \Sigma \frac{d\Omega}{dR} = \Sigma \nu_R \Omega + \frac{C}{2\pi R^3}. \quad (2.20)$$

Para encontrarmos a constante C , impomos para o disco o limite físico de que no raio externo temos que $d\Omega/dR = 0$. Assim:

$$C = -2\pi \Sigma \nu_R \Omega R_d^3 = -\dot{M} R_d^2 \Omega. \quad (2.21)$$

A taxa de decréscimo de matéria é $\dot{M} = 2\pi R \Sigma \nu_R$, e usando o Ω kepleriano descrito anteriormente, podemos reescrever a constante da seguinte maneira

$$C = -\dot{M} \sqrt{GM_* R_d}, \quad (2.22)$$

sendo G a constante de gravitação universal. Em seguida, substituímos a Equação (2.22) na Equação (2.20), e v_R por $\dot{M}/2\pi R\Sigma$, e $d\Omega/dR$ para o caso de decréscimo de matéria

$$\Sigma(R) = \frac{\dot{M}}{3\pi v} \left(\sqrt{\frac{R_d}{R}} - 1 \right). \quad (2.23)$$

A equação acima descreve a densidade superficial do disco de decréscimo.

2.2.3 SINGLEBE

As equações apresentadas nas subseções anteriores possuem soluções analíticas apenas para casos especiais. Por isso, faz-se necessária a utilização de métodos numéricos para sua solução.

A ferramenta que utilizamos para resolver as equações de difusão viscosa foi o código *SINGLEBE*, desenvolvido em linguagem *Fortran 77* por Okazaki et al. (2002). Esse é um código hidrodinâmico que resolve as equações dos fluidos viscosos em uma dimensão (2.11). Ele calcula a evolução do perfil radial de densidade superficial de um disco, dados a história de injeção de massa e o parâmetro de viscosidade α .

2.2.4 Transferência radiativa

Para realizar o cálculo do fluxo e, conseqüentemente, magnitude aparente, da estrela em estudo, foi necessário fazer um código para aplicação das equações de transferência radiativa que nos mostre como a luz se comporta após atravessar o meio interestelar.

A equação de transferência radiativa, que considera a absorção, a emissão espontânea e o espalhamento, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{dI_\lambda}{dl} = -\kappa_\lambda I_\lambda + j_\lambda + \int g I_\lambda d\Omega. \quad (2.24)$$

Uma vez que a resolução do termo de espalhamento é extremamente complexa, usamos uma aproximação, considerando que a intensidade é isotrópica,

$$\frac{dI_\lambda}{dl} = -\kappa_\lambda I_\lambda + j_\lambda - \sigma_e I_\lambda + \sigma_e J_\lambda, \quad (2.25)$$

sendo $-\sigma_e I_\lambda$ o termo de espalhamento “para fora”, expelido da seção, $\sigma_e J_\lambda$ o termo de espalhamento “para dentro” da seção, $J_\lambda = \langle I_\lambda \rangle$ a intensidade média, e σ_e o coeficiente de espalhamento. Esta aproximação é apresentada no livro de Rybicki & Lightman (1979), sendo

utilizada, por exemplo, por Budaj et al. (2005).

A intensidade média é dada por

$$J_\lambda = \frac{1}{2} I_\lambda \left(1 - \sqrt{1 - \frac{R^2}{d^2}} \right), \quad (2.26)$$

para o caso de uma estrela esférica. Quando $d \gg R$, podemos escrever a equação como:

$$J_\lambda = \frac{I_\lambda}{4} \frac{R^2}{d^2}. \quad (2.27)$$

Revisando os termos da Equação 2.25, temos

$$d\tau_\lambda \equiv (\kappa_\lambda + \sigma_e) dl, \quad (2.28)$$

$$S_\lambda = \frac{\kappa_\lambda B_\lambda + \sigma_e J_\lambda}{\kappa_\lambda + \sigma_e} = \frac{\kappa_\lambda}{\kappa_\lambda + \sigma_e} B_\lambda + \frac{\sigma_e}{\kappa_\lambda + \sigma_e} J_\lambda, \quad (2.29)$$

sendo B_λ a função de Planck de emissão de corpo negro, e o termo $\sigma_e / \kappa_\lambda + \sigma_e$ o albedo (fração refletida).

Dessa forma, temos que

$$\frac{dI_\lambda}{d\tau_\lambda} = -I_\lambda + S_\lambda, \quad (2.30)$$

e portanto,

$$I_\lambda(\tau_\lambda) = I(0)e^{-\tau_\lambda} + S_\lambda(1 - e^{-\tau_\lambda}). \quad (2.31)$$

A dependência desta solução com a densidade do disco encontra-se na definição de κ_λ e σ_e , os quais são dados por Brussaard & van de Hulst (1962):

$$\kappa_\lambda = 3.691 \times 10^8 [1 - e^{(-hc/\lambda k T_d)}] \bar{z}^2 T_d^{-1/2} (\lambda/c)^3 \gamma (\rho/\mu m_H)^2 [g(\lambda, T_d) + b(\lambda, T_d)], \quad (2.32)$$

onde h corresponde a constante de Planck, c a velocidade da luz, λ o comprimento de onda, k a constante de Boltzmann, T_d a temperatura do disco, $\bar{z}$ o valor médio do número atômico, γ a fração de ionização, ρ a densidade, μ o peso molecular médio do gás, $[g(\lambda, T_d) + b(\lambda, T_d)]$ são os fatores *gaunt free-free* e *bound-free*, e n o índice de refração do meio.

Finalmente, o fluxo em um comprimento de onda pode ser definido como:

$$F_\lambda \approx \frac{1}{d^2} \int I_\lambda dA, \quad (2.33)$$

sendo I_λ a intensidade medida em um certo λ .

Nosso grupo de pesquisa possui um código que implementa as equações apresentadas em linguagem *Python* e resolve o problema de transporte radiativo para nosso caso específico. Ele recebe os valores de densidade superficial e calcula o valor do fluxo associado, em seguida converte esse fluxo para magnitude aparente. Com isso, podemos compará-los com as curvas de luz observadas.

Por fim, observamos algumas das limitações destas aproximações. Além de incluir uma abordagem aproximada para o espalhamento eletrônico, temos que o perfil de temperatura adotado para o disco é isotérmico. Em adição, as correções quânticas introduzidas pelos fatores de Gaunt da absorção ligado-livre foram calculadas sob a hipótese de equilíbrio termodinâmico local (LTE), o que não é válido para discos de estrelas Be. Tal aproximação pode modificar a escala das densidades (e $\dot{M}$) calculadas, embora seus valores relativos sejam corretos.

2.3 A curva de luz de ABE A26

Como mencionado na introdução, a estrela ABE A26 possui quase duas dezenas de eventos de *outburst* observados pelo KELT. No entanto, muitos deles não possuem amostragem temporal suficiente para serem modelados, ou simplesmente não se adequam às hipóteses de nosso modelo (que sua magnitude aparente parta do valor de base, somente da estrela, ao iniciar a formação do disco e retornasse a ela após a dissipação dele) .

O modelo físico adotado assume que o sistema parta de um estado sem disco no instante inicial. A inspeção da Fig. 1.2 mostra que isso não é verdade para os quatro primeiros eventos de *outburst*, uma vez que a magnitude de base desses picos ainda apresenta um excesso de fluxo sobre a emissão fotosférica. Dos 13 restantes, 7 possuem uma amostragem temporal insuficiente ou um padrão de construção/dissipação que não é claro. Dessa forma, nosso conjunto final de *outbursts* foi composto pelos eventos de número 5, 6, 9, 13, 16 e 17. Os detalhes da curva de luz de cada um de seus eventos de *outburst* podem ser vistos na Figura 2.2.

2.4 Método estatístico de *Markov Chain Monte Carlo*

Para realizar o ajuste dos parâmetros dos modelos, foi utilizado o método estatístico Markov Chain Monte Carlo (MCMC), que permite explorar de forma eficiente a distribuição de probabilidade dos parâmetros a serem estimados. Em termos mais simples, esse método gera

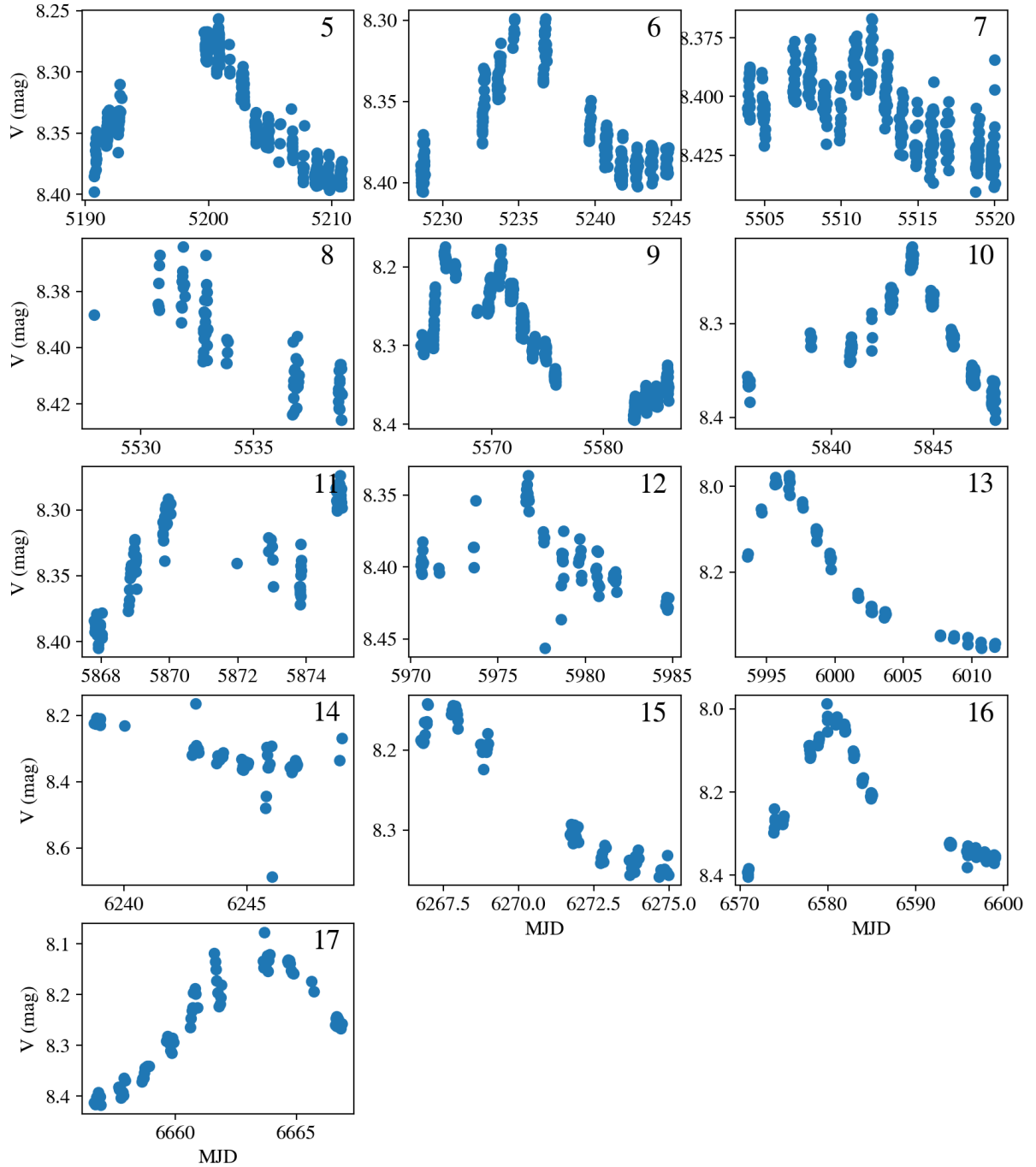


Figura 2.2: Eventos de *outburst* da estrela ABE A26 observados pela missão KELT. O número de cada evento se encontra no canto direito superior de cada painel. Os quatro primeiros eventos foram omitidos, por possuírem o patamar de brilho mínimo acima dos demais ($V > 8.4$). Em todos os gráficos, o eixo x representa o tempo, em dias julianos modificados, e o eixo y representa a magnitude V aparente em uma escala invertida.

uma sequência de amostras que, após um número suficiente de passos, descreve a distribuição de probabilidade dos parâmetros e, conseqüentemente, suas incertezas. Para a implementação, foi empregada a biblioteca `emcee`ⁱⁱⁱ desenvolvida por Foreman-Mackey et al. (2013), que utiliza diversos “caminhantes” (*walkers*) para percorrer o espaço de parâmetros. Essa estratégia possibilita uma exploração robusta e paralela da região de maior probabilidade, resultando em estimativas mais confiáveis para os parâmetros do modelo. Para o primeiro ajuste, associado à SED, foram utilizados 3000 passos. Já para as curvas de luz, foram utilizados 300. Em ambos os casos, foram usados 50 *walkers*, e a convergência das soluções foi alcançada.

ⁱⁱⁱ <https://emcee.readthedocs.io/en/stable/>

Neste capítulo, apresentamos os principais resultados deste trabalho, que consistem no ajuste da SED e no ajuste dos perfis dos *outbursts* selecionados da curva de luz da estrela ABE A26. Em cada seção lembraremos os métodos utilizados para os ajustes. Ao final, apresentaremos um panorama geral dos resultados obtidos.

3.1 Parâmetros estelares

Uma das entradas do código *SINGLEBE* são os parâmetros estelares. Dessa forma, determinar seus valores foi um dos passos iniciais. Para determiná-los, foi feito um ajuste da SED da estrela escolhida.

Utilizamos a aproximação de uma lei de potência para descrever o perfil de densidade radial do disco, $\Sigma(r) = \Sigma_0 \left(\frac{R_e}{r}\right)^m$, onde Σ_0 representa a densidade superficial do disco, R_e o raio equatorial da estrela e Σ_0 a densidade na borda interna do disco. Como as várias medidas fotométricas foram obtidas em épocas distintas, e dada a natureza variável dessa classe de objetos, a densidade do disco foi considerada como *um valor médio*.

Os parâmetros encontrados nesse primeiro momento com auxílio do *emcee* foram: massa da estrela (M), achatamento dos polos (R_e/R_p), o valor médio da densidade superficial na base do disco (Σ_0), o expoente da lei de potência (m), o cosseno do grau de inclinação da estrela ($\cos i$), a extinção ($E(B - V)$) e a distância (d) até a estrela.

Os modelos de curva de luz são extremamente dependentes do valor inicial da magnitude, ele tem que ser condizente com o da magnitude de base (apenas estrela). Por sua vez, o intervalo de soluções dado pelo *emcee* abrange uma faixa de magnitudes iniciais. Por isso, selecionamos apenas as sub-amostra de soluções dadas pelo *emcee* (posições finais de *walkers* específicos) que garantissem a magnitude inicial correta. A Tabela 3.1 mostra os resultados do ajuste original e da sub-amostra selecionada.

Nas Figuras 3.1 e 3.2 é possível visualizar o gráfico de ajuste do modelo sobre a SED e da correlação dos parâmetros.

Parâmetro	Valores originais	Valores da sub-amostra
Massa [$M_{\odot}$]	$10,0 \pm 1,0$	$9,5 \pm 1,0$
$\log \Sigma_0$ [g/cm^2]	$-0,89 \pm 0,04$	$-0,91 \pm 0,04$
m	$0,82 \pm 0,05$	$0,82 \pm 0,06$
R_e/R_p	$1,36 \pm 0,20$	$1,40 \pm 0,17$
$\cos i$	$0,42 \pm 0,13$	$0,48 \pm 0,14$
E(B-V)	$0,44 \pm 0,02$	$0,43 \pm 0,02$
Distância [pc]	1091 ± 46	1086 ± 62

Tabela 3.1: Valores dos parâmetros estelares obtidos com o da SED. Na segunda coluna temos os valores encontrados com o ajuste original, enquanto na terceira estão os valores encontrados apenas para as soluções que reproduzem a magnitude de base da estrela.

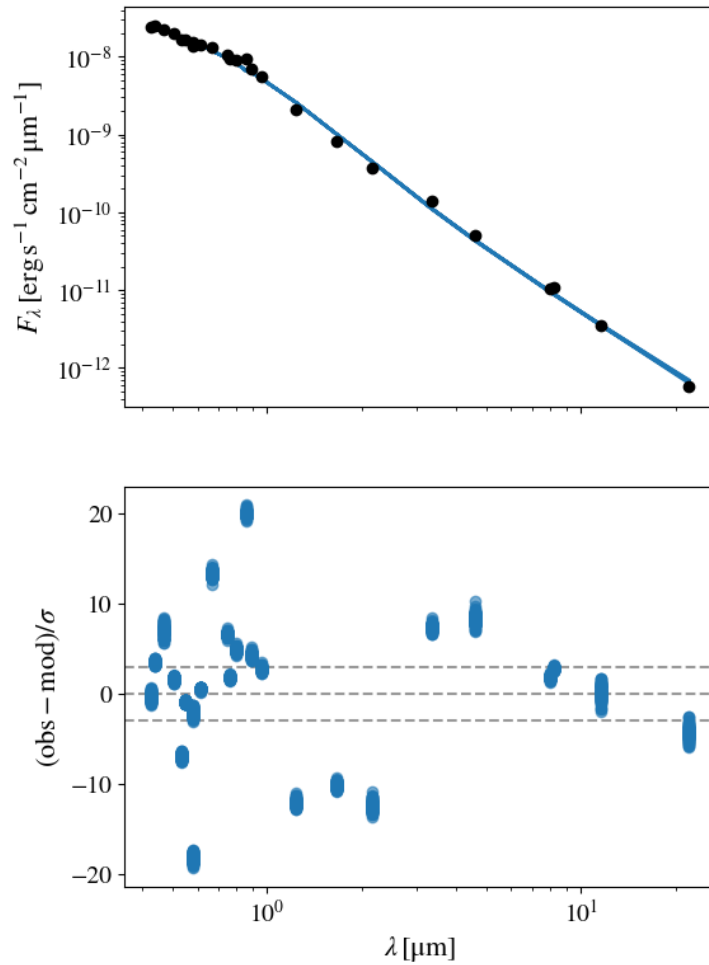


Figura 3.1: Painel superior: ajuste de modelo da SED da estrela ABE A26. Os pontos pretos são os dados observacionais, a linha em azul corresponde ao ajuste do modelo, e o eixo y representa o fluxo em escala logarítmica. Painel inferior: Gráfico de resíduos (diferença entre SED observada e modelada) normalizado pela incerteza. As linhas pontilhadas horizontais representam a região de confiança de 1σ . Em ambos os painéis, o eixo x mostra o comprimento de onda em escala logarítmica.

3.2 Ajuste da curva de luz

Com os valores dos parâmetros estelares encontramos (vide seção 3.1) usamos eles de entrada para o código *SINGLEBE* e simulamos cenários de construção e dissipação do disco

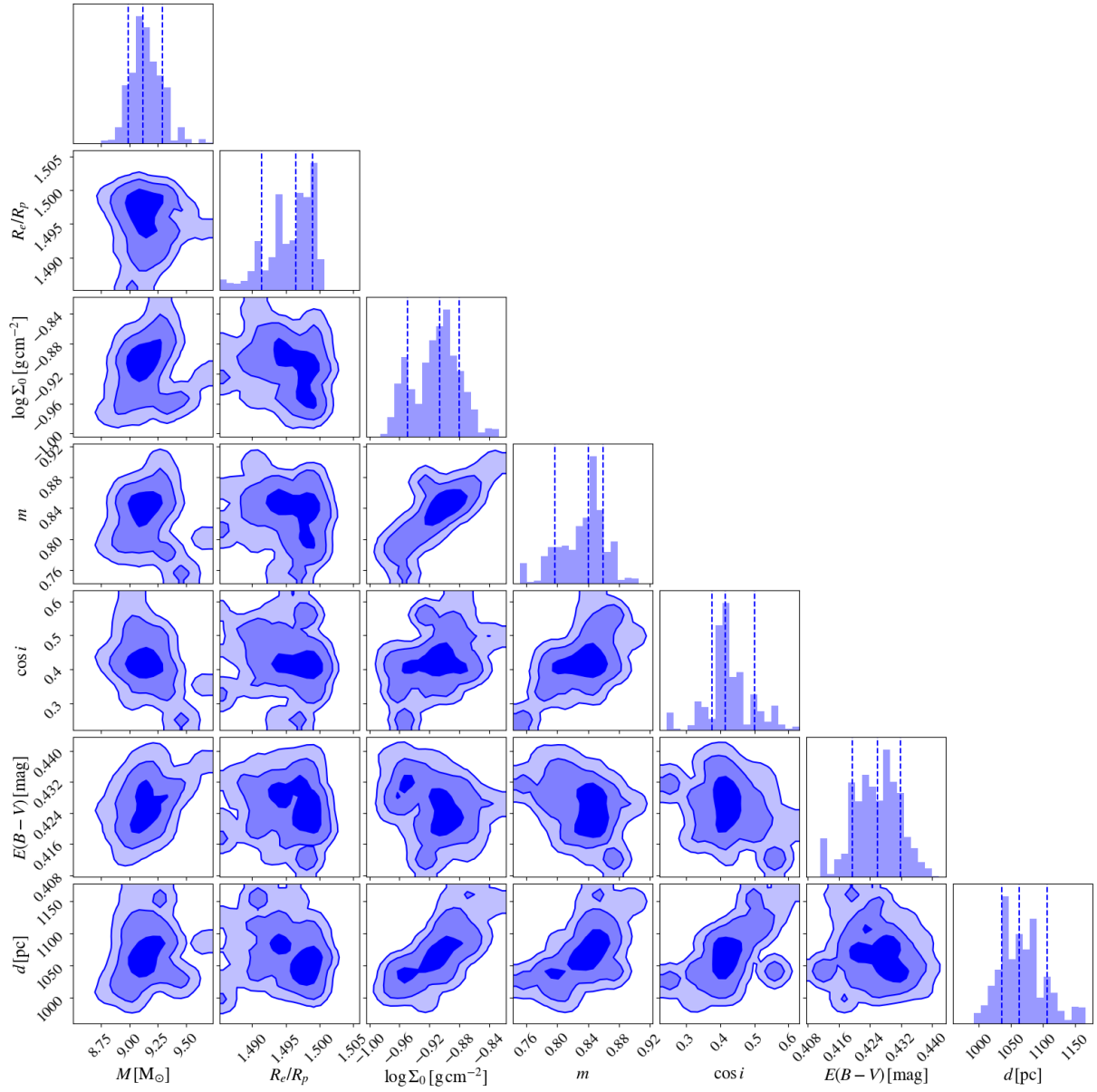


Figura 3.2: Gráfico de correlação dos parâmetros da estrela ABE A26. Os contornos escolhidos para os gráficos de correlação correspondem aos intervalos de confiança de 1, 2 e 3 σ .

Nº do <i>outburst</i>	$\log \alpha$	$\log \Sigma_0 [g\,cm^{-2}]$	t_1 [MJD]	Δt [dias]
5	$0,153 \pm 0,008$	$-0,235 \pm 0,002$	$5190,711 \pm 0,003$	$11,659 \pm 0,013$
6	$0,546 \pm 0,003$	$-0,402 \pm 0,003$	$5232,107 \pm 0,029$	$6,175 \pm 0,114$
9	$0,083 \pm 0,004$	$0,103 \pm 0,002$	$5561,587 \pm 0,041$	$9,720 \pm 0,046$
13	$0,547 \pm 0,001$	$0,870 \pm 0,016$	$5992,880 \pm 0,049$	$2,832 \pm 0,098$
16	$0,391 \pm 0,004$	$0,516 \pm 0,003$	$6573,584 \pm 0,007$	$7,585 \pm 0,028$
17	$0,395 \pm 0,005$	$0,367 \pm 0,004$	$6659,368 \pm 0,007$	$5,056 \pm 0,022$

Tabela 3.2: Resultados do ajuste das curvas de luz dos 6 momentos de *outburst* da estrela ABE A26. O primeiro parâmetro representa a medida de viscosidade do disco. O segundo corresponde à densidade de base do disco. O terceiro representa o tempo de início da formação do disco nesse evento. O último corresponde à quantidade de dias entre o início da formação e o início da dissipação do disco.

que reproduzem o ambiente ao redor da nossa estrela, para diferentes valores de densidade de base do disco, parâmetro de viscosidade, tempo de início da formação e tempo de duração da fase de formação. A partir dessas curvas simuladas, ajustamos as curvas reais com auxílio do *emcee*. Os resultados desses ajustes para cada um dos momentos de *outburst* escolhidos estão apresentados na Tabela 3.2. As Figs. de 3.3 a 3.8, apresentamos os ajustes e as correlações dos parâmetros para cada momento escolhido.

Por fim, as Figs. 3.9 e 3.10 mostram a evolução temporal dos parâmetros físicos do disco para os momentos ajustados, e a Fig. 3.11 mostra a relação dos parâmetros entre si.

3.3 Discussão

Como mencionado na introdução, as massas das estrelas Be normalmente estão entre 3 e 20 massas solares. O resultado do nosso ajuste de nosso alvo indicou que sua massa está nesse intervalo, com $M = 10,0 \pm 1,0 M_{\odot}$. A relação entre o raio equatorial e o do polo das estrelas Be normalmente está em torno de 1,3 (Rivinius 2013), valor compatível com os nossos resultados com $R_e/R_p = 1,36 \pm 0,20$.

Partindo para o ajuste das curvas de luz, ao analisar os valores de Δt , ou seja, da duração da fase de formação do disco em cada momento, é possível notar que são valores muito pequenos, indo de ≈ 3 à ≈ 12 dias. Os intervalos de tempo medidos são substancialmente mais curtos que os observados na estrela ω CMa (estudada por Ghoreyshi et al. (2018)), indo de ≈ 900 à ≈ 1500 dias.

Normalmente esperamos encontrar valores entre 0 e 1 para α (Shakura & Sunyaev 1973). Porém, os valores encontrados neste trabalho se encontram entre 1 e 4. Temos algumas hipóteses sobre porque obtivemos valores mais elevados do que o comumente referenciado na literatura:

- *Outbursts* curtos formam discos reduzidos, para os quais a variação radial da temperatura deve ser importante. Como nossos modelos consideram um disco isotérmico, é possível

que esta aproximação tenha influenciado a determinação dos valores de α .

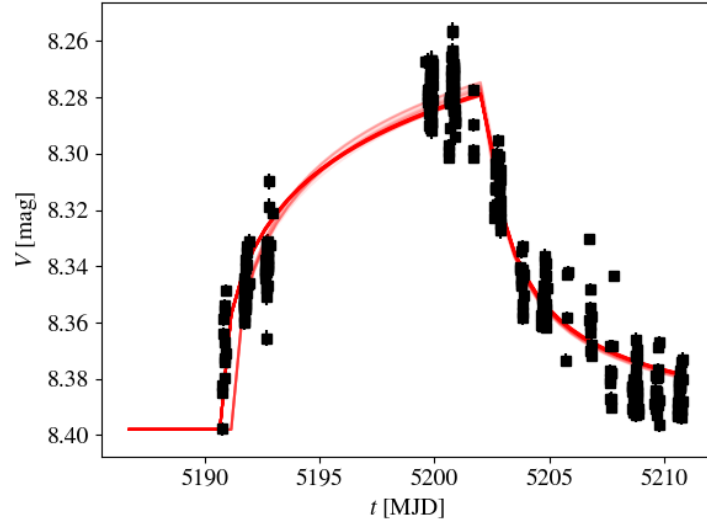
- Em um intervalo tão curto de tempo, a ejeção de matéria (provavelmente assimétrica) não teria tido tempo de ser circularizada. Isto significa que a aproximação de disco axi-simétrico do *SINGLEBE* pode não ser tão boa durante a construção do disco.

Valores típicos para a densidade superficial de base estão entre $0,01$ e 10 g/cm^2 (Bjorkman & Carciofi 2005; Haubois et al. 2012; Rivinius 2013). Os valores encontrados com o nosso modelo estão entre $0,5$ e 4 g/cm^2 , mostrando-se dentro dos valores normalmente encontrados. É possível notar um aumento no valor com o passar do tempo até o momento de número 13, após ele, há uma queda nesses valores. Esta variação é evidente na Tabela 3.2 e na Figura 3.10.

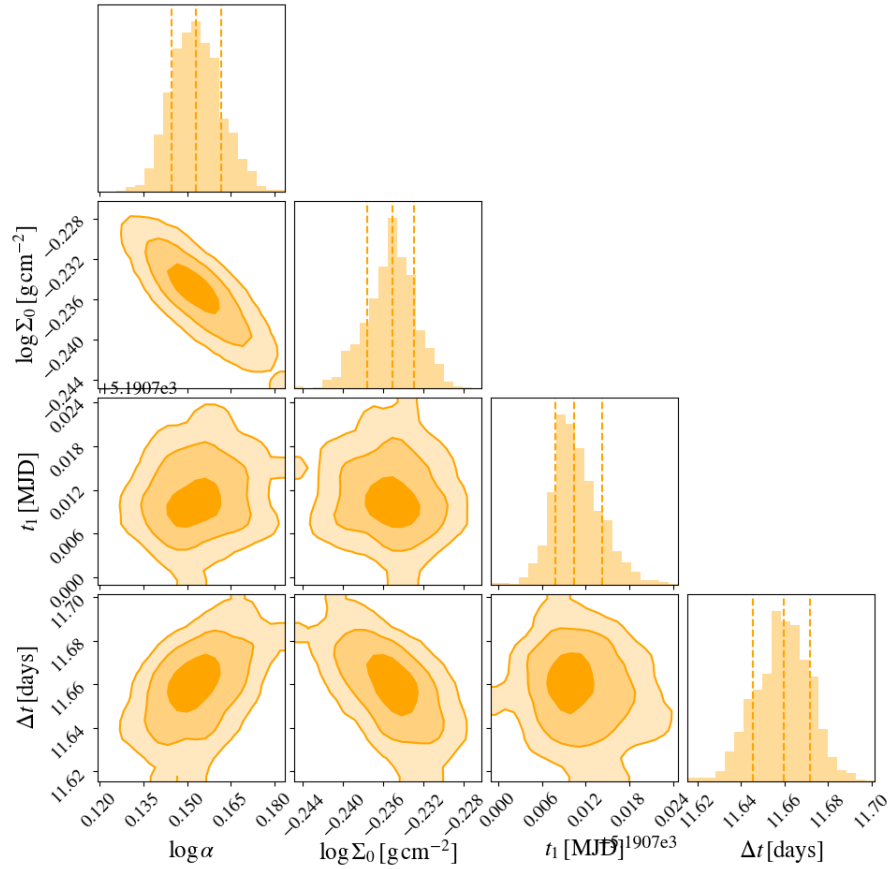
É importante ressaltar a qualidade dos ajustes das curvas de luz ao analisar os resultados para os diferentes modelos, não só visualmente ao focar nos gráficos de ajuste, mas também nos gráficos de correlação dos parâmetros. Consideramos um ajuste de boa qualidade quando o seu *corner* apresenta uma distribuição unimodal bem definida.

Outro ponto importante a ser ressaltado é a maior discrepância observada no ajuste do *outburst* 9. A diferença pode ser justificada pela ocorrência de um comportamento diferente ao esperado no modelo já que ele apresenta dois picos de formação. Esse picos indicam que nesse momento 9 a estrela não apenas começou a formar um disco mas parou, e o disco veio a dissipar até restar apenas a estrela novamente. A estrela injetou matéria em órbita, parou, e antes que o disco pudesse ser totalmente dissipado, houve uma nova injeção de matéria. Apesar do comportamento inesperado para o modelo, ele ainda assim conseguiu reproduzir o começo e o fim do momento no geral.

Finalmente, a Figura 3.11 sugere uma correlação entre os parâmetros $\log \alpha$ e $\log \Sigma_0$, com exceção do ponto superior a esquerda do gráfico. A confirmação dessa relação será explorada em um possível trabalho futuro, em uma análise conjunta a uma amostra de diferentes objetos.



(a) Visualização do ajuste do modelo para o momento de *outburst* 5, no eixo x temos o tempo em dias julianos modificados e no eixo y temos uma escala inversa da magnitude aparente. Os dados observacionais são representados pelos pontos pretos e as linhas de vermelho nos mostra as soluções do modelo.



(b) Gráfico de correlação para o momento de *outburst* 5 dos parâmetros: $\log \alpha$, $\log \Sigma_0$, tempo 1 (tempo de início da formação do disco), Δt (duração da fase de formação do disco). Podemos visualizar três contornos nos gráficos de correlações: 3σ (englobando 99% dos dados), 2σ (englobando 95% dos dados) e 1σ de confiança (englobando 68% dos dados). Nos histogramas da diagonal (distribuições marginalizadas), são representados a mediana e o intervalo de 1σ com linhas tracejadas verticais.

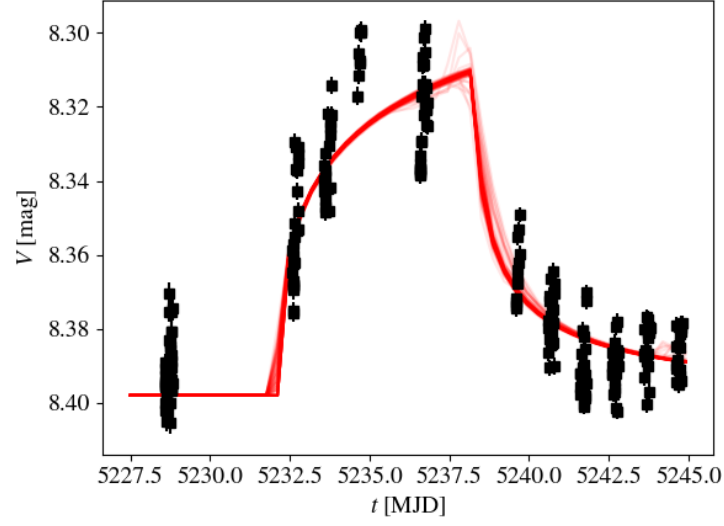
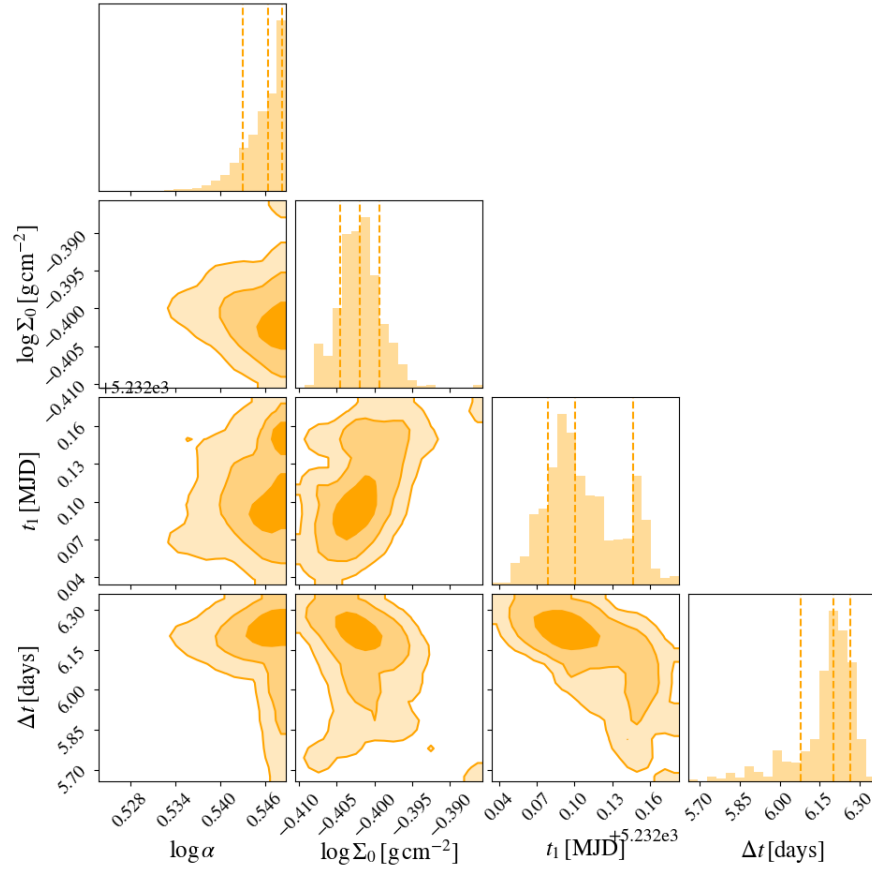

 (a) Idem à Figura 3.3(a), mas referente ao *outburst* 6.

 (b) Idem à Figura 3.3(b), mas referente ao *outburst* 6.

Figura 3.4: Ajuste da curva de luz e gráfico de correlação dos parâmetros para o momento de *outburst* 6.

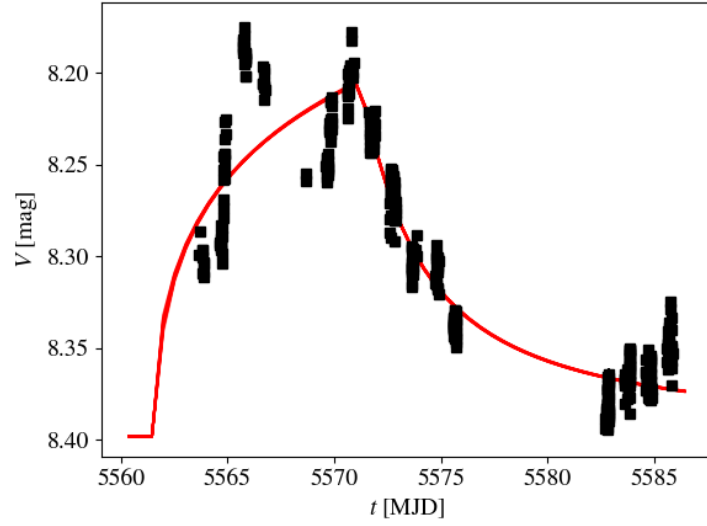
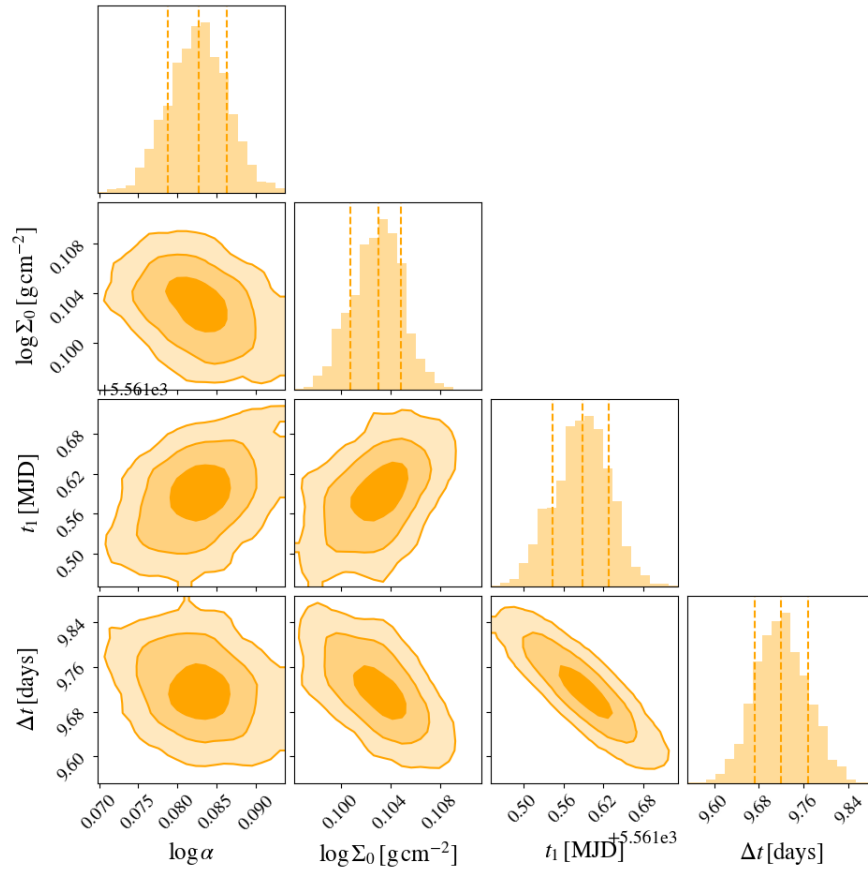

 (a) Idem à Figura 3.3(a), mas referente ao *outburst* 9.

 (b) Idem à Figura 3.3(b), mas referente ao *outburst* 9.

Figura 3.5: Ajuste da curva de luz e gráfico de correlação dos parâmetros para o momento de *outburst* 9.

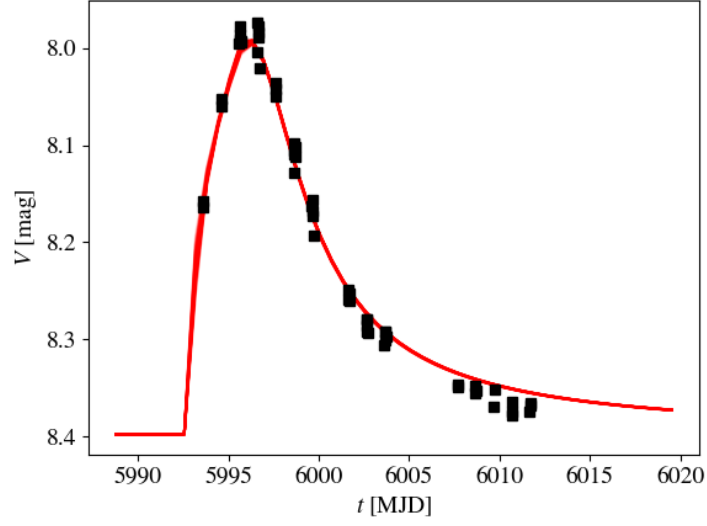
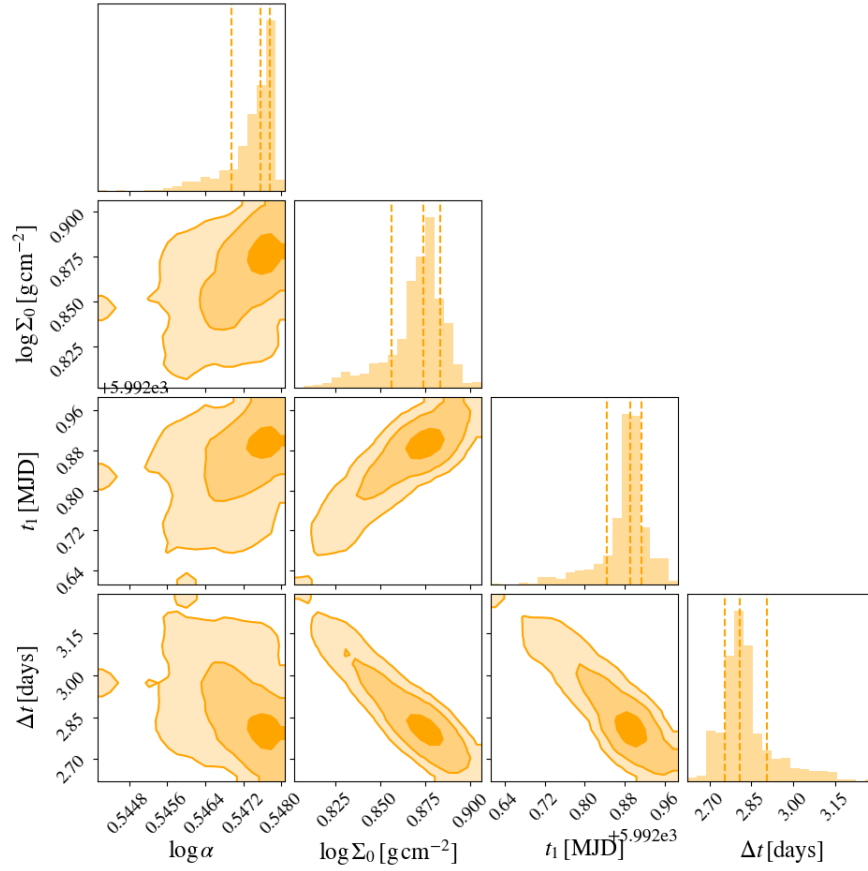

 (a) Idem à Figura 3.3(a), mas referente ao *outburst* 13.

 (b) Idem à Figura 3.3(b), mas referente ao *outburst* 13.

Figura 3.6: Ajuste da curva de luz e gráfico de correlação dos parâmetros para o momento de *outburst* 13.

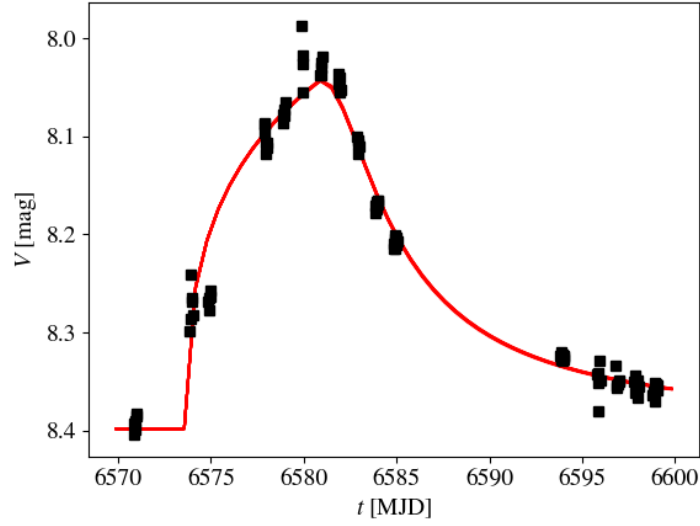
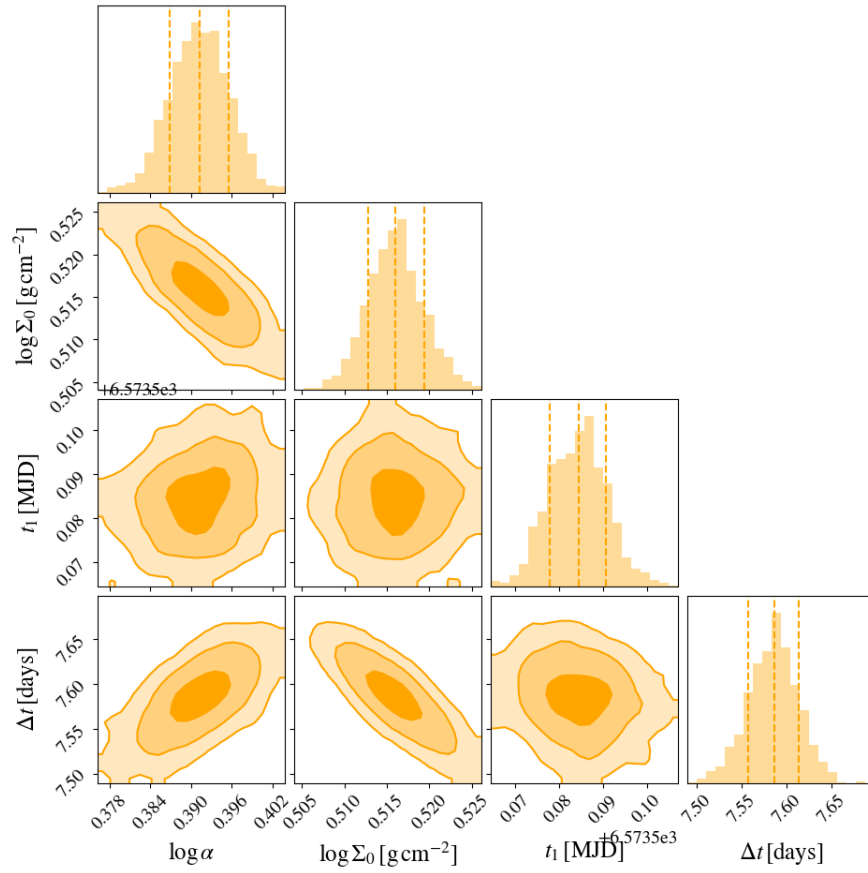

 (a) Idem à Figura 3.3(a), mas referente ao *outburst* 16.

 (b) Idem à Figura 3.3(b), mas referente ao *outburst* 16.

Figura 3.7: Ajuste da curva de luz e gráfico de correlação dos parâmetros para o momento de *outburst* 16.

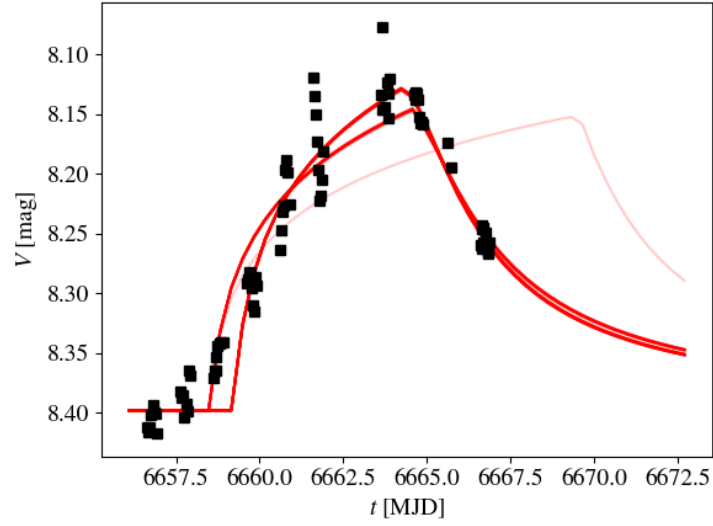
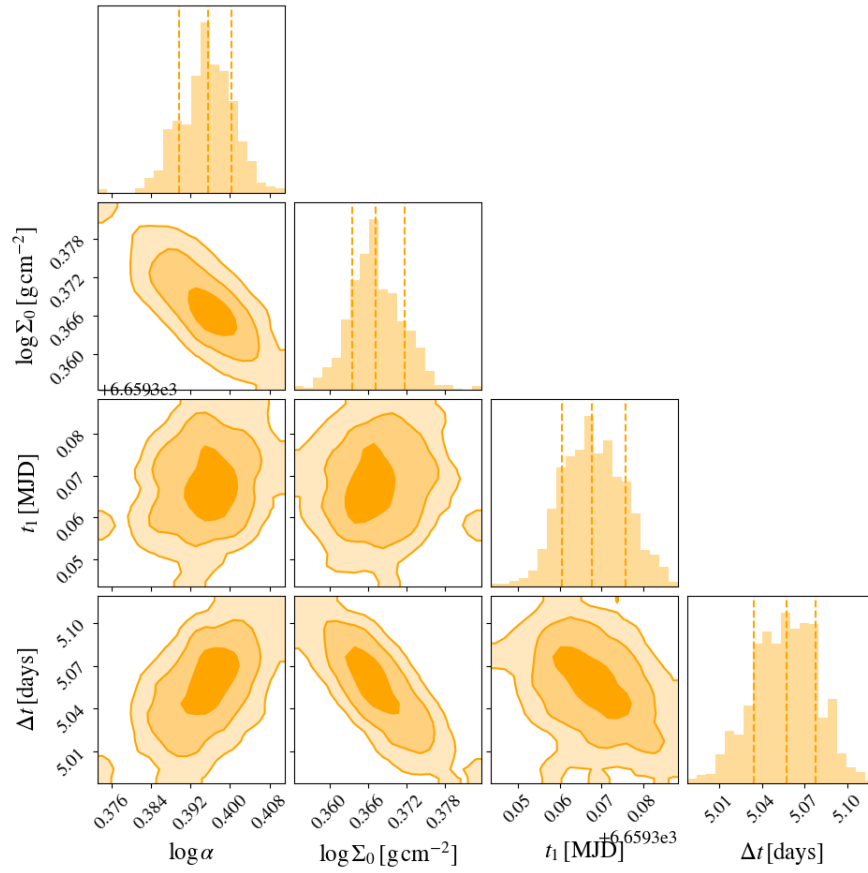

 (a) Idem à Figura 3.3(a), mas referente ao *outburst* 17.

 (b) Idem à Figura 3.3(b), mas referente ao *outburst* 17.

Figura 3.8: Ajuste da curva de luz e gráfico de correlação dos parâmetros para o momento de *outburst* 17.

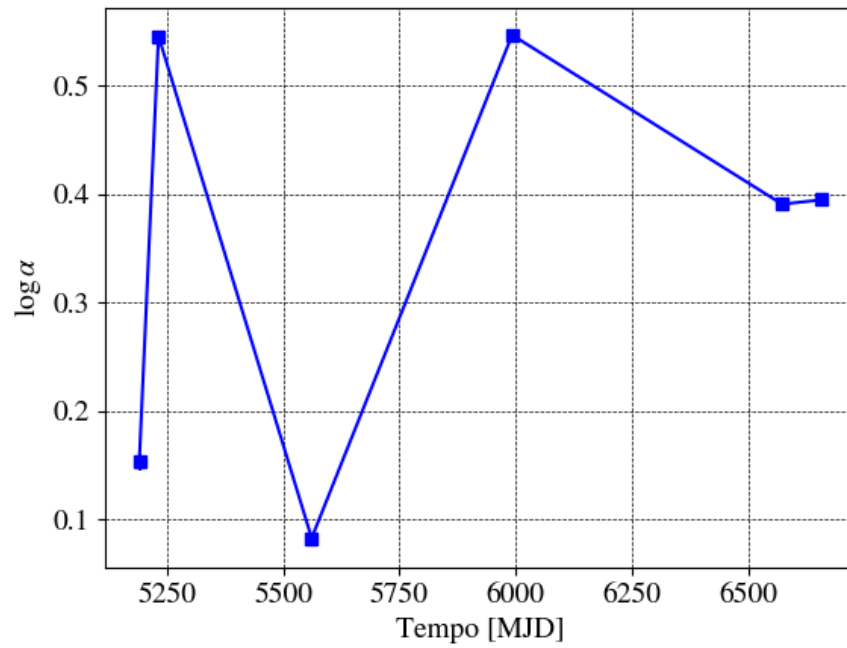


Figura 3.9: Evolução temporal do parâmetro $\log \alpha$ ajustado. As estimativas de incerteza são menores do que os símbolos adotados.

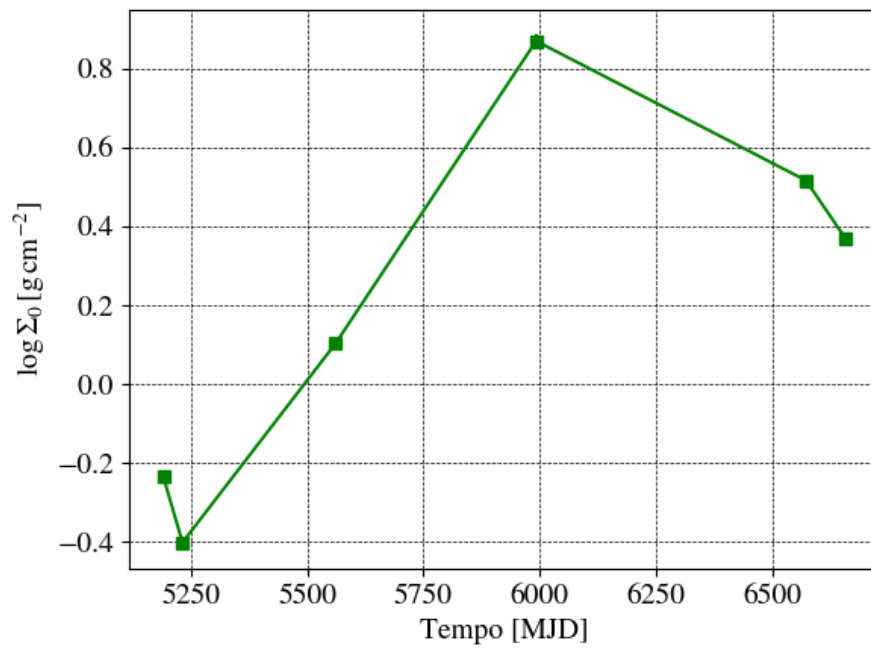


Figura 3.10: Evolução temporal do parâmetro $\log \Sigma_0$ ajustado. As estimativas de incerteza são menores do que os símbolos adotados.

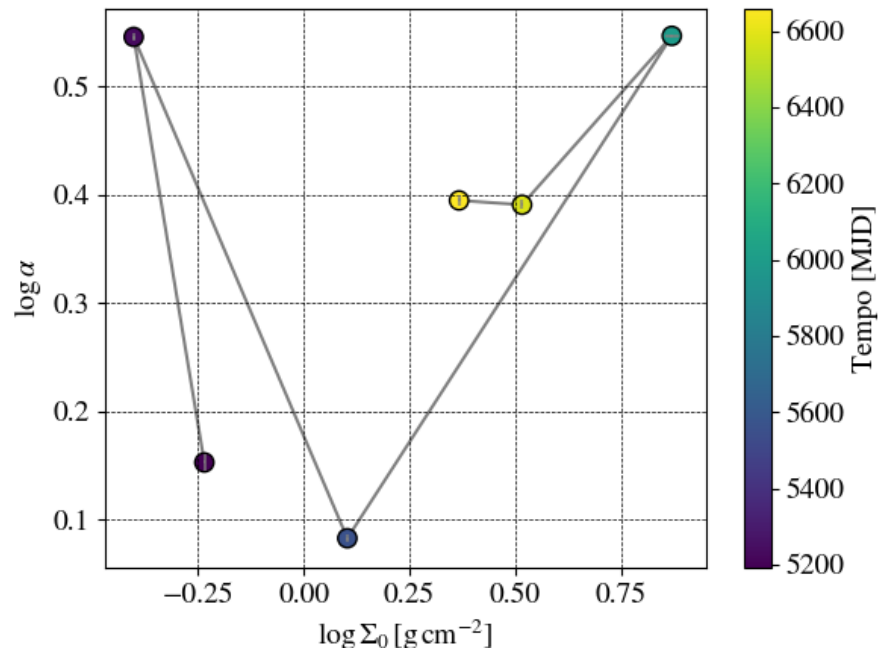


Figura 3.11: Gráfico com os valores obtidos para os parâmetros físicos do disco em cada um dos momentos de *outburst*. O eixo x está representando o parâmetro $\log \Sigma_0$, o eixo y está representando o parâmetro $\log \alpha$ e a escala de cor representa a evolução temporal. As estimativas de incerteza são menores do que os símbolos adotados.

Para explorar e analisar o parâmetro de viscosidade do disco da estrela Be ABE A26 (também conhecida como MWC 109) e compreender melhor sua dinâmica e evolução, foi desenvolvida uma metodologia que envolve a determinação de parâmetros estelares a partir de sua distribuição espectral. Uma vez determinados os parâmetros estelares, podemos simular vários cenários de disco com diferentes densidades superficiais de base e valores de viscosidade, resultando na modelagem de curvas de luz reais.

Parâmetros estelares com valores dentro de intervalos esperados para estrelas Be foram encontrados. Em particular, o valor de massa encontrado é próximo da expectativa para o tipo espectral desta estrela (B1V). Ademais, o valor de R_e/R_p concorda com o valor médio reportado na literatura (Rivinius 2013).

Analizamos seis episódios de *outburst*, nomeados de 5, 6, 9, 13, 16 e 17. Os intervalos dos valores encontrados para $\log \alpha$ são de 0,15 a 0,55, para $\log \Sigma_0$ [g/cm^2] são de $-0,40$ a $0,87$, e para Δt são de 2,83 a 11,66 dias.

Os valores encontrados para o parâmetro de viscosidade foram um pouco maiores do que os normalmente encontrados na literatura, sendo um possível resultado dos baixos valores de tempo de desenvolvimento do disco, em uma escala de menos de 15 dias até atingir o pico de formação.

A evolução temporal do parâmetro de densidade de base nos disco indica uma tendência de crescimento (até aproximadamente o momento 13), possivelmente causada pelas ejeções de massa consecutivas em período tão curto de tempo. As curvas anteriores às ajustadas já demonstravam esse padrão, refletindo na sua magnitude que mesmo após o fim do episódio não retornava a magnitude aparente somente da estrela.

Observamos uma possível correlação entre os parâmetros $\log \alpha$ e $\log \Sigma_0$, mas são necessários mais dados para que seja comprovada. O parâmetro de viscosidade dita o quão rápido o fluido desse disco vai se espalhar. Se a taxa de matéria se mantiver constante em meio a mudança desse parâmetro, uma mudança no quão denso esse disco se torna seria esperada.

Apesar da estrela estudada nesse trabalho apresentar alta variabilidade como a estrela estudada por [Ghoreyshi et al. \(2018\)](#), a escala de tempo de seus *outbursts* é muito diferente, sendo a nossa de poucos dias e a deles de anos.

Como perspectivas, pretendemos estudar os primeiros *outbursts* desse objeto observados pelo KELT, cujas magnitudes iniciais são mais brilhantes que aquelas dos eventos selecionados neste trabalho. Isso indica que a taxa de injeção de massa não cessa depois do *outburst*, mas sim é modulada para um valor menor ([Ghoreyshi et al. 2018](#)). Por fim, planejamos aplicar a metodologia aqui desenvolvida para toda a amostra de estrelas Be observadas pela missão KELT, e eventualmente para outras missões observacionais.

Referências

- Bayo, A., Rodrigo, C., Barrado Y Navascués, D., et al. 2008, *A&A*, 492, 277
- Bjorkman, J. E., & Carciofi, A. C. 2005, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 337, *The Nature and Evolution of Disks Around Hot Stars*, ed. R. Ignace & K. G. Gayley, 75
- Brussaard, P. J., & van de Hulst, H. C. 1962, *Reviews of Modern Physics*, 34, 507
- Budaj, J., Miller, B., Richards, M. T., & Koubsky, P. 2005, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, Vol. 206, *American Astronomical Society Meeting Abstracts #206*, 08.01
- Carciofi, A. C., Bjorkman, J. E., Otero, S. A., et al. 2012, *ApJ*, 744, L15
- Collins, G., Slettebak, A., & Snow, T. 1987, in *IAU Colloq*, Vol. 92
- Dominik, C. 2015, in *European Physical Journal Web of Conferences*, Vol. 102, *European Physical Journal Web of Conferences*, 00002
- Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D., & Goodman, J. 2013, *PASP*, 125, 306
- Frank, J., King, A., & Raine, D. J. 2002, *Accretion Power in Astrophysics: Third Edition* (Cambridge University Press)
- Ghoreyshi, M. R., Carciofi, A. C., Rímulo, L. R., et al. 2018, *MNRAS*, 479, 2214
- Habets, G. M. H. J., & Heintze, J. R. W. 1981, *A&AS*, 46, 193
- Haubois, X., Carciofi, A. C., Rivinius, T., Okazaki, A. T., & Bjorkman, J. E. 2012, *ApJ*, 756, 156
- Jaschek, M., & Egret, D. 1982, in *IAU Symposium*, Vol. 98, *Be Stars*, ed. M. Jaschek & H. G. Groth, 261
- Labadie-Bartz, J., Chojnowski, S. D., Whelan, D. G., et al. 2018, *AJ*, 155, 53
- Lee, U., Osaki, Y., & Saio, H. 1991, *MNRAS*, 250, 432
- Okazaki, A. T., Bate, M. R., Ogilvie, G. I., & Pringle, J. E. 2002, *MNRAS*, 337, 967
- Pepper, J. 2007, PhD thesis, The Ohio State University
- Rímulo, L. R., Carciofi, A. C., Vieira, R. G., et al. 2018, *MNRAS*, 476, 3555

- Rivinius, T. 2013, in *Astrophysics and Space Science Proceedings*, Vol. 31, *Stellar Pulsations: Impact of New Instrumentation and New Insights*, ed. J. C. Suárez, R. Garrido, L. A. Balona, & J. Christensen-Dalsgaard, 253
- Rybicki, G. B., & Lightman, A. P. 1979, *Radiative processes in astrophysics*
- Secchi, A. 1866, *Astronomische Nachrichten*, 68, 63
- Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. 1973, *A&A*, 24, 337