

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

André Luiz Figueiredo

Estudo Sistemático de discos de estrelas Be

São Paulo

2014

André Luiz Figueiredo

Estudo Sistemático de discos de 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 obtenção do título de bacharelado em Astronomia.

Área de Concentração: Astrofísica estelar
Orientador(a): Prof. Dr. Alex Cavaliéri Carciofi

São Paulo

2014

à Karina e à minha família

Agradecimentos

Ao professor orientador Alex Cavaliéri Carciofi, pela oportunidade de trabalho, gentileza, paciência e por oferecer a oportunidade à outros conhecimentos.

Ao pós-doutorando e colega Rodrigo G. Vieira, pela paciência e por compartilhar sua empolgação, conhecimento e tempo, e pela grande ajuda na elaboração deste texto e sem o qual este trabalho não seria possível.

Ao pessoal que compõem nosso grupo de pesquisa, Artur Alegre, Bruno Mota, Cyril Escolano, Daniel Moser, Daiane Breves, Daniel Bednarski, Despina Panoglou, Fellipy Silva, Jorge Ribeiro, Leandro Rimulo, Lucas Zillner, Sayyed Mohammad, Sérgio Quadros, Xavier Haubois por compartilharem a empolgação, conhecimento e companheirismo.

Aos Professores e estudantes, que fazem do IAG um lugar próspero e conciliador.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Aos grupos de estudos da física e da FFLCH, em especial ao Álvaro, Alex e Ricardo, que nos levam à reflexões profundas e no auxílio na busca do autoconhecimento, proporcionando novos estados de pensamento/entendimento.

Aos colegas da FFLCH, André Guedes, Martha Costa, Paulo Borges, Viviane Longo, Rosana de Oliveira, pela amizade, companheirismo e por me ensinarem muito sobre outros universos.

Aos queridos Rosane Amado, Willian Amado, Marcus Lourenço pelo carinho e amizade.

Aos colegas do basquete de Taboão da Serra e região, que me tornaram uma pessoa mais sociável e saudável.

Ao time de Basquete, que me fez sentir como integrante de uma família, em especial ao Victor Santoro e Robson Gomes por sua dedicação, entrega e lágrimas.

Aos meus sogros Ana e Domingos, e cunhado Rodolfo, pelo respeito e carinho com o qual me receberam e me trataram.

Aos meus avós Levino, Dionízia, Gizelda e Benê, ao pai João e a muitos outros amigos espirituais que sempre estão conosco.

À minha família, pelo amor, carinho, compreensão e dedicação incondicional e pelo apoio, conversa e compreensão que nunca faltaram; e por momentos e exemplificações que me ajudaram a me tornar um ser melhor, desde ir à feira pegar comida para os bichinhos, aos piqueniques na história e geografia.

Aos meus irmãos Cássio e Marcos por todo carinho, companheirismo, amizade e apoio sincero.

À Karina Oliveira pelo seu amor e dedicação, por ombrear a vida comigo e por acreditar mais em mim do que eu mesmo; e por me apresentar ao esperanto, o que possibilitou que eu conhecesse pessoas maravilhosas como José Tenório, Rodolfo Boffo, Fernanda Aguilera, Thiago Andrade, Daniel Morales, Eder, Priscila e Lais Benedetti, Toni, Rodner, para citar alguns nomes.

“Não entendo. Isso é tão vasto que ultrapassa qualquer entender. Entender é sempre limitado. Mas não entender pode não ter fronteiras. Sinto que sou muito mais completa quando não entendo. Não entender, do modo como falo, é um dom. Não entender, mas não como um simples de espírito. O bom é ser inteligente e não entender. É uma benção estranha, como ter loucura sem ser doida. É um desinteresse manso, é uma doçura de burrice. Só que de vez em quando vem a inquietação: quero entender um pouco. Não demais: mas pelo menos entender que não entendo.”

Clarice Lispector - A Descoberta do Mundo

“Em toda a história da humanidade há uma questão que nos acompanha, que é absolutamente abstrata mas funda, que é: Porque é que existe alguma coisa e não o nada?”

Quatro foram os caminhos para tentar responder a esta angústia: a ciência a arte a filosofia e a religião. Com uma grande diferença: a ciência procurou trabalhar o como, o funcionamento das coisas, enquanto que a arte, a filosofia e a religião foram em busca dos porquês. Ambos são necessários; não ao mesmo tempo e não do mesmo modo, mas tanto o como, quanto o porque são necessários.”

Mário Sérgio Cortela - Eu maior

Resumo

O fenômeno Be está associado à linhas de emissão no espectro de estrelas quentes (tipo B), relacionadas a um disco equatorial, circunstelar ionizado. O estudo desses discos foi realizado até o momento exclusivamente por meio de modelos de estrelas individuais. Um modelo que tem se destacado pela sua capacidade de explicar várias das propriedades observacionais destes discos é o modelo de decréscimo viscoso (Viscous Decretion Disk - VDD, em inglês).

Na modelagem das observações, utilizamos o código de transferência radiativa HDUST. O código utiliza o método de Monte Carlo para resolver a transferência da radiação polarizada em modelos de disco compatíveis com o VDD. Como resultado, ele calcula a distribuição de energia espectral, espectro polarizado, perfis de linha, imagens e mapas de polarização.

Acreditamos que o próximo grande passo no estudo das estrelas Be é o teste da universalidade do modelo de VDD. Isto pode ser feito com a comparação de suas previsões com os resultados de grandes levantamentos disponíveis atualmente. Com este intuito, o grupo de interferometria do IAG/USP, liderado pelo Professor Dr. Alex C. Carciofi, iniciou o projeto BE ATLAS. O BE ATLAS consiste em uma grade de 2100 modelos, que abrange os vários subtipos espectrais de estrelas tipo B e parâmetros físicos do disco, calculada pelo código HDUST.

Neste trabalho, apresentamos uma série de ferramentas desenvolvidas, em parceria com o pós-doutorando Rodrigo G. Vieira, para analisar os resultados obtidos com o BE ATLAS. Inicialmente, estudamos a eficiência de paralelização do HDUST, seguido de estudos sobre a melhor maneira de calcular o fluxo em banda. Em seguida, estudamos as propriedades da estrutura térmica do disco. Atualmente, encontra-se em desenvolvimento uma série de rotinas para a visualização dos modelos que constituem o BE ATLAS, sendo já funcional a parte utilizada para análise da convergência dos modelos. Finalmente, um estudo preliminar sobre os primeiros resultados do BE ATLAS é apresentado.

Abstract

The Be phenomenon is associated to the presence of line emission in addition to the photospheric spectrum of hot stars (B spectral type), arising from an equatorial and ionized disk. Until now, the study of these disks was based exclusively on models of individual stars. In particular, the Viscous Decretion Disk (VDD) model provides the most satisfactory description of the observational properties of these stars.

To model the observations, we use the radiative transfer code, HDUST. This code uses the Monte Carlo method to solve the radiative transport in Be stars disks, and is able to compute the spectral energy distribution, polarized spectrum, line profiles, images and maps of polarization.

We believe that the next breakthrough in the field is the test of the universality of the VDD model. This can be done by confronting the model implications to the results of large surveys currently available. Motivated by this proposition, the interferometric group from IAG/USP, led by Professor Alex C. Carciofi, started the BE ATLAS project. The BE ATLAS consists of 2100 models, encompassing the several Be spectral sub-types and disk physical parameters, to be computed with HDUST.

In this work, we present a set of useful developed tools, made in collaboration with the post-doctorate Rodrigo G. Vieira, to analyse the upcoming results of the BE ATLAS. We have tested the HDUST parallelization efficiency with the Ahmdal law, in order to determine the optimal number of processors to run the BE ATLAS processes. Additionally, we have studied different numerical methods to compute flux in a band from HDUST computed fluxes. Also, we have studied the properties of the thermal structure of the disk, in terms of parametric functions. Currently, a set of visualization routines is under development, in order to analyse the BE ATLAS results. In particular, the visualization tools to study the convergence of the models is already working and is presented. Finally, a preliminary study of the BE ATLAS first results is presented.

Lista de Figuras

1.1	Observações e modelos de ζ Tauri. Esquerda: SED observada (preto), modelada (azul) e SED da fotosfera estelar (vermelho). Direita: Espectro polarizado observado (preto), modelado (azul), Carciofi et al. (2009).	22
1.2	Projeção da convergência dos modelos que constituem o BE ATLAS. Neste gráfico mostramos os modelos para as várias densidades superficiais do disco e de massas estelares e a projeção de corte de modelos que não convergirão.	26
1.3	O crescimento radial da emissão no contínuo para várias bandas espectrais juntamente a polarização na banda V. O fluxo estelar foi subtraído do espectro total de forma a mostrar apenas o fluxo proveniente do disco, Rivinius et al. (2013).	27
2.1	Estudo da eficiência de paralelização do código BE ATLAS para três diferentes processos: o cálculo da temperatura do disco, emissão no contínuo e produção de $H\alpha$	31
2.2	Comparação das temperaturas para a região interna do disco: realista (obtidas com o BE ATLAS) e as temperaturas fornecidas por duas expressões analíticas obtidas a partir de modelos simplificados.	34
2.3	Resultado da parametrização automatizada da estrutura de temperatura do disco.	35
2.4	Exemplo de resultado produzido utilizando a rotina de visualização da temperatura dos modelos do BE ATLAS.	39
2.5	Estudos da dependência do raio de transição térmica como função da massa e do achatamento geométrico estelar.	40

2.6	Estudo do raio de transição térmica como função da densidade superficial do disco.	40
-----	--	----

Lista de Tabelas

1.1	Diferentes modelos para o HDUST. São listadas as maneiras que o código pode calcular a temperatura e as densidades radial e vertical.	25
2.1	Avaliação de diferentes métodos para o cálculo de fluxo em banda. A comparação é feita com o valor esperado observacionalmente, tendo em vista o erro estatístico da simulação.	33

Sumário

1. <i>Introdução</i>	19
1.1 Apresentação	19
1.2 Estrelas de Alta Massa e a Rotação Estelar	21
1.3 Estrelas Be	22
1.3.1 O Modelo de Decréscimo Viscoso	23
1.4 HDUST	24
1.5 Be Atlas	25
1.6 Locais de Formação dos Observáveis	27
2. <i>Estudo Sistemático dos Discos de Estrelas Be</i>	29
2.1 Lei de Amdahl	30
2.1.1 Objetivos	30
2.1.2 Metodologia	30
2.1.3 Resultados	31
2.2 Cálculo do Fluxo em Banda Fotométrica	32
2.2.1 Metodologia	32
2.2.2 Resultados	32
2.3 Estrutura Térmica do Disco	33
2.3.1 Objetivos	33
2.3.2 Metodologia	34
2.3.3 Resultados	35
2.4 Primeira Análise dos Modelos do BE ATLAS	36
2.4.1 Objetivos	36

2.4.2	Metodologia	37
2.4.3	Resultados	37
3.	<i>Conclusões e Perspectivas</i>	41
	<i>Referências</i>	43

Introdução

O objetivo Original do projeto era o estudo da região de formação dos observáveis, utilizando uma grade de modelos extensa (o BE ATLAS). Naturalmente o projeto se voltou ao desenvolvimento de ferramentas para análise e desenvolvimento desta grade de modelos. Atualmente estamos desenvolvendo ferramentas para análise inicial dos modelos que constituem o BE ATLAS. Os passos seguintes do projeto, seguem a linha de produção de ferramentas, mas agora se voltando para a comparação entre os modelos e observações, mais especificamente, para comparar as SED e polarimetria.

O estudo sistemático feito a partir da grade de modelos em desenvolvimento permitirá em última instância, que testemos a universalidade do modelo de disco de decréscimo viscoso (VDD¹), que até então tem sido confirmado por estudos individuais de objetos. Em particular, as ferramentas de análise desenvolvidas pelo presente trabalho serão de grande utilidade para o estudo do BE ATLAS e de suas implicações.

1.1 Apresentação

A descoberta da primeira estrela Be ficou registrada em uma carta do diretor do observatório do Collegio Romano, o Padre Secchi (1866), datada de 23 de Agosto de 1866. A carta endereçada ao editor do "*Astronomische Nachrichten*", reportava "une particularité de l'étoile γ Cassiopée" que ao invés de uma linha de absorção $H\alpha$, como observada em Sirius e Vega, apresentava "une ligne lumineuse très belle et bien plus brillante que tout le reste du spectre." Esta frase marca a descoberta da primeira estrela Be por meio da linha de emissão $H\alpha$. Posteriormente, Struve (1931) presumiu que as linhas deveriam se

¹ do inglês, *Viscous Decretion Disk*.

originar de objetos em rotação extremamente rápida; desta forma a rotação faria a estrela se achatar e ejetar matéria através da região equatorial. Mais tarde, Collins (1987) apresentou a definição atual de estrelas Be clássicas, situando-as como estrelas não supergigantes (ou seja que estão da Sequência Principal ou saindo dela) cujo espectro apresenta, ou apresentou em algum momento, uma ou mais linhas de Balmer em emissão.

Há apenas duas ou três décadas, o conhecimento observacional e teórico de estrelas Be saltou de aproximações taxonômicas e *toy-models* para um consenso das propriedades físicas presentes e processos atuantes em estrelas Be. Esse progresso se deve, em parte, à disponibilização de bases de dados extensas e de alta precisão em fotometria, polarimetria e espectroscopia, incluindo dados de missões espaciais, e ao surgimento de novas técnicas observacionais, como a interferometria. Complementarmente, avanços computacionais permitiram modelos teóricos muito mais detalhados.

Estrelas Be são objetos enigmáticos. Resultados apresentados em últimas conferências, mostram o surgimento de um consenso qualitativo, tomando estrelas Be como sendo estrelas B em alta rotação e pulsação não-radial com a formação de um disco de decreção. Seus discos são alimentados pela perda de massa da estrela e compostos de gás ionizado, sendo governados pela viscosidade e possuindo um comportamento kepleriano. Apesar do mecanismo responsável pela transferência de massa entre estrela e disco ser desconhecido, há vínculos suficientes para guiar futuros trabalhos. Pesquisas em estrelas Be têm avançado significativamente, permitindo a investigação das propriedades quantitativas em detalhe, como por exemplo, a primeira determinação do parâmetro de viscosidade do disco por Carciofi et al. (2012). Há algumas décadas o estudo de estrelas Be era considerado peculiar e de pouca relevância para a área principal (estrelas quentes e massivas). No entanto, é mais adequado vê-las atualmente como os mais bem compreendidos laboratórios de física estelar para a parte superior da sequência principal, entre outros fatores, pela presença de efeitos da alta rotação na estrutura e características astrofísicas dessas estrelas (Che et al., 2011).

A importância astrofísica do estudo da teoria de discos é ampla, além do estudo do fenômeno Be. Por exemplo, este estudo constitui importante elemento para a compreensão de estrelas jovens com discos, formadas a partir de nuvens em colapso, como as estrelas de Herbig Ae/Be e as T Tauri, que estão na fase de acreção de matéria. Algumas das estrelas mais brilhantes do céu são estrelas Be, e levando-se em conta que a escala temporal das

variações do disco é bastante variada, esses objetos oferecem uma importante oportunidade para o estudo dinâmico de discos.

1.2 Estrelas de Alta Massa e a Rotação Estelar

As propriedades estelares, como a rotação, temperatura, a presença de campo magnético, metalicidade, podem alterar drasticamente o caminho evolutivo de estrelas massivas (massa maior que $\sim 5M_{\odot}$). Nos modelos de evolução estelar, destaca-se a taxa de perda de massa, que em estrelas massivas pode chegar a várias massas solares ao longo da sequência principal.

A rotação pode influenciar de maneiras diferentes o caminho evolutivo estelar. Meynet e Maeder (2000) argumentam que após a fase na sequência principal, os efeitos de contração do núcleo e expansão do envelope dominam a evolução do momento angular. Adicionalmente, as velocidades superficiais podem diminuir durante a evolução na sequência principal (devido à alta taxa de perda de massa), o que gera uma remoção significativa do momento angular. Um resultado curioso é que para estrelas com massas inferiores à $12M_{\odot}$ com velocidades iniciais elevadas podem atingir o limite crítico próximo ao fim da Sequência Principal, o que pode explicar as estrelas Be. Outros efeitos originários da rotação estelar são

1. Deformação geométrica devido a alta taxa de rotação. Este efeito foi diretamente detectado através de medições interferométricas para as estrelas Archenar (Domiciano de Souza et al. (2003); Carciofi e Bjorkman (2008)) e Altair (Monnier et al., 2007).
2. Escurecimento gravitacional (ou efeito Von Zeipel para estrelas quentes (von Zeipel, 1924), que é caracterizado pelo redirecionamento do fluxo do equador para o polo, devido a baixa gravidade efetiva ($T_{eff} \propto g^{0.25}$), já tendo sido observado com o uso da interferometria (e.g. Domiciano de Souza et al. (2012)).

Embora os recentes avanços, ainda há dificuldades na determinação da taxa de rotação através da espectroscopia. Por exemplo, Cranmer (2005) e Townsend et al. (2004) mostram que a taxa de rotação podem estar sendo subestimadas, quando é levado em consideração o efeito de escurecimento gravitacional na análise de dados. Isto porque o fluxo de regiões de

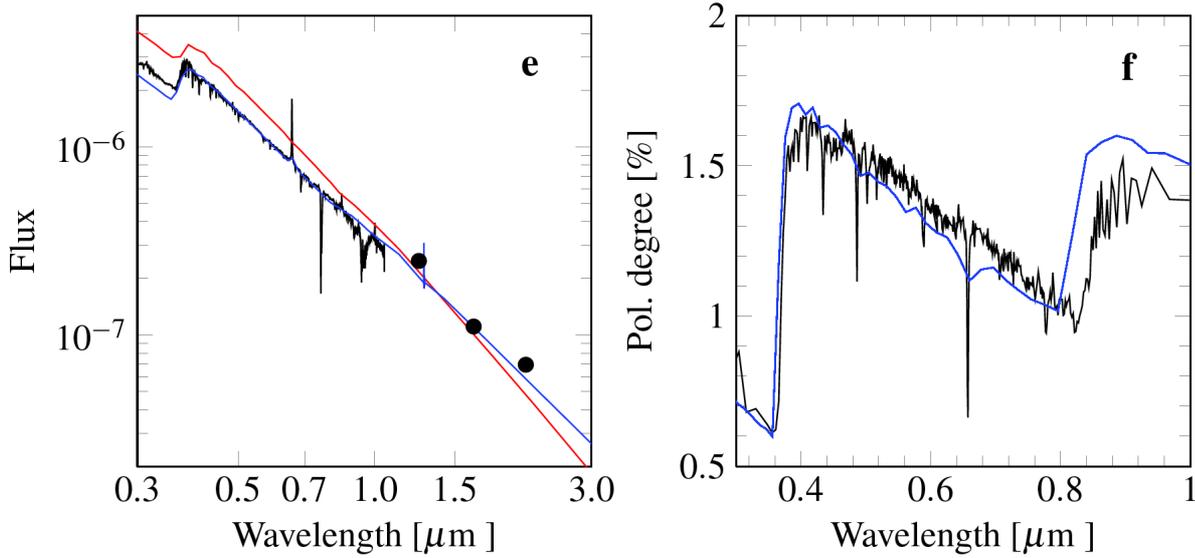


Figura 1.1: Observações e modelos de ζ Tauri. Esquerda: SED observada (preto), modelada (azul) e SED da fotosfera estelar (vermelho). Direita: Espectro polarizado observado (preto), modelado (azul), Carciofi et al. (2009).

alta velocidade torna-se reduzido, ou seja, as regiões de menor velocidade acabam tendo um peso maior no espectro total, fazendo com que as velocidades projetadas, $v \sin i$, calculadas sem o escurecimento, sejam subestimadas.

1.3 Estrelas Be

A concepção das propriedades do material circunestelar em torno de estrelas Be evoluiu muito desde os trabalhos pioneiros de (Struve, 1931), que foi o primeiro a propor um modelo viável para explicar as linhas de emissão presentes no espectro destas estrelas. Graças aos avanços observacionais e teóricos, há uma década vimos surgir um consenso de como esses discos são estruturados. O paradigma de disco viscoso, VDD, se fortaleceu apoiado em pelas observações e pela teoria, tendo o nosso grupo do IAG fornecido contribuições interessantes na parte de teoria e de transporte radiativo de discos circunstelares com o auxílio do código de Monte Carlo de transporte radiativo, o HDUST. Em Carciofi et al. (2009), por exemplo, é apresentado o primeiro teste realmente crítico do VDD mostrado na figura 1.1. Nesta figura, tem-se o ajuste da SED² e do espectro polarizado de ζ Tauri.

A modelagem de discos de Be é uma tarefa complexa, pois o gás circunestelar está a baixas densidades e ionizado ($\rho < 10^{-10} \text{g cm}^{-3}$) implicando em um equilíbrio termodinâmico

² Spectral Energy Distribution

não local, NLTE³. Resolver o transporte radiativo em regime NLTE em geometrias 2D e 3D é notoriamente complexo, tendo evoluído significativamente mais recentemente (Carciofi e Bjorkman, 2006). A estrutura do disco que é radialmente governada pela viscosidade e verticalmente governada pelo equilíbrio hidrostático, que é fortemente dependente da temperatura (Carciofi e Bjorkman, 2008). Progressos recentes indicam que o material é radialmente conduzido para fora sob a influência de torques viscosos, ainda não muito bem compreendidos.

Observacionalmente, sabemos que estrelas Be são marcadas por possuírem discos circunstelares que podem ser detectados pelo excesso de emissão no infravermelho resultante do reprocessamento da radiação estelar pelo disco, pela polarização da radiação estelar pelo disco e via linhas espectrais em emissão em relação ao espectro fotosférico. Adicionalmente, estrelas Be apresentam variabilidade que pode se manifestar em vários observáveis, abrangendo uma escala temporal variada, podendo ir de décadas a minutos. Acredita-se, de forma geral que as variações de curto período estão ligadas às variações na fotosfera estelar ou na parte mais interna do disco, enquanto que as de longo período estariam ligadas a variações mudanças nas propriedades globais do disco circunstellar.

1.3.1 O Modelo de Decréscimo Viscoso

Qualquer teoria que se proponha a descrever os discos de estrelas Be, deve reproduzir as informações estruturais obtidas diagnosticadas observacionalmente. Por exemplo, a espectro-interferometria determinou que o material do disco gira em torno da estrela de forma kepleriana, e a polarimetria e a interferometria determinam que os discos são geometricamente finos. Até o momento, a única teoria capaz de satisfazer os vínculos observacionais é o modelo de disco de decréscimo viscoso proposto por Lee (1991) e desenvolvido por vários autores (Porter, 1999, Okazaki, 2001, Bjorkman e Carciofi, 2005).

Este modelo é o mesmo empregado para discos protoestelares, sendo que os discos de estrelas Be são *outflowing*. No VDD é suposto um mecanismo de ejeção de massa estelar (ainda desconhecido), que injeta material na base do disco a uma velocidade orbital kepleriana. A viscosidade turbulenta começa a atuar, fornecendo momento angular ao material e transportando-o para regiões mais externas do disco. Partindo de hipóteses simplificadas (de uma taxa de perda de massa fixa e disco isotérmico), podemos calcular

³ Non-Local Thermodynamic Equilibrium

o perfil estacionário de densidade volumétrica do disco. Obtemos um perfil de densidade volumétrica na forma de uma lei de potência:

$$\rho(\varpi, z) = \rho_0 \left(\frac{\varpi}{R_\star} \right)^{-n} \exp \left(-\frac{z^2}{2H^2} \right), \quad (1.1)$$

onde ρ_0 é a densidade de base do disco, ϖ é a distância radial do disco ao centro da estrela, R_\star é o raio estelar, z é a distância vertical do plano médio do disco e H é sua escala de altura, dada por $H = (a/v_\phi)\varpi$ (admitindo isothermalidade vertical e que o gás está em equilíbrio hidrostático), sendo a a velocidade isotérmica do som e v_ϕ é a velocidade na direção ϕ . Note que esta equação tem dois termos, um com dependência radial e outro com dependência vertical. Em outras palavras, poderíamos reescrever a equação acima como o produto da densidade vertical e da densidade radial.

Na eq. 1.1, temos uma dependência com o raio estelar. Porém, as estrelas em alta rotação são achatadas (isto é, o raio equatorial aumenta com a rotação), e o valor do raio utilizado na expressão acima é o raio equatorial, R_{eq} . Como explicado mais adiante (sec. 1.5), isto faz com que os discos, de mesma configuração mas com taxas de rotações maiores, sejam mais massivos. Esta propriedade é explicitada pela relação

$$\Sigma_0(M_\star, R_{eq}, a) = \left(\frac{2\pi}{GM_\star} \right)^{1/2} a \rho_0 R_{eq}^{1.5} \quad (1.2)$$

A escolha adequada da escala de altura (o que significa ajustar o valor de a) pode garantir que evitemos este tipo de problema, e por conseguinte possamos construir modelos de disco auto-consistentes.

1.4 HDUST

Dentre outras ferramentas teóricas desenvolvidas pelo grupo de interferometria do IAG/USP, para o estudo de estrelas Be, está o HDUST. O código de transferência radiativa utilizada o método de Monte Carlo para resolver a transferência da radiação polarizada no disco circunstelar. Entre outras grandezas, o HDUST calcula a distribuição de energia espectral, espectro polarizado, perfis de linha, imagens e mapas de polarização para uma configuração de estrela e disco dada pelo usuário. Sumariamente, a tarefa do código é converter as características e estrutura de um modelo físico em observáveis astrofísicos.

O código vem sendo empregado com sucesso na modelagem de várias estrelas Be e B[e] (Carciofi et al., 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012). Contudo, não há nenhum teste sobre a universalidade do VDD, de modo que o grupo de interferometria do IAG USP deu início à construção de uma grade de modelos, o BE ATLAS, que é descrito mais detalhadamente na subseção 1.5. Para a construção da grade de modelos, utilizamos o código HDUST, em diferentes tipos de modelos. As razões para as escolhas estão fora do propósito deste trabalho, de modo que estas não serão abordadas aqui, bem como os parâmetros para as simulações.

O transporte radiativo no disco depende do cálculo das opacidades em cada célula, que por sua vez dependem da estrutura de excitação, ionização e temperatura do disco. Como nenhuma destas grandezas é conhecida *a priori*, o HDUST adota um método iterativo, onde este conjunto de grandezas acopladas convergem simultaneamente. Neste processo de iterações, podemos escolher manter ou não algumas quantidades fixas. Na construção da grade BE ATLAS, utilizamos os modelos paramétrico e não isotérmico, descritos esquematicamente na tabela 1.1. Embora os modelos completamente não isotérmicos são completamente auto-consistentes, e portanto mais realistas, é ainda bastante útil discutir as propriedades do disco em termos de parâmetros físicos. Daí a relevância de mantermos os modelos paramétricos em nosso estudo.

Modelo	Dens. Vertical	Dens. Radial	Temperatura
Isotérmico	isotérmico	isotérmico	isotérmico
Paramétrico	isotérmico	isotérmico	não isotérmico
Híbrido	não isotérmico	isotérmico	não isotérmico
Não isotérmico	não isotérmico	não isotérmico	não isotérmico

Tabela 1.1 - Mostramos como os cálculos da temperatura (quarta coluna) e das densidades vertical e radial adotados para cada tipo de modelo (segunda e terceira colunas, respectivamente). As opções que são marcadas com **isotérmico**, simbolizam que o cálculo da grandeza (densidade ou temperatura) são feitos com base em expressões paramétricas, obtidas quando fazemos a hipótese de disco isotérmico. Já as opções com **não isotérmico** se referem à opção em as grandezas são calculadas iterativamente, a partir de um valor inicial.

1.5 Be Atlas

Visando a construção de uma grade de modelos que auxiliará na compreensão de correlações observadas entre diferentes observáveis (veja Yudin 2001, para um estudo da

correlação entre a polarimetria e fotometria infravermelha), o grupo de interferometria de estrelas Be do IAG, liderado pelo prof. Dr. Alex C. Carciofi, deu início a uma tarefa de grande escopo, o BE ATLAS. O projeto conta com a participação de vários estudantes de pós graduação, além de pós doutores, que estão trabalhando na construção de uma grade estimada de 2 100 modelos, para vários subtipos espectrais e parâmetros físicos do disco, utilizando o código HDUST. Adicionalmente, esta grade possibilita explorarmos a universalidade do VDD.

A grade de modelos, até o momento, abrange dez massas estelares, cinco taxas de rotação, quatro leis de potência da densidade (o parâmetro n da eq. 1.1) e sete valores de densidade superficial. A escolha da densidade superficial em vez da densidade volumétrica é justificada quando tentamos comparar a mesma configuração estrela + disco, com diferentes taxas de rotação. Nos modelos em que a rotação é crítica, a escala de altura também é maior, fazendo com que esses discos sejam 2.25 vezes mais massivos que o caso sem rotação (veja eq. 1.2).

Com as escolhas dos valores de densidade superficial e de massa das estrelas, sabemos que alguns dos modelos não convergirão (predominantemente os mais frios e densos). O nosso grupo fez uma projeção dos modelos que não convergirão, que é mostrado na fig. 1.2.

1.6 Locais de Formação dos Observáveis

Uma forma de analisar os discos de estrelas Be é estudar onde se formam os observáveis astrofísicos (polarização, excesso de emissão no contínuo linhas espectrais etc.) no disco. Para isso, é importante introduzirmos o conceito de locais de formação dos observáveis (*loci*), introduzido em Carciofi (2011) e que se mostrou útil por fornecer informações quantitativas de qual região é amostrada por cada observável.

Na figura 1.3 mostramos o fluxo integrado como função da distância radial à estrela, normalizado pelo fluxo total do disco, com raio de $100R_*$. Isto mostra que diferentes bandas possuem diferentes *loci* de formação, como por exemplo, a curva vermelha (referente ao fluxo de $60\mu m$) que amostra uma região maior do disco, $R \approx 20R_*$, enquanto que o fluxo no visível apresenta seu máximo nas regiões mais internas, $R < 2R_*$.

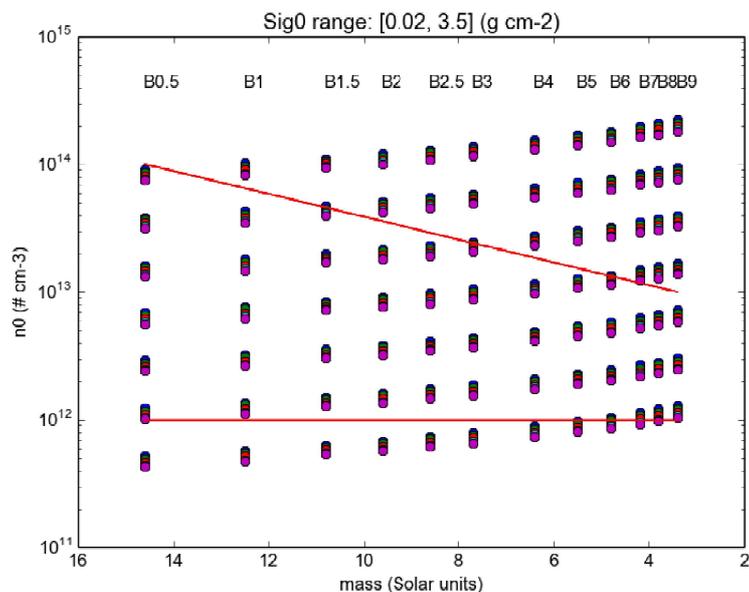


Figura 1.2: Projeção da convergência dos modelos que constituem o BE ATLAS. A projeção dos modelos que não convergiram estão abaixo da linha inferior vermelho a acima da linha superior. Os valores inferiores são modelos em que a densidade circunstelar é tão baixa que não é distinguível da emissão fotosférica. Os pontos verticais mostram a variação de n_0 (partículas por volume, ou $\#cm^{-3}$) com a taxa de rotação da estrela para manter fixa a densidade superficial. Esse gráfico vai de 0.2 à 3.5 g/cm^2 , e as densidade rodadas foram: 0.02, 0.05, 0.12, 0.28, 0.68, 1.65, 4.00 g/cm^2 .

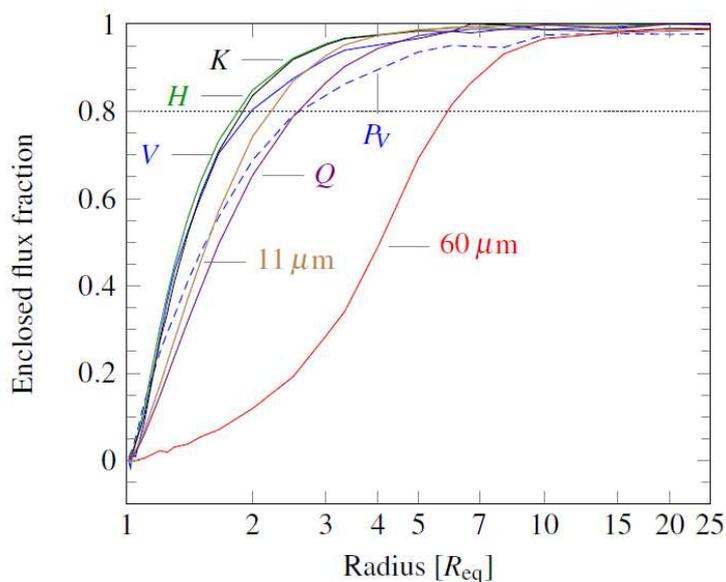


Figura 1.3: O crescimento radial da emissão no contínuo para várias bandas espectrais juntamente a polarização na banda V. O fluxo estelar foi subtraído do espectro total de forma a mostrar apenas o fluxo proveniente do disco, Rivinius et al. (2013).

Estudo Sistemático dos Discos de Estrelas Be

O objetivo original do projeto era o estudo sistemático dos locais de formação dos observáveis no disco, utilizando a grade de modelos BE ATLAS. Naturalmente, pelo fato de utilizarmos a grade de modelos, o objetivo do projeto se reorientou, parcialmente, para o desenvolvimento de ferramentas para análise para o BE ATLAS. Desta forma, o projeto é constituído por um conjunto de testes e pelo desenvolvimento de ferramentas, que descrevemos nas seções a seguir.

Inicialmente, estudamos a eficiência de paralelização do código de Monte Carlo, que é mostrado na seção 2.1.

O estudo das curvas de *loci* possui a dificuldade intrínseca: a definição de fluxo em uma banda. Deste modo, estudamos várias maneiras de se efetuar este cálculo e comparamos os resultados como o esperado observacionalmente; os resultados são apresentados na seção 2.2.

Visando reproduzir as curvas de *loci* obtidas com modelos do HDUST utilizando modelos simplificados, contruímos uma rotina que parametriza a estrutura de temperatura do disco. Utilizando dois parâmetros (a posição de mínimo de temperatura R_0 e temperatura da região externa do disco), esperamos reproduzir a estrutura de temperatura, para em seguida, aplica-la no cálculo de curvas de *loci*. Adicionalmente poderíamos aplicar essa ferramenta para analisar a convergência dos modelos que constituem o BE ATLAS. Os resultados obtidos são mostrados na seção 2.3.

O próximo passo foi o desenvolvimento de uma ferramenta específica para a visualização dos resultados do BE ATLAS. Atualmente esta ferramenta já permite a visualização da estrutura de temperatura do disco em uma iteração arbitrária, além do cálculo da média das quatro últimas iterações da temperatura. Uma perspectiva imediata deste trabalho

é estender esta ferramenta de visualização para a análise da SED, linhas de $H\alpha$, $H\beta$, $Br\gamma$, entre outros. No momento, essa rotina permitiu uma análise preliminar da estrutura térmica do disco, com o propósito de testar a convergência da grade de modelos. Os resultados são mostrados na seção 2.4.

2.1 Lei de Amdahl

2.1.1 Objetivos

Devido a grande quantidade de modelos que integrarão o BE ATLAS, é importante que minimizemos o custo computacional envolvido, principalmente no que diz respeito ao tempo de processamento. Para estudarmos a eficiência de paralelização do código HDUST, em termos do número de processadores, utilizamos a Lei de Amdahl (que prediz a máxima eficiência teórica esperada de um código paralelizado). Este estudo tem importância fundamental dentro do projeto do BE ATLAS, dado que ele não apenas determina a forma mais eficiente de utilizarmos os recursos computacionais disponíveis em nosso departamento, como também pode otimizar os processos paralelos submetidos do grupo.

2.1.2 Metodologia

A lei de Amdahl é um modelo teórico que relaciona a velocidade esperada de um algoritmo paralelizado com outro não paralelizado (ou serial), assumindo que ambos possuem o mesmo tamanho, ou seja, ao paralelizarmos uma porção P de um programa teremos um fator de melhora S . É de interesse que expressemos esta lei em função do número de processadores, n , que fica:

$$S(n) = \frac{1}{(1 - P) + \frac{P}{n}}, \quad (2.1)$$

onde $S(n)$ é o aumento máximo da velocidade de processamento. A partir do fator de melhora conseguimos calcular a eficiência de paralelização do código.

Analizamos a eficiência de paralelização, testando três tipos de cálculos distintos realizados pelo código: a convergência da temperatura no disco, o cálculo da emissão no contínuo e em linha. Isto porque os cálculos por trás de cada processo físico são diferentes, e logo é importante que saibamos como o código se comporta nesses três processos

2.1.3 Resultados

Utilizando diferentes números de processadores para computar a mesma simulação (com a mesma configuração dos parâmetros estelares e do disco), obtivemos uma curva de tempo de processamento por número de processadores. Este procedimento foi repetido para os três diferentes processos (cálculo de temperatura, emissão no contínuo e em linha), para os quais calculamos os respectivos fatores de melhora. Os resultados obtidos são mostrados na figura 2.1. A eficiência de paralelização ficou em $P = 0.999$ (ou 99.9%) para os três casos. Isto significa que, pelo menos dentro do limite de 512 processadores, o tempo de processamento do código diminui proporcionalmente ao número de processadores, com uma perda de eficiência praticamente nula.

Portanto, para efeitos práticos, demonstramos que a eficiência na paralelização do código HDUST garante que podemos utilizar ao máximo os recursos computacionais oferecidos pelo departamento, sem prejuízo algum à otimização de nossos processos.

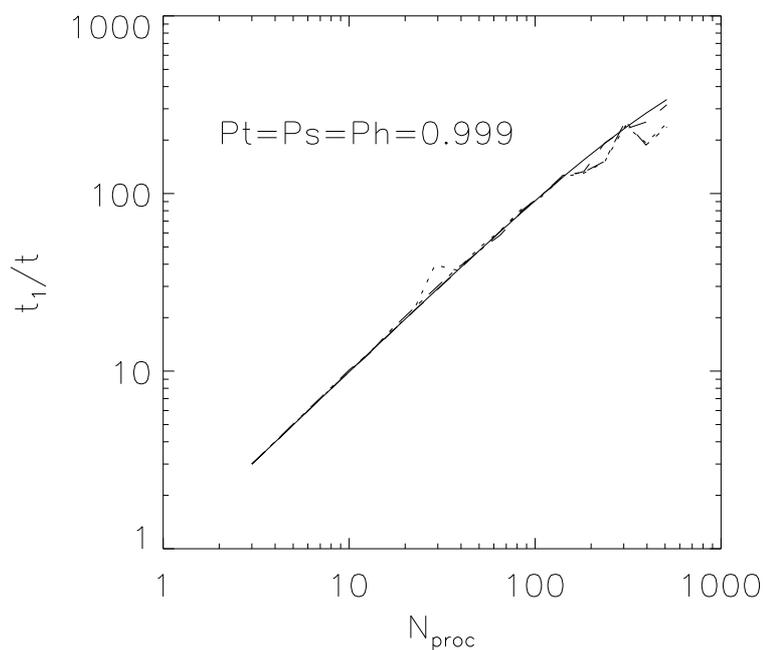


Figura 2.1: Comparação da curva teórica da Lei de Amdahl (linha cheia) com a obtida utilizando o código HDUST para a temperatura do disco (linha tracejada), emissão no contínuo ou SED (linha pontilhada) e a $H\alpha$ (linha tracejada com pontos). O fator de paralelização para os três processos são iguais, com valor de $P = 0.999$.

2.2 Cálculo do Fluxo em Banda Fotométrica

Utilizando o código HDUST, podemos calcular o fluxo contínuo emitido pelo disco em diversos comprimentos de onda. No entanto, para relacionarmos esta quantidade às observações, devemos convertê-la em fluxo medido em uma *banda espectral* específica.

Nesta seção, exploramos diferentes métodos para o cálculo do fluxo em uma banda, na busca da melhor maneira para realizar esta conversão. Em particular, adotamos a curva de transmissão da banda *K* (2MASS) como referência para este estudo.

2.2.1 Metodologia

Para estimar o fluxo na banda a partir dos resultados do HDUST, utilizamos os seguintes métodos numéricos: *(i)* a integração na caixa, *(ii)* *Spline* cúbica, *(iii)* média dos pontos vizinhos, e *(iv)* o fluxo do ponto mais próximo do comprimento de onda central da banda (λ_c). Tomamos como referência para comparação entre os métodos o cálculo exato do fluxo na banda, que corresponde à convolução dos fluxos calculados pelo HDUST com a curva de transmissão (T_λ) do filtro utilizado,

$$F_{\text{band}} = \frac{\int T_\lambda F_\lambda d\lambda}{\int T_\lambda d\lambda}. \quad (2.2)$$

Apesar de apresentarmos apenas o resultado para a banda K, a rotina desenvolvida é capaz de ser utilizada para outras bandas¹. Finalmente, o erro relativo associado a cada método é comparado à dispersão associada à razão sinal-ruído da simulação (erro estatístico). Desta forma, podemos testar se as flutuações observadas são reais ou correspondem à dispersão intrínseca à simulação.

2.2.2 Resultados

Os resultados das diferentes maneiras de se calcular o fluxo são mostrados na tabela 2.1, em unidades de código. Nela, podemos verificar que o algoritmo de integração na caixa, dentro do erro estatístico, melhor corresponde ao fluxo total observado na banda (*i.e.*, resultado da convolução). Desta forma, demonstramos que o método de integração na caixa é a melhor maneira de se realizar o cálculo do fluxo para a banda K. Isto se

¹ As curvas de transmissão utilizadas estão disponíveis no sítio do SOAR para as bandas JHK. Para as bandas UBVRi, utilizamos as curvas de Bessell (1990)

deve provavelmente ao fato de que o fluxo varia muito rapidamente dentro deste intervalo espectral, fazendo com que seu ponto central não corresponda à média na banda.

É importante ressaltar que este resultado não é necessariamente válido para outras bandas, dado que a curva de transmissão de cada filtro pode variar bastante. No entanto, o presente trabalho oferece as ferramentas para testarmos qualquer banda específica de interesse.

Método	F_{λ_c}	$\sigma_{F_{\lambda_c}}$	$\sigma_{Relativo}$
Convolução	7574	-	-
Integração na Caixa	7568	$8,441 \times 10^{-4}$	0.1252
Spline Cúbica	7478	$1,284 \times 10^{-2}$	1.882
Média dos Pontos Vizinhos	7487	$1,171 \times 10^{-2}$	1.718
Ponto Mais Próximo	7692	$1,531 \times 10^{-2}$	2.208

Tabela 2.1 - Os vários métodos utilizados para calcular o fluxo no comprimento de onda central para a banda K, juntamente com o método de convolução que é o método de referência. Na primeira coluna mostramos os métodos utilizados, seguidos do dfluxo no comprimento de onda central da banda (que está em unidades de código), do erro do fluxo normalizado de cada método e o erro relativo. Para se obter o erro relativo, dividimos o erro de cada método pelo erro estatístico dos dados gerados pelos HDUST, que neste caso é de $\sigma_{HDUST} = 8,60302 \times 10^{-3}$.

2.3 Estrutura Térmica do Disco

2.3.1 Objetivos

Utilizando modelos simplificados, que levam em conta a física do disco mais relevante, gostaríamos de reproduzir as curvas de *loci* obtidas com o HDUST. Resultados prévios do grupo indicam que a temperatura do disco possui papel central no comportamento destas curvas. As simulações indicam um comportamento extremamente não isotérmico da temperatura (*e.g.*, Carciofi e Bjorkman 2006), caracterizado por dois regimes diferentes: uma lei de potência, na região mais interna do disco; enquanto para as regiões mais afastadas observamos um regime isotérmico. As regiões características em que cada regime ocorre, assim como a zona de transição entre eles, influenciam na formação dos observáveis.

A presença dos dois regimes se deve à propriedades globais do disco (Vieira et al., 2014). Utilizaremos o BE ATLAS para validar essas parametrizações a partir de estudos sistemáticos, varrendo todo o espaço de parâmetros relevante e estudando as possíveis

correlações que possam haver entre a parametrização da temperatura e a produção de observáveis. Na seção 2.4, apresentamos resultados preliminares da posição da transição entre os dois regimes ocorre.

2.3.2 Metodologia

Se fazemos a hipótese de um disco fino, oticamente espesso e admitindo-se o equilíbrio radiativo, obtemos uma expressão analítica para a temperatura, como função do raio do disco (Lynden-Bell e Pringle, 1974):

$$T(\varpi) = (1/\pi)^{1/4} T_\star \left[\sin^{-1}(R_\star/\varpi) - (R_\star/\varpi) \sqrt{1 - (R_\star/\varpi)^2} \right]^{1/4} \quad (2.3)$$

onde T_\star e R_\star são a temperatura e o raio da estrela, respectivamente e ϖ é a distância radial do disco ao centro da estrela. Se tomamos essa equação no limite em que ϖ/R_\star tende ao infinito, obtemos uma lei de potência:

$$T = \frac{T_\star}{(2\pi)^{1/4}} (\varpi/R_\star)^{-3/4} \quad (2.4)$$

Inicialmente, avaliamos a diferença entre a descrição da temperatura na região interna para as duas expressões, uma vez que a segunda é mais simples e fácil de ser implementada e é mais frequentemente utilizada que a primeira (na literatura, a expressão 2.4 é utilizada para a descrição da parte interna do disco, justa posta, às hipóteses de grandes distâncias,

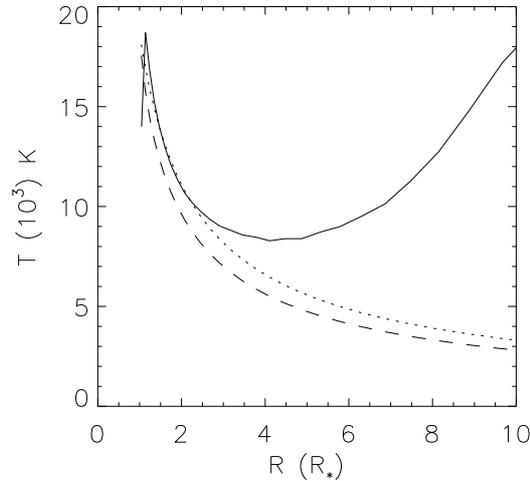


Figura 2.2: Comparação entre a temperatura de um modelo do HDUST (linha cheia) e as equações 2.3 (linha tracejada) e 2.4 (linha pontilhada).

utilizadas para obtê-la). Adicionalmente comparamos as temperaturas dadas pelas duas equações com a produzida para um modelo do HDUST.

Em seguida, implementamos uma rotina que parametriza a estrutura de temperatura. A parametrização é feita utilizando-se de dois parâmetros: o raio para o qual ocorre o mínimo de temperatura (que chamaremos por simplicidade de, raio de transição térmica ou RTT), R_0 , e a temperatura isotérmica do disco, T_{iso} . Dessa forma, utilizamos a lei de potência para a região interna do disco ($\varpi < R_0$) e o regime isotérmico para a região externa ($\varpi > R_0$).

2.3.3 Resultados

A comparação entre as temperaturas, para a região interna do disco, é mostrada na fig. 2.2. Nota-se que a diferença entre as duas descrições da temperatura é pequena, sendo que a lei de potência é sistematicamente menor que a expressão 2.3, e que elas se aproximam quanto maior é a distância à estrela. Logo, concluímos que podemos utilizar a lei de potência para a descrição da temperatura interna do disco como uma aproximação razoável.

O resultado da parametrização da estrutura térmica é mostrado na fig. 2.3. A parametrização implementada mostrou-se insuficiente, pois a temperatura isotérmica ajustada não

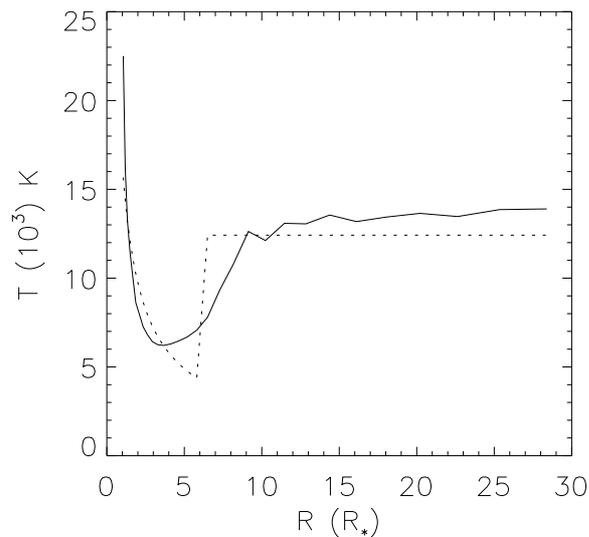


Figura 2.3: Resultado da modelagem paramétrica, onde observa-se que a temperatura isotérmica é menor que o platô de temperatura do modelo do HDUST.

representa bem o platô da temperatura do modelo (sendo menor do que deveria). Isso se deve ao fato de termos ignorado a região de transição térmica entre a região que é descrita pela lei de potência e a região em que admitimos a isothermalidade. Concluímos portanto que a parametrização da estrutura isotérmica deve levar em consideração a região onde a temperatura sobe para atingir o valor da parte externa do disco. Essa descrição deve ser melhor explorada em um estudo sistemático a ser desenvolvido com o BE ATLAS.

2.4 Primeira Análise dos Modelos do BE ATLAS

2.4.1 Objetivos

Dados os parâmetros físicos do sistema estrela+disco, o código de HDUST inicialmente calcula as estruturas térmica, de excitação e de ionização do disco. Dadas estas informações, ele é capaz de calcular posteriormente os diversos observáveis de interesse do disco (SED, polarização, linhas, etc). Recentemente, o grupo finalizou o processamento desta primeira etapa descrita, produzindo resultados para 2100 modelos.

Para avaliarmos os modelos que constituem esta etapa do BE ATLAS, desenvolvemos uma série de rotinas em linguagem IDL² para a visualização dos resultados, de acordo com parâmetros fornecidos pelo usuário. A aplicação inicial desta ferramenta é sua avaliação da convergência dos perfis de temperatura que constituem a grade de modelos. A avaliação destes perfis de temperatura é feita através de inspeção visual, dado que não há um conjunto de critérios objetivos que permitam automatizar essa tarefa. O exame da convergência pode ser extremamente complexo, pois exige a verificação da evolução das soluções e se as iterações finais ainda guardam resquícios das condições iniciais.

Uma vez que a ferramenta de visualização para a avaliação da convergência esteja funcional, podemos utilizá-la para examinar a dependência do raio de transição térmica (R_0) com parâmetros da estrela e do disco. Este tipo de estudo é interessante porque a estrutura térmica determina o perfil de brilho do disco (Vieira et al., 2014). Desta forma, uma caracterização empírica desta estrutura utilizando o BE ATLAS pode ser útil não apenas para o estudo do perfil de brilho do disco, como também para a compreensão mais ampla dos processos físicos envolvidos no disco. Em particular, caracterizamos em nosso estudo a região de transição térmica (RTT), marcada pela posição de mínimo do perfil

² Interactive Data Language, <http://www.exelisvis.com/ProductsServices/IDL.aspx>

radial de temperatura do disco.

2.4.2 Metodologia

A ferramenta implementada para a produção dos gráfico é estruturada por uma rotina principal que chama uma série de outras sub-rotinas, de acordo com a opções que o usuário fornece ao programa. Para facilitar o teste de convergência da grade de modelos, em cada gráfico há três curvas. Entre as 30 iterações realizadas para cada modelo, são exibidas a décima iteração, a vigésima e a média das quatro últimas. As curvas correspondem ao perfil radial da temperatura no plano central do disco ($z = 0$).

Para o estudo da dependência estrutura térmica com os parâmetros do BE ATLAS, fixamos o expoente da densidade em $n = 3.5$. Os diferentes parâmetros estudados para a dependência da temperatura, foram:

- **Massa da estrela central:** o disco é constantemente irradiado pela estrela central, fazendo com que estrelas de maior ou menor massa tenham, respectivamente, discos mais ou menos quentes.
- **Taxa de rotação estelar:** para altas taxas de rotação, o brilho superficial da estrela não é uniforme, devido ao efeito de von Zeipel. Além do mais, o achatamento geométrico da estrela também modifica o campo de radiação que incide sobre disco.
- **Densidade superficial do disco:** como o material do disco é quase completamente ionizado, o processo livre-livre domina a opacidade do disco a partir do infravermelho médio. Esta, por sua vez, depende do quadrado da densidade do disco, e portanto determina diretamente seu regime ótico.

2.4.3 Resultados

A fig. 2.4 mostra o arquivo de saída da rotina de visualização desenvolvida. A figura exibe os perfis de temperatura associados às densidades superficiais da grade de modelos (colunas) e às massas estelares (linhas). Os parâmetros fixos escolhidos para o exemplo apresentado são $n = 3.5$ e achatamento geométrico $ob \equiv R_{eq}/R_p = 1.1$

A RTT como função da massa, e várias densidades, são mostrados à esquerda na Fig. 2.5, onde o achatamento geométrico foi fixado em $ob = 1.1$. Podemos notar que há uma

dependência entre o RTT e a massa da estrela (ou, equivalentemente, a temperatura da estrela). Quanto maior é a temperatura estelar, mais próxima é a RTT da estrela. Observamos também que o perfil de temperatura depende fortemente da densidade do disco. Para os modelos mais densos observamos uma migração da RTT, que se desloca de aproximadamente $5.0R_*$ para aproximadamente $3.5R_*$. Já para os modelos de disco menos densos, a posição de mínimo ocorre entre aproximadamente $2.5R_*$ e $2.0R_*$.

A relação entre o achatamento geométrico e a RTT é mostrada no painel à direita da fig. 2.5, para várias massas diferentes e densidade fixa. Já para uma massa fixa, observamos que não há dependência clara entre esses parâmetros. Contudo, observamos que a RTT é mais próxima da estrela quanto mais quente esta for.

Na Fig. 2.6 mostramos a RTT como função da densidade superficial do disco, para várias massas e mantendo um achatamento geométrico fixo. Notamos que há uma dependência entre esses parâmetros, sendo que a RTT está mais distante da estrela para maiores densidades, independentemente da massa do objeto central.

Estes são resultados preliminares, obtidos a partir da análise da recém rodada grade de modelos do BE ATLAS. O teste de convergência deverá ainda ser refinado, para que enfim possamos posteriormente calcular com o HDUST os observáveis do disco.

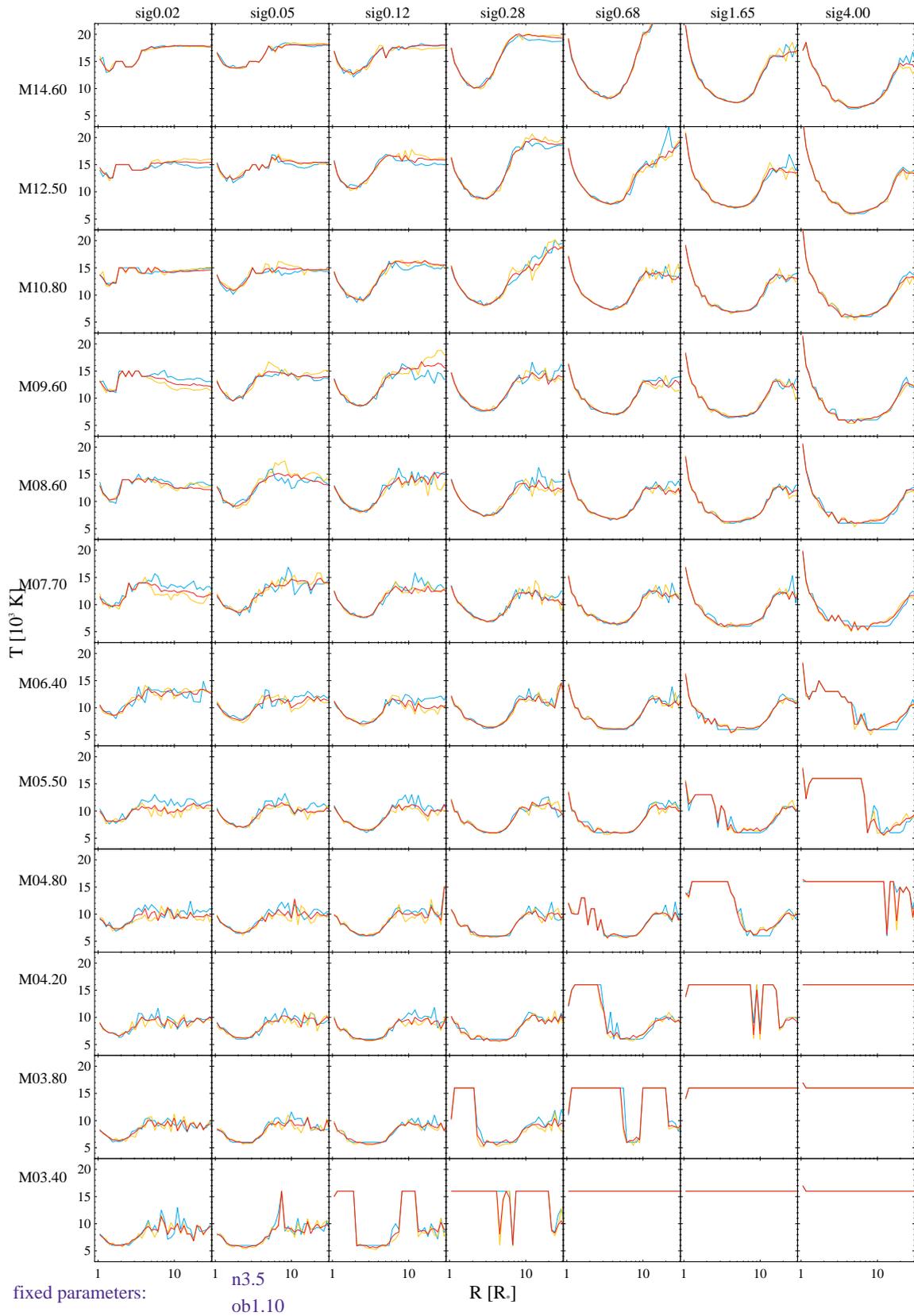


Figura 2.4: Exemplo de um gráfico produzido, variando massa e densidade superficial e fixando $n = 3.5$ e achatamento geométrico de $ob = 1.10$. Em cada gráfico temos três curvas: azul, amarela e vermelha, que representam, respectivamente, as temperaturas das iterações 10, 20 e a média das quatro últimas iterações (que vão da iteração 27 até a 30). Podemos notar modelos que convergiram, tipicamente com massas maiores e densidades intermediárias; ao passo que há modelos que notamos facilmente que não convergiram, há outros que podem ser melhorados com algumas iterações extras.

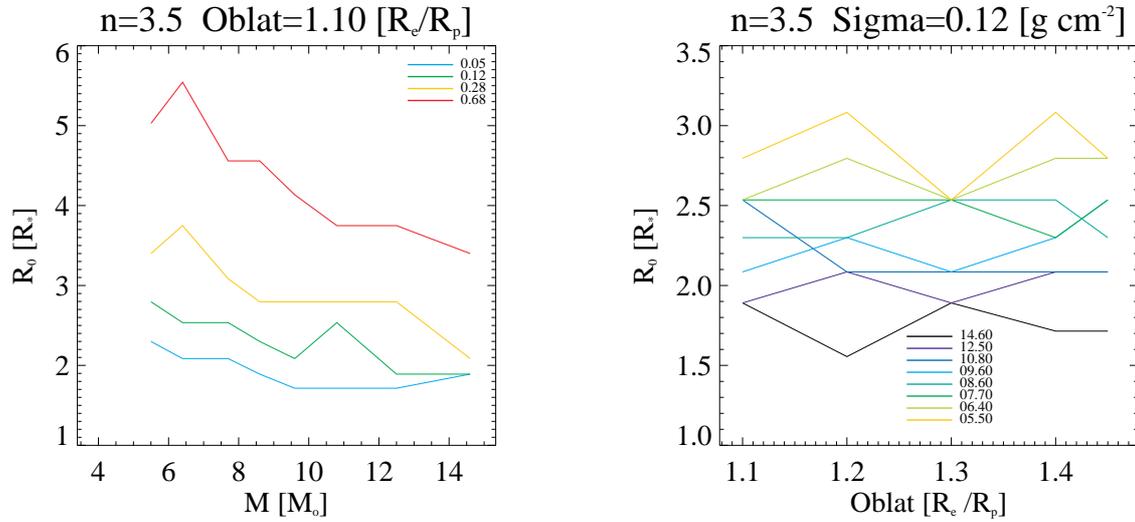


Figura 2.5: Dependência do raio de transição térmica com a massa e achatamento geométrico estelar. Os parâmetros fixos são especificados no topo de cada gráfico. À esquerda são exibidas as posições de mínimo da temperatura em função da massa estelar, para três valores diferentes de densidade superficial do disco (dadas em g/cm^2). À direita, apresentamos o raio de transição térmica em função do achatamento geométrico da estrela, para distintas massas estelares (dadas em M_{\odot}).

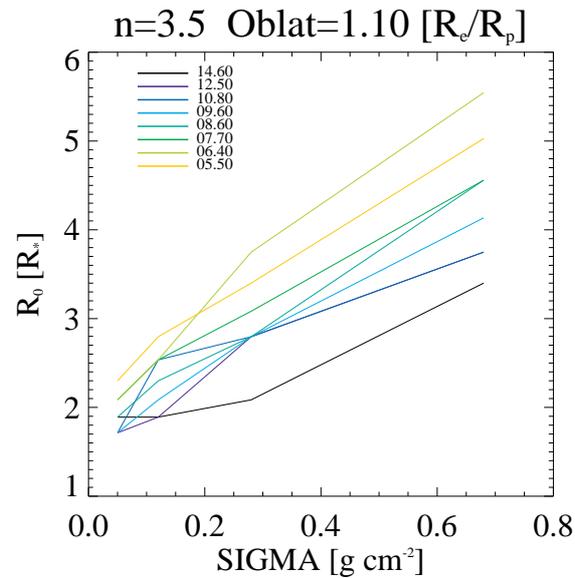


Figura 2.6: Idem fig. 2.5 como função da densidade superficial do disco, para várias massas estelares diferentes (em M_{\odot}).

Conclusões e Perspectivas

Testando a eficiência de paralelização do código HDUST, obtivemos que esta é de $P = 99.9\%$ para os três processos (cálculo de temperatura, emissão no contínuo e em linha). Portanto o tempo de processamento do código diminui proporcionalmente ao aumento do número de processadores, com perda de eficiência próxima de zero. Desta forma, baseados na eficiência de paralelização, demosntramos que a podemos utilizar os recursos computacionais oferecidos pelo departamento ao máximo, sem prejuízo à otimização dos processos rodados com o HDUST.

Dentre os diferentes algoritmos utilizados para calcular o fluxo para a banda K, a integração na caixa é o que melhor corresponde ao fluxo total observado dentro do etto estatístico. Provavelmente, este resultado se deve ao fato de que o fluxo varia rapidamente dentro deste intervalo espectral, fazendo com que o ponto central não corresponda à média na banda. Este resultado não é essencialmente válido para outras bandas, devido à curva de transmissão destas serem bastante variadas. No entanto, esta ferramenta é capaz de realizar este cálculo para qualquer banda de interesse.

O resultado da parametrização da estrutura térmica mostrou-se insuficiente, pois a temperatura isotérmica é menor que o platô da temperatura. Isso se deve ao fato de termos ignorado a região de transição térmica entre a região descrita pela lei de potência e a região que admitimos a isothermalidade. Portanto a parametrização da estrutura térmica deve levar em consideração a região onde a temperatura se eleva para atingir o valor da parte externa do dico. Essa parametrização pode ser melhorada com um estudo posterior sistemático utilizando o BE ATLAS.

Os resultados para a região de transição térmica são bastante interessantes. Não há uma dependência clara entre a RTT e o achatamento geométrico. Obtivemos que a RTT como

função da densidade cresce independentemente da temperatura estelar. Ao estudarmos a dependência da RTT com a massa (isto é, temperatura) obtivemos que quanto maior for a temperatura, mais próximo à estrela ocorre a RTT, a depender da densidade do disco (para densidades mais elevadas, a migração é mais drástica). Estes são resultados preliminares, obtidos a partir da análise da recém rodada grade de modelos do BE ATLAS. O teste de convergência deverá ainda ser refinado, para que enfim possamos posteriormente calcular com o HDUST os observáveis do disco. Embora o trabalho seja desenvolvido por um graduando, este é de relevância para o grupo, gerando uma série de ferramentas para o estudo do BE ATLAS.

Perspectivas

Futuramente, estenderemos a ferramenta para visualização dos resultados do BE ATLAS para análise da SED, $H\alpha$, $H\beta$ e $Br\gamma$. Mais imediatamente, nos voltaremos para a comparação entre os modelos e observações, especificamente, para comparar as SED e a polarimetria. O estudo sistemático feito a partir do BE ATLAS permitirá que testemos a universalidade do modelo de disco de decréscimo viscoso. As ferramentas de análise desenvolvidas pelo presente trabalho serão de grande utilidade para o estudo do Be Atlas e de suas implicações. Devido ao envolvimento no estudo da estrutura térmica, há a perspectiva de participação em uma série de artigos que estuda os efeitos da não isothermalidade em discos de estrelas Be.

Referências Bibliográficas

- Bessell M. S., UBVRI passbands, PASP, 1990, vol. 102, p. 1181
- Bjorkman J. E., Carciofi A. C., NLTE Monte Carlo Models of the Polarization of Circumstellar Disks. In *Astronomical Polarimetry: Current Status and Future Directions*, vol. 343 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2005, p. 270
- Carciofi A. C., The circumstellar discs of Be stars. In *IAU Symposium*, vol. 272 of *IAU Symposium*, 2011, p. 325
- 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., Bjorkman J. E., Non-LTE Monte Carlo Radiative Transfer. II. Nonisothermal Solutions for Viscous Keplerian Disks, *ApJ*, 2008, vol. 684, p. 1374
- Carciofi A. C., Bjorkman J. E., Otero S. A., Okazaki A. T., Štefl S., Rivinius T., Baade D., Haubois X., The First Determination of the Viscosity Parameter in the Circumstellar Disk of a Be Star, *ApJ*, 2012, vol. 744, p. L15
- Carciofi A. C., Domiciano de Souza A., Magalhães A. M., Bjorkman J. E., Vakili F., On the Determination of the Rotational Oblateness of Achernar, *ApJ*, 2008, vol. 676, p. L41
- Carciofi A. C., Magalhães A. M., Leister N. V., Bjorkman J. E., Levenhagen R. S., Achernar: Rapid Polarization Variability as Evidence of Photospheric and Circumstellar Activity, *ApJ*, 2007, vol. 671, p. L49
- Carciofi A. C., Miroshnichenko A. S., Bjorkman J. E., Toward Understanding the B[e] Phenomenon. IV. Modeling of IRAS 00470+6429, *ApJ*, 2010, vol. 721, p. 1079

- Carciofi A. C., Miroshnichenko A. S., Bjorkman J. E., The circumstellar environment of the FS CMa star IRAS 00470+6429. In IAU Symposium , vol. 272 of IAU Symposium, 2011, p. 384
- Carciofi A. C., Miroshnichenko A. S., Kusakina A. V., Bjorkman J. E., Bjorkman K. S., Marang F., Kuratov K. S., García-Lario P., Calderón J. V. P., Fabregat J., Magalhães A. M., Properties of the δ Scorpii Circumstellar Disk from Continuum Modeling, ApJ, 2006, vol. 652, p. 1617
- Carciofi A. C., Okazaki A. T., Le Bouquin J.-B., Štefl S., Rivinius T., Baade D., Bjorkman J. E., Hummel C. A., Cyclic variability of the circumstellar disk of the Be star ζ Tauri. II. Testing the 2D global disk oscillation model, A&A, 2009, vol. 504, p. 915
- Che X., Monnier J. D., Zhao M., Pedretti E., Thureau N., Mérand A., ten Brummelaar T., McAlister H., Ridgway S. T., Turner N., Sturmman J., Sturmman L., Colder and Hotter: Interferometric Imaging of β Cassiopeiae and α Leonis, ApJ, 2011, vol. 732, p. 68
- Collins II G. W., The use of terms and definitions in the study of Be stars. In IAU Colloq. 92: Physics of Be Stars , 1987, p. 3
- Cranmer S. R., A Statistical Study of Threshold Rotation Rates for the Formation of Disks around Be Stars, ApJ, 2005, vol. 634, p. 585
- Domiciano de Souza A., Hadjara M., Vakili F., Bendjoya P., Millour F., Abe L., Carciofi A. C., Faes D. M., Kervella P., Lagarde S., Marconi A., Monin J.-L., Niccolini G., Petrov R. G., Weigelt G., VizieR Online Data Catalog: Interferometry of α Eri (Domiciano de Souza+, 2012), VizieR Online Data Catalog, 2012, vol. 354, p. 59130
- Domiciano de Souza A., Kervella P., Jankov S., Abe L., Vakili F., di Folco E., Paresce F., The spinning-top Be star Achernar from VLTI-VINCI, A&A, 2003, vol. 407, p. L47
- Lee R. W., ed., 1991 A review of spectral line broadening relevant to hot dense plasmas
- Lynden-Bell D., Pringle J. E., The evolution of viscous discs and the origin of the nebular variables., MNRAS, 1974, vol. 168, p. 603
- Meynet G., Maeder A., Stellar evolution with rotation. V. Changes in all the outputs of massive star models, A&A, 2000, vol. 361, p. 101

-
- Monnier J. D., Zhao M., Pedretti E., Thureau N., Ireland M., Muirhead P., Berger J.-P., Millan-Gabet R., Van Belle G., ten Brummelaar T., McAlister H., Ridgway S., Turner N., Sturmman L., Sturmman J., Berger D., *Imaging the Surface of Altair*, Science, 2007, vol. 317, p. 342
- Okazaki A. T., *Viscous Transonic Decretion in Disks of Be Stars*, PASJ, 2001, vol. 53, p. 119
- Porter J. M., *On outflowing viscous disc models for Be stars*, A&A, 1999, vol. 348, p. 512
- 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
- Secchi A., *Schreiben des Herrn Prof. Secchi, Directors der Sternwarte des Collegio Romano, an den Herausgeber*, Astronomische Nachrichten, 1866, vol. 68, p. 63
- Struve O., *On the Origin of Bright Lines in Spectra of Stars of Class B*, ApJ, 1931, vol. 73, p. 94
- Townsend R. H. D., Owocki S. P., Howarth I. D., *Be-star rotation: how close to critical?*, MNRAS, 2004, vol. 350, p. 189
- Vieira R. G., Carciofi A. C., Bjorkman J. E., *Non-isothermal effects on Be disks*, No prelo, 2014
- von Zeipel H., *The radiative equilibrium of a rotating system of gaseous masses*, MNRAS, 1924, vol. 84, p. 665
- Yudin R. V., *Statistical analysis of intrinsic polarization, IR excess and projected rotational velocity distributions of classical Be stars*, A&A, 2001, vol. 368, p. 912