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

Lucas Zillner Pinheiro

Polarimetria de Estrelas Be em Alta Rotação

São Paulo
2017

Lucas Zillner Pinheiro

Polarimetria de Estrelas Be em Alta Rotação

Monografia do Trabalho de Graduação apresentada ao Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.
Área de Concentração: Astronomia
Orientador: Prof. Dr. Alex Cavaliéri Carciofi

São Paulo

2017

Aos meus pais Marcos Fernandes Pinheiro e Deborah de Castro Zillner Pinheiro.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao professor Alex Carciofi. Sua presença desde cedo na minha vida de graduando em Astronomia foi vital para minha formação científica. E seu apoio fora do meio acadêmico, tanto comigo quanto com outros me mostrou o quando ele se esforça e preza pelos seus alunos. Uma forma de ver isso é a amizade e o apoio que se encontra em seu grupo de pesquisas Beacon. Falando no Beacon, tenho que agradecer aos meus colegas do grupo de pesquisas. Agradeço a todos do grupo Beacon, porém especialmente aos membros, André Figueiredo, Bruno Mota, Daiane Seriacopi, Mohammad Ghoreyshi, Leandro Rímulo, Despina Panoglou, Rodrigo Vieira, Daniel Moser, Amanda Rublo e Daniel Bednarski. Preciso agradecer muito ao Daniel Bednarski por todo seu apoio e pelos ensinamentos das técnicas de redução e obtenção de dados polarimétricos. Agradeço também a todo o corpo docente do IAG, em especial a professora Jane Cristina Gregorio Hetem, a professora Tatiana Alexandrovna Michtchenko e ao professor Ramachrisna Teixeira. Agradeço muito a todos os meus colegas e amigos pelas risadas, pela amizade, mas principalmente pelo apoio nas horas difíceis. Agradeço principalmente aos meus amigos, Atu, Monitor, Tetix, Stelinha, Bixinglio, Naty, Caião, BH, Ruffles e Marcelo. Agradeço a todos os funcionários do IAG por mantê-lo limpo, funcionando e com sua manutenção em dia. A toda administração do IAG e principalmente do departamento da Astronomia. Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro da minha primeira iniciação científica. Agradeço à FAPESP pelo apoio financeiro da minha segunda iniciação cientifica que resultou no atual trabalho (projeto 2017/08747-9). Agradeço muito a todo o pessoal do OPD, os técnicos, as cozinheiras e o pessoal da limpeza.

Agradeço muito a minha família. Agradeço principalmente a minha mãe, Deborah, e ao meu pai, Marcos. Eu devo tudo a vocês dois. Agradeço o sustento financeiro, o apoio

emocional, a todos os ensinamentos e pelo conforto nas horas difíceis. Agradeço também ao Westinho, mesmo sendo meio rabugento. Agradeço ao Ví por todo apoio e por estar sempre comigo. Agradeço a Nicole por Tudo, principalmente por tê-la conhecido. E por último, mas não menos importante, agradeço a Deus por este Universo maravilhoso e suas leis naturais, muitas das quais eu tive o prazer de estudar.

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

Resumo

As estrelas Be são estrelas massivas do tipo espectral B que possuem ou já possuíram linhas de emissão em seus espectros. Estas linhas estão associadas à presença de um disco circunstelar equatorial de decréscimo, formado a partir de material ejetado pela estrela central. Outra característica que as distinguem das demais estrelas B é a sua altíssima taxa de rotação, frequentemente próxima à rotação crítica.

Os discos de estrelas Be podem ser estudados de diversas maneiras, uma delas seria a polarimetria. Quando a luz da estrela passa pelo disco, a luz torna-se parcialmente polarizada por espalhamento Thomson. Usando a polarimetria pode-se estudar a densidade do disco e sua variação temporal a curto e longo prazo, que vão de semanas e meses até dezenas de anos. Desde 2006 é conduzido um projeto de longo prazo no Observatório do Pico dos Dias, que resultou em um grande banco de dados polarimétricos com quase 80 estrelas Be. A assinatura polarimétrica canônica de discos de estrelas Be é um espectro polarizado de inclinação negativa para discos mais densos, ou de inclinação próxima a zero no caso de discos tênues. Klement e colaboradores (2015), entretanto, observaram um espectro polarizado com inclinação positiva para a estrela Be beta CMi. Este resultado surpreendente está aparentemente ligado à alta rotação da estrela, que causa um redirecionamento do fluxo estelar para o pólo, efeito conhecido como escurecimento gravitacional.

O objetivo deste projeto é, inicialmente, estudar a causa do espectro polarizado positivo e investigar se ele está ligado à alta rotação estelar. Foi feita uma busca na base de dados polarimétricos BEACON, para procurar novos exemplos de estrelas Be com espectro polarizado positivo. Além de utilizar a base de dados, foi vital a obtenção de novos dados polarimétricos de alta precisão para classificar estrelas promissoras.

Abstract

Be stars are massive stars of spectral type B that have or have already had emission lines in their spectra. These lines are associated to the presence of a circumstellar decretion disk, formed from material ejected by the central star. Another feature that distinguishes them from other B stars is their extremely high rotation rate, often close to the critical one. Be stars disks can also be studied through polarimetric observations. When the stellar light passes through the disk, the light becomes partially polarized by Thomson scattering. By using polarimetric data it is possible to study the disk density and variation at short and long terms, terms that could be weeks or months to decades. Since 2006, a long term project has been conducted at OPD (Observatório do Pico dos Dias), which resulted in a big database of polarimetric observations for almost 80 Be stars.

The canonical polarimetric signature of Be star disks is a negative slope spectrum for denser disks, or near-zero inclination in the case of tenuous disks. However, Klement et al. (2015) observed a polarized spectrum with a positive slope for the beta CMi Be star. This surprising result is apparently linked to the stellar high rotation rates, which causes the stellar flux to be redirected to the pole, an effect known as gravity darkening. This project has the objective of studying the cause of polarized positive spectrum and investigating if it is linked with the high rotation rates.

The Beacon polarimetric database was used in searching for new examples of Be stars with a polarized spectrum of positive slope. New data with high precision was also vital to classify such promising stars.

Lista de Figuras

1.1 O Espalhamento Thomson 17
1.2 Espectro Polarizado para Diferentes Densidades do Disco 18
1.3 O Espectro Polarizado Positivo 19
1.4 Os Efeitos da Alta Rotação 20

3.1 IRAF - (*Image Reduction and Analysis Facility*) 24
3.2 Poltools 25

4.1 ϵ Tuc - dados preliminares 28
4.2 ϵ PsA - dados preliminares 28
4.3 ω Car - dados preliminares 29
4.4 α Col - dados preliminares 29
4.5 ϵ Psa - dados com alta precisão 30
4.6 ϵ Tuc - dados com alta precisão 30
4.7 ω Car - dados com alta precisão 31
4.8 Fótons polares e equatoriais 33

Sumário

1. Introdução 15

1.1 Polarimetria de estrelas Be 16

1.2 O caso de beta CMi 18

1.3 Efeitos da rotação estelar 19

2. Objetivos 21

2.1 Buscar e classificar as estrelas com espectro polarizado positivo no levantamento Beacon 21

2.2 Novos dados polarimetricos com alta precisão e seleção de novas estrelas . 21

2.3 Relação entre a alta rotação e espectro polarizado com inclinação positiva . 21

2.4 Busca de dados fora do levantamento Beacon 22

3. Materiais e métodos 23

3.1 Levantamento Beacon 23

3.2 Portal CDS 23

3.3 Reduções e validações, IRAF e Poltools 23

3.4 Catálogo do HPOL 24

4. Resultados 27

4.1 Estudos preparatórios 27

4.2 Resultados da busca no Levantamento Beacon 27

4.3 Novos dados 29

4.4 O tipo espectral tardio e novos alvos 31

4.5 Busca nos dados do HPOL 31

4.6 A alta rotação e o espectro polarizado positivo - Discussão 32
4.7 Trabalhos paralelos 32

5. Conclusões e perspectivas 35
5.1 Estrelas classificadas 35
5.2 Tipo espectral 35
5.3 Perspectivas 36

Referências 37

Capítulo 1

Introdução

As propriedades de discos viscosos são um tema recorrente em Astrofísica. Tais discos são presentes em ambientes bastante distintos no Universo, que incluem desde discos protoplanetários de estrelas pouco luminosas ainda na pré-sequência principal até núcleos ativos de galáxias altamente energéticos. Dentre eles, um caso de grande interesse são as estrelas Be.

Estrelas Be são objetos massivos (com massa entre 3 e 20 massas solares), jovens (da sequência principal ou da pós-sequência principal) e que possuem ou já possuíram linhas de emissão em seus espectros, daí o seu nome (estrela B com emissão). As linhas de emissão formam-se em um disco gasoso que circunda a estrela. Outra característica marcante das estrelas Be é sua altíssima rotação, que pode chegar próxima à rotação crítica (Rivinius et al. 2013).

Acredita-se que ao menos dois processos físicos distintos sejam necessários para a formação dos discos de estrelas Be: um para ejetar material da estrela com momento angular suficiente para que este material entre em órbita próxima ao equador estelar, e outro para o transporte de momento angular da estrela para fora, para que o material ejetado ganhe órbitas progressivamente maiores e, portanto, o disco cresça em tamanho. O primeiro processo ainda não foi firmemente identificado, mas progressos recentes na literatura apontam para pulsações não-radiais (e.g., Baade et al. 2016 e Cranmer et al 2009).

Apenas para ilustrar a relação entre a estrela, seu momento angular e o disco, utiliza-se o exemplo de um patinador de gelo. Quando um patinador faz uma manobra de giro e permanece com seus braços abertos, sua rotação quase não varia. Porém quando ele fecha seus braços próximo ao seu tronco, sua velocidade angular aumenta bastante e seu momento

angular é conservado. Algo semelhante ocorre com as estrelas. Pela própria natureza de funcionamento de uma estrela, com o passar do tempo, seu núcleo encolhe bem lentamente e sua velocidade angular aumenta. Isso se deve a queima de material em seu interior, por meio da fusão nuclear. E por mecanismos ainda não perfeitamente compreendidos, parte do momento angular do núcleo é transportado para as camadas externas, fazendo com que elas girem mais rapidamente. Para estrelas com baixa taxa de rotação, isso não é algo muito relevante. Porém, quando se trata de estrelas Be, principalmente as que possuem suas taxas de rotação próximas a rotação crítica, esse fenômeno se torna interessante e está intimamente ligado ao disco circunstelar. Pode-se dizer que o disco funciona como um mecanismo de transferência de momento angular. O que se passa é que o momento angular é dissipado para o disco e a estrela se mantém ligeiramente abaixo da rotação crítica, e por consequência ela se mantém estável.

O segundo processo necessário para a formação do disco já foi identificado de forma segura: trata-se da viscosidade turbulenta. O modelo de decréscimo viscoso (VDD, do inglês *Viscous Decretion Disk*) foi amplamente testado na literatura recente, e é capaz de explicar muitos dos efeitos observados. Inicialmente proposto por Lee et al. (1991) e depois desenvolvido por vários outros autores (Okazaki 2001, Bjorkman & Carciofi 2005, Carciofi 2011), o VDD foi aplicado com sucesso para explicar as características observadas de vários objetos individuais (por exemplo, δ Sco - Carciofi et al. 2006, ζ Tau - Carciofi et al. 2009, 28 CMa - Carciofi et al. 2012, β CMi - Klement et al. 2015) bem como no estudo de conjuntos observacionais de grandes amostras de estrelas Be (e.g., Vieira et al. 2015, 2017).

1.1 Polarimetria de estrelas Be

Uma maneira de se estudar os discos de estrelas Be é através da polarimetria, mais especificamente no estudo da polarização linear e sua dependência espectral. Vários estudos pioneiros (e.g. Wood et al. 1997) mostraram que a polarimetria é muito sensível às condições do disco, em particular sua geometria e densidade, e portanto pode ser usada com sucesso para o estudo das suas condições físicas. Um exemplo é o estudo da estrela Be zeta Tau por Carciofi et al. 2009. A polarimetria, combinada com modelos de transporte radiativo, permitiu a determinação do ângulo de inclinação do disco com precisão melhor

que 2 graus.

O mecanismo que torna a luz proveniente de estrelas Be parcialmente polarizada é o espalhamento Thomson por elétrons livres no disco (Fig. 1.1). A radiação eletromagnética emitida pela estrela, ao cruzar o disco pode interagir com elétrons livres, tornando-se parcialmente polarizada com uma orientação perpendicular ao plano de espalhamento. Como o disco de estrelas Be é geometricamente muito fino (Carciofi 2011) isso gera uma direção preferencial para os planos de espalhamento, portanto, uma polarização líquida não nula.

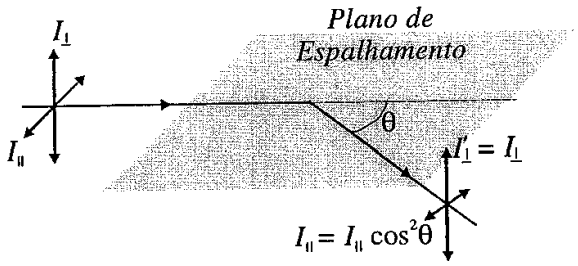

Figura 1.1: Vista esquemática do espalhamento Thomson. A componente da intensidade perpendicular ao plano de espalhamento permanece inalterada, enquanto que a componente paralela ao plano de espalhamento é reduzida por um fator $\cos^2\theta$, onde θ é o ângulo de espalhamento. Figura 1.5 da tese de Doutorado do Prof. Dr. Alex Cavaliéri Carciofi.

Recentemente, Haubois et al. (2014) estudaram em detalhes o espectro polarizado de estrelas Be usando o código de transporte radiativo HDUST. A Fig. 1.2 ilustra a aparência típica de um espectro polarizado no chamado contínuo de Balmer (entre as descontinuidades de Balmer em 3600 Å e de Paschen em 8400 Å). No caso de discos tênues (Fig. 1.2-a), a opacidade dominante do disco é a opacidade de espalhamento eletrônico, portanto o espectro polarizado não apresenta variação significativa com o comprimento de onda. Entretanto, no caso de discos mais densos (Fig. 1.2-b), a opacidade dominante passa a ser a opacidade do hidrogênio, que cresce com o comprimento de onda. Como o aumento da opacidade do hidrogênio acarreta uma diminuição da polarização, basicamente por haver menos fótons disponíveis para serem espalhados, o resultado é que o espectro polarizado adquire uma inclinação negativa.

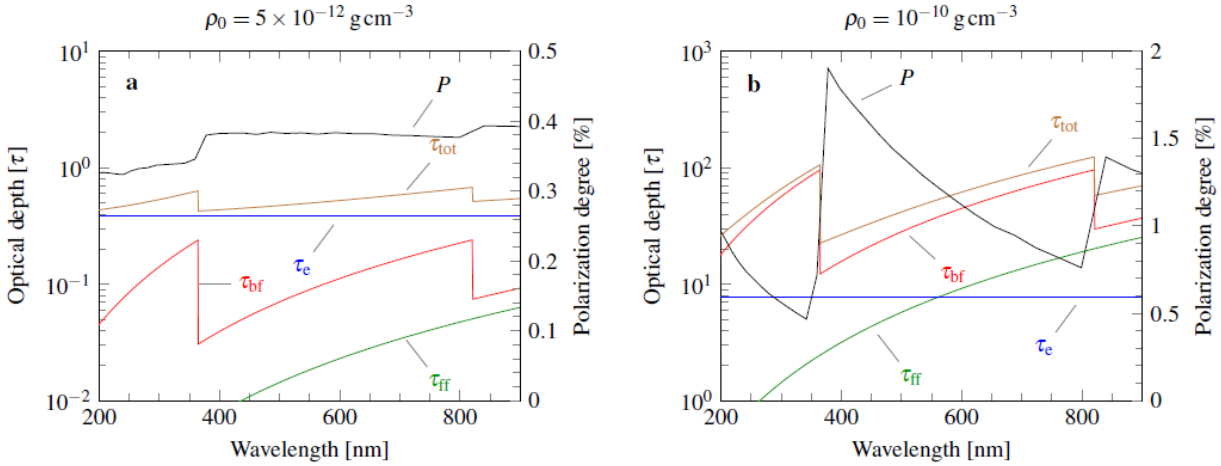

Figura 1.2: Espectro polarizado de dois modelos de disco de estrela Be (linha preta). À esquerda: Modelo com baixa densidade ($n_0 = 5 * 10^{-12} gcm^{-3}$). À direita: Modelo com alta densidade $n_0 = 10^{-10} gcm^{-3}$). As curvas coloridas indicam as profundidades ópticas radiais total ($\tau_{\rm tot}$), de espalhamento eletrônico ($\tau_{\rm e}$) , livre-livre ($\tau_{\rm ff}$) a ligado-livre ($\tau_{\rm bf}$). Figura de Rivinius et al (2013).

1.2 O caso de beta CMi

Recentemente, o Dr. Robert Klement, que foi co-orientado pelo prof. Alex C. Carciofi, publicou um estudo muito detalhado da estrela beta CMi e seu disco (Klement et al. 2015). O resultado principal deste estudo é que foi demonstrado que o VDD é capaz de explicar bastante bem um conjunto amplo de observações multitécnicas (interferometria, polarimetria, espectroscopia e fotometria). Um resultado bastante intrigante foi a descoberta de que o espectro polarizado de beta CMi apresenta uma inclinação positiva (ou seja, a polarização cresce com o comprimento de onda, Fig. 1.3). Apesar dos autores não terem se aprofundado nesta questão, resultados preliminares usando modelos de transporte radiativo (alguns deles mostrados na Fig. 1.3) sugerem que a inclinação positiva do espectro polarizado tenha relação com a rotação estelar: apenas modelos com altíssima taxa de rotação conseguiram reproduzir o espectro polarizado.

Entender a origem física do espectro polarizado com inclinação positiva, sua relação com a rotação estelar bem como sua utilidade como diagnóstico está entre os objetivos principais deste projeto (descritos em detalhes na Seção 3).

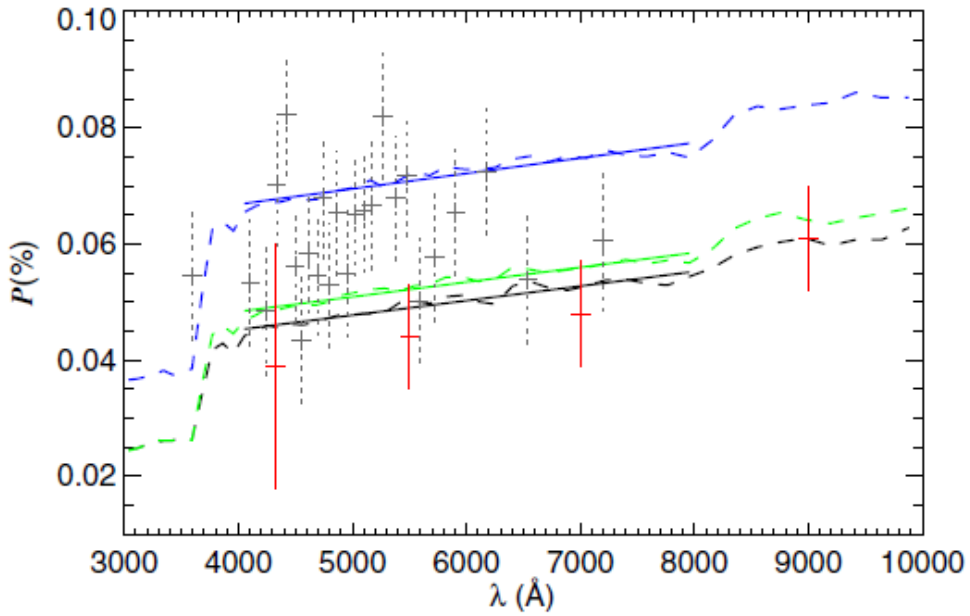

Figura 1.3: Gráfico que mostra o espectro polarizado positivo de β Cmi. Os pontos correspondem à observações, enquanto que as linhas à modelos. Figura de Klement et al (2015).

1.3 *Efeitos da rotação estelar*

A alta rotação estelar acarreta dois efeitos principais na estrutura da estrela: o achatamento rotacional e o escurecimento gravitacional, ambos ilustrados na Fig. 1.4. Nesta figura, os modelos da fileira superior têm uma taxa de rotação moderada, $W = 0.62$. Este parâmetro W é definido como a razão entre a velocidade da fotosfera no equador pela velocidade orbital Kepleriana no mesmo ponto. Um $W = 1$ corresponde a uma taxa de rotação crítica, em que o material do equador não mais está ligado gravitacionalmente à estrela. Os modelos da segunda fileira têm uma taxa de rotação muito maior ($W = 0.9$). A comparação entre as duas fileiras mostra os dramáticos efeitos da alta rotação: a estrela adquire um formato fortemente oblato, com o equador muito mais estendido radialmente do que o pólo. Como a força gravitacional é fortemente contraposta pela centrípeta no material próximo ao equador, a pressão neste local é menor. Além disso, o fluxo radiativo passa a ser direcionado preferencialmente para os pólos, que se tornam muito mais quentes e brilhantes.

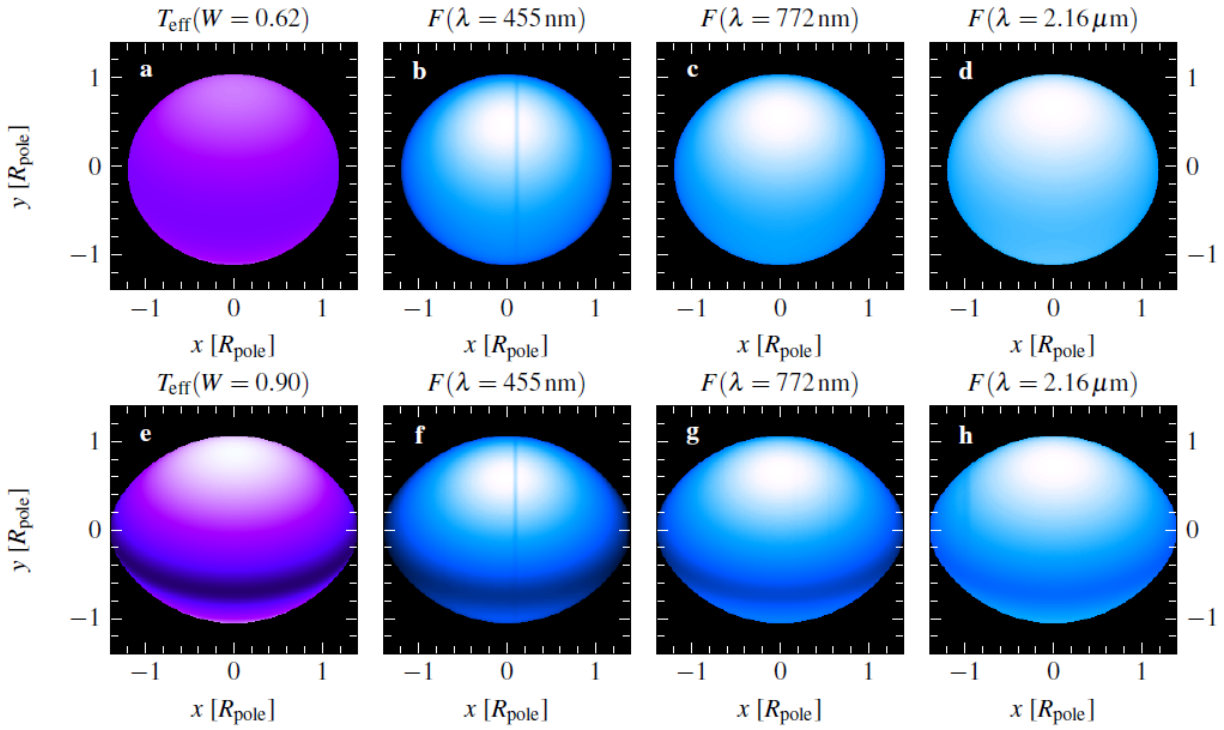

Figura 1.4: Fileira de cima: aparência da superfície de uma estrela girando a $W = 0,62$. Fileira de baixo: aparência da superfície de uma estrela girando a $W = 0,90$. A primeira coluna mostra um mapa de temperatura, enquanto que as demais mostram mapas de intensidade para diferentes comprimentos de onda, como indicado. Parte da figura de Rivinius et al (2013).

Capítulo 2

Objetivos

Os objetivos podem ser divididos em 4 partes.

2.1 Buscar e classificar as estrelas com espectro polarizado positivo no levantamento Beacon

Um dos objetivos deste projeto é buscar e classificar quais estrelas do levantamento Beacon (descrito em Materiais e Métodos) possuem o espectro polarizado positivo. Para identificar as que têm possibilidade de serem potenciais alvos de estudo, tais como β CMi.

2.2 Novos dados polarimetricos com alta precisão e seleção de novas estrelas

O segundo objetivo foi o de confirmar com melhor precisão se as estrelas do levantamento Beacon que foram consideradas promissoras possuem realmente o espectro polarizado positivo. Também foi feito um esforço para encontrar estrelas de fora da base de dados que fossem interessantes para este projeto. Deve-se notar que uma grande parte deste objetivo foi o de obtenção, redução e validação dos novos dados.

2.3 Relação entre a alta rotação e espectro polarizado com inclinação positiva

Um dos objetivos deste projeto é estudar se há relação entre a alta taxa de rotação de estrelas Be e o seu efeito no espectro polarizado.

2.4 Busca de dados fora do levantamento Beacon

Um objetivo secundário foi o de buscar estrelas promissoras no atlas do espectropolarímetro HPOL (também descrito em materiais e métodos). A fim de comparar novos alvos com os alvos encontrados no levantamento Beacon.

Capítulo 3

Materiais e métodos

3.1 Levantamento Beacon

O orientador do aluno tem um projeto de longo prazo no Observatório do Pico dos Dias (OPD/LNA), em andamento desde 2006. Esse projeto visa o monitoramento polarimétrico (filtros UBVRI) e espectroscópico de estrelas Be, tendo gerado uma grande base de dados observacionais que foram usados neste projeto. São dados para quase 80 estrelas no total, e este número cresce à medida que novas estrelas são observadas. Esta base de dados foi a principal fonte de dados utilizada. O telescópio utilizado foi o IAG/B&C (60cm), com a gaveta polarimétrica do OPD.

3.2 Portal CDS

O portal CDS [1] foi utilizado no esforço de classificar as estrelas que já pertenciam à base e de buscar novos alvos em potencial. Esta foi uma forte ferramenta utilizada para cumprir o objetivo 2.2.

3.3 Reduções e validações, IRAF e Poltools

Para reduzir os novos dados polarimétricos, foi utilizado o programa IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*) com um pacote com funções extras voltadas aos dados do OPD, o pacote Beacon. Exemplo de redução de dados é mostrado na Figura 3.1. Os dados foram validados utilizando a subrotina Poltools, cuja documentação se encontra no site

[1] http://cdsportal.u-strasbg.fr/

do Pyhdust [2]. O Poltools é uma subrotina que foi escrita em Python por Daniel Moser e Daniel Bednarski, que possui funções úteis para se trabalhar com dados polarimétricos do OPD. O Pyhdust é um pacote de subrotinas em python utilizada pelo grupo Beacon. No processo de redução, o programa IRAF reduz as imagens de formato FITS e gera arquivos que contém os parâmetros de Stokes Q e U. Estes parâmetros são pseudovetores usados na descrição da componente linear da luz polarizada (para maiores detalhes ver Bednarski 2016). Em seguida o usuário deve analisar e escolher o melhor ajuste com auxílio desta função, tendo em vista que ele pode notar erros observacionais. É fácil notar quando a observação foi atrapalhada pela presença de uma nuvem analisando as modulações. Mas deve-se utilizar os relatórios feitos durante as observações para se ter controle da qualidade dos dados. Exemplo de validação de dados é mostrado na Figura 3.2.

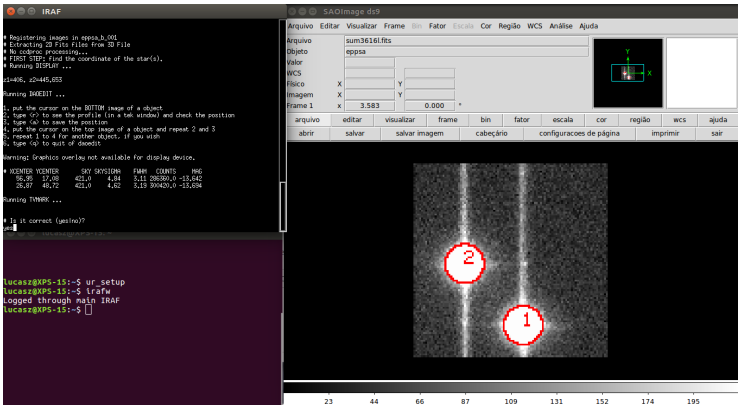

Figura 3.1: Exemplo de redução de dados polarimétricos com o programa IRAF.

3.4 Catálogo do HPOL

Foi utilizado o atlas do espectropolarímetro Hpol[3] do Observatório de Pine Bluff (Universidade de Wisconsin - EUA). O catálogo contém estrelas que não são possíveis de serem observadas no hemisfério sul, o que foi útil para complementar a base de dados Beacon. O catálogo tem dados para 61 estrelas do hemisfério norte celeste.

[2] http://pyhdust.readthedocs.io/en/latest/index.html#
[3] http://www.sal.wisc.edu/ meade/beatlas/index.html

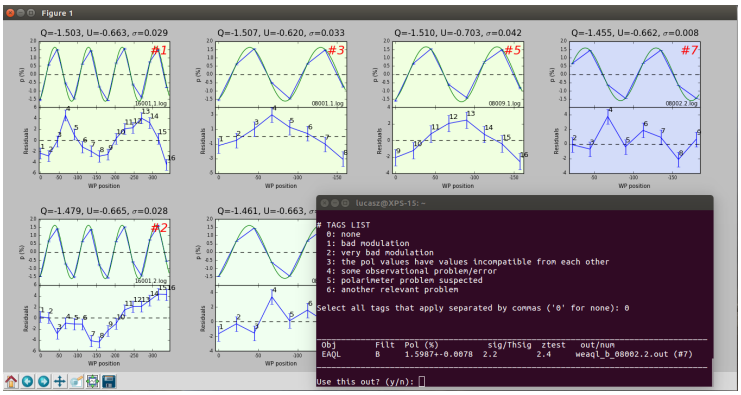

Figura 3.2: Exemplo de validação dos dados. Cada janela mostra a modulação para uma dada abertura fotométrica. Com isso é possível escolher aquela que tem o menor erro, bem como identificar problemas na modulação decorrentes de questões observacionais, tais como a passagem de nuvens.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Estudos preparatórios

O aluno estudou e revisou a parte da literatura (ver seção "Bibliografia") necessária ao desenvolvimento do projeto, os principais trabalhos para este estudo são: Klement et al (2015), Rivinius et al (2013), Vieira et al (2017), Bjorkman et al (1994), Cranmer et al (2005), Cranmer et al (2009), Carciofi (2001), Bednarski (2016).

4.2 Resultados da busca no Levantamento Beacon

Foi escrito um programa utilizando a linguagem de programação Python, que por sua vez serviu como ferramenta para buscar estrelas nos dados do Levantamento Beacon. Os dados de cada estrela são acessados e é feita uma média, ponderada pelo erro da polarização em cada um dos filtros. Os resultados são graficados mostrando-se também uma regressão linear da polarização *vs* comprimento de onda, de forma a medir a inclinação do espectro polarizado. O erro mostrado nos gráficos é o desvio padrão dos dados. Utilizando o programa escrito, foram encontradas outras quatro estrelas com fortes indicações de possuirem o espectro polarizado positivo. Além disso, foram encontradas outras estrelas com resultados sugestivos, mas ainda não firmemente estabelecidos dada a pequena quantidade de dados disponíveis

As estrelas promissoras encontradas são: ϵ Tuc, ϵ PsA, ω Car e α Col. Seus gráficos de polarização pelo comprimento de onda são mostrados nas Figuras 4.1 a 4.4.

Estes foram os resultados preliminares, a variação positiva detectada nestes quatro objetos poderia não ter validade estatística devida ao alto desvio padrão. O desvio padrão poderia ter duas fontes: A variabilidade intrínseca e erros observacionais.

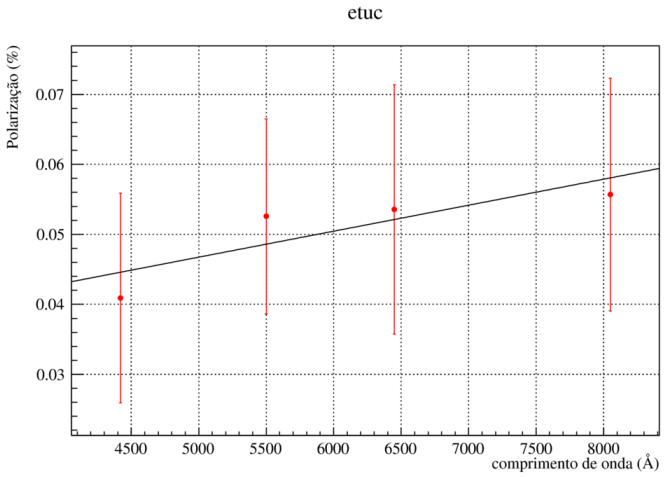

Figura 4.1: Media e desvio padrão, filtro a filtro de todas as observações disponíveis para ϵ Tuc no levantamento Beacon.

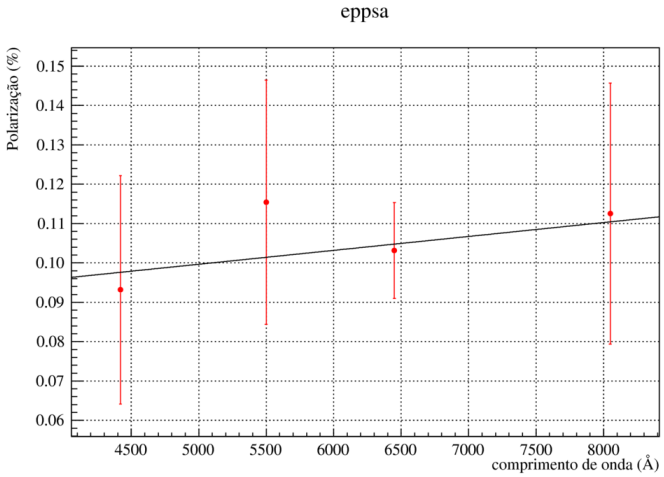

Figura 4.2: Media e desvio padrão, filtro a filtro de todas as observações disponíveis para ϵ PsA no levantamento Beacon.

Para resolver este problema, foi programada a reobservação destes alvos com alta precisão. Para melhorar a precisão foi necessário aumentar o tempo de exposição, e o número de imagens. Os dados também foram analisados noite a noite, de forma a não incluírem o componente da variação intrínseca. Os novos dados se mostraram muito mais confiáveis.

Além destes objetos, foram reobservados outros que mostraram potencial de possuir o espectro polarizado positivo: 23 Tau, AGCar, η PsA. Porém, os dados indicaram espectros polarizados diferentes do buscado, tendo inclinação negativa.

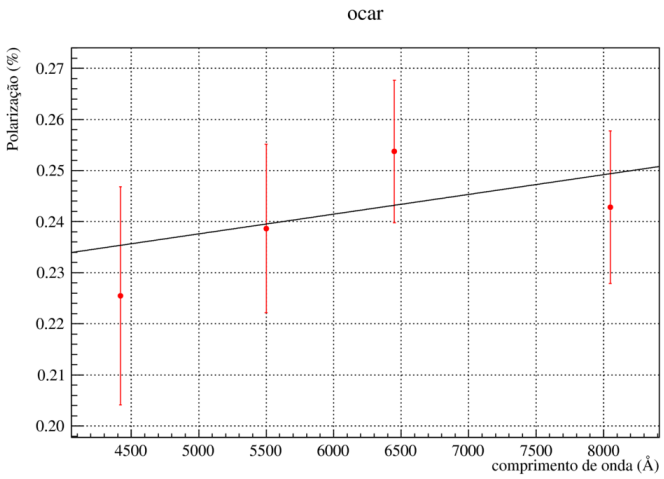

Figura 4.3: Media e desvio padrão, filtro a filtro de todas as observações disponíveis para ω Car no levantamento Beacon.

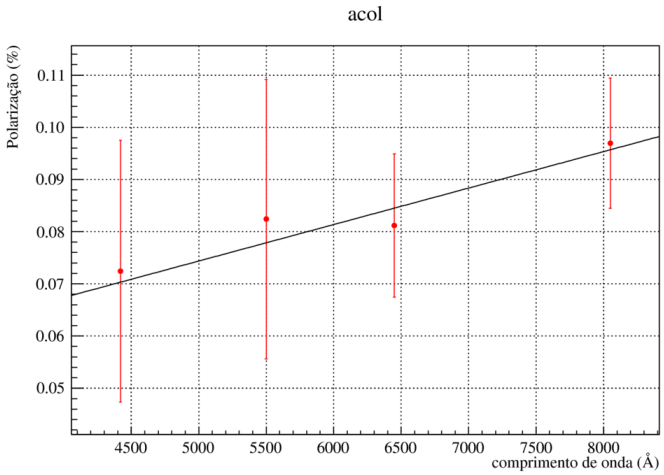

Figura 4.4: Media e desvio padrão, filtro a filtro de todas as observações disponíveis para α Col no levantamento Beacon.

4.3 Novos dados

Foram feitas 2 missões observacionais no OPD com a prioridade de obter dados mais precisos para as estrelas promissoras. Foram no total 6 noites de observação contendo dados para 27 estrelas incluindo os alvos e as estrelas-padrão polarizadas, usadas na calibração do ângulo de polarização. Os dados foram reduzidos, validados e analisados. O espectro polarizado positivo foi confirmado em três estrelas: ω Car, ϵ PsA e ϵ Tuc.

Em sua tese de mestrado, D. Bednarski discute a forma correta de se tratar a polarização e seu erro no caso de valores pequenos de polarização. Isso é importante porque

a distribuição de probabilidade do grau de polarização se distancia da distribuição Gaussiana à medida que a polarização medida se aproxima de ser compatível com zero. No caso dos dados mostrados a seguir, foi feito um ajuste (Bednarski 2016) nos valores da polarização a fim de que seus valores não se tornem superestimados. A correção foi do tipo $P \rightarrow \sqrt{P^2 - \sigma_P^2}$, com P sendo o grau de polarização e com σ_P sendo o seu respectivo erro. Os novos dados são mostrados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

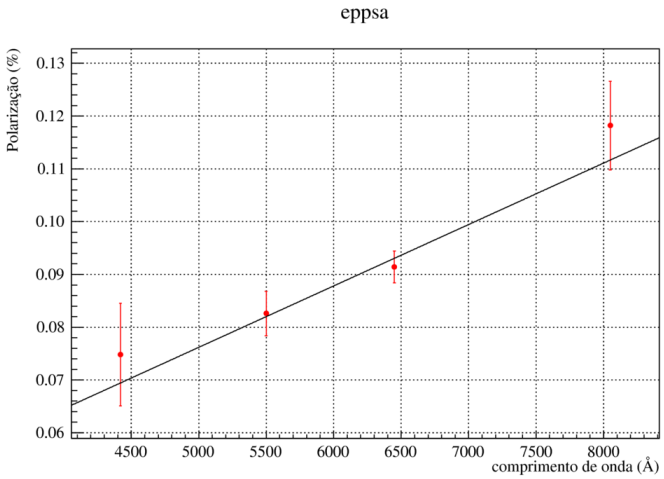

Figura 4.5: Novos dados, com alta razão sinal ruído, obtidos para a estrela ϵ Psa.

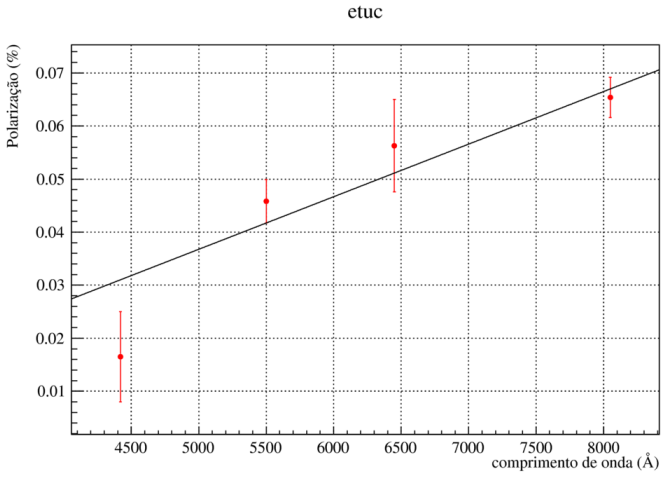

Figura 4.6: Novos dados, com alta razão sinal ruído, obtidos para a estrela ϵ Tuc.

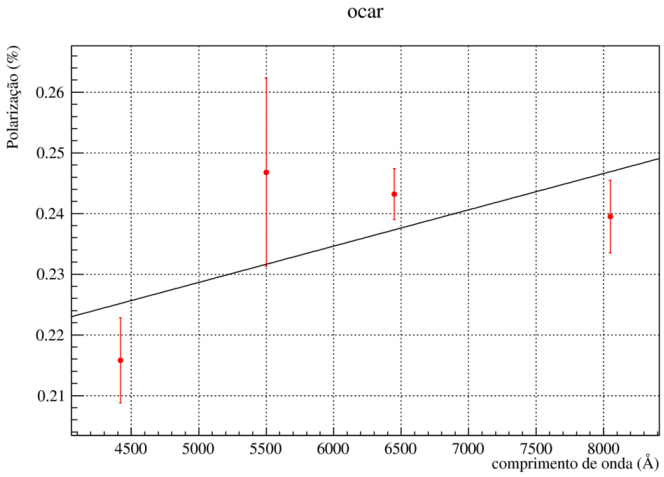

Figura 4.7: Novos dados, com alta razão sinal ruído, obtidos para a estrela ω Car.

4.4 O tipo espectral tardio e novos alvos

Uma busca no portal CDS [1] revelou que todas as estrelas identificadas são de tipo espectral B tardio: ϵ Tuc (B8V), ϵ PsA (B8V), ω Car (B8IIIe), α Col (B9Ve). Somando-se ao fato que β CMi também tem tipo espectral semelhante (B8V), conclui-se que foi identificado um padrão bastante relevante na ocorrência do espectro polarizado positivo. Este resultado está de acordo com o esperado de levantamentos recentes (ex., Vieira et al. 2017) que indicam que discos de estrelas Be tardias são muito mais tênues que os discos de estrelas recentes. Após esta identificação, foi feita uma lista com 11 estrelas Be de tipo espectral tardio, a partir do *Bright Star Catalog*, que não constavam na base de dados Beacon. Para criar esta lista as magnitudes aparentes dos alvos foram limitadas em 6 mag. Esta lista foi adicionada no planejamento observacional do levantamento Beacon. As estrelas listadas foram: ν Gem, HD173370, HR7418, ζ Crv, HD47054, 25 Vul, 13 Tau, HR2545, 25 Peg, HR6172 e 20 Vul.

4.5 Busca nos dados do HPOL

Foi feita uma busca nos dados do catálogo do HPOL e foram encontradas 6 estrelas promissoras. Nos dados analisados elas apresentaram pelo uma vez, em alguma época o espectro polarizado positivo. Note-se que, teoricamente, uma estrela que possue espectro

[1] http://cdsportal.u-strasbg.fr/

polarizado positivo pode deixar de tê-lo caso a densidade de seu disco aumente como resultado do aumento da taxa de injeção de massa a partir da estrela central. As estrelas encontradas também confirmaram o resultado anterior, pois todas são de tipo espectral tardio: HR8762 (B6IV), 13 Tau (B9Vne), 17 Tau (B6IIIe), 23 Tau (B6IVe), 28 Tau (B8Ve) e HD24479 (B9IV). Porém deve-se notar que havia dados apenas para os filtros UBVR, não havia dados para o filtro I.

4.6 A alta rotação e o espectro polarizado positivo - Discussão

Analisando a Fig. 1.2, é possível notar que a inclinação de um espectro polarizado é quase nula para discos com baixa densidade. Como o efeito de escurecimento gravitacional torna os pólos mais quentes, os fótons provenientes da região polar têm menor comprimento de onda do que os fótons do equador. Como resultado, dado um observador ilustrado na Figura 4.8, os fótons de maior comprimento de onda seriam polarizados pelo disco enquanto os fótons polares viajariam livres (Bjorkman & Bjorkman 1994). Analisando os resultados de Vieira et al. (2017), pode-se notar que estrelas Be de tipo tardio têm discos muito mais tênues que suas irmãs de tipo recente (Fig. 4.5).

Com base no exposto e nos nossos resultados observacionais, concluímos que estrelas Be de tipo tardio, por apresentarem discos mais tênues e alta taxa de rotação intrínseca, representam a população de estrelas Be para a qual espera-se um espectro polarizado com inclinação positiva.

A identificação de 5 estrelas com espectro com inclinação positiva firmemente estabelecido, além de outras canditadas, sugere que uma fração significativa de estrelas Be tardias podem ter tal característica.

4.7 Trabalhos paralelos

O aluno reduziu dados de outras estrelas não pertinentes a este projeto, uma delas foi Achernar. Os dados de Achernar sugerem que a estrela esteja entrando numa fase de atividade em seu disco após um longo período estável. Porém, esta pesquisa e estes dados não fazem parte deste projeto mas sim do trabalho de pós-doutoramento do Dr. Daniel Moser.

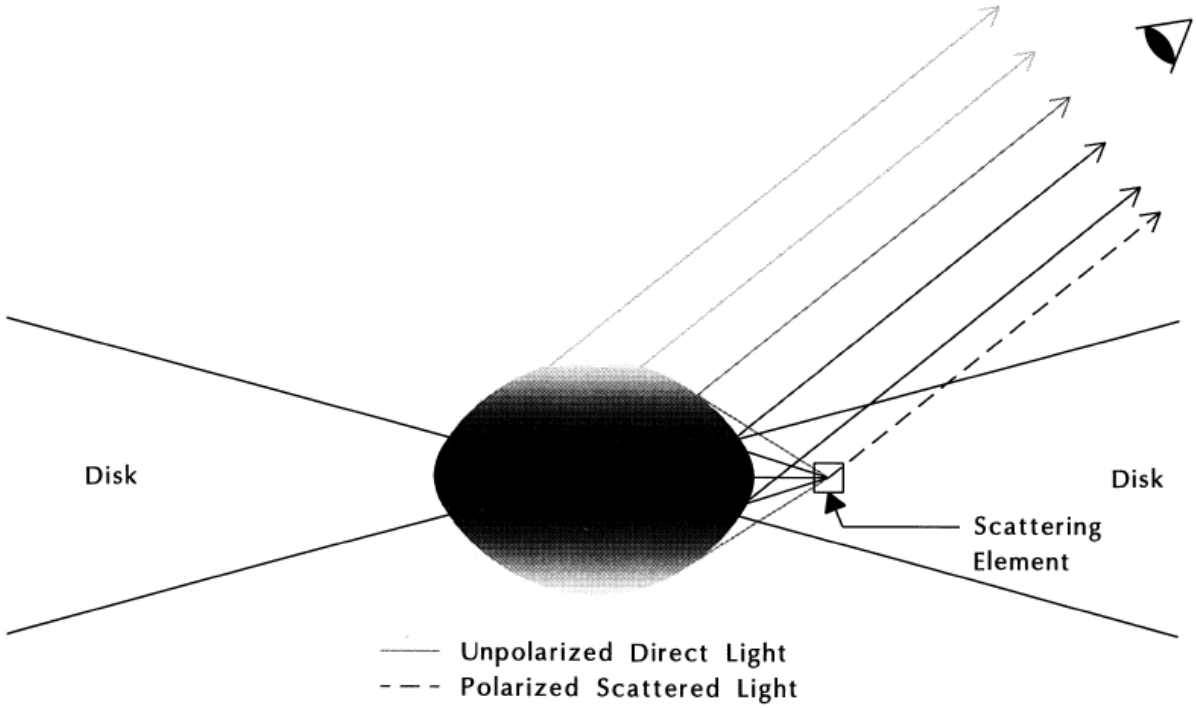

Figura 4.8: Figura mostrando as regiões geradoras dos fótons que sofrem polarização e dos que não sofrem. Figura 2 de Bjorkman & Bjorkman (1994).

Capítulo 5

Conclusões e perspectivas

5.1 Estrelas classificadas

Este trabalho partiu da identificação, em 2015, de uma estrela Be com espectro polarização com inclinação positiva (beta CMi, Klement et al. 2015). Uma busca no levantamento Beacon e Hpol resultou na identificação de novas estrelas potencialmente possuidoras da mesma característica.

Três destas estrelas foram reobservadas com alta precisão, confirmando o espectro com polarização positiva. Além disso, outra estrela (alpha Col) já possuia dados suficientemente bons para que a confirmação fosse possível. O principal resultado deste trabalho de TCC foi, portanto, a identificação firme de novas 3 estrelas com este interessante fenômeno, a saber: ϵ Psa, ϵ Tuc, ω Car.

5.2 Tipo espectral

Foi identificado que 100% das estrelas encontradas são de tipo espectral tardio. Pode-se concluir que o padrão para o tipo espectral encontrado foi um resultado muito interessante e importante. Este resultado direcionou as buscas das novas estrelas e da criação da lista de novos alvos observacionais. Este resultado foi vital para o entendimento da relação entre a alta rotação e o espectro polarizado positivo. Esse resultado também valida a hipótese de que o espectro polarizado positivo apenas ocorre para estrelas com discos tênues.

5.3 Perspectivas

Visto que foi gerada uma lista de novos alvos, novas observações são necessárias para cada um deles.

Será necessário realizar esforços de modelagem, no sentido de usar os resultados encontrados e buscar investigar o espaço de parâmetros em que o espectro polarizado com inclinação positiva ocorre. Com o desenvolvimento da parte teórica, poderemos responder as seguintes questões: qual o intervalo de taxa de rotação necessário para produzir um espectro polarizado positivo? Este observável pode ser usado como um indicador indireto da taxa de rotação estelar? Com que precisão? Esta poderá ser o tema da futura dissertação de mestrado do aluno.

Referências Bibliográficas

Klement, R., Carciofi, A. C., Rivinius, T., Panoglou, D., Vieira, R. G., Bjorkman, J. E., Štefl, S., Tycner, C., Faes, D. M., Korčáková, D., Müller, A., Zavala, R. T., Curé, M., 2015, A&A, 584, A85

Rivinius, T., Carciofi, A. C.; Martayan, C., 2013, A&A Rv, 21, 69

Baade, D., Rivinius, T., Pigulski, A., Carciofi, A. C., Handler, G., Kuschnig, R., Martayan, C., Mehner, A., Moffat, A. F. J., Pablo, H., Popowicz, A., Rucinski, S. M., Wade, G. A., Weiss, W. W., Zwintz, K., 2016, PTA Pr, 123, 51

Lee, U., Osaki, Y., & Saio, H., 1991, MNRAS, 250, 432

Okazaki, A. T., 2001, PASJ, 53, no. 1, p. 119-125

Bjorkman, J. E., Carciofi, A. C., 2005, ASPC 337, 75B

Carciofi, A. C., 2011, IAUS, 272, 325C

Carciofi, A. C., Miroshnichenko, A. S., Kusakin, 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., 2006, ApJ, 652, 1617C

Carciofi, A. C., Okazaki, A. T., Le Bouquin, J. B., Štefl, S., Rivinius, Th., Baade, D., Bjorkman, J. E., Hummel, C. A., 2009, A&A, 504,915C

Carciofi, A. C., Bjorkman, J. E., Otero, S. A., Okazaki, A. T., Štefl, S., Rivinius, Th., Baade, D., Haubois, X., 2012, ApJ, 744L, 15C

Vieira, R. G., Carciofi, A. C., Bjorkman, J. E., 2015, MNRAS, 454, 2107V

Wood, K., Bjorkman, K. S., Bjorkman, J. E., 1997, ApJ, 477, 926W

Haubois, X., Mota, B. C., Carciofi, A. C., Draper, Z. H., Wisniewski, J. P., Bednarski, D., Rivinius, Th., 2014, ApJ, 785, 12H

Vieira, R. G., Carciofi, A. C., 2017, ASPC, 508, 33V

Bjorkman, J. E., Bjorkman, K. S., 1994, ApJ, 436, 818-830

Cranmer, S. R., 2005, ApJ, 634, 585-601

Cranmer, S. R., 2009, ApJ, 701, 396-413

Carciofi, A. C., **Transporte Radiativo em envoltórios circunstelares usando o método de Monte Carlo**, 2001, tese de doutorado - IAG/USP, SP

Bednarski, D., **Polarimetria de estrelas Be próximas**, 2016, tese de mestrado - IAG/USP, SP