

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

Ariane Cristina Fonseca Silva

**Um Levantamento da Polarização de Campo  
para estrelas Be Brilhantes**

São Paulo

2021



Ariane Cristina Fonseca Silva

# Um Levantamento da Polarização de Campo para estrelas Be Brilhantes

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

Vertente: Pesquisa Básica

Orientador: Prof. Dr. Alex Cavaliéri Carciofi  
(IAG/USP)

São Paulo

2021



*A todos que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.*



# Agradecimentos

Aos meus pais Francisco e Aurea por me ensinar a importância da família e fortalecer o meu caráter, vocês são minha maior referência. Tudo o que tenho de mais precioso aprendi com vocês. À Mariane que desde sempre foi mais amiga que irmã, a primeira a me apoiar nas minhas decisões.

Ao meu namorado Kaio, que trilhou junto comigo todos os passos dessa difícil e tumultuada graduação. Eu jamais teria conseguido sem você.

Às minhas lindas cachorrinhas Linguíinha e Panceta que iluminaram cada um dos meus dias, trazendo a paz que eu precisava para continuar. Minha família hoje é completa, pois vocês fazem parte dela também.

Ao meu orientador, Alex Cavaliéri Carciofi, por todos os ensinamentos, não só na área acadêmica, mas também como pessoa, uma inspiração que busco seguir sempre. Obrigada por transformar o meu sonho de ser pesquisadora em realidade todos os dias.

Ao grupo Beacon por ter feito parte da minha história. Eu aprendi muito com cada um de vocês e agradeço por todo o auxílio quando mais precisei. Agradeço especialmente ao Daniel Bednarski pela paciência de me ensinar e compartilhar comigo tudo o que sabia sobre as reduções.

À minha grande amiga Luciana Dourado que me acolheu desde o primeiro momento quando cheguei em São Paulo, e foi a grande responsável por me guiar durante esses quatro anos de graduação. Sem a sua ajuda teria sido bem mais difícil. Muito obrigada pela amizade e companheirismo.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro, sob o projeto nº: 2020-865.



*“Equipped with his five senses, man explores the universe around him and calls the  
adventure Science.”*

Edwin Powell Hubble

*“Don’t let your dreams be dreams. You know, this living’s not so hard as it seems.”*

Jack Johnson



# Resumo

As estrelas Be são estrelas do tipo B que possuem altas taxas de rotação e um disco viscoso na região equatorial, e são os principais objetos de estudo do grupo Beacon do IAG/USP. A variabilidade fotométrica observada em estrelas Be pode ser classificada tanto como eventos fotosféricos (e.g., pulsação) ou devida ao disco. Por outro lado, variações na polarimetria só podem ser associadas à variações no disco, o que indica a importância da polarimetria neste tipo de estrela. Devido a essa variabilidade polarimétrica, um dos objetivos deste trabalho é reduzir os dados das observações realizadas pelo grupo Beacon no Observatório Pico dos Dias que buscam obter dados de alta precisão e longa linha de base temporal para esta classe de estrelas.

Para se determinar a polarização intrínseca de uma estrela Be é preciso conhecer a polarização interestelar (PI) ao longo da linha de visada. Um dos métodos mais utilizados para determinar a PI é o método de estrelas de campo, que consiste em observar estrelas fisicamente próximas à estrela alvo. O grupo Beacon iniciou um levantamento de estrelas de campo em 2014, levantamento este retomado neste Trabalho de Graduação.

Em 2021 foram obtidas 12 noites de observação no Observatório Pico dos Dias e foram observadas 42 estrelas de campo de 15 estrelas Be diferentes. Optou-se por analisar, nesta monografia, os campos com no mínimo 3 estrelas, o que resultou em 9 campos estudados, que foram separados em 3 grupos. O Grupo 1 reuniu os campos das estrelas em que foi possível fazer uma estimativa completa da PI. O Grupo 2 são os campos em que foram obtidas estimativas preliminares da PI, que precisam ser confirmadas ou corrigidas através de novas observações futuras. O Grupo 3 reuniu os campos indeterminados, em que nenhuma informação da polarização interestelar foi possível ser determinada. Dos 9 campos analisados, cinco deles foram incluídos no Grupo 1, dois no Grupo 2 e os dois

restantes no Grupo 3.

# Abstract

Be stars are B type stars that have high rotation rates and a viscous disk in the equatorial region, and are the main objects of study of the Beacon group at IAG/USP. Photometric variability observed in Be stars can be classified either as photospheric events (pulsation) or due to the disk. On the other hand, variations in polarimetry can only be associated with variations in the disk, which indicates the importance of polarimetry in this type of star. Due to this polarimetric variability, one of the objectives of this work is to reduce the data from observations carried out by the Beacon group at the Pico dos Dias Observatory, which seek to obtain high-precision and long-time baseline data for this type of stars.

An important step in knowing the intrinsic polarization of a Be star is to determine the interstellar polarization along the line of sight. One of the methods used in this project to determine the interstellar polarization is the field stars method, which consists of observing stars physically close to the target. The Beacon group has have a survey of field Be stars since 2014, which is being resumed in this Graduation Work.

In 2021, 12 nights of observation were obtained at the Pico dos Dias Observatory and 42 field stars of 15 different Be stars were observed. We chose to analyze, in this graduation work, fields with at least 3 stars, which resulted in 9 fields studied that were separated into 3 groups. Group 1 gathered the fields for which it was possible to make a complete estimate of the interstellar polarization. Group 2 contains the fields with preliminary estimates of the interstellar polarization, pending future observations of new field stars. Group 3 consists of fields for which the observations did not allow for the determination of reliable estimates for the interstellar polarization. From the 9 fields analyzed, five of them were included in Group 1, two in Group 2 and the remaining two in Group 3.



# Lista de Figuras

1.1	Diagrama mostrando o avermelhamento de uma estrela situada atrás de uma nuvem de poeira . . . . .	25
1.2	Curva de extinção interestelar partindo do infravermelho até o ultravioleta	27
1.3	Representação no diagrama $QU$ de um feixe com módulo $P$ de polarização na direção $\theta$ . . . . .	29
1.4	Representação esquemática do espalhamento Thomson . . . . .	30
1.5	Vetores de polarização resultantes dos espalhamentos em envoltórios esférico, inclinado e em um disco . . . . .	31
1.6	Espectros polarizados teóricos de estrelas de tipo espectral B2 com densidades diferentes e inclinação de $70^\circ$ . . . . .	33
2.1	Polarização linear das estrelas do catálogo de Heiles em coordenadas galácticas	35
2.2	Esquema da Polarização Interestelar . . . . .	36
2.3	Diagrama com a representação vetorial das polarizações observada, intrínseca e interestelar no diagrama $QU$ . . . . .	38
2.4	Representação esquemática de uma série observacional de uma estrela Be em uma dada banda espectral no diagrama $QU$ ao longo da construção e/ou dissipação do disco. . . . .	40
3.1	Esquema da instrumentação utilizada para observações no OPD. . . . .	42
3.2	Arquivo de texto <i>obt.dat</i> resultante da rotina <i>genAllLog</i> . . . . .	46
3.3	Arquivo de texto <i>std.dat</i> resultante da rotina <i>genAllLog</i> . . . . .	47
3.4	Arquivo de texto resultante da rotina <i>genTarget</i> para a estrela $\pi$ Aqr na noite do dia 03/09/2020. . . . .	47

4.1	Gráficos da polarização máxima $P_{máx}$ versus a distância $r$ para o campo da estrela 228 eri. As linhas verticais tracejadas representam a distância da estrela Be e as linhas pontilhadas representam as incertezas da distância. Houve uma melhora significativa nas incertezas calculadas das distâncias das estrelas de campo e também da estrela Be quando comparados os catálogos <i>Hipparcos</i> com o DR3 do <i>Gaia</i> . . . . .	50
4.2	Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para $\tau$ Sco . . . . .	52
4.3	Mapa de polarização para o campo de $\tau$ Sco . . . . .	53
4.4	Gráfico da polarização máxima $P_{máx}$ versus a distância $r$ para o campo da estrela $\tau$ Sco. . . . .	53
4.5	Ajustes da função de Serkowski obtidos para quatro estrelas de campo observadas para HR 7355 . . . . .	54
4.6	Mapa de polarização para o campo de HR 7355 . . . . .	55
4.7	Gráfico da polarização máxima $P_{máx}$ versus a distância $r$ para o campo da estrela HR 7355. . . . .	55
4.8	Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para 228 Eri . . . . .	57
4.9	Mapa de polarização para o campo de 228 Eri . . . . .	58
4.10	Gráfico da polarização máxima $P_{máx}$ versus a distância $r$ para o campo da estrela 228 Eri. . . . .	58
D.1	Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para $\gamma$ Ara . . . . .	83
D.2	Mapa de polarização para o campo de $\gamma$ Ara . . . . .	84
D.3	Gráfico da polarização máxima $P_{máx}$ versus a distância $r$ para o campo da estrela $\gamma$ Ara. . . . .	84
D.4	Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para $\beta$ Psc . . . . .	85
D.5	Mapa de polarização para o campo de $\beta$ Psc . . . . .	85
D.6	Gráfico da polarização máxima $P_{máx}$ versus a distância $r$ para o campo da estrela $\beta$ Psc. . . . .	86

D.7	Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para $\eta$ Tau . . . . .	87
D.8	Mapa de polarização para o campo de $\eta$ Tau . . . . .	87
D.9	Gráfico da polarização máxima $P_{m\acute{a}x}$ versus a distância $r$ para o campo da estrela $\eta$ Tau. . . . .	88
D.10	Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para HD 35502 . . . . .	89
D.11	Mapa de polarização para o campo de HD 35502 . . . . .	89
D.12	Gráfico da polarização máxima $P_{m\acute{a}x}$ versus a distância $r$ para o campo da estrela HD 35502. . . . .	90
D.13	Ajustes da função de Serkowski obtidos para quatro estrelas de campo observadas para 51 Oph . . . . .	91
D.14	Mapa de polarização para o campo de 51 Oph . . . . .	92
D.15	Gráfico da polarização máxima $P_{m\acute{a}x}$ versus a distância $r$ para o campo da estrela 51 Oph. . . . .	92
D.16	Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para $\epsilon$ PsA . . . . .	93
D.17	Mapa de polarização para o campo de $\epsilon$ PsA . . . . .	93
D.18	Gráfico da polarização máxima $P_{m\acute{a}x}$ versus a distância $r$ para o campo da estrela $\epsilon$ PsA. . . . .	94



# Lista de Tabelas

1.1	Propriedades físicas das distintas fases do meio interestelar . . . . .	24
3.1	Estrelas Be selecionadas para medição de estrelas de campo. . . . .	44
4.1	Polarizações interestelares das estrelas Be. . . . .	51
4.2	Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de $\tau$ Sco, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva. . . . .	52
4.3	Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de HR 7355, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva. . . . .	54
4.4	Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de 228 Eri, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva. . . . .	57
A.1	Lista de estrelas Be . . . . .	68
B.1	Lista de estrelas de campo . . . . .	70
C.1	Dados observacionais das estrelas de campo . . . . .	76
D.1	Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de $\gamma$ Ara, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva. . . . .	83

D.2	Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de $\beta$ Psc, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva. . . . .	85
D.3	Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de $\eta$ Tau, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva. . . . .	87
D.4	Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de HD 35502, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva. . . . .	89
D.5	Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de 51 Oph, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva. . . . .	91
D.6	Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de $\epsilon$ PsA, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva. . . . .	93

## Lista de Símbolos

$\Delta\theta$	Indicador do deslocamento angular do eixo óptico da calcita durante observações
$\lambda$	Comprimento de onda
$\lambda_{\text{máx}}$	Comprimento de onda máximo
$\theta$	Ângulo de polarização da luz
$\theta_{\text{IS}}$	Ângulo de polarização relativo ao meio interestelar
$K$	Constante adimensional da Lei de Serkowski
$P$	Polarização linear da luz
$P_{\text{int}}$	Polarização intrínseca
$P_{\text{IS}}$	Polarização interestelar
$P_{\text{máx}}$	Polarização máxima no comprimento de onda $\lambda_{\text{máx}}$
$Q$	Parâmetro Q de Stokes
$U$	Parâmetro U de Stokes



# Sumário

1. <i>Introdução</i> . . . . .	23
1.1 O Meio Interestelar . . . . .	23
1.1.1 Avermelhamento Interestelar . . . . .	25
1.2 Polarização da Luz . . . . .	27
1.2.1 Parâmetros de Stokes . . . . .	28
1.2.2 Polarização em Astronomia . . . . .	29
1.2.3 Espalhamento Thomson . . . . .	29
1.2.4 Extinção Dicróica . . . . .	30
1.3 Estrelas Be . . . . .	31
1.3.1 Polarimetria de Estrelas Be . . . . .	32
1.4 Objetivos . . . . .	32
2. <i>Polarização Interestelar</i> . . . . .	35
2.1 Dependência com o Comprimento de Onda . . . . .	36
2.2 Determinação da Polarização Interestelar . . . . .	37
2.2.1 Observações de estrelas em fase sem disco . . . . .	38
2.2.2 Estrelas de Campo . . . . .	39
2.2.3 Diagrama $QU$ . . . . .	39
2.2.4 Despolarização de linhas $H\alpha$ . . . . .	39
3. <i>Metodologia e Desenvolvimento do Trabalho</i> . . . . .	41
3.1 Procedimentos de Observação . . . . .	41
3.1.1 Polarímetro . . . . .	41
3.1.2 Estrelas padrão polarizadas . . . . .	42

3.1.3	Imagens de Calibração . . . . .	43
3.2	Observações das estrelas de campo . . . . .	43
3.2.1	Seleção das estrelas de campo . . . . .	44
3.3	Redução dos Dados . . . . .	44
3.4	Curadoria dos Dados . . . . .	45
4.	<i>Resultados</i> . . . . .	49
4.1	Polarização de campo . . . . .	49
4.1.1	Grupo 1 - Campos bem determinados . . . . .	51
4.1.2	Grupo 2 - Campos parcialmente determinados . . . . .	53
4.1.3	Grupo 3 - Campos Indeterminados . . . . .	56
4.2	Redução Parcial do Levantamento Beacon . . . . .	57
5.	<i>Conclusões e perspectivas</i> . . . . .	59
	<i>Referências</i> . . . . .	63
	<i>Apêndice</i> . . . . .	65
A.	<i>Lista de Estrelas Be</i> . . . . .	67
B.	<i>Estrelas Be e suas respectivas estrelas de campo selecionadas</i> . . . . .	69
C.	<i>Dados Observacionais</i> . . . . .	75
D.	<i>Campos das estrelas Be</i> . . . . .	83
D.1	Grupo 1 - Campos bem determinados . . . . .	83
D.1.1	$\gamma$ Ara . . . . .	83
D.1.2	$\beta$ Psc . . . . .	85
D.1.3	$\eta$ Tau . . . . .	87
D.1.4	HD 35502 . . . . .	89
D.2	Grupo 2 - Campos parcialmente determinados . . . . .	91
D.2.1	51 Oph . . . . .	91
D.3	Grupo 3 - Campos indeterminados . . . . .	93
D.3.1	$\epsilon$ PsA . . . . .	93

## Introdução

Este capítulo descreve os principais conceitos teóricos relacionados ao meio interestelar e suas características de avermelhamento, discute a polarização da luz e qual a sua relação com a poeira interestelar. Em seguida, são apresentados os principais objetivos deste Trabalho de Graduação.

### *1.1 O Meio Interestelar*

Durante observações espectroscópicas no final do século XIX, o astrônomo britânico William Huggins percebeu que algumas nebulosas eram distantes de conhecidos grupos de estrelas enquanto que outras eram constituídas por gases difusos ao redor de estrelas azuladas. Foi a primeira vez que o material presente entre estrelas, hoje denominado de meio interestelar, foi reconhecido ([Raga et al. 2020](#)).

O meio interestelar é composto por gás e poeira em baixas densidades, sendo que cerca de 70% da sua massa é constituída por hidrogênio, 28% de hélio e os 2% restantes incluem os elementos pesados, dentre eles o carbono, nitrogênio e oxigênio. Os elementos do meio interestelar podem se apresentar de variadas formas: ionizados, neutros, em formas moleculares simples ou complexas, podendo estar tanto no estado sólido quanto no gasoso ([Tielens 2005](#)). Os elementos pesados estão distribuídos de maneira inhomogênea, pois dependem das condições físicas do meio ([Lequeux et al. 2006](#)).

O gás do meio interestelar possui uma alta concentração de hidrogênio neutro que não é luminoso, mas que em regiões próximas a estrelas massivas e quentes torna-se ionizado pela radiação ultravioleta proveniente dessas estrelas e passa a emitir um espectro composto por linhas de emissão ([Oliveira Filho & Saraiva 2017](#)). Já a poeira é composta por

Tabela 1.1 – Propriedades físicas das distintas fases do meio interestelar (adaptada de [Klessen & Glover 2014](#)).

Componente	Temperatura (K)	Densidade ( $\text{cm}^{-3}$ )	Fração de ionização
Gás molecular	10 – 20	$> 10^2$	$< 10^{-6}$
Meio neutro frio	50 – 100	20 – 50	$\sim 10^{-4}$
Meio neutro morno	6000 – 10000	0.2 – 0.5	$\sim 0.1$
Meio ionizado morno	$\sim 8000$	0.2 – 0.5	1.0
Meio ionizado quente	$\sim 10^6$	$\sim 10^{-2}$	1.0

grafite, silicatos e gelo de água em variados tamanhos. A partir de observações dos efeitos de extinção no ultravioleta, estudos de dispersão da luz e da polarização das estrelas, é conhecido que a poeira do meio interestelar deve ter uma ampla distribuição de tamanho. Essa distribuição pode variar de grãos menores com tamanhos de  $0.01 \mu\text{m}$  até grãos maiores, com tamanhos de  $0.2 \mu\text{m}$  ([Draine 2011](#)), sendo que a distribuição de tamanho tem a maior parte da massa nos grãos maiores, e a maior parte da área de superfície nos grãos menores. Considerando todos os componentes do meio interestelar, a poeira corresponde a apenas 1% da massa total do meio ([Klessen & Glover 2014](#)). Apesar dessa baixa densidade, ela apresenta importantes efeitos ópticos ([Raga et al. 2020](#)), como será discutido neste Capítulo.

O estado térmico e químico do meio interestelar são geralmente apresentados em termos de uma série de fases distintas. Uma visão geral das principais propriedades físicas dessas diferentes fases é dada na Tabela 1.1.

As regiões mais densas do meio interestelar são propícias para a formação estelar que, porém, depende das condições locais de densidade e de temperatura. As estrelas são formadas a partir do colapso das nuvens moleculares, que podem se fragmentar e formar aglomerados de estrelas. Por causa da formação de estrelas, há uma diminuição do gás no meio ao longo do tempo, com uma redução na fração de hidrogênio, um acréscimo na fração de hélio e a adição de pequenas quantidades de elementos pesados. O retorno do material processado no interior estelar, que pode se dar através de ventos estelares ou mesmo explosões estelares, é responsável por modificar a composição química do meio interestelar ([Draine 2011](#)).

O meio interestelar também apresenta um campo magnético que é da ordem de 5 microgauss ( $\mu\text{G}$ ), sendo este campo maior em regiões mais densas do meio. Em escalas menores, este campo contribui significativamente para a instabilidade gravitacional que

leva ao colapso da nuvem molecular, responsável pela formação estelar (Lequeux et al. 2006).

### 1.1.1 Avermelhamento Interestelar

Estrelas quentes embebidas em nuvens interestelares difusas dão origem às chamadas nebulosas de reflexão. É possível afirmar que a reflexão de fato ocorre, pois o espectro dessa nebulosa é similar ao da estrela próxima. Isto ilustra o que ocorre com a radiação eletromagnética proveniente de uma estrela distante, ao passar por uma nuvem de poeira. Comprimentos de onda menores (azul) são mais facilmente espalhados ou absorvidos pelos grãos de poeira, enquanto que comprimentos de onda maiores (vermelho) são mais transmitidos (Figura 1.1). Desta forma, a poeira causa um fenômeno muito importante em astrofísica chamado avermelhamento interestelar.

Quando há uma nuvem de poeira entre o observador e uma estrela, há uma atenuação parcial da luz, chamada de extinção interestelar, que ocorre devido aos efeitos combinados de absorção e espalhamento da luz. A extinção também pode ocorrer por causa da atmosfera terrestre, dificultando as observações de telescópios localizados no solo, o que

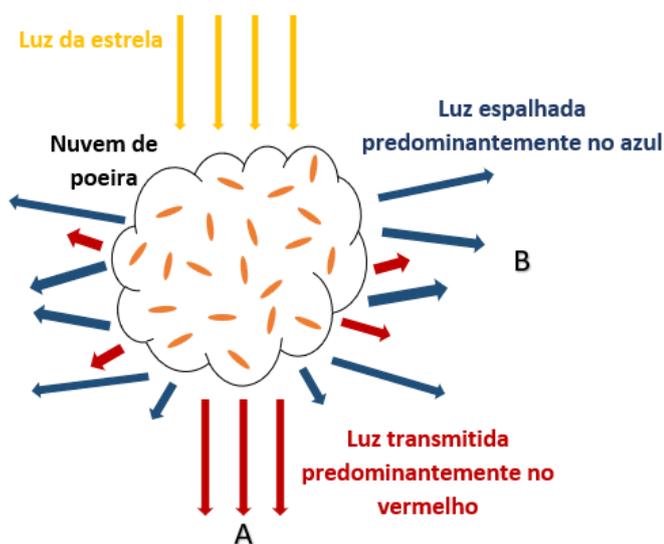


Figura 1.1: Uma nuvem de poeira pode tanto absorver quanto espalhar a luz que passa por ela. A quantidade de espalhamento e absorção depende da densidade dos grãos de poeira, do comprimento de onda da luz e da espessura da nuvem. Como comprimentos de onda mais curtos são afetados mais significativamente que comprimentos de ondas mais longos, uma estrela atrás da nuvem de poeira aparece avermelhada para o observador A. O observador B vê os comprimentos de onda mais curtos espalhados como uma nebulosa de reflexão azul. (adaptado de Carroll & Ostlie 2007)

impulsionou o surgimento dos telescópios espaciais. A extinção altera o valor da magnitude de uma estrela (Carroll & Ostlie 2007); para levar este efeito em consideração a equação do módulo da distância deve ser modificada e reescrita como

$$m_\lambda = M_\lambda + 5 \log_{10} d - 5 + A_\lambda, \quad (1.1)$$

sendo  $d$  a distância em parsecs (pc),  $m_\lambda$  é a magnitude aparente,  $M_\lambda$  é a magnitude absoluta e  $A_\lambda > 0$  representa a extinção interestelar (em magnitudes) presente ao longo da linha de visada para um determinado comprimento de onda  $\lambda$ . Isso significa que, se aumentar o valor de  $A_\lambda$ , a estrela passa a ter sua luz mais atenuada pela poeira interestelar aos olhos do observador (Carroll & Ostlie 2007).

A extinção interestelar é influenciada pela profundidade geométrica da nuvem de poeira que se encontra ao longo da linha de visada entre a fonte de luz e o observador, além da densidade numérica de grãos e das suas propriedades ópticas. Logo, a extinção medida é proporcional à profundidade óptica ( $\tau_\lambda$ , Draine 2011)

$$A_\lambda = 1.086\tau_\lambda. \quad (1.2)$$

Considerando duas estrelas,  $A$  e  $B$ , que possuem o mesmo tipo espectral e a mesma classe de luminosidade, observadas em dois comprimentos de onda diferentes  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , e assumindo que uma delas seja livre de extinção ou avermelhamento, tem-se

$$\Delta m_{\lambda_1} - \Delta m_{\lambda_2} = A_{\lambda_1} - A_{\lambda_2} = E(\lambda_1, \lambda_2), \quad (1.3)$$

em que  $E(\lambda_1, \lambda_2)$  é o excesso de cor para a estrela em extinção nos comprimentos de onda  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ . Adotando, por exemplo, os filtros B e V do sistema UBV (Johnson & Morgan 1953), o excesso de cor pode ser escrito como

$$\Delta m_B - \Delta m_V = E_{B-V} = E(B - V). \quad (1.4)$$

É importante notar que ao fixar o valor de  $\lambda_2$  e variando o valor de  $\lambda_1$  na Equação 1.3, obtém-se a variação da extinção seletiva com o comprimento de onda (Maciel 2013). A razão entre a absorção total  $A_\lambda$  no comprimento de onda  $\lambda$  e a extinção seletiva medida pelo excesso de cor  $E_{B-V}$  é dada por

$$R_\lambda = \frac{A_\lambda}{E_{B-V}}. \quad (1.5)$$

Considerando  $\lambda = V = 5500 \text{ \AA}$ , tem-se que

$$R_V = \frac{A_V}{E_{B-V}}. \quad (1.6)$$

O valor de  $R_V$  depende das propriedades dos grãos de poeira do meio interestelar e indica a forma espectral do avermelhamento.

A Figura 1.2 mostra um exemplo de como a extinção interestelar varia com o comprimento de onda. Com o aumento do comprimento de onda, há também o aumento da extinção. Há, também, um pico local próximo ao comprimento de onda  $\lambda = 2200 \text{ \AA}$ . Fitzpatrick (1999) relaciona ainda os valores de  $R_V$  com a distribuição de tamanhos dos grãos de poeira. Para valores mais altos de  $R_V$ , refletem-se tamanhos de grãos médios maiores que o típico.

## 1.2 Polarização da Luz

A polarização da luz ocorre devido a algum tipo de anisotropia, seja no processo que geração da luz ou no meio em que a luz se propaga ulteriormente, que faz com que haja uma direção preferencial para os planos de vibração do campo eletromagnético. Um mecanismo

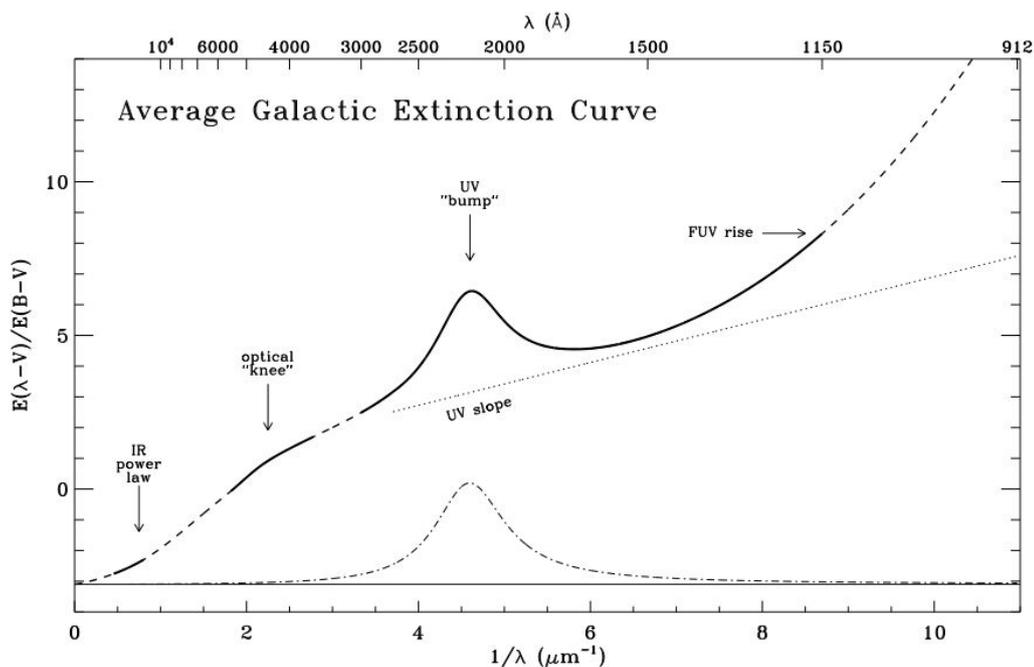


Figura 1.2: Curva média de extinção da Via Láctea, correspondente ao caso  $R_V = 3.1$ , calculada por Fitzpatrick (1999).

possível de polarização é uma absorção seletiva cuja intensidade varie no plano normal à direção de propagação da luz. Isto pode acontecer, por exemplo, no caso em que haja algum tipo de alinhamento nas partículas absorvedoras presentes no meio de propagação. No meio interestelar, tal alinhamento pode ser causado pelo campo magnético. Como a poeira interestelar é o mais importante constituinte absorvedor deste meio (Davis & Greenstein, 1951), o alinhamento dos grãos de poeira gera efeitos observacionais importantes. Antes de discuti-los vamos definir a forma mais comum de descrever a polarização da luz, através dos parâmetros de Stokes.

### 1.2.1 Parâmetros de Stokes

Uma onda plana, que se propaga na direção do eixo  $z$ , é da forma

$$\begin{cases} E_x = \epsilon_x e^{i\delta_x} \cdot e^{i2\pi(z/\lambda - vt)} \\ E_y = \epsilon_y e^{i\delta_y} \cdot e^{i2\pi(z/\lambda - vt)} \end{cases}, \quad (1.7)$$

em que  $v$  é a velocidade da onda,  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$  são as amplitudes reais das duas componentes transversais, e  $\delta_x$  e  $\delta_y$  são as constantes de fase. A onda plana monocromática mais geral possível é elipticamente polarizada e a forma dessa elipse depende da defasagem  $\delta \equiv \delta_y - \delta_x$  (Nussenzveig 2014), sendo:

- Linearmente polarizada quando  $\delta = n\pi$  com  $(n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ ;
- Circularmente polarizada quando  $\epsilon_x = \epsilon_y$  e  $\delta = n\pi + \frac{\pi}{2}$  com  $(n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ ; e
- Elipticamente polarizada nas demais situações, em que há a combinação das polarizações linear e circular.

Um feixe luminoso pode ser descrito pelo vetor de Stokes (Stokes 1851), que relaciona a intensidade  $I$ , os parâmetros  $Q$  e  $U$  que fornecem a polarização linear e o parâmetro  $V$  que fornece a polarização circular. Para este trabalho será abordada somente a polarização linear da luz, descrita como um vetor em um plano  $QU$ , cujas intensidade ( $P$ ) e direção em relação à alguma direção referencial ( $\theta$ ) são dadas por

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2}, \quad (1.8)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q}, \quad (1.9)$$

e a representação no diagrama é dada pela Figura 1.3.

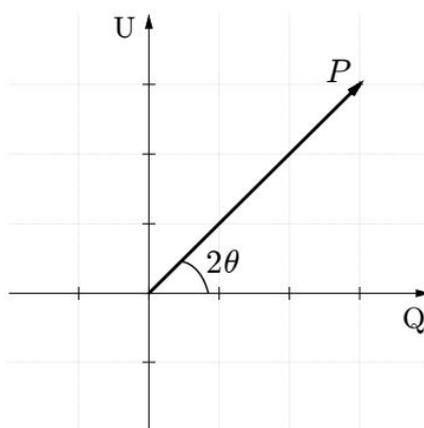


Figura 1.3: Representação no diagrama  $QU$  de um feixe com módulo  $P$  de polarização na direção  $\theta$  (Bednarski 2016).

### 1.2.2 Polarização em Astronomia

Em Astronomia, a polarização da luz surge em inúmeros contextos, associados a diferentes objetos e processos físicos. Por exemplo, estrelas binárias, em que uma delas possui um envoltório circumstelar, podem apresentar polarização intrínseca devido à iluminação causada pela estrela companheira no envoltório da estrela alvo. A polarização neste caso é modulada e sofre alterações de acordo com a fase orbital em que o sistema se encontra (Rodrigues 1997). Outros exemplos importantes de polarização em Astronomia é a alteração da polarização causada pelos grãos interestelares (polarização interestelar) e a polarização não nula de estrelas Be quando estas possuem discos circumstelares. Ambos os casos serão tratados com mais detalhes abaixo.

### 1.2.3 Espalhamento Thomson

Existem diversos processos físicos que possibilitam a polarização da luz. Dentre eles, há o espalhamento Thomson, que consiste no espalhamento da luz por elétrons livres. Quando uma determinada onda eletromagnética passa por um elétron, ele entra em oscilação e espalha parte da energia da onda incidente. A seção de choque deste tipo de espalhamento é independente do comprimento de onda e é dada por

$$\sigma_0 = \frac{8\pi}{3} \left( \frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2, \quad (1.10)$$

em que  $m_e$  e  $e$  correspondem à massa e à carga do elétron, respectivamente, e  $c$  é a velocidade da luz.

A Figura 1.4 mostra o esquema de espalhamento de um feixe de radiação despolarizado de componentes perpendicular ( $I_{\perp}$ ) e paralela ( $I_{\parallel}$ ) ao plano de espalhamento  $\alpha$ . Logo, inicialmente  $I_{\perp} = I_{\parallel}$ . Após o espalhamento, a amplitude do vetor de campo elétrico que é perpendicular ao plano  $\alpha$  não sofre alteração. Já o vetor paralelo passa a ser

$$I'_{\parallel} = I_{\parallel} \cos^2 \theta, \quad (1.11)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de espalhamento. Conseqüentemente, a polarização será dada por

$$P = \frac{1 - \cos^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta}, \quad (1.12)$$

sendo que  $P = 0$  quando  $\theta = 0^\circ$  (espalhamento para frente) e  $\theta = 180^\circ$  (espalhamento para trás) e  $P = 100\%$  quando  $\theta = 90^\circ$ . A polarização sempre possuirá direção perpendicular ao plano  $\alpha$ .

#### 1.2.4 Extinção Dicroica

A extinção dicroica ocorre quando há uma atenuação seletiva de diferentes componentes do vetor elétrico quando a luz passa por um meio em que o índice de refração complexo

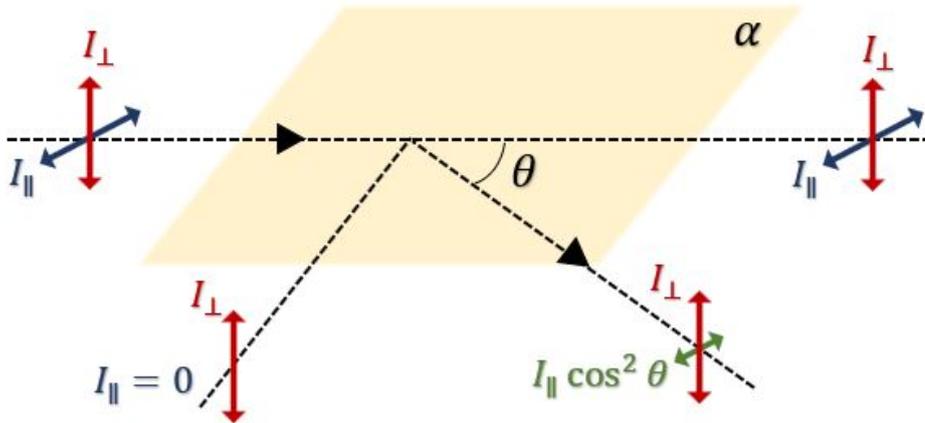


Figura 1.4: Representação esquemática do espalhamento Thomson. A componente da intensidade do feixe perpendicular ao plano  $\alpha$  de espalhamento não sofre alterações (em vermelho). A componente paralela do feixe (em azul) é reduzida por um fator  $\cos^2 \theta$  (em verde), sendo  $\theta$  o ângulo de espalhamento (adaptado de Carciofi, 2001).

do material muda ao longo do plano normal à direção de propagação. Esta absorção seletiva resulta em uma polarização líquida perpendicular à direção ao longo da qual o coeficiente de absorção da luz é máximo. No meio interestelar tal situação ocorre quando a luz se propaga por uma nuvem interestelar composta por grãos de poeira alongados e (parcialmente) alinhados a um campo magnético. Este processo será melhor discutido no Capítulo 2.

### 1.3 Estrelas Be

As estrelas Be são estrelas do tipo B da sequência principal com linhas de Balmer em emissão. Elas apresentam altas taxas de rotação, percebidas observacionalmente por altos valores conhecidos de  $v \sin(i)$ . Possuem uma polarização que pode atingir quase 2%, o que indica uma quebra de simetria em seu sistema devido à presença de um disco gasoso ao redor da estrela (Rodrigues 1997), conforme mostra a Figura 1.5.

O disco de uma estrela Be é formado a partir de eventos de ejeção de matéria da fotosfera, que alimentam o disco com material e momento angular (Carciofi 2011). A causa por trás destes eventos ainda precisa ser determinada de forma inequívoca, mas está provavelmente associada à pulsações não-radiais (Baade et al. 2016).

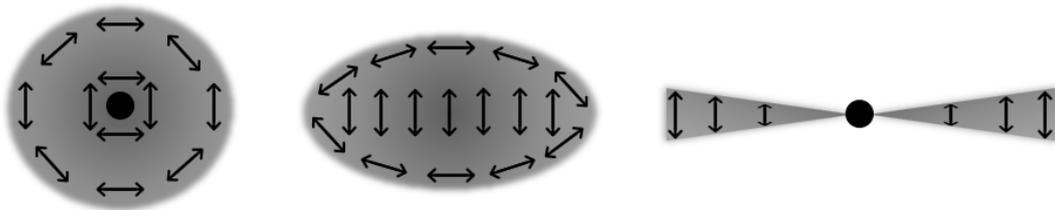


Figura 1.5: Representação esquemática dos vetores de polarização em envoltórios com diferentes geometrias. À esquerda: em uma geometria esférica, os vetores de polarização cancelam-se mutuamente, resultando em uma polarização nula. Ao centro: Em um envoltório oblato, os vetores de polarização estão preferencialmente alinhados com o semi-eixo maior. Neste caso, o cancelamento é apenas parcial, resultando em uma polarização não nula. À direita: No caso de um disco equatorial geometricamente fino, os vetores de polarização são exclusivamente perpendiculares ao plano do equador, resultando em uma polarização máxima.

### 1.3.1 Polarimetria de Estrelas Be

Os elétrons livres presentes no disco das estrelas Be produzem, a partir do espalhamento Thomson, a polarização intrínseca que caracteriza estes objetos. A partir do estudo da polarização é possível determinar a densidade do disco e sua direção de projetada no céu. A esta técnica observacional é dada o nome de Polarimetria.

A polarização permite um estudo sobre a geometria do disco de uma estrela Be. O fluxo polarizado tem origem no espalhamento de elétrons no disco, sendo afetado pela absorção pré-espalhamento por átomos de HI. A polarimetria desempenha um papel fundamental neste caso, pois ela permite estudar o ambiente circunstelar da estrela com mais detalhes (Haubois et al. 2014).

Como visto, o espalhamento eletrônico não depende do comprimento de onda. Quando a densidade do disco de uma Be é baixa, a opacidade HI também é baixa e, neste caso, o espectro polarizado resultante é quase plano. Porém, quando a densidade é maior a opacidade HI também o é; neste caso são observadas mudanças no nível de polarização devido à absorção pré-espalhamento da luz estelar, o que resulta em uma diminuição do fluxo polarizado quando a opacidade é maior e vice-versa. Assim, há uma relação inversa entre as curvas de polarização e as curvas de profundidade óptica (Haubois et al. 2014). A Figura 1.6 mostra dois espectros polarizados teóricos de uma estrela de tipo espectral B2 para duas densidades de base diferentes e inclinação de  $70^\circ$ . A linha laranja mostra a profundidade óptica total do disco medida na direção radial ao longo do plano equatorial ( $\tau_{\text{total}}$ ). No modelo em que a densidade é mais baixa, o espectro polarizado é quase plano, desde o óptico ao infravermelho próximo, enquanto que, no modelo de densidade mais alta, o espectro é mais íngreme e apresenta mudanças marcantes próximo aos limites de ionização do HI. Logo, ao estudar a polarização de uma estrela Be em fase de disco, em particular sua dependência com o comprimento de onda, podemos obter informações importantes sobre a densidade do disco em questão.

## 1.4 Objetivos

A proposta deste trabalho é determinar a polarização interestelar de um conjunto de estrelas Be já observadas pelo grupo Beacon do IAG/USP, coordenado pelo prof. Alex C. Carciofi e também obter dados inéditos de alvos ainda não observados previamente.

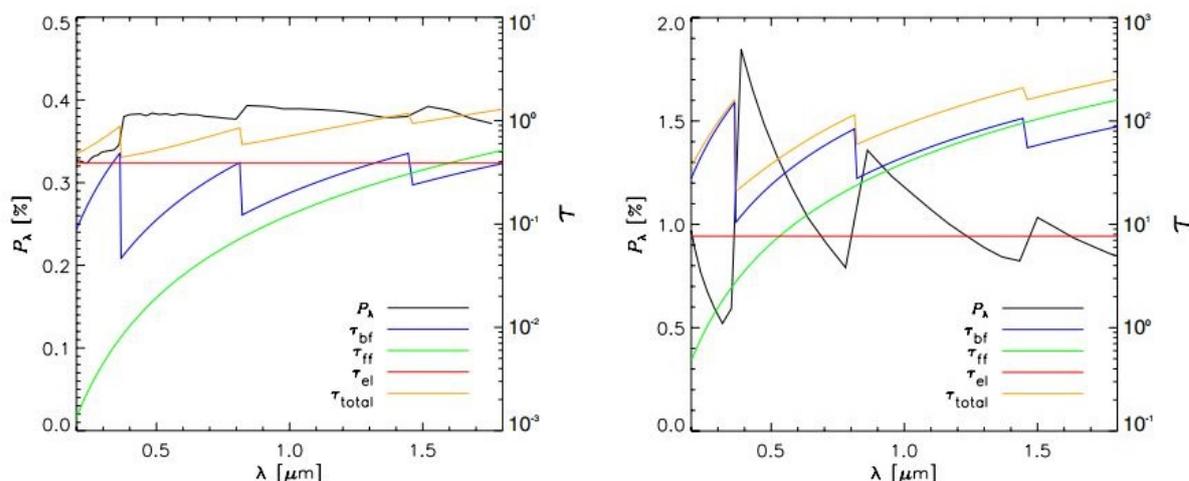


Figura 1.6: Espectro polarizado e as contribuições da profundidade óptica radial ao longo do plano médio. A profundidade óptica total é a soma da profundidade óptica de cada fonte de opacidade contínua, conforme indicado.  $\tau_{bf}$ ,  $\tau_{ff}$  e  $\tau_{el}$  são as opacidades associadas aos processos ligado-livre, livre-livre, e ao espalhamento Thomson, respectivamente, enquanto que  $P_\lambda$  é a polarização do disco. À esquerda: modelo com densidade de base  $4.2 \times 10^{-12} \text{ g cm}^{-3}$ . À direita: densidade  $8.4 \times 10^{-11} \text{ g cm}^{-3}$ . O ângulo de inclinação nos dois casos é  $70^\circ$  e o tipo espectral é B2 (Haubois et al. 2014).

Como será visto em mais detalhes no Capítulo 2, a polarização observada de uma estrela Be é a soma da sua polarização intrínseca com a polarização interestelar, sendo que a última surge a partir dos grãos de poeira que estão parcialmente alinhados com o campo magnético local. Sem conhecer a componente de polarização interestelar de uma estrela, não é possível determinar sua polarização intrínseca. Portanto, uma tarefa importante para qualquer estudo polarimétrico de estrelas Be é medir de maneira adequada a polarização interestelar.

Para isto, um dos objetivos deste projeto é pesquisar e entender como a polarização interestelar é medida e seus diferentes métodos de obtenção, tais como o método de estrelas de campo, diagrama  $QU$  e a despolarização ao longo da linha  $H\alpha$ . Os dois primeiros métodos serão mais importantes para este trabalho, já que não há dados disponíveis no grupo Beacon para a aplicação do terceiro método citado.

O grupo Beacon vem construindo um amplo banco de dados com observações de campos de estrelas Be brilhantes desde 2006. Os dados obtidos até 2016 já foram reduzidos e estão prontos para serem analisados. Outro dos objetivos deste projeto é reduzir os dados do levantamento Beacon desde 2017 até o presente, disponibilizando-os assim para o grupo e seus colaboradores, e contribuir para o aumento da base de dados existentes através da

inclusão de novos alvos relevantes.

## Polarização Interestelar

A polarização da luz das estrelas foi descoberta em 1949 de maneira acidental. Os astrônomos notaram que o grau de polarização era maior em estrelas com maior avermelhamento. Notaram também que estrelas que estavam em uma mesma região do céu pareciam ter direções de polarização similares. Essa polarização foi atribuída ao meio interestelar. Ou seja, a luz da estrela, inicialmente despolarizada, passa a ser polarizada ao passar pelos grãos de poeira do meio interestelar (Draine 2011). A Figura 2.1 mostra a direção dos vetores de polarização de 5453 estrelas. A organização desses vetores, com uma concentração maior no plano do centro galáctico (latitude  $b = 0$ ), pode ser explicada pelo alinhamento dos grãos de poeira com o campo magnético da Galáxia.

Os grãos de poeira do meio interestelar tendem a se alinhar com seu maior eixo perpendicularmente ao campo magnético local (Figura 2.2). O mecanismo responsável por alinhar esses grãos com o campo magnético ainda permanece sem explicação. Porém, o

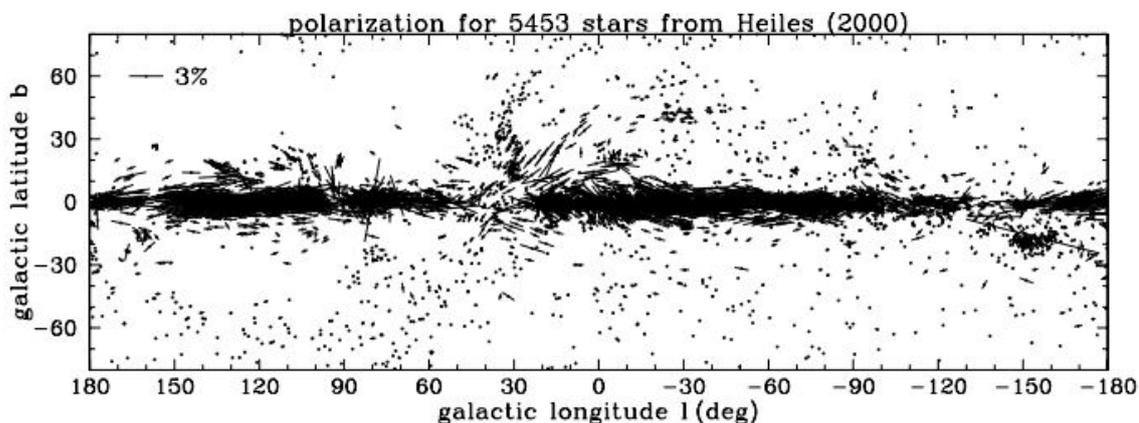


Figura 2.1: Polarização linear da luz plotada em coordenadas galácticas, para todas as estrelas do catálogo de Heiles. O comprimento de cada segmento de linha é proporcional ao grau de polarização (Draine 2011).

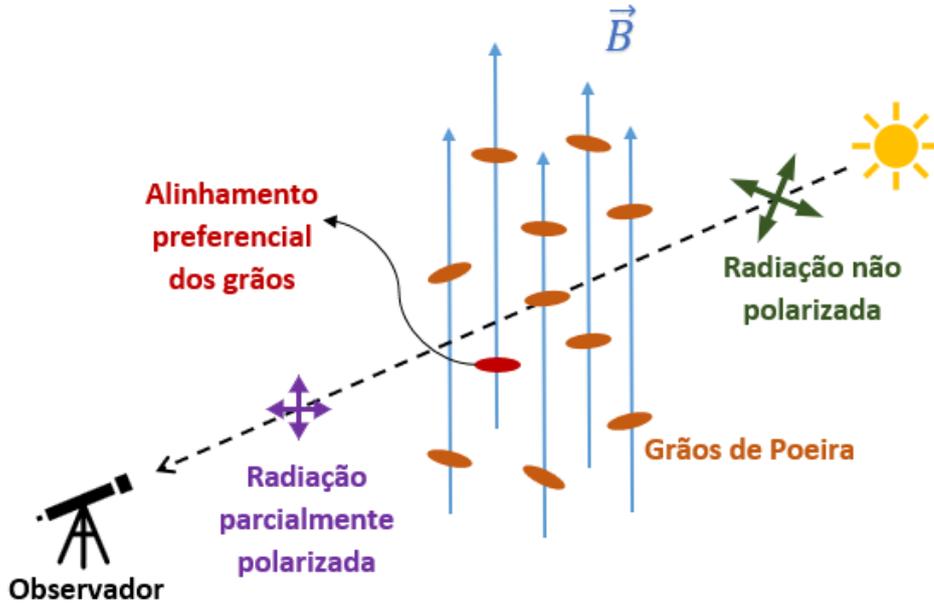


Figura 2.2: Origem da polarização interestelar. Os grãos de poeira tendem a se alinhar perpendicularmente ao campo magnético local (esferóides em vermelho) e a luz polarizada (em roxo) possui polarização com a mesma direção do campo magnético.

tamanho dos grãos pode influenciar na polarização da luz observada já que, neste caso, a extinção cresce rapidamente no ultravioleta, e conseqüentemente há a diminuição da polarização (Draine 2011).

## 2.1 Dependência com o Comprimento de Onda

A dependência espectral da polarização linear do meio interestelar com o comprimento de onda é dada pela Lei de Serkowski (Serkowski et al. 1975)

$$\frac{P(\lambda)}{P_{\max}} = \exp \left[ -K \ln^2 \left( \frac{\lambda_{\max}}{\lambda} \right) \right], \quad (2.1)$$

em que  $P(\lambda)$  é a polarização em um comprimento de onda  $\lambda$ ,  $P_{\max}$  é a polarização máxima que ocorre em um comprimento de onda  $\lambda_{\max}$ ,  $K$  é uma constante adimensional que descreve a largura inversa da curva de polarização com pico ao redor de  $\lambda_{\max}$  (Cotton et al. 2018).

Se a constante  $K$  for tratada como um terceiro parâmetro livre, pode-se mostrar que  $\lambda_{\max}$  e  $K$  estão relacionados linearmente seguindo a relação (Martin et al. 1992)

$$K = c_1 \lambda_{\max} + c_2. \quad (2.2)$$

Whittet et al. (1992) define o valor de  $c_1 = 1.66 \pm 0.09$  e  $c_2 = 0.01 \pm 0.05$ , com  $\lambda_{\max}$  em  $\mu\text{m}$ . A Equação 2.1 com  $K$  dado pela Equação 2.2 também é conhecida como Lei de Serkowski-Wilking, já que Wilking et al. (1980) foi o primeiro a propor  $K$  em função de  $\lambda_{\max}$ .

Os grãos responsáveis pela polarização são aqueles que possuem diâmetros da ordem de  $2a$ , sendo  $a$  o raio dominante dos grãos, que pode ser estimado pela relação

$$a \approx \frac{\lambda_{\max}}{2\pi}. \quad (2.3)$$

Assim, regiões mais densas tendem a apresentar valores mais elevados de  $\lambda_{\max}$ , causados possivelmente por processos que aumentaram o tamanho dos grãos de poeira ao longo do tempo (Cotton et al. 2018).

Os valores de  $\lambda_{\max}$  e  $P_{\max}$  da Lei de Serkowski (Equação 2.1) dependem das nuvens interestelares que estão entre o observador e a estrela observada, e portanto será diferente para diferentes linhas de visada. O parâmetro  $P_{\max}$  é em geral positivamente correlacionado com o avermelhamento, indicando que quanto maior a densidade colunar de poeira entre nós e a estrela-alvo, maior a polarização interestelar. Entretanto,  $P_{\max}$  pode também estar relacionado ao grau de alinhamento dos grãos de poeira, o que possibilita que estrelas com alto excesso de cor apresentem  $P_{\max}$  relativamente baixo (Bednarski 2016).

Já o ângulo de polarização  $\theta_{\text{IS}}$  nos fornece o ângulo preferencial de alinhamento dos grãos, que em geral se mantém constante desde o ultravioleta ao infravermelho próximo (Bednarski 2016). Entretanto, quando há mais de uma nuvem de poeira com diferentes direções de alinhamento entre o observador e a estrela, pode ocorrer uma mudança significativa do ângulo de polarização interestelar.

## 2.2 Determinação da Polarização Interestelar

Como já mencionado na Introdução, a polarização observada de uma estrela Be inclui também a polarização interestelar. Sabendo o valor da polarização interestelar é possível separar o valor da polarização intrínseca, tão importante para o estudo de estrelas Be. Um feixe que possui polarização intrínseca possui parâmetros de Stokes  $Q_{\text{int}}$  e  $U_{\text{int}}$ . Assim, a polarização observada será

$$Q = Q_{\text{int}} + Q_{\text{IS}}, \quad (2.4)$$

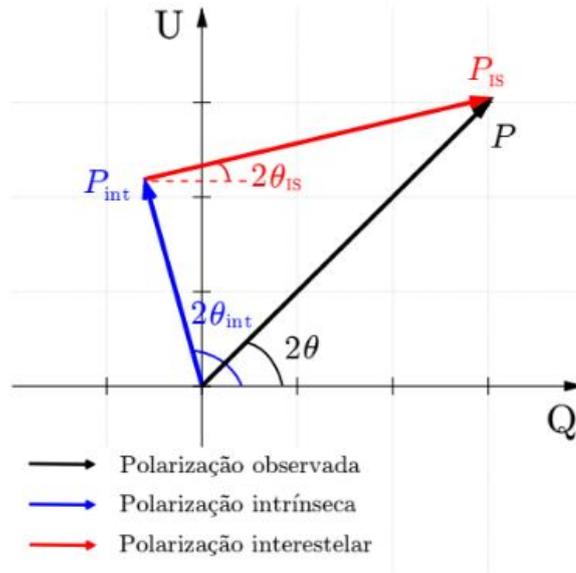


Figura 2.3: Diagrama com a representação do vetor de polarização observada  $P$ , que é a soma vetorial das polarizações intrínseca  $P_{int}$  e interestelar  $P_{IS}$  no diagrama  $QU$  (Bednarski 2016).

$$U = U_{int} + U_{IS}, \quad (2.5)$$

em que  $Q_{IS}$  e  $U_{IS}$  são a contribuição do meio interestelar (Figura 2.3).

### 2.2.1 Observações de estrelas em fase sem disco

A maneira mais eficiente para determinar a polarização interestelar de uma estrela Be é medir a sua polarização quando ela estiver em uma fase inativa, ou seja, sem um disco circunstelar. Neste caso, se a estrela apresentar um valor não nulo de polarização, ele será atribuído somente ao meio interestelar, já que a estrela não terá uma polarização intrínseca (Bednarski 2016). A partir de observações espectroscópicas é possível inferir se a estrela possui ou não um disco. Mais especificamente, uma estrela Be sem disco terá um perfil de linha de  $H\alpha$  em absorção. O trabalho de Marr et al. (2021) mostra um exemplo em que a polarização interestelar foi determinada desta maneira. Inicialmente, determinou-se, por espectroscopia, que a estrela 66 Oph perdeu seu disco em 2010 e permanece inativa desde então. A partir de dados polarimétricos de 2016 os autores puderam, assim, determinar a polarização interestelar desta estrela de forma muito mais precisa que estudos anteriores que fizeram uso do método de estrelas de campo. Entretanto, há que se notar que casos como este são mais raros pois é necessário a combinação de 2 fatores: observações polarimétricas feitas em uma fase inativa, identificada espectroscopicamente.

### 2.2.2 Estrelas de Campo

O método de estrelas de campo será o mais utilizado ao longo deste trabalho. Ele consiste em estudar o campo das estrelas Be através da medida da polarização de estrelas fisicamente próximas ao alvo. É importante que estas estrelas estejam na sequência principal, pois assim a chance delas apresentarem polarização intrínseca cai consideravelmente. Caso essas estrelas não possuam polarização intrínseca, as medidas polarimétricas resultarão na polarização interestelar do meio que estão situadas. Quanto mais próxima a estrela de campo estiver da estrela Be alvo, maiores as chances delas pertencerem ao mesmo meio interestelar, ou seja, com as mesmas características.

### 2.2.3 Diagrama QU

Estrelas Be que possuem um disco axissimétrico apresentam ângulo de polarização intrínseco constante ao longo do tempo. Como em geral os discos de estrelas Be são muito variáveis, é razoável supor que apenas o nível de polarização varia enquanto que o ângulo de polarização permanece constante. Considerando que a polarização interestelar também permaneça constante, dados de observação de uma estrela observada durante um certo período de tempo em um mesmo filtro, tendem a se posicionar ao longo de uma reta no diagrama QU. A Figura 2.4 ilustra tal situação com dados observacionais hipotéticos de uma mesma banda espectral. A partir deste diagrama é possível extrair uma estimativa do ângulo da polarização intrínseca, representado na Figura como  $\theta_{\text{int}}$ , e, por conseguinte, a direção do disco projetada no céu. Apesar deste método não fornecer a polarização interestelar em si, ele provê uma forma de se testar a polarização obtida de uma outra forma, pois permite a comparação do  $\theta_{\text{int}}$  obtido de duas maneiras independentes.

### 2.2.4 Despolarização de linhas H $\alpha$

Uma estrela Be em fase de construção ou dissipação do disco, tende a apresentar linhas de Balmer (H $\alpha$  e H $\beta$ ) em emissão mais intensas.

McLean & Clarke (1979) relaciona a polarização observada nos comprimentos de onda da linha de Balmer e a polarização do contínuo por

$$\frac{p_*(\lambda)}{p_*(\lambda_c)} = \frac{1}{1 + \chi(\lambda)}, \quad (2.6)$$

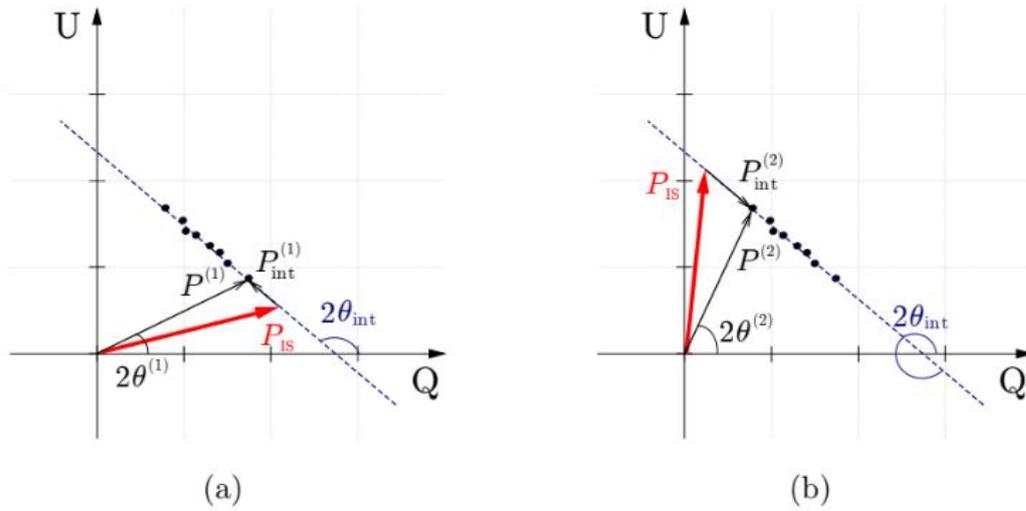


Figura 2.4: Representação esquemática de uma série observacional de uma estrela Be em uma dada banda espectral no diagrama  $QU$  ao longo da construção e/ou dissipação do disco. Os pontos representam dados hipotéticos, que devem se distribuir ao longo da reta intrínseca (reta azul). À esquerda, a polarização interestelar (em vermelho) está em uma posição tal que o ângulo de cada polarização intrínseca é  $\theta_{\text{int}}$ . À direita, a polarização interestelar é admitida em outra posição, tal que as polarizações intrínsecas devem ser em sentido contrário (Bednarski 2016).

em que  $\chi(\lambda)$  é a razão da intensidade da linha e do contínuo no comprimento de onda  $\lambda$ ,  $p_*(\lambda)$  é a polarização observada nos comprimentos de onda da linha e  $p_*(\lambda_c)$  é a polarização do contínuo. Nota-se que quando a intensidade de linha é muito maior que a do contínuo,  $\chi(\lambda) \gg 1$  e a polarização no centro da linha tenderá a zero. Pode-se usar este fato para, então, estimar a polarização interestelar próxima ao comprimento de onda central da linha.

## Metodologia e Desenvolvimento do Trabalho

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os passos para o desenvolvimento do trabalho e a metodologia utilizada.

### 3.1 Procedimentos de Observação

O prof. Dr. Alex C. Carciofi conduz um projeto de longo prazo no Observatório Pico dos Dias, em Brazópolis, MG, para monitorar polarimetricamente estrelas Be desde 2006. Tipicamente, uma observação polarimétrica completa fornece a polarização observada em quatro bandas do contínuo (*BVRI*) e no sistema equatorial, i.e., com o ângulo de polarização medido do leste para o norte celeste.

#### 3.1.1 Polarímetro

Para as observações no OPD foi utilizado o polarímetro IAGPOL, que possui um conjunto de lâminas retardadoras de meia onda e um analisador, que neste caso foi um prisma de Savart de calcita. O polarímetro é um instrumento que possibilita determinar a direção de vibração predominante do campo elétrico e também a porcentagem da intensidade total que ela representa (Bednarski 2016). As lâminas são rotacionadas e assumem posições a  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67.5^\circ$ , etc. As observações foram realizadas utilizando 8 posições de lâminas. Já o prisma de calcita forma duas imagens do alvo separadas por 1 mm e com polarizações ortogonais entre si (Magalhães et al. 1996), separando-as nos feixes ordinário e extraordinário.

Esses dois feixes passam então pelos filtros *BVRI* e em seguida são detectados pelo CCD (*charge-coupled device*), conforme mostra a Figura 3.1. As intensidades registradas

dos feixes ordinário ( $I_o$ ) e extraordinário ( $I_e$ ) nas 8 posições de lâmina possibilitam o mapeamento efetivo da diferença nas intensidades da luz nas diferentes direções de vibração do campo elétrico. Os parâmetros  $Q$  e  $U$  de Stokes são encontrados através da função (Magalhães 1996)

$$P \equiv \frac{I_o - I_e}{I_o + I_e} = Q \cdot \cos(4\phi) + U \cdot \sin(4\phi), \quad (3.1)$$

ajustada a partir das medidas das intensidades dos dois feixes nas 8 posições de lâminas utilizadas, sendo  $\phi$  o ângulo entre os eixos ópticos da lâmina e da calcita.

### 3.1.2 Estrelas padrão polarizadas

Os resultados obtidos a partir das observações não estão no sistema equatorial, já que a calcita é posicionada arbitrariamente em cada missão observacional e não está alinhada com o eixo norte-sul celeste. Por isso, é necessário observar uma estrela com polarização conhecida, com altos valores de polarização e que não seja variável. Chamamos essas estrelas de padrão polarizadas e o ângulo de polarização ( $\theta_{\text{padrão}}$ ) obtido com a observação dessas padrões está associado aos valores de  $Q$  e  $U$  obtidos a partir da Equação 3.1 (Bednarski 2016).

É necessário ainda aplicar um fator de correção  $\Delta\theta$ , que é a diferença entre o ângulo da padrão que foi observada ( $\theta_{\text{padrão}}$ ) e o que foi publicado no sistema equatorial ( $\theta_{\text{padrão}}^{(eq)}$ )

$$\Delta\theta = \theta_{\text{padrão}} - \theta_{\text{padrão}}^{(eq)}. \quad (3.2)$$

Em cada missão é observada ao menos uma padrão polarizada que irá calibrar o valor do ângulo de polarização para o sistema equatorial.

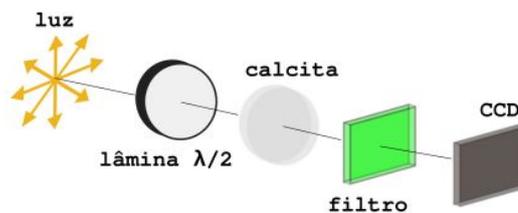


Figura 3.1: Esquema da instrumentação utilizada para observações no OPD. A luz passa pela lâmina retardadora de meia onda e em seguida pela calcita. Na sequência ela atravessa um filtro *BVRI* para ser detectada ao final pelo CCD (Lobo-Gomes 2012).

### 3.1.3 Imagens de Calibração

Como parte do procedimento observacional padrão, é necessário a obtenção de imagens de calibração em todas as noites de observação. São elas:

- *Flat-field* ou *flat*: o telescópio é direcionado para uma tela iluminada por lâmpadas que podem ter diversas intensidades, variando entre fraca, média e forte; e em seguida as imagens *flat* são obtidas. Para os filtros *BVR* geralmente é utilizada a lâmpada forte, enquanto que para o filtro *I* utiliza-se a lâmpada média. As imagens *flat* são importantes para indicar as diferentes respostas de cada pixel do CDD, quando expostos a uma iluminação uniforme (*flat*).
- *Bias*: são imagens obtidas com o obturador fechado com o objetivo obter o viés (*flat*) de contagens do CCD introduzido pela eletrônica a ele acoplada.

## 3.2 Observações das estrelas de campo

Em 2014 iniciou-se um projeto com duração de 3 semestres no Observatório Pico dos Dias para observar estrelas de campo de estrelas Be. Os autores principais deste projeto foram Daniel Bednarski, Bruno C. Mota e o prof. Carciofi. Os autores observaram o campo de 28 estrelas Be durante todo o projeto de observação, sendo que em 9 delas os resultados obtidos com as observações foram inconclusivos ([Bednarski 2016](#)).

Com o objetivo de incluir campos de novas estrelas Be no levantamento Beacon, a aluna e o orientador submeteram 2 pedidos de tempo ao OPD/LNA. Foram concedidas 12 noites de observação, sendo 8 noites no primeiro semestre de 2021 utilizando o telescópio *Boller & Chivens* de 60 cm, e 4 noites no segundo semestre utilizando o telescópio *Perkin-Elmer* de 1.60 m. Foi feita uma seleção de estrelas Be que incluísse estrelas que ainda não haviam sido observadas pelo grupo Beacon e também aquelas estrelas com resultados inconclusivos do estudo anterior. A Tabela 3.1 apresenta a lista de estrelas Be selecionadas para observação (ver Apêndice A) e o Apêndice B apresenta a lista de estrelas de campo selecionadas para cada uma dessas estrelas.

Durante as duas missões observacionais ao longo de 2021 no Observatório Pico dos Dias, foram observadas um total de 42 estrelas de campo de 15 estrelas Be diferentes. Das 12 noites concedidas, 8 tiveram um aproveitamento total do tempo de observação e 4 com

Tabela 3.1 - Estrelas Be selecionadas para medição de estrelas de campo.

* $\eta$ Tau	*228 Eri	*HD 35502	$\theta^1$ Ori C	$\zeta$ Tau
$\delta$ Cen	* $\tau$ Sco	$\kappa$ Lup	*51 Oph	* $\gamma$ Ara
*HR 7355	31 Peg	* $\epsilon$ PsA	* $\beta$ Psc	$\epsilon$ Tuc

aproveitamento parcial. Para este trabalho serão analisados apenas os campos com pelo menos 3 estrelas de campo observadas, resultando em 29 estrelas de campo para 9 estrelas Be. As estrelas Be referentes a esses campos a serem analisados estão marcadas com um asterisco na Tabela 3.1. O Apêndice C contém os dados observacionais de todas as estrelas observadas e que pertencem aos campos analisados.

### 3.2.1 Seleção das estrelas de campo

A seleção das estrelas de campo foi feita a partir de buscas no catálogo Hipparcos (van Leeuwen 2007) utilizando o TOPCAT<sup>1</sup>. Foram escolhidas no mínimo 3 estrelas de campo para cada estrela Be, seguindo quatro critérios:

1. separação angular máxima de  $3^\circ$  da estrela Be;
2. a partir da paralaxe calcula-se a distância e são selecionadas as estrelas com  $\pm 30\%$  da distância da Be;
3. estrelas que estejam preferencialmente na sequência principal;
4. magnitude menor que 11.

Os dois primeiros critérios permitem escolher estrelas de campo com probabilidade maior de estarem no mesmo meio interestelar que a estrela Be alvo. O terceiro critério permite a escolha de estrelas que são menos prováveis de apresentar polarização intrínseca. Já o quarto critério seleciona estrelas suficientemente brilhantes para que o tempo de exposição não se torne excessivamente alto.

## 3.3 Redução dos Dados

Para fazer a redução dos dados observados é necessário realizar, primeiramente, a organização das imagens obtidas, para que atendam aos critérios de redução do IRAF (*Image*

<sup>1</sup> <http://www.starlink.ac.uk/topcat/>

*Reduction and Analysis Facility*). O IRAF é um *software* gratuito que tem como objetivo auxiliar a análise e redução de dados astronômicos.

As imagens são separadas por noites e para cada noite há:

- imagens brutas das estrelas observadas;
- imagens de calibração (*flat* e *bias*); e
- imagens brutas da estrela padrão.

O objetivo de reduzir os dados de cada noite é obter os parâmetros de Stokes  $Q$  e  $U$  a partir das imagens brutas. Utilizando o pacote BEACON, a tarefa *calib* é utilizada para preparar as imagens de calibração, utilizando outras três tarefas:

- *zerocombine*: faz uma imagem média das imagens *bias* adquiridas nas observações;
- *ccdproc*: faz a subtração das imagens *bias* de cada imagem *flat*;
- *flatcombine*: cria uma imagem *flat* média a partir das imagens corrigidas pela tarefa *ccdproc*.

Em seguida, a tarefa *reduce* é utilizada para reduzir completamente os dados, e ela utiliza outras duas tarefas. A primeira, *ccdrap*, calcula a fotometria de abertura dos feixes ordinário e extraordinário para cada lâmina utilizada. A segunda, *polrap*, usa os resultados da fotometria para calcular a modulação da polarização, a partir da Equação 3.1, para cada posição da lâmina. As intensidades  $I_o$  e  $I_e$  são provenientes da tarefa *ccdrap*. A Equação 3.1 é então ajustada, retornando os valores dos parâmetros  $Q$  e  $U$  de Stokes. Ao final, a tarefa *reduce* retorna diversos arquivos com os valores polarimétricos que serão analisados na próxima etapa, de curadoria dos dados.

### 3.4 Curadoria dos Dados

Para a curadoria dos dados é utilizado o módulo *poltools* do Python, que faz parte do pacote PyHdust<sup>2</sup>. Este módulo faz a validação interativa de cada resultado polarimétrico e depois organiza esses resultados em arquivos de texto. O primeiro passo é utilizar a

<sup>2</sup> <https://github.com/danmoser/pyhdust>

#MJD	ccd	target	filt	calc	outfile	star	flag	tags
2	59118.973849	ixon	paqr	v 44.0	paqr1/wpaqr_v_08002.2.out	1	OK	---
3	59118.985755	ixon	paqr	v 44.0	paqr1/wpaqr_v_08025.1.out	1	OK	---
4	59118.994675	ixon	paqr	v 44.0	paqr1/wpaqr_v_08041.1.out	1	OK	---
5	59118.999135	ixon	paqr	v 44.0	paqr1/wpaqr_v_08049.2.out	1	OK	---
6	59119.010015	ixon	paqr	v 44.0	paqr1/wpaqr_v_08068.1.out	1	OK	---
7	59119.016977	ixon	paqr	v 44.0	paqr1/wpaqr_v_08081.1.out	1	OK	---
8	59118.977663	ixon	paqr	i 44.1	paqr1/wpaqr_i_08008.2.out	1	OK	s>>theor_s
9	59118.987970	ixon	paqr	i 44.1	paqr1/wpaqr_i_08025.2.out	1	OK	s>>theor_s
10	59118.994961	ixon	paqr	i 44.1	paqr1/wpaqr_i_08038.2.out	1	OK	---
11	59119.001351	ixon	paqr	i 44.1	paqr1/wpaqr_i_08049.2.out	1	OK	s>>theor_s
12	59119.014732	ixon	paqr	i 44.1	paqr1/wpaqr_i_08073.2.out	1	OK	s>>theor_s
13	59119.020851	ixon	paqr	i 44.1	paqr1/wpaqr_i_08083.2.out	1	OK	---
14	59119.190928	ixon	paqr	v 44.0	paqr5/wpaqr_v_08009.1.out	1	OK	---
15	59119.197619	ixon	paqr	v 44.0	paqr5/wpaqr_v_16017.1.out	1	OK	---
16	59119.193144	ixon	paqr	i 44.1	paqr5/wpaqr_i_08009.2.out	1	OK	---
17	59119.202065	ixon	paqr	i 44.1	paqr5/wpaqr_i_08025.2.out	1	OK	---
18	59119.083881	ixon	paqr	v 43.9	paqr3/wpaqr_v_08009.1.out	1	OK	---
19	59119.090572	ixon	paqr	v 43.9	paqr3/wpaqr_v_16017.1.out	1	OK	---
20	59119.098736	ixon	paqr	v 43.9	paqr3/wpaqr_v_08034.1.out	1	OK	---
21	59119.108413	ixon	paqr	v 43.9	paqr3/wpaqr_v_16049.1.out	1	OK	s>>theor_s
22	59119.117062	ixon	paqr	v 43.9	paqr3/wpaqr_v_08068.2.out	1	OK	---
23	59119.128484	ixon	paqr	v 43.9	paqr3/wpaqr_v_08089.1.out	1	OK	---
24	59119.086097	ixon	paqr	i 44.0	paqr3/wpaqr_i_08009.2.out	1	OK	---
25	59119.092216	ixon	paqr	i 44.0	paqr3/wpaqr_i_08019.2.out	1	OK	s>>theor_s
26	59119.099478	ixon	paqr	i 44.0	paqr3/wpaqr_i_08033.2.out	1	OK	---
27	59119.110629	ixon	paqr	i 44.0	paqr3/wpaqr_i_16049.2.out	1	OK	s>>theor_s
28	59119.119850	ixon	paqr	i 44.0	paqr3/wpaqr_i_08070.2.out	1	OK	s>>theor_s
29	59119.128770	ixon	paqr	i 44.0	paqr3/wpaqr_i_08086.2.out	1	OK	s>>theor_s

Figura 3.2: Arquivo de texto *obt.dat* resultante da rotina *genAllLog*.

rotina *genAllLog* para compilar as informações das estrelas observadas em cada noite. Para cada interação são mostrados os gráficos de modulação produzidos pelos diferentes agrupamentos das posições de lâmina. Assim, o usuário pode escolher as modulações que apresentam as melhores incertezas na polarização.

Depois de feito este processo para cada noite, dois arquivos são obtidos a partir da compilação das informações resultantes da rotina *genAllLog*: “obj.dat” com os dados de cada objeto alvo e “std.dat” com os dados da estrela padrão. A Figura 3.2 mostra o arquivo-saída da rotina *genAllLog* com os dados de  $\pi$  Aqr obtidos em 2020. Como exemplo, a Figura 3.3 mostra o arquivo-saída da mesma rotina para as estrelas padrões que foram observadas na mesma missão de  $\pi$  Aqr em 2020.

Finalmente, a rotina *genTarget* é utilizada para ler todos os arquivos *.dat* gerados na etapa anterior, e isso resultará em um arquivo texto com a tabela de série temporal polarimétrica para cada alvo observado. Nesta rotina é feita ainda a calibração para o sistema equatorial a partir da leitura do arquivo *std.dat* da noite, utilizando o procedimento descrito na Seção 3.1.2. O parâmetro *ispol*, opcional para esta rotina, permite incluir os valores de polarização interestelar para subtração no valor da polarização observada, com a finalidade de obter a polarização intrínseca do alvo. Como exemplo, a Figura 3.4 mostra o arquivo-saída resultante da rotina *genTarget* para a observação de  $\pi$  Aqr em uma noite de 2020.

1 #MJD	ccd	target	filt	calc	outfile	star	flag	tags
2 59095.954613	ixon	osco	b	44.5	osco/wosco_b_08003.2.out	1	W	obs!=pub
3 59095.957943	ixon	osco	v	44.5	osco/wosco_v_08005.2.out	1	OK	---
4 59095.962840	ixon	osco	r	44.5	osco/wosco_r_08001.2.out	1	W	obs!=pub
5 59095.971024	ixon	osco	i	44.5	osco/wosco_i_16001.2.out	1	W	obs!=pub
6 59116.912417	ixon	eaql	b	43.8	eaql/weaql_b_08001.1.out	1	OK	s>>theor_s
7 59116.931625	ixon	eaql	v	43.8	eaql/weaql_v_16001.2.out	1	OK	s>>theor_s
8 59116.937610	ixon	eaql	r	43.7	eaql/weaql_r_08001.2.out	1	OK	---
9 59116.942096	ixon	eaql	i	43.7	eaql/weaql_i_16001.2.out	1	OK	s>>theor_s

Figura 3.3: Arquivo de texto *std.dat* resultante da rotina *genAllLog*.

1 #	ISP parameters used:	2 #	3 #	Pmax (%)	lmax (A)	PA	4 #	0.0000	0.00	0.00	5 #	6 #	MJD	night	ccd	filt	calc	stdstars	dth	sigdth	P	Q	U	th	sigP	sigth	outfile	star
7	59095.989652	20set03	ixon	v	44.2	osco,eaql	137.8	32.3	0.9782	0.8023	0.5597	17.45	0.0222	0.65	16001.2.out	1												
8	59095.992743	20set03	ixon	i	44.4	osco,eaql	124.8	30.2	0.7321	0.6202	0.3890	16.05	0.0109	0.43	08001.2.out	1												
9	59095.997671	20set03	ixon	v	44.2	osco,eaql	137.8	32.3	0.9826	0.8027	0.5607	17.61	0.0062	0.18	16017.1.out	1												
10	59096.001242	20set03	ixon	i	44.4	osco,eaql	124.8	30.2	0.7294	0.6063	0.4056	16.89	0.0082	0.32	08017.2.out	1												
11	59096.006197	20set03	ixon	v	44.2	osco,eaql	137.8	32.3	0.9791	0.7064	0.5832	18.28	0.0039	0.11	08038.1.out	1												
12	59096.012013	20set03	ixon	i	44.4	osco,eaql	124.8	30.2	0.7505	0.6133	0.4326	17.60	0.0196	0.75	16033.2.out	1												
13	59096.016661	20set03	ixon	v	44.2	osco,eaql	137.8	32.3	0.9914	0.7893	0.6000	18.62	0.0089	0.26	16049.1.out	1												
14	59096.020490	20set03	ixon	i	44.4	osco,eaql	124.8	30.2	0.7616	0.6023	0.4662	18.87	0.0113	0.43	08049.2.out	1												
15	59096.024225	20set03	ixon	v	44.2	osco,eaql	137.8	32.3	0.9728	0.7598	0.6074	19.32	0.0036	0.11	08065.2.out	1												
16	59096.029973	20set03	ixon	i	44.4	osco,eaql	124.8	30.2	0.4092	0.3763	0.1608	11.57	0.3855	26.99	16065.2.out	1												
17	59096.034308	20set03	ixon	v	44.2	osco,eaql	137.8	32.3	0.9890	0.7403	0.6558	20.77	0.0055	0.16	08086.2.out	1												
18	59096.038376	20set03	ixon	i	44.4	osco,eaql	124.8	30.2	0.7726	0.5870	0.5024	20.28	0.0092	0.34	08088.2.out	1												
19	59096.041867	20set03	ixon	v	44.3	osco,eaql	137.8	32.3	0.9983	0.7589	0.6486	20.26	0.0047	0.13	16001.2.out	1												
20	59096.046503	20set03	ixon	i	44.1	osco,eaql	124.8	30.2	0.7094	0.5601	0.4354	18.93	0.0331	1.34	08009.2.out	1												
21	59096.049523	20set03	ixon	v	44.3	osco,eaql	137.8	32.3	0.9716	0.7200	0.6524	21.09	0.0047	0.14	08019.1.out	1												
22	59096.054229	20set03	ixon	i	44.1	osco,eaql	124.8	30.2	0.7163	0.5473	0.4622	20.09	0.0105	0.42	08017.2.out	1												
23	59096.058783	20set03	ixon	v	44.3	osco,eaql	137.8	32.3	0.9736	0.7022	0.6744	21.92	0.0089	0.26	16033.1.out	1												
24	59096.063349	20set03	ixon	i	44.1	osco,eaql	124.8	30.2	0.7416	0.5525	0.4947	20.92	0.0069	0.27	08041.2.out	1												
25	59096.068145	20set03	ixon	v	44.3	osco,eaql	137.8	32.3	0.9733	0.6771	0.6992	22.96	0.0066	0.19	08049.2.out	1												
26	59096.075542	20set03	ixon	i	44.1	osco,eaql	124.8	30.2	0.7487	0.5566	0.5874	21.33	0.0191	0.73	16049.2.out	1												
27	59096.081781	20set03	ixon	v	44.3	osco,eaql	137.8	32.3	1.0038	0.6993	0.7201	22.92	0.0028	0.08	08073.1.out	1												

Figura 3.4: Arquivo de texto resultante da rotina *genTarget* para a estrela  $\pi$  Aqr na noite do dia 03/09/2020.

Outro módulo do pacote PyHdust também utilizado foi o *fieldstars*. Nele há a rotina *genscv* que irá buscar as tabelas obtidas com a rotina *genTarget* e cruzar os dados com uma tabela que contém as informações sobre coordenadas dos alvos, distâncias, magnitudes, tipos espectrais, etc. Como saída, é gerada uma tabela no formato *.csv* com os comprimentos de onda efetivos calculados e todos os dados observacionais de cada estrela (Apêndice C), que serão essenciais para a geração dos gráficos de cada campo estudado.



## Resultados

### 4.1 Polarização de campo

Foi criado um código em *Python* para gerar os gráficos dos campos selecionados a partir da tabela *.csv* obtida na rotina *gensv*. Este código é uma adaptação das rotinas *graf\_p*, *graf\_pradial* e *graf\_field*, que também compõem o módulo *fieldstars*. O código criado produz 3 gráficos que combinados fornecem um panorama completo do campo e da polarização interestelar na direção da Be respectiva.

O primeiro gráfico é a polarização *versus* o comprimento de onda das estrelas de campo. Aos dados de cada estrela é ajustada a função de Serkowski (Equação 2.1) utilizando o Método de Monte Carlo via Cadeias de Markov. Os ajustes retornam os valores da polarização máxima ( $P_{\text{máx}}$ ) e comprimento de onda máximo ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) de cada curva.

O segundo gráfico mostra as posições das estrelas no céu (a declinação,  $\Delta\text{Dec}$ , e ascensão reta,  $\Delta\text{RA}$ ) com respectivos vetores de polarização, que representam a direção da polarização em cada filtro observado. A estrela Be é marcada no gráfico com um ponto preto na origem do sistema de coordenadas.

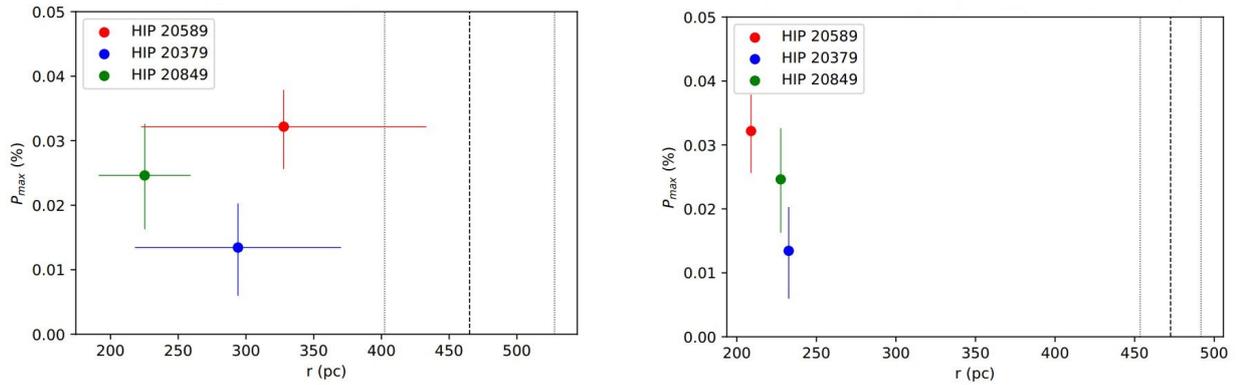
O terceiro gráfico é a polarização máxima ( $P_{\text{máx}}$ ) *versus* a distância a cada estrela. A Be é representada com uma reta vertical na sua respectiva distância e incertezas. Bednarski (2016) utilizou os valores de distância a partir dos valores de paralaxe presentes no catálogo *Hipparcos* (van Leeuwen 2007). A sucessora da missão *Hipparcos* é a missão *Gaia*<sup>3</sup>. Por ser ainda uma missão em andamento, os dados estão ainda sujeitos a revisões e aprimoramentos. Neste trabalho usamos dados tanto da edição mais recente (*Data Release 3 – DR3*, Gaia Collaboration et al. 2021, de dezembro de 2020) quanto o anterior (DR2,

---

<sup>3</sup> <https://www.cosmos.esa.int/gaia>

Gaia Collaboration et al. 2018, de abril de 2018).

Como os dados do *Gaia* são mais recentes, os valores das paralaxes de cada estrela sofreram alterações e na maior parte dos casos, as incertezas são significativamente menores quando comparadas ao catálogo *Hipparcos*. A Figura 4.1 apresenta um exemplo do terceiro gráfico gerado para o campo da estrela 228 *Eri*, sendo o gráfico da Figura 4.1(a) feito utilizando os dados do *Hipparcos* e o gráfico da Figura 4.1(b) utilizando os dados do DR3. O gráfico mostra o grande ganho em precisão obtido para as 4 estrelas em questão. Entretanto, em alguns casos os dados do *Gaia* são ainda de pior qualidade que os do *Hipparcos*. Dessa forma, para cada campo analisado foi feita uma comparação entre os três catálogos (*Hipparcos*, DR2 e DR3), com a finalidade de escolher os valores que apresentavam as menores incertezas.



(a) Polarização máxima  $P_{m\acute{a}x}$  versus a distância  $r$  do catálogo de *Hipparcos*.

(b) Polarização máxima  $P_{m\acute{a}x}$  versus a distância  $r$  do *Gaia*.

Figura 4.1: Gráficos da polarização máxima  $P_{m\acute{a}x}$  versus a distância  $r$  para o campo da estrela 228 *Eri*. As linhas verticais tracejadas representam a distância da estrela Be e as linhas pontilhadas representam as incertezas da distância. Houve uma melhora significativa nas incertezas calculadas das distâncias das estrelas de campo e também da estrela Be quando comparados os catálogos *Hipparcos* com o DR3 do *Gaia*

Foram analisados os campos das estrelas HR 7355, 228 *Eri*, 51 *Oph*,  $\tau$  *Sco*,  $\epsilon$  *PsA*,  $\gamma$  *Ara*,  $\beta$  *Psc*,  $\eta$  *Tau* e HD 35502, que possuíam no mínimo 3 estrelas de campo cada um. Cada campo deve ser analisado individualmente e o objetivo dessa análise é estudar a homogeneidade do meio interestelar no qual a estrela Be está inserida e determinar a polarização interestelar em sua direção.

As análises dos campos possibilitaram fazer a divisão em 3 grupos:

- Grupo 1: Campos bem determinados;

- Grupo 2: Campos parcialmente determinados;
- Grupo 3: Campos indeterminados.

Os resultados encontrados para as polarizações interestelares e o grupo ao qual cada campo pertence foram compilados na Tabela 4.1. As seções seguintes apresentam as análises detalhadas de um campo representativo de cada grupo. Os demais campos podem ser consultados no Apêndice D.

Tabela 4.1 - Polarizações interestelares das estrelas Be.

Estrela	$P_{\text{máx}}$ (%)	$\lambda_{\text{máx}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\theta_{\text{IS}}$ ( $^{\circ}$ )	Grupo
HR 7355	$0.106 \pm 0.020$	$0.437 \pm 0.042$	$109.7 \pm 2.1$	2
228 Eri	–	–	–	3
51 Oph	$0.187 \pm 0.041$	$0.766 \pm 0.089$	$10.2 \pm 4.4$	2
$\tau$ Sco	$0.327 \pm 0.042$	$0.577 \pm 0.033$	$13.5 \pm 9.1$	1
$\epsilon$ PsA	–	–	–	3
$\gamma$ Ara	$0.990 \pm 0.074$	$0.563 \pm 0.021$	$11.0 \pm 4.5$	1
$\beta$ Psc	$0.314 \pm 0.093$	$0.378 \pm 0.060$	$104.9 \pm 9.6$	1
$\eta$ Tau	$0.281 \pm 0.099$	$0.587 \pm 0.057$	$101.0 \pm 2.6$	1
HD 35502	$0.132 \pm 0.085$	$0.523 \pm 0.027$	$94.4 \pm 9.0$	1

#### 4.1.1 Grupo 1 - Campos bem determinados

O Grupo 1 reuniu os campos das estrelas em que foi possível obter uma estimativa completa da polarização interestelar. Dos 9 campos analisados, 5 foram inseridos neste grupo:  $\tau$  Sco,  $\gamma$  Ara (Apêndice D.1.1),  $\beta$  Psc (Apêndice D.1.2),  $\eta$  Tau (Apêndice D.1.3) e HD 35502 (Apêndice D.1.4).

Para a estrela  $\tau$  Sco foram observadas 3 estrelas de campo. As curvas ajustadas pela função de Serkowski são mostradas na Figura 4.2 e a Tabela 4.2 apresenta os resultados dos parâmetros ajustados. Para a estrela HIP 81619 a polarização foi medida em apenas um filtro e seu valor é bastante baixo, de modo que o único parâmetro de Serkowski obtido com algum grau de confiança neste caso foi  $P_{\text{máx}}$ .

A Figura 4.3 mostra o mapa de polarização do campo de  $\tau$  Sco e a direção dos vetores polarização de cada estrela. Analisando este gráfico juntamente com o valor da média ponderada do ângulo  $\theta$  de cada estrela (Tabela 4.2), vê-se uma consistência na direção dos vetores de polarização, principalmente entre as estrelas HIP 80819 e 81521, que tiveram seus ângulos de polarização medidos com precisão.

Tabela 4.2 – Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de  $\tau$  Sco, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva.

Estrela	$P_{m\acute{a}x}$ (%)	$\lambda_{m\acute{a}x}$ ( $\mu m$ )	$\langle\theta\rangle$ ( $^\circ$ )	N
HIP 81521	$0.747^{+0.012}_{-0.009}$	$0.611^{+0.021}_{-0.029}$	$4.4 \pm 0.7$	4
HIP 81619	$0.078^{+0.016}_{-0.013}$	$0.474^{+0.372}_{-0.305}$	$162.1 \pm 3.1$	1
HIP 80819	$0.383^{+0.011}_{-0.031}$	$0.544^{+0.087}_{-0.497}$	$22.6 \pm 1.1$	4

A Figura 4.4 mostra a variação de  $P_{m\acute{a}x}$  com a distância. Observe que as duas estrelas mais distantes apresentam um valor muito maior de  $P_{m\acute{a}x}$  que a estrela mais próxima. Isto é consistente com o fato de que se espera que quanto maior a distância, maior a quantidade de poeira na linha de visada e portanto maior a polarização.

Para encontrar o valor da polarização interestelar para o campo de  $\tau$  Sco, assume-se que o  $P_{m\acute{a}x}$  aumente linearmente com a distância. Um ajuste de uma reta através do método dos mínimos quadrados (Figura 4.4), retornou  $P_{m\acute{a}x} = (0.0073 \pm 0.0002)r - (0.72 \pm 0.03)$ , sendo o valor de  $P_{m\acute{a}x}$  em % e  $r$  em pc. Tem-se então que, para a distância de  $\tau$  Sco,  $P_{m\acute{a}x} = (0.327 \pm 0.042)\%$ . Quanto ao ângulo de polarização foi calculada a média entre as estrelas HIP 81521 e HIP 80819, que apresentam observações em todos os 4 filtros (valores utilizados para o cálculo estão descritos na Tabela 4.2), resultando em  $\theta_{IS} = (13.5 \pm 9.1)^\circ$ . Para o erro das medidas calculadas foi utilizado o erro padrão da média, procedimento que será utilizado também para os outros campos. Os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  e  $\theta_{IS}$  estão apresentados na Tabela 4.1 e constituem a primeira estimativa da polarização interestelar do campo de

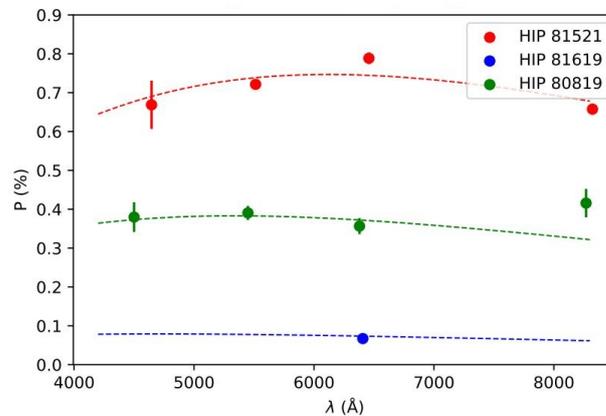


Figura 4.2: Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para  $\tau$  Sco.

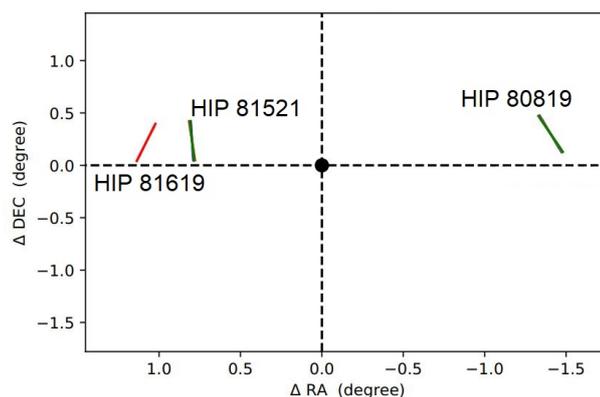


Figura 4.3: Mapa de polarização para o campo de  $\tau$  Sco, que está representada como o ponto preto na origem do sistema de coordenadas. A direção de cada um dos vetores das estrelas de campo representa a polarização medida para cada filtro observado.

$\tau$  Sco disponível na literatura.

#### 4.1.2 Grupo 2 - Campos parcialmente determinados

O Grupo 2 reúne os campos em que foram obtidas estimativas preliminares da PI, que precisam ser confirmadas ou corrigidas através de novas observações futuras. Isto ocorreu para os campos das estrelas HR 7355 e 51 Oph (Apêndice D.2.1).

Para a estrela HR 7355 foram observadas 4 estrelas de campo. A Figura 4.5 mostra a dependência da polarização medida com o comprimento de onda e o ajuste da função de Serkowski para cada curva. Os valores dos parâmetros ajustados são mostrados na

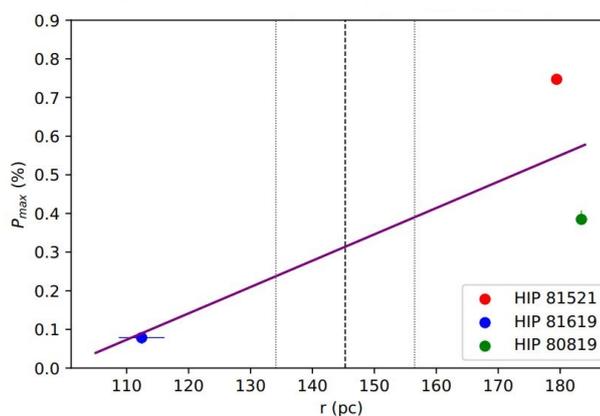


Figura 4.4: Gráfico da polarização máxima  $P_{máx}$  versus a distância  $r$  para o campo da estrela  $\tau$  Sco. A linha vertical tracejada representa a distância da estrela Be e as linhas pontilhadas representam as incertezas da distância. A reta roxa é o ajuste para  $P_{máx} = (0.0073 \pm 0.0002)r - (0.72 \pm 0.03)$ .

Tabela 4.3 – Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de HR 7355, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva.

Estrela	$P_{máx}$ (%)	$\lambda_{máx}$ ( $\mu m$ )	$\langle\theta\rangle$ ( $^\circ$ )	N
HIP 95386	0.086 <sup>+0.019</sup> -0.018	0.479 <sup>+0.281</sup> -0.313	107.5 $\pm$ 8.4	4
HIP 95782	0.165 <sup>+0.022</sup> -0.023	0.758 <sup>+0.076</sup> -0.173	66.2 $\pm$ 3.7	4
HIP 95604	0.086 <sup>+0.021</sup> -0.019	0.446 <sup>+0.305</sup> -0.291	162.0 $\pm$ 11.3	4
HIP 94825	0.126 <sup>+0.031</sup> -0.029	0.395 <sup>+0.337</sup> -0.244	111.8 $\pm$ 6.3	2

Tabela 4.3. É possível perceber uma incerteza grande nos valores de  $P_{máx}$  e  $\lambda_{máx}$  para a estrela HIP 95604. Já a estrela HIP 95782 apresenta um ângulo de polarização médio muito discrepante dos demais e também o valor de  $P_{máx}$  está acima dos outros três.

A Figura 4.6 mostra o mapa de polarização do campo de HR 7355. Percebe-se que há uma discrepância na direção da polarização das estrelas HIP 95782 e HIP 95604 em relação às outras duas, o que é provavelmente melhor notado pelos dados da Tabela 4.3. Isto pode sugerir que essas duas estrelas não pertencem ao mesmo meio interestelar das outras 2 estrelas de campo (e de HR 7355).

A Figura 4.7 mostra a relação da polarização máxima ( $P_{máx}$ ) de cada estrela de campo com a distância. Para todas as estrelas, incluindo a Be, foram utilizados os dados do *Gaia* DR3 para o cálculo da distância (ver Apêndices A e B).

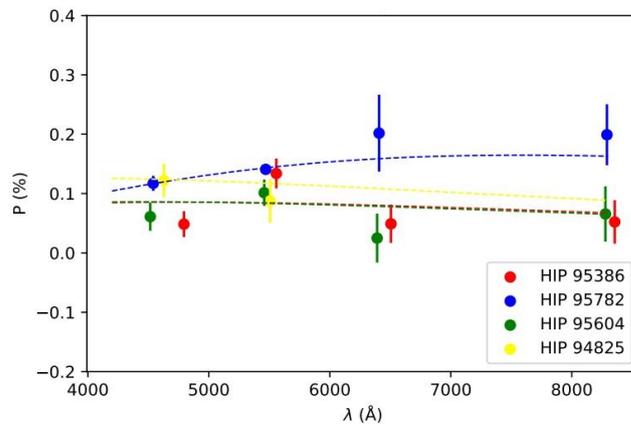


Figura 4.5: Ajustes da função de Serkowski obtidos para quatro estrelas de campo observadas para HR 7355.

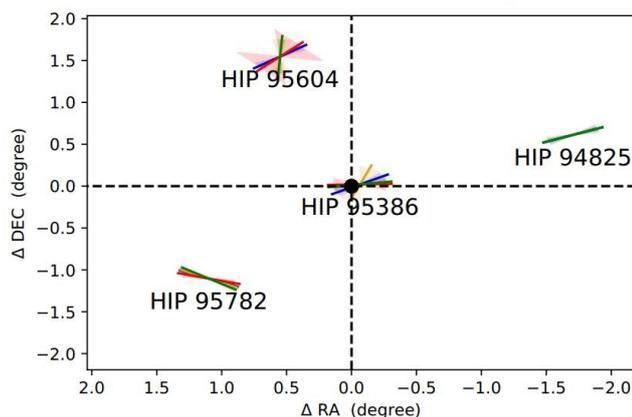


Figura 4.6: Mapa de polarização para o campo de HR 7355, que está representada como o ponto preto na origem do sistema de coordenadas. A direção de cada um dos vetores das estrelas de campo representa a polarização medida para cada filtro observado.

Uma análise do campo de HR 7355 sugere que a estrela HIP 95386 tem um papel importante neste campo, pois está angularmente muito próxima à HR 7355 ( $0.06^\circ$ ) e está mais distante de nós que a estrela Be. Ao mesmo tempo, HIP 94825, que tem um ângulo de polarização muito próximo ao de HIP 95386 e está a uma distância muito menor, tem um  $P_{máx}$  semelhante a esta estrela. Estes 2 fatos sugerem fortemente que o meio interestelar na direção de HR 7355 é bem amostrado por estas duas estrelas.

Por este motivo, optou-se por excluir as estrelas HIP 95728 e HIP 95604 do cálculo da polarização interestelar. Com isso, calculou-se a média simples das duas estrelas restantes

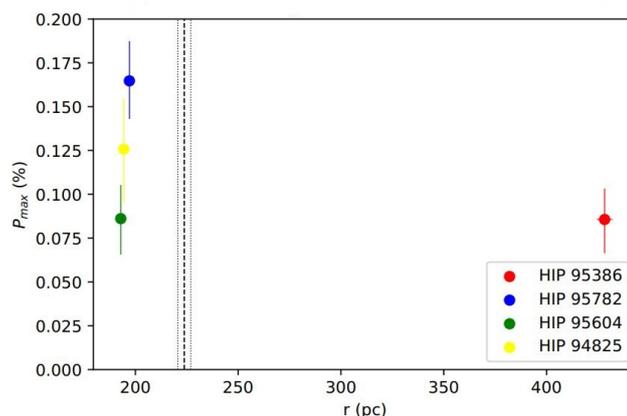


Figura 4.7: Gráfico da polarização máxima  $P_{máx}$  versus a distância  $r$  para o campo da estrela HR 7355. A linha vertical tracejada representa a distância da estrela Be e as linhas pontilhadas representam as incertezas da distância.

(HIP 95386 e HIP 94825), chegando aos valores de  $P_{máx} = (0.106 \pm 0.020)\%$  e  $\lambda_{máx} = (0.437 \pm 0.042) \mu\text{m}$ . Foi feita a média também dos ângulos de polarização descritos na Tabela 4.3, resultando no valor de  $\theta_{IS} = (109.7 \pm 2.1)^\circ$  (ver Tabela 4.1).

O campo de HR 7355 já havia sido observado por Bednarski (2016), porém o autor concluiu que os dados obtidos foram inconclusivos para obter a polarização interestelar. A partir dos novos dados obtidos com as observações recentes, foi possível chegar ao valor estimado da polarização interestelar deste campo, que será utilizado pelo estudante de mestrado Matheus Zaghi de Oliveira em sua tese, também orientada pelo professor Alex C. Carciofi. O motivo que este campo foi elencado como parcialmente determinado é que a PI foi determinada a partir de dados de 2 estrelas apenas. Para que este campo tenha resultados mais confiáveis, propomos a observação assim que possível das estrelas HIP 95278 e HIP 95182 que estão localizadas às distâncias de  $(305.2 \pm 4.8)\text{pc}$  e  $(317.2 \pm 1.66)\text{pc}$ , respectivamente.

Finalmente, é importante salientar a importância dos dados do *Gaia* para os resultados obtidos para o campo de HR 7355. A melhor precisão da distância oferece uma visão tridimensional do campo, permitindo identificar claramente estrelas tanto mais próximas quanto mais distantes do que a estrela alvo.

#### 4.1.3 Grupo 3 - Campos Indeterminados

No Grupo 3 foram incluídos os campos em que não foi possível obter nenhuma informação que pudesse levar à determinação da polarização interestelar do campo, que é o caso das estrelas 228 Eri e  $\epsilon$  PsA (Apêndice D.3.1).

Para a estrela 228 Eri foram observadas 3 estrelas de campo e a Figura 4.8 mostra a polarização medida em cada filtro *versus* o comprimento de onda, e o ajuste da função de Serkowski para cada estrela. Os valores dos parâmetros ajustados estão descritos na Tabela 4.4. Os valores médios do ângulo de polarização são bem discrepantes, apresentando uma diferença de  $91.6^\circ$  entre o maior valor (HIP 20379) e o menor (HIP 20849). Isto também pode ser visto no mapa de polarização de 228 Eri (Figura 4.9). Um dos motivos de tal discrepância é que os níveis de polarização são bastante baixos, o que implica em altos erros observacionais na determinação do ângulo. Os dados, assim, não permitem dizer se a variação do ângulo é intrínseca aos objetos ou não.

A Figura 4.10 mostra o gráfico da polarização máxima *versus* a distância. As três

Tabela 4.4 – Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de 228 Eri, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva.

Estrela	$P_{máx}$ (%)	$\lambda_{máx}$ ( $\mu m$ )	$\langle \theta \rangle$ ( $^\circ$ )	N
HIP 20589	0.032 <sup>+0.007</sup> -0.006	0.319 <sup>+0.276</sup> -0.172	146.0 $\pm$ 16.1	4
HIP 20379	0.013 <sup>+0.007</sup> -0.007	0.545 <sup>+0.330</sup> -0.360	176.9 $\pm$ 21.5	2
HIP 20849	0.025 <sup>+0.008</sup> -0.008	0.407 <sup>+0.340</sup> -0.239	85.3 $\pm$ 23.3	4

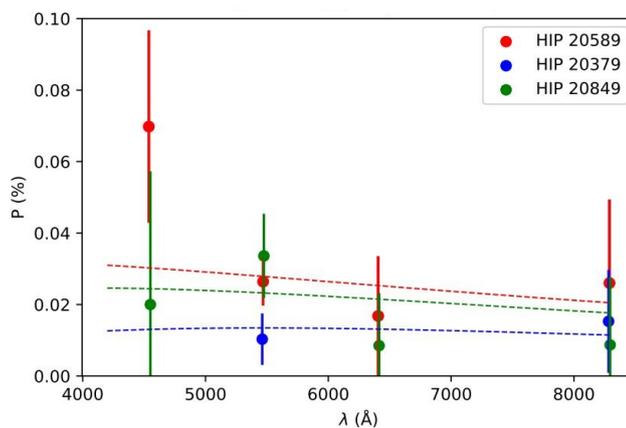


Figura 4.8: Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para 228 Eri.

estrelas estão muito menos distantes do que de 228 Eri. As estrelas de campo que foram selecionadas não estão amostrando o meio interestelar próximo de 228 Eri, o que impede uma estimativa confiável para o valor da PI. A observação de estrelas mais próximas de 228 Eri, tais como HIP 20893, que apresenta uma distância de  $r = (341.87 \pm 6.14)$  pc; e HIP 20838 com  $r = (441.41 \pm 3.87)$  pc, poderia incluir dados que possibilitariam uma determinação da PI para este campo.

## 4.2 Redução Parcial do Levantamento Beacon

Foram reduzidos os dados de todas as noites desde fevereiro de 2020 até novembro de 2021. Entre os anos de 2017 e 2019 os dados foram reduzidos parcialmente, sendo que das 100 noites observadas 40% já foram reduzidas. Essa redução parcial inclui alvos importantes para o Grupo Beacon e também a redução das estrelas Be selecionadas para análise dos campos neste trabalho, tais como as estrelas  $\tau$  Sco,  $\gamma$  Ara,  $\epsilon$  PsA e  $\beta$  Psc.

Podemos citar dois resultados importantes obtidos através da redução dos dados do

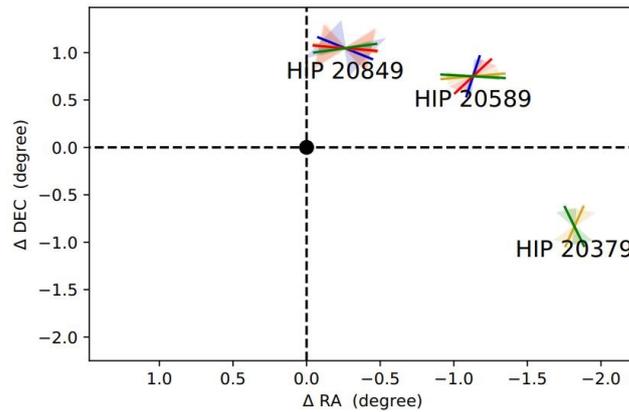


Figura 4.9: Mapa de polarização para o campo de 228 Eri, que está representada como o ponto preto na origem do sistema de coordenadas. A direção de cada um dos vetores das estrelas de campo representa a polarização medida para cada filtro observado.

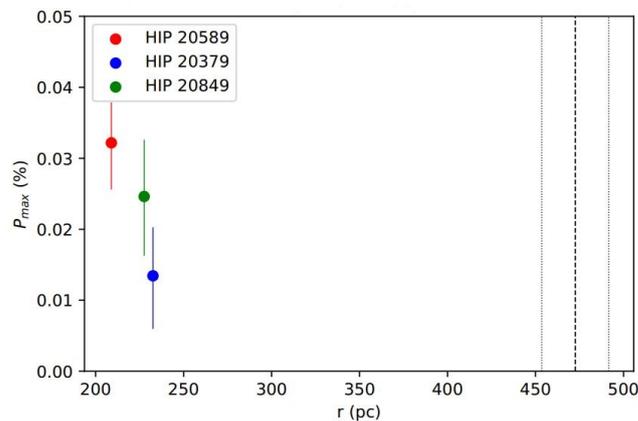


Figura 4.10: Gráfico da polarização máxima  $P_{\max}$  versus a distância  $r$  para o campo da estrela 228 Eri. A linha vertical tracejada representa a distância da estrela Be e as linhas pontilhadas representam as incertezas da distância.

levantamento Beacon. O primeiro é a redução, e disponibilização dos resultados para análise, da estrela  $\pi$  Aqr, que foi observada em 2020 durante 14 noites entre os meses de setembro e novembro. Esses dados serão analisados pela aluna de doutorado Amanda Caveagna Rubio. O segundo resultado foi a redução dos dados de Pleione, que foi observada em duas noites (uma em 2018 e outra em 2020) e recentemente observada em 3 noites entre outubro e novembro de 2021. Os dados obtidos foram de extrema importância para um artigo recém submetido ao *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, do qual a aluna é uma das co-autoras.

## Conclusões e perspectivas

Neste Trabalho de Graduação foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre o meio interestelar, visando a compreensão da origem e propriedades da polarização interestelar. Fez-se, também, um estudo sobre diferentes métodos para a determinação da polarização interestelar, com ênfase em estrelas Be. Isto foi descrito pormenorizadamente no Capítulo 2.

Visando aumentar a base de dados observacionais de estrelas de campo do *survey* Beacon, foram feitos pedidos de tempo ao OPD/LNA, com 12 noites concedidas em 2021, sendo que, na maioria das noites, obteve-se um aproveitamento total do tempo de observação. Além disso, a aluna se aprofundou nos processos de redução e curadoria dos dados do levantamento, usando o pacote IRAF.

Foram realizadas melhorias e adaptações no módulo *fieldstars* do PyHdust, que facilitaram a obtenção dos dados das polarizações dos campos observados de forma prática e mais automatizada. Para observações futuras será mais simples gerar gráficos e tabelas com os valores de polarização interestelar a partir dos dados da redução.

O Capítulo 3 mostra a metodologia para a obtenção dos dados, redução e curadoria. A partir dos resultados obtidos ao longo do trabalho, notamos que observações realizadas no telescópio *Perkin-Elmer* geraram imagens com sinal-ruído maiores e consequentemente dados mais confiáveis e com incertezas menores. E também, o aproveitamento do tempo de observação neste telescópio foi maior quando comparado ao telescópio *Boller & Chivens*, já que o tempo de exposição era consideravelmente menor, possibilitando observar uma quantidade maior de estrelas em um mesmo período de tempo.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos para os 9 campos analisados nesta monografia. Somente em dois deles não foi possível obter a polarização interestelar devido a

que as polarizações observadas são muito baixas, o que implica em maiores erros observacionais, e também pelo fato de todas as estrelas de campo estarem a uma distância menor que a estrela Be alvo. Para 2 outros campos foi possível obter uma estimativa preliminar para a PI e nos outros 5 casos conseguimos obter dados confiáveis e consistentes para a PI. Em todos os casos em que resultados foram obtidos, trata-se da primeira estimativa da polarização interestelar na literatura. É um resultado importante pois a partir deles a polarização intrínseca das estrelas alvo podem ser calculadas.

Os dados produzidos pelo levantamento dos campos das estrelas Be poderão ser utilizados em trabalhos futuros dos alunos do grupo Beacon. Atualmente, os dados obtidos da polarização interestelar do campo de HR 7355 estão sendo utilizados pelo aluno de mestrado Matheus Zaghi de Oliveira, que trabalha principalmente no estudo de estrelas magnéticas.

Os dados reduzidos das estrelas Be também possibilitarão contribuições em trabalhos de integrantes do grupo Beacon e demais colaboradores. Até o momento, a redução dos dados da estrela  $\pi$  Aqr está sendo utilizada pela aluna de doutorado Amanda Caveagna Rubio e os dados de Pleione contribuirão para um artigo recentemente submetido ao MRNAS, do qual a aluna é co-autora.

Como perspectivas, temos quatro principais para este trabalho, que serão conduzidas durante o mestrado:

1. dar continuidade às observações das estrelas de campo selecionadas, com foco na obtenção de dados inéditos para o grupo Beacon e também em novos alvos para os campos cujos resultados foram considerados preliminares neste trabalho. Para isso, já foi realizado um pedido de tempo ao Observatório Pico dos Dias para o primeiro semestre de 2022.
2. terminar a redução e organizar os dados de observação de todo o levantamento Beacon de forma a facilitar a busca e o acesso às informações pelos integrantes do grupo.
3. melhorar a metodologia da redução e curadoria dos dados para tentar criar uma rotina em *Python* que faça uma automatização de todo o processo, desde a observação até a obtenção dos gráficos finais.
4. fazer uma nova análise dos campos observados por [Bednarski \(2016\)](#) utilizando os

---

dados da missão *Gaia*, que apresentam paralaxes com precisão muito maior que a missão *Hipparcos*.



## Referências Bibliográficas

- Baade, D., Rivinius, T., Pigulski, A., et al. 2016, *A&A*, 588, A56
- Bednarski, D. 2016, Master's thesis, Universidade de São Paulo
- Carciofi, A. 2011, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 272, 325
- Carciofi, A. C. 2001, PhD thesis, Universidade de São Paulo
- Carroll, B., & Ostlie, D. 2007, *An Introduction to Modern Astrophysics* (Pearson Addison-Wesley)
- Cotton, D., Marshall, J., Frisch, P., et al. 2018, *MNRAS*, 483, 3636
- Davis, Leverett, J., & Greenstein, J. L. 1951, *ApJ*, 114, 206
- Draine, B. T. 2011, *Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium* (Princeton University Press)
- Fitzpatrick, E. L. 1999, *PASP*, 111, 63
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2018, *A&A*, 616, A1
- . 2021, *A&A*, 649, A1
- Haubois, X., Mota, B. C., Carciofi, A. C., et al. 2014, *ApJ*, 785, 12
- Johnson, H. L., & Morgan, W. W. 1953, *ApJ*, 117, 313
- Klessen, R. S., & Glover, S. C. O. 2014, *arXiv: Astrophysics of Galaxies*

- Lequeux, J., Falgarone, E., & Ryter, C. 2006, *The Interstellar Medium*, Astronomy and Astrophysics Library (Springer Berlin Heidelberg)
- Lobo-Gomes, A. 2012, Master's thesis, Universidade de São Paulo
- Maciel, W. J. 2013, *Astrophysics of the interstellar medium* (Springer)
- Magalhães, A. M. 1996, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*
- Magalhães, A. M., Rodrigues, C. V., Margoniner, V. E., Pereyra, A., & Heathcote, S. 1996, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*
- Marr, K. C., Jones, C. E., Carciofi, A. C., et al. 2021, *ApJ*, 912, 76
- Martin, P. G., Adamson, A. J., Whittet, D. C. B., et al. 1992, *ApJ*, 392, 691
- McLean, I. S., & Clarke, D. 1979, *MNRAS*, 186, 245
- Nussenzveig, H. 2014, *Curso de física básica: Ótica, relatividade, física quântica* (Blucher)
- Oliveira Filho, K. S., & Saraiva, M. F. O. 2017, *Astronomia e astrofísica* (Livraria da Física)
- Raga, A. C., Cantó, J., & Rodríguez-González, A. 2020, *The physics of the interstellar medium*
- Rodrigues, C. V. 1997, PhD thesis, Universidade de São Paulo
- Serkowski, K., Mathewson, D. S., & Ford, V. L. 1975, *ApJ*, 196, 261
- Stokes, G. G. 1851, *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 9, 399
- Tielens, A. G. G. M. 2005, *The physics and chemistry of the interstellar medium* (Cambridge University Press)
- van Leeuwen, F. 2007, *A&A*, 474, 653
- Whittet, D. C. B., Martin, P. G., Hough, J. H., et al. 1992, *ApJ*, 386, 562
- Wilking, B. A., Lebofsky, M. J., Martin, P. G., Rieke, G. H., & Kemp, J. C. 1980, *ApJ*, 235, 905

# Apêndice



## Lista de Estrelas Be

Este Apêndice apresenta uma lista das estrelas Be que foram selecionadas para determinação da polarização interestelar, a partir do estudo de suas respectivas estrelas de campo. A Tabela A.1 apresenta 10 colunas:

- Estrela Be: nome da estrela Be selecionada;
- HD: nome da estrela de acordo com o catálogo *Henry Draper*;
- AR: valor da ascensão reta da estrela;
- Dec: valor da declinação da estrela;
- Tipo Espectral: identificação do tipo espectral da estrela;
- U: magnitude da estrela no filtro U;
- B: magnitude da estrela no filtro B;
- V: magnitude da estrela no filtro V;
- Distância: distância (e sua respectiva incerteza) calculada a partir da paralaxe, que foi obtida pelo catálogo em que esta medida apresentava a menor incerteza. Foram consultados os catálogos DR2, DR3 e *Hipparcos*;
- Catálogo: catálogo escolhido para calcular a distância a partir da paralaxe.

Os dados identificados nas colunas HD, AR, Dec, Tipo Espectral, U, B e V foram retirados do Simbad <sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

Tabela A.1 - Lista de estrelas Be selecionadas.

Estrela Be	HD	AR (2000)	Dec (2000)	Tipo Espectral	U	B	V	Distância (pc)	Catálogo
$\eta$ Tau	HD 23630	03 47 29.08	+24 06 18.49	B7III	2.44	2.78	2.87	123.61 $\pm$ 6.42	Hipparcos
228 Eri	HD 28497	04 29 06.92	-13 02 54.12	B2(V)ne	4.45	5.23	5.41	472.60 $\pm$ 19.04	Gaia DR3
HD 35502	HD 35502	05 25 01.20	-02 48 55.69	B8II	6.76	7.30	7.34	363.71 $\pm$ 6.21	Gaia DR3
$\theta^1$ Ori C	HD 37022	05 35 16.46	-05 23 22.85	O7V	4.20	5.15	5.13	392.13 $\pm$ 7.39	Gaia DR3
$\zeta$ Tau	HD 37202	05 37 38.69	+21 08 33.16	B1Ive	2.22	2.84	3.03	136.43 $\pm$ 15.26	Hipparcos
$\delta$ Cen	HD 105435	12 08 21.50	-50 43 20.74	B2Vne	1.51	2.39	2.52	127.23 $\pm$ 7.61	Hipparcos
$\tau$ Sco	HD 149438	16 35 52.95	-28 12 57.66	B0.2V	1.55	2.56	2.81	145.35 $\pm$ 11.20	Hipparcos
$\kappa$ Lup	HD 134481	15 11 56.07	-48 44 16.17	B9.5Vne	3.55	3.67	3.70	56.85 $\pm$ 0.74	Gaia DR3
51 Oph	HD 158643	17 31 24.95	-23 57 45.51	A0V	4.75	4.81	4.81	125.73 $\pm$ 1.65	Gaia DR3
$\gamma$ Ara	HD 157246	17 25 23.66	-56 22 39.81	B1Ib	2.25	3.21	3.34	341.30 $\pm$ 18.64	Hipparcos
HR 7355	HD 182180	19 24 30.18	-27 51 57.40	B2Vnn	5.22	5.91	6.02	223.79 $\pm$ 3.13	Gaia DR3
31 Peg	HD 212076	22 21 31.07	+12 12 18.66	B2IV-Ve	4.08	4.89	4.99	497.51 $\pm$ 69.31	Hipparcos
$\epsilon$ PsA	HD 214748	22 40 39.34	-27 02 37.02	B8Ve	3.69	4.09	4.18	123.49 $\pm$ 5.46	Gaia DR2
$\beta$ Psc	HD 217891	23 03 52.61	+03 49 12.17	B6Ve	3.90	4.40	4.52	124.16 $\pm$ 2.02	Gaia DR3
$\epsilon$ Tuc	HD 224686	23 59 54.98	-65 34 37.68	B8V	4.12	4.38	4.47	108.87 $\pm$ 1.32	Gaia DR3

# Estrelas Be e suas respectivas estrelas de campo selecionadas

Este Apêndice mostra quais estrelas de campo foram selecionadas para cada Be mostrada no Apêndice A. A Tabela B.1 apresenta 10 colunas:

- Estrela Be: nome da estrela Be selecionada;
- Estrela de Campo: nome da estrela de campo selecionada para observação;
- HD: nome da estrela de campo de acordo com o catálogo *Henry Draper*;
- AR: valor da ascensão reta da estrela de campo;
- Dec: valor da declinação da estrela de campo;
- Tipo Espectral: identificação do tipo espectral da estrela de campo;
- V: magnitude da estrela de campo no filtro V;
- Distância: distância (e sua respectiva incerteza) calculada a partir da paralaxe, que foi obtida pelo catálogo em que esta medida apresentava a menor incerteza. Foram consultados os catálogos DR2, DR3 e *Hipparcos*;
- Catálogo: catálogo escolhido para calcular a distância a partir da paralaxe.

Os dados identificados nas colunas HD, AR, Dec, Tipo Espectral e V foram retirados do Simbad<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

Tabela B.1 - Lista de estrelas de campo.

Estrela Be	Estrela de Campo	HD	AR (2000)	Dec (2000)	Tipo Espectral	V	Distância (pc)	Catálogo	
$\eta$ Tau	HIP 16664	22091	03 34 26.63	+24 27 51.10	A3IV	8.56	181.8 $\pm$ 2.4	Gaia DR3	
	HIP 17181	22805	03 40 46.33	+25 19 45.80	A2IV	6.10	172.2 $\pm$ 1.4	Gaia DR3	
	HIP 17923	23964	03 49 57.89	+23 50 52.50	B9.5V	10.15	135.8 $\pm$ 0.6	Gaia DR3	
	HIP 18485	24769	03 57 03.83	+23 10 31.70	B9.5IV	6.00	230.6 $\pm$ 3.3	Gaia DR3	
228 Eri	HIP 20379	27700	04 21 50.29	-13 52 54.80	A0V	8.20	232.6 $\pm$ 1.9	Gaia DR3	
	HIP 20589	27985	04 24 35.62	-12 17 55.30	A2V	8.80	209.0 $\pm$ 1.1	Gaia DR3	
	HIP 20849	28377	04 28 04.04	-12 00 07.50	A9IV	7.50	227.6 $\pm$ 1.1	Gaia DR3	
	HIP 20893	28437	04 28 39.20	-11 57 30.40	G2	7.60	341.9 $\pm$ 6.1	Gaia DR3	
	HIP 21578	—	04 37 59.92	-13 01 56.80	A2V	7.80	162.3 $\pm$ 0.7	Gaia DR3	
	HD 35502	HIP 24842	293959	05 19 33.50	-02 19 20.40	A2	9.20	433.6 $\pm$ 4.3	Gaia DR3
	HIP 25193	290385	05 23 22.94	-01 26 27.40	A0	8.30	330.4 $\pm$ 3.5	Gaia DR3	
HIP 26130	36826	05 34 17.62	-02 23 07.30	B5	8.15	466.9 $\pm$ 11.3	Gaia DR3		
HIP 26000	36629	05 32 57.09	-04 33 59.40	B2V	7.65	429.0 $\pm$ 5.7	Gaia DR3		
HIP 26334	37173	05 36 30.59	-01 59 01.70	B6II	7.85	434.9 $\pm$ 8.4	Gaia DR3		
$\theta^1$ Ori C	HIP 26197	36959	05 35 01.05	-06 00 33.70	B1.2	8.80	358.2 $\pm$ 14.0	Gaia DR3	
	HIP 26263	37055	05 35 35.90	-03 15 09.30	B3III	10.50	322.6 $\pm$ 9.0	Gaia DR3	
	HIP 26934	38088	05 42 58.82	-04 49 58.10	A0V	9.65	409.1 $\pm$ 2.9	Gaia DR3	
	HIP 26949	38109	05 43 05.23	-05 48 27.80	A5	9.45	300.8 $\pm$ 2.2	Gaia DR3	
$\zeta$ Tau	HIP 26064	36576	05 33 31.64	-18 32 24.90	B2IV	5.65	393.6 $\pm$ 13.4	Gaia DR3	
	HIP 26964	37967	05 43 19.52	-23 12 15.40	B2.5Ve	6.20	276.3 $\pm$ 3.9	Gaia DR3	

Continua na próxima página. . .

Tabela B.1 - Continuação

Estrela Be	Estrela de Campo	HD	AR (2000)	Dec (2000)	Tipo Espectral	V	Distância (pc)	Catálogo
	HIP 25539	35708	05 27 38.09	+21 56 12.90	B2.5V	4.85	185.3 ± 4.8	Gaia DR3
	HIP 26616	37439	05 39 27.12	+21 45 45.90	A1Vn	6.40	183.6 ± 1.9	Hipparcos
$\delta$ Cen	HIP 59481	105994	12 11 58.82	-50 46 12.52	F3V	8.47	111.3 ± 0.3	Gaia DR3
	HIP 59393	105854	12 11 03.65	-50 00 32.91	F6V	8.68	102.9 ± 0.2	Gaia DR3
	HIP 58859	104839	12 04 16.70	-51 28 21.06	B9.5V	6.47	120.3 ± 0.5	Gaia DR3
	HIP 58967	105013	12 05 26.88	-51 39 55.74	F5	8.60	130.8 ± 0.4	Gaia DR3
$\tau$ Sco	HIP 80819	148594	16 30 15.67	-27 54 58.50	B8V	6.90	183.4 ± 0.9	Gaia DR3
	HIP 81521	149960	16 39 04.43	-27 58 56.34	F5V	8.17	179.4 ± 0.9	Gaia DR3
	HIP 81619	150148	16 40 12.16	-27 59 50.19	F02V	8.20	112.4 ± 3.7	Gaia DR3
	HIP 81765	150436	16 42 06.61	-28 50 45.33	G1V	9.02	90.3 ± 0.6	Gaia DR3
$\kappa$ Lup	HIP 73833	133277	15 05 21.40	-48 10 18.18	G4V	8.23	69.9 ± 1.9	Gaia DR2
	HIP 74264	134237	15 10 38.53	-50 09 06.69	G8V	8.79	44.7 ± 0.3	Gaia DR2
	HIP 74380	134482	15 11 57.67	-48 44 37.34	A3IV	5.64	55.8 ± 0.2	Gaia DR3
	HIP 74217	134120	15 09 58.81	-49 14 44.95	G4V	8.68	69.7 ± 0.1	Gaia DR3
51 Oph	HIP 85877	158940	17 33 00.35	-24 19 23.54	F3V	8.50	95.8 ± 0.2	Gaia DR3
	HIP 85642	158406	17 30 06.53	-22 57 04.82	F8V	9.00	149.6 ± 0.4	Gaia DR3
	HIP 85388	157863	17 26 51.38	-24 23 07.81	G6V	9.40	105.6 ± 20.0	Hipparcos
	HIP 85315	157747	17 26 01.29	-23 10 17.87	F5V	8.19	99.9 ± 0.3	Gaia DR3
$\gamma$ Ara	HIP 84724	156139	17 19 03.92	-56 21 01.38	B9.5V	8.66	335.0 ± 3.7	Gaia DR3
	HIP 85897	158550	17 33 11.50	-56 17 03.76	A1V	7.53	284.7 ± 4.7	Gaia DR2

Continua na próxima página. . .

Tabela B.1 - Continuação

Estrela Be	Estrela de Campo	HD	AR (2000)	Dec (2000)	Tipo Espectral	V	Distância (pc)	Catálogo
	HIP 85529	157836	17 28 43.70	-54 35 34.34	F2V	8.95	173.4 ± 0.7	Gaia DR3
HR 7355	HIP 94825	180469	19 17 40.98	-27 15 13.34	F7V	8.99	194.4 ± 1.8	Gaia DR3
	HIP 95386	182120	19 24 14.62	-27 50 41.11	G8III	9.00	428.2 ± 3.8	Gaia DR3
	HIP 95782	183091	19 28 53.90	-28 58 11.99	A2IV	7.86	197.1 ± 1.3	Gaia DR3
	HIP 95604	182649	19 26 42.18	-26 19 06.24	A0V	7.76	192.9 ± 1.3	Gaia DR3
31 Peg	HIP 110250	211856	22 19 55.36	+12 27 06.88	F2	7.62	258.4 ± 2.9	Gaia DR3
	HIP 110286	211905	22 20 21.21	+11 02 20.65	K0	7.48	341.7 ± 2.6	Gaia DR3
	HIP 109946	-	22 16 01.52	+11 47 46.52	G5	8.27	306.4 ± 4.1	Gaia DR3
	HIP 110606	212501	22 24 28.41	+14 53 43.47	K4V	8.07	431.2 ± 6.2	Gaia DR3
$\epsilon$ Psa	HIP 112176	215082	22 43 11.02	-28 09 04.50	F6V	8.12	130.8 ± 0.4	Gaia DR3
	HIP 111882	214600	22 39 46.48	-28 20 53.33	F5V	7.11	105.2 ± 0.2	Gaia DR3
	HIP 111749	214405	22 38 12.33	-25 39 23.11	F0IV	7.81	121.7 ± 0.6	Gaia DR3
	HIP 111705	214306	22 37 42.69	-29 02 40.19	F6V	8.00	103.2 ± 0.4	Gaia DR3
$\beta$ Psc	HIP 113913	217927	23 04 05.24	+03 17 35.77	F3V	7.40	90.3 ± 0.6	Gaia DR3
	HIP 113705	217590	23 01 43.58	+03 31 51.27	G8III	6.45	128.7 ± 0.4	Gaia DR3
	HIP 113627	217458	23 00 46.03	+02 30 37.27	F8	8.59	100.9 ± 0.3	Gaia DR3
	HIP 114148	218330	23 07 02.67	+03 03 08.08	K0III	7.00	164.3 ± 0.6	Gaia DR3
$\epsilon$ Tuc	HIP 117493	223400	23 49 32.10	-66 15 27.35	F7V	7.21	63.9 ± 0.6	Gaia DR3
	HIP 690	403	00 08 29.79	-66 30 51.13	G3	9.22	100.7 ± 0.1	Gaia DR3
	HIP 117045	222744	23 43 37.80	-65 25 52.15	F5V	8.70	114.9 ± 0.2	Gaia DR3

Continua na próxima página. . .

Tabela B.1 - Continuação

Estrela Be	Estrela de Campo	HD	AR (2000)	Dec (2000)	Tipo Espectral	V	Distância (pc)	Catálogo
HIP 299		225134	00 03 44.09	-63 36 02.38	F5V	8.42	112.5 ± 1.0	Gaia DR3



## Dados Observacionais

Este Apêndice apresenta um compilado dos dados observacionais obtidos a partir das observações no Observatório Pico dos Dias para cada estrela de campo. A Tabela [C.1](#) apresenta 11 colunas:

- Estrela: nome da estrela de campo observada;
- Be: nome da estrela Be que faz parte do campo da estrela observada;
- Data: data de observação da estrela de campo no observatório;
- Filtro: identificação do filtro observado;
- Padrão: nome da estrela padrão observada na missão;
- $\Delta\theta$ : fator de correção para o sistema equatorial e sua incerteza;
- P: porcentagem da polarização e sua incerteza;
- Q: parâmetro Q de Stokes e sua incerteza;
- U: parâmetro U de Stokes e sua incerteza;
- $\theta$ : ângulo de polarização e sua incerteza;
- $\lambda$ : comprimento de onda efetivo calculado e sua incerteza.

Tabela C.1 - Dados de observação das estrelas de campo no OPD.

Estrela	Be	Data	Filtro	Padrão	$\Delta\theta$ (°)	P (%)	Q (%)	U (%)	$\theta$ (°)	$\lambda$ (Å)
HIP 80819	$\tau$ Sco	17/08/21	B	$\eta$ Aql	$52.4 \pm 1.1$	$0.3798 \pm 0.0383$	$0.2811 \pm 0.0383$	$0.2554 \pm 0.0383$	$21.13 \pm 2.89$	$4500.2 \pm 11.0$
	$\tau$ Sco	17/08/21	V	$\eta$ Aql	$57.6 \pm 0.3$	$0.3905 \pm 0.0182$	$0.2646 \pm 0.0182$	$0.2872 \pm 0.0182$	$23.67 \pm 1.34$	$5449.3 \pm 6.0$
	$\tau$ Sco	17/08/21	R	$\eta$ Aql	$54.7 \pm 0.4$	$0.3566 \pm 0.0208$	$0.2467 \pm 0.0208$	$0.2575 \pm 0.0208$	$23.11 \pm 1.67$	$6379.5 \pm 8.5$
	$\tau$ Sco	17/08/21	I	$\eta$ Aql	$46.2 \pm 0.4$	$0.4158 \pm 0.0365$	$0.2957 \pm 0.0365$	$0.2924 \pm 0.0365$	$22.34 \pm 2.51$	$8268.0 \pm 7.6$
HIP 81521	$\tau$ Sco	19/08/21	B	$\eta$ Aql	$52.4 \pm 1.1$	$0.6688 \pm 0.0622$	$0.6660 \pm 0.0622$	$0.0613 \pm 0.0622$	$2.63 \pm 2.66$	$4645.7 \pm 1.6$
	$\tau$ Sco	19/08/21	V	$\eta$ Aql	$57.6 \pm 0.3$	$0.7214 \pm 0.0116$	$0.7148 \pm 0.0116$	$0.0974 \pm 0.0116$	$3.88 \pm 0.46$	$5513.1 \pm 5.7$
	$\tau$ Sco	19/08/21	R	$\eta$ Aql	$54.8 \pm 0.4$	$0.7885 \pm 0.0149$	$0.7763 \pm 0.0149$	$0.1380 \pm 0.0149$	$5.04 \pm 0.54$	$6457.8 \pm 6.2$
	$\tau$ Sco	19/08/21	I	$\eta$ Aql	$46.2 \pm 0.4$	$0.6576 \pm 0.0140$	$0.6431 \pm 0.0140$	$0.1372 \pm 0.0140$	$6.02 \pm 0.61$	$8321.6 \pm 3.6$
HIP 81619	$\tau$ Sco	19/09/21	R	$o$ Sco	$168.4 \pm 1.4$	$0.0672 \pm 0.0072$	$0.0545 \pm 0.0072$	$-0.0393 \pm 0.0072$	$162.13 \pm 3.07$	$6407.2 \pm 7.4$
HIP 85877	51 Oph	10/07/21	B	$o$ Sco	$4.1 \pm 0.2$	$0.0134 \pm 0.0045$	$-0.0095 \pm 0.0045$	$0.0095 \pm 0.0045$	$67.45 \pm 9.62$	$4592.6 \pm 14.0$
	51 Oph	10/07/21	V	$o$ Sco	$9.8 \pm 0.3$	$0.0299 \pm 0.0357$	$0.0297 \pm 0.0357$	$-0.0036 \pm 0.0357$	$176.53 \pm 34.21$	$5493.1 \pm 5.7$
	51 Oph	10/07/21	R	$o$ Sco	$6.9 \pm 0.3$	$0.1683 \pm 0.0179$	$0.1674 \pm 0.0179$	$0.0172 \pm 0.0179$	$2.94 \pm 3.05$	$6435.3 \pm 6.6$
	51 Oph	10/07/21	I	$o$ Sco	$178.3 \pm 0.4$	$0.173 \pm 0.0577$	$0.173 \pm 0.0577$	$-0.0006 \pm 0.0577$	$179.9 \pm 9.56$	$8308.7 \pm 3.9$
HIP 85642	51 Oph	18/09/21	B	$o$ Sco	$179.6 \pm 1.1$	$0.2216 \pm 0.0130$	$0.1968 \pm 0.0130$	$-0.1019 \pm 0.0130$	$166.31 \pm 1.68$	$4660.3 \pm 17.0$
	51 Oph	18/09/21	V	$o$ Sco	$167.8 \pm 0.7$	$0.2856 \pm 0.0097$	$0.2596 \pm 0.0097$	$-0.1192 \pm 0.0097$	$167.67 \pm 0.97$	$5518.2 \pm 5.8$
	51 Oph	18/09/21	R	$o$ Sco	$168.4 \pm 1.4$	$0.3244 \pm 0.0145$	$0.2909 \pm 0.0145$	$-0.1436 \pm 0.0145$	$166.86 \pm 1.28$	$6463.2 \pm 6.2$
	51 Oph	18/09/21	I	$o$ Sco	$179.9 \pm 1.2$	$0.2397 \pm 0.0274$	$0.2087 \pm 0.0274$	$-0.1179 \pm 0.0274$	$165.27 \pm 3.27$	$8324.8 \pm 3.7$
HIP 85388	51 Oph	10/07/21	B	$o$ Sco	$4.1 \pm 0.2$	$0.0291 \pm 0.0321$	$-0.0082 \pm 0.0321$	$-0.0279 \pm 0.0321$	$126.66 \pm 31.6$	$4648.5 \pm 16.5$
	51 Oph	10/07/21	V	$o$ Sco	$9.8 \pm 0.3$	$0.0922 \pm 0.0489$	$0.0811 \pm 0.0489$	$-0.0439 \pm 0.0489$	$165.8 \pm 15.2$	$5514.1 \pm 5.7$
	51 Oph	10/07/21	I	$o$ Sco	$178.3 \pm 0.4$	$0.0647 \pm 0.0689$	$0.0511 \pm 0.0689$	$-0.0397 \pm 0.0689$	$161.08 \pm 30.51$	$8322.3 \pm 3.6$

Continua na próxima página...

Tabela C.1 - Continuação

Estrela	Be	Data	Filtro	Padrão	$\Delta\theta$ (°)	P (%)	Q (%)	U (%)	$\theta$ (°)	$\lambda$ (Å)
HIP 85315	51 Oph	17/08/21	B	$\eta$ Aql	52.4 ± 1.1	0.0168 ± 0.0259	0.0017 ± 0.0259	0.0167 ± 0.0259	42.03 ± 44.17	4602.6 ± 14.4
	51 Oph	17/08/21	V	$\eta$ Aql	57.6 ± 0.3	0.0243 ± 0.0115	0.0163 ± 0.0115	-0.018 ± 0.0115	156.09 ± 13.56	5497.1 ± 5.7
	51 Oph	17/08/21	R	$\eta$ Aql	54.7 ± 0.4	0.0584 ± 0.0164	0.057 ± 0.0164	0.0126 ± 0.0164	6.24 ± 8.05	6439.9 ± 6.5
	51 Oph	17/08/21	I	$\eta$ Aql	46.2 ± 0.4	0.0326 ± 0.0273	0.0321 ± 0.0273	0.0059 ± 0.0273	5.21 ± 23.99	8311.4 ± 3.7
HIP 84724	$\gamma$ Ara	09/07/21	B	$\circ$ Sco	4.1 ± 0.2	1.0473 ± 0.0284	1.0438 ± 0.0284	0.0854 ± 0.0284	2.34 ± 0.78	4513.9 ± 11.3
	$\gamma$ Ara	09/07/21	V	$\circ$ Sco	9.8 ± 0.3	1.1038 ± 0.0472	1.1011 ± 0.0472	0.0768 ± 0.0472	1.99 ± 1.23	5456.6 ± 5.9
	$\gamma$ Ara	09/07/21	R	$\circ$ Sco	6.9 ± 0.3	1.1331 ± 0.0198	1.1253 ± 0.0198	0.1326 ± 0.0198	3.36 ± 0.5	6389.6 ± 8.1
	$\gamma$ Ara	09/07/21	I	$\circ$ Sco	178.3 ± 0.4	1.0121 ± 0.0646	1.012 ± 0.0646	0.0136 ± 0.0646	0.39 ± 1.83	8276.8 ± 6.7
HIP 85897	$\gamma$ Ara	08/07/21	B	$\circ$ Sco	4.1 ± 0.2	0.8304 ± 0.036	0.6799 ± 0.036	0.4768 ± 0.036	17.52 ± 1.24	4515.9 ± 11.3
	$\gamma$ Ara	08/07/21	V	$\circ$ Sco	9.8 ± 0.3	0.8605 ± 0.0241	0.7401 ± 0.0241	0.4389 ± 0.0241	15.34 ± 0.8	5457.6 ± 5.9
	$\gamma$ Ara	08/07/21	R	$\circ$ Sco	6.9 ± 0.3	0.866 ± 0.0591	0.7705 ± 0.0591	0.3953 ± 0.0591	13.58 ± 1.96	6391.0 ± 8.0
	$\gamma$ Ara	08/07/21	I	$\circ$ Sco	178.3 ± 0.4	0.7781 ± 0.0289	0.5922 ± 0.0289	0.5047 ± 0.0289	20.22 ± 1.06	8277.9 ± 6.6
HIP 85529	$\gamma$ Ara	09/07/21	B	$\circ$ Sco	4.1 ± 0.2	0.9455 ± 0.0152	0.8032 ± 0.0152	0.4988 ± 0.0152	15.92 ± 0.46	4590.2 ± 13.9
	$\gamma$ Ara	09/07/21	V	$\circ$ Sco	9.8 ± 0.3	0.9714 ± 0.0259	0.8497 ± 0.0259	0.4708 ± 0.0259	14.5 ± 0.76	5492.1 ± 5.7
	$\gamma$ Ara	09/07/21	R	$\circ$ Sco	6.9 ± 0.3	0.9823 ± 0.0482	0.8716 ± 0.0482	0.453 ± 0.0482	13.73 ± 1.41	6434.2 ± 6.6
	$\gamma$ Ara	09/07/21	I	$\circ$ Sco	178.3 ± 0.4	0.7961 ± 0.0156	0.7223 ± 0.0156	0.3348 ± 0.0156	12.44 ± 0.56	8308.0 ± 4.0
HIP 95386	HR 7355	08/07/21	B	$\circ$ Sco	4.1 ± 0.2	0.0484 ± 0.0218	-0.0262 ± 0.0218	-0.0407 ± 0.0218	118.6 ± 12.9	4794.4 ± 23.6
	HR 7355	08/07/21	V	$\circ$ Sco	9.7 ± 0.3	0.1338 ± 0.0252	-0.1286 ± 0.0252	-0.037 ± 0.0252	98.02 ± 5.4	5557.7 ± 6.2
	HR 7355	08/07/21	R	$\circ$ Sco	6.9 ± 0.6	0.049 ± 0.0322	-0.0489 ± 0.0322	-0.0026 ± 0.0322	91.52 ± 18.83	6505.3 ± 6.6
	HR 7355	08/07/21	I	$\circ$ Sco	178.4 ± 0.4	0.0522 ± 0.0367	0.0382 ± 0.0367	-0.0356 ± 0.0367	158.52 ± 20.14	8354.7 ± 5.9

Continua na próxima página...

Tabela C.1 - Continuação

Estrela	Be	Data	Filtro	Padrão	$\Delta\theta$ (°)	P (%)	Q (%)	U (%)	$\theta$ (°)	$\lambda$ (Å)
HIP 95782	HR 7355	18/08/21	B	$\eta$ Aql	$52.6 \pm 0.9$	$0.1172 \pm 0.0128$	$-0.079 \pm 0.0128$	$0.0866 \pm 0.0128$	$66.18 \pm 3.13$	$4540.4 \pm 12.0$
	HR 7355	18/08/21	V	$\eta$ Aql	$57.3 \pm 0.4$	$0.1408 \pm 0.008$	$-0.0586 \pm 0.008$	$0.128 \pm 0.008$	$57.3 \pm 1.63$	$5469.9 \pm 5.8$
	HR 7355	18/08/21	R	$\eta$ Aql	$54.0 \pm 0.6$	$0.2018 \pm 0.0648$	$-0.1736 \pm 0.0648$	$0.1029 \pm 0.0648$	$74.66 \pm 9.2$	$6407.2 \pm 7.4$
	HR 7355	18/08/21	I	$\eta$ Aql	$45.8 \pm 0.9$	$0.1991 \pm 0.0514$	$-0.1222 \pm 0.0514$	$0.1571 \pm 0.0514$	$63.94 \pm 7.4$	$8290.4 \pm 5.4$
HIP 95604	HR 7355	18/08/21	b	$\eta$ Aql	$52.6 \pm 0.9$	$0.0611 \pm 0.0238$	$-0.0212 \pm 0.0238$	$-0.0573 \pm 0.0238$	$124.84 \pm 11.16$	$4515.9 \pm 11.3$
	HR 7355	18/08/21	v	$\eta$ Aql	$57.3 \pm 0.4$	$0.1014 \pm 0.0222$	$0.1005 \pm 0.0222$	$-0.0136 \pm 0.0222$	$176.13 \pm 6.27$	$5457.6 \pm 5.9$
	HR 7355	18/08/21	r	$\eta$ Aql	$54.0 \pm 0.6$	$0.0249 \pm 0.0413$	$-0.0005 \pm 0.0413$	$-0.0249 \pm 0.0413$	$134.44 \pm 47.52$	$6391.0 \pm 8.0$
	HR 7355	18/08/21	I	$\eta$ Aql	$45.8 \pm 0.9$	$0.0656 \pm 0.0466$	$0.065 \pm 0.0466$	$-0.0087 \pm 0.0466$	$176.2 \pm 20.35$	$8277.9 \pm 6.6$
HIP 94825	HR 7355	10/07/21	B	$\sigma$ Sco	$4.1 \pm 0.2$	$0.1222 \pm 0.0282$	$-0.0882 \pm 0.0282$	$-0.0846 \pm 0.0282$	$111.91 \pm 6.61$	$4628.9 \pm 15.6$
	HR 7355	10/07/21	V	$\sigma$ Sco	$9.8 \pm 0.3$	$0.0877 \pm 0.0368$	$-0.0637 \pm 0.0368$	$-0.0602 \pm 0.0368$	$111.69 \pm 12.02$	$5507.1 \pm 5.7$
HIP 111882	$\epsilon$ PsA	16/08/21	B	$\eta$ Aql	$52.5 \pm 1.1$	$0.0163 \pm 0.019$	$0.0108 \pm 0.019$	$0.0122 \pm 0.019$	$24.25 \pm 33.4$	$4602.6 \pm 14.4$
	$\epsilon$ PsA	16/08/21	I	$\eta$ Aql	$46.2 \pm 0.4$	$0.0629 \pm 0.036$	$-0.0411 \pm 0.036$	$-0.0476 \pm 0.036$	$114.62 \pm 16.4$	$8311.4 \pm 3.8$
HIP 111749	$\epsilon$ PsA	17/08/21	B	$\eta$ Aql	$52.4 \pm 1.1$	$0.0188 \pm 0.0086$	$-0.0184 \pm 0.0086$	$-0.004 \pm 0.0086$	$96.12 \pm 13.11$	$4568.9 \pm 13.0$
	$\epsilon$ PsA	17/08/21	V	$\eta$ Aql	$57.6 \pm 0.3$	$0.0137 \pm 0.0148$	$-0.0113 \pm 0.0148$	$0.0078 \pm 0.0148$	$72.62 \pm 30.95$	$5483.1 \pm 5.7$
	$\epsilon$ PsA	17/08/21	R	$\eta$ Aql	$54.7 \pm 0.4$	$0.0402 \pm 0.0315$	$0.0288 \pm 0.0315$	$0.028 \pm 0.0315$	$22.11 \pm 22.45$	$6423.5 \pm 6.9$
	$\epsilon$ PsA	17/08/21	I	$\eta$ Aql	$46.2 \pm 0.4$	$0.0736 \pm 0.0692$	$-0.0685 \pm 0.0692$	$-0.0268 \pm 0.0692$	$100.69 \pm 26.94$	$8301.5 \pm 4.4$
HIP 111705	$\epsilon$ PsA	18/08/21	B	$\eta$ Aql	$52.4 \pm 1.1$	$0.0158 \pm 0.0089$	$0.0012 \pm 0.0089$	$-0.0158 \pm 0.0089$	$137.26 \pm 16.14$	$4597.6 \pm 14.2$
	$\epsilon$ PsA	18/08/21	V	$\eta$ Aql	$57.6 \pm 0.3$	$0.0194 \pm 0.0169$	$-0.0067 \pm 0.0169$	$-0.0182 \pm 0.0169$	$124.94 \pm 24.96$	$5495.1 \pm 5.7$
	$\epsilon$ PsA	18/08/21	R	$\eta$ Aql	$54.7 \pm 0.4$	$0.0287 \pm 0.0129$	$-0.0277 \pm 0.0129$	$-0.0077 \pm 0.0129$	$97.75 \pm 12.88$	$6437.6 \pm 6.6$
	$\epsilon$ PsA	18/08/21	I	$\eta$ Aql	$46.1 \pm 0.4$	$0.0428 \pm 0.0313$	$0.0419 \pm 0.0313$	$0.0087 \pm 0.0313$	$5.88 \pm 20.95$	$8310.1 \pm 3.8$

Continua na próxima página...

Tabela C.1 - Continuação

Estrela	Be	Data	Filtro	Padrão	$\Delta\theta$ ( $^{\circ}$ )	P (%)	Q (%)	U (%)	$\theta$ ( $^{\circ}$ )	$\lambda$ (Å)
HIP 113913	$\beta$ Psc	18/08/21	B	$\eta$ Aql	$52.4 \pm 1.1$	$0.1064 \pm 0.0256$	$-0.1062 \pm 0.0256$	$-0.0061 \pm 0.0256$	$91.63 \pm 6.89$	$4592.6 \pm 13.9$
	$\beta$ Psc	18/08/21	V	$\eta$ Aql	$57.6 \pm 0.3$	$0.0742 \pm 0.0194$	$-0.0733 \pm 0.0194$	$-0.0116 \pm 0.0194$	$94.49 \pm 7.49$	$5493.1 \pm 5.7$
	$\beta$ Psc	18/08/21	R	$\eta$ Aql	$54.7 \pm 0.4$	$0.036 \pm 0.0356$	$-0.035 \pm 0.0356$	$0.0083 \pm 0.0356$	$83.37 \pm 28.33$	$6435.3 \pm 6.6$
	$\beta$ Psc	18/08/21	I	$\eta$ Aql	$46.1 \pm 0.4$	$0.0887 \pm 0.031$	$-0.0836 \pm 0.031$	$-0.0295 \pm 0.031$	$99.72 \pm 10.01$	$8308.7 \pm 3.9$
HIP 113705	$\beta$ Psc	16/08/21	B	$\eta$ Aql	$52.5 \pm 1.1$	$0.3305 \pm 0.0104$	$-0.3113 \pm 0.0104$	$-0.111 \pm 0.0104$	$99.81 \pm 0.9$	$4762.5 \pm 22.0$
	$\beta$ Psc	16/08/21	V	$\eta$ Aql	$57.5 \pm 0.4$	$0.3428 \pm 0.0249$	$-0.3318 \pm 0.0249$	$-0.0863 \pm 0.0249$	$97.29 \pm 2.08$	$5549.1 \pm 6.1$
	$\beta$ Psc	16/08/21	R	$\eta$ Aql	$54.8 \pm 0.4$	$0.321 \pm 0.0123$	$-0.3138 \pm 0.0123$	$-0.0674 \pm 0.0123$	$96.06 \pm 1.1$	$6496.2 \pm 6.4$
	$\beta$ Psc	16/08/21	I	$\eta$ Aql	$46.2 \pm 0.4$	$0.2601 \pm 0.0291$	$-0.258 \pm 0.0291$	$-0.0327 \pm 0.0291$	$93.61 \pm 3.21$	$8347.0 \pm 5.1$
HIP 114148	$\beta$ Psc	17/08/21	B	$\eta$ Aql	$52.4 \pm 1.1$	$0.5283 \pm 0.0111$	$-0.1876 \pm 0.0111$	$-0.4939 \pm 0.0111$	$124.6 \pm 0.6$	$4806.9 \pm 24.2$
	$\beta$ Psc	17/08/21	V	$\eta$ Aql	$57.6 \pm 0.3$	$0.524 \pm 0.0131$	$-0.1859 \pm 0.0131$	$-0.4899 \pm 0.0131$	$124.61 \pm 0.72$	$5561.0 \pm 6.2$
	$\beta$ Psc	17/08/21	R	$\eta$ Aql	$54.7 \pm 0.4$	$0.4379 \pm 0.0167$	$-0.1701 \pm 0.0167$	$-0.4035 \pm 0.0167$	$123.57 \pm 1.09$	$6508.8 \pm 6.7$
	$\beta$ Psc	17/08/21	I	$\eta$ Aql	$46.2 \pm 0.4$	$0.3728 \pm 0.0391$	$-0.1566 \pm 0.0391$	$-0.3383 \pm 0.0391$	$122.58 \pm 3.0$	$8357.9 \pm 6.2$
HIP 20589	228 Eri	18/09/21	B	<i>o</i> Sco	$179.6 \pm 1.1$	$0.0698 \pm 0.0269$	$0.0638 \pm 0.0269$	$-0.0283 \pm 0.0269$	$168.04 \pm 11.04$	$4538.3 \pm 11.9$
	228 Eri	18/09/21	V	<i>o</i> Sco	$167.8 \pm 0.7$	$0.0264 \pm 0.0067$	$-0.026 \pm 0.0067$	$0.0044 \pm 0.0067$	$85.18 \pm 7.27$	$5468.9 \pm 5.8$
	228 Eri	18/09/21	R	<i>o</i> Sco	$168.4 \pm 1.4$	$0.0168 \pm 0.0167$	$0.006 \pm 0.0167$	$-0.0157 \pm 0.0167$	$145.49 \pm 28.48$	$6405.9 \pm 7.5$
	228 Eri	18/09/21	I	<i>o</i> Sco	$173.9 \pm 1.2$	$0.026 \pm 0.0234$	$-0.0251 \pm 0.0234$	$-0.0069 \pm 0.0234$	$97.68 \pm 25.79$	$8289.5 \pm 5.4$
HIP 20379	228 Eri	18/09/21	V	<i>o</i> Sco	$167.8 \pm 0.7$	$0.0103 \pm 0.0072$	$0.0084 \pm 0.0072$	$0.0059 \pm 0.0072$	$17.52 \pm 20.03$	$5461.8 \pm 5.9$
	228 Eri	18/09/21	I	<i>o</i> Sco	$173.9 \pm 1.2$	$0.0153 \pm 0.0144$	$0.0129 \pm 0.0144$	$-0.0082 \pm 0.0144$	$163.71 \pm 26.96$	$8282.4 \pm 6.1$
HIP 20849	228 Eri	18/09/21	B	<i>o</i> Sco	$179.6 \pm 1.1$	$0.02 \pm 0.0373$	$-0.0088 \pm 0.0373$	$0.018 \pm 0.0373$	$57.98 \pm 53.43$	$4551.1 \pm 12.4$
	228 Eri	18/09/21	V	<i>o</i> Sco	$167.8 \pm 0.7$	$0.0336 \pm 0.0118$	$-0.0306 \pm 0.0118$	$-0.0139 \pm 0.0118$	$102.24 \pm 10.06$	$5475.1 \pm 5.8$

Continua na próxima página...

Tabela C.1 - Continuação

Estrela	Be	Data	Filtro	Padrão	$\Delta\theta$ (°)	P (%)	Q (%)	U (%)	$\theta$ (°)	$\lambda$ (Å)
	228 Eri	18/09/21	R	<i>o</i> Sco	168.4 ± 1.4	0.0085 ± 0.0147	-0.0082 ± 0.0147	0.0021 ± 0.0147	82.8 ± 49.55	6413.6 ± 7.2
	228 Eri	18/09/21	I	<i>o</i> Sco	173.9 ± 1.2	0.0087 ± 0.0189	-0.0081 ± 0.0189	0.0031 ± 0.0189	79.55 ± 62.24	8294.9 ± 4.9
HIP 16664	$\eta$ Tau	22/11/21	B	HD 23512	106.0 ± 0.3	0.3647 ± 0.0056	-0.3643 ± 0.0056	-0.016 ± 0.0056	91.26 ± 0.44	4521.9 ± 11.5
	$\eta$ Tau	22/11/21	V	HD 23512	110.1 ± 0.3	0.4248 ± 0.0204	-0.4169 ± 0.0204	-0.0815 ± 0.0204	95.53 ± 1.38	5460.8 ± 5.9
	$\eta$ Tau	22/11/21	R	HD 23512	108.0 ± 0.3	0.399 ± 0.0128	-0.3909 ± 0.0128	-0.0801 ± 0.0128	95.79 ± 0.92	6395.2 ± 7.8
	$\eta$ Tau	22/11/21	I	HD 23512	97.7 ± 0.4	0.3271 ± 0.0161	-0.2997 ± 0.0161	-0.1312 ± 0.0161	101.82 ± 1.41	8281.3 ± 6.2
HIP 17181	$\eta$ Tau	22/11/21	B	HD 23512	106.0 ± 0.3	0.4423 ± 0.0079	-0.4015 ± 0.0079	-0.1855 ± 0.0079	102.4 ± 0.51	4515.9 ± 11.3
	$\eta$ Tau	22/11/21	V	HD 23512	110.1 ± 0.3	0.4943 ± 0.0282	-0.4419 ± 0.0282	-0.2215 ± 0.0282	103.31 ± 1.63	5457.6 ± 5.9
	$\eta$ Tau	22/11/21	R	HD 23512	108.0 ± 0.3	0.4328 ± 0.0146	-0.3976 ± 0.0146	-0.1709 ± 0.0146	101.63 ± 0.97	6391.0 ± 8.0
	$\eta$ Tau	22/11/21	I	HD 23512	97.7 ± 0.4	0.4153 ± 0.0163	-0.3608 ± 0.0163	-0.2056 ± 0.0163	104.84 ± 1.12	8277.9 ± 6.6
HIP 18485	$\eta$ Tau	22/11/21	B	HD 23512	106.0 ± 0.3	0.5086 ± 0.0094	-0.4602 ± 0.0094	-0.2166 ± 0.0094	102.6 ± 0.53	4504.1 ± 11.1
	$\eta$ Tau	22/11/21	V	HD 23512	110.1 ± 0.3	0.5746 ± 0.0439	-0.4974 ± 0.0439	-0.2876 ± 0.0439	105.02 ± 2.19	5451.4 ± 6.0
	$\eta$ Tau	22/11/21	R	HD 23512	108.0 ± 0.3	0.5918 ± 0.0065	-0.5193 ± 0.0065	-0.2838 ± 0.0065	104.33 ± 0.31	6382.4 ± 8.3
	$\eta$ Tau	22/11/21	I	HD 23512	97.7 ± 0.4	0.5279 ± 0.0146	-0.4622 ± 0.0146	-0.2551 ± 0.0146	104.45 ± 0.79	8270.7 ± 7.3
HIP 25193	HD 35502	25/11/21	B	HD 23512	118.9 ± 0.2	0.0587 ± 0.0105	-0.0293 ± 0.0105	-0.0509 ± 0.0105	120.04 ± 5.12	4498.3 ± 10.9
	HD 35502	25/11/21	V	HD 23512	124.5 ± 0.4	0.095 ± 0.0145	-0.0944 ± 0.0145	-0.0111 ± 0.0145	93.34 ± 4.37	5448.2 ± 6.0
	HD 35502	25/11/21	R	HD 23512	122.0 ± 0.3	0.0974 ± 0.015	-0.0878 ± 0.015	-0.0421 ± 0.015	102.82 ± 4.41	6377.9 ± 8.5
	HD 35502	25/11/21	I	HD 23512	112.1 ± 0.4	0.0533 ± 0.0083	-0.0279 ± 0.0083	-0.0454 ± 0.0083	119.2 ± 4.46	8266.7 ± 7.7
HIP 24842	HD 35502	24/11/21	B	HD 23512	118.9 ± 0.2	0.1919 ± 0.0071	-0.1785 ± 0.0071	-0.0705 ± 0.0071	100.77 ± 1.06	4534.1 ± 11.8
	HD 35502	24/11/21	V	HD 23512	124.5 ± 0.4	0.2403 ± 0.0237	-0.2293 ± 0.0237	-0.0719 ± 0.0237	98.71 ± 2.83	5466.9 ± 5.8

Continua na próxima página...

Tabela C.1 - Continuação

Estrela	Be	Data	Filtro	Padrão	$\Delta\theta$ (°)	P (%)	Q (%)	U (%)	$\theta$ (°)	$\lambda$ (Å)
	HD 35502	24/11/21	R	HD 23512	122.0 ± 0.3	0.2032 ± 0.0121	-0.1815 ± 0.0121	-0.0914 ± 0.0121	103.36 ± 1.71	6403.3 ± 7.5
HIP 26334	HD 35502	24/11/21	B	HD 23512	118.9 ± 0.2	0.3105 ± 0.0032	-0.2571 ± 0.0032	0.1742 ± 0.0032	72.94 ± 0.3	4488.8 ± 10.8
	HD 35502	24/11/21	V	HD 23512	124.5 ± 0.4	0.3325 ± 0.0227	-0.2993 ± 0.0227	0.1449 ± 0.0227	77.08 ± 1.96	5442.9 ± 6.1
	HD 35502	24/11/21	R	HD 23512	122.0 ± 0.3	0.3079 ± 0.0162	-0.2863 ± 0.0162	0.1132 ± 0.0162	79.21 ± 1.51	6370.4 ± 8.84
	HD 35502	24/11/21	I	HD 23512	112.1 ± 0.4	0.2625 ± 0.0102	-0.231 ± 0.0102	0.1247 ± 0.0102	75.82 ± 1.11	8259.7 ± 8.4



## Campos das estrelas Be

### D.1 Grupo 1 - Campos bem determinados

#### D.1.1 $\gamma$ Ara

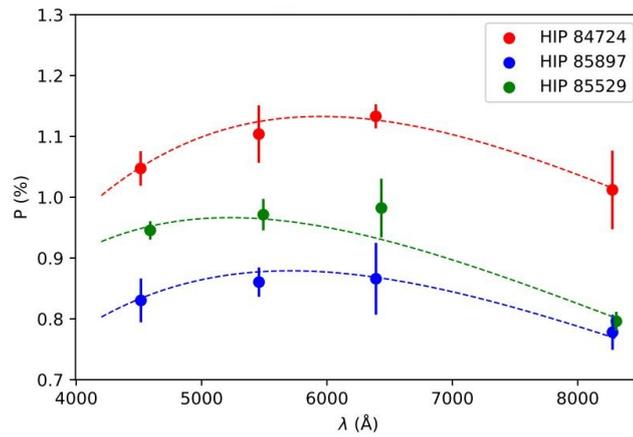


Figura D.1: Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para  $\gamma$  Ara.

Tabela D.1 – Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de  $\gamma$  Ara, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva.

Estrela	$P_{\text{máx}}$ (%)	$\lambda_{\text{máx}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\langle\theta\rangle$ ( $^{\circ}$ )	N
HIP 84724	$1.133^{+0.018}_{-0.025}$	$0.595^{+0.024}_{-0.042}$	$2.1 \pm 0.6$	4
HIP 85897	$0.879^{+0.073}_{-0.020}$	$0.571^{+0.033}_{-0.487}$	$16.6 \pm 0.7$	4
HIP 85529	$0.966^{+0.015}_{-0.011}$	$0.523^{+0.016}_{-0.022}$	$14.2 \pm 0.5$	4

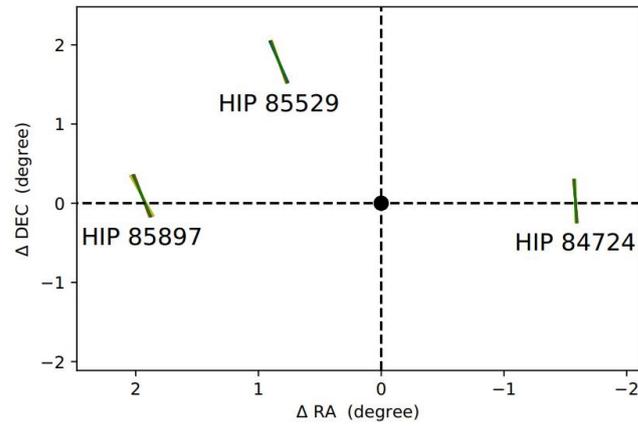


Figura D.2: Mapa de polarização para o campo de  $\gamma$  Ara, que está representada como o ponto preto na origem do sistema de coordenadas. A direção de cada um dos vetores das estrelas de campo representa a polarização medida para cada filtro observado.

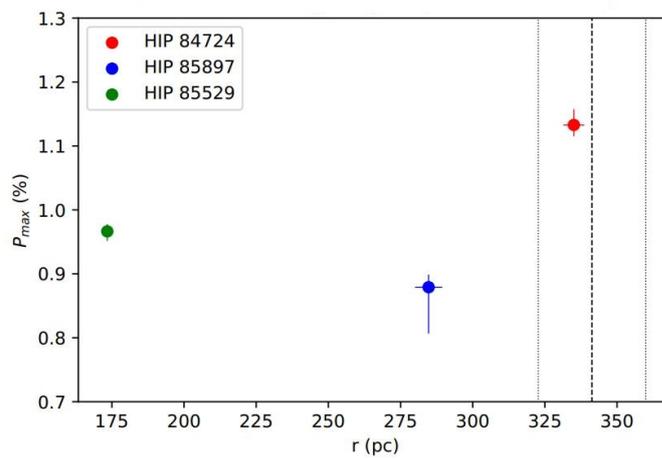


Figura D.3: Gráfico da polarização máxima  $P_{max}$  versus a distância  $r$  para o campo da estrela  $\gamma$  Ara. A linha vertical tracejada representa a distância da estrela Be e as linhas pontilhadas representam as incertezas da distância.

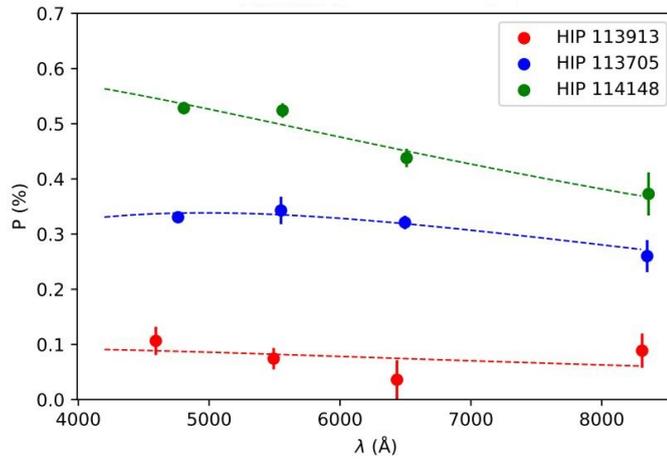
D.1.2  $\beta$  Psc

Figura D.4: Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para  $\beta$  Psc.

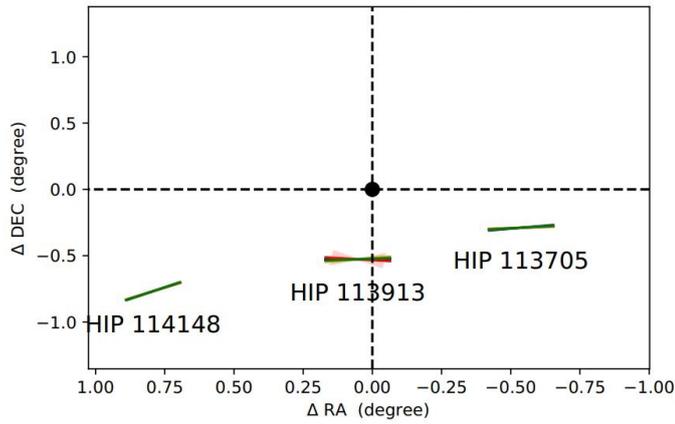


Figura D.5: Mapa de polarização para o campo de  $\beta$  Psc, que está representada como o ponto preto na origem do sistema de coordenadas. A direção de cada um dos vetores das estrelas de campo representa a polarização medida para cada filtro observado.

Tabela D.2 – Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de  $\beta$  Psc, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva.

Estrela	$P_{\text{máx}}$ (%)	$\lambda_{\text{máx}}$ ( $\mu m$ )	$\langle \theta \rangle$ ( $^{\circ}$ )	N
HIP 113913	$0.093^{+0.020}_{-0.018}$	$0.338^{+0.297}_{-0.203}$	$93.7 \pm 5.4$	4
HIP 113705	$0.338^{+0.028}_{-0.009}$	$0.496^{+0.052}_{-0.242}$	$96.9 \pm 1.0$	4
HIP 114148	$0.594^{+0.071}_{-0.050}$	$0.299^{+0.091}_{-0.112}$	$124.0 \pm 0.7$	4

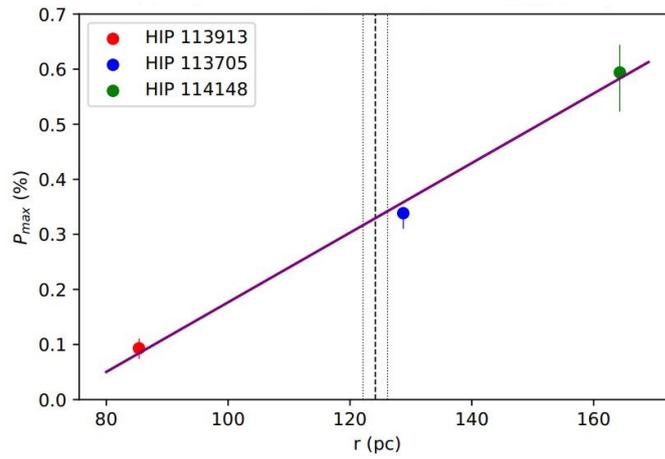
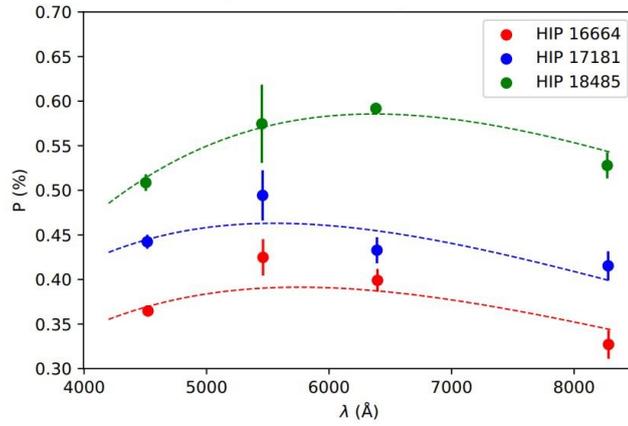
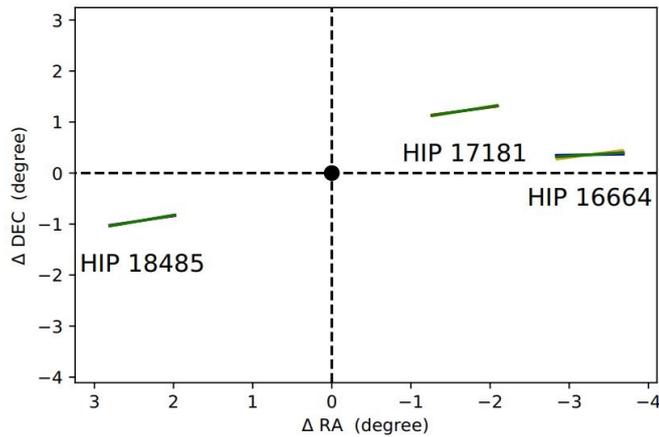


Figura D.6: Gráfico da polarização máxima  $P_{\max}$  versus a distância  $r$  para o campo da estrela  $\beta$  Psc. A linha vertical tracejada representa a distância da estrela Be e as linhas pontilhadas representam as incertezas da distância. A reta roxa é o ajuste para  $P_{\max} = (0.0058 \pm 0.0004)r - (0.41 \pm 0.05)$ .

D.1.3  $\eta$  TauFigura D.7: Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para  $\eta$  Tau.Figura D.8: Mapa de polarização para o campo de  $\eta$  Tau, que está representada como o ponto preto na origem do sistema de coordenadas. A direção de cada um dos vetores das estrelas de campo representa a polarização medida para cada filtro observado.Tabela D.3 – Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de  $\eta$  Tau, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva.

Estrela	$P_{\text{máx}}$ (%)	$\lambda_{\text{máx}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\langle\theta\rangle$ ( $^{\circ}$ )	N
HIP 16664	$0.391^{+0.008}_{-0.010}$	$0.576^{+0.024}_{-0.514}$	$95.9 \pm 0.6$	4
HIP 17181	$0.463^{+0.010}_{-0.008}$	$0.556^{+0.022}_{-0.045}$	$103.0 \pm 0.6$	4
HIP 18485	$0.586^{+0.006}_{-0.013}$	$0.637^{+0.014}_{-0.034}$	$104.1 \pm 0.6$	4

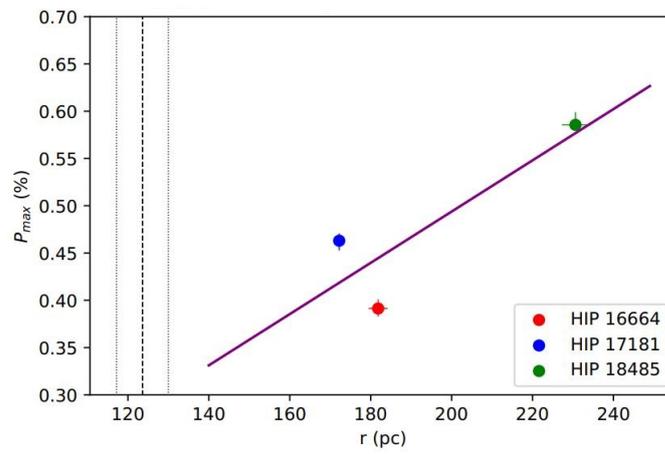


Figura D.9: Gráfico da polarização máxima  $P_{máx}$  versus a distância  $r$  para o campo da estrela  $\eta$  Tau. A linha vertical tracejada representa a distância da estrela Be e as linhas pontilhadas representam as incertezas da distância. A reta roxa é o ajuste para  $P_{máx} = (0.0029 \pm 0.0002)r - (0.07 \pm 0.04)$ .

## D.1.4 HD 35502

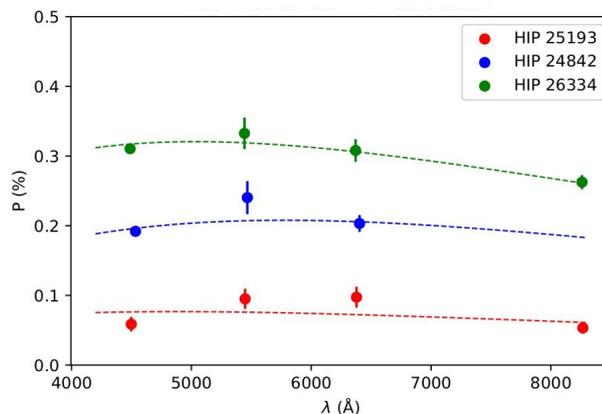


Figura D.10: Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para HD 35502.

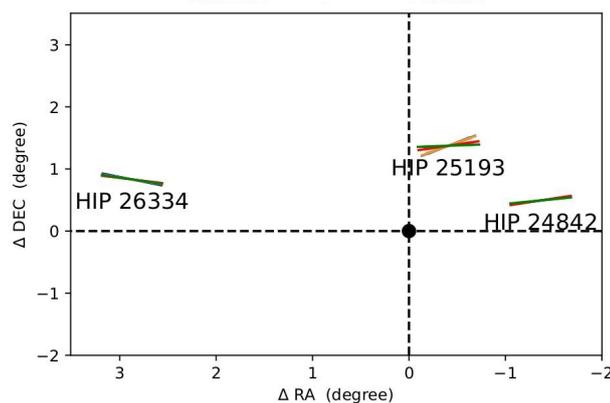


Figura D.11: Mapa de polarização para o campo de HD 35502, que está representada como o ponto preto na origem do sistema de coordenadas. A direção de cada um dos vetores das estrelas de campo representa a polarização medida para cada filtro observado.

Tabela D.4 – Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de HD 35502, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva.

Estrela	$P_{\text{máx}}$ (%)	$\lambda_{\text{máx}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\langle\theta\rangle$ ( $^{\circ}$ )	N
HIP 25193	$0.077^{+0.012}_{-0.008}$	$0.488^{+0.122}_{-0.274}$	$106.0 \pm 2.5$	4
HIP 24842	$0.208^{+0.012}_{-0.012}$	$0.580^{+0.060}_{-0.502}$	$100.8 \pm 1.2$	3
HIP 26334	$0.318^{+0.040}_{-0.004}$	$0.515^{+0.024}_{-0.412}$	$76.3 \pm 0.7$	4

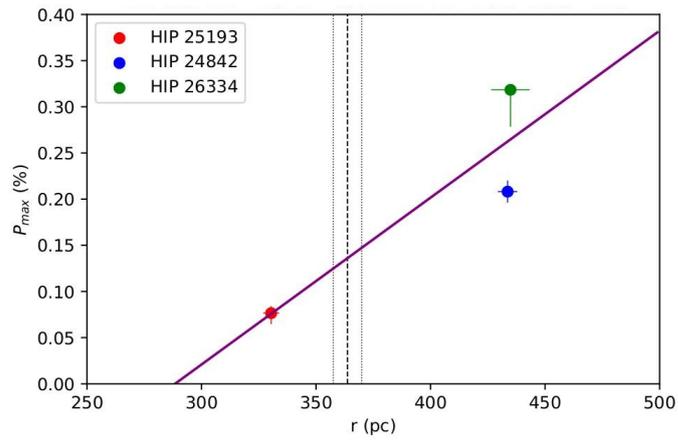


Figura D.12: Gráfico da polarização máxima  $P_{m\acute{a}x}$  versus a distância  $r$  para o campo da estrela HD 35502. A linha vertical tracejada representa a distância da estrela Be e as linhas pontilhadas representam as incertezas da distância. A reta roxa é o ajuste para  $P_{m\acute{a}x} = (0.0019 \pm 0.0001)r - (0.56 \pm 0.05)$ .

## D.2 Grupo 2 - Campos parcialmente determinados

### D.2.1 51 Oph

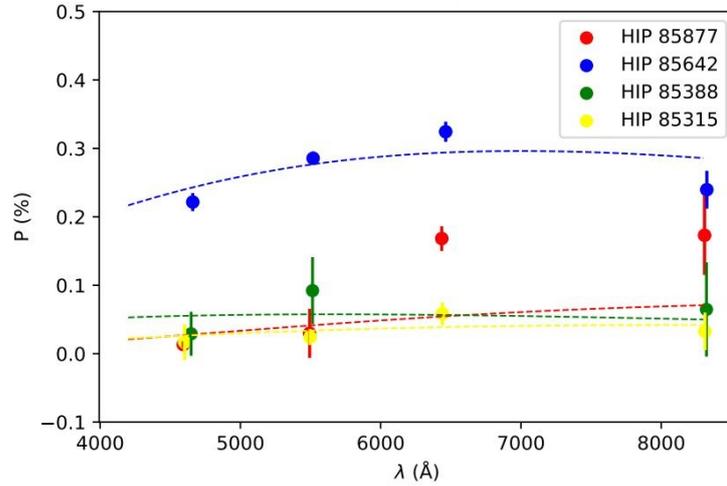


Figura D.13: Ajustes da função de Serkowski obtidos para quatro estrelas de campo observadas para 51 Oph.

Tabela D.5 – Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de 51 Oph, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva.

Estrela	$P_{\text{máx}}$ (%)	$\lambda_{\text{máx}}$ ( $\mu m$ )	$\langle \theta \rangle$ ( $^{\circ}$ )	N
HIP 85877	$0.074^{+0.012}_{-0.074}$	$0.986^{+0.012}_{-0.985}$	$1.8 \pm 3.9$	4
HIP 85642	$0.296^{+0.003}_{-0.005}$	$0.699^{+0.019}_{-0.023}$	$166.6 \pm 0.7$	4
HIP 85388	$0.058^{+0.026}_{-0.027}$	$0.564^{+0.302}_{-0.378}$	$159.0 \pm 15.5$	3
HIP 85315	$0.042^{+0.011}_{-0.009}$	$0.815^{+0.137}_{-0.406}$	$4.6 \pm 8.0$	4

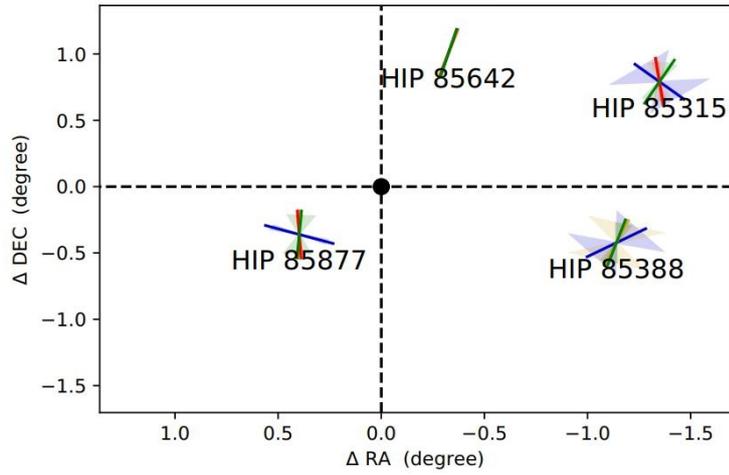


Figura D.14: Mapa de polarização para o campo de 51 Oph, que está representada como o ponto preto na origem do sistema de coordenadas. A direção de cada um dos vetores das estrelas de campo representa a polarização medida para cada filtro observado.

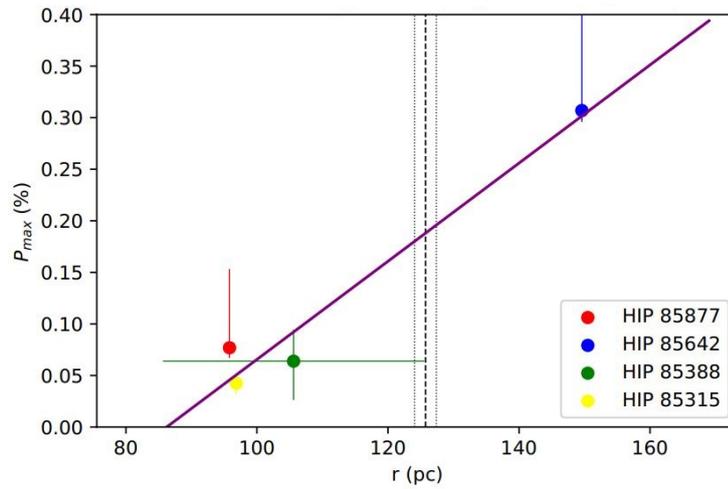


Figura D.15: Gráfico da polarização máxima  $P_{máx}$  versus a distância  $r$  para o campo da estrela 51 Oph. A linha vertical tracejada representa a distância da estrela Be e as linhas pontilhadas representam as incertezas da distância. A reta roxa é o ajuste para  $P_{máx} = (0.0046 \pm 0.0001)r - (0.37 \pm 0.02)$ .

## D.3 Grupo 3 - Campos indeterminados

### D.3.1 $\epsilon$ PsA

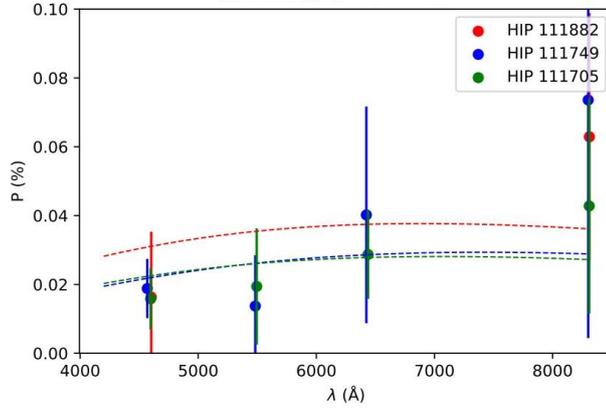


Figura D.16: Ajustes da função de Serkowski obtidos para três estrelas de campo observadas para  $\epsilon$  PsA.

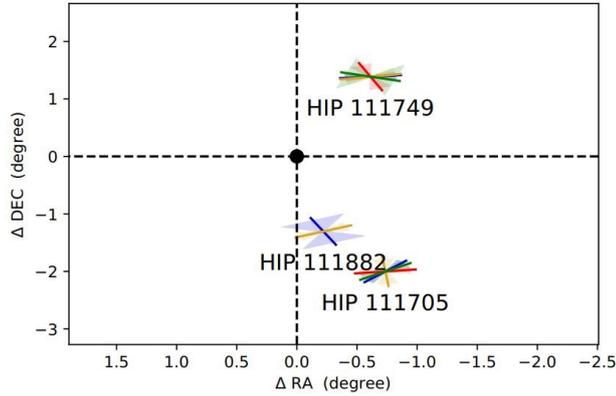


Figura D.17: Mapa de polarização para o campo de  $\epsilon$  PsA, que está representada como o ponto preto na origem do sistema de coordenadas. A direção de cada um dos vetores das estrelas de campo representa a polarização medida para cada filtro observado.

Tabela D.6 – Parâmetros ajustados da função de Serkowski para as estrelas de campo de  $\epsilon$  PsA, os ângulos médios de polarização e a quantidade N de pontos utilizados para a realização do ajuste de cada curva.

Estrela	$P_{\text{máx}}$ (%)	$\lambda_{\text{máx}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\langle\theta\rangle$ ( $^{\circ}$ )	N
HIP 111882	$0.038^{+0.013}_{-0.012}$	$0.689^{+0.226}_{-0.458}$	$114.7 \pm 25.0$	2
HIP 111749	$0.029^{+0.013}_{-0.006}$	$0.741^{+0.199}_{-0.509}$	$87.9 \pm 52.0$	4
HIP 111705	$0.028^{+0.007}_{-0.005}$	$0.706^{+0.204}_{-0.485}$	$142.4 \pm 52.0$	4

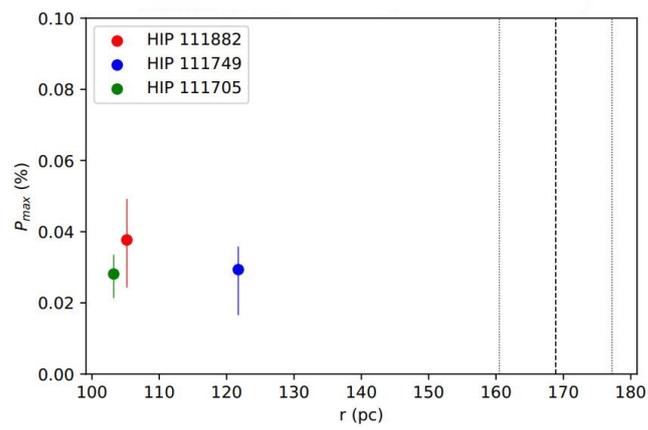


Figura D.18: Gráfico da polarização máxima  $P_{máx}$  versus a distância  $r$  para o campo da estrela  $\epsilon$  PsA. A linha vertical tracejada representa a distância da estrela Be e as linhas pontilhadas representam as incertezas da distância.