



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/03.20.19.08-TDI

ESPECTROPOLARIMETRIA DE AM HERCULIS UTILIZANDO O INSTRUMENTO ESPADONS/CFHT

Yasmin Matos Amado

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Astrofísica, orientada pelos Drs. Cláudia Vilega Rodrigues, e Eder Martioli, aprovada em 02 de abril de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3QP6545>>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/03.20.19.08-TDI

ESPECTROPOLARIMETRIA DE AM HERCULIS UTILIZANDO O INSTRUMENTO ESPADONS/CFHT

Yasmin Matos Amado

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Astrofísica, orientada pelos Drs. Cláudia Vilega Rodrigues, e Eder Martioli, aprovada em 02 de abril de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3QP6545>>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Amado, Yasmin Matos.

Am12e Espectropolarimetria de AM Herculis utilizando o instrumento
ESPaDONs/CFHT / Yasmin Matos Amado. – São José dos
Campos : INPE, 2018.

xx + 76 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/03.20.19.08-TDI)

Dissertação (Mestrado em Astrofísica) – Instituto Nacional de
Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. Cláudia Vilega Rodrigues, e Eder Martioli.

1. Variáveis cataclísmicas. 2. Polar. 3. AM Her.
4. Espectropolarimetria. I.Título.

CDU 520.84



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): *Yasmin Matos Amado*

Título: "ESPECTROPOLARIMETRIA DE AM HERCULIS UTILIZANDO O INSTRUMENTO ESPADONS/CFHT".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Astrofísica

Dr. Flavio D'Amico



Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Dra. Cláudia Vilega Rodrigues



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Eder Martioli



Orientador(a) / LNA / Itajubá - MG

Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Francisco Jose Jablonski



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Marcos Perez Diaz



Convidado(a) / IAG/USP / Butantã - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

*“Para criaturas tão pequenas como nós, a imensidão só é tolerável
por meio do amor.”*

CARL SAGAN

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que tem me dado força, coragem e sabedoria para prosseguir com o mestrado a cada dia.

À minha mainha Lúcia, por todo o cuidado e carinho incomparável desde o começo da minha vida acadêmica, por me fazer sentir segura nas minhas escolhas e estar sempre ao meu lado. À minha irmã Gabriela, por ser essa mulher forte e mesmo mais nova ser o meu exemplo de determinação.

Ao meu pai Júlio, pelo cuidado e apoio durante o mestrado. Pelas conversas sobre os assuntos mais diversos e interessantes. Sentirei muito a falta dos nossos cafés da manhã no INPE.

Agradeço à minha orientadora, Dra. Cláudia Vilega Rodrigues pela paciência para me ensinar e motivar em cada etapa do mestrado, sempre explicando cuidadosamente cada parte do trabalho. Ao meu coorientador Dr. Eder Martioli, que, mesmo longe, me auxiliou em todas as partes do projeto.

À minha irmã venezolana Yaherlyn, por me apoiar e me inspirar a cada dia do mestrado. Por ter sido meu porto seguro nos momentos difíceis. Agradeço pelas infinitas rizadas. Guardarei cada momento com carinho.

Ao Dr. Francisco J. Jablonski, meu pai acadêmico, pela amizade sincera que vai durar pra sempre. Pelos conselhos dentro e fora do INPE. E pelas dicas de IRAF muito necessárias para o trabalho.

Ao meu amigo Raphael Alves, já mestre, pelo apoio incondicional no início do meu mestrado, sem o qual não seria possível ter chegado onde cheguei. Agradeço de coração.

À todos os companheiros do curso, em especial às minhas colegas de turma Tabata, Pietra e Nina, e aos amigos Aysses, Dudu, Lia e Rafael (juntamente com a Fernanda), pela amizade, motivação e pelas conversas e rizadas divididas ao longo desses anos.

Agradeço aos demais professores do curso de astrofísica, pelas aulas e motivação. Aos demais funcionários do INPE que tornaram possível a conclusão deste mestrado.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

Variáveis cataclísmicas magnéticas do tipo polares apresentam campo magnético da ordem de $B \gtrsim 10$ MG. O alto campo magnético impede a formação do disco, de modo que a transferência de matéria é feita por coluna de acreção, a qual segue as linhas de campo da anã branca. AM Her, o protótipo da classe, apresenta na literatura diversas propostas para a geometria de acreção em diferentes estados de brilho. Obtivemos espectros de fluxo e polarização circular com o ESPaDOnS/CFHT para AM Her e uma estrela padrão não polarizada. Esses dados representam a primeira espectropolarimetria em fase de AM Her. Os espectros mostram variações das linhas de emissão ao longo do ciclo orbital. Seu espectro polarimétrico mostra depolarização nas linhas de emissão e polarização circular no contínuo de até 9%. O espectro de fluxo polarizado apresenta um contínuo suave e bem definido. As medidas de polarização da estrela padrão não polarizada não são maiores que 0,03% em módulo para a polarização circular, mostrando que a polarização instrumental do ESPaDOnS/CFHT é muito pequena, de modo que o instrumento permite realizar medidas acima deste limite. Esse conjunto de dados do ESPaDOnS/CFHT é o primeiro a ser utilizado para o cálculo da polarização circular no contínuo, demonstrando a capacidade do instrumento para realizar tais medidas.

Palavras-chave: Variáveis Cataclísmicas. Polar. AM Her. Espectropolarimetria.

SPECTROPOLARIMETRY OF AM HERCULIS WITH THE INSTRUMENT ESPADONS/CFHT

ABSTRACT

Polars are the magnetic cataclysmic variables that present magnetic field $B \gtrsim 10$ MG. The high magnetic field prevents the formation of the disk, so the transferred material is channeled via the magnetic field lines of the white dwarf. AM Her, the prototype of the class, exhibits in the literature several ideas for the accretion geometry in different states of brightness. We obtained spectropolarimetric data with ESPaDOnS/CFHT for AM Her and a non polarized standard star. These data present unprecedented resolved spectropolarimetry covering the entire orbital cycle. Spectra show variations of emission lines along the orbital cycle. Its polarimetric spectrum presents depolarization in the $H\alpha$ emission lines and circular polarization in the continuum of up to 9%. The polarized flux spectrum is smooth and presents a well defined continuum. The polarization measurements of the standard non polarimetric star are not larger than 0.03% in module for circular polarization. These results show that the instrumental polarization of ESPaDOnS/CFHT is very small, so that it is possible to measure polarization within these limits. These data obtained with ESPaDOnS/CFHT are the first to be used to calculate circular polarization on the continuum, demonstrating the instrument's ability to perform such measurements.

Keywords: Cataclysmic variable stars. Polar. AM Her. Spectropolarimetry.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Equipotenciais na Geometria de Roche com a anã branca na origem do referencial para $a = 1$ e $q = 0,5$	4
1.2 Distribuição de períodos orbitais das variáveis cataclísmicas com dados do catálogo Downes et al. (2006), obtidos em março 2017. O <i>period gap</i> está destacado.	6
1.3 Distribuição de períodos orbitais das variáveis cataclísmicas polares com dados do catálogo Downes et al. (2006), obtidos em março 2017. O <i>period gap</i> está destacado.	8
1.4 Esquema de uma polar.	9
1.5 Esquema da região pós-choque.	9
1.6 Curva de luz histórica de AM Her para a banda do visível utilizando dados públicos da <i>American Association of Variable Star Observers</i> (KAFKA, 2017). A data de início é 16/04/1977 e do final de 04/07/2017.	11
1.7 Espectropolarimetria de AM Her. Em cima, a polarização circular em porcentagem, no meio, o espectro de fluxo, e abaixo, o desdobramento Zeeman na série de Balmer.	12
1.8 Espectro de AM Her destacando as principais linhas de emissão, absorção e componentes Zeeman.	13
1.9 Espectros de fluxo para AM Her em diferentes fases. O espectro médio é mostrado no topo da imagem destacando as principais linhas de emissão.	15
1.10 Velocidade radial como função do fase magnética na linha de $H\alpha$	16
1.11 Velocidade radial como função do fase magnética na linha de $H\alpha$	16
1.12 Espectro de fluxo para AM Her ajustados com uma curva modelo de atmosfera de anã branca com temperatura de 24.000 K e com um espectro de uma estrela do tipo M4.	17
1.13 Espectro de fluxo de AM Her na fase 0,97, em estado de alto brilho $V \sim 13$ mag.	17
1.14 Perfis de AM Her ao longo do ciclo orbital. Os perfis foram normalizados para uma amplitude comum para exibição. Esquerda: Observação com o espectrógrafo KPNO 2,1 m em 2003. Direita: Observação com o espectrógrafo WIYN 3,5 m em 2004.	18
2.1 Esquema do caminho óptico do módulo espectroscópico do ESPaDOnS.	21
2.2 Caminho óptico da unidade polarimétrica do ESPaDOnS.	23

2.3	Curva de luz de AM Her para a banda do visível utilizando dados públicos da <i>American Association of Variable Star Observers</i> (AAVSO) (KAFKA, 2017). A data de observação, Dia Juliano 2457262, está em destaque com a linha vermelha.	27
2.4	Comparação entre um dos espectros de fluxo de AM Her com (preto) e sem (cinza) a aplicação dos filtros.	29
2.5	Comparação entre um dos espectros de polarimetria de AM Her com (preto) e sem (cinza) a aplicação dos filtros.	30
2.6	Espectro de fluxo de HD 202573 em preto deslocado em 15 unidades acima do espectro de uma estrela do mesmo tipo espectral, G5III, obtido com o Atlas <i>Kurucz</i>	31
3.1	Polarização observada da estrela padrão não polarizada para os três parâmetros de Stokes V, Q (deslocado em 0,5%) e U (deslocado em 1%) . Os espectros tem resolução de 5Å.	33
4.1	Os 16 espectros de fluxo para AM Her obtidos ao longo de um período orbital, deslocados entre si de 50 unidades. A fase orbital é mostrada à direita em cima de seus respectivos espectros.	36
4.2	Espectro de fluxo médio de AM Her com as principais linhas de emissão, absorção e telúricas.	37
4.3	Curva de velocidade radial obtida a partir da linha de emissão de H α , com valores da semi-amplitude $K \approx 90$ km/s, ajustada uma curva seno com amplitude 90 e período 3,7 em vermelho.	39
4.4	Espectros de fluxo com uma aproximação na linha de H α 6563Å. É possível notar que a linha é composta por componentes que variam ao longo do período orbital. As linhas de emissão nas fases 0,0; 0,06; 0,75; 0,81; 0,88 e 0,94 apresentam pelo menos 4 componentes.	41
4.5	Comparação entre a polarização circular da padrão não polarizada, correspondente à polarização instrumental do ESPaDOnS, e de duas fases distintas de AM Her, as quais apresentam menor valor em módulo de polarização circular, demonstrando a capacidade do instrumento em medir polarização circular no contínuo.	43
4.6	Os 16 espectros de polarimetria de AM Her ao longo de um ciclo orbital, deslocados em 10 unidades negativas com as respectivas fases à direita de cada espectro.	44
4.7	Os 16 espectros de polarimetria de AM Her na região de H α e He I, sem deslocamento, destacando a depolarização na linha de H α	45

4.8	Fluxo polarizado ao longo do ciclo orbital em unidades arbitrárias de fluxo. A fase é mostrada a direita de cada espectro.	48
4.9	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,0.	49
4.10	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,06.	49
4.11	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,13.	50
4.12	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,19.	50
4.13	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,25.	51
4.14	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,31.	51
4.15	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,38.	52
4.16	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,44.	52
4.17	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,50.	53
4.18	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,56.	53
4.19	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,63.	54
4.20	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,69.	54
4.21	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,75.	55
4.22	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,81.	55
4.23	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,88.	56
4.24	Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,94.	56
4.25	Diagramas de fases para os filtros g, r, i e z do <i>Sloan Digital Sky Survey</i> a partir dos dados de fluxo.	58
4.26	Diagramas de fases para os filtros g, r, i e z do <i>Sloan Digital Sky Survey</i> a partir dos dados de polarimetria.	59
4.27	Diagramas de fases para os filtros g, r, i e z do <i>Sloan Digital Sky Survey</i> a partir dos dados de fluxo polarizado.	60
4.28	Fluxo, polarização e fluxo polarizado para a banda g.	61
4.29	Fluxo, polarização e fluxo polarizado para a banda r.	61
4.30	Fluxo, polarização e fluxo polarizado para a banda i.	62
4.31	Fluxo, polarização e fluxo polarizado para a banda z.	62
A.1	Caminho óptico da unidade polarimétrica do ESPaDONs destacando as matrizes de Mueller para cálculo da polarimetria.	76

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Dados da observação	25
2.2 Valores utilizados nos filtros para cada tipo de espectro e objeto.	29
3.1 Valores médios de V(%), Q(%), e U(%), e seus respectivos erros.	33
4.1 Valores de dia juliano heliocêntrico, o comprimento de onda central, amplitude e sigma da gaussiana ajustada, fase e semi-amplitude K para cada espectro de AM Her.	39
4.2 Limites de comprimento de onda para os filtros do <i>Sloan Digital Sky Survey</i>	57

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Variáveis Cataclísmicas	1
1.1.1 Classificação	1
1.1.2 Geometria de Roche	2
1.1.3 Evolução	3
1.2 Polares	7
1.2.1 Geometria	7
1.2.2 Acreção magnética	7
1.3 AM Herculis	10
2 OBSERVAÇÃO E REDUÇÃO DOS DADOS	19
2.1 ESPaDOnS	19
2.1.1 Medidas de polarização com o ESPaDOnS	21
2.2 Observação	25
2.3 Redução	26
2.4 Tratamento dos Dados	28
2.5 Qualidade da calibração em fluxo	30
3 POLARIZAÇÃO INSTRUMENTAL	33
4 ESPECTROPOLARIMETRIA DE AM HER	35
4.1 Espectros de fluxo	35
4.1.1 Velocidade Radial	38
4.1.2 Perfil $H\alpha$	40
4.2 Espectros de polarimetria	42
4.3 Fluxo polarizado	45
4.4 Diagramas de fases	57
5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
APÊNDICE A - POLARIZAÇÃO	71
A.1 INTRODUÇÃO	71

A.2	Onda eletromagnética	71
A.3	Polarização elíptica	72
A.4	Polarização linear	72
A.5	Polarização circular	73
A.6	Parâmetros de Stokes	74
A.7	Polarimetria no ESPaDOnS	75

1 INTRODUÇÃO

AM Herculis (AM Her), nosso objeto de estudo, é o protótipo das *polares*, uma subclasse das variáveis cataclísmicas. Neste capítulo apresentamos inicialmente na seção 1.1 uma revisão das variáveis cataclísmicas (VCs), sua classificação e as principais características de uma VC. Em seguida, na seção 1.2, apresentamos as *polares*, variáveis cataclísmicas com alto campo magnético na anã branca e rotação sincronizada. Com o propósito de apresentar AM Her, na seção 1.3 foi feito um resumo com suas principais propriedades, incluindo curvas de luz e espectros observados anteriormente presentes na literatura.

1.1 Variáveis Cataclísmicas

Variáveis cataclísmicas (VCs) são sistemas binários compactos compostos por uma anã branca (primária) e uma estrela na sequência principal (secundária), orbitando tão próximas uma à outra, a ponto de haver acreção de matéria da secundária para a primária. A anã branca apresenta massa entre 0,3 e 1,3 M_{\odot} , entretanto, na maioria dos sistemas binários conhecidos, essa massa varia no intervalo de 0,5 a 0,6 M_{\odot} , com temperaturas variando no intervalo de 10.000 K a 60.000 K. A secundária consiste em uma estrela de baixa massa na sequência principal tardia ou levemente evoluída com temperatura variando de 2900 K a 7500 K (WARNER, 1995).

1.1.1 Classificação

Inicialmente, as variáveis cataclísmicas foram classificadas de acordo com sua variabilidade fotométrica, associada a distintos fenômenos físicos dos sistemas. Com o passar do tempo, e com o aperfeiçoamento dos instrumentos de espectroscopia, as características espectrais também passaram a ser usadas na classificação (WARNER, 1995).

- *Novas*: são VCs que apresentam uma variação fotométrica de grande amplitude, da ordem de 6 a 19 mag (WARNER, 1995), aumentando a luminosidade em poucos dias e decaindo lentamente. Essa variação é causada por um episódio de queima termonuclear na camada externa da anã branca, causada pelo acúmulo de matéria transferida pela secundária. O aumento da temperatura e pressão na base da camada de hidrogênio acumulado provoca a ignição nuclear do gás degenerado, iniciando a

queima do hidrogênio, aumentando a pressão de radiação, levando à erupção. *Novas Clássicas* apresentam apenas uma erupção registrada, enquanto que as *Novas Recorrentes* são aquelas com mais de uma erupção observada.

- *Novas Anãs*: também apresentam aumento repentino de luminosidade mas com menor variação, da ordem de 2 a 5 mag num intervalo de dezenas de dias. A causa de sua erupção está associada a instabilidades termodinâmicas do disco de acreção.
- *Nova-like*: são as VCs nas quais não foram observadas erupções de *Novas Anãs*, pois permanecem em estado de alto brilho devido à elevada taxa de transferência de matéria, capaz de manter o disco em um estado equivalente a uma erupção permanente.
- *Magnéticas*: apresentam anã branca com elevado campo magnético, capaz de interromper o disco de acreção, parcial ou totalmente. Os espectros apresentam desdobramento Zeeman. São subclassificadas em:

Polares Intermediárias: Campos magnéticos menores, $1\text{MG} \lesssim B \lesssim 10\text{MG}$, possuem usualmente disco e coluna de acreção e sua rotação é assíncrona. DQ Her é o protótipo da classe.

Polares: Campos magnéticos maiores, $B \gtrsim 10\text{MG}$, sem formação de disco, somente coluna de acreção e rotação sincronizada. AM Her é o protótipo da classe.

1.1.2 Geometria de Roche

No sistema binário, a secundária orbita em torno da anã branca, que, por ser mais massiva, está muito próxima do centro de massa do sistema. As componentes do sistema estão separadas por uma distância a de dimensão menor que a de um raio solar. A distância a é obtida pelo período orbital P_{orb} segundo as equações de Kepler, mostrado na equação 1.1 (WARNER, 1995):

$$P_{orb}^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_1 + M_2)}. \quad (1.1)$$

Assumindo que as coordenadas cartesianas (x, y, z) giram com o sistema binário, e sua origem está na anã branca, o eixo x ao longo da linha do centro dos objetos, o eixo z perpendicular ao plano orbital e o eixo y na direção do movimento orbital da primária, o potencial total em qualquer ponto, ou seja, a soma dos potenciais

gravitacionais das duas estrelas e o potencial efetivo da força centrífuga, é dado pela equação 1.2.

$$\Phi_R = -\frac{GM_1}{(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} - \frac{GM_2}{[(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{1/2}} - \frac{2\pi^2}{P_{orb}^2} \left[\left(x - \frac{aM_2}{M_1M_2} \right)^2 + y^2 \right]. \quad (1.2)$$

Combinando as equações 1.1 e 1.2, obtém-se a equação 1.3,

$$\Phi_R = \frac{GM_1}{a} F\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a}, \frac{z}{a}, q\right), \quad (1.3)$$

de modo que a geometria de Roche é caracterizada por uma função F determinada pela razão das massas pontuais $q = M_2/M_1$ e a separação a entre as estrelas.

As equipotenciais da geometria de Roche, considerando movimento somente em x e y , para os valores de separação $a = 1$ e razão de massa $q = 0,5$ são mostradas na figura 1.1. Os pontos onde as duas superfícies equipotenciais se intersectam são os pontos de Lagrange.

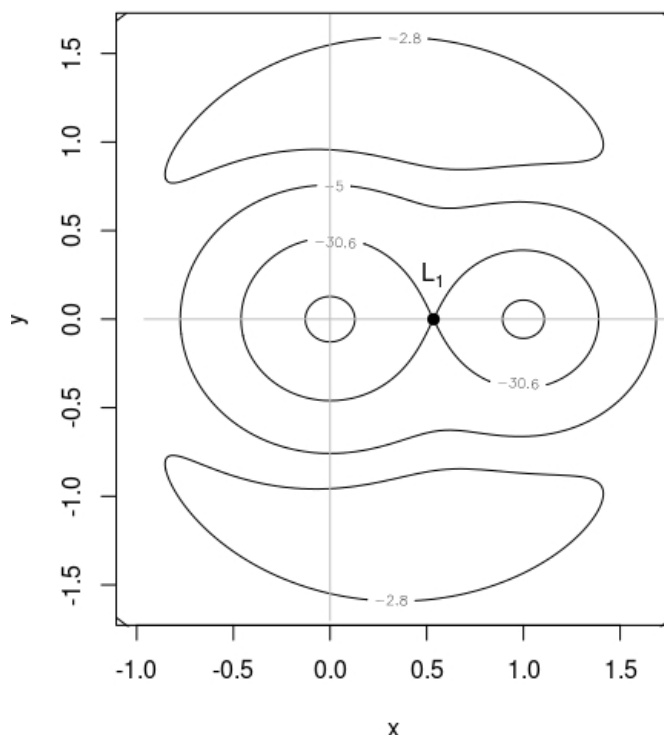
A transferência de massa ocorre quando a secundária preenche totalmente o seu lóbulo de Roche, formado pelas equipotenciais que se intersectam. A matéria sai da secundária pelo ponto interno de Lagrange L_1 .

Como o sistema é bem compacto, a secundária sofre o efeito de forças de maré. Isso causa um sincronismo em seu movimento, fazendo com que seu período de rotação seja igual ao período de translação (análogo ao sistema Terra-Lua).

1.1.3 Evolução

Antes de se tornar uma variável cataclísmica, tem-se um sistema binário que possui duas estrelas na sequência principal, uma com massa maior que a solar e outra com massa menor, período orbital de aproximadamente 10 anos e raio de separação próximo de $100R_{\odot}$ (HELLIER, 2001). Eventualmente, a mais massiva expande, se torna uma gigante vermelha e as estrelas passam por uma fase de envelope comum quando a separação entre elas diminui atingindo cerca de $1R_{\odot}$. Nesta fase, ocorre perda de energia pelo movimento orbital do sistema binário, até que o envelope é expulso formando uma nebulosa planetária e uma pré variável cataclísmica, composta por uma anã branca e uma anã vermelha ainda muito separadas para que ocorra

Figura 1.1 - Equipotenciais na Geometria de Roche com a anã branca na origem do referencial para $a = 1$ e $q = 0,5$.



Fonte: Produzido pelo autor.

a transferência de matéria (secundária ainda não preenche seu Lóbulo de Roche). O sistema binário interage até que a separação entre as componentes diminua ao ponto da secundária preencher completamente seu lóbulo de Roche e dar início à transferência de matéria.

Em uma variável cataclísmica, a estrela de menor massa (secundária) perde matéria para a de maior massa (primária). Em primeira análise, vamos considerar que o momento angular deve ser conservado. Uma partícula localizada na secundária ao ser transferida para a primária, se aproxima do centro de massa e portanto perde momento angular. Para compensar a perda, o sistema binário aumenta sua separação a , aumentando também o Lóbulo de Roche, de modo que a secundária deixa de preenchê-lo, cessando então a transferência de matéria. Mas, um sistema binário sem transferência de matéria não é uma variável cataclísmica.

A fim de que a transferência de matéria se mantenha estável é necessário que a secundária preencha continuamente o seu lóbulo de Roche. Existem duas possibilidades para manter tal configuração. A primeira requer que a secundária esteja

evoluindo para uma gigante vermelha, assim, a estrela em expansão sempre preencherá seu lóbulo de Roche. Entretanto, a maioria das variáveis cataclísmicas possuem secundária na sequência principal com massas menores que $1M_{\odot}$, e portanto, não chegaram nesta escala evolutiva.

A segunda hipótese requer que haja perda de momento angular no sistema binário, de modo que diminua a separação a e, portanto, o lóbulo de Roche da secundária, permitindo a transferência de matéria para a primária.

Existem dois mecanismos para a perda de momento angular em sistemas nos quais ocorre transferência de matéria: radiação gravitacional e freamento magnético.

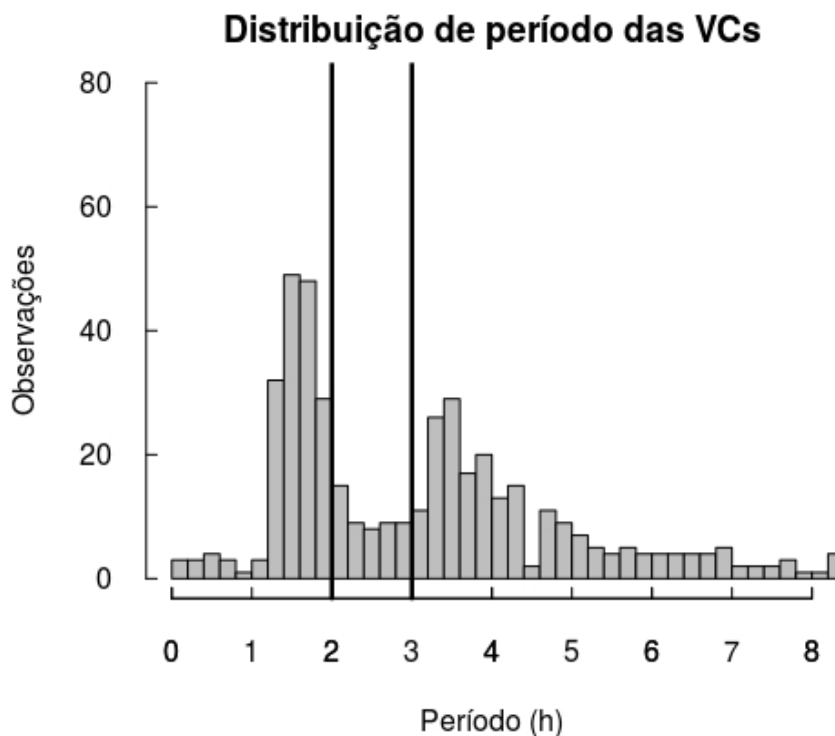
A variação do campo gravitacional com a rotação das estrelas em torno do centro de massa no sistema binário emite radiação gravitacional. A perda de energia por esse processo é suficiente para diminuir o momento angular em variáveis cataclísmicas com períodos menores ou da ordem de 2h. Quanto menor o período maior emissão de ondas gravitacionais. A taxa de perda de matéria pela secundária é da ordem de $10^{-10}M_{\odot}/\text{ano}$.

O sistema também pode perder momento angular por freamento magnético devido à interação do campo magnético da secundária com as partículas ionizadas expulsas pelo seu vento estelar. O fluxo de partículas segue as linhas de campo magnético da secundária, a qual rotaciona com o sistema. Neste movimento, o fluxo em raios mais externos das linhas de campo se desacopla e retira momento angular da secundária e, conseqüentemente, do sistema binário, para períodos maiores de 3h. Neste estado, a taxa de perda de matéria é da ordem de $10^{-9}M_{\odot}/\text{ano}$.

As variáveis cataclísmicas seguem uma distribuição por período orbital mostrada na figura 1.2. Quando a transferência de matéria é iniciada, e portanto o sistema binário se torna uma variável cataclísmica, com período determinado pela separação a . A evolução ocorre de períodos maiores para períodos menores. Quando a secundária já perdeu muita massa, se torna degenerada e aumenta seu raio, levando a uma maior transferência de massa. Assim, a tendência do aumento da distância a passa a ser maior que a diminuição por emissão gravitacional, e o sistema passa a evoluir no sentido contrário, aumentando o período.

Analisando a figura 1.2, é possível identificar os sistemas que perdem momento angular por radiação gravitacional, aqueles com período menor que 2h, e por freamento magnético, períodos maiores que 3h.

Figura 1.2 - Distribuição de períodos orbitais das variáveis cataclísmicas com dados do catálogo [Downes et al. \(2006\)](#), obtidos em março 2017. O *period gap* está destacado.



Fonte: Produzido pelo autor.

No intervalo entre 2h e 3h, existe um menor número de objetos identificados. Neste intervalo, denominado *period gap*, supõe-se que ocorra a mudança de mecanismo de perda de momento angular, de freamento magnético para radiação gravitacional.

No *period gap*, a secundária já perdeu muita massa então, para se reestruturar internamente, diminui sua estrutura e o transporte interno passa a ser somente convectivo e não mais radiativo ([ROBINSON et al., 1981](#)). Durante esse processo de contração, a estrela se desacopla do seu lóbulo de Roche, a transferência de matéria cessa e o sistema binário deixa de ser uma variável cataclísmica. O período orbital diminui gradativamente até aproximadamente 2h, a separação a diminui, reduzindo seu lóbulo de Roche ao ponto da secundária preenchê-lo novamente para reiniciar a transferência de matéria. Neste cenário, o sistema binário volta a ser classificado como uma variável cataclísmica ([MCDERMOTT; TAAM, 1989](#)).

1.2 Polares

De acordo com o catálogo Downes et al. (2006), das 1830 VCs, 80 são polares, equivalente à 4,4%. Ferrario et al. (2015) mostram que o intervalo de magnitude do campo magnético pode variar de 1 à 230 MG.

Essa subclasse de variáveis cataclísmicas tem como principal característica a sincronização do período da anã branca com o do sistema. A interação entre o alto campo magnético da anã branca e o campo da secundária, além de dissipação por marés, fazem com que o sistema rotacione sincronizadamente. Esse é o processo que separa as polares das polares intermediárias, as quais possuem rotação assíncrona (WARNER, 1995).

Como consequência, as linhas de campo magnético da secundária irão retornar para a superfície da estrela ou se conectarão com o campo magnético da anã branca, diminuindo a efetividade da perda de momento angular por freamento magnético (LI et al., 1994). É possível ver na distribuição de períodos da figura 1.3 que maior parte das polares possuem período menor que 2h, e portanto, têm a radiação gravitacional como principal mecanismo de perda de momento angular.

1.2.1 Geometria

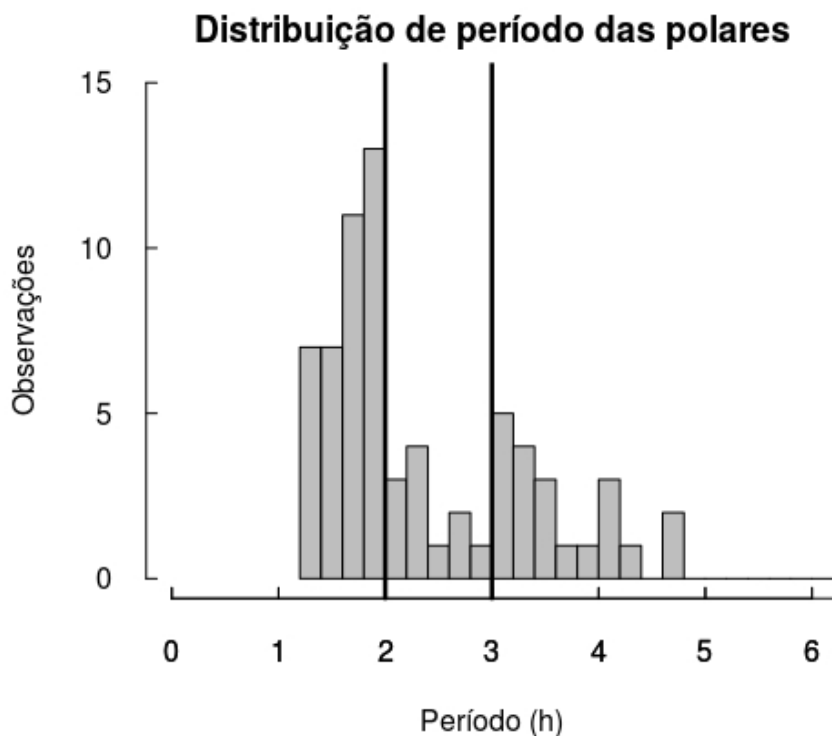
Nas polares o raio da magnetosfera é o raio referente ao volume da esfera na qual o campo afeta fortemente o fluxo de matéria, energia e momento angular, é da ordem da separação orbital. Como consequência, o campo magnético da anã branca é suficientemente forte para evitar a formação de disco de acreção. Durante a transferência de matéria, o gás, que está parcialmente ionizado, flui do ponto L_1 em direção à anã branca seguindo uma trajetória balística até o momento em que encontra a magnetosfera, região chamada de *threading region*. A partir deste ponto, a trajetória passa a ser definida pelas linhas de campo magnético, e a acreção ocorre via colunas. O esquema de tais propriedades pode ser visto na figura 1.4.

1.2.2 Acreção magnética

A matéria conduzida pela coluna de acreção é ionizada, e assim, apresenta movimento espiral com aceleração uniforme ao redor das linhas do campo magnético devido à força de Lorentz. Nas polares, essas partículas atingem velocidades levemente relativísticas emitindo radiação ciclotrônica polarizada.

Radiação ciclotrônica é responsável pela maior parte da emissão do espectro contínuo

Figura 1.3 - Distribuição de períodos orbitais das variáveis cataclísmicas polares com dados do catálogo Downes et al. (2006), obtidos em março 2017. O *period gap* está destacado.



Fonte: Produzido pelo autor.

no óptico em polares. Analisando a polarização, é possível determinar o ângulo de inclinação entre a linha de visada e o eixo magnético da anã branca, e como ele varia com o período orbital.

O fluxo de matéria segue radialmente em queda livre e a energia gravitacional se transforma em radiação em um volume muito próximo à anã branca, chamado de região pós-choque. A região pós-choque não está localizada nos polos, mas sua localização é determinada pela *threading region* de acordo com a magnitude e geometria do campo magnético. Um esquema da região pós-choque pode ser visto na figura 1.5.

O fluxo de matéria atinge a anã branca e sua energia cinética é convertida em energia térmica, aquecendo a região pós-choque a temperaturas de aproximadamente 20 keV, emitindo em raios X moles, fazendo com que a região se expanda. O resultado é uma coluna de acreção quente e densa que se estende por quase $0,1 R_{AB}$ acima da superfície (HELLIER, 2001). As temperaturas na região pós-choque são altas o suficiente para ionizar elementos em altos estágios de ionização.

Figura 1.4 - Esquema de uma polar.

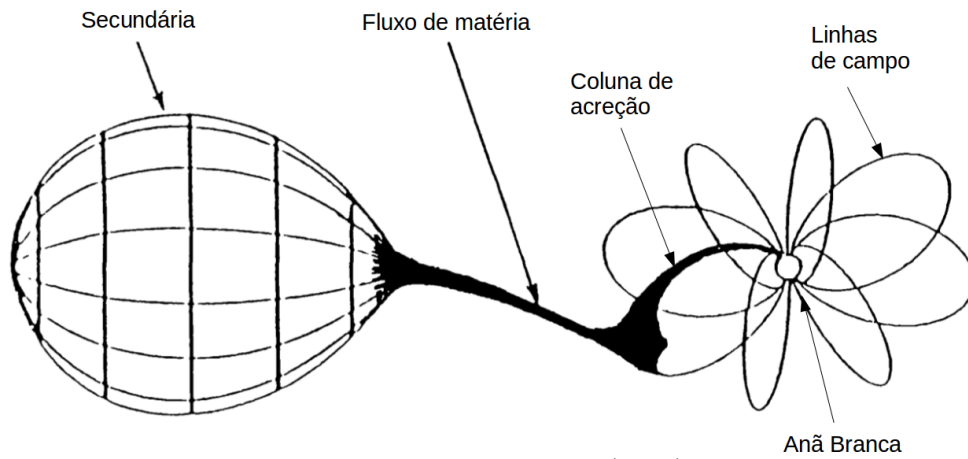
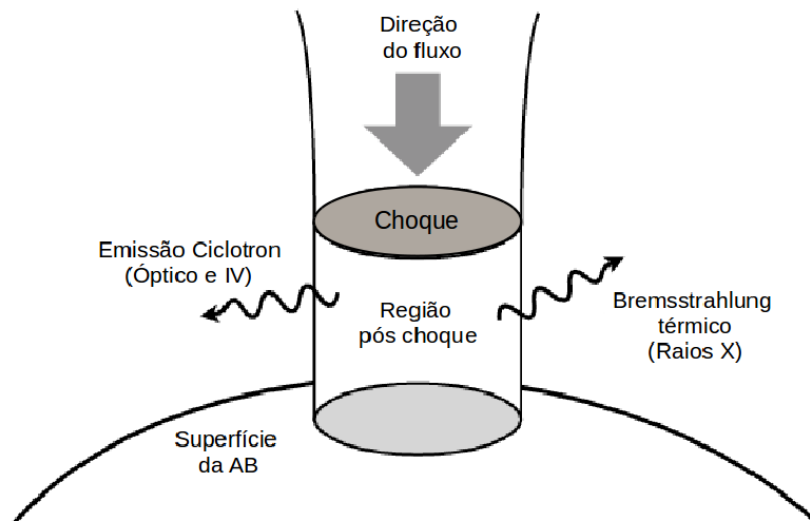


Figura 1.5 - Esquema da região pós-choque.



As linhas fotosféricas da anã branca podem apresentar o desdobramento Zeeman decorrente da quebra de degenerescência dos níveis de energia devido à presença de campo magnético. Mas nem sempre é possível observá-lo no óptico já que outras emissões podem diluir a emissão da fotosfera da anã branca.

Uma importante característica das polares é a presença de dois estados fotométricos bastante distintos: um estado de alto brilho, durante o qual as modulações orbitais fotométricas são aparentes, e um estado de baixo brilho, caracterizado por uma

redução média de 2,5 mag, aproximadamente a 10 vezes em fluxo (KALOOMENI, 2012; WU; KISS, 2008). Esses estados são atribuídos a uma variação na taxa de transferência de matéria pela secundária. Quando existe maior taxa de transferência, a coluna de acreção torna-se mais densa, podendo em alguns casos aumentar em diâmetro (GANSICKE et al., 1995).

1.3 AM Herculis

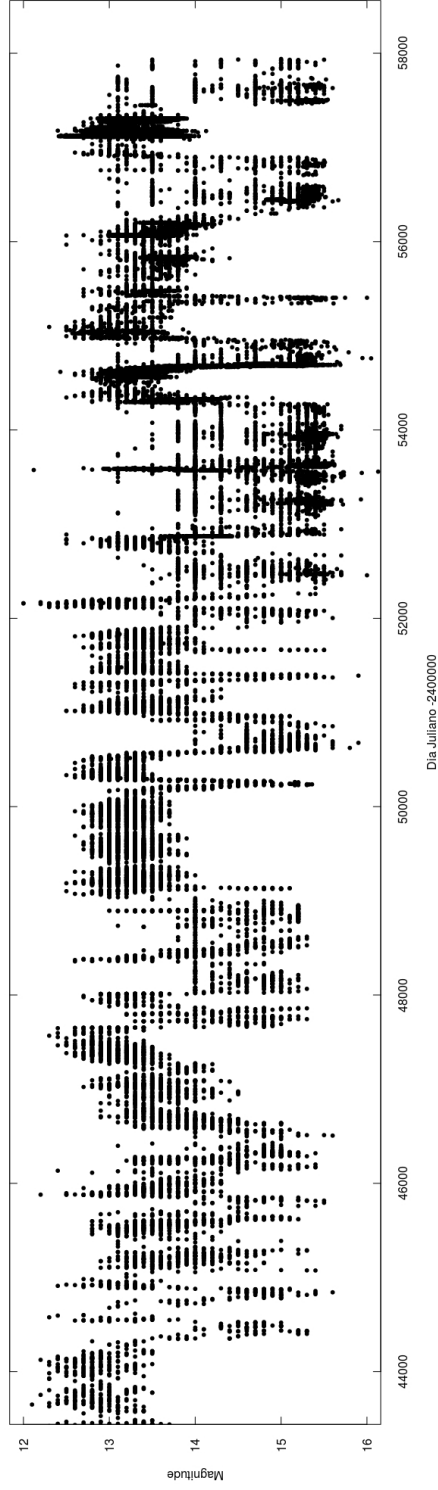
O protótipo das polares, AM Herculis (AM Her), foi a primeira polar a ser descoberta por Reinmuth (1924), entretanto foi inicialmente classificada como *novalike*. Hearn et al. (1976) descobriram que essa VC emitia raios X moles. Em suas observações, Tapia (1977) descobriu que AM Her emite luz polarizada linear e circularmente em comprimentos de onda ópticos com polarização linear variando de zero até 7% e circular de - 9% a + 3%, variando suavemente durante o período de 3,09 h. O alto grau de polarização circular, anteriormente visto apenas em anãs brancas magnéticas (ANGEL, 1978), sugeriu a presença de um campo magnético forte.

A denominação *polar* foi introduzida pelos astrônomos Krzeminski and SERKOWSKI (1977) para a AM Her e outros objetos identificados como fontes de raios X que também emitem luz óptica polarizada.

AM Her varia seu estado de brilho sem periodicidade aparente. A variação é de aproximadamente 2,5 mag entre cada estado na banda V. No estado de alto brilho ocorre um aumento da taxa de transferência de matéria. Sua curva de luz para a banda do visível é mostrada na figura 1.6, na qual foram utilizados dados disponíveis na página da *American Association of Variable Star Observers* (AAVSO). A curva obtida é compatível com as curvas de Kafka3 et al. (2005) e Kaloomeni (2012).

Em suas observações, Young et al. (1981) determinaram período orbital de 3,094 h. Utilizando a geometria de Roche, Patterson (1984) determinou o valor do raio da secundária $R_S = 0,324R_{\odot}$, que corresponde a uma massa entre $0,22 M_{\odot}$ a $0,28 M_{\odot}$, e assim, calculou a distância até AM Her, $d = 91$ pc, utilizando o método do ajuste do brilho superficial na banda K para a secundária proposto por Bailey (1981). Para tal distância, empregando o raio máximo da anã branca de $R_{AB} = 8,5 \cdot 10^8$ cm, sua massa é da ordem de $M_{AB} \approx 0,6 M_{\odot}$. Utilizando a tomografia Doppler, Davey and Smith (1996) calcularam uma inclinação de $i = 50^{\circ}$, mesmo valor encontrado anteriormente por Wickramasinghe et al. (1991).

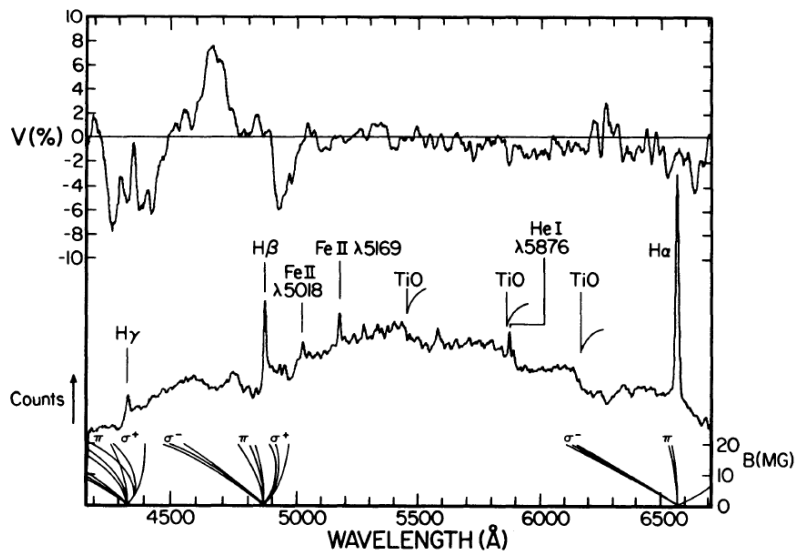
Figura 1.6 - Curva de luz histórica de AM Her para a banda do visível utilizando dados públicos da *American Association of Variable Star Observers* (KAFKA, 2017). A data de início é 16/04/1977 e do final de 04/07/2017.



Fonte: Produzido pelo autor.

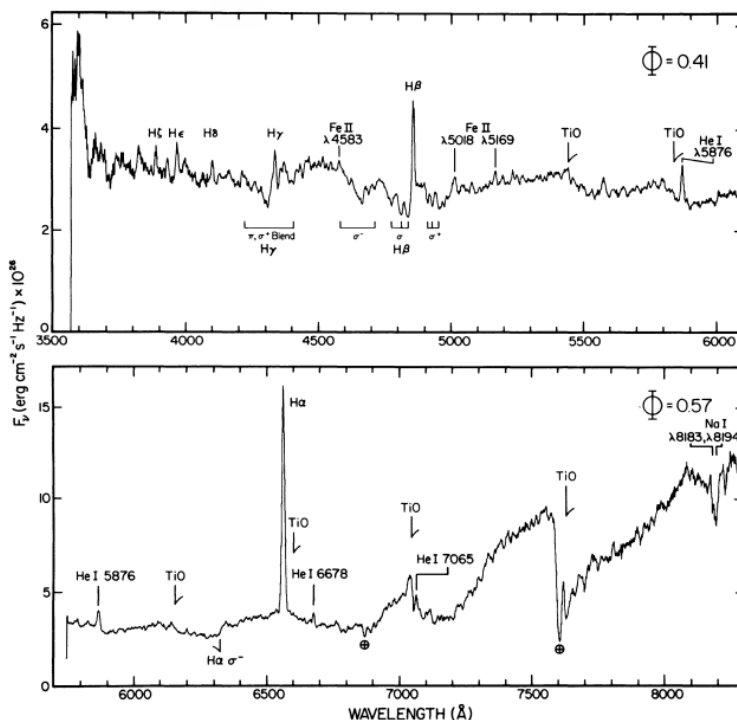
Schmidt et al. (1981) publicaram os primeiros dados de espectropolarimetria de AM Her, mostrados na figura 1.7. Durante as observações AM Her estava em estado de baixo brilho, com magnitude da ordem de $V \sim 15.3$ mag, o espectro apresenta forte polarização circular e desdobramento Zeeman nas linhas de absorção características de hidrogênio em campo magnético da ordem de 10 a 20 MG mostrados nas figuras 1.7 e 1.8. O espectro de fluxo total pode ser visto na figura 1.8. Ajustando um espectro de corpo negro, na região de 3500\AA a 5000\AA , encontraram temperaturas para a superfície da anã branca no intervalo de 13.000 K a 22.000 K. Determinaram que a secundária é uma estrela do tipo M4.5 - M5, uma vez que o espectro apresenta linhas de $\text{TiO } \lambda 6160\text{\AA}$, $\text{TiO } \lambda 7054\text{\AA}$ e $\text{Na I } \lambda 8190\text{\AA}$, características de uma estrela do tipo tardia.

Figura 1.7 - Espectropolarimetria de AM Her. Em cima, a polarização circular em porcentagem, no meio, o espectro de fluxo, e abaixo, o desdobramento Zeeman na série de Balmer.



Fonte: Schmidt et al. (1981).

Figura 1.8 - Espectro de AM Her destacando as principais linhas de emissão, absorção e componentes Zeeman.



Fonte: Schmidt et al. (1981).

No mesmo ano da publicação de Schmidt et al. (1981), Patterson and Price (1981) apresentam o espectro de AM Her também em estado de baixo brilho $V \sim 15$ mag para diferentes fases, mostrado na figura 1.9. Para a linha de emissão de H α , obtiveram velocidade radial de $K \sim 120 \pm 20$ km/s, e seu gráfico pode ser visto na figura 1.10. Hutchings et al. (1981) obtiveram velocidade radial de $K \sim 90$ km/s, como mostrado na figura 1.11.

Gansicke et al. (1995) atualizaram os dados de espectroscopia para AM Her, e obtiveram a mesma distância de $d = 91 \pm_{15}^{18}$ pc. Ajustando espectros de corpo negro na região de 1500 \AA a 3000 \AA , atribuíram a temperatura da superfície da anã branca de 24.000 K. Também ajustaram um espectro para a região de 4000 \AA a 9000 \AA , confirmando que a secundária é uma estrela do tipo M4+. O espectro com os melhores ajustes para ambas as regiões é mostrado na figura 1.12.

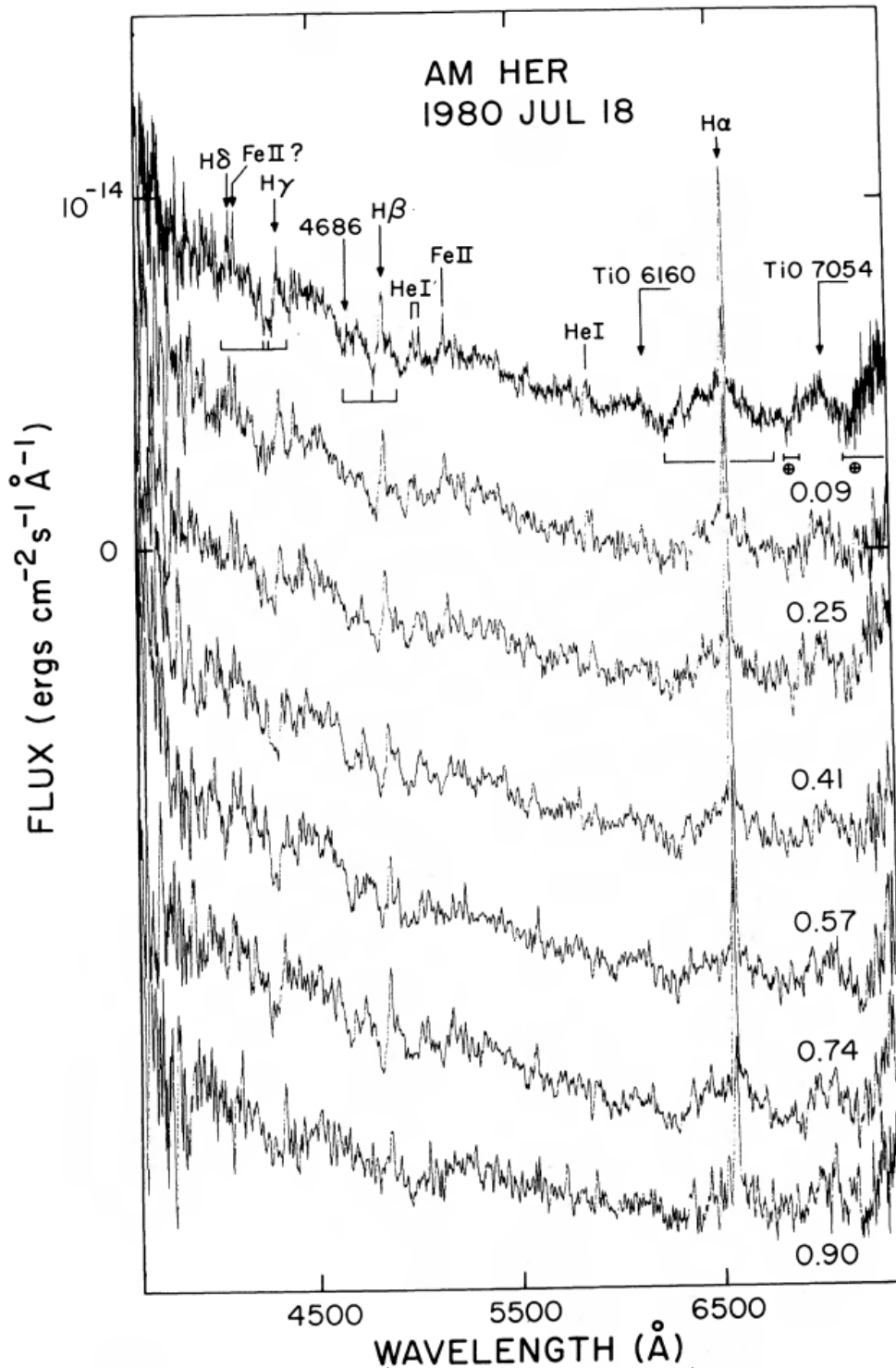
O espectro de AM Her em estado de alto brilho foi obtido por Schaich et al. (1992) com brilho do sistema em $V \sim 13$ mag. O espectro é mostrado na figura 1.13. A observação foi feita em julho de 1988, utilizando o espectrógrafo *Boller and Chivens*

com resolução de 16\AA localizado no Observatório do Calar Alto.

Os valores atualizados do campo magnético de AM Her são apresentados por [Bonnet-Bidaud et al. \(2000\)](#), que encontraram o valor de 12,5 MG para o desdobramento Zeeman nas linhas de absorção do hidrogênio para um espectro médio de AM Her em estado de baixo brilho.

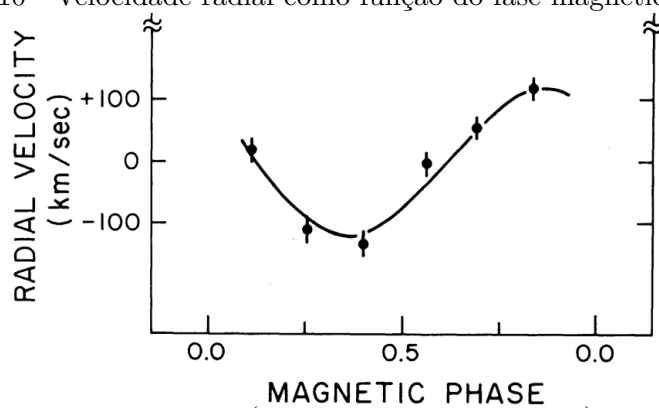
[Kafka et al. \(2005\)](#) observaram AM Her em estado de baixo brilho, $V \sim 15$ mag, e fizeram um análise das componentes na linha de $H\alpha$. Segundo os autores, a linha de emissão é composta por pelo menos três componentes, de modo que as velocidades radiais de cada uma delas coincidem com o movimento orbital da estrela secundária. Atribuem o pico central ao hemisfério interior iluminado da estrela secundária e os outros picos às estruturas coronais que conectam regiões ativas na estrela secundária. Os espectros obtidos na região de $H\alpha$ podem ser vistos na figura 1.14.

Figura 1.9 - Espectros de fluxo para AM Her em diferentes fases. O espectro médio é mostrado no topo da imagem destacando as principais linhas de emissão.



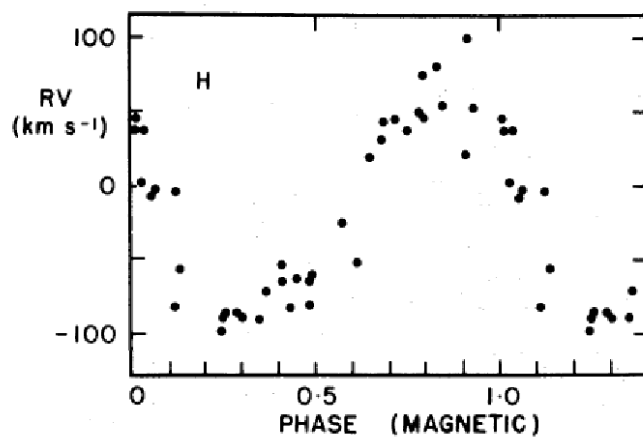
Fonte: (PATTERSON; PRICE, 1981).

Figura 1.10 - Velocidade radial como função do fase magnética na linha de $H\alpha$.



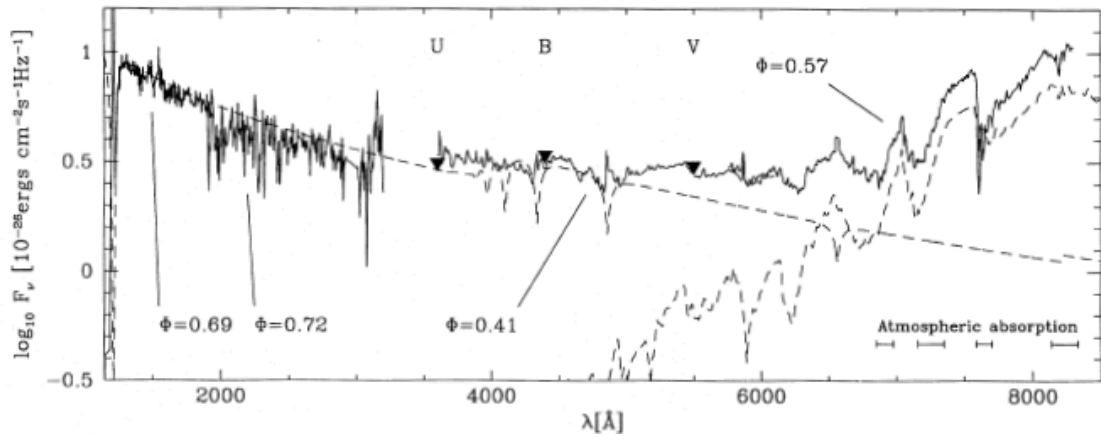
Fonte: (PATTERSON; PRICE, 1981).

Figura 1.11 - Velocidade radial como função do fase magnética na linha de $H\alpha$.



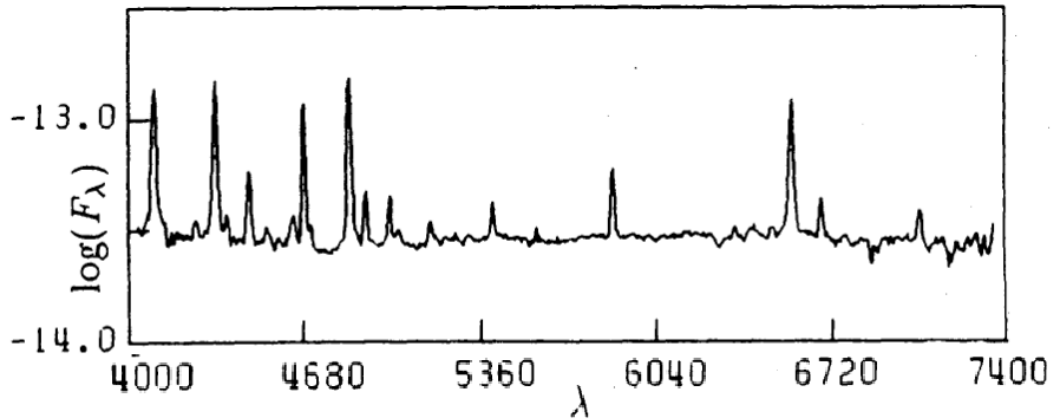
Fonte: (HUTCHINGS et al., 1981).

Figura 1.12 - Espectro de fluxo para AM Her ajustados com uma curva modelo de atmosfera de anã branca com temperatura de 24.000 K e com um espectro de uma estrela do tipo M4.



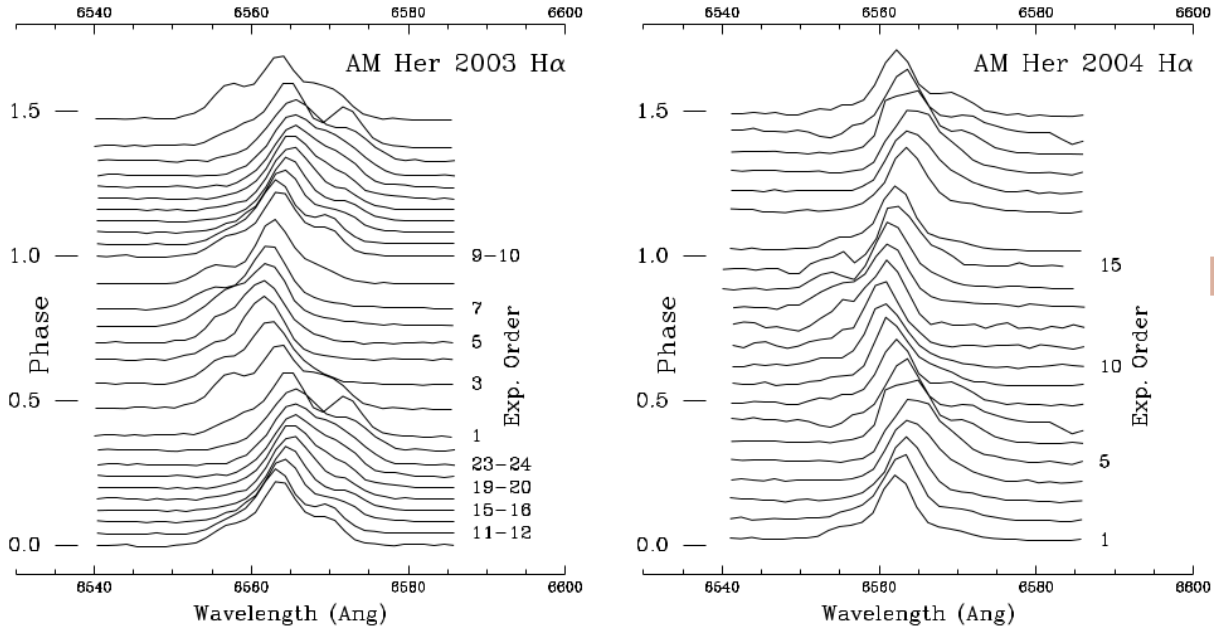
Fonte: (GANSICKE et al., 1995).

Figura 1.13 - Espectro de fluxo de AM Her na fase 0,97, em estado de alto brilho $V \sim 13$ mag.



Fonte: Schaich et al. (1992).

Figura 1.14 - Perfis de AM Her ao longo do ciclo orbital. Os perfis foram normalizados para uma amplitude comum para exibição. Esquerda: Observação com o espectrógrafo KPNO 2,1 m em 2003. Direita: Observação com o espectrógrafo WIYN 3,5 m em 2004.



Fonte: (KAFKA et al., 2005).

2 OBSERVAÇÃO E REDUÇÃO DOS DADOS

Este capítulo descreve a obtenção e a redução dos dados de espectropolarimetria de AM Her e de uma estrela padrão não-polarizada. Na seção 2.1 apresentamos o instrumento utilizado para as observações, o *Echelle Spectro Polarimetric Device for the Observation of Stars* (ESPaDOnS). As especificações das observações são mostradas na seção 2.2. A redução dos dados foi feita utilizando o programa *Open-source Pipeline for ESPaDOnS Reduction and Analysis* (OPERA), descrito na seção 2.3. Os espectros finais foram obtidos após a aplicação de filtros, descritos na seção 2.4. Para verificar a qualidade dos espectros obtidos, apresentamos o espectro de fluxo da padrão, mostrado na seção 2.5 comparando-o com o espectro de uma estrela do mesmo tipo espectral.

2.1 ESPaDOnS

O instrumento ESPaDOnS está instalado no telescópio *Canada France Hawaii Telescope* (CFHT), localizado na montanha Mauna Kea no Havaí, a uma altitude de 4204 metros. O ESPaDOnS é um espectropolarímetro de dispersão cruzada, do tipo Echelle, de alta resolução que opera na faixa do ultravioleta até o infravermelho próximo e inclui os módulos de calibração, guiagem e polarimetria (DONATI, 2003).

O ESPaDOnS é composto por duas unidades distintas, cada uma localizada em um lugar diferente em relação ao telescópio. A unidade Cassegrain inclui o módulo de calibração/apontamento e o módulo polarimétrico. A unidade de espectroscopia está instalada em uma sala termicamente e vibracionalmente estável e é alimentada pelas fibras ópticas da unidade Cassegrain.

O módulo de calibração/apontamento inclui:

- um corretor de dispersão atmosférica, composto por dois prismas separados girando independentemente. Cancela o efeito de refração diferencial atmosférica, que causa uma aberração cromática na imagem;
- uma câmera CCD compacta que recebe a luz diretamente da abertura do instrumento usada para guiar a estrela de interesse ou qualquer outra estrela presente no campo de visão;
- uma a roda de calibração a qual pode substituir o feixe estelar por vários tipos de luz de calibração para correções como a de *flat field*.

O polarímetro é composto por duas lâminas de meia onda rotacionais, uma lâmina de um quarto de onda fixa e um prisma de Wollaston. Duas imagens são formadas em cada uma das fibras com diâmetro de 1,6 segundo de arco. Essas duas imagens são utilizadas para calcular os parâmetros de Stokes do feixe incidente no instrumento.

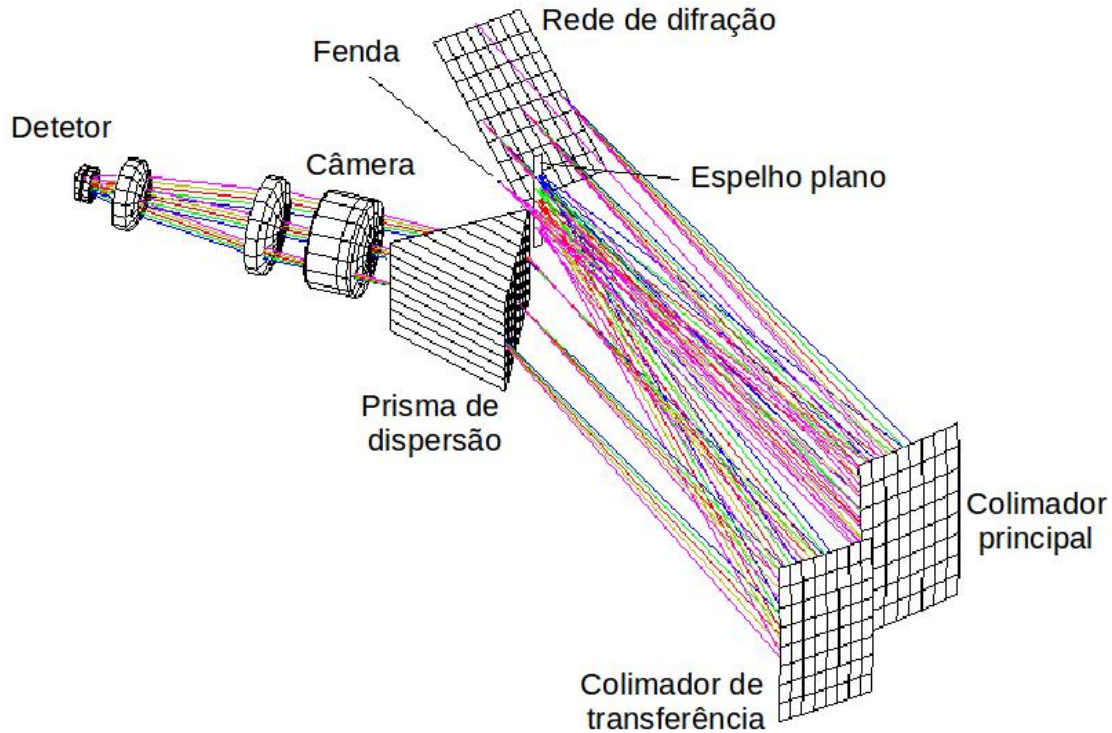
O módulo de duas fibras ópticas coleta os fótons na saída do polarímetro (uma fibra por imagem) e transmite-os para o *image slicer* do tipo Bowen-Walraven ajustável na entrada do espectrógrafo.

O espectrógrafo possui dupla abertura de 190 milímetros, dois colimadores refletores, uma rede de difração, uma câmara dióptrica, um prisma de dispersão cruzada composto por dois prismas idênticos e um detector CCD com 2000×4500 pixels quadrados de $13,5 \mu\text{m}$. Conforme ilustrado na figura 2.1, a luz que vem do *image slicer* vai para o colimador principal e segue o feixe colimado para a rede de difração, onde ocorre dispersão da luz em diferentes comprimentos de onda, mas ainda com todas as ordens sobrepostas. Em seguida, o feixe volta para o colimador principal e segue para o espelho plano, que reflete o feixe para o colimador de transferência. Desta maneira, o feixe segue até o prisma de dispersão cruzada, onde as ordens são separadas, e, em seguida, a câmera projeta a imagem do espectro no detector.

O ESPaDOnS possui três modos de operação: apenas objeto, objeto + céu e modo polarimétrico. No modo apenas objeto, a luz é enviada ao espectrógrafo por uma única fibra. No modo estrela + céu, o espectro é obtido simultaneamente através de duas fibras. Para o modo polarimétrico, o espectrógrafo também é alimentado por duas fibras, no entanto, a luz em ambas as fibras é proveniente de uma única fonte, mas cada fibra apresenta uma polarização diferente. Uma observação tomada no modo polarimétrico ocorre como uma sequência de quatro exposições, que são usadas em conjunto para determinar a polarização.

Os dados obtidos pelo ESPaDOnS para cada exposição são armazenados em um arquivo de imagem FITS, contendo uma extensão de cabeçalho e uma unidade de dados. Na unidade de cabeçalho estão contidas as informações relativas ao estado do instrumento, formato dos dados e condições físicas e ambientais no momento da exposição. A unidade de dados contém uma matriz de pixels, onde cada pixel é um registro digital da energia transferida pela luz incidente na área do detector durante a exposição.

Figura 2.1 - Esquema do caminho óptico do módulo espectroscópico do ESPaDOnS.



Fonte: (JACOBS, 2017).

2.1.1 Medidas de polarização com o ESPaDOnS

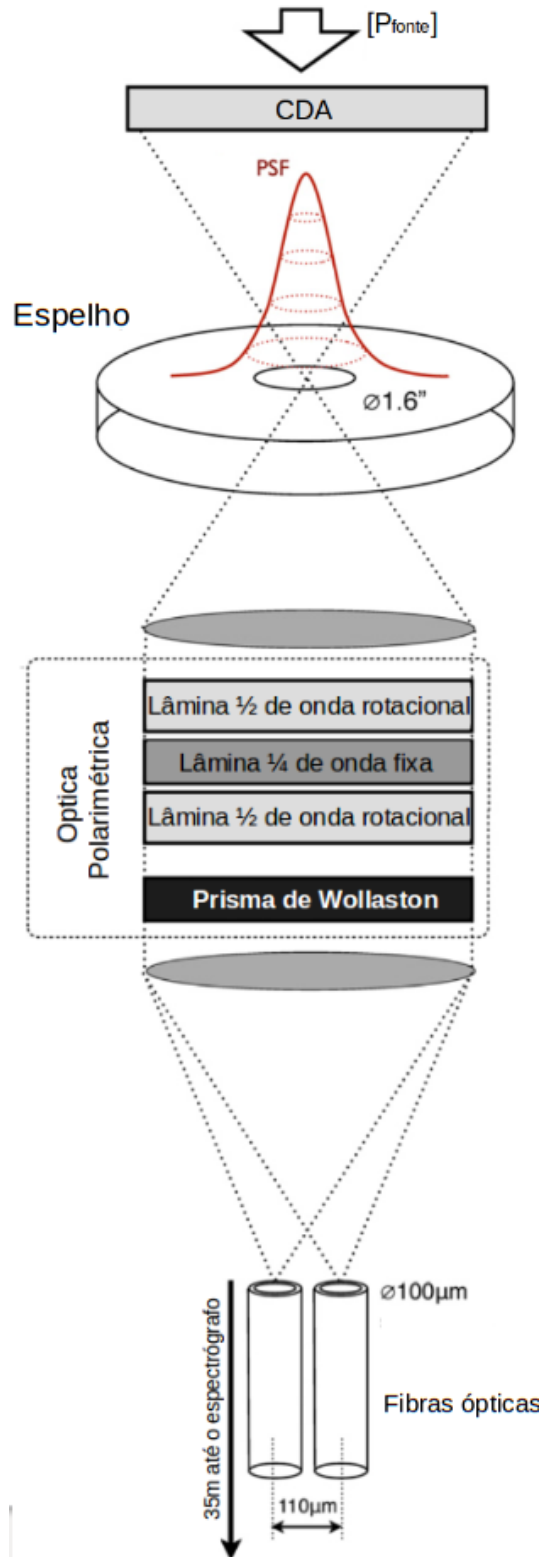
As propriedades de polarização de um feixe de luz são descritas pelos parâmetros de Stokes e pelas matrizes de Mueller para cada instrumento. Um resumo de tais propriedades pode ser visto no apêndice A.1, no qual constam as matrizes de Mueller específicas do ESPaDOnS.

De acordo com a página inicial do ESPaDOnS, o espectropolarímetro não seria um bom instrumento para medir polarização no contínuo (MANSET, 2017). Possíveis erros na medida dos Parâmetros de Stokes e as perdas de luz sobre a entrada das fibras ópticas são fatores que, segundo a equipe técnica do ESPaDOnS, ocasionam uma polarização instrumental muito alta. Em consequência, o pipeline que foi rotineiramente aplicado aos dados ESPaDOnS nos últimos anos, Libre ESPrIT (DONATI2 et al., 1997), realiza principalmente a detecção de linhas com a remoção do contínuo em fluxo e polarimetria. Entretanto, resultados recentes de nosso grupo (PEREYRA et al., 2015) demonstram que o ESPaDOnS fornece medidas robustas de polarização circular no contínuo, com dados reduzidos utilizando o código *Open source Pipeline*

for ESPaDOnS Reduction and Analysis v1.0.1229 (OPERA).

A figura 2.2 ilustra o caminho óptico da unidade polarimétrica do ESPaDOnS. O feixe de luz proveniente do objeto observado chega primeiramente no corretor de

Figura 2.2 - Caminho óptico da unidade polarimétrica do ESPaDONs.



Fonte: Adaptado de Pereyra et al. (2015).

dispersão atmosférica (CDA). O feixe converge para o orifício do espelho com diâmetro de 1,6 segundos de arco. Em seguida passa pelo retardador, composto por duas lâminas de meia onda rotacionais e uma de um quarto de onda fixa, que introduzem uma diferença de fase entre as componentes ordinária e extraordinária do feixe. Na sequência o feixe passa pelo prisma de Wollaston que separa o feixe nas duas componentes, captadas pelas fibras ópticas as quais levam a informação até o espectrógrafo.

Dois dos elementos ópticos podem adicionar uma polarização instrumental à medida. São eles o corretor de dispersão atmosférica e as lâminas de meia-onda e de um quarto de onda. O corretor de dispersão atmosférica pode apresentar birrefringência, introduzindo uma polarização espúria nas observações. Outra fonte de erro seria uma imprecisão no posicionamento das lâminas rotativas.

De acordo com a página do ESPaDOnS (ESPADONS, 2017), existem outros dois fatores que impedem uma medida confiável de polarização no contínuo:

- a) A polarização instrumental pode ocorrer quando a luz entra na abertura do espelho, de modo que uma iluminação não uniforme das bordas do furo causa uma polarização. Esse efeito depende da posição da estrela em relação ao centro do orifício de entrada e na extensão da fonte. Conforme mencionado na página inicial ESPaDOnS (MANSET, 2017), esse efeito pode ser minimizado, melhorando a orientação e aumentando o tempo de integração.
- b) A medida da polarização baseia-se na diferença de intensidade dos 2 feixes produzidas pelo prisma de Wollaston as quais são registradas simultaneamente. Cada feixe segue por uma fibra até o espectrógrafo. Portanto, se houver variações ou erros na guiagem de modo que o objeto se mova em relação ao orifício de abertura, a imagem também varia na entrada das fibras, ou seja, uma fibra pode perder mais luz que a outra. Essa diferença de intensidade pode gerar uma polarização, mesmo que o objeto não emita luz polarizada.

Os efeitos acima variam suavemente com comprimento de onda. Portanto, se o observador estiver interessado em uma pequena porção dos espectros, por exemplo, estudos de linhas espectrais, o contínuo de polarização pode ser subtraído e qualquer polarização instrumental também será removida. Essa é abordagem padrão do

observatório com relação aos dados do ESPaDOnS e que está implícita na redução com o software LIBRE-ESPRIT.

2.2 Observação

Os espectros de fluxo e polarização de AM Her foram obtidos no dia 28 de agosto de 2015. As observações foram feitas no modo fila num total de 4,5h, tempo suficiente para observar um ciclo completo de AM Her ($P_{orb} = 3,09h$) e observar ainda a estrela padrão. A tabela 2.1 apresenta o total de espectros e o tempo de integração para cada imagem.

Tabela 2.1 - Dados da observação

Objeto	$T_{int}(s)$	Dia Juliano Modificado	Massa de ar	Parâmetro Stokes
AM Her	611.2	57262.3382927	1.261	V
AM Her	611.2	57262.3461370	1.285	V
AM Her	611.2	57262.3539828	1.313	V
AM Her	611.2	57262.3618259	1.343	V
AM Her	611.2	57262.3698687	1.378	V
AM Her	611.2	57262.3776998	1.417	V
AM Her	611.2	57262.3855454	1.460	V
AM Her	611.2	57262.3933884	1.508	V
AM Her	611.2	57262.4015496	1.564	V
AM Her	611.2	57262.4093973	1.625	V
AM Her	611.2	57262.4173417	1.693	V
AM Her	611.2	57262.4251840	1.769	V
AM Her	611.2	57262.4334403	1.861	V
AM Her	611.2	57262.4412852	1.958	V
AM Her	611.2	57262.4491266	2.070	V
AM Her	611.2	57262.4569637	2.199	V
HD202573	80.0	57262.4682736	1.137	V
HD202573	80.0	57262.4699711	1.143	V
HD202573	80.0	57262.4716679	1.150	V
HD202573	80.0	57262.4733567	1.156	V
HD202573	80.0	57262.4750458	1.162	Q
HD202573	80.0	57262.4767346	1.169	Q
HD202573	80.0	57262.4784330	1.176	Q
HD202573	80.0	57262.4801223	1.183	Q
HD202573	80.0	57262.4818099	1.190	U
HD202573	80.0	57262.4835021	1.198	U
HD202573	80.0	57262.4851996	1.206	U
HD202573	80.0	57262.4868891	1.213	U

Foram obtidos 16 espectros de fluxo de AM Her, cada um com tempo de integração de 611,2 segundos. As observações em polarimetria foram feitas no modo de Polarimetria Circular (Parâmetro de Stokes V), com quatro posições para cada medida.

Para HD202573, a estrela padrão não polarizada observada, foram obtidos 12 espectros de fluxo e medidas de polarização circular (Parâmetro de Stokes V) e linear (Parâmetro de Stokes Q e U). O tempo de integração foi de 80 segundos para cada espectro.

O projeto inicialmente previa mais dois turnos de observação similares, de AM Her e outras estrelas padrão polarizadas, entretanto, a não renovação do contrato entre Brasil e CFHT impediu a realização das medidas.

Na data da observação, 28 de agosto de 2015, AM Her estava em estado de alto brilho, com magnitude da ordem de $V \sim 13$ mag, como mostra a figura 2.3.

2.3 Redução

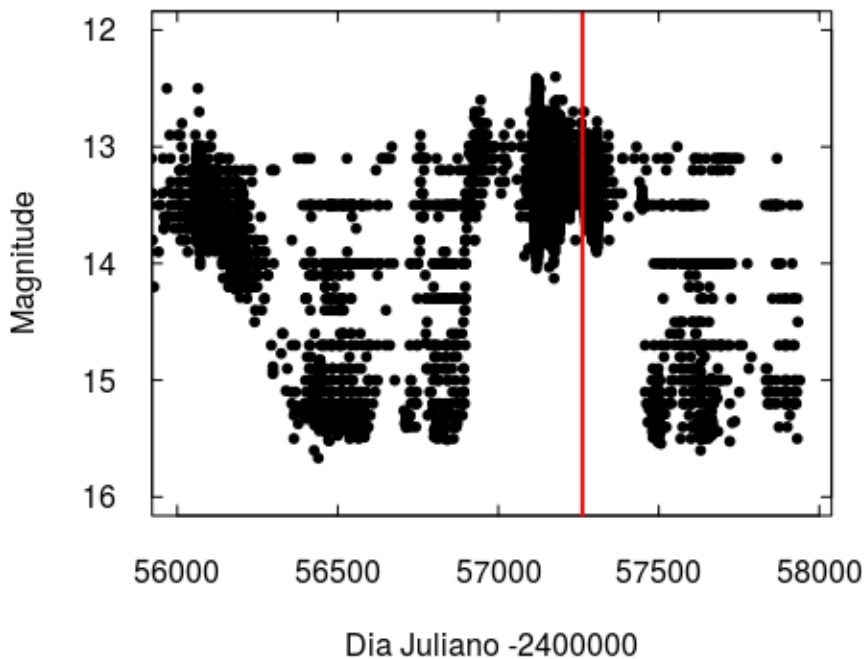
A redução dos dados foi feita utilizando o código OPERA v1.0.1229 (*Open source Pipeline for ESPaDOnS Reduction and Analysis*) (OPERA3, 2017), instalado no sistema operacional Linux. O OPERA consiste em um pacote de software utilizado para reduzir os dados de espectropolarimetria do ESPaDOnS (MARTIOLI et al., 2012). O pacote padrão de redução do ESPaDOnS é o Libre-Sprit (DONATI2 et al., 1997), porém, ele subtrai automaticamente o contínuo de polarização. Neste trabalho, nós adotamos uma estratégia diferente, usamos o software OPERA que não subtrai o contínuo da polarização.

Mesmo que o OPERA tenha sido inicialmente desenvolvido para reduzir os dados da ESPaDOnS, o código é suficientemente flexível para reduzir dados para uma variedade de instrumentos similares.

As imagens utilizadas no processo de redução se dividem em duas categorias: imagens de calibração e imagens científicas. As imagens de calibração são imagens obtidas com fontes conhecidas de luz para fornecer uma referência para efeitos instrumentais e outros externos. As imagens de ciência são as exposições do objeto astronômico.

As imagens de calibração foram tomadas na noite de observação. Para ESPaDOnS, os dados de calibração consistem em quatro tipos de exposições: *bias*, *flat field*, imagens de lâmpadas de calibração e uma de alinhamento.

Figura 2.3 - Curva de luz de AM Her para a banda do visível utilizando dados públicos da *American Association of Variable Star Observers* (AAVSO) (KAFKA, 2017). A data de observação, Dia Juliano 2457262, está em destaque com a linha vermelha.



Fonte: Produzido pelo autor.

A imagem de *bias* consiste em uma exposição com tempo de integração mínimo. São usadas para determinar o ruído e incluir no cálculo da incerteza. O nível de *bias* é então subtraído dos dados.

São necessárias de 20 a 40 imagens de *flat field*, com iluminação contínua composta a partir de 2 lâmpadas halogêneas com filtros azul e vermelho e tempo de exposição entre 2 e 4 segundos, suficiente para obter um fluxo significativo sem saturação no CCD. As exposições de *flat field* também permitem determinar os limites das ordens espectrais.

A imagem de comparação é feita a partir da exposição de uma lâmpada de referência que produz um espectro contendo linhas de comprimento de onda conhecido ao longo de toda a faixa espectral coberta pelo espectrógrafo. Dessa maneira se constrói uma função de transformação de pixel para comprimento de onda para todo o CCD,

calibrando o instrumento. São utilizadas como referência as lâmpadas de gás de tório-argônio (Th-Ar).

São produzidas imagens medianas tanto de *bias*, quanto de *flat-field*. A subtração pelo *bias* é feita diretamente na extração do espectro, pois as incertezas são propagadas no momento da subtração. A divisão pelo *flat-field* ocorre somente depois da extração, ou seja, divide-se o espectro 1-D de ciência pelo espectro 1-D do *flat-field* normalizado. Realizamos testes e dessa forma a remoção de franjas é mais eficiente, além do ruído ser menor do que se dividirmos a imagem antes da extração. A conversão de pixel para comprimento de onda também é feita no espectro extraído, onde primeiramente medimos a posição das linhas de Th-Ar, as quais são identificadas em um atlas, depois ajustamos um polinômio para gerar a conversão.

A imagem de alinhamento (Fabry-Perot) é utilizada para medir o ângulo da pseudo-fenda, ou seja, como a extração de cada elemento espectral é feita por uma abertura retangular inclinada, medimos o ângulo de inclinação desse retângulo nas imagens de alinhamento. Essa medida também pode ser feita nas imagens de Th-Ar, porém, as imagens de alinhamento fornecem medidas mais precisas.

Para o modo polarimétrico, o código usa uma sequência de quatro exposições para determinar os dados referentes a um parâmetro de Stokes. Desta maneira, na primeira redução obtivemos apenas 4 espectros polarimétricos, no qual cada espectro utilizava a sequência de quatro espectros de fluxo na ordem de observação. A fim de se obter todos os 16 espectros de polarimetria referente a todas as fases orbitais de AM Her, foi necessário realizar mais três reduções com o OPERA alterando os quatro espectros de fluxo escolhidos para cada espectro de polarimetria.

2.4 Tratamento dos Dados

Para uma melhor análise dos dados, foram aplicados dois diferentes filtros em cada um dos espectros de fluxo e de polarização obtidos pelo OPERA, tanto nos espectros de AM Her, quanto nos espectros da estrela padrão.

O primeiro filtro consiste numa remoção de valores baseando-se na razão sinal-ruído (SNR). O programa elimina todos os pontos onde a razão sinal-ruído é menor que um limite determinado pelo usuário, ou seja, se o usuário determina que os dados utilizados na análise devem ter $SNR > 20$, o filtro calcula para cada comprimento de onda a razão sinal-ruído do fluxo ou polarização e elimina os dados com $SNR < 20$.

O segundo filtro calcula ou a média, ou a mediana, tanto para os valores de comprimento de onda, quanto de fluxo de todos os pontos no intervalo de comprimento de onda definido, aplicando uma binagem nos pontos.

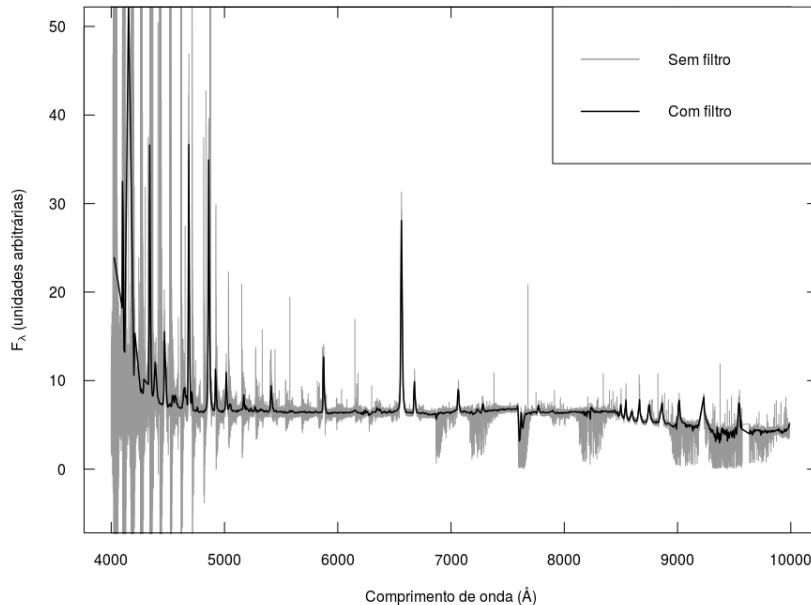
Os parâmetros finais dos filtros para a obtenção dos espectros foram determinados após vários testes, a fim de verificar os melhores valores para que a resolução e análise dos dados não fosse comprometida. Os valores escolhidos para o corte em SNR e intervalo de comprimento de onda para binagem são mostrados na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Valores utilizados nos filtros para cada tipo de espectro e objeto.

	Fluxo		Polarimetria	
	SNR	$\Delta\lambda(\text{\AA})$	SNR	$\Delta\lambda(\text{\AA})$
HD 202573	30	5	-	0,5
AM Her	10	5	-	0,5

A figura 2.4 mostra a comparação dos dados com e sem os filtros para um dos espectros de fluxo de AM Her.

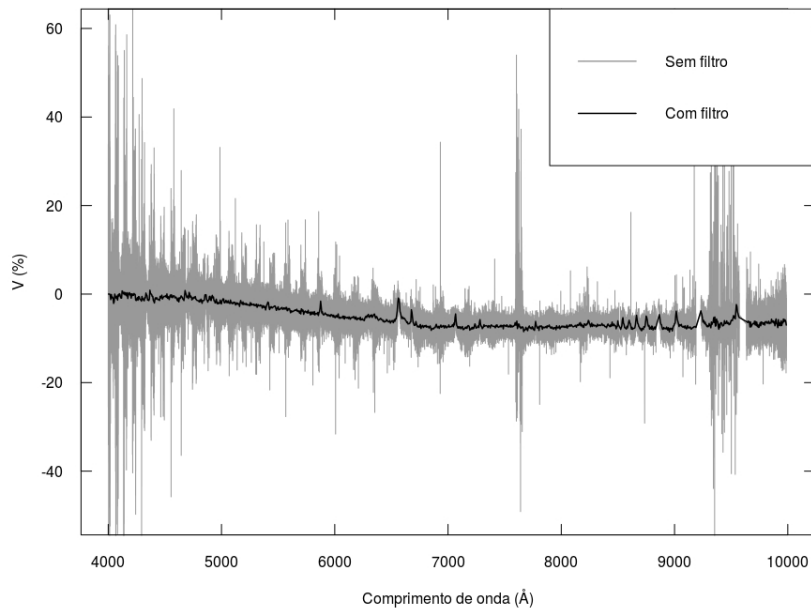
Figura 2.4 - Comparação entre um dos espectros de fluxo de AM Her com (preto) e sem (cinza) a aplicação dos filtros.



Fonte: Produzido pelo autor.

Nos espectros de polarimetria tanto da padrão como de AM Her não foram utilizados os filtros de corte na razão sinal-ruído. Os valores de polarização flutuam muito próximos de zero, assim, somente a binagem seria necessária para obter os gráficos para análise. Em ambos os objetos a binagem foi feita no intervalo de 0,5 nm. A figura 2.5 mostra a comparação dos dados com e sem filtro para um dos espectros de polarimetria de AM Her.

Figura 2.5 - Comparação entre um dos espectros de polarimetria de AM Her com (preto) e sem (cinza) a aplicação dos filtros.



Fonte: Produzido pelo autor.

2.5 Qualidade da calibração em fluxo

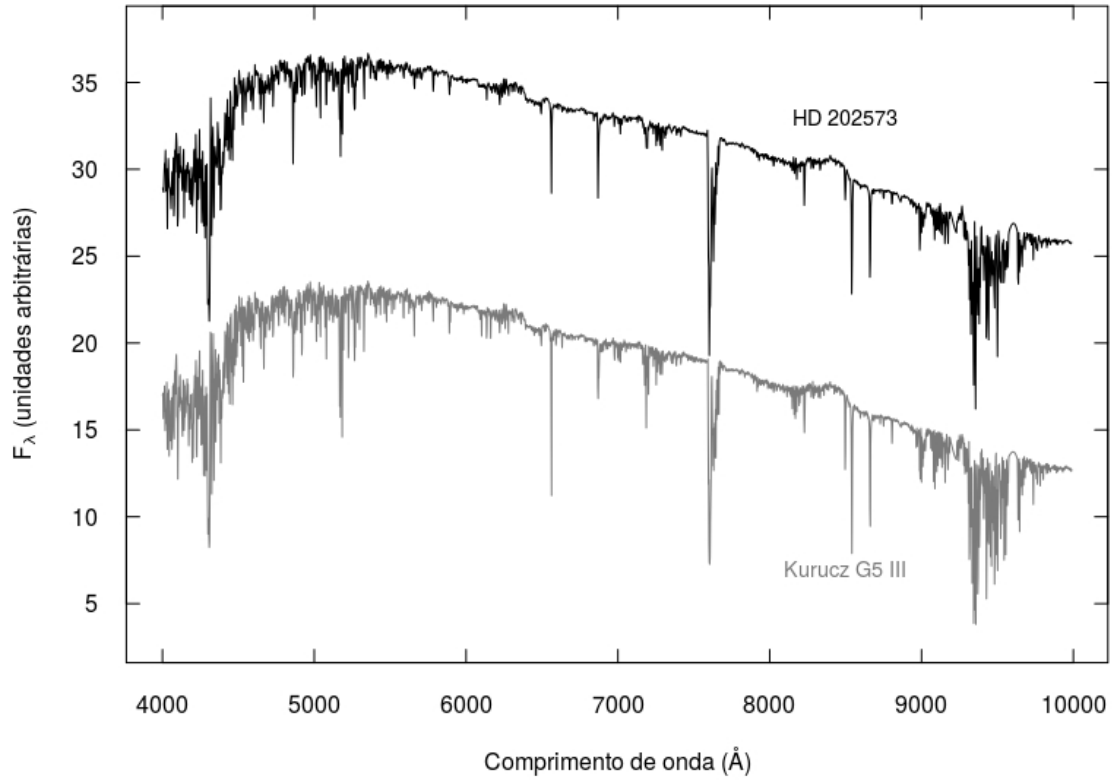
Os espectros de fluxo da estrela padrão, HD 202573, foram usados para atestar a qualidade da redução feita pelo OPERA.

HD 202573 é uma estrela do tipo espectral G5III. Seu espectro final é mostrado na figura 2.6, juntamente com o espectro sintético de uma estrela do mesmo tipo espectral, com temperatura efetiva de 5150 K, obtida a partir do catálogo *Kurucz 1993 Atlas of Model Atmospheres* (KURUCZ, 2017).

É possível observar a concordância na formas dos espectros, atestando uma boa calibração relativa, na qual o espectro da estrela padrão encontra-se deslocado em

15 unidades.

Figura 2.6 - Espectro de fluxo de HD 202573 em preto deslocado em 15 unidades acima do espectro de uma estrela do mesmo tipo espectral, G5III, obtido com o Atlas *Kurucz*.



Fonte: (KURUCZ, 2017).

3 POLARIZAÇÃO INSTRUMENTAL

Os dados de polarimetria obtidos para a estrela padrão HD 202573 foram utilizados para determinar a polarização instrumental do ESPaDOnS, já que esta é uma estrela não polarizada. Neste capítulo são mostradas as análises e os valores encontrados para a polarização instrumental do ESPaDOnS para os três parâmetros de Stokes.

O resultado da polarimetria obtidos para a estrela padrão não polarizada HD 202573 são mostrados na figura 3.1. Os espectros possuem resolução de 5\AA . A tabela 3.1 apresenta a média e o erro em torno de um fit linear para cada parâmetro de Stokes em todo o espectro (4000\AA a 10000\AA).

Figura 3.1 - Polarização observada da estrela padrão não polarizada para os três parâmetros de Stokes V, Q (deslocado em 0,5%) e U (deslocado em 1%) . Os espectros tem resolução de 5\AA .

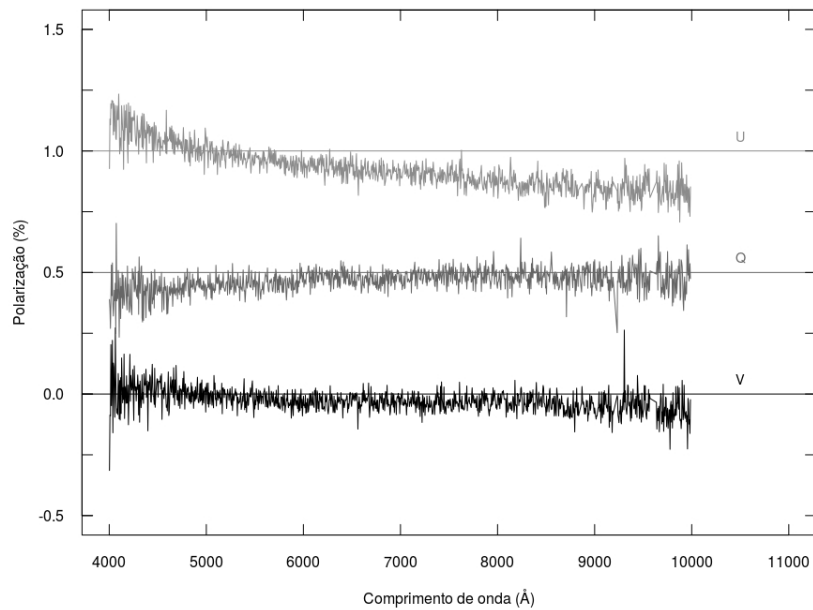


Tabela 3.1 - Valores médios de V(%), Q(%), e U(%), e seus respectivos erros.

Stokes	P(%)	σ_p (%)
U	-0,074	0,016
Q	-0,033	0,015
V	-0,028	0,015

A análise a seguir assume que a polarização medida para HD 202573 representa a polarização instrumental do ESPaDOnS. De modo geral, a figura 3.1 e a tabela 3.1 mostram que não há evidência que algum parâmetro de Stokes apresente um valor instrumental maior que 0,2%. A polarização circular apresenta-se consistente com zero e com dispersão da ordem de 0,2% para comprimentos de onda menores que 5500Å. Para valores mais vermelhos, ela é levemente negativa, mas com dispersão menor. O parâmetro Q tem um comportamento de certo modo complementar a V, sendo muito próximo de zero para comprimentos de onda maiores que 6000Å e levemente negativa para o azul. Já o parâmetro U tem valores sempre menores em módulo que 0,2%, mas decrescem de maneira monotônica deste 0,2% no limite azul até -0,2% no limite vermelho.

Os valores da polarização instrumental encontrados estão consistentes com os obtidos por [Pereyra et al. \(2015\)](#). Para os 11 objetos estudados, a polarização circular não é maior que 0,3% em módulo para tempos de integração maiores que 20 s. Portanto, afirmam que o ESPaDOnS possui polarização circular instrumental nos limites de 0,2%-0,3%.

[Pereyra et al. \(2015\)](#) sugerem que a substituição do corretor de dispersão atmosférica pode ter diminuído a polarização espúria do ESPaDOnS, já que a análise de dados coletados entre junho de 2006 e outubro de 2008 apresentam maior dispersão do que os dados obtidos com o corretor de dispersão atmosférica mais recente.

4 ESPECTROPOLARIMETRIA DE AM HER

As observações em espectropolarimetria de AM Her são apresentadas neste capítulo. Os espectros de fluxo encontram-se na seção 4.1, na qual estão os 16 espectros, o espectro de fluxo médio, a curva de velocidade radial, obtida a partir do período orbital e uma análise das linhas de emissão e absorção, estudo da linha de emissão de $H\alpha$. Na seção 4.2 são apresentados os 16 espectros de polarização, a depolarização na linha de $H\alpha$ e a comparação da polarização circular no contínuo de AM Her com a polarização instrumental do ESPaDOnS, analisada anteriormente no capítulo 3. Com os dados de fluxo e polarimetria foi calculado o fluxo polarizado para cada espectro, apresentados na seção 4.3. Na última seção 4.4, apresentamos os diagramas de fases obtidas para fluxo, polarimetria e fluxo polarizado.

4.1 Espectros de fluxo

Os 16 espectros de fluxo de AM Her observados ao longo do período orbital foram obtidos após as reduções descritas no capítulo 2. O ESPaDOnS disponibiliza os dados do dia juliano heliocêntrico (HJD) com precisão de cinco casas decimais para cada observação. Utilizamos a efeméride calculada por Dai et al. (2013), mostrada na equação 4.1, para calcular a fase AM Her em cada espectro.

$$T_i = \text{HJD } 2.446.603,401658(99) \pm 0,1289271368(17)E \quad (4.1)$$

Na figura 4.1 são apresentados todos os 16 espectros de fluxo para cada fase. A resolução final dos espectros é de 5\AA . Utilizando a task *scombine* no IRAF que faz a combinação dos espectros pela média, obtemos o espectro médio mostrado na figura 4.2, no qual são destacadas as principais linhas de emissão e absorção.

Figura 4.1 - Os 16 espectros de fluxo para AM Her obtidos ao longo de um período orbital, deslocados entre si de 50 unidades. A fase orbital é mostrada à direita em cima de seus respectivos espectros.

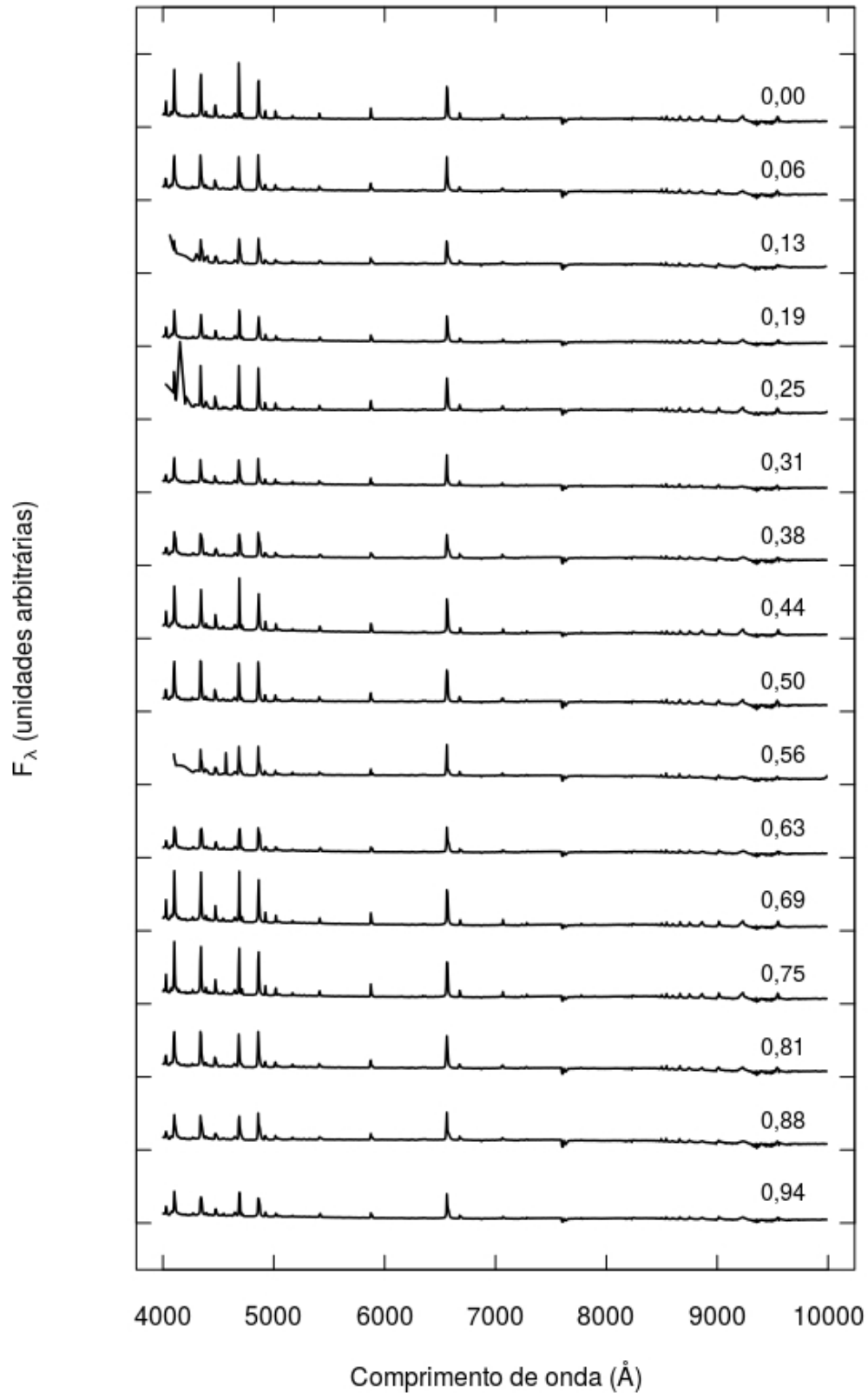
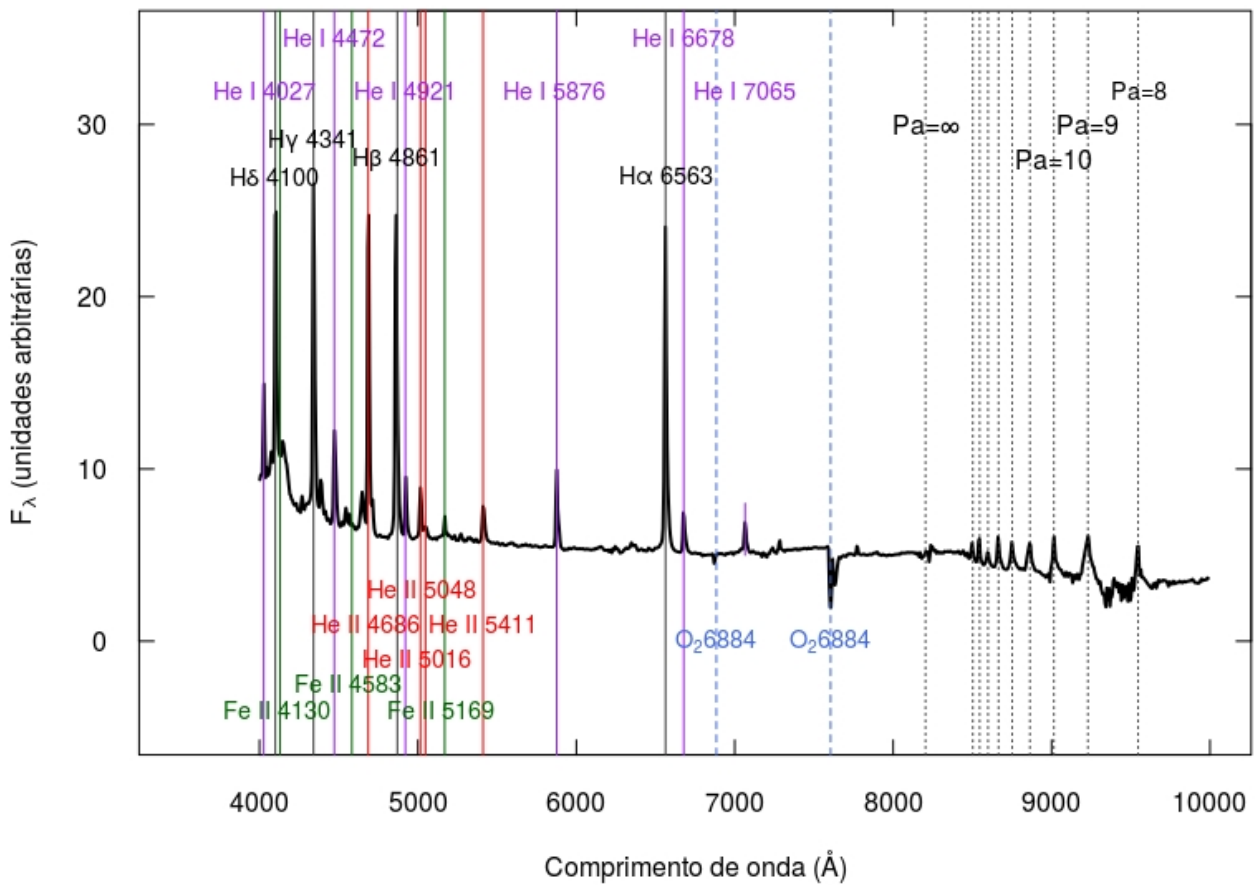


Figura 4.2 - Espectro de fluxo médio de AM Her com as principais linhas de emissão, absorção e telúricas.



As linhas de emissão que mais se destacam no espectro de AM Her são as linhas de emissão da série de Balmer, $H\alpha$ λ 6563Å, $H\beta$ λ 4861Å, $H\gamma$ λ 4341Å e $H\delta$ λ 4100Å, que são produzidas em um região com presença de hidrogênio ionizado, as quais representam regiões com abundância em hidrogênio e de altas temperaturas. As linhas de emissão nos comprimentos de onda entre 8000Å e 10000Å são a Série de Paschen para o hidrogênio.

O espectro apresenta um grande número de linhas de emissão do hélio. A presença de linhas de emissão do HeII (hélio uma vez ionizado) indica regiões quentes o suficiente para que o hélio esteja em parte duas vezes ionizados, no caso das polares, a região pós choque.

A presença de linhas de emissão de Fe II λ 4130Å, Fe II λ 4583Å e Fe II λ 5169Å foram primeiramente observadas por Hutchings et al. (1981). O autor sugere que

são provenientes de uma região de ionização e densidade mais baixa do que as que geralmente estão presentes em variáveis cataclísmicas. Gansicke et al. (1995) afirmam que a presença de metais pesados ocorre na superfície da anã branca aquecida por radiação.

As bandas moleculares de O II $\lambda 6884\text{\AA}$ e O II $\lambda 7605\text{\AA}$ são linhas telúricas, provenientes da absorção da radiação estelar pela atmosfera terrestre.

4.1.1 Velocidade Radial

Para determinar a velocidade radial de AM Her, foram feitas análises do deslocamento das linhas de H α $\lambda 6563\text{\AA}$ e He I $\lambda 5876\text{\AA}$, entretanto, somente a linha de H α , apresentou valores significativos de deslocamento ao longo do período orbital. A determinação da velocidade radial foi feita a partir de um programa em Python, utilizando a função *curve_fit* que ajusta os dados em uma única função, no nosso caso, escolhemos uma gaussiana, dentro do intervalo de comprimento de onda escolhido pelo usuário. O programa entrega o valor do dia juliano heliocêntrico, o comprimento de onda central, amplitude e sigma da gaussiana ajustada. Com a fase já determinada, foi possível calcular a velocidade radial, V_R , para cada fase utilizando a equação 4.1.1. A tabela 4.1 apresenta os respectivos valores.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{V_R}{c}$$

(4.2)

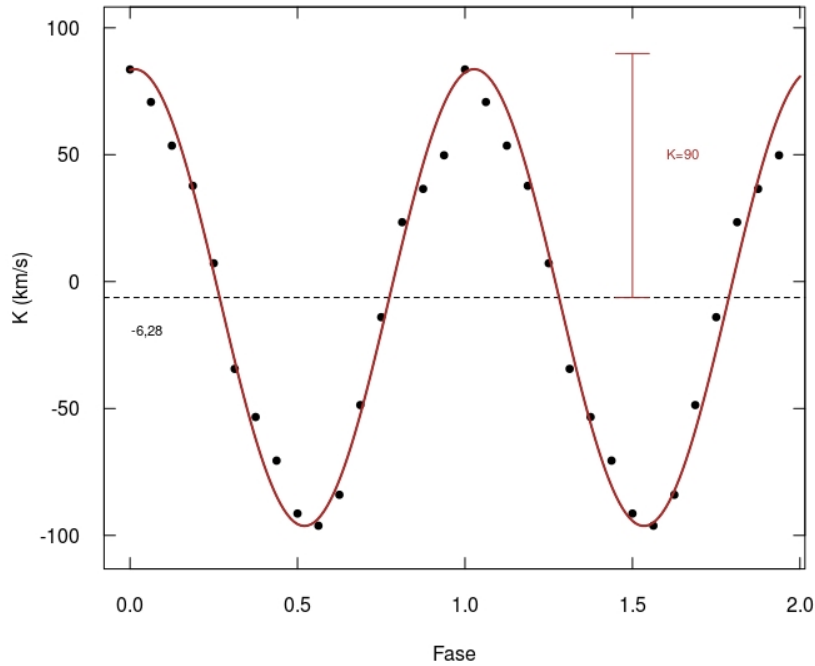
$\Delta\lambda$: diferença entre o valor encontrado para comprimento de onda central da gaussiana e o comprimento real da linha de emissão escolhida ($\lambda_0 = 6563\text{\AA}$).

O valor da semi-amplitude K encontrado foi de $K \approx 90$ km/s, uma estimativa pela média do módulo dos valores mínimos e máximos encontrados. O gráfico da velocidade radial é mostrado na figura 4.3 juntamente com uma curva seno ajustada, para valores de amplitude de 90 e período 3,7.

Tabela 4.1 - Valores de dia juliano heliocêntrico, o comprimento de onda central, amplitude e sigma da gaussiana ajustada, fase e semi-amplitude K para cada espectro de AM Her.

HJD	$\lambda_{central}(\text{\AA})$	Amplitude	$\sigma(\text{\AA})$	Fase	$V_R(km/s)$
2457262,8752	6562,7579	865,3973	0,33	0	83,59
2457262,8830	6562,0427	744,9521	0,34	0,06	70,76
2457262,8593	6563,7609	1508,4943	0,33	0,13	36,53
2457262,8671	6563,3080	1033,9665	0,31	0,19	49,78
2457262,9068	6561,3206	1130,1947	0,23	0,25	7,23
2457262,9147	6561,1785	1512,6554	0,22	0,31	-34,37
2457262,8908	6561,8662	916,6438	0,32	0,38	53,57
2457262,8987	6561,3041	1245,5526	0,32	0,44	37,75
2457262,9387	6560,7413	605,0875	0,27	0,5	-91,36
2457262,9466	6560,6484	969,6693	0,23	0,56	-96,16
2457262,9226	6561,1101	1190,3150	0,26	0,63	-53,34
2457262,9305	6561,4030	700,4634	0,27	0,69	-70,52
2457262,8436	6564,2269	1693,6309	0,43	0,75	-14,00
2457262,8514	6563,9554	1948,9021	0,37	0,81	23,42
2457262,9544	6561,7422	1335,4694	0,25	0,88	-83,98
2457262,9623	6563,2529	1313,2550	0,34	0,94	-48,62

Figura 4.3 - Curva de velocidade radial obtida a partir da linha de emissão de $H\alpha$, com valores da semi-amplitude $K \approx 90$ km/s, ajustada uma curva seno com amplitude 90 e período 3,7 em vermelho.



Na literatura, encontram-se dados de velocidade radial para a linha de $H\alpha$ para AM Her, mas em estado de baixo brilho. Nos estudos de Hutchings et al. (1981), a semi-amplitude da velocidade radial encontrada foi de $K \approx 90$ km/s, mostrado no gráfico da figura 1.11 na página 16, e Patterson and Price (1981) encontraram velocidade de $K \approx 120 \pm 20$ km/s, mostrado na figura 1.10, página 16.

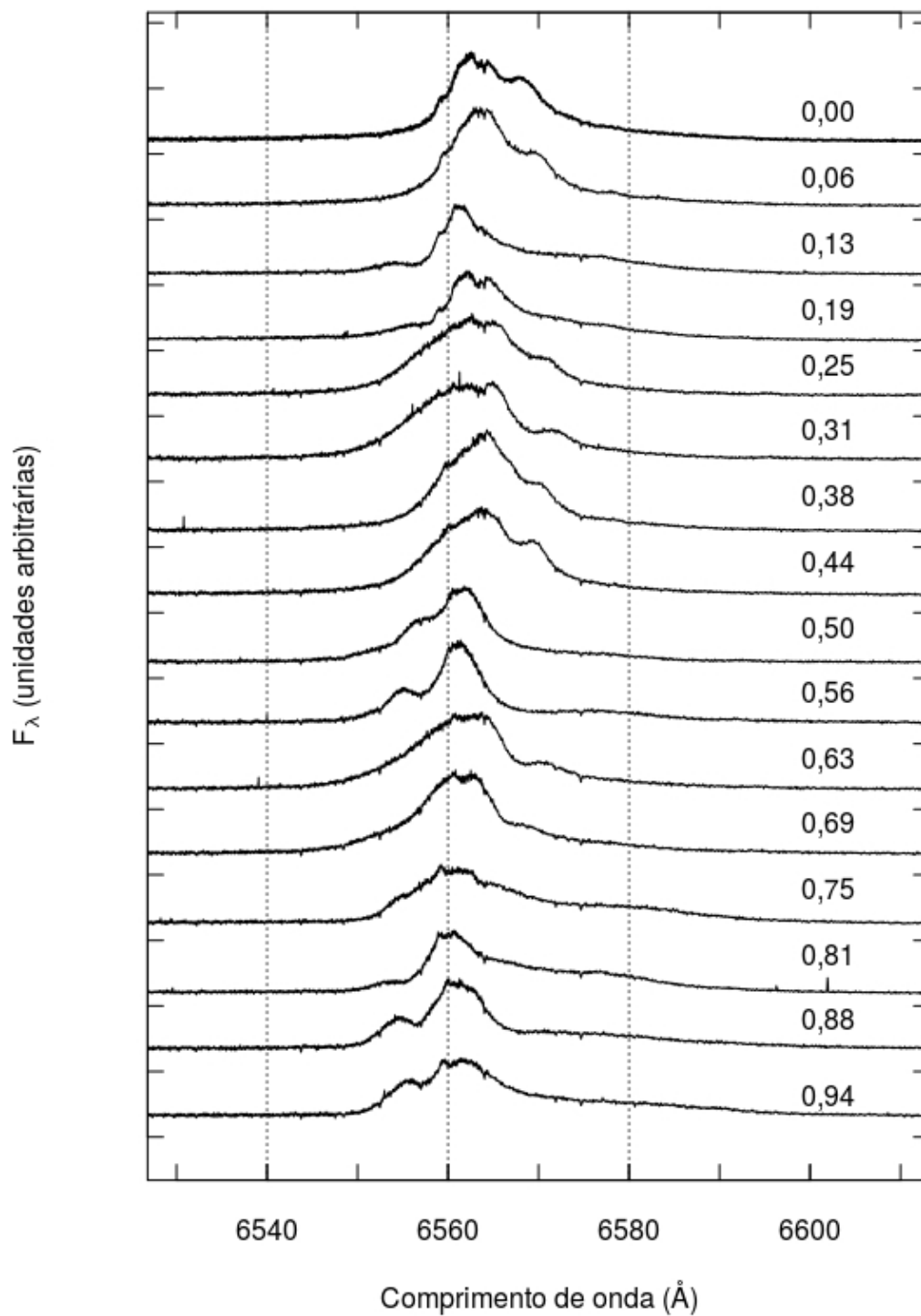
Uma possível explicação da diferença nos valores da semi-amplitude K é que Patterson and Price (1981) ajustaram um perfil gaussiano para somente 70% da linha de emissão, ou seja, o contínuo foi definido acima do contínuo verdadeiro por 0,3 vezes para remover possíveis efeitos de contaminação por outras possíveis componentes da linha de emissão. A diferença nos valores ocorre principalmente porque a linha de emissão $H\alpha$ possui várias componentes. Nossos espectros de alta resolução mostram estruturas que não são facilmente identificáveis em espectros de baixa resolução (como os da figura 1.14). O estudo para a linha de emissão é mostrado na seção seguinte.

4.1.2 Perfil $H\alpha$

A figura 4.4 mostra o perfil da linha de $H\alpha$ para os 16 espectros. Nesta seção, utilizamos os espectros binados em 1\AA para uma melhor descrição dos perfis. É evidente a variação de perfil ao longo do período orbital. A linha de emissão de $H\alpha$ é composta por várias componentes.

Os nossos espectros são os primeiros com resolução alta o suficiente para resolver várias componentes na linha de $H\alpha$ em estado alto. O perfil de $H\alpha$ na fase 0,56 mostra claramente ao menos duas componentes centradas em 6555\AA e 6562\AA . Já o perfil na fase 0,00 é bem mais complexo. Do azul para o vermelho, podem existir: (i) uma componente fraca e estreita em torno de 6558\AA ; (ii) duas componentes intensas e estreitas em 6562\AA e 6565\AA ; (iii) uma componente mais larga e fraca centrada em torno de 6768\AA ; (iv) e uma componente muito larga responsável pela asa vermelha da linha. Uma decomposição de cada perfil nas diferentes componentes é uma perspectiva importante de continuação deste trabalho e pode resultar em resultados interessantes sobre a origem das linhas de emissão em polares.

Figura 4.4 - Espectros de fluxo com uma aproximação na linha de $H\alpha$ 6563Å. É possível notar que a linha é composta por componentes que variam ao longo do período orbital. As linhas de emissão nas fases 0,0; 0,06; 0,75; 0,81; 0,88 e 0,94 apresentam pelo menos 4 componentes.

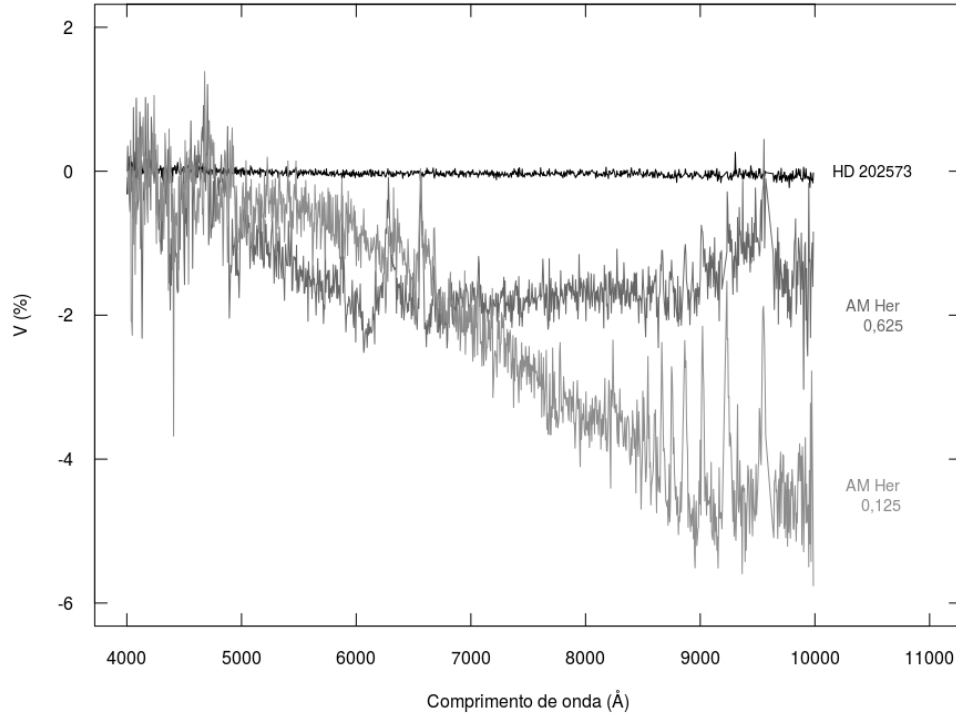


No trabalho de [Kafka et al. \(2005\)](#), baseado em dados nos quais AM Her estava em estado de baixo brilho, foram identificadas três componentes na linha de $H\alpha$, que os autores atribuem a atividades coronais da secundária. Nossos espectros apresentam linhas com largura muito próximas dos obtidos por [Kafka et al. \(2005\)](#), principalmente comparando com os dados de 2003. A modulação ao longo do período também é semelhante aos nossos dados. Isso de certo modo dificulta a interpretação dessas componentes como devidas à atividade coronal da secundária, já que a linha parece possuir perfil semelhante em estado alto quando se espera que a estrutura de acreção domine a emissão.

4.2 Espectros de polarimetria

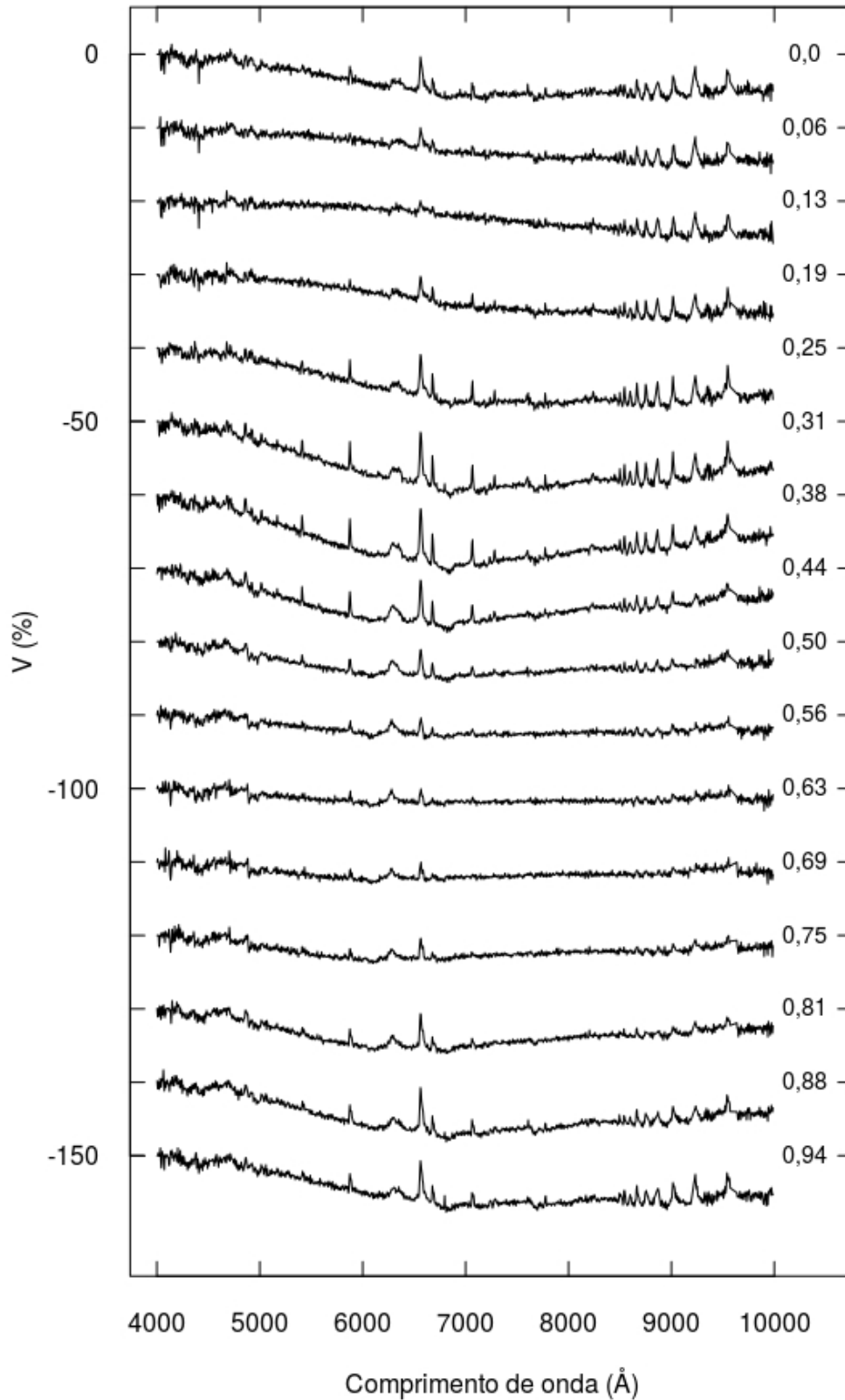
Foi possível determinar a polarização circular no contínuo de AM Her pois, como mostrado no capítulo 3, a polarização instrumental do ESPaDOnS não interfere na medida para valores em módulo de polarização maiores de 0,2%. A figura 4.5 apresenta uma comparação da polarização instrumental do ESPaDOnS, correspondente à polarização da estrela não polarizada HD 202573, com duas medidas de polarização no contínuo com menores valores de $V(\%)$. A polarização instrumental não altera as medidas da polarização circular no contínuo de AM Her.

Figura 4.5 - Comparação entre a polarização circular da padrão não polarizada, correspondente à polarização instrumental do ESPaDOnS, e de duas fases distintas de AM Her, as quais apresentam menor valor em módulo de polarização circular, demonstrando a capacidade do instrumento em medir polarização circular no contínuo.



Os 16 espectros de polarimetria de AM Her ao longo do período orbital são mostrados na figura 4.6, destacando a fase de cada um. Os espectros de polarimetria possuem resolução de 5\AA . A polarização de AM Her é negativa em todo o espectro. Os maiores valores em módulo, 9%, ocorrem nas fases 0,31 e 0,38. O máximo (em módulo) da polarização no contínuo varia lentamente em função da fase. Em torno da fase 0,63 ocorre em torno de 7000\AA , e se torna mais vermelha em fases próximas a 0,1. Nas linhas de emissão, vemos uma clara depolarização que varia ao longo do ciclo.

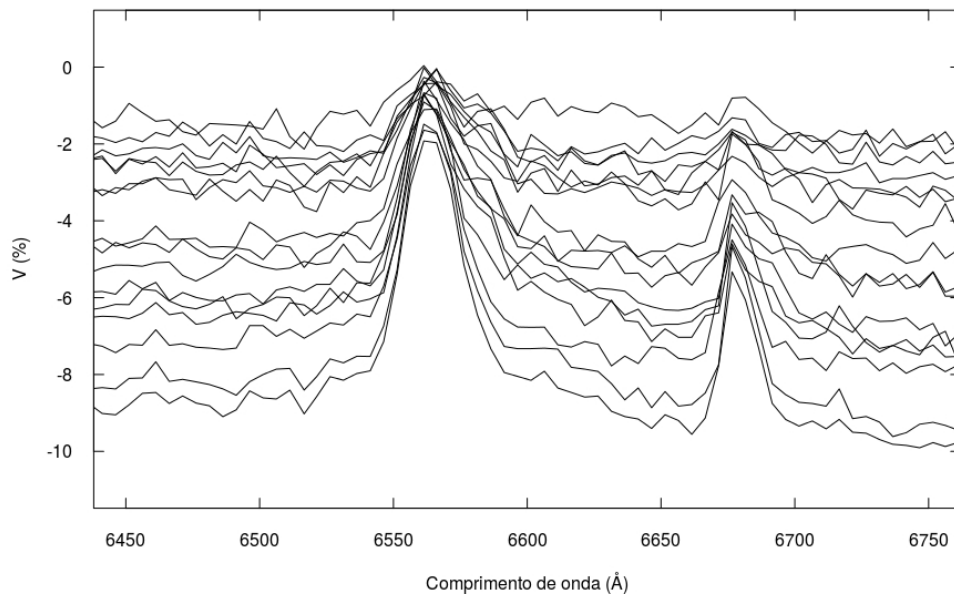
Figura 4.6 - Os 16 espectros de polarimetria de AM Her ao longo de um ciclo orbital, deslocados em 10 unidades negativas com as respectivas fases à direita de cada espectro.



Nos espectros vemos a variação da intensidade das linhas de Paschen em concordância com as linhas de He I, de modo que nas fases onde são mais intensas, estamos vendo a coluna de acreção.

Uma característica notável é a depolarização de todos os espectros na linha de $H\alpha$, mostrada na figura 4.7. A depolarização ocorre quando o módulo da polarização diminui. É um efeito estudado e discutido em sua maioria para estrelas quentes (PEREYRA3 et al.,), a fim de determinar a localização relativa das fontes de luz polarizada e não polarizada dentro do sistema.

Figura 4.7 - Os 16 espectros de polarimetria de AM Her na região de $H\alpha$ e He I, sem deslocamento, destacando a depolarização na linha de $H\alpha$.



4.3 Fluxo polarizado

O fluxo polarizado é também uma quantidade importante, pois pode isolar componentes de emissão. Devido aos filtros aplicados, os espectros de fluxo e polarização não possuem exatamente os mesmos comprimentos de onda. Assim, para calcular o fluxo polarizado foi preciso fazer uma interpolação nos espectros de fluxo e polarimetria, mas sem alterar a resolução do espectro que foi mantida em 5\AA .

Considerando duas fontes de emissão, nas quais ambas tem fluxo F e uma delas

emite luz polarizada P e a outra não, temos que o fluxo polarizado F_p será:

$$F_p = F_{total} \cdot P_{total} \rightarrow P_{total} = \frac{F_p}{F_{total}}$$

Para duas fontes 1 e 2:

$$\begin{cases} F_1 \\ P_1 \end{cases} \rightarrow F_{p1} = P_1 \cdot F_1$$

$$\begin{cases} F_2 \\ P_2 = 0 \end{cases} \rightarrow F_{p2} = P_2 \cdot F_2 = 0$$

$$P_{total} = \frac{F_p}{F_{total}} = \frac{F_{p1} + F_{p2}}{F_1 + F_2} = \frac{F_{p1}}{F_1 + F_2}$$

$$F_p = F_{total} \cdot P_{total} = (F_1 + F_2) \cdot P_{total}$$

$$F_p = (F_1 + F_2) \frac{P_1 \cdot F_1}{F_1 + F_2} = P_1 \cdot F_1$$

$$F_p = P_1 \cdot F_1$$

O fluxo polarizado, portanto, apresenta a forma espectral da componente polarizada somente. O espectro final corresponde ao contínuo da polarização. Como visto anteriormente no capítulo 1, radiação ciclotrônica proveniente da coluna de acreção é responsável pela maior parte da emissão no contínuo óptico. Portanto, ao analisarmos o contínuo do fluxo polarizado estamos analisando a coluna de acreção.

Foram calculados os 16 espectros de fluxo polarizado ao longo do ciclo orbital mostrados na figura 4.8. Uma comparação do fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para os 16 espectros obtidos pode ser visto nas figuras 4.9 à 4.24. É nítido a suavização da curva em relação as linhas de emissão e absorção, com exceção das linhas telúricas, pois não são formadas por nenhuma das componentes de AM Her.

O espectro de fluxo da figura 1.8 na pagina 13 apresenta a componente σ - correspondente ao efeito Zeeman de $H\alpha$ em 6300Å. Também mostra as bandas absorção de TiO em 6160Å, 7054Å e 7600Å. Nos nossos espectros de polarização e fluxo polarizado vemos uma componente muito intensa entre 6000Å e 6500Å, principalmente nas fases entre 0,44 a 0,81. Essa componente intensa está muito próxima da componente Zeeman encontrada por Schmidt et al. (1981) para campo magnético entre 10 MG e 20 MG e da banda de TiO em 6160Å. Nos nossos espectros as bandas de TiO não são evidentes, nem mesmo na região do vermelho onde são mais claramente vistas nos espectros de Schmidt et al. (1981). Portanto, essa componente possivelmente é o σ - proveniente do desdobramento Zeeman para o hidrogênio em campo magnético entre 10 MG e 20 MG, com posição no espectro coincidente com as observadas por Schmidt et al. (1981).

Figura 4.8 - Fluxo polarizado ao longo do ciclo orbital em unidades arbitrárias de fluxo. A fase é mostrada a direita de cada espectro.

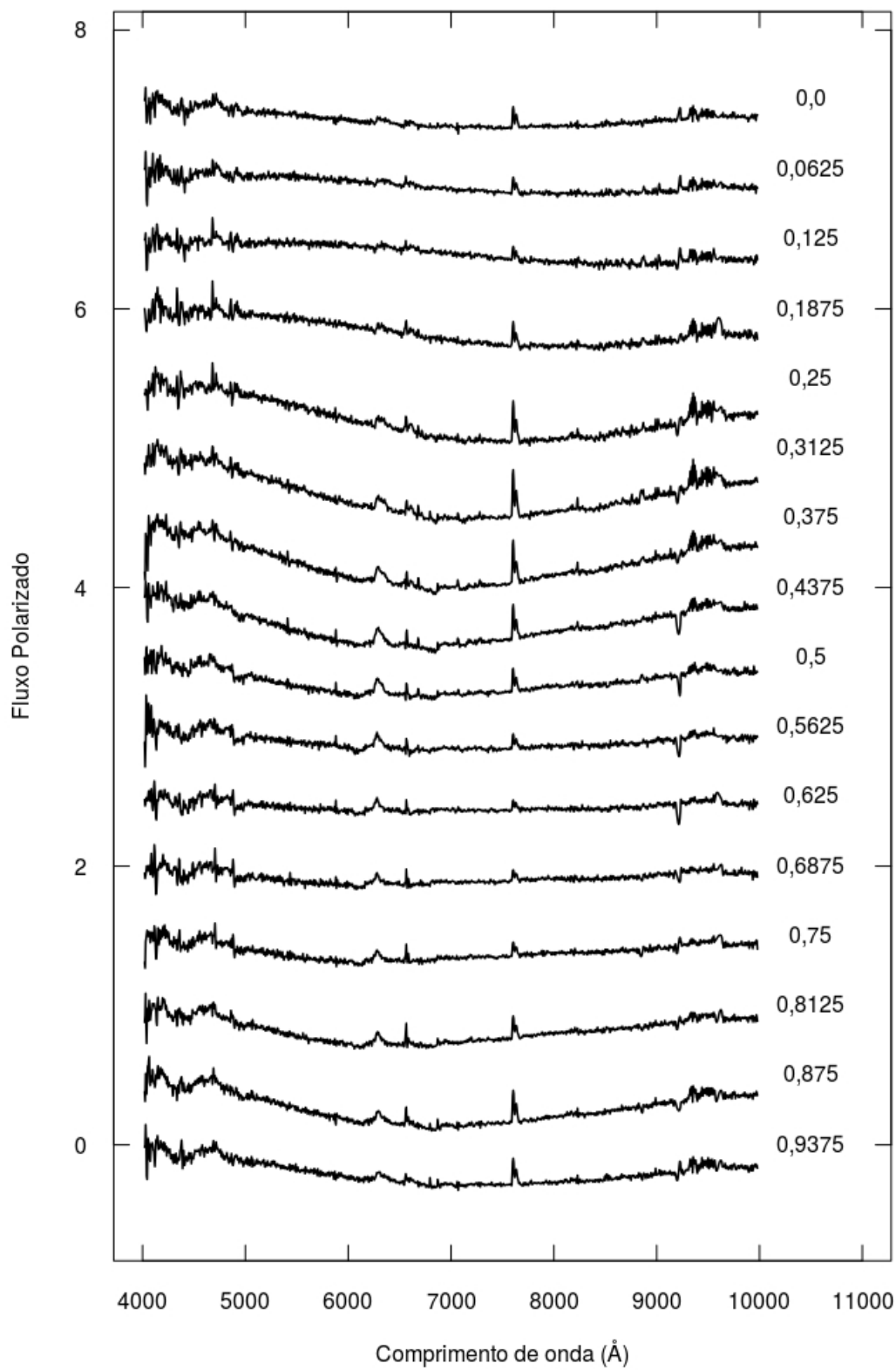


Figura 4.9 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,0.

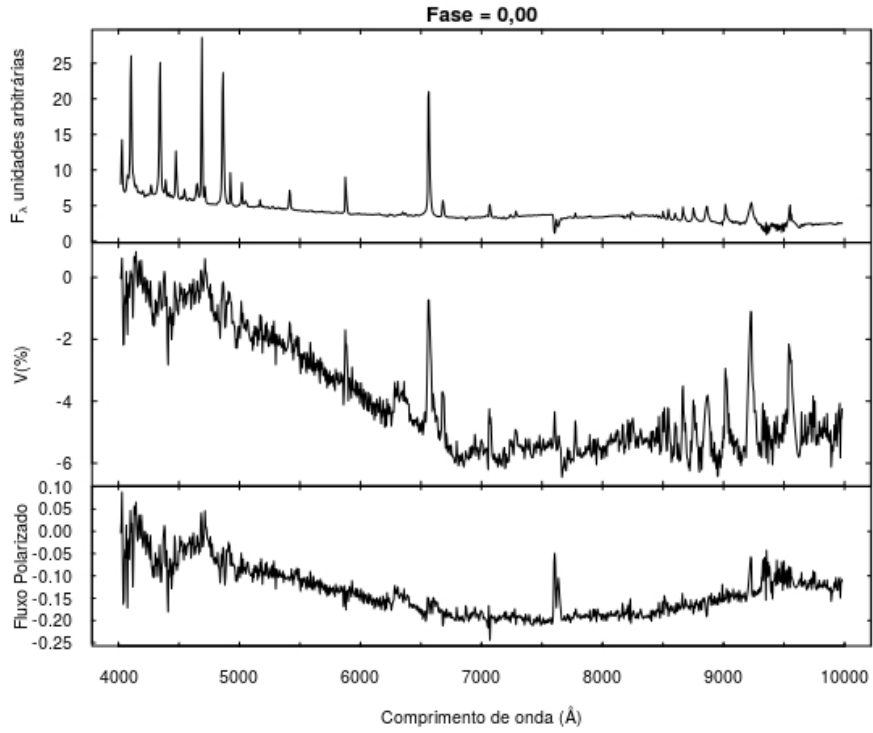


Figura 4.10 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,06.

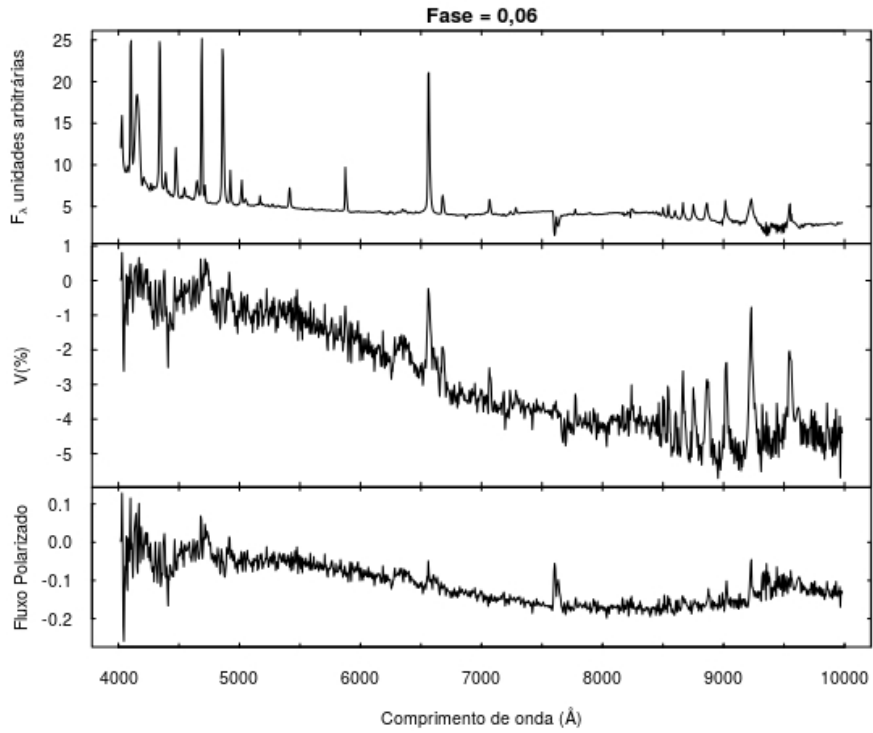


Figura 4.11 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,13.

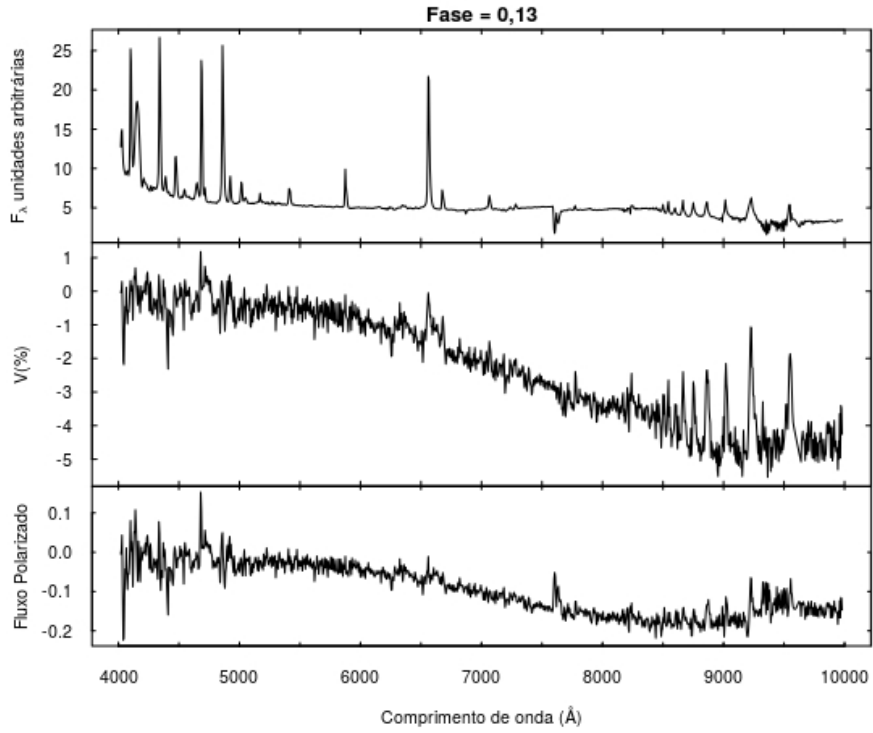


Figura 4.12 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,19.

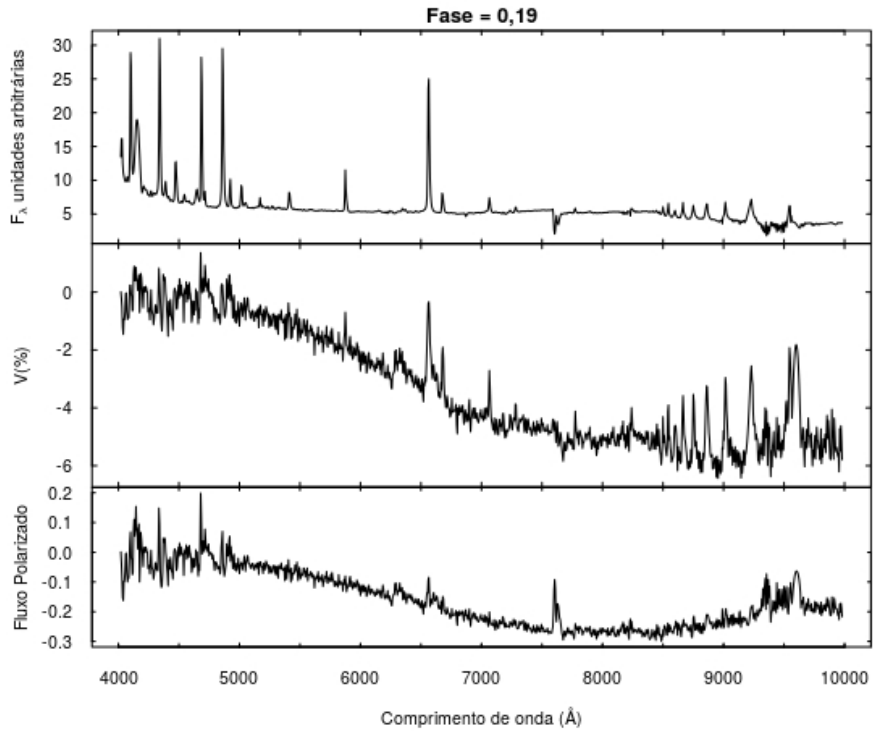


Figura 4.13 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,25.

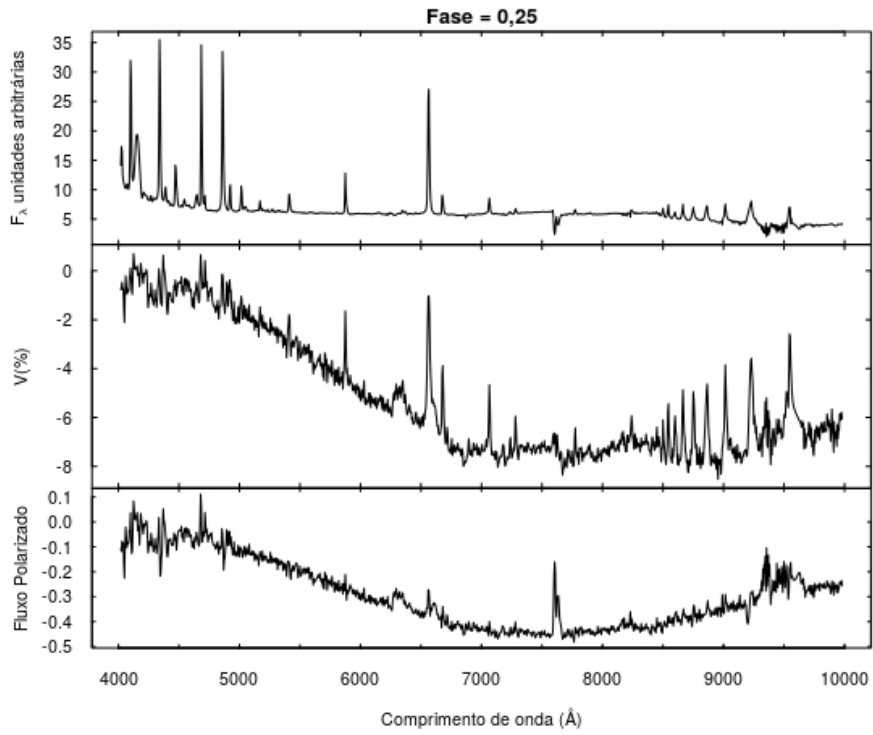


Figura 4.14 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,31.

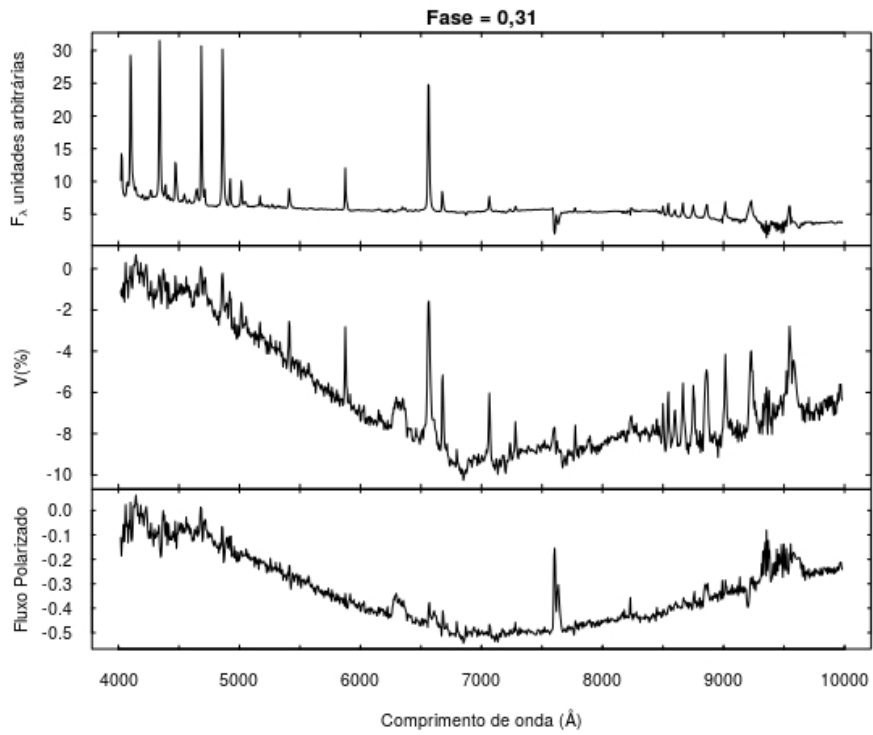


Figura 4.15 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,38.

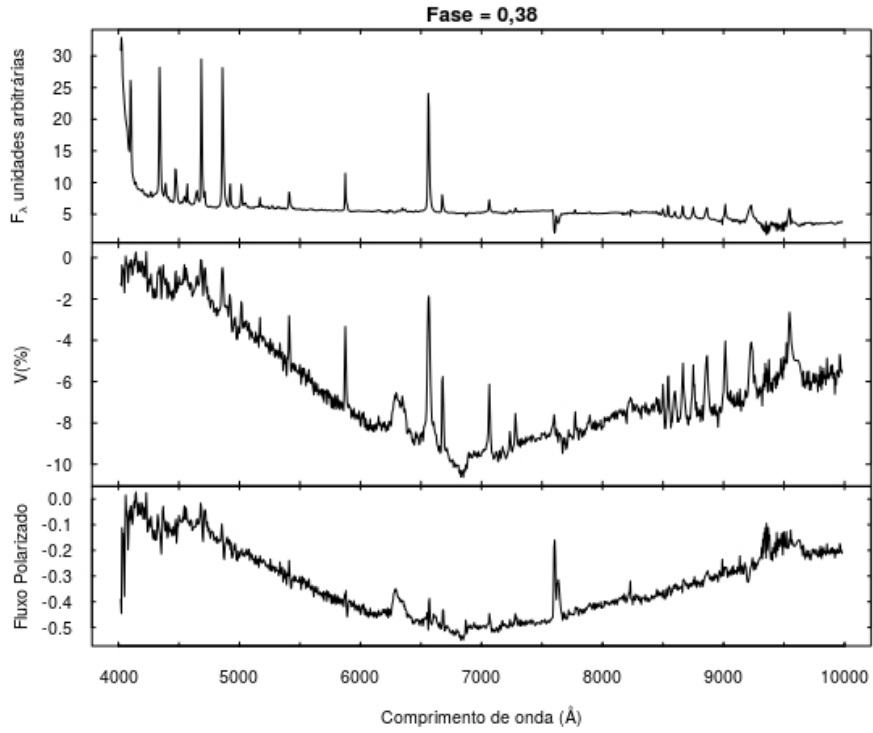


Figura 4.16 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,44.

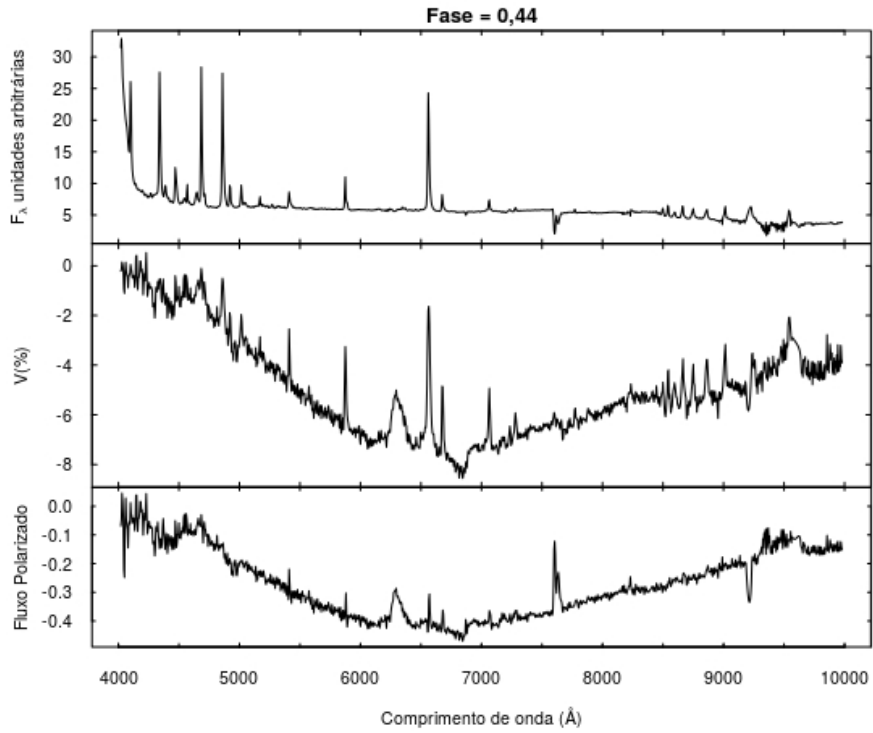


Figura 4.17 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,50.

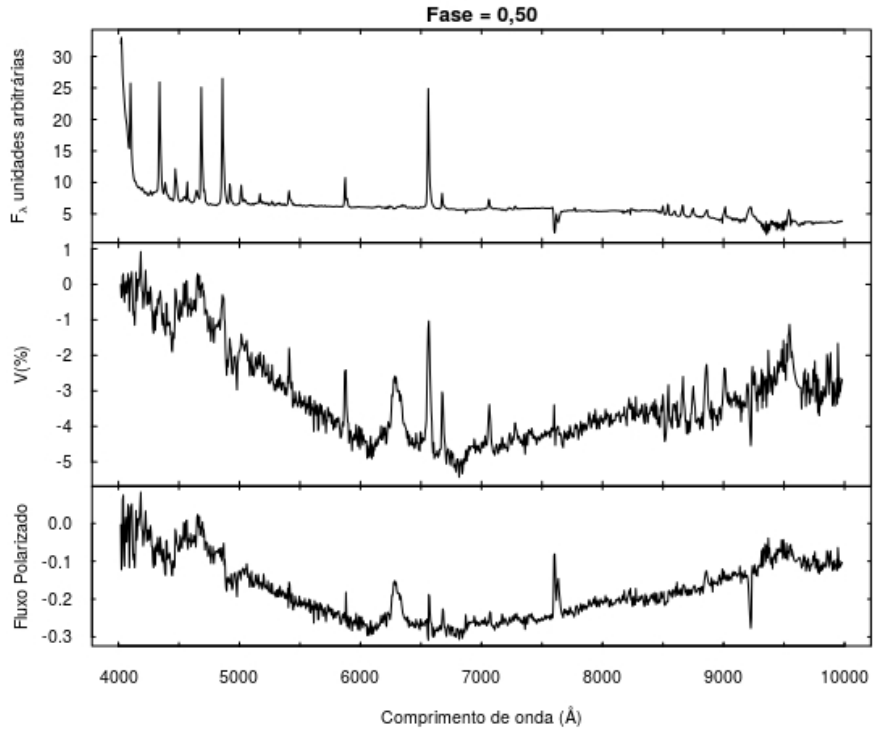


Figura 4.18 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,56.

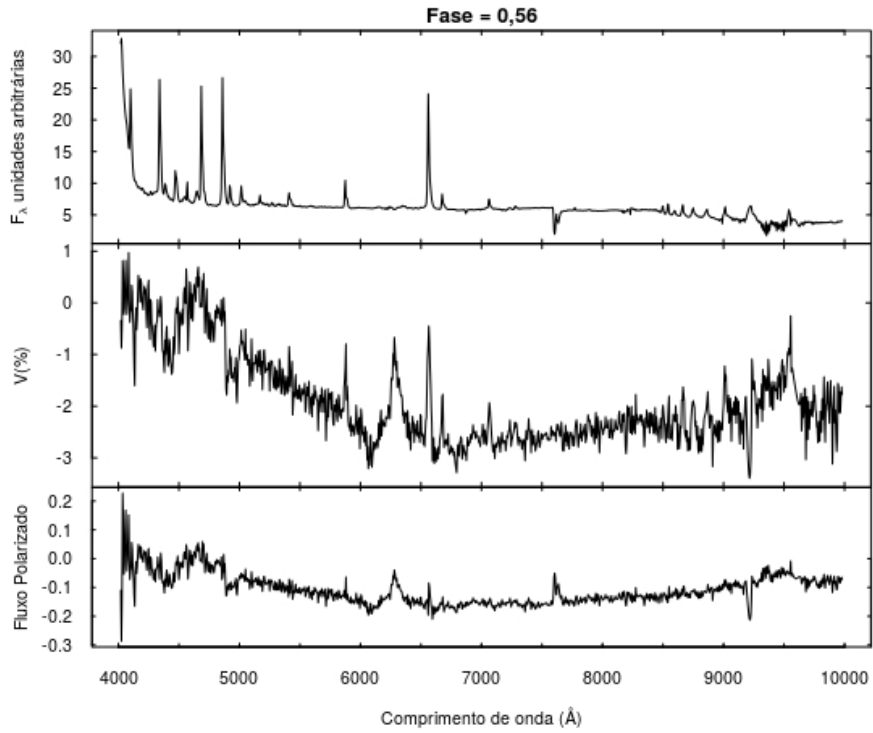


Figura 4.19 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,63.

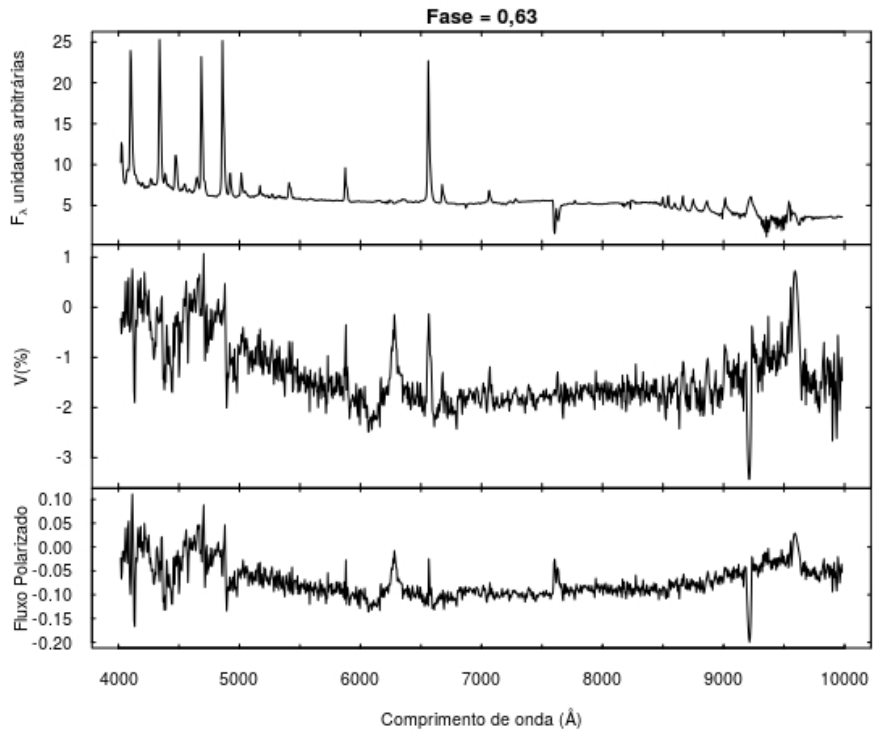


Figura 4.20 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,69.

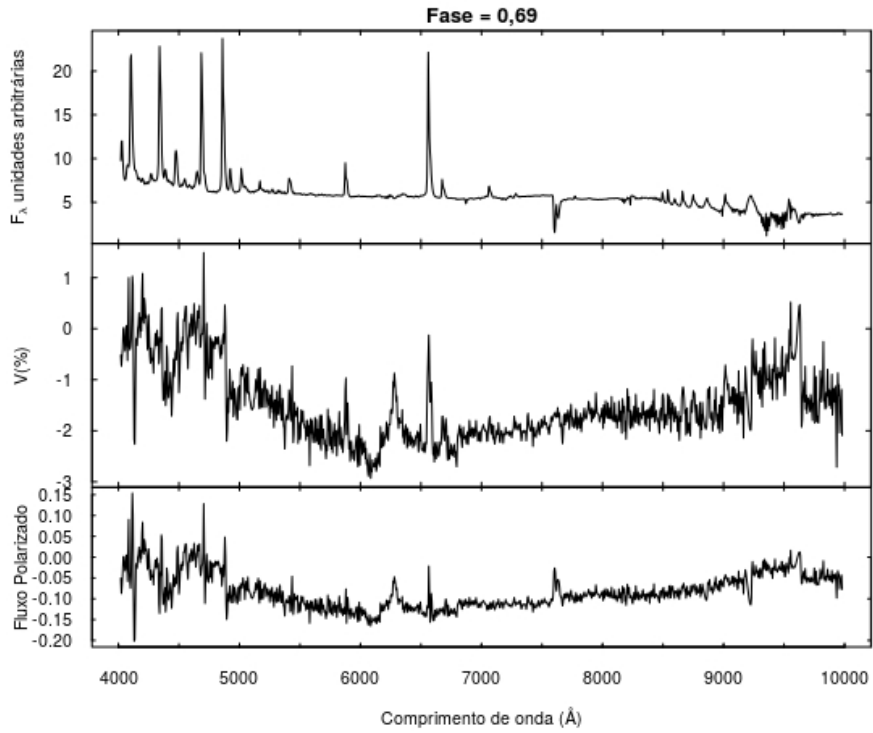


Figura 4.21 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,75.

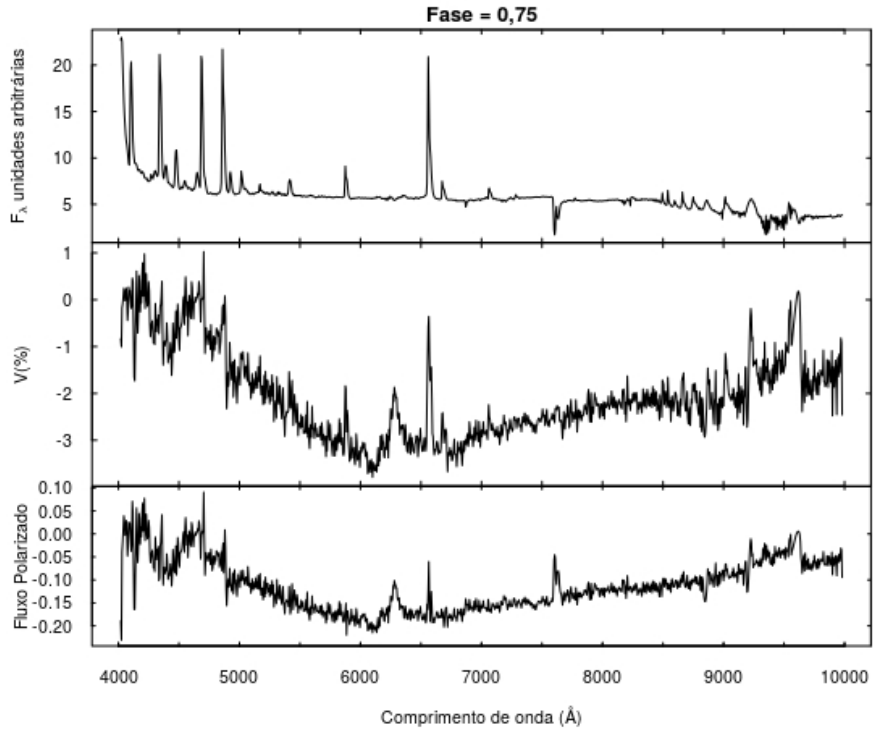


Figura 4.22 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,81.

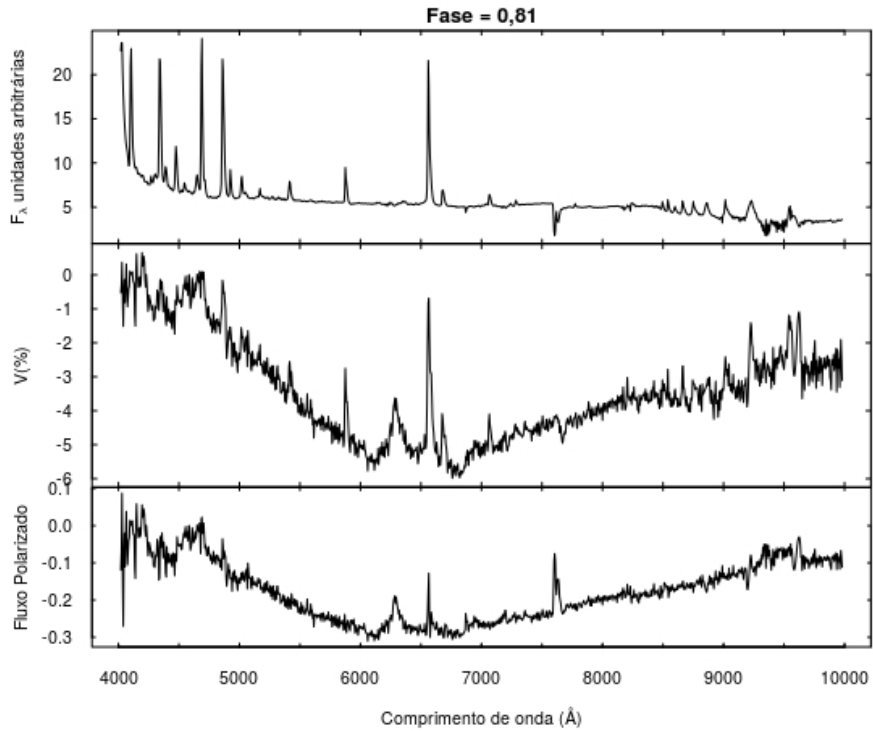


Figura 4.23 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,88.

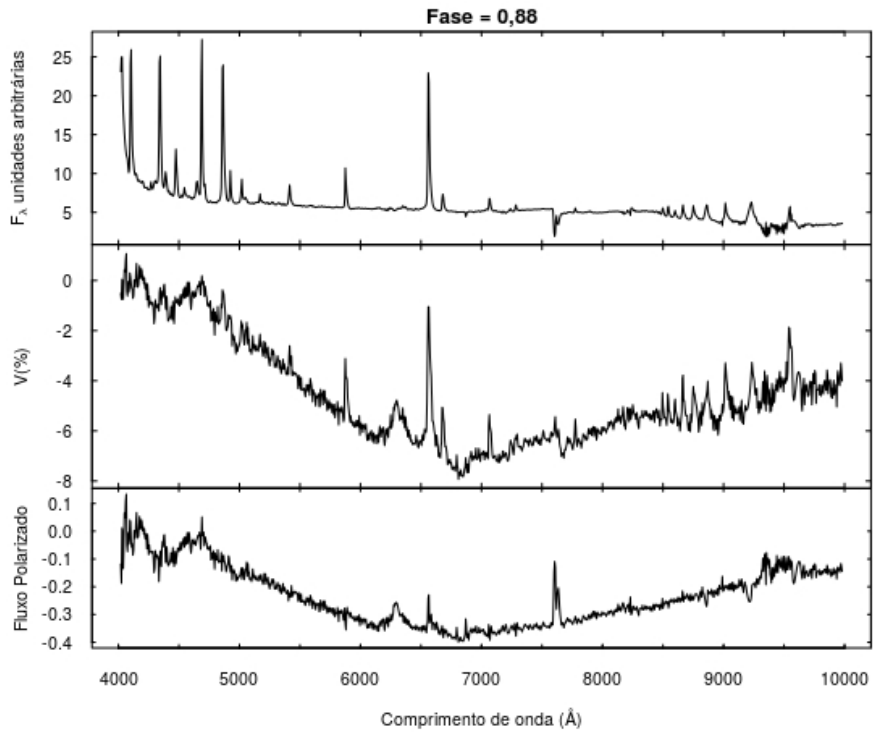
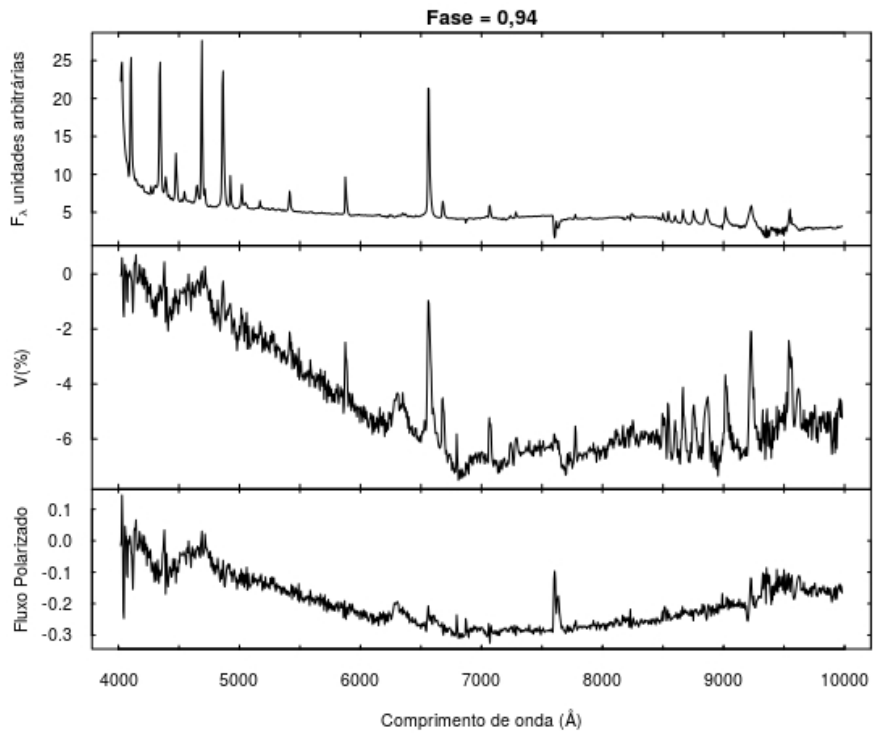


Figura 4.24 - Fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para a fase 0,94.



4.4 Diagramas de fases

Utilizando as bandas dos filtros do *Sloan Digital Sky Survey*, mostradas na tabela 4.2, foi possível construir o diagrama de fases para o fluxo, polarização e fluxo polarizado, mostrados nas figuras 4.25, 4.26 e 4.27 respectivamente. Para a banda u não foi construído o gráfico pois os dados de espectropolarimetria começam em 4000Å. Os dados da banda z foram truncados até $\lambda=10000\text{Å}$.

Tabela 4.2 - Limites de comprimento de onda para os filtros do *Sloan Digital Sky Survey*.

Banda	$\lambda_i[\text{Å}]$	$\lambda_f[\text{Å}]$
u	2980	4130
g	3630	5830
r	5380	7230
i	6430	8630
z	7730	11230

Os diagramas de fases foram construídas pela média dos valores em cada banda. A barra de erro corresponde ao desvio padrão de cada medida. Esse erro não é de fato um erro observacional da medida, mas mostra a dispersão do valor medido dentro da banda, já que o erro somente pela razão sinal ruído seria muito pequeno.

Os erros no fluxo polarizado são bem menores, já que o espectro de fluxo polarizado segue bem o contínuo, e assim possui menor variação de valores ao longo do comprimento de onda.

Para a banda g, r, i e z foram construídos os gráficos de fluxo, polarização e fluxo polarizado ao longo da fase, mostrados nas figuras 4.28 à 4.31. Esses gráficos consistem nos mesmos dados das figuras 4.25, 4.26 e 4.27, mas neste caso representados em função do filtro, a fim de se observar a variação das três medidas em função do comprimento de onda.

Figura 4.25 - Diagramas de fases para os filtros g, r, i e z do *Sloan Digital Sky Survey* a partir dos dados de fluxo.

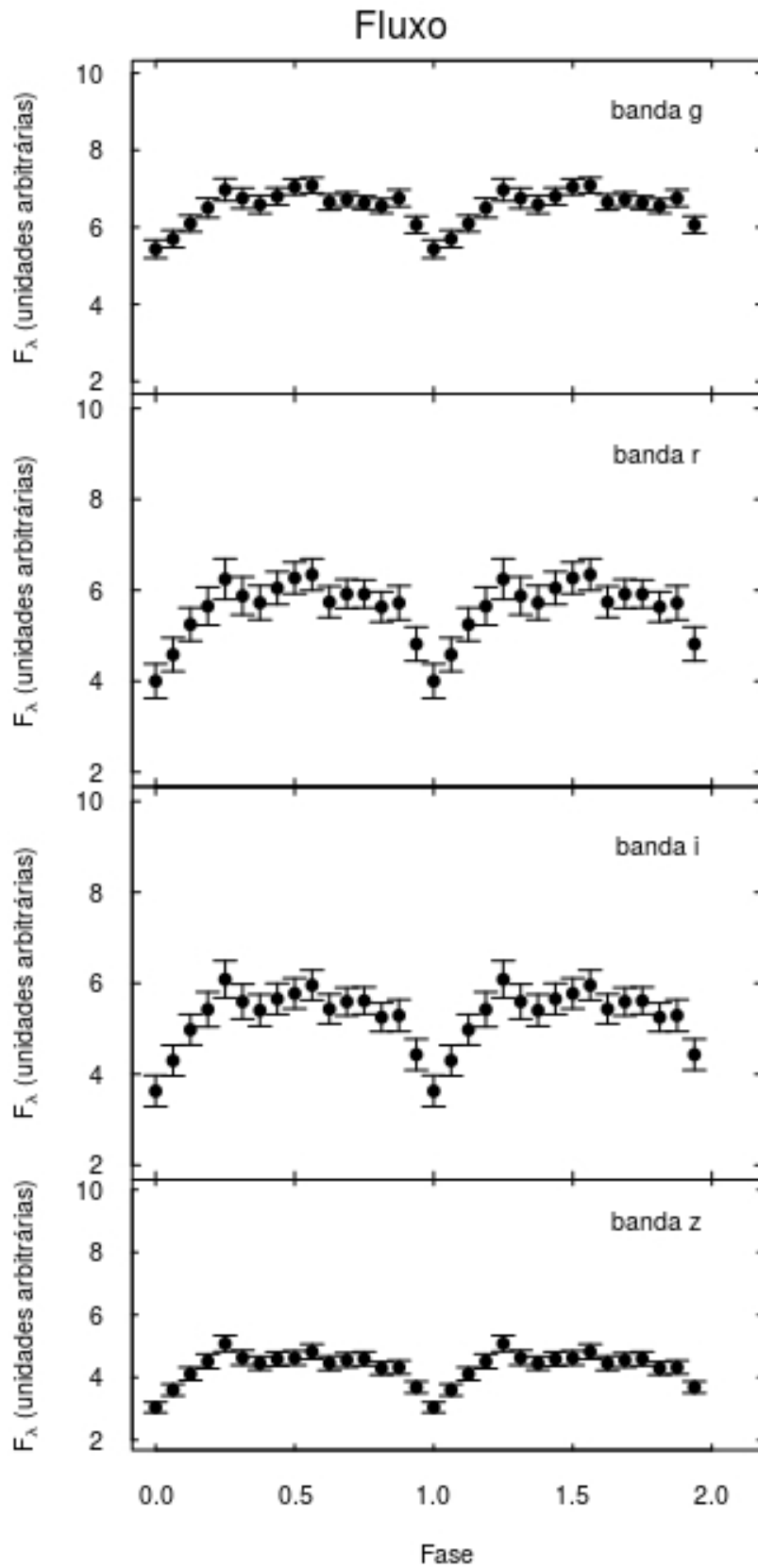


Figura 4.26 - Diagramas de fases para os filtros g, r, i e z do *Sloan Digital Sky Survey* a partir dos dados de polarimetria.

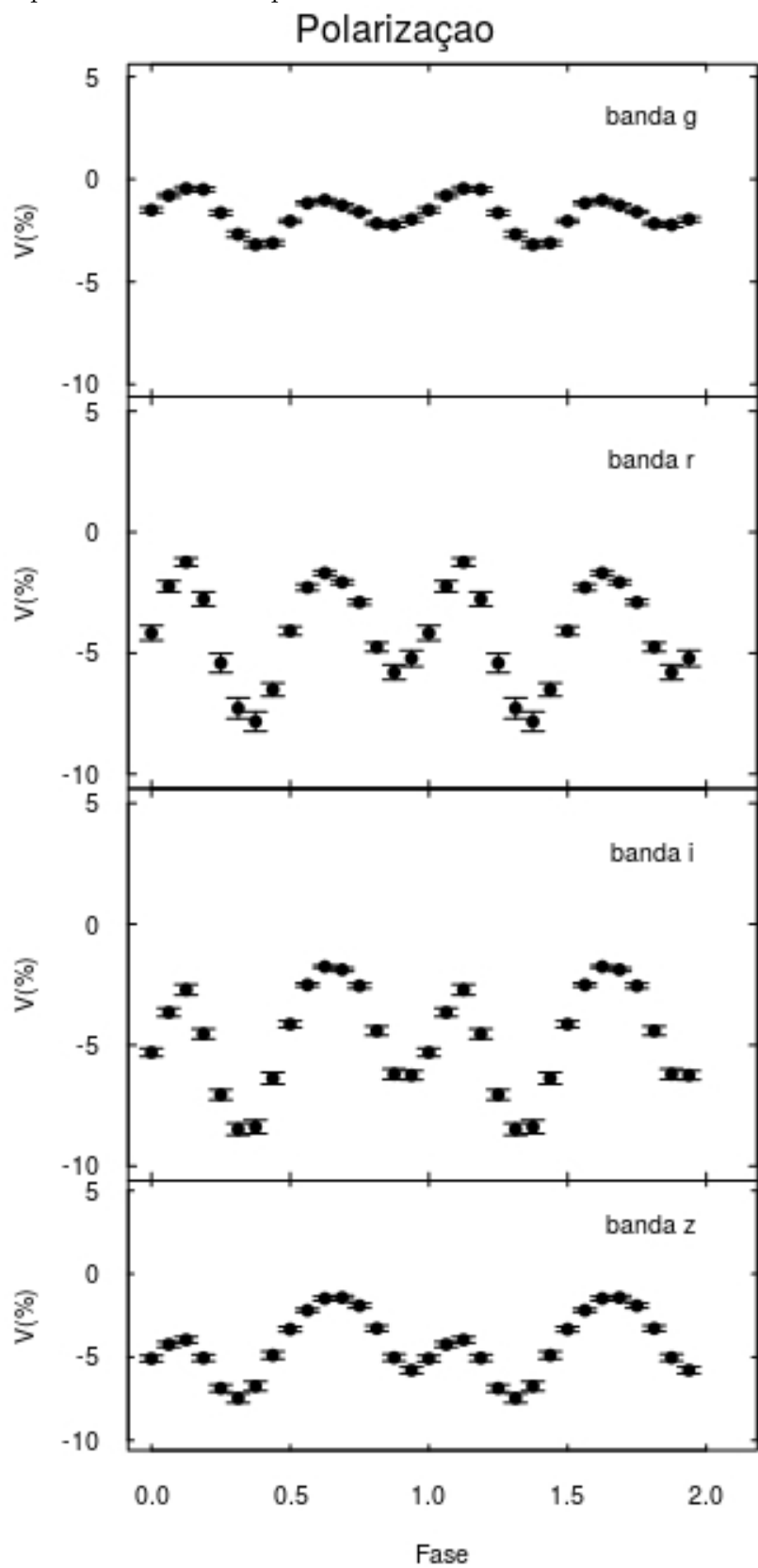


Figura 4.27 - Diagramas de fases para os filtros g, r, i e z do *Sloan Digital Sky Survey* a partir dos dados de fluxo polarizado.

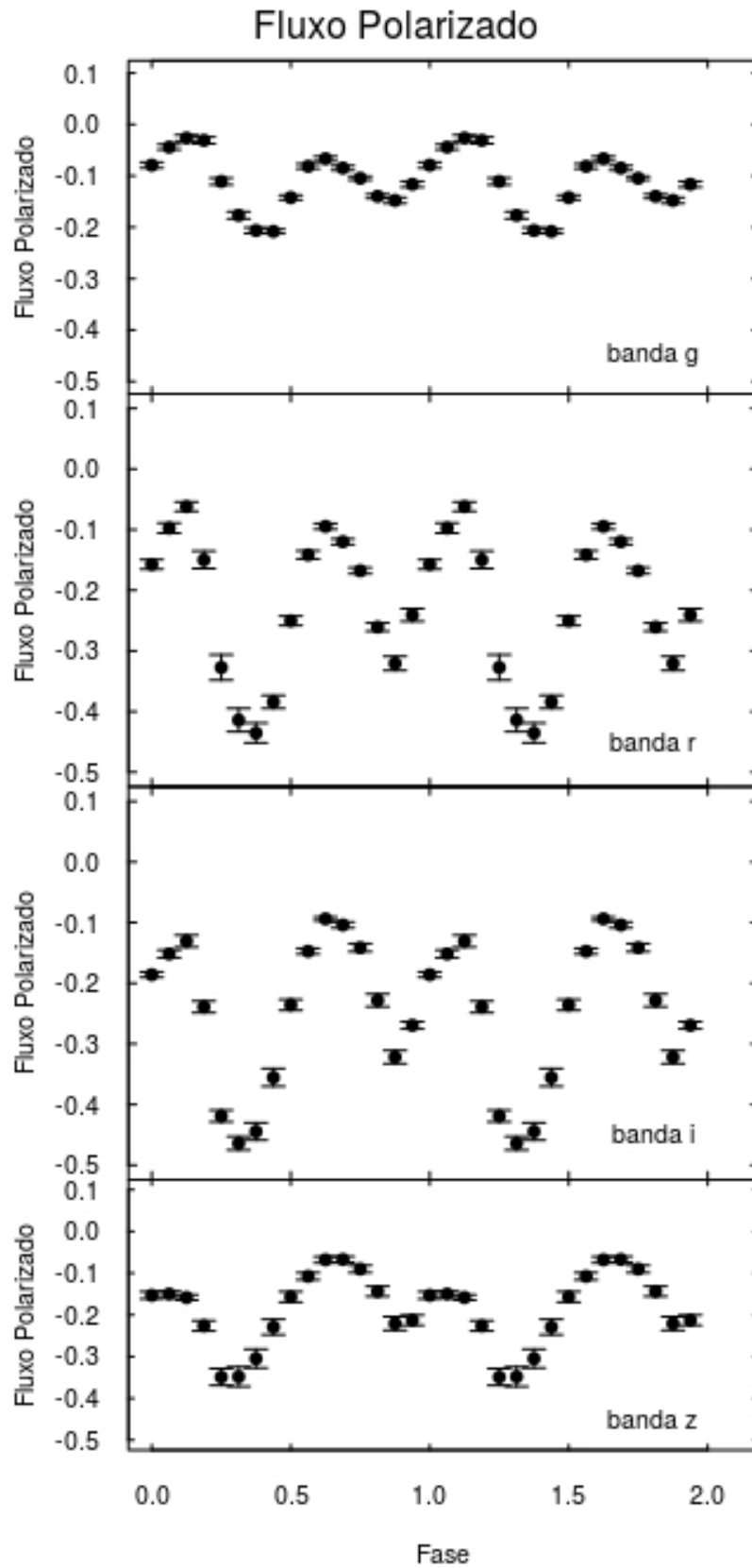


Figura 4.28 - Fluxo, polarização e fluxo polarizado para a banda g.

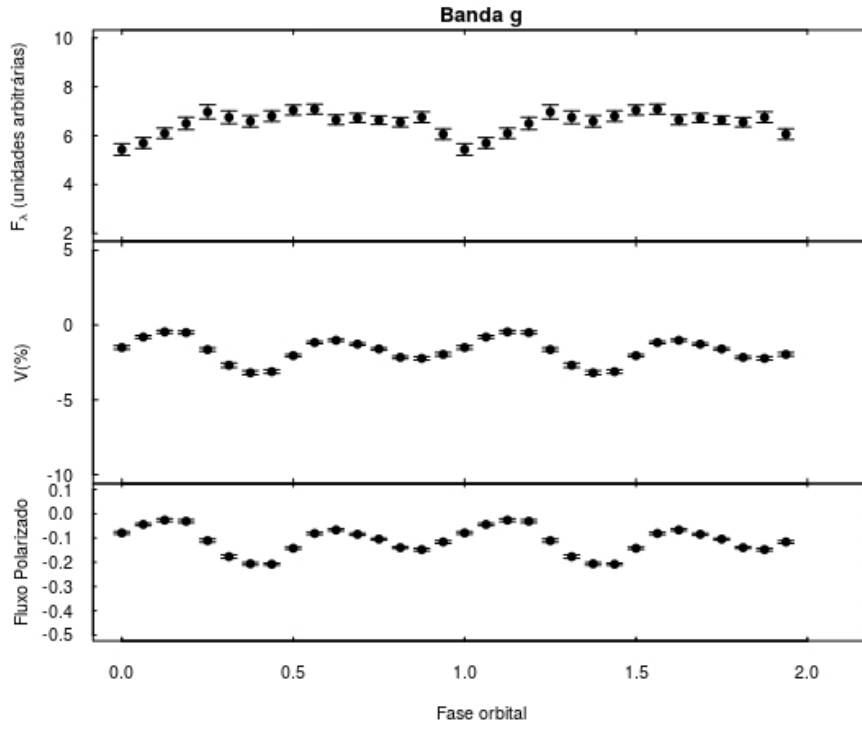


Figura 4.29 - Fluxo, polarização e fluxo polarizado para a banda r.

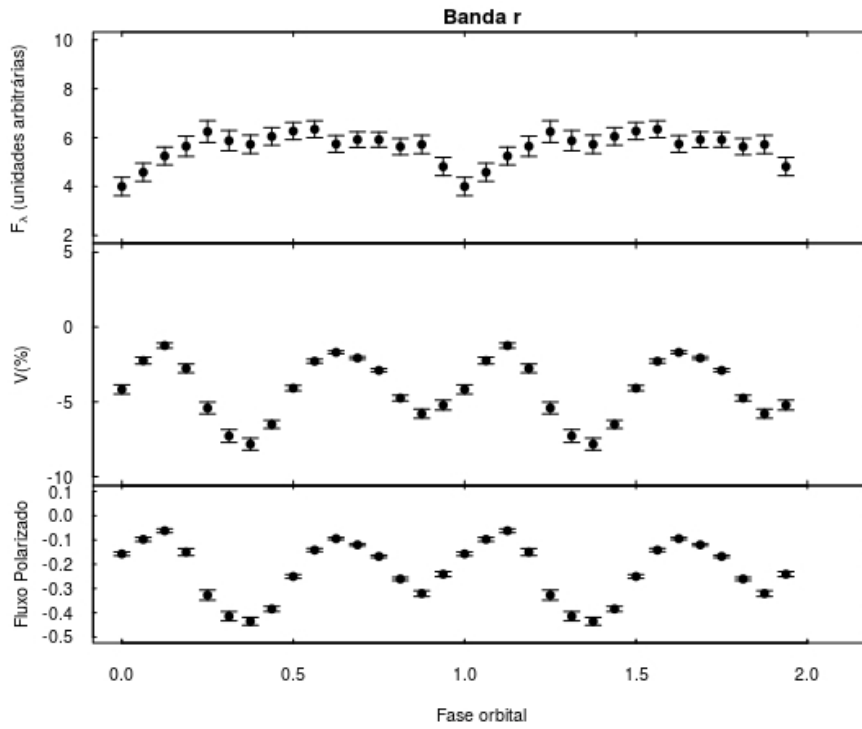


Figura 4.30 - Fluxo, polarização e fluxo polarizado para a banda i.

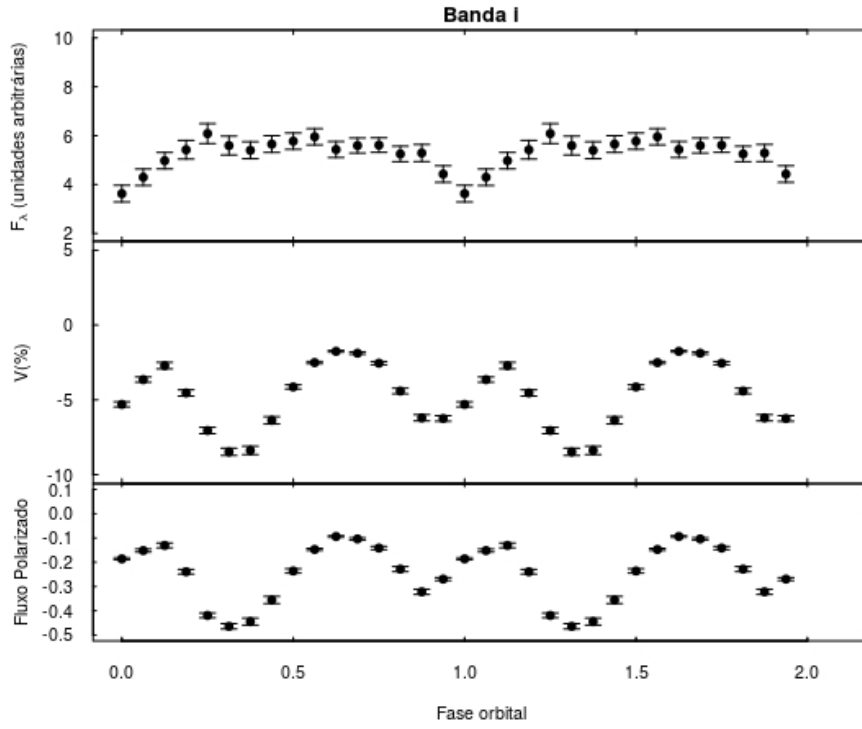
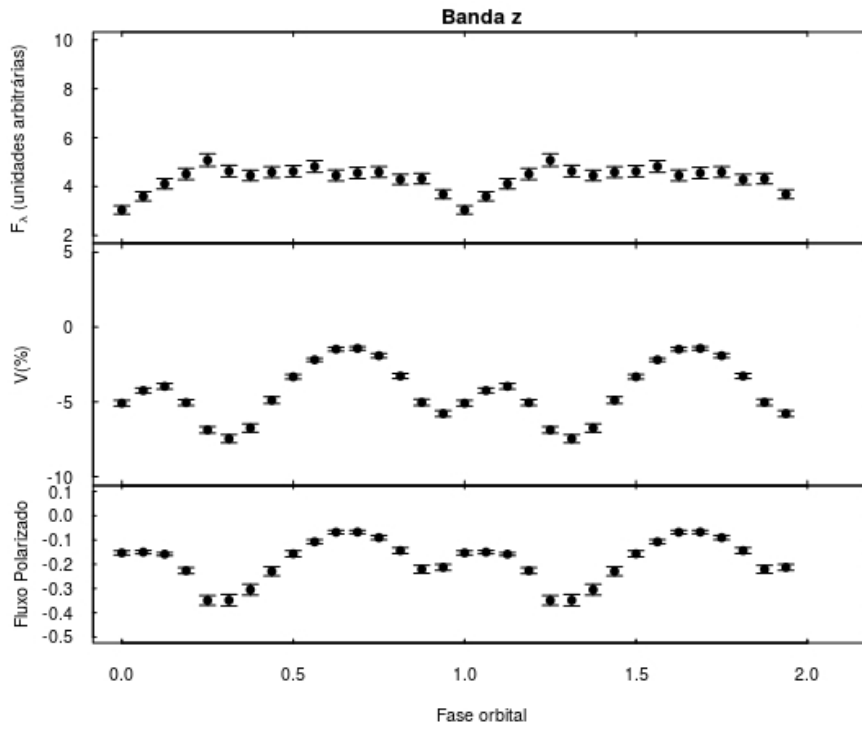


Figura 4.31 - Fluxo, polarização e fluxo polarizado para a banda z.



5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho apresentamos dados de espectropolarimetria de AM Her e de uma estrela padrão não polarizada HD 202573 observadas com o ESPaDOnS/CFHT em agosto de 2015.

Os dados foram reduzidos utilizando o código OPERA (OPERA3, 2017) e filtros de razão sinal-ruído. A redução com o OPERA apresentou ótima calibração, comparando os dados com dados do catálogo Kurucz (2017).

Os dados da padrão também foram utilizados para determinar a polarização instrumental do ESPaDOnS, e verificar a viabilidade do instrumento em medir polarização circular no contínuo. Nossas observações demonstram que o ESPaDOnS apresenta medidas confiáveis de polarização circular no contínuo para valores maiores que 0,2% em módulo. Os valores encontrados estão de acordo com os anteriormente publicados por Pereyra et al. (2015).

Estes dados representam a primeira observação espectro-polarimétrica de alta resolução de AM Her no estado alto. Apresentamos os espectros de fluxo, polarização e fluxo polarizado para 16 fases ao longo do ciclo orbital do sistema.

Nos espectros de fluxo são observadas as linhas da série de Balmer e Paschen, além de linhas de emissão de He II, provenientes de regiões de alta ionização, neste caso, da coluna de acreção. Obtivemos valores para a velocidade radial em concordância com dados da literatura, com valor da semi-amplitude $K \approx 89,88$ km/s. A alta resolução dos espectros permitiu uma melhor análise das linhas de $H\alpha$, mostrando qualitativamente que são compostas por várias componentes. Uma análise cuidadosa das componentes decompostas em nossos espectros e uma comparação detalhada com dados anteriores são necessárias para uma melhor compreensão da origem das diferentes componentes nos vários estados de brilho de AM Her.

Apresentamos o espectro da polarização circular da estrela padrão não polarizada juntamente com os espectros de duas fases com menor polarização circular de AM Her, demonstrando que a polarização instrumental do ESPaDOnS não impediu tais medidas.

Nos 16 espectros de polarização é possível observar a variação do contínuo e de algumas linhas ao longo do ciclo orbital. Na linha de $H\alpha$ vemos uma depolarização em todos os 16 espectros. O valor máximo em módulo de polarização encontrado para AM Her foi de 9%.

Foi feita uma comparação entre os espectros de fluxo, polarimetria e fluxo polarizado para cada fase. Vemos uma variação da intensidade de algumas linhas ao longo do ciclo orbital. Observamos uma componente que varia tanto em polarização quanto em fluxo polarizado, a qual é possivelmente a componente σ - do desdobramento Zeeman para o hidrogênio em alto campo magnético. Para uma melhor análise será necessário o desenvolvimento de um modelo no qual subtraia o contínuo, deixando somente as linhas de emissão polarizadas e não polarizadas, para os três tipos de espectros, a fim de modelar a componente Zeeman para esta e outras possíveis linhas.

Além dos estudos mais aprofundados das componentes da linha de $H\alpha$ e do Zeeman, os dados apresentados serão posteriormente utilizados para modelar a coluna de acreção que emite em ciclotron utilizando o programa CYCLOPS (COSTA; RODRIGUES, 2009). O CYCLOPS modela a emissão ciclotrônica no contínuo das polares no óptico, de modo a representar a coluna de acreção tridimensionalmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGEL, J. R. P. Magnetic white dwarfs. **Annual Review of Astron and Astrophys**, v. 16, p. 487–519, 1978. 10
- BAILEY, J. The distances of cataclysmic variables. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 197, p. 31–39, oct. 1981. 10
- BONNET-BIDAUD, J. M.; MOUCHET, M.; SHAKHOVSKOY, N. M.; SOMOVA, T. A.; SOMOV, N. N.; ANDRONOV, I. L.; MARTINO, D. de; KOLESNIKO, S. V.; KRAICHEVA, Z. Magnetic field and unstable accretion during AM Herculis low states. **Astronomy and Astrophysics**, v. 354, p. 1003–1010, feb. 2000. 14
- BROSSEAU, C. **Fundamentals of polarized light: A statistical optics approach**. [S.l.: s.n.], 1998. 71
- COSTA, J. E. R.; RODRIGUES, C. V. Stokes imaging of AM Her systems using 3D inhomogeneous models - I. Description of the code and an application to V834 Cen. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 398, p. 240–248, sep. 2009. 64
- COTTON, D. V.; BAILEY, J.; HOWARTH, I. D.; BOTT, K.; KEDZIORA-CHUDCZER, L.; LUCAS, P. W.; HOUGH, J. H. Polarization due to rotational distortion in the bright star Regulus. **Nature Astronomy**, v. 1, p. 690–696, oct. 2017. 71
- CROPPER, M. The polars. **Space Science Reviews**, v. 54, p. 195–295, 1990. 9
- DAI, Z.; QIAN, S.; LI, L. Updated Photometry and Orbital Period Analysis for the Polar AM Herculis on the Upper Edge of the Period Gap. **The Astrophysical Journal**, v. 774, p. 153, sep. 2013. 35
- DAVEY, S. C.; SMITH, R. C. Spectroscopic imaging of the secondary star in AM HER. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 280, p. 481–488, may 1996. 10
- DONATI, J.-F. ESPaDOnS: An Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars at CFHT. In: Trujillo-Bueno, J.; Sanchez Almeida, J. (Ed.). **Solar Polarization**. [S.l.: s.n.], 2003. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 307), p. 41. 19

DONATI², J.-F.; SEMEL, M.; CARTER, B. D.; REES, D. E.; CAMERON, A. C. Spectropolarimetric observations of active stars. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 291, p. 658, nov. 1997. 21, 26

DOWNES, R. A.; WEBBINK, R. F.; SHARA, M. M.; RITTER, H.; KOLB, U.; DUERBECK, H. W. VizieR Online Data Catalog: Catalog of Cataclysmic Variables (Downes+ 2001-2006). **VizieR Online Data Catalog**, v. 5123, jan. 2006. xiii, 6, 7, 8

EDLUND. Über die Polarisation des Lichtes der Corona bei totalen Sonnenfinsternissen. Von Herrn Prof. Edlund in Stockholm. **Astronomische Nachrichten**, v. 52, p. 305, mar. 1860. 71

ESPADONS. **ESPaDONs an Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars at CFHT**. 2017.

<http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Spectroscopy/Espadons/>. Acessado em 01/05/2017. 24

FERRARIO, L.; MARTINO, D. de; GANSICKE, B. T. Magnetic White Dwarfs. **Space Science Reviews**, v. 191, p. 111–169, oct. 2015. 7

GANSICKE, B. T.; BEUERMAN, K.; MARTINO, D. de. The white dwarf in AM Herculis. **Astronomy & Astrophysics**, v. 303, p. 127, nov. 1995. 10, 13, 17, 38

HEARN, D. R.; RICHARDSON, J. A.; CLARK, G. W. Detection of soft X-ray emission from an unidentified source at high galactic latitude. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 210, p. L23–L26, nov. 1976. 10

HELLIER, C. **Cataclysmic Variable Stars How and Why They Vary**. [S.l.: s.n.], 2001. 208 p. 3, 8

HUTCHINGS, J. B.; CRAMPTON, D.; COWLEY, A. P. Optical spectroscopy of AM Herculis - The 1980 low state. **Astrophysical Journal**, v. 247, p. 195–201, jul. 1981. 13, 16, 37, 40

JACOBS. **ESPaDONs: The high-resolution spectrograph**. 2017.

<http://www.ast.obs-mip.fr/projets/espadons/espadons/spectro.html>. Acessado em 11/12/2017. 21

KAFKA, S. **Observations from the AAVSO International Database**. 2017. Acessado em 10/04/2017. Available from: <<https://www.aavso.org>>. xiii, xiv, 11, 27

KAFKA, S.; HONEYCUTT, R. K.; HOWELL, S. B.; HARRISON, T. E. A Multiwavelength Study of AM Herculis during the 2002-2004 Low States. **The Astronomical Journal**, v. 130, p. 2852–2865, dec. 2005. 14, 18, 42

KAFKA3, S.; ROBERTSON, J.; HONEYCUTT, R. K.; HOWELL, S. B. Low-State Flaring Events in AM Herculis. **The Astronomical Journal**, v. 129, p. 2411–2419, may 2005. 10

KALOOMENI, B. Short and long time-scale variability in magnetic cataclysmic variables: long-term monitoring of polars. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 422, p. 1601–1608, may 2012. 10

KRZEMINSKI, W.; SERKOWSKI, K. AN Ursae Majoris. **IAU Circulars**, v. 3039, feb. 1977. 10

KURUCZ. **THE 1993 KURUCZ STELLAR ATMOSPHERES ATLAS**. 2017. <ftp://ftp.stsci.edu/cdbs/grid/k93models/>. Acessado em 10/01/2018. 30, 31, 63

LI, J. K.; WU, K. W.; WICKRAMASINGHE, D. T. On the Rate of Orbital Angular Momentum Loss of Synchronously Rotating Magnetic Cataclysmic Variables. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 270, p. 769, oct. 1994. 7

MANSET. **ESPaDOnS**. 2017. http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Spectroscopy/Espadons/Espadons_FAQ.html. Acessado em 10/01/2018. 21, 24

MARTIOLI, E.; TEEPLE, D.; MANSET, N.; DEVOST, D.; WITHINGTON, K.; VENNE, A.; TANNOCK, M. Open source pipeline for ESPaDOnS reduction and analysis. In: **Software and Cyberinfrastructure for Astronomy II**. [S.l.: s.n.], 2012. (Proceedings of the International Society for Optical Engineering, v. 8451), p. 84512B. 26

MCDERMOTT, P. N.; TAAM, R. E. On the disrupted magnetic braking model for the period gap of cataclysmic variables. **The Astrophysical Journal**, v. 342, p. 1019–1027, jul. 1989. 6

OPERA3. **The Echelle SPECTroscopy Tutorials for data Reduction with Opera**. 2017. <http://wiki.lna.br/wiki/espectro>. Acessado em 08/11/2017. 26, 63

- PATTERSON, J. The evolution of cataclysmic and low-mass X-ray binaries. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 54, p. 443–493, apr. 1984. 10
- PATTERSON, J.; PRICE, C. Spectrophotometry of AM Herculis at minimum. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 93, p. 71–76, feb. 1981. 13, 15, 16, 40
- PEREYRA, A.; RODRIGUES, C. V.; MARTIOLI, E. Measuring the continuum polarization with ESPaDOnS. **Astronomy and Astrophysics**, v. 573, p. A133, jan. 2015. 21, 23, 34, 63, 76
- PEREYRA3, A.; ARAÚJO, F. X. de; MAGALHÃES. In: . [S.l.: s.n.]. 45
- REINMUTH, K. Nova 47.1909 Herculis. **Astronomische Nachrichten**, v. 222, p. 207, aug. 1924. 10
- ROBINSON, E. L.; BARKER, E. S.; COCHRAN, A. L.; COCHRAN, W. D.; NATHER, R. E. MV Lyrae - Spectrophotometric properties of minimum light; or on MV Lyrae off. **The Astrophysical Journal**, v. 251, p. 611–619, dec. 1981. 6
- RYBICKI, G. B.; LIGHTMAN, A. P. **Radiative processes in astrophysics**. [S.l.: s.n.], 1979. 72
- SCHAICH, M.; WOLF, D.; OESTREICHER, R.; RUDER, H. Phase resolved linear polarization spectra of AM Herculis. **Astronomy and Astrophysics**, v. 264, p. 529–535, oct. 1992. 13, 17
- SCHMIDT, G. D.; STOCKMAN, H. S.; MARGON, B. A direct measurement of the magnetic field in AM Herculis. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 243, p. L157–L161, feb. 1981. 12, 13, 47
- SECCHI. Letter from Father Secchi to the Astronomer Royal on the Polarisation of Light reflected by the Moon. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 20, p. 70, jan. 1860. 71
- TAPIA, S. Discovery of a magnetic compact star in the AM Herculis/3U 1809+50 system. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 212, p. L125–L129, mar. 1977. 10
- TRIPPE, S. [Review] Polarization and Polarimetry. **Journal of Korean Astronomical Society**, v. 47, p. 15–39, feb. 2014. 71
- WARNER, B. **Cataclysmic Variable Stars**. [S.l.: s.n.], 1995. 590 p. 1, 2, 7

WEISSKOPF, M. C.; SILVER, E. H.; KESTENBAUM, H. L.; LONG, K. S.; NOVICK, R. A precision measurement of the X-ray polarization of the Crab Nebula without pulsar contamination. **Astrophysical Journal, Letters**, v. 220, p. L117–L121, mar. 1978. 71

WICKRAMASINGHE, D. T.; BAILEY, J.; MEGGITT, S. M. A.; FERRARIO, L.; HOUGH, J.; TUOHY, I. R. New polarimetric observations and a two pole model for the cyclotron emission from AM Herculis. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 251, p. 28–45, jul. 1991. 10

WILSON T.L., R. K. . H. S. **Tools of radio astronomy, 5th edn.** [S.l.: s.n.], 2010. 71

WU, K.; KISS, L. L. High and low states of the system AM Herculis. **Astronomy & Astrophysics**, v. 481, p. 433–439, apr. 2008. 10

YOUNG, P.; SCHNEIDER, D. P.; SHECTMAN, S. A. Am-Herculis - the Magnetic Maw Uncloaks Itself. **The Astrophysical Journal**, v. 245, p. 1043, may 1981. 10

APÊNDICE A - POLARIZAÇÃO

A.1 INTRODUÇÃO

O estudo da luz polarizada se iniciou com a descoberta de birrefringência, fenômeno que consiste na criação de dois raios refratados a partir de um único raio inicial incidindo sobre um cristal, descrito por Erasmus Bartholinus em 1669 (BROSSEAU, 1998).

As observações astronômicas de luz polarizada se iniciaram com observações de polarização linear da luz solar refletida pela lua (SECCHI, 1860) e a polarização linear da luz da coroa solar (EDLUND, 1860). Posteriormente, as técnicas de polarimetria passaram a ser aplicadas em observações não somente no óptico, mas também em rádio na década de 1940 (WILSON T.L., 2010), e em raio-X na década de 1970 (WEISSKOPF et al., 1978).

A polarização é uma propriedade fundamental da radiação eletromagnética. O estudo da luz polarizada é utilizado em muitas áreas de astronomia para estudar características físicas de fontes, incluindo núcleos ativos de galáxias, exoplanetas, gás e poeira no meio interestelar, supernovas, rajadas de raios gama, campos magnéticos estelares, discos de detritos e a radiação cósmica de fundo (COTTON et al., 2017). As observações em astronomia são realizadas principalmente por espectropolarimetria, na qual a polarização é medida em função do comprimento de onda.

As observações em polarimetria complementam métodos de análise baseados em fotometria, bem como em resolução espectral (espectroscopia) ou angular (mapeamento) (TRIPPE, 2014).

A.2 Onda eletromagnética

A radiação eletromagnética pode ser descrita como uma onda propagando-se nas coordenadas cartesianas (x, y, z) ao longo do eixo z com velocidade da luz c , e campos elétrico e magnético perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação. Seguindo o formalismo padrão, consideraremos somente o campo elétrico, que pode ser descrito pela equação A.1,

$$\mathbf{E}(t, z) = \mathbf{E}(0, 0) \cos(\omega t - kz - \phi) \quad (\text{A.1})$$

de modo que t é o tempo, ω corresponde à frequência angular, $k = \omega/c$ é o número de onda e ϕ denota uma fase arbitrária. Como o campo elétrico é perpendicular ao eixo z , é possível decompor $\mathbf{E}(t, z)$ nas componentes de x e y , com ϕ_1 e ϕ_2 denotando duas fases arbitrárias, como mostrado na equação A.2 abaixo:

$$\begin{aligned} E_x(t) &= E_x(0) \cos(\omega t - \phi_1) \\ E_y(t) &= E_y(0) \cos(\omega t - \phi_2) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

A.3 Polarização elíptica

O ângulo de polarização χ é aquele entre o vetor $\mathbf{E}(t, z)$ e o eixo x , calculado no sentido anti-horário. A polarização da onda é dada pelos valores relativos de $E_x(0)$, $E_y(0)$, ϕ_1 e ϕ_2 (RYBICKI; LIGHTMAN, 1979).

No caso mais geral, o vetor de campo elétrico segue uma trajetória elíptica no plano xy ; nesse caso, define-se que a luz apresenta polarização elíptica. A orientação da elipse no plano xy é constante no tempo, o ângulo de polarização corresponde ao ângulo entre o eixo x positivo e o eixo semi-maior da elipse, calculado no sentido anti-horário.

As magnitudes $E_x(0)$ e $E_y(0)$ são diferentes entre si, e existe diferença de fase $\delta = \phi_2 - \phi_1 \neq 0$.

A polarização elíptica é o estado mais geral de polarização de uma onda eletromagnética. A polarização linear ocorre se a elipse se degenera em uma linha. Já a polarização circular corresponde ao oposto, elipse é degenerada em um círculo.

A.4 Polarização linear

A luz é polarizada linearmente se $\phi_1 = \phi_2 = 0$, ou seja, não há diferença de fase entre $E_x(0)$ e $E_y(0)$, assim as equações do campo elétrico são:

$$\begin{aligned} E_x(t) &= E_x(0) \cos(\omega t) \\ E_y(t) &= E_y(0) \cos(\omega t) \end{aligned} \tag{A.3}$$

A orientação do campo \mathbf{E} é independente do tempo, tem ângulo de polarização constante e depende apenas das magnitudes de $E_x(0)$ e $E_y(0)$, que se relacionam pela tangente do ângulo de polarização de acordo com a equação A.4:

$$\frac{E_x}{E_y} = \tan \chi$$

$$\frac{E_x}{E_y} = 0 \rightarrow \chi = 0^\circ \rightarrow \text{Polarização linear em } x$$

$$\frac{E_x}{E_y} = \infty \rightarrow \chi = 90^\circ \rightarrow \text{Polarização linear em } y$$

$$\frac{E_x}{E_y} = 1 \rightarrow \chi = 45^\circ \rightarrow \text{Polarização linear na diagonal} \tag{A.4}$$

A.5 Polarização circular

Quando as magnitudes $E_x(0)$ e $E_y(0)$ são iguais e existe uma diferença de fase de $\delta = \phi_2 - \phi_1 = \pm \pi/2$ a polarização é circular, pois, o vetor campo elétrico se movimenta ao longo do eixo z descrevendo um círculo no plano xy .

$$\begin{aligned} E_x(t) &= E_x(0) \cos(\omega t) \\ E_y(t) &= \pm E_y(0) \sin(\omega t) \end{aligned} \tag{A.5}$$

O sinal de $E_y(t)$, que deriva da fase relativa, determina o sentido do movimento de \mathbf{E} . O sinal positivo corresponde ao movimento no sentido anti-horário, e o sinal negativo, no sentido horário.

A.6 Parâmetros de Stokes

Em geral, as observações astronômicas lidam com intensidades de luz e não com amplitudes de campo, $E_x(0)$ e $E_y(0)$, ou diferença de fase, $\delta = \phi_2 - \phi_1$, portanto, é conveniente quantificar a polarização através de intensidades características, denominadas *Parâmetros de Stokes*: $S = [I, Q, U \text{ e } V]$.

A convenção adotada relaciona a intensidade I e a amplitude de campo E da seguinte maneira $I = E^2$, ou, em unidades SI $I = \varepsilon_0 c E^2$, com ε_0 correspondendo a permissividade no vácuo. As relações entre os parâmetros de Stokes S e as amplitudes de campo são mostradas na equação A.6:

$$\begin{aligned} I &= \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \\ Q &= \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \\ U &= 2\langle E_x E_y \cos\delta \rangle \\ V &= 2\langle E_x E_y \sin\delta \rangle \end{aligned} \tag{A.6}$$

I é proporcional ao fluxo total de energia, ou seja, proporcional à intensidade da onda, portanto $I > 0$ sempre. Os parâmetros Q e U se referem à polarização linear, de modo que Q quantifica a diferença nas intensidades em x e y , e U quantifica a diferença entre os dois componentes de campo diagonais (ângulos de 45° e 135° contados a partir do eixo x positivo). Finalmente, o parâmetro V corresponde à intensidade de polarização circular, referente à razão dos eixos da elipse. Para $V > 0$, a polarização é circular para a direita, sentido anti-horário, e, conseqüentemente, para $V < 0$ a polarização é circular para a esquerda no sentido horário.

O grau de polarização n é dado pela fração da intensidade da componente completamente polarizada com relação à intensidade total, como mostrado na equação A.7. Os parâmetros de Stokes são portanto expressos em unidades de intensidade, ou seja, energia por ângulo sólido.

$$\text{Linear} : n_L = \frac{\sqrt{(Q^2 + U^2)}}{I} \tag{A.7}$$

$$\text{Circular} : n_c = \frac{V}{I}$$

A.7 Polarimetria no ESPaDOnS

O método para medir a polarização adotado neste trabalho é uma técnica diferencial, pois compara dois feixes diferentes, os quais podem ser provenientes da mesma fonte. Qualquer feixe, com qualquer polarização, pode ser decomposto em componentes linearmente perpendiculares. Um modo de decompor fisicamente o feixe consiste em fazer com que a luz vinda do objeto atravessasse dois elementos ópticos: um retardador e um analisador (ou Polarizador).

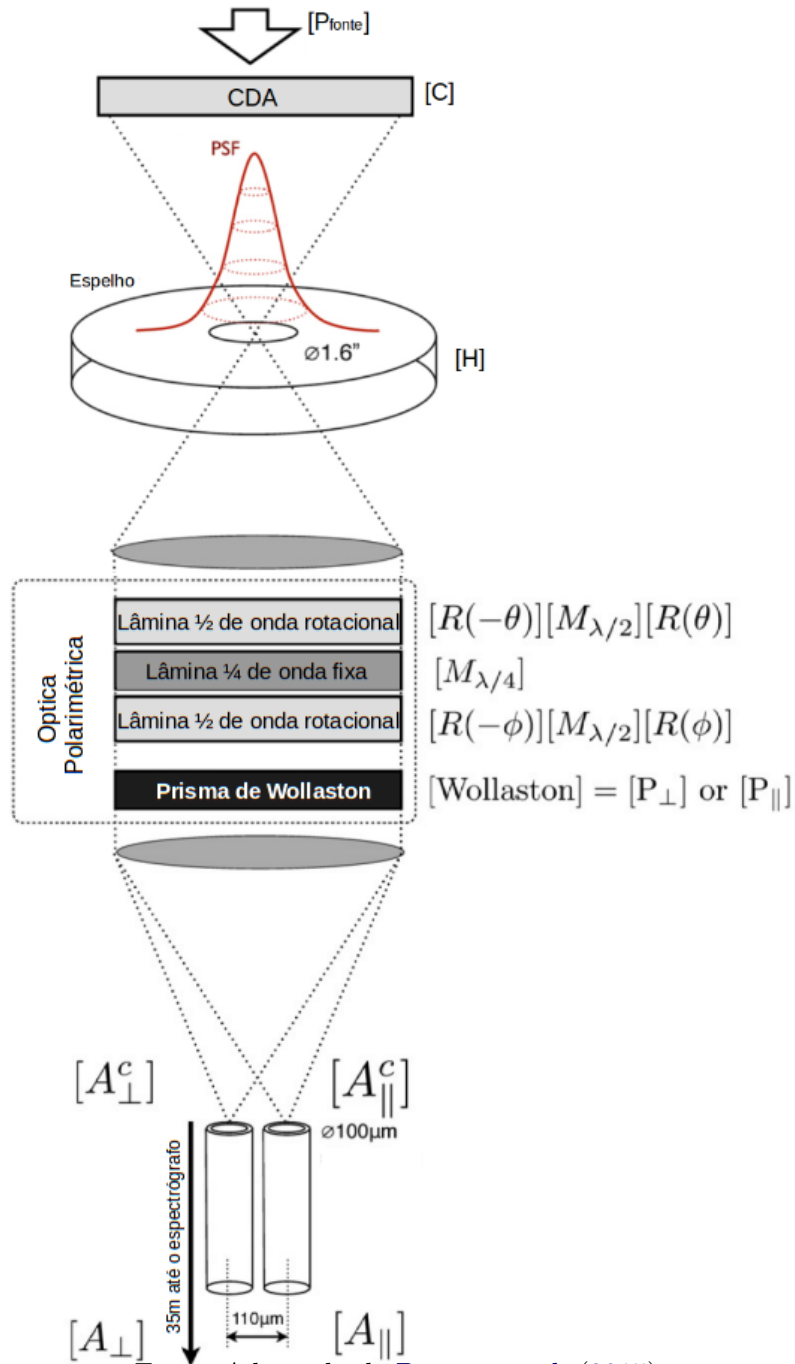
O **retardador** muda o estado de polarização, mudando a diferença de fase entre as componentes de um feixe. Nesta etapa utiliza-se um material birrefringente que introduz uma diferença de fase δ , dada pela equação A.8, entre os dois feixes, denominados feixe ordinário (perpendicular ao eixo de anisotropia) e extraordinário (paralelo ao eixo).

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n \quad (\text{A.8})$$

O ângulo da mudança de fase δ depende da espessura da lâmina retardadora d , do comprimento de onda λ e da diferença entre os índices de refração nas direções de propagação dos feixes extraordinário e ordinário Δn . Para $\delta = 90^\circ$ tem-se uma lâmina de quarto de onda, que converte a polarização circular em linear ou vice-versa. Para $\delta = 180^\circ$, tem-se uma lâmina de meia onda, que gira o ângulo de polarização linear.

O esquema da configuração óptica do ESPaDOnS é mostrada na figura A.1, mas dessa vez são apresentadas as matrizes de Mueller para o cálculo da polarimetria correspondente a cada elemento.

Figura A.1 - Caminho óptico da unidade polarimétrica do ESPaDOnS destacando as matrizes de Mueller para cálculo da polarimetria.



Fonte: Adaptado de Pereyra et al. (2015).

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.