

Universidade do Vale do Paraíba
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento - IP&D
Programa de Pós Graduação em Física e Astronomia

MURILO MARTINS

**Modelagem da Variável Cataclísmica Polar
1RXS J174320.1-042953 = V3704 Oph**

São José dos Campos, SP

2022

MURILO MARTINS

**Modelagem da Variável Cataclísmica Polar
1RXS J174320.1-042953 = V3704 Oph**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, como parte do processo de avaliação para a obtenção do título de Doutor em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Soares de Oliveira

Coorientadora: Profa. Dra. Claudia Vilega Rodrigues

São José dos Campos, SP

2022

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Martins, Murilo
Modelagem da Variável Cataclísmica Polar IRXS
J174320,1-042953 = V3704 Oph / Murilo Martins; orientador, Prof.
Dr. Alexandre Soares de Oliveira; co-orientadora Profa. Dra.
Claudia Vilega Rodrigues. - São José dos Campos, SP, 2022.
1 CD-ROM, 75 p.

Tese (Doutorado) - Universidade do Vale do Paraíba, São José
dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Astrofísica estelar. 3. Modelagem
de dados. 4. Poplares. I. Oliveira, Prof. Dr. Alexandre Soares
de, orient. II. Rodrigues, Profa. Dra. Claudia Vilega, co-orient.
III. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação
em Física e Astronomia. IV. Título.

Eu, Murilo Martins, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em
outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o
usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado
respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de
propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e
profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 10 de Agosto de 2022.



Autor(a) da Obra

Data da defesa: _____/_____/_____

MURILO MARTINS

“MODELAGEM DA VARIÁVEL CATACLÍSMICA POLAR 1RXSJ174320.1-042953 = V3704 OPH.”

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho	<i>Irapuan Rodrigues</i>
Prof. Dr. Alexandre Soares de Oliveira	<i>Alexandre S. Oliveira</i>
Prof. ^a Dr. ^a Cláudia Vilega Rodrigues	<i>Cláudia V. Rodrigues</i>
Prof. Dr. Sergio Pilling Guapyassu de Oliveira	<i>Sergio Pilling G. de Oliveira</i>
Prof. Dr. Alex Cavaliéri Carciofi – IAG/USP	<i>Alex Cavaliéri Carciofi</i>
Prof. Dr. Francisco Jose Jablonski - INPE	<i>Francisco Jose Jablonski</i>

Prof.^a Dr.^a Lúcia Vieira
Diretora do IP&D – Univap
São José dos Campos, 30 de maio 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

À minha família;

Meus pais, Sidnei e Cristina, por sempre me motivarem e incentivarem para que eu sempre busque mais, vocês me ensinaram a nunca me acomodar. Agradeço por toda a base educacional que me foi dada, por me dar carinho, por me ensinar o que é amor, o exemplo que vivi da união, que não é aquela das novelas e do cinema, aquela união real de vocês me tornou quem eu sou.

Minha esposa, minha linda, minha querida Cris, pelo apoio, pelo amor, pelos planos, por me escutar (e como escutou, rs), me motivar e sempre acreditar em mim. Tenho certeza que sem você eu não terminaria esse trabalho, você foi a minha rocha e ao teu lado tudo fica mais fácil. Que tudo que conquistamos até aqui seja só uma pequena parte de tudo que temos a conquistar. Quero viver sempre ao seu lado. TE AMO!

Meu irmão Marcel, o mais velho, o exemplo de honestidade, de amizade, de parceria. Seu apoio nos momentos difíceis foram importantíssimos para que eu pudesse chegar até aqui. Me espelho em você, saiba que sempre poderá contar comigo, como eu sempre soube que poderia contar com você.

Meu maninho Matheus, por estar sempre presente, embora distante fisicamente, nesses anos em que estive na batalha da graduação. Sou orgulhoso do Homem que você está se tornando. Sei que a carreira acadêmica é complicada, mas sei que você, com toda a sua dedicação dará muito resultado, você já está no mestrado em Química (como o tempo passa...), espero um dia poder trabalhar lado a lado com você.

Minha maninha Letícia, por me permitir fazer parte de sua vida, por não me dar sossego, rs, por me ajudar alegrando meus dias. Ter participado de sua infância, acompanhar sua formação escolar e participar de sua escolha de faculdade certamente me transformou. Estou muito feliz por você estar estudando na mesma universidade em que apresento este trabalho, tenho certeza que você será uma fisioterapeuta fenomenal e cuidará de minhas dores, hahaha.

Meus tios, primos, avós e todos os familiares dessa grande família, que é muito unida, e também muito ouriçada, brigam por qualquer razão, mas acabam pedindo perdão....

Amo todos vocês!

Aos ensinamentos;

De meu orientador Prof. Dr. Alexandre Soares de Oliveira, pelo apoio, pela paciência, pela disponibilidade, pelos conselhos, por entender as minhas indagações e ter sido extremamente claro nas respostas. Agradeço também, pelas conversas, por me levantar quando estava caindo na espiral da dúvida acerca de minha capacidade, pelos conselhos de vida e pela paixão empreendida na pesquisa, a qual me serviu como exemplo e como motivação para realizar esse trabalho.

De minha coorientado Profa. Dra Cláudia Vilega Rodrigues, por toda a ajuda com o código CYCLOPS e por me nortear no árduo processo de modelagem, sou extremamente grato ao seu apoio.

Do grupo de *mCVs*, Dr. Dionísio Cielinski, Dra. Karleyne Medeiros G. Silva, Dr. Leonardo Almeida e Dra. Isabel Lima, Dr. Diogo Belloni e Msc. Diego C. Souza por compartilharem o conhecimento e estarem sempre disponíveis para auxiliar quando necessário.

Do meu amigo Matheus Soares Palhares, por estar sempre ao meu lado (literalmente enquanto não havia pandemia, rs), compartilhando o seu conhecimento sobre astronomia, iraf, cyclops, latex....essa lista é longa. Agradeço pelas conversas, desabafos mas principalmente pela amizade. Espero um dia trabalhar ao seu lado outra vez.

Ao companheirismo;

Dos amigos e professores do Programa de Pós Graduação de Física e Astronomia pela amizade, pela recepção e por todo o apoio.

Dos amigos, coordenadores e direção do Colégio Adventista de São José dos Campos e Colégio Inspire, pela confiança em meu trabalho e pelo suporte nos momentos necessários. Acredito que o mundo precise de empregadores que apoiem seus funcionários, e com vocês eu sempre me senti "parte da família".

Ao apoio;

Da CAPES, pelo suporte financeiro.

Do INPE, pelo acesso ao cluster.

Da UNIVAP, pela base educacional e toda infraestrutura.

BOA LEITURA!!

RESUMO

As variáveis cataclísmicas são sistemas binários, de curto período orbital, formados por uma estrela próxima à sequência principal que transfere matéria para a companheira anã branca. Nas polares, subclasse desses sistemas, a matéria transferida se conecta às linhas do intenso campo magnético da anã branca, formando uma coluna de acreção que conduz a matéria até um choque na sua superfície. Na coluna de acreção e na região do choque é emitida intensa radiação ciclotrônica e em raios-X moles. Nesta tese apresentamos os resultados da modelagem de dados ópticos de fluxo total e fluxo polarizado, juntamente com dados de raios-X, da polar 1RXS J174320.1-042953 (= V3704 Oph). A modelagem foi feita com o código CYCLOPS (*CYCLOtron emission of PolarS*), que calcula a emissão radiativa de uma região pós-choque tridimensional e não-homogênea, a fim de estimar parâmetros físicos e geométricos do sistema. Encontramos degenerescência no conjunto de parâmetros quando aplicamos a modelagem a dados de bandas individuais ou exclusivamente aos dados de raios-X. Essa degenerescência foi quebrada ao modelar o conjunto completo de dados simultaneamente, resultando em um modelo que apresenta baixa inclinação, com $i \approx 21^\circ$, campo magnético no polo da anã branca com valor de 12 MG , considerado baixo para sistemas polares, e alta massa para a anã branca, $M_{AB} \approx 1,36 M_\odot$. Essa massa é incomum entre as anãs brancas em sistemas binários, que caso confirmada tornaria V3704 Oph um objeto de destaque entre as polares.

Palavras-chave: Astrofísica estelar; Variáveis Cataclísmicas; Polares; Modelagem.

ABSTRACT

Cataclysmic variables are short orbital period binary systems, composed by a near main sequence star that transfers matter to a white dwarf companion. In polars, a subclass of these systems, the transferred matter connects to the intense magnetic field lines of the white dwarf, forming an accretion column that leads the matter to a shock on its surface. Intense cyclotron and soft X-ray radiations are emitted in the accretion column and in the shock region. In this thesis we present the modeling of the total and polarized optical flux data, together with X-ray data, of the polar 1RXS J174320.1-042953 (= V3704 Oph). The modeling was done with the CYCLOPS (*CYCLOtron emission of PolarS*) code, which calculates the radiative emission of a three-dimensional and non-homogeneous postshock region, in order to estimate the physical and geometrical parameters of the system. We found degeneracy in the parameter sets when we applied the modeling to single band data or exclusively to X-ray data. This degeneracy was broken by modeling the complete dataset simultaneously, resulting in a model in which the system has low inclination, with $i \approx 21^\circ$, magnetic field at the pole of the white dwarf with an intensity of 12 MG , which is considered a low value for polar systems, and high white dwarf mass, $M_{AB} \approx 1,36 M_\odot$. This mass is unusual among white dwarfs in binary systems and, if confirmed, would make V3704 Oph a prominent object among polars.

Keywords: Astrophysics; Cataclysmic Variables; Polars; Computer Modelling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de uma variável cataclísmica não magnética.....	12
Figura 2 – Esquema do potencial de Roche para um sistema binário.	13
Figura 3 – Esquema de uma mVC polar.	17
Figura 4 – Esquema da região de acreção nas polares (AM Her).	18
Figura 5 – Curvas de luz de V3704 Oph obtidas pelo <i>Montecatini Astronomical Centre</i> por Denisenko e Martinelli (2012).	21
Figura 6 – Curvas de luz de V3704 Oph calibradas em magnitude e em fase com o período e época da efeméride de Martins (2017)	22
Figura 7 – Curvas de polarização circular, em fase com os parâmetros da efeméride fotométrica de V3704 Oph.....	23
Figura 8 – Diagrama representativo da geometria utilizada pelo código CYCLOPS para recriar a emissão da RPC.	26
Figura 9 – Exemplo de modelagem CYCLOPS de V348 Pav	28
Figura 10 – Diagrama das principais rotinas usadas pelo CYCLOPS.	31
Figura 11 – Aplicação dos filtros TS_SMOOTH e SAVGOL com janela de 8 pontos à esquerda e à direita e grau do polinômio igual a 4.	32
Figura 12 – Aplicação dos filtros TS_SMOOTH e SAVGOL com janela de 8 pontos à esquerda e à direita e grau do polinômio igual a 8.	33
Figura 13 – Taxas de contagens de raios-X com energia acima de 10 keV em função do tempo	35
Figura 14 – Curva de luz em raios-X (câmera PN) no intervalo de energia entre 0,3 e 2 keV.	35
Figura 15 – Curva de luz, periodograma e diagrama de fases do conjunto completo da câmera PN no intervalo de energia 0,3 a 2 keV.	37
Figura 16 – Curva de luz, periodograma e diagrama de fases do conjunto de baixo <i>background</i> da câmera PN no intervalo de energia 0,3 a 2 keV.	38
Figura 17 – Curvas de luz em raios-X (câmera PN) nos intervalos de energia entre 0,3 e 2 keV (<i>soft</i>), entre 2 e 10 keV (<i>hard</i>) e entre 0,3 e 10 keV (total), em fase com parâmetros dados pela efeméride fotométrica.	38
Figura 18 – Espectro de potências dos dados da câmera PN, de 0,2 a 3 keV, dados de baixo <i>background</i> , com frequências entre 2 a 500 d ⁻¹	39
Figura 19 – Espectro em raios-X de V3704 Oph.	39
Figura 20 – Espectro de potências <i>Lomb-Scargle</i> para todos os dados fotométricos.....	41
Figura 21 – Espectro de potências <i>Lomb-Scargle</i> com os <i>aliases</i> de ± 1 ciclo.	42

Figura 22 – Espectro de potências <i>Lomb-Scargle</i> com os <i>aliases</i> de 3 meses.	43
Figura 23 – Espectro de potências <i>Lomb-Scargle</i> com os <i>aliases</i> de ~ 2 anos.	43
Figura 24 – Todos os dados fotométricos em fase com o período de 0,086507 d.	44
Figura 25 – Fotometria em fase com a efeméride refinada.	44
Figura 26 – Polarização Circular em fase com a efeméride refinada.	45
Figura 27 – Ajuste da refletância do telescópio P&E.	46
Figura 28 – Ajuste da transparência do céu no OPD.	47
Figura 29 – Eficiência quântica do CCD Andor iKon-L936-BR-DD (SN:13739).	47
Figura 30 – Resposta espectral normalizada para os filtros <i>Johnson-Cousins</i> (V, R e I).	48
Figura 31 – Espectro em raios-X de V3704 Oph usado no CYCLOPS.	51
Figura 32 – Modelo CYCLOPS calculado simultaneamente para dados ópticos e raios-X, para os 3 filtros, em função da fase orbital fotométrica	54
Figura 33 – Modelo CYCLOPS calculado simultaneamente para dados ópticos e raios-X, sobreposto ao espectro em raios-X observados no intervalo de 0,3 até 10 keV.	55
Figura 34 – Perfis de densidade e temperatura da RPC para modelo simultâneo dos dados ópticos e de raios-X.	55
Figura 35 – Geometria de acreção de V3704 Oph vista pelo observador terrestre em diferentes fases orbitais resultante do modelo aplicado simultaneamente aos dados ópticos e de raios-X.	57
Figura 36 – Modelo CYCLOPS calculado exclusivamente para dados ópticos em função da fase orbital fotométrica (Equação 4.1).	58
Figura 37 – Geometria de acreção de V3704 Oph vista pelo observador terrestre em diferentes fases orbitais resultante do modelo dos dados exclusivamente ópticos.	60
Figura 38 – Modelo CYCLOPS calculado exclusivamente para os dados em raios-X sobre os dados observados no intervalo de 0,3 até 10 keV.	60
Figura 39 – Histogramas de massas de 130 ABs em VCs não-magnéticas e VCs magnéticas do catálogo de Ritter e Kolb (2003).	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela das observações de V3704 Oph.....	40
Tabela 2 – Valores de refletância do telescópio P&E.....	46
Tabela 3 – Coeficientes de extinção do céu.....	46
Tabela 4 – Frequências utilizadas para compor cada banda no CYCLOPS.....	49
Tabela 5 – Valores de extinção para as bandas B e V.....	50
Tabela 6 – Propriedades físicas e geométricas de V3704 Oph estimadas a partir da modelagem pelo código CYCLOPS aplicada simultaneamente aos dados ópticos e de raios-X.	56
Tabela 7 – Propriedades físicas e geométricas de V3704 Oph estimadas a partir da modelagem pelo código CYCLOPS para dados exclusivamente ópticos.	59
Tabela 8 – Propriedades físicas e geométricas de V3704 Oph estimadas a partir da modelagem pelo código CYCLOPS para o espectro em raios-X.	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Estrutura e evolução de Variáveis Cataclísmicas	12
1.1.1	O processo de acreção de matéria em Polares	17
1.2	O sistema 1RXS J174320.1-042953 (V3704 Oph) no contexto da busca por novas mVCs.....	20
1.3	Objetivos.....	25
2	A MODELAGEM DA EMISSÃO DE RADIAÇÃO EMPOLARES E O CÓDIGO CYCLOPS	26
2.1	O código Cyclops.....	27
2.2	Estrutura de rotinas do código CYCLOPS	31
2.3	Contribuições ao código Cyclops	33
3	OBSERVAÇÕES EM RAIOS-X	36
3.1	Análise temporal dos dados de raios-X: curvas de luz.....	36
3.2	Espectroscopia em raios-X	39
4	AJUSTES PARA A MODELAGEM CYCLOPS	42
4.1	Refinando a Efeméride	42
4.2	Resposta espectral normalizada dos dados	47
4.3	Densidade colunar do Hidrogênio interestelar	51
4.4	Preparação dos dados para modelagem	52
5	RESULTADOS DA MODELAGEM	54
6	DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	63
	Referências	69

1. INTRODUÇÃO

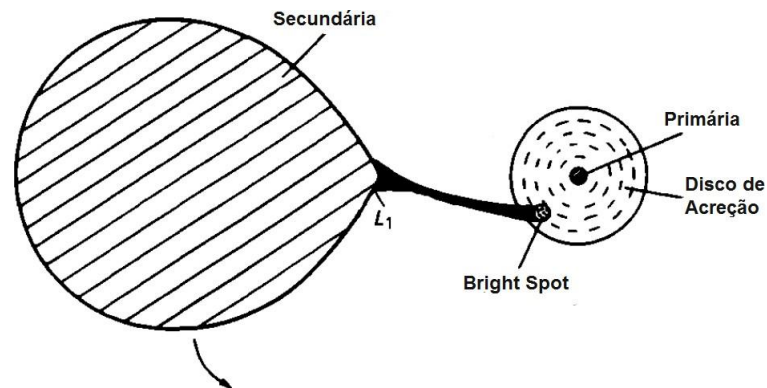
1.1 Estrutura e evolução de Variáveis Cataclísmicas

As Variáveis Cataclísmicas (VCs) são sistemas binários compactos de período orbital curto, entre 1,3 a 10 horas, formados por uma anã branca, também chamada de primária, e uma estrela anã da sequência principal (SP), chamada de secundária. A anã branca (AB) é uma estrela degenerada muito densa com temperatura superficial da ordem de 1×10^4 a 6×10^4 K, raio em torno de 10^4 km e massa variando de 0,3 a $1,3 M_{\odot}$. A secundária é comumente uma anã vermelha, que é uma estrela menos massiva que o Sol (variando de $\sim 0,075$ a $\sim 0,5 M_{\odot}$), do tipo espectral M, K ou G, com temperatura superficial da ordem de 3×10^3 a 6×10^3 K e raio de cerca de $0,15 R_{\odot}$ (WARNER, 1995).

As estrelas do sistema estão muito próximas, geralmente com UMA separação $a \approx 1R_{\odot}$ entre seus centros de massa, levando à circularização das órbitas e à sincronização da rotação da secundária com o movimento orbital por efeitos de maré. Principalmente, esta proximidade resulta em um fluxo de matéria da estrela secundária para a AB, que segue uma trajetória balística. Devido à viscosidade e à conservação de momento angular do sistema ocorre, em torno da AB, a formação de um disco de acreção que contribui com uma grande fração da luminosidade total do sistema ao transformar sua energia potencial gravitacional em energia térmica. O choque da matéria em trajetória balística com as bordas externas do disco já estabelecido, produz uma região aquecida e brilhante comumente denominada *bright spot*. Como veremos mais adiante, em casos menos frequentes a possível presença de um forte campo magnético na AB pode, dependendo da sua intensidade, inibir a formação das partes mais internas do disco de acreção, ou até suprimi-lo totalmente. A transferência de matéria da estrela secundária para a AB, que ocorre tanto em VCs não-magnéticas como magnéticas, é responsável por uma grande variedade de fenômenos que definem e representam esta classe de objetos. Estes diferentes fenômenos se manifestam como variabilidade no fluxo, na polarização e nos espectros, em escalas de tempo de minutos a anos, e podem ser extremamente violentos, justificando o nome da classe. Dentre estes fenômenos temos, por exemplo, o *flickering*, as erupções de Novas Anãs, as mudanças de estados de brilho e as explosões de Novas. A Figura 1 é uma ilustração de uma VC com uma AB de campo magnético pouco intenso, onde destacamos suas componentes.

Para compreendermos melhor como ocorre a transferência de matéria entre as estrelas devemos recorrer ao modelo de equipotenciais gravitacionais de Roche. A superfície equipotencial que passa pelo ponto interno de Lagrange, L_1 , e engloba as duas estrelas

Figura 1 – Esquema de uma variável cataclísmica não magnética, onde indicamos as estrelas primária e secundária, o disco de acreção e o *bright spot*.

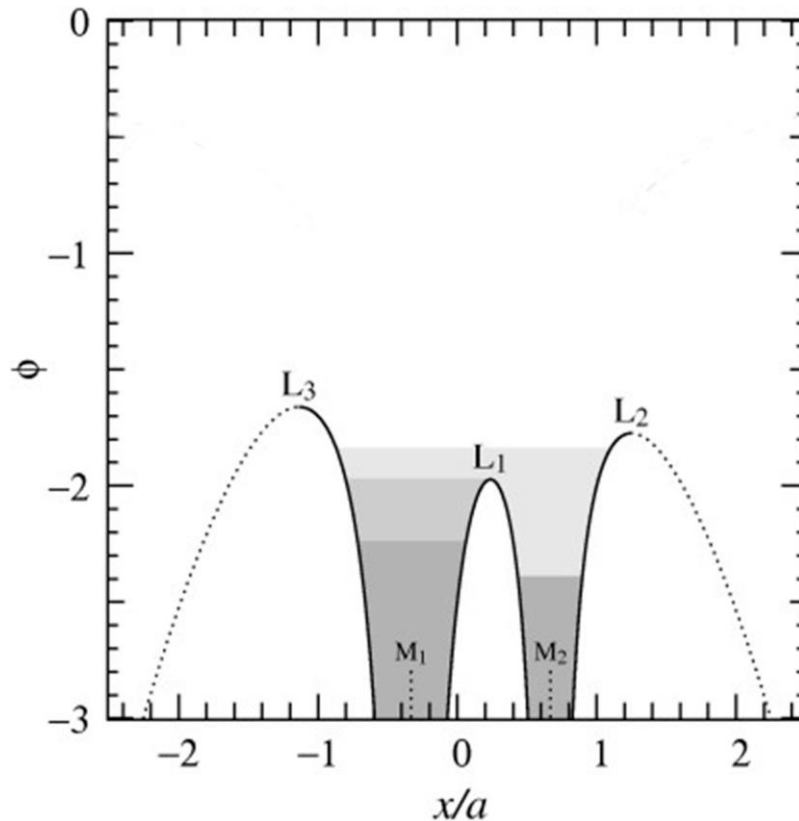


Fonte: Adaptada de Warner (1995)

do sistema é denominada lóbulo de Roche. A Figura 2 esquematiza as equipotenciais de Roche, os pontos lagrangianos e possíveis configurações para um sistema binário. Em um sistema dito separado, ambas as estrelas preenchem uma superfície equipotencial interna ao lóbulo de Roche. Nesse caso suas estruturas e evoluções não são muito afetadas pela geometria de Roche. Se apenas uma das estrelas preencher o seu lóbulo de Roche, o sistema é considerado semi-separado. Qualquer aumento de volume da estrela ou redução do volume do lóbulo levará a matéria a escoar através de L_1 para o lóbulo de Roche de sua companheira. Neste caso temos o transbordamento pelo lóbulo de Roche (*Roche-lobe overflow, RLOF*) e é nessa configuração que encontram-se as VCs. Por fim, quando ambas as estrelas extravasam seus próprios lóbulos, temos uma binária de contato, uma vez que resulta em contato físico entre as estrelas.

As VCs são originadas de sistemas binários separados com períodos orbitais da ordem de 10 anos, com ambas componentes inicialmente na SP. Um envelope comum passa a envolver o sistema quando a mais massiva das estrelas evolui para a fase de gigante vermelha, e o movimento orbital das componentes dentro deste envelope retira momento angular do sistema, diminuindo a separação entre as componentes e reduzindo o período orbital para escala de horas. Nesta fase temos um sistema com uma AB (originada da evolução da gigante) e uma secundária da SP. Ao mesmo tempo em que o envelope se dissipa, as componentes se aproximam e o sistema evolui para períodos cada vez menores, por perda de momento angular. Dado que os volumes dos lóbulos de Roche são proporcionais à separação a entre as componentes (WARNER, 1995), com a diminuição da separação o lóbulo de Roche da estrela secundária se reduz até que a secundária inicia o transbordamento e, conseqüentemente, a transferência de matéria para a primária, tornando-se uma VC.

Figura 2 – Esquema do potencial do lóbulo de Roche (linha contínua) para um sistema binário, a escala horizontal está em unidades do semi-eixo maior a , e o potencial Φ está em unidades de $G(M_1 + M_2)/a$. Os pontos indicados por M_1 e M_2 representam as posições dos centros de massa das duas estrelas, e L_1 , L_2 e L_3 indicam os pontos de Lagrange. As escalas de cinza indicam os três possíveis sistemas binários: Separado (cinza escuro), semi-separado (cinza intermediário) e de contato (cinza claro).



Fonte: Adaptado das notas de aula da Universidade de Utrecht, escrito por Onno Pols.

Em condições de conservação de momento angular total do sistema, a transferência de matéria da componente mais massiva para a menos massiva em um sistema binário leva a uma redução na separação a e conseqüente redução do lóbulo de Roche, aumentando ainda mais a transferência de massa. Este processo é retroalimentado e descontrolado. No entanto, na quase totalidade das VCs a transferência de matéria ocorre no sentido oposto, da componente menos massiva para a mais massiva, levando a um aumento de a e do volume do lóbulo e, conseqüentemente, à cessação da transferência de massa. Portanto, uma VC só pode ter transferência contínua de matéria, como de fato observado, se algum outro mecanismo de perda de momento angular estiver presente. Atribui-se esta perda de momento angular, necessário para as VCs, a dois mecanismos que ocorrem em circunstâncias distintas mas que podem ser simultâneos, ainda que com eficiências diferentes: o freamento por ventos magnetizados da estrela secundária, dominante em sistemas com períodos orbitais mais longos, e a radiação gravitacional em sistemas com períodos orbitais mais curtos. A conseqüência evolutiva da transferência de massa nas

VCs é a redução gradual do período orbital.

No freamento magnético, o vento ionizado emitido pela secundária é forçado a girar acoplado ao campo magnético desta estrela, retirando momento angular do sistema. Enquanto a secundária doa massa para a primária, via perda de momento angular por freamento magnético, sua escala de tempo térmica aumenta e ela se torna cada vez mais inchada em relação ao seu equilíbrio térmico. Quando o período orbital, que se encontra em redução, atinge cerca de 3 horas, a estrutura da secundária se altera, tornando-se completamente convectiva e interrompendo o efeito dínamo que se acredita ser responsável pelo freamento magnético. Esta súbita interrupção permite que a secundária contraia mais rapidamente que seu Lóbulo de Roche, descolando-se do mesmo e cessando a transferência de massa. Nesta fase evolutiva a perda de momento angular passa a se processar apenas pela radiação gravitacional, que reduzirá a separação orbital até que a secundária preencha novamente seu Lóbulo de Roche e reative a transferência de massa, em um período orbital de cerca de 2 h. Este cenário pode explicar, em termos gerais, a deficiência de objetos com períodos orbitais entre 2 e 3 h na distribuição de períodos das VCs, conhecida como *period gap*. Ao interromper temporariamente a transferência neste intervalo, os sistemas deixam de ter discos de acreção e, portanto diminuem drasticamente sua luminosidade, deixando de ser detectáveis como uma VC. Posteriormente, ao evoluir até o período de aproximadamente 80 minutos a secundária se altera novamente, tornando-se degenerada. A partir deste ponto o período orbital evolui para valores maiores, portanto ~ 80 min deve ser o limite mínimo para períodos orbitais de VCs. [Knigge, Baraffe e Patterson \(2011\)](#) traz uma revisão sobre a evolução de VCs.

A classificação nos vários subtipos de VCs depende de 2 fatores: a taxa de transferência de matéria da secundária e o campo magnético da AB. Em sistemas com AB de campo magnético menos intensos ($B < 1$ MG), vimos que a matéria transferida da secundária forma um disco de acreção. Nesta situação o comportamento do disco dependerá, principalmente, da taxa de transferência de matéria: altas taxas de transferência produzirão alta viscosidade em um disco estável e muito luminoso, enquanto que baixas taxas resultarão em discos instáveis que se alternam entre estados de alta e baixa viscosidade e com conseqüente variação de luminosidade. Os sistemas com discos estáveis e luminosos são classificados como Nova-likes, com períodos orbitais maiores que 3 h e que não apresentam variações de luminosidade de grande amplitude. Por outro lado, os sistemas de baixas taxas de transferência de matéria e discos instáveis são classificados como Novas Anãs, a subclasse mais abundante das VCs. As chamadas erupções de novas-anãs são frequentes e recorrentes, sendo causadas por variações nas taxas de transferência de matéria da secundária ou na viscosidade do disco, atingindo amplitude de 2 a 6 magnitudes em escalas de tempo de dias. A matéria acreta, rica em hidrogênio, se acumula sobre a superfície da AB e vai, em algum momento, entrar em ignição numa violenta reação

termonuclear. Esta explosão, chamada de Nova, ejetará parte ou quase a totalidade da matéria acumulada, interrompendo temporariamente a transferência de massa da secundária. As VCs devem passar por explosões de Novas recorrentemente, com intervalos de dezenas a milhares de anos que dependem inversamente da massa da AB e da taxa de transferência de massa. Dependendo do saldo líquido de massa nas explosões recorrentes de Novas, ou seja, qual fração da massa acumulada não é ejetada em cada explosão, a anã branca em uma VC pode crescer em massa e atingir o limite de Chandrasekhar, terminando em uma explosão de Supernova do Tipo Ia.

Variáveis Cataclísmicas magnéticas, ou mVCs, são sistemas nos quais o campo magnético superficial da anã branca é intenso ($B \geq 1$ MG). Neste caso, o material ionizado transferido pela secundária se conecta às linhas de campo magnético e se deposita diretamente sobre a superfície da AB, na proximidade dos polos magnéticos, através de uma coluna de acreção ao invés de um disco. As mVCs são subdivididas em *polares intermediárias* (PIs), ou sistemas DQ Her (PATTERSON, 1994), que possuem campos entre 1 e 10 MG, e *polares*, ou sistemas AM Her (CROPPER, 1990), com campos entre 7 e 230 MG.

Uma característica importante das mVCs é a magnetosfera, que é a região de influência do campo magnético da AB. O raio da magnetosfera (r_{mag}), conhecido como raio de Alfvén, é a distância da superfície da AB em que há equilíbrio entre a força magnética e a força exercida pela matéria proveniente da trajetória balística, sendo expresso por (FRANK; KING; RAINE, 1992):

$$r_{mag} = 5,5 \times 10^8 \frac{M_1^{1/7}}{M_\odot} R^{-2/7} L^{-2/7} \mu^{4/7} \text{ (cm)},$$

sendo R o raio da AB em unidade de 10^9 cm, M_1 é a massa da AB em unidade de M_\odot , L é a luminosidade do sistema em unidade de 10^{33} erg/s e μ é o momento magnético da AB em unidade de 10^{30} G.cm³.

Já o raio de circularização (r_{circ}) representa o raio de uma órbita circular em torno da AB onde uma partícula possuiria o mesmo momento angular que teria no ponto L_1 , e pode ser entendido como o raio mínimo da borda exterior de um disco de acreção em torno da AB. A partir da conservação do momento angular para o material acrescido podemos obtê-lo assim:

$$r_{circ} \approx (1 + q) \frac{R_{L_1}^4}{a^3},$$

em que R_{L_1} é a distância entre o centro da AB e o ponto L_1 , q é a razão entre as massas do sistema ($=M_2/M_1$) (HELLIER, 2001).

Assim, quando $r_{mag} \gg r_{circ}$ não há formação de disco e o material acretado tem sua dinâmica ditada pelo campo magnético da AB e assim temos os sistemas *polares*. Já quando $r_{mag} < r_{circ}$ há a formação de disco até que o plasma ionizado atinja a magnetosfera, modificando assim a sua dinâmica de acreção, característica presente nas PIs, que têm discos de acreção truncados nas suas regiões internas.

Como vimos anteriormente, a distribuição de períodos orbitais de VCs reflete diretamente os processos evolutivos destes sistemas. A princípio pode-se esperar que a evolução de mVCs seja semelhante à das VCs não-magnéticas, porém [Wickramasinghe e Wu \(1994\)](#) previram um cenário no qual o forte campo magnético das polares reduz a eficiência do freamento magnético e, como consequência, reduz a taxa de transferência de matéria e alonga a escala de tempo evolucionária das mVCs. Entre as mVCs, as polares dominam a distribuição de períodos abaixo de 4h enquanto que as PIs dominam a distribuição em períodos mais longos ([FERRARIO; DE MARTINO; GÄNSICKE, 2015](#)). [Norton, Wynn e Somerscales \(2004\)](#) argumentam que PIs com $P_{orb} > 3h$ e com ABs de campos magnéticos mais intensos devem evoluir para Polares. No entanto, as poucas PIs com $P_{orb} < 2h$ conhecidas não devem seguir esta evolução e se transformar em polares.

Revisões fundamentais sobre VCs e mVCs podem ser encontradas em [Cropper \(1990\)](#), [Warner \(1995\)](#), [Patterson \(1994\)](#), [Ferrario, de Martino e Gänsicke \(2015\)](#) e [Mukai \(2017\)](#).

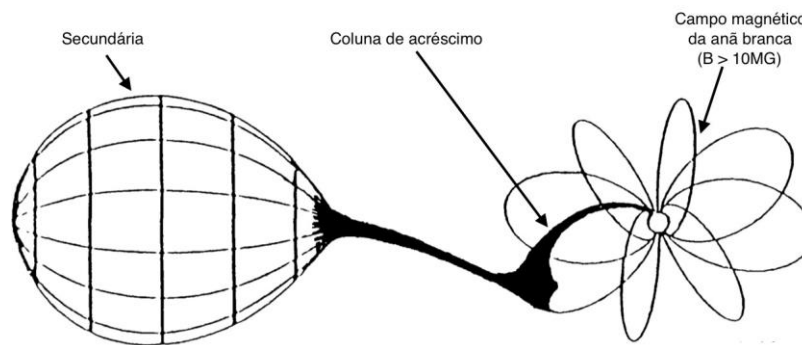
1.1.1 O processo de acreção de matéria em Polares

Nas mVCs polares, a AB possui campo magnético entre 10^7 G e 10^8 G, sendo suficientemente intenso para não permitir a formação de um disco. Assim, a matéria proveniente da secundária transferida através do ponto interno de Lagrange (L_1) segue trajetória balística até o ponto em que encontra a magnetosfera da AB, determinando uma região chamada de *threading region*, ou região de acoplamento. A partir dessa região, o plasma segue as linhas de campo magnético da AB, formando uma coluna de acreção, como demonstra a Figura 3. Esse intenso campo magnético também resulta em uma característica fundamental para essa subclasse: a AB ter seu período de rotação (P) sincronizado com o período orbital do sistema (P_b) devido a equiparação do torque gerado pelo acréscimo na AB e o torque magnético gerado pela interação do campo magnético da AB com a secundária ([FRANK; KING; RAINE, 1992](#)):

$$\frac{\mu_1 \mu_2}{a^3} = \dot{M} (GM_1 r_{mag})^{1/2},$$

sendo μ_1 o momento magnético da AB, μ_2 o momento magnético da secundária e \dot{M} a taxa de acreção do material da secundária.

Figura 3 – Esquema de uma mVC polar.



Fonte: Adaptado de [Cropper \(1990\)](#)

Enquanto o fluxo de matéria ionizada não homogênea, proveniente da secundária, se aproxima da AB, o crescimento da pressão magnética comprime o fluxo de matéria fazendo com que se formem aglomerados de matéria que continuam em uma trajetória balística. Com o aumento da pressão magnética sofrida por esses aglomerados, ao se aproximarem da AB, eles são forçados a mudarem de direção e seguirem as linhas de campo, porém só cederão à pressão magnética quando esta for superior à sua pressão de arraste, que está fortemente relacionada com a densidade e a velocidade. Desta forma há uma separação entre o gás mais denso e menos denso, fazendo com que o gás de alta densidade se aproxime mais da anã branca, penetrando mais no campo magnético do que o gás de menor densidade. Assim os aglomerados provenientes da secundária seguirão por linhas do campo magnéticos ligeiramente diferentes até a superfície da AB.

O gás transferido não será simplesmente conduzido pelas linhas de campo magnético para próximo dos polos da anã branca, mas, devido à força de Lorentz, apresentará movimento espiral com aceleração uniforme ao redor das linhas do campo magnético. Esta força faz com que as partículas do gás ionizado se desloquem em um movimento circular pelas linhas de campo magnético, e por conta desta aceleração emitem radiação. Esta forma de radiação é denominada de radiação ciclotrônica e é altamente polarizada (daí a classificação destes objetos como *polares* ([KRZEMINSKI; SERKOWSKI, 1977](#))), sendo dominante no óptico e no infravermelho.

A polarização da radiação eletromagnética pode ser descrita através dos parâmetros de Stokes:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

sendo I a intensidade, Q e U parâmetros que definem a polarização linear e V_c define a polarização circular. Quando a polarização é nula, temos a relação $Q = U = V_c = 0$. Quando é exclusivamente linear temos $V_c = 0$ e para a polarização exclusivamente circular temos $Q = U = 0$. Um feixe completamente polarizado é caracterizado por:

$$I = \sqrt{Q^2 + U^2 + V_c^2} \quad (1.2)$$

O grau de polarização linear é dado por:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (1.3)$$

e o grau de polarização circular, por:

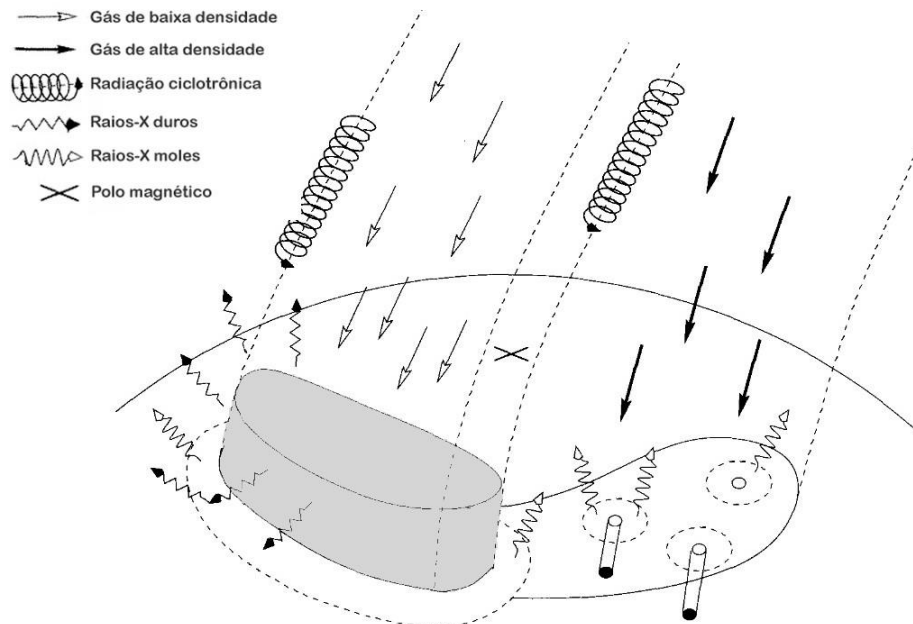
$$V = \frac{V_c}{I}. \quad (1.4)$$

A matéria acretada é conduzida para próximo de um dos polos magnéticos da anã branca (ou dos dois polos simultaneamente, em alguns sistemas), definindo uma região de acreção que é a fonte dominante de radiação nas polares (Figura 4). A localização da região de acreção na superfície da AB é determinada ainda na região de acoplamento. O material chega a essa região com velocidades supersônicas. Com a colisão do material de menor densidade com a superfície da primária, a sua energia cinética é convertida em energia térmica, criando uma região conhecida como região pós-choque (RPC), que se expande adiabaticamente acima da superfície por aproximadamente 10% do raio da anã branca. De acordo com as condições de Rankine–Hugoniot para choques intensos (*strong-shock*), os valores pré e pós-choque da velocidade e da densidade variam por um fator quatro (FRANK; KING; RAINE, 1992). Assim, o gás que chega na RPC colide com o topo dessa coluna, reduzindo em quatro vezes sua velocidade, enquanto sua densidade é aumentada por este mesmo fator. O plasma quente então se resfria através de dois mecanismos distintos nesta região, o resfriamento por raios-X, na forma de radiação *bremstrahlung*, e o resfriamento ciclotron, na forma de radiação ciclotrônica no óptico e no infravermelho. Desta forma formam-se perfis de temperatura e densidade variáveis na RPC. A liberação dessa energia cinética aquece o material da coluna a uma temperatura de aproximadamente 2×10^8 K (20 keV) e resulta em uma emissão de raios-X duros. Cerca de metade dessa radiação é dirigida para a anã branca, sendo reprocessada na forma de raios-X moles.

Na região de acoplamento o gás de alta densidade penetrou mais fundo nas linhas de campo magnético e conseqüentemente é conduzido para uma região vizinha à RPC na superfície da AB. Sendo mais denso, este gás consegue penetrar na sua superfície e,

desta forma, a energia cinética é convertida em energia térmica que é absorvida pela anã branca, gerando radiação de corpo negro (≈ 2 eV), e emitindo raios-X moles (HELLIER, 2001).

Figura 4 – Esquema da região de acreção nas polares (AM Her), a RPC está preenchida em cinza.



Fonte: Adaptado de Hellier (2001)

Além da polarização intensa e da emissão de raios-X, outras características observacionais das polares incluem o desdobramento Zeeman nas linhas espectrais, cujo grau de desdobramento depende da intensidade do campo magnético. Além destas características, costuma-se observar a alternância entre estados altos e baixos de luminosidade, tanto no óptico quanto em raios-X, com quedas de 1 a 3 magnitudes, provavelmente associadas a variações na taxa de transferência de matéria da secundária. Quando em estado baixo, o espectro óptico pode apresentar ondulações (*cyclotron humps*) em seu contínuo, associadas aos harmônicos da emissão ciclotron na frequência fundamental. Junto com a polarização e o desdobramento Zeeman, os *cyclotron humps* constituem os três métodos principais para determinação da intensidade do campo magnético B. O espectro óptico típico das polares apresenta, também, linhas de emissão de alta ionização de He II, o complexo de C III/N III em 4650 Å e linhas de Balmer.

1.2 O sistema 1RXS J174320.1-042953 (V3704 Oph) no contexto da busca por novas mVCs

Detalhes do mecanismo de transferência de matéria, da evolução dos campos magnéticos, dos estados alto e baixo de luminosidade, da acreção na superfície da AB, a

formação e a evolução de VCs magnéticas, e a possível relação evolutiva entre as PIs e as polares, são questões fundamentais que permanecem sem resposta. Para resolver estas questões é fundamental conhecer detalhadamente uma grande quantidade de mVCs, aumentando a amostra de objetos bem estudados, e é neste contexto que se enquadra este trabalho. Enquanto o número de VCs conhecidas está na casa dos milhares, segundo o catálogo [Ritter e Kolb \(2003\)](#)(RKcat Edition 7.24, 2016)¹, a quantidade de mVCs polares confirmadas estão na casa de centenas. Uma boa forma de destacar uma candidata a mVC é observar o seu espectro no óptico, já que os espectros destes sistemas apresentam características que são importantes para auxiliar a diferenciá-las de outros sistemas, como visto acima. Apesar disso, a identificação de uma mVC não é tarefa trivial. Geralmente, nenhuma técnica observacional é suficiente para classificar um objeto como mVC quando aplicada isoladamente, especialmente no caso das PIs (devido à contribuição do disco de acreção truncado que mimetiza o comportamento de uma VC não magnética). Os critérios usuais para classificação como mVC incluem, além das características espectrais já citadas, a detecção em raios-X e radiação polarizada no óptico e infravermelho. No entanto, apesar da maior parte das mVCs terem sido descobertas através de *surveys* de raios-X como o do ROSAT, a detecção de raios-X não é um critério necessário nem suficiente para a classificação de um objeto como mVC. Objetos pouco luminosos ou muito distantes podem não ser detectados em raios-X, e além disso a emissão em raios-X não é exclusividade de mVCs, já que Novas Anãs ([BEUERMANN; THOMAS, 1993](#); [SZKODY et al., 2011](#)) e outras subclasses de VCs também podem ser fontes de raios-X. Em termos espectroscópicos, a linha de alta ionização de He II 4686 Å também é presente em, por exemplo, Novas, Nova-likes, CBSS e em Novas Anãs. Assim, a identificação de uma nova mVC costuma exigir o uso de várias técnicas distintas.

Desde 2012, o grupo de pesquisa com membros de diversas instituições², ao qual fui inserido em 2015, trabalha com um projeto observacional que procura por novas mVCs a fim de aumentar o número de membros conhecidos desta classe e realizar um estudo observacional extensivo e multi-técnicas dos sistemas mais promissores então descobertos.

Naquele projeto uma amostra de 90 objetos fotometricamente transientes foram selecionados, principalmente do catálogo CRTS³ (*Catalina Real-Time Transient Survey*, ([DRAKE et al., 2009](#))). Para a amostra selecionada foram obtidos, entre 2012 e 2018, espectros exploratórios nos telescópios SOAR e P&E de 1,6 m do OPD (Observatório Pico dos Dias), com o objetivo de identificar as características espectrais que poderiam ser as assinaturas de alta ionização típicas das mVCs. Com base nos espectros exploratórios encontramos 72 candidatas a VCs, das quais 30 são fortes candidatos a mVCs, sendo 20 polares, 1 PI e 9 candidatos a PIs de curto período. Os resultados deste projeto de busca

¹ <http://physics.open.ac.uk/~uckolb/RKcat>

² UNIVAP, INPE, IAG/USP e GEMINI

³ <http://nesssi.cacr.caltech.edu/CRTS/>

por novas mVCs estão publicados em [Oliveira et al. \(2017\)](#) e [Oliveira et al. \(2020\)](#). Dentre os candidatos a mVCs resultantes desta busca, foram selecionados os mais promissores para um *follow-up* observacional através de fotometria, espectroscopia e polarimetria com dados obtidos nos observatórios SOAR e OPD, a fim de realizar uma análise detalhada de suas características. O objeto 1RXS J174320.1-042953 foi um dos candidatos selecionados para estudo observacional complementar, sendo classificado por [Martins \(2017\)](#), em sua dissertação de mestrado, como uma mVC do tipo polar.

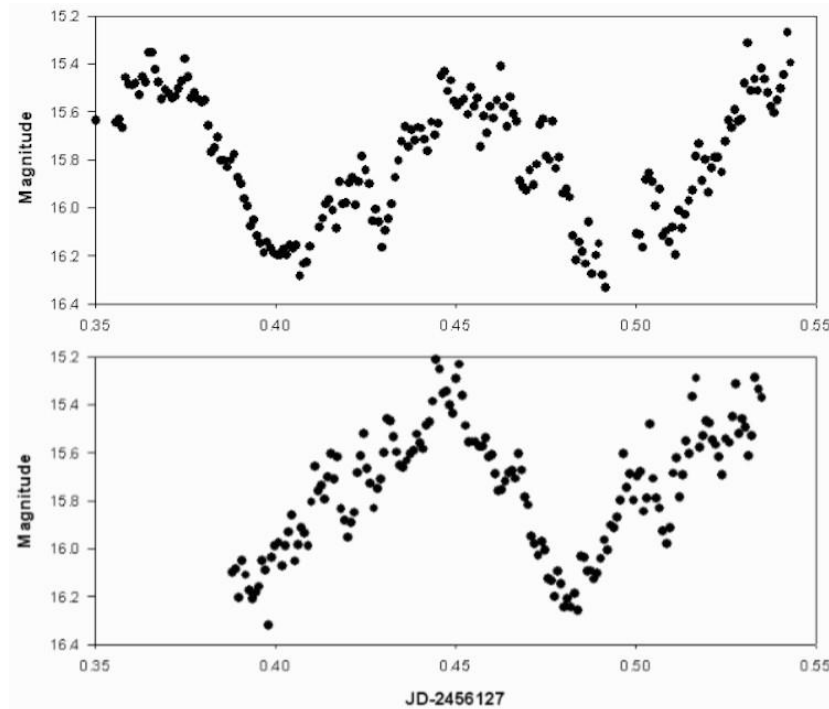
O objeto 1RXS J174320.1-042953, doravante referido como V3704 Oph, foi selecionado para o projeto de espectroscopia exploratória ([OLIVEIRA et al., 2017](#)) por ser uma fonte de raios-X associada a um objeto com variabilidade no óptico. V3704 Oph foi descoberto por [Denisenko e Sokolovsky \(2011\)](#), através da correlação entre objetos catalogados no ROSAT⁴ e entre objetos que apresentavam variabilidade óptica em catálogos como o DSS⁵ (*Digitized Sky Survey*) e o *Palomar Observatory Sky Survey*. Devido a sua variação fotométrica, aqueles autores sugeriram para V3704 Oph a classificação de VC do tipo nova anã. Posteriormente, [Denisenko e Martinelli \(2012\)](#) realizaram séries temporais de fotometria de V3704 Oph (Figura 5) em duas noites em julho de 2012, utilizando um telescópio de 35 cm de diâmetro, sem o uso de filtros, e sugeriram a classificação como uma mVC devido à forma e amplitude (de cerca de 0,8 mag) de sua curva de luz. Uma busca por periodicidades nos seus dados fotométricos sugeriu um período orbital de $0,0866 \pm 0,0003$ dias, ou 2,08 horas. Os autores não descartaram a possibilidade deste objeto ser uma polar intermediária devido a indícios de variabilidade com periodicidade mais curta, possivelmente associada à rotação da anã branca. A distância de V3704 Oph é de $d = 214, 19_{-1,63}^{+1,97}$ pc, estimada por [Bailer-Jones et al. \(2021\)](#) a partir das paralaxes publicadas na terceira liberação de dados do satélite Gaia (*early data release 3*, eDR3).

Em [Martins \(2017\)](#) foi apresentada a análise de dados de fotometria, polarimetria e espectroscopia de V3704 Oph. Foram as primeiras observações espectroscópicas e polarimétricas publicadas deste objeto. O espectro se mostrou típico de polares, com a linha de alta ionização de He II 4686 Å com intensidade comparável à de H β , além do complexo de Bowen de C III/N III, H α e linhas de He I, todas em emissão. Estas linhas apresentam perfis que variam ao longo da série, com a evidente presença de uma componente gaussiana estreita e uma larga, característica comum entre as polares, e podem ser interpretadas como emissões originadas em regiões distintas do sistema. Não há sinais de linhas da estrela secundária nestes espectros. As curvas de velocidades radiais das linhas de HeII 4686 Å, H β e H γ têm amplitudes de 400 a 500 km/s. Análises de periodicidades baseadas em técnicas de Fourier, aplicadas aos dados de velocidades radiais, mostram um período de 0,088 \pm 0,015 d que é compatível, dentro das incertezas, com o período fotométrico obtido

⁴ <http://www.xray.mpe.mpg.de/cgi-bin/rosat/rosat-survey>

⁵ http://stdatu.stsci.edu/cgi-bin/dss_form

Figura 5 – Curvas de luz de V3704 Oph obtidas pelo *Montecatini Astronomical Centre* nos dias 16 (acima) e 18 (abaixo) de julho de 2012, sem uso de filtros (luz branca).



Fonte: Adaptado de [Denisenko e Martinelli \(2012\)](#)

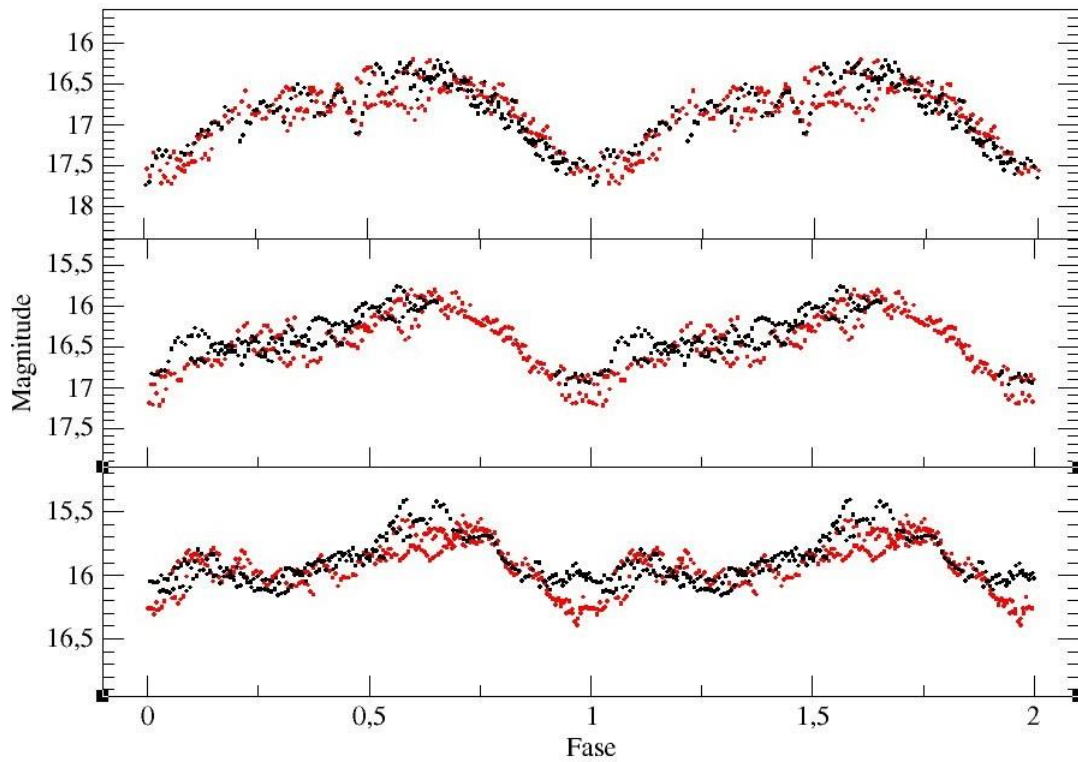
por [Denisenko e Martinelli \(2012\)](#). Os dados fotométricos de [Martins \(2017\)](#) apresentam curvas de luz com amplitude de cerca de 1,5 mag, associada à modulação orbital, e apresentam um mínimo principal além de indício de um mínimo secundário defasado de 0,5 ciclo, e são não-eclipsantes. O periodograma destes dados mostra um período orbital de $0,08659 \pm 0,00005$ d, consistente com o período encontrado na literatura, mas com uma incerteza menor devido a maior cobertura temporal dos dados. A efeméride determinada por [Martins \(2017\)](#) foi:

$$T(HJD) = 2.456.773,774(15) + 0,08659(5) \times E \quad (1.5)$$

onde a época (T_0) se refere a um instante de um dos mínimos principais da curva de luz.

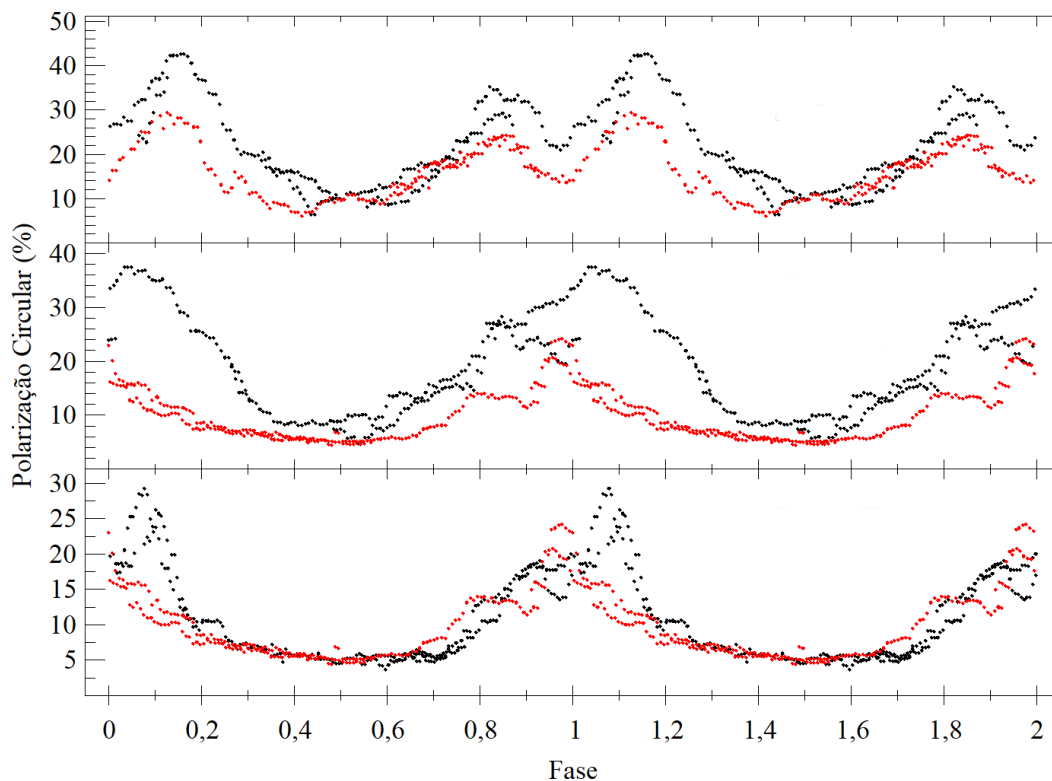
As curvas de luz, em fase com a efeméride e calibradas em magnitude, podem ser vistas na Figura 6. A calibração em magnitudes realizada em [Martins \(2017\)](#) foi feita através das magnitudes conhecidas da estrela de comparação (USNO-A2.0 0825-11051991) usada na fotometria diferencial, nos diferentes filtros usados nas observações. Os dados polarimétricos de [Martins \(2017\)](#), por sua vez, revelam alta polarização circular, de até 45%, como pode ser visto na Figura 7, além de polarização linear menos intensa, de até 10%. A alta polarização circular observada confirmou definitivamente a natureza de VC polar de V3704 Oph. [Martins \(2017\)](#) discutem ainda que a polarização circular é modulada com o período orbital e não troca de sinal, indicando que a acreção deve

Figura 6 – Curvas de luz da V3704 Oph, nos filtros V, R e I (de cima para baixo no gráfico), em fase com o período e época da efeméride de [Martins \(2017\)](#). São mostrados 2 ciclos para melhor visualização da modulação. Os pontos pretos são da missão de abril de 2014 e os vermelhos são de julho de 2014 (ver Tabela 1).



ocorrer na proximidade de apenas um dos polos magnéticos da anã branca, e que a região emissora da radiação ciclotron permanece sempre visível.

Figura 7 – Curvas de polarização circular, em fase com os parâmetros da efeméride de [Martins \(2017\)](#), nos filtros V, R e I (de cima para baixo no gráfico). Os pontos vermelhos são da missão de abril de 2014 e os pretos são de julho de 2014 (ver Tabela 1).



1.3 Objetivos

Nesta tese temos como objetivo apresentar uma modelagem inédita da emissão radiativa da RPC de V3704 Oph tendo como ferramenta o código CYCLOPS. O CYCLOPS considera uma RPC tridimensional e não-homogênea associada a um campo magnético dipolar, e modela as suas emissões cíclotron e *bremsstrahlung* no óptico e em raios-X. Aplicamos esta modelagem aos dados ópticos de séries temporais de medidas de fluxo total e fluxo polarizado apresentados em [Martins \(2017\)](#) e também a dados inéditos de raios-X obtidos com o observatório espacial XMM-Newton. Os dados de raios-X permitem adicionar vínculos à modelagem que auxiliam excluir modelos degenerados ou soluções incompatíveis com o conjunto de dados.

Como veremos a seguir, a modelagem assim realizada permite a caracterização da AB e do material da coluna de acréscimo, tanto nos aspectos de parâmetros geométricos como inclinação do sistema binário e localização da região de acoplamento, quanto de parâmetros físicos como distribuição de temperaturas e densidades radiais da coluna, altura da coluna e até mesmo uma estimativa da massa e campo magnético da AB.

2 A MODELAGEM DA EMISSÃO DE RADIAÇÃO EMPOLARES E O CÓDIGO CYCLOPS

Historicamente, a tentativa de modelar mVCs polares iniciou-se na década de 1980 por diferentes grupos de pesquisas. A emissão de radiação polarizada em polares foi abordada quantitativamente pela primeira vez por [Chanmugam e Dulk \(1981\)](#) e por [Meggitt e Wickramasinghe \(1982\)](#), inicialmente assumindo a região emissora como uma fonte pontual, fixando valores do campo magnético, temperatura e densidade eletrônica e, posteriormente, incluindo uma estrutura de temperatura na frente de choque. [Wickramasinghe e Meggitt \(1985\)](#) avançaram nesta fase inicial de modelagem da emissão ciclotron de polares ao assumir regiões emissoras como fontes pontuais com condições físicas uniformes porém permitindo efeitos associados à profundidade óptica, e localizadas nos polos magnéticos de um campo bipolar centrado em relação à AB, e introduzem uma grade de fluxos não polarizados e polarizações lineares e circulares em função do ângulo de visada. Esses modelos tiveram grande sucesso em explicar características observacionais gerais, porém falharam em detalhes como, por exemplo, a faixa de comprimentos de onda onde a radiação polarizada é encontrada e a ausência de harmônicos ciclotron em seus espectros. Utilizando regiões de emissão cilíndricas estendidas e deslocadas dos polos, [Wickramasinghe e Ferrario \(1988\)](#) conseguiram resolver parte das falhas das modelagens anteriores. [Ferrario e Wickramasinghe \(1990\)](#) aperfeiçoaram a modelagem de assimetrias dependentes da fase que são presentes em curvas de fluxo e polarização, ao considerar regiões emissoras homogêneas em forma de arco com grande extensão azimutal sobre a superfície da AB, usando uma soma de fontes pontuais com parâmetros distintos para representar a emissão região. Esta metodologia leva em consideração a hipótese de que a região emissora é opticamente fina. Como é de se esperar devido ao choque na RPC, a densidade e a temperatura também devem variar na direção radial, e o cálculo desse perfil de densidades e temperaturas foi introduzido nos modelos de [Wickramasinghe e Ferrario \(1988\)](#), [Wu e Wickramasinghe \(1990\)](#) e [Potter *et al.* \(2004\)](#).

Até então, os parâmetros que definem a RPC eram ajustados por tentativa e erro até que o modelo chegasse a um bom ajuste. [Cropper e Horne \(1994\)](#) e [Potter, Cropper e Hakala \(1998\)](#) implementaram algoritmos de otimização (máxima entropia e genético, respectivamente) para obter o modelo de melhor ajuste para a intensidade, polarização circular e linear, e ângulo da polarização linear. Estes últimos autores denominaram o processo de reconstrução da imagem da região emissora ciclotron na superfície da AB de Imageamento Stokes. Um importante passo para a modelagem da região emissora em polares é o cálculo da estrutura do choque resultante de fluxos supersônicos de matéria

acretada sobre ABs através de colunas magneticamente limitadas, como descrito [Cropper et al. \(1999\)](#) e [Canalle et al. \(2005\)](#), considerando a curvatura das linhas de campo em um dipolo magnético. Como próximo passo neste histórico da modelagem, a seguir vamos descrever o código CYCLOPS que, pela primeira vez, adotou uma geometria tridimensional para a coluna de acreção, em associação à solução das equações de transporte radiativo com *input* de radiação não-nulo.

2.1 O código Cyclops

CYCLOPS¹, um acrônimo para **CYCLO**tron emission of **PolarS**, é um código originalmente criado para reproduzir a emissão ciclotrônica que se origina na RPC das mVCs ([COSTA; RODRIGUES, 2009](#)). Atualmente, após sua contínua atualização, podemos reproduzir também a emissão *bremsstrahlung* da RPC e a absorção na coluna de acréscimo ([SILVA et al., 2013](#)), ajustando simultaneamente dados observacionais no óptico e em raios-X a fim de estimar algumas propriedades geométricas e físicas dos sistemas mVCs.

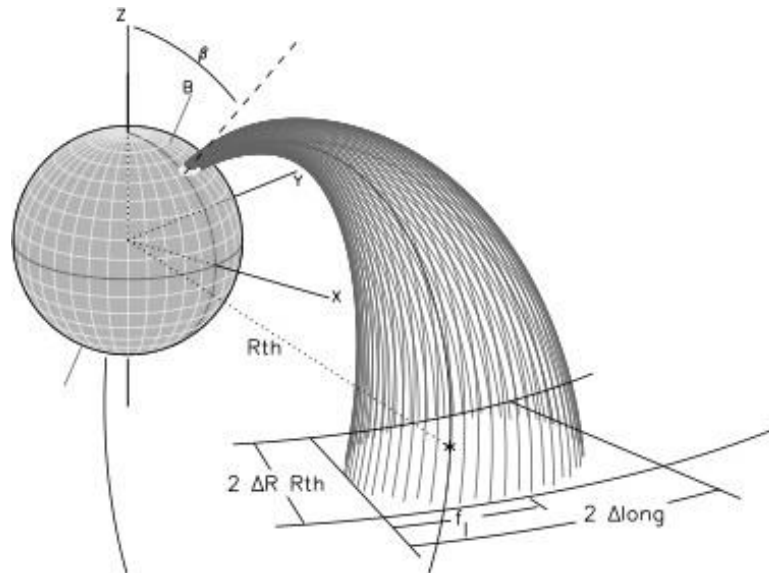
O código CYCLOPS é fundamentado na solução do transporte radiativo de [Pacholczyk e Swihart \(1975\)](#) e [Meggitt e Wickramasinghe \(1982\)](#), que calcula a emissão ciclotron e *bremsstrahlung*, considerando os parâmetros físicos de densidade, temperatura e campo magnético não homogêneos ao longo da região emissora. O código reproduz a coluna de acreção como uma região tridimensional próxima à AB, sendo que essa coluna inteira é dividida em vários elementos de volume (*voxels*) de acordo com a resolução espacial escolhida, cada *voxel* com seu valor de campo magnético, densidade e temperatura. As emissões dos quatro parâmetros de Stokes são calculadas em cada *voxel* e, em seguida, o transporte radiativo é calculado ao longo da linha de visada. Desse modo, temos como resultado curvas de luz e de polarização em função da fase orbital.

A geometria da coluna é definida pelas linhas do campo magnético dipolar centrado na AB, em que o eixo do dipolo faz um ângulo arbitrário com o eixo de rotação da AB, como vemos na Figura 8. Para um determinado referencial definimos a linha de visada do observador, assim, temos um conjunto de linhas de visada bidimensional que varia ao longo da fase orbital. No centro da RPC temos um ponto de referência que define o zero da longitude, e nós o chamamos de ponto de ancoragem. Com a geometria em mente, podemos entender os parâmetros geométricos de entrada para o código CYCLOPS, são eles: i a inclinação do plano orbital do sistema em relação ao observador; β o ângulo entre o eixo de rotação e a RPC; Δ_R e Δ_J demarcam os limites da região de acoplamento, em que sua projeção sobre a anã branca define a RPC bidimensional; h representa a altura

¹ O código CYCLOPS é escrito em IDL e está disponível gratuitamente mediante solicitação. Para obter uma cópia da versão mais atual do código, envie uma solicitação ao desenvolvedor, através do e-mail: claudia.rodrigues@inpe.br

da RPC em unidades do raio da AB; B_e a intensidade do campo magnético da AB em seu polo magnético e B_a e B_g definem a direção do eixo do dipolo magnético da AB.

Figura 8 – Diagrama representativo da geometria utilizada pelo código CYCLOPS para recriar a emissão da RPC. A região emissora é a pequena região branca próxima à superfície da AB.



Fonte: [Costa e Rodrigues \(2009\)](#)

Outros parâmetros físicos devem ser definidos, estes não relacionados à geometria, mas intrínsecos ao sistema, como a massa da AB (M_{AB}), a taxa de acreção (\dot{M}) e, caso seja conhecida, a distância entre um observador terrestre até o sistema, que pode ser obtida através das paralaxes medidas pelo satélite Gaia. Esse último parâmetro é definido no código como um valor fixo, ou seja, não será ajustado.

Como descrito anteriormente, o código CYCLOPS, diferentemente de outros códigos (por exemplo, [Fischer e Beuermann \(2001\)](#); [Canalle et al. \(2005\)](#); [Saxton et al. \(2007\)](#); [Yuasa, et al. \(2010\)](#); [Hayashi e Ishida \(2014\)](#); [Suleimanov, Doroshenko e Werner \(2019\)](#)), é um código aplicado a um volume tridimensional, o que nos permite modelar corretamente polarização óptica e curvas de luz. Uma segunda versão do código ([Silva et al., 2013](#)) incluiu modificações para modelar simultaneamente a emissão ciclotrônica óptica e a emissão *bremmsstrahlung* em raios-X da RPC de polares. A emissividade *bremmsstrahlung* é calculada assumindo um plasma magnetizado de hidrogênio totalmente ionizado, seguindo [Gronenschild e Mewe \(1978\)](#). Além disso, como a AB é tratada como um corpo 3D no código, o CYCLOPS também pode modelar o chamado auto-eclipse da RPC pela AB. Em outras palavras, o código leva em consideração a ocultação parcial ou total da RPC pela AB, que pode ocorrer dependendo da geometria do sistema, produzindo uma

variação no fluxo óptico e raios-X observado em função da fase de rotação da AB. A estrutura de região pré-choque também é representada como uma estrutura 3D no código, que funciona como uma região de absorção parcial. Sua absorção da emissão RPC está incluída no transporte radiativo e nos permite calcular consistentemente a variação da emissão de raios-X ao longo da rotação da AB e seu efeito nas curvas e espectros de raios-X. Em adição às absorções pela região pré-choque e auto eclipse pela AB, que são dependentes da fase, o código contempla a absorção pelo meio interestelar, que é invariante em relação ao ciclo orbital e que depende da densidade colunar do meio interestelar na linha de visada.

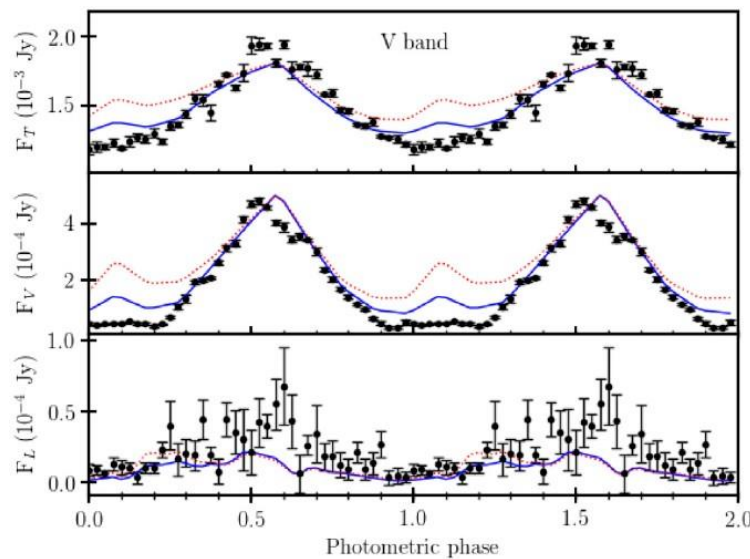
Em sua versão inicial, o código CYCLOPS adotava uma função analítica para representar a distribuição de temperatura e densidade eletrônica na região emissora. A fim de realizar uma modelagem mais acurada da RPC, uma nova versão do código (Oliveira *et al.*, 2019) soluciona as equações hidrodinâmicas do plasma, em que os processos radiativos de *bremsstrahlung* e ciclotron resfriam o plasma até ele encontrar a superfície da AB. Para isso foram levados em conta o potencial gravitacional da AB (por exemplo, Cropper *et al.* (1999)) e equipartição entre íons e elétrons no processo, o que é uma suposição razoável para a maioria das polares (por exemplo, Van Box Som *et al.* (2018)). Seguindo Hayashi e Ishida (2014), adotou-se uma geometria quase dipolar (isto é, há uma variação cúbica na secção transversal) permitindo que o campo magnético da AB decaia com o distanciamento de sua superfície (Canalle *et al.*, 2005) levando em consideração que a região de acoplamento não está a uma distância infinita, como outrora descrito em Suleimanov *et al.* (2016). O resfriamento devido ao *bremsstrahlung*, bem como a relação entre os dois processos, são descritos por Van Box Som *et al.* (2018), já o resfriamento pelo processo ciclotron é descrito seguindo Canalle *et al.* (2005). Como teste de sanidade para a nova versão, verificou-se que os perfis das RPCs e obtidos nessa versão são consistentes com trabalhos prévios (por exemplo, Cropper *et al.* (1999), Yuasa, *et al.* (2010), Hayashi e Ishida (2014), Van Box Som *et al.* (2018)), desde que as premissas sejam as mesmas na modelagem. Além dos aprimoramentos citados, a versão corrente do CYCLOPS possibilita a utilização de múltiplas frequências para representação de cada banda de observação no óptico.

A busca pelo modelo que melhor ajusta os dados observacionais é realizada através de duas técnicas de minimização de χ^2 : o algoritmo genético PIKAIA (Charbonneau, 1995) é inicialmente usado para buscar a região, no espaço de parâmetros, que minimiza o χ^2 , e posteriormente o código AMOEBA (PRESS *et al.*, 1992) refina a busca pelo melhor modelo dentro desta região. O χ^2 a ser minimizado, no regime óptico, é a soma dos χ^2 de cada banda observada e de cada curva observacional, i.e., fluxo total, fluxos circularmente e linearmente polarizados, e ângulo de posição da polarização linear. Cada parcela do χ^2 pode ser ponderada pelo erro observacional correspondente. Ao χ^2 no óptico é somado o

χ^2 em raios-X, e a soma destes dois é a figura de mérito final a ser minimizada.

Um exemplo da aplicação do CYCLOPS pode ser visto em [Oliveira et al. \(2019\)](#), em que a mVC polar V348 Pav teve a sua RPC modelada para os dados fotométricos e polarimétricos nos filtros B, V, R e I. Vemos um exemplo do ajuste do filtro V na Figura 9, como resultado da modelagem eles obtiveram valores de campo magnético da AB de ≈ 28 MG, massa da AB de $\approx 0,85 M_{\odot}$, taxa de acreção de $10^{-11} M_{\odot} \text{ano}^{-1}$ e uma inclinação orbital baixa de $\approx 25^{\circ}$. Os valores de massa da AB e a inclinação do sistema forma condizentes com a análise das velocidades radiais através da tomografia Doppler apresentada no mesmo trabalho.

Figura 9 – Exemplo do melhor modelo de V348 Pav produzido pelo código CYCLOPS (linha azul contínua) sobre os dados observados (barras de erro pretas) para o filtro V, em fase com a efeméride. A linha pontilhada vermelha representa o modelo normalizado sem espalhamento interno na coluna de pré-choque. São mostrados o fluxo total (polarizado e não polarizado) (F_T), o fluxo circularmente polarizado (F_V) e o fluxo linearmente polarizado (F_L).



Fonte: Adaptado de [Oliveira et al. \(2019\)](#)

Atualmente o código CYCLOPS pode modelar dados ópticos simultaneamente com dados em raios-X. Apesar do fato de que a modelagem de emissão de raios-X ser bastante conveniente para estimar parâmetros magnéticos das mVCs, há uma grande dificuldade com esta abordagem, a degenerescência nos modelos. Muitas combinações de parâmetros levam, naturalmente, a espectros de raios-X virtualmente idênticos, apesar de as RPCs serem substancialmente diferentes. Isso implica que o ajuste de espectros contínuos de raios-X por si só não fornece necessariamente estimativas inequívocas para parâmetros mVCs mesmo em esquemas simplificados. Em [Belloni et al. \(2021\)](#) vemos a descrição detalhada da implementação dessa versão bem como uma análise de como quebrar essa degenerescência entre parâmetros nos modelos. Na próxima seção apresentaremos como

o usuário interage com o código e como está organizada a sua lógica de programação.

2.2 Estrutura de rotinas do código CYCLOPS

O usuário interage com o CYCLOPS através da rotina *xanalise*. Ela lê um arquivo criado pelo usuário (com extensão *.inp* ou *.input*) contendo uma série de variáveis geométricas e físicas que serão usadas para criar os modelos. As principais variáveis são:

- **I_INF** = i , que é a inclinação do plano orbital do sistema em relação ao observador;
- **MWD_INF** = M_{AB} é a Massa da AB em unidades de massas solares;
- **BETA_INF** = β , que é o ângulo entre o eixo de rotação e o ponto de ancoragem;
- **B_INF** = B_p é Campo Magnético no polo da AB;
- **MDOT_INF** = \dot{M} é o valor, em log, da taxa de acreção;
- **B_LONG_INF** = B_l que é a longitude do eixo magnético;
- **B_LAT_INF** = B_b que é a latitude do eixo magnético;
- **DELTA_LONG_INF** = Δ_l que é a semi-extensão em longitude da região de acoplamento no plano equatorial do sistema.
- **RESOL** define a resolução espacial do modelo no plano do céu. A região emissora é representada por uma grade de pontos com dimensão dada por RESOL x RESOL;
- **NPHASE** define o número de fases calculadas para um determinado modelo.

No arquivo de entrada definimos, além das variáveis física e geométricas, o intervalo permitido para que o código interpole os valores dessas variáveis. Feita a leitura, o *xanalise* chama a rotina *run_model*, responsável por gerar um modelo com os parâmetros definidos no arquivo de entrada, realizar a leitura dos dados do objeto e chamar a rotina *analise*.

A rotina *analise* tem várias funções e funciona como um HUB de rotinas, mas de forma geral ela executa os códigos que calculam a emissão de um dado conjunto de parâmetros, faz gráficos dos modelos superpostos com os dados, e calcula o χ^2 de um modelo com relação ao conjunto de dados. A rotina *analise* chama, em ordem, as seguintes rotinas:

1. *Base_analise*, que é a responsável por realizar os cálculos com as variáveis definidas no arquivo de entrada e rodar modelos com outra rotina chamada *Model_inhomog_c*. Essa rotina é responsável por construir a grade 3D que define a

geometria da região de acréscimo. Ela calcula um modelo de emissão, contendo os quatro parâmetros de Stokes, de uma RPC dada uma configuração física e geométrica, definida por uma série de parâmetros.

2. *Ajusta_Att*, que trabalha em busca de 5 parâmetros, definidos como FIX, para ajustar os modelos e os dados, esses parâmetros modificam o modelo sem a necessidade de re-executar a rotina *Model_inhomog_c*. Esses 5 parâmetros podem ser definidos no arquivo de entrada, ou permanecerem em aberto para que o próprio código os encontre. São eles:

- FIX[0] consiste na diferença de fase aplicada ao modelo em relação aos dados. Se definido como -1, o código tenta encontrar o melhor valor.
- FIX[1] representa a fração da extinção interna, com valores entre 0 e 1. Se definido como -1, o código tenta encontrar o melhor valor.
- FIX[2] define as contribuições das regiões Norte e Sul nas emissões.
- FIX[3] carrega a fração da densidade colunar do hidrogênio interestelar usada para calcular a extinção óptica e a absorção de raios-X. Se definido = -1, o código tenta encontrar o melhor valor.
- FIX[4] define a densidade colunar do hidrogênio no meio interestelar, $N(H)$.

3. *Perfis*, que aplica transformações na saída do *model_inhomog_c* como binagem, interpolação, convolução com as respostas instrumentais e calcula o χ^2 entre os modelos e o conjunto de dados. Para essas atividades *Perfis* faz uso de três rotinas: *calc_perf*, que transforma o modelo com resolução espacial para algo integrado em área, integrando as intensidades dos parâmetros de Stokes e transformando-os em fluxo; *interpola_model* que interpola ou bina os fluxos em fase para ficarem de acordo com os dados e também aplica ou não, de acordo com os parâmetros dados pelos usuários, uma suavização com o Filtro SAVGOL (que será descrito na seção 2.3) ao modelo; *calc_chi* que calcula um o fator de normalização e de adição para as bandas ópticas bem como os valores de χ^2 e é utilizado pelas rotinas *polar-pikaia*² e *polar-amoeba*³ para o ajuste de dados. Essas duas rotinas minimizam o valor de χ^2 variando os parâmetros definidos no arquivo de entrada em busca do melhor ajuste dos dados.

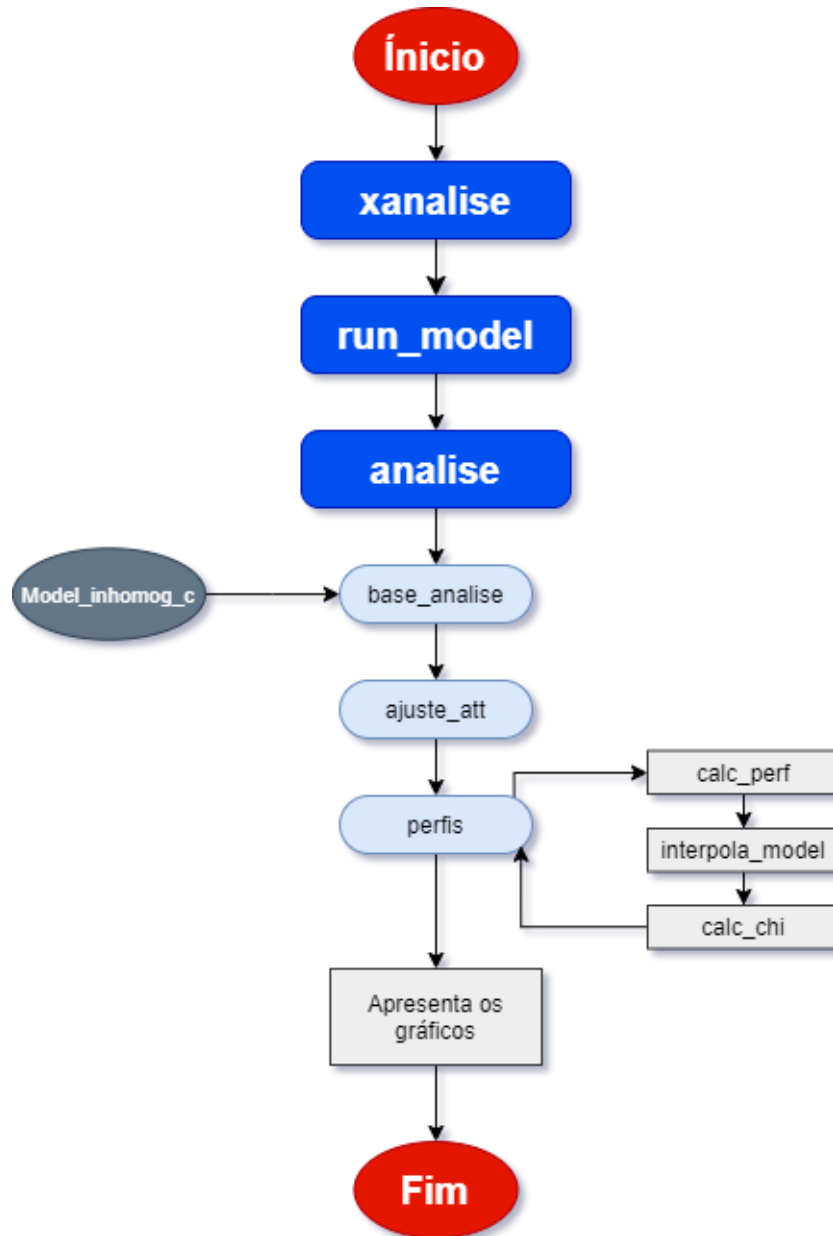
Por fim, a rotina *analise* constrói os gráficos de curva de luz, curvas de polarização para o óptico, e curvas de luz e espectros em raios-X. As rotinas descritas acima são apenas a espinha dorsal do código e estão resumidas no diagrama na Figura 10. Outras sub-rotinas criadas pelo grupo e pacotes já presentes no IDL também são usados no código

² *polar-pikaia* é baseada no algoritmo PIKAIA (Charbonneau, 1995)

³ *polar-amoeba* é baseada no algoritmo AMOEBA (Press et al., 1992)

CYCLOPS. Na modelagem de V3774 Oph utilizaremos a última versão do CYCLOPS, como descrita em Belloni *et al.* (2021).

Figura 10 – Diagrama das principais rotinas usadas pelo CYCLOPS.



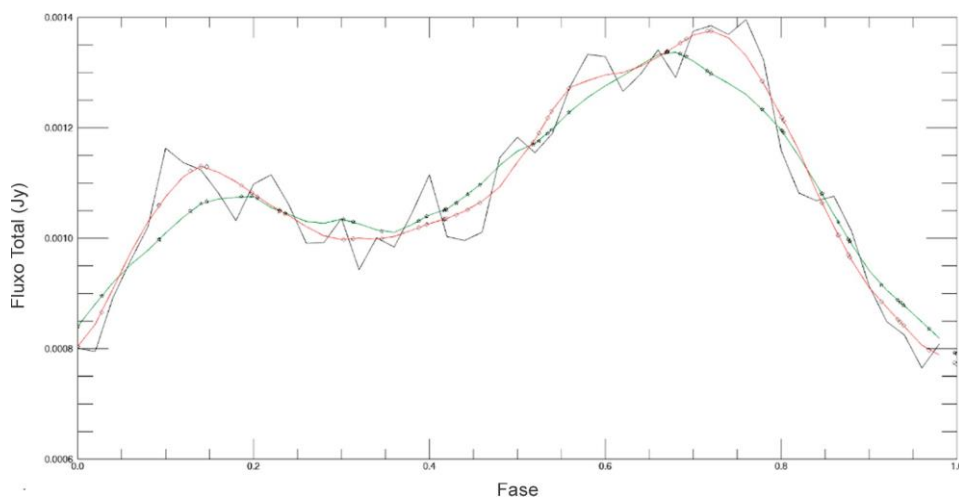
2.3 Contribuições ao código Cyclops

A seguir descreveremos alguns melhoramentos que fizemos ao código CYCLOPS, que se mostraram necessários para tratar especificidades que encontramos ao modelar os dados de V3704 Oph e que, devido à sua utilidade geral, acabaram por ser incluídos como procedimentos opcionais na versão atual do código.

Por trabalhar com modelos com diferentes resoluções espaciais e temporais, alguns desses modelos encontrados pelo CYCLOPS apresentam curvas muito sinuosas devido ao grande número de pontos obtidos, o que dificulta no momento em que o código interpola os dados observacionais com os resultados dos modelos. Para obtermos um resultado melhor, implementamos ao código a opção de realizar uma suavização nas curvas apresentadas pelos modelos antes de serem comparadas com os dados observacionais.

Para realizar a suavização nos modelos gerados pelo CYCLOPS, testamos duas rotinas presentes no IDL, TS_SMOOTH e SAVGOL. A rotina TS_SMOOTH calcula as médias móveis centradas, o que corresponde à média entre duas médias móveis consecutivas situando-se no ponto médio entre as duas, podendo progredir ou retroceder em uma série temporal de n elementos. A rotina SAVGOL aplica o filtro de suavização Savitzky e Golay (1964)⁴, também conhecido como DISPO (*digital smoothing polynomial*, polinômio de suavização digital). O filtro realiza um processo de convolução, ajustando subconjuntos sucessivos de pontos adjacentes com um polinômio de baixa ordem pelo método dos mínimos quadrados. A Figuras 11 e 12 mostram exemplos dos dois filtros aplicados em uma mesma série temporal de dados.

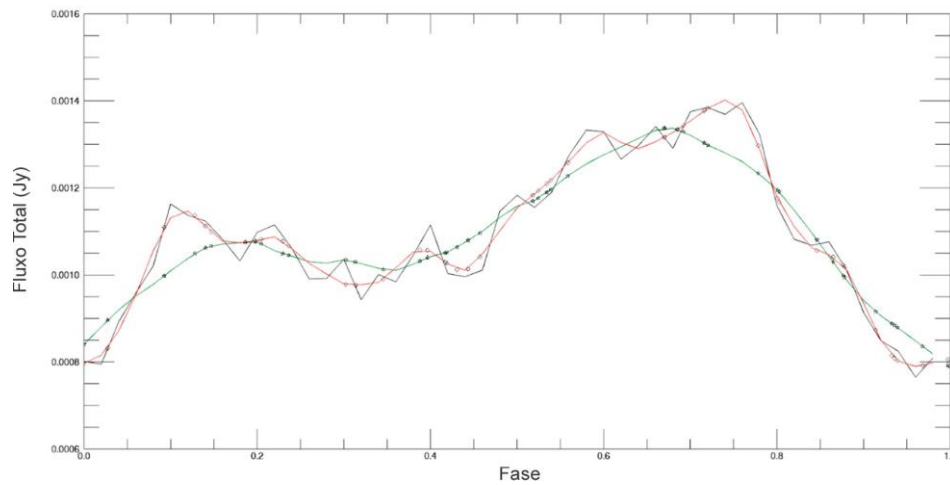
Figura 11 – Aplicação dos filtros TS_SMOOTH (em verde) e SAVGOL (em vermelho) com janela de 8 pontos à esquerda e à direita e grau do polinômio igual a 4. A curva em preto apresenta a curva de luz, para o filtro V, de V3704 Oph.



A ferramenta que escolhemos para implementar a suavização no CYCLOPS foi a rotina SAVGOL, pois ela proporciona um controle mais amplo na suavização, devido a possibilidade de escolha da janela do filtro, ou seja, o número de pontos à esquerda e à direita de um ponto a serem utilizados no filtro, da ordem da derivada e do grau do polinômio. Verificamos que valores mais baixos para o parâmetro grau produz resultados

⁴ O filtro de suavização Savitzky-Golay é descrito na seção 14.8 do livro *Numerical Recipes em C: The Art of Scientific Computing* (Segunda Edição), publicado pela *Cambridge University Press*, e é usado na rotina SAVGOL sob permissão.

Figura 12 – Aplicação dos filtros TS_SMOOTH (em verde) e SAVGOL (em vermelho) com janela de 8 pontos à esquerda e à direita e grau do polinômio igual a 8. A curva em preto apresenta a curva de luz, para o filtro V, de V3704 Oph.



mais suaves, mas podem suprimir informações relevantes (ver Figura 11), enquanto que valores mais altos para este parâmetro reduzirão o desvio do filtro, mas podem gerar curvas mais ruidosas (ver Figura 12), não auxiliando no processo. Desta forma, durante a modelagem CYCLOPS podemos escolher o nível da suavização para diferentes resoluções, obtendo assim um ajuste mais fino dessa ferramenta. Essa ferramenta de suavização foi adicionada à rotina *interpola_model* para os modelos e dados ópticos e de raios-X e está presente no código a partir da versão 3.2.9.

Para que os dados de V3704 Oph fossem analisados pelo CYCLOPS verificamos a necessidade de utilizar altas resoluções espacial e temporal na construção dos modelos. Antes da implementação da suavização, e devido ao grande número de pontos obtidos com as altas resoluções, os modelos apresentavam curvas com oscilações espúrias de alta frequência. Como o código nos apresenta os melhores modelos baseados no menor valor de χ^2 , os modelos muito sinuosos atrapalham essa análise. Como veremos mais adiante, utilizamos a opção de suavização aos modelos gerados pelo código ao ajustar as curvas de luz e de polarização de V3704 Oph.

3 OBSERVAÇÕES EM RAIOS-X

Os dados de raios-X com o satélite XMM-Newton foram obtidos no contexto de um projeto (liderado por R. L. de Oliveira) de observações de Variáveis Cataclísmicas magnéticas previamente detectadas pelo ROSAT, aprovado para execução no *Announcement of Opportunity* 18 (AO-18) no modo *fulfill*. O alvo foi observado com o instrumento EPIC (*European Photon Imaging Camera*) (STRÜDER, *et al.*, 2001) no modo de espectrofotometria em raios-X, utilizando as câmeras MOS1, MOS2 e pn. As observações ocorreram em 21 de setembro de 2019, com uma duração de 17750 segundos (cerca de 5 horas).

3.1 Análise temporal dos dados de raios-X: curvas de luz

As observações em raios-X realizadas com o XMM-Newton foram reduzidas por nosso colaborador e PI do projeto XMM, Dr. R. L. Oliveira. As reduções e extrações dos *data products* (curvas de luz e espectros) foram feitas com o *Science Analysis System* (SAS) v18.0.0. As medidas em raios-X de cada uma das 3 câmeras EPIC do XMM-Newton (MOS1, MOS2 e PN) foram corrigidas do *background* e as curvas de luz foram produzidas com um *binning* temporal de 10 segundos. Este processo foi realizado para três distintos intervalos de energia: entre 0,3 e 10 keV, entre 0,3 e 2 keV (que vamos denominar aqui de intervalo *soft*), e entre 2 e 10 keV (intervalo *hard*). Com isso, podemos avaliar a possível dependência em energia de eventuais sinais temporalmente variáveis presentes nestes dados.

As observações EPIC foram parcialmente contaminadas por partículas solares. Na Figura 13 vemos as taxas de contagens de fótons de raios-X em função do tempo para as três câmeras (PN, MOS1 e MOS2), considerando apenas detecção de fótons com energias acima de 10 keV. O tempo do satélite é o tempo decorrido em segundos desde o início da missão XMM-Newton (1998-01-01 00:00:00 TT, onde TT corresponde a Tempo Terrestre). Nas três câmeras notamos dois eventos de aumento de *background* nas contagens, associados a partículas solares. O tempo líquido com baixo nível de *background* totalizou 12,8 ks, sendo 9,9 ks antes do primeiro evento e 2,9 ks entre o primeiro e o segundo eventos. Lembrando que o tempo total de observação havia sido 17,7 ks, mas os eventos de erupções solares causaram a perda de cerca de 28% dos dados.

Para simplificar, a seguir vamos apresentar apenas os gráficos obtidos com a câmera PN, pois estes dados têm a melhor relação sinal-ruído. Os gráficos referentes aos dados das demais câmeras são semelhantes aos da câmera PN, porém mais ruidosos. Na Figura 14 mostramos a curva de luz da câmera PN do intervalo entre 0,3 e 2 keV. Devido a presença

Figura 13 – Taxas de contagens de raios-X com energia acima de 10 keV em função do tempo (em segundos desde o início da missão XMM-Newton em 1998-01-01 00:00:00 TT). De cima para baixo, temos as taxas das câmeras PN (azul), MOS1 (laranja) e MOS2 (vermelho). Todas apresentam dois picos associados a contaminações por partículas provenientes do Sol.

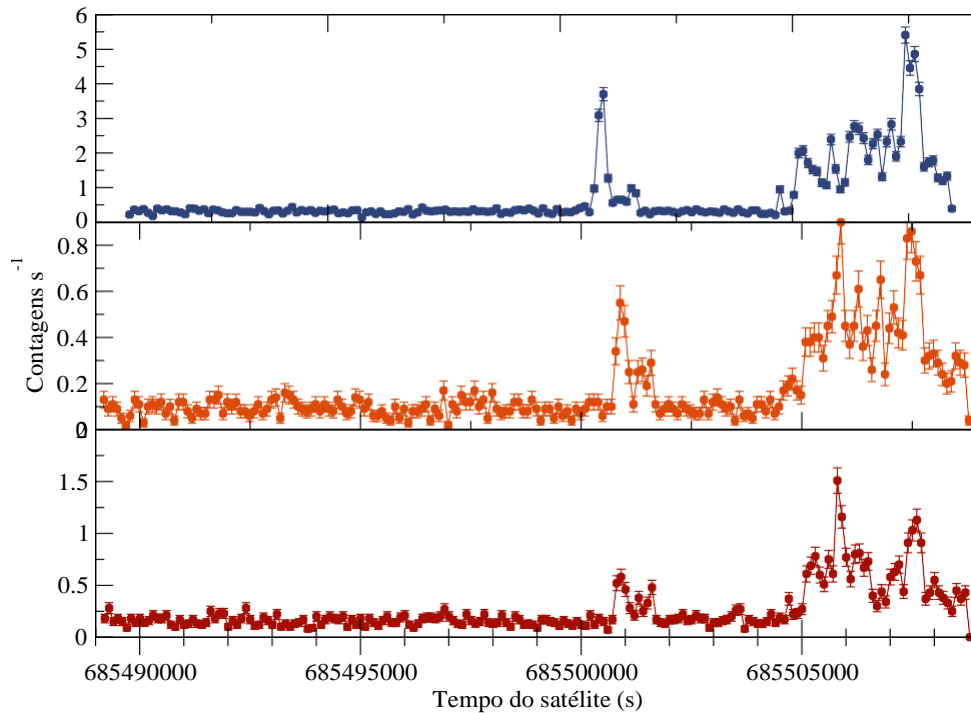
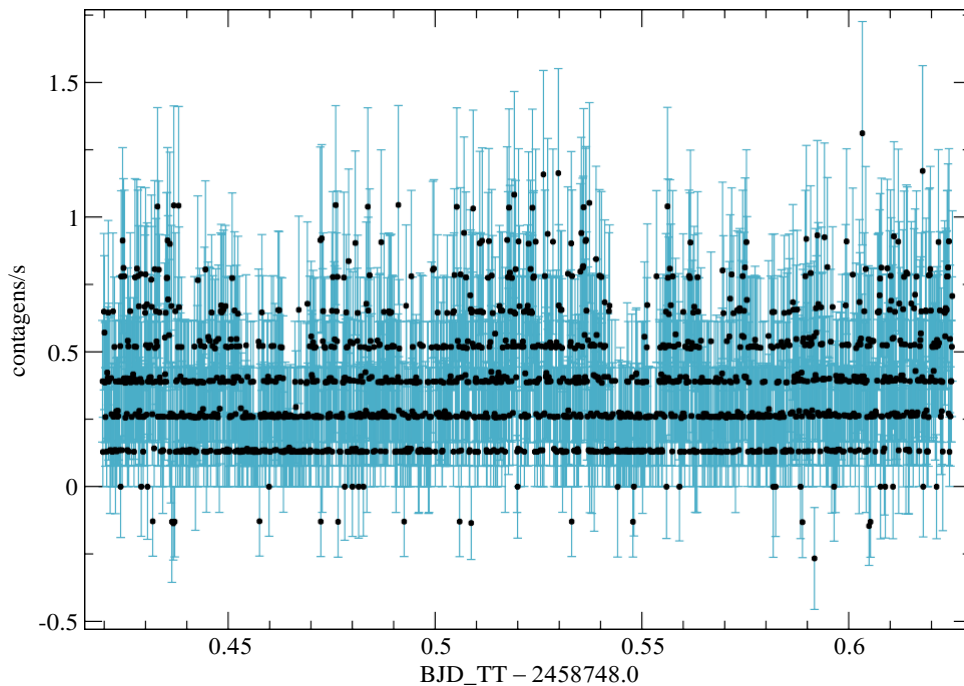


Figura 14 – Curva de luz em raios-X (câmera PN) no intervalo de energia entre 0,3 e 2 keV. O tempo, na abscissa, é dado em dia juliano baricêntrico, tempo terrestre (BJD_TT), subtraído de 2458748 dias. Para permitir a visualização dos pontos, as barras de erros são mostradas em azul. Estes dados têm resolução temporal de 10 segundos e apresentam discretização nos valores das contagens.



de discretização nos níveis das taxas de contagens nas curvas de luz (com diferenças de cerca de 0,13 contagens por segundo), a resolução temporal original, de 10 segundos,

teve que ser alterada por processo de binagem dos dados. Escolhemos o menor número de pontos por *bin* possível, de forma a eliminar o padrão de discretização nos dados sem comprometer demais a resolução temporal. Assim, nossos dados foram agrupados em 8 pontos por *bin* em todas as câmeras e intervalos de energia, resultando em uma resolução temporal média de cerca de 86 segundos, o que equivaleria, caso tivéssemos pontos igualmente espaçados na nossa curva de luz, a uma frequência de Nyquist de $f_N \approx 500 \text{ d}^{-1}$.

Após a binagem, realizamos análises de busca por periodicidades nas curvas de luz binadas das três câmeras, e nos três intervalos de energias (total, *soft* e *hard*), utilizando o método Lomb-Scargle (SCARGLE, 1982)¹. Para tanto, consideramos dois conjuntos de dados para cada uma das câmeras: primeiramente o conjunto completo dos dados, incluindo os pontos associados aos picos nas taxas de contagens de *background*. Depois, o conjunto correspondente aos dados obtidos durante os intervalos de baixo *background*.

No painel esquerdo da Figura 15 apresentamos a curva de luz, do conjunto completo dos dados (ou seja, incluindo pontos contaminados pelo alto *background*), da câmera PN entre 0,3 e 2 keV, binada com 8 pontos por *bin* (205 bins). No painel central, o periodograma calculado para frequências entre 5 e 300 d^{-1} (i.e., períodos entre 288 e 4,8 minutos) e no painel direito o diagrama de fase construído com $f = 9,647 \text{ d}^{-1}$ (0,1037 d, ou 2,49 h), que corresponde ao pico mais intenso no periodograma.

Na Figura 16 temos o equivalente ao mostrado na Figura 15, mas agora para o conjunto de dados de baixo *background*: no painel esquerdo a curva de luz, no painel central o periodograma calculado para frequências entre 5 e 300 d^{-1} e no painel direito o diagrama de fase construído com $f = 10,473 \text{ d}^{-1}$ (0,0954 d, ou 2,29 h), que corresponde ao pico mais intenso no periodograma dos dados de baixo *background*. Este pico de maior potência no periodograma LS, com $f = 10,473 \text{ d}^{-1}$, tem uma largura à meia altura (FWHM) de cerca de 7,4 d^{-1} , que é compatível com o valor esperado da análise de Fourier, pela qual a acurácia com que um pico pode ser determinado em frequência depende do comprimento do conjunto de dados:

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{13970 \text{ sec}} = 6,2 \text{ d}^{-1} \quad (3.1)$$

Assim, dada a curta duração da monitoria em raios-X (que abrange cerca de 2 ciclos orbitais apenas), a incerteza no período de 0,0954 d ($f = 10,473 \text{ d}^{-1}$) encontrado no espectro de potências é relativamente grande, de aproximadamente $\sigma \sim 0,075 \text{ d}$, ou 108 minutos. Portanto, considerando o valor do período orbital obtido dos dados no óptico

¹ O método Lomb-Scargle é um algoritmo usualmente utilizado para a detecção e caracterização de periodicidades em séries temporais não-igualmente espaçadas, baseado na transformada discreta de Fourier.

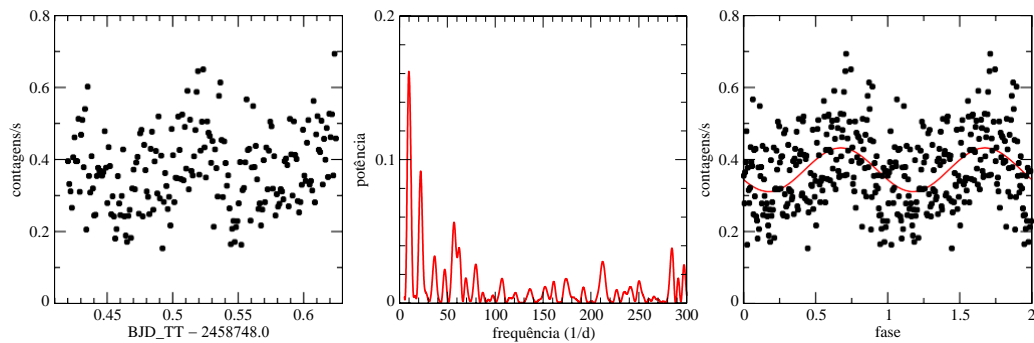
($P_b=0,08659$ d, representado pela linha vertical azul no periodograma da Figura 16), esta modulação com amplitude de aproximadamente 0,1 contagens/s vista no ajuste senoidal do diagrama de fase (painel direito da Figura 16) é muito provavelmente a manifestação do ciclo orbital de V3704 Oph detectado em raios-X.

Em Martins (2017) determinamos o período orbital e a fase zero da modulação orbital de V3704 Oph utilizando nossos dados de fotometria em luz visível. A efeméride assim determinada é:

$$T(HJD) = 2.456.773,774(15) + 0,08659(5) \times E \quad (3.2)$$

Colocamos os dados das curvas de luz em raios-X em fase com o período orbital e T_0 obtidos da fotometria em luz visível (efeméride da Equação 3.2), para avaliar a presença da modulação orbital nos três intervalos de energia. Na Figura 17 mostramos estes diagramas de fase para os três intervalos de energia (*soft*, *hard* e *total*). Nos intervalos *soft* e *total* (que inclui o *soft*), percebe-se uma modulação com amplitude total de $\sim 0,25$ contagens por segundo, enquanto que no intervalo de energias *hard* a curva de luz em fase é praticamente plana.

Figura 15 – Painel esquerdo: curva de luz (câmera PN, 0,3 a 2 keV, conjunto completo) binada em 8 pontos por *bin*. Painel central: periodograma dos dados do painel esquerdo. Painel direito: diagrama de fase dos dados do painel esquerdo, em fase com $f = 9,647 \text{ d}^{-1}$, mostrando dois ciclos completos.



Para buscar eventuais periodicidades com frequências mais altas, levamos a análise até o limite da frequência de Nyquist, $f = 500 \text{ d}^{-1}$ (Figura 18). Encontramos picos com potências bastante baixas (~ 0.05) nas frequências $55,8 \text{ d}^{-1}$ (25,8 min), $212,7 \text{ d}^{-1}$ (6,8 min) e $371,8 \text{ d}^{-1}$ (3,9 min), porém não podemos atribuí-los a periodicidades reais no sistema baseados apenas destes dados.

3.2 Espectroscopia em raios-X

As observações com o XMM-Newton resultaram em um espectro com boa relação sinal/ruído (Figura 19), que se estende por todo o intervalo de energia coberto pelo EPIC. Uma característica marcante no espectro em raios-X é o excesso de emissão entre 6 e 7 keV,

Figura 16 – Painel esquerdo: curva de luz (câmara PN, 0,3 a 2 keV, conjunto de baixo *background*) binada em 8 pontos por *bin*. Note, em comparação com a Figura anterior, a ausência de pontos nos intervalos de alto *background*. Painel central: periodograma dos dados do painel esquerdo. A linha vertical azul corresponde à frequência $f = 11,5486 \text{ d}^{-1}$ da modulação orbital encontrada no óptico. Painel direito: diagrama de fase dos dados do painel esquerdo, em fase com $f = 10,473 \text{ d}^{-1}$, mostrando dois ciclos completos.

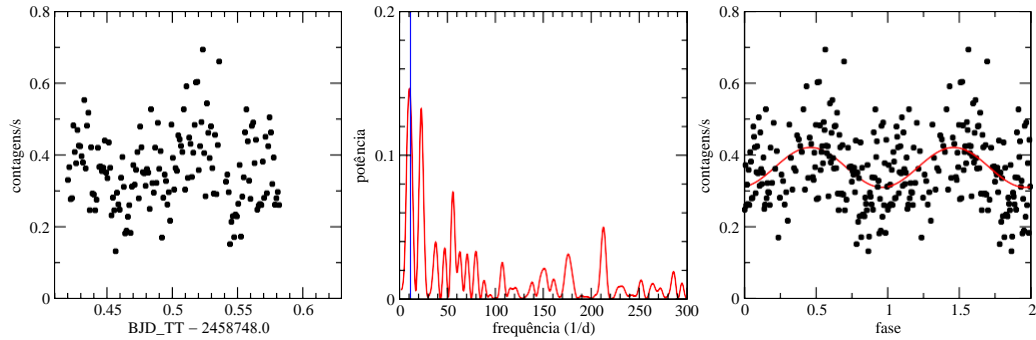
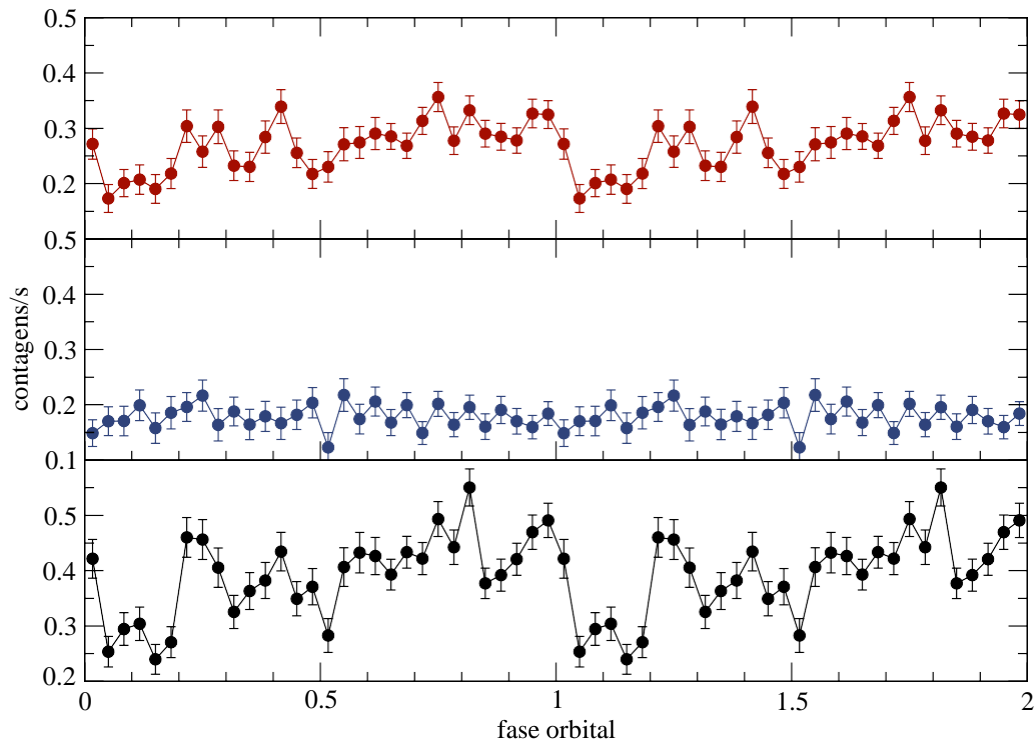


Figura 17 – Curvas de luz em raios-X (câmara PN) nos intervalos de energia entre 0,3 e 2 keV (*soft*, em vermelho), entre 2 e 10 keV (*hard*, em azul) e entre 0,3 e 10 keV (total, em preto), em fase com parâmetros dados pela efeméride fotométrica (Eq. 3.2). Dados agrupados em 30 *bins* de fase. Dois ciclos completos são mostrados.



normalmente associado às linhas do complexo do ferro ($\text{Fe K}\alpha$) e comum em processos de acreção de matéria em anãs brancas.

O espectro em raios-X de V3704 Oph será usado principalmente no processo de modelagem com o código CYCLOPS, em conjunto com os dados de polarimetria e fotometria na faixa visível do espectro eletromagnético obtidos no OPD apresentados em Martins (2017).

Figura 18 – Espectro de potências dos dados da câmera PN, de 0,2 a 3 keV, dados de baixo *background*, com frequências entre 2 a 500 d^{-1} .

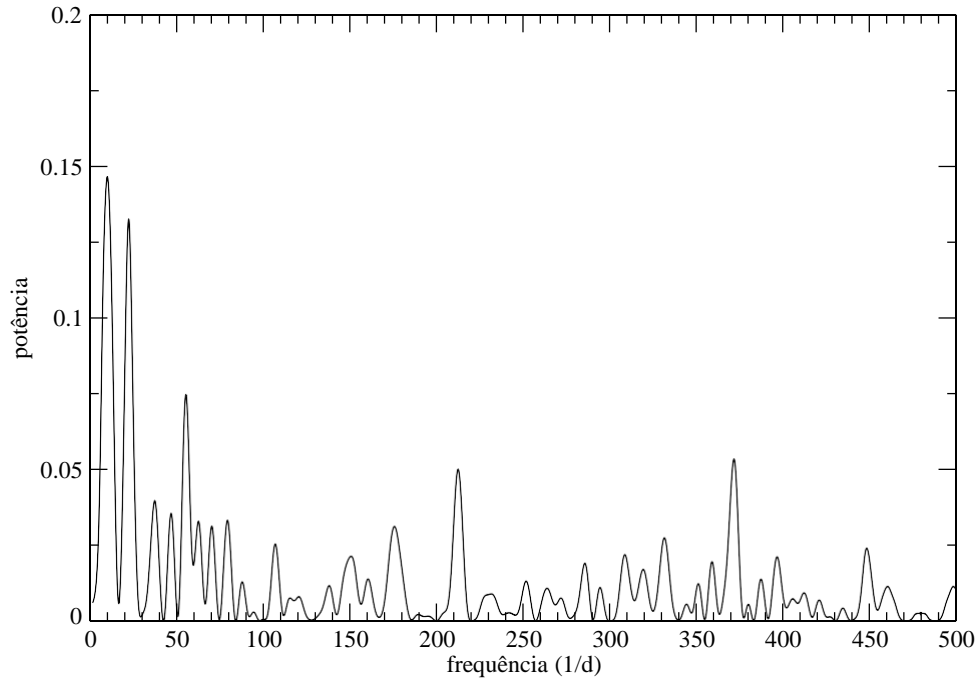
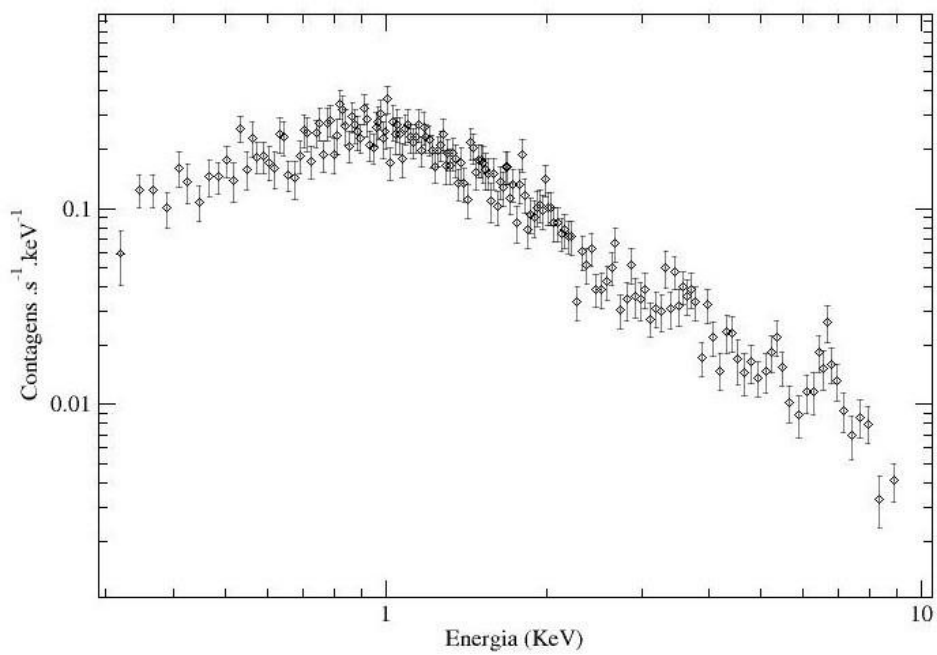


Figura 19 – Espectro em raios-X de V3704 Oph.



4 AJUSTES PARA A MODELAGEM CYCLOPS

Neste trabalho vamos modelar dados de V3704 Oph obtidos por nós no óptico, usando técnicas de polarimetria e fotometria, e também dados em raios-X. Os dados ópticos foram descritos em [Martins \(2017\)](#), e a Tabela 1 mostra as informações sobre a aquisição dos mesmos. Neste capítulo apresentaremos como os dados de V3704 Oph foram preparados para serem utilizados em nossa modelagem, e como definimos alguns parâmetros associados aos dados no código.

Tabela 1 – Tabela das observações de V3704 Oph.

Data	Local de observação	Tipo de observação	Tempo de exposição (s)	Número de exposições	Filtro
25 abr 14	OPD	Polarimetria	40	176	V
26 abr 14	OPD	Polarimetria	40	224	I
27 abr 14	OPD	Polarimetria	40	164	R
21 jul 14	OPD	Polarimetria	40	272	V
22 jul 14	OPD	Polarimetria	40	272	R
23 jul 14	OPD	Polarimetria	30	304	I
21 set 19	XMM-Newton	raios-X	-	-	-

4.1 Refinando a Efeméride

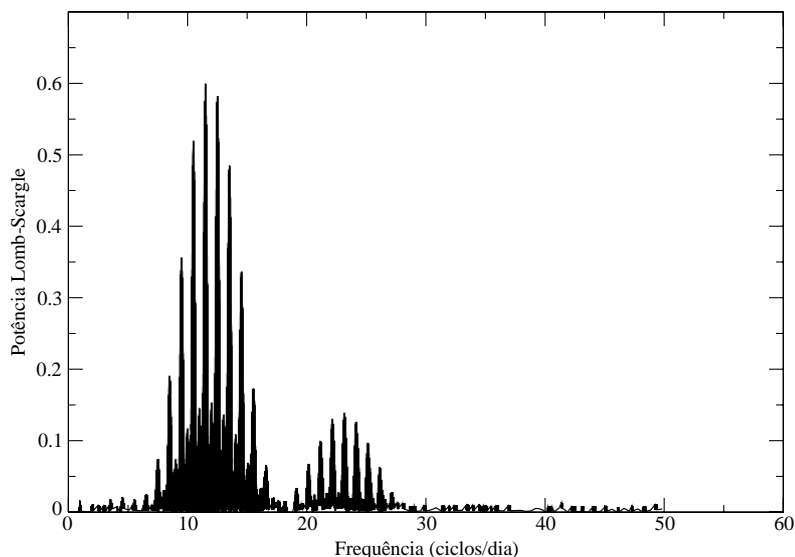
Para a modelagem CYCLOPS precisamos preparar os dados colocando-os em função da fase orbital, dessa forma a precisão do período orbital e da fase inicial na efeméride é primordial para a acurácia dos modelos gerados pelo código. A fim de refinarmos a efeméride de V3704 Oph, submetemos os dados a uma análise de periodocidades usando técnicas de Fourier, especificamente o método *Lomb-Scargle* ([SCARGLE, 1982](#)) implementado para *Python*. De acordo com os fundamentos da análise de Fourier, a acurácia na determinação de um período depende do comprimento da série temporal de dados, de forma que uma série longa produz picos estreitos no periodograma e uma determinação mais acurada do período associado. Pudemos aumentar a base temporal dos dados de fotometria adicionando aos nossos dados obtidos no OPD em 2014 os dados das curvas de luz obtidas e publicadas por [Denisenko e Martinelli \(2012\)](#) em 2012¹ (Figura 5). Dado que, mesmo dentro do conjunto de dados do OPD, os dados foram obtidos com filtros

¹ Para isso usamos a ferramenta *Web Plot Digitizer* (<https://apps.automeris.io/wpd/>) ([Rohatgi, 2021](#))

diferentes, antes de combinar cada noite de observação subtraímos a magnitude média da noite do valor de cada ponto da curva de luz.

Também de acordo com os conceitos básicos da técnica de Fourier, a análise de uma série temporal de dados que contenha intervalos de interrupções dos dados (geralmente devido à luz diurna) cria um padrão de *aliasing* no espectro de potências. Isso porque a distribuição dos dados a cada lado da interrupção é insuficiente para determinar exatamente o número de ciclos que ocorre dentro do intervalo sem dados. Esta ambiguidade produz, no periodograma, uma série de picos vizinhos distanciados, em frequências, de 1 ciclo a mais ou a menos dentro do intervalo. Além disso, estruturas mais complexas de picos de *aliasing* podem resultar de amostragens mais complexas dos dados. Isso é o que vemos no espectro de potências dos dados fotométricos combinados de 2012 e 2014 (Figura 20). Vemos um envelope principal em frequência $\sim 12 \text{ d}^{-1}$ contendo diversos picos de *aliases* com separações de 1 dia. Estes são produzidos pelas interrupções diurnas nas observações. Veremos em seguida que cada um destes *aliases* é, por sua vez, um envelope que contém novos *aliases* associados a outros padrões de interrupções dos dados, e assim sucessivamente. No intervalo de períodos analisado (0,02 a 0,15 dias, ou frequência entre 6,67 e 50 d^{-1}) o periodograma *Lomb-Scargle* indica o máximo em uma frequência de 11,5489 d^{-1} , que resulta em um período de $0,086588 \pm 0,000004 \text{ d}$ (ou 2,078 h). No entanto, não podemos descartar imediatamente os picos laterais a este pico central.

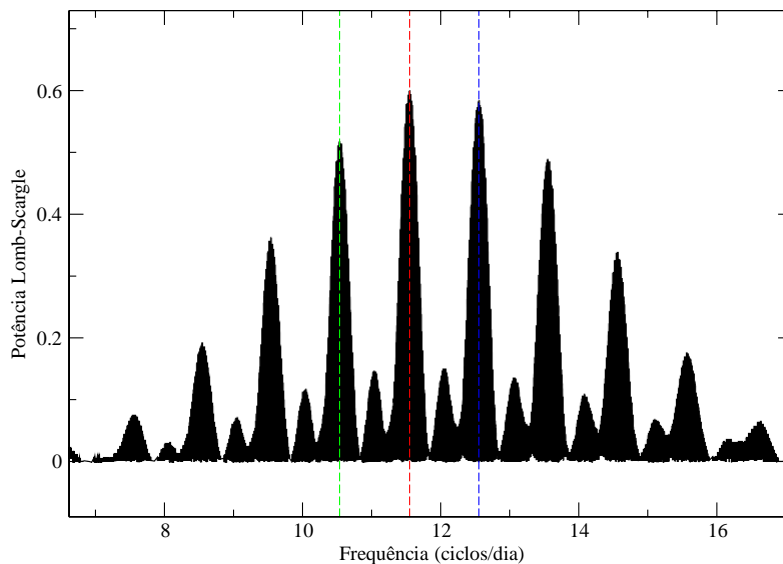
Figura 20 – Espectro de potências *Lomb-Scargle* para todos os dados fotométricos



Portanto, para avaliar estes *aliases* de 1 dia, colocamos os dados fotométricos e polarimétricos em fase com as frequências indicadas pelos picos laterais ao pico central no espectro de potências e, a partir de uma análise visual, verificamos a dispersão das curvas de luz resultantes. A Figura 21 nos apresenta os *aliases* de ± 1 ciclo por dia, com destaque para os valores de frequências 10,5341 d^{-1} , 11,5489 d^{-1} e 12,5515 d^{-1} . Assim, após análise visual das dispersões das curvas de luz e polarização circular em fase com

as respectivas frequências, os valores dos picos laterais, $10,5341 \text{ d}^{-1}$ e $12,5515 \text{ d}^{-1}$, foram descartados e seguiremos com a análise do pico central, de $11,5489 \text{ d}^{-1}$.

Figura 21 – Espectro de potências *Lomb-Scargle* com os *aliases* de 1 ciclo. Destacamos os valores das frequências $10,5341 \text{ d}^{-1}$ (pontilhado verde), $11,5489 \text{ d}^{-1}$ (pontilhado vermelho) e $12,5515 \text{ d}^{-1}$ (pontilhado azul).



A Figura 22 é uma ampliação do pico de $11,5489 \text{ d}^{-1}$ e nos apresenta os *aliases* devidos ao intervalo de 3 meses entre as observações de 27 de abril e 21 julho, ambas em 2014, em que destacamos os valores de frequências $11,5367 \text{ d}^{-1}$, $11,5489 \text{ d}^{-1}$, $11,5598 \text{ d}^{-1}$. Esses valores para os *aliases* foram utilizados para colocar em fase os dados de fotometria e polarização circular e, após análise visual, escolhemos o valor de $11,5598 \text{ d}^{-1}$ como o valor que melhor ajusta as curvas. No entanto, não podemos definitivamente descartar os valores $11,5367 \text{ d}^{-1}$ e $11,5489 \text{ d}^{-1}$.

Seguindo na análise dos sucessivos padrões de *aliases*, a Figura 23 apresenta os *aliases* de ~ 2 anos presentes no pico de $11,5598 \text{ d}^{-1}$ devido ao intervalo entre as observações realizadas por [Denisenko e Martinelli \(2012\)](#) em julho de 2012 e as realizadas por nós em abril de 2014. Utilizamos a mesma estratégia de analisar a dispersão dos diagramas de fase para descartar os picos laterais e selecionar o pico central, em $11,5598 \text{ d}^{-1}$, como nossa escolha para a efeméride. O período orbital que iremos adotar para V3704 Oph é, então, $P_b = 0,086507 \text{ d}$, com uma incerteza de $0,000004 \text{ d}$ estimada pela largura do pico correspondente. Notamos, portanto, que o aumento na cobertura temporal devido à inclusão dos dados de 2012 permitiu reduzir a incerteza por um fator 12 (de $4,3 \text{ s}$ para $0,35 \text{ s}$), em relação ao valor do período de [Martins \(2017\)](#).

Para definimos a época inicial da efeméride fotométrica, T_0 , colocamos todos os dados em fase com o período de $0,086507 \text{ d}$, obtido de análise de *aliases*, aplicamos aos dados em fase uma média móvel com 100 pontos (ver Figura 24) e ajustamos uma parábola ao mínimo dessa média móvel, encontrando o valor de $\text{BJD } 2.456.773,945 \pm 0,005$. Assim,

Figura 22 – Espectro de potências *Lomb-Scargle* com os *aliases* de 3 meses. Destacamos os valores das frequências $11,5367 \text{ d}^{-1}$ (pontilhado azul), $11,5489 \text{ d}^{-1}$ (pontilhado vermelho) e $11,5598 \text{ d}^{-1}$ (pontilhado verde). O valor selecionado através da análise da dispersão dos diagramas de fase correspondentes foi de $11,5598 \text{ d}^{-1}$, equivalente a um período de $0,086507 \text{ d}$.

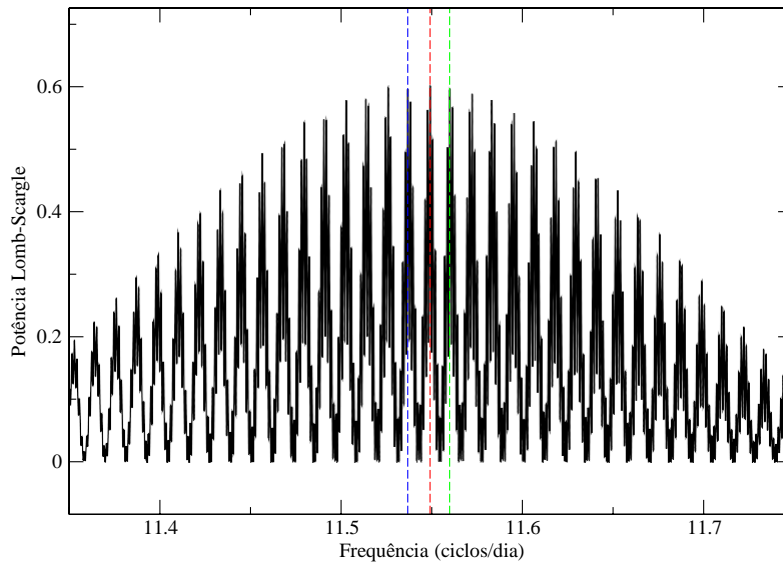
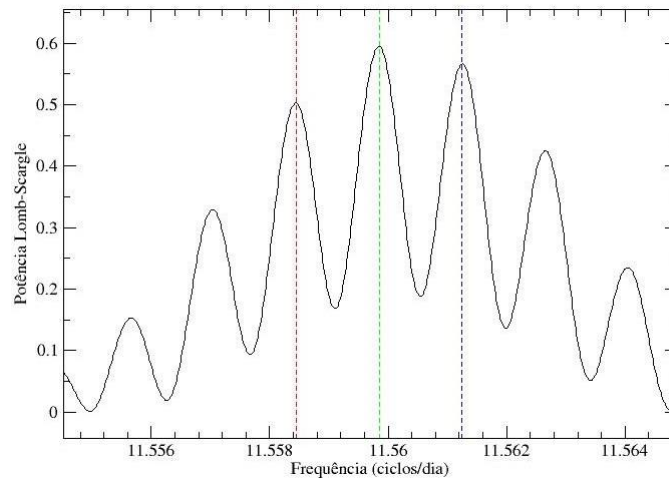


Figura 23 – Espectro de potências *Lomb-Scargle* com os *aliases* de ~2 anos. Destacamos os valores das frequências $11,5584 \text{ d}^{-1}$ (pontilhado vermelho), $11,5598 \text{ d}^{-1}$ (pontilhado verde) e $11,5612 \text{ d}^{-1}$ (pontilhado azul).



a nossa nova efeméride para os dados fotométricos é:

$$T(BJD) = 2.456.773,945(\pm 0,005) + 0,086507(\pm 0,000004) \times E \quad (4.1)$$

Colocamos os dados em fase com a efeméride 4.1 e apresentamos nas seguintes imagens 25 e 26.

Figura 24 – Todos os dados fotométricos em fase com o período de 0,086507 d (pontos pretos) com média móvel de 100 pontos desses dados (curva vermelha).

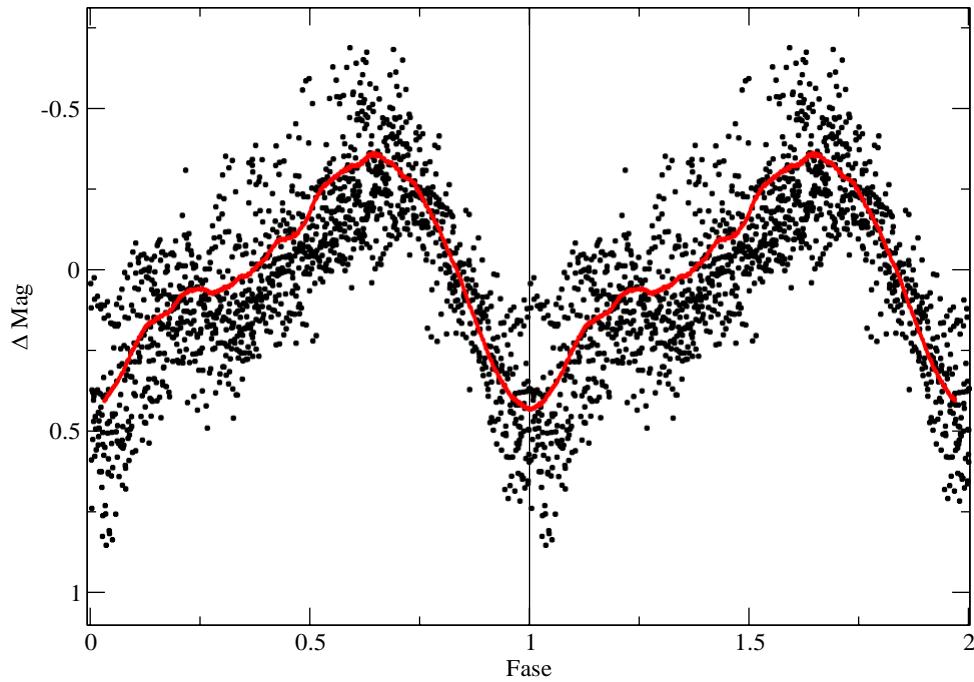


Figura 25 – Fotometria em fase com a efeméride 4.1. De cima para baixo apresentamos as curvas de luz nos filtros V, R, I e luz branca (obtidos por [Denisenko e Martinelli \(2012\)](#)). Nos três primeiros painéis, os pontos pretos são da missão de julho de 2014 e os vermelhos são de abril de 2014, no último painel temos dados obtidos em julho de 2012 e os pontos pretos são do dia 18 e os vermelhos do dia 16 (ver Tabela 1).

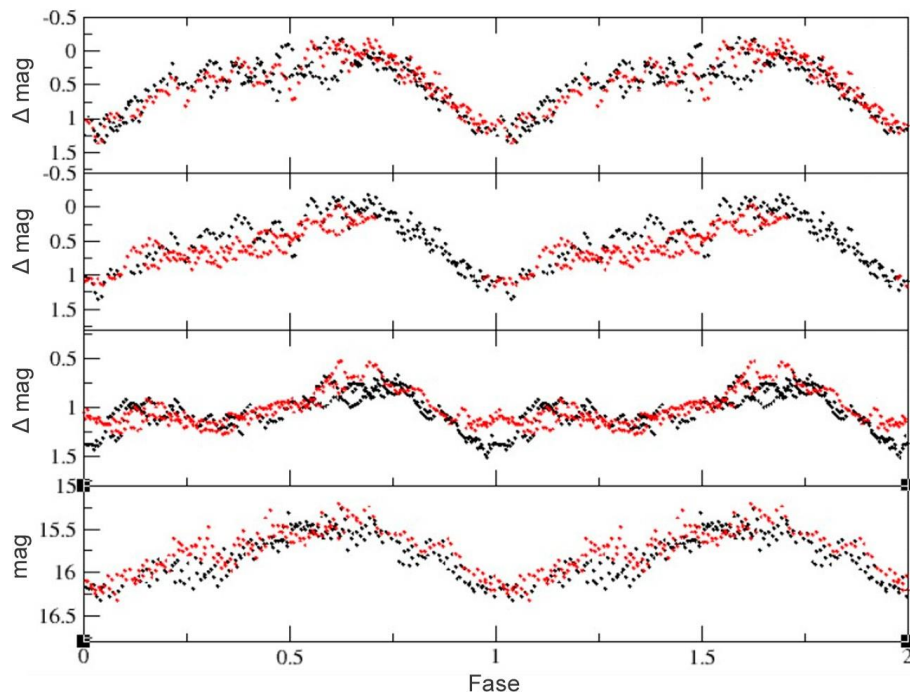
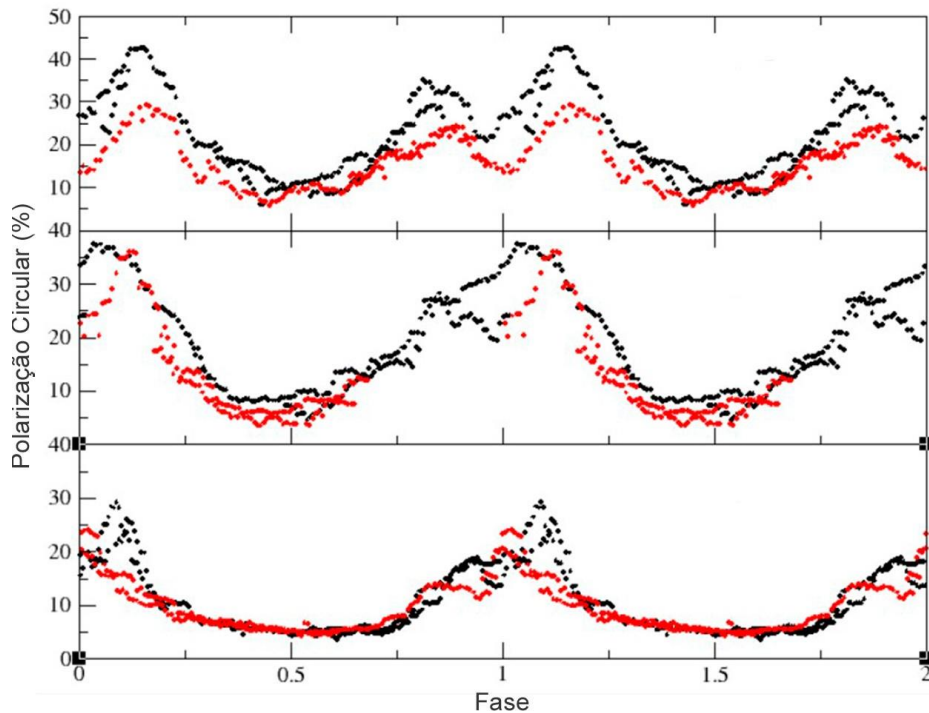


Figura 26 – Polarização Circular em fase com a efeméride, De cima para baixo apresentamos as curvas de polarização circular nos filtros V, R, I. Os pontos pretos são da missão de julho e os vermelhos são de abril, ambos de 2014.



4.2 Resposta espectral normalizada dos dados

Em nosso objetivo de modelar as curvas de luz V3704 Oph com o código CYCLOPS e considerando que a emissão ciclôtrica é fortemente dependente do comprimento de onda, é necessário estimar corretamente a resposta espectral normalizada dos dados. A versão atual do CYCLOPS permite o uso de várias frequências para representar uma banda. Assim, vamos usar 1, 3 ou 5 frequências, com diferentes pesos, para representar a resposta espectral em cada banda. O peso associado a cada frequência será determinado pelo procedimento descrito a seguir.

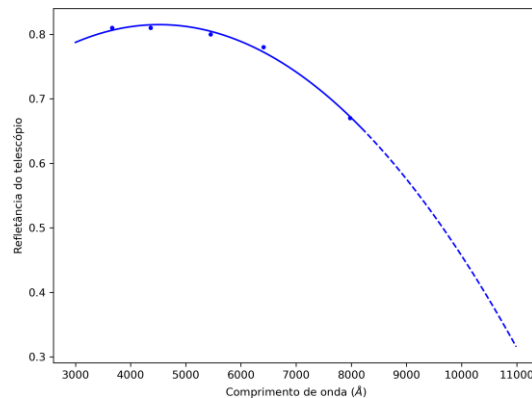
Para obtermos os dados de V3704 Oph utilizamos o telescópio P&E do OPD, acompanhado da gaveta polarimétrica, instalada no foco Cassegrain, com uma roda com os filtros do sistema *Johnson-Cousins* (UBVRI), utilizando apenas os filtros V, R e I. Para essa configuração calculamos a resposta espectral normalizada com a reflexão do telescópio, transparência do céu, eficiência quântica do detector e a transmitância de cada filtro.

Os valores referentes à refletância do telescópio P&E nos foram fornecidos pela equipe do OPD e são apresentados na Tabela 2. Nós ajustamos os pontos da tabela com um polinômio de 2^o grau e a Figura 27 mostra o resultado desse ajuste.

Tabela 2 – Valores de refletância do telescópio P&E.

Filtro	Comprimento de onda (\AA)	Refletância
U	3656	0,81
B	4353	0,81
V	5477	0,80
R	6349	0,78
I	8797	0,67

Figura 27 – Curva de ajuste da refletância do telescópio P&E, em azul. Os pontos apresentam os valores que foram ajustados e a curva pontilhada apresenta a região de extrapolação do ajuste.



Em Dias *et al.* (2010) encontramos os coeficientes de extinção do céu (k), devido ao espalhamento por aerossóis, espalhamento Rayleigh pelas moléculas do ar e pela absorção principalmente pela molécula de ozônio. O trabalho nos apresenta valores de k em condições fotométricas para algumas noites no OPD, na Tabela 3 temos, para cada filtro, um valor mínimo (k_{min}), médio (k_{med}) e máximo (k_{max})

Tabela 3 – Valores dos coeficientes de extinção do céu (em mag/massa de ar) no OPD para os filtros do sistema Johnson-Cousins (UBVRI).

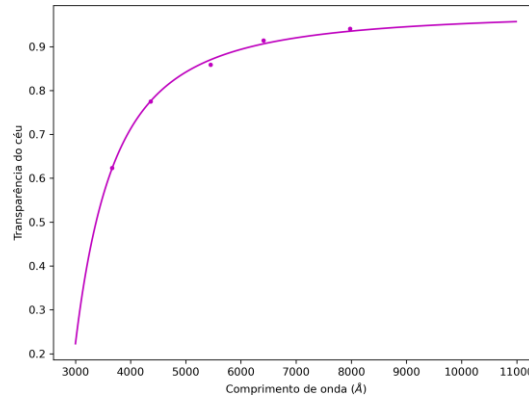
Filtro	k_{min}	k_{med}	k_{max}
U	0,344	0,5135	0,683
B	0,195	0,277	0,359
V	0,113	0,1655	0,218
R	0,03	0,0975	0,165
I	0,01	0,0665	0,123

Os valores usados por nós foram os de k_{med} , pois condiz mais com a condição fotométrica em que os dados foram obtidos, dessa forma para obtermos a transparência do céu (T), ajustamos os valores a uma função exponencial (eq. 4.2) e a Figura 28 mostra o resultado desse ajuste.

$$T_{sky} = \alpha \times e^{\beta/x} + 1,0 \quad (4.2)$$

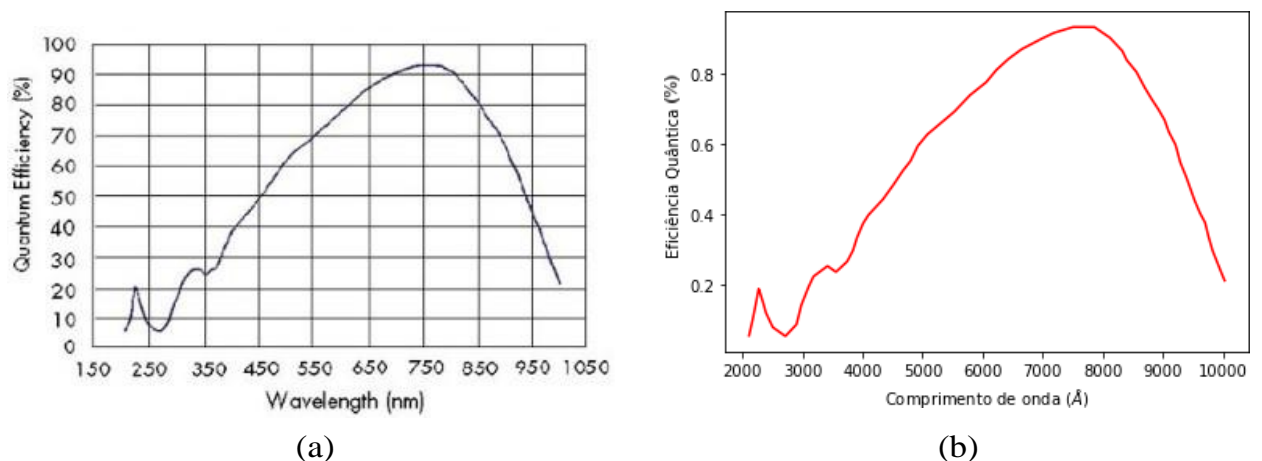
sendo, α e β os valores a serem ajustados e x o comprimento de onda (em Å).

Figura 28 – Curva de ajuste da transparência do céu para o sítio OPD, os pontos apresentam os valores que foram ajustados.



O CCD usado para a aquisição dos dados de V3704 Oph foi o Andor iKon-L936-BR-DD (de número de série: 13739), cuja curva de eficiência quântica (Figura 29a) foi obtida através das especificações técnicas fornecidas pelo site do LNA²(Laboratório Nacional de Astrofísica). Assim, para inserirmos estes valores em nossa análise, extraímos os pontos da curva com a ferramenta *Web Plot Digitizer*. Já com os pontos, ajustamos um polinômio de primeira ordem a eles e este ajuste está representado na Figura 29b.

Figura 29 – Eficiência quântica do CCD Andor iKon-L936-BR-DD (SN:13739). O painel a figura (a) é a curva de eficiência quântica do CCD (com temperatura de -90°C) fornecida pelo LNA e a figura (b) apresenta o ajuste do polinômio usado em nossa análise.

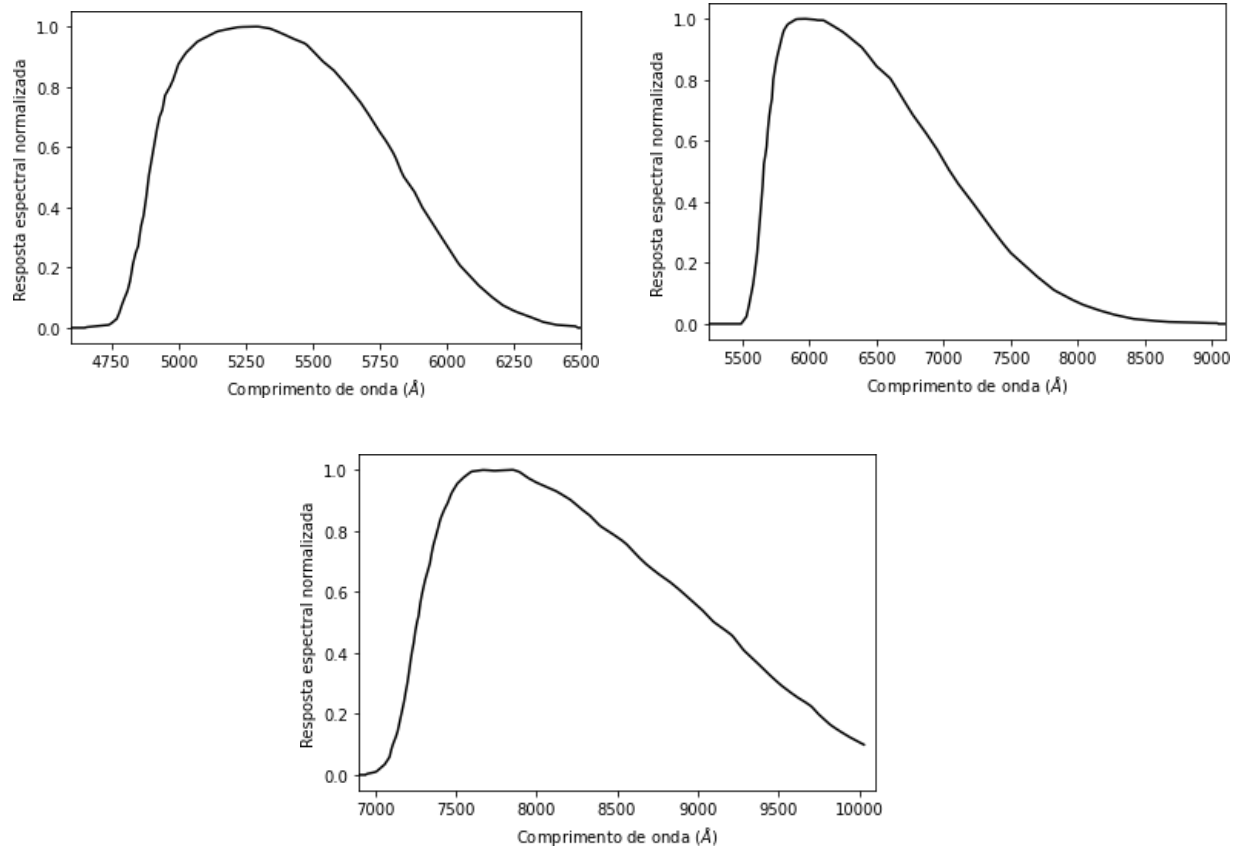


Para a obtenção de nossos dados utilizamos os filtros V, R e I no sistema *Johnson-Cousins* (UBVRI) e a transmitância destes filtros nos foi fornecida pela equipe do OPD.

Com os dados apresentados acima, nós calculamos a resposta espectral normalizada, e na Figura 30 temos as curvas resultantes dessa normalização para cada filtro.

² As especificações podem ser obtidas no seguinte link: <https://www.gov.br/lna/pt-br/composicao-1/coast/obs/opd/instrumentacao/ccd/detectores/ccd-andor-ikon-1936-br-dd-sn-13739-e-13740>

Figura 30 – Resposta espectral normalizada para os filtros *Johnson-Cousins*. No painel superior esquerdo temos o Filtro V, no painel superior direito o filtro R e no painel inferior o filtro I.



O código CYCLOPS utiliza diferentes frequências, e não comprimentos de onda, para representar cada banda, dessa forma convertemos comprimento de onda em frequência no final de nossa análise. Fizemos a opção de usar 3 valores para compor as frequências que descrevem o filtro V, já para os filtros R e I utilizamos 5 diferentes valores para a sua representação. Os valores das respostas espectrais, comprimento de onda e frequência utilizado para representar cada banda no CYCLOPS estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Frequências utilizadas para compor cada banda no CYCLOPS

Filtro V		
Resposta espectral	Comprimento de onda (Å)	Frequência (Hz)
0,50	4890	$6,1307 \times 10^{14}$
1,00	5290	$5,6672 \times 10^{14}$
0,50	5840	$5,1334 \times 10^{14}$
Filtro R		
Resposta espectral	Comprimento de onda (Å)	Frequência (Hz)
0,50	5660	$5,2967 \times 10^{14}$
1,00	5960	$5,0301 \times 10^{14}$
0,90	6405	$4,6806 \times 10^{14}$
0,75	6675	$4,4913 \times 10^{14}$
0,25	7475	$4,0106 \times 10^{14}$
Filtro I		
Resposta espectral	Comprimento de onda (Å)	Frequência (Hz)
0,75	7360	$4,0733 \times 10^{14}$
1,00	7850	$3,8190 \times 10^{14}$
0,90	8215	$3,6493 \times 10^{14}$
0,75	8565	$3,5002 \times 10^{14}$
0,25	9630	$3,1131 \times 10^{14}$

4.3 Densidade colunar do Hidrogênio interestelar

O código CYCLOPS pode, como vimos, considerar o efeito da extinção do meio interestelar na emissão observada, e esta extinção é dependente do comprimento de onda da emissão. O parâmetro fundamental que quantifica a extinção é a densidade colunar de Hidrogênio, $N(H)$, que determina não só a quantidade de extinção como também sua dependência espectral. Em raios-X, a extinção é caracterizada pela absorção de fótons, enquanto que no óptico o avermelhamento causado por espalhamento é fator importante.

A densidade colunar de Hidrogênio interestelar $N(H)$ é um parâmetro de entrada para o código CYCLOPS. Ele foi calculado utilizando a ferramenta de cálculo de extinção, presente no site NED (*NASA/IPAC Extragalactic Database*)³, nele selecionamos os valores de extinção para as bandas B e V apresentados na tabela abaixo:

Como o valor de $N(H)$ no código CYCLOPS é inserido como um valor máximo a ser ajustado no processo de modelagem, nós selecionamos os valores de extinção que resultaria no maior valor para o excesso de cor $E(B-V)$ fornecido por [Schlafly e Finkbeiner \(2011\)](#), ou seja, os valores de extinção do sistema fotométrico CTIO. Para a extinção do

³ A Base de Dados Extragaláctica da NASA/IPAC (NED) é financiada pelo *National Aeronautics and Space Administration* e operado pela *California Institute of Technology*. Essa ferramenta pode ser acessada através do endereço: https://ned.ipac.caltech.edu/extinction_calculator

Tabela 5 – Valores de extinção para as bandas B e V (Schlafly; Finkbeiner, 2011).

Sistema Fotométrico	Comprimento de onda central (μm)	Extinção galáctica (mag)
Landolt B	0,43	2,689
Landolt V	0,54	2,033
CTIO B	0,43	2,700
CTIO V	0,55	1,989

filtro B usamos o valor 2,700 mag e para o filtro V o valor de 1,989, resultando no valor de $E(B-V) = 0,711$ mag para o excesso de cor na direção de V3704 Oph.

Convertemos o valor de $E(B-V)$ em extinção óptica (A_V) com seguinte relação $R_V = A_V/E(B-V)$ usando o valor de $R_V = 3,1$ para objetos em nossa galáxia, obtendo valor de $A_V = 2,2041$ mag. Assim, utilizamos a relação de conversão 4.3 apresentada por Zhu et al. (2017):

$$N(H)(\text{cm}^{-2}) = 2,08(\pm 0,02) \times 10^{21} \times A_V(\text{mag}) \quad (4.3)$$

Desta forma, obtivemos o valor de $N(H) = 4,58 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$, que foi inserido como a densidade colunar do Hidrogênio interestelar máximo na direção de V3704 Oph, parâmetro definido como FIX[4] no código CYCLOPS.

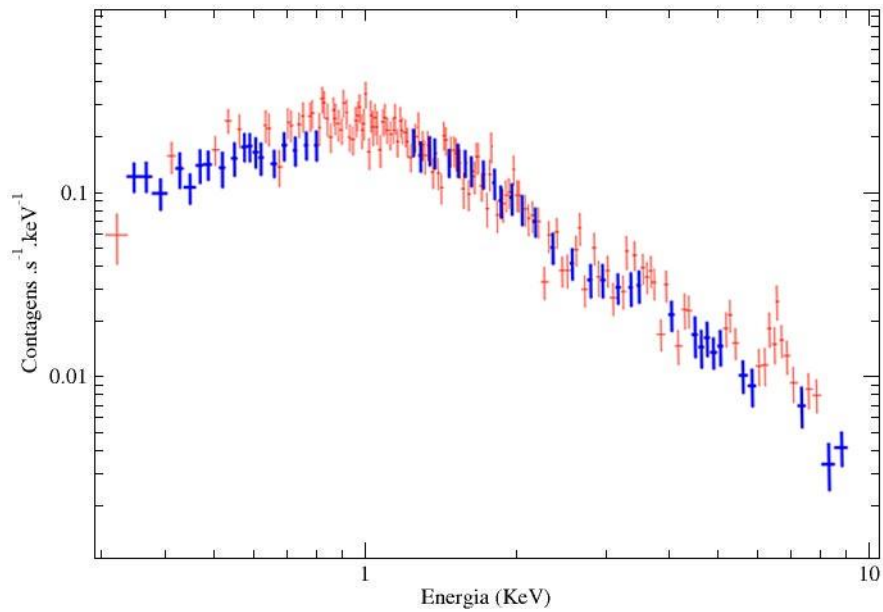
4.4 Preparação dos dados para modelagem

Para a modelagem não devemos juntar conjuntos de dados obtidos em momentos diferentes, pois o estado de acreção do sistema pode ser diferente entre as datas. Dessa forma, utilizamos apenas os dados do mês de julho, que apresentam uma cobertura mais completa de fase orbital comparado com o conjunto de dados em abril. Ao final, comparamos os modelos gerados para os dados de julho com os dados de abril. A fim de preparar os dados de curvas de luz e polarização, obtidas em três noites consecutivas no mês de julho de 2014 com os filtros V, R e I os agrupamos em 50 *bins* de fase em relação à efeméride fotométrica apresentada na seção 4.1 (Equação 4.1). Como a polarização linear desse objeto é baixa e muito ruidosa consideramos apenas o fluxo total e o fluxo polarizado circularmente para a busca do melhor modelo.

Utilizaremos na modelagem o espectro de raios-X descrito na seção 3.2. Em raios-X o código CYCLOPS não contempla as linhas espectrais, e calcula apenas a emissão de *bremsstrahlung*, realizando um ajuste no contínuo do espectro. Assim, para preparar os dados, devemos remover as linhas de emissão evidentes nos espectros a serem ajustados. A Figura 31, mostra o espectro de V3704 Oph observado pelo XMM-Newton e os pontos

selecionados a serem ajustados pelo código, de forma a manter apenas regiões do contínuo do espectro.

Figura 31 – Espectro em raios-X de V3704 Oph. Os pontos vermelhos são os pontos do espectro original e, em azul, estão os pontos a serem ajustados pelo código CYCLOPS. Isto é, os pontos azuis são um subconjunto dos vermelhos.



5 RESULTADOS DA MODELAGEM

A busca por modelos CYCLOPS para V3704 Oph se deu utilizando-se como entrada para o código os seguintes dados:

- Ópticos: curvas de luz e polarização, obtidas em três noites consecutivas no mês de julho de 2014 com os filtros V, R e I. Os dados foram agrupados em 50 *bins* de fase em relação à efeméride fotométrica apresentada na seção 4.4 (Equação 4.1). A versão atual do CYCLOPS nos permite o uso de várias frequências para representar uma banda, assim verificamos que para as bandas R e I há a necessidade de utilizar cinco frequências para uma boa representação, enquanto para a banda V há a necessidade de apenas três, a escolha dos valores para essas frequências foram apresentadas na seção 4.2 com seus valores destacados na Tabela 4. Como a polarização linear desse objeto é baixa e muito ruidosa consideramos apenas o fluxo total e o fluxo polarizado circularmente para a busca do melhor modelo.
- Raios-X: espectro em raios-X com intervalo de energias de 0,3 a 10 keV obtido em setembro de 2019 e apresentado na seção 4.4.

A busca do modelo CYCLOPS que melhor se ajusta aos dados observacionais de entrada é realizada seguindo dois passos. Inicialmente, realizamos uma pesquisa em uma região muito ampla de parâmetros geométricos e físicos, que são valores de entrada para o código *pikaia*, esse código executa quase 10^5 diferentes modelos, por iteração. O código *pikaia* é usado exaustivamente, até encontrarmos conjuntos de parâmetros que se aproximam de um bom ajuste aos dados, denominados "famílias". Feito isso, nós refinamos essas famílias usando o código *amoeba*, que investiga valores próximos aos parâmetros de cada família. Devido ao código não permitir a paralelização da busca por parâmetros, temos que realizar a análise de forma seriada, ou seja, há a necessidade de aguardar o término de uma etapa para iniciarmos a próxima, assim precisamos de um grande esforço computacional, para o qual utilizamos como ferramentas computadores pessoais e dois *clusters*, um presente no IP&D¹ da UNIVAP e outro no INPE. No nosso caso, em que a busca de modelos pelo o código *pikaia* requer uma alta resolução, seja espacial e/ou temporal, o tempo de máquina dispendido na busca pode ser de até 2 meses por iteração. No processo de busca pelo melhor ajuste, através da minimização do χ^2 , o código CYCLOPS nos permite aplicar diferentes pesos para o χ^2 de cada curva, e durante

¹ Cluster Hipercubo sob projetos FINEP 01.10.0661-00, FAPESP 2011/13250-0, 2013/17247-9 e 2014/10489-0.

a análise esses pesos foram variados. Portanto, a busca por modelos que ajustem bem aos dados não é trivial e o tempo dispendido nessa investigação é extenso.

Apresentaremos inicialmente os resultados da modelagem aplicada simultaneamente aos dados ópticos e de raios-X. Os modelos apresentados aqui foram calculados utilizando os mesmos pesos para as curvas de fluxo total, fluxo polarizado circularmente e espectro em raios-X, enquanto que o fluxo linearmente polarizado e o ângulo da polarização linear entraram com peso igual a zero nesta modelagem dado que a polarização linear neste sistema é baixa e ruidosa. O melhor modelo obtido pode ser visto nas Figuras 32 e 33. O modelo aqui apresentado foi obtido após inúmeras tentativas de cobrir completamente o espaço de parâmetros e de buscar possíveis degenerescências nestes conjuntos de parâmetros. O modelo ajusta muito bem os dados ópticos de fluxo total e fluxo circularmente polarizado nos filtros V e R, e razoavelmente bem os dados do filtro I. Vemos também que este mesmo modelo ajusta razoavelmente bem os dados do espectro em raios-X, e que a absorção (intrínseca e do meio interestelar) é fundamental para este ajuste.

Figura 32 – Modelo CYCLOPS (pontos em azul) calculado simultaneamente para dados ópticos e raios-X, sobre os dados ópticos observados (pontos pretos) para os 3 filtros, em função da fase orbital fotométrica (Equação 4.1). Para cada banda as curvas representam, de cima para baixo, o fluxo total, o fluxo polarizado circularmente e o fluxo polarizado linearmente.

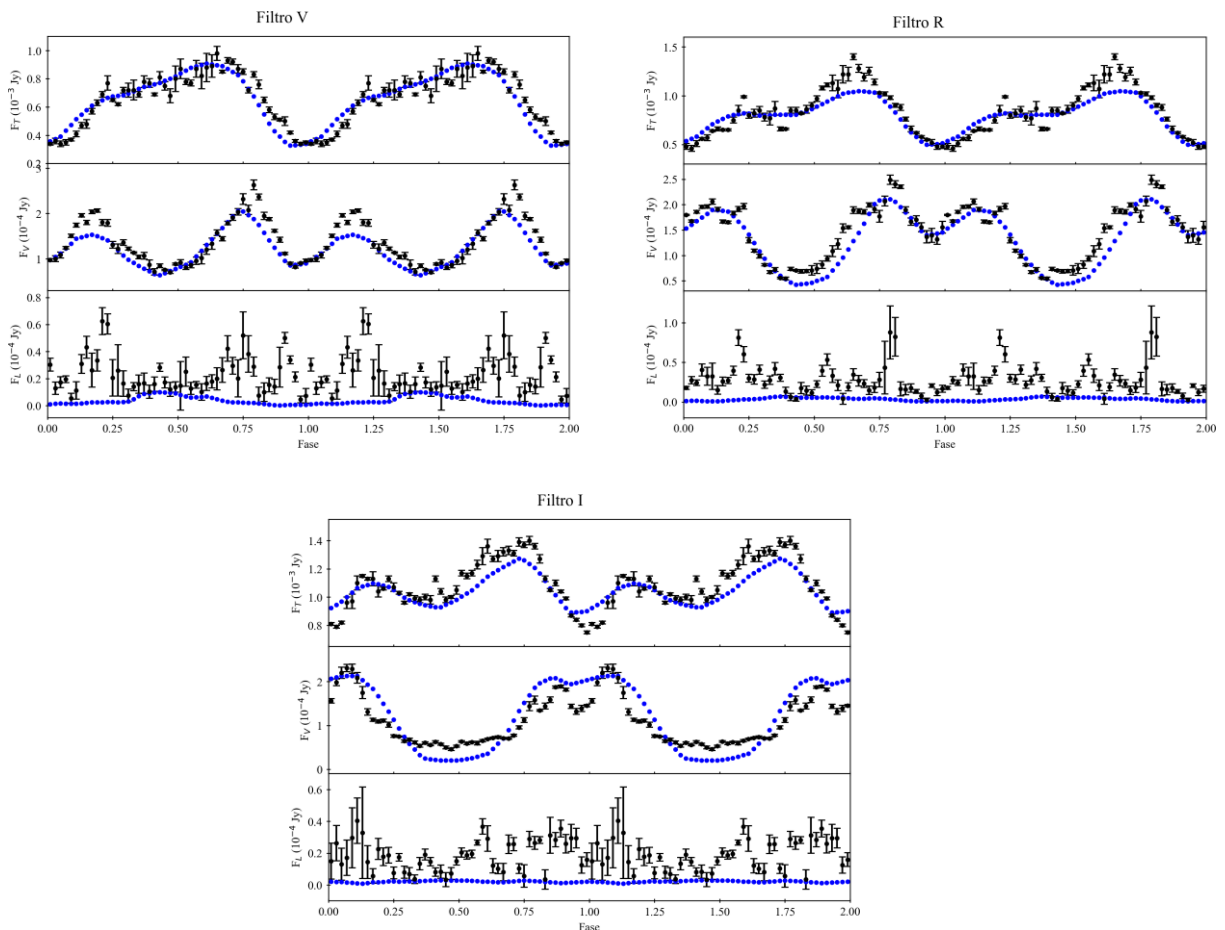
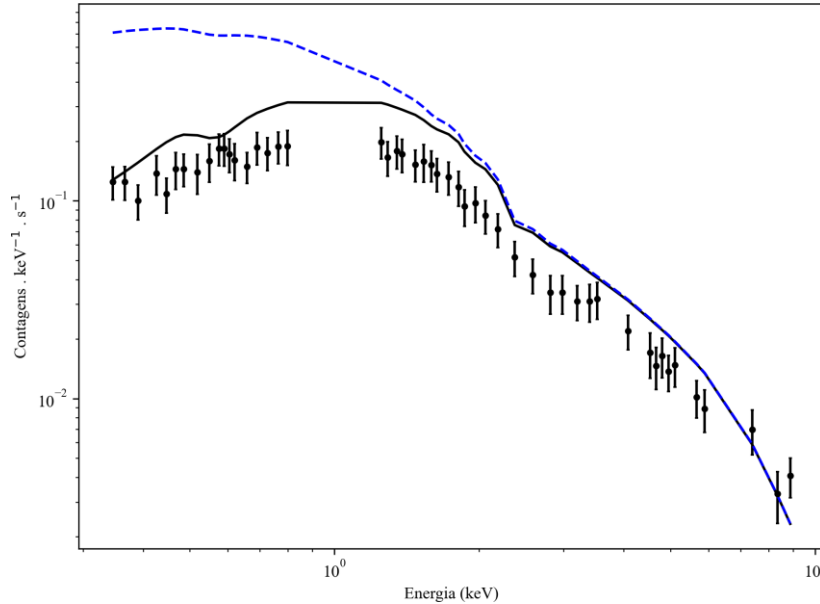


Figura 33 – Modelo CYCLOPS (linha contínua preta) calculado simultaneamente para dados ópticos e raios-X, sobreposto ao espectro em raios-X observado (pontos pretos) no intervalo de 0,3 até 10 keV. A linha azul tracejada mostra o modelo CYCLOPS sem a consideração de qualquer absorção, seja intrínseca ou do meio interestelar.



Os parâmetros obtidos deste modelo são mostrados na Tabela 6. A massa da AB obtida pelo modelo é de $1,36 M_{\odot}$. Trata-se de uma massa alta, acima da média de massas encontradas em polares, mas ainda abaixo do limite de Chandrasekhar ($1,44 M_{\odot}$). Nas discussões dos resultados faremos considerações sobre esse valor da massa no contexto das VCs magnéticas e não-magnéticas. O campo magnético no polo, de 12 MG, está no limite inferior do intervalo típico (de 10 a 80 MG) para sistemas mVCs polares (HELLIER, 2001). O sistema é visto em baixa inclinação, cerca de 21° . A Figura 34 mostra os perfis de densidade eletrônica e de temperatura ao longo da RPC no modelo em questão. A RPC tem uma altura de 0,05 raios da AB, e a densidade aumenta através da RPC, do choque até a superfície da AB, crescendo mais rapidamente próximo à superfície. A temperatura do choque é de cerca de 152 keV.

A Figura 35 mostra a geometria tridimensional de como o observador terrestre vê a AB e a RPC ao longo de um ciclo de rotação completo, resultante do modelo simultâneo com dados ópticos e de raios-X. A linha laranja representa o eixo de rotação da AB. A área projetada da RPC sobre a superfície da AB é mostrada em azul na figura. Vemos que a RPC nunca é encoberta pela própria AB, ou seja, não há um eclipse total ou parcial da RPC. Portanto, qualquer variação no fluxo óptico deve estar associada à anisotropia da emissão ciclotrônica. A coluna de acreção segue uma geometria definida pelas linhas do campo magnético, e a linha vermelha na figura é a representação da linha de campo magnético que passa pelo ponto central da RPC. O eixo do campo magnético B é mostrado pela linha verde na figura.

Figura 34 – Perfis de densidade (linha vermelha) e temperatura (linha preta) ao longo da RPC, para o modelo simultâneo dos dados ópticos e de raios-X.

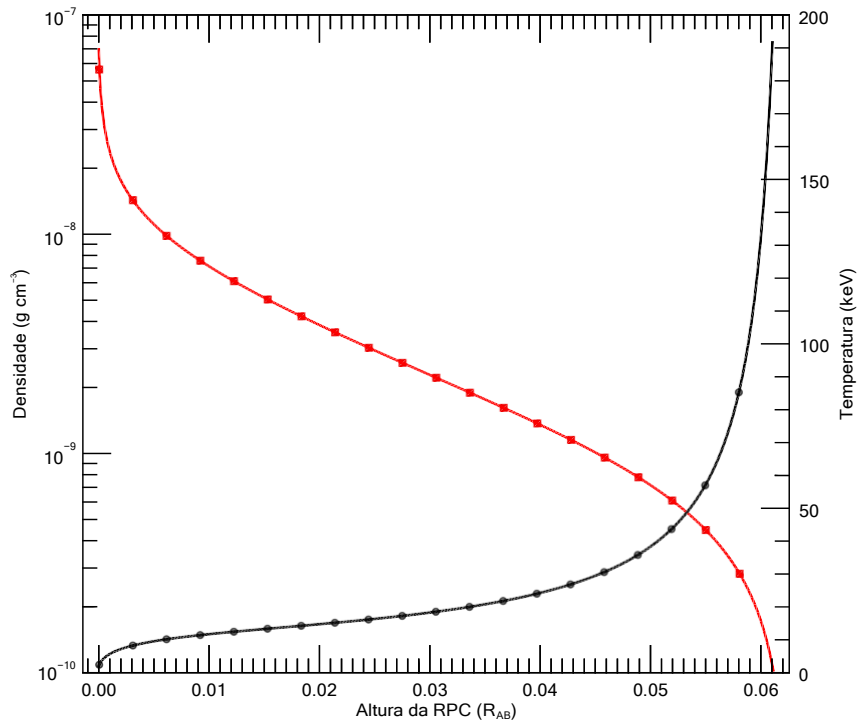


Figura 35 – Geometria de acreção de V3704 Oph, resultante do modelo aplicado simultaneamente aos dados ópticos e de raios-X, vista pelo observador terrestre em diferentes fases orbitais, indicadas pelos números. A RPC é representada pela região azul sobre a esfera que representa a AB. A linha de referencia para o campo magnético é representada pela linha vermelha. O eixo magnético é representado pela linha verde e o eixo de rotação da AB pela linha laranja.

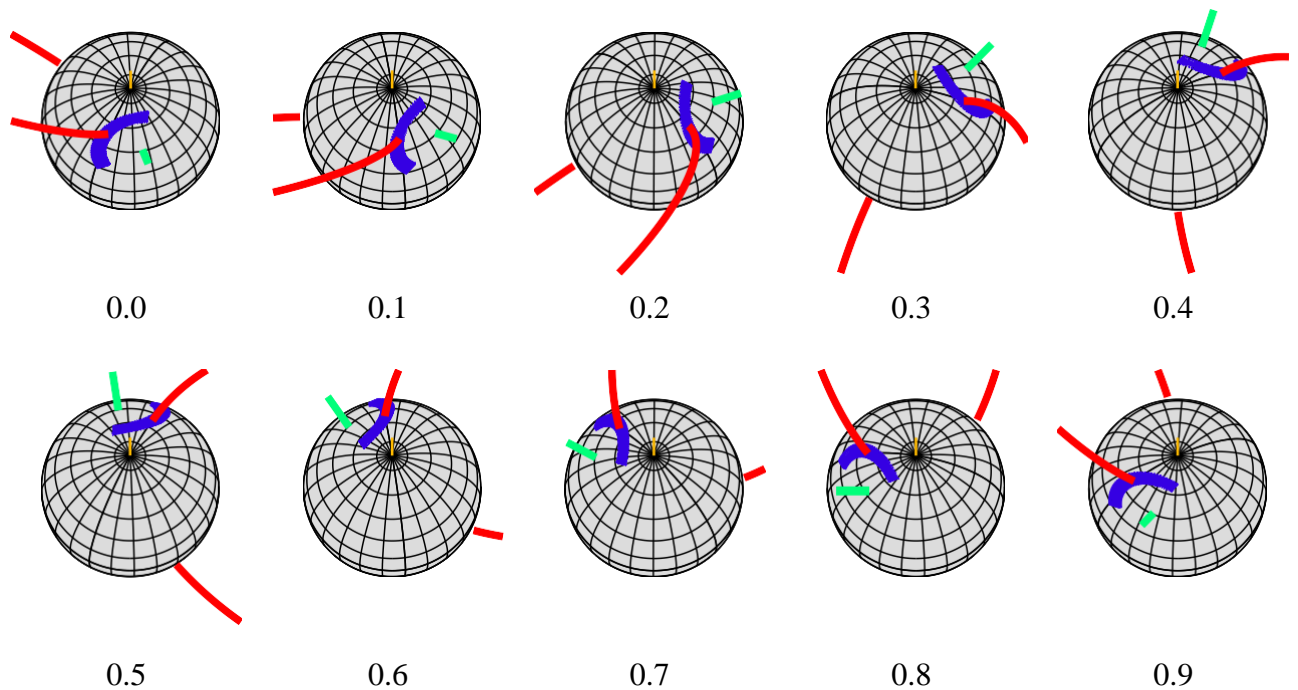


Tabela 6 – Propriedades físicas e geométricas de V3704 Oph estimadas a partir da modelagem pelo código CYCLOPS aplicada simultaneamente aos dados ópticos e de raios-X.

Parâmetros Ajustados	Valores
Massa da Anã Branca, M_{AB}	1,36 M_{\odot}
Taxa de acreção de massa,	$10^{-12} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$
Campo magnético no polo da Anã Branca, B_e	12 MG
Latitude do eixo magnético, B_a	49°
Longitude do eixo magnético, B_g	39°
Inclinação do plano orbital do sistema,	21°
Ângulo entre o eixo de rotação e o ponto de ancoragem, β	33°
Semi-extensão azimutal da região de acoplamento, Δ_g	63°
Semi-extensão radial fracionária da região de acoplamento, Δ_R	0,27
Densidade colunar de hidrogênio do meio interestelar, $N(H)$	$4,58 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
Variáveis obtidas pelo modelo CYCLOPS	Valores
Raio da Anã Branca, R_{AB}	0,003 R_{\odot}
Altura da RPC, h	0,05 R_{AB}
Intervalo da temperatura do Choque	1 a 150 keV
Temperatura do Choque	150 keV
Intervalo de densidade eletrônica	7×10^{13} a $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Densidade eletrônica do choque	$7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
Densidade do choque	$1 \times 10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$
Campo Magnético da RPC	9 a 11 MG
Extensão em latitude da RPC	11°
Área da RPC projetada sobre a AB	0,009 R_{AB}
Distância da região de acoplamento até o centro da AB	4,8 R_{AB}
Deslocamento em fase aplicado ao modelo, δ_{fae}	0,076

Nas nossas curvas de fluxo total e de polarização circular podemos notar que a forma das curvas pode variar consideravelmente de um ciclo orbital para o ciclo seguinte (Martins (2017)). Isso é muito provavelmente causado por variações na acreção de matéria, algo que é típico nas mVCs e que pode ocorrer em escalas de tempo de horas a meses. Assim, não se pode assegurar que dados obtidos em épocas diferentes representem o mesmo estado de acreção e possam ser simultaneamente modelados. A seguir apresentaremos os resultados da modelagem CYCLOPS aplicada exclusivamente aos dados ópticos. Novamente, os modelos apresentados aqui levam em consideração os χ^2 das curvas de fluxo total e fluxo polarizado circularmente, ou seja, descartamos a influência das curvas de fluxo polarizado linearmente e do ângulo de polarização linear. O modelo aqui apresentado foi obtido após inúmeras tentativas de cobrir completamente o espaço de parâmetros e de buscar possíveis degenerescências nestes conjuntos de parâmetros. Ele é um modelo excelente na banda V, na banda R também é muito bom e na banda I é razoável. O melhor modelo obtido pode ser visto na Figura 36 e os parâmetros obtidos deste modelo são mostrados na Tabela 7.

Neste modelo dos dados ópticos obtivemos praticamente os mesmos parâmetros de quando aplicamos a modelagem simultaneamente aos dados ópticos e de raios-X. Em ambos os casos a massa da AB, campo magnético no polo e altura da RPC são iguais, enquanto que a inclinação orbital do sistema teve mudança muito pequena no modelo exclusivamente óptico em relação ao anterior, de 21° para 25° , e a temperatura do choque reduziu de 152 keV para 116 keV. A distância da região de acoplamento até o centro da AB, por sua vez, foi reduzida de $4,8 R_{AB}$ para $2,6 R_{AB}$.

A Figura 37 mostra a geometria tridimensional de como o observador vê a AB e a RPC ao longo de um ciclo completo de rotação, resultante do modelo com dados exclusivamente ópticos. Nota-se a grande semelhança com a Figura 35, como era de se esperar dado que grande parte dos parâmetros são muito parecidos, ou idênticos.

Figura 36 – Modelo CYCLOPS (pontos em azul) calculado exclusivamente para dados ópticos, sobre os dados ópticos observados (pontos pretos) para os 3 filtros, em função da fase orbital fotométrica (Equação 4.1). Para cada banda as curvas representam, de cima para baixo, o fluxo total, o fluxo polarizado circularmente e o fluxo polarizado linearmente.

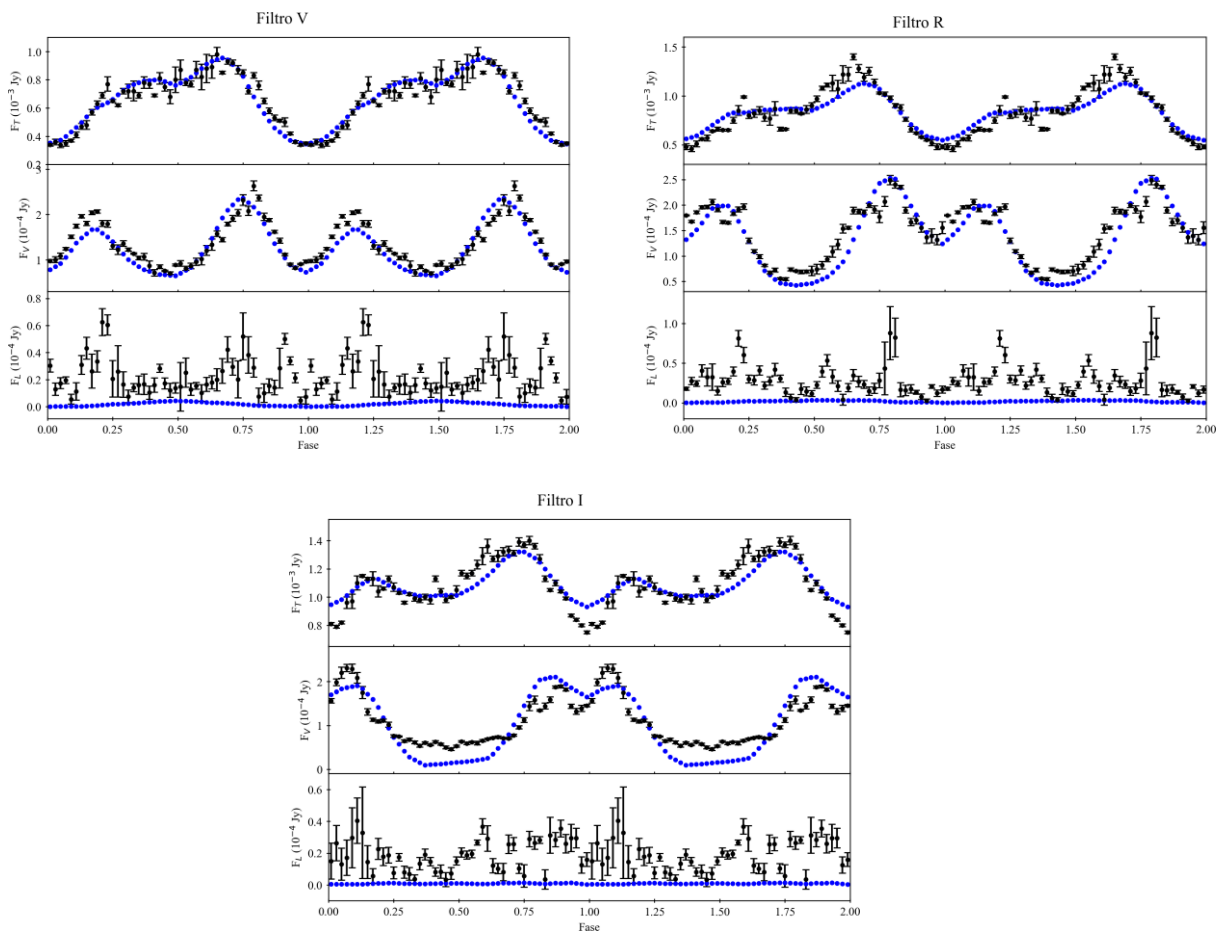
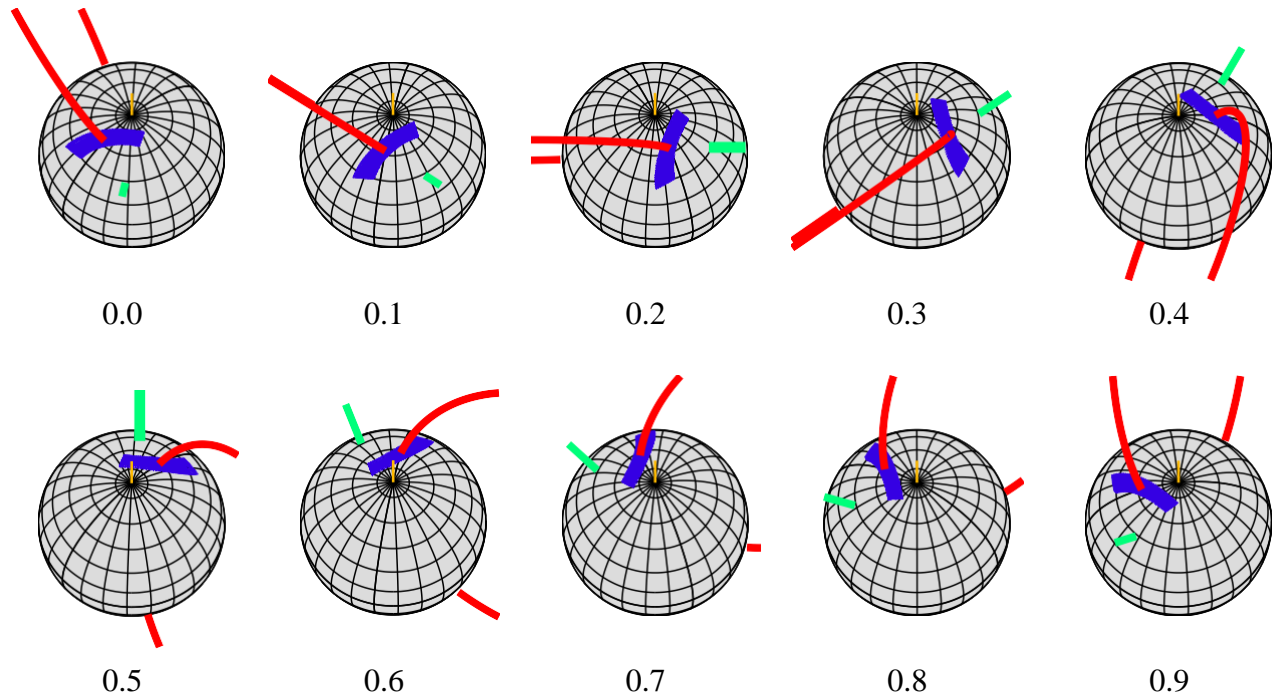


Figura 37 – Geometria de acreção de V3704 Oph, resultante pelo modelo dos dados exclusivamente ópticos, vista pelo observador terrestre em diferentes fases orbitais, indicadas pelos números. A RPC é representada pela região azul sobre a esfera que representa a AB. A linha de referencia para o campo magnético é representada pela linha vermelha. O eixo magnético é representado pela linha verde e o eixo de rotação da AB pela linha laranja.



Com o intuito de testar a consistência do modelo encontrado nas duas situações analisadas, e de buscar um melhor ajuste aos dados do filtro I, realizamos a modelagem CYCLOPS dos dados ópticos de cada um dos filtros (V, R e I) individualmente. Mesmo assim, não foi possível encontrar um melhor ajuste em I. Mais importante, vimos que quando a modelagem é aplicada a dados ópticos de um único filtro (no caso, V) passamos a encontrar grande degenerescência de parâmetros, principalmente entre M_{AB} e B.

O passo seguinte foi a aplicação da modelagem exclusivamente aos espectro de raios-X. No entanto, esta busca não foi exaustiva, de forma que outros modelos além do que apresentaremos a seguir podem existir, principalmente considerando a degenerescência. Na modelagem de raios-X os parâmetros mais relevantes são a massa da AB, a intensidade do campo magnético, a taxa de acreção de matéria e a distância da região de acoplamento, pois estes são os parâmetros principais que caracterizam os perfis de temperatura e densidade na RPC, e por consequência a emissão de raios-X da RPC, especialmente via *bremsstrahlung* (Belloni *et al.* (2021)). Por outro lado, ao contrário da modelagem de dados ópticos, a modelagem de raios-X é menos sensível aos parâmetros

geométricos, pois a emissão *bremsstrahlung* é muito mais isotrópica em comparação à emissão ciclotron no óptico. Um bom modelo obtido em nossa modelagem individualizada do espectro em raios-X pode ser visto na Figura 38, e os parâmetros obtidos deste modelo são mostrados na Tabela 8. Neste modelo e, apesar da degenerescência encontrada, também na maioria dos demais modelos em raios-X que obtivemos, a massa da AB é alta ($1,37 M_{\odot}$), reforçando o valor de M_{AB} obtido anteriormente (nas modelagens de dados exclusivamente ópticos e de dados ópticos conjuntamente com raios-X).

Tabela 7 – Propriedades físicas e geométricas de V3704 Oph estimadas a partir da modelagem pelo código CYCLOPS para dados exclusivamente ópticos.

Parâmetros Ajustados	Valores
Massa da Anã Branca, M_{AB}	$1,36 M_{\odot}$
Taxa de acreção de massa, \dot{M}	$10^{-11} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$
Campo magnético no polo da Anã Branca, B_e	12 MG
Latitude do eixo magnético, B_a	47°
Longitude do eixo magnético, B_g	42°
Inclinação do plano orbital do sistema,	25°
Ângulo entre o eixo de rotação e o ponto de ancoragem, β	23°
Semi-extensão azimutal da região de acoplamento, Δ_g	36°
Semi-extensão radial fracionária da região de acoplamento, Δ_R	0,3
Densidade colunar de hidrogênio do meio interestelar, $N(H)$	$4,58 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
Variáveis obtidas pelo modelo CYCLOPS	Valores
Raio da Anã Branca, R_{AB}	$0,003 R_{\odot}$
Altura da RPC, h	$0,05 R_{AB}$
Intervalo da temperatura do Choque	2 a 118 keV
Temperatura do Choque	116 keV
Intervalo de densidade eletrônica	3×10^{14} a $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Densidade eletrônica do choque	$3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
Densidade do choque	$5 \times 10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$
Campo Magnético da RPC	8 a 11 MG
Extensão em latitude da RPC	11°
Área da RPC projetada sobre a AB	$0,0096 R_{AB}$
Distância da região de acoplamento até o centro da AB	$2,6 R_{AB}$
Deslocamento em fase aplicado ao modelo, δ_{fae}	0,133

Figura 38 – Modelo CYCLOPS (linha contínua preta) calculado exclusivamente para os dados em raios-X, sobreposto ao espectro de raios-X observado (pontos pretos) no intervalo de 0,3 até 10 keV. A linha azul tracejada mostra o modelo CYCLOPS sem a consideração de qualquer absorção, seja intrínseca ou do meio interestelar.

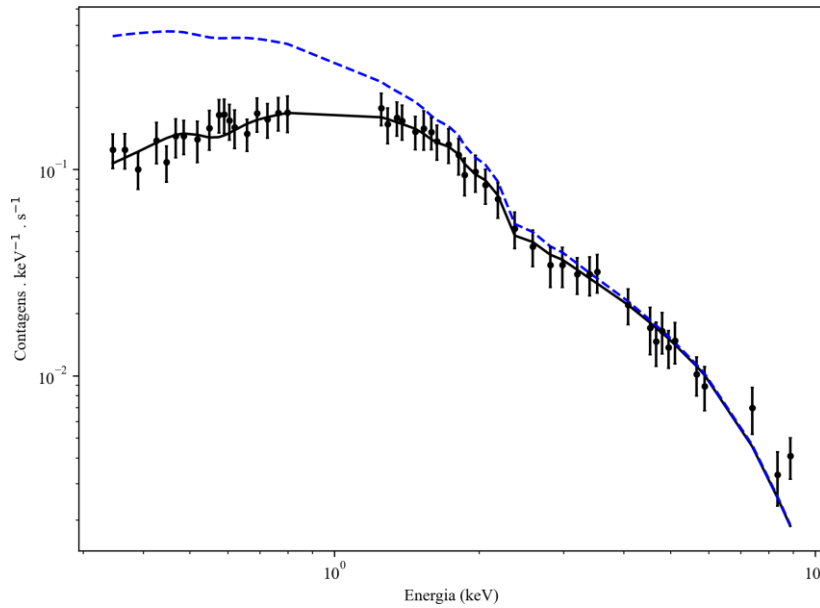


Tabela 8 – Propriedades físicas e geométricas de V3704 Oph estimadas a partir da modelagem pelo código CYCLOPS para o espectro em raios-X.

Parâmetros Ajustados	Valores
Massa da Anã Branca, M_{AB}	1,37 M_{\odot}
Taxa de acreção de massa,	$10^{-12} M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$
Campo magnético no polo da Anã Branca, B_e	29 MG
Latitude do eixo magnético, B_a	98°
Longitude do eixo magnético, B_g	133°
Inclinação do plano orbital do sistema,	19°
Ângulo entre o eixo de rotação e o ponto de ancoragem, β	10°
Semi-extensão azimutal da região de acoplamento, Δ_g	16°
Semi-extensão radial fracionária da região de acoplamento, Δ_R	0,4
Densidade colunar de hidrogênio do meio interestelar, $N(H)$	$4,58 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$
Variáveis obtidas pelo modelo CYCLOPS	Valores
Raio da Anã Branca, R_{AB}	0,003 R_{\odot}
Altura da RPC, h	0,01 R_{AB}
Intervalo da temperatura do Choque	1 a 216 keV
Temperatura do Choque	212 keV
Intervalo de densidade eletrônica	1×10^{15} a $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Densidade eletrônica do choque	$1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Densidade do choque	$2 \times 10^{-9} \text{ g cm}^{-3}$
Campo Magnético da RPC	27 a 28 MG
Extensão em latitude da RPC	3°
Área da RPC projetada sobre a AB	0,0003 R_{AB}
Distância da região de acoplamento até o centro da AB	63 R_{AB}
Deslocamento em fase aplicado ao modelo, δ_{fae}	0

6 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Apresentamos nesta monografia os resultados obtidos por nós no estudo observacional e modelagem do sistema V3704 Oph. Observamos este sistema extensivamente desde 2012, inicialmente no âmbito do projeto de busca por novas Variáveis Cataclísmicas magnéticas através de espectros obtidos no telescópio SOAR (OLIVEIRA *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2020). Estas observações extensivas utilizaram técnicas de fotometria, polarimetria e espectroscopia no óptico, feitas nos telescópios SOAR e P&E do OPD, e espectroscopia e fotometria em raios-X obtidas com o satélite XMM-Newton. Parte dos resultados observacionais aqui apresentados foi tema da minha dissertação de mestrado defendida em 2017 (MARTINS, 2017). Nesta tese avançamos no seu entendimento através da modelagem dos dados ópticos e de raios-X com o código CYCLOPS.

No mestrado, nossos dados confirmam que este objeto é uma Variável Cataclísmica magnética, como sugerido por Denisenko e Martinelli (2012). A intensa polarização circular presente em nossos dados, de até 40%, mostra inequivocamente tratar-se de uma polar. Percebe-se uma variação significativa nas curvas de polarização quando comparamos dados obtidos com diferença de 3 meses, indicando possível variabilidade na taxa de acreção neste intervalo de tempo. O espectro de V3704 Oph tem características típicas de espectros de polares, como linhas de emissão de alta ionização com perfis bastante variáveis e associados a componentes múltiplas formadas em regiões distintas do sistema binário. As curvas de velocidades radiais destas linhas são senoidais com amplitudes grandes, de até 400 km s^{-1} , também comum nas polares.

O espectro em raios-X obtido no XMM apresenta linhas de emissão do complexo do Ferro entre 6 e 7 keV. A análise de periodicidades aplicada às curvas de luz de raios-X apresenta um período de $0,095 \pm 0,075 \text{ d}$ que, dentro das incertezas relativamente grandes devido à cobertura de apenas ~ 2 ciclos orbitais, coincide com o período orbital obtido a partir dos dados ópticos (MARTINS, 2017). A amplitude de variação das curvas de luz em raios-X é maior no intervalo de energias entre 0,3 e 2 keV (*soft*) do que no intervalo entre 0,3 e 10 keV (*hard*), no qual a curva é quase plana. Modulações com amplitudes dependentes da energia, como neste caso, podem ser causadas por absorção pela própria coluna de acreção, dado que eclipses da região acretora pelo próprio limbo da AB ou pela estrela secundária causariam modulação independente da energia. De fato, este pode ser o caso em V3704 Oph, considerando que a modelagem que realizamos indica que a coluna de acreção está posicionada entre a RPC e o observador ao longo do ciclo de rotação. A variação do aspecto da coluna em relação ao observador seria a causa da absorção dependente de fase e modulada com o ciclo.

O código CYCLOPS, desenvolvido por nossas colaboradoras (COSTA; RODRIGUES, 2009; SILVA *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2019; BELLONI *et al.*, 2021), reproduz as emissões ci-clotrônica e *bremstrahlung* originadas na região pós-choque das mVCs, fornecendo curvas de luz e de polarização no óptico, e espectro em raios-X, que permitem ajustar os dados observacionais e modelar importantes propriedades físicas e geométricas do sistema. Uma importante e recente atualização do CYCLOPS substituiu a representação analítica dos perfis de densidade eletrônica e temperatura do choque, por soluções das equações diferenciais hidrodinâmicas que descrevem o plasma acretado. Nesta atualização do código, colaborei diretamente em um detalhe específico, implementando uma rotina IDL de suavização dos modelos a serem comparados com os dados observacionais. Esta suavização aplica o filtro de Savitzky e Golay, num processo de convolução de polinômios aos dados, nas curvas de luz e de polarização no óptico e nas curvas de luz em raios-X. A implementação do cálculo das equações diferenciais do choque e da suavização dos modelos foi apresentada no trabalho de Belloni *et al.* (2021), no qual sou co-autor. A modelagem de V3704 Oph apresentada nesta tese foi a segunda vez onde esta versão do CYCLOPS foi aplicada, e é também a segunda vez que resultados da modelagem simultânea de dados ópticos e raios-X são apresentados, sendo que na primeira vez (SILVA *et al.*, 2013) o cálculo da estrutura do choque ainda não era feito pelo código.

Na modelagem CYCLOPS de nossos dados, realizamos buscas exaustivas por diferentes famílias de parâmetros e por degenerescências. Aplicamos a modelagem em diversos casos: dados exclusivamente ópticos, dados ópticos individualmente por filtros, dados exclusivamente em raios-X, e nos dados ópticos e raios-X simultaneamente. No caso de modelagens aplicadas em filtros individuais ou exclusivamente em raios-X, percebemos que é alta a ocorrência de degenerescência de parâmetros, principalmente casos de combinações distintas dos parâmetros B e M_{AB} que resultam em curvas de luz, de polarização e em espectros de raios-X semelhantes. No entanto, tal degenerescência não apareceu na modelagem dos dados ópticos em três filtros simultâneos, ou na modelagem destes dados ópticos em conjunto com dados em raios-X. Concluímos que a modelagem de dados de filtros individuais deve ser evitada, e que a degenerescência foi quebrada na modelagem multi-banda, ao menos neste caso.

Encontramos em nossos modelos não degenerados basicamente uma única família, e investigamos amplamente os modelos similares que dela fazem parte. Este modelo indica baixa inclinação ($21^\circ - 25^\circ$) e alta massa para a anã branca, além de um campo magnético (no polo da AB) baixo, de 12 MG. Com exceção de M_{AB} , os parâmetros obtidos estão em conformidade com os valores típicos encontrados em polares (FERRARIO; DE MARTINO; GÄNSICKE, 2015).

Todos os nossos bons modelos (inclusive os provenientes de dados exclusivamente em raios-X) resultam em uma anã branca de alta massa, com $M_{AB} \sim 1,36M_{\odot}$. Tentativas de forçar massas mais baixas para a AB nos modelos foram feitas, inclusive fixando este parâmetro em valores como 1,2 e 1,0 M_{\odot} , porém resultando sempre em modelos com maiores valores de χ^2 e piores ajustes visuais. O valor efetivamente obtido para M_{AB} é próximo ao limite de Chandrasekhar de 1,44 M_{\odot} e coloca a primária de V3704 Oph como uma anã branca ultramassiva (que são caracterizadas por $M \geq 1,1M_{\odot}$). Dada a relação massa-raio das anãs brancas, na qual a massa é inversamente proporcional ao raio, e a alta massa estimada, a AB deste sistema apresenta um raio pequeno. O raio resultante dos modelos é de 0,003 R_{\odot} ou ~ 2087 km, que equivale a cerca de 33% do raio da Terra ou $\sim 1,2$ raios lunares.

O interesse histórico no estudo de ABs ultramassivas está relacionado ao entendimento das progenitoras de Supernovas do tipo Ia (SNIa), dado que estas são muito provavelmente causadas por explosões de ABs ultramassivas acretantes (no cenário de sistemas com uma única estrela degenerada) ou por fusões de duas ABs (no cenário de duplas degeneradas). Grande parte das massas de ABs isoladas (ou seja, não pertencentes a sistemas binários) foi determinada pela comparação de espectros ópticos e ultravioletas com modelos de atmosferas de ABs (BÉDARD; BERGERON; FONTAINE, 2017). Esta técnica fornece as temperaturas efetivas, gravidades superficiais e raios, e a massa é então determinada pelas relações massa-raio, que por sua vez são dependentes das abundâncias das ABs. No caso de ABs frias, cujos espectros são pobres em linhas, utiliza-se o método fotométrico, no qual a distribuição espectral de energia, construída com medidas fotométricas, é comparada com modelos de atmosferas. Obtém-se, assim, T_{eff} e o ângulo sólido $\pi(R/D)^2$. Para determinação do raio, e conseqüentemente da massa, este método exige o conhecimento da distância D à AB, portanto foi muito favorecido pelas determinações de paralaxes precisas pelo Gaia.

Uma das primeiras ABs ultramassivas identificadas foi RE J0317-853, com massa estimada em 1,35 M_{\odot} (BARSTOW *et al.*, 1995). Kilic *et al.* (2021a) construíram uma amostra com ABs isoladas na vizinhança solar, dentro de um raio de 100 pc, e identificaram nessa amostra 25 objetos mais massivos que 1,3 M_{\odot} , assumindo ABs com atmosferas de H e núcleos de C e O. Dentre eles, o objeto SDSS J2211+1136 com $M = 1,27 M_{\odot}$ e um período de rotação de 70 s (KILIC *et al.*, 2021b), sendo a AB isolada com rotação mais rápida conhecida atualmente, e SDSS J1329+2549, possivelmente a AB de maior massa conhecida, com $1,351 \pm 0,006 M_{\odot}$. Como outro exemplo, a AB isolada ZTF J1901+1458 (CAIAZZO *et al.*, 2021) teve seu raio estimado em 2140 km, e sua massa, inferida pela relação massa-raio, entre 1,327 e 1,365 M_{\odot} , dependendo da composição

considerada. Além disso, este objeto tem um campo magnético estimado entre 600 e 900 MG em sua superfície.

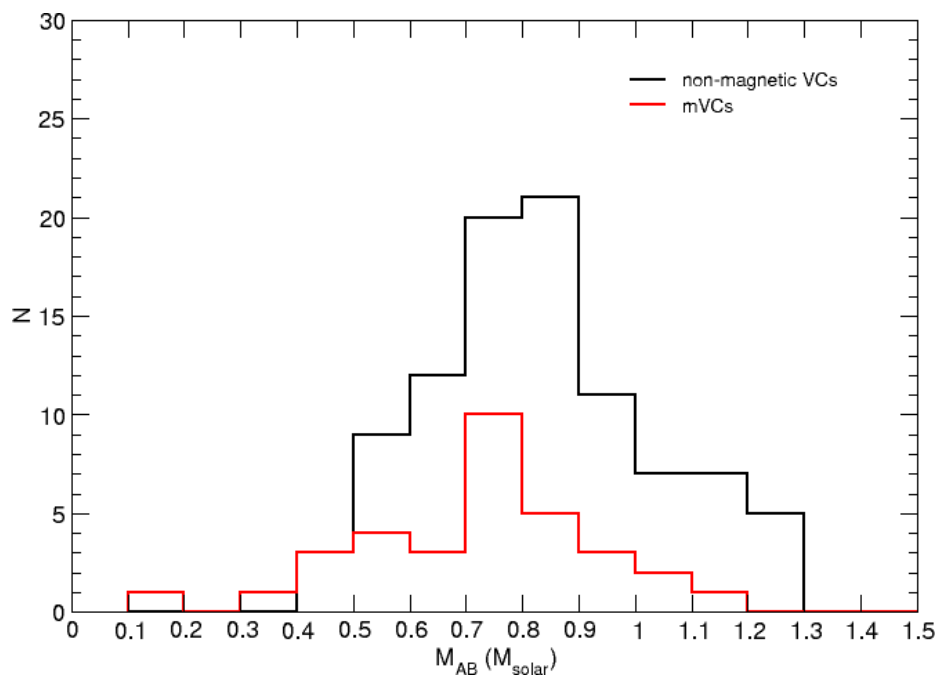
No caso de ABs em VCs, as massas das ABs classicamente são estimadas dinamicamente a partir dos espectros, via determinação das amplitudes K_1 e K_2 das velocidades radiais da primária e da secundária e inclinação do sistema, ou via curvas de luz de sistemas eclipsantes, pelas fases de contato do eclipse da primária (WARNER, 1995, p. 107). Outro método utiliza, além das amplitudes das velocidades radiais, a diferença entre as velocidades sistêmicas das duas componentes causada pelo *redshift* gravitacional da AB. No caso das VCs magnéticas os métodos espectroscópicos geralmente não são aplicáveis, devido à contaminação de K_1 pelas altas velocidades associadas à coluna de acreção, portanto hipóteses adicionais sobre a secundária são necessárias para estimar M_{AB} , levando a grandes incertezas nos valores obtidos (BAILEY, 1995).

Alternativamente, dois métodos indiretos baseados na emissão de raios-X têm sido utilizados em mVCs para determinação de M_{AB} (CROPPER; RAMSAY; WU, 1998; RAMSAY, 2000). O método que ajusta a inclinação do contínuo no espectro de raios-X baseia-se no fato que a temperatura do choque (T_s) é função da massa e raio da AB (AIZU, 1973) segundo $T \simeq 3G\mu M_{AB}/8R_{AB}$, onde k é a constante de Boltzmann, μ é a massa molecular média (que vale 0.615 para um plasma de abundância solar totalmente ionizado) e m_p é a massa do próton. O ajuste do contínuo fornece então a temperatura e, portanto, a massa. O outro método utiliza a razão de intensidades de linhas espectrais como a K_α do ferro (EZUKA; ISHIDA, 1999). Ambos métodos apresentam limitações, principalmente no caso de ABs de alta massa devido ao efeito gravitacional na altura da região do choque sobre a AB. (RAMSAY, 2000; CROPPER; RAMSAY; WU, 1998).

Ferrario, de Martino e Gänsicke (2015) apresentam uma lista completa (assim era em Dezembro de 2014) com parâmetros estimados para as 114 polares conhecidas então. Desta amostra, 68 objetos apresentam determinação da massa da AB, sendo que duas são ultramassivas. Uma é V1432 Aql, uma polar eclipsante e assíncrona, cuja AB possui uma massa de $1,21 \pm 0,10 M_\odot$ determinada pelo contínuo em raios-X ajustado por um modelo de plasma multitemperatura e efeitos de resfriamento ciclotron (RANA *et al.*, 2005). Outra é WW Hor, mais uma polar eclipsante, com $M_{AB} = 1,1 M_\odot$ determinada também por raios-X (RAMSAY *et al.*, 2001). Um caso mais recente, e extremo, de determinação de massa é o de V1500 Cyg. Uma brilhante e rápida erupção de nova em 1975 já sugeria a presença de uma AB ultramassiva (LANCE; MCCALL; UOMOTO, 1988), erupção esta que levou V1500 Cyg a um estado de assincronismo (STOCKMAN; SCHMIDT; LAMB, 1988). Wang, Qian e Liao (2021) modelaram a curva de luz obtida pelo satélite TESS, considerando a iluminação da secundária pela AB acretante, e desta forma determinaram que a AB tem massa de cerca de $1,4 M_\odot$.

Uma revisão das massas das ABs em VCs disponíveis na literatura foi feita por [Zorotovic, Schreiber e Gänsicke \(2011\)](#), tratando as VCs magnéticas e não-magnéticas em conjunto. Encontraram que a massa média das ABs em variáveis cataclísmicas é $\langle M_{AB} \rangle = 0,83 \pm 0,23 M_{\odot}$, muito maior que o valor médio das massas de ABs isoladas, de $\langle M_{AB} \rangle = 0,6 M_{\odot}$. Esta diferença entre as massas médias de ABs isoladas e em VCs foi recentemente confirmada por [Pala *et al.* \(2022\)](#) no estudo de 43 VCs com espectros ultravioleta obtidos pelo Hubble Space Telescope e distâncias do Gaia DR3, chegando a um valor médio de $\langle M_{AB} \rangle = 0,81^{+0,26} M_{\odot}$. Considerando amostras de ABs isoladas magnéticas (com $B > 1$ MG) e não-magnéticas conjuntamente, [Ferrario, de Martino e Gänsicke \(2015\)](#) concluíram que as magnéticas têm uma massa média mais alta ($\langle M_{AB_{mag}} \rangle = 0,784 \pm 0,047 M_{\odot}$) do que a massa média das não-magnéticas ($\langle M_{AB} \rangle = 0,663 \pm 0,136 M_{\odot}$) obtida por [Tremblay *et al.* \(2013\)](#). [Ramsay \(2000\)](#) obtiveram as massas médias de ABs em polares ($\langle M_{AB} \rangle = 0,80 \pm 0,14 M_{\odot}$), de polares intermediárias ($\langle M_{AB} \rangle = 0,85 \pm 0,21 M_{\odot}$) e de mVCs em geral ($\langle M_{AB} \rangle = 0,84 \pm 0,20 M_{\odot}$) em uma amostra de 20 objetos com dados RXTE, e não encontraram diferença significativa entre as VCs magnéticas e não-magnéticas nestas médias. Na Figura 39 apresentamos os histogramas de massas de ABs que construímos com os dados de 97 VCs não-magnéticas e 33 VCs magnéticas obtidas do catálogo de [Ritter e Kolb \(2003\)](#). Nesta amostra incluímos apenas objetos com incertezas determinadas para M_{AB} , e obtivemos valores médios $\langle M_{AB_{mag}} \rangle = 0,74 M_{\odot}$ para as magnéticas, contra $\langle M_{AB_{non-mag}} \rangle = 0,86 M_{\odot}$ para as não-magnéticas.

Figura 39 – Histogramas de massas de 130 ABs em VCs não-magnéticas (preto) e VCs magnéticas (vermelho) do catálogo de [Ritter e Kolb \(2003\)](#).



Em resumo, a massa determinada para a AB de V3704 Oph é alta, e incomum entre as ABs isoladas e em sistemas binários. Porém, não seria um caso único. A confirmação desta massa seria desejável, porém não seria trivial obtê-la por métodos dinâmicos dada a presença da coluna de acreção. Caso confirmada, esta massa tornaria V3704 Oph um objeto muito especial entre as polares e entre as Variáveis Cataclísmicas em geral.

O código CYCLOPS, ao contrário de outros códigos de modelagem de RPC em anãs brancas magnéticas acretantes, é um código tridimensional. Além disso, contempla a modelagem simultânea em óptico e em raios-X. Como qualquer ferramenta, é passível de aprimoramentos futuros. Entre os aspectos que podem ser aperfeiçoados no código destacamos os seguintes. Em relação ao modelo da RPC, atualmente o código considera equipartição entre íons e elétrons. Esta hipótese é válida em muitos casos, porém pode apresentar problemas em alguns casos onde a massa da AB é alta (o que especialmente parece ser o caso em V3704 Oph). Assim, um aprimoramento ao código seria a implementação da aproximação de dois fluidos, ampliando as situações físicas para a modelagem adequada da RPC. Outro aprimoramento possível está associado às condições de contorno do modelo. Atualmente ele assume condições padrões de choques intensos e a hipótese (obviamente questionável) que o fluxo alcança temperatura zero na superfície da AB. Considerar um fluxo que atinja a temperatura fotosférica, especialmente se aquecida pelo processo de acreção, aperfeiçoaria o código. Outros aspectos que podem ser aprimorados no código, e que estão descritos em [Belloni *et al.* \(2021\)](#), tratam do processo de resfriamento da RPC, que atualmente exclui o espalhamento Compton e resfriamento por linhas de emissão, uma melhor descrição da região pré-choque, e a reflexão pela superfície da AB.

Referências

AIZU, K. X-Ray Emission Region of a White Dwarf with Accretion. *Progress of Theoretical Physics*, v. 49, n. 4, p. 1184–1194, abr. 1973.

BAILER-JONES, C. A. L. *et al.* Estimating distances from parallaxes. v. geometric and photogeometric distances to 1.47 billion stars in gaia early data release 3. *The Astronomical Journal, American Astronomical Society*, v. 161, n. 3, p. 147, feb 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd806>>.

BAILEY, J. Fundamental Properties of Polars. In: BUCKLEY, D. A. H.; WARNER, B. (Ed.). *Magnetic Cataclysmic Variables*. [S.l.: s.n.], 1995. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 85), p. 10.

BARSTOW, M. A. *et al.* RE J0317 – 853: the hottest known highly magnetic DA white dwarf. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 277, n. 3, p. 971–985, 121995. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/277.3.971>>.

BÉDARD, A.; BERGERON, P.; FONTAINE, G. Measurements of Physical Parameters of White Dwarfs: A Test of the Mass-Radius Relation. *The Astrophysical Journal*, v. 848, n. 1, p. 11, out. 2017.

BELLONI, D. *et al.* Breaking the degeneracy in magnetic cataclysmic variable x-ray spectral modeling using x-ray light curves. *The Astrophysical Journal Supplement Series, American Astronomical Society*, v. 256, n. 2, p. 45, oct 2021. Disponível em: <<http://doi.org/10.3847/1538-4365/ac141c>>.

BEUERMANN, K.; THOMAS, H. C. The ROSAT view of the cataclysmic variable sky. *Advances in Space Research*, v. 13, n. 12, p. 115–124, Dez. 1993.

CAIAZZO, I. *et al.* Publisher Correction: A highly magnetized and rapidly rotating white dwarf as small as the Moon. *Nature*, v. 596, n. 7873, p. E15–E15, ago. 2021.

CANALLE; SAXTON, C. J. *et al.* Accretion in dipole magnetic fields: flow structure and x-ray emission of accreting white dwarfs. *A&A*, v. 440, n. 1, p.185–198, 2005. Disponível em: <<http://doi.org/10.1051/0004-6361:20052706>>.

CHANMUGAM, G.; DULK, G. A. Polarized radiation from hot plasmas and applications to am herculis binaries. *The Astrophysical Journal*, v. 244, p. 569–578, 1981.

CHARBONNEAU, P. Genetic Algorithms in Astronomy and Astrophysics. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 101, p. 309, dez. 1995.

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, n. 1, p. 240-248, 2009..

CROPPER, Mark. The polars. *Space Science Reviews*, v. 54, n. 3, p. 195-295, 1990.

CROPPER, Mark; HORNE, Keith. Mapping the accretion region in AM Her systems: ST LMi. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 267, n. 3, p. 481-489, 1994.

CROPPER, Mark; RAMSAY, Gavin; WU, Kinwah. White dwarf masses in magnetic cataclysmic variables: multi-temperature fits to Ginga data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 293, n. 3, p. 222-232, 1998.

CROPPER, M. *et al.* Effects of gravity on the structure of post-shock accretion flows in magnetic cataclysmic variables. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 306, n. 3, p. 684–690, 07 1999. ISSN 0035-8711. Disponível em: <http://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02570.x>.

DENISENKO, D.; MARTINELLI, F. A Study of the Cataclysmic Variable 1RXS J174320.1-042953. *Peremennye Zvezdy*, v. 32, ago. 2012.

DENISENKO, D. V.; SOKOLOVSKY, K. V. Identification of new cataclysmic variables in the 1RXS and USNO-B1.0 catalogs. *Astronomy Letters*, v. 37, p. 91–99, fev. 2011.

DIAS, W. S. *et al.* Determination of atmospheric extinction and sky brightness in the OPD. *Bulletin of the Astronomical Society of Brazil*, v. 29, n. 19, p. 54, out. 2010.

DRAKE, A. J. *et al.* First results from the catalina real-time transient survey. *The Astrophysical Journal*, v. 696, n. 1, p. 870, 2009.

EZUKA, H.; ISHIDA, M. Iron Line Diagnostics of the Postshock Hot Plasma in Magnetic Cataclysmic Variables Observed with ASCA. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 120, n. 2, p. 277–298, Feb. 1999.

FERRARIO, L.; DE MARTINO, D.; GÄNSICKE, B. T. Magnetic White Dwarfs. *Space Science Reviews*, v. 191, n. 1-4, p. 111–169, Oct. 2015.

FERRARIO, L.; WICKRAMASINGHE, D. T. Arc-shaped Cyclotron Emission Regions in AM Herculis Systems. *The Astrophysical Journal*, v. 357, p. 582, Jul. 1990.

FISCHER, A.; BEUERMANN, Klaus. Accretion physics of AM Herculis binaries-I. Results from one-dimensional stationary radiation hydrodynamics. *Astronomy & Astrophysics*, v. 373, n. 1, p. 211-221, 2001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20010600>.

FRANK, J.; KING, A.; RAINE, D. Books-Received - Accretion Power in Astrophysics - ED.2. *Journal of the British Astronomical Association*, v. 102, p. 287, out. 1992.

GRONENSCHILD, E. H. B. M.; MEWE, R. Calculated X-radiation from optically thin plasmas. III. Abundance effects on continuum emission. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, v. 32, p. 283–305, Mayo 1978.

HAYASHI, T.; ISHIDA, M. A new comprehensive X-ray spectral model from the post-shock accretion column in intermediate polars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 438, n. 3, p. 2267–2277, 01 2014. ISSN 0035-8711. Disponível em: <http://doi.org/10.1093/mnras/stt2342>.

HELLIER, C. *Cataclysmic Variable Stars*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

KILIC, M. The most massive white dwarfs in the solar neighbourhood. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 503, n. 4, p.5397–5408, 03 2021. Disponível em: <<http://doi.org/10.1093/mnras-/stab767>>.

KILIC, M. *et al.* An Isolated WhiteDwarf with a 70 s Spin Period. *The Astrophysical Journal Letters*, v. 923, n. 1, p. L6, Dec. 2021.

KNIGGE, C.; BARAFFE, I.; PATTERSON, J. The Evolution of Cataclysmic Variables as Revealedby Their Donor Stars. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 194, n. 2, p. 28, Jun. 2011.

KRZEMINSKI, W.; SERKOWSKI, K. Extremely high circular polarization of AN Ursae Majoris. *The Astrophysical Journal*, v. 216, p. L45–L48, ago. 1977.

LANCE, C. M.; MCCALL, M. L.; UOMOTO, A. K. Portrait of a Novel Nova: V1500 Cygni. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 66, p. 151, fev. 1988.

MARTINS, M. *Estudo Observacional da Variável Cataclísmica Polar IRXS J174320.1- 042953*. Dissertação (Mestrado) Universidade do Vale do Paraíba, Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, 2017. Disponível em: <<http://www1-univap.br/marketing/site/Docs/Mestrado/Murilo Martins.pdf>>.

MEGGITT, S. M. A.; WICKRAMASINGHE, D. T. The polarization properties of magnetic accretion columns. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 198, n. 1, p. 71–82, 01 1982. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<http://doi.org/10.1093/mnras/198.1-.71>>.

Mukai, K. X-Ray Emissions from Accreting White Dwarfs: A Review. , v. 129, n. 976, p. 062001, jun. 2017.

NORTON, A. J.; WYNN, G. A.; SOMERSCALES, R. V. The Spin Periods and Magnetic Momentsof White Dwarfs in Magnetic Cataclysmic Variables. *The Astrophysical Journal*, v. 614, n. 1, p. 349–357, Oct. 2004.

Oliveira, A. S. *et al.* Exploratory spectroscopy ofmagnetic cataclysmic variables candidates and other variable objects. *The AstronomicalJournal*, v. 153, n. 4, p. 144, 2017. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1538-3881-/153/i=4/a=144>>.

OLIVEIRA, A. S. *et al.*. Exploratory spectroscopy of magnetic cataclysmic variables candidates and other variable objects. ii. *The Astronomical Journal*, American Astronomical Society, v. 159, n. 3, p. 114, Feb 2020. ISSN 1538-3881. Disponível em: <<http://doi.org/10.3847/1538-3881/ab6ded>>.

OLIVEIRA, A. S. *et al.* Optical observations and cyclops post-shock region modelling of the polar V348Pav. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 489, n. 3, p. 4032–4042,09 2019. Disponível em: <<http://doi.org/10.1093/mnras/stz2445>>.

- PACHOLCZYK, A. G.; SWIHART, T. L. Polarization of radio sources. VI. An oscillatory behavior of the intensity in a general solution of the radiation transfer problem in a plasma. *The Astrophysical Journal*, v. 196, p. 125–127, Feb. 1975.
- PALA, A. F. *et al.* Constraining the evolution of cataclysmic variables via the masses and accretion rates of their underlying white dwarfs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 510, n. 4, p. 6110–6132, mar. 2022.
- PATTERSON, J. The DQ Herculis Stars. *Astronomical Society of the Pacific*, v. 106, p. 209, Mar. 1994.
- POTTER, S. B.; CROPPER, M.; HAKALA, P. The gossip on the mcv v347 pav. 1998. DOI: 10.48550/arxiv.astro-ph/9809317
- POTTER, Stephen B. *et al.* Stokes imaging, Doppler mapping and Roche tomography of the AM Herculis system V834 Cen. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 348, n. 1, p. 316–324, 2004.
- PRESS, W. H. *et al.* *Numerical recipes in FORTRAN. The art of scientific computing.* [S.l.: s.n.], 1992.
- RAMSAY, Gavin. Determining the mass of the accreting white dwarf in magnetic cataclysmic variables using RXTE data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 314, n. 2, p. 403–408, 2000.
- RAMSAY, Gavin *et al.* First XMM-Newton observations of strongly magnetic cataclysmic variables—I. Spectral studies of DP Leo and WW Hor. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 326, n. 2, p. L27–L32, 2001.
- RANA, V. R. X-Ray Emission and Optical Polarization of V1432 Aquilae: An Asynchronous Polar. *The Astrophysical Journal*, v. 625, n. 1, p. 351–367, May 2005.
- RITTER, H.; KOLB, U. Catalogue of cataclysmic binaries, low-mass X-ray binaries and related objects (Seventh edition). *Astronomy & Astrophysics*, v. 404, p. 301–303, Jun. 2003.
- ROHATGI, A. *Webplotdigitizer: Version 4.5.* 2021. Disponível em: <<http://automeris.io/WebPlotDigitizer>>.
- SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, v. 36, n. 8, p. 1627–1639, 1964. Disponível em: <<http://doi.org/10.1021/ac60214a047>>.
- SAXTON, C. *et al.* X-ray emissions from two-temperature accretion flows within a dipole magnetic funnel. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 379, 05 2007.
- SCARGLE, Jeffrey D. Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *The Astrophysical Journal*, v. 263, p. 835–853, 1982..
- SCHLAFLY, Edward F.; FINKBEINER, Douglas P. Measuring reddening with Sloan Digital Sky Survey stellar spectra and recalibrating SFD. *The Astrophysical Journal*, v. 737, n. 2, p. 103, 2011.

- SILVA, K. M. G. et al. Stokes imaging of AM Her systems using 3D inhomogeneous models—II. Modelling X-ray and optical data of CP Tucanae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 432, n. 2, p. 1587-1599, 2013.
- STOCKMAN, H. S.; SCHMIDT, G. D.; LAMB, D. Q. V1500 Cygni: Discovery of a Magnetic Nova., *The Astrophysical Journal*, v. 332, p. 282, set. 1988.
- STRÜDER, L. et al. The European photon imaging camera on XMM-Newton: the pn-CCD camera. *Astronomy & Astrophysics*, v. 365, n. 1, p. L18-L26, 2001. Disponível em: <<http://doi.org/10.1051/0004-6361:20000066>>.
- SULEIMANOV, V. et al. GK Persei and EX Hydrae: Intermediate polars with small magnetospheres. *Astronomy & Astrophysics*, v. 591, p. A35, 2016..
- SULEIMANOV, V.; DOROSHENKO, V.; WERNER, K. Hard x-ray view on intermediate polars in the Gaia era. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 482, p. 3622–3635, 01 2019.
- SZKODY, Paula et al. Cataclysmic variables from the Sloan digital sky survey. VIII. The final year (2007–2008). *The Astronomical Journal*, v. 142, n. 6, p. 181, 2011.
- TREMBLAY, P.-E. et al. Spectroscopic analysis of DA white dwarfs with 3D model atmospheres. *Astronomy & Astrophysics*, v. 559, p. A104, 2013..
- VAN BOX SOM, Lucile et al. Numerical simulations of high-energy flows in accreting magnetic white dwarfs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 473, n. 3, p. 3158-3168, 2018. Disponível em: <<http://doi.org/10.1093/mnras/stx2557>>.
- WANG, Qishan; QIAN, Shengbang; LIAO, Wenping. Photometric Analysis of the TESS Light Curve for the Asynchronous Polar V1500 Cyg. *Astronomical Society of the Pacific*, v. 133, n. 1029, p. 114201, 2021.
- WARNER, Brian. *Cataclysmic variable stars*. Cambridge University Press, 2003.
- WICKRAMASINGHE, D. T.; FERRARIO, Lilia. Cyclotron emission from inhomogeneous shocks in AM Herculis-type systems. *The Astrophysical Journal*, v. 334, p. 412-421, 1988.
- WICKRAMASINGHE, m DT; MEGGITT, S. M. A. An analysis of the AM Her-type variables CW 1103+ 254 and E 1405-451. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 216, p. 857-871, 1985.
- WICKRAMASINGHE, Dayal T.; WU, Kinwah. A new evolutionary model for AM Herculis binaries. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 266, n. 1, p. L1-L4, 1994.
- WU, Kinwah; WICKRAMASINGHE, D. T. Three-Dimensional Structured Shocks in Am-Herculis Type Systems-Part One-the Angular Dependence of Intensity and Polarization from Axisymmetric Shocks. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 246, p. 686, 1990.
- YUASA, Takayuki et al. White dwarf masses in intermediate polars observed with the Suzaku satellite. *Astronomy & Astrophysics*, v. 520, p. A25, 2010. Disponível em: <<http://doi.org/10.1051/0004-6361/201014542>>.
- ZHU, H. et at. The gas-to-extinction ratio and the gas distribution in the Galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 471, n. 3, p.

3494–3528, 06 2017. ISSN 0035-8711. Disponível em: <[http://doi.org/10.1093/mnras-stx1580](http://doi.org/10.1093/mnras/stx1580)>.

ZOROTOVIC, Mónica; SCHREIBER, M. R.; GÄNSICKE, B. T. Post common envelope binaries from SDSS-XI. The white dwarf mass distributions of CVs and pre-CVs. *Astronomy & Astrophysics*, v. 536, p. A42, 2011.