Universidade do Vale do Paraíba Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

# ESTUDO OBSERVACIONAL DA VARIÁVEL CATACLÍSMICA POLAR 1RXS J174320.1-042953

MURILO MARTINS

São José dos Campos - SP 2017

**Murilo Martins** 

# ESTUDO OBSERVACIONAL DA VARIÁVEL CATACLÍSMICA POLAR 1RXS J174320.1-042953

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, como complementação dos créditos necessários para a obtenção do título de Mestre em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Soares de Oliveira.

São José dos Campos - SP 2017

### Murilo Martins

## ESTUDO OBSERVACIONAL DA VARIÁVEL CATACLÍSMICA POLAR 1RXS J174320.1-042953

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Soares de Oliveira

Orientador/UNIVAP São José dos Campos - SP

Presidente: Prof.Dr. Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho

UNIVAP São José dos Campos - SP

INPE

Profa. Dra. Cláudia Vilega Rodrigues

Prof. Dr. Oli Luiz Dors Junior

UNIVAP São José dos Campos - SP

São José dos Campos - SP

Suplente: Profa. Dra. Angela Cristina Krabbe

Suplente: Prof. Dr. Francisco José Jablonski

UNIVAP São José dos Campos - SP

INPE São José dos Campos - SP

Prof. Dr. Leandro José Raniero Diretor do IP&D – UNIVAP São José dos Campos, 29/03/2017.

Eu aprendi que a coragem não é a ausência de medo, mas o triunfo sobre ele. O Homem corajoso não é aquele que não sente medo, mas aquele que conquista por cima do medo.

Nelson Mandela \*1918,+2013

Dedico este trabalho à minha família, Que é muito unida, E também muito ouriçada, Brigam por qualquer razão, Mas acabam pedindo perdão.

...Para a grande Família Martins

## AGRADECIMENTOS

A base familiar;

Meus pais, Sidnei e Cristina, pelo constante incentivo e apoio nos momentos difíceis, por toda a base educacional que me foi dada, pelo carinho e pelo amor, a união de vocês me tornou quem eu sou.

Meu irmão Marcel, meu exemplo, pela honestidade, pela simplicidade e principalmente pelo amor empreendido em suas atividades. Me espelho em você.

Meu maninho Matheus, por estar sempre presente, sou orgulhoso do Homem que você está se tornando, presenciar a sua dedicação escolar me deu forças para continuar e saber que essa dedicação deu resultado, Química/USP (Ahhh muleke!!), me encheu de alegria.

Minha princesinha (rabugenta, rs), Letícia por me permitir fazer parte da sua vida, por me pedir conselhos, por não me dar sossego, por me ajudar, e atrapalhar também, rs, mas por sempre alegrar a minha vida me auxiliando nas situações difíceis.

Aos ensinamentos;

De meu orientador Prof. Dr. Alexandre Soares de Oliveira, pela disponibilidade, pela paciência, apoio, por entender as minhas indagações e respondê-las com extrema clareza. Agradeço também, pela paixão empreendida na pesquisa, a qual me serviu como exemplo e como motivação para realizar esse trabalho.

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

Do Msc. Matheus Soares Palhares, por estar sempre ao meu lado (literalmente), compartilhando o seu conhecimento, pelo auxílio a utilizar o querido IRAF, rs, pelas conversas e principalmente pela amizade.

Ao companheirismo;

De minha linda, minha querida Cristina Sales, pelo apoio, pelo amor, pelos planos, por me escutar (e como escutou, rs), me motivar e sempre acreditar em mim. Tenho muito a agradecer por compartilharmos momentos felizes e também os momentos de dificuldades, ao teu lado tudo fica mais fácil. Que todos os nossos planos se tornem realidade, pois quero viver sempre ao seu lado. TE AMO! 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 Anglo Cassiano Ricardo, pela confiança e pelo suporte nos momentos necessários.

Ao apoio;

Da CAPES, pelo suporte financeiro.

Da UNIVAP, pela base educacional e toda infraestrutura.

BOA LEITURA!!

## **RESUMO**

Neste trabalho apresentamos a análise de dados espectroscópicos, fotométricos e polarimétricos de 1RXS J174320.1-042953 (= RXJ1743) obtidos nos observatórios SOAR e OPD. Este objeto foi selecionado como candidato em um projeto que busca encontrar novas Variáveis Cataclísmicas magnéticas (mVC), entre objetos do catálogo CRTS e de fontes de raios X previamente conhecidas. Os melhores candidatos, como RXJ1743, são então sujeitos a um folow-up observacional, afim de confirmar sua classificação. Nossos dados fotométricos apresentam curvas de luz não-eclipsantes e um período orbital de 0,08659 dias consistente, dentro das incertezas, com o período encontrado na literatura. Nós apresentamos uma efeméride do mínimo principal da curva de luz com o período orbital refinado. Nossos dados não apresentam nenhum sinal estável que possa ser associado à rotação da anã branca, um resultado contrário fomentaria a hipótese do sistema ser uma polar intermediária. Os dados polarimétricos revelam alta polarização circular, de até 45%, além de polarização linear menos intensa, de até 10%. Isto confirma RXJ1743 como uma mVC polar. O espectro óptico é típico de polares, sem linhas de absorção associadas à secundária. As velocidades radiais da linha de emissão de He II 4686 Å e da série de Balmer são moduladas com o período orbital. Os perfis das linhas são compostos por duas componentes gaussianas variáveis, uma estreita e uma larga. Concluindo, o nosso folow-up observacional estabelece RXJ1743 como uma polar típica, com um período orbital próximo ao limite inferior do intervalo de períodos das VCs. As perspectivas deste trabalho incluem a modelagem dos dados fotométricos e polarimétricos com o código CYCLOPS, a fim de investigar a geometria e as características físicas da estrutura de acreção próxima à anã branca.

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

## ABSTRACT

In this work, we present the analysis of extensive, time-resolved spectroscopic, photometric and polarimetric data of 1RXS J174320.1-042953 (=RXJ1743) obtained at the SOAR and OPD telescopes. This object was selected as a candidate in a bigger project, designed to find new magnetic Cataclysmic Variables (mCV) among objects from the CRTS catalog and from previously known X-ray sources. The best candidates, i.e. RXJ1743, are then subject to observational follow-up studies to confirm the mCV classification. Our photometric data yield a non-eclipsing lightcurve and an orbital period of 0.08659 days consistent, within the uncertainties, with the period found in the literature. We provide an ephemeris of the minimum of the lightcurve with the refined orbital period. No stable periodicity related the spin of an unsynchronized white dwarf primary is present in the data, which would otherwise indicate an intermediate polar nature for this system. The polarimetric data reveal strong and modulated circular polarization at the 45% level, besides less intense linear polarization. This confirms that RXJ1743 is a polar mCV. The optical spectrum is typical of polars, with no detected lines from the secondary component. The He II 4686 Å and Balmer emission-line radial velocities are modulated with the orbital period. The line profiles are fitted by two (narrow and broad) variable gaussian components. In conclusion, our observational follow-up establishes RXJ1743 as a typical polar, with an orbital period close to the lower edge of the CV's period gap. The next steps in this work include the modelling of the photometric and polarimetric data with the CYCLOPS code, in order to investigate the geometry and physics of the accretion structure close to the white dwarf.

Keywords: Astrophysics; Cataclysmic Variables; Polars.

# LISTA DE FIGURAS

Pág.
0

1	Esquema de uma variável cataclísmica não magnética	1
2	Corte bidimensional da geometria de Roche no plano da órbita para um	
	sistema binário	3
3	Analogia dos lóbulos de Roche com poços gravitacionais	4
4	Ilustração esquemática da formação de um disco de acreção	5
5	Distribuição de períodos orbitais seguindo o catálogo (Ritter e Kolb, 1998)	
	para Variáveis Cataclísmicas	8
6	Esquema de uma mCV polar intermediária.	11
7	Esquema de uma mCV polar	12
8	Espectro da RX 1313-32 evidenciando a emissão ciclotrônica pela linha	
	ajustada nas protuberâncias do continuo	12
9	Espectro médio de uma mCV polar (RBS 0324) evidenciando a linha de HeII	
	4686 Å comparável a H $\beta$ e H $\gamma$	13
10	Esquema mostrando a trajetória balística da matéria acretada até a região	
	em que ela é "capturada" pelo campo magnético da anã branca.	14
11	Formas de polarização.	15
12	Esquema da região de acreção nas polares (AM Her).	17
13	Histograma de períodos segmentados nas diferentes classes de CVs	19
14	Curvas de luz de RXJ1743 obtidas pelo Montecatini Astronomical Centre por	
	D. Denisenko e Martinelli (2012).	21
15	Finding chart de RXJ1743 capturado pelo telescópio Bradford Robotic Te-	
	lescope (BRT).	24
16	Média das imagens de <i>bias</i> da noite de 25 de abril de 2014, usada na redução	
	dos dados.	28
17	<i>Flat field</i> médio da noite de 25 de abril de 2014, usada na redução dos dados.	29
18	Finding Chart de RXI1743 destacando as estrelas de comparação presentes	
	no campo	33
19	Exemplo da primeira análise fotométrica aos dados de 25 de abril de 2014.	34
20	Fotometria de 25 de abril de 2014 no filtro V	35
21	Fotometria de 26 de abril de 2014 no filtro I	36
22	Fotometria de 27 de abril de 2014 no filtro R	36
23	Fotometria de 21 de julho de 2014 no filtro V	37
24	Fotometria de 22 de julho de 2014 no filtro R	37
25	Fotometria de 23 de julho de 2014 no filtro I	38
26	Periodograma obtido com os dados de fotometria	39

27	Ajuste parabólico na curva de luz do dia 25 de abril, para definir a fase inicial.	39
28	Curvas de luz de RXJ1743 em fase para a missão de abril de 2014	40
29	Curvas de luz de RXJ1743 em fase para a missão de julho de 2014	41
30	Curvas de luz de RXJ1743 calibradas em magnitude e em fase com o período	
	e época da efeméride	42
31	Periodograma obtido com os dados do resíduo do processo prewhitening re-	
	alizado para todas as curvas de luz	43
32	Polarização do dia 25 de abril de 2014 no filtro V	44
33	Polarização do dia 26 de abril de 2014 no filtro I	45
34	Polarização do dia 27 de abril de 2014 no filtro R	45
35	Polarização do dia 21 de julho de 2014 no filtro V	46
36	Polarização do dia 22 de julho de 2014 no filtro R	46
37	Polarização do dia 23 de julho de 2014 no filtro I	47
38	Periodograma obtido para os dados de polarimetria.	48
39	Polarização circular em fase com os parâmetros da efeméride fotométrica	
	de RXJ1743 no filtro V	48
40	Polarização circular em fase com os parâmetros da efeméride fotométrica	
	de RXJ1743 no filtro R	49
41	Polarização circular em fase com os parâmetros da efeméride fotométrica	
	de RXJ1743 no filtro I	49
42	Espectro exploratório médio da RXJ1743 com dados obtido em 2012	50
43	Espectro médio calibrado em fluxo e comprimento de onda dos 24 espectros	
	da RXJ1743 obtidos em 2014 no SOAR	52
44	Velocidade radial das linhas de HeII 4686 Å, H $\gamma$ e H $\beta$	52
45	Periodograma obtido para os dados de velocidade radial da linha de HeII	
	4686 Å	53
46	Linhas de He II 4686 Å e H $eta$ do espectro de RXJ1743 binadas com o período	
	fotométrico.	54
47	<i>Trailled spectogram</i> das linhas de He II 4686 Å e H $\beta$	54
48	Exemplo de ajuste com gaussianas duplas das componentes larga e estreita,	
	na linha de H $\beta$	55
49	Velocidade radial, fluxo, largura equivalente e FWHM das componentes	
	larga e estreita da linha de H $\beta$ de RXJ1743	56
50	Velocidade radial, fluxo, largura equivalente e FWHM das componentes	
	larga e estreita da linha de HeII 4686 Å de RXJ1743	57
= 1		
51	Histograma da distribuição dos periodos orbitais de sistemas polares con-	
	firmados pelo catalogo Ritter e Kolb (2003) (versão RKcat7.24, 2016)	61

# LISTA DE TABELAS

1	Alvos observados por Oliveira et al. (2017)	22
2	Alvos observados por Oliveira et al. (2017) (cont.).	23
3	Dados das observações	25
4	Estrelas padrões observadas para polarimetria.	26
5	Ajuste do ângulo de polarização para as estrelas padrões polarizadas	31
6	Ajuste do ângulo de polarização para cada filtro.	32
7	Aberturas usadas na fotometria	35
8	Magnitudes da estrela C1 obtidas em bancos de dados	43
9	Valores médios da polarização circular de RXJ1743 e das estrelas de com-	
	paração C1 e C2 presentes no campo.	47
10	Largura equivalente (EW) e largura à meia altura (FWHM) das principais	
	linhas espectrais do espectro exploratório médio obtido em 2012	51
11	Largura equivalente (EW) e largura à meia altura (FWHM) das principais	
	linhas espectrais do espectro médio dos espectros obtidos em 2014	51
12	Parâmetros de velocidades radiais das componentes larga e estreita da linha	
	$H\beta$ de RX J1743	55
13	Parâmetros de velocidades radiais das componentes larga e estreita da linha	
	He II 4686 Å de RX J1743.	56

## Pág.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### SIGLAS

OPD	_	Observatório Pico dos Dias
LNA	_	Laboratório Nacional de Astrofísica
SOAR	_	Southern Astrophysical Research Telescope
CCD	_	Charge-Coupled Device
ADU	_	Analog-Digital Units
RMS	_	Root Mean Square
IRAF	_	Image Reduction and Analysis Facility
NOAO	_	National Optical Astronomy Observatories
CRTS	_	Catalina Real Time Survey
DSS	_	Digitized Sky Survey
POSS	_	Palomar Observatory Sky Survey
USNO	_	United States Naval Observatory
ROSAT	_	Röntgensatellit
FWHM	_	Full Width af Half Maximum
EW	_	Equal Width

### ABREVIATURAS

CV -	_	Variável Cataclísmica
mCV -	_	Variável Cataclísmica magnética
IP -	_	Polar intermediária
М⊙ -	_	Massa do sol
Ro -	_	Raio do sol
Rorb -	_	Período orbital
В -	_	Campo magnético

### UNIDADES

Å	_	Angstrom
G	_	Gauss
K	_	Kelvin
km	—	Quilômetros
h	_	horas
min	—	minutos
S	—	segundos
pix	_	Pixels

# SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1 Introdução às Variáveis Cataclísmicas	1
1.1 Estrutura e Lóbulo de Roche	2
1.2 Transferência de Matéria e Evolução	6
1.3 Classificação das Variáveis Cataclísmicas.	8
1.3.1 Variáveis Cataclísmicas Não Magnéticas	9
1.3.2 Variáveis Cataclísmicas Magnéticas	10
1.3.2.1 Polares	10
1.3.2.2 Radiação Ciclotrônica e Emissão de Raios-X 1	13
1.3.2.3 Distribuição de períodos e evolução 1	18
1.4 A busca por mCVs e o candidato a Polar 1RXS J174320.1-042953 1	19
2 Aquisição e Tratamento dos Dados	25
2.1 Observações	25
2.2 Redução de dados	27
2.3 Espectroscopia	28
2.4 Polarimetria	30
2.5 Fotometria	32
3 Resultados	33
3.1 Fotometria	33
3.2 Polarimetria	14
3.3 Espectroscopia	50
4 Discussão e Conclusões	58
Bibliografia	52

### 1 Introdução às Variáveis Cataclísmicas

As Variáveis Cataclísmicas (CVs) são sistemas binários cerrados de período orbital curto, entre 1,3 a 10 horas, formados por uma anã branca, também chamada de primária, e uma estrela da sequência principal, chamada de secundária, que interagem gravitacionalmente. A anã branca é uma estrela degenerada muito densa que apresenta temperatura superficial da ordem de 10.000 a 60.000 K, raio em torno de  $10^4$  km e massa variando de 0,3 a 1,3  $M_{\odot}$ . A anã vermelha é uma estrela da sequência principal menos massiva que o Sol (variando de ~ 0,075 a ~ 0,5  $M_{\odot}$ ), do tipo G, K ou M, com temperatura superficial da ordem de 3.000 a 6.000K e raio de cerca de 0,15  $R_{\odot}$ . A proximidade entre as componentes do sistema, geralmente  $a \approx 1R_{\odot}$ , gera uma transferência de matéria da estrela secundária para a anã branca. Devido à conservação de momento angular do sistema, a matéria pode formar um disco de acreção em torno da anã branca. Porém, se o campo magnético da anã branca for suficientemente intenso, este disco pode ser rompido parcial ou totalmente. A Figura 1 é uma ilustração de uma CV, onde destacamos suas componentes.

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)

A proximidade entre as estrelas faz com que a força de maré entre elas seja significativa, eliminando qualquer excentricidade da órbita e fazendo com que a rota-

ção da secundária seja sincronizada com o movimento orbital do sistema. O período se relaciona com as massas pela terceira lei de Kepler (Equação 1), sendo *a* a separação entre os centros de massa das componentes, *G* a constante gravitacional,  $M_1 e M_2$  as massas da primária e da secundária, respectivamente e,  $P_{orb}$ , o período orbital do sistema.

$$P_{orb}^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_1 + M_2)}.$$
(1)

### 1.1 Estrutura e Lóbulo de Roche

Estrelas isoladas, sem rotação, são aproximadamente esféricas devido à atração gravitacional das mesmas, que mantém os átomos de gás em torno do seu centro de gravidade. No caso dos sistemas binários onde a distância entre as estrelas é da ordem do diâmetro de uma delas ou ligeiramente maior, como por exemplo em CVs, a interação gravitacional entre elas influencia na geometria das mesmas. Assim, a secundária acaba perdendo sua forma esférica, devido à gravidade da sua companheira, a qual "puxa" suas camadas mais externas enquanto a primária permanece esférica, ver Figura 1, uma vez que o campo gravitacional da secundária não é intenso o suficiente para deformar uma estrela compacta como a anã branca.

Para compreendermos melhor as características desses sistemas precisamos primeiramente estudar o modelo de equipotenciais gravitacionais de Roche para sistemas binários. Este é um modelo generalizado desenvolvido pelo matemático francês Édouard A. Roche (1820 - 1883) e aplicado ao problema restrito de 3 corpos. Basicamente, calculamos o potencial gravitacional sentido por uma partícula teste e obtemos as regiões equipotenciais definidas pelas duas massas principais, considerando-as como sendo puntiformes. No sistema de referência que gira com a binária, em um dado ponto (x, y, z) do espaço, o potencial efetivo sobre uma partícula teste é a soma do potencial das duas massas puntiformes das estrelas e o potencial rotacional (Kopal, 1959). O potencial gravitacional  $\Phi$  é definido por:

$$\Phi = -\frac{GM_1}{r_1} - \frac{GM_2}{r_2} - \frac{\omega^2}{2} [(x - \frac{M_2}{M_1 + M_2})^2 + y^2],$$
(2)

sendo  $\omega$  a frequência angular orbital e  $r_1$  e  $r_2$  o módulo dos vetores que especificam o ponto do potencial gravitacional  $\Phi$ .

Um conjunto de pontos associados que sofrem um mesmo potencial gravitacional formam uma superfície equipotencial. Na Figura 2, as superfícies numeradas de 1 a 9 representam algumas equipotenciais do campo gravitacional de um sistema binário qualquer, cuja dinâmica é descrita pela geometria de Roche. A menor superfície equipotencial comum às duas estrelas é conhecida como lóbulo de Roche, representada pela linha sólida na Figura 2 e é uma região em torno da estrela onde a sua matéria é contida pela prórpia gravidade e delimita a forma da estrela secundária nas CVs. Uma eventual expansão de uma das componentes além do lóbulo de Roche pode levar a perda de material para a companheira, como representamos com a Figura 3.

Figura 2 - Corte bidimensional da geometria de Roche no plano da órbita para um sistema binário, sendo  $M_1$  e  $M_2$  as massas das estrelas primária e secundária, respectivamente, os pontos  $L_1$  ao  $L_5$  são os pontos de Lagrange, as superfícies numeradas de 1 a 9 representam equipotenciais gravitacionais e CM o centro de massa do sistema.



FONTE: Adaptada de Frank, King e Raine, 2002

Os pontos onde a força resultante sobre uma partícula parada, no referencial do sistema em rotação, for nula são chamados de pontos de Lagrange. Na geometria de Roche são 5 pontos:  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$  e  $L_5$ . Dentre eles destacamos o ponto  $L_1$  ou ponto lagrangiano interno. É neste ponto que pode ocorrer a transferência de matéria da estrela secundária para a primária, no processo que chamamos de transbordamento do lóbulo de Roche.

Analisando a geometria em distâncias mais afastadas, obtemos equipotenciais esféricos, que englobam as duas estrelas (ver superfícies 8 e 9 na Figura 2). Essas superfícies esféricas são centradas no centro de massa do sistema binário. Uma forma de determinar o volume do lóbulo de Roche da secundária (considerando ele aproximadamente esférico) é através da relação 3 (Eggleton, 1983):

$$\frac{R_L(2)}{a} = \frac{0,49q^{2/3}}{0,6q^{2/3} + \ln(1+q^{1/3})},$$
(3)

sendo q a razão entre as massas, definida como  $q = M_2/M_1$ , a a separação entre as componentes do sistema e  $R_L(2)$  o raio do lóbulo de Roche para a secundária.

#### Figura 3 - Representação dos lóbulos de Roche como poços de potenciais gravitacionais.



FONTE: Adaptada de Hellier, 2001

Em uma CV, a secundária preenche o lóbulo de Roche e perde matéria através de  $L_1$  perdendo momento angular, de forma que seu fluxo de matéria gasosa não incide diretamente na superfície da anã branca, mas descreve uma trajetória balística (Figura 4). Esse fluxo circunda a anã branca colidindo consigo mesmo, dissipando energia e

assumindo a forma de um disco, conhecido como disco de acreção. A fricção entre a matéria transferida da secundária para a primária e a matéria presente no disco, faz com que ela se aqueça e perca energia, perdendo assim seu momento angular e aproximando cada vez mais da primária até ser depositada sobre ela, numa região conhecida como *boundary layer*. A região onde ocorre o choque do fluxo de matéria proveniente da secundária com o disco de acreção é denominado *brigth spot*, e é responsável por grande parte do brilho do sistema.



Figura 4 - Ilustração esquemática da formação de um disco de acreção.

FONTE: Adaptado de Verbunt, 1982

#### 1.2 Transferência de Matéria e Evolução

A evolução de uma Variável Cataclísmica depende muito dos mecanismos pelos quais o sistema perde momento angular e de como se dá a evolução das reações nucleares na secundária.

Como, no caso das CVs, a secundária está perdendo massa, logo o material em seu núcleo também diminui, fazendo com que o produto das reações nucleares diminua. Com menos energia sendo gerada, a estrela contrai sob a ação da gravidade. Além disso, a transferência de massa faz com que haja perda de momento angular, empurrando a secundária para órbitas mais afastadas. Da Equação 3 temos que  $R_L(2) \sim a$ , logo quando a separação *a* entre as componentes aumenta, o raio de Roche também aumenta, assim ela perderá o contato com o seu lóbulo de Roche, detendo a transferência de massa.

Na contramão disso, observamos CVs com transferência de massa estáveis, o que nos dá suporte para assumir que deva existir um mecanismo que expanda a secundária, ou que contraia o lóbulo a fim de compensar continuamente a contração da secundária. Uma possibilidade consiste em a secundária evoluir para uma gigante vermelha, assim, esta expansão manteria o contato com o seu lóbulo de Roche, permitindo a transferência de massa constante. No entanto, esta não é uma explicação muito convincente, pelo menos para a maioria das CVs, uma vez que o sistema contém estrelas secundárias com massas menores que uma massa solar, cujas escalas de tempo evolutivas são muito longas, e o Universo ainda não é velho o suficiente para tais estrelas terem evoluído em gigantes vermelhas.

Uma segunda possibilidade seria a perda de momento angular do sistema, pois assim, a distância entre as estrelas diminuiria, diminuindo também o lóbulo de Roche, permitindo que retorne a transferência de matéria. Existem dois mecanismos principais pelos quais as Variáveis Cataclísmicas podem perder momento angular; a *radiação* gravitacional e o freamento magnético.

A teoria da relatividade geral diz que a matéria provoca uma curvatura no espaço. Desta forma, para as Variáveis Cataclísmicas, o movimento orbital das componentes primária e da secundária faz com que ocorram alterações rítmicas dessa curvatura, que propagam-se em forma de ondas carregando energia para fora do sistema. Este fenômeno é conhecido como radiação gravitacional. Uma consequência deste fenômeno é a diminuição do momento angular do sistema, fazendo com que o período orbital diminua lentamente. A menos que as massas envolvidas sejam comparadas a massa de estrelas de nêutron ou buracos negros, sabemos que a intensidade de tal radiação é muito pequena, mas, à medida que o sistema adquire menores ór-

7

bitas, sua velocidade orbital aumenta tornando o efeito mais relevante. Desta forma, este efeito é mais expressivo em órbitas menores, ou seja, para períodos orbitais mais curtos ( $P_{orb} < 2h$ ).

O freamento magnético é causado quando as partículas ionizadas ejetadas da secundária, conhecidas como vento estelar, são obrigadas, pela presença do campo magnético, a rodar em conjunto com a secundária. Neste movimento o vento estelar sofre uma aceleração, até ser disparado em alta velocidade para o espaço, atravessando as linhas de campo magnético. Isto causa uma grande perda de momento angular com pouca perda de massa. No caso de binárias próximas como as CVs, as forças de maré atuam para produzir a sincronização dos períodos de rotação da secundária com o período orbital, fazendo com que a secundária que está perdendo momento angular por freamento magnético sinta um torque devido às forças de maré que tentam sincronizar sua rotação, transferindo momento angular da órbita para a secundária. Este momento angular transferido do sistema para a secundária é perdido, reduzindo a distância entre as componentes do sistema e o lóbulo de Roche, que se comprime até atingir o ponto de contato com a secundária, iniciando a transferência de matéria para a anã branca.

Analisando a distribuição dos períodos orbitais das CVs presentes no catálogo Ritter e Kolb (1998), mostrada na Figura 5, notamos que praticamente não são encontrados objetos abaixo do período orbital de  $\approx$  77 min e nem acima de 12 horas (Connon Smith, 2007). Este valor mínimo do período orbital é normalmente explicado pelo comportamento das secundárias de baixa massa. Quando a secundária perdeu quase toda a sua massa (M<sub>2</sub>  $\leq$  0.08 M<sub>☉</sub>), já se encontra degenerada e a queima de hidrogênio está em extinção. Assim, ao perder massa ela se expande, levando a um aumento do período orbital, daqui conclui-se que deve existir um valor do período onde ocorre esta transformação de uma estrela não degenerada que se contrai com a perda de massa para uma estrela degenerada que se expande. Isto acontece sem interrupção da transferência de massa devido ao mecanismo de perda de momento angular que, neste estágio da evolução se dá por radiação gravitacional. Já o limite superior de 12 h se dá pelo limite de massas do sistema (Hellier, 2001).

Uma característica importante, além da existência de um período mínimo, é o chamado "intervalo de períodos" ou *period gap*, uma faixa de períodos orbitais onde a distribuição apresenta uma queda considerável. Esta depressão ou "gap" fica entre 2 h e 3 h. Quando o período orbital chega a aproximadamente 3 horas a secundária se torna totalmente convectiva, o freamento magnético se reduz, a secundária deixa de preencher o lobo de Roche, reduzindo a transferência de massa. O período orbital continua a diminuir através da radiação gravitacional e ao atingir 2 horas a secundária volta a preencher o lóbulo de Roche reiniciando a transferência de matéria.





FONTE: Adaptado de Hellier (2001)

Porém vemos alguns sistemas dentro deste "gap", uma possível explicação seria uma CV nascer (primeiro contato) com um período entre 2 h e 3 h. Uma vez que o sistema não pode estar fora do equilíbrio, este pode somente transferir matéria através de radiação gravitacional. Esta visão pode também ser alterada se a anã branca possui um campo magnético suficientemente forte (B > 10 MG) para acoplar-se com o campo da estrela secundária afetando sua evolução. Logo, sistemas magnéticos também podem povoar o "gap".

### 1.3 Classificação das Variáveis Cataclísmicas.

As características da curva de luz nos dão fortes subsídios para entendermos a estrutura de uma variável cataclísmica e através de sua variabilidade fotométrica, podemos diferenciar e classificar estes sistemas. O período orbital, inclinação orbital, taxa de transferência de massa e a intensidade do campo magnético da anã branca são as principais propriedades físicas que afetam as amplitudes e as escalas de tempo da curva de luz de uma CV. Os espectros das CVs nos fornecem informações importantes sobre as características físico-químicas dos objetos, o que nos auxilia a refinar a nossa análise. De acordo com a intensidade do campo magnético superficial da primária, as CVs podem ser classificadas como: CVs não magnéticas ou CVs magnéticas.

### 1.3.1 Variáveis Cataclísmicas Não Magnéticas.

Os sistemas são ditos não magnéticos quando o campo magnético da estrela primária é relativamente baixo ( $B < 10^5$  G). Nesses sistemas o fluxo de matéria forma um disco ao redor da anã branca. O disco constitui uma importante fonte de brilho do sistema na faixa espectral do óptico, infra-vermelho e ultra-violeta (Warner, 1995). Estes sistemas são sub-divididos em *novas clássicas, novas-like, novas recorrentes e novas anãs*.

*Novas Clássicas* têm, por definição, apenas uma erupção observada, apresentando um aumento intenso de brilho, onde a magnitude do objeto cresce de 6 a 19 magnitudes. Os sistemas com as maiores amplitudes (e declínio de brilho mais rápidos) são conhecidos como novas rápidas já os de menor amplitude, como novas lentas. As erupções de *novas* são modeladas satisfatoriamente como explosões termonucleares do material rico em hidrogênio que é depositado sobre a superfície da anã branca. A extrema pressão de radiação oriunda da queima nuclear ejeta esse envelope de matéria em alta velocidade, que se expande ao redor da anã branca com velocidade na ordem de  $10^3$  km s<sup>-1</sup> (Connon Smith, 2007).

*Novas recorrentes* são sistemas previamente classificados como *novas clássicas,* porém que apresentaram mais de uma erupção observada. Essas erupções apresentam um tempo de recorrência relativamente curto, variando de décadas a séculos, o que nos permitiu conhecer cerca de uma dezena destes objetos.

CVs conhecidas como *novas anãs* apresentam erupções menores se comparadas às *novas clássicas*, onde o brilho do sistema varia entre 2 e 5 magnitudes, com um intervalo entre as erupções que varia de alguns dias até poucos meses em uma escala de tempo bem definida para cada objeto. A duração de cada erupção vai de 2 a 20 dias e está diretamente correlacionada com o intervalo entre as erupções. O mecanismo dominante responsável pelas flutuações na luminosidade destes sistemas é a alteração na taxa de transferência de massa da secundária, que afeta a estabilidade térmica do disco de acreção.

*Novas-like* incluem as Variáveis Cataclísmicas não eruptivas e não claramente magnéticas. Esta classe possivelmente inclui sistemas cujas erupções ocorreram antes dos registros começarem (pós-novas) ou ainda não ocorreram (pré-novas). As *novaslike* possuem uma taxa de transferência de matéria razoavelmente alta, permitindo assim que o disco de acreção permaneça em um alto estado de brilho, como se estivesse sempre em erupção.

### 1.3.2 Variáveis Cataclísmicas Magnéticas.

Variáveis Cataclísmicas magnéticas (mCVs) são sistemas onde o campo magnético superficial da anã branca é intenso ( $B \ge 10^5$  G). As mCVs são subdivididas em *polares* ou sistemas AM Her e *polares intermediárias* (IPs) ou sistemas DQ Her, essa classificação é feita baseando-se na geometria do fluxo de acreção apresentada, que é diretamente influenciada pela intensidade do campo magnético na primária.

Nos sistemas mCVs polares (ver abordagem detalhada na seção 1.3.2.1) o campo magnético é tão intenso que a matéria acretada acaba sendo capturada diretamente pelas linhas de campo da anã branca, formando uma coluna de acréscimo e não um disco de acreção. As polares apresentam emissão no infravermelho, óptico, ultravioleta e raios X, apresentando um alto grau de polarização. Esses sistemas devem apresentar ainda um sincronismo de rotação da primária com o sistema, isto é, a velocidade de rotação da anã branca deve ser igual ao período orbital. Entretanto, fenômenos como a erupção de nova podem fazer com que uma polar dessisncronise com o sistema.

Já nos sistemas onde o campo magnético é moderadamente alto ( $10^6 \text{ G} \le B \le 10^7 \text{ G}$ ), classificados com polares intermediárias, observa-se a formação de um disco, mas que em suas regiões mais internas é destruído pela presença do campo magnético da anã branca, fazendo com que o material ionizado siga as linhas do campo até um ou ambos os pólos magnéticos na superfície da primária (ver Figura 6). Os sistemas pertencentes a esta classe possuem forte emissão em raios-X, mas não apresentam polarização detectável no ótico. Nas IPs, a anã branca não gira em sincronia com a órbita assim, existem geralmente dois períodos característicos nestas binárias, o período orbital e o período de rotação da primária.

### 1.3.2.1 Polares

As polares são uma subclasse das mCVs que possuem anãs brancas com campo magnético intenso. O número de polares identificadas está em constante crescimento, em 1995 existiam somente 42 polares confirmadas (Warner, 1995). Atualmente este número aumentou, segundo o catálogo Ritter e Kolb (2003) (RKcat Edition 7.24, 2016<sup>a</sup>), são 154 sistemas polares, onde 119 foram confirmados e 35 aguardam confirmação , o que nos apresenta um cenário promissor. As polares, em sua maioria, encontram-se abaixo do "*gap de períodos*".

A estrela primária é uma anã branca com valores de massa que variam de 0,3



Figura 6 - Esquema de uma mCV polar intermediária.

FONTE: Adaptado de NASA, 2016

 $M_{\odot}$  a 1.2  $M_{\odot}$  (± 0,2  $M_{\odot}$ ) em um raio próximo ao raio da terra ( $R_{Terra}$ ≈ 7.10<sup>3</sup>Km) (Warner, 1995). O campo magnético na primária está entre 10<sup>7</sup> G e 10<sup>8</sup> G, o que faz com que o a matéria proveniente da secundária transferida através do ponto interno de Lagrange ( $L_1$ ) chegue na anã branca através das linhas de campo, não permitindo a formação de um disco ao seu redor, como demonstra a Figura 7. Este campo intenso também é responsável por uma das principais características destes sistemas, o sincronismo de rotação com o período orbital do sistema.

A secundária é uma estrela de sequência principal que possui massa de ~ 0,075  $M_{\odot}$  até ~ 0,5  $M_{\odot}$  com raio aproximadamente 0,15  $R_{\odot}$ , suficiente para preencher seu lóbulo de roche. A temperatura na superfície varia de 3000 K a 6000 K com campo magnético fraco (entre 100 e 1000 G) mas que em interação com o forte campo da primária auxiliará a anã branca a entrar em sincronia com o  $P_{orb}$  do sistema. (Cropper, 1990).

Uma maneira de reconhecer uma candidata a polar é observar o seu espectro no óptico, os espectros destes sistemas apresentam características importantes, que auxiliam a diferenciá-las de outros sistemas, por exemplo: decremento de Balmer invertido, H $\beta$  mais intensa que H $\alpha$ , linhas de emissão de HeII 4686 Å evidentes e comparáveis às linhas da série de Balmer e radiação polarizada. Exemplos de espectros



Figura 7 - Esquema de uma mCV polar.

FONTE: Adaptado de Cropper, 1990

que apresentam essas características são os espectros da RX 1313-32 e da RBS 0324<sup>b</sup>, apresentado na Figura 8 e 9 respectivamente.

Figura 8 - Espectro da RX 1313-32 evidenciando a emissão ciclotrônica pela linha ajustada nas protuberâncias do continuo.



<sup>&</sup>lt;sup>b</sup>Confirmada como polar por Schwope, Brunner et al., 2002




FONTE: (Cieslinski, Rodrigues et al., 2010)

## 1.3.2.2 Radiação Ciclotrônica e Emissão de Raios-X

O processo de transferência de matéria nas mCVs polares se dá através de uma coluna de acreção. Nesse processo o material ionizado (plasma) transferido da secundária através do ponto interno de Lagrange (L<sub>1</sub>), inicialmente não sofre a influência do campo magnético da primária (salvo casos onde o campo magnéticos é extremo, como nos sistemas AR UMa, (Hellier, 2001) e a sua trajetória será balística até se aproximar da anã branca. Quando o campo magnético começa a ser mais significante o plasma deve seguir as linhas de campo pelo resto de seu percurso, até atingir a superfície da anã branca, como mostra a Figura 10.

Enquanto o fluxo de matéria se aproxima da anã branca, o crescimento da pressão magnética comprime o fluxo de matéria fazendo com que se formem aglomerados de matéria em uma região de acoplamento, ou de estagnação. O campo não pode facilmente penetrar esses aglomerados por causa de sua blindagem, assim elas continuam em uma trajetória balística por um tempo. Como a pressão magnética só aumenta enquanto os aglomerados de matéria se aproxima da anã branca, elas são forçadas a mudarem de direção e seguirem as linhas de campo, porém elas só irão ceder à pressão

Figura 10 - Esquema mostrando a trajetória balística da matéria acretada até a região em que ela é "capturada" pelo campo magnético da anã branca.



FONTE: Hellier, 2001

magnética quando esta for superior a pressão de arraste, que está fortemente relacionada com a densidade ( $P_{ram}=\rho.v^2$ ). Desta forma há uma separação entre a matéria mais densa e menos densa, fazendo com que a matéria de alta densidade se aproxime mais da anã branca, penetrando mais no campo magnético do que a matéria de menor densidade.

O material plasmático não é simplesmente conduzido pelas linhas de campo magnético para próximo dos polos da anã branca, como ele é ionizado ele irá apresentar um movimento espiralado ao redor das linhas de campo magnético, pois, o movimento do material ionizado gera corrente elétrica, e esta recebe uma força perpendicular ao seu movimento (força de Lorentz), devido à presença do campo magnético. Esta força faz com que as partículas do material ionizado se desloquem em um movimento circular pelas linhas de campo magnético, logo recebem uma aceleração e emitem radiação. Esta forma de radiação é denominada de radiação ciclotrônica. A radiação ciclotrônica é altamente polarizada e dominante no óptico e no infravermelho.

A polarização é uma medida da quantificação da direção do vetor campo elétrico de ondas eletromagnéticas. Quanto a polarização, a radiação eletromagnética pode ser classificada como linearmente, circularmente ou elipticamente polarizada, como demonstramos na Figura 11.

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



Figura 11 - Formas de polarização.

FONTE: WIKIPÉDIA (2016)

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V_c \end{bmatrix}$$
(4)

sendo *I* a intensidade, *Q* e *U* parametros 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 Q = U = 0. Um feixe completamente polarizado possui a relação:

$$I = \sqrt{Q^2 + U^2 + V_c^2}$$
(5)

O grau de polarização linear é dado por:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}.\tag{6}$$

O grau de polarização circular é dado por:

$$V = \frac{V_c^2}{I}.$$
(7)

Para a configuração instrumental utilizada neste trabalho, os fluxos dos feixes ordinário e extraordinário apontam uma dependência com os parâmetros de Stokes, a qual é apresentada por Rodrigues, Cieslinski e Steiner (1998):

$$2I_o = I + q\cos^2 2\theta + u \sin 2\theta \cos 2\theta - v \sin 2\theta, \tag{8}$$

$$2I_e = I - q\cos^2 2\theta - u \sin 2\theta \cos 2\theta + v \sin 2\theta, \qquad (9)$$

sendo  $I_o$  e  $I_e$ , respectivamente, os fluxos das imagens ordinária e extraordinária,  $\theta$  o ângulo da posição da lâmina retardadora  $\lambda/4$  e I,q,u, e v são os parâmetros de Stokes do feixe de entrada.

Os parâmetros de Stokes são obtidos a partir das relações (Rodrigues, Cieslinski e Steiner, 1998):

$$Q = \frac{1}{3} \sum z_i \cos^2 2\theta_i,$$
  

$$U = \sum z_i \sin 2\theta_i \cos 2\theta_i,$$
  

$$V = -\frac{1}{4} \sum z_i \sin 2\theta_i,$$
  
(10)

sendo  $\theta_i$  o ângulo da lâmina retardadora na posição i (i = 1 a 16), Q, UeV os parâmetros de Stokes, já normalizados por I do feixe de entrada (Q = q/I, U = u/I, V = v/I).

Sendo  $I_{e,i}$  e  $I_{o,i}$ , respectivamente, os fluxos dos feixes ordinário e extraordinário, a quantidade  $z_i$ , que é a função dos parâmetros de Stokes, para cada uma das posições da lâmina, é definida como:

$$z_i = \frac{I_{e,i} - I_{o,i}}{I_{e,i} + I_{o,i}}.$$
(11)

A região de acreção, que fica próxima aos polos magnéticos da anã branca, é a fonte de maior emissão de radiação. As partículas que chegam a essa região possuem velocidades supersônicas, logo, alta energia cinética. Com a colisão do material de baixa densidade com a superfície da primária, a energia cinética é convertida em energia térmica, criando uma densa coluna de acreção que se expande adiabaticamente acima da superfície por aproximadamente 10% do raio da anã branca. As partículas que chegam nesta região colidem com o topo dessa coluna, reduzindo em quatro vezes sua velocidade. A liberação dessa energia cinética esquenta o material da coluna a uma temperatura de aproximadamente 2.10<sup>8</sup> K (20 keV). Nessa temperatura, a colisão entre os elétrons e os íons se torna frequente e resulta em uma emissão de raio-X duros, através do processo de *bremsstrahlung*. Cerca de metade dessa radiação é dirigida para a anã branca, sendo reprocessados na forma de raios-X moles.

O material de alta densidade não é afetado pela coluna de acreção, pois quando este chega à superfície da anã branca, consegue penetrar nela e, desta forma, a energia cinética é convertida em energia térmica que é absorvida pela anã branca. Apenas parte dessa energia consegue gerar radiação de corpo negro ( $\approx 2 \text{ eV}$ ), emitindo raios-X moles (Hellier, 2001). A Figura 12 ilustra este processo.



Figura 12 - Esquema da região de acreção nas polares (AM Her).

FONTE: Adaptado de Hellier, 2001

## 1.3.2.3 Distribuição de períodos e evolução

Nos sistemas mCVs polares, encontramos uma forte interação entre o campo magnético da anã branca com o campo da secundária. Assim, se uma das estrelas rotacionar mais rápido, as linhas de campo receberão uma certa "tensão", o que criará uma força de arrasto. Este arrasto age como um torque na anã branca, retardando assim sua rotação. Desta forma a anã branca é forçada a entrar em sincronia com o sistema (Hellier, 2001). Existem sistemas polares que estão próximos ou saíram de sincronia devido a explosões de nova (Wickramasinghe e Wu, 1994), porém, o sistema irá evoluir e a sincronia será restabelecida em um curto período de tempo ( $\approx$  200 anos, Schmidt e Stockman, 1991).

Como a magnetosfera da anã branca está influenciando diretamente o campo magnético da secundária, as linhas de campo da mesma não conseguem ser abertas, ou seja, devido a presença do forte campo magnético da primária, as linhas de campo da secundária se ligam ao campo da primária ou retornam para a superfície da mesma. Desta forma vemos que a influência do freamento magnético é reduzida, pois não haverá um arraste significativo devido à interação do vento estelar com o campo magnético, diminuindo a perda de momento angular através deste mecanismo. Porém este sistema não está isento da perda de momento angular, pois como suas componentes, em sua grande maioria, estão próximas, o mecanismo de radiação gravitacional será mais intenso. Assim verificamos que, nas polares, a radiação gravitacional é o principal mecanismo para a perda de momento angular.

As mCVs possuem a distribuição de períodos orbitais muito similar à distribuição de todas as CVs, desta forma também verificamos um número reduzido de sistemas com períodos entre 2 h e 3 h, evidenciado na Figura 13. Podemos observar que as polares intermediárias estão, preferencialmente, com períodos acima do gap, já as polares se concentram abaixo do gap de períodos, isso se dá por causa dos mecanismos de perda de momento angular que dominam cada sistema.

Sabendo que existe um intervalo para o campo magnético da primária ( $B \approx 10^7$  G) que podem coexistir os dois sistemas mCVs, polares e polares intermediários, é possível sugerir que ao evoluir para períodos menores as polares intermediárias possam se tornar polares (Chanmugam e Ray, 1984). Para isso a separação orbital deve encolher para ser comparável com o raio da magnetosfera, assim as linhas de campo das componentes do sistema podem se interligar, forçando a sincronia da anã branca com o período orbital. Para entendermos melhor essa possível evolução podemos interpretar o momento magnético da primária  $\mu_1 = BR_{ab}^3$ , onde B é o campo magnético nos polos da primária e  $R_{ab}$  é o raio da anã branca. Cropper (1990) nos apresenta quatro cenários

evolutivos para as polares intermediárias: Se  $\mu_1 \leq 10^{31}$  G cm<sup>3</sup> o campo magnético da anã branca é insuficiente para formar um canal de acreção, então afeta pouco o sistema. Para  $10^{31}$  G cm<sup>3</sup>  $\leq \mu_1 \leq 10^{33}$  G cm<sup>3</sup>, os sistemas continuarão sendo polares intermediárias mesmo que evoluam para períodos menores. No intervalo  $10^{33}$  G cm<sup>3</sup>  $\leq \mu_1 \leq 10^{35}$ G cm<sup>3</sup> as polares intermediárias poderão evoluir para polares. Mas todos os sistemas com  $\mu_1 \gtrsim 10^{35}$  G cm<sup>3</sup> certamente serão polares. Enquanto o momento magnético da primária nas polares é detectado através do seu forte campo magnético, nas polares intermediárias a detecção do campo magnético ainda não é bem determinado. Assim este processo evolutivo ainda não é completamente entendido, bem como a evolução de todas as mCVs está longe de ser compreendida (Kolb, 1995).

Figura 13 - A linha preta (CVs) e a linha verde (mCVs) representam a distribuição da quantidade de sistemas em relação aos períodos orbitais. Já a linha vermelha e azul representam a distribuição cumulativa das polares e polares intermediárias, respectivamente. Histograma realizado com periodos do catálogo Ritter e Kolb, 2003



FONTE: Adaptado de Pretorius, 2014

# 1.4 A busca por mCVs e o candidato a Polar 1RXS J174320.1-042953.

Desde 2012, o grupo de pesquisa com membros de diversas instituições<sup>c</sup>, ao qual fui inserido em 2015, trabalha com um projeto observacional (Oliveira et al., 2017), que procura por novas Variáveis Cataclísmicas magnéticas a fim de aumentar o número de membros conhecidos desta classe e realizar estudo observacional extensivo e multi-técnicas dos sistemas mais promissores então descobertos. O objetivo é aumen-

<sup>&</sup>lt;sup>c</sup>UNIVAP, INPE, IAG/USP e GEMINI

tar a estatística desta classe de objetos, relativamente rara, o que ajudaria a desvendar questões relativas, por exemplo, ao cenário de evolução das mCVs, especialmente à possível e ainda não sistematizada relação evolutiva entre IPs e polares. Naquele projeto uma amostra de 45 objetos transientes em luminosidade (Tabela 1) foi selecionada, principalmente do catálogo CRTS<sup>d</sup> (*Catalina Real-Time Transient Survey*, Drake et al., 2009), a partir da análise das curvas de luz que mais se assemelhavam ao comportamento fotométrico de mCVs, como a variação entre os estados de alta e baixa luminosidade. Foram também considerados os registros anteriores de detecções de raios-X e alertas VSNet<sup>e</sup> (*Variable Star Network*) e ATel<sup>f</sup> (*The Astronomer's Telegram*) referentes a indícios de novos objetos mCVs. Além disso, os objetos deveriam ter magnitudes aparentes e coordenadas adequadas para serem observados no telescópio SOAR (*Southern Astrophysical Research Telescope*).

Para a amostra selecionada foram obtidos, entre 2012 e 2013, espectros exploratórios com o objetivo de identificar as características espectrais que poderiam ser as assinaturas de alta ionização, típicas das mCVs. Nessa amostra, com base nas características dos espectros exploratórios, temos 32 possíveis Variáveis Cataclísmicas, onde sugerimos que 13 destas são fortes candidatos a mCVs polares, 16 objetos apresentam disco em quiescência, 2 objetos em estado de alta acreção, e uma Nova (Oliveira et al., 2017). Dentre os candidatos a mCVs resultantes desta busca, foram selecionados os mais promissores para um *follow-up* observacional através de fotometria, espectroscopia e polarimetria com dados obtidos em 2013 (Projetos SO2013A-004, OI2013A-049) e 2014 (Projetos SO2014A-003, SO2014B-012, OP2014A-020, OP2014A-024 e OP2014B-014), no SOAR e no OPD (Observatório Pico dos Dias), a fim de realizar uma análise detalhada de suas características. Os resultados obtidos neste projeto de busca por novas mCVs, se confirmados nos *follow-ups* observacionais, representarão um aumento de cerca de 4% no número de polares conhecidas e de 12% no número de IPs.

O presente trabalho de mestrado apresenta os resultados deste *follow-up* para o objeto 1RXS J174320.1-042953 = USNO-B1.0 08550326594 (doravante referido como RXJ1743). Este objeto foi selecionado por nós para o projeto de espectroscopia exploratória, não por ser um transiente no CRTS, mas por ser uma fonte de raios-X associada a um objeto com variabilidade no óptico. Foi descoberto por D. V. Denisenko e Sokolovsky (2011), que identificaram 8 candidatas a CVs através da correlação entre objetos catalogados no ROSAT<sup>g</sup> e entre objetos que apresentavam variabilidade óptica em ca-

<sup>&</sup>lt;sup>d</sup>http://nesssi.cacr.caltech.edu/CRTS/

ehttp://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/vsnet/

<sup>&</sup>lt;sup>f</sup>http://www.astronomerstelegram.org

ghttp://www.xray.mpe.mpg.de/cgi-bin/rosat/rosat-survey

tálogos como o DSS<sup>h</sup> (*Digitized Sky Survey*). Estes autores descobriram que RXJ1743 apresentou variabilidade nas imagens ópticas em 1º de julho de 1954 nas placas fotográficas azul e vermelha do *Palomar Observatory Sky Survey* em comparação com 14 de agosto de 1982, o que indica a possibilidade do objeto ser uma variável cataclísmica

RXJ1743 é registrado no catálogo USNO-B1.0 (com B1=16.12, R1=15.15, B2=18.95, R2=18.13) e está localizado nas coordenadas R.A.=17:43:20 e Dec = -04:29:57, com *finding chart* apresentada na Figura 15. D. Denisenko e Martinelli (2012) realizaram séries temporais de fotometria de RXJ1743 e, com base na amplitude da variação de magnitude (0,8 mag na luz branca) e o formato da curva de luz (Figura 14) sugeriram que o alvo seria uma mCV. Realizaram também uma busca por periodicidades nos seus dados fotométricos, sugerindo um período orbital de 0,0866(3) dias, ou 2,08 horas. Nos capítulos a seguir apresentamos nossos resultados do estudo observacional extensivo deste objeto.

Figura 14 - Curvas de luz de RXJ1743 obtidas pelo *Montecatini Astronomical Centre* nos dias 16/17 (acima) e 18/19 (abaixo) no mês de julho de 2012.



FONTE: Adaptado de D. Denisenko e Martinelli (2012)

			- · · · · · · · · · · · ·				
Objeto	Abraviação	R.A. (J2000)	Dec (J2000)	Data da obs.	Telesc.	Tempo de exp. (s)	Classif.
CSS091009:010412-031341	CSS0104-03	01:04:12	-03:13:41	2012 Aug 25	SOAR	3600	D/IP
CSS091215:021311+002153	CSS0213+00	02:13:11	+00:21:53	2012 Sep 09	SOAR	8100	щ
MLS110213:022733+130617	MLS0227+13	02:27:33	+13:06:17	2012 Sep 09	SOAR	3600	Ρ
CSS071206:031525-014051	CSS0315-01	03:15:25	-01:40:51	2012 Nov 13	SOAR	8100	щ
CSS090922:032603+252534	CSS0326+25	03:26:03	+25:25:34	2012 Nov 20	SOAR	3600	D
CSS091109:035759+102943	CSS0357+10	03:57:59	+10:29:43	2012 Nov 12	SOAR	8100	Р
MLS101203:045625+182634	MLS0456+18	04:56:25	+18:26:34	2012 Nov 13	SOAR	8100	Ρ
XMMSL1 J063045.9-603110	XMM0630-60	06:30:45	-60:31:13	2012 Nov 12	SOAR	8100	Z
MLS101226:072033+172437	MLS0720+17	07:20:33	+17:24:37	2012 Nov 12	SOAR	1440	Ъ
1RXS J072103.3-055854	1RXS0721-05	07:21:03	-05:59:20	2012 May 01	SOAR	1440	HA
MLS120127:085402+133633	MLS0854+13	08:54:02	+13:36:33	2012 Dec 15	SOAR	8100	Р
1RXS J100211.4-192534	1RXS1002-19	10:02:11	-19:25:36	2012 May 30	SOAR	360	Ъ
CSS120324:101217-182411	CSS1012-18	10:12:17	-18:24:11	2012 May 30	SOAR	3600	D/IP
SSS110504:101240-325831	SSS1012-32	10:12:40	-32:58:31	2012 Apr 21	SOAR	3600	D
CSS110225:112749-054234	CSS1127-05	11:27:49	-05:42:34	2012 Mar 18	SOAR	1440	Ρ
CSS071218:124027-150558	CSS1240-15	12:40:27	-15:05:58	2012 Mar 17	SOAR	3600	щ
MLS110329:125118-020208	MLS1251-02	12:51:18	-02:02:08	2012 Apr 23	SOAR	8100	щ
SSS110724:135915-391452	SSS1359-39	13:59:15	-39:14:52	2012 Apr 22	SOAR	1440	D/IP
MLS110301:140203-090329	MLS1402-09	14:02:03	-09:03:29	2012 Apr 23	SOAR	8100	щ
MLS100617:140447-152226	MLS1404-15	14:04:47	-15:22:26	2012 Mar 17	SOAR	3600	щ
SSS100507:144833-401052	SSS1448-40	14:48:33	-40:10:52	2012 Mar 26	OPD	1800	PRG
CSS100216:150354-220711	CSS1503-22	15:03:54	-22:07:11	2012 Mar 16	SOAR	3600	Ъ
MLS110526:151937-130602	MLS1519-13	15:19:37	-13:06:02	2012 Mar 18	SOAR	3600	RRL

5
(201
al.
et
iveira
O
por (
ados
observ
Alvos
I.
1
Tabela

	1 22221			a se an (see ) (see )			
Objeto	Abreviação	R.A. (J2000)	Dec (J2000)	Data da obs.	Telesc.	Tempo de exp.	Classif.
MLS110609:160907-104013	MLS1609-10	16:09:07	-10:40:13	2012 Apr 22	SOAR	3600	Р
CSS080606:162322+121334	CSS1623+12	16:23:22	+12:13:34	2012 Apr 22	SOAR	8100	D
SSS100804:163911-235804	SSS1639-23	16:39:11	-23:58:04	2012 Sep 03-04	OPD	2700	PRG
CSS110623:173517+154708	CSS1735+15	17:35:17	+15:47:08	2012 Apr 23	SOAR	1440	D
<b>IRXS J174320.1-042953</b>	1RXS1743-04	17:43:20	-04:29:57	2012 Mar 16	SOAR	720	Р
1RXS J192926.6+202038	1RXS1929+20	19:29:28	+20:20:35	2012 Apr 23	SOAR	1440	D
SSS110625:194030-633056	SSS1940-63	19:40:30	-63:30:56	2012 Sep 03	OPD	2700	PRG
SSS100805:194428-420209	SSS1944-42	19:44:28	-42:02:09	2012 Apr 22	SOAR	3600	Ρ
SSS110526:195648-603430	SSS1956-60	19:56:48	-60:34:30	2012 Apr 21	SOAR	720	Р
USNO-A2.0 0825-18396733	USNO0825-18	20:31:38	-00:05:11	2012 May 20-Jun 25	SOAR	3600	Ρ
SSS110526:204247-604523	SSS2042-60	20:42:47	-60:45:23	2012 Aug 10	SOAR	3600	HA
MLS100706:204358-194257	MLS2043-19	20:43:58	-19:42:57	2012 Aug 10	SOAR	540	D/IP
MLS111021:204455-162230	MLS2044-16	20:44:55	-16:22:30	2012 Sep 03	OPD	2700	RRL
MLS101102:205408-194027	MLS2054-19	20:54:08	-19:40:27	2012 Aug 10	SOAR	1800	D/IP
CTCV J2056-3014	CTCV2056-30	20:56:52	-30:14:38	2012 Sep 04	OPD	2700	D/IP
CSS110513:210846-035031	CSS2108-03	21:08:46	-03:50:31	2012 May 20-Jun 25	SOAR	3600	D
MLS100620:213227-150523	MLS2132-15	21:32:27	-15:05:23	2012 Aug 10	SOAR	006	RRL
CSS100624:220031+033431	CSS2200+03	22:00:31	+03:34:31	2012 Aug 14	SOAR	3600	D/IP
1RXS J222335.6+074515	1RXS2223+07	22:23:34	+07:45:19	2012 Aug 25	SOAR	8100	D
MLS100906:223034-042347	MLS2230-04	22:30:34	-04:23:47	2012 Aug 25	SOAR	1440	Щ
SSS110720:224200-662512	SSS2242-66	22:42:00	-66:25:12	2012 Sep 03-04	OPD	2700	D/IP
CSS111021:231909+331540	CSS2319+33	23:19:09	+33:15:40	2012 Sep 04	OPD	2700	D/IP
P: candidata a po	olar, D: sistemas c	com disco, D/H	P: candidata a	polar intermediária, H	(A: sistem	nas com disco	
de acreção em ali	to estado, N: Nov	vas, RRL: Estre	la RR Lyrae, F	RG: Mira ou gigante	vermelha	pulsante em	
baixa amplitude,	E: Fontes extrage	aláticas.		)		4	

Tabela 2 - Alvos observados por Oliveira et al. (2017) (cont.).

23

Figura 15 - *Finding chart* de RXJ1743 capturado pelo telescópio Bradford Robotic Telescope (BRT). Campo de visão 14'x14'. O norte está para cima e leste para a esquerda. A estrela marcarda entre traços é a RXJ1743, as estrelas usadas como comparação pelo autor da imagem estão destacadas por uma seta junto de suas magnitudes R (USNO-A2.0).



FONTE: D. Denisenko e Martinelli, 2012

# 2 Aquisição e Tratamento dos Dados

# 2.1 Observações

As observações e coleta de dados para este trabalho iniciaram-se em 2012, quando se começou uma campanha para identificar e caracterizar Variáveis Cataclísmicas magnéticas, utilizando o *Southern Astrophysical Research Telescope* (SOAR) que possui espelho principal de 4,1 metros, localizado no *Cerro Pachón*, uma montanha dos Andes Chilenos com altitude de 2.700 metros acima do nível do mar, e pelo telescópio *Perkin-Elmer* com 1,6 metros em seu espelho principal, que faz parte do Observatório Pico dos Dias (OPD) e está localizado entre os municípios sul-mineiros de Brazópolis e Piranguçu, estando a 1864 metros de altitude em relação ao mar, sendo dirigido pelo Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA). Para a obtenção dos dados espectroscópicos foi utilizado o telescópio SOAR e para os dados polarimétricos utilizamos o telescópio *Perkin-Elmer*. As informações sobre a aquisição dos dados estão apresentadas na Tabela 3.

Os dados da espectroscopia foram obtidos pelo Dr. Alexandre Soares de Oliveira em maio de 2014, e os dados polarimétricos de abril foram obtidos, nos dias 25 e 26, pelos Drs. Karleyne Medeiros Gomes da Silva, Deonísio Cieslinski e pelo Msc. Matheus Soares Palhares, e no dia 27 a observação foi realizada pela Dra. Cláudia Vilega Rodrigues e pela Msc. Isabel Lima, já os dados de julho foram observados pelo Msc. Matheus Soares Palhares em todas as noites da missão.

Data	Observatório	Tipo de	Tempo de	Número de	Filtro
		observação	exposição (s)	exposições	
18 mar 12	SOAR	Espectroscopia	480	3	_
25 abr 14	OPD	Polarimetria	40	176	V
26 abr 14	OPD	Polarimetria	40	224	Ι
27 abr 14	OPD	Polarimetria	40	164	R
04 mai 14	SOAR	Espectroscopia	900	24	-
21 jul 14	OPD	Polarimetria	40	272	V
22 jul 14	OPD	Polarimetria	40	272	R
23 jul 14	OPD	Polarimetria	30	304	Ι

Tabela 3 - Dados das observações.

Os espectros foram adquiridos usando o *Goodman High Throughput Spectro*graph (Clemens, Crain e Anderson, 2004) trabalhando com o CCD Fairchild 4096×4096 de resolução de 15  $\mu$ m/pix com um ganho de 2,06 e<sup>-</sup>/ADU e ruído de leitura de 3,99 e<sup>-</sup> RMS. No mês de maio de 2014 realizamos uma série temporal de 24 espectros expostos por um tempo de 900 s, totalizando 6 horas de observação. Para a aquisição dos espectros configuramos o espectrógrafo com uma rede de difração de 1200 linhas/mm e fenda de 0,84 arcsec, extraindo uma resolução espectral de 1,6 Å, com o  $\lambda_{central}$  em 5030 Å, obtendo espectros no intervalo de 4247 e 5543 Å. Usamos como estrela padrão a LTT6248 e seu espectro foi adquirido nas mesmas configurações instrumentais, obtendo um espectro com uma exposição de apenas 20 s, o qual usamos para realizar a calibração de fluxo de nosso objeto. A lâmpada utilizada para obtermos os espectros de calibração em comprimento de onda foi a de *CuHeAr* exposta por 180 s e em intervalos de 30 min, o que nos dá 3 espectros do objeto de estudo entre as exposições da lâmpada, este processo é realizado para que os espectros do objeto e da lâmpada estejam submetidos a mesma configuração instrumental.

Realizamos a aquisição dos dados de polarimetria e fotometria com o CCD iKon 13739 de 2048 × 2048 e resolução de 15  $\mu$ m/pix configurado com ganho de 1,0 e<sup>-</sup>/ADU e ruido de leitura de 6,0 e<sup>-</sup> RMS, acompanhado da gaveta polarimétrica, instalada no foco Cassegrain. A gaveta polarimétrica é composta por três dispositivos, uma lamina retardadora de quarto de onda ( $\lambda/4$ ), um analisador e uma roda de filtros. A lâmina retardadora, usada para obter tanto a polarização circular quanto a linear, tem a primeira posição correspondente ao ângulo de zero graus, sendo adicionados 22,5° a cada mudança na posição da mesma, apresentando 16 posições distintas. O analisador que foi utilizado é um prisma Savart de calcita, que divide o feixe de luz do objeto em dois feixes de polarizações ortogonais. Devido a isso temos, nos dados obtidos, duas imagens para cada objeto. Na gaveta polarimétrica temos uma roda com os filtros do sistema *Johnson* (UBVRI), utilizando apenas os filtros V, R e I em nossa missão. Para ajustarmos a polarização e determinarmos que ela não foi introduzida experimentalmente, observamos estrelas padrões polarizadas e não polarizadas, descritas na Tabela 4.

Padrões Polarizadas	Padrões não polarizadas
HD110984	HD154892
HD111579	HD98161
HD126593	HD94851
HD298383	WD1620-39
HD155197	WD2007
BD144922	_
vBD1251	_
Ve6-23	_

Tabela 4 - Estrelas Padrões Observadas para polarimetria.

### 2.2 Redução de dados

Devemos remover possíveis ruídos e assinaturas incorporados ao dados devido às caracteristicas físicas do sistema instrumental (telescópio) e do detector eletrônico (CCD). Estas assinaturas interferem na contagem de fótons dos objetos, sendo dispensáveis na análise dos dados. Para retirá-las, realizamos um processo de correção dos dados chamado *redução*, realizando correções de *bias frame* e *flat field*, feitas em rotinas padrões do IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*), software distribuido pelo *National Optical Astronomy Observatories* (NOAO)<sup>a</sup>.

Além dos ruídos, os dados podem apresentar regiões do CCD que não são iluminadas, isso é corrigido realizando um corte nas bordas das imagens, procedimento denominado *trim*, utilizando a rotina CCDPROC do IRAF.

A correção de *bias frame* é usada para remover os problemas provocados por contagens de cargas elétricas pré-alocadas nos *pixels* dos CCDs. O valor desta contagem é chamado de *bias level* e possui um efeito aditivo na imagem produzida. Para eliminar esta contagem realizamos exposições com o obturador fechado e com o menor tempo de exposição possível, com a finalidade de detectar o valor aproximado da contagem de elétrons *bias level* para cada *pixel* do CCD. Como este nível de contagens é baixo, realizamos diversas exposições, para obter uma boa estatística e calcula-se a sua média. Esta imagem média, como a da Figura 16, é então subtraída das imagens de ciência e do *flat field*.

Cada *pixel* do CCD possui diferentes respostas para uma mesma intensidade de radiação e, para minimizar essa ligeira diferença, realizamos a correção usando o *flat field*, que será responsável por normalizar a sensibilidade dos *pixels*, que possui um efeito multiplicativo no valor das contagens. As imagens do tipo *flat field* são obtidas com o CCD iluminado uniformemente com uma fonte mais luminosa do que os objetos astronômicos, para que a relação entre sinal-ruido seja alta, devem ser expostas por pouco tempo, para que não saturem o CCD. Existem algumas maneiras de obter os *flats*; uma delas é obter a imagem de uma tela branca iluminada uniformemente e montada no interior da cúpula fechada (flat de cúpula), ou então realizar exposições do céu durante o crepúsculo (*skyflat*). Podemos também obter a imagem de uma lâmpada interna ao instrumento. Como a sensibilidade dos *pixels* é modificada nos diversos comprimentos de onda, devemos obter as imagens de *flat field* utilizando os mesmos filtros usados nas imagens de ciência. Este processo também é estatístico, então necessitamos de diversas exposições, as quais serão combinadas para realizarem uma média. A Fi-

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup>O NOAO é um órgão dirigido pela Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., com a cooperação da National Science Foundation, nos Estados Unidos da América.

Figura 16 - Média das imagens de *bias* da noite de 25 de abril de 2014, usada na redução dos dados.



gura 17 podemos ver um exemplo da média das imagens de *flat field* normalizada. Por fim, a correção consiste em dividir cada imagem pela média normalizada das imagens de *flat field*.

Na redução feita em nossas imagens escolhemos utilizar o *flat field* de cúpula para os dados de polarimetria e os *flat fields* com uma lâmpada de quartzo interna para os dados espectroscópicos.

## 2.3 Espectroscopia

No caso da espectroscopia, o passo seguinte é a extração dos espectros do objeto, estrela de comparação e lâmpada de calibração, tendo o objetivo de obter a energia emitida pelos objetos em cada comprimento de onda, dentro do intervalo espectral escolhido para as observações. Esses dados espectrográficos utilizam o princípio físico da dispersão da luz proveniente dos objetos, a qual passa por uma fenda longa posicionada no plano focal do telescópio, por um colimador e por uma rede de difração.

dos.

Figura 17 - *Flat field* médio da noite de 25 de abril de 2014, usada na redução dos dados.

Estes dados, já reduzidos, nos auxiliam a entender um pouco mais as características físico-químicas dos objetos estudados.

O processo de extração dos espectros é necessário pois a imagem que obtemos dos espectrógrafos são bidimensionais, onde temos um eixo de dispersão e um espacial, os quais devem ser transformados em espectros unidimensionais. Em cada espectro bidimensional é feito um corte ao longo do eixo espacial para se determinar o centro do perfil do objeto e uma janela de extração de tamanho adequado e de mesmo centro. Além disso, determinamos as regiões de céu em ambos os lados da janela para que sejam retiradas as linhas espectrais provenientes da atmosfera terrestre. Visto que o eixo do espectro não é paralelo ao eixo de dispersão, ajusta-se uma função de *Legendre* ou *spline* cúbica ao eixo para otimizar a soma das contagens, este ajuste é realizado em cada um dos espectros bidimensionais. Ao longo dos pontos da curva definida pela função são somadas as contagens da janela de extração e subtraídas as contagens de céu. Assim extraímos espectros unidimensionais das contagens dos *pixels* espectrais.

Feita a extração o próximo passo é realizar a calibração do eixo de dispersão do espectro em função do comprimento de onda. A calibração em comprimento de onda

é uma parte delicada da redução, pois uma boa determinação de velocidades radiais depende fortemente de uma boa calibração em comprimento de onda dos espectros. Para isto utilizamos espectros da luz de uma lampada padrão cujas linhas de emissão possuem comprimentos de onda bem determinados. Os espectros da lâmpada devem ser temporalmente próximos dos do objeto para evitarmos ao máximo alterações produzidas pela movimentação do telescópio. Tendo o espectro das linhas de emissão da lâmpada identificamos algumas linhas intensas, atribuindo seus comprimentos de onda e gerando uma função que converte *pixels* em comprimento de onda. Esta função será armazenada e utilizada para calibrar os espectros do objeto.

Foi utilizada uma lampada de *CuHeAr* exposta por 180 s imediatamente após a aquisição de série de três espectros do objeto, para todas as calibrações deste trabalho. O processo de extração dos espectros foi realizado com a *task* APALL, a identificação dos comprimentos de onda das lâmpadas com a *task* IDENTIFY e a calibração dos objetos com a *task* DISPCOR, todas em ambiente IRAF.

Os espectros dos objetos foram calibrados em fluxo a partir dos espectros obtidos da estrela padrão espectrofotométrica LTT6248, exposta por 20 s, utilizando a *task* STANDARD para atribuirmos valores de fluxo absoluto ao espectro da estrela padrão, SENSFUNC para encontrarmos a função de comparação entre o fluxo e *pixel*, e CALI-BRATE para calibrar em fluxo os objetos. Todas *tasks* deste processo fazem parte do pacote NOAO.ONEDSPEC do IRAF

## 2.4 Polarimetria

Para reduzir os dados polarimétricos foi utilizado o pacote de redução de imagens polarimétricas PCCDPACK (Antonio Pereyra-IAG/USP) em conjunto com algumas rotinas de redução desenvolvidas pela Dr. Cláudia Vilega Rodrigues, todos no *software* IRAF. Após efetuarmos as correções de *bias* e *flat-field* nas imagens, identificamos os pares correspondentes para cada objeto em cada exposição, devido a calcita dividir os feixes de luz em dois, o feixe ordinário e o extraordinário. Com os objetos identificados, identificamos os possíveis deslocamentos entre as imagens, devido a movimentação do telescópio ou por uma mudança na posição do CCD. O fluxo ordinário e o extraordinário de cada exposição do objeto é obtido realizando a fotometria de abertura, que é um pré requisito para realizar o cálculo da polarização. Neste processo usamos a subrotina PHOT do pacote APPHOT do IRAF, e após a redução a abertura com o menor erro associado foi escolhida. Assim calculamos a polarização usamos a subrotina PCCDGEN, do pacote já utilizado PCCDPACK, ao qual fornecemos como entrada os resultados obtidos na fotometria de abertura. A cada série de oito imagens obtidas com a lâmina retardadora de quarto de onda obtemos uma medida das polari zações linear e circular do objeto.

O ângulo de polarização foi ajustado para o sistema equatorial em nossas medidas. Este ajuste é realizado calculando o ângulo médio de cada uma das estrelas padrões polarizadas e comparando com os valores encontrados na literatura por Turnshek et al. (1990) e Fossati et al. (2007), vide Tabela 5.

Feita essa comparação, calculamos a média do desvio entre o ângulo experimental e o da literatura, para cada filtro em cada missão para encontrar a polarização linear e circular do objeto de ciência, usando a rotina TIME\_POL no IRAF. Os valores deste ajuste para cada filtro é apresentado na Tabela 6.

Objeto	Data	$\theta_{Exp}$	$\theta_{Lit}$	$\Delta \theta$	Filtro
HD110984	27 abr 14	161	91,6	69,4	R
HD111579	25 abr 14	10,4	103,1	87,3	V
	27 abr 14	173,4	103,1	70,3	R
HD126593	25 abr 14	157,7	75,2	82,5	v
HD298383	26 abr 14	45,3	148,6	76,7	Ι
Ve6-23	26 abr 14	70,6	170,9	79,7	Ι
BD1449	19 jul 14	49.4	49,6	129,8	V
	20 jul 14	50,1	49,6	0,5	V
	21 jul 14	47,4	49,6	177,8	V
	22 jul 14	46,2	49,9	176,3	R
	23 jul 14	42,2	48,9	173,3	Ι
HD1551	19 jul 14	107,9	103,2	4,7	V
	20 jul 14	106,0	103,2	2,8	V
	21 jul 14	104,6	103,2	1,4	V
	22 jul 14	97,5	103,2	174,3	R
	23 jul 14	91,0	103,2	167,8	Ι
BD1251	23 jul 14	142,7	144,0	178,7	Ι

Tabela 5 - Ajuste do ângulo de polarização para as estrelas padrões polarizadas.

Missão	Filtro	$\Delta \theta$
Abr/14	V	84,9
	R	69,9
	Ι	78,2
Jul/14	V	52,4
	R	175,3
	Ι	173,2

Tabela 6 - Ajuste do ângulo de polarização para cada filtro.

### 2.5 Fotometria.

As medidas da fotometria diferencial de abertura são obtidas como um sub produto da medidas de polarização. Nesta técnica, medimos o fluxo do nosso objeto de ciência relativo a um objeto de brilho constante, C1, localizado no mesmo campo do nosso alvo, de forma a compensar eventuais variações de transparência do céu. Estabelece-se uma abertura circular de raio conveniente, centrada em cada um dos objetos escolhidos, e também uma região em forma de anel entorno da abertura circular, para amostragem da intensidade do fundo de céu. A fotometria diferencial de abertura consiste na soma das contagens dos *pixels* contidos na abertura circular do alvo e na determinação de sua diferença em relação à soma das contagens internas à abertura da estrela de comparação. A região anelar serve para calcular a contagem média da radiação oriunda do céu, a fim de subtrai-la da que é produzida pela estrela. As contagens são convertidas, então, em diferenças de magnitudes. Este procedimento é feito também para mais estrelas de comparação no campo (C2, C3, etc...), para fins de controle da estabilidade da C1 e é realizado com as rotinas de polarimetria do PCCDPACK.

# 3 Resultados

# 3.1 Fotometria

A fotometria diferencial de abertura da RXJ1743, em relação a estrelas de comparação contidas no mesmo campo, foi obtida como subproduto da polarimetria realizada em abril e julho de 2014 que será apresentada na Seção 3.2. Nas duas missões obtivemos séries temporais de dados em 3 noites consecutivas, obtidas com os filtros V, R e I. A *finding chart* contendo RXJ1743 e as estrelas de comparação pode ser vista na Figura 18.

Figura 18 - *Finding Chart* de RXJ1743 obtida dos dados de polarimetria do OPD no filtro V. A estrela RX é a RXJ1743, C1 é a primeira estrela de comparação e assim por diante. C1', em azul, é a estrela de comparação usada na primeira análise. A duplicação dos objetos é gerado pelo analisador de calcita do polarímetro. O raio dos círculos é de 4 *pixels*. Temos o norte para cima e leste para esquerda.



Em uma primeira análise dos resultados da fotometria diferencial, percebemos uma modulação na magnitude das estrelas de comparação (para exemplo, ver curva C6-C1' em vermelho na Figura 19). Descobrimos que essa modulação estava relacionada à contaminação das contagens na abertura de RX pelas contagens da C1', devido à proximidade angular entre RXJ1743 e C1', a qual denominaremos de C1', escolhida nesta primeira análise.

Figura 19 - Exemplo da primeira análise fotométrica aos dados de 25 de abril de 2014. Em preto a modulação RX-C1' e em vermelho C6-C1'.



Desta forma, refizemos a fotometria para todas as noites, trocando a estrela de comparação C1. Para escolher o melhor raio para as aberturas de fotometria para cada noite, bem como o raio interno do anel de céu e sua largura, realizamos a fotometria para vários valores destes parâmetros (e.g. raio de abertura entre 3 e 12 *pixels*) e selecionamos a configuração com a menor média de desvio padrão das curvas de luz das estrelas de comparação C2-C1. A Tabela 7 apresenta o raio de abertura escolhida para cada noite.

As Figuras 20, 21, 22 apresentam, respectivamente, a fotometria nos dias 25, 26 e 27 de abril. A curva de luz de RXJ1743 nos apresenta uma variabilidade com amplitude de  $\approx$  1,5 mag, no filtro V para a primeira noite ,  $\approx$  1 mag no filtro I, na segunda noite e na última noite desta missão  $\approx$  1,2 mag no filtro R.

Data	Abertura (pix)	Desvio Padrão
14abr25	4	0,0176
14abr26	5	0,0086
14abr27	2	0,0155
14jul21	3	0,0113
14jul22	4	0,0093
14jul23	4	0,0102

Tabela 7 - Aberturas escolhidas para a fotometria.

Figura 20 - Fotometria de 25 de abril de 2014 no filtro V. Em preto RX-C1, em vermelho C2-C1 e em azul C3-C1.



As Figuras 23, 24, 25 apresentam, respectivamente, a fotometria nos dias 21, 22 e 23 de julho. A curva de luz de RXJ1743 nos apresenta uma variabilidade de magnitude com amplitude de  $\approx$  1,5 mag, no filtro V para a primeira noite,  $\approx$  1,8 mag no filtro R, na segunda noite e na ultima noite desta missão  $\approx$  0,8 mag no filtro I.



Figura 21 - Fotometria de 26 de abril de 2014 no filtro I. Em preto RX-C1, em vermelho C2-C1 e em azul C3-C1.

Figura 22 - Fotometria de 27 de abril de 2014 no filtro R. Em preto RX-C1, em vermelho C2-C1 e em azul C3-C1.



Realizamos uma busca por períodos nos dados fotométricos usando o método *Lomb-Scargle* (Scargle, 1982) implementado para *Python*. O periodograma obtido para todos os dados fotométricos combinados está representado na Figura 26. Fizemos também a mesma análise separando os dados por filtros, com resultados semelhantes. No



Figura 23 - Fotometria de 21 de julho de 2014 no filtro V. Em preto RX-C1, em vermelho C2-C1 e em azul C3-C1.

Figura 24 - Fotometria de 22 de julho de 2014 no filtro R. Em preto RX-C1, em vermelho C2-C1 e em azul C3-C1.



intervalo de períodos analisado (0,02 a 0,15 dias) o *Lomb-Scargle* indica um período de 0,08659  $\pm$  0,00005 d, ou 2,078 h. Este período é perfeitamente compatível com o período de 0,0866  $\pm$  0,0003 d determinado por D. V. Denisenko e Sokolovsky (2011) em sua análise fotométrica.Vemos claramente no periodograma os picos associados aos



Figura 25 - Fotometria de 23 de julho de 2014 no filtro I. Em preto RX-C1, em vermelho C2-C1 e em azul C3-C1.

*aliases* de 1 dia, causados pela cadência diária de observações em cada missão. Temos também no periodograma os picos associados aos *aliases* de cerca de 87 dias causados pelo intervalo entre as 2 missões observacionais (de  $\sim$  3 meses). Portanto, apesar de selecionarmos o período de 0,08659 d como o período orbital do sistema, não podemos por enquanto descartar os períodos associados a estes *aliases* de 3 meses (e.g. 0,08651 d, 0,08668 d, etc...).

Definimos a época inicial, T<sub>0</sub>, ajustando uma parábola ao mínimo principal da curva de luz com o mínimo mais acentuado (dia 25 de abril, ver Figura 27), encontrando o valor de HJD 2.456.773,774 ± 0,015. A efeméride para os dados fotométricos é:

$$T(HJD) = 2.456.773,774(15) + 0,08659(5) \times E$$
(12)

Para testar a efeméride definida acima, colocamos as curvas de luz em fase com o período e época correspondente (ver Figuras 28 e 29) verificando uma modulação coerente com o período orbital para todas as noites.

Pudemos calibrar a magnitude de RXJ1743 usando as magnitudes da estrela de comparação C1, catalogada como USNO-A2.0 0825-11051991. A Tabela 8 apresenta os valores das magnitudes encontradas pelo *Aladin* (Bonnarel et al., 2000) usando a ferramenta de acesso a catálogos VizieR (D. Monet e et al., 1998), e a Figura 30 apresenta as curvas de luz calibradas pela média das magnitudes encontrada para cada filtro.



Figura 26 - Periodograma obtido com os dados de fotometria.

Figura 27 - Ajuste parabólico na curva de luz do dia 25 de abril, para definir a época inicial através do ponto de mínimo, marcado pela linha vertical.



Figura 28 - Curvas de luz de RXJ1743, obtidas em 25, 26 e 27 de abril de 2014 (de cima para baixo no gráfico), em fase com os parâmetros da efeméride. Os filtros usados nos dias 25, 26 e 27 de abril foram, respectivamente, V, I e R.



40

Figura 29 - Curvas de luz da RXJ1743, obtidas em 21, 22 e 23 de julho de 2014 (de cima para baixo no gráfico), em fase com os parâmetros da efeméride. Os filtros usados nos dias 25, 26 e 27 de julho foram, respectivamente, V, R e I.



Figura 30 - Curvas de luz da RXJ1743, nos filtros V, R e I (de cima para baixo no gráfico), calibradas em magnitude usando a magnitude de C1, e em fase com o período e época da efeméride. São mostrados 2 ciclos para melhor visualização da modulação. Os pontos pretos são da missão de abril e os vermelhos são de julho.



Referência	Mag. (R)	Mag. (V)	Mag.(I)	
USNO-A2.0 <sup>a</sup>	15,7	-	-	
USNO-B1.0 <sup>b</sup>	15,71	-	14,88	
	15,89	-	-	
NOMAD1 <sup>c</sup>	15,89	16,14	-	
APASS <sup>d</sup>	-	16,641	-	
Média	15,7975	16.3905	14,88	

Tabela 8 - Magnitudes da estrela C1 obtidas em bancos de dados.

<sup>*a*</sup>D. Monet (1998), <sup>*b*</sup>D. G. Monet et al. (2003), <sup>*c*</sup>Zacharias et al. (2004), <sup>*d*</sup>Henden et al. (2009).

Fizemos uma busca adicional por periodicidades de escalas de tempo de dezenas de minutos nos dados de fotometria, após a subtração da modulação de 2,078 h (*prewhitening*). Os resíduos foram analisados com o método *Lomb-Scargle*, entre 0,005 d e 0,080 d. O processo foi realizado em todas as noites individualmente e os periodogramas são apresentados na Figura 31. Não encontramos nenhum pico significativo, e estável de noite para noite, que possa ser associado a uma modulação consistente de alta frequência (dezenas de minutos) nos dados de fotometria.

Figura 31 - Periodograma obtido com os dados do resíduo do processo *prewhitening* realizado para todas as curvas de luz.



### 3.2 Polarimetria

Os dados de polarimetria foram obtidos em seis dias em abril e julho de 2014. As Figuras 32, 33 e 34 apresentam a polarimetria para a missão de abril e as Figuras 35, 36 e 37 as de julho. Nas duas missões observamos uma polarização circular de até 30% e polarização linear menor que  $\sim 10\%$ .

A fim de verificar se a polarização é mesmo intrínseca a RXJ1743, mostramos na Tabela 9 a polarização circular de RXJ1743 e de duas estrelas de comparação presentes no mesmo campo. Como os objetos astronômicos, em sua grande maioria, possuem polarização circular nula, esperamos obter valores próximos de zero para essas estrelas, o que de fato ocorreu.





Realizamos também uma busca por períodos usando o *Lomb-Scargle* com os dados de todas as noites de polarimetria, e obtivemos um período de 0,08660 $\pm$ 0,00005 dias (ver Figura 38), condizente com o período encontrado pela fotometria. Da mesma forma que no caso da fotometria, os *aliases* de 3 meses não podem ser descartados. Para uma melhor análise apresentamos nas Figuras 39, 40 e 41 a polarização circular para cada filtro, V, R e I respectivamente, já em fase com a efeméride fotométrica.





Figura 34 - Polarização do dia 27 de abril de 2014 no filtro R, onde V é a polarização circular, P é a polarização linear e  $\theta$  é o angulo da polarização linear.





Figura 35 - Polarização do dia 21 de julho de 2014 no filtro V, onde V é a polarização circular, P é a polarização linear e  $\theta$  é o angulo da polarização linear.

Figura 36 - Polarização do dia 22 de julho de 2014 no filtro R, onde V é a polarização circular, P é a polarização linear e  $\theta$  é o angulo da polarização linear.



Figura 37 - Polarização do dia 23 de julho de 2014 no filtro I, onde V é a polarização circular, P é a polarização linear e  $\theta$  é o angulo da polarização linear.



Tabela 9 - Valores médios da polarização circular de RXJ1743 (RX) e das estrelas de comparação C1 e C2 presentes no campo. V é a polarização circular média,  $\sigma_V$  o valor médio dos erros da polarização e  $\sigma_{\bar{V}}$  o desvio padrão da polarização circular.

Objeto	Data	V(%)	$\sigma_V(\%)$	$\sigma_{ar{V}}(\%)$
	25 abr 14	16,36326	1,57961	0,63568
	26 abr 14	9,80320	0,40727	0,27411
RX	27 abr 14	12,12534	0,72757	0,56005
	21 jul 14	21,49363	1,01607	0,61812
	22 jul 14	18,71699	0,71720	0,41800
	23 jul 14	11,03005	0,69053	0,57143
	25 abr 14	0,02309	0,32564	0,12724
	26 abr 14	0,04059	0,11547	0,04230
C1	27 abr 14	-0,04310	0,22083	0,08501
	21 jul 14	-0,06962	0,43912	0,11843
	22 jul 14	0,09284	0,18921	0,15551
	23 jul 14	0,10775	0,12448	0,08053
	25 abr 14	0,05353	0,44169	0,23330
	26 abr 14	0,06822	0,17658	0,15060
C2	27 abr 14	0,07625	0,22189	0,11951
	21 jul 14	0,07930	0,30497	0,14794
	22 jul 14	0,08096	0,23601	0,14420
	23 jul 14	0,07529	0,16863	0,07645



Figura 38 - Periodograma obtido para os dados de polarimetria.

Figura 39 - Polarização circular em fase com os parâmetros da efeméride fotométrica de RXJ1743 no filtro V.




Figura 40 - Polarização circular em fase com os parâmetros da efeméride fotométrica de RXJ1743 no filtro R.

Figura 41 - Polarização circular em fase com os parâmetros da efeméride fotométrica de RXJ1743 no filtro I.



## 3.3 Espectroscopia

O espectro exploratório médio da RXJ1743, apresentado na Figura 42 foi construído com os dados obtidos em 2012 no projeto de espectroscopia exploratória pelo grupo de pesquisa. O espectro contém linhas de emissão com destaque para as linhas de HeI 4471 Å, HeII 4686 Å, H $\beta$  e H $\alpha$ . Vemos neste espectro HeII 4686 Å tão intenso quando H $\beta$ , H $\beta$  mais intenso que H $\alpha$  e o contínuo apresenta uma elevação para o azul, características essas comum às polares, que colaboraram para que RXJ1743 fosse selecionado para o programa de *follow-up* observacional extensivo. Observamos também uma linha de absorção telúrica em 6872 Å.

As linhas de HeI 4471 Å, HeII 4686 Å e HeII 5412 Å foram ajustadas por perfis Gaussianos e as linhas de H $\beta$  e H $\alpha$  foram melhor ajustadas por perfis de Lorentz, por apresentarem asas bastante estendidas. A medida da largura equivalente (EW) e da largura à meia altura (FWHM) das linhas espectrais descritas acima são apresentadas na Tabela 10.



Figura 42 - Espectro exploratório médio da RXJ1743 com dados obtido em 2012.

Identificação	-EW (Å)	FWHM (Km.s <sup>-1</sup> )
HeI 4471 Å	8	960
HeII 4686 Å	20	770
${ m H}eta$	43	870 <sup>e</sup>
HeII 5412 Å	4	860
Нα	49	730 <sup>f</sup>

Tabela 10 - Largura equivalente (EW) e largura à meia altura (FWHM) das principais linhas espectrais do espectro exploratório médio obtido em 2012.

<sup>e f</sup> Linhas ajustada por perfil de Lorentz

O espectro médio, já calibrado em fluxo e em comprimento de onda, dos 24 espectros de RXJ1743 obtidos em maio de 2014 é apresentado na Figura 43. Este espectro possui uma faixa espectral e uma resolução diferente do espectro exploratório, pois o intuito era obter também informações da linha de H $\gamma$  e atingir maior resolução espectral. Porém, para alcançar este objetivo a linha de H $\alpha$  ficou fora da cobertura espectral. As linhas que estão presentes em ambos os espectros não apresentam mudanças significativas em seus perfis nem na relação de intensidade das linhas, logo receberam o mesmo ajuste no perfil que foi feito para as linhas do espectro exploratório. A Tabela 11 nos apresenta as medidas de EW e de FWHM para as linhas do espectro médio obtido em 2014

Tabela 11 - Largura equivalente (EW) e largura à meia altura (FWHM) das principais linhas espectrais do espectro médio dos 24 espectros obtidos em 2014.

Identificação	-EW (Å)	FWHM (Km.s <sup>-1</sup> )
Нγ	28	820 <sup>g</sup>
HeI 4471 Å	10	980
HeII 4686 Å	35	820
$H\beta$	54	670 <sup>h</sup>
HeII 5412 Å	5	940

<sup>*b c*</sup>Linhas ajustada por perfil de Lorentz.

Medimos preliminarmente as velocidades radiais das linhas de HeII 4686 Å, H $\gamma$  e H $\beta$  dos 24 espectros de RXJ1743 de 2014, ajustando uma função gaussiana aos picos dos perfis das linhas. As curvas são apresentadas na Figura 44. As linhas de H $\gamma$ e H $\beta$  possuem variações aproximadamente senoidais com amplitudes totais próximas de 400 km s<sup>-1</sup> e a linha de HeII 4686 Å, também aproximadamente senoidal, possui amplitude total próxima de 500 km s<sup>-1</sup>.

Figura 43 - Espectro médio calibrado em fluxo e comprimento de onda dos 24 espectros da RXJ1743 obtidos em 2014 no SOAR.



Figura 44 - Velocidade radial das linhas de HeII 4686 Å, H $\gamma$  e H $\beta$ .



Para realizar uma análise de periodicidades nos dados de velocidades radiais, usamos o *Lomb-Scargle*. O periodograma obtido para os dados de velocidade radial da linha de HeII 4686 Å é apresentado na Figura 45. No intervalo de períodos analisado (0,02 a 0,15 dias) o *Lomb-Scargle* indica um período de 0,088  $\pm$  0,015 d, ou 2,11 horas. Dentro das incertezas, este período é compatível com o período de 0,08659 d determinado em nossa análise fotométrica.



Figura 45 - Periodograma obtido para os dados de velocidade radial da linha de HeII 4686 Å.

Combinamos os espectros individuais em 10 intervalos de fase utilizando o período fotométrico (ver Figura 46). Desta forma, evidenciou-se a variação dos perfis das linhas dos espectros ao longo do ciclo, característica típica entre as polares. Construimos, também, um *trailled spectrogram* empilhando os 24 espectros em fase com a efeméride fotométrica (Figura 47). Nesta figura evidenciou-se que os perfis das linhas de emissão são compostos por, pelo menos, uma componente estreita e uma componente larga.

Por este motivo refizemos as medidas de velocidades radiais das linhas de HeII 4686 Å e H $\beta$ , agora não mais com um simples ajuste por perfil de Gauss ou de Lorentz ao topo da linha, como nas medidas preliminares descritas anteriormente. Ajustamos cada perfil de emissão com duas funções gaussianas, uma larga e uma estreita, utilizando a tarefa *splot* do IRAF. Mostramos um exemplo desse ajuste na Figura 48.



Figura 46 - Linhas de He II 4686 Å (esquerda) e H $\beta$  (direita) do espectro de RXJ1743 binadas com o período fotométrico.

Figura 47 - Trailled spectogram das linhas de He II 4686 Å (esquerda) e H $\beta$  (direita).



Figura 48 - Exemplo de ajuste gaussiano do perfil espectral feito usando a rotina de *splot* do IRAF, usando gaussianas duplas, nas componentes larga e estreita, na linha de H $\beta$ .



Os resultados para as velocidades radiais, fluxo, largura equivalente e FWHM das componentes estreita e larga da linha de H $\beta$  são mostrados na Figura 49 e, da linha de HeII 4686 Å, na Figura 50. As curvas de velocidades radiais foram ajustadas por funções senoidais, cujos parâmetros são mostrados na Tabela 12, para H $\beta$  e, na Tabela 13, para HeII, respectivamente.

Tabela 12 - Parâmetros do ajuste senoidal das velocidades radiais das componentes larga e estreita da linha H $\beta$  de RXJ1743, sendo K a semi-amplitude,  $\gamma$  a velocidade sistêmica e  $\phi_0$  a fase correspondente ao maior *redshift*.

Parâmetro	Comp. Estreita	Comp. Larga
K (Km s <sup>-1</sup> )	$243 \pm 47$	396 ±198
$\gamma ~({ m Km}~{ m s}^{-1})$	22 ±2	-106 ±2
$\phi_0$	$0,20 \pm 0,01$	$0,90 \pm 0,05$

Figura 49 - Velocidade radial, fluxo, largura equivalente (Eq. Width) e FWHM das componentes larga (linha cheia) e estreita (linha tracejada) da linha de H $\beta$  de RXJ1743, obtida realizando o ajuste com gaussianas duplas.



Tabela 13 - Parâmetros do ajuste senoidal das velocidades radiais das componentes larga e estreita da linha He II 4686 Å de RXJ1743, sendo K a semiamplitude,  $\gamma$  a velocidade sistêmica e  $\phi_0$  a fase correspondente ao maior *redshift*.

Parâmetro	Comp. Estreita	Comp. Larga
$K ({\rm Km}~{\rm s}^{-1})$	$339 \pm 24$	$416 \pm 164$
$\gamma ~({ m Km}~{ m s}^{-1})$	$-33,1\pm 0,2$	$-114 \pm 1$
$\phi_0$	$0,17 \pm 0,01$	$0,95 \pm 0,05$

Figura 50 - Velocidade radial, fluxo, largura equivalente (Eq. Width) e FWHM das componentes larga (linha cheia) e estreita (linha tracejada) da linha de HeII 4686 Å de RXJ1743, obtida realizando o ajuste com gaussianas duplas.



As curvas de velocidade radial, tanto para a linha de He II 4686 Å quanto para a linha de H $\beta$ , nos apresenta uma semi-amplitude alta, com valor médio de 290 km s<sup>-1</sup> para a componente estreita e 405 km s<sup>-1</sup> para a componente larga.

## 4 Discussão e Conclusões

Neste trabalho foi realizado um *follow-up* observacional do sistema binário RXJ1743, usando técnicas de fotometria, polarimetria e espectroscopia. Este objeto foi selecionado previamente como candidato a Variável Cataclísmica magnética por Oliveira et al. (2017). Nosso objetivo foi verificar a sua possível classificação como polar.

Dos dados de fotometria obtivemos um período de 0,08659 dias, compatível com o período fotométrico de 0,0866 dias obtido por D. Denisenko e Martinelli (2012), que atribuímos ao movimento orbital do sistema. As curvas de luz têm amplitude média de variação 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, sem evidência de eclipses. Polares costumam apresentar estados altos (prevalentes) e baixos (pouco frequentes) de luminosidade. Em nossos dados fotométricos o objeto se apresenta em seu estado alto de brilho, em cerca de 16,5 mag, sendo que o estado baixo foi registrado em 1982 como cerca de 18,5 mag (D. V. Denisenko e Sokolovsky, 2011).

Além da modulação orbital, as curvas de luz de RXJ1743 também mostram uma variação de escala de tempo de minutos e amplitude de até 0,5 mag. Por isso, buscamos por variações periódicas de curto período possivelmente superposta à modulação orbital, através de um procedimento de *prewhitening* aplicado às curvas de luz. Os periodogramas (Figura 31) assim obtidos não mostram nenhum sinal estável que possa ser associado à rotação da anã branca, na hipótese do sistema ser uma polar intermediária. No entanto, não podemos descartar que algumas das séries temporais apresentem sinais que possam ser associados a QPOs (*Quasi Periodic Oscillations*) de dezenas de minutos. Polares podem apresentar QPOs em duas escalas de tempo: da ordem de 1 segundo ou de minutos (e.g. Cieslinski e Steiner, 1997) e sua origem ainda não é bem compreendida.

Nossos dados mostram que RXJ1743 apresenta polarização circular alta, de até 45%, confirmando este sistema como uma mCV do tipo polar. Além disso, o objeto tem polarização linear de até 10%. A polarização circular é modulada com o período orbital e apresenta sempre o mesmo sinal, indicando que provavelmente temos acreção em apenas um polo e que a região emissora da radiação ciclotron permanece sempre visível. As curvas de luz e as curvas de polarização de RXJ1743 são muito semelhantes às da polar V834 Cen (Cropper, Menzies e Tapia, 1986 e Potter et al., 2004). Em RXJ1743, o mínimo fotométrico ( $\phi = 0$ ) corresponde à fase de máxima polarização circular, com perfil em "M" na banda V. A forma da curva de polarização depende do filtro, e notamos uma grande variação na porcentagem de polarização (mas nem tanto na forma da curva) quando comparamos os dados de mesmo filtro separados por 3 meses (por

exemplo, na Figura 40).

Nosso grupo realizou as primeiras observações espectroscópicas deste objeto, utilizando o Goodman HTS no telescópio SOAR. O espectro é típico de polares, incluindo HeII 4686 Å quase tão intenso quando H $\beta$ , contínuo com inclinação para o azul, H $\beta$  mais intenso que H $\alpha$  e de linhas com perfis altamente variáveis ao longo da série. As velocidades radiais de linhas de HeII 4686 Å, H $\beta$  e H $\gamma$ , medidas ao longo de quase três ciclos orbitais, são moduladas com o período orbital do sistema. Não há indícios, em nossos espectros, de linhas de absorção que possam ser atribuídas à estrela secundária e que poderiam, junto com variações elipsoidais ou eclipses nas curvas de luz, indicar a fase orbital da conjunção da secundária.

Em nossa análise ficou evidente a presença de mais de uma componente nas linhas espectrais de RXJ1743, o que é comum entre as polares (e.g. Bailey et al., 1985; Cowley, Crampton e Hutchings, 1982; Greenstein et al., 1977; Rosen, Mason e Cordova, 1987 e Schneider e Young, 1980). Desta forma, analisamos as linhas He II 4686 Å e H $\beta$  separando-as em duas componentes gaussianas, uma larga e uma estreita, e medindo as velocidades radiais, fluxos e larguras destas componentes ao longo da série temporal de espectros. As semiamplitudes das curvas de velocidades radiais das componentes larga e estreita da linha de HeII 4686Å são aproximadamente 420 km s<sup>-1</sup> e 340 km s<sup>-1</sup>, respectivamente. Em polares as componentes largas podem ter amplitude de velocidades de até 1000 km s<sup>-1</sup> e dispersão de velocidades tão grande quanto (Warner, 1995), e são geralmente interpretadas como emissão do gás na coluna de acreção, próximo da região de choque na anã branca ou próximo da região de acoplamento (Diaz e Steiner, 1994). Assim, sua largura resulta do espalhamento de velocidades na região emissora. Já a componente estreita é comumente associada à superfície da estrela secundária, aquecida pela radiação-X proveniente da região de choque, ou associada ao fluxo horizontal de matéria entre o ponto interno de Lagrange, L1, e a região de acoplamento. No caso de ser oriunda da superfície da secundária, a velocidade  $\gamma$ desta componente pode refletir a velocidade sistêmica da binária. O redshift máximo da componente larga em RXJ1743 ocorre próximo à fase 0 ou pouco antes disso (ver Tabelas 12 e 13), enquanto que para a componente estreita isso ocorre próximo à fase 0,2. Isso indica claramente que estas componentes são produzidas em regiões distintas. Neste aspecto, RXJ1743 se comporta como a maioria das polares (e.g. V834 Cen), nas quais o máximo redshift da componente larga ocorre próximo ao máximo da polarização circular, ou seja, quando olhamos aproximadamente ao longo das linhas de campo magnético, sugerindo que a origem da componente larga é o gás em queda próximo à anã branca. O comportamento orbital do fluxo da componente estreita pode indicar sua região de origem: enquanto que o fluxo de uma componente originada na superfície da secundária deve apresentar apenas um máximo por ciclo (Schwope, Buckley et al., 1997) correspondente à conjunção superior da secundária, dois máximos por ciclo devem indicar a origem no fluxo de matéria visto de lado, o que ocorre duas vezes por ciclo orbital (Mukai, 1988). A componente estreita da linha de He II em nossos espectros parece mostrar que RXJ1743 se comporta desta segunda maneira, como dois máximos próximos das fases 0 e 0,5. No entanto, este indício deve ser olhado com cautela, dado que este comportamento é marginal nos dados de He II e praticamente ausente na linha de H $\beta$ .

Enfim, concluímos que RXJ1743 é uma polar típica, com um período orbital de 2,078 h. Este valor de período a coloca no limite inferior do clássico intervalo de períodos de 2 a 3 horas das Variáveis Cataclísmicas, junto com a maioria das polares conhecidas. A Figura 51 mostra a posição de RXJ1743 no histograma dos períodos orbitais de todas as polares confirmadas até 31 de dezembro de 2015, publicadas no catálogo de Ritter e Kolb (2003) (versão RKcat 7.24, 2016). Esta confirmação auxilia na complementação dos objetivos do projeto de descoberta de novas Variáveis Cataclísmicas magnéticas (Oliveira et al., 2017), desenvolvido por nosso grupo de pesquisa. Naquele projeto estudamos 45 sistemas e encontramos 22 candidatos a mCVs que, se tiverem sua classificação confirmada em follow-ups observacionais como o descrito aqui, aumentarão em 4% o número de polares e em 12% o número de IPs conhecidas. Variáveis Cataclísmicas magnéticas são objetos raros, sujeitos a interessantes cenários de acreção controlados por campos magnéticos. Estes cenários são frequentes em astronomia, abrangendo desde processos de formação estelar até acreção em diversas classes de objetos compactos, e Variáveis Cataclísmicas são laboratórios ideais para o estudos destes fenômenos, dadas as curtas escalas de tempos envolvidas e a ausência de outros efeitos. Em particular, o aumento da estatística das Variáveis Cataclísmicas magnéticas pode ajudar no entendimento de questões ainda abertas referentes à sua formação e evolução. Para determinar propriedades como período orbital ou campo magnético, é necessário o estudo de sistemas individuais com técnicas, cobertura e resolução temporal adequadas, e modelamento.

Neste sentido, as perspectivas deste trabalho, a serem desenvolvidas no doutorado, incluem a modelagem das curvas de luz e de polarização de RXJ1743 com o código CYCLOPS (Costa e Rodrigues, 2009 e Silva et al., 2013), que modela a geometria da estrutura de acreção sobre a anã branca pelo cálculo do transporte radiativo ao longo de uma região não homogênea em densidade, temperatura e campo magnético. O futuro doutorado também contemplará o *follow-up* e a modelagem de outras candidatas a mCVs descobertas pelo projeto de busca de mCVs realizado com o SOAR.

Figura 51 - Histograma da distribuição dos períodos orbitais de sistemas polares confirmados pelo catálogo Ritter e Kolb (2003) (versão RKcat 7.24, 2016). A barra vermelha é referente a RXJ1743.



## Bibliografia

Bailey, J. et al.: An optical and near-infrared study of the AM Herculis-type binary CW 1103 + 254. Em: MNRAS 215 (jul. de 1985), pp. 179–196. doi: 10.1093/mnras/215.2. 179.

Bonnarel, F. et al.: *The ALADIN interactive sky atlas. A reference tool for identification of astronomical sources.* Em: *A&AS* 143 (abr. de 2000), pp. 33–40. doi: 10.1051/aas: 2000331.

Chanmugam, G. e A. Ray: *The rotational and orbital evolution of cataclysmic binaries containing magnetic white dwarfs*. Em: *ApJ* 285 (out. de 1984), pp. 252–257. DOI: 10. 1086/162499.

Cieslinski, D., C. V. Rodrigues et al.: *Time-Resolved Spectroscopy of the Polar RBS* 0324(=1RXS J023052.9-684203). Em: Information Bulletin on Variable Stars 5957 (dez. de 2010). arXiv: 1102.3371 [astro-ph.SR].

Cieslinski, D. e J. E. Steiner: *The orbital period of RX J1141.3-6410*. Em: *MNRAS* 291 (out. de 1997), pp. 321–323. doi: 10.1093/mnras/291.2.321.

Clemens, J. C., J. A. Crain e R. Anderson: "The Goodman spectrograph". Em: *Groundbased Instrumentation for Astronomy*. Ed. por A. F. M. Moorwood e M. Iye. Vol. 5492. Proc. SPIE. Set. de 2004, pp. 331–340. DOI: 10.1117/12.550069.

Connon Smith, R.: *Cataclysmic Variables*. Em: *ArXiv Astrophysics e-prints* (jan. de 2007). eprint: astro-ph/0701654.

Costa, J. E. R. e C. V. Rodrigues: Stokes imaging of AM Her systems using 3D inhomogeneous models - I. Description of the code and an application to V834 Cen. Em: MNRAS 398 (set. de 2009), pp. 240–248. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2009.15130.x. arXiv: 0905.3483 [astro-ph.SR].

Cowley, A. P., D. Crampton e J. B. Hutchings: *Time-resolved spectroscopy of VV Puppis*. Em: *ApJ* 259 (ago. de 1982), pp. 730–739. DOI: 10.1086/160209.

Cropper, M.: *The Polars*. Em: *Space Sci. Rev.* 54 (dez. de 1990), pp. 195–295. DOI: 10. 1007/BF00177799.

Cropper, M., J. W. Menzies e S. Tapia: *E1405-451 - Three seasons of polarimetry and photometry*. Em: *MNRAS* 218 (jan. de 1986), pp. 201–222. doi: 10.1093/mnras/218.2. 201.

Denisenko, D. V. e K. V. Sokolovsky: *Identification of new cataclysmic variables in the 1RXS and USNO-B1.0 catalogs*. Em: *Astronomy Letters* 37 (fev. de 2011), pp. 91–99. doi: 10.1134/S1063773711010038. arXiv: 1007.1798 [astro-ph.SR].

Denisenko, D. e F. Martinelli: A Study of the Cataclysmic Variable 1RXS J174320.1-042953. Em: Peremennye Zvezdy 32 (ago. de 2012). arXiv: 1207.6320 [astro-ph.SR].

Diaz, M. P. e J. E. Steiner: *Locating the emission line regions in polars: Doppler imaging of VV Puppis*. Em: *A&A* 283 (mar. de 1994), pp. 508–514.

Drake, A. J. et al.: *First Results from the Catalina Real-Time Transient Survey*. Em: *ApJ* 696 (maio de 2009), pp. 870–884. DOI: 10.1088/0004-637X/696/1/870. arXiv: 0809.1394.

Eggleton, P. P.: *Approximations to the radii of Roche lobes*. Em: *ApJ* 268 (maio de 1983), p. 368. DOI: 10.1086/160960.

Fossati, L. et al.: "Standard Stars for Linear Polarization Observed with FORS1". Em: *The Future of Photometric, Spectrophotometric and Polarimetric Standardization*. Ed. por C. Sterken. Vol. 364. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. Abr. de 2007, p. 503.

Frank, J., A. King e D. J. Raine: *Accretion Power in Astrophysics: Third Edition*. Jan. de 2002, p. 398.

Greenstein, J. L. et al.: Velocity curves for broad and sharp components observed in the emission lines from AM Herculis. Em: ApJ 218 (dez. de 1977), pp. L121–L127. DOI: 10. 1086/182589.

Hellier, C.: Cataclysmic Variable Stars. Jan. de 2001.

Henden, A. A. et al.: "The AAVSO Photometric All-Sky Survey (APASS)". Em: *American Astronomical Society Meeting Abstracts* #214. Vol. 214. American Astronomical Society Meeting Abstracts. Maio de 2009, p. 669.

Kolb, U.: "Cataclysmic Variable Evolution: The Role of the White Dwarf Magnetic Field". Em: *Magnetic Cataclysmic Variables*. Ed. por D. A. H. Buckley e B. Warner. Vol. 85. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 1995, p. 440.

Kopal, Z.: Close binary systems. 1959.

Monet, D.: USNO-A2.0. 1998.

Monet, D. G. et al.: *The USNO-B Catalog*. Em: *AJ* 125 (fev. de 2003), pp. 984–993. DOI: 10.1086/345888. eprint: astro-ph/0210694.

Monet, D. e et al.: *VizieR Online Data Catalog: A catalogue of astrometric standards*. Em: *VizieR Online Data Catalog* 1252 (1998).

Mukai, K.: *Accretion streams in AM HER type systems*. Em: *MNRAS* 232 (maio de 1988), pp. 175–197. doi: 10.1093/mnras/232.1.175.

NASA: Introduction to Cataclysmic Variables (CVs). 2016. URL: http://heasarc.gsfc. nasa.gov/docs/objects/cvs/cvstext.html (acesso em 20/07/2016).

Oliveira, A. S. et al.: Exploratory Spectroscopy of Magnetic Cataclysmic Variables Candidates and Other Variable Objects. Em: The Astronomical Journal 153.4 (2017), p. 144. URL: http://stacks.iop.org/1538-3881/153/i=4/a=144.

Potter, S. B. et al.: *Stokes imaging, Doppler mapping and Roche tomography of the AM Herculis system V834 Cen.* Em: *MNRAS* 348 (fev. de 2004), pp. 316–324. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2004.07379.x.eprint: astro-ph/0311151.

Pretorius, M.: "The space density of magnetic and non-magnetic cataclysmic variables, and implications for CV evolution". Em: *The X-ray Universe 2014*. Jul. de 2014, p. 164. arXiv: 1407.3149 [astro-ph.SR].

Ritter, H. e U. Kolb: *Catalogue of cataclysmic binaries, low-mass X-ray binaries and related objects (Seventh edition)*. Em: A&A 404 (jun. de 2003), pp. 301–303. DOI: 10.1051/0004-6361:20030330. eprint: astro-ph/0301444.

— Catalogue of cataclysmic binaries, low-mass X-ray binaries and related objects (Sixth edition). Em: A&AS 129 (abr. de 1998), pp. 83–85. DOI: 10.1051/aas: 1998175.

Rodrigues, C. V., D. Cieslinski e J. E. Steiner: *Polarimetry and spectroscopy of the polar RX J1141.3-6410*. Em: *A&A* 335 (jul. de 1998), pp. 979–984. eprint: astro-ph/9805193.

Rosen, S. R., K. O. Mason e F. A. Cordova: *Phase-resolved optical spectroscopy of the AM HER system E1405-451*. Em: *MNRAS* 224 (fev. de 1987), pp. 987–1006. doi: 10.1093/ mnras/224.4.987.

Scargle, J. D.: Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. Em: ApJ 263 (dez. de 1982), pp. 835–853. DOI: 10. 1086/160554.

Schmidt, G. D. e H. S. Stockman: *Synchronization of the magnetic Nova V1500 Cygni*. Em: *ApJ* 371 (abr. de 1991), pp. 749–760. DOI: 10.1086/169939.

Schneider, D. P. e P. Young: VV Puppis and an Ursae Majoris - A radial velocity study. Em: ApJ 240 (set. de 1980), pp. 871–884. DOI: 10.1086/158301. Schwope, A. D., H. Brunner et al.: *The census of cataclysmic variables in the ROSAT Bright Survey*. Em: *A&A* 396 (dez. de 2002), pp. 895–910. doi: 10.1051/0004-6361:20021386. eprint: astro-ph/0210059.

Schwope, A. D., D. A. H. Buckley et al.: *RX J2115.7-5840: a short-period, asynchronous polar.* Em: *A&A* 326 (out. de 1997), pp. 195–202. eprint: astro-ph/9705106.

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. Em: MNRAS 432 (jun. de 2013), pp. 1587–1599. DOI: 10.1093/mnras/stt578. arXiv: 1304.2605 [astro-ph.SR].

Turnshek, D. A. et al.: *An atlas of Hubble Space Telescope photometric, spectrophotometric, and polarimetric calibration objects*. Em: *AJ* 99 (abr. de 1990), pp. 1243–1261. DOI: 10. 1086/115413.

Verbunt, F.: Accretion disks in stellar X-ray sources - A review of the basic theory of accretion disks and its problems. Em: Space Sci. Rev. 32 (1982), pp. 379–404. DOI: 10.1007/ BF00177448.

Warner, B.: Cataclysmic variable stars. Em: Cambridge Astrophysics Series 28 (1995).

Wickramasinghe, D. T. e K. Wu: *A New Evolutionary Model for Am-Herculis Binaries*. Em: *MNRAS* 266 (jan. de 1994), p. L1. DOI: 10.1093/mnras/266.1.L1.

WIKIPÉDIA: *Polarização Eletromagnética*. 2016. URL: https://pt.wikipedia.org/ wiki/Polariza%C3%A7%C3%A3o\_eletromagn%C3%A9tica (acesso em 05/07/2016).

Zacharias, N. et al.: "The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset (NOMAD)". Em: *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. Vol. 36. Bulletin of the American Astronomical Society. Dez. de 2004, p. 1418.