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

Gael Romain Cerveny Barreteau

Caracterização Espectroscópica e Busca de *Close Binary Supersoft Sources*

São Paulo
2025

Gael Romain Cerveny Barreteau

Caracterização Espectroscópica e Busca de *Close Binary Supersoft Sources*

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

Vertente: Pesquisa Básica
Orientador(a): Prof. Dr. Marcos Perez Diaz

São Paulo

2025

Agradecimentos

À minha mãe, Evelize. Por ter proporcionado o meio para que eu me tornasse quem sou hoje, e por sempre ter me incentivado a seguir meu próprio caminho.

À minha companheira, Victória. Pelo afeto, presença e suporte incondicionais durante os últimos anos da minha graduação.

Ao Professor Marcos Diaz. Pela orientação e confiança ao longo de dois anos de trabalho e, em especial, por ensinar astrofísica de forma intuitiva e inspiradora.

Aos amigos que o IAG me apresentou. Pelas trocas de conhecimento, ajudas nos estudos e principalmente por tornarem este ambiente mais leve e acolhedor.

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

"*We are stardust brought to life, then empowered by the Universe to figure itself out.*"

Neil deGrasse Tyson

Resumo

As *Close Binary Supersoft Sources* (CBSS) são uma classe composta por sistemas binários em interação, nos quais uma Anã Branca acreta material em elevadas taxas através de um espesso disco de acreção. Nesta condição, a Anã Branca queima hidrogênio continuamente em sua fotosfera, gerando uma forte emissão térmica com pico nos raios-x supermoles, que caracteriza a classe. Poucas CBSS são conhecidas na Galáxia, possivelmente devido à extinção interestelar, que limitaria a detecção de seus raios-x.

Este trabalho visou buscar por novas candidatas às CBSS de maneira independente de suas emissões em raios-x, tomando como base as características marcantes de seus espectros ópticos. Foram desenvolvidos índices fotométricos sintéticos, representantes de suas linhas de emissão recorrentes, com o objetivo de determinar critérios de discriminação singulares desta classe.

Os índices desenvolvidos foram aplicados a centenas de milhares de espectros, provenientes dos bancos de dados do *Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope* (LAMOST) e do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). Os resultados deste processo foram usados para filtrar por objetos com características espectrais semelhantes àquelas das CBSS.

Foi encontrada uma candidata promissora à classe de interesse, cujo espectro apresenta todas as características esperadas para uma CBSS. Dados fotométricos do objeto foram analisados, apontando para um provável período orbital de 5,42 horas, em acordo com as orbitas típicas da classe. Sua curva de luz em fase revela também uma modulação condizente. Mais estudos estão previstos para uma caracterização mais robusta do sistema, de forma a fortalecer a hipótese de uma nova CBSS galáctica.

Abstract

Close Binary Supersoft Sources (CBSS) are a class of interacting binary systems in which a White Dwarf accretes material at high rates through a thick accretion disk. Under this condition, the White Dwarf burns hydrogen steadily on its photosphere, producing strong thermal emission peaking in the supersoft X-ray range, which characterizes this class. Only a few CBSS are known in the Galaxy, possibly due to interstellar extinction, which limits the detection of their X-ray emission.

This work aimed to search for new CBSS candidates independently of their X-ray emission, based on the distinctive features of their optical spectra. Synthetic photometric indices were developed to represent their recurrent emission lines, with the goal of establishing unique discrimination criteria for this class.

The developed indices were applied to hundreds of thousands of spectra from the Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST) and the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) databases. The results of this process were used to filter objects exhibiting spectral characteristics similar to those of CBSS.

A promising candidate for the class of interest was found, whose spectrum displays all expected features of a CBSS. Photometric data of the object were analyzed, suggesting a probable orbital period of 5.42 hours, consistent with typical orbits of the class. Its phase-folded light curve also reveals a corresponding modulation. Further studies are planned for a more robust characterization of the system, in order to strengthen the hypothesis of a new galactic CBSS.

Lista de Figuras

1.1 Esquema de um sistema CBSS. O disco de acresção e a face irradiada da secundária são indicados. Os lóbulos de Roche da binária são mostrados, com o da secundária sendo preenchido. Fonte: Kahabka & van den Heuvel (1997). 19

2.1 Conjunto de espectros das CBSS utilizadas como base para as análises. As linhas de emissão relevantes são demarcadas em vermelho. 23

3.1 Diagrama de diagnóstico espectral de He II contra Hβ, comparando as VCs do LAMOST às CBSS. 29
3.2 Diagrama de diagnóstico espectral de He II contra O VI (5290Å), comparando os alvos ROSAT do SDSS às CBSS. 29
3.3 Espectro óptico de ZTF04 usado para sua identificação como candidata, com linhas de emissão relevantes demarcadas. 30
3.4 Curva de luz dobrada em fase de ZTF04, construída com dados do setor 59 do TESS. 31

Lista de Tabelas

2.1 Bandas fotométricas usadas para representar as linhas de emissão dos espectros analisados. O "Modo"se refere à como o contínuo relevante foi tomado para o cálculo de EWs, entre bandas centradas ou adjacentes. 26

Sumário

1. Introdução 17
1.1 Descrição dos Sistemas de Interesse 17
1.2 Objetivos 19

2. Dados e Métodos 21
2.1 Dados Iniciais 21
2.2 Conjuntos Espectrais Analisados 22
2.3 Fotometria Sintética e Larguras Equivalentes 24

3. Resultados e Análise 27

4. Conclusões 33

Referências 35

Capítulo 1

Introdução

1.1 Descrição dos Sistemas de Interesse

As *Close Binary Supersoft Sources* (CBSS) são sistemas binários formados por uma anã branca (AB) e uma estrela companheira mais massiva (secundária), que possui um envoltório radiativo. Quando a separação orbital entre as duas estrelas é suficientemente pequena, o que ocorre para períodos que variam entre 5 e 20 horas, a secundária pode preencher seu lóbulo de Roche e começar a transferir matéria para a AB. Esse processo dá origem a um disco de acreção opticamente e geometricamente espesso, que canaliza o material para a superfície da primária (Kahabka & van den Heuvel, 1997).

As taxas de acreção nesses sistemas são muito elevadas, da ordem de $10^{-7}\,M_{\odot}\,\mathrm{ano}^{-1}$. Nessa condição, a AB é capaz de manter a queima termonuclear de hidrogênio em sua superfície de maneira contínua e praticamente estável, produzindo temperaturas típicas de corpo negro entre $\sim$ 300.000 e 500.000 K em uma fotosfera expandida. Desta forma, uma forte emissão térmica com pico nos raios-x moles é gerada, responsável por aquecer o disco de acreção e a face iluminada da estrela secundária, que reprocessam essa radiação. Assim, todas as partes do sistema, i.e. a anã branca, a companheira e o disco, podem contribuir para a formação das linhas de emissão observadas em seus espectros. Um esquema representando esse cenário é mostrado na Figura 1.1.

Os espectros ópticos das CBSS apresentam linhas de emissão intensas de hidrogênio (H) e hélio ionizado (He II). Observações da fonte eclipsante CAL 87, um dos protótipos da classe, indicaram que as intensidades dessas linhas não variam de forma significativa ao longo da órbita (Cowley *et al.*, 1990). Esse resultado sugere que as regiões onde essas emissões se formam não estão restritas a um ponto específico, mas podem estar distribuídas

em torno do sistema, em uma espécie de corona ou em ventos que partem do disco, da AB ou da face irradiada da companheira (van den Heuvel *et al.*, 1992).

As CBSS são consideradas uma subclasse dentro do grupo mais amplo das *Supersoft X-ray Sources* (SSS). Essas fontes foram identificadas inicialmente a partir de observações de objetos muito luminosos nas faixas do ultravioleta extremo e dos raios-x moles, principalmente nas Nuvens de Magalhães e em M31. Estudos por van den Heuvel *et al.* (1992) mostraram que as SSS provavelmente correspondem a sistemas onde uma AB sofre acreção de matéria rica em hidrogênio em taxas elevadas, mantendo a queima nuclear de forma estável, o que pode ocorrer tanto em CBSS, quanto em outros tipos de sistemas binários interagentes.

Apesar de sua alta luminosidade, poucas SSS são conhecidas: a maioria foi detectada em galáxias vizinhas e menos de dez foram identificadas até hoje na Via Láctea. Suas propriedades, variabilidades e comportamentos eruptivos ainda são temas de estudo e não estão completamente compreendidos (Bhattacharya, 2017). Uma das dificuldades na detecção dessas fontes é que sua radiação em raios-x moles é facilmente absorvida pelo meio interestelar, especialmente para fontes localizadas no disco da Galáxia. Isso pode explicar, ao menos em parte, o número reduzido de SSS conhecidas na Via Láctea, em comparação com as observadas nas Nuvens de Magalhães e em M31, as quais não sofreriam uma extinção tão considerável em suas emissões características nos raios-x.

Os discos de acreção das CBSS são diferentes daqueles encontrados em sistemas de Variáveis Cataclísmicas (VCs), pois apresentam taxas de transferência de massa superiores em aproximadamente duas ordens de grandeza, resultando em luminosidades e temperaturas também mais altas. Porém, existem semelhanças marcantes entre as CBSS e as Novas Clássicas, um dos tipos de VCs, durante a chamada fase "*supersoft*". Em ambos os casos, a emissão é dominada pelos raios-x moles e as luminosidades se aproximam do limite de Eddington. A principal diferença está na duração do processo de queima de hidrogênio, nas CBSS ele é contínuo e estável, enquanto nas Novas Clássicas é temporário, com registros de duração de até alguns anos.

Outro grupo de objetos intimamente relacionado às CBSS é o das estrelas V Sagittae (V Sge), proposto por Diaz & Steiner (1998). Essa classe foi definida a partir de características espectroscópicas muito particulares, incluindo intensas linhas de emissão de HeII (4686Å) e H, além de transições de alta ionização de NV (4930–45Å) e OVI (3811–34, 5290 e

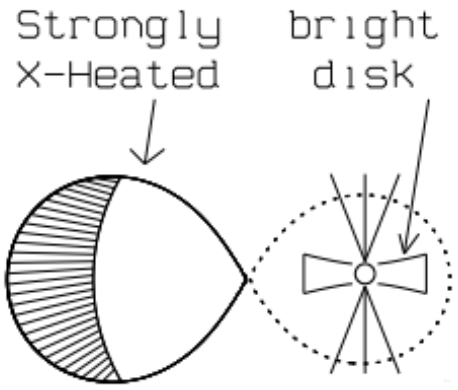

Figura 1.1: Esquema de um sistema CBSS. O disco de acresção e a face irradiada da secundária são indicados. Os lóbulos de Roche da binária são mostrados, com o da secundária sendo preenchido. Fonte: Kahabka & van den Heuvel (1997).

5584Å), que também são registradas nos espectros das CBSS. Nessas estrelas, a largura equivalente da linha de HeII é tipicamente duas ou mais vezes maior que a de Hβ (4861Å), característica usada para o estabelecimento da classe, e que é compartilhado também pelas CBSS.

Diversas propriedades das V Sge, como os períodos orbitais, as massas e naturezas das componentes e até a detecção de raios-X pelo *Roentgen Satellite* (ROSAT) em duas delas, são muito semelhantes às observadas nas CBSS. Por isso, Diaz & Steiner (1998) sugeriram que as V Sge poderiam representar as contrapartes galácticas desta classe. Nesses sistemas, os raios-X supermoles característicos estariam fortemente absorvidos, seja pelo meio interestelar, seja por ventos internos ricos em metais.

Dessa forma, considerando as evidências observacionais e as similaridades físicas, neste trabalho as duas classes (CBSS e V Sge) são tratadas como pertencentes a um mesmo grupo, designado simplesmente por CBSS daqui em diante.

1.2 Objetivos

O número reduzido de CBSS conhecidas na Galáxia dificulta a realização de análises estatísticas abrangentes sobre essa classe de objetos. Os estudos detalhados conduzidos para sistemas individuais indicam a necessidade de ampliar o intervalo de parâmetros

observacionais e teóricos considerados, de modo a compreender melhor os processos físicos que ocorrem tanto no disco de acreção quanto na fonte central. Essa ampliação também é essencial para investigar possíveis conexões evolutivas entre as CBSS e outras classes de binárias em interação.

A semelhança espectral e fotométrica observada entre algumas CBSS galácticas, e certos tipos de Variáveis Cataclísmicas e estrelas Wolf-Rayet do tipo WN (ricas em nitrogênio), já foi fundamental para a descoberta de novos membros dessa classe no passado. Exemplos notáveis incluem os sistemas WX Cen (Diaz & Steiner, 1995), V Sge (Diaz, 1999) e MR Vel (Mennickent, Matsumoto & Diaz, 2003).

Modelos populacionais sugerem, entretanto, que a Via Láctea deve abrigar várias centenas de sistemas desse tipo (Di Stefano & Rappaport, 1994; Yungelson *et al.*, 1996). Diante dessa expectativa, o presente trabalho possui como objetivo principal desenvolver uma forma de buscar por novas candidatas às CBSS, com base nas linhas de emissão recorrentes que se destacam nos espectros ópticos conhecidos da classe, de forma a não depender observacionalmente das suas emissões nos raios-x.

Para este fim, serão desenvolvidos índices fotométricos sintéticos que representem as linhas de emissão citadas, possibilitando o cálculo das suas intensidades em grandes volumes de espectros com agilidade. Os resultados obtidos para as CBSS serão comparados àqueles das classes cujos espectros mais se assemelham aos delas, as Variáveis Cataclísmicas Magnéticas (VCMs) e as Wolf-Rayets (WRs), para determinação de critérios de discriminação da classe de interesse.

Estes índices então serão aplicados à grandes amostras de espectros, provenientes de grandes *surveys* espectroscópicos como o *Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope* (LAMOST) e o *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). Considerando os critérios de discriminação determinados, serão selecionadas possíveis candidatas às CBSS a partir de semelhanças espectrais nas transições relevantes, tais objetos então serão estudados com maior profundidade, para que verifique-se se adequam-se às outras características da classe.

Capítulo 2

Dados e Métodos

2.1 Dados Iniciais

Os primeiros dados necessários foram os espectros ópticos das CBSS conhecidas, além daqueles de WRs e VCMs para possibilitar as primeiras comparações entre classes. Todas as SSS reconhecidas até dezembro de 1999 foram catalogadas por Jochen Greiner no intitulado "*Catalog of Supersoft X-ray Sources*"(Greiner, 2000), que serve como uma base de dados praticamente completa. Contudo, Greiner considerou apenas aqueles objetos identificados por meio de observações em raios-x, de forma que se torna necessário considerar também Diaz & Steiner (1998) para adicionarmos as estrelas V Sge, identificadas por espectroscopia, ao grupo. Dessa forma, um total de 12 CBSS, sendo cinco galácticas e sete extragalácticas, foram consideradas inicialmente.

Foi conduzida uma busca minuciosa pelos dados espectroscópicos disponíveis para este grupo, explorando resultados de *surveys*, bancos de dados públicos e publicações relacionadas aos objetos em questão. Ao final, foram selecionados espectros de apenas cinco CBSS, que foram considerados como satisfatórios por possuírem coberturas espectrais razoáveis e calibrações em fluxo, sendo que nenhum destes se encontrava disponível em formato de arquivo. A solução encontrada para possibilitar a análise foi de aplicar o *software* Dexter, do *German Astrophysical Virtual Observatory*, às imagens dos espectros escolhidos, para digitalizar as informações destes gráficos em tabelas contendo comprimentos de onda e fluxos. Em seguida foi utilizada a tarefa "rspectext", do software de análise de dados IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*), para transformar tais dados em espectros de formato FITS (Flexible Image Transport System).

Houve casos de CBSS cujos espectros ópticos foram encontrados, porém não se de-

monstraram satisfatórios para a análise proposta por não representarem o que foi denominado o formato "canônico"para a classe. Estes foram compreendidos como casos em que os sistemas apresentaram estados baixos, nos quais a emissão em raios-x não estaria ocorrendo, ocasionando a aparente falta das características destacadas anteriormente. Tais diminuições na emissão dos raios-x em CBSS podem ser causadas por aumentos ou decréscimos na taxa de transferência de matéria, que afetam a queima de hidrogênio, e por consequência tal emissão.

O conjunto final das CBSS contém apenas seis espectros, de cinco fontes distintas, sendo elas: QR And, cujos dados são provenientes de Beuermann *et al.* (1995); RX J0513, dados de Pakull *et al.* (1993); V617 Sgr, dados de Steiner *et al.* (1999); WX Cen, dados de Diaz & Steiner (1995); e V Sge, com dois espectros diferentes para melhor cobertura espectral, provenientes de Patterson *et al.* (1998) e Echevarría & Diego *et al.* (1989). A Figura 2.1 apresenta tal conjunto amostral, com as linhas espectrais de interesse (He II, Hβ, O VI e N V) demarcadas.

A amostra de espectros referente à classe das WRs foi construída com base nos resultados de Torres-Dodgen & Massey (1988), disponibilizados no portal de buscas da ferramenta VizieR do *Strasbourg astronomical Data Center* (CDS), responsáveis por montar um catálogo de espectros ópticos das WRs galácticas, incluindo uma grande variedade dos subtipos de WCs e WNs, que variam de acordo com as composições e níveis de ionização dos objetos. Já os espectros de VCMs utilizados foram coletados a partir de buscas no SDSS e no LAMOST, usando como parâmetro as coordenadas, compiladas para tais sistemas no livro *Cataclysmic Variable Stars* (Warner, 1995).

2.2 Conjuntos Espectrais Analisados

Para a condução da busca por candidatas às CBSS, diversos subconjuntos dos dados resultantes dos *surveys* mencionados foram analisados com o método descrito na seção 2.3. Estes foram escolhidos por conterem espectros com características semelhantes àquelas esperadas para uma CBSS, de forma que tais subconjuntos possuiriam uma maior chance de abrigar uma CBSS classificada erroneamente. Para tal, foi necessário compreender também as pipelines de redução e classificação de dados dos *surveys*.

Além de subconjuntos disponibilizados pelas próprias organizações dos *surveys*, também

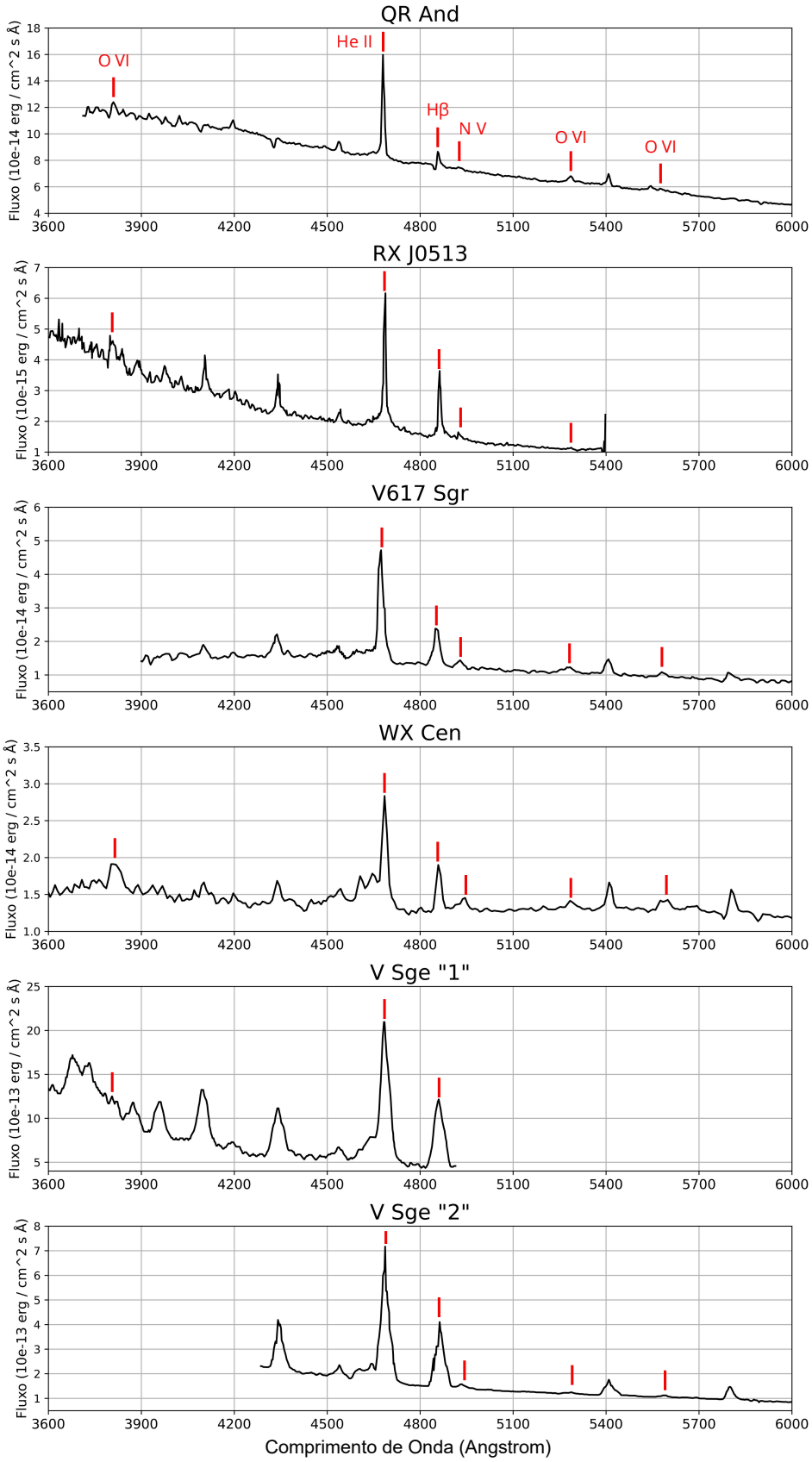

Figura 2.1: Conjunto de espectros das CBSS utilizadas como base para as análises. As linhas de emissão relevantes são demarcadas em vermelho.

foram criados conjuntos à serem analisados usando os valores, medidas e características dadas aos espectros ao longo das pipelines, usando os chamados *Value Added Catalogs* (VACs). Para esta etapa de buscas e preparação para download dos dados que seriam analisados, uma ferramenta importante foi a *Structured Query Language* (SQL), cujo uso permite escrever códigos para buscas através de diversas bases de dados astronômicos, incluindo as do SDSS e do LAMOST.

Da base de dados do LAMOST DR11, foram analisados os catálogos de Anãs Brancas, de Variáveis Cataclísmicas e de estrelas que apresentaram linhas de carbono. Também foram escolhidas todas as estrelas às quais se atribuíram os tipos espectrais A, B e O, além daquelas de tipo "EM", que possuem linhas de emissão e não se encaixaram em outras classificações. E foram explorados os resultados de *crossmatches* com alvos dos telescópios de raios-x ROSAT, Chandra e XMM-Newton, executados à partir da ferramenta XMatch do CDS com base nas coordenadas dos objetos.

Dos resultados do SDSS DR18, foram utilizados os catálogos de ABs e de VCs, além das estrelas identificadas com a linha de Hβ em emissão, e todas as estrelas com índice de cores $g - r < 0.5$ que apresentaram relação sinal ruído maior que 15 para a banda g. Também foram usados os *crossmatches* desta base de dados com os alvos do ROSAT e do Chandra, novamente feitos através do XMatch.

2.3 Fotometria Sintética e Larguras Equivalentes

O método de fotometria sintética foi escolhido como base para a quantificação das intensidades das linhas de emissão características das CBSS. Ao contraria de uma fotometria de abertura, na qual um fluxo pode ser deduzido a partir da contagem de fótons em uma imagem de duas dimensões de um objeto, na fotometria sintética uma região de um espectro unidimensional (uma banda fotométrica), calibrado em fluxo, é integrada para que se obtenha um valor de fluxo total em tal banda.

Inicialmente este método foi utilizado com a aplicação da tarefa "magband"do IRAF, que performa tal integração, e devolve resultados tanto em magnitude quanto fluxo. Para tal, foi necessário extrair os dados de comprimento de onda e fluxo dos espectros provenientes dos *surveys*, e montar novos arquivos FITS destes espectros unidimensionais com a tarefa "rspectext", uma vez que a estrutura dos arquivos originais não é compatível com

a leitura do IRAF, e de grande parte de suas tarefas. Contudo, quando testes com alguns milhares de espectros começaram a ser feitos, ficou evidente que este processo demandava tempo demais para o objetivo posto. Por isso o pacote Astropy foi utilizado para criar um código em Python capaz de realizar a fotometria sintética nos arquivos originais do SDSS e do LAMOST que, com a aplicação de paralelização do processamento, se mostrou diversas vezes mais eficiente que o meio anterior.

Partindo das medidas de fluxo, o objetivo foi de calcular as larguras equivalentes (EWs) das linhas de emissão destes espectros, para isso foi necessário estabelecer bandas fotométricas representativas tanto das linhas, quanto de seus respectivos contínuos locais. Para as linhas, suas bandas foram centradas em seus respectivos comprimentos de onda centrais, e as larguras foram ajustadas de acordo com àquelas observadas nas CBSS. Já para os contínuos, houve casos em que a melhor estimativa foi tomada em torno das próprias linhas, com bandas de larguras maiores que as das linhas em si, sendo este o caso denominado "centrado". Contudo em certos casos as regiões vizinhas às linhas eram contaminadas por outras características espectrais tornando necessário que bandas "adjacentes"fossem criadas para representar alguma região próxima de contínuo. Ou seja, as bandas fotométricas desenvolvidas foram ajustadas especialmente para representar boas estimativas em espectros como os das CBSS, por isso foi esperado que possivelmente as medidas não representariam bem a realidade de espectros com características muito distintas às deles. O valor de EW, em função do fluxo no contínuo F_C e do fluxo da linha em cada comprimento de onda considerado na integração F_λ, é definido pela Equação 2.1.

$$EW = \int \frac{F_C - F_\lambda}{F_C} d\lambda \tag{2.1}$$

Para calcularmos EW a partir dos valores obtidos pelo método descrito anteriormente, precisamos fazer algumas mudanças. Para o caso com as bandas centradas, são definidos os fluxos da banda estreita fn e da banda larga fw, além das larguras das bandas respectivas dn e dw, sendo o fator $\alpha = dw/dn$. Então podemos calcular o fluxo da linha espectral como:

$$fl = \frac{1}{2}\left[(fw + fn) - (fw - fn)\frac{\alpha + 1}{\alpha - 1}\right] \tag{2.2}$$

Então o fluxo no contínuo deve ser $(fc = fw - fl)$, e a largura equivalente da linha é:

$$EW = \frac{fl}{fc/dw} \tag{2.3}$$

Já no caso da banda adjacente, são definidos o fluxo da banda da linha com contínuo flc, e o fluxo da banda do contínuo fc, com as larguras de banda dlc e dc, e o fator $\alpha = dc/dlc$. De forma que o fluxo da linha espectral e sua respectiva EW são dados por:

$$fl = flc - \frac{fc}{\alpha} \tag{2.4}$$

$$EW = \frac{fl}{fc/dc} \tag{2.5}$$

A Tabela 2.1 apresenta as bandas fotométricas aplicadas às linhas de emissão de interesse. São dados os comprimentos de onda centrais, as larguras escolhidas para as bandas, para que melhor representassem suas respectivas linhas, e os modos nos quais elas foram utilizadas para o cálculo das larguras equivalentes, referindo-se à maneira como o contínuo respectivo foi tomado, diferenciando os casos "adjacentes"do casos "centrados".

Tabela 2.1 - Bandas fotométricas usadas para representar as linhas de emissão dos espectros analisados. O "Modo"se refere à como o contínuo relevante foi tomado para o cálculo de EWs, entre bandas centradas ou adjacentes.

Banda	O VI	He II	Hβ	N V	O VI	O VI
λ Central (Å)	3811	4686	4861	4945	5290	5584
Largura (Å)	120	70	100	60	110	100
Modo	Cent.	Adj.	Adj.	Cent.	Cent.	Cent.

Capítulo 3

Resultados e Análise

Em primeiro lugar, verificou-se que as medidas de EW obtidas através do método de fotometria sintética, para as linhas de He II, Hβ, O VI e N V do conjunto de espectros das CBSS, representou de forma satisfatória os valores obtidos com medidas interativas, que possuem maior nível de confiança, mas são de difícil aplicação em grandes volumes amostrais. Desta forma, as bandas escolhidas para representar regiões de linhas e contínuos foram validadas. Vale destacar que as aproximações de EW por fotometria sintética nas WRs e VCms não foram tão boas quanto para as CBSS. Este resultado era esperado e não representa um grande problema para a análise aqui proposta, pois espectros de interesse, i.e. semelhantes aqueles de CBSS, devem ter suas linhas de emissão bem mensuradas pelo método.

Análises das relações de intensidade entre as linhas espectrais descritas foram tomadas, com o uso de diagramas de diagnóstico espectral, inicialmente comparando os resultados obtidos para as CBSS, as WRs e as VCMs. Com isso, mostrou-se que a relação da linha de He II (em 4686 Å) com a de O VI 5290Å é a mais adequada para separar as CBSS das WRs, enquanto a relação He II contra Hβ é a melhor para distinguir-se entre CBSS e VCMs. Desta forma as duas relações de EWs citadas se tornaram as mais promissoras à serem utilizadas na busca por novas candidatas à classe.

Um total de 390.152 espectros foram processados e analisados pelo método descrito no capítulo 2, pertencentes aos diversos grupos descritos em tal seção. Para cada um destes grupos separados, foram construídos diagramas de diagnóstico espectral, com foco nas relações de linhas apontadas como proeminentes para a distinção de CBSS, para uma visualização dos comportamentos espectrais encontrados.

A Figura 3.1 apresenta um diagrama de diagnóstico espectral de He II contra Hβ,

resultante da análise do conjunto de VCs do LAMOST. As medidas obtidas para as CBSS são dispostas para comparação. Observa-se que as VCs, em grande maioria, encontram-se distantes de alcançar uma relação de $HeII/H\beta > 2$, separando-se consideravelmente das CBSS, que apresentam um comportamento típico de condições ionizantes mais intensas. Uma candidata poderia ser identificada através deste gráfico caso se sobrepusesse à região demarcada pelas CBSS, contudo isso só ocorre na parte de menores EWs do diagrama, na qual erros associados à aproximação feita com as bandas fotométricas são mais propensos à dominar os valores vistos. Enquanto isso, na parte de maiores EWs do diagrama, os pontos que mais se aproximaram da região de interesse estavam associados à espectros com características marcantes de VCMs, sistemas nos quais a intensidade de ionização de fato se mostra maior em relação às VCs.

Um diagrama referente aos alvos ROSAT do SDSS é apresentado na Figura 3.2, novamente as CBSS são colocadas como comparativo. Neste caso a relação entre He II e O VI (5290Å) é estudada, vale notar que a comparação das demais linhas de emissão com a de He II é preferencial, devido à sua estabilidade, em âmbitos de presença e alta intensidade, nos espectros que nos interessam. Percebe-se que os objetos em análise se distribuem em torno do "ponto zero"do gráfico, estando distantes dos valores de He II apresentados pelas CBSS.

Espectros "de interesse"foram separados usando filtros sobre os valores de EWs calculados, buscando por valores e relações de intensidade típicos das CBSS, para que fossem analisados individualmente à olho. Em maior parte, os espectros resultantes destas filtragens se apresentaram bastante distintos do esperado, sendo exemplos de mal representações geradas pelo posicionamento das bandas fotométricas quando características espectrais distintas das esperadas estavam presentes, como bandas de absorção, linhas de emissão distintas, etc.

Contudo, durante a análise do conjunto de espectros referente ao catálogo de VCs do LAMOST, foi encontrada uma candidata proeminente à classe das CBSS. Denominada ZTF04, suas medidas de larguras equivalentes se mostraram bastante semelhantes àquelas associadas às linhas de QR And, tendo sido possível verificar a emissão em O VI e N V, além da relação $HeII/H\beta > 2$. A Figura 3.3 mostra o espectro óptico de ZTF04, com as linhas de emissão usadas para sua identificação demarcadas. Apesar da semelhança em especial com o espectro de QR And, principalmente na linha Hβ que apresenta uma carac-

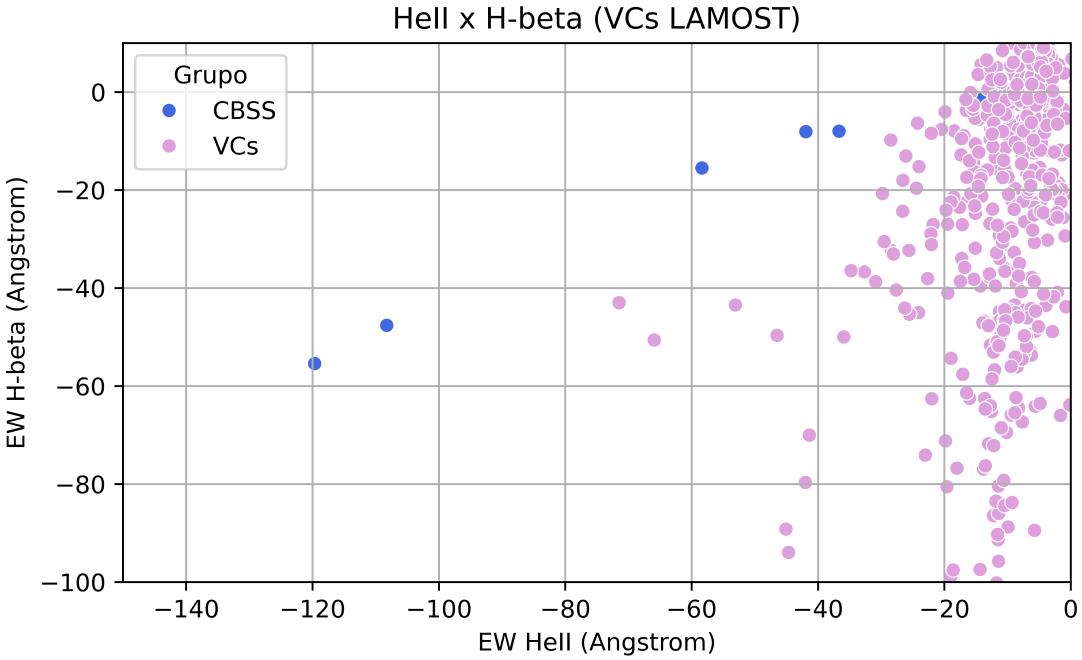

Figura 3.1: Diagrama de diagnóstico espectral de He II contra Hβ, comparando as VCs do LAMOST às CBSS.

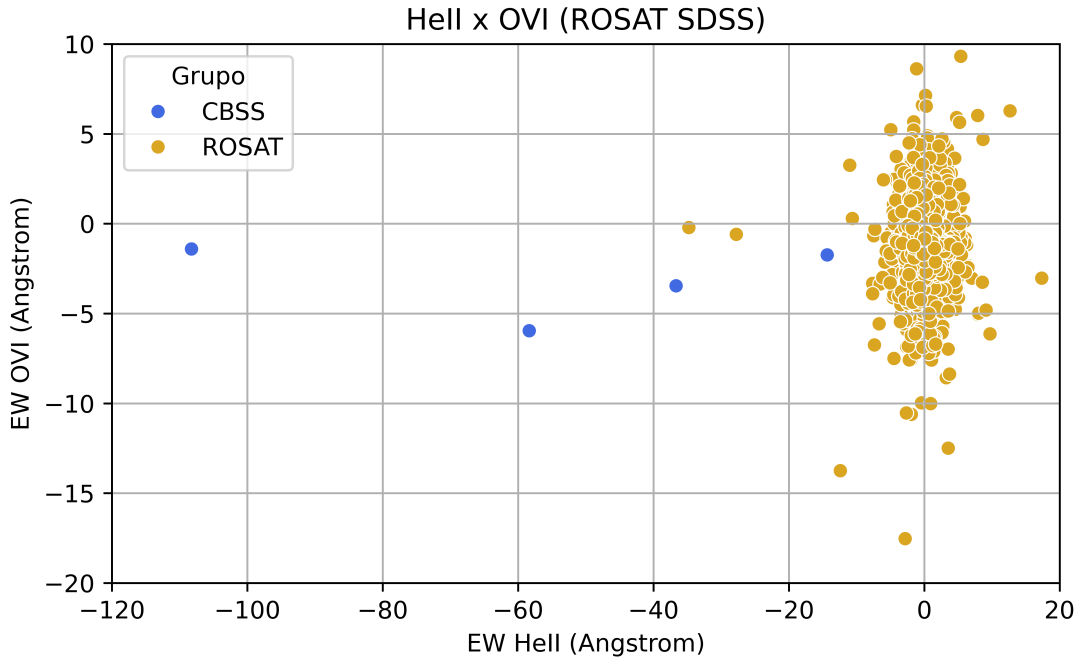

Figura 3.2: Diagrama de diagnóstico espectral de He II contra O VI (5290Å), comparando os alvos ROSAT do SDSS às CBSS.

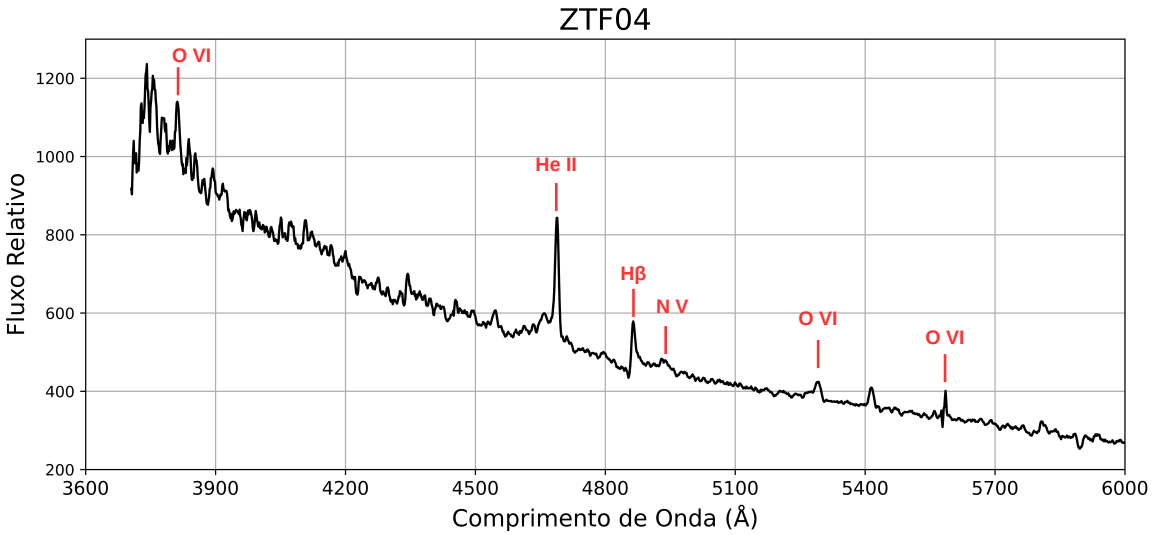

Figura 3.3: Espectro óptico de ZTF04 usado para sua identificação como candidata, com linhas de emissão relevantes demarcadas.

terística semelhante a um perfil P Cygni, a candidata possui linhas de emissão associadas ao complexo de Bowen (C III e N III) na asa azul da linha de He II (4686Å), assim como ocorre visivelmente nos espectros de WX Cen e V Sge.

O objeto identificado como ZTF04 havia recebido a classificação de CV por meio da pipeline de redução e classificação de espectros do LAMOST (Sun *et al.*, 2021), por conta de suas linhas de emissão, contudo esta classificação não levou em conta o fato de que uma relação de He II / Hβ como a vista em ZTF04 não é comum sequer para as VCMs, que possuem maiores níveis de ionização, enquanto é uma característica comum para o modelo aceito para as CBSS.

O *Zwicky Transient Facility* (ZTF) executou fotometria em duas bandas distintas da região visível da luz da candidata, estes dados foram utilizados para classificá-la como uma binária eclipsante de contato (tipo W UMa) devido à sua curva de luz, com determinação de um período de variação de $10,85$ horas (Chen *et al.*, 2020). Contudo, ZTF04 apresenta uma magnitude visível de ~ 16 *mag*, e possui distância determinada pelo Gaia DR3 como $5.8^{+1.9}_{-1.1}$ kpc, sendo sua posição no plano galáctico (com apenas 7 graus de inclinação), esta fonte se mostra como intrinsecamente luminosa, característica que não é comum para estrelas W UMa.

Foi possível extrair fotometria de observações do *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (TESS) para obter uma curva de luz com resolução temporal de 200 segundos de

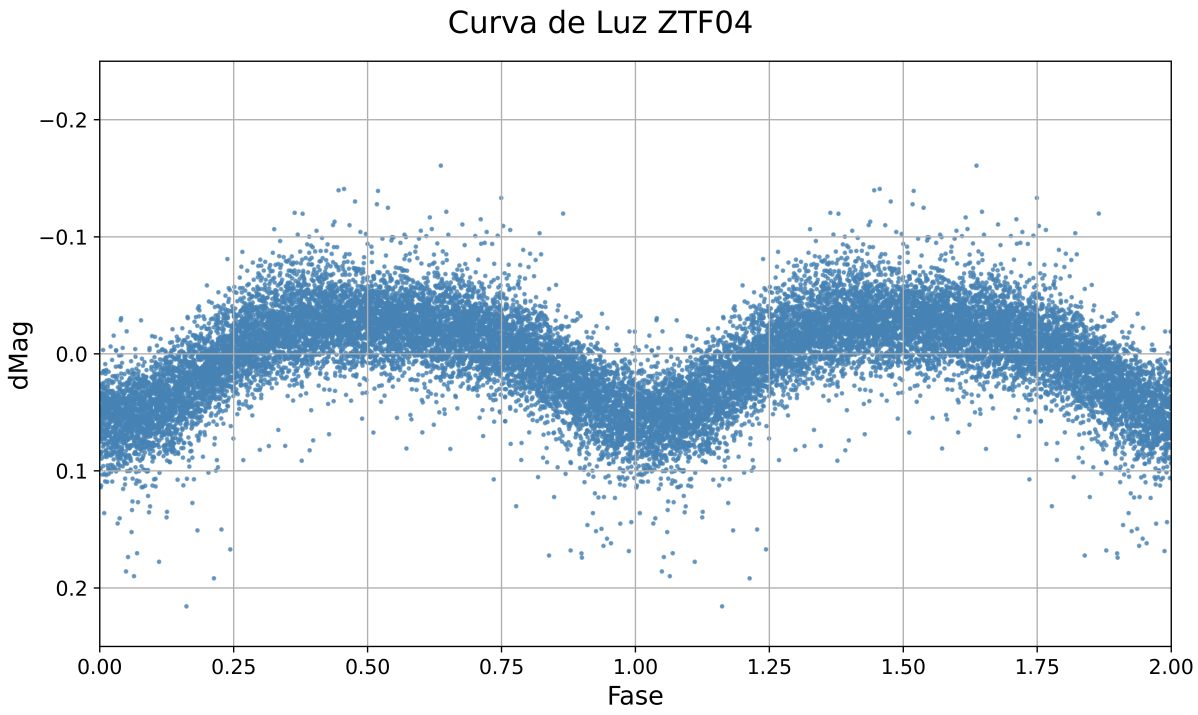

Figura 3.4: Curva de luz dobrada em fase de ZTF04, construída com dados do setor 59 do TESS.

ZTF04, uma diferença positiva em relação à cadência da ordem de várias horas dos dados fotométricos nas curvas de luz do ZTF. Apresentada na Figura 3.4, esta curva de luz possibilitou uma análise mais minuciosa do comportamento variável da candidata. O periodograma obtido para ela apontou $5,42$ horas como o período de variação mais provável para o objeto, o que faz com que a curva dobrada em fase aponte para uma variação característica de iluminação em um sistema binário, com 0.2 *mag* de amplitude.

Não foi encontrada nenhuma identificação em raios-x para ZTF04, porém existem observações no ultravioleta distante executadas pelo satélite *Galaxy Evolution Explorer* (GALEX) que apontam para uma SED (*Spectral Energy Distribution*) dominada pela componente de raios-x e UV, o que estaria de acordo com o demonstrado para as CBSS por Stecchini *et al.*, (2025), principalmente levando em consideração o $E(B-V) \sim 0,7$ aceito para a localização do objeto, que indica um severo avermelhamento na distribuição espectral dele.

Foram também identificados outros espectros promissores em meio aos dados analisados, nos quais as linhas de alta ionização não apareceram em emissão, mas que continham relações de EWs de $HeII/H\beta > 2$, algo que não é comum para outras classes espectrais. Tais casos não foram considerados como candidatas diretas às CBSS, mas foram separados

para análises mais detalhadas no futuro. Vale citar que há espectros de CBSS registrados com estas características, contudo não foram considerados como o formato canônico aqui apresentado, sendo possivelmente associados aos estados baixos destas fontes.

Outro caso notável durante as análises conduzidas foi o do espectro da nebulosa planetária Abell 30, reconhecido como integrante da classe rara das "*Born-Again Nebulae*", com um sistema binário em órbita próxima, de período estimado em 1.06 dia, em seu interior (Jacoby, Hillwig & Jones, 2020). Estes objetos são tipificados por possuírem nebulosas ao seu redor, com nós de gás ejetados posteriormente à nebulosa principal, e intensa radiação ionizante em seus interiores. É proposto que sistemas binários interagentes sejam os responsáveis por estas características, contudo mais estudos são necessários para que se defina quais são as componentes, e os exatos processos físicos, que permitiriam o cenário descrito. O espectro de Abell 30 foi identificado como tendo as características típicas das CBSS, incluindo as linhas de alta ionização em emissão, com exceção da presença de H.

Capítulo 4

Conclusões

A aplicação de fotometria sintética possibilitou o cálculo de larguras equivalentes em larga escala, considerando as linhas de emissão típicas dos espectros ópticos das CBSS. Foi determinado que as relações de intensidade da linha de He II (4686Å) com as linhas de Hβ (4861Å) e O VI (5290Å) são capazes de distinguir as CBSS das classes com espectros mais semelhantes aos delas, as Wolf-Rayets e as Variáveis Cataclísmicas Magnéticas. Sendo assim, os índices fotométricos desenvolvidos para estas linhas espectrais foram os principais utilizados na busca por candidatas à classe de interesse.

O método desenvolvido foi utilizado para processar e analisar 390.152 espectros no total, provenientes de diversos subgrupos estabelecidos nas bases de dados dos *surveys* espectroscópicos LAMOST e SDSS. As larguras equivalentes deduzidas para estes espectros foram utilizadas em filtragens, para selecionar aqueles com índices mais semelhantes ao esperado para as CBSS.

Foi encontrada uma candidata promissora, denominada ZTF04, seu espectro apresentou todas as características típicas da classe. Uma análise de dados fotométricos obtidos pelo TESS indica um período mais provável de 5,42 horas para este sistema variável, a curva de luz dobrada em fase para tal período revela características comuns de variação orbital, sendo possível propôr que este é um sistema binário de curto período, de acordo com o modelo das CBSS. Ademais, a identificação do GALEX de ZTF04 aponta para a possibilidade de uma SED dominada pela componente do UV e dos raios-x moles, especialmente considerando o intenso avermelhamento ao qual o objeto está sujeito em sua posição distante, e dentro do plano galáctico.

Em seguida, planeja-se aplicar o método de busca desenvolvido em conjuntos maiores de espectros, uma vez que sua eficácia foi validada pelo resultado com ZTF04. O próximo

grupo de a ser analisado será o catálogo estelar do *Dark Energy Spectroscopic Instrument* (DESI), que conta com mais de 4 milhões de espectros. Volume que será passível de ser analisado dada a melhoria na eficiência do processo de análise descrita. Posteriormente, espera-se que os catálogos estelares completos do SDSS e do LAMOST também sejam utilizados na busca.

Outra vertente para a continuação deste trabalho será focada em estudar ZTF04 em maior profundidade. Para verificar uma possível emissão em raios-x, foi efetuada uma proposta de observação para o turno de 2026 do satélite XMM-Newton. Também está planejada uma proposta para o observatório Gemini North no período 2026B, para a coleta de espectrofotometria de maior resolução, em relação aos dados disponíveis, de ZTF04, permitindo a aplicação de análise por Tomografia Doppler nas linhas de emissão de seu espectro. Por fim, será feita uma análise de sua SED, com a maior completude possível, para comparações com os modelos utilizados em trabalhos recentes sobre as CBSS.

Referências Bibliográficas

Beuermann K., Reinsch K., Barwig H., Burwitz V., de Martino D., Mantel K. H., Pakull M. W., Robinson E. L., Schwope A. D., Thomas H. C., Truemper J., van Teeseling A., Zhang E., Discovery of a galactic supersoft binary X-ray source., A&A, 1995, vol. 294, p. L1

Bhattacharya P., Supersoft X-Ray Sources: A Review Study, Journal of Applied and Fundamental Sciences, 2017, vol. 3, p. 30

Chen X., Wang S., Deng L., de Grijs R., Yang M., Tian H., The Zwicky Transient Facility Catalog of Periodic Variable Stars, ApJS, 2020, vol. 249, p. 18

Cowley A. P., Schmidtke P. C., Crampton D., Hutchings J. B., CAL 87: an Eclipsing Black Hole Binary?, ApJ, 1990, vol. 350, p. 288

Di Stefano R., Rappaport S., The Derived Population of Luminous Supersoft X-Ray Sources, ApJ, 1994, vol. 437, p. 733

Diaz M. P., Time-resolved Spectroscopy of V Sagittae, PASP, 1999, vol. 111, p. 76

Diaz M. P., Steiner J. E., The Nova-like Variable WX Centauri and the V Sagittae Phenomenon, AJ, 1995, vol. 110, p. 1816

Echevarría J., Diego F., Martínez A., Ruiz E., Salas L., Gutiérrez L., Enríquez R., Spectrophotometry of cataclysmic variables with the Mepsicron system., Rev. Mexicana Astron. Astrofis., 1989, vol. 17, p. 15

Greiner J., Catalog of supersoft X-ray sources, New A, 2000, vol. 5, p. 137

Jacoby G. H., Hillwig T. C., Jones D., Abell 30 - A binary central star among the born-again planetary nebulae, MNRAS, 2020, vol. 498, p. L114

Kahabka P., van den Heuvel E. P. J., Luminous Supersoft X-Ray Sources, ARA&A, 1997, vol. 35, p. 69

Mennickent R. E., Matsumoto K., Diaz M., Infrared spectroscopy of the supersoft X-ray source MR Vel, A&A, 2003, vol. 402, p. 315

Pakull M. W., Motch C., Bianchi L., Thomas H. C., Guibert J., Beaulieu J. P., Grison P., Schaeidt S., Optical/UV counterpart of the supersoft transient X-ray source RX J0513.9-6951 in the Large Magellanic Cloud., A&A, 1993, vol. 278, p. L39

Patterson J., Kemp J., Shambrook A., Thorstensen J. R., Skillman D. R., Gunn J., Jensen L., Vanmunster T., Shugarov S., Mattei J. A., Shahbaz T., Novak R., Two Galactic Supersoft X-Ray Binaries: V Sagittae and T Pyxidis, PASP, 1998, vol. 110, p. 380

Stecchini P. E., Jablonski F., Diaz M. P., Oliveira A. S., D'Amico F., Palivanas N., Spectral energy distribution analysis of the supersoft X-ray source CAL 87: Multiwavelength constraints, Journal of High Energy Astrophysics, 2026, vol. 50, p. 100467

Steiner J. E., Cieslinski D., Jablonski F. J., Williams R. E., The photometric and spectroscopic characterization of the V Sagittae star V617 Sagittarii, A&A, 1999, vol. 351, p. 1021

Steiner J. E., Diaz M. P., The V Sagittae Stars, PASP, 1998, vol. 110, p. 276

Sun Y., Cheng Z., Ye S., Ding R., Peng Y., Zhang J., Huo Z., Cui W., Wang X., Shi J., Lin J., Wu C., Li L., Feng S., Yu Y., Ma X., Li X., Liu C., Zhang Z., Shao Z., A Catalog of 323 Cataclysmic Variables from LAMOST DR6, ApJS, 2021, vol. 257, p. 65

Torres-Dodgen A. V., Massey P., Spectrophotometry of Wolf-Rayet Stars: Intrinsic Colors and Absolute Magnitudes, AJ, 1988, vol. 96, p. 1076

van den Heuvel E. P. J., Bhattacharya D., Nomoto K., Rappaport S. A., Accreting white dwarf models for CAL 83, CAL 87 and other ultrasoft X-ray sources in the LMC., A&A, 1992, vol. 262, p. 97

Warner B., Cataclysmic Variable Stars. vol. 28, Cambridge Astrophysics Series, 1995

Yungelson L., Livio M., Truran J. W., Tutukov A., Fedorova A., A Model for the Galactic Population of Binary Supersoft X-Ray Sources, ApJ, 1996, vol. 466, p. 890