

1.04.02 - Astronomia / Astrofísica Estelar

OBSERVAÇÃO DA EXPLOSÃO DE 2011 DA NOVA RECORRENTE T PYXIDIS

Florence I. H. de Almeida¹, Alessandro Ederoclite², Larissa Takeda³, Marcos Diaz⁴

1. Estudante do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP)

2. Pesquisador do Centro de Estudos de Física do Cosmos de Aragón - Orientador

3. Pós-doutoranda do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (IAG-USP) - Departamento de Astronomia

4. Professor e pesquisador do IAG-USP – Departamento de Astronomia

Resumo

T Pyx é uma nova recorrente que tem sofrido erupções quase que regularmente a cada 20 anos até atingir uma longa quiescência entre 1967 e 2011. Apresentamos dados de uma campanha espectroscópica que durou um ano e utilizamos dois espectrógrafos cobrindo os regimes óptico e infravermelho próximo: VLT/X-Shooter e SOAR/Goodman.

O objetivo deste trabalho é deduzir as propriedades físicas de T Pyx. Para isso é preciso estimar a extinção do meio interestelar e a distância.

Utilizando diferentes metodologias, obtemos um valor de extinção de 0,25 mag que está de acordo com os resultados anteriores da literatura. Também mostramos uma análise preliminar dos parâmetros físicos tais como temperatura e densidade eletrônicas, velocidade de expansão do envoltório e granulação do material, a fim de estimar a massa ejetada de hidrogênio.

Palavras-chave: CVs; extinção; massa ejetada

Apoio financeiro: Programa Unificado de Bolsas da Universidade de São Paulo (PUB-USP)

Trabalho selecionado para a JNIC: IAG-USP

Introdução

Novas Clássicas são explosões termonucleares que ocorrem em sistemas binários produzindo um aumento súbito e significativo da sua luminosidade.

São variáveis cataclísmicas, ou seja, são formadas por uma anã branca - chamada de estrela primária - e uma estrela que ainda se encontra na sequência principal - chamada de estrela secundária. Nesses sistemas há transferência de massa da secundária para a primária na forma de um disco de acreção através do lóbulo de Roche (para mais detalhes, ver Bode & Evans 2008). Quando as condições de temperatura e pressão na base da camada acumulada são suficientes, o gás excedente é expelido.

Embora sejam fenômenos periódicos (Shara et al., 1986), o tempo entre cada explosão é da ordem de dezenas de milhares de anos, dada sua taxa de acreção de massa. Portanto, só é possível estudar um ciclo completo através de Novas Recorrentes que ocorrem em uma escala de tempo comparável a uma vida humana.

T Pyx ocupa um espaço especial em sua categoria: ela apresenta o período orbital mais curto e a taxa de declínio mais lenta das Novas Recorrentes. Ela explodiu seis vezes desde sua descoberta em 1890 e é, portanto, considerada uma das Novas mais bem estudadas. Esperava-se que explodisse no final dos anos 80, mas foi somente em 2011 que outra explosão foi detectada. Além disso, ela se encaixa em uma classe espectral híbrida, uma vez que seus espectros mostram tanto linhas de He/N quanto de Fe II em uma ordem nunca antes detectada. Assim, é possível estudar com detalhes sem precedentes os processos físicos que ocorrem durante a explosão de uma Nova.

O objetivo deste trabalho é deduzir as propriedades físicas de T Pyx e entender se a massa da anã branca aumenta ou diminui durante um ciclo. Se sua massa aumentar e atingir o limite de Chandrasekhar, poderá explodir em uma supernova do tipo Ia.

Metodologia

Este trabalho baseia-se em 89 espectros obtidos nos três braços do espectrógrafo VLT/X-Shooter (UBV, VIS e NIR) e nas grades de dispersão azul e vermelho do SOAR/Goodman. Esses dados espectroscópicos tem uma resolução razoavelmente elevada. Os espectros produzidos pelo VLT/X-Shooter são referentes ao primeiro ano de evolução da explosão, cobrindo tanto a fase inicial quanto nebular: a resolução varia entre 20000 (quando o objeto atingiu seu brilho máximo) e 5000 (nos estágios menos

brilhantes). Já, os que foram gerados pelo SOAR/Goodman cobrem os três primeiros meses que sucederam a erupção e o mês de novembro de 2011, época de transição para a fase nebular. Nesse caso, a resolução é de 2800.

Considerando as formas irregulares das linhas e a falta de modelos teóricos que sirvam de comparação, usa-se a ferramenta *splot* do IRAF (Image Analysis and Reduction Facility) para medir as linhas de emissão (e algumas de absorção). O IRAF permite fazer ajustes gaussianos (usando o comando *k-k*) para obter o comprimento de onda, o fluxo, a FWHM - do inglês *Full Width at Half Maximum*, isto é, a largura da linha na altura correspondente à metade do valor máximo do fluxo, também conhecida como largura à meia altura - e a largura equivalente das linhas (esta última usando o comando *e-e*).

Por fim, para usar os valores corrigidos dos fluxos das linhas necessárias, subtrai-se a extinção adequada dos espectros usando a função *deredden* do IRAF. No total, mais de 5400 linhas de emissão e absorção foram medidas. Todos os gráficos e cálculos foram realizados através de programas desenvolvidos em Python exclusivamente para este trabalho.

Resultados e Discussão

A fim de compreender a evolução no tempo do material em expansão, analisamos tanto o gás opticamente espesso como o fino. Podemos deduzir as velocidades de expansão do material opticamente espesso através do estudo dos perfis P Cygni das principais linhas de emissão presentes nos estágios iniciais da explosão.

Optou-se por analisar as linhas de O I $\{\lambda\lambda 7773, 8446 \text{ \AA}\}$ que são particularmente intensas quando T Pyx atinge o seu brilho máximo, assim como explicado em Williams (2012). Nota-se que ambas as linhas apresentam um comportamento parecido com apenas um perfil P Cygni em todos os dias prévios ao brilho máximo atingido pela Nova e mais de um em datas posteriores. A presença de mais de um perfil P Cygni implica que diferentes velocidades de expansão são observadas para a mesma linha de emissão no mesmo dia. Em valor absoluto, as velocidades estão aumentando com o tempo.

Por outro lado, observamos as principais linhas de recombinação de Balmer nos estágios mais avançados da explosão para obter o mesmo parâmetro, desta vez para o gás opticamente fino. As velocidades calculadas utilizando H α , H β e H δ diminuem com o tempo enquanto as calculadas com H γ aumentam.

Há uma série de métodos listados em Ederoclite et al. (2006) para determinar a extinção que dependem de diferentes linhas de emissão que foram geradas na explosão ou então linhas de absorção devido à matéria interestelar presente na linha de visada. Mais precisamente, reproduzimos os procedimentos adotados em Williams (1994), Munari & Zwitter (1997) e Friedman et al. (2011). As extinções do meio interestelar calculadas de acordo com cada método são comparadas com os resultados encontrados em estimativas anteriores disponíveis na literatura. Os valores encontrados usando bandas interestelares difusas, sódio e hélio fornecem extinções de 0,1 a 0,2 mag superior ao resto. Considerando que a maioria dos valores apresentados na literatura flutuam entre 0,25 e 0,35 mag, optamos por adotar uma extinção de 0,25 mag. Dentre as distâncias encontradas, a publicada por Gaia Collaboration et al. (2021) tem o menor erro. Por este motivo, determinamos os parâmetros físicos com base neste valor: 2880 +/- 230 parsecs.

Também com base em Ederoclite et al. (2006), deduzimos uma profundidade óptica (τ) de 5,2. Este processo foi realizado numericamente, em Python. Em seguida, obteve-se uma temperatura eletrônica de 4750 K, que se faz necessária para estimar a abundância de oxigênio e hidrogênio do material ejetado. Para isso, foca-se na fase nebular da Nova, isto é, cerca de seis meses após a erupção no caso de T Pyx, que é quando surgem linhas proibidas nos espectros. Usando os valores corrigidos dos fluxos das linhas H α e H β , das linhas proibidas [N II] $\lambda\lambda 6548, 6584 \text{ \AA}$, [O III] $\lambda\lambda 4959, 5007 \text{ \AA}$ e [O I] $\lambda\lambda 6300, 6364 \text{ \AA}$, calculamos cerca de $10^{-8} M_{\odot}$ para o oxigênio e $6 \times 10^{-7} M_{\odot}$ para o hidrogênio. Estes valores foram obtidos com base nos conceitos de física nebular explicados em Williams (1994) e Osterbrock & Ferland (2006).

Conclusões

A precisão e acurácia deste tipo de análise depende principalmente da identificação e medição de linhas. Assim, uma boa resolução espectral e uma boa relação sinal/ruído são essenciais para obter dados mais confiáveis.

De forma geral, constata-se uma diminuição dos valores dos fluxos das linhas de emissão com o tempo porque após chegar no seu brilho máximo, a densidade do envoltório de T Pyx diminui por conta da sua expansão. A presença de múltiplos perfis P Cygni em uma mesma linha de emissão indica a existência de sistemas diferentes de gás em expansão, e não uma camada única e homogênea. Ademais, é coerente sugerir que as pequenas flutuações observadas nos fluxos das linhas H α e H β nos primeiros três meses que precederam a explosão são devidas a esses perfis P Cygni que provocam uma diminuição nos valores intrínsecos dos fluxos. Porém, no estágio mais avançado das observações, perfis P Cygni já não são tão comuns. No caso de H α , as flutuações nessa época são mais provavelmente devidas à contaminação com o dupletto [N II] $\lambda\lambda 6548, 6584 \text{ \AA}$, provocando um leve aumento do fluxo total medido. Contaminações entre linhas são esperadas, o que explica a maioria dos valores superestimados de extinção e a tendência crescente da velocidade de expansão do material opticamente fino obtida com H γ .

Por outro lado, comparar os valores de extinção com resultados da literatura permitiu investigar mais a fundo sobre os valores excessivamente elevados fornecidos por alguns dos métodos empregados. No caso do

sódio, seguiu-se o procedimento empregado em Munari & Zwitter (1997). Ao reavaliar as medidas feitas observou-se um problema nos valores das larguras equivalentes devido à sensibilidade do comando e-e do IRAF na escolha do contínuo que se revelou significativo o suficiente para fornecer valores finais de extinção com cerca de 0,1 mag a menos que o estimado anteriormente. Quanto às bandas difusas interestelares, existem dois fatores a serem levados em consideração: por um lado, assim como no caso do sódio, é possível que tenham tido problemas ao realizar as medidas e acertar a posição do contínuo. Porém, os resultados apresentados em Friedman et al. (2011) que relacionam a extinção e a largura equivalente das linhas podem ter sido obtidos a partir de uma amostragem pequena de linhas de visada. Em outras palavras, essa relação não é válida para todas as direções nas quais se observa dentro da Galáxia.

Comparamos os parâmetros físicos com os resultados apresentados em Ederoclite et al. (2006) e constatamos que todos são compatíveis, exceto as massas de oxigênio e hidrogênio que são de 5 a 10 ordens de magnitude menores para T Pyx. A discrepância nos valores das massas de oxigênio e hidrogênio são coerentes uma vez que V5114 Sgr é uma nova clássica, implicando que a acreção de matéria leva milhares de anos a cada ciclo, diferente de T Pyx onde o processo leva apenas algumas décadas. Por outro lado, como os processos físicos por trás de ambas as explosões são os mesmos, parâmetros como a profundidade óptica, a temperatura eletrônica, e as velocidades de expansão são compatíveis entre si.

Finalmente, em relação à massa da anã branca, usamos a taxa de acreção de massa deduzida por Selvelli et al. (2008) e descobrimos que os resultados apontam para uma possível perda de massa durante um ciclo e que, portanto, T Pyx não explodirá em uma supernova do tipo Ia.

Referências bibliográficas

- Bode, M. F. & Evans, A. 2008, **Classical Novae**, Vol. 43
 Ederoclite, A., Mason, E., Della Valle, M., et al. 2006, *A&A*, 459, 875
 Friedman, S. D., York, D. G., McCall, B. J., et al. 2011, *ApJ*, 727, 33
 Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2021, *A&A*, 649, A1
 Munari, U. & Zwitter, T. 1997, *A&A*, 318, 269
 Osterbrock, D. E. & Ferland, G. J. 2006, **Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei (University Science Books)**
 Selvelli, P., Cassatella, A., Gilmozzi, R., & González-Riestra, R. 2008, *A&A*, 492, 787
 Shara, M. M., Livio, M., Moffat, A. F. J., & Orio, M. 1986, *ApJ*, 311, 163
 Williams, R. 2012, *The Astronomical Journal*, 144, 98
 Williams, R. E. 1994, *ApJ*, 426, 279