



Trabalho final

Variáveis Cataclísmicas

A. Izcson

10 de Julho de 2022

ABSTRACT

Variáveis cataclísmicas são estrelas binárias nas quais uma das componentes é uma estrela da sequência principal ou do ramo das gigantes que transfere massa à outra componente, que é uma anã branca. Esses sistemas apresentam uma variedade de fenômenos - mais notavelmente *novas* e *novas-anãs* - que os tornam laboratórios ideais para se estudar uma gama de fenômenos físicos e a testar modelos de estrutura e evolução estelar. Nesse artigo vamos explorar os diversos tipos de binárias cataclísmicas, sua observação e as explicações físicas para os fenômenos que são observados.

1. Introdução

Variáveis cataclísmicas são estrelas que sofrem um aumento repentino de brilho, voltando em seguida para um estado quiescente. Esses aumentos de brilho são súbitos e irregulares, podendo ocorrer em escalas de tempo de alguns dias a muitas décadas, sendo que em muitos casos a recorrência ainda não foi observada, apenas se supõe teoricamente.

Estrelas *novas* são conhecidas há muitos séculos, tendo sido registradas especialmente por astrônomos chineses, que as chamavam de “*estrelas-convidadas*”. Na Europa, onde imperava o dogma de que os céus seriam imutáveis, foi apenas durante o renascimento que tais estrelas passaram a ser registradas. As *novas* registradas por Tycho e por Kepler (que

posteriormente se soube tratarem-se de *supernovas*) são exemplos disso.

Foi, porém, apenas com o advento da espectroscopia e de imageamento com alta resolução temporal que começamos a ter uma compreensão física das novas e a classificá-las de modo mais assertivo, em especial dividindo as *novas* das muito mais energéticas *supernova* e posteriormente subdividindo as novas em subclasses.

A descoberta de variações Doppler no espectro dessas estrelas permitiu, por volta dos anos 60, que se estabelecesse a natureza física desses sistemas: todos eles consistem em sistemas binários com transferência de massa entre as componentes. Apesar dessa característica em comum, esses sistemas apresentam uma enorme variedade.

2. Características básicas

De maneira bastante superficial, variáveis cataclísmicas consistem em estrelas binárias próximas o suficiente para que o efeito de maré se torne relevante e faça com que as órbitas se circularizem e as velocidades de rotação das estrelas se sincronizem, de modo que cada estrela apresente a mesma face à outra. Nesses sistemas, a estrela mais massiva evoluirá mais rapidamente, se tornando uma anã branca. A outra estrela, conforme evolui e deixa a sequência principal, expande o seu envelope, que passa a preencher o seu lobo de Roche. Assim, se inicia um fluxo de matéria (primordialmente Hidrogênio) através da cúspide do lobo de Roche (que é o ponto de Lagrange L1, ou seja, o ponto de sela no potencial gravitacional diretamente entre as duas estrelas). Esse material flui em direção à anã branca e forma um disco de acreção ao redor dela. O ponto de impacto do material em queda no disco se aquece, formando um ponto quente e luminoso na periferia do disco. O diferencial de velocidade entre órbitas sucessivas do material no disco faz com que esse se aqueça, dissipando energia sob a forma de radiação. Assim, o material espirala em direção à anã branca, gradualmente se depositando na superfície da estrela.

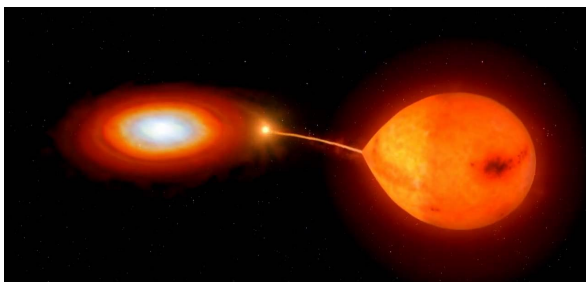


Imagem 1: Visão esquemática típica de uma binária cataclísmica

Essa transferência de massa afeta as órbitas das estrelas: Caso a estrela doadora de gás seja a mais massiva do sistema, o gás transferido estará portanto se movendo para mais longe do

baricentro do sistema. Assim, por conservação do momento angular, a distância entre as estrelas irá diminuir. Isso, por sua vez, aumenta o efeito de maré, o que diminui o tamanho do lobo de Roche. Assim, a taxa de transferência de massa irá aumentar ao longo do tempo, de forma acelerada. Caso a razão das massas seja oposta, porém, o inverso ocorre, e é possível até que a transferência de massa cesse.

A acreção de gás no disco e o seu espiralamento em direção à anã branca são fenômenos instáveis, que causam alteração de luminosidade do sistema em escalas algumas vezes tão curtas quanto alguns segundos.

O acúmulo de gás tanto no disco quanto na própria superfície da anã branca pode gerar instabilidade: em alguns casos, o gás se acumula no disco até que este atinja uma densidade crítica, quando então o gás é despejado de maneira abrupta sobre a superfície da anã branca - o que dá origem às novas-anãs. Em outros casos, o material acumulado na superfície da anã branca pode produzir uma explosão termonuclear, o que dá origem às novas clássicas.

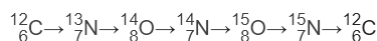
Essas instabilidades são a principal característica observacional dessa classe de estrelas: elas passam por longos períodos de quiescência (na qual ainda assim se observa variabilidade significativa em escalas de tempo curtas) seguidos por abruptos e imprevisíveis aumentos de brilho.

Vamos explorar as diferentes classes desses objetos e os seus mecanismos de ação nas seções seguintes.

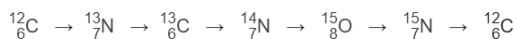
3. Classificação

As variáveis cataclísmicas podem ser divididas de modo grosseiro em duas grandes categorias: Aquelas nas quais os processos de geração de energia são primariamente oriundos pela fusão nuclear, e aquelas nas quais a principal fonte de

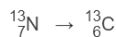
de uma estrela “normal” para uma anã branca. Esse material, primordialmente hidrogênio, se acumula sobre a superfície da anã branca, formando um envelope. A força gravitacional na superfície da anã branca é tal que esse hidrogênio se encontra em estado de degenerescência de elétrons, quando a sua pressão não mais está relacionada com a sua temperatura e a sua equação de estado passa a ser: $P \propto \rho^\alpha$. Conforme mais material é depositado sobre a anã branca pelo disco de acreção, sua massa aumenta até um valor crítico (quanto mais massiva a anã branca mais baixo é esse valor crítico) no qual o hidrogênio sofre fusão nuclear através do ciclo *hot-CNO*. Esse ciclo apenas pode ocorrer em locais com condições extremas de temperatura e pressão, e é caracterizado pela taxa de captura de prótons superior à taxa de decaimento beta, produzindo o ciclo:



ao invés do CNO convencional:



Note que a etapa:



está ausente no ciclo *hot-CNO*, uma vez que há a captura de um próton antes que haja um decaimento beta. Esse ciclo possui dependência da temperatura da ordem de T^{18} . Assim que o processo de fusão se inicia, a temperatura do envelope se eleva. Este, por sua vez, não pode expandir-se, reduzindo a temperatura, pois é composto de matéria degenerada. A temperatura se eleva exponencialmente, elevando a taxa de fusão, em uma reação de *runaway thermonuclear*. Esse processo se mantém até que a temperatura atinja a temperatura de Fermi, da ordem de $350 \cdot 10^6 \text{K}$, quanto a degenerescência dos elétrons se encerra. Assim, a equação de estado do envelope volta à forma convencional $P \propto \rho T$ e o envelope então se expande em resposta à sua

temperatura descomunal. A velocidade de ejeção, como deduzimos pelo espectro, pode atingir a ordem de mil quilômetros por segundo, superior à velocidade de escape da anã branca. O envelope, assim, é ejetado. (Munari, 2012)

A anã branca, porém, não é destruída. Em pouco tempo o sistema retornará ao seu estado quiescente: o disco de acreção será restabelecido e o hidrogênio voltará a se depositar sobre a superfície da anã branca. Se especula que novas clássicas sejam sistemas com explosões recorrentes, mas com períodos seculares. Ainda não foi observada a recorrência de uma nova clássica. Há, porém, uma subclasse de estrelas que se assemelham a novas em sua fase pós-eruptiva, mas que nunca foram observadas em erupção. São provavelmente antigas novas em estado quiescente.

b. Novas recorrentes

Uma nova recorrente é, como o nome sugere, uma nova que foi observada em *outburst* múltiplas vezes. Essas novas foram observadas em *outburst* com períodos variando entre um e 98 anos. Note que esse limite superior reflete essencialmente o início de observações telescópicas sistemáticas por volta do início do séc. XX. Não há motivo para supor que essas novas diferem qualitativamente das novas clássicas em seus mecanismos de ação. Porém, elas diferem de forma quantitativa: Os curtos períodos das novas recorrentes sugerem que suas anãs brancas são mais massivas - o que torna o campo gravitacional em sua superfície mais intenso - e que as taxas de fluxo de massa entre as estrelas são mais elevadas. Assim, o elevado campo gravitacional faz com que menos material seja requerido para se atingir as condições de fusão do Hidrogênio, e a elevada taxa de transferência de massa faz com que esse limite seja atingido ainda mais rapidamente.

As taxas de transferência de massa elevadas sugerem que a estrela doadora não mais esteja na sequência principal. Assim, como sub-gigante ou gigante vermelha, o seu envelope se expande de modo a preencher o seu lobo de Roche, que extravasa para a anã branca.

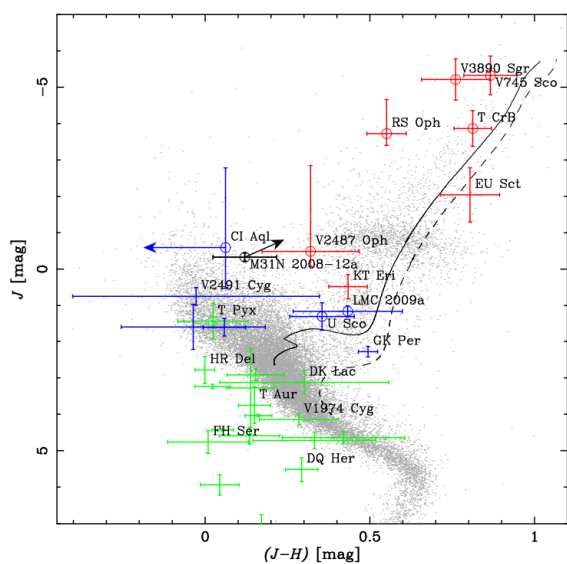


Imagem 4: diagrama HR de algumas novas. Pontos com círculo denotam novas recorrentes. Pontos vermelhos denotam doadoras gigantes vermelhas, pontos azuis denotam doadoras sub-gigantes e pontos verdes denotam doadoras da sequência principal (Darnley, 2020)

O diagrama HR acima parece suportar essa conclusão: se nota que as novas recorrentes são justamente aquelas mais afastadas da sequência principal, enquanto que nenhuma das estrelas da sequência principal foi observada produzindo novas recorrentes. (Darnley, 2020)

Se especula que novas recorrentes possam ser progenitoras de supernovas tipo Ia, uma vez que SN Ia são causadas pela explosão de anãs brancas em sistemas binários que atingem a massa de Chandrasekhar. Há, porém, duas questões ainda em aberto que impedem uma resposta definitiva: a primeira é se há novas recorrentes em número suficiente para explicar as taxas observadas de supernovas Ia. A segunda é se os *outbursts* das novas recorrentes deixam parte do material depositado na superfície da anã branca de modo que essa possa gradualmente aumentar a sua massa até o limite

de Chandrasekhar. Simulações indicam que os outbursts onde há a fusão do Hidrogênio depositam os produtos da fusão - Hélio - sobre a superfície da anã branca: a anã branca gradualmente aumenta a sua massa. Porém, surge um novo problema: o He acumulado também pode atingir uma massa crítica na qual ele sofre fusão através do processo triplo- α . Simulações sugerem que esses flashes de Hélio são violentos o suficiente para não apenas ejetar toda a massa depositada, mas também parte da massa original da anã branca. Assim, esse parecia um empecilho intransponível. Simulações recentes, porém, indicam que apesar de que os flashes de hélio iniciais de fato reduzem a massa da anã branca, eles também promovem um efeito secundário de aquecer a anã branca, especialmente as suas camadas exteriores. Esse aumento de temperatura reduz a degenerescência dos elétrons, de forma que após alguns flashes de hélio a sua fusão possa ocorrer em estado *quasi* estacionário - sem nem mesmo produzir explosões. Assim, a anã branca pode, nessas condições, aumentar a sua massa até o limite de Chandrasekhar (Hillman, 2016)

Observações em raios-X parecem confirmar esse cenário: Inicialmente identificadas pela missão ROSAT, fontes de *super soft* X-rays, ou seja, de raios-X de baixa energia (entre 0.09 to 2.5 keV) parecem estar associadas a esses objetos. Radiação nessa gama de energias é facilmente absorvida pelo meio interestelar, de modo que a maioria desses objetos é observada em outras galáxias. Para anãs brancas relativamente massivas (0,7 a 1,2 M_{sol}), as luminosidades da fusão nuclear e a temperatura parecem estar em acordo com as observações do ROSAT. (Kahabka, 2002).

Esses sistemas também podem ocorrer em anãs brancas fazendo fusão de Hidrogênio em determinadas circunstâncias, como por exemplo em sistemas com taxas de acreção elevadas o suficiente para que a anã branca esteja envolta não por um disco de acreção, mas por uma

atmosfera similar à de uma gigante vermelha. A gama de circunstâncias em que pode haver fusão estável na superfície de uma anã branca, porém, ainda não está completamente estabelecida.

c. Novas anãs

Novas anãs são o primeiro subgrupo de binárias cataclísmicas cujos *outbursts* tem como principal fonte de energia o potencial gravitacional da componente compacta do sistema.

Esse tipo de sistema produz *outbursts* de menor intensidade do que as novas recorrentes, e com frequência maior. Há uma enorme variabilidade entre as novas anãs, com diversas subclasses de propriedades distintas, nomeadas a partir de suas estrelas prototípicas (Lasota (2001) afirma que: “*Que as estrelas protótipo ainda pertençam às classes que elas definiram é uma das poucas coisas tranquilizadoras que alguém pode dizer sobre novas anãs*”). Dentre as subclasses, podemos destacar como as mais comuns (Hameury, 2019)

- **U-Gem** são as novas anãs típicas: tem *outbursts* da ordem de ~ 5 magnitudes com duração de uma a duas semanas, e com recorrência a cada três meses, aproximadamente.
- **Z-Cam** alternam períodos em que se comportam como novas anãs U-Gem com períodos de quiescência de muitos meses, nos quais o sistema tem seu brilho reduzido em aproximadamente uma magnitude.
- **SU-UMa** exibem *super-outbursts*, durando até dez vezes mais tempo do que *outbursts* normais. Os *super-outbursts* ocorrem intercalados com sequências de alguns *outbursts* normais.

O mecanismo primordial dos *outbursts* das novas anãs é a instabilidade do disco de acreção. Desenvolvido a partir dos anos 1970, esse modelo propõe - de forma altamente simplificada - que a partir de um disco de acreção no estado quiescente, o disco vai gradualmente acumulando matéria (especialmente nas proximidades de seu limite interior) até que se atinja uma densidade crítica. Quando o disco se torna, assim, instável, uma grande quantidade de matéria é rapidamente despejada na superfície da anã branca, liberando grandes quantidades de energia. Enquanto que o modelo original proposto nos anos 70 oferecia poucos detalhes além dessa breve descrição, o mecanismo que serviria de gatilho para a instabilidade permanecia desconhecido. Nas décadas subsequentes foi gradualmente estabelecido o papel da viscosidade nessa instabilidade.

A viscosidade exerce um papel importante no processo de acreção. Caso o gás no disco não tivesse alguma viscosidade, suas partículas descreveriam órbitas keplerianas sem jamais espiralar em direção ao centro. A viscosidade, porém, dissipa energia e permite que o momento angular seja transferido para a periferia do disco e o material espirale para o centro.

Considere, porém, que o fluxo de matéria através do disco seja F_m , e que seja determinado pela viscosidade do disco. Tipicamente, F_m será distinto de \dot{M} , o fluxo de matéria que é transferido da estrela doadora. Assim, se $F_m < \dot{M}$, o disco aumentará de massa. Se considerarmos que F_m é determinado pela viscosidade do disco, temos um aparente paradoxo: se a viscosidade for uma função monotonicamente decrescente da densidade, então um aumento da massa do disco diminuiria a viscosidade, o que por sua vez diminuiria F_m . O disco, assim, ganharia cada vez mais massa sem que nunca se atingisse uma situação de equilíbrio. Caso o oposto seja

verdade, porém, se viscosidade for uma função monotonicamente crescente da densidade, então a viscosidade aumentaria com a massa do disco, aumentando por sua vez F_m , chegando a uma situação em que $F_m = \dot{M}$. Esse equilíbrio é estável, e a estrela jamais produziria *outbursts*.

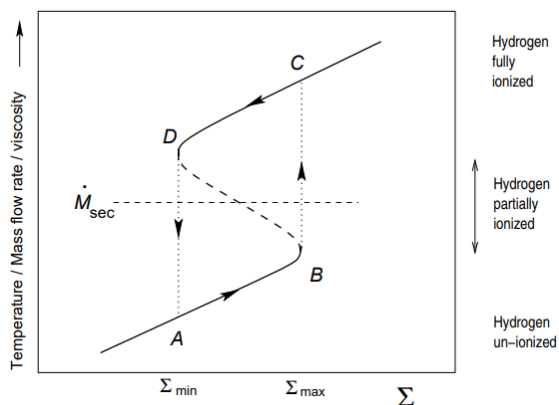


Imagem 5: curva S mostrando a dependência da viscosidade com a densidade superficial do disco (Smith, 2007)

A solução encontrada foi a compreensão de um mecanismo físico através do qual a dependência da viscosidade, e portanto de F_m , não seja linear. Na imagem acima F_m está plotada contra a densidade superficial do disco, Σ . Os tramos AB e CD representam a situação descrita anteriormente na qual a viscosidade é uma função monotonicamente crescente da densidade. Esses tramos representam, como vimos, equilíbrios estáveis. A curva BD, porém, é instável. Suponhamos que \dot{M} esteja na região instável (\dot{M}_{sec} na imagem acima). Considere também que o sistema esteja inicialmente no tramo AB. Nesse caso, $F_m < \dot{M}$, o disco aumentará de massa até atingir o ponto B. Aqui, ele já não pode seguir uma trajetória de equilíbrio. O disco segue acumulando massa e a temperatura aumenta. Ao atingir uma certa temperatura, o sistema sofre uma mudança de fase e salta para o ponto C no gráfico. Aqui, $F_m > \dot{M}$ e o disco diminui de massa, despejando grandes quantidades de gás sobre a anã branca. O sistema segue a trajetória estável do tramo

superior até o ponto D, quando não mais pode reduzir a sua densidade superficial. A temperatura do disco cai até que haja uma súbita transição para o ponto A e o ciclo assim se repete. (Smith, 2007)

Mas qual seria o mecanismo físico responsável por esse comportamento da curva S? Hoje é amplamente aceito que a instabilidade térmica responsável pela mudança de fase é causada pela variação de opacidade do hidrogênio quando ele se torna ionizado (Hameury, 2019). Assim, é possível reinterpretar a curva S através das condições de ionização do hidrogênio. O tramo AB representa o regime frio, no qual o hidrogênio está em sua forma neutra ou molecular, o tramo CD representa o regime quente, no qual o hidrogênio se encontra ionizado, e o tramo intermediário, instável. Esse modelo, conhecido como DIM (Disk Instability Model) se tornou o mais aceito na literatura

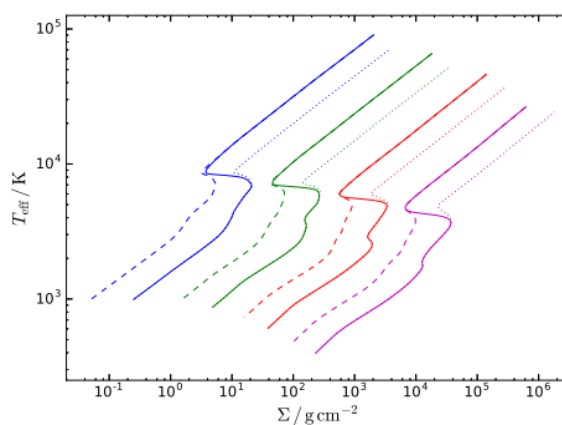


Figura 6: resultados do modelo DIM, mostrando diversas curvas S calculadas para uma anã branca de massa 1.35 M_{\odot} e a diversos raios do disco (Bollimpalli, 2018)

A imagem acima mostra a concordância, de forma qualitativa, do modelo físico proposto com a curva S descrita anteriormente. Apesar de que esse modelo tem ganhado complexidade nos últimos anos, com a consideração de efeitos de radiação no disco, turbulência e o seu efeito na viscosidade, transporte convectivo, etc. que fogem do escopo dessa breve revisão, se pode ver a concordância com o que é observado.

Esse modelo permite também compreender o comportamento dos objetos de classe Z-Cam. Os sistemas Z-Cam seriam aqueles nos quais a taxa de transferência de massa \dot{M} está logo abaixo ao ponto D da curva S. Após alguns outbursts, a anã branca se torna mais aquecida e irradia mais a estrela doadora. Isso aumenta a taxa \dot{M} , colocando o sistema no tramo estável CD. Após um tempo consideravelmente longo a anã branca volta a sua temperatura de quiescência, reduzindo \dot{M} para justo abaixo do ponto D, reiniciando o ciclo.

O modelo também explica os *super soft X-Ray sources*, que parecem fazer a fusão em regime constante. Esses sistemas seriam aqueles nos quais \dot{M} está acima de D.

Para explicar a classe SU-UMa, porém, é necessário introduzir parâmetros adicionais, envolvendo efeitos de maré e sincronização das órbitas do disco com o período orbital das estrelas. Essas estrelas apresentam *superoutbursts*, que ocorrem com menor frequência que *outbursts* normais, mas com maior regularidade.

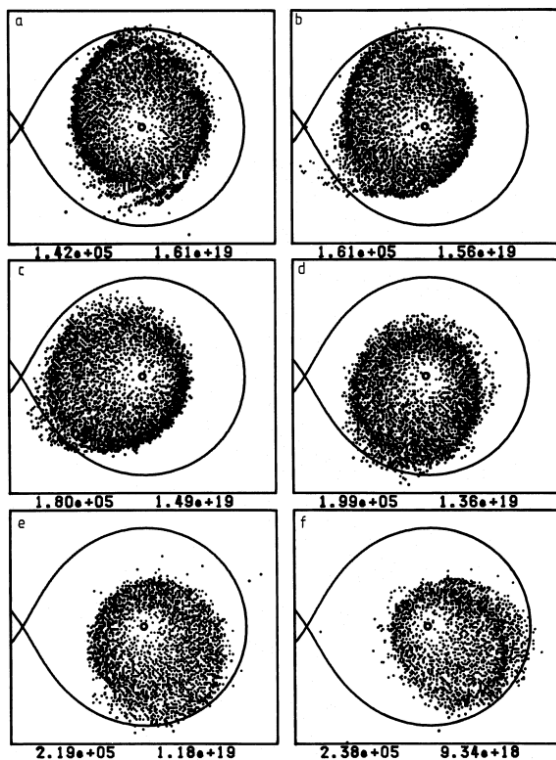


Figura 7: disco de acreção exibindo distorção por efeito de maré e instabilidade (Whitehurst, 1988)

Os outbursts normais são explicados pelo mesmo mecanismo descrito anteriormente, com exceção que nem todo o material adicional acumulado no disco é despejado sobre a anã branca. Assim, o disco ganha massa conforme vai produzindo *outbursts*. O disco, assim, aumenta seu diâmetro externo conforme passam os ciclos, até que forças de maré da estrela doadora começam a distorcê-lo. O disco se torna instável quando se estabelece uma ressonância de 3:1 e a massa acumulada é então despejada sobre a anã branca, produzindo o *superoutburst*. (Whitehurst, 1988)

d. Polares (AM Herculis)

Outrora conhecidas pela sua estrela protótipo AM Herculis, as Polares são sistemas nos quais a anã branca é altamente magnética. O forte magnetismo da anã branca produz duas diferenças fundamentais em relação aos sistemas discutidos até o momento: o período de rotação da anã branca se torna sincronizado com seu período orbital, de modo que ela sempre apresente a mesma face à estrela doadora, e a formação de um disco de acreção é suprimida.

Ao invés disso, a matéria proveniente da estrela doadora flui ao longo das linhas do campo magnético da anã branca, acelerando a grandes velocidade pelo campo gravitacional da anã branca e impactando uma região pequena próxima a um dos polos. O gás em queda sofre um choque normal antes de atingir a superfície da anã branca. Esse choque eleva a temperatura do gás até valores próximos à sua temperatura de estagnação, e há emissão de raios X de alta energia (*hard X-rays*). A superfície onde há a acreção de material também é iluminada pelos *hard X-rays* e se aquece, emitindo *soft X-rays*. Como a fonte dos raios X é pequena (praticamente pontual) é frequente que esses sistemas exibam eclipses. (Harrop-Allin, 1999)

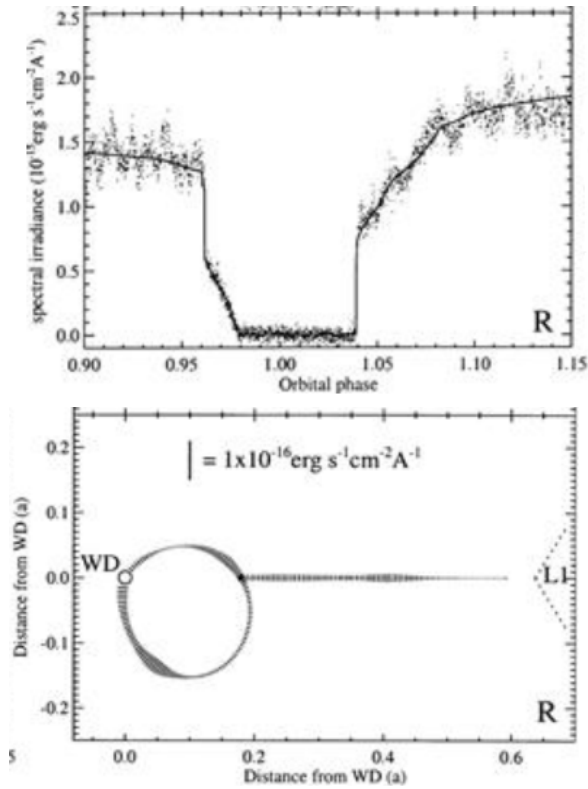


Figura 8: no painel superior, se nota um eclipse ocasionado pela ocultação do ponto de impacto do fluxo de acreção na anã branca. A linha contínua representa o modelo ilustrado no painel inferior, onde se nota o ponto de Lagrange L1 à direita, o fluxo de acreção em queda balística (linha horizontal) até ser capturado pelas linhas do campo da anã branca e impactar sobre ela (Harrop-Allin, 1999)

4. Discussão

Nos capítulos anteriores não descrevemos senão uma grosseira pincelada sobre as diversas classes de variáveis cataclísmicas. Há diversas subclasses mais, com efeitos distintos e interessantes. Podemos destacar algumas, como as VY Sculptoris, estrelas que diminuem de brilho e em raramente produzem *outbursts*; AM Canum Venaticorum, que são sistemas formados por duas anãs brancas que trocam Hélio; SW Sextantis, que possuem o disco de acreção em estado estacionário e não exibem *outbursts*, dentre outras.

Existem também sistemas nos quais ambas as estrelas preenchem os seus lobos de Roche: o sistema pode ter a aparência de um amendoim

ou até mesmo de uma gigante vermelha, com um núcleo duplo. Alguns desses sistemas terminam em um *merger* das duas estrelas, o que produz uma nova vermelha luminosa (*luminous red novae*), da qual a estrela mais conhecida é V838 Monocetotis.

Essas variáveis são laboratórios extremos nos quais distintos efeitos físicos se manifestam, sendo portanto ideais para se testar modelos de evolução estelar em condições bastante desafiadoras.

Esse é um campo no qual astrônomos amadores ainda podem ter um papel bastante significativo: o comportamento pouco previsível dessas estrelas faz com que os profissionais, com tempo limitado ao telescópio, dificilmente possam fazer um acompanhamento adequado desses objetos. Organizações amadoras como a AAVSO (*American Association of Variable Star Observers*) acumulam dezenas de milhões de observações de estrelas variáveis, uma rica base de dados que é amplamente usada em pesquisas profissionais. Enquanto que a descoberta de outbursts em breve será feita, em sua maioria, por novos telescópios de grande *entendue*, como o *Vera Rubin Observatory* atualmente em construção, os amadores vão manter o seu papel de monitorar essas estrelas com alta resolução temporal ao longo de diversos anos. A contribuição dos amadores e profissionais nesse ramo da pesquisa tem sido frutífera e o futuro promete que esses laços se estreitem ainda mais.

Referências

SMITH, R.C. *Cataclysmic variables*.

[arXiv:astro-ph/0701654v1](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0701654v1), 2007

ROBINSON, L.E. *The structure of cataclysmic variables*. Annual Rev. Astron. Astrophys., Vol. 14, p. 119-142, 1976

MUNARI, U. *Classical and Recurrent Novae*, JAAVSO Volume 40, 2012

WALKER, R. *Spectral Atlas for Amateur Astronomers: A Guide to the Spectra of Astronomical Objects and Terrestrial Light Sources*, Cambridge University Press, 2017

DARNLEY, M. J. *Accrete, Accrete, Accrete... Bang! (and repeat): The Remarkable Recurrent Novae*, arXiv:1912.13209v2, 2020

HILMANN, Y. et al., *Growing White Dwarfs to the Chandrasekhar Limit: The Parameter Space of the Single Degenerate SNIa Channel*, ApJ 819 (2016)

<https://arxiv.org/abs/1508.03141>

KAHABKA, P., *Super soft sources*, (2002)

<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0212037v1>

HAMEURY, J.M. *A review of the disc instability model for dwarf novae, soft X-ray transients and related objects*, (2019)

arXiv:1910.01852v1

LASOTA, J.P. *The disc instability model of dwarf-novae and low-mass X-ray binary transients*, (2001)

<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0102072>

BOLLIMPALLI, D.A. et al., *Disc instabilities and nova eruptions in symbiotic systems: RS Ophiuchi and Z Andromedae*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 481, Issue 4, December 2018, Pages 5422–5435

WHITEHURST, R. *Numerical simulations of accretion disks. I – Superhumps – A tidal phenomenon of accretion disks*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 232:35–51, 1988.

HARROP-ALLIN, M.K. *Indirect imaging of the accretion stream in eclipsing polars — II. HU Aquarii*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 308, Issue 3, September 1999, Pages 807–817