

Curso sobre introdução à Anãs Brancas Acretantes

Departamento de Física da Universidade Federal de Sergipe

Responsável: Prof. Raimundo Lopes de Oliveira Filho

Junho- Julho 2020

Aluna: Vitória Fernanda Belo Campos

1. Compare as estrelas doadoras de massas em Variáveis Cataclísmicas e em Simbióticas e responda: é factível pensar que um sistema simbiótico pode evoluir para um sistema do tipo CV? Justifique sua resposta.

Foi estudada a diferença entre CV e Simbiótica, processos envolvendo uma anã branca acretante e uma estrela companheira. Diferentes condições revelam diferentes possibilidades acontecendo.

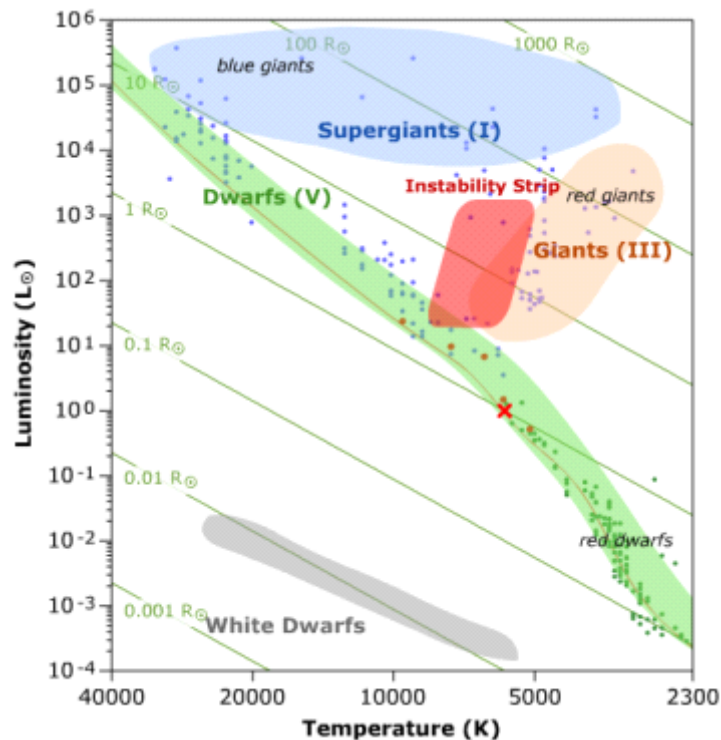
VARIÁVEL CATACLÍSMICA (CV): Caracterizada por binária entre um objeto compacto aka anã branca - final evolutivo de estrelas intermediárias com degenerescência de elétrons no núcleo - e uma companheira na sequência principal- estado evolutivo da estrela que está fazendo fusão nuclear de Hidrogênio - com massa entre 0.08 Massa Solar e 0.4 Massa Solar. Em geral, a companheira possui massa menor do que a do Sol - anã vermelha.

Em sistemas **simbióticos**, cada observação mostra fases acontecendo quando a estrela companheira está ou não numa evolução de envelope comum. Sabemos que a companheira é uma gigante vermelha tardia, a órbita do sistema está se contraindo a medida que transfere massa e expande-se mais no lóbulo de Roche, numa dinâmica instável. A anã branca pode não suportar toda a matéria de uma vez, formando o envelope. Geralmente possui período orbital entre dias e anos.

Podemos evoluir uma gigante vermelha tardia para uma anã vermelha? Sabemos que o inverso não é possível, pela idade necessária de evolução que leva bilhões de anos, ou seja, como observadores não poderíamos ver algo que ainda não aconteceu desde o início do universo observável.

Analisando a proposta vemos a contradição em afirmar que uma estrela que já passou pela sequência principal e tende para seu final evolutivo, volte a estar na sequência principal, já que uma anã vermelha ainda está produzindo energia via cadeia próton-próton na fusão nuclear do hidrogênio em hélio. Portanto, o núcleo da gigante vermelha que está repleto de hélio não poderia ser externalizar uma vez que caminha para uma evolução onde a estrela fica totalmente convectiva, e por isto não levaria o material mais pesado para camadas externas.

A conclusão defende a impossibilidade de evolução de sistemas simbióticos para cataclísmicas variáveis.



Fonte: University of Nebraska-Lincoln

2. Apresente o conceito de corpo negro e duas possíveis fontes de emissão em anãs brancas acretantes que podem ser aproximadas por este tipo de modelo.

Foi teorizado o modelo de corpo negro sendo um objeto hipotético que exibe perfeita absorção (ou emissão) de radiação eletromagnética incidente em todos os comprimentos de onda. Desta forma, em todas as direções a máxima radiação possível para a temperatura do corpo é emitida, após a termalização do corpo e redistribuição uniforme de energia, num espaço com densidade relativamente alta.

Possui um espectro contínuo numa distribuição conhecida como Maxwell-Boltzmann. No estudo corrente, a exemplo: analisamos tal efeito em regiões opticamente espessas no disco de acreção. Importante salientar que é um modelo ideal (simples absorvedor), naturalmente os acontecimentos são mais complexos do que o proposto pela existência de um gradiente de temperatura, não uniformidade do sistema - entre outros.

Em CVs é observado o modelo de coluna de acreção para explicar como a matéria é acretada na superfície. Nesta situação, a fotosfera da estrela emite raio x fraco e ultravioleta, aproximando-se de um corpo negro devida termalização via coluna. É possível ver onde há choque e contínuo, segundo espectroscopia.

Em Simbióticos temos um evento de casca queimante ocorrendo com variadas intensidades nas estrelas gigantes vermelhas tardias. Foi visto no artigo de referência que para velocidades do vento entre 10-20km/s, o vento pode oferecer uma densidade espacial de

10^{22} cm^2 , sendo suficiente para esconder uma emissão super fraca (tipo α - varia entre 0.1 - 2 keV na banda energética). A emissão via casca aproxima-se de corpo negro.

Encontramos também raio x fraco e emissão UV proveniente da região opticamente espessa da camada limite. Essas emissões são diretamente relacionadas como o corpo negro é apresentado na espectroscopia.

3. Qual é a natureza (processo físico de emissão) da emissão dominante de fótons com energia acima de 1 keV em anãs brancas acretantes?

Explique-a.

Sabemos que não é possível enxergar partes separadas do objeto, então a distribuição energética vista deve comportar modelos coexistindo, onde não temos certeza da natureza do objeto analisado. Por isso, o espectro apresenta vários modelos como corpo negro, lei de potência e *bremsstrahlung*, dando explicação física ao que acontece num ambiente onde há gradiente de temperatura. Usualmente entendemos o fenômeno *bremsstrahlung* como desvio da trajetória ou desaceleração de elétrons devida interação com um próton.

Nesta banda energética, acima de 1 keV, é possível encontrar colisões entre elétrons e íons normalmente, resultando em emissão de raio x forte, através de *bremsstrahlung* ou *freamento*. Pode redirecionar radiação para anã branca e gerar emissão em raio x fraco. A radiação proveniente deste fenômeno vem da diferença de energia na forma de onda eletromagnética.

Há uma natureza térmica fina associada a energia da linha do Fe tipo He que ajusta o espectro usando modelos e emissão térmica derivado do plasma excitado via colisão, incluindo o *continuum* de *bremsstrahlung* e linhas discretas.

4. Apresente dois métodos de busca por sistemas do tipo Variáveis Cataclísmicas.

A detecção dos sistemas em estudo ocorre a partir de vários métodos. Entre as possibilidades, discorro sobre *survey* em raio x e variabilidade óptica.

O base de um *survey* envolve a exposição de todo o céu observável ou uma região específica utilizando diferentes bandas energéticas, neste caso dentro do raio x. Ao longo do acúmulo de dados - catálogo - este modelo ajudou o desenvolvimento teórico para CVs magnéticos.

A partir da variação óptica fotométrica, retiram-se dois parâmetros que serão utilizados para ajustar um modelo com caminho aleatório e curva de luz de cada objeto presente no campo estudado. São eles: as escalas de tempo características da variabilidade e amplitudes de direção em escalas de tempo curtas.

5. Em termos de evolução, apresente qualitativamente como evoluem o período orbital e a distância entre as estrelas de Variáveis Cataclísmicas

em função do tempo.

Sabemos que as interagentes de variáveis cataclísmicas consistem em uma anã branca e uma estrela na sequência principal. Os dados leem discos de acreção transferindo matéria estavelmente - a menos de *outbursts*. Possui um período orbital e semi-eixo maior que obedecem a 3 lei de Kepler, variando entre 1 - 10h e aproximadamente o tamanho do sistema Terra-Lua, respectivamente.

Entende-se a evolução do período orbital e seu envolvimento com a distância binária em função do tempo, como resultado de uma perda de momento angular e contração da distância, via dois procedimentos: frenagem magnética ou radiação de gravitação. Existe um *gap* temporal entre os períodos orbitais, entre sistemas polares acontecendo geralmente abaixo de 2h e intermediárias polares acima de 3h.

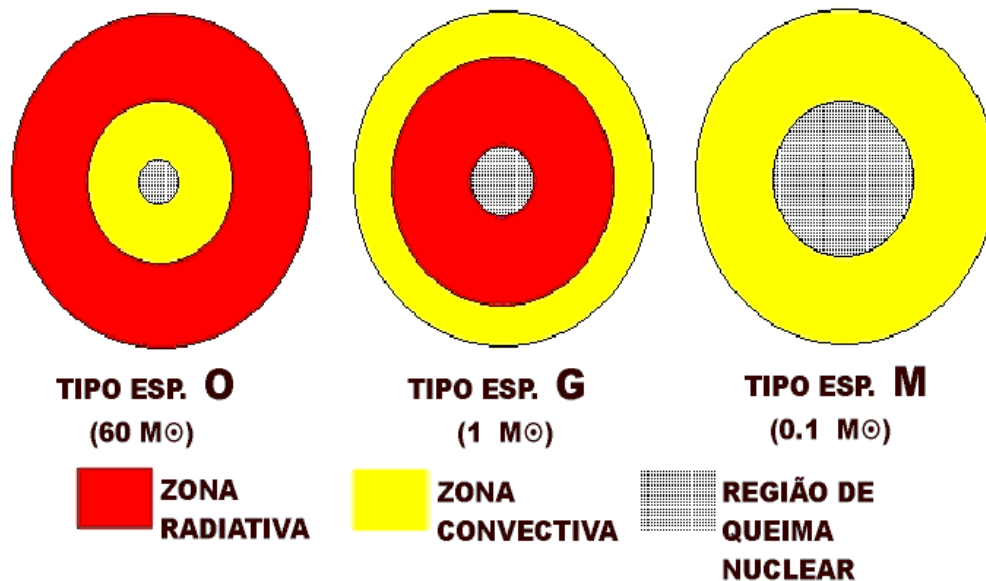
A **radiação gravitacional** reina em polares. A teoria atrás desta radiação envolve a famosa teoria da relatividade geral - o espaço-tempo consiste em geometria e distorção de um tecido elástico devido a objetos massivos. Imaginamos uma curvatura sendo periodicamente moldada da mesma forma, isto gera ondas bem estabelecidas. Conforme o tempo passa, parte da energia do sistema é liberada ao ambiente via onda. Portanto, radiação gravitacional. Em CVs, esta perda é baixa comparada a sistemas envolvendo buracos negros ou estrelas de nêutrons ou os dois.

Tal fenômeno perde energia potencial e por isto diminui seu momento angular. Evoluem para um choque muito longínquo, onde o período orbital fica cada vez menor, sua distância diminui e velocidade orbital aumenta.

A **frenagem magnética** acontece na estrela companheira. Ocorre devida aceleração que partículas ionizadas - vento estelar - recebem após serem obrigadas, pela presença do campo magnético, a rodar em conjunto com a secundária. Quando é ejetado com alta velocidade atravessa tal campo e perde momento angular, mas perde pouca massa.

Devido a proximidade das interagentes, existe uma considerável força de maré atuante, que por sua vez busca sincronizar o período orbital do sistema com a rotação da secundária. Sabendo que esta perde momento angular via *braking magnetic*, há um torque associado a tentativa de equilíbrio do sistema pela força de maré, onde há transferência de momento orbital para a companheira.

ESTRUTURA INTERNA DE ESTRELAS DA SEQÜÊNCIA PRINCIPAL



(1)

O intervalo temporal evolui na sequência: o período orbital chega a aproximadamente 3 horas, daí a secundária se torna totalmente convectiva, o frenamento magnético se reduz pois não há tanta partícula ionizada saindo da estrela, a secundária deixa de preencher o lóbulo de Roche, reduzindo a transferência de massa. O período orbital segue diminuindo através da radiação gravitacional e ao atingir 2 horas a secundária volta a preencher o lóbulo de Roche voltando a transferir matéria.

6. Como podemos estimar a massa da anã branca acretante a partir de espectroscopia em raios X, e qual é a base física para que se faça assim? Sustente suas afirmações.

Para obter a massa da anã branca acretante sem entrar no domínio da relação massa-raio, é utilizado sistema eclipsante binária. Estes orbitam em um plano que cruza a linha de visada, possibilitando medir a variação de brilho que acontece via uma passar em frente da outra. Combinando medições utilizando fotometria e espectroscopia estima-se a massa.

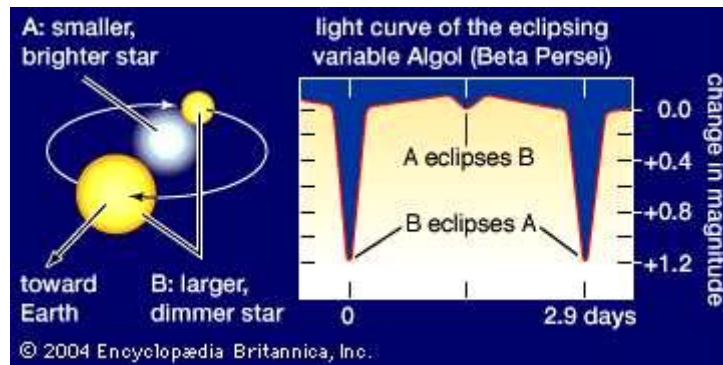
A forma do eclipse reflete sua duração e largura da estrela que oculta. Com a duração estimamos o período orbital e a partir do avermelhamento das linhas espectrais, obtemos o raio da anã.

O desvio para o vermelho gravitacional acontece pela interação da luz e da curvatura feita pela massa/raio da anã - a gravidade neste objeto é 350 mil vezes superior à Terra. Relacionando a quantidade de desvio com a 3ª lei obtemos uma relação entre o raio da anã branca e a inclinação binária.

Com a espectroscopia calcula-se a semi-amplitude de velocidade radial de cada estrela,

devido efeito doppler espectral. Por fim, dada velocidade radial, inclinação da órbita e Kepler: estima-se a massa da anã branca.

O ajuste combinado da curva de luz e as velocidades radiais das estrelas, junto com a lei de Kepler e a relação de mudança gravitacional, resultam na massa e o raio sem precisar recorrer à relação massa-raio.

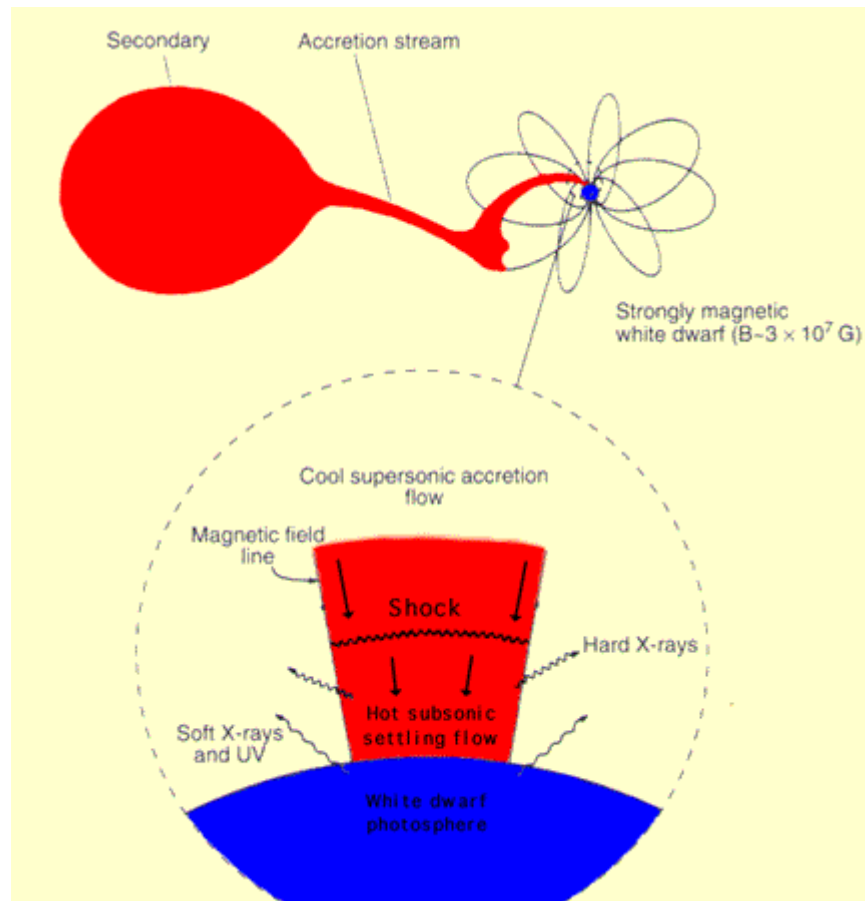


(2)

7. O que se pode dizer em termos de existência de disco de acreção em sistemas dos tipos Polar Intermediária e Polar? Explique.

POLAR: não é formado disco, matéria segue linha do campo magnético que faça menor percurso. Sofre pressão magnética e espirala ao redor das linhas graças interação do campo elétrico da partícula ionizada e o campo magnético da estrela, recebe força de Lorentz perpendicular ao seu movimento - para chocar-se no polo magnético preferencial - num modelo conhecido como coluna de acreção, após a matéria transbordar o lóbulo de Roche da estrela companheira, viajando em queda livre. Há também um ponto quente formado na região do ponto interno de Lagrange. Neste acontecimento, é possível atingir velocidades consideráveis, fortemente observados em espectros ópticos.

Analisando o resultado da força temos o desvio espiralado da trajetória e uma aceleração - segundo Newton, que gerará radiação conhecida como ciclotrônica - altamente polarizada e forte no óptico e no infravermelho.

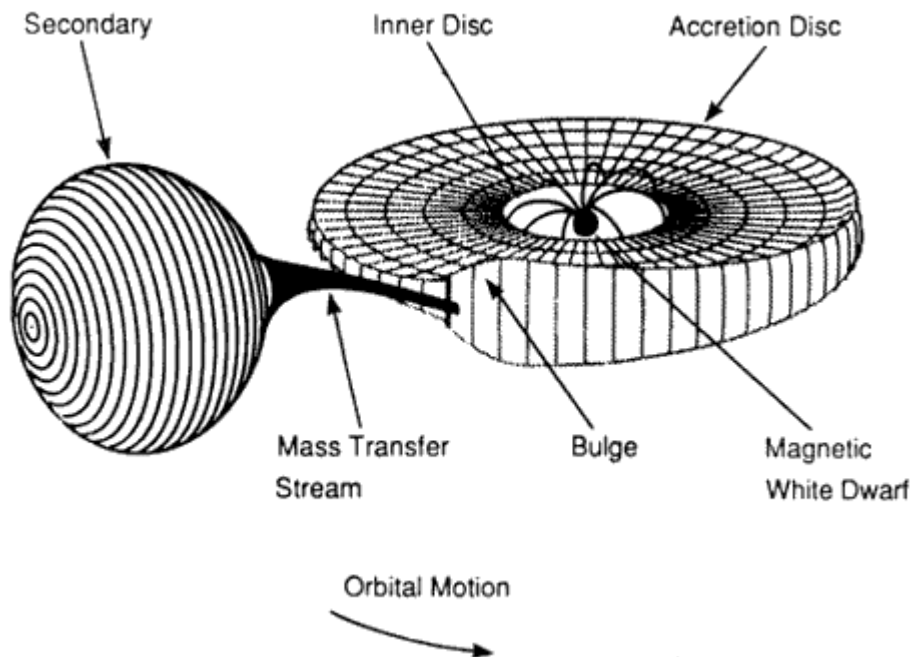


(3)

INTERMEDIÁRIA POLAR:

São entendidas como sistemas onde há formação de um disco que eventualmente tem sua região interna perturbada pela existência de um campo magnético moderado; a partir da interação, a matéria flui da borda interna do disco - limite magnetosférico - para trajetória das linhas de campo e se choca pouco acima da superfície do pólo, no modelo de coluna de acreção. Fonte de raio x forte na região dos pólos magnéticos. Possuem um período orbital maior do que os polares e tem um maior afastamento entre estrelas.

Segundo Koji, o forte choque é aproximado no modelo de *cooling flow* - amarrado no complexo absorvedor - ou fluxo de resfriamento explicando o espectro em raio x acima de 10 keV. Entende-se tal modelo como estratificação de temperatura.



(4)

A região interna do disco encontra-se balanceada entre densidade de energia cinética e densidade de energia magnética. O estado de equilíbrio rotativo é determinado na igualdade do torque material e do torque magnético. Aproxima-se tal região com o raio de co-rotação - sistema onde a velocidade de acreção é proporcional a velocidade angular.

Se o sistema está *spinning down* - a matéria caindo desacelera o disco - dizem estar fora do raio de co-rotação a borda interna do disco de acreção.

8. Em se tratando de um sistema do tipo polar: como se relacionam os períodos de rotação de sua anã branca e o período orbital do sistema? Por que?

Conhecemos CV polares graças ao seu notável campo magnético e sua interação com o campo da companheira. Quando uma das interagentes rotacionar rápido demais, as linhas dos campos emaranhados sofrerão uma suposta tensão, entendida como força de arraste. Funciona como um torque induzindo o sistema a sincronização de seu período orbital com suas respectivas rotações.

Denomina-se magnetosfera a região ao redor de um progenitor onde há influência de campo magnético. Neste sistema, a magnetosfera da anã branca influencia diretamente o campo da secundária, como foi afirmado há pouco. A partir disto, o campo secundário fica recatado, ou integrando-se ao majoritário ou recuando para sua superfície. Por fim, não há considerável efeito de frenamento magnético para roubar momento angular do sistema.

Sabemos que o frenamento - ou *braking* - não é forte, então a radiação gravitacional é responsável para gradualmente dissipar a rotação do sistema. Observacionalmente foi comprovada maior estatística de sistemas polares abaixo do conhecido gap. Ou seja, período orbital está em geral abaixo de 2h.

9. Como os sistemas simbióticos foram originalmente classificados e o que muda nos dias de hoje?

Inicialmente teorizavam não existir equivalente entre polares (CVs) e simbióticas, devida larga separação entre as estrelas constituintes. Em 1999 foi relatado no artigo de Sokoloski & Bildsten a existência de uma anã branca magnética num desses sistemas, conhecido como Z Andromedae com período orbital de $1682,6 \pm 0,6$ s na emissão óptica. Foi primeiro pulso periódico persistente encontrado neste tipo de sistema. Há uma pequena amplitude relacionada que provavelmente deriva-se da oscilação da rotação da anã branca magnética.

Supõe-se que a baixa quantia de detecções de sistemas simbióticos magnéticos deve-se ao fato de ser difícil enxergar a anã branca em uma região embebida por casca queimando. Se estrelas simbióticas estiverem dirigidas puramente pela acumulação e forem descobertas, uma fração pode conter uma anã branca magnética.

10. Descreva uma coluna de acreção de uma anã branca com campo magnético intenso. -

Como descrito anteriormente, quando temos campo magnético intenso, a dinâmica do sistema segue a trajetória da linha de campo, chocando um pouco acima da superfície, num intervalo conhecido como *hot subsonic settling flow*. O choque da colisão produz raio x forte na área do pólo magnético, tal radiação terminaliza a superfície estelar excitando-a de maneira que emita raio x fraco nas proximidades da região.

Quando a partícula chega finalmente perto do fim de sua trajetória até a região de acreção perto do pólo magnético da anã branca, ela está com velocidade supersônica. Através da colisão sucessiva deste material de baixa densidade com a superfície, há conversão de energia cinética em térmica gerando uma densa coluna de acreção expandindo adiabaticamente - ou seja, sem troca de calor por acontecer rápido demais. A transferência de energia termaliza o material da coluna até aproximadamente 20 keV.

Notória a interferência do forte campo com o período orbital e rotacional, de maneira a entrar numa ressonância derivada de um bloqueio - dado por torque - da anã branca em relação a companheira.

11. Apresente o conceito de lóbulo de Roche e apresente o que é o ponto interno de Lagrange.

taxa de transferência, acontecem instabilidades geradas por fusão termonuclear. Conforme se acumula, as temperaturas na superfície aumentam. Se atingir temperatura para fundir hidrogênio em hélio, ocorre uma nova.

A explosão de nova aumenta o brilho aparente do sistema binário entre 10 mil a 1 milhão de vezes (um aumento na magnitude estelar de 10 a 15). Em observações de raios-X, novas clássicas foram observadas muitas vezes. Não há um padrão trivial em suas curvas de luz durante um intervalo de anos ou décadas.

Várias fontes - CVs - foram observadas no período de dias a meses após a explosão como emissores fracos de raios-x. Qualquer choque presente deve ser interno, pois há colisões entre os múltiplos componentes do ejeto, com diferentes velocidades. A densidade esperada está em função do tempo, à medida que a ejeção expande.



Nova recorrente semelhante a Scorpii 1437. Fonte: David A. Hardy

<http://www.astroart.org> & Science and Technology Facilities Council.

Sobre Scorpii 1437: Foi descoberto que a anã branca tem período orbital diferente do período de rotação, visto isso cogitaram ser uma intermediária polar a progenitora da nova.

Em erupções novas, vemos emissão termal em raio x derivado de uma região opticamente fina. Em sistemas simbióticos, o jato proveniente está embebido no denso vento solar que saiu da estrela doadora. Após a ejeção da anã branca, o jato choca-se fortemente com o vento. Nesta dinâmica, vemos emissão termal em raio x forte, derivado de uma região opticamente fina.

É possível uma CV polar sair de sua sincronia entre períodos graças a uma explosão de nova. Provavelmente irá evoluir para o equilíbrio num curto intervalo de tempo ~ 200 anos.

13. O que é *boundary layer*?

Cada situação envolvendo sistema binário de anã branca acreta foi modelada a partir de observações e teoria física. Nos casos de CVs não magnéticas e estrelas simbióticas,

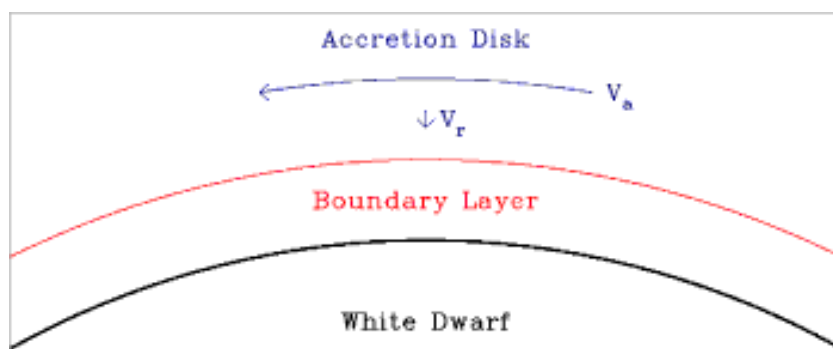
introduziram o modelo de *camada limite*. Esta teoria precisa de no mínimo duas dimensões, diferente da coluna de acreção.

Sabemos que o disco de acreção se comporta como um plasma com alta temperatura. Associado a este fluido, há o conceito de viscosidade, que neste modelo faz total diferença, uma vez que altera a velocidade que o material irá chegar na superfície.

A viscosidade atua como um controle ao escoamento da matéria - transporte de quantidade de movimento por difusão molecular. Esta propriedade atua alterando a velocidade orbital do material em acúmulo - altamente supersônica - para a velocidade de rotação equatorial da anã branca. Novamente um sistema como raio de co-rotação.

O processo envolve mudanças dinâmicas e termodinâmicas extremamente rápidas em distâncias pequenas em comparação com o raio do disco ou da estrela. O disco converte metade da energia potencial em energia cinética e o restante é irradiado no infravermelho, óptico e UV.

Em altas taxas de acréscimo - internamente - a camada limite tornar-se opticamente espessa e emite na faixa de raios-x fraco/UV, mas normalmente é observado componente de raios-X de energia média, fino e opticamente fino. A presença aparente de fortes choques em uma geometria de pastagem da camada limite permanece um enigma.



(7)

Foi mostrada através da figura 12 do Koji a teórica distribuição de profundidade óptica da camada. A região interna seria mais densa, emitindo raio x forte e a externa, mais fina e com emissão fraca. Como a densidade no disco cai exponencialmente com a altura acima do plano, isso pode muito bem ser aproximado entre regiões opticamente finas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. Mukai, K. **X-Ray Emissions from Accreting White Dwarfs: A Review**. Astronomical Society of the Pacific, 2017.
2. S. G. Parsons, B. T. Gänsicke, T. R. Marsh, R. P. Ashley, M. C. P. Bours, E. Breedt, M. R. Burleigh, C. M. Copperwheat, V. S. Dhillon, M. Green, L. K. Hardy, J. J. Hermes, P. Irawti, P. Kerry, S. P. Littlefair, M. J. McAllister, S. Rattanasoon, A. Rebassa-Mansergas, D. I. Sahman, M. R.

Schreiber. **Testing the white dwarf mass-radius relationship with eclipsing binaries.** Cornell University, 2017.

3. T. J. B. Collins, H. L. Helfer, H. M. Van Horn. **Accretion Disk and Boundary Layer Models Incorporating Opal Opacities.** The American Astronomical Society, 1998.

4. Sokoloski, J. L.; Bildsten, Lars. **Discovery of a Magnetic White Dwarf in the Symbiotic Binary Z Andromedae.** The Astrophysical Journal, 1999.

5. John J. Ruan, Scott F. Anderson, Chelsea L. MacLeod, Andrew C. Becker, T. H. Burnett, James R. A. Davenport, Željko Ivezić, Christopher S. Kochanek, Richard M. Plotkin, Branimir Sesar. **CHARACTERIZING THE OPTICAL VARIABILITY OF BRIGHT BLAZARS: VARIABILITY-BASED SELECTION OF FERMI ACTIVE GALACTIC NUCLEI.** The American Astronomical Society, 2012.

6. STEVEN N. SHORE. **Binary star systems known as cataclysmic variables can exhibit violent explosions called novae. Observations of a system hundreds of years after a nova reveal details about the long-term effects of such explosions.** Nature, 2017.

7. Martins, M. **ESTUDO OBSERVACIONAL DA VARIÁVEL CATACLÍSMICA POLAR 1RXS J174320.1-042953.** Universidade do Vale do Paraíba, 2017.

8. INTRODUCTION TO CATACLYSMIC VARIABLES (CVs). NASA, 2020. Disponível em: <<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/cvs/cvstext.html>>. Acesso em: 22 de jul. de 2020. / referência tanto de imagens (3) / (4) como conteúdo.

9. COMMON ENVELOPE. Wikipédia. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Common_envelope>. Acesso em: 29 de jul. de 2020.

FIGURAS:

(1) **ESTRELAS DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL.** Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/oei/stars/mainseq/ms_evol.htm>. Acesso em: 24 de jul. de 2020.

(2) **Variable star.** Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/variable-star>>. Acesso em: 27 de jul. de 2020.

(5) ANJOS, S. **Evolução de Estrelas em Sistemas Binários.** IAG/USP, 2017.

(6) **ESTRELAS BINÁRIAS.** Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/evol/node56.htm>>. Acesso em: 25 de jul. de 2020.

(7) Mukai, K. **The density of the boundary layer in non-magnetic cataclysmic variables.** NASA/GSFC/CRESST & UMBC, 2017.