

Mapa em rádio da erupção de RS Oph em 2006 feito pelo VLBA, com medidas interferométricas feitas pelo VLT superpostas. Crédito: ESO.

A NOVA RECORRENTE SIMBIÓTICA RS OPHIUCHI: UMA PROGENITORA DE SUPERNOVA?

Tasso A. Napoleão (Setembro, 2021)

A NOVA RECORRENTE SIMBIÓTICA RS OPHIUCHI: UMA PROGENITORA DE SUPERNOVA?

Tasso A. Napoleão

1 – Novas clássicas e novas recorrentes

É fato conhecido que todas as novas são sistemas binários, nos quais uma das componentes é sempre uma anã branca, enquanto que sua companheira é, na maior parte dos casos, uma estrela da sequência principal; ou, mais raramente, uma gigante vermelha. Durante a maior parte do tempo, o sistema permanece no seu estado quiescente, situação na qual a matéria do envelope gasoso da estrela "doadora" (basicamente hidrogênio) é atraída gravitacionalmente pela anã branca, geralmente formando um disco de acreção e se depositando em uma fina camada sobre a superfície da anã. Quando a temperatura nessa região atinge um valor crítico, da ordem de 10^7 K, iniciam-se reações termonucleares de fusão do hidrogênio nessa camada da anã branca. A explosão resultante provoca um aumento de brilho tipicamente da ordem de 5 a 15 magnitudes em questão de horas ou poucos dias, marcando o evento transiente que os antigos já designavam como "Nova Stella" (ou simplesmente "Nova"), com o significado de uma nova estrela no céu onde nada se percebia anteriormente¹.

Por esse mecanismo, a anã branca não é destruída; certa quantidade de massa é lançada ao espaço, formando uma nuvem de ejetos que se dissolvem gradualmente no meio interestelar. Com a dissolução da nuvem, o sistema volta ao estado quiescente original, e recomeçará o processo de transferência de massa da doadora para a anã branca até a erupção seguinte, que se acredita venha a ocorrer em uma escala de tempo de dezenas - ou até centenas - de milhares de anos.

O ciclo descrito até aqui é característico das chamadas *novas clássicas*, o grupo mais comum entre todas as novas. Estima-se que a taxa de ocorrência de novas clássicas na Via Láctea esteja em torno de 50 novas/ano (Shafter, 2017), embora o número que é observado *de fato* seja muito menor (atualmente, 10 novas/ano em média), em razão principalmente da absorção interestelar causada pelo gás e poeira existentes no disco da Galáxia, região onde nosso Sistema Solar se localiza. Desde o ano de 1612 até o presente, existem na literatura ocidental registros históricos confiáveis da observação de cerca de 520 novas clássicas na Galáxia². Se levarmos em conta referências a "novas históricas", feitas na era pré-telescópica (principalmente na China, Japão e Coréia), o número total sobe para cerca de 610^3 .

Existe, no entanto, um pequeno grupo de dez *novas recorrentes* em nossa Via Láctea, além de quatro descobertas na Grande Nuvem de Magalhães e dezoito em M31, a galáxia de Andromeda (Darnley et al, 2019). Nas novas recorrentes, a periodicidade das erupções é da ordem de 100 anos ou menos (Schaefer, 2010). Obviamente, o período no qual temos

¹ Apesar de muitas vezes se atribuir o primeiro uso da expressão "Nova Stella" a Tycho Brahe, por tê-la utilizado no título de seu livro "De nova et nullius ævi memoria prius visa Stella" (Sobre a nova estrela nunca vista anteriormente), acerca da supernova de 1572, a expressão já era mencionada por Plínio, o Velho, no ano de 75 AD, na "História Natural" (livro 2, Cap. 24), ao se referir a uma nova descoberta por Hiparco ("...o mesmo Hiparco descobriu uma "estrela nova" em sua própria época..."). (Duerbeck, 2008)

² Ver a respeito das novas catalogadas desde 1612: http://www.cbat.eps.harvard.edu/nova_list.html e <https://asd.gsfc.nasa.gov/Koji.Mukai/novae/novae.html>.

³ Duerbeck, 2008.

registros bastante precisos de erupções de novas (em torno de 150 anos) é muito curto, e é possível também que determinadas erupções de outras novas tenham simplesmente passado despercebidas; porém as observações mais recentes de novas em M31 parecem confirmar a hipótese de que as novas recorrentes em escalas de tempos de décadas são de fato relativamente raras.

Mas por que razão essas poucas novas apresentam escalas de tempo de recorrência de menos de um século? Pela teoria parece haver duas condições que devem ser satisfeitas. A primeira é que suas anãs brancas devem possuir massas altas, próximas ao limite de Chandrasekhar: de forma geral, acredita-se que todas elas tenham massas de no mínimo $1,2 M_{\odot}$. A segunda é que a taxa de acreção de massa da secundária para a anã seja alta: algo da ordem de 10^{-7} massas solares/ano. Apenas se ambas as condições forem satisfeitas será possível transferir material em quantidade suficiente para atingir o ponto crítico de temperatura e pressão para ignição das reações termonucleares em tão pouco tempo.

Essas mesmas características poderiam tornar as novas recorrentes potenciais candidatas a progenitoras de supernovas do Tipo Ia, que como sabemos são objetos do maior interesse como indicadores de distâncias cosmológicas (Anupama, 2013). Ainda não há consenso entre os cientistas sobre essa hipótese; mas pesquisas recentes, incluindo a análise das curvas de luz e a modelagem de diversas das novas recorrentes da Galáxia, sugerem que sete entre elas poderiam ter como destino final a explosão como SN do Tipo Ia (Hachisu; Kato, 2002).

São as seguintes as novas recorrentes conhecidas na Via Láctea, listadas em ordem crescente de t_3 . Lembramos que t_3 é um dos parâmetros usados para classificar as novas de acordo com sua “classe de velocidade” em novas rápidas, intermediárias ou lentas, e representa o tempo (em dias) para a nova decair de três magnitudes desde o seu máximo:

Nome	Período orbital (dias)	Magnitudes	t_3 (dias)	Anos das erupções
U Scorpii	1.23	7.5–17.6	2.6	2010, 1999, 1987, 1979, 1945, 1936, 1917, 1906, 1863
V394 Coronae Australis	1.52	7.2–18.4	6	1987, 1949
T Coronae Borealis	228	2.5–9.8	6	1946, 1866
V745 Scorpii	510	9.4–18.6	7	2014, 1989, 1937
V2487 Ophiuchi	1	9.5–17.3	9	1998, 1900
RS Ophiuchi	457	4.8–11	14	2021, 2006, 1985, 1967, 1958, 1945, 1933, 1907, 1898
V3890 Sagittarii	519.7	8.1–15.5	14	2019, 1990, 1962
CI Aquilae	0.62	9.0–16.7	40	2000, 1941, 1917
T Pyxidis	0.076	6.4–15.5	62	2011, 1967, 1944, 1920, 1902, 1890
IM Normae	0.102	8.5–18.3	80	2002, 1920

(Fonte: Schaefer, 2010, atualizado para 2021)

Diversos autores (p. ex. Schaefer 1990, Schaefer 2010, Anupama, 2013) têm proposto uma subclassificação dessas dez novas recorrentes em três grupos, levando em consideração as semelhanças entre seus períodos orbitais e suas características espectrais. Adotaremos aqui a mais recente delas (Anupama, 2013), que define as classes seguintes:

- (a) Classe U Scorpii: Formada pela própria U Scorpii, por V394 Coronae Australis e V2487 Ophiuchi. Este é um grupo bastante homogêneo; são novas rápidas e de período orbital curto (da ordem de um dia). As secundárias são subgigantes da classe K. Seus espectros apresentam linhas de emissão muito largas (Balmer, HeI, NIII, CIII) nas erupções, indicando velocidades de expansão muito rápidas. Na fase quiescente, são dominados por linhas de HeII.
- (b) Classe T Pyxidis: Formada por T Pyx, CI Aql e IM Nor. Este grupo abrange novas lentas, com períodos orbitais extremamente curtos (semelhantes aos das novas clássicas) e secundárias da sequência principal. Seus espectros também lembram os das novas clássicas, com linhas de Balmer, FeII e NIII nas erupções, indicando velocidades de expansão da ordem de 800 – 2500 km/s. Na fase quiescente, os espectros das três não são homogêneos e parecem indicar secundárias das classes K – M.
- (c) Classe T Coronae Borealis / RS Ophiuchi: Formada por T CrB, V 3890 Sgr, V745 Sco e RS Oph, a nova que é o objeto deste artigo. Apresentam períodos orbitais muito longos (centenas de dias) e suas secundárias são gigantes vermelhas da classe espectral M. Na fase quiescente, seus espectros são semelhantes às estrelas binárias simbióticas, com o contínuo dominado pela gigante vermelha, porém com linhas de emissão intensas de HI (Balmer) e HeI superpostas. Por esse motivo, as estrelas deste subgrupo são geralmente chamadas de “novas recorrentes simbióticas” (SyRNe), e não devem ser confundidas com as “novas simbióticas”, que são erupções *extremamente lentas* (ascensão ao máximo em meses ou anos) produzidas por reações termonucleares em sistemas binários simbióticos. Nas erupções das SyRNe, aparecem linhas de emissão largas, indicando velocidades de expansão da ordem de 4000 km/s. Nas estrelas desta subclasse, há evidências de interações entre o material produzido na explosão da nova com o proveniente do vento estelar da gigante vermelha.

Embora as causas das erupções das novas recorrentes sejam as mesmas das novas clássicas, as suas características nas erupções são bem diferentes. Novas clássicas geralmente mostram uma ascensão rápida de brilho até o máximo (1 - 2 dias), e, tipicamente, depois de algumas horas (ou poucos dias) a sua luminosidade começa a cair, a velocidades que variam muito de nova para nova. Esse declínio persiste até que a magnitude de antes da explosão (o estado de quiescência) é restabelecida. Durante a fase de decaimento de brilho, o material ejetado pela explosão costuma ser, no início, totalmente opaco, o que impede a visão do binário central. Geralmente isso dura até 3 - 4 magnitudes abaixo do pico de brilho. Na fase seguinte, o material irá se tornar opticamente transparente, e a luz proveniente do sistema central torna a ser visível (Azzollini, 2021).

O tempo que essa transição dura depende da classe de velocidade da nova, que é usualmente medido pelos parâmetros t_2 ou t_3 . E, como sabemos desde meados do século XX, as novas mais luminosas são também as mais rápidas (McLaughlin, 1945; Payne-Gaposchkin, 1957).

Por outro lado, nas novas recorrentes existe um importante fator a mais para se considerar: o material ejetado pela explosão na superfície da anã branca se choca com o denso vento estelar proveniente da gigante vermelha, produzindo forte emissão de raios-X. O vento estelar, dependendo do tamanho e massa dessa estrela secundária, significa uma transferência de massa da ordem de $10^{-7}M_{\odot}$ a $10^{-10}M_{\odot}$ por ano, da gigante vermelha para a anã branca. Isso, evidentemente, afeta a evolução das novas recorrentes, em especial as da classe SyRNe: o material ejetado nas explosões desses sistemas nunca terá uma fase de expansão livre - e nem o fluxo de matéria terá uma taxa constante, como ocorre nas novas clássicas. Essas diferenças são claramente perceptíveis na evolução dos espectros dessas novas (Azzollini, 2021).

2 – RS Oph e a erupção de 2021

RS Ophiuchi, a nova recorrente que é o objeto deste texto, foi descoberta em 1898 por Williamina Fleming em Harvard, e é (juntamente com U Sco, que é de outra subclasse) a nova que apresentou o maior número de erupções desde sua descoberta: foram nove no total (embora as erupções de 1907 e 1945 não tenham sido acompanhadas integralmente em razão das respectivas conjunções solares). Seu intervalo de recorrência atinge 14.7 anos em média; a energia produzida em cada erupção é da ordem de $10^6 M_{\odot}$, e o material ejetado pela explosão é lançado ao espaço a velocidades que chegam a 4000 km/s.

RS Oph (ao lado de T CrB) é o paradigma das novas recorrentes simbióticas (SyRNe): suas duas componentes são uma anã branca de massa da ordem de $1.35 M_{\odot}$ (Kato et al 2008) e uma gigante vermelha da classe espectral MO/M2III, com massa em torno de $0.8 M_{\odot}$ e raio da ordem de 10^{13} cm. Considerando que a massa da anã é maior que a da gigante vermelha, o período orbital é de cerca de 457 dias e que a separação real entre as componentes é de 2.68×10^{13} cm (1.78 UA), pode-se calcular que a secundária transfere massa para a anã branca principalmente através de um denso vento estelar com velocidade de 20 - 40 km/s, o que implica em uma perda de massa da gigante para a anã a uma taxa da ordem de $10^{-7}M_{\odot}$ por ano (Azzollini, 2021). Tanto Mikolajewska e Shara (2017) como Hachisu e Kato (2018) concluem que, com a recorrência contínua desses ciclos, a massa da anã continuará crescendo, o que torna RS Oph uma forte candidata a progenitora de uma supernova Tipo Ia no futuro.

2.1 – Descoberta e dados fotométricos

As últimas erupções de RS Oph haviam se dado em 1985 e 2006, e (assim como nas erupções anteriores) suas curvas de luz mostram boa cobertura por parte de observadores da AAVSO. As erupções apresentam notável consistência e homogeneidade nos dados fotométricos (Oppenheimer e Mattei 1993), com máximos visuais em torno de magnitude 4.8 e mínimos em volta de mag 11. Na figura 1, apresentamos as curvas de luz das erupções de 1985 e 2006. Nota-se que, ao fim do declínio e em todas as erupções já observadas, RS Oph passa por uma fase (com duração em torno de seis meses) em que a estrela se torna *uma magnitude mais apagada do que no seu estado quiescente*, retornando a ele em seguida. Isso não ocorre com nenhuma outra nova, recorrente ou não. Acredita-se que a causa esteja relacionada a variações de longo período na gigante vermelha, antes de o disco de acreção se restabelecer.

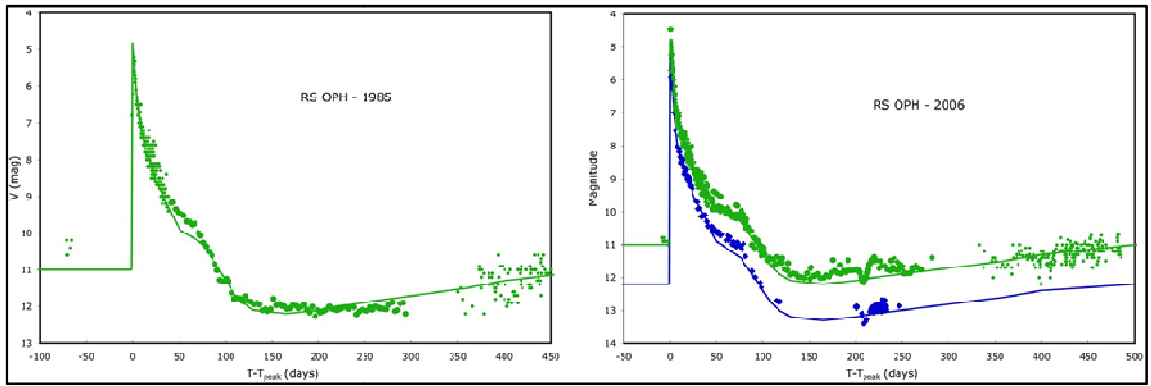


Fig. 1 – Curvas de luz das erupções de RS Oph nos anos de 1985 (esquerda) e 2006 (direita). A curva de 1985 foi construída com estimativas visuais da AAVSO. Na de 2006, os pontos em azul são medidas CCD feitas com filtro B e os em verde, com filtro V ou visuais. Em ambos os casos, os círculos menores são medidas individuais; os maiores, médias de três dias (Schaefer 2010).

A erupção de 2006 foi descoberta visualmente por H. Narumi, no Japão, que estimou a magnitude da estrela como 4.5 em Fevereiro 12.829 UTC. O tempo de ascensão ao máximo (medido pela diferença para o último registro da nova no estado quiescente disponível no banco de dados AAVSO) foi inferior a 2.58 dias, mas infelizmente não pode ser estabelecido com certeza. Muito provavelmente, foi muito menor: o momento do início da erupção da estrela (a saída do estado quiescente) não foi registrado pelos membros da AAVSO.

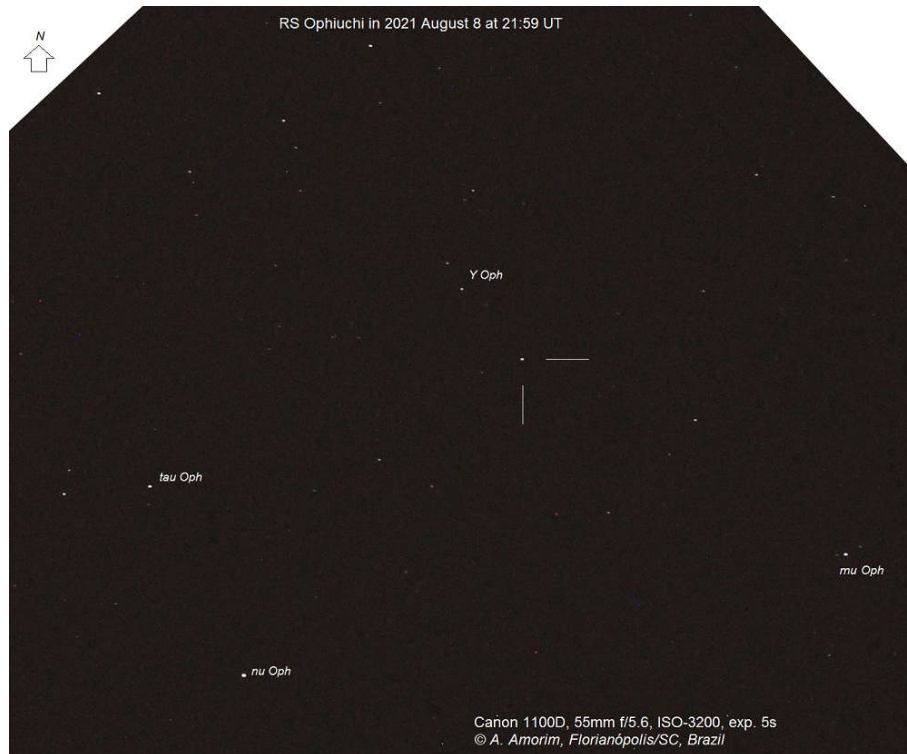


Figura 2: Primeira imagem da erupção de RS Oph em 2021, feita por Alexandre Amorim em Florianópolis, SC, em Agosto 08.916 – apenas quatro minutos após sua descoberta visual.

A erupção de 2021 foi percebida visualmente em Agosto 08.91319 UTC pelo observador brasileiro Alexandre Amorim, que estimou sua magnitude em 5.0. O mesmo Amorim havia sido o último a observar visualmente a estrela na noite anterior (Agosto 07.96940), ainda em seu estado quiescente, com mag 11.2. Ou seja, em menos de 24 horas, RS Oph aumentou seu brilho em cerca de seis magnitudes. O brilho máximo (mag. visual 4.8) seria atingido poucas horas após a descoberta, segundo relatos de diversos observadores. Ver Figura 2.

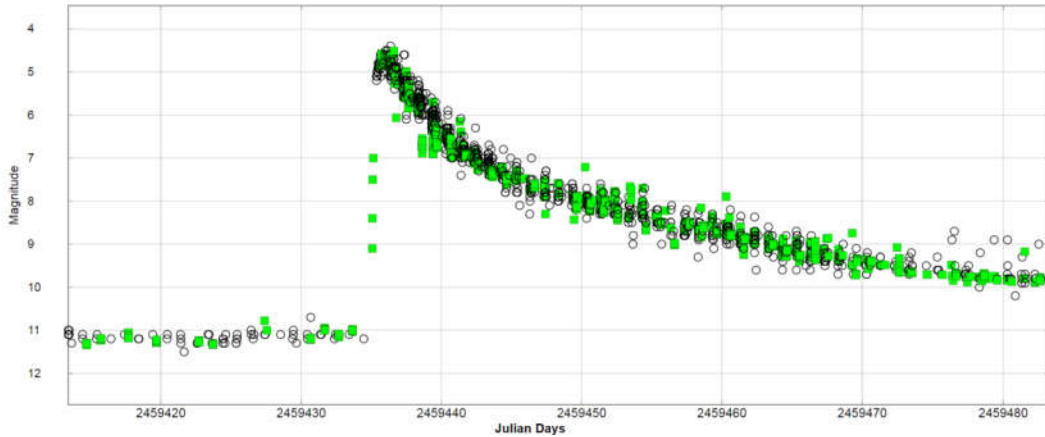


Figura 3 – Curva de luz da AAVSO para os primeiros 50 dias da erupção de RS Oph em 2021. Os quadrados em verde são medidas com CCD e filtro V. Os círculos são estimativas visuais.

A velocidade da nova em termos do parâmetro t_3 na erupção de 2021 foi de 14 dias, o mesmo valor encontrado na erupção de 2006 e também o adotado por Schaefer (2010) e outros autores como padrão. Já o parâmetro t_2 , também para ambas as erupções, foi de 7 dias, novamente em concordância com a literatura existente. Ver Figura 3.

Levando em consideração esse valor de t_3 , podemos calcular a magnitude absoluta da nova em seu máximo por uma das relações MMRD (Maximum Magnitude-Rate of Decline) que desde McLaughlin (1945) são usadas para esse fim⁴. Neste caso, utilizaremos a relação proposta por Downes e Duerbeck (2000), válida para novas rápidas (que apresentam $\log t_2 < 1.20$):

$$M_{V(\max)} = -11.26 + 1.58 \log(t_3)$$

$$M_{V(\max)} = -11.26 + 1.58 \log 14 \rightarrow M_{V(\max)} = -9.45$$

⁴ Pode-se argumentar se as relações MMRD - tão úteis para as novas clássicas - seriam aplicáveis para as novas recorrentes, pois afinal trata-se de leis empíricas deduzidas a partir de dados observados em erupções de certo número de novas clássicas, que não incluem recorrentes. E, como se sabe, estas últimas têm certas características distintas das novas clássicas, como o choque dos ejetos da erupção com o vento estelar da gigante vermelha. A este respeito, Barry et al (2008) consideram que “há algumas evidências teóricas de que o uso das equações MMRD, derivadas para novas clássicas, pode não ser diretamente aplicável às recorrentes; no entanto, os valores históricos encontrados usando este método fornecem distâncias que estão dentro do razoável”.

A partir da magnitude absoluta, é fácil obter a distância da nova pelo uso da equação do módulo de distância:

$$m_V - M_{V(\max)} = 5 \log D - 5 + A_V$$

O termo relativo à absorção interestelar (A_V) pode ser calculado a partir do valor do excesso de cor $E(B-V)$ encontrado em Schaefer (2010):

$$E(B-V) = 0.73 \rightarrow A_V = 3.1 \times 0.73 \rightarrow A_V = 2.26$$

Substituindo esse valor na equação do módulo de distância, resulta:

$$4.8 + 9.45 = 5 \log D - 5 + 2.26 \rightarrow \mathbf{D = 2\ 500\ pc}$$

Esse valor, em uma primeira análise, parece bastante razoável quando comparado ao obtido através da paralaxe da estrela pelo GAIA DR2 (D entre 2021 e 2569 pc) e mesmo ao calculado por Schaefer (2010), também a partir da relação MMRD (2100 pc). No entanto, a questão da distância de RS Oph se apresenta bem mais complexa quando verificamos os resultados obtidos por numerosos pesquisadores através de diferentes técnicas. Em Barry et al (2008) essa discrepância é claramente demonstrada: esses autores apresentam nada menos que 26 estimativas da distância da nova, realizadas de forma independente entre os anos de 1957 e 2008. Os resultados variam desde 400 pc (Hachisu e Kato, 2001) até 5800 pc (Pottasch 1967)! No entender de Schaefer (2010), “Historicamente, a questão da distância de RS Oph tem dado terrivelmente errado”. Curiosamente, esse mesmo autor refaz a sua estimativa já citada a partir da relação MMRD (2100 pc) por outras três, baseadas em certas propriedades inferidas para a estrela secundária, fazendo em seguida sua média aritmética e admitindo um erro de 23%. O resultado “final” de Schaefer – no mesmo paper de 2010 – passa a ser 4200 ± 900 pc.

O problema da distância não é meramente numérico; na verdade, ele envolve os processos físicos que determinam a transferência de massa da gigante vermelha para a anã, e em consequência, a modelagem do sistema. Existem claramente duas tendências entre os pesquisadores que têm se dedicado ao estudo de RS Oph e outras novas recorrentes simbióticas: uma corrente (que inclui Schaefer 2010) acredita que a gigante vermelha preenche seu lóbulo de Roche, e assim a transferência de massa se dá pelo extravasamento de matéria através do lóbulo para a anã, através de um disco de acreção. Outro grupo (que inclui Hachisu e Kato 2018 e Azzollini 2021) crê que o raio da secundária é menor que o do seu lóbulo de Roche, e em consequência, o fluxo de matéria para a anã se dá primariamente pela ação do formidável vento estelar da gigante vermelha.

Um ponto de decisão entre essas duas hipóteses pode estar, obviamente, ligado à distância de RS Oph. A grosso modo, Schaefer (2010) estima que, se a distância da estrela for ≥ 3000 pc, então a gigante vermelha preenche seu lóbulo de Roche. Já se a distância for < 3000 pc, então a acreção de matéria sobre a anã branca se dá basicamente pela ação do vento estelar da gigante, que nesse caso não preenche seu lóbulo de Roche. A questão ainda está em discussão, dependendo ainda principalmente de mais dados observacionais (em diversos comprimentos de onda) sobre a secundária. É possível que o monitoramento fotométrico e espectroscópico durante a atual erupção de 2021 traga novas luzes para esclarecer os pontos de discordância.

2.2 – Dados espectroscópicos

A erupção de RS Oph em 2021 certamente é a que obteve maior cobertura espectral entre todas as de novas recorrentes até hoje. Boa parte desse resultado se deve ao extraordinário trabalho do grupo internacional de astrônomos amadores ARAS (Astronomical Ring for Amateur Spectroscopy), liderado por François Teyssier (França) e com o apoio do pesquisador Steve Shore, da Universidade de Pisa. Desde a data da erupção (09 de agosto) e até o dia 28 de setembro de 2021 foram feitos nada menos que 257 perfis espectrais, todos disponibilizados de forma aberta na Web no endereço <https://aras-database.github.io/database/rsoph.html>. Ou seja, uma cadência fantástica de mais de 5 espectros por dia em média. Isso permite a análise das fases principais da erupção em seus primeiros 50 dias, em correlação com a curva de luz do mesmo período obtida pela AAVSO e mostrada na Fig. 3. Nos parágrafos seguintes, alguns dos perfis obtidos através do Banco de Dados do ARAS serão descritos⁵ (as identificações de linhas são do autor, usando o software PlotSpectra, de Tim Lester).

2.2.1 – Fase quiescente

Um espectro da fase quiescente foi feito por Pavol Dubovsky (Eslováquia), cerca de cinco meses antes da erupção de 2021 (e 5503 dias após a erupção de 2006). Nota-se a semelhança com outro espectro da mesma fase feito por Keith Shank (UK) um ano antes da erupção (Fig 4).

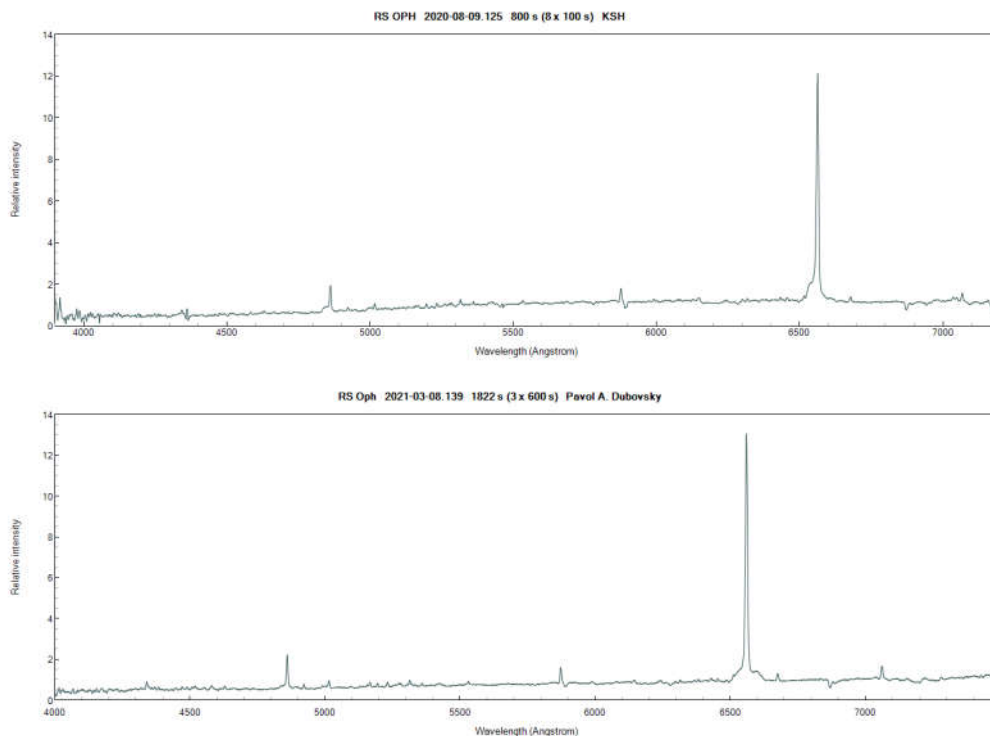


Fig 4: Espectros de RS Oph na fase quiescente em 08/2020 (K. Shank) e 03/2021 (Dubovsky)

⁵ Para mais detalhes sobre o Banco de Dados de espectros do ARAS, recomendamos a leitura do seguinte artigo: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019CoSka..49..217T/abstract>.

Mudando a escala do eixo de intensidades no espectro de Dubovsky (típico do estado de quiescência), pode-se analisar melhor o contínuo e as linhas espectrais: distingue-se claramente a tendência avermelhada do contínuo, dominado pela componente secundária – a gigante vermelha do tipo espectral M. Superpostas a ele, estão evidentes as linhas de emissão de HI (H-Alfa, H-Beta, H-Gama e H-Delta da série de Balmer), além de linhas de HeI (Hélio neutro) em 5875, 6678 e 7065 Angstrom e de uma série de linhas finas permitidas de FeII (ferro monoionizado), provenientes da região do disco de acreção e da anã branca. (Ver Fig 5).

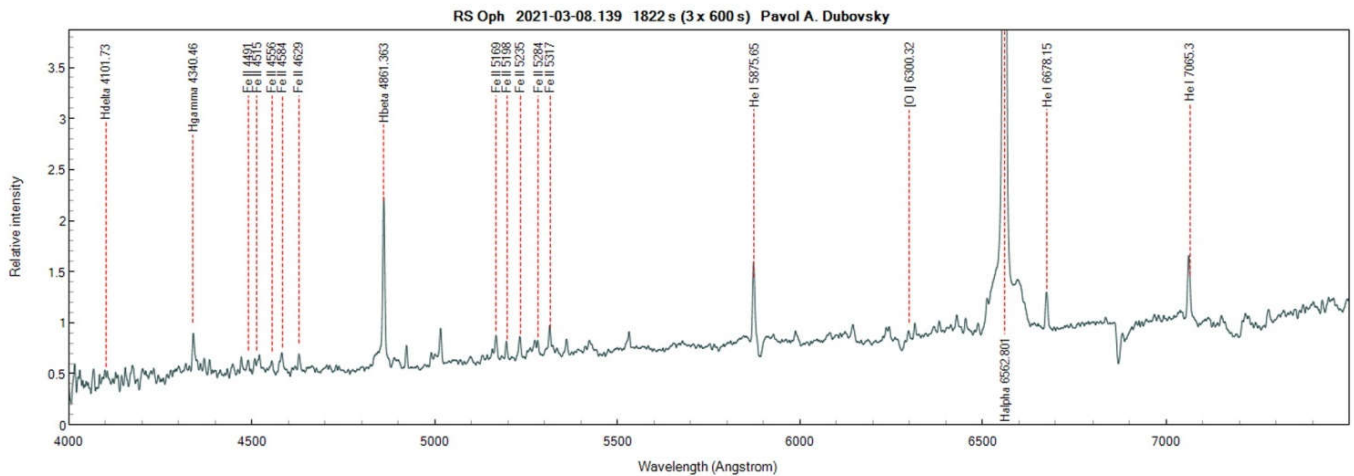


Fig 5 – Espectro quiescente de P. Dubovsky (Agosto 03.139, 2021) com identificação de linhas

2.2.2.- A erupção

O primeiro espectro da erupção na base de dados ARAS foi feito por Jean-Bruno Desrosiers (Canadá), apenas 3.6h após a descoberta. Esta é a fase inicial da evolução da nova, conhecida como “fireball phase”. As linhas largas de emissão H-alfa, H-beta e H-gama (bem como linhas de HeI em 5015, 5875, 6678 e 7065 A) lembram as novas clássicas de He/N. As linhas de Balmer mostram perfis P-Cygni bem definidos, resultantes da alta velocidade do material ejetado na erupção, estimada entre -3700 and -2700 km/s por Munari (ATel #14840).

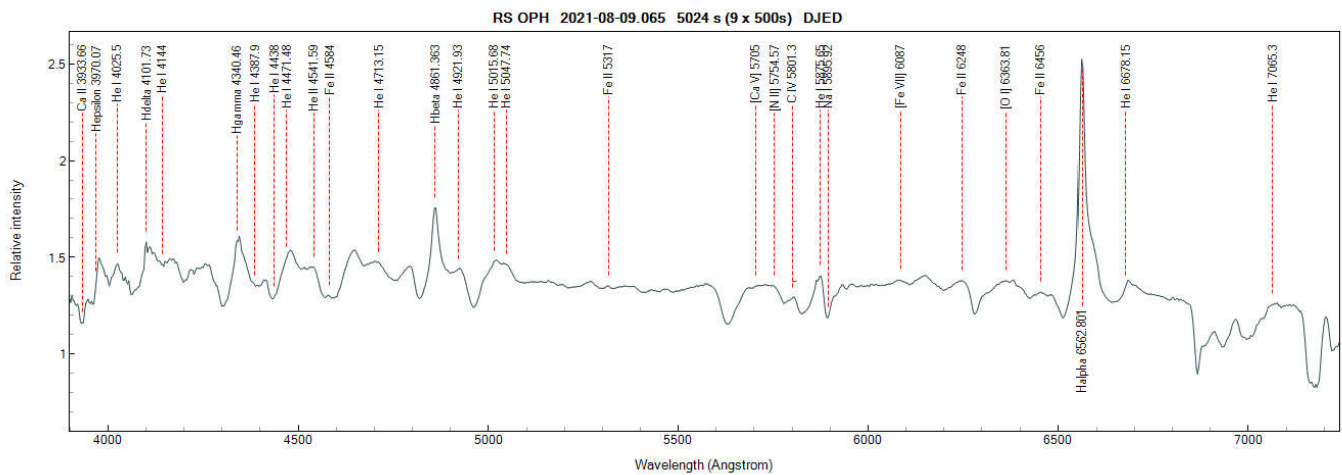


Fig 6 – Primeiro espectro da erupção (Agosto 09.065, 2021) por J. B. Desrosiers (Canadá)

Cerca de uma semana após a erupção, está ocorrendo a interação entre o material ejetado da anã branca pela explosão, a cerca de 3000 km/s e o denso vento estelar que provém da gigante vermelha a 20-30 km/s. No perfil da figura 7, feito pelo britânico David Boyd, nota-se como aumentou a complexidade do espectro: as linhas de Balmer aumentaram de intensidade várias vezes, porém se tornaram mais finas. Uma série de finas linhas permitidas de FeII, HeI, NaI, CaII, CIII e CIV apareceram ou se desenvolveram, bem como linhas proibidas de [NII], [OII], [OIII],[SIII] e outras, incluindo algumas primeiras linhas coronais como [FeVI], [FeVII] e [ArV]. O material gasoso periférico proveniente da secundária é fotoionizado pela erupção e se recombina, dando origem às linhas mais finas.

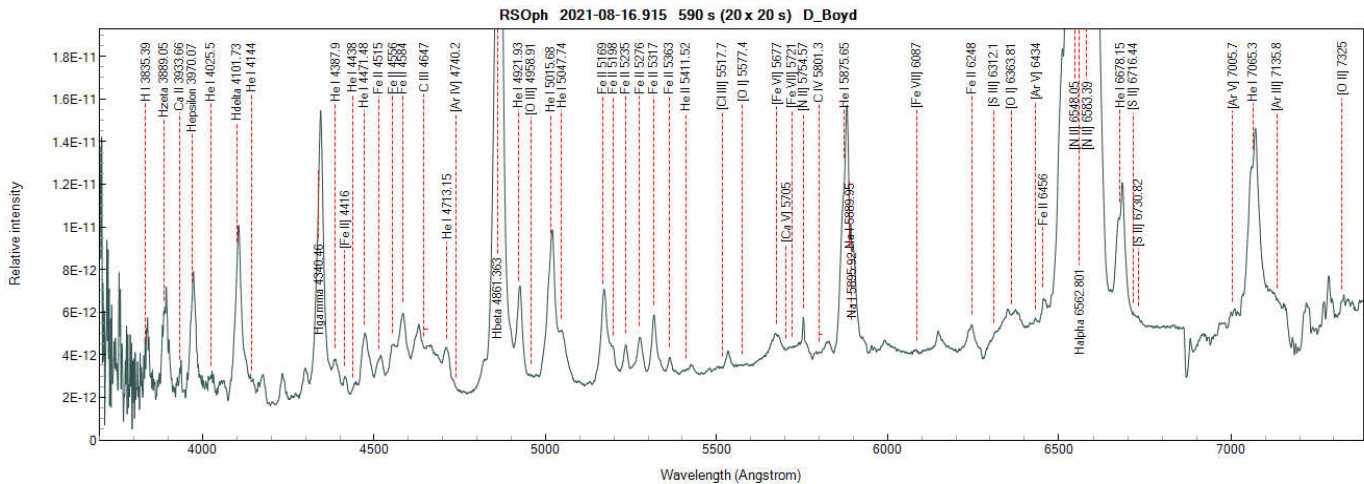
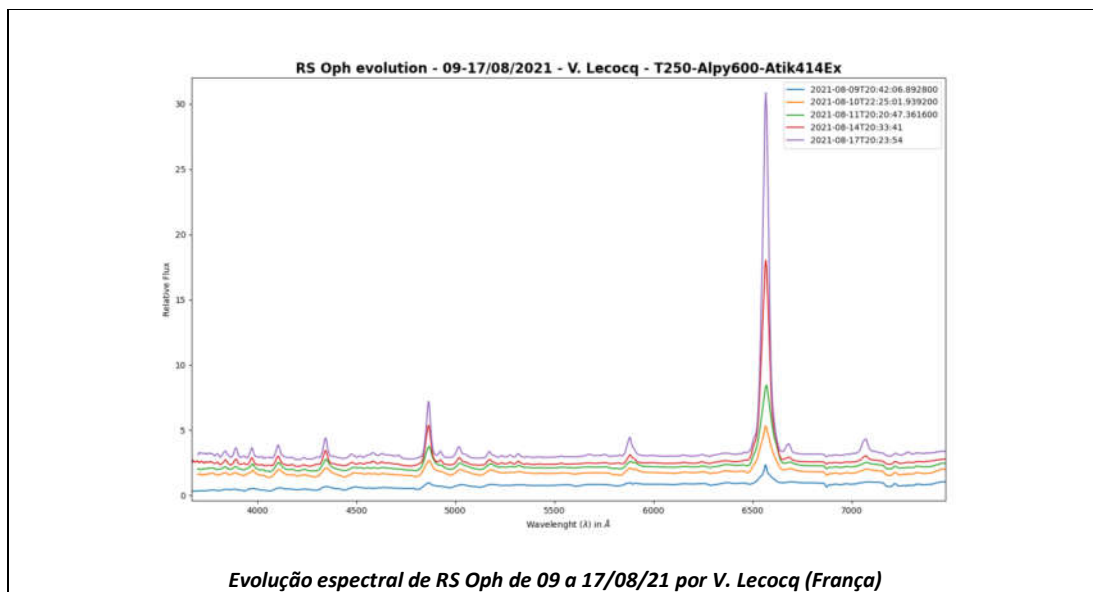


Fig 7 – Espectro de RS Oph uma semana após a erupção (Agosto 16.915) por David Boyd (UK)

A evolução do espectro de RS Oph nas primeiras fases da erupção de 2021 pode ser bem visualizada na Fig. 8 abaixo, uma excelente montagem de uma série de perfis obtidos pelo observador francês Vincent Lecocq, também do ARAS, entre 09 e 17/8. Note-se o aumento do fluxo das linhas de Balmer (em especial de H-alfa) e o surgimento de linhas de emissão de HeI.



Evolução espectral de RS Oph de 09 a 17/08/21 por V. Lecocq (França)

No momento em que este texto é escrito (cerca de cinquenta dias após a erupção), já se nota a progressiva dissipação da matéria opaca ejetada na explosão. À medida que o sistema se torna mais transparente, observa-se que o espectro tende gradualmente a se aproximar novamente do estado quiescente, cada vez mais próximo daquele observado ao fim da erupção de 2006. As linhas de Balmer, de Fe I e de He I predominam, o contínuo se torna pouco mais avermelhado, indicando a presença da binária simbiótica (gigante vermelha e anã branca). Restam, no entanto, algumas linhas que não pudemos identificar (possivelmente linhas coronais de alta ionização). Ver o espectro feito por Keith Shank (UK) em 24 de setembro de 2021 (Fig. 9), comparando-o com os da fase quiescente anterior, vistos nas Figs 4 e 5.

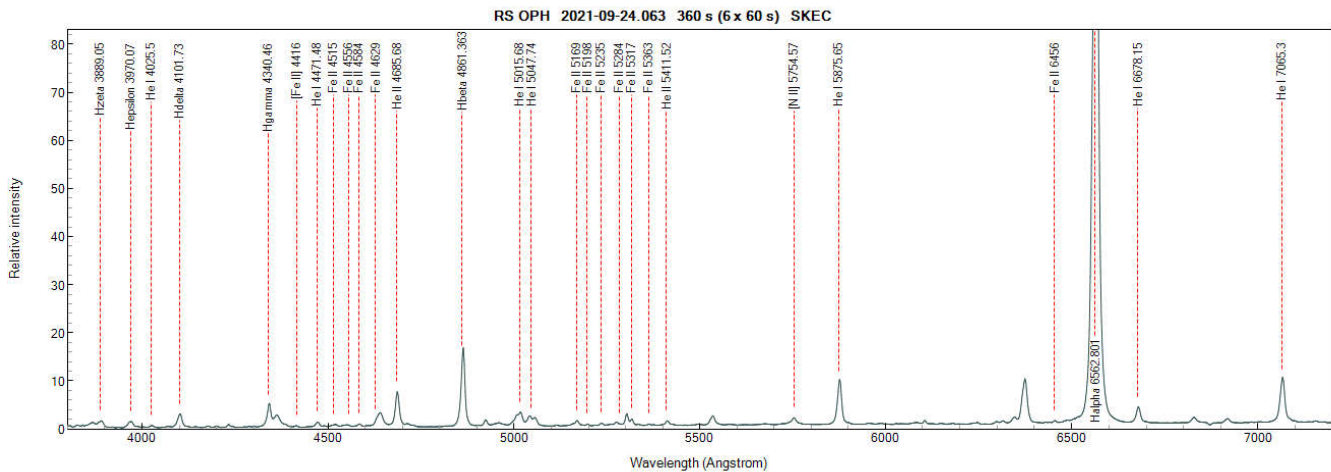


Fig 9 – Espectro de RS Oph em Setembro 24, 2021 por Keith Shank (UK)

3 - Conclusões

Por diversos motivos, tudo leva a crer que a história das erupções de RS Oph em 2006 e em 2021 será semelhante, como de certa forma seria de se esperar pelas explosões registradas dessa nova recorrente simbiótica desde 1898. Uma análise detalhada da erupção de 2006 é encontrada em Mondal et al (2017). Comparando-a com os resultados obtidos até este momento (cerca de 50 dias após a erupção de 2021), alguns paralelos podem ser traçados.

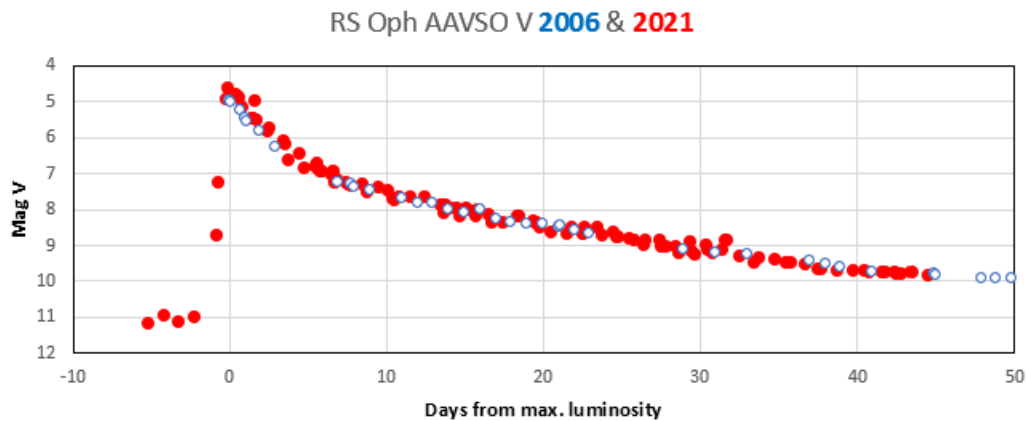


Fig 10 – Curvas de luz AAVSO para RS Oph em 2006 e 2021 (fonte: François Teyssier)

Do ponto de vista fotométrico, as curvas de luz para os dois eventos são praticamente idênticas, com parâmetros equivalentes. As curvas das erupções de RS Oph em 2006 e 2021, produzidas pelos AAVSO e compiladas por François Teyssier, deixam isso evidente (ver Fig 10)

Nos perfis espectroscópicos de 2021, o comportamento temporal das linhas principais (predomínio das linhas de H α e H β nas fases iniciais, surgimento posterior de linhas nebulares e coronais, provavelmente produzidas pela ionização do vento estelar proveniente da gigante vermelha) seguem a mesma evolução demonstrada em Mondal et al (2017). Observa-se também que as larguras das linhas de emissão diminuem com o tempo, o que é também descrito e interpretado em Mondal et al (2017) como a onda de choque gerada pela erupção se propagando na região do vento estelar da gigante vermelha.

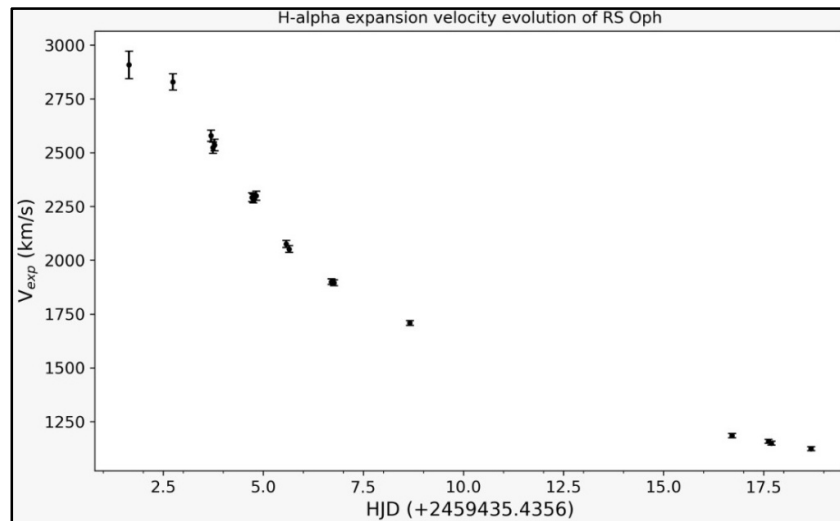


Fig 11 – Evolução da velocidade de expansão em H-alfa (M. Faajrin et al (ATEL 14909))

Pelas figuras 6, 7 e 8 pode-se também verificar que os perfis P-Cygni das linhas de Balmer são muito proeminentes logo após a erupção de 2021, vão se atenuando e desaparecendo ao longo dos dias. Isso indica uma gradual redução na velocidade da propagação da onda de choque, que pode ser também visualizada também no gráfico da Fig 11. Este mostra a evolução da velocidade de expansão, medida por M. Faajrin et al (ATEL 14909) na linha H-alfa, nos vinte dias após a erupção de 2021. Um gráfico praticamente idêntico é visto na Fig 7 de Mondal et al (2017) para os primeiros 20 dias da erupção de 2006.

Tudo isso parece indicar que as erupções da nova recorrente simbiótica RS Oph são essencialmente equivalentes entre si e que vão continuar ocorrendo em intervalos entre dez e vinte anos, assim como temos observado desde 1868. Mas isso vai se repetir até quando? A resposta parece estar na massa da anã branca, que parece já estar bem próxima do limite de Chandrasekhar. A questão é se essa massa continuará aumentando (ou não) de uma erupção para outra: de um lado, a anã ganha massa da secundária por acreção entre as erupções; de outro, ela perde massa nas explosões. Se o balanço for positivo e a anã ganhar massa, então é provável, como acreditam vários autores (Mikolajewska e Shara 2017; Hachisu e Kato 2002, 2018; Kato et al 2008; Walder et al 2009; Hernanz e José 2008), que RS Oph seja de fato uma progenitora de supernova Ia. Os últimos autores calcularam que isso se dará em $\sim 3 \times 10^4$ anos.

Agradecimentos

Agradecemos em especial a François Teyssier e ao grupo de espectroscopia amadora ARAS (Astronomical Ring for Amateur Spectroscopy), principalmente aos observadores David Boyd, Jean-Bruno Desrosiers, Keith Shank, Pavol Dubovsky e Vincent Lecocq, que disponibilizaram de forma livre seus arquivos fits com espectros de RS Oph e muitas outras estrelas, em uma contribuição inestimável para a ciência astronômica.

Referências

AAVSO (American Association of Variable Stars Observers). Website. Disponível em: <https://www.aavso.org/>.

ARAS Spectral Database - (F.M. Teyssier, org) – ARAS Symbiotics Program – RS Ophiuchi <https://aras-database.github.io/database/index.html#>

ARAS Spectroscopy Forum (F. M. Teyssier, org), Symbiotic Recurrent Nova RS Oph in Outburst, <https://www.spectro-aras.com/forum/viewtopic.php?f=36&t=2804&start=50>

Anupama, G.C., Recurrent Novae: What Do We Know about Them? In: *Binary Paths to Type Ia Supernovae Explosions, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Vol 281, p. 154-161, 2013.*

Azzollini, A., Multi-wavelength Spectroscopic Study of Shock Phenomena Driven by Explosive Outbursts in Symbiotic-like Recurrent Novae. Ph.D. Thesis (Università di Pisa, 2021)

Barry, R.K., et al, On the Distance of RS Ophiuchi. In: RS Ophiuchi (2006) and the Recurrent Nova Phenomenon, ASP Conference Series, Vol. 401, 2008.

Darnley, M. J. et al., Classical novae from the POINT-AGAPE microlensing survey of M31, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 369, 257–271, 2006.

Downes, R.; Duerbeck, H., Optical imaging of nova shells and the MMRD relationship, *Astronomical Journal* 120 :2007, 2000.

Faaajrin et al., Intermediate resolution spectroscopic follow-up observation around H-alpha of the 2021 outburst of the recurrent nova RS Oph. ATEL 14909, 2021.

Hachisu, I.; Kato, M., Recurrent Novae as a progenitor system of Type Ia Supernovae. In: *Classical Novae Explosions, AIP Conference Proceedings vol 637, p.284, Hernanz, José (eds), 2002.*

Hernanz, M. E José, J., Theoretical Models of RS Ophiuchi and its γ -ray Emission: Comparison with SWIFT/BAT Observations. In: RS Ophiuchi (2006) and the Recurrent Nova Phenomenon, ASP Conference Series, Vol. 401, 2008.

- Kato, M., The Supersoft X-ray Light Curve of RS Ophiuchi – The White Dwarf Mass is Increasing. In: RS Ophiuchi (2006) and the Recurrent Nova Phenomenon, ASP Conference Series, Vol. 401, 2008.
- McLaughlin, D.B., The light curves of novae. *Popular Astronomy*, 47, 410, 1939.
- McLaughlin, D.B., The relation between light-curves and luminosities of novae. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 57, 335, 1945.
- Mikolajewska, J. The Place of Recurrent Novae Among the Symbiotic Stars, in ASP Conference Series, (A.Evans et al, eds), V. 401, 2008.
- Mikolajewska, J. e Shara, M., The Massive CO White Dwarf in the Symbiotic Recurrent Nova RS Ophiuchi, *The Astrophysical Journal*, 847:99, 2017.
- Mondal, A. et al., Optical spectroscopy of the recurrent nova RS Ophiuchi – from the outburst of 2006 to quiescence. *MNRAS* 474, 4211–4224 (2018).
- Munari, U. e Valisa, P., The 2021 outburst of RS Oph. A pictorial atlas of the spectroscopic evolution: the first 18 days. arXiv:2109.01101v1, 2021.
- O’Brien, T.J., et al, The 2006 explosion of the recurrent nova RS Ophiuchi. 8th European VLBI Network Symposium, September 26-29, 2006 (PoS - Proceedings of Science - PoS(8thEVN)052).
- Oppenheimer, B., e Mattei, J., Analysis of Long-Term AAVSO Observations of RS Ophiuchi, *JAAVSO* vol 22, 1993.
- Payne-Gaposchkin, C. *The galactic novae*. New York: Dover Publications, 1957.
- Patat, F. et al., Connecting RS Ophiuchi to [some] type Ia supernovae. *Astronomy & Astrophysics* 530, A63, 2011.
- Shafter, A. W., The Galactic nova rate revisited, *Astrophysical Journal*, 834:196, 2017.
- Shore, S.N., Spectroscopy of Novae – A User’s Manual. arXiv:1211.3176v1, 2012.
- Schaefer, B., Comprehensive Photometric Histories of All Known Galactic Recurrent Novae. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 187-2, 275-373, 2010.
- Teyssier, F., Eruptive stars monitoring and the ARAS database. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, vol. 49, no. 2, p. 217-227, 2019
- Walder, R., et al, Recurrent Novae: Progenitors of SN Ia? arXiv:0912.2498v1, 2009

%%%%%%%%%