

LMCN 2019-11a: uma nova excepcional descoberta em 2019 na Grande Nuvem de Magalhães.

Tasso A. Napoleão (BraTS, Alfa Crucis, REA)

Resumo

Em um trabalho anterior (Napoleão, 2019, doravante “*Paper 1*”), relatamos a descoberta da nova LMCN 2019-07a na Grande Nuvem de Magalhães (GNM) por nosso grupo de busca de transientes BraTS¹, e apresentamos os primeiros resultados observacionais disponíveis nos dois meses seguintes à sua erupção. Em 11 de novembro de 2019, o grupo descobriu a segunda nova do ano na GNM, denominada LMCN 2019-11a. No presente trabalho, elaborado dois meses após a explosão desta última, procuramos sintetizar as informações existentes sobre ela e estabelecer um paralelo entre ambas as novas a partir da discussão de suas semelhanças e diferenças em um contexto astrofísico.

1 – Introdução

No “*Paper 1*”, detalhamos os diversos fatores que tornam a GNM - uma galáxia satélite da Via Láctea - um “laboratório” ideal para acompanhar os fenômenos e processos astrofísicos envolvidos na evolução das estrelas. Entre eles estão: sua distância relativamente modesta (50 kiloparsecs, ou 163 mil anos-luz), e determinada com exatidão de 2% (Pietrzynski et al. 2013); a baixa extinção interestelar na direção da GNM (Imara; Blitz, 2007); sua massa (da ordem de 10^{10} massas solares) e a imensa diversidade de sua população estelar (Westerlund, 1996); e, por fim (devido principalmente a diversas pesquisas realizadas nas últimas décadas com o Hubble Space Telescope) um conhecimento apreciável da sua história de formação estelar e de enriquecimento químico, permitindo reconstituir os picos antigos e recentes na taxa de formação de estrelas e entender a diversidade de idades e composições químicas de suas populações estelares (Olsen, 1999; Holtzman et al, 1999; Smecker-Hane et al, 2002; Harris; Zaritsky, 2009).

Sabemos assim que a GNM é rica em gás e poeira (as “matérias-primas” para gerar novas estrelas); que possui baixa metalicidade e que apresenta atualmente uma taxa de formação estelar (SFR) cinco vezes maior que a da Via Láctea. De acordo com pesquisas recentes, a SFR da Grande Nuvem de Magalhães parece ter sido alta até cerca de 12 bilhões de anos (Gyr) atrás. Entre 12 Gyr e 5 Gyr, seguiu-se um longo intervalo quiescente, com SFR reduzida. A partir de 5 Gyr, no entanto, a taxa de formação de estrelas dispara outra vez, atingindo picos em 2 Gyr, 500 Myr, 100 Myr e 12 Myr (Harris; Zaritsky, 2009).

Um dos principais objetivos do grupo BraTS é a busca de novas clássicas na Via Láctea e nas Nuvens de Magalhães. Como é amplamente sabido, as novas clássicas são estrelas variáveis cataclísmicas que estão no estado quiescente durante a maior parte do tempo e que sofrem abruptamente, de forma imprevisível, uma erupção na qual seu brilho aumenta tipicamente

¹ Componentes do grupo BraTS (por ordem alfabética de nomes): Carlos Colesanti, Cristóvão Jacques, Eduardo Pimentel, Israel Mussi, João Amâncio, João Ribeiro, Leonardo Amaral, Marcelo Domingues, Paulo Holvorcem, Tasso Napoleão.

algo como 5 a 15 magnitudes em questão de horas ou poucos dias. Após a erupção, o brilho decai lentamente, demandando anos ou décadas para voltar ao estado original.

Acredita-se hoje que todas as novas sejam compostas por sistemas binários, nos quais uma das componentes é uma anã branca; a companheira pode ser uma gigante vermelha ou uma estrela da sequência principal. A matéria do envelope gasoso da companheira (basicamente hidrogênio) flui através de um disco de acreção e se deposita em uma fina camada sobre a superfície da anã. Quando a temperatura ali atinge cerca de 10^7 K, iniciam-se as reações termonucleares de fusão do hidrogênio nessa camada da anã branca (ou, eventualmente, no próprio disco de acreção). 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 continuará acrescentando massa até a erupção seguinte, que hoje se acredita que ocorra em uma escala de tempo de milênios, no caso das novas clássicas. Existe, todavia, um pequeno grupo de dez *novas recorrentes* em nossa Via Láctea (além de algumas poucas descobertas na GNM e em M31) nas quais a periodicidade das erupções está entre 10 e 100 anos apenas (Schaefer, 2010). Acredita-se que estas possuam anãs brancas com massas próximas ao limite de Chandrasekhar, acretando o material da secundária em taxas muito altas – o que as tornaria candidatas a progenitoras de supernovas do Tipo Ia, justamente o tipo de maior interesse como indicadores de distâncias cosmológicas (Anupama, 2013). Embora ainda não haja consenso absoluto sobre essa hipótese, pesquisas recentes incluindo a análise das curvas de luz e a modelagem de várias novas recorrentes da Galáxia indicam que sete entre elas poderiam ter como destino final a explosão como SN do Tipo Ia (Hachisu; Kato, 2002).

Quanto à taxa teórica média de ocorrência de novas na Via Láctea, os modelos mais recentes indicam algo em torno de 50 novas/ano (Shafter, 2017). No entanto, o que conseguimos observar na prática é muito menos que isso, devido principalmente à absorção interestelar causada pelo gás e poeira existentes no disco da Galáxia. Mesmo nos anos mais recentes (2008-2018), o número real de descobertas na Via Láctea tem atingido apenas a média de 10 novas/ano (<https://asd.gsfc.nasa.gov/Koji.Mukai/novae/novae.html>). Uma relação completa de todas as 407 novas que foram descobertas na Galáxia entre os anos de 1612 e 2010 pode ser encontrada em http://www.cbat.eps.harvard.edu/nova_list.html. Praticamente todas elas apresentaram magnitudes ao alcance do instrumental do BraTS.

Já na galáxia de Andrômeda (M31), com massa, luminosidade e morfologia não muito diferentes da Via Láctea, a taxa média teórica é estimada em torno de 65 novas/ano (Darnley et al., 2006), enquanto que o número *real* de descobertas está geralmente entre 30 e 40 novas a cada ano, graças à nossa posição externa à galáxia e à baixa extinção interestelar na sua direção. Infelizmente, no entanto, até as novas mais luminosas de M31, em função da distância dessa galáxia, atingem na melhor das hipóteses a faixa de magnitudes (V) entre 15 e 16, o que as coloca fora do alcance do instrumental utilizado pelo BraTS. Todas as descobertas de novas na galáxia de Andrômeda desde o ano de 1909 podem ser vistas no endereço http://www.mpe.mpg.de/~m31novae/opt/m31/M31_table.html.

Na Grande Nuvem de Magalhães, a situação é bem diferente. A sua massa é da ordem de $10^{10}M_{\odot}$ - ou seja, cem vezes menor que a da Galáxia ou de M31 (além, naturalmente, do tipo morfológico da GNM, que é bem distinto das destas últimas). De forma compatível com sua massa, a taxa teórica de ocorrência de novas na GNM está em torno de 2 a 3 novas/ano.

Alguns exemplos: 2.5 ± 0.5 novas/ano (Della Valle et al. 1994); 2.4 ± 0.8 novas/ano (Mróz et al. 2016). Neste caso, o número real de novas descobertas anualmente também é menor que a taxa teórica: no período de 1926 a 2019, foram encontradas 55 novas na GNM, o que corresponde, em média, a apenas 0.6 novas/ano. Mesmo nos anos mais recentes (entre 2008 e 2018), a média de descobertas foi de pouco mais de uma nova/ano (http://www.mpe.mpg.de/~m31novae/opt/lmc/LMC_table.html). A maior parte delas tem ocorrido na região da barra central. Aqui (assim como na Pequena Nuvem de Magalhães) reside uma excelente oportunidade para o BraTS: além da declinação austral, as magnitudes das novas que ocorrem em ambas essas galáxias são perfeitamente compatíveis com o equipamento do BraTS.

Finalmente, e lembrando um comentário já feito no “*Paper 1*”, a taxa de ocorrência de novas em qualquer galáxia guarda uma forte correlação com a sua massa (ou luminosidade), e provavelmente também com seu tipo morfológico (Matteucci et al. 2003; Della Valle et al. 1994). Podemos comparar as taxas relativas (ou específicas) de produção de novas em galáxias com diferentes massas e morfologias, normalizando-as segundo um critério denominado LSNR (*Luminosity Specific Nova Rates*). Por esse critério, a GNM passa a ter a *taxa específica mais alta de ocorrência de novas* entre todas as quinze galáxias nas quais foi possível observar esses objetos até o momento (Shafter et al. 2014). É provável que isso esteja relacionado à história recente de formação estelar da GNM, como veremos adiante.

2 - Descoberta da nova LMCN 2019-11a

A nova LMCN 2019-11a foi descoberta pelo BraTS na madrugada de 11 de novembro de 2019. Assim como no caso da LMCN 2019-07a, as imagens foram feitas com uma câmera Canon 6D acoplada a uma teleobjetiva 200mm f/1.8, instaladas no Observatório SONEAR, na cidade de Oliveira, MG. As imagens de busca foram processadas com o software SkySift, desenvolvido por P.R.Holvorcem² e as potenciais detecções da noite, examinadas visualmente por um dos membros do grupo poucas horas após o imageamento.

No caso da nova LMCN 2019-11a, a detecção foi feita através de uma sequência de três imagens de busca, sendo a primeira delas feita em 2019 Novembro 11.22631 UTC (ou seja, aproximadamente às 02h26m do dia 11/11, no horário local; ou ainda em Data Juliana 2458798.72631). Localizada na Grande Nuvem de Magalhães (mais precisamente, em Ascensão Reta 05h14m53.6s e Declinação $-70^{\circ}09'48.6''$), sua magnitude era de 11.9 no instante da descoberta. Neste momento, a nova havia cruzado há pouco o meridiano local, encontrando-se aproximadamente à altura de 43° sobre o horizonte, em azimute 183° , na constelação de Mensa (a mesma da nova descoberta em julho). Na Figura 1 vê-se essa imagem no painel do software SkySift.

Na manhã do dia 11/11, as imagens foram discutidas entre vários dos membros do grupo. Verificou-se que não havia nenhum objeto visível naquela posição, em imagens feitas uma semana antes (em Nov. 4.2503 UTC). Para confirmação e para refinar a astrometria do objeto com um instrumento de maior porte, foi feita uma imagem com um telescópio remoto em Siding Springs, na Austrália (reproduzida aqui na Figura 2). A comunicação da descoberta foi feita em seguida ao CBAT (*Central Bureau for Astronomical Telegrams*, da União Astronômica Internacional), através da página Web “*Transient Objects Confirmation Page*” (TOCP), que pode ser acessada em <http://www.cbat.eps.harvard.edu/unconf/tocp.html>. O objeto recebeu assim a denominação provisória³ de PNV J05145365-7009486.

² Informações sobre o software SkySift podem ser encontradas em <http://sites.mpc.com.br/holvorcem/>.

³ A denominação definitiva da nova (LMCN 2019-11a) foi atribuída três semanas após a descoberta.

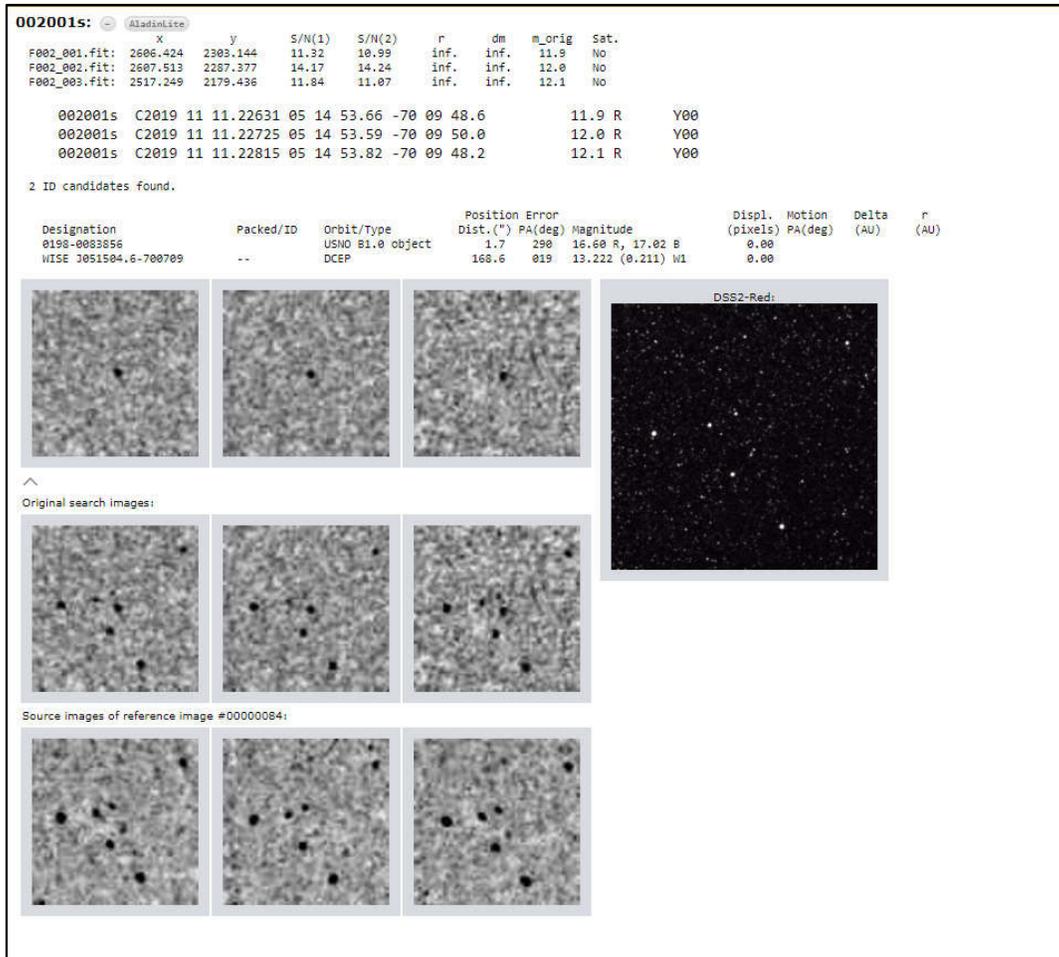


Figura 1: Imagens de descoberta da nova LMCN 2019-11a (software SkySift). As três imagens da linha central correspondem aos horários assinalados em azul. As três imagens da linha inferior são de referência e as três da linha superior são as subtrações respectivas. Uma imagem do DSS2 (à direita) ajuda a confirmar a identificação. Créditos: BraTS.

A comunicação original da descoberta⁴ é transcrita a seguir:
 PNV J05145365-7009486

2019 11 11.2263

Discovered by C. Jacques, L. Amaral, C. Colesanti, E. Pimentel, I. Mussi, J. Ribeiro, M. Domingues, J. Amancio, P. Holvorcem, T. Napoleao on behalf of the Brazilian Transient Search - BraTS - at SONEAR Observatory, Oliveira, Brazil with three frames with 60 seconds exposure using an telephoto 200m f/1.8 + Canon 6D camera with magnitude 12.0 under limiting mag = 13.5. Nothing is visible at this location on the previous frame (limiting mag = 14.5) taken on 2019 Nov. 4.2503 UT. Possible nova in LMC.

O follow-up da descoberta da LMCN 2019-11a está disponível na seguinte página do CBAT:
<http://www.cbat.eps.harvard.edu/unconf/followups/J05145365-7009486.html>

⁴ Além do CBAT, o objeto foi reportado também ao *Transient Name Server* da IAU (<https://wis-tns.weizmann.ac.il/>), no qual recebeu a denominação de AT 2019uni.

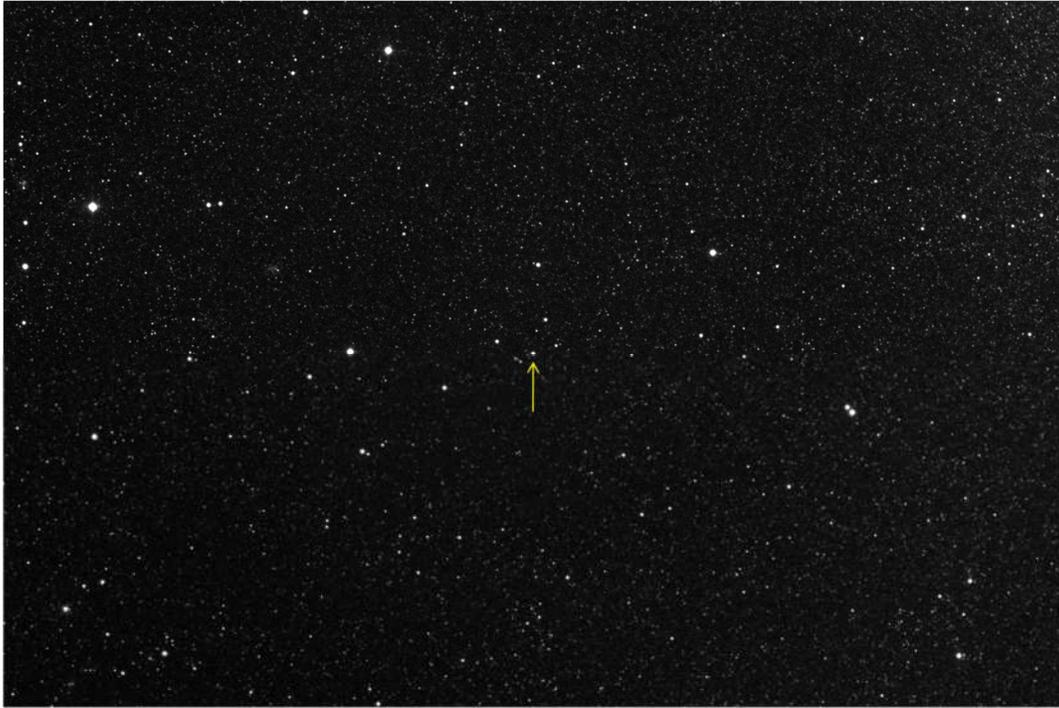


Figura 2: Imagem de confirmação da nova LMCN 2019-11a (indicada pela seta). Exposição de 60s feita remotamente em Siding Springs, Austrália com um refletor de 50cm, f/6.8.

3 – Posição da nova LMCN 2019-11a e possíveis progenitoras

Neste ponto começam as diferenças entre as duas novas de 2019. Enquanto a nova LMCN 2019-07a se localizava na região da barra central da GNM, a LMCN 2019-11a explodiu em uma área bastante distante dela. Mas por que isso seria relevante?

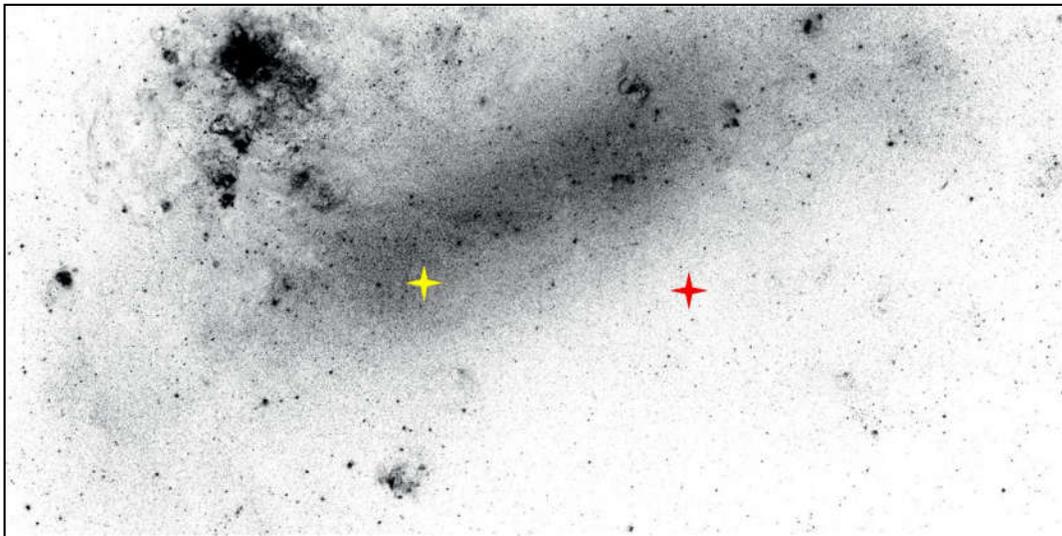


Figura 3: Posições das novas LMCN 2019-07a (na barra central, em amarelo) e LMCN 2019-11a (à direita, em vermelho). Imagem adaptada do DSS2.

Lembramos que a GNM é uma galáxia que até algumas décadas atrás era classificada como irregular, mas a partir de 1971 (de Vaucouleurs e Freeman) foi reclassificada como um tipo muito especial de galáxia espiral: na verdade, o paradigma de uma classe: as espirais barradas magelânicas (SBm). De forma geral, essa classe se caracteriza pela presença de uma barra central (mas sem o bojo presente nas espirais clássicas), de um único braço espiral, e isofotas externas em posição excêntrica em relação ao centro da barra. Os mesmos autores sugerem que este tipo de configuração costuma ocorrer em pares (por exemplo, a GNM e a PNM), e que essa morfologia peculiar é induzida por interações gravitacionais (no caso da GNM, com a PNM e com a própria Via Láctea). Tudo isso implica em que as progenitoras das duas novas poderiam pertencer a populações estelares (e idades) distintas, e que as massas das suas anãs brancas sejam diferentes. Em consequência, as propriedades fotométricas e espectroscópicas das novas resultantes poderiam ser diferenciadas. Mais adiante, veremos se isso se comprovou.

A progenitora mais provável da nova LMCN 2019-11a, tendo como base a astrometria efetuada pelo BraTS na imagem de confirmação feita na Austrália (Figura 2), é a estrela listada no GAIA DR2 com a identificação 4652135578095561728, que se situa a apenas 0.1 segundos de arco de nossa medição. Sua magnitude g (segundo o GAIA DR2) é de 20.17, o que é perfeitamente compatível com o incremento de brilho esperado para uma nova à distância da GNM (50 kpc). Nossa opinião foi também corroborada em 13/11 pela ATEL #13 289.

No caso da nova descoberta em julho, infelizmente não foi possível identificar com segurança uma progenitora. A astrometria indicou duas opções com probabilidade similar: as fontes GAIA DR2 4657903650424803584, com magnitude $g = 19.85$, e GAIA DR2 4657903650475628288, com mag $g = 19.42$. No entanto, a paralaxe não está disponível para nenhuma dessas estrelas e as suas magnitudes aparentes são tão próximas entre si que qualquer uma das duas fontes poderia ser a progenitora, do ponto de vista do incremento de brilho na explosão.

4 – Fotometria.

4.1 - Uma constatação surpreendente.

Juntamente com a comunicação da descoberta ao TOCP/CBAT, pesquisamos de imediato todos os registros fotométricos correspondentes às coordenadas do objeto disponíveis na Web. Encontramos dados bastante significativos na página do ASAS-SN Sky Patrol (<https://asas-sn.osu.edu/>) (ver Tabela 1). Estava evidente pelos mesmos que a erupção havia ocorrido *pelo menos dois dias antes* de nossa descoberta, tendo passado despercebida pelos demais observadores em todo o mundo. Em nosso caso, teria sido impossível detectá-la na data da explosão, pois o céu esteve inteiramente encoberto por nuvens espessas no sítio observacional do BraTS nas três noites anteriores à data da descoberta (11 de novembro).

Estava claro que (ao contrário do que ocorreu com a nova descoberta em julho, que foi descoberta *antes* do máximo), a nova LMCN 2019-11a havia sido descoberta já na fase de declínio de brilho. Com grande probabilidade, mesmo ao ser detectada pelo ASAS-SN em 9 de novembro, ela já estava caindo de brilho. Os números da fotometria do ASAS-SN denotavam um fato impressionante: a nova havia decaído de *duas magnitudes em dois dias apenas!*

Por que isso é surpreendente? Para entender melhor, lembremos antes de alguns conceitos fundamentais que foram discutidos em detalhes no “*Paper 1*”. As novas são classificadas segundo a taxa de declínio do seu brilho a partir da data do máximo. Essa taxa de declínio é expressa através de dois parâmetros obtidos diretamente da curva de luz: t_2 (tempo

necessário para a nova decair duas magnitudes desde o máximo) ou t_3 (tempo para a nova decair três magnitudes). A classificação tradicionalmente mais usada foi estabelecida por Payne-Gaposchkin (1957). Baseada no parâmetro t_2 , ela lista cinco classes: novas muito rápidas ($t_2 < 10$ dias), novas rápidas (11-25 dias), novas moderadamente rápidas (26-80 dias), novas lentas (81-150 dias) e muito lentas (151-250 dias). E desde os trabalhos de Payne-Gaposchkin e de McLaughlin (1939, 1945) sabe-se que as novas mais rápidas são também as mais luminosas intrinsecamente.

HJD	UT_date	mag	
2458795.67927	2019-11-08.1792853	>16.399	
2458796.83898	2019-11-09.3390115	10.463	Máximo pelo ASAS
2458796.84022	2019-11-09.3402412	10.474	
2458796.84143	2019-11-09.3414606	10.463	
2458797.74140	2019-11-10.2414296	11.774	
2458797.74262	2019-11-10.2426476	11.750	
2458797.74383	2019-11-10.2438660	11.768	
2458798.71913	2019-11-11.2191689	12.316	
2458798.72035	2019-11-11.2203930	12.324	
2458798.72157	2019-11-11.2216085	12.310	
2458798.72627	2019-11-11.2263100	11.9	Data de nossa descoberta
2458799.75115	2019-11-12.2512111	12.688	
2458799.75243	2019-11-12.2524783	12.678	
2458799.75370	2019-11-12.2537476	12.693	
2458799.77571	2019-11-12.2757626	12.712	

Tabela 1 – Evolução da magnitude da nova LMCN 2019-11a segundo dados do ASAS-SN Sky Patrol. Em amarelo, a data/hora do máximo observado pelo ASAS. Em azul, a data/hora (em HJD) da descoberta pelo BraTS, cerca de dois dias depois⁵.

Tendo em vista esses conceitos e os valores da Tabela 1, vamos supor que o brilho máximo real da nova tenha sido aquele medido pelo ASAS-SN em 2019-11-09.3390115 UTC (ou seja, $m = 10.463$). *Note-se que isso não é necessariamente verdadeiro: o máximo real pode ter ocorrido horas antes*, e a rigor em qualquer instante a partir da medição anterior (que foi feita 28 horas antes do máximo medido pelo ASAS-SN). O mesmo se aplica ao valor da magnitude no máximo real. Porém, como simplesmente não existiu nenhuma observação do objeto durante essas 28 horas, teremos de supor para efeito dos cálculos que o máximo do ASAS-SN seja de fato o real.

Nessas condições, podemos afirmar que o valor de t_2 foi de dois dias apenas. Ou seja, uma nova extremamente rápida. Ora, uma queda de brilho de uma magnitude por dia após o máximo não é nada comum. Uma pesquisa recente sobre as propriedades fotométricas e espectroscópicas de 43 novas observadas entre 1926 e 2012 na GNM (Shafter, 2013) indicou que, entre as novas que possuem registros observacionais confiáveis e em número suficiente, apenas duas delas tiveram t_2 tão curto. Raciocínio idêntico se aplica ao parâmetro t_3 . O valor de t_3 encontrado a partir do máximo do ASAS-SN foi de aproximadamente 6 dias (da mesma forma, passível de ser de algumas horas a mais, devido à incerteza no instante do máximo real.). Também pelo índice t_3 , a LMCN 2019-07a foi uma das mais rápidas até hoje: na mesma pesquisa, Shafter indica apenas três novas que tiveram t_3 na mesma ordem de grandeza que

⁵ O sistema fotométrico usado pelo BraTS não é o mesmo que o utilizado pelo ASAS. Por isso a aparente discrepância entre o valor da magnitude medido na descoberta e os dados do ASAS.

ela. Como era de se esperar, em todos esses casos as novas foram muito brilhantes. Será que isso se aplicaria também à LMCN 2019-07a?

Para entender como foi feito o cálculo da luminosidade da LMC 2019-11a vamos recorrer novamente ao “*Paper 1*”. Nele, vimos que existe uma relação empírica entre as luminosidades das novas clássicas no seu máximo (expressa por sua magnitude absoluta M_v) e os parâmetros t_2 ou t_3 . Proposto originalmente por McLaughlin (1945), este método passou a ser conhecido como “MMRD” (“*maximum-magnitude-rate-of-decline*”), e ainda hoje é uma ferramenta de grande utilidade para estimar a magnitude absoluta (ou luminosidade) das novas.

Ao longo dos anos, diversos pesquisadores desenvolveram diferentes versões da relação MMRD, algumas baseadas nos valores de t_2 e outras nos de t_3 . Abaixo, relacionamos algumas dessas equações, e logo em seguida usaremos cada uma delas para calcular a magnitude absoluta da nova LMCN 2019-11a, lembrando que $t_2 = 2$ dias e $t_3 = 6$ dias.

Relações MMRD baseadas em t_2 :

1. $M_v = -7.92 - 0.81 \arctan [(1.32 - \log t_2)/0.23]$ (Della Valle; Livio, 1995)
2. $M_v = -8.02 - 1.23 \arctan [(1.32 - \log t_2)/0.23]$ (Downes; Duerbeck, 2000)
3. $M_v = -9.60 + 0.28 \log t_2 + 0.70(\log t_2)^2$ (Liller; Shida, 2004)

Equação	Versões / referências	Valores de M_v
1	Della Valle; Livio, 1995	-9.0
2	Downes; Duerbeck, 2000	-9.7
3	Liller; Shida, 2004	-9.5

Relações MMRD baseadas em t_3 :

1. $M_0 = -11.8 + 2.5 \log t_3$ (Schmidt-Kaler, 1957)
2. $M_v = -11.99 + 2.54 \log t_3$ (Downes; Duerbeck, 2000)

Equação	Versões / referências	Valores de M_v
1	Schmidt-Kaler, 1957	-9.9
2	Downes; Duerbeck, 2000	-10.0

Como cada uma dessas expressões da relação MMRD foi deduzida empiricamente a partir de dados observacionais de novas anteriores, é razoável considerar a média dos cinco valores encontrados para representar a magnitude absoluta da nova LMCN 2019-11a. O resultado é:

$$M_v = -9.6 \pm 0.4$$

Este é um resultado notável. Apenas uma dentre todas as 55 novas encontradas até hoje na Grande Nuvem de Magalhães (a extraordinária nova LMCN 1991-04a) foi mais luminosa que a nova descoberta em novembro de 2019⁶. Pelos registros da época (Schwarz et al, 2001), a

⁶ Outra nova recente (LMCN 1990-01a) teve características espectrais semelhantes às da 2019-11a, e pode ter atingido a mesma luminosidade, porém seu máximo brilho não foi observado diretamente.

nova de 1991 atingiu a magnitude absoluta de -10, situava-se em região da GNM não muito distante da LMCN 2019-11a (o que implica extinção não muito diferente e talvez população estelar similar), e resultou provavelmente da acreção de material de baixa metalicidade a uma anã branca relativamente massiva (massa igual ou maior a $1.2 M_{\odot}$). A curva de luz da nova de 1991 indicou uma magnitude aparente de 9.0, a mais brilhante já registrada na GNM.

A esse ponto, se assumirmos que a magnitude absoluta de -9.6 ± 0.4 (média das relações MMRD) está correta para a LMCN 2019-11a, podemos simular qual teria sido o valor da magnitude aparente *V no máximo real*, assumindo assim que ele tenha ocorrido algumas horas antes da primeira medida do ASAS-SN. Isto é possível, uma vez que a distância da GNM é bem conhecida. Lembrando que o avermelhamento total (foreground + extragaláctico) para a GNM é de 0.12 (Imara; Blitz, 2007), podemos escrever, pela equação do módulo de distância:

$$m_v - M_v = 5 \log d - 5 + A_v$$

$$m_v + 9.6 (\pm 0.4) = 5 \log 49970 - 5 + 3.1 \times 0.12$$

$$m_v = \mathbf{9.3 \pm 0.4}$$

Uma vez mais, este é um resultado surpreendente. Além de ser a segunda nova mais brilhante já observada na GNM, esse resultado implica em um aumento de brilho vertiginoso, da ordem de dez magnitudes, em questão de apenas um dia - e provavelmente uma transição para um início de declínio posterior, da ordem de uma magnitude por dia. É um cenário fantástico, porém não inusitado: algumas poucas novas galácticas, como a Nova Cygni 1975 (V1500 Cyg) ou a Nova Puppis 1942 (CP Pup) tiveram trajetórias até mais rápidas e de maior amplitude. Se colocada à mesma distância da Nova Puppis 1942, por exemplo, a LMCN 2019-11a teria no céu a magnitude aparente da ordem de Alfa Centauri ou de Vega no brilho máximo.

Ainda a título de comparação, a nova LMCN 2019-11a foi cerca de 50 vezes mais brilhante que a 2019-07a, descoberta pelo BraTS em julho. Ou, ainda, era equivalente em seu máximo a aproximadamente seis milhões de vezes a luminosidade solar.

4.2 – A curva de luz

Os registros fotométricos da nova LMCN 2019-11a por membros da AAVSO se iniciaram em 13 de novembro (dois dias após a descoberta) com a nova já em franco declínio de brilho. A partir daí, e até a nova ultrapassar a magnitude-limite instrumental dos observadores da AAVSO (em torno de $V=17$), passaram-se apenas 31 dias! A nova foi acompanhada em diversos comprimentos de onda (B, V, R, I), em um total de 494 observações⁷. A curva de luz AAVSO em V é vista na Figura 4. Agradecemos à AAVSO pela generosidade da sua disponibilização pública. Ao contrário do que ocorreu com a nova LMCN 2019-07a, no entanto, não foi possível o uso da curva de luz da AAVSO para a determinação de t_2 ou t_3 – pelo evidente motivo que a nova já havia ultrapassado o máximo por pelo menos quatro dias quando as observações se iniciaram.

Nota-se, mais uma vez, a diferença entre as duas novas descobertas em 2019. Para atingir a mesma magnitude-limite dos observadores da AAVSO, a primeira nova (2019-07a) levou 70 dias (mais do dobro do tempo que a 2019-11a).

⁷ Cerca de 97% dos registros da AAVSO foram feitos por dois observadores: o cientista belga Franz-Josef Hambusch e o norte-americano Gordon Myers (o presidente atual da Associação). Ambos são experts em estrelas variáveis cataclísmicas e operam telescópios remotos, respectivamente no Chile e Austrália.

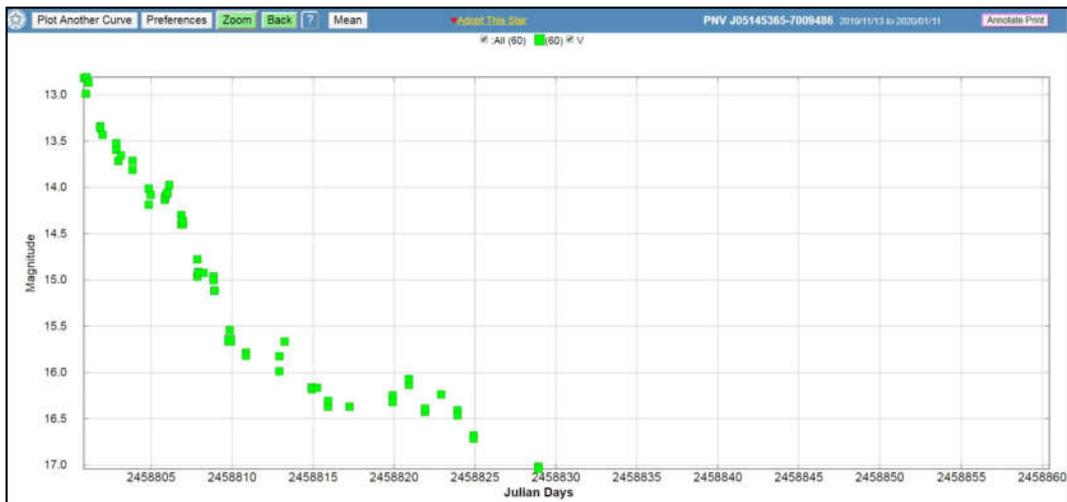


Figura 4: Curva de luz (V Johnson) para a nova LMCN 2019-11a até a magnitude limite de 17.0. A nova já estava em declínio de brilho na data da primeira observação. Fonte: AAVSO.

Na Figura 5, para efeito comparativo, apresenta-se a curva de luz V da nova LMCN 2019-07a, pelos dados AAVSO até a magnitude-limite 17. Mesmo quando corrigimos para as diferenças de magnitude entre as duas novas nos seus máximos, chegamos a uma taxa média de declínio de brilho (até a magnitude-limite) da ordem de 0.09 mag/dia para a LMCN 2019-07a, versus 0.21 mag/dia para a LMCN 2019-11a. Ou seja, mais uma evidência de que a nova de novembro foi de fato uma das mais rápidas já observadas na GNM.

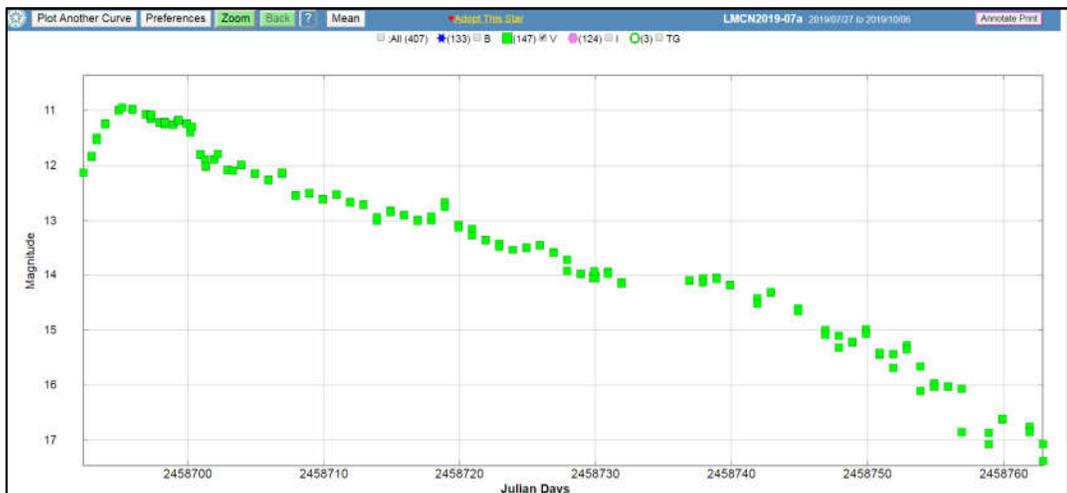


Figura 5: Curva de luz (V Johnson) para a nova LMCN 2019-07a até magnitude limite ~ 17.2 . Neste caso o máximo foi atingido três dias após a data da primeira observação. Fonte: AAVSO.

5 – Espectroscopia

Os resultados da fotometria (uma nova extremamente luminosa e energética) já permitiam antecipar as características espectrais da nova LMCN 2019-11a: quase certamente, seria uma nova do tipo He/N, o mais comum entre as novas muito rápidas. Como vimos no “Paper 1”, desde a década de 1990 se sabe que os espectros das novas na fase pós-erupção se dividem em dois grandes grupos: o primeiro é formado pelas novas do tipo Fell, que (além de fortes linhas de Balmer do hidrogênio) apresentam tipicamente finas linhas de emissão de Fell, perfis P-Cygni pronunciados, velocidades de expansão dos gases moderadamente altas e um baixo nível de ionização. O outro tipo (as novas do tipo He/N), além de ter as linhas de Balmer também proeminentes, apresenta linhas fortes e largas de hélio e nitrogênio, velocidades de expansão dos gases muito altas (geralmente acima de 2500 km/s), altos níveis de ionização, e os seus espectros evoluem mais rapidamente que os das novas de Fell (Williams, 1992). Estudos posteriores mostraram que o espectro das novas do tipo He/N se origina no material ejetado da anã branca, enquanto que os espectros do tipo Fell se formam no grande envelope de gás cuja origem está na componente secundária (Williams, 2012).

De fato, logo no dia posterior à descoberta, foram divulgados (com diferença de minutos) dois reportes de espectros da nova, feitos respectivamente com o telescópio de 1.5m do CTIO (Cerro Tololo Interamerican Observatory, F. Walter, ATEL 13287) e com o telescópio de 11m do SALT (South African Large Telescope, Aydi et al, ATEL 13288). Infelizmente, nenhum desses dois grupos disponibilizou seus perfis espectrais na Web, mas as descrições são unânimes em caracterizar a nova LMCN 2019-11a como sendo inequivocamente do tipo He/N, com linhas de emissão largas e fortes de H (Balmer), HeI, Ni e NaI. A largura da linha H-Alfa, por exemplo, medida pelo parâmetro FWZI (*full width at zero intensity*, ou largura da linha à intensidade zero) atingia reportadamente mais de 8500 km/s; medida pelo parâmetro FWHM (*full width at half maximum*, ou largura da linha na metade da altura máxima) era de 4500 km/s. As linhas mostravam perfis estruturados tipo P-Cygni, cuja largura (em absorção + emissão) atingia 4300 km/s em H-Beta, ou 4000 km/s em HeI, por exemplo, indicando velocidades de expansão dos gases extremamente altas. Apenas para comparação, os parâmetros equivalentes eram de aproximadamente 1250 km/s para a nova LMCN 2019-07a, que era da classe Fell.

As análises de todos os espectros de novas obtidos a partir dos numerosos programas de busca que têm sido efetuados ao longo dos anos na Grande Nuvem de Magalhães, em M31 e na Via Láctea mostraram que, tanto para M31 como para a Galáxia, a proporção entre os dois tipos de espectros é de aproximadamente 80% de novas de Fell contra 20% de novas de He/N. Para a GNM, no entanto as estatísticas são bem diferentes: 50% das novas são do tipo Fell e 50% do tipo He/N. As novas da GNM são também, em média, mais rápidas do que as observadas em M31 (ou na Via Láctea). Como se explicariam essas discrepâncias? Uma hipótese que nos parece bastante razoável é aventada em Shafter (2013): a causa residiria na diferença entre as populações dominantes na GNM em comparação com galáxias como M31, a Via Láctea, e outras assemelhadas. A maior parte das novas da GNM parece ter origem na sua população estelar intermediária e jovem, com idade média em torno de 1- 3 Gyr, enquanto que a maioria das novas de M31 ocorre na região do bojo, em que as idades estão em torno de 12 Gyr. Modelos de síntese de populações estelares (Yungelson et al., 1997) demonstram que as populações mais jovens tendem a produzir novas em maior número que as mais antigas, principalmente devido às massas mais altas (em média) das anãs brancas formadas em épocas mais recentes e baixas metalicidades. Em anãs brancas com massas maiores, como parece ser o caso da nova LMCN 2019-11a, as reações termonucleares de fusão que produzem a explosão poderão se desencadear com uma quantidade de massa acretada (e ejetada) menor, resultando em uma evolução fotométrica mais rápida, uma fração maior de novas do tipo He/N. e uma taxa específica de ocorrência de novas (normalizada pelo fator LSNR) mais alta,

equivalente a duas a três vezes a taxa média de galáxias como a nossa Via Láctea ou M31. Dessa forma, as propriedades das novas da GNM e sua alta taxa normalizada de ocorrência seriam resultado de sua história de formação estelar recente, particularmente o pico da SFR ocorrido a partir de 5 Gyr atrás (Mróz et al., 2017).

6 - Conclusões:

Nosso objetivo neste trabalho foi apresentar e interpretar os primeiros resultados dos registros observacionais da nova LMCN 2019-11a, bem como estabelecer uma comparação com a nova LMCN 2019-07a, também descoberta em 2019 pelo grupo BraTS. Embora os dados atuais sejam baseados em apenas dois meses de observações, acreditamos que algumas primeiras conclusões já podem ser consideradas razoáveis neste momento. Resumindo:

- A nova LMCN 2019-11a é uma das novas mais rápidas já observadas na Grande Nuvem de Magalhães. O momento exato do máximo, infelizmente, é impossível de determinar, uma vez que ela foi descoberta na fase de declínio; todavia, os dados de patrulhas fotométricas da região (ASAS-SN) indicam que a erupção ocorreu entre Novembro 08.1792853 UTC e Novembro 09.3390115 UTC. Neste último registro, a nova estava com magnitude 10.463, mas isso não significa necessariamente que o máximo se deu neste preciso instante, e nem que o valor da magnitude no máximo real tenha sido esse. Ao contrário, se levarmos em conta a média de diversas relações MMRD e os instantes t_2 e t_3 observados, é possível que o máximo real tenha ocorrido algumas horas antes e que a nova tenha alcançado magnitude V da ordem de pelo menos meia magnitude mais brilhante que a observação do ASAS-SN. Nesta hipótese, a nova LMCN 2019-11a seria a segunda nova mais luminosa já observada na GNM.
- Os espectros obtidos, tanto pela equipe do CTIO quanto do SALT, confirmam que se trata inequivocamente de uma nova da classe He/N, que são justamente as mais rápidas e energéticas; isso é corroborado pelas medidas da largura dos perfis P-Cygni feitas por ambos os grupos, que indicam velocidades de expansão dos gases extremamente altas para uma nova clássica. Essas conclusões são perfeitamente compatíveis com aquelas obtidas da fotometria.
- Uma comparação bastante representativa entre as duas novas de 2019 e uma amostra de 30 outras novas descobertas em anos anteriores na GNM pode ser feita utilizando o método gráfico proposto em Shafter (2013) e Shafter et al (2014), que reproduzimos na Figura 6. Nesse processo, a taxa de declínio de brilho logo após o máximo (v) é estimada como $(2/t_2)$, quando apenas t_2 foi determinado; como $(3/t_3)$, quando apenas t_3 é conhecido; ou, quando ambos estão disponíveis, pela média aritmética desses dois parâmetros (caso que consideraremos aqui para nossas duas novas). Para a nova LMCN 2019-07a, vimos no “*Paper 1*” que a taxa resultante desse cálculo foi de $v = 0.09$ magnitudes/dia. Usando o mesmo processo de cálculo para a LMCN 2019-11a, encontramos $v = 0.75$ mag/dia. Na Figura 6, essas taxas estão colocadas (sob forma logarítmica) no eixo das abscissas, enquanto que no eixo das ordenadas está M_V , a magnitude absoluta (V) no máximo. As 30 novas descobertas na Grande Nuvem de Magalhães e compiladas por Shafter (2013) são representadas por dois símbolos distintos: as novas do tipo He/N (mais energéticas, mais rápidas e luminosas, e cujas anãs brancas possuem massas mais altas) são representadas como quadrados. Já as novas do tipo FeII, mais lentas e menos energéticas do que as precedentes, são vistas como círculos. As cruzes representam novas cuja classe espectroscópica não foi determinada. O triângulo vermelho representa a nova LMCN 2019-07a, que, como se vê na figura, pode ser considerada uma nova típica entre as da classe FeII da GNM. O quadrado amarelo representa a nova LMCN 2019-11a, que visivelmente se apresenta

como uma das mais rápidas e luminosas entre todas as novas da amostra. Lembramos, todavia, que a posição indicada corresponde aos parâmetros t_2 , t_3 e à magnitude absoluta (média) determinadas no item 4.1. Como existe uma incerteza em todos esses valores pelo fato de o máximo real não ter sido observado (lembramos que, para efeito dos cálculos, usamos o máximo registrado pelo ASAS-SN), estimamos que nossa margem de erro esteja em torno de meia magnitude a mais ou a menos – o que não invalida a conclusão sobre a velocidade e a luminosidade extraordinárias desta nova.

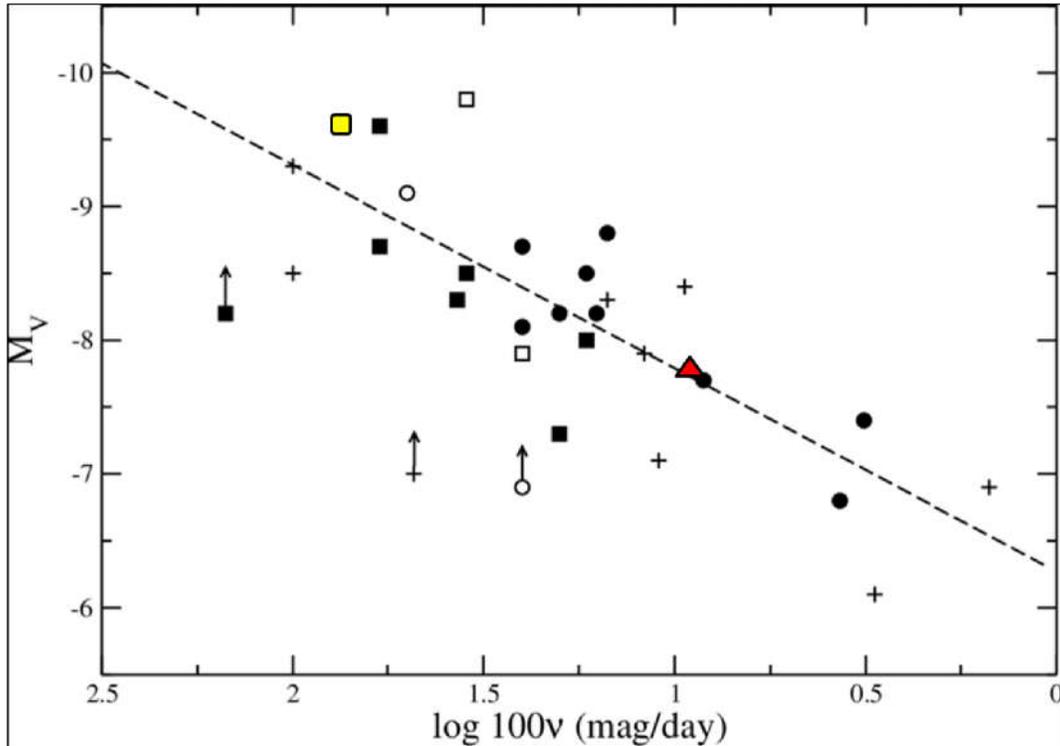


Figura 6 - Relação MMRD para uma amostra de 30 novas da GNM mostrando a posição relativa das novas LMCN 2019-07a (triângulo vermelho) e LMCN 2019-11a (quadrado amarelo)
Créditos do diagrama original: Shafter et al., 2014.

- A linha tracejada é o melhor ajuste da relação MMRD para as 30 novas da amostra (determinada em Shafter et al., 2014):

$$M_v = -(1.52 \pm 0.24) \log_{10} v - 6.27 \pm 0.32$$

Para o caso das nossas novas, esse ajuste fornece $M_v = 7.7 \pm 0.5$ para a nova LMCN 2019-07a, e -9.1 ± 0.8 para a nova LMCN 2019-11a, razoavelmente compatíveis com os valores obtidos por outras equações (note-se que a incerteza em relação à média é maior para a LMCN 2019-11a, em virtude dos fatores já discutidos aqui e do fato de esta nova não ser exatamente uma “nova típica” em relação à amostra).

- Por fim, no “*Paper 1*” estimamos a massa da componente anã branca da nova LMCN 2019-07a. Isso foi feito através do uso de uma expressão analítica desenvolvida por Mario Livio, que relaciona a magnitude absoluta B no máximo (M_B) com a massa da anã, em unidades de massa solar (Livio, 1992):

$$M_B = - 8.3 - 10.0 \log (M_{\text{anã}}/M_{\odot})$$

Isso foi possível porque o máximo M_B da nova LMCN 2019-07a foi perfeitamente determinado a partir da curva de luz BVRI da AAVSO, uma vez que aquela nova foi descoberta *antes* do máximo. Obtivemos um valor da ordem de 0.9 massas solares para a anã branca da nova.

Já para a nova LMCN 2019-11a, infelizmente, não há como se fazer um cálculo similar, uma vez que a nova foi descoberta bem após o máximo, e portanto simplesmente não se tem o valor de M_B (nem mesmo de forma aproximada, pois os dados do ASAS-SN não abrangem a magnitude B). No entanto, não é descabido traçar um paralelo de nossa nova com aquela que apresentou várias características semelhantes: a nova LMCN 1991-04a, justamente a mais luminosa e rápida descoberta na GNM, além de situada na mesma região. Felizmente, a nova LMCN 1991-04a foi descoberta antes do máximo, o que permitiu uma análise detalhada de sua curva de luz por vários meses e em múltiplos comprimentos de onda (Schwarz et al, 2001). Neste notável artigo, os autores modelam o cenário da explosão de uma nova tão luminosa quanto a LMCN 1991-04a e concluem, entre vários outros parâmetros, que a massa de sua componente anã branca deveria ser pelo menos da ordem de 1.2 massas solares. Parece-nos que este deveria também ser o limite superior para a massa da anã branca da LMCN 2019-11a. Esta conclusão está em linha com o fato de que as novas mais luminosas e/ou que apresentam t_2 ou t_3 mais curto são também as que possuem anãs brancas de massas maiores, acordo com Shafter (2013) e Mróz et al. (2016), e obviamente respeitado o limite de Chandrasekhar, de aproximadamente $1.4 M_{\odot}$.

Referências

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

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.

Aydi, E. et al., SALT spectroscopic observations of the LMC nova PNV J05145365-7009486. ATEL 13288, 2019.

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.

Della Valle, M. et al., The nova rate in galaxies of different Hubble types, *Astronomy and Astrophysics* 287, 403, 1994.

Della Valle, M.; Livio, M., The calibration of novae as distance indicators, *Astrophysical Journal* 452:704, 1995.

- de Vaucouleurs, G., Freeman, K. C. (1972), Structure and dynamics of barred spiral galaxies, in particular of the Magellanic type. *Vistas in Astronomy*, 14, 163
- Downes, R.; Duerbeck, H., Optical imaging of nova shells and the MMRD relationship, *Astronomical Journal* 120 :2007, 2000.
- 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.
- Harris, J.; Zaritsky, D., The star formation history of the Large Magellanic Cloud, *Astronomical Journal*, 138, 1243–1260, 2009.
- Holtzman, J., et al, Observations and Implications of the Star Formation History of the Large Magellanic Cloud. *Astronomical Journal*, Vol. 118-5, 2262-2279, 1999.
- Imara, N.; Blitz, L., Extinction in the Large Magellanic Cloud, *Astrophysical Journal* 662:969, 2007.
- Kochanek et al., The All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN) Light Curve Server v1.0. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 129:104502 (2017)
- Liller, W.; Shida, R., Magellanic Clouds novae and the peak magnitude vs rate-of-decline relationship, *ASP conference series*, vol 310, 2004.
- Livio, M., Classical novae and the extragalactic distance scale, *Astrophysical Journal*, 393:516, 1992.
- Matteucci, F. et al., 2003, Modelling the nova rate in galaxies, *Astronomy and Astrophysics* 405, 23–30, 2003.
- 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.
- Mróz, P. et al., OGLE Atlas of classical novae II – Magellanic Clouds, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 222:9, 2016.
- Napoleão, T.A., Um estudo sobre a nova LMCN 2019-07a, na Grande Nuvem de Magalhães 2019). Disponível em <https://alfacrucis.org/fotometria/um-estudo-sobre-a-nova-lmcn-2019-07a/>.
- Olsen, K., Star Formation Histories from Hubble Space Telescope Color-Magnitude Diagrams of Six Fields of the Large Magellanic Cloud. *Astronomical Journal*, Vol. 117-5, 2244-2267, 1999.
- Payne-Gaposchkin, C. *The galactic novae*. New York: Dover Publications, 1957.
- Pietrzynski, G. et al., An eclipsing binary distance to the Large Magellanic Cloud accurate to 2 per cent, *Nature* vol 495, 76–79, 2013.

- Schaefer, B., Comprehensive Photometric Histories of All Known Galactic Recurrent Novae. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 187-2, 275-373, 2010.
- Schmidt-Kaler, Th. Die Lichtkurven-Leuchtkraft-Beziehung Neuer Sterne. *Zeitschrift für Astrophysik*, 41, 182, 1957.
- Schwarz, G.J. et al, Multiwavelength analyses of the extraordinary nova LMC 1991. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 320, 103-123 (2001).
- Shafter, A. W. , Photometric and spectroscopic properties of novae in the Large Magellanic Cloud, *Astronomical Journal* 145:117 (11pp), 2013.
- Shafter, A. W. et al., Extragalactic nova populations, *ASP Conference Series*, Vol. 490, 2014.n
- Shafter, A. W., The Galactic nova rate revisited, *Astrophysical Journal*, 834:196, 2017.
- Smecker-Hane, T., et al, The Star Formation History of the Large Magellanic Cloud. *Astrophysical Journal*, Vol. 566-1, 239-244, 2002.
- Staveley-Smith, L., et al., A new look at the large-scale H I structure of the Large Magellanic Cloud, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 339, 87–104, 2003.
- Vanlandingham, K.M. et al, Elemental abundances for Nova LMC 1990#1. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 308, 577–587 (1999)
- Walter, F.M., PNV J05145365-7009486 is a He-N Nova in the LMC. ATel #13287, 2019.
- Westerlund, B.E. *The Magellanic Clouds*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- Williams, R. The formation of novae spectra, *Astronomical Journal*, Volume 104, Number 2, 1992.
- Williams, R. Origin of the "He/N" and "Fe II" spectral classes of novae, *Astronomical Journal*, Volume 144, # 4, 2012.
- Yungelson, L., et al., On the rate of novae in galaxies of different types, *Astrophysical Journal* 481:127, 1997.

%%%%%%%%%