



*NGC 1566 no infravermelho próximo. Imagem feita pela câmera WFC3 do Hubble Space Telescope.
Créditos: ESA/Hubble & NASA*

A supernova 2021aefx e a distância da galáxia NGC 1566

Tasso Napoleão e Carlos Colesanti

Abril, 2022

A supernova 2021afx e a distância da galáxia NGC 1566

Tasso Napoleão e Carlos Colesanti (Alfa Crucis, REA)

1 – Introdução e histórico

NGC 1566 é uma galáxia espiral de magnitude 9.7, situada na constelação de Doradus, nas coordenadas: Ascensão Reta 04h20m00.42s e Declinação -54g56m16.1s. Historicamente, ela foi descoberta em 1826 pelo escocês James Dunlop (1793-1848), com um telescópio de 23 cm de abertura construído por ele. Dunlop nunca teve formação em astronomia, mas desde cedo havia demonstrado aptidão para mecânica: já aos 17 anos, enquanto trabalhava como operário em uma fábrica têxtil em Beith, na Escócia, fabricava telescópios de boa qualidade. Esse talento foi notado por um seu compatriota, o oficial-general do exército britânico e astrônomo amador Sir Thomas Brisbane, que em 1821 seria nomeado Governador da província de Nova Gales do Sul, Austrália.

Dunlop foi contratado no mesmo ano como segundo assistente do observatório Parramatta (ver Fig 1), que Brisbane mandou construir próximo a Sydney em 1822, e começou a compilar um catálogo estelar do Hemisfério Sul com 7385 estrelas, que só seria publicado por Brisbane em 1835. Terminado seu trabalho em 1826, Dunlop deixou o observatório e, da sua própria casa nas imediações, passou a se dedicar à elaboração de um catálogo de 629 nebulosas e aglomerados do Hemisfério Sul com o telescópio de 23 cm que ele mesmo construía.

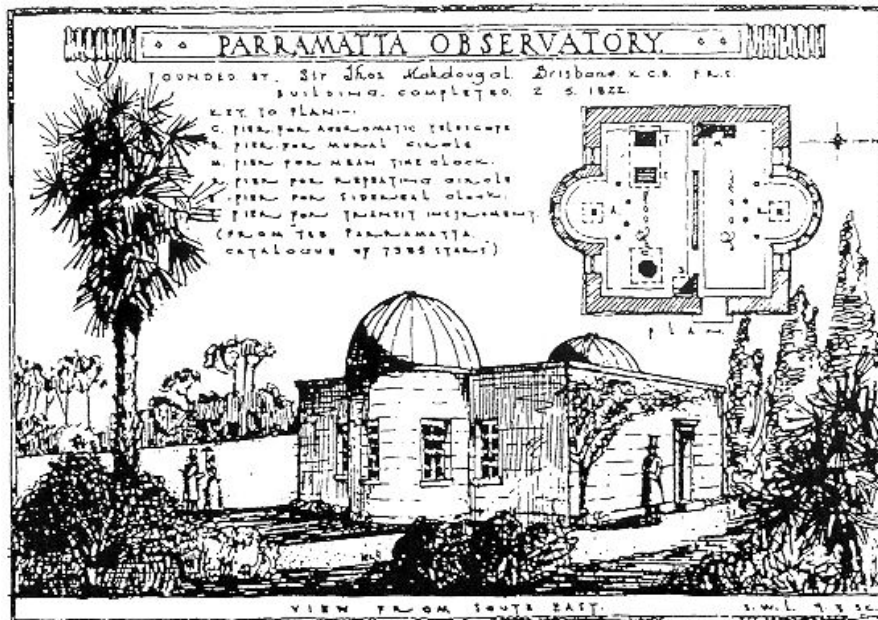


Fig 1 – Observatório Parramatta, próximo a Sydney, capital da Nova Gales do Sul, Austrália, como visto em 1822. Nele trabalhavam, além dos assistentes Carl Rümker e James Dunlop, o próprio administrador da província, Thomas Brisbane, que era também astrônomo amador. Fonte: Steinicke (2022)

Esse trabalho, publicado em 1828 no *Philosophical Transactions of the Royal Society*, seria o primeiro catálogo extenso de objetos difusos elaborado para o hemisfério austral¹.

Infelizmente, como as posições medidas por Dunlop não eram precisas, nem todos os objetos de seu catálogo puderam ser identificados: John Herschel, em 1847, confirmou apenas 211 deles. Por essa razão, o catálogo de Dunlop foi relativamente esquecido. Apenas no século 21, pesquisadores australianos (Cozens, Walsh & Orchiston, 2010) revisaram cuidadosamente o catálogo e conseguiram confirmar um total de 335 objetos difusos reais, sendo 187 deles na Galáxia e os restantes nas Nuvens de Magalhães. Os objetos de Dunlop remanescentes eram provavelmente estrelas duplas ou asterismos apagados, percebidos erroneamente como objetos difusos pelo escocês devido à má qualidade de suas oculares. No catálogo de Dunlop, a galáxia NGC 1566 foi listada sob a denominação Dunlop 338, sendo descrita como “uma nebulosa bastante grande, com cerca de 4 minutos de arco de diâmetro, moderada e gradualmente condensada em direção ao seu centro”.



*Figura 2 – A galáxia NGC 1566 em imagem do Hubble Legacy Archive
(créditos do processamento: Andrealuna Pizzetti)*

¹ Na realidade, um primeiro catálogo de objetos difusos austrais já havia sido preparado no século 18 pelo abade francês Nicolas Louis de Lacaille (1713–1762), observando em Cape Town em 1751-52 com um pequeno refrator de 1.3 cm abertura. No entanto (e certamente em função do modesto instrumento empregado) o catálogo de Lacaille era bem mais simples, contendo apenas 42 objetos.

2 – O problema da distância de NGC 1566

A classificação morfológica atual de NGC 1566 segundo o critério de De Vaucouleurs (SAB(s)bc) indica que ela é uma galáxia espiral do tipo intermediário entre as espirais normais e as barradas, sem um anel definido na sua região central e com abertura dos braços espirais entre média e pronunciada (ver Fig.2). A galáxia é também uma galáxia ativa – na verdade, uma das mais brilhantes e próximas galáxias de Seyfert conhecidas. Lembramos que as galáxias de Seyfert possuem núcleos extremamente concentrados e luminosos, o que se atribui à presença de buracos negros centrais supermassivos. A massa do buraco negro no centro de NGC 1566 é estimada como $(1.3 \pm 0.6) \times 10^7 M_{\odot}$, ou seja, cerca de mil vezes mais massivo do que o BN central de nossa Via Láctea (Slater et al, 2019). NGC 1566 é a mais brilhante entre as 26 componentes do subgrupo principal do chamado Grupo de Doradus (Kilborn et al, 2005). Bem mais rico que nosso próprio Grupo Local, esse é um dos mais complexos grupos de galáxias do Hemisfério Sul, e consiste de pelo menos 70 – 80 galáxias em uma área aparente da ordem de 10° quadrados no céu, o que corresponde a uma área real de cerca de 3 Mpc^3 .

Praticamente todas as informações acima, no entanto, dependem da distância real de NGC 1566. Curiosamente, apesar de a galáxia estar relativamente próxima, existe uma inesperada controvérsia sobre a distância de NGC 1566. Os valores encontrados variam amplamente, não apenas com o método empregado, mas também de autor para autor com o mesmo método. O NED (NASA-IPAC Extragalactic Database)², reconhecidamente o mais extenso repositório de dados sobre objetos extragalácticos, relaciona 36 medidas do *redshift* de NGC 1566, realizadas por diferentes pesquisadores entre 1991 e 2018, que vão de 0.003999 até 0.005390. Os correspondentes resultados para a velocidade de recessão variaram entre 1199 km/s até 1616 km/s. Obviamente esses resultados foram obtidos, nesse período de quase 30 anos, com diferentes valores da constante de Hubble-Lemaître (H_0); porém, se pudéssemos parametrizar os resultados usando aquele valor que o NED chama de “valor preferido”³ para essa constante (67.8 km/s/Mpc), as distâncias de NGC 1566 estariam entre 17.7 Mpc e 23.8 Mpc. O “valor mais aceito” atualmente para a distância segundo o NED (baseado nos redshifts), seria assim da ordem de $22.03 \pm 1.54 \text{ Mpc}$. Até aí não parece haver grandes discrepâncias.

O problema aparece realmente quando se consideram as medidas de distâncias feitas por outros métodos, independentes do redshift. O NED relaciona 19 diferentes medições, feitas entre 1981 e 2018. Dezesete delas utilizam a relação de Tully-Fisher, tradicionalmente um dos métodos mais usados para a medida da distância de galáxias espirais desde a sua concepção, na década de 1970 (Tully e Fisher, 1977). Essencialmente, o método de Tully-Fisher nada mais é do que uma relação empírica entre a luminosidade intrínseca de uma galáxia espiral (ou a sua massa) e a sua velocidade máxima de rotação (que pode ser medida, por exemplo, pela largura da linha de 21cm do hidrogênio neutro). Grosso modo, podemos dizer que as galáxias espirais mais luminosas e massivas possuem velocidades de rotação maiores, na proporção dada por $L \propto W^4$ (sendo L a luminosidade absoluta e W a largura da linha espectral). Uma vez

² Disponível em <https://ned.ipac.caltech.edu/>, consultado em 11/04/2022

³ O “valor preferido” para H_0 , de acordo com o NED (NASA-IPAC Extragalactic Database) em 04/2022, é de 67.8 km/s/Mpc, e é baseado nos resultados obtidos em 2015 pelo satélite Planck, da Agência Espacial Européia, para os parâmetros cosmológicos da radiação cósmica de fundo.

tendo a luminosidade intrínseca e a magnitude aparente integrada da galáxia (além da extinção), pode-se calcular com facilidade o módulo de distância e o valor desta.

Mas na prática as dificuldades inerentes à precisão dos dados observacionais aparecem: as 17 determinações de distância de NGC 1566 pela relação de Tully-Fisher apontaram resultados que vão desde 5.5 Mpc até 16.5 Mpc – ou seja, uma diferença de 200% usando o mesmo método! Essa não é uma situação trivial – e, como o processo de Tully-Fisher é um método já consagrado para o cálculo de distâncias extragalácticas, consideramos mais provável que as divergências encontradas entre os autores sejam relacionadas a incertezas de natureza observacional nas medições. Com efeito, em Slater et al (2019) encontramos o seguinte comentário (em tradução nossa): *“Muitos estudos usando a relação de Tully Fisher (TFR) encontraram distâncias para NGC 1566 entre 18 Mpc e cerca de 6 Mpc.(...) Mesmo que os espectros de HI usados nesses estudos possuam altas relações sinal-ruído, eles mostram claramente uma estrutura com picos duplos, o que pode levar a subestimar significativamente a velocidade de rotação e em consequência a distância baseada na relação TFR”*. Note-se que, para contornar essa deficiência, Slater et al (2019) usaram para seu artigo um valor médio de 10 Mpc entre as diversas medidas de distância baseadas na relação TFR. Essa não nos parece uma solução ideal, pois ignora os valores das distâncias obtidas pelos métodos baseados nos redshifts e velocidades de recessão, já mencionados acima e que, como exposto, apresentam maior consistência entre si que aquelas baseadas na relação de Tully Fisher.

Em novembro de 2021, todavia, um evento incomum chamou nossa atenção como sendo uma boa oportunidade de testar essas duas séries de medidas de distância através de um terceiro método. Esse evento foi a explosão da supernova 2021aefx em NGC 1566. Nos itens seguintes, demonstramos como, a partir de medidas fotométricas e espectroscópicas, foi possível determinar a distância de NGC 1566 de forma independente.

3 – A supernova 2021aefx: classificação e espectroscopia

Em 11 de novembro de 2021, o site TNS (Transient Name Server) comunicava a descoberta, às 12:30:43.776 UTC (em data Juliana, JD=2459530.02134), de uma possível supernova nas coordenadas RA = 04:19:53.320 e DEC = -54:56:52.60 (J2000.0), com magnitude 17.25 (C). Descoberta efetuada pelo grupo DLT40 (mantido pela U.C.Davis / University of Arizona). A primeira classificação do TNS foi incerta: uma “supernova do Tipo Ia ou Ib ou Ic, com o brilho ainda em ascensão”, com base em um espectro feito no mesmo dia 11 de novembro, às 20:55:27 UTC, com o espectrógrafo RSS do South African Large Telescope (SALT). Em vista do provável aumento de brilho nas noites seguintes e consequente probabilidade de melhora da relação sinal-ruído nos espectros para refinar a classificação da SN, o TNS recomendou vivamente o monitoramento espectroscópico desta supernova.



Figura 3 – NGC 1566 e a SN 2021aefx (indicada pelas setas), em 23/11/2021. Créditos: Rolando Ligustri.

Infelizmente, não dispomos de instrumental para produzir espectros de objetos de magnitude tão alta. No entanto, nas noites seguintes, nos foi possível analisar os perfis espectrais que iam sendo disponibilizados por colegas amadores e profissionais no TNS (<https://wis-tns.weizmann.ac.il/>) e no fórum de espectroscopia amadora ARAS (<https://www.spectro-aras.com/forum/>), com o auxílio do software de classificação de supernovas GELATO (<https://gelato.tng.iac.es/>), desenvolvido pelo Padova-Asiago Supernova Group. O GELATO tem como base os algoritmos de Harutyunyan et al (2008).

O primeiro espectro, como descrito no comunicado do TNS, não foi conclusivo em termos de classificação, provavelmente pela alta magnitude do alvo na data da descoberta. Um segundo espectro foi disponibilizado em 13 de novembro pelo programa PESSTO (*Public ESO Spectroscopic Survey of Transient Objects*), que utiliza o NTT (*New Technology Telescope*), situado em La Silla, Chile. A análise do espectro do PESSTO feita com o GELATO revelou uma probabilidade de 67% de que a SN fosse do Tipo Ia.

O terceiro espectro foi disponibilizado em 14 de novembro e, em um feito notável, foi obtido remotamente por um grupo de astrônomos amadores franceses, operando um telescópio de 12 polegadas e um espectroscópio amador (Alpy 600), situado no Chile. O grupo, denominado 2SPOT (*Southern Spectroscopic Project Observatory Team*) é formado por S. Charbonnel, O. Garde, L. Mulato, P. Le Dù e T. Petit. O setup instrumental foi montado na região de Rio Hurtado, Chile (não muito distante de Cerro Tololo) em maio de 2021; até hoje é o único observatório amador no mundo dedicado à espectroscopia remota. O espectro do 2SPOT feito em 14/11 revelou uma probabilidade de 73% de que a SN fosse do Tipo Ia: um resultado

praticamente equivalente ao obtido um dia antes com um telescópio profissional de 3.6 metros de abertura! Note-se que os dados fotométricos do ASAS-SN mostram que nessa noite a magnitude (Sloan g) da supernova ainda era da ordem de 15, o que só vem a ressaltar a competência e o talento dos colegas franceses.

Finalmente, o quarto espectro disponibilizado no TNS foi também realizado pelo grupo 2SPOT, mas agora no dia 03 de dezembro (DJ 2459551.7065), cerca de três dias após o brilho máximo (ver Figura 4). Este espectro é extraordinário. Com a SN 2021aefx mais brilhante e agora na fase na qual a maioria das supernovas costuma ser descoberta e em que seus perfis espectrais mostram com clareza os padrões característicos de cada tipo (justamente após o máximo), torna-se bastante evidente a identificação das principais linhas e a confirmação do tipo correto da supernova com maior segurança, através do reconhecimento desses mesmos padrões em comparação com outras SN cujos perfis espectrais já foram classificados anteriormente.

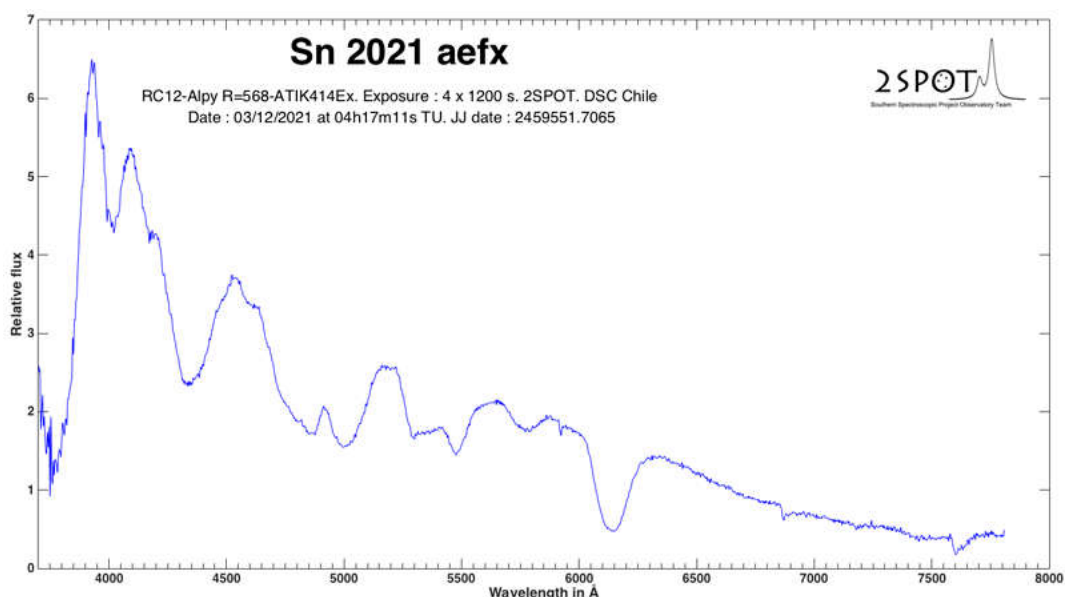


Fig 4 - Espectro da SN 2021aefx, cerca de três dias após o máximo em B. Créditos: Grupo 2SPOT, imagem originalmente publicada no ARAS Spectroscopy Forum em 03/12/2021.

A análise do perfil espectral gentilmente disponibilizado pelo grupo 2SPOT, por nós realizada com o software VSPEC, permitiu identificar algumas linhas características das supernovas Tipo Ia nesta fase: a mais marcante é a linha de Si II $\lambda 6355$, que no espectro aparece fortemente desviada para o azul em virtude da alta velocidade de expansão dos gases (Filippenko, 1997). Note-se que essa linha aparece no espectro do 2SPOT, como visto na Figura 4, com o baricentro em 6141 Å; o cálculo da largura equivalente pelo VSPEC indicou $Leq = 102$. Esse valor da largura equivalente pode ser convertido em velocidade de expansão através do diagrama da Figura 2 de Wang, Filippenko et al (2009), baseado em uma amostra de espectros de SN Tipo Ia tomados a ± 3 dias do máximo. Desse gráfico, pudemos obter para a velocidade de expansão o valor $v = 10\,300$ km/s, aproximadamente. Este valor é compatível com o que obtivemos diretamente pelo efeito Doppler com o auxílio do VSPEC, que foi de $v = 10\,100$ km/s, e também com o forte alargamento da linha tal como se vê no espectro. No perfil do 2SPOT podemos identificar claramente também, com o auxílio do VSPEC e dos perfis vistos em

Wang e Li (2009), as linhas H e K do CaII (*blueshiftadas* em $\sim 3700 \text{ \AA}$), além das linhas de Si II $\lambda 4130$, do tripleto de Mg II em $\lambda 4481$, linhas blendadas de FeII $\lambda 5018$ e Si II $\lambda 5051$, de FeII $\lambda 5169$, de S II $\lambda 5654$ e de Si II $\lambda 5972$ – todas, naturalmente, alargadas e desviadas para o azul, da mesma forma como descrito acima para a linha de Si II $\lambda 6355$.

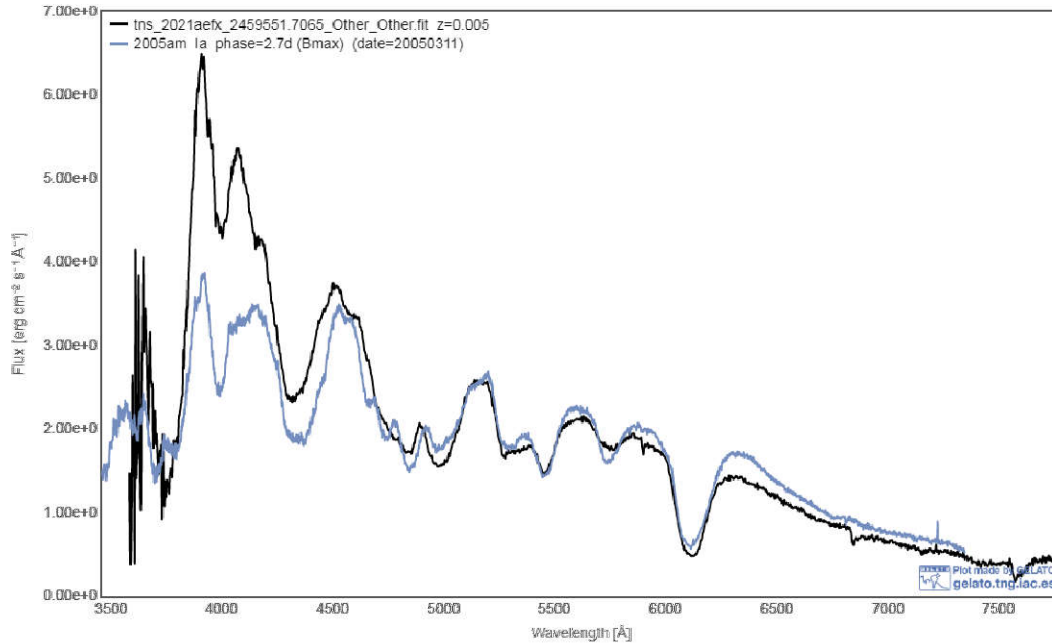


Fig. 5 – Espectro da SN 2021aefx obtido pelo grupo 2SPOT (linha negra) comparada no software GELATO contra o modelo da SN 2005am, do Tipo Ia (linha azul), obtido também cerca de 3 dias após o máximo em B. O redshift usado nesta análise foi de 0.005. A semelhança é evidente.

É exatamente através da comparação com os “templates” de milhares de supernovas em sua base de dados que softwares como o GELATO operam. Assim, a partir do perfil espectral disponibilizado pelo 2SPOT em 3 de dezembro, usamos o GELATO para determinar a classe da SN 2021aefx. O resultado não poderia ser melhor: o software indicou 100% de probabilidade de se tratar de uma SN do Tipo Ia (ver Figura 5). Mas por que isso é importante? Porque daqui para diante poderemos usar com segurança as leis físicas e o tratamento matemático que são características desse tipo específico de supernova.

A importância de uma classificação precisa de uma supernova pode ser bem entendida através de um caso sugestivo. Na verdade, a supernova 2021aefx não foi a primeira a ser registrada em NGC 1566. Em 19/6/2010, o astrônomo amador sul-africano Berto Monard descobriu a SN 2010el nesta mesma galáxia (CBET 2334/2339). Os primeiros espectros indicavam perfis característicos de uma supernova do Tipo Ia – porém, os posteriores mostravam que a velocidade de expansão dos gases era bem mais lenta do que a usual para esse tipo. Nas semanas posteriores, com as medições fotométricas, o desenvolvimento da curva de luz e o cálculo de sua luminosidade (muito mais fraca que a habitual), chegou-se à conclusão que ela era na realidade um nova classe de supernovas, que a partir de 2013 passou a ser conhecido

como Tipo Iax (Foley et al, 2013; Jha, 2017)⁴. Claro que, se usássemos para a SN 2010el as mesmas equações que usaremos a seguir para a SN 2021aefx, nossos resultados finais do cálculo da distância de NGC 1566 seriam totalmente errados.

4 – Análise das curvas de luz da SN 2021aefx

A supernova 2021aefx, afortunadamente, foi descoberta dezoito dias antes de seu máximo, o que é em si um evento bastante raro; a maioria das SN é descoberta já próxima ao seu brilho máximo, ou pouco depois dele. Dessa forma, tivemos a sorte de contar com dois conjuntos de dados fotométricos bastante sólidos para a determinação das curvas de luz e seus parâmetros. O primeiro foi a série das magnitudes do campo da SN (na banda Sloan g) medidas pelo ASAS-SN Sky Patrol de outubro 2021 a abril 2022, em um total de 464 dados em 179 dias. Ver Fig. 6.

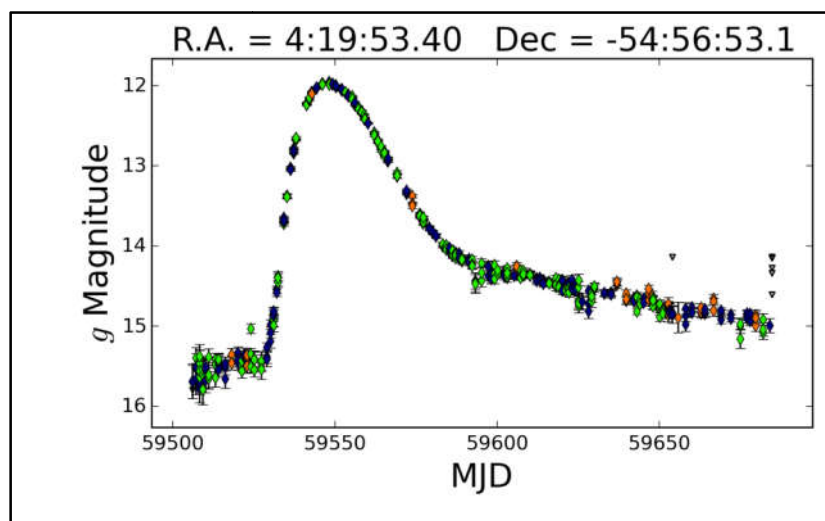


Figura 6 – Curva de luz (em mag Sloan g) da SN 2021 aefx no período de 19/10/2021 até 15/04/2022.
Créditos: ASAS-SN Sky Patrol (Kochanek et al, 2017)

As outras séries fotométricas foram selecionadas a partir de 163 observações (multibanda) de diversos membros da AAVSO, entre 16/11/2021 e 10/04/2022. A Tabela 1 relaciona os observadores, número de dados e bandas fotométricas selecionados para este trabalho:

Observador	(cod AAVSO)	No. Observações	Bandas (cod. AAVSO)
Matthias Kolb	KMWA	108	CV,TB,TG,TR
Carlos Colesanti	CCT	32	V
Eddy Muyliaert	MUY	18	CV,TG,V
Steve Boerner	BSCC	4	CV
Stewart Bean	BENS	1	CV

Tabela 1: Medidas fotométricas que foram utilizadas nesta análise (Crédito: AAVSO e observadores)

⁴ Supernovas do Tipo Iax também resultam da deflagração de reações termonucleares em anãs brancas, assim como as SN Tipo Ia; porém o processo se dá de forma muito menos energética. Como resultado, a anã branca não é completamente destruída, deixando uma remanescente (que passou a ser apelidada pelos especialistas, com bom humor, de “estrela zumbi”). Até 2022, conheciam-se algumas dezenas de supernovas desse novo tipo, sendo que em 2021 foi descoberta a mais fraca dentre todas: a SN 2021fcp, cerca de 600 vezes menos luminosa que uma SN Tipo Ia típica (Karambelkar et al, 2021).

A Figura 7 apresenta as curvas de luz (multibanda) das medidas dos citados observadores da AAVSO, superpostas em um mesmo gráfico. Obviamente, para as reduções necessárias a este trabalho, cada banda fotométrica foi analisada de forma individualizada.

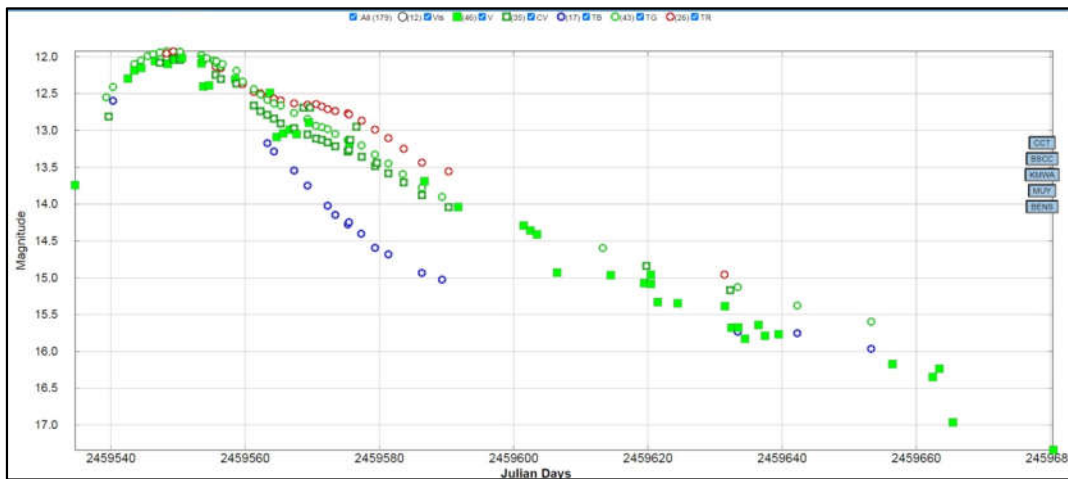


Figura 7 – Curvas de luz em diversas bandas com base nas medidas dos observadores da Tabela 1 (Crédito: AAVSO)

Como seria de se esperar, as coberturas – e também as precisões nas datas de máximos brilhos e nas magnitudes não são uniformes. É necessário considerar que os sistemas fotométricos e filtros não foram os mesmos para todos os observadores. A mais completa e precisa cobertura, sem dúvida, foi aquela fornecida pelo ASAS-SN Sky Patrol. Os instrumentos desse programa, todavia, não utilizam o filtro V do sistema UBVRI Johnson, que é aquele referido em praticamente toda a literatura disponível sobre a evolução fotométrica de supernovas, mas sim um filtro (Sloan g)⁵.

Já entre os observadores selecionados da AAVSO, apenas dois utilizaram o filtro V Johnson standard, o que limitou bastante o número de dados úteis nesse canal. Infelizmente, não existem, nessa série, medições nos canais B e R do sistema UBVRI, que seria o ideal para a acurácia do conjunto de dados usados para a redução. A maior parte dos dados, todavia, está em um sistema fotométrico “tricolor” aceito pela AAVSO (magnitudes TB, TG e TR) que é usado geralmente pelos observadores que possuem câmeras DSLR ou CCD coloridas⁶. Embora não sejam equivalentes ao padrão UBVRI, felizmente essas magnitudes se aproximam bastante daquelas, de tal forma que (ainda que sua utilização introduza uma fonte adicional de incertezas nos dados fotométricos) essas medidas fornecem uma consistência suficiente para as finalidades esperadas. Finalmente, as magnitudes da AAVSO listadas como magnitudes CV

⁵ O filtro Sloan g é um dos filtros do sistema fotométricos desenvolvido para o Sloan Digital Sky Survey (SDSS); possui cor verde-azulada, um comprimento de onda efetivo central (λ_M) de 4800 Å e FWHM (largura à meia-altura) de 1410 Å, comparado com o filtro V da série Johnson UBVRI, que possui cor verde, $\lambda_M = 5500$ Å e FWHM de 880 Å.

⁶ O filtro TG (Tri-color green) corresponde ao canal verde (G) das câmeras DSLR ou CCD coloridas, e as medidas em TG usam para as estrelas de comparação as magnitudes V padrão, obtidas no catálogo fotométrico APASS (AAVSO Photometric All-Sky Survey) ou similar. Os filtros TB e TR, de forma análoga, usam os canais azul e vermelho daquelas câmeras e usam para as estrelas de comparação as magnitudes B e R padrão dos mesmos catálogos.

(ou seja, obtidas sem filtro ou com filtro *clear*), embora tenham sido de utilidade para registrar as primeiras visualizações da supernova, foram consideradas muito imprecisas para as nossas finalidades nas reduções que se seguem e não foram, portanto, usadas nos cálculos⁷.

A Tabela 2 resume os dados recolhidos das séries fotométricas descritas acima, que foram usados nas reduções. Como já indicado, na série da ASAS-SN (mag Sloan g) a cobertura foi excelente (permitindo determinar o instante do máximo neste canal com boa precisão), porém nela não existem contrapartidas em outros canais (azul e vermelho). Neste caso tivemos de recorrer à série “tricolor” TG, TB e TR da AAVSO. Enquanto a série TG (43 medidas) mostrou boa consistência com as medidas feitas com a série feita com filtro V Johnson (46 medidas) e a série TR mostrou cobertura ainda razoável (26 medidas), a série TB, infelizmente, teve uma cobertura inferior às demais (17 medidas), e pecou principalmente por inexistirem medições nos momentos em que elas seriam mais necessárias para nossas reduções (nas proximidades do brilho máximo em B). Em decorrência desse fato, foi necessário determinar o máximo em TB através de interpolações polinomiais a partir das 17 medições existentes, além de comparar esses resultados com *templates* existentes na literatura para a fotometria UBVRI de outras supernovas para assegurar a consistência nos resultados. Mesmo assim, consideramos que a ausência de medidas em canais B ou TB nas proximidades do respectivo brilho máximo foi com segurança a maior fonte de incertezas para o resultado final deste trabalho.

Sistema fotométrico	Magnitude no máximo	Data Juliana do máximo
Sloan g	11.954	2459548.67323
V	12.020	2459548.48507
TB	12.06 (*)	2459547 (*)
TG	11.924	2459548.27951
TR	11.956	2459549.28232

Tabela 2 - Parâmetros obtidos das curvas de luz

(*)valores obtidos por interpolação

5 – Redução dos dados e cálculo da distância

Até o início da década de 1990, imaginava-se que todas as supernovas do Tipo Ia possuíam a mesma luminosidade e magnitude absoluta no máximo. O conjunto de curvas de luz existentes era bastante homogêneo, o que parecia consistente com o fato (já conhecido) que o mecanismo de explosão desse tipo de SN envolvia sempre um sistema binário com transferência de massa, no qual um dos componentes era uma anã branca de carbono-oxigênio cuja massa se aproximava do limite de Chandrasekhar. No entanto, com o desenvolvimento da tecnologia dos detectores CCD e novos programas de busca sistemática e automatizada de supernovas, a qualidade das curvas de luz aumentou drasticamente – e então se percebeu que a uniformidade das SN Tipo Ia não era perfeita como se supunha, havendo variações sensíveis tanto no formato da curva de luz como no brilho máximo atingido. Algumas delas apresentavam ainda peculiaridades na evolução de seus espectros. Durante poucos anos, houve mesmo certa controvérsia sobre a continuidade do uso tradicional das SN Tipo Ia como “velas-padrão” - ou seja, indicadores de distância confiáveis (Branch e Miller, 1992).

Um importante passo para contornar o problema da não-uniformidade foi revelado ainda em 1993, com base em observações realizadas no CTIO (*Cerro Tololo Interamerican Observatory*):

⁷ As magnitudes CV são de maior utilidade para outros tipos de objetos (ex: binárias eclipsantes).

a existência de uma correlação significativa entre as magnitudes absolutas das supernovas Tipo Ia com suas taxas de declínio de brilho logo após o máximo (Phillips, 1993). Grosso modo, as supernovas intrinsecamente mais luminosas apresentam declínio mais lento em seu brilho, e vice-versa. Essa correlação (conhecida hoje como “Relação de Phillips”) existe em todos os comprimentos de onda no óptico, mas não é numericamente igual para cada filtro (ver Fig 8). Por isso, convencionou-se tomar como padrão a queda de magnitude nos primeiros 15 dias após o brilho máximo, tal como medidos com o filtro B Johnson (indicada como $\Delta m_{15}(B)$). A partir do monitoramento fotométrico pós-máximo (ou seja, da própria curva de luz), portanto, tornava-se possível determinar com segurança a magnitude absoluta da supernova e a partir daí calcular sua distância através da equação do módulo de distância. É justamente esta relação (na forma aperfeiçoada por Hamuy, Phillips, Schommer e Suntzeff em 1996 com o uso de uma amostra de 29 SN Tipo Ia)⁸ que usaremos a seguir para calcular a distância de NGC 1566.

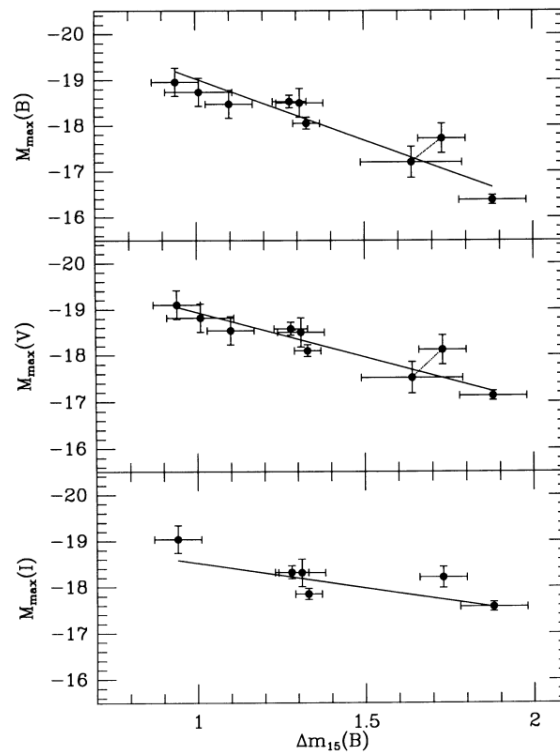


Figura 8 – Relação de Phillips original (baseada em uma amostra de 9 SN Tipo Ia): nas abscissas, está a taxa de declínio de brilho $\Delta m_{15}(B)$. Nas ordenadas, de cima para baixo, as correspondentes magnitudes absolutas em B, V e I no máximo de brilho. Crédito: Fig. 1 de Phillips (1993)

⁸ Nos anos seguintes, outras correlações empíricas na mesma direção que a relação de Phillips foram desenvolvidas para uniformizar as curvas de luz das SN Tipo Ia e dessa forma otimizar o seu uso como excelentes indicadores de distâncias: os métodos MLCS, ou Multicolor Light-Curve Shape (Riess et al, 1996) e “stretch-factor” (Perlmutter, 1997). Foram essas técnicas que tornaram possível o uso de SN Ia como “velas-padrão” para distâncias cosmológicas, o que permitiu aos grupos independentes Supernova Cosmology Project e High-z Supernova Search Team a descoberta, em 1998, que o Universo está se expandindo de forma acelerada.

Vamos partir da forma analítica da relação de Phillips, que são os ajustes das curvas de luz de 26 SN Tipo Ia (com baixa extinção no “foreground”)⁹ pelos mínimos quadrados, tal como visto em Hamuy et al (1996). Para tanto, escolhemos as equações relativas aos canais B e V, pois não dispomos de dados observacionais no canal I. As magnitudes absolutas em V e em B no máximo são dadas pela equação da relação de Phillips aperfeiçoada por Hamuy et al (1996):

$$M_{\max} = a + b[\Delta m_{15}(B) - 1.1]$$

Onde os valores das constantes a e b para os canais V e B são vistos na Tabela 3:

Canal	a	b
V	-19.267(±0.042)	0.707(±0.150)
B	-19.258(±0.048)	0.784(±0.182)

Tabela 3 – Valores das constantes a e b dos ajustes das curvas de luz (Fonte: Hamuy et al (1996))

Das curvas de luz descritas no item (4), temos $\Delta m_{15}(B) = 0.9$. Levando os valores das constantes da Tabela 3 à equação da relação de Phillips aperfeiçoada, o valor médio no canal V é de:

$$M_{(\max, V)} = -19.267 + 0.707 \times [\Delta m_{15}(B) - 1.1]$$

$$M_{(\max, V)} = -19.408$$

(se considerássemos as incertezas indicadas na Tabela 3, teríamos: $-19.48 < M_{(\max, V)} < -19.05$)

De forma análoga, para o canal B teremos o valor médio:

$$M_{(\max, B)} = -19.258 + 0.784 \times [\Delta m_{15}(B) - 1.1]$$

$$M_{(\max, B)} = -19.415$$

(e, da mesma forma, poderíamos indicar com as incertezas citadas: $-19.50 < M_{(\max, B)} < -19.02$)

A distância da galáxia (em média) pode ser agora estimada a partir de seu módulo de distância (m-M). Daremos preferência à magnitude aparente que foi determinada na banda V, uma vez que em TB ela foi obtida de forma aproximada através de interpolações. Podemos então escrever que $(m-M) = 31.43$ e resulta:

$$M - M = 5 \log D - 5 + A_v$$

$$31.43 = 5 \log D - 5 + 0.025$$

$$D = 19.1 \text{ Mpc}$$

(ou ainda 62.3 milhões de anos-luz)

⁹ As extinções de NGC 1566 são de 0.025 e 0.033 respectivamente nos canais V e B, pelos dados disponíveis no NED (NASA Extragalactic Database).

6 – Conclusões e comentários

O resultado obtido para a distância de NGC 1566 através da curva de luz da SN 2021aefx e da relação de Phillips para supernovas do Tipo Ia (**19.1 Mpc**) é consistente com os mais recentes valores obtidos por métodos baseados do redshift da galáxia, que vêm indicando resultados da velocidade de recessão em torno de 1504 km/s. Se usarmos o valor médio mais recente para a constante de Hubble-Lemaître disponível no momento em que este texto é escrito (Riess et al 2021, ainda em preprint), que foi de (73.04 ± 1.04) km/s/Mpc, encontraríamos uma distância de **20.6 Mpc** para NGC 1566. Note-se que este resultado de Riess et al (2021) para H_0 é superior por 5σ ao “valor mais aceito” que é ainda usado pelo NED em 04/2022 (67.8 km/s/Mpc), que, como vimos, é baseado nos dados do satélite Planck da ESA (publicados em 2015)¹⁰ e que implica em uma distância média de **22.03 Mpc**.

Em relação aos métodos não-relacionados ao redshift, nosso resultado situa-se compatível com o obtido recentemente pelo método fotométrico TRGB (Top of the Red Giant Branch), que foi de **18.0 ± 2.0 Mpc** (Sabbi et al, 2018) e até mesmo com alguns resultados mais recentes com uso da relação de Tully-Fisher, como o obtido por Thereau et al (2007) e citado no NED (**16.50 Mpc**), porém não com os resultados anteriores por esse método, cujas distâncias nos parecem subestimadas, provavelmente pelo motivos já citados no item 2.

Finalmente, cabe ressaltar que a acurácia de nossa medida poderia ter sido ainda melhor caso houvesse um número maior de medições na banda B (ou TB). A circunstância infeliz de não haver nenhuma observação perto do máximo nesses canais certamente aumentou a incerteza de nosso resultado final. Este é assim um lembrete para os próximos eventos semelhantes.

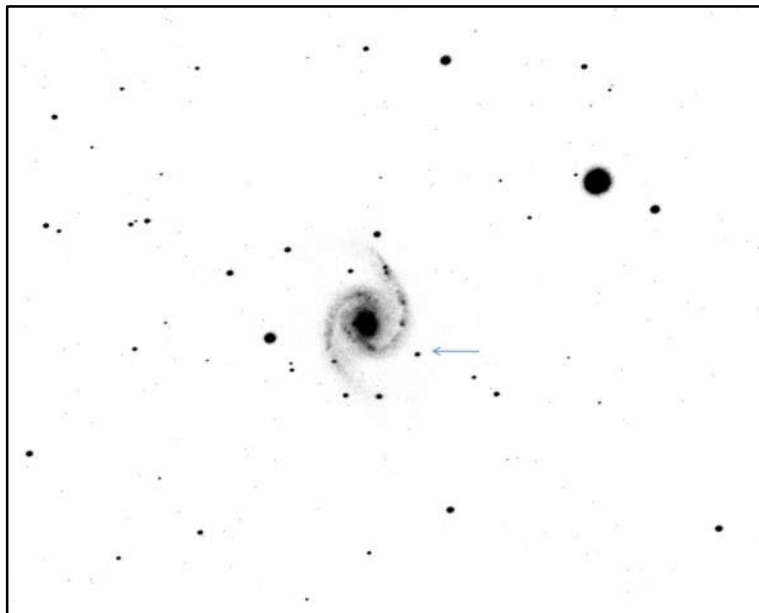


Figura 9 – Dois meses após o máximo, a SN 2021aefx havia decaído quase quatro magnitudes. Seu brilho era então equivalente ao das numerosas regiões HII que povoam os braços espirais de NGC 1566, nos quais o processo de formação de estrelas continua vigorosamente (Imagem: Carlos Colesanti)

¹⁰ Todas as publicações da missão Planck da ESA estão disponíveis para download no seguinte endereço: <https://www.cosmos.esa.int/web/planck/publications> (acessado em abril de 2022).

7 - Referências

- AAVSO (American Association of Variable Stars Observers): <https://www.aavso.org/>.
- Branch e Miller, Type Ia supernovae as standard candles. *Astrophysical Journal* 405L...5B (1992)
- Carrasco, E., Mendes de Oliveira, C., et al, The Dwarf Galaxy Population of the Dorado Group Down to $M_v \sim -11$. *The Astronomical Journal*, Volume 121, Issue 1, pp. 148-168 (2001).
- Cozens, G., Walsh, A., & Orchiston, W., James Dunlop's historical catalogue of southern nebulae and clusters. *Journal of Astronomical History and Heritage* (ISSN 1440-2807), Vol. 13, No. 1, p. 59 - 73 (2010).
- de Vaucouleurs, G., Southern Galaxies.VI. Luminosity Distribution in the Seyfert Galaxy NGC 1566. *Astrophysical Journal*, Vol. 181, pp. 31-50 (1973).
- Elagali, A. et al, WALLABY Early Science - III. An HI Study of the Spiral Galaxy NGC 1566. arXiv:1905.09491v1 (2019).
- Filippenko, A., Optical spectra of supernovae. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 35:309–55 (1997).
- Foley, R.J. et al, Type Iax supernovae: a new class of stellar explosion. *The Astrophysical Journal*, Volume 767, Number 1 (2013)
- Hamuy, M. et al, The absolute luminosities of the Calan/Tololo Type Ia Supernovae. *The Astronomical Journal*, 112:6 (1996).
- Harutyunyan, A.H., et al, ESC supernova spectroscopy of non-ESC targets. *A&A* 488, 383–399 (2008).
- Jha, S.W., Type Iax Supernovae. arXiv:1707.01110v2 [astro-ph.HE] 9 Aug 2017
- Karambelkar, V. et al, Faintest of Them All: ZTF 21aaoryiz/SN 2021fcg—Discovery of an Extremely Low Luminosity Type Iax Supernova. *The Astrophysical Journal Letters*, 921:L6 (2021).
- Kilborn, V. et al, A wide-field H I study of the NGC 1566 group. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 356, 77–88 (2005).
- Kochanek et al, The All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN) Light Curve Server v1.0. PASP 129j4502K (2017).
- NASA-IPAC Extragalactic Database (NED): disponível em <https://ned.ipac.caltech.edu/> .
- Perlmutter, S. et al, in *Thermonuclear Supernovae*, ed. P. Ruiz-Lapuente, R. Canal, & J. Isern (Dordrecht: Kluwer), 749 (1997).
- Phillips, M. M., The absolute magnitudes of Type Ia supernovae. *The Astrophysical Journal*, 413: L105-108 (1993).

Riess et al, A precise distance indicator: Type Ia supernova multicolor light-curve shapes (MLCS). The Astrophysical Journal, 473:88–109 (1996).

Riess et al., A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 km/s/Mpc Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team. arXiv:2112.04510v2 (dezembro de 2021).

Sabbi, E. et al, The Resolved Stellar Populations in the LEGUS Galaxies. ApJS..235...235 (2018).

Slater, R., et al, Outflows in the inner kiloparsec of NGC 1566 as revealed by molecular (ALMA) and ionized gas (Gemini-GMOS/IFU) kinematics. A&A 621, A83 (2019).

Steinicke, W. : Discovery and Cataloguing of Nebulae and Star Clusters. In http://www.klima-luft.de/steinicke/index_e.htm (acesso em março, 2022)

Theureau, G, et al, Kinematics of the Local Universe. XIII. 21-cm line measurements of 452 galaxies with the Nançay radiotelescope, JHK Tully-Fisher relation, and preliminary maps of the peculiar velocity field, A&A...465...71T (2007).

Tully, R. B., Fisher, J.R. , A new method of determining distances of galaxies. Astronomy and Astrophysics 54, 661-673 (1977).

Wang, X., Filippenko, A. et al, Improved distances to Type Ia Supernovae with two spectroscopic subclasses. The Astrophysical Journal, 699:L139–L143 (2009).

Wang, X, Li, W. et al, The golden standard Type Ia supernova 2005cf: observations from the ultraviolet to the near-infrared wavebands. The Astrophysical Journal, 697:380–408, 2009.

%%%%%%%%%