

Supernovas do tipo Ia e a expansão do Universo

Ribamar R. R. Reis^{1,2} e Beatriz B. Siffert³

¹Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro

²Observatório do Valongo, Universidade Federal do Rio de Janeiro

³Campus Duque de Caxias, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

A aplicação de supernovas do tipo Ia como velas padrão para a medida de distâncias no Universo revolucionou a cosmologia na década de 90. A constatação de que supernovas distantes pareciam menos brilhantes do que o esperado levou à construção da hipótese da expansão acelerada do Universo, atualmente parte fundamental do modelo padrão da cosmologia. Neste artigo, iniciaremos com uma revisão dos principais marcos na descrição de supernovas, desde a sua classificação moderna até a construção das hipóteses que levaram à concepção dos levantamentos SCP e *High-Z*, cujos resultados foram as primeiras evidências da expansão acelerada. Em seguida, apresentaremos a análise cosmológica realizada e os procedimentos para a padronização das curvas de luz adotados. Descreveremos também os principais levantamentos de supernovas já conduzidos e as diferentes amostras resultantes e finalizaremos comentando sobre os atuais desafios e perspectivas da área.

Abstract

The use of type Ia supernovae as standard candles to measure distances in the Universe has established a turning point in cosmology in the end of the last century. The experimental fact that distant supernovae appeared less bright than nearby ones, lead to the construction of the accelerated expansion model, currently part of the standard cosmological model. In the present paper we will start by reviewing the main landmarks in the application of type Ia supernovae in cosmology, from their modern classification to the construction of the hypotheses behind the conception of the SCP and the *High-Z* surveys, which resulted in the first evidence for the accelerated expansion. We will then present the procedure for light curve standardization, required for the application of these supernovae in cosmology, which will be followed by the description of the main supernova surveys conducted so far and the resulting data samples. We will finish by commenting on the current main challenges in the field and how future surveys can help overcoming them.

Palavras-chave: supernova, vela padrão, cosmologia, energia escura.

Keywords: supernova, standard candle, cosmology, dark energy.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.37130](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.37130)

1 Introdução

Um dos pilares da cosmologia moderna, a ideia de que o Universo está em expansão, se consolidou na primeira metade do século XX, com a contribuição fundamental dos estudos de Lemaître [1, 2] e das observações feitas por Hubble [3]. Lemaître deduziu teoricamente e Hubble inferiu a partir de observações de galáxias a conhecida lei de Hubble-Lemaître, que determina que a velocidade com que os objetos no Universo se afastam uns dos outros é proporcional à distância entre eles. Para obter seu resultado, Hubble utilizou dois conceitos importantes: o efeito Doppler, no qual o comprimento de onda, ou frequência, observado de uma onda (eletromagnética, no caso)

muda de acordo com a velocidade da fonte com respeito ao observador, dando origem ao chamado desvio para o vermelho; e a distância de luminosidade, que é obtida a partir do fluxo (energia por unidades de tempo e área) e da luminosidade (energia por unidade de tempo) da fonte. Portanto, de acordo com a lei de Hubble-Lemaître, quanto maior o desvio para o vermelho de um um objeto, maior é a velocidade com a qual ele se afasta de nós e maior é a sua distância.

Para obter a distância de luminosidade em função do desvio para o vermelho, Hubble usou estrelas variáveis cefeidas, cuja luminosidade média pode ser calculada, pois é proporcional ao período de oscilação da própria luminosidade, propriedade descoberta por Henrietta Leavitt [4, 5].

Infelizmente, cefeidas não podem ser observadas a distâncias além do Grupo Local de galáxias, ao qual pertence a Via Láctea. Para obter informações sobre parâmetros cosmológicos usando esse tipo de abordagem seria necessário encontrar uma classe de objetos ou eventos astronômicos muito mais brilhantes. Isso motivou o estudo de supernovas para esse fim.

Uma supernova (SN) é uma explosão que ocorre no estágio final da evolução de algumas estrelas ou sistemas de estrelas. Existem vários tipos de SN e elas são tipicamente classificadas de acordo com as características observadas nos seus espectros, que são medidas de fluxo específico (energia por unidades de tempo, área e comprimento de onda) em função do comprimento de onda, e nas suas curvas de luz, que são medidas de fluxo em função do tempo. Enquanto o espectro de um corpo celeste carrega informação sobre a distribuição da sua emissão em diferentes porções do espectro eletromagnético, a sua curva de luz nos mostra a evolução da sua emissão de radiação com o tempo. Em geral, curvas de luz são obtidas quando a radiação recebida passa por um filtro no telescópio. Esse tipo de observação é conhecido como “fotometria” e dá informação sobre a emissão em toda a faixa de comprimento de onda permitida pelo filtro utilizado. Em observações espectroscópicas (espectroscopia), em contraste, é possível obter informação sobre a emissão em cada comprimento de onda individual, o que permite a visualização de linhas de emissão e absorção dos elementos e moléculas que compõem o objeto. Através da observação de tais linhas é possível calcular diretamente o desvio para o vermelho do objeto.

Primeiramente, as supernovas foram divididas em tipo I, que não apresentam linhas de hidrogênio nos seus espectros, e tipo II, que as apresentam. As SN do tipo I, por sua vez, são divididas entre as do tipo Ia, que apresentam linha de silício II (uma vez ionizado) no espectro e as que não possuem essa característica, tipos Ib e Ic. As SN do tipo II são, em geral, classificadas de acordo com a forma das suas curvas de luz. Do ponto de vista da estrela ou sistema que sofre a explosão, temos uma distribuição diferente. As SN do tipo II, Ib e Ic ocorrem devido ao colapso gravitacional de estrelas massivas (acima de 8 vezes a massa do Sol), enquanto as SN Ia têm origem na explosão termonuclear de estrelas anãs bran-

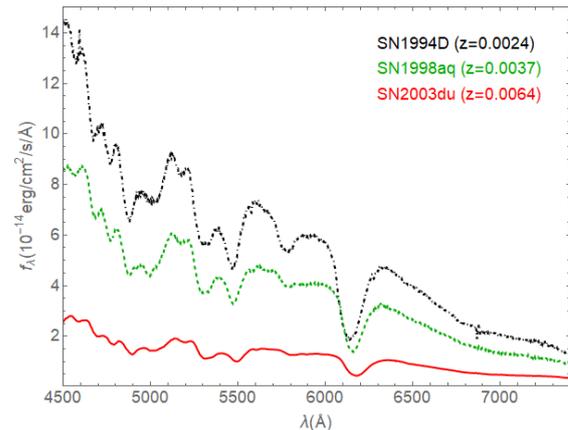


Figura 1: Exemplos de espectros de supernovas Ia observados 4 dias após o máximo de brilho. As curvas representam as supernovas SN2003du (vermelha contínua), SN1998aq (verde pontilhada) e SN1994D (preta ponto-tracejada). Dados obtidos de [6].

cas em sistemas binários. O fato de haver um limite máximo para a massa de uma anã branca (1,4 vezes a massa do Sol) faz com que todas as explosões de SN Ia sejam muito similares entre si, quando comparadas com os outros tipos de SN, e essa homogeneidade é fundamental para a sua aplicabilidade em cosmologia, como veremos na próxima seção. A Figura 1 mostra exemplos de espectros de SN Ia em diferentes desvios para o vermelho (ou seja, a diferentes distâncias da Terra), enquanto a Figura 2 ilustra a classificação das SN e as principais características de cada tipo. A Figura 3 mostra um sistema de filtros bastante usado na observação de SN próximas, o UBVRI. Cada curva representa a porcentagem da energia incidente que atravessa o filtro em função do comprimento de onda e está normalizada para ser 100% no pico. A Figura 4 mostra curvas de luz no filtro B, um dos filtros apresentados na Figura 3, para três SN Ia. Podemos ver como todas têm uma forma bastante semelhante.

2 O uso de supernovas como velas padrão

Como mencionamos anteriormente, uma maneira de estimar a distância de uma fonte é através da distância de luminosidade, que é definida como

$$d_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}, \quad (1)$$

onde F é o fluxo que recebemos na câmera do telescópio e L a luminosidade da fonte, conforme

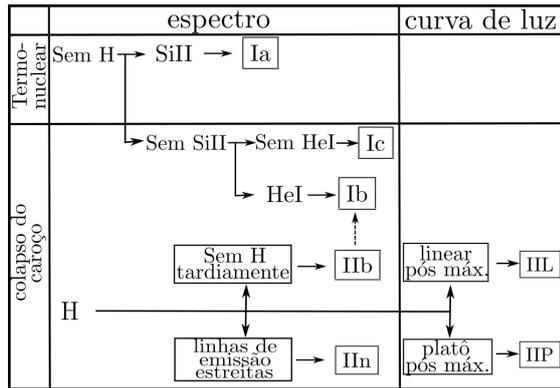


Figura 2: Classificação dos tipos mais comuns de supernovas. Figura retirada de [7], com a permissão de *IOP publishing*, por intermédio de *Copyright Clearance Center, Inc.*, e traduzida pelos autores.

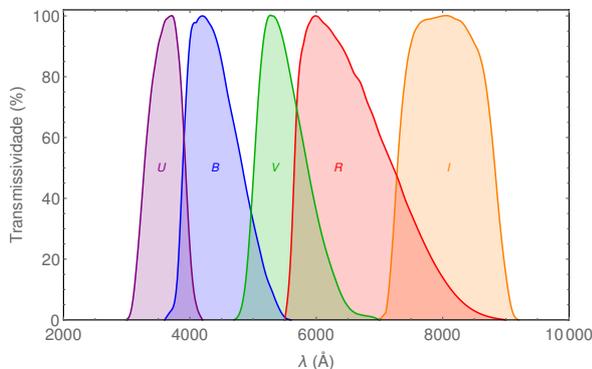


Figura 3: Curvas de transmissão do sistema de filtros UBVR. Figura adaptada de [7], com a permissão de *IOP publishing*, por intermédio de *Copyright Clearance Center, Inc.*

medida por um observador a 10 parsecs¹ de distância e em repouso com relação a ela.

Para que possamos usar a Eq. (1) para estimar a distância de uma fonte a partir do fluxo observado, precisamos ter uma estimativa da sua luminosidade. Naturalmente, não podemos nos aproximar a uma distância de 10 parsecs de cada fonte para medir essa quantidade e, por isso se torna útil o conceito de velas padrão, que consistem em classes uniformes de fontes, todas com a mesma luminosidade. Dessa forma, poderíamos obter medidas de luminosidade de fontes próximas (com distâncias medidas através de outros métodos) e usá-las para as fontes distantes.

O uso de supernovas como velas padrão remonta à década de 1960, quando Kowal [8] usou uma amostra de supernovas do tipo I para estimar distâncias de luminosidade. Atualmente,

¹O parsec é uma unidade de distância comum em astronomia e equivale a $3,086 \times 10^{13}$ km.

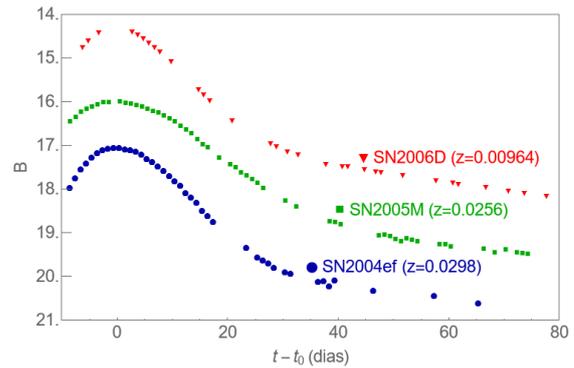


Figura 4: Exemplos de curvas de luz no filtro B de supernovas Ia. Figura retirada de [7], com a permissão de *IOP publishing*, por intermédio de *Copyright Clearance Center, Inc.* e traduzida pelos autores.

sabemos que esses eventos não são rigorosamente velas padrão, apresentando variações não desprezíveis nas suas luminosidades o que, conseqüentemente, afetam a medida de distância obtida. No entanto, eles pareciam candidatos promissores ao que podemos chamar de “velas padronizáveis”, para as quais podemos descrever tais variações em termos de um modelo e usá-lo para obter estimativas mais precisas. Um breve histórico desse período inicial do uso de supernovas em cosmologia pode ser encontrado em [9, 10].

Em astronomia, a medida de brilho mais utilizada é a chamada “magnitude”, que está relacionada com o logaritmo do fluxo de um corpo celeste. Chamamos de “cor” (ou, à rigor, “índice de cor”) a diferença entre as magnitudes de um objeto medidas com dois diferentes filtros. A cor (B-V) de um objeto é, por exemplo, a diferença entre as magnitudes desse objeto medidas com os filtros B e V. Uma importante contribuição para o processo de padronização de SN Ia foi o trabalho de Mark Phillips em 1993 [11], que encontrou fortes correlações entre o fluxo máximo, a taxa de decaimento da curva de luz após o máximo e a cor (B-V) das SN Ia. Phillips também verificou que as correlações entre o fluxo máximo e a taxa de decaimento eram maiores quando usava dados no filtro B. Em geral, SN Ia mais brilhantes, são mais azuis (brilham mais no filtro B, cuja inicial, de fato, se refere à palavra em inglês *blue*) e demoram mais para se apagar. Usando essas correlações é possível ajustar as curvas de luz e melhorar a precisão das distâncias obtidas. Desde então, abriu-se um novo campo de estudo dos chamados métodos de ajuste de curva de luz, que exploram essas correlações e outras descobertas mais tarde.

Dentre os vários métodos de ajuste de curva de luz, podemos destacar:

- Δm_{15} [11–13], em que o parâmetro que dá nome ao método representa a variação da magnitude no intervalo de 15 dias a partir do máximo.
- *Stretch* [14], em que o eixo temporal é multiplicado por um fator para expandir ou contrair a curva de luz na direção horizontal. Uma implementação simples dessa ideia pode ser encontrada em [7]. A Figura 5, retirada dessa referência, ilustra o efeito do ajuste.
- *Multicolor Light Curve Shape* (MLCS) [15, 16], que estende a proposta do Δm_{15} introduzindo um ajuste simultâneo em vários filtros e usando o módulo de distância $\mu = 5 \log [d_L / (10 \text{ pc})]$ como um parâmetro a ser ajustado, tornando esse método um estimador de distância. Além disso, alguns parâmetros do modelo precisam ser determinados *a priori* a partir de uma amostra de treinamento formada por SN Ia próximas.
- *Spectral Adaptive Lightcurve template* (SALT) [17, 18], que segue a ideia do *stretch*, usando como ponto de partida a média, e desvios de primeira ordem em torno dela, do fluxo específico em função do comprimento de onda e do tempo. Essas funções são estimadas a partir de uma amostra de treinamento, procedimento fundamental para a precisão e acurácia do modelo, que é objeto de estudo até hoje (veja, por exemplo, [19–21]). Este é o método mais usado pela comunidade atualmente.

3 Qual é a relação entre supernovas e aceleração cósmica?

Como vimos anteriormente, é possível usar métodos de padronização para estimar a distância de SN Ia. Com isso, podemos confrontar essas medidas com os valores esperados, assumindo um modelo teórico. O modelo que consideramos padrão supõe que a gravitação é descrita pela teoria da relatividade geral e que a matéria e a energia no Universo são distribuídas de forma homogênea

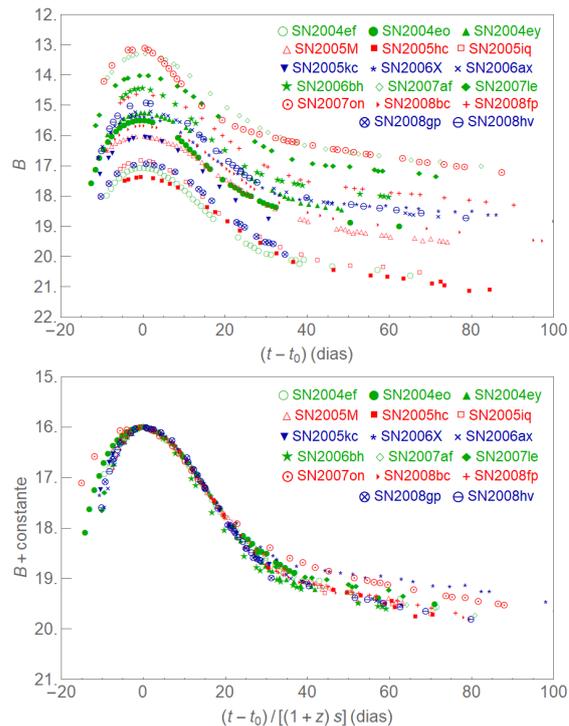


Figura 5: Curvas de luz no filtro B de supernovas Ia conforme observadas (acima) e depois de corrigidas pela distância, desvio para o vermelho e *stretch* (abaixo). As curvas também foram deslocadas na vertical para coincidir no máximo. Figuras retiradas de [7], com a permissão de IOP publishing, por intermédio de Copyright Clearance Center, Inc., e traduzidas pelos autores.

(não variam com a posição) e isotrópica (não dependem da direção em que são observadas). Sabemos que a distribuição não é exatamente homogênea e isotrópica, como indica a existência de estruturas como galáxias e aglomerados, mas esta é uma boa aproximação em escalas suficientemente grandes. De fato, o Universo pode ser considerado homogêneo e isotrópico se considerarmos regiões maiores do que 100 Mpc (megaparsecs, ou milhões de parsecs), que correspondem a dezenas de vezes o tamanho de um aglomerado de galáxias típico. Com essas hipóteses, podemos calcular a previsão do modelo para a relação entre distância de luminosidade e o desvio para o vermelho, para cada configuração dos “ingredientes” que compõem o Universo, como matéria não relativística (formada por componentes que se movem com velocidade muito menor que a luz, como a matéria comum e a matéria escura), radiação (eletromagnética e neutrinos) e a chamada energia escura.

No contexto da relatividade geral, é possível mostrar que, em um universo em expansão com-

posto por matéria não relativística e radiação, a expansão cósmica é sempre desacelerada. Para produzir uma aceleração nessa classe de modelos é preciso adicionar algum componente extra com uma característica pouco usual, pressão negativa. É a esse tipo de componente que nos referimos quando usamos o termo energia escura. A expressão “escura” se refere ao fato de não termos detectado esse componente em observações astronômicas, o que indica que ele não deve interagir com radiação eletromagnética, que é a base dessas observações.

Existem várias propostas para descrever a natureza da energia escura na literatura (veja, por exemplo, [22] e suas referências), mas a mais simples de todas é a própria constante cosmológica Λ , introduzida originalmente por Einstein com um intuito diferente, e que pode ser descrita como um fluido com pressão negativa e , em módulo, igual à sua densidade de energia. É comum em cosmologia usarmos o termo “equação de estado” para se referir à relação entre a pressão p e a densidade de energia de um fluido ρ . É comum também definirmos o parâmetro da equação de estado

$$w = \frac{p}{\rho}. \quad (2)$$

No caso da constante cosmológica, portanto, temos $w = \text{constante} = -1$.

É de praxe expressar as quantidades relativas de cada ingrediente de matéria e energia em um modelo para o Universo através do que chamamos de “parâmetro de densidade”, definido como

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}, \quad (3)$$

onde ρ_c é a densidade total (chamada crítica) necessária para que o Universo tenha curvatura exatamente zero. Conhecendo a equação de estado, podemos determinar como o parâmetro de densidade de cada componente evolui com o desvio para o vermelho. Os valores atuais desses parâmetros (Ω_{m0} para a matéria, Ω_{r0} para a radiação e $\Omega_{\Lambda0}$ para a constante cosmológica) ficam em aberto, como parâmetros livres do modelo, a serem determinados a partir das observações. A Figura 6 mostra a dependência da distância de luminosidade com o desvio para o vermelho para duas diferentes configurações de universo: $\Omega_{m0} = 1$, $\Omega_{r0} = 0$ e $\Omega_{\Lambda0} = 0$ (curva tracejada) e $\Omega_{m0} = 0,3$, $\Omega_{r0} = 0$ e $\Omega_{\Lambda0} = 0,7$ (curva com linha contínua). Com isso, as medidas de distância

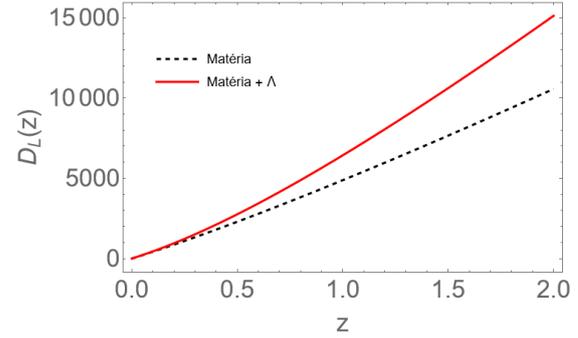


Figura 6: Distância de luminosidade (em megaparsecs) em função do desvio para o vermelho. A curva preta tracejada representa um universo com apenas matéria não relativística e a curva contínua vermelha representa o modelo padrão atual, com matéria e constante cosmológica.

das SN Ia nos permitem obter estimativas para esses parâmetros, quando as confrontamos com as curvas teóricas. É importante notar que as curvas coincidem para pequenos valores de distância, ou desvio para o vermelho, o que torna fundamental procurar por objetos ou eventos suficientemente brilhantes para possam ser observados a grandes distâncias. De fato, SN Ia são explosões extremamente brilhantes, e podem atingir bilhões de vezes o brilho do Sol sendo, portanto, visíveis a grandes distâncias.

É comum descrever a aceleração da expansão através do chamado parâmetro de desaceleração

$$q = -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2}, \quad (4)$$

onde a é o fator de escala, uma função que indica quanto as distâncias mudam com o tempo devido à expansão. A distância entre dois objetos em um dado instante é dada pela distância entre eles hoje multiplicada pelo fator de escala no mesmo instante. Os pontos sobre a grandeza representam derivadas com relação ao tempo, um ponto para primeira derivada e dois para segunda. Como vimos antes, no contexto de relatividade geral com a matéria que conhecemos, é esperado que a expansão seja desacelerada. Por isso optou-se por definir o parâmetro de tal maneira que $q > 0$ indique desaceleração. O valor do parâmetro de desaceleração hoje, q_0 , pode ser escrito em termos dos parâmetros de densidade como

$$q_0 = \frac{\Omega_{m0}}{2} - \Omega_{\Lambda0}. \quad (5)$$

Os primeiros trabalhos nessa área estavam empenhados em estimar o valor de q_0 . Em 1998,

a colaboração *High-Z Supernova Search*, usando uma amostra com 50 SN Ia, concluiu que $q_0 < 0$, ou seja, a expansão é acelerada, com pouco mais de 99% de confiança [23]. No ano seguinte, a colaboração *Supernova Cosmology Project* (SCP) obteve, de maneira independente e com uma amostra diferente com 42 SN Ia, um resultado semelhante [24].

O trabalho das colaborações SCP e *High-Z* se beneficiou enormemente dos resultados da colaboração *Calán/Tololo supernova survey*, que gerou uma amostra com cerca de 30 SN Ia próximas (com desvio para o vermelho até $z \sim 0.1$) [12]. Essa amostra foi fundamental para a melhoria da calibração das estimativas de distância de SN Ia e foi incluída na análise de ambos os grupos.

4 Levantamentos de supernovas

Os artigos originais das colaborações SCP e *High-Z*, no final da década de 90, analisaram amostras com um total de aproximadamente 60 supernovas do tipo Ia com desvios para o vermelho de 0,16 a 0,97, o que corresponde a uma faixa de distâncias de luminosidade de aproximadamente 770 Mpc a 6500 Mpc. Considerando que o diâmetro do Grupo Local de galáxias é de ~ 3 Mpc, e a distância até o aglomerado de Virgo, o maior da nossa vizinhança, é de ~ 20 Mpc, podemos vislumbrar o quão distantes estavam essas explosões.

A base de dados *Transient Name Server*,² que é atualmente usada para registrar novos eventos transientes, contém quase 9000 supernovas do tipo Ia. De acordo com a base de dados *Open Supernova Catalog*,³ [6] que se propõe a compilar supernovas de diferentes fontes, existem mais de 16000 supernovas do tipo Ia conhecidas, com desvios para o vermelho de até 2,2. No entanto, apenas aproximadamente 1/8 delas possui medidas do espectro e 1/3 delas não possui medidas de espectro e nem da curva de luz.

De fato, após a descoberta da aceleração cósmica, foram iniciados diversos levantamentos com o objetivo exclusivo de detectar supernovas do tipo Ia. Além disso, a detecção desse tipo de supernova passou a ocupar posição privilegiada dentre os objetivos científicos dos grandes levantamentos cosmológicos desde então.

Os primeiros levantamentos do século XXI dedicados exclusivamente à detecção de supernovas do tipo Ia foram o *Supernova Legacy Survey* (SNLS) [25] e o *Equation of State: SuperNova trace Cosmic Expansion* (ESSENCE) [26], que incluíam muitos membros das colaborações SCP e *High-Z* respectivamente.

O SNLS foi parte de um projeto maior chamado *Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey* (CFHTLS),⁴ realizado com o telescópio *Canada-France-Hawaii* (CFHT) de 3,6 m de diâmetro, no Havaí. Entre 2003 e 2006, o SNLS detectou ~ 250 supernovas do tipo Ia com $z \leq 1$, ao observar periodicamente uma porção do céu correspondente a 20 vezes a área ocupada pela Lua cheia, com 4 filtros de banda larga [19].

Observações periódicas de uma mesma região do céu são fundamentais para a detecção de supernovas de qualquer tipo, de outros objetos de brilho variável e até mesmo de objetos que se movem, como asteroides. Isso porque a procura por tais objetos é realizada através da comparação de imagens do céu obtidas em diferentes noites, a fim de detectar alterações no brilho ou posição dos objetos em cada uma delas.

O SNLS realizou observações com periodicidade (ou, como costumamos chamar, *cadência*) de 3 a 4 dias. Já o levantamento ESSENCE, realizado com o telescópio *Blanco*, com 4 m de diâmetro, localizado no observatório CTIO no Chile, utilizou 2 filtros de banda larga e realizou observações do céu com uma cadência de 4 dias. Esse levantamento, que foi realizado entre 2002 e 2007, detectou um total de $\simeq 200$ supernovas do tipo Ia com $z \lesssim 0,8$, em uma área aproximadamente 3 vezes maior do que o SNLS.

Com a descoberta de um número cada vez maior de SN Ia, ao longo dos anos surgiu também um esforço para a construção de amostras unificadas de supernovas. De fato, supernovas detectadas por diferentes telescópios passam por processos de análise diferentes e podem apresentar diferentes níveis de qualidade. Portanto, não basta combinar os resultados dos diferentes levantamentos para formar uma amostra unificada, mas é necessário refazer todas as análises utilizando as mesmas ferramentas e seguindo os mesmos passos, uniformizando, assim, o resultado.

Em 2008 surgiu a amostra unificada de supernovas do tipo Ia que ficou conhecida como *Union*,

²<https://www.wis-tns.org/>

³<https://sne.space>

⁴<http://cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS>

composta por 307 supernovas, com desvios para o vermelho entre $\sim 0,01$ e $\sim 1,55$ [27]. Essas supernovas foram selecionadas dentre aquelas detectadas pelos levantamentos SNLS, ESSENCE, SCP, dentre outros. Admitindo que o parâmetro w da equação de estado é constante, a análise cosmológica da amostra *Union*, combinada com os resultados provenientes de oscilações acústicas de bárions (BAO, do inglês *Baryon Acoustic Oscillations*) e radiação cósmica de fundo (CMB, do inglês *Cosmic Microwave Background*), resultam em $w = -0,969$, com incertezas devido a erros estatísticos e sistemáticos de valores muito próximos, entre 0,059 e 0,066. Esse resultado, além de ser consistente com um modelo de constante cosmológica para a energia escura, evidencia a transição que a cosmologia com supernovas do tipo Ia sofreu na década passada: o crescimento do número de supernovas observadas fez com que os erros estatísticos diminuíssem ao ponto de que, atualmente, os erros sistemáticos são as principais fontes de incerteza nesse tipo de análise.

Enquanto o SNLS e o ESSENCE se concentravam em descobrir supernovas distantes, uma equipe liderada pelo *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA)*⁵ utilizou o telescópio de 1,2 m de diâmetro do observatório F. L. Whipple, localizado no estado norte-americano do Arizona, para observar supernovas do tipo Ia próximas com um conjunto de 5 filtros de banda larga. Observações realizadas entre 2001 e 2008 produziram um conjunto de 185 supernovas do tipo Ia com $z \lesssim 0,08$, que ficou conhecido como CfA3 [28]. A adição desse conjunto de observações à amostra *Union* deu origem à amostra *Constitution*, em 2009 [29]. Após a exclusão de muitas supernovas do CfA3, que não seguiam os mesmos critérios de seleção da amostra *Union*, chegou-se à amostra final com 397 supernovas. A análise cosmológica da amostra *Constitution*, combinada com resultados provenientes de BAO, resulta em $w = -0,987$, com incertezas devido a erros sistemáticos e estatísticos de aproximadamente 0,11 e 0,066, respectivamente.

Em 2005, teve início o *SDSS Supernova Survey*,⁶ parte do levantamento *Sloan Digital Sky Survey (SDSS)*,⁷ realizado com um telescópio de 2,5 m de diâmetro no observatório Apache Point,

localizado no estado do Novo México, nos Estados Unidos. O SDSS visitou, com cadência de poucos dias, a chamada “faixa 82”, uma região do céu próxima ao equador celeste, com área equivalente a 1500 vezes a área ocupada pela Lua cheia no céu. Utilizando 5 filtros de banda larga, detectou, entre 2005 e 2008, aproximadamente 500 supernovas do tipo Ia com $0,05 < z < 0,4$, espectroscopicamente confirmadas, além de mais algumas centenas de supernovas desse tipo que não foram observadas através de espectroscopia [30].

A combinação das amostras de SN Ia detectadas pelo SDSS e pelo SNLS com supernovas próximas detectadas por outros experimentos deu origem em 2014 à amostra *Joint Light-Curve Analysis*, que ficou conhecida como “JLA” [20]. Com 740 supernovas do tipo Ia com $0,01 < z < 1,2$, a análise cosmológica da amostra JLA resultou em $w = -1,018 \pm 0,057$, combinando incertezas de origem estatística e sistemática.

A compilação mais recente de SN Ia é conhecida como *Pantheon* e contém 1048 supernovas com $0,01 < z < 2,3$ [31]. Publicada em 2018, essa amostra é formada por supernovas detectadas pelos levantamentos *Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS)*, SDSS, SNLS, SCP, *Hubble Space Telescope (HST)* e SN Ia próximas de outros levantamentos. O levantamento Pan-STARRS é realizado em telescópios de 1,8 m, no Havaí, com 5 filtros de banda larga. Observações de uma área do céu equivalente a 350 vezes aquela ocupada pela Lua cheia, realizadas com o telescópio Pan-STARRS1 de 2010 a 2014, resultaram em 365 SN Ia espectroscopicamente confirmadas, descobertas utilizando 4 filtros e uma cadência média de 7 dias [31]. Combinando os dados de CMB com a amostra *Pantheon*, obtém-se $w = -1,026 \pm 0,041$.

As amostras JLA e *Pantheon* incluem também SN Ia próximas do levantamento *Carnegie Supernova Project (CSP)* [32] realizado no observatório *Las Campanas*, no Chile, entre 2004 e 2009. Utilizando um conjunto de 10 filtros no ótico e no infravermelho, o CSP obteve curvas de luz para ~ 100 supernovas próximas [33].

Não poderíamos deixar de enfatizar a relevância das supernovas descobertas pelos programas conduzidos no telescópio espacial Hubble⁸, que fazem parte de todas as amostras acima mencionadas e foram responsáveis pela detecção de

⁵<https://lweb.cfa.harvard.edu/supernova>

⁶<http://classic.sdss.org/supernova/aboutsupernova.html>

⁷<https://www.sdss.org/>

⁸<https://hubblesite.org/>

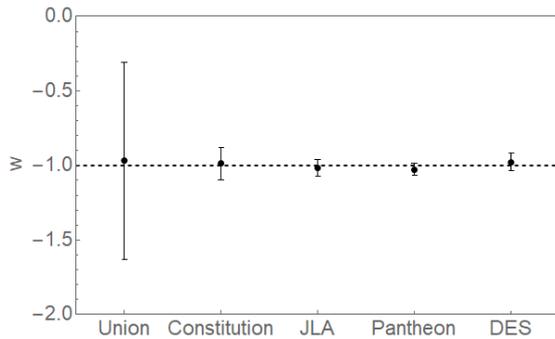


Figura 7: Evolução dos vínculos sobre o parâmetro w da energia escura.

grande parte das supernovas do tipo Ia mais distantes até hoje conhecidas [34].

Por fim, em 2019, o levantamento *Dark Energy Survey* (DES)⁹ publicou os dados de uma amostra de SN Ia que contém 207 supernovas com $z < 0,85$, detectadas entre 2013 e 2016 [35]. O DES foi realizado no telescópio *Blanco*, com 5 filtros de banda larga e, para a procura de supernovas, observou uma área de 27 graus quadrados, correspondente à aproximadamente 130 vezes a área ocupada no céu pela Lua cheia, uma vez por semana. Utilizando uma amostra que contém também 122 supernovas próximas, a colaboração DES obteve $w = -0,978 \pm 0,059$, ao combinar com o vínculos obtidos com dados de CMB.

Na Figura 7 estão representados os vínculos sobre w obtidos com cada uma das amostras mencionadas e é possível verificar a drástica redução das barras de erro desde 2008, com a amostra *Union*, até 2018, com a amostra *Pantheon*. O DES ainda não publicou sua amostra final de supernovas Ia, mas tem potencial para superar a precisão atual, de acordo com simulações.

5 Desafios para o futuro

Atualmente, três levantamentos realizados com telescópios de menor porte têm se destacado na detecção de supernovas. O *Zwicky Transient Facility* (ZTF) [36] é realizado com um telescópio de 1,2 m no observatório de Palomar, na Califórnia, Estados Unidos, e tem capacidade para observar uma área de quase 1/10 de todo o céu a cada hora. Utilizando dois filtros de banda larga, o ZTF é dedicado à detecção de transientes e está em funcionamento desde 2017. O levanta-

mento *Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System* (ATLAS) [37], dedicado à detecção de asteroides, é realizado com dois telescópios de apenas 0,5 m no Havaí. Com capacidade para observar 25% do céu até 4 vezes por noite, o ATLAS está em funcionamento desde 2017 e utiliza 5 filtros de banda larga e 2 filtros de banda estreita. Por fim, o levantamento *All-Sky Automated Survey for Supernovae* (ASAS-SN) [38], em operação desde 2014, é dedicado à detecção de supernovas e observa o céu todo com 24 telescópios distribuídos por diferentes continentes. Todos os três levantamentos possuem cadência que podem variar de horas a poucos dias e podem detectar supernovas próximas (com $z \lesssim 0,24$). De acordo com o *Transient Name Server*, apenas esses levantamentos foram responsáveis pela detecção de mais de 5000 SN Ia nos últimos anos.

Com o rápido aumento do número de SN Ia, as incertezas relacionadas à análise cosmológica com supernovas desse tipo é cada vez mais dominada por erros de origem sistemática. Abaixo, dividimos as principais fontes de erros sistemáticos na análise de SN Ia em categorias.

- **Calibração fotométrica e critérios de seleção**
A imagem produzida por um telescópio contém apenas informação do número de fótons provenientes de cada fonte. Para converter essa informação em fluxo, é necessário realizar a calibração fotométrica da imagem, que utiliza informação sobre o fluxo de estrelas de referência já conhecidas que apareçam na imagem. Esse procedimento naturalmente introduz incertezas no fluxo calculado, que dependem também das características de cada instrumento e filtro utilizados. Além disso, cada instrumento naturalmente impõe diferentes restrições sobre a distância máxima ou brilho mínimo dos objetos que podem ser detectados e, portanto, os resultados de diferentes levantamentos possuem diferentes graus de completeza. Por fim, cada grupo adota seus próprios critérios para selecionar as supernovas cuja evolução será acompanhada ou que serão observadas por espectroscopia, o que introduz também diferenças entre as diferentes amostras. Para reduzir o impacto dessas incertezas, o ideal é que a análise cosmológica seja realizada a partir de uma amostra homogênea de supernovas, obtida com o mesmo instru-

⁹<https://www.darkenergysurvey.org/>

mento e o mesmo conjunto de filtros. Esse é o objetivo do levantamento *Foundation* [39], que pretende construir uma amostra de SN Ia detectadas apenas pelos telescópios Pan-STARRS.

- **Padronização das curvas de luz**
Como vimos na Seção 2, os métodos de padronização de SN Ia para uso em cosmologia, em geral, envolvem uma etapa de treinamento na qual usamos informação de SN Ia conhecidas, em uma ampla faixa de comprimento de onda e tempo. O intervalo, nessas duas variáveis, entre as observações, assim como a precisão das medidas, determina o quão bem podemos inferir o comportamento geral das SN Ia e modelar variações em torno dele. A qualidade e a quantidade dos dados usados no treinamento dos ajustadores de curva de luz são importantes fontes de erros sistemáticos na análise cosmológica e têm sido objeto de constantes revisões e aperfeiçoamentos.
- **Determinação do desvio para o vermelho e classificação**
Incertezas associadas ao cálculo do desvio para o vermelho obtido espectroscopicamente são muito pequenas. No entanto, o crescente número de supernovas detectadas torna praticamente impossível o acompanhamento espectroscópico de todas elas e, portanto, o desvio para o vermelho deve ser estimado através apenas da fotometria. Incertezas relacionadas ao cálculo do desvio para o vermelho fotométrico podem ser reduzidas com a melhoria dos algoritmos utilizados e também com o uso de dados em diferentes faixas de frequência. O levantamento *Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey* (J-PAS)¹⁰ [40], por exemplo, que é fruto da colaboração entre Brasil e Espanha, realizará observações de aproximadamente 1/4 do céu com um conjunto de 59 filtros de banda estreita, larga e intermediária. Espera-se que os resultados do J-PAS possam contribuir para o aprimoramento na determinação de desvios para o vermelho fotométricos. Um problema adicional associado à ausência de observações espectroscópicas é que sem espectro não po-

demos identificar com certeza o tipo da supernova. É possível classificar SN fotometricamente, usando técnicas semelhantes às aplicadas ao desvio para o vermelho. Infelizmente, é possível que algumas SN sejam classificadas erroneamente, o que introduziria uma contaminação na amostra de SN Ia por outros tipos.

- **Evolução**
A possibilidade de que as características das explosões de supernovas possam depender das propriedades do meio em que se encontram como a idade e abundância de diferentes elementos (medida pela chamada *metallicidade*) na galáxia hospedeira é alvo de intenso debate na comunidade científica. Dessa forma, supernovas distantes, que explodiram quando o Universo era muito mais jovem, poderiam ser intrinsecamente diferentes das supernovas mais próximas o que, se não for levado em consideração, é uma fonte de erro na análise cosmológica com SN Ia. Para desvendar essa e outras questões em aberto com relação às explosões de supernovas, precisamos fundamentalmente entender com mais detalhes a natureza de seus progenitores e os mecanismos de explosão. Uma revisão sobre essas questões é apresentada em [41]. De um ponto de vista observacional, informação sobre os estágios finais da evolução da estrela pode ser obtida através da detecção de polarização da luz emitida pelas supernovas logo após a explosão [42]. Além disso, o advento da espectroscopia com *Integral Field Units* (IFU) permite a observação das variações de metalicidade em diferentes regiões das galáxias, representando um grande avanço no estudo da correlação entre esse parâmetro e as propriedades das supernovas.
- **Extinção por poeira**
A luz emitida pelas supernovas é parcialmente absorvida pelas pequenas partículas de poeira cósmica que se encontram no seu trajeto entre a explosão e a Terra. Os ajustadores de curva de luz realizam correções para esse efeito considerando a chamada *extinção* do brilho das supernovas pela poeira na nossa galáxia, através de estimativas da quantidade de poeira em cada direção do céu.

¹⁰<http://www.j-pas.org/>

Esse procedimento, assim como as correções ainda mais incertas para a absorção na galáxia hospedeira, é, claramente, fonte de erro na análise cosmológica de SN Ia. A extinção, que depende do comprimento de onda da radiação, é consideravelmente menor na faixa do infravermelho e espera-se, portanto, que a detecção de supernovas nessa faixa por projetos futuros como o do telescópio espacial Nancy Grace Roman¹¹ (previamente conhecido como WFIRST, com previsão para ser lançado em 2027) possa contribuir de forma significativa para a redução das incertezas associadas à absorção.

Atualmente, existe enorme expectativa para o início das atividades do levantamento *Legacy Survey of Space and Time* (LSST),¹² previsto para 2023. A ser realizado no Observatório Vera C. Rubin, no Chile, com um telescópio de 8,4 m de diâmetro, espera-se que o LSST obtenha uma amostra de supernovas 300 vezes maior do que o número total de supernovas conhecidas atualmente, com $0 < z < 1$. Espera-se que, juntos, o LSST e o telescópio espacial Nancy Grace Roman, detectem mais de 300.000 SN Ia com desvios para o vermelho de até $z = 3$ [43]. A análise conjunta do enorme número de dados desses dois telescópios fornecerá informação no ótico e no infravermelho de milhares de supernovas distantes e, aliada à espectroscopia obtida com outros telescópios, contribuirá para a redução das incertezas de origem sistemática.

Sobre os autores

Beatriz B. Siffert (beatriz@caxias.ufrj.br) possui Bacharelado (2004) e Doutorado (2008) em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Possui Pós-doutorado na Universidade de Nápoles, Itália, no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, e no Instituto de Física da UFRJ. Tem experiência nas áreas de cosmologia e astrofísica, tendo trabalhado com detecção indireta de matéria escura, modelos cosmológicos com ricochete, e atualmente com a detecção de supernovas do tipo Ia e astrobiologia. Atualmente é professora adjunta de física no Campus Duque de Caxias da UFRJ.

¹¹<https://roman.gsfc.nasa.gov/>

¹²<https://www.lsst.org/>

Ribamar R. R. Reis (ribamar@if.ufrj.br) possui Bacharelado (2001), Mestrado (2003) e Doutorado (2007) em Física pela UFRJ. Possui Pós-doutorado pelo Fermi National Accelerator Laboratory, EUA (2008). Tem experiência nas áreas de relatividade e gravitação, atuando principalmente nos seguintes temas: supernovas do tipo Ia, oscilações acústicas de bárions, lentes gravitacionais, energia escura e modelos alternativos de gravitação. Atualmente é professor associado no Instituto de Física da UFRJ.

Referências

- [1] G. Lemaître, *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques*, *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* **47**, 49 (1927).
- [2] G. Lemaître, *A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **91**, 483 (1931).
- [3] E. Hubble, *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*, *Proceedings of the National Academy of Science* **15**(3), 168 (1929).
- [4] H. S. Leavitt, *1777 variables in the Magellanic Clouds*, *Annals of Harvard College Observatory* **60**, 87 (1908).
- [5] H. S. Leavitt e E. C. Pickering, *Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud.*, *Harvard College Observatory Circular* **173**, 1 (1912).
- [6] J. Guillochon et al., *An Open Catalog for Supernova Data*, *The Astrophysical Journal* **835**(1), 64 (2017). [ArXiv:1605.01054](https://arxiv.org/abs/1605.01054).
- [7] R. C. V. Coelho et al., *Standardization of type Ia supernovae*, *European Journal of Physics* **36**, 015007 (2015). [ArXiv:1411.3596](https://arxiv.org/abs/1411.3596).
- [8] C. T. Kowal, *Absolute magnitudes of supernovae*, *The Astronomical Journal* **73**, 1021 (1968).

- [9] J. A. Auping (ed.), *Proceedings of the International Conference on Two Cosmological Models* (Plaza y Valdes, 2012).
- [10] A. Clocchiatti, *Type Ia supernovae and the discovery of the cosmic acceleration* (2011). [ArXiv:1112.0706](#).
- [11] M. M. Phillips, *The absolute magnitudes of type Ia supernovae*, *Astrophysical Journal Letters* **413**, L105 (1993).
- [12] M. Hamuy et al., *The Absolute Luminosities of the Calan/Tololo Type Ia Supernovae*, *The Astronomical Journal* **112**, 2391 (1996). [ArXiv:astro-ph/9609059](#).
- [13] M. M. Phillips et al., *The reddening-free decline rate versus luminosity relationship for type Ia supernovae*, *The Astronomical Journal* **118**(4), 1766 (1999).
- [14] S. Perlmutter et al., *Measurements of the Cosmological Parameters Ω and Λ from the First Seven Supernovae at $z \geq 0.35$* , *The Astrophysical Journal* **483**(2), 565 (1997). [ArXiv:astro-ph/9608192](#).
- [15] A. G. Riess, W. H. Press e R. P. Kirshner, *A precise distance indicator: Type Ia supernova multicolor light-curve shapes*, *The Astrophysical Journal* **473**, 88 (1996). [ArXiv:astro-ph/9604143](#).
- [16] S. Jha, A. G. Riess e R. P. Kirshner, *Improved distances to type Ia supernovae with multicolor light-curve shapes: $Mlcs2k2$* , *The Astrophysical Journal* **659**(1), 122 (2007).
- [17] J. Guy et al., *SALT: a spectral adaptive light curve template for type Ia supernovae*, *Astronomy & Astrophysics* **443**(3), 781 (2005). [ArXiv:astro-ph/0506583](#).
- [18] J. Guy et al., *SALT2: using distant supernovae to improve the use of type Ia supernovae as distance indicators*, *Astronomy & Astrophysics* **466**(1), 11 (2007). [ArXiv:astro-ph/0701828](#).
- [19] J. Guy et al., *The supernova legacy survey 3-year sample: Type Ia supernovae photometric distances and cosmological constraints*, *Astronomy & Astrophysics* **523**, A7 (2010).
- [20] M. Betoule et al., *Improved cosmological constraints from a joint analysis of the SDSS-II and SNLS supernova samples*, *Astronomy & Astrophysics* **568**, A22 (2014).
- [21] W. D. Kenworthy et al., *SALT3: An Improved Type Ia Supernova Model for Measuring Cosmic Distances* (2021). [ArXiv:2104.07795](#).
- [22] P. A. Zyla (Particle Data Group) et al., *Review of Particle Physics*, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2020**, 083C01 (2020).
- [23] A. G. Riess et al., *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant*, *The Astronomical Journal* **116**(3), 1009 (1998).
- [24] S. Perlmutter et al., *Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae*, *The Astrophysical Journal* **517**(2), 565 (1999). [ArXiv:astro-ph/9812133](#).
- [25] P. Astier et al., *The Supernova Legacy Survey: measurement of Ω_M , Ω_Λ and w from the first year data set*, *Astronomy & Astrophysics* **447**(1), 31 (2006). [ArXiv:astro-ph/0510447](#).
- [26] G. Miknaitis et al., *The ESSENCE Supernova Survey: Survey Optimization, Observations, and Supernova Photometry*, *The Astrophysical Journal* **666**(2), 674 (2007). [ArXiv:astro-ph/0701043](#).
- [27] M. Kowalski et al., *Improved cosmological constraints from new, old, and combined supernova data sets*, *The Astrophysical Journal* **686**(2), 749 (2008).
- [28] M. Hicken et al., *CfA3: 185 type Ia supernova light curves from the CfA*, *The Astrophysical Journal* **700**(1), 331 (2009).
- [29] M. Hicken et al., *Improved dark energy constraints from 100 new CfA supernova type Ia light curves*, *The Astrophysical Journal* **700**(2), 1097 (2009).
- [30] M. Sako et al., *The Data Release of the Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Survey*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **130**(988), 064002 (2018).

- [31] D. M. Scolnic et al., *The Complete Light-curve Sample of Spectroscopically Confirmed SNe Ia from Pan-STARRS1 and Cosmological Constraints from the Combined Pantheon Sample*, *The Astrophysical Journal* **859**(2), 101 (2018). [ArXiv:1710.00845](#).
- [32] M. Hamuy et al., *The Carnegie Supernova Project: The Low-Redshift Survey*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **118**(839), 2 (2006). [ArXiv:astro-ph/0512039](#).
- [33] M. D. Stritzinger et al., *The Carnegie Supernova Project: Second Photometry Data Release of Low-redshift Type Ia Supernovae*, *The Astronomical Journal* **142**(5), 156 (2011). [ArXiv:1108.3108](#).
- [34] A. G. Riess et al., *Type Ia Supernova Distances at Redshift >1.5 from the Hubble Space Telescope Multi-cycle Treasury Programs: The Early Expansion Rate*, *The Astrophysical Journal* **853**(2), 126 (2018). [ArXiv:1710.00844](#).
- [35] T. M. C. Abbott et al., *First Cosmology Results using Type Ia Supernovae from the Dark Energy Survey: Constraints on Cosmological Parameters*, *The Astrophysical Journal* **872**(2), L30 (2019).
- [36] E. C. Bellm, *The zwicky transient facility* (2014). [ArXiv:1410.8185](#).
- [37] J. L. Tonry et al., *ATLAS: A High-cadence All-sky Survey System*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **130**(988), 064505 (2018).
- [38] B. J. Shappee et al., *The Man behind the Curtain: X-Rays Drive the UV through NIR Variability in the 2013 Active Galactic Nucleus Outburst in NGC 2617*, *The Astrophysical Journal* **788**(1), 48 (2014). [ArXiv:1310.2241](#).
- [39] R. J. Foley et al., *The foundation supernova survey: motivation, design, implementation, and first data release*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **475**(1), 193 (2017).
- [40] N. Benitez et al., *J-pas: The javalambre-physic of the accelerated universe astrophysical survey* (2014). [ArXiv:1403.5237](#).
- [41] M. Livio e P. Mazzali, *On the progenitors of Type Ia supernovae*, *Physics Reports* **736**, 1 (2018).
- [42] L. Wang e J. C. Wheeler, *Spectropolarimetry of supernovae*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **46**(1), 433 (2008).
- [43] B. M. Rose et al., *Synergies between vera c. rubin observatory, nancy grace roman space telescope, and euclid mission: Constraining dark energy with type ia supernovae* (2021). [ArXiv:2104.01199](#).