

# Fotometria e calibração de supernovas do tipo Ia

Ribamar R. R. Reis e Beatriz B. Siffert

Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

## Resumo

Supernovas do tipo Ia forneceram a primeira evidência, no final da década de 1990, de que a expansão do Universo é acelerada. Desde então vários grupos, usando as mais variadas observações têm confirmado esse resultado pioneiro, indicando que o Universo está em uma fase dominada por uma constante cosmológica, que é o mecanismo mais simples para explicar a aceleração cósmica, no contexto da teoria da relatividade geral. Mas, conforme as técnicas de observação foram se sofisticando, o número de eventos observados aumentou a ponto de as incertezas estatísticas não serem mais o maior problema. Cada vez mais, o foco dos novos projetos é controlar os erros sistemáticos devidos à modelagem do fenômeno, condições de observação e limitações dos equipamentos. Neste trabalho, apresentamos um pequeno vislumbre do desafio de fotometria, que se refere a observação de eventos astronômicos em faixas grandes de comprimento de onda e, a partir dessa informação inferir propriedades intrínsecas de tais eventos. Além disso, abordamos brevemente o desafio de controlar a propagação das incertezas para as distâncias estimadas e, conseqüentemente, para os parâmetros cosmológicos obtidos a partir delas.

## Abstract

Type Ia supernovae provided the first evidence, by the end of the 1990's, that the expansion of the Universe is accelerated. Since then, various groups, using different observations have been confirmed this pioneer result, indicating that the Universe is in phase dominated by a cosmological constant, which is the simplest mechanism to explain the cosmic acceleration, in the context of general relativity. However, as the observation techniques were improving, the number of observed events increased to a point at the statistical uncertainties are not the biggest problem. The main focus of new projects shifted to controlling systematic errors due to modeling of the phenomenon, observation conditions e equipment limitations. In this work, we present a small glimpse of the photometry challenge, regarding the observation of astronomical events em large wavelength bands and, from this information, infer intrinsic properties of such events. In addition, in briefly consider the challenge of controlling the propagation of uncertainties to the estimated distances e, consequently, to the cosmological parameters obtained from them.

---

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

**Keywords:** supernova, photometry, calibration, standard candle, cosmology, dark energy.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v7n1.51476](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v7n1.51476)

## 1 Introdução

Supernovas do tipo Ia (SNIa) têm sido um observável chave para investigar a expansão cósmica desde que forneceram, na década de 1990, a primeira evidência para a sua aceleração [1, 2]. Desde então, a comunidade científica nunca parou de estudar esses eventos com objetivo de aprimorar tanto o nosso conhecimento sobre a evolução das estrelas, quanto a precisão das estimativas de distância usadas em cosmologia. Neste trabalho, nos concentramos apenas no uso de SNIa como indicadores de distâncias cosmológicas.

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 como 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 e é através dela que podemos inferir a distância desses eventos até nós. Como veremos adiante, 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 ondas permitida pelo filtro utilizado. Vamos nos concentrar na fotometria desses eventos e supor que temos uma medida do desvio para o vermelho (*redshift*, em inglês) deles, que é idealmente obtido a partir do espectro, mas também pode ser estimado a partir da própria fotometria. O desvio para o vermelho é a mudança no comprimento de onda, ou frequência, de uma fonte quando esta se encontra em movimento com respeito ao observador (efeito *Doppler*).

Uma discussão sobre os tipos de SN e como eles são identificados pode ser encontrada em [3]. Aqui, nos limitaremos a considerar SNIa, que tem sido o tipo tradicionalmente usado para estimar distâncias para aplicação em cosmologia. Existem muitos trabalhos investigando a possibilidade de padronizar supernovas do tipo IIP para usá-las como indicadores de distância [4] mas, até o momento, as incertezas envolvidas ainda são grandes quando comparadas com as SNIa. Como qualquer observável em astronomia, SNIa estão sujeitas a várias fontes de incertezas. Aquelas devidas à própria variabilidade nas propriedades desses eventos são consideradas por nós como erros estatísticos. O principal exemplo é o fato de que as SNIa não podem ser classificadas como velas padrão, pois elas não explodem todas com a mesma potência. Quando existe uma relação entre a luminosidade de um corpo celeste e alguma outra característica que o descreve, dizemos que ele se comporta como uma “vela padrão”. Mas no caso de SNIa, de fato, é preciso utilizar um procedimento de padronização, que se vale de correlações empíricas entre propriedades como o fluxo máximo, a duração da explosão e cor. A padronização diminui bastante, mas não elimina, a variação intrínseca entre as SNIa. Esse tipo de incerteza, no entanto, pode ter o seu impacto na análise diminuído conforme aumentamos o número de eventos na amostra. Podemos dizer que a primeira fase da cosmologia com supernovas foi dominada pelos erros estatísticos, justamente por-

que as amostras continham poucos eventos (da ordem de 100 ou menos).

Existe outro tipo de fonte de incertezas, que chamamos de erros sistemáticos, que não são atenuados com o aumento da amostra. Esses erros têm origem em procedimentos aplicados a toda a amostra ou em efeitos externos ao fenômeno de interesse. Como veremos adiante, os dispositivos usados para realizar as medidas introduzem incertezas inerentes ao seu funcionamento. Além disso, efeitos como a dispersão da luz devido à poeira (extinção), seja na atmosfera, na nossa galáxia ou na galáxia hospedeira (onde ocorreu a explosão) estão sempre presentes em todas as observações. Com o surgimento de grandes levantamentos para busca e observação de supernovas, o número de eventos nas amostras cresceu ao ponto de, atualmente, estarmos em uma fase dominada por erros sistemáticos.

Naturalmente, os pesquisadores envolvidos em grandes levantamentos sempre estiveram cientes desses problemas e têm dedicado uma grande parte do seu tempo ao desenvolvimento de novas técnicas para diminuir o impacto dos erros sistemáticos na análise. Entre os trabalhos das grandes colaborações dedicados a esses aspectos técnicos da busca e acompanhamento de SNIa podemos destacar o *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) [5, 6], *SuperNova Legacy Survey* (SNLS) [7], *Equation of State: SuperNova trace Cosmic Expansion* (ESSENCE), *Joint Light-curve Analysis* (JLA) [8], *Dark Energy Survey* (DES) [9] e *Pantheon* [10].

Neste trabalho, trataremos de questões relacionadas à calibração fotométrica de SNIa. De fato, as imagens obtidas por um telescópio contém inicialmente apenas informação do número de fótons provenientes de cada direção do céu e precisamos converter essa informação em fluxo. Tal procedimento de calibração introduz incertezas que dependem das características dos instrumentos utilizados, da amostra de calibração selecionada e das técnicas adotadas.

A atualidade da questão se torna flagrante diante da chamada “tensão de *Hubble*” [11], que já desafia a comunidade científica há quase uma década, e se trata da discrepância nas medidas da constante de *Hubble* em diferentes épocas da evolução do Universo obtidas com diferentes observáveis. Dentre os conjuntos de dados analisados,

encontram-se medidas de SNIa a baixo *redshift* que, como veremos mais adiante, só podem fornecer informação a respeito de  $H_0$  uma vez que tenham sua luminosidade calibrada com dados provenientes de outro observável.

Neste artigo, iniciaremos nas Seções 2 e 3 com noções básicas de instrumentação digital em astronomia e fotometria, apresentando as definições de magnitude dentre outros. Na Seção 4, descreveremos brevemente a técnica de subtração de imagens, utilizada para a detecção de eventos transientes no céu e na Seção 5 apresentaremos o processo de calibração fotométrica, em que estrelas de referência são utilizadas para obtermos a magnitude de uma fonte desconhecida, e como podemos aplicá-lo ao caso das SNIa. Na Seção 6 descreveremos a escada cósmica de distância e como ela permite que utilizemos SNIa para obter medidas de parâmetros cosmológicos e, finalmente, na Seção 7, discorreremos sobre as incertezas associadas a esse processo.

## 2 Noções de instrumentação óptica digital

O dispositivo mais usado em astronomia óptica (e em ultravioleta e infravermelhos próximos, como veremos adiante) é o CCD (do inglês *Charge-Coupled Device*, ou dispositivo de carga acoplada), que é o coração da esmagadora maioria das câmeras digitais, como as presentes em telefones celulares. O fenômeno físico fundamental para o desenvolvimento desse detector é o efeito fotoelétrico, cuja descrição moderna [12, 13] rendeu um prêmio Nobel a Albert Einstein em 1921.<sup>1</sup> O efeito consiste na emissão de elétrons por materiais devido à incidência de luz e só foi satisfatoriamente explicado com a hipótese de que as ondas eletromagnéticas são quantizadas. A partícula associada a um *quantum* de luz, a menor quantidade possível de energia eletromagnética, é o fóton. Nossa intenção não é fornecer uma descrição completa do funcionamento desses dispositivos, apenas ressaltar algumas características que contribuem para a incerteza nas medidas de interesse. Para mais detalhes, recomendamos a referência [14].

O CCD é um arranjo bidimensional de pequenas células feitas de material semicondutor, como

o Silício, nas quais os elétrons emitidos pela incidência de luz sobre o telescópio são capturados por uma voltagem para posterior contagem. Essas células são os pixels do dispositivo e, sabendo a posição de cada uma no arranjo, podemos associar o fluxo recebido de uma região diferente do céu e, assim, construir uma imagem. Os elétrons emitidos pelo material e coletados em cada pixel, são recolhidos em um processo de leitura. Esse processo não é perfeito e, por isso, nem todos os fótons que atingem o CCD serão efetivamente registrados.

A razão entre os fótons realmente detectados e os fótons incidentes é o que chamamos de eficiência quântica do CCD. Essa razão depende do comprimento de onda dos fótons incidentes e, dependendo do material usado, a faixa em que o dispositivo é sensível pode variar. Existe ainda uma incerteza adicional, chamada ruído de leitura (*readout noise*, em inglês), que está associada à eletrônica responsável, entre outras coisas, em converter o sinal analógico (voltagem em cada pixel) em digital. Nesta fase o próprio circuito pode introduzir um sinal eletrônico adicional, não associado à voltagem nos pixels. O ruído de leitura é expressado em termos de número de elétrons “espúrios” introduzidos no sinal, por pixel, durante a leitura.

Todo material pode emitir elétrons mesmo sem a incidência de uma onda eletromagnética, simplesmente devido à agitação térmica, que pode produzir variações na energia cinética dessas partículas. Isso significa que, mesmo com a câmera totalmente coberta, o sistema eletrônico fornecerá um sinal diferente de zero, que chamamos de corrente escura. A intensidade desse sinal depende da temperatura e é a principal razão para as câmeras usadas em astronomia serem resfriadas. Com a temperatura suficientemente baixa, podemos garantir que a corrente escura não domine o sinal. É comum os fabricantes fornecerem informação sobre a corrente escura em termos de elétrons por pixel como função da temperatura de operação.

A última característica que gostaríamos de ressaltar é o ganho do CCD, que determina qual a quantidade de carga coletada em um pixel correspondente a uma unidade na conversão do sinal analógico para digital na eletrônica do sistema.

<sup>1</sup>[www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/](http://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/)

### 3 Fotometria

A grandeza que podemos medir usando um CCD é o fluxo, a quantidade de energia por unidade de tempo e área. Essa quantidade de energia, em geral, depende também da frequência, ou comprimento de onda. Cada fonte tem o seu fluxo específico (fluxo por unidade de comprimento de onda). A partir dessa grandeza fundamental, podemos obter o chamado fluxo bolométrico, integrando em todos os comprimentos de onda

$$f(t) := \int_0^\infty f_\lambda(\lambda, t) d\lambda, \quad (1)$$

onde  $f_\lambda$  é o fluxo específico,  $\lambda$  o comprimento de onda e estamos explicitando a dependência com o tempo  $t$ , que é importante para fenômenos transientes como SNIa.

O fluxo bolométrico, infelizmente, não é observável. Não podemos medir o fluxo de uma fonte para qualquer comprimento de onda. Na prática, o que fazemos é observar através de uma “janela”, que chamamos de filtro ou banda. Para complicar mais as coisas cada filtro deixa passar uma fração diferente de energia para cada comprimento de onda. Com isso, o fluxo medido através de um filtro  $X$  é uma soma ponderada por uma função de transmissão  $S_\lambda^X$ ,

$$f^X(t) := \int_0^\infty f_\lambda(\lambda, t) S_\lambda^X(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

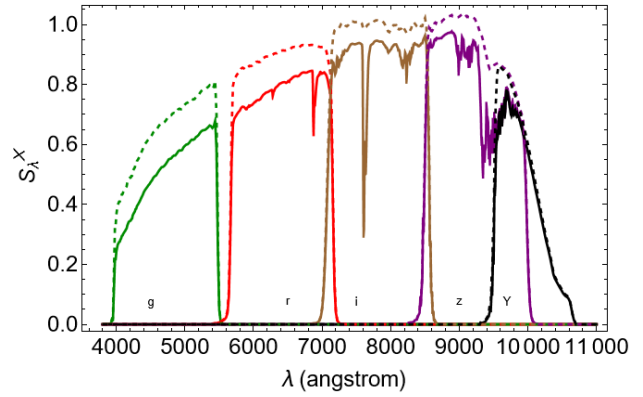
A magnitude aparente é uma medida logarítmica, adimensional, do fluxo. Podemos também definir magnitudes bolométricas e em filtros,

$$m(t) := -2.5 \log_{10} \left( \frac{f(t)}{g} \right), \quad (3)$$

$$m_X(t) := -2.5 \log_{10} \left( \frac{f^X(t)}{g^X} \right), \quad (4)$$

onde as quantidades  $g$  e  $g^X$  são valores de referência que definem o sistema de magnitudes usado. Junto com um conjunto de filtros, e suas correspondentes curvas de transmissão, eles definem um sistema fotométrico. Um sistema de magnitudes bastante usado atualmente é o AB, no qual o valor de referência é uma constante para todas as frequências,  $g_\nu^{AB} = 3631 \text{ Jy}$ .<sup>2</sup> Dois sistemas fotométricos comuns são o UBVRI, bastante usado

<sup>2</sup>1 Jansky (Jy) =  $10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$



**Figura 1:** Curvas de resposta do sistema fotométrico do DES [9], com (linhas contínuas) e sem (linhas tracejadas) a contribuição da atmosfera. Dados disponíveis em NOIR-Lab (*National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory*).

para caracterizar supernovas próximas, e o *ugriz* (e suas variantes), muito usado em grandes levantamentos de galáxias, como o SDSS [5], DES [9] e LSST [15].

A rigor, a função  $S_\lambda^X$  na Eq. (2) deve incluir, além da transmissão do filtro (fração da energia incidente que realmente atravessa o material), outros efeitos instrumentais, como a eficiência quântica do CCD, e ambientais, como a extinção atmosférica, quantidade de luz que não chega ao instrumento devido ao espalhamento por moléculas do ar. Geralmente, os grupos responsáveis pelas observações disponibilizam as curvas resultantes, chamadas curvas de resposta, incluindo todos os efeitos relevantes, como ilustrado na Figura 1.

O conceito básico por trás do uso de velas padrão é a distância de luminosidade, que é definida como

$$d_L := \sqrt{\frac{L}{4\pi f}}, \quad (5)$$

onde  $L$  é luminosidade bolométrica da fonte, a quantidade de energia por unidade de tempo medida por um observador “local” a  $10 \text{ pc}^3$  de distância, e em repouso relativo. É útil definir a magnitude absoluta bolométrica como

$$M(t) := -2.5 \log_{10} \left( \frac{L(t)}{g} \right), \quad (6)$$

<sup>3</sup>1 parsec (pc) =  $3,086 \times 10^{16} \text{ m}$

e a magnitude absoluta em um filtro como

$$M_Y(t) := -2.5 \log_{10} \left( \frac{L^Y(t)}{g^Y} \right), \quad (7)$$

de maneira análoga ao que fizemos com o fluxo. Assim,

$$L^Y(t) := \int_0^\infty L_\lambda(\lambda, t) S_\lambda^Y(\lambda) d\lambda, \quad (8)$$

onde  $L_\lambda$  é a luminosidade específica, a quantidade de energia por unidade de tempo e comprimento de onda (ou frequência). Essas quantidades ditas específicas também costumam ser conhecidas como distribuições espectrais de energia (SED, do inglês *Spectral Energy Distribution*). Com essas definições, é possível mostrar o seguinte resultado

$$\mu := 5 \log_{10} \left( \frac{d_L}{10 \text{ pc}} \right) = m - M, \quad (9)$$

onde  $\mu$  é o módulo de distância e a distância de luminosidade é medida em parsecs.

Infelizmente, como vimos anteriormente, magnitudes bolométricas não são de fato diretamente observáveis e é importante notar que a diferença entre magnitudes aparentes e absolutas em filtros não é igual ao módulo de distância. De fato,

$$\mu = m_X - M_Y + K_{XY}, \quad (10)$$

onde  $K_{XY}$  é a chamada “correção K”, e a Eq. (10) é a definição desta quantidade, que depende da luminosidade específica da fonte, das transmissões dos filtros e do desvio para o vermelho. Para mais detalhes sobre essa discussão, recomendamos [16] e suas referências.

É possível mostrar que a relação entre fluxo e luminosidade específicos pode ser escrita como

$$f_\lambda(\lambda, t, r, z, L_\lambda) = \frac{L_\lambda(\lambda/(1+z), t/(1+z))}{(1+z) 4\pi d_L^2}, \quad (11)$$

onde  $z$  é o desvio para o vermelho (*redshift*), definido como a diferença entre o comprimento de onda medido por um observador em movimento relativo à fonte  $\lambda_{obs}$  e o medido em repouso  $\lambda_{em}$  (na emissão),

$$z := \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}}. \quad (12)$$

Uma complicação adicional é que a expressão (10) considera que não existe nenhum meio material entre observador e fonte. Sabemos que isso

não é verdade. A atmosfera da Terra e a poeira distribuída em todo o interior da nossa galáxia e da galáxia hospedeira dispersam parte da luz da fonte. Isso significa que a energia que recebemos é menor do que deveria e, portanto a magnitude da fonte fica maior. A Eq. (10), conseqüentemente, precisa ser corrigida somando termos de extinção atmosférica  $A_{atm}$ , da Via Láctea  $A_{VL}$  e da galáxia hospedeira  $A_{hosp}$ . Sabemos que existe poeira distribuída entre as galáxias, mas essa contribuição, em geral, é bem menor do que as outras. Assim temos,

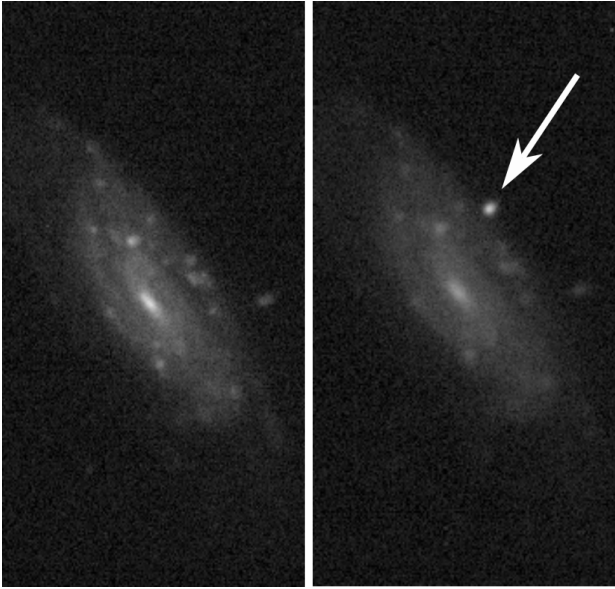
$$\mu = m_X - M_Y + K_{XY} + A_{atm} + A_{VL} + A_{hosp}. \quad (13)$$

#### 4 Busca e detecção de supernovas

A procura sistemática por explosões de supernovas, assim como o de eventos transientes e objetos variáveis em geral, se dá através do que chamamos de “imageamento diferencial” ou, mais simplificada, “subtração de imagens”. Tal procedimento consiste em comparar imagens de uma mesma região do céu obtidas em instantes de tempo diferentes, a procura de fontes luminosas que tenham surgido, desaparecido ou variado significativamente de brilho. Um exemplo pode ser visto na Figura 2, em que o painel da esquerda mostra a imagem de uma galáxia espiral e o da direita mostra a mesma galáxia durante a explosão de uma SNIa, cuja posição está indicada por uma seta. Se subtraíssemos a imagem da esquerda da imagem da direita, obteríamos, idealmente, uma imagem subtraída contendo apenas a SNIa.

Existem à disposição pacotes astronômicos que realizam o processo de subtração das imagens, além do prévio alinhamento astrométrico necessário. O pacote mais conhecido para a realização da subtração de imagens astronômicas é o HOTPANTS (*High Order Transform of PSF ANd Template Subtraction*) [17], que é amplamente utilizado nos *pipelines* para detecção de supernovas de diversas colaborações.

Em grandes levantamentos, é comum termos à disposição muitas imagens de uma mesma região do céu e, assim, é importante definir quais subtrações serão realizadas, a fim de otimizar a utilização de recursos computacionais e possibilitar a detecção de eventos logo após a explosão. Como regra geral, a subtração deve ser sempre



**Figura 2:** Imagens de uma mesma galáxia UGC272, tiradas em noites diferentes. Na imagem da direita, é possível observar uma nova fonte, a supernova SN2005hk. Montagem com imagens do SDSS.

realizada entre imagens obtidas com o mesmo filtro e, no jargão da área, em “épocas” distintas. No contexto da detecção de SNIa, é usual entendermos por “época” a noite em que a imagem foi obtida. Não é comum fazer a distinção entre imagens obtidas em diferentes momentos em uma mesma noite e, dependendo do estágio de desenvolvimento da explosão, pode não ser importante nem mesmo distinguir entre noites subsequentes. Desta forma, para fins da detecção de SNIa, imagens obtidas em um mesmo filtro e em uma mesma noite e até mesmo em noites subsequentes devem ser adicionadas para formar uma única imagem com razão sinal-ruído mais alta, permitindo a detecção de explosões mais distantes. A subtração é realizada entre as imagens resultantes (os chamados “coadds”) obtidos com intervalos de alguns dias ou até mesmo semanas ou meses, dependendo da cadência (frequência com a qual o telescópio volta a observar uma mesma região do céu) do levantamento.

Uma vez que uma fonte luminosa aparece na imagem subtraída, temos um candidato que pode vir a ser uma SNIa, mas pode ser também uma supernova de outro tipo, um asteroide, uma estrela variável, uma AGN, dentre outros objetos astronômicos, além de, mais provavelmente, um resquício do processo de subtração e raios cósmi-

cos. Desta forma, é importante ter recursos para filtrar os candidatos resultantes e aumentar a probabilidade de uma correta identificação de SNIa, reduzindo a necessidade de etapas de inspeção visual. Tais recursos podem variar desde a simples verificação do formato da fonte, que pode ser bastante eficiente na eliminação de raios cósmicos, por exemplo, até a análise da variação temporal do brilho, que pode distinguir estrelas variáveis e objetos em movimento de transientes. Nas últimas etapas da análise, é comum a utilização de ferramentas mais sofisticadas de aprendizado de máquina ou até mesmo projetos de *citizen science*.<sup>4</sup>

Quando se determina que o candidato se trata de um transiente, as imagens de cada noite podem ser novamente individualizadas para produzir curvas de luz (gráficos do brilho como função do tempo) em diferentes filtros e, assim, determinarmos o tipo de explosão a partir das características observadas como o tempo desde a explosão até o brilho máximo, o valor do máximo atingido e o tempo até retorno ao brilho pré-explosão.

## 5 Calibração fotométrica: determinação da magnitude de objetos astronômicos

A obtenção do brilho ou, mais especificamente, da magnitude aparente de fontes em imagens astronômicas é realizada através da comparação com fontes previamente conhecidas, usadas como referência. Tais fontes são em geral estrelas de magnitude bem determinada localizadas nas vizinhanças da fonte cuja magnitude queremos determinar.

### 5.1 Escolha das estrelas de referência e cálculo do ponto zero de magnitude

A escolha das estrelas a serem utilizadas como referência costuma seguir algumas regras básicas como o fato de que elas não podem ser classificadas como estrelas variáveis, devem ter brilho em uma faixa que permita sua detecção por uma vasta gama de telescópios e sejam facilmente identificáveis no céu.

<sup>4</sup>Projetos em que as imagens são disponibilizadas para o público e qualquer pessoa pode contribuir com análise, após um breve treinamento.

A magnitude de uma fonte medida através de um determinado filtro  $X$  pode ser escrita como

$$m_X = -2.5 \log_{10} (f^X) + zp, \quad (14)$$

onde  $f^X$  é o fluxo da fonte medido na imagem obtida com o filtro  $X$  e  $zp$  é o chamado “ponto zero” de magnitude na imagem.

Para o caso em que utilizamos apenas uma estrela de referência, o ponto zero é definido como

$$zp := 2.5 \log_{10} (f_\star^X) + m_{\star X}, \quad (15)$$

onde  $f_\star^X$  é o fluxo da estrela de referência medido na imagem no filtro  $X$  e  $m_{\star X}$  é sua magnitude aparente no mesmo filtro, que pode ser obtida em um catálogo de referência.

Se selecionarmos  $N$  estrelas de referência, o ponto zero pode ser obtido, de uma forma simples, como a média aritmética dos  $N$  pontos zero calculados.

O astrônomo americano Arlo Landolt dedicou sua carreira à criação de um catálogo de estrelas de referência no sistema de filtros UBVRI (ilustrado na Figura 1). Ele se preocupou em incluir estrelas localizadas em ambos os hemisférios celestes e que estivessem distribuídas de forma relativamente homogênea no céu [18].

## 5.2 Calibração de SNIa e subtração do fluxo da galáxia hospedeira

Para eventos transientes como SNIa, a magnitude dependerá do tempo e a Eq. (14) deverá depender do tempo assim como a Eq. (4). Assim, podemos escrever:

$$m_X(t) = -2.5 \log_{10} (f^X(t)) + zp, \quad (16)$$

onde  $zp$  é dado pelas Eq. (15), dependendo do número de estrelas que desejamos ou temos à disposição para usar na calibração e se há disponível informação a respeito da extinção.

Em geral, o fluxo da SNIa está superposto ao da sua galáxia hospedeira, que é subtraído durante o processo de subtração de imagem. Porém, o cálculo do ponto zero deve ser feito nas imagens originais, e não nas subtraídas, visto que as estrelas de referências não aparecem nessas imagens. Portanto, precisamos remover o fluxo da galáxia hospedeira da SNIa antes de calcular a sua magnitude através da Eq. (16). Para realizar tal procedimento em casos em que não há

disponível imagens da galáxia antes da explosão da SNIa nos filtros desejados, pode ser necessário aguardar meses para que os sinais da explosão enfraqueçam o suficiente para que tais imagens sejam obtidas.

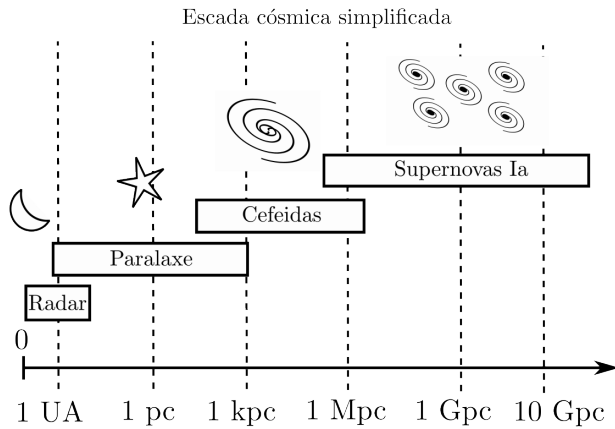
Levantamentos modernos utilizam sistemas de filtros próprios que, mesmo baseados nos sistemas clássicos, podem possuir peculiaridades ou ser mistos de diferentes sistemas. Assim, apesar de estrelas de referência ainda serem utilizadas, muitos levantamentos utilizam também sistemas de lasers para determinar a resposta de suas câmaras (ver, por exemplo, [19]).

As diferentes colaborações desenvolvem procedimentos detalhados para levar em consideração todas as possíveis incertezas relacionadas ao processo de calibração fotométrica. Exemplos disso são os métodos de calibração “Supercal” [20] e o *CROSS-CALIBRATION with a Uniform Reanalysis (X-CALIBUR)* [21], que podem ser utilizados para recalibrar as medidas de SNIa ao comparar as medidas de estrelas de referência em diferentes sistemas fotométricos. De fato, a aplicação do Supercal deu origem à amostra Pantheon, contendo 365 SNIa descobertas pelo levantamento *Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS1)* [10].

## 6 A escada cósmica: calibração de supernovas a partir de outros observáveis

Medidas de distância consistem em um dos grandes desafios da astronomia. As técnicas utilizadas não apenas não podem ser diretas como muitas das que utilizamos na Terra, como variam de acordo com as escalas que desejamos estudar. Assim, costumamos denominar de “Escada Cósmica de Distâncias” o diagrama que representa os métodos de determinação de distâncias utilizados em astronomia, englobando desde aqueles utilizados dentro do Sistema Solar, até aqueles utilizados para estimar as maiores distâncias do Universo, estudadas no contexto dos modelos cosmológicos.

No Sistema Solar, por exemplo, somos capazes de medir a distância até a Lua e outros corpos rochosos através de técnicas de radar (acrônimo para *RADIO DETECTION AND RANGING*), que per-



**Figura 3:** Esquema bastante simplificado de uma escada cósmica. O eixo horizontal indica o intervalo em que cada método pode ser usado com eficiência. É importante notar a interseção entre os intervalos, que permitem calibrar um método a partir do anterior, conectando os “degraus”.

mite obter medidas com precisão de uma parte em um bilhão [22]. O cálculo da distância é feito através da medida do tempo necessário para que ondas de rádio com comprimentos de onda de centímetros a metros emitidas a partir da Terra e refletidas no corpo em questão retornem até nós.

Como ilustrado na Figura 3, tal método deixa de ser prático para os objetos mais próximos fora do Sistema Solar, visto que as estrelas do sistema  $\alpha$ -Centauri, aquelas mais próximas de nós, se encontram a mais de 4 anos-luz de distância. Assim, logo que deixamos o Sistema Solar, adota-se o método da paralaxe trigonométrica para determinar distâncias. A paralaxe consiste na mudança aparente da posição de um objeto quando se muda o ponto de observação e não ocorre apenas no contexto astronômico.

No entanto, as próprias medidas do ângulo de paralaxe exigem instrumentos muito precisos e não é possível medir paralaxe para distâncias muito além de algumas centenas de parsecs [23]. Para  $\alpha$ -Centauri, o ângulo de paralaxe é menor do que 1 segundo de arco (para fins de comparação, a lua cheia tem um diâmetro de aproximadamente 1800 segundos de arco).

O próximo degrau importante na escada cósmica são as estrelas variáveis cefeidas que, como descoberto pela astrônoma americana Henrietta Leavitt no início do século passado [24, 25], possuem período de pulsação proporcional a sua luminosidade máxima. Assim, medidas de período permitem a determinação da magnitude absoluta

e, portanto, medidas de magnitude aparente permitem a determinação da distância. Como as cefeidas são estrelas muito brilhantes, elas podem ser observadas até algumas dezenas de Mpc [26]. Para fins de comparação, a Grande Nuvem de Magalhães se localiza a 50 kpc de distância [27] e o aglomerado de Virgo se localiza a 17 Mpc [28] da Via Láctea. Assim, podemos dizer que cefeidas permitem medir distâncias no “Universo local”, de um ponto de vista da cosmologia.

Para distâncias maiores, torna-se necessário o uso de outros degraus na escada cósmica, e um outro tipo de vela padrão, as SNIa, entram finalmente em cena. A característica que define as SNIa como velas padrão (ou, mais precisamente, velas padronizáveis) é a relação entre a largura do pico da curva de luz e a luminosidade máxima atingida durante as explosões. SNIa podem ser observadas a distâncias muito maiores. De fato, a mais distante já observada foi a uma distância de aproximadamente 5 Gpc, correspondente a  $z \sim 1,9$  [29].

Como ilustrado na Figura 3, cada “degrau” da escada cósmica se sobrepõe com o anterior e o seguinte e, assim, os resultados de um método de medida são utilizados para calibrar os resultados do método utilizado para medir as distâncias imediatamente maiores. Desta forma, as medidas de distância realizadas com SNIa foram inicialmente calibradas através da comparação de amostras de SNIa consideradas próximas e variáveis cefeidas consideradas distantes.

Podemos ilustrar a medida local de parâmetros cosmológicos com SNIa da seguinte forma. Para valores de desvio para o vermelho de até  $z \sim 0,1$ , a Eq. (9) pode ser escrita como [30]:

$$m - M = 5 \log_{10}(cz) - 5 \log_{10}(H_0) + 25, \quad (17)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $H_0$  é a constante de Hubble, que se relaciona com a taxa de expansão atual do Universo.

Assim, se medirmos o desvio para o vermelho  $z$  e a magnitude aparente  $m$  de uma SNIa a uma distância grande o suficiente para que os efeitos de velocidades peculiares possam ser desprezados (a SNIa deve estar no *Hubble flow*<sup>5</sup>), mas pequena o suficiente para que a aproximação acima seja

<sup>5</sup>*Hubble flow* é o referencial formado por observadores localmente em repouso, de forma que a velocidade relativa entre eles é apenas devida à expansão.

válida, podemos obter informação à respeito da relação de  $H_0$  e  $M$  (ou, mais comumente,  $\mu$  ou  $d_L$ ).

O gráfico de  $d_L$  ou  $\mu$  como função de  $z$ , como ilustrado na Figura 4), é conhecido como “diagrama de Hubble”. Nesse limite de  $z$  pequeno, temos uma relação linear no diagrama de Hubble. Para  $z > 0,1$  a relação deixa de ser linear e passa a depender fortemente do modelo cosmológico adotado e dos valores de outros parâmetros cosmológicos além de  $H_0$ .

Em 1996, Sandage e colaboradores [31] obtiveram os valores  $H_0 = (56 \pm 4) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  (banda  $B$ ) e  $H_0 = (58 \pm 4) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  (banda  $V$ ) utilizando uma amostra de 20 variáveis cefeidas para obter a distância da galáxia NCG 4639, onde ocorreu a SN 1990N do tipo Ia, juntamente com os dados de outras seis SNIa.

Em 1998, Riess e colaboradores [1] utilizaram variáveis cefeida observadas nas galáxias hospedeiras de três SNIa de sua amostra para calcular suas magnitudes absolutas e declararam que tal procedimento adicionou uma incerteza de 5% na incerteza da constante de Hubble por eles obtida.

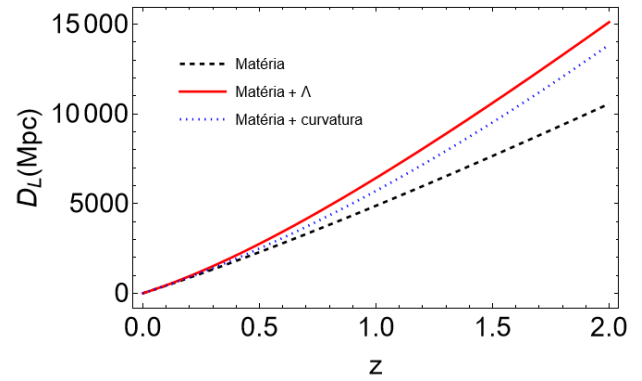
Em 2019, a colaboração SH0ES utilizou uma amostra de 70 variáveis cefeidas na Grande Nuvem de Magalhães para aprimorar os cálculos de distância de SNIa e obtiveram  $H_0 = (74,03 \pm 1,42) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  [32].

Esse resultado faz parte de um conjunto de resultados obtidos com SNIa que, desde 2016, vinham de encontro com os valores de  $H_0$  obtidos a partir da análise das medidas da radiação cósmica de fundo (por exemplo  $H_0 = (67,4 \pm 0,5) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  [33] obtido em 2018 pela colaboração Planck). Foi então que surgiu a chamada “tensão de Hubble”, problema que até o momento ainda não possui solução definitiva [11, 34, 35].

É interessante notar como as medidas da constante de Hubble e suas incertezas evoluíram desde a década de 90 até os valores atuais, essas últimas tendo diminuído de  $\sim 6 - 7\%$  para os atuais  $\sim 1 - 2\%$ .

## 7 Propagação das incertezas para os parâmetros cosmológicos

As velas padrão são importantes para a cosmologia porque as distâncias, como função do



**Figura 4:** Distância de luminosidade em função do *redshift* para o modelo padrão, plano com constante cosmológica (linha contínua vermelha), plano sem a constante (linha tracejada preta) e sem constante mas com curvatura (linha pontilhada azul).

*redshift*, dependem do modelo cosmológico. Além disso, essa dependência cresce com o *redshift*, como podemos ver na Figura 4. Uma análise estatística, comparando as estimativas de distância obtidas das observações com as previsões teóricas, como as curvas na Figura 4, nos permite inferir qual o modelo que melhor se ajusta aos dados e qual a incerteza associada a cada parâmetro do modelo.

Um parâmetro bastante usado e o chamado parâmetro da equação de estado da energia escura, dado pela razão entre a pressão e a densidade de energia desse componente,  $w = p/\rho$ .

A constante cosmológica pode ser tratada como um fluido com  $w = -1$ , constante. Um modelo sem constante cosmológica, dominado pela matéria que conhecemos, é caracterizado por  $w = 0$ . Os dados coletados nas últimas duas décadas têm mostrado que o melhor ajuste é  $w = -1$ , com uma incerteza de cerca de  $\sigma = 0,03$  [36], mesmo incluindo os efeitos que mencionamos e muitos outros. A tabela 1 mostra uma pequena fração do levantamento feito por uma colaboração sobre o impacto desses efeitos no resultado final.

Essa é uma evidência muito forte para a existência de energia escura, no contexto da teoria da relatividade geral. A questão que permanecia era se, entre todos os modelos propostos, a constante cosmológica continuaria sendo a preferida pelos dados. Somente nos últimos dois anos, começaram a surgir evidências para um valor de  $w$  negativo e diferente de  $-1$ , o que apontaria para um modelo de energia escura dinâmico,

**Tabela 1:** Algumas fontes de erros sistemáticos e sua contribuição para a incerteza no parâmetro da equação de estado da energia escura  $w$ . Dados obtidos de [36].

Sistemático	incerteza ( $w$ )	% do total
Calibração	0,057	34
Poeira (hospedeira)	0,027	18
Velocidade peculiar	0,025	16
Poeira (Via Láctea)	0,020	13

não constante. Essas primeiras evidências surgiram com o projeto DESI (do inglês *Dark Energy Spectroscopic Instrument*, instrumento espectroscópico para energia escura) [37, 38], voltado para medidas das chamadas oscilações acústicas de bárions. Essa nova evidência gerou grande entusiasmo na comunidade, que tem revisitado vários modelos propostos nos últimos 30 anos, com o intuito de reanalísá-los à luz dos novos dados.

Na era da “cosmologia de precisão”, em que tentamos determinar se a densidade da energia escura é ou não constante, fica cada vez mais patente a necessidade de aprimorar as técnicas de observação e controle de incertezas de medição, assim como os modelos que descrevem esses fascinantes eventos astrofísicos que nos permite sondar a evolução do Universo em grandes escalas.

### Sobre os autores

Beatriz B. Siffert ([beatriz@caxias.ufrj.br](mailto:beatriz@caxias.ufrj.br)) possui bacharelado (2004) e doutorado (2008) 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.

Ribamar R. R. Reis ([ribamar@if.ufrj.br](mailto: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 na área

de Física, com ênfase em Relatividade e Gravitacão, 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] A. G. Riess et al., *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, *The Astronomical Journal* **116**(3), 1009 (1998).
- [2] S. Perlmutter et al., *Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 High-Redshift Supernovae*, *The Astrophysical Journal* **517**(2), 565 (1999). [ArXiv:astro-ph/9812133](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9812133).
- [3] R. R. R. Reis e B. B. Siffert, *Supernovas do tipo Ia e a expansão do Universo*, *Cadernos de Astronomia* **3**(1), 21 (2022).
- [4] P. Nugent e M. Hamuy, *Cosmology with Type IIP Supernovae*, in *Handbook of Supernovae*, editado por A. W. Alsabti e P. Murdin (Springer International Publishing, Cham, 2017), 2671–2688.
- [5] J. E. Gunn et al., *The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera*, *The Astronomical Journal* **116**(6), 3040 (1998). [ArXiv:astro-ph/9809085](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9809085).
- [6] 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).
- [7] N. Regnault et al., *Photometric calibration of the Supernova Legacy Survey fields*, *Astronomy & Astrophysics* **506**(2), 999–1042 (2009).
- [8] M. Betoule et al., *Improved cosmological constraints from a joint analysis of the SDSS-II and SNLS supernova samples*, *Astronomy & Astrophysics* **568**, A22 (2014).
- [9] T. M. C. Abbott et al., *The Dark Energy Survey: Data Release 1*, *The Astrophys. J.*

- Supp. **239**(2), 18 (2018). [ArXiv:1801.03181](#).
- [10] 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](#).
- [11] L. Knox e M. Millea, *Hubble constant hunter's guide*, *Phys. Rev. D* **101**, 043533 (2020).
- [12] A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, *Annalen der Physik* **322**(6), 132 (1905).
- [13] A. B. Arons e M. B. Peppard, *Einstein's Proposal of the Photon Concept—a Translation of the Annalen der Physik Paper of 1905*, *American Journal of Physics* **33**(5), 367 (1965).
- [14] S. B. Howell, *Handbook of CCD Astronomy*, Cambridge Observing Handbooks for Research Astronomers (Cambridge University Press, 2006), 2 ed.
- [15] Ž. Ivezić et al., *LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products*, *The Astrophysical Journal* **873**(2), 111 (2019). [ArXiv:0805.2366](#).
- [16] R. C. V. Coelho et al., *Standardization of type Ia supernovae*, *European Journal of Physics* **36**, 015007 (2015). [ArXiv:1411.3596](#).
- [17] A. Becker, *HOTPANTS: High Order Transform of PSF AND Template Subtraction*, Astrophysics Source Code Library [ascl:1504.004](#) (2015).
- [18] A. U. Landolt, *UBVRI Photometric Standard Stars in the Magnitude Range  $11.5 < V < 16.0$  Around the Celestial Equator*, *Astronomical Journal* **104**, 340 (1992).
- [19] C. W. Stubbs et al., *Precise throughput determination of the panSTARRS telescope and the gigapixel imager using a calibrated silicon photodiode and a tunable laser: initial results*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **191**(2), 376 (2010).
- [20] D. Scolnic et al., *Supercal: cross-calibration of multiple photometric systems to improve cosmological measurements with type Ia supernovae*, *The Astrophysical Journal* **815**(2), 117 (2015).
- [21] M. Currie et al., *Evaluating the Calibration of SN Ia Anchor Datasets with a Bayesian Hierarchical Model* (2020). [ArXiv:2007.02458](#).
- [22] J.-L. Margot, *A Data-Taking System for Planetary Radar Applications*, *Journal of Astronomical Instrumentation* **10**(01) (2020).
- [23] P. Schneider, *Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction* (Springer Berlin, Heidelberg, 2015).
- [24] H. S. Leavitt, *1777 variables in the Magellanic Clouds*, *Annals of Harvard College Observatory* **60**, 87 (1908). Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1907AnHar...60...87L>, acesso em fev. 2026.
- [25] H. S. Leavitt e E. C. Pickering, *Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud*, *Harvard College Observatory Circular* **173**, 1 (1912). Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1912HarCi.173...1L/abstract>, acesso em fev. 2026.
- [26] B. Ryden, *Introduction to Cosmology* (Cambridge University Press, 2017).
- [27] G. Pietrzyński et al., *A distance to the Large Magellanic Cloud that is precise to one per cent*, *Nature* **567**(7747), 200 (2019).
- [28] W. L. Freedman et al., *Distance to the Virgo cluster galaxy M100 from Hubble Space Telescope observations of Cepheids*, *Nature* **371**(6500), 757 (1994).
- [29] D. O. Jones et al., *The discovery of the most distant known type Ia supernova at redshift 1.914*, *The Astrophysical Journal* **768**(2), 166 (2013).
- [30] S. Perlmutter et al., *Measurements of the Cosmological Parameters  $\Omega$  and  $\Lambda$  from the First Seven Supernovae at  $z \geq 0.35$* , *The*

- [Astrophysical Journal](#) **483**(2), 565 (1997).  
[ArXiv:astro-ph/9608192](#).
- [31] A. Sandage et al., *Cepheid Calibration of the Peak Brightness of Type Ia Supernovae: Calibration of SN 1990N in NGC 4639 Averaged with Six Earlier Type Ia Supernova Calibrations to Give  $H_0$  Directly*, [The Astrophysical Journal](#) **460**(1), L15 (1996).
- [32] A. G. Riess et al., *Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics beyond  $\Lambda$ CDM*, [The Astrophysical Journal](#) **876**(1), 85 (2019).
- [33] N. Aghanim et al., *Planck 2018 results: VI. Cosmological parameters*, [Astronomy & Astrophysics](#) **641**, A6 (2020).
- [34] W. L. Freedman et al., *The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch*, [The Astrophysical Journal](#) **882**(1), 34 (2019). [ArXiv:1907.05922](#).
- [35] E. Di Valentino et al., *In the realm of the Hubble tension—a review of solutions*, [Classical and Quantum Gravity](#) **38**(15), 153001 (2021).
- [36] M. Vincenzi et al., *The Dark Energy Survey Supernova Program: Cosmological Analysis and Systematic Uncertainties*, [The Astrophysical Journal](#) **975**(1), 86 (2024).
- [37] A. G. Adame et al., *DESI 2024 VI: cosmological constraints from the measurements of baryon acoustic oscillations*, [JCAP](#) **2025**(2), 021 (2025). [ArXiv:2404.03002](#).
- [38] M. Abdul Karim et al., *DESI DR2 results. II. Measurements of baryon acoustic oscillations and cosmological constraints*, [Physical Review D](#) **112**(8) (2025).