

A energia escura e os desafios do modelo cosmológico padrão

Rodrigo von Marttens^{1,2}, Jailson Alcaniz³ e Saulo Carneiro^{1,3}

¹Universidade Federal da Bahia

²PPGCosmo, Universidade Federal do Espírito Santo

³Observatório Nacional

Resumo

A evidência observacional de que o Universo se encontra em expansão acelerada representa um dos principais desafios da cosmologia moderna, sendo usualmente atribuída à presença de uma componente dominante conhecida como energia escura. O modelo cosmológico padrão, Λ CDM, fornece uma descrição consistente de uma ampla gama de observações, mas enfrenta importantes dificuldades tanto do ponto de vista teórico quanto observacional. Neste artigo, apresentamos uma revisão do modelo Λ CDM, discutindo sua fundamentação teórica e os principais testes observacionais que sustentam sua validade. Damos ênfase às tensões observacionais recentes, como aquelas associadas à constante de Hubble (H_0) e à amplitude das flutuações de matéria (σ_8), além de resultados recentes do levantamento DESI que sugerem possíveis desvios em relação ao modelo padrão. Discutimos ainda as implicações dessas tensões e possíveis extensões do modelo, destacando o papel de cenários com energia escura dinâmica. Este panorama busca fornecer uma visão atualizada dos desafios enfrentados pela cosmologia contemporânea e das perspectivas para a compreensão da aceleração cósmica.

Abstract

Observational evidence that the Universe is undergoing accelerated expansion represents one of the main challenges of modern cosmology, usually attributed to the presence of a dominant component known as dark energy. The standard cosmological model, Λ CDM, provides a consistent description of a wide range of observations, but faces significant difficulties from both a theoretical and observational standpoint. In this article, we present a review of the Λ CDM model, discussing its theoretical foundation and the main observational tests that support its validity. We emphasize recent observational strains, such as those associated with the Hubble constant (H_0) and the amplitude of matter fluctuations (σ_8), as well as recent results from the DESI survey that suggest possible deviations from the standard model. We also discuss the implications of these strains and possible extensions of the model, highlighting the role of scenarios with dynamic dark energy. This overview seeks to provide an updated view of the challenges faced by contemporary cosmology and the prospects for understanding cosmic acceleration.

Palavras-chave: energia escura; modelo cosmológico padrão; energia escura dinâmica; tensões cosmológicas.

Keywords: dark energy; standard cosmological model; dynamical dark energy; cosmological tensions.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v7n1.52249](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v7n1.52249)

1 Introdução

A descoberta de que o Universo está se expandindo de maneira acelerada alterou radicalmente o paradigma da física e introduziu o conceito de energia escura (DE, do inglês *dark energy*) [1, 2]. Esse fenômeno inesperado desafiou a compreensão convencional sobre a gravidade, que é uma força atrativa, e gerou um novo campo de estudo sobre a dinâmica cósmica. Com base em observações realizadas a partir de supernovas tipo Ia, foi possível inferir que a aceleração da expansão

do Universo é impulsionada por uma componente exótica, a energia escura, responsável por cerca de 70% do conteúdo energético do cosmos [3].

A explicação teórica mais aceita para esse fenômeno é o modelo cosmológico padrão, o modelo Λ CDM, que incorpora a constante cosmológica Λ e a matéria escura fria (CDM, do inglês *cold dark matter*). A constante cosmológica foi inicialmente introduzida por Einstein em 1917 [4], como um termo que permitia manter o Universo estático, mas se tornou fundamental na descrição da aceleração cósmica ao longo do século XX. O

modelo Λ CDM tem sido bem-sucedido em descrever a evolução do Universo em grande escala, mas ainda enfrenta desafios significativos, tanto teóricos quanto observacionais [5].

De um ponto de vista mais fundamental, o modelo enfrenta o famoso “problema da constante cosmológica”, que se refere à discrepância entre os resultados da teoria quântica de campos e os valores observados da energia do vácuo [6, 7]. Entre as principais questões observacionais enfrentadas pelo modelo Λ CDM estão a discrepância entre as medições locais da constante de Hubble H_0 [8] e as observações da radiação cósmica de fundo em micro-ondas (CMB, do inglês *cosmic microwave background*), e a amplitude das flutuações de matéria σ_8 [9], que revelam tensões entre os dados mais recentes e as previsões teóricas do modelo. Além disso, dados recentes do levantamento DESI (*Dark Energy Spectroscopic Instrument*) parecem indicar importantes inconsistências com o modelo Λ CDM, como uma discordância no valor encontrado para a fração atual de matéria no Universo e uma preferência por uma energia escura dinâmica, em contraposição à constante cosmológica [10].

Este artigo discute a formulação da energia escura e as tensões atuais no modelo Λ CDM, explorando essas discrepâncias observacionais recentes e alternativas teóricas para a descrição da energia escura.

2 Uma breve perspectiva histórica

O conceito de aceleração cósmica, um dos pilares da cosmologia moderna, está intimamente ligado ao desenvolvimento das primeiras observações e teorias sobre o Universo em expansão. As primeiras medições das velocidades radiais das galáxias foram feitas em 1912 [11], ainda antes de Einstein publicar sua teoria da relatividade geral. No entanto, foi em 1917, com o trabalho de Einstein, que a constante cosmológica apareceu pela primeira vez, introduzida como uma ferramenta matemática [4]. Curiosamente, essa constante, que inicialmente visava manter o Universo estático, mais tarde se tornaria a principal explicação para a aceleração de sua expansão.

Tempos depois, já na década de 1920, o físico russo Alexander Friedmann propôs soluções cosmológicas novas que previam a expansão do Universo, incluindo a possibilidade de um Universo

com curvatura positiva, que eventualmente se expandiria até atingir um raio máximo antes de colapsar [12]. Vale ressaltar que essa proposta foi inicialmente rejeitada por Einstein, mas ele viria a reconhecê-la mais tarde como válida. A evidência observacional que apoiava a expansão do Universo veio com as contribuições de Georges Lemaître e Edwin Hubble, que, em 1927 e 1929, respectivamente, mostraram que as galáxias estavam se afastando de nós, estabelecendo a base para o que viria a ser conhecido como a Lei de Hubble-Lemaître.¹

Décadas mais tarde, a matéria escura fria (CDM) foi proposta por Zwicky em 1933 [13], e a detecção da radiação cósmica de fundo (CMB) em 1965, por Penzias e Wilson [14], forneceu mais evidências que corroboraram a ideia de que o Universo se originou a partir de uma fase inicial altamente densa e quente, expandindo-se desde então até o estado atual. Contudo, foi somente nos anos 1990 que a aceleração cósmica foi observada diretamente, através da análise de supernovas tipo Ia, que sugeriram que o Universo não apenas estava se expandindo, mas que essa expansão estava acelerando [1, 2]. Esse resultado surpreendente levou à introdução do conceito de energia escura, um componente exótico que permeia o espaço e acelera a expansão do Universo.

Esse desenvolvimento culminou na formulação do modelo cosmológico Λ CDM, que combina a constante cosmológica (Λ) com a matéria escura fria para descrever a evolução do Universo. Embora o modelo tenha sido um sucesso notável, tanto teórica quanto observacionalmente [15–18], ele ainda enfrenta desafios significativos, que continuam a ser temas de intensa pesquisa e debate.

3 Fundamentação teórica do modelo Λ CDM

Conforme já mencionado, o modelo Λ CDM, conhecido como modelo cosmológico padrão, é a teoria que descreve a evolução do Universo em grandes escalas. Ele é fundamentado na teoria

¹A União Astronômica Internacional (IAU) recomenda o uso do termo Lei de Hubble-Lemaître para reconhecer a contribuição de Georges Lemaître, que propôs a expansão do Universo independentemente de Edwin Hubble. A resolução foi divulgada em 2018. Para mais detalhes, consulte o comunicado oficial da IAU em <https://iauarchiv.eso.org/news/pressreleases/detail/iau1812/>.

da relatividade geral de Einstein e incorpora a constante cosmológica Λ e a matéria escura fria (CDM) na composição energética do Universo, além das componentes ordinárias que conhecemos do laboratório. De acordo com os dados atuais, estima-se que essas componentes escuras constituem cerca de 95% do conteúdo energético do Universo atual, e entender sua natureza é um dos maiores desafios da Cosmologia moderna. Neste capítulo, apresentamos alguns aspectos teóricos básicos do modelo Λ CDM, com ênfase no papel da constante cosmológica na explicação da expansão acelerada.

3.1 O princípio cosmológico

O modelo cosmológico padrão supõe que o Universo é homogêneo e isotrópico em grandes escalas, ou seja, ele possui as mesmas propriedades em todos os pontos e em todas as direções. Esse é o Princípio Cosmológico, que implica que qualquer observador no Universo, independentemente de sua localização, observa um Universo semelhante. A partir deste princípio, é possível descrever de maneira formal o espaço-tempo no contexto cosmológico, através de uma métrica. O tensor métrico, que é um tensor simétrico de ordem dois, é utilizado para definir distâncias e ângulos no espaço-tempo. Para o Universo homogêneo e isotrópico, usamos a métrica de Friedmann-Lemaître, dada por

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2(\theta) d\phi^2 \right), \quad (1)$$

onde $a(t)$ é o fator de escala, uma função dependente do tempo que descreve a expansão do espaço, e K é a curvatura espacial.

3.2 Composição do Universo

Além da geometria do espaço-tempo, é necessário descrever o conteúdo energético do Universo. No contexto do modelo cosmológico padrão, temos três componentes principais: radiação (matéria relativística), matéria bariônica (matéria visível) e matéria escura fria (CDM). A radiação predominou no início do Universo, mas atualmente representa uma fração mínima da energia

total. A matéria bariônica, que interage com a radiação, constitui os objetos visíveis como estrelas, planetas e galáxias. Por outro lado, a CDM é uma forma de matéria que não interage significativamente com a radiação e desempenha um papel crucial na formação de estruturas cósmicas.

Do ponto de vista formal, esses componentes são descritos por tensores de energia-momento de fluidos perfeitos, cujas densidades de energia (ρ_i) e pressões (p_i) são relacionadas por uma equação de estado $w_i = p_i/\rho_i$ (onde $i = r, b$ ou c , de radiação, bárions e CDM, respectivamente). Como é conhecido da mecânica estatística, a radiação (matéria relativística) é descrita por uma equação de estado $w_r = 1/3$, enquanto a matéria bariônica e a CDM, que são não-relativísticas, são consideradas componentes sem pressão, com $w_b = w_c = 0$.

3.3 A dinâmica do Universo no modelo padrão

A dinâmica do Universo no modelo Λ CDM é governada pelas equações de Einstein, que descrevem como a geometria do espaço-tempo se comporta em resposta à presença de matéria e energia. Para a evolução do Universo, a equação de Friedmann relaciona a taxa de expansão, representada pelo parâmetro de Hubble ($H \equiv \dot{a}/a$), com as densidades de energia dos diferentes componentes cósmicos. No contexto do modelo Λ CDM, a equação de Friedmann é dada por

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}, \quad (2)$$

Onde G é a constante gravitacional e ρ , sem índice, denota a densidade de energia total do Universo.²

Por outro lado, a evolução temporal das densidades de energia dos componentes do Universo é governada pela equação de continuidade. No contexto do modelo cosmológico padrão, considera-se que cada componente material possui uma evolução independente das outras, de modo que o único efeito físico na evolução da densidade de energia se dá por conta da diluição devido à expansão do

²Sempre que uma componente do fluido cósmico não possuir índice, ela se refere ao fluido total, considerando a contribuição de todos os componentes presentes.

Universo. Nesse contexto, a equação da continuidade, para cada componente, é dada por

$$\dot{\rho}_i + 3H(\rho_i + p_i) = 0. \quad (3)$$

Considerando as equações de estado da radiação e da matéria,³ a solução da evolução temporal para suas densidades é dada por

$$\rho_r = \rho_{r0}a^{-4}, \quad \rho_m = \rho_{m0}a^{-3}. \quad (4)$$

A densidade de radiação decai com o fator de escala de acordo com a^{-4} , devido tanto à expansão do Universo quanto ao estiramento do comprimento de onda devido ao efeito de desvio para o vermelho cosmológico. Por outro lado, a densidade de matéria decai como a^{-3} , devido à expansão volumétrica.

Por fim, a evolução do parâmetro de Hubble, que descreve a taxa de expansão do Universo, pode ser expressa como

$$H^2 = H_0^2 (\Omega_r a^{-4} + \Omega_m a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda), \quad (5)$$

onde H_0 é o valor atual do parâmetro de Hubble, e Ω_r , Ω_m , Ω_k , e Ω_Λ são os parâmetros de densidade para radiação, matéria, curvatura espacial e energia escura, respectivamente. Esses parâmetros são definidos como

$$\Omega_i \equiv \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{i0}, \quad \Omega_k = -\frac{K}{H_0^2}, \quad \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H_0^2}. \quad (6)$$

Esses parâmetros descrevem a fração de cada componente da energia total do Universo no tempo presente, com a condição de sua soma total seja igual à unidade ($\Omega_\Lambda + \Omega_m + \Omega_r + \Omega_k = 1$).

Embora a equação de Friedmann e a equação de continuidade sejam suficientes para calcular a dinâmica de fundo do Universo, é possível obter das equações de campo de Einstein uma equação para a segunda derivada do fator de escala, conhecida como equação da aceleração

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}. \quad (7)$$

Este resultado é fundamental para a compreensão do que realmente significa a expansão acelerada do Universo. Em um Universo em expansão, o fator de escala descreve o alongamento do espaço,

³Vamos considerar a matéria total como a soma da matéria bariônica e da matéria escura fria, ou seja, $\rho_m = \rho_b + \rho_c$.

e uma expansão acelerada indica que a velocidade de alongamento está aumentando. Assim, o critério para tal aceleração é simplesmente que a segunda derivada do fator de escala em relação ao tempo seja positiva. Contudo, de acordo com a Eq. (7), na ausência de uma constante cosmológica, uma aceleração positiva da expansão é impossível, já que ρ e p são exclusivamente não negativos. Por outro lado, a presença de uma constante cosmológica positiva abre essa possibilidade. Para garantir a expansão acelerada, a condição a ser satisfeita pela constante cosmológica é dada por

$$\Lambda > 4\pi G(\rho + 3p). \quad (8)$$

3.4 Desafios do modelo Λ CDM

A formulação apresentada, embora matematicamente coerente, deixa algumas questões em aberto. De maneira geral, essas questões estão conectadas à nossa ignorância sobre a natureza dos constituintes do setor escuro. Nesta seção e nas seguintes, abordaremos alguns desafios enfrentados pelo modelo cosmológico padrão, tanto no âmbito teórico quanto observacional. Espera-se que uma melhor compreensão dessas questões ofereça valiosos *insights* sobre a natureza da energia escura.

O problema da constante cosmológica

O candidato mais natural para a constante cosmológica é a energia do vácuo. Como consequência da condição de ser invariante sob transformações de Lorentz, o tensor de energia-momento do vácuo deve ser proporcional ao tensor métrico, ou seja, pode ser escrito como

$$T_{\mu\nu}^{(\text{vac})} = -\frac{\Lambda^{(\text{vac})}}{8\pi G} g_{\mu\nu}. \quad (9)$$

Esta expressão para o tensor de energia-momento do vácuo coincide com o termo da constante cosmológica que aparece nas equações de Einstein, o que torna essa associação imediata. No entanto, a teoria quântica de campos prevê que a densidade de energia do vácuo deve ser calculada como

$$\begin{aligned} \rho^{(\text{vac})} &= \frac{\Lambda^{(\text{vac})}}{8\pi G} \\ &= \int_0^{k_{\text{lim}}} \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \sqrt{k^2 + m^2} \approx \frac{k_{\text{lim}}^4}{16\pi^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

onde m e k representam, respectivamente, a massa e o momento de um campo escalar utilizado para calcular sua energia de ponto zero, com $k_{\text{lim}} \gg m$.

A integral mostrada na Eq. (10) diverge quando $k \rightarrow \infty$. Portanto, uma prática comum é introduzir uma escala de corte como k_{lim} , que define o limite de validade da teoria. No contexto da Relatividade Geral, a escala de Planck é um candidato plausível para esse limite. Ao empregá-lo, obtemos uma densidade de energia do vácuo cerca de 120 ordens de magnitude maior que os resultados observados [6, 7]. Essa enorme discrepância impediu a identificação até o momento da constante cosmológica com a energia do vácuo. No entanto, há que se lembrar que o cálculo acima só é bem definido no espaço-tempo plano, onde não se espera qualquer presença de conteúdo energético [19]. Avanços em nossa compreensão da teoria quântica de campos no espaço-tempo curvo podem oferecer insights sobre a resolução desse problema.

3.5 Aspectos observacionais

Como em outras áreas da Física, a verificação experimental de uma hipótese/teoria é um processo vital na cosmologia. Esta seção é dedicada a discutir alguns dos principais aspectos observacionais do modelo Λ CDM, incluindo os resultados mais recentes reportados na literatura.

3.5.1 Análise de supernovas do tipo Ia

Dada a sua importância histórica como a primeira observação direta da expansão acelerada do Universo, uma ênfase particular será dada ao formalismo empregado para comparar dados observacionais de supernovas tipo Ia (SN Ia). Uma SN Ia surge como a última fase do processo de acreção/fusão envolvendo uma anã branca de carbono-oxigênio em um sistema binário. Quando a anã branca atinge a massa de Chandrasekhar, dada por $1,4 M_{\odot}$, a força gravitacional supera a pressão do gás degenerado de elétrons [20]. Como resultado, o sistema entra em colapso, gerando uma enorme explosão, tão brilhante quanto uma galáxia. De acordo com esse mecanismo astrofísico, a SN Ia tem uma magnitude absoluta característica, o que torna a SN Ia adequada para ser considerada como “velas pa-

dronizáveis”. Considerando que a magnitude absoluta pode ser calibrada para todas as SN Ia, torna-se viável obter a sua distância com base na diferença entre suas magnitudes absolutas e aparentes, definindo-se a distância como o módulo de distância. O módulo de distância quantifica a diferença de magnitude causada pela propagação da luz através do Universo, incluindo efeitos de curvatura e expansão. A expressão teórica para o módulo de distância é

$$\mu = m - M = 5 \log \left(\frac{d_L}{1 \text{ Mpc}} \right) + 25, \quad (11)$$

onde m e M são as magnitudes aparentes e absolutas, respectivamente, e d_L é a distância luminosidade, dada por

$$d_L = \begin{cases} \frac{\text{sen} \left[\sqrt{|\Omega_k|} H_0 \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{H(\tilde{z})} \right]}{(1+z) H_0 \sqrt{|\Omega_k|}}, & \text{para } \Omega_k > 0, \\ \frac{1}{(1+z)} \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{H(\tilde{z})}, & \text{para } \Omega_k = 0, \\ \frac{\text{sinh} \left[\sqrt{|\Omega_k|} H_0 \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{H(\tilde{z})} \right]}{(1+z) H_0 \sqrt{|\Omega_k|}}, & \text{para } \Omega_k < 0. \end{cases}$$

As pesquisas de SN Ia medem suas magnitudes aparentes e, ao se realizar a análise estatística para restringir os parâmetros cosmológicos, a magnitude absoluta é considerada como um parâmetro livre constante. Atualmente, o maior conjunto de dados disponível de SN Ia é o Union 3, que contém 2.087 objetos catalogados de diferentes levantamentos [21].

Recentemente, a colaboração *Dark Energy Survey* (DES) conduziu uma análise cosmológica utilizando seu próprio catálogo de 1.635 SN Ia [22]. O diferencial do catálogo obtido pela colaboração DES é que, com exceção de alguns objetos em baixos redshifts, todos os outros foram observados diretamente pelo levantamento. A Fig. 1 mostra os diagramas de Hubble obtidos a partir das amostras Union3 e DES.

3.5.2 Outros observáveis cosmológicos

Além das SN Ia, o modelo Λ CDM tem sido testado de forma recorrente utilizando-se uma variedade de dados cosmológicos. A diversidade de testes observacionais é crucial porque mitiga o

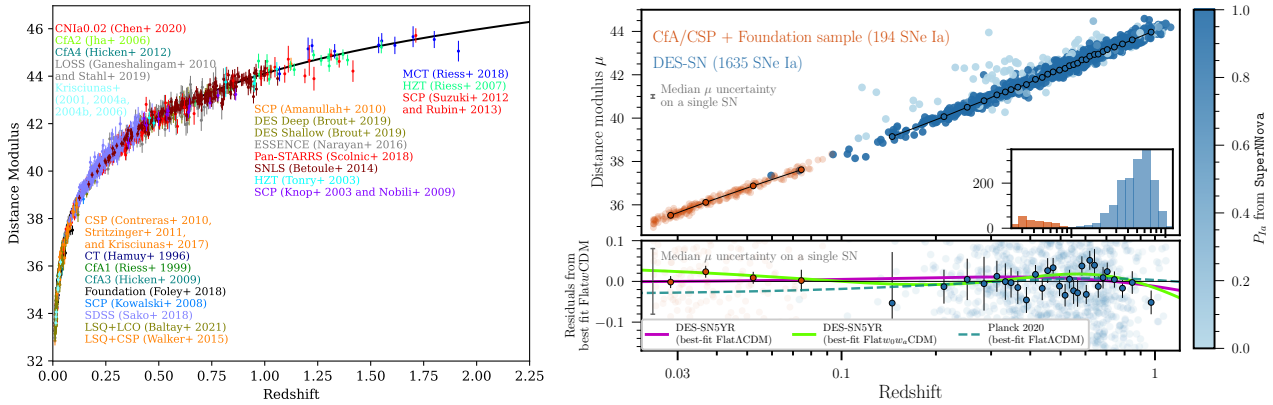


Figura 1: Relação entre o módulo de distância e o redshift (diagramas de Hubble) para amostras de supernovas tipo Ia. À esquerda, o diagrama correspondente à compilação Union3, retirado da Ref. [21]. À direita, o diagrama obtido pela colaboração DES, retirado da Ref. [22].

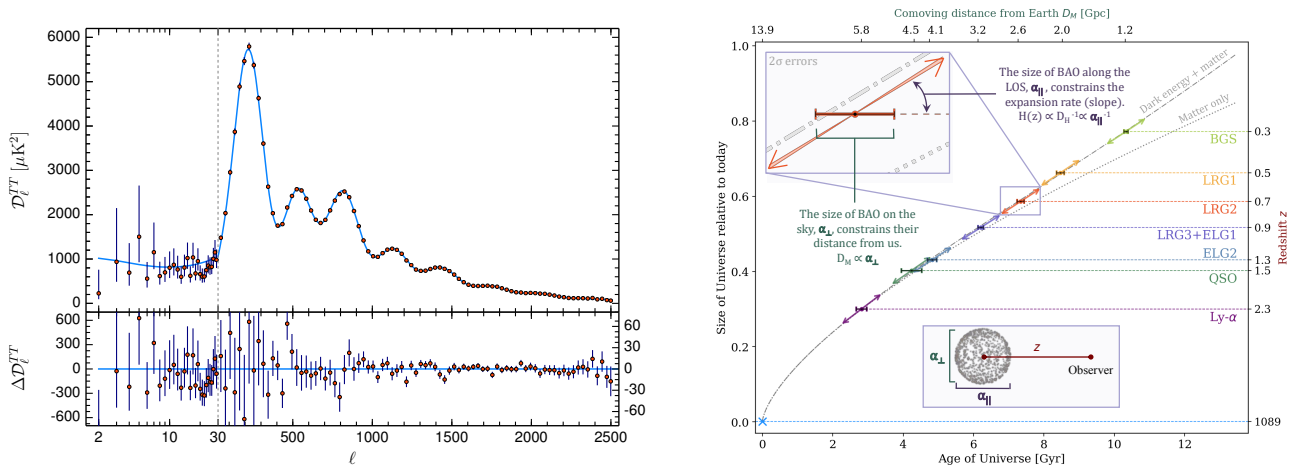


Figura 2: Resultados observacionais da CMB e das BAOs. O painel esquerdo, retirado da Ref. [15], mostra o espectro de potência de temperatura da CMB medido pela missão Planck, enquanto o painel direito, retirado da Ref. [10], ilustra como medições de BAO do DESI DR2 restringem a história de expansão do Universo.

risco de conclusões errôneas baseadas em vieses induzidos por erros sistemáticos observacionais, que são únicos para cada experimento. Entre outros, três testes observacionais de grande importância na cosmologia moderna são:

- **Radiação Cósmica de Fundo (CMB):** a CMB é uma radiação remanescente do Universo primordial, aproximadamente 380.000 anos após a singularidade inicial, quando o acoplamento entre os bárions e os fótons cessou, na chamada superfície de último espalhamento. Essa radiação é agora observada por todo o céu com uma temperatura de cerca de 2,73 K. A análise das anisotropias de temperatura, polarização e efeitos de lente gravitacional no mapa da CMB fornece restrições robustas sobre os parâmetros cosmológicos do modelo Λ CDM. Os resultados

mais recentes dos dados de CMB foram fornecidos pelo satélite Planck em 2018 [15]. Como mostrado na Fig. 2, as medidas do espectro de potência do CMB fornecem restrições extremamente precisas sobre os parâmetros cosmológicos.

- **Oscilações Acústicas Bariônicas (BAO):** as BAOs consistem em um padrão esférico regular impresso na distribuição de matéria bariônica, aparecendo como um pequeno aumento de densidade. Essas oscilações se originam do congelamento das ondas sonoras no fluido fóton-bariônico após seu desacoplamento. À medida que o Universo evolui, a formação de estruturas cósmicas é favorecida nessas regiões, permitindo sua detecção através da distribuição de galáxias. As medições de BAO desempenha-

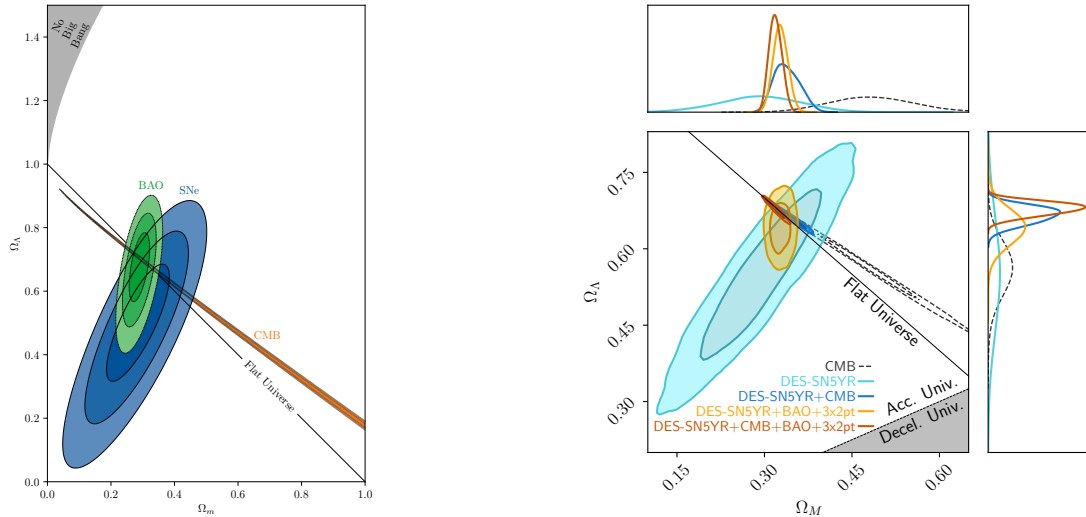


Figura 3: Restrições no plano $\Omega_m - \Omega_\Lambda$ provenientes de dados de SN Ia, BAO e CMB, ilustrando a concordância entre diferentes observáveis cosmológicos para o modelo Λ CDM. O painel esquerdo foi retirado da Ref. [21], enquanto o painel direito, da Ref. [22].

ram um papel crucial na restrição dos parâmetros cosmológicos, particularmente na determinação da curvatura do Universo. Os principais resultados relacionados aos dados de BAO foram fornecidos pelo *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) [16]. Mais recentemente a colaboração *Dark Energy Spectroscopic Instrument* (DESI) divulgou resultados de medidas de oscilações acústicas de bárions que indicam que pode haver uma inconsistência observacional com o modelo Λ CDM [10]. Este resultado será melhor discutido na próxima seção. Por outro lado, como ilustrado também na Fig. 2, as medições de BAO permitem rastrear a história de expansão do Universo em tempos tardios, complementando as informações obtidas a partir do CMB.

- *Lentamento fraco e correlações em largas escalas:* uma das análises mais completas do processo de formação de estruturas no Universo combina diferentes observáveis cosmológicos por meio do método conhecido como $3 \times 2pt$, que inclui o cisalhamento cósmico (lentamento fraco), o agrupamento de galáxias e a correlação galáxia-cisalhamento. Essa abordagem permite sondar simultaneamente a geometria do Universo e o crescimento de estruturas. A colaboração *Dark Energy Survey* (DES), utilizando os dados do terceiro ano (Y3), estabeleceu restrições sobre os parâmetros cosmológicos [18].

O maior feito do modelo cosmológico padrão é a sua capacidade de ajustar com precisão os dados obtidos de diferentes observáveis, utilizando valores consistentes para os parâmetros cosmológicos. Essa consistência de parâmetros nos resultados observacionais é exatamente o que se espera de uma “descrição correta” do Universo, o que deu ao modelo Λ CDM o status de modelo de concordância. Esta concordância pode ser vista na Fig. 3, que ilustra restrições consistentes entre si, cuja combinação resulta em determinações precisas dos parâmetros do modelo Λ CDM. Além disso, alguns resultados observacionais do modelo Λ CDM são mostrados na Tab. 1.

3.6 Tensões cosmológicas

Apesar do relativo sucesso observacional do modelo Λ CDM, alguns resultados recentes encontraram discrepâncias notáveis em comparação com os resultados derivados dos dados do Planck 2018. Os casos mais proeminentes ocorrem para: (i) lentes fracas, em relação à amplitude das perturbações da densidade de matéria, codificada no parâmetro σ_8 , que quantifica o quadrado médio das flutuações de densidade da matéria em uma escala de $8 h^{-1}$ Mpc; (ii) medições locais da constante de Hubble (H_0), obtidas tipicamente pelo método da escada de distâncias, que relaciona as distâncias a objetos astronômicos próximos com o uso de velas padrão; e (iii) dados do levanta-

Tabela 1: Resultados observacionais do modelo Λ CDM (adaptado da Tabela 2 da Ref. [22]).

Λ CDM plano		
Observável cosmológico	Ω_m	Ω_k
SN Ia (DES-Y5)	$0,352 \pm 0,017$	-
SN Ia (DES-Y5) + CMB (Planck 2020)	$0,338^{+0,016}_{-0,014}$	-
SN Ia (DES-Y5) + CMB (Planck 2020) + BAO (SDSS) & DES Y3 3×2 pt	$0,315 \pm 0,007$	-
Λ CDM com curvatura		
Observável cosmológico	Ω_m	Ω_k
SN Ia (DES-Y5)	$0,291^{+0,063}_{-0,065}$	$0,16 \pm 0,16$
SN Ia (DES-Y5) + CMB (Planck 2020)	$0,359^{+0,014}_{-0,016}$	$-0,010 \pm 0,005$
SN Ia (DES-Y5) + CMB (Planck 2020) + BAO (SDSS) & DES Y3 3×2 pt	$0,318^{+0,011}_{-0,010}$	$0,002^{+0,004}_{-0,003}$

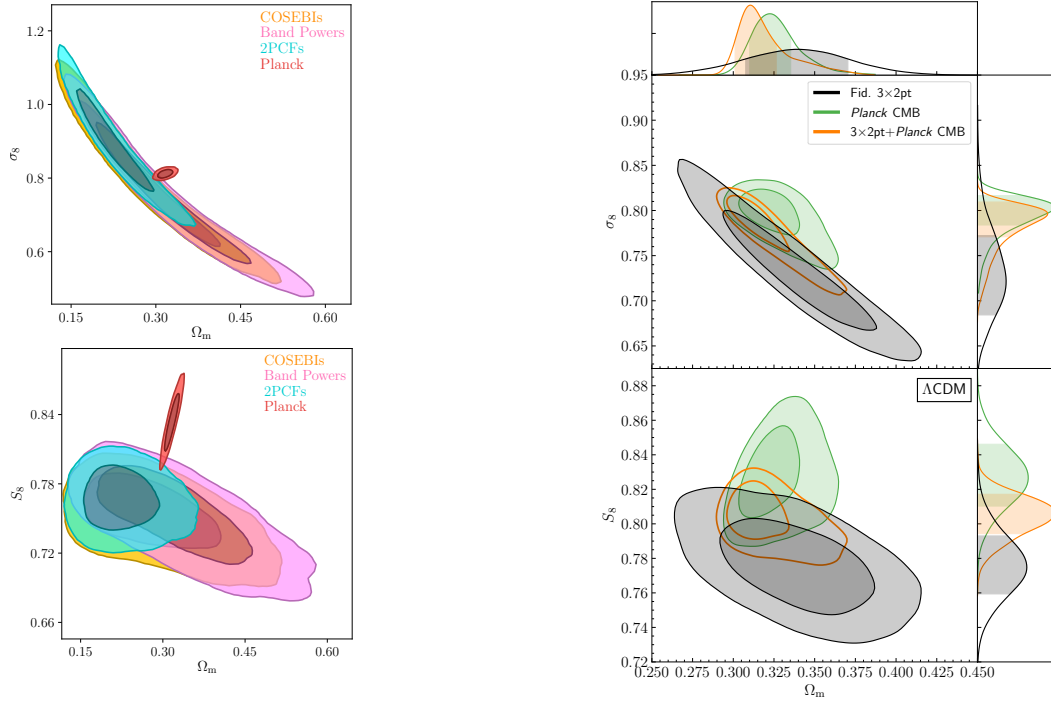


Figura 4: Restrições no plano $\Omega_m - S_8$ obtidas por levantamentos de lenteamento fraco. À esquerda, os resultados do KiDS, retirados da Ref. [9], mostram uma preferência por valores de S_8 menores do que aqueles inferidos pela CMB. À direita, os resultados do DES Y3, retirados da Ref. [18], utilizando a análise 3×2 pt também favorecem valores mais baixos de S_8 , porém com maior concordância com os resultados do Planck.

tamento de galáxias do segundo *data release* do DESI, cujas medidas das oscilações acústicas bariônicas indicam importantes discrepâncias com o modelo padrão.

Em relação à formação de estruturas, resultados recentes de lentes fracas da Kilo Degree Survey (KiDS) indicam uma tensão de aproximadamente 3σ na amplitude das perturbações escalares da matéria, caracterizada pelo parâmetro $S_8 = \sqrt{\Omega_m}/0,3 \sigma_8$, em comparação com os resultados mais recentes do Planck 2018 [9, 23]. Deve-se observar que a análise recente semelhante do levantamento *Dark Energy Survey* (DES) sugere uma diferença de cerca de 2σ dos resultados

do Planck 2018, o que é considerado um suporte aceitável para o modelo Λ CDM [18]. Como ilustrado na Fig. 4, diferentes levantamentos de lenteamento fraco indicam valores de S_8 sistematicamente menores do que os inferidos a partir do CMB, sendo a tensão mais significativa nos resultados do KiDS em comparação com o DES.

Quanto aos resultados de H_0 , embora as previsões realizadas através dos dados do Planck 2018 [15] e do DES+BAO+BBN⁴ [18], forneçam $H_0 = 67,66 \pm 0,42 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ e $H_0 =$

⁴BBN significa o processo de formação de elementos químicos leves logo após o big-bang, cuja abundância pode ser hoje observada.

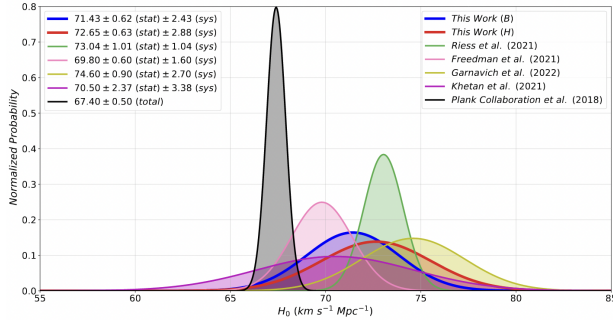


Figura 5: Distribuições de probabilidade para a constante de Hubble H_0 obtidas por diferentes métodos de medição direta, incluindo calibrações baseadas em Cefeidas, TRGB e flutuações de brilho superficial (SBF), comparadas com o valor inferido a partir da CMB. Esta figura foi retirada da Ref. [26].

$67,6 \pm 0,9 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, respectivamente, medições locais recentes da análise SH0ES com cefeidas variáveis e SN Ia resultam num valor significativamente mais alto, $H_0 = 74,04 \pm 1,04 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ [8]. Essa inconsistência atualmente excede o nível de confiança de 4σ .

Uma análise semelhante, mas considerando uma calibração de SN Ia combinando dados de cefeidas variáveis, gigantes vermelhas e flutuações no brilho superficial de galáxias próximas forneceu $H_0 = 71,76 \pm 0,58 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (estatístico) $\pm 1,19 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (sistemático) [24], que está mais em concordância com os resultados do Planck 2018. Uma discussão abrangente sobre a tensão do H_0 pode ser encontrada, por exemplo, nas Refs. [25, 26]. Diferentes resultados de medidas de H_0 são mostrados na Fig. 5. De maneira geral, os diferentes métodos de medição direta de H_0 tendem a fornecer valores sistematicamente maiores do que aqueles inferidos a partir do CMB, evidenciando a chamada tensão de Hubble.

Recentemente, ainda no quadro do modelo Λ CDM, medições de BAO realizadas pelo DESI DR2 indicaram resultados conflitantes com as observações de supernovas tipo Ia para o parâmetro de densidade de matéria Ω_m , revelando uma tensão também entre observáveis “recentes”. Em primeiro lugar, os resultados mais recentes da colaboração DESI indicaram uma discrepância entre os valores do parâmetro de densidade de matéria Ω_m comparados com aqueles obtidos por meio de supernovas tipo Ia, com as análises baseadas na amostra DES Y5 apresentando uma diferença ao

nível de aproximadamente 3σ . Este resultados estão ilustrados no painel esquerdo da Fig. 6.

Adicionalmente, esta mesma análise da colaboração DESI também sugere uma possível preferência observacional por um cenário de Energia Escura dinâmica, em contraste com a hipótese de uma constante cosmológica.⁵ Para investigar essa possibilidade, foi considerado um modelo no qual a equação de estado da energia escura pode evoluir no tempo. Em particular, adotou-se a parametrização CPL (Chevallier-Polarski-Linder) [31, 32], que será discutida em mais detalhes posteriormente.⁶ Nesse cenário, a Energia Escura é descrita por dois parâmetros adicionais, w_0 e w_a , sendo o modelo Λ CDM recuperado no limite $(w_0, w_a) = (-1, 0)$. Conforme ilustrado na Fig. 6 (painel direito), esse ponto encontra-se deslocado das regiões favorecidas pelos dados em aproximadamente 3σ , dependendo do conjunto de supernovas tipo Ia utilizado na análise. É importante destacar que essa tendência persiste mesmo quando se consideram apenas dados de BAO em combinação com observáveis do CMB.

Todos esses resultados, quando analisados em conjunto, motivam a exploração de extensões do modelo Λ CDM que vão além de um componente de energia do vácuo constante, abrindo caminho para novas abordagens que possam explicar essas discrepâncias e proporcionar uma visão mais precisa da aceleração cósmica e da natureza da energia escura.

3.7 Energia escura além da constante cosmológica

Dentro do contexto da compreensão limitada da natureza da constante cosmológica e das observações recentes que se desviam das previsões do modelo Λ CDM, diversas teorias alternativas têm surgido e continuarão a ser propostas na tentativa de explicar a aceleração do Universo. Nesta seção, vamos abordar a alternativa mais usual abordada na literatura, que consiste em relaxar a hipótese de que a energia escura seria descrita por uma

⁵Esses resultados são atualmente objeto de debate [27], com análises paramétricas e não paramétricas produzindo conclusões divergentes [28–30].

⁶Essa parametrização passou a ser amplamente utilizada após os resultados da figura de mérito da *Dark Energy Task Force* (DETF) [33].

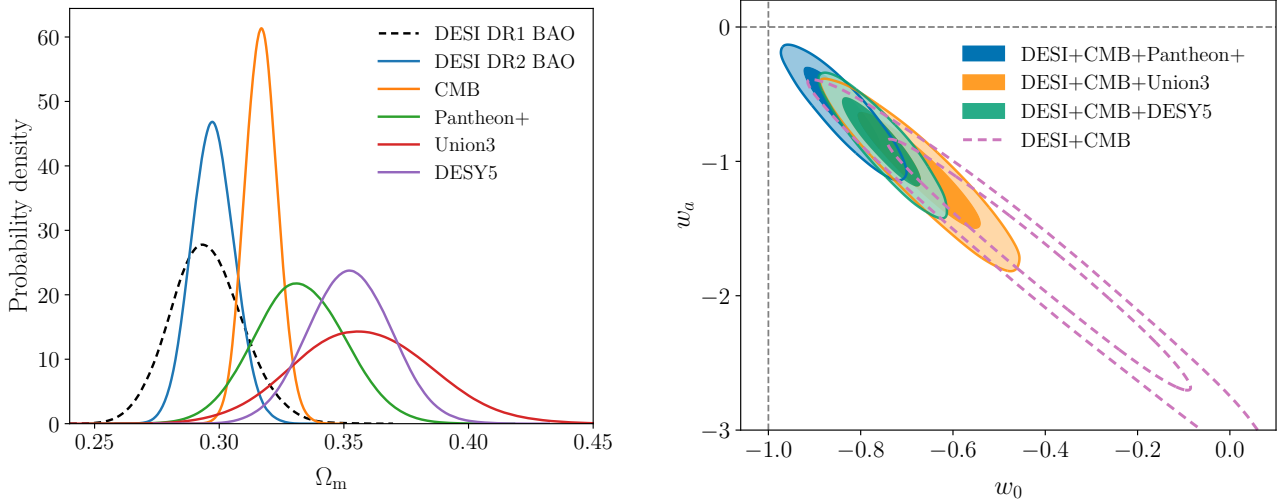


Figura 6: Resultados do levantamento DESI que indicam possíveis discrepâncias com o modelo Λ CDM. À esquerda, distribuições de probabilidade para Ω_m mostram uma discrepância entre os valores inferidos a partir de BAO do DESI DR2 e aqueles obtidos com dados de SN Ia. À direita, restrições no plano (w_0, w_a) sugerem uma preferência por energia escura dinâmica. Esses resultados foram retirados da Ref. [10].

constante cosmológica, permitindo uma dinâmica mais complexa.

Modelos de quintessência

A abordagem mais simples para introduzir um componente desconhecido que permeia o espaço-tempo é incorporar um campo escalar com um termo cinético canônico e sob a ação de um potencial dado. Em termos cosmológicos, esse campo escalar é denominado quintessência. Mais precisamente, consideramos um campo escalar descrito pela seguinte lagrangiana

$$\mathcal{L}_\phi = -\frac{1}{2}g^{\mu\nu}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi - V(\phi), \quad (12)$$

onde o primeiro termo representa o termo cinético canônico, enquanto o segundo denota o potencial, que é uma função do campo escalar. Neste caso, há agora dois campos dinâmicos: o tensor métrico e o campo escalar. As equações de Einstein desse sistema são dadas por

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \left(\frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi) + \rho \right), \quad (13)$$

$$\dot{H} = -\frac{4\pi G}{3} (\dot{\phi}^2 + \rho + p), \quad (14)$$

enquanto a conservação do campo escalar é dado pela equação de Klein-Gordon,

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V_\phi = 0, \quad (15)$$

onde $V_\phi = dV/d\phi$.

Nesse contexto, para obter explicitamente a dinâmica do Universo, é necessário escolher uma expressão particular para o potencial. Cada modelo de quintessência é caracterizado por tal escolha. Como feito para as teorias de inflação, a capacidade de um potencial gerar uma expansão acelerada pode ser quantificada pelos seguintes parâmetros de *slow-roll*,

$$\epsilon = \frac{1}{16\pi G} \left(\frac{V_\phi}{V} \right)^2 \quad \text{e} \quad \eta = \frac{1}{4\pi G} \frac{V_{\phi\phi}}{V}. \quad (16)$$

Quanto mais próximos de zero ϵ e η forem, maior será a aceleração da expansão. No caso limite $\epsilon = 0$ e $\eta = 0$, a expansão é exponencial. Uma discriminação típica entre os modelos de quintessência é feita dividindo os modelos em dois grupos: modelos *freezing* [34–36] e modelos de *thawing* [37, 38]. Nos modelos de *freezing*, o campo é livre para rolar no passado, no entanto, nos tempos recentes, o campo atinge o regime de *slow-roll* ($w \approx -1$), o que leva à expansão acelerada. Por outro lado, nos modelos de *thawing*, o campo é congelado no passado, mas começa a evoluir nos tempos recentes.

Uma característica importante da abordagem do campo escalar é que, de maneira semelhante ao fato de que a constante cosmológica pode ser reescrita como um fluido com densidade de energia constante e $w_\Lambda = -1$, também é possível de-

finir um fluido que fornecerá a mesma dinâmica que o campo escalar. Mais precisamente, pode-se definir uma densidade de energia e pressão em termos do campo escalar e do potencial. Uma diferença importante em relação ao caso da constante cosmológica é que, como o campo escalar é dinâmico, o fluido resultante é mais geral, no sentido de que pode ser dependente do tempo. Nesse caso é possível definir a densidade de energia e a pressão como

$$\rho_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad \text{e} \quad p_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi), \quad (17)$$

de modo que a equação de estado da energia escura seja

$$w_\phi = \frac{\dot{\phi}^2 + 2V(\phi)}{\dot{\phi}^2 - 2V(\phi)}. \quad (18)$$

As condições de slow-roll são atingidas quando $\dot{\phi}^2 \rightarrow 0$, e conseqüentemente $w_\phi \rightarrow -1$.

Uma característica importante dos modelos de quintessência é que o termo cinético canônico está associado a uma velocidade do som luminal, o que significa que o efeito das perturbações de pressão supera o colapso gravitacional no nível perturbativo. Como consequência, a energia escura em quintessência é suave como a constante cosmológica.

3.8 Energia escura como um fluido

Como os modelos de quintessência podem ser mapeados em fluidos, em vez de escolher um potencial dado $V(\phi)$, uma abordagem mais simples é propor uma equação de estado dinâmica para descrever a Energia Escura. Para ilustrar a equivalência entre as abordagens, vamos tomar um modelo de quintessência bastante geral: para um potencial dado qualquer, a equação de Klein-Gordon pode ser usada para calcular a solução do campo escalar; e conseqüentemente a equação de estado fica determinada pela Eq. (18).

Algumas das descrições mais exploradas na literatura são:

- *Modelo w CDM*: nesse modelo, a equação de estado da Energia Escura ainda é constante, mas não necessariamente -1 . Neste caso, a equação de estado do fluido de Energia Escura pode ser escrita como $p_\phi = w_0\rho_\phi$, onde w_0 é considerado um parâmetro livre. Esta abordagem pode ser

interpretada como uma primeira extensão do caso da constante cosmológica.

- *Parametrização CPL*: nesse caso, propõe-se uma parametrização linear para a equação de estado da Energia Escura, ou seja, a expressão explícita para a equação de estado de DE é dada por

$$w_\phi = w_0 + (1 - a)w_a. \quad (19)$$

Na prática, esta abordagem é mais complexa. Primeiro, o fluido de Energia Escura é descrito por dois parâmetros extras. Além disso, a equação de estado de DE agora varia com o tempo. Quanto à evolução de w_ϕ , esta equação de estado pode ser interpretada da seguinte forma: w_0 representa o valor final alcançado nos tempos atuais, e w_a modula a evolução temporal no passado.

- *Parametrização BA*: essa parametrização também apresenta um comportamento linear em baixos redshifts, sendo escrita como [39]

$$w_\phi = w_0 + w_a \frac{1 - a}{a^2 + (1 - a)^2}. \quad (20)$$

Contudo, diferentemente da parametrização CPL, que diverge exponencialmente quando o fator de escala tende ao infinito (para $w_a > 0$), a parametrização BA permanece bem comportada em todos os tempos, ao mesmo tempo em que ainda permite desvios em relação ao cenário CPL.

Uma vez que tanto os modelos w CDM quanto CPL podem ser vistos como extensões efetivas do modelo Λ CDM, ambos os modelos têm sido constantemente testados usando os dados mais atuais disponíveis. Em relação ao modelo w CDM, os resultados atuais que combinam SN Ia, BAO e CMB mostram boa concordância com $w = -1$. Como no caso do Λ CDM, os resultados mostram uma boa sobreposição, indicando uma concordância quando $w \approx -1$ e $\Omega_m \approx 0,3$.

Por outro lado, conforme já discutido, usando os mesmos dados observacionais para testar a parametrização CPL, os resultados indicam que os dados não estão em acordo com o limite Λ CDM. Este intrigante resultado desencadeou discussões importantes sobre alguns tópicos críticos: (i) o impacto das galáxias vermelhas luminosas (LRG)

w CDM plano				
Observável cosmológico	Ω_m	$10^3 \times \Omega_k$	w_0	w_a
BAO (DESI) + CMB (Planck) + SN Ia (Pantheon+)	$0,3047 \pm 0,0051$	-	$-0,995 \pm 0,023$	-
BAO (DESI) + CMB (Planck) + SN Ia (Union3)	$0,3044 \pm 0,0059$	-	$-0,997 \pm 0,027$	-
BAO (DESI) + CMB (Planck) + SN Ia (DESY5)	$0,3098 \pm 0,0050$	-	$-0,971 \pm 0,021$	-
CPL plano				
Observável cosmológico	Ω_m	$10^3 \times \Omega_k$	w_0	w_a
BAO (DESI) + CMB (Planck) + SN Ia (Pantheon+)	$0,3114 \pm 0,0057$	-	$-0,838 \pm 0,055$	$-0,62^{+0,22}_{-0,19}$
BAO (DESI) + CMB (Planck) + SN Ia (Union3)	$0,3275 \pm 0,0086$	-	$-0,667 \pm 0,088$	$-1,09^{+0,31}_{-0,27}$
BAO (DESI) + CMB (Planck) + SN Ia (DESY5)	$0,3191 \pm 0,0056$	-	$-0,752 \pm 0,057$	$-0,86^{+0,23}_{-0,20}$
CPL com curvatura				
Observável cosmológico	Ω_m	$10^3 \times \Omega_k$	w_0	w_a
BAO (DESI) + CMB (Planck) + SN Ia (Pantheon+)	$0,3117 \pm 0,0056$	$1,1 \pm 1,3$	$-0,853 \pm 0,057$	$-0,54 \pm 0,22$
BAO (DESI) + CMB (Planck) + SN Ia (Union3)	$0,3273 \pm 0,0086$	$0,6 \pm 1,3$	$-0,678 \pm 0,092$	$-1,03^{+0,33}_{-0,29}$
BAO (DESI) + CMB (Planck) + SN Ia (DESY5)	$0,3193 \pm 0,0056$	$0,8 \pm 1,3$	$-0,762 \pm 0,060$	$-0,81 \pm 0,24$

Tabela 2: Resultados observacionais para extensões do modelo Λ CDM considerando parametrizações de energia escura dinâmica w CDM e CPL. Os valores foram obtidos a partir da Tabela V da Ref. [10].

nos resultados finais da análise de SN Ia [40]; (ii) a sensibilidade dos resultados de DESI à escolha de priors estatísticos [41]; e (iii) potenciais efeitos sistemáticos nos dados de SN Ia [27]. Alguns dos resultados mais recentes desta abordagem de Energia Escura como um fluido dinâmico são mostrados na Tab. 2.

Em vista desses recentes resultados, é plausível especular que eles possam indicar uma evolução dinâmica da Energia Escura. Os próximos anos, marcados pela disponibilização de novos dados do DESI e pela expectativa de levantamentos futuros, serão de grande importância para confirmar esses resultados.

4 Conclusão

Neste trabalho, apresentamos uma visão geral do modelo cosmológico padrão Λ CDM, destacando seus fundamentos teóricos e seu notável sucesso em descrever a evolução do Universo em grandes escalas. Discutimos também o papel central da energia escura na explicação da expansão acelerada e revisamos os principais observáveis cosmológicos utilizados para testar o modelo, como SN Ia, a CMB e outras sondas complementares.

Apesar de seu sucesso, o modelo Λ CDM enfrenta desafios importantes. Do ponto de vista teórico, o problema da constante cosmológica permanece sem solução, evidenciando uma profunda lacuna entre previsões da teoria quântica de campos e observações cosmológicas. No âmbito observacional, tensões recentes, como aquelas asso-

ciadas à constante de Hubble H_0 e à amplitude das flutuações de matéria σ_8 , indicam possíveis limitações do modelo. Além disso, resultados recentes, em particular do levantamento DESI, sugerem possíveis desvios em relação ao cenário de energia escura descrito por uma constante cosmológica, apontando para a possibilidade de uma componente dinâmica. Esses indícios, embora ainda inconclusivos, reforçam a importância de investigar extensões do modelo padrão.

Dessa forma, a cosmologia contemporânea encontra-se em um momento de transição, no qual novos dados observacionais de alta precisão desempenham um papel crucial na avaliação da validade do modelo Λ CDM. Espera-se que futuras observações permitam esclarecer a natureza da energia escura e, possivelmente, apontar para uma nova descrição do setor escuro do Universo.

Sobre os autores

Rodrigo von Marttens (rodrigovonmarttens@gmail.com) é Professor Adjunto A do quadro permanente da Universidade Federal da Bahia (UFBA) no campus de Ondina, em Salvador-BA, onde também é membro permanente do programa de pós-graduação em física. Além disso, é membro permanente do programa de doutorado internacional em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação (PPGCosmo). Atua na área de Cosmologia, principalmente nos seguintes temas: energia escura, teorias de gravitação modificada, formação de estruturas em largas

escalas, análise de dados e machine learning. Possui graduação em Física (2011), mestrado (2013) e doutorado (2017) em Cosmologia e Gravitação pela Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes), com pós-doutorado no Observatório Nacional e na Universidade de Genebra. É membro das colaborações internacionais J-PAS e J-PLUS.

Jailson Alcaniz (alcaniz@on.br) é Bacharel e Doutor em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2001), com pós-doutorado realizado na University of Washington, Seattle/EUA. Foi professor visitante na McGill University, em Montreal/Canadá, e na Beijing Normal University, em Pequim/China. Desde 2013, é membro associado do ICTP-SAIFR e bolsista Cientista do Nosso Estado da FAPERJ. Entre 2012 e 2017, foi chefe da Coordenação de Astronomia e Astrofísica do Observatório Nacional (ON), onde atualmente é Pesquisador Titular III. É membro do Programa de Pós-Graduação em Astronomia do ON, no qual já orientou mais de duas dezenas de dissertações de mestrado e teses de doutorado, além de supervisionar diversos projetos de pós-doutorado. Atualmente, é Diretor do Observatório Nacional; coordenador do Grupo de Teoria da colaboração J-PAS; membro do grupo de cosmologia e física fundamental do projeto ANDES/ELT/ESO, além de integrar a União Astronômica Internacional (IAU). Com cerca de 250 artigos publicados nas principais revistas científicas internacionais nas áreas de Física e Astrofísica, sua pesquisa tem ênfase em Cosmologia, atuando especialmente nos seguintes temas: matéria e energia escuras, estrutura em grande escala do Universo, testes de hipóteses fundamentais em cosmologia, relatividade geral e a física do Universo primordial.

Saulo Carneiro (saolocarneiro@on.br) é físico formado na Universidade de São Paulo, onde também se doutorou e foi bolsista Fapesp de pós-doutorado. Foi professor visitante no Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Madri, Espanha), na Queen Mary University of London (Reino Unido), no Instituto de Física Gleb Wataghin da Unicamp, além de membro associado do International Centre for Theoretical Physics (Trieste, Itália). Em 2009 foi premiado com o Second Award of the Gravity Research Foundation (EUA). É professor titular da Universidade Fede-

ral da Bahia, pesquisador do CNPq, membro fundador da colaboração hispano-brasileira J-PAS, pesquisador colaborador do Observatório Nacional (RJ) e editor associado do Brazilian Journal of Physics (Springer). Suas pesquisas abrangem as áreas de Cosmologia, Relatividade e Gravitação, Teoria Quântica de Campos, Física de Partículas e Astrofísica.

Referências

- [1] 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](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9812133).
- [2] A. G. Riess et al., *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, *The Astronomical Journal* **116**(3), 1009 (1998). [ArXiv:astro-ph/9805201](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9805201).
- [3] J.-P. Uzan, *The acceleration of the universe and the physics behind it*, *General Relativity and Gravitation* **39**(3), 307 (2007). [ArXiv:astro-ph/0605313](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0605313).
- [4] A. Einstein, *Cosmological Considerations in the General Theory of Relativity*, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.)* **1917**, 142 (1917).
- [5] L. Perivolaropoulos e F. Skara, *Challenges for Λ CDM: An update*, *New Astronomy Reviews* **95**, 101659 (2022). [ArXiv:2105.05208](https://arxiv.org/abs/2105.05208).
- [6] S. Weinberg, *The Cosmological Constant Problem*, *Reviews of Modern Physics* **61**(1), 1 (1989).
- [7] J. Martin, *Everything you always wanted to know about the cosmological constant problem (but were afraid to ask)*, *Comptes Rendus. Physique* **13**(6–7), 566 (2012). [ArXiv:1205.3365](https://arxiv.org/abs/1205.3365).
- [8] A. G. Riess et al., *A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 km s⁻¹ Mpc⁻¹ Uncertainty from the Hubble Space Telescope and*

- the *SH0ES Team*, *The Astrophysical Journal Letters* **934**(1), L7 (2022). [ArXiv:2112.04510](#).
- [9] M. Asgari et al., *KiDS-1000 Cosmology: Cosmic shear constraints and comparison between two point statistics*, *Astronomy & Astrophysics* **645**, A104 (2021). [ArXiv:2007.15633](#).
- [10] M. Abdul Karim et al., *DESI DR2 results. II. Measurements of baryon acoustic oscillations and cosmological constraints*, *Physical Review D* **112**(8), 083515 (2025). [ArXiv:2503.14738](#).
- [11] V. M. Slipher, *The radial velocity of the Andromeda Nebula*, *Lowell Observatory Bulletin*, vol. 2, no. 8, pp. 56-57 **2**, 56 (1913).
- [12] A. Friedman, *Über die Krümmung des Raumes*, *Zeitschrift für Physik* **10**(1), 377 (1922).
- [13] F. Zwicky, *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*, *Helvetica Physica Acta* **6**, 110 (1933), traduzido para o inglês em *General Relativity and Gravitation* **41**, 207 (2009).
- [14] A. A. Penzias e R. W. Wilson, *A Measurement of excess antenna temperature at 4080-Mc/s*, *The Astrophysical Journal* **142**, 419 (1965).
- [15] N. Aghanim et al., *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, *Astronomy & Astrophysics* **641**, A6 (2020), [Erratum: *Astron. Astrophys.* 652, C4 (2021)]. [ArXiv:1807.06209](#).
- [16] S. Alam et al., *Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Cosmological implications from two decades of spectroscopic surveys at the Apache Point Observatory*, *Physical Review D* **103**(8), 083533 (2021). [ArXiv:2007.08991](#).
- [17] D. Brout et al., *The Pantheon+ Analysis: Cosmological Constraints*, *The Astrophysical Journal* **938**(2), 110 (2022). [ArXiv:2202.04077](#).
- [18] T. M. C. Abbott et al., *Dark Energy Survey Year 3 results: Cosmological constraints from galaxy clustering and weak lensing*, *Physical Review D* **105**(2), 023520 (2022). [ArXiv:2105.13549](#).
- [19] B. S. DeWitt, *Quantum field theory in curved spacetime*, *Physics Reports* **19**(6), 295 (1975).
- [20] S. L. Shapiro e S. A. Teukolsky, *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects* (Wiley, 1983).
- [21] D. Rubin et al., *Union Through UNITY: Cosmology with 2,000 SNe Using a Unified Bayesian Framework*, *The Astrophysical Journal* **986**(2), 231 (2025). [ArXiv:2311.12098](#).
- [22] T. M. C. Abbott et al., *The Dark Energy Survey: Cosmology Results With ~1500 New High-redshift Type Ia Supernovae Using The Full 5-year Dataset*, *The Astrophysical Journal Letters* **973**(1), L14 (2024). [ArXiv:2401.02929](#).
- [23] C. Heymans et al., *KiDS-1000 Cosmology: Multi-probe weak gravitational lensing and spectroscopic galaxy clustering constraints*, *Astronomy & Astrophysics* **646**, A140 (2021). [ArXiv:2007.15632](#).
- [24] S. A. Uddin et al., *Carnegie Supernova Project I and II: Measurements of H_0 Using Cepheid, Tip of the Red Giant Branch, and Surface Brightness Fluctuation Distance Calibration to Type Ia Supernovae**, *The Astrophysical Journal* **970**(1), 72 (2024). [ArXiv:2308.01875](#).
- [25] A. G. Riess, *The expansion of the Universe is faster than expected*, *Nature Reviews Physics* **2**(1), 10 (2019). [ArXiv:2001.03624](#).
- [26] W. L. Freedman e B. F. Madore, *Progress in direct measurements of the Hubble constant*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **11**(11), 050 (2023). [ArXiv:2309.05618](#).
- [27] G. Efstathiou, *Evolving dark energy or supernovae systematics?*, *Monthly Notices of*

- the Royal Astronomical Society **538**(2), 875 (2025). [ArXiv:2408.07175](#).
- [28] B. R. Dinda e R. Maartens, *Model-agnostic assessment of dark energy after DESI DR1 BAO*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **01**(01), 120 (2025). [ArXiv:2407.17252](#).
- [29] A. Sousa-Neto et al., *Symbolic regression analysis of dynamical dark energy with DESI-DR2 and SN data*, *Physics of the Dark Universe* **50**, 102108 (2025). [ArXiv:2502.10506](#).
- [30] K. Lodha et al., *Extended dark energy analysis using DESI DR2 BAO measurements*, *Physical Review D* **112**(8), 083511 (2025). [ArXiv:2503.14743](#).
- [31] M. Chevallier e D. Polarski, *Accelerating universes with scaling dark matter*, *International Journal of Modern Physics D* **10**(02), 213 (2001). [ArXiv:gr-qc/0009008](#).
- [32] E. V. Linder, *Exploring the expansion history of the universe*, *Physical Review Letters* **90**(9), 091301 (2003). [ArXiv:astro-ph/0208512](#).
- [33] A. Albrecht et al., *Report of the Dark Energy Task Force*, Fermilab Technical Publications FN-0793-A (2006). [ArXiv:astro-ph/0609591](#).
- [34] P. G. Ferreira e M. Joyce, *Cosmology with a primordial scaling field*, *Physical Review D* **58**(2), 023503 (1998). [ArXiv:astro-ph/9711102](#).
- [35] R. R. Caldwell, R. Dave e P. J. Steinhardt, *Cosmological imprint of an energy component with general equation of state*, *Physical Review Letters* **80**(8), 1582 (1998). [ArXiv:astro-ph/9708069](#).
- [36] S. M. Carroll, *Quintessence and the rest of the world*, *Physical Review Letters* **81**(15), 3067 (1998). [ArXiv:astro-ph/9806099](#).
- [37] A. de la Macorra e G. Piccinelli, *Cosmological evolution of general scalar fields and quintessence*, *Physical Review D* **61**(12), 123503 (2000). [ArXiv:hep-ph/9909459](#).
- [38] R. Kallosh et al., *Observational bounds on cosmic doomsday*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **10**(10), 015 (2003). [ArXiv:astro-ph/0307185](#).
- [39] E. M. Barboza, Jr. e J. S. Alcaniz, *A parametric model for dark energy*, *Physics Letters B* **666**(5), 415 (2008). [ArXiv:0805.1713](#).
- [40] Z. Wang et al., *The role of LRG1 and LRG2's monopole in inferring the DESI 2024 BAO cosmology*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **534**(4), 3869 (2024). [ArXiv:2405.02168](#).
- [41] V. Patel, A. Chakraborty e L. Amendola, *The prior dependence of the DESI results* (2024). [ArXiv:2407.06586](#).