

DESI DR2 是否真正揭示了动力学暗能量？

Deng Wang*

Instituto de Física Corpuscular (CSIC-Universitat de València), E-46980 Paterna, Spain

David Mota

*Institute of Theoretical Astrophysics, University of Oslo,
P.O. Box 1029 Blindern, N-0315 Oslo, Norway*

宇宙学中的一个基本问题是暗能量是否随时间演变，这个问题自从发现宇宙加速膨胀以来变得尤为重要。最近，DESI 合作组织利用宇宙微波背景 (CMB)、Ia 型超新星 (SN) 以及他们对原初声波振荡 (BAO) 的新测量结果，报告了越来越多支持暗能量演化的证据。然而，我们的分析表明，这些组合存在问题，因为 CMB、BAO 和 SN 数据集之间存在明显矛盾。因此，DESI 关于动态暗能量 (DDE) 的说法并不稳固。一个更可靠的方法是使用每个数据集独立地约束暗能量的演化。通过对每个数据集进行统计比较，我们发现平均而言，DDE 比 Λ CDM 模型更有优势。这表明 DDE 很可能存在，尽管由于对暗能量状态方程的弱约束以及数据集之间的不一致，其真实参数空间仍然难以捉摸。有趣的是，在考虑 DDE 时，包括 CMB、DESI DR2、Pantheon+、Union3 和 DESY5 在内的任何一个单独的数据集都不能在显著水平上独立检测到宇宙加速膨胀。我们的研究不仅澄清了暗能量性质的当前理解，还挑战了已经确立的宇宙加速发现以及长久以来认为暗能量施加负压的观点。无论是单独数据集还是合并后的数据集都表明，宇宙最终的命运很可能由物质主导而不是暗能量。

介绍。标准宇宙学模型， Λ 冷暗物质 (Λ CDM)，已被 CMB[1–5]、BAO[6–12] 和 SN 观测 [13, 14] 证实，可以成功地描述各种物理现象，如大尺度上的宇宙加速和小尺度上的物质聚集团 [15]。然而，它面临着两个难以解决的挑战，即宇宙学常数难题 [16, 17] 和巧合问题，同时遭受着诸如所谓的哈勃常数 (H_0) 紧张局势和物质波动幅度 (S_8) 差异 [18–22] 等新兴的宇宙紧张局势。从逻辑上讲，质疑 Λ CDM 在验证基本理论以及描绘宇宙背景动力学和结构形成方面的有效性是相当合理的。迄今为止，为了解决这些差异，不同作者提出了大量的替代方案（参见 [21, 22] 的综述）。值得注意的是，除了理论发展之外，更重要的是我们需要新的独立且强大的探测器以更高的精度给出一些核心谜题的确定答案。为了实现这一目标，一个非常有前景的探测方法是声波重子振荡 (BAO)。

BAO 是宇宙中 [15] 的规则且周期性的物质密度波动，源自重组时代之前由热的重子-光子等离子体诱导的声波。BAO 的特征尺度约为 150 Mpc，这是在等离子体冷却到成为重组时代的中性原子之前的原始等离子体中声波能够传播的最大距离，它作为宇宙学中的标准尺规发挥作用。许多 BAO 实验如 2dF[7]、6dF[8]、SDSS[6] 和 eBOSS[11, 12] 通过在不同红移处测量该尺规的视大小来绘制宇宙晚期膨胀的历史。BAO 是探索宇宙随时间演化情况非常干净的探测器，其不受小尺度上的非线性物理影响，并且与其它宇宙学探测相比对系统不确定性相对

稳健。

最近，DESI 合作组基于其对星系、类星体和莱曼- α 森林示踪器的 BAO 测量，提供了 DDE[23] 的大量证据，这些测量来自暗能量光谱仪 (DESI) 的首次数据发布 (DR1)[24, 25]。

有趣的是，DESI 的第二数据发布 (DR2) 包括超过 1400 万个星系和类星体，基于三年的运行 [28]，增强了这一 DDE 证据 [26, 27]。

理论上，DDE 预测：(i) 暗能量 (DE) 的状态方程 (EoS) 和能密度会随时间演化；(ii) 不同于 Λ CDM 的宇宙膨胀历史；(iii) 星系和星团等宇宙结构形成的速度可以被改变；(iv) 宇宙的命运可能会受到显著影响。如果最终证明 DDE 是正确的，它将表明真空并非空无一物，并且确实存在物质。因此，DESI 发现 DDE 证据对于理论来说至关重要。到目前为止，在使用哪个超新星样本的情况下，将 CMB 和 SN 数据添加到 DESI DR2 中导致了 $2.8-4.2\sigma$ 的 DDE[26] 证据。尽管前所未有的精度和数据点数量带来了 DDE 的证据，但我们应该对这些结果非常谨慎。关键原因是 DDE 的证据是通过 CMB、DESI DR2 和 SN 的数据组合得出的，并非来自每个独立探测器。如果 CMB、DESI DR2 和 SN 各自对包括物质分数和 DE EoS 在内的宇宙学参数给出了符合一致的约束，就可以安全地声称晚近期宇宙中存在 DDE。基于此担忧，必须严肃质疑：DESI 是否真正看到了 DDE？我们的结果显示，使用 CMB、DESI DR2

和 SN 数据的组合来宣称 DDE 的存在还为时过早，但独立的数据集仍然对 DDE 给出了强统计偏好超过 Λ CDM。未来的高精度观测可以帮助澄清 DE 的状态。

基础。在广义相对论 [29] 中，考虑一个均匀且各向同性的宇宙，弗里德曼方程可以表示为 $H^2 = (8\pi G\rho)/3$ 和 $\ddot{a}/a = -4\pi G(\rho+3p)/3$ ，其中 a 是尺度因子， H 是宇宙膨胀率，而 ρ 和 p 分别是不同种类的平均能量密度和压力，包括辐射、重子、暗物质和 DE。结合两个弗里德曼方程，可以表示一个平坦的 Chevallier-Polarski-Linder (CPL) 宇宙 [30, 31] 的无量纲哈勃参数 $E(z) \equiv H(z)/H_0$ 为

$$E(a) = \left[\Omega_m a^{-3} + (1 - \Omega_m) a^{-3(1+\omega_0+\omega_a)} e^{3\omega_a(a-1)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

其中 Ω_m 是物质分数。当 $\omega_0 = -1$ 和 $\omega_a = 0$ 时，它简化为 Λ CDM。

数据与方法。我们使用普朗克 2018 高- ℓ 文件 温度 (TT) 似然度在多极子 $30 \leq \ell \leq 2508$ ，极化 (EE) 及其互相关 (TE) 数据在 $30 \leq \ell \leq 1996$ ，以及低- ℓ TT 指挥官和模拟全部 EE 似然度在 $2 \leq \ell \leq 29$ [32]。我们保守地采用了来自 SMICA 图谱的 [33] 普朗克透镜似然性在 $8 \leq \ell \leq 400$ 处。我们使用了 DESI DR2 中最新的 13 个 BAO 测量值，包括有效红移分别为 $z_{\text{eff}} = 0.295, 0.51, 0.706, 0.934, 1.321, 1.484$ 和 2.33 的 BGS、LRG1、LRG2、LRG3+ELG1、ELG2、QSO 以及 Ly α 样本，各自为 [26–28]。为了完全探索晚期的 DE EoS，我们采用了三个校准良好的 SN 汇编：(i) Pantheon+ 包含来自 $z \in [0.00122, 2.26137]$ [34] 中 18 个不同调查的 1701 个数据点；(ii) Union3 包含由来自 $z \in [0.05, 2.26]$ [35] 中 24 个不同调查的 2087 个 SN 导出的 22 个样条插值数据点；(iii) DESY5 包含在 $z \in [0.025, 1.130]$ [36] 中的 1735 个有效数据点。

为了计算宇宙的背景动力学和理论功率谱，我们使用了玻尔兹曼求解器宇宙学和天体物理学中的蒙特卡洛方法 [37]。为了实现贝叶斯分析，我们采用蒙特卡罗马尔可夫链 (MCMC) 方法利用公开可用的软件包科巴雅 [38] 推断模型参数的后验分布。我们通过 Gelman-Rubin 准则 $R-1 \lesssim 0.01$ [39] 评估 MCMC 链的收敛性，并使用获取距离 [40] 对它们进行分析。

我们使用以下均匀先验分布于自由参数：重子分数 $\Omega_b h^2 \in [0.005, 0.1]$ ，冷暗物质分数 $\Omega_c h^2 \in [0.001, 0.99]$ ，再结合时期的声学角尺度 $100\theta_{MC} \in [0.5, 10]$ ，标量谱指数 $n_s \in [0.8, 1.2]$ ，原初标量功率谱的振幅 $\ln(10^{10} A_s) \in [2, 4]$ ，光学深度 $\tau \in [0.01, 0.8]$ ，当前暗能量状态方程 $\omega_0 \in$

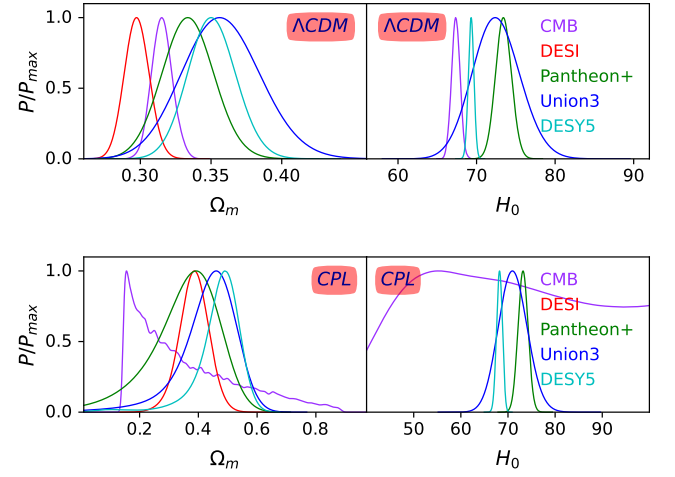


图 1: 参数 Ω_m 和 H_0 从 CMB、DESI DR2 和 SN 观测在 Λ CDM (上部) 和 CPL (更低的) 模型中的一维后验分布。

$[-15, 20]$ 和暗能量演化的振幅 $\omega_a \in [-30, 10]$ 。为了在高红移处产生一个物质主导的时代，我们在贝叶斯分析中施加了条件 $\omega_0 + \omega_a < 0$ 。我们为参数对 (ω_0, ω_a) 采用如此宽的先验范围的原因是，足够大的参数空间可以完全展现 DESI DR2 BAO 测量 [41] 的约束能力。

Ω_m 和来自独立探测的 H_0 张力。DESI 合作组注意到，在 CMB、DESI DR2 和三个 SN 样本下存在 Ω_m 紧张关系， Λ CDM [26]。SN 数据集明显更倾向于更大的物质分数而不是 CMB 和 DESI DR2。然而，伴随的 H_0 紧张关系并未被报道。在图中 1 我们发现，Pantheon+、Union3 和 DESY5 分别在 5.31σ 、 1.69σ 和 3.03σ 水平上与 CMB [1] 存在 H_0 矛盾。尽管这三个超新星样本得到了很好的校准，但它们在首选的 H_0 值方面存在内部不一致。例如，Pantheon+ 与 DESY5 处于 3.86σ 张力中。DESI 的主要目标是探索暗能量的本质及其可能的动力学特性。基于 DDE 可能有助于解决 Λ CDM 中的 Ω_m 张力的新动机，我们实施了对 CPL DDE 的约束，并发现 CMB 倾向于更小的 Ω_m ，而 DESI DR2 和 SN 则偏好更大的物质分数。有趣的是，DESI DR2 与 CMB、Pantheon+、Union3 和 DESY5 之间的 Ω_m 张力从 $1.57\sigma, 1.83\sigma, 2.10\sigma$ 和 2.81σ 分别缓解到 $0.14\sigma, 0.21\sigma, 0.49\sigma$ 和 0.94σ 。看来 DDE 解决了 Ω_m 的不一致问题，然而代价是 DESI DR2 和 SN 在 CPL 中的 Ω_m (例如 ~ 0.5) 比在 Λ CDM 中更大，而 Pantheon+ 与 DESY5 之间的 H_0 紧张关系从 3.86σ 增加到 4.29σ (见表 I)。因此，众所周知的晚期宇宙由暗能量主导的事实，在 CPL 中受到了很大程度的挑战。请注意，由于对暗能量状态方程的弱约束，CMB 无法限制 CPL 中的 H_0 。

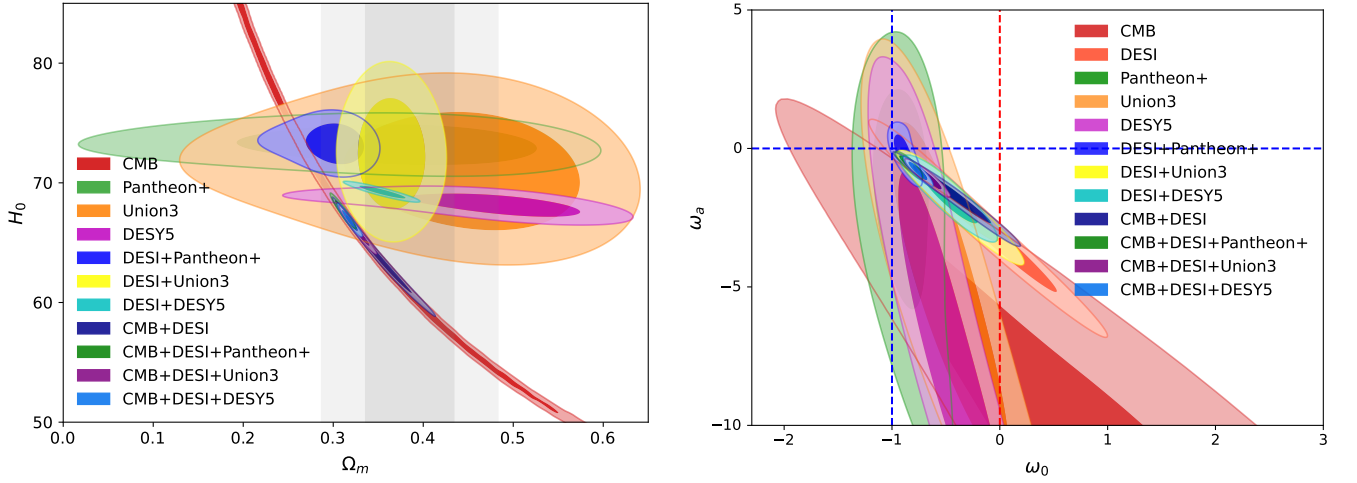


图 2: 参数对 (Ω_m, H_0) 和 (ω_0, ω_a) 在 CPL 模型中来自不同数据集的二维后验分布。垂直阴影灰色区域是 DESI DR2 中的约束值 1σ 和 2σ Ω_m 。蓝色虚线的交点表示 Λ CDM。红色虚线表示 $\omega_0 = 0$ 。

数据组合中的不一致性。DDE 的主要强证据来自于 CMB、BAO 和 SN 数据的结合。然而，这一结果容纳了它们之间的一致性。因此，质疑这种组合的有效性是合理的。在图 2 中，CMB 对 (ω_0, ω_a) 的不敏感导致了在 CPL 中对 H_0 和 Ω_m 的约束远弱于在 Λ CDM 中的约束。幸运的是， H_0 和 Ω_m 之间的强负相关性仍然存在。结合 CMB 与 BAO 和 SN，这种负相关性将大大有助于压缩参数空间，并因此加强对 (ω_0, ω_a) 的约束。不幸的是，CMB 与 SN 之间存在超过 1σ 的张力。特别是，DESY5 给出了与 CMB 的 $\sim 2\sigma$ 张力。更糟糕的是，添加 DESI DR2 到 SN 导致了与 CMB 超出 2σ 的张力，尤其是，DESY5 加上 DESI DR2 给出与 CMB 超出 3σ 的张力。这些紧张关系也可以通过 r_d 值来捕捉。将 DESI DR2 添加到 Pantheon+、Union3 和 DESY5 中，在估计 r_d 时分别与 CMB 产生了 5.30σ 、 2.86σ 和 4.26σ 的紧张关系。请注意，Pantheon+ 加上 DESI DR2 与 DESY5 加上 DESI DR2 之间存在超出 2σ 的紧张关系。这表明了超新星样本之间的明显差异。有趣的是，CMB 加上 DESI DR2 超过了 3σ ，并且分别与 Pantheon+、DESY5 和 Union3 存在超出 2σ 和 $\sim 1.5\sigma$ 的紧张关系。所有这些差异表明，结合约束下的 DDE 证据存在问题。

此外，我们使用比 Planck 和 DESI 合作更广泛的先验来对 (ω_0, ω_a) 给出更多完整的约束条件 [1, 26, 27]。我们发现 CMB 与 DESI DR2 存在 $\sim 2\sigma$ 紧张关系，三个 SN 样本在 $\sim 1\sigma$ 水平上基本与 CMB 不一致。由于 DESI DR2 具有与 SN 明显不同的 (ω_0, ω_a) 退化方向，并且与 SN 存在 $\sim 1\sigma$ 紧张关系，因此从 DESI DR2 加上 CMB

或 SN 得到的 DDE 证据存在问题。此外，即使是对于仅 SN 的情况，SN 样本之间也存在不一致性，即 Pantheon+ 与 Λ CDM 在 1σ 水平上一致，而 Union3 和 DESY5 表现出超出 1σ 的紧张关系与 Λ CDM。因此，我们不应过于信任从这些数据集的任意两两组合中得出的约束条件。从这个观点出发，CMB、DESI DR2 和 SN 组合得出的 Ω_m 值与仅通过 CMB 约束得到的 $\Omega_m = 0.3153 \pm 0.0073$ [1] 的 Λ CDM 值如此接近应该是一种巧合。

解。由于前所未有的精度和不断增加的数据点数量，在使用数据组合研究可能的物理时，我们应该谨慎行事，这可能会使结果偏离真相。尽管 CMB、BAO 和 SN 数据之间存在差异，但不可否认的事实是它们都偏好 $\omega_0 > -1$ 和 $\omega_a < 0$ 区域。特别是 DESI DR2，显示出足够强烈的反相关性 (ω_0, ω_a) ，并且以相对较高的精度表现出对 $\sim 2\sigma$ 的偏好。鉴于此，我们实施了 CPL 与 Λ CDM 之间的统计比较。对于 CMB，我们发现贝叶斯因子为 $\ln B_{ij} = 6.34 > 5$ [45]，表明从 CMB 中强烈支持 CPL 模型。对于 DESI DR2、Pantheon+、Union3 和 DESY5，我们分别获得 $\Delta\text{BIC} = 2.25, 25.63, 3.92$ 和 11.49 [46]，表明 DESI DR2 和 Union3 有正面证据，而 Pantheon+ 和 DESY5 有强烈证据支持 DDE。因此，DDE 很可能存在，然而，我们无法根据这些独立探测确定其真实参数空间，因为它们对 (ω_0, ω_a) 的约束较弱且不一致。如果未来观测（CMB、BAO 或 SN）能提供精度更高的互不一致的 DDE 约束，我们可以安全地宣称其存在。

宇宙的命运。DDE 的存在将影响宇宙的组成、命运、扩张历史和结构形成。三个 SN 数据集允许 CPL 中的

表 I: 自由参数在 CPL 模型中不同数据集的平均值和 1σ (68%) 不确定性。我们在仅使用 CMB 的情况下引用了 ω_0 的 2σ (95%) 上限。符号 “★” 和 “◆” 分别表示数据未约束的参数和约束较差的参数。这里 $h \equiv H_0/100$ 的单位是千米每秒⁻¹ 每兆秒差距⁻¹。

Parameter	ω_0	ω_a	Ω_m	H_0	r_d	hr_d
CMB	2.4 ± 1.9	< -3.62	$0.344^{+0.054}_{-0.200}$	◆	147.32 ± 0.27	103^{+20}_{-30}
DESI	-0.17 ± 0.44	-2.8 ± 1.6	0.385 ± 0.049	★	★	$91.5^{+4.4}_{-4.9}$
Pantheon+	-0.89 ± 0.17	$-2.1^{+3.2}_{-1.8}$	$0.360^{+0.130}_{-0.086}$	73.2 ± 1.0	★	★
Union3	$-0.45^{+0.28}_{-0.40}$	$-5.4^{+4.7}_{-3.1}$	$0.437^{+0.100}_{-0.066}$	71.1 ± 3.0	★	★
DESY5	$-0.35^{+0.30}_{-0.41}$	$-9.0^{+5.4}_{-4.5}$	$0.471^{+0.075}_{-0.043}$	68.20 ± 0.60	★	★
DESI+Pantheon+	-0.885 ± 0.061	-0.19 ± 0.46	$0.299^{+0.025}_{-0.016}$	73.3 ± 1.0	136.1 ± 2.1	99.72 ± 0.93
DESI+Union3	-0.37 ± 0.23	-2.07 ± 0.82	0.365 ± 0.024	72.4 ± 3.0	129.3 ± 6.3	93.5 ± 2.6
DESI+DESY5	-0.47 ± 0.17	-1.75 ± 0.61	0.354 ± 0.016	69.24 ± 0.34	136.6 ± 2.5	94.6 ± 2.1
CMB+Pantheon+	-0.868 ± 0.092	$-0.56^{+0.48}_{-0.42}$	$0.311^{+0.011}_{-0.013}$	67.8 ± 1.2	147.13 ± 0.25	99.7 ± 1.8
CMB+Union3	-0.63 ± 0.14	$-1.39^{+0.68}_{-0.60}$	$0.319^{+0.012}_{-0.014}$	66.9 ± 1.3	147.17 ± 0.25	98.5 ± 2.0
CMB+DESY5	-0.73 ± 0.10	-1.04 ± 0.51	$0.3151^{+0.0094}_{-0.0110}$	$67.3^{+1.10}_{-0.95}$	147.15 ± 0.25	$99.1^{+1.6}_{-1.4}$
CMB+DESI	$-0.41^{+0.21}_{-0.25}$	$-1.74^{+0.75}_{-0.59}$	$0.353^{+0.022}_{-0.025}$	63.7 ± 2.0	147.16 ± 0.23	93.7 ± 3.1
CMB+DESI+Pantheon+	-0.843 ± 0.054	$-0.58^{+0.23}_{-0.19}$	0.3108 ± 0.0058	67.62 ± 0.60	147.28 ± 0.22	99.59 ± 0.89
CMB+DESI+Union3	-0.673 ± 0.087	$-1.04^{+0.30}_{-0.27}$	0.3268 ± 0.0086	66.02 ± 0.84	147.22 ± 0.21	97.2 ± 1.2
CMB+DESI+DESY5	-0.757 ± 0.057	-0.82 ± 0.22	0.3184 ± 0.0057	66.86 ± 0.57	147.24 ± 0.22	98.44 ± 0.84

$\Omega_m > 0.5$ 意味着晚期宇宙可能是由物质主导而不是暗能量主导。至少, CMB、DESI DR2 和 SN 都独立地允许一个较大的 $\Omega_m \sim 0.5$ 。有趣的是, CMB、DESI DR2、Union3 和 DESY5 都没有排除 $\omega_0 > 0$ 和 $\omega_0 > 1/[3(\Omega_m - 1)]$ [47]。只有 Pantheon+ 发现了晚期宇宙加速的超过 1σ 的暗示。人们必须质疑现在宇宙是否正在加速。CMB、DESI DR2、Union3 和 DESY5 分别给出了 $\omega_0 = 2.4 \pm 1.9$ 、 -0.17 ± 0.44 、 $-0.45^{+0.28}_{-0.40}$ 和 $-0.35^{+0.30}_{-0.41}$, 允许当前宇宙可能正在减速或以恒定速度移动。特别地, CMB 给出了一个 1.3σ 的提示 $\omega_0 > 0$, 允许 DE 具有正压。我们的发现不仅深刻挑战了对宇宙加速的理解, 还挑战了长期以来认为 DE 压力为负的观点。有趣的是, 我们发现无论是独立数据集还是联合数据集都倾向于最终宇宙的命运是完全充满物质而不是 DE, 即 $\Omega_m = 1$ 。在遥远的未来某个

时刻, 物质将主导宇宙的演化。最后, 宇宙将奇迹般地停止移动 [48]。关于宇宙命运的更多细节将在 [49] 中展示。

总结, DESI DR2 数据与 CMB 和 SN 数据结合时, 似乎为动力学暗能量 (DDE) 提供了越来越多的证据。然而, 我们的分析表明这一结论并不稳健。通过对 CPL 模型进行独立观测和各种数据组合的约束, 我们发现了不同数据集之间的显著张力。当不兼容的数据集被结合时, 这些张力会导致有问题的约束。

尽管组合约束得到的 Ω_m 和 H_0 值接近于仅从 CMB 约束得到的 Λ CDM 的值, 但我们认为这是巧合。在 CPL 模型中, Λ CDM 中宇宙常数的影响部分被更大的物质分数和动态暗能量所取代。

CMB、DESI DR2 和 SN 数据的结合导致 H_0 值较低, 因为 DESI DR2 表明 $\Omega_m = 0.385 \pm 0.049$ 较高。这

种高物质密度与 CMB 数据相结合时, 直接导致了较低的 $H_0 = 63.7 \pm 2.0 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 值, 这是由于 CMB 观测中 H_0 和 Ω_m 之间存在强负相关。鉴于 H_0 在宇宙背景演化中的关键作用, 我们探讨了 H_0 和 $H_0 r_d$ 对 DECI DR2 中参数 ω_0 和 ω_a 的影响, 在补充材料 (SM) 中进行了研究。此外, 我们发现允许透镜振幅 A_L 自由变化可以将 DDE 的显著性降低大约 1σ , 因为 A_L 和 DDE 在 CMB 透镜势中是简并的 (见补充材料)。

需要注意的是, 随着宇宙学数据的精度和数量增加, 不同探测方法之间的紧张关系也在加剧。这种日益增长的统计复杂性挑战了我们对数据、潜在物理原理以及可能系统误差的理解。目前我们在应对这些挑战的关键节点上。

致谢。DW 得到了西班牙科学研究委员会 (CSIC) 的 CDEIGENT 奖学金的支持。DFM 感谢挪威研究理事会的支持以及由挪威高性能计算和数据存储国家基础设施 UNINETT Sigma2 提供的资源。

* Electronic address: dengwang@ific.uv.es

- [1] N. Aghanim *et al.* [Planck], “Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters,” *Astron. Astrophys.* **641**, A6 (2020) [erratum: *Astron. Astrophys.* **652**, C4 (2021)].
- [2] T. Louis *et al.* [ACT], “The Atacama Cosmology Telescope: DR6 Power Spectra, Likelihoods and Λ CDM Parameters,” [arXiv:2503.14452 [astro-ph.CO]].
- [3] L. Balkenhol *et al.* [SPT-3G], “Measurement of the CMB temperature power spectrum and constraints on cosmology from the SPT-3G 2018 TT, TE, and EE dataset,” *Phys. Rev. D* **108**, no.2, 023510 (2023).
- [4] D. N. Spergel *et al.* [WMAP], “First year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Determination of cosmological parameters,” *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 175-194 (2003).
- [5] P. A. R. Ade *et al.* [Planck], “Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters,” *Astron. Astrophys.* **571**, A16 (2014).
- [6] D. J. Eisenstein *et al.* [SDSS], “Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies,” *Astrophys. J.* **633**, 560-574 (2005).
- [7] S. Cole *et al.* [2dFGRS], “The 2dF Galaxy Redshift Survey: Power-spectrum analysis of the final dataset and cosmological implications,” *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **362**, 505-534 (2005).
- [8] F. Beutler *et al.* [6dF], “The 6dF Galaxy Survey: Baryon Acoustic Oscillations and the Local Hubble Constant,” *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **416**, 3017-3032 (2011).
- [9] S. Alam *et al.* [eBOSS], “Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Cosmological implications from two decades of spectroscopic surveys at the Apache Point Observatory,” *Phys. Rev. D* **103**, no.8, 083533 (2021).
- [10] E. de Carvalho, A. Bernui, G. C. Carvalho, C. P. Novaes and H. S. Xavier, “Angular Baryon Acoustic Oscillation measure at $z = 2.225$ from the SDSS quasar survey,” *JCAP* **04**, 064 (2018).
- [11] M. Ata *et al.* [eBOSS], “The clustering of the SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey DR14 quasar sample: first measurement of baryon acoustic oscillations between redshift 0.8 and 2.2,” *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **473**, no.4, 4773-4794 (2018).
- [12] J. Hou *et al.* [eBOSS], “The Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: BAO and RSD measurements from anisotropic clustering analysis of the Quasar Sample in configuration space between redshift 0.8 and 2.2,” *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **500**, no.1, 1201-1221 (2020).
- [13] A. G. Riess *et al.* [Supernova Search Team], “Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant,” *Astron. J.* **116**, 1009-1038 (1998).
- [14] S. Perlmutter *et al.* [Supernova Cosmology Project], “Measurements of Ω and Λ from 42 high redshift supernovae,” *Astrophys. J.* **517**, 565-586 (1999).
- [15] D. H. Weinberg, M. J. Mortonson, D. J. Eisenstein, C. Hirata, A. G. Riess and E. Rozo, “Observational Probes of Cosmic Acceleration,” *Phys. Rept.* **530**, 87-255 (2013).
- [16] S. Weinberg, “The Cosmological Constant Problem,” *Rev. Mod. Phys.* **61**, 1 (1989).
- [17] S. M. Carroll, “The Cosmological constant,” *Living Rev. Rel.* **4**, 1 (2001).
- [18] E. Di Valentino *et al.*, “Snowmass2021 - Letter of interest cosmology intertwined I: Perspectives for the next decade,” *Astropart. Phys.* **131**, 102606 (2021).
- [19] E. Di Valentino *et al.*, “Snowmass2021 - Letter of interest cosmology intertwined II: The hubble constant tension,” *Astropart. Phys.* **131**, 102605 (2021).
- [20] E. Di Valentino, L. A. Anchordoqui, Ö. Akarsu, Y. Ali-Haimoud, L. Amendola, N. Arendse, M. Asgari, M. Ballardini, S. Basilakos and E. Battistelli, *et al.* “Cosmology Intertwined III: $f\sigma_8$ and S_8 ,” *Astropart. Phys.* **131**, 102604 (2021).

- [21] E. Abdalla *et al.*, “Cosmology intertwined: A review of the particle physics, astrophysics, and cosmology associated with the cosmological tensions and anomalies,” *JHEAp* **34**, 49-211 (2022).
- [22] E. Di Valentino *et al.*, “The CosmoVerse White Paper: Addressing observational tensions in cosmology with systematics and fundamental physics,” [arXiv:2504.01669 [astro-ph.CO]].
- [23] A. G. Adame *et al.* [DESI], “DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurements of Baryon Acoustic Oscillations,” [arXiv:2404.03002 [astro-ph.CO]].
- [24] A. G. Adame *et al.* [DESI], “DESI 2024 III: Baryon Acoustic Oscillations from Galaxies and Quasars,” [arXiv:2404.03000 [astro-ph.CO]].
- [25] A. G. Adame *et al.* [DESI], “DESI 2024 IV: Baryon Acoustic Oscillations from the Lyman Alpha Forest,” [arXiv:2404.03001 [astro-ph.CO]].
- [26] M. Abdul Karim *et al.* [DESI], “DESI DR2 Results II: Measurements of Baryon Acoustic Oscillations and Cosmological Constraints,” [arXiv:2503.14738 [astro-ph.CO]].
- [27] K. Lodha *et al.* [DESI], “Extended Dark Energy analysis using DESI DR2 BAO measurements,” [arXiv:2503.14743 [astro-ph.CO]].
- [28] M. Abdul Karim *et al.* [DESI], “DESI DR2 Results I: Baryon Acoustic Oscillations from the Lyman Alpha Forest,” [arXiv:2503.14739 [astro-ph.CO]].
- [29] A. Einstein, “The foundation of the general theory of relativity,” *Annalen Phys.* **49**, no.7, 769-822 (1916).
- [30] M. Chevallier and D. Polarski, “Accelerating universes with scaling dark matter,” *Int. J. Mod. Phys. D* **10**, 213-224 (2001).
- [31] E. V. Linder, “Exploring the expansion history of the universe,” *Phys. Rev. Lett.* **90**, 091301 (2003).
- [32] N. Aghanim *et al.* [Planck], “Planck 2018 results. V. CMB power spectra and likelihoods,” *Astron. Astrophys.* **641**, A5 (2020).
- [33] N. Aghanim *et al.* [Planck], “Planck 2018 results. VIII. Gravitational lensing,” *Astron. Astrophys.* **641**, A8 (2020).
- [34] D. Brout *et al.*, “The Pantheon+ Analysis: Cosmological Constraints,” *Astrophys. J.* **938**, no.2, 110 (2022).
- [35] D. Rubin *et al.*, “Union Through UNITY: Cosmology with 2,000 SNe Using a Unified Bayesian Framework,” [arXiv:2311.12098 [astro-ph.CO]].
- [36] T. M. C. Abbott *et al.* [DES], “The Dark Energy Survey: Cosmology Results with ~ 1500 New High-redshift Type Ia Supernovae Using the Full 5 yr Data Set,” *Astrophys. J. Lett.* **973**, no.1, L14 (2024).
- [37] A. Lewis, A. Challinor and A. Lasenby, “Efficient computation of CMB anisotropies in closed FRW models,” *Astrophys. J.* **538**, 473-476 (2000).
- [38] J. Torrado and A. Lewis, “Cobaya: Code for Bayesian Analysis of hierarchical physical models,” *JCAP* **05**, 057 (2021).
- [39] A. Gelman and D. B. Rubin, “Inference from Iterative Simulation Using Multiple Sequences,” *Statist. Sci.* **7**, 457-472 (1992).
- [40] A. Lewis, “GetDist: a Python package for analysing Monte Carlo samples,” [arXiv:1910.13970 [astro-ph.IM]].
- [41] D. Wang, “The Self-Consistency of DESI Analysis and Comment on ‘Does DESI 2024 Confirm Λ CDM?’,” [arXiv:2404.13833 [astro-ph.CO]].
- [42] R. Trotta, “Applications of Bayesian model selection to cosmological parameters,” *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **378**, 72-82 (2007).
- [43] G. Schwarz, “Estimating the Dimension of a Model,” *Annals Statist.* **6**, 461-464 (1978).
- [44] A. Heavens *et al.*, “No evidence for extensions to the standard cosmological model,” *Phys. Rev. Lett.* **119**, no.10, 101301 (2017).
- [45] For CMB, choosing Λ CDM as the reference model, we use the `MCEvidence` package [44] to calculate the Bayesian evidences of CPL and Λ CDM, ε_i , and the Bayes factor, $B_{ij} = \varepsilon_i / \varepsilon_j$, where ε_j is the statistical evidence of the reference model. We use a revised and more conservative version of the so-called Jeffreys’ scale [42], i.e., $\ln B_{ij} = 0-1$, $\ln B_{ij} = 1-2.5$, $\ln B_{ij} = 2.5-5$ and $\ln B_{ij} > 5$ implying an *inconclusive*, *weak*, *moderate* and *strong* preference of the model i over the reference model j , respectively. Note that data prefers the reference model if $\ln B_{ij} < 0$ for an experiment. Here the reference model is Λ CDM.
- [46] For DESI DR2 and SN, we implement the statistical comparison using the Bayesian information criterion (BIC) [43], which is defined as $\text{BIC} = \chi^2_{\min} + n \ln N$, where n and N denotes the numbers of model parameters and data points. It is noteworthy that the relative values of this criterion between different models are more useful than the absolute values to distinguish which model is preferred by observations. Hence, we define the relative variation ΔBIC between models as follows $\Delta\text{BIC} = \text{BIC}^{\text{model}} - \text{BIC}^{\text{CDM}}$, where we have chosen the Λ CDM model as the reference model. Generally, the differences $\Delta\text{BIC} \sim 2$ and $\Delta\text{BIC} \sim 6$ indicate a positive and strong evidence against the reference model, respectively.

- [47] In CPL DDE, cosmic acceleration requires $\omega_0 < 1/[3(\Omega_m - 1)]$ easily derived from the violation of the strong energy condition $\rho + 3p \geq 0$.
- [48] J. D. Barrow and F. J. Tipler, "The Anthropic Cosmological Principle." Oxford University Press (1986).
- [49] In preparation.

“DESI DR2 是否真正揭示了动态暗能量？”的补充材料

在本补充材料中，首先，我们研究了 CMB 透镜振幅 A_L 对 DDE 约束的影响，使用的是 CMB、DESI DR2 和 SN 观测的组合。由于暗能量状态方程与当前宇宙膨胀率密切相关，我们随后仅使用 DESI DR2 BAO 测量来研究 H_0 和 $H_0 r_d$ 对 DDE 约束的影响。最后，我们将比较仅用 CMB 对 CPL DDE 和 Λ CDM 的约束。

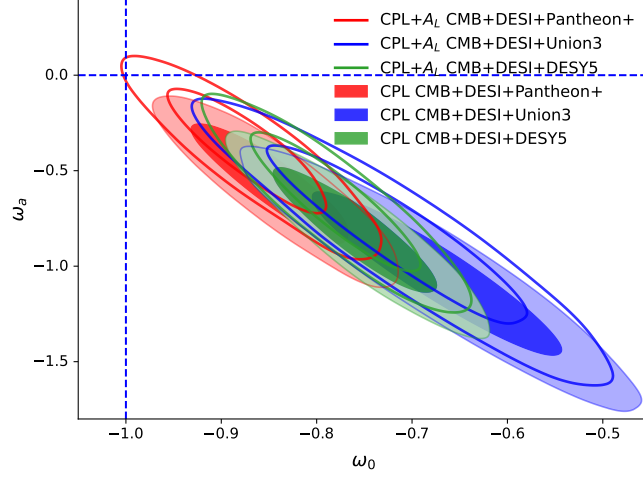


图 1: 参数对 (ω_0, ω_a) 在 CMB、DESI DR2 和 SN 观测中的二维后验分布，在有无透镜振幅 A_L 的 CPL 模型中。蓝色虚线的交点对应于 Λ CDM。

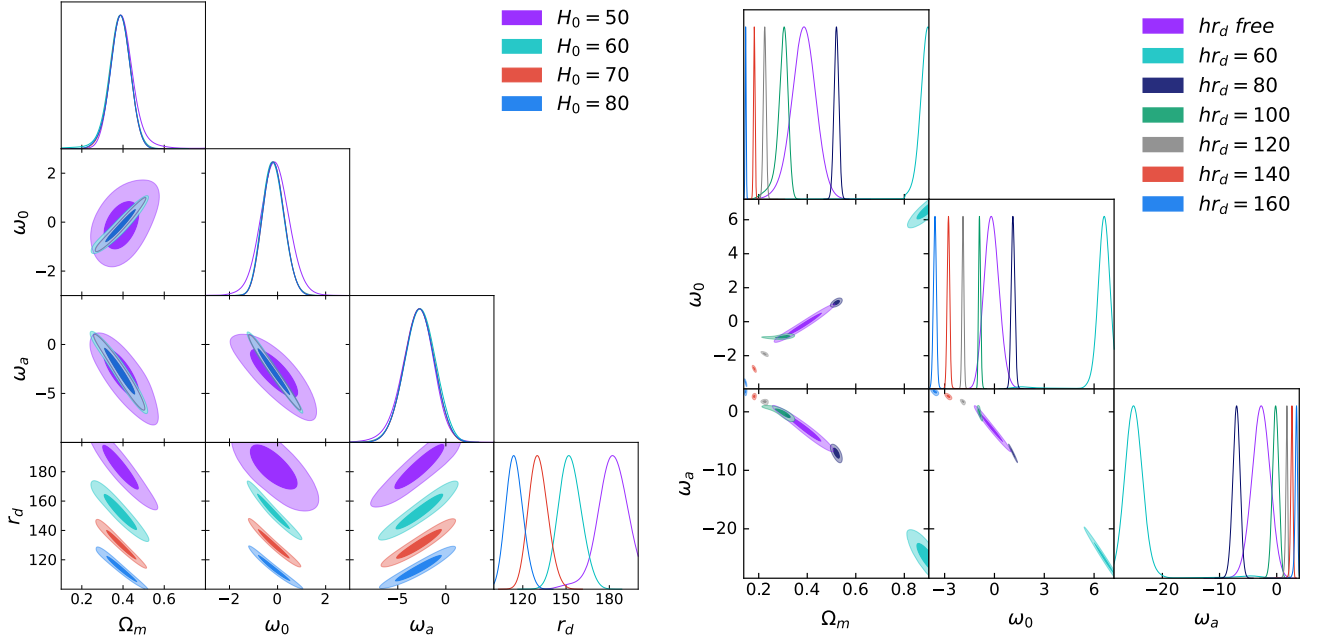


图 2: CPL 模型中从 DESI DR2 数据得到的模型参数的一维和二维后验分布，分别考虑不同的 H_0 和 hr_d 值。对于 hr_d 的情况，我们使用一个自由的 hr_d 作为比较。

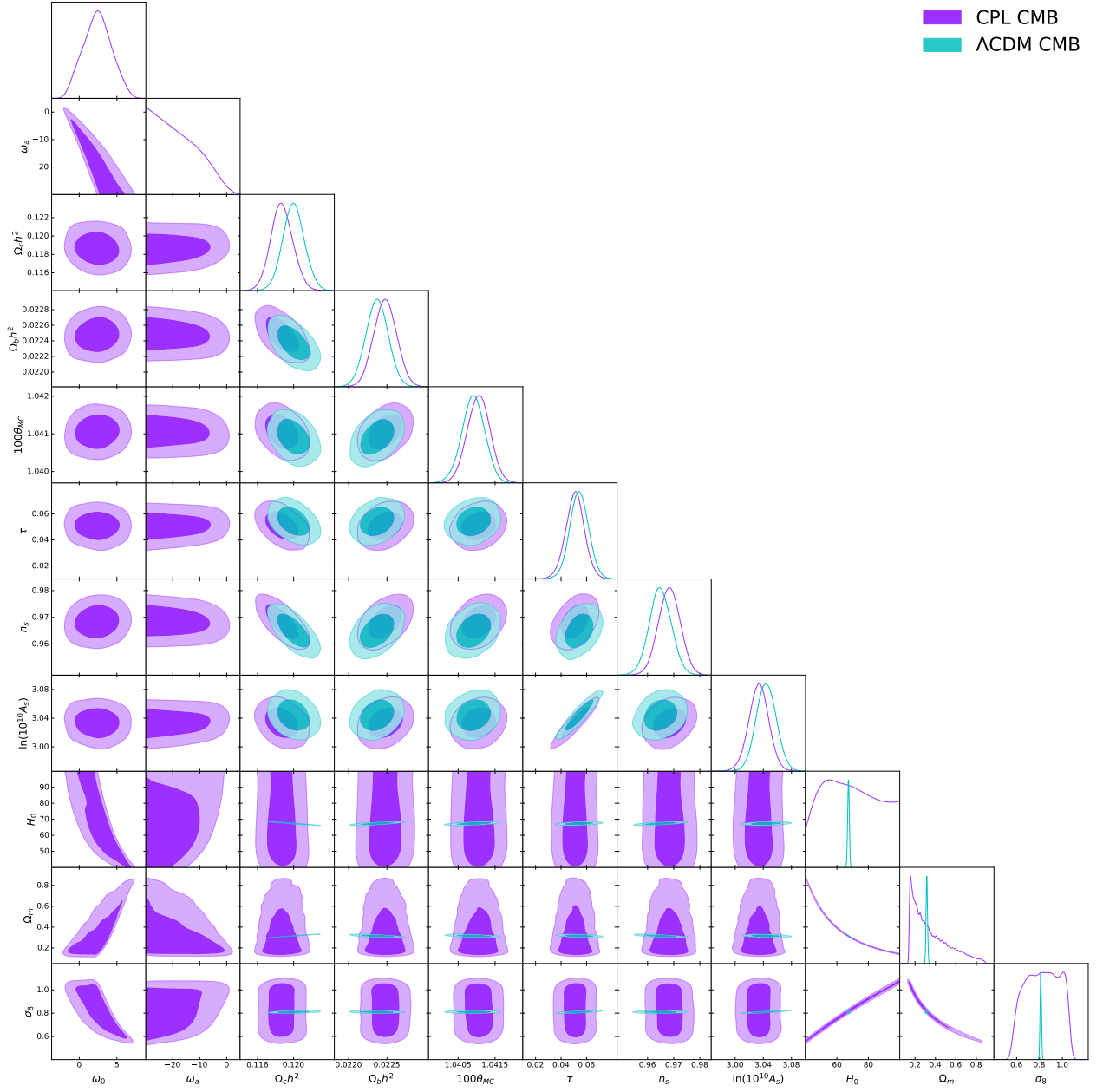


图 3: CPL 和 Λ CDM 模型中从 CMB 观测得到的一维和二维后验分布。

A. 透镜幅度对 DDE 的影响

如我们所知, CMB 透镜异常与宇宙尺度上的许多新物理现象强烈退化, 例如, 修改的重力 [1, 2]、宇宙曲率 [3] 和暗能量的有效场论 [1]。由于 DDE 和 A_L 都对引力势有影响, 考虑 A_L 可能会改变对 (ω_0, ω_a) 的约束。利用 CMB、DESI DR2 和 SN 的数据组合, 我们发现一个自由的 A_L 可以降低 DDE 的 $\sim 1\sigma$ 显著性 (见图 1)。这一结果对于这里考虑的所有三个 SN 样本都成立。

B. H_0 和 hr_d 对延迟微分方程的影响

理论上, BAO 需要从 CMB 中获取拖曳时期声视界 r_d 的信息来帮助确定 H_0 , 因为 BAO 无法独立约束 H_0 。然而, 有趣的是看到 r_d 与暗能量状态方程 (或物质密度比) 之间的相关性如何随不同的 H_0 值变化。在图中。2 如预期的那样, 变化 H_0 几乎不会改变物质分数的约束。较大的 H_0 导致较小的 r_d 。 r_d 继承了 H_0 和 Ω_m (或 ω_0) 之间的反相关性以及 H_0 和 ω_a 之间的正相关性。值得注意的是, 当取较小的 H_0 值时, 整个参数空间将会扩大。此外, 我们研究复合参数 $H_0 r_d$ 如何影响 DDE 约束。类似于 H_0 的情况, 较大的 $H_0 r_d$ 会导致较小的 Ω_m 和 ω_0 以及较大的 ω_a 。自由下落情况下 $H_0 r_d$ 的约束条件很好地介于 $H_0 r_d = 80$ 和 100 之间, 因为它给出了 $H_0 r_d = 91.5^{+4.4}_{-4.9}$ (见正文中的表格)。

C. CPL 与 Λ CDM 在 CMB 视角下的比较

在图 3 中, 我们对 CPL DDE 和 Λ CDM 模型进行了比较。总体而言, DDE 给出了六个基本参数相似的限制, 尽管某些参数存在微小的变化。值得注意的是, CMB 在现象学上对晚期 DE EoS 不敏感。这种不敏感性导致了对 (ω_0, ω_a) 的约束较差。因此, 在 CPL DDE 模型中无法很好地限制背景量如 H_0 和 Ω_m 。

* Electronic address: dengwang@ific.uv.es

- [1] N. Aghanim *et al.* [Planck], “Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters,” *Astron. Astrophys.* **641**, A6 (2020) [erratum: *Astron. Astrophys.* **652**, C4 (2021)].
- [2] D. Wang and O. Mena, “Robust analysis of the growth of structure,” *Phys. Rev. D* **109**, no.8, 083539 (2024).
- [3] E. Di Valentino, A. Melchiorri and J. Silk, “Planck evidence for a closed Universe and a possible crisis for cosmology,” *Nature Astron.* **4**, no.2, 196-203 (2019).