中国科学: 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 4 期: 240021
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
观 点 西安交通大学建校130周年专辑

标准宇宙学模型的尺度适用性而非模型危机?

胡建萍[1*], 贾轩东[2], 左兆宇[1*], 杨涛只[1], 王发印[2,3*]

1. 西安交通大学物理学院, 物质非平衡合成与调控教育部重点实验室, 西安 710049
2. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210093
3. 南京大学现代天文与天体物理教育部重点实验室, 南京 210093
*联系人, 胡建萍, E-mail: hjp1206@163.com; 左兆宇, E-mail: zuozyu@xjtu.edu.cn; 王发印, E-mail: fayinwang@nju.edu.cn

收稿日期: 2025-10-22; 接受日期: 2026-01-16; 网络出版日期: 2026-03-12
国家自然科学基金(编号: 12473043, 12494575, 12273009, 12003020)和陕西省数理基础科学研究(编号: 23JSY015)资助项目

摘要 宇宙学常数冷暗物质模型(ΛCDM)作为标准宇宙学模型, 与大多数天文观测吻合. 近几年, 随着技术的发展, 逐渐发现诸多违背其预期的现象. 这些现象表明, 近邻宇宙的演化可能并不完全遵循ΛCDM模型. 例如, 哈勃常数危机暗示对当前宇宙膨胀速率的估计可能存在偏差; 近邻宇宙的各向异性特征暗示宇宙在本地并非完全各向同性; 动态暗能量暗示其状态方程参数或能量密度随时间变化, 这种变化可能导致宇宙演化在不同阶段的膨胀速率与ΛCDM模型的预测存在显著差异. 这表明可能存在超越标准宇宙学模型的新物理, 且新物理对宇宙晚期的演化影响更为显著. 因此, 晚期观测数据对标准宇宙学模型的挑战暗示其在描述近邻宇宙时需要被修正, 但并不影响其在更大尺度上的适用性. 值得注意的是新物理不必源于宇宙晚期, 只是在宇宙晚期变得显著.

关键词 哈勃常数, 宇宙学基本原理, 宇宙学常数, 距离阶梯, 新物理

PACS: 98.80.-k, 98.80.Es, 98.62.Py

1 引言

宇宙学模型的发展历程跨越数个世纪: 从古希腊的思辨天球, 到牛顿、爱因斯坦的时空几何, 再到如今的精确宇宙学, 我们对“宇宙如何运转”的认知被一次次重写. 目前的标准宇宙学模型是宇宙学常数+冷暗物质模型, 即ΛCDM模型. 该模型用6个参数给出极简宇宙配方: 68%暗能量, 27%冷暗物质, 而我们熟悉的重子物质仅占5%[1]. 这一“宇宙学标准配方”并非理论偏爱, 而是经由多重独立观测共同“投票”确立. 多种类型观测数据彼此交叉验证, 共同支持该模型的合理性, 其中包括宇宙微波背景辐射[1](CMB)、Ia型超新星[2](SN Ia)、伽马射线爆[3](GRB)、重子声学振荡[4](BAO)等. 迄今尚无其他模型能在如此少的参数下通过全部宇宙学检验.

近十年来, 6个参数的ΛCDM模型在近乎横扫绝大多数天文数据的同时, 也留下一系列的“未解之谜”: 暗能量疑似“动起来”[4]、结构增长因子比预期更低[5]、BAO尺子在高红移段出现相位偏移[6]、宇宙年龄小于最老恒星年龄[7]、S_8危机持续3–4标准差[8]、南天冷斑

引用格式: 胡建萍, 贾轩东, 左兆宇, 等. 标准宇宙学模型的尺度适用性而非模型危机? 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 240021
Hu J P, Jia X D, Zuo Z Y, et al. Scale applicability of the standard cosmological model, rather than a crisis of the model itself? (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 240021, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0475

© 2026《中国科学》杂志社

和偶极各向异性[9], 以及最醒目的哈勃常数危机[10]. 这些“异常”暗示可能存在超越标准模型的新物理, 亦或仍潜伏着未知的系统误差——观测设备的校准问题、数据处理中的偏差或理论模型中的近似假设等, 都可能导致观测结果与理论预测之间的偏离. 为提升观测结果的准确性和可靠性, 可以通过改进观测设备、优化数据处理方法、改进理论模型等措施逐步降低系统误差对结果的影响. 只有把误差逼至墙角, 才能让“新物理”浮出水面, 推动宇宙学迈过精度时代的下一道门槛.

2　哈勃常数危机

哈勃常数(Hubble Constant, 简称H_0)是宇宙学中一个极为重要的参数, 它反映当前宇宙膨胀的速率. 然而, 最权威的两种测量方式却给出不一致的测量结果. SH0ES合作组利用Ia型超新星作为标准烛光测量H_0值, 最新测量结果为73.04 ± 1.04 km s^{-1} Mpc^{-1}[11]. 普朗克(Planck)合作组则基于ΛCDM模型, 利用宇宙微波背景辐射(CMB)测量H_0值, 其最新测量结果为67.40 ± 0.50 km s^{-1} Mpc^{-1} [1]. 两者之间不一致性约为4.89个标准差, 即哈勃常数危机.

目前, 对于哈勃常数危机可能的成因, 主要有三种猜测: (1) 两个合作组中某一方的数据处理存在缺陷; (2) 已知系统误差考虑不够全面, 或存在未知系统误差; (3) 可能存在超越标准模型的新物理. 围绕危机成因问题, 研究人员开展一系列深入研究. SH0ES和Planck合作组均经过自查, 宣称各自的研究方法和数据分析过程不存在明显的问题, 其测量结果是可靠的. 在其他独立探针中, 部分观测虽表现出倾向性, 但测量误差较大, 不足以构成统计显著的证据. 例如, 类星体强引力透镜得到的H_0测量值整体倾向于宇宙晚期距离阶梯的测量结果. 但是, 单个测量结果的误差较大, 使得倾向性并不明显. 整体上, 其他独立观测并未给出一致的结果, 无法仲裁哈勃常数危机. 与此同时, 各种ΛCDM修正模型(早期暗能量、衰变暗物质、额外辐射分量等等)接踵而至, 却无一能在解决哈勃常数危机的同时不挑起其他冲突. 对于哈勃常数危机及其解决方案的详细介绍, 敬请参阅综述文章[12–14]. 一系列深入研究使得学界倾向于认为, 哈勃常数危机更可能源自未知系统误差或超越标准模型的新物理.

总之, 哈勃常数危机挑起了宇宙早期和晚期观测之间的矛盾.

3　哈勃常数的红移依赖性

在ΛCDM模型中, 哈勃常数H_0是描述当前宇宙膨胀速率的恒定参量. 然而, 基于ΛCDM模型, Wong等人从类星体强引力透镜观测中发现, 单个透镜测量的H_0值随透镜体红移增加而下降[15]; 相同模型下, 多组独立观测及其联合分析亦重现该趋势[16–19]. Hu和Wang[20]进一步以哈勃参数观测数据结合模型无关方法高斯过程重构, 揭示H_0值在红移0.49附近发生“跃迁行为”: 从高红移到低红移, H_0测量值由与Planck微波背景辐射测量结果一致跃迁为与SH0ES距离阶梯结果一致. 该发现可以有效缓解哈勃常数危机, 缓解程度约为70%, 如图1所示. 随后, Jia等人[18]在ΛCDM模型框架下以参数化分段拟合得到不同红移处的H_0, 发现其随红移增加而下降, 显著性达3.80个标准差; 同一方法应用于BAO和DESI BAO联合样本后, 显著性升至6.40个标准差[19]. 若ΛCDM模型即为宇宙真相, 各红移段导出的H_0测量结果应一致, 而不应存在演化行为.

哈勃常数下降趋势暗示可能存在超越标准宇宙学模型的新物理, 并且极有可能与哈勃常数危机同出一

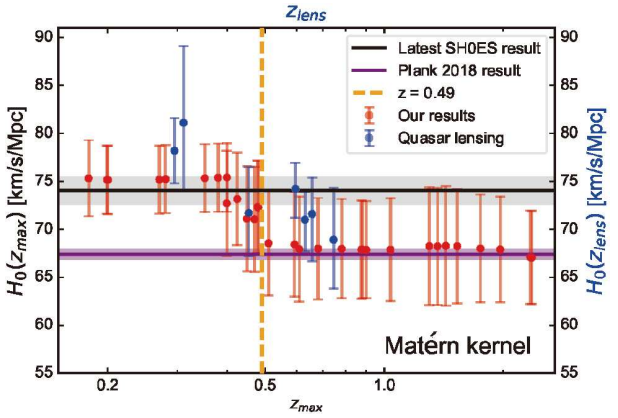


图 1　H_0测量值(红点)随所用数据最大红移(z_{max})的变化. 紫色和红色实线分别代表普朗克CMB和SH0ES的测量结果, 阴影区代表1个标准差的误差范围. 蓝点代表类星体强引力透镜的测量结果. 图片来自文献[20]

Figure 1　The variation of H_0 measurements (red dots) with the maximum redshift (z_{max}) of the data used. Purple and red solid lines represent the measurement results from the Planck CMB and SH0ES, respectively, and the shaded areas represent the corresponding 1σ error. The blue dots represent the H_0 measurements from strong gravitational lensing of quasars. This figure is from ref. [20].

源. 最初, 哈勃常数危机被认为是宇宙早期观测和晚期观测之间的冲突. 演化行为的发现表明危机也可能源自宇宙晚期低红移与高红移之间的分化: 以红移0.50为界, 低红移指向较大值(与距离阶梯测量结果一致); 高红移指向较小值(与微波背景辐射测量结果一致).

因红移大于1.0的观测数据稀少, 哈勃常数红移依赖研究主要集中在红移1.0以内(低红移); 高红移段亟待数据补全. 若未来更高精度的观测确认高红移处的H_0值仍倾向于CMB的测量结果, 将同时揭示两点: (1) 哈勃常数危机与哈勃常数红移演化可能源自同一超出标准模型的新物理; (2) 该新物理体现于宇宙晚期, 并不动摇标准宇宙学模型在更大尺度上的有效性.

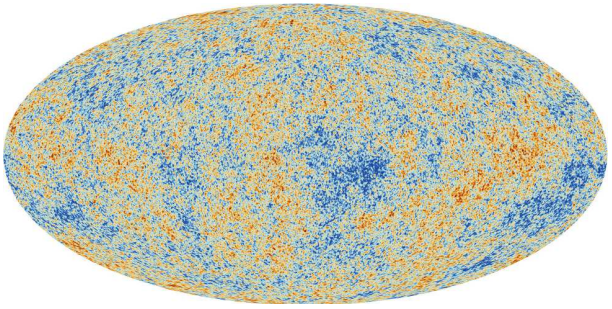


图 2　普朗克观测到的宇宙微波背景. 图片来自欧洲航天局(ESA)的官方网站(https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck/Planck_and_the_cosmic_microwave_background)

Figure 2　Cosmic microwave background seen by Planck. Figure from the official website of the ESA (https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck/Planck_and_the_cosmic_microwave_background).

4　宇宙各向异性

宇宙学基本原理作为宇宙学基本假设, 要求宇宙在大尺度上均匀且各向同性. ΛCDM模型正是在此假设基础上建立.

1965年阿诺·彭齐亚斯(Arno Penzias)和罗伯特·威尔逊(Robert Wilson)意外发现了宇宙微波背景辐射, 这是大爆炸理论的关键预言之一[21]. 然而, 当时观测到的CMB非常均匀, 没有明显的各向异性. 1992年, 宇宙背景探测器(COBE)的差分微波辐射计(DMR)仪器首次发现CMB的各向异性, 即在不同方向上的温度存在微小差异(约十万分之一)[22]. 这一发现为大爆炸理论提供直接证据, 并开启宇宙学的“精确测量”时代. 2001年升空的威尔金森微波各向异性探测器(WMAP)[23]与2009年接力运行的普朗克(Planck)[24]卫星, 进一步精确测量了CMB的各向异性. 图2展示的是Planck 2020最新释放的温度图, 其中最受瞩目的结构是南天(l, b) ≈ (209°, −57°)处的“冷斑”: 温度降幅~−100 μK, 高斯随机场出现同量级波动的概率小于2%, 被视为可能偏离宇宙学基本原理的显著线索[9].

为进一步检验“宇宙大尺度各向同性”这一基础假设, 研究人员将视线转向近邻宇宙. Ia型超新星[2,25]因测距精度高、样本庞大, 成为近邻宇宙检验宇宙学基本原理的首选探针. 类星体[26]、伽马暴[27]、星系团[28]等也被纳入检验宇宙学基本原理的“工具箱”, 用于补充红移覆盖、弥补分布不均以及交叉校验. 目前, 常用检验方法包括“半球比较法”[29]和“偶极拟合法”[30], 被广泛用于近邻宇宙的各向异性研究. 2024年, Hu等人[31]新增“区域拟合法”(Region fitting method), 并将其应用于Pantheon+样本[25], 发现显著的各向异性信号, 首选方向位于天球坐标(l, b)= (313.4°, −16.8°)处, 如图3所示. 统计各向同性分析给出的统计显著性为3.96个标准差. 红移层析进一步显示, 各向异性水平随红移演化. 在红移0.30附近触及峰值, 在红移0.60附近触及谷值, 暗示近邻宇宙结构可能比预期更为复杂, 并且这种复杂性随红移增加而演化, 系统性偏离宇宙学基本原理. 鉴于现样本仍旧稀疏、置信度尚未跨越5个标准差判据, 亟需空间分布更均匀、更精确的新一代数据, 方能将这一“疑似破缺”升格为新物理证据.

综合当前证据, 近邻宇宙呈现出的偶极偏离对标准宇宙学模型的“各向同性”假设形成实质性挑战. 其成因或指向暗物质和暗能量的复杂分布, 亦或源于早期宇宙扰动在长期演化过程中被意外放大. 无论哪种情形, 均要求我们重新审视各向同性假设.

5　动态暗能量

在ΛCDM框架下, 暗能量是解释宇宙加速膨胀的关键成分, 其被假设为宇宙学常数(Λ), 能量密度在整个宇宙中应保持不变, 状态方程恒定为−1.

暗能量光谱仪(DESI)的重子声学振荡(BAO)观测首次在3.90个标准差偏好“动态暗能量”[4], 如图4所示. 当DESI DR2数据与DES-SN5YR超新星数据结合, 状态方程$w(z)$显著偏离−1, 呈现出从phantom区域(w <

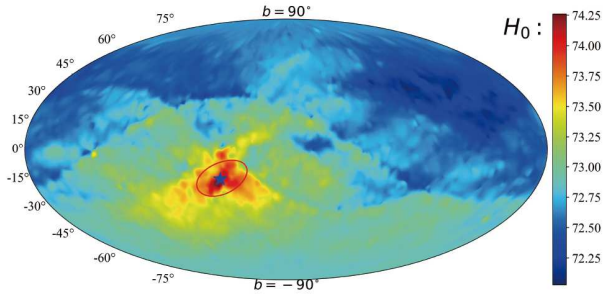


图 3　银道坐标系下，宇宙膨胀速率的全天分布. 图片来自文献[30]

Figure 3　All sky distribution of the cosmic expansion velocity in the galactic coordinate system. This figure is from ref. [30].

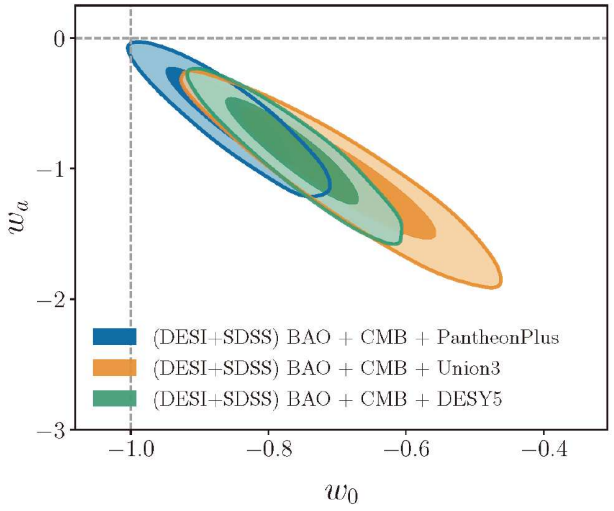


图 4　DESI+SDSS BAO与CMB, Pantheon Plus, Union3和DESY5超新星数据集相结合的宇宙学参数限制结果. 图片来自文献[4]

Figure 4　The cosmological constraints from DESI+SDSS BAO combined with CMB and each of the Pantheon Plus, Union3 and DESY5 SN Ia datasets. This figure is from ref. [4].

−1)穿过−1进入quintessence区域($w > -1$)的“穿越”轨迹. Gu等人[32]利用团队自主开发的新方法，通过深入分析DESI最新观测获得的宇宙学距离数据，并结合Ia型超新星和CMB的观测，把显著性推高至4.10个标准差, 同时给出穿越红移$z_{cross} = 0.28$.

动态暗能量动摇了ΛCDM模型将其当常数的零阶假设，同时揭示了近邻宇宙的演化历史比标准模型预期更跌宕. 不过，目前的“动态”信号仅来自红移z ⩽ 2.50的观测数据；更高红移是否保持穿越−1行为，还是回归$w \approx -1$的平静，需要未来多数据联合共同作答. 如果未来数据显示更高红移w确实维持在−1附近，则仍支持宇宙学常数，ΛCDM模型仅需要在低红移做“局部修正”而非“全盘推翻”.

6　讨论与总结

若超越标准模型的新物理真实存在，各课题看似无关的“异常”，实际可能同出一脉：哈勃常数红移演化行为既为哈勃常数危机提供解释方案，同时与宇宙各向异性演化行为相呼应. 最新工作[33,34]指出，考虑各向异性能够显著影响H_0的测量结果，H_0值随各向异性水平增加而减小; Hu等人[35]发现在ΛCDM模型基础上，引入单极-偶极修正项将宇宙晚期观测数据测得的H_0值直接推回Planck CMB的H_0值，一次消除~4 km s^{-1} Mpc^{-1}的差异，让“危机”在新物理的共振中消解.

在哈勃常数和各向异性的红移依赖研究中，存在一个耐人寻味的“巧合”，位于红移区间0.50–0.60. 该处既是哈勃常数与各向异性同步“拐折”的窗口；也是宇宙从减速膨胀迈向加速膨胀的特殊时期. 理论上，

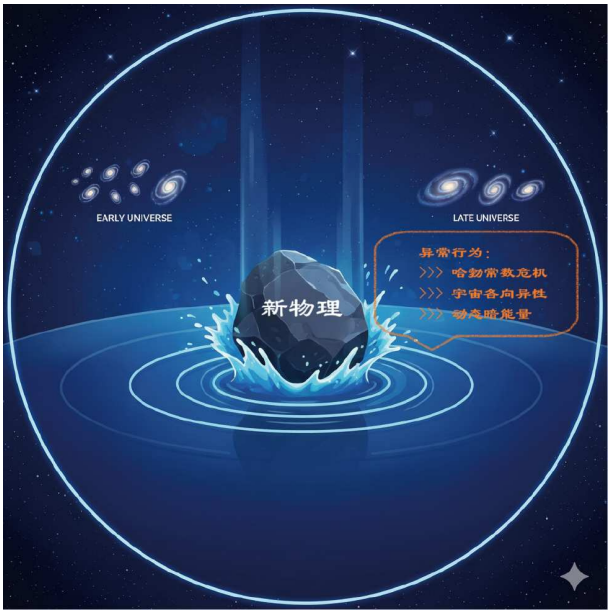


图 5　以“落石入湖”喻示新物理打破ΛCDM的平静，激起哈勃常数危机、宇宙各向异性与动态暗能量等涟漪, 湖面最终复归平静抑或永驻微澜, 取决于湖底是否还有未见的暗流

Figure 5　The metaphor of “falling a rock into a lake” represents how new physics breaks the tranquility of ΛCDM stirring up ripples such as Hubble tension, cosmic anisotropy, and dark energy dynamics. Whether the lake surface will eventually return to calm or remain calm forever depends on whether there are any unseen undercurrents at the bottom of the lake.

宇宙当前的加速膨胀是从减速膨胀平稳过渡来的, 减速-加速过渡时期被称为拐折红移(z_{tr}). 最新研究测量的拐折红移z_{tr} = 0.64, 与演化行为发生时期非常接近[36]. 这可能是一种巧合, 但也可能是新物理存在的证据. 有两种可能的猜测: (1) 新物理产生于宇宙由减速膨胀转变为加速膨胀的特殊时期(物质能量和暗能量对宇宙膨胀的贡献正处于临界相等), 促使宇宙组成结构发生剧烈变化, 逐渐偏离标准宇宙学模型的预期; 其产生可能与暗物质或暗能量的特殊属性相关. (2) 宇宙早期的某些扰动或者新物理机制在减速膨胀转变为加速膨胀的时期被放大.

对于宇宙未来的演化, 无论哪种情形, 新物理既有可能使宇宙持续偏离标准预期, 也可能随宇宙膨胀稀释而“恢复平静”. 如图5所示, 新物理像平静湖面的落石, 落石虽能激起涟漪(异常行为), 但湖水终将归于平静. 上述观点是基于现有数据和研究下的合理外推; 欲解锁宇宙晚期反常背后的真实物理机制, 需要依赖更高精度、更宽红移覆盖的下一代观测. 简言之, 哈勃常数危机挑起了宇宙“早期对晚期”的冲突, 哈勃常数演化将矛盾指向宇宙晚期高-低红移之间. 伴随各向异性、动态暗能量等异常行为的相继现身, 近邻宇宙的结构和膨胀历史显露出比标准宇宙学模型预期更加复杂的特征. 因此, 新物理所需修正更可能是ΛCDM的“近邻微调”, 而非动摇其整体框架的根基.

参考文献

1 Aghanim N, Akrami Y, Ashdown M, et al. *Planck* 2018 results-VI. Cosmological parameters. Astron Astrophys, 2020, 641: A6
2 Brout D, Scolnic D, Popovic B, et al. The Pantheon+ analysis: Cosmological constraints. Astrophys J, 2022, 938: 110
3 Wang F Y, Hu J P, Zhang G Q, et al. Standardized long gamma-ray bursts as a cosmic distance indicator. Astrophys J, 2022, 924: 97
4 Adame A G, Aguilar J, Ahlen S, et al. DESI 2024 VI: Cosmological constraints from the measurements of baryon acoustic oscillations. J Cosmol Astropart Phys, 2025, 2025: 021
5 Joudaki S, Blake C, Johnson A, et al. KiDS-450+2dFLenS: Cosmological parameter constraints from weak gravitational lensing tomography and overlapping redshift-space galaxy clustering. Mon Not R Astron Soc, 2018, 474: 4894–4924
6 Cuceu A, Farr J, Lemos P, et al. Baryon Acoustic Oscillations and the Hubble constant: Past, present and future. J Cosmol Astropart Phys, 2019, 2019: 044
7 Verde L, Protopapas P, Jimenez R. Planck and the local Universe: Quantifying the tension. Phys Dark Univ, 2022, 28: 166
8 Skara F, Perivolaropoulos L. Tension of the E_G statistic and redshift space distortion data with the Planck-ΛCDM model and implications for weakening gravity. Phys Rev D, 2020, 101: 063521
9 Akrami Y, Ashdown M, Aumont J, et al. *Planck* 2018 results. VII. Isotropy and statistics of the CMB. Astron Astrophys, 2020, 641: A7
10 Riess A G. The expansion of the Universe is faster than expected. Nat Rev Phys, 2020, 2: 10–12
11 Riess A G, Yuan W, Macri L M, 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. ApJL, 2022, 934: L7
12 Di Valentino E, Mena O, Pan S, et al. In the realm of the Hubble tension—a review of solutions. Class Quantum Grav, 2021, 38: 153001
13 Hu J P, Wang F Y. Hubble tension: The evidence of new physics. Universe, 2023, 9: 94
14 Abdalla E, Abellán G F, Aboubrahim A, et al. Cosmology intertwined: A review of the particle physics, astrophysics, and cosmology associated with the cosmological tensions and anomalies. J High Energy Astrophys, 2022, 34: 49–211
15 Wong K C, Suyu S H, Chen G C F, et al. H0LiCOW—XIII. A 2.4 per cent measurement of H0 from lensed quasars: 5.3σ tension between early- and late-Universe probes. Mon Not R Astron Soc, 2020, 498: 1420–1439
16 Krishnan C, Colgáin E Ó, Ruchika E Ó, et al. Is there an early Universe solution to Hubble tension? Phys Rev D, 2020, 102: 103525
17 Dainotti M G, De Simone B, Schiavone T, et al. On the Hubble constant tension in the SNe Ia pantheon sample. Astrophys J, 2021, 912: 150
18 Jia X D, Hu J P, Wang F Y. Evidence of a decreasing trend for the Hubble constant. Astron Astrophys, 2023, 674: A45
19 Jia X D, Hu J P, Yi S X, et al. Uncorrelated estimations of H_0 redshift evolution from DESI baryon acoustic oscillation observations. ApJL, 2025, 979: L34
20 Hu J P, Wang F Y. Revealing the late-time transition of H_0: Relieve the Hubble crisis. Mon Not R Astron Soc, 2022, 517: 576–581
21 Penzias A A, Wilson R W. A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s. Astrophys J, 1965, 142: 419

22 Kogut A, Lineweaver C, Smoot G F, et al. Dipole anisotropy in the COBE differential microwave radiometers first-year sky maps. Astrophys J, 1993, 419: 1
23 Spergel D N, Verde L, Peiris H V, et al. First-year *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (*WMAP*) observations: Determination of cosmological parameters. Astrophys J Suppl S, 2003, 148: 175
24 Planck Collaboration, Akrami Y, Ashdown M, et al. Planck 2018 results VII. Isotropy and statistics of the CMB. Astron Astrophys, 2020, 641: A7
25 Scolnic D M, Jones D O, Rest A, et al. The complete light-curve sample of spectroscopically confirmed SNe Ia from Pan-STARRS1 and cosmological constraints from the combined pantheon sample. Astrophys J, 2018, 859: 101
26 Risaliti G, Lusso E. Cosmological constraints from the Hubble diagram of quasars at high redshifts. Nat Astron, 2019, 3: 272–277
27 Zhao D, Xia J Q. Testing cosmic anisotropy with the *Ep-E* iso ('Amati') correlation of GRBs. Mon Not R Astron Soc, 2022, 511: 5661–5671
28 Migkas K, Pacaud F, Schellenberger G, et al. Cosmological implications of the anisotropy of ten galaxy cluster scaling relations. Astron Astrophys, 2021, 649: A151
29 Deng H K, Wei H. Testing the cosmic anisotropy with supernovae data: Hemisphere comparison and dipole fitting. Phys Rev D, 2018, 97: 123515
30 Mariano A, Perivolaropoulos L. Is there correlation between fine structure and dark energy cosmic dipoles? Phys Rev D, 2012, 86: 083517
31 Hu J P, Wang Y Y, Hu J, et al. Testing the cosmological principle with the Pantheon+ sample and the region-fitting method. Astron Astrophys, 2024, 681: A88
32 Gu G, Wang X, Wang Y, et al. Dynamical dark energy in light of the DESI DR2 baryonic acoustic oscillations measurements. Nat Astron, 2025, 2025: 1–11
33 Yadav V. Measuring Hubble constant in an anisotropic extension of ΛCDM model. Phys Dark Universe, 2023, 42: 101365
34 Yadav V, Yadav S K, Rajpal S K. Effects of anisotropy in an anisotropic extension of wCDM model. Phys Dark Universe, 2024, 46: 101626
35 Hu J P, Jia X D, Hu J, et al. Hints of new physics for the Hubble tension: Violation of cosmological principle. ApJL, 2024, 975: L36
36 Hu J P, Jia X D, Gao D H, et al. Constraints on transition redshift utilizing the latest H(z) measurements and comments on the Hubble tension. Mon Not R Astron Soc, 2025, 542: 1063–1075

Scale applicability of the standard cosmological model, rather than a crisis of the model itself?

HU JianPing[1*], JIA XuanDong[2], ZUO ZhaoYu[1*], YANG TaoZhi[1] & WANG FaYin[2,3*]

[1] *MOE Laboratory for Nonequilibrium Synthesis and Modulation of Condensed Matter, School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*

[2] *School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China*

[3] *Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics, the Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210093, China*

**Corresponding authors (HU JianPing, email: hjp1206@163.com; ZUO ZhaoYu, email: zuozyu@xjtu.edu.cn; WANG FaYin, email: fayinwang@nju.edu.cn)*

The Lambda Cold Dark Matter (ΛCDM) model, as the standard cosmological model, has been largely consistent with most astronomical observations. However, in recent years, with the advancement of technology, numerous phenomena that contradict its predictions have been discovered. These phenomena suggest that the evolution of the local universe might not entirely follow the ΛCDM model. For example, the Hubble tension implies that there may be a discrepancy in the estimation of the current expansion rate of the Universe; the anisotropic features of the local Universe suggest that the Universe is not entirely isotropic on a local scale; and the dynamic dark energy implies that its equation of state parameter or energy density might vary over time, thereby leading to significant differences between the expansion rates of the universe at different stages and the predictions of the ΛCDM model. These anomalies suggest the possible existence of new physics beyond the standard cosmological model, and this new physics might have a more pronounced impact on the late-time evolution of the universe. Thus, late-universe observations challenge ΛCDM model, indicating that the model requires refinement on local scales while remaining viable on larger ones. Crucially, while this new physics becomes apparent in late-universe observations, its origins may be rooted in much earlier cosmological epochs.

Hubble constant, cosmological principle, cosmological constant, distance ladder, new physics

PACS: 98.80.-k, 98.80.Es, 98.62.Py

doi: 10.1360/SSPMA-2025-0475