草稿版本 2026年11月25日 使用 LaTeX双栏 样式由
AASTeX631 排版

arXiv:2611.32552v1 [astro-ph.CO] 24 Nov 2026

利用0.1σ 早期暗能量化解哈勃张力：JWST观测中最高红移星系的关键作用

Guo-Hong Du、Tian-Nuo Li、[2]、Xing-Fei Zhang、[1]和 Xin Zhang[1,3,4]

[1]辽宁省宇宙学与天体物理学重点实验室，东北大学理学院，中国沈阳 *110819*[2]基础物理与数学科学学院，杭州高等研究院，中国科学院大学，杭州 *310024*[3]智能工业数据分析与优化教育部重点实验室，东北大学，中国沈阳 *110819*[4]工业智能与系统优化国家卓越工程师创新研究院，东北大学，中国沈阳 *110819*

摘要

我们表明，在早期暗能量（EDE）框架下，哈勃张力可以在 0.1σ 水平上得到解决，其中 JWST观测发现的最高红移星系发挥了关键作用。通过将 JWST 紫外光度函数测量所采用的参考宇宙学纳入考量，并结合宇宙微波背景（CMB）和 DESI 重子声学振荡数据，我们在轴子早期暗能量模型中得到 $H_0 = 72.76 \pm 1.00$ km s^{-1} 百万秒差距$^{-1}$，与 SH0ES 在 0.1σ 水平上高度吻合。我们发现，红移为 $z = 11$ 和 12.5 时增强的星系丰度对这一结果起着关键作用。这些观测支持更强的小尺度物质功率，这可以通过增大原初标量谱指数 n_s 来实现。在宇宙微波背景的约束下，n_s、$f_{\rm EDE}$ 和 H_0 之间的正相关会导致推断得到更高的H_0。通过 α_s 在原初功率谱中引入额外的尺度依赖性，会得到超过 4σ 的正跑动，进一步将 H_0 提高至 73.75 ± 1.04 km s^{-1} 百万秒差距$^{-1}$，其数值甚至超过 SH0ES 的测量结果。这些结果揭示了高红移小尺度结构观测如何通过原初功率谱与早期暗能量参数简并之间的相互作用，影响推断得到的H_0。

关键词：哈勃常数 (758) – 暗能量 (351) – 宇宙学参数 (339)

1. 引言

哈勃常数 H_0 刻画了宇宙当前的膨胀速率，是现代宇宙学中最基本的参数之一。然而，通过不同宇宙学观测获得的 H_0

……显示出显著差异。在标准ΛCDM 模型中，Planck 宇宙微波背景（CMB）观测推得 $H_0 = 67.4 \pm 0.5$ km s^{-1} Mpc^{-1}（Aghanim et al. 2020a），而 SH0ES 合作组利用局域距离阶梯测得 $H_0 = 73.04 \pm 1.04$ km s^{-1} Mpc^{-1}（Riess et al. 2022）。这一差异超过5σ 水平，构成了著名的哈勃张力，也是对 ΛCDM 模型最突出的挑战之一（Zhao et al. 2017；Verde et al. 2019；Guo et al. 2019；Poulin 等，2019；Vagnozzi 2020；Di Valentino et al. 2021a,b；Shah et al. 2021；Vagnozzi 2021；Gao et al. 2021；Perivolaropoulos & Skara 2022；Schöneberg et al. 2022；Abdalla et al. 2022；Di Valentino 2022；Lee et al. 2023；Kamionkowski & Riess 2023；Giarè 2023；Hu & Wang 2023；Vagnozzi 2023；Bernui et al. 2023；Giarè 2024；Jiang & Piao 2025；Pedrotti et al. 2025, 2026；Pedrotti 2026；Du 等，2026e；Cai & Wang 2026；Schöneberg et al. 2026；Du et al. 2026a）。这种张力促使人们广泛探索 ΛCDM 之外的新物理，例如早期暗能量、暗扇区内的相互作用以及其他扩展（Boisseau et al. 2000；Chevallier & Polarski 2001；Li 2004；Huang & Gong 2004；Zhang & Wu 2005；Zhang 2005, 2006；Zhang & Wu 2007；Zhang 2009；Zhang et al. 2014, 2015；Cai et al. 2016；Wang et al. 2016；Feng & Zhang 2016；Guo & Zhang 2016；Guo et al. 2018；Poulin 等，2019；Feng et al. 2020；Di Valentino et al. 2020；Yin et al. 2023；Yao & Meng 2024；Wang et al. 2024；Giarè 等，2024；Di Valentino 等，2025；Kochappan et al. 2025；Li et al. 2025a；Liu et al. 2025；Li et al. 2026c,a；Song et al. 2026；Xu et al. 2026；Zhang et al. 2026）。

早期暗能量（EDE）是一种重要的理论情景，旨在缓解哈勃张力（Poulin 等，2019；Lin 等，2019；Smith 等，2020；Ye 与 Piao，2020a，b；

通讯作者：Tian-Nuo Li litiannuo@ucas.ac.cn通讯作者：Xin Zhang zhangxin@mail.neu.edu.cn

Braglia 等，2020；Agrawal 等，2023；Poulin 等，2023；Bella 等，2026；Yin 等，2026；Wang 等，2026a）。其核心思想是在复合之前引入一种瞬态能量成分，提高早期膨胀速率，从而减小声视界。更小的声视界可以容纳更高的 H_0，同时保持精确测量的宇宙微波背景声学角尺度（Poulin 等，2019；Knox 与 Millea，2020）。在标准轴子早期暗能量模型中，标量场在临界红移附近开始演化，随后迅速稀释，其对宇宙膨胀历史的影响主要集中在复合 эпох附近（Poulin 等，2019）。

近年来，詹姆斯·韦布空间望远镜（詹姆斯·韦布空间望远镜）揭示了高红移处大量高光度星系，其紫外光度函数（紫外光度函数）为早期星系形成和小尺度物质功率谱提供了新的观测信息（Pérez- González 等，2023年；Casey 等，2024； Donnan 等，2024；Harikane 等，2025）。先前研究表明，早期暗能量可以提高早期高光度星系的预测丰度，并改善其与詹姆斯·韦布空间望远镜观测的一致性（Forconi 等，2024； Shen 等，2024；Huang 等，2024； Jiang 等，2025a）。在我们此前的工作中，结合宇宙微波背景观测、DESI DR2重子声学振荡测量[1]（Abdul Karim 等，2025）以及詹姆斯·韦布空间望远镜高红移星系观测，我们在轴子早期暗能量模型中得到了$H_0 = 71。58 \pm 1。05$ kms^{-1} 百万秒差距$^{-1}$，从而将与SH0ES的张力缓解至约0。6σ（Du 等，2026e）。这一结果引出了一个关键的物理问题：为什么高红移星系的小尺度结构信息能够影响推断出的宇宙整体膨胀率，并在早期暗能量框架下导致如此高的 H_0？

在这项工作中，我们从观测和理论两个角度探讨这一问题。我们首先考虑已发表的詹姆斯·韦布空间望远镜紫外光度函数测量所采用的参考宇宙学，并改进似然函数构建（Sabti 等，2022），得到 $H_0 = 72。76 \pm 1。00$ 千米·秒$^{-1}$ 百万秒差距$^{-1}$的轴子早期暗能量模型结果，将与SH0ES 的张力降至 0。1σ 水平。在观测方面，我们发现红移为 $z = 11$和 12。5的星系丰度显著高于上述 ΛCDM预测，而排除这些测量后，H_0 会降低约 1–2 千米·秒$^{-1}$ 百万秒差距$^{-1}$，这表明最高红移星系在推动更高的 H_0方面起着关键作用。在理论方面，这些观测支持增强的小尺度物质功率；在早期暗能量模型中，可通过提高原初标量谱指数 n_s来实现这一点。在宇宙微波背景约束下，n_s、 f_{EDE}和 H_0 之间的正相关性因此会导出更高的 H_0。进一步引入原初标量谱指数的运行 α_s（Parashari & Laha 2023；Calabrese et al. 2025；Kobayashi et al. 2026；Sabogal et al. 2026），以使原初功率谱具有更大的尺度依赖自由度后，我们发现联合观测支持超过 4σ的正跑动，同时对应更高的 $H_0 = 73。75 \pm 1。04$ 千米·秒$^{-1}$ 百万秒差距$^{-1}$。这些结果揭示了詹姆斯·韦布空间望远镜高红移星系丰度、原初功率谱形状与早期暗能量模型参数之间的紧密联系，并阐明了高红移小尺度结构观测如何通过原初功率谱参数与早期暗能量参数之间的简并性，影响推断得到的 H_0 这一物理机制。

[1] 暗能量光谱仪结果暗示了动力学暗能量，并由此推动了对早期暗能量（Chaussidon 等，2025；Pang 等，2025；Bella 等，2026；Yin 等，2026；Wang 与 Piao，2026）、相互作用暗能量（Li 等，2024；Giarè 等，2024；Li 与 Zhang，2025；Li 等，2026a、e；Pan 等，2026；Wang 等，2026c、b；Wu 等，2026）、修正引力（Yang 等，2024；Ye 等，2025；Wolf 等，2025；Du 等，2026b）、宇宙学中微子质量（Du 等，2025、2026d；Jiang 等，2025b；Elbers 等，2025；Giarè 等，2025；Du 等，2026c；Li 等，2026d；Yang 等，2026b、a）及其他方向（Li 等，2025b、2026f；Liu 等，2026；Giarè 等，2026b；Colgáin 与 Sheikh-Jabbari，2026）的广泛研究。近期综述可参见，例如（Di Valentino 等，2025；Cai 等，2026；Li 等，2026b；Anchordoqui 与 Lust，2026；Zhang，2026；Giarè 等，2026a）。

2. 方法与数据

2.1. 轴子早期暗能量与原初谱

我们采用标准轴子早期暗能量模型，其特征由标量场势决定（Poulin 等人，2019；Smith 等人，2020）

$$V(\phi) = m^2 f^2 \left[1 - \cos\left(\frac{\phi}{f}\right)\right]^3, \tag{1}$$

其中，m 和 f 分别表示标量场的质量尺度和衰变常数尺度。该场最初受哈勃摩擦作用而冻结，并在临界红移 z_c附近开始演化。我们用红移 z_c 处的早期暗能量分数能量密度 f_{EDE} 以及初始场位移$\theta_i = \phi_i/f$来表征该模型。随后，该场以平均状态方程 $\bar{w}_\phi = 1/2$振荡，因此在振荡阶段，其能量密度按 $\rho_\phi \propto a^{-9/2}$ 稀释。因此，早期暗能量对宇宙膨胀历史的贡献集中在复合 эпох附近。

对于原初曲率功率谱，我们同时考虑标准幂律形式，以及允许标量谱指数跑动的扩展形式，表示为

$$\ln \mathcal{P}_\mathcal{R}(k) = \ln A_s + (n_s - 1)\ln\left(\frac{k}{k_*}\right) + \frac{\alpha_s}{2}\ln^2\left(\frac{k}{k_*}\right), \tag{2}$$

其中，A_s 和 n_s 分别表示枢轴尺度 $k_* = 0.05$百万秒差距$^{-1}$ 处的原初振幅和标量谱指数，而 $\alpha_s \equiv \mathrm{d}n_s/\mathrm{d}\ln k$ 表示标量谱指数的跑动。

2.2. 高红移光度函数

表 1。 使用宇宙微波背景、DESI 和詹姆斯·韦布空间望远镜数据，对基准情形、数据筛选和跑动分析得到的边缘化宇宙学约束。第二个区块中的红移表示从该组合中移除的 Donnan 分箱（Donnan 等，2024）。对于每种数据组合，$Q_{\rm DMAP}$ 张力是加入 SH0ES 先验后最佳拟合 χ^2 增加量的平方根。

模型 / 数据	H_0 [千米 秒$^{-1}$ 百万秒差距$^{-1}$]	$10^9 A_{\rm s}$	$n_{\rm s}$	$f_{\rm EDE}$	$\alpha_{\rm s}$	$r_{\rm d}$ [百万秒差距]	$Q_{\rm DMAP}$
基准情形							
ΛCDM	68.20 ± 0.27	2.181 ± 0.029	0.9764 ± 0.0029	–	–	147.56 ± 0.19	4.5σ
EDE	72.76 ± 1.00	$2.184^{+0.024}_{-0.027}$	$0.9983^{+0.0059}_{-0.0074}$	0.143 ± 0.026	–	139.3 ± 1.6	0.1σ
数据筛选							
早期暗能量（无 $z = 12.5$）	71.38 ± 1.13	2.171 ± 0.026	$0.9902^{+0.0057}_{-0.0068}$	$0.104^{+0.035}_{-0.031}$	–	141.7 ± 2.0	0.4σ
早期暗能量（无 $z = 11,\ 12.5$）	$70.50^{+0.98}_{-1.15}$	$2.163^{+0.023}_{-0.027}$	$0.9852^{+0.0054}_{-0.0061}$	$0.075^{+0.031}_{-0.036}$	–	$143.2^{+2.0}_{-1.7}$	1.4σ
跑动							
ΛCDM+$\alpha_{\rm s}$	68.07 ± 0.27	$2.152^{+0.027}_{-0.032}$	0.9762 ± 0.0030	–	0.0135 ± 0.0049	147.66 ± 0.19	4.7σ
早期暗能量+$\alpha_{\rm s}$ (无詹姆斯·韦布空间望远镜)	$69.80^{+0.85}_{-1.25}$	$2.142^{+0.026}_{-0.030}$	$0.9823^{+0.0054}_{-0.0078}$	< 0.120（95%）	$0.0052^{+0.0056}_{-0.0069}$	$144.4^{+2.3}_{-1.6}$	1.8σ
早期暗能量+$\alpha_{\rm s}$	73.75 ± 1.04	2.129 ± 0.027	1.0142 ± 0.0070	0.185 ± 0.028	0.0317 ± 0.0074	137.6 ± 1.7	0.9σ

我们使用红移范围内的39个詹姆斯·韦布空间望远镜紫外光度函数探测$7 \le z \le 12.5$，来自 Pérez-González 等（2023年）；Casey 等（2024）；Donnan 等（2024）；Harikane 等（2025）。其中，28次测量属于Donnan样本（Donnan 等，2024），涵盖了四个红移区间：$z = 9$、10、11和12.5。为研究不同红移区间对宇宙学参数推断的影响，我们通过排除Donnan次测量（红移为 $z = 12.5$）或排除红移为 $z = 11$ 和12.5的14次测量，构建了另外两种数据组合。

理论紫外光度函数可表示为

$$\Phi(M_{\rm UV}, z) = \frac{{\rm d}n}{{\rm d}M_{\rm UV}} = \frac{{\rm d}n}{{\rm d}M_{\rm h}} \frac{{\rm d}M_{\rm h}}{{\rm d}M_*} \left| \frac{{\rm d}M_*}{{\rm d}M_{\rm UV}} \right|, \tag{3}$$

其中，$M_{\rm h}$ 和 M_* 分别表示晕质量和恒星质量。第一项 ${\rm d}n/{\rm d}M_{\rm h}$是使用 Sheth-Mo-Tormen 处方计算得到的晕质量函数（Shethet al. 2001），其取决于物质功率谱。第二项由双幂律恒星质量-晕质量关系确定（Stefanon etal. 2021；Larson et al. 2023；Scholtz, Jan et al. 2024），而第三项则使用 Stefanon et al. (2021）给出的依赖红移的恒星质量-紫外星等关系计算，并纳入基于紫外连续谱斜率的尘埃消光修正（Meurer et al.1999；Cullenet al.2023）。

在本研究中，我们进一步考虑了不同观测样本所采用的参考宇宙学。由于推断得到的绝对紫外星等 $M_{\rm UV}$ 和共动数密度 Φ 取决于构建紫外光度函数时所假设的宇宙学模型，因此我们采用 Sabti 等人 (2022) 所描述的依赖于宇宙学的转换。绝对紫外星等根据以下公式进行转换

$$M_{\rm UV} = M_{\rm UV}^{\rm ref} - 5 \log_{10} \left[\frac{D_{\rm L}(z)}{D_{\rm L}^{\rm ref}(z)} \right], \tag{4}$$

其中，$D_{\rm L}$ 是所检验宇宙学模型中的光度距离，上标 ref 表示观测样本所采用的参考宇宙学。相应地，理论紫外光度函数通过共动体积比进行转换，

$$\Phi_{\rm th}^{\rm ref}(M_{\rm UV}^{\rm ref}, z) = \frac{V(z_-, z_+)}{V^{\rm ref}(z_-, z_+)} \Phi_{\rm th}(M_{\rm UV}, z), \tag{5}$$

其中，$V(z_-,\ z_+)$ 表示红移区间 $[z_-, z_+]$ 内的共动体积。通过这些转换，我们将不同宇宙学模型的理论预言一致地转换为每个观测样本所采用的参考宇宙学，从而能够与詹姆斯·韦布空间望远镜紫外光度函数数据进行一致比较。

2.3. 数据与贝叶斯推断

对于宇宙微波背景观测，我们将普朗克2018低l 温度和偏振数据与来自 Planck、ACT DR6 和 SPT-3G D1 的高l 功率谱结合起来（Aghanim 等，2020b；Louis 等，2025；Camphuis 等，2026）。为避免实验之间的重复计数，我们对普朗克温度-温度谱采用与 ACT 兼容的l 截断$l_{\rm max} = 1000$，并对 TE 和 EE 谱采用$l_{\rm max} = 600$ 截断。我们还纳入了由普朗克PR4、ACT DR6 和 SPT-3G 重建得到的联合宇宙微波背景引力透镜功率谱（Qu 等，2026）。对于重子声学振荡观测，我们采用 DESI DR2 的测量结果（Abdul Karim 等，2025）。

我们使用修改版的CAMB（Lewis 等，2000）计算背景和线性扰动演化。我们

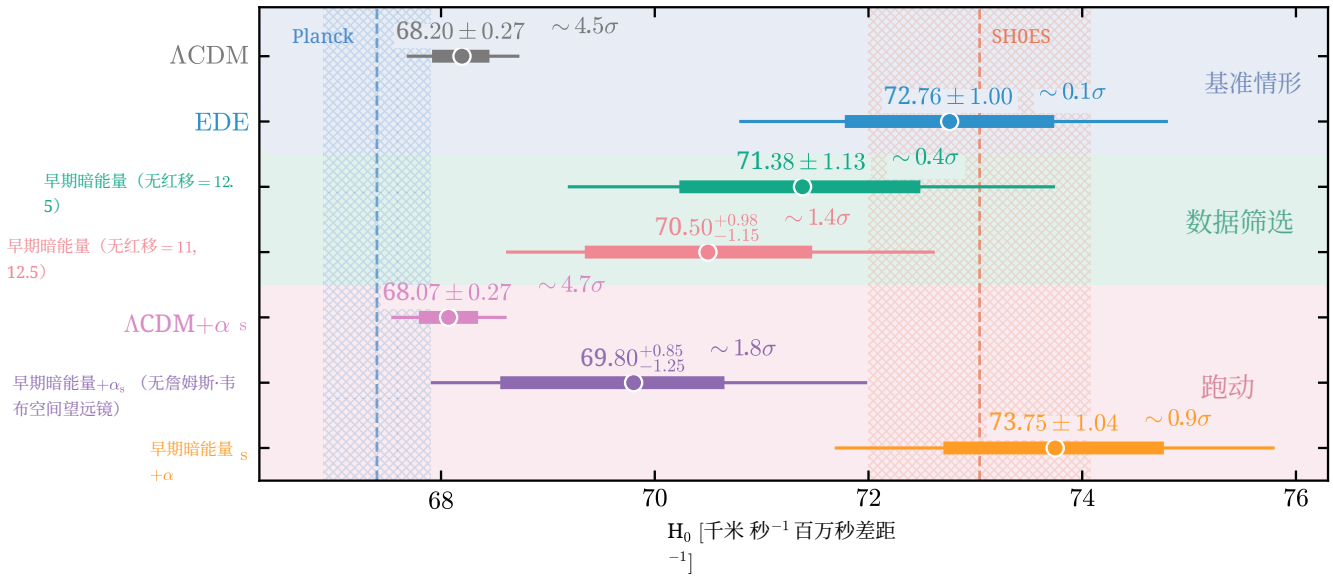


图 1. 基准情形、高红移 Donnan UVLF 测量数据筛选和原初谱跑动分析中边缘化 H_0 约束的概览。粗细误差条分别表示 68% 和 95% 可信区间。 $N\sigma$ 数值给出了与 SH0ES 的$Q_{\rm DMAP}$ 张力。

使用Cobaya（Torrado& Lewis2021）进行马尔可夫链蒙特卡罗抽样，使用GetDist （Lewis 2025）分析所得链，并使用 Gelman–Rubin 判据评估收敛性 $R-1<0。02$（Gelman & Rubin1992）。

3. 结果与讨论

图 1 和表 1总结了我们的主要结果。我们使用 $Q_{\rm DMAP}$ (Raveri& Hu2019；Schöneberg 等 2022）量化与 SH0ES 的剩余张力，即加入 SH0ES 先验后最小 χ^2 增加量的平方根。采用修订后的 JWST UVLF 分析，基准情形下的宇宙微波背景+DESI+詹姆斯·韦布空间望远镜数据给出 $H_0 = 72。76 \pm 1。00\ \mathrm{kms}^{-1}$ 百万秒差距$^{-1}$，在轴子早期暗能量模型中与 SH0ES 在 $0。1\sigma$ 水平上高度一致。下文中，我们将探究这一更高 H_0的物理起源。

3.1. 最高红移 *JWST* 分箱的作用

为了确定哪些 JWST观测在推断 H_0中发挥关键作用，我们首先将不同红移处观测到的紫外光度函数与 ΛCDM 模型的理论预言进行比较。如图2所示， $z = 7$、9 和 10 处的观测结果总体上与 ΛCDM 预言一致，而最高红移处的星系丰度，即 $z = 11$和 12.5，系统性地高于理论预言。这些结果表明，最高红移星系观测偏好显著更强的物质聚集。为检验这些高红移测量的影响，我们进一步开展数据删减检验，排除相应的Donnan 测量结果。

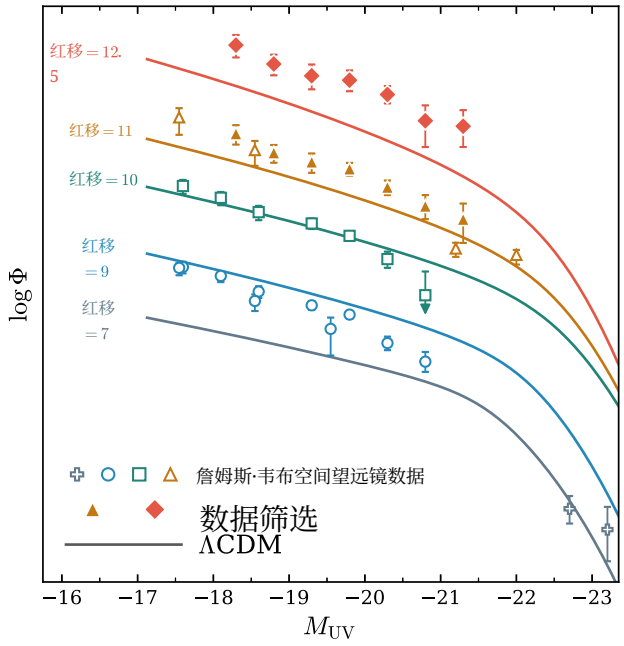


图 2。 不同红移处的 JWST 紫外光度函数观测结果，与基于宇宙微波背景+DESI+JWST 的 ΛCDM 模型理论预言的比较。实心符号突出显示了在数据删减分析中考虑的 Donnan 测量结果，即 $z = 11$ 和 12。5；空心符号表示其余的 JWST 测量结果。请注意，为了视觉清晰起见，图中应用了依赖红移的偏移，同时保留了观测结果与理论预言的相对位置。

如图1 和表1所示，仅排除 $z = 12.5$ 的测量值会使 H_0 从72.76降至

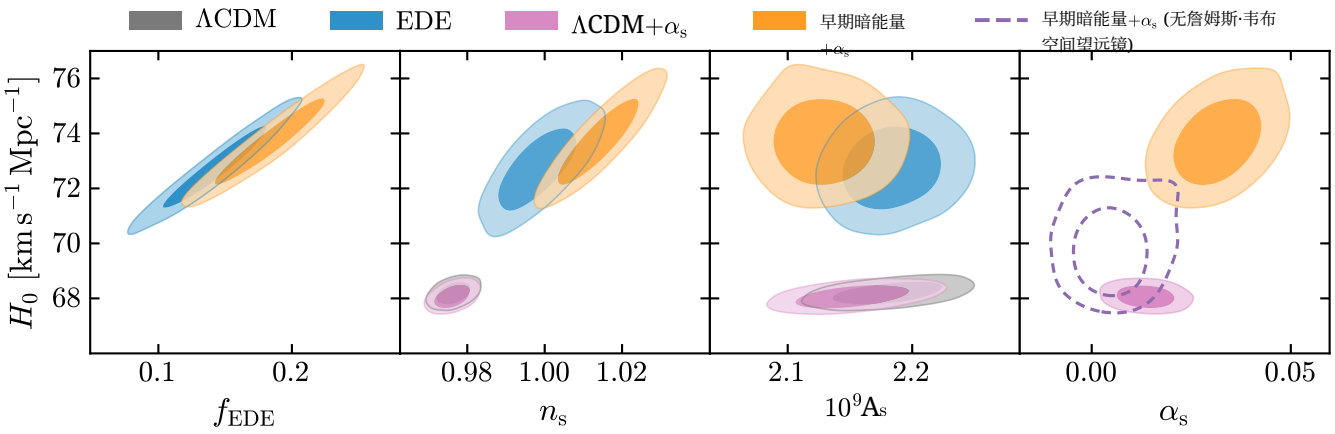


图3。二维　　来自宇宙微波背景、DESI和JWST数据的 H_0 与 f_{EDE}、 n_s、 A_s和 α_s 的一维边缘化等高线。

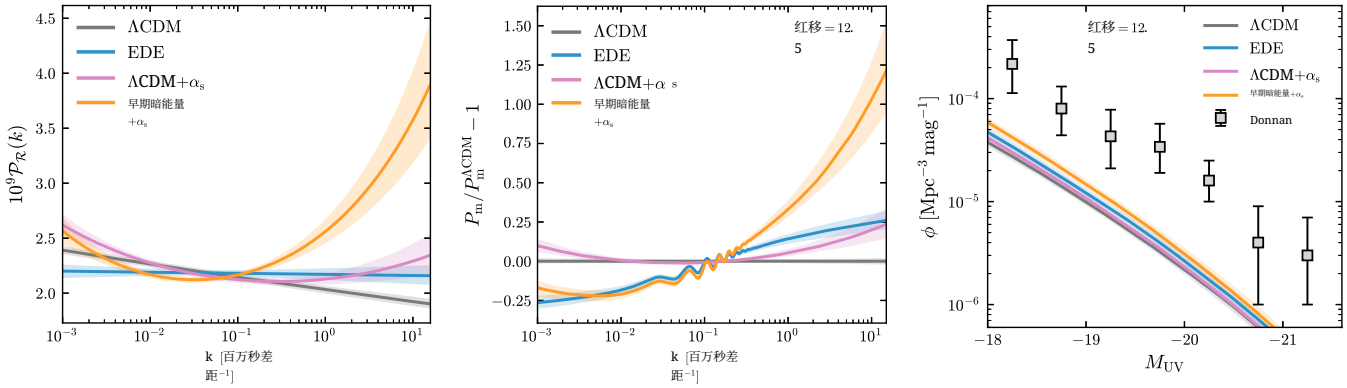


图4。 基准情形和跑动模型的原初功率谱、物质功率谱及紫外光度函数预测。 左图： 带有后验中位数和68%可信区间的原初功率谱。 中图： 相对于 ΛCDM的物质功率谱分数差异及68%可信区间。 右图： 在 $z = 12.5$ 处的紫外光度函数预测及68%可信区间，并与Donnan等人（2024）的JWST观测结果进行比较。

71.38 km s^{-1} Mpc^{-1}；而同时移除 $z = 11$ 和12.5两个区间后，该值进一步降至70.50 km s^{-1} Mpc^{-1}。相应地，与SH0ES的哈勃张力分别从0.1σ 增至0.4σ 和1.4σ。与此同时，f_{EDE} 从0.143 ± 0.026降至0.075$^{+0.031}_{-0}$ .036，而 n_s 则从约0.998降至0.985。这些结果表明，最高红移JWST观测在推动更大的 H_0方面发挥着关键作用。

3.2. 小尺度物质功率与早期暗能量参数简并

上述结果表明，高红移星系丰度的增加与EDE模型中推断出的更高 H_0 密切相关。高红移的高光度星系通常由相对稀有且质量较大的暗物质晕承载，其丰度对物质密度涨落的振幅高度敏感。更高的星系丰度通常可由更强的小尺度物质功率产生。对于幂律原初谱，提高标量谱指数 n_s 会增强枢轴尺度以上波数处的原初功率，从而加强相应尺度上的物质聚集。因此，詹姆斯·韦布空间望远镜在 $z = 11$和12.5处观测到的星系丰度增加，在联合分析中支持更大的 n_s 。

另一方面， n_s 受到宇宙微波背景观测的严格约束。在早期暗能量模型中，较高的 n_s 通常与较大的 H_0相关，这种正相关可以从宇宙微波背景温度各向异性功率谱中理解。对于幂律原初谱，Sachs-Wolfe贡献近似满足（Ye & Piao 2020a）

$$(C_\ell)_{SW} \propto A_s (D_A^* k_*)^{1-n_s} f(n_s), \tag{6}$$

其中， D_A^* 是到最后散射面的共动距离，而 $f(n_s)$是 n_s的单调递增函数。在EDE模型中，较高的 H_0 对应较小的 D_A^*，这会减小 $n_s < 1$中的因子$(D_A^* k_*)^{1-n_s}$ 。因此，为了与观测到的宇宙微波背景功率谱保持一致，更大的n_s 会更受偏好。

如图3所示，我们的分析清楚地显示了这种正相关性，同时还显示出 H_0 与 $f_{\rm EDE}$之间的强正相关。因此，当詹姆斯·韦布空间望远镜的高红移星系观测要求增强小尺度物质功率时，联合拟合可以增大 $n_{\rm s}$ ，以增强这些尺度上的原初功率，同时沿着宇宙微波背景允许的参数简并方向移动至更大的$f_{\rm EDE}$ 和 H_0。这一机制解释了为什么小尺度星系观测能够显著影响对《宇宙》整体膨胀率的推断。

3.3. 标量谱指数的跑动的影响

为进一步检验小尺度原初功率谱的增强是否是驱动 H_0 增长的重要机制，我们引入标量谱指数的跑动 $\alpha_{\rm s}$，从而允许原初功率谱具有更大的尺度依赖自由度。如表 1 所示，早期暗能量+$\alpha_{\rm s}$ 模型结合宇宙微波背景+、DESI+和詹姆斯·韦布空间望远镜数据给出 $H_0 = 73.75 \pm 1.04$ km s^{-1} 百万秒差距$^{-1}$。与此同时，联合数据偏好显著为正的跑动值 $\alpha_{\rm s} = 0.0317 \pm 0.0074$，这对应于约 4.3$\sigma\sigma$ 的偏离。标量谱指数进一步增大至 $n_{\rm s} = 1.0142 \pm 0.0070$，比尺度不变值高出约 2.0$\sigma\sigma$，而 $f_{\rm EDE}$ 增大至 0.185 ± 0.028。相比之下，仅使用宇宙微波背景+和 DESI 数据时，得到的跑动与零一致，且为 $H_0 \simeq 69.80$ km s^{-1} 百万秒差距$^{-1}$。

图4 进一步说明了原初谱跑动对小尺度功率和星系丰度的影响。如左面板所示，正的 $\alpha_{\rm s}$ 在早期暗能量+$\alpha_{\rm s}$ 模型中显著增强了小尺度上的原初功率，且增强幅度随更大的 k 而迅速增大。在k = 10百万秒差距$^{-1}$处，原初功率相对于基准EDE模型增加约70%。中间面板进一步表明，在 k = 10百万秒差距$^{-1}$处，早期暗能量+$\alpha_{\rm s}$ 模型中的物质功率相对于 ΛCDM增强了100%以上，大幅超过基准EDE模型中的增强幅度。相应地，右面板表明，增强的小尺度功率提高了 z = 12.5处的预言星系丰度，使其更接近JWST观测。这些结果表明，仅增大 $n_{\rm s}$ 并不足以在基准早期暗能量框架内完全解释JWST所偏好的小尺度功率。引入额外的尺度依赖自由度，可使联合数据倾向于更大的 $n_{\rm s}$ 和正的 $\alpha_{\rm s}$，从而进一步增强小尺度功率，并推动 H_0 取更高值。

4. 结论

在本工作中，我们从观测和理论两个角度研究了詹姆斯·韦布空间望远镜高红移星系观测在轴子早期暗能量框架下偏好更高H_0 的物理机制。

考虑詹姆斯·韦布空间望远镜紫外光度函数测量所采用的参考宇宙学后，我们得到 H_0 = 72。76 ± 在轴子早期暗能量模型中为 1。00 km s^{-1} Mpc^{-1}，使哈勃张力与 SH0ES 的差异降至 0。1σ 水平。观测到的星系丰度在 z = 11 和 12。5 处显著高于 ΛCDM 的预测；而排除这些测量后， H_0 会降低约 2。26 km s^{-1} Mpc^{-1}，与 SH0ES 的张力则增至最高 1。4σ。这些结果表明，这些观测对推动更高的 H_0起着关键作用。观测结果偏好更强的小尺度物质功率，这使联合拟合趋向于更大的原初标量谱指数 $n_{\rm s}$。在宇宙微波背景约束下， $n_{\rm s}$、 $f_{\rm EDE}$和 H_0 之间的正相关关系意味着，为满足这一要求，推断出的 H_0会更高。

通过进一步引入原初标量谱指数的运行 $\alpha_{\rm s}$，以允许原初功率谱具有更大的尺度依赖自由度，我们发现，联合观测以超过 4σ的显著性偏好正运行，同时 $n_{\rm s}$ 和 $f_{\rm EDE}$进一步增加，使 H_0 升高至73.75 ± 1.04 km s^{-1} Mpc^{-1}。这一结果进一步支持了增强的小尺度原初功率在早期暗能量框架下推动更高 H_0 方面所发挥的重要作用。

总体而言，我们的研究揭示了詹姆斯·韦布空间望远镜高红移星系丰度、原初功率谱形状与哈勃常数之间的密切联系，阐明了高红移小尺度结构观测影响所推断 H_0的物理机制。这些结果为理解詹姆斯·韦布空间望远镜观测与哈勃张力之间的联系提供了系统性的物理认识。

致谢

我们感谢 Lu Yin、Sheng-Han Zhou、Yun-He Li 和 Yi-Min Zhang 富有帮助的讨论。本工作得到国家自然科学基金委员会（项目批准号：12533001、12575049 和 12473001）、中国国家平方公里阵列计划（项目批准号：2022SKA0110200 和 2022SKA0110203）、中国载人航天工程（项目批准号：CMS-CSST-2025-A02）以及 111计划（项目批准号：B16009）的资助。本工作部分基于 [部分] 利用 NASA/ESA/CSA 詹姆斯·韦布空间望远镜（JWST）和哈勃空间望远镜（HST）开展的观测。数据取自空间望远镜科学研究所运营的米库尔斯基空间望远镜档案馆（MAST）。该研究所由天文学研究大学协会（Association of Universities for Research in Astronomy, Inc.）运营，并分别依据 NASA 为 JWST 和 HST 签订的合同 NAS 5-03127 和 NAS 5-26555 开展工作。这些观测对应于项目 3293、1837、1180、1210 和 2079，并通过以下地址获取：10.17909/je9x-d314 和 10.17909/gbkc-2b17。我们还感谢通过 ESO科学档案设施获取的数据：10.18727/archive/52。OpenAI 的 ChatGPT 和 Codex（GPT- 6 Astra）被用于改进论文语言、交叉核对代数计算与推导、协助修改代码以及进行数值检查。作者

对本工作的科学内容和结论承担全部责任。

参考文献

Abdalla, E., 等. 2022, 高能天体物理学杂志, 34, 49, 数字对象标识符：10.1016/j.jheap.2022.04.002Abdul Karim,M., 等. 2025, 《物理评论D》, 112, 083515, 数字对象标识符：10.1103/tr6y-kpc6Aghanim,N., 等. 2020a, 《天文学与天体物理学》, 641, A6, 数字对象标识符：10.1051/0004-6361/201833910—. 2020b, 《天文学与天体物理学》, 641,A5, 数字对象标识符：10.1051/0004-6361/201936386Agrawal, P., Cyr-Racine, F.-Y., Pinner, D., & Randall, L. 2023年, 《暗宇宙物理学》, 42, 101347, 数字对象标识符：10.1016/j.dark.2023.101347Anchordoqui, L. A., & Lust, D. 2026年, 《宇宙》, 12, 216, 数字对象标识符：10.3390/universe12070216Bella, M., Poulin, V., Vagnozzi, S., & Knox, L. 2026年。https://arxiv.org/abs/2604.13535Bernui, A.,Di Valentino, E., Giarè, W., Kumar, S., & Nunes, R. C. 2023年, 《物理评论D》, 107, 103531, 数字对象标识符：10.1103/PhysRevD.107.103531Boisseau, B., Esposito-Farese, G., Polarski, D., & Starobinsky, A. A. 2000, Phys.Rev. Lett., 85, 2236, 数字对象标识符：10.1103/PhysRevLett.85.2236Braglia, M.,Emond, W. T., Finelli, F., Gumrukcuoglu, A. E., & Koyama, K. 2020, 《物理评论D》, 102, 083513, 数字对象标识符：10.1103/PhysRevD.102.083513Cai, R.-G.,& Wang, S.-J. 2026年, 《研究天文学与天体物理学》, 26, 084011, 数字对象标识符：10.1088/1674-4527/ae842fCai, Y., Ren, X.,Qiu, T., Li, M., & Zhang, X. 2026年, 《国家科学评论》, 13, nwag115, 数字对象标识符：10.1093/nsr/nwag115Cai, Y.-F., Capozziello, S., De Laurentis, M., & Saridakis, E. N. 2016, 《物理学进展报告》, 79, 106901, 数字对象标识符：10.1088/0034-4885/79/10/106901Calabrese,E., 等. 2025, 《宇宙学与天体粒子物理学杂志》, 11, 063, 数字对象标识符：10.1088/1475-7516/2025/11/063Camphuis, E., 等. 2026年, 《物理评论D》, 113, 083504, 数字对象标识符：10.1103/7wt3-9v2yCasey, C. M., 等. 2024, 《天体物理学杂志》, 965, 98, 数字对象标识符：10.3847/1538-4357/ad2075Chaussidon, E., 等. 2025, 《物理评论D》, 112, 063548, 数字对象标识符：10.1103/xtql-wh3hChevallier,M., & Polarski, D. 2001,《国际现代物理学杂志D辑》, 10, 213, 数字对象标识符：10.1142/S0218271801000822Colgáin, E. Ó., & Sheikh-Jabbari, M. M. 2026年。https://arxiv.org/abs/2608.19883Cullen, F., 等. 2023, 《皇家天文学会月刊》, 520,14, 数字对象标识符：10.1093/mnras/stad073

Di Valentino, E. 2022, 《宇宙》, 8, 399, 数字对象标识符：10.3390/universe8080399 Di Valentino, E., Melchiorri, A., Mena, O., & Vagnozzi, S. 2020, 《物理评论D》, 101, 063502, 数字对象标识符：10.1103/PhysRevD.101.063502 Di Valentino, E., 等 2021a, 《粒子与核物理》, 131, 102605, 数字对象标识符：10.1016/j.astropartphys.2021.102605 Di Valentino, E., Mena, O., Pan, S., 等 2021b, 《经典与量子引力》, 38, 153001, 数字对象标识符：10.1088/1361-6382/ac086d Di Valentino, E., 等 2025, 《暗宇宙物理学》, 49, 101965, 数字对象标识符：10.1016/j.dark.2025.101965 Donnan, C. T., 等 2024, 《皇家天文学会月刊》, 533, 3222, 数字对象标识符：10.1093/mnras/stae2037 Du, G.-H., Li, T.-N., Ling, J.-L., 等 2026a, 《物理评论D》, 114, L041304, 数字对象标识符：10.1103/rl22-1dyx Du, G.-H., Li, T.-N., Liu, T., Zhang, J.-F., & Zhang, X. 2026b, 《中国科学：物理学、力学、天文学》, 69, 280411, 数字对象标识符：10.1007/s11433-026-2987-7 Du, G.-H., Li, T.-N., Wu, P.-J., 等 2026c, 《欧洲物理学杂志C》, 86, 110, 数字对象标识符：10.1140/epjc/s10052-025-15237-z Du, G.-H., Li, T.-N., Wu, P.-J., Zhang, J.-F., & Zhang, X. 2026d, 《中国科学：物理学、力学、天文学》, 69, 100413, 数字对象标识符：10.1007/s11433-026-3051-4 Du, G.-H., Li, T.-N., Yin, L., 等 2026e, 《天体物理学杂志通讯》, 1008, L62, 数字对象标识符：10.3847/2041-8213/ae9f47 Du, G.-H., Wu, P.-J., Li, T.-N., & Zhang, X. 2025, 《欧洲物理学杂志C》, 85, 392, 数字对象标识符：10.1140/epjc/s10052-025-14094-0 Elbers, W., 等 2025, 《物理评论D》, 112, 083513, 数字对象标识符：10.1103/w9pk-xsk7 Feng, L., He, D.-Z., Li, H.-L., Zhang, J.-F., & Zhang, X. 2020, 《中国科学：物理学、力学、天文学》, 63, 290404, 数字对象标识符：10.1007/s11433-019-1511-8 Feng, L., & Zhang, X. 2016, 《宇宙学与天体粒子物理学杂志》, 08, 072, 数字对象标识符：10.1088/1475-7516/2016/08/072 Forconi, M., Giarè, W., Mena, O., 等 2024, 《宇宙学与天体粒子物理学杂志》, 05, 097, 数字对象标识符：10.1088/1475-7516/2024/05/097 Gao, L.-Y., Zhao, Z.-W., Xue, S.-S., & Zhang, X. 2021, 《宇宙学与天体粒子物理学杂志》, 07, 005, 数字对象标识符：10.1088/1475-7516/2021/07/005 Gelman, A., & Rubin, D. B. 1992, 《统计学》, 7, 457, 数字对象标识符：10.1214/ss/1177011136 Giarè, W. 2023, 数字对象标识符：10.1007/978-981-99-0177-7_36—. 2024, 《物理评论D》, 109, 123545, 数字对象标识符：10.1103/PhysRevD.109.123545 Giarè, W., Lee,D. H., & Di Valentino, E. 2026a, 《新天文学评论》, 103, 101759, 数字对象标识符：10.1016/j.newar.2026.101759

Giarè, W., Lodha, K., Caldwell, R. R., Di Valentino, E., & Linder, E. V. 2026b。https://arxiv.org/abs/2610.41077 Giarè, W., Mena, O., Specogna, E., & Di Valentino, E. 2025，《物理评论D》，112，103520，数字对象标识符：10.1103/njfc-pd1w Giarè, W., Sabogal, M. A., Nunes, R. C., & Di Valentino, E. 2024，《物理评论快报》，133，251003，数字对象标识符：10.1103/PhysRevLett.133.251003 Guo, R.-Y., Zhang, J.-F., & Zhang, X. 2018，《中国物理学C》，42，095103，数字对象标识符：10.1088/1674-1137/42/9/095103 —。2019，《宇宙学与天体粒子物理学杂志》，02，054，数字对象标识符：10.1088/1475-7516/2019/02/054 Guo, R.-Y., & Zhang, X. 2016，《欧洲物理学杂志C》，76，163，数字对象标识符：10.1140/epjc/s10052-016-4016-x Harikane, Y., 等 2025，《天体物理学杂志》，980，138，数字对象标识符：10.3847/1538-4357/ad9b2c Hu, J.-P., & Wang, F.-Y. 2023，《宇宙》，9，94，数字对象标识符：10.3390/universe9020094 Huang, H.-L., Jiang, J.-Q., & Piao, Y.-S. 2024，《物理评论D》，110，103540，数字对象标识符：10.1103/PhysRevD.110.103540 Huang, Q.-G., & Gong, Y.-G. 2004，《宇宙学与天体粒子物理学杂志》，08，006，数字对象标识符：10.1088/1475-7516/2004/08/006 Jiang, J.-Q., Liu, W., Zhan, H., & Hu, B. 2025a，《物理评论D》，111，023519，数字对象标识符：10.1103/PhysRevD.111.023519 Jiang, J.-Q., & Piao, Y.-S. 2025，《物理评论D》，111，103505，数字对象标识符：10.1103/PhysRevD.111.103505 Jiang, J.-Q., Giarè, W., Gariazzo, S., 等 2025b，《宇宙学与天体粒子物理学杂志》，01，153，数字对象标识符：10.1088/1475-7516/2025/01/153 Kamionkowski, M., & Riess, A. G. 2023，《核与粒子科学年度评论》，73，153，数字对象标识符：10.1146/annurev-nucl-111422-024107 Knox, L., & Millea, M. 2020，《物理评论D》，101，043533，数字对象标识符：10.1103/PhysRevD.101.043533 Kobayashi, M. U., Chiaki, G., Kimura, K., 等 2026，《物理评论D》，114，063537，数字对象标识符：10.1103/f18k-xmxm Kochappan, J., Yin, L., Lee, B.-H., & Ghosh, T. 2025，《物理评论D》，112，063562，数字对象标识符：10.1103/x1qj-t4jz Larson, R. L., 等 2023，《天体物理学杂志通讯》，953，L29，数字对象标识符：10.3847/2041-8213/ace619 Lee, N., Ali-Haïmoud,Y., Schöneberg, N., &Poulin, V. 2023，《物理评论快报》，130，161003，数字对象标识符：10.1103/PhysRevLett.130.161003 Lewis, A. 2025，《宇宙学与天体粒子物理学杂志》，08，025，数字对象标识符：10.1088/1475-7516/2025/08/025 Lewis, A., Challinor, A., & Lasenby, A. 2000，《天体物理学杂志》，538，473，数字对象标识符：10.1086/309179 Li, M. 2004，《物理学快报B》，603，1，数字对象标识符：10.1016/j.physletb.2004.10.014 Li, T.-N., Du, G.-H., Li, Y.-H., 等 2026a，《中国科学：物理学、力学、天文学》，69，210413，数字对象标识符：10.1007/s11433-025-2771-5 Li, T.-N., Du, G.-H., Wang, H., 等 2026b，《研究天文学与天体物理学》，26，084002，数字对象标识符：10.1088/1674-4527/ae8429 Li, T.-N., Du, G.-H., Zhou, S.-H., 等 2026c，《暗宇宙物理学》，52，102254，数字对象标识符：10.1016/j.dark.2026.102254 Li, T.-N., Giarè,W., Du, G.-H., 等. 2026d. https://arxiv.org/abs/2611.14584 —.2026e. https://arxiv.org/abs/2601.07361 Li, T.-N., Li, Y.-H., Du, G.-H., 等.2025a，《欧洲物理学杂志C》, 85, 608, 数字对象标识符: 10.1140/epjc/s10052-025-14279-7 Li, T.-N., Wu, P.-J., Du, G.-H., 等. 2024，《天体物理学杂志》,976,1, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4357/ad87f0 —.2025b,《暗宇宙物理学》, 50, 102068, 数字对象标识符: 10.1016/j.dark.2025.102068 Li, X.,Liu, T., Li, T.-N., 等. 2026f，《天体物理学杂志通讯》, 1001, L21, 数字对象标识符: 10.3847/2041-8213/ae5a36 Li, Y.-H., & Zhang, X. 2025，《宇宙学与天体粒子物理学杂志》, 12, 018, 数字对象标识符: 10.1088/1475-7516/2025/12/018 Lin, M.-X., Benevento, G., Hu, W., & Raveri, M. 2019，《物理评论D》, 100, 063542, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevD.100.063542 Liu, T., Cao, S., & Wang, J. 2025，《物理评论D》, 112, 123539, 数字对象标识符: 10.1103/3c2h-g7cz Liu, T., Li, X., Biesiada, M., 等. 2026. https://arxiv.org/abs/2611.23906 Louis, T., 等. 2025，《宇宙学与天体粒子物理学杂志》, 11, 062, 数字对象标识符: 10.1088/1475-7516/2025/11/062 Meurer, G. R., Heckman, T. M., & Calzetti, D. 1999年，《天体物理学杂志》, 521, 64, 数字对象标识符: 10.1086/307523 Pan, S., Paul, S., Saridakis, E. N., & Yang, W. 2026，《物理评论 D 》 , 113, 023515, 数字对象标识符: 10.1103/5y21-k39n Pang, Y.-H., Zhang, X., & Huang, Q.-G. 2025，《中国科学：物理学、力学、天文学》,68, 280410, 数字对象标识符: 10.1007/s11433-025-2713-8 Parashari, P.,& Laha, R. 2023年，《皇家天文学会月刊》, 526, L63, 数字对象标识符: 10.1093/mnrasl/slad107 Pedrotti, D.2026年. https://arxiv.org/abs/2604.25813 Pedrotti, D.,Escamilla, L. A., Marra, V., Perivolaropoulos,L., & Vagnozzi, S.2026，《物理评论D》, 113, 043507, 数字对象标识符: 10.1103/pn9j-8whx Pedrotti, D.,Jiang, J.-Q., Escamilla, L. A., da Costa, S. S., & Vagnozzi, S.2025，《物理评论D》, 111, 023506, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevD.111.023506 Pérez-González, P. G., 等. 2023年，《天体物理学杂志通讯》, 951, L1, 数字对象标识符: 10.3847/2041-8213/acd9d0 Perivolaropoulos, L., & Skara, F. 2022, New Astron. Rev., 95, 101659, 数字对象标识符: 10.1016/j.newar.2022.101659 Poulin, V., Smith, T. L., & Karwal, T. 2023年，《暗宇宙物理学》, 42, 101348, 数字对象标识符: 10.1016/j.dark.2023.101348 Poulin, V., Smith, T. L., Karwal, T., & Kamionkowski, M. 2019，《物理评论快报》, 122, 221301, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevLett.122.221301 Qu, F. J., 等. 2026年，《物理评论快报》, 136, 021001, 数字对象标识符: 10.1103/k5yr-3h6d Raveri, M., & Hu, W. 2019，《物理评论D》, 99, 043506, 数字对象标识符 : 10.1103/PhysRevD.99.043506

Riess, A. G., 等. 2022, 《天体物理学杂志通讯》, 934, L7, 数字对象标识符: 10.3847/2041-8213/ac5c5b Sabogal, M. A., Iovino, A. J., & Vagnozzi, S. 2026, 《物理评论D》, 114, 063521, 数字对象标识符: 10.1103/3j59-xdf6 Sabti, N., Muñoz, J. B., & Blas, D. 2022, 《物理评论D》, 105, 043518, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevD.105.043518 Scholtz, Jan, Witten, Callum, Laporte, Nicolas, 等. 2024, 《天文学与天体物理学》, 687, A283, 数字对象标识符: 10.1051/0004-6361/202347187 Schöneberg, N., Franco Abellán, G., Pérez Sánchez, A., 等. 2022, 《物理学报告》, 984, 1, 数字对象标识符: 10.1016/j.physrep.2022.07.001 Schöneberg, N., Poulin, V., Ferrari, A. G., 等. 2026年. https://arxiv.org/abs/2607.13283 Shah, P., Lemos, P., & Lahav, O. 2021, 《天文学与天体物理学评论》, 29, 9, 数字对象标识符: 10.1007/s00159-021-00137-4 Shen, X., Vogelsberger, M., Boylan-Kolchin, M., Tacchella, S., & Naidu, R. P. 2024, 《皇家天文学会月刊》, 533, 3923, 数字对象标识符: 10.1093/mnras/stae1932 Sheth, R. K., Mo, H. J., & Tormen, G. 2001, 《皇家天文学会月刊》 , 323, 1, 数字对象标识符: 10.1046/j.1365-8711.2001.04006.x Smith, T. L., Poulin, V., & Amin, M. A. 2020, 《物理评论D》, 101, 063523, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevD.101.063523 Song, J.-Y., Du, G.-H., Li, T.-N., 等. 2026, 《中国科学：物理学、力学、天文学》, 69, 240413, 数字对象标识符: 10.1007/s11433-025-2888-0 Stefanon, M., 等. 2021, 《天体物理学杂志》, 922, 29, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4357/ac1bb6 Torrado, J., & Lewis, A. 2021, 《宇宙学与天体粒子物理学杂志》, 05, 057, 数字对象标识符: 10.1088/1475-7516/2021/05/057 Vagnozzi, S. 2020, 《物理评论D》, 102, 023518, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevD.102.023518 —. 2021, 《物理评论D》, 104, 063524, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevD.104.063524 —. 2023, 《宇宙》, 9, 393, 数字对象标识符: 10.3390/universe9090393 Verde, L., Treu, T., & Riess, A. G. 2019, Nature Astron., 3, 891, 数字对象标识符: 10.1038/s41550-019-0902-0 Wang,B., Abdalla, E.,Atrio-Barandela, F., & Pavon, D. 2016, 《物理学进展报告》, 79, 096901, 数字对象标识符 : 10.1088/0034-4885/79/9/096901 Wang, B., Abdalla, E., Atrio-Barandela, F., & Pavón, D. 2024, 《物理学进展报告》, 87, 036901, 数字对象标识符: 10.1088/1361-6633/ad2527 Wang, H., & Piao, Y.-S. 2026, 《物理学快报B》, 873, 140180, 数字对象标识符: 10.1016/j.physletb.2026.140180 Wang, H., Ye, G., & Piao, Y.-S. 2026a. https://arxiv.org/abs/2611.27069 Wang, J.-Q., Cai, R.-G., Guo, Z.-K., 等. 2026b, 《物理评论D》, 114, 043514, 数字对象标识符: 10.1103/4sl7-m1qc Wang, J.-Q., Cai,R.-G., Guo, Z.-K., & Wang, S.-J. 2026c, 《物理评论D》,113, 083534, 数字对象标识符: 10.1103/r6cx-8ghz Wolf, W. J.,García-García, C., Anton, T., & Ferreira, P. G. 2025, Phys.Rev.Lett., 135, 081001, 数字对象标识符: 10.1103/jysf-k72m Wu, P.-J., Zhang,M., & Jin, S.-J. 2026, 《物理评论D》, 113, L081302, 数字对象标识符: 10.1103/zg3k-k6g1 Xu, T.,Kumar, S.,Chen, Y., Capistrano, A. J. S., & Akarsu, Ö. 2026, 《宇宙学与天体粒子物理学杂志》, 08, 004, 数字对象标识符: 10.1088/1475-7516/2026/08/004 Yang, W., Di Valentino, E., Linder, E. V., Zhang, S., & Pan, S. 2026a,《物理评论D》, 114, 063515, 数字对象标识符: 10.1103/41tc-5ffp Yang, W., Zhang, S., Pan, S., Anchordoqui, L. A., & DiValentino, E. 2026b. https://arxiv.org/abs/2610.33729 Yang, Y., Ren, X., Wang, Q., et al. 2024, 《科学通报》, 69, 2698, 数字对象标识符: 10.1016/j.scib.2024.07.029 Yao, Y.-H.,& Meng, X.-H. 2024, 《理论物理通讯》, 76, 075401, 数字对象标识符: 10.1088/1572-9494/ad426e Ye, G., Martinelli, M., Hu, B., & Silvestri, A. 2025, Phys.Rev. Lett., 134, 181002, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevLett.134.181002 Ye, G., & Piao,Y.-S. 2020a, 《物理评论D》, 101, 083507, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevD.101.083507 —.2020b, 《物理评论D》, 102, 083523, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevD.102.083523 Yin, L., Du, G.-H., Li, T.-N., & Zhang, X. 2026, 《宇宙学与天体粒子物理学杂志》, 09, 052, 数字对象标识符: 10.1088/1475-7516/2026/09/052 Yin, L., Kochappan, J., Ghosh, T., & Lee, B.-H. 2023, 《宇宙学与天体粒子物理学杂志》, 10, 007, 数字对象标识符: 10.1088/1475-7516/2023/10/007 Zhang, J.-F., Li, Y.-H., & Zhang, X. 2014, 《欧洲物理学杂志C》, 74, 2954, 数字对象标识符: 10.1140/epjc/s10052-014-2954-8 Zhang, J.-F., Zhao, M.-M., Li, Y.-H., & Zhang, X. 2015, 《宇宙学与天体粒子物理学杂志》, 04, 038, 数字对象标识符: 10.1088/1475-7516/2015/04/038 Zhang, X. 2005年, 《国际现代物理学杂志D辑》, 14, 1597, 数字对象标识符: 10.1142/S0218271805007243 —.2006年,《物理评论D》, 74, 103505, 数字对象标识符 : 10.1103/PhysRevD.74.103505 —. 2009年,《物理评论D》, 79, 103509, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevD.79.103509 —.2026年,《中国科学：物理学、力学、天文学》, 69, 120401, 数字对象标识符: 10.1007/s11433-026-3116-4 Zhang, X., & Wu, F.-Q. 2005年, 《物理评论D》, 72, 043524, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevD.72.043524 —.2007年,《物理评论D》, 76, 023502, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevD.76.023502 Zhang, Z., Xu, T., & Chen, Y. 2026年, 《天体物理学杂志》, 999,248, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4357/ae4738 Zhao, M.-M., He, D.-Z., Zhang, J.-F., & Zhang, X. 2017年, 《物理评论D》,96, 043520, 数字对象标识符: 10.1103/PhysRevD.96.043520