

局域空洞的方向性与低频调制： 一组可证伪的观测预测

王建明
独立研究者

预印本 · 2026 年 8 月

摘要

本文提出一组围绕局域欠密结构（KBC 空洞）的可证伪观测预测。核心假设仅有三条，均为现象学陈述：

- H1 (腔室)**：我们处于一个尺度约 300 Mpc 的局域欠密腔室内部；
- H2 (主轴)**：该腔室非球形，具有可分辨的几何主轴；
- H3 (调制)**：局域膨胀含一个低频调制分量，其周期受先验区间约束。

本文的核心新增量是 H2。现有局域空洞研究主要把空洞视为各向同性的统计欠密区；本文主张空洞具有可分辨的几何主轴，并给出该主张的可证伪观测后果。方向性预测的幅度（0.3%–0.5%）由空洞深度与椭率的一阶 scaling 导出 (§3.1)，而非任意设定。

由此导出四条正式预测 (P-1 至 P-4) 与一条背景一致性条件 (C-0)。每条均附明确失败判据；P-1 与 P-2 的检验设计已按预注册规范单独成文并冻结（《P-1/P-2 观测检验方案》，LSU-P12-001, 2026-08-29），检验轴、特征值简并判据、统计阈值与最小样本条款在数据分析前锁定。本文不引入新的物理机制，仅提出可检验的现象学结构；全部检验可用现有公开数据（Pantheon+、CosmicFlows-4、Planck、CatWISE/NVSS）或其近期扩展执行。

关键词：哈勃张力；KBC 空洞；局域各向异性；CMB 偶极；红移漂移；脉冲星计时阵列

1 引言

1.1 哈勃张力与局域空洞

哈勃张力——局域距离梯与早期宇宙推断的 H_0 之间存在 5σ 以上分歧——是当代观测宇宙学最突出的异常之一 [1, 2]。

局域空洞解释通道已有系统研究：Keenan 等人基于星系计数给出本地约 300 Mpc 尺度欠密的证据 [3]；Haslbauer、Banik 与 Kroupa 论证了 KBC 空洞与张力在 Gpc 尺度上对 Λ CDM 的联合压力 [4]；Mazurenko 等人给出空洞模型对 $H_0(z)$ 红移依赖的先验预言 [5]；Banik 等人对该纲领作了系统综述 [6]。

与此同时，Stiskalek、Desmond 与 Lavaux 基于 Tully–Fisher 与超新星距离未发现局域 H_0 各向异性的证据 [7]——这构成任何“结构化空洞”假设必须跨越的约束。

1.2 本文的核心增量：空洞非球形

现有局域空洞研究几乎都把空洞视为各向同性的统计欠密区。空洞的存在被用来解释哈勃张力，但空洞自身的几何形态——它是否有方向、有主轴、有内部结构——基本未被作为独立的观测问题提出。

本文的主张是：

空洞非球形。它有一个可分辨的几何主轴。这个主轴在现有数据的灵敏度边缘应留下可观测痕迹。

“可分辨”有严格的操作性含义：密度场位置二阶矩张量（欠密度加权）的最大两个特征值必须拉开间距（ $\lambda_2/\lambda_1 \leq 0.9$ ），否则主轴方向由噪声主导、不存在可操作定义（见 §4 与预注册文件）。

1.3 低频调制：一个带先验的受约束假设

本文同时提出 H3：局域膨胀不是完美平滑，而是叠加一个低频调制。调制周期 τ_{mod} 的先验区间预设为 50–500 年，依据：

- 更短的周期（ $\lesssim 50$ 年）不构成新的预测增量：此类分量若存在，应在现有 PTA 残余与哈勃残差中呈现短周期结构，而现有数据中未见；
- 更长的周期（ $\gtrsim 500$ 年）在可预见的观测基线内与长期趋势不可分辨。

进一步地，按基线匹配原则声明可判子区间：本文所提检验运行于 10–20 年基线，通过漂移曲率可分辨的周期上限约为基线的 5–10 倍，故 H3 的可判子区间为 50–150 年；150–500 年区间列为长期目标，不计入 P-3/P-4 的近期失败判据 (§3.4、§3.5)。

2 假设的三条现象学陈述

H1 (腔室)：观测者处于尺度约 300 Mpc 的局域欠密腔室内部 [3, 4]。

H2 (主轴)：腔室非球形，具有可分辨的几何主轴（特征值比 $\lambda_2/\lambda_1 \leq 0.9$ ）。主轴方向须在检验前由独立数据集（2M++/DESI 本地密度场重建）预注册定义，见 §4。

H3 (调制)：局域膨胀叠加低频调制分量，先验区间 $50 \leq \tau_{\text{mod}} \leq 500$ 年，可判子区间 50–150 年。超出先验区间的拟合结果视为探索性分析，不计入正式判定。

全部预测仅由 H1–H3 生成；任何一条被否，相应预测即死亡，其余预测独立存活。

3 预测与一致性条件

3.1 P-1：局域 H_0 的方向依赖（核心预测，2–3 年，已存在约束）

幅度的量级依据（一阶 scaling）。线性理论中，空洞内部外流本动速度的量级为 $v \sim \frac{1}{3}f(\Omega_m)H_0|\delta|r$ （球对称近似， $f(\Omega_m) = \Omega_m^{0.55} \approx 0.51$ ）。对椭率为 e 的椭球空洞，长轴与短轴方向外流之差 $\Delta v \sim e \cdot v$ ，换算为膨胀率的方向差异：

$$\frac{\Delta H_0}{H_0} \approx \frac{1}{3}f(\Omega_m)|\delta|e \approx 0.034 \times \left(\frac{|\delta|}{0.2}\right) \times \left(\frac{e}{0.1}\right). \quad (1)$$

取 KBC 空洞深度 $\delta \approx -0.2$ [3, 4], 则 0.3%–0.5% 的预测区间对应椭率 $e \approx 0.1$ –0.15——一个相当温和的椭球畸变。观测者偏心位置与空洞边界锐度引入量级为一的几何修正。该估计为一阶量级推导, 非精确预言; 其作用是证明预测幅度非任意设定。

具体预测:

$$\frac{\Delta H_0}{H_0} \geq 0.003, \quad \text{且全天最优偶极方向与预注册主轴角距} \leq 20^\circ. \quad (2)$$

符号声明 (预注册): 本预测以幅度+方向为判据, 符号开放。作为指示性 (非冻结) 预期: 空洞趋于球形化的动力学意味着长轴方向外流较弱, 若主轴取长轴方向, 则顺轴 H_0 预期略低于垂直方向; 该符号预期不进入判定。

现有约束: Stiskalek–Desmond–Lavaux (2026) 未发现各向异性 [7], 其灵敏度边界与本预测幅度接近, 两者暂不冲突但构成真实压力。

失败判据: 下一代样本 (ZTF/LSST) 在 10^{-3} 精度内确认各方向一致, 则 H2 死亡, 本文退化为静态空洞模型的各向同性版本, 失去独立预言能力。

检验协议 (双轨强制并报告、单侧下限、限期判决制、特征值简并判据、最小样本条款) 见预注册文件 LSU-P12-001 §3。

3.2 P-2: 残余偶极的方向相关性 (2–3 年)

由 H2 导出。判别量不是“残余偶极非零” (Λ CDM 本身预言约 10^{-5} 量级内禀偶极), 而是方向: 扣除运动学偶极后, CMB 残余偶极与星系计数残余偶极 (CatWISE/NVSS) 的方向应与预注册主轴统计相关。计数偶极与 CMB 运动学预期的不一致已有文献确认 [8, 9]。

失败判据: 残余方向与主轴在预注册门槛 (蒙特卡洛 $p < 0.05$, 强通过 $p < 0.01$) 下无相关, 则 P-2 失败; 禁止事后重定义主轴。蒙特卡洛采用相关噪声共偏模型, 细节见 LSU-P12-001 §4。

3.3 C-0: 哈勃张力的瞬态行为 (背景一致性条件, 不独立计分)

说明: 本项列为背景一致性条件而非独立预测——“张力持续”同时为静态空洞模型所预言, 不构成判别; 其“失败”仍有效。

内容: 若张力源于结构化腔室的内部流场, 则它是瞬态现象: (a) 当前阶段持续存在或加剧; (b) 长期尺度上系统性衰减。

失败条件 (冻结): 张力在未来十年内、于未发现任何测量系统误差的情况下消失, 则 H1–H3 的组合假设失败。通过不加分, 失败即出局。

3.4 P-3: 红移漂移的周期微扰 (10–20 年, 由 H3 导出)

Sandage–Loeb 型红移漂移监测 [10] 中, 漂移残差应呈现超出平滑宇宙学预期的非随机时间结构。

振幅条款 (预注册义务): 本文不提供调制的点振幅预言。为避免“残差非随机”判据的模糊性, P-3/P-4 的专属预注册方案须在揭盲前冻结振幅下限——参考尺度取与 P-1 方向性幅度 (0.3%–0.5%) 同量级的膨胀率调制; 未冻结振幅下限的检验不产生判定。量级自查: 若调制振幅处于该参考尺度且周期处于可判子区间, 10–20 年基线内的超额漂移约为长期信号的 10^{-4} – 10^{-3} 相对量级, 处于当前技术灵敏度边缘以下——本文承认 P-3/P-4 的近期判定力有限, 其判决主要依赖基线的持续累积。

判据范围声明：失败判据仅覆盖可判子区间 50–150 年。10–20 年基线内漂移与标准预测完全一致，则 H3 在 50–150 年子区间内被排除；150–500 年区间为长期目标，本检验不对其判活或判死。

3.5 P-4: PTA 背景残余中的准周期结构 (10–20 年, 由 H3 导出, 已存在约束)

纳赫兹引力波背景证据已由 NANOGrav、EPTA 等阵列报告 [11, 12]；单源连续波搜索迄今仅有上限 [13]。本预测不主张强单色连续波，而主张扣除最优随机背景后，残余信号含幅度低于当前连续波上限的宽带准周期调制结构。

判据范围声明：同 P-3，失败判据仅覆盖可判子区间 50–150 年；长基线残余与纯随机噪声不可区分，则 H3 在该子区间内被排除。

预测汇总

表 1: 预测汇总

编号	内容	时间尺度	失败条件
P-1	H_0 方向依赖 $\geq 0.3\%$ (scaling 导出)	2–3 年	10^{-3} 精度内各向一致 $\rightarrow$ H2 死亡
P-2	残余偶极方向相关	2–3 年	与预注册主轴无关
C-0	张力的瞬态行为	当前	无系统误差发现下十年内消失 (不独立计分)
P-3	红移漂移周期微扰 (50–150 年可判)	10–20 年	漂移完全平滑 $\rightarrow$ H3 子区间排除
P-4	PTA 残余准周期结构 (50–150 年可判)	10–20 年	残余纯随机 $\rightarrow$ H3 子区间排除

4 预注册检验方案

P-1 与 P-2 的完整检验设计已单独成文并冻结 (《P-1/P-2 观测检验方案》，LSU-P12-001, 2026-08-29)，要点：

- 双轴制：主轴（密度场位置二阶矩张量最大特征向量）与参考轴（空洞中心方向）分别预注册、md5 封存；
- 特征值简并判据： $\lambda_2/\lambda_1 > 0.9$ 即判定主轴不可分辨，检验终止记“方向未定义”——近球形空洞没有主轴，此条款防止把噪声方向当作检验轴；
- 伪独立性门槛：主轴与 CMB 运动学偶极角距 $< 15^\circ$ 时触发镜像回退条款；
- 最小样本条款： $\pm 30^\circ$ 帽内超新星数低于冻结阈值时，定向轨道记“功效不足”，仅报上限；
- 双轨强制并报告；限期判决（冻结至 2029-12-31，逾期失效）；相关噪声共偏模型；
- 联合失败声明：P-1 物理判负且 P-2 失败，则“结构化腔室具有可分辨主轴”的图像被排除。

周期先验的归属声明：H3 的周期先验 (50–500 年) 与可判子区间 (50–150 年) 预设于本文，不属于 LSU-P12-001 的冻结范围；P-3/P-4 的检验细节将随其专属方案单独预注册。

5 与现有文献的关系及局限

5.1 与局域空洞研究纲领的关系

本文与局域空洞研究纲领 [4, 5, 6] 是嵌套而非对立关系：接受其观测基础；增加两项可检验结构（主轴 H2、调制 H3）；放弃其默认的各向同性假设。两项增量各自携带独立失败判据，故本假设比静态空洞模型“更可杀”。

5.2 主要局限

1. 本文不提供 H1–H3 的物理成因，结构化腔室的形成机制开放；
2. P-1 的幅度推导为一阶 scaling (§3.1)，含量级为一的几何修正；预测幅度处于当前数据灵敏度边缘，判决依赖 LSST 时代样本；
3. P-3/P-4 的失败判据仅覆盖 50–150 年可判子区间，150–500 年为长期目标；
4. H3 的周期约束是区间而非点预言；
5. P-3/P-4 无点振幅预言，其判定力取决于专属预注册方案中冻结的振幅下限与基线累积 (§3.4 振幅条款)，近期判决力有限；
6. 若密度场特征值简并判据触发 ($\lambda_2/\lambda_1 > 0.9$)，H2 在当前数据下不可操作——这是数据性质，非模型豁免。

本文作者对这些局限不享有豁免。

6 结论

本文把“我们处于一个结构化局域腔室内”转写为四条附明确失败判据的观测预测与一条背景一致性条件，其中两条的检验已预注册化。核心主张 H2——空洞非球形——使局域空洞模型从“统计修正”升级为“几何结构”；其预测幅度由空洞深度与椭率的一阶 scaling 支撑，其可操作性由特征值简并判据兜底。本文的价值不依赖于假设为真，而依赖于：无论结果正负，宇宙学都将获得关于局域结构的判决性信息。

致谢

本文的设想方向由作者独立提出；成文过程中，Kimi（月之暗面）、DeepSeek、通义千问、豆包等 AI 系统协助了文献梳理、结构推演与文字润色，全部内容由作者审核裁定，文责自负。

本文为一个更一般生成框架的现象学子集，完整框架见作者同日预印本《宇宙作为一个高维发育系统的局部观测》（2026 年 8 月）；本文与作者前作《SUFT-11：十一维尺度对偶统一场论》（2026-04-17, AiXiv）、《弯曲 IIB 紧致化中通量调制规范耦合的唯象模型》（2026-04, AiXiv）及《洛书晶胞统一框架》（2026-08）构成同一研究脉络。

参考文献

- [1] Planck Collaboration, “Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters,” *A&A* 641, A6 (2020).
- [2] A. G. Riess et al., “A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant,” *ApJ* 934, L7 (2022).
- [3] R. C. Keenan, A. J. Barger, L. L. Cowie, “Evidence for a ~ 300 Mpc Scale Under-density in the Local Galaxy Distribution,” *ApJ* 775, 62 (2013).
- [4] M. Haslbauer, I. Banik, P. Kroupa, “The KBC void and Hubble tension contradict Λ CDM on a Gpc scale,” *MNRAS* 499, 2845 (2020).
- [5] S. Mazurenko, I. Banik, P. Kroupa, “The redshift dependence of the inferred H_0 in a local void solution to the Hubble tension,” *MNRAS* 536, 3232 (2025).
- [6] I. Banik, H. Desmond, V. Kalaitzidis, S. Mazurenko, “The local void model for the Hubble and BAO tensions,” arXiv:2602.03928 (2026).
- [7] R. Stiskalek, H. Desmond, G. Lavaux, “No evidence for local H_0 anisotropy from Tully–Fisher or supernova distances,” *MNRAS* 546, staf2048 (2026).
- [8] N. J. Secrest et al., “A Test of the Cosmological Principle with Quasars,” *ApJ* 908, L51 (2021).
- [9] N. J. Secrest et al., “A Challenge to the Standard Cosmological Model,” *ApJ* 937, L31 (2022).
- [10] J. Liske et al., “Cosmic dynamics in the era of Extremely Large Telescopes,” *MNRAS* 386, 1192 (2008).
- [11] G. Agazie et al. (NANOGrav), “The NANOGrav 15 yr Data Set: Evidence for a Gravitational-wave Background,” *ApJ* 951, L8 (2023).
- [12] J. Antoniadis et al. (EPTA), “The second data release from the European Pulsar Timing Array. III,” *A&A* 678, A50 (2023).
- [13] G. Agazie et al. (NANOGrav), “The NANOGrav 15 yr Data Set: Bayesian Limits on Gravitational Waves from Individual Supermassive Black Hole Binaries,” *ApJ* 951, L50 (2023).