

宇宙学原理检验研究概述

唐宇航^{1,2}, 杨术银^{1,2}, 沙艾德·艾力^{2,3}, 杨晓峰^{2,4*}, 刘雄伟¹

¹西华师范大学物理与天文学院, 四川 南充

²中国科学院新疆天文台, 新疆 乌鲁木齐

³新疆大学物理科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐

⁴中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京

收稿日期: 2023年4月24日; 录用日期: 2023年5月24日; 发布日期: 2023年5月31日

摘要

本文简要介绍了宇宙学原理检验的相关工作。首先介绍了几种宇宙学模型, 接着简单地描述了目前宇宙学中仍待解决的一些反常发现。由于这些反常发现, 宇宙学原理假设似乎并非一定是正确的。于是研究者们采用了不同的方法和数据对宇宙学原理进行了检验, 在相关研究中大多数结果是支持宇宙学原理假设的, 然而在一些数据中发现了可能违背宇宙学原理的反常信号, 这些反常信号的出现似乎意味着宇宙存在一个特殊的膨胀方向。此外, 大尺度结构的反常发现似乎也暗示宇宙有也可能是非均匀的。迄今为止, 人们还没有发现确凿和明显违背宇宙学原理的证据。

关键词

宇宙学原理, 标准宇宙学模型, 各向异性

A Brief Review on the Research of Testing of Cosmological Principle

Yuhang Tang^{1,2}, Shuyin Yang^{1,2}, Xahyda·Ali^{2,3}, Xiaofeng Yang^{2,4*}, Xiongwei Liu¹

¹School of Physics and Astronomy, China West Normal University, Nanchong Sichuan

²Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi Xinjiang

³School of Physics and Technology, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang

⁴School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

Received: Apr. 24th, 2023; accepted: May 24th, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

This paper presents a brief introduction on the research of testing of cosmological principles.

*通讯作者。

文章引用: 唐宇航, 杨术银, 沙艾德·艾力, 杨晓峰, 刘雄伟. 宇宙学原理检验研究概述[J]. 天文与天体物理, 2022, 10(4): 37-52. DOI: 10.12677/aas.2022.104004

Firstly, we introduce several cosmological models, and then we simply describe cosmological anomalies which need to be solved in the future. The Cosmological Principle hypothesis seems to be not exactly correct because of these anomalies, thus, researchers employed different methods and data to test the Cosmological Principle. Most of the results supported the hypothesis of the Cosmological Principles. However, few anomalous signals are found in some works that may violate the Cosmological Principles. The emergence of the abnormal signal means that the universe has a preferred expansion direction. Moreover, the abnormal discovery of large-scale structures implies that the universe may be inhomogeneity. Up to now, there is no acceptable and clear evidence for violation of Cosmological Principle.

Keywords

Cosmological Principle, Standard Cosmological Model, Anisotropy

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

一直以来,为了寻找宇宙的规律,人们从未停止对宇宙的探索,在这个过程中,不断有新的猜想出现,对宇宙学的研究产生了深远的影响。从地心说到日心说再到开普勒定律的发现,不断突破人们对宇宙的认知。在20世纪初期,爱因斯坦首次用他刚建立的广义相对论对我们的宇宙进行研究,由于彼时观测手段尚不发达,可以使用的数据极少,于是在研究中忽略一些次要因素,他假设宇宙中的物质均匀分布在宇宙空间中,且在足够大的尺度上是各向同性的,这个假设成为了现在人们所说的宇宙学原理(Cosmological Principle, CP)假设。由于宇宙学原理的合理性以及观测支持和广义相对论的验证成功,成为现代标准宇宙学模型的基石。

在20世纪末,有研究者在Ia型超新星研究中发现宇宙在加速膨胀[1] [2] [3],这一发现为宇宙学的发展提供了新方向,并在2011年时被授予诺贝尔物理学奖。基于宇宙的空间物质分布是均匀且各向同性这一假设,按常理由于宇宙受到引力作用应该是减速膨胀的,于是人们猜想或许有一种能够抗衡引力的物质,即暗能量(Dark energy)的存在[4],并且宇宙学原理的成立是暗能量存在的前提。由于宇宙学原理对宇宙学研究起到十分重要的作用,研究者们不断采用了多种方式来严格检验它。目前宇宙学原理已经得到了多个探测器的支持,例如威尔金森微波各向异性探测器(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, WMAP)和 planck 卫星探测器所探测到的宇宙微波背景辐射(Cosmic Microwave Background Radiation, CMB)的功率谱在大尺度上显示出各向同性[5] [6],以及远距离射电源均匀分布[7]和星系在大尺度空间的均匀分布[8] [9] [10]等等。

尽管宇宙学原理假设受到广泛认可,但仍然存在一些挑战,例如,精细化结构常数 α 的变化,1998年有研究发现精细结构常数随时间变化[11],后来研究又发现精细化结构常数不仅是随时间变化的而且还随着空间变化[12] [13] [14]。此外,有研究发现在CMB角功率谱中显示出半球不对称性,这种半球不对称性反应了黄道半球相对另一半黄道半球的功率不对称[15] [16]。类星体极化矢量[17],哈勃参数的直接测量[18]。类星体和射电星系在天空中分布的大各向异性[19] [20],这些研究都暗示宇宙可能存在更好的膨胀方向。而大尺度伽马射线暴(Gamma-Ray Bursts, GRB)环[21],大型类星体群[22]等大尺度结构的发现是对宇宙均匀性的挑战。

随着技术手段提升, 观测精度也在不断提高。因此我们在寻找宇宙各项异性信号的脚步也在不断向前。文章中首先简单介绍几种宇宙学模型, 其次描述一些与宇宙学原理相矛盾的研究发现, 接着整理了一些关于宇宙学原理的相关测试, 最后对宇宙学原理检验研究现状进行总结和展望。

2. 宇宙学模型

如今的标准宇宙学模型的基础可以追溯至近一个世纪, 以广义相对论和宇宙学原理为基础, 人们提出了标准宇宙学模型, 标准宇宙学模型框架下的宇宙是均匀且各向同性的, 也是受到广泛认可的宇宙学模型。此外还有非均匀各向同性模型的宇宙学模型和非各向同性的模型, 但由于观测宇宙呈现出高度的各向同性, 非各向同性的模型并未受到广泛关注, 以下简单介绍几种宇宙学模型。

2.1. 标准宇宙学模型

广义相对论是用来描述物质间引力相互作用的理论, 它采用最大对称的弗里德曼 - 勒梅特 - 罗伯逊 - 沃克度规(Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker metric, FLRW)描述时空几何结构, 假设宇宙是均匀且各向同性的, FLRW 度规的一般形式可以写为:

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \right]$$

其中 k 为曲率系数, 当 $k = 1$ 时宇宙为闭合宇宙, $k = -1$ 时宇宙为开放宇宙, 当 $k = 0$ 时宇宙为平坦宇宙; (r, θ, φ) 构成共动坐标; 宇宙尺度因子 $a(t)$ 是时间 t 的函数。

后来人们认识到星系的分布是不均匀的, 它可能说明暗物质分布占主要地位存在偏差。当前受到广泛认可的标准宇宙学模型认为宇宙主要包括三种成分, 根据 Planck 卫星观测数据显示, 宇宙学常数 Λ 代表的暗能量占比 69%, 冷暗物质为 26%, 普通重子物质为 5% [23]。因此标准宇宙学模型又被称为标准冷暗物质(Λ Cold Dark Matter, Λ CDM)模型。

尽管 Λ CDM 模型如今受到广泛的认可, 但目前仍然面临一些挑战, 例如视界疑难问题、准平坦性疑难、暗物质问题等等[24] [25]:

视界疑难问题: “视界”是指如今能观测到的宇宙的最大范围, 视界疑难问题是由于观测 CMB 均匀性而出现的, 从 CMB 温度天图中可以看出宇宙在大尺度上是均匀性的, 其中一些微小的扰动仅有 10^{-5} , 而这表明宇宙各部分是处于热平衡状态的, 然而根据宇宙大爆炸理论倒推至宇宙极早期, 宇宙各部分散射面的视界是互相远离的, 意味着宇宙中可观测的物质间不应存在因果联系, 宇宙就不可能处在热平衡状态, 那为什么宇宙在大尺度上会是均匀且各项同性的呢? 此为视界疑难问题。后来由 Guth 提出的暴胀模型[26], 可以很好的解释这一疑难, 暴胀模型指在宇宙的极早期, 宇宙可能在极短的时间(约 10^{-34} s)内发生指数性膨胀, 使视界范围迅速增加到大于可观测宇宙, 其内的部分可观测物质间的联系消失。便可以维持宇宙的均匀性和平坦性。这一段时间被称为暴胀时期。

准平坦性疑难: 爱因斯坦场方程可以描述宇宙动力学, 其一般形式可写为:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

其中 $R_{\mu\nu}$ 为 Ricci 张量, R 为 Ricci 标量, $g_{\mu\nu}$ 表示度规张量, $T_{\mu\nu}$ 表示动能张量。

根据宇宙各向同性和 FLRW 度规并将 $T_{\mu\nu}$ 取为理想流体形式后, 令 $a(t) = 1$ 时为现在时刻则, 定义 \dot{a}/a 为哈勃常数用 H 表示, 可得 Friedmann 方程:

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho + \frac{\Lambda}{3} - \frac{k}{a^2}$$

其中 \dot{a} 是宇宙尺度因子 $a(t)$ 随时间的导数, ρ 表示能量密度。

宇宙学研究中定义了宇宙临界密度, 用 ρ_c 来表示,

$$\rho_c \equiv \frac{3H^2}{8\pi G}$$

且宇宙能量密度参数 Ω 可以写为:

$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c}$$

则 Friedmann 方程为:

$$\Omega - 1 = \frac{k}{H^2 a^2}$$

令其除以 Ω 可得

$$1 - \frac{1}{\Omega} = \frac{k}{\Omega H^2 a^2} = \frac{3k}{8\pi G \rho_c a^2}$$

假设宇宙为平坦宇宙, 此时 $k = 0$, $\Omega = 1$ 。

等式左侧的绝对值 $\left|1 - \frac{1}{\Omega}\right|$ 可以表示宇宙偏离平坦宇宙的程度。

从式中可以看出, 随着时间增长, 偏离平坦宇宙的程度应该增加, 且程度显著, 那么如今人们观测到的宇宙呈现出高度的平坦性是如何保持的? 这就是准平坦性疑难问题。而后的暴胀模型这一猜想同样可以很好地解释这一疑难。

暗物质问题: 暗物质在天体物理和粒子物理的研究中都是很重要研究内容。根据牛顿的万有引力定律, 通过计算预言了引力波和黑洞的存在, 在后期的观测中也证实了它们的存在。但随后, 人们根据牛顿力学计算重子物质引力同观测所得的结果出现了偏差。于是便假定一种不发光的物质来解释这一偏差。在对漩涡星系旋转曲线研究时, 要使其外部恒星在极高速度的情况下维持系统引力的束缚, 在不修改引力理论的情况下, 就需要引入这种不发光的物质。而后根据引力透镜效应发现分析所得的物质分布远超过可见物质分布。这也为暗物质的存在提供了有利的证据。但目前为止, 还没有研究能解释暗物质的本质究竟是什么。

2.2. 其他宇宙学模型

Lemaître-Tolman-Bondi (LTB) 空洞模型[27]: 由于宇宙学原理还没有在大于等于 1 Gpc 的尺度上得到充分的证明[28], 但局部宇宙在小尺度上呈现出较为明显的非均匀性, 如果说可以放宽宇宙学原理, 那么就可以在不引入暗能量或修正引力的情况下来解释宇宙的加速膨胀[1] [2] [3], 于是研究者假设人们处于密度不足的空洞中。空洞模型假设宇宙是球对称, 径向非均匀的, 从空洞中心的视线推断出的哈勃图很有可能被误解为宇宙加速度。空洞模型大致可分为三类, 极小空洞模型, 大空洞模型以及无边界空洞模型。1933 年 Lemaître 首先提出空洞模型, 然后 Tolman 和 Bondi 分别进行了进一步研究得到了 LTB 空洞模型, 详见[27]中的参考文献。LTB 空洞模型在许多研究中已经得到了参考。它描述的是非均匀各向同性的宇宙, 是不符合宇宙学原理的。

Godel 模型[29]: 爱因斯坦的场方程 Godel 解描述的是一个均匀旋转的宇宙, LTB 模型在物质分布上违背宇宙学原理, 而均匀旋转的宇宙是说我们所处的宇宙绕着固定的轴旋转, 即宇宙存在一个特殊的位置, 这一类模型也是不符合宇宙学原理的。

Bianchi 模型[30]: Bianchi I-IX 模型是较为典型的脱离宇宙学原理的一种模型, 大多用来描述均匀宇宙但并未假设各向同性, 在这类模型中, type-I 是最基础的一种模型, 并且它所描述的时空为线性叠加的时空。文献[30]总结了 9 种 Bianchi 模型的特点。

3. 宇宙学原理检验

宇宙学原理(CP)假设被提出后, 得到了多个探测器所得到的观测数据的支持。到目前为止, 并没有明确的各向异性存在的证据, 但在宇宙学研究中出现了不符合宇宙学原理的异常信号。由于 CP 受到了挑战, 且 CP 对于宇宙学研究至关重要, 因此使用现有的观测数据对 CP 进行检验是必要的。

3.1. 宇宙学中的反常信号

1) **CMB 半球功率不对称:** 标准 Λ CDM 模型认为如今的宇宙存在早期残留的电磁辐射, 并且这种辐射具有宇宙早期的信息。由于其最强信号处于微波波段, 因此被称为宇宙微波背景辐射, 并且它在 20 世纪中期被偶然间观测所证实[31], 这个发现也证明 Λ CDM 模型是正确的, 但由于观测技术提升, 在 CMB 功率谱中发现 CMB 天空的北黄道和南黄道半球似乎具有明显的统计不对称性, 如图。南半球似乎与标准 Λ CDM 模型预期的各向同性 CMB 天空一致, 这表明 CMB 异常可能主要起源于北半球。在 WMAP 数据[14] [15] [32]中报告了 CMB 温度波动的低方差, 这似乎与四极子 - 八极子密切相关, 因为一旦移除四极子和八极子, 异常就会消失[32]。Planck 的后续研究证实, 低方差局限于北黄道半球, 其 P 值约为 0.1%, 而南半球的 P 值约为 45%。Planck 还证实了四极子 - 八极子形式与低方差之间的联系[33]。而这种功率不对称的现象开始仅仅在大尺度上才显现出来, 后来在 WMAP 五年的数据中发现这种现象也存在于更小的尺度[34]。这一发现表明 CMB 中存在统计各项同性偏离。

2) **宇宙学参数精细方向改变:** 由于半球功率不对称的影响, CMB 观测值中的异常对标准 Λ CDM 模型中的参数推断可能产生一定程度的影响。而 CMB 的异常表示为统计涨落, 因此影响并不显著, 但这种看法仍需要进一步的研究。文献[35]中总结了 9 年的 WMAP 数据的变化, 但后来 Mukherjee S.等人认为, 普朗克数据中不会存在宇宙学参数的显著偏离[36]。在最近一项对 WMAP 和在 $l > 30$ 的普朗克过剩温度图谱的分析中发现宇宙中存在三个斑块, 其中 Λ CDM 参数出现了明显差异。这三个斑块角直径在 $40^\circ \sim 60^\circ$, 中心方向为 $(l, b) = (345^\circ, 15^\circ)$; $(l, b) = (240^\circ, -5^\circ)$ 和 $(l, b) = (150^\circ, -40^\circ)$ 。其中第二个斑块方向同半球功率不对称一致。 H_0 范围从 (61.3 ± 2.6) km/s/Mpc 变为 (76.6 ± 5.4) km/s/Mpc, 差异约 2.6σ 。需要注意的是 H_0 在半球功率不对称的方向上取较低值 $(l, b) = (218^\circ, -21^\circ)$ 。而这种变化水平超过了标准 Λ CDM 模型的 300 次模拟中看到的水平, 并将这种差异估计为 10^{-9} 概率的统计波动[37]。此外, 文献[16]中也发现了宇宙学参数的类似变化, 如 $\Omega_b h^2$, H_0 , 以及 n_s 。

3) **哈勃常数:** 在 FLRW 宇宙学中, 哈勃常数 H_0 应该是一个与宇宙学模型无关的常数[38], 而其他宇宙学参数如物质密度、曲率等都同宇宙学模型相关[39], 而在研究中发现局部宇宙中作为确定的 H_0 在天空中发生了改变[40]。在哈勃太空望远镜关键项目的数据中, H_0 似乎存在至少 9 km/s/Mpc 的统计显著变化。方向不确定度约为 $10^\circ \sim 20^\circ$ 。在超星系团中, 观测到的差异高达 35 km/s/Mpc, 并且这些差异往往发生在超星系平面附近, 在超星系团之外, 观测到了高达 20 km/s/Mpc 的差异, 这些差异往往发生在远离超星系平面的区域。但考虑到宇宙中存在的结构不均匀性, H_0 的变化是可预见的。这种变化一定程度上解释了为什么 H_0 一直受到诸多的不确定性的困扰。不仅如此, 星系团 X 射线光度和星系团温度关系的异常似乎证实了这一变化[41] [42], 星系团温度 T 不依赖宇宙学模型, 但从直接可观测测量中可以推断出与宇宙学强相关的星系团的其他性质, 最显著的是 H_0 , 且研究得到了 H_0 的方向性的结论。在 Ia 型超新星 Pantheon 数据集中也发现了同样的趋势, 研究发现 CMB 偶极子方向的 H_0 更大[43] [44]。而 Pantheon

数据集是处在“CMB 框架”中的，因此样本追踪 CMB 偶极子的趋势是异常的。

4) 宇称不对称：宇称就是指空间的对称，而偶多极子和奇多极子之间的显著功率不对称可以被解释为对特定宇称的偏好，这在 CMB 天空中是异常的。文献[45]使用 WMAP 第一年的数据探测这种偏好发现，在低多极区($l_{\max} = 2\sim 20$)，奇宇称偏好置信度约为 2σ 。文献[46]中研究 CMB 功率谱中的宇称偏好，研究发现在多极($l_{\max} = 18\sim 33$)范围内发现宇称偏好置信度在 3σ 以下。而在[33] [47]研究中， $l_{\max} = 20\sim 30$ 发现的宇称偏好处于 2σ 以上。但[48] [49]中并未在 CMB 温度数据中找到明显的宇称不对称性。最近的一项寻找星系分布宇称破缺的研究得到了相似的结论[50]，早在物理学家进行核衰变实验时便发现宇宙可能存在轻微的“手性”，只是当时人们认为这种弱力的左手性影响的范围很小，研究者通过斯隆数字化巡天(SDSS)和重子震荡光谱巡天所得星系数据分布寻找宇称破缺。这项研究中选定一个星系作为四面体的顶点，接着观测它与其他三个星系的距离，如果距离是顺时针方向增加的，则称之为右手的四面体，反之，如果是逆时针的则称为左手的。在这组星系数据中包含了 100 万个星系，共得到 10^{24} 数量的四面体，并且与模拟宇宙演化过程的“模拟宇宙”作对比，得到置信度为 7σ 的差异，在后续分析中排除一些异常四面体，最终得到了置信度为 2.9σ 的宇称破缺。目前后续研究仍在进展，研究者正试图寻找更确切的证据。此外，在 CMB 中也曾发现了置信度为 2.4σ 的宇称破缺[50]。

5) 大尺度结构：在假设宇宙是均匀和各向同性的前提下，宇宙学研究中确定的宇宙均匀性尺度不超过 370 Mpc [51]。在 20 世纪 80 年代末，Geller 和 Huchra 将宇宙映射到红移 $z \approx 0.03$ 处，发现了一个约 200 Mpc 大小的结构，并称为长城(Great Wall) [52]。在 2005 年，文献[53]报告了一个两倍于此大小的天体并命名为斯隆长城(Sloan Great Wall)。在 1991 年时，发现了第一个大尺度的类星体群(Large Quasar Group, LGQ)，其尺度约为 630 Mpc [54]，随后文献[55] [56]中也相继报告发现了 LGQ，2013 年在斯隆数字化巡天的第七批数据的星表中发现了一个巨型的 LQG [22]。最长尺度约为 1240 Mpc，包含 73 个类星体成员，红移范围为 $1.0 \leq z \leq 1.8$ ，是红移范围最大的类星体群。与类星体是普遍存在的天体不同，GRB 是短暂的宇宙瞬时现象，时间跨度从毫秒到数百秒不等[57]。由于伽马射线暴的巨大亮度，它们可以在很远的宇宙学距离上被观测到。文献[58]通过分析 GRB 的空间分布，宣布发现了一个比巨型 LQG 更大的宇宙结构。该结构的 3000 Mpc 尺寸超过斯隆长城的尺寸约 6 倍；这是目前宇宙中已知的最大的结构。在 2015 年，Balázs, L.G. 等人报告发现有一个由 9 个平均角直径为 36° 的 GRB 组成的环，在共动框架中的尺度为 1720 Mpc，红移范围 $0.78 < z < 0.86$ [21]。这些结构的大小远超过 370 Mpc，因此挑战了宇宙学原理的假设。

3.2. 宇宙学原理检验方法

由于研究中出现了许多不符合当前宇宙学原理的异常信号，为了检验宇宙学原理假设的合理性，一种是检验宇宙的均匀性，另一种是检验 FLRW 度规的演化。

3.2.1. 距离对偶关系的检验

距离对偶关系(Distance Duality Relation, DDR)是 1933 年 Etherington 首次提出的，指光度距离 d_L 与角直径距离 d_A 存在某一特定红移的关系[59]。

$$d_L = (1+z)^2 d_A$$

DDR 不依赖爱因斯坦场方程与物质性质，但这个方程的成立需要满足两个条件：

- a) 光子在类光测地线上传播；
- b) 光子数守恒，指光子在传播过程中既不会产生也不会湮灭。

查看观测数据是否符合 DDR，如果不符合 DDR，则宇宙学原理则需要重新考量，在文献[60]中有详细的关于 DDR 的研究，需要注意的是尘埃消光、光子具有非最小耦合项等情况时，DDR 可能不成立。

因此许多研究者也尝试寻找违反 DDR 的证据。此外, 空洞或 LTB 模型也可能会导致 BAO 特征的偏差, 在[61]中研究了对 LTB 模型上严格的 BAO 约束的几何近似, 但没有考虑空洞模型中结构的各向异性增长。而面对当前现有的数据看, LTB 模型在很大程度上未能很好的解释哈勃危机[62] [63], 质量密度的任何对比都受到了很好的约束[64]。

3.2.2. 曲率

为了区分非均匀宇宙学和均匀暗能量模型, Clarkson 根据距离与哈勃参数 $H(z)$ 提出了曲率零假设检验, 本质是利用 FLRW 度规可以得到 d_L 和 $H(z)$ 的关系, 而两者与宇宙曲率参数 Ω_k 相关[65]。在限制宇宙曲率参数 Ω_k 时, 需要先假设一个宇宙学模型, 而 Ω_k 通过 $H(z)$ 与宇宙学观测数据相联系, 而 $H(z)$ 与 FLRW 度规和暗能量模型相关, 因此这种限制宇宙曲率参数的方法依赖于 FLRW 度规。并且空间曲率一般不遵循广义相对论中的守恒定律[66]。曲率检验的目的是排除或确认宇宙曲率参数 Ω_k 的变化, 其优点是不需要用到特定的宇宙学模型和引力理论, 可以限制宇宙曲率, 检验 FLRW 度规以及检验不同观测数据之间的矛盾。

3.2.3. 其他的检验方法

对宇宙学原理的检验的方法并不局限于以上方法, Goodman 提出可以通过观察星系团中的 Sunyaev-Zel'dovich 效应、激发低能原子跃迁和 CMB 的精确热谱来探测不均匀性[67]。也可以通过比较使用径向 BAO 固有时间和使用恒星物理学沿星系世界线的时间来检验均匀性[68]。还可以通过强引力透镜来约束宇宙学参数, 检验宇宙学模型等等。

4. 宇宙学原理测试

4.1. Ia 型超新星

通过 SNIa 数据进行宇宙学原理检验的相关测试相对较多, 目前研究可用的数据集列在表 1 中, 可以看出新的数据集包含了更多的样本。

超新星是恒星在极短的时间内爆发, 并释放大量的能量, 根据不同的光谱谱线类型, 超新星可大致分为不具有氢谱线的 I 型超新星, 和具有氢谱线的 II 型超新星, 在 I 型超新星中具有硅谱线的为 Ia 型超新星, 不具有硅谱线的则为 Ib 型超新星。Ia 超新星是由于白矮星的吸积或者并合而引起的热核反应, 由于在这个过程中释放了大量的能量, 该过程极为明亮且峰值近似相同, 其 B 波段和 V 波段的绝对星等约为 $M_B \approx M_V \approx -19.3 \pm 0.3$, 这个近似相同的峰值使得 Ia 型超新星在宇宙学研究中可以作为理想化的标准烛光[69] [70], 在研究中具有已知绝对光度的天体可以被视为标准烛光。而一些存在偏差的 Ia 型超新星则可以通过光变曲线来进行校正[70] [71] [72]。在检验宇宙学原理这一研究中, Ia 型超新星可以用来拟合宇宙学模型的宇宙学参数[73] [74] [75] [76] [77], 还可以直接通过数据信息寻找可能的各项异性信号[78]-[92]。

2010 年 Antoniou 等人采用半球比较(Hemisphere Comparison, HC)法[93]寻找 Union2 样品的各向异性偏好方向。他们发现了一个最大的加速膨胀率, 这对应于各向异性的偏袒方向[79]。之后, Mariano 等人采用偶极拟合(Dipole Fitting, DF)法, 利用 Union2 样本在 2σ 水平发现了一个可能的各向异性偏袒方向[94]。此后, 这两种方法被广泛用于探索宇宙各向异性, 例[80] [81] [82] [89] [90]。并且有研究发现使用同一数据集但用不同方法所得到的结果不总是近似一致的[78] [83]。文献[95]利用 HC 和 DF 方法, 通过 Pantheon 样本研究了宇宙各向异性, 他们发现, SDSS 样本在万神殿样本中起着决定性作用。这可能意味着非均匀分布对宇宙各向异性有显著影响。在[91]中, 研究者除了使用 HC 和 DF 法外还使用了 HEALPIX 来测试 Pantheon 样本中的宇宙各向同性, 并且将三种方法所得的结果做了交叉检验, 结果符合各向同性。

目前为止, 研究出现的最大差异是利用残差统计的方法在 Union2 数据集中发现的, 差异在 2σ 到 3σ 之间 [96]。其他数据集中目前无明显偏离各向同性的信号。文献[97]中已经做了关于各向异性偏袒方向详细的总结。

最近公布了一个新的 Ia 型超新星数据集 Pantheon+, 样本数量较 Pantheon 增加了 500 余个, 有关新数据集的具体分析可参考[98]。暂时未发现研究利用新的 Pantheon+ 样本检验宇宙各向同性。

Table 1. Sample numbers of commonly used Type Ia supernova datasets

表 1. 常用的 Ia 型超新星数据集样本数量

样本名称	红移范围	样本个数
Union	--	307
Union2	$0.015 \leq z \leq 1.55$	557
Union2.1	$0.015 \leq z \leq 1.55$	580
Constitution	$0.015 \leq z \leq 1.55$	397
Joint Light-Curve Analysis (JLA)	$0.01 \leq z \leq 1.30$	740
Pantheon	$0.01 < z < 2.26$	1048
Pantheon+	$0.001 < z < 0.3$	1550

4.2. 星系团

同 Ia 型超新星数据不同的是, 星系团数据集之间比较独立的, 只有少数样本会同时存在于不同的数据集, 且相比于 Ia 型超新星在天空分布上更加均匀, 因此星系团也是检验局部宇宙各向同性极好的探测器。星系团是公认的宇宙中最大的引力束缚系统, 在星系团的介质(Intra-cluster Medium, ICM)内含有大量的热气体。这种气体会发射强 X-ray 光子, 通过这种 X-ray 性质可以得到 ICM 气体的密度和温度。ICM 气体温度也可以通过普朗克测量的 Sunyaev-Zeldovic (SZ)效应间接观察到, 通过 SZ 效应探测天空对应区域中的星团角分布得出的是统计各向同性的结果。此外, 星系团还可以通过它们的星系成员在光学和红外波长中观察到。星系团在它们的许多性质之间表现出强相关性, 这些性质随质量的变化而变化, 即“星系团比例关系” [99] [100], 也常被用于星系团物理学和宇宙学研究。

最近, [41] [42] [101]引入并采用了一种新的方法来检验宇宙学原理。该方法利用星系团 X-ray 光度和星系团温度的关系, 1986 年 Kaiser 提供了 X 射线光度与 ICM 气体温度(T)的数学表达式[99]。其中的关键在于 ICM 气体温度的观测不依赖于任何宇宙学参数, 是与宇宙学无关的。但星系团 X 射线光度距离可直接观测的参数同宇宙学是强相关, 最显著的是哈勃常数。在这项研究中, 使用 570 个星系团和两个不同的、几乎独立的星系团样本(ACC: 即 ASCA Cluster Catalog; XCS-DR1: 即 XMM-Newton Cluster Survey 第一次数据发布)。这些星系团的空间分布在银河系外的天空中几乎是均匀的, 覆盖了 0.01~0.60 的红移范围。通过分析 X-ray、微波和红外光度关系, 检测到 9% 的偶极各向异性, 其方向为 $(l, b) \sim (280^{+35^\circ}, -15^{+20^\circ}_{-20^\circ})$, 并且利用蒙特卡罗评估观测到的各向异性统计显著性为 5.4σ , 为局部宇宙各向异性提供了有利证据[42]。

在将来, 会有更新的星系团调查和更大的具有更多高红移星系团的样本, 如: eROSITA All-Sky Survey 星系团样本等, 也将会被用于寻找宇宙的各向异性信号。

4.3. 伽玛射线暴

目前的多信使天文学, 包括伽玛射线暴(Gamma-Ray Bursts, GRB)的观测, 为宇宙学测试提供了新的

探针, 例如早期宇宙探测器(THESEUS)任务[102]。文献[103]对 GRB 宇宙学进行了详细的综述。

GRB 是由于大型超新星爆炸和两个致密天体合并而产生的, 会释放极高的能量, 超过超新星辐射总能量的数百倍, 它们将主星系记为高红移, 因此他们可以观测可见物质的大规模空间分布[104]。

在过去的研究中, GRB 的天空分布被证明是符合各向同性的例如, Ripa 等人 在研究中分析了 Fermi, BATSE and Swift 数据在天球中 GRB 分布的各向同性, 得出结果符合各向同性[105], 如图 1 所示。Uendert 等人利用 2626 个 GRB 数据的两点角相关函数检验各向同性假设, 结果认为是 GRB 位置不确定性导致的假各向异性信号[106]。其他 GRB 支持各向同性的研究可参阅[107] [108] [109] [110] [111]。

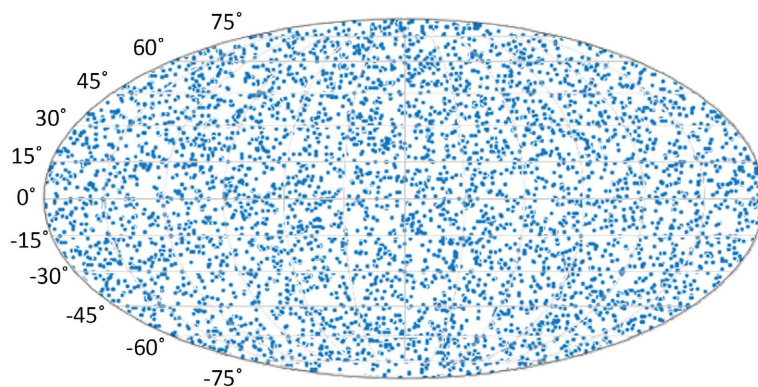


Figure 1. Mollweide projection of the GRB sky positions of the FERMIGBRST/CGRO/BATSE catalogue [106]

图 1. FERMIGBRST/CGRO/BATSE 星表中 GRB 天空位置的 Mollweide 投影[106]

但有许多研究中检测到 GRB 的天空分布的各向异性。例如, 一组空间上孤立的五个 GRB 被探测到, 坐标为 $23\text{ h }50\text{ min} < \alpha < 0\text{ h }50\text{ min}$ 和 $50 < \delta < 250$, 在 $0.81 < z < 0.97$ 红移处, 并且他们还在天空上的几个方向上发现 GRB 群[21] [112] [113] [114]。此外, 一些 GRB 子样本似乎明显偏离各向同性。Balázs 等人报道了短 GRB 和长 GRB 的角度分布不同[115]。Cline 等人发现, 非常短的 GRB 的角度分布是各向异性的[116]。Magliocchetti 等人报告称短 GRB 显示偏离统计各向同性[117]。Mészáros 等人和 Litvin 等人研究发现, 中等持续时间 GRB 的角度分布不是各向同性的[118] [119]。对具有已知红移的 GRB 的空间分布的研究也发现了非常大的不均匀结构, 但还具有较大的不确定性[21]。

需要注意的是, 空间分布的均匀性和各向同性是大尺度结构的不同性质。例如, 物质的分布可以具有统计各向同性, 同时是不均匀的, 并且满足哥白尼原理[120]。未来也会有新的观测将会有更多具有已知红移的 GRB 的数量, 可以对物质分布的均匀性和各向同性的宇宙学原理进行更加严格的检验。

4.4. 其它数据

利用 X 射线单色光度与紫外单色光度的非线性关系, 可以将类星体视为准标准烛光。因此, 非线性关系可以用于宇宙学的目的。Risaliti 和 Lusso 利用由 1598 个类星体组成的类星体样本来检验宇宙学原理。并发现它与标准宇宙学模型有偏差, 其统计显著性为 4σ 。但这种偏离是否会出现于宇宙各向同性中还不清楚[121]。文献[122]利用 SDSS 类星体光谱中的中性氢的分布搜索宇宙学各向异性, 未发现各向异性信号。在其他研究中, 类星体样本会同其他样本构成一个新样本, 优势在于红移范围更大且样本数量更多, 分布也更加均匀, 例如[97]。

2017 年 LIGO-Virgo 探测器首次探测到引力波(Gravitational Waves, GW), GW 作为一种标准的警报器, 直接由引力波波形确定光度距离, 而不依赖于特定的宇宙学模型, 其红移可以通过电磁对应物如中

子星和大质量黑洞双星的 GW 事件单独获得, 因此研究者认为可以利用引力波来检验宇宙学原理[123]。GW 作为标准汽笛, 曾被用于研究哈勃常数的演化, 但还没有被用于检验宇宙学原理。在探测到 GW 后, 蔡荣根等人对引力波作为标准汽笛探测宇宙各向异性的前景进行研究。研究认为 GW 相比于 Ia 型超新星精度更高, 系统误差更小[124]。

5. 结论

宇宙学原理(CP)假设宇宙是均匀并且各向同性的。CP 是标准宇宙学模型的基石之一, 也是暗能量存在的前提。 Λ CDM 模型得到了 CMB、BAO 和 Ia 型超新星等观测数据的支持。但标准宇宙学模型遇到的问题目前还没有得到良好的解释。并且, 在一些数据中检测到偏离宇宙各向同性的信号如 Ia 型超新星[96]、星系团[42]、GRB [117]等等可能指向宇宙存在一个特定的膨胀方向。还有一些如大型类星体群[55] [56]、巨型 GRB 环[21]等超过宇宙均匀性规定的 370 MPc 的大尺度结构的发现暗示我们宇宙也可能是非均匀的宇宙。

随着时间的推移, 有些异常发现已经被解释了, 例如在 CMB 温度图中的冷点, Cruz M.等人发现冷点出现的概率仅有 0.1%~0.4% [125], 且在[126]中并未发现冷点存在的证据。还有四极子异常, 文献[127] [128]已经给出合理的解释。文中 3.1 节提到的一些挑战宇宙学原理的异常暂时还未得到很好的解释。

在宇宙学原理检验中, 超新星数据除 Union2 中发现了 2σ 的偏差外[94], 并没有明显偏离统计各向同性的信号, 文献[100]在星系团中发现的偏差较大, 排除所有可能性影响结果的因素后, 这种偏差并没有显著降低, 为各向异性宇宙提供了有利支持。GRB 中发现了大尺度结构, 以及在中短 GRB 中也发现了偏离各向异性信号, 暂未看到关于长 GRB 偏离宇宙各向同性的研究。对于新的探针如引力波检验宇宙学原理, 已经被评估, 并认为是具有前景的[124]。此外, 随着观测设备精度提高, 会有新的观测数据被用于检验宇宙学原理, 如 Ia 型超新星 Pantheon+数据集, GRB 新的观测任务 THESEUS-BTA 等等。

综合目前的检验结果来看, 可以发现许多偏袒方向在哈勃图中都朝向 CMB 偶极子($263.99^\circ, 48.26^\circ$)的方向, 如星系团[41] [42] [100], 还有 Ia 型超新星[79] [80] [96], 类星体[121], CMB 四极子等等, 尽管样本和方法存在差异, 但在 CMB 偶极子的方向上却存在明显的偏袒方向, 这种趋势显然是偏离 FLRW 度规的。文献[97]中总结的几种数据集中所得的各向异性偏袒方向如图 2 所示。

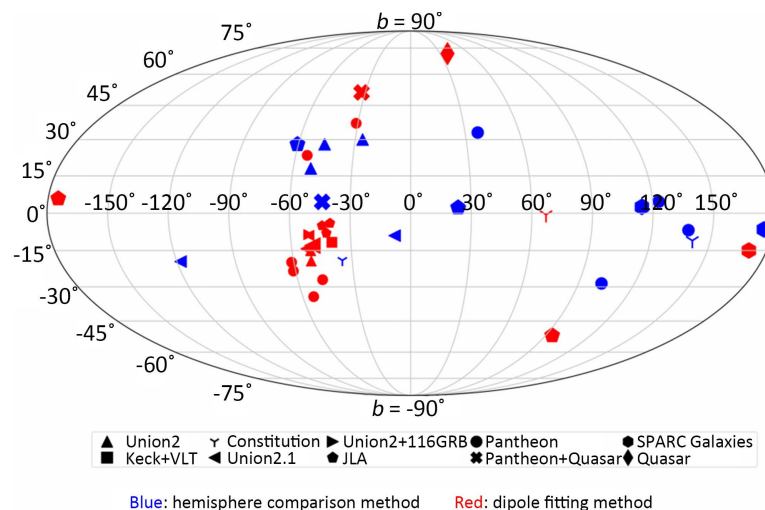


Figure 2. Distribution of anisotropic orientations (l, b) in several datasets summarized in literature [97]. Blue and red colors correspond to the HC and DF methods, respectively

图 2. 文献[97]总结的几种数据集中各向异性偏袒方向(l, b)的分布。蓝色和红色分别对应 HC 法和 DF 法

对于这些各向异性信号产生的原因, 目前还不是清楚。虽然研究者在研究中已经排除了可能的影响因素, 但是偏差置信水平仍然没有明显降低, 我们期待未来诸如 CSST/WFST/LSST 等大型巡天项目的海量宇宙学观测数据, 将会以前所未有的精度去检验宇宙学原理, 同样也关乎标准宇宙学模型的命运和人类对宇宙认识与理解的更进一步深入。

基金项目

中国科学院率先行动“BR 计划”择优入选项目(杨晓峰主持)。

参考文献

- [1] Riess, A.G., Filippenko, A.V., *et al.* (1998) Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *The Astronomical Journal*, **116**, 1009-1038. <https://doi.org/10.1086/300499>
- [2] Bahall, N., Ostriker, J.P., Perlmutter, S. and Steinhardt, P.J. (1999) The Cosmic Triangle: Revealing the State of the Universe. *Science*, **284**, 1481-1488. <https://doi.org/10.1126/science.284.5419.1481>
- [3] Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., *et al.* (1999) Measurements of Ω and λ from 42 High-Redshift Supernova. *The Astrophysical Journal*, **517**, 565-586. <https://doi.org/10.1086/307221>
- [4] Nishizawa, A., Taruya, A. and Kawamura, S. (2010) Cosmological Test of Gravity with Polarizations of Stochastic Gravitational Waves around 0.1-1 Hz. *Physical Review D*, **81**, Article ID: 104043. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.81.104043>
- [5] Komatsu, E., Smith, K.M., *et al.* (2011) Seven-Year *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **192**, Article No. 18. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/192/2/18>
- [6] Ade, P.A.R., Aghanim, N., Aumont, M., *et al.* (2014) Planck 2013 Results. I. Overview of Products and Scientific Results. *Astronomy & Astrophysics*, **571**, Article No. A1.
- [7] Blake, C. and Wall, J. (2002) A Velocity Dipole in the Distribution of Radio Galaxies. *Nature*, **416**, 150-152. <https://doi.org/10.1038/416150a>
- [8] Marinoni, C., Bel, J. and Buzzi, A. (2012) The Scale of Cosmic Isotropy. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **10**, Article No. 036. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/10/036>
- [9] Appleby, S. and Shafieloo, A. (2014) Testing Isotropy in the Local Universe. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **10**, Article No. 070. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/10/070>
- [10] Pandey, B. and Sarkar, S. (2015) Testing homogeneity in the Sloan Digital Sky Survey Data Release Twelve with Shannon entropy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **454**, 2647-2656. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2166>
- [11] Webb, J.K. *et al.* (1999) A Search for Time Variation of the Fine Structure Constant. *Physical Review Letters*, **82**, 884-887. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.884>
- [12] Wei, H. (2009) Varying Alpha Driven by the Dirac-Born-Infeld Scalar Field. *Physics Letters B*, **682**, 98-104. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2009.10.086>
- [13] Barrow, J.D. (2010) Varying Alpha. *Annals of Physics*, **19**, 202-210.
- [14] Wei, H., Zou, X.-B., Li, H.-Y. and Xue, D.-Z. (2017) Cosmological Constant, Fine Structure Constant and beyond. *The European Physical Journal C*, **77**, Article No. 14. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4581-z>
- [15] Larson, D., Dunkley, J., Hinshaw, G., *et al.* (2011) Seven-Year *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) Observations: Power Spectra and WMAP-Derived Parameters. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **192**, Article No. 16. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/192/2/16>
- [16] Bennett, C.L., Larson, D., Weiland, J.L., *et al.* (2013) *Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) Observations: Final Maps and Results. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **208**, Article No. 20. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/208/2/20>
- [17] Hutsemekers, D., Cabanac, R., Lamy, H. and Sluse, D. (2005) Mapping Extreme-Scale Alignments of Quasar Polarization Vectors. *Astronomy & Astrophysics*, **441**, 915-930. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053337>
- [18] Bonvin, C., Durrer, R. and Kunz, M. (2006) Dipole of the Luminosity Distance: A Direct Measure of $H(z)$. *Physical Review Letters*, **96**, Article ID: 191302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.191302>
- [19] Singal, A.K. (2015) A Large Anisotropy in the Sky Distribution of 3crr Quasars and Other Radio Galaxies. *Astrophys-*

- ics and Space Science*, **357**, Article No. 152. <https://doi.org/10.1007/s10509-015-2388-2>
- [20] Bengaly, C.A.P., Maartens, R. and Santos, M.G.(2018) Probing the Cosmological Principle in the Counts of Radio Galaxies at Different Frequencies. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **1804**, Article No. 031. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2018/04/031>
- [21] Balázs, L.G., *et al.* (2015) A Giant Ring-Like Structure at $0.78 < z < 0.86$ Displayed by GRBs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **452**, 2236-2246. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv1421>
- [22] Clowes, R.G., *et al.* (2013) A Structure in the Early Universe at $z \sim 1.3$ That Exceeds the Homogeneity Scale of the R-W Concordance Cosmology. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **429**, 2910-2916. <https://doi.org/10.1093/mnras/sts497>
- [23] Ade, P.A.R., Aghanim, N., Arnaud, M., *et al.* (2016) Planck 2015 Results XIII. Cosmological Parameters. *Astronomy & Astrophysics*, **594**, Article No. A13.
- [24] Albrecht, A. and Steinhardt, P.J. (1982) Cosmology for Grand Unified Theories with Radiatively Induced Symmetry Breaking. *Physical Review Letters*, **48**, 1220-1223. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.48.1220>
- [25] 俞允强. 物理宇宙学讲义[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [26] Penzias, A.A. and Wilson, R.W. (1965) A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *The Astrophysical Journal*, **142**, 419-421. <https://doi.org/10.1086/148307>
- [27] Enqvist, K. (2008) Lemaitre-Tolman-Bondi Model and Accelerating Expansion. *General Relativity and Gravitation*, **40**, 451-466. <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0553-9>
- [28] Caldwell, R.R. and Stebbins, A. (2008) A Test of the Copernican Principle. *Physical Review Letters*, **100**, Article ID: 191302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.191302>
- [29] Li, S.-L., Feng, X.-H., Wei, H. and Lü, H. (2017) Gödel Universe from String Theory. *The European Physical Journal C*, **77**, Article No. 289. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-4856-z>
- [30] Batakis, N.A. (1995) Bianchi-Type String Cosmology. *Physics Letters B*, **353**, 39-45. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(95\)00582-6](https://doi.org/10.1016/0370-2693(95)00582-6)
- [31] Dicke, R.H., Peebles, P.J., Roll, P.G. and Wilkinson, D.T. (1965) Cosmic Black-Body Radiation. *The Astrophysical Journal*, **142**, 414-419. <https://doi.org/10.1086/148306>
- [32] Cruz, M., Vielva, P., Martínez-González, E. and Barreiro, R.B. (2011) Anomalous Variance in the WMAP Data and Galactic Foreground Residuals. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **412**, 2383-2390. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.18067.x>
- [33] Ade, P.A.R., *et al.* (2014) Planck 2013 Results. XXIII. Isotropy and Statistics of the CMB. *Astronomy & Astrophysics*, **571**, Article No. A23.
- [34] Hansen, F.K. *et al.* (2009) Power Asymmetry in Cosmic Microwave Background Fluctuations from Full Sky to-Sub-Degree Scales: Is the Universe Isotropic? *The Astrophysical Journal*, **704**, 1448-1458. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/704/2/1448>
- [35] Axelsson, M., *et al.* (2013) Directional Dependence of Λ CDM Cosmological Parameters. *The Astrophysical Journal Letters*, **773**, Article No. L3. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/773/1/L3>
- [36] Mukherjee, S. and Wandelt, B.D. (2018) Making Maps of Cosmological Parameters. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **2018**, Article No. 042. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2018/01/042>
- [37] Fosalba, P. and Gaztañaga, E. (2021) Explaining Cosmological Anisotropy: Evidence for Causal Horizons from CMB Data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **504**, 5840-5862. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1193>
- [38] Sandage, A.R. (1970) Cosmology: A Search for Two Numbers. *Physics Today*, **23**, 34-41. <https://doi.org/10.1063/1.3021960>
- [39] Krishnan, C., Colgáin, E.Ó., Sheikh-Jabbari, M.M. and Yang, T. (2021) Running Hubble Tension and a H_0 Diagnostic. *Physical Review D*, **103**, Article ID: 103509. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.103509>
- [40] McClure, M.L. and Dyer, C.C. (2007) Anisotropy in the Hubble Constant as Observed in the HST Extragalactic Distance Scale Key Project Results. *New Astronomy*, **12**, 533-543. <https://doi.org/10.1016/j.newast.2007.03.005>
- [41] Migkas, K., *et al.* (2020) Probing Cosmic Isotropy with a New X-Ray Galaxy Cluster Sample through the L_X - T Scaling Relation. *Astronomy & Astrophysics*, **636**, Article No. A15. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936602>
- [42] Migkas, K., *et al.* (2021) Cosmological Implications of the Anisotropy of Ten Galaxy Cluster Scaling Relations. *Astronomy & Astrophysics*, **649**, Article No. A151. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140296>
- [43] Scolnic, D.M., *et al.* (2018) The Complete Light-Curve Sample of Spectroscopically Confirmed SNe IA From Pan-STARRS1 and Cosmological Constraints From the Combined Pantheon Sample. *The Astrophysical Journal*, **859**, Article No. 101. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab9bb>

- [44] Krishnan, C., Mohayaee, R., Colgáin, E.Ó., Sheikh-Jabbari, M.M. and Yin, L. (2022) Hints of FLRW Breakdown from Supernovae. *Physical Review D*, **105**, Article ID: 063514. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.063514>
- [45] Finelli, F., Gruppuso, A., Paci, F. and Starobinsky, A.A. (2012) Searching for Hidden Mirror Symmetries in CMB Fluctuations from WMAP 7 Year Maps. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **2012**, Article No. 049. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/07/049>
- [46] Aluri, P.K. and Jain, P. (2012) Parity Asymmetry in the CMB Temperature Power Spectrum. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **419**, 3378-3392. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19981.x>
- [47] Ade, P.A.R., et al. (2016) *Planck* 2015 Results. XVI. Isotropy and Statistics of the CMB. *Astronomy & Astrophysics*, **594**, Article No. A16.
- [48] Gruppuso, A., et al. (2011) New Constraints on Parity Symmetry from a Re-Analysis of the WMAP-7 Low-Resolution Power Spectra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **411**, 1445-1452. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17773.x>
- [49] Ade, P.A.R., et al. (2020) *Planck* 2018 Results. VII. Isotropy and Statistics of the CMB. *Astronomy & Astrophysics*, **641**, Article No. A7.
- [50] Philcox, O.H.E. (2022) Probing Parity-Violation with the Four-Point Correlation Function of BOSS Galaxies. *Physical Review D*, **106**, Article ID: 063501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.063501>
- [51] Yadav, J.K., Bagla, J.S. and Khandai, N. (2010) Fractal Dimension as a Measure of the Scale of Homogeneity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **405**, 2009-2015. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16612.x>
- [52] Geller, M.J. and Huchra, J.P. (1989) Mapping the Universe. *Science*, **246**, 897-903. <https://doi.org/10.1126/science.246.4932.897>
- [53] Gott III, J.R., Jurić, M., Schlegel, D., Hoyle, F., Vogeley, M., Tegmark, M., Bahcall, N. and Brinkmann, J. (2005) A Map of the Universe. *The Astrophysical Journal*, **624**, 463-484. <https://doi.org/10.1086/428890>
- [54] Webster, A. (1982) The Clustering of Quasars from an Objective-Prism Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **199**, 683-705. <https://doi.org/10.1093/mnras/199.3.683>
- [55] Crampton, D., Cowley, A.P. and Hartwick, F.D.A. (1987) The Space Distribution of Faint Quasars from the CFHT Survey. *The Astrophysical Journal*, **314**, 129-144. <https://doi.org/10.1086/165045>
- [56] Clowes, R.G. and Campusano, L.E. (1991) A 100-200 Mpc Group of Quasars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **249**, 218-226. <https://doi.org/10.1093/mnras/249.2.218>
- [57] Mészáros, P. (2006) Gamma-Ray Bursts. Reports on Progress in Physics, **69**, 2259-2321. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/69/8/R01>
- [58] Horváth, I., Hakkila, J. and Bagoly, Z. (2014) Possible Structure in the GRB Sky Distribution at Redshift Two. *Astronomy & Astrophysics*, **561**, Article No. L12. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201323020>
- [59] Etherington, I.M.H. (2007) Republication of: LX. On the Definition of Distance in General Relativity. *General Relativity and Gravitation*, **39**, 1055-1067. <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0447-x>
- [60] Renzi, F., Hogg, N.B. and Giaré, W. (2022) The Resilience of the Etherington-Hubble Relation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **513**, 4004-4014. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1030>
- [61] Zumalacárregui, M., García-Bellido, J. and Ruiz-Lapuente, P. (2012) Tension in the Void: Cosmic Rulers Strain Inhomogeneous Cosmologies. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **2012**, Article No. 009. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/10/009>
- [62] Kenworthy, W.D., Scolnic, D. and Riess, A. (2019) The Local Perspective on the Hubble Tension: Local Structure Does Not Impact Measurement of the Hubble Constant. *The Astrophysical Journal*, **875**, Article No. 145. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0ebf>
- [63] Camarena, D., Marra, V., Sakr, Z. and Clarkson, C. (2022) A Void in the Hubble Tension? The End of the Line for the Hubble Bubble. *Classical and Quantum Gravity*, **39**, Article ID: 184001. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/ac8635>
- [64] Camarena, D., Marra, V., Sakr, Z. and Clarkson, C. (2022) The Copernican Principle in Light of the Latest Cosmological Data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **509**, 1291-1302. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab3077>
- [65] Clarkson, C., Bassett, B. and Lu, T.H.-C. (2008) A General Test of the Copernican Principle. *Physical Review Letters*, **101**, Article ID: 011301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.011301>
- [66] Buchert, T. and Carfora, M. (2008) On the Curvature of the Present-Day Universe. *Classical and Quantum Gravity*, **25**, Article ID: 195001. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/25/19/195001>
- [67] Goodman, J. (1995) Geocentrism Reexamined. *Physical Review D*, **52**, 1821-1827. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.1821>

- [68] Heavens, A.F., Jimenez, R. and Maartens, R. (2011) Testing Homogeneity with the Fossil Record of Galaxies. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **2011**, Article No. 035. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2011/09/035>
- [69] Phillips, M.M. (1993) The Absolute Magnitudes of Type IA Supernovae. *Astrophysical Journal Letters*, **413**, L105-L108. <https://doi.org/10.1086/186970>
- [70] Hillebrandt, W. and Niemeyer, J.C. (200) Type IA Supernova Explosion Models. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **38**, 191-230. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.38.1.191>
- [71] Riess, A.G., Press, W.H. and Kirshner, R.P. (1995) Using Type IA Supernova Light Curve Shapes to Measure the Hubble Constant. *Astrophysical Journal Letters*, **438**, L17-L20. <https://doi.org/10.1086/187704>
- [72] Guy, J., Astier, P., Nobili, S., Regnault, N. and Pain, R. (2005) SALT: A Spectral Adaptive Light Curve Template for Type IA Supernovae. *Astronomy & Astrophysics*, **443**, 781-791. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053025>
- [73] Campanelli, L., Cea, P., Fogli, G.L. and Marrone, A. (2011) Testing the Isotropy of the Universe with Type IA SUPERNOVAE. *Physical Review D*, **83**, Article ID: 103503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.103503>
- [74] Li, X., Lin, H.-N., Wang, S. and Chang, Z. (2013) Λ CDM Model with a Scalar Perturbation vs. Preferred Direction of the Universe. *European Physical Journal C*, **73**, Article No. 2653. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-013-2653-x>
- [75] Aluri, P.K., Panda, S., Sharma, M. and Thakur, S. (2013) Anisotropic Universe with Anisotropic Sources. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **2013**, Article No. 003. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2013/12/003>
- [76] Chang, Z., Li, X., Lin, H.-N. and Wang, S. (2014) Constraining Anisotropy of the Universe from Different Groups of Type-IA Supernovae. *The European Physical Journal C*, **74**, Article No. 2821. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-014-2821-7>
- [77] Wang, Y.-Y. and Wang, F.Y. (2018) Testing the Isotropy of the Universe with Type IA Supernovae in a Model-Independent Way. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **474**, 3516-3522. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2982>
- [78] Deng, H.-K. and Wei, H. (2018) Testing the Cosmic Anisotropy with Supernovae Data: Hemisphere Comparison and Dipole Fitting. *Physical Review D*, **97**, Article ID: 123515. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.123515>
- [79] Antoniou, I. and Perivolaropoulos, L. (2010) Searching for a Cosmological Preferred Axis: Union2 Data Analysis and Comparison with Other Probes. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **2010**, Article No. 012. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2010/12/012>
- [80] Cai, R.-G. and Tuo, Z.-L. (2012) Direction Dependence of the Deceleration Parameter. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **2012**, Article No. 004. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/02/004>
- [81] Cai, R.-G., Ma, Y.-Z., Tang, B. and Tuo, Z.-L. (2013) Constraining the Anisotropic Expansion of Universe. *Physical Review D*, **87**, Article ID: 123522. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.123522>
- [82] Zhao, W., Wu, P.X. and Zhang, Y. (2013) Anisotropy of Cosmic Acceleration. *International Journal of Modern Physics D*, **22**, Article ID: 1350060. <https://doi.org/10.1142/S0218271813500600>
- [83] Yang, X.F., Wan, F.Y. and Chu, Z. (2014) Searching for a Preferred Direction with Union2.1 Data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **437**, 1840-1846. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt2015>
- [84] Chang, Z. and Lin, H.-N. (2015) Comparison between Hemisphere Comparison Method and Dipole-Fitting Method in Tracing the Anisotropic Expansion of the Universe Use the Union2 Data Set. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **446**, 2952-2958. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu2349>
- [85] Lin, H.-N., Wang, S., Chang, Z. and Li, X. (2016) Testing the Isotropy of the Universe by Using the JLA Compilation of Type IA Supernovae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **456**, 1881-1885. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2804>
- [86] Lin, H.-N., Li, X. and Chang, Z. (2016) The Significance of Anisotropic Signals Hiding in the Type IA Supernovae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **460**, 617-626. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw995>
- [87] Chang, Z., Lin, H.-N., Sang, Y. and Wang, S. (2018) A Tomographic Test of Cosmological Principle Using the JLA Compilation of Type IA Supernovae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **478**, 3633-3639. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1120>
- [88] Javanmardi, B., Porciani, C., Kroupa, P. and Pflamm-Altenburg, J. (2015) Probing the Isotropy of Cosmic Acceleration Traced by Type IA Supernovae. *The Astrophysical Journal*, **810**, Article No. 47. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/810/1/47>
- [89] Bengaly, C.A.P., Bernui, A. and Alcaniz, J.S. (2015) Probing Cosmological Isotropy with Type IA Supernovae. *The Astrophysical Journal*, **808**, Article No. 39. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/39>
- [90] Andrade, U., Bengaly, C.A.P., Alcaniz, J.S. and Santos, B. (2018) Isotropy of Low Redshift Type IA Supernovae: A Bayesian Analysis. *Physical Review D*, **97**, Article ID: 083518. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.083518>
- [91] Deng, H.-K. and Wei, H. (2018) Null Signal for the Cosmic Anisotropy in the Pantheon Supernovae Data. *The Euro-*

- pean *Physical Journal C*, **78**, Article No. 755. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-6159-4>
- [92] Wang, J.S. and Wang, F.Y. (2014) Probing the Anisotropic Expansion from Supernovae and GRBs in a Model-Independent Way. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **443**, 1680-1687. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu1279>
- [93] Schwarz, D.J. and Weinhorst, B. (2007) (An)Isotropy of the Hubble Diagram: Comparing Hemispheres. *Astronomy & Astrophysics*, **474**, 717-729. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077998>
- [94] Mariano, A. and Perivolaropoulos, L. (2012) Is there Correlation between Fine Structure and Dark Energy Cosmic Dipoles? *Physical Review D*, **86**, Article ID: 083517. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.083517>
- [95] Zhao, D., Zhou, Y. and Chang, Z. (2019) Anisotropy of the Universe via the Pantheon Supernovae Sample Revisited. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **486**, 5679-5689. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz1259>
- [96] Colin, J., Mohayaee, R., Sarkar, S. and Shafieloo, A. (2011) Probing the Anisotropic Local Universe and beyond with SNe IA Data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **414**, 264-271. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18402.x>
- [97] Hu, J.P. Wang, Y.Y. and Wang, F.Y. (2020) Testing Cosmic Anisotropy with Pantheon Sample and Quasars at High Redshifts. *Astronomy & Astrophysics*, **643**, Article No. A93. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038541>
- [98] Broutl, D., Scolnic, D., *et al.* (2022) The Pantheon+ Analysis: Cosmological Constraints. *The Astrophysical Journal*, **938**, Article No. 110.
- [99] Kaiser, N. (1986) Evolution and Clustering of Rich Clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **222**, 323-345. <https://doi.org/10.1093/mnras/222.2.323>
- [100] Giodini, S., *et al.* (2013) Scaling Relations for Galaxy Clusters: Properties and Evolution. *Space Science Reviews*, **177**, 247-282. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9994-5>
- [101] Migkas, K. and Reiprich, T.H. (2018) Anisotropy of the Galaxy Cluster X-Ray Luminosity-Temperature Relation. *Astronomy & Astrophysics*, **611**, Article No. A50. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731222>
- [102] Amati, L., *et al.* (2018) The THESEUS Space Mission Concept: Science Case Design and Expected Performances. *Advances in Space Research*, **62**, 191-244.
- [103] Wang, F.Y., Dai, Z.G. and Liang, E.W. (2015) Gamma-Ray Burst Cosmology. ArXiv: 1504.00735.
- [104] Sokolov, V.V., *et al.* (2018) The Core Collapse Supernovae, Gamma-Ray Bursts and SN 1987A.
- [105] Řípa, J. and Shafieloo, A. (2019) Update on Testing the Isotropy of the Properties of Gamma-Ray Bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **486**, 3027-3040.
- [106] Andrade, U., Carlos, A.P.B., Alcaniz, J.S. and Capozziello, S. (2019) Revisiting the Statistical Isotropy of GRB Sky Distribution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Preprint.
- [107] Hartmann, D. and Blumenthal, G.R. (1989) Angular Clustering Properties of Gamma-Ray Bursts and Quantitative Constraints on Their Distances. *The Astrophysical Journal*, **342**, 521-526. <https://doi.org/10.1086/167611>
- [108] Briggs, M.S., *et al.* (1996) BATSE Observations of the Large-Scale Isotropy of Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, **459**, 40-43. <https://doi.org/10.1086/176867>
- [109] Tegmark, M., Hartmann, D.H., Briggs, M.S. and Meegan, C.A. (1996) The Angular Power Spectrum of BATSE 3B Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, **468**, 214-224. <https://doi.org/10.1086/177684>
- [110] Tarnopolski, M. (2017) Testing the Anisotropy in the Angular Distribution of *Fermi*/GBM Gamma-Ray Bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **472**, 4819-4831. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2356>
- [111] Řípa, J. and Shafieloo, A. (2017) Testing the Isotropic Universe Using the Gamma-Ray Burst Data of *Fermi*/GBM. *The Astrophysical Journal*, **851**, Article No. 15. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa9708>
- [112] Vavrek, R., Balazs, L.G., Meszaros, A., Horvath, I. and Bagoly, Z. (2008) Testing the Randomness in the Sky-Distribution of Gamma-Ray Bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **391**, 1741-1748. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13635.x>
- [113] Gerasim, R.V., Orlov, V.V. and Raikov, A.A. (2015) Study of the Large-Scale Distribution of Gamma-Ray Burst Sources by the Method of Pairwise Distances. *Astrophysics*, **58**, 204-215. <https://doi.org/10.1007/s10511-015-9376-7>
- [114] Shirokov, S.I., Raikov, A.A. and Baryshev, Y.V. (2017) Spatial Distribution of Gamma-Ray Burst Sources. *Astrophysics*, **60**, 484-496. <https://doi.org/10.1007/s10511-017-9500-y>
- [115] Balázs, L.G., Meszáros, A. and Horváth, I. (1998) Anisotropy of the Sky Distribution of Gamma-Ray Bursts. *Astronomy & Astrophysics*, **339**, 1-6.
- [116] Cline, D.B., Matthey, C. and Otwinowski, S. (1999) Study of Very Short Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, **527**, 827-834. <https://doi.org/10.1086/308094>
- [117] Magliocchetti, M., Ghirlanda, G. and Celotti, A. (2003) Evidence for Anisotropy in the Distribution of Short-Lived

- Gamma-Ray Bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **343**, 255-258. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06657.x>
- [118] Mészáros, A., Bagoly, Z., Horváth, I., Balázs, L.G. and Vavrek, R. (2000) A Remarkable Angular Distribution of the Intermediate Subclass of Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, **539**, 98-101. <https://doi.org/10.1086/309193>
- [119] Litvin, V.F., Matveev, S.A., Mamedov, S.V. and Orlov, V.V. (2001) Anisotropy in the Sky Distribution of Short Gamma-Ray Bursts. *Astronomy Letters*, **27**, 416-420. <https://doi.org/10.1134/1.1381609>
- [120] Labini, F.S., Tekhanovich, D. and Baryshev, Y.V. (2014) Spatial Density Fluctuations and Selection Effects in Galaxy Redshift Surveys. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **2014**, Article No. 035. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/07/035>
- [121] Risaliti, G. and Lusso, E. (2019) Cosmological Constraints from the Hubble Diagram of Quasars at High Redshifts. *Nature Astronomy*, **3**, 272-277. <https://doi.org/10.1038/s41550-018-0657-z>
- [122] Zavarygin, E.O. and Webb, J.K. (2019) A Search for Cosmological Anisotropy Using the Lyman Alpha Forest from SDSS Quasar Spectra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **489**, 3966-3980. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2416>
- [123] Cai, R.-G., Cao, Z., Guo, Z.-K., Wang, S.-J. and Yang, T. (2017) The Gravitational-Wave Physics. *National Science Review*, **4**, 687-706. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx029>
- [124] Cai, R.-G., Liu, T.-B., Liu, X.-W., Wang, S.-J. and Yang, T. (2018) Probing Cosmic Anisotropy with Gravitational Waves as Standard Sirens. *Physical Review D*, **97**, Article ID: 103005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.103005>
- [125] Cruz, M., Tucci, M., Martínez-González, E. and Vielva, P. (2006) The Non-Gaussian Cold Spot in *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*: Significance, Morphology and Foreground Contribution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **369**, 57-67. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10312.x>
- [126] Zhang, R. and Huterer, D. (2010) Disks in the Sky: A Reassessment of the WMAP “Cold Spot”. *Astroparticle Physics*, **33**, 69-74. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2009.11.005>
- [127] Hanson, D. and Lewis, A. (2009) Estimators for CMB Statistical Anisotropy. *Physical Review D*, **80**, Article ID: 063004. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.80.063004>
- [128] Das, S., Mitra, S., Rotti, A., Pant, N. and Souradeep, T. (2016) Statistical Isotropy Violation in WMAPCMB Maps Resulting from Non-Circular Beams. *Astronomy & Astrophysics*, **591**, Article No. A97. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424164>