

超越爱因斯坦的旅程：修正引力理论与宇宙学模型*

王海天 徐立昕[†]

(大连理工大学物理学院 大连 116024)

2025-06-10 收到

[†] email: lxxu@dlut.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250703

CSTR: 32040.14.wl20250703

The journey beyond Einstein: modified gravity theories and cosmological models

WANG Hai-Tian XU Li-Xin[†]

(School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

摘要 在宇宙学研究中, 广义相对论虽在局部尺度取得成功, 但在解释星系旋转曲线异常、宇宙加速膨胀等宇宙尺度现象时面临困境, 暗物质和暗能量本质也尚未明确, 这促使科学家探索修正引力理论与宇宙学模型。修正引力理论通过调整引力基本假设, 为解决宇宙学难题提供新视角。如 $f(R)$ 引力可驱动早期宇宙暴胀并在晚期模拟暗能量效应; 标量-张量理论引入动态标量场调节引力强度; 膜宇宙模型利用额外维度引力泄漏解释宇宙加速膨胀。引力波作为时空探针, 为检验引力理论和研究宇宙演化开辟了新窗口, 例如 GW170817 的联合观测限制了引力波传播速度与光速的偏差。未来, 欧几里得卫星等空间引力波探测器天文项目将提供更多数据, 进一步检验修正引力理论, 推动人们对宇宙本质的理解, 助力物理学迈向新时代。

关键词 修正引力理论, 宇宙学模型, 引力波, 广义相对论

Abstract In cosmological research, although the general theory of relativity has achieved success on local scales, it faces difficulties in explaining cosmic-scale phenomena such as abnormal galactic rotation curves and the accelerated expansion of the universe. Moreover, the nature of dark matter and dark energy remains unclear. These issues have prompted scientists to explore modified gravitational theories and cosmological models, which offer new perspectives on cosmological puzzles by adjusting the basic assumptions of gravity. For example, $f(R)$ gravity can drive the inflation of the early universe and simulate the effects of dark energy in the late stage; scalar-tensor theories introduce dynamic scalar fields to regulate the strength of gravity; and braneworld models explain the accelerated expansion of the universe using the gravitational leakage of extra dimensions. Gravitational waves, as probes of spacetime, open up a new window for testing gravitational theories and studying the evolution of the universe. For instance, the joint observation of GW170817 constrained the deviation of the propagation speed of gravitational waves from the speed of light. In the future, astronomical projects such as the Euclid satellite and space-based gravitational wave detectors will provide more data to further test the modified theories, promoting our understanding of the nature of the universe and helping physics move towards a new age.

Keywords modified gravity theories, cosmological models, gravitational wave, general relativity

1 引言

引力是自然界中最直观却又最深奥的基本相互作用之一。从苹果落地的日常现象到星系团的宏伟舞蹈,引力遍布于宇宙的每一个角落。1687年,牛顿在其划时代的著作《自然哲学的数学原理》中提出了万有引力定律,用一个简洁的数学表达式——引力与质量乘积成正比,与距离平方成反比——统一了地球和天体的运动规律。这一理论成功解释了行星的椭圆轨道、潮汐的周期性变化以及彗星的回归,成为经典物理学的基石。然而,随着19世纪天文观测精度的提高,牛顿引力理论的局限性逐渐显现。例如,水星近日点的异常进动——每百年约43角秒的额外偏移——无法用牛顿引力精确描述。这一现象早在1859年由法国天文学家勒威耶(Urbain Jean Joseph Le Verrier)通过光学望远镜的长期观测数据发现,成为推动引力理论革新的重要契机。

1915年,爱因斯坦受到马赫(Mach)原理的启发,认为局部引力与宇宙整体质量分布相关,力求使物理定律在所有参考系中一致,进而提出了广义相对论,将引力理解为物质分布导致的时空弯曲现象,实现了引力与时空几何的统一、理论的美学统一与物理一致性,体现了对自然规律的深刻哲学探索。这一理论不仅解释了水星近日点每百年约43角秒的异常进动,还预言了光线在强引力场中的偏折、引力波等新现象。1919年5月29日,英国天文学家爱丁顿团队分别在巴西和非洲西海岸的日全食观测中,测量了太阳引力场中背景恒星光线的偏折角度,结果约为1.75角秒,与广义相对论的预言高度吻合^[1]。这一实验震撼了科学界,使广义相对论迅速成为引力研究的标杆。随后,广义相对论在多个领域得到了验证。例如,地球引力场对时钟的微小影响(引力红移效应)已被精确测量,并应用于现代全球定位系统的计时校正。此外,广义相对论还预言了黑洞的存在,20世纪下半叶,天文学家通过X射线双星系统

和引力透镜效应发现了大量黑洞候选者,例如银河系中心的Sgr A*,其质量约为400万倍太阳质量。

广义相对论的另一伟大预言是引力波,即由加速运动的大质量物体(如黑洞或中子星构成的双星系统)产生的时空涟漪。爱因斯坦在1916年首次提出这一概念,但认为其强度过于微弱,难以探测^[2]。经过近一个世纪的技术积累,2015年9月14日,美国激光干涉引力波天文台(LIGO)捕获了双黑洞并合事件GW150914的信号^[3]。这两个黑洞(质量分别为36和29倍太阳质量)在13亿光年外合并,释放了相当于3个太阳质量的能量,以引力波的形式传播到地球。这一发现不仅验证了广义相对论的预言,还开启了引力波天文学的新纪元,为研究极端引力环境和宇宙演化提供了全新工具。2017年,三位主导相关地面引力波探测项目的科学家因这一成就荣获诺贝尔物理学奖。

尽管广义相对论在局部尺度上取得了巨大成功,但在宇宙的宏大尺度上,其局限性逐渐浮现。20世纪初,天文学家开始探索宇宙的整体结构。1929年,哈勃通过观测遥远星系的红移,发现宇宙正在膨胀,这一发现奠定了现代宇宙学的基础。广义相对论预言,宇宙的膨胀速率应因引力作用逐渐减慢。然而,1998年,两个独立的研究团队通过对Ia型超新星的观测发现,宇宙在过去数十亿年中加速膨胀(约为当前宇宙尺度的2/3大小时开始)^[4, 5]。Ia型超新星作为“标准烛光”,其亮度与距离的已知关系为测量宇宙膨胀提供了可靠依据。这一结果迫使科学家引入暗能量概念,认为其是一种具有负压的神秘能量,推动宇宙加速膨胀。为了将暗能量纳入广义相对论的框架,研究者通常以宇宙常数 Λ 的形式将其加入场方程,形成了当前的宇宙学标准模型:冷暗物质加宇宙常数模型(Λ CDM)。

暗物质的概念则更早提出。1933年,瑞士天文学家兹威基(Fritz Zwicky)在研究后发座星团时发现,其成员星系的运动速度远超可见质量所能提供的引力束缚^[6]。他计算出,星团中恒星和气体的总质量仅能解释所需引力的约10%,因此提出了“暗物质”的假说,认为存在一种不可见的

* 国家自然科学基金(批准号:12475047)资助项目

物质为星团提供了额外的引力。1970年代,美国天文学家鲁宾(Vera Rubin)通过对螺旋星系旋转曲线的研究,进一步证实了这一观点^[7]。她的观测表明,星系外围恒星的运动速度并未如牛顿引力预期的随距离增加而减小,而是保持近乎恒定。这种“平坦”的旋转曲线暗示,星系中存在大量不可见物质,形成一个围绕星系的晕。这些观测奠定了暗物质在现代宇宙学中的地位。根据普朗克卫星2018年的最新测量,宇宙的总能量密度分布为:普通物质约占4.9%,暗物质约占26.5%,暗能量约占68.6%^[8]。

然而,暗物质和暗能量的本质仍是未解之谜。数十年的探测实验,如大型地下氙探测器和费米空间望远镜,未能直接捕获暗物质粒子,如弱相互作用大质量粒子。暗能量的理论解释同样充满争议。基于量子真空能量计算的宇宙常数预言值与观测值相差120个数量级,这一“宇宙常数问题”是物理学中的重大难题(“精细调节问题”)^[9]。此外,暗能量的能量密度为何在当前宇宙中恰好与物质密度相当(“巧合问题”),也缺乏令人满意的解释。这些观测上的难题促使科学家质疑广义相对论在宇宙尺度上的适用性,修正引力理论应运而生。这些理论试图通过修改引力的基本假设,解释宇宙的加速膨胀和星系动力学,而无需依赖暗物质和暗能量。例如, $f(R)$ 引力通过调整时空曲率的响应方式模拟暗能量的效应,标量—张量理论引入动态标量场调节引力强度,膜宇宙模型则利用额外维度的引力泄漏解释加速膨胀。特别地, $f(R)$ 引力可通过共形变换转化为一类特殊的标量—张量理论,其中标量场源自于对里奇(Ricci)标量的非线性推广。

修正引力理论的动机还包括理论上的需求。广义相对论与量子力学在奇点(如黑洞中心或大爆炸初始)处存在根本矛盾,时空曲率趋于无穷,场方程失效。量子引力的探索(如弦理论和圈量子引力)试图解决这一问题,而修正引力理论被视为一种中间路径,可能在不引入量子框架的情况下,解释宇宙学观测中的异常现象。此外,引力波的探测为测试修正引力理论提供了新窗口。2017年

的GW170817事件(中子星并合)尤为关键,其引力波与伽马射线暴的到达时间差仅1.7秒,跨越1.3亿光年,限制了引力波传播速度与光速的偏差小于 10^{-15} 。这一结果支持广义相对论,同时对许多修正引力模型提出了挑战^[10, 11]。

本文旨在深入探讨修正引力理论及其在宇宙学中的应用,并分析引力波如何成为检验这些理论的关键工具。我们将从广义相对论的成功与局限出发,逐步剖析修正引力理论的多样性,包括 $f(R)$ 、 $f(T)$ 和 $f(Q)$ 引力、标量—张量理论、矢量—张量理论和膜宇宙模型的理论基础及其宇宙学模型;随后探讨引力波的观测突破及其在测量宇宙参数、测试引力理论和探测早期宇宙中的应用;最后总结这些领域的交汇如何推动我们对宇宙本质的理解。

2 修正引力理论及宇宙学:重塑引力框架与宇宙演化

修正引力理论可以简单地概括为修改了爱因斯坦引力理论中能量动量分布与时空结构之间的关系,改变了引力相互作用的传播模式。若考虑四维时空结构,包括将高维时空理论约化后得到的四维时空,即将四维时空的度规作3+1分解为标量、矢量和张量部分,此时引力的相互作用仅可能为三种传播模式,即标量、矢量和张量模式。这些不同的引力传播模式修改了物质间相互作用,从而修改了引力相互作用和宇宙的演化。基于这一基本逻辑,本部分重点介绍当前比较流行的修正引力理论,包括 $f(R)$ 、 $f(T)$ 和 $f(Q)$ 引力、标量—张量理论、矢量—张量理论和膜宇宙模型以及宇宙演化。

2.1 $f(R)$ 、 $f(T)$ 和 $f(Q)$ 引力:曲率、挠率和非度规相容的函数扩展

一般地,可对度规 (L, g) 的仿射连通时空作如下分类:一般仿射连通时空的里奇标量、挠率和非度规相容量均不为零 $R \neq 0, T \neq 0, Q \neq 0$ 。 $R =$

$0, T \neq 0, Q \neq 0$ 对应远平行几何； $R \neq 0, T = 0, Q \neq 0$ 对应无挠几何； $R \neq 0, T \neq 0, Q = 0$ 对应黎曼—嘉当几何。以此类推，若 $R = 0, T = 0, Q = 0$ ，且该时空为拓扑平凡的平直时空，则其为闵可夫斯基时空^[12-16]。

如图1所示，曲率、挠率和非度规相容性可几何地理解为：曲率为一个矢量绕一闭合曲线作平行移动回到起点后与原初矢量的差；挠率为起点相同的两矢量沿彼此作平行移动后终点不重合的差，或者理解为作平行移动后的两矢量张成的平面与原初两个矢量所张成平面的差；非度规相容性为一个矢量作平行移动时长度的变化。

在广义相对论中，引力的描述基于爱因斯坦—希尔伯特作用量，其中引力项简单地与时空的里奇标量 R 成正比。而一般度规 (L_a, g) 的仿射连通时空的曲率由黎曼曲率、挠率和非度规相容性三者之和构成。此时将爱因斯坦—希尔伯特作用量写成一般曲率的形式，故任何两者为零时都等效地对应“曲率”，从而得到等价的三种描述引力的形式，如图2所示，称为“三位一体引力”^[15]。也很容易证明将三者扩展为任意函数 $f(R)$ 、 $f(T)$ 和 $f(Q)$ 时不再等价，这就是通过修改广义相对论的作用量形式来扩展引力理论的方法。这种方法的核心思想是，通过调整时空曲率的响应方式，可以在不同尺度上改变引力的行为，既能解释宇

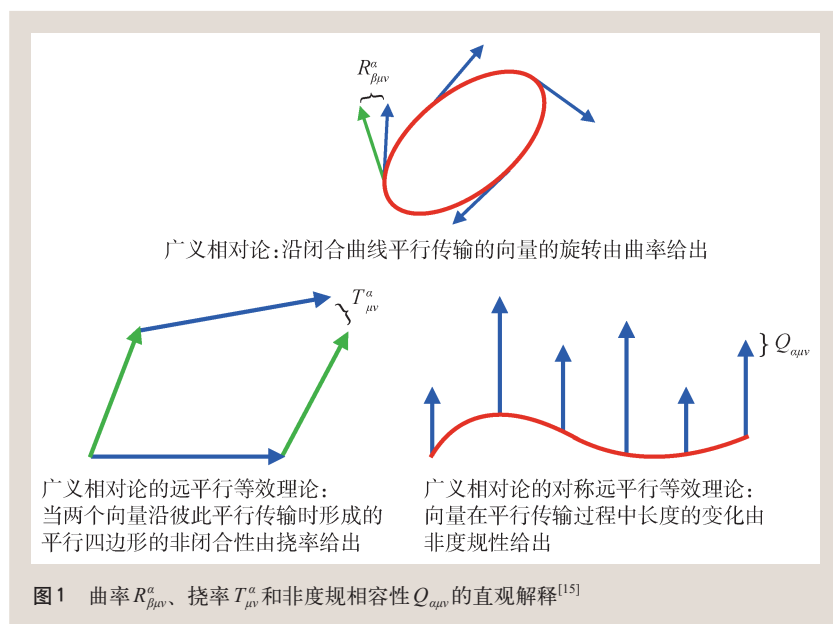
宙的加速膨胀，也可能模拟暗物质的引力效应。

$f(R)$ 引力则将这一线性关系推广为 R 的任意函数 $f(R)$ ，从而引入了新的物理效应^[17-25]。 $f(R)$ 引力的概念最早可以追溯到20世纪70年代，当时科学家开始探索引力理论的非线性扩展。例如，斯塔罗宾斯基(Alexei Starobinsky)在1980年提出了一个经典模型，即 $f(R) = R + \alpha R^2$ ，其中 α 是一个正的常数^[17]。这一模型在高曲率条件下(如早期宇宙)具有重要意义。在宇宙诞生后的极短时间内， R^2 项主导了引力行为，导致宇宙经历了一段指数膨胀，这一过程与现代暴胀理论中的暴胀阶段类似。斯塔罗宾斯基模型的独特之处在于，它无需引入额外的暴胀场(如标量场暴胀)，仅通过引力的几何修改即可实现暴胀。这一特性使其成为早期宇宙学研究的里程碑，被广泛认为是暴胀理论的一个重要替代方案(感兴趣的读者可参考同期由皮石和郭宗宽撰写的《早期宇宙暴涨和引力波宇宙学》)。随后，斯塔罗宾斯基模型的预测被宇宙微波背景辐射(cosmic microwave background, CMB)的观测数据部分验证，例如普朗克卫星测量的标量扰动谱指数，与该模型的预言高度一致。

在晚期宇宙， $f(R)$ 引力被用来解释加速膨胀。2007年，韦恩·胡(Wayne Hu)和萨维茨基(Ignacy Sawicki)提出了一个复杂的 $f(R)$ 形式，旨在模拟

暗能量的效应^[26]。他们设计了一个函数，使其在高曲率区域接近广义相对论，而在低曲率区域(如当前宇宙的平均曲率)产生一个额外的引力效应，推动宇宙加速膨胀。这一模型的关键在于，它能够自然过渡到广义相对论的预测，从而与局部引力的检验结果兼容。例如，太阳系中的行星轨道和光线偏折测量对引力理论的偏差设定了严格的上限，任何修正引力模型都必须满足这些约束。

为了解决局部检验结果的挑



战, $f(R)$ 引力引入了筛选机制, 其中变色龙 (chameleon) 机制是最著名的一种^[27, 28]。这一机制依赖于一个标量场的动态行为, 该标量场的有效质量随环境密度变化。在高密度区域(如地球或太阳系), 标量场的质量变得非常大, 其影响范围被压缩到亚毫米尺度以下, 引力行为几乎完全恢复到广义相对论的预言。在低密度区域(如星系际空间或宇宙背景), 标量场的质量较小, 其效应得以显现, 可能增强星系尺度的引力, 或推动宇宙膨胀。这一机制的灵感来源于粒子物理中的非线性相互作用, 使得 $f(R)$ 引力能够在不同尺度上表现出截然不同的行为。

变色龙机制的有效性已被实验严格检验。例如, 厄缶(Eöt-Wash)实验利用精密扭摆测量了地球引力场中的微小偏差, 并试图探测标量场的存在。结果显示, 任何修正引力的效应必须被压制到极低的水平, 与广义相对论的预测一致。此外, 天文观测也在星系和星团尺度上检验 $f(R)$ 引力的预言。例如, 星系团的引力透镜效应和 X 射线辐射数据表明, $f(R)$ 引力可能通过增强引力效应来解释部分暗物质的作用, 但其参数范围受到严格的约束。

与 Λ CDM 中的宇宙常数不同, $f(R)$ 模型中的有效暗能量随曲率变化, 可能留下独特的观测印记。例如, 宇宙微波背景辐射的综合萨克斯—沃尔夫效应(ISW)效应可能因曲率修改而增强, 这一特征可以通过宇宙微波背景辐射与星系分布的相关测量来检验。

$f(R)$ 理论对宇宙学结构的形成也有影响^[29]。由于引力的非线性修改, 标量场的存在可能增强星系尺度的引力效应, 模拟暗物质的作用。然而, 这种增强必须受到严格控制, 以避免与观测数据冲突。例如, 星系团的 X 射线发射和引力透镜测量表明, $f(R)$ 模型的参数(如标量场的质量和耦合强度)需被限制在狭窄范围内, 以匹配实际的星系团丰度。未来的天文项目, 如于 2023 年发射的欧几里得望远镜(Euclid), 将通过测量数亿个星

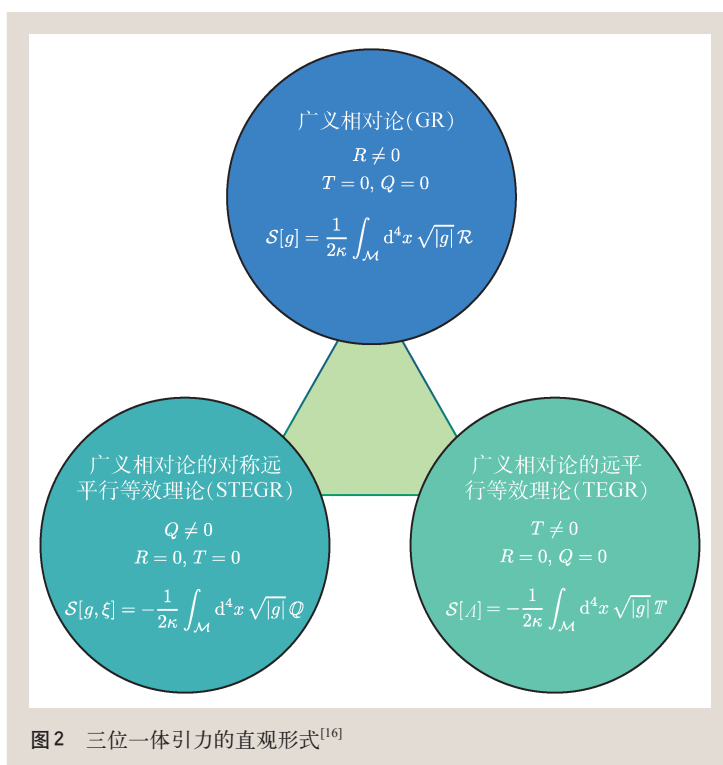


图2 三位一体引力的直观形式^[16]

系的形状和红移, 精确描绘宇宙的结构形成历史, 为 $f(R)$ 宇宙学的预言提供高精度检验。此外, 暗能量光谱仪(DESI)的星系红移测量也将搜寻 $f(R)$ 模型在宇宙膨胀和结构形成中的微弱信号^[30]。

$f(T)$ 修正引力论基于远平行引力理论(teleparallel gravity)。远平行引力理论是广义相对论的一种等价形式, 不同于广义相对论使用列维—奇维塔(Levi—Civita)联络并通过曲率描述引力, 远平行引力理论采用魏岑博克(Weitzenböck)联络, 通过挠率来刻画引力作用^[31, 32]。在这种框架下, 时空的几何性质不再由曲率决定, 而是由挠率张量 T 来表征。它的雏形可以追溯到爱因斯坦在 1920 年代后期的研究。爱因斯坦试图通过这种方法统一引力和电磁力, 尽管当时他的努力并未成功, 远平行理论在随后几十年中也未受到广泛关注。 $f(T)$ 修正引力论的直接起源与 2007 年费拉罗(Ferraro)和菲奥里尼(Fiorini)的工作密切相关。他们受到 $f(R)$ 引力理论(其中 R 为曲率标量)的启发, 将远平行理论中的线性挠率标量 T 推广为 T 的任意函数 $f(T)$, 如幂律形式 $f(T) = T + \alpha T^n$

(其中 α 和 n 为常数),可以在不引入暗能量的情况下解释现阶段宇宙的加速膨胀现象。此外,一些模型还被用于描述早期宇宙的暴胀阶段,为暴胀理论提供了一种替代解释。人们深入地探讨了 $f(T)$ 理论的对称性、守恒定律以及与广义相对论的等价性问题。但是当引入非线性的 $f(T)$ 函数后,局部洛伦兹不变性被打破,导致物理现象的描述依赖于所选取的参考系,一些理论预言可能与实验观测相矛盾。此外,不恰当的 $f(T)$ 形式还可能不存在不稳定等问题。

$f(Q)$ 修正引力论基于对称远平行引力(symmetric teleparallel gravity),这也是广义相对论的一种等价形式^[16]。它采用一种平直、无挠但具有非度规性的联络,通过非度规性标量 Q 刻画引力效应。 $f(Q)$ 修正引力论的直接灵感来源于 $f(R)$ 引力理论。类似于 $f(R)$ 引力理论, $f(Q)$ 理论将对称远平行引力中的非度规性标量 Q 推广为 Q 的函数 $f(Q)$,从而引入了非线性项,增强了理论的灵活性,同样可以解释如宇宙晚期加速膨胀而无需假设暗能量,或早期暴胀而无需引入暴胀场。近年来, $f(Q)$ 引起了人们的广泛关注,然而也同样存在类似于 $f(T)$ 理论的问题,这里不再赘述。

$f(R)$ 、 $f(T)$ 和 $f(Q)$ 修正引力论都必须面临一个共性的问题是:如何确定这些扩展函数的形式。除了在理论上充分地考虑对称性外,从天文观测的角度也有了一些尝试^[33]。然而,至今仍未找到不仅可以描述整个宇宙的演化,也能有效地避免不稳定等问题的有效解。

2.2 标量—张量理论:动态引力场

标量—张量理论通过引入一个标量场 ϕ 与引力场耦合,扩展了广义相对论的框架。这一理论的核心思想是,引力常数 G 不再是固定的常数,而是由标量场动态调节。这种方法在物理学中有着悠久的历史,最早的系统性尝试可以追溯到20世纪初的努德斯特伦(Gunnar Nordstrom)引力理论,但真正奠定标量—张量理论基础的是1961年

由布兰斯(Carl Henry Brans)和迪克(Robert Henry Dicke)提出的布兰斯—迪克理论^[34]。

布兰斯—迪克理论源于对马赫原理的探索。马赫原理认为,局部的物理性质(如惯性)应受到宇宙整体质量分布的影响。基于这一思想,在布兰斯—迪克理论中,引力常数 G 不再是一个固定值,而是与一个标量场 ϕ 成反比,即 $G \propto 1/\phi$ 。该标量场的动力学行为由一个无量纲参数 ω 所决定, ω 的大小反映了标量场与引力之间的耦合强度。当 $\omega \rightarrow \infty$ 时,该理论在物理结果上趋于广义相对论的预言。观测数据通过引力红移测量和行星轨道的精确性,对 ω 设定了严格的下限。例如,太阳系测试表明 ω 值必须大于40000,这一结果显示布兰斯—迪克理论与广义相对论在局部尺度上高度一致。

尽管布兰斯—迪克理论在局部尺度上受到严格约束,但其在宇宙学中的潜力激发了进一步的探索。霍恩德斯基理论是标量—张量理论的广义框架,由霍恩德斯基(Gregory Horndeski)于1974年提出^[35]。这一理论包含了所有可能的二阶标量—张量相互作用形式,同时避免了奥斯特罗格拉茨基(Ostrogradsky)不稳定性(一种可能导致理论不稳定的高阶导数问题)。霍恩德斯基理论的灵活性使其能够描述丰富的物理现象。例如,在某些参数配置下,黑洞可能携带额外的标量自由度,称为“标量毛发”,这违反了广义相对论的“无毛定理”(即黑洞仅由质量、角动量和电荷描述)。这种标量毛发可能通过引力波回声被探测到,引力波回声是黑洞并合后残余振荡的微弱信号,目前地面引力波探测正在尝试搜寻这一现象存在的证据。

标量—张量理论在宇宙学中的一个重要应用是模拟暗能量。标量场 ϕ 可以作为一个动态暗能量分量,其势能随时间演化,推动宇宙加速膨胀。例如,第五元素模型假设标量场具有一个缓慢滚动的势能,与宇宙常数不同,其能量密度随宇宙膨胀而变化。这种动态行为可能留下独特的观测印记,例如宇宙微波背景辐射的综合萨克斯—沃尔夫效应或星系分布的功率谱变化。 k -本质(k -

essence)模型是标量—张量宇宙学的进一步扩展,引入非标准动力学项,使标量场的压力和能量密度关系更加复杂。 k -本质模型可以产生“追踪行为”,即标量场的能量密度自动调整以追踪物质或辐射的密度,从而缓解暗能量的“巧合问题”。在结构形成方面,标量场的存在可能改变引力势的演化速率,影响星系团的形成时间和丰度。重子声学振荡光谱巡天(BOSS)的最新数据表明,当前观测与 Λ CDM模型一致,但标量—张量模型的微弱偏差可能在未来更高精度的数据中显现。

与 $f(R)$ 引力理论类似,标量—张量理论也需要筛选机制来通过局部测试。范施泰因(Vainshtein)筛选机制是最常用的一种,利用标量场的非线性自相互作用,在高密度区域(如太阳系)将标量场的影响压制到极低水平。这一机制依赖于标量场的动力学方程,在高曲率环境下形成一个“屏障”,限制其传播范围。天文观测通过星系引力透镜和星系团的X射线发射,初步测试了标量—张量模型的预言。例如,暗能量巡天(DES)的最新结果表明,标量场的效应在当前数据中尚未显著显现,但未来更高精度的观测可能揭示其踪迹。

近年来,中山大学的高显团队提出了基于空间协变的引力理论,其核心思想是使用标量场定义的超曲面的几何量,而不是标量场或时空曲率的协变导数来构建理论^[36]。这种方法可以有效地避免鬼场或者不必要的自由度,统一了 k -本质、霍恩德斯基理论以及暴胀有效场论等,并且非常自然地包含多标量场情形。

2.3 矢量—张量理论:对称性破缺

矢量—张量理论通过引入一个矢量场 A_μ 来修正引力,与标量—张量理论的标量场方法不同,矢量场的引入打破了时空的洛伦兹对称性,这一特性可能在宇宙学和星系尺度上产生显著影响。爱因斯坦—以太理论是矢量—张量理论的代表,由雅各布森(Ted Jacobson)和马特林(David Mattingly)于2001年提出^[37]。该理论假设存在一个优

先参考系,矢量场 A_μ 定义了一个时间方向,其动态与引力场耦合。

爱因斯坦—以太理论的一个潜在应用是增强星系尺度的引力效应,以替代暗物质。矢量场的空间分量可能在星系晕中产生额外的引力分量,使旋转曲线趋于平坦,而无需引入不可见的物质。这一特性使其成为替代暗物质的有力竞争方案。然而,洛伦兹对称性破缺会导致宇宙微波背景辐射的各向异性,普朗克卫星的观测数据显示,CMB的各向同性达到了极高精度,对矢量场的可变空间设定了严格上限。

矢量—张量理论的另一挑战是其参数范围的稳定性。矢量场的动力学可能导致不稳定模式(如鬼态或超光速传播),需要仔细调整理论参数以避免这些问题。尽管如此,该理论在理论物理中仍具有吸引力,因为其对称性破缺可能与量子引力的某些特征相关,例如弦理论中的额外维度效应。

2.4 膜宇宙模型:高维引力理论

1919年,卡鲁扎(Theodor Franz Eduard Kaluza)提出通过引入第五维度统一引力和电磁学;1926年,克莱因(Oskar Klein)发展了紧致化概念;1974年,施瓦茨(John Schwarz)和舍尔克(Joël Scherk)发现超弦理论自然包含引力,使其转向成为量子引力理论的候选。1984年,格林(Michael Boris Green)和施瓦茨提出了超弦理论,引发了“第一次超弦革命”。1995年,威滕(Edward Witten)提出M理论,统一了五种不同的超弦理论,标志着“第二次超弦革命”。1996年,波尔钦斯基(Joseph Gerard Polchinski)提出D-膜概念,D-膜是开放弦的终止点,为研究黑洞和宇宙学提供了新视角。1998年,高维引力理论在大额外维度模型和兰道尔—桑德拉姆模型中得到发展,用于解决层次问题和宇宙学常数问题,并在宇宙学和黑洞研究中取得进展。膜宇宙模型是一种基于高维时空的修正引力理论,假设我们的四维宇宙是一个嵌在更高维空间中的“膜”。Dvali—Gabadadze—Porrati

(DGP)模型是这一类理论的代表,由杜瓦利(Giorgi Dvali)等人于2000年提出^[38]。在DGP模型中,引力场可以穿透到第五维度,导致在宇宙尺度上引力强度减弱。这一效应通过修改弗里德曼方程实现,使得宇宙在晚期经历加速膨胀,而无需引入暗能量^[39]。

DGP模型的一个关键特征是其两分支解:正分支需要额外的暗能量,而负分支通过引力的额外维度效应自然产生加速膨胀。负分支模型在宇宙学中更具吸引力,因为其简化了对暗能量的依赖。然而,该模型在结构形成方面遇到困难。由于引力在宇宙尺度上的减弱,DGP模型预测的星系团的形成速率低于观测值。例如,基于斯隆数字巡天(SDSS)的分析表明DGP模型与实际观测不符。为了弥补这一缺陷,研究者常需引入少量暗物质,削弱了模型的理论简洁性。

膜宇宙模型的观测检验包括宇宙微波背景辐射的偏振效应和引力透镜测量。西蒙斯天文台和未来的宇宙微波背景辐射第四阶段计划(CMB-S4计划)将通过高精度偏振数据,进一步约束DGP模型的参数空间。此外,膜宇宙模型可能影响引力波的传播特性,例如波形的振幅衰减,这将在下一代引力波探测器(如天琴和太极等)中得到验证。

近年来,兰州大学刘玉孝团队在厚膜上费米子的局域化和质量谱、厚膜的内部结构等方面开展了一系列有趣的研究工作^[40, 41]。

2.5 理论检验的前景

修正引力理论的可观测预言包括引力波波形、引力波传播速度、宇宙微波背景辐射的功率谱特征、星系团的动态行为等。当前,局部引力测试高度支持广义相对论,例如太阳系中的光线偏折和行星轨道测量。然而,在宇宙尺度上,修正引力理论仍有探索空间。例如, $f(R)$ 引力和标量—张量理论将会影响CMB的综合萨克斯—沃尔夫效应或星系分布的功率谱,留下独特的观测印记。矢量—张量理论的对称性破缺预期在CMB的各向

异性中显现,而膜宇宙模型的额外维度效应可能影响宇宙膨胀的历史。

未来的天文项目将为检验这些理论提供更多的数据支持。例如,欧几里得卫星将通过测量数亿个星系的形状和红移,精确描绘宇宙的几何和结构形成历史。空间引力波探测器将探测低频引力波,揭示黑洞并合和早期宇宙的信号。地面项目如DESI和时空遗珍巡天(LSST)也将通过大规模星系巡天,搜寻修正引力的微弱信号。这些观测将共同决定修正引力理论的命运,或进一步巩固广义相对论的地位。

2.6 引力波的宇宙学应用

引力波在宇宙学中的应用潜力巨大,不仅为研究宇宙演化提供了新途径,还成为检验引力理论和测量宇宙参数的强有力工具。以下是引力波宇宙学的三大主要应用领域。

测量哈勃常数(H_0)是引力波宇宙学的核心应用之一。普朗克卫星根据CMB数据推导的 H_0 约为67 km/s/Mpc,而基于Ia型超新星和造父变星测量的局部 H_0 值约为73 km/s/Mpc,这一差异已达到 5σ 以上的统计显著性。“哈勃危机”是当前宇宙学的热点问题,可能暗示 Λ CDM模型的缺陷或新物理的存在。修改宇宙学模型为缓解这一危机提供了潜在方案。例如, $f(R)$ 宇宙学通过调整晚期宇宙的膨胀历史,可能使局部 H_0 值与CMB结果更接近。标量—张量模型中的动态暗能量也可以通过改变膨胀速率,调和这一分歧。

检验引力理论是引力波探测的另一重要应用。广义相对论预言引力波以光速传播,并具有两种极化模式,也决定了引力波波形的振幅和相位的形式。修正引力理论可能改变这些特性,例如引力波速度偏离光速、引入额外的极化模(如标量或矢量模)或者影响波形的振幅和相位。GW170817的引力波与伽马射线暴到达时间差仅1.7 s,跨越1.3亿光年,限制了引力波速度与光速的偏差小于 10^{-15} 。这一结果排除了许多修正引力模型(如某些标量—张量理论),支持广义相对论的预测^[42]。此

外,脉冲量计时阵列(PTA)探测到的随机引力波背景信号也对一些修正引力理论给出了有效的限制^[43]。

原初引力波携带大爆炸后极早期(10^{-36} s至 10^{-32} s)的物理信息,是检验暴胀理论和量子引力模型的直接手段。暴胀时期的量子涨落产生张量扰动,形成低频引力波背景,其强度由张量—标量比描述。CMB偏振实验已将张量—标量比约束到小于0.036^[44],未来空间引力波探测项目天琴、太极或激光干涉太空引力波天线(LISA)可能直接探测到这一背景。

3 总结与展望

修正引力理论、修正宇宙学模型和引力波宇宙学的交汇,代表了当代物理学和天文学在探索宇宙本质时的前沿努力。广义相对论作为引力的基石,在局部尺度上取得了无可争议的成功。然而,宇宙尺度的观测现象,如星系旋转曲线的异常、宇宙加速膨胀以及哈勃危机,揭示了其潜在的局限性。暗物质和暗能量的引入虽然使 Λ CDM模型能够解释这些现象,但它们的物理本质尚未明确,数十年的探测努力未能提供直接证据。这种不确定性激发了修正引力理论的发展,试图通过调整引力的基本框架,重新解释宇宙的演化历程。

$f(R)$ 引力、标量—张量理论和膜宇宙模型等修正引力理论为宇宙学难题提供了替代视角。 $f(R)$ 引力通过非线性曲率修改,既能驱动早期宇宙的暴胀,又能在晚期模拟暗能量的效应;标量

—张量理论引入动态标量场,调节引力强度并塑造膨胀历史;DGP膜宇宙模型则利用额外维度的引力泄漏,解释宇宙加速膨胀而无需暗能量。这些模型在理论上具有吸引力,但在观测验证上面临挑战。例如,局部引力测试(如太阳系行星轨道)和宇宙微波背景辐射的精确测量对修正效应的参数空间设定了严格约束。尽管如此,这些理论在宇宙结构形成和膨胀历史等方面仍为探索新物理提供了宝贵思路。

引力波作为时空的探针,为检验修正引力理论和研究宇宙演化开辟了全新窗口。自2015年首次探测以来,地面引力波探测器已捕获数百例引力波事件,从双黑洞并合到双中子星并合,揭示了极端引力环境下的丰富信息。其中GW170817事件尤为关键,其引力波与电磁信号成协,进而限制了引力波的传播速度,支持了广义相对论并排除了部分修正模型。引力波还可作为标准汽笛或暗汽笛进而测量哈勃常数,为解决哈勃危机提供了新的途径。

未来,随着下一代天文项目的推进,修正引力理论和引力波宇宙学的交汇将迎来关键时刻。欧几里得卫星和LSST将通过星系巡天精确描绘宇宙结构,探测修正引力的微弱效应;空间引力波探测器将捕获低频引力波,揭示大质量黑洞并合和原初引力波的信号;CMB-S4和DESI将进一步约束宇宙参数。这些观测将共同决定修正引力理论的命运,或巩固 Λ CDM模型的地位,或揭示超越广义相对论的新物理。无论结果如何,这一探索过程都将加深我们对引力、时空和宇宙本质的理解,推动物理学迈向新的时代。

参考文献

- [1] Dyson F W *et al.* Philosophical Transactions of the Royal Society A, 1920, 220: 291
- [2] Einstein A. Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften, 1916: 688
- [3] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116(6): 061102
- [4] Riess AG *et al.* Astron. J., 1998, 116: 1009
- [5] Perlmutter S *et al.* Astrophys. J., 1999, 517: 565
- [6] Zwicky F. Helvetica Physica Acta, 1933, 6: 110
- [7] Rubin V C *et al.* The Astrophysical Journal, 1980, 238: 471
- [8] Collaboration P. Astronomy & Astrophysics, 2020, 641: A6
- [9] Weinberg S. Reviews of Modern Physics, 1989, 61(1): 1
- [10] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119(16): 161101
- [11] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. D, 2021, 104(12): 122002
- [12] Hayashi K, Shirafuji T. Phys. Rev. D, 1979, 19: 3524
- [13] Hehl F W *et al.* Rev. Mod. Phys., 1976, 48: 393
- [14] Mao Y *et al.* Phys. Rev. D, 2007, 76: 104029

- [15] Jimenez J B, Heisenberg L, Koivisto T S. *Universe*, 2019, 5 (7):173
- [16] Heisenberg L. 2023, arXiv:2309.15958
- [17] Starobinsky A A. *Physics Letters B*, 1980, 91(1):99
- [18] Tsujikawa S. *Lect. Notes Phys.*, 2010, 800:99
- [19] Clifton T *et al.* *Phys. Rep.*, 2012, 513:1
- [20] Felice A, Tsujikawa S. *Living Rev. Relat.*, 2010, 13:3
- [21] Nojiri S, Odintsov S D. *Phys. Rept.*, 2011, 505:59
- [22] Nojiri S, Odintsov S D, Oikonomou V K. *Phys. Rept.*, 2017, 692:1
- [23] Ishak M. *Living Rev. Rel.*, 2019, 22:1
- [24] Amendola L *et al.* *Living Rev. Rel.*, 2018, 21:2
- [25] Joyce A, Jain B, Khoury J *et al.* *Phys. Rept.*, 2015, 568:1
- [26] Hu W, Sawicki I. *Phys. Rev. D*, 2007, 76(6):064004
- [27] Khoury J, Weltman A. *Phys. Rev. D*, 2004, 69:044026
- [28] Khoury J, Weltman A. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93:171104
- [29] Xu L. *Phys. Rev. D*, 2015, 91(6):063008
- [30] DESI Collaboration. *MNRAS*, 2023, 520:3443
- [31] Cai Y F *et al.* *Rept. Prog. Phys.*, 2016, 79:106901
- [32] Bahamonde S *et al.* *Rep. Prog. Phys.*, 2023, 1:86(2)
- [33] Han Y F, Li E K, Xu L X. *Eur. Phys. J. C*, 2024, 84:863
- [34] Brans C, Dicke R H. *Physical Review*, 1961, 124(3):925
- [35] Horndeski G W. *International Journal of Theoretical Physics*, 1974, 10(6):363
- [36] Gao X. *Phys. Rev. D*, 2014, 90:081501
- [37] Jacobson T, Mattingly D. *Phys. Rev. D*, 2001, 64(2):024028
- [38] Dvali G *et al.* *Phys. Lett. B*, 2000, 485:208
- [39] Deffayet C *et al.* *Phys. Rev. D*, 2002, 65(4):044023
- [40] Liu Y X *et al.* *JHEP*, 2008, 2008(08):041
- [41] Liu Y X *et al.* *Phys. Rev. D*, 2009, 80:065020
- [42] Abbott B P *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2019, 123:011102
- [43] NANOGrav Collaboration. *Astrophys. J. Lett.*, 2023, 951:L11
- [44] BICEP and Keck Collaborations. *Phys. Rev. Lett.*, 2021, 127:151301



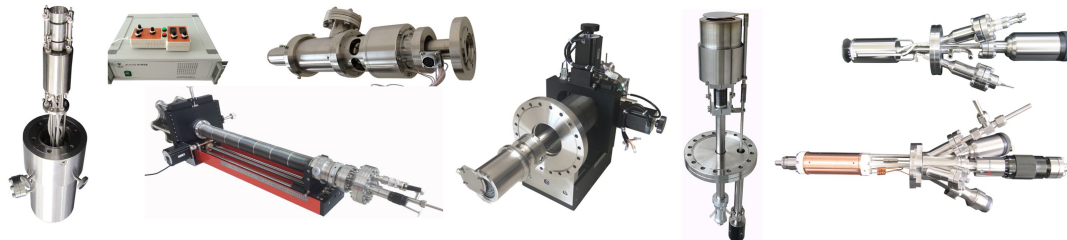
大连齐维科技发展有限公司

地址:大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: info@chi-vac.com HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理和薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

