

阿里原初引力波探测计划与 Axion-Chern-Simons 宇宙学

李 虹¹ 刘 洋¹ 李思宇¹ 蔡一夫² 张新民^{1,3}

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 中国科学技术大学 230026;

3. 中国科学院大学 100049)

2025 年是爱因斯坦提出广义相对论后的 110 周年。在过去的一个多世纪里,该理论成功刻画了万有引力从小尺度到宇宙尺度上的经典性质,取得了诸多卓越成就:它精准解释了水星近日点的进动现象,预言了光线偏折、引力透镜、雷达回波延迟以及引力波等现象,这些预言均已通过实验得到验证。然而,即便取得了如此辉煌的成就,引力理论在新世纪仍面临着一些棘手的难题。首先,暗物质和暗能量占据了宇宙总组分的约 95%,它们几乎主导了宇宙的演化历程,而其本质与引力的性质密切相关。其次,引力的量子化问题——即量子引力——也一直是困扰物理学家数十年的难题。这些困难表明,现有的引力理论在极大尺度(如宇宙尺度)和极小尺度(如量子尺度)上仍存在未解之谜。宇宙的极早期状态为解决这些难题提供了一个独特的试验平台。根据标准宇宙学模型,宇宙在极早期会通过时空的量子波动产生原初引力波。这些引力波一旦诞生,能在宇宙空间中自由传播,它们携带着宇宙诞生时的关键信息。如果实验上能够探测到原初引力波,我们或许就能一窥引力理论的量子特性,从而为引力理论的下一步发展指明方向。

阿里原初引力波探测计划(Ali Cosmic Microwave Background Polarization Telescope, AliCPT, 以下简称阿里计划)是在西藏阿里地区海拔 5250 米建设我国第一个高海拔原初引力波观测站,领导研制和建设北半球首台多频段、高灵敏度宇宙微波背景辐射(CMB)偏振望远镜——AliCPT-1,探测原初引力波,探索宇宙起源。该计划由中国科学院高能物理研究所牵头,参研单位包括中国、美国、欧洲多家科研院所

和高校共 17 个科研单位。经过 8 年的研制,AliCPT 项目组克服了高原缺氧、疫情等困难,AliCPT-1 目前正在做在站安装和调试,预计将在 2025 年 3 月初光。

原初引力波(Primordial Gravitational Waves)是宇宙诞生初期(大爆炸后 10^{-36} ~ 10^{-32} 秒内)产生的引力波,作为宇宙暴涨理论预言的一种时空涟漪,它们携带着宇宙诞生之初的关键信息,被认为是揭示宇宙起源和演化之谜的重要线索之一,在暴涨过程中,时空的量子涨落被拉伸至宏观尺度,从而在宇宙中形成一种扰动背景波,即原初引力波。与 LIGO/Virgo 探测到的由黑洞、中子星等大质量天体剧烈绕转产生的经典引力波不同,原初引力波与量子涨落密切相关,将为量子引力理论提供重要的实验依据。

在 CMB 的偏振信号中,人类可以搜寻到原初引力波留下的独特印记。这种印记源于原初引力波的存在导致 CMB 在大尺度上产生 B 模式偏振,而标量扰动则无法产生这种信号。因此,通过观测 CMB 大尺度上的 B 模式偏振信号,科学家能够直接探测原初引力波的存在。在过去的十余年间,由美国主导、位于南极极点的宇宙河外偏振背景成像(BICEP)系列实验,一直是原初引力波探测领域的领先项目,并提供了目前最精确的测量上限。2014 年,BICEP2 合作组曾宣布探测到了原初引力波的信号,但随后发现这一结果是由银河系“前景”污染造成的误判。此后,各 CMB 实验团队通过增加探测器数量、扩展观测频段以及建设望远镜阵列,不断提升原初引力波探测的灵敏度,当前对原初引力波参数(张量标量比 r)最好的限制是南极 BICEP/KECK 实验给出的 $r < 0.036(2\sigma)$ 。

近年,美国天文和粒子物理两大学界都力推下一代的地面 CMB 实验(CMB-S4),拟投资 6.5 亿美元,约 47 亿元人民币,增强原初引力波的探测能力。CMB-S4 原计划在南极极点和智利阿塔卡马沙漠两个台址上部署望远镜阵列。位于智利的西蒙斯天文台(Simons Observatory,简称 SO)项目在过去几年中得到了美国自然科学基金委员会(NSF)的更多经费支持,并取得了快速进展,为未来的探测奠定了重要基础。2024 年 5 月,美国 NSF 宣布将放弃原计划在南极极点的台址部署新的 CMB 望远镜阵列,这一决定会影响 CMB-S4 的进度。2030 年前主要是南半球智利的 Simons Observatory 和南极极点的 BICEP Array,以及北半球的 ALICEPT。ALICEPT-1 将打开北半球天区搜索原初引力波的新窗口,并计划通过几个观测季的数据积累大幅提升对原初引力波参数 r 的测量精度到 0.01 的水平。

将张标比 r 的限制推进到 0.01 量级,标志着宇宙起源研究迈入了一个全新的阶段。这一实验突破不仅为众多宇宙起源理论模型提供了前所未有的精准筛查,更可能重塑我们对宇宙早期演化的认知。主流的暴涨学说预言了原初引力波的量子产生,其张标比通常满足一个非常强的关联性,被称为一致性关系。例如,当 r 限制到 0.01 时,经典的大场暴涨基本可以被排除,这会迫使理论研究的焦点转向多场暴涨或复杂势能模型,例如 α -吸引子模型等。这些模型在理论框架上更为复杂,但可能更接近宇宙早期的真实物理过程。与此同时,非奇异宇宙起源理论,如反弹模型、浮现宇宙模型和弦气体模型等,通常预言的张标比 r 小于 0.01。因此,ALICEPT-1 的实验结果可以结合其他宇宙学参数的限制,对这些理论进行综合性的筛查。这些理论的核心在于破坏奇点定理的条件,从而避免宇宙起源中的奇点问题。其中,引入具有精灵(quintom)动力学有效场论是一种有效的方法。精灵场的状态方程能够合理越过 -1,从而破坏奇点定理中的零能条件,实现非奇异的宇宙演化。这一理论由中国科学家张新民首次提出,为解决宇宙奇点问题提供了全新的思路。在原初引力波的预测上,非奇异宇宙学与暴涨

学说存在显著差异。暴涨通常预言标度不变的原初引力波,而非奇异宇宙学的原初引力波则可能是标度依赖的。例如,收缩相的状态方程约等于 0 的反弹模型预言原初引力波的张量谱指数接近零,而火劫模型和弦气体模型则给出蓝谱(即高频模式的幅度相对较高)。这些差异使得原初引力波成为筛查宇宙起源的关键工具。

CMB 偏振科学作为揭示宇宙奥秘的重要工具,其研究范畴不仅限于原初引力波的探测,还广泛延伸至多个新物理研究方向。近年来,Axion-Chern(陈省身)-Simons 极化旋转角的精确测量成为备受关注的热点课题之一。Axion-Chern-Simons 相互作用通常表示为:

$$\mathcal{L} = \frac{c}{M} \phi(x) F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$

其中 $\phi(x)$ 是标量场,例如,暗能量场或类似 Axion(轴子)场等, $F_{\mu\nu}$ 是光子的电磁场强张量, $\tilde{F}^{\mu\nu}$ 是电磁场的对偶张量。轴子是 Roberto D. Peccei 与 Helen Quinn 于 1977 年为解决强相互作用中的 CP 问题(电荷共轭-宇称问题)提出的一个优雅的物理机制,并预言了一种新的粒子——轴子(axion)的存在。Axion-Chern-Simons 相互作用在膨胀的宇宙下,提供了一个破缺 CPT 对称性的特殊环境,这种宇宙尺度上的 CPT 破缺有望在 CMB 光子的极化中被观测到,一旦被证实将意味着新物理的存在。Axion-Chern-Simons 相互作用导致在 CMB 光子传播超过 130 亿年的过程中线性偏振平面的旋转,从而产生极化旋转角 α ,在文献中也被称为“宇宙双折射”(cosmic birefringence)。这一研究方向为探索暗能量属性、轴子暗物质、宇称和 CPT 破缺以及早期宇宙物理等新物理领域开辟了全新的研究路径,深化对宇宙基本规律的理解,还为超越标准模型的新物理提供了关键的实验依据和理论启示。标志着 CMB 偏振科学在推动宇宙学和粒子物理学交叉研究中的重要作用,并为未来探索宇宙起源和演化奠定了坚实的基础。

在 2005 年至 2006 年期间,中国科学院高能物理研究所张新民课题组提出了 CMB 偏振实验检验 Axion-Chern-Simons 相互作用(简称 ACS)的新方

法。ACS相互作用造成的光子旋转角在再复合期后会导致一部分E模式偏振转化为B模式偏振,从而改变CMB的偏振角功率谱和偏振-温度关联谱,其典型特征是产生TB和EB关联谱(TB和EB分别是CMB温度和B模式,以及E模式和B模式的交叉关联函数),而且实际中EB比TB在探测CPT破缺信号上更为有效。通过观测TB和EB谱,人们就可以测量CMB极化旋转角,进而对CPT进行检测。2006年,张新民带领团队在国际上首次分析测量了CMB极化的旋转角,利用当时美国WMAP卫星和BOOMERanG南极气球实验的数据,文章发表于Phys. Rev. Lett. 96, 221302 (2006)。为此,美国物理学会周刊《Physical Review Focus》作了专题报道,充分肯定了这一研究结果以及所用的方法。这种方法得到国际上多个宇宙学课题组的青睐,并为一些大型CMB实验合作组如WMAP, Planck, 地面观测QUaD, BICEP等采用。近期,在极化旋转角测量领域有长足的进展,德国马普天体物理所所长Komatsu等人重新分析了WMAP和Planck的极化天图,得到了一个令人振奋的信号,极化旋转角的统计显著性达到了 3.6σ ,这为进一步研究提供了重要的线索。基于AliCPT-1在北半球天区测得更为精确的极化天图,模拟结果显示, AliCPT-1将有望在极化旋转角研究领域取得重大突破。

值得指出的是,ACS极化旋转角现象与望远镜探测器自身的极化角存在强简并,对极化旋转角的度量研究将深刻影响未来CMB实验数据的校准和分析方式。这一研究方向,正在驱动地面CMB极化实验的标定新方法, AliCPT-1也提出了自己的具有创新性的标定方案。

除上述主要科学目标外, AliCPT在其他方面亦具有独特的优势。AliCPT-1凭借其大视场的特点,满载的焦平面视场张角为 33.4° ,一次曝光将覆盖800平方度的天空区域,大视场设计使其能够同时对广阔天区进行高灵敏度观测,从而显著提升了对短暂且快速变化的宇宙现象的捕捉效率,为时域天文学的研究提供宝贵的数据支持。

此外, AliCPT-1的观测能力还使其能够与其他

波段的观测设备(如光学、X射线和射电望远镜)一起,实现对暂现源的多频段联合测量。这种多波段联合观测将有助于全面理解暂现源的物理机制。因此, AliCPT-1的大视场特点不仅使其在微波波段暂现源探测领域填补国内空白,还为推动多信使天文学的发展奠定基础。

将提供精确的北半球天区的CMB极化观测天图,对E模式的测量精确度将好于Planck卫星,可以更好地限制宇宙学模型,例如早期暗能量模型等,从而推动对宇宙起源、演化和基本物理规律的深入理解。

未来,阿里计划还将部署大口径CMB极化望远镜,继续提升对原初引力波探测灵敏度。大口径望远镜观测的CMB极化天图中CMB弱引力透镜效应,将提供大尺度结构的重要信息,为研究暗能量、中微子提供重要依据。弱引力透镜效应是指宇宙中的大尺度结构(如星系团和暗物质分布)对CMB光子的传播路径产生的微弱偏折作用。这种偏折会改变CMB极化信号的统计特性,特别是在E模式极化和B模式极化之间引入额外的耦合。具体而言,弱引力透镜效应会将CMB的E模式极化部分转化为B模式极化,从而在CMB极化天图中产生非原初的B模式信号。这种B模式信号与宇宙暴涨产生的原初B模式不同,但其强度与宇宙中大尺度结构的演化密切相关。因此,通过精确测量CMB极化天图中的弱引力透镜效应,可以间接探测宇宙中暗物质的分布及其演化历史,同时为限制宇宙学参数(如暗能量状态方程、中微子质量等)提供重要约束。近年来,随着CMB观测技术的不断进步,弱引力透镜效应的测量精度显著提高。例如,Planck卫星和地面实验(如ACT、SPT)已经成功提取了CMB极化天图中的弱引力透镜信号,并利用这些数据对宇宙学模型进行了精确检验。未来,下一代CMB实验,如SO、CMB-S4以及北半球的阿里计划将进一步提升弱引力透镜效应的测量能力,为揭示宇宙大尺度结构的形成与演化提供更深入的洞察,也为探索暗物质、暗能量等未知物理现象开辟了新的途径。