

阿里原初引力波探测计划

张新民

(中国科学院高能物理研究所 100049)

2016年2月,美国激光干涉引力波天文台(LIGO)合作组宣布探测到双黑洞并合的引力波,引起了世界巨大的轰动,并于2017年获得了诺贝尔物理学奖。迄今为止,LIGO/Virgo测量到的引力波事例均起源于黑洞、中子星等大质量天体,探测到的引力波属于经典的引力波。然而,原初引力波与之截然不同,它产生于宇宙诞生时期时空剧烈的量子涨落。原初引力波探测是验证暴涨(inflation)等宇宙早期理论的关键实验,并将为引力波的量子——“引力子”的存在提供一个“间接”的证据。

20世纪40年代以来,大爆炸宇宙模型取得了巨大的成功(图1),但其理论是不完善的,存在着平坦性疑难、视界疑难、奇点疑难等问题。为了解决这些疑难,Alan Guth等科学家在20世纪70年代末80年代初提出了暴涨理论,认为宇宙在创生初期经历了指数膨胀,期间,时空产生剧烈的量子涨落形成原初引力波。然而,暴涨理论没有解决奇点问题。为了解决奇点问题,科学家引入了反弹宇宙的概念。一个典型的例子是美国普林斯顿大学物理学家Paul Steinhardt等人提出的火劫理论。这个理

论预言的原初引力波比一般暴涨模型预言的要小很多。但是,火劫理论仍然存在着类似的奇点疑难。2007年,我国科学家提出了无奇点的Quintom反弹理论。这一理论唯象上引入了一种具有Quintom暗能量性质的场,避免了奇点问题,同时预言了不同于火劫理论的原初引力波。由此探测原初引力波对于检验暴涨、反弹等早期宇宙理论,探索引力的量子效应和Planck标度新物理等具有重大意义,被公认为诺奖级的基础科学前沿。

在引力波家族中,原初引力波频率最低,其波长与宇宙尺度相当,目前对它探测的最佳手段是测量宇宙微波背景辐射(Cosmic Microwave Background,简称CMB)的原初B模式偏振信号(详见张新民等,“原初引力波与阿里探测计划”《现代物理知识》,2016年第2期)。CMB是宇宙大爆炸的光子余晖,它的发现对宇宙大爆炸模型的建立起到了决定性的作用,由此Penzias和Wilson获得了1978年度诺贝尔物理学奖。20世纪90年代以来,COBE、WMAP、Planck三代CMB空间卫星开启了精确宇宙学时代(详见李虹等“WMAP与精确宇宙学”《现代物理知识》2011年第6期),建立了以暗物质、暗能量为主的现代宇宙学标准模型。COBE合作组的Mather和Smoot由于发现CMB的黑体谱和各向异性获得了2006年度诺贝尔物理学奖,2019年Peebles由于在CMB等物理宇宙学理论研究方面的贡献和发现获得了诺贝尔物理学奖。CMB有两种偏振,其中E模偏振和引力透镜导致的B模偏振已分别于2002年、2014年被南极地面的CMB实验发现,但至今,与原初引力波直接相关的原初B模偏振尚未被探测到。目前,世界各国正集中人力物力,加强探测实

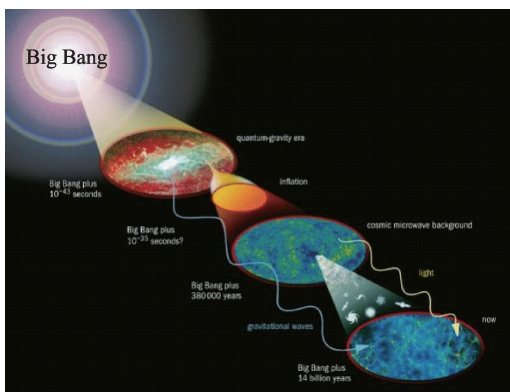


图1 宇宙大爆炸模型、CMB与原初引力波(来源:NASA)

验研究,争夺这一科学圣杯。

2014年,我国科学家提出了阿里原初引力波探测计划(Ali CMB Polarization Telescope,简称AliCPT)(详见张新民“我与粒子宇宙学研究”《现代物理知识》2023年)。阿里计划于2016年年底正式立项。该项目是一个以我为主的国际大科学合作项目,由中国科学院高能物理研究所牵头,参与单位包括中国科学院国家天文台等国内多家科研院所和高校以及Stanford大学等美国、欧洲的共17个科研单位,其目标是在我国西藏阿里地区海拔5250米处建设我国第一个高海拔原初引力波观测站(图2),建设高灵敏度、多频段的CMB望远镜,探测原初引力波,探索宇宙起源。经过七年的努力,AliCPT项目组克服了高原缺氧、疫情等带来的种种困难,取得了重大进展,预计今年(2024年)建成,开始运行、产出科学成果。

目前,国际上正在运行和建设中的地面CMB实验都集中于水汽含量低、观测条件优的三大基地:智利阿塔卡马沙漠,南极极点,西藏阿里。前二个都位于南半球。AliCPT地处北半球中纬度,利用地球自转,天区覆盖率达60%,与极地台址相比在CMB大尺度科学领域具有更大的科学潜能;同

时,AliCPT与南半球实验结合,可以相互交叉检验,更重要的是实现地面CMB观测的全天覆盖,有助于精确测量小 l 功率谱,并在CMB偏振上测量南北不对称性,检验宇宙学原理。

阿里一号望远镜(AliCPT-1)是一台双频段小口径折射式高灵敏度CMB偏振望远镜(图3、图4)。望远镜由基座、接收机、数据读出及控制、数据分析等系统组成。基座重达十七吨,可在方位、俯仰、视轴进行三轴转动,实现大范围高速往返扫描。接收机物镜采用高纯氧化铝镜片,物理直径达800 mm,有效口径达720 mm,在目前国际上同类型望远镜中口径最大。焦平面探测器采用超导转变边沿探测器(Transition-Edge Sensor,简称TES),中心频率为95 GHz和150 GHz。焦平面有效直径达635.6 mm,最高可容纳19个探测器模块,总探测器数量3万多个,是正在运行以及在建的同类型望远镜中单镜筒探测器数量最多的。

AliCPT-1有三大科学目标:

1) CMB B模式偏振科学。AliCPT-1的核心科学目标是测量CMB原初B模式偏振,探测原初引力波,检验暴涨、反弹等早期宇宙理论。此外,通过测量CMB EB模式偏振交叉相关,探测CMB偏振



图2 阿里原初引力波观测站,海拔5250米



图3 阿里一号望远镜基座

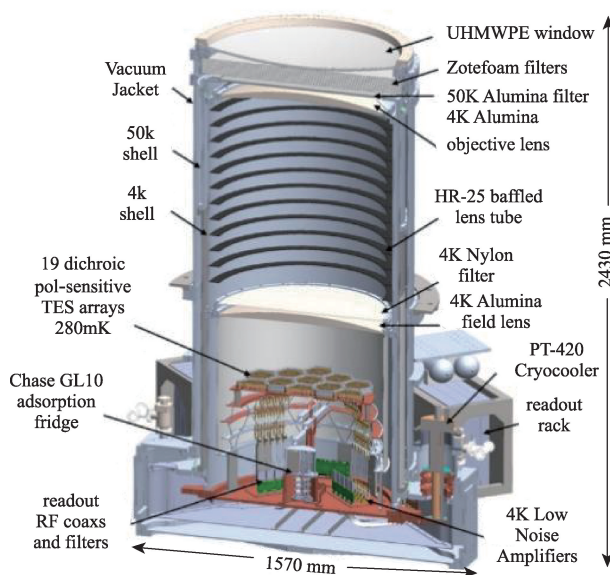


图4 阿里一号望远镜接收机设计图 (来源:AliCPT 合作组文章, *Maria Salatino et al., Proc. SPIE, 11453,114532A (2020)*)

旋转, 检验 Chern(陈省身)—Simons 相互作用, 检验基础物理中的 CPT(电荷共轭、宇称、时间反演)对称性是 AliCPT-1 的另一个重要的科学目标。2006 年, 我国科学家在国际上首次测量分析了这个 CMB 的偏振旋转。之后, 该研究方向逐渐成为了 CMB 领域的一个重要研究热点。近年来, Komatsu 研究团

队通过分析 Planck 卫星数据, 发现非零偏振旋转的显著度达到了 3.7σ 。我们的模拟结果显示, AliCPT-1 有望提高至 $4.1 \sim 4.6 \sigma$ 。AliCPT-1 的 B 模式偏振数据还将与大尺度巡天实验, 如 DESI 等, 进行交叉研究, 重建引力透镜效应。

2) CMB E 模式偏振科学。精确测量 CMB E 模式偏振是检验 Λ CDM 标准宇宙学模型, 精确测量宇宙学参数的一个重要途径。通过对 60% 天区的观测, AliCPT-1 将在多极矩范围 $1 \sim 30 \sim 1000$ (大约对应于 10 角分至 5 度的尺度) 提供高精度的 EE 偏振功率谱。当前, 哈勃常数危机 (Hubble tension) 是宇宙学领域的热点问题, 引入动力学的早期暗能量是一个重要的解决方案。由于早期暗能量在多极矩 $1 \sim 500 \sim 1000$ 的 CMB EE 功率谱中留下痕迹, 而且, 不同于 TT 功率谱, CMB EE 谱不受 early Sachs-Wolfe 的影响, 由此, AliCPT-1 的高精度 CMB 偏振数据将对早期暗能量检验、哈勃常数危机研究等方面提供重要的独立数据。探测到暗能量的动力学性质将是基础科学领域的一个重大的进展, 对于暗能量的物理本质研究、暗能量理论模型检验具有重大的科学意义。2004 年, 我国科学家首次提出了状态方程越过 $w = -1$ 的 Quintom 动力学暗能量理论。2017

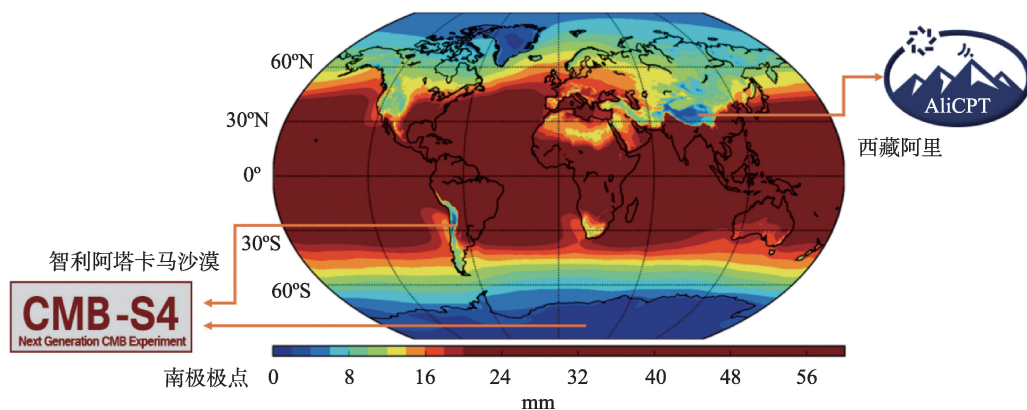


图5 AliCPT与CMB-S4台址分布图

年,国际大型星系巡天 SDSS-III(BOSS)合作组在《自然·天文》上发表论文,其观测数据在 3.5σ 支持 Quintom 理论。

3) 北天毫米波巡天科学。AliCPT-1 将给出北天最精确的毫米波巡天数据,在点源、暂现源、银河系前景科学及轴子探测等领域具有广泛的科学潜力。目前赤道坐标系北天最好的观测数据来自于已经结束的 Planck 卫星任务。相比于 Planck 每半年完成一次全天扫描,由于地球自转,灵敏度更高的 AliCPT-1 将每天对近 60% 的天区进行一次巡天观测,在暂现源探测、时域天文学领域优势明显。与此同时, AliCPT-1 在北天区的多频段扫描将为北天银河系极化前景辐射的研究提供最精确的毫米波观测数据。

2023 年 12 月,由美国能源部和自然科学基金委员会设立的粒子物理学项目优化小组(Particle Physics Project Prioritization Panel, 简称 P5)发布了未来 10 年美国粒子物理学发展规划报告,在规划启动的项目中, CMB-S4 排名第一。CMB-S4 计划在智利阿塔卡马沙漠、南极极点两个台址上建设 CMB 望远镜阵列。2022 年 11 月,美国在其天文和天体物理 10 年规划(Decadal Survey 2020)中,也将 CMB-S4 列为地面主要先导项目的第二位。由此,力推 CMB 实验、探测原初引力波、研究宇宙起源与演

化,是美国高能物理和天文两个学界的重要共识。

美国主导的 CMB-S4 计划投资 6.5 亿美元(~45 亿元人民币),相比之下,我国的 AliCPT 急需进一步地加大投入。CMB-S4 将在 2032 年左右建成,为了确保我国在 CMB 实验、原初引力波探测方面不失这一重大科学机遇,在 AliCPT-1 基础上,需要增加探测器数量,拓宽观测频段,并增加大口径望远镜。我国的 CMB 实验将充分发挥西藏阿里观测基地的地域优势,保持在北天的领先地位。科学上,与 CMB-S4 结合,开展南半球和北半球地面 CMB 实验的联网分析、实现全天覆盖,这将对高能物理、天文和宇宙学研究具有重大的科学意义。

