

原初引力波探测:国际发展新趋势

张新民^{1,2} 刘聪展¹ 李 虹¹ 徐 鹤¹

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049;2. 中国科学院大学 100049)

原初引力波是宇宙本身在诞生之初因剧烈膨胀而产生的时空涟漪。原初引力波探测是当前粒子物理、天文学和宇宙学的重大科学前沿,是验证暴胀、反弹等宇宙起源理论的关键实验。目前国际上原初引力波探测实验主要分布于三大基地:南极极点、智利阿塔卡马沙漠和我国的西藏阿里。近日,美国政府取消了对宇宙学旗舰项目CMB-S4(宇宙微波背景第四阶段项目)的支持。2025年7月22日,《科学美国人》(Scientific American)杂志发表了题为《美国刚刚取消了数十年来最大胆的宇宙学实验》的文章,对此事件做了深度报道和分析。

文中,美国加州大学伯克利分校的物理学家和粒子物理优先项目委员会(Particle Physics Project Prioritization Panel,简称P5)主席Hitoshi Murayama认为取消CMB-S4对科学和作为科学领导者的美国而言是巨大的损失,也是对整个领域的巨大打击。但同时,美国能源部发言人也强调,“宇宙微波背景(CMB)探测的科学价值重大且极具说服力”。2023年,P5小组撰写的美国粒子物理学未来十年发展规划报告《Exploring the Quantum Universe — Pathways to Innovation and Discovery in Particle Physics》,将CMB-S4列为美国未来十年粒子物理领域新建项目中的最高优先级。在此之前,2021年通过的美国天文学与天体物理十年规划《Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s》,也将CMB-S4列为地面新建前沿天文设施的第二位。

特别是在文中,美国西蒙斯基金会主席、理论天体物理学家David Spergel指出:取消CMB-S4将使得该领域的研究主导权拱手让渡给其他国家。

例如日本宇航局(JAXA)主导的预计于2030年代初发射的LiteBIRD卫星项目,以及中国位于西藏阿里地区的阿里原初引力波探测实验(AliCPT),该项目近日完成了两期规划中的第一期建设,即将开始科学观测。美国国家标准与技术研究院(NIST)通过硬件贡献参与了这两个项目,但仅扮演支撑角色。尽管美国仍在支持智利的CMB实验,但关于宇宙历史上最奇异篇章的终极验证,或许最终将由其他国家完成(图1、图2)。

目前,AliCPT项目一期已建成并实现首光观测,标志着我国在原初引力波探测实验领域迈出了关键一步,基本具备了参与国际竞争的能力,对我国的原初引力波探测实验的发展是一个良好的开端(图3)。

在“十五五”期间,AliCPT的重大科学目标有两个:(一)测量BB功率谱,探测原初引力波,实现张量比 r 的探测精度达到 $r \sim 0.01$;(二)测量TB、EB功率谱,探测和研究宇宙暗能量的动力学性质。大家知道,今年DESI(国际暗能量光谱巡天项目)的重大发

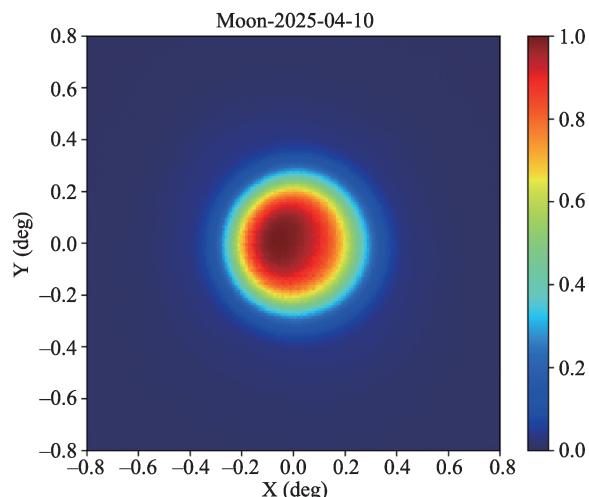


图1 月球的150GHz辐射图像

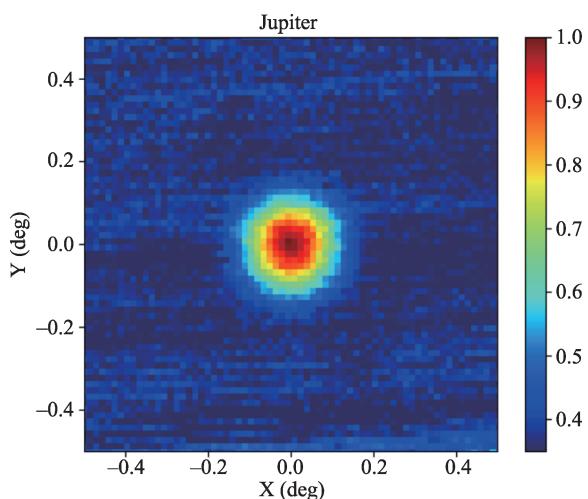


图2 木星的150GHz辐射图像

现是动力学暗能量,他们首次以 $\sim 4\sigma$ 置信度得到暗能量状态方程(w)随时间演化并穿越 $w=-1$ 的宇宙学常数界限。值得指出,中国科学家从理论到数据分析做出了重大贡献:国家天文台赵公博研究员、邹虎研究员带领的团队,深度参与了DESI数据分析;同时,DESI的新结果与高能所张新民研究员团队2004年提出的精灵(Quintom)暗能量模型预言一致(图4、图5)。

在AliCPT上探测动力学暗能量是完全不同于DESI对暗能量的探测方法。对暗能量性质的研究有两个途径,一是DESI的方法,通过测量重子声学振荡来确定暗能量的状态方程;二是探测暗能

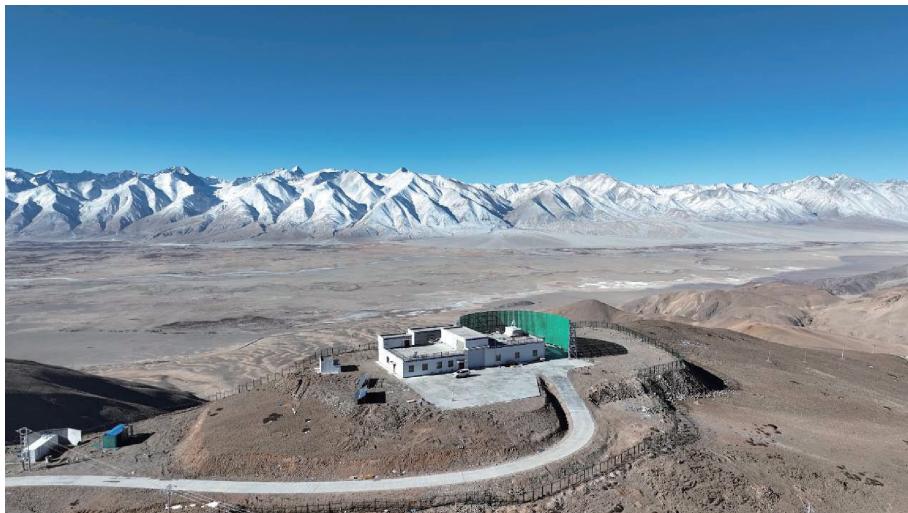


图3 阿里原初引力波观测站



图4 阿里原初引力波一号望远镜俯视图



图5 阿里原初引力波一号望远镜基座

量场与光子等的相互作用。一般来说,这种相互作用可有多种形式,但理论上为了避免灾难性的圈图修正,将要求暗能量场的相互作用满足“shift symmetry”。其结果导致暗能量场的相互作用项主要有两大类,一是暗能量场与费米子的导数耦合,其产生物质间的自旋相关力;二是暗能量场与光子场的Chern(陈省身)-Simons相互作用,将导致CMB极化方向的旋转。

2006年,张新民团队利用WMAP和BOOMERANG的CMB数据在国际上首次测量了CMB极化旋转角,虽然因数据精度原因给出的测量结果误差较大,但研究思路得到了国际各个CMB实验组的认可并沿用。2022年,日籍科学家Komatsu等人利用WMAP和Planck数据以 3.6σ 置信度测到非零的CMB极化旋转角,将CMB极化旋转角的测量工作推到了新的高度。近期,AliCPT团队在Komatsu等人工作基础上,结合当前发展的CMB极化角标定技术,预测2030年前AliCPT有望将CMB极化旋转角的探测精度提高到 5σ ,这将是一个重大发现。

另外,AliCPT的科学目标还包括测量EE功率谱,检验宇宙学标准模型;开展北半球毫米波巡天观测。同时,阿里原初引力波探测实验将加快我国低温探测关键技术自主研发步伐,助力我国基础研

究自立自强(图6)。

原初引力波的探测是现代天文学与宇宙学研究中的核心前沿课题之一。在这一领域中,阿里原初引力波探测计划致力于对北半球天区进行高精度观测,有望为人类探索宇宙起源及早期演化提供关键数据,推动原初引力波探测研究取得实质性进展。

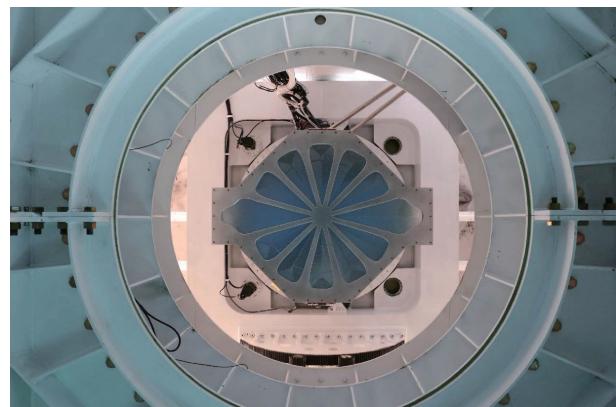


图6 从基座底部仰视阿里原初引力波一号望远镜接收机

致谢

本工作得到了国家重点研发计划“引力波探测”重点专项的经费支持。

Scientific American 文章链接: <https://www.scientificamerican.com/article/u-s-ends-support-for-cmb-s4-project-to-study-cosmic-inflation/>