

处于国际领先的中国宇宙线研究事业

曹 臻

(中国科学院高能物理研究所 100049)

2021年10月,我国的“高海拔宇宙线观测站(LHAASO)”建成,并通过由多名高能物理、天文界的专家组成的工艺性能验收专家组验收,从此LHAASO以高于95%的有效观测时间(duty cycle),投入了稳定的科学观测运行。以超越上一代望远镜几十倍的超高能伽马射线探测灵敏度,雄踞世界之首,引领未来的伽马射线天文学研究的发展。国际上公认:未来至少10年的伽马射线天文学研究属于LHAASO^[1]。这一地位不仅仅凭借LHAASO是110年宇宙线研究历史上第二大投资规模的单个实验,更重要的是,在稍早于验收的5月和7月,LHAASO实验已经相继在《Nature》^[2]和《Science》^[3]刊发了两项突破性的成果,发现了银河系内普遍存在超高能伽马射线源和精确测量了标准烛光——蟹状星云的超高能段能谱,不但发现伽马射线在超高能段不存在多年来预期的能谱截断,还直接探测到来自于天鹅座方向和蟹状星云脉冲星风云的>1 PeV超高能光子,刷新了人类获得的最高能量光子记录的同时,也拉开了称之为“超高能伽马天文学”的序幕。高能所正是这一历史事件的主角。

作为我国宇宙线研究的领头单位,高能所不但保持着一支精干的研究团队,还联合国内多家研究机构和大学,长期与国际宇宙线研究领域保持良好的合作与参与。尤其是通过LHAASO的合作,高能所牵头成立了由31个研究机构参与的国际合作组,使宇宙线研究事业发展到空前的规模,在国际上的影响力也达到了前所未有的高度。在整个宇宙线研究活动中,高能所扮演的不仅仅是一个领导者的

角色,其实验团队拥有研发先进宇宙线探测器、前沿的读出电子学、构建大规模数据获取系统、海量数据的管理、分析、存储和大型计算机集群的算力分配与管理的综合能力,其宇宙线物理研究团队能够胜任组织全国优秀的宇宙线和伽马天文学家联合开展高水平的研究,产出国际一流的科研成果。正是这样的高能所,才能在短短4年的时间里带领大家建成LHAASO这种宇宙线和伽马天文领域里支柱性的大型实验。高能所强大的承建大科学装置能力、完善的管理体系、健全的专业学科建设发挥了高效、关键的作用。

由于LHAASO前所未有的超高能伽马射线探测灵敏度和宽阔的视场,正在引起伽马天文研究革命性的变化。前面已经提到,LHAASO发现了银河系内12个超高能伽马光源,而且最高能量的光子达到破纪录的1.4 PeV,无论产生这些光子的父辈粒子是电子还是质子,都揭示了银河系内大量存在能把粒子加速到1 PeV以上能量的超级加速器(PeVatron),原有的模型和理论更倾向于认为银河系内的加速器存在更低的能量上限,而且超新星爆炸的遗迹是最佳的对应天体。LHAASO的初步结果显示,各种其他类型的天体,如年轻巨质量星团等都是可能的对应天体。这已经引起了领域内广泛的讨论,今年所有伽马天文相关的国际研讨会必谈PeVatron,甚至举办PeVatron专题研讨会。

在前面也提到,来自蟹状星云脉冲星风云的1.1 PeV光子也引起了强烈的反响,因为这个风云是几乎确定的 e^+e^- 等离子体环境,如果出现这么高能

量的电子,这里将存在所谓的“极端加速器(extreme accelerator)”,否则难于想象电子如何能够如此快速地获取能量,来补充它通过辐射迅速丢失的能量,甚至于挑战了基本的电磁物理规律。或者,存在另一种可能性,即蟹状星云并非纯的 e^+e^- 源,也同时产生能量超过几十 PeV 的质子,而这些最高能量的光子是它们与周围的物质或场相互作用的产物,换句话说,蟹状星云可能是第一个被发现的河内超过“膝”的高能宇宙线的源。未来几年内,LHAASO 的观测将给出答案,无论哪一个被确定,都将会是划时代的发现。

LHAASO 的宽视场的确让我们开了眼界,不但能够看见明亮的伽马射线点源,还能看见源的周围与星际尘埃相关联的伽马射线“晕”。这可能提供“看见”宇宙线从其源区向外扩散的证据,甚至对宇宙线产生的机制做出相当细致的描述,这实际上已经超越了“寻找宇宙线源”这个命题的范围了。LHAASO 正在不断地创造奇迹,向人们展现宇宙神秘的细节,新现象层出不穷,引发革命性的思考。令人惊叹的是,这些发现,才用到 LHAASO 设计能力的几十分之一,随着统计性的积累,未来还会有许多发现,但谁能对未知的宇宙做出预测呢?

随着这些极端现象的发现,远远超出人工加速器能够给我们提供的实验条件,基础性的物理规律可以得到检验,这也是在实验室里无法想象的检验。LHAASO 的初步观测结果已经刷新了记录。

宇宙线的精确测量是 LHAASO 的另一个重要任务。利用其强大的综合测量能力,多参数解析空气簇射的横向与纵向发展,目标是回归粒子物理的标准测量程序:先鉴别原初粒子的种类,然后精确测量簇射的能量。这在广延空气簇射传统实验中似乎是公认不可实现的目标。但是 LHAASO 的预先实验已经证明这种可能性。三种独立的簇射探测手段相互支持,可以实现多维度的交叉检验,控制好测量的系统误差。

关于太阳活动的监控研究,有可能提供全新的空间天气预报的手段和方法。初步的数据分析与

模拟显示,LHAASO 的灵敏度可以支撑 1.8 天提前量的大型磁暴预报能力。

诸如以上,都可被视为革命性的变化,随之而来的是我们观念的转变,是人类对宇宙认知的提升。

而这一切,都是与高能所为主力的中国宇宙线研究团队,在高海拔雪域高原长期的奋斗为基础的。高能所一直保持与国际上致力于发展高海拔地面粒子探测器阵列技术的日本和意大利保持密切的合作,在西藏羊八井相继发展了闪烁计数器阵列、缪子探测器阵列组成的 AS γ 实验,和用地毯式密排的高阻抗板探测器阵列形成的 ARGO-YBJ 实验。这些长达 30 多年的不懈努力,使我们一直保持在国际宇宙线实验和伽马天文研究领域中的先进行列,更重要的是我们一直在坚持探索、发展一条平行于甚高能伽马天文研究的主流设备——切伦科夫望远镜的技术路线。持之以恒的探索,认真地总结包括美国的 CASA-MIA 实验和 MILAGRO 实验在内的所有成功经验和失败教训,终于通过 LHAASO,将这种技术发展成为了超高能伽马天文的主流技术,占据了探测灵敏度和能量覆盖范围的领先地位,领跑未来 10 年甚至 20 年的伽马天文和宇宙线研究。这是几代高能人奋斗的成就。

宇宙线研究,可能是最早开放、展开国际合作的为数不多的领域之一。早在中美、中日建交之前的 1974 年,日本的宇宙线物理学家就来到中国寻求合作,开展了从甘巴拉山乳胶室实验到羊八井 AS γ 实验。上一辈的科学家们瞄准美国 CASA-MIA 实验,早在 20 世纪 80 年代中期,就提出了装备齐全的西藏计划,约定由日本提供地面粒子探测阵列、意大利提供地下缪子探测器阵列、美国提供水切伦科夫探测器,大家汇集西藏羊八井,充分发挥中国的高海拔站址优势,建设国际领先的伽马天文望远镜系统。如果当时的计划成功,LHAASO 就会提前 20 年出现,并有可能成为主导伽马天文的实验。当然,历史有其自身的规律,当时全球研发总投入显然不能与今日的水平同日而语,我国在科学研究中

的国际影响力有限,科学中的“国界”现实地存在于经费的管理与人员的流动。现实是AS γ 实验只能以小于2万平方米的单一探测器阵列开始其长达30多年的漫长发展与壮大,最终于2019年探测到450TeV当时最高能量的光子^[4],达到其高光时刻。而美国的科学家只能借助Los Alamos一个废弃的循环水池开始了从MILAGRITO到MILAGRO实验同样漫长的探索发展之路。直到2007年左右,MILAGRO实验组终于意识到高海拔的重要意义,在综合考察了羊八井和墨西哥Sierra Negra站址之后,发展成为HAWC实验,取得了发现脉冲星晕(pulsar halo)等重要成果^[5],发现了36个新的VHE伽马射线源^[6]。意大利的团队也经历漫长的探索和努力,最终,于2007年在羊八井采用当时新发明的高阻抗板探测器建成了世界上独一无二的全覆盖的宇宙线簇射探测装置——ARGO-YBJ,认证了第一个甚高能伽马射线“超泡”^[7],通过长期不间断测量活动星系核的光度变化^[8],取得了重要的研究成果。由此可见,我们凭借羊八井国际宇宙线观测站独特的高海拔优势和良好的站址条件,保持了在国际宇宙线研究领域的先进性,承载了粒子探测器阵列技术在伽马天文学中几十年的发展,其中,还包括了从2009年以后对LHAASO所采用的簇射探测相关技术开展的预先研究。为最终登顶超高能伽马射线观测研究,发挥了不可磨灭重要贡献。

回顾高能所在我国乃至全球的宇宙线研究史上的发展历程,我们不难发现:高瞻远瞩,敢于问鼎科学前沿问题,勇于挑战极限、发掘宝贵的科学实验资源,善于发挥领导作用,拓展国际合作的空间,努力增强国际影响力,这些都是这段历史的真实写照,也是我们取之不尽的宝贵精神财富。正是这些

精神造就了今天的成功,它们是深深地植根于我国宇宙线物理、乃至整个高能物理优良的历史传统之中的。在50年代,我国老一辈的科学家在云南东川的高山上创建高海拔实验室,开创我国的高能物理和宇宙线物理的研究,他们的实践不但奠定了整个领域的发展、培养了一大批优秀的科研骨干,成为后续发展的强大驱动力,更加宝贵的是,他们具有“头顶青天,脚踏白云,胸怀祖国、放眼世界”的精神和胸怀,在非常艰苦的物质条件下,他们仍然紧盯国际粒子物理研究的前沿,努力建设大型的云雾室探测器,试图捕捉最高能量的宇宙线粒子,探索前沿性的科学问题,给继承了他们伟大事业的一代又一代科学家们设立了高远的理想、奋斗的目标和迎接挑战的情怀。

展望未来,我们现在来到了一个新的高度,虽然占据了领先的地位,但绝不是可以停下来的高度。这里我们面对的是人类以前没有探索过的新疆域,层出不穷的新现象给我们提出的是全新的课题和对新探测技术的需求。更年轻的一代高能所科学家们再次出发,引领宇宙线、伽马天文和中微子天文的研究,团结全国的宇宙线研究队伍,向着更高、更深、更难的科学目标前进。

参考文献

- [1] F.Aharonian, 曹臻(译)·《现代物理知识》·2021年第3期32-34,共3页.
- [2] Z.Cao et al., LHAASO Coll., Nature, 594, 33-36, 2021.
- [3] Z.Cao et al., LHAASO Coll., Science, 373, 425, 2021.
- [4] M. Amenomori et al., Phys. Rev. Lett. 123, 051101, 2019.
- [5] Abeysekara, A. U. HAWC Coll., Science, 358, 911-914, 2017.
- [6] Albert, A et al.,HAWC Coll., ApJ 905 76, 2020.
- [7] B. Bartoli, et al., ARGO-YBJ Coll.,790:152, 2014.
- [8] Bartoli, et al., ARGO-YBJ Coll., ApJ, 734, 110B, 2011.