

LHAASO 启航, 目标 宇宙线起源

——《LHAASO 科学白皮书》解读

马欣华

(中国科学院高能物理研究所 100049)

一、百年之谜

1912年,维克托·赫斯携带着自己设计的能够承受高空大气温度和气压变化的验电器,首先在维也纳的一片牧草地上测量了地面辐射强度,然后乘坐气球升到5300米的高空,测量到大气中的辐射强度是地面上的9倍,得出结论:高穿透力的辐射不是来自于地球,而是来自太空。13年后,罗伯特·密立根(做油滴实验的那位)为之起名宇宙射线(cosmic ray,亦译作宇宙线),意思是来自宇宙的不知名的射线。这种命名法在当时是普遍的,即将未知辐射谓之某某射线,比如紫外线、X射线、伽马射线、阿尔法射线、贝塔射线,后来即便研究清楚了射线的粒子本质(上述射线分别是能量高于可见光并且能量依次增高的三种光子、氦核、电子),仍然保留了惯常叫法。

广义的宇宙线是指来自地球以外的所有粒子,包括带电粒子(原子核、电子、正电子、反质子等)、电中性粒子(中子、高能伽马射线、中微子等),其中原子核占比最大。在本文中是指传统意义上的宇宙线,即原子核,成分包括从轻原子核如氢核(质子)、氦核到重原子核如铁核。宇宙线能量跨度从1 GeV ($1 \text{ GeV}=10^9 \text{ eV}$)至100 EeV ($1 \text{ EeV}=10^{18} \text{ eV}$)。100 EeV可以换算成16焦耳,差不多是煮熟一枚鸡蛋所需热量,也就是说,1个100 EeV的宇宙线可以煮熟一枚

鸡蛋。相比之下,人工产生的最高能量粒子是大型强子对撞机(LHC)实验产生的质子,被加速到了7 TeV ($1 \text{ TeV}=10^{12} \text{ eV}$),也只是宇宙线最高能量的千万分之一。

宇宙线的流强随能量单调下降,即能量越高的宇宙线数量越少。这导致有两种宇宙线探测的方式:直接测量和间接测量。直接测量是在高空气球、卫星、空间站等航天器上搭载探测器,到大气层外直接探测宇宙线,在那里宇宙线还没有和大气层作用。由于探测器作为载荷不能过重过大,飞行时间也有限,能量高的宇宙线流强又太低,因此直接测量方式很难得到研究高能量宇宙线所需的足够的统计量。间接测量是在地面建造大型探测器阵列,通过探测宇宙线与地球大气层的原子核碰撞产生的次级粒子形成的广延大气簇射(extensive air shower,简称簇射),来推断出宇宙线的成分和能量。簇射是皮埃尔·俄歇于1938年发现的。这种簇射的英文名字shower(阵雨)更形象,成千上万的次级粒子倾泻而下,确实像下雨一样。簇射包含了电子、光子、缪子、中微子、强子等次级粒子。当赫斯发现宇宙线的时候,他探测到的其实是簇射。

通过观测宇宙线来研究其起源,有一个不利因素,即宇宙线是带电的,在星际空间传播的过程中已经被星际磁场不断改变运动方向,结果我们无法知道宇宙线是来自哪个天体,这为寻找宇宙线源带

来了困难。不过,由于光子和中微子是电中性的,不在磁场中偏转方向,因此它们的方向直指天体源。尤其是伽马射线,其能量很高,同样能在大气中产生簇射,其簇射特征又与宇宙线的不同,所以采用恰当的探测技术就可以将宝贵的伽马射线从众多的宇宙线中挑出来,从而发现伽马射线源。当确切观测到这些光子源和中微子源后,通过理论推测与实验观测结果相比较,能够判选出产生宇宙线的天体源。

从宇宙线发现至今已经有110年了,人类掌握的科学技术有了突飞猛进的发展,多家实验对于宇宙线的种类、能量、强度、分布等进行了广泛的探测,实验设备越来越高精尖,实验规模越来越大,理论研究也越来越深入,可是宇宙线起源仍是一个未解之谜:宇宙线是在哪里产生的?怎样加速到不可思议的能量的?怎样传播到地球的?为了解开这个谜团,LHAASO上场了。

二、LHAASO 和《LHAASO 科学白皮书》

LHAASO 是高海拔宇宙线观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory)的英文缩写,中文简称“拉索”。“拉索”与藏文“好”同音,当初起名字的时候倒不是刻意为之的,但却预示了美好前景。LHAASO 是我国以宇宙线观测研究为核心的国家重大科技基础设施。2008 年我们开始构想 LHAASO 计划,估算出了 LHAASO 观测灵敏度。2009 年 2 月在香山科学会议上提出了 LHAASO 计划的完整构思。2013 年 1 月国务院常务会议讨论通过了《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030 年)》,规划中所列 16 项优先安排的重大科技基础设施建设中明确包括了 LHAASO。经过六年选址,2014 年 3 月 LHAASO 项目最终选定位于四川稻城海子山平均海拔为 4410 米的高地作为观测基地,并在海拔较低的稻城县城区建立测控基地。2015 年 12 月,LHAASO 项目建议书获得国家发改委批复,标志着项目正式立项。2016 年进

行了四川省地方配套建设。2017 年主体工程破土动工。2021 年 10 月整个设施通过了工艺验收,进入全阵列科学运行阶段。14 年过去了,在这个关键节点,我们需要回答:LHAASO 是什么样的?预期获得哪些重要的科学成果?能不能解开宇宙线起源之谜?为此我们编写了《LHAASO 科学白皮书》。

科学期刊《中国物理 C》于 2022 年 3 月发表专辑《LHAASO 科学白皮书》(以下简称《白皮书》)。《白皮书》封面(图 1)上方是 LHAASO 发现的大于 100TeV 的伽马射线源在银河系中的真实分布图,中间是发端于天鹅座的一个宇宙线在大气层中产生簇射的示意图,下方是无人机拍摄的 LHAASO 鸟瞰图。整个画面形象地描述了伽马射线起源于天体、传播于星际空间、在地球大气中引发簇射、最后被 LHAASO 探测到的全过程。《白皮书》包括了七个主题,凝练了 LHAASO 的建设和探测技术和具体的科学目标,下面请听我一一到来。

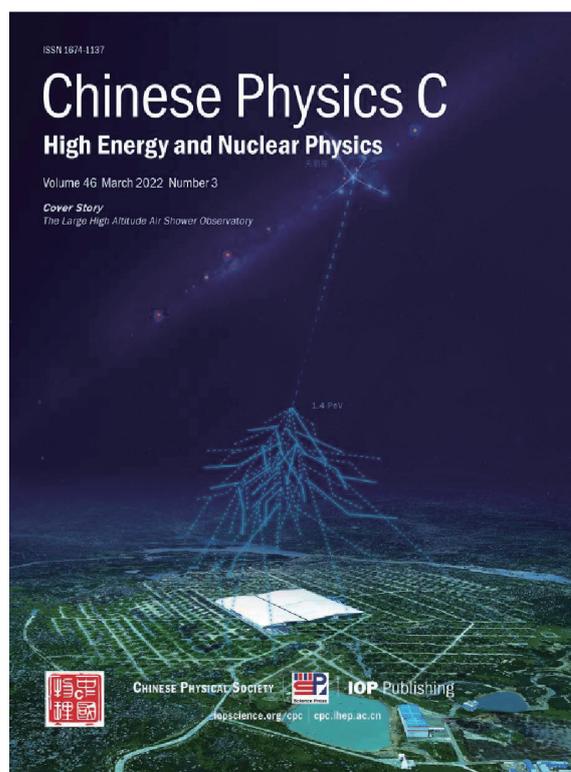


图1 科学期刊《中国物理 C》(CPC)专辑《LHAASO 科学白皮书》封面

三、LHAASO 的建设和探测技术

《白皮书》第一章介绍 LHAASO 的建设和探测技术。LHAASO 观测基地建在了海拔 4410 m, 已经接近赫斯那时候的气球飞行高度, 赫斯肯定预料不到他的后继者居然能在他的飞行高度上建一个平方公里阵列! 我们经常被问到的一个问题就是: 除了在高原地区土生土长的人比较适应以外, 一般人都会有高原反应的, LHAASO 为啥要建在高海拔地区呢? 建设、工作、生活都不容易适应呀。这是由 LHAASO 要探测的簇射在大气中的纵向发展特点决定的。从宇宙线与大气原子核第一次碰撞开始, 次级粒子会与大气原子核发生第二次、第三次……多次碰撞, 次级粒子数量(簇射大小)如雪崩般增加, 同时由于能量-质量守恒, 每个次级粒子的能量也相应减小。一定能量的宇宙线产生的簇射, 会在一定的高度达到极大, 即次级粒子的数目达到最多, 再往下发展数目就越来越少。LHAASO 的物理目标所关注的宇宙线, 正是在观测站点所在的海拔高度附近达到极大, 这非常有利于精确探测, 而且建于高海拔的水切伦科夫实验可同时具有低阈能和高伽马射线探测灵敏度的优点。占据高海拔优势地位, 克服高海拔困难, 是为了得到最佳的物理结果, 正所谓不入虎穴, 焉得虎子。

占地 1.3 平方公里的 LHAASO 主要包括三个大阵列: 由 5216 个电磁粒子探测器(ED)和 1188 个缪子探测器(MD)交错排布组成的平方公里地面簇射粒子探测器阵列(KM2A)、78000 平方米水切伦科夫探测器阵列(WCDA)和 18 台广角切伦科夫望远镜组成的阵列(WFCTA)。另外, LHAASO 目前正在考虑增建中国-俄罗斯合作研制的占地面积一万平方米的采用的晶体闪烁体材料的新型热中子探测阵列(ENDA)。LHAASO 还包括配套的电子学、定时、数据采集、触发判选、数据处理等功能系统和保障阵列安装、运行、维护的基地设施。

建设多种探测器阵列是 LHAASO 的物理目标所要求的: KM2A 主要瞄准的是将伽马射线的探测

尽可能地延伸到更高能量, 其中 ED 采用的是用塑料闪烁体探测器探测簇射中的带电粒子, MD 用水切伦科夫光探测器探测簇射中的缪子, 两者相结合能够高效区分伽马射线和宇宙线, 因为伽马射线产生的缪子比宇宙线少得多。切伦科夫光是带电粒子以超过光的相速度穿过介质(比如空气和水)时所发出的光。WCDA 主攻的是探测相对低能部分的伽马射线以找到更多的伽马射线源, 是把阵列中心的大水池分割成 3120 个探测单元, 进行地毯式近 100% 全覆盖探测。WFCTA 在 KM2A 和 WCDA 的有力配合下进行大能量范围、高精度宇宙线探测, 采用望远镜探测大气切伦科夫光, 比传统的大气切伦科夫望远镜有更广阔的视角, 满足宇宙线探测的需求。ENDA 采用新型的闪烁晶体 $ZnS(Ag)+B_2O_3$ 材料, 探测簇射中的强子在地下产生的热中子, 期望进一步提高 LHAASO 对宇宙线成分区分的能力。图 2 是 LHAASO 探测器的布局示意图。

虽然 LHAASO 探测器种类多样, 探测单元数量达上万个, 但是每个探测器都是将光信号通过光敏器件(光电倍增管或者硅光电管)转化成电脉冲信号, 信号类型单一、信号特征一致, 便于进行相互配合、统一处理。探测器工作原理可以类比眼睛: 眼睛的晶状体和角膜捕捉飞逝的光子, 将光子投射到视网膜上, 视网膜的光感受器把光子转换成电信号, 通过视神经传递到大脑, 大脑就产生了影像; 我们的探测过程是带电粒子在闪烁材料或者水或者空气中产生光子, 光子打到光敏器件上产生电信号, 经转化为数字信号, 传输到在线计算中心进行初步分析产生数据文件, 最后数据文件传输到大型离线计算中心储存并作后续分析。

LHAASO 庞大的阵列对各项技术都提出了挑战, 我们通过自主创新, 完成了多项关键核心技术攻关: 首次在 WFCTA 中大规模使用新型硅光电管, 彻底改变了这类望远镜不能在月夜工作的传统观测模式, 实现了有效观测时间的成倍增长。发展了基于“小白兔”技术、适应高海拔野外工况的大面积、多节点、高精度时钟同步技术, 提升了该技术远

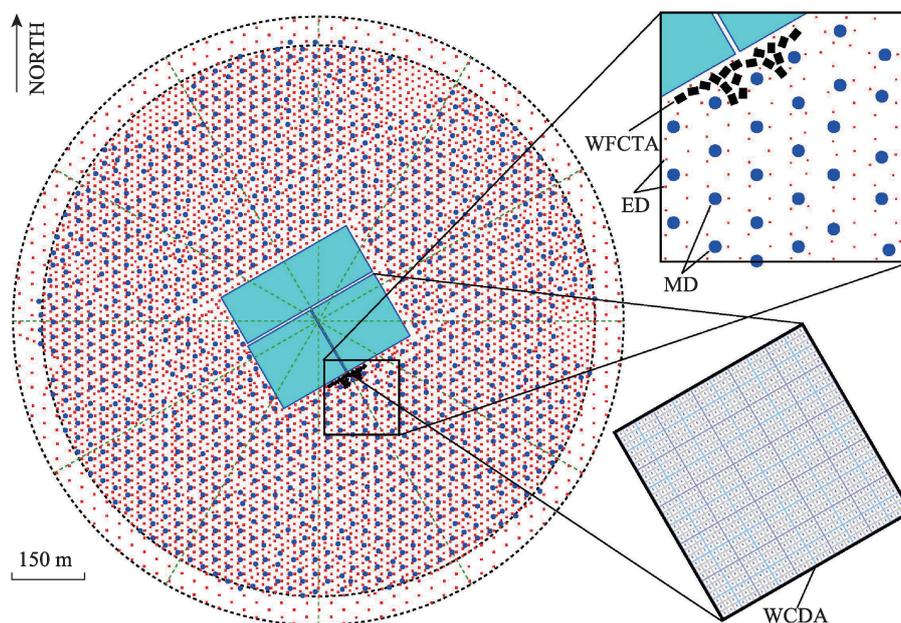


图2 LHAASO探测器的布局示意图

距离同步精度5倍,达到国际领先水平。采用了国产20英寸超大光敏面积微通道板光电倍增管,将时间响应提高了3倍,突破了国际上的技术垄断。在海量数据获取技术上取得显著进步,发展并实现了“无触发”数据获取,对大数据量实现“零死时间”观测。采用特殊的数据筛选技术,对海量数据进行无损压缩,实现从海子山到离线计算中心的实时数据传输。目前正在增建的中国-俄罗斯合作ENDA,采用的新型闪烁材料具有大面积、高效率、高性价比的特点,将实现对簇射的全粒子探测。所有这些尝试都为宇宙线和伽马射线的高灵敏度的精确测量奠定了基础。

通过与其他实验进行比较,才能更形象地理解LHAASO的强大能力,这里仅举一个例子:图3是LHAASO伽马射线探测积分灵敏度和其他实验的比较。形象地说,可以把伽马射线源比作是宝藏,我们不知道海盗会把多少数量的宝藏(宇宙有多少伽马射线源)藏在地下不知道什么地方(产生的伽马射线的能量是多少),不知道藏得多深(伽马射线多强多弱)。那么,如果开展挖宝竞赛(发现伽马射线源的竞争),那就看谁挖的范围广(探测伽马射线的

能量范围宽,表现在图3上就是灵敏度曲线长)、挖得深(探测伽马射线的灵敏度高,表现在图3上就是灵敏度曲线低),谁就越有可能挖到宝藏(发现伽马射线源)。在高能区(>10 TeV),LHAASO的优势显而易见。在低能区,由于探测器的种类不同,各自的优势也不尽相同,LHAASO擅长全天区扫描发现新源,而国外建设中的大气切伦科夫望远镜阵列CTA擅长高灵敏度的定点观测,如果二者能强强联合,相互补充,定然能碰撞出光彩照人的火花来。

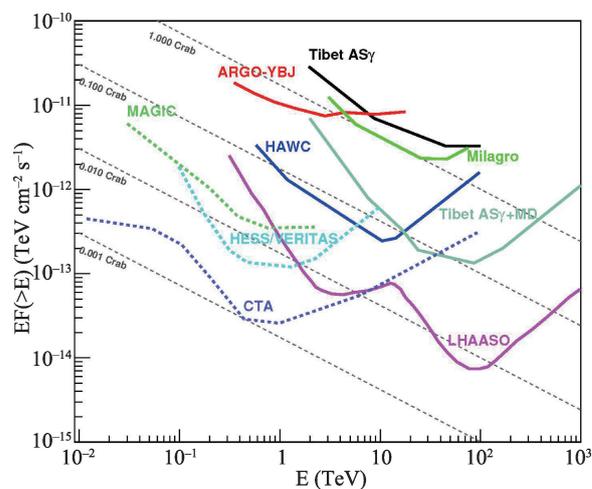


图3 LHAASO伽马射线探测积分灵敏度和其他实验的比较

四、LHAASO 科学成果的预期

《白皮书》第二章至第七章描述了LHAASO具体的科学目标,我将其分成五个部分简略介绍一下。

1. 甚高能(TeV)伽马射线天文学(第二、三章)

目前甚高能(TeV)伽马射线天文学领域的关键问题在于:一方面,尚未收集到足够多伽马射线源的样本,无法按其加速行为进行分类;对已知源的能谱和源区多波段详细观测的样本也太少,难以在较为普遍存在的规律性观测结果和特殊个体行为之间做出正确的判断。因此,目前需要的是对整个天空的巡天观测以发现大批伽马射线源。另一方面,需要对伽马射线源做深度成像观测、大范围的能谱测量和尽可能宽广的多波段观测研究,彻底弄清伽马射线的辐射机制,判选出真正进行强子加速的天体源。因此对所辐射的伽马射线能量达到100 TeV以上的天体源(因为发射伽马射线的粒子能量超过1 PeV= 10^{15} eV,所以称为Pevatron)的搜索是伽马射线天文学的新的热点。

银河系内的伽马射线源类型多样,数量众多,包括:(1)超新星遗迹(SNR)。超新星是一部分恒星演化的终点,恒星通过爆炸可以将其大部分甚至几乎所有物质以很高的速度向外抛散,并与周围的星际物质碰撞产生激波,形成一个由膨胀的气体和尘埃构成的壳状结构,被称作超新星遗迹。SNR长久以来被认为是银河宇宙线的主要来源。(2)脉冲星风云(PWN)。脉冲星高速旋转的超强磁场可以将带电粒子加速到相对论速度,冲入星际介质,产生一股强烈的激波,在其作用下磁化的粒子流加速喷射出来。PWN是TeV能段河内源中最多的一类,目前在TeV能段观测到的PWN有34个,其中13个在LHAASO视场内。(3)银河系弥散伽马辐射,可用以研究银河宇宙线的传播,研究不同区域的宇宙线和星际介质气体的分布及相互作用。(4)高能粒子与星际物质或辐射场相互作用产生伽马辐射,这些

高能粒子是从加速区逃逸出来的,因此许多甚高能伽马射线源表现为扩展源。此外,银道面弥散伽马辐射大部分来自宇宙线与星际物质及辐射场相互作用产生的辐射。

银河系外的伽马射线源包括:(1)活动星系核(AGN)通常是大质量黑洞,具有显著的流强变化的特征。由于源的距离非常遥远,通过与其他电磁波波段的联合观测,辐射变化可以用于探索多个涉及大尺度物质分布、河外背景光分布、量子引力效应等基本天体物理问题。(2)存在一类空间上扩展的源,比如位于天鹅座方向的一个相当明亮的伽马射线源,其流强都远远超出了切伦科夫望远镜所能探测的最低灵敏流强,但他们并没有被这些窄视场的望远镜所发现。这充分体现出宽视场扫描探测器在发现具有扩展特性的源的优势,也给LHAASO留下了发现较强源的宽广空间。(3)伽马射线暴(GRB),是宇宙中最剧烈的恒星级高能爆发现象,在观测上GRB表现为来自宇宙空间某一方向上伽马射线流量短时间内突然增加。我们仍然不知道GRB产生的光子最高能到多高能量,而LHAASO提供的GRB的高能辐射观测结果对于全面了解这种剧烈爆发现象来说至关重要,为黑洞和致密星相关物理、高能宇宙线和中微子的产生等问题提供线索,还能够用于限制GRB的洛伦兹因子、源区磁化度等关键参量。

2. 宇宙线物理(第四章)

图4是到目前为止各家实验测量到的宇宙线能谱。我们只看最高能量(图4最右边)的那条,形状像不像腿?物理学家还真的给它上面的那些拐折起起了形象的名字:“膝(knee)”和“踝(ankle)”。膝区对于研究宇宙线起源是非常重要的,目前认为膝区以下(能量小于膝区)的宇宙线来自于银河系内,膝区是银河系内宇宙线源的加速极限能量,膝区以上银河系外宇宙线逐渐占多。目前多个宇宙线起源理论模型预报的膝区特征有不少差别。只有精确的分成能谱,才能对不同的理论模型给出明确的

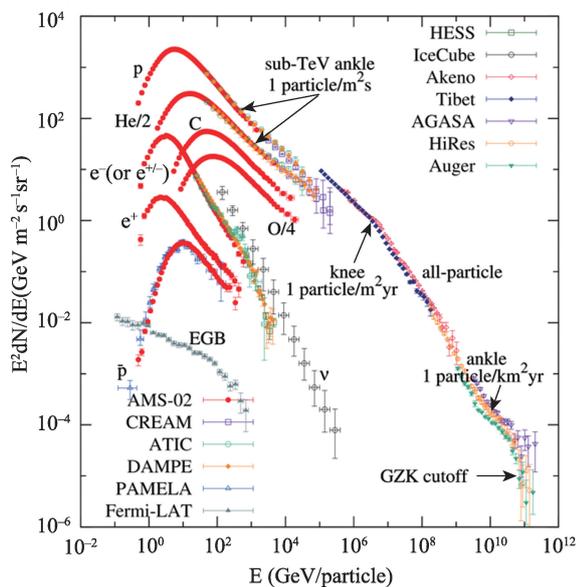


图4 宇宙线能谱

评判。LHAASO的探测范围是从300GeV到1EeV,跨越6个数量级,全覆盖膝区,延展接近踝区。探测能区达6个数量级是什么概念?可以类比长度测量,从1毫米到1千米跨度6个数量级。我们一般要用四种尺子丈量:1毫米到20厘米用文具尺,0.1米到1米用米尺,1米到10米用卷尺,而10米到1千米就要用激光全站仪了。如果只用一把尺子去量呢?同时保证精度和范围的难度可想而知。LHAASO这一把“尺子”就是要实现在6个数量级的宇宙线成分能谱上的高精度探测,深度研究膝区分成分能谱,并且将更低能区的直接探测结果与最高能区的实验结果(比如阵列面积达3000平方公里的皮埃尔·俄歇计划)连为一体,将精确测量从直接测量推向最高能宇宙线的测量,实现能量定标的统一。

3. 新物理(第五章)

新物理方面,LHAASO对伽马射线和宇宙线的测量可以用来限制各种暗物质和轴子理论模型的参数空间。有的理论预期暗物质能够通过湮灭产生高能伽马射线对,会在弥散伽马射线能谱上叠加上一个超出,而LHAASO在这个能区具备前所未有的灵敏度。另外,在相对论和量子场论中,洛伦兹对

称性是一个基本的对称性,有的理论预期在普朗克标度的高能条件和量子引力条件情况下,洛伦兹对称性可能会有一定的破坏。洛伦兹破坏的一个重要预言,就是高能光子的传播速度相对低能量的光子有所减小。在LHAASO观测中,如果洛伦兹对称性破坏,就会造成高能的光子不再稳定,能够快速衰变为一对正负电子对或者衰变到3个伽马光子。换句话说,高能的光子在飞往地球的旅程中就自动消失了。对于我们在地球上的观测者来说,即使天体源已经发出了能量更高的光子,我们测量到这个天体的光子能谱也在这个特定的能量就会忽然截断。还有,LHAASO能看到的PeV伽马射线,远超人工在LHC产生的最高能量,在这么高的能量会有什么新现象被发现呢?这也是一个兴奋点。

4. 多信使物理——中微子(第六章)

宇宙线在产生、加速、传播中能产生多种粒子,包括宇宙线本身、伽马射线、中微子,这些粒子就是宇宙线源发出的我们能探测到的“信使”。高能中微子之所以重要,是因为高能中微子必然是在宇宙线与空间介质作用过程中产生的,中微子源必然是宇宙线源。同伽马射线一样,中微子可能也有银河系内源和河外源,有点源有扩展源,但是中微子的作用非常弱,要捕获中微子,需要建设以大体积且透明的水或者冰为靶物质的大型实验,比如在南极洲的冰立方(IceCube)。到目前为止,还没有中微子天体源被冰立方明确发现。LHAASO通过持续观测附近的耀变体和星暴星系,可以提供更多候选中微子源的详细信息。另外,LHAASO可以独自做一项工作,即通过探测大角度横向飞来的簇射来寻找水平中微子事例,特别是寻找稀有的 τ 中微子,这种事例与其他簇射相比有显著的独特特征,便于排除本底。

5. 交叉学科研究(第七章)

作为交叉学科研究平台,LHAASO还可以在其他物理领域做出贡献。太阳是我们最近的恒星,

不断地在辐射出不同能量的粒子,形成太阳风。强烈的日冕物质抛射,可能对地球磁场产生巨大的扰动并引发地磁风暴,造成“空间天气”的突然变化甚至于灾变,影响着我们的生活。这些太阳活动造成了地面低能辐射的变化,包括电磁成分和中子通量的变化,从而引起探测器中计数率的变化。另一方面,地球大气中电场的变化(比如雷暴),也能够诱发低能宇宙线流强的变化。有趣的是,地壳运动(比如地震)也能够影响地壳(包括土壤、岩石、混凝土等)中的放射性同位素的释放,从而改变了中子的通量。LHAASO具备多种探测手段以及不间断的海量宇宙线数据,可用于对这些变化现象进行深入的跟踪监测和研究,为太阳物理、大气物理、地球物理等相关课题提供重要的线索和佐证。

五、千里之行,始于足下

LHAASO采用边建设、边运行、边出结果的工作模式,在全阵列完工之前,已经获得了部分重要成果:

(1) LHAASO基于已经建成的1/2规模探测装置在银河系内发现12个超高能宇宙线加速器PeVatron,并记录到能量达1.4 PeV的伽马光子,这是人类观测到的最高能量光子,突破了人类对银河系粒子加速的传统认知,开启了“超高能伽马天文学”时代。这些发现于2021年5月17日发表在《自然》(*Nature*)。

(2) LHAASO精确测量了被称为高能天文学“标准烛光”的蟹状星云的亮度,还记录到能量达1.1 PeV的伽马光子。这个迄今为止研究得最为透彻的一个电子加速源,发射的光子达到了人工加速器产生的电子束能量的两万倍左右,直逼经典电动力学和理想磁流体学理论所允许的加速极限。相关结果于2021年7月8日发表在《科学》(*Science*)。

(3) LHAASO发现了一个环绕脉冲星PSR J0622+3749的伽马射线扩展源LHAASO J0621+3755,确认了高能粒子是能够在脉冲星晕的介质中扩散出来的,该成果于2021年6月16日发表在《物理评论快报》(*Phys. Rev. Lett.*)。

(4) LHAASO的观测数据显示,目前的伽马射线谱到PeV以上都是一直向高能延续的,并没有发现任何高能伽马事例“神秘”消失的现象,表明洛伦兹对称性在接近普朗克能标下仍然是正确的。这一研究成果于2022年2月3日发表在《物理评论快报》。

(5) LHAASO对质量超过100 TeV的重暗物质的寿命做出了迄今最强烈的限制,比已有结果提高了近10倍,与其他寻找暗物质的实验(如中微子观测实验)有很强的互补性。这一研究成果于2022年12月21日发表在《物理评论快报》,并被杂志选为高亮论文,American Physical Society对此作了报道。

LHAASO采用多种探测技术,可以大视场、全天候、宽能段、全方位、多变量、立体地测量伽马射线和宇宙线在大气层中的反应,并重建它们的基本信息。LHAASO独特的多种探测手段、相互交叉检验的能力以及强大的伽马射线和宇宙线成分区分能力,将确保测量结果的准确性和可靠性。结合高海拔优势和长期稳定运行优势,LHAASO能够发现大量的伽马射线源,在超高能伽马射线源和宇宙线成分能谱的研究上达到国际领先的灵敏度。LHAASO也为开展大气、环境、空间天气等前沿交叉科学研究提供了重要实验平台,成为多边国际合作共同开展高水平研究的科学基地。

如果把LHAASO比作一艘远洋巨轮,那么之前是巨轮的设计、制造阶段,而且初次试水便不同凡响。现在,LHAASO正全速前进,驶向探索宇宙线起源的深蓝海洋。期待中。