



# LHAASO在宇宙线物理中的里程碑意义

曹臻<sup>1,2,3</sup>

1. 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理实验室, 北京 100049;

2. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049;

3. 天府宇宙线研究中心, 成都 610000

E-mail: caozh@ihep.ac.cn

2022-02-06 收稿, 2022-02-23 修回, 2022-02-24 接受, 2022-02-25 网络版发表

**摘要** 高海拔宇宙线观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)是110年来人类研究宇宙线最大的实验装置之一, 核心的科学问题是寻找宇宙线的起源, 不但要探测超高能(ultra-high energy, UHE)伽马射线源, 还要精确测量地球附近带电宇宙线的成分和能量分布, 系统地研究宇宙线的加速与传播. 其首批科学发现就开创了UHE伽马天文学领域, 展现出银河系丰富多彩的宇宙线加速源的候选天体, 奠定了发现宇宙线起源的良好基础, 指明了随后探索宇宙线加速机制、传播效应等精确研究的方向, 同时也对现有的理论和模型提供了精确检验的机会与挑战. LHAASO的发现, 对其后宇宙线、伽马天文、中微子天文等方面的未来实验研究提出了明确的要求. 本文综述了我国大科学装置LHAASO及其科学发现意义, 介绍了其在宇宙线研究中的历史作用, 并对未来的发展做出了展望.

**关键词** 宇宙线, 高海拔宇宙线观测站, 拍电子伏加速器, 伽马射线, 中微子

宇宙线研究虽始于110年以前Victor Hess的著名发现, 但仍然是一门“年轻”的学科, 没有形成一个“标准模型”完整地描述其起源、加速的机制、星际空间的传播, 甚至于进入太阳系之后受到的太阳活动调制效应也是近些年才有了比较精确的测量和研究<sup>[1,2]</sup>. 大量实验数据的积累、细致的分析、与各种模型的比对是整个研究领域的主流工作. 一个非常重要的原因, 就是对宇宙线粒子的源头缺乏足够的知识. 首先是没有定位其源天体, 因此更不清楚它们是如何被加速到超过人造加速器千万倍的高能量, 只是根据银河系内的平均磁场强度, 推算出大约 $10^{18}$  eV以下的宇宙线粒子可以被束缚在银河系内, 那么能量更高的宇宙线应该是源自银河系以外的加速源. 但是, 这种从河内到河外起源的转换, 也还是本领域的一个前沿研究课题, 尚需要更多观测证据来确认.

因此, 溯源是宇宙线研究中的核心问题, 之所以会

如此困难, 正是因为宇宙中无所不在的磁场, 经历了大约百万年的传播过程, 带电的宇宙线粒子完全失去了它们的出发点信息, 我们只能通过捕捉宇宙线在其加速源内产生的中性粒子——光子和中微子来完成这项任务. 这就是所谓“甚高能伽马射线天文学”诞生的原始动机. 代表性的实验装置——成像Cherenkov光望远镜的内禀特性, 决定了其工作能区在0.1~100 TeV. 从1989年发现第一个辐射出TeV光子的源——蟹状星云<sup>[3]</sup>开始, 已经累计发现了200多颗TeV伽马射线源天体(源天体动态列表见tevcad.uchicago.edu). 这无疑为发现宇宙线的起源向前迈了一大步, 但尚未解决这个世纪谜题, 因为对所有这些源的伽马辐射机制的确认, 主要是通过一个宽广能量范围(从射电到10 TeV伽马射线)的多波段分析研究, 都碰到了一个竞争性的机制: 这些伽马射线更像是由高能电子辐射出来的, 而不是由重子宇宙线粒子产生出来. 从天文学的角度来看,

引用格式: 曹臻. LHAASO在宇宙线物理中的里程碑意义. 科学通报, 2022, 67: 1558-1566

Cao Z. LHAASO: A milestone of the cosmic ray research (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 1558-1566, doi: 10.1360/TB-2022-0160

TeV伽马天文的这些发现无疑是非常大的进步,但对于解决宇宙线的起源问题,似乎没有产生太大的帮助.随着该领域主力装置的积分灵敏度逐渐到达其极限,整个领域已经缺乏冲击这个核心科学问题的动力,许多的唯象研究甚至倾向于描绘一种图像:银河系的天体大概存在几百TeV的加速能力上限<sup>[4]</sup>,由此导致的结果就是超过100 TeV,也许伽马射线能谱就截断了.这种结果似乎与地球上测量到的重子宇宙线能谱在该能区的一个著名现象——20世纪50年代发现的宇宙线能谱所谓的“膝”状结构<sup>[5]</sup>近似地吻合了,即其流强随能量下降的幂律函数关系在该能区突然加剧了,但是并不是很精确的符合,而且这并没有回答更高能量宇宙线起源的问题.

其实,对于由实验主导的宇宙线研究领域来说,真正的需求应该是装备的提升,需要新一代的探测器以前所未有的灵敏度,开创一个新的时代.新千禧年的第一个十年,各国纷纷提出下一代伽马天文观测大科学装置计划:欧洲国家提出了建造100多台Cherenkov望远镜组成的阵列(Cherenkov Telescope Array, CTA)计划<sup>[6]</sup>;美国选择一条通过升级改造实现适度提升灵敏度的高海拔水Cherenkov探测器(High Altitude Water Cherenkov, HAWC)计划<sup>[7,8]</sup>;而我国提出了在“十二五”期间建设高海拔宇宙线观测站的计划,正式参与这场全世界范围内的科学发现竞赛.

高海拔宇宙线观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)是我国自主提出,并设计、建造的新一代伽马射线望远镜和宇宙线探测装置<sup>[9]</sup>.它具有前所未有的伽马射线探测灵敏度,将伽马天文的研究带入了人类从未观测过的新波段,即光子能量高于0.1 PeV的所谓超高能伽马射线波段,继已经活跃了30年的“甚高能伽马射线天文学”之后,开启了“超高能伽马射线天文学”的新时代.

本文首先简单介绍LHAASO实验及其建设过程,其次总结LHAASO的第一批科学发现,即大量存在于银河系内的拍电子伏加速器(PeVatron),然后讨论PeVatron对于寻找宇宙线起源的作用与贡献,最后讨论两个话题:其一是PeVatron的发现对现有物理规律的挑战,其二是面临这突如其来的新研究领域,LHAASO还存在哪些不足,未来应该怎样发展和规划.

## 1 LHAASO简介

2009年第342次香山科学会议上,题为“宇宙线物

理的若干前沿问题和我国的发展战略”的主旨报告正式提出LHAASO计划并得到与会专家一致赞成,与会专家建议尽快启动LHAASO项目.2013年,国务院发布《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030年)》, LHAASO被列入“十二五”期间16项优先支持项目名单. LHAASO项目前期准备工作包括选址,随之启动.2015年,国家发展和改革委员会批准“高海拔宇宙线观测站”项目建议书,标志项目落地四川稻城海子山,站址海拔高度4410 m.配套设施项目初步设计于2016年获得四川省发展和改革委员会批准,5月动工.主体项目初步设计于2017年获得中国科学院及国家发展和改革委员会批准,他们决定建设由水切伦科夫探测器(Water Cherenkov Detector Array, WCDA;中心78000 m<sup>2</sup>)、平方公里阵列(Kilometer<sup>2</sup> Array, KM2A;由地面闪烁计数器和地下缪子探测器组成)、切伦科夫望远镜阵列(Wide Field-of-view Cherenkov Telescope Array, WFCTA;几何因子为4000 m<sup>2</sup>立体角)3个子阵列组合而成的复合型宇宙线/伽马射线探测大科学装置<sup>[10]</sup>.当年,主体工程动工.历时4年,2021年7月,建成由3120个水切伦科夫探测器单元、5216个闪烁计数器、1188个缪子探测器、18台望远镜组成的完整阵列<sup>[11]</sup>,并投入稳定运行. WCDA每日记录低能量宇宙线事例30亿个; KM2A记录2亿个高能事例,正常运行时间占空比均超过95%; WFCTA实现满月夜晚的不间断观测,2021年10月份进入观测季后保持零故障运行,累计观测时间已经超过600 h,累计记录2.4亿个高质量的符合观测事例.2021年10月, LHAASO探测装置通过中国科学院组织的性能验收,所有指标全面达到设计要求,部分性能好于设计指标.

LHAASO的建设周期按每年的冬季歇工期分割为3个阶段,各子阵列的建设也自然分段完成,并实现分段运行.最早建成的是拥有900个探测单元的WCDA-1子阵列,于2019年4月开始运行. WCDA-1的性能通过测量标准烛光——蟹状星云脉冲风云来确定.由于风云的角直径小于0.03°<sup>[12]</sup>,对于高能伽马射线探测器来说,它就是优良的点光源,而且具有稳定的辐射强度.在WCDA-1的工作能区(0.5~15 TeV),国际上已经存在不少于7个实验的观测结果,可以相互之间进行交叉检验,由此检验了WCDA-1的角分辨随能量增大越来越好,在高端可以达到0.2°.整个阵列作为一个伽马射线望远镜,指向精度好于0.03°,伽马射线探测灵敏度达到0.06 Crab-Unit(CU,即蟹状星云脉冲星云风云的伽马射

线流强),测得的流强与其他实验测量结果在误差范围内吻合<sup>[13]</sup>,达到设计要求。

2019年底,建设到一半的KM2A子阵列投入观测。由于其超群的灵敏度,半年的观测结果就足以完成10~200 TeV的蟹状星云脉冲星风云的高精度观测,结果表明其指向精度好于 $0.05^\circ$ ,角分辨随能量增大迅速变好,在100 TeV达到 $0.3^\circ$ 以下,对伽马事例的能量测量精度达到14%。更重要的是,缪子探测器阵列提供的光子鉴别能力超强,在100 TeV处可以将带电宇宙线背景的流强压低10000倍,从而实现零背景光子测量。测得的流强与其他实验测量结果在误差范围内一致<sup>[14]</sup>,达到设计要求。

2019~2020年观测季,拥有6台望远镜的WFCTA子阵列投入运行。按照设计,WFCTA的物理目标是联合WCDA和KM2A组成高度复合的宇宙线探测装置,对宇宙线在大气中的簇射事例开展多参数的精确测量,包括簇射到达地面的横向分布、不同种类的次级粒子、簇射芯区的能量密度分布、簇射在大气层中的发展特性等各个方面,逐事例确定其成分,从而实现成分宇宙线的能谱精确测量。其设计工作能区是100 TeV~100 PeV,瞄准宇宙线能谱的第一“膝”的测量。长期困扰宇宙线物理的一个根本问题是绝对能量定标,因为没有已知实验粒子束用来标定地面探测器阵列。在较低的1 TeV处,上一代的探测装置,如位于西藏的ARGO-YBJ实验发展了一种标定方法,使用月亮遮挡效应产生的“负粒子束”在地磁场中的偏转量来标定宇宙线事例的能量测量<sup>[15]</sup>。这个方法原则上也可以在此应用,但存在两个根本问题:(1) WFCTA望远镜不能指向月亮观测,因为月光太强烈,掩盖了所有事例;(2)设计的观测范围能量太高,宇宙线粒子在地磁场中的偏转太小,超出了探测器的精度范围。针对性地,我们设计了采用WCDA与WFCTA联合观测事例来传递能标,而用WCDA尽其探测精度在尽可能高的能量测量能标,结果测得了 $(21\pm 6.5)$  TeV的能标,并以10%左右的传递精度传递到WFCTA的测量中<sup>[16]</sup>。这也标志着WFCTA实验已经具备开展宇宙线精确测量的能力,其性能超过初步设计的要求。

目前,WCDA的能标测量精度只能达到31%,这主要来自月影的微小偏转角测量的统计误差。预计利用WCDA全阵列4年的月亮阴影观测数据,这个误差可以缩小到10%以内,将成为本领域最精确、能量最高的绝对标定。

## 2 第一阶段的科学发现——银河系PeVatrons

KM2A-1/2阵列的最初运行检验了LHAASO探测器正常的工作状态,确认其灵敏度达到设计指标等值。虽然实际只达到设计指标的一半,但其灵敏度已经远超上一代探测器,把我们带入了一个从未探索过的“无人区”,即能量超过0.1 PeV的电磁波段。这是最后一个没有打开的波段,因为能量超过1 PeV的光子在其传播到地球的路途上,就会与宇宙中无处不在的微波背景光子发生共振散射产生正负电子对而消失,一个更形象化的描述是1 PeV以上的宇宙就不再透明。仔细计算这个效应产生的PeV视界(horizon)就会发现,银河系的一大部分还在视界之内,这也就是LHAASO重要的发现空间。

LHAASO果然不负众望,11个月的观测就发现银河系内大量存在正在辐射0.1 PeV以上光子的源,正式定名为超高能伽马射线源。根据能产生如此高能量伽马射线为数不多的几个辐射机制,很容易推断这些源的核心必定存在着能把质子或更重的原子核甚至电子加速到至少1 PeV的拍电子伏加速器(PeVatron)。这就是多年来寻找的宇宙线加速源的候选天体。完全出乎意料的是,银河系内竟然遍布PeVatrons,就LHAASO当时的累积灵敏度所及,发现了12个PeVatrons<sup>[17]</sup>。由于首次发布重大的发现,我们实际上采取了比通常的科学发现更严格的判选条件,即要求所发现的伽马射线流强要超出背景宇宙线流强涨落的7倍以上,而且要求每个源的光子事例数要足够多,总的超高能伽马光子事例达到了530个。几乎所有源的能谱分布都没有显示出截断的特性,在整个超高能区,能谱均按照幂律形式延伸到1 PeV附近。从两个著名的源,即天鹅座和蟹状星云,还分别测量到了人类观测史上最高能量的1.4和1.1 PeV伽马光子<sup>[17]</sup>。

这些发现无疑是重大的突破性进展,不但彻底改变了人们对银河系的认知,突破了原有的加速能量上限,更重要的是存在多种多样的PeVatrons,它们可能有完全不同的伽马射线产生机制。如此丰富的新现象给我们带来的是一个全新的研究领域,而不仅仅是几个孤立的事件。这实际上开启了一个称之为“超高能伽马射线天文学”的新时代。这不禁让人联想起1989年发现第一个TeV伽马射线源——蟹状星云脉冲星风云的情景,以及随之而来30年丰富多彩的甚高能伽马天文学研究及发现的200多个源、伽马射线暴等,这些发现大

大提升了人们对高能天体的认知水平。对于LHAASO这个刚刚开启正式观测运行的新实验而言，意义尤其重大，即未来的研究方向已经非常明确，而且科学发现的空间宽广，潜力巨大。同时，这些发现为LHAASO之后的升级，甚至于新的研究方向提供了清晰的指导。

实际上，LHAASO已经开始了其发现之旅。第一批公开的数据已经包含了3个确定的新源<sup>[18-20]</sup>，它们均具有非常特殊的特性，引起了国际上其他甚高能伽马天文实验的关注。多项多波段观测研究已经启动，展现出LHAASO在本领域开始发挥引领作用，随着LHAASO新源表的发布，这个效应会进一步彰显。

### 3 PeVatron之于宇宙线的起源问题

在银河系中大量发现PeVatrons，对于逼近被称为世纪之谜的宇宙线起源问题，无疑又向前迈进了一大步。在LHAASO空间分辨率所及的 $0.3^\circ$ 的水平上，宇宙线的加速源其实已经被锁定。一个粗略的估计，产生一个1 PeV光子的质子应该拥有10到几十倍的能量，即10 PeV以上。LHAASO探测到400 TeV以上的伽马射线源，并且没有截断的迹象，就确定了这些银河系的源对超过“膝”以上能量的宇宙线能谱的贡献，而且可能是主要的贡献。这对宇宙线起源的探索来说，突破了传统的认知。虽然尚未得到明确的观测证据，一个普遍接受的模型认为，银河系宇宙线的主要来源是超新星爆炸留下的遗迹(supernova remnant, SNR)，这里有足够强大的激波场区域、丰富的等离子体，以及足够强的磁场，可以约束住它们在激波场内反复加速，这与地球上人造加速器有着非常相似之处。经过推算，考虑到超新星的爆发率和强度分布，这样的宇宙加速器足以提供已经观测到的宇宙线流强。然而，根据越来越多关于SNR的精确测量，人们发现这些加速器存在清楚的加速上限，即很难产生“膝”以上的宇宙线。这本身就是对“膝”现象的一种解释，但却留下了如何产生“膝”以上宇宙线这个更大的谜。LHAASO初步的发现显然给解开这个谜带来了很大的希望。首先，初步的印象是第一批发现的PeVatron似乎与SNR关联较少，而与其他种类的源，如脉冲星风云、大质量恒星团，甚至于双星系统等有更多的关联。其次，进一步深入地调查源区的细致结构，尤其是结合多波段的联合观测与分析，以及源周围的分子云和原子云分布越来越多的测量数据，超高能伽马射线的辐射机制会更加清晰。相信在不久的将来，随着LHAASO数据的不断积累，分析工作的深入，“膝”

以上宇宙线的加速器，亦即超级拍电子伏加速器(super-PeVatron)的庐山真面目会逐渐显现出来。这无疑令人激动的突破。其实，LHAASO也会对许多SNR的高能光谱做出更加细致的测量，同样需要多波段的联合分析，对“膝”以下宇宙线的加速机制和直到100 TeV的伽马射线辐射机制得到更准确的描述，从而获得SNR作为宇宙线起源的明确证据。这也是里程碑性的成果。在深入的分析研究中还发现，在许多重要的候选天体内部，这些不同种类的源常常会互相伴随，给我们的分析工作带来麻烦的同时，也会产生巨大的惊喜。

## 4 PeVatron之于基本物理规律的检验

进入一个从未被探索过的“无人区”，自然会发现一些前所未有的现象，也会对传统的理论和模型发起挑战，同时也可以对基础性的物理规律在全新的极端条件下做出更加严格和精细的检验。最出其不意的是来自大家研究得最深入、观测数据最为丰富的所谓标准烛光的蟹状星云脉冲星风云。

### 4.1 电子-PeVatron: 蟹状星云

前面已经提到，对蟹状星云的详细观测提供了对LHAASO探测器性能的精确检验与测试。经过检验的LHAASO，立刻就提供了超高能伽马射线谱高统计量的新数据，一共收集了100多个能量高于0.1 PeV的光子，分布为一个没有截断迹象的幂律谱，并一直延伸到1 PeV，还探测到来自蟹状星云迄今最高能量的0.9和1.1 PeV两个光子<sup>[21]</sup>。这两个结果都是出人意料的。

蟹状星云是一个非常奇特的天体。它是研究得最为充分的源，能谱的测量覆盖了整个电磁波段，从波长最长的射电波段到最高能量的PeV光子，实现了22个量级上的精确测量。它还是第一个被认证的超新星爆炸，而且还有宋朝的精确记录。更为重要的是，其周围物质分布稀少，是一颗独立的具有清晰边界的超新星遗迹。高清的内部X射线观测，清晰地呈现出脉冲星风云细致的环状结构、小尺度的喷流，甚至于风云环上局部的强辐射区(knots)<sup>[22]</sup>。基于如此翔实的观测，理论研究也开展得相当深入，尤其是基于磁流体动力学(magnetic hydrodynamics, MHD)对风云等离子体的particle-in-cell(PIC)模拟研究<sup>[23]</sup>。这些研究似乎已经完整、清楚地解释了整个蟹状星云的辐射机制，以及正负电子对等离子体产生的轻子加速机制，用一个6参数的单区轻子注入能谱就能拟合跨越22个量级的双成分

复杂光谱分布<sup>[21,24]</sup>。不可否认,这个模型在很大程度上逼近了蟹状星云内部粒子加速和电磁辐射的真实情况,但是,LHAASO的发现仍然对此提出了严峻的挑战。

首先是能谱延伸到PeV,就要求单区轻子模型在极端的所谓Klein-Nishina区域,对逆Compton散射产生超高能光子做出正确的描述,在同步辐射产生的X射线光谱强度对单区磁场强度的限制下,超高能段的光谱实际上并不能很好地描述该模型。更加细致的分析发现,单区轻子模型在所有的能区,都仅仅是近似地符合测量的结果<sup>[24]</sup>,如果聚焦1 GeV~1 PeV的伽马射线观测结果,模型预言的光谱偏离数据超过约20标准偏差。这还不是最大的挑战。其次,更大的问题是,在当地的磁场条件下,电子或正电子的同步辐射导致的能量损失很严重。如果没有一种超乎异常的加速过程,以极高的加速效率给予轻子能量,就不可能把它们的能量提升到1.1 PeV的高能量。这个加速效率要比通常超新星遗迹“正常”的加速效率高3个量级,达到16%。如果按照通常的模型假设,天体物理环境下加速粒子的电场都是由磁场的湍动、碰撞诱导而出,对于经典电动力学和纯MHD理论来说,这就成为难于回答的问题。

仔细分析最高能量段的能谱分布,有迹象表明可能存在另外一个成分的贡献。如果这个成分被未来LHAASO几年的观测所证实,那就是超高能重子成分,换句话说,就是“膝”以上的宇宙线,而蟹状星云脉冲星风云就成为大家一直在寻找的super-PeVatron,能够提供高达几十PeV的宇宙线质子,同时还缓和了超强轻子加速效率的困难:轻子的贡献只在相对低一些的能量范围内,而最高能量的光子则由被加速的重子,比如质子来提供。这个模型似乎漂亮地解决了当前的问题<sup>[24]</sup>,与数据很好地吻合。按照LHAASO现在的观测灵敏度,在未来3~5年内,就会提供比较清晰的判断所需要的观测数据。

## 4.2 PeV光子对洛伦兹不变性的检验

这些最高能量的光子的测量,比如来自天鹅座的1.4 PeV光子,还给我们提供了一次难得的机会,来检查洛伦兹不变性(Lorentz invariance, LI)的正确性,这是检验是否存在量子引力,从而实现规范场与广义相对论引力理论统一的重要指标。困难在于,量子引力预言的破缺(LI violation, LIV)只在普朗克能标( $10^{19}$  GeV)处才会显现,只能在大尺度的天体物理“实验室”内进行检验。如果存在按量子引力理论所预言的LIV,光子就

会自发衰变,而不能到达地球,从而造成观测能谱的截断。LHAASO测到从4700光年处的天鹅座飞来的光子能谱在最高能量1.4 PeV处并未发现截断的事实,证实了在距离普朗克能标3个量级( $10^{16}$  GeV)的范围内不存在LIV现象,虽然尚未完全排除量子引力模型预言的二级效应,但给出了迄今为止最逼近普朗克能标的检验结果<sup>[25]</sup>,比之前的最高能量提升了一个量级以上。

## 5 LHAASO的发现提出的新课题

### 5.1 更高的空间分辨率解析源区细致结构: PeVatron的认证

LHAASO发现的12个超高能伽马射线源中,大多数具有空间延展性,这与源区复杂的激波场分布即加速区域,以及物质分布即伽马射线辐射区的性质密切相关。一些典型的源往往拥有多个高能伽马射线辐射区域,比如超新星爆炸产生的碎片形成的遗迹,经过长达上万年的扩散,尤其是与当地的分子云发生碰撞、挤压,可以形成超过 $1^\circ$ 的巨大辐射区域。而爆炸的中心遗迹附近又可能形成脉冲星风云,成为关联度很高的复杂伽马射线辐射区,甚至还存在不同距离的辐射源形成重叠的现象。解决这类复杂的源带来的问题,天文学的解决办法就是提高空间分辨率。LHAASO采用的空气簇射探测阵列技术,受限于簇射前锋面涨落的影响,即使是ARGO-YBJ实验使用过的地毯式全覆盖探测器阵列,也不能得到好于0.2的空间分辨率,必须采用其他技术,提高超高能段伽马射线观测的空间解析能力。

前文提到,甚高能伽马射线测量的主力设备是Cherenkov光望远镜阵列,其空间分辨率可以达到 $0.06^\circ$ 的水平,但当前一代的探测器,灵敏度明显不足,不能探测到超高能伽马射线信号。按照国际上自然形成的分工格局,欧洲的CTA主要就是瞄准高分辨率定点观测,但按其设计目标,对100 TeV以上的灵敏度仍然与LHAASO提出的要求不相匹配。更重要的是,几年之内,CTA也不能形成其高能段的观测能力。针对这个局面,应该大力发展特定目标指引的高空间分辨率探测装置,聚焦超高能伽马射线,建设高灵敏度的探测装置。其技术指标应该具备:(1)能够长时间定点观测特定的超高能伽马射线源;(2)具有强大的宇宙线背景抑制能力,确保超高能伽马射线探测能力能够匹配LHAASO的观测灵敏度;(3)空间分辨率好于 $0.06^\circ$ 。

只有在对源区进行细致的空间形态分析的基础上,才能开展行之有效的多波段联合分析,精准认证辐射源,探寻粒子加速的精确模型。

## 5.2 在PeV能区需要更高的探测灵敏度

LHAASO对北天12个最明亮的超高能伽马射线源亮度的测量表明,超高能伽马光子的流强非常微弱,针对最亮的单个源,探测1 PeV左右的光子事例率低于1个/年。这对于通过累计足够多的事例样本,搞清楚它们的辐射机制,仍然具有极大的挑战性。根据初步的分析,发现源的种类还各不相同,如果不能对相关种类的源内的粒子加速机制和超高能伽马射线的辐射机制开展充分的统计性研究,对最终全面地理解“膝”以上宇宙线的起源、加速,以及“膝”的成因,仍然缺乏确定性的实验判据,对模型的依赖性也许还会是一个长期存在的问题。扩大超高能伽马射线源的样本数目,增强超高能伽马天文观测的整体灵敏度,仍然是一个既紧迫,又非常必要的艰巨任务,应该举全世界之力,通过广泛的国际合作来完成。南天区面对银河系的主要部分,候选天体比北天区多很多,在南半球开展LHAASO类型的观测研究,将会是一个成效显著的成就。目前,国际上发起了名为“南方大视场伽马射线观测站(Southern Wide-field Gamma-ray Observatory, SWGO)”的大型国际合作动议,已经启动了包括探测技术研发、站址选址等各方面的工作。受到LHAASO发现的激励,并由于我们拥有LHAASO建设的成功经验,我们收到了他们的邀请,SWGO合作组广泛地希望LHAASO团队的加入,学习LHAASO的经验,并有效地推动项目的立项、研发和实施。我相信,这是一个正确的选择与发展的方向,也会成为发挥中国团队引领作用的重要平台。

## 5.3 更深入的唯象研究:连接源区宇宙线与近地宇宙线

随着LHAASO对源区研究的不断深入,对原初宇宙线向星际空间的注入,会积累起更多的、更精确的观测证据,从而给出可靠的注入模型。这就要求对宇宙线在星际空间的传播开展更加精细的唯象研究,才能产生地球附近的宇宙线在空间、种类和能量上的分布,然后可以与LHAASO另外一个观测成果进行直接的对比研究,即各种带电宇宙线粒子在“膝”区能谱分布的精确测量,这也是LHAASO实验的一个重要的组成部分。因此,需要大力发展宇宙线在星际空间传播的唯象

研究。一方面,我国在这个研究方向上的发展与国际先进的研究水平还存在比较大的距离,这与在这方面的投入、项目投入不足有很大的关系;另一方面,LHAASO的其他两项观测研究,即银河系内弥散伽马射线分布的测量和带电宇宙线到达方向空间分布各向异性的精确测量,都会为这些唯象研究提供高质量的观测结果作为支撑。事实上,我国在宇宙线的各向异性研究方面有很好的研究基础<sup>[26]</sup>。

## 5.4 伴生中微子的探测

LHAASO的发现,给出了迄今最清晰的100 TeV以上银河系内可能存在的中微子源,而且每个源的中微子流强都可以根据伽马射线流强准确地估计出来,这是在宇宙线源附近被加速的质子与周围物质作用的主要产物, $\pi^0$ 和 $\pi^\pm$ ,等量的共生衰变产物 $\gamma$ 光子和中微子。从三个方面讲,这是非常重要的。首先,近年来IceCube的观测表明,100 TeV以上,甚至于弥散的中微子流强已经超过了大气中微子的背景,对这些超高能伽马源的中微子观测就可以做到“无背景测量”。其次,长期困扰高能中微子探测的一个问题是是否存在确定的源,相当一段时间,人们在讨论高能中微子可能的源头时,只有当GZK截断效应被发现<sup>[26]</sup>之后,才有1 EeV以上的中微子被看成是模型无关的中微子存在证据,所谓的“确保存在的(guaranteed)”中微子源。显然,那是非常微弱的流强,多年的探测努力尚未发现确切的信号证据,但现在银河系内找到了另一类“确保存在”的源。第三,不言而喻,如果根据伽马射线的流强估计出的中微子流强果真被测到,那就是板上的钉子,最终敲定宇宙线的起源。初步估计,30~100 km<sup>3</sup>的探测装置才具有足够的探测灵敏度,能对这些银河系宇宙线源的中微子进行有效的测量。

目前,国际上中微子探测器的规模和灵敏度水平还远未达到这个要求,达到1 km<sup>3</sup>和大致等价的探测器是南极的IceCube和位于贝加尔湖的GVD,两个探测器均探测到了超过100 TeV的中微子事例,是弥散在整个天球上的孤立事例。未来的大型中微子探测器,包括开始建设但进展缓慢的欧洲KM3Net-ARCA计划和IceCube-Gen2升级计划,规模目标都是小于10 km<sup>3</sup>的大型实验,目前并没有完成建设的明确时间计划。根据LHAASO目前测量到的伽马射线流强来推算,这两个实验计划也不能达到所需的灵敏度对单个点源开展有效的测量,比如最明亮的超高能伽马射线源LHAASO

J1825-1326<sup>[17]</sup>. 所以, 这个领域亟需整合力量, 会聚共识, 积极研发先进、可实施的探测技术, 攻克关键技术难题, 建设超大规模的超高能中微子望远镜. 因为探测器规模巨大、耗资不菲、人力物力投入巨大, 必须精心规划、优化设计、妥善高效地实施, 在有限、可控的投资条件下, 切实聚焦核心的科学目标, 即直接探测来自银河PeVatron的中微子信号, 才有可能实现.

## 6 结语

LHAASO已经进入观测状态, 启动了其超高能宇宙线源的发现之旅. 每一个划时代的探测器投入观测

运行, 由于其领先的探测灵敏度, 必然会有新的发现随之而来, 但自然界却并不保证在任何一个新的窗口、波段都存在像超高能伽马射线天文如此丰富的新现象和关键性的观测证据, 使我们能够迅速地逼近核心科学问题, 明确近期、中期, 甚至长期努力的方向和目标. 这使得LHAASO在整个宇宙线研究历史上扮演了一个推开蕴藏着谜底的密室大门的重要角色, 一个个PeVatron好比锁着谜底的百宝箱, 已经呈现在LHAASO的面前. 我们将不懈地努力探索每一个PeVatron的超高能伽马辐射机制和粒子加速机制, 直到发现宇宙线起源.

## 参考文献

- 1 Aguilar M, Ali Cavazonza L, Ambrosi G, et al. The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II — Results from the first seven years. *Phys Rep*, 2021, 894: 1–116
- 2 Aielli G, Bacci C, Bartoli B, et al. Highlights from the ARGO-YBJ experiment. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2012, 661: S50–S55
- 3 Weekes T C, Cawley M F, Fegan D J, et al. Observation of TeV gamma rays from the Crab Nebula using the atmospheric Cerenkov imaging technique. *Astrophys J*, 1989, 342: 379
- 4 Funk S. Ground- and space-based gamma-ray astronomy. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2015, 65: 245–277
- 5 Kulikov G V, Khristiansen G B. On the size spectrum of extensive air showers. *Sov Phys JETP-USSR*, 1959, 8: 441–444
- 6 Actis M, Agnetta G, Aharonian F, et al. Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA: An advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy. *Exp Astron*, 2011, 32: 193–316
- 7 Sinnis G, Smith A, McEnery J E. HAWC: A next generation all-sky VHE gamma-ray telescope. 2004, arXiv: astro-ph/0403096
- 8 Abeyssekara A U, Alfaro R, Alvarez C, et al. Sensitivity of the high altitude water Cherenkov detector to sources of multi-TeV gamma rays. *Astropart Phys*, 2013, 50-52: 26–32
- 9 Cao Z. A future project at Tibet: The large high altitude air shower observatory (LHAASO). *Chin Phys C*, 2010, 34: 249–252
- 10 He H. Design of the LHAASO detectors. *Radiat Detect Technol Methods*, 2018, 2: 7
- 11 Cao Z. An ultra-high-energy  $\gamma$ -ray telescope at 4,410 m. *Nat Astron*, 2021, 5: 849
- 12 Ng C Y, Romani R W. Fitting pulsar wind tori. *Astrophys J*, 2004, 601: 479–484
- 13 Aharonian F, An Q, Axikegu, et al. Performance of LHAASO-WCDA and observation of the Crab Nebula as a standard candle. *Chin Phys C*, 2021, 45: 085002
- 14 Aharonian F, An Q, Axikegu, et al. Observation of the Crab Nebula with LHAASO-KM2A — A performance study. *Chin Phys C*, 2021, 45: 025002
- 15 Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. Observation of the cosmic ray moon shadowing effect with the ARGO-YBJ experiment. *Phys Rev D*, 2011, 84: 022003
- 16 Aharonian F, An Q, Axikegu, et al. Calibration of the air shower energy scale of the water and air Cherenkov techniques in the LHAASO experiment. *Phys Rev D*, 2021, 104: 062007
- 17 Cao Z, Aharonian F A, An Q, et al. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12  $\gamma$ -ray Galactic sources. *Nature*, 2021, 594: 33–36
- 18 Cao Z, Aharonian F, An Q, et al. Discovery of the ultrahigh-energy gamma-ray source LHAASO J2108+5157. *Astrophys J Lett*, 2021, 919: L22
- 19 Cao Z, Aharonian F, An Q, et al. Discovery of a new gamma-ray source, LHAASO J0341+5258, with emission up to 200 TeV. *Astrophys J Lett*, 2021, 917: L4
- 20 Aharonian F, An Q, Axikegu, et al. Extended very-high-energy gamma-ray emission surrounding PSR J0622+3749 observed by LHAASO-KM2A. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 241103
- 21 Cao Z, Aharonian F, An Q, et al. Peta-electron volt gamma-ray emission from the Crab Nebula. *Science*, 2021, 373: 425–430
- 22 Weisskopf M C, Hester J J, Tennant A F, et al. Discovery of spatial and spectral structure in the X-ray emission from the Crab Nebula. *Astrophys J*, 2000, 536: L81–L84

- 
- 23 Lu Y, Guo F, Kilian P, et al. Fermi-type particle acceleration from magnetic reconnection at the termination shock of a relativistic striped wind. [Astrophys J](#), 2021, 908: 147
  - 24 Nie L, Liu Y, Jiang Z J, et al. Ultra-high-energy gamma-ray radiation from the Crab pulsar wind nebula. [Astrophys J](#), 2022, 924: 42
  - 25 Cao Z, Aharonian F A, An Q, et al. Exploring Lorentz invariance violation from ultra-high-energy gamma rays observed by LHAASO. [Phys Rev Lett](#), 2022, 126: 051102
  - 26 Amenomori M, Ayabe S, Bi X J, et al. Anisotropy and corotation of galactic cosmic rays. [Science](#), 2006, 314: 439–443
  - 27 Abbasi R U, Abu-Zayyad T, Allen M, et al. First observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin suppression. [Phys Rev Lett](#), 2008, 100: 101101

Summary for “LHAASO在宇宙线物理中的里程碑意义”

## LHAASO: A milestone of the cosmic ray research

Zhen Cao<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>2</sup> School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup> Tianfu Cosmic Ray Research Center, Chengdu 610000, China

E-mail: caozh@ihep.ac.cn

The Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) is one of the largest experiments in the history of cosmic ray physics research for 110 years. The key scientific goal is to search for cosmic ray origins. Not only for exploring for ultra-high-energy (UHE) gamma ray sources, LHAASO is also used for the precision measurements of the charged cosmic rays for their composition and energy spectral distributions near-by the Earth, thus allowing a systematic study of the cosmic rays for their acceleration in source regions and propagation through the interstellar space. In this paper, we reviewed the history of proposing, construction and operation of LHAASO. We also briefly explain the discoveries made in the first phase of operation of LHAASO mainly during the deployment of the next half of the array. They demonstrate the capability of finding new gamma ray sources particularly for extended radiation regions in gamma ray energy greater than 100 TeV. Since the energy range is so high that have never been systematically explored by previous experiments, the territory allows us to do many new studies and to have new views on the existing gamma ray sources particularly in the way to identify them as cosmic ray sources. The first discoveries by LHAASO actually start the era of UHE gamma ray astronomy, by unveiling the various types of PeVatron candidates in our galaxy. This paved the way of finding the origins of cosmic rays, offered guidance of precision study of the cosmic ray particle acceleration mechanisms and propagation effects in the future. This is unique in the history of cosmic ray research that a single experiment could make breakthroughs in both gamma ray astronomy and precision measurement of charged cosmic ray particles. Separating single species of cosmic rays out of the total cosmic ray flux at such high energy, was treated as an impossible mission in the community. Meanwhile, the LHAASO experiment provides a platform with extreme conditions for precision testing for existing theories and models, or even poses challenges to them. The current measurements of the newly discovered PeVatrons also set performance specifications for post-LHAASO experiments in cosmic rays, gamma rays and astronomic neutrino detections. We express our views about the historic impact of the LHAASO experiment in this paper. We also outlook the future experiments along the direction pointed by LHAASO. In short term, it is urgent to boost the sensitivity of pointing observation of UHE gamma ray sources, to resolve the detailed structures of possible cosmic ray sources among the PeVatrons discovered by LHAASO. This is the way to unveil the particle acceleration mechanisms in the PeVatrons. In the medium term, the discovery power for PeVatrons in our galaxy particularly in the southern hemisphere ought to be enhanced. The goal is to find sufficient sources to count for all observed cosmic ray flux. In the long run, we need to raise the astronomic neutrino detection sensitivity to a level that matches the gamma ray detection, namely to have the capability of detecting the neutrino flux from a single source like the Crab Nebula or Cygnus region as predicted according to their gamma ray flux measured by LHAASO. This is the way to approach the ultimate goal of certifying the cosmic ray origins.

**cosmic ray, Large High Altitude Air Shower Observatory, PeVatron,  $\gamma$ -ray, neutrino**

doi: [10.1360/TB-2022-0160](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0160)