

揭秘宇宙线起源：LHAASO 的使命、挑战与展望

刘佳 曹臻[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2024-04-04 收到

† email: caozh@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20240403

Unveiling the origins of cosmic rays: the mission, challenges, and prospects of LHAASO

LIU Jia CAO Zhen[†]

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 高海拔宇宙线观测站(LHAASO)是人类研究宇宙线最大的实验装置之一，其核心科学目标是寻找宇宙线的起源，不但要探测超高能伽马射线源，也致力于精确测量地球附近带电宇宙线的成分和能谱，系统地研究宇宙线的加速过程及传播机制。从发现12个超高能伽马源(标志着超高能伽马天文学领域的开启)，到第一个星表的发布(展现出银河系丰富多彩的宇宙线加速源的候选天体)，LHAASO已经为发现宇宙线起源奠定了良好的基础。此外，这些成果为后续的宇宙线加速机理和传播效应的研究指明了方向，同时也为现有理论与模型提供了精确检验的机会与挑战。文章概述了LHAASO项目的开展背景、望远镜主要结构及其在宇宙线物理学中的重大意义，并对其未来的研究方向进行了展望。

关键词 高海拔宇宙线观测站，粒子天体物理，超高能伽马射线，宇宙线起源

Abstract The Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) stands as one of the largest experimental setups in the last 110 years dedicated to cosmic ray research. Its core scientific objective is to uncover the origins of cosmic rays, not only by detecting ultra-high energy (UHE) gamma-ray sources but also by accurately measuring the composition and energy spectrum of charged cosmic rays near Earth, and systematically studying the acceleration and propagation mechanisms of cosmic rays. From the identification of 12 UHE gamma-ray sources, marking the advent of UHE gamma astronomy, to the release of the first star catalog showcasing the diverse potential cosmic ray accelerators within the Milky Way, LHAASO has laid a solid foundation for uncovering the origin of cosmic rays. Moreover, these achievements have directed the subsequent research on cosmic ray acceleration and propagation, while also providing opportunities and challenges for testing existing theories and models. This article outlines the background of the LHAASO project, the significance of this major scientific instrument led by Chinese scientists in cosmic ray physics, and envisages its future research directions.

Keywords LHAASO, particle astrophysics, ultra-high energy gamma-ray, origin of cosmic rays

1 背景

自奥地利物理学家 Victor Hess 于 1912 年发现宇宙线以来，尽管已经过去了多个世纪，但宇宙线的起源依然是一个悬而未决的谜题。主要是因为银河系中的磁场使得宇宙线的路径发生偏转，实验中观测到的宇宙线丧失了其原始方向的信息，无法直接通过宇宙线的到达方向来追溯其源头。因此，科学家们只能间接地通过测量伽马射线或中微子这类中性粒子来寻找宇宙线的起源。由于高能伽马射线的流强比宇宙线要低 4—5 个量级，如何排除宇宙线本底一度成为甚高能(VHE)伽马射线天文的瓶颈。20 世纪 90 年代，WHIPPLE 实验组成功研制了大气成像切伦科夫望远镜(IACT)，通过大幅提升角分辨率，成功克服了这一难题，其对蟹状星云等甚高能伽马射线源的观测奠定了甚高能伽马射线天文学的基础；随后，HESS、VERITAS、MAGIC 等实验组利用 IACT 立体观测，发现了大量的甚高能伽马射线源，为甚高能伽马天文学树立了里程碑。到目前为止，已探测到几百个甚高能伽马射线源。伽马射线发射并不一定直接关联于源区宇宙线的加速，已经发现的近百个 TeV 河内源多数适用于逆康普顿(IC)模型，即电子起源。尽管如此，某些高能源的观测结果暗示了强子加速器的存在，尽管 HESS 等实验的能谱测量局限在一百 GeV 到几十 TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$)，尚不足以确定其为宇宙线源，但人们从此看到了揭开宇宙线起源的曙光。

在过去二十年里，宇宙线研究经历了重大变革，尤其是发现了大量的伽马射线源，这为揭示宇宙线起源谜团迈出了关键一步，标志着人类能够在广袤的宇宙中确定某个具体的星体或星系是否为 TeV 宇宙加速器(Tevatron)。目前的观测数据足以证明，电子已经在这些 Tevatron 中被加速到不低于 100 TeV 的能量。然而，电子只占通常的重子宇宙线流强的万分之一，甚至十万分之一。在能够明确地证明这些宇宙加速器同时或者专门加速重子物质粒子之前，宇宙线起源的难题尚未破解。在对已发现的 Tevatron 进行能谱精细测量

的过程中，一些迹象暗示了强子加速器的可能存在，但目前仍面临一些挑战：(1) 尚未收集到足够的伽马射线源样本，无法按其加速行为进行分类；(2) 对于已探测到的源，现有能谱的多波段详细的观测数据较少，使得无法在普遍的观测规律与个别源的特殊行为之间进行精确判断。因此，伽马射线天文学——这个极有可能在短期内实现突破、揭示宇宙线起源之谜的领域，迫切需要扩大对整个天空的巡天扫描观测，发现更多的伽马射线源。正如 HESS 实验在银河系中心^[1]以及 VERITAS 实验在天鹅座区域开展的扫描观测^[2]，虽然这些扫描覆盖的区域相对较小(大约只占全天空的 1%)，但已经获得了丰富的发现，当然按照预期这些区域源的密度也是最高的。另一方面，人们同样期待对扫描发现的众多源做深度成像观测、大范围的能谱测量和尽可能广泛的多波段观测研究，彻底弄清伽马射线的辐射机制，进而得到产生伽马射线的宇宙线粒子的加速机制。在一百 TeV 以上能区，伽马射线源的搜索也引起了广泛关注，这些源的发现为宇宙线起源提供了几乎毫无争议的证据，因为电子在软光子上的逆康普顿散射过程几乎不可能产生如此高能量的光子。

在 2009 年初的香山科学论坛“高能宇宙线物理的若干前沿问题”上，我国科学家们形成如下共识：粒子天体物理已经发展成为高能物理一个非常重要的分支，在未来的 5 到 10 年内将有望产生具有深远影响的突破，即可能发现极高能宇宙线的加速器，从而解开宇宙线起源这一世纪之谜。与此紧密相关的还有高能宇宙线本身的加速和传播机制，以及宇宙演化、高能天体演化等基本问题，由此延伸至银河系宇宙线源的最高加速能量、电子与质子是否通过不同的机制被加速、天体加速器具有怎样的性质、有什么样的引力和磁场环境、加速能力受到哪些因素制约、伽马射线暴的爆发机制与宇宙线加速的关系、用宇宙线如何探测暗物质、遥远的宇宙早期黑洞存在与否，甚至是否存在量子引力效应等等一系列问题。毋庸置疑，宇宙线起源是所有问题中的核心，是迫切需要解决的首要问题。已有二十多年发展历史的甚

高能伽马天文学正是基于这一重大科学挑战成熟起来的，其中尤以空气切伦科夫望远镜为主的高灵敏度定点观测技术为典型，至今已取得发现近300颗伽马源的辉煌成就。不足的是，这项技术受视场范围窄(小于3°)、曝光时间短(约10%)的限制。随着大量高亮度源的发现(特别是河内的源)，进一步深化该领域的探索和研究，就必须继续大力开展宽视场巡天观测技术，即以我国羊八井ARGO-YBJ和AS γ 为代表的地面粒子探测器阵列技术。这些探测器阵列，在空间角分辨、探测能区和灵敏度等方面都已经不能满足当前的需求。为能够进一步揭示宇宙线起源之谜，会上提出在国内高海拔地区新建一个高海拔宇宙线观测站项目。

2 LHAASO 实验介绍

高海拔宇宙线观测站(LHAASO，又称“拉索”)选址在四川稻城海拔高达4410 m的海子山上，紧邻217省道，离稻城亚丁机场仅8 km，交通便捷。LHAASO项目经过前期的筹备工作，2017年开工建设。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^[3]，并投入稳定运行。

LHAASO实验^[4]主要包含3个探测器阵列(图1)：分布面积最大的阵列称为一平方公里地面粒子探测器阵列(KM2A)，在1.3 km²范围内均匀放置地面电磁粒子探测器(ED)和地下缪子探测器(MD)；中心部分是全覆盖、低阈能、总面积78000 m²的水切伦科夫光探测器阵列(WCDA)；还有可以机动布置以适应不同物理需求的18台广角大气切伦科夫光望远镜(WFCT)组成的望远镜阵列(WFCTA)。下面对这些探

测系统进行分别介绍。

2.1 一平方公里阵列

地面粒子探测器阵列(KM2A)由5195个电磁粒子探测器和1171个地下缪子探测器以及后级的电

子学、定时、数据采集、触发判选、数据处理、标定等功能系统组成。电磁粒子探测器(图2(a))是1 m²的塑料闪烁体探测器，其产生的光子经光纤收集，传输到光电倍增管转化成电信号读出。电磁粒子探测器表面覆盖5 mm厚的铅板，用于将空气簇射中的光子转化成电子以提高探测效率和角分辨率。电磁粒子探测器之间采取正三角形排布，在1 km²的中心区域间隔为15 m排布。外围区域相邻电磁粒子探测器的间距为30 m，用于判

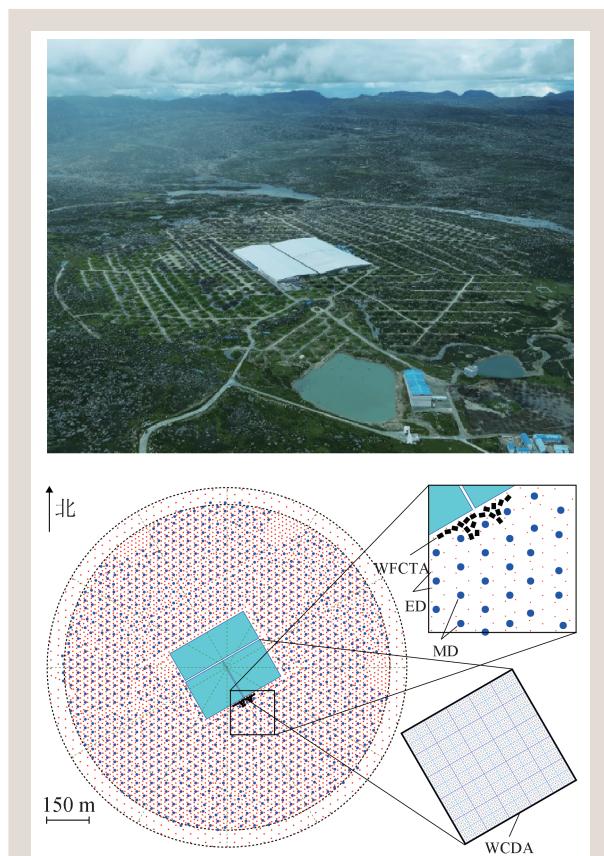


图1 LHAASO阵列航拍图(上)及探测器布局图(下)。其中，布局图中有些地方因地质原因缺失地下缪子探测器(MD)

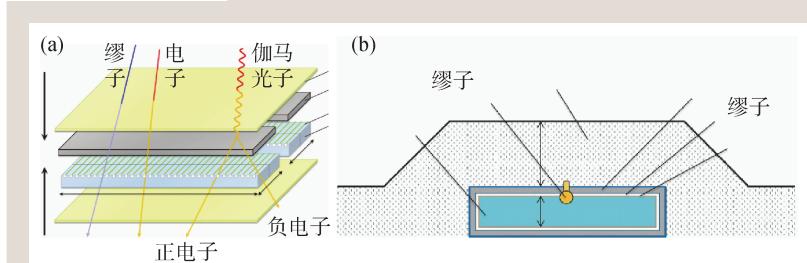


图2 (a)电磁粒子探测器结构示意图；(b)地下缪子探测器结构示意图

别簇射的芯位落在了阵列以内还是以外，总分布面积达到 1.3 km^2 。电磁粒子探测器用于重建原初粒子的能量和方向。

地下缪子探测器(图2(b))是 36 m^2 的水切伦科夫探测器，用光电倍增管读出。地下缪子探测器表面覆盖 2.5 m 厚土层，用于吸收电子和光子，探测缪子的阈能为 1.3 GeV 。地下缪子探测器之间同样采取三角形排布，间隔为 30 m ，分布在中心区域。整个阵列布局如图1所示。因为强子宇宙线的次级粒子中富含缪子，而伽马射线的次级粒子中缪子很少，所以可以用地下缪子探测器区分宇宙线和伽马射线。图3显示了在模拟计算中，地

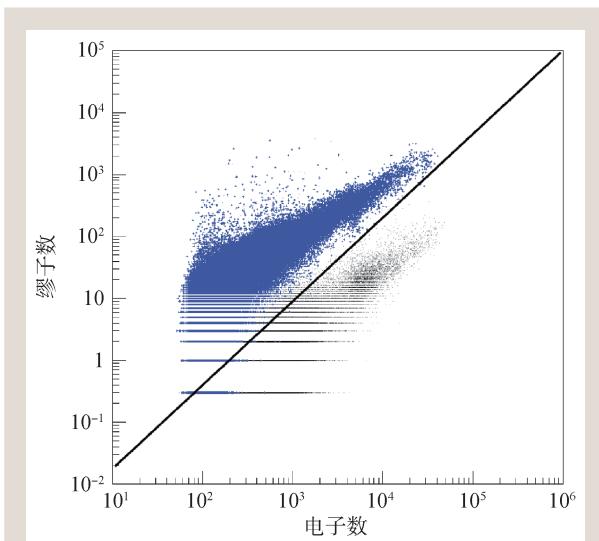


图3 地面粒子探测器阵列利用测量到的缪子数与电子数对原初伽马射线(黑点)和宇宙线(蓝点)进行区分，黑线是两者的区分线(模拟计算结果)

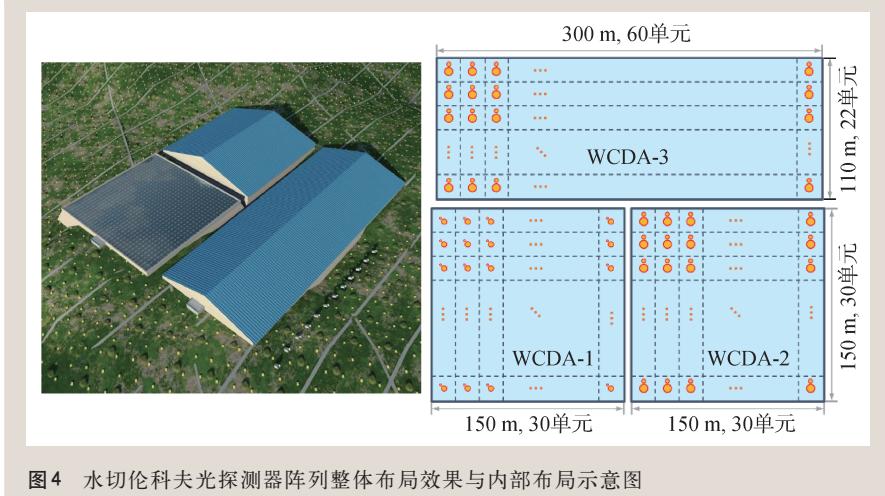


图4 水切伦科夫光探测器阵列整体布局效果与内部布局示意图

面粒子探测器阵列观测到的缪子数与电子数，可以看到宇宙线和伽马射线具有明显区分度，在一定能区以上可以完全排除掉宇宙线^[5]。

2.2 水切伦科夫阵列

水切伦科夫光探测器阵列(WCDA，图4)分成3个水池，由3120个单元探测器以及后级的电子学、定时、数据采集、触发判选、数据处理、标定等功能系统组成。单元探测器为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的水域，深度为 4.4 m ，两个单元之间用隔光帘隔开，从而避免来自同一次级粒子尤其是缪子信号的串扰。水切伦科夫光探测器阵列将大尺寸光电倍增管分别布设于每个单元的中央，置于水底，向上观测。另外还将小尺寸光电倍增管放置在大尺寸光电倍增管旁边，用于扩大簇射粒子的动态测量范围，从而实现高能宇宙线的高精度测量。

2.3 大气成像切伦科夫望远镜阵列

大气成像切伦科夫望远镜阵列(WFCTA，图5)由18台大气成像切伦科夫望远镜组成，每台望远镜由光学系统、硅光电倍增管阵列、电子学读出系统、慢控制系统和检测系统、标定系统和机械系统6大部分组成^[6, 7]。望远镜都放置在一个海运集装箱内，并把集装箱放置在底盘上，使其便于移动并能够在仰角 0° — 90° 之间升降。高能宇宙线进入大气层之后能够引发广延大气簇射，而簇

射中的带电粒子能够进一步辐射出切伦科夫光，或者激发的氮分子退激发而发出荧光。大气成像切伦科夫望远镜阵列通过探测这些光子实现对宇宙线的探测。簇射中的切伦科夫光或者荧光由多面反射镜组成的光学系统收集并反射聚焦到硅光电倍增管阵列上，在硅光电倍增管阵列上形成切伦科夫光像或荧光像。每台望远镜的光学

系统由20面边长为六边形的球面子镜及5块相应的半子镜拼接而成，总集光面积为 5 m^2 。为了降低视场内光学系统像差引起的光斑能量分布的不一致性，通过光学优化，要求硅光电倍增管阵列至反射镜中心的距离为2.87 m。

3 超高能伽马天文学

3.1 银河系PeV宇宙加速器

自2019年起，LHAASO开始实行“边建设、边运行”的策略，其探测器阵列分阶段逐渐开始科学观测工作。2021年，依托于已完成一半规模的地面上粒子探测器阵列，通过2020年11个月的数据收集，在银河系中发现了12个超高能宇宙粒子加速器^[8]，并记录到最高1.4 PeV(1 PeV= 10^{15} eV)的伽马射线光子。这个发现刷新了人类对银河系的传统认知，并标志着“超高能伽马天文学”时代的开启(图6)^[9]。

在2021年7月全阵列建成之后，LHAASO凭借其卓越的探测灵敏度，在短短一年时间内将其发现的超高能伽马射线源数量增至43个，展现了强大的伽马射线源探测能力。2023年5月，LHAASO第一期伽马射线源星表通过arXiv平台向国际发布(图7)。该星表共计录入了90个伽马射线源，其中32个为新发现，显著增加了甚高能以及更高能区伽马射线源的数量，而此前30多年的累积天体源数目仅为270个。尤为重要的事，星表中记录的43个超高能伽马射线源被视为探索超高能宇宙线起源的理想候选，远超LHAASO项目之前不足5个的数量。此外，星表还初步提供了35个天体源的跨越三个量级的能谱测量结果，对深入研究天体辐射机制具有极其重要的价值。该星表发布后在国际上引起了高度关注和热烈研讨，成为天体物理领域国际研讨会的亮点^[10]。

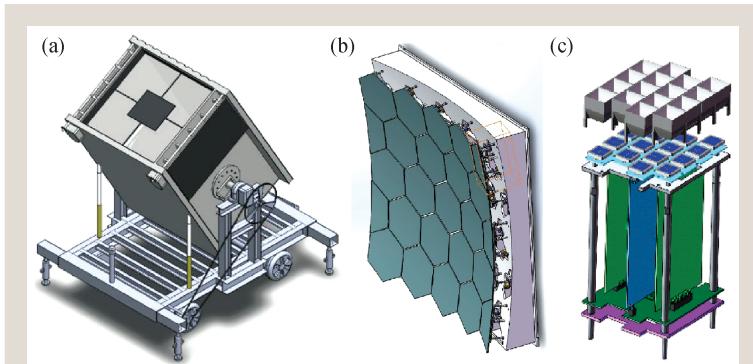


图5 大气成像切伦科夫望远镜(a)及其光学系统(b); (c)硅光电倍增管阵列

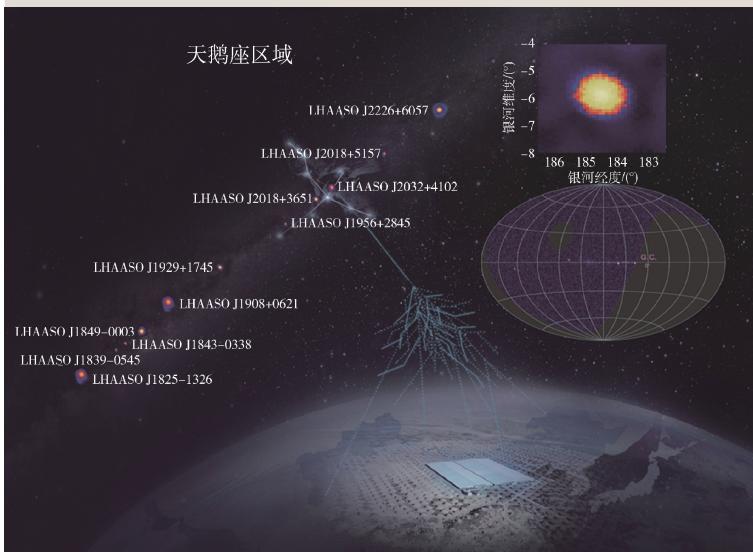


图6 LHAASO实验中发现的12个稳定伽马射线源示意图(能量超过PeV的光子来自天鹅座内非常活跃的恒星形成区)

天鹅座恒星形成区是银河系在北天区最亮的区域，这里散布着多个大质量恒星星团。由于大质量恒星生命周期短暂，仅有数百万年，因此该星团内部充斥着高度活跃的恒星和复杂的强激波环境，成为加速宇宙线的理想场所。这一引人注目的区域已经被确定为寻找超高能宇宙线源的最佳天区，成为揭示宇宙线起源这一“世纪之谜”的关键。

随着时间的推移和数据的累积，研究人员在天鹅座方向，距地球约5000光年处，发现了一个直径超过1000光年的巨型超高能伽马射线泡状结构。在超过三年的观测期中，LHAASO在这一方向捕获了66个超过1 TeV的光子，其中有8个光子的能量超过了1 PeV。最高能量的光子达到了

2.5 PeV，刷新了已知最高能量光子的记录。

在这个伽马射线泡状结构的中心区域，光子分布更加密集，相较于泡状结构内的平均光子密度明显超出。这表明泡状结构中心必定存在一个宇宙线加速源，向周围持续注入宇宙线，而这个巨型“泡泡”就是由超级宇宙线加速源产生的。

LHAASO的此次发现不仅首次定位了高能天体物理学家们几十年来一直寻找的PeV宇宙线加速源，而且证明了银河系中天体的粒子加速能力，这很可能突破了传统认为的PeV极限，将对宇宙线起源的研究产生重要影响。随着观测时间的增加，LHAASO将探测到更多的PeV乃至更高能量宇宙线的加速源，有望解决银河系宇宙线起源

之谜。

3.2 银河系银盘区域超高能弥散伽马辐射

银河系弥散伽马射线主要产生于宇宙线和星际物质以及星际辐射场的相互作用，因而是研究宇宙线起源和传播的重要射线。由于宇宙线电子在银河系磁场和辐射场中快速冷却，超高能段的弥散伽马射线被认为主要来自于宇宙线原子核和物质的非弹性碰撞，进而可以直接探索核素宇宙线的分布，因此其被认为是粒子天体物理研究中最为重要的观测量之一。以往对弥散伽马射线的观测主要集中在TeV能量以下，由空间卫星直接测量给出。然而，TeV以上能区的数据匮乏限制了对超高能宇宙线粒子分布的认识。

在此背景下，图8突破性地展示了LHAASO-KM2A对银河平面内外两个关键区域的超高能段(10 TeV—1 PeV)弥散伽马射线发射的精确测量。这两个区域一是内银盘区域，涵盖银河经度(l) 15° — 125° 以及银河纬度(b)小于 5° 的范围；二是外银盘区域，包括银河经度 125° — 235° 和银河纬度小于 5° 的区域。LHAASO的测量结果不仅填补了TeV以上能区的观测空白，同样重要的是，图8通过细致的能量区间划分，为我们提供了一个清晰的视图，展示了弥散伽马射线在这些特定天区内不同能区的流强，这对于理解宇宙射线在银河系中的分布、传播和相互作用提供了重要的线索。

LHAASO通过对来自于银盘区域的超高能段弥散伽马射线辐射的测量，表明辐射强度远高于理论预期。这是迄今为止在超高能段给出的最可靠的测量结果，覆盖能段宽、测量精度高、点源污染少。LHAASO也首次提供了外银道面区域的测量结果，该研究成果于2023年10月9日发表于《物理评论快报》^[11]。

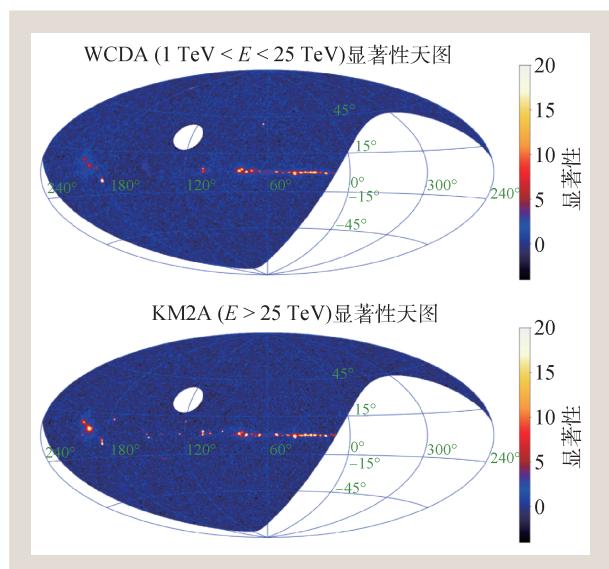


图7 LHAASO第一期星表在1—25 TeV和大于25 TeV能段的显著性天图

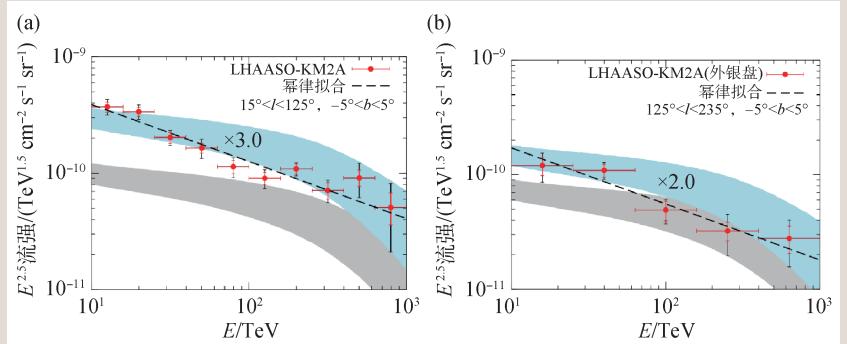


图8 LHAASO测量的弥散伽马射线流强(红点)和传统理论模型预期(灰色阴影)的比较。浅蓝色阴影区域是传统模型增大3倍或2倍的结果。其中，(a)为银河系内银盘区域，(b)为银河系外银盘区域

4 结语及未来展望

在每一个划时代的探测器投入观测运行时，由于其领先的探测灵敏度，都会带来新的发现与机遇。LHAASO已经进入全面观测状态，开启了超高能宇宙线源的发现之旅，使我们能够迅速地逼近宇宙线起源这一核心科学问题。但是另一方面，从现有的观测数据可以看到，LHAASO发现的超高能伽马射线源多数具有空间延展性，并且源区加速区域与物质分布密切相关，一些典型的源甚至拥有多个高能伽马射线辐射区域。这就给数据与理论分析带来了较大的不确定性和兼并性，从仪器设备角度来解决此问题就是提高探测的空间分辨率，从而提高超高能段伽马射线观测的空间解析能力。在接下来计划中，LHAASO项目将进一步提高探测的空间分辨率，同时也会进一步提高设备的灵敏度和能量的覆盖范围。

从第一个LHAASO星表可以看出，超高能伽马射线源的种类各不相同，如果不能对不同种类源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(图9)^[12–23]，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

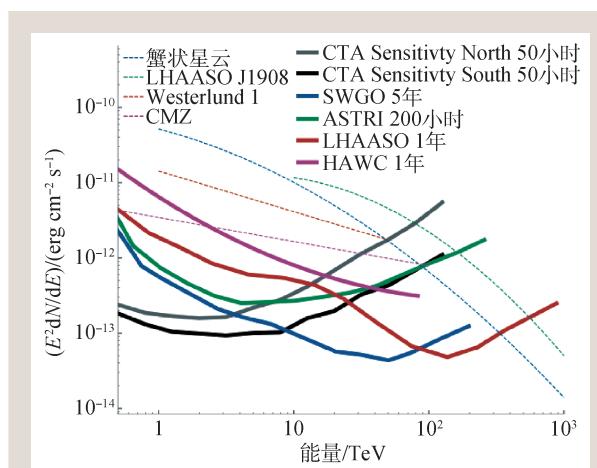


图9 针对选定的超高辐射源：蟹状星云、LHAASO J1908、Westerlund 1 和中心分子云(CMZ)，不同望远镜阵列的探测灵敏度。注意SWGO提供的曲线是所谓的“稻草人”灵敏度。其中，CTA是切伦科夫望远镜阵列，SWGO是南天大视场伽马射线天文台，ASTRI是由意大利国家天体物理研究所(INAF)主导的切伦科夫望远镜阵列，HAWC是墨西哥高海拔水切伦科夫天文台

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^[24])”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成果的激励，中方团队收到了邀请，并且在2022年加入了SWGO合作组。在这个平台上，各国科学家将联合研发下一代高灵敏度、高分辨率、大能量范围的超高能伽马天文望远镜。

LHAASO实验在整个宇宙线研究历史上扮演了一个推开超高能伽马天文学窗口的重要角色，并且将会持续带来新的发现，这些发现也将继续给人们带来新奇、困惑与启迪。沿着这些发现人们也将继续探索宇宙，认识宇宙。

参考文献

- [1] Nekrasov D. A Detailed Study of the HESS data from the Galactic Center region. Ruperto-Carola University of Heidelberg, Doctor of Natural Sciences. 2010
- [2] Krause M, VERITAS Collaboration. AIP Conference Proceedings, 2017, 1792(1):040002
- [3] Cao Z. Nat. Astron., 2021, 5:849
- [4] He H H, For the LHAASO Collaboration. Radiation Detection Technology and Methods, 2018, 2:7
- [5] Cui S W, Liu Y, Liu Y J et al. APh, 2014, 54:86
- [6] Bai B Y, Zhang S S, Cao Z et al. NIMPA, 2018, 899:94
- [7] Zhang S S, Bi B Y, Wang C et al. Proceedings of International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics 2017. Singapore: Springer, 2018. pp.22—26
- [8] Aharonian F et al. Chin. Phys. C, 2021, 45:025002
- [9] Cao Z, Aharonian F A, An Q et al. Nature, 2021, 5910:33
- [10] Cao Z, Aharonian F, An Q et al. The Astrophysical Journal

Supplement Series, 2024, 271(1):25

- [11] Cao Z, Aharonian F, An Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2023, 131(15): 151001
- [12] Atwood W, Albert A, Baldini L *et al.* Pass 8: Toward the Full Realization of the Fermi-LAT Scientific Potential. 2013, arXiv: 1303.3514
- [13] Aleksić J, Ansoldi S, Antonelli L A *et al.* Astropart Phys., 2016, 72: 76
- [14] Holler M *et al.* PoS(ICRC2015), 2015: 847. <https://doi.org/10.22323/1.236.0847>
- [15] Abeysekara A U, Albert A, Alfaro R *et al.* Astrophys. J., 2017, 843(1):39
- [16] Abeysekara A U, Albert A, Alfaro R *et al.* The Astrophysical Journal, 2017, 843:39
- [17] Cao Z, della Volpe D, Liu S *et al.* The Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) Science Book (2021 Edition).
- [18] CTA Observatory Consortium. CTAO Instrument Response Functions-prod5 version v0.1. 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5499840>
- [19] Lombardi S, Antonelli L A, Bigongiari C *et al.* PoS (ICRC 2021), 2021:884. <https://doi.org/10.22323/1.395.0884>
- [20] LHAASO Collaboration, Cao Z, Aharonian F *et al.* Science, 2021, 373:425
- [21] Cao Z, Aharonian F A, An Q *et al.* Nature, 2021, 594(7861):33
- [22] Aharonian F, Ashkar H, Backes M *et al.* Astron. Astrophys., 2022, 666:124
- [23] HESS Collaboration, Abramowski A, Aharonian F *et al.* Nature, 2016, 531(7595):476
- [24] Ackermann M, Ajello M, Allafort A *et al.* Science, 2013, 339 (6121):807



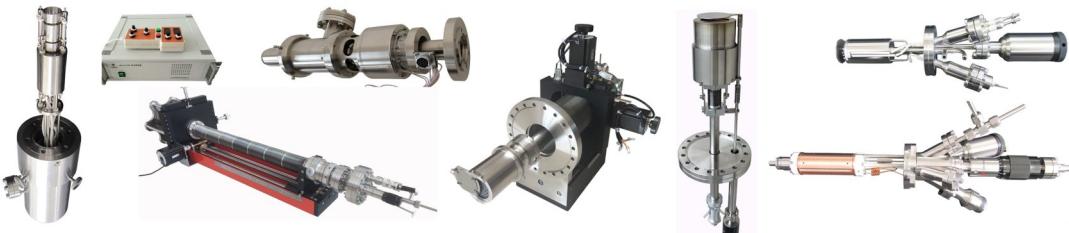
大连齐维科技发展有限公司

地址: 大连高新区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: info@chi-vac.com HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理和薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

