LHAASO与宇宙线起源

杨睿智^{1,2*}

1. 中国科学院星系宇宙学重点实验室, 中国科学技术大学天文学系, 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学天文与空间学院, 合肥 230026

*联系人, E-mail: yangrz@ustc.edu.cn

收稿日期: 2021-06-18; 接受日期: 2021-07-22; 网络出版日期: 2021-09-14

国家自然科学基金(编号: 11421303, 12041305)资助项目

摘要 宇宙线的能谱延展到超过 10^{15} 电子伏特(PeV)的能段, 这表明银河系中存在超高能宇宙线加速源. 而近期的甚高能伽马射线观测表明, 长期以来被认为是主要宇宙线加速源的超新星遗迹很难把宇宙线加速到超高能. 因此, 寻找超高能(PeV)宇宙线加速源是宇宙线起源研究中的核心问题. 其中一个最直接的方法就是寻找加速源附近宇宙线与星际气体相互作用产生的超高能伽马射线辐射. 我国的高海拔宇宙线观测站(LHAASO), 由于其在超高能伽马射线能段世界领先的灵敏度, 成为这一研究的理想工具. LHAASO半阵列建成后一年之内, 已经在银盘上观测到了十二个超高能伽马射线源, 在这一领域取得了突破性的进展. 本文将介绍这些已得到的观测结果, 并对LHAASO全阵列建成后可能的新进展进行展望.

关键词 宇宙线, 伽马射线, 伽马射线源**PACS:** 96.50.S-, 95.85.Pw, 98.70.Rz

1 引言

宇宙线是星际空间中的相对论性带电粒子, 其中绝大部分是质子, 也包括氦和更重元素的原子核, 以及电子成分. 在银盘上, 宇宙线贡献了大概 1 eV/cm^3 的能量密度, 是星际介质的重要组成部分^[1]. 同时, 宇宙线也控制了恒星形成和星际化学过程.

地面的直接宇宙线观测, 如Pierre Auger^[2], Telescope Array^[3], ARGO-YBJ^[4], AS γ ^[5]和KASCADE^[6]等, 得到了宇宙线的能谱和各向异性信息. 但是由于宇宙线粒子带电, 它们在传播过程中会在星际磁场中发生

偏转, 因此宇宙线的直接观测不能得到宇宙线加速源的信息. 宇宙线的能谱在很宽的能段内都可以用幂律谱来近似, 在PeV (10^{15} 电子伏特)处能谱变软(谱指数绝对值增大), 存在一个被称为“膝”的结构^[7]. 一般认为, 至少到“膝”区能量处的宇宙线应为银河系内的加速源所加速. 但是, 宇宙线在何处被加速到如此高的能量至今依然存疑. 正如前文所述, 宇宙线的直接观测不能告诉我们宇宙线的加速源. 另一方面, 宇宙线与星际介质中其他成分相互作用产生伽马射线. 由于伽马射线不在磁场中偏转, 从而可以提供宇宙线起源的信息.

引用格式: 杨睿智. LHAASO与宇宙线起源. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 229501

Yang R Z. LHAASO and the origin of cosmic rays (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 229501, doi: 10.1360/SSPMA-2021-0172

一般认为, 超新星遗迹是河内宇宙线最可能的加速源^[7]. 但是超新星遗迹能否提供到“膝”区能量处的所有宇宙线? 是否存在其他不同于超新星遗迹的河内超高能加速源? 这些问题的答案依然未知. 宇宙线与星际气体相互作用产生的次级伽马射线的能量大概比宇宙线本身的能量低一个量级左右^[8]. 因此, 要对“膝”区的宇宙线进行研究, 就需要在能量为100 TeV左右的超高能伽马射线能段进行观测. 我国的国家重大科技基础设施高海拔宇宙线观测站(The Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)是在这个能段目前世界上最灵敏的仪器, 在LHAASO的建设阶段, 一半阵列已经得到了一系列重要的科学结果, 为回答宇宙线起源问题提供了崭新而重要的材料. 本文将对LHAASO阵列和已取得的重要观测成果, 以及这些成果在宇宙线科学上的应用进行介绍.

2 河内宇宙线的可能起源

一般认为, 超新星遗迹是河内宇宙线的主要加速源^[9]. 这种假设已经得到一系列理论和观测证据的支持. 首先, 一次超新星爆发性事件的总能量注入约为 10^{51} erg, 假设其中大概10%的能量被用来加速宇宙线, 再考虑到整个银河系中每百年大约有3次超新星爆发, 那么超新星爆发能提供的宇宙线能量注入率和观测得到的相近, 均为大约 10^{41} erg/s^[9]. 其次, 超新星遗迹中存在高速的激波, 带电粒子在激波中的扩散激波加速过程^[10]被认为是一种有效的加速机制. 另外, 伽马射线的直接观测也表明超新星遗迹的确是宇宙线加速源. 一个直接证据来自于Fermi LAT卫星对中等年龄超新星遗迹的观测^[11]. 在对中等年龄(年龄为10000年左右)超新星遗迹W44和IC443的观测中, Fermi卫星均发现了在100 MeV以下伽马射线能谱出现了明显的压低. 而这种形状的能谱正是宇宙线质子与星际气体中的质子发生非弹性碰撞之后, 所产生的中性 π 介子衰变产生的伽马射线能谱特征^[8]. 因此, 中等年龄的超新星遗迹的确是宇宙线质子的加速源. 然而, 这类源的伽马射线能谱在几个GeV处就发生了截断, 这表明其加速的宇宙线也应该在几十GeV能量处发生截断. 因此这类源显然不能加速能量延伸至PeV的所有河内宇宙线.

理论上, 这类中等年龄超新星遗迹的激波速度已

经降低到100 km/s的量级, 而被加速粒子的最高能量被认为与激波速度的平方成正比^[12]. 所以这类超新星遗迹不能把宇宙线加速到较高的能量也在预期之内. 所以一个自然的推论就是年轻超新星遗迹(年龄1000年左右)是甚高能和超高能宇宙线的加速源. 事实上, 地面的切伦科夫望远镜阵列已观测到多个年轻超新星遗迹的甚高能(TeV)辐射^[13–15]. 然而, 进一步的观测表明, 这一类年轻超新星遗迹的伽马射线辐射在10 TeV以下也出现了截断的迹象(见图1)^[16], 这表明其加速的宇宙线的最高能量应小于100 TeV, 距离宇宙线的“膝”区能量仍有一个量级左右的差距. 同时我们需要注意的是, 现有仪器的灵敏度还不能对这种截断进行完全的证认, 因此我们迫切需要对于年轻超新星遗迹在10 TeV以上更高灵敏度的观测.

综上所述, 寻找PeV宇宙线的加速源(也被称为PeVatron), 是目前宇宙线起源研究中的核心问题. 伽马射线观测可以为PeVatron存在的直接证据. 这是因为在10 TeV及以上能段, 伽马射线的产生机制主要只有两种: 一种是宇宙线质子与星际气体相互作用产生的中性 π 介子衰变, 另一种是高能电子与背景光子场的逆康普顿散射(Inverse Compton Scattering, IC). 对于IC机制, 在10 TeV以上, 出射光子能量与入射电子能量接近, Klein-Nishina效应变得显著, 散射截面迅速减小. 因此, IC机制产生的伽马射线在10 TeV以上不可避免地会出现能谱逐渐变软的现象. 因此, 只要观测到10 TeV以上较硬的伽马射线能谱, 同时没有能谱的截断, 这种能谱的形式很可能对应于PeVatron.

PeVatron的一种可能性是更年轻的超新星遗迹, 更高的激波速度有可能提供更高的加速能量. 目前银河系内已知的最年轻的超新星遗迹是SNR G1.9+0.3. 其年龄大概为100年, 激波速度超过10000 km/s^[17].

对于这个源的硬X射线细致的能谱分析表明^[18], 这个源的加速效率要比理论预期的低20倍(见图2), 目前并不是PeVatron. 而如果这个源在更年轻的阶段曾经是PeVatron, 那么由于其有限的年龄, 这些超高能宇宙线与加速源的距离应该在100光年(约30 s差距)之内. H.E.S.S.望远镜对这个超新星遗迹附近区域的观测得到了甚高能伽马辐射(1 TeV以上)的能流密度上限为 10^{32} erg/s^[19]. 如果考虑到这个超新星遗迹附近较高的气体密度(约为 100 cm^{-3}), 则得到的0.01–1 PeV能量范围的宇宙线能量注入应小于 10^{45} erg, 而正如我们之

图 1 (网络版彩图) 已知的年轻超新星遗迹能谱, 图片来自文献[16]收集的数据

Figure 1 (Color online) The energy spectrum of the known young SNRs. Data are from ref. [16].

前提到的, 每个超新星遗迹需要注入 10^{50} erg的宇宙线能量才能和观测相符, 即使考虑到能段的差异, 数个数量级的差距依然表明这类最年轻的超新星遗迹似乎依

然不是PeVatron.

最近, 年轻巨星团(Young Massive Clusters, YMC)被认为是另一种可能的宇宙线来源^[16]. 同样也有一系列观测和理论证据支持这种假说. 首先, 年轻巨星团中的大质量恒星的星风速度可达3000 km/s, 单个恒星星风的动能可以达到 10^{38} – 10^{39} erg/s. 因此, 这样的系统有足够的能量加速宇宙线到超高能. 事实上, 早在20世纪80年代, 有研究就指出, 由于高速星风存在的时间 10^6 年远高于超新星遗迹激波的持续时间, 星团中的大质量恒星有可能是比超新星遗迹更有效的加速源^[20,21]. 而最近的宇宙线同位素观测也表明宇宙线更可能来自于年轻巨星团附近的超级气泡(Super Bubble)结构中^[22]. 进一步地, 在一系列的年轻巨星团附近都观测到了延展的伽马射线辐射^[16,23–25]. 这些伽马射线辐射的物理尺度大多超过50 pc, 能谱指数为2.3左右, 并且在目前可观测的最高能段没有任何截断的迹象, 一些典型的此类系统的能谱见图3. 这些迹象表明这类天体的确有可能是超高能宇宙线的加速源. 另一方面, 对伽马射线空间分布和气体分布的联合分析表明在一系列的年轻巨星团附近, 宇宙线的空间分布都

图 2 (网络版彩图) 超新星遗迹SNR G1.9+0.3的硬X射线能谱与理论预期曲线^[18]. 其中 η 代表激波附近扩散系数与Bohm扩散系数之间的比值, 可以用来表示加速效率. 最有效的加速对应于 $\eta=1$

Figure 2 (Color online) The observed hard X-ray spectrum SNR G1.9+0.3, as well as the theoretical predictions [18]. η is the ratio between the diffusion coefficient in the shock front and the Bohm diffusion coefficient, which can be used to represent the acceleration efficiency. The most effective acceleration is realized when $\eta=1$.

图 3 (网络版彩图) 年轻巨星团 Cygnus OB2, Westerlund 1 (Wd1) 以及银心附近中心分子区域 (Central Molecular Zone, CMZ) 的弥散甚高能伽马射线能谱^[16], 其中银心的伽马射线也可能由银心的大质量星团加速的宇宙线产生

Figure 3 (Color online) The VHE gamma-ray spectrum of the young massive cluster Cygnus OB2, Westerlund 1 and the CMZ near the Galactic Center [16]. The gamma-ray radiations in the CMZ may also come from the CRs accelerated by the young massive star clusters in the Galactic Center.

遵循 $1/r$ 的空间关系^[16], 其中 r 是到年轻巨星团的距离 (图 4). 这样的空间分布也是宇宙线被连续注入的过程所预期的. 因此对这类源在更高能量处的伽马射线观测将为这些源是否是 PeVatron 提供直接证据.

3 高海拔宇宙线观测站

高海拔宇宙线观测站 (LHAASO) 是国家重大科技基础设施^[26]. LHAASO 坐落于海拔 4410 m 的四川省稻城县海子山, 于 2017 年开始建设. LHAASO 由三个探测器阵列组成:

(1) 平方公里阵列 (1 km² Array, KM2A) 由 5159 个电磁粒子探测器 (Electromagnetic Particle Detectors, ED) 和 1188 个缪子探测器 (Muon Detectors, MD) 构成. 其中电磁粒子探测器是面积为 1 m² 的闪烁体探测器. 电磁粒子探测器的间距为 15–30 m. 在距离阵列中心小于 575 m 的区域, 电磁粒子探测器的间距为 15 m, 而在距阵列中心大于 575 m 的区域, 其间距为 30 m. 外围这

图 4 (网络版彩图) Cygnus OB2, Wd1 和 CMZ 附近的宇宙线分布^[16]

Figure 4 (Color online) The Cosmic ray distribution near Cygnus OB2, Wd1 and CMZ [16].

些较为稀疏的电磁粒子探测器用于判别事例芯位是否位于阵列之内. 缪子探测器是位于地下的横截面积为 36 m² 的水切伦科夫探测器, 缪子探测器的间距为 30 m. 两种探测器重叠布置在总面积约为一平方公里的范围内.

(2) 水切伦科夫探测器阵列 (Water Cherenkov Detector Array, WCDA) 由分布于三个水池中总面积为 78000 m² 的水切伦科夫探测器构成.

(3) 广角切伦科夫望远镜阵列 (Wide Field Cherenkov Telescope Array, WFCTA) 由 18 个大视场大气切伦科夫望远镜构成.

整个 LHAASO 的布局见图 5.

LHAASO 将对能量为 10^{12} – 10^{18} eV 的宇宙线能谱和各向异性进行精确测量, 同时也将对 10^{11} – 10^{16} eV 的伽马射线天空进行大视场连续监测. 其中, KM2A 阵列直接记录超高能宇宙线或伽马射线产生的大气簇射的缪子和电子分布, 从而对入射粒子种类 (宇宙线或伽马射线光子) 进行鉴别, 并重建入射粒子的能量和方向信息. 它主要对 20 TeV 以上的伽马射线和宇宙线粒子进行观测. WCDA 阵列观测宇宙线和伽马射线产生的大气簇射中的次级粒子在水中产生的切伦科夫辐射, 主要用于探测 0.3–20 TeV 的伽马射线和宇宙线. WFCTA

图 5 (网络版彩图) LHAASO中三种阵列的排布
Figure 5 (Color online) The layout of three arrays in LHAASO.

用于探测大气簇射的次级粒子在大气中产生的切伦科夫光, 从而对大气簇射的三维结构进行重建, 进而对宇宙线的成分和能量进行精确测量。

在伽马射线天文领域, WCDA和KM2A阵列覆盖了0.3–1000 TeV的能区, 其灵敏度随能量的变化见图6. 通过对伽马射线天文“标准烛光”蟹状星云(Crab Nebular)的观测得到的WCDA和KM2A阵列性能已发表在文献[27,28]. KM2A的缪子探测器提供了强大的粒子鉴别能力, 在1 PeV的能段, 伽马射线光子和质子的鉴别能力可以达到 $1/10^5$, 从而大大压低了伽马射线观测中的主要背景. LHAASO阵列超过1 km²的面积和极低的背景水平使LHAASO的灵敏度在100 TeV左右的能段远远好于国际上已有的及计划中的其他仪器. 在最灵敏的100 TeV左右, LHAASO的一年微分能流灵敏度达到了 10^{-13} erg/(s cm²). 同时LHAASO阵列在100 TeV的角分辨率也达到了0.3°左右, 能量分辨大概在15%–20%, 从而可以对伽马射线源进行有效的空间形态和能谱分析, 进而在PeVatron搜寻和认证的工作中发挥重要的作用。

4 首批12个超高能伽马射线源

LHAASO-KM2A阵列于2017年开始建设, 2019年当1/4 KM2A阵列建成之后开始观测取数. 截至2020年底, 11个月的1/2 KM2A阵列观测数据已经观测到12个100 TeV以上显著性超过7倍标准偏差的伽马射线源^[33]. 这些射线源集中在银盘上, 详细信息见表1, 其

图 6 (网络版彩图) LHAASO的一年伽马射线微分灵敏度曲线与其他甚高能伽马射线仪器的比较. 其他仪器的灵敏度曲线来自于文献[29–32]

Figure 6 (Color online) The one year LHAASO sensitivity for gamma rays is compared with the sensitivities of other instruments. The sensitivities of other instruments are from refs. [29–32].

中流量单位是该源在100 TeV处流量与Crab流量的比值。

考虑到LHAASO之前100 TeV以上伽马射线源只有少数几个^[34,35], LHAASO打开了超高能(100 TeV以上)伽马天文的新窗口。

除了表1中的第一个源蟹状星云, 列表内的伽马射线源是延展源. 因此不难想象, 这些源的区域内部都有多个可能的天体与其对应, 一些可能的对应天体及其距离见表2. 所以这些超高能伽马射线源和其对应的宇宙线加速源的认证还需要详细的理论和多波段观测研究. 之前的甚高能伽马射线观测表明, 可能的候选对应天体包括超新星遗迹(SNR)、脉冲星和脉冲星风云(PWN)和年轻巨星团(YMC)等。

目前唯一可以认证对应体的超高能伽马射线辐射源是蟹状星云(Crab Nebular). 这个源观测到的伽马射线光子能量最高已经达到了1 PeV, 这表明无论伽马射线的辐射机制是什么, 产生伽马射线光子的电子或质子能量一定高于1 PeV. 由于蟹状星云本身是一个脉冲星风云, 因此可以合理地推论这是银河系中第一个被完全认证的电子PeVatron。

蟹状星云是一个脉冲星风云. 脉冲星风云是银河

表 1 LHAASO首批探测到的12个伽马射线源信息

Table 1 The information of 12 gamma-ray sources detected by LHAASO

源名	赤经 (°)	赤纬 (°)	置信度(标准偏差)>100 TeV	最大能量 (PeV)	流量(CU) @100 TeV
LHAASO J0534+2202	83.55	22.05	17.8	0.88±0.11	1.00(0.14)
LHAASO J1825-1326	276.45	-13.45	16.4	0.42±0.16	3.57(0.52)
LHAASO J1839-0545	279.95	-5.75	7.7	0.21±0.05	0.70(0.18)
LHAASO J1843-0338	280.75	-3.65	8.5	0.26±0.16-0.10	0.73(0.17)
LHAASO J1849-0003	282.35	-0.05	10.4	0.35±0.07	0.74(0.15)
LHAASO J1908+0621	287.05	6.35	17.2	0.44±0.05	1.36(0.18)
LHAASO J1929+1745	292.25	17.75	7.4	0.71±0.16-0.07	0.38(0.09)
LHAASO J1956+2845	299.05	28.75	7.4	0.42±0.03	0.41(0.09)
LHAASO J2018+3651	304.75	36.85	10.4	0.27±0.02	0.50(0.10)
LHAASO J2032+4102	308.05	41.05	10.5	1.42±0.13	0.54(0.10)
LHAASO J2108+5157	317.15	51.95	8.3	0.43±0.05	0.38(0.09)
LHAASO J2226+6057	336.75	60.95	13.6	0.57±0.19	1.05(0.16)

表 2 LHAASO首批探测到的12个伽马射线源信息可能对应体的信息, 使用了文献[33]收集的数据

Table 2 The possible association of the 12 LHAASO sources. The data are summed in ref. [33]

源名	对应体	类型	距离 (kpc)
LHAASO J0534+2202	PSR J0534+2200	PSR	2.0
LHAASO J1825-1326	PSR J1826-1334	PSR	3.1±0.2
	PSR J1826-1256	PSR	1.6
LHAASO J1839-0545	PSR J1837-0604	PSR	4.8
	PSR J1838-0537	PSR	1.3
LHAASO J1843-0338	SNR G28.6-0.1	SNR	9.6±0.3
LHAASO J1849-0003	SNR G28.6-0.1	SNR	7
	W43	YMC	5.5
LHAASO J1908+0621	SNR G40.5-0.5	SNR	3.4
	PSR 1907+0602	PSR	2.4
	PSR 1907+0631	PSR	3.4
LHAASO J1929+1745	PSR J1928+1746	PSR	4.6
	PSR J1930+1852	PSR	6.2
	SNR G54.1+0.3	SNR	6.3±0.8
LHAASO J1956+2845	PSR J1958+2846	PSR	2.0
	SNR G66.0-0.0	SNR	2.3±0.2
LHAASO J2018+3651	PSR J2021+3651	PSR	1.8
	Sh 2-104	YMC	4.0±0.5
LHAASO J2032+4102	Cygnus OB2	YMC	1.4±0.08
	PSR 2032+4127	PSR	1.4±0.08
	SNR G79.8+1.2	SNR	—
LHAASO J2108+5157	—	—	—
LHAASO J2226+6057	SNR G106.3+2.7	SNR	0.8
	PSR J2229+6114	PSR	0.8

系内最常见的一类甚高能(TeV)伽马射线源, 而蟹状星云是其中最特别的一个. 其中心脉冲星的降速光度 (Spin-Down Luminosity)高达 5×10^{38} erg/s, 磁场高达

100 μ G, 而其物理尺度仅有几个pc. 脉冲星风云中甚高能/超高能伽马射线的辐射机制是相对论性电子的逆康普顿散射. 一般来说, 较高的磁场会造成相对论性

电子很快地冷却, 因此降低逆康普顿散射的效率. 但是对于蟹状星云, 较低的逆康普顿散射辐射效率被其超高的光度所补偿, 因此蟹状星云是一个明亮的甚高能/超高能伽马射线源. 对于其他脉冲星风云, 由于其较低的磁场, 逆康普顿散射的效率较高, 因此也有可能成为明亮的甚高能/超高能伽马射线源. 在脉冲星风云中, 电子在终端激波(Termination Shock)处被加速并随脉冲星风向外传播, 脉冲星风云伽马射线辐射的形态由相对论性电子和背景光子的空间分布决定. 由于产生甚高能/超高能伽马射线的逆康普顿散射过程中参与作用的背景光子主要是微波背景辐射(Cosmic Microwave Background, CMB), CMB符合各向同性分布, 因此相对论性电子的分布就完全决定了伽马射线辐射的空间形态. 进而对于伽马射线空间形态的测量可以用来直接研究相对论性电子的加速和传播过程. 另一方面, 这些相对论性电子也能传播到比脉冲星风云范围更大的区域. 最近, HAWC阵列在明亮的脉冲星周围发现了一些非常延展的伽马射线辐射结构, 被认为就是这种扩散到更大区域的相对论性电子晕(Pulsar Halo)^[36]. 因此, 对于一些LHAASO延展源, 如果其内部有较明亮的年老脉冲星, Pulsar Halo也是一种可能的候选天体.

尽管蟹状星云无疑是一个电子的PeVatron, 但正如我们之前提到的, 宇宙线的成分中强子(主要是质子)占绝大多数, 因此寻找质子PeVatron是一个更有普遍意义的问题.

如前所述, SNR被认为是最可能的一类质子加速源, 而最近的研究表明YMC也可能有显著的贡献. 有趣的是, 12个LHAASO源中有8个与已知的SNR或YMC成协. 因此这些源也是可能的质子(强子)PeVatron候选者. 其中在LHAASO J2032+4102中, 最高的光子能量达到了1.4 PeV. 这个源与年轻巨星团Cygnus (天鹅座) OB2成协. 由于年轻巨星团附近极强的光子场, 如果这个源的辐射机制是电子的逆康普顿散射, 那么会在Cyg OB2附近有显著的伽马射线的流量增强. 而如果没有观测到这种空间分布则可以较好地确认这些伽马射线来自于宇宙线强子的辐射过程. 另外, 对于这个源, 高能伽马射线的观测给出了 $1/r$ 的宇宙线分布^[16], 这样的空间分布也是连续注入宇宙线质子过程所预期的. 如果能在超高能能段也观测到类似的空间分布结构, 则可以确认Cyg OB2确实是一个强子PeVa-

tron, 这样的验证有望在LHAASO全阵列积累2-3年曝光后进行.

图7给出了比较亮的三个源LHAASO J1825-1326, LHAASO J1908+0621和LHAASO J2226+6057的能谱(Spectral Energy Distribution, SED). 可以看到, 虽然没有显著的截断迹象, 在100 TeV左右能谱都出现了逐渐变软的趋势, 因此对数抛物线函数(Log Parabolic)对能谱形状的拟合要显著地好于传统的幂律谱. 而在图7的下半部分也可以看到, 谱指数确实是随能量增加的. 在下一节将对这三个源的多波段观测信息和可能的起源进行讨论.

5 多波段研究

如前所述, 对于这些超高能伽马射线源的具体辐射机制和相关的粒子加速过程的确认, 需要进行详细的多波段观测研究. 对较亮的三个LHAASO源给出这类研究的简单例子.

对LHAASO J1825-1326, 在这个源附近, H.E.S.S.望远镜探测到了两个独立的源: H.E.S.S. J1825-137和H.E.S.S. J1826-130^[37,38]. HAWC也观测到了-一个延展源

图7 (网络版彩图)三个较亮的源LHAASO J1825-1326, LHAASO J1908+0621和LHAASO J2226+6057的能谱. (a) 对数抛物线函数的拟合; (b) 谱指数随能量的变化

Figure 7 (Color online) The energy flux of LHAASO J1825-1326, LHAASO J1908+0621 and LHAASO J2226+6057. (a) The log-parabola fittings; (b) the energy dependence of the indices.

2HWC J1825-134^[35]. LHAASO-KM2A阵列对这个源观测的25 TeV以上显著性天图见图8. 文献[39]对这个区域的分子气体分布做了详细的研究, 在该区域发现了6个致密的气体团块, 其位置和大小也标在了图8中. 在这些致密团块中, 密度可以达到 $100\text{--}10000\text{ cm}^{-3}$. 我们注意到, 有四个团块的位置都很接近KM2A显著性天图中最明亮的区域. 这种伽马射线与气体分布成协的现象, 是伽马射线来自于强子宇宙线与气体相互作用的证据. 尽管我们并没有发现超新星遗迹(SNR), 但是这个区域包含两个明亮的脉冲星PSR J1826-1256和PSR J1826-1334, 因此, 这些脉冲星的前身星爆发时产生的超新星遗迹有可能是宇宙线强子的加速源, 而由于明亮脉冲星的存在, 伽马射线的轻子来源也并不能被完全排除. 另一方面, 能谱也能提供关于辐射机制的信息. 把LHAASO KM2A阵列和Fermi LAT^[40], H.E.S.S.^[37], HAWC^[35]对这个区域观测得到的能谱汇总

图 8 (网络版彩图) LHAASO-KM2A阵列得到的25 TeV以上能段LHAASO J1825-1326的显著性天图. 右下角绿色圆形是KM2A阵列在这个能段和天区的点扩散函数. 白色圆圈分别是H.E.S.S. J1825-137在低能(大)和高能(小)的延展度, 紫色圆圈是H.E.S.S. J1826-130的大小和延展度. 两个黑色钻石形是这个区域的两个脉冲星. 蓝绿色椭圆是文献[39]找到的该区域致密气体团块

Figure 8 (Color online) The significance map above 25 TeV from the LHAASO-KM2A observations on LHAASO J1825-1326. The green circle in the right bottom is the point spread function of LHAASO-KM2A. The white circles are the extensions of H.E.S.S. J1825-137 at lower (large) and higher (small) energies. The purple circle is the extension of H.E.S.S. J1826-130. The two black diamonds label the position of two pulsars while the cyan ellipse is the dense molecular gas clump identified in ref. [39].

在图9中. 我们注意到, H.E.S.S.观测得到的能谱显著地低于HAWC和LHAASO能谱. 我们认为这可能是由于大气成像切伦科夫望远镜阵列(H.E.S.S., MAGIC和VERITAS)的视场远小于广延大气簇射阵列(LHAASO和HAWC), 因此抽取的能谱也可能来自于更致密的区域. 当然具体的原因还需要与大气切伦科夫望远镜合作组对同一个源进行合作观测后才能得到, 这方面的研究超出了本文的讨论范围. 本文的拟合中我们尽量使用HAWC的数据点与LHAASO观测进行多波段的拟合. H.E.S.S.合作组通过详细的多波段研究认为H.E.S.S. J1825-137确定是一个脉冲星风云^[37]. 然而LHAASO源的位置与H.E.S.S. J1825-130并不完全一致, 而是包含了H.E.S.S. J1825-137和H.E.S.S. J1826-130两个源的部分. 因此, 目前我们尚不能完全确认LHAASO J1825-1326的起源和辐射机制, 所以对这些能谱用轻子和强子起源两种模型进行了拟合. 对于强子起源, 分段幂律谱(Broken Power-Law, 图9中粗线)要略好于指数阶段的幂律谱(细线). 分段幂律谱的最佳拟合参数为, 质子的谱指数在120 TeV以下为2.0, 之上为3.4. 指数截断幂律谱的拟合参数: 谱指数为1.9, 截断能量为240 TeV.

图 9 (网络版彩图) LHAASO J1825-1326的伽马射线能谱. Fermi LAT, H.E.S.S., HAWC数据点来自于文献[35,37,40]. 其中H.E.S.S.数据点来自于源H.E.S.S. J182-137, 而Fermi LAT的数据点对应于整个区域. 实线和虚线分别为强子和轻子起源的最佳拟合曲线. 而粗实线和细实线分别代表分段幂律谱和带指数截断幂律谱的强子模型. 拟合的详细描述见文内描述

Figure 9 (Color online) The gamma-ray spectrum of LHAASO J1825-1326. The data points of Fermi LAT, H.E.S.S., HAWC are from refs. [35,37,40]. The H.E.S.S. data points are from the source H.E.S.S. J182-137, and Fermi LAT points are from the whole region. The solid and dashed curves are the best-fit curves for both hadronic and leptonic scenarios. In the hadronic scenarios, the thick and thin curves are for the parent protons with broken power law and power law with exponential cutoffs, respectively.

在轻子模型中, 由于电子的冷却很快, 所以在拟合中必须考虑电子的冷却效应, 在这里我们考虑了连续稳定注入的电子, 具体的拟合步骤可以参见文献[33]的附录, 最佳拟合曲线为图9的虚线. 拟合得到电子注入谱的谱指数为2.07, 截断能量为570 TeV.

LHAASO J1908+0621是另一个明亮的LHAASO源. H.E.S.S, VERITAS, ARGO和HAWC在这个区域也观测到了显著的TeV辐射^[41–44].

LHAASO在这个区域的25 TeV以上显著性天图见图10. 在这个区域有明亮的脉冲星PSR J1907+0602和超新星遗迹SNR G40.5-0.5, 因此存在强子与轻子的加速源. 对这个源处的气体分布尚没有专门的研究, 因此我们对文献[44]中的CO数据进行了分析. 考虑到脉冲星和超新星遗迹的距离大概都是3 kpc左右, 我们对速度范围48–54 km/s的CO辐射进行了积分, 又利用气体柱密度($N(\text{H}_2)$)和CO辐射强度(W_{co})之前的线性关系 $N(\text{H}_2) \sim X_{\text{co}} W_{\text{co}}$ (X_{co} 是CO谱线强度到气体密度的转换因子), 得到气体的柱密度分布图11. 在LHAASO辐射区域有三个较明亮的CO结构, 可能对应于较致密的气体团块. 在LHAASO辐射区域内的总气体质量大概为

图 10 (网络版彩图) LHAASO J1908+0621 25 TeV以上显著性天图. 其中白圈为H.E.S.S. J1908+063的位置和延展度, 黑色钻石形和X形是脉冲星PSR J1907+0602和超新星遗迹SNR G40.5-0.5. 蓝绿色椭圆为致密气体团块

Figure 10 (Color online) The significance map above 25 TeV from the LHAASO-KM2A observations on LHAASO J1908+0621. The white circle is the extension of H.E.S.S. J1908+063; black diamond and cross label the position of PSR J1907+0602 and SNR G40.5-0.5. Cyan ellipses are the dense gas clumps.

15000太阳质量, 平均密度大概为 10 cm^{-3} .

将这个区域的伽马射线能谱总结在图12中. 我们

图 11 (网络版彩图) LHAASO J1908+0621附近的分子气体柱密度. CO数据来自文献[44], 速度积分范围为48–54 km/s. 其中白圈为LHAASO J1908+0621的延展度, 白色钻石形和X形是脉冲星PSR J1907+0602和超新星遗迹SNR G40.5-0.5. 绿色椭圆为三个CO强度较高的区域, 可能对应于致密气体团块

Figure 11 (Color online) The column density of molecular gas in the vicinity of LHAASO J1908+0621. The CO data are from ref. [44]. The line of sight velocity range of 48–54 km/s is integrated. The white circle is the extension of LHAASO J1908+0621. The white diamond and X label the position of PSR J1907+0602 and SNR G40.5-0.5. Green ellipses are the three peaks of CO emissions, which may correspond to the dense gas clumps.

图 12 (网络版彩图) LHAASO J1908+0621的伽马射线能谱. Fermi LAT, H.E.S.S, ARGO, HAWC数据点来自于文献[33,35,41,42]. 实线和虚线分别为强子和轻子起源的最佳拟合曲线

Figure 12 (Color online) The gamma-ray spectrum of LHAASO J1908+0621. The data points of Fermi LAT, H.E.S.S, ARGO and HAWC are from refs. [33,35,41,42]. The solid and dashed curves are the best-fit curves for both hadronic and leptonic scenarios.

对轻子和强子起源都进行了拟合. 对于LHAASO J1908+0621, 分段幂律谱(粗线)的拟合要显著好于指数截断的幂律谱(细线). 最佳拟合得到的参数为, 谱指数在20 TeV之下为1.3, 以上为2.7. 我们同样使用稳定注入含时间演化的轻子模型进行了拟合, 拟合结果是图12中的虚线. 电子注入谱的谱指数为2.2, 截断能量为900 TeV. 第三个明亮的LHAASO源是LHAASO J2226+6057, VERITAS也探测到了这个源^[45], HAWC和AS γ 更是在这个区域发现了100 TeV左右的辐射^[34,45]. 这个区域里包含了明亮的脉冲星PSR J2229+6114和超新星遗迹G106.3+2.7. LHAASO-KM2A对这个源观测的显著性天图见图13.

文献[46]对这个区域的气体分布进行了详细的研究, 我们也使用同样的CGPS CO巡天数据^[47], 考虑到800 pc的距离, 对速度范围-4—8 km/s进行积分得到了附近的分子气体分布(图14). 我们看到, 在接近LHAASO辐射区域中心的位置存在一个较致密的分子气体结构. 整个辐射区域的气体质量大概是400太阳质量, 对应于 30 cm^{-2} 的气体密度.

将GeV–TeV能段的伽马射线能谱总结在图15

图 13 (网络版彩图) LHAASO J2226+6057 25 TeV以上显著性天图. 其中白圈为VER J2227+608的位置和延展度, 黑色钻石形是脉冲星PSR J2229+6114. 蓝绿色椭圆为致密气体团块

Figure 13 (Color online) The significance map above 25 TeV on LHAASO J2226+6057. The white circle labels the position and size of VER J2227+608; black diamond shows the position of PSR J2229+6114. The cyan ellipse is the dense molecular gas clump.

中^[48,49]. 我们对轻子和强子起源都进行了拟合. 对于强子模型, 指数截断的幂律谱可以较好地拟合伽马射线能谱. 最佳拟合得到的参数: 谱指数为1.8, 截断能量为500 TeV. 我们同样使用稳定注入含时间演化的轻子模型进行了拟合, 拟合结果为图15中的虚线. 电子注入谱

图 14 (网络版彩图) LHAASO J2226+6057附近的分子气体分布(柱密度). CO数据来自文献[44]. 白圈为VER J2227+608的位置和延展. 白色钻石形是脉冲星PSR J2229+6114

Figure 14 (Color online) The column density of molecular gas in the vicinity of LHAASO J2226+6057. The CO data are from ref. [44]. The white circle labels the position and size of VER J2227+608. The white diamond shows the position of PSR J2229+6114.

图 15 (网络版彩图) LHAASO J2226+6057的伽马射线能谱. Fermi LAT和VERITAS数据点来自于文献[48,49]. 实线和虚线分别为强子和轻子起源的最佳拟合曲线

Figure 15 (Color online) The gamma-ray spectrum of LHAASO J2226+6057. The data points of Fermi LAT and VERITAS are from refs. [48,49]. The solid and dashed curves are the best-fit curves for both hadronic and leptonic scenarios.

的谱指数为2.2, 截断能量为400 TeV.

我们看到, 在这三个比较亮的LHAASO源附近都是既存在脉冲星, 又存在超新星遗迹和致密的气体团块, 因此轻子和强子模型均可以对现有的伽马射线观测进行解释.

所以尽管在这三个源中都探测到了500 TeV左右伽马射线光子, 但是目前的数据还无法确认这些超高能伽马射线源究竟对应的是轻子还是强子PeVatron. 更详尽的多波段研究和LHAASO数据量的积累有望进一步推进对轻子和强子模型的鉴别.

6 总结与展望

LHAASO-KM2A 1/2阵列不到一年的观测已经带来了丰硕的成果. 新观测的12个100 TeV以上伽马射线源开启了超高能伽马射线观测的新窗口. 同时这些源的发现也表明, 银河系内存在大量可以把宇宙线(轻子或强子)加速到PeV以上能量的天体, 从而为宇宙线起源研究提供了崭新的材料.

我们有理由相信, 随着全阵列的建成, KM2A阵列将会发现更多的超高能伽马射线源, 同时随着统计量的增加, 对现有源的辐射和粒子加速机制的研究也会取得更多突破. 一个最值得关注的区域就是天鹅座天区. Cygnus OB2附近已经观测到了1.4 PeV的光子, 随着统计量的积累, 对空间形态的分析有可能直接定位

这个区域的强子PeVatron. 另一方面, LHAASO-WCDA阵列的数据重建和分析工作也在紧锣密鼓地进行之中^[28], WCDA的主要观测能段为0.4–20 TeV, 这个能段对于辐射机制的研究有重要的意义. 我们已经注意到, 在大气切伦科夫望远镜与LHAASO-KM2A均能观测的能量范围, 前者观测得到的能谱要显著低于后者观测得到的, 因此, 具有比HAWC更高灵敏度的WCDA阵列将和KM2A阵列协作, 对这些源的能谱测量将覆盖三个量级, 从而对辐射机制进行更好的限制.

另外, 多波段的观测对于轻子、强子PeVatron的区分也很重要. 在这方面, 我国已有的和在研的其他科学装置可以与LHAASO形成很好的合作. 例如, 银河画卷巡天^[50]的高分辨率CO观测可以提供LHAASO亮源附近的详细气体分布信息, 对于鉴别辐射机制有重要作用. 另外, 如前所述, 脉冲星加速的电子/正电子扩散到更大的区域形成的晕状结构Pulsar Halo被认为有可能是一种常见的甚高能/超高能伽马射线源. 因此一些未证认的LHAASO源附近的脉冲星搜寻对于证认这类伽马射线源也有着重要的意义, 而我国另一个国家重大科技基础设施500米口径球面射电望远镜(FAST)^[51]世界领先的脉冲星搜寻能力在这一领域也能与LHAASO形成很好的协作.

综上所述, LHAASO全阵列建成并投入使用后, 将继续开拓超高能伽马射线天文这一独特的观测宇宙的窗口, 在宇宙线起源和其他科学问题上取得重要进展.

参考文献

- Webber W R. A new estimate of the local interstellar energy density and ionization rate of galactic cosmic cosmic rays. *Astrophys J*, 1998, 506: 329–334
- Abraham J, Abreu P, Aglietta M, et al. Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above 10^{18} eV using the Pierre Auger Observatory. *Phys Lett B*, 2010, 685: 239–246
- Kawaia H, Yoshida S, Yoshii H, et al. Telescope array experiment. *Nucl Phys B Proc Suppl*, 2008, 175: 211–226
- Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. Cosmic ray proton plus helium energy spectrum measured by the ARGO-YBJ experiment in the energy range 3–300 TeV. *Phys Rev D*, 2015, 91: 112017, arXiv: 1503.07136
- Amenomori M, Bi X J, Chen D, et al. Cosmic-ray energy spectrum around the knee obtained by the Tibet experiment and future prospects. *Adv Space Res*, 2011, 47: 629–639
- Schatz G. The KASCADE cosmic ray experiment. *Nucl Phys B Proc Suppl*, 1995, 43: 261–264
- Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. Knee of the cosmic hydrogen and helium spectrum below 1 PeV measured by ARGO-YBJ and a Cherenkov telescope of LHAASO. *Phys Rev D*, 2015, 92: 092005, arXiv: 1502.03164
- Kafexhiu E, Aharonian F, Taylor A M, et al. Parametrization of gamma-ray production cross sections for pp interactions in a broad proton energy range from the kinematic threshold to PeV energies. *Phys Rev D*, 2014, 90: 123014, arXiv: 1406.7369
- Drury L O C. Origin of cosmic rays. *Astropart Phys*, 2012, 39–40: 52–60, arXiv: 1203.3681

- 10 Bell A R. Turbulent amplification of magnetic field and diffusive shock acceleration of cosmic rays. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2004, 353: 550–558
- 11 Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. Detection of the characteristic pion-decay signature in supernova remnants. *Science*, 2013, 339: 807–811, arXiv: [1302.3307](#)
- 12 Zirakashvili V N, Aharonian F. Analytical solutions for energy spectra of electrons accelerated by nonrelativistic shock-waves in shell type supernova remnants. *Astron Astrophys*, 2007, 465: 695–702
- 13 Abramowski A, Acero F, Aharonian F, et al. A new SNR with TeV shell-type morphology: HESS J1731-347. *Astron Astrophys*, 2011, 531: 81–90
- 14 Archambault S, Archer A, Benbow W, et al. Gamma-ray observations of Tycho’s supernova remnant with VERITAS and Fermi. *Astrophys J*, 2017, 836: 23, arXiv: [1701.06740](#)
- 15 Ahnen M L, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. A cut-off in the TeV gamma-ray spectrum of the SNR Cassiopeia A. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2017, 472: 2956–2962, arXiv: [1707.01583](#)
- 16 Aharonian F, Yang R, de Oña Wilhelmi E. Massive stars as major factories of galactic cosmic rays. *Nat Astron*, 2019, 3: 561–567, arXiv: [1804.02331](#)
- 17 Drory N, Alvarez M. The contribution of star formation and merging to stellar mass buildup in galaxies. *Astrophys J*, 2008, 680: 41–53, arXiv: [0803.1489](#)
- 18 Aharonian F, Sun X, Yang R. Energy distribution of relativistic electrons in the young supernova remnant G1.9+0.3. *Astron Astrophys*, 2017, 603: 7–12
- 19 Abramowski A, Aharonian F, Benkhali F A, et al. TeV-ray observations of the young synchrotron-dominated SNRs G1.9+0.3 and G330.2+1.0 with H.E.S.S. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2014, 441: 790–799, arXiv: [1404.1613](#)
- 20 Cesarsky C J, Montmerle T. Gamma rays from active regions in the galaxy: The possible contribution of stellar winds. *Space Sci Rev*, 1983, 36: 173–193
- 21 Bykov A M, Marcowith A, Amato E, et al. High-energy particles and radiation in star-forming regions. *Space Sci Rev*, 2020, 216: 42, arXiv: [2003.11534](#)
- 22 Binns W R, Israel M H, Christian E R, et al. Observation of the ^{60}Fe nucleosynthesis-clock isotope in galactic cosmic rays. *Science*, 2016, 352: 677–680
- 23 Yang R, Aharonian F. Diffuse gamma-ray emission near the young massive cluster NGC 3603. *Astron Astrophys*, 2017, 600: 107–112
- 24 Yang R, de Oña Wilhelmi E, Aharonian F. Diffuse γ -ray emission in the vicinity of young star cluster Westerlund 2. *Astron Astrophys*, 2018, 611: A77, arXiv: [1710.02803](#)
- 25 Sun X, Yang R, Liang Y, et al. Diffuse γ -ray emission toward the massive star-forming region W40. *Astron Astrophys*, 2020, 639: 80–86
- 26 He H. Design of the LHAASO detectors. *Radiat Detect Technol Methods*, 2018, 2: 7
- 27 Aharonian F, An Q, Axikegu, et al. Observation of the Crab Nebula with LHAASO-KM2A—A performance study. *Chin Phys C*, 2021, 45: 025002
- 28 LHAASO Collaboration. Performance of LHAASO-WCDA and observation of Crab Nebula as a standard candle. arXiv: [2101.03508](#)
- 29 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. FERMI large area telescope observations of the Crab Pulsar and nebula. *Astrophys J*, 2010, 708: 1254–1267, arXiv: [0911.2412](#)
- 30 Aleksić J, Ansoldi S, Antonelli L A, et al. The major upgrade of the MAGIC telescopes, Part II: A performance study using observations of the Crab Nebula. *Astropart Phys*, 2016, 72: 76–94, arXiv: [1409.5594](#)
- 31 Hassan T, Arrabito L, Bernlöhr K, et al. Monte Carlo performance studies for the site selection of the Cherenkov Telescope Array. *Astropart Phys*, 2017, 93: 76–85, arXiv: [1705.01790](#)
- 32 Abeysekara 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
- 33 Cao Z, Aharonian F A, An Q, et al. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray galactic sources. *Nature*, 2021, 594: 33–36
- 34 Amenomori M, Bao Y W, Bi X J, et al. First detection of photons with energy beyond 100 TeV from an astrophysical source. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 051101, arXiv: [1906.05521](#)
- 35 Abeysekara A U, Albert A, Alfaro R, et al. Multiple galactic sources with emission above 56 TeV detected by HAWC. *Phys Rev Lett*, 2020, 124:

021102

- 36 Abeyssekara A U, Albert A, Alfaro R, et al. Extended gamma-ray sources around pulsars constrain the origin of the positron flux at Earth. *Science*, 2017, 6365: 911–914
- 37 Abdalla H, Aharonian F, Ait Benkhali F, et al. Particle transport within the pulsar wind nebula HESS J1825–137. *Astron Astrophys*, 2019, 621: A116, arXiv: [1810.12676](#)
- 38 Abdalla H, Adam R, Aharonian F, et al. An extreme particle accelerator in the Galactic plane: HESS J1826–130. *Astron Astrophys*, 2020, 644: A112, arXiv: [2010.13101](#)
- 39 Voisin F, Rowell G, Burton M G, et al. ISM gas studies towards the TeV PWN HESS J1825–137 and northern region. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2016, 458: 2813–2835, arXiv: [1604.00090](#)
- 40 Grondin M H, Funk S, Lemoine-Goumard M, et al. Detection of the pulsar wind Nebula HESS J1825–137 with the Fermi large area telescope. *Astrophys J*, 2011, 738: 42, arXiv: [1106.0184](#)
- 41 Abdalla H, Abramowski A, Aharonian F, et al. The H.E.S.S. Galactic plane survey. *Astron Astrophys*, 2018, 612: A1, arXiv: [1804.02432](#)
- 42 Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. Observation of the TeV gamma-ray source MGRO J1908+06 with ARGO-YBJ. *Astrophys J*, 2012, 760: 110–115
- 43 Aliu E, Archambault S, Aune T, et al. Investigating the TeV morphology of MGRO J1908+06 with VERITAS. *Astrophys J*, 2014, 787: 166, arXiv: [1404.7185](#)
- 44 Dame T M, Hartmann D, Thaddeus P. The Milky Way in molecular clouds: A new complete CO survey. *Astrophys J*, 2001, 547: 792–813, arXiv: [astro-ph/0009217](#)
- 45 Acciari V A, Aliu E, Arlen T, et al. Detection of extended VHE gamma ray emission from G106.3+2.7 with VERITAS. *Astrophys J*, 2009, 703: 6–9
- 46 Amenomori M, Bao Y W, Bi X J. Potential PeVatron supernova remnant G106.3+2.7 seen in the highest-energy gamma rays. *Nat Astron*, 2021, 5: 460–464
- 47 Kothes R, Uyaniker B, Pineault S. The supernova remnant G106.3+2.7 and its pulsar-wind Nebula: Relics of triggered star formation in a complex environment. *Astrophys J*, 2001, 560: 236–243, arXiv: [astro-ph/0106270](#)
- 48 Heyer M H, Brunt C, Snell R L, et al. The five college radio astronomy observatory CO survey of the outer galaxy. *Astrophys J Suppl Ser*, 1998, 115: 241–258
- 49 Xin Y, Zeng H, Liu S, et al. VER J2227+608: A hadronic PeVatron pulsar wind nebula? *Astrophys J*, 2019, 885: 162, arXiv: [1907.04972](#)
- 50 Su Y, Yang J, Zhang S, et al. The Milky Way Imaging Scroll Painting (MWISP): Project details and initial results from the galactic longitudes of 25.8–49.7. *Astrophys J Suppl Ser*, 2019, 240: 9, arXiv: [1901.00285](#)
- 51 Nan R, Li D I, Jin C, et al. The five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST) project. *Int J Mod Phys D*, 2011, 20: 989–1024, arXiv: [1105.3794](#)

LHAASO and the origin of cosmic rays

YANG RuiZhi^{1,2*}

¹ CAS Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

² School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

The extension of the cosmic ray spectrum beyond 1 PeV ($1 \text{ PeV} = 10^{15} \text{ eV}$) indicates the existence of particle accelerators operating as PeVatrons in the Milky Way. However, recent gamma-ray observations reveal that supernova remnants (SNRs), considered the major source of galactic cosmic rays, have difficulty in accelerating cosmic rays to PeV. Therefore, searching and identifying PeVatrons is crucial for understanding the origin of cosmic rays. The ultra-high-energy (UHE) gamma-ray observations will provide decisive evidence for such studies. Due to its high sensitivity in the UHE gamma-ray band, Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO) would play a key role in the research on PeVatron. After running the 1/2 LHAASO-KM2A array, 12 UHE gamma-ray sources were detected. This paper summarizes the observation results and discusses the prospect of the full LHAASO array.

cosmic rays, gamma-ray, gamma-ray source

PACS: 96.50.S-, 95.85.Pw, 98.70.Rz

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0172](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0172)