

高海拔宇宙线观测站与超高能伽马射线源

柳若愚[†]

(南京大学天文与空间科学学院 南京 210023)

近日,我国的重大科技基础设施“高海拔宇宙线观测站”(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)在《Nature》期刊上发表了首批科学结果^[1]. LHAASO利用其1/2阵列在2020年1月至11月这段时期的数据,共发现了12个显著性大于7倍标准偏差的超高能伽马射线(指能量大于100 TeV的光子, $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$)源.

LHAASO坐落于四川省稻城县的海子山上,海拔4410 m,由平方公里阵列(Kilometers Square Array, KM2A)、水切伦科夫探测器阵列(Water Cherenkov Detector Array, WCDA)以及广角切伦科夫望远镜阵列(Wide Field Cherenkov Telescope Array, WFCTA)组成.此次发现使用的是KM2A的数据,该阵列由5195个电磁粒子探测器和1188个缪子探测器组成,占地面积约 1 km^2 .超高能伽马射线进入大气层后会与大气中的原子核发生反应,自身被吸收,并产生一代又一代的大量次级正负电子对,这个现象被称为广延大气簇射. KM2A阵列主要通过电磁粒子探测器测量这些正负电子对来还原初级光子的能量与方向.同时,高能宇宙线在进入大气层后同样会引发广延大气簇射现象,产生大量的次级粒子,因此对于探测超高能伽马射线来说是一种噪音.但宇宙线所引发的级联中除了正负电子对之外,也包含大量的缪子,可以被KM2A的缪子探测器捕捉到,因此KM2A可以通过一个簇射事件中缪子与正负电子的比例将超高能伽马射线事件准确地挑选出. 1 km^2 的大探测面积以及对超高能伽马射线事件的准确挑选能力,使得LHAASO成为当今世界最灵敏的超高能伽马射线探测器.

LHAASO本次发现的12个源集中分布在银道面上,同时考虑到超高能伽马射线的平均自由程在几个Mpc之内,基本可以确定这些超高能伽马射线源是银河系内的天体所产生.对于银河系内的天体,产生超高能伽马射线的机制一般有两种:一种是高能质子与气体产生的质子-质子碰撞,这种方式产生的伽马射线能量约为高能质子能量的10%,因此产生超高能伽马射线需要能量大于 $1 \text{ PeV} (= 10^{15} \text{ eV})$ 的质子.另一种是高能电子散射宇宙微波背景辐射(即逆康普顿散射),产生超高能伽马射线需要的电子能量在 0.3 PeV 之上.由此可见,超高能伽马射线源与宇宙中PeV宇宙线加速器有直接的关联,而后者则是高能天体物理与粒子天体物理领域长期寻找的一个重要目标.

通过把12个超高能伽马射线源的位置与一些已知的候选天体源进行对照,可以在大多数源的位置或附近找到脉冲星、超新星遗迹或者年轻的大质量恒星星团等天体.脉冲星产生于Ib/Ic/II型超新星爆发,是快速自转的磁化中子星.它向四周发射由正负电子对组成的脉冲星风,这些极端相对论性的脉冲星风云冲击在超新星抛射物上形成一道终止激波,而脉冲星风中的正负电子对会在终止激波附近进一步被加速,并产生多波段的辐射,形成脉冲星风云^[2].最著名的脉冲星风云—蟹状星云—也在此次观测到的12个源之中.从蟹状星云而来的最高光子能量为 0.88 PeV ,证明了它是一个极端的电子加速器,对现有的粒子加速理论提出了一定的挑战.超新星遗迹是超新星爆发产生的爆震波.这些爆震波的速度在早期可达一两万公里每秒,随着爆震波在星际介质中扫过越来越多的物质,它的速度会逐渐衰减^[3].一般认为要把质子加速到PeV,爆震波的速度至少需要几千公里每秒,对应的超新星遗迹年龄只

[†]ryliu@nju.edu.cn

有几百年来^[4]。此前的观测表明超新星遗迹确实可以加速质子^[5]，但是还没有证据表明其能把质子加速到PeV。年轻大质量星团中的粒子加速来自于O型星与B型星的高速星风。O、B星巨大的辐射压驱动了速度高达上千公里每秒的高速星风^[6]，在整个恒星形成区产生了很多激波，由于星团内恒星之间的距离较近，激波之间的相互碰撞可以使粒子加速效率进一步提高^[7]。LHAASO探测到的最高能量光子便是从天鹅座的恒星形成区而来，该光子能量高达1.4 PeV，刷新了人类从宇宙中探测到的光子能量纪录。值得一提的是，除了蟹状星云被确定为是超高能伽马射线源，其他10个源的范围或附近都存在着不止一个候选天体源，LHAASO的空间分辨率不足以清晰地区分区域内具体哪一个天体是超高能伽马射线的源或每个天体各自贡献了多少超高能伽马射线辐射。此外还有一个源(LHAASO J2108+5157)的附近暂时还没有发现候选天体。我们需要结合其他波段的观测以及中微子的观测来进一步确定这些超高能伽马射线的确切起源。

LHAASO的此项成果对银河系宇宙线起源的研究是一个里程碑，对理解天体中的粒子加速机制、宇宙线的输运机制有重要的意义。不仅如此，LHAASO也开启了超高能伽马射线天文观测的新时代。超高能伽马射线作为宇宙中极端物理过程与天文现象的探针，使我们得以窥见宇宙汹涌澎湃的一面。可以期待未来LHAASO全阵列的观测将让我们对宇宙有更加全面的认识。

参 考 文 献

- [1] LHAASO Collaboration. *Nature*, 2021, 594: 33
- [2] Gaensler B M, Slane M O. *ARA&A*, 2006, 44: 17
- [3] Truelove J K, McKee C F. *ApJS*, 1999, 120: 299
- [4] Schure K M, Bell A R. *MNRAS*, 2013, 435: 1174
- [5] Fermi-LAT Collaboration. *Science*, 2013, 339: 807
- [6] Abbott D C. *ApJ*, 1982, 259: 282
- [7] Bykov A M, Gladilin P E, Osipov S M. *MNRAS*, 2013, 429: 2755

Large High Altitude Air Shower Observatory and Ultrahigh-energy Gamma-ray Sources

LIU Ruo-yu

(*School of Astronomy and Space Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023*)