



LHAASO解密宇宙线起源

李聪^{1,2*}, 杨睿智^{3*}, 曹臻^{1,2*}

1. 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室, 北京 100049;

2. 天府宇宙线研究中心, 成都 610213;

3. 中国科学技术大学天文学系, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: licong@ihep.ac.cn; yangrz@ustc.edu.cn; caozh@ihep.ac.cn

Exploring the origin of cosmic rays with LHAASO

Cong Li^{1,2*}, Ruizhi Yang^{3*} & Zhen Cao^{1,2*}

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

² TIANFU Cosmic Ray Research Center, Chengdu 610213, China;

³ Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

* Corresponding authors, E-mail: licong@ihep.ac.cn; yangrz@ustc.edu.cn; caozh@ihep.ac.cn

doi: [10.1360/TB-2024-0441](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0441)

宇宙线是星际空间中以接近光速高速运动的带电粒子,它在星际介质中是与磁场和冷气体同样重要的成分,在星际化学过程和恒星形成过程中也扮演着重要的角色,是宇宙不可或缺的重要组成部分^[1]. 高能宇宙线还是连接微观粒子和宏观宇宙的桥梁,与宇宙天体中的极端物理过程相联系,是近年来新兴的交叉学科——粒子天体物理的重要组成部分. 然而,宇宙线的起源依然未知.

在地球上对宇宙线的观测表明,宇宙线强度随能量在 1 PeV(千万亿电子伏特)附近突然快速减少,在宇宙线强度随能量变化的“能谱”上形成形状类似膝关节的结构,被称为宇宙线能谱的“膝”^[2]. 宇宙线能谱在 1 EeV(百亿亿电子伏特)附近又会突然缓解这一快速减少的趋势,使得宇宙线能谱出现了“踝”的结构^[3]. 一般认为,能量比“膝”低的宇宙线起源于银河系内的天体,能量比“踝”高的宇宙线来源于银河系之外,但是从 1 PeV 到 1 EeV 的宇宙线起源完全不清楚,成为宇宙线研究中长期存在的重大科学问题. 宇宙线成分的测量可以提供宇宙线起源、传播的重要信息. 目前,以“悟空”实验为代表的卫星实验已经可以测量 100 TeV 以下的质子和氦核能谱^[4,5]. 但是由于统计量的限制,对于更高能量的能谱目前还只能由地面簇射实验进行测量. “膝”区附近的宇宙线流强和成分测量结果如图 1 所示^[6],可以看到实验结果还存在较大系统误差,因此不同实验的结果之间存在明显差异. LHAASO 的最新实验结果发现在“膝”区附近宇宙线成分会先变轻再变重,是一个类似于“肘”的结构,同时表明“膝”由轻成分主导^[6]. 总体而言,银河系加速粒子的能量上限在哪儿还存在较大争议,

也缺乏直接证据. 银河系内的天体是否能够把质子加速到 1 PeV 以上? 银河系加速粒子的最高能量是多少? 这是近年来宇宙线研究中最引人关注的课题之一.

宇宙线由于带电,在星际磁场中会发生偏转,因此直接观测不能告诉我们宇宙线起源的信息. 另一方面,宇宙线在传播过程中会与星际介质中的原子核发生相互作用产生电中性的粒子,例如中微子和伽马射线光子,通过测量这些粒子可以直接定位宇宙线的加速源. 中微子与物质相互作用截面很低,因此探测难度很高,往往需要非常大体积的探测器,比如南极的冰立方实验^[17]等. 虽然中微子探测器已经达到了立方公里的尺度,但是目前还没有探测到来自天体源的显著信号. 伽马射线探测方法则相对更为成熟,GeV 的伽马射线可以由卫星实验直接探测,对于能量更高的伽马射线则由地面实验进行测量. 高能光子会与大气分子相互作用产生次级粒子,而地面实验可以通过测量这些次级粒子来反推原初粒子信息. 比较有代表性的实验有欧洲的 MAGIC、HESS 实验,美国的 VERITAS、HAWC 实验,以及我国的 ARGO、ASy 实验等^[18]. 在过去的 30 多年里,伽马射线天文学蓬勃发展,产生了许多重要的发现.

高海拔宇宙线观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)是我国自主提出、设计、建造的新一代伽马射线望远镜和宇宙线探测装置. 它包含水切伦科夫探测器阵列(Water Cherenkov Detector Array, WCDA)、平方公里阵列(Kilometer² 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)3 个子阵列. LHAASO 是

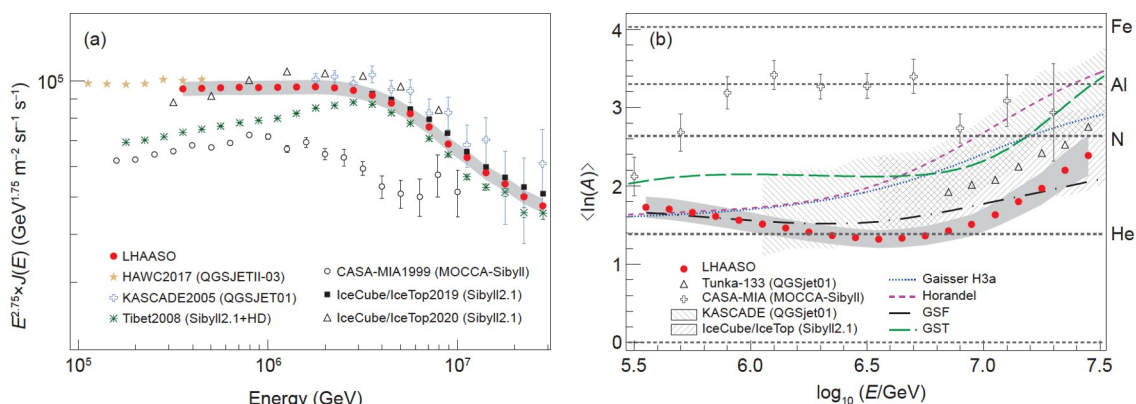


图 1 (网络版彩色)不同实验测量的宇宙线“膝”区全粒子能谱(a)和 $\langle \ln(A) \rangle$ 随宇宙线能量关系(b)^[6]。(a) 红色数据点表示LHAASO测量结果, 其他颜色数据点代表HAWC^[7]、CASA-MIA^[8]、Tibet-III^[9]、KASCADE^[10]、IceCube/IceTop^[11,12]等实验结果。(b) 红色数据点表示LHAASO实验结果, 其他数据点分别表示CASA-MIA^[13]、Tunka-133^[14]实验结果, 灰色带子表示KASCADE^[10,15]和IceCube/IceTop^[16]系统误差范围

Figure 1 (Color online) The all-particle energy spectrum of cosmic rays measured by different experiments (a) and the relationship between $\langle \ln(A) \rangle$ and cosmic-ray energy (b)^[6]. The red data points in (a) represent the results of LHAASO, while data points in other colors represent results from experiments such as HAWC^[7], CASA-MIA^[8], Tibet-III^[9], KASCADE^[10], IceCube/IceTop^[11,12], etc. The red data points in (b) represent the results of the LHAASO experiment, while other data points represent the results of the CASA-MIA^[13] and Tunka-133^[14] experiments, and the gray band represents the systematic error range of the KASCADE^[10,15] and IceCube/IceTop^[16]

工作在超高能段(>0.1 PeV)的灵敏度最高的伽马射线望远镜, 并成功开启了“超高能伽马射线天文学”的新窗口^[2]。

最近, LHAASO在天鹅座区域发现了一个巨型超高能伽马射线泡状结构, 其物理尺度超过500光年, 同时观测到了8个能量超过PeV光子(图2)^[19]。超高能伽马光子随着距离中心位置越近密度越高。特别是在Cygnus OB2周围0.5°范围之内有7个超高400 TeV伽马光子, 其中2个事例能量超过1 PeV。但是中心区域环境复杂, 不仅有大量星团Cygnus OB2, 还有微类星体Cygnus X-3和未认证的甚高能伽马射线源LHAASO J2031+4127存在, 因此目前还无法确定中心区域超高能伽马光子起源^[19]。

该泡状结构的伽马射线空间分布与物质分布存在明显关联性, 表明伽马射线极有可能是由宇宙线与物质相互作用产生。分布在银河系空间的背景宇宙线也可以与物质相互作用产生弥散伽马信号, 称为银河系弥散伽马背景(galactic diffuse emission, GDE)。但是该泡状结构的伽马射线空间分布要比弥散伽马分布更“陡”, 而且流强要比估计的银河系弥散伽马背景更高, 因此排除了主要是由弥散伽马背景组成的可能性。该伽马射线泡的能谱一直延伸超过2 PeV, 未发现强度突然减弱现象, 意味着位于泡中心的宇宙线源对高能粒子的加速能力并未出现衰竭的迹象, 有能力产生更高能量的宇宙线粒子。宇宙线与星际介质相互作用产生伽马射线的过程与地球上加速器中的粒子对撞过程类似, 对此我们已经具有准确的知识。如果伽马射线是由质子对撞产生, 那么对应的质子能量约10倍于伽马光子能量。因此, 我们通过观测到的伽马射线能量可以推知这个宇宙线源能够大量产生能量超过10 PeV的宇宙线, 这被称为“超级宇宙线加速器”。

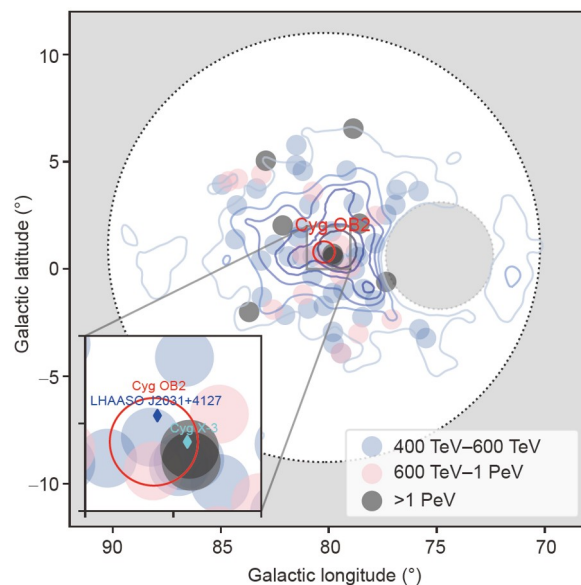


图 2 (网络版彩色)LHAASO观测到的超高能伽马光子空间分布^[19]。等高线代表伽马射线强度分布, 颜色越深代表流强越高。不同颜色实心圆圈代表不同能量的光子, 其中黑色圆圈代表能量超过1 PeV伽马光子。总共有8 PeV光子被探测到, 其中两个位于中心位置。中心区域蓝色菱形代表超高能伽马射线源LHAASO J2031+4127, 绿色菱形代表微类星体Cygnus X-3, 红色圆圈代表大量星团Cygnus OB2

Figure 2 (Color online) Photon distribution in the Cygnus-X region^[19]. The contour lines represent the intensity of the gamma-ray flux, with darker color indicating higher intensity. The solid circles with different colors represent photos of different energies. The 8 photos with energy above 1 PeV are labeled as black circles. The blue diamond labels the ultra-high energy (UHE) gamma-ray source LHAASO J2031+4127, the cyan diamond is the micro-quasar Cygnus X-3 and the red circle is the massive star cluster Cygnus OB2

由伽马射线的空间分布,我们还可以对宇宙线加速源的位置进行限制,结果表明最可能的宇宙线加速源是位于泡状结构中央区域的Cygnus OB2. 这是一个包含数十颗最大质量恒星的年轻星团,这些大质量恒星每个的质量都要比太阳大几十倍,体积大数万倍,亮度更是超过太阳百万倍. 这些大质量恒星时时刻刻都以超过1000 km/s的速度向星际空间中抛射大量物质. 这些高速星风是宇宙线加速最可能的能量来源. 这些被加速到极高能量的宇宙线从加速区域逃逸出来,与星际介质中的致密分子和原子气体相互作用,产生了被LHAASO观测到的伽马射线. 因此,通过利用伽马射线的能谱和空间分布信息, Cygnus OB2有可能是首个被人类成功认证的超级宇宙线加速器.

宇宙线起源研究的最终目的是理解宇宙线的起源、加速和传播过程,进而理解地球附近测量到的宇宙线流强. Cygnus Bubble是LHAASO发现的第一个超级宇宙线加速器,具有里程碑意义. 未来随着LHAASO积分灵敏度的不断提升,有望认证其他类型的宇宙线源,从而对宇宙线起源有更加系统、深入的认识.

推荐阅读文献

- Castellina A, Donato F. Astrophysics of galactic charged cosmic rays. In: Oswalt T D, McLean I S, Bond H E, et al., eds. Planets, Stars, and Stellar Systems. Berlin: Springer, 2012
- Cao Z. LHAASO: A milestone of the cosmic ray research (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 1558–1566 [曹臻. LHAASO在宇宙线物理中的里程碑意义. 科学通报, 2022, 67: 1558–1566]
- Hörandel J R. On the knee in the energy spectrum of cosmic rays. *Astropart Phys*, 2003, 19: 193–220
- An Q, Asfandiyarov R, Azzarello P, et al. Measurement of the cosmic ray proton spectrum from 40 GeV to 100 TeV with the DAMPE satellite. *Sci Adv*, 2019, 5: eaax3793
- Yoon Y S, Anderson T, Barrau A, et al. Proton and helium spectra from the CREAM-III flight. *Astrophys J*, 2017, 839: 5
- Cao Z, Aharonian F, Axikegu F, et al. Measurements of all-particle energy spectrum and mean logarithmic mass of cosmic rays from 0.3 to 30 PeV with LHAASO-KM2A. *Phys Rev Lett*, 2024, 132: 131002
- Alfaro R, Alvarez C, Álvarez J D, et al. All-particle cosmic ray energy spectrum measured by the HAWC experiment from 10 to 500 TeV. *Phys Rev D*, 2017, 96: 122001
- Glasmacher M. The cosmic ray energy spectrum between 10^{14} and 10^{16} eV. *Astropart Phys*, 1999, 10: 291–302
- Amenomori M, Bi X J, Chen D, et al. The all-particle spectrum of primary cosmic rays in the wide energy range from 10^{14} to 10^{17} eV observed with the Tibet-III air-shower array. *Astrophys J*, 2008, 678: 1165–1179
- Antoni T, Apel W D, Badea A F, et al. KASCADE measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays: Results and open problems. *Astropart Phys*, 2005, 24: 1–25
- IceCube Collaboration. Cosmic ray spectrum and composition from PeV to EeV using 3 years of data from IceTop and IceCube. *Phys Rev D*, 2019, 100: 082002
- Aartsen M G, Abbasi R, Ackermann M, et al. Cosmic ray spectrum from 250 TeV to 10 PeV using IceTop. *Phys Rev D*, 2020, 102: 122001
- Glasmacher M A K, Catanese M A, Chantell M C, et al. The cosmic ray composition between 10^{14} and 10^{16} eV. *Astropart Phys*, 1999, 12: 1–17
- Berezhnev S., et al. The Tunka-133 EAS Cherenkov light array: Status of 2011. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2012, 692: 98
- Kampert K H, Unger M. Measurements of the cosmic ray composition with air shower experiments. *Astropart Phys*, 2012, 35: 660–678
- Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. Cosmic ray spectrum and composition from PeV to EeV using 3 years of data from IceTop and IceCube. *Phys Rev D*, 2019, 100: 082002
- Abbasi R, Ackermann M, Adams J, et al. The IceCube data acquisition system: Signal capture, digitization, and timestamping. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2009, 601: 294–316
- Sitarek J. TeV instrumentation: Current and future. *Galaxies*, 2022, 10: 21
- LHAASO Collaboration. An ultrahigh-energy γ -ray bubble powered by a super PeVatron. *Sci Bull*, 2024, 69: 449–457