

“拉索”膝区质子能谱测量与超高能伽马源

尹丽巧 游智勇

(中国科学院高能物理研究所 100049)

在宇宙中,时刻都有高能微观粒子到达地球,这些粒子来自太空深处,携带着天体剧烈活动的秘密,它们就是宇宙线。宇宙线包含质子、氦核等各种原子核,正负电子,伽马光子等。作为人类能从宇宙中直接获取的物质样本,宇宙线是破解宇宙极端物理过程的关键密码。而在其跨越11个数量级的能量分布图上,存在一个困扰了科学家近70年的神秘结构——“膝”,其起源至今成谜。中国的“拉索”实验以前所未有的精度测量了“膝”区质子能谱,为揭开宇宙线起源之谜提供重要的数据。

1. 宇宙线能谱的“膝”:一个近七十年的谜题

宇宙线的能量分布基本服从幂律函数的形式,但从细节上看,其能谱并非完全平滑,在大约3000万亿电子伏特(3 PeV)的位置,出现了一个明显的拐弯,形状类似于人的膝盖,因此被形象地称为宇宙线能谱的“膝”。在“膝”之上,宇宙线的数量随能量升高而减少的速度加快。自20世纪50年代“膝”被发现以来,它的成因一直是宇宙线物理领域的核心谜题之一。主流猜测认为,这标志着银河系主流加速器的能量加速极限。

要真正解开“膝”的谜团,一个关键步骤是进行成分分析。宇宙线是混合粒子流,包含从最轻的质子到较重的铁原子核等多种原子核。不同成分的“膝”位置可能不同^[1]。实现对各成分能谱的精确测量,是区分不同的加速与传播模型、解释“膝”的形成机制的重要渠道。

然而,宇宙线成分能谱的精确测量极具挑战性。一方面,高能宇宙线的流强很低。在PeV能

区,每平方米每年只能接收到几个粒子。目前的卫星探测器面积有限,在可接受的时间内无法积累足够的统计数据。“膝区”宇宙线能谱测量主要依赖地面实验完成;另一方面,地面实验无法直接捕捉原初宇宙线粒子,只能测量它们与大气中的原子核相互作用后产生的次级粒子,根据这些次级粒子的信息来推测原初粒子是质子还是更重的原子核。由于大气簇射中次级粒子的产生存在较大的涨落,且地面实验是一种采样测量,仅针对特定能量以上的部分次级粒子种类进行观测,因此地面实验对宇宙线粒子的鉴别很难。在上述背景下,质子作为最轻且丰度最高的宇宙线成分,其能谱测量就成为解开“膝”之谜的重要一环。各个地面实验,如KASCADE^[1], IceTop^[2], ARGO-YBJ^[3], ASγ^[4]等,虽尽力尝试,但无法得到高纯度的质子样本,系统误差也很大,导致不同实验的结果难以相互印证。

2. “拉索”强大的粒子鉴别能力

广延大气簇射(EAS)是高能宇宙线撞击大气原子核引发的“粒子阵雨”(如图1所示)。宇宙线粒子与空气原子核碰撞产生的大多数粒子为 π 介子和K介子。这些粒子在发生相互作用之前可衰变为 μ 子和中微子,从而形成大气簇射中穿透性最强的成分—— μ 子成分。簇射中数量最多的成分是电子和光子,它们主要来自中性 π 介子的快速衰变:中性 π 介子衰变为光子后,会触发电磁簇射,经韧致辐射与电子对产生循环实现粒子倍增,将原初粒子原本很高的能量分散到数百万个次级粒子中。此外,当次级带电粒子的运动速度超过空气中的光速时,还会产生蓝紫色的切伦科夫光子。

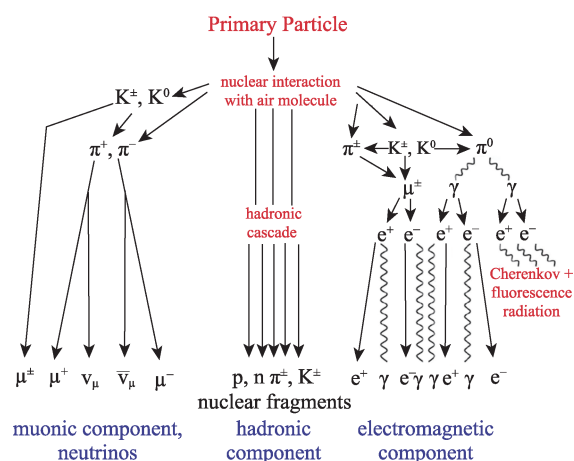


图1 广延大气簇射(EAS)示意图(图片引自参考文献[5])

高海拔宇宙线观测站,“拉索”(LHAASO),位于四川稻城海子山,海拔4410米,是由三大探测器阵列组成的复合型探测阵列,如图2所示。三个阵列分别为平方公里阵列(KM2A)、水切伦科夫探测器阵列(WCDA)和广角切伦科夫望远镜阵列(WFCTA)^[6]。KM2A具有遍布1.3平方公里的电磁粒子探测器(ED),测量到达地面的电磁粒子数量以及它们的到达时间等信息;KM2A还拥有大量缪子探测器(MD),这些MD同样分散在1平方公里范围内,覆盖率高达4%,远超以往任何实验。这些MD被埋在2.5米深的土层下面,土层可以有效地吸收簇射中的电磁粒子。能量约为1 GeV以上的缪子可穿透土层并在探测器中产生信号,从而实现MD对簇射中缪子成分的精确测量,该成分是区分原初宇宙线成分的关键依据。WCDA是密排型探测阵列,每

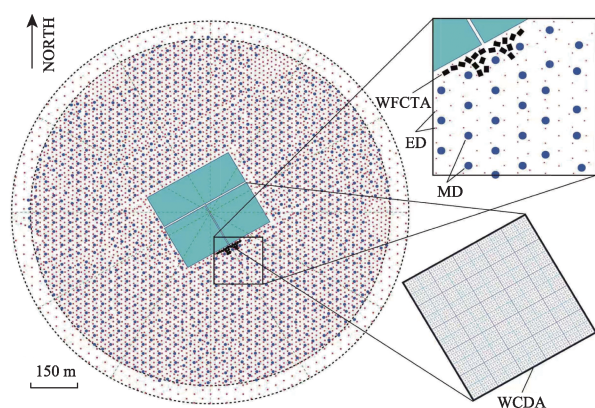


图2 “拉索”阵列示意图(图片引自参考文献[6])

个探测单元大小为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$,可测量簇射近芯区的信号。WFCTA可以将大气中次级带电粒子产生的切伦科夫光汇聚到焦平面上,观测到不同大气深度下产生的切伦科夫光子,从而获得和簇射纵向发展相关的信息。

“拉索”能同时对一次簇射进行多维度的测量:包括地面粒子横分布、缪子含量和簇射极大深度。利用KM2A和WFCTA的联合观测数据,可以实现:(1)高纯度质子筛选:结合缪子占比和簇射极大深度信息,“拉索”成功地从宇宙线事例中筛选出了纯度超过89%的质子样本,剩余的约10%基本上全是氦核事例,并几乎完全排除了更重原子核的污染。(2)精确重建能量:通过综合电磁和缪子成分的信息,能量分辨率优于15%,并且对理论模型的依赖很小^[7]。这意味着,我们在“膝区”能段首次有能力挑选出足够高纯度的宇宙线质子,实现高精度的质子能谱测量。

3. 拉索对“膝区”质子能谱的精确测量

“拉索”实验团队利用2021至2022年整个观测季的数据,收集到超过3万个1 PeV以上的宇宙线事例,实现了“膝区”质子能谱的精确测量,如图3a所示,质子的膝在3.3PeV附近,膝前后的能谱指数分别为-2.51和-3.5^[7]。质子能谱的误差主要表现在三个方面,一是统计误差(如图中误差棒所示),二是强子相互作用模型引入的系统误差(如图中三种颜色的数据点之间的差异所示),三是除强子相互作用模型以外的其他因素综合的系统误差(如图中阴影带所示)。其中,强子相互作用模型引入的系统误差最大,不超过17%。

此前,人们认为仅空间卫星实验可做到单成分宇宙线能谱的精确测量,以我国的悟空实验(DAMPE)为例,其测量的质子能谱最高延伸到100万亿电子伏特(100TeV),如图3a中蓝色方块所示,在20TeV以上,其测量的质子能谱的系统误差也达到10%^[8]。虽然“拉索”此次对质子能谱测量的误差未完全达到空间实验的水平,但也已达到可比的

程度。

当把“拉索”测量的质子能谱结果与低能段的AMS-02结果^[9]、中能段的“悟空”(DAMPE)卫星结果^[8]结合时,如图3b所示,可以看到复杂的质子能谱结构:在质子能谱的全能量段中,可以观察到多个能谱硬化(即流强随能量下降的速率变缓)与软化(即流强随能量下降的速率变快)交替出现的复杂结构。首先,在200 GeV附近,能谱开始变硬,延伸至约14 TeV后,质子能谱转而变软。DAMPE的测量结果显示,在14 TeV以上,谱指数约为-2.85;而当能量进入“拉索”的测量范围(150 TeV以上)后,谱指数变为约-2.51,即能谱再次出现硬化。随着能量继续升高至膝区附近,流量急剧下降,能谱显著变软。

整体来看,质子能谱在约14 TeV和约3 PeV附近均存在明显的变软结构,类似特征在不同能段重复出现,这暗示银河系内存在多种宇宙线加速源,且每种源具有各自的加速机制与能量贡献区间。其中,TeV能段的质子主要由一类天体源(如超新星遗迹)贡献,而PeV能段的质子则由另一类天体源主

导。宇宙线能谱中的“膝”结构,正是这类新天体源主导贡献能量的外在体现。那么,这个在PeV能段起主导作用的、强大的新天体源究竟是什么?

4. 解释“膝”的起源:从另一个角度出发

要解释宇宙线的起源,本质上需回答三个问题:加速这些粒子的天体源是什么?被加速的粒子来自何处?以及什么机制将粒子加速到如此高能量?长期以来,超新星遗迹被视为银河系宇宙线的主要加速器,被加速的物质主要来自超新星爆发时抛射的物质,而驱动这一切的物理机制则是激波加速。然而,随着观测和理论的深入,科学家们发现超新星遗迹的加速能力很难将粒子加速到“膝”所对应的能量^[10],更不用说在宇宙线能谱上形成如今“拉索”看到的“高能组分”了。

由于宇宙线粒子带电的性质,它们在从产生地传播到地球的过程中受到星际空间磁场的偏转早已偏离了源的方向,我们很难根据测量的宇宙线粒子方向直接溯其源头。宇宙中还有另一类高能粒子——伽马光子。当宇宙线粒子在源头被加速后,可能和当地的物质产生相互作用,产生伽马光子。这些光子不受磁场偏转,因此我们可以根据它们的到达方向直接溯源至高能天体源。

目前,“拉索”已成功发现超过40个新的超高能伽马射线源^[11],其中一类为微类星体。这类系统由一颗致密天体(如黑洞)与一颗普通恒星组成,黑洞在吸积伴星物质时会产生相对论性喷流,宛如微缩版的“类星体”。“拉索”最近对五个微类星体(SS 433、V4641 Sgr、GRS 1915+105、MAXI J1820+070、Cygnus X-1)的研究表明^[12]这类天体是“高能组分”可能的天体源。

其中,“拉索”对SS 433的研究发现其超高能伽马射线发射区与一个巨型原子云在空间上高度重合。这强烈暗示了由微类星体喷流加速到PeV能量的质子,扩散至云中并与云内物质碰撞,产生了我们观测到的超高能伽马射线。这些被加速的PeV粒子来自何处,微类星体如何将粒子加速

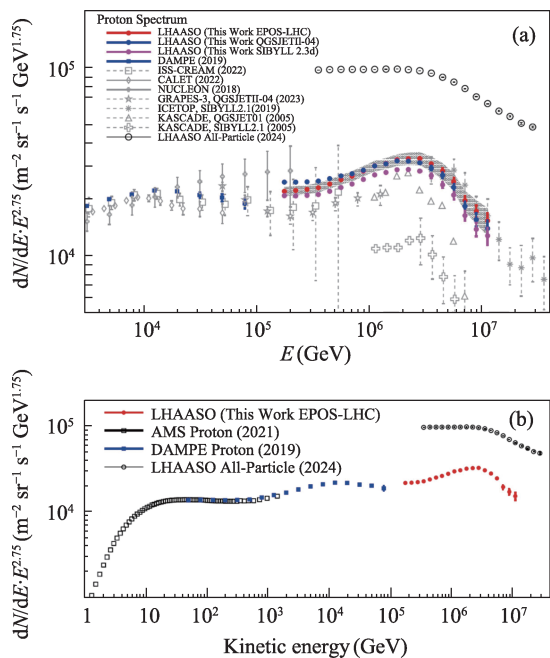


图3 “拉索”测量的质子能谱与其他实验结果的比较
(图片引自参考文献[7])

到 PeV, 仍是待解决的难题。例如, 有一种模型认为, 微类星体捕获银河系内原本就存在的低能宇宙线粒子, 通过喷流——茧层结构中的剪切加速, 将这些粒子加速到 PeV^[13]。另一种模型认为, 微类星体作为天体源, 以扩散激波加速为核心机制, 将吸积盘和星际介质中的物质加速至 PeV^[14]。

5. 总结与展望

“拉索”的突破无疑是迈向最终解决宇宙线起源问题的“关键一步”。“拉索”首次实现了膝区质子能谱的精确测量, 揭示了膝区附近全新的“高能组分”, 结合“拉索”发现的一系列超高能伽马源, 银河系内的确存在许多足够强力的天体源, 能够将质子等其他原子核加速到膝区, 进而贡献宇宙线能谱中的“高能组分”。

对候选的宇宙线加速源进行长期监测与多波段联测, 将有助于深入揭示其粒子加速的物理机制, 并最终确定它们作为“膝”区起源关键角色的地位。未来, “拉索”还将对氦核、碳核、铁核等其他成分进行高精度的测量, 为完善银河系宇宙线起源的物理图景提供更多的观测依据。

参考文献

- [1] KASCADE Collaboration, Apel WD, et al. Energy spectra of elemental groups of cosmic rays: update on the KASCADE unfolding analysis. *Astropart Phys* 2009; 31: 86-91.
- [2] IceCube Collaboration, Aartsen MG, 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.
- [3] 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[J]. *Phys. Rev. D*, 2015; 92:092005.
- [4] Amenomori M, Ayabe S, Chen D, et al. Primary proton spectrum around the knee observed by the Tibet air-shower experiment[J]. *Advances in Space Research*, 2006; 37(10):1938-1943.
- [5] Haungs A, Rebel H, Roth M. Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2003, 66(7) : 1145-1206.
- [6] LHAASO Collaboration, Ma XH, et al. Chapter 1 LHAASO instruments and detector technology. *Chin Phys C* 2022; 46: 030001.
- [7] LHAASO Collaboration, Cao Z, et al. Precise measurements of the cosmic ray proton energy spectrum in the “knee” region. *Sci Bull* 2025;70,24.
- [8] DAMPE Collaboration, An Q, et al. Measurement of the cosmic ray proton spectrum from 40 GeV to 100 TeV with the DAMPE satellite. *Sci Adv* 2019;5. eaax3793.
- [9] AMS Collaboration, Aguilar M, 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.
- [10] Pierre Cristofari, Pasquale Blasi, Elena Amato, The low rate of Galactic pevatrons. *Astroparticle Physics* 2020; 123, 102492.
- [11] LHAASO Collaboration, Cao Z, et al. The First LHAASO Catalog of Gamma-Ray Sources. *ApJS* 2024; 271, 25.
- [12] LHAASO Collaboration, Cao Z, et al. Ultrahigh-energy gamma-ray emission associated with black hole-jet systems. *Natl Sci Rev* 2025;12, nwaf496.
- [13] Haungs A, Rebel H, Roth M. Energy spectrum and mass composition of high-energy Zhang, B. Theodore, Shigeo S. Kimura, and Kohta Murase. 2025. “Microquasar Jet-Cocoon Systems as PeVatrons.” *Physical Review D* 112 (12): 123015.
- [14] Wang J, Reville B, Aharonian F A. Galactic Superaccreting X-Ray Binaries as Super-PeVatron Accelerators[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2025, 989(2): L25.

