

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.03.07

宇宙线“膝区”物理简介 及国内观测研究进展

厉海金^{1,2}, 陈天禄^{1,2}, 刘茂元^{1,2}

(1. 西藏大学 理学院物理系, 拉萨 850000; 2. 西藏大学 宇宙线教育部重点实验室, 拉萨 850000)

摘要: 宇宙线发现 100 年来极大地推动了粒子物理学、天体物理学的发展, 然而其起源、加速和传播的问题依然是宇宙线研究的三个根本问题。宇宙线“膝区”物理的研究是解决宇宙线这些基本问题的途径之一。简要回顾了宇宙线研究的历史和能谱特点; 重点阐述了宇宙线“膝区”的实验观测数据以及重要实验组测量的差异和争论的焦点; 归纳讨论了解释宇宙线“膝区”成因的四种主要理论模型, 并结合最新实验数据说明了第四种成因(新物理过程)的可能性不大; 叙述了国内研究者对宇宙线“膝区”物理研究的贡献; 最后对宇宙线“膝区”物理研究的前景进行了展望。

关键词: 粒子物理; 宇宙线; 膝区; 地面阵列

中图分类号: P113 **文献标识码:** A

1 引 言

1912 年, 奥地利物理学家 Hess 带着密闭的电离室, 乘坐氢气球升到高空测量空气的电离率随着高度的变化。这次实验结果表明 1500 m 以下电离率与地面基本相同, 可是随着高度增加, 电离率明显地加大; 这次的飞行高度达到了 5350 m^[1], 他探测到电离率增长到大约地面的 4 倍。他得出的结论是“我的观察结果最好的解释是设想一种高穿透力的射线从上部进入大气层”。Hess 因为这次后人命名为“宇宙线 (cosmic rays)”的发现于 1936 年获得诺贝尔物理学奖。在随后的几年, Kolhörster 带着改进了的设备测这种电离率随海拔高度的变化, 甚至到了 9000 m 高度之上, 再次证明了 Hess 的实验结果^[2]。

宇宙线的发现为当时的物理学家研究粒子物理学打开了一扇新的大门。由于当时的地面实验所能达到的能量非常有限, 在第一台同步加速器建立之前, 研究宇宙线是发现新粒子唯一的有效手段。1932 年, Anderson 从宇宙线中发现了正电子^[3]; 1937 年, Anderson 和

收稿日期: 2013-03-12; 修回日期: 2013-06-21

资助项目: 国家自然科学基金 (11165013, 11078012); 西藏自治区科技厅自然科学基金“基于羊八井宇宙线观测站的“膝区”物理研究: I”

Neddermeyer 利用云雾室又在宇宙线中发现了 μ 子^[4]；1947年，Powell 在高空核乳胶中发现了 Yukawa 于 1934 年预言的能传递强相互作用的 π 介子^[5]等。诸多的物理学家也因为在研究宇宙线中取得的重大发现而获得了诺贝尔物理学奖^[6]。

宇宙线的研究已经过了一个世纪，但 Hess 在 1936 年所作的诺贝尔物理学奖获得者演讲时所说的一番话仍然没有过时：“无限体积物理学领域所新发现的事实，…… 似乎显示……，主要的物理问题都已经被解决。但这远非事实，这将会被新开辟的一个最大的、最重要的研究领域所证明，那就是宇宙线。”^[7]

宇宙线是来自宇宙空间的高能粒子流的总称，包括以质子为主的各类元素的原子核，还包括少量的电子、反质子、正电子、中微子、高能 γ 射线和其他可能的未知粒子^[9]。图 1 是宇宙线的全粒子谱图，从中不难发现在能量 $100\text{ GeV}(1\text{ GeV}=10^9\text{ eV})\sim 100\text{ EeV}(1\text{ EeV}=10^{18}\text{ eV})$ 范围内宇宙线能谱都很好地符合幂律谱的形式，谱指数约为 2.7；能量低于 100 GeV 的粒子由于受到太阳磁场的偏转比较明显，从而偏离了这个幂律谱结构；能量高于 100 EeV 的粒子由于其流量太小，观测比较困难，缺乏统计要求，目前还无法确定是否还遵守幂律谱结构。能量小于 $100\text{ TeV}(1\text{ TeV}=10^{12}\text{ eV})$ 宇宙线可以通过高空气球和空间卫星实验进行直接测量；能量大于 100 TeV 的宇宙线由于其超低的流量和空间实验有效荷载面积的限制，目前只能依靠地面阵列进行间接测量。但细看宇宙线的能谱，从中可以发现一些细微的结构，比较显著的是在约 $4\text{ PeV}(1\text{ PeV}=10^{15}\text{ eV})$ 处有个明显的拐折，谱指数从约 2.7 变为约 3.1。这是 Khristiansen 和 Kulikov 在宇宙线广延大气簇射 (Extensive Air Shower, 简称 EAS) 实验中测量电磁成分时，于 1958 年首先发现的^[10]；由于其形状类似于人的膝盖，所以被人们形象地称之为“膝区”，本文将详细地介绍宇宙线“膝区”物理研究的情况。在约 400 PeV 的地方有一个轻微的拐折，被称为第二个“膝”，有可能是银河宇宙线最终被截断的地方^[11]。另外，宇宙线能谱在 10 EeV 附近有一个向上的拐折，由于其形状类似于人的脚踝，所以被称为“踝区”^[12-14]。“踝区”形成的原因公认是河外宇宙线的进入，但具体在哪个能区开始进入还存在着争议^[15-17]。在 50 EeV 附近，理论上曾经预言高于这个能量的粒子不可能到达地球。1966 年 Greisen^[18]，Zatsepin 和 Kuzmin^[19,20] 同时提出，距离在 50 Mpc 以外，能量高于 50 EeV 的质子，因与宇宙空间中普遍存在的微波背景光子相互作用产生 π 粒子，导致能量损失而不能到达地球，因此这个能量范围被称为 GZK 截断。虽然实验上由于存在能量标度系统的不确定性，还无法严格地检验这个理论预言，但最新的实验结果，无论是 TA 实验、Auger 实验，还是 HiRes 实验^[21]，都以较大的统计性显示在超高能区上宇宙线的流量有着显著抑制。而且 TA 实验^[22] 和 Auger 实验^[23] 对超高能区宇宙线的各向异性做了测量，发现超高能区宇宙线的方向和河外的源存在一定程度上的关联。当然，也有可能是新的物理过程才产生这么高能量的粒子^[24]。

2 宇宙线“膝区”的发现及实验观测数据

1929 年，Bothe 和 Kolhörster 用两个盖革计数器测量同时发生的信号时^[25]，发现宇宙射线是带电的粒子。继续他们的实验，1938 年，Kolhörster 发现，把两个盖革-米勒管放到距离

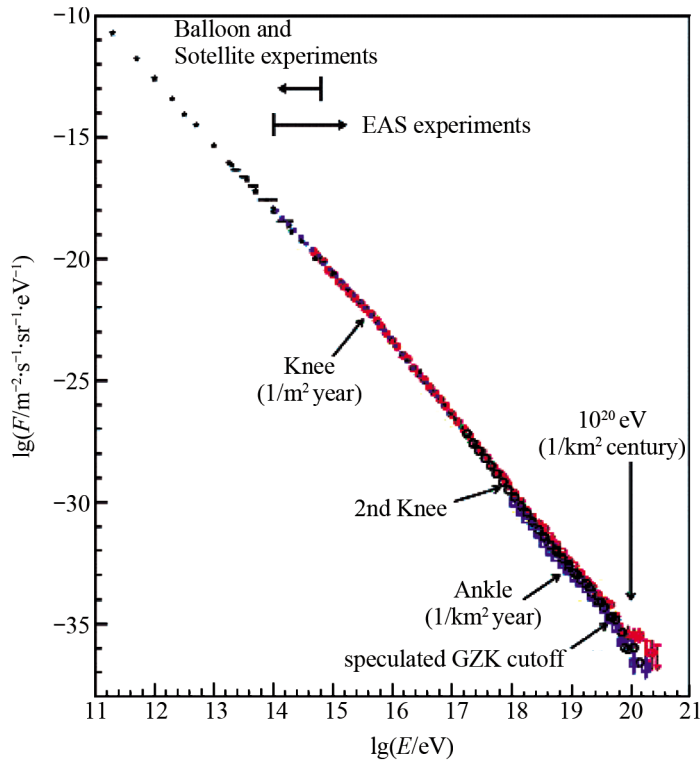


图 1 宇宙线的全粒子谱图^[8]

75 m 远还是能同时接收到这样的一个信号, 他的结论是宇宙射线在大气中产生的次级粒子同时击中管而引发的^[26]。随后, Auger 在海拔 3500 m 的瑞士少女峰继续做宇宙辐射的测量, 他用两个分开很大距离的威尔逊云雾室和盖革-米勒管同时来测量, 得出了相同的结论: 记录到的粒子是同一个原初宇宙线在大气中产生的次级粒子^[27]。于是高能宇宙线在大气中产生的广延大气簇射 (Extensive Air Shower, 简称 EAS) 被发现了, 然后才有了后面的地面探测阵列的建立。1995 年开始建立的世界最大宇宙射线天文台, 被命名为“Auger 实验”, 就是为了纪念这位科学家。

从 20 世纪 40 年代中期开始, 大型的地面探测阵列逐渐被建立起来用于探测 EAS, 探测技术也从早期的盖革计数器到闪烁体探测器、契伦可夫探测器、大气荧光探测器等, 从而发现宇宙线的能谱在很大的能量范围内都是很好的幂律谱结构。1958 年, Kristiansen 和 Kulikov 用宇宙线描述仪计数器来测量空气簇射中积分电子谱时, 发现在 60 万粒子数的地方有一个拐折, 换算成原初宇宙线的能量大概就是几个 PeV 的地方^[10], 这就是现在大家都熟知的“膝区”。随后, 只要测量范围覆盖“膝区”能段, 所有的地面探测阵列都探测到这个结构, 只是不同实验之间“膝区”的位置及形状, 尚存在一定的差异。

德国的宇宙线研究人员 Hröandel 在文献[11]中对“膝区”附近的实验数据进行了详细的总结, 具体的数据在图 2 中标记了出来, 测量这些数据的实验简介见表 1。从图 2 中可以看

出,除了各个实验能量的绝对标度有比较大的差异,“膝区”的位置和形状略有不同外,从整体上来看还是比较一致的。这是相当引人注目的,要知道他们测量的成分可能不一样,测量的手段可能不相同,所处的海拔高度不一样,所处经纬度不一样,他们所采用粒子进入大气后和大气粒子发生的相互作用的模型有可能不同,但都得出如此相似的结果。这说明“膝区”确实是存在的,它的存在一定有其深刻的物理原因。之所以绝对的标度有比较大的差异,可能是系统的误差引起的,因为地面的阵列普遍存在 10%~30% 的误差。德国的宇宙线研究人员 Hröandel 基于这个想法对实验数据进行了调整^[11],和直接测量的数据有重叠部分,按照直接测量数据的平均值在 1 PeV 的位置进行调整对齐,再把这些数据的平均值作为后面高能端数据调整的基准,去掉一些明显不大合理的实验数据。经过这一系列的调整后,不同地面阵列的实验数据展现出惊人的一致性,如图 3 所示;调整的幅度见表 1 的最后一列,幅度都在误差范围内,而且绝大多数都是负的调整,这意味着现有的能量定标方法对能量的外推都可能有些过高。这更加说明,目前实验数据之间的差异很有可能是能量定标中存在的误差所造成。虽然实验数据明确无误地显示了“膝区”的存在,而且“膝区”被发现和研究的历史已经过去半个世纪了,但“膝区”成因目前还是没有定论,至今仍是宇宙线物理中重要的研究课题之一。普遍公认的是,“膝区”的成因关联着宇宙线的起源、加速和传播这些宇宙线研究中的难题,正确理解“膝区”的成因是解决宇宙线这些基本问题的关键所在。

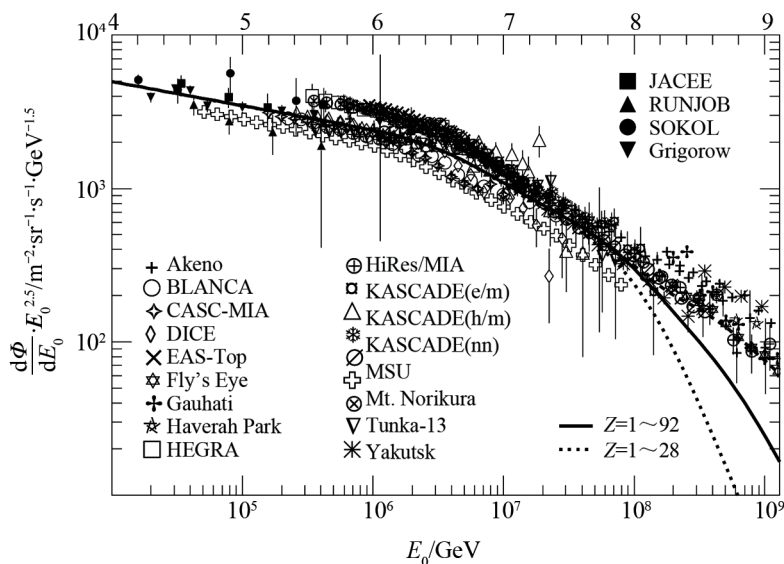


图 2 各个实验在膝区附近测得的实验数据^[11]

实心的数据是直接测量的数据,其他是间接测量的数据,第二个膝以前的实线可以看成是优化了的各个实验数据的平均值。

“膝区”物理研究的争论主要集中在以下几个问题:

(1) 全粒子能谱在“膝区”的结构到底是平滑的还是突变的?即是“平滑的膝”^[28]还是“尖锐的膝”^[29]的问题。

(2) “膝区”宇宙线的组成成分到底是以重核为主还是轻核为主?典型的代表分别是西藏

表 1 世界上测量“膝区”的主要地面阵列简介^[11]

Experiment	e	μ	h	\check{C}	F	G/g·cm ⁻²	Energy shift/(%)
AKENO(low energy) [73]	×	1 GeV				930	-4
BLANCA [74]	×			×		870	4
CASA-MIA [75]	×	800 MeV				870	4
DICE [76]	×	800 MeV		×		860	1
EAS-Top [77]	×	1 GeV				820	-11
HEGRA [78]	×			×		790	-10
KASZADE(electrons/muons) [79]	×	230 MeV				1022	-7
KASZADE(hadrons/muons) [80]		230 MeV	50 GeV			1022	-1
KASZADE(neural network) [81]	×	230 MeV				1022	-8
MSU [82]	×					1020	-5
Mt. Norikura [83]	×					735	9
Tibet [84]	×					606	-10
Tunka-13 [85]				×		680	0
Yakutsk(low energy) [86]				×		1020	-3
AKENO(high energy) [87]	×					930	-16
Fly's Eye [88]					×	860	-3
Gauhati [89]	×					1025	-5
Haverah Park [90]	×					1018	-10
HiRes/MIA [91]		800 MeV			×	860	-5
Yakutsk(high energy) [92]	×	1 GeV		×		1020	-20

说明: e 代表电磁成分; μ 代表 μ 子成分; h 代表强子成分; \check{C} 代表契伦科夫光; F 代表荧光; G 代表大气深度, 值越小表示海拔越高; × 表示有该成分的测量; 第三、四列里的能量是指测量的阈能; 最后一列是能量调整的幅度。

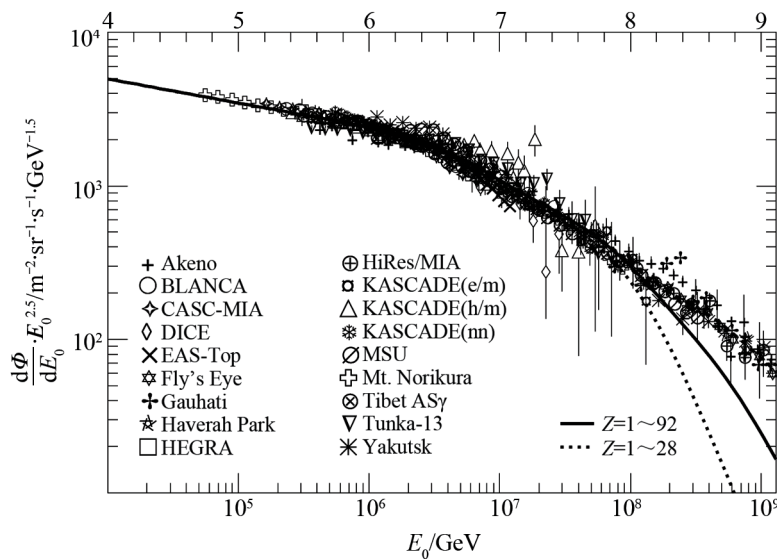


图 3 各个实验在膝区附近经过调整后的实验数据^[11]

的 AS γ 实验^[30]和德国的 KASCADE(KARlsruhe Shower Core and Array DEtector) 实验^[31]。

(3) 单个成分谱或相近的元素组成成分都有“膝”的结构吗? 如果有, 它们是如何拐折的? 拐折的点在哪? 是 Z(电荷) 依赖还 A(核子数) 依赖?

(4) 全粒子谱在“膝区”的拐折, 是这些单个成分拐折的叠加, 还是附近的某个源贡献了主要的成分?

(5) “膝区”能谱还有没有更精细的结构?

(6) “膝区”真正的物理成因是什么?

3 “膝区”物理主要理论模型

现有的对“膝区”的理论解释模型概括起来可以分成四大类^[32]: 前三类认为形成“膝区”的原因是天体物理过程, 是能谱内在的一种属性; 最后一类认为“膝区”形成的原因是粒子进入大气以后发生了一种新的粒子物理过程, 而原初宇宙线能谱中根本不存在“膝”的结构, 纯粹是地面阵列的一种观测效应造成的。下面分别介绍这四类模型。

(1) 第一大类模型: “膝区”是宇宙线的加速过程形成的。

标准的模型是超新星激波加速理论^[33-36]。大质量恒星演化到晚期, 坍缩会引发超新星爆炸向外抛射物质, 喷射物质速度超过周围介质的声速时, 就会形成激波, 穿过激波面粒子就会被加速。而激波加速是一阶费米加速, 从而有更高的效率, 可以把粒子加速到更高的能量。但激波面存在的时间是有限的, 约为 10 万年的时间, 从而限制了粒子能加速到的最高能量, 粒子能获得最高能量应与电荷数成正比, 即具有 Z 依赖性。正因为这个能量的限制, 导致了“膝区”的出现。其出现的许多种具体情况都被讨论过^[37-40], 无非是超新星遗迹的各种不同性质, 如磁场强度不同, 可能利用的能量多少不同, 周围的环境介质不一样等; 也有学者认为是附近的单个超新星遗迹源引发了“膝区”的结构^[41]; 还有一种观点认为是宇宙线在银河系风中被再加速而形成的^[42]; 其他的模型还提出宇宙线粒子是 γ 射线暴加速的^[43-45]。

(2) 第二大类模型: “膝区”是宇宙线在传播的过程中形成的。

被加速后的宇宙线在到达地球之前还需在银河系传播很长一段距离, 由于银河系的磁场 (约 μG) 对宇宙线的束缚是有限度的, 特别是能量很高时, 宇宙线从银河系逃逸的几率也增大。可以看成宇宙线在银河系的磁场里旋转, 其旋转的拉莫尔半径 $R = p/eZB \approx (10 \text{ pc})E_{15}/ZB$ ^[46]。当拉莫尔半径接近银河系的半径时, 银河系的磁场再难以把宇宙线束缚住。而拉莫尔半径跟 Z 成反比, 所以那些轻核最先被泄漏出去, 随着能量的升高, 其他较重的核依次被泄漏, “膝区”应有 Z 的依赖性。很多方法被用来描述宇宙线的传播过程^[47-52], 最常用也最简单的是漏箱模型^[50], 还有无规则的扩散模型^[49]、霍尔扩散模型^[51]、在湍流磁场中扩散模型^[47]和扩散漂移模型^[52]等。

(3) 第三类模型: “膝区”是宇宙线和银河系中的背景粒子发生相互作用而形成的。

宇宙线在传播过程中, 不可避免地会与宇宙空间普遍存在的背景粒子发生相互作用, 正是由于这种相互作用形成了“膝区”结构, 而这种相互作用应与核子数有关, 即应有 A 的依

赖性。描述这种过程的有扩散传播加光子裂解模型^[53], 宇宙线和微波背景辐射光子发生相互作用模型^[54], 宇宙线和背景中微子发生相互作用模型^[55], 宇宙线在加速源区和星光发生相互作用模型^[56]等。

(4) 第四类模型: “膝区”是 EAS 在大气中的发展过程中形成的。

高能宇宙线在大气的顶端恰好在“膝区”能量附近发生了新的相互作用过程, 把部分的能量转变成不可观测的(至少是目前无法观测到的)新型粒子, 从而在地面阵列的观测中出现了“膝区”结构。这种可能的新型粒子有引力子^[57]、超高能量的 μ 子^[58]和最轻的超对称粒子^[59]等。

根据最近地面加速器实验欧洲大型强子对撞机(The Large Hadron Collider, LHC)的实验结果, 第四类模型基本上可以被排除。LHC 实验的能量在质心坐标系中已经达到了 8 TeV^[60], 换算成实验坐标系对应的能量已经超过“膝区”的能量, 实验的结果和用标准物理模型得出的强子相互作用模型的预言, 符合得相当好^[61, 62], 没有任何迹象显示有新的物理过程发生。第一类模型中, 如果质子能被加速到的最高能量在 100 TeV 附近, 那么“膝区”的成分应以重核为主; 如果最高能量大于 1 PeV, 那么“膝区”的成分应以轻核为主。同样推断, 第二类模型中, 如果质子在 100 TeV 附近开始从银河系泄漏, 那么“膝区”的成分应以重核为主; 如果质子在 1 PeV 附近开始从银河系泄漏, 那么“膝区”的成分应以轻核为主。第三类模型中, 在这么高能量下重核与背景粒子发生相互作用, 不可避免地会被裂解成较轻的核, 所以“膝区”的成分应以轻核为主。由此可见, 准确地测量“膝区”能谱的成分十分重要, 但遗憾的是, 现有的地面阵列还无法做到这一点。当然, “膝区”很有可能是第一类模型和第二类模型共同作用的结果, 甚至是前三类模型共同作用的结果。要弄明白“膝区”真正的成因还有待于宇宙线实验物理学家和理论物理学家们的继续努力。

4 国内研究者对“膝区”物理研究的贡献

4.1 观测工作

西藏羊八井宇宙线国家野外观测研究站位于北纬 30°13', 东经 90°53' 处, 海拔 4300 m, 距离拉萨市仅 90 km, 拥有中日合作 AS γ 实验和中意合作 ARGO-YBJ 实验两个大型项目, 是北半球最高、世界第二高的宇宙线观测站, 也是高海拔地面站中规模最大、最有前景的一个^[63]。该站以其海拔高、交通便利、能源充足、气候相比而言较为宜人等优势, 成为国际上品质最高的地面宇宙线观测站^[64]。下面就这两大实验项目作一个简单的介绍, 以及它们在“膝区”物理上所做的贡献。

4.1.1 中日合作 AS γ 阵列实验

AS γ 阵列建成于 1990 年, 科学目标是高能伽玛射线的寻找和宇宙线能谱“膝区”物理研究。实验通过采样式的塑料闪烁体探测器阵列获取次级粒子横向分布的信息, 最终得到原初粒子的能量、方向等几何信息。从实验建成开始, AS γ 通过三次扩展加密和一次升级改造来提升阵列的物理指标: 1994 年扩建 AS γ 二期阵列, 野外探测器增至 221 个, 覆盖

36900 m²; 1996 年在其中的约 5000 m² 地面增加了 77 个探测器, 使其探测器间距缩小至 7.5 m, 从而将探测阈能降至国际同类设备的最低值 3 TeV, 实现了对蟹状星云 ≥ 3 TeV 能量 γ 射线的正探测; 1999 年又增加了 255 个野外探测器, 将阵列作了全面加密; 2000 年和 2002 年又分别增加了 133 个测定粒子密度的探头和 180 个快时间探测器, 使得 AS γ 三期阵列一共拥有 733 个野外探测器, 加密区的面积达到 32500 m²。其间, 为了测定超高能宇宙线的成分, 1996 年在阵列中心建造了 80 m² 的高山乳胶室及配套的地方簇射探测器。目前, 中日 AS γ 阵列探测取样比约为 1%, 平均每秒记录 1700 个 (每天 16 GB) 空气簇射事例。经过 10 多年的稳定运行, AS γ 在膝区能谱测量、大尺度各向异性、 γ 天文学、稳定源的暂态爆发 (Mrk421 和 Mrk501)、太阳物理学等方面取得了多项重要成果^[65]。

以羊八井 AS γ 实验为基础, 目前正在进行的与“膝区”物理相关的实验有 YAC (Yangba-jing Air shower Core detector) 计划。该计划通过制作空气簇射轴芯探测器 124 台 (覆盖面积 500 m²), 来记录膝区宇宙线空气簇射芯区的高能电磁成分, 使之与外围的广延大气簇射阵列 (AS), 以及地下 Muon 探测器 (MD) 相联合运行; 利用这三种复合式探测器阵列的联合实验, 来求得 50 TeV~10 PeV 的高精度原初质子和氦的单一成分能谱, 特别是精确地求出原初质子谱和氦能谱的“膝”的位置及其能谱的斜率, 来验证超新星激波加速模型理论和银河系刚度依赖截断的传播模型理论, 从而率先获得膝区质子及其他原子核成分的起源、加速及传播证据。该计划已经获得 2010 年国家自然科学基金天文联合基金的资助, 正在顺利地按计划进行, 预期到 2014 年可以得到足够的数据积累, 从而获得所需要的物理结果。最近 AS γ 实验组对 Tibet-III+YAC-II 阵列的性能进行了计算机 MC 模拟研究, 初步结果显示, 基于联合阵列, 采用人工神经网络方法可以有效区分原初宇宙线的化学成分, 特别对“膝区”能谱的主要成分研究非常有效^[66]。

4.1.2 中意合作全覆盖式探测阵列 ARGO 实验

该实验于 2006 年最终建成并开始运行。ARGO 实验大厅总面积为 11200 m², 由轻质、高保温的聚氨脂彩钢夹心板建成, 在不使用空调的情况下, 可以抑制高海拔地区较大昼夜温差对室内温度的影响, 保证 RPC 探测器工作状态的长期稳定。ARGO 探测器由一个安装在上万平方米实验厅中的 5000 m² 中心“地毯”和一个外围保护圈组成, 共用 1848 个 3.5 m² 的 RPC 探测器, 拥有 18480 个快时间和粒子数信号通道, 近 2000 个微电子学插件, 154 个电子学子站和一个数据采集中心站。全部运行时其 EAS 触发率可达 3.4 kHz, 日产原始数据约 630 GB, 是迄今非加速器物理实验中数据量最高的一个^[65]。

羊八井 AS γ 阵列和 ARGO 实验在“膝区”上所取得的成就:

(1) 1996 年, 羊八井 AS γ 实验发表了“膝区”宇宙线全粒子谱, 得到许多学者的认同, 是当时最为精确的“膝区”能谱之一^[28]。

(2) 2008 年, 羊八井 AS γ 实验再次发表了升级版的“膝区”宇宙线全粒子谱, 被誉为是这个能区统计性最高、系统控制得最好的一次测量^[29]。而且还得出了尖锐“膝”的形状及“膝”拐折的精确位置。

(3) 2006 年羊八井 AS γ 实验发表了“膝区”成分的报告, 得出了“膝区”主要成分是比较

氦核更重的原子核, 实验数据的核碰撞相互作用的依赖度小于 30% 的结论^[30]。该研究结果在宇宙线国际会议上发表时, 引起极大关注, 并被广泛引用。这不同于 KASCADE 实验得出“膝区”主要成分是质子的结论^[31], 但 KASCADE 实验对核碰撞相互作用的依赖度可能超过 300%。

(4) ARGO-YBJ 实验 2012 年发表了 5~200 TeV 能量范围的轻核 (P、He) 原初宇宙线能谱, 跟最近的高空气球实验 CREAM 数据一致^[67]。这是历史上首次在原初宇宙线成分测量上实现地面阵列间接测量数据与直接测量数据如此完美的对接, 使得 ARGO-YBJ 实验在更高能区的测量数据具有更高的可信度, 也可以成为其他阵列能量定标的一个基准。

4.2 “膝区”的理论研究

中国研究人员对“膝区”的成因作了较为深入的研究^[56, 68]。他们受到 ATIC (Advanced Thin Ionization Calorimeter)、PAMELA (a Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics)、HESS (The High Energy Stereoscopic System) 和 Fermi 实验 (Fermi Gamma-ray Space Telescope) 观测到正负电子反常超出的启发, 提出了一个新的模型, 试图同时解决“膝区”问题和正负电子超出的观测结果。该模型认为“膝区”的成因是由于加速源区光核相互作用产生正负电子对 ($p\gamma \rightarrow p+e^+e^-$)。在某些宇宙线加速源里, 背景光子密度非常大, 高能宇宙线将不可避免地 and 背景光相互作用。对于能量大约为 1 eV 的可见光, 当宇宙线的能量达到 1 PeV 的时候, 产生正负电子对的反应发生了, 这恰恰对应着“膝”区能量; 当相互作用发生的时候, 高能宇宙线粒子将损失自身的一部分能量, 导致宇宙线能谱更快地下降, 因此在电子对产生能量点前后宇宙线能谱出现了两种不同的能谱指数, 这恰恰解释了宇宙线能谱的“膝”。同时, 产生的正负电子对也能解释最近观测到的正负电子的超出。对相互作用过程的详细模拟结果进一步显示, 阈能附近的堆积效应能很好地解释宇宙线能谱尖锐的“膝”。由于不同宇宙线成分的电子对产生有不同的阈能, 在这个相互作用模型中“膝”区附近的精细结构也能够重新产生出来。最后, 对于比阈能更高的宇宙线粒子, 电子对产生的相互作用变弱, 可以自然解释所谓的银河系宇宙线“B 成分”问题。

5 研究展望

中日合作 AS γ 阵列实验和中意合作全覆盖式探测阵列 ARGO 实验, 地处西藏羊八井镇, 海拔 4300 m, 高度正好处于“膝区”原初宇宙线粒子 EAS 次级粒子发展到极大的地方, 因此成了世界上研究“膝区”物理最佳的位置。但由于该观测站目前观测的手段还比较单一, 使这个巨大优势没有得到很好的发挥。拥有电子和 μ 子探测器及最大的强子量能器等多种探测手段的德国 KASCADE 实验, 虽被认为是世界上最优质的探测器阵列, 但其位于海平面, “膝区”EAS 次级粒子发展已处于衰弱阶段。从图 4 中可以看出, KASCADE 实验所处的海拔高度与西藏羊八井的海拔高度相比粒子数下降了将近一个量级, 测量“膝区”大气簇射尾部的次级粒子涨落大, 被观测粒子经过许多代的作用, 对初级成分已不够灵敏, 对相互作用模型的依赖大。依据不同的相互作用模型, KASCADE 实验测量出的单成分能谱结果存在很大的

差别,甚至会出现相互矛盾的结果;KASCADE 实验对核碰撞相互作用的依赖度有可能大于 300%,而中日合作 AS γ 阵列实验由于地处“膝区”粒子 EAS 发展的极大处,对核碰撞相互作用的依赖度在 30% 以内。

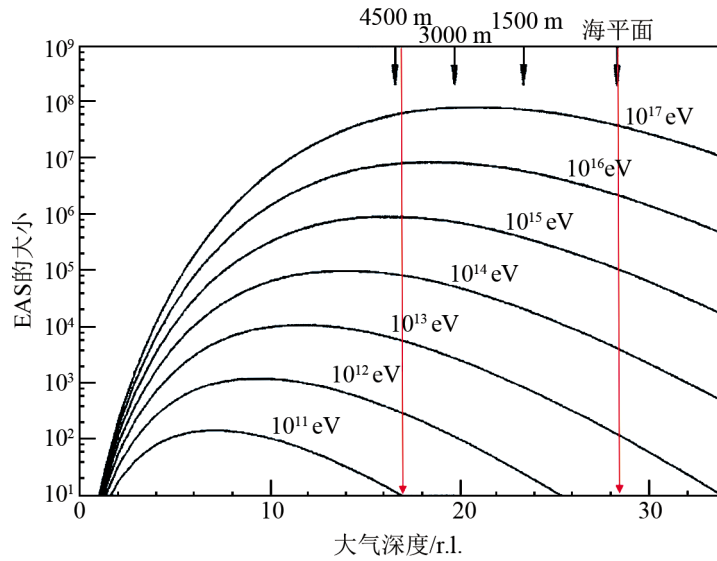


图 4 EAS 的大小随海拔高度的发展图^[69]

左边的箭头所标示的是西藏羊八井实验所在的海拔高度,右边的箭头所标示的是 KASCADE 实验所在的海拔高度。

科学家们自然而然就会有这么一种想法:如果把多种探测手段移植到羊八井宇宙线观测站上,就会使羊八井蕴含的地理优势所带来的宇宙线物理研究的巨大潜力得到充分的发挥,西藏羊八井国际宇宙线观测站必将成为世界上“膝区”物理研究最精确、最强大和最优化的地面阵列。正是在这样的国际宇宙线研究背景之下,LHAASO 项目 (Large High Altitude Air Shower Observatory, 大型高海拔空气簇射观测站) 被适时地提了出来^[70,71],LHAASO 项目是获得国务院批准的《国家重大科技基础设施建设中长期规划 (2012—2030 年)》16 个项目之一,已列入国家发改委“十二五”重点建设规划。LHAASO 项目的科学目标之一就是宇宙线能谱和成分的精确测量,做到对轻、重两种成分的完全独立测量,并首次确定单成分“膝”的位置,从而彻底改变持续了数十年之久的膝区测量混乱局面。

LHAASO 项目探测器建设如图 5 所示,可分为如下 3 个部分:1 平方公里地面簇射粒子阵列,包括 2400 个电子/光子探测器、4 万平方米分布式 μ 子探测器、28 台大气荧光暨契伦科夫探测器和 1000 平方米簇射中芯探测器;9 万平方米水契伦科夫探测器;两台契伦科夫成像望远镜。这样一个探测器阵列,将对传统的宇宙线观测研究产生巨大的影响,特别是对受到特别关注的两个“膝”区,即从 10 TeV 到 1 EeV 跨越 5 个量级的宽广能区的能谱和成分做出最佳的测量;这个能区的空气簇射发展刚好在羊八井的高度达到极大,最适合于能量和成分的精确测量,只要适当增加其他种类的探测器,如 28 台大气荧光暨契伦科夫探测器和 1000 平方米簇射中芯探测器,就能实现上述科学目标,有望结束具有长达 50 年观测历史

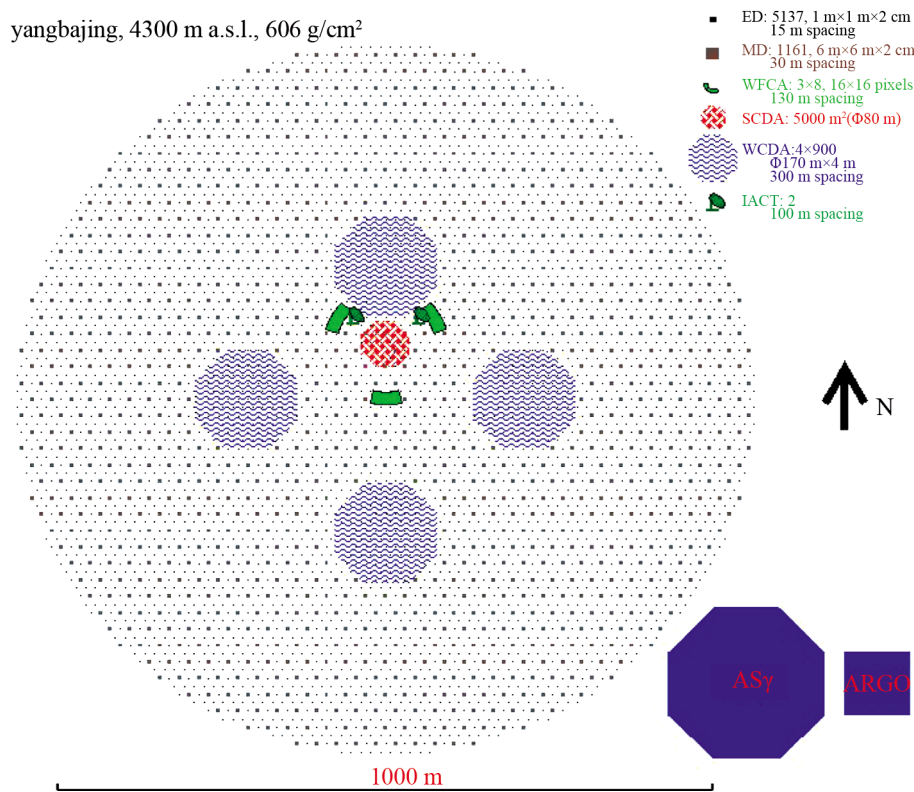


图5 LHAASO 阵列的整体布局图

的“膝”区研究的争论, 精确测定“膝”的位置, 对最终弄清“膝”的产生机制, 以及银河系内外宇宙线产生起源的能量分界点和在宇宙空间的传播机制等一系列重大问题做出结论性的回答^[72]。

虽然地面阵列已经选择最佳的观测地点和具备多种的观测手段, 且具有不受探测器接收度(面积及时间)的限制、造价低廉、易于维护等优势, 但是地面阵列有着自身无法克服的困难^[73], 因为地面阵列必须从EAS观测量重建初级粒子的能量及粒子的成分, 在重建过程中有许多不确定性, 主要表现在两个方面:

(1) 事例能量的重建依赖于 Monte Carlo 采用的强相互作用模型, 而强相互作用模型的建立依赖于加速器实验。在质心系总能量 2 TeV 以上能区的朝前区^[74], 加速器实验未能提供建立模型的信息, 因此目前所建立的模型具有不确定性^[75]。

(2) 事例的重建还依赖于 Monte Carlo 采用的成分模型。成分模型的建立来自于直接测量。在高于 100 TeV 的能量区, 直接测量未能提供建立成分模型的依据。

也就是说, 当我们研究在某一组选择条件下选出的“膝区”事例样本, 既可以选择调整强相互作用模型, 也可以选择调整成分。由于目前这两方面实验上都没有给出足够的限制, 就不可避免地陷入了成分和模型相互缠绕的怪圈。也就是目前地面阵列研究“膝区”物理所

面临的最大的难题——“二义性”困扰。要解决这个困扰，一方面需要地面加速器对质心系总能量 2 TeV 以上能区的朝前区提供更多的信息，目前 LHC 的能量在实验坐标系中已达到 100 PeV，并扩大了对朝前区粒子的观测范围，这方面已渐露曙光；另一方面，需要空间实验和高空气球实验把直接测量的成分推到更高的能量，这需要将来空间探测技术的进一步发展。相信在地面阵列建设、地面加速器和空间探测这三方面共同的发展下，“膝区”问题终将会得到全面的解决。

致谢

感谢中国科学院高能物理研究所袁强博士和冯朝阳博士对本论文提出的有益建议及提供的资料。

参考文献:

- [1] Hess V. *Phys. Zeitschr*, 1912, 13: 1084
- [2] Kolhörster W. *Phys. Zeitschr*, 1925, 26: 654
- [3] Anderson C D. *Physical Review*, 1932, 41: 405
- [4] Neddermeyer S H, Anderson C D. *Physical Review*, 1937, 51: 884
- [5] Powell C F, et al. *Nature*, 1947, 160: 486
- [6] 胡红波. *现代物理知识*, 2011, 23: 33
- [7] Hess V F. *Nobel Lectures in Physics 1922—1941*, Amsterdam: Elsevier, 1965: 360
- [8] Nagano M, Watson A A. *Rev. Mod. Phys*, 2000, 72: 689
- [9] 马宇倩. *物理学进展*, 1998, 18: 384
- [10] Kulikov G, Khristiansen G. *JETP*, 1958, 35: 635
- [11] Hröandel J R. *Astropart. Phys*, 2003, 19: 193
- [12] Bird D J, et al. *Phys. Rev. Lett*, 1993, 71: 3401
- [13] Lawrence M A, Reid R J O, Watson A A. *J. Phys. G*, 1991, 17: 733
- [14] Nagano M, et al. *J. Phys. G*, 1992, 18: 423
- [15] Hillas A M. *J. Phys. G*, 2005, 31: R95
- [16] Wibig T, Wolfendale A. *J. Phys. G*, 2005, 31: 255
- [17] Berezhinsky V S, Grigorieva S I, Hnatyk B I. *Astropart. Phys*, 2004, 21: 617
- [18] Greisen K. *Phys. Rev. Lett*, 1966, 16: 748
- [19] Zatsepin G T, Kuzmin V A. *Pis' ma Zh. Eksp. Teor. Fiz*, 1966, 4: 114
- [20] Zatsepin G T, Kuzmin V A. *JETP. Lett*, 1966, 4: 78
- [21] Abbasi R U, et al. *Phys. Rev. Lett*, 2008, 100: 101101
- [22] Abraham J, et al. *Science*, 2007, 318: 938
- [23] Tkachev I, et al. *ICRC*, 2011, 2: 281
- [24] 王新. *物理学进展*, 2004, 24: 300
- [25] Bothe W, Kolhörster W. *Zeitschr. f. Phys*, 1929, 56: 751
- [26] Kolhörster W, et al. *Naturwissenschaften*, 1938, 26: 576
- [27] Auger P, et al. *Comptes rendus*, 1938, 206: 1721
- [28] Amenomori M, et al. *APJ*, 1996, 461: 408
- [29] Amenomori M, et al. *APJ*, 2008, 678: 1165
- [30] Amenomori M, et al. *Phys. Lett. B*, 2006, 632: 58
- [31] Haungsa A, et al. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, 2006, 151: 167

- [32] H \ddot{r} andel J R. *Astropart. Phys.*, 2004, 21: 241
- [33] Axford W, et al. *Proc. of 15th Int. Cosmic Ray Conf.*, 1977, 11: 132
- [34] Krymsky G. *Dok. Acad. Nauk USSR*, 1977, 234: 1306
- [35] Bell A. *MNRAS*, 1978, 182: 147
- [36] Blandford R D, Ostriker J P. *Astrophys. J.*, 1978, 221: L29
- [37] Berezhko E, Ksenofontov L. *JETP*, 1999, 89: 391
- [38] Kobayakawa K, et al. *Phys. Rev. D*, 2002, 66: 083004
- [39] Stanev T, Biermann P L, Gaisser T K. *Astronom. Astrophys.*, 1993, 274: 902
- [40] Sveshnikova L, et al. *Astronom. Astrophys.*, 2003, 409: 799
- [41] Erlykin A, Wolfendale A J. *Phys. G*, 2001, 27: 1005
- [42] V \ddot{o} lk H J, Zirakashvili V N. *Proc. of 28th Int. Cosmic Ray Conf.*, Tsukuba, 2003, 4: 2031
- [43] Plaga R. *New Astronomy*, 2002, 7: 317
- [44] Wick S, et al. *Astropart. Phys.*, 2004, 21: 125
- [45] Dar A. *Nuovo Cim. B*, 2005, 120: 767
- [46] Wandel A. arXiv: astro-ph/9709133
- [47] Ogio S, Kakimoto F. *Proc. of 28th Int. Cosmic Ray Conf.*, Tsukuba, 2003, 1: 315
- [48] Roulet E. *Int. J. Modern Phys. A*, 2004, 19: 1133
- [49] Lagutin A, et al. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, 2001, 97: 267
- [50] Swordy S. *Proc. of 24th Int. Cosmic Ray Conf.*, Rome, 1995, 2: 697
- [51] Ptuskin V, et al. *Astronom. Astrophys.*, 1993, 268: 726
- [52] Candia J, et al. *J. Cosmology Astropart. Phys.*, 2003, 0305: 003
- [53] Karakula S, Tkaczyk W. *Astropart. Phys.*, 1993, 1: 229
- [54] Candia J, et al. *Astropart. Phys.*, 2002, 17: 23
- [55] Dova M T, et al. preprint astro-ph/0112191
- [56] Hong-Bo Hu, et al. *APJ*, 2009, 700: L170
- [57] Kazanas D, Nikolaidis A. *Gen. Rel. Grav.*, 2001, 35: 1117
- [58] Petrukhin A. *Phys. Atom. Ncl.*, 2003, 66: 517
- [59] Kazanas D, Nicolaidis A. preprint astro-ph/0103147
- [60] "LHC physics data taking gets underway at new record collision energy of 8TeV". *Press.web.cern.ch*. 5 April 2012. Retrieved 2012-04-05
- [61] Pierog T, et al. *Proc. of 32nd Int. Cosmic Ray Conf.*, Beijing, 2011, 1: 1169
- [62] H \ddot{r} andel J R. *Proc. of 32nd Int. Cosmic Ray Conf.*, Beijing, Highlight and Rapporteur talks "Rapporteur talk HE2 & HE3" in press (2012)
- [63] 卢红. *工程研究——跨学科视野中的工程*, 2010, 2: 53
- [64] 陈天禄, 刘茂元, 单增罗布等. *西藏大学学报 (自然科学版)*, 2011, 26: 103
- [65] 中国科学院高能物理研究所. *大科学装置*, 2010, 25: 461
- [66] Amenomori M, et al, 2013, arXiv:1303.2919
- [67] Bartoli B, et al. *Phys. Rev. D*, 2012, 85: 092005
- [68] WANG Bo, et al. *SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy*, 2010, 53: 842
- [69] 阿尔科费尔 O C. *宇宙线入门*. 徐春娴, 朱清其译. 北京: 科学出版社, 1987: 119
- [70] Cao Z. *CPC(HEP & NP)*, 2010, 34: 249
- [71] 何会海. *中国技术科学进展报告 (第一卷)*, 2009, 1: 221
- [72] 刘玉娟. 硕士论文. 河北: 河北师范大学, 2011: 12
- [73] 张颖. 硕士论文. 四川: 西南交通大学, 2011: 14
- [74] Armstrong T A, et al. *Phys. Lett. B*, 1996, 385: 479
- [75] Popova L. *Nucl. Phys. B*, 1997, 52: 143

Introduction to Knee Region of Cosmic Rays and Developments of Observations and Studies in China

LI Hai-jin^{1,2}, CHEN Tian-lu^{1,2}, LIU Mao-yuan^{1,2}

(1. Physics Department of Science School, Tibet University, Lhasa 850000, China; 2. The Key Laboratory of Cosmic Rays, Ministry of Education, Lhasa 850000, China)

Abstract: Cosmic rays have been discovered for one hundred and one years, it plays a significant role in particle physics and astrophysics. However, the origin, acceleration, propagation of cosmic rays is still a mystery, the knee region physics of it is a critical problem.

Firstly, we introduce the histories and spectrum structure of cosmic rays briefly.

Secondly, the observations, the discrepancies and hot spot of argument among several important ground-based arrays experiments are summarized, especially such as the Tibet AS γ Array and the KASCADE Array. We also introduce the outstanding theory work of Dr. Hröandel.

Thirdly, numerous mechanisms are proposed to explain the knee structure in the all-particle spectrum. In the article basic ideas of several models are summarized, including diffusive acceleration of cosmic rays in shock fronts, leakage from the Galaxy, interactions with background particles in the interstellar medium, as well as new high-energy interactions in the atmosphere. Combined with the new results of LHC, we conclude the new high-energy interactions between the cosmic rays and the atmosphere almost doesn't exist.

Fourthly, the remarkable and convincing result on the structure in the all-particle spectrum of the Tibet AS γ array, the new result from 5~200 TeV of the ARGO-YBJ array are summed up, the two arrays are located in the Tibet Antonymous Region of China. The prominent work of some Chinese scientists is also introduced, and new models can explain the common origin of the subtle features of the cosmic ray spectra, such as the knee of cosmic ray spectra and the excesses of electron/positron fluxes recently observed by ATIC, H.E.S.S., Fermi-LAT and PAMELA.

Lastly, we prospect the future outlook of knee region physics. We point out the Yangbajing International Cosmic rays observatory is the optimum place to observe the knee fine structure because of the best conditions, such as the suitable altitude (4300m.a.l), more than twenty years observations, convenient transportation, ample power and so on. The upgraded Tibet AS γ array (Tibet AS γ +YAC) and the new project LHAASO are dedicated to study knee physics of cosmic rays.

Key words: particle physics; cosmic rays; knee region; ground-based array