

怀柔 EAS 阵列对初级宇宙线 “膝”区能谱的测定

罗光宣 谭有恒 张春生 董玉琚 袁 澎

张慧敏 王 辉 袁余奎 力 京

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1994-07-14 收稿

摘 要

仔细分析了近年来怀柔广延大气簇射阵列记录的 65 万个大气簇射事例,得到了簇射 Size (即荷电总粒子数)谱和 10^{15} — 5×10^{16} eV 能段的初级宇宙线微分能谱。此谱呈明显的、平滑过渡的“膝”样结构,拐点在 3×10^{15} eV 附近。除了“膝”较平滑不象明野谱那样尖锐转折而外,怀柔谱在绝对流强和“膝”的位置上都与日本明野组吻合得很好。在银河磁场刚度截止模型框架下,怀柔实验 Size 谱界定的宇宙线质子谱拐折能量 E_c 的取值范围在 160 到 240 TeV 之间。

关键词 宇宙线,广延大气簇射 (EAS), EAS 阵列,簇射 Size, 初级宇宙线能谱,“膝”。

1 引 言

一些宇宙线实验揭示的初级宇宙线全粒子能谱在稍高于 10^{15} eV 处的“膝”样拐折,由于关系到银河宇宙线的起源、传播和成分,长期以来一直是人们关注的焦点之一。其成因,可能源于银河系星际磁场对宇宙线各主要成分的约束力在 10^{15} eV 之后相继失效而发生的银河粒子的泄漏^[1],从而使能谱陡化并伴以对各核成分的银河调制;也可能是银河宇宙线源的物理条件和加速机制限制了高于 10^{15} eV 宇宙线粒子的产生;甚至也不排除某种未知的超高能作用阈效应对 EAS 观测的影响。但由于超高能宇宙线流强很弱,气球和卫星上的直接观测相当困难,能量高至“膝”区时测量误差太大;而对一般 EAS 阵列的间接测量这里又正值其可测能区之低端,取样到的粒子数少因而也难于测准。因此关于“膝”的存在及其细致结构,至今还缺乏一致而精确的数据^[2],对“膝”的测量及其相关物理问题的研究依然是个十分重要又十分艰巨的课题。

怀柔阵列(见图 1)^[3]由于地处海平面且闪烁体的面积不大,一般说来对此项测量没有优势。因此,为提高测量的精度和可靠性,着重在大统计量和细致分析上下了功夫:用了近两年积累的约 65 万 EAS 事例,改进了 EAS 重建程序^[4],仔细选择了事例判选的标

准,使可测能量的低端下移至 $5 \times 10^{14} \text{eV}$ 并提高了事例重建的精度和速度。产生了 36 万

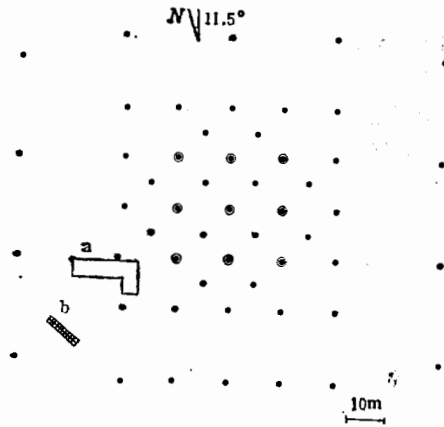


图1 怀柔 EAS 探测器阵列

○ 同时测定到达时间和粒子密度的闪烁探测器 (0.25 m²), ● 测定粒子密度的闪烁探测器 (0.25 m²), a. 控制室 b. 20m² μz 探测器。

个 Monte Carlo EAS 事例,对仪器的响应和实验结果作了大量的模拟^[2],对数据的正确性作了一系列的检验。例如,事例率、天顶角分布、阵列的 EAS Size 响应等,实验与模拟间都符合得很好。

2 实验和事例的筛选

怀柔 EAS 阵列自 1988 年建成并投入观测以来,曾三度改变触发条件。本工作使用的是 1991 年 4 月以来积累的约 65 万个 EAS 事例。它们是在下述硬件判选条件下被触发记录的:在阵列中心的第 13 号探测器被 1 个以上的 EAS 粒子击中的同时,第 1 到第 25 号探测器中的任意 9 个(第 13 号

除外)有幅度相当于 0.5 个以上的单粒子的信号输出,即所谓的“any-10”触发条件。

在基于各探测器的粒子密度和到达时间信息进行 EAS 重建之前,还要经过一个检查软件排除少数因硬件误触发或有电子学故障的事件。通过了这种检查的有 65 万个事例。将它们的原始数据和各探测器的标定参数作为输入,以新改进的快速重建程序^[4]去进行 EAS 重建,拟合 EAS 参数。这样得以正常重建者有约 50 万事例。

用于物理分析的事例还必须是那些落在阵列测得准、效率高的区域内的 EAS。为此,经过种种试验,采取了下列软件判选标准:

- (1) 年龄参数 $S \in [0.15, 1.85]$ 。
- (2) 所有着火探测器记录到的粒子密度之和 $\geq 240/\text{m}^2$ 。
- (3) 未着火探测器数目 ≤ 25 个。
- (4) 心距(即 EAS 轴到阵列中心的距离) $r < r_0(N, \vartheta)$ 。不同 Size(N) 和天顶角(ϑ)区间的 r_0 值由实验事例用“ r^2 法”统计得出。此外,为保证近 100% 的探测效率,还只选用 $\vartheta < 17.75^\circ$ 的自近垂直方向到达的 EAS 作微分能谱测量。

为检验上述事例选择标准的无偏性,对这些 EAS 事例的参数作过多种统计分布,如天顶角、Size、年龄、心位、赤经、赤纬分布等。它们都与预期或 Monte Carlo 模拟分布符合得很好。

3 结果和讨论

将经过上述严格筛选的 EAS 事例分 Size 和天顶角区间计算流强和进行统计处理。在流强计算中,有效观测时间由运行时间扣除中间发生的死时间得到;各 (N, ϑ) 区间的阵列有效收集面积由 $\pi r_0^2(N, \vartheta)$ 得到,立体角由 $\int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \sin \vartheta d\vartheta$ 得到。统计分析产生

了下列结果.

3.1 EAS Size 谱

各天顶角区间的积分和微分 Size 谱均已获得. 图 2 为 7 个天顶角区间的 EAS 积分 Size 谱. 它们全有拐折显示.

3.2 初级宇宙线(总粒子)能谱

相关的 Monte Carlo 研究给出以天顶角小于 17.75° 到达怀柔阵列的 EAS 的 Size 与其初能 E 的关系如下:

$$E = 10^{10.64} N^{0.84} (\text{eV}). \quad (1)$$

利用(1)式作转换关系式, 基于 $\theta = 0^\circ - 17.75^\circ$ 的实验 Size 谱, 得到了初级宇宙线的能谱. 图 3 给出了怀柔阵列测得的宇宙线“膝”区能谱. 为便于比较, 被广泛引用的日本明野谱和低端的前苏联“质子”卫星直接测量谱也画在图中. 为保证足够的精确度, 采用的怀柔数据跨度不够宽, 难以准确给出“膝”前和“膝”后的能谱

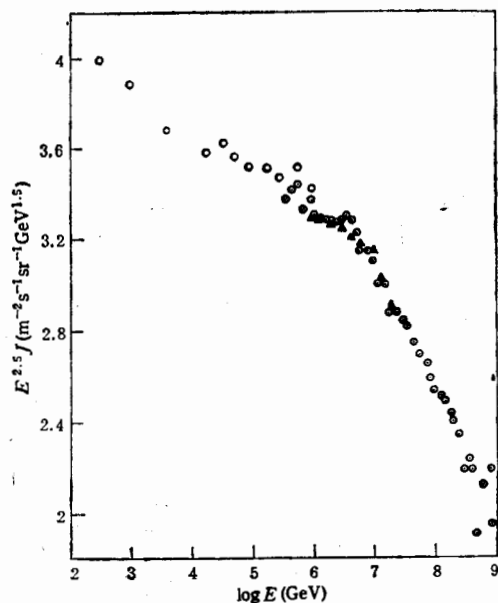


图 3 初级宇宙线的全粒子微分能谱
怀柔数据(\blacktriangle)与“proton”卫星数据(\circ)和 Akeno
EAS 数据(\odot)的比较.

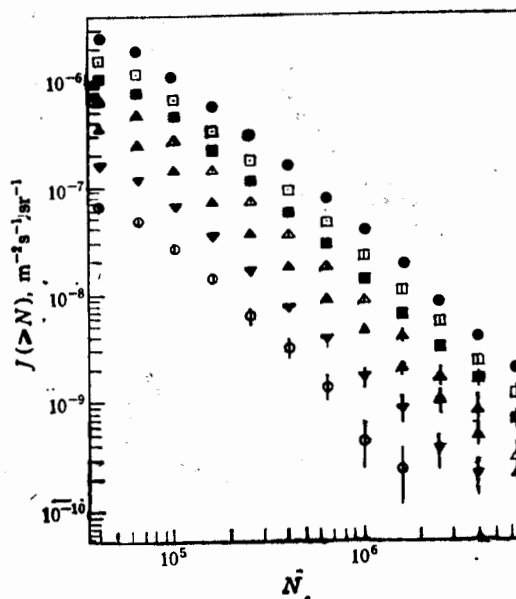


图 2 不同天顶角区间的实验 Size 谱

\bullet 、 \square 、 \blacksquare 、 \triangle 、 \blacktriangle 、 ∇ 和 \circ 分别代表如下天顶角区间: $\sec \vartheta \in$
[1.00, 1.05]、[1.05, 1.10]、[1.10, 1.15]、[1.15, 1.20]、
[1.20, 1.30]、[1.30, 1.40]、[1.40, 1.50]

指数, 但它们刚好覆盖“膝”区, 并给出如下明确信息: 证实宇宙线能谱“膝”结构的存在; 怀柔谱在流强和“膝”位 ($\sim 3 \times 10^{15} \text{eV}$) 上与明野谱相当一致, 但没有明野谱那种尖锐的肩状拐折而呈平滑过渡的“膝”样结构.

3.3 初级质子谱拐折能量的估计

EAS 阵列不能区分引起 EAS 的初始粒子的成分, 然而借助于 Monte Carlo 模拟和关于能谱的公认的知识, 怀柔的观测数据可以为质子谱的拐折能量 (相应于质子自银河逃逸的特征能量) E_0 界定一个范围.

宇宙线是由多种裸原子核混合组成的. 设第 i 种成分的电荷数为 Z_i , 则按照银河磁场刚度截断模型, 其 Lamor 半径

$$R_i = \frac{1}{Z_i} \cdot \frac{100p}{3H} \quad (\text{cm}), \quad (2)$$

其中 p 为宇宙线粒子的动量 (eV/c), H 为星际磁场的平均强度 (T). 由于轻核的 R_i 大, 随着能量的升高质子将得以最先摆脱银河磁场的约束而发生质子流自银河系的泄漏, 从而使质子谱在 $E \approx E_c$ 处开始拐折. 接着是 He 核能谱在 E_{c2} 拐折 ($E_{c2} > E_{c1}$), 等等.

设第 i 种宇宙线成分的微分能谱为

$$J_i = \begin{cases} a_{i1} \cdot E^{b_{i1}}, & \text{当 } E \leq E_{ci}, \\ a_{i2} \cdot E^{b_{i2}}, & \text{当 } E > E_{ci} \end{cases} \quad (3)$$

由于 $a_{i2} = a_{i1} \cdot E_{ci}^{b_{i1}-b_{i2}}$, J_i 只有四个独立参量, 即 $a_{i1}, b_{i1}, b_{i2}, E_{ci}$. 其中 $E_{ci} = Z_i \cdot E_c$. b_{i2} 没有成份的直接测量, 但许多 EAS 实验组对全粒子谱的幂指数 b_2 有着较一致的测量值, 可以假定任何成份组有一样的“膝”后谱指数: $b_{i2} = b_2 = -3.1$. “膝”前的各成份谱参数 a_{i1} 和 b_{i1} 则可由 TeV 到数十 TeV 能区的直接测量数据拟合得到^[8]. 这里把宇宙线分成 7 个成份组, 它们的相关参数列于表 1.

表 1

组序 (i)	1	2	3	4	5	6	7
组名	H 核	He 核	轻核	轻重核	中重核	重核	Fe 核
Z_i	1	2	7	12	17	23	26
b_{i1}	-2.70	-2.79	-2.64	-2.70	-2.47	-2.52	-2.60
a_{i1}	1.10	0.87	0.31	0.51	0.0076	0.013	0.10

注: a_{i1} 的单位为 $\text{GeV}^{b_{i1}}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{GeV}$

定义

$$\chi^2 = \sum_k (J_{k,\text{MC}} - J_{k,\text{ex}})^2 / \sigma, \quad (4)$$

即怀柔实验 Size 谱与 Monte Carlo 模拟 Size 谱的相应流强的差之加权平方和, 为预期值与实验值间的符合度的一个标志量. 在模拟计算中依次在 10^{12} — 10^{16} eV 中选取 E_c 输入值, 得到如图 4 所示的 χ^2 - E_c 关系. 它的拟合曲线显示, χ^2 最小发生在 $E_c \approx (160-240) \times 10^{12}$ eV 区间. 这是国际上首次用 EAS 阵列数据对宇宙线初级质子谱的拐折能量所作的估计, 其取值区间与 JACEE 气球乳胶室测得的 $(80-150) \times 10^{12}$ eV 和富士山、甘巴拉高山乳胶室得到的 $(100-300) \times 10^{12}$ eV 相近.

用上述参数描述的 7 组分能谱之和与怀柔全粒子谱正好一致. 可以说, 怀柔谱所展示的平滑过渡型“膝”结构与所谓“通常混合成分”(即类似于 10^{12} eV 能区的宇宙线成分)加刚度截断模型相一致. 如果银河超高能宇宙线并非来自少数几个源而是很多源分散贡献的集合的话, 怀柔谱也不排除主要河内宇宙线源的加速能力在“膝”区截止的假说, 或者说

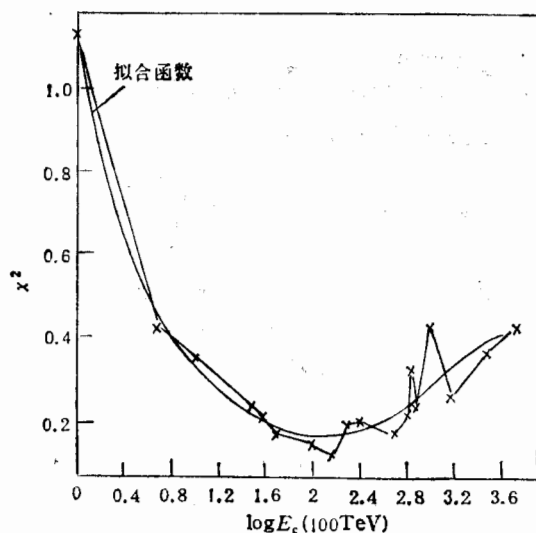


图 4 Monte Carlo 模拟 Size 谱与怀柔实验 Size 谱的符合度和质子谱拐折能量 E_c 的关系

与两种情形的并存也不矛盾。

以上结果也说明,怀柔 EAS 阵列的硬件和软件是经过考验的,具备以大统计量在特定能区作准确测量的能力。在阵列收缩加密后,预期能把能谱测量有效下扩至 10^{14} eV 区域。将它与将来的羊八井观测能谱作比较研究,将能导致对宇宙线能谱拐折成因的更深入的认识。

作者感谢霍安祥、丁林培先生和孙欣新、曹臻同志的有益讨论和建议,感谢孟烈、施志政、王挺鹤、王焕玉同志在实验和设备建设上的贡献。本文作者罗光宣感谢贵州大学物理系对本人工作的支持。

参 考 文 献

- [1] B. Peters, *Nuovo Cimento* (suppl.), **14**(1959)436; *ibid*, **22**(1961)800.
- [2] M. Ichimura et al., Proc. 23rd ICRC, **2**(1993)5.
- [3] Tan, Y. H. et al., Proc. 21st ICRC, (1990) HE, 7.3.
- [4] 罗光宣等,〈怀柔实验总结报告〉,1994.
- [5] 罗光宣等,“怀柔 EAS 阵列的 Monte Carlo 研究”,高能物理与核物理,待发表.
- [6] M. Nagano et al., *J. Phys. G.*, **10**(1984)1295.
- [7] N. L. Grigorov et al., Proc. 12nd ICRC, **2**(1971)206.
- [8] 张春生“宇宙线超高能核作用事例特征及其有关现象的研究”,博士论文,中国科学院高能物理所,1990.

Primary Energy Spectrum of Cosmic Ray at the "Knee" Region Observed with the Huairou Air Array

Luo Guangxuan Tan Youheng Zhang Chunsheng Dong Yuju
Yuan Peng Zhang Huimin Wang Hui Yuan Yukui Li Jing
(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

Received 14 July 1994

Abstract

650 thousands of EAS events recorded by Huairou EAS Array have been analysed carefully. The Size spectrum and primary energy spectrum in the region from 10^{15} to 10^{16} eV are obtained. The energy spectrum shows a clear and smooth "Knee" structure around 3×10^{15} eV. Except the smooth steep feature of "Knee", it is consistent very well with Akeno spectrum. Under the assumption of so-called rigidity-dependent cut model, by adjusting the breaking energy E_c of primary proton spectrum in the Monte Carlo simulation and comparing with the experimental spectrum, we found that the proper value of E_c is in the energy range from 160 to 240TeV.

Key words cosmic ray, extensive air shower (EAS), EAS array, shower size, energy spectrum of primary cosmic ray, "Knee" structure.