

# 宇宙线大气簇射 $\mu$ 子定点密度 及原初能谱“膝”的研究

刘俊<sup>1,1)</sup> 耿庆熹<sup>1</sup> 杨洪涛<sup>1</sup> 刘长钦<sup>1</sup> 张品<sup>1</sup> 高晓宇<sup>1</sup>  
经才骝<sup>2</sup> 查敏<sup>2</sup> 荆贵茹<sup>2</sup> 朱清棋<sup>2</sup> 张增<sup>3</sup> 吴本韩<sup>4</sup>

1 (云南大学宇宙线研究所 昆明 650091)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

3 (香港城市大学 香港)

4 (香港教育学院 香港)

**摘要** 用梁王山宇宙线观测站的数据研究宇宙线大气簇射  $\mu$  子定点密度谱,谱呈现明显的拐折. 通过 Monte Carlo 模拟,得到拐点对应的能量约为  $1.7 \times 10^{15}$  eV,拐点左右原初能谱指数差约为 0.43,证实了 KASCADE 实验  $\mu$  子定点密度谱呈现拐折的首次观测结果,又一次推证了原初宇宙线能谱膝的存在.

**关键词**  $\mu$  子定点密度谱 膝 原初宇宙线能谱

## 1 引言

宇宙线总粒子的能谱服从幂律  $E^{-\gamma}$ : 低于  $10^{14}$  eV,  $\gamma \approx 2.6$ ; 在  $10^{15}$  eV 到  $10^{16}$  eV 能区,能谱变陡; 高于  $10^{16}$  eV,  $\gamma \approx 3.0$ . 通常把能谱变化的区域称为“膝”区. 在一个平滑的能谱上出现这种明显的拐折,通常都关系到高能宇宙线粒子的起源、加速、传播机制以及超高能相互作用等一系列宇宙线、高能天体物理的基本问题,具有特殊的物理意义. 自从 1958 年 MSU 组发现宇宙线大气簇射的大小谱存在膝以来,膝现象一直是人们关注的焦点,对于膝的位置、形态、以及由此关联到的宇宙线起源、加速机制和原初成分等问题的争论一直没有停止过.

低能量的宇宙线可以用高空气球或人造卫星进行直接测量,目前直接测量能区已达到了  $10^{14}$  eV. 由于原初宇宙线流强随能量增加而迅速减小,对于能量超过  $10^{14}$  eV 的宇宙线,目前还只能采用地面阵列探测它们所产生的广延大气簇射(EAS),根据由此得到的电子大小谱和 Monte Carlo 模拟的比较推断原初粒子的能谱<sup>[1]</sup>,由于各实验组所处位置、采用的

探测器以及模拟模型的不同,加之大气簇射发展中的随机涨落较大,使得所得的结果难以直接比较.

1999 年 KASCADE<sup>[2]</sup> 用大气簇射探测阵列中的多丝正比室测得了离大气簇射轴心两个固定距离处的大气簇射定点  $\mu$  子密度谱,发现在密度值分别为  $0.26 \text{ m}^{-2}$  和  $0.18 \text{ m}^{-2}$  附近有明显的拐折,这是世界上首次观测到  $\mu$  子密度谱有拐折,并由此推断原初能谱在  $5 \times 10^{15}$  eV 附近有拐折. 用大气簇射的  $\mu$  成分研究原初能谱与一贯采用的大气簇射电子成分(大小谱)不同, $\mu$  子密度是直接测量量不需要由重建获得,而且  $\mu$  子较为稳定,随大气深度变化缓慢,在这个意义上,用  $\mu$  子定点密度推断原初能谱较传统的大小谱更为直接.

本文用云南大学宇宙线研究所梁王山观测站<sup>[3]</sup> 的数据进行了类似的分析,结果也显示了  $\mu$  子密度谱有明显的拐折,通过 Monte Carlo 模拟将  $\mu$  子密度同原初能量相关联,得到了拐点的能量,证实了 KASCADE 的观测结果. 用大气簇射的另一成分—— $\mu$  成分同样观察到膝,这是对宇宙线原初能谱存在膝的又一论证.

2002-04-09 收稿,2002-08-26 收修改稿

1) E-mail: ynuerri@public.km.yn.cn

## 2 实验及模拟

梁王山观测站距昆明 60km(24.5°N,102.9°E), 海拔 2720m, 大气深度  $735\text{g}\cdot\text{cm}^2$ , 年平均气温为  $15.5^\circ\text{C}$ . 梁王山 EAS 阵列<sup>[3]</sup>由 3 个部分组成: 37 个闪烁体探测器组成的粒子密度阵列(PD 阵), 19 个空气切仑柯夫光探测器组成的切仑科夫光阵列(C 阵)和地下  $\mu$  子阵列( $\mu$  阵), 能对大气簇射多种成分且阵列最佳工作能段在  $2 \times 10^{14}\text{eV} - 10^{16}\text{eV}$ , 正好覆盖了膝能区<sup>[4]</sup>.  $\mu$  阵列<sup>[5]</sup>是由埋于地下 4m 深(相当于 2GeV 阈值)的 21 个独立的闪烁体计数器组成的, 总面积  $50\text{m}^2$ , 距粒子阵中心 40m, 具有自己独立的符合触发系统, 也可以用 PD 阵的中心快时间计数器所提供的信号来触发, 或者两阵并行触发. 阵列对大气簇射的电子和  $\mu$  子成分进行同时测量, PD 阵提供了每个 EAS 事例的大气簇射参数(方位角  $\phi$ 、天顶角  $\theta$ 、大小 size、年龄  $s$  以及芯距  $R$  等), 相应的  $\mu$  子数( $N_\mu$ )和定点  $\mu$  子密度( $\rho_\mu^*$ )则由  $\mu$  阵数据获得.

为了对  $\rho_\mu^*$  谱的结果进行分析, 我们用梁王山模拟程序<sup>[6,7]</sup>进行了 PD 阵列和  $\mu$  阵列的 MC 全模拟. 模拟程序在能量范围  $2 \times 10^{14}\text{eV}$  到  $1 \times 10^{16}\text{eV}$  按指数为  $-2.7$  的原初能谱分布, 在天顶角  $0^\circ$  到  $45^\circ$ , 对原初粒子进行取样. 我们使用 Mini-Jet 模型作为强相互作用模型<sup>[8]</sup>, 并跟踪了所有的次级粒子, 其中电子的能量下限是  $0.003\text{GeV}$ ,  $\mu$  子的能量下限是  $2\text{GeV}$ , 程序记录了到达观测面的电子、正电子及  $\mu$  子的信息以便进一步分析. 然后, 根据真实阵列的探测器布置, 在探测阵列平面上以随机的芯位和天顶角投点来模拟探测器的响应, 再由探测器效率(实验定标而得)计算出每个 PD 探测器记录下来的粒子密度和击中探测器的  $\mu$  子数目. MC 模拟事例使用了和实验中同样的触发条件, 使实验中的各种选择性偏差都包含在模拟结果中, 使实验事例和模拟事例具有较好的可比性.

## 3 结果及讨论

本文所用的数据为梁王山站 1994 年记录的两阵并行触发的共  $4.4 \times 10^4$  个簇射事例, 有效观测时间为  $2.9 \times 10^6\text{s}$ . 我们对记录事例进行了如下挑选:  $0.2 < s < 2.0$ ,  $10^\circ \leq \theta < 30^\circ$ ,  $5 \times 10^4 \leq \text{size} \leq 1.6 \times 10^7$ . 最后在距簇芯  $25\text{m} \leq R < 30\text{m}$  和  $30\text{m} \leq R < 35\text{m}$  两个

距离获得有效事例 386 个和 285 个, 所得到定点  $\mu$  子密度积分谱见图 1.

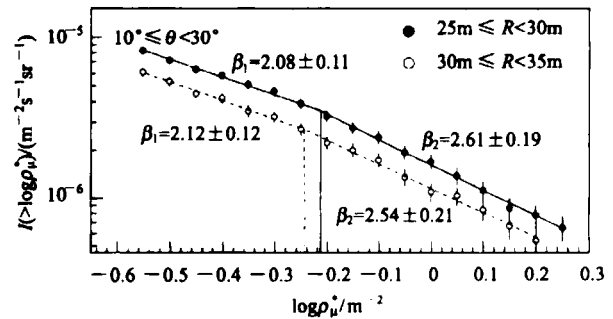


图 1 定点  $\mu$  子密度积分谱

从图中可以清楚看到两个不同芯距的  $\mu$  子定点密度谱均为有拐折的直线, 拐点的前后都可以用规律  $\frac{dN}{d(\rho_\mu^*)} \propto (\rho_\mu^*)^{-\beta}$  来拟合, 拟合得到的  $\beta$  值已分别标于图中, 两个拐点的  $\mu$  子密度分别为  $0.62/\text{m}^2$  和  $0.58/\text{m}^2$ .

$\rho_\mu^*$  谱拐点所对应的原初能量可以通过模拟计算来确定. 我们分别对原初成分为质子(p)和铁核(Fe)的情况进行了模拟, 获得了 15517 个 P 事例和 2062 个 Fe 事例, 由此得到距簇芯  $25\text{m} \leq R < 30\text{m}$  和  $30\text{m} \leq R < 35\text{m}$  两个距离处的  $\rho_\mu^*$  和原初能量  $E_0$  的关系, 如图 2.

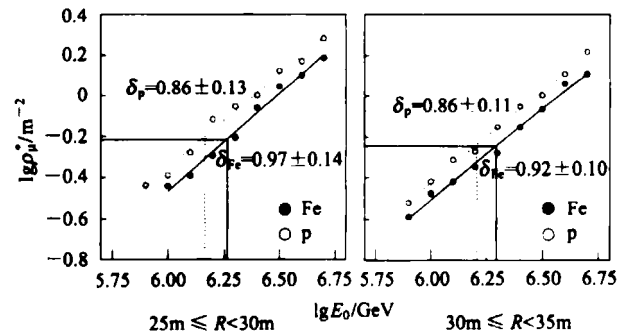


图 2 模拟得到的  $\rho_\mu^* - E_0$  关系

从图上看到可以用  $\rho_\mu^* \propto E_0^\delta$  来拟合  $\rho_\mu^* - E_0$  关系, 由于相同的  $E_0$  可以产生一个较宽分布的  $\rho_\mu^*$ , 一个固定的  $\rho_\mu^*$  也对应于一个较宽分布的  $E_0$ . 图 2 给出的  $\rho_\mu^*$  和  $E_0$  的关系, 是指它们的平均值之间的关系. 拟合得到的  $\delta$  值已分别标示于图中, 与拐点的  $\mu$  子密度相对应的能量也可以得出. 由图 2 看到, 当初能相同时, p 产生的大气簇射的  $\mu$  子密度高于 Fe 核大气簇射的  $\mu$  子密度, 这是距簇芯较近的原因; 当芯距较大时, Fe 核大气簇射的  $\mu$  子密度将高

于质子. 另外,通过简单的计算可以把  $\rho_{\mu}^*$  谱指数  $\beta$  与宇宙线原初能谱指数  $\gamma$  联系起来,并得到能谱指数在膝前与膝后的改变  $\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1 = \delta(\beta_2 - \beta_1)$ . 分别把  $\delta, \beta_1, \beta_2$  代入上式得到  $\Delta\gamma$ , 现将所得结果列于表 1 中.

表 1

芯 距	成分	p	Fe
	参量		
25m—30m	$\delta$	$0.86 \pm 0.13$	$0.97 \pm 0.14$
	$\Delta\gamma$	$0.46 \pm 0.20$	$0.51 \pm 0.23$
	$E_{\text{knee}}$	$(1.50 \pm 0.23) \times 10^{15} \text{ eV}$	$(1.82 \pm 0.24) \times 10^{15} \text{ eV}$
30m—35m	$\delta$	$0.86 \pm 0.11$	$0.92 \pm 0.10$
	$\Delta\gamma$	$0.36 \pm 0.21$	$0.39 \pm 0.23$
	$E_{\text{knee}}$	$(1.72 \pm 0.22) \times 10^{15} \text{ eV}$	$(1.84 \pm 0.21) \times 10^{15} \text{ eV}$

为了便于与 KASCADE 的结果进行比较,由表

中所列数据可得出膝前后能谱指数改变的平均值为 0.43,在不了解拐点处宇宙线成分的情况下,拐点对应能量的平均值可取在 1.7PeV 附近;KASCADE 相应的结果是 0.3 和 5PeV. 两实验组得到的能谱指数改变均与目前一般认为的约 0.4 接近,而拐点能量与目前一般认为的 3PeV 均有差异. 另外从  $\rho_{\mu}^*$  谱的外形来看,两个实验组的数据均呈现降幂分布,均有明显拐折.

用大气簇射的  $\mu$  子成分来研究能谱的膝,虽然  $\rho_{\mu}^* - E_0$  关系要用 MC 模拟得出,但大气簇射  $\mu$  子定点密度是直接测量量,减小了重建过程对结果的影响,所以其结论应具更大的可信度. 另一方面由于大气簇射中  $\mu$  子较少,且获取数据较为困难,膝的位置和形状都有待于增加数据量作进一步研究;所得结论对 MC 模拟的依赖也有待于进一步研究.

参考文献 (References)

- 1 LUO Guang-Xuan, TAN You-Heng, ZHANG Chun-Sheng et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1995, 19(9): 769—774 (in Chinese) (罗光宣, 谭有恒, 张春生等. 高能物理与核物理, 1995, 19(9): 769—774)
- 2 Haungs A, Antoni T, Apel W D et al. Cosmic Ray Energy Spectrum around the Knee by Muon Density Measurements at KASCADE. In: D. Kieda, M. Salamon, & B. Dingus. 26th International Cosmic Ray Conference. Utah: 26th ICRC Conference Committee, 1999
- 3 GAO X Y, Leung K C, Yang H T et al. A New Underground Muon Detector on Mt. Liang Wang. 24th International Cosmic Ray Conference, Vol. 1. Roma, 1995, 978—981
- 4 Ng L K, GAO X Y, YANG Z T et al. New Gamma-ray Observatory on Mt. Liang Wang. In: R. J. Protheroe. 21st International Cosmic Ray Conference, Vol. 4. Australia, 1990, 286—289
- 5 GAO Xiao-Yu, Leung K C, YANG Hong-Tao et al. The EAS Muon De-
- tection on Mt. Liang Wang. In: ZHU Qing-Qi. CCAST-WL Workshop Series, Vol. 48. Beijing: CCAST (World Laboratory) Workshop, 1995, 121—128 (in Chinese) (高晓宇, Leung K C, 杨洪涛等. 梁山站 EAS 的  $\mu$  子探测. 见: 朱清棋编辑. CCAST - WL Workshop Series, 48 卷. 北京: CCAST (World Laboratory) Workshop, 1995, 121—128)
- 6 ZHA Min, CHUENG Tsang, DING Lin-Kai et al. Chinese Physics Letters, 1999, 16(8): 622—624
- 7 Cheung T, JING Gui-Ru, GAO Xiao-Yu et al. EAS Muon Lateral Distribution and Primary Cosmic Ray. 7th National Cosmic Ray and Astrophysics Conference Paper. Yunnan, 1996 (in Chinese) (张增, 荆贵茹, 高晓宇等. EAS 中  $\mu$  子横向分布与初级宇宙线. 第七届全国宇宙线和天体物理会议论文集. 云南, 1996)
- 8 Cheung T, ZHU Q Q. A Monte-Carlo Generator of Mini-jet Model for the Simulation of Hadron Multiproduction. 24th International Cosmic Ray Conference, Vol. 1 Roma; 1995, 143—146

## Study of EAS Local Muon Density Spectrum and the Knee in the Energy Spectrum of Primary Cosmic Rays

LIU Jun<sup>1,1)</sup> GENG Qing-Xi<sup>1</sup> YANG Hong-Tao<sup>1</sup> LIU Chang-Qin<sup>1</sup>  
ZHANG Pin<sup>1</sup> GAO Xiao-Yu<sup>1</sup> JING Cai-Liu<sup>2</sup> ZHA Min<sup>2</sup>  
JING Gui-Ru<sup>2</sup> ZHU Qing-Qi<sup>2</sup> Cheung T<sup>3</sup> Ng L K<sup>4</sup>

1 (Cosmic Ray Research Institute of Yunnan University, Kunming 650091, China)

2 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

3 (City University of Hong Kong, Hong Kong, China)

4 (Hong Kong Institute of Education, Hong Kong, China)

**Abstract** With the extensive air shower (EAS) array at Mt. Liang Wang ( $735 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ ,  $245^\circ\text{N}$ ,  $102.9^\circ \text{E}$ , Kunming China) it is able to measure the muon density spectrum at a fixed distance from the core of EAS in the knee region. The spectra at two different fixed core distances ( $25\text{m} \leq \text{core distance} < 30\text{m}$ ,  $30\text{m} \leq \text{core distance} < 35\text{m}$ ) were obtained from  $4.4 \times 10^4$  events collected in 1994 with criteria  $5 \times 10^4 \leq \text{size} \leq 1.6 \times 10^7$  and  $10^\circ \leq \theta < 30^\circ$  that show obvious kinks. Monte Carlo simulations for the EAS development and detection with same selection criteria in the array triggering and the analysis procedure have been performed in order to relate the local muon densities to primary energy. As a result, we have deduced that the average position of the knee ( $E_{\text{knee}}$ ) is at about  $1.7 \times 10^{15} \text{ eV}$  and the average difference of the slopes of the primary energy spectrum before and after the knee ( $\Delta\gamma$ ) is about 0.43. This work corroborates the first result ( $E_{\text{knee}} = 5\text{PeV}$ ,  $\Delta\gamma = 0.3$ ) reported by KASCADE. It authenticates reliably the existence of the knee at the primary energy spectrum by another composition of EAS — muon composition (more direct than electron composition). Based on the results obtained by two experiments, the difference of slopes of cosmic ray primary energy spectrum before and after the knee is close to 0.4 that is accepted widely, while the energy of the knee is different from the accepted 3PeV.

**Key words** local muon density spectrum, knee, energy spectrum of primary cosmic rays