

用宇宙线大气簇射 N_e-N_μ 关系 研究“膝”区原初成分*

杨洪涛^{1;1)} 刘俊¹ 耿庆熹¹ 刘长钦¹ 张品¹ 高晓宇¹ 查敏² 荆贵茹²
经才骝² 朱清棋² 张增³ 梁淦章³ 吴本韩⁴

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 100049)

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获得的宇宙线大气簇射 μ 子数据, 与假设原初分别为质子、氦核、中等核 ($Z=15$) 和铁核的 Monte-Carlo 模拟结果进行比较, 结果显示宇宙线膝区原初成分无明显变化且以轻核为主.

关键词 N_e-N_μ 关系 膝 原初宇宙线成分

1 引言

1958年MSU组发现宇宙线广延大气簇射(EAS)大小谱在能量约为3—5PeV处有所改变, 通常把这一变化的区域称为膝区. 在一个平滑的谱上出现这种明显的拐折, 往往联系于宇宙线粒子的起源、加速、传播机制的变化, 具有特殊的物理意义. 膝现象自发现以来一直是人们关注的焦点, 虽然膝的存在已被广泛接受, 但对于膝的位置、形态, 特别是膝区原初成分的争论一直没有停止过.

宇宙线原初粒子的能量和成分, 应该由大气层上空直接测量得出, 但由于原初宇宙线的流强随能量升高而按幂律迅速降低, 给高能宇宙线的直接测量造成了很大的困难, 目前用高空气球和人造卫星直接测量的能区只达到 $\sim 10^{14}$ eV. 对于能量超过 10^{14} eV 的宇宙线, 仍采用地面阵列探测原初宇宙线粒子产生的广延大气簇射(EAS)来获取原初粒子的信息. EAS中的 μ 子容量对宇宙线原初成分和核作用模型很敏感^[1], 用梁王山宇宙线观测站数据得到的电子数 (N_e) 与 μ 子数 (N_μ) 关系和相应的 Monte-Carlo 模拟, 研究了原初宇

宙线膝区成分.

2 实验数据

梁王山观测站距昆明60km, 位于 24.5°N , 102.9°E , 海拔2720m, 大气深度 $735\text{g}/\text{cm}^2$, 年平均气温为 12.7°C . 梁王山观测站EAS阵列^[2] (如图1所示) 由3个部分组成: 37个 $(1/4)\text{m}^2$ 闪烁体探测器组成的粒子密度阵列(PD阵, 其中13个同时包含快时间探测器), 19个空气切仑柯夫光探测器组成的切仑科夫光阵列(\check{C} 阵)和地下 μ 子阵列(μ 阵), 能对大气簇射多种成分进行同时观测, 并且阵列最佳工作能段在 2×10^{14} — 10^{16} eV, 正好覆盖了膝能区^[3]. μ 阵列^[4] 是由埋于地下4m深(相当于2GeV阈值)的21个相互独立的闪烁体探测器组成的, 总面积约 50m^2 , 距粒子阵中心40m, 并设有3个 1m^2 地面闪烁体探测器作为 μ 阵的符合系统. μ 阵的每个探测单元由 $1.9\text{m} \times 1.3\text{m}$ 的闪烁体和嵌入其中心的 $5''$ 光电倍增管构成, 虽然每个探测单元只能给出“Yes”或“No”信号, 但21个单元形成的整体对每次簇射将有“Yes”响应数的记录, 通过对探测

2004-11-30 收稿, 2006-01-04 收修改稿

* 国家自然科学基金(10120130794)资助

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

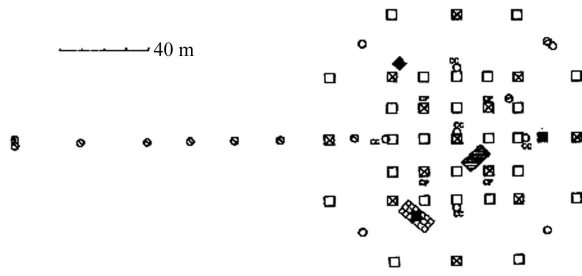


图1 梁王山观测站阵列示意图

□ 粒子密度闪烁体探测器; ⊠ 粒子密度与快时间闪烁体探测器(CP为符合探测器); ○ 切仑科夫入射方向探测器(CC为符合探测器); ⊙ 切仑科夫横分布探测器; ⊖ 切仑科夫脉冲波形探测器; ■ μ子符合探测器; ▀ 地下μ子探测器; ■ 中心控制室.

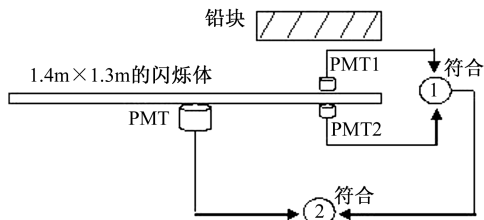


图2 探测单元的μ子响应测量

单元的有效性和“Yes”响应数与入射μ子数关系的定标研究^[5],可获得入射μ子数. 定标研究可分为两个步骤,首先在探测器下埋前采用图2所示的办法,对每个探测单元逐点进行μ子响应测量: PMT1和PMT2为1”快时间管计数器,分别置于闪烁体的上下方,符合①的计数为穿过探测单元该位置的μ子数,符合②给出的5”光电倍增管PMT信号和①的符合数即为相应的“Yes”信号数. 由符合①和②的读数可得出探测单元该点的μ子响应. 对每个探测器均进行上述的逐点测量. 然后用Monte-Carlo模拟各种不同能量的簇射对阵列投点,每次投点可得到击中μ阵50m²(21个探测单元)的能量大于2GeV的μ子数及其位置分布,结合以上实验测得的单元μ子响应即可获得一组击中μ子数和相应的“Yes”数,这些数据的拟合给出本μ阵列的“Yes”数与击中μ子数的关系,如图3所示.

EAS阵列可以用μ阵提供的符合信号触发,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. μ子阵列和PD阵列联合运转时,可对每个簇射的电子成分和μ子成分进行同时测量,PD阵列提供EAS事例的参数(方位角φ、天顶角θ、大小N_e、年龄s以及芯位等),相应的μ子数据则由μ阵列获得.

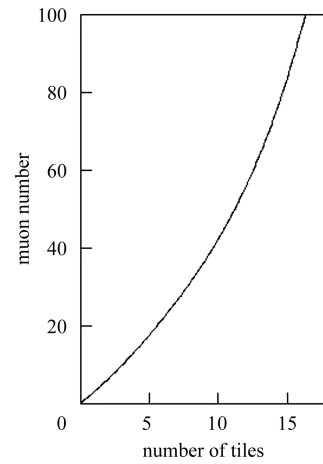


图3 被击中的μ子探测器数与入射μ子数的转换曲线

μ阵和PD阵在1994年1月至12月同时运行,选择了两阵并行触发的共4.4×10⁴个簇射事例,有效观测时间为2.9×10⁶s. 这些事例的触发条件是: PD阵4个中心快时间探测器全部有粒子打中或者μ阵3个符合探测器全部被粒子打中.

簇射μ子的横分布规律已经由理论推导结合实验修正获得,在μ子能量E_μ ≥ 1GeV时,μ子密度可由Greisen函数表示^[6]:

$$\rho_{\mu}(R) = K_0 N_{\mu} R^{-0.75} \left(1 + \frac{R}{R_0}\right)^{-2.5},$$

式中ρ_μ(R)为距簇芯R处的μ子密度,单位为m⁻²,N_μ为簇射的μ子数,K₀,R₀两个参数与簇射原初能量和探测高度有关. 图4给出了阵列获得的N_e为7×10⁵~1×10⁶的平均μ子横分布数据(图中黑点),

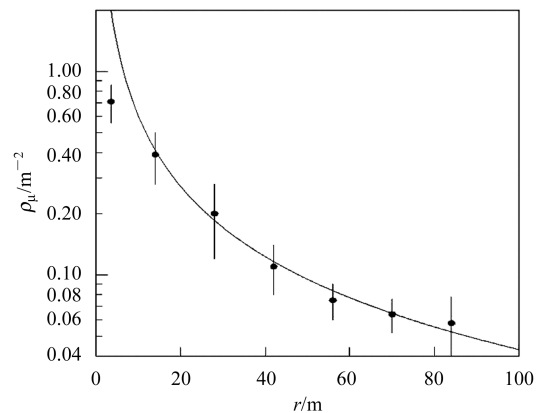


图4 μ子横分布

簇射的选择条件是: 天顶角θ ≤ 15°; 簇芯距阵心的距离D ≤ 50m; 簇射年龄s限制为0.4 ≤ s ≤ 2.0. 在上式中,令K = K₀N_μ,拟合曲线可得出K和R₀,再由平均横分布的实验数据用数值积分确定N_μ,这样就可获得与此平均横分布相应的K₀,R₀和N_μ(考虑到簇射近

芯区电子穿透效应可能导致的影响, 第一点数据没有参加拟合与数值积分). 取多个平均横分布算出的 K_0 , R_0 的平均值最后得到 $K_0 = 3.65 \times 10^{-4}$, $R_0=194$. 图中曲线为按上述理论式对实验数据的拟合, 可以看到 μ 子横分布数据能与理论值吻合.

对事例进行了如下挑选: 至少有 15 个粒子密度探测器的读数在零点以上, 年龄范围 $0.4 < s < 2.0$, 天顶角 $\theta \leq 30^\circ$, 簇芯距 $D \leq 50\text{m}$, 大小 $4.80 \leq \lg N_e \leq 7.05$, 选择后还有 2.35×10^4 个事例. 按 $\Delta \lg N_e = 0.15$ 的间隔统计 $\lg N_\mu$ 与 $\lg N_e$, 统计时在每个区间内按照戈罗贝斯舍弃标准 $g(K, \alpha)$ (K 为各个区间内的测量值个数, α 为舍弃可疑值后犯错误的几率, 这里取 $\alpha=0.05$) 对数据进行了筛选, 使所有区间都没有异常值出现. 最后得到的 $\lg N_e$ - $\lg N_\mu$ 关系如图 5 中实验数据点 \bullet 所示, 实验数据的误差包括了统计误差和系统误差.

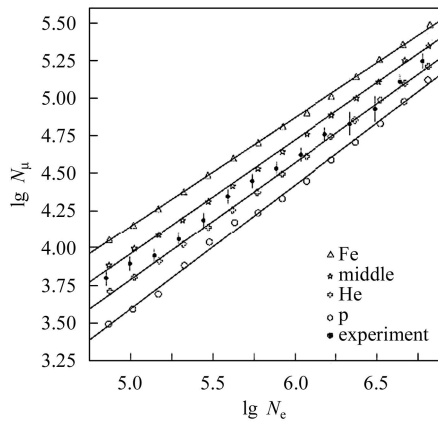


图 5 $\lg N_e$ - $\lg N_\mu$ 关系

3 模拟

为了分析膝区宇宙线原初成分, 我们做了相应的 Monte-Carlo 模拟计算. 已经建立了梁王山站大气簇射 Monte-Carlo 模拟程序系统^[7], 整个系统由梁王山合作组自己发展的 COMUGEN 和西欧核子联合研究中心 (CERN) 发展的 GEANT3 组成. 在 COMUGEN

模块中, 对于强子-强子碰撞采用了 Mini-jet 模型, 对于核-核碰撞, 采用了重叠模型. 该模拟系统可以输入不同的原初粒子进行 PD 阵列和 μ 阵列的 Monte-Carlo 全模拟. 模拟分为纯模拟程序与投点程序, 由纯模拟程序获得到达观测面的电子、正电子及 μ 子的信息, 投点程序将纯模拟获得的结果以随机的芯位和天顶角投点到实际探测器阵列面上, 并记录下探测器的响应. 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 μ 子数目. 在投点程序中使用了与实验同样的触发条件, 使实验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. 为与实验数据的挑选条件一致, 对投点的要求是: 天顶角 $\theta \leq 30^\circ$, 簇芯距 $D \leq 50\text{m}$. 投点后, 对投点数据进行了与实验数据一样的重建, 对重建结果又进行了与实验数据一样的挑选, 挑选出来的事例就是我们的全模拟数据.

用模拟系统在能量范围 $2 \times 10^{14}\text{eV}$ 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° 到 30° , 对原初粒子分别为质子 p、氦核 He、中等核 ($Z=15$) 和铁核 Fe 4 种情况进行了 PD 阵列和 μ 阵列的 Monte-Carlo 全模拟, 电子的能量下限为 0.003GeV , μ 子的能量下限为 2GeV . 最后分别获得了 4.3×10^5 个 p 事例、 2.7×10^5 个 He 事例、 2.1×10^5 个中等核事例和 1.8×10^5 个 Fe 事例. 与实验数据一样, 用同样的间隔对模拟数据进行统计, 结果也示于图 5 中.

4 结论

以膝位置在 $3 \times 10^{15}\text{eV}$ 来计算, 梁王山阵列相应于 p-Fe 成分的 N_e 为 5.59 — 5.99 . 从实验数据与模拟数据结果的比较可以看出整个膝区宇宙线原初成分没有明显变化且以轻核为主. 此结果与 DICE/CASA-MIA 实验 (S.P. Swordy, 1999)^[8] 和 KASCADE (A. Haungs, 1999)^[9] 得到的结果类似.

参考文献 (References)

- 1 Teshima M. Proc. of 23rd ICRC. Calgary, Inv., Rap. & Highlight Papers, 1993. 257
- 2 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
- 3 Ng L K, GAO X Y, YANG Z T et al. New Gamma-ray Observatory on Mt. Liang Wang. Protheroe R J. In: 21st International Cosmic Ray Conference (Vol.4). Australia, 1990,

286—289

- 4 GAO X Y, Leung K C, YANG H T et al. The EAS Muon Detection on Mt. Liang Wang. ZHU Q Q. In: CCAST-WL Workshop Series (Vol.48). Beijing: CCAST (World Laboratory) Workshop, 1995. 121—128 (in Chinese) (高晓宇, 梁淦章, 杨洪涛等. 梁王山站 EAS 的子探测. 朱清棋编辑. 见: CCAST-WL Workshop Series (48 卷). 北京: CCAST (World Laboratory) Workshop, 1995. 121—128)
- 5 Leung K C. Muon Detector Array To Discriminate γ -Ray EAS at Mountain Altitude. Doctor Degree Thesis of Hongkong University, 1995

- 6 Bennett S, Greisen K. Physical Review, 1961, **124**(6): 1982—1987
- 7 ZHA Min, CHUENG Tsang, DING Lin-Kai et al. Chinese Physics Letters, 1999, **16**(8): 622—624
- 8 Swordy S P, Kieda D B. The Composition near the ‘Knee’ from Multiparameter Measurements of Air Showers. Kieda D, Salamon M, Dingus B. In: 26th International Cosmic Ray Conference. Utah: 26th ICRC Committee, 1999
- 9 Haungs A, Antoni T, Apel W D et al. Cosmic Ray Energy Spectrum around the Knee by Muon Density Measurements at KASCADE. Kieda D, Salamon M, Dingus B. In: 26th International Cosmic Ray Conference. Utah: 26th ICRC Committee, 1999

Study of Primary Cosmic Ray Composition around the “Knee” with N_e - N_μ Relationship of EAS^{*}

YANG Hong-Tao^{1,1)} LIU Jun¹ GENG Qing-Xi¹ LIU Chang-Qin¹ ZHANG Pin¹ GAO Xiao-Yu¹
ZHA Min² JING Gui-Ru² JING Cai-Liu² ZHU Qing-Qi² Cheung T³ Leung K C³ NG L K⁴

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

2 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

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

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

Abstract The $\lg N_e$ - $\lg N_\mu$ relationship has been studied from 4.4×10^4 events (total observation time is 2.9×10^6 s) collected from Mt. Liang Wang Array (24.5° N, 102.9° E, 2720m above sea level). In order to study the mass composition at the knee, Monte-Carlo simulations for the EAS development and detection under same event selection criteria as used in the experimental data have been performed. The result shows that the mass composition of primary cosmic rays has no obvious change and the dominant component is light nuclei around the knee.

Key words N_e - N_μ relationship, knee, mass composition of primary cosmic rays

Received 30 November 2004, Revised 4 January 2006

*Supported by NSFC (10120130794)

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