

宇宙线高能族事例中簇射粒子的横向分布*

王河¹⁾ 王永刚 戴志强 薛良 冯存峰 张学尧 李金玉
张乃健 何瑁 王承瑞

(山东大学物理系 济南 250100)

任敬儒 陆穗苓

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 对甘巴拉山铅乳胶室实验所获取的总观测能为 100TeV 至 400TeV 的高能族事例中簇射粒子的横向分布进行了分析,并与相应的 Monte Carlo 模拟计算进行了比较.模拟计算采用的是 CORSIKA 程序,其中的强相互作用采用 QGSJET 模型.结果表明:采用 CORSIKA(QGSJET)程序进行模拟所给出的族事例中簇射粒子的横向分布以及族事例能量集中率分布的整体趋势均与相应的实验数据基本相符.

关键词 铅乳胶室 Monte Carlo 模拟 族事例 横向分布 能量集中现象

1 引言

宇宙线高能粒子与大气中的原子核相互作用,在传播过程中形成广延大气簇射(EAS).利用高山乳胶室可以把靠近 EAS 簇射轴的高能簇射粒子以族事例的形式记录下来.对乳胶室获取的总观测能 $\Sigma E_{vis} \geq 100\text{TeV}$ 的高能族事例的产生特征进行系统分析,并与基于一定的强相互作用模型和原初宇宙线成分假设的 Monte Carlo 模拟计算进行比较,可以获得有关 10^{15} — 10^{17} eV 能区超高能强相互作用机制与原初宇宙线化学组成等重要信息^[1,2].实验与模拟计算表明,族事例中簇射粒子的横向分布对原初宇宙线成分最为敏感,横向扩展的涨落反映了原初成分的不同;特别是族事例能量集中现象^[3,4]与其他特殊事例的存在,使得对族中簇射粒子的横向分布的研究一直备受人们关注^[5,6].

在宇宙线高能族事例的 Monte Carlo 模拟计算中遇到的严重问题是:现有的对撞机实验由于受到所覆盖的能区与快度区的限制,难以为 EAS 心区的模拟计算提供准确的有关超高能强相互作用机制的信

息.此外,对 10^{15} eV 以上原初宇宙线的能谱与化学组成目前尚无直接测量的数据可以利用,结果使得各实验组对于人们广为关注的“膝”区(10^{15} — 10^{16} eV)强相互作用机制的理解与原初宇宙线化学成分的推断难以取得一致的观点.最近几年,在 EAS 模拟方面取得了一些新的进展,将这些新的进展用于乳胶室模拟,并与实验数据进行对比分析,对进一步探索超高能强相互作用机制和“膝”区原初宇宙线的化学组成有着重要的意义.

本文对甘巴拉山铅乳胶室获取的高能族事例中簇射粒子的横向分布与能量集中现象进行了分析,并利用最近几年在国际上广泛应用于 EAS 模拟的 CORSIKA^[7]程序进行相应的 Monte Carlo 模拟,把模拟计算结果与实验数据进行了对比与讨论.

2 实验与模拟

2.1 实验数据

我们的实验数据来自中日合作甘巴拉山(海拔 5500m)乳胶室实验^[1]的 K0—K9 铅乳胶室,室厚

2002-04-29 收稿

* 国家自然科学基金(19905007)与教育部博士点基金资助

1)E-mail: wangh@hepg.sdu.edu.cn

28e.u. (电磁辐射单位). 本工作选择族事例的标准是: (1) 族事例的总观测能为 $100\text{TeV} \leq \sum E_{\text{vis}} \leq 400\text{TeV}$, $\sum E_{\text{vis}} = \sum (E_{\gamma} + E_{\text{h}}^{(\gamma)})$. 其中 E_{γ} 是族中 γ 簇射的观测能, $E_{\text{h}}^{(\gamma)}$ 为强子转换成 γ 簇射部分的观测能; (2) 族中簇射的最小观测能 $E_{\text{min}} = 4\text{TeV}$; (3) 族中的 γ 簇射数 N_{γ} 与强子簇射数 N_{h} 之和满足: $(N_{\gamma} + N_{\text{h}}) \geq 4$; (4) 舍弃距族的能量中心半径 15 cm 以外的簇射. 满足上述标准的实验族事例共有 134 个

2.2 族事例的 Monte Carlo 模拟

在 Monte Carlo 模拟计算中, 本文采用的是 CORSIKA 程序, 其中的强相互作用采用 QGSJET^{8-10]} 模型. CORSIKA 程序可用于模拟直到 10^{20} eV 能区的光子、质子、原子核及其他所有粒子在大气中产生 EAS 的发展过程, 其中有多种强相互作用模型可供选择. 我们采用的 QGSJET (Quark Gluon String model with JETs) 模型是夸克胶子弦 (QGS) 模型的扩展, 它基于交换超临界玻密子 (Pomeron) 描述强相互作用. 玻密子按照 AGK 规则断裂成两条弦, 这些弦以类似于 Lund 模型的方式碎裂. QGSJET 模型考虑了 minijet 在 高能区对于描述硬作用的重要贡献. 该模型对高能下核-核相互作用的描述也采用了夸克胶子弦模型, 在全部非弹性核子-核子相互作用的基元中均考虑了多重玻密子的贡献.

模拟时采用的原初宇宙线能谱和化学组成, 是由最新的直接测量结果进行外推, 并按刚度截断模型适当选择 拐折能量推算得到的^[11], 其特征是随着原初能量的上升, 重核所占的比例逐步增大, 并在“膝”区变成以重核为主. 原初宇宙线化学组成共分成 6 组份: 质子 (P)、氦核 (He)、碳氮氧 (CNO)、重核 (H)、甚重核 (VH) 与铁核 (Fe). 它们的平均电荷数及微分能谱 ($dN/dE \sim E^{-\gamma}$) 拐折前的幂指数 (γ) 和相对化学组成如表 1 所示, 拐折后的微分能谱幂指数均取为 3.0, 质子的拐折能量取为 2×10^{14} eV.

我们在原初宇宙线能量为 $10^{14} - 10^{17}$ eV 的能区内模拟了 180 万个原初粒子, 模拟时次级粒子追踪到 2TeV. 对到达观测平面 (海拔 5500m) 的次级粒子, 采取了与甘巴拉山乳胶室实验相同的条件进行数据处理^[1], 这些条件包括乳胶室的有效面积, 粒子的探测效率, γ 射线与强子的区分, 实验的空间分辨能力以及倾斜入射的影响等因素. 对强子在乳胶室中与核相互作用的非弹性度采用 (0.1, 0.9) 区间

的随机抽样值, 并假设其次级粒子全部为 π 介子, 其中的 π^0 份额采用 (0.3, 0.5) 区间的随机抽样值. 在采取与实验相同的标准进行选择后, 得到了 2447 个总观测能为 $100\text{TeV} \leq \sum E_{\text{vis}} \leq 400\text{TeV}$ 的模拟族事例, 其中原初质子产生的族事例数为 1468 个, 原初铁核产生的族事例数为 100 个.

表 1 模拟所采用的原初宇宙线微分能谱幂指数与相对化学组成

核成分		P	He	CNO	H	VH	Fe
平均电荷数		1	2	7	12	17	26
拐折前能谱幂指数 γ		2.72	2.68	2.55	2.55	2.55	2.5
相对化学组成 (%)	10^{14} eV	28.0	23.0	19.0	13.0	5.0	12.0
	10^{15} eV	16.0	16.9	25.3	17.3	6.6	17.9
	10^{16} eV	11.4	12.0	20.9	18.3	8.2	29.1

3 结果与讨论

3.1 族事例的横向分布

为了考察 EAS 心区次级高能粒子的横向分布特征及簇射能量对横向分布的影响, 我们研究了族中簇射粒子 (γ 射线与强子) 的平均横向扩展 \bar{R} ($\bar{R} = \sum R_i/n$, R_i 是族中簇射到族的能量中心的距离, n 为族中簇射成员的数目) 与平均能量矩 \overline{ER} ($\overline{ER} = \sum E_i R_i/n$, E_i 是族中簇射成员的能量) 分布, 结果分别如图 1 与图 2 所示. 图中同时给出了模拟中原初质子与原初铁核所产生的族事例的相应分布. 为了能够与实验相比较, 在作图时, 把模拟数据归一到了实验数据, 原初质子与原初铁核的数据则是把模拟数据归一到实验数据后相对于模拟数据的份额. 在以下所有的图中, 都作了同样的归一化处理. 从图 1 与图 2 可以看到, 模拟族事例的 \bar{R} 及 \overline{ER} 分布均与实验的相应分布基本相符.

通过考虑标准偏差后的计算, 得到了实验、模拟的族事例以及模拟中由原初质子与原初铁核产生的族事例的 \bar{R} 平均值 $\langle \bar{R} \rangle$, \overline{ER} 平均值 $\langle \overline{ER} \rangle$, 结果见表 2. 从表 2 可以看出, 由 CORSIKA (QGSJET) 模拟程序产生的族事例的 $\langle \bar{R} \rangle$ 与 $\langle \overline{ER} \rangle$ 值与实验数据符合得很好. 此外, 将模拟中由原初质子和原初铁核产生的族事例的 $\langle \bar{R} \rangle$ 及 $\langle \overline{ER} \rangle$ 值相比较可以看出, 无论是 $\langle \bar{R} \rangle$ 还是 $\langle \overline{ER} \rangle$ 值, 原初质子产生的只有原初铁核产生的值的一半左右, 说明 $\langle \bar{R} \rangle$ 值较小的族事例主要来自原初质子的贡献, 而 $\langle \bar{R} \rangle$ 值较大的族事例则主要来自重核.

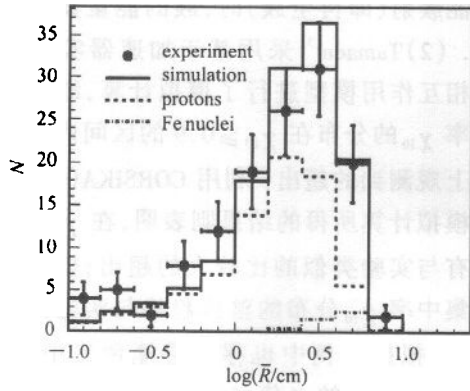


图 1 实验簇事例、模拟簇事例以及模拟簇事例中原初质子与原初铁核产生的簇事例的平均横向扩展 \bar{R} 的分布

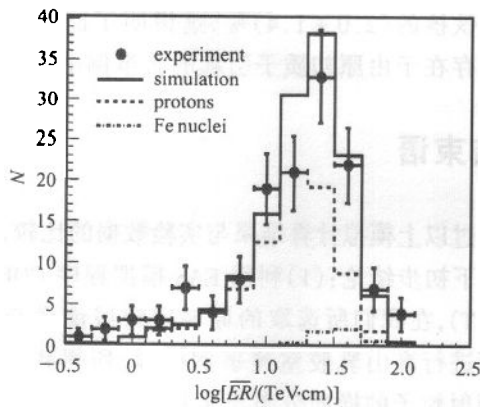


图 2 实验簇事例、模拟簇事例以及模拟簇事例中原初质子与原初铁核产生的簇事例的 $\bar{E}R$ 分布

后指出,基于加速器实验数据外推的强相互作用模型所进行的模拟计算,均不能解释这一实验现象.对甘巴拉山乳胶室实验数据的分析^[4,12],也证实了簇事例的能量集中现象的存在,并且指出,能量集中现象不限于在强子簇中存在,而观测能量 $\sum E_{vis} \geq 100\text{TeV}$ 的簇事例(包括 γ 族与强子- γ 族)中就存在这种现象.下面我们对甘巴拉山铅室总观测能为 $100\text{TeV} \leq \sum E_{vis} \leq 400\text{TeV}$ 的簇事例能量集中现象进行研究,并与利用 CORSIKA(QGSJET)程序得到的模拟结果进行对比分析.

为了挑选出在极端向前区域内具有能量集中现象的簇事例,定义能量集中率^[3]为: $\chi_{10} = \sum E_{vis}(\gamma \leq 10\text{mm}) / \sum E_{vis}$,其中 $\sum E_{vis}(r \leq 10\text{mm})$ 为在距能量中心半径 $r = 10\text{mm}$ 范围内的 γ 射线与强子簇射的观测能之和.

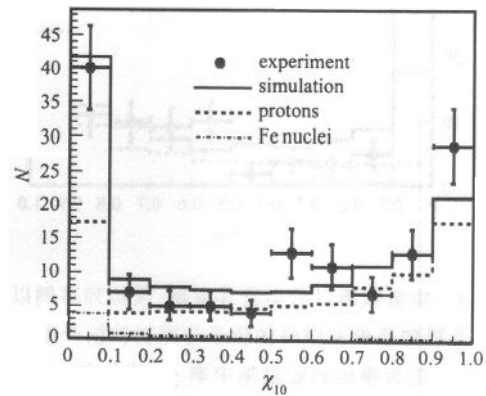


图 3 实验簇事例、模拟簇事例以及模拟簇事例中原初质子与原初铁核产生的簇事例的能量集中率 χ_{10} 的分布

表 2 实验与模拟簇事例的横向分布平均值

横向分布 平均值	实验簇事例	模拟簇事例	质子簇事例 (模拟)	铁核簇事例 (模拟)
$\langle \bar{R} \rangle / \text{cm}$	2.4 ± 0.2	2.5 ± 0.1	2.0 ± 0.1	4.1 ± 0.2
$\langle \bar{E}R \rangle / (\text{TeV} \cdot \text{cm})$	23.3 ± 1.7	22.8 ± 0.4	18.7 ± 0.4	34.9 ± 1.4

3.2 簇事例的能量集中现象

通过对 Chacaltaya 与 Pamir 乳胶室实验数据中 $\sum E_{vis} \geq 100\text{TeV}$ 的强子- γ 族的系统分析, Tamada^[3] 观察到了簇事例的能量集中现象. 就是说,在宇宙线高能簇事例中有相当大份额的簇事例,其总观测能的绝大部分 ($\geq 90\%$) 集中于围绕簇射轴的极端向前区(即离簇的能量中心只有 1 cm 或几 mm 范围内). Tamada 对能量集中现象进行了系统研究,并采用 5 种不同的强相互作用模型进行了模拟计算,最

图 3 给出了本工作中实验与模拟得到的满足簇事例选择标准的全部簇事例的能量集中率 χ_{10} 的分布,同时在图中给出了模拟中原初质子与原初铁核所产生的簇事例的能量集中率 χ_{10} 的分布. 为了对簇事例的能量集中现象进行量化处理,我们把具有较高能量集中率 ($\chi_{10} \geq 0.9$) 簇事例数 $n(\chi_{10} \geq 0.9)$ 与全部簇事例数 N_{event} 的比值定义为: $\zeta = n(\chi_{10} \geq 0.9) / N_{\text{event}}$. 实验与模拟簇事例的 ζ 值分别为 $(21.6 \pm 4.0)\%$ 和 $(15.9 \pm 0.8)\%$, 模拟中原初质子与原初铁核产生的簇事例的 ζ 值分别为 $(21.9 \pm 1.2)\%$ 与 $(2.0 \pm 1.4)\%$.

由于簇中的高能簇射更为直接地携带着宇宙线超高能强相互作用的信息,我们对实验与模拟的簇事例均进行了能量截断. 能量截断以后得到的簇事例称为“再生簇”. 再生簇通过以下方法得到^[11]:取

定一个能量截断因子 f'_m , 将族中全部簇射以能量从大到小为序按下式进行计算: $f' = E_{v_{in}} / \sum' E_{v_{in}}$, 其中 $\sum' E_{v_{in}}$ 是对满足条件 $f' \geq f'_m$ 的簇射能量求和, 剔除不符合条件 $f' \geq f'_m$ 的簇射, 本文取 $f'_m = 0.05$. 实验与模拟的再生族的能量集中度 χ_{10} 的分布如图 4 所示, 同时在图中给出了模拟中原初质子与原初铁核的再生族的能量集中度 χ_{10} 的分布. 对再生族进行数据处理, 得到实验与模拟族事例的 ζ 值分别为 $(27.6 \pm 4.5)\%$ 与 $(22.2 \pm 1.0)\%$, 模拟中原初质子与原初铁核产生的族事例的 ζ 值分别为 $(30.0 \pm 1.4)\%$ 与 $(4.0 \pm 2.0)\%$.

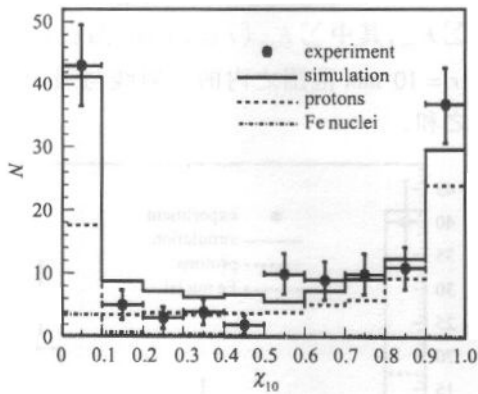


图 4 能量截断以后实验族事例、模拟族事例以及模拟族事例中原初质子与原初铁核产生的族事例的能量集中度 χ_{10} 的分布

将以上得到的实验与模拟的结果进行对比分析, 可以看出: (1) 甘巴拉山铅乳胶室获取的高能族事例中也存在着能量集中现象, 其 ζ 值为 $(21.6 \pm 4.0)\%$, 这与 Tamada^[3] 给出的三组实验数据 (Pamir 室, Chacaltaya 室, Pamir 联合室) 的 ζ 值 (约为 15%—30%) 比较接近. 当对族中簇射进行能量截断, 只

考虑高能簇射 (即再生族) 时, 族的能量集中现象更为明显. (2) Tamada^[3] 采用基于加速器实验数据外推的强相互作用模型进行了模拟计算, 结果表明能量集中度 χ_{10} 的分布在 $\chi_{10} \geq 0.9$ 的区间内并无类似于实验上观测到的超出. 利用 CORSIKA (QGSJET) 程序进行模拟计算所得的结果则表明, 在 $\chi_{10} \geq 0.9$ 的区间内有与实验类似的比较大的超出; 模拟族事例的能量集中度 χ_{10} 分布的整体趋势与实验数据基本相符, 在模拟族事例中也存在着能量集中的趋势. 但是, 模拟族事例的 ζ 值 $(15.9 \pm 0.8)\%$ 与实验值相比仍然偏低, 有必要采用多种强相互作用模型, 对族事例的能量集中现象继续进行研究. (3) 模拟中原初质子产生的族事例的 ζ 值为 $(21.9 \pm 1.2)\%$, 远高于原初铁核的 $(2.0 \pm 1.4)\%$, 这说明了能量集中现象主要存在于由原初质子引起的族事例中.

4 结束语

通过以上模拟计算结果与实验数据的比较, 可以得出以下初步结论: (1) 利用 EAS 模拟程序 CORSIKA (QGSJET), 在我们所选取的原初宇宙线能谱与化学组成下进行高山乳胶室族事例模拟, 所得到的族事例中簇射粒子的横向分布与实验的相应结果基本相符; 原初质子产生的族事例比原初铁核产生的族事例的横向分布范围更加集中. (2) 模拟族事例的能量集中度 χ_{10} 分布的整体趋势与实验数据基本相符, 模拟族事例中也存在着能量集中的趋势. 能量集中现象主要存在于由原初质子引起的族事例中.

作者衷心感谢甘巴拉山乳胶室合作组对本工作的支持.

参考文献 (References)

- 1 Ren J R et al. Phys. Rev., 1988, **D38**(5):1404—1417
- 2 Baradzei I T et al. Nucl. Phys., 1992, **B370**:365
- 3 Tamada M. 23rd ICRC, 1993, **4**:80
- 4 REN Jing-Ru et al. HEP & NP, 2000, **24**:1 (in Chinese)
(任敬儒等. 高能物理与核物理, 2000, **24**:1)
- 5 Zhdanov G B, Genisova V G. 24th ICRC, 1995, **1**:193
- 6 Borisov A et al. 26th ICRC, 1999, **1**:84
- 7 Heck D et al. FZKA-Report, 1998, 6019, Forschungszentrum Karlsruhe
- 8 Kaidalov A B, Ter-Martirosyan K A. Sov. J. Nucl. Phys., 1984, **39**:979
- 9 Kaidalov A B et al. Sov. J. Nucl. Phys., 1986, **43**:822
- 10 Kalmykov N N, Ostapchenko S S. Sov. J. Nucl. Phys., 1989, **50**:315
- 11 WANG Yong-Gang et al. HEP & NP, 2002, **26**:108 (in Chinese)
(王永刚等. 高能物理与核物理, 2002, **26**:108)
- 12 DAI Zhi-Qiang et al. HEP & NP, 2000, **24**:885 (in Chinese)
(戴志强等. 高能物理与核物理, 2000, **24**:885)

Lateral Distribution of Shower Particles in High Energy Family Events of Cosmic Rays *

WANG He¹⁾ WANG Yong-Gang DAI Zhi-Qiang XUE Liang FENG Cun-Feng
ZHANG Xue-Yao LI Jin-Yu ZHANG Nai-Jian HE Mao WANG Cheng-Rui
(Department of Physics, Shandong University, Jinan 250100, China)

REN Jing-Ru LU Sui-Ling
(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract An analysis on the characteristics of lateral distributions of the shower particles in high energy family events with visible energies 100TeV—400TeV observed in lead emulsion chambers at Mt. Kanbala (5500m a. s. l.) is done. The experimental results are compared with those of the corresponding Monte Carlo simulation. The code CORSIKA with QGSJET as the hadronic interaction model is applied in the simulation. It shows that the lateral distributions of shower particles in the simulated family events are basically in agreement with experimental data and the whole distribution tendency of the rate of energy concentration for simulation is basically consistent with experimental data.

Key words lead emulsion chamber, Monte Carlo simulation, family event, lateral distribution, phenomenon of energy concentration

Received 29 April 2002

* Supported by NSFS(19905007) and Doctoral Fund of National Education Committee of China

1) E-mail: wangh@hepg.sdu.edu.cn