

超高能 γ -强子族的能量集中现象*

戴志强^{1,1)} 薛良² 李金玉² 张学尧² 冯存峰² 傅宇²
李婕² 曹培园² 张乃健² 何瑁² 王承瑞²

1 (山东大学电子工程系 济南 250100)

2 (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 通过对甘巴拉山铁乳胶室观测到的族事例以及 COSMOS 程序和 CORSIKA 程序产生的模拟族事例进行分析、对比,对超高能 γ -强子族的能量集中现象的产生特征进行了细致的研究. 初步的结论是:超高能 γ -强子族的能量集中现象是族中含有的高能中心簇射集团的外在表现,这种现象在实验上发生的频度为 $(20.5 \pm 3.1)\%$,集团的平均横向扩展约为 0.37cm . 与传统的以唯象多团模型为基础的 COSMOS 程序相比,基于 SIBYLL 模型的 CORSIKA 程序的模拟结果较为接近实验的分析结果.

关键词 铁乳胶室 γ -强子族 Monte Carlo 模拟 高能中心簇射集团

1 引言

高山乳胶室是由吸收体和感光材料交替迭合组成的夹层型探测器,是探测 10^{15} — 10^{17}eV 宇宙线超高能核作用规律和寻找超高能新现象的重要手段. 通过对由高山乳胶室所记录的宇宙线高能核作用产生的空气簇射的心区次级粒子(即由 γ 线和强子组成的族事例)进行研究,并与基于一定模型的模拟计算相比较,能够获取有关碎裂区高能强子相互作用机制的重要信息,而对撞机实验由于受到加速器结构的限制,难以对极端向前小角度区(即碎裂区)的次级粒子进行有效的探测.

在利用高山乳胶室进行碎裂区超高能强相互作用特征与机制的研究中,Chacaltaya-Pamir 合作组对超高能 γ -强子族事例中存在的能量集中现象进行了系列报道^[1-4]. 具有能量集中现象的族事例主要是由平均横向扩展很小、高度准直的高能中心簇射集团所组成,集团的外围没有或只有少量的分离簇射,集团的能量占整个族总观测能的绝大部分. Chacaltaya-Pamir 合作组的结果表明,这类事例在实验上出现的频度明显超出了模拟的预

1999-10-15 收稿

* 国家自然科学基金(19875031)和高等学校博士学科点专项科研基金资助

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

期值. 他们认为这类事例具有强的贯穿能力, 是晕现象的早期发展阶段, 可能与质子原初以及在核碰撞的极端向前小角度区入射重子的衍射分解过程相联系^[1,4].

中日甘巴拉山乳胶室合作组于 80 年代铺设了大规模的铁乳胶室^[5], 室厚为 29c. u. (c. u. 为级联单位, 即辐射长度), 相当于 3 个核作用长度, 它对强子具有较高的探测效率^[6]. 因此, 利用铁乳胶室对含有高能中心簇射集团的 γ -强子族的能量集中现象进行研究, 具有独特的优越性.

本工作分析的实验数据源于中日合作的甘巴拉山 K2—K7 铁乳胶室. 族事例的模拟数据是通过分别采用广延大气簇射模拟程序 COSMOS^[7] 和选用了 SIBYLL^[8] 模型的 CORSIKA^[9] 程序, 结合在 高能区重核稍占优势的原初能谱, 在 HP9000 工作站上运行获得的. 根据含有高能中心簇射集团族事例的选择标准, 分别对实验和模拟的族事例进行处理, 然后就族事例的产生特征、能量集中度的分布以及含有高能中心簇射集团的族事例的特征进行了分析与对比.

2 实验与模拟

2.1 族事例中 γ 与强子的判选标准

为了研究宇宙线形态学和超高能核作用机制, 正确区分 γ 线和强子成分是极为重要的. 将族事例中的簇射区分为强子或 γ , 通常是根据级联簇射的起始点深度 Δt 的大小来判别. 若以 t_c 表示某一选定的深度标准, 则 $\Delta t < t_c$, 且无后继作用的簇射认为是 γ , 而其余的簇射则认为是强子.

对于铅乳胶室, 通常取 $t_c = 6c. u.$. 由于强子在铁中的核作用长度 ($\lambda_{Fe} \approx 9.5c. u.$) 比在铅中的短得多 ($\lambda_{Pb} \approx 30c. u.$), 若将铅室中采用的这一判选标准用于铁乳胶室, 会把大量的强子误判为 γ . 根据我们对铁乳胶室中 γ 与强子区分标准的研究, 如果取 $t_c = 6c. u.$, 铁室中将会有 53.5% 的强子混入 γ . 而取 $t_c = 4c. u.$, 这一份额将会下降到 39.5%, 此时 γ 混入强子的份额仅为 3.1%. 为了提高强子的正判率, 在铁乳胶室中取 $t_c = 4c. u.$ 作为强子与 γ 的判选标准更为合适.

本工作在对实验与模拟数据处理时采用 $t_c = 4c. u.$ 作为 γ 与强子的判选标准.

2.2 族事例的选择标准

为了对 γ -强子族的能量集中现象进行定量研究, 搜寻含有高能中心簇射集团的族事例, 定义族事例中簇射集团的能量集中度^[2] $\chi_{R_0} = E_{\text{cluster}}(R \leq R_0 \text{ mm}) / \sum E_{\text{vis}}$, 其中 $E_{\text{cluster}}(R \leq R_0 \text{ mm})$ 表示距离族的能量中心, 半径为 $R_0 \text{ mm}$ 的小圆区域内各个簇射的能量之和, 即簇射集团的能量, $\sum E_{\text{vis}}$ 表示族的总观测能.

在实验的和模拟的族事例中采用了如下的选择标准:

- (1) 族的总观测能 $\sum E_{\text{vis}} = 100\text{—}1000 \text{ TeV}$, 族中簇射的最小观测能量 $E_{\text{min}} =$

4TeV;

(2) 族中簇射总数($N_\gamma + N_h$) ≥ 4 , 要求强子数 $N_h \geq 1$;

(3) 当 R_0 取 10mm 时, 族事例中高能中心簇射集团的能量集中度 $\chi_{10} \geq 90\%$.

2.3 族事例的 Monte Carlo 模拟

族事例的模拟工作分别采用 COSMOS 程序^[7] 和 CORSIKA 程序^[9]. COSMOS 和 CORSIKA 能够模拟宇宙线从大气顶部到观测平面的整个传输过程. 对于粒子的相互作用, COSMOS 采用了唯象多团模型. 在模型中, 非弹性相互作用截面随能量按 $E^{0.08}$ 的规律增长, 在碎裂区 Feynman Scaling 基本保持. CORSIKA 程序是研究 KASCADE 实验时发展起来的, 它包括 5 种可选的强相互作用模型. 本工作采用其中的 SIBYLL 模型^[8], 这种模型以添加了 minijet 模型的 DPM(Dual Parton Model)模型为核心, 包括了事例的非衍射和衍射以及 minijet 产生的过程, 强化了碎裂区数据的再现. 在模拟中采用高能区重核稍占优势的七组份原初能谱^[10]. 这种谱的拐点在 10^{15} eV 附近, 呈明显的、平滑过渡的“膝”样结构. 原初能谱中各种化学成分所占份额的百分比如表 1 所示.

表 1 原初能谱的化学组成*(%)

原初能量	P(1)	He(2)	CNO(7)	LH(12)	MH(17)	VH(23)	Fe(26)
10^{14} eV	36	10	20	17	4	3	10
10^{15} eV	21	7	26	19	7	6	14
10^{16} eV	14	5	21	18	10	9	23

* 括号中为原子序数, LH 为轻重核, MH 为中重核, VH 为甚重核.

根据甘巴拉山铁乳胶室实验的具体条件, 对 COSMOS 和 CORSIKA 的输出数据进行了处理, 在处理过程中考虑了甘巴拉山铁乳胶室的有效面积、粒子的探测效率、 γ 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; 对强子在乳胶室中的非弹性系数的抽样为在 (0.1, 0.9) 区间内的均匀分布, 并假设次级粒子全部为 π 介子, 其中 π^0, π^+, π^- 各占三分之一; 假设粒子在乳胶室吸收体中的相互作用自由程服从指数分布.

3 结果与讨论

3.1 实验及模拟的族事例的特征

为了对实验及模拟族事例的能量特征进行分析、对比, 这里定义了族的平均总观测能: $\langle E_t \rangle = \sum E_{tk} / N_t$, 其中 E_{tk} 为第 k 个族的总观测能, N_t 为实验的或模拟的符合族事例选择标准的全部族事例数目. 并且定义了族平均总观测能的均方根差变异系数 $CV_E = \langle E_t \rangle / \sigma_E$, 其中 σ_E 是族平均总观测能的均方根差, $\sigma_E^2 = \frac{1}{N_t} \sum_k [E_{tk} - \langle E_t \rangle]^2$.

为了对族事例的产生特征以及能量集中度的分布进行对比分析, 表 2 给出了 t_c 取 4c. u. 时的实验与模拟的族事例的总数 N_t 、族的平均总观测能 $\langle E_t \rangle$ 及其均方根差变异系数 CV_E ; 图 1 给出了 t_c 取 4c. u., $R \leq 10$ mm 时, 实验的与 COSMOS 及 CORSIKA 模拟的

族事例能量集中度 χ_{10} 的分布, 模拟族事例的直方图分布分别用 44 个实验族事例进行了归一处理.

从表 2 中可以看出, 尽管按照本文 2.1 及 2.2 选择族事例的标准, 所得到的实验与模拟的族事例数目相差很大, 但实验与模拟族事例的平均总观测能 $\langle E_t \rangle$ 及其均方根差变异系数 CV_E 基本处于同一规模.

表 2 实验及模拟的 γ -强子族事例的能量特征

特征量	实验族事例	模拟族事例	
		COSMOS	CORSIKA
N_f	44	1361	1581
$\langle E_t \rangle / \text{TeV}$	259.0 ± 39.1	231.7 ± 6.3	210.0 ± 5.3
CV_E	1.78 ± 0.27	1.48 ± 0.04	1.45 ± 0.04

从图 1 中可以看出, 当 $\chi_{10} \geq 0.9$ 时, 实验数据的分布明显向上, 较 COSMOS 模拟数据的族事例数有大约两倍的超出, 而 CORSIKA 模拟的族事例却在能量集中现象上有较为突出的表现, 与实验数据的分布趋势基本一致.

为了充分考查族中簇射能量对横向分布的影响, 对实验的及模拟的族事例求出了能量矩 $E_i R_i$ 的平均值 $\langle ER \rangle$, 其定义为 $\langle ER \rangle = \sum E_i R_i / N_i$. 其中, E_i 表示族中簇射成员的能量, R_i 表示该簇射到族的能量中心的距离, N_i 表示族中簇射总数. 图 2 给出了 t_c 取 4c. u. 时的实验与模拟族事例平均能量矩的对数分布 $\log \langle ER \rangle$. 从图 2 中可以看出, 实验族事例的 $\log \langle ER \rangle$ 分布的峰值位置较 COSMOS 模拟的向左稍有偏移, 而 CORSIKA 模拟的族事例无论是峰值位置还是宽度分布都能较好地与实验族事例的 $\log \langle ER \rangle$ 分布相吻合. 这可能与 CORSIKA 中的 SIBYLL 模型考虑了非衍射分解和衍射分解以及 minijet 产生的过程有关. 由于实验数据统计量小, 实验族事例的 $\log \langle ER \rangle$ 分布起伏较大.

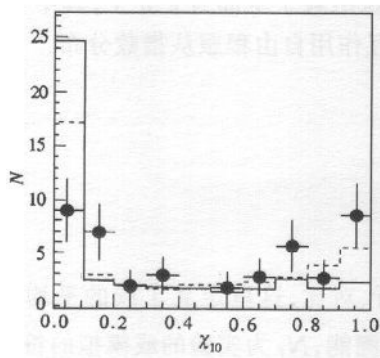


图 1 能量集中度 χ_{10} 的分布

● 实验族事例, 实线及虚线直方图分别表示 COSMOS 及 CORSIKA 的模拟族事例.

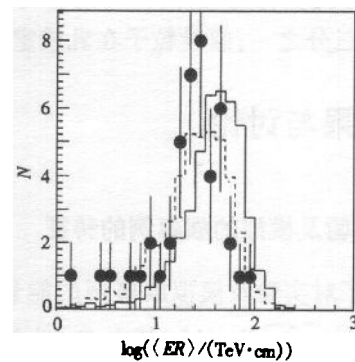


图 2 平均能量矩的对数分布 $\log \langle ER \rangle$

图示同图 1.

3.2 含有高能中心簇射集团的族事例的特征及其出现的频度

表 3 给出了含有高能中心簇射集团的族事例在 t_c 取 4c. u. 时的特征参数及其出现的频度. 其中 N_i^* 表示在 $R \leq 10\text{mm}$ 内含有的 $\chi_{10} \geq 0.9$ 的高能中心簇射集团的簇事例数; $\langle R \rangle_{\text{cluster}}^* = \sum \langle R \rangle_k / N_i^*$, 表示族事例中高能中心簇射集团的平均横向扩展, $\langle R \rangle_k$ 表示第 k 个含有高能中心簇射集团的族中高能中心簇射集团的平均横向扩展; $\langle R \rangle_{\text{av}}^*$ 和 $\langle ER \rangle_{\text{av}}^*$ 分别表示含有高能中心簇射集团的全部族事例的平均横向扩展和平均能量矩, $\langle R \rangle_{\text{av}}^* = \sum \langle R \rangle_k^* / N_i^*$, $\langle ER \rangle_{\text{av}}^* = \sum \langle ER \rangle_k^* / N_i^*$, 其中 $\langle R \rangle_k^* = \sum R_i / N_i$, $\langle ER \rangle_k^* = \sum E_i R_i / N_i$, R_i 表示簇射到族的能量中心的距离, E_i 表示族中簇射成员的能量, N_i 表示族中簇射总数; $\xi = N_i^* / N_i$, 表示全部族事例中出现含有高能中心簇射集团族事例的频度^[2], 其中 N_i 为符合族事例选择标准的全部族事例数目.

表 3 含有高能中心簇射集团的族事例特征

特征量	实验族事例	模拟族事例	
		COSMOS	CORSIKA
N_i^*	9	83	213
$\langle R \rangle_{\text{cluster}}^* / \text{cm}$	0.37 ± 0.12	0.34 ± 0.04	0.35 ± 0.02
$\langle R \rangle_{\text{av}}^* / \text{cm}$	0.55 ± 0.18	1.10 ± 0.12	0.89 ± 0.06
$\langle ER \rangle_{\text{av}}^* / (\text{TeV} \cdot \text{cm})$	8.15 ± 2.72	11.06 ± 1.21	9.35 ± 0.64
$\xi (\%)$	20.5 ± 3.1	6.1 ± 0.2	13.5 ± 0.3

从表 3 可以看出, 含有高能中心簇射集团的族中, 实验的与模拟的高能中心簇射集团的平均横向扩展都很小, 且结果基本一致; 含有高能中心簇射集团的族事例中, CORSIKA 模拟的平均横向扩展及平均能量矩与实验的比较接近, 而 COSMOS 模拟的相应结果与实验的差距较大; 结合图 1 可以看出, 实验数据中含有高能中心簇射集团族事例的频度较大, 说明 γ -强子族中确有能量集中现象存在, CORSIKA 模拟数据中出现含有高能中心簇射集团族事例的频度, 较 COSMOS 模拟的相应结果有一倍以上的超出, 与实验数据的分析结果更接近一些, COSMOS 模拟的相应结果与实验的相比存在较大差异. 这说明采用了 SIBYLL 模型的 CORSIKA 程序有趋势模拟超高能 γ -强子族的能量集中现象, 而采用传统的以唯象多团模型为基础的 COSMOS 程序难以模拟出这种现象.

3.3 小结

通过对实验及模拟的 γ -强子族事例的分析、对比, 可以看出, 超高能 γ -强子族的能量集中现象是族中含有的高能中心簇射集团的外在表现; 实验的与模拟的高能中心簇射集团的平均横向扩展具有较好的一致性, 在实验上, 集团的平均横向扩展约为 0.37cm; 在 γ 与强子的判选标准取 4c. u., $R \leq 10\text{mm}$, $\chi_{10} \geq 90\%$ 的条件下, 能量集中现象在实验上发生的频度为 $(20.5 \pm 3.1)\%$, 采用 SIBYLL 模型的 CORSIKA 程序模拟出的族事例中, 含有

高能中心簇射集团的频度有趋势接近实验分析的结果,而传统的采用唯象多团模型的 COSMOS 程序却难于对存在着能量集中现象的超高能 γ -强子族进行模拟. 本工作采用的实验数据有限,有待于增加实验事例的统计性,对本课题做进一步的研究.

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 Barzei L T, Borisov A S, Cherdyntseva K V et al. Nucl. Phys., 1992, **B370**:365
- 2 Tamada M. Proc. 23rd ICRC, Calgary, 1993, **4**:80
- 3 Zhdanov G B, Denisova V G. Proc. 24th ICRC, Rome, 1995, **1**:193
- 4 Hasegawa S, Tamada M. Nucl. Phys., 1996, **B474**:141
- 5 REN JingRu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1990, **14**:961
(任敬儒等, 高能物理与核物理, 1990, **14**:961)
- 6 Shibata M, Yuda T, Taira K et al. IL Nuovo Cimento, 1977, **39B**:302
- 7 Kasahara K. Proc. 24th ICRC, Rome, 1995, **1**:399
- 8 Fletcher R S et al. Phys. Rev., 1994, **D50**:5710
- 9 Heck D. Proc. 25th ICRC, Durban, 1997, **6**:245
- 10 LUO GuangXuan et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1995, **19**:769
(罗光宣等. 高能物理与核物理, 1995, **19**:769)

Phenomenon of Energy Concentration in Super-High Energy
 γ -Hadron Families *

DAI ZhiQiang^{1,1)} XUE Liang² LI JinYu² ZHANG XueYao² FENG CunFeng²
FU Yu² LI Jie² CAO PeiYuan² ZHANG NaiJian² HE Mao² WANG ChengRui²

1 (Department of Electronic Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

2 (Department of Physics, Shandong University, Ji'nan 250100, China)

REN JingRu LU SuiLing

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

Abstract The family events observed with iron emulsion chambers at Mt. Kanbala are analyzed and compared with the simulations by the COSMOS code and CORSIKA code respectively. A detailed study on the production of super-high energy γ -hadron families with energy concentration behavior is carried out. The preliminary conclusions are: 1) the energy concentration behavior of super-high energy γ -hadron families is the external embodiment of high energy central shower clusters contained in the families. 2) the mean lateral spread of these clusters is about 0.37cm. 3) the frequency of this phenomenon appeared under the conditions of $R \leq 10\text{mm}$ and $\chi_{10} \geq 90\%$ is $(20.5 \pm 3.1)\%$. 4) compared to the COSMOS code based on the phenomenological multicluster model, the simulation by the CORSIKA code that adopts SIBYLL model is closer to the analytical results of experiment.

Key words iron emulsion chambers, γ -hadron families, Monte Carlo simulation, high energy central shower clusters

Received 15 October 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19875031) and Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education

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