

# 宇宙线高能族事例中的共线现象\*

薛良<sup>1)</sup> 戴志强 李金玉 张学尧 冯存峰 傅宇 张乃健

(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 K0—K7 乳胶室所观测到的部分族事例与运用 COSMOS, CORSIKA 程序产生的模拟族事例进行了可分辨能量中心(EDC)的共线性的分析,结果表明:在实验族事例中,共线事例产生的份额随族的总观测能的增高而上升;而传统的模拟计算不能解释共线现象这一特征.文中还对族事例中  $\gamma$  线与强子的判别标准进行了讨论.

**关键词** 乳胶室  $\gamma$ -强子族 Monte Carlo 模拟 共线性

## 1 引言

高山乳胶室是研究宇宙线超高能核作用的重要探测器之一.通过对乳胶室所记录的宇宙线高能族事例进行细致的分析,可以得到有关超高能强相互作用的重要信息. Pamir 合作组通过对具有“晕”(halo)形成的超高能族事例的空间结构进行分析,发现在多心晕事例中存在着高度的共线性<sup>[1]</sup>. 十几年来, Pamir 合作组在宇宙线高能族事例的共线现象方面进行了系统的研究<sup>[2-8]</sup>. 一方面他们在实验上积累事例,扩大统计量,得到了可靠的实验结果;另一方面,他们在理论上也进行了积极的探索,先后提出了多种模型(如 MSF, MJ, SHDID, MC0 等),对共线现象进行了广泛的 Monte Carlo 模拟.

宇宙线高能族事例中的共线现象是指高能  $\gamma$ -强子族内可分辨能量中心(Energetically Distinguished Core, 简称 EDC)在靶平面内近似呈直线分布. 在实验上,可分辨能量中心系指以下客体<sup>[2]</sup>:(1) 电磁来源的 halo 或多心 halo 分离的中心;(2)  $\gamma$  束(用退级联标准组合而成);(3) 单个的高能  $\gamma$  量子;(4) 高能强子,特别是在乳胶室内形成 halo 的强子. 这些客体的最小能量一般要求超过 10TeV.

在 Pamir 合作组的早期工作中,一直是将退级联后形成的  $\gamma$  束与强子一起作为 EDC 进行处理的,这样做不能反映共线现象的本质. 一般认为,共线现象是由于原初强子与空气核相互作用产生的半硬衍射非弹性分解(Semihard Diffractive Inelastic Dissociation, 简

1999-11-10 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: xuel@hepg.sdu.edu.cn

称 SHDID)过程中的共面喷注发射引起的<sup>[9]</sup>.  $\gamma$ 团(将族中 $\gamma$ 簇射集团化后形成的)与强子有着内在的联系,它可以被看作是宇宙线粒子与空气核相互作用产生的喷注.因此,在研究共线现象时,应该选取强子及代表强子的 $\gamma$ 团作为可分辨能量中心(EDC).

甘巴拉山组于 80 年代铺设了大规模的铁乳胶室和铅乳胶室<sup>[10]</sup>,积累了大量的总观测能  $\Sigma E_{\text{vis}} > 100\text{TeV}$  的高能族事例.特别是铁乳胶室对强子的探测效率高<sup>[11]</sup>,为研究宇宙线超高能强子相互作用提供了优越的条件.

本工作对甘巴拉山 K0—K7 乳胶室族事例进行了退级联、集团化处理,并对其进行了可分辨能量中心的共线性的分析,结果表明在甘巴拉山铁室和铅室族事例中存在着共线现象.同时,本工作还根据高能区重核占优势的原初粒子能谱,使用 COSMOS 和选用 SIBYLL 模型的 CORSIKA 程序并按照甘巴拉山乳胶室的具体实验条件对宇宙线粒子在大气中传播过程进行了模拟,我们对模拟族事例进行了与实验数据相同的处理和分析.

## 2 Monte Carlo 模拟

本工作采用 COSMOS 和 CORSIKA 两个模拟程序对宇宙线粒子在大气中传播过程进行了模拟. COSMOS 程序是以唯象多团模型为基础<sup>[12]</sup>,它支持 Feynman Scaling 在碎裂区基本保持.在不同能区,该程序对强相互作用采用不同的方法:在低能区 ( $E_{\text{lab}} < 500\text{GeV}$ ),用户可选用 LUND 模型中的 FRITIOF 或 GHEISHA 算法,本工作采用的是 FRITIOF 算法;在 高能区,采用由 UA5 实验得到的参数化模型. CORSIKA 程序<sup>[13]</sup>是为 KASCADE 实验而发展起来的,它包括 5 种可选择的强相互作用模型,本工作选用的是其中的 SIBYLL 模型<sup>[14]</sup>. SIBYLL 模型是一个以 DPM(Dual Parton Model)和 Minijet 模型为基础的强相互作用模型.

在模拟中本工作采用的是怀柔 EAS 阵列测量出的初级宇宙线能谱,该能谱将原初宇宙线分为七组<sup>[15]</sup>:(1)质子,(2)氦核(He),(3)轻核( $Z \sim 7$ ),(4)中重核( $Z \sim 12$ ),(5)重核( $Z \sim 17$ ),(6)甚重核( $Z \sim 23$ ),(7)铁核(Fe).在  $10^{16}\text{eV}$ ,以上各成分的比例依次为(%) 14.4,4.7,20.7,18.1,9.9,9.5,22.7.

本工作依照甘巴拉山乳胶室实验的具体条件对 COSMOS 和 CORSIKA 程序的模拟数据进行处理,在处理过程中考虑了甘巴拉山乳胶室的有效面积、粒子的探测效率、 $\gamma$ 与强子的混合、实验的空间分辨能力以及倾斜入射的影响等因素.

## 3 族事例的处理方法

### 3.1 $\gamma$ 和强子判别标准的确定

实验上正确区分  $\gamma$  和强子是利用乳胶室进行宇宙线形态学及超高能强相互作用研究的前提.在高山乳胶室实验中一般取 6 c. u. 作为  $\gamma$  线与强子的判别标准,即起始点深度  $\Delta t < 6$  c. u. 且无后继相互作用的簇射定为  $\gamma$  线,其余定为强子事例.对于铁乳胶室,由于强子在铁中的核作用长度  $\lambda_i$  (通常用辐射长度即级联单位 c. u. 作为度量单位)比在铅中

短得多( $\text{Fe}: \lambda_i \cong 9.5 \text{ c. u.}$ ,  $\text{Pb}: \lambda_i \cong 30 \text{ c. u.}$ ), 若仍采用  $6 \text{ c. u.}$  作为判别标准将会使大量的强子事例混入  $\gamma$  线的数据中.

本工作采用统计方法对于采用不同的判别标准时铁乳胶室内  $\gamma$ 、强子事例的相互混入情况进行了模拟, 结果如表 1 所示.

由表 1 可见, 对于铁室数据, 若取  $6 \text{ c. u.}$  为判别标准, 在被判为  $\gamma$  线的事例中强子混入份额占  $53.5\%$ ; 而取  $4 \text{ c. u.}$  为判别标准, 这一份额下降到  $39.5\%$ , 同时  $\gamma$  混入强子份额仅为  $3.1\%$ , 这是可以接受的. 因此, 对于铁乳胶室数据本工作将采用  $4 \text{ c. u.}$  作为  $\gamma$  和强子判别标准. 而对于铅乳胶室数据, 本工作仍采用  $6 \text{ c. u.}$  的判别标准.

表 1 铁乳胶室中不同判别标准下  $\gamma$ 、强子事例相互混入份额

$\gamma$ 和强子判别标准	$\gamma$ 混入强子份额	强子混入 $\gamma$ 份额
6.0 c. u.	0.6%	53.5%
5.5 c. u.	0.9%	50.3%
5.0 c. u.	1.3%	46.8%
4.5 c. u.	2.0%	43.1%
4.0 c. u.	3.1%	39.5%

### 3.2 退级联和集团化因子的选择

在乳胶室所记录的族事例的电磁成分中, 除了一部分来自原初核作用产生的  $\pi^0$  介子衰变而成的  $\gamma$  射线(称为原始  $\gamma$ )外, 还有大量的电子和  $\gamma$  是来自乳胶室上空电磁级联簇射的产物. 为了研究共线现象, 有必要对乳胶室中所记录的  $\gamma$  簇射进行退级联和集团化处理. 首先, 把来自同一个原始  $\gamma$  线的级联粒子结合在一起, 称为“退级联”. 然后再选取适当的集团化因子, 把那些属于同一个空气喷注的粒子结合在一起, 称为集团化分析.

在退级联时, 本文选取的横向扩展参数为

$$Z_{ij} = \sqrt{E_i \cdot E_j} \cdot R_{ij} \leq Z_0,$$

其中  $E_i, E_j$  分别为第  $i$  个和第  $j$  个  $\gamma$  簇射的能量,  $R_{ij}$  为它们之间的距离. 作为退级联标准的横向扩展常数为

$$Z_0 = 2 \cdot E_s \cdot X_0 = 2.4 \text{ TeV} \cdot \text{cm},$$

其中  $E_s$  为散射能量( $\approx 20 \text{ MeV}$ ),  $X_0$  为  $\gamma$  线在大气中的辐射长度(在甘巴拉山高度约为  $600 \text{ m}$ ).

在集团化时, 本文选取的表征退级联后各原始  $\gamma$  线成员横向扩展参数为

$$Z_{ij}^* = \frac{E_i^* \cdot E_j^*}{E_i^* + E_j^*} \cdot R_{ij}^* \leq X_c^*$$

集团化常数为

$$X_c^* = p_{\perp, \gamma} \cdot H,$$

其中  $p_{\perp, \gamma}$  为原始  $\gamma$  线平均横动量,  $H$  为事例的有效产生高度. 本工作使用不同的集团化常数对实验和模拟族事例进行处理, 发现在  $X_c^* = 10 \text{ TeV} \cdot \text{cm}$  处团的数量已趋于稳定. 因

此,本文选取的集团化常数为  $10\text{TeV}\cdot\text{cm}$ .

### 3.3 共线族事例的选择标准

本文使用 Pamir 合作组引入的参数  $\lambda_N$  描述高能  $\gamma$ -强子族方位不对称性<sup>[3]</sup>:

$$\lambda_N = \sum_{i \neq j \neq k}^N \cos 2\phi_{ijk} / N(N-1)(N-2),$$

其中  $\phi_{ijk}$  为第  $i$  个和第  $j$  个 EDC 中心分别与第  $k$  个 EDC 中心连线的夹角;  $N$  为 EDC 个数. 参数  $\lambda_N$  的取值范围为  $[-1/(N-1), 1]$ . 当  $N$  个 EDC 处于同一直线上时,  $\lambda_N = 1$ ; 当  $N$  个 EDC 接近各向同性的情况,  $\lambda_N \approx -1/(N-1)$ .  $\lambda_N$  愈大, 表明族事例的共线性愈高.  $\lambda_N > 0.8$  的族事例被判定为共线事例.

## 4 结果及讨论

本工作对甘巴拉山 K0—K7 乳胶室部分实验数据及 COSMOS, CORSIKA 程序产生的模拟族事例进行了退级联、集团化处理, 并对其中的 EDC 进行了共线性的研究. 本文对族事例的选择标准是:

- (1) 族的总观测能  $\Sigma E_{\text{vis}} = 100\text{—}3000\text{TeV}$ ;
- (2) 族中簇射最小观测能  $E_{\text{min}} = 4\text{TeV}$ ;
- (3) 族中簇射数目  $N \geq 4$ , 其中强子数  $N_h \geq 1$ .

符合这一标准的铁室族事例为 47 个, 铅室族事例为 67 个, COSMOS, CORSIKA 程序产生的模拟族事例分别为 1834 和 1674 个(其中铁室事例与铅室事例的比例与实验数据相同).

表 2 模拟族事例中共线事例出现的频度(%)

	$\Sigma E_{\text{vis}}/\text{TeV}$	100—300	300—500	500—1000	1000—3000
COSMOS	$\lambda_3 > 0.8$	$20.4 \pm 0.6$	$23.3 \pm 1.6$	$25.5 \pm 2.1$	$21.1 \pm 2.8$
	$\lambda_4 > 0.8$	$5.2 \pm 0.2$	$5.7 \pm 0.4$	$6.3 \pm 0.5$	$5.3 \pm 0.7$
CORSIKA	$\lambda_3 > 0.8$	$20.4 \pm 0.6$	$21.3 \pm 1.6$	$22.2 \pm 2.1$	$19.4 \pm 3.2$
	$\lambda_4 > 0.8$	$6.8 \pm 0.2$	$4.9 \pm 0.4$	$4.8 \pm 0.5$	$5.6 \pm 0.9$

模拟族事例在各能量段中共线事例出现的频度如表 2 所示. 从表中可以看出, 无论是 COSMOS 还是 CORSIKA 程序产生的事例, 其共线事例出现的频度均表现出能量的无关性. 在共线能量中心数  $N_{\text{EDC}} = 4$  的情况下, 共线份额为 5.5% 左右; 在  $N_{\text{EDC}} = 3$  的情况下, 共线份额约在 20%—25% 之间, 略高出本底 ( $N_{\text{EDC}} = 3$  时本底值约为 15%,  $N_{\text{EDC}} = 4$  时约为 3%<sup>[2]</sup>). 这个结果与 Pamir 组所使用的 MCO 程序的模拟结果一致<sup>[8]</sup>.

甘巴拉山 K0—K7 乳胶室部分族事例共线事例出现的频度如图 1 所示. 由于事例数少, 统计量不够, 本工作只作了三心共线的情况. 图中短划线表示 COSMOS 和 CORSIKA 模拟数据中共线事例出现的比例, 虚线表示杂乱无章客体入射所形成的本底. 由图可见, 实验族事例中共线事例的份额随能量的增加而上升, 在  $\Sigma E_{\text{vis}} = 100\text{—}1000\text{TeV}$  各能区, 共

线事例的份额都在 20% 左右,这与 COSMOS 和 CORSIKA 程序的模拟结果基本一致;而在  $\Sigma E_{\text{vis}} = 1000\text{--}3000\text{TeV}$  能区共线份额却达到  $50.0 \pm 15.8\%$ ,为本底值的三倍以上,这与 Pamir 组的实验结果相符合<sup>[2]</sup>. 由模拟和实验结果比较可以看出,传统的模型不能解释共线事例份额随能量增高而上升的特性.

关于共线现象产生的机制,到目前为止仍然没有定论. 有人认为,共线现象产生的最重要、最基本的原因是强相互作用中次级粒子的关联,可能是  $10^{16}\text{eV}$  以上能区才会发生的一种新的物理现象. R. A. Mukhamedshin

曾基于玻密子(Pomeron)物理采用 SHDID 模型解释共线现象<sup>[9]</sup>,并假设在  $\sqrt{s} = 4\text{TeV}$  以上电弱标度破坏时有一种由色六态夸克组成的重子( $B_6$ )产生. 依据这个模型所得到的共线事例的份额约为 40% ( $\lambda_4 < 0.8$ ),与实验结果相符合. COSMOS 和选用 SIBYLL 模型的 CORSIKA 程序在超高能区所采用的关于强相互作用的参数均由加速器数据外推得来,而并没有将超高能区所独有的强相互作用机制包含进去,这可能是它们以及 Pamir 组采用的其它传统模型不能解释共线现象的原因.

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 Baradezi L T, Smorodin Yu A, Lebedev P N et al. Proc. of Inter. Symp. on Cosmic Rays and Part. Physics, Tokyo, 1984, 136—141
- 2 Pamir Collaboration. Proc. 22nd ICRC, 1991, 4: 125—128
- 3 Pamir Collaboration. Proc. of 4th ISCRSHEI, Beijing, 1986, 4: 29—36
- 4 Pamir Collaboration. Proc. of 5th ISCRSHEI, Lodz, 1988, 9—14
- 5 Kopenkin V V, Managadze A K, Rakobolskaya I V et al. Proc. of 8th ISVHECRI, Tokyo, 1994, 71—83
- 6 Mukhamedshin R A. Proc. 8th ISVHECRI, Tokyo, 1994, 57—70
- 7 Puchkov V S. IL NUOVO CIMENTO, 1996, 19C: 1011—1016
- 8 Borisov A S, Denisova V G, Maximenko V M et al. Proc. 25th ICRC, 1997, 6: 61—64
- 9 Mukhamedshin R A. IL NUOVO CIMENTO, 1996, 19C: 1005—1010
- 10 REN JingRu, HUO AnXiang, LU ShuiLing et al. Phys. Rev., 1988, D38: 1404—1416
- 11 Shibata M, Yuda T, Taira K et al. IL NUOVO CIMENTO, 1977, 39B: 302—318
- 12 Kasahara K. Proc. 24th ICRC, 1995, 1: 399—402
- 13 Heak D. 25th ICRC, 1997, 6: 245—248
- 14 Fletcher R S, Geisser T K, Lipari P et al. Phys. Rev. 1994, D50: 5170—5731
- 15 LUO GuangXuan, TAN YouHeng, ZHANG ChunSheng et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1995, 19: (9)769—774  
(罗光宣, 谭有恒, 张春生等. 高能物理与核物理, 1995, 19: (9)769—774)

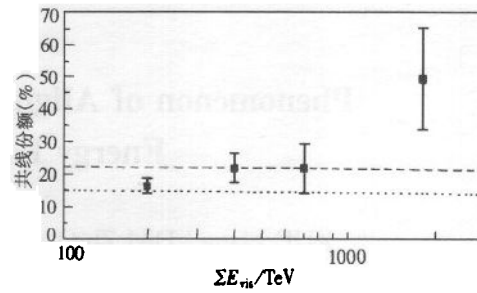


图 1 实验簇事例中共线份额随簇的总观测能的变化

--- 模拟计算结果, ..... 杂乱无章客体入射所形成的本底.

## Phenomenon of Alignment in Cosmic Ray High Energy Family Events \*

XUE Liang<sup>1)</sup> DAI ZhiQiang LI JinYu ZHANG XueYao

FENG CunFeng FU Yu ZHANG NaiJian

(*Department of Physics, Shandong University, Jinan 250100, China*)

REN JingRu LU SuiLing

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

**Abstract** The alignment of energetically distinguished cores in a part of family events observed with Kanbala K0—K7 emulsion chambers is analyzed, and compared with the simulation results given by COSMOS and CORSIKA code. It is shown that the fraction of events with alignment in the experimental families increases with the visible energy of families but this effect can not be explained by the conventional simulations. The Criteria of identifying  $\gamma$ -rays and hadrons in the family events are also discussed.

**Key words** emulsion chambers,  $\gamma$ -hadron family, Monte Carlo simulations, alignment

---

Received 10 November 1999

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

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