

# 用铁乳胶室观测大气宇宙线中的高能强子\*

张乃健 王承瑞 何 瑁 曹培园  
李金玉 邹宝堂 王广君 蔚 超

(山东大学高能物理研究室, 济南)

## 摘 要

对中国-日本乳胶室合作组在甘巴拉山(海拔 5500m, 大气深度 520g/cm<sup>2</sup>)照射的 K4 铁乳胶室的一部分进行了系统的扫描、测量与分析。给出了簇射事例的起始点分布, 大气宇宙线高能强子的天顶角分布、垂向流强、积分能谱及其在大气和铁中的衰减长度。与其它实验组近期给出的实验数据进行了比较, 几组结果大体一致。

## 一、引 言

在高山高度探测到的大气宇宙线中的强子成分, 更为直接地携带着高能强子相互作用的信息。因此, 利用高山乳胶室对宇宙线高能核作用中产生的次级强子成分进行研究, 不仅能提供宇宙线形态学方面的数据, 而且还可为研究高能强子相互作用机制和能量为  $10^{15}$ eV 以上的原初宇宙线的质量谱提供重要信息。

近几年来, 甘巴拉山乳胶室实验发表了一系列有关大气宇宙线中的电磁成分和强子成分的实验结果<sup>[1-3]</sup>, 其它实验组也就这一研究课题作了报道, 如富士山组<sup>[10,11]</sup>, 帕米尔组<sup>[12,13]</sup>等。上述已发表的有关大气宇宙线强子成分的实验数据, 基本上都是用铅乳胶室获得的, 而本文的结果是用探测强子几率较高的铁乳胶室得到的。

宇宙线高能强子与乳胶室中的铅(或铁)原子核相互作用, 产生次级粒子形成簇射, 被记录在乳胶室中。强子与铅原子核作用的平均自由程为 31r.l., 而与铁原子核作用的平均自由程为 9.4r.l., 因此铁乳胶室对强子的探测几率要比同样厚度(以辐射长度为单位)的铅室高。文献[7]指出, 在厚度为 28—30r.l. 的铁乳胶室内对强子的探测几率要比铅室的相应值高一倍。为了更有效地探测强子成分, 中国-日本乳胶室合作组自 1982 年起在西藏甘巴拉山上(海拔 5500m, 大气深度 520g/cm<sup>2</sup>)铺设了大面积铁乳胶室。近几年报道了有关大气宇宙线中电磁成分和强子成分的部分实验结果<sup>[5-7]</sup>。

\* 国家自然科学基金资助的课题。  
本文 1989 年 1 月 30 日收到。

为了研究大气宇宙线中高能强子的特征,我们对甘巴拉山 K4 铁乳胶室的一部分进行了系统的扫描、测量和分析.给出了簇射事例的起始点分布,大气宇宙线高能强子的天顶角分布、垂向流强、积分能谱,以及强子在大气和铁中的衰减长度,并把所得到的实验结果与其它实验组的相应数据进行了比较与讨论.

## 二、实 验

K4 甘巴拉山铁乳胶室每个单元的厚度为 29r.l., 由 60cm × 90cm × 9mm 的 59 张铁板和 13 层 40cm × 50cm 的真空密封感光层(自第 5r.l. 起)交替迭合组成. 所用 X 光底片为 Sakura-N 型、Fuji-100 型和天津高银量-III 型. 照射时间从 1984 年 5 月到 1985 年 5 月,总面积为 58m<sup>2</sup>. 本文的实验数据来自其中的 7.8m<sup>2</sup>.

经扫描、测角、作靶图而被认证的簇射事例,利用 NLM-C 型测微光度计对簇射斑的黑度进行了测量,所用观测孔为 200 × 200μm<sup>2</sup>. 铁乳胶室中簇射事例能量的确定方法,与铅乳胶室所用的方法基本相同<sup>[7]</sup>.

根据簇射事例的起始点分布和相互作用特征,可以把它们分为  $\gamma$  线簇射和强子喷注. 通常认为起始点深度  $\Delta z \leq 6r.l.$ , 并且无可见后继相互作用的簇射是由  $\gamma$  线引起的; 其余的认为是强子喷注. 本实验在 39 个单元的铁乳胶室中,共观测到  $E_{\text{cl}}^{(\gamma)} > 5\text{TeV}$  的簇射事例 405 个,其中属于无关联高能簇射、满足条件  $\Delta z > 6r.l.$ 、且  $E_{\text{cl}}^{(\gamma)} \geq 7\text{TeV}$  的事例共 147 个,  $E^{(\gamma)}$  表示强子与铁核作用产生的次级粒子转换成电磁成分的能量值. 在处理实验数据时,取强子的有效记录区为  $6 \leq \Delta z \leq 23r.l.$ , 并且扣除了那些未穿过单元上表面而进入室内的旁入事例.

## 三、实验结果与讨论

### 1. 簇射事例的起始点分布与强子在铁中的衰减长度

实验观测到的所有簇射事例的起始点分布,如图 1 中的实验点“+”所示. 图中虚线是与全部实验点相拟合的分布曲线,其中起始点深度较小的峰区是由  $\gamma$  线和部分强子组成; 深区(如  $\Delta z > 6r.l.$  部分)中的事例则是来自强子. 根据  $\gamma$  线和强子在铁中的衰减长度的不同,分别对图中的峰区和深区中的实验点进行曲线拟合,可以得到预期的  $\gamma$  线和强子分布.

根据图 1 中的实曲线在  $\Delta z > 6r.l.$  部分的斜率, 可以求得强子在铁中的衰减长度为  $\lambda_{Fe} = 11.2 \pm 1.1r.l.$ . 这一结果与早期富士山组<sup>[14]</sup>给出的  $\lambda_{Fe} = 11.5 \pm 1.5r.l.$ , 近期中日合作的甘巴拉山实验给出的数据<sup>[7]</sup>  $\lambda_{Fe} = 13.5r.l.$ , 以及根据文献 [15] 给出的实验数据推算而得到的  $\lambda_{Fe} = 14.5r.l.$ , 都基本相符.

### 2. 强子的天顶角分布及其在大气中的衰减长度

强子的天顶角分布如图 2 所示. 根据在大气深度  $x$  处、沿  $\theta$  方向入射的宇宙线粒子流强  $J(x, \theta)$  与垂向流强  $J_{\perp}(x)$  的关系,对实验点进行拟合,可以求得强子在大气中的

衰减长度为： $\lambda = 93 \pm 9 \text{ g/cm}^2$ 。这一数据与最近报道的<sup>[16]</sup>  $\gamma$  线与强子在大气中的衰减长

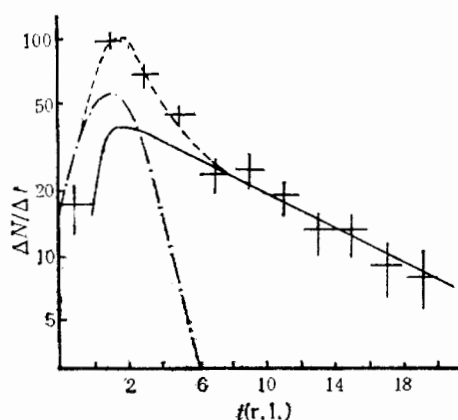


图 1 簇射事例的起始点分布。虚线为与实验点相拟合的全部簇射事例的分布，点划线与实曲线分别代表  $\gamma$  线与强子的预期的分布

度  $\lambda = 95 \text{ g/cm}^2$  相一致。

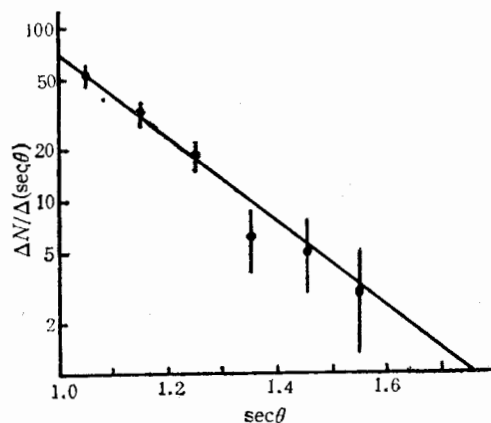


图 2 强子的天顶角分布

### 3. 强子的积分能谱和垂向流强

强子的积分能谱如图 3 所示。与实验点相拟合的能谱指数（在  $E_h^{(\gamma)} \geq 10 \text{ TeV}$  的能区）为  $\beta = 1.85 \pm 0.18$ 。

由于铁乳胶室的探测阈能较高，所以能谱的低能部分探测效率较低，但是对于  $E_h^{(\gamma)} \geq 10 \text{ TeV}$  的高能强子，不存在探测偏爱。

设乳胶室的面积为  $S$ 、照射时间为  $T$ 、强子的探测几率为  $P$ 、乳胶室对强子的有效立体角为  $\Omega$ ，则强子的垂向流强  $J_{\perp}(\geq E_h^{(\gamma)})$  与实验观测到的强子数目  $N_{\text{obs}}(\geq E_h^{(\gamma)})$  之间的关系为： $J_{\perp}(\geq E_h^{(\gamma)}) = N_{\text{obs}}(\geq E_h^{(\gamma)}) / (S \cdot T \cdot P \cdot \Omega)$ 。在本实验条件下，强子的探测几率与室的有效立体角的乘积为  $P \cdot \Omega \approx 0.23 \text{ sr}^{[9]}$ 。根据实验数据进行计算，最后求得，在  $10 \leq E_h^{(\gamma)} \leq 100 \text{ TeV}$  的能区内、在甘巴拉山高度、大气宇宙线强子成分的垂向流强为

$$J_{\perp}(\geq E_h^{(\gamma)}) = (1.6 \pm 0.2) \times 10^{-10} \left( \frac{E_h^{(\gamma)}}{10} \right)^{-(1.85 \pm 0.18)} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}.$$

### 4. 强子的垂向流强随大气深度的变化

把近几年各乳胶室实验组——富士山组、帕米尔组与甘巴拉山组给出的有关大气宇宙线强子成分的垂向流强与积分能谱指数进行汇总，结果如表 1 所示。由该表可以看出，各实验组所给出的强子积分能谱指数比较接近。此外，将表 1 所列举的各实验组在不同时期所发表的有关强子垂向流强的数据进行比较，可以看出，富士山组与帕米尔组给出的最新数据<sup>[11,13]</sup>，比他们以前发表的相应数据<sup>[10,12]</sup>（均折算到同一能区）要高 40% 左右。与以前发表的数据相比较，最新数据中强子和  $\gamma$  线的积分能谱向高能端移动，而能谱指数基

本保持不变,结果使流强数值增高<sup>[17]</sup>.

将表1中富士山组<sup>[11]</sup>、帕米尔组<sup>[13]</sup>与本文利用铁乳胶室给出的宇宙线强子的垂向流

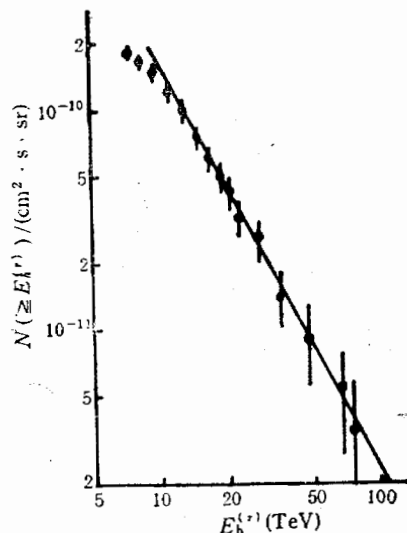


图3 强子的垂向积分能谱

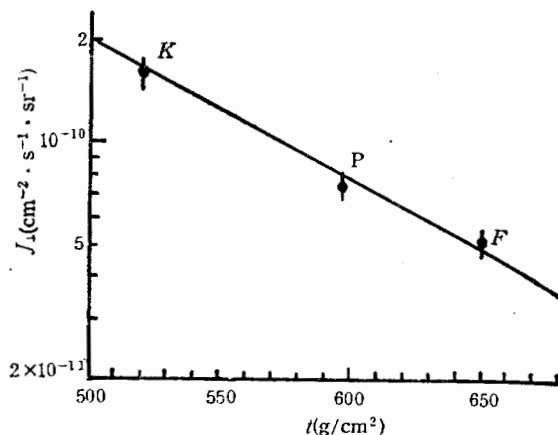


图4 不同大气深度处宇宙线强子的垂向流强 ( $E_h^{(p)} \geq 10 \text{ TeV}$ ). K——甘巴拉山(本工作), P——帕米尔<sup>[13]</sup>, F——富士山<sup>[11]</sup>

表1 不同大气深度处有关强子的实验数据

| 观测点  | 海拔 (m) | 大气深度 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) | 强子垂向流强 $J_1(\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$ | 积分能谱指数 $\beta$  | 文献   |
|------|--------|---------------------------------|---|-----------------|------|
| 富士山  | 3776   | 650                             | $J_1(E_h^{(p)} \geq 5 \text{ TeV}) = (1.5 \pm 0.1) \times 10^{-10}$   | $1.80 \pm 0.18$ | [10] |
|      |        |                                 | $J_1(E_h^{(p)} \geq 5 \text{ TeV}) = (2.1 \pm 0.1) \times 10^{-10}$   | $2.0 \pm 0.1$   | [11] |
| 帕米尔  | 4370   | 596                             | $J_1(E_h^{(p)} \geq 5.5 \text{ TeV}) = (1.6 \pm 0.1) \times 10^{-10}$ | $2.04 \pm 0.07$ | [12] |
|      |        |                                 | $J_1(E_h^{(p)} \geq 5 \text{ TeV}) = (2.7 \pm 0.1) \times 10^{-10}$   | $1.9 \pm 0.1$   | [13] |
| 甘巴拉山 | 5500   | 520                             | $J_1(E_h^{(p)} \geq 5 \text{ TeV}) = (6.0 \pm 0.6) \times 10^{-10}$   | $2.03 \pm 0.08$ | [5]  |
|      |        |                                 | $J_1(E_h^{(p)} \geq 10 \text{ TeV}) = (1.4 \pm 0.2) \times 10^{-10}$  | $1.90 \pm 0.10$ | [7]  |
|      |        |                                 | $J_1(E_h^{(p)} \geq 10 \text{ TeV}) = (1.6 \pm 0.2) \times 10^{-10}$  | $1.85 \pm 0.18$ | 本工作  |

强数据均折算到同一能区 ( $E_h^{(p)} \geq 10 \text{ TeV}$ ), 并对相应的大气深度进行标绘, 结果如图4所示. 图中的实线是取强子在大气中的衰减长度为  $\lambda = 100 \text{ g}/\text{cm}^2$  对实验点进行拟合得到的. 由图可见, 实线与实验点基本一致.

#### 四、结 束 语

本工作表明,采用铁乳胶室观测大气宇宙线所得到的高能强子在大气中的衰减长度、垂向流强与积分能谱等,与用铅乳胶室得到的实验结果相符;本文给出的强子在铁中的衰减长度与其它实验给出的结果一致. 上述结果是用铁乳胶室为甘巴拉山高度大气宇宙线高能强子 ( $E_N^{(T)} \geq 10\text{TeV}$ ) 的特征提供了进一步的实验数据,与铅乳胶室对照,给出各种形态学结果.

作者感谢甘巴拉山乳胶室合作组的同事们给予的支持与所作的大量实验工作,感谢中科院高能物理研究所任敬儒同志给予的帮助与多次有益的讨论.

#### 参 考 文 献

- [1] 任敬儒等,《高能物理与核物理》, **5**(1981),205.
- [2] 霍安祥等,《高能物理与核物理》, **6**(1982),778.
- [3] 陆穗苓等,《高能物理与核物理》, **7**(1983),118.
- [4] 张春生等,《高能物理与核物理》, **9**(1985),649.
- [5] J. R. Ren et al., 19th ICRC, **6** (1985), 204.
- [6] J. R. Ren et al., 20th ICRC, **5**(1987), 255, 371.
- [7] J. R. Ren et al., *Nuovo Cimento*, **10C**(1987), 43.
- [8] 曹培园等,山东大学学报(自然科学版), **23**(1988),31.
- [9] N. J. Zhang et al., Proc. of Int. Symposium on CR Superhigh Energy Interactions, Beijing, (1986), 2—13.
- [10] M. Akashi et al., 17th ICRC, **5**(1981), 247.
- [11] M. Amenomori et al., 19th ICRC, **6**(1985), 208.
- [12] S. G. Bayburina et al., 18th ICRC, **5** (1983), 420
- [13] S. D. Cananov et al., 19th ICRC, **6**(1985), 216.
- [14] M. Shibata et al., *Nuovo Cimento*, **39B** (1977), 302.
- [15] "Particle Properties Data Booklet", Printed at CERN, (1986), P. 162.
- [16] E. H. Shibuya, "Rapporteur Talks of 20th ICRC, HE Session", 20th ICRC, **8**(1987), 238.
- [17] 张乃健等,山东大学学报(自然科学版), **22**(1987),69.

## HIGH ENERGY HADRONS IN ATMOSPHERIC COSMIC RAYS OBSERVED WITH Fe EMULSION CHAMBERS

ZHANG NAIJIAN   WANG CHENGRUI   HE MAO   CAO PEIYUAN   LI JINYU   ZOU BAOTANG  
WANG GUANGJUN   WEI CHAO

*(Department of High Energy Physics, Shandong University, Jinan)*

### ABSTRACT

A part of K4(1984—1985) Fe emulsion chambers exposed at Mt. Kanbala (5500 m, atmospheric depth 520 g/cm<sup>2</sup>) by China-Japan Emulsion Chamber Collaboration has been analyzed with systematic scanning and measurement. The distribution of the starting point depths of the observed showers is given. The zenith angle distribution, vertical intensity, energy spectrum and attenuation length of hadrons in air and in iron are presented. Our results are compared with the recent data given by other experiments, and they are consistent with each other approximately.