

5500米高度高能 γ 线的特性

任敬儒 陆穗苓 苏 实 王允信 王殿臣

(中国科学院高能物理研究所)

王承瑞 何 瑁 张乃健 曹培园 李金玉

(山东大学)

陈允鸿 王士智

(郑州大学)

摘 要

用设置在西藏甘巴拉山(海拔5500米,大气深度520克/[厘米]²)上的乳胶室,研究了高能 γ 线的特性。得出了高能 γ 线的垂直流强、积分能谱、天顶角分布及其在大气中的衰减长度。把所得到的结果与同类工作相应的结果进行了比较,彼此是一致的。同时,我们还选出部分 γ 族进行了分析,得到了族中 γ 线成员的能谱、分数能谱及平均横动量,并对所得到的结果进行了讨论。

一、引 言

到目前为止,用高山乳胶室对超高能现象进行的研究,已取得了许多有价值的结果^[1,2],它为对能量超过100 TeV的超高能核作用的研究提供了许多有用的信息。在我国,用高山乳胶室研究超高能核现象的工作,虽然刚刚开始不久,但已取得了一些成果^[3,4]。1977年8月在西藏甘巴拉山上建的乳胶室(*5),分为厚、薄两部分。经过对厚部分的扫描与测量,共得到644个单个簇射事例,其中的142个单个簇射事例,组成了簇射斑数 n_γ 不同的族23个。本文对其中的单 γ 线事例进行了分析,得出5500米高度处高能 γ 线的垂直流强、能谱、天顶角分布以及 γ 线在大气中的衰减长度。并且把所得到的这些结果与同类工作进行比较。此外,选出总观测能 $\Sigma E_\gamma > 10$ TeV、簇射斑数 $n_\gamma \geq 4$ 、成员的能量 $E_\gamma \geq 2$ TeV的 γ 族作了初步分析,得出 γ 族中成员的能谱、分数能谱及平均横动量。并对这些结果作了讨论。

二、实验情况

本工作所用的那部分厚乳胶室,由50个结构完全相同的单元组成。铺设总面积为5

米²,厚度为10厘米铅。在每个单元中,铅板的尺寸为 30×37 [厘米]²,X光片的面积为 27.9×35.6 [厘米]²。图1是乳胶室单元结构的剖面图。

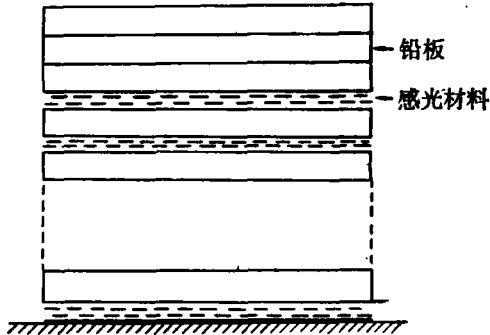


图1 乳胶室单元结构的剖面图

图1是乳胶室单元结构的剖面图。如图所示,自室顶往下数,在3厘米厚的铅板下放置第一层感光材料,以下每隔1厘米厚的铅板放置一层感光材料。每个单元中,共计有8层感光材料,10厘米厚的铅。每层感光材料中,含有两张X光片,一张是上海5F型高对比度X光片,另一张是天津工业III型X光片。

该乳胶室(#5)于1977年8月建立,1978年解体,共曝光257天,回收的片子随即运至北京处理,处理时的室温恒定在 $(18 \pm 0.4)^\circ\text{C}$ 。

将处理好的属于同一感光层中的两张X光片,按照预先用X光机打好的标志重叠起来,在看片灯下用肉眼直观扫描,寻找由电磁作用或强子的核作用形成的簇射黑斑。对扫出的黑斑在测量显微镜(МБИ-8,МБИ-9)下反复进行观察、审核,以证认出事例斑,剔除假象。对于判定为事例的黑斑,要沿其纵向上下追踪,直至追到室内尽可能的远处,以得到事例在室内发展的概貌。

对得到证认的事例,进行了天顶角的测量和不同深度处X光片上黑斑黑度的测量。作黑度测量时,采用的观测孔面积为 100×100 [微米]²。在黑度-能量曲线上找出测得的黑度相对应的能量值,从而定出事例的能量^[4]。

三、事例的起始点分布

为了区分 γ 线与强子,我们作了全部被观测到的事例的起始点的分布。将实验观测到的簇射纵向发展的情况,与根据三维级联簇射理论计算得到的转换曲线相比较,确定出每个事例簇射发展的起始点在室内的深度位置 z 。全部事例的起始点分布,如图2所示。

由于 γ 线在铅中质化的平均自由程远小于强子在铅中的平均碰撞自由程,因此,在乳胶室的上部所观测到的簇射斑,主要是由 γ 线引起的,而在室内足够的深度以下所观察到的簇射斑,主要是强子引起的。只要室的厚度足够,便可根据事例的起始点的分布,从统计上将两者区分开来。

γ 线质化的自由程可视为一个随机变量,其分布可用一正态分布(高斯分布)来描述。由图2可以看出,实验曲线(实线)在 $z = 1.2$ c. u. 处有一个峰值。我们可用一个分布中心(即数学期望值)为 $z_0 = 1.2$ c. u. 和均方差为 $\sigma = 1.7$ 的正态分布(图中的虚线)与该峰值

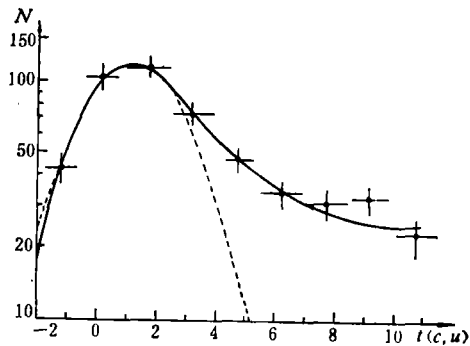


图2 事例的起始点分布

部分的实验曲线得到最佳拟合。其中的 t_0 的取值与 γ 线在铅中质化的平均自由程 8.4 克/[厘米]²(相当于 1.3 c. u.)^[5] 很相近。显然, 峰值所在的深度位置, 就是 γ 线引起的簇射起始点的最可几值; 正态分布曲线也就反映了 γ 线质化自由程的分布。由实验曲线与正态分布曲线的比较可以看出, $t = 4$ c. u. 可作为区分 γ 线与强子的选择标准。 $t \leq 4$ c. u. 的定为 γ 线; $t > 4$ c. u. 的定为强子。当然, 在定为 γ 线的 $t \leq 4$ c. u. 的范围内, 也有强子混入; 在定为强子的 $t > 4$ c. u. 的范围内, 也有 γ 线的混入。在两个区域中两者的混淆, 可从统计上加以确定。上述结果与文献[5,6]相一致。在我们的情况下, 强子约占全部事例的 30%。用这种方法得到的强子在全部分观测到的事例中所占的份额, 与乳胶室的厚度密切相关。当室的厚度 ≤ 40 c. u. 时, 室越厚得到的结果越接近于大气宇宙线中强子在 γ 线与强子中实际所占的份额。

四、单个 γ 线的特性

通过事例起始点分布, 我们挑选出了 γ 线, 并且估计出了 γ 线与强子这两者间的混淆。为求得 γ 线的绝对强度, 必须确定室的有效面积。为此, 把在离边缘 1 厘米范围内斜入的事例剔除在统计之外。对这样挑选出的高能 γ 线进行了分析, 得到的结果如下:

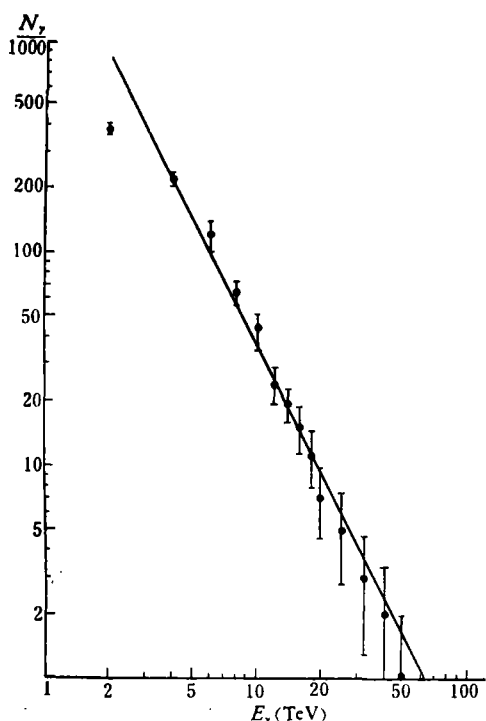


图 3 γ 线的积分能谱

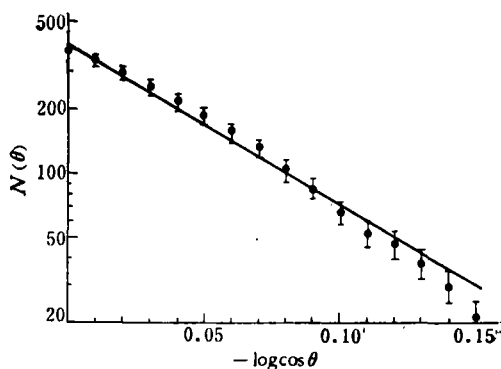


图 4 γ 线的积分天顶角分布

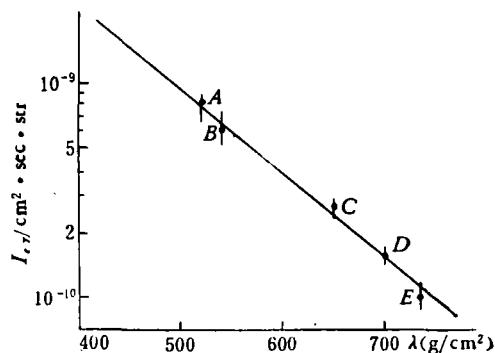


图 5 不同高度处 γ 线的垂直流强

A 甘巴拉山; B 恰卡尔培亚山; C 富士山; D 云南站; E 乘鞍山

1. 垂直流强 实验得到,在高度为 5500 米的高山上,能量 $E_\gamma \geq 2 \text{ TeV}$ 的高能 γ 线的垂直流强为 $I_{e,\gamma}(E_\gamma \geq 2 \text{ TeV}) = (8.09 \pm 0.26) \times 10^{-10} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ str}^{-1}$.

2. 能谱 图 3 是我们得到的 5500 米高山上高能 γ 线的积分能谱。图上的直线表示该能谱可表成下面的幂函数规律: $N = N_0 E_\gamma^{-\beta}$, 其中的能谱指数 $\beta = 1.96 \pm 0.07$.

3. 天顶角分布 我们得出的高能 γ 线的积分天顶角分布,如图 4 所示。设 $N_\gamma(\theta)$ 表示进入室且天顶角大于 θ , 能量 $E_\gamma \geq 2 \text{ TeV}$ 的高能 γ 线数,假定在所涉及的 2—50 TeV 能区里, $N_\gamma(\theta)$ 可表示为 $\cos \theta$ 的幂函数: $N_\gamma(\theta) \propto \cos^m \theta$ 。由图可得,幂指数 $m = 7.3 \pm 0.4$ 。

4. γ 线在大气中的衰减长度 γ 线在大气中的衰减长度,与角分布密切相关,其关系式为^[7] $m = \frac{z}{\lambda} + 2$ 。其中, m 为角分布幂指数, z 为大气深度, λ 为 γ 线在大气中的衰减长度。由此可得 $\lambda = (98 \pm 6) \text{ 克/[厘米]}^2$ 。

表 1 和图 5 给出了本工作及同类工作的结果。图 5 给出了不同高山高度处 γ 线的垂直流强。图中的直线表示根据这些数据得出的 γ 线流强随高度变化的规律。由图可以看出,我们所得到的 γ 线的垂直流强,与流强随高度变化的曲线,是吻合的。

表 1

观测点	海拔高度 (米)	大气深度 (克/[厘米] ²)	积分能谱指数 β	积分角分布 指数 m	衰减长度 λ (克/[厘米] ²)	参考文献
乘鞍山	2770	735	2.3 ± 0.72	8.6 ± 1.0	101 ± 7	[7]
云南站	3200	700	2.08 ± 0.2 ($1 < E_\gamma \leq 10 \text{ TeV}$)	9.9	90 ± 16	[4]
富士山	3776	650	1.95 ± 0.2 -0.1	8.0	107	[5]
帕米尔山	4370	596	2.05 ± 0.04 ($2 \leq E_\gamma \leq 30 \text{ TeV}$)	8.0 ± 0.6	103 ± 4	[8]
恰卡尔塔亚山	5200	540	2.07 ± 0.16 ($0.2 \leq E_\gamma \leq 50 \text{ TeV}$)	8.1 ± 0.7	95 ± 10	[2]
甘巴拉山	5500	520	1.96 ± 0.07 ($2 \leq E_\gamma \leq 50 \text{ TeV}$)	7.3 ± 0.4	98 ± 6	本工作

五、 γ 族的某些特征

在由这部分厚室中得到的族中,我们选出满足下面的标准的族进行了初步分析。事例的选择标准是:族的总观测能量 $\Sigma E_\gamma \geq 10 \text{ TeV}$; 组成族的簇射斑数 $n_\gamma \geq 4$; 族中 γ 线成员的能量 $E_\gamma \geq 2 \text{ TeV}$ 。分析得到的初步结果如下:

1. 族中 γ 线的积分能谱 图 6 是我们得到的族中 γ 线的积分能谱。这个能谱可用幂函数表示: $N \propto (E_\gamma)^{-\beta}$ 。实验得出的能谱指数 $\beta = 1.23 \pm 0.14$ 。这个结果和工作 [9] 是

一致的。在接近阈能 2 TeV 的区域, 实验点低于图中的直线, 估计是由扫描损失造成的。

2. 分数能谱 在一个总观测能量为 ΣE_γ 的族中, 设第 i 个 γ 线的能量为 E_i 。将每个族中的 γ 线, 按其能量由大至小顺序排列, 依序逐一求出分数能量 $f_i = E_i / \sum_{j=1}^i E_j$, 直到求得的 f 大于最小值 $f_m = 0.04$ 为止。满足这一条件的 γ 线数设为 n' , 这 n' 个 γ 线的能量之和设为 $\Sigma' E_\gamma$ 。则第 i 个 γ 线的分数能量 $f'_i \equiv E_i / \Sigma' E_\gamma$ 。

图 7 是我们得到的 f' 谱。图上的纵坐标是归一化为一个族的 $f' \geq 0.04$ 的 γ 线数。图中的曲线表示按照标度性规律作的 Monte-Carlo 模拟的结果, 相应的能区为 $80 < \Sigma' E < 250$ TeV。我们的实验结果所涉及的能区为 $10 \leq \Sigma E < 445$ TeV。由图可见, 在低能区中, 我们的实验结果在趋势上与标度性规律是不矛盾的^[10]。

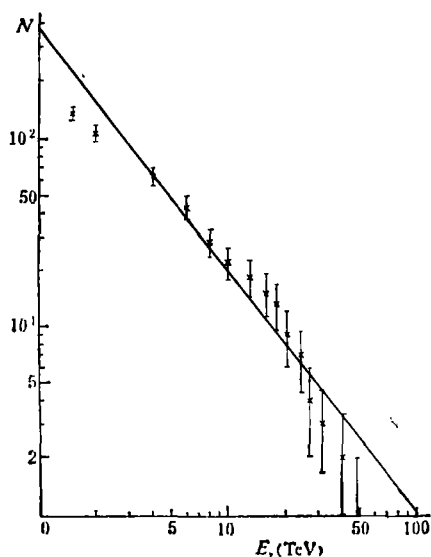


图 6 族中 γ 线的积分能谱

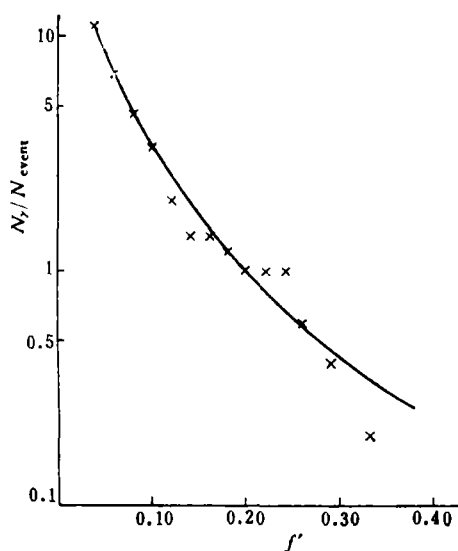


图 7 族中满足 $f' \geq 0.04$ 的 γ 线的 f' 谱

3. 横动量分布 在我们选择的族中, 簇射斑的分布范围较小, 图 8 是族中簇射斑至能

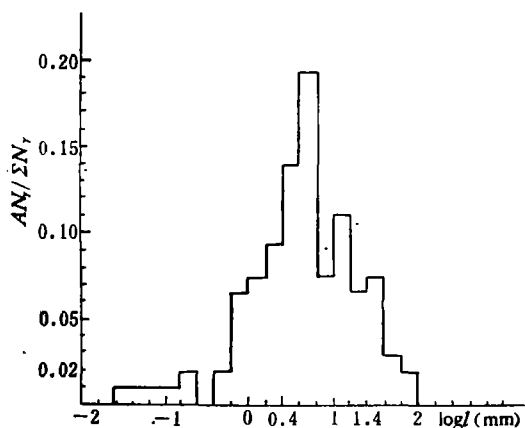


图 8 族中 γ 线的 R 分布

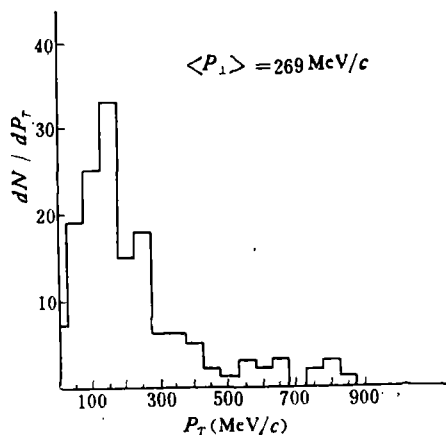


图 9 族中 γ 线的横动量分布

量中心距离 R 的分布。因此,可以假定形成族的主相互作用发生在低空。对每个事例都用 π^0 介子耦合的方法^[3]求出相互作用的产生高度,所得到的结果均在 900 米以下。求出族中诸 γ 线的横动量,作出相应的分布,如图 9 所示。横动量的平均值为 $\langle p_T \rangle = 269$ MeV/ c ,与一般的结果相比较,这一数值偏高。其原因,估计是由于定高度时有二次作用混入,使定出的高度降低所致。

该项工作得到了中国科学院高能物理研究所张文裕先生、何泽慧先生、力一先生和霍安祥同志的热情关怀和支持,作者在此向他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Brasil Group and Japan Group, 15th ICRC, Vol. 7(1977), 208.
- [2] C. M. G. Lattes and M. Akashi et al., *Suppl. Prog. Theor. Phys.*, 47(1971), 1.
- [3] 任敬儒、何 璋、陈允鸿等, 16th ICRC, Vol. 7(1979), 273.
- [4] 任敬儒等, 高能物理与核物理, 2(1978), 318.
- [5] M. Akashi et al., 16th ICRC, Vol. 7(1979), 68.
- [6] S. G. Bayburine et al., 16th ICRC, Vol. 7(1979), 74.
- [7] M. Akashi et al., *Suppl. Prog. Theor. Phys.*, 32(1964), 1.
- [8] H. A. Доброгун и др. изв. А. Н. СССР Сер. физ., 401 (1976), 901.
- [9] M. Akashi et al., 14th ICRC, (1975), 4306.
- [10] M. Akashi et al., CRL-Report, 54-77-13.

CHARACTERISTICS OF HIGH ENERGY γ -RAYS AT 5500m ALTITUDE

REN JING-RU LU SUI-LING SU SHI

WANG YUN-XIN WANG DIAN-CHEN

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

WANG CHENG-RUI HE MAO ZHANG NAI-JIAN CAO PEI-YUAN

LI JIN-YU

(*Shandong University*)

CHEN YUN-HONG WANG SHI-ZHI

(*Zhengzhou University*)

ABSTRACT

The characteristics of high energy γ -rays are studied using emulsion chamber installed at Mt. Ganbala, Tibet, 5500 m high above the sea level, at atmospheric depth of 520 g/cm². The vertical flux, integral energy spectrum, zenith-angle distribution and the attenuation length in the atmosphere for the high energy γ -rays are obtained. The comparison of the results with those of the similar works shows satisfactory agreement. Several γ -ray families are selected and analyzed and the energy spectrum, fractional energy spectrum and the mean values of the transverse momentum of γ -rays in the families are obtained and discussed.