

# 产生多个大横动量成份的 超高能核作用事例

任敬儒 况浩怀 霍安祥 陆穗苓 苏实  
王殿臣 胡文君 范海昆

(中国科学院高能物理研究所)

王承瑞 曹培园 李金玉 李光炬 刘建国  
(山东大学物理系) (重庆建筑工程学院)

## 摘 要

对甘巴拉山乳胶室得到的一个  $\Sigma E_r \approx 1300\text{TeV}$  的  $r$  线族进行了分析, 这个事例是发生在乳胶室上方的核作用, 产生高度低于 150m. 事例的中心部分由 5 个集团组成. 对此事例的特性进行了讨论.

利用甘巴拉山乳胶室, 观测宇宙线的能谱及  $r$  族现象, 研究能量超过  $10^{14}\text{eV}$  的超高能核作用<sup>[1]</sup>. 高山乳胶室观察的族现象是作用中产生的极端向前的粒子形成的. 在这些族中, 最引人注意的是双心结构与多心结构现象<sup>[2,3]</sup>. 这种现象与通常的族现象比较, 很自然会使人联想到 jet 产生或大横动量现象的事实. 但是宇宙线现象比加速器实验中同类问题的研究复杂得多, 由于许多外界条件的干扰, 就某些现象很难作出一些肯定的结论, 往往只能给人们一种启发. 对于双心结构与多心结构的观测也是一样, 虽然早已观测到这些现象, 但对现象产生的原因, 由于初级宇宙线成份和族在空气中传播的历史不清楚, 就很难进行更深入的探讨. 双心结构的族占同能区族的 10% 左右, 而多心结构的族就更少了. 预计这些现象的产生: 一种可能是与 jet 产生或大横动量现象相关, 另一种可能为作用的原初粒子是高能原子核, 或者原初作用发生的位置, 在乳胶室上方很高的地方, 经过多次核作用才到达乳胶室内. 某些模拟计算表明<sup>[4]</sup>, 第二种可能是存在的. 但在对撞机实验中, 肯定了大横动量现象的存在, 所以又不能轻易否定第一种可能. 按第二种可能标度律在  $10^{15}\text{eV}$  能区破坏不严重. 而按第一种可能要导出标度律破坏.

从 1980 年 9 月至 1981 年 9 月, 在甘巴拉山设置的  $14.8\text{m}^2$  的乳胶室中, 得到了一例观测能量  $\Sigma E_r \approx 1300\text{TeV}$  的事例. 这事例是一个在乳胶室上方 150 米高度内产生的作用. 它的中心部分明显由 5 个能量大于  $100\text{TeV}$  的集团组成. 这就是说, 在超高能强子作用中, 可以产生多心现象. 它虽未排除上述的第二种可能, 但它能肯定第一种可能的存在, 因而对认识  $10^{16}\text{eV}$  以上的超高能作用是很有价值的.

## 一、实验简况

这一次乳胶室实验共得观测能量  $\Sigma E_T > 200 \text{TeV}$  事例 9 例. KOE19 是 9 例中能量较大的一例. 事例记录的感光层中含有两张 N 型 X 光片及一张  $100^{\#} \text{X}$  光片、一张 ET7C 原子核乳胶片, 事例的中心部分在 N 型 X 光片中已完全黑化, 外围只有少数低能簇射. 而在  $100^{\#} \text{X}$  光片和原子核乳胶片中, 中心部分的一个个簇射斑清晰可见, 可以分别测定能量、确定座标, 作出各种分布曲线. 图 1 是 KOE19 事例的总靶图. 图 2 是中心部分的放大靶图.

簇射在乳胶室中能量的定标是根据它在 X 光片中形成黑斑的黑度  $D$  与其能量  $E$  的关系而定的, 这个关系是根据三维空间的簇射理论, 考虑缝隙效应的计算<sup>[5]</sup>, 结合黑度  $D$  与电子密度  $\rho$  的关系曲线、与测量条件作出的. 另外, 从原子核乳胶片中数簇射电子径迹密度, 也可以精确确定能量.

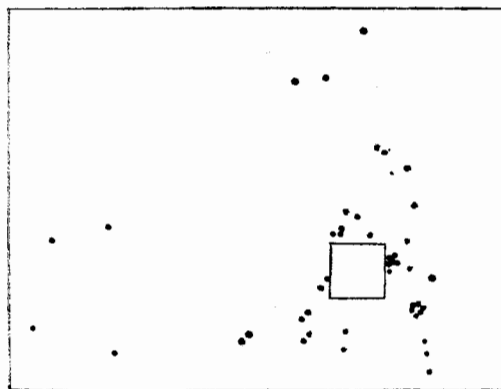


图 1 KOE19 事例靶图

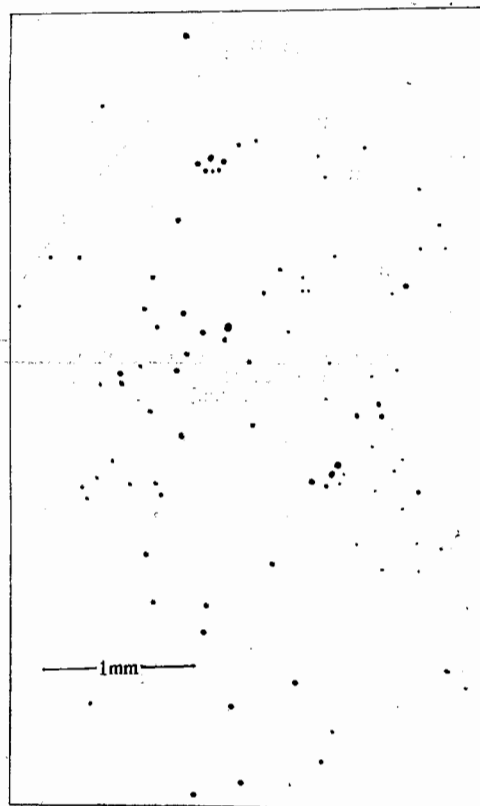


图 2 KOE19 中心部分靶图

## 二、总能量与高度的估计

事例 KOE19 的观测能量, 分别在 N 型 X 光片上、 $100^{\#} \text{X}$  光片及原子核乳胶片上进行测量, 并相互核实.

在 N 型 X 光片上, 事例核心部分已完全黑化, 只能按照在各感光层上黑度分布的变化情况, 来估计这个族在感光层中电子的数目  $n_i$ , 再用  $B$  近似曲线外推, 得出事例电子总数  $N$ , 总径迹长度  $Z$ , 观测能量  $\Sigma E_T$ <sup>[6]</sup>. 根据感光层  $i$  中事例黑度  $D$  沿轴线的分布情况, 及  $D \sim \rho$  曲线 ( $\rho$  为电子密度), 各感光层中 X 光片的本底黑度等, 得到电子密度分布  $\rho(r)$ ,

按实验点的趋势近似为:

$$\rho_i(r) = B_i e^{-A_i \sqrt{r}} \quad (1)$$

其中  $B_i$ 、 $A_i$  为待定系数. 那么对每个感光层都应有:

$$n_i = \int_0^{\infty} 2\pi r B_i e^{-A_i \sqrt{r}} dr = \frac{24\pi B_i}{A_i^4} \quad (2)$$

根据实验中作出的  $\rho_i \sim \sqrt{r}$  的关系图, 从(2)式得到  $n_i$  值. 再作出  $n_i$  与穿过Pb层厚度  $t$  的关系[见图3], 并用  $B$  近似外推,

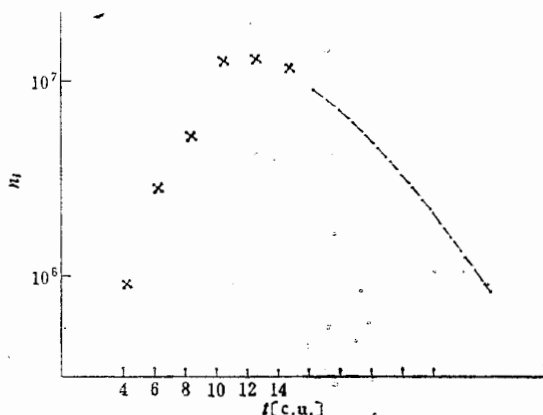


图3 各感光层晕部分中电子数分布

得出事例在 Pb 中的总电子径迹长度  $Z = \sum n_i \Delta t$ ,  $\Delta t = 2\text{c.u.}$ .  $\Sigma E_r = Z \cdot \epsilon_i$ , 从实验上知道  $\epsilon_i \approx 10\text{MeV/c.u.}$ , 当  $Z = 1.2 \times 10^8\text{c.u.}$  时,  $\Sigma E_r = 1.2 \times 10^{15}\text{eV}$ .

在  $100^\# \text{X}$  光片中, 可以对簇射逐个测量. 其方法是在各层 X 光片上测簇射斑的黑度  $D$ , 求出最大黑度  $D_{\max}$ . 利用  $D_{\max} - E$  曲线<sup>[7]</sup>定出各簇射相应的能量. 其结果为:  $\Sigma E_r = 1307\text{TeV}$ . 在 N 型 X 光片中给出的能量只限于事例的主要部分——晕的部分. 事例外围簇射的总能量

约为  $130\text{TeV}$ , 未包括在内. 另外在  $100^\# \text{X}$  光片中, 中心部分本底黑度较大, 有些小簇射被淹没了. 所以从  $100^\# \text{X}$  光片中测得的能量要稍低些.

在原子核乳胶片中, 选取了七个簇射, 用数簇射电子径迹的方法, 对黑度相应的能量进行了校对.

对 N 型 X 光片的晕部分, 作出等黑度线的描绘如图 4 所示. 中心部分可明显看到 5 个突出的核心. 对应于  $100^\# \text{X}$  光片上的位置, 是 5 组高能  $\gamma$  簇射集团 [图 5]. 在 高能簇射集团之间, 则很少出现分散簇射. 为对此现象作进一步分析, 首先要估计事例产生的高度.



图4 晕部分等黑度线图

从下面的分析中可以看出 KOE19 是一个低空事例. 事例的各种统计平均量如表 1 所示. 其中  $R$  是从事例能量中心到簇射的距离.  $N_\gamma$  是能量大于  $2\text{TeV}$  的  $\gamma$  线数. 相比较的事例  $F_4-589$ <sup>[8]</sup> 是富士山乳胶室到目前为止找到的产生高度最低的事例. 大约为  $180$  米. 如果  $\gamma$  族的主要部分是在乳胶室的上空不太高的地方产生, 那么族的成员横向扩大  $\langle E \cdot R \rangle$  就不大. 而且由于电磁级联发展不充分, 平均能量  $\langle E_\gamma \rangle$  值也较大. KOE19 事例外围簇射很少, 中心部分集中了全部高能簇射斑. 与  $F_4-589$  相比预计产生高度低于

150 米.

表 1

事 例	$N_r(E \geq 2\text{TeV})$	$\Sigma E_r(\text{TeV})$	$\langle E_r \rangle(\text{TeV})$	$\langle R \rangle(\text{cm})$	$\langle E \cdot R \rangle(\text{TeV} \cdot \text{cm})$
F <sub>A</sub> -589	232	1855	8.0	0.84	4.40
KOE19	131	1083	8.3	0.39	3.23

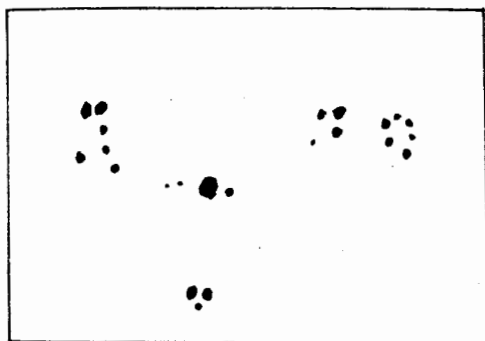


图 5 与图 4 最高黑度对应的簇射斑

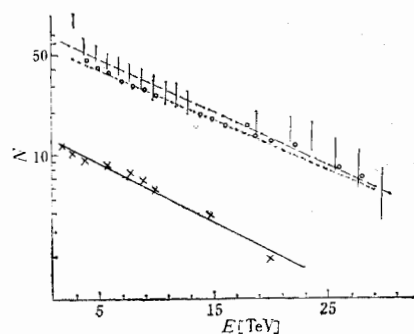
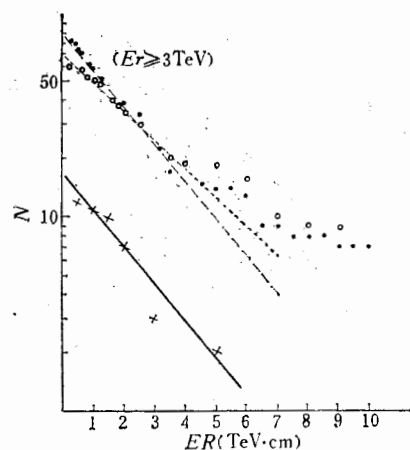
图 6  $\gamma$  线与强子的能谱 —— $\gamma$  线;  
○ 退级联后的  $\gamma$ ; × 强子

图 6 为 KOE19 事例能量大于 3TeV 的  $\gamma$  线谱。实验点大体与  $e^{-E/11.4}$  相近。指数形式的  $\gamma$  谱也表明产生高度低,所以未能经过充分的电磁级联,变能谱为幂级数形式。

族中大于 3TeV 的强子共 11 个,得到的能谱大致与  $\gamma$  线谱相似,近于  $e^{-E/12.3}$ 。这也说明产生高度低,  $\gamma$  谱与强子谱都反映了同一作用中次级粒子的状况。

从表 1 知道  $\langle E \cdot R \rangle = 3.2\text{TeV} \cdot \text{cm}$ , 那么我们取  $\langle P_{T_r} \rangle = 200\text{MeV}/c$ , 则产生高度  $H = 160\text{m}$ 。但这个  $\langle E \cdot R \rangle$  值中含有大  $P_T$  成分较多,所以高度不会超过 160m。从强子的  $ER$  分布(图 7)得到  $\langle E \cdot R \rangle = 2.3\text{TeV} \cdot \text{cm}$ , 所以  $H = 115\text{m}$ 。从退级联后的  $\gamma$  线  $ER$  分布(图 7), 也可求得  $\langle E \cdot R \rangle = 2.9\text{TeV} \cdot \text{cm}$ ,  $H = 145\text{m}$ 。

总之, 从上述种种估计中得到产生高度低于 150m。

图 7  $\gamma$  线与强子的  $ER$  分布 —— $\gamma$  线;  
..... ○ 退级联后; —— × 强子

### 三、族的性质

到达乳胶室中的  $\gamma$  线, 由于在大气中发生电磁级联, 已不能直接反映出原初作用的面貌。为了尽可能还原出作用发生时的状态, 近来都采取了退级联的处理<sup>[9]</sup>。如能量为  $E_i$ 、

$E_j$  的两个  $\gamma$  线簇射, 相互间距离为  $R_{ij}$ . 若  $i, j$  属于同一簇射, 则量:

$$\chi = R_{ij} \cdot \sqrt{E_i \cdot E_j} \quad (3)$$

应小于  $\chi_c = 2K \cdot t/E_{th}$ ,  $K$  为库仑散射常数 (20MeV/c.u.),  $t$  为簇射通过的距离,  $E_{th}$  为观测的阈能, 在此取 1.5TeV 或 2 TeV. 若取  $t = 150\text{m}$ , 则  $\chi_c = 0.4\text{TeV}\cdot\text{cm}$ .

对 KOE19 的全部  $\gamma$  线, 经过这种退级联后, 得到的  $\gamma_1$  谱(图 6) 与强子谱几乎相同, 近于  $e^{-E/12.6}$ . 与原  $\gamma$  谱也很相近. 这是由于产生高度低的缘故.

从  $\gamma$  线的  $ER$  分布(图 7) 中可以看到, 大  $E \cdot R$  值簇射分布, 明显偏离于  $e^{-ER/2.3}$ . 这表明  $P_T$  值大的次级粒子比例较大. 这部分大  $P_T$  的粒子是怎样产生的呢?

我们假定大  $P_T$  粒子是由 jet 产生的. 再仿照公式 (3), 作退 jet 计算. 不过这时取  $\chi_c = 4\text{TeV}\cdot\text{cm}$  (图 8). 是退 jet 后的  $ER$  分布. 那些大  $ER$  值的集团, 正是图 5 中的 5 个集团.

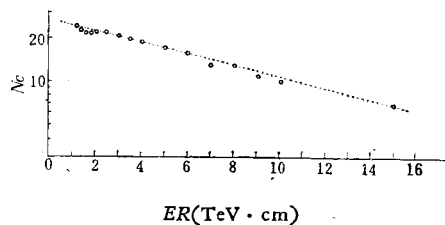


图 8 退 jet 后的  $N_c \sim ER$  关系

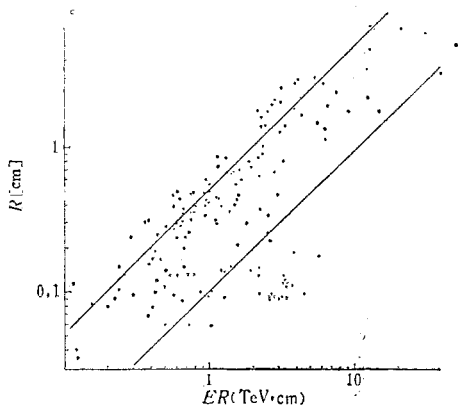


图 9  $R \sim ER$  关联分布

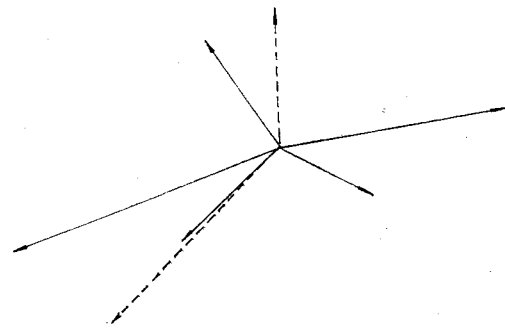


图 10 大  $ER$  集团矢向分布 —— 晕内大  $ER$  集团; ---- 晕外大  $ER$  集团

从  $R-ER$  分布(图 9), 知道具备大  $ER$  值且高能的簇射, 一定集中在倾斜线的前方. 那些  $E \cdot R$  值大, 而能量低的簇射并不是事例的重要部分. 很可能是由更高地方产生作用的次级粒子. 当没有大横动量粒子的时候, 实验点应较均匀地分布在  $45^\circ$  的带内. KOE19 实验点在  $45^\circ$  带中心处突出一部分. 也就是由这部分点构成了大  $ER$  值的高能量集团. 把这些集团按方位分布作出矢量图(见图 10). 其中  $ER$  值较大的四个集团, 如取产生高度为 150m 时, 且假定观测能量为集团总能量的三分之一, 则相应的  $P_T$  值为: 2.3 GeV/c, 5.1GeV/c, 2.3GeV/c, 3.9GeV/c.

这一结果与工作 [2, 3] 比较, 有一定相似性, 即在一次作用中, 可有几个大  $P_T$  粒子 (或集团) 产生, 但 KOE19 是低空发生作用, 因此这个事例中大  $E \cdot R$  簇射的产生, 不可能是多次作用, 或入射粒子是原子核的结果。

这项工作得到了高能物理研究所所长张文裕先生、副所长何泽慧先生, 东京大学宇宙线研究所所长三宅三郎先生、宇宙航空研究所西村纯先生的关怀。实验由中日学者共同进行。作者在此向他们致谢意。

### 参 考 文 献

- [1] 任敬儒等, 高能物理与核物理, 4(1980), 349.
- [2] 任敬儒等, 高能物理与核物理, 5(1981), 706.
- [3] M. Akashi et al., 15th Int. Conf. on Cosmic Ray, HE46(1977), 184.
- [4] K. Kasahara et al., 17th Int. Conf. on Cosmic Ray, HE4.2-3(1981), 235.
- [5] N. Hotta et al., ICR-93-81-3.
- [6] 汤田利典, 宇宙线研究, 24(1981), 92.
- [7] 任敬儒等, 全国第三届宇宙线会议录.
- [8] M. Akashi et al., Cosmic Rays Particle Physics, (1978) (Bartol Conference) 334.

## THE ULTRA-HIGH ENERGY NUCLEAR INTERACTION EVENT PRODUCING MULTIPLE LARGE TRANSVERSE MOMENTUM COMPONENTS

REN JING-RU KUANG HAO-HUAI HUO AN-XIANG LU SUI-LING

SU SHI WANG DIAN-CHEN HU WAN-JUN FAN HAI-KUN

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

WANG CHENG-RUI CAO PEI-YUAN LI JIN-YU

(*Shandong University*)

LI GUANG-JU LIN JIAN-GUO

(*Chongqing Architecture College*)

### ABSTRACT

An analysis of the gamma-ray family ( $\Sigma E_\gamma \approx 1300$  TeV) obtained with Mt. Kamabala emulsion chambers is made. The event is produced by one nuclear interaction occurred at lower altitude than 150 m above the chamber. Central region of the event is composed of 5 clusters. Characteristics of the event is discussed.