

高能宇宙綫粒子与石蜡核作用的角分布*

况浩怀 李如柏 譚有恆 刘永鉞

提 要

本文描述一个利用云室研究高能宇宙綫粒子与石蜡的核作用中次级粒子角分布的实验。共分析了 64 个 $n_s \geq 4$ 的事例,其平均初能 $E_0 \approx 70$ BeV。结果表明,在此能区,次级粒子在 CMS 中,角分布不是各向同性,而在 0° 和 180° 方向呈现极大,且有相当比例 ($\geq 20\%$) 事例的角分布形式显示出火球模型给出图象。

王世伟等^[1]的工作曾指出,在初能 $E_0 \lesssim 100$ BeV 能区,在 $x = \lg r_c \cdot \lg \vartheta_i$ 坐标上,角分布 dN/dx 有可能呈现两个峰。同一能区布加勒斯特组^[2]的乳胶工作也有类似的结果,为了进一步研究此问题,我们将[1]中实验装置作了适当的改进,专门考查此能区核作用中次级粒子的角分布。

一、实 驗

用照明体积为 $45 \times 45 \times 18\text{cm}^3$ 的云室,其中間偏上部分安置一块厚度为 8 cm 的石蜡块作靶,云室下部装有一块 2 cm 厚的鉛板(云室内的结构参看图 1, 图 2)。按这样装置,初级和次级粒子的径迹都约有 15 cm 可测长度,使角度测量误差较小。云室上下安排有 4 层 G-M 计数管,其間夹有 15 cm 厚的鉛吸收体,以此构成选择器控制云室照相。经过有效时间约 3500 小时,得到 20000 对立体照片,在石蜡中的核作用事例有 165 个,图 1、图 2 就是其中两个。

我們按照下列規則剔除事例:

- (1) 径迹畸变较大或次粒子数目太多无法区分者,此类事例剔除了 28 个。
- (2) 由中性粒子引起的核作用或次级荷电粒子多重性 $n_s \leq 3$ 者,此类事例共剔除了 25 个。
- (3) 在照明区边缘的事例共剔除了 25 个。
- (4) 延长次粒子径迹所得交点较散,其范围大于半径为 3 mm 的小球者,此类事例共剔除了 23 个。

按这些規則剔选之后,对余下的 64 个事例 426 条径迹进行了测量,这 426 条径迹不包括已经去掉的次级作用产生的径迹、灰黑径迹(12条)和次粒子中混杂的电子对径迹(25对)。电子对径迹来源于 π^0 , π^0 衰变产生的光子在承托石蜡靶的一块 2mm 厚的黄銅板内有一

* 1964 年 10 月 4 日收到。

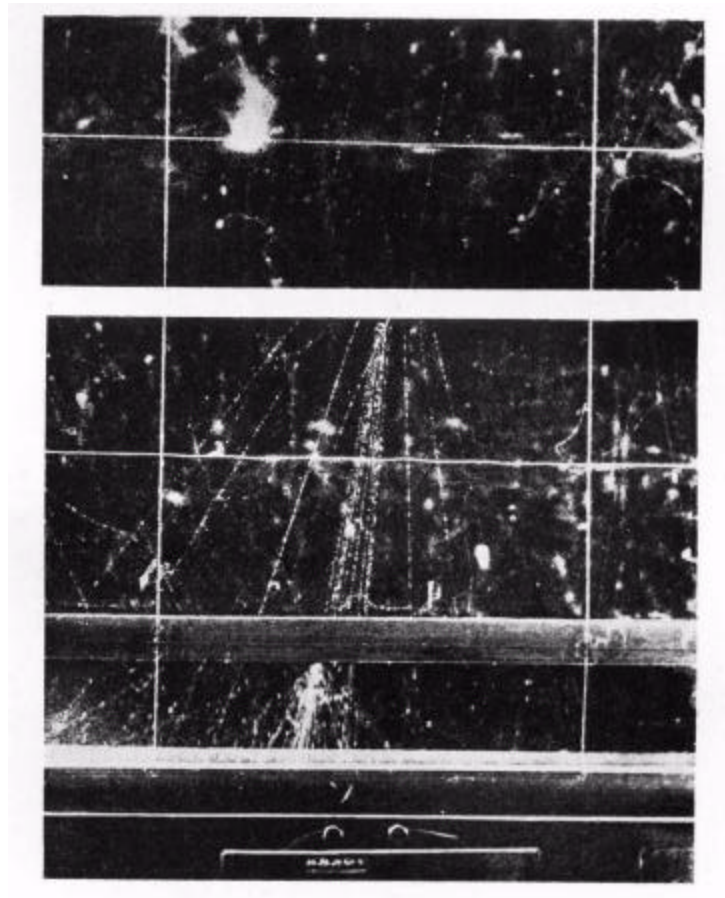


图1 事例 79588, 角分布有内外锥结构

部分转化为电子对, 电子对的夹角很窄, 并在铅板内发展为电磁级联, 据此特征来剔除它。按铜板厚度及次粒子数目估计应观察到 40 个电子对, 因此, 可能还有部分电子径迹尚未除去, 其数量约占次粒子总数的 5%。一方面, 未除去者已为数不多; 另一方面, 它们来源于 π^0 , 根据已辨认的电子对径迹来看, 其角分布与荷电次级粒子径迹角分布相近, 故这种少量电子径迹的混入不致改变角分布的总体性质。

本实验主要测量实验室系 (LS) 中每个次级粒子与初级粒子间的夹角 ϑ_{il} 。由于初级粒子与次级粒子径迹分别处于云室里的靶的上下两格空间中, 云室膨胀的不均匀性会造成 ϑ_{il} 的测量误差。我们利用云室内粒子动量 $p \geq 1\text{BeV}/c$ 的高能穿透径迹进行校正。根据测量的 81 条穿透径迹确定, 云室膨胀的不均匀性可以造成 $2-4^\circ$ 的系统偏差, 校正了系统偏差之后, 角度测量的标准偏差为 2° 。

全部事例都独立测量了两次, 所有计算都经过交叉核对。

二、实验数据的分析讨论

测量了每个事例各次级粒子的发射角 ϑ_{il} 后, 按 Castagnoli 公式^[3]定出每个事例碰撞质心系 (CMS) 的 Lorentz 因子 r_c 。按 426 条径迹计算的 r_c 的平均值为

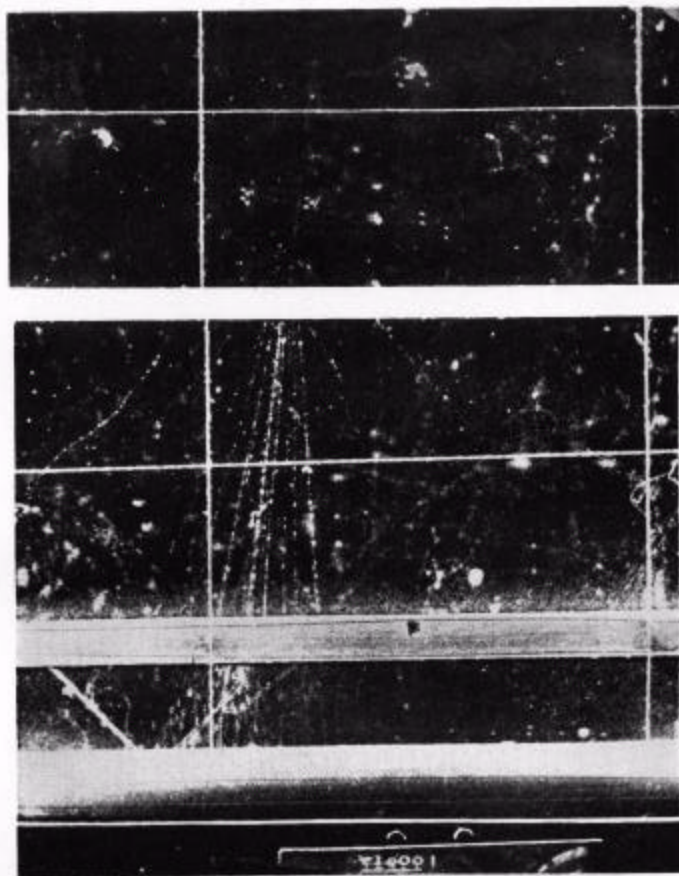


图2 事例 00917, 角分布看不出内外锥结构

$$\bar{r}_c \simeq 6.1,$$

假定事例为核子-核子碰撞, 则平均初能为

$$\bar{E}_0 \simeq 70 \text{ BeV.}$$

现在已经知道, 这样确定的初能误差较大, 但它可以表征我们所得核作用事例所处的能区的范围.

由 64 个 $n_s \geq 4$ 的事例得

$$\bar{n}_s = 6.7 \pm 0.3,$$

其中所标误差仅为统计涨落.

在 $x = \lg r_c \cdot \lg \vartheta_{il} = \lg \lg \vartheta_{il} - \overline{\lg \lg \vartheta_{il}}$ 坐标¹⁾上作角分布 dN/dx . 图 3 示出 64 个事例 426 条径迹的总迭加分布, 分布之平均根方差 $\bar{\sigma} = 0.41 \pm 0.02$, 分布在 $x \approx \pm 0.20$ 处呈现两个峰. 这个分布与王世伟等^[1]的结果相近, 但与其他实验室发表的结果不一致, 他们多得到在 100 BeV 能区 CMS 中角分布是各向同性^[4,5]的, 即相应于分布

1) 在近似假定下可推得

$$x \approx \lg \lg \frac{\vartheta_{ic}}{2},$$

其中 ϑ_{ic} 为次粒子在 CMS 中的发射角.

$$\frac{dN}{dx} \propto \frac{10^{2x}}{(1 + 10^{2x})^2}$$

此分布之根方差 $\sigma = 0.39$, 且可近似为 $\sigma = 0.36$ 的 Gauss 分布。也有人的结果在此能区 CMS 中角分布不全是各向同性^[6,7], 但结果都是按照“一个中心”形式的分布, 即 dN/dx 分布仍为单峰, 形式通常可表为

$$\frac{dN}{dx} \propto \phi(n) = \frac{10^{nx}}{(1 + 10^{2nx})^2}$$

$\phi(n)$ 形分布为单峰, 其根方差 $\sigma = 0.788/n$, 当 $n = 2$ 就是各向同性分布。若 $n < 2$ 则分布在 CMS 中 0° 和 180° 方向有极大, n 越小, σ 越大, 在 0° 和 180° 方向极大的现象就越突出。图 3 中的虚线就是 $\phi(1.9)$ 分布, 其根方差 $\sigma = 0.41$, 与本实验数值相同, 但其形式与本实验结果却有差别, 在 $x = 0$ 处虚线分布比实验分布显著地高。图 4 (a) 是作的 $dN/d\left(\frac{x}{\sigma}\right)$ 分布, 其中 σ 为每个事例的根方差值。图中横坐标间隔是取作使 $\phi(n)$ 形分布在每一间隔内相等, 即图中水平虚线。图中实线为实验分布, 后者在 $\frac{x}{\sigma} = 0$ 附近显著低凹。按 χ^2 检验, 在三倍标准偏差的水准上, 排除了二者相符的可能。

为了分析因处理近似及实验误差所产生的影响, 我们用 Monte-Carlo 法取得一组对比事例, 此组事例系根据下列假定获得的:

- (1) 次级粒子在 CMS 中角分布各向同性;
- (2) 所有次级粒子均为 π -介子, 其动量分布按相近能区实验^[8]给出的谱。

由此二分布随机抽样, 给出一个粒子在 CMS 中的发射角和动量, 并按 $r_c = 5$ 计算出

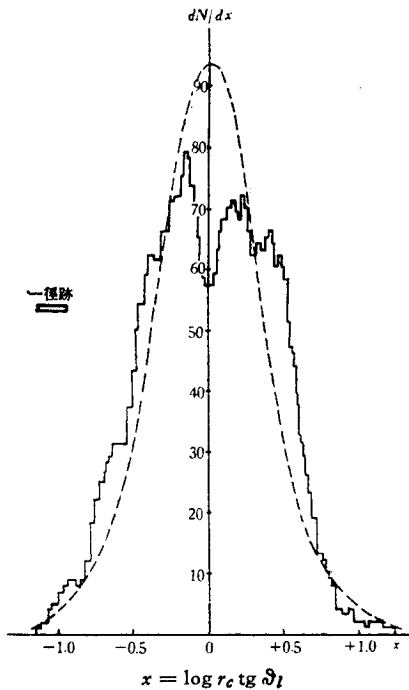


图 3 64 个事例 426 条径迹的微分角分布

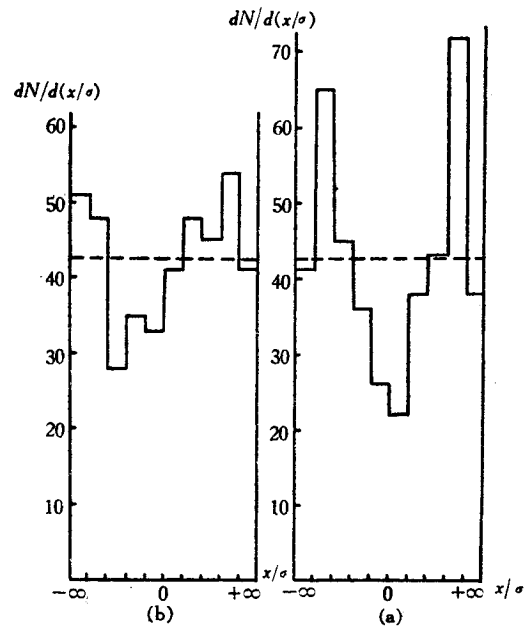


图 4 (a) 实验分布; (b) Monte-Carlo 事例分布
水平虚线是 $\phi(n)$ 形分布

它在 LS 中的角度；其后由角度测量误差以标准偏差为 2° 涨落，计算出实际测量到的 ϑ_{ii} ；并根据守恒定律限制，按实验观察到的 n_i 组成对比事例；再依前述处理实验数据的方法处理这组事例。结果其角分布 dN/dx 为单峰， $dN/d\left(\frac{x}{\sigma}\right)$ 分布为图 4 (b)，按 χ^2 检验，在二倍标准偏差的水准上，这组 Monte-Carlo 事例的分布与 $\phi(n)$ 型分布是不矛盾的。相反，Monte-Carlo 分布与本实验分布的差异则很显著，将显著性水准取作三倍标准偏差也排除了二者相符的可能。因此，实验分布的双峰现象很难看作是由于统计涨落，或由于角度测量误差以及转换计算近似等因素所引起的。

值得注意的是，我们这组包含了角度测量误差影响等因素的 Monte-Carlo 事例，其角分布 dN/dx 变窄很多，分布的平均根方差 $\sigma = 0.325 \pm 0.020$ ，这比近似理论 $\phi(2)$ 分布所预期的 $\sigma = 0.394$ 小得多。我们所得的实验分布的 $\sigma = 0.41 \pm 0.02$ ；它表明在初能 $\bar{E}_0 \leq 100$ BeV 能区，次级粒子 CMS 中角分布不是各向同性的，而是 0° 和 180° 方向有极大。文献[9]也有类似的结论。图 5 示出实验所得的 $\bar{\sigma}-\bar{r}_c$ 关系。由图中可以看出， $\bar{\sigma}$

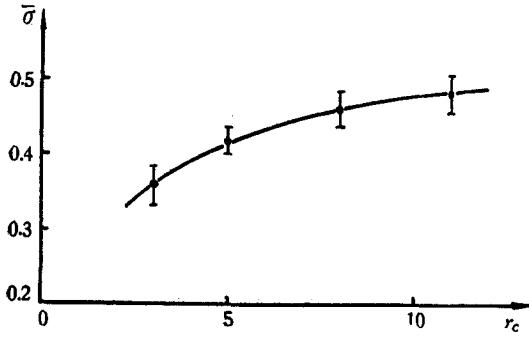


图 5 实验所得 $\bar{\sigma}-\bar{r}_c$ 关系

值随 \bar{r}_c 值增大而增大的趋势比较明显。它表明，随初能增高在 0° 和 180° 方向有极大的各向异性程度就越突出。

在 dN/dx 分布图上出现双峰，可以用二心火球模型^[6,10]解释，它把双峰分布视为两个单峰迭加而成，每一个单峰又各由一个火球各向同性衰变发射次级粒子形成，火球在 CMS 中沿 0° 和 180° 方向运动。假若认为 $\phi(2)$ 形分布相应于各向同性分布，即每个单峰之根方差

$\sigma = 0.39$ ，这样，只有 $\sigma > 0.55$ 的事例才可能呈现双峰。但由我们所作 Monte-Carlo 计

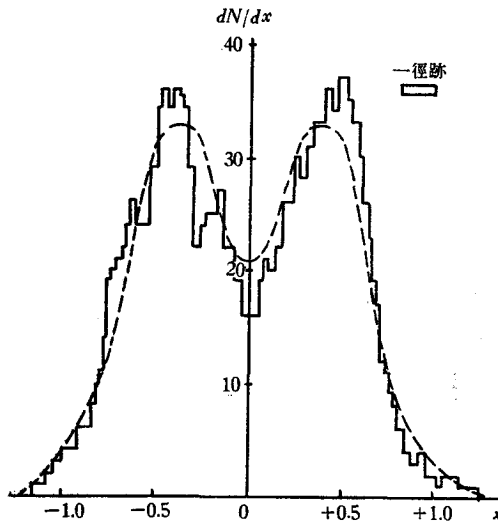


图 6 $\sigma \geq 0.40$ 的 33 个事例的微分角分布，虚线意义见正文

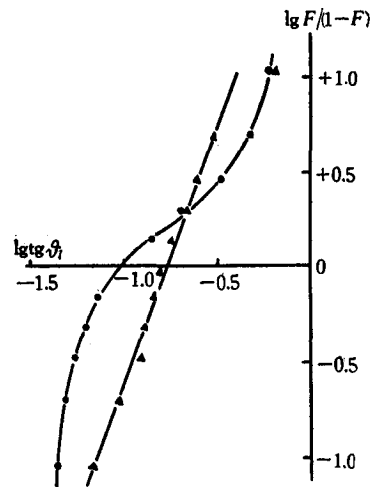


图 7 图 1,2 所示事例的积分角分布

算得知,在我們实验条件下观察到的各向同性峯比 $\phi(2)$ 形窄得多。因此,在 σ 值較小的情况下也可能呈现双峯。在我們 64 个事例中, $\sigma \geq 0.40$ 者共有 33 个,用它們作 dN/dx 分布迭加,得图 6。图中虚綫分布是两个 $\sigma = 0.30$ 、极大值在 $x = \pm 0.40$ 处单峯的迭加,它与实验分布符合得很好。按火球模型的观点,假定火球在 CMS 中运动的 Lorentz 因子 $r_B \approx 1.8$, 火球近于各向同性的衰变,于是就可以得到图中的虚綫。

dN/dx 分布呈现双峯,相应于 LS 中次粒子角分布呈现内外錐结构,即約有一半左右的粒子集中在一个頂角很小的錐內,另一半粒子則散得很开。图 1 所示事例 79588 就有内外錐结构。图 2 所示事例 00917 則看不出内外錐结构。图 7 是这两个事的积分角分布^[4], 00917 的点子大多落在一条斜率为 2.8 的直綫附近。[积分分布为直綫相应于 $\phi(n)$ 形微分分布,直綫的斜率就是参数 n 。] 事例 79588 的点子則很难用一条直綫逼近,二錐结构相当明显。我們所得事例中, $n_s \geq 7$ 者共有 27 个,对这些事例都作了积分分布。其中 15 个事例可近似为一直綫, 12 个事例有二錐结构特征。

由此看来,呈现二心图象的事例在此能区已为数不少,但由于我們实验条件的限制,計数管选择系統可能存在选择偏見等影响,很难确切計算有二心结构事例的比例,初步估計比例应为 $\geq 20\%$ 。

三、結 論

在初能 $\bar{E}_0 \lesssim 100$ BeV 能区,宇宙綫粒子与核子或輕核作用产生的次級粒子的角分布有下述特征:

1. 在 CMS 中角分布不是各向同性,而是在 0° 和 180° 方向有极大。各向异性程度随初能增高而增高。
2. 所有事例全用单峯描述角分布 dN/dx 与实验不符,已有相当比例($\geq 20\%$)呈现火球模型給出的双峯图象。

我們的工作是在肖健先生指导下进行的。霍安祥、袁余奎等同志对我們的工作有很多帮助,特此志謝。

参 考 文 献

- [1] 王世伟、况浩怀、袁余奎,物理学报, **19** (1963), 205.
- [2] Balea, E., Friedlander, E. M., Potoceanu, C. and Sahini, M., *Proc. Ind. Acad. Scien.*, **55** (1962), 367.
- [3] Castagnoli, C., Cortini, G., Franzinetti, C., Manfredini, A., Moreno, D., *Nuovo Cim.*, **10** (1953), 1539.
- [4] Duller, N. M., Walker, W. D., *Phys. Rev.*, **93** (1954), 215.
- [5] Lal, S., Yash Pal, Raghavan, R., *Nuclear Phys.*, **31** (1962), 415.
- [6] Ciok, P., Coghén, T., Gierula, J., Holyński, R., Jurak, A., Miesowicz, M., Saniewska, T., *Nuovo Cim.*, **8** (1958), 166; **10** (1958), 741.
- [7] Lindern, L., *Nuovo Cim.*, **5** (1957), 491.
- [8] Гусева, В. В., Добротин, Н. А., Зелевская, Н. Г., Котельничков, К. А., Лебедев, А. М. и Славатинский, С. А., *Изв. АН СССР, сер. физ.*, **26** (1962), 549.
- [9] Montanet, L., Newth, J. A., Petrucci, G., Salmeron, R. A. and Zichichi, A., *Nuovo Cim.*, **17** (1960), 166.
- [10] Cocconi, G., *Phys. Rev.*, **111** (1958), 1699.

**ANGULAR DISTRIBUTION OF NUCLEAR INTERACTIONS OF
HIGH ENERGY COSMIC RAY PARTICLES
WITH PARAFFIN**

KUANG HAO-HWAI LI RU-BAI TAN YUE-HEN LIU YUNG-YUIH

ABSTRACT

A cloud chamber experiment is described, in which the angular distribution of secondary particles produced in nuclear interaction by high energy cosmic ray particles with paraffin has been studied. Sixty-four $n_s \geq 4$ events with average primary energy of 70 BeV have been analysed. The result shows that, in this energy region, the angular distribution in CMS is not isotropic but possesses maxima in the 0° and 180° directions; furthermore, there is already an appreciable fraction ($\approx 20\%$) of the events with angular distribution exhibiting the features given by the "fire-ball" model.