

# 高山宇宙线粒子电磁簇射的研究\*

丁林垵 李惕碚 沈长铨 陈映宣 蔡邦鉴

(中国科学院)

## 提 要

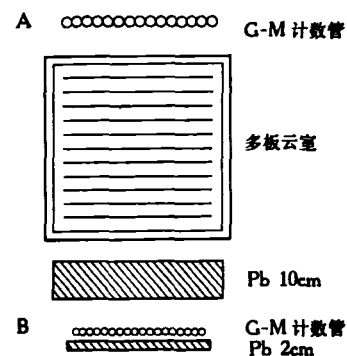
在海拔 3200 m 高山,用一台有效体积为  $45 \times 45 \times 14 \text{ cm}^3$  的多板云室,测量了宇宙线贯穿粒子的电磁簇射几率,传递能量范围为 0.4—2 GeV。获得了 801 个有用事例,得到选入的高山宇宙线粒子在 1.25 cm 厚铅层中产生电磁簇射的平均几率是  $[4.62 \pm 0.76] \times 10^{-3}$ ,大于由理论和加速器实验数据推出的  $\mu$ ,  $\rho$ ,  $\pi^\pm$  的电磁簇射几率。用统计方法对实验结果进行了分析。

## 一、实验安排

从早先落雪实验室所获得的云室照片<sup>[1]</sup>中,观察到可能有一部分宇宙线粒子产生电磁簇射的几率比电子小,比  $\mu$  介子和其它重粒子大,难以用已知过程来解释<sup>[2]</sup>。当时,这样的事例数目较少,还难于作出较明确的统计判断。

近期,我们在海拔 3200 m 的云南高山站上,用多板云室进一步研究了宇宙线粒子产生小传递能量(0.4 到 2 GeV 之间)的电磁簇射的几率。为简便起见,以下称这种簇射为“小簇射”。

实验装置见图 1。云室照明区域为  $45 \times 45 \times 14 \text{ cm}^3$ , 内装 11 块铅板,第一至第十块铅板每块厚度均为 1.25 cm,用来测量电磁簇射的几率。云室下部有 10 cm 厚的铅层,加上云室内最后一块 2 cm 厚的铅板,连同 A, B, C 三排 G-M 计数管组成选择器。当各排计数管被触发计数并满足选择条件  $A \geq 1, B \geq 3, C \geq 1$  时,云室膨胀照相。



## 二、实验结果

对 6000 对照片进行立体扫描,选出了 801 个有用事例。选择标准是:

- (1) 必须有一根主径迹贯穿整个云室并能触发 A, B, C 三排计数管。
- (2) 对于在第一至第十块铅板中产生的电磁簇射,要求次级电子数目在 3 到 10 之间,被计数的电子与簇射轴的夹角小于  $60^\circ$ 。第十一块铅板产生的小簇射不予选取。

C ○○○○○○○○○○○ G-M 计数管

图 1 实验装置

\* 1973 年 2 月 15 日收到。

(3) 有次级贯穿径迹存在的簇射视为核簇射, 并称为“明显核作用”而不选入样本。

(4) 次电子数大于 10 的电磁簇射事例, 有多根贯穿径迹同时进入云室的事例, 以及有大气簇射产物的事例都不选入。

在多板室中没有产生小簇射的事例定义为 0 事例, 产生一次小簇射的事例为 1 事例, 产生两次小簇射的事例为 2 事例, ……。选出的 801 个事例分类列于表 1。

表 1 801 个事例的分类

小簇射次数 $x$	0	1	2	$\geq 3$
事例数 $\nu_x$	768	29	4	0

另有“明显核作用”事例 126 个。

由此可以算得, 选入的宇宙线粒子在 1.25 cm 铅层中产生小簇射的几率是:

$$\frac{\nu_1 + 2\nu_2}{10(\nu_0 + \nu_1 + \nu_2)} = (4.62 \pm 0.76) \times 10^{-3},$$

所给的误差是统计误差。

### 三、计 算

在我们的选择条件下, 宇宙线中的电子已被选择器滤去,  $\mu$  介子可以在 12 cm 铅层中产生电磁簇射而被选入,  $p, \pi^\pm$  可以在 12 cm 铅层中产生核作用或电磁簇射而被选入, 中性粒子不能被选入。所以, 宇宙线粒子中主要有  $\mu, p, \pi^\pm$  被选入。被选入的几率与它们的高山能谱和仪器对它们的选择效率有关。对这些因素进行估计后, 即可算出选入的  $\mu, p, \pi^\pm$  粒子在多板室中产生小簇射的几率。

#### 1. $\mu, p, \pi^\pm$ 粒子的能谱

$\mu$  谱: 文献[3]中用磁谱仪测得 3200 m 高山上 1—33 GeV 的  $\mu$  能谱。在这个能区, 纬度效应可以忽略, 因此可以直接使用他们的测量结果。文献[4]中给出了 20—10<sup>4</sup> GeV 能区的海平面  $\mu$  介子微分谱:

$$N(E) = 5 \times 10^7 \frac{\left(\frac{E}{100}\right)^{-2.5 \pm 0.20}}{1 + \frac{E}{100}} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{GeV}^{-1}.$$

计算表明, 能量大于 100 GeV 的高能  $\mu$  介子流强在 3200 m 高山比海平面大不过 3%, 能量更高时相差更小, 因而高能  $\mu$  介子能谱可以采用海平面的数值。

$p, \pi^\pm$  谱: 实验上已测得海拔 3200 m 高山能量低于 14 GeV 的质子能谱<sup>[3]</sup>和 200—1000 GeV 的核作用粒子总谱<sup>[5]</sup>。根据文献[6]综合测量宇宙线核作用粒子中性荷电比的实验结果, 内插得海拔 3200 m 处中性荷电比是  $0.66 \pm 0.07$ 。由此得到 3200 m 带电核作用粒子 (主要是  $p, \pi^\pm$ ) 的微分谱为

$$N(E)dE = 0.028 E^{-3.1} dE \quad (200 \leq E \leq 1000 \text{ GeV}).$$

利用文献[7]所综合的宇宙线  $\pi^\pm$  介子在核作用粒子中所占份额的实验结果, 得出海拔

3200 m 处, 在  $200 \leq E \leq 1000$  GeV 能区的  $\mu, \pi^\pm$  微分能谱为

$$\mu: N(E)dE = 0.019E^{-3.1}dE;$$

$$\pi^\pm: N(E)dE = 0.009E^{-3.1}dE.$$

以上所得到的  $\mu, \rho$  和  $\pi^\pm$  粒子微分能谱见图 2.

### 2. 电磁簇射能量的估计

Thom<sup>[8]</sup> 用一个多板云室, 测量了加速器引出的 1 GeV 以下的单能电子经过不同厚度铅层的簇射发展情况, 云室条件和扫描标准都和本实验相近. 所以, 1 GeV 以下的电磁簇射, 直接采用 Thom 的结果. 对 1 GeV 以上的电磁簇射, 采用 Monte Carlo 法<sup>[9-10]</sup>和矩函数法<sup>[11]</sup>的计算结果. 因理论计算只给出了簇射在某一厚度、能量大于某一数值 (例如 10 MeV) 的次级电子数目, 而本实验是考虑与簇射轴夹角小于  $60^\circ$  的次级电子数目. 因此, 将理论计算结果应用于本实验时, 需要进行修正, 以使理论和实验条件一致, 并在 1 GeV 处和 Thom 的结果衔接. 从修正后的一组簇射曲线

(图 3), 推得在 1.25 cm 铅层下, 观察到 3—10 根电子径迹的簇射的能量, 平均是 0.4—2 GeV.

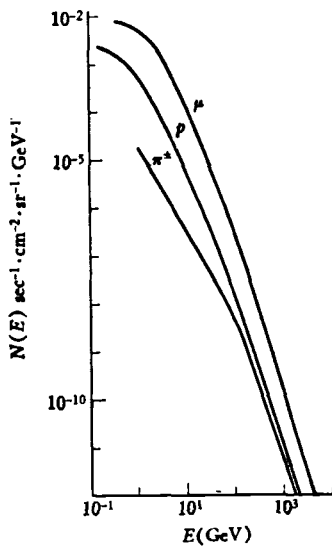


图 2 海拔 3200 m 高山宇宙线  $\mu, \rho$  和  $\pi^\pm$  粒子微分能谱

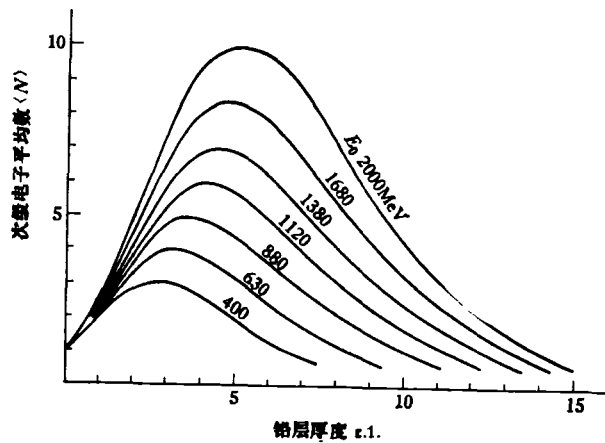


图 3 初能  $E_0$  的电子在铅中引起的电磁级联簇射曲线

### 3. 仪器对 $\mu$ 介子的选择效率及 $\mu$ 介子通过 1.25 cm 铅层产生小簇射的平均几率

$\mu$  介子在 12 cm 铅层中通过击出电子、韧致辐射和直接对产生三种电磁作用过程, 产生电磁簇射而在 12 cm 铅层下出现两个以上次级电子的几率就是仪器对  $\mu$  介子的选择效率.

$\mu$  介子击出电子几率的计算用 Bhabha 公式, 韧致辐射几率的计算用 Christy 和 Kusaka 公式, 直接对产生截面的计算用 Кельнер 的数据<sup>[12]</sup>. 计算时, 把 12 cm 铅层分为 18 层, 再把 18 层的截面迭加. 所得  $\mu$  介子通过 12 cm 铅层的选择效率见图 4.

以高山  $\mu$  介子能谱乘  $\mu$  介子的选择效率, 得到触发仪器的  $\mu$  介子谱  $N'_\mu(E)$ . 在触发仪器的  $\mu$  介子中, 产生传递能量大于 2 GeV 簇射的那些  $\mu$  介子被扫描时排除. 以  $P_{\mu, E' > 2}(E)$  表示  $\mu$  通过多板室产生传递能量大于 2 GeV 簇射的几率, 则  $N_\mu(E) = [1 -$

$P_{\mu, E' > 2}(E) \cdot N'_\mu(E)$ , 就是所得实验样本中的  $\mu$  介子能谱(图 5).

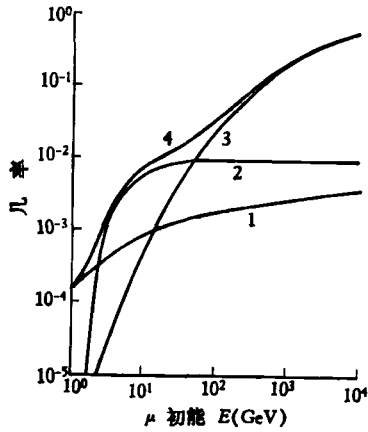


图 4  $\mu$  介子通过 12 cm 铅层产生电磁簇射而触发仪器的几率  
1. 韧致辐射; 2. 击出电子; 3. 直接对产生;  
4. 三种过程总几率.

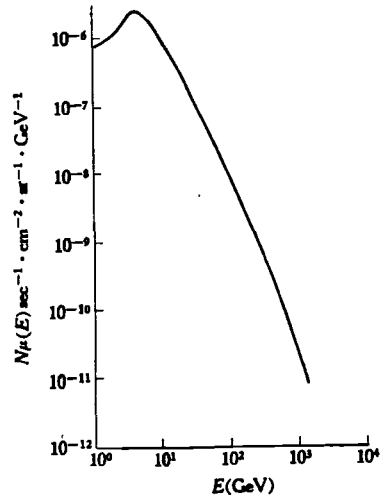


图 5  $N_\mu(E)$ ——实验样本中的  $\mu$  介子微分能谱

进而可以算出,这些  $\mu$  介子通过多板室一块 1.25cm 铅板时,产生小簇射的几率  $P_\mu(E)$ . 在计算中,我们把 1.25 cm 铅层分为五层,然后把五层的截面迭加. 所得结果见图 6.

将  $P_\mu(E)$  对样本中的  $\mu$  介子能谱平均,算得  $\mu$  介子通过 1.25 cm 铅层产生小簇射的平均几率是  $\bar{P}_\mu = 1.57 \times 10^{-3}$ .

#### 4. 仪器对 $p, \pi^\pm$ 的选择效率,及 $p, \pi^\pm$ 通过 1.25 cm 铅层产生小簇射的平均几率

$p, \pi^\pm$  因电磁作用而触发系统的几率,及产生小簇射的几率的计算,除计算公式稍有不同外,其方法完全和  $\mu$  介子相同.

利用加速器给出的  $pp, pn, \pi^\pm p$  截面,分析各个反应道触发仪器的可能性,并转换为  $p, \pi^\pm$  和铅核的作用截面,把它和电磁作用的截面迭加,就可以得到  $p, \pi^\pm$  通过 12 cm 铅层的选择效率,见图 7.

以高山  $p, \pi^\pm$  粒子能谱乘上仪器对  $p, \pi^\pm$  粒子的选择效率,得到触发仪器的  $p, \pi^\pm$  粒子谱

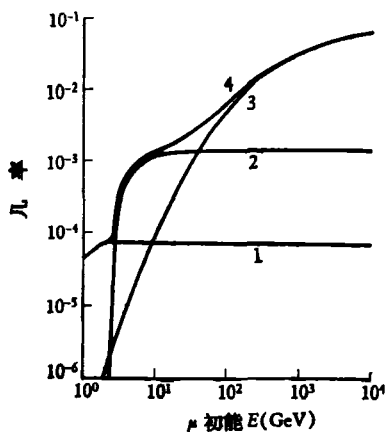


图 6  $P_\mu(E)$ —— $\mu$  通过 1.25 cm 铅层产生小簇射的几率  
1. 韧致辐射; 2. 击出电子; 3. 直接对产生;  
4. 三种过程总几率.

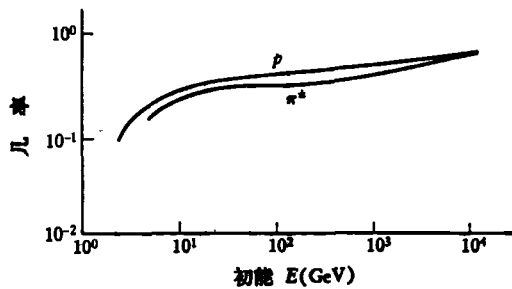


图 7  $p, \pi^\pm$  触发仪器的几率

$N_p'(E)$  和  $N_{\pi^\pm}'(E)$ . 触发仪器的  $p, \pi^\pm$  粒子中, 在多板室内产生“明显核作用”或次电子数大于 10 的簇射事例, 被扫描时排除. 由  $p$ -Pb 和  $\pi^\pm$ -Pb 的非弹性总截面, 可得到“明显核作用”截面. 从触发谱中扣除“明显核作用”和大簇射部分, 就得到实验样本中的  $p, \pi^\pm$  粒子能谱  $N_p(E)$  和  $N_{\pi^\pm}(E)$ , 见图 8.

实验样本中的  $p, \pi^\pm$  粒子可能在多板室中产生电磁簇射, 或除原初粒子外只产生  $\pi^0$  而不出现其他荷电次粒子的核作用,  $\pi^0$  立即衰变为光子并发展为簇射. 分析  $pp, p\pi, \pi^\pm p$  作用中产生  $\pi^0$  的各个反应道, 根据加速器实验给出的截面值, 推出这些反应道的截面, 并转换为  $p, \pi^\pm$  和铅核作用的截面, 就得到  $p, \pi^\pm$  通过核作用产生小簇射的几率. 这个几率和  $p, \pi^\pm$  的电磁作用小簇射几率合在一起, 得到  $p, \pi^\pm$  通过 1.25 cm 铅层产生小簇射的几率, 分别用  $P_p(E)$  和  $P_{\pi^\pm}(E)$  表示(见图 9).

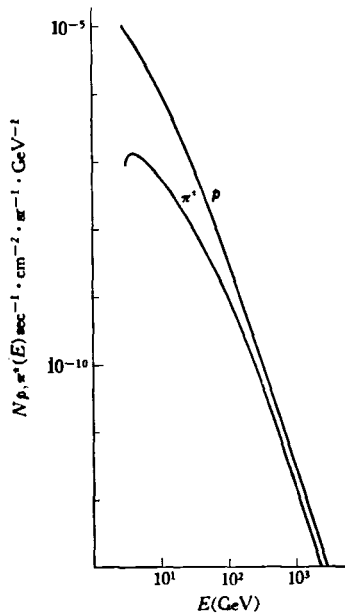


图 8 实验样本中的  $p, \pi^\pm$  微分能谱

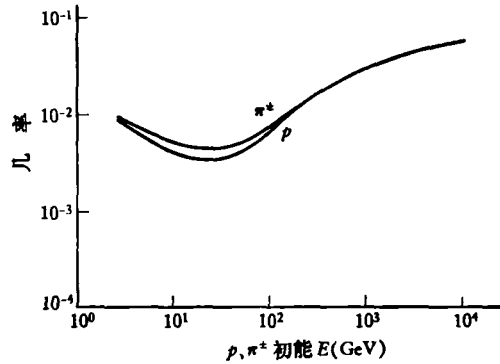


图 9  $p, \pi^\pm$  通过 1.25 cm 铅层产生小簇射的几率

在计算  $p, \pi^\pm$  通过 1.25 cm 铅层产生小簇射的平均几率之前, 还需要确定选进来的  $p, \pi^\pm$  的能量下限  $E_{min}$ . 利用样本事例数 801 和“明显核作用”事例数 126, 并考虑了样本中粒子的能谱和“明显核作用”粒子的能谱, 算得  $E_{min} \approx 10$  GeV.

最后, 用  $P_p(E), P_{\pi^\pm}(E)$  分别对样本中的  $p, \pi^\pm$  能谱平均, 算得  $p, \pi^\pm$  通过 1.25 cm 铅层产生小簇射的平均几率为

$$\bar{P}_N = 4.06 \times 10^{-3}.$$

从样本中  $\mu$  和  $p, \pi^\pm$  的能谱, 可以算出选进样本的  $\mu$  占  $\mu, p, \pi^\pm$  总数的比例为  $\phi = 76\%$ ,  $p, \pi^\pm$  占总数的比例为  $1 - \phi = 24\%$ . 于是样本中的  $\mu, p, \pi^\pm$  加权平均的小簇射几率为

$$\bar{P} = \phi \bar{P}_\mu + (1 - \phi) \bar{P}_N = 2.2 \times 10^{-3},$$

小于实验观察到的小簇射几率  $(4.62 \pm 0.76) \times 10^{-3}$ .

#### 四、统计分析

实验观察到的小簇射几率大于理论计算的几率, 或许是由于选进来的宇宙线粒子除

$\mu$ ,  $p$  和  $\pi^\pm$  外, 还有其他成分.

假定云室选择进来的宇宙线粒子中, 已知的  $\mu$ ,  $p$  和  $\pi^\pm$  粒子所占份额为  $1 - \varphi$ , 它们产生小簇射的平均几率是  $\bar{P}$ ; 可能存在的未知成分所占份额为  $\varphi$ , 它们产生小簇射的平均几率是  $q$ . 则总体中的一个粒子进入云室, 在  $x$  块铅板中产生小簇射而在  $(10 - x)$  块铅板中没有产生小簇射的几率是

$$f(x; q, \varphi) = \binom{10}{x} [\varphi q^x (1 - q)^{10-x} + (1 - \varphi) \bar{P}^x (1 - \bar{P})^{10-x}].$$

现在从实验中得到一个随机子样, 即从总体中随机抽出的一个样本(表 1), 这个样本的似然函数是

$$L(q, \varphi) = \prod_{x=0}^2 \left\{ \binom{10}{x} [\varphi q^x (1 - q)^{10-x} + (1 - \varphi) \bar{P}^x (1 - \bar{P})^{10-x}] \right\}^{v_x}.$$

按最大似然法, 从样本出发对总体的未知参量  $q, \varphi$  作点估计, 得到  $q, \varphi$  的估计值  $q_0, \varphi_0$  为

$$q_0 = 0.04, \quad \varphi_0 = 0.06.$$

这就是说, 样本中可能存在约 6% 的未知成分, 它们产生小簇射的几率约为 4%.

取 70% 的置信水平,  $q, \varphi$  的误差椭圆<sup>[13]</sup>如图 10 所示.

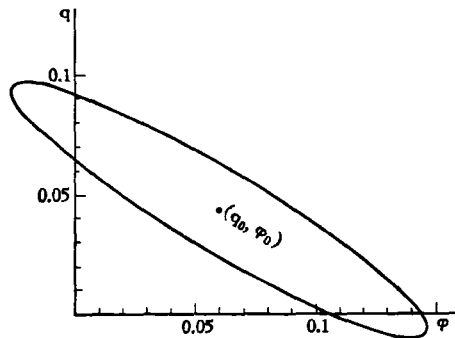


图 10  $q, \varphi$  的误差椭圆(置信水平 70%)

本实验所得到的宇宙线粒子产生电磁簇射的几率较理论预期偏大的现象, 有可能是由宇宙线中存在少量某种未知成分所引起, 也可能是  $\mu$  介子的电磁作用本身有某些反常. 但由于本实验的统计样本还不够大, 同时选进样本的宇宙线粒子成分也比较复杂, 核作用粒子的贡献难以准确估计, 目前还不能作出比较确定的结论.

在本实验的分析过程中, 看到 Kiel 组<sup>[14]</sup>的工作, 他们的实验也表明, 接近水平方向的宇宙线粒子在传递能量 1 GeV 左右, 产生电磁簇射的几率比  $\mu$  介子的理论预期值偏高.

肖健、袁宏昌、何景棠、杜云鹤同志参加过本实验的部分工作.

后记 本文完成后, 又看到 W. R. Binns 等人的工作 [*Nucl. Phys.*, **B43** (1972), 402], 他们把一架多板云室放在地下, 也观察到传递能量在 1—5 GeV 范围,  $\mu$  介子电磁簇射的几率比理论值偏高.

## 参 考 文 献

- [1] 吕 敏等, 物理学报 **15** (1959), 230.
- [2] 肖 健, 关于“反常簇射”的几点考虑 (未发表).
- [3] Г. С. Саакян, “Энергетические спектры и ядерные взаимодействия частиц космического излучения”, Ереван, 1960.
- [4] Э. В. Бугаев и Др., “Космические мюоны и нейтрино”, Атомиздат, Москва, 1970.
- [5] К. Alekseeva et al., *Int. Conf. Cosmic Rays*, 1963, Jaipur, 5, 356.
- [6] S. Hayakawa, “*Cosmic Ray Physics*”, John Wiley & Sons, N. Y., 1969.
- [7] V. Avakian et al., *Canad. J. Phys.*, **46** (1968), S709.
- [8] H. Thom, *Phys. Rev.*, **136** (1964), B447.
- [9] R. R. Wilson, *Phys. Rev.*, **86** (1952), 261.
- [10] D. F. Crawford and H. Messel, *Phys. Rev.*, **128** (1962), 2352.
- [11] И. П. Иваненко и Б. Е. Самосудов, *Я. Ф.* **5** (1967), 622.
- [12] B. Rossi, “*High Energy Particles*”, Prentice-Hall, N. Y., 1952.  
С. Р. Кельнер и Др., *Я. Ф.*, **7** (1968), 360.
- [13] A. M. Mood and F. A. Graybill, “*Introduction to the Theory of Statistics*” 2nd Ed., McGraw-Hill Book Comp. Inc., N. Y., 1963, §11.8.
- [14] O. C. Allkofer et al., *Phys. Rev.*, **D4** (1971), 638.