

海拔 3220 米水平宇宙线 μ 子 强度和动量谱测量

沈长铨 朱爱民 张人清 姚伟忠 徐佑安
(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

在云南省海拔 3220 米高山上用 G-M 计数管描迹仪测量了天顶角 78.4° — 90° 范围、平均天顶角 86.2° 、动量大于 $2\text{GeV}/c$ 的 μ 介子绝对强度为 $(9.2 \pm 1.0) \cdot 10^{-5} \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。配合磁云室测量了动量 2.0 — $51\text{GeV}/c$ 的 μ 子动量谱。

一、引 言

在各种高度上对各种天顶角的宇宙线 μ 介子强度、能谱和荷电比的测量数据,是宇宙线研究的基本数据之一。因为 μ 介子是次级宇宙线的主要成分之一,它也能提供关于初级宇宙线能谱及成分,高能强相互作用及 μ 介子电磁作用的信息。

二、实验装置

实验装置如图 1 所示。A, B, C, D 是组成描迹仪的四个相同单元,每个都由紧密排列的 40 根 G-M 计数管组成。计数管直径 $d = 32\text{mm}$, 灵敏长度 280mm 。A, B, C, D 由东到西互相对齐,它们既是选择器,又是记录器——由描迹仪打印机记录下 μ 介子经过的位置。在 AB 间和 CD 间都有厚 650mm 的铁,使该装置所选择的 μ 介子有一个动量下限。

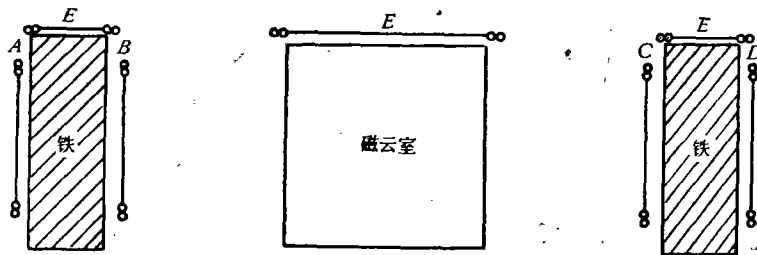


图 1 实验装置正视图

选择条件取每一排管子同时触发的管子数为 $1 \leq A < 5$, C, D 也如此, B 在实验第二阶段为 $0 \leq B < 5$, 在第一、三阶段为 $1 \leq B < 5$. E 为一排反符合的 G-M 管, $E \geq 1$ 的事例不记录.

实验第一、二阶段是绝对强度测量, 不加磁场, 磁云室不工作. 第三阶段用描述仪触发云室, 云室置于约 7000 高斯磁场中^[4].

三、探测效率

探测效率的测定是测量绝对强度的关键之一. 本实验 A, B, C, D 四排计数管相同, 问题就归结为测量单排的探测效率 η . 为此安排了第二阶段实验, B 排选择条件改为 $B \geq 0$, 而记录方式依旧. 无偏见地选得 ACD 三重符合径迹 $N(3)$ 个, 其中 $N(4)$ 个也被 B 排记录(即四重符合). 对偶然符合等因素作修正后得

$$N(3) = 135.2, \quad N(4) = 122.2,$$

因此

$$\eta = \frac{N(4)}{N(3)} = 0.904.$$

$N(3)$ 是样本容量, $N(4)$ 为随机变量, 服从几率为 η 的二项式分布, 标准误差

$$\Delta N(4) = \sqrt{N(3) \cdot \eta \cdot (1 - \eta)},$$

由此得

$$\Delta \eta = \frac{\Delta N(4)}{N(3)} = \frac{\sqrt{N(3) \cdot \eta \cdot (1 - \eta)}}{N(3)} = 0.025.$$

四、强度测量

对第一、二阶段实验中记录的事例进行了扫描, 只选取其中贯穿 A, B, C, D 的单根径迹. 这样选取的事例都是贯穿 1300mm 铁和 600mm 墙的带电粒子. 在近水平方向上穿过大气到达该实验装置的带电粒子可以认为全部是 μ 介子^[2]. 由动量—射程关系^[3] 算得相应的动量下限为 $2.0 \text{ GeV}/c$.

实验装置轴线是东西方向. 鉴于西方有一个山峰略高于本装置, 来自西方的大部分 μ 被山峰吸收, 几何因子及能阈无法计算. 因此把来自西方的 μ 径迹舍弃. μ 到达的方向是由径迹的天顶角来判断的. 显然, 来自东方的天顶角大于 90° 的 μ 径迹也被舍弃了. 所测天顶角范围为 $78.4-90^\circ$. 根据实验装置对不同天顶角所具有的不同几何因子, 算出平均天顶角为 86.2° .

实验装置对东方的总几何因子 $A = 16.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$.

在实验第一阶段 $t_1 = 9.081 \cdot 10^5$ 秒时间内记录到来自东方的 μ 介子数 $N'_1 = 877$.

在实验第二阶段 $t_2 = 1.668 \cdot 10^5$ 秒时间内记录到来自东方的 μ 介子数 $N'_2 = 224$.

考虑到 μ 介子在 130cm 铁中的库仑散射, 根据所收集的 μ 径迹的分类统计, 算出修正值为 $\Delta N_1 = 5$, $\Delta N_2 = 2$. 因此

$$N_1 = N'_1 + \Delta N_1 = 882, \quad N_2 = N'_2 + \Delta N_2 = 226,$$

$$\text{积分强度 } I(> 2 \text{ GeV}/c) = \frac{\frac{N_1}{\eta^4} + \frac{N_2}{\eta^3}}{A \cdot (t_1 + t_2)} = 9.2 \times 10^{-5} \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

I 的标准误差 ΔI 为

$$\Delta I = \left[\left(\frac{\partial I}{\partial N_1} \right)^2 (\Delta N_1)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial N_2} \right)^2 (\Delta N_2)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial \eta} \right)^2 (\Delta \eta)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1.0 \times 10^{-5}.$$

五、动量谱

在实验第三阶段,经常随机地拍摄一些云室的“热无场照片”,即保持云室在有磁场工作状态下的热平衡状态,在无磁场情况下拍摄能量大于 1GeV 的 μ 介子径迹. 随机地选

表 1 μ 积分谱

动量 P (GeV/ c)	测得 μ 数 $N(>P)$	积分强度 $I(>P)$ ($10^{-5} \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
2	261	9.2 ± 1.0
3	258	9.1 ± 1.3
4	249	8.7 ± 1.2
5	237	8.3 ± 1.2
7	223	7.8 ± 1.1
10	200	7.0 ± 1.0
13	181	6.4 ± 0.9
25	125	4.4 ± 0.7
51	59	2.1 ± 0.4

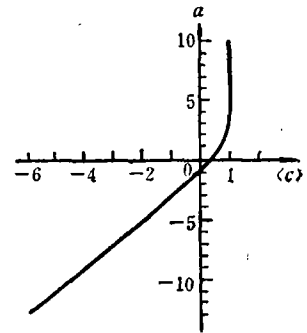


图 2

取其中 73 条,用投影仪逐条测量,并在电子计算机上逐条进行处理,对相机的光学畸变进行修正,用二次曲线拟合: $y = a + bx + cx^2$. 其中 a 为径迹在云室中的上下位置, b 为径迹天顶角 θ 的余切, c 为由云室气流造成的无场曲率. 得出云室不同区域(即不同 a 值)的无场曲率平均值 $\langle c \rangle$ 有图 2 所示的关系. c 服从高斯分布,标准误差

$$\Delta c = 4 \cdot 10^{-6} \text{mm}^{-1},$$

对应于 7000 高斯磁场中云室最大可测动量 $P_{\text{max}} = 53 \text{GeV}/c$.

对 7000 高斯磁场中云室的照片上 261 条 μ 介子径迹作了测量,作光学畸变和曲率修正后算出每条径迹的动量. 由于 μ 进入云室前已在 650mm 铁和墙中损失 1GeV/ c 动量,故由云室照片测出的动量须加上 1GeV/ c . 大于一定动量的 μ 径迹数如表 1 所示.

以所测得的绝对流强 $I(>2 \text{ GeV}/c) = (9.2 \pm 1.0) \cdot 10^{-5} \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 归一化. 求出几何因子和有效时间的乘积 $A \cdot t = N(>2)/I(>2)$, 积分谱为

$$I(>P) = \frac{N(>P)}{A \cdot t} = \frac{N(>P)}{N(>2)} \cdot I(>2),$$

标准误差

$$\Delta I(>P) = \left[\left(\frac{\Delta I(>2)}{I(>2)} \right)^2 + \frac{1}{N(>2)} + \frac{1}{N(>P)} \right]^{\frac{1}{2}} I(>P)$$

$$= \left[0.016 + \frac{1}{N(>P)} \right] I(>P).$$

由此算出的积分动量谱如表1和图3示。

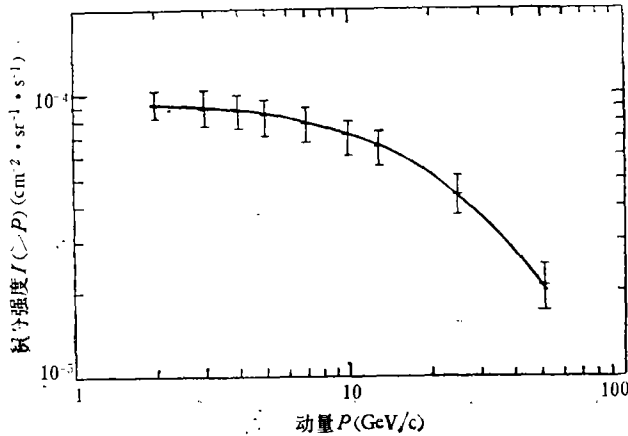


图3 海拔3220m天顶角86°μ介子积分谱

参 考 文 献

- [1] 原子能研究所云南站, 物理, 2(1972), 57.
 [2] 中国科学院高能物理研究所磁云室组, Proc. 16th. Int. Conf. C. R., 6(1979). 72.
 [3] B. Rossi, "High Energy Particles" (Prentice-Hall, N. Y. 1952).

MEASUREMENT OF INTENSITY AND MOMENTUM SPECTRUM OF HORIZONTAL COSMIC RAY MUON AT 3220m ABOVE SEA LEVEL

SHEN CHANG-QUAN ZHU AI-MIN ZHANG REN-QING

YAO WEI-ZHONG XU YOU-AN

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

At an altitude of 3220 metres above sea level in Yunan, the muon intensity above 2.0 GeV/c was measured at large zenith angles (78.4—90°) by a G-M hodoscope. At mean zenith angle 86.2°, the measured result was $(9.2 \pm 1.0) \cdot 10^{-5} \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

By a magnetic cloud chamber, the muon spectrum at same zenith angles was measured in the momentum region 2—51 GeV/c.