

海拔 3200 米的 μ 子垂直微分动量谱

李延国 李鹤年 吴仕培 郑荣庭

袁余奎 覃克宇 霍安祥

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

在海拔 3200 米的云南高山实验室(地磁刚度 14GV), 利用改进了的 G-M 计数管磁谱仪和吸收谱仪, 测量了动量在(0.4—250GeV/c)范围的宇宙线 μ 子垂直微分动量谱和 μ 子荷电比, 并与相同高度的 μ 谱比较基本相符. 实验给出的谱在动量大于 15GeV/c 以上与 O. C. Allkofer 等人的海平面 μ 谱也符合得很好. μ 子荷电比在 5—100GeV/c 动量范围几乎是常数, 其值为 1.30 ± 0.06 .

一、引 言

宇宙线 μ 子来源于初级宇宙线与大气空气核发生超高能核作用产生的介子衰变, 精确测量 μ 子谱的绝对强度、荷电比以及谱的形状, 可反映它们母体粒子的诸如动量, 角分布和多重数等情况, 为研究高能强相互作用和原初宇宙线提供数据. 多年来宇宙线 μ 子的研究工作一般都是在近海平面进行^[1-11], 虽有为数很少的人在不同高度的高山作过测量^[12-14], 但能量都较低, 数据一致性较差. 特别是近年来 O. C. Allkofer^[15] 等人精确测量了近海平面 1GeV/c 处的 μ 子绝对强度, 引起了大家的极大兴趣, 但至今仍没有发表过有关高山高度测量的结果. 本文介绍我们的高山 (3200 米) 实验方法和结果.

二、实验装置

(1) 吸收谱仪: 绝对强度测量所用的吸收谱仪如图 1 所示, 用铅作吸收体, G-M 计数管描述仪构成角度很小的 μ 子望远镜(最大半张角 4°), 几何因子为 $1.94\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$. 描述仪由 A、B、C、D 四盒 G-M 计数管组成. 每盒计数管都分三层交错放置, 能使定位精度比单只密排的高三倍. 单个荷电粒子穿过计数管盒的径迹横向坐标, 由盒中三层 G-M 计数管的放电情况给出, 经验公式为:

$$x = 8N_i - q$$

其中 N 为盒中放电计数管序号, q 为位置修正量, S_1 、 S_2 是为消除簇射事例的两个有效探测面积为 0.25m^2 的反符合计数管盒, 分别放置在望远镜两侧. 吸收体厚度从 $141\text{g}/\text{cm}^2$ 逐

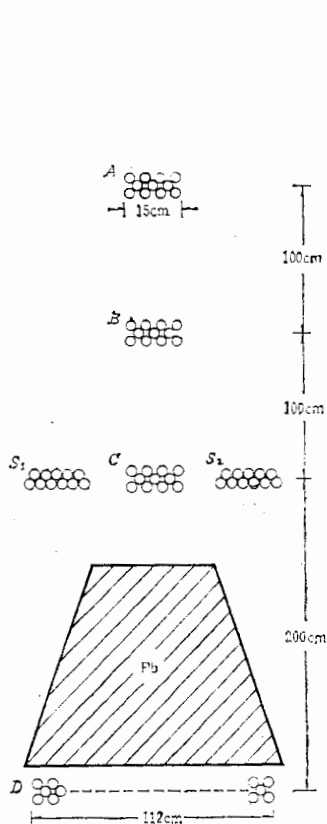


图1 吸收谱仪

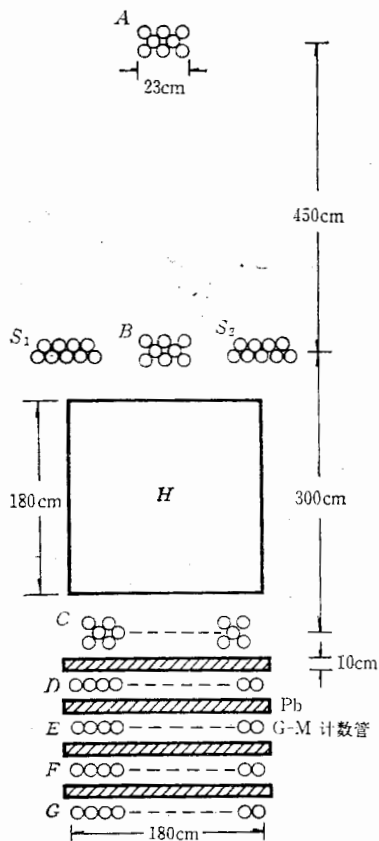


图2 磁谱仪

次增加到 $1965\text{g}/\text{cm}^2$ 。对 μ 子在吸收体中遭受多次库仑散射引起“Zig-Zag”运动的影响作了修正之后,相应的动量范围为 $0.29\text{--}2.80\text{GeV}/c$ 。考虑到 μ 子在吸收体中多次散射造成的符合计数的减少依赖于实验安排,利用 G-M 计数管描述仪记录数据,分别测量各种厚度的多次散射角分布,来修正散射计数损失。

(2) 磁谱仪: 图2所示为本实验用的由电磁铁和 G-M 计数管描述仪组成的磁谱仪^[16]。电磁铁的磁极面为 $180\times 180\text{cm}^2$,磁间隙为 30cm ,励磁电流为 500 安培时,中心场强为 10000 高斯,在 $120\times 120\text{cm}^2$ 内磁场均匀度优于 5% 。在计算磁场线积分时中心磁场 $100\times 100\text{cm}^2$ 以外的边缘磁场用经验解析式表达。

描述仪由 A、B、C、D、E、F、G 七盒 J109 γ 计数管组成。为了提高定位精度, A、B、C 三盒都放置三层计数管,用来测量荷电粒子进入磁场区前后的位置,决定粒子的动量。D、E、F、G 四盒和四层 10cm 厚的铅交替放置,用以鉴别入射粒子的性质。区别入射粒子是强子还是 μ 子等^[17]。反符合计数管盒 S_1 、 S_2 分别放置在 B 盒两侧,保证选中的是单个非伴随荷电粒子。

描述仪电子学线路已有过介绍^[18],它是采用“符合预选—寄存—运算再选”的数字在线技术,在符合电路的控制下,由循环移位寄存器将 G-M 计数管阵的信号一一对应寄存,并转换成二进制数字矩阵,完成一系列的逻辑判断,图象识别等功能。

荷电粒子动量计算公式为:

$$P = 300H\rho = \frac{300 \int Hdl}{\alpha} = K/\Delta. \quad (K \text{ 为常数})$$

用 A 、 B 、 C 三盒测量粒子动量时位移 Δ 为:

$$\Delta = x_A - 2.5x_B + 1.5x_C.$$

x_A 、 x_B 、 x_C 分别是计数管盒 A 、 B 、 C 中荷电粒子径迹的横向坐标, 装置的系统误差可通过选用 $\geq 2\text{GeV}/c$ 的无磁场 μ 子准直调整为零, 并通过测量 $\geq 2\text{GeV}/c$ 的无磁场 μ 子的 Δ 分布计算谱仪的最大可测动量。

高动量测量时, 考虑到提高最大可测动量, 以及获得好的统计量, 我们用 A 、 B 、 C 、 D 四盒测量动量, 每盒都放 96 支分三层放置。移去 C 盒下面的铅层, 将 AB 、 CD 之间距离改为 546cm 和 182cm。

三、实验数据

吸收谱测量数据收集于 1981 年 12 月—1983 年 2 月, 在这期间大约记录了 8 万个 $ABCD\bar{S}$ 符合事例(见表 1), 在推导绝对强度的过程中, 已经考虑到各种因素的修正。在整个记录过程中, 一直监测荷电粒子流强 $ABC\bar{S}$ 符合计数率的变化。

表 1 吸收谱测量数据

吸收体厚度 (g/cm^2)	截止动量 (GeV/c)	符合计数(个)	总流强计数率 $ABC\bar{S}$ (s^{-1})	有效时间 (s)	偶然符合修正 ($-\%$)	散射修正 ($+\%$)	积分强度 ($\text{cm}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \text{sec}$) $^{-1}$
141	0.29	15461	2.64	549600	2	0	1.44×10^{-2}
255	0.42	10131	2.64	379770	2.5	1.0	1.35×10^{-2}
481	0.70	10213	2.65	450000	2.5	4.0	1.19×10^{-2}
822	1.15	19297	2.65	1054920	3.0	7.5	9.89×10^{-3}
1162	1.62	10261	2.66	691990	3.5	9.4	8.26×10^{-3}
1738	2.45	12571	2.65	1133728	5.0	12.0	6.18×10^{-3}
1965	2.80	1168	2.64	120480	5.5	15.0	5.55×10^{-3}

为了覆盖所要求的动量范围和为了便于检查数据内部的一致性, 磁谱仪测量数据收集于 1982 年 3 月—9 月, 分为励磁电流 70、150、500 安培三个阶段。电子学线路选择条件为 $A = B = C = D \geq 1$, $S = 0$, 基本数据见表 2。

表 2 磁谱仪测量的基本数据

励磁电流 (A)	中心磁场 ($\text{k} \cdot \text{G} \cdot \text{S}$)	边缘场强表达式 ($\text{k} \cdot \text{G} \cdot \text{S}$)	磁场线积分 ($\text{G} \cdot \text{S} \cdot \text{cm}$)	P_{\max} (GeV/c)	$S\Omega$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$)	效率	有效观测时间 (s)	动量范围 (GeV/c)	观测到的 粒子数 (个)
70	2.07	0	4.84×10^5	33	1.01	0.94	1644474	1—33	16233
150	4.45	$\frac{0.75}{(z-0.18)^2}$	1.04×10^6	70	1.94	0.94	964432	2.3—70	16444
500	9.86	$\frac{2.05 \times 10^{27}}{(z+120)^{10}}$	2.29×10^6	250	11.10	0.86	4356915	8—250	54594

在高动量测量阶段为选择动量大于 $8\text{GeV}/c$ 的 μ 子, 利用动量选择器^[19]在线处理舍弃大位移值 ($\Delta > 4.5\text{cm}$) 事例, 同时谱仪效率降低。由于磁偏转, 磁谱仪的几何因子随动量降低而变小, 已分别作了计算。

四、实验结果和讨论

对实验数据进行了强子扣除, 几何因子等修正之后, 将各阶段的数据都标绘在图 3 中, (所标误差为统计误差)。由图 3 可见我们的数据一致性很好, 将各次测量的数据进

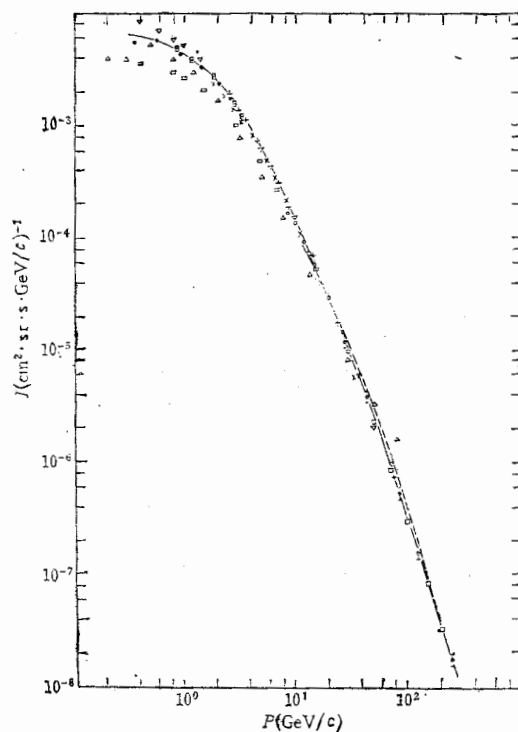


图 3 μ 子动量谱

- 吸收谱
- × 励磁电流 70A
- + 励磁电流 150A
- 励磁电流 500A
- 励磁电流 70A 未扣强子
- O. C. Allkofer et al.
- ▽ 海拔 3200 米 N. M. Kocharian et al.
- △ 海拔 3000 米 O. C. Allkofer et al.
- 丁林垵等 3200 米, 蒙特卡罗模拟谱
- 本实验拟合曲线

行拟合得到如图 3 所示的拟合谱。为了便于跟其他小组的工作进行比较, 也将他们的结果标绘在图 3 中。如图 3 所示经拟合后的谱, 动量在 $(0.4-4)\text{GeV}/c$ 范围的强度比相同高度的 N. M. Kocharian^[13] 等人的 μ 谱强度低, 动量在 $(4-50)\text{GeV}/c$ 范围两谱符合得很好, 这主要是低端受纬度效应的影响, 比较时我们未作修正。动量在 $(10-250)\text{GeV}/c$

范围与丁林培^[20]等人蒙特卡洛模拟计算的在 3200 米高度的 μ 谱相符, 动量在(0.4—40) GeV/c 范围, 我们的谱与 O. C. Allkofer^[42] 等人在 3000m 高度测量的 μ 谱形状基本一

表 3 不同动量的 μ 子微分强度和斜率

动量 (GeV/c)	微分强度 ($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{GeV}/c$) ⁻¹	微分斜率
0.4	6.38×10^{-3}	0.25
0.8	4.95×10^{-3}	0.48
1.0	4.39×10^{-3}	0.60
1.5	3.28×10^{-3}	0.77
2.0	2.54×10^{-3}	1.09
3.0	1.47×10^{-3}	1.67
5.0	6.10×10^{-4}	1.85
7.0	3.12×10^{-4}	2.13
10	1.45×10^{-4}	2.23
15	5.38×10^{-5}	2.31
20	2.80×10^{-5}	2.37
30	1.01×10^{-5}	2.69
50	2.35×10^{-6}	2.90
70	9.00×10^{-7}	2.96
100	3.10×10^{-7}	3.06
150	8.51×10^{-8}	3.11
200	3.35×10^{-8}	3.14
250	1.65×10^{-8}	3.20

致。此外由图可见在动量大于 15GeV/c 以上我们的高山 μ 谱与 O. C. Allkofer^[6] 等人的海平面 μ 谱也符合得很好。

用标准动量计算的拟合谱的微分强度和相应的斜率见表 3。不同动量区域的正负 μ 子荷电比见表 4, 动量在 (5—100) GeV/c 范围 μ 子荷电比加权平均为 1.30 ± 0.06 。

表 4 μ 子荷电比

动量范围 (GeV/c)	荷电比
3~5	1.22 ± 0.04
5~15	1.32 ± 0.06
15~20	1.32 ± 0.06
20~30	1.25 ± 0.06
30~50	1.28 ± 0.07
50~100	1.17 ± 0.07

王立安、徐佑安、郑行立、姚伟忠同志参加了数据收集和初步测量工作。代义方、王晓明同志在计算中给予许多帮助, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] J. Pine et al., *Nuovo cimento*, Vol. 14 (1959), 1181.
- [2] P. J. Hayman, *Proc. Phys. Soc.*, Vol. 80(1962), 710.
- [3] B. J. Bateman et al., *Phys. Letters*, 36B (1971), N2.
- [4] R. C. Appleton et al., *Nucl. Phys.*, 26B (1971), 365.
- [5] B. C. Nandi et al., *Nucl. Phys.*, 40B (1972), 289.
- [6] O. C. Allkofer et al., *Phys. Letters*, 36B (1971), 425.
- [7] C. A. Ayre et al., *J. Phys. G.*, Vol. 1(1975), 854.
- [8] Y. Muraki et al., *Phys. Rev. Lett.*, 43(1979), 974.
- [9] L. K. Ng et al., *Nuovo Cimento*, 22B (1974).
- [10] S. Iida, *Nuovo Cimento*, 26B (1977), 559.
- [11] O. C. Allkofer et al., *Phys. Rev. Lett.*, 41(1978), 823.
- [12] O. C. Allkofer et al., *Habil. Schr. Kiel*, (1964).
- [13] N. M. Kocharian et al., *J. Exp Theo Phys. (USSR)*, 30 (1956), 243.
- [14] 荆贵茹等, 高能物理与核物理, 5(1978)417.
- [15] O. C. Allkofer et al., *Phys. Lett.*, 31B(1970), 606.
- [16] 李鹤年等, 宇宙线室年报, (1981—1982)40.
- [17] 李鹤年等, 高能物理与核物理, 9(1985), 268.
- [18] 袁余奎等, 宇宙线室年报, (1980)16.
- [19] 李延国等, 宇宙线室年报, (1981—1982)44.
- [20] 丁林培等, 高能物理与核物理, 6(1980)365.

THE VERTICAL DIFFERENTIAL MOMENTUM SPECTRUM OF THE MUON AT 3200M ABOVE SEA-LEVEL

LI YAN-GUO LI HE-NIAN WU SHI-PEI ZHENG RON-TING YUAN YU-KUI QIN KE-YU

HUO AN-XIANG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The vertical differential momentum spectrum and the charge ratio of the cosmic ray muon, in the range (0.4—250) GeV/c, has been measured by means of the magnetic spectrometer and the range-spectrometer in Yunnan station at 3200 m above the sea level. The present spectrum is in agreement with the differential spectrum of muons, measured by others at the same mountain altitude. In the (15—250) GeV/c momentum range, the spectrum obtained from the present experiment is also in good agreement with the differential spectrum of the muon which has been determined by O.C. Allkofer et al. at the sea level. The charge ratio of the muon is almost constant in the range (5—100) GeV/c. The average value is 1.30 ± 0.06 .