

# 海平面宇宙线 $\mu$ 子垂直绝对强度 及积分动量谱测量

(高能所物理二室\*)

## 摘 要

利用两个大面积塑料闪烁计数器和两个液体闪烁计数器组成的望远镜系统与铅吸收体组成射程谱仪,并用一个灵敏体积为  $70 \times 50 \times 30 \text{cm}^3$  的流光室作为剔除簇射装置,1981年冬季,对北京地区海平面宇宙线  $\mu$  子垂直通量及其积分动量谱进行了测量. 动量测量范围为  $0.2 \text{GeV}/c$  至  $1.3 \text{GeV}/c$ . 动量大于  $0.3 \text{GeV}/c$   $\mu$  子的垂直通量为  $9.2 \times 10^{-3} \text{sr}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . 在  $3.5 \times 10^4$  张照片中对  $1.6 \times 10^4$  张照片进行了扫描判别,可得簇射比例约占 30%. 文中并对若干修正进行了讨论.

## 一、引 言

由于不同高度宇宙线  $\mu$  子绝对强度(通量)及其能谱不仅与原初宇宙线成份及与大气层各种相互作用有关,而且与地磁、纬度、太阳影响等有关,因此是宇宙线物理和地球物理的重要研究对象和基本参量. 一般  $1 \text{GeV}/c$  左右的动量谱用射程谱仪的方法测量. 作为一个标准,虽然海平面  $\mu$  子谱及通量已测量较多<sup>[1-4]</sup>. 但北京地区<sup>1)</sup>数据尚少. 另外,本文选用流光室作为簇射等假效应剔除装置,径迹直接可见. 其特点是明显的. 近年来测量结果表明  $\mu$  子通量比早期公认的 Rossi 点偏高,本测量将进一步对北京地区的这一值进行判断.

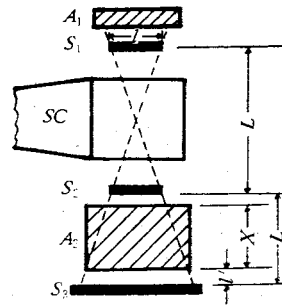


图 1

## 二、实验装置及原理

实验装置如图 1 所示

其中:

\* 王孝良 王朝俊 王德武 王殿荣 王继华 刘念宗 卢新华 李云山 李志刚 林建锋 周伟 陈元柏  
陈昌 徐雨林 徐蓉芬 赵海泉 韩 纛 姜嫫嫫 尧宗元 奚基伟 谢一冈 张家铨 楼家恕

本文 1982 年 5 月 14 日收到.

1) 海拔高度: 69m

地理纬度: 东经  $39.9^\circ$ , 北纬  $116.4^\circ$

地磁纬度:  $54000r$ , 磁偏角  $5^\circ$ .

$S_1S_2$  是塑料闪烁计数器, 闪烁体有效面积为  $31 \times 25 \text{cm}^2$ , 厚度 1.3cm.  $S_3$  由两块液体闪烁计数器  $S_{31}S_{32}$  组成, 有效面积为  $60 \times 60 \text{cm}^2$ , 厚度为 5cm.  $S_3$  的面积要覆盖  $S_1S_2$  所张的立体角.  $A_1$  为上铅吸收体, 厚 15cm, 用以吸收宇宙线软成分.  $A_2$  为下铅吸收体, 底面尺寸比  $S_3$  长宽各大约 10cm, 厚度可变, 其改变范围为 0—67cm.  $SC$  为流光室, 用以剔除簇射等引起的假效应.

可以认为: 经过上吸收体  $A_1$  后几乎全部为  $\mu$  介子. 而  $S_3$  只能记录射程大于  $A_1$  加  $A_2$  吸收体总厚度  $x$  的那些  $\mu$  介子. 由此,  $S_1S_2S_3$  三重符合计数  $N$  即为  $\mu$  介子积分通量  $I(>P_0)$ ,  $P_0$  为射程  $x$  所对应的动量. 改变  $A_2$  吸收体的厚度, 即得积分动量谱.  $I$  可表示如下:

$$I(>P_0) = \frac{N(1-F)}{D\eta ATM} \text{ (sr}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$$

其中:

- $N$ : 三重符合计数;
- $A$ : 望远镜系统的接收度;
- $\eta$ : 计数器望远镜系统的探测效率;
- $D$ : 系统计数率死时间修正因子;
- $F$ : 假效应的修正因子;
- $T$ : 测量的总时间;
- $M$ : 多次散射修正因子.

### 三、测量及修正

为了避免流光室脉冲高压装置运行时对计数器系统的干扰, 由控制线路的输出信号获得三重符合计数  $N$ . 因为控制线路的输出信号同时用来触发流光室的脉冲高压装置和起动照相机进行拍照, 所以三重符合计数  $N$  也就是获取的流光室照片数. 改变铅吸收体  $A_2$  的厚度, 获得一组对应于不同宇宙线  $\mu$  子动量值的三重符合计数  $N$  和相应的流光室照片. 流光室照片数大约是三重符合计数的一半. 将测量得到的三重符合计数  $N$  按上面公式中给出的各项修正因子进行校正就可以得出宇宙线  $\mu$  子的积分动量谱. 下面讨论修正因子的计算及测量.

#### 1. 接收度 $A$

我们比较了几种计算接收度的方法. 考虑到本实验中的计数器望远镜是由矩形闪烁体组成的. 用下列公式计算角接收度  $A$ :

$$A = \Omega S = \frac{w^2}{4} \left[ 3 \frac{l}{L} \lg^{-1} \frac{l}{L} + \frac{l^2}{l^2 + L^2} \right] = 10.99 \pm 0.22 \text{sr cm}^2$$

其中:  $l = 31 \text{cm}$  闪烁体长度

$w = 25 \text{cm}$  闪烁体宽度

$L = 232.8 \text{cm}$ ,  $S_1S_2$  之间的距离

$S_1, S_2$  望远镜所张半角  $\theta = 9.71^\circ$ , 几何不确定度按  $\Delta l = \Delta w = \Delta L = 0.2\text{cm}$  考虑。一般要求  $\theta < 10^\circ$ , 因  $\theta$  太大则多次库伦散射对计数率及厚度影响效应明显,  $\theta$  太小则计数率太低, 且簇射影响修正更大。

## 2. 望远镜系统的探测效率 $\eta$ 及电子学系统

按以下步骤进行望远镜计数器系统的条件选择。首先, 用多道分析器分别测量二个面积为  $5.0 \times 5.0\text{cm}^2$  的小闪烁计数器对宇宙线最小电离  $\mu$  子的效率。为使效率为 100%, 选择放大倍数。计数器高压和甄别阈, 使  $\mu$  子脉冲幅度高于阈值 3—4 倍。然后, 利用此标准探头系统、根据三重符合和二重符合之比的方法<sup>[8,9]</sup>, 测量每个大面积闪烁计数器的探测效率。为此, 将闪烁体平面分为 6 个区域, 用两个标准探头置于每一区域的中央, 测量该大面积闪烁计数器与标准探头的三重符合计数, 与标准探头二重符合计数之比即得  $\mu$  子通过该区的探测效率。取平均后即得一个大面积闪烁计数器的探测效率, 四个大面积闪烁计数器的探测效率测量值如表 1:

表 1 大面积闪烁计数器的探测效率

	$S_1$	$S_2$	$S_{31}$	$S_{32}$	系 统
$\eta(\%)$	$61.8 \pm 1.2$	$73.4 \pm 1.1$	$99.7 \pm 0.4$	$98.6 \pm 0.7$	$45.0 \pm 1.0$

表中望远镜系统的总效率为  $\eta = \eta_1 \eta_2 \left( \frac{\eta_{31} + \eta_{32}}{2} \right)$ 。

我们选用按区域平均的方法是因为限于计数器部件性能指标, 不能只考虑寻找闪烁体远端效率达到 100% 的条件, 因为由此选定的高压、放大器和甄别器的工作条件会使噪声计数过大, 以致偶然符合过大。当甄别器输出脉冲为 20ns, 要求偶然符合小于真符合的 1% 时, 选择每个计数器噪声计数应小于约  $10^4$  次/秒。(选每个计数器平均噪声计数率为  $5 \times 10^3$ /秒, 符合分辨时间 40ns, 则偶然符合计数率为 0.03/分。)兼顾效率和偶然符合选好每一路电子学系统条件后, 不能再有任何变动, 最后阶段的效率及其稳定性测量(约 300 小时)和最佳符合条件的选择, 都注意在既定的实验条件下进行, 电缆长度经仔细调节好后也不能有任何变动。电子学系统框图如图 2 所示。

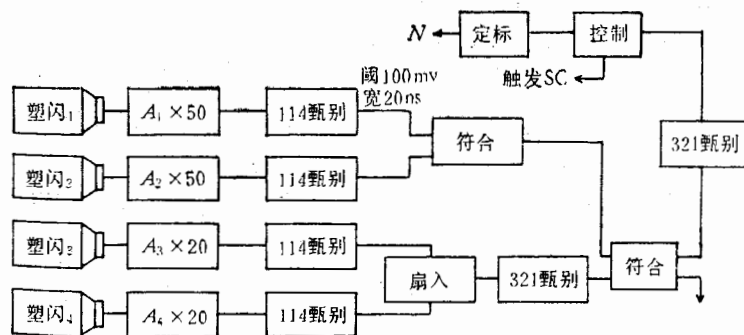


图 2

### 3. 死时间修正因子 $D$

为防止流光室脉冲高压串扰,三重符合计数  $N$  由流光室控制电路的一个输出端取出. 电路的关门时间为 3.55 秒. 此即为系统死时间  $\tau$ , 修正因子  $D$  表示为:

$$D = \frac{N}{N_0} = 1 - \frac{N\tau}{T}$$

其中  $N_0$  为对  $\mu$  子的真计数,  $T$  是测量  $N$  的时间, 此死时间  $\tau$  似乎大一些, 但比某些用闪光管作簇射剔除的装置的死时间还要短许多. 如文<sup>[10]</sup>中装置的死时间为 28.9 秒.

### 4. 剔除簇射修正因子 $F$

对每次触发计数, 利用一个灵敏体积为  $70 \times 50 \times 30 \text{cm}^3$  的流光室<sup>[11]</sup> 进行拍照. 对  $1.6 \times 10^4$  张流光径迹照片进行观测分类. 引入修正因子  $F$ .

$$F = \frac{N - N_1}{N}$$

其中  $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_M + N_\theta + N_z$

$N_1$ : 相当于望远镜系统接收范围内有一条贯穿径迹的照片数 (在贯穿径迹旁伴随有敲出电子径迹也包括在内).

$N_2 - N_M$ : 是分别有 2、3、及多于 3 条径迹的照片数.

$N_\theta$ : 有大角度斜射径迹的照片数.

$N_z$ : 空片数, 可能是横向同时进入三个计数器但未进入流光室的事例, 也可能是流光室高压系统自触发, 正式实验前对流光室自触发率进行了调整和测量, 小于 1%.

曾按不同吸收体厚度对照片进行扫描, 未观测到  $F$  随厚度变化的趋势. 按有效的总扫描照片数计算得

$$1 - F = \frac{N_1}{N} = \frac{10126}{16337} = 0.619 \pm 0.008$$

其中误差仅考虑统计误差. 剔除因子  $F \sim 38\%$ , 比文<sup>[4]</sup>中报道的  $F \sim 30\%$  还大一些.

### 5. 多次散射修正

由于  $\mu$  子在铅吸收体内多次散射使其有效射程  $R$  比吸收体实际厚度  $x$  大. 故必须考虑厚度修正. 根据文献<sup>[12]</sup>中的数据, 动量为  $0.3 \text{GeV}/c$  时  $R = 1.1x$ ,  $0.9 \text{GeV}/c$  时  $R = 1.05x$ . 在本实验动量范围内, 近似考虑  $R$ 、 $x$  关系为过该二点的直线, 由此做各射程的修正. 根据 Serre<sup>[13]</sup> 的动量射程数据求得动量. 在结果中厚度  $x$  已包括  $A_1$  吸收体、外房顶、铁板等吸收体厚度. 房顶和铁板等的等效铅厚度为 3.8cm.

另外, 由于吸收体  $A_2$  多次散射引起  $S_1 S_2$  对应的接收束内的  $\mu$  子斜射出  $S_3$ , 而使三重符合计数由  $N_0$  减少至  $N$ . 为了在计算中利用 Steinheimer (14) 的分析曲线, 将本实验中三个矩形探测器等效成为该文所要求的圆形. 经计算查图可得修正因子  $M (M = N/N_0)$ . 在计算和结果中注意到以下几点.

1. 吸收体  $A_2$  愈厚, 距  $S_3$  愈远 ( $l'$  大), 多次散射影响愈大.

2. 通过吸收体  $\mu$  子的能量愈低, 引起的修正愈大. 设  $M_p(P_{\min})$  为恰能通过的最小动量  $\mu$  子引起的多次散射修正值. 计算结果见四.

3. 对某一吸收体厚度, 要考虑全部能通过吸收体的不同动量的  $\mu$  子的影响. 计算中以微分动量谱  $I_D$  作为权重求修正因子  $M$

$$M = \frac{\sum I_D \Delta P M_p}{\sum I_D \Delta P}$$

其中  $\Delta P$  为动量间隔, 乘  $\Delta P$  是因为  $I_D$  不是按等动量间隔取的.

例如对最薄的厚度 ( $x = 6.8\text{cm}$ ), 对恰能通过该厚度的  $\mu$  子, 当动量  $P = 0.201\text{GeV}/c$  时, 其多次散射修正因子  $M_p \sim 99.8\%$ , 而当动量  $P > 0.361\text{GeV}/c$  时,  $M_p > 99.9\%$ , 对最厚的厚度 ( $x = 85.8\text{cm}$ ), 对恰能通过该厚度的  $\mu$  子, 当动量  $P = 1.313\text{GeV}/c$  时, 其多次散射修正因子  $M_p(P_{\min}) = 98.2\%$ , 而当  $P > 3\text{GeV}/c$  时,  $M_p > 99.9\%$ . 在本实验条件下, 影响最严重的修正量为  $2\%$ , 但考虑全部按积分动量谱分布的  $\mu$  子影响, 当  $x$  小于  $58.8\text{cm}$  时, 计算所得的  $M$  都大于  $99.9\%$ . 若这样考虑则可以忽略其影响.

另外, 如前所述偶然符合率约占  $1\%$ , 但因已包括在修正因子  $F$  中, 故不再考虑. 关于强子  $\pi p$  的影响, 因其强度小于  $\mu$  子强度的  $0.3\%$ , 对  $3.8\text{cm}$  等效铅厚度的混凝土天花板等, 得到核作用强度约为  $0.1\text{sec}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1} \ll I_\mu$ , 且这些核作用的次级粒子能穿过下层厚吸收体, 贯穿全部望远镜系统的只占很小比例, 故可忽略不计.

#### 四、结 果

实验数据获取时间约  $650$  小时, 计数率为  $\sim 2-4$  次/分, 所得结果及与不同厚度的计数  $N$  有关的修正因子如表 2 及图 3 所示. 其中  $P_x(\text{GeV}/c)$  为实际吸收体厚度所对应之动量,  $P(\text{GeV}/c)$  为经多次散射修正后的有效射程  $R$  所对应之动量. 积分通量  $I(\text{sr}^{-1}\text{cm}^{-2})$

表 2

$x(\text{cm})$	$N$	$T(\text{时:分})$	$D$	$P_x(\text{GeV}/c)$	$P(\text{GeV}/c)$	$M$	$M_p(P_{\min})$	$I \times 10^3(\text{sr}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$
6.8	4591	20:33	0.780	0.201	0.210	1.000	0.998	$9.96 \pm 0.37$
18.8	3849	18:44	0.797	0.367	0.390	1.000	0.997	$8.97 \pm 0.34$
28.8	4395	24:15	0.821	0.501	0.535	1.000	0.995	$7.68 \pm 0.28$
38.8	3913	22:00	0.825	0.638	0.677	0.999	0.992	$7.51 \pm 0.28$
43.8	4111	23:47	0.830	0.707	0.748	0.999	0.991	$7.25 \pm 0.28$
48.8	4162	24:09	0.830	0.776	0.816	0.999	0.990	$7.22 \pm 0.27$
53.8	4877	28:57	0.834	0.847	0.887	0.999	0.989	$7.03 \pm 0.27$
58.8	3057	19:44	0.847	0.918	0.959	0.999	0.988	$6.37 \pm 0.25$
63.8	5190	34:05	0.850	0.990	1.027	0.998	0.987	$6.24 \pm 0.23$
68.8	4331	28:31	0.850	1.062	1.095	0.990	0.986	$6.22 \pm 0.23$
73.8	4095	27:37	0.851	1.136	1.160	0.998	0.985	$6.05 \pm 0.23$
79.8	4017	28:35	0.861	1.224	1.250	0.996	0.983	$5.70 \pm 0.21$
85.8	4423	32:53	0.867	1.313	1.330	0.995	0.982	$5.41 \pm 0.20$

s<sup>2</sup>) 的误差由下式求出:

$$\sigma_I = \left( \frac{N(1-F)}{D\eta ATM} \right) \left[ \left( \frac{\sigma_N}{N} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_F}{D} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_F}{1-F} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_A}{A} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_\eta}{\eta} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$\sigma_D/D = \tau \sqrt{N}/(T - N\tau)$ , 小于 0.4%, 后三项误差已如前述.

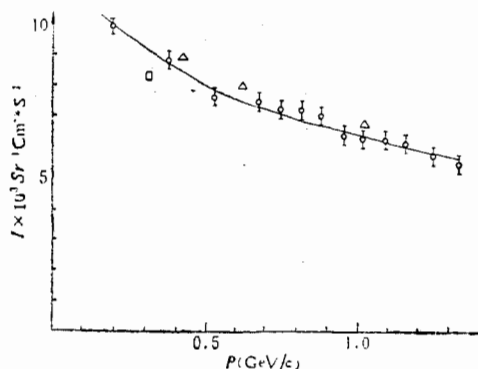


图3 本文

△ Allkofer □ Greisen

由结果可知,与早期标准的 0.3GeV/c 的积分通量值 (Greisen 点)  $8.3 \times 10^{-3} \text{sr}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  相比,本实验值为  $9.2 \times 10^{-3} \text{sr}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . 此动量范围结果与文<sup>[1-4]</sup>所给的都相近,即与目前国外测到的值一般皆高于该值的趋势相符.

## 五、 讨 论

1. 测量修正因子  $F$  时,按不同吸收体厚度扫描得到的  $F$  与厚度关系不大. 估计是因为本实验测量动量范围较小.

2. 可以将软成份吸收体  $A_1$  放在流光室下面或与  $A_2$  合而为一. 这样可以减少由上方产生的敲出电子和其他次级效应粒子的径迹. 好在我们用的是径迹直接可见的流光室作为剔除假效应装置,在测定  $F$  值时,  $N_1$  已包括伴随敲出电子的事例. 因此对结果不会有明显影响.

3. 多次散射修正比较小. 估计一是因为装置的几何条件. 如  $S_3$  明显大于  $S_1 S_2$  的尺寸,且吸收体  $A_2$  与  $S_3$  距离很近. 根据文<sup>[15]</sup>报道,当此距离很近时修正量可显著减小. 至于对厚吸收层多次散射公式的偏离程度等有待进一步探讨.

最后,在此谨对王先佩、李革涛、谢琦在电子学、照片冲洗及加工制图等方面的支持和协助深深表示感谢.

## 参 考 文 献

- [1] O. C. Allkofer and Jokisch, *Nuovo Cim.*, **15A**(1973), 371.
- [2] O. C. Allkofer, *Nuovo Cim. Letter*, **3**(1970), 6; *Physics Lett.*, **31B**(1970), 606.
- [3] A. K. De, *Phys. Rev.*, **D5**(1972), 1068.
- [4] Baschiera, *Nuovo Cim.*, **2C**(1979), 473.
- [5] Martin A. Pomerrantz, *Phys. Rev.*, **75**(1949), 1721.

- [6] D. J. Heritchi, *Nucl. Instr. Meth*, 47(1967), 39.
- [7] A. Lovati, *Nuovo Cim.*, 12(1954), 526.
- [8] 王殿荣等, 高能物理与核物理, 5(1981), 569.
- [9] 郑志鹏等, 高能物理与核物理, 5(1981), 576.
- [10] F. Ashton, *Nuovo Cim.*, 9(1972), 334.
- [11] 高能所物理二室, 高能物理与核物理, 6(1982), 1.
- [12] H. P. Koenig, *Phys. Rev.*, 69(1946), 590.
- [13] Serre, CERN Report 67—D55(1967).
- [14] Steinheimer, *Rev. Sci. Inst.*, 25(1954), 1070.
- [15] J. N. Crookes, *Nucl. Phys.*, B39(1972), 493.

## MEASUREMENT OF THE ABSOLUTE VERTICAL INTENSITY AND MOMENTUM SPECTRUM OF COSMIC-RAY MUONS AT SEA LEVEL OF BEIJING DISTRICT

(Second Experimental Group of the Institute of High Energy Physics)\*

### ABSTRACT

The absolute vertical intensity and momentum spectrum of cosmic-ray muons at sea level of Beijing district has been measured with a range spectrometer composed by a counter telescope system of four large area scintillation counters (two plastic and two liquid scintillators) and a pile of Pb absorber. In addition, a  $70 \times 50 \times 30 \text{ cm}^3$  streamer chamber was used as a track detector for shower rejection. The integral spectrum of the momentum was measured from  $0.2 \text{ GeV}/c$  to  $1.3 \text{ GeV}/c$ . The integral flux at  $0.3 \text{ GeV}/c$  is  $9.2 \times 10^{-3} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . The ratio of shower rejection is about 30% obtained by scanning streamer tracks from  $1.6 \times 10^4$  photographs.

\* Wang Xiao-liang, Wang Chao-jun, Wang De-wu, Wang Dian-rong, Wang Ji-hua, Lio Nian-zong, Lu Xin-hua, Li Yun-shan, Li Zhi-gang, Lin Jian-feng, Zhou Wei, Chen Yuan-bo, Chen Chang, Xu Yun-lin, Xu Yong-fen, Zhao Hai-quan, Han Ying, Jiang Ying-yuan, Yao Zong-yuan, Xi Ji-wei, Xie Yi-gang, Zhang Jia-quan, Lo Jia-shu.