

北京谱仪 μ 计数器的宇宙线数据分析

朱永生 张良生 高文绣 张英平 赵平德

张家文 李芳 陈乐琚 徐芷菁

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

摘 要

通过分析北京谱仪 μ 计数器的宇宙线实验数据, 确定了 μ 计数器阵列的整体信号-噪声阈, 单丝层探测效率, μ 粒子探测效率, z 向和 γ - ϕ 平面上的定位精度; 并将实验数据与蒙特卡洛模拟计算作了比较, 两者的一致性令人满意

一、引 言

北京谱仪 μ 子鉴别器由 189 个 μ 计数器组件的阵列和吸收体构成, 对单个 μ 计数器组件测量的结果表明, 各组件性能达到设计要求^[1]. 目前谱仪各主要探测器已安装到位, 并成功地实现了与触发判选系统、VAX 785 在线计算机的联调, 获得了宇宙线测试数据. 在谱仪上, 大量探测器单元及其前级电子学密集在很小的区域内, 电子学信号间的干扰, 电源电压的波动, 各 μ 计数器组件及其电子学之间的性能差异, 工作气体成份、温度、气压的变化等各种复杂因素, 使得 μ 计数器阵列的整体性能一般总比单个组件的性能要

差. 因此, 通过宇宙线实验, 在谱仪整体正常工作的条件下确定 μ 计数器阵列的整体性能是十分必要的.

北京谱仪宇宙线实验中, 当放在谱仪几何中心的闪烁计数器和桶部飞行时间计数器 (TOF) 48 个单元中任一单元同时有信号输出, 即作为有效事例记录下来 (参见图 1). 粒子到达中心闪烁体前至少要穿过 $\sim 490\text{g}/\text{cm}^2$ 的物质层, 因此实验收集的是通过谱仪中心的、宇宙线高能带电粒子, 其中绝大部分是 μ 子.

谱仪上 189 个 μ 计数器组件共 1512 个正比管, 两两串接为 756 对正比管, 其输出脉冲幅度记录为 ADC 的道数. 从正比管输出端到 ADC 之间的电子学的台阶和非线性效

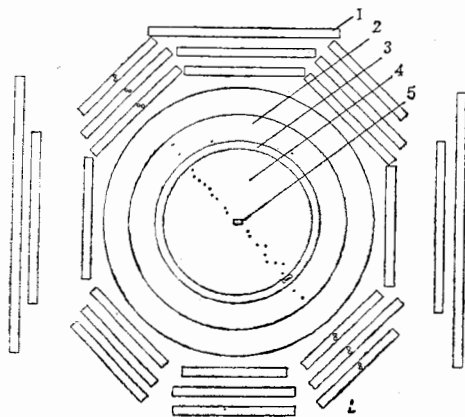


图 1 北京谱仪宇宙线径迹
1. μ 计数器; 2. 桶部簇射计数器; 3. 桶部飞行时间计数器; 4. 主漂移室; 5. 闪烁计数器

应

为极大成

到

两子冲比言幅值饱正中应数表的范该 TE 谱一

阈 TE 曲: 不

应, 用谱仪 μ 计数器电子学系统校正和标定^[2]。

二、信号-噪声阈的确定

信号-噪声阈是人为规定的一个幅度值 Th , 凡幅度值超过 Th 的 μ 计数器脉冲, 认为是粒子穿过正比管产生的有用信号, 低于 Th 的脉冲则认为是噪声。选择恰当的阈值极为重要: 阈值过高, 会丢失有用的真实信号; 阈值过低, 数据中混入过多的噪声脉冲, 大大加长在线计算机记录事例的时间, 反过来影响有用事例的记录, 对数据的离线分析也造成困难。

采用了四种方法确定信号-噪声阈, 得到了基本相同的结果。

(1) 脉冲幅度谱

对于任一正比管的一次击中, 串接的两个正比管的输出端均有脉冲输出。离粒子击中点距离近的输出端的脉冲称近端脉冲, 离击中点远的称远端脉冲。由于 μ 正比管的阳极丝电阻率 $\sim 727 \Omega/m$, 平均而言, 近端脉冲幅度高于远端脉冲。它们的幅度谱示于图 2, 峰值对应于最可几幅度值。近端谱中 4000 道附近的小峰是幅度饱和(高于 ADC 最大量程 4096 道)以及各正比管校正系数不同所造成的^[2]。幅度谱中低道数处计数的急剧上升是噪声的效应, 低道数区计数降到最低值时对应的道数可选为阈值 Th , 由此确定的 Th 值见表 1。随着阳极电压的升高, 阈值有升高的趋势, 在可能选定的最终阳极工作电压范围内 (2350—2400V), $Th = 25-35$, 该数值与用相同方法对单个组件确定的 $Th = 26-36$ 吻合^[2]。在阈值附近, 远端谱的计数比近端谱高, 这表明由于远端信号幅度较小, 在阈值附近有信号-噪声混同现象, 一部分远端信号幅度甚至低于 Th , 造成信号的丢失。

(2) 每事例平均脉冲数 N_p

贯穿 6 层 μ 计数器组件 (12 层 μ 正比管) 的宇宙线粒子应产生 24 个信号脉冲, 但在阈值以下, 噪声的存在使脉冲数增多。每事例中高于一定道数的脉冲数平均值 N_p 随设定 Th 道数的变化见图 3(a)。在 25 道附近曲线斜率明显变化, 故 Th 可选为 25 道。阈值以上曲线的缓慢下降表示, 若 Th 值选得过高, 会有一部分有效信号被丢失。阈值处的 N_p 值不等于 24, 这是因为 μ 计数器组件壁厚和组件间的缝隙产生的探测死区(线度约 8.8%),

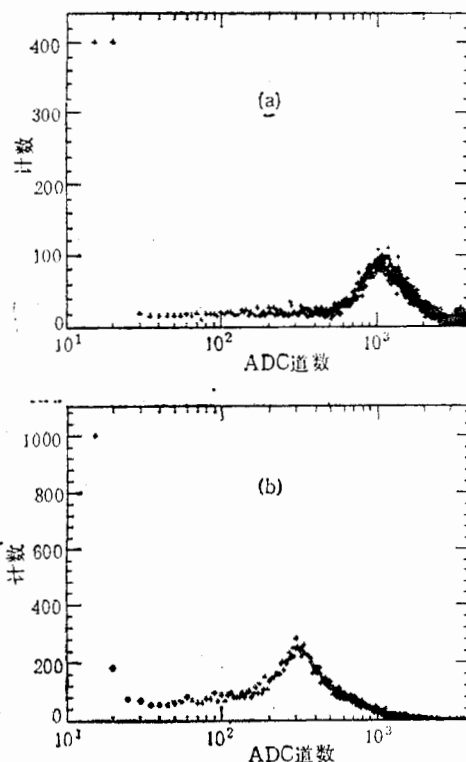


图 2 μ 正比管输出脉冲幅度谱, $HV = 2350V$
(a) 近端谱 (b) 远端谱

表1 四种方法确定的信号-噪声阈 Th

HV	方法	脉冲幅度谱		N_p	N_n	不成对脉冲幅度谱
		近端谱	远端谱			
2350 V	Th	30	25	25	25—30	35
2375 V		30	25	25	25—30	35
2400 V		35	30	25	25—30	35

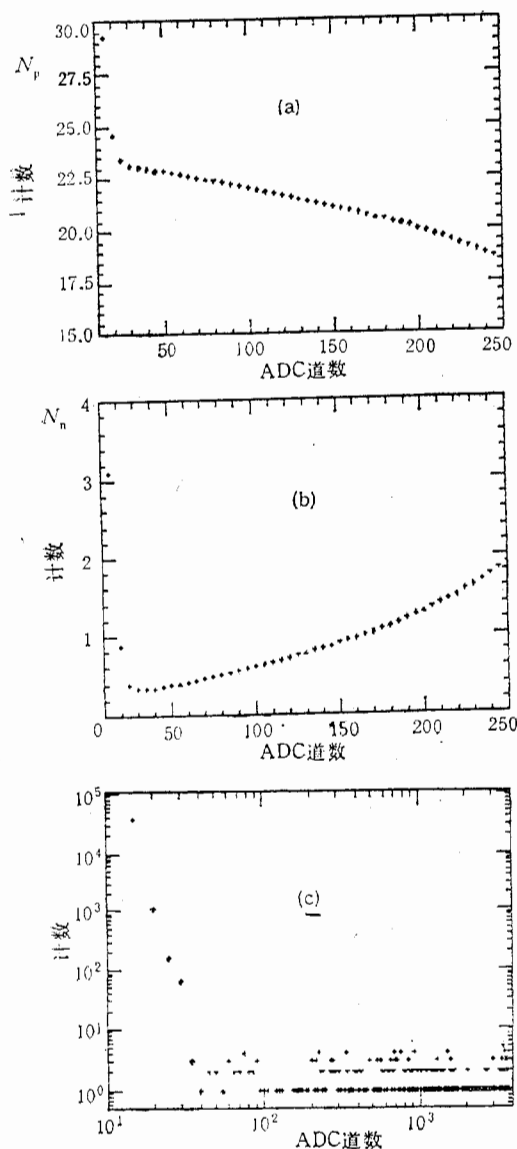


图3 信号-噪声阈的确定 $HV = 2350V$
 (a) 每事例平均脉冲数 N_p , (b) 每事例平均不成对脉冲数 N_n , (c) 不成对脉冲幅度谱
 横坐标为设定的阈值道数

μ 计数器各边覆盖的立体角范围不同, 以及粒子在谱仪物质中的吸收这些因素, 使得可被谱仪触发系统记录的宇宙线粒子, 有一部分不能穿过所有 12 层 μ 正比管的有效探测区, 导致每事例平均脉冲数的减小。

(3) 每事例平均不成对脉冲数 N_n

粒子击中一个正比管, 两个串接的正比管两端都有脉冲输出, 就是说信号脉冲应成对出现; 而噪声是随机的, 同时在串接正比管两端出现一对幅度不很小的噪声脉冲概率很小。因此脉冲是否成对出现用来判定信号-噪声阈。平均每事例不成对脉冲数 (幅度高于一定道数) N_n 随设定 Th 道数的变化曲线见图 3 (b), N_n 极小值对应的道数可认为是适当的 Th 值 (25—30 道)。阈值向下, N_n 迅速增大, 显然是噪声所致。阈值向上 N_n 缓慢上升, 这表示若 Th 定得过高, 原本成对信号中的远端信号可能因幅度低于 Th 而“丢失”, 成为不配对脉冲。即使 Th 选得适当, 远端信号幅度仍有一定概率低于阈值, 故 N_n 极小值不可能等于零。

(4) 不成对脉冲幅度谱

不成对脉冲除了噪声外, 还有信号脉冲, 主要是远端信号幅度低于阈值使近端信号成为不配对脉冲, 它们的幅度较高, 容易与噪声区分开。不成对脉冲幅度谱示于图 3 (c)。由图可见, 在 35 道附近曲线由迅速下降变为平坦, 因此 Th 可取为 35 道。

以上四种方法定出的阈值 (见表 1) 均

在 25—35 道之间, 说明这些方法合理而又相互一致, 所对应的 μ 正比管输出端电荷量大体是 0.041—0.057 pC. 在以下的数据分析中, 信号-噪声阈 Th 取为 35 道.

三、探测效率

(1) 单丝层探测效率

当粒子在固定位置射入 μ 正比管的有效探测区内, 测定的单丝探测效率 $\epsilon_w \approx 98\%$ ^[1]. 但在谱仪上, 粒子可能射入组件的死区或有效探测区的边缘, 或者击中点距串接正比管的一个输出端很远, 远端信号小于阈值而丢失. 因此谱仪上 μ 计数器单丝层探测效率要低于 ϵ_w .

选择径迹穿过相重迭的内、中、外三层 μ 计数器组件(六层正比管)的粒子, 定义单丝层探测效率

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{N_1/6}{N_n}, \\ \epsilon'_1 &= \frac{N'_1/12}{N_n}, \end{aligned} \quad n = 1, 2, \dots, 5 \quad (1)$$

式中, N_n ——有 $\geq n$ 对信号的事例数,

N_1 ——这些事例中的总信号对数,

N'_1 ——这些事例中的总信号个数.

若同一层正比管中有一对以上的信号, 则只取一对信号, 以排除相邻正比管同时有信号输出, 或杂散击中导致不真实的效率增加. 效率 ϵ'_1 考虑了不成对信号的贡献. 阳极电压 2350V 时, 对于 $n = 1, 2, 3, 4, 5$, $\epsilon_1 = 0.934, 0.934, 0.937, 0.947, 0.971$, $\epsilon'_1 = 0.944, 0.944, 0.947, 0.956, 0.980$, 比单个组件在较理想状态下的值 $\epsilon_w \approx 0.98$ 下降不多, HV = 2375, 2400V 时的 ϵ_1, ϵ'_1 与 2350V 时基本相同.

(2) 粒子的多层探测效率 ϵ_m

谱仪对撞点射出的一个 μ 子, 当动量高于 $0.7\text{GeV}/c$ 时, 可在六层正比管中产生六对信号. 要确定该 μ 子的径迹, 原则上只要有(最低限度)两对信号即可. 宇宙线实验中, $\geq n$ 对信号 ($n = 2, 3, 4, 5, 6$) 的事例数与总事例数 (≥ 1 对信号) 之比 ϵ_m 可视为粒子的多层探测效率, ϵ_m 的实验数据 (HV = 2350V) 为 0.9997, 0.9940, 0.9715, 0.8967, 0.7395, HV = 2375, 2400V 时 ϵ_m 基本上相同. 如将至少有四对信号作为确定粒子径迹的要求标准(四个击中点能很好地确定径迹), 粒子探测效率 ϵ_m 达 97.2%.

四、击中点的定位及精度

(1) z 向定位

按电荷分配原理, 击中点位置 z 与两端信号电荷比 f 近似地有线性关系, 按照三点法^[3], 有

$$z = A \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} + C = A \frac{V_1}{V_1 + BV_2} + C \equiv Af + C \quad (2)$$

式中 Q_1, Q_2 为串接正比管两端输出电荷, V_1, V_2 是经前级电子学线路后的输出电压, A, B, C 与阳极电阻丝长度、电阻率及两端电子学输入阻抗和放大系数有关, 可用谱仪 μ 电子学系统按三点法对每对串接正比管加以测定^[2,3]。

对事例的信号进行了筛选, 按式(2)计算每一击中点的 z 坐标, 按击中点正比管的位置确定 x, y 坐标(见下节), 去掉明显不在径迹上的信号 ($\Delta z > 25\text{cm}$, $\Delta r_\phi > 25\text{cm}$, 其含义见后文)。然后对六层正比管的击中点 z 坐标作直线径迹拟合, 得到击中点位置拟合值 z_{fit} 。表征 $f-z$ 关系的散点图示于图 4, 它是一条不同 z 值处宽度不等的带, 但基本上符合直线关系。带宽反映了不同串接正比管 $f-z$ 关系式中系数 A, B, C 数值大体相同, 但又有微小的差别, 以及可能存在的对于 $f-z$ 直线关系的偏离。

z 的测量值与拟合值之差 $\Delta z = z - z_{fit}$ 的分布反映了 z 测量值的离散程度, Δz 分布的标准偏差 $\sigma_{\Delta z}$ 对应于 z 方向的位置分辨。在不同的 z 值处作相应的 Δz 分布图, 可求得 $\sigma_{\Delta z}$ 与位置 z 的关系曲线见图 5。对于阳极丝电压 $HV = 2350, 2375, 2400\text{V}$,

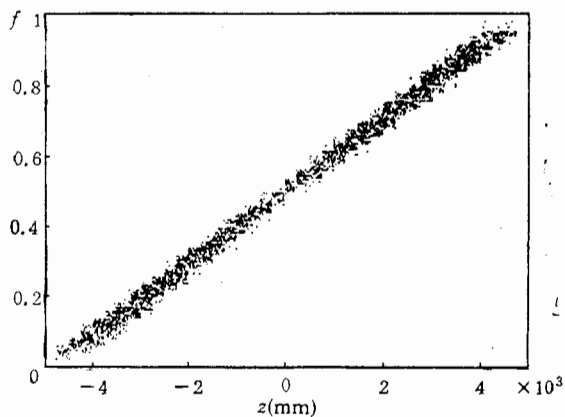


图 4 $f-z$ 散点图 ($HV = 2350\text{V}$)

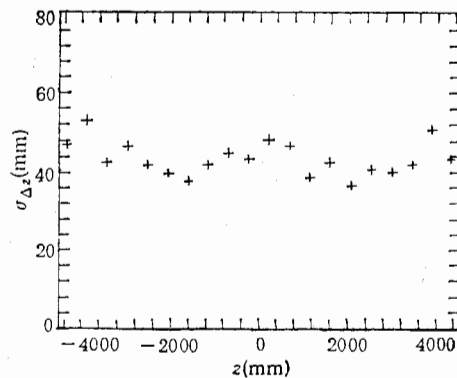


图 5 Δz 的标准偏差 $\sigma_{\Delta z}$ 随 z 的变化。

$HV = 2350\text{V}$

$\sigma_{\Delta z}$ 的平均值分别为 4.26, 4.62, 5.00 cm, 故 z 向定位误差随着阳极电压的升高略有增加, 其中 $HV = 2375\text{V}$ 的 $\bar{\sigma}_{\Delta z} = 4.62\text{cm}$ 与相同阳极电压下单个组件的 $\bar{\sigma}_{\Delta z} = 4.43\text{cm}$ ^[2] 可以比拟, $\bar{\sigma}_{\Delta z}$ 的微小增加可归之为两相邻层组件之间 14cm 轭铁的多次散射导致的击中点位置偏离(均方根值约 1cm), 以及组件 z 向机械定位误差 ($\sim 0.5\text{cm}$)。

(2) $r-\phi$ 平面上的定位

击中点在垂直于 z 轴的 $r-\phi$ 平面上的定位是由被击中的正比管丝的 (x, y) 位置确定的。根据上节选出的事例信号样本, 由六层正比管的击中点 z 坐标, 可从六对串接正比管中确定被击中的六个正比管编号, 对这六个正比管丝的 (x, y) 坐标作直线拟合, 得到点 (x, y) 到拟合直线的距离 Δr_ϕ 。大量事例的 Δr_ϕ 分布反映了测量值 (x, y) 对于直线的离散, Δr_ϕ 分布的标准偏差 σ_{r_ϕ} 对应于 $r-\phi$ 平面上的定位误差。 $HV = 2350,$

2375, 2400V 时 $r-\phi$ 平面上的分辨为 $\sigma_{r\phi} = 3.01, 3.15, 3.05\text{cm}$, 基本上与阳极丝电压无关. 理想情形下, 对于任何一条径迹上的任一击中点, $r-\phi$ 平面上的定位误差应小于 μ 正比管的半宽度 ($\sim 3\text{cm}$), 但 14cm 厚钨铁中粒子的多次散射, μ 计数器组件 x, y 方向机械定位误差 ($\sim \pm 5\text{mm}$) 使定位误差 $\sigma_{r\phi}$ 增大. 所以在 Δr_{ϕ} 的分布中存在 $> 3\text{cm}$ 的点, 但出现的概率很小, Δr_{ϕ} 分布的标准偏差 $\sigma_{r\phi}$ 达到了 μ 正比管半宽度 ($\sim 3\text{cm}$) 的水平.

五、测量数据与模拟计算的比较

谱仪宇宙线实验的触发条件要求中心闪烁体必须有信号输出, 只有 $700\text{MeV}/c$ 以上的 μ 子才能穿透谱仪上半部的物质层到达中心闪烁体. 宇宙线海平面 μ 子动量谱可用下式描写^[4]:

$$I \propto \exp(a + bP + cP^2), \quad (3)$$

其中 $P = \ln p$, $p(\text{GeV})$ 为 μ 子动量, a, b, c 为三个常数. 宇宙线强度的天顶角分布换算到谱仪坐标系中变成

$$f(\cos\theta) = \frac{3}{4} (1 - \cos^2\theta), \quad \theta = 0 \text{---} \pi, \quad (4)$$

$$f(\varphi) = \frac{2}{\pi} \sin^2\varphi, \quad \varphi = 0 \text{---} \pi.$$

根据宇宙线 μ 子的动量分布和角分布, 结合北京谱仪的触发条件和 μ 计数器的性能、几何安排, 用蒙特卡洛方法计算出宇宙线实验中一些物理量的模拟数据^[5] 如图 7 所示, 相应的实验数据则示于图 6. 其中图 (a) 是信号电荷 Q 的幅度分布, 实验值与模拟值符合得很好; 图 (b) 是谱仪三层 24 边的 μ 计数器信号数的分布, 两者亦大体一致. 在实验数据中, 同一丝层只选择属于连贯径迹的一对信号, 去掉明显不属于连贯径迹的零星信号, 得到的每事例信号数分布与模拟结果相似. 两者都出现了 12 和 24 的峰值, 这对应于粒子穿过谱仪上部

六层和全部十二层 μ 正比管, 因而产生六对和十二对信号这两种情形. 仅穿过上部六层主要是 μ 子能量较低所致. 另一个共同点是信号数为偶值 (即全部是成对信号) 的概率比

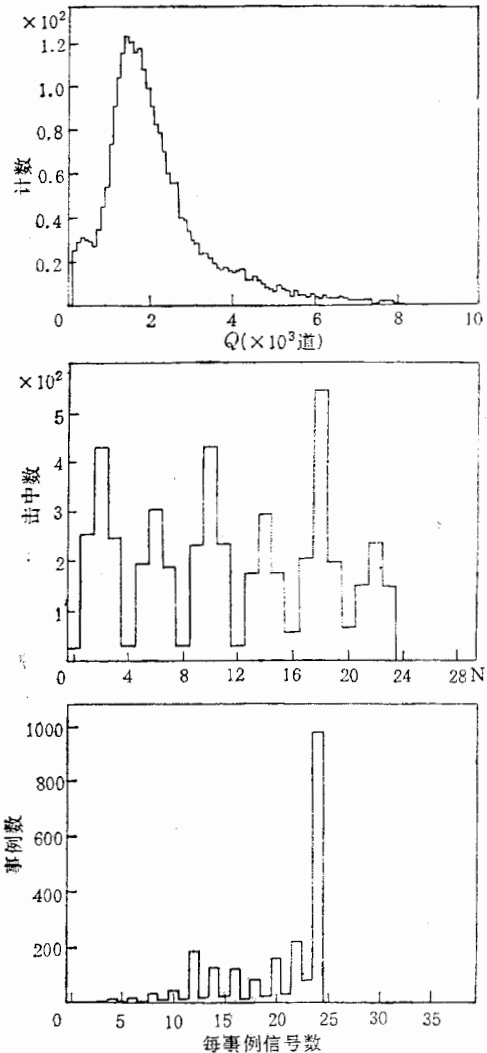


图 6 宇宙线实验数据的统计直方图
(HV = 2350)

(a) 756 对串接正比管两端输出信号电荷和 Q 的分布 (b) 谱仪中三层 24 边 μ 计数器击中信号数的分布 (c) 每事例信号数分布
N-谱仪三层 24 边 μ 计数器各边的编号

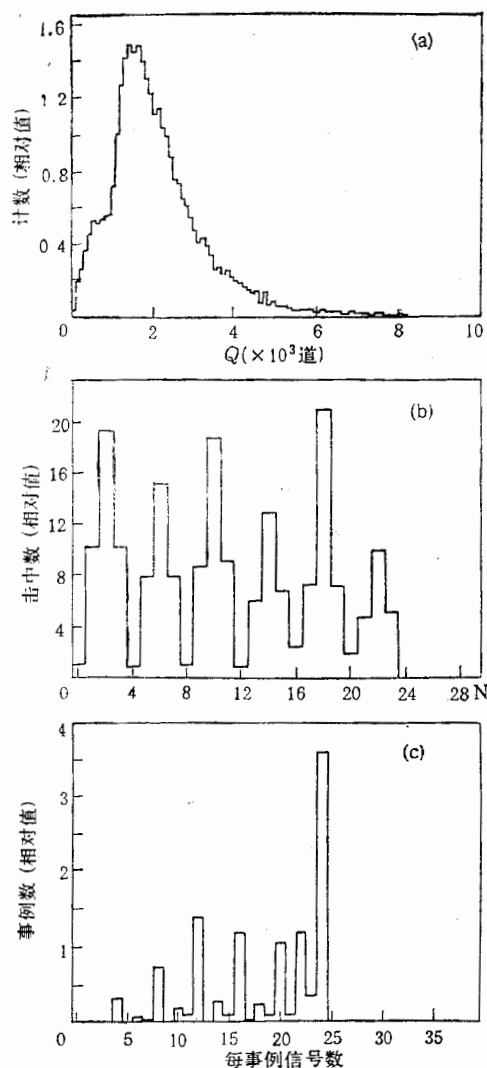


图7 与图6相对应的蒙特卡洛模拟
计算结果(相对值)
N-同图6

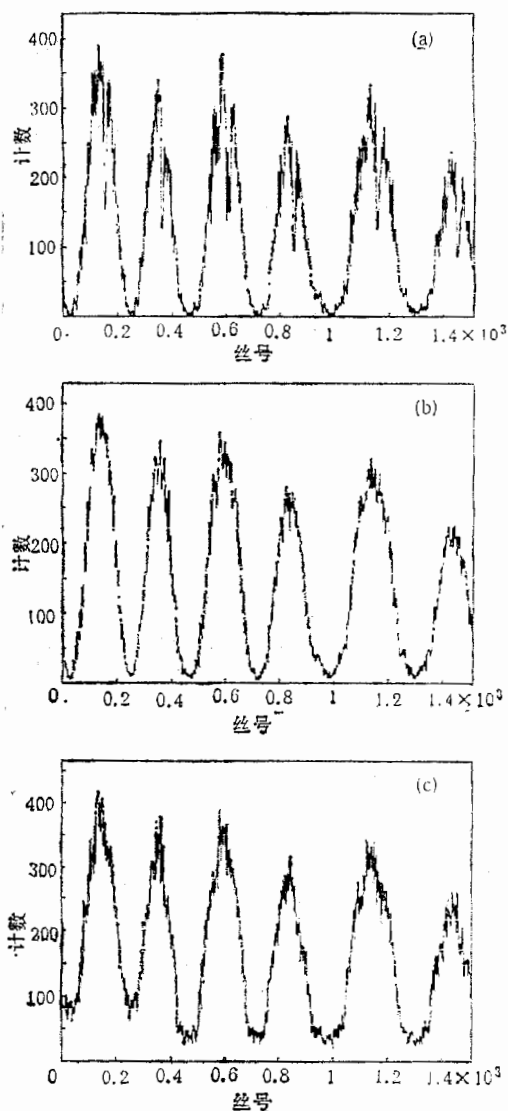


图8 谱仪 μ 计数器阵列全部 1512 个正比管
在宇宙线实验中的累计信号数
(a) 触发条件: 中心闪烁体和桶部 TOF 至少
一个单元同时有信号输出; (b) 图(a)的蒙
特卡洛模拟; (c) 触发条件: 桶部 TOF 至
少有两个单元同时有信号输出

奇数值为大。作图 6 (c) 时所以要对实验数据作上述处理, 是因为实验中观测到同一层两相邻正比管可同时产生输出信号, 也观测到了事例中存在不属于任何连贯径迹的击中点, 这些都是无法加以模拟的。

图 8 (a) 是谱仪 μ 计数器阵列全部 1512 个正比管在全部宇宙线实验中累积的信号数统计结果, 横坐标是正比管编号, 对应于谱仪上特定位置的 μ 正比管, 纵坐标是计数。实验值和模拟值(图 8 (b)) 都出现了六个峰值, 并且其横坐标相同, 这是由宇宙线的强度角分

布
布
减
致
要
正

还
满

判
学
春

[1
[2
[3

[4
[5

th
th
fc
sl

布所产生的。两者的形状相一致,这说明(4)式正确地反映了海平面宇宙线 μ 子的强度分布,而且所有的 μ 正比管探测效率的一致性很好。实验数据在各个峰中部都出现了计数减少的现象,这是因为在一段时间内,与这些位置对应的桶部 TOF 单元工作不正常,导致计数减少。这一故障后来得以排除,在后来进行的“下雨”宇宙线实验中(触发条件仅要求桶部 TOF 至少有两个单元同时击中,中心闪烁体是否击中没有要求),这些位置的正比管的计数没有下降(见图 8(c)),即可证明上述论断。

模拟计算中未考虑粒子的多次散射,未考虑 μ 子以外海平面宇宙线的硬成分,此外,还有许多无法模拟的因素。考虑到以上这些原因,测量值与模拟计算值的一致性令人满意的。

北京谱仪的宇宙线数据的成功获取和分析,是建立在各探测器及其电子学系统、触发判选和在线、离线数据获取和分析系统、气体系统成功运行的基础之上的。 μ 计数器电子学系统由方澄、顾树棣领导的小组提供。在分析 μ 计数器宇宙线的具体工作中,得到张长春、赵维仁、王泰杰、林丰成的帮助,谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 朱永生等,北京谱仪中的 μ 计数器,高能物理与核物理, 13(1989), 586
- [2] 李芳等, μ 计数器组件的定位测量及精度,内部报告,1989.4.
- [3] 顾树棣,用三点法对电荷分配法探测器进行标定,第二次全国核电子学与核探测器学术会议论文集,第一册,昆明,1984.10.
- [4] Hayakawa, Cosmic Ray Physics, p374, 1969.
- [5] 朱永生,张家文,北京谱仪 μ 计数器的宇宙线数据分析,内部报告,1989.4.

THE COSMIC RAY DATA ANALYSIS OF μ -COUNTER ARRAY IN BES

ZHU YONGSHENG, ZHANG LIANGSHENG, GAO WENXIU, ZHANG YINGPING,
ZHAO PINGDE, ZHANG JIAWEN, LI FANG, CHEN LEJUN, XU ZHIQING

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT

By analysing the cosmic ray data of μ -counter array in BES, we obtained informations on the threshold for identifying signal and noise, the detection efficiency of single wire layer, the particle detection efficiency, and the location resolutions in z direction and in r - ϕ plane for μ -counter array. The comparison between experimental data and Monte-Carlo simulation showed good agreement.