

高山宇宙线荷电强子流强的负正比

徐春娴 霍安祥 袁余奎 顾逸东 李惕碛
沈培若 贾桂斌 肖谦益 张承模 陈端保

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

在海拔3220米的实验室里,用磁谱仪动量子选装置和多板云室,对落在 0.23m^2 面积上的单根荷电强子进行了观测。考虑到各种可能的修正以后,得出在 $10\text{--}20\text{GeV}/c$ 之间,荷电强子的负正比为: $N^-/N^+ = 0.53 \pm 0.05$ 。当认为 N^+ 只包含有 p 和 π^+ , N^- 是 π^- ,而且 $N_{\pi^+}/N_{\pi^-} = 1$ 时,推算出 $N_{\pi^-}/N_p = 0.9 \pm 0.1$ 。若 π^- 积分谱的形式为 $j(>p) = Kp^{-\gamma}$,估算出在 $5\text{--}20\text{GeV}/c$ 的动量范围, $\gamma \simeq 2.3$ 。本文也对荷电强子的积分流强作了粗略的估计,其结果是:

$$j_{\pi^+\pi^-}(>12\text{GeV}/c) = (7.4 \pm 0.7) \times 10^{-5} \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}.$$

一、引 言

在各种高度上对强子的流强、负正比进行观测,能提供高能作用以及宇宙线在大气层中传播的机制和规律的有用资料,它也是宇宙线研究的基本数据。多年以来,在这方面已做了不少工作^[1-5],积累了一定的资料,并推算出质子与空气核非弹性作用长度以及它随能量变化的情况。一般还要研究单根荷电强子的流强、荷电比随选择面积、强子的能量和种类等诸因素的变化关系。

二、实验安排和工作情况

实验安排如图1所示。 A 、 B 、 C 、 D 是四排计数管。 A 、 B 两排各有26根计数管, C 、 D 两排各由56根计数管组成。各排之间的距离如图1中所示。单根计数管的直径是 3.3cm ,长 28cm 。在 B 、 C 两排之间有 6400gauss 的磁场。这四排计数管与运算器相联。当单个荷电粒子通过 A 、 B 、 C 三排计数管时,运算器立即由放电计数管的位置算出粒子的入射方向与出射方向的角度差值 Δ (以偏转的计数管根数表示)。我们取 $|\Delta| \leq 2$ 作为装置的触发条件。这相当于负粒子动量大于 $7.7\text{GeV}/c$,正粒子的动量大于 $12.0\text{GeV}/c$ 。这部分装置的详细情况参看资料[6]。

在资料[7]中对磁云室已有介绍。由于磁云室的死时间是15分钟，而描述仪的平均死时间只有18.5秒，所以磁云室只能对选入事例的一部分抽样照像。照像资料的分析工作见资料[8]。本文只限于对描述仪的打印资料进行分析。

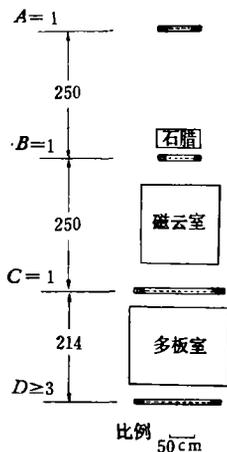


图1 实验安排

多板室照明区的大小为： $200 \times 150 \times 45 \text{ cm}^3$ ，室内有11块铜板，两块铁板。每块板的厚度是1.8 cm。在本实验中它用作强子的鉴别器。

在B排上方有36 cm厚的石腊靶，是为兼顾别的实验题目而设置的。

本文对事例的选择标准是： $A = B = C = 1, D \geq 3, |\Delta| \leq 2$ 。在近600小时的实验中，获得的数据如表1所示。

表1 事例分类

事例总数 N	事例按 Δ 分类					其它事例	总时间 (秒)	有效时间 (秒)
	+2	+1	0	-1	-2			
1088	304	272	190	160	162	327	2149200	2122805.5

三、分析和计算

1. 装置的几何因子

仪器在单位时间内接收到动量大于 $p \text{ GeV}/c$ 的粒子数为：

$$j(>p \text{ GeV}/c) = \int_s \int_{s'} j_{\perp}(>p) \cos^n \theta \cos^4 \theta \frac{ds ds'}{l^2}$$

$$= j_{\perp}(>p) \int_s \int_{s'} \cos^{n+4} \theta \frac{ds ds'}{l^2} = j_{\perp}(>p) \cdot QS$$

其中双重积分为装置的几何因子。 s, s' 分别是装置上、下两排计数管(A与D)的接收面积。 l 是 s, s' 间的垂直距离。 $j_{\perp}(>p)$ 是动量大于 $p \text{ GeV}/c$ 的垂直流强。 n 是强子的天顶角分布指数，在此取 $n = 7^{[4]}$ 。

考虑到磁场偏转对几何因子的影响，对于不同的角度差值 Δ (相应于不同动量的人射粒子) 算出相应的几何因子为：

$$\text{当 } \Delta = 0 \text{ 时, } \quad QS = 24.87 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$$

$$\text{当 } \Delta = \pm 1 \text{ 时, } \quad QS = 23.91 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$$

$$\text{当 } \Delta = \pm 2 \text{ 时, } \quad QS = 22.96 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$$

加权平均求出 $\overline{QS} = 23.67 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$ 。由观察可以得到 $j(>p)$ ，所以 $j_{\perp}(>p) = j(>p) / \overline{QS}$ ，即得到在观察高度上的垂直强子积分流强。

2. 动量误差分析

用A、B、C三排计数管的放电位置 a, b, c 确定粒子动量的公式是：

$$p = 300 H \rho = 300 H \frac{\sqrt{l_{BC}^2 + 3.3^2(b-c)^2}}{3.3 \times 2(a+c-2b)} \times l_{BC} (\text{GeV}/c)$$

$$\simeq \frac{A'}{\Delta} (\text{GeV}/c),$$

其中 H 是磁场强度, l_{BC} 是 B 、 C 两排计数管之间的垂直距离, $\Delta \equiv a + c - 2b$, 它是出射角与入射角之差的量度。以下我们用 Δ' 表示它的观测值, Δ 表示它的真值。 A' 在我们选取的动量范围内, 近似为常数。

选择 110 个大于 $2 \text{ GeV}/c$ 的无场 μ 子, 得到在真值 $\Delta = 0$ 时观测值 Δ' 的分布, 结果见图 2。又设真值为任意值时, Δ' 有同样的分布形式和分布宽度, 得到真值为 Δ 时, Δ' 的概率密度函数 $h(\Delta'|\Delta)$ 为:

$$h(\Delta'|\Delta) = \frac{1}{0.5\sqrt{\pi}} \exp \left[-\left(\frac{\Delta' - 0.442 - \Delta}{0.5} \right)^2 \right].$$

又知 Δ 的验前分布为 $h(\Delta) = B\Delta^{-\Gamma}$, 所以由贝叶斯公式^[9], 得到当观测值为 Δ' 时, 其真值 Δ 的分布函数为:

$$h(\Delta|\Delta') = \frac{h(\Delta) \exp \left[-\left(\frac{\Delta' - 0.442 - \Delta}{0.5} \right)^2 \right]}{\int h(\Delta) \exp \left[-\left(\frac{\Delta' - 0.442 - \Delta}{0.5} \right)^2 \right] d\Delta}.$$

取 $\Gamma = 3^{[1,3,4]}$, 发现 $h(\Delta|\Delta')$ 与高斯分布相似, 用高斯分布拟合, 得到平均与方差分别是: $\bar{\Delta} = \bar{\Delta}' - 0.442$, $\delta_{\Delta} = 0.5$ 。所以,

$$\begin{aligned} \Delta' = -2, & \quad p = -7.68_{-1.31}^{+1.97} \quad (\text{GeV}/c), \\ \Delta' = -1, & \quad p = -13.0_{-3.4}^{+6.9} \quad (\text{GeV}/c), \\ \Delta' = 0, & \quad p = -48.4_{-28.3}^{+274.9} \quad (\text{GeV}/c), \\ \Delta' = 1, & \quad p = 33.6_{-13.9}^{+289.7} \quad (\text{GeV}/c), \\ \Delta' = 2, & \quad p = 12.0_{-2.9}^{+5.69} \quad (\text{GeV}/c). \end{aligned}$$

图 3 表示观测值 $\Delta' = -1$ 时, 真值 Δ 的分布情况。

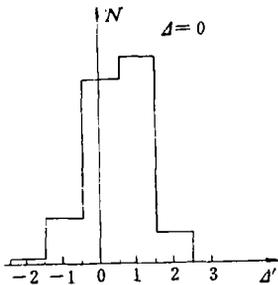


图 2 无场 μ 子 ($\Delta = 0$) Δ' 分布

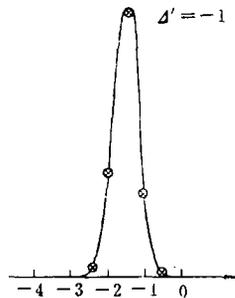


图 3 观测值为 Δ' 时, 真值 Δ 分布图

3. 粒子成份的分析

在以上的选择条件下, 可以进入样本的粒子有 p 、 π^{\pm} 、 K^{\pm} 、 \bar{p} 和 μ^{\pm} 等。经过分析计算, 认为在所选动量范围内, \bar{p} 、 K^{\pm} 均可以忽略。

对于混入的 μ 子,由 μ 子在多板室物质中打击电子的几率和电磁级联曲线进行详细计算,给出在本实验条件下,混入 μ 子的总量,在结果中给予扣除。

通过石蜡靶、云室壁,以及多板室中物质的全体质子中(或 π 介子),能满足触发条件的占总进入数的比,便是装置对 p (或 π)的选择效率。由于在选择动量范围, p 和 π 的作用长度不同,所以对 p 和 π 的选择效率也不同。经计算他们分别是: $\eta'_p = 0.227$, $\eta'_\pi = 0.257$,又考虑到计数管记录荷电粒子的效率以及它的有效体积,综合起来,对 p 、 π 的实际选择效率是: $\eta_p = 0.18$, $\eta_\pi = 0.21$ 。

四、结果和讨论

由实验数据的分析,得到以下的结果:

1. 在 $12\text{GeV}/c$ 附近,单个荷电强子的负正比是: $N^-/N^+ = 0.53 \pm 0.05$,如果 $N^+ = N_p + N_{\pi^+}$, $N^- = N_{\pi^-} = N_{\pi^+}$,导出 $i_{\pi^-}/i_p = 0.9 \pm 0.1$ 。

2. 若 π^- 的积分强度形式为: $Kp^{-\gamma}$,则在 $5-20\text{GeV}/c$ 范围,有:

$$\frac{\int_{9.7}^{19.9} p^{-\gamma-1} dp}{\int_{6.4}^{9.7} p^{-\gamma-1} dp} = \frac{160/\eta_{10}}{162/\eta_5} \approx 0.5,$$

解出 $\gamma \approx 2.3$ 。

其中, η_5 是 $5\text{GeV}/c$ 的 π^- 在多板室中起始的强子级联,满足选择条件而进入样本的几率。 η_{10} 是 $10\text{GeV}/c$ 的 π^- ,在多板室中起始的强子级联,满足选择条件进入样本的几率。 $\eta_5/\eta_{10} \approx 0.5$ 。

3. 由表观的记录数据,经过以上各项分析,修正后,估算出在 $700\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的高度,单个荷电强子的垂直总流强是:

$$j_{\perp}(>12\text{GeV}) = (7.4 \pm 0.7) \times 10^{-5} \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}.$$

由于兼顾别的题目,我们的实验对单个强子的选择效率较低,只能对流强作粗略估计。另外,我们判定“单个”的面积是 0.23m^2 ,与同类工作相比是小了一些,这可能会增加我们选中局部作用次级粒子的几率,从而使 N^-/N^+ 值偏高。文中所标误差均为统计误差。

参 考 资 料

- [1] R. W. Ellsworth et al., 14th Int. C. R. Conf., 7 (1975), 2528.
- [2] R. W. Ellsworth et al., 14th Int. C. R. Conf., 7 (1975), 2538.
- [3] F. Siohan et al., 13th Int. C. R. Conf., 3 (1973), 2135.
- [4] V. A. Sobinyakov et al., *Can. Jour. of Phys.*, 10-12 (1968), 686.
- [5] V. V. Avakian and M. P. Pheshko, *Can. Jour. of Phys.*, 10-12 (1968), 709.
- [6] 荆贵茹等, 本期, 417.
- [7] 原子能研究所云南站, 物理, 2 (1972), 57.
- [8] 袁余奎等, 本期, 478.
- [9] 李惕碚, 《实验的数学处理》, 科学出版社(将出版).

THE NEGATIVE-POSITIVE RATIO OF CHARGED COSMIC RAY HADRONS AT THE 3220 m ABOVE SEA-LEVEL

XU CHUN-XIAN HUO AN-XIANG YUAN YN-KUI
GU YI-DONG LI TI-PEI SHEN PEI-RO JIA GUEI-BIN
XIAO QIAN-YI ZHANG CHENG-MO CHEN DUAN-BAO
(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

Single tracks of unaccompanied charged hadrons, within a horizontal area of 0.23 m^2 have been measured with a magnetic spectrometer, a pre-selector of momentum in combination with a multiplate cloud chamber in a laboratory at 3220 m above sea level. Taking various possible corrections into account, the negative-positive ratio of charged hadrons was obtained as $N^-/N^+ = 0.53 \pm 0.05$ in the momentum range of 10—20 GeV/c. If we considered N^+ contained only P and π^+ , N^- were π^- and that $N_{\pi^+}/N_{\pi^-} = 1$, we deduced the result $N_{\pi^-}/N_p = 0.9 \pm 0.1$. Taking the form of the π^- integral spectrum as $j(>p) = Kp^{-\gamma}$, it was estimated that $\gamma \simeq 2.3$ in the momentum range 5—20 GeV/c. In this paper the integral vertical flux intensity of all charged hadrons was also estimated roughly, the result is:

$$j_{\perp}^{p+\pi}(> 12 \text{ GeV/c}) = (7.4 \pm 0.7) \times 10^{-5} / \text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s}.$$