

高能铁核 ($E \geq 4\text{GeV}/N$) 与铝核 作用截面的测量

任国孝 周寅藻 黄荣庆 陈鸣远
(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

用塑料核径迹探测器 CR-39 与铝板交替迭合组成核-核作用探测器,在北京地区用气球送至 37 公里高空,接受初级宇宙线高能核粒子的照射,测得能量大于 $4\text{GeV}/N$ 的铁核与铝核的作用截面为 1.76 ± 0.18 巴 ($\Delta z \geq 1$).

一、引 言

高能核-核作用截面,包括重核-核作用截面是核物理研究的基本数据之一,也是宇宙线成份、起源、传播研究和宇宙线高能物理研究需要的重要数据.一些实验表明^[1],在 10^6GeV 以上,铁核在宇宙线中占的份额仍比较大.所以对铁核的核作用的研究是有意义的,也是可行的.

从五十年代开始,用气球载运乳胶迭,接受宇宙线核粒子的照射,对核-核作用截面作过一些测量^[2-5].但是获得的事例统计量较少,而且电荷分辨较差,一般只给出一些核组(如轻核组 $z = 6 \sim 8$,中等核组 $z = 10 \sim 20$,重核组 $z \geq 20$)和靶核(通常是核乳胶复杂核,不是单一核)的作用截面值.最近几年,利用重离子加速器对核-核作用截面作了精确测量^[6,7],但入射核(除氦核外)达到的最高能量只有 $2\text{GeV}/N$.

由于北京地区的垂直有效地磁截止刚度为 $9.76\text{GV}^{[8]}$,有可能利用进入这一地区高空的初级宇宙线核束流,对高于加速器能区的核-核作用截面进行测量.

本实验采用近几年出现的新型塑料径迹探测器 CR-39 作为核径迹探测器,纯铝板作为靶物质,组成夹层结构,用高空气球运载,测量了能量大于 $4\text{GeV}/N$ 的铁核-铝核作用截面.从所得结果看,这种结构简单、造价低、易于扫描测量的核径迹探测器,基本上能适合于重核作用截面的测量.

二、探测器和探测方法

探测器由 6 块厚度为 1.8 厘米的铝板和 8 片厚度为 0.16 厘米的 CR-39 相互交替迭

合组成, 面积为 272 平方厘米 (图 1)。最上面的两片 CR-39, 用来确定入射的初级核粒子的电荷及入射角。其余的各片 CR-39 记录穿过各块铝板前或后的核粒子的电荷和入射角^[9]。探测器有较好的安装精度, 每层的位置误差不大于 1 毫米。

上述探测器在垂直方向的总物质量为 29.16 克/厘米²。相对论性核粒子穿过此探测器时, 不可能因电离损失能量而停止, 而且因电离能量损失引起的能量变化也很小。例如, 相对论性铁核穿过 1.8 厘米厚的铝板, 总电离能量损失只有 100MeV/ N 左右。所以, 如果入射核粒子在一块靶物质中没有发生非弹性核作用, 它就应该贯穿这块板, 而且在这块板的上、下两片 CR-39 中, 形成大小相同, 且入射角相同的

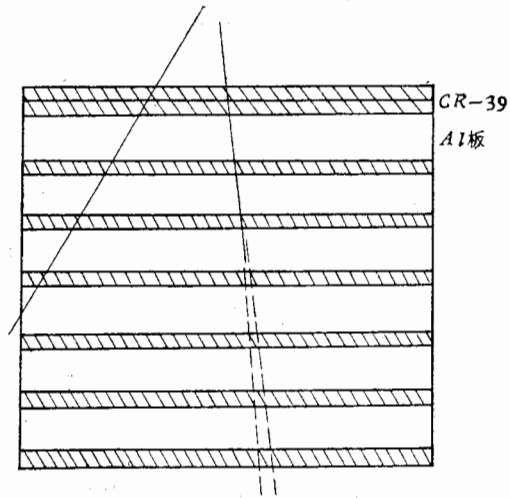


图 1 探测器示意图

的径迹, 径迹的位置应在粒子的入射线上。反之, 如果发生了电荷变化 $\Delta z \geq 1$ 的核作用, 入射核碎裂为较轻的核, 则次级核的径迹大小 (即电荷数 z) 会发生变化, 径迹出现的位置也会偏离入射线。如果核作用后的次级核比碳核轻, 则不再能被 CR-39 探测到, 原径迹消失不见。按照这一判据, 判定入射核是否在铝板中发生了非弹性核作用。

三、实验和结果

上述探测器于 1982 年 5 月 14 日在北京附近 (香河县) 用我国高空科学气球发放, 气球体积为 3 万立方米, 平飞高度 36.8 公里 (剩余大气 4.6 克/厘米²), 平飞时间为 9 小时 40 分钟。成功回收^[10]。

回收的全部 CR-39 片在大型恒温槽中一次蚀刻。蚀刻溶液为 6.8N 的 NaOH 溶液, 温度为 $70 \pm 0.1^\circ\text{C}$, 持续时间 41 小时。

扫描、测量核径迹的方法同于 [9]。本次实验记录的宇宙线核粒子的电荷分布如图 2, 对铁核的电荷分辨为 $0.7e$ 。

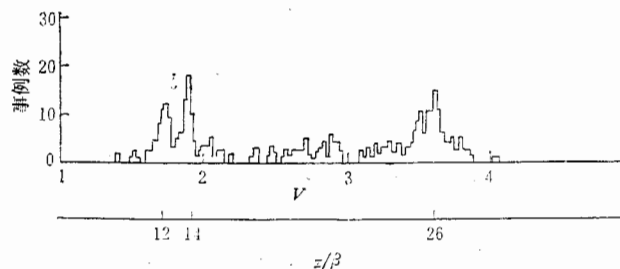


图 2 高空宇宙线电荷分布

在各层 CR-39 片中,跟踪每一个入射的铁核,直到它们离开了探测器或者发生了核作用($\Delta z \geq 1$)。设有 N_0 个人射铁核,其中有 N 个在探测器内发生了作用,测量出每个铁核在探测器中通过的路程长度 $l_i (i = 1, 2, \dots, N_0)$, 则铁核的核作用平均自由程 λ 的最大似然估计值为:

$$\lambda = \sum_{i=1}^{N_0} l_i / N \quad (1)$$

其方差为:

$$\sigma^2(\lambda) = \lambda^3 / \left(2 \sum_{i=1}^{N_0} l_i - N\lambda \right) \quad (2)$$

(1)、(2)的证明见附录。

本实验中入射铁核总数 $N_0 = 141$, 在探测器中发生核作用的铁核数 $N = 93$ 。这 N_0 个铁核在探测器内走过的路程总和为 875.2 厘米。由式(1)、(2)算出铁核-铝核作用平均自由程 $\lambda_{\Delta z \geq 1}$ 为 9.41 ± 0.98 厘米。作用截面 $\sigma_{\text{Fe-Al}}$ 为 1.76 ± 0.18 巴。这里标出的误差为(2)式算出的统计误差¹⁾。下表列出其它工作的结果。表中 F. Fumuro 的工作是直接测的铁-铝作用截面,其余的是由实验拟合计算出的数值。本实验结果与 [5] 和 [11] 一致。

实验者	T. Saito ^[5]	F. Fumuro ^[6]	S. Tasaka ^[11]	本实验
束流电荷 (e)	20~26	26	26	26
束流能量 (GeV/N)	>10	1.88	1.0	>4
$\sigma_{\text{Fe-Al}}$ (巴)	1.75	2.52 ± 0.37	1.96	1.76 ± 0.18

何泽慧先生不断关心和支持这一工作,顾逸东同志设计了气球飞行装置,中国科学院高空气球总体组完成了气球的飞行和回收,在分析方法上与霍安祥、吴枚和朱清棋同志进行了多次有益的讨论。作者对他们深表谢意。

附录:

核粒子在物质中发生核作用的路程长度 l 服从指数分布, 设其期待值为 λ 。现由实验得到容量为 N_0 的一个随机样本 $l_i (i = 1, 2, \dots, N_0)$, 其中有 N 个粒子在探测器内发生了作用, $M = N_0 - N$ 个粒子未发生作用穿过了探测器。为简单计,先假设这 N_0 个粒子垂直入射。

粒子在核作用前通过的距离为 l 的概率密度为:

$$\lambda^{-1} \exp(-l/\lambda)$$

粒子通过厚度为 A 的探测器不发生作用的概率为:

$$\int_A^{\infty} \lambda^{-1} \exp(-l/\lambda) dl = \exp(-A/\lambda)$$

则样本 l 的似然函数可写为:

$$L(l|\lambda) = \prod_{i=1}^N [\lambda^{-1} \exp(-l_i/\lambda)] \cdot [\exp(-A/\lambda)]^M \quad (l_i \leq A)$$

1) 当一个核在一块铝板中发生作用时,作用点取在铝板中心处,由此引起作用路程的标准误差为 0.52 厘米,(1)式分子的标准误差为 6.43 厘米, λ 的标准误差为 0.07 厘米,甚小于由(2)给出的统计误差。

按照参数估计的点估计法^[12], 参数 λ 的最大似然估计值为:

$$\hat{\lambda} = \left(\sum_{i=1}^N l_i + MA \right) / N = \sum_{i=1}^{N_0} l_i / N$$

估计值的方差为:

$$\begin{aligned} \sigma^2(\lambda) &= - \left[\frac{\partial^2 L(l|\lambda)}{\partial \lambda^2} \right]_{\lambda=\hat{\lambda}}^{-1} \\ &= \left[\hat{\lambda}^3 / \left(2 \sum_{i=1}^N l_i + 2MA - N\hat{\lambda} \right) \right] \\ &= \hat{\lambda}^3 / \left(2 \sum_{i=1}^{N_0} l_i - N\hat{\lambda} \right) \end{aligned}$$

在粒子按不同角度入射的情况, 对每个粒子而言, 探测器厚度 A 各不相同. 经 Monte-Carlo 模拟计算, 证实上面的似然估计值仍然正确.

参 考 文 献

- [1] C. B. A. McCusker, *Physics Reports*, **20C** (1975), 230.
- [2] H. Bradt, B. Peters, *Phys. Rev.*, **77**(1950), 54.
- [3] P. S. Freier et al., *Phys. Rev.*, **84**(1951), 322.
- [4] J. H. Noon et al., *Phys. Rev.*, **97** (1955), 769.
- [5] T. Saito, *J. Rhys. Soci. Japan*, **30** (1971), 1243.
- [6] F. Fumuro, R. Ihara, *16th ICRC*, **6**, (1979), 166.
- [7] K. R. V. Nair et al., *16th ICRC*, **6**(1979), 216.
- [8] 程栋元, 郑州大学学报(自然科学版) 1983年增刊, 188.
- [9] 任国孝等, 空间科学学报, **3**(1983), 78.
- [10] 任国孝, 顾逸东等, “测量高能重核作用长度和原初宇宙线成分的气球飞行”, 高空气球技术与应用学术讨论会(1983年2月, 北京).
- [11] S. Tasaka et al., *18th ICRC*, **5** (1983), 206.
- [12] 李惕碛, 《实验的数学处理》, 科学出版社, p. 124

MEASUREMENT ON CROSS SECTION OF HIGH ENERGY IRON NUCLEUS ($E \geq 4\text{GeV}/N$)-ALUMINIUM NUCLEUS INTERACTIONS

REN GUO-XIAO ZHOU YIN-ZAO HUANG RONG-QING CHEN MING-YUAN
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

For the purpose of nucleus-nucleus interaction detection, a detector consisted of CR-39 plastic track detector sheets interlayered with aluminium plates was launched to 37 km height by balloon near Beijing and exposed in the high energy nucleus beam of primary cosmic rays for 10 hours. The obtained Fe-Al interaction cross section ($\Delta z \geq 1$) at energy region higher than 4 GeV/N is 1.76 ± 0.18 b.