

200 A GeV 硫核及其重碎片与铜核作用的 电荷改变总截面的测量

任国孝

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要

测量了 200 A GeV 的 ^{32}S 及其碎片 P, Si, Al, Mg, Na 和 Ne 与 Cu 靶作用的电荷改变总截面。观察到次级碎片的电荷改变总截面比相同电荷的初级粒子的要高。导出的电磁散裂截面与弹丸电荷的平方成比例, 与理论预言一致。

一、引 言

工作[1]和[2]报道了在 CERN SPS 200 A GeV 的超相对论核-核碰撞中, 电磁散裂截面随靶核电荷变化的规律与理论模型^[3]相符。值得注意的是, 在能量很高并且碰撞核很重时, 电磁散裂截面甚至超过核作用截面。因此, 在研究超相对论能区的核-核作用时, 测量总截面和电磁散裂截面具有重要的意义。

使用固体核径迹探测器测量核-核碰撞中的电荷改变截面(以下简称截面), 比较简便且效率高。工作[1]和[4]报道了初步结果。本工作对 S-Cu 相互作用的情况, 采用了比[1]和[4]高一个量级的统计量, 进行了更细致的测量。在计算总截面值时, 采用了四种不同的方法以互相比。由总截面给出了不同弹丸的电磁散裂截面对弹丸电荷的依赖关系。

二、实 验

用塑料核径迹探测器 CR-39($\text{H}_8\text{C}_{12}\text{O}_7$) 片测量弹丸核及其重核碎片的电荷。探测器由 8 个相同的单元叠加组成(图 1)。每个单元内有一块铜板作为靶物质, 厚度为 0.32 cm (约为 ^{32}S 的核作用长度 mfp 的 10%); 5 片 CR-39 作为电荷探测器, 每片厚度为 740 μm 。在探测器的最上面放置两片 CR-39, 用来选择束流粒子。每块铜板后面的 CR-39 用于测量穿过该靶的所有粒子的电荷。

1987 年 7 月在 CERN SPS 上用 200 A GeV 的 ^{32}S 束垂直照射了这个探测器。离子密度 $\sim 10^3/\text{cm}^2$ 。总入射粒子数约为 15 000。

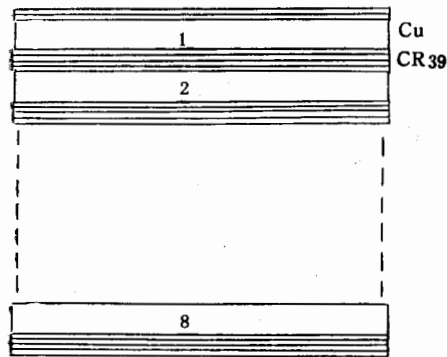


图1 探测器结构示意图

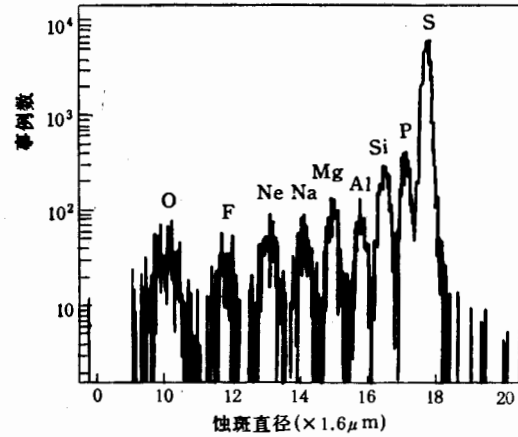


图2 CR-39-面上的蚀斑直径分布

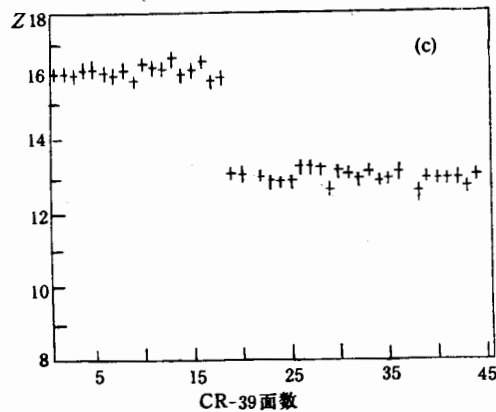
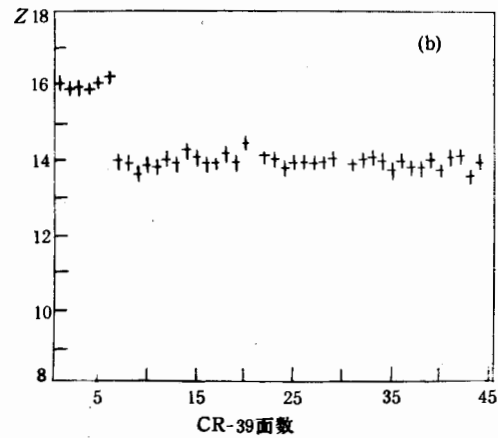
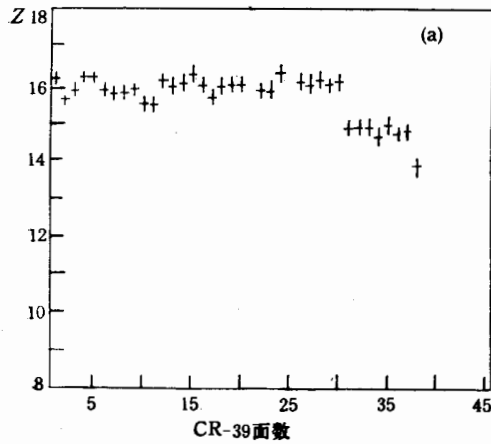


图3 几个事例

照射后的 CR-39 片,在 70°C 的 6.25N 氢氧化钠溶液中进行了 40 小时蚀刻。电荷大于和等于 8 的核都形成了可测量的蚀锥。

用自动显微镜成象系统 VICOM^[9]测量了前 7 个单元内的第 1、3、5 片和第 8 单元的第

1 片 CR-39 上、下表面的所有蚀斑。用计算机记录所有蚀斑直径(准确到 $0.1\mu\text{m}$)并拟合出其圆心的位置。在 200AGeV 情况下,入射粒子和碎片的速度都接近于光速,这时蚀斑直径的大小即代表粒子的电荷值。图 2 是第 4 块铜板后第 1 片 CR-39 的上表面所有蚀斑直径的分布。各个峰的位置表示不同电荷核的蚀斑的平均直径值。电荷分辨为 $0.23e$ 。

根据蚀斑中心的位置,可用计算机程序跟踪该粒子,找到它在下一个单元或下一片 CR-39 中的位置,并得知其电荷值,直到它射出探测器或变为电荷 $Z < 8$ 的碎片。用这个方法,径迹重建效率接近 100%,可以确定入射粒子及其碎片发生电荷变化作用的位置及其次级的电荷值。图 3 给出在径迹重建后,几个入射粒子的电荷值在探测器中的变化情况。

三、计算方法

采用以下四种方法来计算核的总截面:

1. 把整个探测器作为一个整体。按照粒子穿过物质的指数衰减规律,如果入射粒子数为 N_0 ,则通过厚度为 $L(\text{gcm}^{-2})$ 的物质后,存活的粒子数为:

$$N = N_0 \exp(-N_A \sigma L / A),$$

式中 σ 为总截面 (cm^2), N_A 为阿佛加德罗常数, A 为靶核原子量。由此求出截面

$$\sigma = \frac{A}{N_A L} \ln(N_0 / N). \quad (1)$$

2. 用每一靶层后粒子的存活数 $N_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ 与相应的深度 $x_i (\text{gcm}^{-2})$ 的关系:

$$N_i = N_0 e^{-B x_i} \quad (i = 1, 2, \dots, 8), \quad (2)$$

作最小二乘拟合求出 B 。截面可由拟合常数 B 求出:

$$\sigma = B \cdot A / N_A.$$

3. 用每一靶层内的作用粒子数 $N'_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ 求 mfp, 其最大似然估计值^[6]为:

$$\hat{\lambda} = H / \ln \left[1 + \frac{\sum_i N'_i}{nN + \sum_i (i-1)N'_i} \right]$$

式中 H 为一层靶的厚度 (gcm^{-2}), n 为靶层的个数。截面:

$$\sigma = A / (N_A \hat{\lambda}). \quad (3)$$

4. 用粒子在探测器中的自由路程 $l_i (i = 1, 2, \dots, N')$ 求 mfp, 其最大似然估计值^[6]为:

$$\hat{\lambda} = \left(\sum_i l_i + NL \right) / N', \quad (4)$$

式中 N' 为在探测器中发生了作用的粒子总数。知 $\hat{\lambda}$ 后仍由[3]式求截面。

四、结果和讨论

本实验中入射于探测器的 ^{32}S 粒子数 N_0 为 12401, 出射 S 粒子数 N 为 4828, 探测器

厚度 $L = 26.8448 \text{ gcm}^{-2}$ 。用计算方法 1 得出 S 在整个探测器 Cu/CR-39 混合物中的总截面值为 $3585 \pm 64 \text{ mb}$ 。按照 [2] 给出的资料, 扣去 CR-39 的贡献, 得到 S 在 Cu 中的总截面值为 $3675 \pm 66 \text{ mb}$ 。为简便起见, 以下直接给出粒子与 Cu 作用的截面值。

表 1 列出 S 粒子在各靶层后的存活数 N_i 及在各靶层内的作用数 N'_i 。 N'_i 随深度的变化显示了很好的指数衰减规律。由方法 2 求出的总截面值为 $3681 \pm 58 \text{ mb}$, 由方法 3 求得相应的值为 $3714 \pm 44 \text{ mb}$ 。

表 1 S 粒子经过各靶层后的存活数及在各靶层内的作用数

靶层数	一	二	三	四	五	六	七	八
存活数	11013	9699	8573	7619	6774	6027	5341	4828
作用数	1388	1314	1126	954	845	747	686	513

全部作用了的 S 粒子 ($N' = 7573$) 的自由路程之和为 $83786.8 \pm 72.2 \text{ gcm}^{-2}$, 由方法 4 求得总截面为 $3713 \pm 44 \text{ mb}$ 。

在本实验的统计量下, 4 种方法所得到的结果在误差范围内相当一致。这说明, 只有当事例样本很小时, 才应该注意计算方法^[6]。

以上是初级硫粒子的情况。下面讨论次级重碎片的总截面。由于各碎片核产生的深度不同, 因而不能用前三种方法来确定它们的总截面, 只能采用方法 4。表 2 列出在整个探测器中产生的碎片核 P, Si, Al, Mg, Na 和 Ne 的数目, 它们在探测器中再次发生作用的数目以及所有碎片的自由路程总和。表 2 还列出了用方法 4 求出的各碎片核的总截面。

表 2 各次级碎片核的实验数据和截面值

碎片名称	P	Si	Al	Mg	Na	Ne
产生数	1044	715	280	341	236	215
作用数	407	286	115	120	73	63
路程和 (gcm^{-2})	11631.5	8377.8	3213.9	3904.3	2761.3	2524.2
电荷改变总截面 (mb)	3660 ± 184	3572 ± 214	3747 ± 353	3214 ± 297	2759 ± 328	2604 ± 334
核作用截面计算值 (mb)	2173	2104	2077	2008	1973	1894
电磁散裂总截面 (mb)	1487 ± 184	1468 ± 214	1670 ± 353	1206 ± 297	786 ± 328	710 ± 334

图 4 是 S 及各重碎片在 Cu 中的总截面。横坐标为弹丸电荷 Z_p , 标“*”的两个值是用薄靶测得的初级束流 ^{32}S 和 ^{16}O 的截面值^[2]。可以看出, 本实验的 S 及次级核的截面值比它们都高。S 的截面值较高的可能原因是, S 在探测器中经过较厚的靶层, 可能产生了一些不稳定的同位素核, 它们具有较高的电磁散裂截面^[7]。工作 [8] 对 14.5 AGeV 的

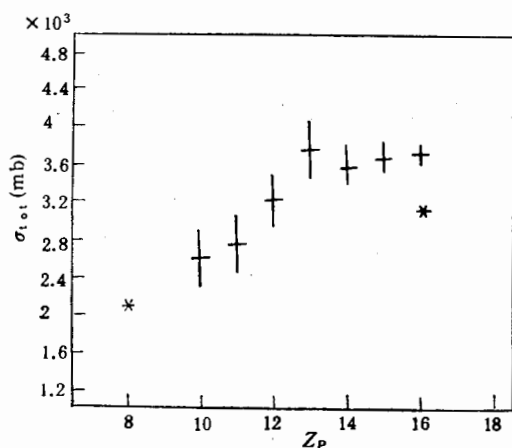
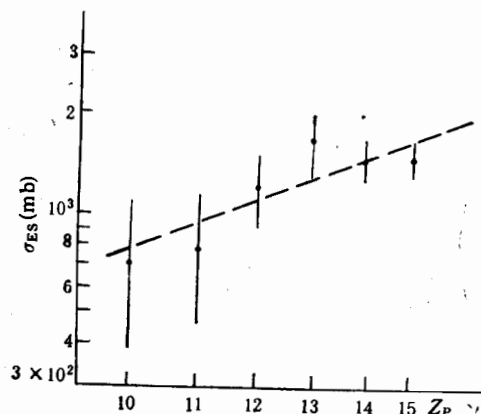


图 4 S 及重碎片在 Cu 中的电荷改变总截面

图 5 重碎片的 σ_{ES} 与 Z_p 的关系

Si 核与 Pb 靶的作用也观察到类似现象。同样地, 高能碰撞产生的次级碎片中也可能含有一些不稳定的同位素核, 导致它们的截面值增高。当然, 也不能排除次级核中存在着某种反常现象。这些问题还有待进一步的研究。

人们认为实验观察到的电荷改变作用, 是由碰撞参数小于核力作用范围时发生的核作用和碰撞参数较大时发生的电磁散裂作用二者的总贡献^[1,2,4]。核作用截面可由半经验公式^[9]

$$\sigma_{NS} = \pi r_0^2 (A_P^{1/3} + A_T^{1/3} - b)^2 \quad (5)$$

算出, 其中 A_P 和 A_T 分别是弹丸和靶核的原子量, $r_0 = 1.32 \text{ fm}$, $b = 0.83$ 。计算结果列于表 2。

由此求得电磁散裂截面 $\sigma_{ES} = \sigma - \sigma_{NS}$ 也列于表 2。 σ_{ES} 与弹丸电荷 Z_p 的关系可以拟合为 $Z_p^{1.95 \pm 0.08}$ (见图 5)。应该指出, 工作 [1]、[2] 和 [4] 给出的 σ_{ES} 与靶核电荷 Z_T 的关系是 $\sigma_{ES} \propto Z_T^{1.8-2.0}$ 。它们都与理论^[3]的预言一致。该理论认为, 一个快速运动的核的电磁场可由虚光子谱来描述, 虚光子强度与核的电荷的平方成比例。

本工作的实验部分是作者在 Berkeley 执行中美科技合作项目时完成的。感谢加州大学 Berkeley 分校 P. B. Price 教授和他的实验组成员 W. T. Williams, D. Ifft, A. Westphal 和 M. Solarz 的合作和帮助。数据分析在高能所宇宙线室 VAX 计算机上完成, 感谢该机组给予的支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] P. B. Price, Ren Guoxiao and W. T. Williams, *Phys. Rev. Lett.*, **61**(1988), 2193.
- [2] C. Brechtmann and W. Heinrich, *Z. Phys.*, **A330**(1988), 407; **A331**(1988), 463.
- [3] J. D. Jackson, "Classical Electrodynamics", Wiley, New York, 1975.
- [4] P. B. Price, He Yudong, Ren Guoxiao and W. T. Williams, 21th ICRC, OG8.3-11, 1990.
- [5] G. Gerbier, Ren Guoxiao and P. B. Price, *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988), 2258.
- [6] 吴枚和任国孝, 高能物理与核物理, **11**(1987), 145.
- [7] I. Tanihata, *Nucl. Phys.*, **A488**(1988), 113c.
- [8] P. B. Price and Y. D. He, *Phys. Rev.*, **C43**(1991), 835.
- [9] G. D. Westfall etc., *Phys. Rev.*, **C19**(1979), 1309.

Measurement of Charge Changing Cross Sections of 200A GeV S and Fragments with Cu Target

REN GUOXIAO

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

ABSTRACT

The charge changing cross sections of 200A GeV S and its fragments P, Si, Al, Mg, Na and Ne in collisions with Cu target are measured. It is shown that the cross sections of secondary fragments are larger than that of primary beams with the same charges. The electromagnetic spallation cross sections deduced show a dependence on charges of projectiles which is consistent with theoretical prediction.