

文章编号: 1007-4627(2017)03-0545-06

中高能 ^{28}Si 碎裂截面研究进展

李俊生, 党英华, 张东海

(山西师范大学现代物理研究所, 山西 临汾 041004)

摘要: 介绍了利用CR-39探测器对 ^{28}Si 与不同靶作用的电荷变化总截面和分截面的研究进展, 给出723 AMeV ^{28}Si 与碳靶作用电荷变化总截面和分截面的最新实验结果。对 ^{28}Si 与靶核反应电荷变化总截面和分截面与束流能量和靶核质量的关系进行了讨论, 发现束流能量大于200 AMeV时, 中高能 ^{28}Si 与不同靶核反应电荷变化总截面与束流能量无关, 分截面表现出明显的奇偶效应, 且随靶核质量数的增加而增加。

关键词: 碎裂; CR-39; 电荷变化总截面; 电荷变化分截面

中图分类号: O571.414 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.545

1 引言

了解中高能重离子碰撞相互作用机制, 对于评估太空飞船遭受的空间辐射损害和研究宇宙射线中重离子在星际间的传播以及辐射的生物学效应都有重要的科学价值。最近几年, 对于高纬度的国际航班中人员的辐射防护也引起了一定的重视^[1-4]。研究表明, 重离子束在物理学和生物学性质上具有很多的优势^[5]。在物理学方面, 重离子在介质中接近停止时会产生巨大的能量损失——Bragg效应^[6]。在生物学方面, 高的相对生物学效应是重离子在生物学上的最显著特点, 对肿瘤乏氧细胞的杀伤力要比线性能量传输(LET)低的射线大, 对细胞生长周期依赖较小^[7], 达到对肿瘤细胞同样的杀伤所需要的剂量比常规射线小得多^[8]。然而, 对生物学效应的评估非常复杂并且具有很大的不确定性^[4]。

宇宙射线粒子大部分是p(约占87%), 其次是He(约占12%), 重离子约占1%。这些粒子的能量范围可从几十 AMeV到超过 10^{15} AMeV。重离子包括C, Ne, Si, Fe等。虽然这些重离子的含量远少于p和He, 但它们是引起生物学效应的主要成分^[9]。在银河宇宙线中, Si也是含量相对较多的重元素之一, 并且大多是Fe和其它重粒子相互作用的碎裂产物。

近年来, 人们利用CR-39探测器对中高能重离子碰撞反应截面进行了大量的实验研究^[9-24]。但是, 不同实验组得到的 ^{28}Si 与不同靶核作用电荷变化总截面和弹核碎片产生分截面, 在相同或相近束流能量下不同实验

组给出的实验结果均存在一定差异。由于实验结果存在一定差别, 不仅影响优化核碎裂模型及银河宇宙线粒子的传播及演化模型, 而且影响宇航员在空间舱内外所接受的剂量评估、空间舱及宇航服的辐射屏蔽设计。

在理论上, 人们主要采用参数化方法^[25,26]、NUCFRAG2算法^[27]和量子多重散射模型^[27]等及Bradt-Peters半经验公式^[28]对反应截面进行理论计算。但是, 理论预言与实验结果之间仍存在一定差异。

CR-39的主要化学成分是 $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{O}_7$, 对超过3 keV/ μm 的LET能谱非常灵敏^[29]。由于CR-39具备高灵敏度、易制备和成本低的优点, 广泛应用在中高能重离子碰撞的实验研究中。此外, CR-39与人体组织最为接近, 是最适合模拟人体组织对高LET粒子辐射反应的无源探测器。

2 实验方法

利用CR-39进行中高能重离子碰撞研究时, CR-39探测器和靶交替放置, 如图1所示, 将靶置于两片CR-39探测器中间, 弹核束流沿垂直于CR-39平面的方向照射, 弹核束流与靶核碰撞后, 将碎裂为大小不同的弹核碎片。

中高能弹核及其作用在靶上产生的重离子碎片在CR-39探测器中由于电离损失而形成潜径迹, 经化学蚀刻后, 这些潜径迹达到微米量级, 在CR-39中形成

收稿日期: 2016-12-07; 修改日期: 2017-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11075100, 11565001); 山西省自然科学基金资助项目(2011011001-2); 山西省留学回国人员科研资助项目(2011-058)

作者简介: 李俊生(1977-), 男, 河北三河人, 副教授, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: lij@sxnu.edu.cn

锥形坑，可以通过显微镜观察与测量。蚀刻溶液一般为 7 mol/L 的 NaOH 溶液，蚀刻温度在 40~80 °C 之间，蚀刻时间一般为 15~30 h。

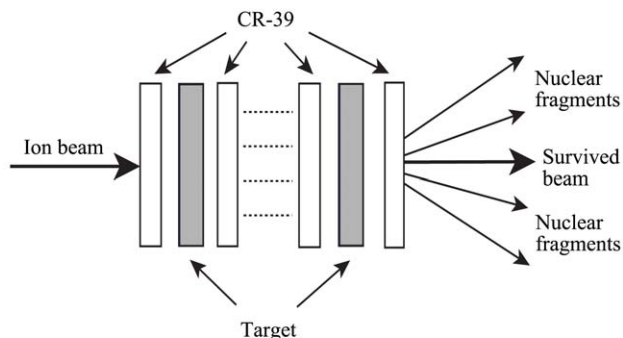


图 1 靶与CR-39探测器结构示意图

可以通过两种不同的方法对 CR-39 探测器中形成的径迹进行鉴别。一种是通过测量蚀刻径迹，即锥形坑在 CR-39 表面的截面面积进行鉴别，这种方法简单易行，使用频率更高一些；另一种方法是通过测量蚀刻径迹在 CR-39 中锥形坑的高度进行鉴别，这种方法主要适用于电荷数较大的重离子鉴别，且一般需要单面蚀刻^[15]。图 2 给出 788 AMeV ²⁸Si 与 C 靶反应弹核及其碎片在靶后 CR-39 中径迹的截面积分布^[18]，可以看出，5 ≤ Z ≤ 12 的碎片在 CR-39 中径迹可由面积分布很好区分，Z = 13 的碎片和 Si 的径迹面积分布有部分重叠，给 Z = 13 的碎片的鉴别带来困难。图 3 给出 600 AMeV ²⁸Si 与 CH₂ 靶反应弹核及其碎片在靶后 CR-39 中径迹的锥高分布^[15]，其中 Z/β = 4.7 对应 Z = 3 的弹核碎片，Z/β = 21.9 对应 Z = 14 的弹核 Si，可以看出，3 ≤ Z ≤ 13 的碎片及 Si 在 CR-39 中径迹可由锥高分布很好区分。

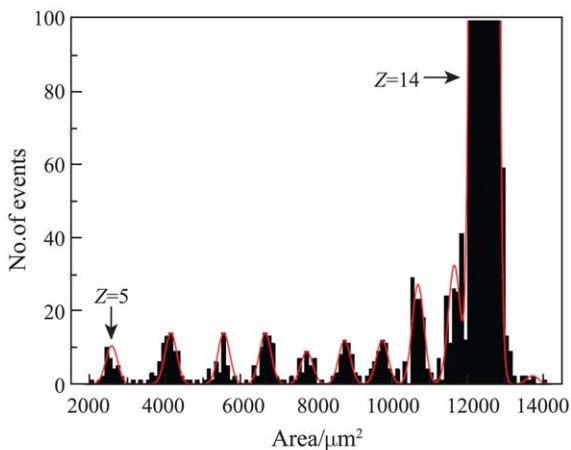


图 2 (在线彩图) 788 AMeV ²⁸Si+C 反应弹核及其碎片在 CR-39 中径迹面积分布

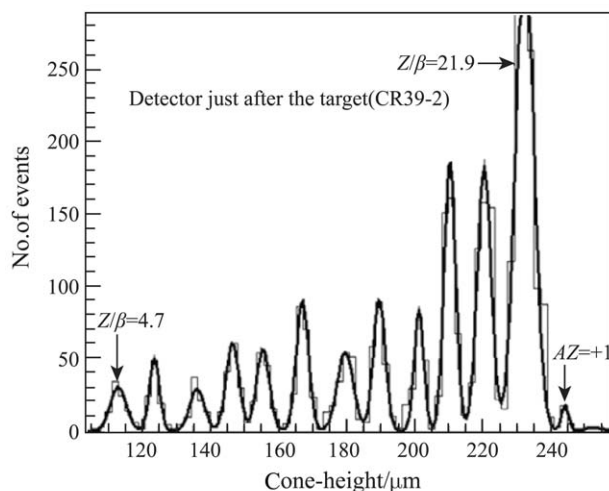


图 3 600 AMeV ²⁸Si+CH₂ 反应弹核及其碎片在 CR-39 中径迹锥高分布

3 反应截面

3.1 电荷变化总截面

电荷变化总截面可以由公式^[17]

$$\sigma_{\text{tot}} = \frac{A_T \ln(N_{\text{in}}/N_{\text{out}})}{\rho_T t N_{\text{Av}}}$$

计算得出，式中 A_T 是靶核的质量数； N_{in} 和 N_{out} 分别是靶前入射弹核的个数和靶后未反应弹核的个数； ρ_T 是靶的密度； t 是靶的厚度； N_{Av} 是阿伏伽德罗常数。电荷变化总截面中的电荷变化量一般指弹核碎片电荷数与弹核电荷数的差，即 $\Delta Z = Z_F - Z_P$ ，对于 ²⁸Si， $-13 \leq \Delta Z = Z_F - Z_P \leq -1$ 。在一些实验中也观察到电荷拾取反应，即 $\Delta Z = +1$ 的情况^[15,18]。

表 1 给出了不同研究组测得的 ²⁸Si 作用在不同靶上的电荷变化总截面。从表 1 中可以看出，目前关于 ²⁸Si 碎裂的研究数据还不够充分，其中只有 ²⁸Si 诱发 H 靶和 C 靶的数据相对较多。图 4 给出了不同能量的 ²⁸Si 作用在不同靶上得出的电荷变化总截面与束流能量之间的关系，图中数据来自文献[9-19]。从图 4 看出，在 200 AMeV 以下能区，²⁸Si 与 C 靶反应电荷变化总截面随束流能量的增加而缓慢地减小；在 200 AMeV 以上能区，²⁸Si 与各种靶反应的电荷变化总截面基本与束流能量无关。现有数据表明，²⁸Si 作用在不同靶上的电荷变化总截面随靶核质量数的增大而增大，这可以由反应体-旁观体图像进行解释，随着靶核质量数的增加，弹核和靶核相互重叠区域增加，即反应截面增大。

表 1 弹核 ^{28}Si 作用在不同靶上的电荷变化总截面

靶核	能量/AMeV	电荷变化总截面 $\sigma_{\text{tot}}/\text{mb}$	参考文献	
H	14 500	388.0 ± 24.0	[12]	
	1 296	407 ± 10	[19]	
	1 158~1 136	426 ± 15	[14]	
	1 000	483 ± 76	[17]	
	770	387 ± 10	[19]	
	770~760	424 ± 12	[14]	
	568~536	393 ± 12	[14]	
	503	379 ± 9	[19]	
	467	367.6 ± 16.7	[10]	
	364~340	371 ± 12	[14]	
	278~262	393 ± 27	[14]	
	C	14 500	$1 185.0 \pm 30.0$	[12]
		1 296	$1 215 \pm 12$	[19]
		1 158~1 136	$1 100 \pm 16$	[14]
1 000		$1 117 \pm 62$	[17]	
788		$1 127 \pm 42$	[18]	
770		$1 183 \pm 12$	[19]	
770~760		$1 110 \pm 14$	[14]	
723		$1 186 \pm 42$	本工作	
550		$1 124 \pm 7$	[13]	
568~536		$1 142 \pm 16$	[14]	
503		$1 176 \pm 12$	[19]	
488		$1 124 \pm 6$	[13]	
467		$1 136.4 \pm 12.8$	[10]	
453		$1 114 \pm 6$	[13]	
412		$1 103 \pm 7$	[13]	
364~340		$1 125 \pm 16$	[14]	
309		$1 119 \pm 8$	[13]	
278~262		$1 131 \pm 34$	[14]	
255		$1 119 \pm 6$	[13]	
225		$1 117 \pm 7$	[13]	
208		$1 138 \pm 17$	[13]	
175		$1 164 \pm 12$	[13]	
144		$1 195 \pm 12$	[13]	
90		$1 292 \pm 35$	[13]	
Al		14 500	$1 620.0 \pm 25.0$	[12]
		3 000	$1 533 \pm 133$	[18]
	1 000	$1 397 \pm 138$	[18]	
	453	$1 637.7 \pm 23.0$	[10]	
Cu	14 500	$2 457.0 \pm 59.0$	[12]	
	442	$2 200.8 \pm 29.2$	[10]	
Ag	14 500	$3 121.0 \pm 52.0$	[12]	
	436	$2 871.8 \pm 47.8$	[10]	
Pb	14 500	$4 992.0 \pm 99.0$	[12]	
	430	$3 751.3 \pm 63.3$	[10]	
CH_2	5 000	757 ± 168	[17]	
	1 000	694 ± 70	[17]	
	1 000	$1 065 \pm 140$	[11]	
	788	761 ± 24	[18]	
CR39	14 500	839 ± 26	[16]	
	1 000	$1 113 \pm 176$	[17]	
$\text{CH}_2 + \text{CR39}$	5 000	734 ± 128	[9]	
	600	766 ± 17	[15]	
$\text{C}_{18}\text{H}_{38}\text{O}$	14 500	657.0 ± 13.0	[12]	

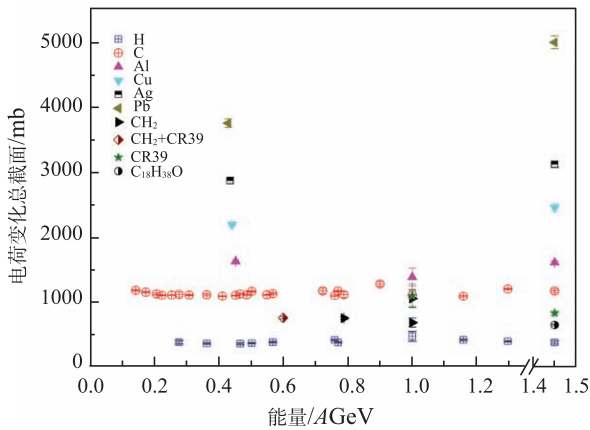


图 4 (在线彩图) ^{28}Si 与不同靶反应的电荷变化总截面与束流能量之间的关系

3.2 电荷变化分截面

电荷变化分截面为不同电荷数的弹核碎片产生截面, 即 Z_F 分别为 13, 12, 11, ... 的产生截面。对于电荷变化分截面我们可以由公式^[17]:

$$\sigma_z = \frac{A_T}{\rho_T t N_{Av}} \left(\frac{N_{out}^f}{N_{out}^p} - \frac{N_{in}^f}{N_{in}^p} \right)$$

求得, 式中 N_{in}^f 和 N_{out}^f 分别为电荷数为 Z 的碎片在靶前和靶后的个数, ρ_T 是靶的密度, t 是靶的厚度, N_{Av} 是阿伏伽德罗常数。 N_{in}^p 和 N_{out}^p 分别是靶前入射的弹核数和靶后没有反应的弹核数。如果实验中只选择靶前的弹核离子径迹来分析并利用径迹重建去除非入射 ^{28}Si 产生的碎片, 则 $N_{in}^f = 0$ 。上式则可以简化为

$$\sigma_Z = \frac{A_T}{\rho_T t N_{Av}} \frac{N_{out}^f}{N_{out}^p}$$

表 2 给出了弹核 ^{28}Si 作用在不同靶上产生的碎片电荷范围为 $6 \leq Z \leq 13$ 的弹核碎片电荷变化分截面。从表 2 可以看出, $6 \leq Z \leq 12$ 的弹核碎片电荷变化分截面表现出明显的奇偶效应, 即电荷数为偶数碎片的截面通常高于相邻的电荷数为奇数碎片的截面; 对于给定的束流能量和碎片种类(由于 Ag 靶的数据量少, 在不考虑 Ag 靶的情况下), ^{28}Si 作用在 H, C, Al, Cu, Sn, Pb 靶产生的反应分截面随靶的质量数的增加呈现递增的趋势。值得注意的是, 除 CH_2 靶外的其它所有靶中, 电荷数 $Z = 9$ 的碎片产生的截面的值均低于其它碎片产生的截面。对于所有的靶, F 产生的截面明显低于相邻的 Ne 和 O 产生的截面。而随着束流能量的增加, 电磁离解会导致一部分的单个电荷的分离, 这或许可以解释 Al ($Z = 13$) 产生的截面要大于 Mg ($Z = 12$) 产生的截面的现象。

图 5 给出能量为 14.5 AGeV 的 ^{28}Si 作用在不同靶上产生的弹核碎片的电荷变化分截面与靶的质量数之间的关系, 图中数据来自文献 [12]。从图 5 可以看出, 对于同一种弹核碎片, 随着靶的质量数的增加, 电荷变化分截面总体呈现上升趋势。这是由于对于 $6 \leq Z \leq 13$ 的弹核碎片, 基本来自弹核与靶核的边缘碰撞, 随着靶核质量数的增加, 参与反应核子数增加, 旁观体受激程度增加。但对于电荷数 $Z = 12, 13$ 的弹核碎片, 随着靶质量数的增加, 其增长的趋势明显高于 $6 \leq Z \leq 11$ 的弹核碎片, 这可能是由于电磁离解作用的影响。

表 2 弹核 ^{28}Si 与不同靶反应电荷变化分截面

核	能量/AMeV	σ_z/mb								参考文献
		($Z_F = 13$)	($Z_F = 12$)	($Z_F = 11$)	($Z_F = 10$)	($Z_F = 9$)	($Z_F = 8$)	($Z_F = 7$)	($Z_F = 6$)	
H	263	86±7	104±8	53±5	48±5	16±2	36±7	22±5	18±6	[14]
	350	79±4	96±5	47±3	44±3	18±1	32±5	15±4	18±5	[14]
	467	65.0±6.4	78.6±6.9	40.9±4.8	35.1±4.8	12.2±3.1	24.7±4.4	15.7±3.6	33.2±4.7	[10]
	503	87±4	84±4	37±2	36±2	16±2	36±2	16±2	23±2	[14]
	560	73±3	86±3	45±2	48±2	21±1	38±4	25±3	27±5	[14]
	765	75±3	83±3	46±2	47±2	22±1	42±5	27±4	34±5	[14]
	770	83±4	76±4	37±2	36±2	16±2	35±2	18±2	25±2	[14]
	1 147	66±4	71±4	41±2	41±2	21±2	43±6	31±5	34±7	[14]
	1 296	78±4	75±4	38±2	39±2	18±2	36±2	20±2	32±3	[14]
	14 500	62.8±6.3	58.0±6.5	28.5±4.6	30.5±4.7	8.5±3.4	30.0±4.9	23.5±4.2	40.1±7.2	[12]
C	266	140±7	164±8	92±4	94±5	51±3	94±8	73±6	94±8	[14]
	344	122±4	143±4	80±3	86±3	45±2	93±6	71±5	104±7	[14]
	467	125.3±4.7	129.5±4.8	66.7±3.4	77.1±3.5	37.8±2.4	79.4±3.5	61.5±3.1	84.6±3.6	[10]
	503	130±2	141±2	68±2	72±2	31±1	68±2	40±2	73±4	[14]
	560	118±3	134±3	74±2	80±2	42±1	86±5	65±4	98±6	[14]
	723	205±20	131±16	58±11	75±12	33±8	58±11	62±11	81±13	本工作
	765	113±3	124±3	68±2	73±2	41±1	80±5	64±4	91±5	[14]

(续表2)

核	能量/AMeV	σ_z/mb								参考文献
		($Z_F=13$)	($Z_F=12$)	($Z_F=11$)	($Z_F=10$)	($Z_F=9$)	($Z_F=8$)	($Z_F=7$)	($Z_F=6$)	
Al	770	157±2	163±2	64±2	63±2	30±2	65±2	48±1	74±2	[14]
	788	225±19	154±15	92±12	75±11	49±9	92±12	55±9	107±13	[18]
	1 147	103±3	109±4	61±2	64±2	38±2	73±5	59±5	88±7	[14]
	1 296	160±2	160±2	52±2	53±2	25±1	53±2	44±1	71±2	[14]
	14 500	107.0±7.4	116.7±6.9	56.2±4.7	65.1±5.1	42.0±4.1	76.8±5.6	54.2±5.2	65.7±11.4	[12]
	269	165±11	192±12	108±7	111±7	66±5	119±11	102±10	132±12	[14]
	355	154±7	163±7	98±5	97±4	53±3	107±9	89±7	129±10	[14]
	453	162.5±8.0	163.6±8.0	93.6±6.0	97.0±6.0	50.1±4.0	102.4±6.0	78.7±5.0	112.4±6.0	[10]
	560	141±5	154±6	84±3	92±4	50±2	99±6	81±5	121±8	[14]
	765	143±4	150±4	81±2	90±3	48±1	96±6	81±5	117±7	[14]
Cu	1 160	126±6	130±6	80±4	82±4	50±3	84±7	70±6	109±9	[14]
	14 500	142.5±6.2	137.8±6.2	67.6±4.4	73.2±4.5	39.7±3.3	74.6±4.7	55.1±4.1	88.3±6.0	[12]
	273	211±20	223±20	135±13	137±13	70±7	156±18	125±14	174±20	[14]
	344	184±9	197±9	105±5	113±6	63±3	137±11	110±9	153±12	[14]
	442	192.9±9.9	198.2±9.7	100.3±6.7	95.2±6.5	61.1±5.2	120.6±7.3	90.3±6.2	143.7±8.0	[10]
	545	189±6	192±6	106±3	119±4	60±2	126±8	102±6	138±8	[14]
	765	193±5	187±5	101±3	109±3	62±2	126±8	99±6	149±9	[14]
	1 150	185±7	182±7	106±4	107±5	60±3	128±10	99±8	142±12	[14]
	14 500	288.4±14.3	190.2±10.5	79.2±6.9	81.3±6.9	53.9±5.5	104.0±8.1	82.0±7.7	116.1±9.3	[12]
	436	233.9±15.6	241.1±15.4	128.5±11.2	141.5±11.7	61.5±7.8	151.9±11.9	105.6±10.0	177.6±13.1	[10]
Ag	14 500	489.0±20.0	237.0±15.0	116.0±11.0	113.0±10.0	48.0±8.0	133.0±12.0	73.0±11.0	135.0±13.0	[12]
	278	262±27	264±27	157±17	144±16	87±10	188±23	151±19	215±26	[14]
Sn	359	259±21	237±19	130±11	137±11	75±10	152±19	142±18	172±21	[14]
	560	244±10	229±10	119±5	134±6	75±4	146±11	123±9	174±13	[14]
Pb	771	258±11	221±9	118±5	129±6	72±3	153±6	119±5	188±8	[14]
	1 155	281±14	232±12	135±8	129±8	73±5	132±12	110±11	169±17	[14]
Pb	274	301±42	318±43	189±26	184±26	100±15	184±29	187±29	266±40	[14]
	364	326±26	254±24	140±16	165±16	88±10	161±19	136±19	251±31	[14]
Pb	430	362.3±24.0	342.9±21.9	132.1±13.6	163.1±15.4	70.4±9.4	171.1±14.9	123.8±12.4	190.1±15.3	[14]
	540	353±10	276±8	146±5	157±5	84±3	163±5	137±4	220±14	[14]
Pb	770	373±16	268±12	143±7	147±7	89±4	174±12	148±10	241±17	[14]
	1 145	430±18	314±14	169±9	169±9	95±6	158±15	123±13	176±19	[14]
CH ₂	14 500	1039.0±41.0	441.0±28.0	125.0±16.0	126.0±15.0	96.0±13.0	138.0±16.0	108.0±15.0	178.0±18.0	[12]
	600	168±11	151±9	61±5	83±4	67±3	85±4	56±3	60±3	[15]
CH ₂	788	191±12	160±11	66±7	63±7	46±5	49±6	30±5	47±6	[18]
	1 000	293±18	177±12	123±11	122±11	62±8	117±11	83±9	90±10	[17]
C ₁₂ H ₁₈ O ₇	14 500	83.1±3.4	83.2±3.6	48.5±2.8	49.1±2.8	24.8±2.0	51.2±2.9	41.1±2.9	58.5±4.2	[12]
C ₁₈ H ₃₈ O	14 500	77.8±3.6	77.9±3.7	37.9±2.6	42.2±2.6	19.8±1.8	45.8±2.7	33.9±2.3	48.8±2.9	[12]

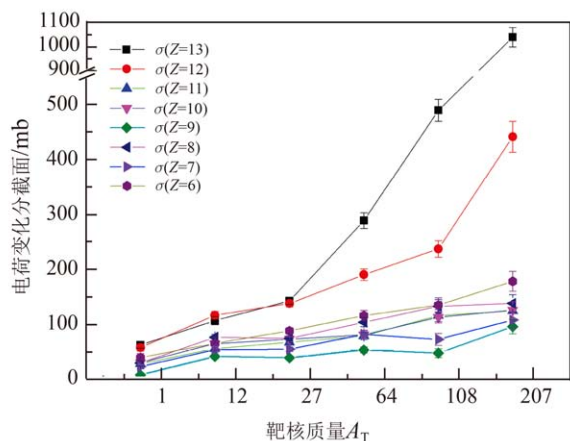


图 5 (在线彩图) 14500 AMeV 的 ^{28}Si 作用在不同靶上产生的电荷变化分截面与靶核质量数之间的关系

4 结论

CR-39 探测器可以记录中高能 ^{28}Si 与靶核反应 $5 \leq Z \leq 13$ 的弹核碎片。束流能量小于 200 AMeV 时, 中高能 ^{28}Si 与 C 靶反应电荷变化总截面随束流能量的增加而缓慢减小; 束流能量大于 200 AMeV 时, 中高能 ^{28}Si 与不同靶核反应电荷变化总截面与束流能量无关。中高能 ^{28}Si 与不同靶核反应碎片产生分截面表现出明显的奇偶效应, 且随靶核质量数的增加而增加。

参考文献:

[1] GAO Xin, YANG Shengsheng, NIU Xiaole, *et al.* Vacuum & Cryogenics, 2007, **13**(1): 41. (in Chinese)
(高欣, 杨生胜, 牛小乐, 等. 真空与低温, 2007, **13**(1): 41.)

- [2] ZEITLIN C, GUETERSLOH S, HEILBRONN L, *et al.* Advances in Space Research, 2010, **46**: 728.
- [3] ZHOU Dazhuang, WANG Shijin, ZHANG Binquan, *et al.* Manned Spaceflight, 2013, **19**(4): 81. (in Chinese)
(周大庄, 王世金, 张斌全, 等. 载人航天, 2013, **19**(4): 81.)
- [4] SIHVER L, LANTZ M, TAKECHI M, *et al.* Advances in Space Research, 2012, **49**: 812.
- [5] WEI Shihua, LIU Qian. Nuclear Physics Review, 2008, **25**(4): 402. doi: [10.11804/NuclPhysRev.25.04.402](https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.25.04.402). (in Chinese)
(魏世华, 刘倩. 原子核物理评论, 2008, **25**(4): 402.)
- [6] WANG Guiling, LIU Yuquan, WEI Zengquan. Nuclear Techniques, 1994, **17**(3): 136. (in Chinese)
(王桂玲, 刘玉岩, 卫增泉. 核技术, 1994, **17**(3): 136.)
- [7] WEYRATHER W K, KRAFT G. Radiotherapy and Oncology, 2004, **73**(Suppl2): S161.
- [8] YE Fei, LI Qiang. Nuclear Physics Review, 2010, **27**(3): 309. doi: [10.11804/NuclPhysRev.27.03.309](https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.27.03.309). (in Chinese)
(叶飞, 李强. 原子核物理评论, 2010, **27**(3): 309.)
- [9] GUPTA R, KUMAR A. Radiation Physics and Chemistry, 2013, **92**: 8.
- [10] FLESCH F, IANCU G, HEINRICH W, *et al.* Rad Meas, 2001, **34**: 237.
- [11] TOGO V, BALESTRA S, CECCHINI S, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2007, **580**: 58.
- [12] BRECHTMANN C, HEINRICH W. Phys Rev C, 1989, **39**(6): 2222.
- [13] YAMAGUCHI T, FUKUDA S, FAN G W, *et al.* Phys Rev C, 2010, **82**: 014609.
- [14] ZEITLIN C, MILLER J, GUETERSLOH S, *et al.* Nucl Phys A, 2007, **784**: 341.
- [15] GUPTA R, KUMAR A. The European Physical Journal A, 2013, **49**: 98.
- [16] CECCHINI S, DEKHISSI H, GIACOMELLI G, *et al.* Astroparticle Physics, 1993, **1**: 369.
- [17] CECCHINI S, CHIARUSI T, GIACOMELLI G, *et al.* Nucl Phys A, 2008, **807**: 206.
- [18] LI JunSheng, ZHANG Donghai, CHENG Jinxia, *et al.* Chinese Journal of Physics, 2016, **54**: 314.
- [19] WEBBER W R, KISH J C, SCHRIER D A. Phys Rev C, 1990, **41**: 533.
- [20] LETAW J R, SILBERBERG R, TSAO C H. Astrophys J, 1983, **51**(Suppl): 271.
- [21] OTA S, KODAIRA S, YASUDA N, *et al.* Rad Meas, 2008, **43**: S195.
- [22] GUPTA R, KUMAR A, GIACOMELLI G, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2012, **694**: 32.
- [23] GUPTA R, KUMAR A, GIACOMELLI G, *et al.* Rad Meas, 2012, **47**: 1023.
- [24] KOX S, GAMP A, PERRIN C, *et al.* Phys Rev C, 1987, **35**: 1678.
- [25] SUMMERER K, BLANK B. Phys Rev C, 2000, **61**: 034607.
- [26] FENG Jun, SHEN Wenqing, WANG Bing, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 1989, **13**(5): 459. (in Chinese)
(冯军, 沈文庆, 王柄, 等. 高能物理与核物理, 1989, **13**(5): 459.)
- [27] TOWNSEND L W, CUCINOTTA F A, HEILBRONN L H, *et al.* Adv Space Res, 2002, **30**(4): 907.
- [28] BRADT H L, PETERS B. Phys Rev, 1950, **77**(1): 54.
- [29] KODAIRA S, YASUDA N, KAWASHIMA H, *et al.* Rad Meas, 2009, **44**: 861.

Development of Fragmentation Cross Sections of ^{28}Si at Intermediate and High Energies

LI Junsheng¹⁾, DANG Yinghua, ZHANG Donghai

(*Institute of Modern Physics, Shanxi Normal University, Linfen 041004, Shanxi, China*)

Abstract: In this paper, the development of the total and partial charge changing cross sections of ^{28}Si ions beam in different targets using the CR-39 detectors are reviewed. The newest experimental results of the total and partial charge changing cross sections of ^{28}Si in carbon target at 723 AMeV are presented. The dependence of the target mass and the cross sections of ^{28}Si including the total and the partial charge changing cross sections are discussed. It is found that the total charge changing cross sections of ^{28}Si are independent of the energy when the energy of the ions beam is greater than 200 AMeV. The partial charge changing cross sections show an obviously odd-even effect, and increase with the increasing of the mass number of the target.

Key words: fragmentation; CR-39; total charge changing cross section; partial charge changing cross section

Received date: 7 Dec. 2016; **Revised date:** 8 May 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11075100, 11565001); Natural Science Foundation of Shanxi Province(2011011001-2); Fund Program for the Scientific Activities of Selected Returned Overseas Professionals in Shanxi Province(2011-058)

1) E-mail: lijs@sxnu.edu.cn.