

46MeV/A¹²C 和 ⁹³Nb 相互作用中 线性动量转移

李文新 孙彤玉 孙儒林 吴定清

靳根明 赵莉莉 李宗伟 秦芝

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

摘 要

使用离线 γ 能谱法测定了46MeV/A¹²C离子和⁹³Nb相互作用中厚靶反冲射程,得到了最大线性动量转移和平均线性动量转移,和已有工作比较后指出,相应于中心碰撞的最大线性动量转移在轻靶和中重靶范围内与靶质量无关,但明显低于与²³⁸U碰撞的线性动量转移.平均线性动量转移显示了与弹核和靶核不对称性的强烈依赖关系.

一、引 言

重离子反应中线性动量转移是描述入射弹核与靶核相互作用一般特征的量度.在低能反应中,全熔合为主要反应道,其特征是入射弹核的全部动量转移给复合系统.随着入射能量增加,弹核发生破裂,只有一部份弹核与靶核熔合,即所谓非完全熔合反应,此时,转移的动量近似为与靶核熔合的那部份弹核所携带的动量.当入射能增加到高能区时,靶核被打碎,作为旁观者的靶余核只从入射弹核接受到很少一点动量.因此,测定入射弹核向靶核转移的线性动量可以了解弹核与靶核的相互作用,成为目前中能重离子反应中普遍关注的一个研究课题.

迄今,大部份线性动量转移的资料都来自易裂变靶核的裂变碎片角关联测量^[1-5].较轻的重离子轰击²³⁸U时,裂变碎片折迭角分布可分为二个主要组份,分别相应于伴随很大动量转移的中心碰撞(全熔合和非完全熔合)和仅有很少动量转移的周边碰撞(非弹性散射和直接作用)^[3,4].入射能量从大约8—10MeV/A起,不完全动量转移过程开始发生.中心碰撞线性动量转移(或通常称作最可几线性动量转移 P_{\parallel}^{*P})的百分数随入射弹核的 $\sqrt{E/A}$ 进一步增加而线性下降^[3].当入射能超过40MeV/A后,周边相互作用占了裂变截面的主要部份.裂变碎片折迭角分布显示不出明显结构,提取中心碰撞线性动量转移变得很困难^[4],因此,提出了线性动量转移的平均值 $\langle P_{\parallel} \rangle$ ^[4,5].这个量是从中心到周边各种碰撞转移的线性动量平均结果.

与易裂变的重靶核相比,轻靶和中质量靶的线性动量转移的实验资料少得多.飞行时间法目前仅限于测量类熔合反应的蒸发余核^[6-9],蒸发粒子的不变截面法尚未广泛使用^[9],但是,基于测量余核反冲射程的放射化学方法得到广泛应用^[10-17].本工作中我们用放化法研究了 46MeV/ $A^{12}\text{C}$ 离子和 ^{93}Nb 相互作用中线性动量转移.通过和已有数据比较,试图更好了解中能重离子反应中线性动量转移的一般规律.

二、实 验

实验在中国科学院近代物理研究所的中能重离子加速装置 HIRFL 上进行.靶组由 41.6mg/cm² 金属 ^{93}Nb 以及覆盖在它前后作为收集箔的 10.5mg/cm² Mylar 膜组成.加速器引出的 47MeV/ $A^{12}\text{C}$ 离子经过 Mylar 膜后在 ^{93}Nb 靶中心的能量为 549MeV(或约 46MeV/ A)^[18].照射持续 39 小时.束流强度为 5—10enA,并用法拉第筒周期性地记录.总的积分束流达 746 μC 或 7.8×10^{14} 个 ^{12}C 离子.

照射结束后,将前后向反冲收集箔和 ^{93}Nb 靶分别在已知效率的 HPGe γ 能谱仪上测量.测量在照射后 33 分钟开始,并持续 2 个月.获取的 γ 谱用 SAMPO 程序分析^[19],衰变曲线用 TAU88 程序分解^[20].根据 γ 射线能量,半寿命和 γ 相对强度指定放射性核素^[21].计算截面使用的核数据取自文献[22].实验细节已在我们以前的工作中作了描述^[17].

三、结 果

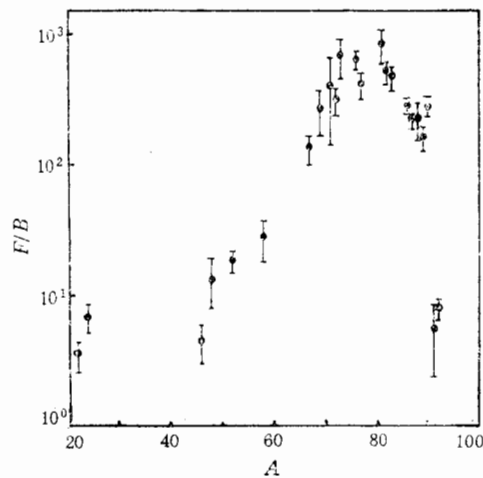
本工作中鉴定了从 ^{23}Na 到 ^{93m}Mo 共 43 个反应余核.根据前后向收集箔以及留在靶中的活性得到了与线性动量转移有关的 F/B 和 FW 值(见表 1).其中 F 和 B 分别为前后向收集箔中某一核素活性占该核素总活性的相对份数. F/B 为前后向发射比,表示反冲核前角成峰程度,因此是角分布和反冲射程的综合量度. W 为靶厚, FW 近似为反应余核在 ^{93}Nb 靶中前向平均射程.列出的误差为标准偏差.计算 ^{24}Na 的 F/B 值时,已对 Mylar 膜中直接生成的 ^{24}Na 及其反冲影响作了修正^[17].

F/B 值随产物质量数 A 的变化见图 1.与靶核相近的重产物有较低的 F/B 值,因为它们主要来自转移反应.随着 A 的减小, F/B 值迅速上升,并在 $A = 70-85$ 之间形成一个极大.典型的 F/B 值达数百之高,表明弹核与靶核初始碰撞中伴随相当大的动量转移.近中心碰撞伴随更高的激发能,导致大量粒子发射,使更轻的反应余核的 F/B 值进一步下降.反应余核的前向平均射程 FW 值随它们质量数增加而减小,只有最轻的产物 ^{22}Na 和 ^{24}Na 有显著大的平均射程.

使用能量-射程表^[23]将前向反冲射程转换成平行于束流方向的反冲速度 $v_{||}$ ^[17].计算得到的 $v_{||}$ 值以相对于 v_{CN} 的百分数 $v_{||}/v_{\text{CN}}$ 表示,并列在表 1 中,其中 v_{CN} 为完全动量转移的复合体系所具有的速度,对于 549MeV 的入射 ^{12}C 离子, $v_{\text{CN}} = 1.09(\text{MeV}/u)^{1/2}$.如果假定反冲核的质量等于粒子发射前复合体系质量,那么 $v_{||}/v_{\text{CN}}$ 就代表了从入射弹核转移的线性动量百分数 $P_{||}/P_{\text{beam}}$. $P_{||}/P_{\text{beam}}$ 对反应产物的质量损失 ΔA 关系指出在图 2 中,其中质量损失 $\Delta A (= A_{\text{T}} - A_{\text{R}})$ 为靶核质量与反应余核质量 A_{R} 之差.为了进行比

表1 $46\text{MeV}/A^{12}\text{C} + {}^{93}\text{Nb}$ 反应中靶余核的反冲性质

核素	FW (mg/cm^2)	F/B	ν_d/ν_{GN} (%)	核素	FW (mg/cm^2)	F/B	ν_d/ν_{GN} (%)
${}^{22}\text{Na}$	8.2 ± 3.4	3.5 ± 0.8		${}^{77}\text{Br}$	1.18 ± 0.08	417 ± 98	34 ± 2
${}^{24}\text{Na}$	7.5 ± 1.2	6.9 ± 1.7		${}^{81}\text{Rb}$	2.38 ± 0.30	853 ± 232	55 ± 7
${}^{46}\text{Sc}$	2.03 ± 0.34	4.4 ± 1.5	55 ± 9	${}^{82m}\text{Rb}$	1.90 ± 0.17	524 ± 88	46 ± 4
${}^{48}\text{V}$	2.12 ± 0.29	13.3 ± 5.2	58 ± 8	${}^{82}\text{Sr}$	1.70 ± 0.29		43 ± 7
${}^{52}\text{Mn}$	1.98 ± 0.30	18.9 ± 3.0	54 ± 8	${}^{89}\text{Rb}$	1.40 ± 0.13	478 ± 92	37 ± 3
${}^{56}\text{Co}$	1.70 ± 0.21		47 ± 6	${}^{89}\text{Sr}$	1.51 ± 0.10		36 ± 2
${}^{57}\text{Co}$	1.92 ± 0.21		51 ± 6	${}^{84}\text{Y}$	1.85 ± 0.41		46 ± 10
${}^{58}\text{Co}$	1.72 ± 0.26	28 ± 10	47 ± 7	${}^{85}\text{Y}$	1.51 ± 0.40		40 ± 11
${}^{62}\text{Zn}$	2.74 ± 1.7		62 ± 25	${}^{86}\text{Y}$	1.12 ± 0.13	290 ± 34	32 ± 4
${}^{65}\text{Zn}$	1.75 ± 0.31		46 ± 8	${}^{86}\text{Zr}$	1.57 ± 0.27		41 ± 7
${}^{66}\text{Ga}$	2.45 ± 0.46		60 ± 11	${}^{87}\text{Y}$	1.49 ± 0.19	229 ± 79	39 ± 5
${}^{67}\text{Ga}$	1.99 ± 0.23	138 ± 33	50 ± 6	${}^{87m}\text{Y}$		223 ± 47	
${}^{69}\text{Ge}$	2.10 ± 0.22	274 ± 104	53 ± 6	${}^{88}\text{Y}$	0.51 ± 0.11		21 ± 4
${}^{71}\text{As}$	2.02 ± 0.20	408 ± 263	51 ± 5	${}^{88}\text{Zr}$	0.78 ± 0.11	237 ± 79	26 ± 4
${}^{72}\text{As}$	2.37 ± 0.63	318 ± 74	57 ± 2	${}^{89}\text{Zr}$	0.61 ± 0.08	166 ± 30	23 ± 3
${}^{72}\text{Se}$	1.56 ± 0.24		42 ± 7	${}^{90}\text{Nb}$	0.54 ± 0.05	292 ± 40	21 ± 2
${}^{73}\text{Se}$	2.41 ± 0.37	690 ± 246	58 ± 9	${}^{90}\text{Mo}$	0.97 ± 0.10		30 ± 3
${}^{74}\text{As}$	1.77 ± 0.22		45 ± 6	${}^{91}\text{Sr}$	0.94 ± 0.29		28 ± 9
${}^{75}\text{Se}$	1.85 ± 0.14		47 ± 4	${}^{91m}\text{Nb}$		5.4 ± 2.9	
${}^{76}\text{As}$	2.41 ± 0.26		55 ± 6	${}^{92m}\text{Nb}$		7.7 ± 1.5	
${}^{76}\text{Br}$	1.96 ± 0.15	650 ± 111	48 ± 4	${}^{93m}\text{Mo}$	0.44 ± 0.08		19 ± 4

图1 前后向发射比 F/B 值与产物质质量数关系

较,图2中还给出了 $44\text{MeV}/A^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应的类似结果.

从图2(a)可以看到,相对线性动量转移随着 ΔA 从近靶产物的大约 0.20 处逐渐增加.当 ΔA 接近 20 时,线性动量转移达到最大值,并不再随 ΔA 的增加而变化,出现了一个线性动量转移达到饱和的坪区.类似的现象在其他中能重离子反应中也能看到^[15,16].坪区的线性动量转移称作在一定轰击能量下,最大的线性动量转移.有理由认为导致最

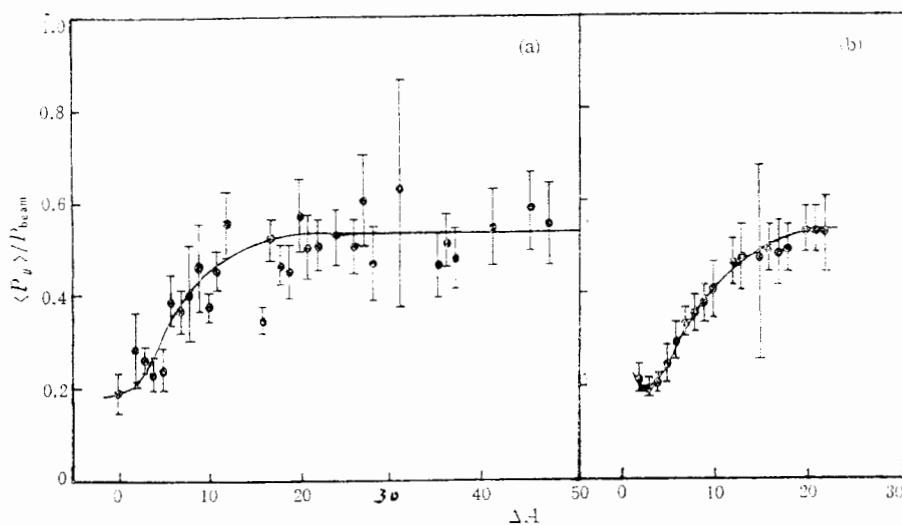


图 2 相对线性动量转移 $P_{\parallel}/P_{\text{beam}}$ 随质量损失 ΔA 的变化
 (a) $46 \text{ MeV/A}^{12}\text{C} + {}^{93}\text{Nb}$, (本文). (b) $44 \text{ MeV/A}^{12}\text{C} + \text{Cu}$, (文献[17])

大线性动量转移的碰撞是中心碰撞^[16,17]. 本工作在 $46 \text{ MeV/A}^{12}\text{C} + {}^{93}\text{Nb}$ 反应中最大线性动量转移的权重平均值为 0.53 ± 0.05 . 需要指出的是这里的最大线性动量转移不同于一个特定的核反应可以转移的最大线性动量. 将图 2 的 $P_{\parallel}/P_{\text{beam}} - \Delta A$ 关系经质量产额曲线权重得到线性动量转移的平均值 $\langle P_{\parallel} \rangle / P_{\text{beam}}$.

四、讨 论

1. 最大的线性动量转移

已经知道,当入射能量超过一定阈值后,线性动量转移随入射弹核速度增加而线性下降,并且几乎与碰撞系统的组合无关. 因此,使用一条“万用”的曲线可以比较成功地描述二者的关系^[4,11,24,25]. 理论上使用玻耳兹曼主方程方法^[26]或费米动量球重迭模型^[8]也能较好地再现实验数据. 但是,当实验数据从易裂变的重靶核向轻靶核拓广时,发现线性动量转移下降的速率存在明显的区别. 例如,按线性动量转移经验公式^[24]

$$P_{\parallel}/P_{\text{beam}} = -0.092 \times \sqrt{E/A} + 1.273 \quad (1)$$

计算本工作 $549 \text{ MeV}^{12}\text{C} + {}^{93}\text{Nb}$ 的线性动量转移应为 0.65,明显高于实验测定的 0.53. 分歧主要原因在于线性动量转移除了主要由相对运动速度控制外,还与弹靶质量以及它们的组合有关.

图 3 给出了若干重离子反应中相对线性动量转移 $P_{\parallel}/P_{\text{beam}}$ 与相对运动速度参数 $\sqrt{(E - V_c)/A_p}$ 的关系,其中 V_c 为相互作用库仑位垒($r_0 = 1.5 \text{ fm}$). 这些数据分别来自 ^{12}C , ^{20}Ne 和非裂变靶核反应中用放射化学方法测定的最大线性动量转移; ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O 和 ^{238}U 反应中用角关联方法测定的最可几线性动量转移以及 ^{14}N , ^{16}O , ^{20}Ne 和 ^{27}Al 到 ^{64}Ni 反应中飞行时间法测定的类融合产物的线性动量转移. 选择这些数据的准则是所有这些线

性动量转移都和重离子反应中中心碰撞有着最紧密的联系^[4,17]。正如图3所显示的,这些实验数据明显地落在彼此分离的3条线上,表明线性动量转移的复杂性。

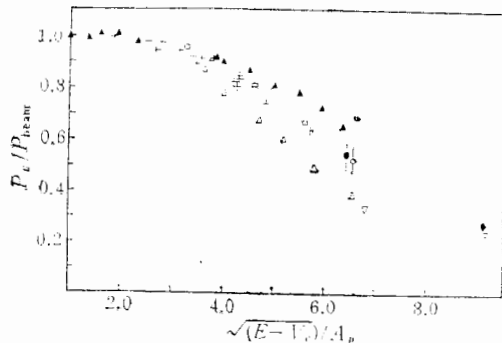


图3 相应于中心碰撞的线性动量转移 $P_{||}/P_{\text{beam}}$ 与 $\sqrt{(E-V_c)/A_p}$ 关系

▲—— $^{12}\text{C}, ^{14}\text{N}, ^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$, 文献[1-4]. +—— $^{14}\text{N}, ^{16}\text{O}, ^{20}\text{Ne} + \text{Al}, \text{Ca}, \text{Ti}, \text{Ni}$, 文献[6-8].
□—— $^{12}\text{C} + \text{Cu}$, 文献[10,14]. ◆—— $^{12}\text{C} + ^{89}\text{Y}$, 文献[27]. ●—— $^{12}\text{C} + \text{Cu}$, 文献[17]. ○—— $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$, 本文. △—— $^{20}\text{Ne} + \text{Cu}$, 文献[28].
▽—— $^{20}\text{Ne} + ^{124}\text{Sn}$ 文献[29]

但是当靶子为 ^{238}U 时, $P_{||}/P_{\text{beam}}$ 明显增加, 例如在 $45\text{MeV}/A$ 能量下, $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$ 反应的相对线性动量转移比我们在 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 中测定的高约 20%. 这和核子-核子碰撞的引导粒子 (Leading Particle) 模型计算结果相符^[30], 但是 BUU 方法看来高估了这个差别^[31].

对于非裂变靶核, 当入射弹核从 ^{12}C 变为 ^{20}Ne 时, 正如从图3可看到的, 线性动量转移下降约 30%. 由此可见线性动量转移与弹核质量的依赖关系比与靶核的依赖关系更为强烈. 在反冲的飞行时间测量中也观察到线性动量转移与弹核的依赖关系, 并能用动量球重迭模型解释^[8]. 但是, 对易裂变靶核, 例如 $^6\text{Li}, ^{12}\text{C}, ^{14}\text{N}$ 和 ^{238}U 碰撞中, 线性动量转移却与弹核质量无关^[4].

2. 线性动量转移的平均值

反映从中心到周边各种碰撞平均结果的线性动量转移的平均值描述了弹靶之间相互作用的整体特征. 本工作在 $46\text{MeV}/A$ $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中得到最大线性动量转移为 0.53, 与我们在 $44\text{MeV}/A$ $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ 反应中测定的 0.54 几乎一致^[17]. 但是这两个反应的线性动量转移的平均值分别为 0.41 和 0.38. 差别被明显地扩大了. 其原因也是清楚的. $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应的质量分布较宽, 对于从靶子

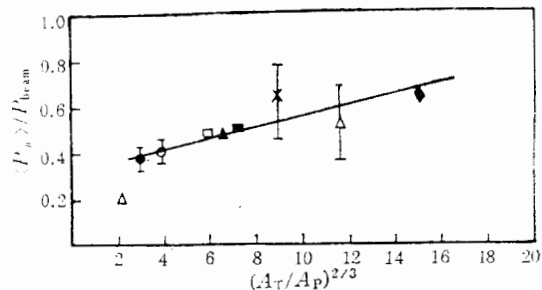


图4 线性动量转移平均值 $\langle P_{||} \rangle / P_{\text{beam}}$ 与弹靶不对称性 $(A_T/A_P)^{2/3}$ 关系

$E_i = 45\text{MeV}/A$. △—— $^{20}\text{Ne} + \text{Cu}$, 文献[28]. ●—— $^{12}\text{C} + \text{Cu}$, 文献[17]. ○—— $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$, 本文.
□—— $\alpha + ^{59}\text{Co}$ 文献[15]. ▲—— $^{14}\text{N} + ^{238}\text{U}$ 文献[4]. ■—— $^3\text{He} + ^{59}\text{Co}$, 文献[15]. ✕—— $\alpha + \text{Ag}$, 文献[12]. ▽—— $^6\text{Li} + ^{238}\text{U}$, 文献[4]. ◆—— $\alpha + ^{238}\text{U}$, 参阅文献[5]

移走 ≥ 20 个核子的余核仍有足够大的生成截面. 这些余核的反冲速度已达最大值, 也就是说有相当多的余核进入了图2(a)所示的坪区. 而在 Cu 的情况下, 正如从图2(b)

可看到的,只有极少数几个余核进入坪区. 考虑到导致产生坪区余核的碰撞是中心碰撞,这就意味着同样的入射离子和较重靶核作用时发生中心碰撞的几率要比和较轻靶核作用更高. 结果使线性动量转移的平均值增高. 这个结论进一步支持 Batsch 等人的观察结果^[2].

对于同一靶核, Fatyga 等人指出 ⁶Li + ²³⁸U 反应中中心碰撞的最可几线性动量转移 $P_{T,P}^m$ 与 ¹²C, ¹⁴N + ²³⁸U 反应结果很好相符,但是,线性动量转移平均值比后者高出约 10%^[4]. 换句话说,较轻的重离子和同样的靶核作用时,发生中心碰撞的几率比较重的重离子更高. 根据上述两方面的实验结果,我们认为重离子反应中,平均的线性动量转移与弹核和靶核的相对大小,或质量的不对称性存在一定的依赖关系.

图 4 指出在 45MeV/A 的入射能量下 ³He-²⁰Ne 入射离子和 ⁵⁹Co-²³⁸U 靶核相互作用中线性动量转移平均值与弹核和靶核几何截面比 $(A_T/A_P)^{2/3}$ 的关系. 这里 A_T 和 A_P 分别为靶核和弹核的质量数. 其中 ⁶Li + ²³⁸U 的数据为文献[4]的粗略估算, α + ¹⁰⁸Ag 的数据为文献[12]结果的外推值,对此我们均人为地给出 30% 的误差. α + ⁵⁹Co, ³He + ⁵⁹Co 和 α + ²³⁸U 均为内插值^[5,15]. 从图 4 可以看到,除 ²⁰Ne + Cu 外,实验结果都很好地落在同一条直线上. 这个事实进一步支持了上面提到的论述,并且表明线性动量转移平均值随弹核和靶核几何截面的不对称性增加而明显增加. 据我们所知,迄今对中能重离子反应尚无理论可预言,其线性动量转移的平均值与弹核和靶核的不对称性的依赖关系. 因此,积累更多的实验资料,能更好了解中能重离子反应中线性动量转移的规律.

衷心感谢重离子加速装置 HIRFL 的全体人员为我们完成本实验所作的巨大努力. 张立、李云生参加了 γ 能谱测量,谨在此表示谢意.

参 考 文 献

- [1] T. Sikkeland et al., *Phys. Rev.*, **125** (1962), 1350.
- [2] B. B. Back et al., *Phys. Rev.*, **C22** (1980), 1927.
- [3] V. E. Viola, Jr. et al., *Phys. Rev.*, **C26** (1982), 178.
- [4] M. Fatyga et al., *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985), 1376.
- [5] F. Saint Laurent et al., *Phys. Lett.*, **110B** (1982), 372.
- [6] Y. Chan et al., *Phys. Rev.*, **C27**(1983), 447.
- [7] H. Morgenstern et al., *Z. Phys.*, **A313** (1983), 39.
- [8] G. S. F. Stephans et al., *Phys. Lett.*, **161B** (1985), 60.
- [9] J. Galin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **48**(1982), 1787.
- [10] T. Lund et al., *Z. Phys.*, **A306** (1982), 43.
- [11] J. Jastrzebski et al., *Phys. Lett.*, **136B** (1984), 153.
- [12] T. Batsch et al., *Phys. Lett.*, **189B** (1987), 287.
- [13] S. Y. Cho et al., *Phys. Rev.*, **C36** (1987), 2349.
- [14] S. Y. Cho et al., *Phys. Rev.*, **C39** (1989), 2227.
- [15] J. Jastrzebski et al., *Phys. Rev.*, **C34** (1986), 60.
- [16] J. Jastrzebski et al., Proc. Third Inter. Conf. on *Nucl.-Nucl. Colli.*, Saint-Molo. France, (1988), 64.
- [17] 李文新等,“44MeV/A¹²C 离子与铜相互作用中靶余核的研究”,高能物理与核物理(待发表).
- [18] 陈家超,陈克勤,马峰,“快离子辐照损伤能量深度分布理论计算”,高能物理与核物理(待发表).
- [19] T. Routti and S. G. Prussin, *Nucl. Instrum. Meth.*, **72**(1969), 125.
- [20] 李文新,近代物理研究所 1985 年年报, (1986), 133 页.
- [21] 李文新,孙彤玉,“核化学研究中 γ 能谱的测量和分析”,原子能科学技术, **Vol.24, No. 2**(1990), 60.
- [22] U. Reus and W. Westmeier, *At. Data Nucl. Data Tables*, **29**(1983).

- [23] L. C. Northcliffe and R. F. Schilling, *Nucl. Data Tables*, **A7**(1970), 233.
[24] E. Tomasi et al., Proc. Second Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Colli., Vol.1, p.50.
[25] S. Leray, *J. Phys.*, **C4**(1986), 275.
[26] M. Blann, *Phys. Rev.*, **C31** (1985), 1245.
[27] A. Lleres et al., *Z. Phys.*, **A312** (1983), 177.
[28] L. Pienkowski et al., Proc. Third Int. Conf. on Nuclear-Nucleus Colli., Saint-Molo. France, (1988), 63.
[29] J. Blachot et al., *Z. Phys.*, **A321** (1985), 645.
[30] J. B. Natowitz et al., *Z. Phys.*, **A325** (1986), 467.
[31] J. Aichelin, *Phys. Rev.*, **C33**(1986), 537.

LINEAR MOMENTUM TRANSFER IN THE INTERACTION OF ^{93}Nb WITH $46\text{MeV}/A$ ^{12}C IONS

LI WENXIN SUN TONGYU SUN RULIN WU DINGQING JING GENMING
ZHAO LILI LI ZHONGWEI QIN ZHI

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou*)

ABSTRACT

Thick-target recoil ranges of the residues from the interaction of ^{93}Nb with $46\text{ MeV}/A$ ^{12}C ions have been measured by off-line γ -ray spectroscopy. From these data the maximum linear momentum transfer and the mean linear momentum transfer were obtained. A comparison with other results indicates that the maximum linear momentum transfer, corresponding to central collisions is independent of the target mass numbers for light and intermediaumass targets. However the mean linear momentum transfer shows a strong dependence of the projectile-target asymmetry.