

46.7 MeV/u ^{12}C 引起的核反应中 碎裂与转移的竞争¹⁾

刘冠华 詹文龙 诸永泰 郭忠言 胡晓庆 郝鸿飞
周建群 尹淑芝 冯恩普 赵有雄 魏志勇 范恩杰

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要

本文讨论了 46.7 MeV/u ^{12}C 引起的核反应中弹核碎裂与转移反应的共存及相互竞争, 实验中提取的转移部分的约化平行动量分布宽度为 44 ± 10 MeV/c, 这比弹核碎裂部分的 $\sigma_0 = 80 \pm 10$ MeV/c 要窄。弹核碎裂及转移反应发生的几率都与被转移结团的结构有关。

一、引 言

中能区的重离子核反应既具有低能时的平均场效应, 又具有高能时的核子-核子碰撞特征, 因而反应机制变得复杂。就重离子碰撞的核-核相互作用时间而言, 中能时作用时间与原子核的内禀自由度的弛豫时间可比拟或更短, 因而非平衡现象将越来越重要。中能区是由一体耗散向两体耗散过渡的能区, 随着入射能量的不断增高, 平均场效应逐渐消失, 而核子-核子碰撞则占据越来越重要的地位。

中能区实验发现产物的能谱中存在着转移反应的贡献^[1]。在中能重离子核反应中观察到了比弹核稍重的碎片, 并且在比弹核稍轻一些的类型碎片 (PLF) 能谱中可以明显地看到三个组分: 准弹或转移的高能成分, 耗散的低能成分以及介于两者之间的中能碎裂峰。这说明弹核碎裂与转移过程对类型碎片的形成都有贡献。

很多中能区的实验证实了碎裂与转移的共存^[2,3]。与碎裂过程相比, 转移几率随入射能量的上升而迅速下降。低能重离子核反应中, 相空间的限制使得准弹转移反应主要是转移到弹核或靶核的束缚态; 随着入射能的增加, 弹核和靶核的动量分布重迭减少, 这预示着转移反应可能转移到弹核及靶核的非束缚态。转移反应对 PLF 的贡献在符合实验中可以精确地确定^[4]。实验表明, 转移反应主要贡献于接近弹核质量的碎片。少数核子转移至连续态的准弹能谱可用 DWBA 与能级密度结合起来予以解释^[5]。

为了研究中能区重离子引起的弹核碎裂及转移反应, 我们在 HIRFL 加速器上进行

本文 1991 年 11 月 15 日收到。

1) 国家自然科学基金资助项目。

了实验。实验中使用 46.7 MeV/u 的 ^{12}C 束流轰击不同的靶核, 用一组由 CsI(Tl) 晶体与半导体探测器组成的望远镜在前方向 5° — 20° 范围内对各种出射产物进行了测量^[6]。

二、类弹碎片能谱中碎裂与转移贡献的区分

实验室系中弹核碎裂的碎片能谱可以在假定弹核参考系中动量分布为高斯分布的基础上获得。当碎片质量远离弹核时, 能谱的高能部分主要是碎裂的贡献, 转移的贡献可以忽略。拟合实验能谱, 可以对各种反应系统的 ^6Li 、 ^7Li 、 ^7Be 、 ^9Be 等碎片提取出碎裂部分的最可几能量 \bar{E} ^[6]。对于更重的类弹碎片如 ^{10}B 、 ^{11}B 、 ^{10}C 、 ^{11}C , 由于转移对其形成有贡献, 能谱的高能部分是弹核碎裂和转移贡献的迭加, 所以实验测得的峰位比按碎裂预计的要高。因此我们按照下面的步骤来获得碎裂部分的贡献^[7]:

(1) 由 ^6Li 、 ^7Li 、 ^7Be 、 ^9Be 提取的约化平行动量分布宽度 $\sigma_0 = 80 \text{ MeV}/c$, 与 PLF 的质量无关, 对于较重的类弹碎片, 在拟合其碎裂能谱时仍选取相同的 σ_0 值。

(2) 对于较重碎片的碎裂部分最可几能量值 \bar{E} , 由较轻碎片拟合出的最可几能量值外推来获得, 这样对不同反应系统的较重碎片都可得到最可几能量 \bar{E} 。

(3) 拟合实验中测得的碎片能谱中高能端的低能部分。

通过上述步骤就可将 ^{10}B 、 ^{11}B 、 ^{10}C 、 ^{11}C 各类弹碎片能谱中的高能部分分解为碎裂和转移两部分。如图 1 所示, 将碎裂贡献扣除后, 余下的高能部分和低能部分可认为分别来自于转移和耗散, 这样我们就可以粗略地将不同反应机制的贡献分开, 从而可以进一步研究它们随反应系统的变化。这里未作发射粒子及蒸发修正, 所以讨论只是定性的。

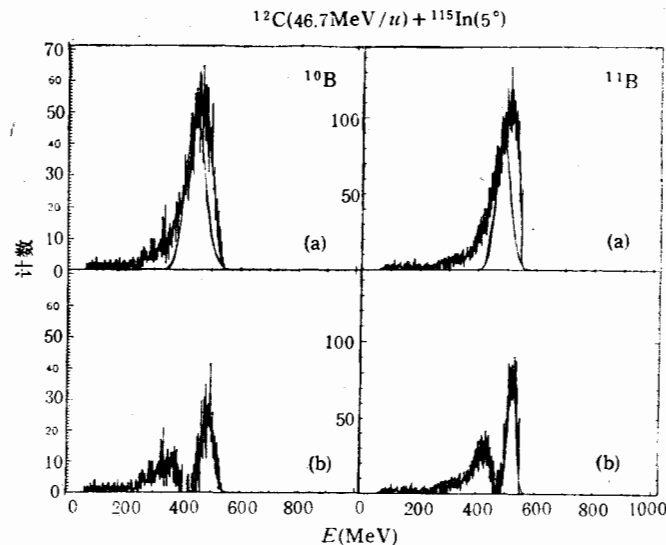


图 1 类弹碎片中碎裂和转移部分的分解

三、碎裂与转移部分的平行动量分布宽度

Goldhaber 利用独立粒子统计模型给出碎片的动量分布宽度 σ 与碎片质量 A_F 的关系^[8]:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \frac{A_F(A_P - A_F)}{A_P - 1} \quad (1)$$

式中 σ_0 为约化动量分布宽度,它与碎片质量无关,是由费米运动所决定的。在 $46.7\text{MeV}/u^{12}\text{C}$ 引起的核反应实验中提取的碎裂部分的约化平行动量分布宽度 σ_0 为 $80 \pm 10\text{MeV}/c$ ^[6],这说明弹核碎裂的动量谱可在 Goldhaber 理论上用动量球模型加以解释^[9]。

表1 转移部分的动量分布宽度

¹² C		$E/A = 46.7\text{MeV}$				转移部分的动量分布宽度			
靶	碎片	$\sigma(\text{MeV}/c)$				$\sigma_0(\text{MeV}/c)$			
		¹⁰ B	¹¹ B	¹⁰ C	¹¹ C	¹⁰ B	¹¹ B	¹⁰ C	¹¹ C
	⁵⁸ Ni	61.1	46.5	60.3	47.9	45.3	46.5	44.7	47.9
	⁶⁴ Ni	67.4	53.4	66.2	51.4	50.0	53.4	49.1	51.4
	¹¹⁵ In	54.6	42.1	46.7	35.9	40.5	42.1	34.6	35.9
	¹⁹⁷ Au	57.5	41.1	49.7	35.4	42.6	41.1	36.9	35.4

当类弹碎片的质量接近于弹核质量时,能谱的高能部分是弹核碎裂和转移贡献的迭加,转移部分的平均能量要比碎裂部分高一些。按上述方法在能谱中将碎裂部分扣除后,将剩余能谱转换为协变速度谱,对速度谱中的高速部分进行高斯拟合,可得到转移部分的平行动量分布宽度,同样可由(1)式计算出转移部分的约化动量分布宽度。对各种反应系统中的各种碎片所得到的结果见表1。对于转移反应所得到的约化平行动量分布宽度为 $44 \pm 10\text{MeV}/c$,这与已有的相近能量下的实验结果相一致^[9]。与碎裂部分相比,转移部分的动量分布宽度更窄。这是因为对于转移反应,由于动量守恒的限制,核子是被转移到一定的末态,因而相空间限制较严格,而对于碎裂反应,弹核的破裂并不受此约束^[10]。

四、弹核碎裂与转移反应的竞争

中能重离子核反应的复杂性在于多种反应机制的共存及相互竞争。仅就类弹碎片能谱的高能部分而言,弹核碎裂和转移反应都有贡献。随着弹核的入射能量由低能向高能过渡,碎裂起着越来越重要的作用,而转移反应的几率则逐渐减少。

在 $46.7\text{MeV}/u^{12}\text{C}$ 引起的重离子核反应中,我们观察到了转移反应的存在。在实验中测到了比 ¹²C 重的 ¹³C 及 ¹²N、¹³N、¹⁴N 等核素,小角度时其能谱主要为高能成分,这些反应道只能归因于转移反应。因此在弹核附近的类弹碎片能谱中,弹核碎裂和转移均有贡献,采用前述方法可将这些类弹碎片的能谱中的碎裂成分与转移成分分开。能谱中扣除碎裂的贡献后,所得到的剩余能谱中的高能部分可认为是转移的贡献。

图 2(a) 和图 2(b) 分别给出了各种反应系统中各碎片的碎裂截面。对于各种碎片, 实验结果都显示出, 当靶核的几何尺寸增加时, 碎裂截面也增加, 这与 Abrasion 图象是一致的。碎裂几率与被擦去的结团结构有关。比较 ⁷Li 和 ⁷Be 两种碎片, 对所有的反应系统, ⁷Li 的碎裂截面都要大一些。⁷Li 对应于被擦去结团中含有三个质子和两个中子 (³Li 结团), 而 ⁷Be 对应于被擦去结团中含有两个质子和三个中子 (³He 结团), 结团结构不同导致碎裂几率存在差别。再比较 ¹⁰C 和 ¹⁰B, ¹⁰B 的碎裂截面比 ¹⁰C 的碎裂截面大得多, ¹⁰B 对应于被擦去一个质子和一个中子, ¹⁰C 则对应于被擦去两个中子, 两个中子不能形成稳定的束缚态, 因而形成 2n 结团的几率也大大降低, 这导致较低的 ¹⁰C 碎裂截面。同时碎裂几率与靶核的结构也表现出一定的关系, 将不同反应系统的 ⁷Li、⁷Be 碎裂截面之比列于表 2 中, 可以看出, 当靶核的 N/Z 增加时, ⁷Li/⁷Be 碎裂截面之比也增加。即 N/Z 较大的靶核更趋向于擦去质子较多的结团。这也可以解释为什么实验中 ¹¹B 的碎裂截面要比 ¹¹C 的大。

下面我们来看不同反应系统中碎片的转移截面。由图 3 中可知, ¹¹C、¹¹B 比 ¹⁰C、¹⁰B 的转移截面明显地要大, 这说明单个核子转移的几率比转移两个核子的几率要大得多。当靶核的几何尺寸增加时, 转移的几率也增加。转移截面与靶核的结构具有明显的依赖关系, 对于 ⁵⁸Ni 靶, ¹⁰B 的转移截面比 ¹⁰C 大, 因为 ⁵⁸Ni 靶的 N/Z 比较小, 向它转移中子比转移质子要容易。自表 3 中可知, 当靶核的 N/Z 增加时, ¹⁰C、¹⁰B 的转移截面之比也增加。同样的道理可以解释 ¹¹C、¹¹B 的转移截面之比随靶核 N/Z 增加而增加的事实。

表 2 ¹²C 入射反应中的 ⁷Li、⁷Be 碎裂截面之比 (5°)

靶核	⁵⁸ Ni	¹¹⁵ In	¹⁹⁷ Au
$(N/Z)_{\text{target}}$	1.07	1.35	1.49
$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{frag}} (^7\text{Li}/^7\text{Be})$	1.08	1.47	1.70

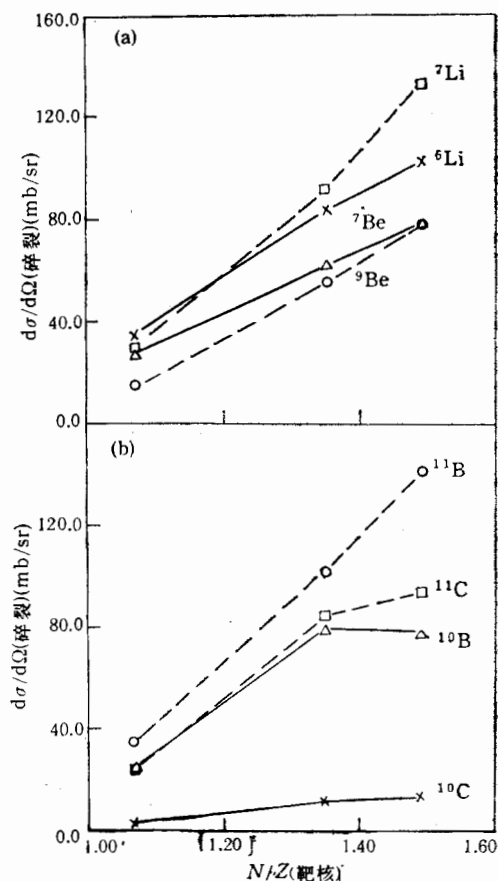
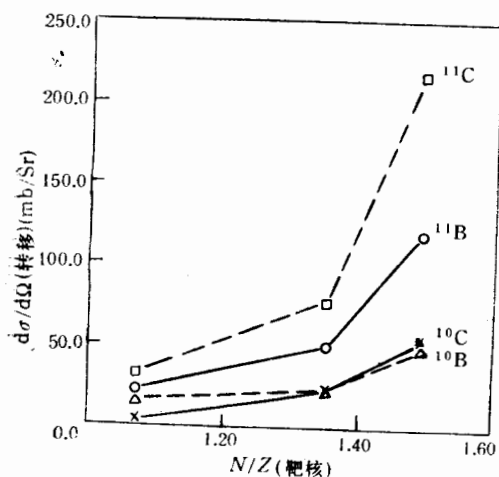
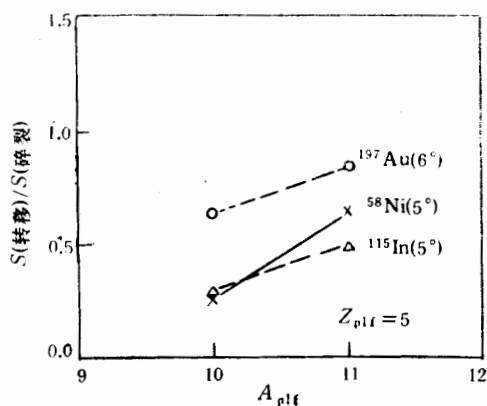


图 2(a) ⁶Li、⁷Li、⁷Be、⁹Be 的碎裂截面(5°)
 (b) ¹⁰C、¹¹C、¹⁰B、¹¹B 的碎裂截面(5°)

图3 ^{10}C 、 ^{11}C 、 ^{10}B 、 ^{11}B 的转移截面(5°)图4 ^{10}B 、 ^{11}B 的转移截面与碎裂截面之比与碎片质量的关系(5°)表3 ^{11}C 入射反应中碎片的转移截面之比(5°)

靶核	^{58}Ni	^{115}In	^{197}Au
$(N/Z)_{\text{target}}$	1.07	1.35	1.49
$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{trans.}} (^{10}\text{C}/^{10}\text{B})$	0.25	1.02	1.12
$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{trans.}} (^{11}\text{C}/^{11}\text{B})$	1.44	1.52	1.84

实验中发现,对所有的反应系统, ^{11}C 、 ^{11}B 和 ^{10}C 、 ^{10}B 的转移截面要大于 ^{13}C 及 N 各种同位素的截面,这说明转移倾向于发生在由轻核向重核的转移中。在 ^{11}C 、 ^{11}B 的能谱中看到,除了转移至连续态的贡献外,还有转移至分离态的贡献,这方面的结果有待于进一步的分析。

由于反应中弹核碎裂与转移机制共存,研究它们的相互竞争是很有意义的。图4给出了三种反应系统中测到的 ^{10}B 、 ^{11}B 的转移与碎裂截面之比,当转移的核子数较少时,转移与碎裂截面之比比较大,这说明转移反应主要为少数核子的转移,转移主要对弹核附近的碎片有贡献。当类弹碎片质量偏离弹核较远时,转移可以忽略,弹核碎裂成为类弹碎片的主要来源。

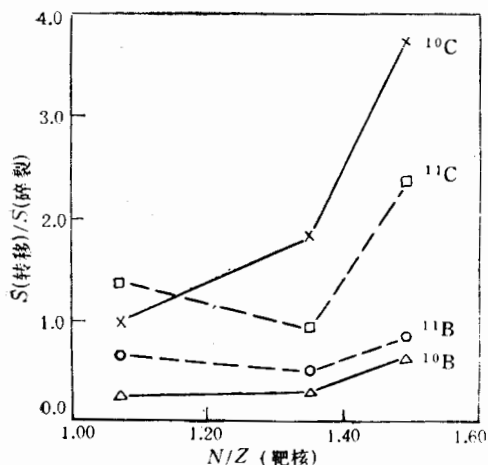
图5 不同反应系统的 ^{10}C 、 ^{11}C 、 ^{10}B 、 ^{11}B 的转移截面与碎裂截面之比(5°)

图5中给出了转移与碎裂截面之比和靶核的关系,当靶核的 N/Z 增加时,比值呈现

上升的趋势。对于 ¹⁰B 和 ¹¹B, 比值上升缓慢, 而对于 ¹⁰C 和 ¹¹C, 比值则迅速上升。这说明靶核越重, 相对来说越容易发生转移, 而 B 和 C 同位素的转移与碎裂截面之比及其随靶核的变化的差别, 则反映了核结构对反应机制的影响。转移与碎裂的相对贡献因被转移的结团不同而受到靶核 N/Z 的影响。

五、结 论

我们在兰州重离子加速器 HIRFL 上进行了 46.7MeV/u ¹²C 轰击 ⁵⁸Ni、⁶⁴Ni、¹¹⁵In 和 ¹⁹⁷Au 等靶核的实验, 用 CsI(Tl) 与半导体组成的望远镜探测器在 5°—20° 范围内测量了反应中的出射产物, 着重研究了 ¹²C 引起的中能重离子核反应中的弹核碎裂和转移反应以及它们的相互竞争。

类弹碎片中的高能部分主要来源于弹核碎裂, 当类弹碎片的质量接近于弹核质量时, 转移反应也对类弹碎片的形成有贡献。对于接近弹核的类弹碎片, 我们利用外推法来确定其碎裂部分的最可几能量, 同时采用实验中提取的约化平行动量分布宽度的值, 在弹核参考系中动量分布为高斯分布的假设基础上拟合出碎裂部分的能谱, 从而将弹核碎裂与转移反应的贡献区分开来。可以通过轻粒子和 PLF 的符合实验来进行两者之间的区分, 这类实验正在准备之中。

由碎片中转移部分的贡献提取的约化平行动量分布宽度为 $44 \pm 10 \text{ MeV}/c$, 这比弹核碎裂部分的 $\sigma_0 = 80 \pm 10 \text{ MeV}/c$ 要窄, 说明转移反应受到了相空间中更严格的限制。弹核碎裂及转移反应发生的几率与被转移结团的结构有关。当靶核变重时, 碎裂与转移的几率都增加。转移主要发生在轻核向重核的转移中。转移反应主要对弹核附近的碎片有贡献, 当类弹碎片质量与弹核质量相差较大时, 主要是弹核碎裂的贡献。

本工作得到国家自然科学基金资助。作者感谢 HIRFL 的全体工作人员, 他们提供了品质良好的 ¹²C 离子束; 感谢数据获取室、NIM 库和公共实验室工作人员的辛勤劳动; 感谢探测器组提供了性能优良的 ΔE 半导体探测器。

参 考 文 献

- [1] M. C. Mermaz et al., *Nucl. Phys.*, **A441**(1985), 129.
- [2] S. Wald et al., *Phys. Rev.*, **C32**(1985), 894.
- [3] D. Guerreau, *Nucl. Phys.*, **A447**(1985), 37c.
- [4] J. C. Steckmeyer et al., *Nucl. Phys.*, **A500**(1989), 372.
- [5] M. C. Mermaz et al., *Z. Phys.*, **A324**(1986), 217.
- [6] 刘冠华等, *高能物理与核物理*, **17**(1993), 166.
- [7] K. Van Bibber et al., *Phys. Rev. Lett.*, **43**(1979), 840.
- [8] A. S. Goldhaber, *Phys. Lett.*, **53B**(1974), 306.
- [9] Zhu Yongtai et al., *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, **14**(1990), 195.
- [10] K. W. McVoy and M. C. Nemes, *Z. Phys.*, **A295**(1980), 177.

The Competition Between Fragmentation and Transfer in 46.7 MeV/u ^{12}C Induced Reactions

LIU GUANHUA ZHAN WENLONG ZHU YONGTAI GUO ZHONGYAN

HU XIAOQING XI HONGFEI ZHOU JIANQUN YIN SHUZH

FENG ENPU ZHAO YOUXIONG WEI ZHIYONG FAN ENJIE

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

ABSTRACT

The co-existence and competition between fragmentation and transfer in 46.7 MeV/u ^{12}C induced reactions have been discussed. The reduced parallel momentum distribution width for transfer part extracted from our experiment is 44 ± 10 MeV/c, which is smaller than that for fragmentation part (80 ± 10 MeV/c). The probabilities for both projectile fragmentation and transfer processes are found to be dependent on the structure of the transferred cluster.