

46.7 MeV/u ^{12}C 引起的弹核碎裂反应*

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

测量了 46.7 MeV/u ^{12}C 束流轰击不同靶核的核反应中前方向出射的类弹碎片, 发现弹核碎裂产物的最可几能量可用 Abrasion 图象来解释. 它们的平行动量分布宽度满足 Goldhaber 关系式, 实验中提取的约化平行动量分布宽度 $\sigma_0 = 80 \pm 10 \text{ MeV}/c$, 接近于相对论情形下的值, 并且 σ_0 对于不同的反应系统有相近的值.

一、引 言

中能区重离子核反应机制的研究目前受到普遍的关注. 周边碰撞过程中, 大量的产物是类弹碎片 (PLF). 在低能时, 即弹核能量 $< 10 \text{ MeV}/u$ 时, 平均场效应占主要地位, 一体耗散是主要过程, 相对运动动能转化为内部激发能, 相对运动角动量转化为内部角动量, 类弹碎片主要来自于深部非弹性碰撞过程 (DIC) 和准弹转移. 在高能情况下, 即弹核能量 $> 100 \text{ MeV}/u$ 时, 核-核作用时间比内禀自由度弛豫时间短, 约化波长比核内核子间距离要短, 核子-核子碰撞是主要过程, 类弹碎片主要来自于弹核碎裂过程 (Projectile Fragmentation), 可用 Abrasion-Ablation 图象予以解释. 中能区 ($10 \text{ MeV}/u \sim 100 \text{ MeV}/u$) 是介于低能和高能间的过渡能区, 该能区的反应既具有低能时的耗散特点, 又具有高能时的核子-核子碰撞特征, 多种反应机制共存, 相互竞争^[1-3]. 最初在中能区进行的 ^{40}Ar 入射的反应实验表明存在类似于碎裂机制的过程, 类弹碎片的同位素分布与高能情况类似^[4,5], 但是中能区的弹核碎裂反应与高能时的纯碎裂不同, 类弹碎片的同位素产额分布受靶核同位旋的影响, 碎裂与转移机制共存, 非弹性的激发甚至深度的耗散依然存在. 为了更好地了解中能区重离子引起的弹核碎裂反应, 我们用 46.7 MeV/u 的 ^{12}C 束流进行了实验, 以研究不同反应系统中的弹核碎裂反应机制.

二、实验概况

实验是于 1991 年 5 月在兰州重离子加速器 HIRFL 的大面积位置灵敏电离室终端上完成的. 实验中用 46.7 MeV/u 的 ^{12}C 束流轰击了厚度分别为 $1.046 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 、 $2.092 \text{ mg}/$

本文 1991 年 11 月 1 日收到.

* 国家自然科学基金资助.

cm² 的 ⁵⁸Ni 靶, 厚度为 1.063mg/cm² 的 ⁶⁴Ni 靶, 厚度为 4.81mg/cm² 的 ¹¹⁵In 靶, 和厚度分别为 2.73mg/cm²、4.53 mg/cm² 的 ¹⁹⁷Au 靶。实验中束流强度为 5—10nA。在前角区用一个由 3 片穿透型半导体探测器和光二极管读出的 CsI(Tl) 组成的望远镜测量类弹碎片。3 片半导体探测器的厚度分别是 130μm、1580μm 和 5000μm, 剩余能量探测器由 CsI(Tl) 配以 S1790-02 型光二极管读出。该探测器置于靶室内转臂上距靶心 50cm 处。中角区由 9 单元 CsI(Tl) 闪烁体阵列测量轻带电粒子。该探测器置于与束流方向成 20° 角的方向, 主要用来测量轻带电粒子关联。在束流另一侧, 气体电离室用来在中后角区测量复杂粒子。一套由 3 片半导体探测器组成的望远镜用来测量后角区出射的产物。实验中共计有 69 个参数, 采用近代物理研究所 GOOSY 获取系统进行数据获取, 将数据以逐个事件方式记录在磁带上。

本文主要分析了 CsI(Tl) 与半导体组成的望远镜探测器在前方向测得的类弹碎片的的结果, 对不同反应系统的研究可以得到一些中能区反应机制与反应系统的关系。

三、弹核碎裂产物的最可几能量

我们用 CsI(Tl) 与半导体组成的望远镜探测器测量了反应中前方向的出射产物。图

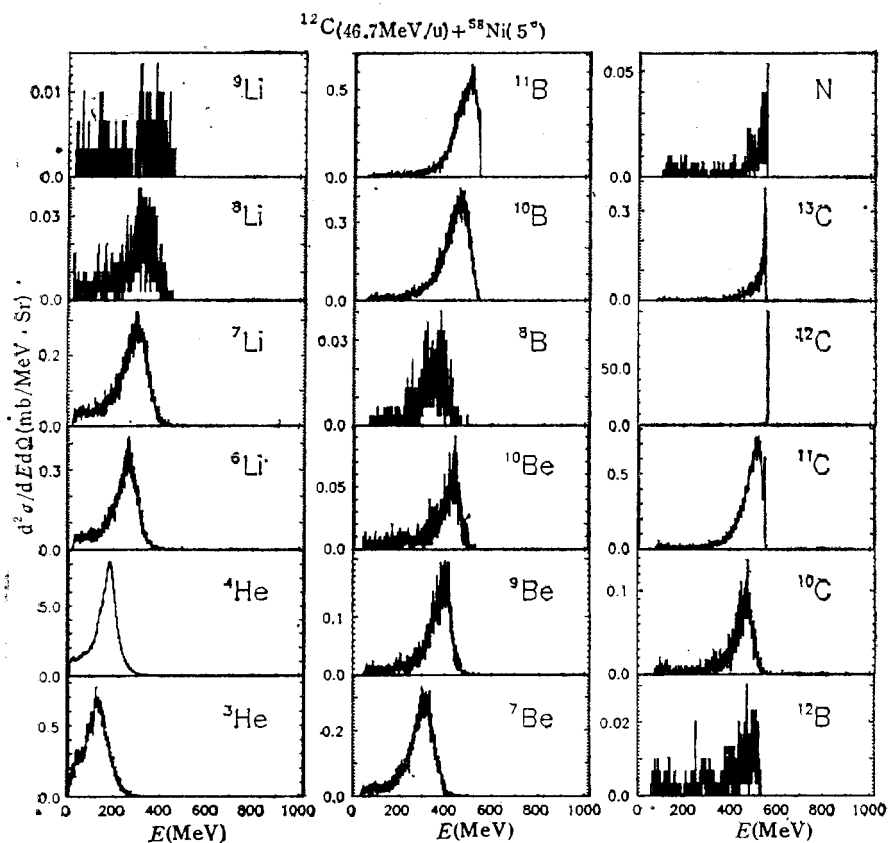


图 1 ¹²C(46.7MeV/u) + ⁵⁸Ni 反应中 5° 方向测得的各种碎片的能谱

1 给出了 $^{12}\text{C}(46.7\text{MeV/u}) + ^{58}\text{Ni}$ 反应中在 5° 方向测得的各种碎片的能谱,由能谱可以看出,这一轰击能量下在小角度时多为直接过程的产物,能谱在对应于接近束流速度的能量处成峰。

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。考虑平行动量和横向动量,则质量为 A_t 的碎片的质心系双微分截面为^[6]:

$$\frac{d^2\sigma}{dE dQ} \sim \exp\left(-\frac{p_{\parallel}^2}{2\sigma_{\parallel}^2} - \frac{p_{\perp}^2}{2\sigma_{\perp}^2}\right), \quad (1)$$

其中 p_{\parallel} 和 p_{\perp} 分别为碎片的平行动量和横向动量, σ_{\parallel} 和 σ_{\perp} 分别为碎片的平行动量分布宽度和横向动量分布宽度。变换到实验室系中则有:

$$\frac{d^2\sigma}{dE dQ} = N \sqrt{2A_t E} \exp\left[-A_t \left(\frac{E \sin^2\theta}{\sigma_{\perp}^2} + \frac{E \cos^2\theta + \bar{E} - 2\sqrt{E\bar{E}}\cos\theta}{\sigma_{\parallel}^2}\right)\right], \quad (2)$$

其中 A_t 为碎片质量, E 为碎片实验室系动能, \bar{E} 是对应于碎裂部分的能量分布的最可几值, θ 为碎片实验室系出射角, N 是归一化常数。当考虑前方向出射产物时, θ 一般比较小,接近于擦边角,又因为 σ_{\perp} 比 σ_{\parallel} 要大得多,因此式(2)可简化为:

$$\frac{d^2\sigma}{dE dQ} = N \sqrt{2A_t E} \exp\left[-\frac{A_t}{\sigma^2} (E - 2\sqrt{E\bar{E}}\cos\theta + \bar{E})\right], \quad (3)$$

(3) 式中的 σ 即是(2)式中的 σ_{\parallel} 。

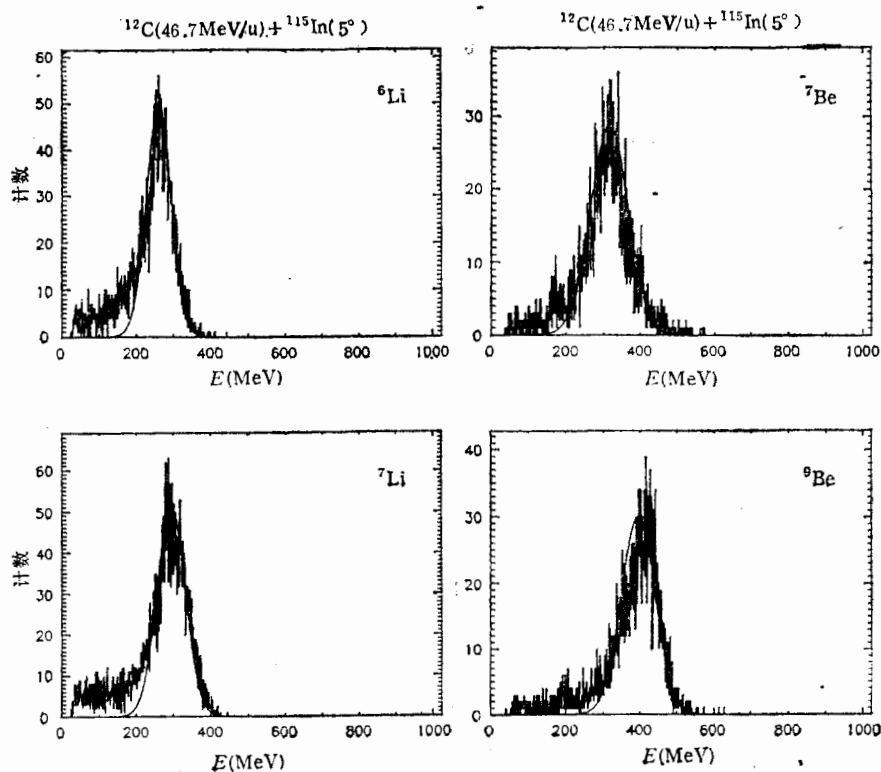


图2 类弹碎片最可几能量的拟合

当碎片质量远离弹核时,从测得的能谱来看,我们可以认为能谱的高能部分主要是碎裂的贡献,转移的贡献可以忽略。用简化后的(3)来拟合实验谱,可以很好地重现实验能谱。拟合中采用了 $\sigma_0 = 80\text{MeV}/c$, 这是因为在 ^6Li 、 ^7Li 、 ^7Be 、 ^9Be 等远离弹核的碎片速度谱的拟合中得到的 σ_0 都在 $80\text{MeV}/c$ 左右, 我们在拟合中取其平均值,即选用 $80\text{MeV}/c$ 。 σ_0 的提取参见下节。拟合中 N 和 \bar{E} 也是可调参数, 这样对各种反应系统的 ^6Li 、 ^7Li 、 ^7Be 、 ^9Be 等碎片的能谱可以提取出碎裂部分的最可几能量 \bar{E} , 如图 2 所示。由 $^{12}\text{C}(46.7\text{MeV}/u) + ^{58}\text{Ni}$ 系统所得到的 \bar{E} 值如图 3, 随着碎片质量减少, 最可几能量 \bar{E} 也减小。 \bar{E} 和 A_f 的关系可归因于与擦去核子结合能有关的摩擦力。弹核被擦去若干核子后, 出射的类弹碎片质量为 A_f , 其速度为 v_f , 则^[7,8]:

$$v_f = v_p \left(1 - \frac{E_s A_p}{E_p A_f} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

其中 v_p 为弹核速度, A_p 、 A_f 为弹核和类弹碎片的质量, E_p 为弹核入射能, E_s 为弹核中两部分的分离能, 在 Abrasion 图象中有:

$$E_s = 2\gamma S, \quad (5)$$

式中 γ 为核表面张力系数, 通常取为 $0.98\text{MeV}/\text{fm}^2$, S 为弹核中被擦去部分与剩余碎片间的截面面积。通过这简单的模型可以较好地拟合碎片的最可几能量。

对于较重的碎片(如 ^{10}B 、 ^{11}B 、 ^{10}C 、 ^{11}C), 其碎裂部分的最可几能量值 \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} 。图 3 中给出了对于 $^{12}\text{C}(46.7\text{MeV}/u) + ^{58}\text{Ni}$ 所得到的 \bar{E} 值, 图中圆点为实验值, 虚线为实验值的拟合曲线, 叉号表示由拟合曲线外推得到的值, 对于 $A_f = 10$ 和 11 的类弹碎片所取的 \bar{E} 值分别为 429MeV 和 472MeV 。用这两个 \bar{E} 值分析 $A_f = 10$ 和 11 的碎片能谱, 看到能谱的高能部分除了弹核碎裂的贡献外, 还有转移反应的贡献, 关于碎裂与转移的竞争将在其他文章^[9]中详细分析。

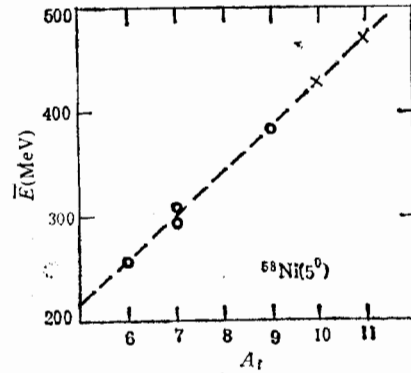


图 3 最可几能量与碎片质量的关系

四、弹核碎裂产物的平行动量分布宽度

在相对论重离子实验中发现,弹核静止系中的碎片动量分布通常是高斯分布,宽度与弹核及碎片质量有关,但与靶核质量以及束流能量没有明显的关系^[10]。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^[11]:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \frac{A_f(A_p - A_f)}{A_p - 1}. \quad (6)$$

式中 σ_0 为约化动量分布宽度,它与碎片质量无关,而是由费米运动所决定的。Bertsch 在这个简单的统计模型里引入泡里禁戒的限制^[12],考虑了单个核子动量间的关联,因此给出的 σ_0 比 Goldhaber 给出的 σ_0 要小,得到了与实验结果更好的符合。按此计算的 ^{40}Ar 碎

裂的分布宽度比 Goldhaber 的约小 17%。Murphy 把碎片也考虑为费米气体, 进一步考虑了碎片中核子的相空间限制^[43], 因而得到的动量分布宽度更小, 比实验测得的值还要小。Friedman^[44] 将分布宽度与分离能以及吸收截止半径相联系, 并考虑了低能情形时库仑作用对动量分布宽度的影响, 给出了不同能量下碎裂过程的平行动量分布宽度。

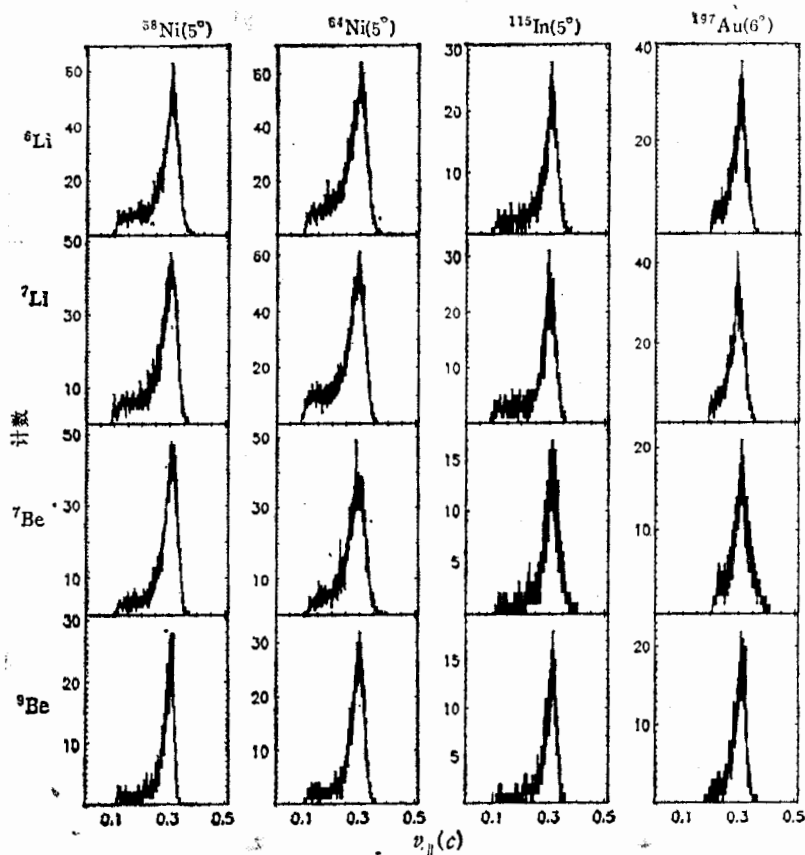


图 4 类弹碎片的协变速度谱

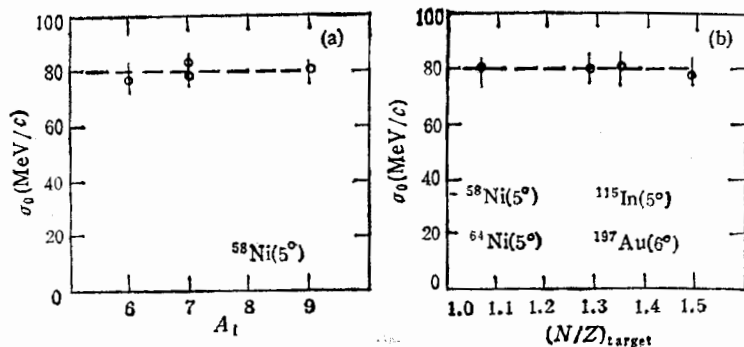


图 5(a) σ_0 与类弹碎片质量的关系

图 5(b) σ_0 与反应系统的关系

实验中是按照下面的程序来提取平行动量分布宽度的: 对于 ⁶Li, ⁷Li, ⁷Be, ⁹Be 这几种产额比较高因而统计比较好的同位素, 首先将其实验室系能谱转换为协变速度谱, 示于图 4, 从速度谱中看出, 这些碎片均在稍小于束流速度处成峰。然后对速度谱进行高斯拟合, 这样就可得到各碎片的速度分布宽度, 考虑了碎片质量后, 就可得到相应的平行动量分布宽度。实验值见表 1, 表中的 σ_0 值是按 Goldhaber 公式 (6) 计算得到的。

图 5(a) 中给出了 ¹²C(46.7 MeV/u) + ⁵⁸Ni 反应中提取的约化平行动量分布宽度 σ_0 与类弹碎片质量的关系, 可以看出各碎片的平行动量分布宽度很好地满足 Goldhaber 关系式, 提取的 σ_0 对各种类弹碎片都相同。这一结论对其它几种反应系统也适用。

σ_0 与反应系统的关系如图 5(b), 图中的 σ_0 值是对反应中各种类弹碎片平均后的结果。对于实验中的四种反应系统, 都得到相近的 σ_0 值。

我们将 σ_0 与重离子核反应中弹核入射能量的关系示于图 6, 图中的数据取自 ⁴⁰Ar、²⁰Ne、¹⁴N 等弹核引起的重离子核反应^[5,15,16]。对于 ¹²C(46.7 MeV/u) 引起的核反应, 我们得到 $\sigma_0 = 80 \pm 10 \text{ MeV}/c$, 这个值接近于相对论能量下的 σ_0 值。图中虚线是用 Friedman 模型计算的结果。

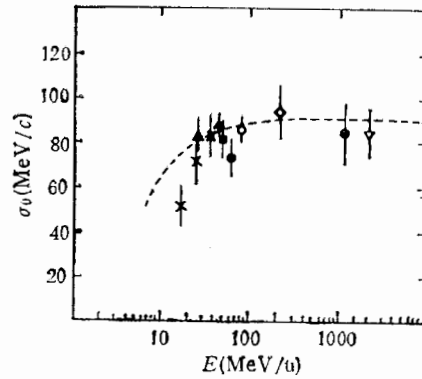


图 6 σ_0 与重离子核反应中弹核入射能量的关系

◆: 本工作 * : 文献 [15] 其它: 文献 [5,16]

表 1 弹核碎裂部分的动量分布宽度

靶	¹² C $E/A = 46.7 \text{ MeV}$ 弹核碎裂部分的动量分布宽度							
	$\sigma (\text{MeV}/c)$				$\sigma_0 (\text{MeV}/c)$			
	⁶ Li	⁷ Li	⁷ Be	⁹ Be	⁶ Li	⁷ Li	⁷ Be	⁹ Be
⁵⁸ Ni	138.9	147.2	140.7	125.5	76.8	82.5	78.9	80.1
⁶⁴ Ni	138.8	148.3	146.0	125.4	76.7	83.2	81.9	80.1
¹¹⁵ In	134.7	147.7	147.6	129.8	74.4	82.8	82.8	82.8
¹⁹⁷ Au	136.9	140.0	143.4	123.8	75.7	78.5	80.4	79.0

五、结 论

我们在兰州重离子加速器 HIRFL 上进行了 46.7 MeV/u¹²C 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测量了反应中的前方向出射产物, 着重讨论了 ¹²C 引起的中能重离子核反应中的弹核碎裂产物的最可几能量及其平行动量分布宽度。由于弹核碎裂反应产生的类弹碎片集中于前方向小角度范围内, 我们在本文中只讨论了 5° 方向的实验结果, 而对其他角度未予讨论。

对于弹核碎裂产物的最可几能量进行了讨论,用 Abrasion 图象可以较好地重现实验中拟合出的碎片的最可几能量。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 ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Ba}$ 、 ${}^9\text{Ba}$ 几种产额较高的核素,将其实验室系能谱转换为协变速度谱,它们均在稍小于束流速度处成峰。对速度谱进行高斯拟合,可得到各碎片的平行动量分布宽度。实验发现,它们满足 Goldhaber 关系式,由此提取的约化平行动量分布宽度 σ_0 为 $80 \pm 10 \text{ MeV}/c$,与相对论情形下的值接近,并且 σ_0 对于各种反应系统均相近。

本工作得到国家自然科学基金资助。作者感谢 HIRFL 的全体工作人员提供了品质良好的 ${}^{12}\text{C}$ 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。

参 考 文 献

- [1] J. C. Steckmeyer et al., *Nucl. Phys.*, **A500**(1989), 372.
- [2] C. Pruneau et al., *Nucl. Phys.*, **A500**(1989), 168.
- [3] M. Morjean et al., *Phys. Lett.*, **203B**(1988), 215.
- [4] D. Guerreau et al., *Phys. Lett.*, **131B**(1983), 293.
- [5] V. Borrel et al., *Z. Phys.*, **A324**(1986), 205.
- [6] K. Van Bibber et al., *Phys. Rev. Lett.*, **43**(1979), 840.
- [7] V. Borrel et al., *Z. Phys.*, **A314**(1983), 191.
- [8] F. Rami et al., *Nucl. Phys.*, **A444**(1985), 325.
- [9] 刘冠华等,“46.7 MeV/u ${}^{12}\text{C}$ 引起的核反应中碎裂与转移的竞争”,高能物理与核物理,待发表。
- [10] D. E. Greiner et al., *Phys. Rev. Lett.*, **35**(1975), 152.
- [11] A. S. Goldhaber, *Phys. Lett.*, **53B**(1974), 306.
- [12] G. Bertsch, *Phys. Rev. Lett.*, **46**(1981), 472.
- [13] M. J. Murphy, *Phys. Rev.*, **135B**(1984), 25.
- [14] W. A. Friedman, *Phys. Rev.*, **C27**(1983), 569.
- [15] Zhu Yongtai et al., *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* **14**(1990), 195.
- [16] D. E. Greiner et al., *Phys. Rev.*, **C28**(1983), 1602.

Projectile Fragmentation in 46.7 MeV/u ${}^{12}\text{C}$ 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 projectile-like fragments emitted from 46.7 MeV/u ${}^{12}\text{C}$ induced reactions have been measured. The most probable energies of the PLFs due to the projectile fragmentation can be reproduced within the Abrasion picture. Their parallel momentum distribution widths are found to fulfill the Goldhaber relation and the extracted reduced parallel momentum distribution width σ_0 is $80 \pm 10 \text{ MeV}/c$, which is close to the value obtained in the relativistic energy region. Furthermore, the values of σ_0 are the same for different reaction systems in our experiment.