

$^{20}\text{Ne}(14.7, 19.2\text{MeV/u}) + ^{58}\text{Ni}$ 反应中 类弹碎片与 α 粒子的关联研究*

胡晓庆 诸永泰 沈文庆 李松林
詹文龙 郝鸿飞 祝翔 张震

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要

我们研究了在 $^{20}\text{Ne}(14.7\text{MeV/u}, 19.2\text{MeV/u}) + ^{58}\text{Ni}$ 的反应中出射的类弹碎片与 α 粒子的符合, 发现除了原始激发碎片的相继衰变产生这种符合事件以外, 还有一种反应过程导致深度耗散的类弹碎片与前方向 α 粒子的“非关联”符合, 这种过程意味着 α 粒子在反应初期就从弹核 ^{20}Ne 中飞出, 而剩余的 ^{16}O 继而与靶核进行的一种耗散碰撞, 我们称之为“非完全的深部非弹性过程”。

一、引 言

在重离子核反应中, 人们常常探测到类弹碎片与轻粒子的符合, 这些碎片与轻粒子来源于初级类弹产物, 这种过程人们称之为弹核的碎裂^[1]。在高能情况下, 弹核的碎裂可以在“参加者-旁观者”模式^[2]中进行解释。在周边碰撞中, 弹核与靶核相接触的部分形成一个高温发射区发射轻粒子, 而弹核的另一部分则以接近束流的速度飞离而去, 这个旁观者的动量分布宽度表征了它在弹核中的费米运动^[3]。而在低能情况下, 弹核在周边碰撞中可以与靶核发生转移反应、非弹性碰撞及深度非弹性碰撞, 激发的类弹产物再通过发射轻粒子进行相继衰变, 因此我们同样会测到一个类弹碎片与一个轻粒子的关联。这种反应过程基本上体现了低能情况下的平均场效应, 它不同于高能情况下的核子-核子相互作用。

在中能区 ($10\text{MeV/u} - 100\text{MeV/u}$), 重离子之间的相互作用既有低能下的平均场相互作用也表现出了高能下的核子-核子相互作用的特征^[4-7]。其反应的过程也会变得复杂一些, 因此对中能区周边反应的研究会对我们了解中能区反应的特征提供很多信息。在中能区的低端, 弹核的碎裂与高能情况下的碎裂不同, 但预计会出现一些不同于低能时的特征。基于这种考虑我们研究了 14.7MeV/u 和 19.2MeV/u 的 ^{20}Ne 轰击 ^{58}Ni 靶中周边反应的弹核碎裂, 我们将在前方向用一探测器阵列探测反应中产生的轻粒子, 而在不同角

本文 1991 年 1 月 21 日收到。

* 国家自然科学基金资助。

度测量类弹产物,通过分析这两种产物之间的关联,以期找出这种能量下周边反应的特征。

下面第二节描述测量中所用的实验装置,在第三节中我们通过对两种产物之间的能量关联判定相继衰变的存在,而在第四节中通过一个蒙特卡罗模拟和对角关联的分析,指出一个非完全过程的存在,最后再给出结论。

二、实验装置

294MeV 和 384MeV 的 ^{20}Ne 束流是由荷兰 KVI 的回旋加速器提供的,实验中使用的靶是厚度为 $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 的 ^{58}Ni 靶。测量的反应产物是前方向出射的轻带电粒子(包括 H 和 He 的同位素)及在不同角度出射的类弹产物,实验布局见图 1。在前方向放置了一个塑料叠层闪烁探测器阵列^[6],此阵列包括 20 个塑料叠层闪烁探测器,每个探测器是由 1mm 厚的快闪烁体 (NE102A) 和 15mm 厚的慢闪烁体 (NE115) 组成。每个面积为 $65 \times 65\text{mm}^2$ 。整个塑料探测器阵列覆盖了由 -20° 到 $+20^\circ$ 的在平面角区、由 -10° 到 $+10^\circ$ 的出平面角区,阵列正中的一个单元留空,让束流通过,总立体角约为 0.2Sr 。这些探测器能清楚地分开 H 和 He 的同位素,由不同能量 α 束流刻度的结果表明其光输出与能量近似线性关系。

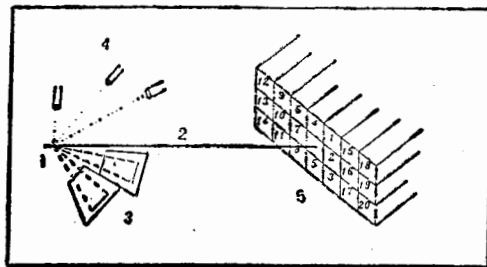


图1 实验装置示意图

1.靶,2.束流,3.位置灵敏电离室望远镜,4.硅探测器望远镜,5.塑料闪烁体阵列

在束流方向的一侧,有三组半导体望远镜,用来探测类弹碎片。它们分别由 $50\mu\text{m} + 5000\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m} + 3000\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m} + 2000\mu\text{m}$ 的 Si 半导体探测器组成,对类弹产物有很好的元素鉴别能力。实验数据由数据获取系统按逐个事件方式记录,在中科院近物所的 VAX8350 机器上离线进行分析。

三、结果与讨论

按照碰撞参数 b 的大小,重离子核反应可分为周边碰撞和中心碰撞。在低能情况下,周边反应导致弹核与靶核的非弹性碰撞或深部非弹性碰撞,类弹产物被激发。这些被激发的原始产物会通过发射轻粒子衰变(这种过程被称之为相继衰变),因此在实验中能观测到一种次级类弹产物与一个轻粒子的符合。当束流能量稍高一些,到 $15-20\text{MeV/u}$ 时,类弹碎片与轻粒子的符合是不是完全来自这种相继衰变呢?

为此我们仔细研究了在 $^{20}\text{Ne} + ^{58}\text{Ni}$ 反应中测到的类弹碎片与 α 粒子的能量关联及角度关联。图 2 显示的是在 19.2MeV/u 反应中在 6° 出射的类弹碎片碳的能量与被一个邻近角度的塑料闪烁探测器测到的 α 粒子的能量之间的关联。从散点图中可以清楚地分

出两个部分,分别对应 α 粒子能谱中的两个分量。

由三体运动学的分析我们知道:当一个被激发的原始产物的激发能超过其可能的衰变道的基态结合能时,它可由这种道衰变为两个次级产物。在原始产物的系统中,这两个次级产物的相对运动动能便为激发能与基态结合能之差(假定次级产物均处于基态)。在两个邻近的探测器中探测到的这两个次级产物的能谱会受到几何效应及运动学效应的影响而在能量关联图上显示出两个明显分开的部分。在对应的轻粒子的能谱上会产生两个能量分量,分别对应于初始发射体系统中轻粒子的向前发射和向后发射。

因此图2显示的类弹碎片和 α 粒子的关联主要来自于原始激发类弹产物的相继衰变过程。从其它类弹碎片与邻近角度探测到的 α 粒子的能量关联图上也可以看到类似图2的关联图,这说明在邻近几何条件下的关联主要是相继衰变的结果。可是当两个探测器角度相距较远时,即使所测到的类弹碎片与 α 粒子来自于某种初始产物的相继衰变,由于反应运动学的限制,实验也不能给出象图2那样的关联图,在这种条件下就无法确定导致类弹碎片和 α 粒子关联的反应机制。

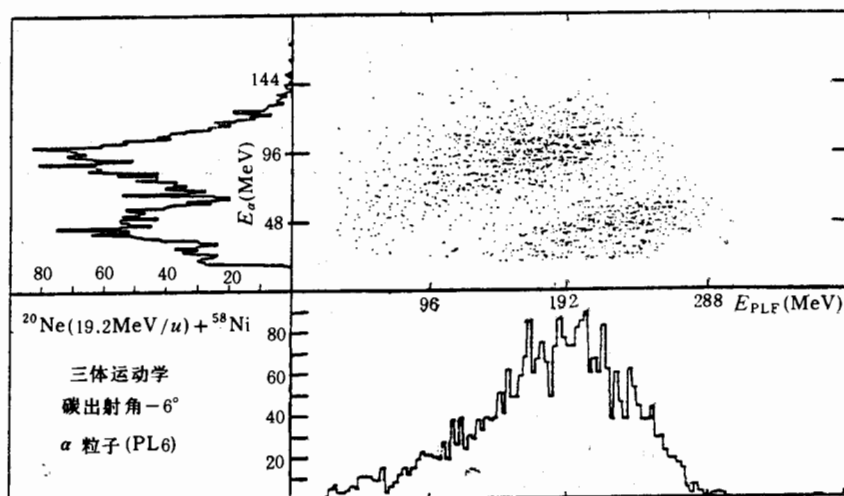
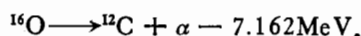
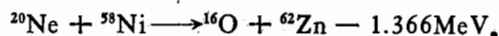


图2 在 -6° 出射的碳的能量和与其邻近的 PL6 探测到的 α 粒子的能量之间的关联及其相应的能谱

因此,对类弹碎片与 α 粒子的关联角分布的研究是至关重要的。为此我们对原始激发碎片的相继衰变进行了蒙特卡罗模拟。为了简单起见,我们选择下面的反应过程:



蒙特卡罗模拟过程中需要有以下三个方面的考虑:

1) 原始产物的激发能分布即次级产物之间相对运动动能的分布对类弹碎片和 α 粒子间的角关联是较为灵敏的。原始产物的激发能扣除阈能后即次级产物之间的相对运动动能,它决定了两个次级产物能够分开多远(在速度平面中),因此对次级产物之间的

角关联影响甚大。为了获得原始碎片的激发能分布,我们选取两个邻近探测器所探测的类弹碎片与 α 粒子的关联事件,在相继衰变的假定之下,直接计算出所测到的两个次级产物之间的相对运动动能,这如图 3 中的(+++++)所示。由于运动学和几何效应的影响,这种分布必须通过修正才能得到真正的原始碎片激发能分布,修正后的激发能分布如图中的直方图所示。这个分布类似于一个麦克斯韦分布:

$$f(E_{rel}) = C \times \sqrt{E_{rel}} \times \exp\left(-\frac{E_{rel}}{T}\right), \quad (1)$$

其中 E_{rel} 为相对运动动能,拟合得到的 T 值为 4MeV 。对不同角度的邻近探测器所测到的关联事件都得到了相同的初始产物激发能分布。

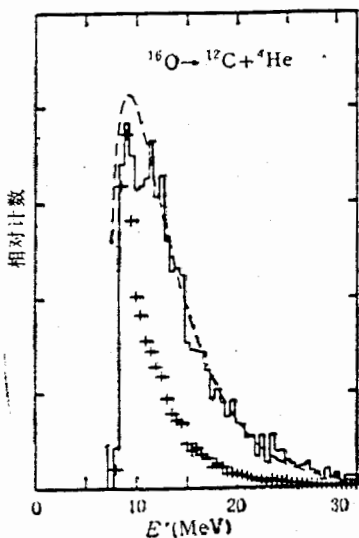


图 3 原始产物的激发能分布

十字代表在相继衰变假定下由相邻的两个探测器测到的碳和 α 的能量直接计算得到的分布,直方图表示经过运动学修正后的分布,而虚线是对其拟合得到的麦克斯韦分布。

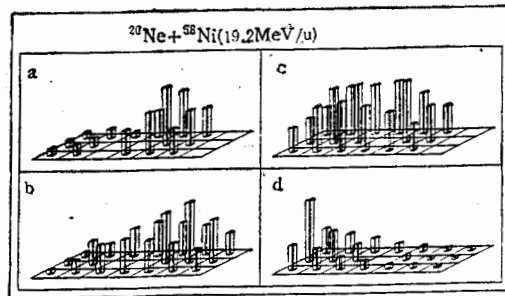


图 4 在 $19.2\text{MeV}/u$ $^{20}\text{Ne} + ^{58}\text{Ni}$ 反应中出射的碳与前方向的 α 粒子的角关联在 20 个塑料闪烁体探测器上的分布。

a. 碳出射角 -6° 实验结果, b. 碳出射角 -6° 模拟结果, c. 碳出射角 -26° 实验结果, d. 碳出射角 -26° 模拟结果。

2) 模拟中另一个必须考虑的分布是原始产物的角度和动能分布。我们假定这种分布为质心系中的几个随角度指数衰减的高斯分布之和

$$f(E, \theta) = \sum C_i \times \exp(-\mu_i \times \theta) \times \exp\left(-\frac{(E - E_i)^2}{2\sigma_i^2}\right). \quad (2)$$

这里的参数 C_i 、 μ_i 的选取参照了单举测量得到的类弹碎片的角分布,而 E_i 、 σ_i 的选取保证次级产物的能谱与实验测到的能谱相一致。

3) 次级 α 粒子在原始产物的系统中被假定为各向同性发射。

蒙特卡罗模拟过程中,原始碎片的角度和动能首先被抽样选取,然后按照所得的麦克斯韦分布抽样选取相对运动动能,在原始产物的坐标系中,按照动量守恒和能量守恒原理在速度平面上计算出次级产物的速度矢量, α 粒子的速度方向按各向同性分布抽取。将两个次级产物的速度矢量投影到实验室系中的探测器角度范围内就可得到两个产物在实验

室系中相关的动能和角度分布。按照探测器的几何布局,选取不同角度之间的关联,然后与实验数据直接进行比较。结果如图4所示。

图中所示为在 19.2MeV/u 的 $^{20}\text{Ne} + ^{58}\text{Ni}$ 反应中出射的类弹碎片 ^{12}C 与前方向的 α 粒子的角关联在 20 个塑料闪烁体探测器上的分布。其中 ^{12}C 的探测角度为 -6° (左)和 -26° (右),实验结果由上面两图所示,蒙特卡罗模拟结果相应地显示在下面两图中。当类弹碎片角度较小时(-6°),符合截面的分布在类弹碎片相对于束流方向的对侧增大,蒙特卡罗模拟的结果再现了这种分布。因此,可以证实小角度类弹碎片与前方向 α 粒子的关联主要来自于原始产物的相继衰变。

但是,当类弹碎片探测角度增大到 -26° 时,实验上得到的分布是在向前方向的一个鼓包,而蒙特卡罗模拟的结果与其相差很大。因此我们可以断定除了相继衰变以外还有别的反应过程导致这种关联。

进一步考察大角度的类弹碎片与前方向 α 粒子的符合时,我们发现这种符合截面的分布近似地与两个单举测量的截面分布之间有如下关系:

$$\left[\frac{d\sigma}{dQ_{p1}dQ_{\alpha}} \right]_{\text{coin}} = K \times \left[\frac{d\sigma}{dQ_{p1}} \right]_{\text{incl}} \times \left[\frac{d\sigma}{dQ_{\alpha}} \right]_{\text{incl}} \quad (3)$$

其中 K 值近似为一常数。

因此可以说这种符合中类弹碎片的出射和 α 粒子的出射不直接相关,我们称这种符合为“非关联”符合^[9,10]。可能的反应过程是: α 粒子在反应初期从弹核中脱离飞向前方向,剩下的 ^{16}O 与靶核进行一种深度的耗散过程,这种耗散过程与 α 粒子无关。因此我们测到的前方向 α 粒子的发射与耗散后出射的类弹碎片不直接相关,这种过程我们称之为“非完全深部非弹性碰撞”^[11-13]。

四、结 论

在 $^{20}\text{Ne} + ^{58}\text{Ni}$ 反应研究中,我们测量了前方向出射的 α 粒子和不同角度的类弹碎片之间的关联。当类弹碎片在小角度时(接近擦边角),主要为准弹性的类弹碎片与 α 粒子的符合,可以解释成为某种被激发的原始产物的相继衰变导致的符合。这种符合的角分布可以由蒙特卡罗模拟再现出来。而类弹碎片在大角度出射时(主要为深度耗散的类弹碎片)它们与前方向的 α 粒子的符合是一种“非关联”的符合。这种符合不能被原始产物的相继衰变所解释。导致这种“非关联”符合的反应过程主要是“非完全深部非弹性碰撞”这种新的重离子核反应过程。

作者感谢荷兰 KVI 提供的实验条件,出色的重离子束和 R. H. Siemssen 教授的支持和有益讨论。

参 考 文 献

- [1] R. Daytas, *J. de Physique*, **C4**(1986), 13.
- [2] C. Gregoire and B. Tamain, *Ann. Phys. Fr.*, **11**(1986), 323.
- [3] A. S. Goldhaber, *Phys. Lett.*, **53B**(1974), 306.
- [4] C. K. Gelbke et al., *Phys. Rev. Lett.*, **70B**(1977), 415.

- [5] S. B. Gazes et al., *Phys. Rev.*, **C38**(1988), 712.
- [6] G. Bizard, et al., *Phys. Lett.*, **172B**(1986), 301.
- [7] J. C. Steckmeyer et al., *Nucl. Phys.*, **A500**(1989), 372.
- [8] E. E. Koldenhof, KVI Annual Report, 1986.
- [9] R. K. Bhowmik et al., *Phys. Rev. Lett.*, **43**(1979), 619.
- [10] J. van Driel et al., *Phys. Lett.*, **98B**(1981), 351.
- [11] Zhu Yongtai et al., *Nucl. Phys.*, **A488**(1988), 409C.
- [12] F. Guzman Martinez and R. Reif, *Nucl. Phys.*, **A436**(1985), 294.
- [13] W. Terlau et al., *Z. Phys.*, **A330**(1988), 303.

Study on the Correlation between Projectile-Like Fragments And α -Particles in $^{20}\text{Ne} (14.7, 19.2\text{ MeV/u}) + ^{58}\text{Ni}$ Reactions

HU XIAOQING ZHU YONGTAI SHEN WENQING LI SONGLIN ZHAN WENLONG
XI HONGFEI ZHU XIANG ZHANG ZHEN

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

ABSTRACT

The coincidence between projectile-like fragments and α -particles emitted from $^{20}\text{Ne} (14.7\text{MeV/u}, 19.2\text{MeV/u}) + ^{58}\text{Ni}$ reactions has been studied. The coincident events were caused by the sequential decay of the excited primary fragments and by the "uncorrelated" coincidence between forward emitted α -particles and projectile-like fragments, formed in a deeply dissipated reaction process, as well. This reaction process means, that the α -particle flied off from the Ne^{20}Ne projectile in the initial stage of the reaction, and then the residual ^{16}O collides with the target nucleus dissipatively. It is called "Incomplete Deep Inelastic Process".