

一种可能的重离子核反应机制—非完全深部非弹性碰撞

诸永泰 沈文庆 胡晓庆 谢元详 冯恩普 李松林

唐文龙 张震 张玉虎 祝翔 王柄

(中国科学院近代物理研究所)

一、深部非弹性碰撞和非完全深部非弹性碰撞

重离子深部非弹性碰撞是七十年代发现的一种介于直接相互作用和形成复合核之间的核反应机制。在核反应过程中弹核—靶核组合系统的各种宏观自由度经历着由强的非平衡逐步过渡到局部平衡的弛豫过程。集体自由度和单核子自由度之间通过摩擦,质量转移等不可逆过程相耦合。大量的相对运动动能转化为产物内部激发能,相对运动角动量也部分地转化为碎片的内禀角动量。但相互作用时间还不足够长,不足以使所有的自由度都达到完全的平衡,并没有形成完全的复合核,而是以两个带有入射道痕迹的产物发射出来。国际上对重系统和重系统的深部非弹性碰撞在实验上和理论上都进行了广泛的研究,对这种反应的特性和规律性都有比较深入的了解。但对轻系统研究得较少,对轻系统是否存在深部非弹性碰撞过程尚无定论。

前几年我们根据轻系统的特点和近物所原有的1.5m重离子回旋加速器的可能性开展了轻系统深部非弹性碰撞的研究。以5—7 MeV/A的 ^{12}C , ^{14}N 和 ^{16}O 离子轰击由 ^{27}Al 至 $^{48,54}\text{Ni}$ 等一系列靶核^[1],对双核系统的动能,电荷和质量的弛豫现象及它们之间的竞争与轰击能量间的关系,估算了相互作用时间大约在 10^{-22} 秒量级,比重系统的短。我们提出对轻系统必须考虑核结构效应的影响,在势能面的计算中应该采用核质量的实验值才能

解释反应产物的元素和同位素分布。在深部非弹碎片与 α -粒子的关联实验中证实了激发的深部非弹产物,无论是类弹还是类靶都可能相继 α -粒子^[2]。除此之外,在对具有 α 结团结构的 ^{16}O 弹核轰击 ^{27}Al 靶的类弹碎片与 α -粒子的关联测量中还在前方向($\sim 5^\circ$)观察到了较强的具有束流速度的关联 α -粒子的发射(图1)。当时我们提出可能存在一种新的反应机制: ^{16}O 弹核在反应的第一阶段先分裂成 α 粒子和 ^{12}C (结合能为7.16 MeV), α -粒子以接近弹核的速度向前冲方向发射,在反应的第二阶段,剩余部分 ^{12}C 再和靶核发生深部非弹性碰撞,经历弛豫过程以后像类弹产物那样再发射出来。我们称这种两阶段反应过程为:“非完全深部非弹性碰撞”。对在几到十几MeV/A能区内的入射

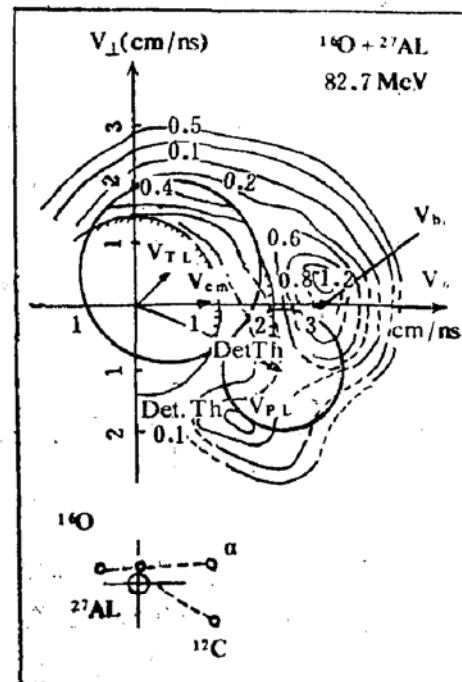


图 1

弹核，尤其是具有 α -结团结构的弹核在与靶核作用的初始阶段的碎裂过程近年来人们已进行了较多的研究，在重离子核反应的反应机制中增加了准弹性碎裂和非完全熔合这两种反应机制，但对于可能介于这两者之间的“非完全深部非弹性碰撞”则几乎一无所知。只是在最近发表的个别文献中有人提到过这种想法^[4]。图2中给出了对有结团结构的弹核随碰撞参数的增大可能出现的熔合、非完全熔合、非完全深部非弹性碰撞和准弹性碎裂等重离子核反应机制的示意图。

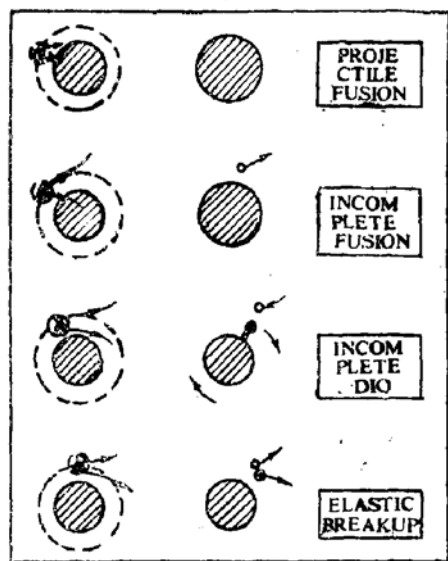
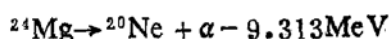
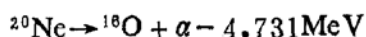
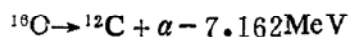
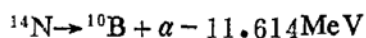
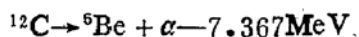


图 2

二、非完全深部非弹性碰撞的实验研究

对这种新的重离子核反应机制的研究是很有意义的。首先要从实验上进一步证实“非完全深部非弹性碰撞”机制的存在，然后再对这种反应机制的规律进行系统性的研究。

弹核碎裂并发射出 α -粒子的几率与 α -粒子在弹核中的结合能有强烈的依赖关系。为比较起见，列出几种常用的轻弹核以作比较：



从以上的比较可以看出非 α -结团结构的 ^{14}N 中的 α -结团的结合能最高，而 ^{20}Ne 中 α -结团结合能最低(4.731MeV)，比 ^{16}O 弹核更为有利。我们对第一轮实验所选取的反应系统是 $^{20}\text{Ne} + ^{27}\text{Al}$ 。当然另一原因是我们已经对 $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 系统的深部非弹性碰撞有了比较系统的研究，可将完全及非完全深部非弹的结果进行直接比较。虽然在5-7MeV/A的 ^{16}O 引起的反应中已经发现有弹核分裂的迹象，我们在 ^{20}Ne 的实验中还是选择了更高一些的轰击能(10.8MeV/A)，以保证更高的弹核裂开几率。第一轮的实验是在荷兰K~1的回旋加速器上进行的^[3]，该所重离子核物理小组的R. H. Siemssen和H. W. Wilschut等人也参加了合作研究。

在传统的粒子-碎片关联实验中，人们往往将碎片探测器固定在稍大于擦边角的地方，而在较大的立体角范围内探测 α -粒子。这对于 α -粒子发射机制的研究是合理的。但在我们的物理图象中感兴趣的 α -粒子的发射角在前冲方向，速度接近于弹核速度。因此，我们采用了新的实验布局(图3)，将放置在靠近束流方向($\sim 5^\circ$)的大立体角光叠层

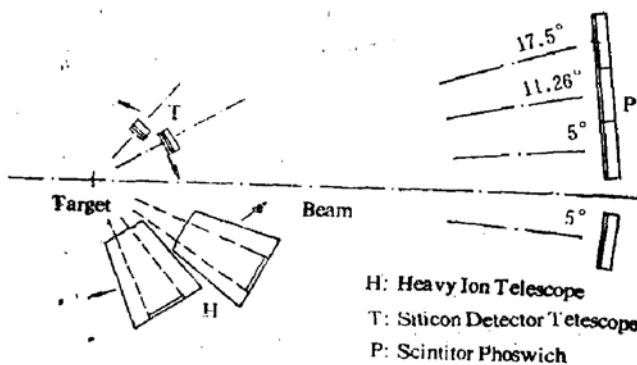


图 3

塑料闪烁体望远镜作为鉴别选择符合事件的 α -粒子探测器(由1mm厚的NE102和15mm的NE115塑料闪烁体组合而成)。为了进行比较，在反应平面内和出平面的一些角度上也安放了作符合测量用的 α -粒子望远镜。为了探测与弹核碎裂 α -粒子关联的轻反应碎片元素分布、能谱、角分布，我们制作了两台以纵向电场电离室为 ΔE 探测器和 $48 \times 7\text{mm}^2$

的位置灵敏半导体探测器为E探测器的位置灵敏重离子望远镜，一次就能复盖较大的角度范围，它们被安装在靶室内的转环上，实验中轻碎片测量的角度区为 $9^\circ \sim 65^\circ$ ，同时也保证了数据有较好的空间连续性和较高的符合计数率。重离子望远镜保证了对反应产物从He到Cl的粒子鉴别性能，其位置分辨约在 0.5° 左右。图4中给出了典型的单举和符合类弹碎片的元素分布。在单举元素分布中主要有两部分：一是在弹核Ne附近及轻于Ne的元素，主要来源于深部非弹性碰撞的产物，其产额随角度的增大而逐渐减少；另一部分是在Si附近或更重的元素，这部分主要来源于熔合和非完全的蒸发余核，其产额随角度的增加而迅速下降，在较大的角区只观察到少数这样的产物，因为只有发射更多的轻粒子才能具有足够的横向动量以达到较大的出射角，其剩余产物当然也就越来越轻了。从单举和符合的元素分布可以看出，第二部分较重的产物在符合元素分布中受到强的抑制，因为具有弹核速度的 α -粒子的选择条件只能给出非完全熔合的蒸发余核部分，而全熔合的蒸发剩余核由于蒸发的 α -粒子的能量较低，而且没有向前方向的、强的选择而受到了抑制。而第一部分轻产物的符合元素分布中由于入射弹核 ^{20}Ne 在发射了向前方向的 α 粒子后再与靶核发生耗散碰撞，所以其主要产物集中分布于比氧轻的元素，当然，由于重离子望远镜对较重的元素有越来越高的探测阈(ΔE 探测器为8cm厚的充70托气压的 $\text{Ar}(90\%) + \text{CH}_4(10\%)$ 的电离室)，实验所得到的元素分布是被畸变了。但如果将不同角区得到的符合元素分布与 $80.6 \text{ MeV } ^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 时的对应的元素分布相比较，我们可以发现它们有很大的相似性(图5)。现在，实验数据的详细分析正在积极进行中。

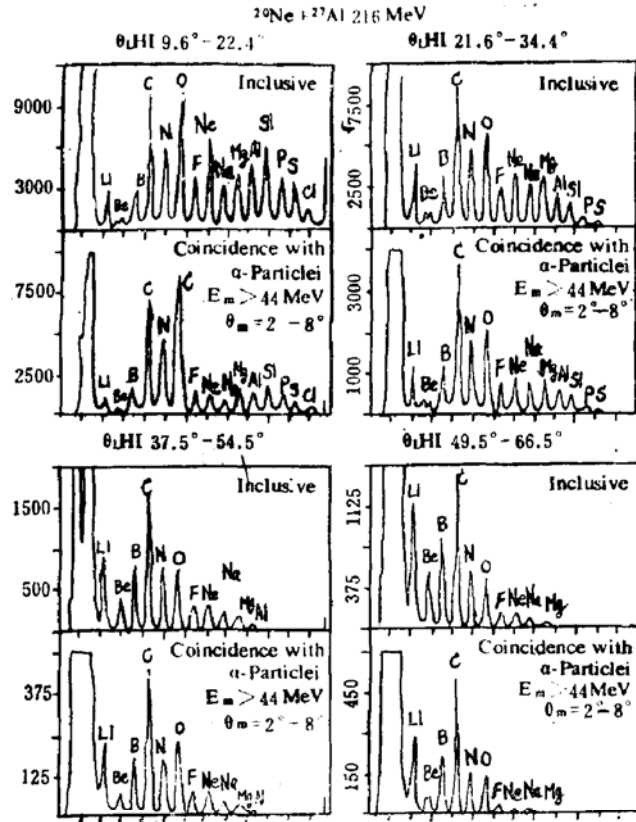


图 4

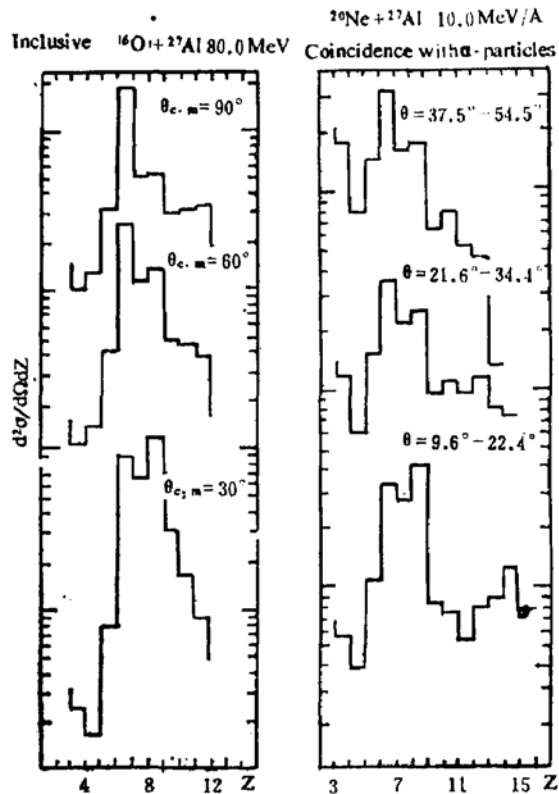


图 5

在轻系统深部非弹性碰撞的研究中，我们在用输运理论解释耗散碰撞的过程中，在解Fock-Planck方程时引入了考虑核

结构效应的驱动势，得到了较好的结果^[6]。在研究非完全深部非弹性碰撞的耗散过程中仍会继续有效，只是入射的不再是确定能量的¹⁶O弹核，而是在动量空间中具有一定几率分布的在反应第一阶段中弹核²⁰Ne碎裂的¹⁶O产物。我们可以用简单的区域平面波玻恩近似来计算这种分布。

三、非完全深部非弹性碰撞研究的进一步设想

为了比较全面地对这种新的反应机制进行研究，我们准备：

1. 在比较宽的能区内(几 MeV/A 到 20 MeV/A)对²⁰Ne + ²⁷Al 系统研究非完全深部非弹与深部非弹之间的竞争及其演化规律。
2. 研究靶核质量数及中子过剩自由度对非完全深部非弹性碰撞的影响。⁵⁸Ni 和 ⁶⁴Ni 是较好的选择。以前的研究表明中子过剩自由度的弛豫是比准弹性相互作用时间长得不太多快过程，而弹核的裂开也是一个快过程。弄清楚这两者之间的关系无疑是有

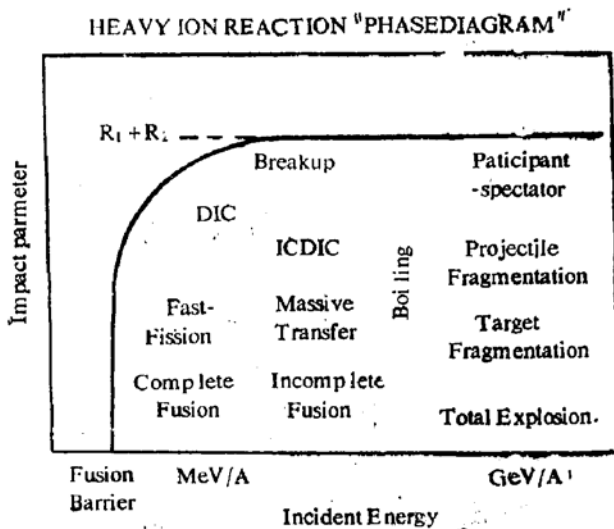


图 6

参 考 文 献

- [1] Zhu Yongtai J. Phys. Soc. JPN 54 (1985)Suppl. I 335
- [2] 范国英等 原子核物理 V. 8 (1986) 102
- [3] 沈文庆等 高能物理与核物理 V. 11 (1987)104

意义的。

3. 角动量是重离子核反应中的重要自由度之一。用 α 粒子、类弹碎片和 γ 射线的多重符合来研究角动量弛豫和非完全深部非弹性碰撞之间的关联是进一步了解非完全深部非弹性碰撞的规律性的重要方面。

4. 为了进一步证实摩擦阻尼在非完全深部非弹性碰撞中的作用，我们还准备对反应产物的极化度进行测量，测量反应产物发射的 γ 射线的圆极化。

对非完全深部非弹性碰撞的研究能深化对重离子反应机制的认识，并逐步向中能重离子核反应的能区过渡。它也将增进我们关于核反应动力学的认识和量子系统从非平衡态向平衡态过渡方面的知识。图 6 中表示了非完全深部非弹性碰撞在重离子核反应相图中的预期的位置，其能量下限应决定于弹核的碎裂，而在高能端则决定于与非弹性碎裂的竞争。这种反应机制仍应属于周边碰撞，图 7 表示哪些入射分波可能贡献于这种新的反应机制，和它与非完全熔合之间的关系。所有这些都待于进一步的实验和理论研究来加以证实。

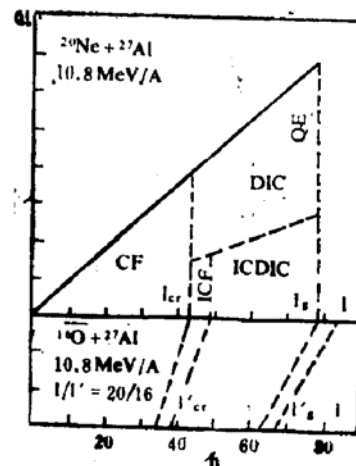


图 7

- [4] F. Guzman Martinez, et. al. Nucl. Phys. A436(1985)294
- [5] Zhu Yongtai et. al. KVI Annual Report 1986
- [6] Shen Wenqing et. al. proc. Beijing, Intern. Symp, on Phys. at TANDDEM, World Scientific (1986) 293