

# 研究非平衡态物理的“实验室”——重离子深部非弹性碰撞<sup>1)</sup>

诸永泰 沈文庆 谢元祥 吴钟立 范国英 冯恩普

(中国科学院近代物理研究所)

各种系统由非平衡态向平衡态的演化是自然界的普遍现象,人们对此现象进行了长期的研究。原子核是自然界中已知的唯一的强相互作用的有限量子多体系统。重离子深部非弹性碰撞研究的主要内容是高速碰撞的弹核和靶核组成的系统由强烈的非平衡态向局部平衡演化的弛豫过程。这是70年代在重离子核反应研究中发现的反应机制,它介于核的直接相互作用和复合核反应之间。反应中两核间有一定的重叠,所形成的双核系统有较长的寿命,如 $10^{-22}$ — $10^{-21}$ s。系统的集体自由度和单粒子自由度之间通过摩擦、电荷转移、质量转移和角动量转移等不可逆过程相耦合,大量的相对运动动能转化为系统的内部激发能,相对运动角动量部分地(与运动形态有关)转化为产物的内禀角动量,但作用时间还不够长,不足以使所有的自由度都达到完全的统计平衡,在复合核形成以前系统就分裂了。在这个弛豫过程中,双核系统以一定的角速度转动,因此用不同出射角进行测量,就可以在弛豫的不同阶段对各有关宏观自由度的变化进行详细研究,就能得到有关核物质的粘滞性、导热性、质量和电荷的扩散以及中子扩散与质子扩散之间的关联等信息。随着相对运动动能的耗散,系统的激发能增加,被激发的能级数剧增。因此不能象直接反应那样,对每个反应道用微扰理论进行微观研究,而是引入统计概念。再加上重离子核反应中相对运动波长短的特点,在重离子深部非弹性碰撞中高激发伴随的统计性和重离子相对运动的半经典性是考虑问题的出发点。

对重离子深部非弹性碰撞的研究,一般侧重于重和中重的系统,对轻系统尚无定论。我们在5—7MeV/u能区内,对<sup>12</sup>C, <sup>14</sup>N和<sup>16</sup>O离

物理

子轰击<sup>27</sup>Al到<sup>58,64</sup>Ni等一系列轻靶时所引起的反应进行了系统的研究。通过对组合系统的能量、电荷和质量的弛豫现象的分析,证实了轻碰撞系统中确实同样存在深部非弹性反应。除这种反应机制的一般规律外,还研究了核结构效应的影响和深部非弹性碰撞与 $\alpha$ 粒子发射的关联。其他实验室尚无类似的工作。因此,“轻系统重离子深部非弹性碰撞研究”获得了1986年中国科学院科学技术进步二等奖和1987年国家自然科学成果三等奖。有关本课题的研究成果已在国内外学术刊物上发表了20余篇学术论文,在1984INS-RIKEN国际重离子讨论会上作了特邀报告。有关专家、学者评审本成果时认为,这属于一种开创性的研究,选题目的明确,物理思想清晰,理论和实验结合,立足国内较差的实验条件,通过细致的系统研究,获得了一些前人没有得到的结果,是一项具有国际学术交流意义的成果。国际同行们指出,在中国可能的条件下,对深部非弹性碰撞进行这样系统细致的研究是很有意义的,充分反映了轻系统的特点,对全面认识深部非弹过程是有贡献的。

我们对11种不同的弹核——靶核系统用不同的实验技术在重离子回旋加速器上进行了实验测量。我们发展了位置灵敏电离室产物鉴别系统和飞行时间测量技术,同时在对应于非平衡态过程不同阶段的各个出射角测量了反应产物的元素、同位素和能量的分布,发展了数据处理和分析的计算机软件系统。经过大量的数据处理和分析,得到的主要结果如下:

(1) 实验测得的反应产物有两种组分:一种是偏转角度小、交换核子少、能量耗散小、角

1) 本文介绍的科研成果获国家自然科学成果三等奖。

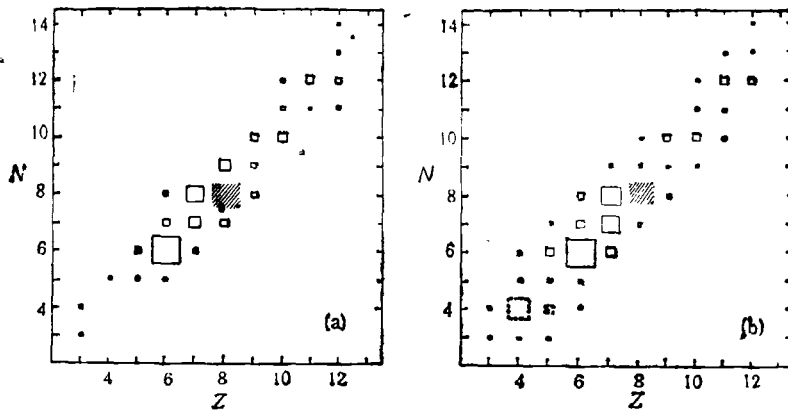


图1 80.6MeV<sup>16</sup>O + <sup>27</sup>Al 反应中在 14° 处测得的反应产物同位素产额分布 (a), 与以势能面为基础的理论预言值 (b), 比较(每个方块的面积正比于该同位素的产额)

分布斜率较大、作用时间短的准弹性组分;另一种是偏转角增大、交换粒子增多、能量耗散增加(逐渐达到局部平衡的全弛豫动能)的深部非弹性组分,其角分布斜率较小,作用时间较长(10<sup>-22</sup>s)。在单核子转移反应道的产物能谱中,观察到了由耗散初始阶段的分立能级激发逐渐向深部非弹性反应的连续能谱的演化过程。根据产物的能谱和角分布,我们首次在实验上区分了这两种反应机制的贡献,并估算了轻系统深部非弹性碰撞截面,发现它与轰击能量有较强的依赖关系,随轰击能量的升高而增加。

(2) 在理论分析中,用输运理论较好地解释了能量弛豫、产物角分布、核子交换及质量弛豫。随着相互作用时间的增长和动能耗散的增加,交换核子数逐渐增加,产物的质量分布的重心逐渐向最低势能点漂移,分布宽度也逐渐增加并趋近于一个饱和值。产物分布只能用以实验的核质量值计算的势能而来解释,还未见到其他实验室有这样系统的结果。图1是实验测得的 80.6MeV<sup>16</sup>O + <sup>27</sup>Al 反应中的产物分布和理论预言的比较。轰击离子的核结构对反应产物的分布有较强烈的影响,奇-奇核 <sup>14</sup>N 比具有

$\alpha$  结团结构的 <sup>12</sup>C 和 <sup>16</sup>O 作弹核时的影响要小些。

(3) 在 <sup>14</sup>N 离子轰击镍同位素靶核 <sup>58</sup>Ni 和 <sup>60</sup>Ni 的实验中,深部非弹性反应产物元素的同位素分布在擦边角附近(相应于短的相互作用时间)就达到了平衡。同位素分布的 N/Z 的平均值在 <sup>60</sup>Ni 靶时的值大于 <sup>58</sup>Ni 靶时的值,并各自接近于反应系统的 N/Z 值。这些结果与从重及中重系统得到的结论是一致的。但在这以前,对轻系统尚未在实验上得到明确的证实。

(4) 在深部非弹性反应碎片与  $\alpha$  粒子符合的关联实验中,证实了激发的深部非弹性反应产物,无论是类弹还是类靶产物,都可能相继发射  $\alpha$  粒子,还观察到了类弹碎片对类靶产物发射的  $\alpha$  粒子的“阴影效应”。在具有  $\alpha$  结团结构的 <sup>16</sup>O 轰击 <sup>27</sup>Al 靶的实验中,除观察到类弹和类靶产物发射的  $\alpha$  粒子外,还观察到了反应初期弹核碎裂发射的  $\alpha$  粒子,而其剩余部分 (<sup>12</sup>C) 再与靶核发生耗散碰撞,在此基础上我们提出了一种可称为“非完全深部非弹性碰撞”的重离子反应机制。根据这种现象,我们提出了新的研究课题,正在进一步研究。

(上接第 714 页)

[3] S. Suckewer et al., *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985), 1753.  
 [4] C. Chenais-Popovis et al., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 2161.  
 [5] T. N. Lee, *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 1185.  
 [6] 董骥,李家明,物理学报, **35**(1986), 1634.  
 [7] 鲍敏琪,全晓明,李家明,物理学报, **38**(1989), 1759.

[8] 赵中新,李家明,物理学报, **34**(1985), 1496.  
 [9] 侯氢,李家明,物理学报, **37**(1988), 1972.  
 [10] 田伯刚,李家明,物理学报, **35**(1986), 203.  
 [11] 刘磊,全晓明,李家明,物理学报, **37**(1988), 1800.  
 [12] Zunqi Lin et al., *Opt. Comm.*, **65**(1988), 445.  
 [13] 谭维汉等,物理学报, **37**(1988), 989.  
 [14] Zunqi Lin et al., *Opt. Comm.*, **68**(1988), 418.  
 [15] 林尊琪等,物理学报, **37**(1988), 20.