

## HI-13 串列加速器上的核反应研究及进展

张焕乔 程业浩 赵 葵 袁 坚 陈 泉

(中国原子能科学研究院核物理所 北京 102413)

**摘 要** 本文简介了 HI-13 串列加速器上开展的核反应及其进展情况,重离子垒下熔合反应、重离子准弹性碰撞和轻粒子核反应.

**关键词** 重离子碰撞, 垒下熔合反应, 转换反应, 拉长态.

### 1 重离子垒下熔合反应研究

在低能重离子核反应研究中,垒下熔合反应仍是一个热门课题,因为至今对垒下熔合增强的机制尚无定论,而且这种涉及入射道相对运动与核内其它自由度耦合的量子隧道过程,有着特殊的科学意义.

前期研究主要集中于测量熔合激发函数、揭示出垒下熔合截面高出简单一维势垒穿透计算值 2~3 个量级和观察到增强的同位素效应. 随之,激起人们广泛深入研究兴趣的是找到了若干增强的物理因素,如核的静态形变、核表面的零点振动、准弹耦合和熔合的颈生成等,提出了多种垒下熔合模型,大体都能解释实验. 为了严格检验垒下熔合理论,我们提出以裂变碎片角分布为探针,抽取熔合复合核的均方自旋  $\langle I^2 \rangle$  值,与激发函数重现得到的  $\langle I^2 \rangle$  值作比较. 1987 年我院 HI-13 串列式静电加速器提供束流,此时,开始了进行近垒和垒下重离子熔合裂变碎片角分布的实验研究. 整个工作可分为两个阶段.

第一阶段是近垒和垒下重离子熔合裂变的截面和碎片角分布的单举测量. 采用云母径迹探测器记录裂变碎片,探测角区  $77^\circ \leq \theta_{\text{Lab}} \leq 172^\circ$ , 角分辨  $1.4^\circ$ . 完成了  $^{12}\text{C} + ^{237}\text{Np}$ 、 $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 、 $^{238}\text{U}$  和  $^{19}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}$  五个反应系统的测量. 由实验测定的裂变碎片角分布且相对 Rutherford 截面,定出总裂变截面. 从而得到相应的裂变激发函数和碎片角分布的实验数据. 利用耦合道理论很好地重现了裂变激发函数,

抽取了复合核的自旋分布及均方自旋值. 基于裂变角分布的鞍点过渡态理论,碎片角异性  $W(0^\circ)/W(90^\circ)$  与均方自旋  $\langle I^2 \rangle$  的近似关系为:

$$W(0^\circ)/W(90^\circ) \approx 1 + \langle I^2 \rangle / (4K^2)$$

通过转动液滴模型或系统学已知  $K^2$  值和利用激发函数重现抽取的  $\langle I^2 \rangle$  值,可以计算碎片角异性,与实验值进行比较. 获得的主要实验结果有:(1)在  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$  和  $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$  等系统中<sup>[1-2]</sup>,第一次观察到裂变碎片角异性随质心能量变化在垒下 5MeV 附近出现异常峰;(2)在所有五个系统中观察到裂变碎片角异性实验值都大于常规理论值,表明这种异常有普遍性<sup>[3]</sup>;(3) $^{19}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$  系统的结果证实 Dasso 等人用耦合道理论所作的预言,在远离垒下能区熔合复合核的均方自旋  $\langle I^2 \rangle$  值近乎常数<sup>[4]</sup>.

应当指出,在现有裂变角分布的统计理论中都假定熔合形成复合核. 实际上,单举测量的裂变事件有可能包含全熔合裂变和转移跟随裂变两种成分. 为了肯定碎片角异性异常,从实验上排除转移跟随裂变至关重要. 为此,开展了第二阶段的测量. 利用两块大面积二维位置灵敏气体雪崩计数器测量裂变碎片折叠角分布,由此实现全熔合裂变与转移跟随裂变的区分,从而得到全熔合裂变的激发函数和碎片角分布. 实验中,两块雪崩计数器的覆盖角分别为  $10^\circ \leq \theta_{\text{Lab}} \leq 90^\circ$  和  $-160^\circ \leq \theta_{\text{Lab}} \leq -75^\circ$ . 现已完成了  $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 、 $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$  和  $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$  三个系统<sup>[5]</sup>的测量. 用耦合道 CCDEF 程序很好重现全熔合裂变激发函数,但现有的裂变统计理论(无论鞍点

或断点模型)都不能解释裂变角分布的实验数据. 作为一个例子, 图 1 绘出了 $^{16}\text{O}+^{232}\text{Th}$ 的全融合裂变的碎片角异性随质心能量的变化. 图中的实心符号分别表示全融合裂变与单举的实验数据; 实线和虚线分别为不考虑和考虑断前中子发射修正的鞍点模型的计算结果. 从图上可以清楚看出, 全融合裂变的碎片角异性比起单举测量值有所减小( $\leq 10\%$ ), 但实验值大于理论值的异常仍然存在. 全融合裂变碎片角异性随质心能量变化出现的异常峰虽有所减弱, 但结构并未完全消失(尤其是 $^{19}\text{F}+^{232}\text{Th}$ 系统). 至今, 理论上不能同时自洽地解释全融合裂变的激发函数和碎片角分布这一矛盾, 尚有待实验与理论作进一步的研究.

大立体角(9.92msr)、大色散( $D=11.38\text{cm}/1\% \Delta P/P$ )、较强运动学效应修正能力( $K\sim 0.3$ )及对某些核反应可在零度角进行测量等优良性能, 已成为轻、重离子核反应乃至原子物理基础研究以及一些应用研究的有力工具<sup>[6]</sup>. 与谱仪配套的几个焦面探测器已建立, 用于此课题研究的轻重离子和重离子两个半焦面探测器都有较好的性能, 其中重离子焦面探测器具有好于1mm的本征位置分辨和 $0.8^\circ$ 的角度分辨, 其能量分辨对于 $\Delta E$ ,  $E_R$ 和 $E_T$ 分别达到3.0%、1.4%和0.9%. 已达到国际同类探测器水平, 其粒子分辨本领非常好, 图 2 给出了测量 $^{156}\text{Gd}$ ( $^{18}\text{O}, ^{15}\text{O}$ )时的典型 $\Delta E-E_T$ 粒子分辨二维谱.

此课题是国家自然科学基金支持的项目, 包括以下三个子课题.

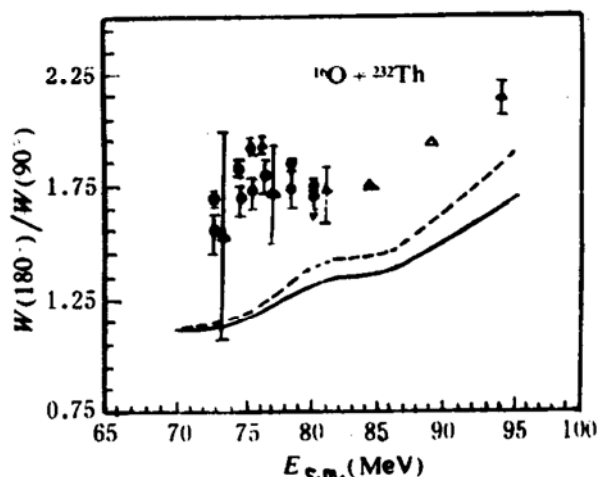


图 1  $^{16}\text{O}+^{232}\text{Th}$  的全融合裂变的碎片角异性随质心能量的变化.

- 本工作(FP)
- Zhang et al. (1990)
- △ Back et al. (1985)
- ▲ Back et al. (1990)
- ▽ Vandenbosch et al. (1986)

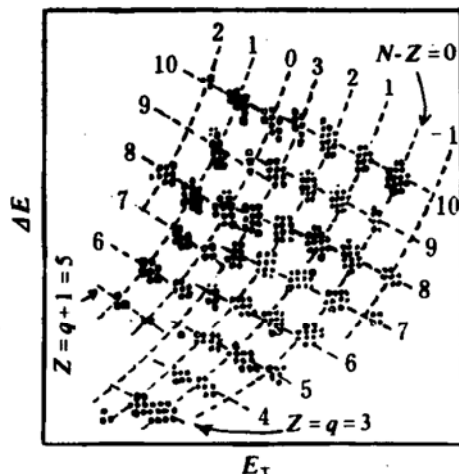


图 2  $^{156}\text{Gd}(^{18}\text{O}, ^{15}\text{O})$  反应的典型  $\Delta E-E_T$  二维谱.  $96\text{MeV}, \theta_c=59^\circ$

## 2 重离子准弹性碰撞

此课题是在大型精密的 Q3D 磁谱仪上进行的, Q3D 谱仪具有高分辨率( $\Delta E/E \sim 2 \times 10^{-4}$ )、

### 2.1 库仑耦合强弱和核激发与库仑激发相干的研究

国际上的准弹碰撞研究已很多, 经分析可归纳为两类: (1) 系统属于弱库仑耦合, 但其  $2^+$  态的非弹性散射角分布上出现核激发与库仑激发相干的图形; (2) 强库仑耦合没有相干的实验. 人们往往认为库仑耦合的强弱和相干与否是有联系的, 我们认为这是两个独立的现象, 并

从理论分析预言库仑耦合的强弱正比于  $B(E2)/Z^2$ , 而相干的大小取决于因子  $1/Z_p Z_T$ . 为此, 我们设计了两个系统, 即 63.2 MeV 的  $^{12}\text{C} + ^{152}\text{Sm}$  和 90.8 MeV 的  $^{16}\text{O} + ^{148}\text{Nd}$ . 通过弹性散射及第一个  $2^+$  态的角分布测量, 第一次在  $^{12}\text{C} + ^{152}\text{Sm}$  这样强库仑耦合系统中看到明显的核激发与库仑激发相干的图形<sup>[7]</sup>, 证实了我们的论断是正确的. 考虑了 reorientation 贡献的 ECIS 和 PTOLMY 耦合道计算与实验很好的拟合. 从实验结果中提取了相关的  $B(E2)$  值和四极矩  $Q_0$  值.

为进一步研究上述现象对能量的依赖关系, 测量了 57 MeV 时  $^{12}\text{C} + ^{152}\text{Sm}$  的弹性和非弹性散射角分布<sup>[8]</sup>. 可以看到当能量下降时, 库仑耦合增强, 但相干依然存在, 只是不象 63.2 MeV 时那么明显了.

## 2.2 重离子碰撞中的共振结构研究

30 多年来, 重离子碰撞中的共振现象被广泛地研究了. 近年来,  $^{12}\text{C}$  和  $^{16}\text{O}$  与一些 sd 壳的偶核和某些奇核碰撞时, 在弹性和非弹性散射的激发函数上观测到了后角增强的共振现象. 对奇核系统, 这种共振在  $180^\circ$  附近比较明显. 由于这种现象不能用已有的理论解释才更引起研究的兴趣. 我们用  $^{31}\text{P}$  和  $^{35}\text{Cl}$  做为入射离子轰击  $^{12}\text{C}$  靶, 在零度和前角区测量了激发函数, 以便确定在  $^{12}\text{C} + ^{31}\text{P}$  和  $^{12}\text{C} + ^{35}\text{Cl}$  系统中是否有后角增强的共振存在.

在  $\theta_L = 11^\circ, 24^\circ, 26^\circ, 30^\circ, 41^\circ$ , 能区 40 ~ 90 MeV 以及在  $\theta_L = 0^\circ, 55 \sim 74$  MeV 测量了  $^{31}\text{P} + ^{12}\text{C}$  弹性散射  $^{12}\text{C}$  的激发函数. 在  $\theta_L = 11^\circ, 30^\circ, 40^\circ$  和  $56^\circ$ , 能区 55 ~ 74 MeV 和  $\theta_L = 0^\circ$ , 能区 80 ~ 97 MeV 测量了  $^{35}\text{Cl} + ^{12}\text{C}$  的弹性散射  $^{12}\text{C}$  的激发函数. 在所测量的能区内未观测到后角增强的共振, 但对于  $^{31}\text{P} + ^{12}\text{C}$  系统在库仑位垒 (60 MeV) 以下观测到了一些共振. 对于  $^{35}\text{Cl} + ^{12}\text{C}$  系统共振则不明显. 详细的分析正在进行之中.

## 2.3 转移反应和远离稳定线核素质量测量的研究

### 2.3.1 单核子转移反应

作为在 Q3D 磁谱仪上进行的第一个重离子转移反应的实验, 在 88 MeV 测量了  $^{114}\text{Cd}$  和

$^{116}\text{Sn}(^{16}\text{O}, ^{17}\text{O}), (^{16}\text{O}, ^{15}\text{N})$  单核子转移反应与弹性散射和非弹性散射角分布. 为进一步进行多核子转移反应实验摸索条件, 积累经验, 已用半经典模型分析了弹性散射结果, DWBA 和 CCBA 分析正在进行之中.

### 2.3.2 用双质子转移反应测量 $^{158}\text{Sm}$ 的质量

借助于  $(^{18}\text{O}, ^{20}\text{Ne})$  双质子转移核反应测量远离稳定线核素  $^{158}\text{Sm}$  的质量. 实验也是在 Q3D 磁谱仪上进行的. 使用的靶是丰度为 98.6% 的  $^{160}\text{Gd}$ , 同时选用  $^{156}\text{Gd}$  靶作为能量刻度.  $^{18}\text{O}$  束是英国 Daresburg 实验室提供的, 平均流强达 ~ 400 nA. 实验表明, 反应产额强烈地依赖于入射  $^{18}\text{O}$  的能量, 在实验所确定的反应擦边角  $\theta_L = 50^\circ$  处, 在 98 MeV 时测到了  $^{160}\text{Gd}(^{18}\text{O}, ^{20}\text{Ne})$  反应的基态, 通过  $^{156}\text{Gd}$  靶的同样反应以及  $^{18}\text{O}$  弹性散射在焦面上的扫描进行了焦面刻度和能量刻度. 在进行靶厚修正后, 得到了该反应  $Q$  值的初步结果为  $3.897 \pm 0.240$  MeV. 由此推算出  $^{158}\text{Sm}$  的质量亏损为  $-65.585 \pm 0.240$  MeV.

实验还对进行  $^{160}\text{Gd}(^{18}\text{O}, ^{15}\text{O})$  和  $(^{18}\text{O}, ^{17}\text{F})$  等核反应的可行性做了研究.

## 3 轻粒子核反应研究

### 3.1 $^{56,57}\text{Fe}, ^{58,59}\text{Co}(\alpha, d)^{58,59}\text{Co}, ^{61}\text{Ni}$ 反应及其拉长态探索

拉长态是纯壳模型组态, 对研究多粒子壳模型组态空间和确定相应的剩余相互作用具有重要意义. 实验上观测到的拉长态并不多, 能否在  $f-p$  壳核上寻找至今尚未确认的  $(1g_{9/2}, 1g_{9/2})$  拉长组态是本工作的主要目的.

由串列加速器提供 35 MeV 的  $\alpha$  束流, 测量了  $^{56,57}\text{Fe}, ^{58,59}\text{Co}(\alpha, d)^{58,59}\text{Co}, ^{61}\text{Ni}$  反应能谱和角分布. 出射粒子首先由  $\Delta E-E$  望远镜完成全能谱测量, 找出强激发能级, 然后利用 Q3D 磁谱仪及轻粒子焦面探测器系统, 分段精细测量粒子鉴别后的单一氘谱. 图 3 给出了  $^{56}\text{Fe}(\alpha, d)^{58}\text{Co}$  反应九个强激发能级的实验角分布和微观扭曲波玻恩近似计算的曲线. 计算中假定转移质子-中子对处于  $(1g_{9/2}, 1g_{9/2})$  拉长组态, 纯  $L=8$  的计算

角分布能与 6.79MeV 能级实验角分布拟合得很好, 4.65 和 3.75MeV 能级的实验角分布也能由  $(1f_{5/2}, 1f_{5/2})$  和  $(1f_{7/2}, 1g_{9/2})$  拉长组态相应的纯  $L=6, L=7$  的计算角分布再现. 值得注意的是 6.4MeV 能级呈现明显的截面增强, 却有很不同的角分布形状. 在微观 DWBA 分析中, 只有  $L=0, J^\pi=1^+$  的角分布能与实验角分布拟合, 它相应于 p-n 对分别处于  $2p_{3/2}$  和  $2p_{1/2}$  组态. 对于这种组态截面增强现象在轻核拉长态研究中还未观测过, 6.4MeV 能级的反常行为也可能是至今发表的文献中不能确定其  $J^\pi$  的原因.

$^{57}\text{Fe}, ^{59}\text{Co}(\alpha, d)^{59}\text{Co}, ^{61}\text{Ni}$  反应实验结果与偶靶核不同, 没有观测到强激发能级, 这意味着组态强度分配在几个可能的能态上.

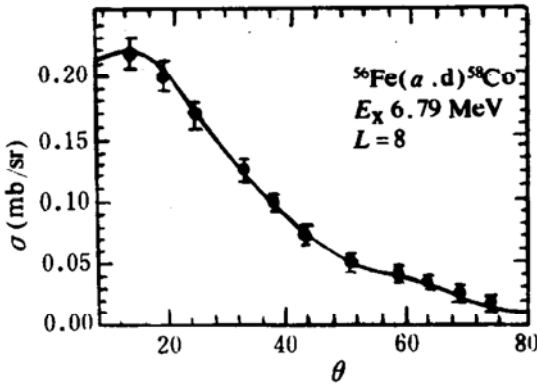


图 3  $^{56}\text{Fe}(\alpha, d)^{58}\text{Co}$  反应到 6.79MeV 能级的角分布. 入射能量 35MeV. 实线为 DWBA 计算结果.

### 3.2 $^{89}\text{Y}(\alpha, \alpha')^{89}\text{Y}^*$ 非弹性散射核芯激发贡献

核芯激发是壳模型描述中重要的一种激发模式, 能够从实验上直接检验核芯激发模式是非常有兴趣的. 利用全微观 DWBA 分析  $^{89}\text{Y}(\alpha, p)^{92}\text{Zr}^{(2)}$  和  $(p, \alpha)$  反应数据揭示: 考虑核芯激发的贡献确实改善了理论与实验数据的拟合, 人们期望这一结果也应该在其它核反应中得到检验. 本工作的目的是在  $^{89}\text{Y}(\alpha, \alpha')^{89}\text{Y}$  非弹性散射中继续寻找核芯激发模式的重要贡献, 在  $f-g$  壳中  $^{89}\text{Y}$  核是一个很好地被壳模型描述的核, 因而是研究核芯激发贡献的理想候选者.

利用 HI-13 串列加速器提供的 30.135MeV

的  $\alpha$  束流在  $\theta_L=10^\circ\sim 100^\circ$  之间每隔  $2.5^\circ$  测量了  $^{89}\text{Y}$  弹性散射和非弹性散射角分布. 利用自动寻找光学模型参数程序, 得到了最佳拟合弹性散射数据的光学模型参数集, 并且应用于  $^{89}\text{Y}(\alpha, \alpha')^{89}\text{Y}$  非弹性散射数据的全微观 DWBA 分析中. 考虑  $^{88}\text{Sr}$  为核芯的核波函数以及其核芯激发贡献的全微观 DWBA 计算的角分布能很好地与实验角分布拟合, 这意味着基于 Vergadas, T. T. S. Kuo 和 Gugers 提供的  $^{89}\text{Y}$  低层态壳模型波函数是合理的和核芯激发波函数在非弹性散射中是重要的.

### 3.3 $^{27}\text{Al}, ^{42}\text{Ca}(p, \alpha)$ 反应及三核子转移反应理论的绝对值问题

三核子转移反应理论低估实验截面达 2 至 3 个数量级是长期困惑不解的老大难问题. 近些年来  $(p, \alpha)$  和  $(\alpha, p)$  转移反应研究表明,  $\alpha$  光学势的选择起很大的作用. 1987 年 Abele 等人在分析  $\alpha$  弹性散射数据时, 着重引入双折叠势作为势的实部, 而虚部表示为多项 Fourier-Bessel 函数的展开. 1988 年 Walz 基于双折叠势对  $(p, \alpha)$  和  $(\alpha, p)$  反应的分析同样取得很大进展. 这样给出的截面归一化因子在 1.2~7.36 之间. 为了进一步弄清绝对值问题, 利用串列加速器提供的  $E_p=17.5\text{MeV}$  和  $E_p=20\text{MeV}$  质子束, 测量了  $^{27}\text{Al}(p, \alpha)^{24}\text{Mg}$  和  $^{42}\text{Ca}(p, \alpha)^{39}\text{K}$  反应微分截面. 理论分析方面, 在双折叠势的计算中引入以现实 G 矩阵为基础的密度相关的有效核相互作用力, 不仅计算出光学势实部, 而且还引用 Yamaguchi 的理论算出了光学势虚部, 使双折叠势的应用得到完善. 计算结果表明, 三核子转移反应形状因子在核边缘部分对反应振幅的积分起重要作用, 对应这部分的光学势越浅则扭曲波的振幅越大, 给出较大的积分值. 这就是浅势比深势给出的计算值高 1~2 个数量级而双折叠势又能与浅势给出的计算值相近的原因.

参加本工作的还有许谨诚、刘祖华、路秀琴、李志常、李淑媛、郭继宇、阮明、徐侃、林承键、陆道如、黄小临、譙愚、刘晓东、马勇、钱兴、李辉、吕骏、陈韶林、李庆利、李民、宋小斌、卢明、章庆华、姜承烈和孙祖训等人.

## 参 考 文 献

- 1 Zhang H Q, et al. Phys. Lett., 1989, B218 : 133
- 2 Zhang H Q, et al. Phys. Rev., 1990, C42 : 1086
- 3 Zhang H Q, et al. Nucl. Phys., 1990, A512 : 531;  
Phys. Rev., 1990, C42 : 2752
- 4 Zhang H Q, et al. Nucl. Phys., 1992, A538 : 229
- 5 Zhang H Q, et al. Phys. Rev., 1994, C49
- 6 Li Zhichang, et al. Nucl. Inst. and Meth., 1993, A336 : 150
- 7 Zhao Kui, et al. Chinese Jour. of Nucl. Phys., 1991, 13 : 197
- 8 Lu Xiuqin, et al. Chinese Jour. of Nucl. Phys., 1993,  
15 : 107
- 9 Yuan Jian, et al. Chinese Jour. of Nucl. Phys., 1993,  
15(3) : 215
- 10 Yuan Jian, et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1989,  
13 : 1038

## Recent Studies and Achievements on Nuclear Reaction at HI-13 Tandem

Zhang Huanqiao Cheng Yehao Zhao Kui Yuan Jian Cheng Quan  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

**Abstract** The experimental studies and achievements recently made at the HI-13 tandem accelerator are reviewed, including many subjects of three research fields: sub-barrier fusion reaction, heavy ion quasi-elastic collision and light particle nuclear reaction.

**Key Words** heavy ion collision, sub-barrier fusion, transfer reaction, stretch state.

(上接 41 页)

变化. 我们的重要贡献是发现 Y123 超导跃迁时金属氢化物(NNSF 青年基金)和生物大分子(CNNC 基金)研究正在进行中. Cu-O 链由二维变为一维结构, 解释了电荷转移.

## Progress and Present Status of Nuclear Analysis in CIAENAL

Zhu Shengyun  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

**Abstract** The progress and present status of nuclear analysis in CIAENAL are briefly described. The emphasis is given to the activation analysis, accelerator mass spectroscopy, nuclear solid state track detector, ion beam analysis and nuclear effect study.

**Key Words** nuclear analysis, accelerator mass spectroscopy, activation analysis.