

# 25MeV/u ${}^6\text{He}$ 在 ${}^9\text{Be}$ 靶上的弹性转移反应研究\*

庞丹阳<sup>1</sup> 叶沿林<sup>1;1)</sup> 江栋兴<sup>1</sup> 郑涛<sup>1</sup> 李智焕<sup>1</sup> 李湘庆<sup>1</sup> 葛愉成<sup>1</sup> 吴翠娥<sup>1</sup>  
陈志强<sup>1</sup> 华辉<sup>1</sup> 张高龙<sup>1</sup> 王佳<sup>1</sup> 楼建玲<sup>1</sup> 卢飞<sup>1</sup> 范凤英<sup>1</sup> A. Ozawa<sup>2</sup>  
Y. Yamaguchi<sup>2</sup> R. Kanungo<sup>2</sup> D. Fang<sup>2</sup> I. Tanihata<sup>2</sup>

1 (北京大学物理学院技术物理系和教育部重离子物理重点实验室 北京 100871)

2 (RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan)

**摘要** 报告了25MeV/u  ${}^6\text{He}$  在  ${}^9\text{Be}$  靶上的弹性散射和弹性转移的实验结果. 用光学模型和一阶DWBA的方法计算了弹性散射和 ${}^3\text{He}$ 集团转移的截面, 计算结果和实验测量基本一致. 计算表明 ${}^3\text{He}$ 在 ${}^9\text{Be}$ 中的谱幅度应该明显大于壳模型的理论计算值0.70.

**关键词** DWBA 弹性散射 转移反应 破裂反应 集团结构 谱幅度

## 1 引言

轻粒子中的集团结构一直是原子核物理研究中的重要内容, 近年放射性核束物理的研究表明在丰中子核中集团结构有加强的趋势<sup>[1]</sup>. 谱幅度是核子集团在原子核中的重要物理量, 而转移反应是抽取谱幅度的有效的实验手段<sup>[2]</sup>. 对与  $A+B(b+x) \rightarrow C(A+x)+b$  类型的转移过程来说, 它的概率依赖于B分解为  $(b+x)$  以及C分解为  $(A+x)$  的概率, 因此通常的转移反应与B和C两个核中集团x的谱幅度的乘积有关. 而对于弹性转移过程来说, 如同下面第三节将要介绍的,  $A=b$  是相同的核, 因此B和C相同, 在这种情况下转移反应的截面只与一个核的谱幅度相关. 此外, 弹性转移反应不仅可以给出绝对截面的值, 而且可以给出转移反应与弹性散射两个过程的相干信息, 因此对于确定的反应道而言, 它们相对于单纯的转移反应更有利于提取核的谱信息<sup>[3]</sup>.

入射粒子能量的选择对弹性转移反应很有影响: 能量比较低的情况下(小于15MeV/u)势散射在所有的角度范围内的贡献都相当大, 将与转移过程产生较强的干涉; 而在能量比较高的情况下(质心系的每核子能量达到或者超过费米能), 转移过程的概率则大大

降低. 因此若要研究弹性转移过程, 入射粒子的能量在20—30MeV/u的情况下是比较合适的<sup>[4]</sup>. 我们实验中 ${}^6\text{He}$ 粒子的能量正好在这个范围, 为研究 ${}^6\text{He}$ 与 ${}^9\text{Be}$ 这个系统的弹性转移反应提供了很好的条件.

人们对 ${}^9\text{Be}$ 的集团结构已经做了相当多的研究, 通常认为它具有 $\alpha+n+\alpha$ 的结构<sup>[5-9]</sup>, 而对其中 ${}^3\text{He}$ 集团结构的研究则比较少, Comer等人研究了在 ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ 和 ${}^{12}\text{C}$ 靶上的( ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^6\text{He}$ )反应<sup>[10]</sup>, 认为这些反应中发生了 ${}^3\text{He}$ 集团的直接转移, 而D. Kurath和D.J. Millener早在1975年就在 $SU(3)$ 表象中计算了 ${}^3\text{He}$ 在 ${}^9\text{Be}$ 里的谱因子<sup>[11]</sup>. 这些工作为我们提供了适当的参照.

## 2 实验介绍

本实验是在日本理化所(RIKEN)完成的, 弹性转移是实验观察到的出射道之一. 实验的一般情况(如束流情况及探测器布局)已经在文献[12]中详细介绍, 这里只是对 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^9\text{Be}$ 的弹性散射和转移过程相关的实验信息做必要的说明. 文献[12]中的图5给出了4号探测器望远镜(望远镜的几何中心在实验室系中的角度为 $15^\circ$ )  $\Delta E-E$ 信号的粒子分辨图. 而对于弹性转移

2005-04-28 收稿

\*国家重点基础研究发展规划项目(G2000077403)和国家自然科学基金(10221003)资助

1) E-mail: yeyl@pku.edu.cn

过程, 出射的 $^9\text{Be}$ 粒子大部分被阻止在望远镜的前两片穿透型硅探测器(PSD和SSD)上, 因此我们需要从前两片硅探测器的 $\Delta E$ - $\Delta E$ 谱中提取出射的 $^9\text{Be}$ 粒子的数目. 作为例子, 我们可看Be同位素在4号望远镜上的粒子分辨以及能谱(图1和图2). 由图2可知,  $^9\text{Be}$ 粒子的能量集中在比较高的部分, 说明它们对应于直接的弹性反冲或弹性转移反应.

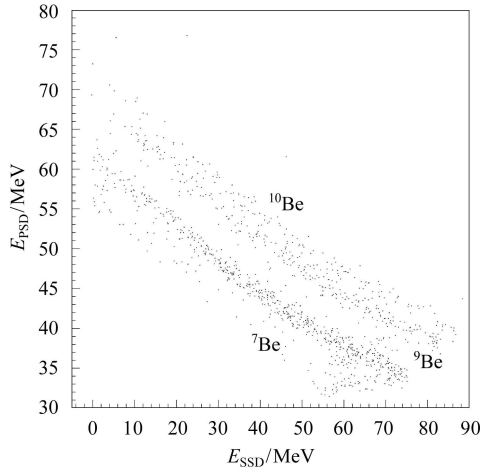


图1 4号探测器的Be同位素的粒子分辨

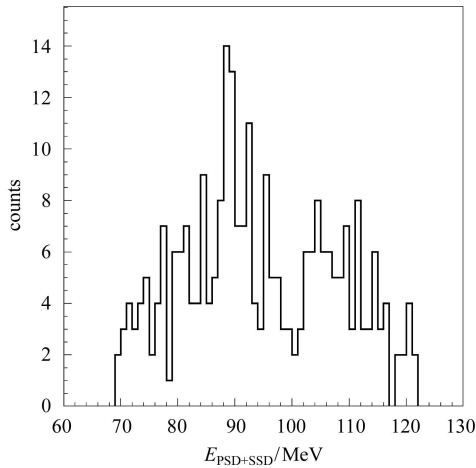


图2 4号探测器中 $^9\text{Be}$ 的能谱

如同文献[11]中一样, 我们把3号(望远镜的几何中心在实验室系中的角度为 $20^\circ$ )、4号探测器望远镜在 $\theta$ 方向上分为3个部分, 而把5号探测器望远镜(几何中心在实验室系中的角度为 $30^\circ$ )作为一个整体. 入射粒子数的统计以及立体角的模拟方法也与文献[12]中完全相同, 得到的 $^9\text{Be}$ 的截面以及弹性散射截面如图3中的方块图标所示, 图中的误差棒表示的只是统计误差. 另外出射粒子和入射粒子数目以及立体角的不确定性所带来的系统误差大约为15%. 需要说明的是, 由于反应动力学和探测器的限制,  $^9\text{Be}$ 是在前角度单举测量的, 作图时我们假定它对应于后角度的

$^6\text{He}$ 的出射, 这样就可以以 $^6\text{He}$ 的质心系角度为横轴统一画出各个实验点的截面. 从实验数据看出, 后角度的截面相对于势散射截面有很大的增强, 这表明反应中发生了粒子转移或者粒子交换过程.

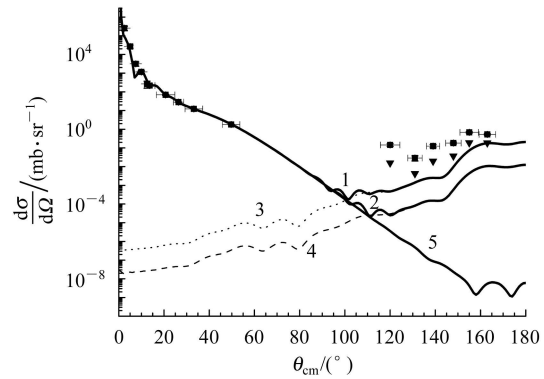


图3 弹性散射和转移反应的微分截面角分布

其中前角度的方块对应测量的粒子为 $^6\text{He}$ , 而后角度的方块对应测量的粒子为 $^9\text{Be}$ (转换到 $^6\text{He}$ 的质心系角度画出), 三角符号表示近似地扣除了破裂截面以后的弹性转移截面. 粗实线1和2分别对应于 $^9\text{Be} \rightarrow ^6\text{He} + ^3\text{He}$ 的谱幅度为 $a = 1.41$ 和 $a = 0.70$ 的情况下势散射截面和转移截面的相干和; 点线3和虚线4则分别为 $a = 1.41$ 和 $a = 0.70$ 时单纯的转移反应截面; 粗实线5为势散射截面.

然而实际上单举测量的前角区的 $^9\text{Be}$ 可以对应于多种反应机制的贡献. 我们主要讨论3种比较主要的机制: (1)弹性反冲, 即入射 $^6\text{He}$ 粒子弹性散射到后角度, 而将靶中的 $^9\text{Be}$ 反冲到前角度, 这种截面是势散射截面, 对应的后角度 $^6\text{He}$ 的截面通常比前角度小几个量级; (2)弹性转移, 即入射 $^6\text{He}$ 粒子俘获靶中的一个 $^3\text{He}$ 集团后变成 $^9\text{Be}$ 出射到质心系前角度, 而靶中剩余的 $^6\text{He}$ 作为一个整体出射到质心系后角度, 这种转移或者交换反应通常是引起后角度截面随角度升高而升高的主要原因; (3)转移碎裂, 即与过程(2)类似, 入射 $^6\text{He}$ 粒子俘获靶中的一个 $^3\text{He}$ 集团后变成 $^9\text{Be}$ 出射到质心系前角度, 但剩余核 $^6\text{He}$ 在后角度发生破裂反应而以 $^4\text{He} + 2n$ 的方式出射. 因此, 图3中后角度的数据点实际上是这3种截面之和, 其中机制(1)的贡献可以忽略不计<sup>[4]</sup>, 而对于(2)和(3)两种机制的贡献的比例可以做一些定量分析, 以便和理论计算进行比较.

在本实验中可以产生两种 $^6\text{He}$ 粒子的散射和破裂过程: 一种是入射 $^6\text{He}$ 粒子在靶核 $^9\text{Be}$ 的势场中的弹性散射和破裂, 产生的 $^6\text{He}$ 或 $^4\text{He}$ 粒子集中在质心系的前角度出射<sup>[12-14]</sup>; 第二种是靶核 $^9\text{Be}$ 转移一个 $^3\text{He}$ 给弹核后剩余的 $^6\text{He}$ 在质系的后角度发生散射或破裂(如前所述, 其截面对应于图3中后角度的数据). 这

两种过程在质心系中是对称的, 因此我们可以近似地用质心系前角度 ${}^6\text{He}$ 的弹散和破碎截面之比来计算质心系后角度 ${}^6\text{He}$ 的弹散和破碎截面之比. 图4所示是质心系前角度的实验测量和相应的计算拟合结果, 理论计算结果能够很好地描写实验数据. 可见在大于 $10^\circ$ 的角度范围内破裂反应的截面比弹性散射的截面要大得多, 这与 ${}^6\text{He}$ 的弱束缚性质有关. 把这种比例关系近似应用到对称的后角度上, 可以得到弹性转移部分的截面如图3中的倒三角符号所示.

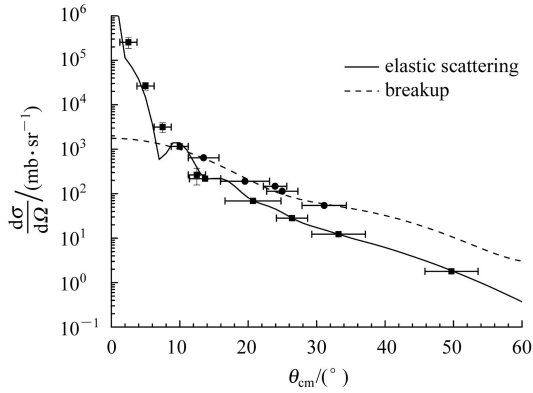
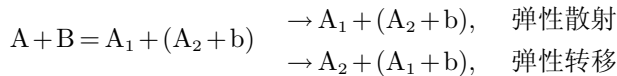


图4 质心系前角度 ${}^6\text{He}$ 的弹性散射和破裂反应截面  
实线和虚线分别是文献[12]—[14]中的理论计算结果.

### 3 理论分析

两个核A和B之间的弹性散射和弹性转移可以表示为<sup>[3]</sup>:



在这两种情形里 $A_1 = A_2$ 是两个完全相同的核. 而实验观测的总的振幅( $f_t(\theta)$ )是弹性散射振幅( $f_{el}(\theta)$ )和转移反应的振幅( $f_{tr}(\pi - \theta)$ )之和:

$$|f_t(\theta)|^2 = |f_{el}(\theta) + (-1)^A f_{tr}(\pi - \theta)|^2,$$

其中弹性散射部分可以用光学模型来计算<sup>[12]</sup>, 而转移反应部分则可以用一阶DWBA近似来处理. 我们用FRESCO<sup>[15]</sup>来对这两种过程进行计算. 在计算中只考虑 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^9\text{Be}$ 的基态. 入射道的光学势通过光学模型拟合前角度弹性散射数据得到, 即为文献[12]表2中的set B. 程序通过调整 ${}^3\text{He}$ 与 ${}^6\text{He}$ 之间的结合势的深度来得到 ${}^3\text{He}$ 集团在 ${}^9\text{Be}$ 基态里的结合能, 而结合势的约化半径和弥散参数则采用的是系统值( $r = 1.25\text{fm}$ ,  $a = 0.65\text{fm}$ ). 在计算中我们假设 ${}^3\text{He}$ 集团在 ${}^9\text{Be}$ 基态中的单粒子组态为 $(p)^3$ , 径向节点数通

过 $2N + L = \sum_{i=1}^3 2n_i + l_i$ 的关系来确定, 其中 $(n_i, l_i)$ 表示 ${}^3\text{He}$ 中每一个核子的量子数, 而 $(N, L)$ 为 ${}^3\text{He}$ 集团相对于核芯 ${}^6\text{He}$ 的径向量子数和轨道量子数. 在这里 $2N + L = 3$ , 即 $N = 1, L = 1$ , 这个选择和文献[8]相同. 需要注意的是FRESCO中定义的节点数包含原点, 因此在用FRESCO进行计算时结点数应为 $N + 1$ . 为了保证光学势对前角度弹性散射截面很好的描写, 我们保持光学势参数不变, 而改变 ${}^3\text{He}$ 在 ${}^9\text{Be}$ 中的谱幅度, 并试图得到在此条件下的关于 ${}^3\text{He}$ 在 ${}^9\text{Be}$ 中的谱幅度的一些信息. 计算的结果如图3所示. 早期的文献[11]中给出 ${}^3\text{He}$ 集团在 ${}^9\text{Be}$ 中的谱幅度为 $a = 0.70$ , 它对应的弹性转移反应的微分截面如图3中粗实线2所示. 可见在后角度截面的理论值比实验值小了两个数量级左右. 由于谱幅度的平方即为谱因子, 而后者实际上表示复合核中在考虑到交换对称性等因素后可以形成的集团的个数. 在我们这里,  ${}^9\text{Be}$ 中可以形成的 ${}^3\text{He}$ 集团的个数最多为2, 因此 ${}^3\text{He}$ 集团的谱因子不能超过2, 从而可以确定谱幅度的最大值为1.41, 如图3中的粗实线1所示, 此时可以大体上重现弹性转移的实验数据. 考虑到单举实验测量引起的不确定性, 我们无法声称这个谱幅度的值有多大的意义, 但是我们至少可以确认 ${}^3\text{He}$ 在 ${}^9\text{Be}$ 基态中的谱幅度的值应该大于0.70. 由计算可见转移反应截面对谱因子很敏感, 而准确地确定 ${}^3\text{He}$ 在 ${}^9\text{Be}$ 中的谱因子需要做更加细致的符合测量.

### 4 总结

本文报告了25MeV/u  ${}^6\text{He}$ 在 ${}^9\text{Be}$ 靶上的弹性散射和弹性转移的实验结果, 在后角度观察到了微分截面有很大的增强现象. 用光学模型和一阶DWBA的方法计算了弹性散射和转移的截面, 计算结果与实验测量基本一致. 计算表明质心系后角度微分截面随角度增大而增大的趋势可以由转移过程来描述. 分析表明 ${}^3\text{He}$ 在 ${}^9\text{Be}$ 中的谱幅度应该明显大于壳模型的理论计算值0.70, 但准确地确定谱幅度需要对末态的出射粒子进行符合测量. 本工作表明弹性转移反应是用来研究轻核中集团结构的谱幅度(或谱因子)的非常有效的手段.

本文作者非常感谢日本理化所提供的束流以及在实验中提供的各种帮助. 感谢I. Thompson教授在FRESCO计算中提供的指导.

## 参考文献(References)

- 1 Jensen A S et al. Rev. Mod. Phys., 2004, **76**: 215
- 2 Satchler G R. Direct Nuclear Reactions. New York: Oxford University Press, 1983. 709—727
- 3 Oertzen W von, Bohlen H G. Phys. Rep., 1975, **19**: 1—61
- 4 Ter-Akopian G M et al. Phys. Lett., 1998, **B426**: 251—256
- 5 Kurath D. Phys. Rev., 1973, **C7**: 1390
- 6 Roos P G et al. Phys. Rev., 1977, **C15**: 69
- 7 WANG C W et al. Phys. Rev., 1985, **C31**: 1662
- 8 Nadasen A et al. Phys. Rev., 1989, **C40**: 1130
- 9 Yoshimura T et al. Nucl. Phys., 1998, **A641**: 3—20
- 10 Comer L M et al. Phys. Rev., 1992, **C45**: 1803
- 11 Kurath D, Millener D J. Nucl. Phys., 1975, **A238**: 269—286
- 12 YE Y L et al. Phys. Rev., 2005, **C71**: 014604
- 13 YE Y L et al. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys, to be published
- 14 WANG J et al. Chin. Phys. Lett., 2005, **22**: 1370
- 15 Thompson I J. Comput. Phys. Rep., 1988, **7**: 167—212

Elastic Transfer Reactions of 25MeV/u  $^6\text{He}$  on  $^9\text{Be}$  Target\*

PANG Dan-Yang<sup>1</sup> YE Yan-Lin<sup>1;1)</sup> JIANG Dong-Xing<sup>1</sup> ZHENG Tao<sup>1</sup> LI Zhi-Huan<sup>1</sup> LI Xiang-Qing<sup>1</sup>  
 GE Yu-Cheng<sup>1</sup> WU Cui-E<sup>1</sup> CHEN Zhi-Qiang<sup>1</sup> HUA Hui<sup>1</sup> ZHANG Gao-Long<sup>1</sup> WANG Jia<sup>1</sup>  
 LOU Jian-Ling<sup>1</sup> LU Fei<sup>1</sup> FAN Feng-Ying<sup>1</sup> A. Ozawa<sup>2</sup> Y. Yamaguchi<sup>2</sup>  
 R. Kanungo<sup>2</sup> D. Fang<sup>2</sup> I. Tanihata<sup>2</sup>

1 (School of Physics and MOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

2 (RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan)

**Abstract** Angular distributions for elastic transfer in the  $^6\text{He}+^9\text{Be}$  system were measured at the incident  $^6\text{He}$  laboratory energy of  $E = 150\text{MeV}$ . From a distorted-wave Born approximation (DWBA) analysis,  $^3\text{He}$  spectroscopic amplitude in  $^9\text{Be}$  were extracted and compared with values obtained by shell model calculations. The result shows that the spectroscopic amplitude is much greater than 0.70.

**Key words** DWBA, elastic scattering, transfer reaction, breakup reaction, cluster structure, spectroscopic amplitude

---

Received 28 April 2005

\*Supported by Major State Basic Research Developing Program (G2000077403) and National Natural Science Foundation of China (10221003)

1) E-mail: yeyl@pku.edu.cn