

一种可能的新型反应机制

——双 α 直接转移反应

徐树威 吴国华 廖容之 韩飞

(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

假定 ${}^8\text{Be}$ 是由两个在组态空间相邻的 α 粒子组成的,因而获得在余核中 ${}^8\text{Be}$ 集团的谱密度正比于核表面 α 粒子预形成几率 P_0 的平方.利用改进了的EFR-DWBA重叠积分的参数化方法^[1-2],我们计算了 ${}^{209}\text{Bi}({}^{12}\text{C}, \alpha){}^{217}\text{Fr}$ 反应中出射的 α 粒子的角分布和双微分能谱,而且通过拟合实验数据提取了在 ${}^{217}\text{Fr}$ 核表面的 α 粒子的预形成几率,结果与由 α 衰变数据提取的预形成几率在计算误差范围内一致.这个事实说明, ${}^{209}\text{Bi}({}^{12}\text{C}, \alpha){}^{217}\text{Fr}$ 可能是双 α 直接转移反应.

前 言

1972年 R. Bimbot 等人^[3]曾经用 ${}^{12}\text{C}$ 轰击 ${}^{209}\text{Bi}$,研究了At的同位素产物 ${}^{209}\text{At}$, ${}^{210}\text{At}$ 和 ${}^{211}\text{At}$.轰击能量范围从59.5MeV到89.4MeV.他们用反冲射程技术测量反冲重余核的能量和角分布,并用运动学分析推得出射粒子的角分布.他们认为,对于轰击能量低于3MeV的反应, ${}^{211}\text{At}$ 的产生可能是由于 ${}^8\text{Be}$ 转移的结果.中国科学院近代物理研究所核物理实验室^[4-5]在测量余核的同时,测量了出射 α 粒子的角分布和能谱.并且将两种测量结果进行了对比分析,指出这种反应过程 ${}^{209}\text{Bi}({}^{12}\text{C}, \alpha){}^{217}\text{Fr}$ 在入射能量低于73MeV的范围内贡献较大,总截面达到10—30mb.除此之外,他们还用半经典方法计算出射 α 的角分布和能谱的相对值^[6],用实验峰值归一后,结果与实验符合很好.这就说明可能是一种表面转移过程.但由于未能计算出截面的绝对值,所以这一看法还不能算定论.本论文就是企图用近几年发展起来的EFR-DWBA重叠积分的参数化方法进一步计算出射 α 粒子的绝对角分布和能谱,看是否与实验数据相符.

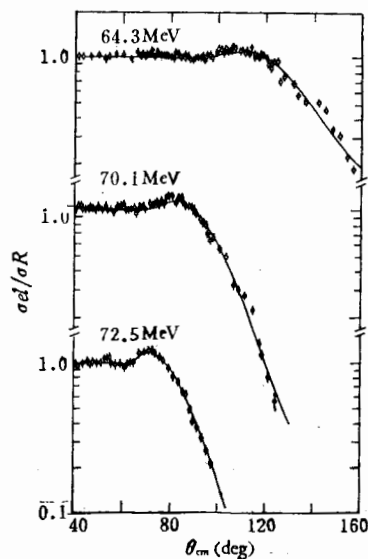
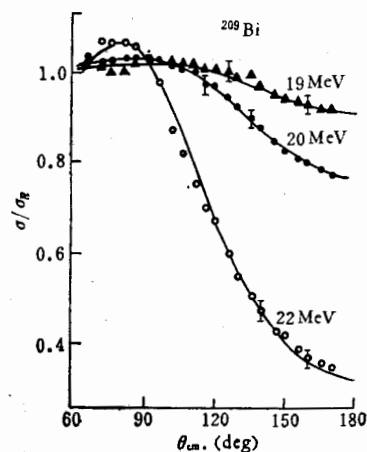
一、光学模型分析

我们利用自动调参光学模型程序^[7]拟合了 ${}^{12}\text{C} + {}^{209}\text{Bi}$ 三个能量(73MeV, 70.1MeV,

64.3MeV) 的实验弹散角分布数据^[8](图1), 定出入射道的 W-S 型光学模型参数。同时参考 70.1MeV 的情况外推得到能量为 67.3MeV 的光学模型参数。此外, 我们拟合了 19MeV, 20MeV, 22MeV $\alpha + {}^{209}\text{Bi}$ 弹散角分布^[9](图2), 得到出射道的光学模型参数。具体参数值见表1。

表1 光学模型参数

	$V(\text{MeV})$	$r(\text{fm})$	$a(\text{fm})$	$W(\text{MeV})$	$r_i(\text{fm})$	$a_i(\text{fm})$	$r_c(\text{fm})$
${}^{12}\text{C} + {}^{209}\text{Bi}$							
73MeV	-100	1.262	0.45	-22.5	1.345	0.30	1.3
70.1MeV	-103.9	1.166	0.553	-14	1.258	0.452	1.3
67.3MeV	-102	1.16	0.58	-14	1.26	0.45	1.3
64.3MeV	-17.9	1.30	0.49	-2.25	1.36	0.17	1.3
$\alpha + {}^{209}\text{Bi}$							
19-22MeV	-90.3	1.11	0.6	-32	0.96	0.42	1.2

图1 ${}^{12}\text{C} + {}^{209}\text{Bi}$ 的弹性散射角分布与光学模型计算拟合。图2 $\alpha + {}^{209}\text{Bi}$ 在 $E_L=19, 20, 22\text{MeV}$ 时的弹性散射角分布, 与光学模型计算拟合。

二、EFR-DWBA 分析^[10]

由于出射的 α 粒子的能谱为连续谱, 说明余核处于连续态。所以我们采用 T. Ugawawa 和 T. Tamura 等人发展的动力学因子 $I_{l_a l_b}^{l_a l_b}(E_a, E_b)$ 参数化方法^[11], 其参数化公式如下:

$$I_{l_a l_b}^{l_a l_b}(E_a, E_b) = N_0(l_1, l_2 l_a l_b) \exp[-(l_b - l_b^{(0)})^2 / \Gamma_b^2] \\ \times \exp[-(Q - Q_0)^2 / \Gamma_Q^2] \exp(i\delta),$$

其中 $N_0 = k_1 + k_2 l + (k_3 + k_4 l) l_a$, $l_d \equiv l_b - l_a$; $Q = E_b - E_a$ 是反应 Q 值; l_2 是核

和
初
出
算
的
谱
级
小
态
势
参
用
确
(n
的
就
可
的
双
此
处

能量

73M

70.1M

67.3M

64.3M

1) i

2) i

移集团在弹核中的轨道角动量, l_1 是被转移集团在余核中的轨道角动量, l 是转移反应中被转移的角动量; l_a 和 l_b 分别是入射道和出射道的轨道角动量. E_a, E_b 分别是入射道和出射道的道能. $N_0, l_b^{(0)}, \Gamma_b, Q_0, \Gamma_Q, \delta$ 为待定参数.

我们还对原方法进行几点改进: 1) 编制了一个计算准束缚态波函数的程序^[11] 来计算被转移集团在余核中的状态波函数; 2) 在互作用势中加入库仑项; 3) 选用了一种不同的谱密度. 我们假定 ${}^8\text{Be}$ 是由两个在组态空间相邻的 α 粒子所组成, 如果一个 α 粒子的谱密度为 $\frac{g}{4} P_a^{[12]}$, 那么 ${}^8\text{Be}$ 在余核中的谱密度就应该是 $\frac{g}{8} P_a^2$, 其中 g 是普通的单核子能级密度, P_a 是相邻四个核子在核表面形成 α 粒子的预形成几率.

我们利用 EFR-DWBA 程序^[13] 对于每一个入射能量计算 1000 个动力学因子, 再用最小二乘法将公式 (1) 对这些动力学因子值进行拟合从而定出待定参数 (见表 2).

计算动力学因子时所用的参数是: (1) 计算在 ${}^{12}\text{C}$ 中 ${}^8\text{Be}$ 和 α 粒子相对运动的束缚态波函数时, $r = 1.25\text{fm}$, $a = 0.65\text{fm}$, 用调整结合能值与实验值 7.367MeV 相同来确定势阱深度 V , 节点数 $N - 1 = 2$. (2) 计算 ${}^8\text{Be}$ 在余核 ${}^{27}\text{Fr}$ 中准束缚态波函数时, 所用的参数与计算 α 衰变的穿透因子 (详见下节) 所用的参数相同, $r = 1.11\text{fm}$, $a = 0.60\text{fm}$. 并用调整结合能值与实验值相同的方法定出势阱深度 V , 波函数节点数是根据基态的情况确定的, 我们认为 ${}^8\text{Be}$ 是由 4 个处于 $2g_{9/2}(n = 2, l = 4)$ 轨道上的质子和 4 个处于 $1h_{9/2}(n = 1, l = 5)$ 轨道上的中子所组成. ${}^{27}\text{Fr}$ 核的总自旋 $9/2$ 完全是由剩余在 $2g_{9/2}$ 轨道上的奇质子的贡献. 这样 ${}^8\text{Be}$ 集团的自旋为 0, 轨道角动量亦为 $L = 0$, 所以根据公式

$$2(N - 1) + L = \sum_{i=1}^8 (2(n_i - 1) + l_i), \quad (2)$$

就可以确定出节点数 $N - 1 = 22$.

最后, 再根据解析形式的动力学因子计算出扭曲波截面 $\frac{d\sigma}{dQ}$, 进一步计算出射粒子的双微分能谱

$$\frac{d^2\sigma}{dQdE_b}(E_b, \theta) = C_a \sum_j \frac{d\sigma}{dQ}(E^*, J, \theta) \frac{g}{8} P_a^2 \quad (3)$$

此处, C_a 为 ${}^8\text{Be}$ 和 α 组成 ${}^{12}\text{C}$ 的谱因子, 取理论值 0.55. E^*, J 分别为转移后 ${}^8\text{Be}$ 在 ${}^{27}\text{Fr}$ 中

表 2 参数化动力学因子的参数表

参数 能量	$k_1^{(1)}$	$k_2^{(1)}$	$k_3^{(1)}$	$k_4^{(1)}$	$l_b^{(0)}$	Γ_b	$-Q_0$ (MeV)	Γ_Q (MeV)	δ ($^\circ$)
3MeV	-3.80	-0.305	-0.474	0.0057	44.81 + 0.79Q	5.0 \pm 1.0	46.6 \pm 1.0	5.0 \pm 1.0	86 \pm 2
1MeV	-2.844	-0.287	-0.487	0.0096	47.02 + 0.92Q	4.8 \pm 1.0	43.1 \pm 1.0	4.4 \pm 1.0	104 \pm 2
3MeV	-2.896	-0.183	-0.448	0.0160	44.62 + 0.933Q	4.7 \pm 1.0	41.7 \pm 1.0	4.4 \pm 1.0	117 \pm 2
1MeV	-1.714	-0.169	-0.304	0.0185	12.73 + 0.225Q	4.5 \pm 1.0	39.3 \pm 1.0	4.7 \pm 1.0	138 \pm 2

$$N_0 = k_1 + k_2 l + (k_3 + k_4 l) l d; \quad l_d = l_b - l_a$$

误差 ± 1.0

的激发能和自旋。 $g = \frac{6}{\pi^2} a$, a 为能级密度参数, 根据中子和质子共振能级实验数据^[15] 定出 $a = \frac{A}{8}$, A 为余核质量数。

将 $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE_b}$ 对 E_b 积分则求出出射 α 粒子的角分布, 把理论计算的双微分能谱与角分布和实验数据加以拟合(图3—6)就可以提取出 α 粒子在 ^{217}Fr 中的预形成几率 P_α (表3)。

表3 α 预形成几率 P_α

提取的方式	$^{209}\text{Bi}(^{12}\text{C}, \alpha)^{217}\text{Fr}$				α 衰变
	73	70.1	67.3	64.3	
P_α	0.40	0.28	0.36	0.42	0.20

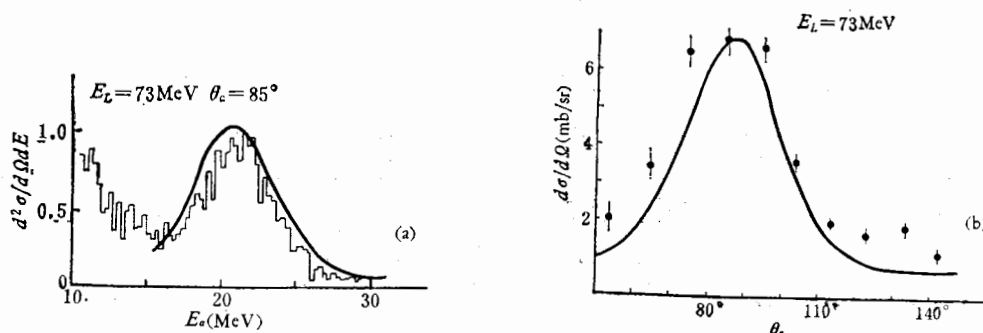


图3

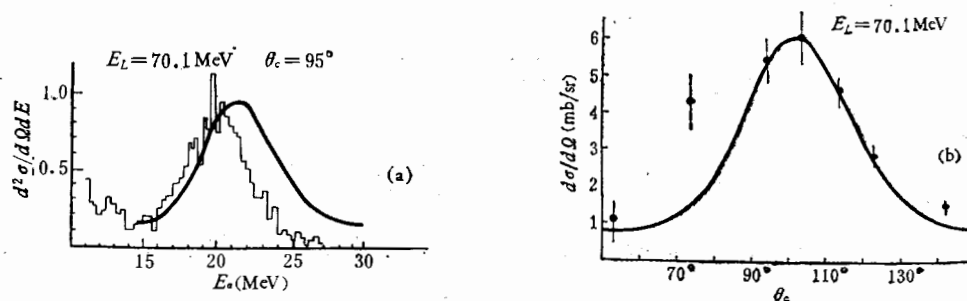


图4

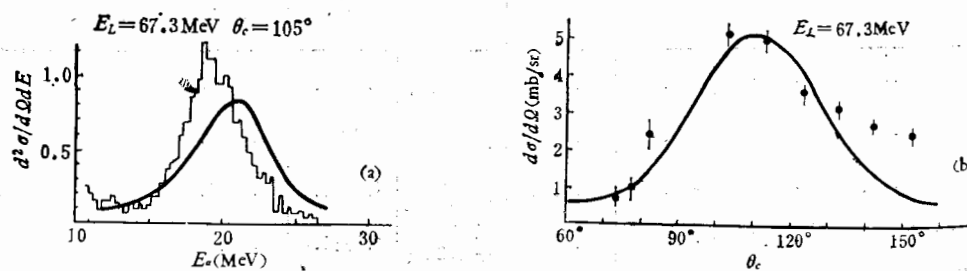


图5

变 [1] 变把 的 上的 相明 见算 1.1 用

了 能 具 的 算 所 以

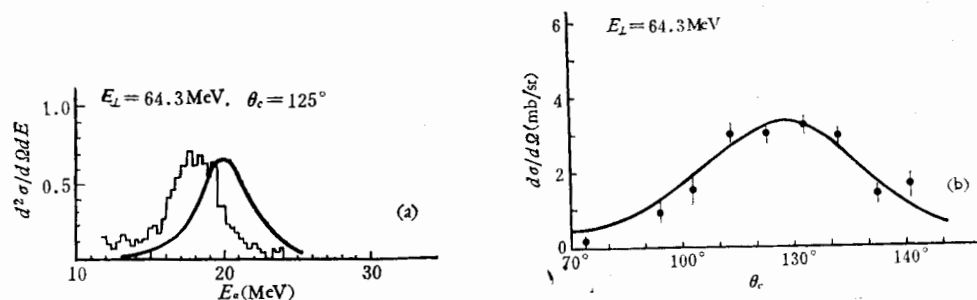


图 6

三、由 α 衰变的实验衰变常数来提取 在余核中 α 粒子的预形成几率

为了检验我们由转移反应提取的 α 粒子的预形成几率是否合理, 正巧 ^{217}Fr 又是 α 衰变核, 我们还可以由 α 衰变的实验衰变常数来提取 α 粒子的预形成几率^[15]. 而且根据 [15] 可知, 由 (p, α) , (n, α) 前平衡发射提取的处于高激发态的 α 预形成几率与由 α 衰变提取的基态的 α 预形成几率相近, 说明 α 预形成几率对激发能不灵敏. 因此, 我们可以把由转移反应提取的结果与由 α 衰变提取的结果来加以比较.

^{217}Fr 基态自旋为 $9/2$, 我们可以归之于 $2g_{9/2}$ 轨道上奇质子的贡献, 经过 α 衰变形成的 ^{213}At 基态的自旋也是 $9/2$, 也可以认为是由于 $2g_{9/2}$ 轨道上奇质子的贡献. 从这个意义上来说, 决定这两个核基态自旋的奇质子没有参与 α 衰变, 而且 α 衰变也没有引起核自旋的改变, 我们就可以认为 α 衰变是属于 $l=0$ 的衰变. 另外, 我们还把 ^{217}Fr 的衰变性质与相邻偶-偶核 ^{216}Ra 、 ^{216}Fr 作了比较, 计算得出 ^{217}Fr 核 α 衰变的禁戒因子接近 1, 进一步说明 $l=0$ 的合理性. 所以, 我们就可以利用处理偶-偶核的方法来处理 ^{217}Fr (处理方法详见 [2]). 在提取 α 预形成几率时需要计算 α 粒子穿透核芯的库仑位垒的穿透因子. 计算位垒时所用的核势参数与转移反应中计算准束缚态波函数时所用的参数相同: $r=11\text{fm}$, $a=0.60\text{fm}$. 此外 $V=100\text{MeV}$ 亦与后者调出的结果相近. 这样就可以消除在两种方法进行比较时由于参数选取不一样所带来的不确定性. 最后结果见表 3.

四、结果与讨论

用我们这种方法处理 α 粒子转移反应, 计算截面的绝对值大约会带来一个误差因子. 处理 ^9Be 转移, 误差或许更大些, 但由于我们直接提取的是 P_α^2 , 故属于 P_α 的误差可在一倍左右. 从表 3 中可见, 我们由转移反应提取的 P_α 值与由 α 衰变提取的值在一倍误差范围之内是一致的.

此外, 理论计算的角分布和在擦边角附近的能谱也与实验结果基本相符 (图 3—6).

我们说, $\text{C}^{12} + ^{209}\text{Bi}$ 反应中出射的 α 粒子可能是主要来源于双 α 的表面直接转移.

但是, 应该注意到, 理论计算的双微分能谱与实验比较, 能量位置偏高, 特别是入射能

量为 64.3MeV 的情况。这有可能是由于能量接近库仑位垒,一些慢反应过程容易发生,故而其中包含有,比如说, α 粒子的两步转移过程在内的缘故。

本工作是在杨澄中教授和邬恩九副教授建议下进行的,并且得到他们长期的、热情的支持和帮助,作者谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] T. Udagawa, T. Tamura and D. Price, *Phys. Rev.*, **C21** (1980), 1891.
- [2] 徐树威、吴国华、缪容之、韩飞,(待发表).
- [3] R. Bimbot, D. Gardes, M. F. Rivet, *Nucl. Phys.*, **A189** (1972), 193.
- [4] 沈文庄、徐树威、王大延、谢元祥、郭忠言、李祖玉, *高能物理与核物理*, **1** (1977), 71.
- [5] 郭俊盛、孙锡军、徐晓冀、王儁、刘洪业, *高能物理与核物理*, **2** (1978), 143.
- [6] 徐树威、冉启慧、马洪范, **2** (1978), 534.
- [7] 中国科学院近代物理研究所内部资料,徐树威、吴国华.
- [8] 谢元祥、范国英等,中国科学院近代物理研究所科技情报资料汇编, **3** (1979).
- [9] A. R. Barnet and J. S. Lilley, *Phys. Rev.*, **C9** (1974), 2010.
- [10] 详细情况请参阅文献 [2].
- [11] 中国科学院近代物理研究所内部资料,缪容之、徐树威.
- [12] L. Milazzo-colli, G. M. Brage-marcazzan and M. Milazzo, *Nuovo Cimento*, **30A** (1975), 632.
- [13] 中国科学院近代物理研究所内部资料,韩飞、徐树威.
- [14] D. Kurath, *Phys. Rev.*, **C7** (1973), 1390.
- [15] U. Facchini and E. Saetta-Menichlla, *Energia Nucleare*, **15** (1968), 54.
- [16] R. Bonetti and L. Milazzo-colli, *Phys. Lett.*, **49B** (1974), 17.

A PROBABLE NEW TYPE OF REACTION MECHANISM —DOUBLE α DIRECT TRANSFER PROCESS

XU SHU-WEI WU GUO-HUA MIAO RONG-ZHI HAN FEI

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

It is assumed that ${}^8\text{Be}$ consists of two α -particles which are close to each other in configuration space. A spectroscopic density of ${}^8\text{Be}$ -cluster in the residue nuclei is then obtained which is proportional to the square of the preformation probability of α -particle at nuclear surface. Using the improved method of parametrization of EFR-DWBA overlap integral^[1], We calculate the double differential energy spectra and angular distributions of α -particles for the reactions ${}^{209}\text{Bi}({}^{12}\text{C}, \alpha){}^{217}\text{Fr}$ and extract the preformation probability of α -particle at the surface of ${}^{217}\text{Fr}$ nuclei from fitting the experimental data. The agreement within the range of calculation error between the preformation probabilities extracted from transfer reactions and α -decay suggests that the reaction ${}^{209}\text{Bi}({}^{12}\text{C}, \alpha){}^{217}\text{Fr}$ may be explained as a double α direct transfer process.

唯象
确定
(介子
数据
人^[1]
“C,⁸
用于

程:

其中