第 22 卷 第 1 期
2005 年 3 月

原子核物理评论
Nuclear Physics Review

Vol. 22, No. 1
Mar., 2005

文章编号：1007-4627(2005)01-0006-05

晕核 ^{6}He(25 MeV/u) 在 ^{9}Be 上的弹性散射研究*

庞丹阳，叶沿林#，江栋兴，郑 涛，王全进，李智焕，
李湘庆，陈志强，胡青元，张高龙，王 佳
（北京大学物理学院技术物理系，教育部重离子物理开放实验室，北京 100871）
A. Ozawa, Y. Yamaguchi, C. Wu, R. Kanungo, D. Fang, I. Tanihata
(RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan)

摘 要：分析了北京大学核物理实验小组在日本 RIKEN 实验室完成的 25 MeV/u ^{6}He 和 ^{9}Be 的弹性散射实验数据，得到了弹性散射微分截面角分布. 利用双折叠模型，并通过拟合弹性散射微分截面得到了此弹靶体系在此能量下的弹性散射光学势.

关 键 词：中子晕核；弹性散射；双折叠模型；光学模型；微分截面角分布
中图分类号：O571.4 **文献标识码**：A

1 引言

弹性散射可以提供有关反应系统的重要的信息. 这主要体现在可以通过弹性散射微分截面来抽取弹性散射光学势，而弹性散射光学势反映了核碰撞时相互作用的总体信息，并且是很多其它核反应类型计算中的重要的输入量.

人们在过去 20 年间从实验上和理论上对 ^{6}He 进行了广泛的研究[1—4]. 其中 Rusek 等[5]研究了质心系能量为 11.6, 15.9 和 60.4 MeV 的 ^{6}He 和 ^{4}He 的弹性散射，Lapoux 等[6,7]研究了 38.3 MeV/u 的 ^{6}He和质子以及 ^{12}C 靶的弹性散射. 他们发现弹性道和破裂道之间的耦合对于 ^{6}He 所引起的弹性散射具有重要的作用，这是 ^{6}He 的两个价中子与核芯(α)之间束缚很弱的反映.

由于弹性散射的重要性，我们于 2002 年 9 月在日本理化研究所做 25 MeV/u ^{6}He + ^{9}Be 转移反应实验的同时测量了该反应体系的弹性散射. 本文介绍这次实验中的弹性散射数据的处理和分析. 由于小角度的弹性散射微分截面非常重要并且很难准确测量，所以我们着重介绍小角度微分截面数据的处理.

2 实验布局

实验布局如图 1 所示. 需要指出的是，这种实验布局是专门根据转移反应的动力学而设置的. 在弹性散射实验时，我们把二号探测器望远镜移到了零度，束流强度降低为 5×10^3 ions/s. 在这种较低的束流强度下，我们移去了准直孔，依靠 PPAC1 和 PPAC2 探测器给出入射粒子的位置信号.

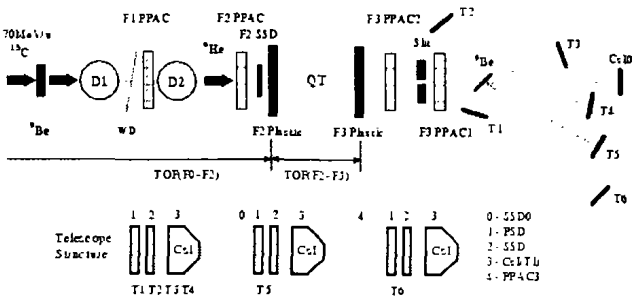

图 1 实验布局

3 实验数据分析

放置在零度的二号探测器望远镜使得我们可以仔细地分析束流中所包含的粒子以及它们的成分. 入射的 ^{6}He 粒子可以通过 F2 和 F3 处的塑料闪烁体探测器的时间信号用 TOF 方法和除了 ^{3}H 以外其它

收稿日期：2004-08-16；修改日期：2004-09-17
* 基金项目：国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000077403)；国家自然科学基金资助项目
作者简介：庞丹阳(1979-)，男(汉族)，河南扶沟人，博士生，从事实验核物理的研究；E-mail：dypang@hep.pku.edu.cn
联 系 人：叶沿林，E-mail：yeyl@pku.edu.cn

粒子分辨开来，而^{3}H 可以通过 ΔE 信号去除.

为了得到弹性散射微分截面的角分布，我们以靶的中心为坐标系的原点，束流的反方向为 z 轴正方向建立坐标系(如图 2 所示). 在此坐标系下通过如下方式定义散射角：通过粒子在 PPAC2 上的坐标($P2x$, $P2y$)和 PPAC1 上的坐标($P1x$, $P1y$)可以计算出粒子打在靶上的坐标(Tx, Ty)以及没有被散射的情况下打在 PSD 探测器上的坐标($PSEx$, $PSEy$)，同时 PSD 探测器测量到了粒子经过散射以后的坐标($PSDx$, $PSDy$). 通过(Tx, Ty)，($PSEx$, $PSEy$)和($PSDx$, $PSDy$)这 3 个点的坐标，可以计算出粒子的散射角. 为了建立绝对坐标系，我们以束流线的中心为基准把 3 个位置探测器(PPAC1, PPAC2 和 PSD)的坐标中心校准在一条直线上. 具体做法如下：

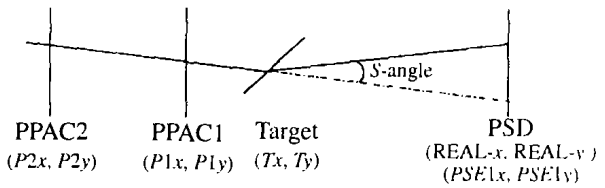

图 2　绝对坐标系的建立以及散射角的定义

(1) 校准束流线的中心为 PPAC1 和 PPAC2 的中心. 以 PPAC1 探测器来说明(如图 3 所示)：选择入射的^{6}He 粒子，把它们在 PPAC1 探测器上的位置谱做高斯拟合得到束流在 x 方向的中心在 PPAC1x 上的位置，如图 3(a)所示. 然后以这个位置为偏移量对 $P1x$ 进行校正，使得束流的中心同时为探测器坐标的中心，如图 3(b)所示. 对于 $P1y$ 以及 PPAC2 探测器的 x 和 y 方向用同样方法进行处理.

(2) 校准束流线的中心为 PSD 探测器的中心. PPAC 探测器的定位公式为

$$PSDx = \frac{p22 + p24 - p21 - p23}{P21 + P22 + P23 + P24} \times W_x = R_x \times W_x,$$

$$PSDy = \frac{p23 + p24 - p21 - p22}{P21 + P22 + P23 + P24} \times W_y = R_y \times W_y, \tag{1}$$

其中，$p2i$ ($i=1, 2, 3, 4$)为二号望远镜上 PSD 探测器的四路位置信号，W_x和 W_y为 PSD 探测器 x 和 y 方向的刻度因子. 首先在无靶时得到的 $R_x - R_y$谱上用与 PPAC 探测器类似的方法把 PSD 的中心校准为束流中心. 然后用经过刻度并校正了中心的 PPAC1 和 PPAC2 探测器来确定 PSD 探测器的 W_x和 W_y. 为此定义 $CHECKx(W_x)$和 $CHECKy(W_y)$两个函数：

$$CHECKx(W_x) = \frac{PSEx - a_x}{R_x \times W_x} - 1,$$

$$CHECKy(W_y) = \frac{PSEy - a_y}{R_y \times W_y} - 1, \tag{2}$$

其中 a_x和 a_y分别是 $PSEx$-$PSEy$ 谱的 x 和 y 方向的中心在 PSD 探测器上的 x 和 y 轴的偏移量. 这里，a_x 和 a_y 的值分别为：-0.994×10^{-1} mm 和 -0.524 mm. 我们选择 W_x 和 W_y 使得无靶时 $CHECKx$ 和 $CHECKy$ 在零附近的几率最大. 通过这种方法，得到 W_x和 W_y的值分别为 37.9 和 38.8. 这样就可以得到每一个粒子在 PSD 上的坐标.

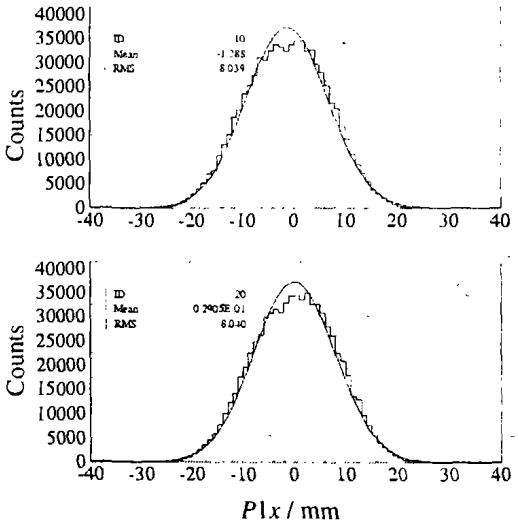

图 3　对 PPAC1 探测器的 x 轴相对束流中心的零点校正

通过上面的步骤，我们建立了实验室系的绝对坐标系而且使得位置探测器 PPAC1, PPAC2 和 PSD 的中心在这个坐标系里处在同一条直线上. 这个方法的优点是不依赖于实验前后的人工准直和测量，而是利用在线束流和在线 PPAC 的测量直接确定坐标系和散射角，避免了人为不确定因素. 由于小角度时弹性散射截面变化很大，角度刻度的细小偏差会造成截面的极大不准确，因此正确标定坐标轴特别重要. 本工作证明了上述方法是一种可靠的新方法.

根据图 2 中散射角的定义，很容易得到发生弹性散射的^{6}He 散射角的分布，如图 4 所示.

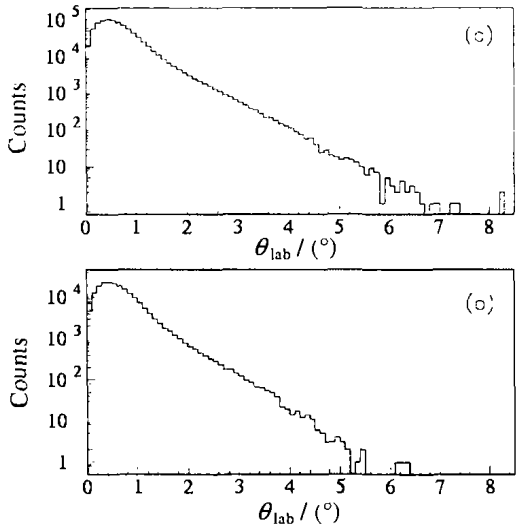

图4 有靶(a)和无靶(b)时^{6}He粒子的散射角分布通过PPAC选择打在靶上x和y方向±8 mm范围内的^{6}He粒子

为了确定探测系统(包括靶前靶后探测器)总的角分辨，我们取无靶时通过PPAC2和PPAC1探测器中心半径1 mm范围内的入射粒子投影到PSD探测器上，这些粒子在PSD上分布的半径的半宽度为2.4 mm，由此可以得出这种方法的总角分辨(FWHM)约为0.56°

考虑到无靶本底误差的影响，我们从0.75°开始，以1.5°为间隔，得到5个数据点，其分别对应的实验室系角度为1.5°，3.0°，4.5°，6.0°和7.5°. 每个数据点对应的立体角采用Monte-Carlo方法进行模拟：对每一个入射的^{6}He粒子，如果它能打在靶的有效面积上，则对它经过靶以后的出射方向进行均匀抽样，每一个出射方向和原来的入射方向之间的夹角即为抽样散射角. 对落在PSD探测器有效面积内的抽样散射角同样从0.75°开始，以1.5°为间隔分为不同的区间，记录每一个散射角区间的抽样事件数N_{theta}，设总的抽样数为N_{total}，则对应于散射角为theta的立体角为

$$d\Omega = 4\pi \times \frac{N_{theta}}{N_{total}} \quad . \tag{3}$$

图5是将探测器望远镜放置到5°以外(主要用于转移反应)并且使用约20×10^5 ions/s的强流^{6}He情况下得到的ΔE-ΔE和ΔE-E粒子分辨谱. 由图可见，在转移反应实验中也测到了弹性散射事件. 但是，如前面所述，由于束流强度超过了PPAC1和PPAC2两个探测器的阴极信号的承受能力，因此失去了对入射粒子位置的检测. 我们在F3处PPAC2和PPAC1探测器之间放置了一个20 mm×20 mm的准直孔，通过这个准直孔的粒子全部能够打在靶上. 在这种情况下，弹性散射的角度分辨变差. 我们把三号(20°)和四号(−11.6°)望远镜的PSD探测器沿x方向分为三部分，每部分做一个数据点(对应的实验室系散射角分别为15.5°，20°，24.4°和8.2°和12.4°和15.9°)，而把五号(−30°)望远镜整体做一个数据点来表示弹性散射微分截面. 每一个数据点对应的立体角同样用Monte-Carlo方法进行模拟，得到的弹性散射微分截面连同前面所详细讲述的零度探测器得到的弹性散射微分截面一起表示(如图6所示).

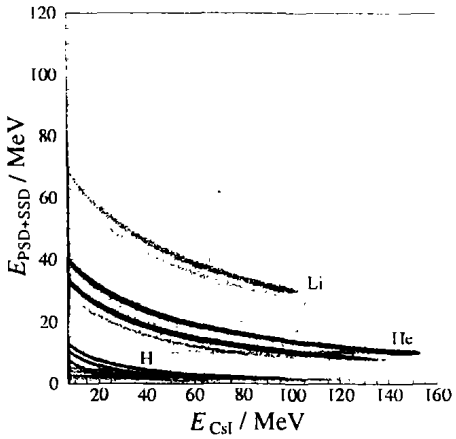

图5 四号探测器望远镜的粒子分辨谱

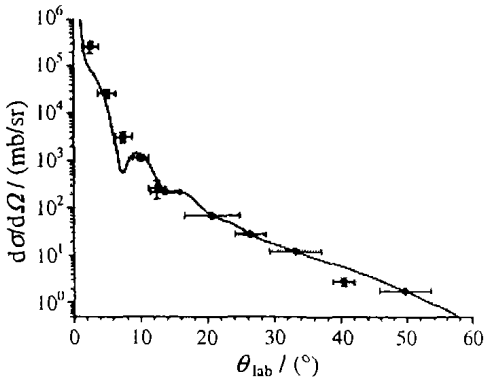

图6 弹性散射微分截面

实线为光学模型计算的结果.

4 光学势参数的抽取

我们采用在微观模型基础上调节参数的方法，初步研究了25 MeV/u ^{6}He + ^{9}Be的光学势.

双折叠模型[8,9]可以用来计算弹性散射的光学势的实部：

$$V_F = \int d\boldsymbol{r}_p \int d\boldsymbol{r}_t \rho_p(\boldsymbol{r}_p)\rho_p(\boldsymbol{r}_t) v_{pt}(\boldsymbol{r}_{pt}, \rho_p, \rho_t), \quad (4)$$

其中ρ_p和ρ_t分别是弹核和靶核的基态密度分布，它们满足归一化条件：

$$\int \rho_i(\boldsymbol{r}_i) d\boldsymbol{r}_i = A_i \quad , \quad (5)$$

而v_{pt}为核子-核子有效相互作用，它可以是密度相关的. 这里我们利用程序 DFPOT[10]来计算光学势实部，其中^{6}He 的密度分布函数为[11]

$$\rho_i(r) = N_{ci}\frac{\exp(-r^2/a^2)}{\pi^{3/2}a^3} + N_{vi}\frac{2\exp(-r^2/b^2)}{3\pi^{3/2}b^5} \times [Ar^2 + B(r^2 - 3b^2/2)^2], \quad (6)$$

其中，N_{ci}和N_{vi}分别指核芯以及价核子中中子(i = n)和质子(i = p)的数目，参数 a, b, A 和 B 的值分别为 1.55 和 2.24 fm，1 和 0. ^{9}Be 的密度分布函数为[12]

$$\rho(r) = (A + BC^2r^2)\exp(-C^2r^2) + (D + EF^2r^2)\exp(-F^2r^2) \quad , \quad (7)$$

其中参数 A, B, C, D, E 和 F 的值分别为 0.065 1, 0.039 8, 0.558, 0.054 4, 0.033 2 和 0.487 8. 核子-核子有效相互作用采用 M3Y-Reid 形式[10]：

$$V(r) = \left[7\,999\frac{e^{-4r}}{4r} - 2\,134\frac{e^{-2.5r}}{2.5r}\right] - 276[1 - 0.005(E/A)], \quad (8)$$

式中，E 为入射粒子的能量，A 为入射粒子的质量数. 我们把用 DFPOT 得到的光学势实部用 Woods-Saxon 势的形式进行拟合：

$$V_{WS} = \frac{V}{1 - \exp[(r - R)/a]} \quad , \quad (9)$$

其中，V 为势阱的深度，R 为势的半径参数，$R = R_0(A_t^{1/3} + A_p^{1/3})$，$a$ 为弥散参数. 拟合得到的光学势参数为：$V = 117.0$ MeV，$R = 2.526$ ($R_0 = 0.648$ fm)，$a = 1.060$ fm.

程序 ELASTIC[13]可以用来计算弹性散射微分截面并且通过计算的理论值与实验值的比较来寻找最佳拟合实验微分截面的光学势参数. 在ELASTIC 程序中，我们采用的光学势的实部和虚部均为 Woods-Saxon 势的形式，它们相应的光学势参数分别为：V, R_0, a(实部)和 W, R_0', a'(虚部). 我们令 $a = a'$，而改变 V, W, R_0和 R_0'，得到的与实验微分截面最佳拟合的弹性散射微分截面如图 6 所示，与之对应的光学势参数为：$V = 119.4$ MeV，$W = 25.0$ MeV，$R_0 = 0.955$ fm，$R_0' = 1.217$ fm，$a = 1.060$ fm，$a' = 1.060$ fm.

需要指出的是，采用不同的微观参量，可以得到几组等价的光学势参数. 目前我们还在进一步研究.

5 总结

本工作采用束流中心校准坐标系统的方法，分析了 25 MeV/u ^{6}He 与^{9}Be 的弹性散射实验数据，得到了从 1.5°开始在 25 MeV/u 能区^{6}He 和^{9}Be 的弹性散射微分截面. 通过双折叠模型初步计算了弹性散射光学势的实部，并在此基础上通过拟合弹性散射微分截面实验值得到了一组弹性散射光学势参数.

参 考 文 献：

[1] Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O, *et al.* Phys Rev Lett, 1985, **55**: 2676.

[2] Ter-Akopian G M, Rodin A M, Fomichev A S, *et al.* Phys Lett, 1998, **B426**: 251.

[3] Oganessian Yu Ts, Zagrebaev V I, Vaagen J S. Phys Rev Lett, 1999, **82**: 4 996.

[4] Oganessian Yu Ts, Zagrebaev V I, Vaagen J S. Phys Rev, 1999, **C60**: 044605.

[5] Rusek K, Kemper K W. Phys Rev, 2000, **C61**: 034608.

[6] Lapoux V, Alamanos N, Auger F, *et al.* Phys Lett, 2001, **B517**: 18.

[7] Lapoux V, Alamanos N, Auger F, *et al.* Phys Rev, 2002, **C66**: 034608.

[8] Satchler G R, Love W G. Phys Rep, 1979, **55**: 183.

[9] Brandan M E, Satchler G R. Phys Rep, 1997, **285**: 143.

[10] Cook J. Comput Phys Commun, 1982, **25**: 125.

[11] Korsheninnikov A A, Nikolskii E.Yu, Bertulani C A, *et al.* Nucl Phys, 1997, **A617**: 45.

[12] Hnizdo V, Szymakwski J, Kemper K W, *et al.* Phys Rev, 1981, **C24**: 1 495.

[13] Willian R. Comput Phys Commun, 1969, **1**: 198.

Elastic Scattering of ^{6}He from ^{9}Be at 25 MeV/u*

PAND Dan-yang, YE Yan-lin, JIANG Dong-xing, ZHENG Tao, WANG Quan-jin, LI Zhi-huan, LI Xiang-qing, CHEN Zhi-qiang, HU Qing-yuan, ZHANG Gao-long, WANG Jia

(*Department of Technical Physics and the DOE Key laboratory of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing* 100871, *China*)

A. Ozawa, Y. Yamaguchi, C. Wu, R. Kanungo, D. Fang, I. Tanihata

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

Abstract: We analyzed the ^{6}He elastic-scattering from ^{9}Be target at 25 MeV/u. A Center-of-Beam(CB) method was used to calibrate the particle-tracking detectors and set the reference system of the detection system. The double-folding model approach was used to calculate the real part of the optical model potential. The preliminary optical model potential parameters were extracted by fitting the experimental differential elastic-scattering cross-sections.

Key words: neutron-halo nuclei; elastic scattering; double-folding model; optical model potential; anglular distribution

* **Foundation item**: Major State Basic Research Development Program of China (G2000077403); National Natural Science Foundation of China