

文章编号: 1007-4627(2014)01-0053-05

## 放射性束弹性散射实验中的一种位置校准方法

陈江波<sup>1, 2</sup>, 杨彦云<sup>1, 2</sup>, 王建松<sup>1</sup>, 王琦<sup>1</sup>, 金仕纶<sup>1, 2</sup>, 马朋<sup>1</sup>, 马军兵<sup>1</sup>, 黄美容<sup>1</sup>,  
韩建龙<sup>1</sup>, 白真<sup>1, 2</sup>, 胡强<sup>1, 2</sup>, 金磊<sup>1, 2</sup>, 李勇<sup>1, 2</sup>, 赵明辉<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 在弹性散射实验中, 探测器的位置校准是非常重要的。结合兰州放射性束流线 (RIBLL) 的实际情况, 以低能轻炮弹在重靶上的弹性散射截面在前角区为卢瑟福散射的事实为依据, 发展了一种简单而有效的位置校准方法。通过蒙特卡洛模拟来检测弹性散射角分布与不同方向上位置未校准时的依赖关系。该方法成功地应用在  $^7\text{Be}$  与重靶的弹性散射实验中, 得到了正确的微分截面角分布。

**关键词:** 位置校准; 蒙特卡洛模拟; 弹性散射

**中图分类号:** TL67      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.01.053

### 1 引言

在原子核反应中, 弹性散射是一个基本的反应道, 它伴随在其它各种不同的核反应机制中。弹性散射可以提供有关核反应及核结构方面的重要信息, 放射性束物理的发展为弹性散射的研究注入了新的活力<sup>[1-6]</sup>。在现阶段, 放射性次级束的流强远低于稳定束, 而且包括束斑及能散等因素在内的束流品质也更差, 所以很难用测量稳定核的传统方法来测量弱束缚核的弹性散射。在弹性散射研究中, 由于微分截面对于角度的变化极其敏感, 位置的准确测量尤为重要, 特别是在前角区, 在弹性散射实验数据提取的过程中必须对探测器位置进行校准<sup>[7]</sup>。在实际的弹性散射实验中, 由于不同的束流品质、探测器布局等实验条件, 需要使用不同的方法对探测器位置进行校准。本文介绍了一种按照兰州放射性束流线 (RIBLL) 实际情况而发展的位置校准方法, 该方法已成功地应用在  $^7\text{Be}$  在重靶上的弹性散射实验中。

### 2 实验

$^7\text{Be}$  在铅靶上的弹性散射实验在兰州重离子研

究装置 (HIRFL)<sup>[8-9]</sup> 的 RIBLL 上完成。利用 HIRFL 产生的 54.2 MeV/u  $^{12}\text{C}$  初级束流轰击 2615  $\mu\text{m}$  厚的 Be 靶, 经过 RIBLL 的选择纯化, 获得 17.9 MeV/u 的  $^7\text{Be}$  束流。主束  $^{12}\text{C}$  的平均流强约为 300 enA, 获得的有效的  $^7\text{Be}$  的平均流强约为  $5 \times 10^3$  粒子/s, 纯度为 80% 左右。在次级靶处的束斑如图 1 所示, 束斑的直径约为 30 mm 且分布不均匀。

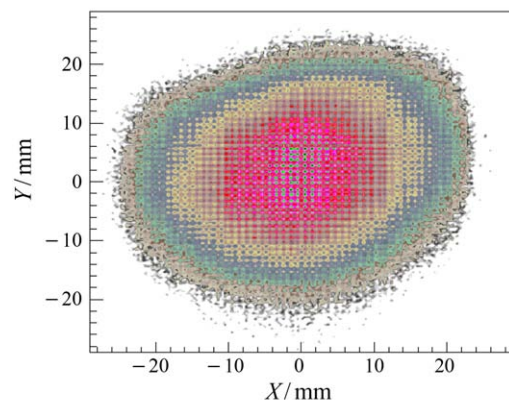


图 1 (在线彩图) 典型的次级束束斑

本次实验使用的探测器布局如图 2 所示, 使用 2 块距离靶心分别为 500 mm 和 100 mm 的位置灵敏的

收稿日期: 2013-03-28; 修改日期: 2013-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11005127, 11075190, 10905076, 11205209, 11205221); 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB834401); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJCX2-YW-N44)

作者简介: 陈江波(1989-), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究;

通信作者: 王建松, E-mail: jswang@impcas.ac.cn.

平行板雪崩电离室 (PPAC) 逐事件记录并计算出束流打在次级靶上的位置和方向。次级束打靶后的散射事件由 2 套硅望远镜测量, 2 套望远镜分别标记为 Si1 和 Si2, 从靶子中心到 2 套望远镜中心的距离分别为 120 mm 和 250 mm, 覆盖的散射角范围分别为  $13^\circ \sim 38^\circ$  和  $4^\circ \sim 21^\circ$ 。在探测器布局中所有探测器在竖直方向上的中心都在一个水平面上, 也就是束流中心所在的水平面。测量中所使用的 PPAC 由中国科学院近代物理研究所研制<sup>[10]</sup>, 位置分辨可达到 1 mm。每套硅望远镜由 1 块 150  $\mu\text{m}$  厚的双面硅条探测器和 1 块 1500  $\mu\text{m}$  的单硅探测器组成, 其中双面硅条的正反面均被分割为 48 条, 每条 1 mm 宽, 几何位置分辨为 1 mm。

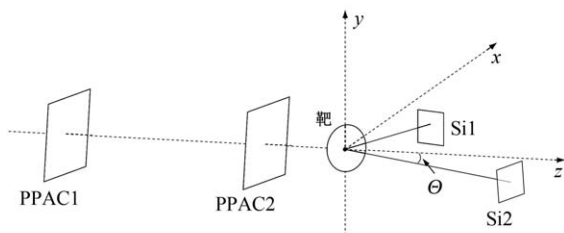


图 2 测量中的探测器示意图

### 3 位置校准方法及应用

在实验前后, 均使用位置测量工具对各探测器的位置做了定位, 误差控制在毫米量级。为了得到精确的弹性散射角分布, 探测器的位置校准非常重要。探测器位置校准的依据为: 低能轻炮弹在重靶上的弹性散射截面在前角区和卢瑟福散射截面的比值约为 1<sup>[11]</sup>。由于库仑力是中心对称的, 所以卢瑟福散射截面不依赖于方位角  $\psi$ , 而与散射角  $\theta_{\text{cm}}$  的关系为:

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{\text{cm}} = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{zZe^2}{4E} \right) \frac{1}{\sin^4(\theta_{\text{cm}}/2)}, \quad (1)$$

其中:  $z$  和  $Z$  分别为炮弹和靶核的电荷数;  $E$  为质心系入射能量;  $\theta_{\text{cm}}$  为散射角度。很明显, 卢瑟福散射截面在小角区对于散射角的变化极其敏感。在位置校准前需要明确的是, 精确确定的是散射角而非探测器的绝对位置, 而散射角是指入射束流方向和出射的散射粒子方向的夹角。对于本次实验, 位置校准需要完成的是: 把靶前确定束流方向的探测设备和靶后确定出射粒子的探测设备的坐标零点校准在同一直线上,

或者说如果散射角为  $0^\circ$  的情况下, 探测到的入射束流和出射粒子的方向应该是一致的。

为方便描述位置校准的过程, 建立了相应的坐标系 (如图 2 所示)。以 2 块 PPAC 的位置为基准, 目标是把望远镜系统的坐标零点校准在 2 块 PPAC 的坐标零点连线的延长线上。从图中可以看到, 对于本次测量方案中, 影响实验结果的有  $X, Y, Z$  及  $\theta$  4 个参量。图 2 中  $z$  是 PPAC 探测器法向方向,  $x$  为与其垂直的水平方向,  $y$  为竖直方向, 而  $Z, X, Y$  分别是这 3 个方向上探测器中心的坐标值,  $\theta$  为束流中心线与 Si 探测器法向的夹角。如果同时校准这 4 个参量会极其复杂, 所以首先通过蒙特卡洛模拟分析各个参量的位置偏差对于角分布的影响。以卢瑟福散射截面作为模拟的样本, 2 块 PPAC 记录到的束流分布为束流输入参数, 实际的探测器布局为基础进行模拟。先假设探测器的位置是准确的, 计算得到每个角度上的计数为  $N_i$ 。然后假设探测器有一个小的位置偏移, 计算得到每个角度上的计数  $N_e$ 。那么如果  $N_e/N_i$  变化越大认为弹性散射截面越依赖于该方向的位置偏移, 相反则认为依赖度较小。

蒙特卡洛模拟的部分结果如图 3 所示, 分别对  $X, Y, Z$  及  $\theta$  进行分析, 在对一个参量进行分析时, 其它参量设置为理想值。 $X$  和  $Y$  的位置偏移为  $-2, -1, 0, +1$  和  $+2$  mm;  $Z$  的位置偏移为  $-5, -2, 0, +2$  和  $+5$  mm;  $\theta$  的偏移为  $-1^\circ, -0.5^\circ, 0^\circ, +0.5^\circ$  和  $+1^\circ$ 。图中最末的点的误差突然变大是因为对在探测器边缘, 导致计数急剧减小使误差增大。可以看到除了最小和最大角度上的数据点以外, 只有  $X$  的偏移对于弹性散射截面有较大的影响, 而其它 3 个参量的依赖关系并不强。所以在实际的位置校准的时候, 只对  $X$  进行校准, 并且舍弃最小和最大角度的数据点。

对于 17.9 MeV/u 的  ${}^7\text{Be}$  打铅靶的弹性散射角分布, 在小于  $12^\circ$  的角度范围内, 弹性散射截面与卢瑟福散射的比值约为 1, 所以对于 Si2 校准的方法为寻找下式最小的  $\chi^2_2$ :

$$\chi^2_2 = \sum_{\theta} \frac{[R(\theta) - \bar{R}]^2}{R(\theta)^2}, \quad (2)$$

其中:  $R(\theta)$  为在给定的  $\theta$  角时的弹性散射和卢瑟福散

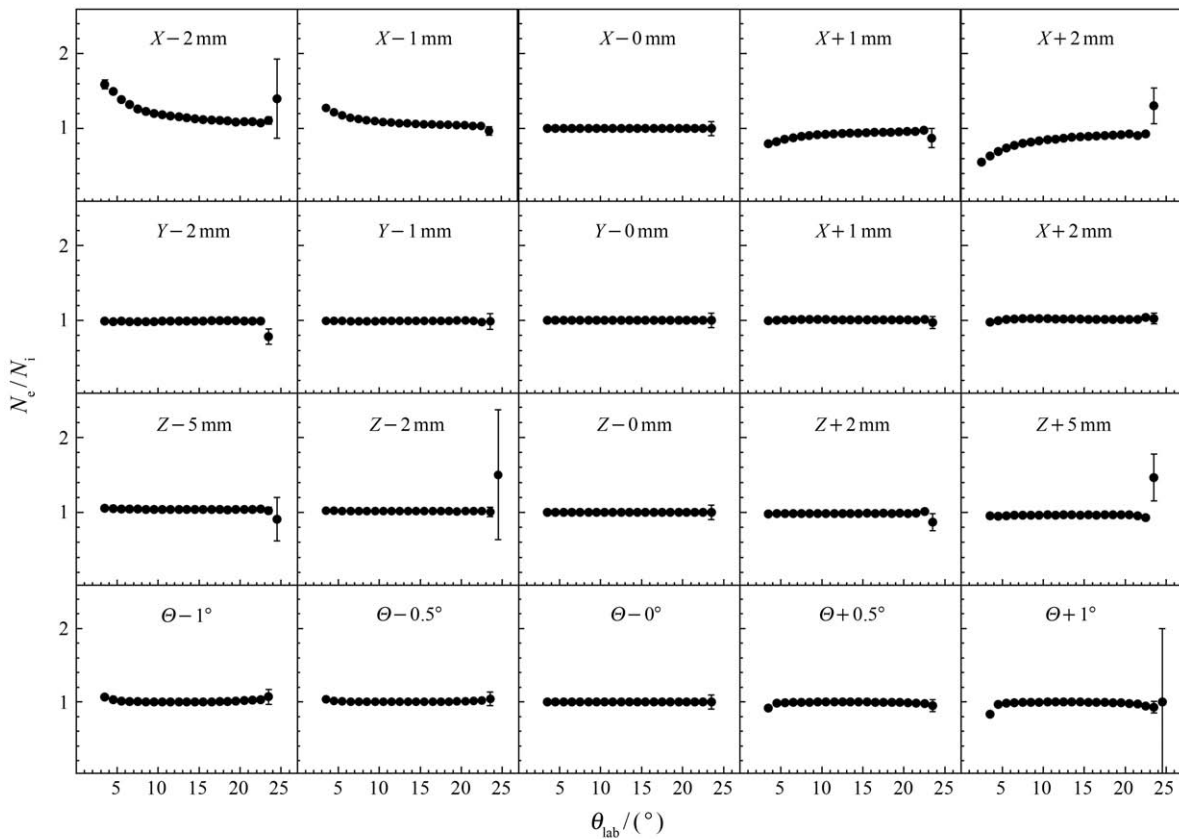


图 3 部分蒙特卡洛模拟结果

射的比值;  $\bar{R}$  为在  $4^{\circ} \sim 12^{\circ}$  范围内  $R(\theta)$  的平均值。图 4 为移动不同的位移所得到的  $\chi_2^2$ , 在  $0 \sim 3$  mm 的范围内步长为 0.1 mm, 图中列出小于 0 的步长变换的原因是因为远离前角区会导致更大的  $\chi_2^2$ 。从图中可以看出最小的  $\chi_2^2$  在位移为 2.1 mm 处。图 5 为 Si2 探测器在位置校准前和校准后分别得到的弹性散射截面和卢瑟福散射截面的比值, 图 5(a) 为校准前, 图 5(b) 为校准后, 通过位置校准得到了正确的弹性散射角分布。

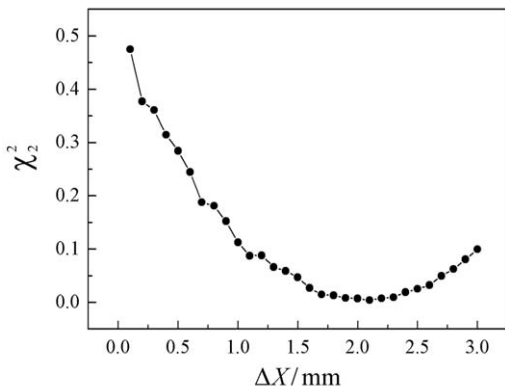


图 4 移动不同的位移得到的  $\chi_2^2$

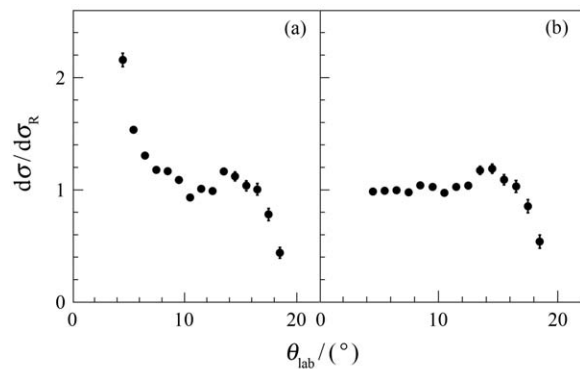


图 5 Si2 获得的位置校准前和位置校准后的弹性散射截面和卢瑟福散射截面的比值

由于望远镜 Si1 覆盖的角度范围大于纯卢瑟福散射截面的范围, 所以不能使用校准 Si2 的方法来完成。在完成 Si2 的位置校准之后, Si1 的位置校准依赖的事实为: 在 2 套望远镜系统覆盖的交叠的角度范围内的形状相同。在交叠的角度范围内使用的公式为

$$\chi_2^1 = \sum_{\theta} \frac{[R_1(\theta) - R_2(\theta)]^2}{R_1(\theta)^2}, \quad (3)$$

其中:  $R_1(\theta)$  和  $R_2(\theta)$  分别为望远镜系统 Si1 和 Si2 测

量到的弹性散射截面和卢瑟福散射截面的比值, 得到的最好的位置校准值为 +2.4 mm。

经过以上的位置校准, 使用 2 套望远镜系统获得的 17.9 MeV/u 的  ${}^7\text{Be}$  在铅靶上的弹性散射微分截面角分布如图 6 所示, 图中标注的误差为统计误差。这个角分布形状为一个典型的 Fresnel 散射, 在前角区 ( $< 12^\circ$ ), 截面比值在 1 上下振荡; 在  $15^\circ$  左右的时候有一个明显的峰, 称为库仑虹; 之后由于核力的作用, 截面比值很快地下降。

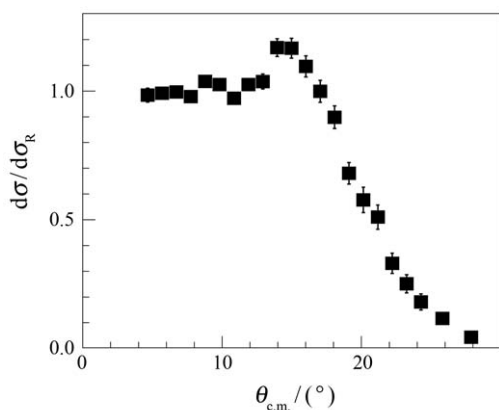


图 6  ${}^7\text{Be}$  在铅靶上的弹性散射截面和卢瑟福散射截面的比值

## 4 结论

结合 RIBLL 束流的实际情况, 基于低能轻炮弹打重靶的弹性散射截面在小角度为卢瑟福散射的事实依据, 发展了一套位置校准的方法。通过蒙特卡洛模拟检测弹性散射微分截面角分布与探测器不同方向偏移的依赖关系, 提出了对于此类探测器设置方案最简单的位置校准方法。并且成功地运用在  ${}^7\text{Be}$  打铅靶测量中, 得到了正确的弹性散射微分截面角分布。由于弹性散射一般伴随在各类核反应过程中, 所以可以利

用弹性散射角分布来为其它的核反应测量校准位置。需要指出的是, 本方法用在此类弹性散射测量中已经足够, 但由于只能校准一个方向的位置, 所以对于其它的核反应道的探测或许需要结合其它的方法。

**致谢** 感谢 HIRFL 的加速器部门同事在本次实验中提供的大力支持和帮助, 整个实验的成功是每个人倾力协助的结果, 在此, 向参与实验的每个人表示感谢。

## 参考文献:

- [1] KUMAR R, BONACCORSO A. *Phys Rev C*, 2011, **84**: 014613.
- [2] OGATA K, MATSUMOTO T, EGAMI T, *et al.* *Nucl Phys A*, 2008, **805**: 447c.
- [3] BERTULANI C A, CARDELLA G, MAPOLI M D, *et al.* *Phys Lett B*, 2007, **650**: 233.
- [4] KOLATA J J, AGUILERA E F, BECCHETTI F D, *et al.* *Phys Rev C*, 2004, **69**: 047601.
- [5] CANTO L F, LUBIAN J, GOMES P R S, *et al.* *Phys Rev C*, 2009, **80**: 047601.
- [6] PANDIT S K, JHA V, MAHATA K, *et al.* *Phys Rev C*, 2011, **84**: 031601.
- [7] RAHIGHI J, LAMEHI-RACHTI M, KAKUEE O R. *Nucl Instr and Meth A*, 2007, **578**: 185.
- [8] SUN Z Y, ZHAN W L, GUO Z Y, *et al.* *Chin Phys Lett*, 1998, **15**: 790.
- [9] SUN Z Y, ZHAN W L, GUO Z Y, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2003, **503**: 496.
- [10] GUO Z Y, ZHAN W L, XIAO G Q, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 2004, **38**: 169. (in Chinese). (郭忠言, 詹文龙, 肖国青, 等. *原子能科学技术*, 2004, **38**: 169.)
- [11] SANCHEZ-BENITEZ A M, ESCRIG D, ALVAREZ M A G, *et al.* *Nucl Phys A*, 2008, **803**: 30.

# A Method of Detector Misalignment Correction for an Elastic Scattering induced by the Radioactive Beams

CHEN Jiangbo<sup>1, 2</sup>, YANG Yanyun<sup>1, 2</sup>, WANG Jiansong<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, JIN Shilun<sup>1, 2</sup>, MA Peng<sup>1</sup>, MA Junbing<sup>1</sup>, HUANG Meirong<sup>1</sup>, HAN Jianlong<sup>1</sup>, BAI Zhen<sup>1, 2</sup>, HU Qiang<sup>1, 2</sup>, JIN Lei<sup>1, 2</sup>, LI Yong<sup>1, 2</sup>, ZHAO Minghui<sup>1, 2</sup>

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** In a typical nuclear elastic scattering experiment, differential cross section is very sensitive to the scattered angle and therefore the main source of systematic errors come from a millimetric uncertainties in the position measurement of detectors. A method for detector misalignment correction has been successfully applied to the elastic scattering of  ${}^7\text{Be}$  on Pb target at  $E_{\text{lab}}=17.9$  MeV/u at Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (RIBLL) at Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL). The correction method is based on the fact that the ratio of elastic scattering and Rutherford cross sections should be independent of scattering angle  $\theta$ , and equal to unity for very forward angles. A Monte Carlo simulation was performed to examine the angular distribution of cross sections for a given shift of detector position.

**Key words:** position alignment; Monte Carlo simulation; elastic scattering

---

**Received date:** 28 Mar. 2013; **Revised date:** 21 Apr. 2013

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(11005127,11075190,10905076,11205209,11205221); National Basic Research Program of China(2013CB83440x); Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences(KJ CX2-YW-N44)

**Corresponding author:** WANG Jiansong, E-mail: jswang@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>