



用于开展几倍库仑势垒能区放射性核束直接核反应实验的探测系统的设计与模拟

王萱轩 宋海声 杨过 段芳芳 王康 杨彦云

Design and Simulation of a Detection System for Conducting Nuclear Radioactive Ion Beam Direct Reaction Experiment in Several Times the Coulomb Barrier Energy Region

WANG Xuanxuan, SONG Haisheng, YANG Guo, DUAN Fangfang, WANG Kang, YANG Yanyun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022083>

引用格式:

王萱轩, 宋海声, 杨过, 段芳芳, 王康, 杨彦云. 用于开展几倍库仑势垒能区放射性核束直接核反应实验的探测系统的设计与模拟[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(2):244–250. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022083

WANG Xuanxuan, SONG Haisheng, YANG Guo, DUAN Fangfang, WANG Kang, YANG Yanyun. Design and Simulation of a Detection System for Conducting Nuclear Radioactive Ion Beam Direct Reaction Experiment in Several Times the Coulomb Barrier Energy Region[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(2):244–250. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022083

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[充气反冲核谱仪焦平面探测阵列的GEANT4模拟](#)

GEANT4 Simulation of the Focal Plane Detection Array of Gas-filled Recoil Separator

原子核物理评论. 2021, 38(4): 423–429 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021014>

[利用直接核反应研究轻丰中子核的奇特结构](#)

Study on Exotic Structure of Light Neutron-rich Nuclei via Direct Reaction

原子核物理评论. 2020, 37(3): 426–437 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC09>

[活性靶技术融合截面测量极限研究](#)

A Study of the Energy Limit for Measuring Fusion Cross Sections with the Active Target Technique

原子核物理评论. 2018, 35(2): 119–126 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.02.119>

[基于极化氦三靶的原子核散射实验](#)

Nuclear Scattering Experiment Based on the Polarized Helium-3 Target

原子核物理评论. 2019, 36(2): 151–160 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.151>

[基于耦合道Gamow壳模型计算 \$^{17}\text{O}\$ 和 \$^{17}\text{F}\$ 的能谱以及 \$^{16}\text{O}\(p,p\)\$ 反应的微分散射截面](#)

Calculations of the ^{17}O and ^{17}F Spectra and $^{16}\text{O}(p,p)$ Reaction Cross Sections in the Coupled-channel Gamow Shell Model

原子核物理评论. 2020, 37(3): 586–594 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC68>

[质子滴线核 \$^8\text{B}\$ 的实验研究进展](#)

Study on Proton Drip-line Nucleus ^8B

原子核物理评论. 2019, 36(2): 135–143 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.135>

文章编号: 1007-4627(2023)02-0244-07

用于开展几倍库仑势垒能区放射性核束直接核反应实验的探测系统的设计与模拟

王萱轩^{1,2}, 宋海声^{1,†}, 杨过^{2,3}, 段芳芳², 王康², 杨彦云^{2,3}

1. 西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070;
2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
3. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

摘要: 基于放射性核束物理的研究需求以及兰州重离子加速器国家实验室兰州放射性束流线(HIRFL-RIBLL1)的实际情况, 本工作设计了一套高效率的带电粒子探测系统。该系统由6套探测模块组成, 每套探测模块均为DSSD+PSD+CsI(Tl)三层结构。利用Geant4模拟给出了整套探测系统的几何效率, 得到了探测系统的最佳设计方案, 之后模拟完成了 $E_{\text{lab}} = 125 \text{ MeV}$ 的 ${}^7\text{Be}$ 在 ${}^{208}\text{Pb}$ 靶上的弹性散射和破裂反应实验, 并对模拟实验结果进行数据分析得到了弹性散射和破裂反应事件的统计分布。

关键词: 探测系统; Geant4; 几何效率; 弹性散射; 破裂反应

中图分类号: O571.53

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022083

0 引言

相对于自然界中已经存在的280多种稳定核素, 远离 β 稳定线的放射性核素具有分离能相对较低, 容易发生破裂或转移反应等特性, 从而为探索核结构的异常特征提供了机会, 激发了研究人员的热情^[1-4]。随着放射性核束装置的发展, 研究人员相继开展了大量的放射性核素直接核反应实验研究, 如弹性散射、非弹性散射、破裂和转移反应等, 发现了一批传统核物理理论不能解释的新物理现象, 极大地改变了人们对原子核的认识^[5-8]。比如在一些放射性核素弹性散射实验中可以观察到破裂/转移反应道对于弹性散射反应道有强烈的耦合效应^[9-11], 且耦合效应与集团结构等奇特结构有较强的关联性^[12-13]。研究认为, 这是由于这些放射性核素的破裂阈较小, 在原子核反应中破裂/转移道成为一个重要的竞争过程, 并且其实验数据能很好地为相关核反应机制和核结构的研究提供有效信息。

放射性核束与稳定核束相比, 其品质相对较差, 束流强度较低, 而且国内外各大实验室的束流时间非常紧缺。因此, 用于开展放射性核束实验的探测器应满足较大的角度覆盖范围、高能量分辨率、高空间分辨率和高几何效率等要求, 以提高束流利用率。双面硅条探测器

(Double-sided Silicon Strip Detector, DSSD)已经被广泛地应用于开展高能物理、核物理、核医学、天体物理以及空间科学等领域的实验研究工作中^[14]。目前, 国际上各大实验室已经相继建成了基于硅条探测器的探测系统, 并仍在不断地升级和完善, 如MUST^[15]、MUST2^[16]、LASSA^[17]、CD^[18]、HiRA^[19]、LEDA^[20]、EXPADES^[21]、EXOTIC^[22]、GLORIA^[23]、SPIDER^[24]等。此外, 国内实验室也已经研制了一些探测系统, 用于研究放射性核素诱发的核物理和天体物理反应, 取得了很多具有丰富物理意义的成果^[25-27], 但是相比国外的探测系统仍存在几何效率较低、角度覆盖范围较小等缺点, 需要新一代的探测系统来满足更高的实验要求。

Geant4模拟程序是由欧洲核子研究中心(CERN)主导开发的用于粒子物理和核物理研究的蒙特卡罗模拟程序包^[28-29]。它是利用软件工程和面向对象技术开发的, 在C++编程语言环境下运行, 被广泛地运用到大型加速器建造、核反应堆设计、探测器研制等方面。可以有效地模拟粒子与探测器介质之间的相互作用, 并易于跟踪感兴趣的粒子, 获得粒子位置、能量和动量等信息^[30]。模拟时需要向Geant4提供三个基本信息: 一是探测系统的几何信息, 包括探测系统每个部分的材料, 几何尺

收稿日期: 2022-07-29; 修改日期: 2022-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12105330)

作者简介: 王萱轩(1997-), 女, 甘肃定西人, 硕士研究生, 从事核物理研究; E-mail: 202022199@nwnu.edu.cn

†通信作者: 宋海声, E-mail: songhs@nwnu.edu.cn

寸以及位置布局等信息；二是实验模拟过程中需要包含的物理过程；三是进入探测系统的粒子源信息，包括粒子种类、动量、入射位置等。通过 Geant4 模拟，得到入射粒子与探测系统作用的结果，对模拟结果进行分析，加深对探测系统性能的认识，进而判断出各种因素对探测系统性能的影响，给出探测系统的优化方案，提高探测系统的性能，使探测系统满足实验的要求。本工作利用 Geant4 设计了一套高效率的带电粒子探测系统，并用这套系统模拟完成了入射能量为 $E_{\text{lab}} = 125 \text{ MeV}$ 时 ${}^7\text{Be}$ 束流在 ${}^{208}\text{Pb}$ 靶上的弹性散射与破裂反应实验。

1 实验装置设计

实验设置如图1所示，为了克服束流光斑大和束流强度低的缺点，必须逐事件测量入射粒子的位置和方向，所以在靶前放置了两块正反面各16条，条宽3 mm的硅条探测器 Si_A 和 Si_B ，它们的面积均为 $48 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$ ，厚度分别为 85, 75 μm ，分别放置在距离实验靶 800 和 300 mm 的位置，先通过它们提供的入射粒子靶点位置信息确定粒子在靶上的位置，再结合靶后探测器探测到的信息确定散射角^[31]。通常在实验数据分析过程中会使用球坐标系，定义靶心为坐标原点，束流入射方向为 Z 轴，Y 轴垂直于 Z 轴向上，根据右手定则确定 X 轴正方向。散射角 θ 表示反应粒子出射方向与 Z 轴的夹角， ϕ 表示方位角。弹性散射实验中比较关注的是四分之一角的反应事件统计，四分之一角是指弹性散射截面和卢瑟福散射截面的比值为四分之一时的角度。研究组所开展的不同放射性核素在高于库仑势垒能区的实验中四分之一角通常在 $10^\circ \sim 25^\circ(\theta)$ 范围内，这也是本套探测系统的重点覆盖角度，增加四分之一角上的数据统计有助于得到完整且精细的弹性散射角分布。本工作所设计的靶后探测系统是由六套 ΔE - E 望远镜探测系统组成，六套望远镜紧凑排列以在 $10^\circ \sim 25^\circ(\theta)$ 范围内覆盖较大立体角。每套望远镜均为三层结构，第一层是厚度为 150

μm 的 DSSD，第二层是厚度为 1 500 μm 的像素硅探测器 (Pixel Silicon Detector, PSD)，第三层是厚度为 20 mm 的 CsI(Tl) 晶体探测器。探测系统的多层探测介质可以阻止和鉴别实验中不同种类和能量的粒子，当能量较低的重粒子穿过 DSSD 探测器被阻止于 PSD 探测器时，可以把 DSSD 探测器作为 ΔE 探测器用于测量粒子穿过探测器的能损和散射粒子在探测器上的位置，PSD 探测器作为 E 探测器测量粒子被阻止在探测器中的剩余能量；当粒子能量较高，足以穿过前两层且阻止于 CsI(Tl) 探测器上时，可用 PSD 探测器做 ΔE 探测器记录粒子穿过探测器的能损，CsI(Tl) 探测器做 E 探测器来记录粒子被阻止在探测器中的剩余能量。所以，探测器个体中的 3 个部分构成了两套 ΔE - E 粒子鉴别系统：DSSD 与 PSD 组成第 1 套 ΔE - E 粒子鉴别系统，用于鉴别能量较低或较重的散射粒子；PSD 和 CsI(Tl) 组成第 2 套 ΔE - E 粒子鉴别系统，用于对轻带电粒子鉴别。探测系统的中心到靶心的距离为 270 mm，如图1所示，整套探测系统覆盖的角度范围约为 $3^\circ \sim 35^\circ$ ，角分辨约为 0.3° 。在探测阵列设计目标的几倍库仑势垒能区，反应体系在 $0^\circ \sim 3^\circ$ 范围内可视为纯卢瑟福散射，不具备太多的物理意义，不是主要的探测目标，而且在此角度范围内，大量未反应的束流直接入射到探测阵列，很难与小角度弹性散射事件区分，给后续数据分析造成困难，所以在设计探测阵列时错开 $0^\circ \sim 3^\circ$ 。Tel1 与 Tel2 上下对称，它们的第一层计划采用“四合一”的拼接设计，即由四块正反面各 32 条，条宽 2 mm 的 DSSD 拼接而成，DSSD 的厚度为 150 μm ，它们覆盖的角度为 $3^\circ \sim 30^\circ$ ；第二层是包含了 121 个 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 小单元的像素硅探测器，厚度为 1 500 μm ；第三层是包含了四块 $64 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$ 的 CsI(Tl) 晶体阵列。其余四套望远镜 Tel3 与 Tel5、Tel4 与 Tel6 左右对称，Tel3 与 Tel4、Tel5 与 Tel6 上下对称，它们的第一层计划采用“二合一”的拼接设计，即由两块正反面各 32 条，条宽 2 mm 的 DSSD 拼接而成，DSSD 的

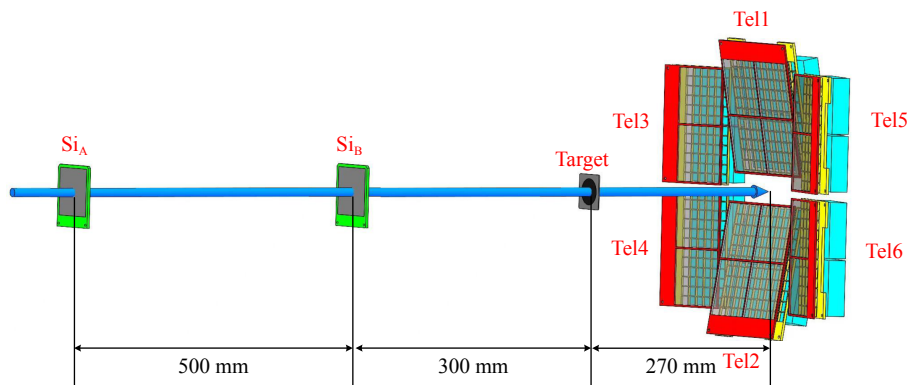


图1 探测系统示意图(在线彩图)

厚度为 300 μm ，它们覆盖的角度为 $15^\circ \sim 35^\circ$ ；第二层是包含了 66 个 10 mm \times 10 mm 小单元的像素硅探测器，厚度为 1 500 μm ；第三层是包含了两块 64 mm \times 64 mm 的 CsI(Tl) 晶体阵列。探测系统计划采用“二合一”和“四合一”的设计方案，是因为硅探测器要做到面积大且满足分辨要求有一定的困难，其定制费用高，拼接设计既节约成本又可满足实验要求，目前近代物理研究所已经有成熟的绑线跳接技术，可保证此设计的可行性。

2 实验模拟

2.1 探测系统的几何效率

在核物理反应中，提取反应截面和光谱因子都需要确定探测系统的几何效率。几何效率是指探测系统的有效探测面积在粒子发射的整个 4π 立体角方向所占的比 [32]。我们目标实验的弹核能量较高，位于几倍库仑势垒能区，大部分反应粒子位于 $35^\circ(\theta)$ 以内，实验中所关心的几何效率主要是在散射角 θ 角度范围内，探测系统有效探测面积所覆盖的方位角 ϕ 的比例。由于束斑半径较大，束流方向不确定，束流强度较低 [31]，实际开展实验时，直接从数学上计算几何效率非常困难，在这种情况下，对探测系统进行完整和真实的模拟非常有必要。在探测系统几何效率的模拟中，定义的几何结构完整覆盖了该探测系统的有效探测面积，发射源发射的 ^7Be 粒子能量分布为均值 140 MeV，标准差 2.8 MeV 的高斯分布；位置范围是均值为 0，半径方向上标准差为 10 mm 的高斯分布，并在半径 25 mm 处截断；角度范围是均值为 0，与 Z 轴夹角的标准差为 1° 的高斯分布。发射粒子 10^9 个，发射源距离靶 2 m，依次穿过 Si_A 、 Si_B 和实验靶被探测系统探测到，中间的物理过程均由 Geant4 自行模拟计算。按照这样的设计，粒子到达靶时，束斑有一定的扩展，为了防止束流粒子直接入射到靶后探测器上，在靶外设置了一个足够大并且足够厚的靶框，束斑扩展的部分被靶框阻止。具体的发射源几何包络如图 2 所示，其中图 2(a) 为侧视图 (YZ 平面)，忽略了 Tel3、Tel4、Tel5、Tel6；图 2(b) 为俯视图 (XZ 平面)，图中忽略了 Tel1、Tel2、Tel4、Tel6。探测系统探测到的粒子数量除以反应粒子总数就得到探测系统的几何效率。为了统计有效的反应粒子总数，模拟的方法是在靶后探测系统后面放置一块足够大的硅平面，用来探测未被靶后探测系统阻止 (探测到) 的反应粒子，将探测系统的几何效率表示为 η ，可以根据下式进行计算：

$$\eta = \frac{n}{n+m}, \quad (1)$$

其中： n 表示探测系统上探测到的粒子数； m 表示为平面探测到的粒子数。

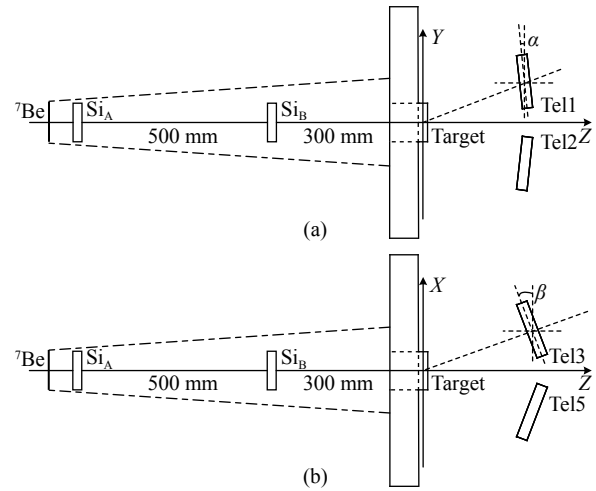


图 2 探测系统的几何布局

通过计算得到 Tel1 和 Tel3 在 $(3^\circ \sim 35^\circ) \times 2\pi$ 这个整体范围内的几何效率分别为 20.1% 和 6%。为了进一步优化探测系统的设计，本工作在 Geant4 模拟中评估了探测系统 Tel1、Tel2 以有效探测面积中心为支点沿 X 轴向探测系统中心旋转以及 Tel3、Tel4、Tel5、Tel6 以有效探测面积中心为支点沿 Y 轴向探测系统中心旋转对几何效率的影响。考虑到探测系统的对称性，仅模拟对 Tel1 和 Tel3 进行旋转，旋转的间隔点是 1° ，如图 2 所示。最终得到旋转不同角度 α 时 Tel1 在 $3^\circ \sim 35^\circ$ 范围内的几何效率，结果如图 3(a) 所示，通过高斯拟合得到在 $\alpha = 5.98^\circ$ 时，几何效率达到最大值 20.3%。同理我们选择了对 Tel3 进行旋转，由图 3(b) 可得，在旋转角度 $\beta = 19.4^\circ$ 时，几何效率达到最大值 6.37%。综上，通过模拟计算得到了各个探测器不同旋转角度下的最高几何效率，进而可得整套探测系统的最佳摆放设计为：Tel1、Tel2 以有效探测面积中心为支点沿 X 轴向探测系统中心旋转 5.98° ，Tel3、Tel4、Tel5、Tel6 以有效探测面积中心为支点沿 Y 轴向探测系统中心旋转 19.4° 。在得到最佳设计方案后，整个探测系统的几何效率随散射角 θ 的变化如图 4(a) 所示，在整套探测系统覆盖的 $3^\circ \sim 35^\circ$ 范围内，几何效率最高达到 90% 以上，在实验中所感兴趣的四分之一角度范围内 ($10^\circ \sim 25^\circ$)，几何效率提升至 65% 以上，相比现有的探测系统可以很大程度上提升束流使用效率，节约束流时间 [31, 33–34]。探测系统在 $3^\circ \sim 35^\circ$ 范围内覆盖了很大的立体角，每套望远镜的角度覆盖如图 4(b) 所示，横坐标 ϕ 表示方位角，纵坐标 θ 表示散射角，图中可以看出 Tel1 与 Tel2，Tel3 与 Tel4，Tel5 与 Tel6，对应的散射角范围都是对称的，与探测系统的设置预期一致，可以用来相互检验实验数据 [31]。

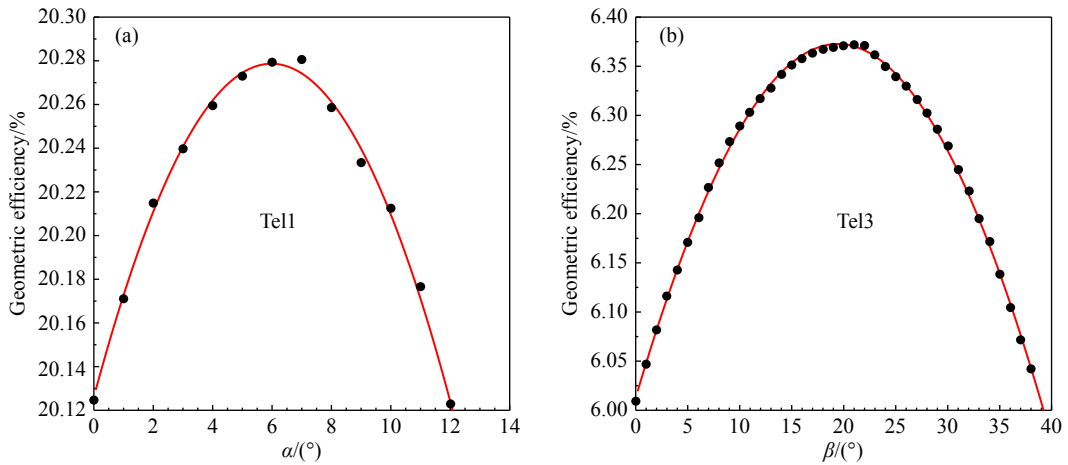


图 3 Tel1(a) 和 Tel3(b) 旋转角度与几何效率的关系 (在线彩图)

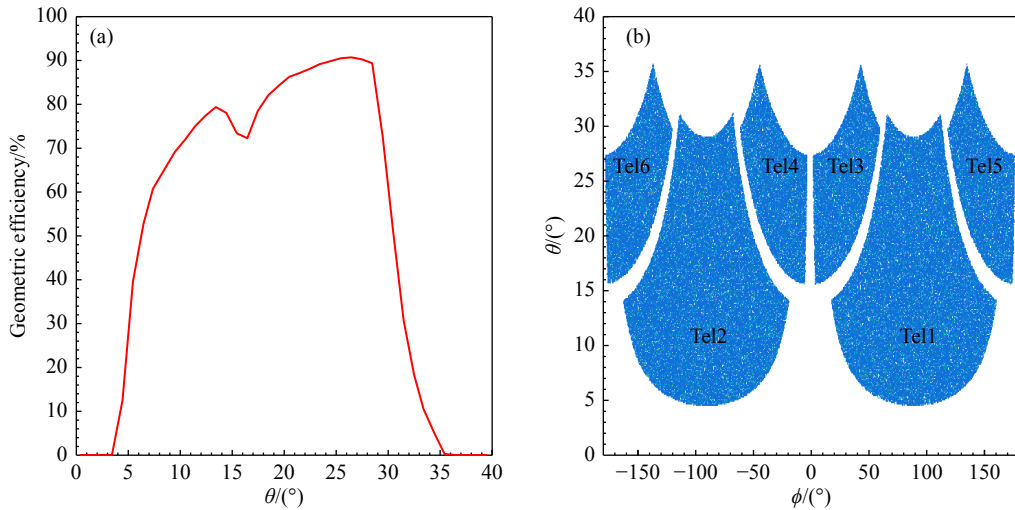


图 4 探测系统几何效率的角分布 (a) 和角度覆盖图 (b) (在线彩图)

2.2 模拟实验数据分析

为了检验探测系统的粒子鉴别能力，模拟完成了 $E_{lab} = 125 \text{ MeV}$ (靶中心能量) 的 ^7Be 在半径为 30 mm ，厚度为 17 mg/cm^2 的 ^{208}Pb 靶上的弹性散射和破裂反应实验，在此能量下， $^7\text{Be} + ^{208}\text{Pb}$ 反应系统的实验室系擦边角约为 22.6° 。发射源与之前设置相同，在此束流能散下，表 1 给出了硅探测器以及靶的相关信息，其中靶后硅探测器以 Tel1 和 Tel3 为代表给出，Tel2 结果与 Tel1 类似，Tel4、Tel5 和 Tel6 结果与 Tel3 类似。表中列出了由

表 1 靶后探测器及靶的相关信息

名称	均值/MeV	σ /MeV	半高宽/MeV	厚度/ μm
Si _A	6.350	0.187	0.439 45	85
Si _B	5.800	0.188	0.441 80	75
Target	3.180	0.143	0.336 05	15
UDSSD (Tel1)	12.687	0.359	0.843 65	150
LDSSD (Tel3)	13.193	0.430	1.010 50	150
USD (Tel1)	113.150	3.460	8.131 00	1 500
LSD (Tel3)	112.890	3.420	8.037 00	1 500

Geant4 模拟自行给出的各个硅探测器探测到的 ^7Be 粒子的能量均值、 σ 和半高宽，其中半高宽可视为各个探测器的能量分辨。图 5 为反应粒子在整个探测系统上的分布，越靠近束流中心，统计计数越高，验证了探测系统

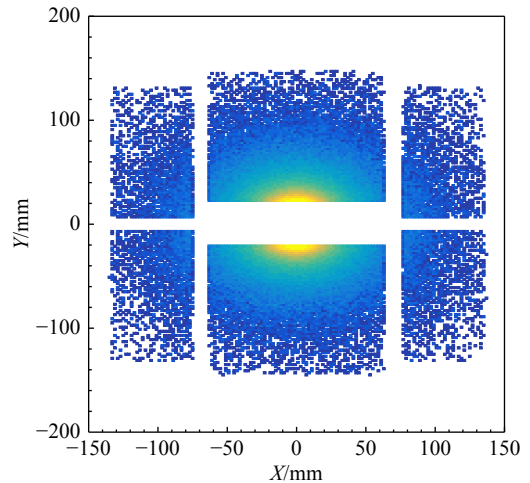


图 5 整套探测系统上的粒子位置分布 (在线彩图)

的合理性。束流 ${}^7\text{Be}$ 轰击 ${}^{208}\text{Pb}$ 靶会反应出不同的粒子，如弹性散射粒子 ${}^7\text{Be}$ 和 ${}^7\text{Be}$ 发生破裂反应后的碎片 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 等。所有的粒子可以通过 ΔE - E 方法清晰鉴别。由 DSSD-PSD 组成的二维粒子鉴别谱可实现对重粒子的鉴别，如图 6(a) 所示，可清晰地鉴别出 ${}^7\text{Be}$ 的散射事件，

由于 PSD 的厚度不足以完全阻止破裂产物 (${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$)，需要利用第三层探测器 CsI(Tl) 对较轻粒子实行鉴别，如图 6(c) 所示，由 PSD-CsI(Tl) 组成 ΔE - E 望远镜对轻带电粒子可实现完全鉴别。图 6(c) 可以清楚地鉴别出破裂事件 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ 以及 p、d、t 带状分布。

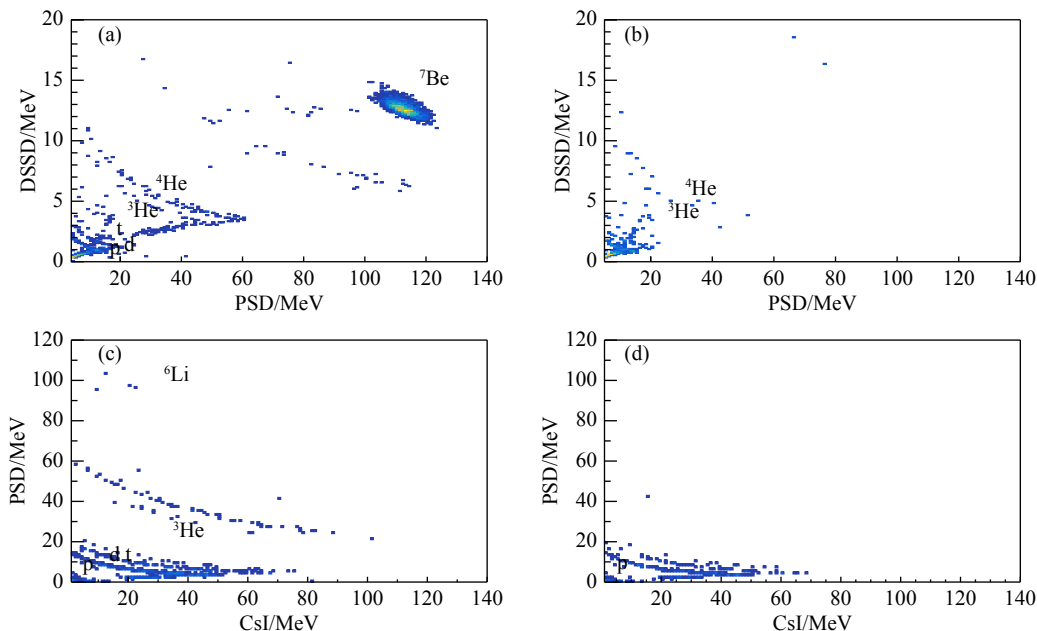


图 6 Tel3 整个角度范围有靶实验 [(a), (c)] 和空靶实验 [(b), (d)] 模拟得到的重粒子和轻粒子的 ΔE - E 粒子鉴别谱 (在线彩图)

对于模拟实验中鉴别出的弹性散射事件 (${}^7\text{Be}$) 和破裂反应事件 (${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$)，通过 Si_A 和 Si_B 提供的入射粒子的入射位置和方向得到靶上的反应位置，再结合出射粒子击中靶后探测系统上的位置，即可逐事件得到散射角 [31]。图 7(a) 是 ${}^7\text{Be}$ 弹性散射事件随散射角 θ 变化的统计分布，图 7(b)、图 7(c) 蓝色实线分别是破裂产物 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 随破裂角 θ 的变化依次填谱后得到。探测系统能够同时测量弹性散射和破裂事件，可满足同时鉴别轻重粒子的实验要求。

能发生弹性散射和破裂反应，对计算束流在 ${}^{208}\text{Pb}$ 靶上的反应截面造成影响，所以需要空靶实验 (即仅移除 ${}^{208}\text{Pb}$ 反应靶，其他设置相同) 进行相关评估。对于靶前硅上发生的弹性散射反应，在我们之前的研究中，已进行过相关的空靶实验模拟计算，发现靶前硅探测器上的弹性散射事件在总的弹性散射事件结果中占比不到 5%，可以忽略不计 [10]。而对于靶前硅探测器上发生的破裂反应对破裂反应截面计算的影响，本工作进行了空靶实验模拟，得到的二维粒子鉴别谱如图 6(b), (d) 所示，可以看到，几乎没有探测到 ${}^7\text{Be}$ 粒子，仅探测到了少量破裂反应产生的 ${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 粒子。通过计算得到了这些破裂反应事件的统计分布，如图 7(b) 和 7(c) 红色实线所

需要注意的是，使用硅探测器探测靶前束流的入射径迹，虽然探测效率接近 100%，但是硅探测器本身也可作为一个薄靶，束流在靶前的探测器 (Si_B) 上也有可

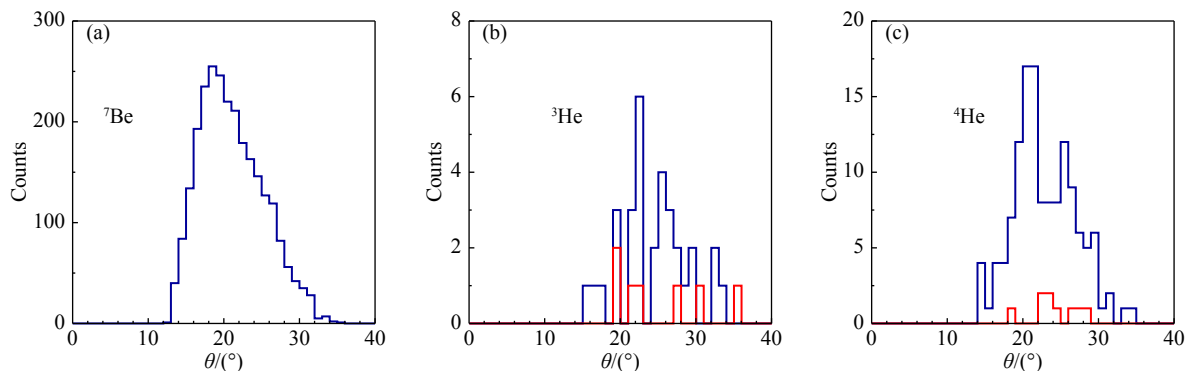


图 7 Tel3 整个角度范围有靶实验和空靶实验模拟得到的弹性散射 (a) 和破裂反应 [(b), (c)] 事件的统计分布 (在线彩图)

示, 与有靶实验的结果相比, 占比约15%左右, 不可以忽略不计。这为今后的相关实验提出了依据和建议, 即靶前硅上的破裂反应不可忽略, 有必要进行空靶实验测量该截面以对靶上的破裂截面进行修正。

3 结论

基于放射性核束物理的研究需求以及兰州重离子加速器国家实验室兰州放射性束流线的实际情况, 本工作设计了一套新的带电粒子探测系统。新一代探测系统由六套望远镜系统组成, 每套望远镜系统均为DSSD+PSD+CsI(Tl)三层结构, 排列紧凑, 覆盖角度范围为 $3^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。通过调节探测器望远镜旋转的角度, 得到了最佳的设计方案, 几何效率最高可达到90%。新探测系统可以大幅度提高束流使用效率, 获得更高质量的实验数据, 拓展放射性核直接核反应领域的研究内容。利用Geant4模拟完成了入射能量为 $E_{\text{lab}} = 125 \text{ MeV}$ 的 ${}^7\text{Be}$ 在 ${}^{208}\text{Pb}$ 靶上的弹性散射和破裂反应实验, 通过模拟实验数据分析验证了新探测系统能够满足弹性散射与破裂反应事件的轻重粒子的同时测量。此外, 空靶实验的模拟结果表明, 在计算破裂反应截面时, 靶前硅探测器上发生的破裂反应不可忽略, 为今后实验方案提供了参考。

参考文献:

- [1] TANIHATA I, HAMAGAKI H, HASHIMOTO O, et al. *Phys Rev Lett*, 1985, 55(24): 2676.
- [2] OTSUKA T, SUZUKI T, HOLT J D, et al. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 032501.
- [3] SUZUKI D, IWASAKI H, BEAUMEL D, et al. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 152503.
- [4] MA W H, WANG J S, YANG Y Y, et al. *Nuclear Science and Techniques*, 2017, 28(12): 177.
- [5] KOLATA J J, GUIMARÃES V, AGUILERA E F. *The European Physical Journal, A Hadrons and Nuclei*, 2016, 52(5): 123.
- [6] JONSON B. *Physics Reports*, 2004.
- [7] LI Kuoang, YE Yanlin. *Nuclear Techniques*, 2014, 37(10): 100501. (in Chinese)
(李阔昂, 叶沿林. *核技术*, 2014, 37(10): 100501.)
- [8] WANG Shuo. *Nuclear Techniques*, 2014, 37(10): 100523. (in Chinese)
(王硕. *核技术*, 2014, 37(10): 100523.)
- [9] KEELEY N. *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, 381: 012087.
- [10] DUAN F F, YANG Y Y, WANG K, et al. *Phys Lett B*, 2020, 811: 135942.
- [11] DUAN F F, YANG Y Y, LEI J, et al. *Phys Rev C*, 2022, 105(3): 034602.
- [12] DUAN F F, YANG Y Y, PANG D Y, et al. *Chin Phys C*, 2020, 44(2): 024001.
- [13] MORCELLE V, PIRES K, GALLARDO M R, et al. *Phys Lett B*, 2014, 732: 228.
- [14] MENG Xiangcheng. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2003, 23(1): 4. (in Chinese)
(孟祥承. *核电子学与探测技术*, 2003, 23(1): 4.)
- [15] BLUMENFELD Y, AUGER F, SAUVESTRE J E, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1999, 421(3): 471.
- [16] POLLACCO E, BEAUMEL D, ROUSSEL-CHOMAZ P, et al. *The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei*, 2005, 25(1): 287.
- [17] DAVIN B, SOUZA R, YANEZ R, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2001, 473(3): 302.
- [18] OSTROWSKI A N, CHERUBINI S, DAVINSON T, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2002, 480(2): 448.
- [19] WALLACE M S, FAMIANO M A, GOETHEM M J, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2007, 583(2): 302.
- [20] DAVINSON T, BRADFIELD-SMITH W, CHERUBINI S, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2000, 454: 350.
- [21] STRANO E, ANASTASIO A, BETTINI M, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2013, 317: 657.
- [22] PIERROUSAKOU D, BOIANO A, BOIANO C, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2016, 834: 46.
- [23] MARQUÍNEZ-DURÁN G, ACOSTA L, BERJILLOS R, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2014, 755: 69.
- [24] ROCCHINI M, HADYŃSKA-KLĘK K, NANNINI A, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2020, 971: 164030.
- [25] ZHANG Gaolong, YAO Yongjin, ZHANG Guangxin, et al. *Nucl Sci Tech*, 2017, 28: 104.
- [26] XU Xinxing. *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 3405. (in Chinese)
(徐新星. *科学通报*, 2021, 66: 3405.)
- [27] ZENG Qi, ZHANG Jingtao, YUE Ke, et al. *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 3395. (in Chinese)
(曾奇, 张景涛, 岳珂, 等. *科学通报*, 2021, 66: 3395.)
- [28] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2003, 506: 250.
- [29] ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, et al. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 53(1): 270.
- [30] WU Chong, ZHANG Qiang, SUN Zhijia, et al. *Nuclear Physics Review*, 2012, 29(2): 173. (in Chinese)
(吴冲, 张强, 孙志嘉, 等. *原子核物理评论*, 2012, 29(2): 173.)
- [31] YANG Y Y, WANG J S, WANG Q, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2013, 701: 1.
- [32] RANGER N T. *RadioGraphics*, 1999, 19(2): 481.
- [33] WANG K, YANG Y Y, MORO A M, et al. *Phys Rev C*, 2021, 103: 024606.
- [34] WANG K, YANG Y Y, GUIMARÃES V, et al. *Phys Rev C*, 2022, 105: 054616.

Design and Simulation of a Detection System for Conducting Nuclear Radioactive Ion Beam Direct Reaction Experiment in Several Times the Coulomb Barrier Energy Region

WANG Xuanxuan^{1,2}, SONG Haisheng^{1,†}, YANG Guo^{2,3}, DUAN Fangfang², WANG Kang², YANG Yanyun^{2,3}

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The detection system designed in this paper is a set of high-efficiency detector system based on the research requirements of the Radioactive Ion Beams physics and the Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou(RIBLL) at the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou(HIRFL). The detector system consists of six sets of telescopes, each composed of a three-layer structure DSSD+PSD+CSI(Tl). After using Geant4 simulation to obtain the geometric efficiency, the best design of the detection system is given. Then the elastic scattering and breakup reactions of ${}^7\text{Be}$ on the ${}^{208}\text{Pb}$ target with $E_{\text{lab}} = 125$ MeV have been simulated. The statistical distributions of the elastic scattering and breakup events were obtained.

Key words: detection system; Geant4; geometric efficiency; elastic scattering; breakup

Received date: 29 Jul. 2022; **Revised date:** 14 Sep. 2022

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(12105330)

† Corresponding author: SONG Haisheng, E-mail: songhs@nwnu.edu.cn