

《原子核物理评论》

# www.npr.ac.cn Nuclear Physics Review



Started in 1984

## 用于逆运动学(<sup>3</sup>He, t)电荷交换反应实验探测系统的研制

李蒙 ト文娟 杨贺润 胡碧涛 何志轩 张毅

Development of Detection System for (<sup>3</sup>He, t) Charge Exchange Reaction Experiment in Inverse Kinematics

HE Zhixuan, LI Meng, BU Wenjuan, YANG Herun, HU Bitao, ZHANG Yi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC69

### 引用格式:

何志轩,李蒙,卜文娟,杨贺润,胡碧涛,张毅.用于逆运动学(<sup>3</sup>He,t)电荷交换反应实验探测系统的研制[J].原子核物理评论, 2024, 41(1):473-479. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC69

HE Zhixuan, LI Meng, BU Wenjuan, YANG Herun, HU Bitao, ZHANG Yi. Development of Detection System for (<sup>3</sup>He, t) Charge Exchange Reaction Experiment in Inverse Kinematics[J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(1):473-479. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC69

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

### 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

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

原子核物理评论. 2023, 40(2): 244-250 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022083

### 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

基于<sup>10</sup>B<sub>4</sub>C转换体的多层多丝正比室中子探测器模拟

Simulation of a Novel Neutron Detector Based on Multi-layer MWPC with <sup>10</sup>B<sub>4</sub>C Convertor

原子核物理评论. 2019, 36(1): 71-77 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.071

### 不稳定原子核β衰变强度的实验测量方法

Experimental Measurement Method of Beta Decay Strength of Unstable Nuclei 原子核物理评论. 2020, 37(3): 438-446 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC69

### 主动中子多重性铀质量测量模拟研究

Simulation of Uranium Mass Measurement Based on Active Neutron Multiplicity

原子核物理评论. 2019, 36(2): 266-271 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.266

### 利用GEANT4研究轻带电粒子诱发反应出射中子双微分产额

Geant4 Simulations of Neutron Production Double Differential Yields in Light Charged Particle Induced Reaction 原子核物理评论. 2020, 37(3): 617-620 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC48

文章编号: 1007-4627(2024)01-0473-07

# 用于逆运动学(<sup>3</sup>He, t)电荷交换反应实验探测系统的研制

何志轩<sup>1</sup>,李蒙<sup>2</sup>,卜文娟<sup>1</sup>,杨贺润<sup>3</sup>,胡碧涛<sup>1</sup>,张毅<sup>1,†</sup>

(1. 兰州大学核科学与技术学院,兰州 730000;
 2. 中南大学湘雅二医院,长沙 410000;
 3. 中国科学院近代物理研究所,兰州 730000)

**摘要:**中能区电荷交换反应可以从自旋-同位旋激发的角度研究原子核复杂结构。利用中国科学院近代物理 研究所的放射性束流线,利用逆运动学方法进行电荷交换反应实验,可以将研究的对象核素拓展至丰中子核 乃至不稳定核。基于此,设计了用于电荷交换反应实验的探测器系统,该系统主要包括了<sup>3</sup>He气体靶、TPC 和 CsI(TI)阵列,其中 TPC 和 CsI(TI)阵列构成 Δ*E-E*系统。利用 Geant4、Garfield++等模拟软件,优化了 TPC 的工作条件,确定了实验研究的运动学区间和探测器的基本设计,考察了探测系统的粒子鉴别能力。基于模 拟优化,搭建了探测系统,并利用激光测试了 TPC 的位置分辨,在读出电极平面,位置分辨约为 422 μm; 在电子漂移方向,位置分辨约为 681 μm。TPC 的性能足以支撑对核反应次级粒子的径迹重建,尤其能够实 现较高的散射角分辨。

**关键词:** 探测系统; Geant4; 模拟; 电荷交换反应 中图分类号: O571.1 文献标志码: A DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC69

## 0 引言

电荷交换反应是一种可以从自旋-同位旋激发的角 度研究原子核复杂结构的实验探针<sup>[1]</sup>。其中(<sup>3</sup>He, t)、 (t, <sup>3</sup>He)、(d, <sup>2</sup>He)等反应是电荷交换反应研究中的常规 实验手段,具有高分辨率、高探测效率等优点。利用加 速器产生<sup>3</sup>He和t束流,针对一系列核素,开展了(<sup>3</sup>He.t) 和(t,<sup>3</sup>He)电荷交换反应实验<sup>[2]</sup>,在原子核的自旋-同位 旋激发、巨共振、β衰变、中子皮厚度等方向的研究取 得了丰硕成果。然而,由于实验设计的限制,迄今为止 的电荷交换反应实验研究绝大部分局限于稳定核素,利 用逆运动学方法对非稳定核素进行电荷交换反应实验仍 在技术上面临巨大挑战,当然也充满机遇。美国密歇根 州大学的研究团队首次成功通过逆运动学(d,<sup>2</sup>He)反应 从不稳定性原子核中提取了 $\beta$ <sup>+</sup>方向的Gamow-Teller跃 迁强度 B(GT);实验方案基于活性靶时间投影室和磁谱 仪的使用,为解决一系列科学难题开辟了道路<sup>[3-4]</sup>。北 京航空航天大学的研究团队提出,利用逆运动学对不稳 定核素的电荷交换反应总截面进行系统测量,并试图将 总截面与总B(GT)之间建立联系<sup>[5]</sup>。基于此,我们提出 利用中国科学院近代物理研究所的加速器装置<sup>[6]</sup>产生的放射性束流轰击<sup>3</sup>He靶,开展逆运动学(<sup>3</sup>He, t)电荷交换反应实验,以将研究核素范围拓展到不稳定丰中子核素。因此,我们设计并搭建了用于探测大角度散射t的探测系统,以验证利用重离子束流进行逆运动学(<sup>3</sup>He, t)实验的可行性<sup>[7]</sup>。探测系统基于 Δ*E*-*E* 望远镜。其中,Δ*E*探测器为时间投影室(TPC),*E*探测器为CsI(TI)。

本文主要论述了探测器的设计与模拟优化。首先, 根据物理目标设计了探测器的基本结构; 然后,基于运 动学计算和Geant4、Garfield++、COMSOL等软件,模 拟了探测器的基本结构和反应本底,并据此优化探测器 的设计方案,确定了探测器研究的运动学区。最后结合 模拟优化分析,完成了探测系统的搭建。

## 1 实验总体设计

如图 1(a) 所示,探测系统主要包括:<sup>3</sup>He气体靶、 TPC、CsI(Tl)闪烁体阵列、前端电子学和数据采集系统 组成。重离子束流轰击<sup>3</sup>He靶发生电荷交换反应产生t, 具有一定动能的散射t穿过TPC,然后在闪烁体中沉积

收稿日期: 2023-08-24; 修改日期: 2024-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2032166,11875301,U1832167);国家重点研发计划项目(2022YFE0103900)

作者简介:何志轩(1996-),男,四川广元人,博士研究生,从事实验核物理研究; E-mail: hezhx21@lzu.edu.cn

**<sup>†</sup>通信作者:** 张毅, E-mail: yizhang@lzu.edu.cn



图 1 探测系统整体框图(a)及t的散射动能与散射角的关系(b)

能量。在实际碰撞过程中,可能会产生其他副产物。 由 TPC和CsI(TI)阵列构成的 $\Delta E - E$ 系统可以进行粒子鉴 别以甄别t。TPC具有较低的能量阈值、较高的探测效 率、较好的能量分辨和位置分辨(特别是散射角 $\theta$ 分辨), 能够精确测量带电粒子的能量损失以及重建三维径迹, 且相比硅条探测器等更经济实惠,便于大尺寸加工。此 外,TPC的工作气体本身就可以成为靶,即活性靶TPC (AT-TPC),这一点在开展核物理实验方面具有显著的 优势和潜力<sup>[8]</sup>。因此,我们采用基于厚型电子倍增器 (Thick Gas Electron Multiplier, THGEM)<sup>[9–10]</sup>的TPC作 为 $\Delta E$ 探测器,以测量带电粒子的三维径迹和能损<sup>[11]</sup>。 CsI(TI)具有能量分辨好、探测效率高、易于加工和封 装等优点,因此,我们选择CsI(TI)为*E*探测器,以有 效地探测带电粒子的剩余能量<sup>[12]</sup>。

如果不考虑同位旋的翻转和末态粒子的激发能,电 荷交换反应可以被看作弹性散射。基于重离子和轻核 (<sup>3</sup>He)弹性碰撞的相对论运动学计算,给出t的散射能量 和实验室系散射角( $\theta_{t,lab}$ )的关系,如图1(b)所示。 $\theta_{t,lab}$ 接近90°时,对应于质心系散射角( $\theta_{t,cm}$ )接近0°,动量 转移接近零;但是小角散射t的动能太低,难以克服靶 的自吸收,所以在实验中难以测到这一区间,可以根据 实际测到的散射角向 $\theta_{t,cm}$ =0处外推。随着 $\theta_{t,lab}$ 减小,t散 射动能增大,需要更厚的CsI(TI)晶体才能使其能量完 全沉积。因此,实验研究的运动学区间,需要结合探测 器的具体设计,进一步地模拟优化和考虑。

## 2 模拟优化

#### 2.1 TPC 模拟

带电粒子穿过TPC,电离工作气体产生电子-离子对。电子在电场驱动下向THGEM方向漂移,并在穿过

THGEM 微孔时发生雪崩放大,雪崩电子进入收集区 被读出电极收集产生信号。在电子的漂移、雪崩等过程 中,TPC工作气体的特性、THGEM 的增益等会影响探 测器性能<sup>[13]</sup>,因此前期模拟优化尤为重要。我们采用 Garfield++<sup>[14]</sup>模拟电子在工作气体中的特性。电子在  $Ar+iC_4H_{10}$ 中的漂移速度模拟结果如图 2(a)所示。在 TPC中,希望电子漂移速度受约化场强的影响较小,这 样即使电场出现轻微波动,漂移速度也不会变化剧烈。 Ar(95%)+iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(5%)是一种合适的工作气体; 当漂移区 的电场强度为200 V/(cm·atm)时,电子的漂移速度接近 饱和,约为4.2 cm/µs;而iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>比例更大,则需要更高 的电场才能达到饱和速度。同时,采用COMSOL<sup>[15]</sup>和 Garfield++<sup>[14]</sup>模拟电子在工作气体中从产生到收集的整 个过程,给出THGEM 合适的电压配置的参考。模拟结 果如图2(b)所示,雪崩增益随THGEM膜压差的增大而 指数增加; 其中, Ar(95%)+iC4H10(5%)气体在较低的电 压下就能实现高雪崩增益;在双层 THGEM 工作时,单 层电压不需要加很高就可以实现高增益,有效避免打火 等情况发生。

考虑 TPC 是一个不规则的形状,且对电场均匀性 要求高,需要设计专用场笼。场笼电极采用印刷电路板 工艺,因其便于加工成不同的形状。然后利用 COM-SOL 计算场笼的电场,确定场笼设计:场笼采用双面 敷铜的 PCB 制作,内外电极条的条宽均是 1.5 mm,条 间隙为 0.5 mm,电极条中心的周期为 2 mm;内外电极 是交错排布的镜像结构。在 COMSOL 内设置参考线提 取电场分布。参考线平行于阴极板,位于场笼中间位置, 分别统计参考线上距离内场笼边缘 2,5,10 mm之内的 电场强度。计算结果显示,距离场笼边缘 2 mm 处的电 场强度的不均匀性约为 2‰,距离场笼 5 mm 处的电场



图 2 Garfield++模拟的 Ar+iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 的电子漂移速度 (a) 及单层 THGEM 总增益与膜压差的关系 (b)(模拟在常温常压下进行)

电场有微小畸变,对于 20~150 MeV 散射的 t,会在 5 mm 的工作气体中损失约 5~30 keV 能量,约为在 TPC 中总能量沉积的 2.5%,可以在数据处理时修正或舍弃;场笼内其余区域的电场畸变很小,可以认为是有效漂移场区。若将距离场笼 5 mm 范围内的电场视为畸变电场,畸变场区约占 5%,均匀场区约占 95%。

### 2.2 Geant4 模拟

基于 Geant4<sup>[16]</sup>程序,我们开发了一套蒙特卡罗模 拟软件包来确定探测系统的结构及运动学。利用 Geant4构建的探测器系统如图 3(a)所示,中心蓝色圆柱 是封装3个大气压<sup>3</sup>He气体的不锈钢腔体(1个标准大气 压等于101.325 kPa)。重离子束穿过<sup>3</sup>He气体后的束斑 直径约为30~40 mm,故气体靶半径设置为24.8 mm, 不锈钢壁厚为0.2 mm。中间黄色半圆柱是TPC,主要 包括场笼和工作气体,如图3(b)所示。TPC内半径为 25 mm,外半径为197 mm。场笼结构中间为厚度0.66 mm 的FR4基材,基材两侧的覆铜厚度均为0.02 mm。场笼 之内填充1个大气压的Ar(95%)+C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(5%)气体。最外 层为CsI(TI)闪烁体阵列,红色部分为CsI(TI)晶体,厚 度20 mm,长200 mm;表面白色部分为0.135 mm厚的 Teflon反射层。

首先,我们进行"快模拟",直接从靶"体积"(Volume) 中生成t以及p、d、<sup>3</sup>He及α粒子等产物,以考察探测 系统能探测的能量范围以及粒子鉴别能力。将碰撞视为 弹性散射过程,t粒子遵循图1(b)中的散射能量和角度 的相关性。为了简化模拟过程,假设p、d、<sup>3</sup>He及α粒 子等产物粒子的能量-角度关系与t相同。将TPC工作 气体和CsI(Tl)晶体指定为"灵敏探测器"(Sensitive detector),分别提取带电粒子在其中的能量沉积。假设 TPC和闪烁体的典型能量分辨率分别为10%和8%,模 拟的Δ*E-E*分布如图3(c)所示,t和其他副产物可以被清 楚地区分。在这种探测器设计下,可探测到的t最大能 量约为130 MeV。t的初始动能和在<sup>3</sup>He气体、不锈钢 腔体以及内层场笼中的能量沉积之和的关系如图3(d)所 示,t克服靶的自吸收且穿出不锈钢侧壁进入TPC,需 要20 MeV的能量;出射t的能量越高,在探测器死区 损耗的能量越小。因此,该探测器设计适用于动能约 为20~130 MeV的t,对应的散射角约为76°~86°。

在确定了探测系统的设计后,为了考察重离子打靶 的反应本底,我们模拟了500 MeV/nucleon<sup>17</sup>C束流轰  $\pm {}^{3}$ He 气体靶的过程。Geant4 的物理过程采用 FTFP BERT ATL 物理列表。 ${}^{17}$ C 束流沿 z 方向,并以 z 轴为中 心、半径20mm的圆面分布入射到3He气体靶中。Geant4 的模拟并不能细致地给出电荷交换反应的截面,特别是 涉及到反应机制的自旋-同位旋激发的过程,而是将反 应视作弹性散射或非弹性散射给出重离子与靶核碰撞产 生t以及其他副产物粒子的统计性描述。根据模拟重建 的<sup>17</sup>C-<sup>3</sup>He碰撞产物的 $\Delta E$ -E分布曲线图(见图4),在76°~ 86°的出射角范围内,可以清楚地区分出各种带电粒子。 考虑束流强度为10<sup>6</sup> pps,模拟给出的产物粒子的计数 率如表1所列。产量最大的是质子,而弹性散射的产物 <sup>3</sup>He则相当小。因此,我们认为<sup>3</sup>He极有可能被500 MeV/ nucleon 的重离子束打碎,从而导致质子和氘核计数占 主导地位。尽管与质子和氘核相比,t的产额较小,每 秒约有32个事例,但它仍然能够被有效测量和甄别。 探测器设计的合理性得到了验证。同时,尽管碰撞产生 的总事件数较高,但是探测器实际上接受的有效计数率 约为1000 pps,对于探测器和电子学的响应要求不高。



图 3 Geant4 模拟的探测系统结构立体图 (a), 剖面图 (b) 和  $\Delta E - E$  分布 (c) 以及 t 在 <sup>3</sup>He 气体、不锈钢腔体以及内层场笼中的 能量沉积与初始动能的关系 (d)



 粒子杆关
 p
 d
 t
 nc
 u

 总计数率/s<sup>-1</sup>
 15 723
 2 689
 1 211
 244
 1 688

 有效计数率/s<sup>-1</sup>
 1 107
 206
 32
 6
 14

注: 总计数率为所有散射角下产生的事例; 有效计数率为散射角76°~86°、且被探测系统测到的事例。

# 3 TPC 搭建与性能测试

基于模拟优化,我们搭建了用于电荷交换反应实验的探测器系统。TPC 探测器<sup>[17]</sup>主要包括阴极板、场笼、 THGEM 膜和阳极读出板,如图 5 所示。阴极是一块单 面敷铜的 PCB 板,加载负高压,并与场笼第一个电极 条连通。场笼整体呈半圆形结构,内场笼半径 25 mm, 外场笼半径 200 mm,外场笼用模具和紫外固化胶固定 成型,内场笼用铝合金模具压模成成型,内外场笼焊接 成一体。TPC 读出探测器采用我们设计、中国科学技术 大学加工的 THGEM。THGEM 灵敏区面积约为270 cm<sup>2</sup>, 为了减少打火信号,在 THGEM 一个覆铜面上做了分区 处理,分为 6 个扇形区域。读出电极采用 zigzag 构型 pad<sup>[18]</sup>,总有效通道数 886 个。灵敏区 pad 在平行入射 粒子方向为 7.5 mm 的长边,垂直入射粒子方向为 4 mm 的短边。读出电子学和数据获取系统采用中国科学技术 大学研制的基于 AGET 芯片的电子学系统<sup>[19]</sup>。



图 5 TPC 的主要结构(在线彩图) (a)结构示意图(虚线框中为pad形状);红色箭头为坐标系定义示意;(b) TPC 实物图。

利用 266 nm 的紫外激光测试了 TPC 的基本性能, 包括读出电极平面(xy 平面)的位置分辨和电子漂移方 向(zy 平面)的位置分辨。激光的三维径迹分别投影到 xy 平面和zy 平面(如图6所示),均未有较大的扭曲,说 明 TPC 的漂移区电场较为均匀。位于同一行且有信号 的 pad 为一个信号团(cluster),信号团的 y 坐标采用该 行 pad 的几何中心;信号团的 x 坐标和 z 坐标为 x 方向 和 z 方向的电荷中心;其中,z 方向的位置根据漂移时间和漂移速度计算给出,漂移速度采用 Garfield++模拟的结果,在漂移电场为200 V/(cm·atm)时,漂移速度为4.12 cm/μs。位置分辨以径迹残差<sup>[20]</sup>的方式给出,残差分布的标准差(σ)即为相应平面的位置分辨,如图 7 所示。在 xy 平面,位置分辨约为422 μm。在 zy 平面,位置分辨约为681 μm。



图 6 激光径迹在 xy 平面 (a) 和 zy 平面 (b) 上的投影 (在线 彩图)

(a) 中红色三角为*xy* 平面的信号团的电荷中心,(b) 中红色方块 为*zy* 平面的信号团的电荷中心,蓝色线条为线性拟合直线。



(a) xy 平面的径迹残差分布;(b) zy 平面的径迹残差分布,红色曲线为高斯函数拟合曲线。

## 4 总结与展望

本文基于计算和模拟,完成了用于逆运动学(<sup>3</sup>He,t) 电荷交换反应的 TPC-CsI(TI) 探测系统的设计及优化。 首先,讨论了实验对探测系统的设计要求。考虑到 TPC 作为ΔE 探测器,其性能要求较高,我们利用 Garfield++、COMSOL等软件,模拟了TPC的工作特性; 模拟显示Ar(95%)+iC4H10(5%)混合气体具有电子漂移速 度快、扩散系数小、工作电压低等优点,从而被选为 TPC工作气体。经过电场分析和电子输运模拟,确定了 场笼的镜像电极设计细节以及THGEM的工作电压。结 合Geant4模拟,确定了探测器的尺寸、工作动态范围 等,考察了其粒子鉴别能力。其次,利用 Geant4 模拟 重离子束流轰击靶核的过程,讨论了碰撞条件下的产物 粒子的种类、能量分布及计数率,亦即反应本底的分布。 最后,确定了探测器适用于测量散射角约为76°~86°、 散射动能约为20~130 MeV的t。在模拟优化的基础上, 完成了 TPC 探测器部分的搭建,并用激光测试了 TPC 的位置分辨。在xy平面,位置分辨约为422 μm;在zy 平面,位置分辨约为681 um。

下一步计划在中国科学院近代物理研究所 RIBLL 2 束流线及外靶终端开展不稳定核素的电荷交换反应实验。 较大尺寸的 TPC 有利于实现较高的角分辨,考虑粒子 径迹长 20 cm,漂移方向的位置分辨只要好于 2 mm, 即可实现实验室系 0.5°的角分辨,现在的 TPC 性能完全 满足这一要求。根据反冲 t核的能量-角度关系,利用 "缺失质量法"重建不稳定核素的激发态。在 TPC-CsI(TI) 系统探测大角度散射 t粒子的同时,利用 RIBLL 2 束流 线及外靶终端现有实验装置探测出射重核产物,实现一 定角度范围内的全举测量,利用时间戳在离线分析时重 建符合事件,筛选出电荷交换反应的产物粒子,可较好 地扣除本底。利用束线探测器可以探测质心系小角度范 围的重核产物,结合理论模型分析及实验测量的较大角 度的反应截面角分布,更准确地外推得到核反应在质心 系小角度不同共振态的反应截面。

#### 参考文献:

[1] FUJIMURA H, AKIMUNE H, DAITO I, et al. Phys Rev C, 2004,

69: 064327.

- [2] ZEGERS R G T, AKIMUNE H, AUSTIN S M, et al. Phys Rev C, 2006, 74: 024309.
- [3] GIRAUD S, ZAMORA J C, ZEGERS R G T, et al. Nucl Instr and Meth A, 2023, 1051: 168213.
- [4] GIRAUD S, ZAMORA J C, ZEGERS R G T, et al. Phys Rev Lett, 2023, 103: 232301.
- [5] ZHANG J C, SUN B H. Nuclear Physics Review, 2020, 37(3): 438. (in Chinese)

(张寂潮,孙保华.原子核物理评论, 2020, 37(3): 438.)

- [6] FANG F, TANG S W, WANG S T, et al. Nuclear Physics Review, 2022, 39(1): 65. (in Chinese)
  (方芳, 唐述文, 王世陶, 等. 原子核物理评论, 2022, 39(1): 65.)
- [7] ZHANG Y, HU B T. Nuclear Physics Review, 2019, 36(2): 151.
   (in Chinese)
   (张毅, 胡碧涛. 原子核物理评论, 2019, 36(2): 151.)
- [8] LIU W, LOU J L, YE Y L, et al. Nucl Sci Tech, 2020, 31: 20.
- [9] BRESKIN A, ALON R, CORTESI M, et al. Nucl Instr and Meth A, 2009, 598(1): 107.
- [10] BRESKIN A, CORTESI M, ALON R, et al. Nucl Instr and Meth A, 2010, 623: 132.
- [11] WEI X L, LU C G, ZHANG J W, et al. Nuclear Physics Review, 2020, 37(3): 765. (in Chinese)
   (魏向伦, 鲁辰桂, 张俊伟, 等. 原子核物理评论, 2020, 37(3): 765.)
- [12] FANG F, YUE K, SUN Z Y, et al. Nuclear Physics Review, 2017, 34(2): 184. (in Chinese)
   (方芳, 岳珂, 孙志宇, 等. 原子核物理评论, 2017, 34(2): 184.)
- [13] SAULI F, Gaseous Radiation Detectors: Fundamentals and Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Pres, 2014: 292.
- [14] Garfield++[EB/OL]. [2023-07-20]. https://garfieldpp.web.cern.ch/ garfieldpp/
- [15] COMSOL Multiphysics[EB/OL]. [2023-07-20]. https://cn.comsol. com/comsol-multiphysics
- [16] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. Nucl Instr and Meth A, 2003, 506(3): 250.
- [17] LI Meng. Development of a Time Projection Chamber Detector System for (<sup>3</sup>He, t) Charge Exchange Reaction Experiment [D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022(9): 51. (in Chinese)
  (李蒙. 用于 (<sup>3</sup>He, t) 电荷交换反应实验研究的时间投影室的研 制 [D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2022(9): 51.)
- [18] AZMOUN B, GARG P, HEMMICK T K, et al. IEEE Trans Nucl Sci, 2018, 65(7): 1416.
- [19] LI C, FENG C Q, ZHU D Y, et al. JINST, 2018, 13: P04013.
- [20] CARNEGIE R K, DIXIT M S, DUBEAU J, et al. Nucl Instr and Meth A, 2004, 538: 372.

# Development of Detection System for (<sup>3</sup>He, t) Charge Exchange Reaction Experiment in Inverse Kinematics

HE Zhixuan<sup>1</sup>, LI Meng<sup>2</sup>, BU Wenjuan<sup>1</sup>, YANG Herun<sup>3</sup>, HU Bitao<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1,†</sup>

School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
 Department of Oncology, The Second Xiangya Hospital, Central South University, Changsha 410011, China;
 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Charge exchange reactions with the intermediate energy can be used to study the complex structure of atomic nuclei from the respect of spin-isospin excitation. By utilizing the radioactive beam line at the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, charge exchange reaction experiments in inverse kinematics can expand the target nuclides to be studied to neutron-rich nuclei and even unstable nuclei. Based on this, a detector system for charge exchange reaction experiments has been designed, which mainly consists of a <sup>3</sup>He gas target, TPC and CsI(Tl) arrays, where the TPC and CsI(Tl) arrays form a  $\Delta E$ -E system. Using simulation software such as Geant4 and Garfield++, the operating conditions of the TPC were optimized, the kinematic intervals and the basic design of the detector for the experimental study were determined, and the particle discrimination ability of the detection system was investigated. Based on the simulation, the detection system was built and the spatial resolution of the TPC was measured by using the UV laser. On the readout electrode plane, the resolution is about 422 µm. And the resolution is about 681 µm in the drift direction. The performance of the TPC is sufficient to support the track reconstruction of the secondary particles of the nuclear reaction, and in particular, it is able to achieve a high resolution of the scattering angle.

Key words: detection system; Geant4; simulation; charge exchange reaction

Received date: 24 Aug. 2023; Revised date: 01 Mar. 2024

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U2032166, 11875301, U1832167); National Key R&D Program of China (2022YFE0103900)

<sup>†</sup> Corresponding author: ZHANG Yi, E-Mail: yizhang@lzu.edu.cn