

BEPCII-LINAC 试验束第二靶室混合辐射 测量探测器的研制

唐兴华^{1,2} 李家才² 徐进章¹ 柯尊建² 安广朋² 杨 涛^{2,3} 张少平²

1(兰州大学核科学与技术学院 兰州 730000)

2(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

3(广西大学物理科学与工程与技术学院 南宁 530004)

摘要 BEPCII-LINAC 试验束(Test Beam)第二靶室内, 1.89 GeV 脉冲电子束轰击目标靶产生的次级粒子(主要为质子、中子、伽玛、正负 pion 和正负电子)形成了能量连续的混合粒子辐射场, 该辐射场是材料或生物样品(如农作物种子)辐照损伤效应试验的理想场所。这些试验都迫切需要给出各种样品对不同粒子的受照剂量, 因此研制一个混合辐射测量探测器——叠层闪烁体探测器。本文阐述该探测器研制的基本过程, 并对其关键性能进行研究测试; 阐明了探测器的基本结构设计、制作过程和探测基本原理, 给出对不同粒子探测效率的 GEANT4 模拟结果, 并对探测器的 n- γ 分辨性能进行了测试。结果显示该混合辐射测量探测器基本满足 Test Beam 混合场的测量需要, 达到预期的基本设计指标。

关键词 叠层闪烁体探测器, GEANT4 模拟, n- γ 分辨

中图分类号 O572.21

北京电子对撞机直线加速器(BEPCII-LINAC)的电子束由磁铁组引入到实验束(Test Beam)第二靶室, 在靶区打靶产生的混合粒子辐射场类似于空间的辐射环境, 较为复杂。这样的混合辐射场包含能量连续的带电粒子和非带电粒子, 要测量混合辐射场中的粒子能谱, 探测器须在一定能量范围内有良好的粒子鉴别性能, 且有较好的能量分辨和探测效率, 对探测器性能的要求很高。

叠层闪烁体探测器的探测效率高和灵敏体积大, 其能量分辨虽不如半导体探测器, 但其环境适应性较强, 造价适宜, 特别是有机闪烁体的定时性能、n- γ 分辨能力和液体闪烁的内计数本领, 均有独特优点, 在混合辐射探测中的使用较广泛。

本文用 FLUKA 软件对 BEPCII-LINAC 试验束第二靶室内混合辐射场进行模拟, 并针对模拟结果设计制作了混合辐射粒子探测器(叠层闪烁体探测器), 并对其性能进行了研究与测试。

1 辐射场模拟与探测器结构

用 FLUKA 软件对 BEPC-LINAC 提供的 1.89 GeV 单能电子脉冲束(12.5 Hz, 10^{10} /pulse)打 Be 靶的

模型如图 1(a), 靶周围的环境介质为空气, 研究每个电子沿 Be 靶正中心入射后在靶周围(4π 球面半径 $=1$ m)产生的次级粒子的种类和分布。模拟结果表明次级粒子中有 γ 、中子、质子、 π 、正负电子等, 其中前三种是主要关心的粒子, 它们的微分能谱如图 1(b-d)。这三种次级粒子的能量分布都较广, 中子和光子的分布主要集中在低能区, 质子能量在 40 MeV 处有一峰值, 高能区一直延伸到 1 GeV, 但产额非常低。

由于质子电离能损较大, 外层闪烁体 NE115(BC444, 成分见表 1)的主要功能是区分质子, 只要质子有一定能量沉积就可, 以尽量减少对中子的影响, 故厚度设计为 15 mm。中子、 γ 光子不带电, 进入探测器后, 与外层闪烁体不作用, 进入内层闪烁体后与富含氢的有机液闪 NE213(BC501A)(成分见表 1)作用产生反冲质子和电子, 由于产生反冲带电粒子的位置随机, 内层圆柱形闪烁体的高度须足够长, 参考 Masashi Takada 等^[1,2]设计的叠层探测器的尺寸后, 将高度设计为 70 mm。

中国科学院重大科研装备研制项目(29200731231123310)资助

第一作者: 唐兴华, 男, 1985 年出生, 2008 年毕业于哈尔滨学院物理系, 获得理学学士学位, 现于兰州大学与中国科学院高能物理研究所进行硕士阶段的学习, 专业为粒子物理与原子核物理

收稿日期: 2010-09-03, 修回日期: 2010-11-03

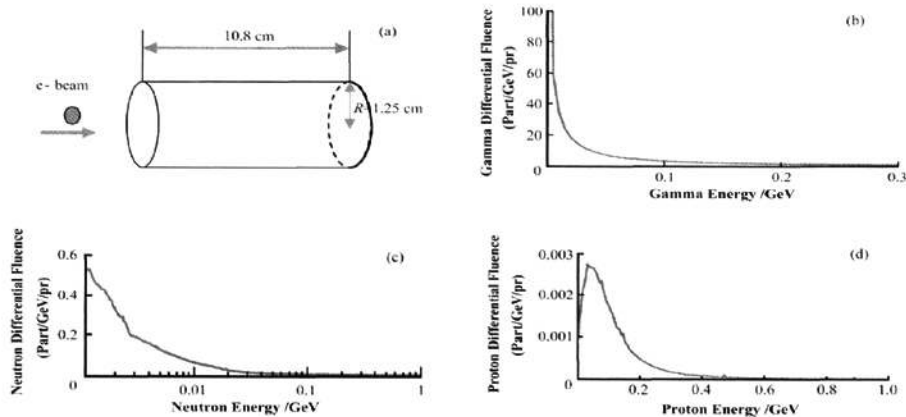


图 1 电子束打 Be 靶 FLUKA 模拟几何模型示意图及模拟结果
Fig.1 FLUKA simulation schematic(a) and the simulation results(b-d) of Be target bombarded by electron beam.

表 1 闪烁体的成分和属性
Table 1 Components and attribute of the scintillators.

闪烁体 Sincillators	密度 Density /g·cm ⁻³	碳原子数 C atoms /cm ⁻³	氢原子数 H atoms /cm ⁻³	碳氢比 C/H ratio	衰减时间(短成分) Decay time (short component) /ns	最大辐射波长 Wavelength of max. emission /nm
BC501A	0.874	4.82×1022	3.98×1022	1.212	3.2	425
BC444	1.032	5.25×1022	4.73×1022	1.109	179.7	428

为避免 NE115 与 NE213 的化学作用,并考虑装载 NE213 液体所需的机械强度,在二者间设计一厚度 2.4 mm 玻璃 Glass (Pyrex)层。

整个闪烁体通过与光导耦合后与 PMT 光阴极耦合,最后通过 Philip 公司的 XP2020 型光电倍增管 PMT 阳极收集信号。探测器闪烁体部分用反射膜紧紧包裹,再用 PVC 避光胶带缠绕,PMT 装于黑色铁筒内,接缝处封以 PVC 避光胶带,以充分收集源自闪烁体的荧光并避免漏光。

作任何放大即可被甄别和测量。设计并制作完毕后的探测器结构如图 2(图中缺省反射纸和避光胶带)。

2 探测器工作原理

该探测器原理^[3]基于不同类型辐射粒子入射到闪烁体后产生的信号波形的不同,γ光子入射到探测器的外层闪烁体基本无信号产生,而到达内层液体闪烁体时便产生康普顿电子,进而引起闪烁体发光,该光信号衰减时间仅几个 ns;中子入射时,外层同样也基本无信号,但到内层闪烁体后产生反冲质子,引起闪烁体发光,该光信号衰减时间~30 ns,长于γ光子;质子入射时,内外两层闪烁体都产生光信号,分别为慢信号和快信号,因此 PMT 收集到的光信号是两信号成分的叠加,信号衰减时间在 30~225 ns 间。反应过程和信号特征如图 3。

甄别 PMT 输出的信号设置慢门(slow gate)和宽门(total gate)对 PMT 输出的信号用两块 QDC 积分,测量到慢成分电荷信号和总电荷信号,由于同种粒子快慢成分电荷积分比值是常数,通过二者信号幅度的二维散点图中的线性情况可分辨出粒子,对分辨出的粒子信号作一维投影后便得到各种辐射粒子的能谱直方图。

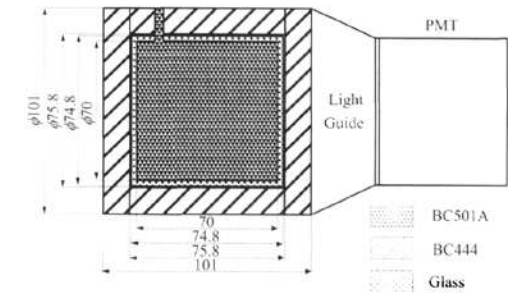


图 2 NE213-NE115 耦合叠层探测器结构示意图
Fig.2 The structure of the NE213-NE115 coupled phoswich detector.

计算得知,闪烁体中 1 MeV 质子能量损失引起的光输出信号通过 PMT 输出的值为~500 mV,而同能量沉积的电子所得讯号幅度为质子的两倍,不需

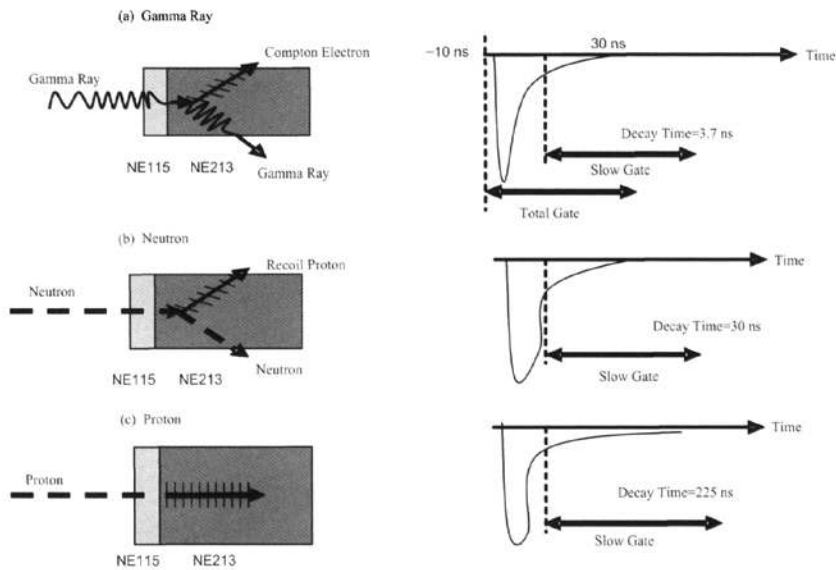


图 3 各种辐射粒子与叠层探测器作用过程的示意图及产生的信号特征
Fig.3 Schematics of signals produced by the phoswich neutron detector.

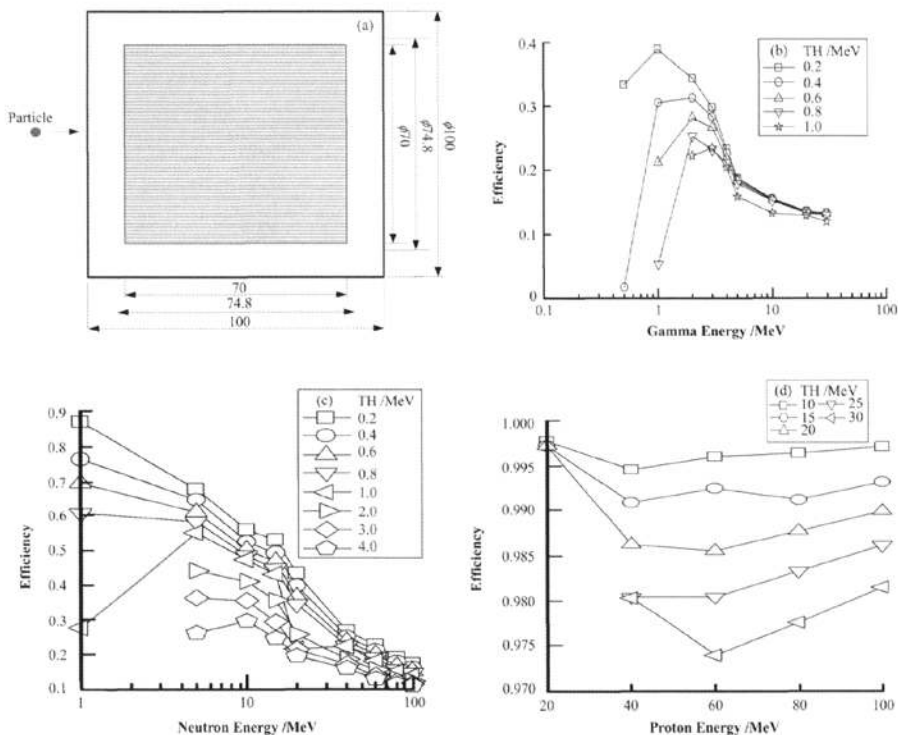


图 4 探测器效率模拟的 GEANT4 探测器模型及 γ 、中子和质子探测效率模拟结果
Fig.4 GEANT4 model(a) of the detector structure and the results of detection efficiency for γ (b), neutron(c) and proton(d).

3 探测器效率的 GEANT4 模拟

探测效率是设计探测器的重要参数，直接决定

其设计是否达到物理目标。本文用 GEANT4 工具包根据图 4(a)的探测器结构和各层的材料，设置模拟探测器的几何和材料，充分考虑各种可能的物理作用过程，合理设置截止步长，计算出不同能量的三

种单能粒子(10^5 事例)入射闪烁体内的能量沉积,通过不同阈值获得各阈值下的探测效率。模拟结果表明,质子的效率非常理想,在97%以上(图4d);中子和 γ 只能通过它们在闪烁体中产生的反冲带电粒子间接探测,故二者的探测效率都不太高,在10%~40%间(图4b,4c),但探测效率在10%以上即符合设计目标。

4 n- γ 分辨性能测试

BEPCII-LINAC 实验束(Test Beam)的第二靶室内中子和 γ 的产额很高,且中子被俘获后常伴随 γ 产生,所以辐射场中测量中子或 γ 探测器的 n- γ 分辨性能^[4-6]非常重要。由此,用中国原子科学研究院计量站的5SDH-2 串行加速器提供的单能中子源(三个能点)对探测器的 n- γ 分辨性能进行测试^[7]。三个直流中子单能点 2.5、5.0 和 14.8 MeV 分别来自三个反应道 $T(p,n)^3He$ 、 $D(d,n)^3He$ 和 $T(d,n)^4He$, 注量率范围为 10^7 ~ $10^8/s$, 可由束流进行调节。探测器用经纬仪和测高仪准直,充分考虑探测器的响应以避免探测信号堆积后,放置中子源下游 335 cm 处(与靶杆角度为 0),并与束流线高度 110 cm 齐平。

探测器的光电倍增管 PMT 采用 Philip 公司的 XP-2020 型,探测器工作高压由 ORTEC556 型高压插件提供,工作高压值参考用宇宙线测量得到的探测效率的坪曲线,选定为 1800 V。将信号引至 Tektronix70404 的 4 GHz 示波器采样,数据通过计算机 PC2 基于 WinXP 的 LabVIEW 获取。从采样结果得知,从 PMT 输出的中子和 γ 信号的衰减时间明显不同, γ 信号的下降沿很快,仅数十 ns;中子信号的尾巴很长,约 300 ns。

根据探测原理设计的电子学框图如图 5,从光

电倍增管阳极输出的信号由线性扇入扇出插件分四路:两路送到 CAMAC 机箱中的两个 QDC(CAEN C.1205),分别送至 Tektronix70404 示波器(对信号采样分析)和恒比甄别器 CFD935(ORTEC,引出三路甄别信号):一路未加延时送到 QDC1 中作开门信号;一路适当延时送到 QDC2;最后一路送到 Scaler 插件进行事例数统计。针对信号大小设置适当甄别阈(500 mV),开门和延时情况如图 6,信号上升时间只有 3~4 ns,总门宽为 300 ns,慢门相对总门向后延时 30 ns,门宽为 270 ns,整个数据采集系统由 CAMAC 机箱控制器 CCU99 和计算机 PC1 上基于 Linux 的 C++编写的 DAQ 软件控制。

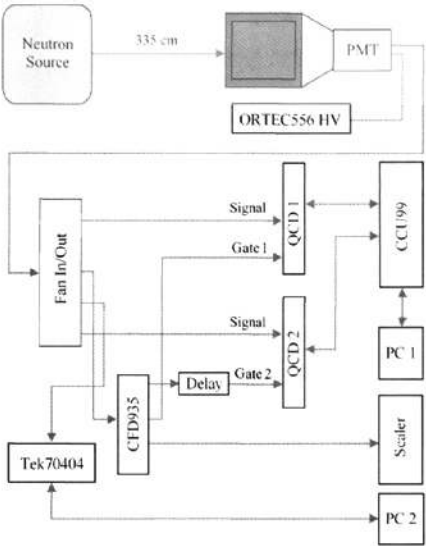


图 5 叠层探测器双门积分法 n- γ 鉴别电子学示意图
Fig.5 Schematic of electronics of two-gate integrated method of n- γ discrimination for phoswich detector.

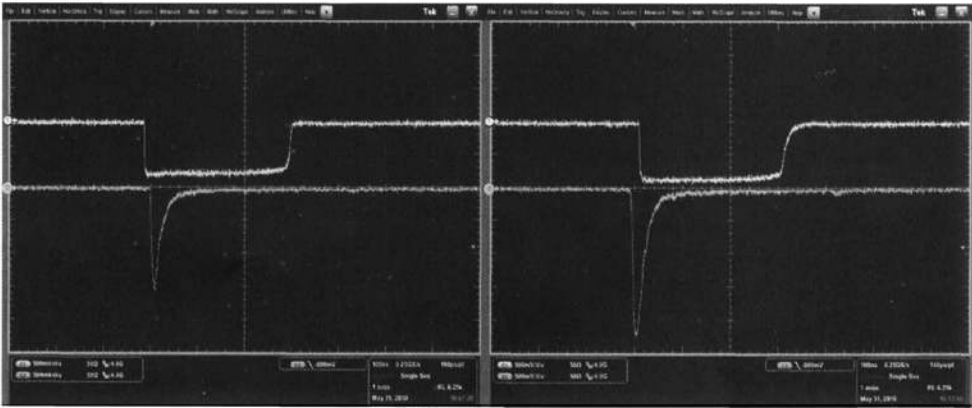


图 6 QDC1(a)和 QDC2(b)开门门宽和延时示波器截图
Fig.6 Oscillograph screenshots of open door width and delay time of QDC1(a) and QDC2(b).

测量各单能中子的同时,用挡全吸收影锥法(measurement with the neutron absorption cone in front of detector)测量本底,同时用计量站提供的长计数管测量中子注量,计算得到探测器端面处的中子通量。实验得到的结果都经扣本底处理,由高产额直流束带来的部分叠加信号也一并扣除。

实验得到慢信号和总信号的二维图如图 7(a),中子和 γ 信号的计数带基本是两条直线,带间距随道址增大。由图 7(a)可知,叠层探测器的 n - γ 分辨在较大能量范围内非常理想,只是在低能端不太理想。

将中子计数带投影到总信号坐标得到单能中子的反冲质子谱如图 7(b),从反冲矩形质子谱的截止能量附近的缓斜坡可知,叠层探测器的能量分辨较差,一般在 $\sim 15\%$,这也是叠层探测器作为量能器的一个不足。由图 7(a₂、a₃)可知,2.5 和 5.0 MeV 能点的中子产额较大,但伴随 γ 较大且能量集中于低能端;14.8 MeV 能点的中子产额大于伴随 γ ,但伴随 γ 总数可观,且能量范围扩展到高能端,由图 7(a₃),在高端 n - γ 分辨更为理想,故在探测器的探测范围内能量越高处 n - γ 分辨性能越优越。

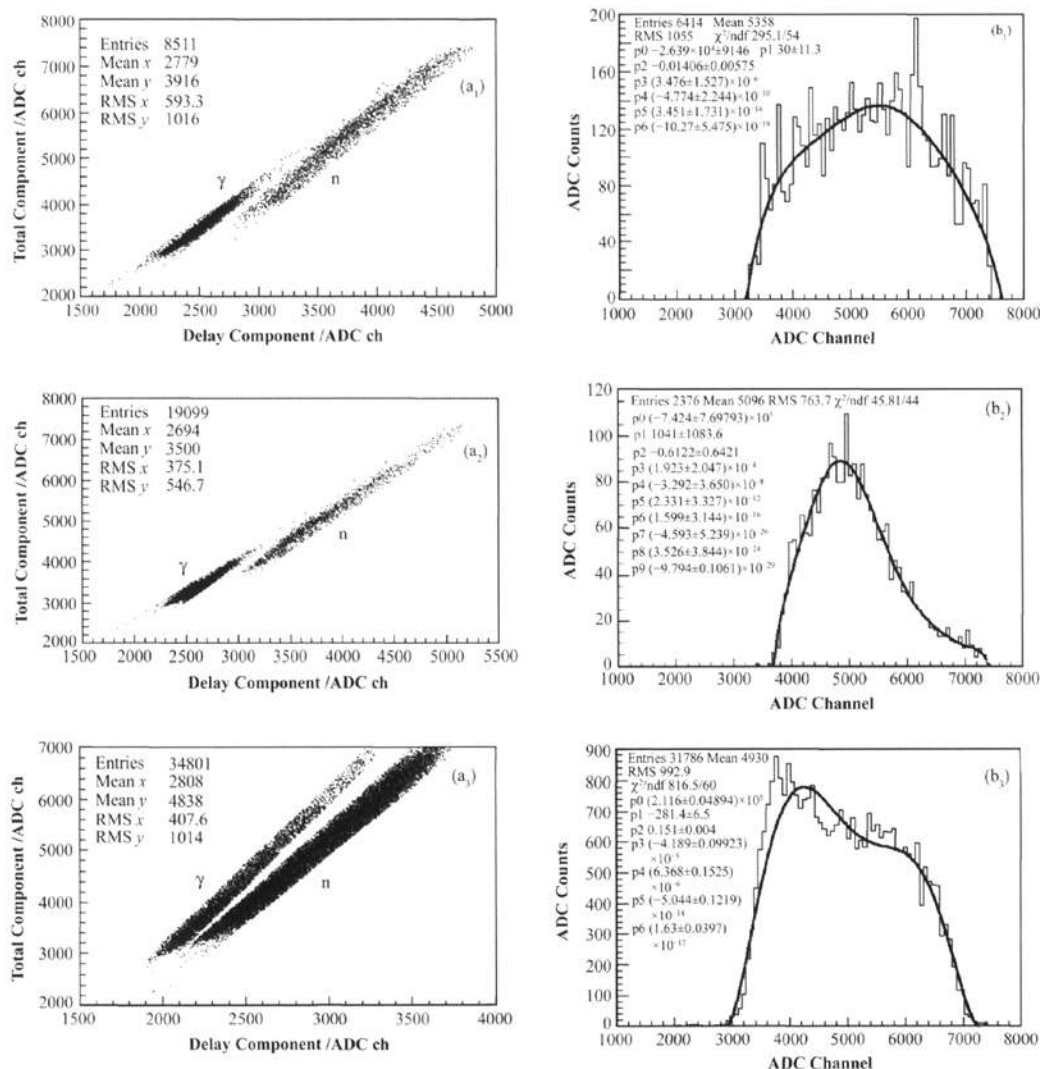


图 7 探测 T+H、D+D、T+D 反应产生的 2.5、5.0 和 14.8 MeV 单能中子获得的快慢电荷成分的二维图(a₁,a₂,a₃)及中子事例在 Total signal 方向的投影得到的单能中子反冲质子谱(b₁,b₂,b₃)

Fig.7 Two-dimensional plot(a₁,a₂,a₃) of slow and total signals in phoswich detector produced by 2.5, 5.0 and 14.8 MeV neutrons from T+H, D+D and T+D reactions, respectively, and their recoiled proton spectra (b₁,b₂,b₃) of selected neutron events projected on total signal component.

5 结束语

为测量 BEPCII-LINAC 试验束(Test Beam)的第二靶室内混合辐射场,研制了混合辐射测量探测器,并对其基本性能进行研究测试。用 FLUKA 模拟了辐射场性能和探测器结构,设计制作了探测器并阐明了其工作原理;用 GEANT4 软件工具包模拟了探测器效率,结果显示达到预期物理目标;测试了探测器的 $n\text{-}\gamma$ 分辨性能,实验结果显示,探测器在较宽能量范围内的 $n\text{-}\gamma$ 分辨性能良好。

下一步计划将叠层闪烁体放到 BEPCII 试验束 Test Beam 的第二靶室对打靶后的混合辐射粒子场进行测量,验证探测器对二种以上辐射粒子的分辨。

参考文献

- 1 Masashi Takada, Tokushi Shibata, Yoshitomo Uwamino, *et al.* Nucl Instrum Methods in Phys Res A, 1996, **379**: 293–306
- 2 Takada Masashi, Shingo Taniguchi, Takashi Nakamura, *et al.* Nucl Instrum Methods in Phys Res A, 2001, **465**: 512–524
- 3 Horst Klein, Sonja Neumann. Nucl Instrum Methods in Phys Res A, 2002, **476**: 132–142
- 4 Noda S, Watanabe T, Shigyo N, *et al.* International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2007. DOI: 10.1051/ndata: 07608
- 5 叶邦角, Nanjyo H, Kobayashi T, 等. 核技术, 2003, **26**(7): 505–508
YE Bangjiao, Nanjyo H, Kobayashi T, *et al.* Nucl Tech, 2003, **26**(7): 505–508
- 6 Ouyang X P, Li Z F, Wang Q S, *et al.* High Energy Phys Nucl Phys, 2005, **29**(4): 399–403
- 7 The ICARUS Collaboration. Nucl Instr Meth, 1998, **A418**: 285–299

Development of the mixed radiation detector for target chamber II of BEPCII-LINAC test beam

TANG Xinghua^{1,2} LI Jiakai² XU Jinzhang¹ KE Zunjian² AN Guangpeng² YANG Tao^{2,3}
ZHANG Shaoping²

1(School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

2(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(School of Physics Sciences and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract In target chamber II of the BEPCII-LINAC Test Beam, radiation field of mixed particles (mainly proton, neutron, gamma, pion, positron and electron) of consecutive energy is generated from the object target bombarded by the 1.89 GeV pulsed electron beams from the linear accelerator. This mixed radiation field is ideal for irradiating materials or biological samples. However, these experiments need to know the dose of various particles delivered to the samples. In light of this, a mixed radiation detector (phoswich detector) was developed. In this paper, the basic process of the detector development and its key properties are reported. The basic structure of detector and principles of detection are given. GEANT4 simulation results of detection efficiency of different particle and performance of $n\text{-}\gamma$ discrimination are given. The results show that the mixed radiation detector, with the design specifications being achieved, satisfies the measurements of mixed field in the Test Beam.

Key words Phoswich detector, GEANT4 simulation, $n\text{-}\gamma$ discrimination

CLC O572.21