

基于反角白光中子源次级质子的探测器标定

蒋伟 江浩雨 易晗 樊瑞睿 崔增琪 孙康 张国辉 唐靖宇 孙志嘉 宁常军 高可庆 安琪 白怀勇 鲍杰 鲍煜
曹平 陈昊磊 陈琪萍 陈永浩 陈裕凯 陈朕 封常青 顾旻皓 韩长材 韩子杰 贺国珠 何泳成 洪杨 黄翰雄
黄蔚玲 黄锡汝 季筱璐 吉旭阳 姜智杰 敬罕涛 康玲 康明涛 李波 李超 李嘉雯 李论 李强 李晓 李祥
刘荣 刘树彬 刘星言 栾广源 穆奇丽 齐斌斌 任杰 任智洲 阮锡超 宋朝晖 宋英鹏 孙虹 孙晓阳 谭志新
唐洪庆 唐新懿 田斌斌 王丽娇 王鹏程 王琦 王涛峰 王朝辉 文杰 温中伟 吴青彪 吴晓光 吴煊 解立坤
羊奕伟 于莉 余滔 于永积 张林浩 张奇玮 张显鹏 张玉亮 张志永 赵豫斌 周路平 周祖英 朱丹阳 朱科
军 朱鹏 CSNS Back-n合作组

Detector calibration based on secondary protons of Back-n white neutron source

Jiang Wei Jiang Hao-Yu Yi Han Fan Rui-Rui Cui Zeng-Qi Sun Kang Zhang Guo-Hui Tang Jing-Yu
Yu Sun Zhi-Jia Ning Chang-Jun Gao Ke-Qing An Qi Bai Huai-Yong Bao Jie Bao Yu Cao Ping
Chen Hao-Lei Chen Qi-Ping Chen Yong-Hao Chen Yu-Kai Chen Zhen Feng Chang-Qing Gu
Min-Hao Han Chang-Cai Han Zi-Jie He Guo-Zhu He Yong-Cheng Hong Yang Huang Han-Xiong
Huang Wei-Ling Huang Xi-Ru Ji Xiao-Lu Ji Xu-Yang Jiang Zhi-Jie Jing Han-Tao Kang Ling
Kang Ming-Tao Li Bo Li Chao Li Jia-Wen Li Lun Li Qiang Li Xiao Li Yang Liu Rong Liu
Shu-Bin Liu Xing-Yan Luan Guang-Yuan Mu Qi-Li Qi Bin-Bin Ren Jie Ren Zhi-Zhou Ruan Xi-
Chao Song Zhao-Hui Song Ying-Peng Sun Hong Sun Xiao-Yang Tan Zhi-Xin Tang Hong-Qing
Tang Xin-Yi Tian Bin-Bin Wang Li-Jiao Wang Peng-Cheng Wang Qi Wang Tao-Feng Wang Zhao-
Hui Wen Jie Wen Zhong-Wei Wu Qing-Biao Wu Xiao-Guang Wu Xuan Xie Li-Kun Yang Yi-Wei
Yu Li Yu Tao Yu Yong-Ji Zhang Lin-Hao Zhang Qi-Wei Zhang Xian-Peng Zhang Yu-Liang
Zhang Zhi-Yong Zhao Yu-Bin Zhou Lu-Ping Zhou Zu-Ying Zhu Dan-Yang Zhu Ke-Jun Zhu Peng
The CSNS Back-n Collaboration

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 082901 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201823

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201823>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于反角白光中子源次级质子的探测器标定*

蒋伟¹⁾²⁾ 江浩雨³⁾ 易晗¹⁾²⁾ 樊瑞睿^{1)2)4)†} 崔增琪³⁾ 孙康¹⁾²⁾⁵⁾
张国辉³⁾ 唐靖宇¹⁾²⁾ 孙志嘉¹⁾²⁾⁴⁾ 宁常军¹⁾²⁾ 高可庆¹⁾²⁾ 安琪⁴⁾⁶⁾
白怀勇³⁾ 鲍杰⁷⁾ 鲍煜¹⁾²⁾ 曹平⁴⁾⁶⁾ 陈昊磊⁴⁾⁶⁾ 陈琪萍⁸⁾ 陈永浩¹⁾²⁾
陈裕凯¹⁾²⁾ 陈朕⁴⁾⁶⁾ 封常青⁴⁾⁶⁾ 顾旻皓¹⁾⁴⁾ 韩长材⁹⁾ 韩子杰⁸⁾
贺国珠⁷⁾ 何泳成¹⁾²⁾ 洪杨¹⁾²⁾⁵⁾ 黄翰雄⁷⁾ 黄蔚玲¹⁾²⁾ 黄锡汝⁴⁾⁶⁾
季筱璐¹⁾⁴⁾ 吉旭阳⁴⁾¹⁰⁾ 姜智杰⁴⁾⁶⁾ 敬罕涛¹⁾²⁾ 康玲¹⁾²⁾ 康明涛¹⁾²⁾
李波¹⁾²⁾ 李超⁴⁾⁶⁾ 李嘉雯⁴⁾¹⁰⁾ 李论¹⁾²⁾ 李强¹⁾²⁾ 李晓¹⁾²⁾ 李祥¹⁾²⁾
刘荣⁸⁾ 刘树彬⁴⁾⁶⁾ 刘星言⁸⁾ 栾广源⁷⁾ 穆奇丽¹⁾²⁾ 齐斌斌⁴⁾⁶⁾
任杰⁷⁾ 任智洲⁶⁾⁸⁾ 阮锡超⁷⁾ 宋朝晖⁹⁾ 宋英鹏¹⁾²⁾ 孙虹¹⁾²⁾
孙晓阳¹⁾²⁾⁵⁾ 谭志新¹⁾²⁾ 唐洪庆⁷⁾ 唐新懿⁴⁾⁶⁾ 田斌斌¹⁾²⁾ 王丽娇¹⁾²⁾⁵⁾
王鹏程¹⁾²⁾ 王琦⁷⁾ 王涛峰¹¹⁾ 王朝辉⁷⁾ 文杰⁸⁾ 温中伟⁸⁾
吴青彪¹⁾²⁾ 吴晓光⁷⁾ 吴焯¹⁾²⁾ 解立坤⁴⁾¹⁰⁾ 羊奕伟⁸⁾ 于莉¹⁾²⁾
余滔⁴⁾⁶⁾ 于永积¹⁾²⁾ 张林浩¹⁾²⁾⁵⁾ 张奇玮⁷⁾ 张显鹏⁹⁾ 张玉亮¹⁾²⁾
张志永⁴⁾⁶⁾ 赵豫斌¹⁾²⁾ 周路平¹⁾²⁾⁵⁾ 周祖英⁷⁾ 朱丹阳⁴⁾⁶⁾
朱科军¹⁾⁴⁾⁵⁾ 朱鹏¹⁾²⁾ CSNS Back-n 合作组

1) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

2) (散裂中子源科学中心, 东莞 523803)

3) (北京大学物理学院, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

4) (核探测与核电子学国家重点实验室)

5) (中国科学院大学, 北京 100049)

6) (中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

7) (中国原子能科学研究院, 核数据重点实验室, 北京 102413)

8) (中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

9) (西北核技术研究院, 西安 710024)

10) (中国科学技术大学工程与应用物理系, 合肥 230026)

11) (北京航空航天大学物理学院, 北京 100083)

(2020年11月2日收到; 2020年12月27日收到修改稿)

* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFA0401604)、国家自然科学基金 (批准号: 12005115) 和广东省基础与应用基础研究基金联合基金 (批准号: 2019A1515110287) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fanrr@ihep.ac.cn

目前国内外的质子标定终端较少,且普遍为单能质子束流.基于中国散裂中子源的反角白光中子源的 eV—200 MeV 中子能量区间的白光中子束流,以及中子与氢的 ${}^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应,可以获得宽能谱的能量连续次级质子.利用 1 GSps 采样率、12 bit 的波形数字化获取系统采集探测器输出波形信号,通过对波形信号的分析,得到中子及反冲质子的飞行时间,进而得到反冲质子的动能.利用该方法得到的质子,为探测器质子标定等研究提供了新的研究平台.在该研究平台已经开展了带电粒子望远镜的标定实验.研究了 CsI (Tl) 探测器不同的信号读出方式对望远镜的 ΔE - E 二维谱、幅度-质子动能二维谱等粒子鉴别方法得到的粒子鉴别的效果,得到了较优的探测器信号读出方案.该研究为带电粒子望远镜的建设提供了实验依据,也说明了基于反角白光中子源的宽能谱质子标定的可行性.

关键词: 质子标定, 探测器, ${}^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应, 反角白光中子源

PACS: 29.25.Dz, 07.77.Ka, 24.10.-i, 29.40.Mc

DOI: 10.7498/aps.70.20201823

1 引言

在空间探测及大科学装置探测谱仪的研究中,探测器在束测试及标定中发挥了重要的作用[1-3].在一些相关的研究工作中,不仅需要使用单能质子进行标定,同时也需要利用连续能量的质子开展研究工作.目前国内可供开展质子标定的终端比较少,且大多为单能质子[4].本文介绍利用反角白光中子源的白光中子束流得到连续能量的质子,为探测器标定等研究提供新的研究平台.

中国散裂中子源(CSNS)一期工程于2018年建成运行,其中子束流产生于能量为1.6 GeV的质子束流与钨靶的散裂反应.利用沿质子束打靶通道回流回来的中子束流(即反角中子),在中国散裂中子源建设了反角白光中子源(Back-n).Back-n是我国第一台高性能白光中子源,与CSNS同步建

成,可以提供0.5 eV—200 MeV能区的连续能量中子[5-8].目前已经测定的能谱如图1所示,能谱峰值位于MeV附近[9].反角白光中子源有两个实验厅,实验厅一及实验厅二的中心位置距离散裂中子源的钨靶分别约55和76 m.通过调节中子开关以及准直器一、准直器二的孔径的组合,可以得到不同束斑尺寸及束流通量的白光中子束流.在散裂中子源的质子束流打靶功率为100 kW时,使用束斑直径 $\Phi 60$ 的孔径组合,在实验厅一的中心位置(距离钨靶55 m)的束流通量为 $1.75 \times 10^7 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,实验厅二的中心位置(距离钨靶76 m)的束流通量为 $7.03 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ [10].

2 基于反角白光中子源得到的宽能谱次级质子

相较于中子与其他核素相互作用产生质子的过程, ${}^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应的反应截面大.基于中子与质子的 ${}^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应,可以利用白光中子束流及含 ${}^1\text{H}$ 靶得到反冲质子.如图2所示,发生弹性散射时,反冲质子将会获得动能.

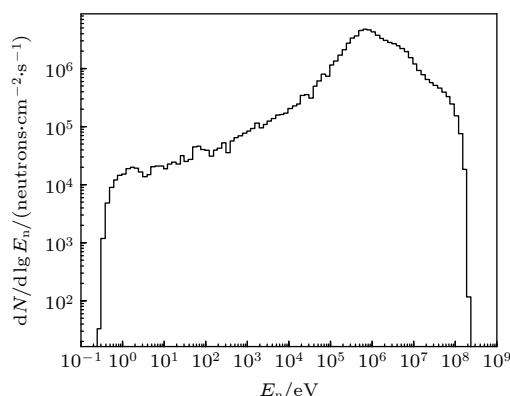


图1 使用裂变室测量得到的Back-n实验厅二中心位置的能谱(束流功率为100 kW)

Fig. 1. The measured neutron energy spectrum at the center of Endstation (ES) #2 at 100 kW. The neutron energy spectrum measurement is achieved using a fission chamber.

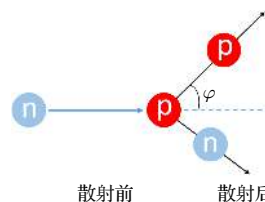


图2 ${}^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应示意图

Fig. 2. Schematic diagram of the ${}^1\text{H}(n, \text{el})$ reaction.

由于Back-n的中子能量最高可达200 MeV[9,10],高能中子的运动速度与光速相比是不可忽略的,因此在计算 ${}^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应中反冲质子的动能时需要

考虑狭义相对论效应. 由于 ${}^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应为弹性碰撞, 反应前后粒子的静止质量及原子核所处能级不变, 由反应的能量及动量守恒关系, 可以计算得到反冲质子的动能. 中子与质子的静止质量近似相同, 在计算中可认为中子的静止质量等于质子的静止质量, 从而简化计算过程. 得到的反冲质子的动能为:

$$E_p = \frac{2\cos^2\varphi E_n}{(\gamma + 1) - (\gamma - 1)\cos^2\varphi}, \quad (1)$$

其中, E_n 为入射中子动能, γ 为入射中子的伽马参数, φ 为质子出射方向与中子入射方向在实验室系的夹角.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}, \quad (2)$$

其中 v 为入射中子速度. 在非相对论近似下, 即 $\gamma = 1$ 时, 反冲质子动能为

$$E_p = \cos^2\varphi E_n. \quad (3)$$

在实验室系 $0^\circ - 45^\circ$ 出射角范围内, 使用 (1) 式和 (3) 式计算得到 $E_n = 10 \text{ MeV}$ 时, ${}^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应中反冲质子的动能 (E_p) 的差别小于 0.3%, 而 E_n 为 100 MeV 时差别小于 3%.

根据图 1 及 (1) 式可知, 利用 ${}^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应, 在 Back-n 可以获得 eV—200 MeV 能区能量连续的反冲质子.

在进行探测器标定时, 提取反冲质子的动能 E_p 非常关键. Back-n 的中子能量由飞行时间方法计算得到^[9]. 同样, 在探测器标定中, 反冲质子的动能 E_p 也由飞行时间方法计算得到. 飞行时间为中子的起始时间与反冲质子到达靶处的时间之间的时间差. 在 Back-n 开展实验时, 散裂中子源 1.6 GeV 的质子束团打钨靶得到散裂中子时, 会伴随产生 γ -flash^[8], 可以利用 γ -flash 来标定中子的起始时间. 从含氢靶上散射的 γ -flash 事件在探测器中得到响应, 探测器的响应时间减去 γ 从钨靶飞行至靶处的时间, 即为中子的起始时间. 由于 CSNS 的打靶质子束团为间隔 410 ns 的双束团结构, 所以在探测器中得到的 γ -flash 事件也为时间间隔为 410 ns 的两团事件, 可以与质子事件明显区分出来. 探测器中测量到的质子的时间包含中子飞行时间和反冲质子从靶至探测器的飞行时间两部分, 由于中子的动能与反冲质子的动能存在 (1) 式的关联, 可以结合靶与探测器之间的距离以及 (1) 式

中的 φ 值计算分别得到中子动能及反冲质子的动能 E_p .

为了得到尽可能准确的 E_p , 在数据获取时采用了一套 1 GSps 采样率、12 bit 分辨率的波形数字化数据采集系统来记录探测器的输出信号^[11]. 将探测器经由电路放大的波形信号记录后, 从波形信号中提取反冲质子到达探测器的时间; 同时, 该套系统会给出采集的信号与加速器每发束流之间的时间差. 该套采样精度达到 1 ns 的波形数字化采集系统为精确得到反冲质子动能提供了有力的保障.

在散裂中子源打靶质子束流功率为 100 kW 时, 能量为 1.6 GeV 的质子束团的展宽 (半高全宽) 约为 60 ns. 由于不同动能的中子及质子的飞行时间不同, 导致由飞行时间方法得到的质子动能的分辨率并不是固定值. 动能越大, 飞行时间越短, 受质子束团展宽的影响越大, 能量分辨率越差. 在实验厅二的中心位置 (距离钨靶 76 m) 处, 考虑质子束团展宽, 实验室系 0° 出射角处, 由 ${}^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应得到的质子的能量分辨 (未考虑质子在含氢靶中的能损及能散) 如图 3 所示. 由于中子的飞行时间与中子动能反相关, 在中子动能低时, 得到的质子的能量分辨非常好, 而在中子动能较高时, 质子的能量分辨变差很多. 譬如, 在 1 MeV 以下, 质子的能量分辨好于 1%, 而在 100 MeV 附近, 质子的能量分辨接近 10%.

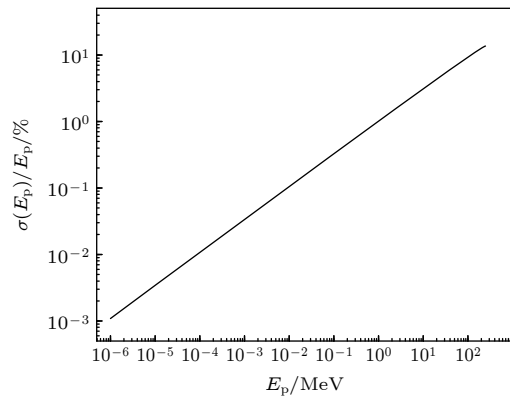


图 3 实验厅二中心位置处实验室系 0° 角方向 ${}^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应出射质子的能量分辨率
Fig. 3. The energy resolution of emitted protons from the ${}^1\text{H}(n, \text{el})$ reaction at 0° in the laboratory at the center of Back-n ES #2.

实验中常用的富含 ${}^1\text{H}$ 且杂质比较少的固体靶为聚乙烯、聚丙烯及 Mylar 膜等材料. 在反应靶的

选择中,需要靶中其他元素产生质子的干扰反应道的影响尽量小. 常温常压下氢的单质以气体存在,在实验室现有的条件下不方便使用;而常规含氢化合物中,聚乙烯或聚丙烯的氢质量比重最高,并且材料易获得且厚度精度高,同时厚度在 μm 量级时可以实现自支撑. 此外,聚乙烯或聚丙烯中 ^{12}C 的带电粒子出射反应道的反应阈值高且截面小,对 $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应干扰小.

在使用聚乙烯、聚丙烯等含 ^1H 材料作为反应靶时,中子与质子的 $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应产生质子的同时,靶中的 ^{12}C 及 ^1H 也会与中子发生其他核反应产生轻带电粒子. 由反应运动学可知,轻带电粒子的能量与 $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应产生的质子的能量接近. 产生轻带电粒子主要为 $^{12}\text{C}(n, \text{p})^{12}\text{B}$ ($Q = -12.59 \text{ MeV}$), $^{12}\text{C}(n, \text{d})^{11}\text{B}$ ($Q = -13.73 \text{ MeV}$), $^{12}\text{C}(n, \text{t})^{10}\text{B}$ ($Q = -18.93 \text{ MeV}$), $^{12}\text{C}(n, ^3\text{He})^{10}\text{Be}$ ($Q = -19.47 \text{ MeV}$), $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ ($Q = -5.70 \text{ MeV}$)和 $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$ 等6个反应道. $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应及以上6个反应道的截面数据如图4所示, $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应以及 $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$ 反应的截面数据来源于FENDL-3.1c数据库[12], 而 $^{12}\text{C}(n, \text{p})^{12}\text{B}$, $^{12}\text{C}(n, \text{d})^{11}\text{B}$, $^{12}\text{C}(n, \text{t})^{10}\text{B}$, $^{12}\text{C}(n, ^3\text{He})^{10}\text{Be}$, $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 等反应道的截面数据来源于Talys1.9程序[13]计算结果. 相较于其他反应道, $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应的截面值明显更大, 其他反应道对 $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应得到质子的影响很小. 在实际实验中选用乙烯或聚丙烯来作为得到反冲质子的反应靶. 并且根据实验能区范围, 结合出射质子的能量分辨率, 选择靶的厚度.

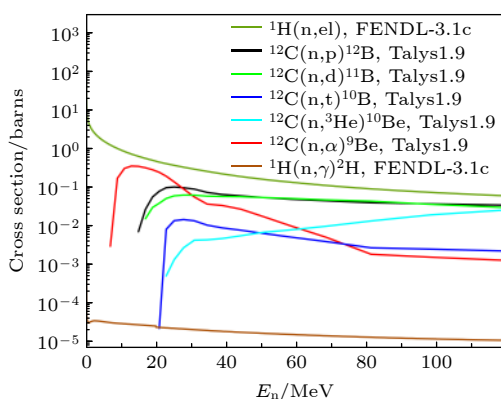


图4 $^1\text{H}(n, \text{el})$, $^{12}\text{C}(n, \text{p})^{12}\text{B}$, $^{12}\text{C}(n, \text{d})^{11}\text{B}$, $^{12}\text{C}(n, \text{t})^{10}\text{B}$, $^{12}\text{C}(n, ^3\text{He})^{10}\text{Be}$, $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 和 $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$ 等反应的截面值曲线

Fig. 4. Cross sections of the $^1\text{H}(n, \text{el})$, $^{12}\text{C}(n, \text{p})^{12}\text{B}$, $^{12}\text{C}(n, \text{d})^{11}\text{B}$, $^{12}\text{C}(n, \text{t})^{10}\text{B}$, $^{12}\text{C}(n, ^3\text{He})^{10}\text{Be}$, $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ and $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$ reactions.

根据测量得到的 Back-n 的中子能谱以及 FENDL-3.1c 数据库中的 $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应截面数据, 可以计算得到使用含 ^1H 靶时得到的次级质子的通量. 在实验厅二的中心位置处, 束流功率为 100 kW, 束斑直径为 $\Phi 60 \text{ mm}$, 利用 $10 \mu\text{m}$ 厚的聚乙烯薄膜作为靶, 得到的次级质子流强为 $8.59 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. 其中 0.1—200 MeV 的质子流强为 $6.20 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$, 表明次级质子集中在 MeV 能区, 与表 1 中的中子通量分布类似. 由于 $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应中, 反冲质子的动能随角度变化而变化, 在某一角度的质子能谱分布需要根据该角度处微分截面数据进行计算.

表 1 对于不同中子能区, Back-n 实验厅二中心位置处的反冲质子流强 (束流功率为 100 kW)

Table 1. Proton fluxes at the center of Back-n ES #2 in different energy regions at 100 kW.

中子能量区间	中子通量/ $(\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2})$	反冲质子流强/ s^{-1} *
0.1 — 1.0 eV	4.08×10^3	1.75×10^2
1 — 10 eV	1.79×10^4	7.68×10^2
10—100 eV	3.01×10^4	1.30×10^3
0.1 —1.0 keV	5.01×10^4	2.15×10^3
1 — 10 keV	1.23×10^5	5.14×10^3
10 — 100 keV	4.30×10^5	1.44×10^4
0.1— 1.0 MeV	2.98×10^6	4.57×10^4
1 — 10 MeV	2.77×10^6	1.56×10^4
10 — 40 MeV	4.62×10^5	6.01×10^2
40 — 70 MeV	9.93×10^4	3.48×10^1
70 — 100 MeV	4.10×10^4	8.54×10^0
100 — 130 MeV	1.65×10^4	2.32×10^0
130 — 160 MeV	6.14×10^3	7.53×10^{-1}
160 — 200 MeV	1.63×10^3	1.99×10^{-1}
总计	7.03×10^6	8.59×10^4

注: *束斑直径为 $\Phi 60 \text{ mm}$, 利用 $10 \mu\text{m}$ 厚的聚乙烯薄膜作为靶.

考虑反冲质子在含氢靶中的能量损失等因素, 在实际探测器标定中适合开展 MeV 能区的质子标定. 利用该方法得到的反冲质子适合开展带电粒子探测器系统的标定, 例如半导体探测器、闪烁体探测器等探测器系统的质子响应曲线测量.

3 利用宽能谱质子标定 Si+CsI(Tl) 望远镜

基于带电粒子在探测器中能量沉积的 Bethe-Block 公式, 在带电粒子测量及鉴别中经常使用多层探测器组成 ΔE - E 带电粒子望远镜来实现粒子

鉴别^[14–16]. 在搭建及使用带电粒子望远镜时, 需要使用带电粒子来进行测试及标定.

利用 $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应得到的反冲质子, 目前已经在 Back-n 开展了 Si+CsI (Tl) 望远镜探测器的测试与标定实验. 实验设置如图 5 所示, 在 Back-n 的实验厅一的带电粒子谱仪的真空靶室中放置了三组 Si+CsI(Tl) 望远镜. 其中, 硅探测器的厚度为 $300\ \mu\text{m}$, 有效探测面积为 $2.5\ \text{cm} \times 2.5\ \text{cm}$, CsI (Tl) 探测器为边长为 $3\ \text{cm}$ 的立方体. 实验采用了厚度为 $1\ \text{mm}$ 的聚乙烯作为靶.

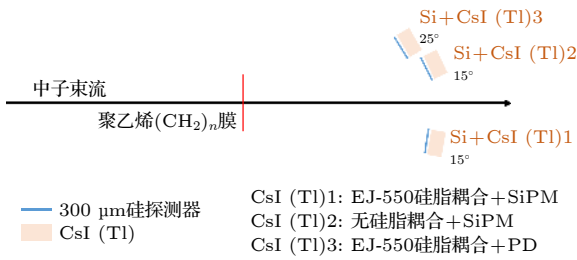


图 5 Si+CsI (Tl) 望远镜探测器的测试与标定实验设置示意图

Fig. 5. Schematic diagram of the calibration experiment of the Si+CsI (Tl) telescopes.

该实验的一个目标为测试 CsI (Tl) 探测器在不同读出方式下的响应曲线. 带电粒子在 CsI (Tl) 探测器中沉积能量后, 会导致 CsI (Tl) 探测器发光, 需要后续的光电转换器件进行读出. 实验中三组望远镜中的 CsI (Tl) 探测器分别采用了三种不同的读出及耦合方式: 1) 使用硅光电倍增管 (SiPM) 读出, 光学硅脂耦合的方式, 记为 CsI (Tl) 1; 2) 使用硅光电倍增管 (SiPM) 读出, 无光学硅脂耦合的方式, 记为 CsI (Tl) 2; 3) 使用硅光电二极管 (PD) 读出, 光学硅脂耦合的方式, 记为 CsI (Tl) 3; 其中, 使用的光学硅脂为 ELJEN 公司生产的 EJ-550^[17]; SiPM 为 Sensl 公司生产^[18], 每个 SiPM 读数为 9 块有效面积为 $6\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$ 的 SiPM 拼接而来, 单个像素尺寸为 $35\ \mu\text{m}$; PD 为滨松公司生产的 S3590-08^[19]. 图 6 中给出了 SiPM 及 PD, 以及 1), 3) 两种读出及耦合方式的 CsI (Tl) 探测器的照片. 对于 SiPM 的输出信号, 经由 SiPM 背后的运放电路放大成型, 而 PD 的输出信号经由 Mesytec 公司的 MSI-8 型号的电荷灵敏放大器进行放大. 放大成型后的信号输入至波形数字化采集系统^[15]中记录波形信号.

对三组 Si+CsI (Tl) 望远镜在束实验得到的波形数据进行逐事例分析, 得到每个事件的能量与时

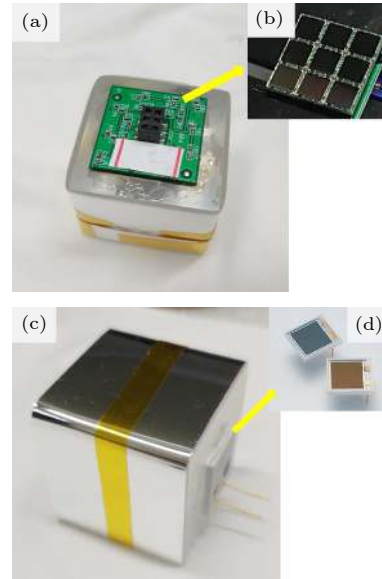


图 6 CsI (Tl) 探测器的测试与标定实验所用探测器及读出方式 (a) 使用光学硅脂耦合的 CsI (Tl) 探测器+SiPM 读出方式; (b) 使用的 SiPM; (c) 使用光学硅脂耦合的 CsI (Tl) 探测器+PD 读出方式; (d) 使用的 PD

Fig. 6. The CsI (Tl) detectors and readout methods used for the calibration experiment: (a) The optical silicon-grease coupled CsI (Tl) detector +SiPM readout method; (b) the SiPM used in the experiment; (c) the optical silicon-grease coupled CsI (Tl) detector +PD readout mode; (d) the PD used in the experiment.

间信息, 结果如图 7 所示. 图中横轴的质子动能 E_p 为使用 (1) 式计算得到, 进而利用探测器的幅度-质子动能二维谱, 可以得到每个探测器的带电粒子的鉴别, 计算中子动能的起始时间由每个探测器测量的 γ -flash 来标定^[20]. 如图 7(a) 所示, 在 CsI (Tl) 探测器的幅度-质子动能二维谱中, 可以看到 $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应得到的质子的束团. 由于 CSNS 的打靶质子为 $25\ \text{Hz}$ 频率的双束团结构, 两质子束团间隔 $410\ \text{ns}$, 所以, Back-n 的中子束流也为时间间隔 $410\ \text{ns}$ 的双束团结构^[8]. 如图 7 所示, 由于高能中子的飞行时间与束团的间隔时间接近, 得到的质子在幅度-质子动能二维谱中会在 MeV 能区以上分成两个事件带^[20]. 图中计算 E_p 时采用第一个束团的 γ -flash 时间信息来作为标定, 此时第一个束团的中子得到的质子的动能为准确值, 而第二个束团的中子得到的质子的动能不准确.

三种 CsI (Tl) 探测器得到的幅度-质子动能二维谱的差别来源于读出方式及耦合方式的不同. CsI (Tl) 1 与 CsI (Tl) 2 均使用 SiPM 进行读出, 区别在于 CsI (Tl) 1 使用光学硅脂进行 CsI (Tl)

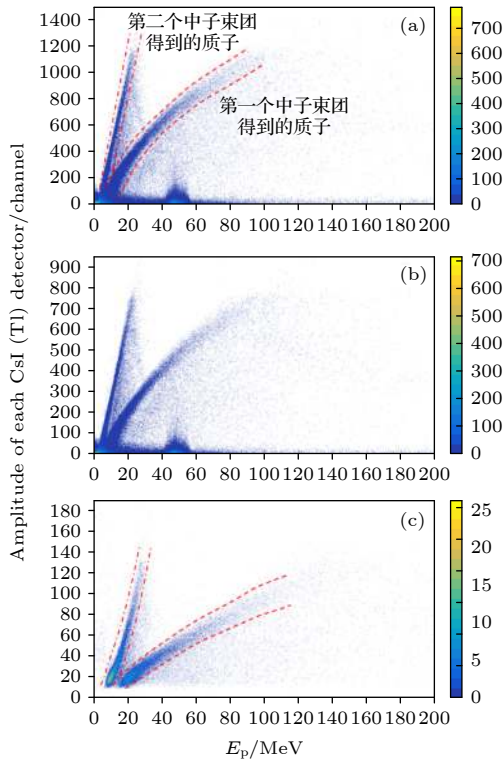


图 7 三种信号读出方式的 CsI (Tl) 的幅度-质子动能二维谱; (a) CsI (Tl) 1; (b) CsI (Tl) 2; (c) CsI (Tl) 3

Fig. 7. The amplitude- E_p two-dimensional spectrums of CsI (Tl) in three signal readout modes: (a) CsI (Tl) 1; (b) CsI (Tl) 2; (c) CsI (Tl) 3.

探测器和 SiPM 之间的耦合, 而 CsI (Tl) 2 的 CsI (Tl) 探测器和 SiPM 之间无耦合. 可以看到, CsI (Tl) 1 与 CsI (Tl) 2 的幅度-质子动能二维谱趋势相同, 在二维谱中可以看到质子事件带中质子能量达到 100 MeV 以上. 对于相同能量的质子得到的信号而言, CsI (Tl) 1 的信号更大一些, 也说明了光学耦合可以达到提高光子传输效率的效果.

图 7(c) 为使用 PD 读出的 CsI (Tl) 3 的幅度-质子动能二维谱, 对比图 7(a) 和图 7(c), 发现两种读出方式的能量响应曲线不同. 此外, 图 7(a) 和图 7(b) 中看到了在 100 MeV 的质子事件的幅度饱和现象, 而在图 7(c) 中未观察到这种情况, 这是由 SiPM 的工作原理导致的. 由于 SiPM 的每个像素在一个事件中只能收集一个光子, 所以 SiPM 的像素数决定了测量光子数的上限, 也即测量带电粒子的能量上限, 在图 7(a) 和图 7(b) 中均表现出质子能量为 100 MeV 时的饱和现象.

图 8 给出了三组 Si+CsI (Tl) 望远镜的粒子鉴别, 三组望远镜的 $\Delta E-E$ 二维谱中均得到了清晰的质子事件带. 相较于图 8(c) 中的质子鉴别效果,

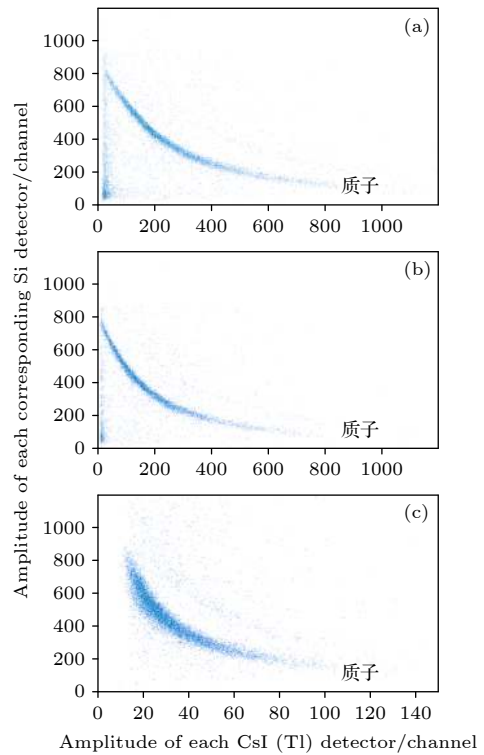


图 8 三组 Si+CsI (Tl) 的 $\Delta E-E$ 二维谱 (a) Si+CsI (Tl) 1; (b) Si+CsI (Tl) 2; (c) Si+CsI (Tl) 3

Fig. 8. The $\Delta E-E$ two-dimensional spectra of CsI (Tl) in three signal readout modes: (a) Si+CsI (Tl) 1; (b) Si+CsI (Tl) 2; (c) Si+CsI (Tl) 3.

图 8(a) 和图 8(b) 的质子鉴别能量下限更低, 质子事件带明显更细. 这是因为在本次实验中发现 CsI (Tl) 3 经由电荷灵敏前置放大器输出的信号噪声偏大, 波形采集时设置的阈值较高.

在这次实验中, 对比三组望远镜 (CsI (Tl) 探测器采用三种不同的信号读出方式) 得到的幅度-质子动能二维谱以及 $\Delta E-E$ 二维谱, 分析不同的信号读出方式的能量响应曲线, 以及对望远镜性能的影响. 在反角白光中子源的 $\Delta E-E$ 望远镜搭建中, 最终选取了使用 SiPM 读出, 并且使用光学硅脂进行耦合的读出方式, 在之后的 MeV 中子能区 $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应、 $^2\text{H}(n, \text{el})$ 反应等微分截面测量实验^[21] 中发挥了良好的效果.

此外, 利用该方法得到的质子, 也对低气压多丝正比室与硅探测器 (MWPC+Si) 望远镜的 $\Delta E-E$ 鉴别能力进行了标定, 在该研究中, 利用 2 μm 厚的 Mylar 膜作为反应靶, 得到了能量低至 0.5 MeV 的质子的粒子鉴别^[22], 在该研究中, 薄靶有效降低了 $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应出射的质子在靶中的能量沉积, 提高低能质子的能量分辨.

4 总 结

利用反角白光中子源的白光中子束流, 通过 $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应, 可以得到连续能量的次级质子, 为探测器标定等研究提供了一个新的研究平台. 考虑含 ^1H 比例及化合物中其他元素的中子诱发带电粒子出射反应的截面, 选择聚乙烯或者聚丙烯作为质子转换的靶. 利用反角白光中子源的能谱、 $^1\text{H}(n, \text{el})$ 反应截面及靶厚度, 可以计算得到次级质子的流强. 在通过飞行时间法计算反冲质子动能的过程中, 束团展宽对质子动能的能量分辨率的影响随能量变化而变化. 利用该方法产生 MeV 能区的质子, 对 Si+CsI (Tl) 望远镜开展了测试工作, 对比不同的信号读出方式对事件鉴别效果的影响, 为实际的探测器搭建提供了实验依据. 该研究也表明了反角白光中子源开展宽能谱次级质子标定及测试实验的可行性.

感谢中国散裂中子源的工作人员的辛苦工作.

参考文献

- [1] Casolino M, Bidoli V, Minori M, et al. 2006 *Adv. Space Res.* **37** 1691
- [2] Makek M, Achenbach P, Ayerbe Gayoso C, et al. 2012 *Nucl. Instrum. Meth. A* **673** 82
- [3] Jakubek J 2011 *Nucl. Instrum. Meth. A* **633** S262
- [4] Ge T, Zhang T J, Lv Y L, et al. 2019 *Atomic Energy Science and Technology* **53** 1547 (in Chinese) [葛涛, 张天爵, 吕银龙, 等 2019 原子能科学技术 **53** 1547]
- [5] An Q, Bai H Y, Bao J, et al. 2017 *J. Instrum.* **12** 07022
- [6] Tang J Y, Fu S N, Jing H T, et al. 2010 *Chin. Phys. C* **34** 121
- [7] Tang J Y, Jing H T, Xia H H, et al. 2013 *Atomic Energy Science and Technology* **47** 1089 (in Chinese) [唐靖宇, 敬罕涛, 夏海鸿, 等 2013 原子能科学技术 **47** 1089]
- [8] Tang J Y, An Q, Bai H Y, et al. 2019 *Atomic Energy Science and Technology* **53** 2012 (in Chinese) [唐靖宇, 安琪, 白怀勇, 等 2019 原子能科学技术 **53** 2012]
- [9] Chen Y, Luan G, Bao J, et al. 2019 *Eur. Phys. J. A* **55** 115
- [10] Bao J, Chen Y H, Zhang X P, et al. 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 080101 (in Chinese) [鲍杰, 陈永浩, 张显鹏, 等 2019 物理学报 **68** 080101]
- [11] Zhang D, Cao P, Wang Q, et al. 2017 *Chin. Phys. C* **41** 026102
- [12] FENDL-3.1 c: Fusion Evaluated Nuclear Data Library Ver.3.1 c: <https://www-nds.iaea.org/fendl/>[2020-10-18]
- [13] TALYS: https://tendl.web.psi.ch/tendl_2019/talys.html [2020-8-20]
- [14] Jiang W, Ye Y L, Lin C J, et al. 2020 *Phys. Rev. C* **101** 031304(R)
- [15] Chen J, Lou J L, Ye Y L, et al. 2018 *Phys. Lett. B* **781** 412
- [16] Pirrie S, Wheldon C, Kokalova Tz, et al. 2020 *Phys. Rev. C* **102** 064315
- [17] EJ-550: <https://eljentechnology.com/products/accessories/ej-500>[2020-11-10]
- [18] Sensl: <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/parametrics/17940/products>[2020-6-5]
- [19] S3590-08: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/type/S3590-08/index.html>[2020-6-17]
- [20] Jiang W, Bai H Y, Jiang H Y, et al. 2020 *Nucl. Instrum. Meth. A* **973** 164126
- [21] Jiang H Y, Jiang W, Cui Z Q, et al. 2021 *Eur. Phys. J. A* **57** 6
- [22] Fan R, Jiang H Y, Jiang W, et al. 2020 *Nucl. Instrum. Meth. A* **981** 164343

Detector calibration based on secondary protons of Back-n white neutron source*

Jiang Wei¹⁾²⁾ Jiang Hao-Yu³⁾ Yi Han¹⁾²⁾ Fan Rui-Rui^{1)2)4)†} Cui Zeng-Qi³⁾
 Sun Kang¹⁾²⁾⁵⁾ Zhang Guo-Hui³⁾ Tang Jing-Yu¹⁾²⁾ Sun Zhi-Jia¹⁾²⁾⁴⁾
 Ning Chang-Jun¹⁾²⁾ Gao Ke-Qing¹⁾²⁾ An Qi⁴⁾⁶⁾ Bai Huai-Yong³⁾ Bao Jie⁷⁾
 Bao Yu¹⁾²⁾ Cao Ping⁴⁾⁶⁾ Chen Hao-Lei⁴⁾⁶⁾ Chen Qi-Ping⁸⁾
 Chen Yong-Hao¹⁾²⁾ Chen Yu-Kai¹⁾²⁾ Chen Zhen⁴⁾⁶⁾ Feng Chang-Qing⁴⁾⁶⁾
 Gu Min-Hao¹⁾⁴⁾ Han Chang-Cai⁹⁾ Han Zi-Jie⁸⁾ He Guo-Zhu⁷⁾
 He Yong-Cheng¹⁾²⁾ Hong Yang¹⁾²⁾⁵⁾ Huang Han-Xiong⁷⁾ Huang Wei-Ling¹⁾²⁾
 Huang Xi-Ru⁴⁾⁶⁾ Ji Xiao-Lu¹⁾⁴⁾ Ji Xu-Yang⁴⁾¹⁰⁾ Jiang Zhi-Jie⁴⁾⁶⁾
 Jing Han-Tao¹⁾²⁾ Kang Ling¹⁾²⁾ Kang Ming-Tao¹⁾²⁾ Li Bo¹⁾²⁾ Li Chao⁴⁾⁶⁾
 Li Jia-Wen⁴⁾¹⁰⁾ Li Lun¹⁾²⁾ Li Qiang¹⁾²⁾ Li Xiao¹⁾²⁾ Li Yang¹⁾²⁾
 Liu Rong⁸⁾ Liu Shu-Bin⁴⁾⁶⁾ Liu Xing-Yan⁸⁾ Luan Guang-Yuan⁷⁾
 Mu Qi-Li¹⁾²⁾ Qi Bin-Bin⁴⁾⁶⁾ Ren Jie⁷⁾ Ren Zhi-Zhou⁶⁾⁸⁾ Ruan Xi-Chao⁷⁾
 Song Zhao-Hui⁹⁾ Song Ying-Peng¹⁾²⁾ Sun Hong¹⁾²⁾ Sun Xiao-Yang¹⁾²⁾⁵⁾
 Tan Zhi-Xin¹⁾²⁾ Tang Hong-Qing⁷⁾ Tang Xin-Yi⁴⁾⁶⁾ Tian Bin-Bin¹⁾²⁾
 Wang Li-Jiao¹⁾²⁾⁵⁾ Wang Peng-Cheng¹⁾²⁾ Wang Qi⁷⁾ Wang Tao-Feng¹¹⁾
 Wang Zhao-Hui⁷⁾ Wen Jie⁸⁾ Wen Zhong-Wei⁸⁾ Wu Qing-Biao¹⁾²⁾
 Wu Xiao-Guang⁷⁾ Wu Xuan¹⁾²⁾ Xie Li-Kun⁴⁾¹⁰⁾ Yang Yi-Wei⁸⁾ Yu Li¹⁾²⁾
 Yu Tao⁴⁾⁶⁾ Yu Yong-Ji¹⁾²⁾ Zhang Lin-Hao¹⁾²⁾⁵⁾ Zhang Qi-Wei⁷⁾
 Zhang Xian-Peng⁹⁾ Zhang Yu-Liang¹⁾²⁾ Zhang Zhi-Yong⁴⁾⁶⁾ Zhao Yu-Bin¹⁾²⁾
 Zhou Lu-Ping¹⁾²⁾⁵⁾ Zhou Zu-Ying⁷⁾ Zhu Dan-Yang⁴⁾⁶⁾ Zhu Ke-Jun¹⁾⁴⁾⁵⁾
 Zhu Peng¹⁾²⁾ The CSNS Back-n Collaboration

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

2) (*Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China*)

3) (*State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

4) (*State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, China*)

5) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

6) (*Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

7) (*Key Laboratory of Nuclear Data, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

8) (*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

9) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

10) (*Department of Engineering and Applied Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

11) (*School of Physics, Beihang University, Beijing 100083, China*)

(Received 2 November 2020; revised manuscript received 27 December 2020)

Abstract

At present, there exist few proton-beam terminals for the detector calibration in the world. Meanwhile, most of these terminals provide monoenergetic protons. Back-n white neutron source from China Spallation Neutron Source(CSNS) was put into operation in 2018. Based on the white neutron flux ranging from 0.5 eV to 200 MeV from the CSNS Back-n white neutron source, continuous-energy protons involved in a wide energy spectrum can be acquired from the $^1\text{H}(n, \text{el})$ reaction. Adopting this method, a new research platform for researches such as proton calibration is realized at CSNS. As hydrogen exists as gas at normal temperature and pressure, in the selecting of the proton-converting target, the hydrogen-rich compounds are preferential considered. Considering the reaction cross sections of the $^1\text{H}(n, \text{el})$, $^{12}\text{C}(n, \text{p})^{12}\text{B}$, $^{12}\text{C}(n, \text{d})^{11}\text{B}$, $^{12}\text{C}(n, \text{t})^{10}\text{B}$, $^{12}\text{C}(n, ^3\text{He})^{10}\text{Be}$, $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ and $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$, polyethylene and polypropylene are suitable for serving as targets in this research. Based on a 3U PXIe, digitizers with 1 GSps sampling rate and 12 bit resolution are utilized to digitize and record the output signals of telescopes. The time and amplitude information of each signal are extracted from its recorded waveform. Proton fluxes can be calculated by using the neutron energy spectrum and the cross section of the $^1\text{H}(n, \text{el})$ reaction. Using the γ -flash event as the starting time of the time-of-flight (TOF) and the time information of signal in detector as the stopping time, the kinematic energy of each secondary proton can be deduced from the TOF and the angle of the detector. A calibration experiment on three charged particle telescopes, with each telescope consisting of a silicon detector and a CsI(Tl) detector, is carried out on this research platform. The readout methods of the CsI(Tl) detectors in these three telescopes are different. In the calibration experiment, ΔE - E two-dimensional spectra and amplitude- E_p two-dimensional spectra of these telescopes are obtained. Through comparing these particle identification spectra, the SiPM is chosen as the signal readout method for CsI(Tl) detectors in the charged particle telescopes. These researches provide experimental evidence for the construction of the charged particle telescope at Back-n, and also illustrate the feasibility of wide-energy spectrum proton calibration based on the Back-n white neutron source.

Keywords: proton calibration, detector, $^1\text{H}(n, \text{el})$ reaction, back-n white neutron source

PACS: 29.25.Dz, 07.77.Ka, 24.10.-i, 29.40.Mc

DOI: 10.7498/aps.70.20201823

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFA0401604), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12005115), and the Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 2019A1515110287).

† Corresponding author. E-mail: fanrr@ihep.ac.cn