

文章编号: 1007-4627(2016)04-0461-05

## DAMPE-PSD 探测单元模块大动态范围读出方案的实验验证

周勇<sup>1,2,3</sup>, 余玉洪<sup>1</sup>, 孙志宇<sup>1</sup>, 张永杰<sup>1</sup>, 方芳<sup>1</sup>, 陈俊岭<sup>1</sup>, 胡碧涛<sup>2</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 暗物质粒子探测卫星 (Dark Matter Particle Explorer, DAMPE) 的塑闪阵列探测器 (Plastic Scintillator Detector, PSD) 需要实现高能  $e/\gamma$  粒子的鉴别功能以及对  $Z = 1 \sim 20$  的宇宙线重离子的电荷测量功能。它使用光电倍增管作为读出器件, 并从打拿极 5 和打拿极 8 同时引出信号来增大读出动态范围。基于该设计方案的探测单元模块在兰州重离子加速器冷却储存环 (HIRFL-CSR) 上的外靶终端 (ETF) 进行了束流测试实验。实验得到了 PSD 单元条在中能轻核区 ( $Z \leq 8$ ) 的能量响应, 并证明了单元条的衰减长度与入射粒子种类无关。通过将实验结果外推至高能重核区, 同时结合衰减长度、入射角度和能量涨落等因素, 可以估算出 PSD 探测单元模块输出信号幅度的动态范围。结果显示, 该范围在 PSD 前端电子学模块的线性工作区间内, 从而验证了 PSD 大动态范围读出方案设计的合理性。

**关键词:** 塑料闪烁体; 大动态范围; 猝灭效应

**中图分类号:** O572.21; O571.1

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.04.461

### 1 引言

暗物质粒子探测卫星 (Dark Matter Particle Explorer, DAMPE)<sup>[1]</sup> 是中国科学院空间先导专项的首批卫星之一。它的主要科学目标包括: 通过测量高能电子和  $\gamma$  射线的能谱和空间分布间接寻找和研究暗物质粒子, 通过测量 TeV 以上的高能电子和 TeV/u 的重离子能谱研究宇宙线的起源、传播和加速机制, 以及  $\gamma$  射线天文学研究。塑闪阵列探测器 (Plastic Scintillator Detector, PSD) 是 DAMPE 的一个关键探测器, 主要承担高能  $e/\gamma$  粒子的鉴别以及对  $Z = 1 \sim 20$  的宇宙线重离子的电荷测量。

PSD 由 X, Y 两个相互垂直的探测阵列平面组成, 其有效探测面积为  $820 \text{ mm} \times 820 \text{ mm}$ , 见图 1。每个探测阵列平面内有 41 个探测单元模块, 且相邻探测单元间交叠排布以消除探测死区。探测单元模块由一根  $884 \text{ mm} \times 28 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的塑料闪烁体单元条 (Eljen EJ-200) 和耦合在单元条两端的两支光电倍增管 (Hamamatsu R4443) 组成。

带电粒子在塑闪单元条中的沉积能量首先转化为光

信号。光子在单元条中经过反射、折射和衰减, 最终被两端的光电倍增管收集并转化为电信号进行后续处理。

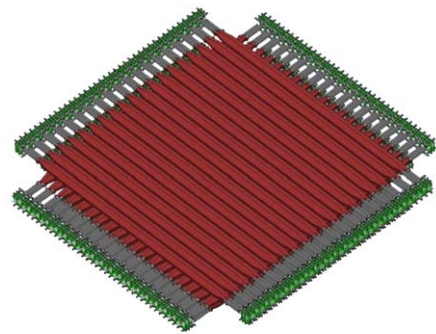


图 1 PSD 内部的塑闪单元条排布

相对论能区 ( $\beta\gamma = 1 \sim 1000$ ) 的带电粒子和重离子在  $10 \text{ mm}$  塑闪材料中的能量沉积主要来自电离能损, 其大小近似正比于  $Z^2$ 。因此, 不同种类的粒子在 PSD 中的沉积能量相差巨大, 可以根据能损大小对其电荷数进行测量。这也意味着 PSD 探测单元模块输出的信号幅度动态范围很大, 一般的读出方案满足不了要求, 需要对信号读出方式进行特别设计。PSD 选择了双打

收稿日期: 2016-01-26; 修改日期: 2016-02-23

基金项目: 中国科学院空间先导专项(XDA04040202-3)

作者简介: 周勇(1988-), 男, 浙江江山人, 博士研究生, 从事实验核物理研究; E-mail: yong@impcas.ac.cn

通信作者: 余玉洪 E-mail: yuyuhong@impcas.ac.cn.

拿极引出的方式来增大读出电路的动态范围,即同时引出 R4443 的打拿极 5(dy5) 和打拿极 8(dy8) 信号,并将两路信号输出到独立的前端电子学通道进行处理<sup>[2]</sup>。对于小信号,使用增益高的 dy8 信号进行能量重建;对于大信号,dy8 通道已经饱和,这时可以使用增益低的 dy5 信号进行能量重建。这样不仅用 dy5 通道增大了读出电路的动态范围,同时用 dy8 通道保证了信号噪声比,从而降低  $e/\gamma$  误判率。

当重离子在塑料闪烁体中的沉积能量很大时,由于猝灭效应的影响,其光产额与沉积能量并不成严格的正比关系,一般需要实验进行确定。利用兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)上的放射性束流线(RIBLL2)提供的 $^{16}\text{O}$ 主束及其次级束,我们对 PSD 探测单元模块的重离子响应进行了研究。本文主要介绍了本次实验的基本情况以及测试结果。另外,由于实验只能得到 PSD 塑闪单元条在中能轻核区的能量响应,本文基于 BTV(Birks-Tarle-Voltz)模型<sup>[3]</sup>将实验结果外推到了相对论重核区,并得到了 PSD 探测单元模块输出信号幅度的动态范围。

## 2 实验设备与实验条件

实验在 HIRFL-CSR 上的外靶终端(ETF)进行,探测器布局如图 2 所示。待测的 PSD 探测单元模块放置在 RIBLL2 束线出口处,其长度方向与束流出射方向成  $90^\circ$ ,使得束流垂直穿过单元条厚度。探测单元的信号输出到 PSD 的专用前端电子学模块中进行处理。该模块使用 ASIC 芯片 VA160<sup>[4]</sup>进行电荷测量,并结合 14 位的 ADC 进行模数转换<sup>[5]</sup>。实验中所用的塑闪单元条、PMT 以及前端电子学与 PSD 正样飞行件完全一致,测试结果可以直接被参考使用。

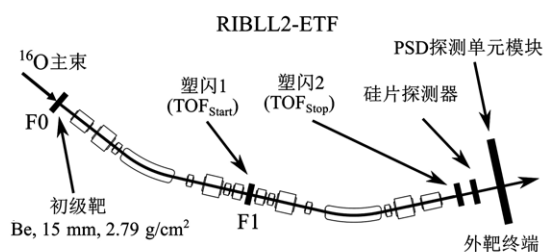


图 2 RIBLL2束线以及PSD探测单元模块在外靶终端的实验布局

来自 CSR 主环的稳定主束在 RIBLL2 的入口处轰击初级 Be 靶,通过弹核碎裂反应产生不同种类的次级离子。具有相近  $A/Z$  比的次级离子经过 RIBLL2 的分离、纯化,最终被传输到外靶终端进行实验。为了得

到  $Z \leq 8$  的所有重离子类型,测试使用了 3 种不同的束流配置,分别是利用 350 MeV/u 的  $^{16}\text{O}$  主束轰击 15.1 mm 的 Be 靶产生  $^{15}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^9\text{Be}$  和  $^7\text{Li}$ , 利用 265 MeV/u 的  $^{16}\text{O}$  主束轰击 15.1 mm 的 Be 靶产生  $^3\text{He}$  以及直接利用 265 MeV/u 的  $^{16}\text{O}$  主束自身。

RIBLL2 束线上同时装配有一组塑闪飞行时间探测器和一个硅片能损探测器,可以使用 TOF- $\Delta E$  方法对次级离子种类进行鉴别。图 3 给出了 350 MeV/u 的  $^{16}\text{O}$  主束条件下次级离子的 TOF- $\Delta E$  关联图,从图中可以清晰地分辨出几种不同的次级离子。数据分析时,我们首先根据 TOF- $\Delta E$  关联图挑选出同种核素的入射事件,然后考察 PSD 探测单元模块对该单一核素的能量响应。

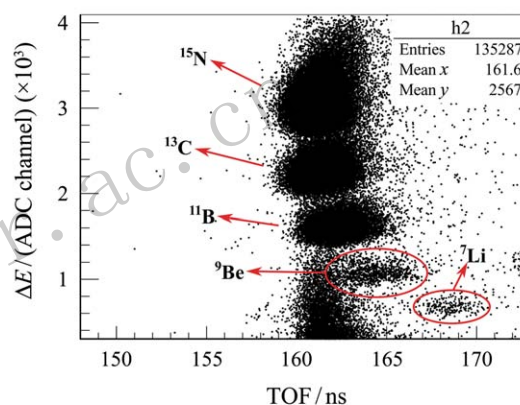


图 3 (在线彩图) 350 MeV/u  $^{16}\text{O}$  主束产生的次级离子 TOF- $\Delta E$  关联图

## 3 单元条中心的重离子响应

实验中发现,  $Z > 2$  的重离子已经使 dy8 信号饱和,因此 dy5 信号被用来研究 PSD 探测单元模块对所有入射离子的能量响应,如图 4 所示。

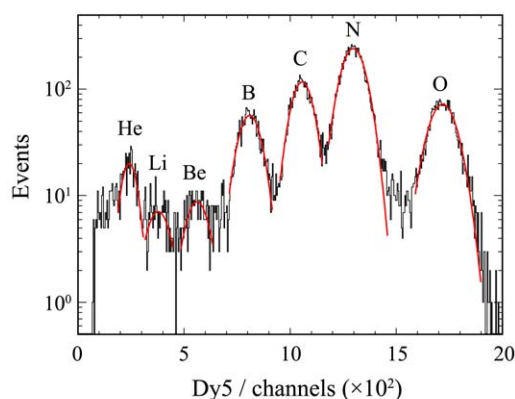


图 4 (在线彩图) 单元条一端得到的原始能谱横轴为从 dy5 通道的 ADC 道数值

可以看到, 不同种类的重离子可以被清晰地分辨出来。表1给出了对各个峰位高斯拟合得到的中心值( $L$ , 代表相对光产额)和展宽值( $\Sigma$ , 代表能量分辨)。

相对论重离子( $\beta\gamma = 1 \sim 1000$ )与实验使用的中能重离子在相同材料中的能量损失并不一致, 因此上述的测量结果需要修正。表1列出了LISE<sup>[6]</sup>计算得到的不同重离子在10 mm 塑闪材料中的沉积能量, 其中 $\Delta E_{\text{exp}}$ 表示本次实验使用的次级束离子,  $\Delta E_{\text{mip}}$ 表示对应的 $\beta\gamma = 3$ 的MIP(Minimum Ionizing Particle,

最小电离粒子)重离子。由于相对论重离子的电离能损与速度的关联性较小<sup>[7]</sup>, 后面的分析中使用MIP重离子来代表相对论能区的能量响应。对于同一种重离子来说, 在沉积能量相差不大的条件下, 其在塑闪中的光产额近似与沉积能量大小成正比。据此, 可以推得PSD探测单元条模块对相对论重离子的能量响应中心值 $L_{\text{mip}}$ :

$$L_{\text{mip}} = L \frac{\Delta E_{\text{mip}}}{\Delta E_{\text{exp}}} \quad (1)$$

表1 PSD探测单元一端得到的能量响应值

重离子	$\Delta E_{\text{exp}}/\text{MeV}$	$\Delta E_{\text{mip}}/\text{MeV}$	$L(\text{ADC mean})$	$\Sigma(\text{ADC sigma})$	$L_{\text{mip}}(\text{ADC counts})$
$^3\text{He}$	16.8	8.2	242.4	32.1	118.3
$^7\text{Li}$	34.4	18.4	382.2	52.4	204.4
$^9\text{Be}$	59.0	32.7	559.5	61.7	310.1
$^{11}\text{B}$	90.2	51.1	807.6	49.2	457.5
$^{13}\text{C}$	128.2	73.7	1055.5	49.4	606.8
$^{15}\text{N}$	173.0	100.5	1298.1	54.2	754.1
$^{16}\text{O}$	255.6	131.0	1718.5	63.7	880.8

基于上述轻核区实验结果, 使用BTV(Birke-Tarlovoltz)模型<sup>[3, 8-9]</sup>外推, 可以得到PSD单元条在重核区的能量响应。BTV模型也被称为core-halo模型, 该模型认为重离子在闪烁体中的光产额由距离入射迹迹较近的内核(core)和较远的晕(halo)两个区域构成。内核区域的能损密度高, 猝灭效应影响大, 其光产额与沉积能量的关系可以用Birke定律<sup>[10]</sup>描述; 晕区域主要由少量高能 $\delta$ 电子组成, 能损密度低, 其光产额与沉积能量大小成正比。公式(2)是BTV模型参数化表示,

$$\frac{dL}{dx} = \frac{A(1-f_h)\alpha Z^2}{1+B_S(1-f_h)\alpha Z^2} + Af_h\alpha Z^2, \quad (2)$$

其中 $dL/dx$ 是单位路径的闪烁光输出;  $f_h$ 是晕区域内沉积能量占总沉积能量的比例;  $B_S$ 代表猝灭效应的强度,  $A$ 是全局归一化参数;  $Z$ 是入射离子的电荷数。 $Z^2$ 项来自于相对论重离子的单位路径能损 $dE/dx = \alpha Z^2$ , 对于塑闪材料来说, 其中的 $\alpha \approx 2 \text{ MeVg}^{-1} \text{ cm}^2$ 。

图5是使用公式(2)对轻核区实验数据的拟合结果, 其中横轴为电荷数 $Z^2$ , 纵轴为使用公式(1)修正后的dy5通道ADC道数值。可以看到, 数据点与理论模型符合得比较好。根据拟合结果, 可以计算出当 $Z = 20$ 时, dy5通道的响应中心值为2940道。

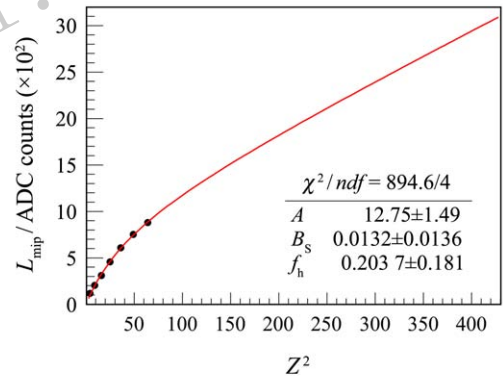


图5 (在线彩图) 将PSD探测单元模块的能量响应外推至 $Z = 20$

## 4 衰减长度的测量结果

通过移动PSD探测单元模块的位置, 使得束流中心依次对准单元条上 $-310 \text{ mm}$ ,  $-210 \text{ mm}$ ,  $0 \text{ mm}$ ,  $210 \text{ mm}$ 以及 $310 \text{ mm}$  5个位置点, 可以对单元条的光衰减长度进行测量。由于到达终端的次级束中包含多种重离子成分, 此次实验同时得到了 $^{15}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{11}\text{B}$  3种核素的测量结果, 如图6所示。为了便于直接比较不同核素的测量结果, 图中各位置点的光输出值都分别归一到了中心位置处。可以看到, 归一化后的三组数据点高度重合。这说明, 不同入射重离子测得的光衰减效应是完全一致的。

使用指数衰减函数对上述所有实验点进行拟合, 可

以得到单元条的衰减长度为 927 mm。据此, 可以计算得到其最近端与中心位置处的信号幅度比值为 1.64, 最近端与最远端的信号幅度比值为 2.59。

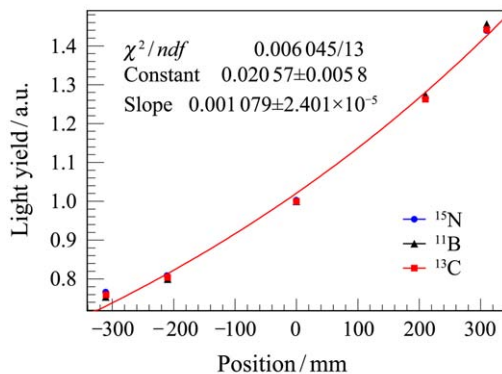


图 6 (在线彩图) 单元条一端测得的光输出量与击中位置的关系

横轴为以单元条中心为零点的击中位置坐标, 纵轴为相对于单元条中心归一化的光输出量。

## 5 输出信号动态范围的估算

PSD 探测单元模块的输出信号大小取决于入射离子种类、沉积能量大小和单元条的击中位置(衰减长度)。而沉积能量大小又与入射粒子穿过的物质厚度和能量涨落有关。 $Z = 20$  的相对论重离子垂直穿过单元条中心位置时,  $dy5$  通道的响应中心值为 2940 道。以此为基础, 可以估算出 PSD 探测单元模块  $dy5$  通道的最大输出信号幅度为  $2940 \times 1.64 \times 2.0 \times 1.15 = 11090$  道。其中, 1.64 是光衰减效应的体现; 2.0 来自 DAMPE 的最大张角, 此时入射粒子径迹的角度为  $60^\circ$ , 因此穿过的物质厚度是垂直入射时的两倍; 1.15 来自能量涨落, 假设单元条对  $Z = 20$  的入射离子的能量分辨率为 10%, 且使用  $3\sigma$  的覆盖范围, 则最大涨落的能损值是中心值的 1.15 倍。PSD 前端电子学模块的量程为 16384 道, 测试得到其有效线性范围为  $0 \sim 12000$  道<sup>[5]</sup>。因此, 上面估算出的信号动态范围在其线性范围内, 满足 PSD 的设计要求。

## 6 总结

本文介绍了 PSD 探测单元模块在 RIBLL2 外靶实验终端的重离子测试实验。实验得到了单元条在中能轻

核区(几百 MeV,  $Z \leq 8$ ) 的能量响应, 并证明了单元条的衰减长度与入射粒子种类无关。通过将实验结果外推至高能重核区, 同时结合衰减长度、入射角度和能量涨落等因素, 我们估算出 PSD 探测单元模块输出信号幅度的动态范围。结果显示, 该范围在 PSD 前端电子学模块的线性工作区间内, 从而验证了 PSD 大动态范围读出方案设计的合理性。

由于束流条件的限制, 本次实验的束流能量不在 DAMPE 关注的能区, 使用的重离子种类也不能覆盖 DAMPE 的全部目标核; 另外, 实验只对 PSD 单个探测单元模块进行了原理性验证, 没有进行多模块的系统级测试。为了得到 DAMPE 的整体性能参数, DAMPE 合作组计划在欧洲核子中心(CERN)对组装完成的 DAMPE 探测器整体进行全面的束流标定。届时, 将使用相对论能区的重核区重离子对 PSD 的灵敏区域进行扫描, 从而直接验证 PSD 各单元模块的大动态范围读出性能。

## 参考文献:

- [1] CHANG Jin. Chinese Journal of Space Science, 2014, **34**: 550.
- [2] ZHOU Yong, SUN Zhiyu, YU Yuhong, *et al.* arXiv: 1601.07234 [physics.ins-det].
- [3] TARLE G, AHLEN S P, CARTWRIGHT B G. The Astrophysical Journal, 1979, **230**: 607.
- [4] IDEAS | Integrated Detector Electronics AS. [2016-01-15]. <http://www.ideas.no/products/ide3160-2>.
- [5] YANG Haibo. Signals Reading Method and Circuit Design for Multiple Detection Unit Based on the Advanced ASIC Chips[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)  
(杨海波. 基于先进 ASIC 芯片的多探测单元信号读出方法与电路设计[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.)
- [6] TARASOV O B, BAZIN D. Nucl Instr and Meth B, 2008, **266**(19): 4657.
- [7] Particle Data Group. Chinese Physics C, 2014, **38**: 090001.
- [8] MARROCCHESI P S, ADRIANI O, AKAIKE Y, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2011, **659**(1): 477.
- [9] DWYER R, ZHOU Dazhuang. Nucl Instr and Meth A, 1985, **242**(1): 171.
- [10] BIRKS J B. The Theory and Practice of Scintillation Counting[M]. Amsterdam: Elsevier, 2014.

## Beam Verification of the Large Dynamic Range Readout Design of DAMPE-PSD

ZHOU Yong<sup>1,2,3</sup>, YU Yuhong<sup>1</sup>, SUN Zhiyu<sup>1</sup>, ZHANG Yongjie<sup>1</sup>, FANG Fang<sup>1</sup>, CHEN Junling<sup>1</sup>, HU Bitao<sup>3</sup>

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

2. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Plastic Scintillator Detector (PSD) of DArk Matter Particle Explorer (DAMPE) aims for high energy  $e/\gamma$  identification and charge measurement for cosmic-ray ions from  $Z = 1 \sim 20$ . It adopts photomultiplier tube as the readout device and extracts signals from both dynode5 and dynode8 to enlarge the readout dynamic range. A beam test on a PSD detector unit based this design has been carried out at the External Target Facility (ETF) terminal of the Cooling Storage Ring of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL-CSR). The detector response to light nuclei ( $Z \leq 8$ ) at the medium energy scale was extracted and the attenuation length was proved to be irrelevant with the impinging nuclei species. By extrapolating the result to heavy nuclei at the high energy scale and taking into account light attenuation, energy fluctuation and imping angle, the dynamic range of the output signal of PSD detector unit was estimated. The range is well within the linear range of the front-end electronics of PSD, thus verifies the large dynamic range readout design of PSD.

**Key words:** plastic scintillator; large dynamic range; quenching effect

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

**Received date:** 26 Jan. 2016; **Revised date:** 23 Feb. 2016

**Foundation item:** Strategic Priority Research Program on Space Science of Chinese Academy of Sciences (XDA04040202-3)

**Corresponding author:** YU Yuhong, E-mail: yuyuhong@impcas.ac.cn.