

暗物质粒子探测卫星PSD的在轨状态 以及PSD的光衰减行为研究*

李 瑶^{1,2} 张亚鹏^{1†} 张永杰¹ 孙志宇¹ 余玉洪¹
董铁矿³ 马鹏雄^{3,4} 王远鹏^{2,3} 袁 强^{3,4}

(1 中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 中国科学院紫金山天文台暗物质与空间天文重点实验室 南京 210008)

(4 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 暗物质粒子探测卫星(DARK MATTER PARTICLE EXPLORER, 简称DAMPE)是一颗高分辨多功能的空间探测器, 主要用来测量宇宙射线中的高能电子(正电子)、质子、伽玛射线和重离子, 卫星已于2015年12月17日发射升空. 塑料闪烁体探测器(Plastic Scintillator Detector, 简称PSD)是DAMPE的子探测器, 位于DAMPE的最上方. 主要介绍DAMPE在轨期间PSD的相关内容, 包括电压和温度状态, 其中PSD的温度变化小于 1°C , 每个光电倍增管的电压变化小于0.5%. 利用卫星传回的数据, 研究了PSD晶体内的光衰减行为, 根据经验公式得到每条PSD晶体的光衰减长度, 利用PSD得到了初步的宇宙射线电荷谱.

关键词 仪器: 探测器, 方法: 数据分析

中图分类号: P145; 文献标识码: A

1 引言

暗物质和暗能量约占宇宙总成分的95%^[1], 同时研究暗物质和暗能量也是当今天文学以及粒子物理学领域的热门话题. 确定暗物质性质的实验方法之一是探测宇宙线粒子(如高能电子和伽玛射线)的能谱^[2]. 已有一些空间探测项目做了这方面的尝试, 如PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics)^[3]、Fermi-LAT (Fermi Large Area Telescope)^[4]和AMS02 (Alpha Magnetic Spectrometer)^[5]等. DAMPE是中国第1个暗物质空间探测项目, 也是中国科学院首批空间科学战略先导专项之一. 它是一颗高分辨多功能的探测器, 可以探测包括正负

2017-03-30收到原稿, 2017-04-11收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11673047、11673075、11303107), 国家重点研发计划(2016YFA0400201), 中国科学院空间科学战略性先导专项(XDA04040400)资助

†y.p.zhang@impcas.ac.cn

电子、伽玛射线、质子和重离子等在内的宇宙线. DAMPE探测高能电子、高能伽玛以及高能宇宙线重离子的性能指标见表1. DAMPE已于2015年12月17日由CZ-2D型运载火箭发射升空, 运行在500 km的太阳同步轨道上.

表 1 DAMPE的设计指标^[6-7]
Table 1 Design parameters of the DAMPE^[6-7]

Particle	Parameter	Energy range	Energy resolution	Spacial resolution	Geometrical acceptance
e^{\pm}		5 GeV–10 TeV	1.5% @ 800 GeV	0.3°@ 100 GeV	> 0.3 m ² ·sr
γ -ray		5 GeV–10 TeV	1.5% @ 800 GeV	0.3°@ 100 GeV	> 0.3 m ² ·sr
Nuclei		100 GeV–100 TeV	>40% @ 800 GeV	0.2°@ 100 GeV	> 0.2 m ² ·sr

DAMPE由4个子探测器构成, 如图1所示, 从上到下依次为: 塑料闪烁体探测器(Plastic Scintillator Detector, 简称PSD)、硅径迹探测器(Silicon-Tungsten Tracker, 简称STK)、BGO量能器(Bismuth Germanate Oxid Calorimeter, 简称BGO)以及中子探测器(Neutron Detector, 简称NUD). PSD主要有两个功能: (a)测量 $Z=1-26$ 的入射重离子的电荷; (b)作为反符合探测器区分伽玛射线和带电粒子. STK^[8]位于PSD的下方, 是DAMPE测量粒子径迹最主要的探测器. BGO^[9-11]用来测量带电粒子以及伽玛射线的能量, 同时是DAMPE的触发系统^[12-14]. NUD位于DAMPE的底部, 由4块掺杂了硼的塑料闪烁体构成, 主要通过测量中子来区分强子簇射与电磁簇射^[15-16].

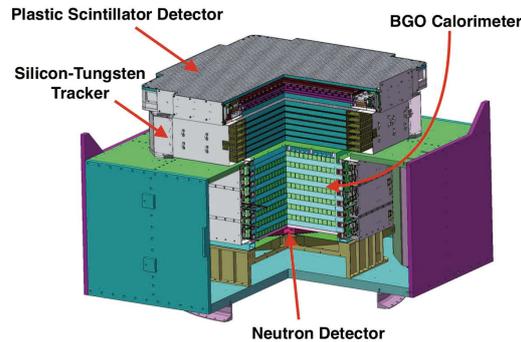


图 1 DAMPE的结构示意图

Fig. 1 Layout of the DAMPE

本文主要内容与PSD相关, 内容安排如下: 在引言之后, 我们在第2节简单地介绍PSD的设计, 第3节将会介绍PSD在轨期间的运行状态, 第4节介绍PSD的光衰减行为. 我们在第5节展示PSD的刻度状态, 最后为总结部分.

2 PSD介绍

为了减少背散射, PSD采用了双层设计, 其结构如图2所示, 其有效面积为825 mm×825 mm. PSD的每个子层都由41根PSD晶体组成, 每根PSD晶体的尺寸(长×宽×高)为884 mm×28 mm×10 mm (位于边缘的PSD晶体宽度为25 mm), 两子层中位于

上侧的PSD晶体(X-层)沿DAMPE坐标系统的X轴摆放,下层的PSD晶体(Y-层)沿Y轴摆放,同时为了防止粒子从PSD晶体条之间的空隙穿过,相邻晶体条交错摆放,有8 mm的重叠,如图3所示. PSD采用Eljen公司的EJ-200¹作为晶体材料,EJ-200有空间探测的使用经验,曾被多个空间探测项目使用过. PSD产生的荧光由耦合在PSD晶体两端的光电倍增管(Photo Multiplier-tube,简称PMT)读出,PMT为Hamamatsu公司的R4443-MOD2型.由于PSD共有两层,每层41条PSD晶体,每条晶体有两端读出,因此共有164个PMT,每个PMT又有两个读出道,因此共有328个信号读出道.最小电离粒子(Minimum ionization particle,简称MIP)是带电粒子穿过物质时能量区间处于最小电离区域的粒子,带电粒子在物质中的能量沉积可以用Bethe公式^[17]描述.PSD需要测量0.1倍MIP到1400倍MIP的能量范围,为此PSD采取了双打拿极读出,其中较小增益的第5打拿极覆盖4倍MIP到1400倍MIP的能量范围,较大增益的第8打拿极覆盖0.1倍MIP到40倍MIP的能量范围,重叠的能量范围可以用来对PMT线性进行刻度.详细的读出方案可以参考文献[18]. PSD使用挪威IDEAS公司的ASIC (Application Specific Integrated Circuits)芯片²作为核心电路,同时为了使PSD在轨期间表现稳定,PSD安装了带有热源的温度控制系统.有关PSD的设计、装配和测试等详细内容可以参考文献[19].

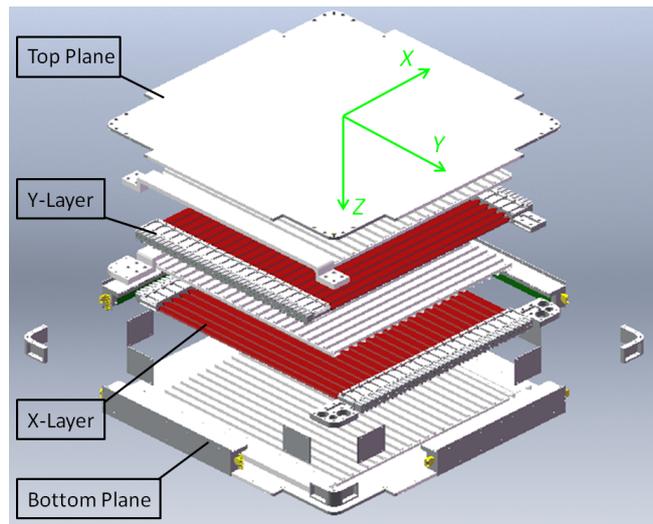


图 2 PSD结构示意图

Fig. 2 The structure of the PSD



图 3 PSD的侧视图

Fig. 3 Side view of the PSD

¹<http://www.eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>

²Integrated Detector Electronics AS (IDEAS), VA160 datasheet, (<http://www.ideas.no>)

3 PSD的在轨状态

高压(High voltage, 简称HV)的稳定性对探测器性能至关重要. PSD上的PMT使用的高压由DAMPE电源系统提供, 相关的状态信息包括高压、温度和卫星位置等由DAMPE的载荷数据管理系统监控提供. 我们定义高压改变率 $(HV_i - \text{Mean})/\text{Mean}$ 来描述高压稳定性, 其中 HV_i 为不同日期的高压值, Mean是长时间以来的高压平均值. 图4展示了高压改变率(纵轴)随时间(横轴)的变化关系. 图中为位于Y-层正端、编号为22–40的PMT温度变化情况, 我们对每个PMT的温度变化率添加了额外的偏移量, 这是为了能在同一张图上尽可能多地展示PMT的温度变化情况, 其中8个PMT有相同的变化趋势(2016年3月附近), 这是因为这8个PMT在电路上相连, 共用同一个高压. 总体上来看, 电压变化率小于0.5%, 从而使得PSD在轨期间表现稳定.

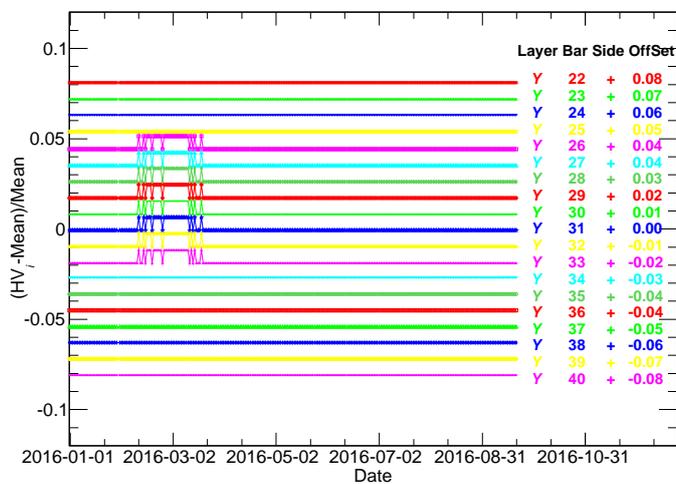


图 4 高压变化率随时间的变化关系, 右侧为与层、条和端对应的偏移量.

Fig. 4 The HV change rate versus date. The corresponding offset of layer, bar, and side are listed at the right of this figure.

PSD是DAMPE最顶端的探测器, 它的温度跟接收阳光的有效面积有关. 图5展示的为PSD中+X方向上温度(纵轴)随时间(横轴)变化的关系, 图中可以看到2016年2月左右温度最低, 这是因为这段时间内卫星接收太阳光的有效面积最小, 之后, 随着有效面积的增大, 温度会逐渐上升. 直到2016年4月25日左右, 卫星轨道处于吸热与散射的平衡状态, 温度趋于稳定. 图中两条水平直线范围为 1°C , 这也表明PSD上安装的温度控制系统工作良好, 对保持温度恒定有效果. 为了进一步消除高压和温度的影响, PSD的刻度(包括基线刻度、打拿极线性刻度等)是动态进行的.

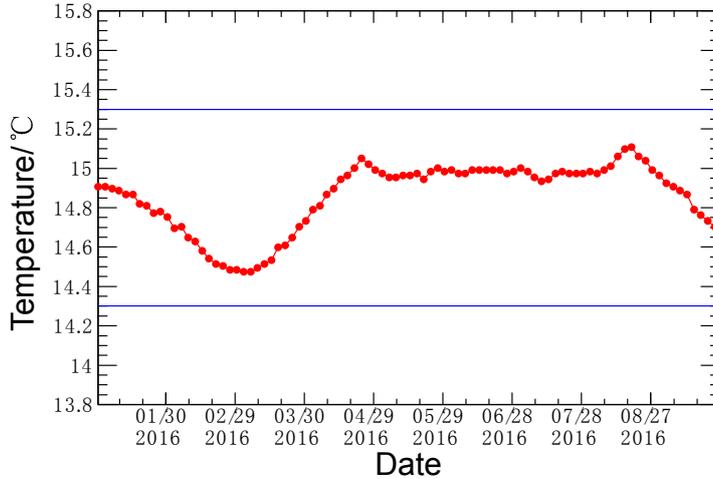


图5 PSD一端的温度随时间变化图, 水平实线的范围为 1°C .

Fig. 5 The temperature of one side of the PSD versus date. The two solid horizontal lines indicate a range of 1°C .

4 光衰减行为

光衰减参数通常与闪烁体的材料、几何尺寸与表面处理相关. 光衰减函数是PSD中极其重要的参量, DAMPE的径迹探测器可以给出高分辨的位置信息, PSD晶体两端可以得到入射粒子能量沉积的Analog-to-Digital Converter (ADC)值, 通过结合光衰减函数和入射粒子的位置以及PSD测到的ADC值, 可以重建出入射粒子的电荷量. 研究PSD的光衰减行为时全部采用MIP事例, 这些MIP事例是从处于高能触发模式下的事例中进一步选择能穿过所有BGO层且在BGO中的能量沉积处于MIP能量范围内的事例而挑选出来的, 对于每个MIP事例, 其击中PSD的位置可以通过延长重建出的径迹到PSD的平面得到. 之后把PSD一端测量得到的ADC值与击中位置做关联图, 即可得到光衰减行为, 如图6所示. 图中展示的为MIP事例测量得到的ADC值(纵轴)与击中PSD位置(横轴)的关系图, 对于横轴中每个Bin内的ADC, 可以把它投影到一维直方图中并用朗道函数进行拟合, 图7展示的即为图6横轴中某个Bin内的ADC分布, 蓝色实线为拟合得到的朗道函数. 图6中间部分的黑色三角形则为每个Bin内拟合得到的最可几值(MPV). 光衰减函数则是通过拟合MPV (图6中黑色三角形)得到, 考虑到荧光在PSD另一端反射的贡献, 其中拟合使用的函数形式如(1)式^[20]所描述,

$$A(x) = C_0 \left[e^{-(\frac{L}{2}+x)/\lambda} + \alpha e^{-(\frac{3L}{2}-x)/\lambda} \right], \quad (1)$$

其中 $L = 82 \text{ cm}$, 为PSD晶体条的长度, λ 为衰减长度, x 为击中位置, 第2个指数项来源于荧光在另一端的反射, 拟合得到的函数如图6红色曲线所示, 拟合得到的 $\lambda \approx 64.3 \text{ cm}$, $C_0 \approx 588.0$, $\alpha \approx 0.74$. 不同PSD晶体拟合得到的衰减长度并不相同, 这是由于PSD晶体表面包装有反射层, 人工包装无法保证包装完全一致. 拟合得到的衰减长度分布如图8所示, 拟合衰减长度分布得到的平均值及方差分别为 57.6 cm 和 4.5 cm .

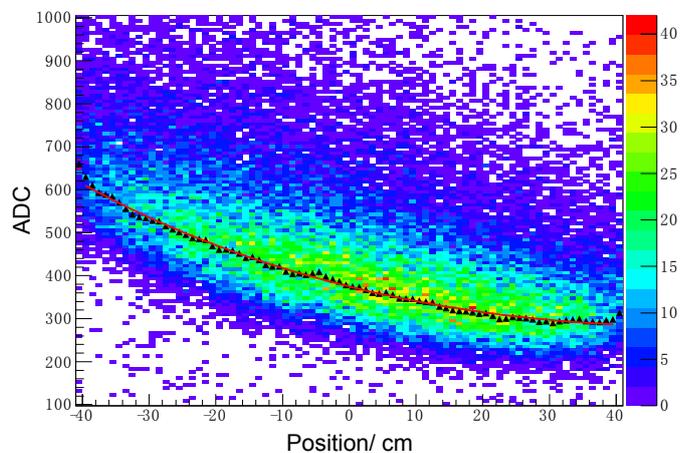


图 6 MIP事例的ADC值(纵轴)与击中位置(横轴)的关系. 黑色三角形为拟合横轴中每个Bin内的ADC分布得到的MPV, 红色实线为拟合MPV点得到的拟合函数.

Fig.6 The ADC value (vertical axis) of MIP versus the hit position (horizontal axis). The black triangles are the MPV values of corresponding Bins in the horizontal axis, and the red solid line is the fitted function.

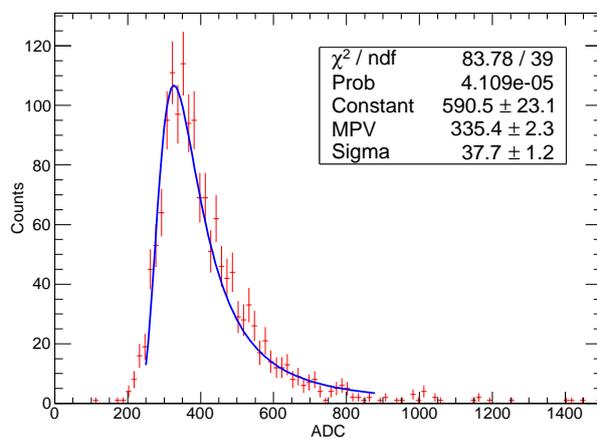


图 7 图6横轴中某个Bin内的ADC分布, 图中曲线为使用朗道函数拟合分布得到的函数图像.

Fig.7 A typical distribution of the ADC values for one horizontal Bin of Fig.6, the curve is the fitted Landau function.

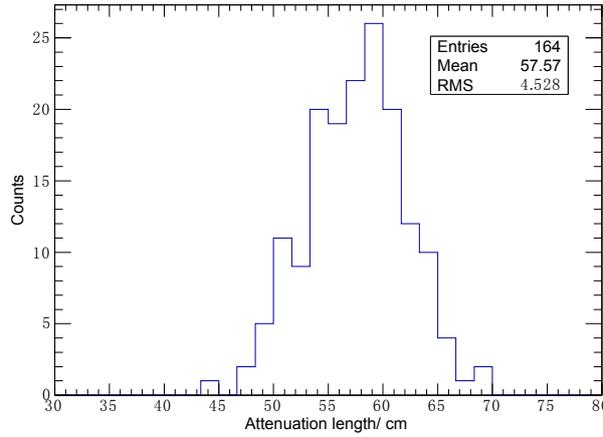


图 8 PSD晶体的衰减长度分布

Fig. 8 The attenuation length (λ) distribution of the PSD bars

5 PSD的刻度状态

自DAMPE发射升空起, PSD一直处于完全正常运行状态. 在轨刻度之所以必要, 是因为相比于地面实验室环境, 空间环境更加复杂. 在轨刻度的过程就是要把PSD直接测量得到的ADC值转换为入射粒子的沉积能量. 刻度过程可以分为几个步骤: 减基线、刻度PMT打拿极的线性、刻度MIP响应和重建沉积能量. 基线是DAMPE处于基线模式下测量得到的ADC值, 正如第2节提到的, 每个PMT都有两个信号读出端: dynode 5 (dy5)以及dynode 8 (dy8). 在刻度得到dy5与dy8的增益关系之后, 就可以整合dy5与dy8的值, 从而用一个数值表示此PMT的测量值. 在刻度MIP响应阶段, MPV是通过用朗道分布拟合PSD测量得到的ADC值得到的. PSD晶体内的能量沉积通过以下公式获得:

$$E_i = \frac{\sqrt{\text{ADC}_i^L \text{ADC}_i^R}}{\text{MPV}_i^{\text{MIP}}} E^{\text{MIP}}, \quad (2)$$

其中 E_i 是第 i 条PSD晶体的能量沉积, $\text{ADC}_i^L/\text{ADC}_i^R$ 是第 i 条PSD晶体左/右端测量得到的ADC值, $\text{MPV}_i^{\text{MIP}} = \sqrt{\text{MPV}_i^L \text{MPV}_i^R}$ 是第 i 条PSD晶体上整合之后得到的MIP响应值, $E^{\text{MIP}}=2 \text{ MeV}$ 为MIP垂直穿过PSD晶体(1 cm厚)时的能量沉积. 根据Bethe公式, 带电粒子的能量沉积与其带电荷数的平方成正比. 这样, 带电粒子的电荷则可以通过其在PSD内的能量沉积获得, 具体如下:

$$Q_i = \sqrt{\frac{E_i f_i(x)}{E_i^{\text{MIP}}}}, \quad (3)$$

其中 Q_i 表示带电粒子在第 i 条PSD晶体上重建出的电荷, E_i 为能量沉积, $E_i^{\text{MIP}} = 2 \text{ MeV}$ 为MIP的能量沉积, $f_i(x)$ 是与击中位置 x 相关的修正函数, 再修正猝灭效应的影响之后就可以得到带电粒子的电荷. 目前PSD基于在轨数据的刻度及电荷重建算法仍在进行当中, 我们会在今后的工作中详细介绍刻度的过程.

我们用3 d的在轨数据展示了PSD中X-层初步的电荷重建结果,如图9所示. 为了压低H及He元素朗道分布的长尾巴,限制粒子在STK中的能量沉积需要大于2 MeV. 从图中可以看到,除了H以及He之外, Li、Be、B、C、N、O、Ne、Mg、Si、S、Ca以及Fe元素的峰位也很明显.

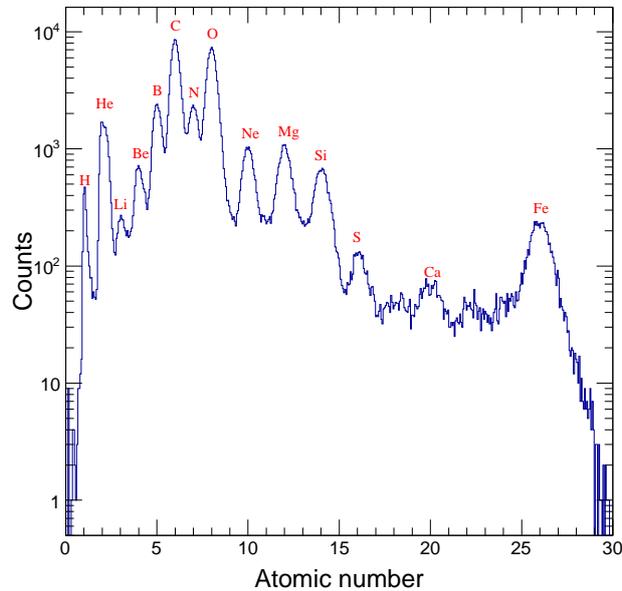


图 9 利用PSD中X-层晶体重建出的电荷谱

Fig. 9 The reconstructed charge spectrum from the X-layer of the PSD

6 总结

DAMPE已经在轨运行一年多时间, PSD运行稳定, 其高压变化率小于0.5%, 温度变化小于1°C, 同时也证实保持PSD温度恒定的温度控制系统有效. 我们研究了PSD晶体的光衰减行为, 并且根据(1)式获得了典型的衰减长度(57.6 cm). 光衰减函数可以结合粒子径迹重建入射粒子的电荷, 同时也是用GEANT4模拟荧光在PSD晶体中传播的重要参数.

本文简略描述了PSD中能量重建与能量修正的步骤, 并且展示了X-层上重建出的初步的电荷谱, 从电荷谱中我们可以清晰地看到H、He、Li、Be、B、C、N、O、Ne、Mg、Si、S、Ca以及Fe元素. DAMPE可以测量到最高100 TeV的核素, 随着统计量的提高, 我们将在今后的工作中展示更高能量核素的通量.

参 考 文 献

- [1] Planck Collaboration, Ade P A R, Aghanim N, et al. *A&A*, 2014, 571: A1
- [2] Chang J, Adams J H Jr, Ahn H S, et al. *Nature*, 2008, 456: 362
- [3] Picozza P, Sparvoli R, PAMELA collaboration. *NIMPA*, 2010, 623: 672
- [4] Atwood W B, Abdo A A, Ackermann M, et al. *ApJ*, 2009, 697: 1071
- [5] Battiston R. *NIMPA*, 2008, 588: 227
- [6] Chang J. *ChJSS*, 2014, 34: 550
- [7] 郭建华, 徐遵磊, 胡一鸣, 等. 暗物质粒子探测卫星有效载荷总体初样设计报告. 南京: 中国科学院紫金山天文台, 2013
- [8] Azzarello P, Ambrosi G, Asfandiyarov R, et al. *NIMPA*, 2016, 831: 378
- [9] Feng C, Zhang D, Zhang J, et al. *ITNS*, 2015, 62: 3117
- [10] Zhang Z Y, Zhang Y L, Dong J N, et al. *NIMPA*, 2015, 780: 21
- [11] Zhang Z Y, Wang C, Dong J N, et al. *NIMPA*, 2016, 836: 98
- [12] Guo J H, Zhang Y Q, Feng C Q, et al. The Trigger System of DAMPE. 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio De Janeiro, July 2-7, 2013
- [13] 张磊, 郭建华, 张永强. *天文学报*, 2014, 55: 522
- [14] Zhang L, Guo J H, Zhang Y Q. *ChA&A*, 2015, 39: 380
- [15] 何明, 马涛, 常进, 等. *天文学报*, 2016, 57: 1
- [16] He M, Ma T, Chang J, et al. *ChA&A*, 2016, 40: 474
- [17] Patrignani C. *ChPhC*, 2016, 40: 100001
- [18] Zhou Y, Sun Z Y, Yu Y H, et al. *NIMPA*, 2016, 827: 79
- [19] Yu Y H, Sun Z Y, Su H, et al. *APh*, 2017, 94: 1
- [20] Akimov D Y, Araújo H M, Barnes E J, et al. *APh*, 2010, 34: 151

On-orbit Status and Light Attenuation Behavior of the DAMPE-PSD

LI Yao^{1,2} ZHANG Ya-peng¹ ZHANG Yong-jie¹ SUN Zhi-yu¹
 YU Yu-hong¹ DONG Tie-kuang³ MA Peng-xiong^{3,4} WANG Yuan-peng^{2,3}
 YUAN Qiang^{3,4}

(1 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(3 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(4 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

ABSTRACT The DArk Matter Particle Explorer (DAMPE) is a high-resolution multi-purpose space-borne device for detecting the high-energy cosmic-rays like e^\pm , γ -rays, protons, and heavy-ions, which was launched on 2015 December 17th. The Plastic Scintillator Detector (PSD) is the top-most sub-detector of DAMPE. The PSD is designed to measure the charge of incident high-energy particles, and to serve as a veto detector for discriminating γ -rays from the charged particles. In this paper, the on-orbit status of the PSD after launching in terms of high voltage (HV) and temperature stabilities is presented. The temperature and the HV variations of the PSD are less than 1°C and 0.5%, respectively. By using the on-orbit data, the attenuation lengths of PSD bars are obtained according to an empirical formula. A preliminary charge spectrum reconstructed from the X-layer of the PSD is obtained.

Key words instrumentation: detectors, methods: data analysis