

暗物质空间探测器 BGO 量能器的 读出设计*

郭建华^{1,2†} 蔡明生^{1,2} 胡一鸣^{1,2} 常 进^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 南京 210008)

摘要 暗物质空间探测器是中国科学院紫金山天文台暗物质空间天文实验室提出的,其目的是为了探测暗物质粒子湮灭可能产生的高能电子和伽玛粒子. 整个探测器主要由 BGO (Bismuth germanate, 锗酸铋) 高能图像量能器和闪烁体径迹探测器构成. 探测器的能量探测范围将覆盖 10 GeV 到 10 TeV 的高能电子和伽玛粒子, 其中高能粒子的能量主要沉积在 BGO 量能器中. 为了验证探测器方案, 紫金山天文台暗物质空间天文实验室设计了暗物质空间探测器 BGO 量能器的读出系统原型, 并对其进行了初步的测试.

关键词 仪器: 探测器, 暗物质, 宇宙线

中图分类号: P 171; **文献标识码:** A

1 引言

自从 20 世纪 30 年代 Zwicky^[1-2] 最先提出暗物质存在的的天文学证据以来, 越来越多的证据表明宇宙中确实存在着暗物质. 宇宙中, 我们所知的部分只占整个的不足 4%, 暗物质和暗能量则充斥着整个宇宙. 但是, 除了引力效应外, 人类对暗物质知之甚少. 暗物质的本质是什么, 它是由什么基本粒子组成的, 这些基本问题仍未得到解决.

在过去几十年的时间里, 物理学家发展出了超对称理论. 这一理论预言, 每一种普通粒子都具有一种尚未被探测到的大质量“超对称伙伴”粒子^[1-2]. 目前, 超对称所预言的粒子是主导的暗物质候选粒子. 这些粒子具有质量和弱相互作用力, 但它们不参与电磁作用, 称之为弱相互作用大质量粒子 WIMP (Weakly Interacting Massive Particle). 由于暗物质粒子不参与电磁相互作用, 要想探测它们就必须要把现有的实验推向极致, 这导致了人们至今都无法确定暗物质粒子是哪种粒子. 目前, 暗物质探测的方法主要有直接探测、加速器上探测和间接探测. 直接探测, 如探测暗物质粒子和普通物质作用的碰撞作用, 通过观测这些碰撞产生的热等信号来证实暗物质粒子的存在. 间接观测, 主要是观测暗物质衰变或者湮灭产生的稳定的次级粒子, 如伽玛和电子等.

2011-03-29 收到原稿, 2011-06-07 收到修改稿

* 中国科学院知识创新工程 - 空间暗物质粒子探测器预研究 (KJ CX2-YW-T16)、973 子课题 - 暗物质的空间探测实验预研项目 (2010CB833002) 资助

† jhguo@pmo.ac.cn

目前国际上已有多个直接和间接探测暗物质粒子的实验. 经过科学家多年的努力, 暗物质粒子的间接观测方面在 2008 年开始有了新的进展. 首先是美国的南极气球实验 ATIC(Advanced Thin Ionization Calorimeter) 通过分析 10 yr 的观测数据, 发现宇宙高能电子能谱在 300 GeV~800 GeV 之间有个偏离宇宙线理论能谱的异常超出^[3], 紧接着欧洲的 PAMELA(Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) 空间实验也观测到类似的结果^[4]. 高能电子的能谱异常被认为是暗物质粒子发出的可能信号, 受到广泛关注.

为了能够更准确地测量宇宙中高能电子和伽玛能谱, 中国科学院紫金山天文台空间室在中美合作 ATIC 实验的基础上, 提出了空间探测暗物质粒子的实验计划^[5]. 其目的是为了探测暗物质粒子湮灭可能产生的高能电子和伽玛射线. 本文将介绍空间暗物质探测器中 BGO 量能器的读出设计和初步测试结果.

2 暗物质探测器系统架构

中国科学院紫金山天文台空间室提出的暗物质空间探测器主要是由两大子探测器构成^[5]: 位于探测器上部的闪烁体径迹探测器和位于下部的 BGO 量能器, 探测器结构如图 1 所示. 为了能够准确地鉴别出入射的高能粒子, 如质子、电子、伽玛粒子等, 需要对入射粒子和探测器作用的径迹进行重建. 因此每个子探测系统均有位置灵敏和能量测量的功能.

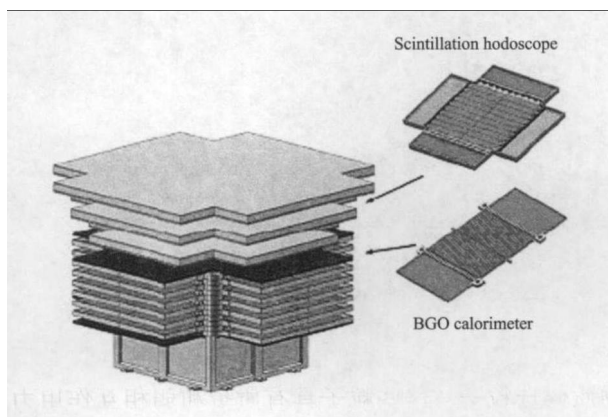


图 1 暗物质空间探测器结构示意图

Fig. 1 Structure of dark matter particle detector in space

探测器上部的闪烁体径迹探测器共有 6 层, 分别以 X 和 Y 方向交替垂直放置, 每根塑料闪烁体为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 大小, 长度为 1 m. 闪烁体探测器下方的 BGO 量能器共有 12 层, 也是 X 和 Y 方向交替垂直放置, 每层总面积为 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$. 由于受到生产工艺的限制, BGO 量能器通过由两根 0.3 m 的 BGO 晶体对拼在一起形成 0.6 m 长度的探测器来满足尺寸要求. 每根 BGO 晶体大小为 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$, 每层共有 24×2 根晶体.

整个探测器预计能量测量范围为 10 GeV~10 TeV, 能量分辨率为 $1.5\% @ 800\text{ GeV}$, 伽玛和电子的区分优于 1%. 由于 BGO 图像量能器中沉积了入射粒子的大部分能量, 因

此其能量探测能力对整个探测器的性能起了关键作用.

3 BGO 量能器设计

3.1 BGO 量能器结构

12 层 BGO 图像量能器由结构框架固定并叠放在一起, 外观如图 2 所示, 图中 PMT (Photo-multiplier tube) 指光电倍增管. 当粒子的能量沉积在 BGO 晶体后, BGO 晶体将其转换为相应大小的荧光, 然后由放置在 BGO 晶体一端的光电倍增管 (滨松公司的 R5610A) 将光信号转换为电信号, 并送到电子学读出系统中进行测量. 整个 BGO 量能器的光信号由 576 根光电倍增管负责读出. 图 3 为单根 BGO 晶体和 PMT 的封装实物图.

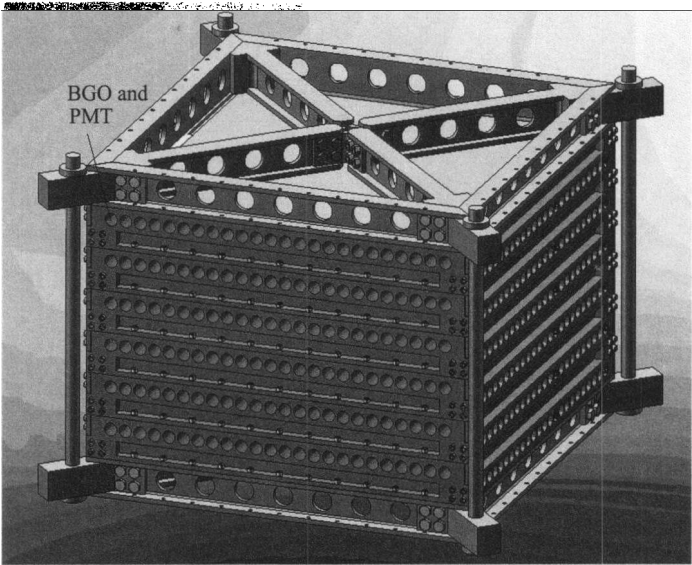


图 2 BGO 量能器晶体放置结构外观图
Fig. 2 The structure figure of BGO calorimeter

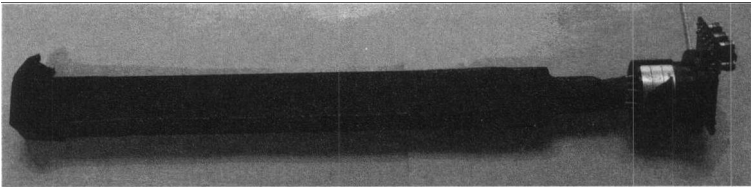


图 3 单根 BGO 晶体探测器
Fig. 3 Single BGO detector element

3.2 BGO 量能器电子学读出

为了使整个探测系统能够探测 10 GeV~10 TeV 能量范围的高能粒子 (主要为伽玛粒子和电子), 要求单根 BGO 探测器能够探测 10 MeV 到 2 TeV 左右的粒子能量 (GEANT4 模拟的结果). 因此, 单个 BGO 晶体要求具有 $10^5\sim10^6$ 左右的动态范围. 考虑到单纯依

靠光电倍增管的阳极或者单个打拿极很难达到这么大的动态范围, 暗物质探测器计划采用 ATIC 实验类似的技术, 通过利用光电倍增管中的 3 个不同打拿极引出信号来扩大动态范围. 这 3 个打拿极分别为第 1、4、7 打拿极. BGO 的荧光进入光电倍增管的光阴极后, 经过各个打拿极的放大, 最后达到阳极. 由于光电倍增管中各个打拿极信号有恒定的倍数关系, 这样所引出的 3 个不同增益的打拿极信号就可以分别对应高能区、中能区和低能区的能量测量. 通过测量 3 个打拿极信号这种方式, 就能够相对单路输出的测量将探测器的动态范围扩大 10^3 倍. 这样, 只要单路打拿极信号能够达到 10^3 的测量范围, 结合 3 路信号就能够方便地使整个 BGO 探测器动态范围达到 10^6 .

光电倍增管的信号引出后送到读出电子测量系统中进行处理. BGO 量能器的电子测量系统主要由两部分构成: 前端电路 FEE (Front end electronics) 板, 子数据获取系统 sub_DAQ (Sub_detector data acquisition). 前端电路板利用电荷灵敏放大器收集光电倍增管的电荷信号, 进行成形放大(慢成形)、峰值保持、数字化, 然后送到子数据获取系统中. 同时前端电路板也通过快成形放大和甄别电路产生粒子的击中信号送到触发系统中, 作为第 1 级触发判选的依据. 前端电路板电路结构如图 4 所示. 图 4 中 dy 表示光电管的打拿极 dynode, FPGA (Field programmable gate array) 为现场可编程逻辑阵列, ADC

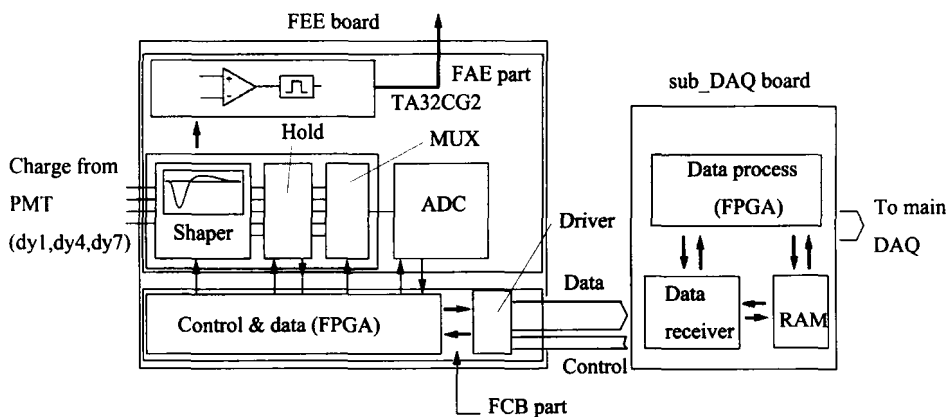


图 4 BGO 量能器读出电路框图

Fig. 4 Readout electronics of BGO calorimeter

为模拟数字变换器 (Analog digital converter), RAM (Random access memory) 为随机存储器, Mux 为多路选择器 (Multiplexer). 由于前端电路板紧靠在 BGO 探测器上, 考虑到面积等因素将前端电路板分为两部分: 前端模拟电路 FAE (Front-end analog electronics) 子板和前端控制电路 FCB (Front-end control board) 子板. 它们分别负责模拟信号的处理和数字控制信号的传送. 这两个子板通过连接器叠合在一起构成了前端电路板, 具体见图 5, 图中 PCB 为印刷电路板 (Printed circuit board). 子数据获取系统 sub_DAQ 主要负责接收上层的主数据获取系统 (Main data acquisition) 以及触发系统的命令, 启动前端电路的数据采集, 并接收前端电路板发送过来的数据, 将数据打包后通过数据总线传输给上层主数据获取系统. 一个子数据获取系统板负责管理 6 个前端电路板 (对应 BGO 量能器的一个侧面方向上的所有 PMT 读出).

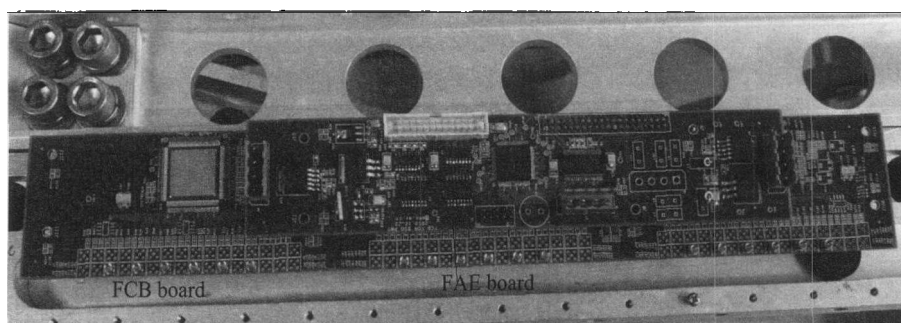


图 5 前端电子学实物图

Fig. 5 Picture of front-end electronics's PCB

4 BGO 探测器测试结果

为了验证 BGO 探测器的性能, 需要对其进行测试. 整个系统的初步测试分为 2 个部分: 利用信号发生器测试前端电子学的性能; 利用宇宙线和放射源作为信号源对探测器进行测试.

4.1 利用信号源的测试结果

在前端电路板和光电倍增管连接之前, 需要对前端电路本身的性能 (噪声、动态范围、线性等) 进行测试. 前端电路的测试是采用信号发生器作为信号源来进行的. 将信号发生器产生脉冲信号通过 10 pF 的电容耦合到前端电子学的输入端, 通过这种方式模拟光电倍增管的输出电荷来测试电子学的性能 [6]. 测试时, 通过不断调整信号源输入的强度对前端电路板的动态范围进行扫描. 图 6 是电路噪声和线性的测试结果, 图中 Bin 为 ADC 的道. 从图中可以看出, 各个通道的噪声 (折算到输入端的电荷量) 大致在 1.2~1.4 fC 之间 (Root mean square, RMS), 图 6 中一个 ADC 道 (Bin) 代表 0.68 fC. 从测量的结果可得, 前端电子学正电荷测量线性最大电荷量能达到 +13 pC (非线性为 1%), 对于 +14 pC 的输入非线性已经比较大了 (2%).

从测试结果看, 单路读出电子学的动态范围大概在 10^4 左右, 完全可以满足探测器的需求.

4.2 宇宙线和放射源测试结果

光电倍增管的打拿极信号之间存在固定的倍数关系, 暗物质探测器所使用的 3 个打拿极中相邻 2 个打拿极信号之间的倍数大概 30~40 倍左右 (+800 V 高压). 为了能够结合 3 个不同放大倍数的打拿极信号, 使整个探测器的能量探测动态范围能够方便地扩展到 10^6 , 两个相邻的打拿极的能量测量范围之间需要有一定的重叠部分, 重叠部分的大小和放大倍数之差相关. 为了检测各打拿极之间放大倍数的线性关系、噪声等性能, 我们在实验室中利用放射源和宇宙线对单根 BGO 探测器进行了测试.

根据 GEANT 4 的模拟, 为了使整个探测器能够探测 10 TeV 左右的电子, 单根 BGO 探测单元需要能够探测到 2 TeV 左右的电子的能量. 虽然 BGO 量能器的 PMT 使用 3 个

打拿极引出信号的方式使得整个探测器动态范围达到 10^6 , 但如果直接把 2 TeV 电子产生的光子全部输入到 PMT, 则大大超过了 PMT 光阴极可接受的范围. 所以在实际使用时

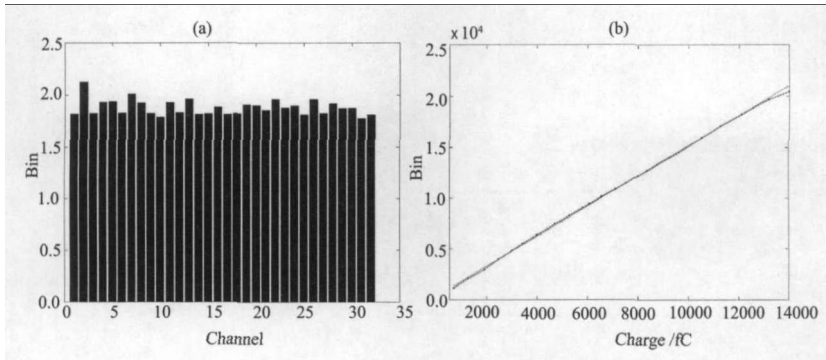


图 6 32 个通道的基线噪声 (a), 前端电子学线性测试结果 (b)

Fig. 6 Noise of all 32 channel's pedestal in FEE (a), linearity test of FEE's charge measurement (b)

需要通过光衰减等各种方式将所需测量能量的粒子对应的荧光强度调整到探测器的测量范围, 这样才能使得探测器探测到所需能量范围内的粒子. 但是, 由于在实验室测试时没法得到这么高能量的射线源, 为了能够利用放射源和宇宙线等射线源测试探测器的性能, 在实验室测试时不对输入光电倍增管的光信号进行衰减, 而是采用直接耦合. 通过这种方式, 1 MeV 的粒子在 BGO 晶体中产生的光子数相当于将来使用时 40 MeV 左右的粒子产生的光子数. 这样就可以利用实验室所能得到的粒子源对探测器进行测试.

图 7 是宇宙线和放射源测试的测试装置示意图, 放射源主要用 Co 60 的伽玛源. 图中 HV (High voltage) 为 PMT 的高压, GND 表示高压的地 (Ground). 数据的采集采用自触发方式, 触发信号由打拿极 7 (dy 7) 产生.

实验中, 利用随机信号采集打拿极的基线信号, 从初步测试结果看, 单路打拿极基线的电荷信号噪声为 6 fC (RMS 值). 由于电子学的电荷测量范围为 0~13 pC, 这样单路打拿极最大可测信号与噪声之比为 $13 \times 10^3 / 6$ 约为 2000, 能够满足探测器要求. 图 8 为利用放射源和宇宙线自触发测试得到的打拿极 7 的能谱, 从图中看出探测系统能够很好的把噪声和 C60 的伽玛谱线区分开. 经拟合可得 C60 的伽玛谱在 497 道, 宇宙线 Moun 的最小电离粒子 MIPS (Minimum ionizing particles) 沉积能量在 9 157 道附近, 而前端电子学大致在 3×10^4 道时达到饱和.

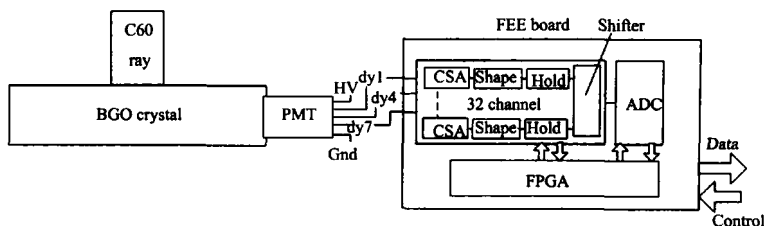


图 7 测试装置示意图

Fig. 7 Scheme of test bench

图 9 是利用宇宙线长时间测试得到的打拿极 7 和打拿极 4 的倍数关系 (图 9(a), 图中坐标为 ADC 的道 Bin) 以及打拿极 4 和打拿极 1 的倍数关系 (图 9(b)). 从 2 个图中可计算得出打拿极 7 和打拿极 1 的信号倍数为 1200, 结合前面计算得出的单路打拿极测量的信噪比可以得知利用 3 个打拿极测量这种方式可以将测量的动态范围扩大到 10^6 左右.

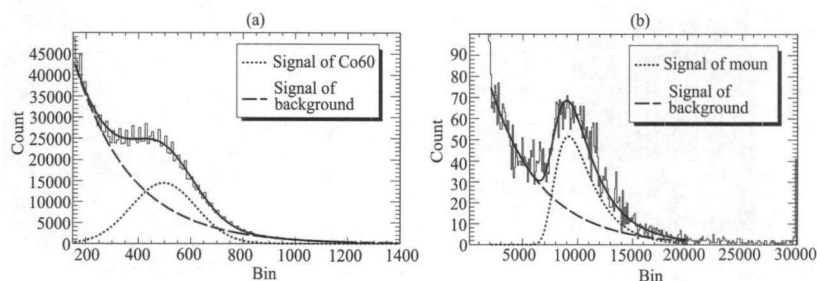


图 8 C60 的伽玛射线测试结果 (a), 宇宙线 moun 子的测试结果 (b)

Fig. 8 Energy spectrum of gammy ray of C60 (a), energy spectrum of moun ray (b)

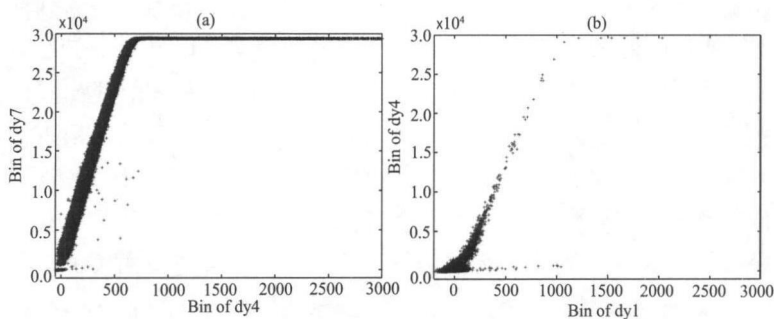


图 9 打拿极 7 和打拿极 4 的信号倍数关系 (a), 打拿极 4 和打拿极 1 的信号倍数关系 (b)

Fig. 9 The ratio of signals between dynode7 and dynode4 (a), the ratio of signals between dynode4 and dynode1 (b)

5 结论

前面介绍了暗物质探测器 BGO 量能器的原型设计方案和初步测试结果, 从测试结果看采用多个打拿极读出的方式能够有效地扩大整个探测器的动态范围, 使得探测器能够满足 10^6 这样的动态范围的要求. 另外, 为了得到更加全面的结果, 我们还需做更为详细的测试.

参 考 文 献

- [1] Feng J L. arXiv:1003.0904, astro-ph. CO, 2010
- [2] Gianfranco B, Dan H, Joseph S. PhR, 2005, 405: 279
- [3] Chang J, Adams Jr J H, Ahn H S, et al. Natur, 2008, 456: 362
- [4] Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. Natur, 2009, 458: 607

- [5] Chang J, Wu J. Proceedings of the 31st ICRC, 2009
[6] 王芝英, 楼滨乔, 朱俊杰, 等. 核电子技术原理. 北京: 原子能出版社, 1989: 8-11

Readout Electronics Design of prototype of BGO Calorimeter in Chinese Space Detector for Dark Matter Particle

GUO Jian-hua^{1,2} CAI Ming-sheng^{1,2} HU Yi-ming^{1,2} CHANG Jin^{1,2}

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(2 *Key laboratory of dark matter and space astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

ABSTRACT The goal of the space detector for dark matter, which is proposed by Purple Mountain Observatory of Chinese Academy of Sciences, is to measure the energy spectra of the gamma-rays and electrons. The whole detector consists of BGO calorimeter and scintillator hodoscope. The detector has a capability of measuring the particle's energy in 10 GeV to 10 TeV, and the main energy of injected particle is deposited in the BGO calorimeter. This paper will introduce the prototype of readout electronics of BGO calorimeter.

Key words instrumentation: detectors, dark matter, cosmic rays