

3×3 锗酸铋晶体阵列探测器对于 0.5—21MeV 光子能量响应的研究

王伟仔 朱国义 何景棠 顾以藩

(中国科学院高能物理研究所)

叶宗垣¹⁾ 袁观俊²⁾ 余泮水²⁾ 杨春祥²⁾

(原子能科学研究院,北京)

摘 要

建造了由九块国产锗酸铋晶体组成的采用光电倍增管读出的阵列式探测器。应用 γ 放射源、中子放射源、静电加速器 (p, γ) 反应以及核反应堆 (n, γ) 反应得到 0.5—21MeV γ 射线。在这个能量范围内进行的测试显示了线性的能量响应。能量分辨率在低能量下满足预期的 $E^{-\frac{1}{2}}$ 关系,而能量在 4.43MeV 以上实际测得的数值较预期为大。实验中还考察了光子在晶体阵列中沉积能量的横向分布情况,结果与蒙特卡罗模拟一致。本工作表明,采用放射源及低能 (p, γ) 反应作为锗酸铋电磁量能器定标和监测的手段是实际可行的。

一、引 言

锗酸铋晶体 ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, 简称 BGO) 因为具有辐射长度短、莫里衰半径小、化学性能稳定和不潮解等特点已被公认为一种优秀的电磁量能器材料。中国科学院高能物理研究所^[1]最先对国产 BGO 晶体针对高能物理实验的需要开展了研究。在单块小尺寸^[2,3]和单块大尺寸^[3]晶体性能测试的基础上,我们第一次建造了一个由国产 BGO 晶体组成的阵列式电磁量能器模型。利用这个模型装置研究了 0.511—51 MeV 光子的能量响应。迄今为止在 BGO 晶体阵列上还没有见到这个能区系统测量结果的正式报道,已报道的数据都是在单块晶体上获得的^[4-6]。与此同时,在这个装置上采用各种可能得到的光子源进行测试,也为制定未来大型电磁量能器的定标监测方案提供实际经验。

二、装 置

3×3 阵列所用的九块晶体均由上海硅酸盐研究所生长,加工成尺寸为 20×20×

1) 参加了核反应堆上的实验工作。
2) 参加了静电加速器上的实验工作。
本文 1986 年 4 月 8 日收到。

200mm
外表镀
分辨率
采
管相比
量下限
整
86×80
此光纤
这些管
管和晶
影响。
面板上
个供
可拆
器输出
合器
的输出
信号
的信号
管电压
电源
器当
时非
算电
小时
统时

γ) 压

200mm³的长方体。每块晶体六面均经仔细抛光;除开一个端面外,其余五面用白纸包装,外表镀铝涤纶薄膜。实际测得九块晶体的纵向光输出非均匀性小于 ±1%,顶端能量分辨率(FWHM)对于¹³⁷Cs的0.662MeV γ射线约在23~26%之间。

采用外径19.5mm的国产GDB-20光电倍增管作为晶体的读出元件。与硅光电二极管相比,光电倍增管具有噪声低、本身具备放大作用的优点,故能适于更低的光子探测能量下限,所需要的电子学也较为简单。

整个探测系统紧凑地安装在一个密封不透光的铝盒中,盒的壁厚8mm,外围尺寸86×86×500mm³。盒中前部是九块晶体堆垛而成的3×3阵列,晶体之间因有包装而彼此光绝缘。紧贴晶体后端面是九只光电倍增管,靠两块带孔(9×φ20mm)铝板横架在这些管子的两个位置上实现定位。晶体与光电倍增管之间用国产硅油耦合。在光电倍增管和晶体阵列外还套有1mm厚的坡莫合金磁屏蔽罩,用以消除实验场所可能存在的磁场影响。在光电倍增管后安装三块印刷电路板,每块板含三路自制的射极跟随器。铝盒背面板上装有十九个插座,其中九个供信号输出,九个供高压输入,一个供低压输入。铝盒外壳采用可拆卸结构,便于检测维修。

图1是实验所用电子学方框图。从射极跟随器输出的九路信号通过屏蔽电缆送到两个8路混合器迭加起来。由于八路信号经过第一次迭加后的输出信号在时间上延迟约100ns,所以第九路信号要采用延时器相应延迟100ns。第二次迭加的信号经过线性放大器放大成形后由1024道脉冲幅度分析器记录下来。九路光电倍增管电压由一个多路高压电源供给并可分别调节。射极跟随器的-12V低压由NIM机箱电源供给。

光电倍增管的噪声通常在10mV以下,而信号幅度范围为25—1200mV。射极跟随器当输入幅度为0.4—1200mV时非线性小于±1.5%;混合器当输入幅度为0.4—2000mV时非线性小于±0.3%;线性放大级当输出幅度小于5V时非线性小于±0.2%。由此估算电子学系统总非线性误差小于±2%。

晶体阵列探测器的长时间稳定性经过测试:采用¹³⁷Cs源测量输出信号幅度,在290小时内各路漂移不大于±1%。实验过程中尽可能对环境温度进行了监测;采用空调系统时,温度变化通常保持在±1℃以内。

三、实 验

我们通过以下几种途径得到0.511—21MeV光子:1.放射源;2.(p, γ)反应;3.(n, γ)反应。实验情况分别叙述于下。

1. 放射源

γ放射源能够提供的能量范围一般不超过3MeV。我们用了三个γ放射源,即:²²Na,

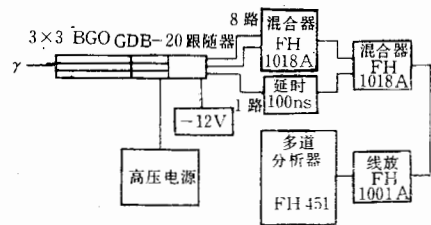


图1 BGO阵列探测器电子学方框图

探测
, γ)
为能
以上
内横
, γ)

化学性能
勿理研究
[1,2]和单
线的阵列
迄今为
的数据都
源进行

× 20 ×

$E_\gamma = 0.511\text{MeV}, 1.27\text{MeV}; {}^{137}\text{Cs}, E_\gamma = 0.662\text{MeV}; {}^{88}\text{Y}, E_\gamma = 0.898\text{MeV}, 1.836\text{MeV}.$

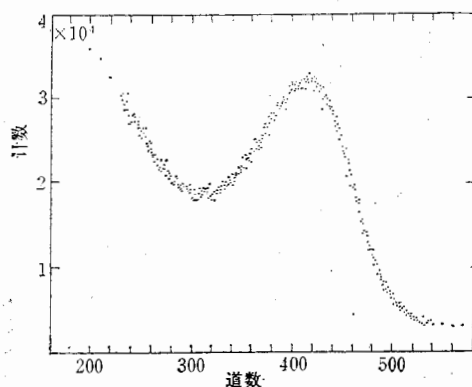


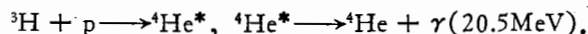
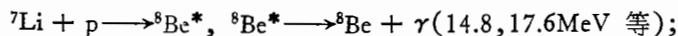
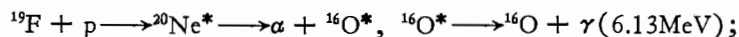
图 2 ${}^{241}\text{Am} + \text{Be}$ 中子源的 γ 射线能谱

测量时, 放射源放在正对中央晶体顶端的位置上. 三种放射源的五种能量光子的全能峰的位置和宽度都可以很好地从测得的谱中确定下来.

更高能量的 γ 射线可以从复合形式的放射源例如 ${}^{241}\text{Am} + \text{Be}$ 中子源得到. ${}^{241}\text{Am}$ 的 α 粒子在铍上产生核反应 ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}^*$, 碳核退激发出 4.43MeV 的 γ 射线. 图 2 是采用强度为 1.8×10^5 中子/秒的 ${}^{241}\text{Am} + \text{Be}$ 源的测量结果, 可以清楚地看到相应于 4.43MeV 的光子峰.

2. (p, γ) 反应

通过若干轻核的低能 (p, γ) 反应可以获得能量上达 20MeV 左右的单色光子. 我们选用了以下三种核反应:



实验是在原子能科学研究所的 2.5MV 静电加速器和清华大学工程物理系的 1MV 静电加速器上进行的. 采用了两种靶: LiF 靶, 厚 $1.3\text{mg}/\text{cm}^2$; 氟靶, 厚 $1.42\text{mg}/\text{cm}^2$. 在 LiF 靶实验中, 入射质子能量为 700keV , 最大流强 $1\mu\text{A}$, 阵列探测器正对质子束方向放置(质子与 ${}^7\text{Li}$ 及 ${}^{19}\text{F}$ 反应产生光子的角分布各向同性); 在氟靶实验中, 入射质子能量同上, 流强 $\sim 0.1\mu\text{A}$, 阵列探测器与质子束方向垂直(质子与氟反应产生光子的角分布表现为 $\sin^2\theta$ 关系, θ 为出射光子与质子束方向夹角). 靶采用压缩空气冷却. 阵列探测器四周以 5cm 厚铅砖, 用于屏蔽杂散 γ 射线本底. 探测器正前方挡有中心开孔 ($\phi 8\text{mm}$) 的铅块, 孔的中心对准中央晶体以保证入射 γ 射线的准直. 每次实验前, 用 ${}^{137}\text{Cs}$ 源对每块晶体进行刻度并调节九路光电倍增管高压使各路输出脉冲幅度差别不大于 1% . 测量结束后, 再用 ${}^{137}\text{Cs}$ 源检查各路脉冲幅度漂移情况. 一般情况下, 测量前后的重复性可以保持在 $\pm 1\%$ 以内.

图 3 是 LiF 靶的测量结果. 观察到了分辨得很好的 6.13MeV 光子峰. 在相应于 17.6MeV 的光子峰左侧, 有一个未能分辨开来的宽的结构, 其能量相当于 ${}^8\text{Be}$ 的 $14.8, 15.1$ 和 16.1MeV 能级. 图 4 是 $T(\text{p}, \gamma)\text{He}$ 反应能谱的测量结果. 由于质子束流强度的限制, 20.5MeV 光子峰的统计性较差.

为了了解光子能量在晶体阵列内沉积的横向分布情况, 在 LiF 靶实验中, 除了测量了九块晶体相加的光子脉冲幅度谱外, 还测量了只用中央晶体以及成十字形的五块晶体相加的光子脉冲幅度谱. 比较三种情况, 可以观察到峰的位置和能量分辨性能的变化(见图 3).

836MeV.
顶端的位
的全能峰
的谱中确

形式的放
 ^{241}Am 的
 $^{12}\text{C}^*$, 碳
2 是采用
Be 源的
.43 MeV

2. 我们

[V 静电
 cm^2 . 在
[方向放
·能量同
·布表现
器四周
1) 的铅
块晶体
束束后,
保持在

相应于
与 14.8,
流强度

了测量
块晶体
变化(见

3. (n, γ) 反应

热中子在原子核上俘获后, 由于中子的结合能, 所形成的复合核处在较高的激发态,

退激时放出 γ 射线, 能量最高可达 10MeV 量级. 鉴于不少原子核的热中子俘获截面很大, 因此在核反应堆这样的强中子场中预期可能产生强度很大(例如达到 $\sim 10^{14}$ /秒)的高能量 γ 射线. 我们在原子能科学研究所的游泳池反应堆上试测了热中子轰击铁靶产生的 7.64 MeV γ 射线. 在进行实验时, 安放在反应堆中紧靠活性区的铁辐射体通过水平孔道中的准直器把 (n, γ) 光子束引向测量地点. 有关细节详见另文^[7]. 根据已知效率 NaI(Tl) 闪烁探测器的测量估计, 铁的 7.64 MeV γ 射线强度可以达到 $\sim 1 \times 10^6/\text{sec} \cdot \text{cm}^2$. 图 5 是在 BGO 晶体阵列探测器上测出的结果. 相应于 7.64 MeV 的光子峰在谱的高能端看到, 但是分辨得并不好.

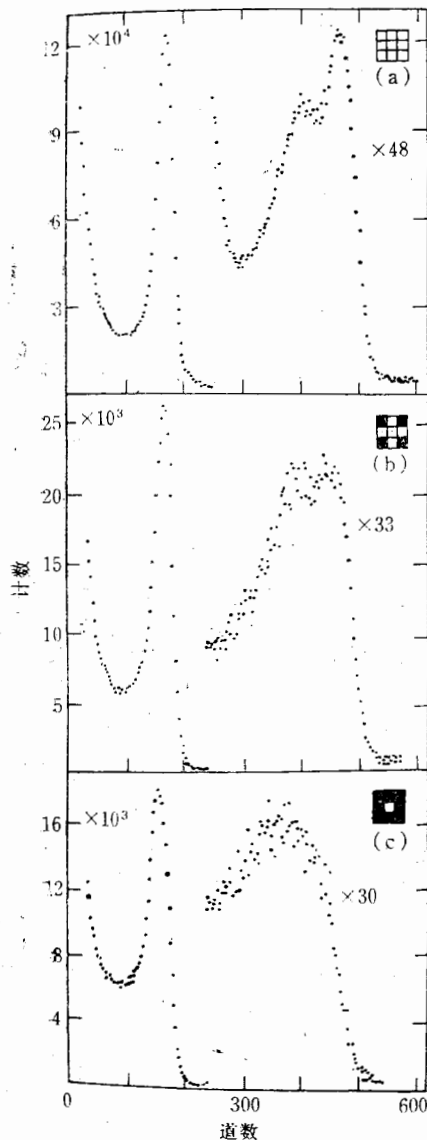


图 3 采用 LiF 靶的 (p, γ) 反应能谱
(a) 九块晶体之和 (b) 五块晶体之和 (c) 中央晶体

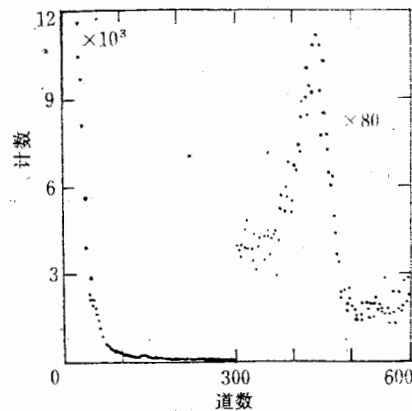


图 4 采用铀靶的 (p, γ) 反应能谱

四、结果分析

对以上实验数据进行了处理: 相应于每个能量的光子峰都仔细扣除了本底, 其中 6.13 MeV 及 14.8 与 17.6 MeV 数据采用西欧原子核研究中心编写的 MINUIT 拟合程序^[8]

块晶
时列
低能
显著
(例如
 $\phi 76$
况)。

其结
能量

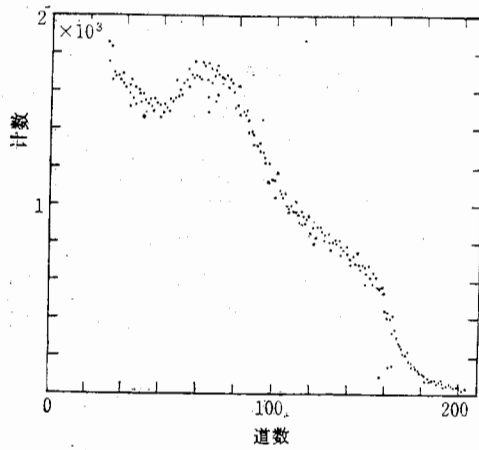


图 5 铁的热中子辐射俘获反应能谱

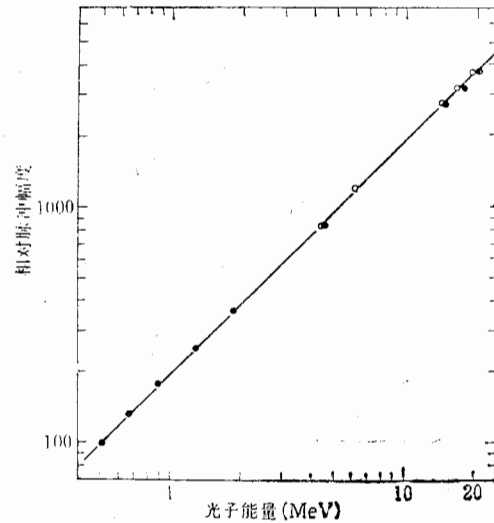


图 6 BGO 阵列探测器对 0.5—21MeV 光子
能量响应线性情况

● 修正前数据; ○ 修正后数据

表 1 BGO 阵列探测器对各种能量光子响应数据

光子能量 (MeV)	0.511	0.662	0.898	1.27	1.84	4.43	6.13	14.8	17.6	20.5
峰位(归一道数)	101	131	178	252	365	824	1161	2738	3181	3662
$(\Delta E/E)_{FWHM}(\%)$	38	33	28	23	18	21	16	(25)*	10	12

* 此值实际为不止一组能量的光子叠加的结果,列入仅作参考。

表 2 九块晶体能量沉积的蒙特卡罗计算结果

光子能量 (MeV)	4.43	6.13	14.8	17.6	20.5
MC 计算	4.36	5.99	14.3	16.8	19.4
修正率(%)	98	98	97	95.5	95

做了本底加上高斯谱形的拟合。主要结果汇集在表 1 中。

图 6 给出阵列探测器在所测能量范围内的线性情况。在高能量下偏离线性的趋向可以用蒙特卡罗模拟计算九块晶体实际沉积能量给出的修正得到校正。计算采用西欧原子核研究中心的程序系统 GEANT3.10^[9], 结果列在表 2 中。

表 3 列出 6.13 MeV 光子在晶体阵列中沉积能量横向分布情况的实验结果,用中央一

表 3 6.13 MeV 光子在晶体阵列中沉积能量横向分布数据

比 率	实 验 数 据	MC 计 算
$\Sigma 1/\Sigma 5$	96%	94%
$\Sigma 1/\Sigma 9$	95%	93%
$\Sigma 5/\Sigma 9$	99%	98%

给
(例
渐
能

较

块晶体 ($\Sigma 1$)、五块晶体之和 ($\Sigma 5$) 以及九块晶体之和 ($\Sigma 9$) 的相互比率来表示。表中同时列入蒙特卡罗计算结果。可以看到实验数据与计算结果之间的较好符合。

图 7 表示了晶体阵列中测得的能量分辨率作为入射光子能量的函数。由图可见: 低能量的实验点较好地表现为预期的 $E^{-1/2}$ 关系, 但是从 4.43 MeV 起的几个高能点数据显著偏离了这个关系。导致高能量下能量分辨率变坏的一个重要因素是横向能量漏逸 (例如单次逃逸峰的贡献)。类似的现象在单块晶体实验中观察到。图 7 中列入了在一块 $\phi 76 \times 76$ mm BGO 晶体上的测量结果^[6], 在高能量下明显地表现出了偏离 $E^{-1/2}$ 关系的情况⁹。采用反符合屏蔽层排除逃逸 γ 射线可以得到改进的结果。

我们在数据分析过程中获悉 L3 实验组用小阵列在静电加速器上进行了初步测量^[10], 其结果也列入图 7 中。由于这个实验采用光电二极管读出, 在所测的能量范围内得到的能量分辨率显著差于我们的测量结果。



光子

20.5
3662
12

0.5

9.4

95

趋向可
欧原子

中央一

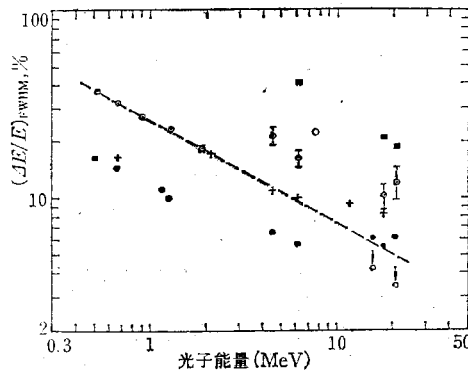


图 7 BGO 阵列探测器能量分辨率作为入射光子能量的函数

(实验点用 \odot 表示; 虚线指示 $E^{-1/2}$ 关系。) 还列入:

单块晶体测量结果用 \bullet 表示; 采用反符合屏蔽后得到结果用 \circ 表示; L3 阵列初步结果用 \blacksquare 表示; NaI(Tl) 晶体阵列测量结果用 $+$ 表示

图 7 中还表出碘化钠晶体球(模型)在这个能区的测量结果^[11]。可以看到, NaI(Tl) 给出能量分辨率随能量的变化相对缓慢。和 BGO 比较起来, NaI(Tl) 虽然在低能量下 (例如 0.662 MeV) 具有比 BGO 好的能量分辨率, 但是随着能量提高, 这种相对优越性逐渐降低。实际测量表明^[12], 在高能量下, 在 BGO 晶体阵列上得到了显著好于 NaI(Tl) 的能量分辨率。

五、总 结

1. 首次建立了国产 BGO 晶体阵列探测器, 采用光电倍增管读出, 在低能光子测量中较光电二极管读出具有噪声低和能量分辨性能好的优点。

1) 这个工作给出的能量分辨率, 4.43 及 6.13 MeV 两点的和其它高能点的不同: 前者通过解谱扣除了单次逃逸峰的贡献, 后者则包含了逃逸的贡献^[6]。

2. 利用这个装置取得首批 0.5 至 21 MeV 能区国产 BGO 晶体对于光子响应的系统数据。能量响应线性在实验误差范围内得到了验证。能量分辨率在低能量下表现为预期的 $E^{-1/2}$ 关系, 在较高能量下则显著偏离从低能区外推的数值。这表明: 为了充分容纳几个 MeV 以上能量的电磁簇射, 需要采用更大尺寸的晶体阵列。

3. 考察了在晶体阵列中沉积能量的横向分布情况。在中央一块、五块和九块晶体上的 6.13 MeV 光子测量结果与蒙特卡罗模拟所预言的一致。

4. 测试表明了采用 γ 放射源、中子放射源和静电加速器 (p, γ) 反应产生的 γ 射线对 BGO 电磁量能器进行绝对和相对定标以及监测的实际可行性。利用 (n, γ) 反应的初步试验未能获得理想结果, 拟作进一步的实验尝试。

作者感谢上海硅酸盐研究所何崇藩、范世骝、廖晶莹同志在提供 BGO 晶体材料方面给予的支持, 高能物理研究所陈和生同志在蒙特卡罗计算方面作出的贡献以及中国原子能科学研究所和清华大学工程物理系负责静电加速器运行的同志在实验过程中的密切配合。

参 考 文 献

- [1] Y. F. Gu, Proc. International Workshop on Bismuth Germanate, Princeton University, ed. C. Newman-Holmes (1982) p. 96.
- [2] 何景棠、顾以藩、何崇藩、沈炳孚, 高能物理与核物理, 7(1983), 766.
- [3] 王任仔等, 高能物理与核物理, 10(1986), 1.
- [4] D. M. Drake et al., Nucl. Instr. and Meth., 188(1981), 313.
- [5] M. Cavalli-Sforza et al., Proc. International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics, SLAC-Report 250(1982), p. 216.
- [6] S. A. Wender, Proc. International Workshop on Bismuth Germanate, Princeton University, ed. C. Newman-Holmes (1982) p. 376.
- [7] 李景文等, 原子核物理, 6(1984), 15.
- [8] F. James and M. Roos, Comp. Phys. Comm., 10(1975), 343.
- [9] R. Brun et al., GEANT User's Guide, CERN DD/EE/84-1 (Feb. 1985).
- [10] L3 实验组通讯.
- [11] G. I. Kirkbride et al., IEEE Trans. Nucl. Part. Science, Vol. NS-26 N. 1 (1979), 1537.
- [12] J. A. Bakken et al., Nucl. Instr. and Meth., 228 (1985), 294.

A
was as
proton
clear
energy
resolut
higher
the pr
demon
by me

应的系统
现为预期
充分容纳

块晶体上

的 γ 射线
反应的

材料方面
中国原子
的密切配

swman-Hol-

n Physics,

. C. New-

THE RESPONSE OF A 3×3 BGO DETECTOR ARRAY TO 0.5—21MeV PHOTONS

GU YI-FAN HE JING-TANG WANG MAO-ZI ZHU GUO-YI

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

YE ZONG-YUAN YUAN GUAN-JIN YU PAN-SHUI YANG CHUN-XIANG

(*Institute of Atomic Energy, Beijing*)

ABSTRACT

An array of 9 BGO crystals of $20 \times 20 \times 200$ mm³ equipped with photomultiplier readout was assembled and tested. Radioactive γ and neutron sources, (p, γ) reactions by low energy protons from Van de Graaff accelerator and (n, γ) reactions by thermal neutrons from nuclear reactor were employed to produce photons in the energy range from 0.5 to 21 MeV. The energy response of the array is shown to be linear over the whole range. Data on the energy resolution follow an $E^{-\frac{1}{2}}$ dependence at low energies, and deviate from it at 4.43 MeV and higher energies. Results from the lateral energy deposition of showers were compared with the predictions of the Monte Carlo simulation and found to be in good agreement. Our study demonstrates the feasibility of calibration and monitoring of BGO electromagnetic calorimeter by means of radioactive sources and low energy (p, γ) reactions.