

文章编号: 1007-4627(2005)01-0094-03

γ 射线和 PET 用晶体单元相互作用特性的研究*

祁辉荣^{1,2}, 肖国青¹, 王金川¹, 郭忠言¹, 詹文龙¹, 徐瑚珊¹,
孙志宇¹, 李文飞¹, 李 琛¹, 陈志强³

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3 北京大学物理学院, 北京 100871)

摘 要: γ 射线与晶体单元的相互作用特性对于 PET 探测器的研制有着重要的参考意义. 通过实验测得了不同能量的 γ 射线在 BGO, CsI, NaI 3 种闪烁晶体中的探测效率、能量分辨率等相互作用特性参数, 并与蒙特卡罗模拟结果进行了比较. 结果给出了最适合 PET 探测器的晶体单元.

关键词: 闪烁晶体; PET; 探测效率; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: O571.33 **文献标识码:** A

1 引言

正电子发射型电子计算机断层影像术 (Positron Emission Tomography 缩写为 PET^[1]), 是利用正电子发射体标记的葡萄糖、氨基酸、胆碱、胸腺嘧啶、受体的配体及血流显像剂等药物为示踪剂, 以解剖图像方式、从分子水平显示机体及病灶组织细胞的代谢、功能、血流、细胞增殖和受体分布状况, 为临床提供更多的生理和病理方面的诊断信息, 是一种新型有效的诊断技术. PET 显像的物理原理是利用带有发射正电子的放射性核素 (如 ¹¹C, ¹³N, ¹⁵O 和 ¹⁸F 等) 显像剂, 引入机体后定位于靶器官, 这些核素在衰变过程中发射正电子. 这种正电子在组织中运行很短距离 (<1 mm) 后, 即与周围物质中的电子相互作用, 发生湮没辐射, 发射出方向相反、能量相等 (511 keV) 的两个光子 (如图 1). PET 显像是采用一系列成对的互成 180° 排列并与符合线路相连的光电倍增管, 探测损失在闪烁晶体中的湮没辐射光子, 从而获得机体正电子核素的断层分布图, 显示病变的位置、形态、大小和代谢功能, 对疾病进行诊断. 其中光电倍增管和闪烁晶体成为组成 PET 探测器探头部分的核心部件, 因此 γ 射线与各种晶体单元的探测效率、能量分辨等相互作用特性的研究, 对于研制最适合 PET 探测

器用的晶体单元有着非常重要的参考意义.

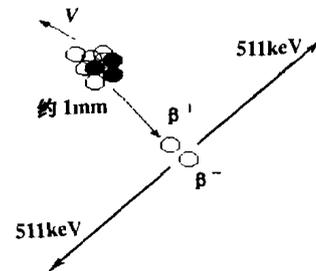


图 1 正负电子对湮灭示意图

常用的闪烁晶体主要具有快发光特点或发光成分中有快发光过程的晶体, 如 NaI 和 BaF₂ 等; 或发光衰减时间较慢但发光较强的晶体, 如 NaI (Tl), CsI (Tl) 和 BaF₂ (Eu) 等; 或近年发展起来的具有较大比重的闪烁晶体, 如 BGO, PbWO₄, LSO (Ge) 和 YSO 等, 这些晶体密度大, 对粒子有高的阻止能力, 非常适合高能探测器的小型化, 但价格相对昂贵. 由于 Bi₄Ge₃O₁₂ (BGO) 对 γ 射线的线性吸收系数比常用的 NaI 闪烁晶体高得多以及光谱峰值能与光电倍增管很好匹配的特点, 而且还具有一定的能量分辨率、不易潮解和价格相对较低的独特优点, 使其成为 PET 探测器中常用的晶体之一. 另外 NaI (Tl) 的价格优势也成为早期 PET 探测器的

收稿日期: 2004 - 08 - 31; 修改日期: 2004 - 10 - 25

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10221003); 中国科学院西部之光人才培养基金资助项目

作者简介: 祁辉荣 (1978-), 男 (汉族), 陕西富平人, 博士研究生, 从事实验核物理研究; E-mail: qihr@impcas.ac.cn

常用晶体, 如德国 SIEMENS 公司的早期商业 PET. LSO 晶体和 PbWO_4 闪烁晶体现在主要用在 Micro-PET^[2] 方面, 但由于其价格过高所以应用较少. 晶体尺寸和种类的选择成为降低 PET 成本和提高探测器性能的主要因素. 本文从性价比角度进行考虑, 选用了最常用的 BGO, CsI 和 NaI 进行研究.

2 模拟原理简述

模拟程序主要是基于欧洲核子中心(CERN)提供的 Geant4 粒子探测器模拟程序包. 该程序由 C++ 语言编写, 运行在 Linux 操作系统下, 应用蒙特卡罗方法模拟 γ 射线与闪烁晶体单元的相互作用.

γ 射线与闪烁晶体相互作用主要有光电效应、Compton-Wu 效应和电子对效应^[3]. 当 γ 射线能量由小到大变化时, 3 种相互作用效应都会发生, 但 3 种效应的相对作用截面也在发生变化, 因此相对贡献就不相同. 比如在低能量直到几个 keV, 主要是光电效应; 从几个 keV 到几百 keV 能区, 主要以 Compton-Wu 效应为主; 在更高能量区则主要最可几的过程是电子对产生. 由于 PET 探测器主要探测正负电子对湮灭产生的 511 keV γ 射线, 因此主要是光子在自由电子上的散射, 即康普顿-吴有训效应. 模拟研究中采用长方体的各种闪烁晶体单元, 其结构如图 2 所示, 不同能量的 γ 射线经半径 5 mm 准直器准直后入射到闪烁晶体的表面. 利用探测模型进行 Monte Carlo 模拟, 经过多次抽样, 模拟输出每次入射的 γ 射线与晶体内部作用产生带电粒子而引起的能量沉积. 模拟过程中不涉及晶体单元侧面包裹反射层以及晶体表面处理等因素, 输出为 γ 射线在晶体内的能量沉积, 因此理论上可以完全探测到入射的 γ 射线.

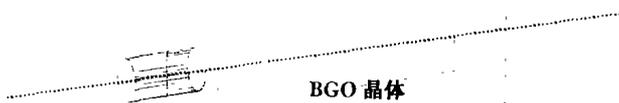


图 2 蒙特卡罗模拟中采用的晶体模型

3 模拟结果和实验结果比较

根据上述的模拟结构, 主要模拟了截面为 10 mm \times 10 mm, 不同长度的 BGO, NaI(Tl) 和 CsI

(Tl) 4 种晶体单元探测效率的特性(如图 3), 并结合实验数据进行了讨论.

图 4 给出了闪烁晶体探测元的能量响应测量装置和外形结构示意图. 采用入射窗直径为 ϕ 50 mm 的 R7723 型光电倍增管. BGO 和 CsI 闪烁晶体四面用 Teflon 膜包裹后再用黑胶布包裹, NaI 闪烁晶体外壳用黑布包裹均保证侧面不漏光, 晶体与光电倍增管之间用硅脂相接. γ 放射源经 ϕ 20 mm 的铅孔准直后入射到晶体一个端面. 整个装置被放在一个避光的黑色盒子里面. 在实验过程中, 产生的光电子经 10 个打拿极倍增后产生可供引出的光电信号. 信号进入主放后分为两路, 一路作为信号直接送入 16 道 CAMAC Module (Philips 7164) ADC, 一路经甄别和成形后作为门信号送入 ADC 给第一路信号开门, 数据获取后用 PAW 软件进行处理.

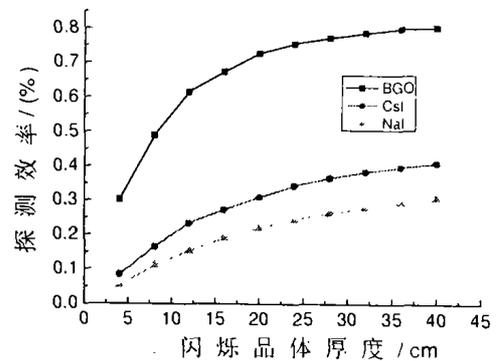


图 3 不同规格晶体的模拟结果

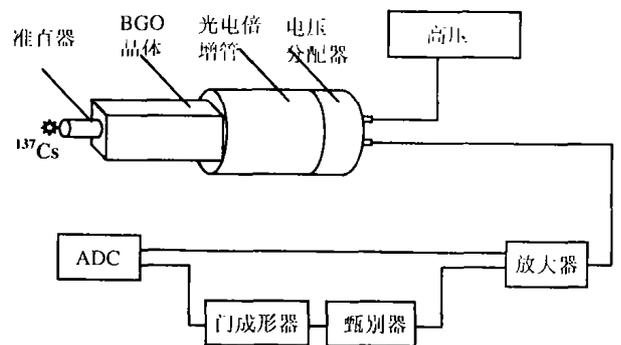


图 4 实验探测装置

对于各种不同长度的闪烁晶体测量中采用完全相同的测试装置和测试电子学线路, 测量时间均为 10 min(误差在 ± 3 s 以内), 均采用 ^{22}Na γ (0.511 MeV) 源. 每次测量之前在相同的情况下测量电子学噪声和本底噪声谱. 进行数据处理时, 先用 ^{22}Na 源的能谱减去本底谱, 然后求全能峰计数, 二者相除就可以得到探测装置的探测效率. 图 5 为 3 种晶

体的测试结果. BGO 晶体、NaI 晶体和 CsI 晶体能量分辨分别为 17.6%, 10.4% 和 11.3%.

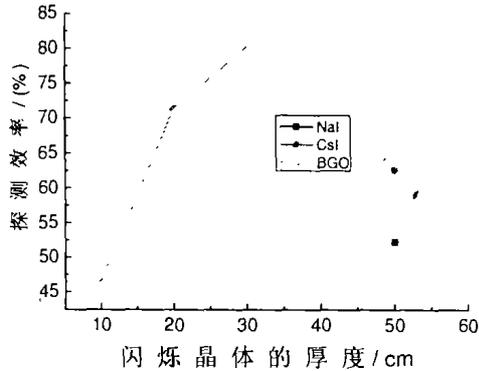


图 5 不同规格闪烁晶体探测效率测试结果

4 结论

本文通过测量 γ 射线与不同闪烁晶体单元的探

测效率、能量分辨率等相互作用特性, 并与蒙特卡罗模拟的晶体探测效率结果进行了比较, 证明了此方法能够较好地与实验数据符合. 通过比较图 3 和图 5, 可以得知最适合 PET 探测器的晶体应该是 BGO 闪烁晶体, BGO 晶体的探测效率几乎是同等长度 CsI 和 NaI 晶体的 2—3 倍. 从模拟结果和测量的 BGO 晶体探测效率来看, BGO 晶体长度为 14—16 mm 的时候探测效率已经达到了 70% 以上, 其后随着晶体长度的增加而探测效率增加已不是非常明显的, 因为 BGO 对于 0.511 MeV 能量的 γ 射线衰减长度只有 12 mm 左右, 增加更多的晶体则充当了光导的作用反而不利于光的收集. 因此对于大量应用 BGO 闪烁晶体的 PET 探测器而言, 从最优性价比的角度考虑最适合探测器的晶体长度应为 14—16 mm.

参 考 文 献:

- [1] Huber J S, Moses W W, Derenzo S E, *et al.* IEEE Trans Nucl Sci, 1997, NS-44: 1 197.
- [2] Jinhun Jounga, Robert S, Miyaoka. cMiCE: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2002, A489: 584.
- [3] 吴治华, 齐卉荃, 沈能学等. 原子核物理实验方法. 北京: 原子能出版社, 1997, 54—55.

Investigation of Interactional Properties of γ -rays and Scintillator Units for PET*

QI Hui-rong^{1, 2}, XIAO Guo-qing¹, WANG Jin-chuan¹, GUO Zhong-yan¹, ZHAN Wen-long¹,

XU Hu-shan¹, SUN Zhi-yu¹, LI Wen-fei¹, LI Chen¹, CHEN Zhi-qiang³

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

2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3 School of Physics of Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: It's important for development of PET detector that the interaction effect of γ -rays and scintillator units are studied. The detection efficiencies and energy resolutions of γ -rays for BGO, CsI and NaI crystal detector units are measured. Geant4 Monte Carlo simulations are compared with the experimental results. The results of the best detection units for PET detector are presented.

Key words: scintillator; PET; detection efficiency; Monte Carlo simulation

* Foundation item: Chinese Academy of Sciences Innovation Research Team (10221003); Gloria of West Project of Chinese Academy of Sciences