

# 复合式高能 $\gamma$ 探测器优化设计 Monte Carlo 模拟计算\*

文万信<sup>1,2</sup> 靳根明<sup>1</sup>

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (苏州大学核医学院 苏州 215007)

**摘要** 用 Monte Carlo 方法系统模拟计算了以 NaI 晶体与 BGO 晶体为探测介质的 clover 与 cluster 复合式高能  $\gamma$  探测器的效率. 对于相同的介质几何, BGO 复合式探测器的全能峰效率远高于相应的 NaI 复合式探测器. 用多块  $\phi 76 \times 127$  BGO 晶体制作成的 clover 与 cluster 复合式高能  $\gamma$  探测器对 22.0 MeV 的  $\gamma$  光子的全能峰特征效率仍然高于 40%, 绝对效率增加因子达 2.4 与 2.7.

**关键词** 复合式 gamma 探测器 BGO 晶体 模拟计算

## 1 引言

最近十多年, 几种新型的高探测效率高能量分辨的低能(几十 keV—3 MeV)复合式  $\gamma$  探测器, 如 clover<sup>[1]</sup>, cluster<sup>[2]</sup> 及 segmented clover 型<sup>[3]</sup> 等相继研制成功并应用于核结构实验. clover 型探测器是将尺寸相同的 4 块圆柱体 N 型高纯锗 HPGe 简单切削后独立封装并组合在一起, 共享冷却系统, 高压与信号各自独立. 在数据分析时采用“补遗”方式(add-back mode)将 4 块 HPGe 的能量相加, 使得探测效率明显提高, 特别是全能峰的绝对效率明显高于各独立单元全能峰绝对效率的总和. 而且它的 Doppler 展宽并无变差, 仍与独立单元大体相同. cluster 型由尺寸相同的 7 个六棱柱 N 型 HPGe 组成, 外加反 Compton BGO 包层. “Segmented clover”型则在 clover 型基础上又将每块 HPGe 纵向横向再分割, 显著提高了空间分辨, 从而可减少 Doppler 展宽.

高能  $\gamma$  探测也是核物理实验的重要探测手段之一, 随着重离子冷却储存环 CSR (cooling storage ring) 建成使用, 对高能 ( $> 4$  MeV)  $\gamma$  的探测将更多. 以上复合式 HPGe  $\gamma$  探测器适合于低能  $\gamma$  测量, 对高能  $\gamma$  因探测效率太低而无法使用. 目前的高能  $\gamma$  探测器的探测介质一般采用大体积 NaI(Tl), BGO 或 BaF<sub>2</sub> 晶体<sup>[4]</sup>, 三者各有特点, NaI 能量分辨高, BGO 探测效率高, BaF<sub>2</sub> 时间性能好. 也有大体积的 HPGe(相对效率 83%) + BGO 或 BaF<sub>2</sub> 包裹的

2001-12-29 收稿

\* 国家自然科学基金(19805012), 中国科学院重要方向性项目资助

复合式高能  $\gamma$  探测器<sup>[5]</sup>, 由于 HPGe 的能量分辨高, 在补遗方式下则可获得较高的探测效率与比较好的能量分辨. 这种方法使原本用于测量低能  $\gamma$  的探测器也能够用于较高能量  $\gamma$  的探测.

随着  $\gamma$  光子能量升高, 不仅高能  $\gamma$  探测器的全能峰效率迅速下降, 而且由于单逃逸率与双逃逸率相对升高, 加之 Compton 散射光子、韧致辐射光子等从探测介质中的逃逸, 一方面造成全能峰效率下降与能量分辨变差, 另一方面还可能引起谱型畸变<sup>[6]</sup>, 导致能量与截面等测量不准确, 这时能量分辨已经失去意义. 图 1 是  $^{12}\text{C}(p, p'\gamma)$  反应中 12.7 MeV 与 15.1 MeV 两条  $\gamma$  谱线的测量结果, 图 1(a) 是 HPGe 独立测量结果, 全能峰很低, 而单逃逸峰与双逃逸峰很高, 谱型严重畸变; 图 1(b) 是 HPGe + BGO 以补遗方式测量的结果. 两条谱线的峰位清楚显现, 谱型比较规则, 单逃逸与双逃逸受到抑制<sup>[7]</sup>. Monte Carlo 模拟计算与实验结果说明高能  $\gamma$  测量可能会出现谱型畸变以及补遗方式有利于改善高能  $\gamma$  测量品质, 包括提高全能峰效率与维持正常谱型形状.

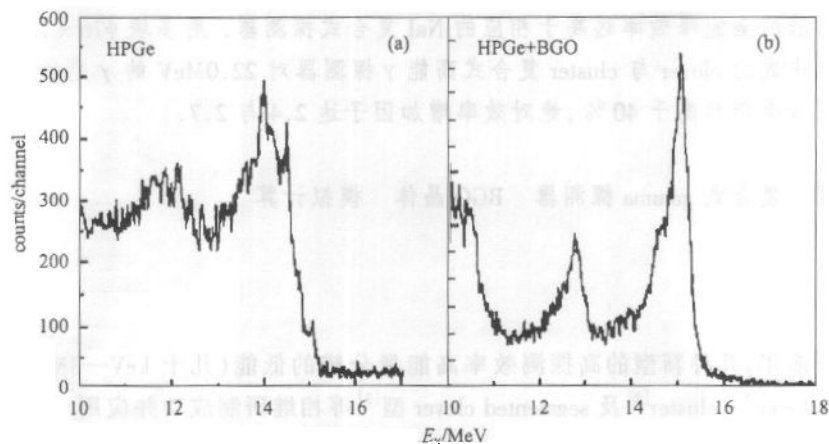


图 1  $^{12}\text{C}(p, p'\gamma)$  反应中 12.7 MeV 与 15.1 MeV 两条  $\gamma$  谱线实验测量结果<sup>[7]</sup>

新型高能  $\gamma$  探测器的设计必须强调高全能峰效率与较高的能量分辨率等特性, 尽可能地凸现全能峰抑制单逃逸峰与双逃逸峰. 增大探测介质的体积无疑能够提高探测效率, 但是生长更大体积的晶体如 BGO 与 HPGe 晶体受到工艺水平的限制, 另外大体积引起 Doppler 展宽进一步增大. 另一途径则是发展复合式探测器, 将几块探测介质组合在一起使其具有特大体积的探测效率同时又兼有单个探测介质的 Doppler 展宽特征. 虽然复合式 HPGe  $\gamma$  探测器只适用于低能  $\gamma$  测量, 但其新颖独特的设计思想对于新型复合式高能  $\gamma$  探测器的设计仍具有借鉴价值. 从定性方面考虑, 由 BGO 或 NaI 晶体制作成的复合式高能  $\gamma$  探测器全能峰绝对效率应该高于分散的独立探测单元全能峰绝对效率之和, 而 Doppler 展宽又与单个单元相近. 本文将采用 GEANT3.21 程序库<sup>[8]</sup> 提供的子程序作一些 Monte Carlo 模拟计算, 为研制复合式高能  $\gamma$  探测器提供依据.

## 2 晶体几何形状

参考复合式 HPGe  $\gamma$  探测器晶体的几何形状, 选择了 3 种复合式几何, 探测介质的端

面如图 2 所示. clover 几何与复合式 HPGe 的 clover 几何相似,不同之处是 4 块圆柱体结合处的半圆切削成直角,晶体之间结合更紧密;晶体的外侧面没有斜切,这样在模拟计算中对几何的描述要简单一些. cluster 几何与 cluster 复合式 HPGe 探测器的介质几何完全相同,但取消了反 Compton 包裹. 在 cluster 型探测器中六棱柱也可以设计成锥状六棱柱,这样则可以任意添加探测单元,根据需要制作大立体角如环状或  $4\pi$  复合式高能  $\gamma$  探测器,相邻单元可以通过补遗方式获取数据. 另外还有一个候选的几何形状,姑且称作 normal-clover,由于少一块晶体其制作费用会降低,这里对其性能不作模拟计算. 3 种几何所对应的体积分别为分散的圆柱体体积之和的 81.8%, 82.7% 与 94.2%. 复合式高能  $\gamma$  探测器中晶体都独立封装,每块晶体都配有光电管,具有独立的高压输入及能量与时间信号输出,实验数据以补遗方式分析处理. 本文模拟计算所涉及的晶体的几何有 3 种,即单个圆柱体(cylinder)及复合式的 clover 与 cluster 几何.

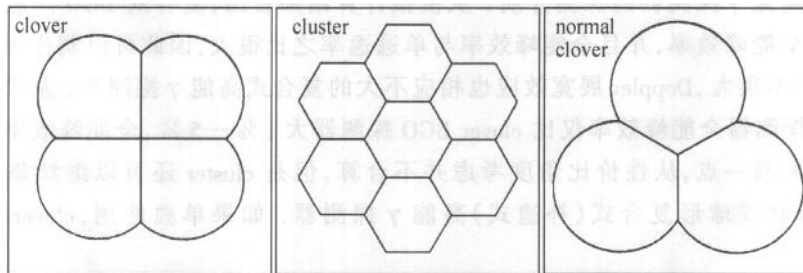


图 2 复合式高能  $\gamma$  探测器晶体端面几何

### 3 Monte Carlo 模拟计算

GEANT 程序是由 CERN 开发的粒子物理探测器模拟计算程序库,广泛应用于核物理实验探测器的优化设计. 对 clover 复合式 HPGe  $\gamma$  探测器效率所作的模拟计算结果与实验测试结果相差不到 2%<sup>[1]</sup>. 在以下的模拟计算中假定点源发射的  $\gamma$  光子在探测器所覆盖的立体角范围内各向同性,考虑到实验中甄别  $\gamma$  与中子需要较长的飞行距离,点源到探测器晶体前端面的距离取为 50cm. 选取入射能量分别为 4.44, 10.0, 15.1 与 22.0MeV 的单能  $\gamma$  光子,每次模拟计算的事件总数均为 200 万. 选择 BGO 与 NaI 晶体作为探测介质,用数值计算方法对 cylinder, clover 与 cluster 3 种几何的探测器的性能进行测试. 为便于比较,切削前的圆柱体尺寸均选取  $\phi 76 \times 127$ (即  $\phi 3'' \times 5''$ ).

不同探测介质的探测效率明显不同,这种现象在 高能  $\gamma$  探测中更加突出. 若比较同一几何形状的探测器的效率, BGO 探测器远高于 NaI 探测器. 图 3 是 22.0MeV 单能  $\gamma$  光子在 3 种几何形状的 NaI 与 BGO 介质中的能量沉积响应. 图 4 给出了全能峰特征效率  $\epsilon_{ph}$  及其与单逃逸率  $\epsilon_{sc}$  之比  $\epsilon_{ph}/\epsilon_{sc}$ . 这里全能峰特征效率与单逃逸率分别定义为全能峰计数和单逃逸峰计数与进入探测器的单能  $\gamma$  光子总数之比. 由于计算量大,只选取了 4.44, 10.0, 15.1, 22.0MeV 4 个单能  $\gamma$  光子能量点. 从图 3 与图 4 可以清楚看出,无论哪种几何形状, BGO 探测介质的全能峰效率远高于相应几何的 NaI 介质. 在相同的圆柱体尺

寸下,即便是 cylinder BGO 介质的全能峰效率也要比 clover 及 cluster 复合式 NaI 介质高. 全能峰效率与单逃逸率及双逃逸率之比越大,单能  $\gamma$  光子谱型则越规则. BGO 探测器不仅全能峰效率高,而且其全能峰效率与单逃逸率之比也远远高于同类型的 NaI 探测器(图 4). 在 cylinder NaI 介质的能量沉积响应中,随着入射  $\gamma$  光子能量升高,单逃逸率可能会高于全能峰效率,造成能谱畸变. 此外,即使是 clover 及 cluster 复合式 NaI 探测器,其全能峰效率与其单逃逸率也相差不大. 在  $\gamma$  光子能量比较低时,NaI 能量分辨比 BGO 好,但在高能时由于 NaI 全能峰效率低而单逃逸率与双逃逸率相对较高,能量分辨变差甚至谱型发生畸变. 不论哪种几何形状,NaI 介质要达到与同类型 BGO 介质同样的全能峰效率,其体积就必须比 BGO 大许多. 即使晶体生长工艺许可,晶体体积增大必然造成 Doppler 展宽效应加剧,不利于高速运动源所发射的  $\gamma$  光子的探测,因此 NaI 晶体不适合用作复合式高能  $\gamma$  探测器的探测介质.  $\text{BaF}_2$  晶体的  $\gamma$  探测效率与 NaI 晶体接近,仅从效率角度考虑也不宜用作复合式高能  $\gamma$  探测器的探测介质. 从模拟计算结果看出,复合式 BGO 高能  $\gamma$  探测器具有很高的全能峰效率,并且全能峰效率与单逃逸率之比很大,因此可以制作出全能峰效率很高、体积不很大、Doppler 展宽效应也相应不大的复合式高能  $\gamma$  探测器. 从图 4 也看出 cluster BGO 探测器全能峰效率仅比 clover BGO 探测器大 1%—5%,全能峰效率与单逃逸率之比也仅略高一点,从性价比角度考虑并不合算,但是 cluster 还可以继续添加探测单元,制作成环状或球形复合式(补遗式)高能  $\gamma$  探测器. 如果单独使用, clover 式更经济实用.

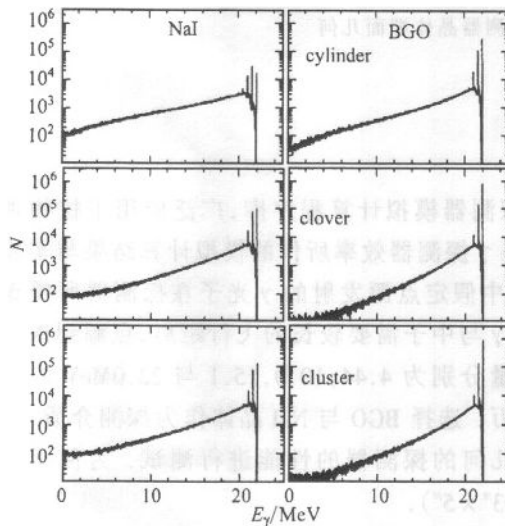


图 3 22MeV 单能  $\gamma$  光子在 3 种几何形状的 NaI 与 BGO 探测器中的能量沉积响应

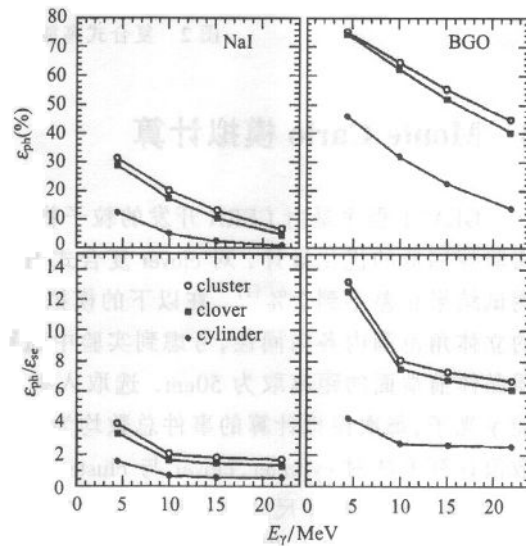


图 4 全能峰特征效率及其与单逃逸率之比

如果要具体分析补遗效果,需要计算复合式探测器绝对效率比相同数量的独立 cylinder 探测器绝对效率之和增大了多少,即计算复合式探测器绝对效率增加因子,因此除考虑全能峰特征效率( $\epsilon$ )外还需考虑几何效率( $\omega$ ). 绝对效率增加因子可以表示为

$$\eta = \frac{(\epsilon\omega)_{\text{com}}}{\sum (\epsilon\omega)_{\text{cyl}}} = \lambda \frac{\epsilon_{\text{com}}}{\epsilon_{\text{cyl}}}, \quad (1)$$

其中  $\lambda = \frac{\omega_{\text{com}}}{\sum \omega_{\text{cyl}}} \approx \frac{S_{\text{com}}}{\sum S_{\text{cyl}}}$ , 即为两者所覆盖的立体角之比, 近似等于两者前端面面积之比.

对于 clover 与 cluster 复合式探测器  $\lambda$  分别为 0.818 与 0.827. 表 1 给出了计算得到的复合式 BGO 高能  $\gamma$  探测器的绝对效率增加因子.

表 1 复合式 BGO 高能  $\gamma$  探测器绝对效率增加因子

$E_{\gamma}/\text{MeV}$	$\eta(\text{clover})$	$\eta(\text{cluster})$
4.44	1.33	1.36
10.0	1.60	1.68
15.1	1.90	2.04
22.2	2.39	2.67

很明显  $\gamma$  能量越高绝对效率增加因子越大, 因此 BGO 复合式高能  $\gamma$  探测器在 高能  $\gamma$  测量方面优势非常明显. 归纳起来, 复合式 BGO 高能  $\gamma$  探测器至少具有 3 个突出优点: (1) 全能峰效率高; (2) Doppler 展宽小, 它们的 Doppler 效应与分立的探测单元相当, 不因组合体积变大而显著变大; (3) 谱型规则, 由于以补遗 (add-back) 方式处理数据, 全能峰效率增加而单逃逸率与双逃逸率相对降低, 避免了分立的小体积探测器测量高能  $\gamma$  时可能发生的谱型畸变.

## 4 讨论

根据 Monte Carlo 模拟计算, NaI 晶体由于效率低、谱型畸变与 Doppler 展宽等因素不适用作复合式高能  $\gamma$  探测器的探测介质, 相反 BGO 晶体是比较理想的复合式高能  $\gamma$  探测器的探测介质. 用多块  $\phi 76 \times 127$  BGO 晶体制作成的复合式高能  $\gamma$  探测器至少具有高的全能峰效率、较小的 Doppler 展宽及规则的谱型 3 个突出优点. 在  $\gamma$  光子能量为 22.0 MeV 时, clover 及 cluster 的全能峰特征效率仍然高于 40%, 这对于高能  $\gamma$  测量来讲已经非常高了. 此外绝对效率增加因子高达 2.4 及 2.7. 目前工艺水平下  $\phi 76 \times 127$  BGO 晶体已经是比较大的, 尺寸小了将降低效率, 在我们所考虑的尺寸中它将是首选. 如果单独使用, clover 与 cluster 效率相当接近, 从研制费用角度考虑, 前者更经济实用. 如果要制作成球形或环状复合式 (补遗式) 探测器, 需要选择 cluster 几何, 此时晶体单元需要切削成锥状六棱柱. 在冷却储存环 (CSR) 能区可以开展较多的与高能  $\gamma$  探测相关的核物理实验<sup>[9]</sup>, 对性能优越的高能  $\gamma$  探测器有一定的需求.

影响能量分辨的因素较多, 探测介质的光转换、光电管光电转换、光电子收集等过程存在统计涨落, 甚至探测器制作工艺也影响能量分辨, 因此能量分辨的模拟计算比较困难. 如果单个 cylinder BGO 探测单元对某一能量  $\gamma$  光子的能量分辨为  $\delta$ , 则 clover 与 cluster 的能量分辨将分别约为  $2\delta$  与  $\sqrt{7}\delta$ . 但是复合式探测器全能峰效率与单逃逸率之比远大于 cylinder 探测器, 因此 clover 与 cluster 的实际能量分辨应该小于  $2\delta$  与  $\sqrt{7}\delta$ . 复合式高能

$\gamma$  探测器的能量分辨还需要进一步考虑.

### 参考文献 (References)

- 1 Duchene G, Beck F A, Twin P J et al. Nucl. Instr. Meth., 1999, **A432**:90—110
- 2 Million B, Bracco A, Camera F et al. Nucl. Instr. Meth., 2000, **A452**:422—430
- 3 Shepherd S L, Nolan P J, Cullen D M et al. Nucl. Instr. Meth., 1999, **A434**:73—386
- 4 Maj A, Gaardhoje J J, Atac A et al. Nucl. Phys., 1994, **A571**:185—220
- 5 Bruce A M, Gaardhoje J, Herskind B et al. Phys. Lett., 1988, **B215**:237—241
- 6 WEN Wan-Xin, JIN Gen-Ming. High Ener. Phys. and Nucl. Phys., 2002, **26**:1178(in Chinese)  
(文万信, 靳根明. 高能物理与核物理, 2002, **26**:1178)
- 7 Csatlos M, Krasznahorkay A, Bacelar J C S et al. Nucl. Instr. Meth., 1999, **A421**:272—277
- 8 Brun R, Carminati F. GEANT Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library, Long Writup W5013 ed., CERN, Geneva, 1994
- 9 WEN Wan-Xin, JIN Gen-Ming, WANG Su-Fang. Nucl. Phys. Rev., 1999, **16**:237—242(in Chinese)  
(文万信, 靳根明, 王素芳. 原子核物理评论, 1999, **16**:237—242)

## Monte Carlo Simulations for Optimum Design of Composite Detectors for High Energy $\gamma$ Ray

WEN Wan-Xin<sup>1,2</sup> JIN Gen-Ming<sup>1</sup>

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

2 (Nuclear Medicine School, Soochow University, Suzhou 215007, China)

**Abstract** The efficiencies of clover and cluster composite detectors using NaI and BGO crystals as the media for detection of high energy  $\gamma$  ray are systematically simulated with Monte Carlo method. It is shown that for the same geometry of detection media concerned the efficiency of the composite BGO detector is much higher than that of the composite NaI detector. Therefore NaI crystal is not a suitable medium of composite detectors for high energy  $\gamma$  ray due to low efficiency, Doppler broadening and distortion to  $\gamma$  spectrum in comparison with BGO crystal. The composite BGO detectors have many advantages such as large photopeak efficiency, small Doppler effect and regular  $\gamma$  spectrum. As to the clover and cluster composite detectors consisting of the cylinders of BGO crystal with original size  $\phi 76 \times 127$ , the intrinsic photopeak efficiencies are over 40 % and the enhanced factor of absolute efficiencies is as high as 2.4 and 2.7, respectively, for 22 MeV  $\gamma$  ray.

**Key words** composite, gamma detector, BGO crystal, numerical simulation

Received 29 December 2001

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19805012), Direction Project Foundation of Chinese Academy of Sciences