

BGO 高能 γ 探测器性能测定与效率模拟*

文万信^{1,2} 靳根明¹

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 实验测定了两套新制作的 $\phi 75 \times 100$ BGO 高能 γ 探测器的能量分辨与时间分辨, 根据 BGO 晶体中 Ge 的热中子俘获所释放的 2 条高能 γ 射线对 γ 能谱作能量刻度. 模拟计算了 4—30 MeV 能量区间 BGO γ 探测器的全能峰效率、单逃逸率与双逃逸率, 计算了入射 γ 光子在 0—30 MeV 区间均匀分布时 BGO 探测器的实际计数响应与计数效率随 γ 光子能量的变化, 分析了 γ 光子在探测介质中的能损向下延展造成的能谱扭曲.

关键词 探测效率 能量分辨 能谱扭曲 模拟计算

1 引言

高能 γ 探测器一般采用闪烁体 NaI(Tl) 晶体、BaF₂ 晶体、BGO 晶体作为探测介质^[1], NaI 能量分辨最好, BaF₂ 时间性能最好, 而 BGO 效率最高. 同样尺寸下 BGO 在低能区 (1 MeV) 能量分辨比 NaI 要差, 随着能量升高二者差别逐渐缩小. BaF₂ 时间分辨可以达到 0.2 ns, 通过飞行时间方法很容易甄别中子与 γ , 因此这种探测器可以放置在距靶很近的位置, 如果起始时间信号分辨在 1 ns 以下, BaF₂ 与靶的距离可以近到 20—30 cm, 以提高探测器的几何效率. 日本 RIKEN 研制的 80 单元半球高能 γ 探测器与意大利 LNS 研制的 4π 高能 γ 探测器 MEDEA 均采用 BaF₂ 晶体. 单独使用的高能 γ 探测器一般都采用大体积 (如 $\phi 240 \times 360$) NaI(Tl) 晶体加反 Compton 塑料包层与大体积 BGO 晶体. BGO 晶体除用作高能 γ 探测介质外, 还用作高纯锗 (HPGe) 低能 γ 探测器的反 Compton 介质. 就效率而言, 为得到同样的效率, NaI 晶体尺寸必须比 BGO 大许多, 这样购置 NaI 晶体的费用未必比 BGO 低. 这也是选择晶体材料所要考虑的一个因素. 另外, BGO 晶体的热中子俘获特性为能量刻度与信号漂移的监测修正提供了新的依据. 半导体材料 HPGe 的能量分辨比 NaI 要好, 只是效率太低, 一般只用作低能 γ 探测介质. 也有实验使用较大体积的 HPGe 外加 BGO 或 BaF₂ 包层的方法测量高能 γ ^[2], 在数据分析处理时采用补遗方式 (add-back mode)

2001-12-29 收稿

* 国家自然科学基金 (19805012) 资助

将二者能量相加, 则可得到较高的探测效率与比较好的能量分辨.

为研究原子核偶极巨共振 GDR(giant dipole resonance)性质, 我们制作了两套 $\phi 75 \times 100$ BGO 高能 γ 探测器, 与北京大学技术物理系制作的两套相同规格的 BGO 探测器一起使用, 以增加几何效率. BGO 晶体从中国科学院上海硅酸盐研究所购得, 光电倍增管采用 Hamamatsu 公司 R594 型 3 英寸管. 晶体表面全部抛光, 侧面与前端面用特氟纶(Teflon)带包裹以增加光反射, 光电管与晶体后端面直接耦合, 耦合处涂有少量硅油使二者紧密结合及增加光的透射, 晶体与光电管包扎后外加圆筒形铁壳固定保护. 本文将给出 BGO 探测器性能包括能量分辨、时间分辨的实验测量结果, 并着重模拟计算探测效率.

2 能量与时间分辨及能量刻度

用放射源标定了两套新制作的 BGO 高能 γ 探测器的能量分辨与时间分辨. 经用 ^{137}Cs 源 0.662MeV γ 射线标定, 得到两套探测器对于 0.662MeV γ 的能量分辨率分别为 16% 与 17%. 用 ^{60}Co 测得的两个探测器的时间分辨均为 6ns. BGO 与 NaI γ 探测器能量分辨基本遵从关系式 $\Delta E/E = k/\sqrt{E}$, 其中 E 为 γ 能量, ΔE 为全能峰半高宽 FWHM, k 为系数^[3]. 对于两套 BGO γ 探测器, 系数 k 分别为 0.13 与 0.14, 系数 k 在探测器能谱的模拟计算中要用到.

BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)本身 Ge 元素的热中子俘获特性为 BGO 高能 γ 探测器的能量刻度提供了便利条件^[4]. ^{70}Ge 与 ^{73}Ge 俘获热中子后分别释放出 7.42 和 10.20MeV 的 γ 射线, γ 放射源的能量一般没有这么高, 这两条谱线对 γ 能量刻度非常有利, 这也成为 BGO γ 探测器的一个优点. 可以使用中子源如 Po-Be 对 BGO γ 探测器作能量刻度, 也可以利用在线实验数据即进入 BGO 探测器的中子数据直接作能量刻度. 通过飞行时间(TOF)方法从测得的原始 γ 谱中取出与中子相关的能谱, ^{70}Ge 与 ^{73}Ge 热中子俘获对应的两条 γ 谱线则会显现出来. 甚至可以利用在线 Ge 中子俘获释放的两条 γ 谱线来监视电子学与光电管的漂移. 我们完成的 $7.5\text{MeV/u } ^{12}\text{C} + ^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$, $6.0\text{MeV/u } ^{24}\text{Mg} + ^{112}\text{Sn} \rightarrow ^{136}\text{Sm}$ 及 $4.0\text{MeV/u } ^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni} \rightarrow ^{98}\text{Cd}$ 偶极巨共振同位旋依赖性实验均采用 Ge 热中子俘获方法对 4 套 BGO 探测器作能量刻度.

3 效率模拟计算

高能 γ 探测器的效率与入射 γ 的能量有关, 随着能量增高探测效率迅速下降. 重离子反应实验中测得的高能 γ ($\geq 4\text{MeV}$) 能谱一般都是连续谱, 如 GDR γ 衰变能谱, 它们通常不存在尖锐的分立峰, 能量微分截面的准确测量十分重要. 由于 γ 探测器的效率不是常数, 效率修正也是得到准确能谱必不可少的一个环节. γ 放射源的能量一般都比较低, 不适合于高能 γ 探测器的效率刻度. 实验上一般采用质子引起的非弹散反应或共振反应来刻度高能 γ 探测器的效率, 如 $^{12}\text{C}(p, p'\gamma)$ 反应、 $^{11}\text{B}(p, \gamma)^{12}\text{C}$ 反应等, 这些实验能够产生 4—20MeV 的分立 γ 射线, 对于更高能量的探测效率则需要通过模拟计算得到. 粒子物理实验探测器模拟程序 EGS^[5] 与 GEANT^[6] 也常用于核物理实验 γ 探测器的设计与效率计

算. 北京大学技术物理系曾利用低能(p, γ)共振反应对他们制作的两套 BGO 高能 γ 探测器的效率作了刻度^[7], 探测器距靶 28cm, 从实验上得到能量为 6.13, 17.23 和 17.65MeV 的 γ 射线的探测效率分别为 22%, 9% 和 7%. 他们也编写了 GET 程序模拟计算探测器效率^[8].

在我们最近完成的 3 组巨共振实验中, 4 套 BGO 高能 γ 探测器与靶心的距离均为 62cm, 实验测量的 γ 能量范围为 4—30MeV. γ 光子与探测介质的相互作用主要有正负电子对 e^+e^- 产生效应、Compton 散射与光电效应三种形式, 光核裂变反应等一般不予考虑. 在 4—30MeV 能量区间, 正负电子对 e^+e^- 产生效应占主导地位, 所产生的正负电子射程较短, 一般都会停阻在探测介质中, 它们通过与介质分子或原子碰撞使其激发电离而损失能量, 或者通过释放 0.1—2MeV 的韧致辐射 γ 光子损失能量. 韧致辐射 γ 光子又通过正负电子对 e^+e^- 产生、Compton 散射或光电效应损失能量. 当正电子 e^+ 能量耗尽时便俘获电子发生正电子湮灭并释放出两个能量为 0.511MeV 的 γ 光子, 它们可能被介质吸收或者有一个甚至两个从介质中逃逸. 正电子湮灭光子、Compton 散射光子、韧致辐射光子等的逃逸, 造成 γ 光子在探测介质中的能损从全能峰位置向低能方向延展, 直接效果是全能峰效率下降或者使能量分辨变差, 如果测量的 γ 能量本身是连续的, 这种延展与探测效率不是常数一样对实际能谱也具有扭曲作用.

GEANT3.21 程序库与 CERN 的数学库类似, 提供了许多粒子与物质相互作用的子程序.

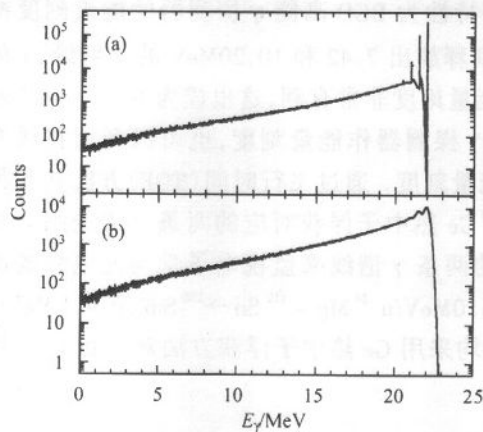


图 1 22MeV 单能 γ 光子在 $\phi 75 \times 100$ BGO 晶体中的能损(a)及在 BGO 探测器中能量响应(b)的模拟计算结果
入射 γ 光子总数为 200 万.

为具体物理需要所编写的计算程序可以直接调用这些子程序. 图 1(a)是 BGO 探测器对 22MeV 单能 γ 光子响应曲线的模拟计算结果, 从中清楚地看到全能峰、单逃逸峰与双逃逸峰以及沉积能量的延展. 计算给出的只是 γ 光子在 BGO 晶体中的能损, 所以全能峰、单逃逸峰与双逃逸峰都是没有宽度的直线峰. 从能损到探测器能量信号的转换过程中还有一系列中间物理过程, 它们存在统计涨落, 造成 γ 探测器测量到的能量有统计涨落. 能量分辨与探测介质的性质如光转换效率、光电管的性能、探测器制作工艺等有关. 计算中我们也人为地在能损中加入了与 γ 探测器能量分辨率相对应的统计涨落, 模拟计算得到的谱型(见图 1(b))更接近实验测量谱型.

针对探测器布局我们用 GEANT 程序模拟计算了 4—30MeV 能量区间单个探测器的效率, 模拟事件总数高达 10^7 , 这样虽然计算时间较长但能够减少统计误差, 即便如此, 平均到每个能量点的入射光子数仍然比较低. 入射的 γ 光子能量在 0—30MeV 区间均匀抽样, 能量步宽为 0.2MeV, 点源距 BGO 探测器 62cm, 计算中也假定点源发射的 γ 光子在单个探测器所覆盖的立体角范围内各向同性. 全能峰特征效率(全能峰效率)为单能 γ 光子的全

能峰计数与入射单能 γ 光子总数之比。图 2 给出了 γ 能量在 4—30MeV 区间 BGO 高能 γ 探测器全能峰效率,同时也给出了单逃逸率与双逃逸率。当 γ 能量升高后, BGO 探测器的全能峰探测效率不断下降,单逃逸率缓慢上升,但在 7MeV 左右以后又缓慢下降,双逃逸率则大体恒定,到了 30MeV 三者相当。总体而言,全能峰效率随能量升高不断下降,单逃逸率与双逃逸率在 γ 能量达到一定限度后基本保持稳定。全能峰效率下降、单逃逸率与双逃逸

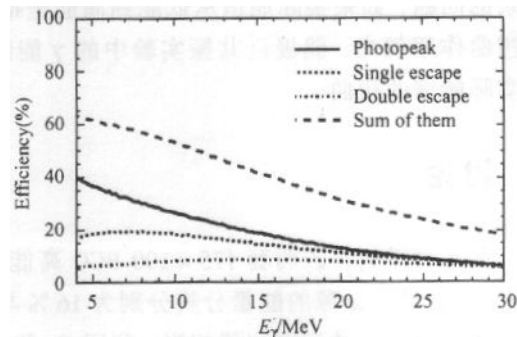


图 2 $\phi 75 \times 100$ BGO 探测器全能峰效率、单逃逸率与双逃逸率模拟计算结果

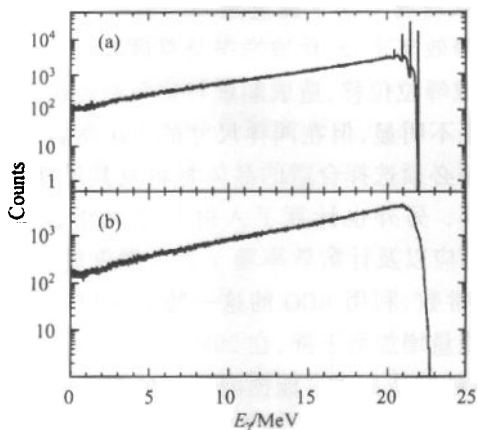


图 3 22MeV 单能 γ 光子在 $\phi 75 \times 100$ NaI 晶体中的能损(a)及在 NaI 探测器中能量响应(b)的模拟计算结果
入射 γ 光子总数为 200 万。

率相对上升不仅造成能量分辨变差,还可能使探测器给出的单能峰峰位发生位移,导致能量与截面等测量不准确。这一现象在同样尺寸的 NaI 高能 γ 探测器中表现尤为明显(图 3)。

保持与效率计算相同的计算条件,又计算了入射的 γ 光子在 0—30MeV 区间均匀分布时 BGO 探测器的实际计数响应以及计数效率随 γ 光子能量的变化(见图 4)。实际计数响应定义为入射 γ 光子能量在某一区间均匀分布时探测器记录到的某一能量点的实际计数与该能量点入射 γ 光子数之比。由于 γ 光子在探测介质中能损的向下延展,探测器记录到的能量可能不同于实际入射的能量,因此尽管每个能量点的入射光子数相同但探测器给出的计数并不相同。计算中假定只要 γ 光子在介质中

的能损大于 0,探测器就给出入射能量点的一个光子计数,以此计算相应能量的计数率。计算中只考虑介质中的能损而不考虑统计涨落。图 4 虚线为计数率效率,在 0—30MeV 区间它基本上是常数,可以利用 BGO 的这一特点制作高能 γ 计数器。实线是入射的 γ 光子在 0—30MeV 区间均匀分布时 BGO 探测器的响应曲线计算结果,在 20MeV 以后响应曲线下降很快,这是由于 γ 光子能量越高能损延展越宽以及没有来自 30MeV 以上 γ 光子的能损延展的贡献。如何修正能损延展对实际 γ 能谱的扭曲是一个比较

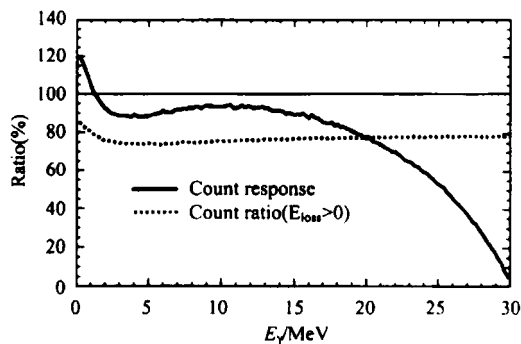


图 4 入射 γ 光子在 0—30MeV 区间均匀分布时 BGO 探测器的实际计数响应与计数效率随 γ 光子能量变化的模拟计算结果

复杂的问题. 如果实际能谱从低能到高能呈指数型下降, 能损延展的扭曲作用就不大, 反之扭曲作用就大. 偶极巨共振实验中的 γ 能谱大体上指数下降, 因此可以忽略能损延展对实际能谱的扭曲.

4 讨论

本文对新制作的两套 $\phi 75 \times 100$ BGO 高能 γ 探测器的能量分辨与时间分辨做了实验测定, 它们对 ^{137}Cs 源的能量分辨分别为 16% 与 17%, 对 ^{60}Co 源的时间分辨均为 6ns, 这些指标与国内外同类型探测器相当. 利用 Ge 热中子俘获方法可以方便地对 BGO 高能 γ 探测器做能量刻度, 我们最近完成的 3 组偶极巨共振实验中都采用这一新方法. 着重利用 GEANT3.21 程序库提供的子程序模拟计算了 BGO 高能 γ 探测器的探测效率, 计算结果表明全能峰效率随能量升高不断下降, 单逃逸率与双逃逸率在 γ 能量达到一定限度后基本保持稳定, 到了 30MeV 三者数量大体相同. 全能峰效率下降、单逃逸率与双逃逸率相对上升一方面造成能量分辨变差, 另一方面还可能造成峰位位移, 造成能量与截面测量出现偏差. 这一现象在 $\phi 75 \times 100$ BGO 高能 γ 探测器中还不明显, 但在同样尺寸的 NaI 高能 γ 探测器中表现尤为突出. 因此, 高能 γ 探测器的研制必须选择合适的晶体材料及其尺寸, 尽可能突出全能峰效率压低单逃逸率与双逃逸率. 另外也计算了入射的 γ 光子在 0—30MeV 区间均匀分布时 BGO 探测器的实际计数响应以及计数效率随 γ 光子能量的变化. 计算显示计数率效率在 0—30MeV 区间基本上是常数, 利用 BGO 的这一特点可以制作高能 γ 计数器. 实际计数响应变化较大, 总体上随能量增加而下降, 在 20MeV 以后响应曲线下降快, 这是由于 γ 光子在探测介质中能损向下延展造成的. 能损向下延展扭曲了实际的 γ 能谱, 对它的修正比较困难. 偶极巨共振实验中的 γ 能谱大体上呈现指数下降形式, 因此可以忽略能损延展对实际能谱的扭曲.

在 GEANT 程序库使用方面杨永峰提供了许多有益经验, 作者表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- 1 Maj A, Gaardhoje J, Atac A et al. Nucl. Phys., 1994, **A571**:185—220
- 2 Bruce A M, Gaardhoje J, Herskind B et al. Phys. Lett., 1988, **B215**:237—241
- 3 Csatlos M, Krasznahorkay A, Bacelar J C S et al. Nucl. Instr. Meth., 1999, **A421**:272—277
- 4 Krolas W, Maj A, Bednarczyk P et al. Z. Phys., 1992, **344**:145—147
- 5 Nelson W R, Hirayama H, Rogers D. The EGS4 code, SLAC-265, 1985
- 6 Brun R, Carminati F. GEANT Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library, Long Writup W5013 ed, CERN, Geneva, 1994
- 7 LIU Xin, YE Yan-Lin, JIANG Dong-Xing et al. High Ener. Phys. and Nucl. Phys., 1994, **18**:496—502 (in Chinese)
(刘昕, 叶沿林, 江栋兴等. 高能物理与核物理, 1994, **18**:496—502)
- 8 YE Yan-Lin. Chin. J. Comp. Phys., 1994, **11**:(3)379—383 (in Chinese)
(叶沿林. 计算物理, 1994, **11**:(3)379—383)

Numerical Simulations on Efficiency and Measurement of Capabilities of BGO Detectors for High Energy γ Ray*

WEN Wan-Xin^{1,2} JIN Gen-Ming¹

1 (Institute of Modern Physics, CAS, Lanzhou 730000, China)

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

Abstract The energy resolution and time resolution of two $\phi 75 \times 100$ BGO (bithmus germanate) detectors for high energy γ ray newly made were measured with ^{137}Cs and ^{60}Co resources. The two characteristic γ rays of high energy emitted from the thermal neutron capture of germanium in BGO crystal were used for the energy calibration of γ spectra. The intrinsic photopeak efficiency, single escape probability and double escape probabilities of BGO detectors in photon energy range of 4—30MeV are numerically calculated with GEANT code. The real count response and count ratio of the uniformly distributed incident photons in energy range of 0—30MeV are also calculated. The distortion of γ spectra caused by the photon energy loss extension to lower energy in detection medium is discussed.

Key words detection efficiency, energy resolution, distortion spectrum, numerical simulation

Received 29 December 2001

* Supported by National Natural Science Foundation of China (1970112)