

HIRFL在束 γ 实验终端BGO反康谱仪性能

雷祥国 郭应祥 罗亦孝 孙相富
赵之正 孙锡军 刘洪业 郭俊盛

(中国科学院近代物理研究所, 兰州)

关键词 BGO, 康普顿抑制。

引言

随着兰州重离子加速器的建成出束, 将有八个实验终端随之投入使用。其中在束 γ 终端是一台主要用于核谱学研究的大型设备。它由置于水平面内的六套带BGO反康普顿屏蔽的高纯Ge探测器和一个由十四块BGO六棱柱探测元构成的小型晶体球组成。增加这种六棱柱形状的BGO元个数, 便能使小型晶体球很容易地扩建成中型和大型晶体球。

一、BGO反康普顿屏蔽及其结构

1. BGO反康普顿屏蔽

在重离子引起的核反应中, 往往有多个反应道同时开放, 产生了多个有高激发能、高角动量的反应余核。这些余核退激, 形成了极为复杂的 γ 谱。由于所用的Ge探测器晶体尺寸有限, 所以入射到Ge晶体中的光子能把全部能量都沉积在Ge晶体中, 而形成全能峰的只占被探测到的光子的很少一部分(例如 $P_0=15\%$, 这个比例数被称为 γ 谱的峰总比), 而其余的被探测光子在Ge晶体中是通过康普顿散射后逸出晶体, 由于它们在晶体中只沉积了部分能量, 因而形成了 γ 能谱中连续分布的康普顿散射高台。 γ - γ 符合测量为获得能级图提供了最丰富, 最重要的信息。而在 γ - γ 符合测量中, 这种很强的康普顿散射是做为本底出现的, 真正有用的只是全能峰-全能峰符合事件。例如在二重符合谱中, 这种事件只占 $P_0^2=0.023$, 在三重符合谱中只占 $P_0^3=0.0034$ 。这样大量强度弱的 γ 跃迁就会被湮没在这很强的康普顿散射中而不能被观测到。可以用高 γ 探测效率的闪烁晶体(例如NaI)把Ge探测器包围屏蔽起来, 从Ge晶体中逸出的康普顿散射光子, 被周围的闪烁晶体吸收探测, 并使之与Ge探测器的信号进行反符合。结果凡是在Ge晶体中经康普顿散射的事件都不被记录了, 大大地抑制了Ge探测器的康普顿散射部分, 从而有效地提高了峰总比。如果我们把保持峰的计数相同时无康普顿抑制和有康普顿抑制能谱中康普顿计数之比 R 称为康普顿抑制系数, 则有康普顿抑制时单峰的峰总比 P 为:

$$P = \frac{P_0}{P_0 + (1 - P_0)/R}$$

二重符合和三重符合谱的峰总比分别为 $P_{2c} = P^2$ 和 $P_{3c} = P^3$ 。表1列出了在不同抑制系数 R 时, 对中等体积, $P_0=15\%$ 的Ge探测器计算的单谱, 二重和三重符合谱的峰总比和

表 1 康普顿抑制系数 R 与峰总比 P 关系

Table 1 Ratio P of the peak to total as a function of the compton suppression factor R

R	P	二重符合		三重符合	
		P_{2c}	Q_2	P_{3c}	Q_3
1	$0.15 = P_0$	2.2×10^{-2}	1.0	3.4×10^{-3}	1.0
3	0.35	0.12	5.45	4.3×10^{-2}	12.65
5	0.47	0.22	10.0	0.10	29.41
7	0.55	0.30	13.54	0.17	50.0
9	0.61	0.37	16.82	0.23	67.65
11	0.66	0.44	20.0	0.29	85.29
15	0.73	0.53	24.09	0.39	114.71
20	0.78	0.61	27.73	0.47	138.24

表 2 BGO 反康普顿屏蔽与 HPGe 探测器对 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 源测得的平均康普顿抑制系数和峰总比结果

Table 2 Results of the energy averaged compton suppression factors and ratios of the peak to total measured with the BGO anti-compton shield and a HPGe detector for ^{137}Cs and ^{60}Co sources.

放射源	能区** /keV	未加抑制屏蔽峰总比 /%	加抑制屏蔽	
			平均抑制系数	峰总比 P /%
^{137}Cs	>0	22.9	4.0	50.6
	>50	25.4	6.9	64.9
	>100	27.5	6.5	66.0
^{60}Co	>0	14.4	6.1	46.7
	>50	15.2	7.0	50.2
	>125	16.1	6.7	51.0
	>400	20.1	5.9	54.7
	* >100	18.0		58.0

* >100能区是英国 Daresbury 的实验结果。

** 对 ^{137}Cs , 能区的上限为800keV, 对 ^{60}Co 源为1400keV。

在符合谱中它们改善的倍数 $Q_2 = \left(\frac{P}{P_0}\right)^2$ 和 $Q_3 = \left(\frac{P}{P_0}\right)^3$ 。从这些数据可以看出, 反康普顿屏蔽降低了符合谱中的康普顿本底, 大大提高了峰-峰符合的比例, 从而使原来被湮没的弱峰有可能突出出来。

近年来, BGO(锗酸铋 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ 的简称)晶体被广泛用来制做探测康普顿散射光子的反康普顿屏蔽。因为与 NaI 相比, BGO 的密度大二倍, γ 探测效率高约 2.5 倍, 用它制做的反康普顿屏蔽体积可比 NaI 小 10 倍, 这就使得可能同时把多个(例如 20 个)这种带 BGO 屏蔽的 Ge 探测器置于距靶不远($\sim 20\text{cm}$)的四周, 相对于两个 Ge 探测器的 γ - γ 符合, 这种安排的计数可增加 190 倍, 相对于 3 个 Ge 探测器的三重 γ 符合可增加 1140 倍, 从而大大提高了对在束 γ 的探测效率。BGO 的另一个优点是不潮湿, 易于机械加工。目前世界上很多实验室都已建立或正在建立由多个这种带有 BGO 反康普顿屏蔽的 Ge 探测器组成的

在束 γ 探测系统，使用它们已取得一批惊人的实验结果，例如测到了 $60\hbar$ 的高自旋分立谱和 $e_2=0.5$ 的超形变^[1]。

2. BGO反康普顿屏蔽的结构

按照 BGO 晶体相对于 Ge 探测器的几何排列，其结构主要分为两种类型。一种为对称型的轴向结构，另一种为非对称型的横向结构。我们采用的是非对称型的，其结构示于图 1。这种类型的屏蔽给出较好的康普顿抑制系数。其中 BGO 屏蔽的截面为 $133 \times 133\text{mm}^2$ 的正方形，长为 143mm。它是由 8 块 BGO 晶体拼装而成。在一侧面开有 $\phi 72\text{mm}$ ，深 107.5mm 的圆洞，使 Ge 探测器可横向插入。 γ 射线入射孔径为 40mm，在正对着入射孔方向的 BGO 晶体厚度很大，这就保证了对沿小角散射的高能康普顿光子的充分吸收。在 BGO 的前面有一厚为 40mm 的 NaI 帽子，它与 BGO 是通过光学耦合粘接在一起的。这是考虑到 BGO 输出脉冲幅度很低(约为 NaI 的 1/10)，为了提高对后方向逸出的低能康普顿散射光子的输出脉冲幅度而设计的。光的输出由一支 $\phi 130\text{mm}$ 的光电倍增管收集。为改善光的收集，使用了一个 50mm 长的特制有机光导。屏蔽的前端成楔形，以便能把六套探测器都放

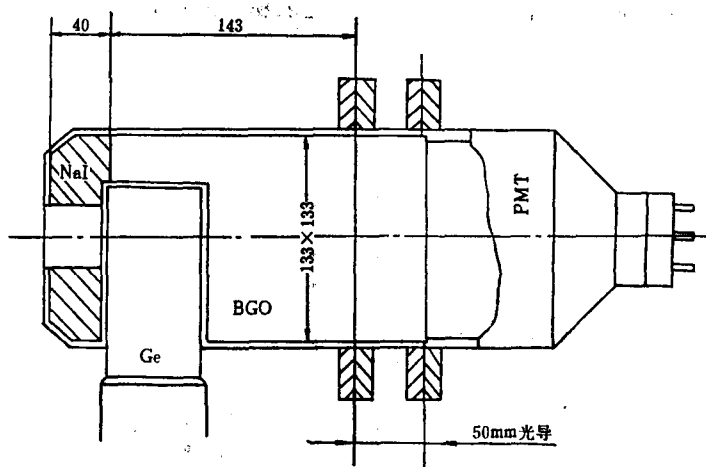


图 1 BGO 反康普顿屏蔽示意图

Fig.1 Schematical drawing of the BGO anti-compton shield

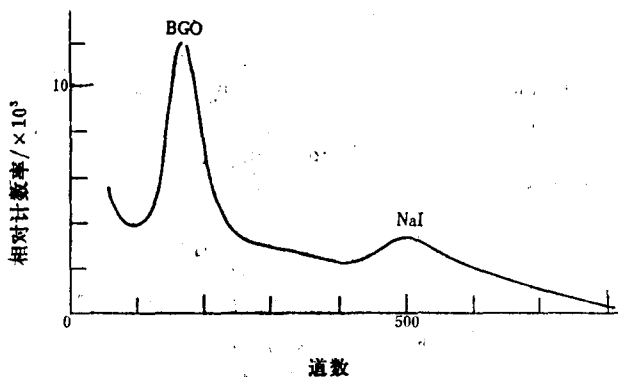


图 2 BGO 屏蔽测得的 ^{137}Cs γ 谱

Fig.2 ^{137}Cs γ -spectrum measured with the BGO shield

置得尽量靠近靶子。BGO屏蔽的尺寸是参考 Lieder^[2]等的蒙特卡罗模拟计算结果而选定的，它可使1.5MeV的入射 γ 射线在Ge探测器中产生的康普顿散射光子的97%以上都被吸收。整个BGO屏蔽是交由荷兰Harshaw公司设计制造的。

二、BGO反康普顿屏蔽的性能测量^[3]

能量分辨是对屏蔽所用BGO晶体质量，制造工艺水平的一个综合反映。所以我们首先对BGO屏蔽本身的性能进行了测量，然后与Ge探测器一起，对其康普顿抑制能力做了测量。

1. BGO反康普顿屏蔽的能谱

把¹³⁷Cs源置于BGO屏蔽入射孔前5cm处，测得的能谱示于图2。能谱中有两个峰，强度大、脉冲幅度低的是 γ 射线在BGO中产生的全能峰；而另一个峰是 γ 射线在前端NaI中产生的全能峰，这种脉冲幅度的差别就是由于BGO光输出小造成的。从BGO全能峰获得的能量分辨为33%。用一个厚5cm，孔径为8mm的限束光栏，让 γ 射线分别从8块BGO上入射，测得的能量分辨在30%—36%。这表明所用晶体及其间的光学耦合质量是均匀相同的。

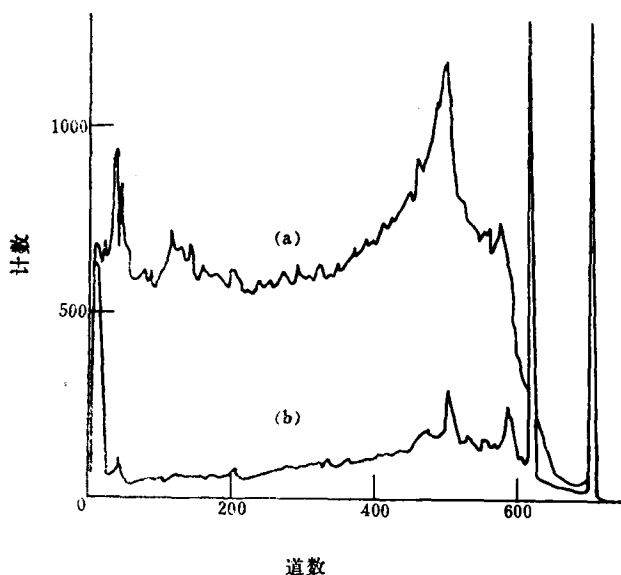


图3 (a)和(b)是测得的非抑制和抑制的⁶⁰Co γ 谱

Fig.3 ⁶⁰Co γ -spectra measured with (a) and without (b)compton suppression

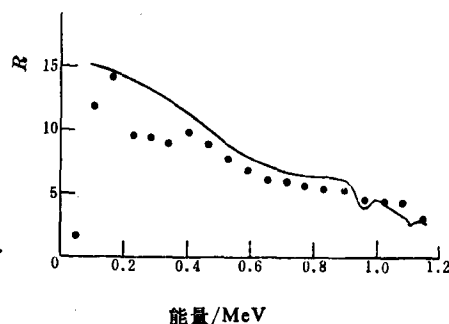


图4 测量的康普顿抑制系数R与蒙特卡罗计算比较

Fig.4 Comparison of the measured compton suppression factor R with the monte-carlo calculation^[2]

——对⁶⁰Co源蒙特卡罗模拟计算；·——实验测量。

对于这种由多块晶体组成，用一个大面积光电倍增管收集的探测器，晶体与光电倍增管之间的光学耦合十分重要。Harshaw公司为我们设计制造的第一个BGO屏蔽，是直接光电倍增管耦合到BGO上，由于BGO几何形状和尺寸的关系，使光电倍增管对从8块BGO晶体输出的光收集效率不同，结果使BGO屏蔽输出脉冲幅度分散严重，能量分辨只有

49%。后加了一端为方，一端为圆的有机光导，改善了光的收集，从而使能量分辨提高到了<35%。

2. BGO反康普顿屏蔽输出脉冲的时间特性

我们的BGO屏蔽输出脉冲的上升时间为400ns，把Ge探测器插入BGO屏蔽侧面的洞中，分别用 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 源测量了Ge探测器中的康普顿散射部分与BGO输出信号间的符合时间分布曲线。它们的时间分辨分别为48ns和45ns。

3. BGO屏蔽的康普顿抑制性能^[4,5]

在BGO屏蔽前面放置一个铅准直器，使从放射源辐射出的 γ 射线不能直接射到BGO屏蔽前端的NaI上，而只能直接射到Ge探测器上。这样，BGO屏蔽测得的全部 γ 光子都是在Ge探测器中经康普顿散射后逸出Ge晶体的。在束 γ 实验中，应选用具有强抗中子辐射损伤的N型高纯Ge探测器，以防中子辐照，使能量分辨变差。我们选用的是相对效率为15%和20%的N型高纯Ge探测器。从对康普顿抑制效果的好坏着眼，用实验的方法确定了Ge探测器插入BGO屏蔽侧洞中的最佳深度是距洞底5cm和放射源距BGO屏蔽的最佳距离是10cm。它们是分别受Ge晶体在Ge探测器中的位置和铅准直器的几何影响的。测量利用了通常的快慢符合技术来反符合掉Ge探测器能谱中的康普顿计数，从而获得了峰总比很大的康普顿抑制谱，如图3所示。从图中看到，康普顿散射计数被大大减少了。在抑制谱中，康普顿散射高能端有两个小的宽峰，它们相应于背散射的 γ 事件。而这些背散射后的 γ 光子沿入射孔逸出了BGO屏蔽，因而没有产生抑制作用。我们用康普顿抑制系数 R 来描述康普顿抑制的程度， R 显然是能量的函数，如图4所示。从中看出实验测量的与蒙特卡罗计算的符合的相当好。从实验结果看，能量<50keV处几乎没有抑制，这是由于选取的BGO屏蔽输出脉冲阈值造成的。在表2中列出了对 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 源测到的相应不同能区的平均抑制系数和峰总比。同时还列出了英国Daresbury实验室用 ^{60}Co 源测量的一个结果，他们使用的HPGe探测器相对效率是20%，因而有较大的峰总比值。

三、小 结

实验用 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 放射源对我们的装置进行了检验。它的能量分辨小于35%，康普顿抑制系数大于6，输出脉冲上升时间400ns。峰总比在能区下阈大于50keV时，对 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 源分别为50.2%和64.9%，达到了设计要求。测量中发现，所用电子学线路的放大倍数、时间常数、阈值等对抑制系数会有一定的影响。由于在束实验时，本底高，计数率强，所以仔细调节有关线路参数，对获得最佳康普顿抑制效果是十分必要的。

参 考 文 献

- [1] Twin, P. J. et al., *Phys. Rev. Lett.*, 57, 811 (1986).
- [2] 孙相富, 在束 γ 终端论证, 近代物理所资料, 1984年12月。
- [3] Lei Xiangguo, et al., Annual Report, Institute of Modern Physics, 147 (1986).
- [4] Nolan, P. J. et al., *Nucl. Instrum. Methods*, A236, 95 (1985).
- [5] Liedler, R. M. et al., *Nucl. Instrum. Methods*, 220, 363 (1984).

(编辑部收到日期: 1988年3月5日)

PERFORMANCE OF THE BGO ANTI-COMPTON SHIELD OF THE IN BEAM γ RAY EXPERI- MENTAL EQUIPMENT OF HIRFL

LEI XIANGGUO GUO YINGXIANG LUO YIXIAO
SUN XIANGFU ZHAO ZHIZHENG SUN XIJUN
LIU HONGYE GUO JUNSHENG

(Institute of Modern Physics, Academic Sinica, Lanzhou)

ABSTRACT

The paper introduces the structure and measures results of the BGO anti-compton shield which is built for the in beam γ ray experimental set up of the Heavy Ion Research Facility Lanzhou (HIRFL). Its energy resolution is less than 35% (^{137}Cs), risetime of the output is 400 ns, and the average compton suppression factor is 6—7.

Key words BGO, Compton suppression.