

φ76mm×100mm BGO 闪烁探测器 探测效率测量*

刘 昕 叶沿林 江栋兴 卢希庭 刘洪涛

(北京大学技术物理系 北京 100871)

1993年3月4日收到

摘 要

用若干低能(p, γ)共振核反应产生的单能光子测得 φ76 mm × 100 mm BGO γ探测器在 17.65、17.23、6.13 MeV 三个能量点下的全能峰本征探测效率分别为 7%、9% 和 22%。

关键词 全能峰本征探测效率, 非线性拟合, 质子背散射。

根据中能重离子核物理实验的需要, 我们制做了 φ76 mm × 100 mm BGO 探测器(有关技术细节见文献[1]), 并在 20 MeV 以下能区研究了探测器的能量响应(详见文献[2])。本文报导 17.65、17.23 及 6.13 MeV 能量下探测器绝对探测效率的测量结果。

1 实验方法

(1) 用大体积的闪烁晶体探测 γ 射线时, 拟合处理的结果中一般只有全能峰的结果可靠^[2], 所以, 本文测量探测器的“全能峰本征探测效率”, 其定义如下:

$$\varepsilon = A/N_\gamma$$

式中 A 为 γ 能谱中全能峰的面积, N_γ 为入射到探测器前表面上的 γ 光子数。

表 1 实验中采用的低能(p, γ)共振核反应

反 应	共振能量 E_r (keV)	共振截面 σ_r (mb)	共振宽度 Γ (keV)	E_γ (MeV)	γ 分支比 δ	入射质子能量 E_0 (keV)
$^{11}\text{B}(p, \gamma)^{12}\text{C}$	1390	0.053	1270	17.23	66	1361
				12.80	34	
				4.43	34	
$^{19}\text{F}(p, \gamma\alpha)^{16}\text{O}$	340	102	2.4	6.13	96.5	367
$^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$	441	6	12	14.75	37	457
				17.65	63	

* 国家教委青年教师基金和国家自然科学基金的资助。

用三个低能 (p, γ) 共振核反应得到三个能量的 γ 射线(见表 1)。研究表明, 这三个反应出射的 γ 射线各向同性^[3-5]。实验中采用了约 500nm 厚的 LiF 和 BN 靶, 衬底是表面抛光的单晶硅。

(2) 全能峰面积的确定。

几个 MeV 以上的 γ 射线与闪烁晶体作用时, 电子对效应是主要的, 它导致了单双逃逸峰的产生, 而且几个 MeV 的正负电子在晶体中还会经韧致辐射放出大量的 X 射线, 入射 γ 射线能量不太高时, 逃逸出晶体的韧致辐射 X 射线极少, 当 γ 射线的能量高于 10 MeV 时, 这部分逃逸已很明显, 16—17MeV 时则相当严重。截面较小的康普顿散射和光电效应的次级电子也会通过韧致辐射逃逸能量。

我们用包含多个参数的非线性拟合方法拟合实验谱。全能峰和单双逃逸峰都可用高斯函数近似表示。针对具体晶体人们通常采用经验公式来描写康普顿坪, 但对大 BGO 还未见到实用的经验公式。拟合中韧致辐射成份如何处理研究得还很少, 文献中类似的工作大多都用屏蔽探测器排除了它的干扰。我们用下面的近似方法处理这两个成份以便得到可靠的全能峰的拟合结果。

拟合函数 $Y(x)$ 包含 10 个参数,

$$Y(x) = f_d(x) + f_s(x) + f_p(x) + f_c(x),$$

式中 $x, Y(x)$ 代表道数和相应的计数; $f_d(x), f_s(x)$ 为双逃逸峰和单逃逸峰, 峰位分别固定在全能峰峰位以下 1.022 和 0.511MeV 处, 两者的高度和宽度是拟合参数; $f_p(x)$ 为全能峰, 其高度、峰位、宽度均为拟合参数; $f_c(x)$ 为康普顿坪, 是用常数函数加半段高斯函数构成的, 包含三个参数。

对 10MeV 以上的 γ 射线, 可以认为单逃逸峰和双逃逸峰的宽度与全能峰的宽度相等, 可合并为一个参数, 但我们仍然让双逃逸峰的宽度作为独立的拟合参数, 当能谱的单双逃逸区有韧致辐射逃逸成份时, 函数 $f_d(x)$ 的拟合结果中必然也包含了韧致辐射的成份, 从而可消除韧致辐射成份对全能峰的拟合结果的干扰。韧致辐射成份只存在于全能峰以下, 而且从全能峰峰位开始随能量的下降而逐渐加强, 所以高斯函数 $f_d(x)$ 的前半部分能够近似反映全能峰峰位以下 1.022MeV 区域内韧致辐射成份的特点。单逃逸峰的宽度作为独立的拟合参数也起到同样的作用, 而且用它的拟合结果的合理性还可以判断 $f_d(x)$ 对韧致辐射成份抵消的效果。

文献[2]中对这种拟合方法做了比较全面的评价, 表明这种方法是行之有效的。

(3) N_γ 值的测量。

① $^{11}\text{B}(p, \gamma)$ 反应共振宽度很大, 靶较薄时反应截面可认为是常数, 若入射质子能量接近共振能量, N_γ 可表达为:

$$N_\gamma = \sigma_r \cdot \rho \cdot t \cdot N_p \cdot [Q/4\pi] \cdot \delta, \quad (1)$$

式中 σ_r 为共振截面, δ 为被分析的 γ 射线的分支比, ρ 为原子数密度, t 为靶的厚度, N_p 为入射到靶上的总质子数, 可由入射质子的积分电荷量 Q 推得, Q 为探测器前表面所张的立体角。

② 一般地, 能量为 E_0 的入射粒子穿过厚度为 t 的靶时, 若能损为 E_b , 那么 N_γ 可表示为:

$$N_{\gamma} = [Q/4\pi] \cdot \rho \cdot N_p \cdot \delta \cdot \int_{E_0-E_b}^{E_0} \sigma(E) \cdot \frac{1}{S(E)} \cdot dE,$$

式中, $S(E)$ 是能量为 E 的质子在靶中的阻止本领, 在靶厚范围内 $S(E)$ 变化很小, 可近似将 $S(E)$ 取为平均阻止本领 S , 在求出靶厚 t 和能损 E_b 后, 由 $S = E_b/t$ 求得.

在共振能量 E_r 附近, ${}^7\text{Li}$ 和 ${}^{19}\text{F}$ 的 (p, γ) 反应的截面 $\sigma(E)$ 满足 Breit-Wigner 公式, 对 Breit-Wigner 公式积分, 得:

$$N_{\gamma} = [Q/4\pi] \cdot \rho \cdot N_p \cdot \delta \cdot \frac{1}{S} \cdot \left[\frac{\Gamma \cdot \sigma_r}{2} \right] \times \left\{ \text{tg}^{-1} \left[\frac{E_0 - E_r}{\Gamma/2} \right] - \text{tg}^{-1} \left[\frac{E_0 - E_r - E_b}{\Gamma/2} \right] \right\}. \quad (2)$$

(4) 由于没有能准确测量束流积分的装置, 所以用入射质子在靶片上的背散射来测量束流的积分电荷量. 文献[6]表明, 能量低于 1.4MeV 的质子与 ${}^{28}\text{Si}$ 不发生共振散射, 因此在实验涉及的能量范围内, 质子与靶衬底中的 Si 元素间的相互作用为库仑相互作用; 另外, 几百 keV 以上的质子与 Si 发生散射时可以忽略核外电子的屏蔽作用, 因此质子与 Si 的散射截面严格遵循卢瑟福散射截面公式. 靶膜中的 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{19}\text{F}$ 、 ${}^{10}\text{B}$ 、 ${}^{14}\text{N}$ 以及各种杂质含量均很低, 与质子是否发生共振散射对质子背散射谱的影响都很小, 近似地, 质子与它们的散射截面也可用卢瑟福公式表达. 所以在考虑了各种展宽因素后, 入射质子在某一散射角的背散射谱可以准确算出, 束流积分电荷量 Q 仅影响谱的高度, 调整 Q 的大小, 使计算出的背散射谱与实验谱吻合, 就能准确定出 Q .

(5) 用质子与 ${}^{19}\text{F}$ 在 340 keV 处的共振核反应测量 LiF 的靶厚. 质子与 ${}^{10}\text{B}$ 在 2.62MeV 处有一个宽达 350keV 的 (p, α) 共振核反应, 可用该反应来测 BN 靶的厚度^[7].

2 实 验

由北大技术物理系 $2 \times 1.7\text{MV}$ 加速器引出 2.67MeV、1361keV、457keV 和 367keV

等能量的质子束分别轰击 ${}^{10}\text{B}$ 、 ${}^7\text{Li}$ 和 ${}^{19}\text{F}$ 靶, 束流斑点约为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$. 没有二次电子抑制装置. 用 BGO 和 Si(Au) 面垒探测器分别测量 γ 和背散射质子, 两探测器与束流共面. 装置布置如图 1 所示. BGO 探测器放在距靶 28 cm 处, 相应立体角 Ω 为 56.5mSr. 探测器和靶被 5mm 厚的靶室壁相隔, 经计算它会吸收约 5% 的 γ 射线. Si(Au) 面垒探测器前加了 $\phi 2.86\text{mm}$ 的准直孔, 计算得知由束斑面积和金硅面垒探测器探测立体角引起的背散射质子出射能量的展宽可以忽略. 考虑到在束流轰击下靶厚可能发生改变, 在 (p, γ) 反应前后分别在同一靶位测量了靶厚. 测量

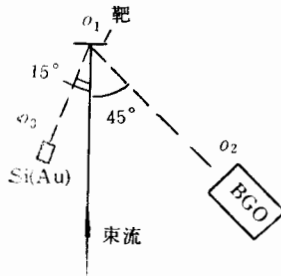


图 1 实验装置

量 BN 靶靶厚时, 将靶逆时针转了 60° 角.

3 实验结果

(1) 测得 $^{19}\text{F}(p, \gamma)$ 在 340keV 处的共振反应放出的 6.13MeV γ 的数目随入射质子能量的变化曲线(图 2), 由该曲线准确地测出能损 E_b , 再根据质子在 LiF 中的阻止本领求出 LiF 厚度为 470nm . 采用的阻止本领值是 TRIM 90 程序算出的, 误差约为 10% , 其他方面的误差相对很小, 因此 LiF 厚度测量值的误差为 10% . TRIM90 是计算阻止本领的 ZBL 半经验理论公式的程序包, 该公式是美国研究阻止本领的 Ziegler 等人以阻止本领的理论为基础, 在拟合了大量阻止本领测量结果后得到的. 在离子束分析领域该程序包被广泛应用, 其版本也在不断更新.

(2) 测得 $^{11}\text{B}(p, \alpha)^8\text{Be}$ 反应的 α 能谱如图 3 所示, 用自编的程序进行退卷积处理(结果如图中实线所示), 得到 BN 靶的厚度为 540nm . 束斑大小和探测器的有限立体角引入的误差约为 5% . 程序已考虑了其他几方面的展宽效应. 阻止本领引起的误差约为 5% , 所以 BN 厚度的总误差约为 7% . 在 $^{11}\text{B}(p, \gamma)$ 反应后测到的 BN 厚度为 500nm , 与反应前相比有明显变化, 这是由于该反应中束流轰击靶的时间长(约 7 个小时). 在计算 γ 产额时, BN 的厚度取为平均厚度 520nm , 相对误差为 8% .

由于某些未知的因素, 测得的 α 能谱不是一个平台, 其原因尚待进一步分析. 不过这

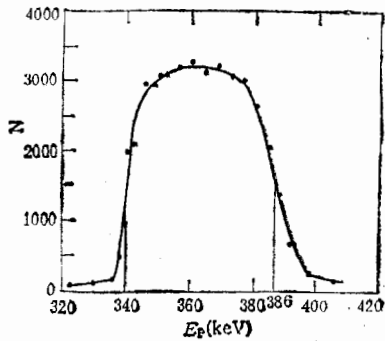


图 2 $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)$ 共振反应中 6.13MeV γ 光子数目 N 与入射质子能量的关系共振能量为 340keV .

· 为实验点, 实线为实验点的连线.

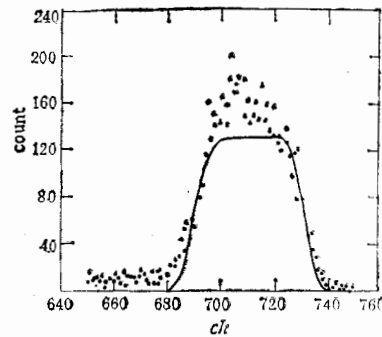


图 3 $^{11}\text{B}(p, \alpha)^8\text{Be}$ 反应的 α 能谱 $E_p = 2.67\text{MeV}$.

· 为实验点, 实线为计算机求出的模拟谱.

表 2 用质子背散射测量束流积分电荷量的测量结果

入射质子能量 (keV)	367		1361		457	1381
样品	LiF + Si	裸 Si	BN + Si	裸 Si	LiF + Si	裸 Si
测定的电荷量 (μC)	135 ± 2	44 ± 2	3710 ± 20	990 ± 2	580 ± 10	5.30 ± 0.02

表3 三个 γ 谱的拟合结果

参量 $E_\gamma(\text{MeV})$	全能峰				单逃逸峰	
	宽度 (道数)	高度 (计数)	能量分辨率 (%)	面积 (计数)	宽度 (道数)	与全能峰 高度之比
6.13	6.0 ± 0.1	1192 ± 44	$6.5(1 \pm 2\%)$	$18016(1 \pm 5\%)$	7.2 ± 0.8	47%
17.23	3.0 ± 0.4	131 ± 16	$3.7(1 \pm 14\%)$	$985(1 \pm 23\%)$	2.4 ± 0.3	98%
17.65	5.4 ± 0.6	333 ± 85	$4.3(1 \pm 10\%)$	$4506(1 \pm 34\%)$	4.3 ± 0.6	92%

对能谱的半高宽影响不大。

(3) 根据实验条件,用自编的程序算出了与3个 (p,γ) 反应相应的质子背散射谱以及质子在裸Si上的背散射谱,当选取了合适的 Q 值之后,计算谱与实验谱吻合得相当好(见图4),确定的束流积分电荷量误差小于2%。表2列出了有关的测量结果。

(4) 求 N_γ

① $^{19}\text{F}(p,\gamma)$ 反应: LiF 的密度为 $2.633\text{g}/\text{cm}^3$, 可求出: $N_\gamma = 81695$, 由(2)式可

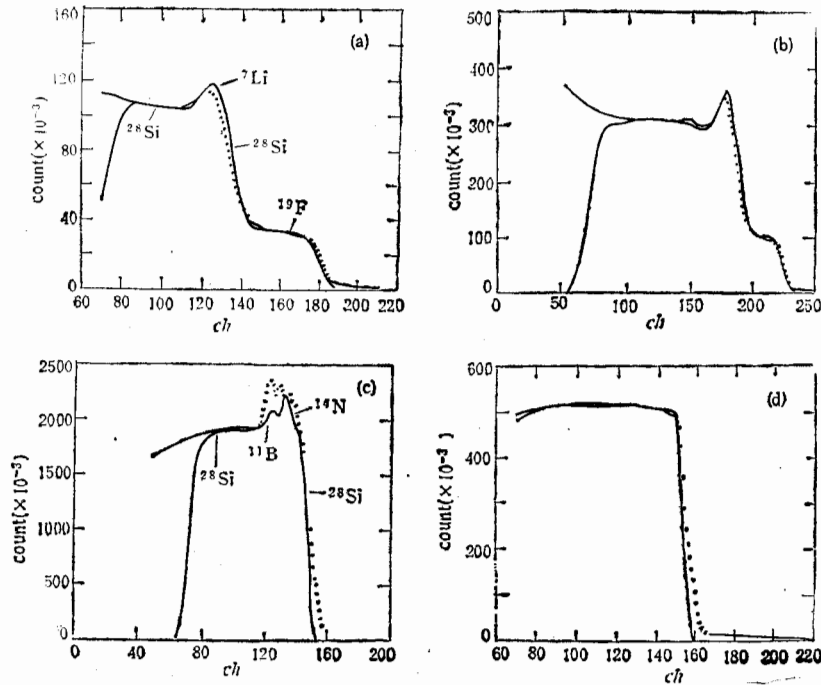


图4 质子的背散射谱

点线为实验谱,实线为计算机求出的模拟谱(由于机时有限没有计算到靶的很深处)。

在两个模拟背散射谱上标出了靶中的元素。

- (a) $p \rightarrow \text{LiF} + \text{Si}$, $E_p = 367\text{keV}$; (b) $p \rightarrow \text{LiF} + \text{Si}$, $E_p = 457\text{keV}$;
 (c) $p \rightarrow \text{BN} + \text{Si}$, $E_p = 1361\text{keV}$; (d) $p \rightarrow \text{Si}$, $E_p = 1381\text{keV}$ 。

知, N_r 的误差主要来自平均阻止本领 S 的误差(或靶厚 z), 其他量 (N_p, E_b 等)的误差相对较小。根据靶厚 z 的误差, N_r 的相对误差为 10%。

② $^{10}\text{B}(p, \gamma)$ 反应: BN 的密度为 2.30g/cm^3 , 可求出: $N_r = 10485$, 由(1)式可知, 其误差主要来自靶厚 z , 为 8%。

③ $^7\text{Li}(p, \gamma)$ 反应: $N_r = 64500(1 \pm 10\%)$, 与①相同, 相对误差为 10%。

(5) 拟合求出 3 个能量的 γ 能谱中全能峰的面积, 见表 3。部分结果示于图 5。两个高能量 γ 射线的计数率低, 拟合结果的误差较大。

(6) 由以上结果可求出探测器的全能峰本征探测效率如下:

$$E_\gamma = 6.13\text{MeV} \quad \varepsilon = 22\%(1 \pm 0.12);$$

$$E_\gamma = 17.23\text{MeV} \quad \varepsilon = 9\%(1 \pm 0.25);$$

$$E_\gamma = 17.65\text{MeV} \quad \varepsilon = 7\%(1 \pm 0.36).$$

文献[8]在 4.43MeV 以下能区测量了 $\phi 76 \times 76\text{mm}$ BGO 晶体的全能峰本征探测效率, 外推到 6.13MeV 处, 得到探测效率约为 25%, 与本文的结果在误差范围内相符。本文的实验中靶壁对 γ 射线的吸收对测量结果的影响相对于测量误差可以忽略。在十几 MeV 能区, 文献中测量的几乎都是“峰本征探测效率”, 即考虑包括单双逃逸峰在内的能谱的主峰^[9-11], 没有见到全能峰本征探测效率的实验结果。

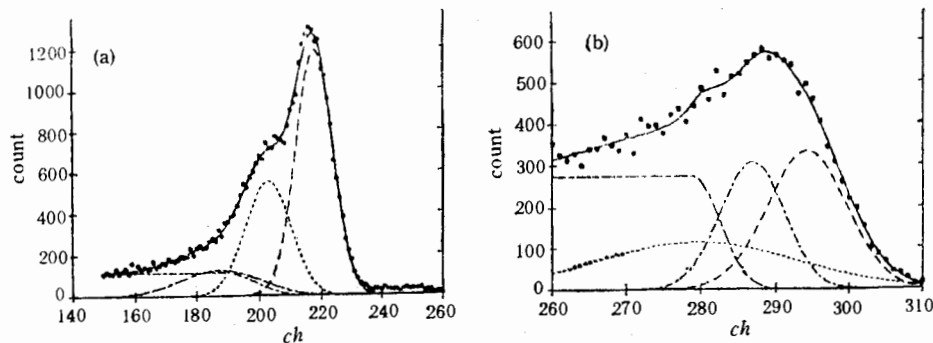


图 5 γ 能谱和拟合谱

(a) $E_\gamma = 6.13\text{MeV}$, (b) $E_\gamma = 17.65\text{MeV}$.

点线为实验谱, 实线为总拟合谱, 虚线谱为总拟合谱中包含的各个成份, 从右至左分别为全能峰, 单逃逸峰, 双逃逸峰和康普顿坪。

4 总 结

根据本文的测量结果, $\phi 76\text{mm} \times 100\text{mm}$ BGO 探测器对 17MeV 的 γ 射线的全能峰本征探测效率接近 10%, 在中高能 γ 的测量中, 这是相当可观的。

$2 \times 1.7\text{MV}$ 加速器实验室的沈定予、王雪梅、李硕中同志提供了高品质的束流, 在此谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] 叶沿林等, 高能物理与核物理, **16**(1992)297.
- [2] 刘昕等, 原子能科学技术, **27**(1993)32.
- [3] Chao, C. Y., *Phys. Rev.*, **79** (1950) 108.
- [4] F. Ajzenberg-Selove et al., *Nuclear Physics*, **A227** (1974), No. 1, 92.
- [5] F. Ajzenberg-Selove, *Nuclear Physics*, **A248** (1975), No. 1, 68.
- [6] E. Rauhala, *Nucl. Instr. and Meth.*, **B12** (1985) 447.
- [7] Lu Xiting et al, *Nucl. Instr. and Meth.*, **B43** (1989) 565.
- [8] C. E. Moss et al, *Nucl. Instr. and Meth.*, **221** (1984) 378.
- [9] N. R. Roberson et al, *Nucl. Instr. and Meth.*, **214** (1983) 541.
- [10] S. A. Wender et al, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A258** (1987) 225.
- [11] S. A. Wender et al, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-30** No. 2 (1983) 1539.

Intrinsic Efficiency of A $\phi 76\text{mm} \times 100\text{mm}$ BGO Scintillation Detector

Liu Xin Ye Yanlin Jiang Dongxing Lu Xiting Liu Hongtao
(Department of Technical Physics, Peking University, Peking 100871)

Received on March 4, 1993

Abstract

With several monoenergetic gamma-rays generated at low energy (p, γ) resonant nuclear reactions, the full-energy-peak intrinsic gamma-rays detecting efficiencies of a $\phi 76\text{mm} \times 100\text{mm}$ BGO scintillation detector were measured as below: 7%、9%、22% at 17.65、17.23 and 6.13MeV gamma-rays energy, respectively.

Key words full-energy-peak intrinsic detecting efficiency, non-linear fit, proton backscattering.