

# 基于蒙特卡罗方法的NaI探测器效率刻度及其测量韧致辐射实验

黄建微<sup>1)</sup> 王乃彦<sup>1)2)3)4)†</sup>

1)(北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875)

2)(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

3)(北京师范大学射线束与材料改性教育部重点实验室, 北京 100875)

4)(北京市辐射中心, 北京 100875)

(2014年5月22日收到; 2014年5月26日收到修改稿)

为了将NaI探测器更好地应用到韧致辐射谱测量工作中,对一套NaI探测器做了研究:利用 $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ 等同位素 $\gamma$ 源,结合蒙特卡罗方法,得到全能峰效率的模拟值与实验测量值符合得较好;利用蒙特卡罗N粒子编码模拟NaI对不同能量光子的响应,得到了该探测器对光子的能量响应,并将获得的能量响应用于韧致辐射的解谱工作,解谱结果与原始谱符合得很好;将该探测器应用到强流电子束打靶韧致辐射测量实验中,对韧致辐射在NaI探测器中的响应做了初步测量.

**关键词:** 效率刻度, 碘化钠谱仪, 蒙特卡罗N粒子编码, 能量响应矩阵

**PACS:** 07.85.Nc, 29.30.Kv, 29.40.Mc, 82.80.Ej

**DOI:** 10.7498/aps.63.180702

## 1 引言

高能电子束打靶产生韧致辐射X射线是辐照加速器未来发展的一个重要方向,在今后10—20年中将逐步取代放射源(如 $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 等)成为辐照加工的主要手段.此时电子的标称能量已经不能完全地反映X射线的全部性质<sup>[1]</sup>,所以对高能强流电子束打靶产生韧致辐射的测量以及解谱研究,一直是该研究领域内的一个重要课题<sup>[2]</sup>.NaI探测器在核物理实验领域内得到广泛应用,因此利用NaI探测器研究韧致辐射谱具有重要实际意义<sup>[3]</sup>.

对探测器测量得到的谱解卷积,可以得到入射谱<sup>[4]</sup>,探测效率是该过程中的一个非常重要的参数,因此对NaI探测器进行效率刻度是必要的<sup>[5]</sup>.对于一台NaI探测器来说,由于实验条件的复杂性,其探测效率要根据具体实验条件来确定.

本文将NaI探测器应用到韧致辐射谱测量实验中,根据实验要求,对一套NaI探测器做了效率刻度;并结合蒙特卡罗N粒子编码(Monte Carlo N particle transport code, MCNP)模拟光子在NaI晶体中的输运过程,得到该探测器对光子的探测效率和能量响应,并将该能量响应应用到能谱解卷积过程中,得到了较好的结果;将该探测器应用到6 MeV强流电子束打靶韧致辐射测量实验中,对韧致辐射做了初步的实验测量.本文可为NaI探测器在韧致辐射谱测量的应用提供借鉴.

## 2 刻度原理与方法

在产生韧致辐射的过程中,电子加速器的功率高,产生的X射线强度高,在测量韧致辐射时,探测器与靶的距离会比较远<sup>[6]</sup>,此时入射到探测器的光子束可以近似地认为是平行光束.而使用同位素

† 通讯作者. E-mail: wangny@bnu.edu.cn

源刻度探测器时, 由于源的强度有限, 如果引入准直器对其进行准直限束会导致NaI探测器的源响应计数大幅度降低, 所以在使用同位素源进行刻度时, 将NaI完全暴露在放射源下, 源与NaI探测器距离一般在50 cm左右或更近<sup>[3]</sup>.

根据探测效率的定义<sup>[7]</sup>, 本文选择将入射本征效率 $\epsilon_{in}$ 和入射本征峰效率 $\epsilon_{imp}$ 作为考察对象. 为了更好地利用MCNP得到NaI探测器对平行光束的探测效率和能量响应, 实验分两步: 第一步结合MCNP, 充分考虑NaI刻度时的环境因素, 模拟探测器在距点源50 cm处的响应谱, 将MCNP模拟得到的脉冲幅度分布谱与实验谱做比较分析, 观察两者之间的接近程度; 第二步, 模拟韧致辐射测量条件下的NaI对单能平行束光子的响应, 构建其对不同单能光子的能量响应, 并检验该能量响应的合理性.

MCNP模拟脉冲幅度分布谱, 是通过引入一个特殊参数高斯能量展宽 (Gaussian energy broadening, GEB) 来描述光子在NaI探测器中的脉冲幅度分布谱在全能峰位置的高斯展宽<sup>[8]</sup>. 模拟脉冲幅度分布谱的能量展宽通过高斯抽样来实现:

$$g(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{E-E_0}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2}, \quad (1)$$

其中,  $g(E)$ 为抽样概率,  $E$ 为展宽后的能量值,  $E_0$ 为展宽前的能量值,  $\sigma$ 为标准偏差. 能量分布的半高全宽 (full width at half maximum, FWHM) 与 $\sigma$ 的关系为

$$FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma. \quad (2)$$

在MCNP中, FWHM与能量的关系是通过GEB的三个参数 $x, y, z$ 来定义:

$$FWHM = x + y\sqrt{k + zk^2}, \quad (3)$$

其中 $k$ 为入射光子的能量, 单位是MeV;  $x, y, z$ 的获得方法为: 首先利用NaI探测器对不同能量的光子进行测量, 得到其脉冲幅度分布谱, 获得全能峰位置的FWHM; 然后将不同能量下测量得到的FWHM代入(3)式做最小二乘法拟合得到 $x, y, z$ 三个参数.

### 3 刻度过程与结果

根据得到的GEB参数, 利用MCNP模型计算NaI探测器对 $\gamma$ 射线的响应, 该模型的几何条件与

实验测量时的几何条件一致. 如图1所示: NaI探测器的尺寸为 $\phi 7.6 \text{ cm} \times L 7.6 \text{ cm}$ , 外边紧紧包裹着一层0.11 cm厚的铝层, 在铝层四周包围着5 cm厚的铅屏蔽; 放射源支架为塑料材质, 与NaI探测器共同位于铁架台的铝质导轨台上; 铝质导轨台厚度为1 cm, 铁架规格为 $2 \text{ m} \times 1.1 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$ , 四周为1 m厚的混凝土墙.

能量为 $k$ 的光子在NaI探测器中的脉冲幅度分布谱, 称为NaI探测器对能量为 $k$ 的光子的响应; NaI对不同能量光子的响应, 称为探测器的能量响应.

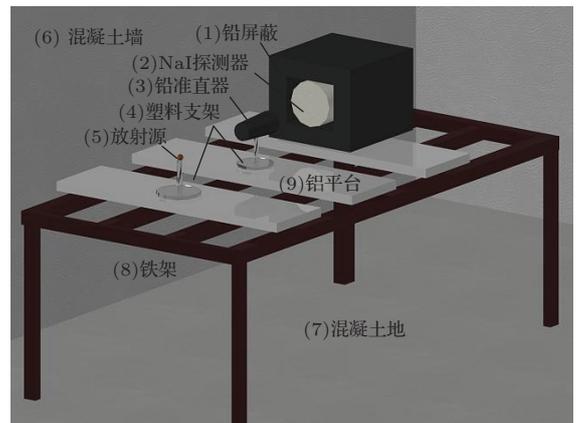


图1 测量NaI探测器对 $\gamma$ 源的响应时的几何条件示意图

### 3.1 高斯展宽

几种不同能量的 $\gamma$ 源在NaI探测器上的响应的FWHM, 由高斯拟合得到, 列于表1. 利用最小二乘法得到 $x, y, z$ 三个参数为

$$\begin{aligned} x &= 0.0253 \text{ MeV}; \\ y &= 0.0048 \text{ MeV}^{1/2}; \\ z &= 52.562 \text{ MeV}^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

### 3.2 对 $^{60}\text{Co}$ 与 $^{137}\text{Cs}$ 的响应

在上述参数下, 利用MCNP对 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{60}\text{Co}$ 源进行NaI探测响应模拟, 各分支比根据各同位素衰变纲图得到, 并将4种不同情况下的NaI探测脉冲幅度分布谱归一到单个入射光子, 如图2所示.

在全能峰位置, 模拟谱与实验谱符合得比较好; 在康普顿平台的低能端模拟谱与实验谱存在差异. 较之在未考虑环境影响的条件下模拟NaI响应谱(d, h), 根据实验条件构建的模型中的NaI响应

谱(c, g)与实验测量谱(a, b, e, f)的康普顿平台在低能端均存在不同程度的“畸变”<sup>[8]</sup>, 将b, f与a, e比较可知, 在NaI探头四周做5 cm的铅屏蔽, 可以明显地降低在低能端的“畸变”; 将根据实验条件构建的模型中的响应谱c, g和在5 cm铅屏蔽情况下的响应谱b, f进行比较, 可以看出, 利用MCNP模拟得到的响应谱在康普顿平台低能端要低于实验测量谱, 间接地表明蒙特卡罗方法并不能完全地描述实验环境的复杂性所引起的散射影响。

表1 不同能量的 $\gamma$ 射线在NaI探测器上的FWHM

核素	能量/MeV	FWHM/MeV	分辨率/%	相关度 $R^2$
$^{22}\text{Na-1}$	0.511	0.0411	8.045	0.99846
$^{137}\text{Cs}$	0.662	0.0475	7.182	0.99989
$^{60}\text{Co-1}$	1.173	0.0661	5.636	0.99239
$^{22}\text{Na-2}$	1.275	0.0692	5.430	0.99507
$^{60}\text{Co-2}$	1.332	0.0731	5.489	0.99554
$^{40}\text{K}$	1.461	0.0768	5.257	0.99945

对图2中的谱进行效率分析, 从入射本征效率 $\epsilon_{\text{in}}$ 、入射本征峰效率 $\epsilon_{\text{inp}}$ 和峰总比 $\eta$ 三个指标考察, 分别示于表2. 其中全能峰计数是在全能峰位置扣除掉康普顿平台成分之后, 对左右各取值到计数 $N = N_{\text{max}} \times 5\%$ 的能量区间内求和得到, 即入射本征峰效率 $\epsilon_{\text{inp}}$ ; 全谱计数则是对能量高于阈值的所有计数进行求和, 即入射本征效率 $\epsilon_{\text{in}}$ . 在全谱计

数中, 由于环境引起的各种各样的计数集中在NaI探测谱的低能部分中, 而这些计数并不是我们希望的. 为了更好地进行实验与模拟结果的比较, 在对NaI测量得到的脉冲幅度分布谱进行计数时, 取能量下阈 $E_t = 150$  keV, 相应地, 模拟谱的全谱计数, 也取到能量下阈 $E_t = 150$  keV. 从表2中可以看到, 实验得到的NaI对 $\gamma$ 射线的响应与模拟所得的全能峰效率是一致的.

表2 不同条件下的探测效率比较

	$^{137}\text{Cs-0.662}$	$^{60}\text{Co-1.173}$	$^{60}\text{Co-1.332}$
$\epsilon_{\text{in-1}}$	0.9977	0.8807	0.8807
$\epsilon_{\text{in-2}}$	0.9053	0.8495	0.8495
$\epsilon_{\text{in-3}}$	0.8319	0.7695	0.7695
$\epsilon_{\text{in-4}}$	0.7420	0.6993	0.6993
$\epsilon_{\text{inp-1}}$	0.4509	0.1293	0.1263
$\epsilon_{\text{inp-2}}$	0.4522	0.1305	0.1243
$\epsilon_{\text{inp-3}}$	0.4508	0.1356	0.1268
$\epsilon_{\text{inp-4}}$	0.4513	0.1347	0.1259
$\eta_1$	45.20%	14.68%	14.34%
$\eta_2$	49.95%	15.36%	14.63%
$\eta_3$	54.19%	17.62%	16.48%
$\eta_4$	60.82%	19.26%	18.00%

注: 1表示未屏蔽时NaI对 $\gamma$ 射线的探测谱; 2表示存在5 cm铅屏蔽时NaI对 $\gamma$ 射线的探测谱; 3表示根据实验条件构建模型时MCNP模拟的NaI对 $\gamma$ 射线的响应谱; 4未考虑NaI周围环境影响时MCNP模拟的NaI对 $\gamma$ 射线的响应谱.

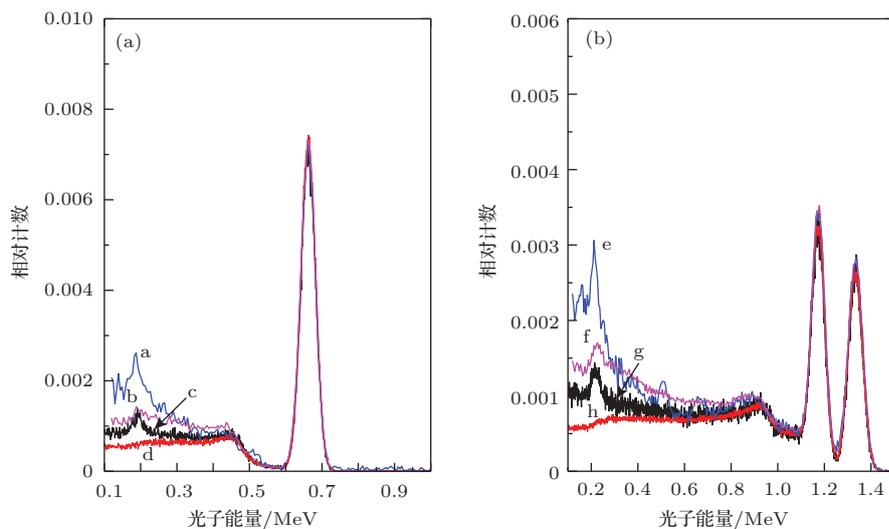


图2 (网刊彩色)两种不同核素的谱图 a, 在NaI未被屏蔽时的 $^{137}\text{Cs}$ 测量谱; b, 在NaI被5 cm铅屏蔽时的 $^{137}\text{Cs}$ 测量谱; c, 根据实验条件构建模型时MCNP模拟谱; d, 未考虑环境影响的MCNP模拟谱; e, 在NaI未被屏蔽时的 $^{60}\text{Co}$ 测量谱; f, 在NaI被5 cm铅屏蔽时的 $^{60}\text{Co}$ 测量谱; g, 根据实验条件构建模型时的MCNP模拟谱; h, 未考虑环境影响的MCNP模拟谱

结合图 2 与表 2, 比较  $\epsilon_{in-2}$  和  $\epsilon_{in-3}$  发现: 实验与模拟的环境条件大致相同, 差异主要集中在康普顿平台的低能端, 表明蒙特卡罗模拟并不能完全地描述实验环境的复杂性所引起的 NaI 探测器的计数. 基于上述讨论, 利用 NaI 探测器测量韧致辐射时, 在探测器的周围进行铅屏蔽是必要的. 为了更合理地模拟在实验条件下的 NaI 探测器对不同能量的 X 射线的响应, 在 MCNP 模拟 NaI 探测器的能量响应的模型中, 将周围的铅屏蔽考虑在内.

### 3.3 效率曲线

在上述讨论中, MCNP 模拟和实验测量得到了 NaI 探测器对  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{60}\text{Co}$  的  $\gamma$  射线的响应, 入射本征效率  $\epsilon_{in}$ . 在给定阈值  $E_t = 150 \text{ keV}$  的情况下, 利用 MCNP 模拟对不同能量的 X 射线的响应, 由于我们需要的 NaI 探测器对于 X 射线能量的响应是其在测量韧致辐射的实验条件下的响应, 所以 MCNP 模拟 NaI 对 X 射线能量响应的模型, 尤其是屏蔽条件, 要尽量地接近实验条件.

该模型中, NaI 探测器所处的“大环境”与图 1 中的环境类似. 不同之处在于四周的铅屏蔽以及对源的描述有差异: 在 NaI 探测器的四周是 10 cm 的铅屏蔽, 在面向 NaI 探测器的前表面的铅屏蔽的厚度为 20 cm, 中间开有  $\phi 10 \text{ cm}$  的准直孔, 在实际测量韧致辐射时, 电子打靶的位置与探测器之间的距离一般比较远, 在 5—7 m 之间甚至更远. 因此, 在 NaI 周围的铅屏蔽上的 1 cm 的准直孔相对于 5 m 远位置上的韧致辐射源的张角为  $\pm 1 \text{ mrad}$ , 约为  $0.0573^\circ$ , 此时可以近似地将入射到 NaI 探测器中的韧致辐射光束看作平行束, 在 MCNP 模型中, 将射线源  $S'$  放在 NaI 晶体的轴线上, 距离 NaI 的前表面距离  $D = 50 \text{ cm}$ ; 为了让模拟源尽可能地与测量韧致辐射时的情况一致, 以及考虑到计算机的运算能力, 所发射的射线设定为平行光束, 与 NaI 晶体轴线相重合, 如图 3 所示.

MCNP 模拟得到的入射本征效率  $\epsilon_{in}$  随光子的能量的变化曲线见图 4, 其中  $\epsilon_t$  和  $\epsilon_e$  分别是根据光子在 NaI 的线性衰减系数  $\mu_t$  和能量衰减系数  $\mu_e$ <sup>[9]</sup> 计算得到的结果.

由于 NaI 探测器的探测阈值  $E_t = 150 \text{ keV}$  的影响, 在能量较低时,  $\epsilon_{in}$  与计算得到的结果差别较大, 随着能量的升高,  $\epsilon_{in}$  与  $\epsilon_t$  的差异逐渐缩小, 并

且趋向于一致, 如果用拟合公式来拟合  $\epsilon_{in}$ , 可以得:

$$\epsilon_{in} = 0.59548 + 0.27061 e^{-\frac{k}{1.11456}}$$

$$k \in (0.5 \text{ MeV}, 6 \text{ MeV}), \quad (5)$$

其中  $k$  表示入射光子能量.

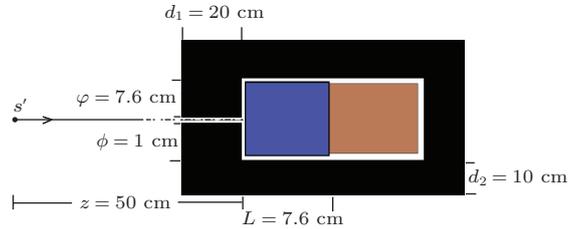


图 3 模拟 NaI 探测器对 X 射线能量响应时的几何模型

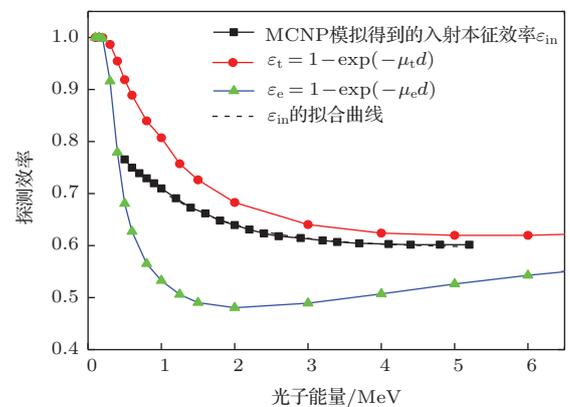


图 4 MCNP 模拟 NaI 探测器的探测效率曲线

### 3.4 能量响应

NaI 探测器对入射能量为  $k$  的光子的响应, 可以用下式表示:

$$P(\kappa) d\kappa = K(k, \kappa) N(k) \epsilon_{in}(k) d\kappa, \quad (6)$$

其中,  $P(\kappa)$  表示在 NaI 探测器中能量为  $\kappa$  的计数,  $N(k)$  表示能量为  $k$  的入射光子数目,  $K(k, \kappa)$  表示能量为  $k$  的单位份额的光子在 NaI 探测器中能量为  $\kappa$ 、道宽为  $(\kappa - \frac{1}{2} d\kappa, \kappa + \frac{1}{2} d\kappa)$  的范围内所产生的计数,  $\epsilon_{in}(k)$  表示 NaI 探测器对能量为  $k$  的光子的入射本征效率. 若入射到 NaI 探测器的光子具有一定的能量分布,  $N(k) dk$  表示能量为  $k$  的份额, 则在 NaI 探测器上得到的脉冲幅度分布谱为

$$P(\kappa) d\kappa = d\kappa \int_0^{k_{max}} K(k, \kappa) N(k) \epsilon_{in} dk, \quad (7)$$

其中  $k_{max}$  表示光子能量分布的最高能量, 将其适当地离散化之后, 可写成如下形式:

$$\bar{P}_i = M_{ij} \bar{N}_j, \quad (8)$$

其中

$$\bar{P}_i = \int_{\kappa_i - \frac{1}{2}\Delta\kappa_i}^{\kappa_i + \frac{1}{2}\Delta\kappa_i} P(\kappa) d\kappa,$$

$$\bar{N}_j = \int_{\kappa_i - \frac{1}{2}\Delta\kappa_i}^{\kappa_i + \frac{1}{2}\Delta\kappa_i} N(\kappa) dk,$$

$$M_{ij} = K(k_j, \kappa_i) \varepsilon_{in}(k_j) \Delta\kappa_i.$$

$M_{ij}$  的物理意义在于: 表示在能量为  $k_j$ , 能量区间在

$$\left(k_j - \frac{1}{2}\Delta k_j, k_j + \frac{1}{2}\Delta k_j\right),$$

单位份额的光子入射到 NaI 探测器中, 在能量为  $\kappa_i$ 、道宽为

$$\left(\kappa_i - \frac{1}{2}\Delta\kappa_i, \kappa_i + \frac{1}{2}\Delta\kappa_i\right)$$

的道址上产生的响应. 这样, (7) 式的解卷积问题就变成了一个解矩阵的问题. 利用 MCNP 构建得到的能量响应  $M_{ij}$ , 结合 NaI 探测器对韧致辐射的测量谱  $P(\kappa)$ , 选用恰当的迭代方法, 可以得到韧致辐射谱  $N(k)$ , 实现对韧致辐射谱的重建.

MCNP 模拟韧致辐射谱  $N_m$  入射 NaI 探测器的响应谱为  $P_m$ ; 将构建的能量响应  $M_{ij}$  作用于  $P_m$  的解谱中, 应用共轭斜量法<sup>[10]</sup> 解得其入射谱为  $N'_m$ , 如图 5 所示. 在很大程度上  $N'_m$  与  $N_m$  十分接近, 这说明两点问题: 1) 所构建的 NaI 探测器对光子的能量响应矩阵是正确的, 在 MCNP 内是自洽的; 2) 共轭斜量法在解韧致辐射谱中的应用是可行的. 两者结合解谱的结果与入射谱在一定程度上是非常相似的.

### 3.5 NaI 测量韧致辐射

将刻度好的 NaI 探测器应用到韧致辐射测量中. 韧致辐射的实验测量是在中国原子能科学研究院核技术所进行的, 实验加速器是 DZ-12/4 型多能量电子辐照加速器. 所提供的加速器参数如下: 能量为 6/8 MeV, 脉冲电流为 50 mA, 脉冲宽度为 2  $\mu$ s, 重复频率为 5 Hz, 钨靶厚度为 1.5 mm. 实验中使用隔离变压器对弱电与强电进行隔离.

图 6 是实验布局示意图, 电子束经过钛窗从加速器出射, 经过一个厚度为 5.5 cm 准直孔径为 1.2 mm 的石墨准直器之后打到一个厚度为 1.5 mm 的钨靶, 产生韧致辐射; NaI 探测器位于远处的位

置上, 周围被铅屏蔽, 正对于钨靶的屏蔽铅上有一个直径为 1 cm 的准直孔, 与图 3 中讨论的情况一致. 图 6 中的石墨的作用是阻止大部分的电子的同时尽量减少韧致辐射的产生, 铅屏蔽的作用是尽量屏蔽环境散射.

如图 7 所示, 为了考察 NaI 探测器的铅屏蔽效果, 将 NaI 放在不同的位置上测量韧致辐射. 同时利用示波器在输出端观察输出波形, 如图 8 所示. 通过比较可以明显地看出: 1) 在单次触发之后很短的时间内, 多个脉冲堆积在一起造成了阳极输出讯号的畸变, 这种情况随着 NaI 探测器与韧致辐射源的距离的增加会得到改善; 2) 20 cm 厚的铅屏蔽并不能完全屏蔽环境散射 X 射线对探测器的影响.

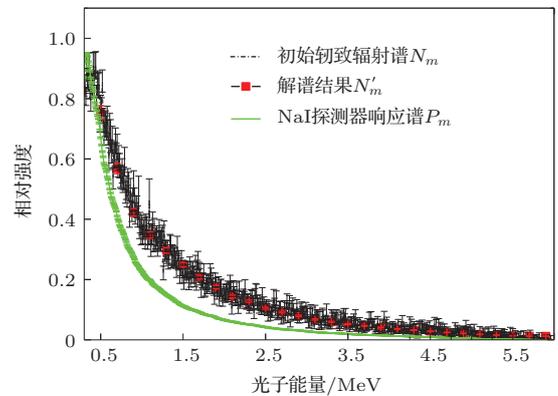


图 5 利用能量响应  $M_{ij}$  解得的韧致辐射谱结果

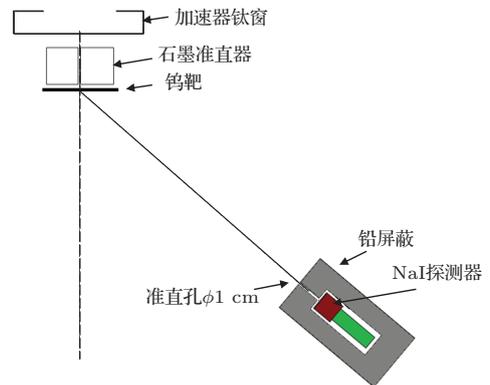


图 6 NaI 测量韧致辐射实验布局示意图

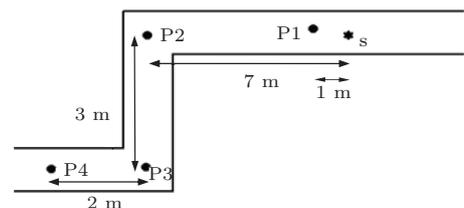


图 7 在不同位置放置 NaI 探测器测量示意图, 其中 s 表示电子加速器打靶位置

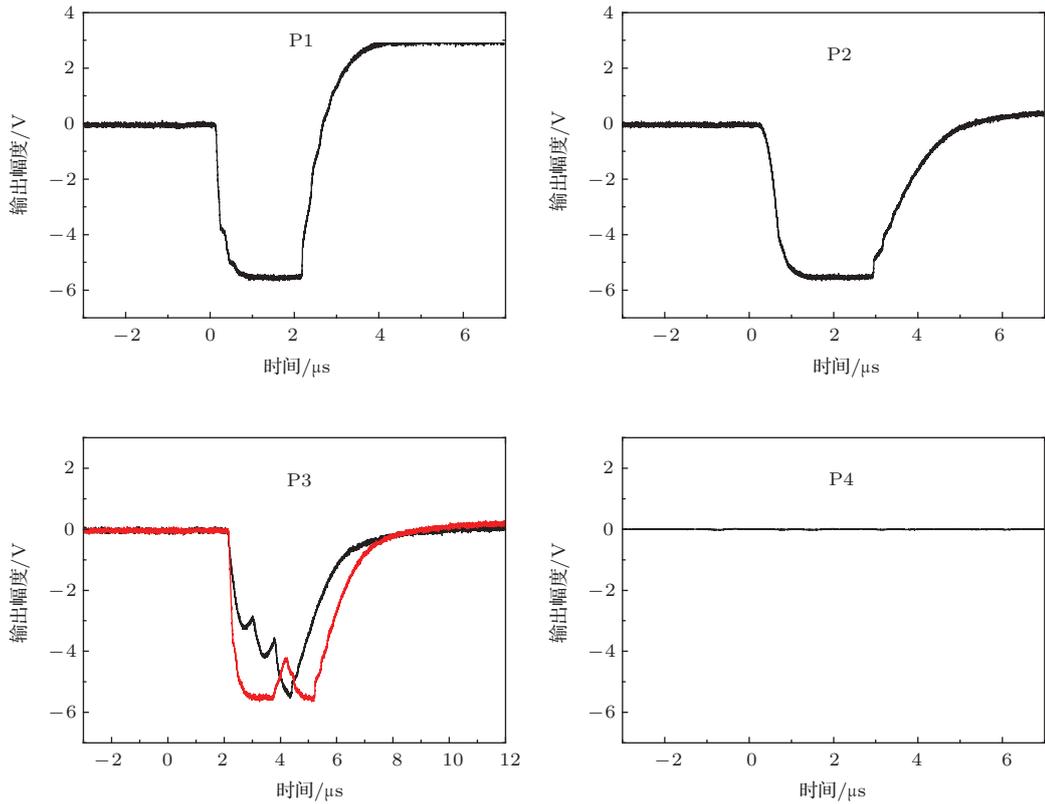


图8 不同位置上NaI的输出脉冲波形

## 4 结 论

本文基于蒙特卡罗方法围绕一套NaI探测器开展工作, 得到如下结论:

1) 结合实验, 得到了MCNP模拟NaI探测器测量 $\gamma$ 射线脉冲幅度分布谱的高斯展宽参数GEB, 并利用MCNP模拟得到了 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{60}\text{Co}$ 的NaI响应谱, 模拟响应谱与实验测量谱在全能峰位置上符合得较好;

2) 利用MCNP模拟了NaI探测器对于不同能量的 $\gamma$ 射线的入射本征效率, 并得到了在此模拟条件下能量阈值 $E_t = 150 \text{ keV}$ 时, NaI探测器的入射本征效率随能量的变化曲线;

3) 构建了NaI探测谱仪对光子的能量响应 $M_{ij}$ , 并且利用该能量响应结合共轭斜量法解得入射谱 $N'_m$ , 与初始韧致辐射谱 $N_m$ 能够较好地符合, 表明该响应可以应用于韧致辐射谱的解谱工作;

4) 使用NaI探测器对6 MeV电子打靶韧致辐射X射线进行了初步的测量.

十分感谢吴金杰博士在实验平台、放射源方面给予的

帮助; 感谢中国原子能科学研究院王国保所长、曾自强主任、吴青峰博士为实验提供加速器时机; 感谢张耀峰博士在实验设计与MCNP方面积极的、有益的讨论; 感谢胡涛、李耀刚等在实验环节中给予的帮助.

## 参考文献

- [1] Xu H B, Peng X K, Chen C B 2010 *Chin. Phys. B* **19** 062901
- [2] Wei X H, Li Q F, Yan H Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2313 (in Chinese) [魏熙晔, 李泉凤, 严慧勇 2009 物理学报 **58** 2313]
- [3] Byun S H, Prestwich W V, Chin K, McNeill F E, Chettle D R 2004 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **535** 674
- [4] Lamoureux M, Charles P 2006 *Radiat. Phys. Chem.* **75** 1220
- [5] Ye Z Y, Li Y B, Ding S Y, Bao Z Y, Yang X Y, Rong C F, Ding X X, Zheng J M 1994 *Chin. Phys. Lett.* **11** 12
- [6] Starfelt N, Koch H W 1956 *Phys. Rev.* **102** 1598
- [7] Wu Z H, Zhao G Q, Shen N X 1997 *Nuclear Physics Experiments* (Beijing: Atomic Energy Press) p266 (in Chinese) [吴治华, 赵国庆, 沈能学 1997 原子核物理实验方法 (北京: 原子能出版社) 第266页]
- [8] Miri H H, Panjeh H, Vejdani-Noghreiyani A 2007 *Appl. Radiat. Isot.* **65** 918

- [9] Templin L J 1963 *Reactor Physics Constants* ANL-5800 pp652–657  
[10] Lin C S 2005 *Numerical Methods* (Vol. 2) (Beijing: Sci-

ence Press) pp47–59 (in Chinese) [林成森 2005 数值计算方法 (第二册) (北京: 科学出版社) 第 47—59 页]

# Efficiency calibration for a NaI scintillation detector based on Monte-Carlo process and preliminary measurements of bremsstrahlung

Huang Jian-Wei<sup>1)</sup> Wang Nai-Yan<sup>1)2)3)4)†</sup>

1) (*College of Nuclear Science and Technology Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

2) (*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

3) (*The Key Laboratory of Beam Technology and Material Modification of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

4) (*Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China*)

( Received 22 May 2014; revised manuscript received 26 May 2014 )

## Abstract

In order to better apply the NaI scintillation spectrometer to bremsstrahlung measurements, the energy response function of a NaI detector spectrometer system is studied by using <sup>137</sup>Cs and <sup>60</sup>Co sources based on Monte Carlo N particle transport code (MCNP) process. Simulated and measured almighty peak efficiency are in good agreement. An energy response matrix (ERM) is obtained by simulating photons with a certain energy incident on the NaI crystal in MCNP process, through deconvoluting the detected spectrum of NaI using the ERM, and the results of the deconvolution accord well with those from the original spectrum. Furthermore, the NaI detector is used to preliminarily detect its response to bremsstrahlung generated by high intensity electrons bombarding a target of 1.5 mm thickness.

**Keywords:** efficiency calibration, sodium iodide spectrometer, Monte Carlo N particle transport code, energy response matrix

**PACS:** 07.85.Nc, 29.30.Kv, 29.40.Mc, 82.80.Ej

**DOI:** 10.7498/aps.63.180702

† Corresponding author. E-mail: wangny@bnu.edu.cn