

文章编号:1673-0062(2011)01-0010-04

塑料-NaI(Tl)复合探测器探测效率虚拟刻度方法研究

李湘栋,龚学余*

(南华大学核科学技术学院,湖南衡阳 421001)

摘要:为了探讨塑料-NaI(Tl)复合探测器对点状 γ 射线源的探测效率与晶体尺寸之间的关系,利用蒙特卡罗方法及相关软件,在VC++开发平台下编制了可以自定义塑料-NaI(Tl)复合晶体尺寸的软件,实现对不同能量的 γ 射线的探测效率的计算.根据计算得到的数据矩阵拟合出不同尺寸探测器对点源的效率函数,并确定出函数的参数.

关键词:塑料-NaI(Tl)晶体;探测效率;蒙特卡罗方法

中图分类号:TL816 **文献标识码:**B

Plastic-NaI (Tl) Crystal Composite Virtual Calibration Method of Detection Efficiency

LI Xiang-dong, GONG Xue-yu*

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to study the relationship between the counting efficiency and crystal size, based on Monte Carlo and related software, in the development platform of the VC++, this paper prepared to customize the plastic-NaI (Tl) crystal size of the software complex, for implementation of different energy γ -ray detection efficiency of the calculation. According to calculation of the data matrix, it fit a different size detector efficiency function of point source, and determined the parameters of the function.

key words: plastic-NaI(Tl) crystal; detection efficiency; Monte Carlo

谱仪探测器的探测效率是表征 γ 射线照射量率与探测器输出脉冲计数之间关系的一个重要物理量.通常对探测器探测效率的刻度是用已知 γ 射线能量和照射量率的标准放射源来实现的.但在实际的实验中,大量标准源的制作及使用耗费

颇多,并且各种能量的标准源很难收集全,因此一些其他的方法像蒙特卡罗和半经验方法以及数值解析方法等被用在探测效率的刻度上.使用各种方法针对固定探测器,对不同空间位置的点源实现对NaI探测器效率进行刻度,前人已经做过很

收稿日期:2010-11-11

作者简介:李湘栋(1981-),男,湖南永州人,南华大学核科学技术学院硕士研究生.主要研究方向:核辐射探测技术.*通讯作者.

多^[14]. 在此应用蒙特卡罗方法,在 VC++ 开发平台下编制了可以自定义塑料-NaI(Tl)复合晶体尺寸的软件,实现对不同能量 γ 射线探测效率的计算. 根据计算得到的数据矩阵拟合出不同体积探测器对点源的效率函数,并确定出函数的参数. 以期该方法能对实验工作起到理论指导作用.

1 计算方法及模型

1.1 蒙特卡罗方法及软件简介

蒙特卡罗方法又称随机抽样技巧法,是以概率统计理论为基础,结合计算机模拟实验的一种算法,能够逼真地描述事物的特点以及物理实验过程^[5].

用到的蒙特卡罗计算程序为 MCNP4C (A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4C). MCNP4C 是一个多功能的蒙特卡罗计算程序,可处理复杂场所三维几何结构的中子与光子耦合运输问题. 它具有较强的通用性,在源描述、空间物质的几何分布上具有很大的灵活性,可处理任意三维几何结构问题,适用面宽,现已用于射线无损检测系统、辐射屏蔽、核仪器设计和保健物理等许多问题上. 它可以很好地用于跟踪计算、决定辐射剂量、物理实验模拟、辐射屏蔽防护上. MCNP4C 程序要求相对统计误差不大于 10%, 这时计算结果才是可以接受的.

1.2 塑料-NaI(Tl)复合晶体模型

单晶谱仪测到的能谱比较复杂,特别是在高能区的 γ 射线在对应仪器谱上都有好几个峰(如全能峰,逃逸峰)和康普顿坪. 现在发展探头具有两个或三个晶体并使用符合或反符合技术,使得对于每一能量只产生一个峰或尽量增强某个峰而同时抑制谱的其他部分. 这样所测到的能谱就变得简单,特别适用于多种核素的 γ 能谱分析. 塑料-NaI(Tl)复合探测器就是一种反符合探测器,由

于塑料闪烁体效率高所以位于外层,NaI(Tl)相对分辨率高位于内层^[6].

本文设计并应用的探测器模型描述如下:复合探测器整体结构为套筒状,其中 NaI(Tl)晶体位于内核部位,呈实心圆柱状,尺寸为 $\Phi 22.9 \text{ cm} \times 10.2 \text{ cm}$;外面包裹塑料闪烁体,为空心圆筒状,其尺寸随需要而改变,具体如图 1 所示.

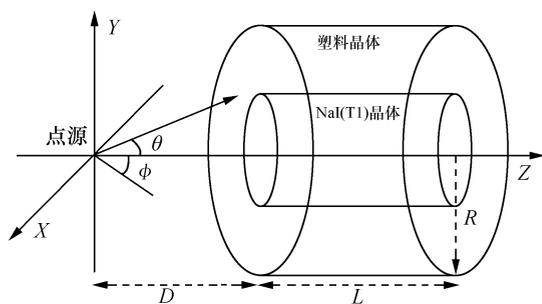


图1 研究模型的几何形状示意图

Fig.1 Schematic of model geometry

1.3 计算参数

如图 1 所示,首先建立直角坐标系,其次放置 γ 点源到原点处,设其能量为 0.662 MeV;再次放置探测器使其中心轴与 X 轴重合,一侧顶端距 γ 点源所在的原点为 11 cm. 通过改变塑料闪烁晶体的尺寸,其具体值如表 1 所示. 结合编制的计算软件,就可以得到不同计算模型下探测器的探测效率的分布规律情况.

2 计算软件的编制

2.1 软件功能组成简介

以上述方法及模型为基础,在 VC++ 开发平台下编写了计算探测效率的软件^[7],其功能架构如图 2 所示.

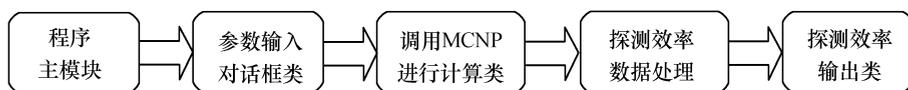


图2 模拟软件模块示意图

Fig.2 Schematic diagram of simulation software modules

由于在软件里面集成了 MCNP4C,这里给出必要的辅助参数,在模拟计算中光子与物质相互作用过程考虑了光电效应、康普顿散射和电子对

的生成,电子的输运截止能量取为 1 keV,模拟计算的光子总数为 10^7 ,采用脉冲能量分布计数卡 (f8) 记录某种能量光子的探测效率^[8-9].

2.2 软件界面及使用简介

软件参数输入界面如图3(a)所示,从界面上输入不同的参数后通过执行计算如图3(b),即可以得到当前模型所对应的探测效率值,本文中模拟计算得到了不同尺寸塑料-NaI(Tl)探测晶体的探测效率值。



图3 程序参数输入及计算选择菜单界面图
Fig.3 Procedure parameters input and computation select menu interface diagram

3 计算结果及讨论

如表1所示,通过改变改变塑料闪烁晶体的尺寸,调用计算软件,得到了有关探测器尺寸与探测器效率之间的关系列表。

在表1基础上,使用TableCurve 3D统计学处理软件对探测效率数据进行数值拟合,确定了该条件下的源探测效率函数 $\varepsilon(E,R,L,a)$ 如下:

$$\varepsilon(E,R,L,a_i) = \frac{a_1 + a_2 \ln L + a_3 (\ln L)^2 + a_4 (\ln L)^3 + a_5 \ln R}{1 + a_6 \ln L + a_7 \ln R} \quad (1)$$

上式中 R 为塑料晶体的半径; L 为探测晶体的长度; $a_i (i = 1, 2, \dots, 7)$ 为待定参数,可以通过具体实验值拟合得到。

其拟合结果的图形如图4所示,由此得到了源探测效率函数 $\varepsilon(E,R,L,a)$ 中待定参数的值如表2,以及数值拟合公式的标准差、参数相关系数及 F 统计量值见表3。

表1 不同尺寸塑料晶体对距离11 cm处能量为0.662 MeV点源探测效率计算值
Table 1 Different sizes of plastic crystals to distance 0.662 MeV 11 cm place energy for point source detection efficiency calculated value

塑料晶体的长度/cm	塑料晶体的半径/cm									
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
10.5	0.035 539 5	0.038 141	0.040 751 4	0.043 903 3	0.046 679 2	0.049 314 5	0.052 603 9	0.055 160 6	0.057 993 9	0.060 880 3
11	0.035 544 8	0.038 147 4	0.040 766	0.043 948 6	0.046 765 5	0.049 468	0.052 719 8	0.055 287 7	0.058 155 7	0.061 120 7
12	0.033 584	0.038 217 5	0.040 837 6	0.044 116 3	0.047 091 8	0.049 745 9	0.053 064 9	0.055 655 9	0.058 527 4	0.061 656 2
13	0.035 609 8	0.038 331 4	0.040 956 3	0.044 34	0.047 425 9	0.050 156 1	0.053 468 8	0.055 991 8	0.059 003 8	0.062 254 1
14	0.035 648 8	0.038 434 9	0.041 060 3	0.044 463 9	0.047 615 5	0.050 414 1	0.053 748 7	0.056 311 5	0.059 401 8	0.062 745 2
15	0.035 657 4	0.038 444 9	0.041 129 9	0.044 586	0.047 753 9	0.050 601 2	0.053 999	0.056 623 1	0.059 880 2	0.063 283 9
16	0.035 657 4	0.038 454 9	0.041 135 8	0.044 611 7	0.047 846 1	0.050 724 5	0.054 2281	0.057 034 9	0.060 342 5	0.063 827 7
17	0.035 682 1	0.038 534 6	0.041 219 7	0.044 770 7	0.048 085 5	0.051 007 1	0.054 595 5	0.057 457 7	0.060 760 5	0.064 293 2
18	0.035 725 3	0.038 587 3	0.041 301 4	0.044 905 6	0.048 287 3	0.051 226 1	0.054 860 5	0.057 730 5	0.061 061 9	0.064 611 5
19	0.035 729 6	0.038 679 8	0.041 393 9	0.045 050 6	0.048 486	0.051 541 3	0.055 259 5	0.058 187 3	0.061 529 4	0.065 093 9
20	0.035 743 5	0.038 695 5	0.041 409 7	0.045 066 4	0.048 548 4	0.051 673	0.055 501 5	0.058 460 9	0.061 86	0.065 428 8
21	0.035 756 2	0.038 703 8	0.041 468 8	0.045 150 6	0.048 668 4	0.051 799 3	0.055 696 9	0.058 659 7	0.062 047 8	0.065 684 9
22	0.035 753 1	0.038 711 2	0.041 492 4	0.045 209 2	0.048 753 4	0.051 890 3	0.055 819 4	0.058 820 7	0.062 235 2	0.065 892

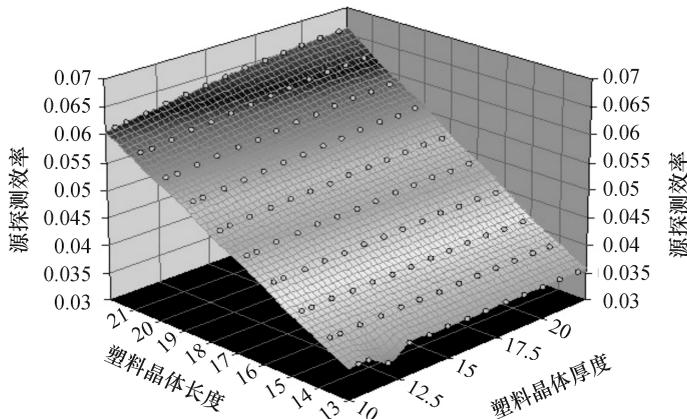


图4 不同尺寸探测晶体对距离11 cm处能量为0.662 MeV的点源探测效率计算结果拟合图
Fig.4 Different size detection of distance in energy crystal 11 cm MeV point for 0.662 detection efficiency calculation results fitting figure

表 2 公式中的待定参数值

Table 2 Undetermined parameter values of formulas

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
0.026 658 612	-0.032 996 648	0.011 507 995	0.001 426 077 4	0.007 553 364 6	-0.064 349 801	-0.181 685 85

表 3 拟合公式的标准差、参数相关系数及 F 统计量值Table 3 Fitting formulae of standard deviation, parameters related coefficient and F statistics quantity

标准差	相关系数	F 统计量
0.000 266 351 17	0.999 131 73	24 944. 352

分析表 1 中的数据可以发现,探测晶体长度为 17 cm、半径为 21 cm 时,源探测效率为 0.060 760 5,而探测晶体长度为 19 cm、半径为 20 cm 时,探测效率为 0.058 187 3,可以分析这两种情况下晶体的体积是前者小于后者,但探测效率反而是前者大于后者。可见并不是探测器体积越大则探测效率越高,在进行探测器探头设计时,如何根据实际情况如何选择探测晶体的尺寸规格及塑料晶体与 NaI(Tl)晶体的比例才能达到最好的探测效率并节约成本是一个值得深入研究的课题。

4 结 论

采用塑料-NaI(Tl)探测器进行放射性测量,可以针对不同的测量条件如源的形状、探测器尺寸、测量环境等,对标准样品进行测量以得到塑料-NaI(Tl)探测器在此条件下的效率。这种实验方法能够提供较精确的结果,但由于 γ 射线源的可使用能量范围有限,对于 2 MeV 以上能量范围的效率,要得到其准确的实验测量值比较困难。另一方面,由于受到实验条件的限制,有时可能没有令人满意的一系列用于刻度的标准 γ 射线源,很多能量点无法用实验的方法刻度。此时,用模拟计算的方法来得到效率就显得非常重要。采用 MC-NP4C 程序计算塑料-NaI(Tl)探测器不同尺寸对点源的探测效率,计算过程简单快捷,与实验值符合较好。该方法可确定塑料-NaI(Tl)探测器对点源的探测效率函数及其参数,在复杂条件下可用

于指导实验研究,降低费用,但尚不能满足某些高精度活度测量的要求。蒙特卡罗模拟计算的误差主要来源于数学物理模型的简化、所采用的介质含量值和各种作用截面数据的误差、模拟计算中抽样粒子数的统计误差等。

确定了塑料-NaI(Tl)探测器不同尺寸对点源的探测效率函数后,可以计算出任意尺寸的塑料-NaI(Tl)探测器的探测效率,从而可以给出塑料-NaI(Tl) γ 探测器的效率矩阵。

参考文献:

- [1] Yalcin S. Calculation of total counting efficiency of a NaI(Tl) detector by hybrid Monte-Carlo method for point and disk sources[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2007(65):1179-1186.
- [2] Mahmoud I. Abbas, calibration of cylindrical detectors using a simplified theoretical approach[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2006(64):1057-1064.
- [3] Jehouani A. Study of the NaI(Tl) efficiency by Monte Carlo method[J]. Applied Radiation and I-sotopes, 2000(53):887-891.
- [4] 张富利,曲德成,杨国山. 应用蒙特卡罗方法确定 NaI 探测器的源效率函数及其参数[J]. 核技术, 2007, 30(3):231-235.
- [5] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京:原子能出版社, 2006.
- [6] 凌球,郭兰英. 核辐射探测[M]. 北京:原子能出版社, 2002.
- [7] 孙鑫,余安萍. VC++ 深入详解[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [8] 向东,郭兰英. γ 能谱的蒙特卡罗模拟[J]. 数理医学杂志, 2006, 19(3):229-231.
- [9] 吴祥余,朱迪,葛良全,等. Monte Carlo 方法对不同尺寸 NaI(Tl)晶体探测效率的刻度[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(1):207-210.