

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.01.019

基于 MCNP 和能谱法对 γ 射线吸收实验的改进

张磊, 白立新

(四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

摘要: 针对一般的测量物质线性吸收系数实验的缺点, 文章利用 Monte Carlo N Particle Transport Code(MCNP) 和全能峰面积法模拟计算了不同实验条件下物质 γ 射线吸收的线性吸收系数, 计算与公认值的偏差. 通过使偏差在较小的合理范围内, 并与其它方法对比, 找出了合适的实验条件, 使测量装置易于调试, 可得射线能量信息, 而且比计数法的准确度高, 探测效率较高, 以此改进并简化了实验.

关键词: MCNP 程序; 能谱法; 线性吸收系数

中图分类号: O571.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)01-0104-05

The improvement of the experiment about the absorption of gamma ray based on the MCNP and the energy spectrum method

ZHANG Lei, BAI Li-Xin

(College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: In view of the defect of the traditional measurements of materials linear absorption coefficients, in this work the linear absorption coefficients of gamma ray in different experimental conditions are simulated and calculated using the Monte Carlo N Particle Transport Code (MCNP) and the method of full energy peak area, and the deviations of the coefficients from the recognized values are also calculated. The appropriate experimental condition is obtained by reducing the deviation to a reasonable scope and contrasting with other methods. As a result, the approved measuring equipment which is easy to adjust is able to obtain the information about radiation energy. It offers a better accuracy and higher detection efficiency compared with the counting method.

Keywords: MCNP program; γ -ray energy spectrum analysis; Linear absorption coefficient

1 引言

在核物理及核技术的各实验中, γ 射线的吸收实验具有重要的地位. 对于物质线性吸收系数的测量在材料科学^[1]、工业应用、辐射防护^[2] 和基础研究^[3] 中也具有十分重要的意义.

在以往的实验方法中, 为保证 γ 射线束的窄束条件(也称好的几何条件), 需要对射线进行准直,

这不可避免地要用到大量的铅, 实验中难以用铅块堆积成良好的射线准直器, 而且准直器需要对准放射源和探头中心, 调试很不方便. 传统上本实验的电子学装置要用单道脉冲幅度分析器或计数器, 阈值的设定一般采取经验值, 缺乏理论依据; 也无法获知射线能量的信息. 本文所述方法对此实验进行了改进, 取消铅准直, 结合全能峰计数法, 使得所求出的线性吸收系数误差不超过 5%.

收稿日期: 2017-05-18

作者简介: 张磊(1987-), 男, 山东日照人, 硕士生, 主要研究方向为核技术及应用. E-mail: rizhaozhanglei@126.com

通讯作者: 白立新. E-mail: blx.scu@163.com

2 原理及实验方法

2.1 γ 射线吸收原理^[4,5]

γ 射线与物质相互作用的主要方式包括光电效应、康普顿散射、电子对效应(γ 射线能量大于 1.02 MeV)。当 γ 光子穿过物质时, 与吸收物质的原子一旦发生上述反应之一, 原来能量为 $h\nu$ 的光子就消失或被散射掉, 从入射的 γ 射线束中移除。没有与物质发生相互作用的光子, 穿过吸收层, 其能量保持不变。 γ 射线穿过吸收片时, 要发生上述三种效应, 因而 γ 射线的强度将减弱, 此即为 γ 射线的吸收。 γ 射线穿过物质后, 其强度的减弱规律为:

$$I = I_0 e^{-\mu t}$$

μ 为物质的线性吸收系数 (cm^{-1}), t 为穿过物质的厚度 (cm), I_0 和 I 分别为穿过物质前后的 γ 射线强度 (一定时间内的 γ 光子数目)。

2.2 不同实验方法及存在问题

对宽束射线, 上述公式不再成立, 因此上述减弱规律成立的前提是入射 γ 射线为单能窄束射线, 即前文所述需要实验装置具有好的几何条件。为保证射线窄束条件, 一般采取准直, 使得射线束流极细, 但这样会使得计数率过低, 测量时长过长, 所

需放射源活度也要较高。

对于 γ 射线强度的确定, 可以直接通过计数器计数; 也可以根据计数脉冲的幅度分布情况, 采用全谱法或全能峰法。对于全谱法或计数法, 由于射线在吸收片中经散射后再在探头灵敏体积中沉积全部能量所形成的脉冲也位于能谱的康普顿坪上而无法区分, 因此两方法都不可避免地会计入散射光子, 带来较大的计数误差。与计数法和全谱法相比, 全能峰法的影响因素大为减少, 因散射及其它干扰产生的辐射脉冲幅度较小不会影响到全能峰的计数。另外, 全能峰容易识别, 求峰面积比较容易^[4]。因此, 利用多道脉冲幅度分析器测全能峰面积的方法测量辐射强度, 其优越性在于自动排除了散射对计数的干扰, 从而无需准直。通过计算全能峰面积, 用能谱的方法代替几何准直的方法, 提高了实验结果的精度, 其对放射源活度的要求也大幅度降低^[6]。

无论准直与否, 都存在一个问题。如图 1 所示, 射线从吸收片中间穿过到达探头灵敏区所穿过的距离即为吸收片厚度 t , 但边缘射线所穿过的吸收片厚度 $t' > t$ 。若是采用吸收片的厚度 t 为穿透厚度, 会给线性吸收系数的拟合带来一定的误差。若对厚度进行修正, 修正公式又很复杂。

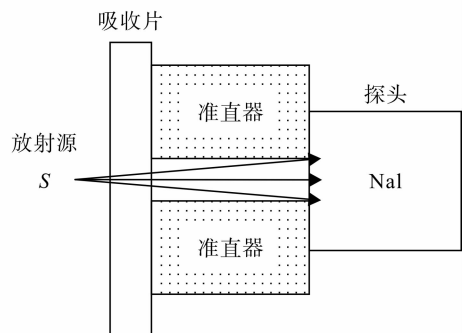
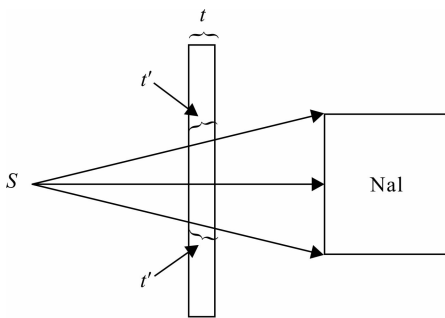


图 1 边缘射线穿过时的吸收片厚度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the thickness of the absorber the edge ray passing through

为此, 在取消准直时, 可以令放射源与探头的距离适当远些, 令探头灵敏区对放射源所张的立体角尽量很小, 即让极角尽量小, 则 $t' \approx t$, 这样就很简单地使误差减到很低。理论上, 源与探头距离越远, 探头对放射源所张的立体角越小, 误差会越小; 但是距离越远, 源峰效率又变低, 使得全能峰计数率越低, 所需的测量时间越长, 短时间内的计数误差会比较大, 反而也会带来较大的误差。因此, 探头距源的距离, 即探头对源所张的极角应该取一合

适值。此外, 吸收片的位置不同—靠近放射源还是靠近探头也会影响实验结果。

目前, 很多人利用相关程序模拟计算物质的线性吸收系数^[7, 8]。文章利用 Monte Carlo N Particle Transport Code (MCNP) 程序, 模拟了源与探头在不同的距离, 不同的吸收片位置、材料与厚度下的 γ 射线能谱。根据模拟结果, 可以选取一合适的实验条件—即在简化实验条件的同时, 使误差减至合理水平。

3 模拟方法与结果

3.1 无准直能谱法时的结果及结论

模拟中,采用 F8 电子脉冲计数卡计算¹³⁷Cs 点源 γ 射线在 NaI(Tl) 晶体中的能谱,并经高斯展宽^[9, 10],采用 76.2 mm NaI(Tl) 探头,能谱共分 1024 道. 令源与探头在不同的距离,不同的吸收片位置下调整吸收片的厚度,模拟计算至少 7 个不同厚度下的射线强度. 计算峰面积有很多方法^[11, 12],此处采用全峰面积(TPA)法计算全能峰净面积,计算本底面积时,选取边界道左右各 5 道求平均值来减小本底误差^[4],这样,使得峰净面积

的相对误差仅在源与探头相距 100 cm,铅吸收片厚 3 cm 时为 7.1%,其余情况的峰净面积的相对误差均小于 4%,绝大多数小于 1%. 最后,用最小二乘法进行数据拟合,得出 μ 值. Al 吸收片的最大厚度为 9 cm,铅、铜吸收片的最大厚度为 3 cm,均保证了大于两个半减弱厚度以上. 不同吸收片位置(吸收片分别靠近源或探头 1 cm)的模拟结果经计算拟合之后得出的线性吸收系数 μ 及其与公认值的偏差如表 1、2 所示. 采取的线性吸收系数公认值为 $\mu_{\text{Pb}}=1.213 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_{\text{Cu}}=0.642 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_{\text{Al}}=0.194 \text{ cm}^{-1}$ ^[13].

表 1 吸收片靠近放射源时的各材料的 μ 值及偏差

Tab. 1 The μ values and deviations of the absorbers near the source

距离/cm	Pb		Cu		Al	
	μ	百分偏差/%	μ	百分偏差/%	μ	百分偏差/%
10	1.202	-0.9	0.663	3.3	0.209	7.7
15	1.187	-2.1	0.655	2.0	0.205	5.7
20	1.178	-2.9	0.655	2.0	0.205	5.7
25	1.170	-3.5	0.649	1.1	0.204	5.2
30	1.177	-3.0	0.647	0.8	0.203	4.6
50	1.172	-3.4	0.649	1.1	0.203	4.6
100	1.164	-4.0	0.655	2.0	0.205	5.7

表 2 吸收片靠近探头时的各材料的 μ 值及偏差

Tab. 2 The μ values and deviations of the absorbers near the probe

距离/cm	Pb		Cu		Al	
	μ	百分偏差/%	μ	百分偏差/%	μ	百分偏差/%
10	1.200	-1.1	0.661	3.0	0.208	7.2
15	1.188	-2.1	0.653	1.7	0.205	5.7
20	1.182	-2.6	0.652	1.6	0.205	5.7
25	1.178	-2.9	0.647	0.8	0.201	3.6
30	1.175	-3.1	0.643	0.2	0.200	3.1
50	1.164	-4.0	0.644	0.3	0.199	2.6
100	1.163	-4.1	0.638	-0.6	0.199	2.6

由以上结果,可以发现:

(1) 对于 Cu 和 Al,随着源与探头距离的增加, μ 值偏差越小;对于 Pb,趋势相反,这是由于模拟中 Pb 吸收片的厚度较大,探测器的探测效率变低,而每次模拟的粒子抽样次数又都相同,使得峰净面积变小,相对误差变大造成的. 由 Al 和 Cu 的数据,可知吸收片的最大厚度取 3 个半减弱厚度之内为宜.

(2) 两表格也反映出,放射源距探头的距离并非越远越好. 距离太远,探测器的探测效率降低,

而每次模拟的粒子抽样次数又都相同,使峰净面积变小,相对误差增大, μ 值偏差增大. 对于不同的吸收片材料,源与探头各存在一个使 μ 值偏差较小的最佳距离. 例如对于 Cu, μ 值偏差较小的最佳实验距离为 30~50 cm 左右.

(3) 吸收片靠近探头放置时的实验效果要好于吸收片靠近放射源时. 这是由于吸收片靠近放射源时,散射的光子被探测到的几率增大,使得全能峰的本底增大,峰净面积误差增大,拟合的 μ 值偏差增大.

根据模拟结果及一般的实际实验情况. 实验时, 令吸收片靠近探头; 放射源距离探头 25 cm 以上, 即探头对源所张的极角小于 8.67° , 一般会取得满意的实验结果. 对于密度比较大的金属, 距离还可以更近些, 即探头对放射源张角还可再大些.

3.2 与准直全能谱计数法的比较

若采用准直方法减小厚度误差的同时, 消除被吸收片散射的 γ 光子对探测器总计数的干扰, 可以在吸收片与探头之间放置准直器(如图 1), 而且准

直孔越细, 吸收片厚度误差越小, 散射干扰越小. 通过 MCNP 程序模拟得出不同吸收片材料在准直孔半径 1 cm, 放射源与探头 30 cm 时的全谱计数的探测效率及相应 μ 值与相同源距下吸收片靠近探头时, 采用无准直全能峰法时的对比, 如表 3 所示. 可见, 相对准直时的全谱计数法, 无准直全能峰法, 可以保证准确度和探测效率相对较高, 实验效果更好.

表 3 有无准直时的探测效率及 μ 值

Tab. 3 The μ values and detection efficiencies with and without the collimator

吸收片材料	吸收片厚度/cm	准直			无准直		
		全谱计数探测效率	μ	μ 值百分偏差/%	全能峰探测效率	μ	μ 值百分偏差/%
Pb	3	1.00×10^{-5}	1.131	-6.8	6.16×10^{-5}	1.175	-3.1
Cu	3	6.75×10^{-5}	0.569	-11.4	3.18×10^{-4}	0.643	0.2
Al	9	5.57×10^{-5}	0.181	-6.7	3.53×10^{-4}	0.200	3.1

4 实验检验

在实际实验中, 探头、吸收片、放射源的几何位置按照模拟时的各栅元位置摆放, 若无法完全复制模拟时的情况, 要保证探头与源的距离按照模拟所得的结果摆放, 即保证探头对源所张的极角小于等于模拟时的相应的极角值.

实验验证时, 吸收片为铅片, 厚度从 0 增加到 5 cm. 记录不同吸收片厚度所对应的能谱, 按照前述方法计算各全能峰面积. 拟合得铅的线性吸收系数为 $\mu_{\text{Pbexp}} = 1.153 \text{ cm}^{-1}$, 此实测值与公认值的偏差为 4.9%, 与同条件下的模拟值 $\mu_{\text{Pbsim}} = 1.182 \text{ cm}^{-1}$ 的偏差为 2.5%, 比较符合模拟得出的结论.

5 结论

多道分析器能根据需要计算某一能量范围内的计数. 在 γ 吸收实验中, 用测全能峰的方法比用计数装置测量强度的方法优越, 即用全能峰面积法计算 γ 射线在不同材料中的线性吸收系数, 避免了射线与吸收片产生康普顿散射造成的影响, 代替了几何准直的方法, 无需用准直器, 避免了铅砖的大量使用, 简化了实验系统, 也同时降低了对源活度的要求^[6], 而且往往比用准直计数法探测效率高, 这样在同样误差的情况下就缩短了测量时间, 提高了效率; 所得结果的准确性也更高.

用 MCNP 程序, 可以快速模拟各种不同条件下的 γ 射线能谱, 同时利用能谱法计算并比较可得

出一种合理的实验条件. 采用模拟并结合实际实验的方法测量铅、铜与铝的线性吸收系数, 在吸收片靠近探测器, 探测器对源所张极角小于 8.67° 的条件下, 所得 μ 值与公认值接近, 偏差小于 5%. 由此, 改进并简化了实验条件, 提高了探测效率和结果准确性, 较快速准确地完成了实验.

此实验方法可应用于某些快速测量场合, 也可作为未知材料在特定能量 γ 射线下的线性吸收系数的测量提供方法指导. 可同时采用 MCNP 模拟和实验法测量, 比较二者所得结果的差异, 最终确定物质的线性吸收系数值^[8].

参考文献:

- [1] Abutalib M M, Yahia I S. Novel and facile micro-wave-assisted synthesis of Mo-doped hydroxyapatite nanorods: characterization, gamma absorption coefficient, and bioactivity [J]. Mater Sci Eng C, 2017, 78: 1093.
- [2] El-Khayatt A M. Semi-empirical determination of gamma-ray kerma coefficients for materials of shielding and dosimetry from mass attenuation coefficients [J]. Prog Nucl Energy, 2017, 98: 277.
- [3] Roy B R, Rao A S N. Measurement of X-ray absorption coefficient of NiCO_3 around K-edge of Ni using synchrotron radiation [J]. Mater Today, 2016, 3: 3861.
- [4] 复旦大学, 清华大学, 北京大学. 原子核物理实验方法 [M]. 北京: 原子能出版社, 1997.
- [5] Choppin G, Liljenzin J, Rydberg J, et al. Radiochem-

- istry and nuclear chemistry [M]. 4th ed. Salt Lake City: Academic Press, 2013: 182.
- [6] 陈英琦, 陈玲燕, 张哲, 等. 用 γ 射线能谱法测量材料的吸收系数和厚度 [J]. 同位素, 2004, 17: 21.
- [7] Singh V P, Medhat M E, Badiger N M. Photon energy absorption coefficients for nuclear track detectors using Geant4 Monte Carlo simulation [J]. Radiat Phys Chem, 2015, 106: 83.
- [8] 周剑良, 吕洋, 程晓龙, 等. 基于 MCNP 程序和 γ 射线能谱法对未知材料吸收系数的测定 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13: 6580.
- [9] 马玉刚, 周银行, 赵广义, 等. NaI(Tl)探测 γ 能谱的 MCNP 模拟 [J]. 吉林大学学报, 2007, 45: 451.
- [10] 唐碧华. 射线探测效率及响应函数的蒙特卡罗方法研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006: 49.
- [11] 邵达, 韩纪峰, 杨朝文. 单能电子半吸收厚度测量中射线吸收强度计算方法研究 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2013, 50: 557.
- [12] 范杰, 吴丽萍, 赵艳群, 等. 用 EGSnrc 程序包对单能电子实验过程影响因素的研究 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2009, 46: 1417.
- [13] 马崇智. 放射性同位素手册[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 451.

引用本文格式:

- 中文: 张磊, 白立新. 基于 MCNP 和能谱法对 γ 射线吸收实验的改进 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2019, 56: 104.
- 英文: Zhang L, Bai L X. The improvement of the experiment about the absorption of gamma ray based on the MCNP and the energy spectrum method [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2019, 56: 104.