

学  
生  
园  
地

## $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ 射线铅的吸收系数测量实验的数据拟合

张国强,边纪,方恺,张志华,杜艾,赫丽

(同济大学物理科学与工程学院,上海 200092)

**摘要:**介绍了计算 $^{60}\text{Co}$ 的 $\gamma$ 射线物质吸收系数的方法.利用NaI(Tl)闪烁晶体探测器测量 $^{60}\text{Co}$ 元素放射的1.17 MeV和1.33 MeV两种 $\gamma$ 射线的初始强度比,通过数据拟合法和分别测量法测定了铅片对2种 $\gamma$ 射线各自的吸收系数,并分别将2种测量单能射线吸收系数的方法得出的结果同标准吸收系数进行了比较,新的数据拟合法优于原来的分别测量法.

**关键词:**数据拟合法;吸收系数; $^{60}\text{Co}$ ; $\gamma$ 射线

**中图分类号:**O571.323

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-4642(2014)09-0042-03

### 1 引言

$\gamma$ 射线吸收系数的测定实验包括利用NaI(Tl)闪烁晶体探测器测定 $^{137}\text{Cs}$ 的能量为0.661 MeV的 $\gamma$ 射线以及 $^{60}\text{Co}$ 的能量为1.17 MeV和1.33 MeV的 $\gamma$ 射线吸收系数<sup>[1-3]</sup>.其中,NaI(Tl)闪烁晶体探测器得到的 $^{137}\text{Cs}$ 能谱中只有1个全能峰,数据处理时扣除能谱图的本底后,利用相应公式通过最小二乘法进行数据拟合就可以获得吸收系数. $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线包含能量为1.17 MeV和1.33 MeV射线,相应地在NaI(Tl)闪烁晶体探测器得到的 $^{60}\text{Co}$ 能谱中就有2个全能峰.教材中介绍了2种数据处理的方法:第一种方法是分别测量法:分别取1.17 MeV和1.33 MeV射线的全能峰进行计算,获得2种射线各自的吸收系数.这种方法中,由于2种射线的能量相差不大,全能峰的谱线相互重叠,NaI(Tl)闪烁探测器对 $\gamma$ 射线很灵敏,造成本底计数比较高,无法准确地扣除本底,难以准确获得2个全能峰各自的吸收系数.第2种方法是整体测量法:将2个全能峰作为整体来处理,测量能量为1.25 MeV的综合峰.这种方法虽然解决了由于全能峰能谱相互交叠的问题,但无法单独确定2种能量峰的吸收系数.

基于以上2种方法,找到了一种新的数据处

理方式,既可以分别测定 $^{60}\text{Co}$  1.17 MeV和1.33 MeV的 $\gamma$ 射线吸收系数,同时又可以成功避免由于全能峰交叠带来的本底扣除的问题.在新的方法中,首先测定 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线中2种不同能量射线的强度比;然后测定整体射线吸收系数与铅片的厚度之间的关系;再通过数据拟合,就可以求得2种射线各自的吸收系数.利用这种新的方法测得的吸收系数,其相对误差小于原有的实验方法获得的结果.

近代物理实验是为高年级物理专业本科生开设的,培养学生的理论联系实际能力,综合实验能力和创新精神的课程,其教学方法与教学内容不断发展与丰富<sup>[4-5]</sup>.本项工作是由本科生在完成讲义中的实验内容后,通过进一步分析思考而提出的,并将作为今后实验教学的拓展内容.

### 2 实验原理

#### 2.1 NaI(Tl)闪烁晶体探测器工作原理

NaI(Tl)闪烁晶体探测器由闪烁体、光电倍增管和相应的电子仪器3部分组成<sup>[3]</sup>.探测器的前端是NaI闪烁晶体,当射线进入闪烁体时产生次级电子,使闪烁体分子电离和激发,退激发时产生大量光子.当闪烁光子入射到光电倍增管阴极上,由于光电效应就会产生光电子.光电子受极间电场加速和聚焦,在各级打拿极上发生倍增,最

“第8届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期:2014-05-29;修改日期:2014-07-10

作者简介:张国强(1991-),男,宁夏固原人,同济大学物理科学与工程学院应用物理学2010级本科生.

指导教师:方恺(1973-),女,江苏南京人,同济大学物理科学与工程学院高级工程师,博士,主要研究方向为物理实验教学、教育技术学和凝聚态物理学.

后被阳极收集后产生电流脉冲。

## 2.2 $\gamma$ 射线的物质吸收系数

$\gamma$ 跃迁可定义为核由高激发态到较低的激发态,而原子序数和质量数均保持不变的退激发过程。 $\gamma$ 射线与物质的相互作用在单次事件中便能导致完全的吸收或散射。本实验研究的对象为窄束 $\gamma$ 射线,不考虑散射成分,并可认为窄束 $\gamma$ 射线穿透物质时能量不变,而强度逐渐减弱。

$\gamma$ 射线的强度随厚度的衰减服从指数规律<sup>[6]</sup>,即:

$$I = I_0 e^{-ux} = I_0 e^{-uR/\rho}, \quad (1)$$

式中, $I_0$ 和 $I$ 分别为穿过物质前后 $\gamma$ 射线的强度, $x$ 是物质厚度, $u$ 是该物质线性吸收系数。为了消除密度影响,引入质量厚度 $R = \rho x$ 来表示吸收体厚度,其中 $\rho$ 为物质的密度。由于在相同实验条件下,某一时刻计数率 $N$ 总与该时刻的 $\gamma$ 射线强度 $I$ 成正比,则

$$N = N_0 e^{-uR/\rho}, \quad (2)$$

则吸收系数 $u$ 为

$$u = -\frac{\rho}{R} \ln \frac{N}{N_0}. \quad (3)$$

这种求吸收系数的方法可应用于计算具有单一能量的 $\gamma$ 射线(如 $^{137}\text{Cs}$ 放射源发出的 $\gamma$ 射线)的吸收系数。

$^{60}\text{Co}$ 放射源发出的 $\gamma$ 射线包含能量为1.17 MeV的射线1和能量为1.33 MeV的射线2,利用(2)式可得:

$$N_0 e^{-ux} = N_0 \alpha e^{-u_1 x} + N_0 (1-\alpha) e^{-u_2 x}, \quad (4)$$

其中, $u_1$ 和 $u_2$ 分别为该材料对单能射线1、射线2的吸收系数, $\alpha$ 与 $1-\alpha$ 分别为射线1、射线2的初始射线强度与总强度之比。由(4)式得:

$$u = \frac{\ln [\alpha e^{-u_1 x} + (1-\alpha) e^{-u_2 x}]}{-x}, \quad (5)$$

其中

$$\alpha = \frac{I_{10}}{I_0} = \frac{N_{10}}{N_0}, \quad (6)$$

可以通过测定初始时2种射线强度确定 $\alpha$ 。

这时的吸收系数 $u$ 与物质厚度 $x$ 有关。测定了 $u$ 和 $x$ 之间的关系后,就可以利用数值拟合的方法,确定2种射线各自的吸收系数 $u_1$ 和 $u_2$ 。

## 3 实验内容和数据处理

### 3.1 实验内容

实验装置和器材包括:a.  $\gamma$ 放射源 $^{60}\text{Co} \approx$

1.5  $\mu\text{C}$ ; b. 200  $\mu\text{m}$  Al窗 NaI(Tl)闪烁探头; c. Pb吸收片若干。实验调节和测量步骤包括:1)调整实验装置,使放射源、准直孔、闪烁探测器的中心位于一条直线上;2)在闪烁探测器和放射源之间加上0,1,2...片已知质量厚度的吸收片,进行定时测量,并保存实验谱图;3)计算所要研究的光电峰净面积 $A_i$ , $A_i$ 对应公式中的 $I_i$ 和 $N_i$ ,其值为总面积 $A_g$ 和本底 $A_b$ 的差值;4)分别用数据拟合法和原来的分别测量法计算两种射线的吸收系数,与2种射线的标准吸收系数进行比较。

### 3.2 数据处理方法

数据处理的关键是双峰净面积的确定。如图1所示<sup>[3]</sup>,分别测量法测量 $^{60}\text{Co}$ 的双能射线吸收系数时, $A_1$ 和 $A_2$ 分别为全能峰1和峰2的净面积, $A_a$ 和 $A_b$ 为相应的本底。数据拟合法确定的测量 $^{60}\text{Co}$ 的双能射线吸收系数时,总的净面积为全能峰1和峰2的净面积之和,总的本底为全能峰1和峰2的本底之和。

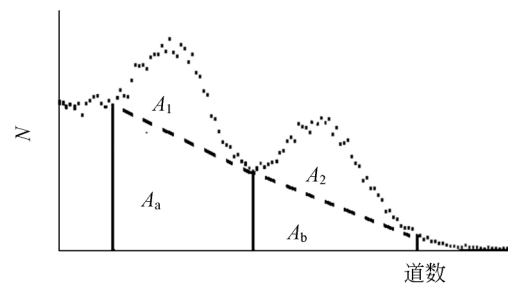


图1  $^{60}\text{Co}$ 源双峰本底示意图

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 1.17 MeV射线强度与总射线强度比值

在放射源和NaI(Tl)单晶 $\gamma$ 闪烁晶体探测器之间不放置铅板时,测得 $^{60}\text{Co}$ 能量为1.17 MeV和1.33 MeV的2种 $\gamma$ 射线的综合峰的净面积 $N_0 = 5330$ ,其中能量为1.17 MeV的 $\gamma$ 射线的全能峰的净面积 $N_{10} = 2658$ ,则1.17 MeV射线强度与总射线强度比值 $\alpha$ 为

$$\alpha = \frac{N_{10}}{N_0} = \frac{2658}{5330} = 0.498. \quad (7)$$

实际上, $^{60}\text{Co}$ 经过1次 $\beta$ 衰变成为处在2.5 MeV激发态的 $^{60}\text{Ni}$ , $^{60}\text{Ni}$ 的激发态的寿命极短,它放出能量分别为1.17 MeV和1.33 MeV的2种 $\gamma$ 射线而跃迁到基态<sup>[7]</sup>。

#### 4.2 数据拟合法确定 $\gamma$ 射线单能射线吸收系数

实验数据如表 1 所示, 利用式 (5), 通过 Mathematica 计算软件的 FindFit 函数做数值拟合, 得出 1.17 MeV 射线的吸收系数  $u_1$  和 1.33 MeV 射线的吸收系数  $u_2$ :

$$u_1 = 0.736 \text{ cm}^{-1}, u_2 = 0.675 \text{ cm}^{-1}.$$

通过数据拟合的结果可知, 铅元素对 1.17 MeV 射线的吸收系数大于 1.33 MeV 射线的吸收系数.

表 1 确定总吸收系数  $u$  与铅块厚度  $x$  之间关系

$x/\text{cm}$	$N_0$	$N_1$	$u/\text{cm}^{-1}$
0	14 614	5 330	—
0.397 6	12 594	4 059	0.685
0.788 0	9 481	3 040	0.713
1.183 2	7 561	2 196	0.750
1.574 6	5 271	1 850	0.672

#### 4.3 用分别测量法确定 $\gamma$ 射线单能吸收系数

利用式 (1), 通过最小二乘法拟合数据并作图 2. 由图 2 可知, 随着铅块厚度的增加, 2 种能量射线的强度都在变弱. 从图 2 中可以得到能量为 1.17 MeV 和 1.33 MeV 射线的吸收系数  $u_1'$  和  $u_2'$  分别为  $0.837 \text{ cm}^{-1}$  和  $0.539 \text{ cm}^{-1}$ .

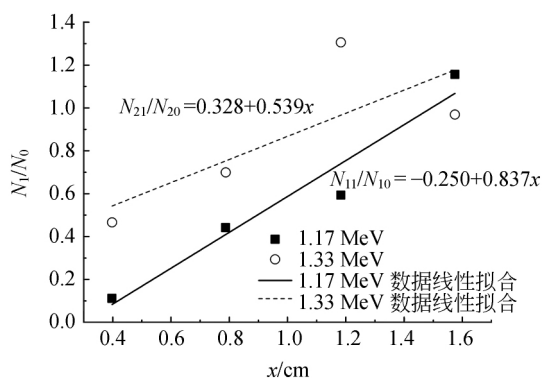


图 2 铅片厚度  $x$  与  $N/N_0$  关系

#### 4.4 比较 2 种方法测量结果

由参考文献 [8] 中提供的  $\gamma$  射线的能量  $E(\text{MeV})$  和吸收系数  $u(\text{cm}^{-1})$ , 分别是 (0.5, 1.640), (1.0, 0.776), (1.5, 0.581) 和 (2.0, 0.518) [6]. 利用 Mathematica 软件 FindFit 函数进行拟合, 可得能量  $E$  和吸收系数  $u$  的关系为

$$u(E) = 537.879e^{-0.306(E+3.994)^2} + 0.553. \quad (8)$$

由式 (8) 作图, 可得图 3 中的  $u_1$  曲线, 并分别用  $u_2$  和  $u_3$  标注出拟合法和分别测量法得到的  $\gamma$

射线的吸收系数. 根据此式即可计算出 1.17 MeV 和 1.33 MeV  $\gamma$  射线吸收系数分别为  $0.707 \text{ cm}^{-1}$  和  $0.642 \text{ cm}^{-1}$ , 以此作为吸收系数  $u$  的标准值.

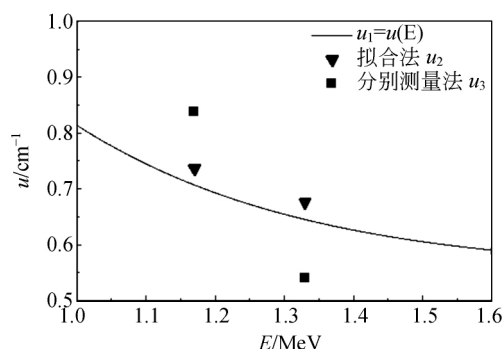


图 3  $\gamma$  射线吸收系数与能量的关系

将用拟合法、分别测量法获得的结果与标准值相比较 [6], 由表 2 可知, 数据拟合法得出的结果误差较小, 与分别测量相比有显著的优点.

表 2 比较两种方法测量  $u_1$  和  $u_2$  的误差

$E_\gamma$ /MeV	$u_1/\text{cm}^{-1}$		$\frac{u_1 - u}{u}$	$u_2/\text{cm}^{-1}$	$\frac{u_2 - u}{u}$
	标准值	拟合法			
1.17	0.707	0.736	4%	0.837	18%
1.33	0.642	0.675	5%	0.540	16%

## 5 结 论

本文提出了计算  $\gamma$  射线物质吸收系数的新方法. 通过用 2 种方法分别测量铅对 1.17 MeV 和 1.33 MeV 两种  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线的吸收系数并与标准值进行对比发现, 数值拟合法测得  $u_1$  和  $u_2$  值相对误差远小于分别测量所得的值. 由此可以看出, 对于测量含多种能量谱线的  $\gamma$  射线中各个能量射线的吸收系数来说, 数值拟合法是一种全新的方式.

## 参考文献:

- [1] 谢筱翊, 陈玲燕. 相对论效应实验中的数据处理 [J]. 物理实验, 1990, 10(2): 51-54.
- [2] 陈玲燕, 顾牡, 秦树基, 等. 相对论效应实验谱仪的系列教学实验 [J]. 物理实验, 2000, 20(3): 3-5.

(下转第 48 页)

广泛。在军事上,可将其作为新式视野屏蔽用具的开发基础,设计出重量轻,易于携带,又能有效封锁视野的屏障护具,当然,制作材料要选用其他透明材料。在艺术方面,可作为舞台背景及装饰道具的开发基础,创造出新的艺术、视觉感受。

### 参考文献:

- [1] 吕正,吕亮. 雾灯穿透能力最佳波长的实验确定[J]. 应用光学,2008,29(4):530-532.  
[2] 袁纵横,张静,张文涛,等. 双波长激光传输特性的

室内模拟实验研究[J]. 激光技术,2010,34(4):478-481.

- [3] 肖翔,赵晓路,卢连成,等. 雾化室雾气浓度分布的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报,2005,26(5):776-778.  
[4] 夏琳茜. 一种基于近红外光谱透雾系统的原理与实现[J]. 红外与激光工程,2007,36(z1):234-237.  
[5] 夏克文,宋建平. 激光光纤核测井技术[J]. 石油仪器,2001,15(2):8-10.

## Influence of air humidity on light transmittance

WU Ya-nan, YOU Zhen-jun, MA Jia-ning, CHEN Lei

( Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The influence pure fog with fixed thickness on the transmittance of natural light and laser light was measured, respectively. The humidity dependence of light transmittance was obtained, which demonstrated the influence of humidity on light transmittance.

**Key words:** humidity; power of transmitted light; light transmittance; atomization

[责任编辑:郭 伟]

(上接第 44 页)

- [3] 同济大学物理实验中心. 近代物理实验讲义[Z]. 2013:78-98.  
[4] 任红,谢莉莎,刘彩霞,等. 近代物理实验教学与考试效果分析评价体系研究[J]. 物理实验,2013,33(7):14-19.  
[5] 顾恩遥,白翠琴,吕景林. 冉绍尔-汤森效应实验仪自动化改进[J]. 物理实验,2013,33(11):11-15.  
[6] 黄新民,解挺. 材料分析测试方法[M]. 北京:国防工业出版社,2008.  
[7] 杨福家. 原子物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2008:356.  
[8] 刘克桓. 物理教师手册[M]. 北京:人民教育出版社,1998:980-981.

## Data-fitting method in $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ -ray absorption experiment

ZHANG Guo-qiang, BIAN Ji, FANG Kai, ZHANG Zhi-hua, DU Ai, HE Li

(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This paper introduced a data-fitting method to determine the  $\gamma$ -ray absorption coefficient of lead. NaI (Tl) scintillator detector was used to measure the original intensity of  $^{60}\text{Co}$  1.17 MeV and 1.33 MeV  $\gamma$ -rays. The data-fitting method and the usual separate-measurement method were used, respectively, to measure the absorption coefficients of lead to the 1.17 MeV and 1.33 MeV  $\gamma$ -rays. Compared to the standard absorption coefficients, the results obtained by the data-fitting method absorption coefficient were better than that obtained by separate-measurement method.

**Key words:** data fitting; absorption coefficient;  $^{60}\text{Co}$ ;  $\gamma$ -ray

[责任编辑:郭 伟]