

应用共振吸收谱仪测量 Al 对 γ 射线的衰减系数

王克斌 李 士 唐孝威

(中国科学院高能物理研究所)

1981年2月16日收到

提 要

应用穆斯堡尔谱仪测量了 Al 对 $^{57}\text{Fe}^*$ 核 14.4keV 的 γ 射线的衰减系数 μ , 两组测量值的平均结果为

$$\mu = (0.00874 \pm 0.00020) \text{cm}^2/\text{mg}.$$

一、引 言

利用穆斯堡尔谱仪^[1,2]可以获得超高分辨率的 γ 射线, 其能量分辨率对 14.4keV 的 γ 射线可达 10^{-13} 量级. 在放射源和共振吸收体间放置不同厚度的 Al 片, γ 射线将同 Al 发生光电吸收和各种散射效应. 散射后的 γ 射线, 如果其能量变化超过所选择的宽度 (对 ^{57}Fe 核约 $5 \times 10^{-9}\text{eV}$) 时, 即不再发生共振吸收, 从而可并入被衰减的部分. 因此, 本方法可以提供通常 X 射线单色器和精心设计的小立体角装置所难于实现的单色性极强的 γ 射线来进行实验. 实验中分别测量无 Al 片和加不同厚度 Al 片时的穆斯堡尔谱线, 然后对所测的谱线经过计算机用最小二乘法拟合, 其拟合优度用 χ^2 值检验. 比较各种情况下谱线峰的位置和形状来确定光子能量的变化. 实验结果表明, 加各种不同厚度的 Al 片后, 穆斯堡尔峰的形状和位置不变^[3]. 对固定样品重复测量的结果在所给误差范围内相符合.

二、实 验 原 理

设放射源 S 在对探测器所张的立体角内发出的 14.4keV 的 γ 射线的强度为 I_0 , 在不加 Al 片的情况下, I_0 经过不锈钢共振吸收片后被衰减为

$$I'_0 = I_0 e^{-\mu_0 d},$$

其中 d 是不锈钢片的厚度, μ_0 是共振吸收系数, 并且 $\mu_0 = \sigma n_0$, n_0 是单位体积的不锈钢中所含 ^{57}Fe 核的个数, σ 是共振吸收截面, 其最大值 $\sigma_0 = 256.6 \times 10^6 \text{b}^{[2]}$. 在本实验中, 不锈钢厚度 d 保持不变. 被共振吸收片所吸收的 γ 射线的强度, 亦即穆斯堡尔峰的强度

$$Y_0 = I_0 - I'_0 = I_0(1 - e^{-\mu_0 d}). \quad (1)$$

穿过厚度为 x_i 的铝片后, γ 射线的强度衰减为

$$I_i = I_0 e^{-\mu x_i}, \quad (2)$$

其中 μ 是 Al 对 14.4keV 的 γ 射线的衰减系数. 强度为 I_i 的 γ 射线进而经过共振吸收片, 被吸收的部分为 $Y_i = I_i(1 - e^{-\mu_0 d})$.

将(2)式代入后

$$Y_i = I_0 e^{-\mu x_i} (1 - e^{-\mu_0 d}). \quad (3)$$

用(1)式去除(3)式, 有

$$I_i/I_0 = Y_i/Y_0 = e^{-\mu x_i}. \quad (4)$$

这里 Y_0 和 Y_i 分别为不加 Al 片和加厚度为 x_i 的 Al 片时穆斯堡尔峰的强度. 由(4)式可知, 从加上不同厚度的 Al 片时的穆斯堡尔峰的强度的变化即可确定衰减系数 μ . 不难看出, 共振吸收片的作用就在于建立一个非常窄的窗, 把单色 γ 射线从透过 Al 片的 γ 射线中选择出来, 其单色程度主要取决于穆斯堡尔峰的宽度 Γ , 这正是本方法的超高分辨特性的关键所在.

对(4)式取对数, 有

$$\ln Y_i = \ln Y_0 - \mu x_i.$$

利用加权最小二乘法直线拟合公式, 对一系列 x_i , Y_i 以及 Y_i 的误差 σ_{Y_i} 的值进行处理, 就可以获得 μ 值及其误差 σ_μ .

三、实验装置

图 1 中, 除准直器 C_1 和 Al 衰减片外, 其余部分为整个穆斯堡尔谱仪系统. 其中, S 为放射源, 它是通过将 ^{57}Co 原子核扩散到 Rh 衬底中而制成的, 其强度约为 50mCu. 放射源经过连杆接到电磁驱动器 D 上, 作往复匀加速运动. 波形发生器和驱动功率放大器 DP 向电磁驱动器提供三角波速度扫描信号. 多道分析器 MC (DIDAC-800) 向 DP 发出时钟脉冲, 使速度扫描和多道扫描信号同步, 从而使一定的速度与一定的道址相对应, 实现多路定标工作方式.

C_0 , C_1 , C_2 和 C_3 均为准直器. 在 C_2 准直孔左侧放有 $25\mu\text{m}$ 厚的不锈钢共振吸收片来选择超高分辨的 γ 射线. C_1 左侧放有不同厚度的 Al 片作为 γ 射线的衰减片. 所选用的 Al 样品的纯度在 99.9% 量级. PC 为流气式端窗正比计数管, 管内流通一个大气压的混合气体 (10% 甲烷 + 90% 氩), 计数管只对低能 γ 射线灵敏, 对 14.4keV 的 γ 射线, 其

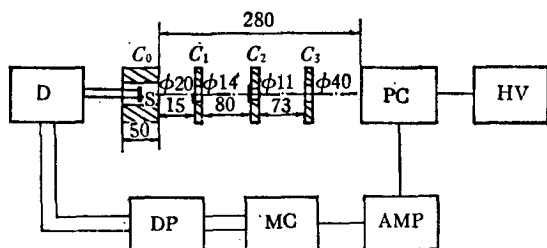


图 1 测量 γ 射线衰减系数的实验装置

能量分辨率好于 20%。高压电源 HV (FH4268) 提供计数管工作电压。实验中, 选择 $V = 1650\text{V}$ 。AMP 是快放大器, 增益 $K = 10$ 。信号经过放大器后即送入多道分析器进行处理。

四、结果和讨论

表 1 给出对同一种 Al 片两次重复测量获得的数据。表中厚度 x 的单位为 mg/cm^2 , 衰减系数 μ 的单位为 cm^2/mg , 强度 Y 都化成半小时计数, 误差 σ_Y 指强度 Y_i 的统计误差。厚度 x 值由称量法获得, 精度高于 0.1%, 因此, 称重和面积的误差在数据处理中均被忽略, 强度 Y 及其误差是经过计算机对穆斯堡尔谱线拟合处理后获得的。 ε 为衰减系数 μ 的相对误差。

对这两组数据中的 μ 值及误差经过加权平均, 获得 μ 的平均值

$$\bar{\mu} = (0.00874 \pm 0.00020)\text{cm}^2/\text{mg}.$$

表 1 对同种衰减片两次测量数据 (单位见上文)

第 1 组 $\mu = 0.00887$ $\sigma_\mu = 0.00031$ $\varepsilon = 3.5\%$

厚度 x	0.00	40.50	77.80	155.60	233.40	311.20	389.00
强度 Y	5284.08	3060.49	2328.21	1310.21	657.97	332.03	136.01
误差 σ_Y	72.00	83.00	42.00	42.50	26.70	9.50	13.60

第 2 组 $\mu = 0.00866$ $\sigma_\mu = 0.00024$ $\varepsilon = 2.8\%$

厚度 x	0.00	40.50	77.80	155.60	233.40	311.20	389.00
强度 Y	8916.89	5849.03	3800.00	2201.96	1107.87	606.96	308.35
误差 σ_Y	94.21	78.00	65.90	34.80	20.00	14.30	11.67

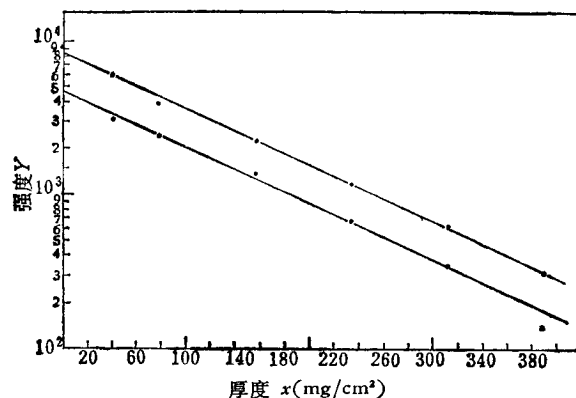


图 2

按表 1 的数据,在半对数坐标上画出衰减曲线,如图 2 所示.

从表 1 的数据中可以看出,二次测量的结果在一倍 σ_μ 内很好地符合. 在表 2 中,列出一些文献报道的能量接近 14.4keV 的几个测量结果以进行比较.(未找出能量为 14.4 keV 的 γ 射线的衰减系数的测量值.)

表 2 一些文献报道的结果

文 献	能量 (keV)	衰减系数 (cm^2/g)	误差 (cm^2/g)
[1]	15	7.91	—
[4]	15	8.08	*
[5]	14.23	8.75	0.30
本 文	14.4	8.74	0.20

* 为相对误差好于 10%.

测量中的误差主要来于统计误差和由仪器的不稳定性造成的系统误差. 统计误差可以通过延长测量时间和采用高分辨率的探测器来改善(见下文); 系统误差可以通过提高仪器的稳定性而得到改善,这包括提高前置放大器和高压电源的温度稳定性,长期稳定性以及更准确地控制计数管中气体的流量,从而提高探测效率的稳定性.

实验结果表明,加 Al 片后,穆斯堡尔谱基线的减弱比谱线强度的减弱来得迟缓. 这是由于能量高于 14.4keV 的 γ 射线经 Al 片散射后向低能部分移动造成的. 这些相对高能的成分包括 ^{57}Fe 的 136keV 和 121.6keV 的两支 γ 射线以及衬底 Rh 的 K -X 线. 探测器的分辨率为 20%,这相当于张了一个比较宽的窗,一旦高能成分经散射后落入此窗,就会导致基线的升高. 而且 Al 片越厚,多次散射就越显著,从而基线降低得就越缓慢. 基线的升高将使统计误差增大. 提高探测器的能量分辨率,将此窗变窄,可以改善这种情况.

本方法的主要优点是能量选择性极强,其能量分辨率远远高于一般的 γ 谱仪,因此可以有效地对混合 γ 谱中的某一分支进行衰减系数的测量. 本方法的主要缺点是局限于对已有的穆斯堡尔同位素的 γ 射线进行测量,因而所适宜的能量区域约在 10—150keV 之间.

在整个实验工作中,赵忠尧教授给予关心和指导,计桂泉同志和邵涵如同志给予帮助并提供工作条件,在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- [1] K. Siegbahn, "Alpha, Beta and Gamma-Rays Spectroscopy", North-Holland, (1965), 1293—1312 and 832.
- [2] U. Gonser, Editor, "Mössbauer Spectroscopy", Springer, Berlin, (1975).
- [3] 李士、王克斌、唐孝威, 高能物理与核物理, 待发表.
- [4] G. R. White, X-Ray Attenuation Coefficients from 10keV to 100keV, Natl. Bur. Standards Circ. (1957), 583.
- [5] J. I. Hopkins, *J. Appl. Phys.*, **30**(1959), 185.

THE γ -RAY ATTENUATION COEFFICIENT OF ALUMINIUM MEASURED WITH A RESONANT ABSORPTION SPECTROMETER

WANG KE-BIN LI SHI TANG XIAO-WEI

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

We applied a Mossbauer spectrometer to measure $^{57}\text{Fe}^*$ 14.4 keV γ -ray's attenuation coefficient of aluminium. The average value of two sets of data is

$$\mu = (0.00874 \pm 0.00020) \text{ cm}^2\text{mg}^{-1}.$$