

近代物理实验报告 2.2: X 荧光分析

xy 学号 匡亚明学院

2019 年 2 月 29 日

1 引言

X 荧光分析是一种快速、无损、多元素同时测定的现代技术，已经广泛应用于材料科学、生物医学、地质研究、环境监测、天体物理、文物考古、刑事侦查、工业生产等诸多领域。

2 实验目的

1. 了解能量色散 X 荧光分析的原理，仪器构成和基本测量、分析方法。
2. 验证 Moseley 定律，并从实验推出屏蔽常数等。
3. 研究物质对 X 涉嫌的吸收规律。

3 实验仪器

X 荧光分析仪、样品。

4 实验原理

以一定能量的光子，电子，质子， α 粒子或其他离子轰击样品，将物质原子中的内壳层电子击出，产生电子空位，原子处于激发态。外壳层电子向内壳层跃迁，填补内壳层电子空位，同时释放出跃迁能量，原子回到基态。跃迁能量以特征 X 射线形式释放，或能量转移给另一个轨道电子，使该电子发射出来，即俄歇电子发射。另外还可能存在几率较低，主量子数相同，角量子数不同，亚壳层间电子的 Coster-Kronig 非辐射跃迁。测出特征 X 射先能谱，即可确定所测样品中元素种类和含量。当原子中 K 层电子被击出后，L 层或 M 层的电子填补 K 层电子空位，同时以一定几率发射特征 X 射线。L \rightarrow K 产生的 X 射线叫 K_α 系，L 层有三个子壳层，允许跃迁使 K_α 系有两条谱线 $K_{\alpha 1}$ 和 $K_{\alpha 2}$ 。M \rightarrow K 产生的 X 射线叫 K_β 系，M 层有五个子壳层，允许跃迁使 K_β 有 $K_{\beta 1}, K_{\beta 3}, K_{\beta 5}$ 三条谱线。当原子中 L 层电子被击出后，M \rightarrow L 跃迁产生的 X 射线叫 L 系。图 (1) 是特征 X 射线与电子跃迁能级示意图。特征 X 射线的能量为两壳层电子结合能之差，即

$$E_{K_\alpha} = B_K - B_L, E_{K_\beta} = B_K - B_M, E_L = B_L - B_M \quad (1)$$

所有元素的 K, L 系特征 X 射线能量在几千电子伏到几十千电子伏之间。

X 荧光分析中激发 X 射线的方式一般有三种：

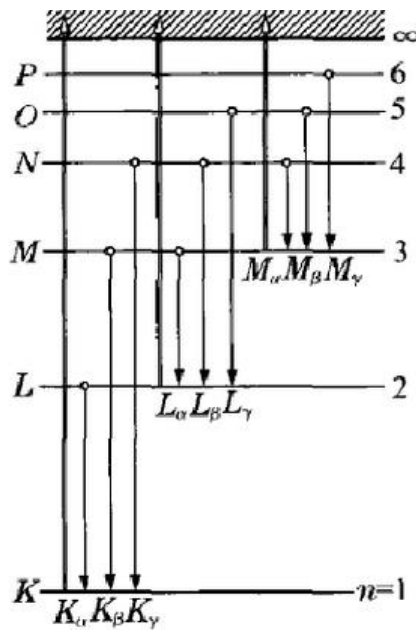


图 1 特征 X 射线系-跃迁能级示意图

图 1: 特征 X 射线系-跃迁能级示意图

1. 用质子、 α 粒子或其他离子激发

用质子激发特征 X 射线的分析技术 () 常记为 PIXE) 是几种激发方式中分析灵敏度最高的, 相对灵敏度达 10^{-6} 10^{-7} g/g, 绝对灵敏度可达 10^{-9} 10^{-16} g, 而且可以将质子束聚焦、扫描, 对样品作微区分析

2. 用电子激发

用电子束激发 (常记为 EIX), 目前主要用在扫描电镜与电子探针中。与 PIXE 相比, 电子激发引起的韧致辐射本底比质子激发大, 影响分析灵敏度。一般灵敏度比 PIXE 低 2 3 个数量级。另外这种激发方式不能在空气中进行, 只适用于薄样品。

3. 用 X 射线或低能 射线激发

用 X 射线或低能 射线激发 (记为 XIX), 常用 X 光管, 放射性同位素作为激发源。这类激发用射线不易聚焦; 分析灵敏度亦稍低, 相对灵敏度一般为 10^{-5} 10^{-6} g/g, 绝对灵敏度约为 10^{-7} 10^{-8} g, 低于 PIXE 的灵敏度。

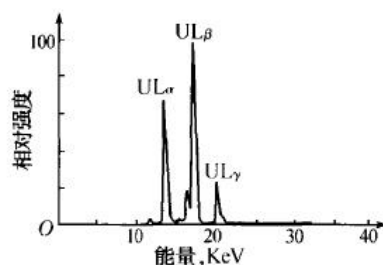


图 2: ^{238}Pu 源的 X 射线能谱

轻便型仪器常用放射性同位素和 X 光管作激发源。可选用的同位素源主要有 ^{55}Fe , ^{238}Pu , ^{109}Cd , ^{241}Am , ^{57}Co , ^{153}Gd 等。其中 ^{238}Pu 在 α 衰变后发出的 ^{234}U 的 LX 射线, 其能量为 11.6keV 21.7keV,

能谱如图 (2) 所示。 ^{238}Pu 的半衰期为 87.7 年, 用得比较多。X 光管是通过加热阴极 K 发出的热电子在阴、阳极间高压电场加速下, 轰击阳极 A(常称阳极靶) 产生 X 射线的。图 (3) 是比较典型的 X 光管 (钨靶) 产生的 X 射线谱; 它由连续谱和特征谱组成。特征谱决定于靶材, 其生成机理如前述。连续谱产生机理如图 (4) 所示。高速电子打入阳极靶, 被靶中原子核的库仑场减速, 发出轫致辐射。原子核的质量远大于电子质量, 此过程中原子核的动能可忽略, 因此, 轫致辐射发出的光子能量 $h\nu$ 应等于电子动能的减少, 即,

$$h\nu = E_{ki} - E_{kf} = eV - E_{kf} \quad (2)$$

当电子动能减少到 0 时, 发出的光子能量最大, 相应频率最高, 波长最短

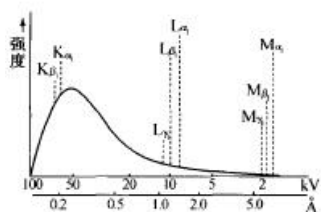


图 3: X 光管激发的 X 射线谱

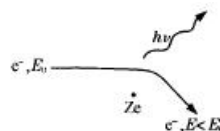


图 4: 连续谱产生机理示意图

$$h\nu_0 = eV, \lambda_0 V = \frac{hc}{e} \quad (3)$$

由上式可知, 连续谱有与加速高压成反比的短波限 λ_0 , 它与靶材和光管电流均无关。测出短波限, 也可以推算出普朗克常数 h 。在频率不太高时, 连续谱的强度近似为 $I(\nu) = \text{常数} \cdot Z(\nu_0 - \nu)$, 辐射的空间分布像偶极振子的辐射分布。频率高时偏前向。

连续谱的强度分布与 X 光管阳极与阴极间电压 V , 光管电流 i 和靶元素的原子序数 Z 有关, 其关系为 $I \propto ZiV^2$, 连续谱最大强度对应的波长 $\lambda_{I_{max}}$ 约为短波限 λ_0 的 1.5 倍 ($\lambda_{I_{max}} \approx 1.5\lambda_0$)。

特征 X 射线强度, 当 X 光管靶材一定后, 与管电压 V 和管电流 i 的关系为 $I \propto (V - V_0)^n i$, 其中 V_0 为激发电势, 它对应于激发某线系所需的最低能量。当 V 是 V_0 的 2~3 倍时, $n \approx 2$, 当 $V > 3V_0$ 时, $n \approx 1$ 。

XIX 技术中, 入射光子除与样品中原子发生光电作用产生内壳层空位外, 还可以发生相干散射和非相干散射 (康普顿散射), 这些散射光子进入探测器, 形成 XIX 分析中的散射本底。另外, 样品中激发出的光电子又会产生轫致辐射, 但这产生的本底比散射光子本底小得多, 且巨能量也较低, 一般在 3keV 以下。所以 XIX 能谱特征是: 特征 X 射线峰叠加在散射光子峰之间的平坦的连续本底谱上。如图 (5) 能谱示意图所示。a 峰是相干散射光子峰, b 是康普顿散射光子峰, c 是特征 X 射线峰, d 是散射光子在探测器中的康普顿边缘。测量特征 X 射线常用 Si(Li) 探测器, 它的能量分辨率高, 适用于多元素同时分析, 也可选用 Ge(Li) 或高纯 Ge 探测器, 但均价格昂贵。另外还有电致冷 Si-PIN, CdTe, HgIz 等探测器在某些特定仪器中使用。

在 X 荧光分析中, 对于轻元素 (一般指 $Z < 45$ 的元素) 通常测其 KX 射线, 对于重元素 ($Z > 45$ 的元素), 因其 KX 射线能量较高且比 LX 射线强度弱, 常测其 LX 射线, 这样测量的特征 X 射线能量一般在 20keV 以下。正比计数管在此能量范围, 探测效率较高, 其能量分辨率虽比 Si(Li) 探测器差, 但远好于 NaI(Tl) 闪烁探测器, 质量好的正比管 5.89keV 处分辨率优于 14%, 能满足一般实验的需要。

用正比计数管作探测器的 X 荧光分析系统如图 (6) 所示。为防止探测系统中脉冲叠加, 除适当选择放射源强度外, 前置放大器和主放大器要有抗堆积措施。多道分析器适宜作多元素同时分析, 数据可由计算机获取和处理。

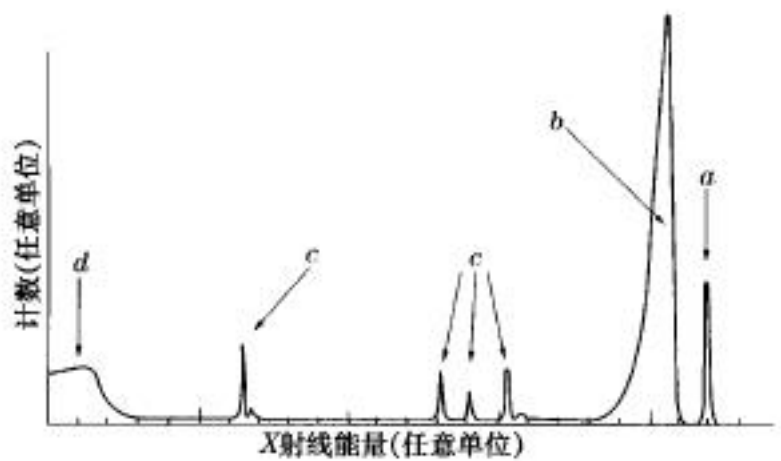


图 5: 光子激发的特征 X 射线能谱示意图

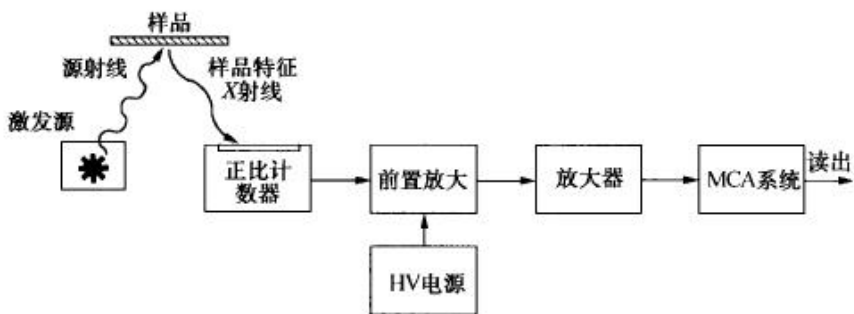


图 6: XIX 装置示意图

5 实验内容

1. X 荧光分析仪的能量、效率刻度仪器在实测样品前需要作能量和效率标定。常用的方法有两种：
 - (a) 用标准 X 射线源进行校刻

即用一组射线能量和强度已知的源，探测器对其张一固定立体角，在固定时间内测出对应能量的 X 射线峰和计数，作出能量效率校正曲线。常用的校刻标准源及其 K_{α} X 射线能量是 ^{54}Mn (5.41keV)、 ^{55}Fe (5.90keV)、 ^{57}Co (6.4keV)、 ^{65}Zn (8.05keV)、 ^{85}Sr (13.39)、 ^{88}Y (14.16)keV、 ^{57}Co (14.4keV)。
 - (b) 用标准样品进行校刻。可以选一组特征 X 射线峰相隔较远，峰不重叠的元素，以不同的相对含量制成一组样品，在与测试样品相同的几何条件下，测出各元素的特征 X 射线峰所在的道址和相应的计数。由特征 X 射线能量数据表查出标样中各元素特征 X 射线的能量，作出能量一道址曲线和相对含量—特征峰强度曲线。

本实验采用的是方法二。

2. 莫塞莱定律的应用

1913 年，莫塞莱 (H. G. J. Moseley) 从实验结果发现元素的同系特征 X 射线的频率 与原子序数 Z 有如下关系：

$$\sqrt{\nu} = \text{常数} \cdot (Z - \sigma) \quad (4)$$

其中 $Z - \sigma$ 是多电子原子中，“指定电子”受到原子核与其余电子合作用的“有效核电荷”， σ 是实验得出的经验常数，称为屏蔽常数。图 (7) 是 K 系、L 系特征 X 射线的 Moseley 图。对

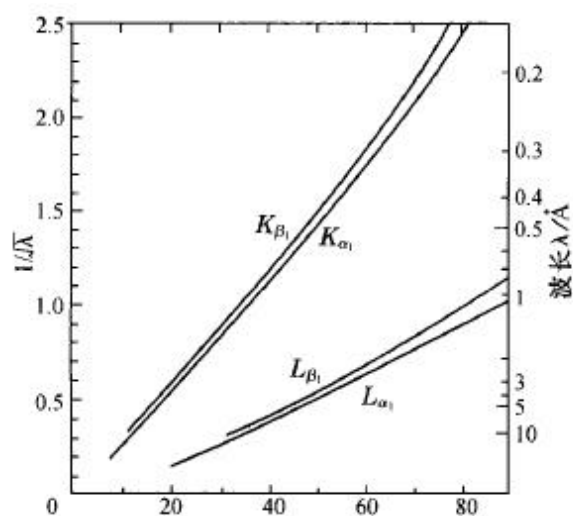


图 7: Moseley 图

于多电子原子、特征 X 射线能量等于跃迁电子初、终态壳层能量差，即

$$E = B_i - B_f = Rhc(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (5)$$

用数种单元素样品，测出它们的特征 X 射线能量，画出 Moseley 图，从实验上得出对应线系的屏蔽常数 σ ，推算出里德堡常数 R 。由元素特征 X 射线相应谱线在 Moseley 图上的位置，可以识别出该元素，即定出它的原子序数 Z 。这是历史上第一个直接测定元素原子序数的方法，这也是特征 X 射线谱，被称为元素标示谱的原因。

6 实验数据

1. 实验数据如表 (1):

表 1: 实验数据及处理

样品成分	道址	线系	特征 X 射线能量 (keV)
Pb	270,322	L_{β_1}, L_{β_2}	10.5515, 12.6137
Mo	449	K_{α_1}	17.47934
Cu	201	K_{α_1}	8.04778
黄 Cu	208	K_{α_1}	8.04778
镀 Zn 的 Fe	158,217	K_{α_1}	6.40384(Fe), 8.63886(Zn)
Y_2O_3	[279], 387(Y), 426(塑料)	K_{α_1}	14.9584(Y)
TiO_2	14(O), 115(Ti), [157], 424(塑料)	K_{α_1}	4.51084(Ti)

说明: 其中，Pb 的 K_{α} 系对应的能量远远大于其它元素的 K_{α} 系能量，因此我们考虑 Pb 的 K_{β} 系，发现与其它元素组成的特征峰强度曲线符合较好。表中的方括号部分是我们实验中测到的峰，但是不能确定是哪种元素，因此用方括号标出以示区别。“道址”一栏中的圆括号内

是我们对观测到的特征峰的推测，其中道址为 426、424 的物质为一极宽广的峰，且仅出现在有塑料容器的 TiO_2 和 Y_2O_3 中，因此我们猜测可能是塑料容器的影响。用自带的塑料尺测试后发现其特征峰曲线也符合这个特性，所以我们暂时认为这个特征峰代表塑料。

2. 特征峰强度曲线

画出道址 (Channel) 与能量 (Energy) 的散点图，并进行线性拟合，如图 (8)：从图中可以看出，

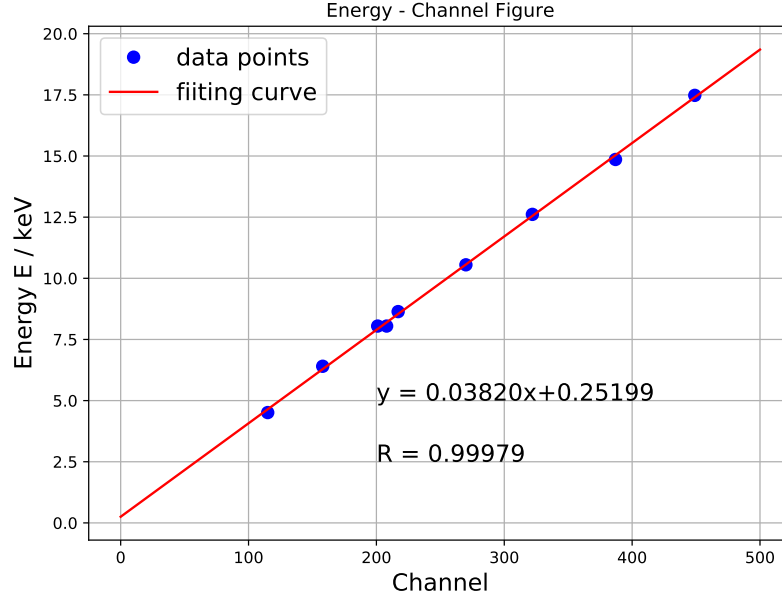


图 8: 特征峰强度曲线

拟合曲线的相关系数为 $R = 0.99979$ ，说明数据的线性非常好，给出能量与道址的关系式：

$$E = 0.0382 * Channel + 0.25199 \text{ (keV)} \quad (6)$$

3. Moseley 定律的应用

根据上文式 (5)，可以推出：

$$\sqrt{E} = \sqrt{Rhc \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)} (Z - \sigma) = k(Z - \sigma) \quad (7)$$

对于 K_α 线系， $n_f = 1$, $n_i = 2$ ，可利用表 (1) 中的各元素的能量和原子序数拟合曲线来求出 A 和 σ 。拟合曲线的结果如图 (9)：可见其线性也非常好。给出拟合曲线的方程：

$$\sqrt{E} = 1.30159 \times 10^{-9} Z - 1.82605 \times 10^{-8} \quad (8)$$

根据斜率 $k=1.30159 \times 10^{-9}$ 和截距 $b=k\sigma=1.82605 \times 10^{-8}$ ，可以推出里德堡常量和屏蔽常数分别为：

$$R = \frac{4k^2}{3hc} \approx 1.1364 \times 10^7 \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{b}{k} \approx 1.6069 \times 10^{-15} \quad (10)$$

理论上，有了这两个关系式，我们就可以用 X 荧光分析仪进行样品分析。

表 2: Moseley 表

元素	Z	E(J)	\sqrt{E}
Mo	42	2.79669e-15	5.28838e-8
Cu	29	1.28764e-15	3.58838e-8
Fe	26	1.02451e-15	3.20096e-8
Zn	30	1.38222e-15	3.71782e-8
Y	39	2.39334e-15	4.89218e-8
Ti	22	7.21734e-16	2.68651e-8

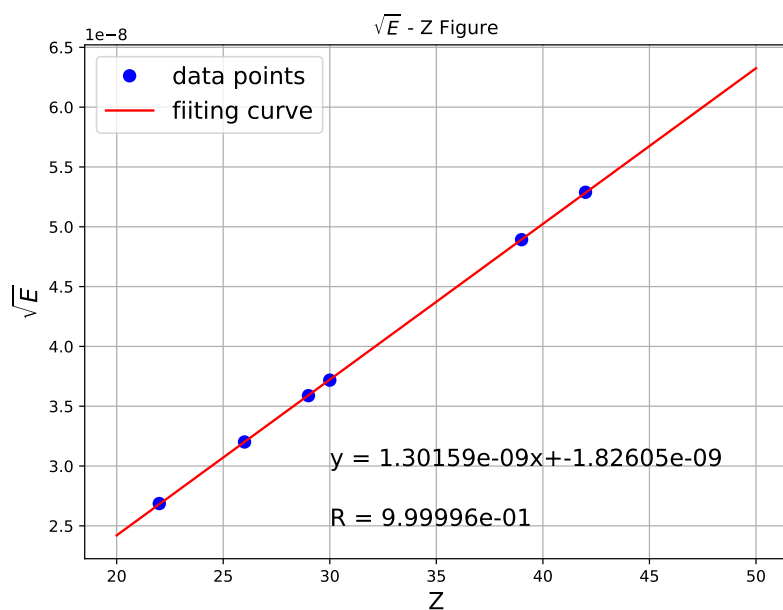


图 9: Moseley 图

4. 测量未知材料样品

我们选取了一个 25 美分的硬币和 1 元人民币硬币进行测试，其测量道址分别为：200，186。

代入公式 (6) 和 (8)，可以推出它们的材料结果如表 (3)：

表 3: 检测未知样品

样品	道址	Z	int(Z)	推测元素
25 美分硬币	200	28.7	29	Cu
	80	19.1	19	K
1 元硬币	186	27.8	28	Ni
	77	18.8	19	K

从表 (3) 中可以看出，两枚硬币的主要金属成分分别为 Cu 和 Ni，经上网查询，确实如此。但是还检测到了 K 元素，我们并不清楚其产生原因。猜测可能是硬币受到环境中的 K 元素污染

导致。

7 思考题

7.1 测量样品与标准样品计数率相差很大，对测量有何影响？

我认为没有影响。在教材^[1]中可知，只有在需要知道样品相对元素含量的情况下才需要用到计数率，因此在本实验中，仅仅测量元素种类，并不需要计数率。

7.2 液体样品可以用 X 荧光分析测其成分吗？用何方法，要注意什么？

可以。实验中， TiO_2 和 Y_2O_3 是粉末状的，盛放在塑料容器中。实验中观测到了与塑料特征峰明显不同的特征峰。那么对于液体样品，仅需用类似的容器盛放之，只要液体样品的特征峰与塑料的不重合，就应该可以使用同样的方法测量。

需要注意的是，容器的壁不宜太厚，一面影响样品对 X 射线的吸收。建议先对空的容器进行一次测量，记录容器本底数据，一边与样品数据区分。

参考文献

[1] 黄润生. 近代物理实验. 南京大学出版社, 2 edition, 2008.