

# X 射线标识谱与吸收

黄 康 靖

北京大学 2012 级本科生 学号:masked student id<sup>\*</sup>

(日期: March 18, 2015)

当原子的外层电子向内壳层上的空位跃迁时, 会放出 X 射线光子. 对于不同的原子, 因为其电子壳层结构的不同, 其放出的 X 射线光子的频率谱是不同的. 这一频率谱可以用来唯一地标识和测量某一种特定的元素, 被称为 X 射线的标识谱. 在今天 X 射线标识谱技术已经被广泛地用于各个领域的技术之中. 本实验通过验证性实验, 证明了 X 射线标识谱和对应谱的原子的原子序数之间的关系 - 莫塞莱定律, 并且对于 X 射线与物质的相互作用引发的吸收效应做了研究.

**关键词:** X 射线, 吸收, 标识谱, 多道分析器

---

<sup>\*</sup> [huangkangjing@gmail.com](mailto:huangkangjing@gmail.com); masked phone number

# I. 引言

## A. 背景

1895 年德国物理学家伦琴在研究阴极射线时发现了一种新的射线, 它不能使用肉眼观察到, 但是可以使铂氰化钡的荧光屏发出荧光. 当时伦琴将这一新射线称为 X 射线. 后来为了纪念这一射线的发现者, 也将它称为伦琴射线.

X 射线具有直线传播, 经过电场不产生偏转, 并且穿透力很强的特征. 在其发现后不久, 它就被医学界用作检查人体伤病的工具, 并用来检查金属或者其他物件内部的缺陷. 1912 年劳厄等人研究了 X 射线在晶体上的衍射现象, 证明了 X 射线本质上是一种电磁波, 波长在 0.1 nm 左右. 1913-1914 年莫塞莱发现了元素发出的标识 X 射线能量与原子序数之间的关系, 即莫塞莱定律. 利用莫塞莱定律, 1923 年人们发现了元素钨. 随着闪烁计数器, 硅探测器等 X 射线能谱测量仪器的发展, 利用标识 X 射线来确定材料的化学组成已经广泛地应用于各种现代谱仪分析技术中.

由于 X 射线的这些优越的特性与广泛的应用, 对于 X 射线的标识谱所满足的物理规律和 X 射线与物质相互作用所满足的物理规律的研究自然具有实在意义. 本实验从这个出发点出发, 验证了 X 射线标识谱所遵守的莫塞莱定律, 并且尝试研究了固体对于 X 射线的吸收过程的相关规律.

## B. 原理

### 1. X 射线标识谱

原子的内壳层上存在一个电子的空位时, 处于较外层的电子将跃迁入内层以填充这个空位, 从而使得整个原子系统的总能量降低而趋于稳定. 根据玻尔的原子理论, 外层电子向内层跃迁时, 会发生光辐射, 其能量为

$$h\nu = \frac{2\pi^2 m_e e^4}{h^2} (Z - \sigma)^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (1)$$

显然, 不同原子所辐射出来的荧光光子能量与该原子的能级结构有关, 实际上, 由于不同种类的原子的能级结构差别足够大, 一旦知道 X 射线荧光的光子能量, 我们就可以断定它来自于哪一种原子. 因此 X 射线荧光被称为特征 X 射线, 意指为某种原子所持有.

1913-1914 年莫塞莱发现, 当 X 射线管中的阳极材料的原子序数  $Z$  逐渐增加时, 相应同一线系的标识 X 射线的波长逐渐减小, 这种波长的变化是单调地逐渐降低, 而不像元素的其他性质那样具有周期性. 他还发现阳极材料的标识 X 射线频率的平方根和原子序数  $Z$  之间存在线性关系, 即:

$$\sqrt{\nu} = K(Z - \sigma) \quad (2)$$

上式称为莫塞莱定律, 式中  $K$  与  $\sigma$  都是常数, 与式 1 相互比较可以得到常数:

$$K = \left[ \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

### C. X 射线的吸收

一束强度为  $I_0$ , 光子能量单一的 X 射线垂直入射到吸收介质上, 由于和吸收介质中原子的相互作用, 出射的 X 射线强度会衰减. 当介质厚度很薄时, 入射 X 射线束的强度的相对减少量与吸收层厚度成正比:

$$\frac{dI}{I} = -\mu_0 dx \quad (4)$$

比例常数  $\mu_0$  称为线衰减系数.

对于 X 射线来说, 线衰减的主要原因是由于线吸收效应 (与吸收介质之间发生的光电效应、康普顿散射和正负电子对产生), 而不是弹性散射. 并且当 X 光子的能量在几十 keV 时, 最主要的相互作用是光电效应, 于是有

$$\mu_0 \approx \tau_{\text{absorption}} \approx \tau_e \quad (5)$$

在式 4 上积分得到

$$I = I_0 \exp(-\tau_e x) \quad (6)$$

设  $\rho$  是吸收介质的密度, 则式 6 可以改写为

$$I = I_0 \exp[-(\tau_e/\rho)\rho x] = I_0 \exp(-\tau_m \rho x) \quad (7)$$

式中  $\tau_m$  称为相应于光电效应的质量吸收系数, 实际工作中采用此式更为方便.

考虑到原子散射光子的具体过程, 应有关系

$$\tau_m \propto \frac{Z^4}{A} \lambda^3 \quad (8)$$

## II. 实验

本实验使用 X 射线照射样品, 使得样品原子的内层电子被激发或者电离, 形成空位, 所使用的激发源为  $^{238}\text{Pu}$  衰变过程中所产生的 X 射线. 光子的能量使用硅探测器和微机多道分析器测量. 具体的实验装置示意图如图 1 所示.

为了防止在实验过程中可能出现的中子泄漏, 整个装置被包在一个石蜡罐内, 唯留一个开口用来替换样品和吸收片.

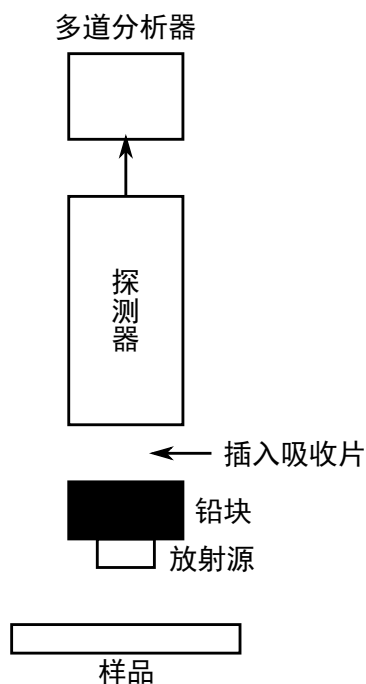
实验先后测量了钼、锆、锶、硒、锌、铜、镍、钴、铁和钛样品的 K 线系 X 射线标识谱, 用于验证莫塞莱定律. 随后又测量了不同厚度的铝片对钼、锆、锌、镍和铁元素的 K 线系 X 射线标识谱的质量吸收系数.

## III. 实验结果及分析讨论

### A. 莫塞莱定律的验证

对于莫塞莱定律的验证实验, 测量结果数据如表 I 所示.

由莫塞莱定律式 2, 以及普朗克关系  $E = h\nu$  和能量  $E$  与多道分析器道数  $N$  之间



**图 1:** 实验装置的示意框图; 放射源放射出的 X 射线轰击在样品上, 产生的特征 X 射线被探测器捕捉后由多道分析器分析.

**表 I:** 莫塞莱定律的验证实验的测量结果表. 表中的峰位和半峰宽度都是使用道数为单位表达的. 因为道数与能量之间的线性关系, 采用道数作为能量的单位不会影响对于莫塞莱定律中线性关系的判断.

样品名称	样品原子序数 $Z$	峰位置	半峰宽度 (FWHM)
Mo	42	1965.27	33.759
Zr	40	1768.45	32.873
Sr	38	1598.91	47.6574
Se	34	1265.88	33.7234
Zn	30	963.36	33.4109
Cu	29	898.73	34.2512
Ni	28	839.78	44.6599
Co	27	774.67	31.6023
Fe	26	715.80	28.8388
Ti	22	507.16	28.0566

的线性关系, 可以得到如下关系:

$$N = p_0(Z - p_1)^2 + p_3 \quad (9)$$

对于表 I 中测得的实验结果, 按照式 9 的形式对其进行拟合, 得到的结果绘制成曲

线, 见图 2.

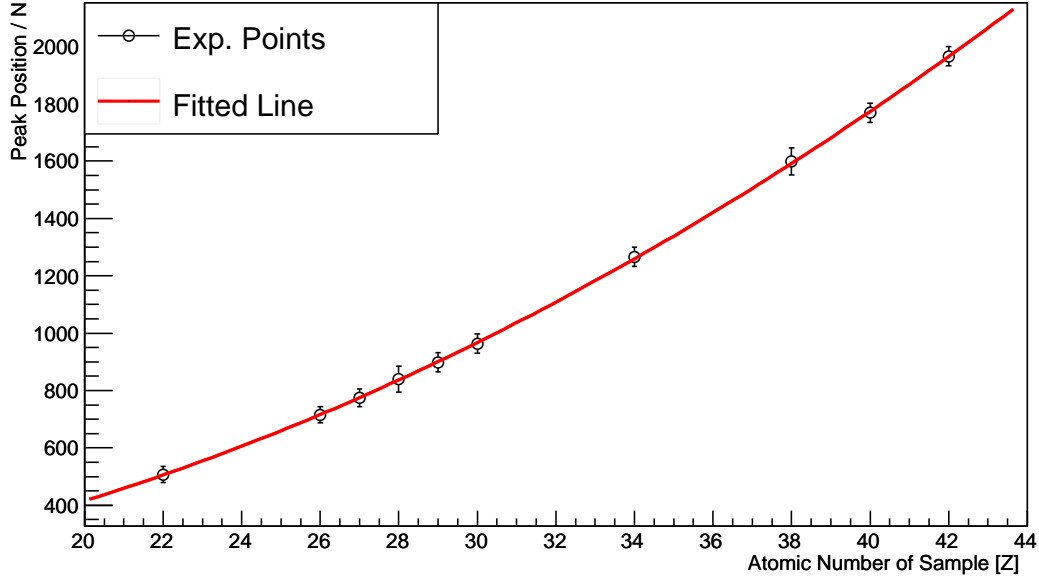


图 2: 莫塞莱定律验证实验的实验数据图像与拟合曲线图像. 拟合采用的公式为式 9, 拟合结果为  $p_0 = 1.26678$ ,  $p_1 = 3.20796$ ,  $p_2 = 58.4646$ ,  $EDM = 1.0241 \times 10^{-6}$ ,  $\chi^2 = 0.108221$

通过图线和拟合数据可以看出, 莫塞莱定律在本实验中得到了较为精确的验证.

## B. X 射线的吸收

对于 X 射线的吸收特性的实验, 实验数据如表格 II 所示.

对于实验数据的初步分析表明, 实验结果对于 X 射线的指数吸收率的偏离较远, 并不能用以验证吸收介质吸收 X 射线的指数吸收率. 分析表明, 这是因为实验使用的硅探测器探头大小太小, 导致在测量中的峰计数率严重受到吸收片和样品的摆放位置影响, 从而引入过大的误差, 使得测量失去了意义.

## IV. 结论

实验成功地验证了莫塞莱定律所指出的原子的标识 X 射线频率的平方根和原子序数之间的线性关系, 但未能对于 X 射线在吸收介质中的吸收规律作出有意义的实验测量.

**表 II:** X 射线吸收特性的测量实验结果表, 表中计数率即为峰下的平均每秒计数, 单位为计数/秒.

Al 片层数	0	2	4	6	8
Mo 谱峰计数率	98.49	31.20	14.32	11.02	6.68
Al 片层数	0	2	4	6	8
Sr 谱峰计数率	384.32	83.59	21.37	16.41	4.92
Al 片层数	0	2	4	6	8
Se 谱峰计数率	484.01	42.31	12.37	3.34	0.75
Al 片层数	0	1	2		
Fe 谱峰计数率	205.35	2.86	0.46		
Al 片层数	0	1	2	3	4
Zn 谱峰计数率	438.77	41.38	12.33	5.66	1.29
Al 片层数	0	1	2	3	
Ni 谱峰计数率	310.75	5.89	3.49	0.95	

## V. 致谢

感谢王思广老师在实验中认真而专业的指导.

---

[1] 吴思成, 王祖铨 2010 近代物理实验 (第三版)(北京: 高等教育出版社) 第 29 页.

## A. 代码

本实验中的实验数据处理使用了 Cern 开发的 ROOT 数据分析框架软件, 数据分析的相关代码附在了文后.

```
1 void analyze()
2 {
3     TGraphErrors * tge = new TGraphErrors("data.txt", "%lg %lg %lg");
4     tge->SetMarkerStyle(kOpenCircle);
5     tge->SetMarkerColor(kBlack);
6     tge->SetLineColor(kBlack);
7     tge->SetTitle("; Atomic Number of Sample [Z] ; Peak Position / N");
8     TF1 * f = new TF1("pdf", "[0]*(x-[1])^2 + [2]", 0, 100);
9     TFitResultPtr res = tge->Fit(f, "S");
10    res->Print();
11    tge->DrawClone("APE");
12    f->DrawClone("Same");
13
14    TLegend * tl = new TLegend(.1, .7, .4, .9);
15    tl->SetFillColor(0);
16    tge->SetFillColor(0);
17    tl->SetTextSize(.05);
18    tl->AddEntry(tge, "Exp. Points");
19    tl->AddEntry(f, "Fitted Line");
20    tl->DrawClone("Same");
21 }
```