

X 射线标识谱与吸收实验

隋源*

北京大学物理学院 学号: 2000011379

本实验通过激发源激发 Mo, Sr, Zn, Ni, Fe 等样品的 K_α 线系 X 射线标识谱并用硅漂移探测器接收, 研究了标识 X 射线的能量-原子序数关系及被铝片吸收的规律。实验结果验证了莫塞莱定律并表明射线强度根据铝片厚度指数衰减, 测定了 K_α 线系的屏蔽系数, 验证了光电效应的质量吸收系数随波长和原子序数的变化关系。

关键词: 莫塞莱定律, X 射线标识谱, X 射线吸收

I 引言

X 射线最初由德国物理学家伦琴 (W.C.Röntgen) 在 1895 年研究阴极射线时发现, 并被劳厄等人于 1912 年证实是一种电磁波。

根据玻尔的量子理论, 当原子的外层电子跃入内层时会发生光辐射, 由于不同种原子能级差异足够大, 这种辐射又被称为标识 X 射线。1913-1914 年莫塞莱 (Moseley) 发现了 X 射线管中阳极材料的标识 X 射线频率平方根与原子序数间的线性关系, 即莫塞莱定律。

如今, 利用标识 X 射线确定材料的化学组成已广泛应用于各种现代谱仪分析技术中。本实验通过测定不同样品的标识 X 射线谱, 分析其能量和原子序数的变化关系, 验证莫塞莱定律, 并进一步研究铝片对标识 X 射线的吸收规律。

II 理论

(一) 标识 X 射线的产生

莫塞莱定律的具体形式

$$\sqrt{\nu} = K(Z - \sigma) \quad (1)$$

*suiyuan@stu.pku.edu.cn

其中 ν 为光子频率, Z 为原子序数, σ 为屏蔽系数 (针对同一线系)。 K 由玻尔的原子理论给出

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

其中 m 为电子质量, n_1, n_2 分别为电子终态和初态所处壳层的主量子数。

(二) 俄歇过程

外层电子退激填补内层空位时, 除了发射标识 X 射线外还可将退激能量给予原子中的另一电子, 使之激发并脱离原子束缚, 即俄歇过程。随原子序数增加, 俄歇电子跃迁概率减小, X 射线荧光跃迁概率增加, 二者总和为 1。

(三) X 射线的吸收

当介质厚度很小时, 垂直入射的单色 X 射线的出射的强度衰减满足

$$\frac{dI}{I} = -\mu_0 dx \quad (3)$$

其中 I 为入射强度, dI, dx 分别为强度改变量和薄膜厚度 μ_0 为线衰减系数。可以得到初始强度为 I_0 的射线出射后强度的大小

$$I = I_0 \exp(-\mu_0 x) \quad (4)$$

由于线衰减系数由线吸收系数 τ_a 和弹性散射系数 σ_s 组成, 而对于 X 射线而言, 前者比后者大得多, 且光电效应在吸收过程中占主导。故有近似

$$\mu_0 = \tau_a + \sigma_s \approx \tau_e = \tau_m \rho \quad (5)$$

其中 τ_e 为光电吸收的线衰减系数, ρ 为介质密度, τ_m 为光电效应的质量吸收系数, 故

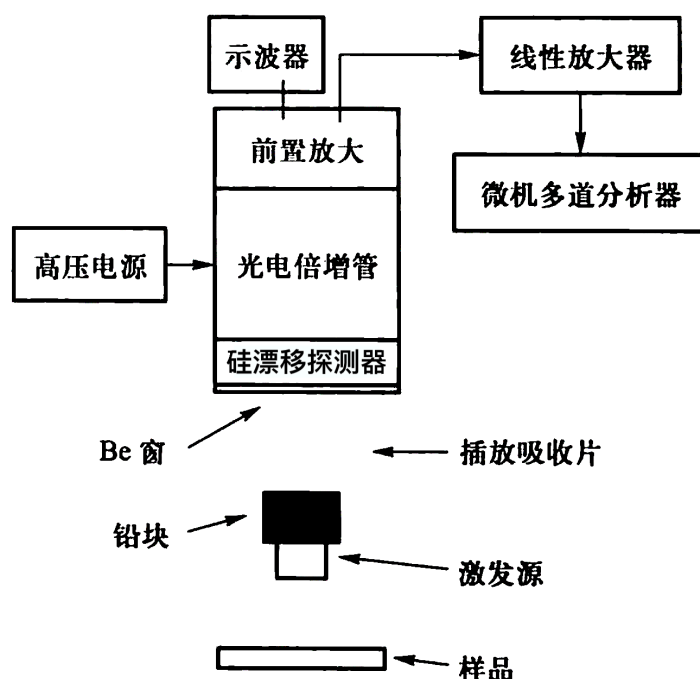
$$I = I_0 \exp(-\tau_m \rho x) \quad (6)$$

根据实验数据, 能量低于 1MeV 的 X 射线光电吸收截面 σ_a 近似与介质原子序数的四次方成正比, 与入射 X 射线波长 λ 的三次方成正比, 于是

$$\tau_m = \frac{\tau_e}{\rho} = \frac{N\sigma_a}{NA} \propto \frac{Z^4}{A} \lambda^3 \quad (7)$$

III 实验

本实验使用 ^{238}Pu 激发源产生的 X 射线照射 Ti, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Sr, Zr, Mo 样品, 通过硅漂移探测器采集标识 X 射线谱, 经光电倍增管、前置放大和线性放大后通过微机多道处理数据得到光子频率与原子序数变化关系。实验全程固定放大倍数, 选用峰左右接近最低点的区域记录峰面积和峰道址, 控制获取时间为 120s。对 Fe, Ni, Zn, Sr, Mo 开展吸收实验, 吸收片选用每层厚度为 $5.3\text{mg}/\text{cm}^2$ 的铝片, 吸收体厚度通过铝片层数控制。



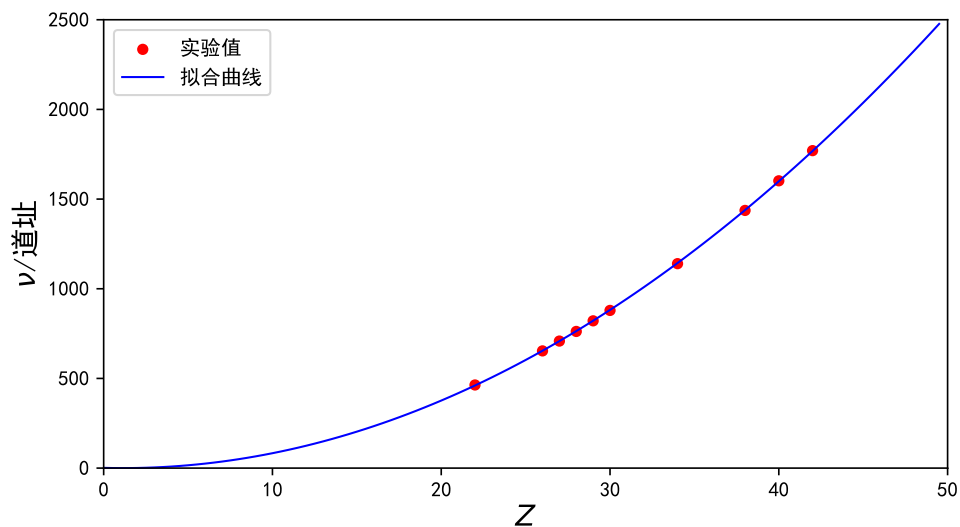
图一：X 标识谱实验装置示意图 [1]。包括激发源、样品、硅漂移探测器、光电倍增管、示波器、前置放大、线性放大和微机多道分析器。其中激发源位于样品和吸收片中间，上方用铅块遮挡。为防止中子泄漏，装置被密闭在石蜡罐中，通过拉开活塞向装置中更换样品和吸收片。实验过程中放大倍数控制在 $65.551\times$ 。

IV 结果与讨论

通过将不同样品的峰道址方根及其原子序数线性拟合得到的结果为

$$\sqrt{\nu} = 1.0291 \times (Z - 1.1468), \quad r = 0.99998 \quad (8)$$

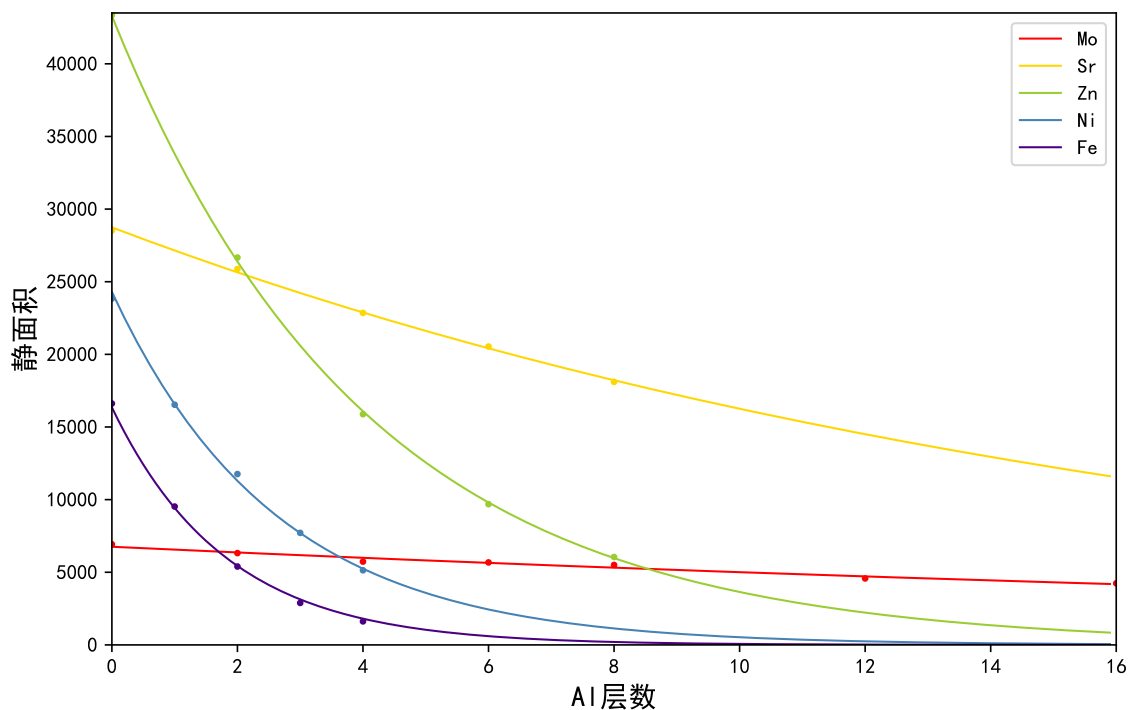
即样品 K_{α} 线系的屏蔽系数的实验值为 $\sigma = 1.147$ 。这与理论比较吻合， $r = 0.99998$ 基本验证了莫塞莱定律。将直线重新改为曲线，可作出频率和原子序数变化关系的曲线如下



图二：莫塞莱定律验证曲线。横坐标为原子序数，纵坐标为峰道址。红色点从左到右依次为 Ti, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Sr, Zr, Mo 的实验数据点，蓝色曲线为改直拟合后改曲的曲线。对应的直线拟合系数为 0.9998。

可以看到实验数据较好地符合二次方行为，验证了莫塞莱定律。

接下来通过对式 (6) 曲线改直，根据不同 Al 吸收层厚度时不同样品峰净面积的变化拟合其指数衰减行为，并由斜率得到 τ_m 的计算值。各样品曲线如下图所示



图三：Al 吸收对不同样品标识 X 射线的的能力。横坐标为 Al 层数， $\rho x = 5.3\text{mg}/\text{cm}^2$ ，纵坐标为对应层数下的峰净面积。不同样品的吸收曲线用不同颜色标出，曲线周围的散点为对应样品的实际测量点，曲线为改直拟合后改曲结果。拟合得到的数据见表一。

可以看到 Al 片对 Zn, Ni, Fe 样品标志 X 射线的吸收能力较强，对 Mo, Sr 则较弱。

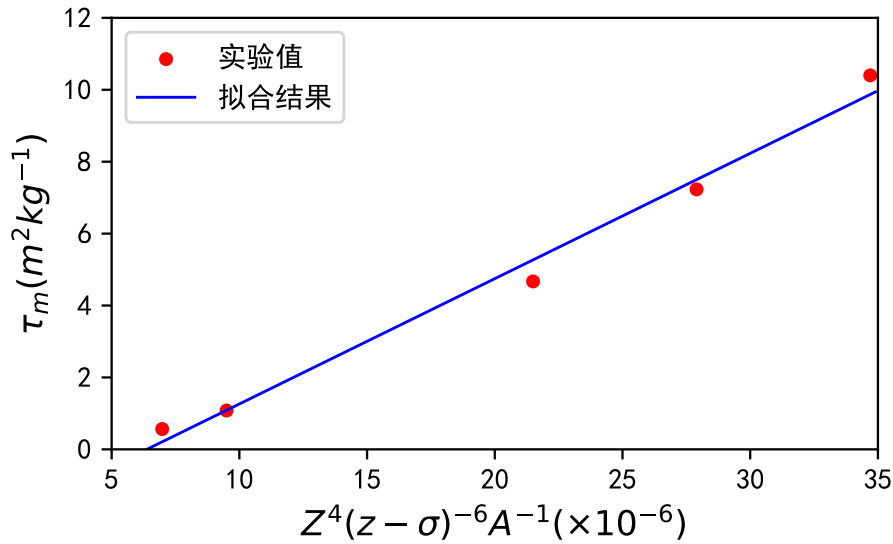
可以看到实验数据较好地指数衰减行为，不同样品的 X 射线吸收拟合数据如下表

样品	Mo	Sr	Zn	Ni	Fe
$\tau_m(\text{m}^2/\text{kg})$	0.566	1.08	4.67	7.23	10.4
相关系数 r	-0.9864	-0.9992	-0.9999	-0.9992	-0.9986

可以看到吸收曲线的相关系数较好，基本验证了指数衰减规律，对应计算得到的光电效应质量吸收系数 τ_m 的值的误差在 3% – 7% 之间。为了验证其与原子序数、原子质量的关系进行线性拟合（注意到 $\lambda^3 \propto (Z - \sigma)^{-6}$ ），结果为

$$\tau_m = 3.485 \times 10^5 \frac{Z^4}{(Z - \sigma)^6 A} - 2.223, \quad r = 0.994 \quad (9)$$

拟合结果如下表



图四： τ_m 与原子序数的变化关系。 τ_m 的数据来自表一，由式 (8) 的拟合结果给出 λ 并进行线性拟合，系数为 0.994。

可以看到数据基本成正比变化，考虑到理论近似和高次数据误差，这基本验证了 $\tau_m \propto \frac{Z^4}{A} \lambda^3$ 。

观察数据发现验证莫塞莱定律时数据质量较好，而在吸收实验过程中实验数据误差较大。可能的原因一方面来自理论上的近似（式 (3) 到式 (6) 的一系列近似，即样品厚度，非光电效应影响等）；另一方面则来自于实验操作产生的误差，如 Al 吸收片的摆放角度偏差又可能引起吸收环境的改变，对强度的测量产生影响，甚至导致无效数据，最终误差传递导致最后验证 τ_m 和原子序数的正比关系时拟合系数的下降。

V 结论

本实验通过激发并分析不同原子序数样品的 K_{α} 线系 X 射线标识谱，实验结果验证了莫塞莱定律及 X 射线入射铝片强度随厚度指数衰减的规律，测定了 K_{α} 线系的屏蔽系数并验证了光电效应的质量吸收系数随 X 射线波长和原子序数的变化关系。

VI 致谢

感谢王思广老师对实验仪器的讲解和实验操作的引导，以及对实验安全事项的提醒；感谢合作者张意飞同学在实验中合作完成实验内容并开展富有意义的讨论。

[1] 吴思诚, 荀坤. 近代物理实验 [M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2015.

附录 I: 思考题

(一) 预习思考题

见附录 II 实验记录中的预习部分。

(二) 实验过程思考题

1. 实验中锑样品和硒样品分别用的是醋酸锑和氧化硒，请问这会对实验结果产生什么影响？为什么？

由于 C, H, O 元素对 X 射线不敏感，因此醋酸锑和氧化硒样品发出的仍是锑和硒标志 x 射线，即峰道址以及峰面积随吸收的衰减不会产生影响，相比同等质量形状的单质样品仅有峰面积等比例地减小。

2. 在做验证莫塞莱定律实验时应该先用哪一种靶样品？为什么？

先做 Mo 样品，因为在待测样品中 Mo 的标识 X 射线能量最高，而为了验证莫塞莱定律，实验过程中的信号放大不能改变，为了使每个样品都能观察到射线峰，首先需要用 Mo 样品进行测量并调整信号放大，使得 Mo 的峰显示在微机屏幕的最右端，之后维持放大增益测量其他样品。

3. 在做吸收实验时，X 射线的强度如何测量？能否用峰为附近一定道址范围内的总计数表示强度？为什么？如果能，道址范围该如何确定？

X 射线强度通过测量能谱中选取的峰的净面积（减去本底）给出，因为在实际实验中产生的散射和自然线宽等因素，需要用附近一定道址范围内的总计数表示强度。本实验使用的硅漂移探测器能量分辨率很高，因此只需要选中峰的左右最低点作为左右道址即可。

4. 在做吸收实验时，X 射线的谱峰形状会随 Al 吸收膜的厚度而变化，为什么？应该用什么方法测量，才能比较吸收膜厚度不同时的 X 射线强度。

观察实验中记录的不同厚度下的峰半高宽（见附录 II），可以发现相同样品不同 Al 厚度的峰半高宽几乎没有变化，这是因为本实验使用的硅漂移探测器能量分辨率很高，因此谱线比较锐利。

5. Al 膜厚度为零时的 I_0 该如何测量？

为了控制变量，厚度为零时的 I_0 应该通过放置实验台上标记为 0 层的透明窗进行吸收测量，从而避免吸收板用透明胶封装 Al 带来的系统误差。

6. 对原子序数较小的样品（如 Fe），当铝吸收膜较厚时，在原来峰位的右边（高能端）会出现一新的峰，请在对实验现象进行仔细观察的基础上对此给予解释。

实验观察中 Fe 样品被 3, 4 层 Al 吸收时确有新的高能偏峰产生，推测是对于该样品的标识 X 射线而言，铝的厚度已经较厚，因此产生了新的散射现象，从而产生了新的峰。但此峰的面积很小，相比主峰可忽略不计，因此不影响实验结果。

(三) 实验报告思考题

1. 计算原子光电吸收截面并估计汤姆孙散射截面对结果的影响。

原子光电吸收截面为

$$\sigma_a = \tau_m A$$

汤姆孙散射截面为

$$\sigma_t = \frac{Ze^4}{6\pi\epsilon_0^2 m_e^2 c^4}$$

可以给出不同样品的原子光电吸收截面如下表。可以看到汤姆孙散射截面普遍比光电吸

样品	Mo	Sr	Zn	Ni	Fe
$\sigma_a(10^{-25}\text{m}^2)$	0.902	1.57	5.07	7.05	9.65
$\sigma_t(10^{-27}\text{m}^2)$	2.79	2.53	2.00	1.86	1.73

收截面小两个量级，且原子序数越小这种影响越小，因此可以忽略不计。

2. 计算硅漂移探测器的能量分辨，并解释为什么能量越小，能量分辨率越大。

样品	Mo	Zr	Sr	Se	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	Ti
能量分辨/%	1.3	1.7	1.6	1.8	2.2	2.6	2.4	2.9	2.6	3.6

表中是原子序数从大到小样品的能量分辨表，数据由半高宽除以道址给出。可以看出能量分辨基本随能量减小而增大。主要的原因可能是随着能量减小，相同放大倍数下探测器的能量沉浸越来越受到康普顿散射等其他效应的影响，从而导致光电效应峰的辨识度下降，因而能量分辨上升。

附录 II: 实验记录

9.28.2007 X射线标识谱与吸收

(预习部分)

[实验原理]

(一) 标识X射线的产生

玻尔原子理论: $h\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} (Z-\sigma)^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$ (1)

莫塞莱定律: $\sqrt{\nu} = K(Z-\sigma)$ (比较可得 $K = \sqrt{\frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)}$) (2)

(二) 俄歇过程

电子空位 $\begin{cases} \rightarrow \text{外层跃迁} \xrightarrow{\text{发出}} \text{X射线} \\ \rightarrow \text{外层跃迁} + \text{脱离束缚} \text{ (俄歇过程)} \end{cases}$

原子序数 \uparrow , X光 \uparrow , 俄歇 \downarrow . $P(\text{俄歇}) + P(\text{X光}) = 1$

(三) X射线的吸收

$$\frac{dI}{I} = -\mu_0 dx \Rightarrow I = I_0 \exp(-\mu_0 x) \quad (3)$$

I 为透射强度, μ_0 为线性吸收系数.

$$\mu_0 = \frac{\tau_0}{\Delta} + \sigma_{\text{散}} \propto \frac{\tau_0}{\Delta} \quad (4)$$

τ_0 : 线性吸收系数 (光电, 康普顿, 电子对)

$\sigma_{\text{散}}$: 弹性散射系数 (汤姆孙散射)

$$\Rightarrow I = I_0 \exp(-\tau_0 x) = I_0 \exp(-\mu_m \rho x) \quad (5)$$

$$\mu_m = \frac{\tau_0}{\rho} \propto \frac{Z^4}{A} \lambda^3, \text{ 质量吸收系数.} \quad (6)$$

[实验装置]

激发源 ($^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$) 发射X射线
 射样品, 产生光子用 NaI(Tl) 和微机电测量. 铅块用于遮挡激发源的X射线进入 NaI(Tl). 为防止中子泄漏, 整个装置用石蜡密封.

[实验内容]

(一) 验证莫塞莱定律

验证X光子频率的平方根与原子序数之间的线性关系。

利用Ti, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Sr, Zr, Mo, 设置好多道分析器, 线性的增益和光电倍增管, 通过读取峰道址 N 来验证 \sqrt{N} 和 Z 的线性关系。

(二) X射线的吸收

测量Al对Mo, Sr, Zn, Ni, Fe等K线或X射线的质量吸收系数, 通过插入不同厚度的铝片验证式(3)和式(6)。

[预习思考题]

1. 电子空穴通过X射线激发产生。也可用高能电子轰击靶原子得到。
2. X射线频率通过在NaI闪烁器中沉积能量后由多道分析器的道址读出。也可用通过晶体衍射等方法测定。
3. 测吸收的条件是膜足够薄。
4. 17 keV的光子康普顿散射最多损失6%-7%的能量。

July 2022.9.28

实验笔记

[实验步骤]

1. 首先放入Mo样品, 调整放大倍数使最高计数位于道数右端, 开始测量。通过Define ROI选中峰, 记下峰道址, 半高宽, 净峰计数之后取出。之后保持放大倍数测量Sr, Se, Zn, Ni, Fe
2. 依次放入Mo, Sr, Zn, Ni, Fe并放入适当的铝片, 记录数据
3. 用道址平均值和原子序数进行线性拟合

面积和厚度曲线改正后。

曝光时间=120s

样品	峰道址	半高宽	净面积	计数	Gain
Mo	1771.64	25.1554	7318	60.98	65.551x
Mo 1	1770.16	23.8604	7090	59.74	
Sr	1436.75	23.2572	29229	243.57	
Sr	1436.75	23.2572	29229	243.57	
Se	1139.93	20.6511	43369	361.41	
Zn	879.17	19.1839	45418	378.48	
Ni	761.96	18.6866	28720	239.33	
Fe	653.50	17.2292	22595	188.29	
Mo 0	1771.282	26.1871	5926	61.2805	
Mo 2	1771.94	26.6166	6321	58.55	
Mo 4	1771.42	25.2365	5733	55.61	
Mo 6	1772.08	26.1899	5980	59.07	
Mo 8	1772.36	26.2637	5678	56.50	
Mo 12	1771.72	25.5494	5502	56.44	
Mo 16	1772.16	26.2768	4577	49.52	
Sr 0	1439.09	24.1777	28523	237.69	
Sr 2	1438.77	24.7005	25875	215.63	
Sr 4	1439.00	25.4952	22855	190.46	
Sr 6	1439.04	24.7657	20539	171.16	
Sr 8	1439.05	24.3394	18104	150.87	
Zn 0	880.65	21.0274	43363	361.35	
Zn 2	880.85	20.8313	26664	222.20	
Zn 4	880.91	21.8814	15879	132.32	
Zn 6	880.79	19.0779	9687	80.72	
Zn 8	880.98	21.9833	6051	50.42	

	峰	半高宽	净面积	计数	
Ni	0	763.67	20.6812	2384	198.68
Ni	1	763.63	19.9743	16532	137.77
Ni	2	763.59	20.8866	11762	98.02
Ni	3	763.73	20.0884	7712	64.27
Ni	4	763.70	18.7343	5137	42.81
Fe	0	654.64	19.4075	16615	138.46
Fe	1	654.31	19.7547	9524	79.37
Fe	2	654.64	18.4360	5396	44.97
Fe	3	654.57	19.8105	2890	24.08
Fe	4	654.21	15.8993	1620	13.50
Zr	\	1601.90	26.9162	8381	75.56
Cu	\	821.15	21.0378	41019	344.82
Co	\	708.33	20.5327	27009	225.07
Ti	\	463.49	16.7679	6010	50.08