

# 用正比计数器测量 X 射线的吸收和特征谱

钱思天 2001112187

2021 年 4 月 7 日

## 摘要

本实验利用了正比探测器和多道计数器,对经由  $^{238}\text{Pu}$  放射源激发的不同样品特征 X 射线进行了测量。通过对铁、钴、锗、铜、锌等元素的特征 X 射线测量,结合参考  $K_\alpha$  能谱对多道计数器进行了能量刻度。并利用刻度后的测量系统测量了三个未知样品的特征 X 射线能量,继而确定了元素种类。而后,通过添加不同厚度的铝吸收片的铜特征 X 射线的测量结果,测得了铝对 X 射线的线性吸收系数。最后,利用了  $^{55}\text{Fe}$  的特征 X 射线的测量结果,评估了正比探测器的分辨本领。

关键词: 正比计数器、特征 X 射线、线性吸收系数

## 1 背景简介

### 1.1 实验原理

#### 1.1.1 本征 X 射线谱

原子核通过核衰变过程(内转换及轨道电子俘获)或由外部射线激发而在其内层产生电子空穴,当外层电子向内层跃迁时发射的射线即为特征 X 射线。玻耳理论指出电子跃迁时放出的光子具有一定的波长  $\lambda$ , 它的能量为:

$$h\nu = Z^2 \frac{2\pi^2 m_0 e^4}{h^2} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (1)$$

其中  $n_1$ 、 $n_2$  为电子终态、始态所处壳层的主量子数,对  $K_\alpha$  线系  $n_1 = 1, n_2 = 2$ 。根据特征 X 射线的能量,可以辨认激发原子的原子序数。

#### 1.1.2 X 射线的吸收

X 射线是一种能量较低的电磁波,它的波长在  $100\text{\AA}$  到  $0.01\text{\AA}$  之间。当一束单色 X 射线垂直入射到某种材料上时,通过吸收体后的 X 射线强度将减弱,即 X 射线被物质吸收。它包含吸收和散射两个过程。吸收过程主要包含光电吸收即光电效应。散射过程包含康普顿散射和汤姆逊散射。

设一厚度及成份均匀的吸收体,其厚度为  $t$ , 每立方厘米有  $N$  个原子。若能量为  $h\nu$  的准直光束,单位时间内垂直入射到吸收体单位面积上的光子数为  $I_0$ , 那么通过厚度为  $t$  的物质后,透射出去的光子数为  $I(t)$ , 并表示为:

$$I(t) = I_0 \exp(-\mu t) \quad (2)$$

式中  $\mu$  定义为线性吸收系数,  $\mu = N \cdot \sigma$ ,  $\sigma$  为截面。

对于铝吸收材料,当 X 射线的能量低于  $40\text{KeV}$  时,光电效应占优势,康普顿散射可以忽略。光电效应的线性吸收系数为

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} (\text{cm}^2/\text{g}) = \phi_0 Z^5 \alpha^4 2^{5/2} (m_0 c^2 / h\nu)^{7/2} \frac{N_A}{A} \quad (3)$$

式中,  $\phi_0 = \frac{8}{3}\pi r_0^2$ ,  $r_0 = \frac{e^2}{m_0 c^2}$ ,  $\alpha \sim \frac{1}{137}$ , 而  $N_A$  是阿伏伽德罗常数,  $A$  是原子量。将铝元素代入, 得

$$\mu_m^{\text{Al}} = 52.694 \text{cm}^2/\text{g} \quad (4)$$

### 1.1.3 正比计数器

正比计数器可将入射粒子 (低能  $\gamma$  或  $X$  射线) 产生的初电离效应放大很多倍之后输出, 并且输出信号的幅度仍然保持与初电离事件数目成正比, 所以正比计数器不仅可以测量计数, 还可以用来测量射线能量。由于正比计数管输出脉冲信号幅度比较大, 而其本身噪声较小, 因此正比计数管可看成是一个没有噪声的理想放大器。这个特点决定了正比计数器在测量低能粒子方面有其独特的优势, 广泛用于测量低能  $\gamma$  射线和  $X$  射线的强度和能量。

正比计数器的能量分辨不仅受到由于原初电离的正负电荷对数涨落的影响, 还受气体放大倍数的影响, 所以同样条件下, 能量分辨要比 Si(Li) $X$  射线谱仪差。

## 1.2 实验目的

1. 学习使用正比计数器并熟悉其工作原理;
2. 了解  $X$  射线与物质的相互作用原理、掌握其吸收规律;
3. 利用元素特征  $X$  射线能量做探测器系统的刻度, 并推断未知样品元素种类;
4. 探测已知种类样品的特征  $X$  射线谱, 评价实验探测系统的分辨率。

## 2 实验操作

### 2.1 实验装置

实验装置示意图如图1。涉及的实验装置如下:

1. 正比计数器: 一套;
2. 电荷灵敏前置放大器 (放大倍率:  $\times 5$ ): 一个;
3. 插件式高压电源、低压电源、主放大器: 各一个;
4. NIM 机箱: 一个;
5. 多道数据采集及微机系统: 一套;
6. 样品 (铜等): 若干;
7. 铝吸收片: 若干;
8.  $^{238}\text{Pu}$  放射源: 一枚;
9.  $^{55}\text{Fe}$  放射源: 一枚。

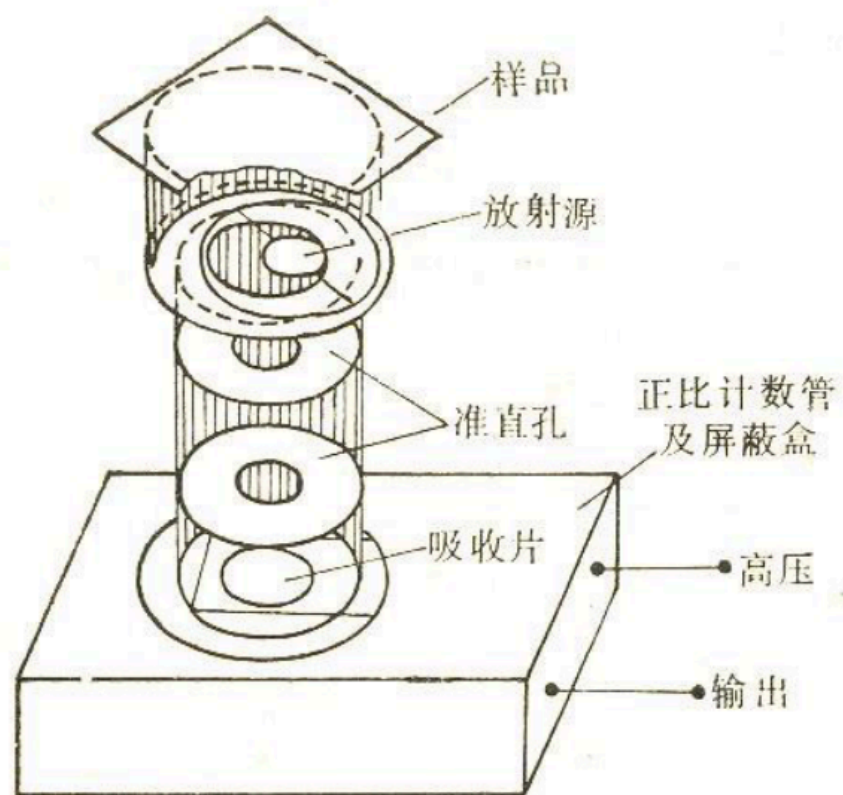


图 1: 实验装置示意图

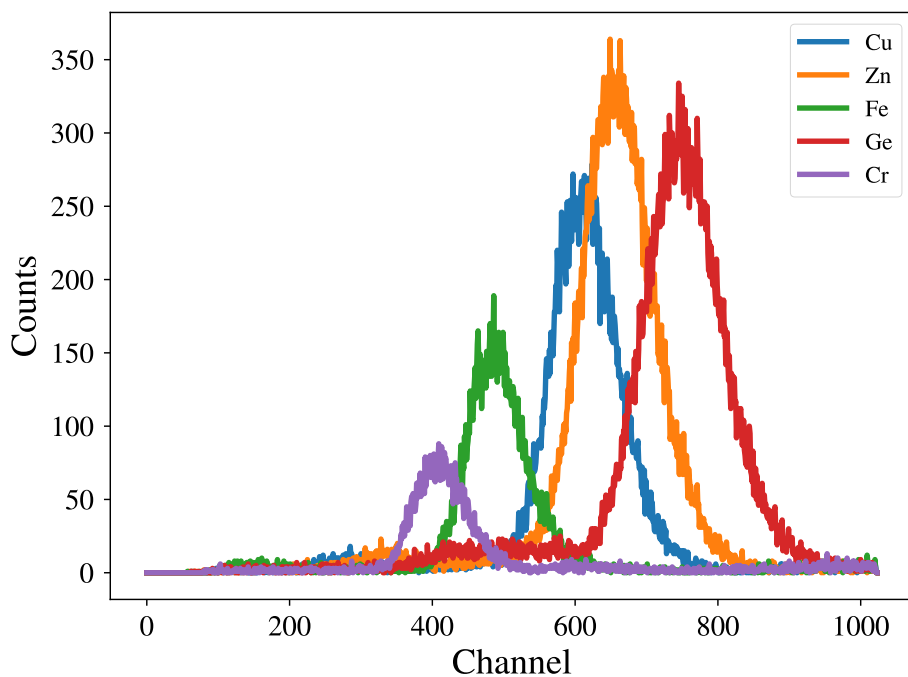


图 2: 五种样品的特征 X 射线谱测量结果

## 2.2 实验操作

1. 观察已安装好的测量 X 射线的探头结构，连接仪器并预热 (注意先开偏压，后加高压)。打开微机，进入微机多道数据采集系统。
2. 逐渐升高正比计数器的高压至额定值约 2000V，放大倍率设置为  $0.9 \times 200$  倍。
3. 用微机多道测量  $^{238}\text{Pu}$  源激发的五种已知样品的特征 X 射线谱 (探测时间为 600s) 并确定其峰位。从附录特征 X 射线及吸收限表中查出各样品对应的 X 射线能量，作峰位道数-能量关系曲线。
4. 测量三个未知样品的特征 X 射线谱 (探测时间为 600s)，根据能量刻度结果确定样品元素种类。
5. 测量铜样品的特征 X 射线谱，并选定适当的阈值和道宽来确定峰面积计算范围。选择 5 个不同层数的铝吸收片 (每片铝箔厚  $2.15\text{mg}/\text{cm}^2$ )，插在射线和探测器之间的插槽里，测量对应的铜样品的特征 X 射线强度 (探测时间为 1200s)。
6. 对所测得的一组数据结果进行最小二乘法拟合，求出吸收系数  $\mu_m$ 。
7. 用微机多道对  $^{55}\text{Fe}$  源进行能谱测量，评价能量分辨率。

## 3 数据处理

### 3.1 利用已知样品标定探测器，并确定未知样品的元素

对于铁、铬、铜、锌、锗五种样品的测量结果 (如图2) 进行高斯拟合 (拟合图见附录)，得到的峰位如下表1 根据多

表 1: 五种样品的特征 X 射线谱拟合峰位及参考 $K_{\alpha}$ 系能量					
	Cu	Zn	Fe	Ge	Cr
Fitted Peak Pos.	613.17	658.92	488.21	750.43	410.70
$K_{\alpha}$ [KeV]	8.047	8.638	6.403	9.885	5.414

道探测器的道址与能量的线性关系，利用最小二乘法进行线性回归做刻度，得到刻度关系为：

$$E = 0.0131 * Ch - 0.0030 \quad (5)$$

回归表现极佳， $R^2 = 0.9999$ 。结合对未知实验的测量结果（见图3，拟合图见附录），可得表2。和元素  $K_{\alpha}$  线系的参考能

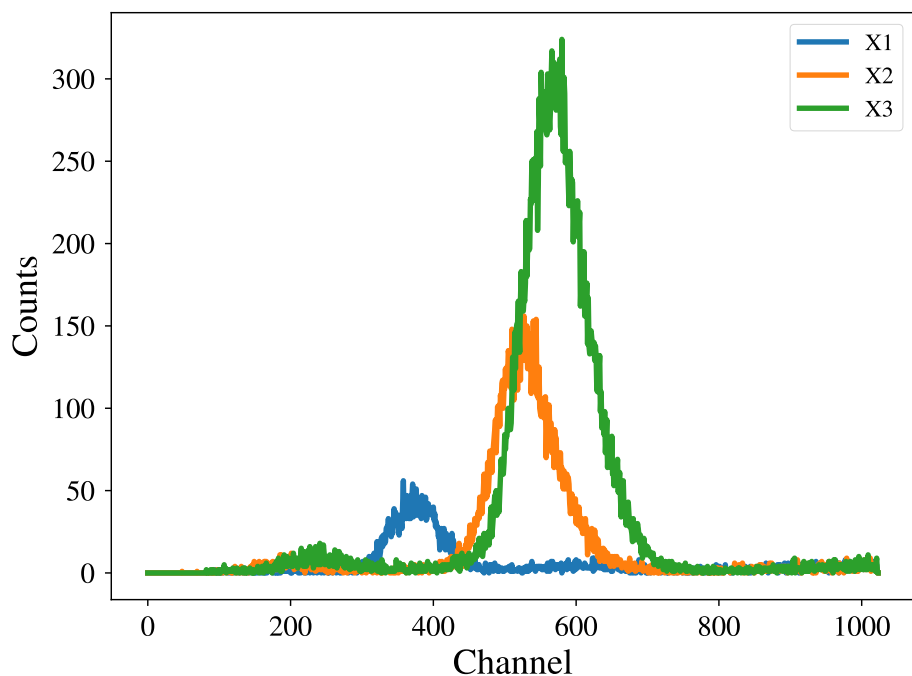


图 3: 三种未知样品的特征 X 射线谱

表 2: 三种未知样品的特征 X 射线谱高斯峰拟合峰位和  $K_{\alpha}$  线系能量预测值

	X1	X2	X3
Fitted Peak Pos.	375.41	527.96	569.94
$K_{\alpha}$ [KeV]	4.93	6.94	7.49

量对照，确认各未知样品的元素种类如下：

1. X1: V, 钒元素；
2. X2: Co, 钴元素；

3. X3: Ni, 镍元素。

本部分的拟合峰位线性回归图及预测  $K_\alpha$  值如图4。

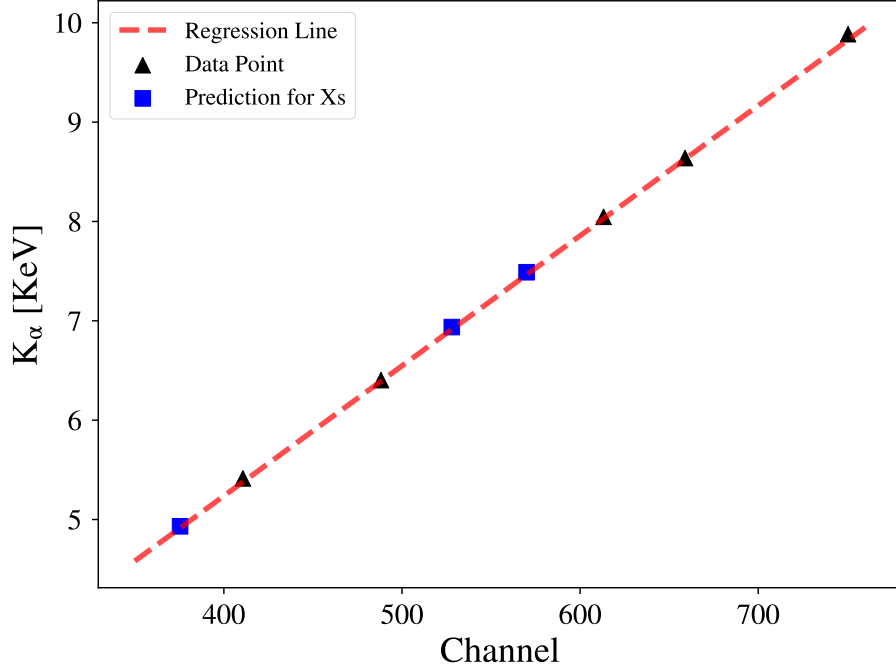


图 4: 峰位- $K_\alpha$  能级拟合图

### 3.2 铝片对铜的特征 X 射线线性吸收系数

对于不同厚度的铝片, 测量结果如图5所示 (高斯峰拟合结果见附录)。峰拟合结果总结如表3。选取半高峰位 (FWHM)

表 3: 不同厚度的铝吸收片后拟合结果

Num. of Slices	2	4	6	8	10
Fitted Peak Pos.	613.56	613.83	614.25	615.01	614.50
Fitted Stderr.	46.47	46.53	45.90	47.39	47.63
Fitted Norm.	44897.09	35904.35	28660.19	23116.89	18097.90
Depth $d_m$ [mg/cm <sup>2</sup> ]	4.30	8.60	12.90	17.20	21.50

下的面积为计数, 则有

$$S_{\pm \text{FWHM}} = \text{Norm.} * \text{erf}(\sqrt{2} \ln 2) \propto \text{Norm.} \quad (6)$$

考虑线性吸收下  $S \propto S_0 * \exp(-\mu_m * d_m)$ , 则有:

$$\ln(\text{Norm.}) = -\mu_m * d_m + C \quad (7)$$

进行线性回归 (见图6, 可以得到

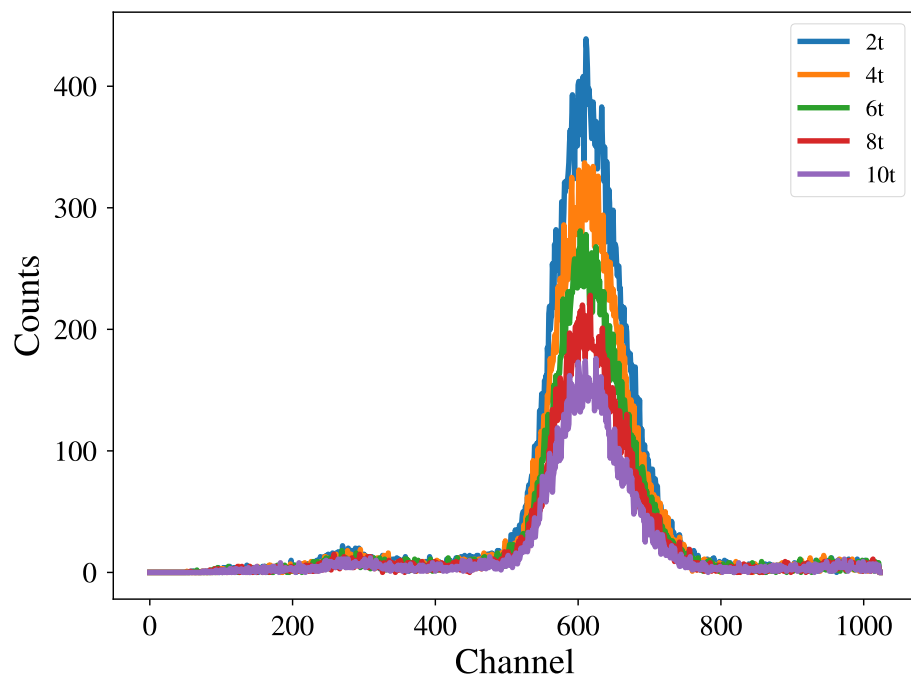


图 5: 使用不同厚度的铝吸收片后的铜特征 X 射线谱测量结果

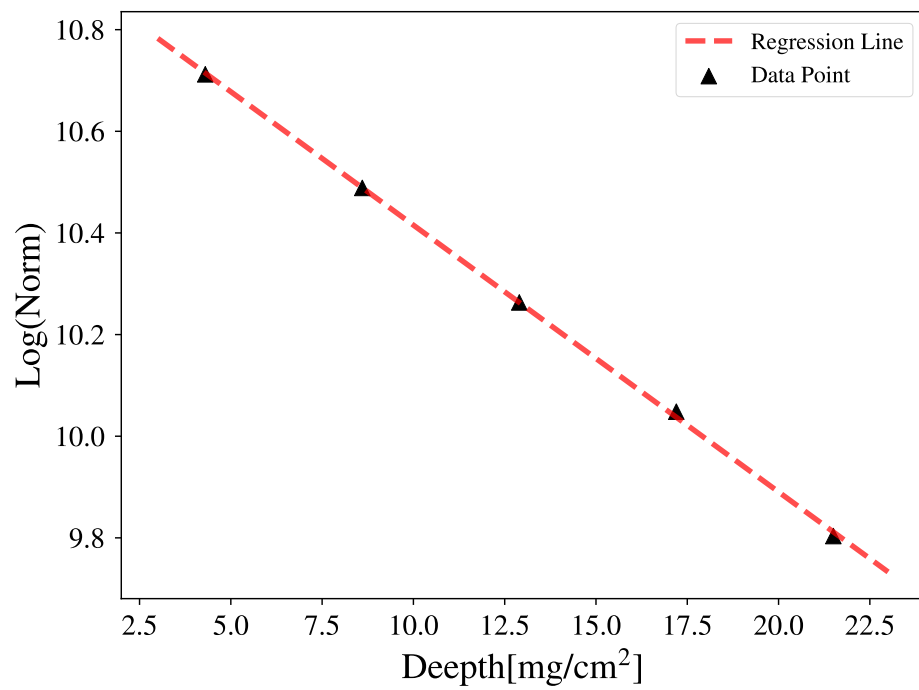


图 6: 厚度与拟合归一化系数对数的线性拟合

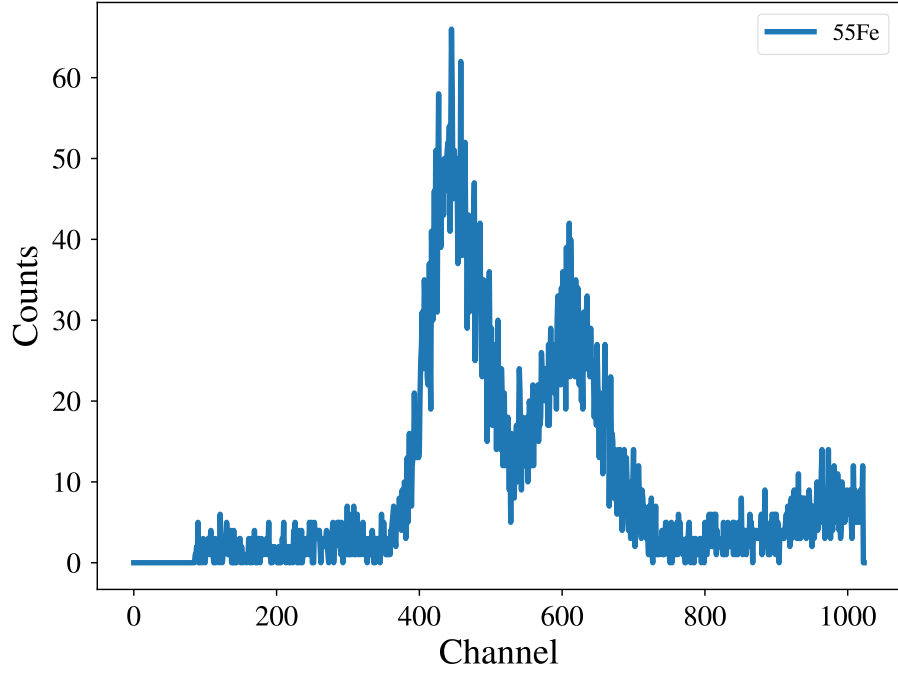


图 7: 对  $^{55}\text{Fe}$  放射源的测量结果

$$\ln(\text{Norm.}) = -0.0525 * d_m + 10.9404 \quad (8)$$

回归  $R^2 = 0.9996$ , 得到

$$\mu_m = -0.0525\text{cm}^2/\text{mg} = -52.5\text{cm}^2/\text{g} \quad (9)$$

与理论结果符合较好。

### 3.3 利用 $^{55}\text{Fe}$ 对探测器分辨率进行评估

对  $^{55}\text{Fe}$  的测量结果如图7。根据  $^{55}\text{Fe}$  的原子序数, 可以确定其特征  $X$  射线峰应该是靠左的较高峰。但是, 测量结果中存在两个靠的很近的峰, 仅仅采用单高斯峰拟合无法解决问题。因此这里采用直接读数的方式进行分辨率评估。直接读

表 4:  $^{55}\text{Fe}$  特征  $X$  射线峰读数结果

Peak Pos.	Left Half Max.	Right Half Max.	FWHM	Resolution
444	407	489	82	18.4%

数的结果给出的分辨率大约在  $\mathcal{O}(10\%)$ 。可见, 本实验装置至少对于  $^{55}\text{Fe}$  的特征谱测量上, 分辨能力较差。当然, 从计数来看, 可能是因为对于活性较差的  $^{55}\text{Fe}$  采集时间较短 (800s) 的缘故。这一点也可以从铝吸收系数测量实验中得到印证 (见图5与图8): 对于不同厚度的吸收片, FWHM 变化不大, 但是计数却差异很大。



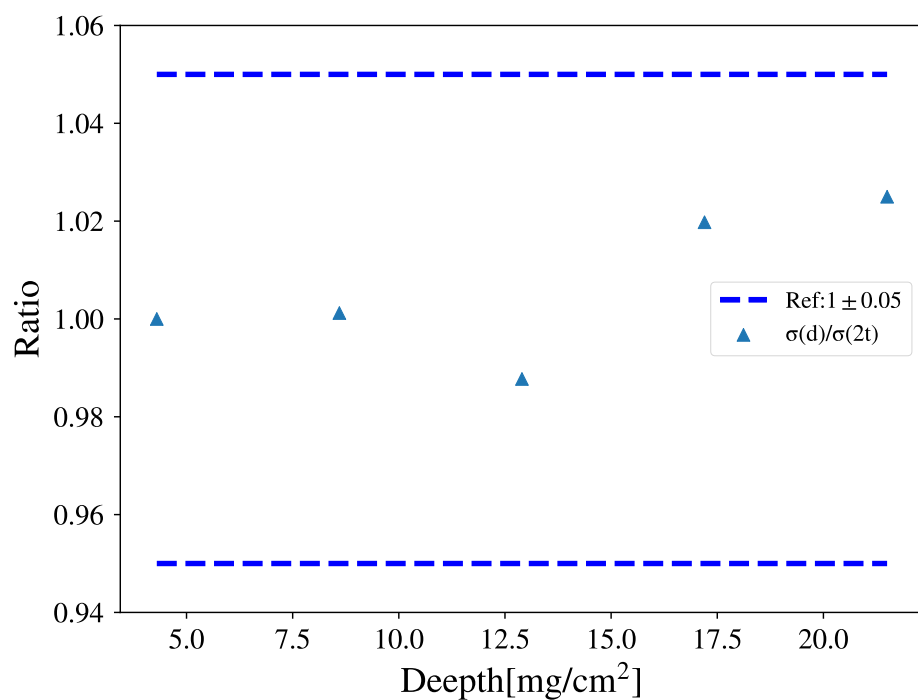


图 8: 不同吸收片厚度的拟合峰宽度比较 (以厚度为两片为基准)

## 4 结论

本实验通过利用五种已知元素样品，对探测器进行了刻度，利用刻度后的探测器探测了三种未知样品的特征  $X$  射线能量，并鉴别出三种未知样品分别为钒、钴和镍元素。而后，利用实验装置测量了通过不同厚度的铝吸收片的铜特征  $X$  射线谱，并计算峰面积，得到铝对铜的特征  $X$  射线线性吸收系数约为  $52.5\text{cm}^2/\text{g}$ 。最后，利用  $^{55}\text{Fe}$  测量，得到针对其的分辨率约为 19.4%。

## 5 致谢

感谢许金艳老师的实验指导，感谢刘寅绅同学的讨论。也感谢张轩豪和童星昱同学一起进行实验和借我 U 盘。

# 附录

## A 思考题

1. 查阅资料得知, Ag 的  $K_{\alpha}$  能级在 22.162KeV, 刚好超过了  $^{238}\text{Pu}$  的激发能力。
2. 约化后, 得到  $\sigma_{ph} \propto Z^5(m_0)^{3/2}$ , 为让吸收系数尽量小, 探测器入射窗需要采用较轻的元素。
3. 考虑角度发散 ( $\theta$ ), 则在材料中的路径会延长为  $(d/\cos\theta)$ , 因此相应的, 测得的  $\hat{\mu}_m$  与实际值  $\mu_m$  为  $\hat{\mu}_m = \mu_m/\cos\theta$ 。  
假设发散角为  $10^\circ, 25^\circ$ , 得到修正因子不会超过  $1/0.98, 1/0.90$ , 即影响  $\sim 2\%, 10\%$ 。
4. 观察波形, 我认为最主要的误差来源还是在信号的强度。波形的展宽比较稳定, 提高分辨率的话需要提高峰值。

## B 谱线高斯峰拟合结果图

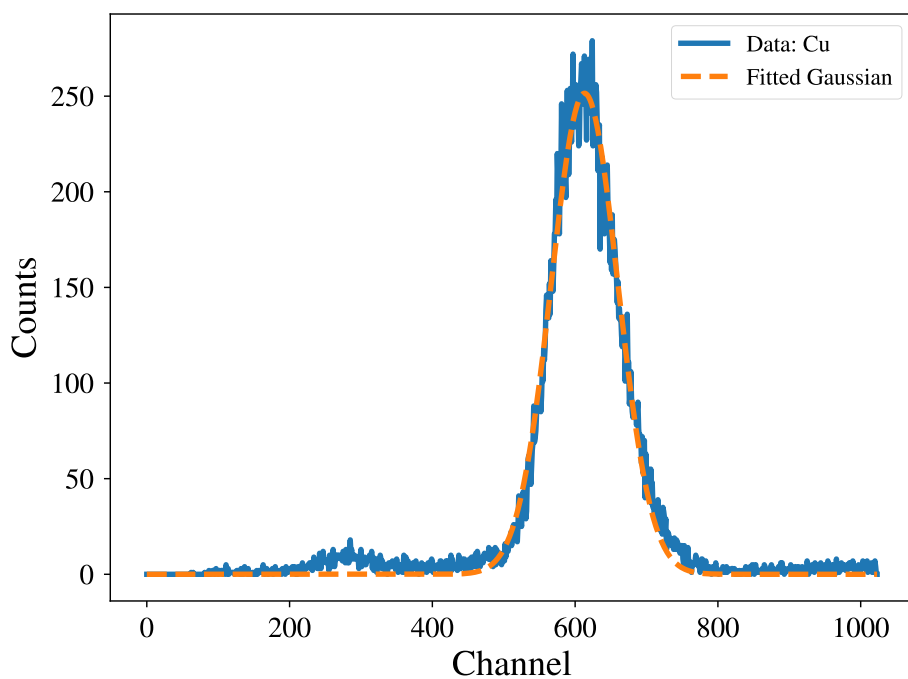


图 9: 铜样品拟合图

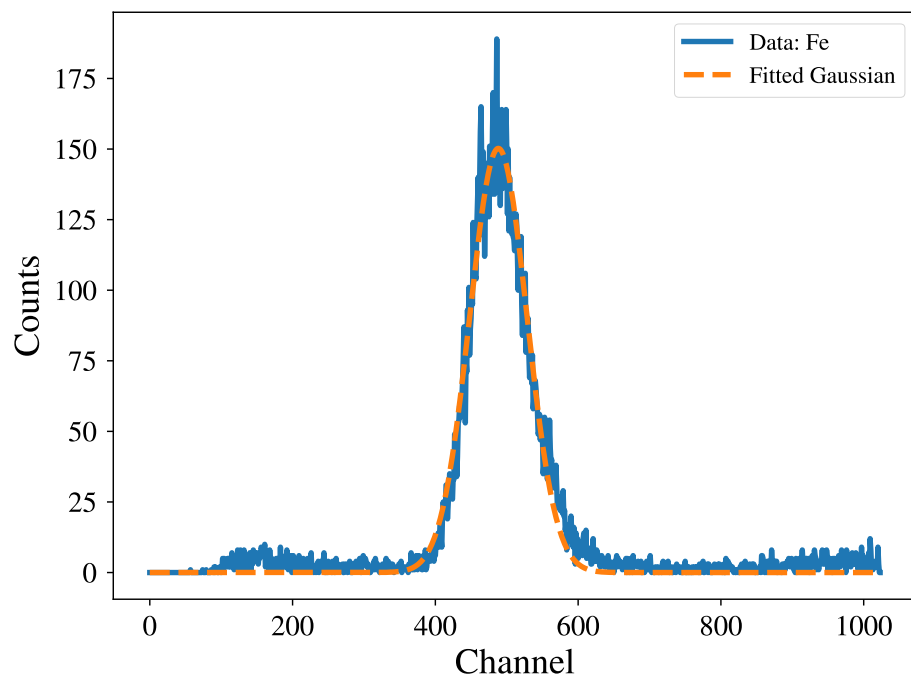


图 10: 铁样品拟合图

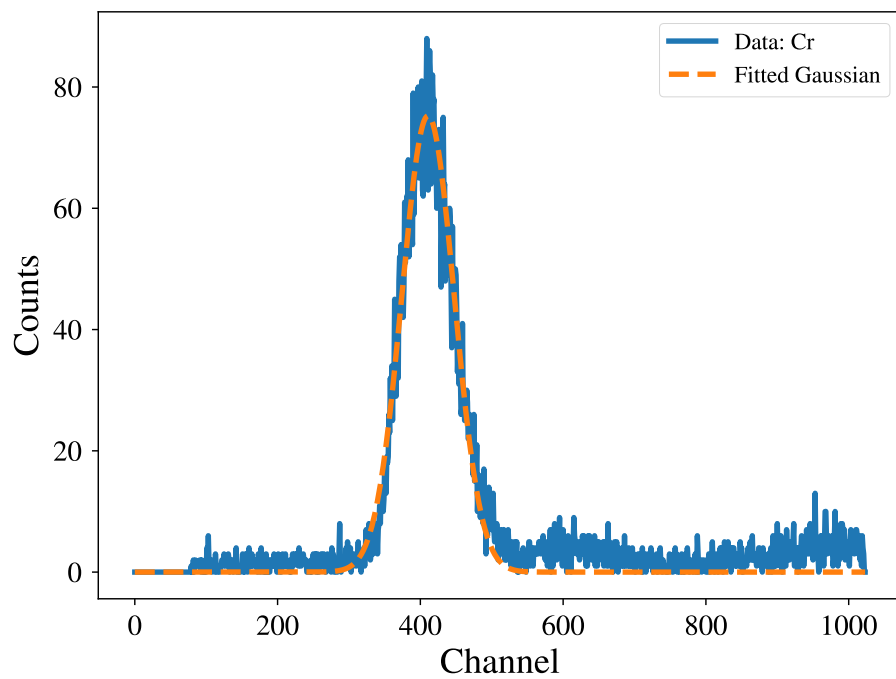


图 11: 铬样品拟合图

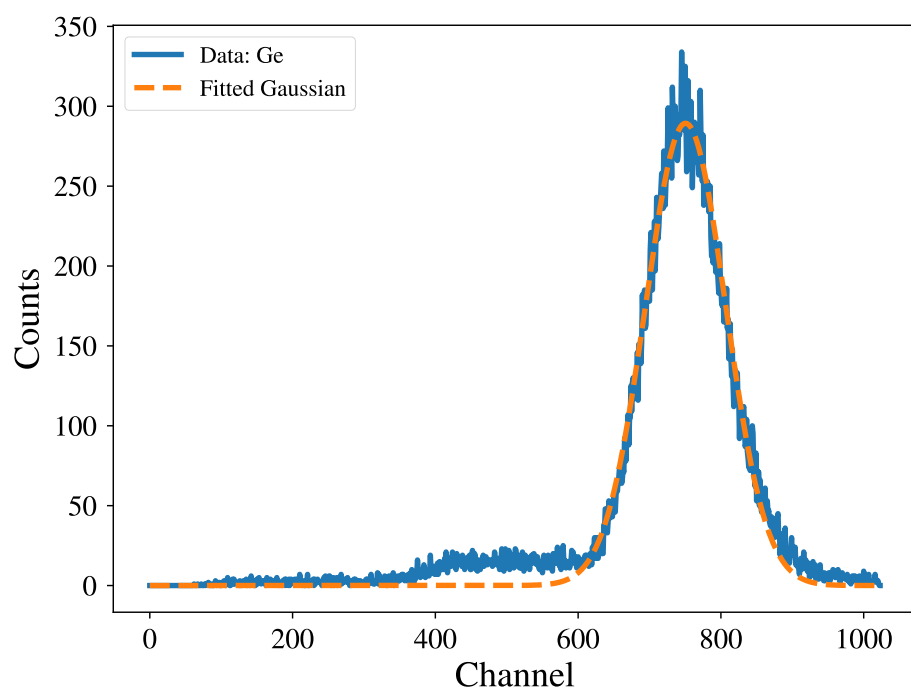


图 12: 锗样品拟合图

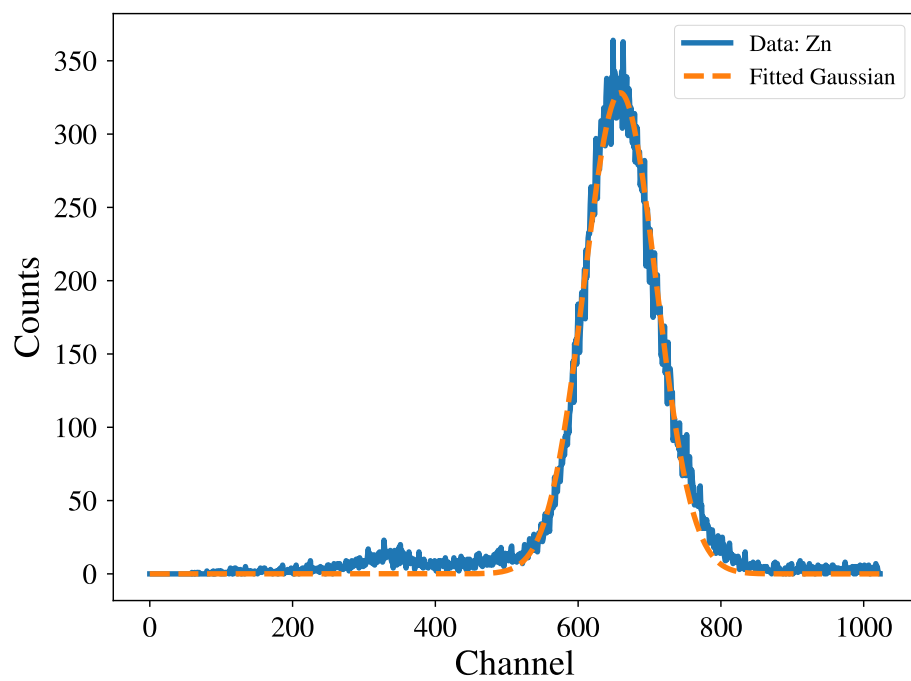


图 13: 锌样品拟合图

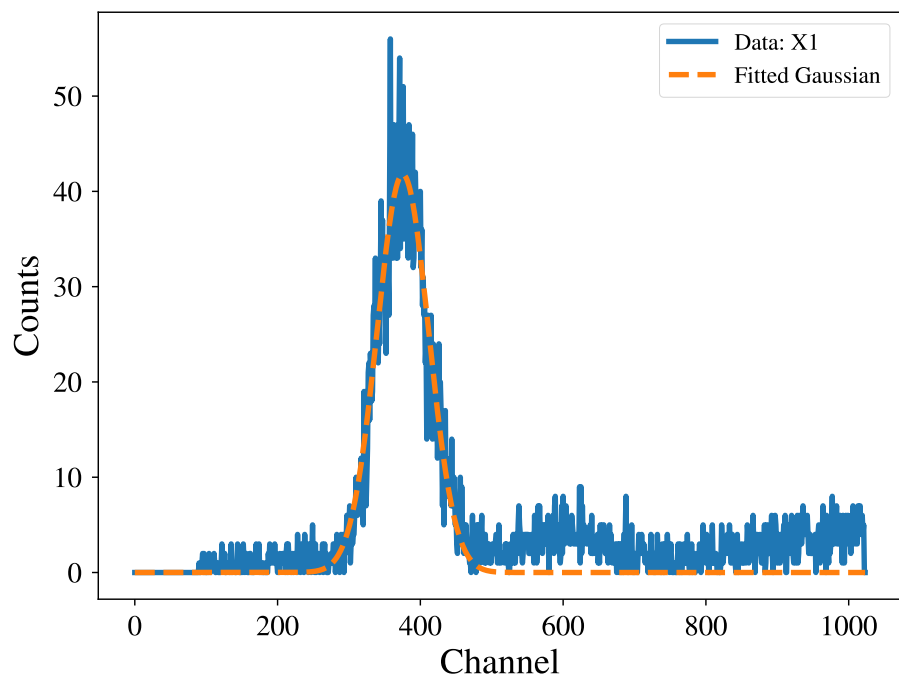


图 14: 未知样品 1 拟合图

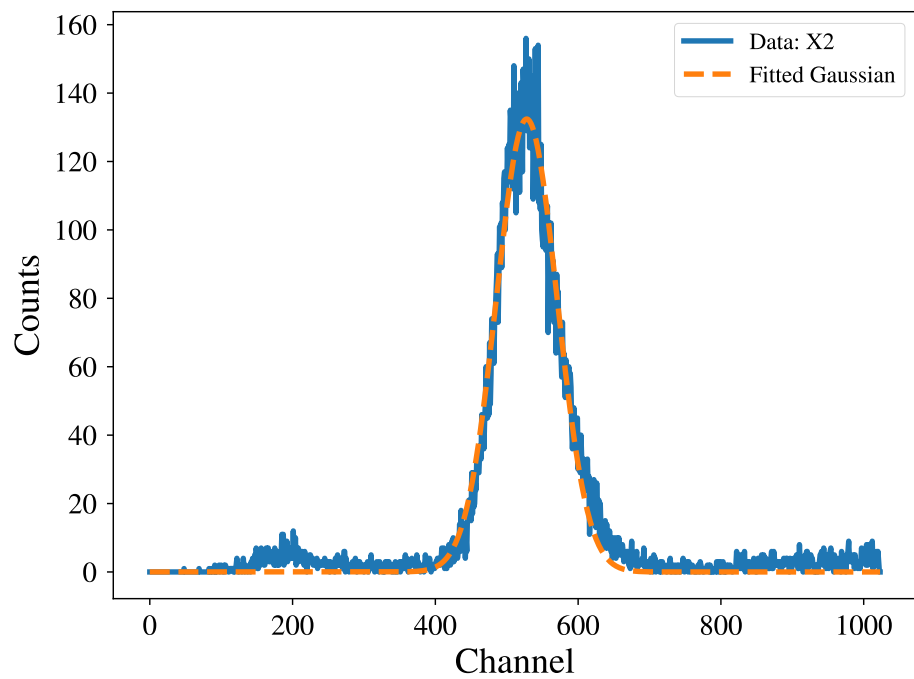


图 15: 未知样品 2 拟合图

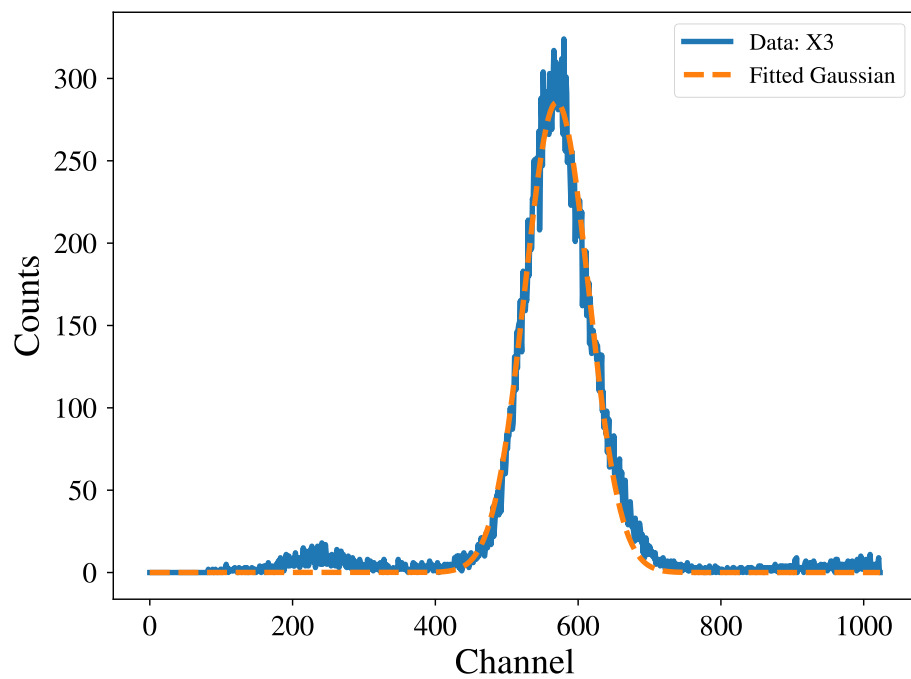


图 16: 未知样品 3 拟合图

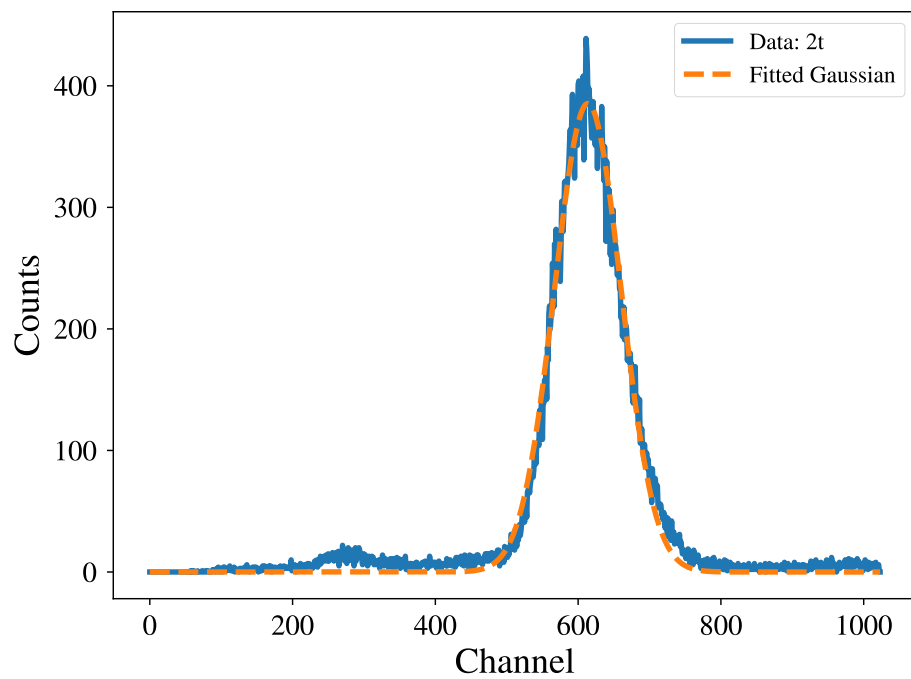


图 17: 2 片铝吸收片测量结果拟合图

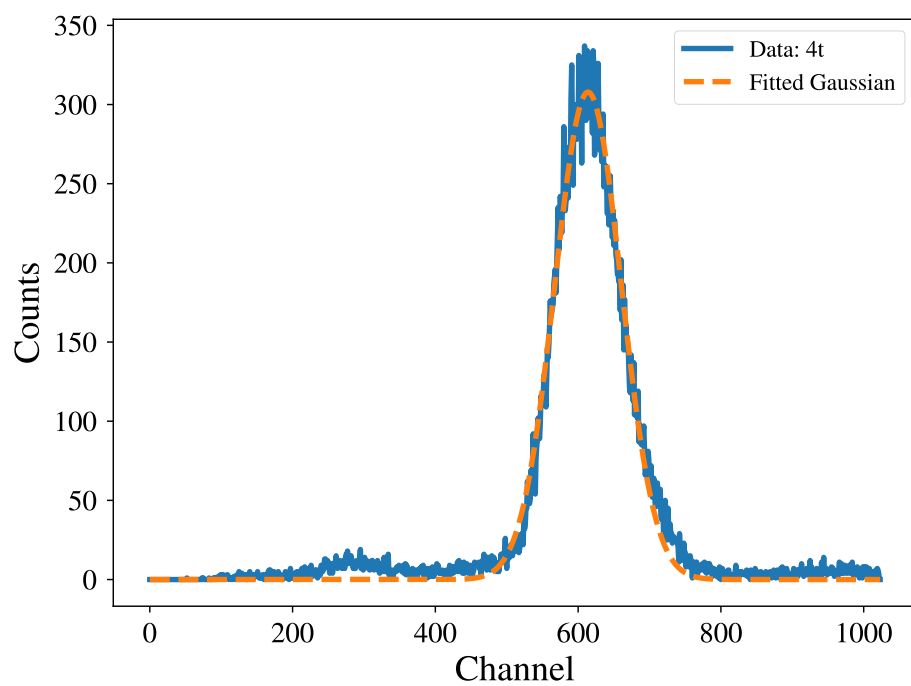


图 18: 4 片铅吸收片测量结果拟合图

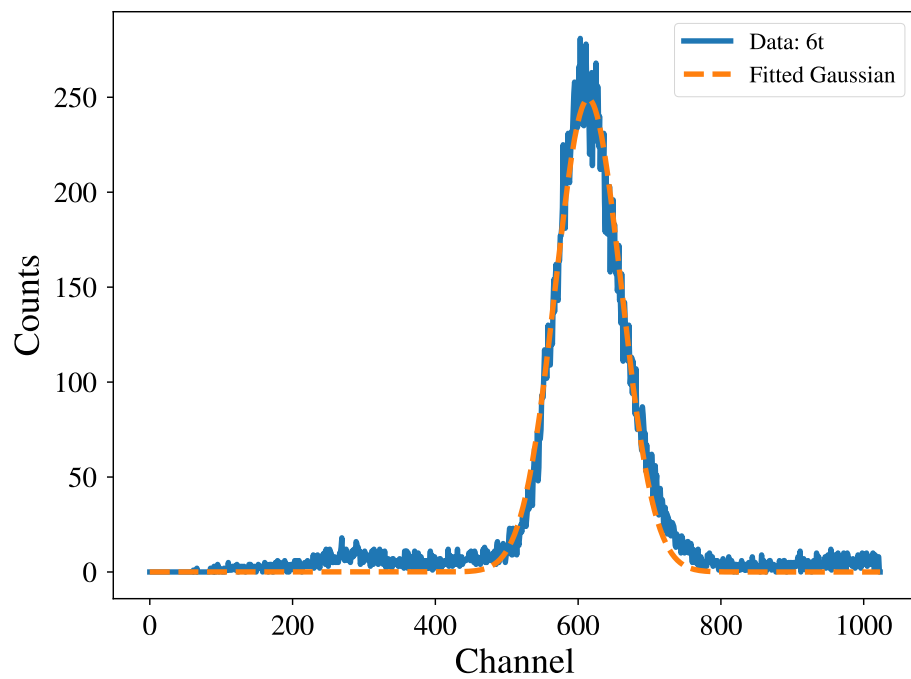


图 19: 6 片铅吸收片测量结果拟合图

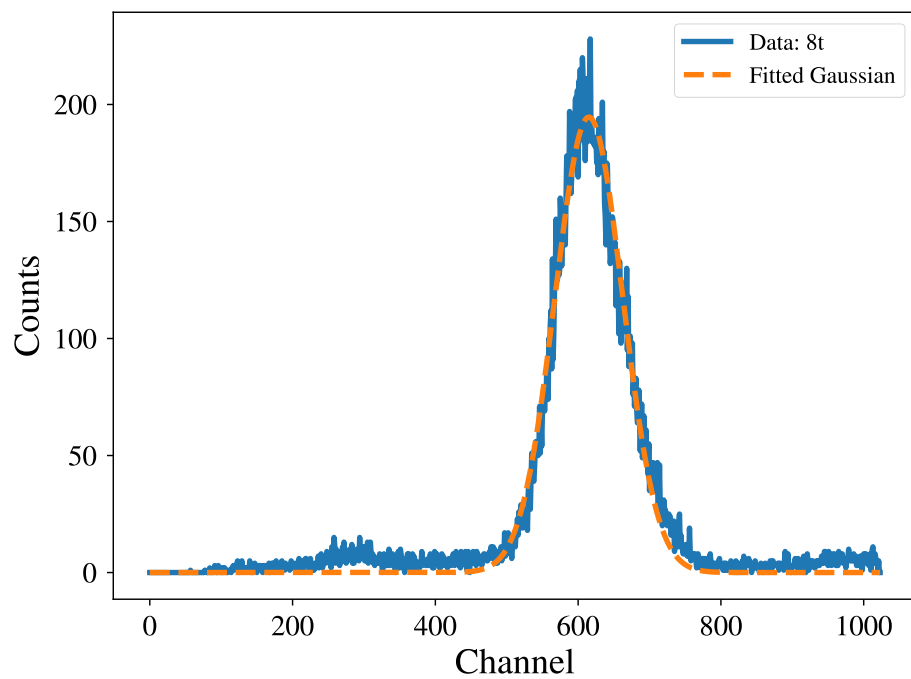


图 20: 8 片铅吸收片测量结果拟合图

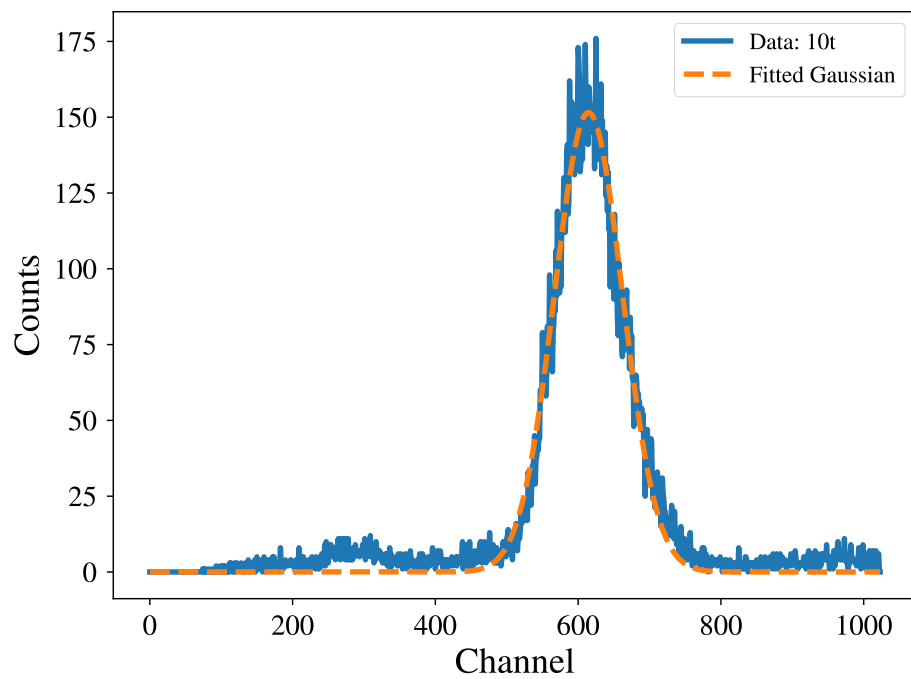


图 21: 10 片铅吸收片测量结果拟合图