

实验 D7 γ 能谱测量实验

γ 射线是一种高能光子，包括核衰变在内的核反应提供了地面上的 γ 射线源。与原子光谱对提示原子内部结构的重要性类似，来自核衰变的 γ 射线能谱也是认识原子核结构的重要手段之一；同时也是认识微观运动的随机性的有效工具。本课程拟通过对核衰变放射光子测量，了解高能光子能谱的一种测量方法，即如何通过物理相互作用将光子的能量（损耗）转多个荧光光子，并通过光电倍增管测量荧光光子数，转变为可测量的电信号，从而进一步理解光子能谱与光谱的异同。对于有兴趣的同学，在已学习的原子物理以及原子光谱实验的基础上，通过测量所得能谱对核的能级结构有更多的了解。

【实验目的】

1. 测定 γ 谱仪的能量分辨率以及能量线性；
2. 测定已知源的 γ 能谱，并作能谱分析；
3. 随机数据处理；

【仪器用具】

表 D7-1 γ 能谱测量实验用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，规格等）
1	核信号发生器	1	NMS-6014-SIG，输出信号电压范围 0-5V
2	通用核信息采集器	1	NMS-6014-GD，采样频率 250MHz，带宽 100MHz；输入范围 0-5V，8192 道，最大计数率 10M/s，死时间 100ns；
3	计算机	1	安装有 Labview2014 及虚拟核数数据采集软件
4	示波器	1	RIGOL DS2202A，带宽 200MHz，双通道，采样频率 1GSa/s

【实验安全注意事项】

使用真实放射源进行实验时，使用镊子放置和移除放射源，实验完毕后将放射源放回

源库，并洗手。

【实验原理】

γ 粒子是光子，电中性，也没有静止质量，具有波粒二象性。波长比普通光波短，比 X 射线波长更短，粒子性更突出。 γ 粒子流，常称 γ 射线，已明确的产生方式有以下 4 种：

1. 处于激发态的原子核向低能级跃迁时发射 γ 射线；
2. 正反粒子湮灭发射 γ 射线，如正负电子对湮灭产生 0.511 MeV 的 γ 光子；
3. 伴随核反应产生的 γ 射线，例如 $(\alpha, {}^9\text{Be}) \rightarrow ({}^{12}\text{C}^*, \text{n})$ 中子的产生过程；
4. 轫致辐射，当快电子与物质相互作用时，因受阻速度改变而辐射电磁辐射的现象。轫致辐射的 γ 射线为连续能量谱。

高能 γ 光子的探测必须依赖于它与（探测器）物质相互作用的原理，而高能 γ 光子与物质相互作用的规律，决定了不可能（像可见光光子那样）将其能量一次性地转换为一个可测量量（如电信号），而只能是通过多种、多次作用的能量损耗，将其能量转换为多个可测量量（如光子数）。

一、 γ 射线与物质的相互作用

1. 光电效应

当能量 E_γ 的入射 γ 光子与物质中原子的束缚电子相互作用时，光子可以把全部能量转移给某个束缚电子，使电子脱离原子束缚而发射出去，光子本身消失，发射出去的电子称为光电子，这种过程称为光电效应。发射出光电子的动能

$$E_e = E_\gamma - B_i \quad (\text{D7-1})$$

B_i 为束缚电子所在壳层的结合能。原子内层电子脱离原子后留下空位形成激发原子，其外部壳层的电子会填补空位并放出特征 X 射线。 γ 射线与物质原子发生光电效应的总截面用汤姆逊散射截面公式^[1]表示，这一理论表明光电效应的反应截面正比于原子序数的 5 次方，反比于 E_γ^2 ，因此（1）重元素的光电效应截面比轻元素大；（2）低能 γ 射线比高能 γ 射线发生光电效应截面大；当 γ 射线能量低至接近电子的结合能时（即 $E_\gamma \sim B_i$ ），光电效应的截面最大。

2. 康普顿效应

γ 光子与自由静止的电子发生碰撞，而将一部分能量转移给电子，使电子成为反冲电子， γ 光子被散射改变了原来的能量和方向。计算给出反冲电子的动能为

$$E_e = \frac{E_\gamma^2 (1 - \cos \theta)}{m_0 c^2 + E_\gamma (1 - \cos \theta)} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0 c^2}{E_\gamma (1 - \cos \theta)}} \quad (\text{D7-2})$$

式中 $m_0 c^2$ 为电子静止质量，角度 θ 是 γ 光子的散射角，见图 D7-1 所示。

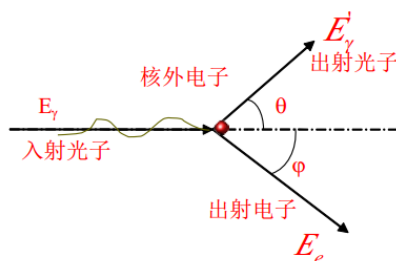


图 D7-2 康普顿散射效应图

由图看出反冲电子以角度 φ 出射， φ 与 θ 间有以下关系：

$$\cot \varphi = \left(1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} \right) \tan \frac{\theta}{2} \quad (\text{D7-3})$$

由式 (D7-2) 给出，当 $\theta = 180^\circ$ 时，反冲电子的动能 E_e 有最大值

$$E_{\max} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0 c^2}{2E_\gamma}} \quad (\text{D7-4})$$

这说明康普顿效应产生的反冲电子的能量有一上限最大值，称为康普顿边界 $E_C = E_{\max}$ 。康普顿散射的反应截面与物质原子序数成正比^[2]。

3. 电子对效应

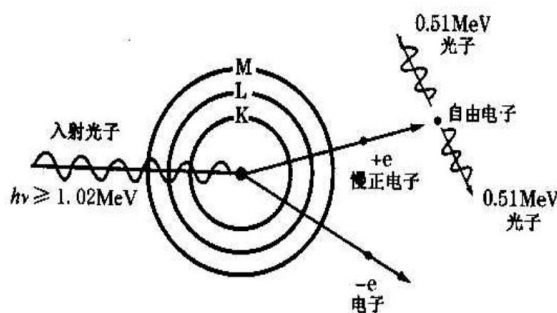


图 D7-2 电子对效应图

当 γ 光子能量大于 $2m_0 c^2$ 时， γ 光子从原子核旁边经过并受到核的库仑场作用，可能转化为一个正电子和一个负电子，称为电子对效应。此时光子能量可表示为两个电子的动能与

静止能量之和，如

$$E_{\gamma} = E_e^{+} + E_e^{-} + 2m_0c^2 \quad (\text{D7-5})$$

其中 $2m_0c^2 = 1.02\text{MeV}$ 。

电子对效应产生的正负电子在吸收物质中通过电离损失和韧致辐射损失能量。正电子很快被慢化，与物质的电子发生电子湮灭，转换为两个光子。发生湮灭时正负电子动能为 0，两个湮灭光子的总能量等于正负电子的静止能量（即 0.511 MeV ）。电子对湮灭后产生的两个光子，在物质中会被吸收（吸收 1 个或者 2 个）或者发生康普顿散射。

综上所述， γ 光子与物质相遇时，通过与物质原子发生光电效应、康普顿效应或电子对效应而损失能量，其结果是产生次级带电粒子，如光电子、反冲电子或正负电子对。次级带电粒子的能量与入射 γ 光子的能量直接相关，因此，可通过测量次级带电粒子的能量求得 γ 光子的能量。

二、闪烁体工作原理

闪烁体是闪烁探测器与粒子相互作用的部件，从化学成分来说可分为有机闪烁体（塑料闪烁体）和无机闪烁体（NaI 闪烁体）。闪烁体具有吸收粒子能量转换成光子的本领，这也是闪烁体最重要的特性之一。常用的表征闪烁体基本特性的参量有发光效率、发光时间和发光衰减时间、光衰减长度。

发光效率是指闪烁体每吸收 1 MeV 的能量所能发射的光子数，常见闪烁体的发光效率大约 $103\sim 105/\text{MeV}$ ，由发光效率乘以沉积在闪烁体中能量可简单估测入射粒子的光产额；

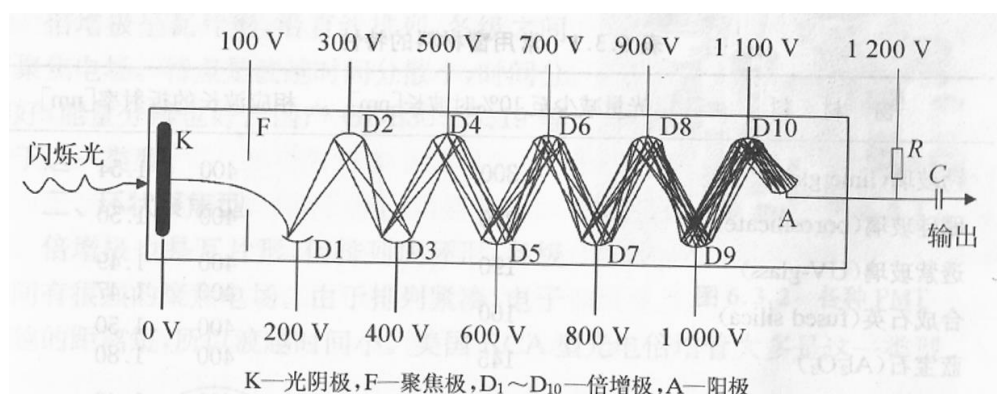
闪烁体产生很快，产生时间一般为 ps 量级；但是闪烁光子衰减很慢并且成指数规律衰减，定义光子数从最大值衰减到原来的 $1/e$ 所用的时间为衰减时间。一般无机闪烁体光衰减时间为 ns 量级。

光衰减长度是描述闪烁光在闪烁体内传播的物理量，一般闪烁光强度随着传播距离成指数衰减。光衰减长度分为本征衰减长度和技术衰减长度，前者取决于闪烁体内部特征（成分和结构），后者是通过改变闪烁体的尺寸、表面光反射等技术手段来干预光衰减。

三、光电倍增管的工作原理。

光电倍增管是一种真空管，它由入射窗、光阴极、倍增系统（亦称倍增极、打拿极）和阳极构成，如下图所示。入射窗的材料常为玻璃、石英或者蓝宝石等高透光材料；光阴极常以发生光电效应概率较大的碱金属为主要材料；倍增系统由 8-13 个倍增极构成，以二次倍增系数表征其倍增能力（每一级的倍增系数一般为 3-6 倍，即经过一次倍增，二次电子数

目增加至原来的 3-6 倍)；阳极采用脱出功较大的材料制成，起到收集电子并输出信号的作用。



附录图 1 光电倍增管的构造图

光电倍增管的工作原理：光子照射在光阴极后，吸收光子并发生光电效应，发射出光电子，光电子在外加电场的作用下被加速打到倍增极并产生二次电子发射，二次电子又在外加电场的作用下被加速打到下一级倍增极产生更多的二次电子发射，随着打拿极的增多，二次电子的数目也得到倍增，最后被阳极吸收并产生电流或者电压信号，下图的分压电路会产生电压信号。

四、闪烁 γ 能谱仪

1. 闪烁谱仪的结构框图及各部分的功能

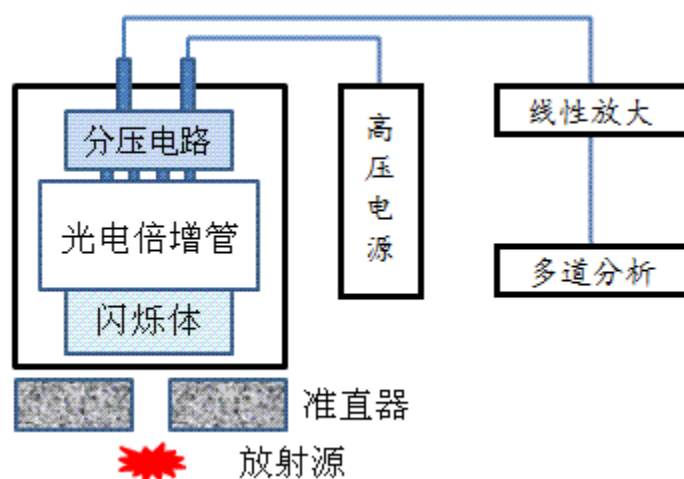


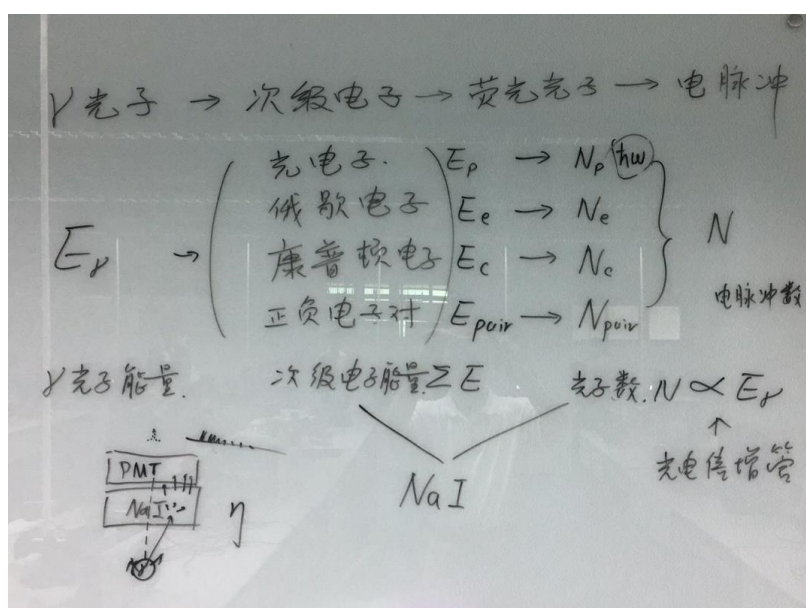
图 D7-3 闪烁谱仪的结构框图

闪烁谱仪的结构框图示于图 D7-3 中，它可分为闪烁探头与高压、信号放大与多道分析等两大部分。以下分别介绍各部分的功能。

(1) 闪烁探头与高压

闪烁探头包括闪烁体、光电倍增管、分压电路以及屏蔽外壳。实验中测量 γ 能谱多使用无机闪烁体如 NaI (TI) 晶体。闪烁体的功能是在次级带电粒子进入闪烁体时入射粒子损失部分或全部能量，使闪烁体的原子和分子电离或激发，退激发的原子释放出低能光子。这些低能光子被光导层引向加载高压的光电倍增管，并在其光敏阴极再次发生光电效应而产生光电子，这些光电子经过一系列倍增极的倍增放大，从而使光电子的数目大大增加，最后在光电倍增管的阳极上形成脉冲信号。脉冲数目是和进入闪烁体 γ 光子数目相对应的。而脉冲的幅度与在闪烁体中产生的荧光光子数目成正比，从而和 γ 射线在闪烁体中损失的能量成正比。整个闪烁探头应安装在屏蔽暗盒内以避免可见光对光电倍增管的照射而引起损坏。

上述转换的物理过程如表 2 所示：



(2) 信号放大与多道分析

由于探头输出的脉冲信号幅度很小，需要经过线性放大器将信号幅度按线性比例进行放大，然后使用多道脉冲幅度分析器测量信号多道能谱。多道脉冲幅度分析器的功能是将输入的脉冲按其幅度不同分别送入相对应的道址（即不同的存贮单元）中，通过软件可直接给出各道址（对应不同的脉冲幅度）中所记录的脉冲数目，即得到了脉冲的幅度概率密度分布。由于闪烁 γ 能谱仪输出的信号幅度与射线在晶体中沉积的能量成正比，也就得到了 γ 射线的能谱。

2. NaI (TI) 闪烁探测器测量的 γ 能谱形状

NaI (TI) 闪烁 γ 能谱仪可测得 γ 能谱的形状，图 D7-4 所示是典型 ^{137}Cs 的 γ 射线能谱图，图的纵轴代表各道址中的脉冲数目，横轴为道址，对应于脉冲幅度或 γ 射线的能量。

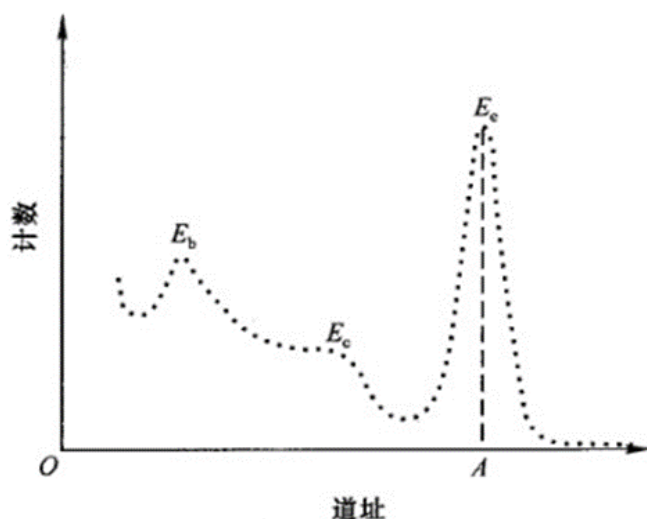


图 D7-4 典型 ^{137}Cs 的 γ 射线能谱图

从能谱图上看，有几个较为明显的峰，光电峰 E_e ，又称全能峰，其能量就对应 γ 射线的能量 E_γ 。这是由于 γ 射线进入闪烁体后，由于光电效应产生光电子，能量关系见式 (D7-1)，其全部能量被闪烁体吸收。光电子逸出原子会留下空位，必然有外壳层上的电子跃入填充，同时放出能量 $E_z = B_i$ 的 X 射线，一般来说，闪烁体对低能 X 射线有很强的吸收作用，这样闪烁体就吸收了 $E_e + E_z$ 的全部能量，所以光电峰的能量就代表 γ 射线的能量，对 ^{137}Cs ，此能量为 0.662MeV。

E_c 即为康普顿边界，对应反冲电子的最大能量。背散射峰 E_b 是由射线与闪烁体屏蔽层等物质发生反向散射后进入闪烁体内而形成的光电峰，一般背散射峰很小。

结合本文第一部分 γ 射线与物质的相互作用原理，对 γ 射线在闪烁探测器中以及探测器周围发生的作用罗列在表 D6-2 中。表中展示了 γ 射线在闪烁体中各种相互作用过程对能谱分布的贡献及周围物质散射对谱形的影响。

表 D6-2 γ 射线在闪烁体中各种相互作用过程对能谱分布的贡献及周围物质散射对谱形的影响^[3]

编号	吸收过程	闪烁体吸收能量	谱仪采集信号的脉冲幅度
1	光电效应	E_γ	全能峰内
2	康普顿散射，散射 γ 射线逃逸	散射电子的能量： $0 \sim E_c$	康普顿分布区内
3	康普顿散射，散射 γ 射线被吸收	E_γ	全能峰内
4	多次康普顿散射，散射 γ 射线逃逸	$0 \sim E_\gamma$	整个能谱，其中脉冲幅度介于 $E_c \sim E_\gamma$ 会降低全能峰

			的峰谷比
5	电子对效应产生的正电子慢化湮灭产生的 2 个湮灭光子均逃逸	$E_{\gamma}-1.02 \text{ MeV}$	正比于 $E_{\gamma}-1.02 \text{ MeV}$ 位置处出现能峰, 称为双逃逸峰
6	电子对效应产生的正电子慢化湮灭产生的 2 个湮灭光子, 其中一个被晶体吸收	$E_{\gamma}-1.02 \text{ MeV}+0.51 \text{ MeV}$	正比于 $E_{\gamma}-0.51 \text{ MeV}$ 位置处出现能峰, 称为单逃逸峰
7	电子对效应产生的正电子慢化湮灭产生的 2 个湮灭光子均被晶体吸收	E_{γ}	全能峰内
8	电子对效应产生的正电子慢化湮灭产生的一个湮灭光子在晶体中发生康普顿散射	$E_{\gamma}-1.02 \text{ MeV}+0.51 \text{ MeV}+\text{康普顿散射贡献}$	分布再康普顿连续区内 (若散射 γ 被吸收则仍在全能峰内)
9	γ 射线在源及周围物质上发生反散射后 ($\theta=\pi$), 进入闪烁体被全部吸收	$E_b=E_{\gamma}-E_c$	称为反散射峰, 出现在相对于全能峰完全确定的位置上。
10	γ 射线在源及周围物质上发生康普顿散射后 ($\theta\neq\pi$), 散射光子被闪烁体被全部吸收	$E_{\gamma}-E_{\max} \sim E_{\gamma}$	分布在全能峰低能段与康普顿散射边缘处
11	γ 射线在源及周围物质上发生电子对效应后的湮灭光子, 其中一个湮灭光子从周围物质逃逸后被闪烁体吸收。	0.51 MeV	峰位在 0.51 MeV 处

3. 谱仪的能量刻度和分辨率

(1) 谱仪的能量刻度

闪烁谱仪测得的 γ 射线能谱的形状及其各峰对应的能量值由核素的衰变纲图 (见附录 1) 所决定, 是各核素的特征反映。但各峰被闪烁探测器采集后所对应的脉冲幅度是与工作条件有关系的。如光电倍增管高压改变、线性放大器放大倍数不同等, 都会改变各峰位在横轴上的位置, 也即改变了能量轴的刻度。因此, 应用 γ 谱仪测定未知射线能谱时, 必须先用已知能量的核素能谱来标定 γ 谱仪。

由于能量与各峰位道址是线性的: $E_{\gamma} = kN + b$, 因此能量刻度就是设法得到 k 和 b 。例如选择 ^{137}Cs 的光电峰 $E_{\gamma} = 0.661 \text{ MeV}$ 和 ^{60}Co 的光电峰 $E_{\gamma_1} = 1.17 \text{ MeV}$, 如果对应

$E_1 = 0.661\text{MeV}$ 的光电峰位于 N_1 道，对应 $E_2 = 1.17\text{MeV}$ 的光电峰位于 N_2 道，则有能量刻度

$$k = \frac{1.17 - 0.661}{N_2 - N_1} \text{MeV} \quad b = \frac{(0.661 + 1.17) - k(N_1 + N_2)}{2} \text{MeV} \quad (\text{D7-6})$$

将测得的未知光电峰对应的道址 N 代入 $E_\gamma = kN + b$ 即可得到对应的能量值。

(2) 谱仪分辨率

γ 能谱仪的一个重要指标是能量分辨率。由于闪烁谱仪测量粒子能量过程中，伴随着一系列统计涨落过程，如 γ 光子进入闪烁体内损失能量、产生荧光光子、荧光光子在光阴极上打出光电子、光电子在倍增极上逐级倍增等等，这些统计涨落使脉冲的幅度服从统计规律而有一定分布的。

定义谱仪能量分辨率 η ：

$$\eta = \frac{FWHM}{E_\gamma} \times 100\% \quad (\text{D7-7})$$

其中 FWHM(Full Width Half Maximum)表示选定能谱峰的半高全宽， E_γ 为与谱峰对应的 γ 光子能量， η 表示闪烁谱仪在测量能量时能够分辨两条靠近的谱线的本领。目前一般的 NaI 闪烁谱仪对 ^{137}Cs 光电峰的分辨率在 10% 左右。对 η 的影响因素很多，如闪烁体、光电倍增管等等。

【实验前思考题】

1. 简述 γ 光子与物质的相互作用类型，及其产生的次级粒子与原入射光子的能量关系。
2. 对探测器中的光电倍增管，射线的光电效应会对其测量产生影响吗？影响能有多大？¹
3. 有一单能 γ 源，能量为 2MeV，根据 γ 与物质的相互作用及 NaI (TI) 闪烁能谱仪输出信号幅度的关系，预测能谱形状。
4. 闪烁谱仪是常用的 γ 能谱仪，简述闪烁谱仪的结构图和各部分功能。

【实验内容及步骤】

本实验中使用虚拟核仿真信号源产生核脉冲信号，从而代替了放射源、探测器与高压电源的使用；通用数据采集器使用多道分析功能，对信号源输出的核脉冲进行线性放大并进行多道能谱测量与分析。通过软件控制虚拟核仿真信号源的电压和放射源的状态，可以

¹¹ 对于测量荧光光子的光子倍增管，原则上也受到 γ 光子的光电效应作用，但其截面低于荧光光子的截面，即荧光光子比高能 γ 光子更容易打出光电子；另一方面，荧光光子数远多于 γ 光子数。

得到相应的核脉冲信号，经过多道分析可以观察到相应的物理现象。虚拟核实验仪与真实核实验仪对应的关系，如图 D7-3 所示。

主要完成以下实验内容：

打开 γ 能谱实验软件，加载探测器高压，设置放射源为 ^{137}Cs ，打开多道分析仪软件，记录 ^{137}Cs 的能谱图，寻找并标记出光电峰和背散射峰的峰位，结合光电峰和背散射峰的能量，定出谱仪的能量刻度，并通过光电峰的 FWHM 估算谱仪的能量分辨率。

【思考题】

1. 解释的 ^{137}Cs 的 γ 射线能谱图中各个能峰的能量以及产生原因。
2. 能谱测量中，为减少统计误差，通常要尽量多的积累能谱数据（增大放射源强度或者增加测量时间）。某同学为了能在有限时间内积累足够的能谱数据，分别用两台 NaI 闪烁探测器同时测量 ^{137}Cs 的 γ 射线能谱图，那么该同学测量的这两组能谱数据能合起来使用吗？能的话，该怎样合起来使用？
3. ^{137}Cs 能谱的峰位做一条垂直于横轴的线，能否看出这条线左侧低能区的总计数和高能区的总计数，哪个多一些？结合 γ 粒子在闪烁体中的相互作用与其对能谱的影响分析，产生这一现象的原因。
4. 分析你测得的 ^{137}Cs (0.662 MeV) 的 γ 射线能谱图的全能峰，绘制能量-峰位图（横坐标为道数，纵坐标为对应能量）和不同 γ 能量的能量分辨率 η 图 ($\ln E - \ln \eta$)。

【参考文献】

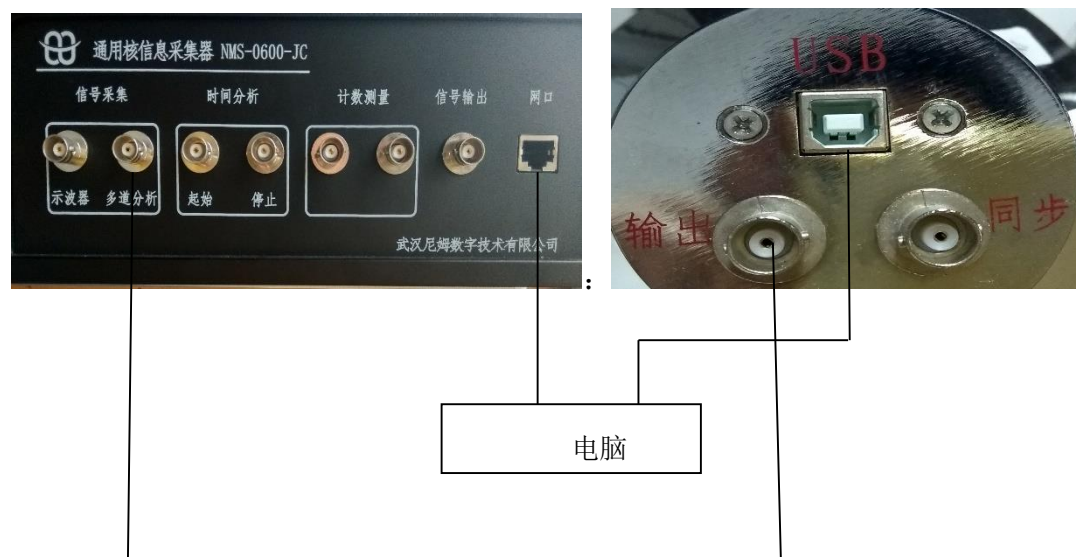
- [1] MARMIER P, SHELDON E. Physics of nuclei and particles, New York: Academic Press, 1969, Volume 1
- [2] 汪晓莲, 李澄等, 粒子探测技术. 安徽合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009, p44
- [3] 孙腊珍, 核与粒子物理专业基础实验讲义, 2015 年 3 月, p52

【附录】

附录一、Co60 和 Cs137 的 γ 放射特性。

原子序数 Z	元素	质量数	半衰期	主要放射性	射线能量 keV (分支比)
27	Co	60	5.27 年	β^- γ	β^- 318; γ 1332 (100%), γ 1173 (100%);
55	Cs	137	30.1 万年	β^- γ	β^- 541 (94%), 1176; γ 662 (85%);

附录二、虚拟核仪器的接线方法

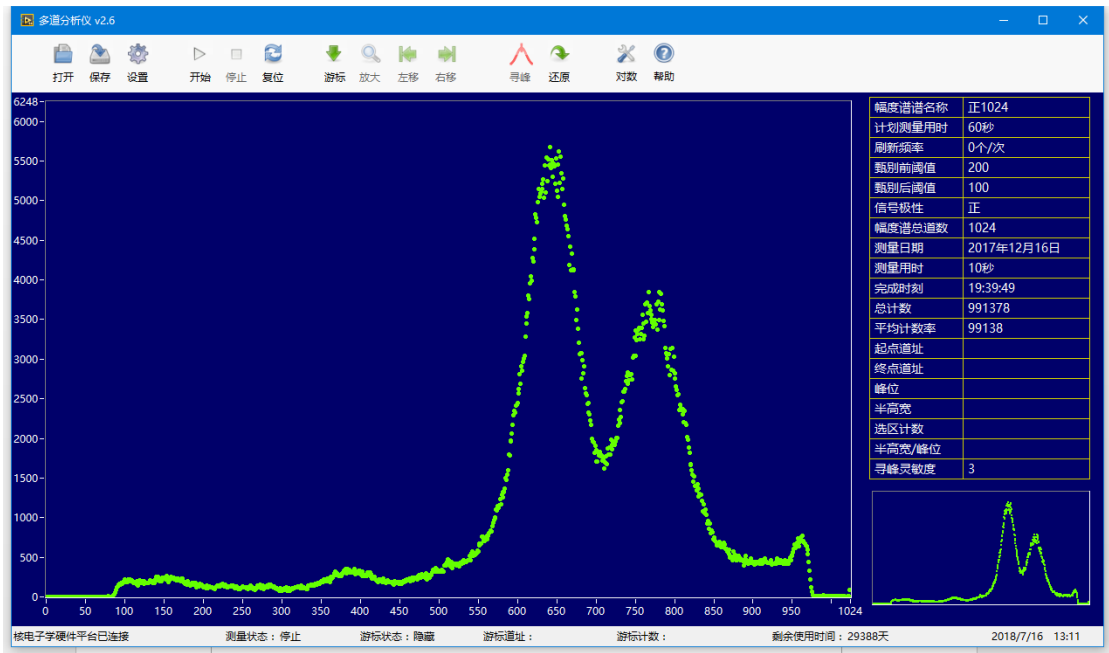


附录图 2：虚拟核仪器能谱测量的接线方法

此种连接方法可进行： α 粒子能量谱、 γ 粒子能谱测量实验、x 射线特征能谱测量与 x 射线吸收

附录三、利用虚拟多道分析软件求解能量分辨率的方法

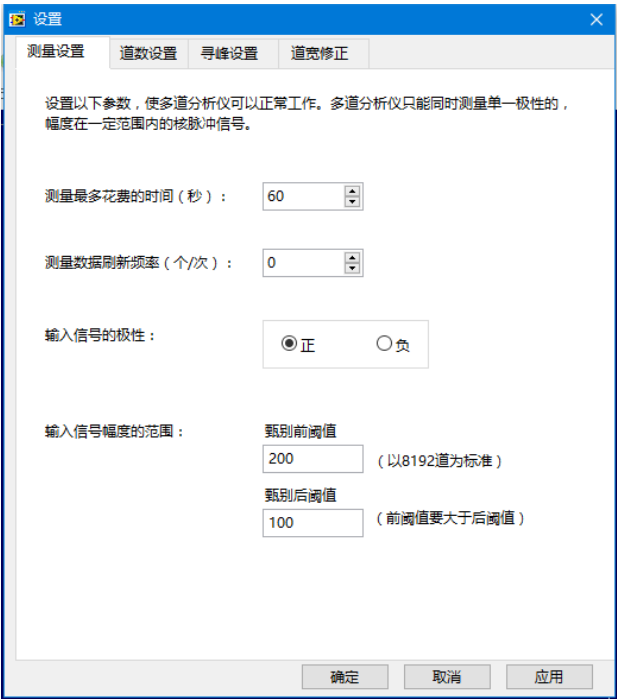
软硬件全部安装成功后，运行多道分析仪软件，进入如下图 3 所示软件界面：软件界面中上面一栏为操作栏，用于用户操作；中间区域显示所测多道能谱；最下面一栏为状态栏，显示当前测量状态；最右边一栏显示所测能谱的各种特性。



附录图 3 多道分析仪软件界面

1.测量能谱

在测量能谱前，要先设定好测量参数，点击操作栏“设置”按钮弹出如下图 4 中界面，在这个弹出框中通过点击选项卡我们可以进行以下设置：



附录图 4 多道分析仪测量设置

1.测量设置：用于设定测量时间、能谱显示刷新频率、信号极性、信号测量阈值和数字滤波参数。

1)测量时间：硬件测量时间 0-65535s

2)能谱显示刷新频率：测量时软件能谱数据显示刷新速度，如设置为 1000，则硬件每测量到 1000 个信号刷新能谱数据；设置为 0 时持续不断刷新

3)信号极性：输入信号极性设置

4)信号阈值：多道测量信号阈值

2.道数设置：用于选择能谱显示道数 1024、2048、4096 和 8192 道。

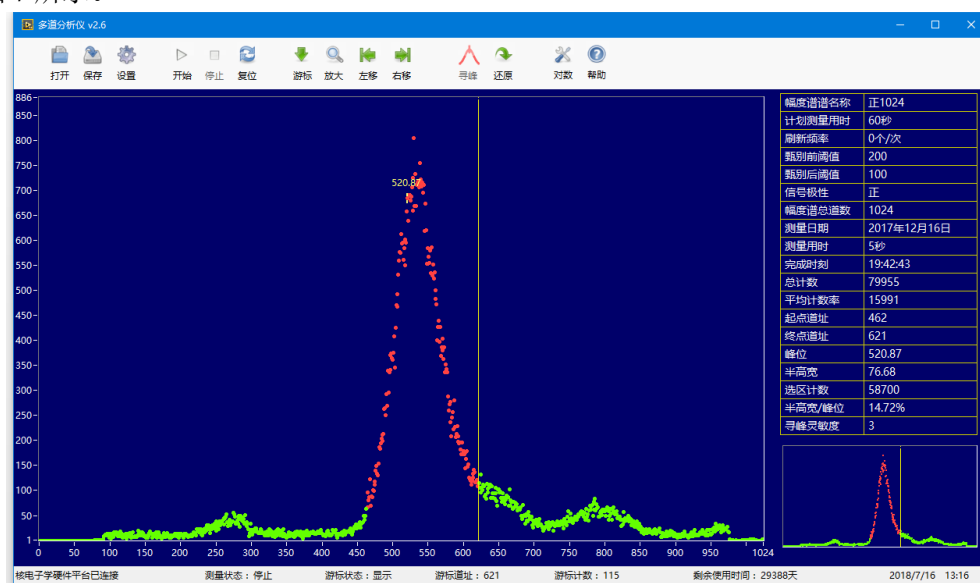
3.寻峰设置：用于设置寻峰参数即寻峰灵敏度，详见第 2 小节“设置感兴趣区，并寻峰”。

在设置完成后，点击应用,选择确定退出设置对话框，然后点击操作栏“开始”键，多道分析开始测量能谱。测量过程中能谱的变化会实时显示在中间能谱图中，在测量时间达到设定值或中间按下“停止”键时，测量自动停止。

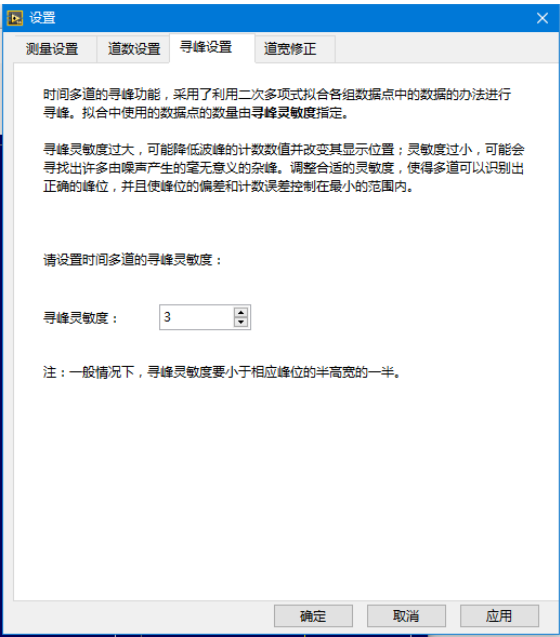
2.设置感兴趣区，并寻峰

在能谱测量进行中或结束后，要设置感兴趣区，点击操作栏“游标”键，屏幕左侧会出现一条黄色垂直游标，用鼠标拖动游标,软件即会自动选中游标拖动的范围为感兴趣区，选中的部分能谱点会变成红色。再次拖动游标即重新选取感兴趣区，在测量时右侧会实时显示感兴趣区的总计数，如下图 5 和图 6。

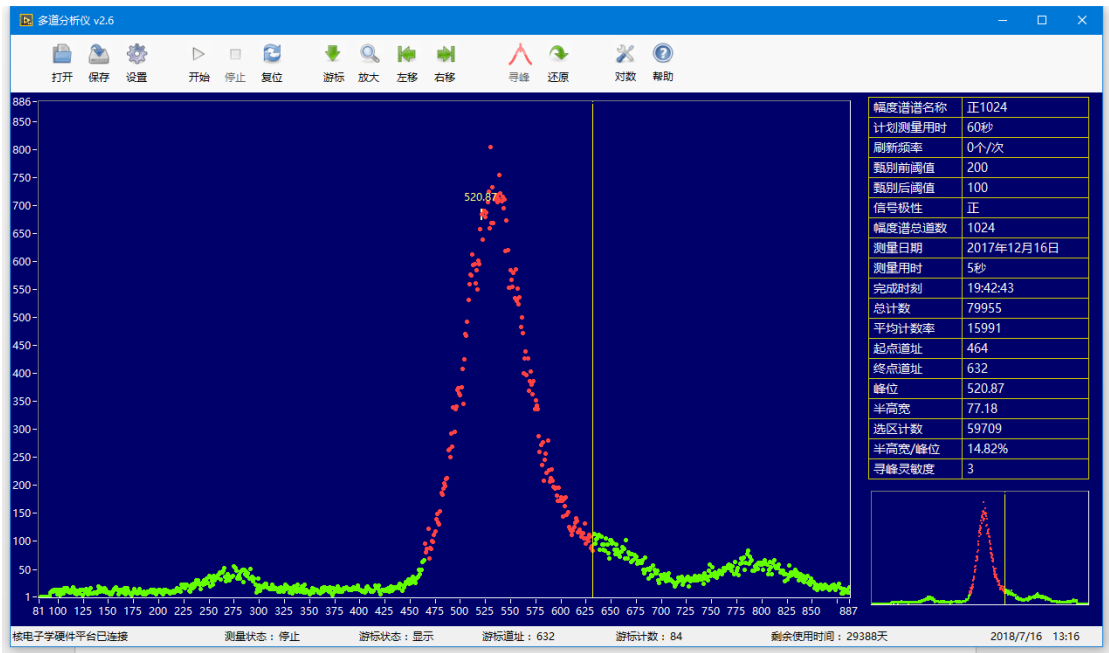
在选定感兴趣区的情况下,若要进行寻峰，要点击操作栏“设置”按钮，选择寻峰设置，根据所选峰的半高宽大致确定寻峰灵敏度，设置完成后确定，然后点击操作栏“寻峰”键，软件将自动寻峰,并将峰参数（半高宽、净面积、峰位和半高宽/峰位等）显示在右边参数栏中。若要对所选区域进行更细致的观察，可以点击操作栏“放大”键，软件将会把感兴趣区放大显示，如图 7 所示。



附录图 5 多道分析仪设置感兴趣区和寻峰



附录图 6 多道分析仪寻峰设置



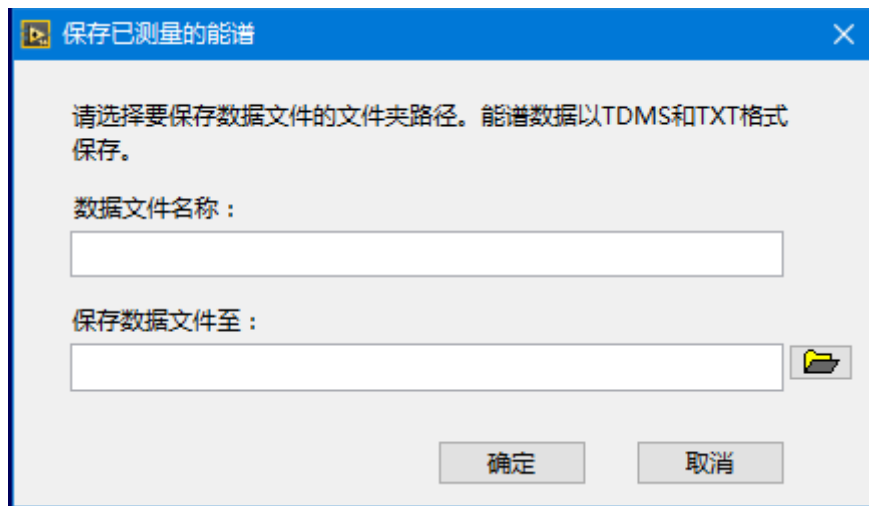
附录图 7 多道分析仪感兴趣区放大

3.对所测能谱的保存与读取

在能谱测量完成后，软件会自动保存测量数据，保存路径在程序安装路径“多道分析仪

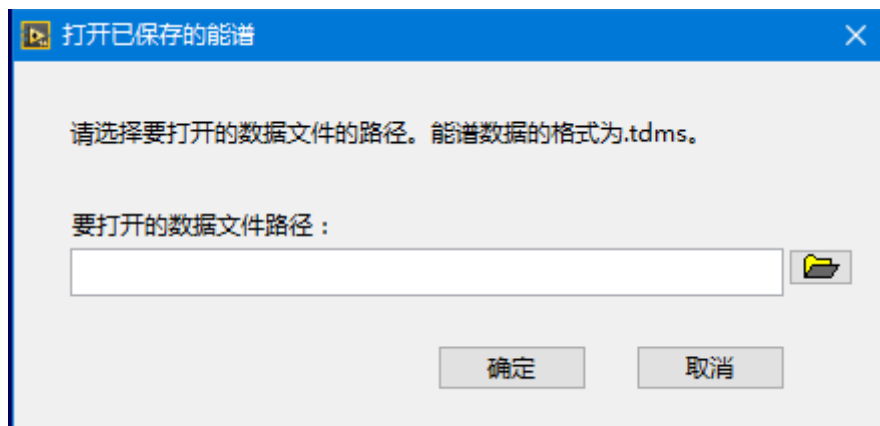
v2.7\data”目录下，文件名为结束测量的时间，文件格式为 tdms。

我们也可以对其进行自定义保存，点击操作栏“保存”按钮，会弹出文件对话框，输入要保存的文件名并选择要保存的文件夹后点击“确定”，如下图 8，软件将会把能谱数据以 txt 和 tdms^[5]两种格式保存。



附录图 8 多道分析仪能谱保存

对保存的能谱数据在下次使用时，只需点击操作栏“打开”按钮，在弹出的对话框中选择要读取的 tdms 文件后点击“确定”即可，如下图 9，数据将会以能谱图的形式显示出来。



附录图 9 多道分析仪能谱读取