

# 核物理实验方法

## 期末习题

YF.Wu

2024 年 1 月 4 日

---

# 前言

核物理实验方法往年期末习题解答, 可能有错误之处。

YF.Wu

2024 年 1 月 4 日

- 
- 1、带电粒子的电离能量损失率  $(-dE/dx)$  与入射带电粒子的质量关系为无关  
与入射带电粒子的原子序数  $z$  的关系为  $-\frac{dE}{dx} \propto z^2$
- 2、在 1MeV-1000MeV 能量范围内,alpha 粒子的  $(dE/dx)$  随着能量的增加而减小 (填增加或减小)
- 3、重带电粒子的能量损失主要通过电离 和激发, 在 1MeV 以上电离 为主; 电子的能损主要通过电离 和 韧致辐射, 随着能量的增加韧致辐射 的贡献所占比例变大。
- 4、Gaussian 分布的 FWHM 与  $\sigma$  的关系式为  $FWHM = 2.35\sigma$ , 测量值  $x \pm \sigma$  意味着真值落在  $x - \sigma$  和  $x + \sigma$  之间的几率为68 %
- 5、按衰减时间 (decay time) 由小到大的顺序排序  $NaI, BaF_2, plastic$ :  
 $BaF_2(fast) < plastic < NaI < BaF_2(slow)$
- 6、硅探测器和塑料闪烁体探测器都是  $\beta$  射线探测中常见的探测器。对于能量测量和活度测量应优先使用哪种探测器? 为什么?
- 答: 对于能量测量应该优先使用硅探测器, 对于活度测量应优先使用塑料闪烁体探测器。
- 原因: 硅探测器产生电子-空穴对所需的能量很小, 具有卓越的能量分辨率。密度相对较大, 具有更好的阻止本领, 阻停同样能量的束流, 所需要的体积较小, 更紧凑。塑料闪烁体探测器的能量分辨率较差, 但是衰减时间仅几个纳秒, 上升时间小于 1 纳秒, 具有极好的时间分辨率, 适宜做时间测量。因此, 对于能量测量应该优先使用硅探测器, 对于活度测量应优先使用塑料闪烁体探测器。
- 7、能量为 2MeV 的单能  $\gamma$ - 光子被  $NaI + PMT$  探测器所探测。
- 画出能谱 ( $dN/dE \sim E$ ), 标注主要特征。
  - 简述谱中各特征的产生机制。
  - 如果探测器的灵敏体积由小到大发生变化, 能谱将发生什么变化?
  - 描述课上讲过的  $\gamma$ - 能谱测量中降低康普顿三色对低能区影响的两种方法。

(1) 能谱

(2) 第一个峰是特征 x 谱线, 第二个是由于背散射导致的峰, 第三个是正电子湮灭导致的峰, 第四个是全能峰的双电子逃逸峰, 第五个是单电子逃逸峰, 第六个是康普顿边缘, 最后一个全能峰。

(3) 当探测器体积过小时, 高能粒子会逃出探测器, 增加探测器体积, 全能峰会向右侧移动。

(4) 1、使用反康普顿仪; 2、使用复合锗探测器

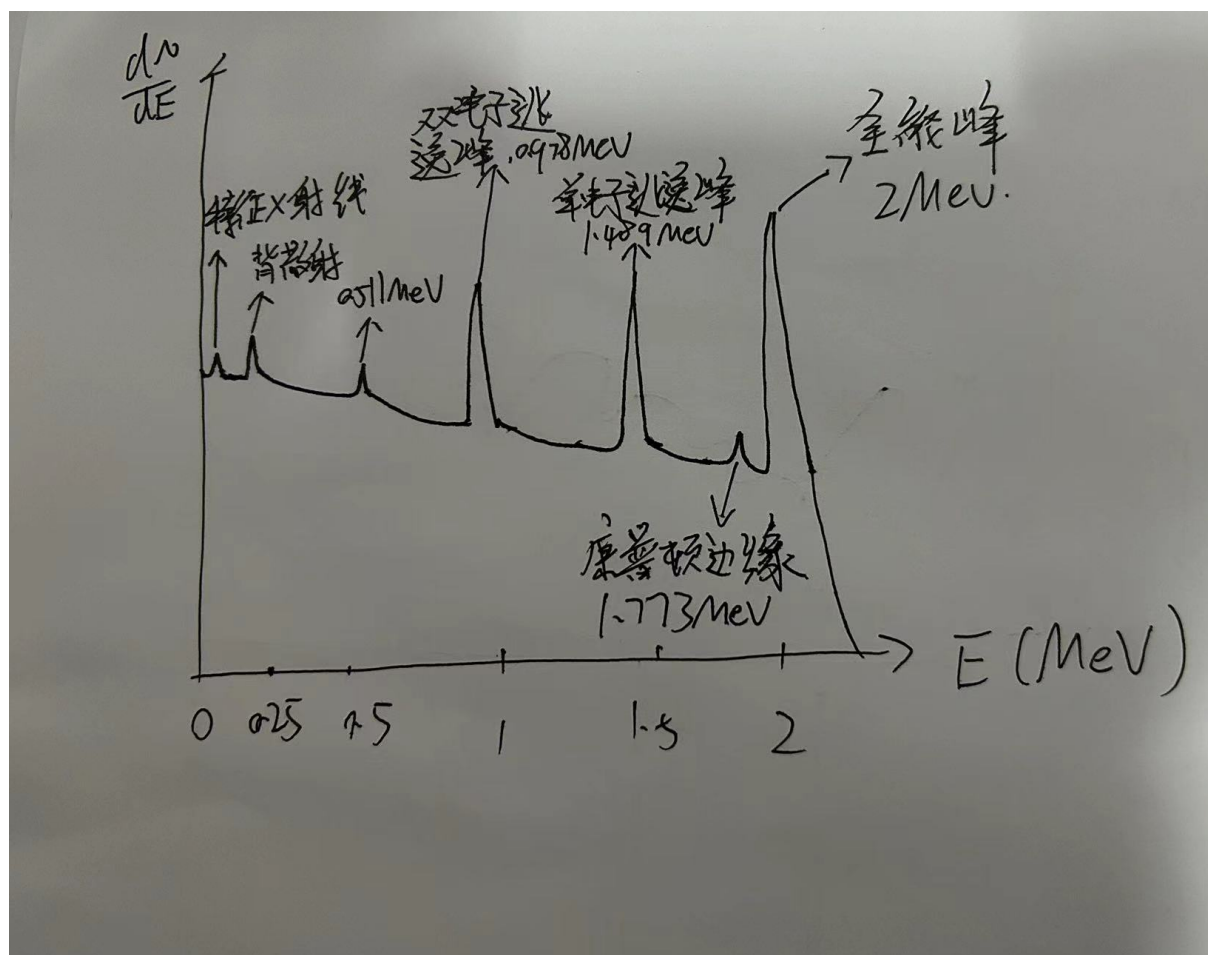


图 1: 能谱

---

8、从电路负载和阻抗匹配对信号影响的角度,描述能量路和时间路电子学的前后级的  $Z_{out1}$  和  $Z_{in2}$  之间满足什么条件,为什么?

答: 能量测量:  $Z_{in} = 1000\Omega$   $Z_{out} < 1\Omega$

时间测量:  $Z_{in} = 50\Omega$   $Z_{out} = 50\Omega$

原因: 用于能量测量、慢信号时最好总是有  $Z_{out} \ll Z_{in}$ , 这样当负载连接时, 信号电平就不会改变。用于时间测量、快速信号时它要求有  $Z_{out} = Z_{in}$ , 这就是射频电路的情况, 以避免信号反射。

9、用金硅面垒探测器测  $^{210}\text{Po}$  的 alpha 粒子能谱。

- 逐步增加反偏电压时观测到的脉冲幅度和分辨率有何变化, 原因是什么?
- 描述利用 alpha 放射源确定探测器工作偏压的方法?

答: (1) 增加反偏电压会使金硅面垒探测器的灵敏区增加, 进而使得探测器中沉积的能量增大直至达到最大值饱和不变, 因此脉冲幅度会先增加然后不变; 对于分辨率而言, 相对分辨率反比于沉积能量的  $1/2$  次方, 随着沉积能量的增大, 能量分辨率逐渐提高, 直至不变。

(2)

1. \*\* 选择适当的 alpha 放射源:\*\* 选择一个放射性核素, 通常是一个放射性的 alpha 粒子源。
2. \*\* 放置 alpha 放射源:\*\* 将 alpha 放射源放置在离探测器表面一定距离的位置, 以确保探测器可以被辐射到。
3. \*\* 逐步调整工作偏压:\*\* 从零开始逐步增加探测器的工作偏压, 监测探测器输出的信号。
4. \*\* 记录信号变化:\*\* 随着工作偏压的增加, 记录 alpha 粒子探测信号的变化。
5. \*\* 确定最佳工作偏压:\*\* 当输出信号的峰不再改变时, 确定了最佳工作偏压。

10、写出望远镜法、脉冲形状甄别法进行粒子鉴别的原理?

答: 脉冲波形法: 入射粒子的  $dE/dx$  的值越大, 闪烁光里面的慢成分越多. 在实验中, 入射粒子在探测器中产生信号的尾部面积与脉冲总面积的比值越大, 则说明粒子的  $dE/dx$  越大, 因此可以通过辨别脉冲形状来鉴别粒子。

望远镜法: 将两块探测器联合在一起, 其中第一块探测能量损失, 第二块探测粒子的能量。根据电离能损公式:  $\frac{dE}{dx} \propto \frac{Az^2}{E}$ , 当第一块探测器厚度很薄时, 粒子的沉积能量很小, 可以认为粒子在第一块探测器中的能量为一常数, 因此粒子在第一块探测中的沉积能量  $\Delta E \propto \frac{Az^2}{E}$ , 再利用第二块探测器探测粒子能量, 将两块探测器的测量值绘制在一个图中, 由于入射粒子的质量数以及质子数不同, 可以得到一系列曲线, 通过这些曲线可以辨别粒子。

11、简述带电粒子在电离室区和正比区发生的物理过程。写出在本课程中出现的几种气体探测器的名称, 至少 5 种, 并指明工作在哪一区。

---

答: 电离室区: 随着外加电压增大, 离子漂移速度增加, 电子吸附、扩散效应的影响减小, 发生复合的机会减小, 被收集的电荷数增加。电压达到一定值 ( $V_a$ ) 时, 基本不存在复合, 总电离数 ( $N_0$ ) 全部被电极收集, 达到饱和在一定电压范围内 ( $V_a - V_b$ ), 被收集电荷不再增加, 达到饱和。

正比区: 工作电压大于  $V_b$  后, 外加电场很强, 电离电子在漂移过程中获得的能量很大, 使气体分子再电离, 又产生次级离子对。次级电子在漂移时又可能加速到足以再次产生次级离子对。如此不断继续下去, 使电离的离子对数目比原总电离对数目  $N_0$  增加很多, 称为气体放大。经气体放大得到的电荷数  $N$  与原总电离数  $N_0$  之比, 叫做气体放大倍数  $M$ ,  $M = N/N_0$ , 气体放大倍数随电压的增加而增加。对确定的探测器, 外加电压一定时, 放大倍数一定。

电离室 (电离室区); 正比计数器 (正比区); 多丝正比室 (正比区); PPAC (正比区); G-M 计数器 (G-M 区)

12、试用误差传递公式求出飞行时间法 (TOF) 测量中子能量  $E_n$  的相对误差 (不考虑 start 探测器时间分辨), 并讨论减少测量误差的方法。

符号: 飞行距离  $L$ , 飞行时间  $T$ , stop 探测器厚度  $\Delta L$ , stop 探测器时间分辨  $\Delta t$

答:

$$\begin{aligned} E_n &= \frac{1}{2}mv^2 \\ v &= \frac{L}{t} \\ E_n &= \frac{mL^2}{2t^2} \\ (\Delta E_n)^2 &= \left( \frac{\partial E_n}{\partial L} \Delta L \right)^2 + \left( \frac{\partial E_n}{\partial t} \Delta t \right)^2 \\ &= \left( \frac{mL}{t^2} \Delta L \right)^2 + \left( \frac{mL^2}{t^3} \Delta t \right)^2 \\ \left( \frac{\Delta E_n}{E_n} \right)^2 &= \left( \frac{2\Delta L}{L} \right)^2 + \left( \frac{2\Delta t}{t} \right)^2 \\ \frac{\Delta E_n}{E_n} &= \sqrt{\left( \frac{2\Delta L}{L} \right)^2 + \left( \frac{2\Delta t}{t} \right)^2} \end{aligned}$$

减小误差的方法: 1、增加飞行距离或者飞行时间 2、选用密度大的阻止探测器以减小  $\Delta L$  3、选用时间分辨小的 stop 探测器以减小  $\Delta t$

13、简述前置放大器和主放大器的功能。

答: 大多数核探测器输出的信号幅度很小, 如硅探测器, 直接输出信号小于 1mV。幅度小的信号在传输过程中易受到噪声的干扰, 不利于远距离传输。因此, 信号在传输前, 需要先进行放大处理。前置放大器: 位于探测器和下一级电子学之间。

---

作用:

- 将探测器的输出信号进行放大, 提高信噪比
- 提供阻抗匹配
- 对信号脉冲进行整形, 方便后续的信号处理

前置放大器的分类:

- 电压灵敏型
- 电荷灵敏型 (主要)
- 电流灵敏型

主放大器: 又叫整形放大器, 位于前置放大器后, 由 CR 微分电路和 RC 积分电路构成, 将前放的输出信号整成准高斯型。

作用:

- 经过谱仪放大输出器输出的信号顶端平, 有利于后面的幅度分析。
- 放大和成形, 改善信噪比。

14、简述前沿甄别和恒比定时甄别的定时原理及适用范围。

答:

前沿定时法:

原理: 当输入信号超过一个固定的阈值水平时, 它会产生一个逻辑脉冲, 该阈值水平应该高于噪声水平, 以防止对噪声信号的杂散触发。

适用范围: 用于输入脉冲幅度和波形变化不大的情况。

恒比定时法:

原理: 将输入信号进行延时以及缩小处理, 注意延时时间要大于信号的上升时间, 当延时的信号幅度等于缩小处理的信号幅度时, 输出信号。

适用范围: 主要用于快响应探测器如有机闪烁体探测器。

15、用两个 HPGe 探测器来测量活度为  $n_0$  的  $^{60}\text{Co}$  放射源的一对  $\gamma$ - 光子, 探测器探测效率分别为  $\epsilon_1$   $\epsilon_2$ , 两个探测器时间信号的宽度均为  $\tau$ 。

- 画出符合法测量  $^{60}\text{Co}$  的两个  $\gamma$  是否有级联关系的电路框图 (包含前置放大器、分路器、时间甄别、Delay、符合单元、触发器、ADC、TDC、ADC gate、TDC start)

- 给出用符合法测得的真符合和偶然符合的计数率。

答:

(1) 符合电路 (题目可能不一样)

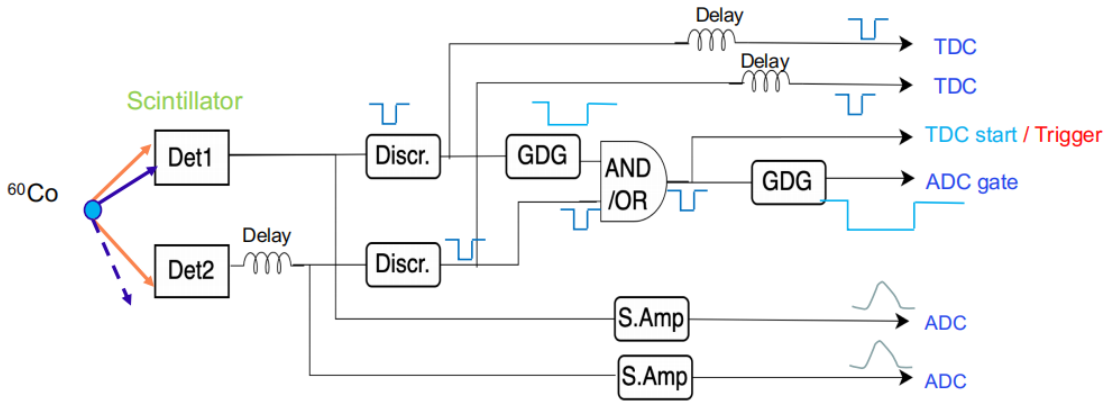


图 2: 符合电路

(2) 假设探测器 1 记录  $\gamma_1$  光子, 对放射源立体角为  $\Omega_{\gamma_1}$ , 对  $\gamma_1$  的探测效率为  $\epsilon_{\gamma_1}$ ; 假设探测器 2 记录  $\gamma_2$  光子, 对放射源立体角为  $\Omega_{\gamma_2}$ , 对  $\gamma_2$  的探测效率为  $\epsilon_{\gamma_2}$ ;

第一道计数率为  $n_{\gamma_1} = n_0 \Omega_{\gamma_1} \epsilon_{\gamma_1}$

第二道计数率为  $n_{\gamma_2} = n_0 \Omega_{\gamma_2} \epsilon_{\gamma_2}$

真符合计数率为  $n_{tc} = n_0 \Omega_{\gamma_1} \epsilon_{\gamma_1} \Omega_{\gamma_2} \epsilon_{\gamma_2}$

偶然符合计数率为  $n_{rc} = 2\tau n_0^2 \Omega_{\gamma_1} \epsilon_{\gamma_1} \Omega_{\gamma_2} \epsilon_{\gamma_2}$

真偶符合比为  $\frac{n_{tc}}{n_{rc}} = \frac{1}{2\tau n_0}$