

核物理实验方法期末开卷考试答案

- 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**，与入射带电粒子的带电量 z 的关系为 z^2 。
- 在 1 MeV - 1000 MeV 能量范围内， α 粒子的 $-dE/dx$ 随着能量的增加而**减小** (填增加或减小)。
- 重带电粒子的能量损失主要通过**电离**和**激发**，在 1 MeV 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。
- Gaussian 分布的 FWHM 与 σ 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%。
- 按衰减时间 (decay time) 由小到大的顺序排序 NaI, BaF₂, plastic : BaF₂(fast) < plastic < NaI < BaF₂(slow)。
- 硅探测器和塑料闪烁体探测器都是 β 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，上升时间约 4 纳秒 (硅探测器的上升时间约 60 ns)，具有极好的时间分辨率，适宜做时间测量。
- 能量为 2 MeV 的单能 γ 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。

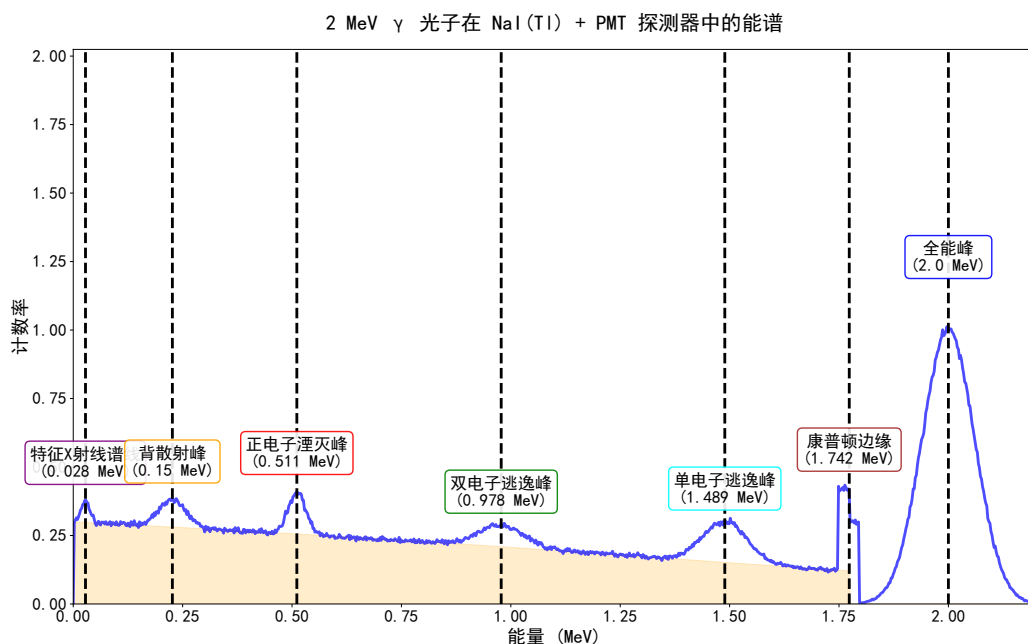


图 1: 能谱

- 简述谱中各特征的产生机制。

第一个峰是特征 X 射线谱线，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。

- 全能峰 (Full-energy peak)

位置：

$$E = X \quad (1)$$

来源： γ 光子在晶体中完全沉积其能量（光电效应 / 多次康普顿散射后再经光电效应）。

- 康普顿连续谱 & 康普顿边缘 (Compton edge)

康普顿边缘位置：

$$E_C = X \left(1 - \frac{1}{1 + 2X/m_e c^2} \right) \quad (2)$$

来源：单次康普顿散射中，反冲电子获得的**最大动能**所对应的能量端点。

- 背散射峰 (Backscatter peak)

位置：

$$E_B = \frac{X}{1 + 2X/m_e c^2} = \frac{X}{1 + \frac{m_e c^2}{2X}} \quad (3)$$

来源： γ 光子在探测器外部发生 180° 康普顿散射后，再返回并在晶体中被吸收。

- 正电子湮灭峰 (511 keV)

位置：

$$E = 0.511 \text{ MeV} \quad (4)$$

来源：当 $X > 1.022 \text{ MeV}$ 时发生对产生，正电子与电子湮灭产生两条 511 keV 光子。

- 单电子逃逸峰 (Single escape peak)

位置：

$$E = X - 0.511 \text{ MeV} \quad (5)$$

来源：对产生后，两条湮灭光子中**有一条逃逸**出探测器。

- 双电子逃逸峰 (Double escape peak)

位置：

$$E = X - 1.022 \text{ MeV} \quad (6)$$

来源：对产生后，两条 511 keV 湮灭光子**全部逃逸**出探测器。

- 特征 X 射线峰 (Characteristic X-rays)

来源核素：NaI 探测器中主要来自 I (碘) 原子的 K 线。

典型能量位置：

$$28 \sim 33 \text{ keV} \quad (7)$$

来源： γ 光子发生光电效应后，原子内壳层空穴退激辐射产生的特征 X 射线。

- 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？

灵敏体积变大，探测效率增加，被探测到的 γ 射线沉积的能量也增多。全能峰面积和多重康普顿散射增加，其他峰位包括康普顿坪减小。等探测器的灵敏体积“无限大”时，只剩下全能峰。

- 描述课上讲过的 γ 能谱测量中降低康普顿连续谱对低能区影响的两种方法。

- 使用反康普顿谱仪：如果半导体探测器和包裹在半导体探测器外侧的 BGO 探测器同时有信号输出，则可以利用反符合的方式，拒绝在半导体中产生的信号，这样最后半导体探测器输出的信号就只有全能峰的信号。（BGO 探测效率大）；
- 使用复合锗探测器：设置多块锗探测器，若某一 γ 先后在多个小探测器中沉积能量产生信号，则可通过符合的方式把多个探测器的输出信号幅度相加，以此增加最后能谱的峰康比。

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 $Z_{\text{out}1}$ 和 $Z_{\text{in}2}$ 之间满足什么条件，为什么？

答：

能量测量: $Z_{in1} = 1000 \Omega$, $Z_{out2} < 1 \Omega$ 。

时间测量: $Z_{in1} = 50 \Omega$, $Z_{out2} = 50 \Omega$ 。

原因:

用于能量测量、慢信号时最好总是有 $Z_{out2} \ll Z_{in1}$, 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 $Z_{out2} = Z_{in1}$, 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}Po 的 α 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?

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。

- 描述利用 α 放射源确定探测器工作偏压的方法?

- 选择适当的 α 放射源:** 选择一个放射性核素, 通常是一个放射性的 α 粒子源。
- 放置 α 放射源:** 将 α 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。
- 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。
- 记录信号变化:** 随着工作偏压的增加, 记录 α 粒子探测信号的变化。
- 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。

几种气体探测器及其工作区:

- 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 TOF, stop 探测器厚度 σ_L , stop 探测器时间分辨 σ_t 。

答:

首先有:

$$E_n = \frac{m_n L^2}{2\text{TOF}^2}. \quad (8)$$

已知有距离的不确定度 σ_L 以及飞行时间的不确定度 σ_{TOF} 。根据不确定度传递公式, 有

$$\begin{aligned} \sigma_{E_n}^2 &= (\partial_L E_n)^2 \sigma_L^2 + (\partial_{\text{TOF}} E_n)^2 \sigma_{\text{TOF}}^2 + 2\partial_{L,\text{TOF}}^2 E_n \text{cov}(L, \text{TOF}) \\ &= \left(\frac{m_n L}{\text{TOF}^2} \right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{m_n L^2}{\text{TOF}^3} \right)^2 \sigma_{\text{TOF}}^2 - 2 \left(\frac{m_n^2 L^3}{\text{TOF}^5} \right) \text{cov}(L, \text{TOF}). \end{aligned} \quad (9)$$

于是相对误差可以写为

$$R = \frac{\sqrt{\left(\frac{m_n L}{\text{TOF}^2} \right)^2 \sigma_L^2 + \left(\frac{m_n L^2}{\text{TOF}^3} \right)^2 \sigma_{\text{TOF}}^2 - 2 \left(\frac{m_n^2 L^3}{\text{TOF}^5} \right) \text{cov}(L, \text{TOF})}}{E_n} = \frac{2}{L} \sqrt{\sigma_L^2 + \frac{L^2}{t^2} \sigma_t^2 - 2 \frac{L}{t} \text{cov}(L, \text{TOF})}. \quad (10)$$

一般认为 $\text{cov}(L, \text{TOF}) = 0$ 。

减小误差的方法:

1. 增加飞行距离 L 或者飞行时间 TOF ;
2. 选用密度大的阻止探测器以减小 σ_L ;
3. 选用时间分辨小的 stop 探测器以减小 σ_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 1 mV。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: 将输入信号进行翻转延时以及缩小处理, 注意延时时间要**大于**信号的上升时间, 当翻转延时的信号幅度与缩小处理的信号幅度之和为零时, 输出信号。

适用范围: 主要用于**上升时间不变的** (保证延迟时间固定) 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}Co 放射源的一对 γ 光子, 探测器探测效率分别为 ε_1 、 ε_2 , 两个**探测器时间信号的宽度均为 τ** 。

- 画出符合法测量 ^{60}Co 的两个 γ 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)。

答: 符合电路 (题目可能不一样)

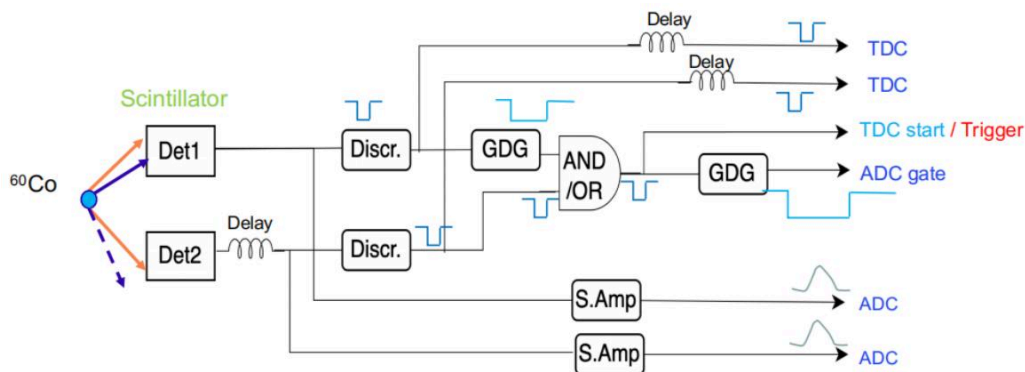


图 2: 符合电路

- 给出用符合法测得的真符合和偶然符合的计数率。

假设探测器 1 记录 γ_1 光子, 对放射源立体角为 Ω_{γ_1} ; 假设探测器 2 记录 γ_2 光子, 对放射源立体角为 Ω_{γ_2} 。

第一道计数率为:

$$n_{\gamma_1} = n_0 \Omega_{\gamma_1} \varepsilon_{\gamma_1}, \quad (11)$$

第二道计数率为:

$$n_{\gamma_2} = n_0 \Omega_{\gamma_2} \varepsilon_{\gamma_2}, \quad (12)$$

真符合计数率为:

$$n_{tc} = n_0 \Omega_{\gamma_1} \varepsilon_{\gamma_1} \Omega_{\gamma_2} \varepsilon_{\gamma_2}. \quad (13)$$

偶然符合计数率为:

$$n_{rc} = 2\tau n_0^2 \Omega_{\gamma_1} \varepsilon_{\gamma_1} \Omega_{\gamma_2} \varepsilon_{\gamma_2}. \quad (14)$$

真偶符合比为:

$$\frac{n_{tc}}{n_{rc}} = \frac{1}{2\tau n_0}. \quad (15)$$