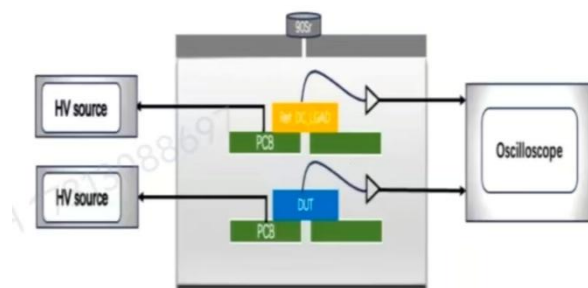


问题 1：什么是“符合”测试？为什么要进行符合测试？为什么时间分辨率的测量要用符合信号来测量？



β望远镜测试原理图 (DUT为待测LGAD样品)

1. 什么是“符合”测试

在这张 PPT 的 β 望远镜测试原理图中，我们能看到典型的符合测量结构：两个探测器（一个参考探测器 Ref，一个待测探测器 DUT）在空间上前后排列，同一个 β 粒子会先后穿过两个探测器，在两者中各产生一个信号。

符合测试就是利用逻辑电路（或示波器 / TDC）筛选出两个信号在预设时间窗口内同时出现的事件，这些事件被判定为“由同一个粒子产生的关联事件”，而单路随机噪声、本底信号因无时间关联，会被直接剔除。

2. 为什么要做符合测试

抑制随机噪声与本底：单路探测器的噪声、暗电流、环境辐射信号是无时间关联的，符合筛选可以把这些无关事件的计数压低几个数量级，大幅提升信噪比。获得天然时间关联的事件：同一个粒子在两个探测器中产生的信号，存在天然的先后时间差，这个时间差的统计分布，就是我们测量时间分辨率的基础。

分离待测探测器的固有时间分辨率：通过双探测器的时间差分布，结合已知的参考探测器分辨率，就能解出待测探测器的真实时间分辨率，而不受单路电子学噪声的干扰。

3. 为什么时间分辨率要用符合信号测量

时间分辨率的本质是探测器对同一事件的响应时间的统计分布宽度。用符合信号测量的核心原因：

只有符合事件才是真正的物理事件：单路信号无法区分“粒子产生的信号”和“噪声触发的假信号”，而符合事件一定是同一个粒子穿过两个探测器产生的，不存在假信号的干扰。

时间差分布直接反映探测器的时间响应宽度：双探测器的时间差分布的宽度 (σ)，满足

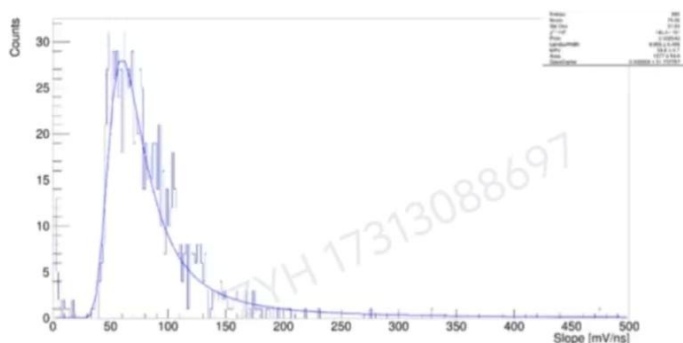
$$\sigma_{\Delta t}^2 = \sigma_{Ref}^2 + \sigma_{DUT}^2$$

如果参考探测器的分辨率已知且足够小，就可以直接解出待测探测器的固有时间分辨率。

消除单路电子学的系统误差：两路信号的时间差可以抵消部分公共的系统误差（如时钟漂移），得到更纯净的探测器固有时间响应信息。

问题 2：朗道效应与消除能量沉积不均匀的影响

β 望远镜测试原理图 (DUT为待测LGAD样品)



1、什么是朗道效应

朗道效应 (Landau effect) 是由粒子在探测器中能量沉积的不均匀性引起的。

对于薄半导体探测器 (如 LGAD), 带电粒子穿过灵敏区时, 电离能损的涨落不是高斯分布, 而是呈非对称的朗道分布: 大部分粒子的能量损失集中在峰值附近, 但少数粒子会因产生 δ 射线等过程损失大量能量, 形成长长的高能尾。这种能量沉积的不均匀性, 会直接导致探测器输出信号的幅度出现大幅涨落, 进而影响时间测量。

2、如何消除信号幅度不一致带来的误差

信号幅度不一致会通过时间游动效应 (Time walk effect) 影响时间测量, 而 σ_{timewalk} 作为 DUT 时间分辨率的重要误差项, 对应解决方法如下:

(1) 核心方法: 恒比定时 (CFD)

不使用信号的过阈时刻作为时间标记, 而是在信号上升沿的固定比例 (如峰值的 50%) 处提取时间。这样即使信号幅度不同, 只要上升沿形状一致, 固定比例点的时刻就不会随幅度变化, 从根本上消除时间游动效应。

(2) 能量窗筛选 (幅度选择)

对应 “非对称的分布能量均匀是不能量沉积是不均匀的”, 我们可以设置信号幅度的上下限 (能量窗), 仅保留幅度在窄范围内的事件进行统计。这样可以过滤掉朗道涨落过大的事件, 减小幅度差异带来的时间游动影响。

(3) 时间 - 幅度关联修正

先标定时间差与信号幅度的关联关系 (如时间差随幅度的线性 / 非线性变化), 然后通过标定曲线对每个事件的时间差进行修正, 补偿幅度差异带来的时间偏差。

(4) 优化前端电子学

采用低噪声、快响应的前置放大器, 提升信号的信噪比, 减小上升沿的噪声畸变, 降低幅度涨落对时间提取的影响 (对应 PPT 中的 σ_{jitter} 项: $\sigma_{\text{jitter}} \propto S/N * t_{\text{rise}}$, 信噪比越高, 时间抖动越小)。

3、其他误差项的补充说明

(1) TDC 误差 σ_{TDC} : 由 TDC 的 bin 宽度决定, 满足 $\sigma_{\text{TDC}} = \Delta t / 12$ (均匀分布的标准差公式), 属于系统固有误差, 只能通过使用更高时间分辨率的 TDC

来降低。

(2) 时间抖动 σ_{jitter} : 由信号上升沿时间 t_{rise} 和信噪比 S/N 共同决定, 信号上升沿越陡、信噪比越高, 时间抖动越小。

(3) 信号畸变误差 $\sigma_{\text{Distortion}}$: 由读出链路中的信号被展宽、反射、非线性失真导致, 可通过优化 PCB 布线、使用阻抗匹配电路来抑制。

问题 3: Claude Code + DeepSeek API 小游戏

