

## 一.符合测试

**(1) 是什么：**符合测试是粒子探测实验中最常用的测试方法之一。其基本思想是：

只有当多个探测器在极短时间窗口内同时探测到信号时，才认为它们来自同一个粒子事件。

*Eg.  $\beta$ 望远镜测试：*

当一个 $\beta$ 粒子同时穿过上下两个探测器时，上层产生一个时间信号  $t_1$ ，下层产生一个时间信号  $t_2$ 。如果： $|t_1 - t_2|$  小于设定时间窗口，则认为这两个信号来自同一个粒子。这就叫做符合事件。

**(2) 为什么：**因为实验环境中存在很多噪声，如电子学噪声（示波器噪声、放大器噪声、电源噪声），这些噪声可能会产生假信号。利用符合测试可以去除随机噪声，去除假触发，保证记录的是同一个粒子，进而提高数据纯度。

**(3) 之所以必须采用符合信号测量时间分辨率，**是因为实验中无法直接获得粒子的真实到达时间。如果没有参考探测器提供时间基准，就无法判断测量结果与真实时间之间的偏差。因此，通过符合测试获得同一个粒子在两个探测器中的响应时间差，是测量探测器时间分辨率最常用且最可靠的方法。

## 二.朗道效应

在 高能粒子探测过程中，粒子穿过硅探测器时会通过电离作用损失能量，并产生电子—空穴对。然而这种能量损失过程具有随机性，因此即使是完全相同的粒子，其在探测器中的能量沉积也并不相同。这种由于统计涨落导致的能量沉积分布被称为朗道分布（Landau Distribution），对应的物理现象称为朗道效应（Landau Effect）。

朗道效应的产生来源于粒子与介质原子之间的随机碰撞过程。在多数情况下，粒子只发生普通电离，沉积较少能量；而在少数情况下，粒子会产生高能 $\delta$ 电子（Delta Ray），从而导致较大的能量转移。因此能量沉积分布并不是对称的高斯分布，而是具有明显长尾结构的朗道分布。

由于探测器输出信号幅度与沉积能量成正比关系： $A \propto Q$ ，而电荷量又与沉积能量相关： $Q \propto E_{dep}$ ，因此： $A \propto E_{dep}$ 。朗道涨落会直接导致不同事件之间的信号幅度存在明显差异。

对于上下排列的两层探测器来说，即使是同一个粒子同时穿过两层器件，其在两层中的能量沉积也会有所不同，从而导致两层探测器产生不同幅度的输出信号。这种幅度差异会进一步影响时间测量结果，成为时间分辨率的重要限制因素之一。

Eg. 在该公式中：

$$\sigma_{DUT}^2 = \sigma_{timewalk}^2 + \sigma_{TDC}^2 + \sigma_{jitter}^2 + \sigma_{Landau}^2 + \sigma_{Disortion}^2$$

$\sigma$  (Landau) 即由朗道效应引入的时间误差项。

### 三. 消除信号幅度不一致带来的误差

朗道效应本身无法消除，因为它来源于粒子与物质相互作用的随机性，是一种固有物理过程。但可以通过改进时间提取方法来减小其对时间分辨率的影响。

#### (1) 时间游走 (Time Walk) 效应及其产生机制

在实际测试中，最简单的时间提取方法是固定阈值法。

假设设定固定阈值： $V_{th} = 50mV$

对于大幅度信号，其上升速度较快，因此较早达到阈值；而对于小幅度信号，则需要更长时间才能达到相同阈值。

因此： $t_{large} < t_{small}$

即使两个粒子实际到达时间完全相同，测得时间仍会出现偏差。

这种由于脉冲高度不同而导致的时间偏移称为 **Time Walk** 效应。

**Time Walk** 误差正是朗道涨落造成时间分辨率恶化的主要原因之一。

## (2) 恒比定时法 (CFD)

减小 **Time Walk** 影响最常用的方法是恒比定时。

CFD 不采用固定电压阈值，而是采用固定比例阈值。例如选取信号峰值的 20%、30% 或 50% 作为时间提取点。

假设两个信号峰值分别为： $A_1 = 200mV$  和  $A_2 = 100mV$

若采用 50% 恒比定时，则对应阈值分别为：

$$0.5A_1 = 100mV$$

$$0.5A_2 = 50mV$$

这样时间提取点始终位于信号上升沿的相同位置，从而显著减小脉冲高度变化带来的时间漂移，提高时间测量精度。

## (3) Time Walk 校正

另一种常见方法是**离线数据校正**。

实验中同时记录： $t$ 和 $A$ ，然后研究时间与幅度之间的关系：

$$t = f(A)$$

如果发现时间随幅度变化存在明显趋势，则利用拟合得到的函数进行修正：

$$t_{corr} = t - f(A)$$

经过校正后，不同幅度事件对应的时间分布会更加集中，从而减小 **Time Walk** 误差。

## (4) 电荷筛选方法

为了进一步降低朗道涨落带来的影响，实验分析中还经常进行电荷筛选：只保留沉积能量接近平均值的事件： $Q_{min} < Q < Q_{max}$ ，去除朗道分布长尾区域中的异常大信号和异常小信号。这样能够减小能量沉积波动带来的影响，使测得的时间分辨率更加接近探测器本征性能。