

## 1.

### 1.1 什么是“符合”测试?

在粒子物理实验中，“符合”（Coincidence）测试是指利用逻辑电路检测两个或多个独立的探测器是否在极短的、预设的时间窗口内同时输出了信号。如果同时产生信号，则判定为一个“符合事件”。

### 1.2 为什么要进行符合测试?

主要目的是消除本底噪声并筛选真实的物理事件。探测器在运行中会产生暗噪声，环境也会有随机的本底辐射。真实的带电高能粒子穿过由多层探测器组成的系统时，会几乎瞬间在各层中都留下信号。通过符合测试，只有多层同时触发的信号才被记录，从而有效地滤除了单层随机产生的噪声。

### 1.3 为什么时间分辨率的测量要用符合信号来测量?

在测试中，我们往往无法提前预知粒子的绝对发射和到达时间。因此，常采用“望远镜测试”方案，即使用一个参考探测器（Ref）和待测探测器（DUT）上下排列。当粒子同时穿过两者产生“符合信号”时，通过测量两者信号的时间差来统计分布。整个系统的时间分辨率方差等于参考探测器与待测探测器的时间分辨率方差之和，即  $\sigma_{\text{system}}^2 = \sigma_{\text{Ref}}^2 + \sigma_{\text{DUT}}^2$ 。利用符合信号和已知精度的参考探测器，就可以倒推出待测探测器的时间分辨率。

## 2.

### 2.1 什么是朗道效应?

在器件性能表征中，朗道效应( $\sigma_{\text{Landau}}$ )是由粒子在探测介质中能量沉积的不均匀性引起的。当带电粒子穿过传感器（如硅片）电离出电子-空穴对时，其单次碰撞损失的能量是一个随机过程。因此，即使是相同能量的同种粒子穿过相同厚度的器件，沉积的能量也不完全一致，其概率密度呈现出带有高能拖尾的非对称分布（即朗道分布）。

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

### 2.2 怎么消除信号幅度不一致带来的误差

信号幅度的不一致（由朗道效应引起）会直接导致时间游走效应（ $\sigma_{\text{timewalk}}$ ），这种误差与信号的幅值分布及放大器的响应速度密切相关。如果电子学读出采用固定的电压阈值，幅度大、上升快的信号会比幅度小、上升慢的信号更早触发，从而产生时间测量上的偏差。

#### （1）硬件逻辑：

弃用前沿甄别（LED）：传统的前沿甄别器采用固定电压阈值，必然导致“大信号早触发、小信号晚触发”。

采用恒比定时甄别（CFD）：这种技术不看信号的“绝对高度”，而是看信号的“相对比例”。电路将原始信号分成两路：一路衰减，另一路反向并延迟，最后将两路相加寻找过零点。因为过零点的时间只取决于波形的上升时间比例和设定的硬件延迟，与信号的总幅度完全无关。因此，无论朗道效应让信号变大，只要波形形状相似，CFD 都能在同一时刻给出触发信号。

#### （2）电路层面

提高带宽，优化上升时间（ $t_{\text{rise}}$ ）：根据时间抖动公式  $\sigma_{\text{jitter}} \propto \frac{t_{\text{rise}}}{N/A}$ ，如果放大器的带宽足够高，信号的上升沿会非常陡峭（即  $t_{\text{rise}}$  极小）。当上升沿无限陡峭时，即使信号幅度有

高有低，它们跨过阈值的时间差也会被极大地压缩。

提高增益，提升信噪比（S/N）：更高的信噪比意味着基线噪声对触发阈值的干扰更小。

保证通道一致性：在进行符合测试时，必须确保两层探测器的前端读出电路参数（如增益、偏置电压、阻抗匹配）完全一致，避免放大器自身的非线性失真（ $\sigma_{Disortion}$ ）将幅度差异转化为额外的相位/时间延迟。

(3) 探测器物理设计层面：

使用 LGAD（低增益雪崩探测器）

减薄耗尽层厚度：相比于传统的厚硅片，LGAD 的耗尽层非常薄（通常在  $\sim 50\mu m$  左右）。耗尽层越薄，载流子的漂移距离越短，信号的内在上升时间就越快。这直接配合了上述的“陡峭上升沿”策略。

引入内部增益层：LGAD 在 n++ 和 p 衬底之间具有 P 型的增益层，可以提供 10-50 倍的内部信号放大。这使得初始电离产生的微弱信号在进入电子学电路前就被放大了，极大提升了初始信噪比。信号本身足够大、足够快，就能让后续电子学处理时的幅度偏差容忍度变高。

(4) 软件层面：

在数据采集时，同时记录信号的时间戳和电荷量（或阈上时间 Time-over-Threshold）。在后期数据分析时，利用时间偏差与信号幅度之间的非线性关系拟合出校正曲线，对每个事件的时间进行数学补偿，从而在软件层面消除幅度不一致带来的误差。

3. 因为有 Google 号，所以就用了 Google ai studio

