

1. 什么是“符合”测试，为什么要进行符合测试，以及为什么时间分辨率的测量要用符合信号？

在粒子物理实验中，符合测试是一种基于时间关联性的信号筛选技术。其核心机制是：当两个或多个探测器在预设的极短时间窗口（通常为纳秒至皮秒量级）内同时输出电脉冲信号时，电子学线路才判定该事件为有效物理事件并予以记录；反之，仅有单个探测器产生信号或信号到达时间差超出窗口宽度的事件，则被视为环境本底或非关联偶然事件而予以剔除。

为什么要进行符合测试？根本目的在于大幅压低本底噪声，提高测量的信噪比。粒子物理实验中，单个探测器时刻受到环境放射性、宇宙射线等本底的干扰，这些本底事件在时间上是随机且彼此独立的。通过要求两个探测器产生符合信号，可以筛选出具有物理关联的级联过程——例如正负电子湮灭会同时产生两个背对背飞行的 511 keV 伽马光子，或某粒子衰变时会先后释放出 β 粒子和 γ 光子。符合电路利用这种时间相关性，使得两个独立本底信号在同一时间窗口内偶然重合的概率极低（与符合分辨时间 τ 成正比），从而有效剔除假事件。

至于为什么时间分辨率的测量必须使用符合信号，其关键在于需要定义一个精确的“时间零点”。在单通道测量中，我们无法确知粒子究竟在何时进入探测器，因此无法区分信号的时间晃动是由探测器本身引起，还是由粒子到达时间的不确定性引起。符合测量解决了这一问题：利用同一个粒子（或其关联粒子）依次或同时击中两个探测器，记录两个探测器输出信号的时间差。这个时间差包含了两个探测器各自的时间晃动、粒子飞行时间差以及电子学延迟等因素。在几何位置修正（扣除固定的飞行时间差）后，时间差分布的标准偏差 σ ，直接反映了两个探测器时间晃动特性的卷积结果。由于两个探测器使用的是同一个参考时钟和相同的电子学链路，共模噪声会被抵消，从而能够准确提取出探测器系统自身的时间分辨率。简言之，符合信号提供了一个内禀的相对时间基准，使得对绝对时间不确定性的测量成为可能。

2. 如何消除朗道效应导致的信号幅度不一致带来的误差？

在粒子物理的薄层探测器（如硅微条探测器、像素探测器）中，朗道效应描述了带电粒子穿过介质时能量沉积的统计涨落特性。其物理机制是：粒子与介质原子核外电子发生电磁相互作用，大多数情况下只通过软碰撞损失少量能量，形成能量沉积的“最概然值”；但偶尔会发生硬碰撞，打出一个具有一定动能的 δ 电子，导致该事件中沉积的能量远高于平均值。因此，对于同一能量、同一类型的粒子，它在探测器中的能量沉积并不服从高斯分布，而是呈现出一个具有显著高能拖尾的朗道分布。这一效应的直接后果是：当一个粒子依次穿过上下排列的两层探测器时，在第一层和第二层中沉积的能量可能差别悬殊（一层发生硬碰撞而另一层没有），导致两个探测器输出的信号幅度出现数量级的差异。在采用前沿定时甄别（即信号超过固定阈值时输出定时脉冲）的情况下，幅度大的信号上升沿陡峭，会较早跨过阈值；幅度小的信号上升沿缓慢，跨阈时间明显滞后——这一现象称为时间游走效应，会严重劣化时间分辨率的测量结果。

为了消除信号幅度不一致带来的定时误差，粒子物理实验中通常采用以下硬件或软件方法。

硬件层面最经典的解决方案是恒比定时甄别器。其操作流程如下：将输入信号分为两路，一路经过衰减（例如衰减到原始幅度的 20%~50%），另一路经过一段固定的延迟；然后将这两路信号反向相加（或相减），得到一个新的双极性脉冲，该脉冲存在一个过零点。CFD 电路的关键特性在于：无论输入信号的幅度如何变化，这个过零点在时间轴上的位置都严格对应于原始信号前沿的某一固定分数高度处（例如峰值高度的 30%）。因此，通过检测过零点来触发时间记录，可以实现定时时刻与信号幅度完全无关。在两层

探测器系统中，分别为两个探测器的输出信号配置 CFD 电路，即可彻底消除朗道效应引起的时间游走，使得时间分辨率的统计宽度仅源于探测器本征的噪声和载流子传输涨落。

离线数据处理层面的修正方案是时间-幅度相关性修正。当硬件已经固定为前沿定时甄别而无法更改时，可以通过数据采集后的算法消除幅度误差。具体流程为：首先，在实验中记录每一个有效事件的参数，包括两层探测器各自测得的信号幅度 A_1 、 A_2 以及原始的时间差 T_{raw} 。然后，绘制 T_{raw} 随幅度（通常取小幅度信号侧）变化的散点图，拟合出一条时间游走曲线 $f(A)$ ，该曲线反映了幅度与定时延迟之间的函数关系。最后，对每一个事件进行离线修正： $T_{\text{corrected}} = T_{\text{raw}} - f(A_1, A_2)$ ，将幅度依赖的延迟分量扣除，得到本征时间差。这种方法在统计样本足够大时能够有效恢复时间分辨率，但其精度受限于拟合模型和幅度测量的动态范围。

