

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？

(1) 符合测试的定义

符合测试（又称符合测量）是核与粒子物理实验中筛选有效事例的经典实验方法：实验者预先设置一个极短的时间窗口，只有当两个及以上探测器在该时间窗口内同时输出有效信号时，才判定为一次真实物理事例并记录。

通俗来讲，符合测试相当于给探测器设置了类似与门的规则：只有多个探测器同时捕捉到同一个粒子，才认为这是有效事件；单个探测器单独出现的信号，会被判定为噪声或无关本底，直接丢弃。

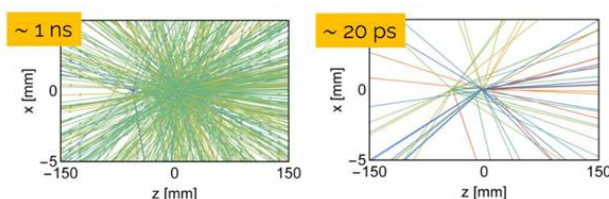
课上介绍的 β 望远镜放射源测试装置，就是典型的双层符合测试结构：将已知性能的参考探测器与待测 LGAD 探测器上下紧贴放置，Sr-90 放出的 β 粒子会依次穿过两层探测器，只有两层同时产生信号的事例才会被采集分析，这就是符合测试在传感器性能测试中的应用示例。根据《粒子探测技术》中的定义，符合方法的核心是利用关联事例的时间一致性区分信号与本底，是低信噪比场景下提升实验数据可靠性的基础技术手段。

(2) 进行符合测试的原因

开展符合测试的核心目的是压低本底噪声、筛选真实物理事例，它的主要作用现在两点：

第一，过滤探测器的自发噪声与环境本底。半导体探测器天然存在热噪声、暗电流带来的随机误触发，实验环境中也存在宇宙射线、环境辐射等带来的无关信号。只靠单个探测器读数，大量噪声会干扰真实粒子信号，我们无法区分有效事例。而真实入射的粒子会依次穿过两层探测器，信号存在特定联系便于筛选；噪声则完全随机没有规律可言，会被设置的符合条件直接过滤，这样可以大幅提升数据的信噪比。

第二点，保证事例的唯一性。课上讲的高亮度对撞机中会出现严重的事例堆积，1 纳秒内就会有大量粒子径迹重叠，同样的在探测器测试中，可能也出现多个粒子先后入射的情况。通过符合条件，能确保我们记录的是同一个粒子依次穿过两层探测器的事件，避免把不同粒子的信号混淆。



高亮度环境下引入时间维度对径迹堆积的显著抑制效果示意图。大量次级顶点与主顶点在空间上重叠，径迹密度较高，导致重建困难；引入 20 ps 的时间窗切割后，无关的本底事例被有效滤除

(3) 时间分辨率测量必须使用符合信号的原因

时间分辨率是探测器对同一个粒子入射事件的时间测量误差。要测量这个误差，我们需要一个已知精度的时间基准，再将待测探测器的测量结果与基准对比，统计偏差分布。

单探测器无法完成自身时间分辨率的测量，因为我们既不知道粒子入射的真实时间，也不可能区分信号是噪声还是真实粒子。而双层符合的方案则能够完美解决：参考探测器的时间分辨率已经过精确标定，同一个粒子穿过两层探测器产生的信号，其时间差的涨落可以由两层探测器各自的时间分辨率共同决定。

这也是误差传播公式 $\sigma_{system}^2 = \sigma_{ref}^2 + \sigma_{DUT}^2$ 的前提：只有符合信号保证了两路信号来自同一个粒子，系统总时间分辨率的平方才等于参考探测器分辨率平方与待测样品分辨率平方之和，

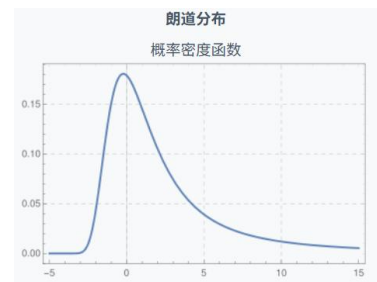
才能通过总测量值反解出待测探测器的真实时间分辨率。如果不使用符合信号，那我们统计的时间差来自不同粒子，得到的涨落就没有意义了，根本无法计算真实的时间分辨率。

2. 由于朗道效应，真实的粒子在器件中的能量沉积不均匀，对于同一个粒子在两层上下排列的两层探测器产生的信号，在进行符合信号来统计时间分辨率时，应该怎么样消除能量沉积不均匀的因素。

(1) 了解什么是朗道效应

朗道效应，全称为带电粒子电离能量损失的朗道涨落，是描述高能带电粒子穿过薄介质层时，能量沉积统计分布的物理效应。

课上专门讲了一个常见认知误区：很多人会默认粒子在探测器中的能量沉积服从对称的高斯分布，但实际并非如此。高能带电粒子穿过硅探测器时，能量沉积呈现“尖头长尾”的非对称分布：大部分粒子的能量沉积集中在峰值附近，同时存在少量沉积能量远高于峰值的事例，这种非对称分布就叫做朗道分布，对应的物理现象就是朗道效应。



从物理本质来看，朗道效应来源于电离碰撞的统计随机性：带电粒子与介质原子的电离碰撞是独立的随机事件，当探测器的灵敏层很薄时（比如 LGAD 探测器耗尽层厚度仅 $50\ \mu\text{m}$ ），粒子发生的电离碰撞总次数很少，单次大能量转移的碰撞会显著拉高总沉积能量，最终形成“峰位靠左、右侧拖出长尾巴”的分布形态。

例如：对于厚度在几十微米量级的硅半导体探测器，最小电离粒子的能量损失涨落显著偏离高斯分布，必须用朗道分布描述，这也是硅探测器时间分辨优化中必须考虑的固有物理限制。

(2) 消除信号幅度不一致带来误差的方法

同一个粒子穿过上下两层排列的探测器时，每层的能量沉积各自独立服从朗道分布，导致两路信号的幅度存在随机差异。结合时间游走效应：当使用固定阈值触发时，信号幅度不同，上升沿跨过阈值的时间就不同，会引入额外的测量误差，最终使得整体时间分辨率偏低。针对朗道涨落导致的信号幅度不一致问题，在符合测量的框架下，主要有三类消除方案：

方案一：恒比定时法

这是粒子探测实验中最常用、最根本的时间游走消除方案，核心逻辑是放弃固定电压阈值，改用信号幅度的固定比例作为触发阈值。

举个通俗的例子：如果设置固定阈值 100mV ，幅度 200mV 的信号上升到 100mV 的时间，和幅度 500mV 的信号上升到 100mV 的时间必然不同，这就是时间游走的来源。而恒比定时电路会取信号峰值的固定比例作为一个触发点： 200mV 的信号在 40mV 处触发， 500mV 的信号在 100mV 处触发。只要信号上升沿的形状保持一致，触发点就永远落在上升沿的同一个相对位置，和信号总幅度完全无关。

这种方法从硬件源头消除了幅度涨落带来的时间游走，是硅探测器高精度时间测量的标准配置方案。

方案二：幅度—时间离线修正法

如果硬件端已经使用固定阈值触发，也可以在离线数据分析中通过数学修正抵消误差。

具体做法是：先通过标定实验，测量不同信号幅度对应的时间偏移量，拟合出一条“信号幅度—时间偏移”的修正曲线。在处理符合数据时，对每一个事例，先读取它的信号幅度，再根据修正曲线，把测量得到的时间值修正为“标准幅度下的等效时间”，抵消幅度差异带来的时间偏移。

对于双层符合的测试场景，可以对参考探测器和待测探测器的信号分别做幅度修正，再计算两者的时间差，就能大幅压低朗道涨落带来的时间游走误差。

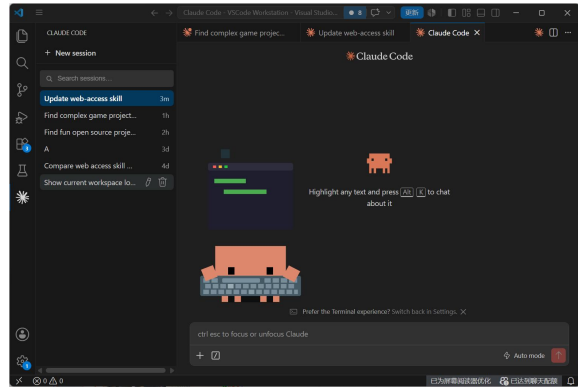
方案三：能窗筛选法

这是操作最简单的离线处理方法：在统计时间分辨率之前，先对信号幅度做区间筛选，只保留能量沉积落在朗道峰附近窄区间内的事例。

相当于我们主动选取“幅度基本一致”的信号做统计，自然就消除了幅度差异带来的误差。这种方法无需改动硬件、也不需要复杂的修正算法，但缺点是会丢弃大量区间外的事例，降低数据统计量，一般用于快速测试、初步验证的场景。

三、安装 Claude Code

我在学校智创平台申请了每月的算力额度，共提供包括 GLM-5.1, DeepSeek-v4 等 18 种模型



不太习惯用 CLI 所以就在 VSCode 里安装了 ClaudeCode，并完成了例如：粒子手势交互、2048 小游戏和桌面宠物等小项目，还做了个自动阅读文档并生成讲解 markdown 文档和定时复盘优化的 skill。

