

一. 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. 什么是“符合”测试

符合测试是粒子探测实验中的一种信号筛选技术，它的核心思想是：只有当同一个粒子同时在两层或多层探测器上产生信号时，才把这个事件记录下来。

比如在街头抓拍行人。如果有两个相机，从不同角度拍摄。只有当两个相机在同一时刻都拍到同一个人时，你才认为这是一个“有效行人”，并把他的照片保存下来。如果只有一个相机拍到，可能是路人甲或者背景干扰，直接扔掉。这就是“符合”的概念——两个信号同时出现，才算是真的。

β 望远镜实验中的具体例子：放射源发出 β 粒子，这个粒子先穿过上面的参考探测器，再穿过下面的待测 LGAD 样品 (DUT)。如果上下两个探测器几乎同时都有信号输出，就说明这很可能是同一个粒子穿过了这两层。这种两个探测器同时响应的事件，就叫符合事件。用这些符合事件来做统计分析，就是符合测试。

时间符合门：实验上怎么判断“同时”呢？我们不能要求两个信号精确到同一个纳秒，因为探测器本身有时间抖动。所以我们会设定一个时间窗口，比如正负 5 纳秒。只要两个信号到达的时间差落在这个窗口内，就算它们是“符合”的。窗口不能太大，太大了会混进噪声；也不能太小，太小了会漏掉真实事件。这个窗口就是时间符合门。

2. 为什么要进行符合测试

①排除噪声和偶然信号：传感器和电子学系统中天生就有噪声，比如热噪声、暗电流、电子学抖动等。如果只有一个探测器，你看到一个信号，根本没法判断它是真实粒子产生的，还是噪声误触发。但如果你有两个探测器，并且要求它们在极短的时间窗口内同时都有信号，那么这两个信号都是随机噪声的概率就极低——因为两个独立的噪声源要在几纳秒内同时出现，可能性几乎为零。所以符合测试可以非常有效地滤除本底，提高信噪比。

②确定粒子的飞行路径：单层探测器只能告诉你“有信号来了”，但没办法告诉你这个粒子是从哪个方向来的、是不是按你预期的路径穿过了 DUT。比如，粒子可能从侧面打中 DUT，而不是从上面垂直入射；也可能是散射粒子从别的方向过来的。有了符合测试，你就可以建立一个路径选择条件：只有同时穿过参考探测器和 DUT 的粒子才被记录。这确保了所有被统计的粒子都经过了相同的路径，测量出来的时间分辨率才是 DUT 自己的性能。

③提高测量精度，分解误差：符合测试只统计那些“干净的”事件，剔除了偶然事件和噪声事件，所以时间差的测量精度会大大提高。而且符合测试能够分解误差。没有符合测试，这个误差分解是做不了的。

3. 为什么时间分辨率的测量要用符合信号来测量

①时间分辨率需要一个参考时间：没办法测量一个信号的“绝对到达时间”，因为任何计时都需要一个起点。在探测器测试中，参考探测器提供“开始”信号，DUT 提供“停止”信号，我们测量的是它们之间的时间差 Δt 。这个 Δt 的分布宽度（标准差）就是系统的时间分辨率。如果不要求这两个信号来自同一个粒子，那这个 Δt 就没有物理意义。

② 锁定同一个粒子，避免随机配对：假设放射源每秒发出 1000 个粒子，平均间隔 1 毫秒。如果不用符合，可能会把参考探测器的第 N 个信号和 DUT 的第 N+1 个信号错误地配对在一起，因为它们的时间差正好落在你的测量范围内。但这个时间差是随机的，跟探测器本身的时间分辨率毫无关系。混入这些随机事件后，你测出来的 Δt 分布会被展宽到毫秒量级，完全没法用。符合测试通过时间窗口“锁定”了同一个粒子，只让真正来自同一个粒子的信号对进入统计，才能测出皮秒到纳秒量级的时间分辨率。

③ 分解 DUT 的各个误差分量：DUT 的时间分辨率由五个误差项组成。符合测量提供了参考时间，可以分别测量：

Time walk：通过比较 Δt 和信号幅度的关系，可以校正

TDC 量化误差：跟 TDC 的最小时间 bin 有关，等于 bin 宽度除以根号 12

Jitter：跟信噪比和上升沿时间有关，噪声越大、上升越慢，jitter 越大

朗道效应：由能量沉积不均匀引起，是第二题的核心

失真：由信号传输链路中的问题引起，比如电缆反射、放大器非线性

二. 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，应该怎样消除能量沉积不均匀的因素

1. 什么是朗道效应

朗道效应是带电粒子穿过薄层物质时，能量沉积的统计分布不是高斯分布，而是一个不对称的、有长尾巴的分布，这个分布就叫朗道分布。这是朗道在 1944 年从理论上推导出来的。

厚探测器：粒子穿过时会发生很多次电离碰撞（成千上万次），每次碰撞传递的能量很小。根据中心极限定理，大量小能量损失的叠加会趋近于高斯分布，涨落不大。

薄探测器：碰撞次数很少（几十到几百次）。大多数碰撞只传递很小的能量，但偶尔有一次“硬碰撞”，打出一个高能 δ 射线，传递的能量远大于平均值。这就导致了分布有一个长的高能尾巴，峰值偏左（最概然能量小于平均能量），左右不对称。

2. 怎么消除信号幅度不一致带来的误差

在 β 望远镜符合测量中，参考探测器和 DUT 都受到朗道效应的影响，两个信号的幅度都在随机变化。消除幅度不一致带来的时间误差，核心思路是：测出每个事件的幅度，然后对时间差进行校正。

① 恒比定时（CFD）——硬件方法

CFD 的原理是：不依赖信号过固定阈值的时刻，而是在信号前沿找到与幅度成固定比例（比如 50%）的位置。具体实现是把原始信号分成两路，一路衰减（比如衰减到 20%），另一路延迟一会儿，然后两路相减，得到过零点。这个过零点对应信号前沿到达峰值 20% 的时刻。对于形状相似的脉冲，这个点的位置几乎与幅度无关——大信号和小信号的定时点是一样的。

所以，把参考探测器和 DUT 的信号都用 CFD 提取定时，再送入 TDC 测时间差，就能从硬件上直接消除幅度不一致带来的误差。这是最常用的方法。

② 离线幅度校正——软件方法

如果用的是数字采集系统（比如波形数字化），可以在采集后做软件校正。

第一步：记录每个事件的信号幅度（参考探测器的 A_{ref} 和 DUT 的 A_{DUT} ）和测量得到的时间差 Δt_{meas} 。

第二步：画散点图，看 Δt_{meas} 跟幅度是什么关系。通常会发现幅度越小， Δt_{meas} 越大（因为小信号过阈值晚）。

第三步：拟合出校正函数，比如 $\Delta t_{corr} = \Delta t_{meas} - k$ 除以根号 A 。

第四步：逐事件计算校正后的时间差，再统计分布宽度。

③ 能量窗筛选法

设定一个较窄的能量区间，只保留信号幅度落在该区间内的事件。比如只保留幅度在朗道分布最概然值附近的事件，剔除太小的（前沿太缓，定时误差大）和太大的（可能是 δ 射线，波形畸变）。

④ 激光 TCT 测试——替代方法

激光的好处是：能量是可控的，没有朗道涨落。每次激光脉冲打到探测器上产生的电荷量基本恒定。所以用激光测出来的时间分辨率，是探测器去掉朗道效应之后的分辨率。

三. 安装 Claude code，建议使用 deepseek api，可以充值五块钱，写一个小游戏程序

```
tetris-game-plan x + v
└─ Done
Thought for 1s (ctrl+o to expand)
● Write(public\index.html)
└─ Wrote 69 lines to public\index.html
1 <!DOCTYPE html>
2 <html lang="zh-CN">
3 <head>
4   <meta charset="UTF-8">
5   <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
6   <title>俄罗斯方块</title>
7   <link rel="stylesheet" href="style.css">
8 </head>
9 <body>
10  <div class="container">
... +59 lines (ctrl+o to expand)
● Write(public\style.css)
└─ Wrote 177 lines to public\style.css
1 * {
2   margin: 0;
3   padding: 0;
4   box-sizing: border-box;
5 }
6
7 body {
8   background: #1a1a2e;
9   color: #eeee;
10  font-family: 'Segoe UI', 'Microsoft YaHei', sans-serif;
... +167 lines (ctrl+o to expand)
Thought for 1s (ctrl+o to expand)
Thought for 1s (ctrl+o to expand)
● Now the core - the game logic:
● Write(public\game.js)
└─ Wrote 517 lines to public\game.js
1 // =====
2 // 俄罗斯方块 - 游戏核心逻辑
3 // =====
4
5 // ---- 常量 ----
6 const COLS = 10;
7 const ROWS = 20;
8 const CELL = 30; // 每格像素
9 const COLORS = {
10  I: '#00e5ff', // 青色
... +507 lines (ctrl+o to expand)
```

