

第五次作业

1. 符合测试与时间分辨率测量

什么是符合测试

符合测试是指：判断两个或多个探测器是否在一个极短的时间窗口内同时产生信号。如果两个信号在预设的时间窗口（比如几纳秒）内都出现了，则认为是一个「符合事件」。当一个粒子先后穿过上下两层探测器时，两个探测器会在几乎同一时刻分别产生信号——这叫作「真符合」。如果两个信号来自不同的粒子、或一个来自粒子另一个来自噪声，则大概率不会满足这个时间关联条件。

为什么要做符合测试

目的	说明
压制本底	单个探测器可能因热噪声、暗计数等产生假信号。要求两个探测器同时有信号，可以大幅压低偶然符合本底。
甄别真实物理事件	保证看到的信号确实来自同一个粒子依次穿过两层探测器，而不是随机涨落。
作为触发条件	符合信号常作为数据采集系统 (DAQ) 的 trigger——只记录符合事件，避免存下海量噪声数据。

为什么时间分辨率的测量要用符合信号

核心原因：我们无法直接知道粒子的「绝对到达时间」。

我们有的只是两个探测器的电信号输出时间 t_1 和 t_2 。对于一个真实粒子先后穿过两个探测器的符合事件，两者时间差：

$$\Delta t = t_1 - t_2$$

假设两个探测器的时间分辨率分别为 σ_1 和 σ_2 ，来自同一粒子的两个时间测量是独立的，则 Δt 分布的宽度满足：

$$\sigma_{\Delta t} = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$$

如果两个探测器相同 ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$)，那么：

$$\sigma = \sigma_{\Delta t} / \sqrt{2}$$

这样就用相对时间差绕过了「绝对时间零点在哪里」这个不可知的问题，得到了每个探测器的时间分辨率。

2. 消除朗道效应导致的能量沉积不均匀

什么是朗道效应

当带电粒子穿过薄层探测器（如塑料闪烁体、硅探测器）时，它主要通过电磁相互作用与介质中的电子碰撞损失能量。

- 大多数碰撞是小能量转移，电离产生少量电子-离子对。
- 偶尔会发生较大的能量转移，打出高能 δ 电子（knock-on electron）。

能量沉积的概率密度函数不是高斯分布，而是朗道分布——一个不对称的分布，在高端有一个长尾（Landau tail）。

这意味着：即使是完全相同的粒子、相同的能量、穿过相同的探测器厚度，产生的信号幅度也可能差异很大。

这对时间测量的影响是致命的：信号幅度不同 → 前端电子学用固定阈值

触发时，大信号更早越过阈值，小信号更晚越过阈值 → 这就是「幅度游走效应 (Time Walk)」。

如何消除信号幅度不一致带来的误差

a) 恒比定时 (CFD) —— 硬件首选

恒比定时器不在固定阈值处触发，而是在信号峰值的固定比例（如 20%）处触发。小信号峰值低，20% 也低，阈值自动降低；大信号峰值高，20% 也高，阈值自动抬高。这样无论幅度如何变化，触发时间点信号形状上的相对位置基本固定，从根源上压制了 time walk。这是最经典的硬件解决方案。

b) 离线 Time-Walk 修正 (TWC) —— 软件补充

即使用了 CFD，残余的幅度依赖性仍然存在。可在离线分析中做进一步修正：

1. 同时记录每个事件的时间 t_{measured} 和信号幅度 A （或积分电荷 Q ）。
2. 画出 Δt （两探测器时间差）随幅度 A 的散点图。
3. 拟合 Δt 随 A 的变化趋势函数 $f(A)$ 。
4. 修正： $t_{\text{corrected}} = t_{\text{measured}} - f(A)$ 。

这样就消除了残余的幅度-时间耦合。

c) 双极成形 + 过零点法

对信号做双极成形 (bipolar shaping) 滤波，信号会先上冲再下冲，形成一个过零点。这个过零点的位置与信号幅度无关，只取决于信号的到达时间。用于精密定时系统。

d) 幅度筛选法

在离线分析中，只选择信号幅度落在某个窄窗口（如 Q 的 $\pm 1\sigma$ 范围）内的事件做时间分辨率分析。排除了幅度差异大的事件，但代价是损失统计量。适用于统计量充足的实验。

e) 参考探测器法

如果系统中有一路参考探测器对幅度不敏感（如切伦科夫探测器 + MCP-PMT，时间特性极好），可以用它的时间作为参考，单独刻度另一路的时间分辨率，同时做幅度修正。

方法总结

方法	层面	原理
CFD	硬件	恒定比例触发，自动补偿幅度差异
TWC	离线	拟合 Δt vs 幅度，扣除走离量
过零法	硬件/离线	双极成形过零点与幅度无关
幅度筛选	离线	只选窄幅度窗口内的事件
参考探测器	系统设计	用不敏感的探测器提供参考时间

实际实验的黄金组合：CFD（硬件） + 离线 TWC（软件），前者解决大部分问题，后者消除残余，兼顾效率与精度。

3. 自制小游戏

