

第五次作业

一、符合测试的定义、目的及在时间分辨率测量中的应用

1. 符合测试的定义

符合测试 (Coincidence Test) 是核电子学与粒子物理实验中一种核心信号处理技术, 用于判断两个或多个探测器输出的信号是否在预先设定的符合时间窗口内同时出现。根据信号的物理关联性, 可分为两类:

- **真符合:** 由同一个物理事件 (如同一个粒子先后穿过多个探测器、 ^{60}Co 核衰变同时产生的两个 γ 光子) 产生的、在时间上具有本质关联的信号符合。
- **偶然符合 (假符合):** 由两个完全不相关的物理事件产生的信号, 恰好落在同一个符合时间窗口内形成的符合。偶然符合是实验本底的主要来源之一, 其计数率与符合时间窗口宽度成正比。

2. 进行符合测试的核心原因

符合测试的本质是通过时间关联性筛选来提高实验的信噪比和选择性, 具体目的包括:

- (1) 高效压低本底与噪声: 宇宙射线、环境放射性本底、电子学热噪声等产生的信号在时间上是随机分布的, 通过符合测试可以排除 99% 以上的无关随机事件。
- (2) 确定事件的时空关联: 只有当粒子同时 (或在极短时间内) 穿过多个探测器时才会产生符合信号, 据此可以重建粒子的飞行路径、击中位置和飞行时间。
- (3) 提高实验的物理选择性: 通过多探测器符合, 可以挑选出特定的物理过程, 例如 $\beta - \gamma$ 符合测量放射性核素的衰变纲图、 $e^+ - e^-$ 符合测量正电子湮灭、顶点探测器与量能器符合确认带电粒子径迹。
- (4) 降低数据获取系统负载: 在高计数率的粒子物理实验中, 符合测试可以将触发率降低几个数量级, 避免数据获取系统过载。

3. 时间分辨率测量必须使用符合信号的原因

时间分辨率是指探测器或电子学系统能够区分两个先后发生的物理事件的最小时间间隔，通常用两个关联信号的时间差分布的半高全宽（FWHM）来表示。使用符合信号测量时间分辨率是由时间分辨率的物理本质和单个探测器的局限性共同决定的：

- (1) 单个探测器无法测量时间差：单个探测器只能测量信号的绝对到达时间，但绝对时间的测量存在不可消除的不确定性（如粒子产生时刻的随机性、电子学触发晃动、粒子入射位置的影响等）。而时间分辨率本质上是对两个关联事件时间差的测量精度，必须使用两个探测器的信号进行符合才能获得时间差。
- (2) 消除公共时间晃动：两个探测器对同一个物理事件产生的信号，其绝对时间中包含了共同的时间晃动分量（如触发系统的公共延迟、粒子束团的时间弥散等）。当计算两个信号的时间差时，这些公共的时间晃动会相互抵消，从而得到更精确的时间测量结果。
- (3) 筛选出真正的关联事件：只有符合信号才能保证两个信号来自同一个物理事件。如果不使用符合，测量到的时间差将包含大量偶然事件的贡献，得到的时间差分布会严重展宽，无法反映系统真实的时间分辨率。
- (4) 提供标准的时间参考：在时间分辨率标定实验中，通常使用具有已知时间关联的放射源（如 ^{60}Co 源，其衰变产生的两个 γ 光子的时间间隔小于1ps）作为标准，通过测量两个探测器对这两个光子的符合时间差分布，来精确确定系统的时间分辨率。

二、朗道效应及其对时间分辨率测量的影响与消除方法

1. 朗道效应的物理本质

朗道效应（Landau Effect）是指高能带电粒子穿过薄介质层时，电离能量损失的统计涨落现象。

当高能带电粒子穿过探测器介质时，主要通过与介质原子的外层电子发生库仑相互作用而损失能量。在厚介质中，粒子与原子的碰撞次数很多，根据中心极

限定理，能量损失服从高斯分布。但在薄探测器中（如硅微条探测器、薄闪烁体探测器），粒子与原子的碰撞次数很少，能量损失不再服从高斯分布，而是服从朗道分布。

朗道分布具有以下显著特点：

- 明显的不对称性，有一个很长的高能尾巴
- 最可几能量损失小于平均能量损失
- 能量损失的涨落远大于高斯分布
- 对于两层上下排列的探测器，同一个粒子穿过两层时，由于朗道效应，在每层中沉积的能量是随机的，因此两层探测器输出的信号幅度会有很大差异，即使是同一个粒子产生的信号，幅度也可能相差几倍。

2. 能量沉积不均匀对时间分辨率测量的影响

能量沉积不均匀导致的信号幅度不一致，会通过幅度 - 时间游动（Amplitude-Time Walk）效应引入严重的系统误差，使测量到的时间分辨率显著变差。

幅度 - 时间游动是指：当使用最常用的前沿定时（Leading Edge Discrimination）技术时，定时触发时刻取决于信号前沿越过固定阈值的时间。对于幅度大的信号，其前沿上升更快，会更早越过阈值，定时结果偏早；对于幅度小的信号，前沿上升较慢，会更晚越过阈值，定时结果偏晚。

即使两个信号是由同一个粒子同时产生的，由于两层探测器的信号幅度不同，它们的定时结果也会出现差异。这种差异不是由系统本身的固有时间分辨率造成的，而是由幅度不一致引入的额外误差，会使测量到的时间差分布明显展宽，得到的时间分辨率结果比真实值差很多。

3. 消除信号幅度不一致带来误差的方法

针对朗道效应导致的信号幅度不一致及其引起的幅度 - 时间游动误差，常用的消除方法按效果和应用场景排序如下：

(1) 使用恒比定时（CFD, Constant Fraction Discriminator）

恒比定时是目前粒子物理实验中消除幅度 - 时间游动的标准技术，效果最好且实现简单。

其基本原理是：将输入信号分成两路，一路经过固定延迟，另一路经过固定比例衰减，然后将两路信号相减。当相减后的信号过零时产生定时信号。通过适当选择衰减系数和延迟时间，可以使定时触发时刻始终位于信号上升沿的固定比例位置（例如上升沿的 20%、50% 或 80% 处），而与信号的绝对幅度无关。

这样，无论信号幅度多大，只要上升时间相同，定时时刻就完全相同，从而从根本上消除了幅度 - 时间游动误差。恒比定时特别适合于朗道分布这种幅度变化范围极大的信号。

(2) 离线幅度 - 时间校正 (Walk Correction)

幅度 - 时间校正是一种离线数据处理方法，不需要改变硬件系统，即可在一定程度上消除幅度 - 时间游动的影响。

具体步骤如下：

- 采集大量实验事件的信号幅度和对应的定时时间数据
- 对数据进行分区间统计和拟合，得到定时时间 t 与信号幅度 A 之间的函数关系 $t=f(A)$
- 对于每个事件，根据其信号幅度 A ，计算出对应的校正量 $\Delta t=f(A)-f(A_0)$ （其中 A_0 是参考幅度）
- 将原始定时时间减去 Δt ，得到校正后的定时时间
- 使用校正后的定时时间计算两个探测器的时间差
- 幅度 - 时间校正可以与前沿定时结合使用，特别适合于已经建成的实验系统的离线数据处理。但需要足够的统计量来建立准确的校正曲线。

(3) 上升时间校正

如果信号的上升时间也存在变化（例如粒子入射位置不同、粒子类型不同、探测器增益不均匀等），单纯的幅度 - 时间校正效果会受到影响。此时可以采用二维上升时间校正，即同时考虑信号幅度 A 和上升时间 T_r 对定时时间的影响，建立二维校正函数 $t=f(A, T_r)$ 。

上升时间校正可以进一步提高时间测量的精度，但实现起来更复杂，需要同时精确测量每个信号的幅度和上升时间。

(4) 能量阈值筛选

通过设置适当的能量阈值，只选择幅度在一定范围内的信号进行处理，可以减少幅度差异带来的影响。例如，只选择幅度在最可几幅度 $\pm 30\%$ 范围内的事件，这样信号幅度的变化范围较小，幅度 - 时间游动的影响也会相应减小。

但这种方法会损失大量的统计量，特别是对于朗道分布这种有很长高能尾巴的信号，会丢弃很多大幅度的事件，因此通常只作为辅助方法使用。

(5) 探测器设计优化

增加探测器的灵敏层厚度，可以增加粒子在探测器中的能量沉积，减少朗道涨落的相对大小，从而降低信号幅度的差异。但增加探测器厚度会同时降低空间分辨率，增加粒子多次散射的概率，因此需要在时间分辨率和空间分辨率之间进行权衡。

三、安装 claudecode, 写一个小游戏程序

