

1. 符合测试与时间分辨率测量

1.1 “符合”测试

“符合”测试是指利用符合电路或软件算法，挑选出在两个或多个探测器在一个预先设定的时间窗内出现的信号，认定它们来源于同一个物理事件。例如，一个高能粒子先后穿过上下两层探测器，两层会各产生一个信号，若这两个信号在极短的时间间隔内被记录，就构成一个符合事件。除高能物理外，LIGO探测引力波也使用了符合测试来排除单台本地的暂态噪声，因此符合测试也是物理实验中用来排除噪声以及减小误差的重要手段。

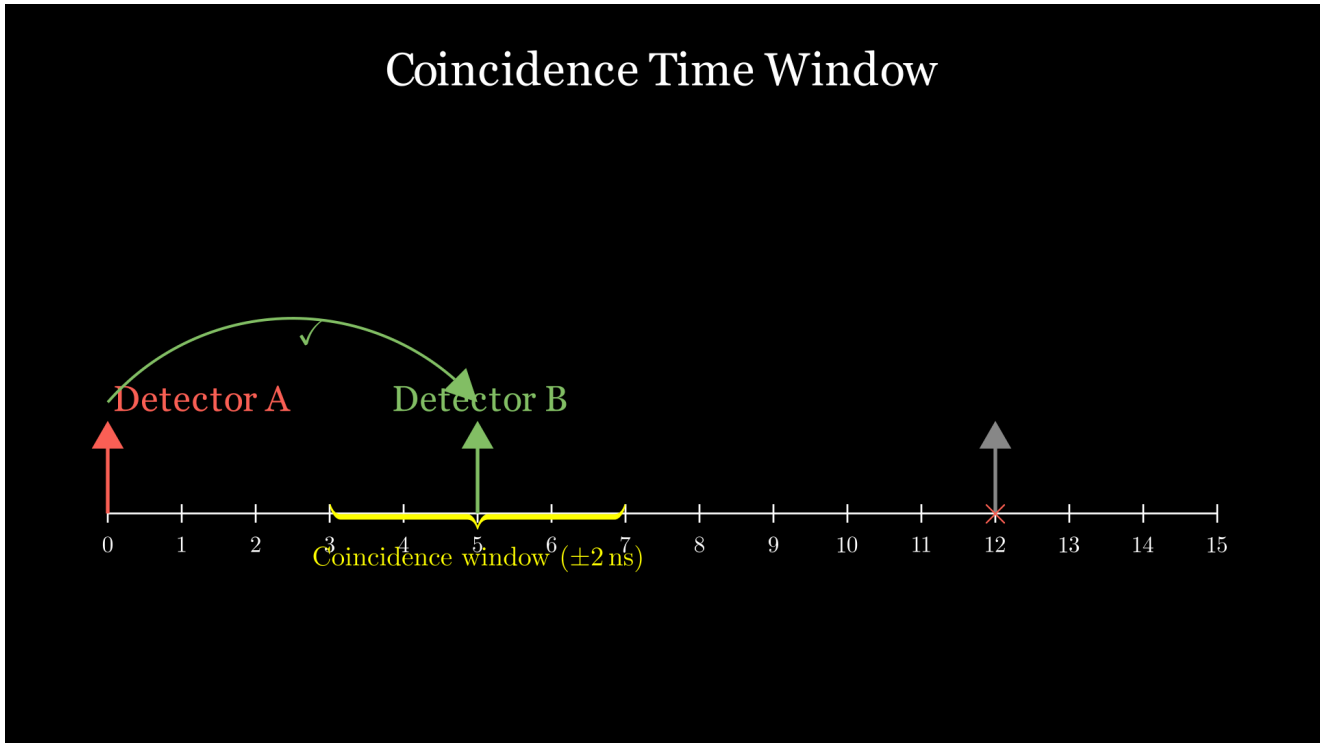
1.2 为什么要进行符合测试以及如何进行

虽然信号和噪声是可分离的脉冲，信号脉冲形状相对固定（如闪烁光衰减时间），噪声常表现为异常幅度或随机时间，尽管如此，还是不可避免地有噪声类似于信号，以至于无法区分，这是单个探测器所难以解决的问题。而一旦探测器数量变成两个或者两个以上，就能通过**前沿甄别+时间窗**大幅压制噪声，达到单个探测器无法企及的效果。大概步骤如下：

(1) **前沿甄别**：噪声脉冲的形状通常是随机的，但偶尔也会产生一个幅度和上升沿都与真实信号相似的脉冲。如果它刚好在符合时间窗内，就可能被误认为是信号。信号脉冲的形状是物理过程决定的，非常稳定。比如，闪烁光虽然总光子数（幅度）可能因能量沉积而变化，但其**上升沿的形状是相对固定的**。前沿甄别通常采用**恒比定时**方法：不是在一个固定的高阈值处触发，而是在脉冲上升沿的**某个恒定比例**（例如峰值的20%）处触发。这样做的结果是，对于真实信号，无论其绝对幅度如何（由朗道涨落等引起），**恒比定时给出的时刻点总是对应于脉冲的同一个相位**，从而大幅降低了幅度-时间游走误差，给出了一个与能量无关的精确时间戳。**对于噪声呢？**一个偶然出现的噪声脉冲，其形状与真实信号只是“形似”而非“神似”。它的上升沿波形大概率与真实信号不同，因此，在恒定比例处触发得到的时间点，对于噪声脉冲来说物理意义含糊，其“时间戳”与任何其他物理事件都缺乏稳固的关联。这样就可以排除绝大部分噪声，但是还是会有一些非常符合波形的噪声保留下来，单个探测器A是难以解决的，因此需要引入第二个探测器B。

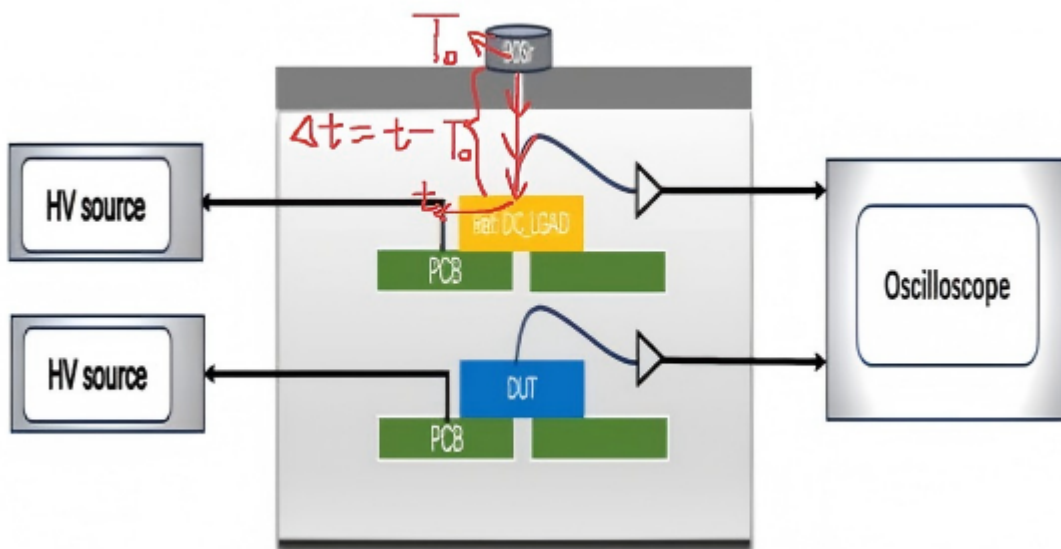
(2) **时间窗**：一个高能粒子，它**几乎以光速先后穿过两个探测器**。因此，两个信号出现的时间差 Δt 极其稳定，等于探测器间距除以粒子速度，展宽则由定时精度决定。而噪声是探测器A里的一个热噪声脉冲，和探测器B里的一个散粒噪声脉冲。它们由完全独立、毫无关联的物理过程产生。通过设定一个极窄的时间窗，如 ± 5 纳秒，正好覆盖真实粒子飞行时间的可能范围。**对真实信号**：粒子穿过探测器A，几乎一定会在5纳秒后穿过探测器B。因此，探测器A的信号总能在5纳秒内在探测器B找到一个信号，它们会被完美地框在时间窗内，形成符合。**对于噪声**：假设探测器A在 $t=0$ 时刻产生了一个酷似信号的噪声脉冲。探测器B的那个噪声脉冲是完全随机的，它可能出现在 $t=-1\mu s$ ，也可能出现在 $t=+100 ns$ ，还可能出现在 $t=+3 ns$ 。它要能造成误判，其出现时间必须**精确地落在 $t=0$ 之后那个 $\pm 5 ns$ 的时间窗内**。在时间的长轴上，这是一个概率极低的“巧合”。更关键的是，探测器B的噪声脉冲自身也必须刚好形状合理，能被前沿甄别系统标记上一个有效的**时间戳**。两个独立事件同时在如此窄的窗口内发生并都“伪装”合格的组合概率，就是偶然符合率。如果这样还不够，再加上探测器C、D、E……以及多次重复实验，可以指数级降低偶然符合概率，这样完全可以认为就是粒子信号而不是噪

声。再使用侧窗法和混合事件法扣除本底，就可以得到我们关心的信息。



1.3 为什么时间分辨率的测量必须使用符合信号

因为依靠符合信号来挑选同一个粒子同时穿过两层探测器的事件，才能把时间差的展宽归因于探测器本身的定时涨落，而非粒子到达时间的绝对抖动。



如上图所示，最直观的想法也许是：用一个已知的精确时钟（比如放射源射出粒子的瞬间 T_0 ）作为参考，测量粒子到达探测器的时间 t ，计算 $\Delta t = t - T_0$ 。这个 Δt 的分布宽度，是不是就是探测器的时间分辨率？

要明确一点，我们想测量的是探测器本身把“粒子到达时刻”变成“电信号时间戳”这一过程中的不确定性，也就是探测器本征的时间分辨率 σ_t 。但是因为 Δt 的展宽里，混进了很多“不是探测器本身造成”的涨落，包括：

- **粒子飞行路径的差异**：粒子飞到探测器，路径长度会有微小差异，飞行时间也就不同。
- **参考时钟的传递晃动**：放射源射出粒子的瞬间 T_0 ，参考信号传到电子学系统，也有自身的晃动。

以上这些，统称为**粒子到达时间的绝对抖动**。如果单看一个探测器相对于 T_0 的时间差，是分不清这分布里有多少是探测器自身的误差，有多少是束流本身的晃动。这就像用一根本身抖动的尺子去量一个物体的长度，读出来的晃动里混入了尺子的误差。

那么符合信号是如何解决这个问题的？

现在，我们在粒子路径上前后放置两个完全相同的探测器 A 和 B，让同一个粒子先后穿过它们。我们测量这个粒子在 A 中产生的信号时刻 t_A ，和在 B 中产生的信号时刻 t_B ，然后计算时间差：

$$\Delta t = t_B - t_A$$

关键是：对于同一个粒子，它“到达”探测器的绝对时间抖动，在 t_A 和 t_B 里是共模的。

我们来写出这两个时间的构成：

$$t_A = t_{\text{粒子到达A的真实时间}} + \delta_A$$

$$t_B = t_{\text{粒子到达B的真实时间}} + \delta_B$$

其中 δ_A 和 δ_B 分别是两个探测器各自独立的定时涨落（测量误差），这是我们想求的。

“粒子到达的真实时间”又可以分解为：

$$t_{\text{粒子到达A的真实时间}} = T_{\text{发射}} + T_{\text{飞行至A}}$$

$$t_{\text{粒子到达B的真实时间}} = T_{\text{发射}} + T_{\text{飞行至B}} = T_{\text{发射}} + T_{\text{飞行至A}} + T_{\text{A到B的飞行时间}}$$

那么时间差：

$$\Delta t = (T_{\text{发射}} + T_{\text{飞行至A}} + T_{\text{A到B}} + \delta_B) - (T_{\text{发射}} + T_{\text{飞行至A}} + \delta_A)$$

$$\Delta t = T_{\text{A到B}} + (\delta_B - \delta_A)$$

那么： $T_{\text{发射}}$ 和 $T_{\text{飞行至A}}$ 这两项包含了所有绝对时间抖动的项，在相减时被完全抵消了。剩下的是一个固定值 $T_{\text{A到B}}$ （粒子在A、B间飞行的平均时间，几乎无涨落），以及两个探测器测量误差的差值 $(\delta_B - \delta_A)$ 。

因此，时间差谱 Δt 的展宽，纯粹来源于 δ_A 和 δ_B 这两个独立随机变量的差值。如果A和B性能完全一致，各自的单点时间分辨率都是 σ_t ，那么根据误差传递：

$$\sigma_{\Delta t}^2 = \sigma_t^2 + \sigma_t^2 = 2\sigma_t^2 \quad \Rightarrow \quad \sigma_t = \frac{\sigma_{\Delta t}}{\sqrt{2}}$$

我们就这样干净地提取出了探测器的本征时间分辨率。

2.朗道效应

2.1 什么是朗道效应

首先介绍朗道分布：朗道分布是复合泊松分布在特点单次损失下的极限情形，其特点为：

- (1) 高能带电粒子束穿过薄介质时粒子数很多，但是碰撞概率很小，其期望为定值，即单位

时间内的碰撞次数服从泊松分布。

(2) 单个粒子单次碰撞损失的能量（电离能损） ϵ 独立且其概率密度正比于 $\frac{1}{\epsilon^2}$ 那么其能量损失的概率密度函数不再是对称的高斯分布，而是服从**朗道分布**——一个具有长拖尾（高能端）的不对称分布。带电粒子穿过薄层介质时，与电子发生少数几次随机碰撞，每次碰撞传递的能量大小差异极大。这种效应导致粒子在薄探测器（如硅传感器、薄闪烁体）中沉积的能量（输出信号幅度）呈现出极大的涨落，同一能量的入射粒子，产生的信号电荷可能相差数倍。

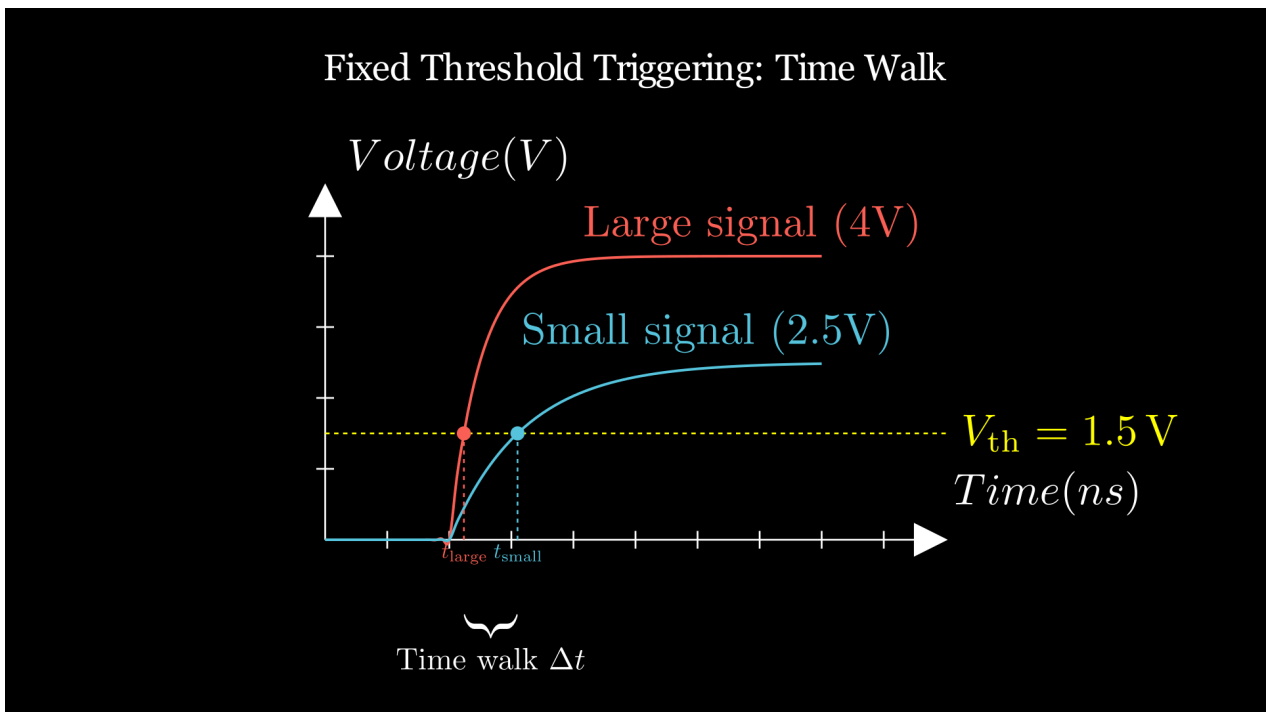
2.2 什么是信号幅值不一致带来的误差、怎么消除信号幅值不一致带来的误差

什么是信号幅值不一致带来的误差

当上下两层探测器用符合信号统计时间分辨率时，同一个粒子在两层的能量沉积可能因朗道效应而明显不同，信号幅度差异会通过**时间游走**效应引入额外定时误差。

(1) 这一点在**固定阈值触发**方式里最明显：

- 信号波形都有类似的上升前沿，但幅度不同。
- 固定阈值是 V_{th} 。
- 一个大信号上升快（斜率大），达到 V_{th} 的时刻早。
- 一个小信号上升慢（斜率小），达到 V_{th} 的时刻晚。



这样一来，信号的真实到达时刻完全相同，但电路输出的时间戳却随幅度变化了。幅度越大，测得的时间越早；幅度越小，时间越晚。这个幅度依赖的定时偏移，就是“时间游走”(Time Walk)。它的函数形式大致为 $t_{meas} \approx t_{true} + \frac{V_{th}}{dV/dt}$ ，而 dV/dt 正比于信号幅度，所以游走量与幅度成反比。

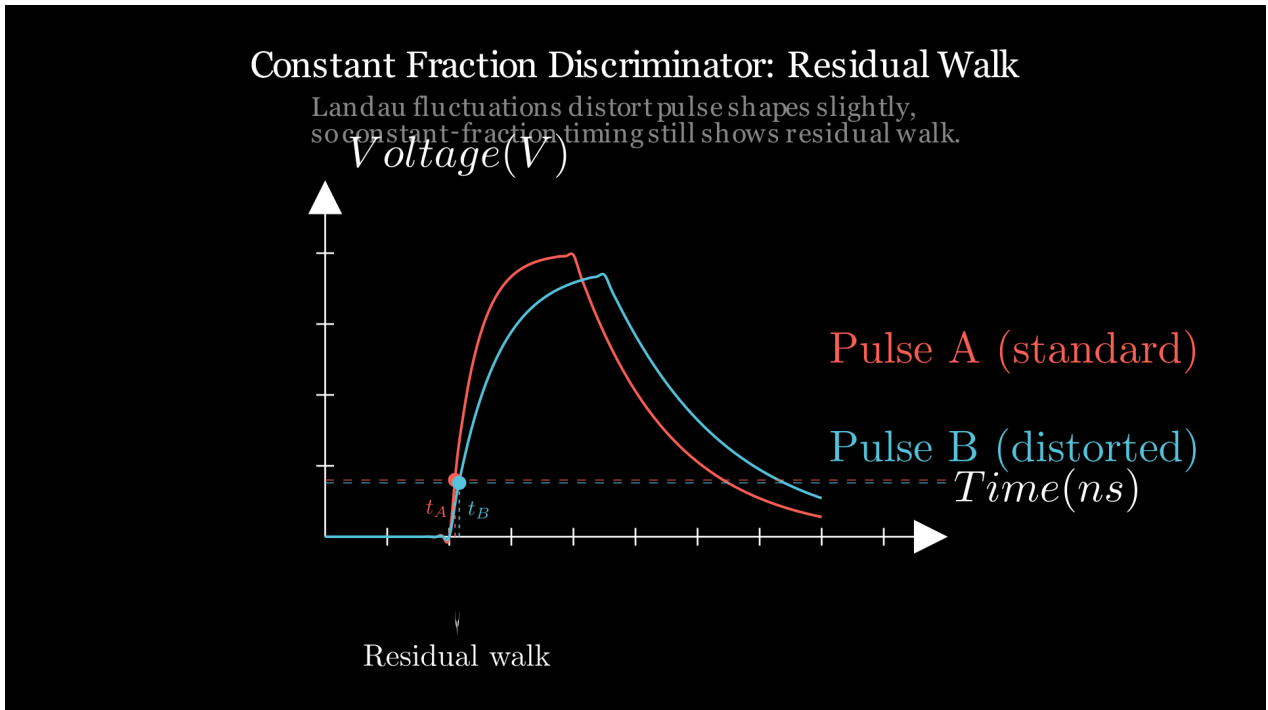
(2) 恒比定时仍有时间游走：

前面提到我们使用**恒比定时 (CFD)** 来进行前沿甄别，它的触发点在脉冲前沿的**恒定比例**

(如 20%) 处，理论上对幅度变化免疫。对于形状**完美线性缩放**的脉冲，恒比定时确实能完全消除游走。

但朗道效应不仅改变信号幅度，还会**微妙地改变脉冲形状**：

- 闪烁体中，高能量损失会产生更致密的电离柱，导致快慢成分比变化或局部猝灭，脉冲形状可能略微改变。
- 半导体中，电荷收集时间与沉积位置有关，朗道涨落的高能尾可能对应更局域的能量沉积，波形前沿斜率会偏离简单正比关系。



这些形状畸变使得“恒比点”不再严格对应同一个相位，从而引入**残余的时间游走**。不过相比固定阈值，它已经抑制掉了绝大部分幅度-时间耦合。

(3) 回到符合时间差公式，在没有游走时：

$$\Delta t = T_{A \rightarrow B} + (\delta_B - \delta_A)$$

其中 δ 是纯粹的本征定时涨落。现在，假设探测器 A 和 B 的信号幅度分别为 A_A 和 A_B ，每个探测器因游走效应会在真实时间上附加一个幅度依赖的偏移 $f(A)$ ：

$$t_A^{\text{meas}} = t_A^{\text{true}} + f_A(A_A), \quad t_B^{\text{meas}} = t_B^{\text{true}} + f_B(A_B)$$

那么测量的时间差变为：

$$\Delta t_{\text{meas}} = (t_B^{\text{true}} - t_A^{\text{true}}) + [f_B(A_B) - f_A(A_A)]$$

由于朗道涨落，即便是同一个粒子，在 A、B 中沉积的能量 A_A 和 A_B 也是**独立涨落**的（虽然平均一致，但具体数值随机）。因此， $f_B(A_B) - f_A(A_A)$ 这一项会变成一个**均值为零但方差不为零的随机变量**，直接叠加在时间差上。

最终后果：时间差谱的宽度 $\sigma_{\Delta t}$ 被额外展宽了，它不再单纯反映本征 σ_t ，而是包含了幅度涨落引起的游走方差项：

$$\sigma_{\Delta t}^2 = 2\sigma_t^2 + \sigma_{f_B - f_A}^2$$

用这个展宽除以 $\sqrt{2}$ 算出的“时间分辨率”就会偏大，夸大了探测器的真实抖动。这就是“引入额外定时误差”的具体物理图像。

如何消除信号幅度不一致带来的定时误差

要消除信号幅度不一致通过时间游走效应引入的定时误差，核心思路只有两条：**要么让定时对幅度不敏感（硬件修正），要么测量幅度并用它去校正时间（离线修正）**。在高精度的时间测量（尤其是符合时间分辨率标定）中，两者往往配合使用。

下面按**硬件在线消除**和**离线软件校正**两大类展开，并在最后以符合测量为例说明完整流程。

1、硬件层面的幅度不敏感定时

(1) . 恒比定时 (Constant Fraction Discrimination, CFD)

- **原理**：触发点在脉冲前沿的**恒定比例**处（如峰值的 20%），而不是固定电压。对于理想缩放信号，无论幅度多大，同一比例的到达时间是相同的。
- **效果**：基本消除因幅度变化引起的触发时间游走。
- **局限**：朗道涨落不仅变幅度，还轻微改变脉冲形状（如快慢成分比），导致恒比点不再严格对应同一相位，残留**高阶游走**。在百皮秒以下精度时需离线校正。

(2) . 双阈值 / 多阈值定时 + 外推

- 若同时记录信号越过两个不同阈值的时刻 t_1 、 t_2 （对应电压 V_1 、 V_2 ），可利用斜率 $k \approx (V_2 - V_1)/(t_2 - t_1)$ 线性外推到脉冲的“零电平起点” $t_0 = t_1 - V_1/k$ 。
- **优点**：无须知道信号总幅度，纯粹由时间差得到斜率，对幅度不敏感。
- **应用**：常用于丝室、MRPC 等探测器，读出快信号后由 TDC 配合计算。

(3) . 恒定前沿触发 + 在线幅度修正

- 用固定低阈值触发，同时用 ADC 记录脉冲高度，通过在线查找表（LUT）直接修正时间戳。本质是把离线修正固化到电子学里。

2、离线软件层面的幅度-时间校正

这是消除残余游走**最根本、最灵活**的手段，几乎适用于所有高精度时间探测系统。

(1) . 建立幅度-时间修正曲线 (T-A 校正)

原理：假设真实到达时间 t_{true} 与测量时间 t_{meas} 只差一个幅度依赖的偏移 $f(A)$ ：

$$t_{\text{true}} = t_{\text{meas}} - f(A)$$

对于每个探测器通道，通过实验数据或测试脉冲，标定出函数 $f(A)$ ，然后在逐事件分析中将所有测量时间归算到某一参考幅度 A_{ref} 下的等效时间。

具体步骤：

- 用大量实验数据，画出 **测量时间 vs 信号幅度** 的二维散点图。在幅度足够宽的范围内，数据会显现出明显的带状结构（同种粒子飞行时间本应相同，却随幅度弯曲）。
- 对幅度分 bin，在每个 bin 里投影得到时间分布，拟合其峰位（或用中位数），得到一组 $(A_i, \langle t \rangle_i)$ 点。
- 用多项式或经验函数（如 $f(A) = p_0 + p_1/A + p_2/\sqrt{A}$ ）拟合这些点，得到连续修正函数。
- 对每个事例，计算修正后时间 $t_{\text{corr}} = t_{\text{meas}} - f(A)$ 。理想情况下，修正后的时间谱随幅度的依赖消失。

(2) . 波形数字化 + 数字恒比或前沿拟合

现代实验越来越多采用波形采样，可以离线进行更精细的定时算法：

- **数字恒比 (dCFD)**：在记录的波形上直接找到恒定比例点，结合插值算法，精度很高，并能事后调整比例常数以评估残留游走。
- **前沿线性拟合外推**：拟合波形上升沿的线性部分，外推到基线得到“零点”时间。对幅度和形状的依赖极小，但需高采样率。
- **模板拟合**：用已知信号形状模板与波形做最大似然拟合，同时提取时间和幅度，天然解耦。

3、在符合时间分辨率测量中的应用流程

以两层探测器做符合测量时间分辨率为场景，推荐标准流程：

1. **硬件预处理**：尽可能使用 CFD 或双阈值定时，把大范围游走抑制掉。
2. **同时记录时间和幅度**：对每个符合事件，记录下 A 和 B 的测量时间 t_A, t_B 以及对应的信号幅度（或电荷） A_A, A_B 。
3. **单通道 T-A 标定**：分别对 A 和 B 单独进行幅度-时间修正标定，得到修正函数 $f_A(A), f_B(B)$ 。修正后得到 $t_{A,\text{corr}}, t_{B,\text{corr}}$ 。
4. **构造修正后的时间差**：

$$\Delta t_{\text{corr}} = t_{B,\text{corr}} - t_{A,\text{corr}}$$

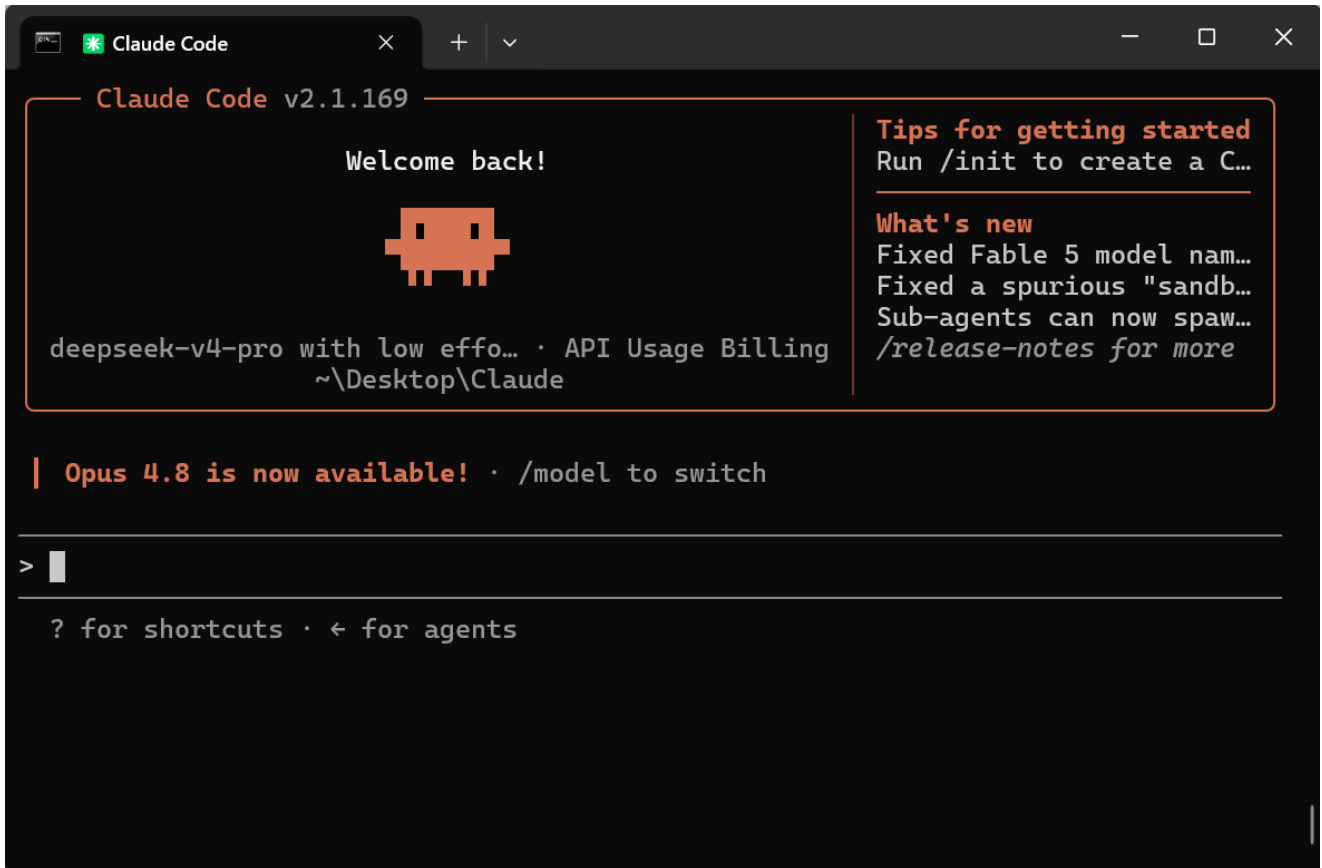
5. **检验**：画出 Δt_{corr} 与 A_A （或 A_B ）的二维图，确认不再有残留依赖。
6. **计算分辨率**：在修正后的时间差谱上拟合宽度 $\sigma_{\Delta t}$ ，即可得到去除了幅度游走效应的纯探测器定时涨落。

4、小结

消除幅度不一致带来的定时误差，本质上就是**解耦幅度与时间**。

- **硬件方法**（恒比定时、双阈值）是“防患于未然”。
- **软件幅度修正**是“事后救赎”，也是最彻底的手段。
- 在实际高精度时间探测器（如 LGAD、MRPC、闪烁体+SiPM）的符合时间分辨率测量中，“**CFD + 离线波形分析 + 残余 T-A 修正**”是黄金组合，能够将朗道涨落引起的额外误差降低到可忽略的水平，从而真正测出探测器本征的时间抖动。

3.Claude Code



我不是很想花token做一些无聊的小游戏，只是用它帮我整理了这五次作业的笔记，在obsidian生成了“作业目录.md”文件，并且以链接的形式让我可以快速检索这五次作业。

我还在探索如何让Claude Code与Obsidian结合，并且拥有长期记忆，能够帮助我实现：

1.在Obsidian里用Markdown实现物理报告的撰写

2.帮我写manim数学动画代码。

最终目标是：Claude Code能够在一次次项目任务中形成长期记忆，形成我的个人偏好，而且可以通过这些长期记忆实现自我迭代，使我的工作效率翻倍。