

粒子探测作业

中国科学院高能物理研究所 · 第一、二、三题解答

第一题

题目：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？

一、什么是符合测试

符合测试是核物理与粒子探测实验中的一种基本信号筛选技术。在实验装置中，通常布置两个或两个以上的探测器，当这些探测器在预设的极短时间内（即“符合时间窗”，一般为纳秒量级）各自接收到信号时，电子学系统便判定这些信号来源于同一个物理事件，从而将它们记录为一次“符合事件”。

其核心思想在于：如果一个真实的粒子依次穿过多个探测器，那么各探测器产生信号的时间间隔必然非常短，且与粒子的飞行时间相对应。相反，来自不同粒子或无关联本底的随机信号，在时间上同时落入符合窗口的概率则很低。因此，通过设定合理的时间窗，即可将真实物理事件与随机噪声有效区分。

二、为什么要进行符合测试

- 抑制随机本底：**探测器中不可避免地存在热噪声、宇宙射线、环境辐射等随机信号。符合测试要求两个以上探测器同时有信号，能够大量排除这些无关联的随机事件，显著提高信噪比。
- 筛选特定物理事例：**许多物理实验中，只有特定类型的事例才会在多个探测器中产生关联信号。例如，在正电子湮灭实验中，两个背对背的 511 keV 光子几乎同时到达两个探测器，利用符合测试即可从大量单光子事件中筛选出湮灭事例。
- 确定事例的几何径迹：**通过多个探测器构成的符合逻辑，可以判断粒子传播的方向和路径，进而重建事例的空间信息。
- 减少数据量：**在触发层面使用符合判选，能够在海量原始信号中快速筛除无效数据，降低后端数据采集和存储的压力。

三、什么是时间分辨率

在讨论“为什么用符合信号测量时间分辨率”之前，首先需要明确时间分辨率的含义。在物理测量中，任何测量结果都包含一个“测量值 \pm 误差”的表述。例如：使用一台精度为 0.01 秒的秒表测量短跑用时，记录为 $t = 6.90 \pm 0.01 \text{ s}$ ，这里的 $\pm 0.01 \text{ s}$ 就是本次测量的时间误差，换言之，就是秒表的时间分辨率。推及粒子探测器，时间分辨率表征的是探测器系统对粒子到达时刻的测量精度，即系统能够分辨的最小时间间隔。

对于服从高斯分布的时间测量结果，拟合得到的标准偏差 σ 即为系统的时间分辨率。通常也使用半高全宽 ($\text{FWHM} = 2.355\sigma$) 来定量描述。以低增益雪崩二极管 (LGAD) 传感器为例，其设计目标为时间分辨率优于 50 皮秒 (ps)，空间分辨率优于 10 微米 (μm)。要达到这样的精度，必须使用符合信号进行标定测量。

四、为什么时间分辨率的测量要用符合信号来测量

要测量一个系统的时间分辨率，必须有一对在时间上具有已知关联的信号，分别提供“起始”和“停止”时刻。符合信号天然满足这一要求：当同一个粒子（或一对同时产生的粒子）穿过两个探测器时，两个探测器各自给出一个时间戳，这两个时间戳之差反映的就是系统对同一物理事件的时间测量离散程度。

对大量符合事件的时间差进行统计，得到时间差分布，该分布的宽度 (σ 或 FWHM) 即代表了系统的时间分辨率。如果使用非符合的随机单信号，则不存在可供参考的关联时间基准，无法获得具有物理意义的时间差分布，因而也就无从测定时间分辨率。因此，符合信号是时间分辨率测量的必要前提。

小结：符合测试利用多探测器在极短时间窗内的同时响应来甄别真实物理事件，其核心功能包括抑制随机本底、筛选特定事例、辅助径迹重建及减轻数据采集负担。时间分辨率是探测器对事件时刻的测量精度，对于高斯分布以 σ (或 FWHM) 定量表征。符合信号提供了一对具有确定时间关联的起始-停止信号，使其成为时间分辨率测量的标准方法。

第二题

题目：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。

一、时间分辨率测量的误差来源总览

在讨论朗道效应之前，有必要先对时间分辨率测量的误差来源建立整体认识。以 β 望远镜法（一种利用放射源产生符合粒子的标准测试方法）为例，待测器件（DUT）的时间分辨率由以下几项误差的平方和决定：

$$\sigma_{\text{DUT}}^2 = \sigma_{\text{timewalk}}^2 + \sigma_{\text{TDC}}^2 + \sigma_{\text{jitter}}^2 + \sigma_{\text{Landau}}^2 + \sigma_{\text{Distortion}}^2$$

以下逐项解释各误差分量的物理含义：

1. 幅度游走误差 (σ_{timewalk})：由信号幅度分布不均引起。不同事例中探测器输出信号的幅度不同，在使用固定阈值甄别时，大幅度信号较早越过阈值、小幅度信号较晚越过阈值，导致定时时刻随幅度漂移。其大小与信号幅度分布范围和前置放大器响应速度有关。
2. TDC 量化误差 (σ_{TDC})：时间数字转换器（Time-to-Digital Converter）以固定的时间单元（bin 宽度 Δt ）对时间进行离散化记录。在单个 bin 内，事例的到达时刻满足均匀分布，由此引入的量化误差为 $\sigma_{\text{TDC}} = \Delta t/\sqrt{12}$ 。
3. 抖动误差 (σ_{jitter})：由探测器系统的信噪比 (S/N) 和信号上升时间 (t_{rise}) 共同决定，其关系为 $\sigma_{\text{jitter}} \propto t_{\text{rise}}/(S/N)$ 。信噪比越高、上升沿越陡峭，抖动误差越小。这是探测器本征性能的核心指标之一。
4. 朗道误差 (σ_{Landau})：由朗道效应引起。粒子在薄探测器中因电离能量损失的统计涨落呈朗道分布，导致沉积能量逐事例波动，进而影响信号波形的形状和定时精度。这是本题讨论的核心问题。
5. 信号失真误差 ($\sigma_{\text{Distortion}}$)：信号在读出链路中传输时，因阻抗不匹配、传输线色散、反射或放大器的非线性等因素导致的波形展宽和畸变。

在实际的 β 望远镜测试中，采用两个完全相同的参考探测器（Ref）和待测器件（DUT）组成三层符合系统，系统总时间分辨率为： $\sigma_{\text{system}}^2 = \sigma_{\text{Ref}}^2 + \sigma_{\text{DUT}}^2$ 。通过已知的参考探测器分辨率，即可从系统总分辨率中提取出待测器件的真实时间分辨率。

二、什么是朗道效应

当带电粒子穿过物质时，会通过电磁相互作用与介质中的电子发生碰撞，从而损失能量。在粒子穿过较厚介质的情况下，由于经历了大量独立碰撞，根据中心极限定理，总能量损失近似服从高斯分布。

然而，在粒子探测器常见的薄层介质条件下（如 LGAD 传感器的耗尽层厚度约为 $50\ \mu\text{m}$ ），碰撞次数较少，且少数几次较大能量转移的碰撞（即产生“ δ 电子”）对总能量损失有显著贡献。此时，能量损失的统计分布不再呈高斯对称形态，而是遵从朗道分

布 (Landau distribution): 其概率密度函数在低能侧上升较快, 在 高能侧拖有一条长尾。1944 年, 苏联物理学家列夫·朗道 (Lev Landau) 首次给出了这一分布的数学描述, 故称“朗道效应”。

朗道效应的直接后果是: 即使是相同能量、同种类型的粒子, 每次穿过探测器所沉积的能量也可能明显不同。探测器输出信号的幅度正比于沉积能量, 因此信号幅度会因朗道涨落而产生逐事例 (event-by-event) 的波动, 进而在时间分辨率误差预算中贡献朗道误差项 σ_{Landau} 。

三、信号幅度不均匀对时间分辨率测量的影响

在测量时间分辨率时, 通常需要从探测器模拟信号中提取一个精确的时间标记点。最简单的做法是设定一个固定的电压阈值: 当信号幅度超过该阈值时, 判定为事件发生, 并记录该时刻。然而, 当信号幅度因朗道效应而发生波动时, 固定阈值法会引入显著的定时误差: 幅度较大的信号上升速度快, 较早越过阈值; 幅度较小的信号上升速度慢, 较晚越过阈值。这一现象称为“幅度游走效应” (time walk)。

若不对幅度游走加以修正, 最终测得的时间差分布将被幅度涨落人为展宽, 导致时间分辨率劣化, 不能真实反映探测器系统本身的定时精度。因此, 必须在硬件层面或数据分析层面消除幅度不均匀的影响。

四、消除能量沉积不均匀因素的常用方法

1. 恒比定时甄别 (Constant Fraction Discriminator, CFD): 这是应用最广泛、效果最显著的硬件方法。CFD 不采用固定电压阈值, 而是将输入信号分为两路: 一路经衰减和延迟处理, 另一路按一定比例衰减后与前者叠加。CFD 的触发点位于信号上升沿的某一恒定比例处 (例如峰值的 20% 或 30%), 而非某一绝对电压值。由于触发比例是固定的, 不论信号整体幅度如何变化, 触发时刻在信号波形上的相对位置保持一致, 从而大幅度消除了幅度涨落对定时的影响 (即抑制 σ_{timewalk} 项)。CFD 结构简单、性能可靠, 是目前核电子学中的标准定时方法。

2. 幅度-时间校正 (Time-Walk Correction): 同时记录每个事例的信号幅度 A 和定时时刻 t 。对大量事例的 (A, t) 数据进行统计拟合, 得到幅度游走曲线 $t = f(A)$ 。利用此校正曲线, 将每个事例的定时时刻修正到某一参考幅度对应的时刻, 从而消除幅度依赖的系统偏差。该方法可在数据离线分析阶段灵活实施, 且可与 CFD 配合使用以进一步压低残余的 σ_{timewalk} 。

3. 过阈时间法 (Time-over-Threshold, TOT): 记录信号超过某一固定阈值的持续时间 (即脉冲宽度)。TOT 的值与信号积分电荷量 (正比于沉积能量) 相关, 相当于获得了一个幅度信息的替代量。利用 TOT 对定时时刻进行修正, 同样可以有效减小幅度游走的影响。此方法在像素探测器等读出通道密集的系统中的应用尤为广泛, 因为它不需要额外的幅度测量电路。

4. **选择特定能量沉积区间的事例**：在数据分析中，通过设定能量窗 (energy window)，仅选取沉积能量落在某一窄小区间内的事例进行时间分辨率分析。在此区间内，信号幅度差异已被控制在可接受的范围，朗道涨落引起的幅度游走影响较小。该方法简单直接，代价是会减少有效统计量，需在精度和统计量之间权衡。

5. **波形数字化与离线拟合 (Waveform Digitization & Offline Fitting)**：使用高速模数转换器 (ADC) 完整记录探测器输出波形，在离线分析中对波形进行函数拟合 (如用指数上升沿模型)，提取不受幅度影响的波形相位或拐点作为定时参考。该方法灵活度最高，可以获得最优的时间分辨率，但需要较高的硬件带宽和数据处理资源。

小结：时间分辨率的误差来源包括幅度游走、TDC 量化、抖动、朗道效应和信号失真五个分量，它们以平方和的形式构成总时间分辨率。朗道效应导致粒子在薄探测器中的能量沉积服从长尾分布，信号幅度逐事例涨落，通过幅度游走机制 (σ_{timewalk}) 恶化时间分辨率。解决方法涵盖硬件层面 (恒比定时甄别 CFD)、软件层面 (幅度-时间校正、TOT 校正、能量窗筛选) 以及前沿技术 (波形数字化与离线拟合)。实际实验中通常以 CFD 作为前端电子学的基础方案，并在离线分析中结合幅度-时间校正，以将各项误差降至最低水平。

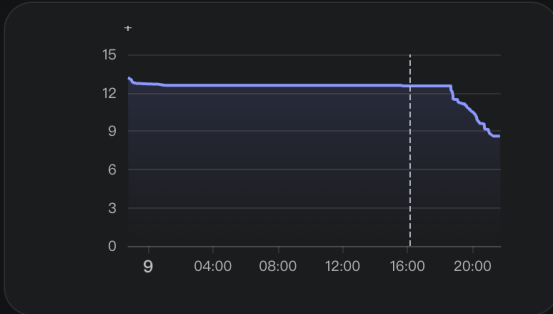
第三题

我选择 Vibe Coding 一个小插件，我觉得挺好用的，是一个 VS Code 插件，不用打开浏览器也能查看 DeepSeek 的余额和 token 使用情况。

GitHub 地址：<https://github.com/2731350936/deepseek-balance-monitor>

The screenshot displays the Claude Code application interface. At the top, there is a tab labeled "Claude Code" and a window title "Untitled". The main area features the "Claude Code" logo and a central instruction: "Highlight any text and press `Option` `K` to chat about it", accompanied by a small robot icon. A notification box titled "Auto mode is enabled" is visible, explaining that auto mode handles permission prompts and tool calls. At the bottom, a status bar contains several elements: a toggle for "Prefer the Terminal experience?", a keyboard shortcut "% Esc to focus or unfocus Claude", a plus sign, a square icon, a toggle for "Auto mode", and a red-bordered box containing the text "DeepSeek ¥8.60 | 26.7M | 96.90%".

余额趋势



更新于 2026/6/9 21:45:00

刷新

平台连接

● 平台连接: 已连接 (23小时前)

★ 推荐 · Playwright 自动同步

可读取全部 Cookie (含 HttpOnly), 浏览器 Profile 持久化, 几周才需重新登录一次。
首次点击按钮会自动安装所需组件 (Playwright + Chromium, 约 170 MB, 仅一次)。

Playwright 自动登录

备选 · 浏览器控制台

在 platform.deepseek.com 页面按 F12 → Console → 粘贴 → 回车

```
(function(){var t=localStorage.userToken||localStorage.token||localStorage.auth||localStorage.e.authToken||'';try{var p=JSON.parse(t);t=p.value||t}catch(e){}fetch('http://127.0.0.1:9877/auth',{method:'POST',body:JSON.stringify({cookie:document.cookie,token:t})})})()
```

其他方式

[自动提取 Cookie](#) [手动输入 Cookie](#) [清除 Cookie](#)

Tampermonkey 脚本: [安装 扩展](#) → 粘贴 `scripts/deepseek-auto-sync.user.js` → 访问页面自动同步

● API Key: 未配置

[设置 API Key](#) [清除](#)