

第 1 次作业 基本原理

问题 1 带电粒子和 γ 光子分别与介质发生哪几种相互作用？发生各种相互作用的条件分别是什么？

带电粒子与介质的相互作用

1. 电离和激发

- 条件：入射带电粒子与原子轨道电子发生库仑相互作用，传递能量使其电离或激发。

2. 韧致辐射

- 条件：快速带电粒子（特别是电子）在原子核电场中减速偏转，发射光子；主要发生在高能电子中。

3. 切伦科夫辐射

- 条件：带电粒子在介质中的速度超过光在该介质中的相速度，即

$$v > \frac{c}{n} \quad (1)$$

4. 穿越辐射

- 条件：高能带电粒子穿过介电常数不同的介质界面时发生。

5. 同步辐射

- 条件：带电粒子在磁场中偏转加速而辐射。

6. 多次库仑散射

- 条件：带电粒子在介质中多次与原子核库仑场发生小角度散射。

γ 光子与介质的相互作用

1. 光电效应

- 条件：低能 γ 光子（几十 keV 以下）与高 Z 材料相互作用，被完全吸收。

2. 康普顿散射

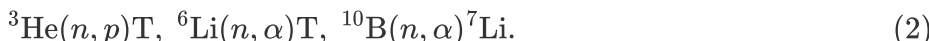
- 条件：中能 γ 光子与低 Z 材料。

3. 电子对效应

- 条件： γ 光子能量大于 1.02 MeV 与高 Z 材料。

问题 2 核反应法一般用来测量慢中子的通量，它常用的是什么反应？如何用它来测快中子？

常用反应为：



快中子不能直接用上述反应测量，需要先慢化：

- 使用含氢材料（如水、石蜡、聚乙烯）把快中子慢化为热中子；
- 再用 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反应进行测量。

问题 3 电磁簇射的基本过程

电磁簇射是高能电子或 γ 光子在介质中产生大量次级粒子的级联过程。基本过程为

1. 初级过程

- 高能电子经**韧致辐射**产生 γ 光子;
- 高能 γ 光子经**电子对效应**产生正负电子对。

2. 级联发展

- 电子、正电子湮灭继续辐射 γ 光子;
- γ 光子继续产生电子对;
- 粒子数快速增加、平均能量降低。

3. 终止条件

- 光子能量低于 1.02 MeV , 无法继续转换为正负电子, 簇射停止。

4. 特点

- 纵向发展由**辐射长度** X_0 描述, 能量沉积得平均纵向发展分布可以用 γ 分布描述;
- 横向扩展由**莫里埃半径** R_M 描述。

第 2 次作业 气体探测器

问题 1 气体探测器的收集电荷随工作电压的变化分为哪几个区？

气体探测器的收集电荷随电压的变化主要分为：

1. **复合区**：电压低，部分离子对复合。
2. **电离区**：随着电压的升高，扩散和复合效应减小。全部原初离子对被收集，信号与原初电离成正比。
3. **正比区**：气体发生一次雪崩，信号仍与原初电离成正比。
4. **有限正比区**：由于阳离子的堆积，空间电荷效应导致信号正比原初离子对的比例被破坏。
5. **盖革区**：电子不断发生雪崩，最终因为空间电荷效应停止。信号强且与原初电离无关。
6. **连续放电区**：持续放电，探测器可能损坏。

问题 2 MWPC的丝径，丝距，气隙一般为多少？为什么？举出一常用的二元气体？各有何用途？

典型参数为

- **丝径**：约 $20\ \mu\text{m}$ （极限可到 $10\ \mu\text{m}$ ）；
- **丝距**：约 $2\ \text{mm}$ ；
- **气隙**：约 $4 \sim 8\ \text{mm}$ （阴极到阳极距离）。

参数选择原因：

- 较小丝径、丝距可以提高空间分辨率；
- 丝距太小导致电容增大、放大倍数降低，工作电压高；
- 气隙小可以降低工作电压，但灵敏体积减小导致信号幅度下降，探测效率也下降。

常用二元气体：

- $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ：便宜，寿命长但是猝灭效率低；
- $\text{Ar} + \text{C}_4\text{H}_{10}$ ：工作稳定，便宜，但是寿命短。

其中 Ar ：是工作气体，提供主要电离介质，但是其增益小于 10^4 。其工作电压低，价格便宜； CO_2 , C_4H_{10} ：猝灭气体，抑制放电、稳定性好。

问题 3 漂移室加磁场的目的与测量 dE/dx 的作用

加磁场是为了测量带电粒子的偏转半径，从而得到其**动量**。动量分辨率随磁场强度 B 与径迹长度 L 增加而提高。

测量 dE/dx 的用途用于测量速度，因为不同粒子在相同动量下能量损失不同。

已知速度和动量，就可以推质量从而粒子鉴别。

问题 4 MRPC 的优点

- 时间分辨率极高；
- 探测效率高；
- 可大面积制造，成本低；
- 多间隙雪崩结构，信号叠加、响应快；
- 适用于高计数率环境。

第 3 次作业 闪烁探测器

一、闪烁探测器的组成与粒子探测过程

闪烁探测器主要由以下三部分组成：

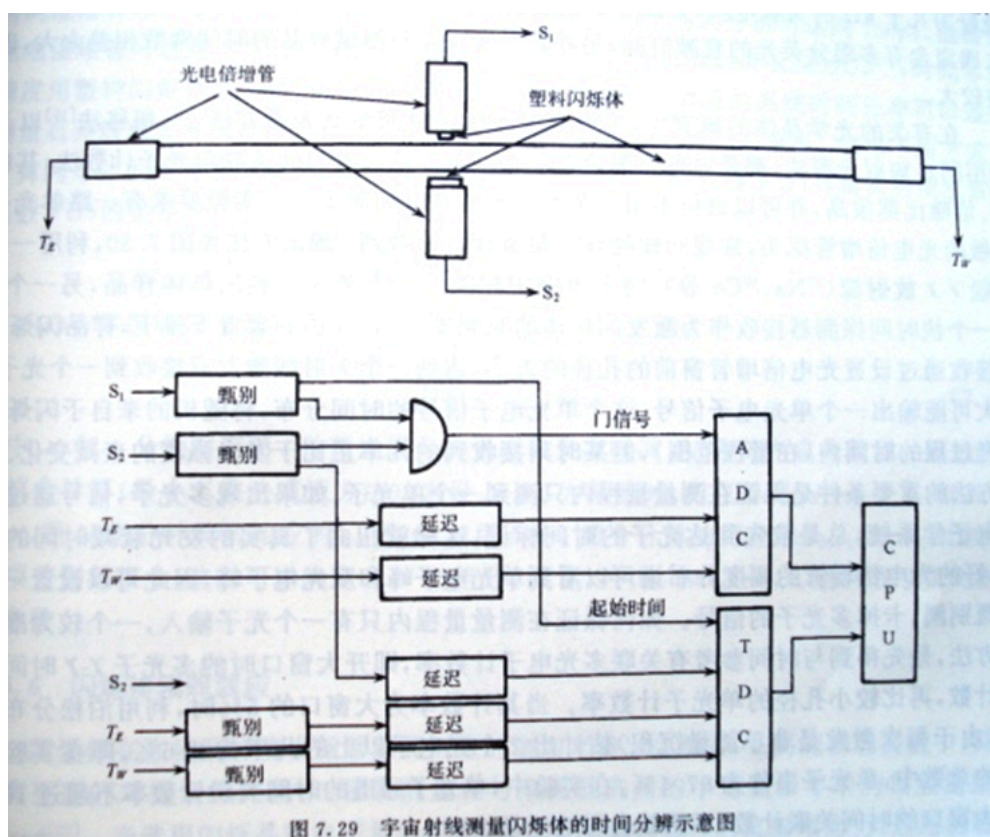
1. **闪烁体**：接受入射粒子，将其能量转换为荧光光子。
2. **光探测器件**：将荧光光子转换为电信号并进行倍增。
3. **电子学系统**：对电信号进行处理、放大和记录。

粒子探测过程简述：

- 入射粒子进入闪烁体，通过电离或激发作用使闪烁体原子/分子受激。
- 受激原子/分子退激发时发射荧光光子。
- 荧光光子通过光导或直接传输至光探测器件的光阴极。
- 光阴极吸收光子并发射光电子。
- 光电子在光电倍增管中逐级倍增，形成较大的电信号。
- 电信号被阳极收集，输出为电压或电流脉冲，经电子学系统放大、成形、甄别和记录。

二、用宇宙线测量大面积闪烁探测器时间分辨的实验框图与原理

- 实验框图：



- 测量原理：

ADC 用于测量波形信息， S_1 和 S_2 经过与门（符合）后作为门信号输入 ADC，代表此时有宇宙线通过，开始记录。 T_L 和 T_R 延迟后输入 ADC，从而将其波形信息转换为数字信号，获得能谱信息；

TDC 用于**测量时间分辨能力**，为了避免电子学带来的时间延迟， S_1 直接做为起始时间，此时测量的时间差是 $T_l - S_1$ 以及 $T_r - S_1$ 。在 CPU 中被处理为 $T_l - T_r$ ，并且通过 ADC 信号是否存在判断 TDC 信号是否应该被剔除。

测量时， S_1 尺寸不能太大，否则会增加时间抖动。但是 S_1 尺寸过小会导致收集的宇宙线少，所以应该增大 S_2 的体积，得到上小下大的结构。

实验上常用 NaI(Tl) 闪烁探测器测量 ^{24}Na 2.76 MeV 的 γ 射线。试计算其能谱图上，康普顿边缘与单光子逃逸峰之间的相对位置。

已知：

- γ 射线能量 $E_\gamma = 2.76 \text{ MeV}$
- 电子静止能量 $m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$

康普顿边缘能量 E_C ：

$$E_C = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{2E_\gamma}} \quad (3)$$

代入数值：

$$E_C = \frac{2.76}{1 + \frac{0.511}{2 \times 2.76}} \approx \frac{2.76}{1 + 0.0926} \approx 2.53 \text{ MeV} \quad (4)$$

单光子逃逸峰能量 E_{escape} ：

$$E_{\text{escape}} = E_\gamma - m_e c^2 = 2.76 - 0.511 = 2.249 \text{ MeV} \quad (5)$$

相对位置：

$$\Delta E = E_C - E_{\text{escape}} \approx 2.53 - 2.249 \approx 0.281 \text{ MeV} \quad (6)$$

康普顿边缘位于约 2.53 MeV，单光子逃逸峰位于约 2.249 MeV，两者相距约 0.281 MeV。

思考题

问题 1 一块单晶硅, 电阻率为 $1000 \Omega \cdot \text{cm}$, 加上电压后, 能否构成一个探测器? 如果是一块绝缘体呢? 请说明理由。

不能, 因为首先没有耗尽层, 粒子通过单晶硅时即使产生了电子-空穴对, 也没有办法收集, 因为电阻率太高, 电子和空穴的平均自由程太小。

绝缘体的话更不可能, 电子-空穴对都没办法产生。

Note

这里的考点其实是构成半导体探测器的必要条件:

1. 介质的足够高的电阻率;
2. 介质中的电荷能够自由移动且有足够长的寿命, 不会发生复合和俘获。

对于单晶硅和绝缘体, 条件 1 是满足的, 但是条件 2 不满足。

问题 2 试讨论影响半导体探测器能量分辨率的因素有哪些?

能量分辨率直接取决于载流子数目, 也就是决定于平均电离能 W 和载流子的收集, 具体因素有

- 掺杂, 包括掺杂浓度和掺杂类型;
- 温度, 半导体探测器的工作温度, 影响漏电流和载流子行为;
- 电结, PN 结的半导体探测器和 PIN 结的半导体探测器在收集载流子上有不同;
- 晶格缺陷, 导致俘获中心或者复合中心;
- 电子学噪声: 前置放大器的噪声贡献;
- 统计涨落。

问题 3 比较单片型和混合型硅像素探测器的特点

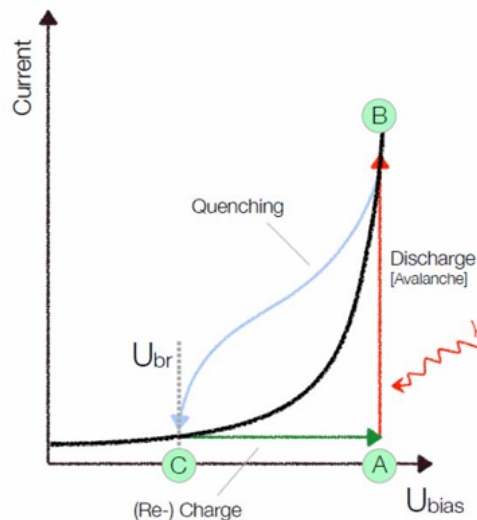
混合型就是分别制作传感器部分和读出电子学部分, 然后通过 bump - bonding 连接。

- 优点: 可以对两部分单独优化; 可以制作大面积探测器; 全耗尽, 响应快。
- 缺点: 功耗高, 发热集中; 受制于 bump - bonding 技术, 像素面积不能太小。

单片型是直接在一个晶片上生长出像素电路以及传感器部分, 其集成度较混合型更高, 因此**空间分辨率更高**, **制作成本更低**, **噪声更小**; 但是物质的量比较小, **不适合用于高能辐射的探测**。

问题 4 简述 SiPM 的工作原理及特点

SiPM 主要是工作在 Geiger 模式下的 APD 并联而成, 每个 APD 要串联一个猝灭电阻以抑制自维持的雪崩。其工作过程如下图所示



在加偏压 U_{bias} 时处于待触发的模式。当光子入射的时候产生电子空穴对，发生自维持的雪崩，输出大电流。光电流接下来被猝灭电阻抑制，使得雪崩逐渐停止。最后对光电二极管逐渐充电（反偏光电二极管可以等效为一个电容）使得 SiPM 重新处于待激发状态。

其最大的特点就是在保留 APD 的大信号的同时通过并联实现了能谱的测量，但是 SiPM 不具备空间分辨能力，因为其读出电子学道数只有 1 道。

Note

- 高增益；
- 低工作电压（几十伏）；
- 对磁场不敏感；
- 快时间响应；
- 易受温度影响（增益随温度变化）；
- 有串扰和后脉冲效应。

问题 5 在符合实验中如何选择合适的源强？由于什么因素的限制使源强不能太大？反之，是否越弱越好？为什么？

根据如下两个原则选择

- 使得**偶然符合事例**尽可能少；
- 使得**真符合事例**在规定时间内达到能量分辨率的要求。

源强不能太大有两个原因

- 在能谱测量中，源强太大会导致计数率特别高，也就是说**和峰出现的概率增大**；
- 对所有探测器而言，死时间是存在的，计数率太高总是会导致**事例的丢失**。
- 需要考虑源的**生物损伤**。

越弱肯定不是越好的，太弱会导致

- 实验时间太长，导致环境的影响可能很显著（比如说温度、湿度难以控制，源的活性可能下降之类）；
- 噪声或偶然事例的影响增大，导致能量分辨率的下降。

问题 6 用快慢符合谱仪测瞬时符合曲线时, 为何延迟时间远大于符合分辨时间 τ 时所得符合计数就是偶然符合?

在使用快慢符合谱仪测量瞬时符合曲线时, 通过改变一个通道的延迟时间, 可以得到符合计数率随延迟时间变化的曲线。曲线中央通常出现一个峰值或平台, 对应于真符合事件; 当延迟时间逐渐增大时, 符合计数率下降并最终趋于一个稳定的本底。

符合分辨时间 τ 是符合电路能够响应两个关联事件的最大时间差。当真符合事件的时间差超过 τ 时, 符合电路不再输出信号。因此, 当延迟时间远大于 τ 时, 真符合事件被完全排除, 此时测得的符合计数完全来源于偶然符合。

偶然符合是由两个互不关联的随机事件恰好落在符合电路的时间窗口 τ 内产生的, 其计数率与延迟时间无关, 仅与两个通道的单计数率 R_1 、 R_2 和分辨时间 τ 有关 (通常为 $R_{acc} = 2\tau R_1 R_2$)。因此, 在延迟时间远大于 τ 的区域, 符合计数率保持恒定, 且全部为偶然符合。

总之, 延迟时间远大于 τ 时, 真符合贡献为零, 仅剩偶然符合, 故测得的符合计数就是偶然符合。

第 4 次作业 磁谱仪

问题 1 实验上如何用阈式切伦科夫计数器鉴别动量为 $3 \text{ GeV}/c$ 的 π 、 K 、 p 粒子？已知三个阈式切伦科夫计数器的折射率分别为 1.02, 1.0014, 1.00077。

将三个阈式切伦科夫辐射计数器按照**折射率由大到小**沿粒子入射方向摆放，通过观察哪个探测器中可以发射切伦科夫辐射，可以用于判定粒子。

由于

$$\beta = \frac{p}{E} = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m^2}}, \quad (7)$$

可以计算出 $\beta_\pi = 0.9989$, $\beta_K = 0.9867$, $\beta_p = 0.9544$ 。

而通过 $\beta_c = 1/n$ 可以计算出阈速度，也就是 $\beta_c^1 = 0.98039$, $\beta_c^2 = 0.998602$, $\beta_c^3 = 0.999230$ 。

所以在第一个计数器中 π , K 可以发光；第二个计数器中 π 可以发光，第三个探测器中三个粒子都不可以发光。只要看入射粒子能令几个探测器发光就好了。

问题 2 BESIII 和 LHC 上的 CMS 的电磁量能器各采用什么晶体？各有何考虑？

BESIII 和 LHC 实验的电磁量能器分别采用了不同类型的闪烁晶体，这是基于各自实验的物理目标、对撞环境、能量范围和性能要求的综合考量。以下是具体分析：

BESIII 电磁量能器：采用 CsI(Tl)。

• 主要考虑因素：

- 物理目标：**BESIII 主要研究 τ -粲能区的强子物理和粲偶素态。该能区末态粒子数较少，能量较低，但需要高精度的能量分辨率。
- 能量分辨率需求：**CsI 晶体的**发光效率高**，且其**辐射长度适中**，**莫里哀半径较大**，适合在**较低能量下实现较好的能量分辨率**。
- 辐射硬度要求较低：**BESIII 的亮度相对较低，晶体所受辐射损伤较小，CsI 的适度辐射硬度已足够。
- 成本与工艺：**CsI 晶体生长技术成熟，成本相对较低，适合大规模使用。

LHC 电磁量能器：采用**铅钨酸盐 (PbWO₄) 晶体**。

• 主要考虑因素：

- 极端对撞环境：**质子-质子对撞质心能量高达 $13 \sim 14 \text{ TeV}$ ，亮度极高，且粒子通量极大，背景辐射极强。
- 快速响应与抗辐照：**PbWO₄ 晶体的**衰减时间极短**，适合 LHC 的高重复频率和短束流交叉时间。同时，PbWO₄ 具有优异的**辐射硬度**，能在强辐射环境下长期保持性能。
- 紧凑性与高密度：**PbWO₄ 的辐射长度极短，莫里哀半径小，可在有限空间内构建紧凑的量能器。
- 能量分辨率与响应：**尽管 PbWO₄ 的发光产额较低，但通过高增益光电倍增管补偿，仍能在

高能区域实现优异的分辨率。

综上所述

- **BESIII 选择 CsI 晶体**，主要权衡了**能量分辨率、成本与低辐射环境**的需求，适用于**低能量、高精度**的粲物理研究。
- **LHC 选择 PbWO₄ 晶体**，核心在于应对 **LHC 极端环境**：**高辐射、高事例率、强空间约束**，强调**快速响应、抗辐照与紧凑性**。

问题 3 在一个磁谱仪系统中，飞行时间探测器（TOF）通常在径迹室的外面，若将其置于径迹室的里面会有什么问题？

1. **破坏径迹测量的精确性**：TOF 介质（如闪烁体）会使带电粒子在进入精密径迹探测器（如硅像素/微条探测器）前发生多次小角度散射，导致粒子原始轨迹畸变。
2. **飞行距离与误差关系**：粒子速度测量误差与飞行距离 r 和飞行时间 t 的相对误差有关：

$$\left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 = \left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 \quad (8)$$

其中 Δr 和 Δt 通常为固定值。因此，**飞行距离越长（即 TOF 离顶点越远），飞行时间 t 越长，速度的相对误差越小**，有利于提高测量精度。