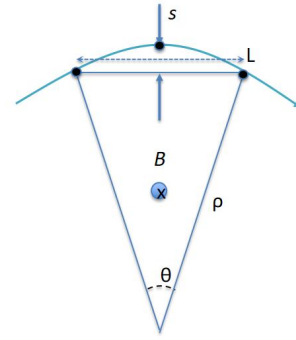


第七次科创作业

Q1: 位置分辨与动量误差的资源博弈

假设你正在设计一个硅微条桶部径迹探测器，用于类似 HL-LHC 的实验。

物理学家要求在 $p_T=100 \text{ GeV}/c$ 处，相对动量测量误差 σ_{p_T}/p_T 必须缩小一半。



- 在高动量极限下，从带电粒子在均匀磁场中的轨迹几何出发，推导相对动量误差 σ_{p_T}/p_T 的简化表达式。假设位置测量误差 σ_x 与硅微条 pitch 近似成正比（在二值读出、电荷分享可忽略的近似下）。
- 基于上述简化公式，提出三个独立的方案，使动量误差在高动量极限下缩小一半。对每个方案，指出你改变了哪个物理/工程参数并简要说明理由。
- 请分别指出这三个方案如果在真实工程中落地，会引发哪些致命的系统级代价？对每个方案，至少列出 2-3 条具体代价，并说明它们会如何影响。
- 在典型 HL-LHC / CEPC 类实验条件下，你最不推荐哪个方案？为什么？必须明确选择一个方案作为“最不推荐”的方案，并说明理由。然后回答：
 - 如果坚持这个方案，你会如何修改系统其他部分（如 ASIC 架构、冷却、材料选择、服务线路）来尽量补偿副作用？
 - 如果无法有效补偿，要说明为什么“这个方案在系统上不可行”。

Q1

a)

设均匀磁场 B 垂直于粒子运动平面，带电粒子曲率半径为 $R=p_T/0.3T$ (p_T 单位 GeV/c , B 单位 T)

取一段有效轨迹长度 L ，其对应的矢高为 $s \approx L^2/8R$

若位置测量误差为 σ_x ，则矢高测量误差近似为 $\sigma_s \approx \sigma_x$

因此相对动量误差为 $\sigma_{p_T}/p_T \approx \sigma_s/s \approx 8\sigma_x p_T/0.3BL^2$

在二值读出、电荷分布可忽略的近似下，硅微条位置分辨率正比于微条间距

所以 $\sigma_{p_T}/p_T \approx k \cdot \text{pitch} \cdot p_T / BL^2$

b)

方案 1: 硅微条间距 pitch 减半，动量误差正比于 pitch, 位置误差减半，动量误差减半

方案 2: 磁场 B 加倍，动量误差反比于 B ，磁场加倍使误差减半

方案 3: 有效轨迹长度 L 增加为 $\sqrt{2}$ ，动量误差反比于 L^2 ，使误差减半

c)

方案 1: 减小硅微条 pitch

1. 通道数、功耗、数据量翻倍

pitch 减半后，同样面积下通道数翻倍。前端 ASIC 通道数、功耗、数据读出带宽都急剧增加。在 HL-LHC 高事例率下，数据链路和触发系统可能饱和。

2. 噪声和电容增大

更小 pitch 使条间电容增加，前端电子学噪声随之增加；辐射损伤后漏电流增大，信噪比进一步恶化，实际位置分辨率不一定按比例提高。

3. 工艺难度和辐照可靠性下降

更细的微条对光刻精度、抗辐照能力要求更高；小尺寸结构更易受辐照损伤影响，探测器寿命和良率降低。

方案 2：提高磁场

1. 磁铁系统成本急剧上升

磁场加倍要求超导磁体电流/储能大幅增加，磁铁体积、重量、低温功耗、失超风险都显著增加，造价可能超出实验预算。

2. 磁场均匀性和电子学兼容性变差

高磁场下边缘场更难控制；前端电子学可能受磁场影响，需要额外磁屏蔽，增加系统复杂度。

3. 低动量粒子接收度下降

更强的磁场使低动量粒子回旋半径变小，可能无法有效穿过探测器，影响径迹重建效率。

方案 3：增大探测器长度 L

1. 探测器体积、面积、通道数增加

增大径向尺寸会使硅微条总面积增加，通道数、功耗、数据量随之增加，机械支撑和安装难度也增大。

2. 系统误差更敏感

更长的径迹对磁场非均匀性、对准误差、热膨胀和重力形变更敏感，可能引入较大的系统误差。

3. 多次库仑散射和本底增加

粒子穿过更多探测材料，多重散射贡献增大；同时可能产生更多簇射和本底击中，部分抵消动量分辨收益。

d)

最不推荐的是：减小硅微条 pitch

理由：辐射损伤会使小 pitch 传感器的漏电流和噪声快速增长，长期运行下位置分辨会严重恶化；通道数翻倍会导致前端电子学、数据采集系统的复杂度和成本大幅提升，同时功耗增加会带来冷却系统的压力；电荷分享效应在小 pitch 下会更加明显，反而可能降低有效位置分辨，无法保证动量误差缩小一半。

若坚持该方案：优化 ASIC 架构，采用更先进的工艺节点降低单通道功耗和噪声，设计低噪声、高集成度的前端 ASIC；升级冷却系统，采用二氧化碳两相冷却或微通道冷却技术，提升散热效率，控制传感器和电子学的工作温度；材料选择辐照硬度更高的硅材料减少辐照损伤对漏电流和噪声的影响；采用低材料预算的服务线路（如铝制线缆），减少粒子多次散射的影响。

不可行性说明：即使采取上述措施，小 pitch 传感器的辐照损伤和电荷分享问题仍难以完全解决，且通道数和功耗的增加会超出实验工程的预算和空间约束，因此该方案在系统层面不可行。

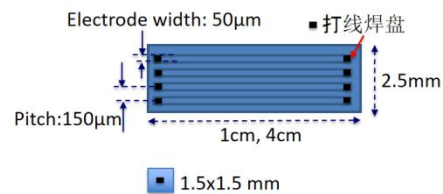
Q2: β 放射源时间分辨测试的 PCB 设计

你拿到了一批新型传感器：

- 1.5 mm × 1.5 mm 的一通道方形 DC-LGAD 器件，用于符合和提供时间参考。
- 1cm x 2.5mm 和 4cm x 2.5mm (pitch=150 μ m, electrode width=50 μ m) 的微条型四通道 AC-LGAD 待测器件

你需要设计一块通用的 PCB 测试板(厚 0.7mm)，用于 β 放射源（如 Sr-90）评估微条型四通道 AC-LGAD 器件的时间分辨率。

- 在不考虑具体放大电路设计的前提下，为了保证获取到真实的物理极限时间分辨率，你的 PCB 在版图和机械结构上必须遵守哪些关键原则？重点论述 4-5 项原则，并简要说明每项原则如何影响时间分辨率。
- 右边在几种常见数据接口和数据线类型中，你会选择哪一种用于本测试板？说明原因。
- 画出 PCB 的俯视图和剖面示意图，并予以适当标注：传感器位置，焊盘位置，打线路径，数据接口（可用方形轮廓表示）等等。剖面图需包括 β 测试时的 PCB 布局，双板设计需粗略估计传感器之间的距离。



Q2

a)

1.

传感器电极→射频连接器全程控制单端 50 Ω 特征阻抗，板材选用低损耗高频介质，严格计算线宽、介质厚度；禁止阻抗突变、过孔不匹配。

影响：阻抗失配会产生信号反射，脉冲边沿畸变、抖动增大，直接劣化时间分辨（ σ_t 显著上升）。

2.

LGAD 模拟灵敏区、射频走线独立分区；数字供电、控制、以太网走线放置 PCB 另一侧，用地平面隔离；模拟地与数字地单点共地，禁止分割地平面跨敏感信号线。

影响：数字开关噪声耦合到快脉冲信号，叠加随机抖动，压低时间测量精度。

3.

打线焊盘紧邻射频连接器，信号线直线最短，禁止长平行走线、蛇形绕线；电极焊盘尺寸最小化，减小对地寄生电容；过孔数量尽可能少，选用背钻过孔消除残桩。

影响：走线过长电或容过大使脉冲上升沿变缓，时间抖动增加；平行走线产生串扰，引入定时误差。

4.

敏感模拟信号上下两层完整实心地平面，形成微带/带状线屏蔽；焊盘周边布置接地保护环；高频信号线远离板边缘、开槽。

影响：地平面断裂会截断信号回流路径，辐射噪声、串扰大幅提升，定时稳定性变差。

5.

传感器偏置供电端口紧邻 0402 高频去耦电容；滤波电容紧贴焊盘，走线极短；偏置电阻选用低寄生薄膜电阻，远离射频通路。

影响：供电纹波、交流噪声直接调制 LGAD 漏电流，带来定时偏移与随机抖动。

b) MMCX 侧卧型

1. 尺寸与被测 DC-LGAD 器件匹配

2. 多通道高密度布线：四通道 LGAD 需要 4 路独立射频输出，MMCX 微型尺寸可在 4cm 宽度 PCB 并排布置 4 路，通道间隔离距离充足；SMA 体积大，4 路排布会超出器件宽度。

3. 射频性能匹配：MMCX 标准 $50\ \Omega$ 阻抗，带宽 6GHz，完全覆盖 LGAD ps 级快脉冲频谱；卡扣式连接拆卸便捷，适合多批次 β 放射源重复测试。

4. 寄生参数更低：小型连接器引脚电容、电感远小于 SMA，避免快脉冲边沿退化，保障时间分辨测量精度。

Q3：拓扑结构的选择：为何不建一个“球”？

假设你正在参与下一代强子对撞机（类似 HL-LHC）的探测器设计讨论。
有人提议将下一代探测器设计成“多层球面洋葱皮”结构，彻底放弃目前的“圆柱形桶部 + 垂直端盖（Barrel + Endcap）”分层拓扑。
请明确选择赞同或反对该提议，并从物理、磁场系统集成三个维度综合讨论。如果你选择反对该球面提议，请说明原因并提出一个你认为更合理的拓扑结构（画出简易示意图），并说明为什么它比球面更优。

Q3

反对

1. 物理维度

球面结构导致材料预算随极角 θ 剧烈变化。粒子若从球体“赤道”附近穿过，路径极短；若从“两极”附近穿过，路径极长。这将导致动量分辨率在全空间内严重不均匀，且破坏顶点分辨率和低动量粒子探测效率。

2. 磁体系统维度

强子对撞机采用轴向均匀螺线磁场。球面探测器内部磁场边缘效应复杂，且磁力线在球面极区会发散，导致电荷粒子在球面不同曲率半径处回旋路径差异巨大，动量重建公式（ $p = 0.3 \cdot B \cdot R$ ）将失去简单的线性关系，必须依赖极其复杂且不准的非均匀场 Map 校正。极大增加软件校正难度，且磁体线圈造价将因异形结构指数级上升。

3. 系统集成维度

球面探测器模块必须是曲面双层或单层结构。现有工业级高精度硅传感器均为平面工艺制造，贴合球面会造成芯片应力碎裂。同时，冷却管道、供电电缆和光纤数据读出无法在球面内侧均匀布线，一旦内部损坏必须整体拆卸。

4. 更合理结构

桶部仍为规则圆柱，中心区域材料厚度恒定，提供最佳动量分辨率。

可以兼容磁体，仍使用传统长螺线管，轴向磁场 B_z 不受影响，动量重建算法无需大幅修改。

便于实际工程：桶部模块仍为可抽出的平面或半圆弧刚性板；锥形端盖虽略带坡度，但模块可在平面基板上预弯成型，相比球面更易散热和走线，且维护时端盖可像“活塞”一样从两侧抽出，极大降低运行维护成本。

