

Q1:

### 1. 相对动量误差的简化表达式推导

在高动量极限下，带电粒子在均匀磁场  $B$  中的轨迹曲率半径  $\rho$  很大。通过测量粒子轨迹的矢高  $s$ ，根据几何近似关系有：

$$s \approx L^2 / (8\rho)$$

横动量  $p_T$  与磁场  $B$  和曲率半径  $\rho$  成正比 ( $p_T \propto B\rho$ )，因此由误差传递可知，相对动量误差等价于相对曲率误差：

$$\sigma_{p_T} / p_T = \sigma_{\rho} / \rho \propto \sigma_s / s$$

在二值读出近似下，位置测量误差  $\sigma_x$  与硅微条 pitch 成正比。代入上式，最终得到简化表达式：

$$\sigma_{p_T} / p_T \propto (\text{pitch} \cdot p_T) / (B \cdot L^2)$$

### 2. 缩小动量误差一半的三个方案及系统级代价

#### 方案一：将硅微条 Pitch 减小一半

**理由：**直接使位置误差  $\sigma_x$  减半。

**系统代价：**通道数翻倍导致前端 ASIC 功耗和读出带宽剧增；为了应对翻倍功耗，需更粗的线缆和强效制冷管，极大增加了死物质，引发多次散射，恶化低动量粒子的测量精度。

#### 方案二：将磁场强度 $B$ 增加一倍

**理由：**增强磁场使高动量粒子弯曲更明显，矢高  $s$  变大，在同等位置精度下误差减半。

**系统代价：**在大体积内将磁场翻倍触及超导材料（如 Nb<sub>3</sub>Sn）和低温制冷的技术极限，造价高昂；指数级增长的洛伦兹力需要极笨重的机械支撑结构防撕裂。

#### 方案三：将最外层半径增加 $\sqrt{2}$ 倍

**理由：**误差与  $L^2$  成反比。

**系统代价：**探测器体积和昂贵的硅传感器面积将不可接受地膨胀；超长悬挑结构对热胀冷缩和震动极其敏感，难以保证微米级机械稳定性。

### 3. 最不推荐的方案及分析

#### 最不推荐方案：方案一（将 Pitch 减小一半）。

**不推荐理由：**单纯减小 pitch 是高能探测器设计中的“死螺旋”。它必然带来读出芯片、电源线缆和冷却管道的急剧增加。这些死物质引入的多次库仑散射会在中低动量区间彻底摧毁探测器的物理性能。

**补偿方案：**若坚持此方案，必须采用更先进节点（如 28nm）的 ASIC 降功耗，改用微通道双相 CO<sub>2</sub> 蒸发制冷，且支撑结构全换成超轻碳纤维。

**为何最终仍不可行：**前端走线密度存在物理极限。即使采用顶配减重技术，散热所需的管壁厚度和工质质量增加带来的多次散射误差，依旧会掩盖 pitch 减小的红利。整个系统投入巨资，却只能在极窄的高动量窗口获益，整体得不偿失。

Q2:

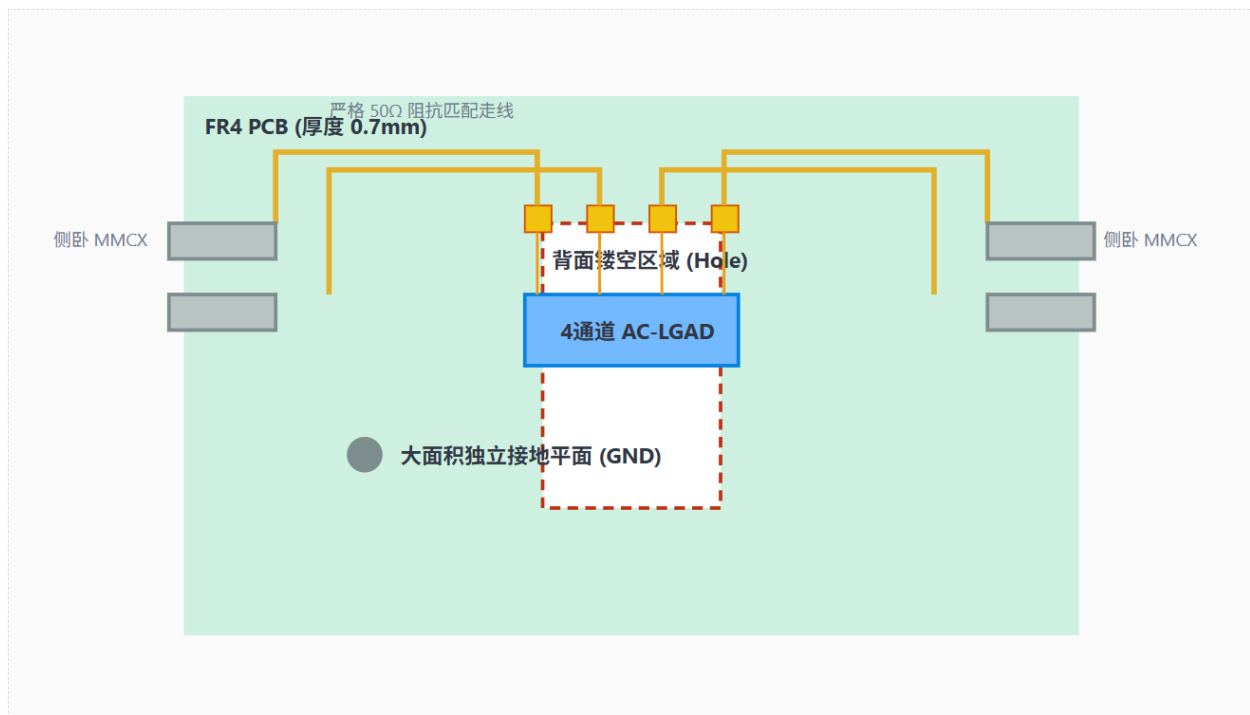
## 1. 关键设计原则

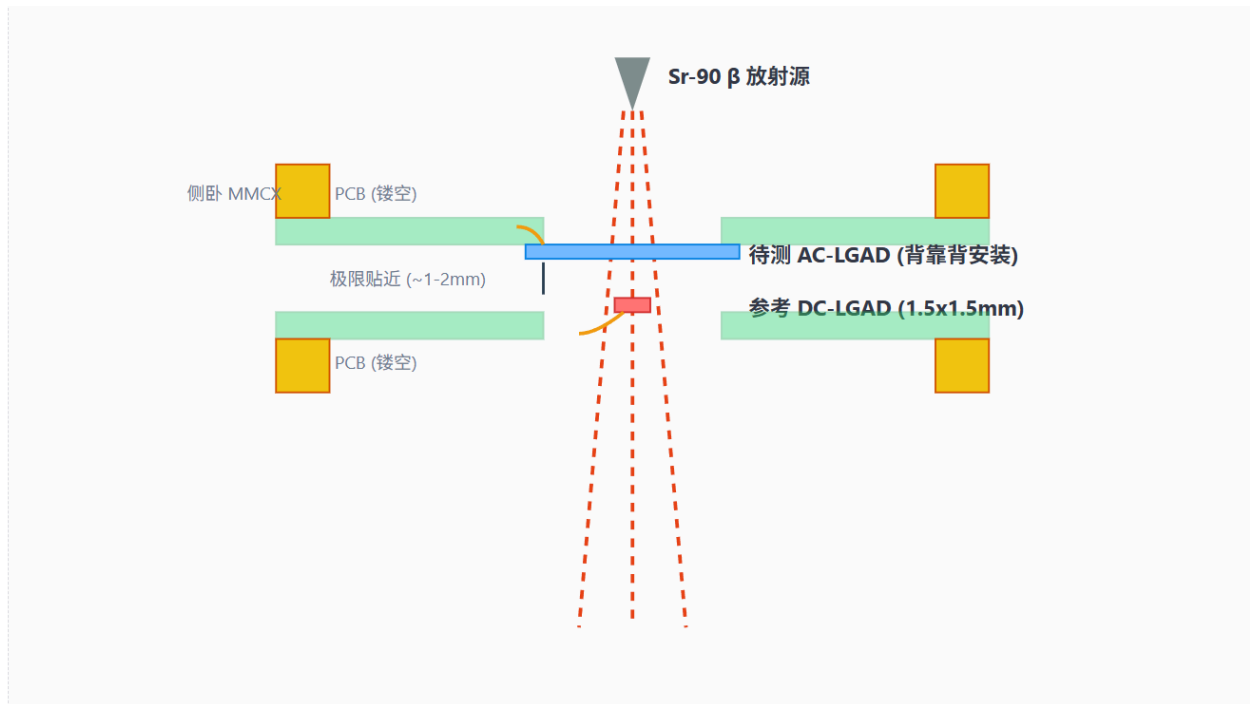
1. **传感器背部必须开孔（镂空）**： $\beta$  射线穿透力弱，如果在 PCB 板中发生库仑散射，粒子将发生偏折和能量损失，导致上下两板的信号产生“走离”误差，无法测准本征时间分辨。
2. **射频阻抗严格控制（50  $\Omega$  匹配）**：LGAD 信号具有极快的高频上升沿（百皮秒级）。走线必须做 50  $\Omega$  匹配，否则阻抗不连续会导致信号反射，上升沿变缓，时间抖动增大。
3. **打线长度极小化**：过长的引线会引入显著的寄生电感（ $\sim 1$  nH/mm），引发信号高频振荡，拖慢上升时间。
4. **大面积独立接地平面**：有效隔离多通道间的串扰，屏蔽环境电磁噪声，提高信噪比。

## 2. 数据接口选择

**选择：侧卧型 MMCX 接口及配套的射频同轴线**

**理由**：时间分辨测试需要数 GHz 的模拟带宽，网口或排线会产生严重衰减；侧卧型 MMCX 高度仅  $\sim 1.5$ mm，能允许上下两块测试板极限贴近，缩短粒子穿越双层传感器的物理距离。





Q3:

### 1. 态度选择

**强烈反对**将下一代探测器设计成纯粹的“多层球面洋葱皮”结构。

### 2. 反对理由

1. **物理层面**：对撞产生的大快度（大  $\eta$ ）前向粒子会以极小的掠射角斜穿球面硅片。这使得粒子在硅片中的等效穿透厚度极大，产生严重的多次散射，并导致电荷簇展宽过大，位置分辨率急剧恶化。
2. **磁场与重建层面**：探测器处于纵向均匀磁场中。球面设计导致每块硅片的法线与磁场夹角连续变化，硅片内电荷漂移的洛伦兹角处处不同，数据重建极为复杂。
3. **工程实现层面**：现代半导体工艺只能制造平面硅晶圆。用平面拼接三维球面将导致大量重叠死角或缝隙盲区，并且冷却管路的三维折弯极难制造，缺乏工程可行性。

### 3. 更合理的拓扑结构

**推荐结构：倾斜模块布局。**

放弃传统的“垂直端盖”，在中心区域保持平直圆柱，但在前向区域将平面硅模块倾斜一定角度，使其表面法线尽量指向对撞点。

**优势**：这既保留了平面硅片的工程易制造性，又近似了球面的物理优势。极前向粒子能够以接近垂直的角度穿透倾斜的硅模块，显著降低了死物质和库仑散射，提升了高  $\eta$  区间

的径迹重建精度。

