

Q1:位置分辨与动量误差的资源博弈

(a)

$$p_T = 100 \text{ GeV}/c$$

考虑洛伦兹力提供向心力:

$$p_T [\text{GeV}/c] = 0.3 Z B [T] r [m]$$

Sagitta 描述粒子轨迹偏离直线大小,用 s 表示,由下列公式给出, $s \ll r$

$$s = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} = \frac{L^2}{8r} = \frac{0.3 B L^2 c}{8 R_T e}$$

σ_s 与 σ_x 关系:

$$\sigma_s = \sqrt{2/3} \sigma_x$$

相对动量误差由误差传播:

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{\sigma_s}{s} = \sqrt{96} \sigma_x \frac{R_T e}{0.3 B L^2 c} (n = 3)$$

考虑 $n \gg 3$ 时每个测量点 σ_x 相同:

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \sqrt{720/(N+4)} \sigma_x \frac{R_T e}{0.3 B L^2 c} (n \gg 3)$$

其中 $\sigma_x \propto$ 微条 pitch

(b)

由公式可知分辨率 σ_{p_T}/p_T 与三个参数直接相关: 微条 pitch P 、磁场 B 、臂长 L 。

方案一: 减小 pitch 至原来一半 ($P/2$) $\rightarrow \sigma_x$ 减半 \rightarrow 分辨率减半。

方案二: 增强磁场至 $2B$ \rightarrow 弯曲半径减半 $\rightarrow s$ 翻倍 \rightarrow 分辨率减半。

方案三: 增大臂长至 $\sqrt{2} \cdot L$ $\rightarrow L^2$ 翻倍 $\rightarrow s$ 翻倍 \rightarrow 分辨率减半。

(c)

方案一 (减小 pitch) 的代价:

1. 通道数翻倍 \rightarrow ASIC 前端功耗上升 \rightarrow 冷却材料增加 \rightarrow 总质量增大 \rightarrow 多重散射加剧, 反而恶化撞击参数分辨率的 b 项 ($b \propto r_1 \cdot \sqrt{\text{物质质量}}$)。
2. 数据率翻倍 \rightarrow DAQ 带宽压力 \rightarrow 可能需降低触发率或增加死时间。
3. Bump bonding 间距减小 \rightarrow 工艺良率非线性下降 \rightarrow 成本大幅上升。

方案二（增强磁场）的代价：

1. 磁铁体积和重量增加 → 造价指数上升 → 支撑结构需额外加固。
2. 低动量粒子更剧烈弯曲 → 可能未到达外层探测器即被弯出几何接受度 → 低 pT 重建效率下降。
3. 更高磁场下均匀性更难保证 → 径迹拟合需引入复杂的场畸变修正。

方案三（增大臂长 L）的代价：

1. 探测器整体体积扩大 → 传感器面积增加 → 通道数/功耗/冷却的连锁放大。
2. 外层半径增大往往要求第一层半径也同步放大 → 直接恶化 b 项 → σ_{d0} 受损。
3. 对于给定对撞机实验，束流管区域空间有限，大幅增大 L 在物理上可能不可行。

(d) 最不推荐方案三：

方案一（减小 pitch）可通过改进 ASIC 集成度和采用更先进的互连工艺部分缓解。

方案二（增大 B）可通过提高低动量径迹寻找算法的效率进行一定补偿

方案三（增大 L）探测器体积增大后，物质质量增加的连锁反应几乎没有补偿手段。

Q2:β 放射源时间分辨测试的 PCB 设计

(a)原则：

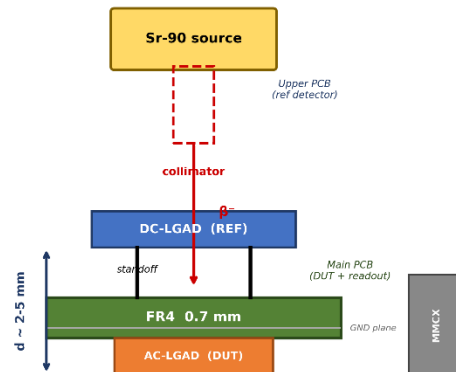
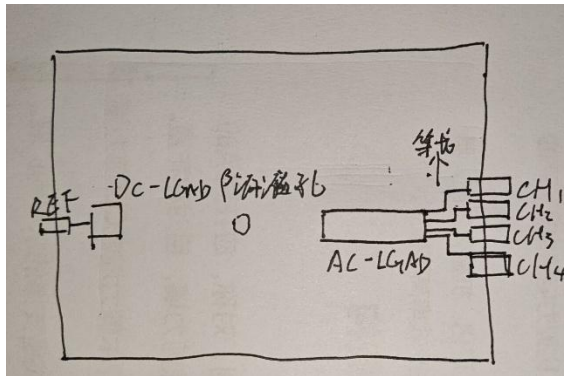
1. 阻抗控制：LGAD 的快速信号上升沿要求传输线阻抗匹配，阻抗失配会使信号沿畸变，破坏定时精度，因而走线宽度和间距应用阻抗计算工具设计
2. 等长布线：四通道的信号走线从传感器焊盘到放大器输入端或连接器必须等长，否则长度差引起的信号时差会被计入测量的时间差，从而使时间分辨率测量出现问题
3. 控制输入寄生电容：传感器输出端到放大器输入之间的 PCB 走线及其寄生电容直接并联在探测器电容上，会降低信号幅度 → 恶化信噪比 → 增加定时 jitter ($\sigma_t \approx \text{trise}/\text{SNR}$)。关键措施：输入端走线尽量短、避免过孔、使用保护环隔离相邻通道间的串扰
4. 接地完整性与噪声隔离：β 源信号微弱，必须使用完整连续的地平面。模拟前端（传感器至放大器）与数字部分（若有板上 ADC）的接地必须物理分隔，仅在 ADC 下方单点汇接。同时注意电源去耦网络（多级电容并联）
5. 机械定位精度：PCB 需设计定位槽或对准标记，确保探测器之间的间距可精确重复。同时考虑 β 源的准直孔，限制粒子入射角度以减小几何时间散布

(b) 推荐选择 MMCX（侧卧型），理由：

- 高度仅约 4mm，对 β 粒子路径遮挡最小，减少非期望散射。

- RF 性能覆盖 DC~6GHz, 满足 LGAD 快速信号带宽。
- 相比 SMA 更轻更矮, 相比 RJ45 在频率响应上有保障。
- 扁平排线 (Flat Ribbon) 虽更矮, 但无阻抗控制且屏蔽困难, 不适合高精度定时。

(c)示意图:



Q3:拓扑结构的选择: 为何不建一个“球”

立场: 反对球状结构, 坚持 **Barrel + Endcap**

(a)物理: Barrel+Endcap 的圆柱-平面几何天然匹配 (r, φ, η) 坐标系, 径迹参数在该坐标下的表达简洁直观, 而球坐标下径迹与探测平面的交角随 η 非均匀变化, 局部坐标到全局坐标的映射是非线性的, 计算极为复杂, 且多层球面层间距与 η 有关, 会导致不同方向测出的动量分辨率不均匀

(b)磁场: 所有大型对撞机探测器均采用螺线管磁场——沿束流方向均匀, 柱体轴线与 B 平行时, 弯曲只和参数 $r\varphi$ 有关, 而在球坐标下, 弯曲与三个参数均有关, 计算复杂度大幅上升

(c)集成: ①硅传感器是平面器件, 可以平铺覆盖圆柱底面, 而球面需要曲面传感器, 难以实现 ②考虑重力时, 两相 CO_2 冷却管路可均匀分布于圆柱底面, 而球面覆盖管道会导致流动不均匀, 不稳定 ③服务管线: 供电、数据光纤、高压偏置等数百条服务线缆的布线和应力释放——在圆柱结构上可平行引导, 在球面上则需三维复杂路由

更合理的结构:

在 Barrel-Endcap 交界区域倾斜安装传感器模块, 减小 η 过渡区的辐射长度间隙。

如图

