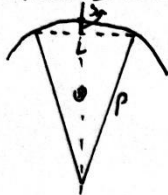


Q1: 位置分辨与动量误差的资源博弈

Q1

(a) 高动量极限



$$q v B = \frac{m v^2}{R}$$

$$p = m v = q B R$$

$$p = 0.3 \times B \times R \times Z$$

$$q = e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$1 \text{ GeV}/c = 5.344 \times 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$\frac{1.602 \times 10^{-19}}{5.344 \times 10^{-19}} \approx 0.3$$

均匀磁场中, $p_T = 0.3 B \cdot \rho \cdot Z$ (横向动量)

小角近似下, $s \approx L^2 / 8\rho$

$$\therefore p_T = 0.3 Z B \cdot L^2 / 8s$$

$$\frac{d p_T}{d s} = -0.3 Z B \cdot \frac{1}{4s^2} \cdot L^2 \quad (\text{默认以 } Z=1, \text{ 简化计算})$$

$$= -\frac{p_T}{s} \quad \therefore \left| \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right| = \frac{\sigma(s)}{s}$$

$\sigma(s)$ 取决于各点位置分辨 σ_x

$\sigma_x \propto \text{pitch}$, 若 s 考虑由三点所决定 $[s = \lambda_2 - (\lambda_1 + \lambda_3)/2]$ 则 $\sigma(s) = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma(x)$

$$\therefore \left| \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right| = \frac{\sigma(s)}{s} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \sigma(x)}{0.3 Z B \cdot \frac{L^2}{8 p_T}} = \frac{6 \sigma(x) \cdot p_T}{0.3 Z B L^2} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}}$$

若径迹测量由 $N(z|0)$ 拟合

$$\left| \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right| = \frac{6 \sigma(x) \cdot p_T}{0.3 Z B L^2} \cdot \sqrt{\frac{720}{N+4}}$$

(b) 方案: ① $\sigma(x)$ 减半, $\therefore \sigma(x) \propto \text{pitch}$ \therefore 可减半径迹率

② $B \rightarrow 2B$

③ $L \rightarrow \sqrt{2} \cdot L$

(c)

处理方案一: 读出通道增多, 前端 ASIC 倍增, 甚至有可能达到 DAQ 带宽极限; 更多的传感器, 更大的功耗 (功能压力、冷却压力), 加剧了多次散射, 恶化效果 (信噪比下降)。

处理方案二: 高 B 场情况下, Lorentz 角急剧增大, 位置分辨率可能会恶化; 需要更严苛的磁屏蔽需求; 成本倍增

处理方案三: 径迹臂增长, 更长的测量杠杆, 意味着全系统放大, ASIC 功耗随面积增大; 粒子的飞行时间会延长, 分辨率会因此受到影响; 兼容性问题, HL-LHC 的相关尺寸参数已经固定 (LHC cavern、CEPC 隧道), 且线圈储能增倍, 淬火保护几乎不可能满足要求, 增加 L, 要么缩小 B 场, 要么重新开挖。

综上, 我认为方案优先级 <改变 B> 优于 <改变 pitch> 优于 <改变 L>

(d)

我最不推荐改变 L, 因为其带来的各项成本过重, 且由于更多的材料在 ECAL 前, 光子转换概率会增大, 电子能量分辨率下降, 与目标背道而驰。若坚持, 则需要采取低 B 场以减轻线圈储能压力; 降低每通道 ASIC 功耗, 稀疏化读出; 更甚者需要推翻整套设计方案, 改变 HL-LHC 的相关尺寸参数。

Q2: β 放射源时间分辨测试的 PCB 设计

(a) 关键原则

1、信号走线遵循最短化（或打线）与阻抗匹配原则（**保证信号完整**）：从传感器打线焊盘到数据接口的走线应尽可能短，并按 50ohm 特征阻抗进行控制。走线仅用 45° / 圆弧拐角，禁止 90° 直角分叉。

影响：LGAD 输出纳秒级快脉冲，高频信号在长导线上会产生传输线效应，引起信号反射和振铃，同时短走线可以减少传输损耗和寄生电感；引线足够短，从传感器到前端 ASIC 的连接仍然应视为高频传输线，阻抗突变会引发信号反射，畸变脉冲上升沿，引入随机时间抖动

2、焊盘遵循最小必要尺寸原则：电极焊板尺寸优化以匹配 150 μm pitch，下方 GND 地层局部挖空隔离，无铺铜覆盖

影响：LGAD 为弱电流输出，焊盘越大，底下铜皮越多，越会增大寄生电容 RC，积攒多余电荷，拉长脉冲前沿，时间刻度被模糊，降低了时间测量精度。

3、传感器紧凑布局：DC 与 AC 中心间距控制紧凑一些

影响；器件间距过大，Sr-9 β 粒子可能无法同时辐射两片探测器，引入不可消除的物理时延

4、高压供电线与信号线分开

影响；高走电线会漏电噪音，这种噪声会增加时间测量随机误差。

(b) 选择 SMA 侧卧型号

× Flat Ribbon Cable&Connector: 没有标准阻抗，且寄生电容 电感极大

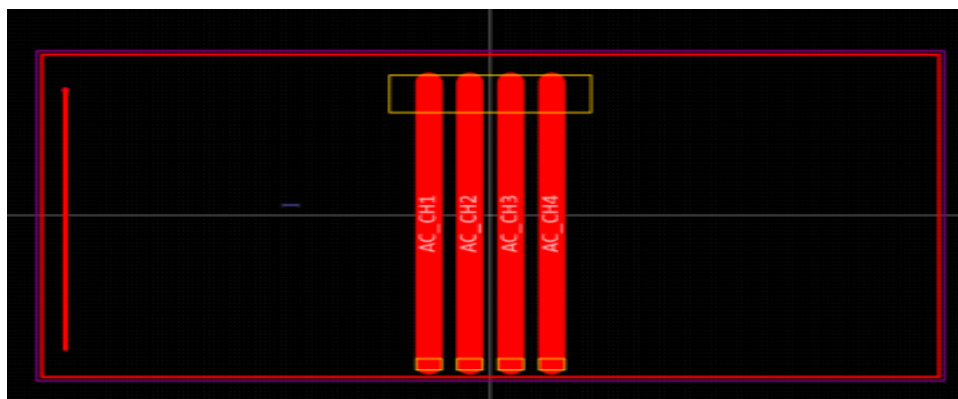
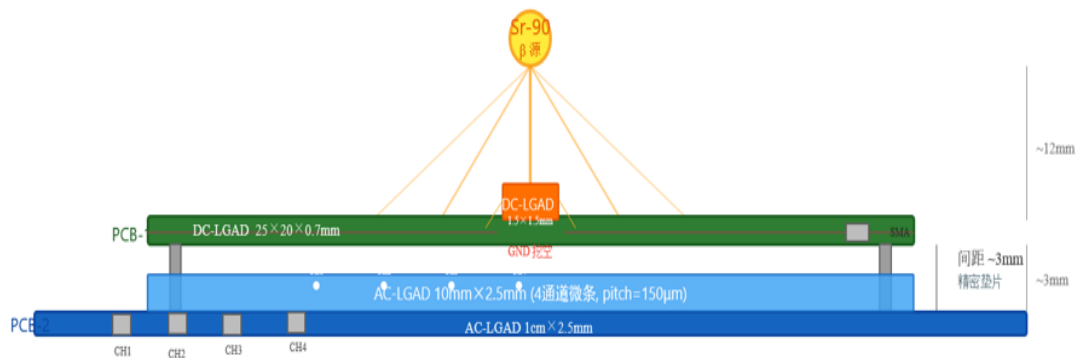
× RJ45: 低频，带宽不满足

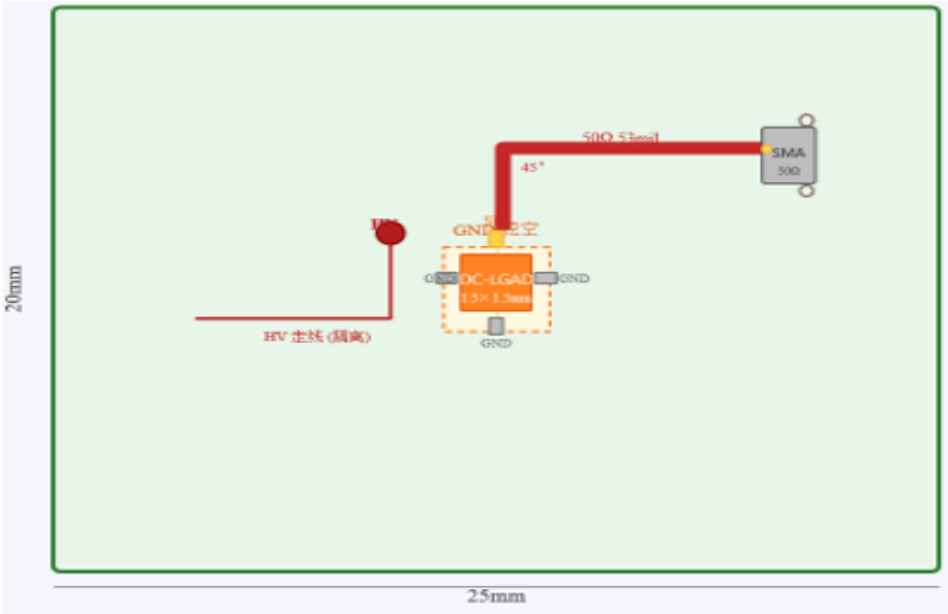
× 竖立：空间占比过大

侧卧 SMA/侧卧 MMCX

都是标准阻抗 50ohm，高频接口，SMA 功率承载更大，拔插寿命更长，标准款 DC~18GHz，精密款可达 26.5GHz，综合考量，我选择侧卧 SMA

(c)





Q3: 拓扑结构的选择: 为何不建一个“球”? (AI 指导下弄的)

反对“多层球面洋葱皮”结构，坚持改进型圆柱 Barrel + Endcap 拓扑。以下从物理、磁场系统集成、整机系统工程集成三个维度展开论述。

维度 1：物理维度

1. 空间分辨率随极角严重不均匀

球面径向半径随极角 θ 连续变化。根据讲义中空间分辨率公式 $\sigma\{r, \phi\} = a \oplus b / (pT \cdot \sin^{\{3/2\}} \theta)$ ，球面不同区域的第 1 层半径 r_1 差异悬殊：赤道区域半径大 \rightarrow 多次散射项 b 暴涨 \rightarrow 分辨率恶化；近束流管两极区域曲率过陡 \rightarrow 像素/微条的几何排布出现畸变 \rightarrow 本征位置分辨下降。结果：全探测器位置分辨极不均匀，动量测量误差随角度剧烈波动，无法为物理分析提供统一量级的径迹精度。

2. 粒子轨迹拟合的几何模型复杂，重建精度下降

磁场中带电粒子轨迹为平面圆弧（螺旋线在 $r-\phi$ 平面的投影），而球面探测器层为曲面——每层命中点不在同一柱面上，轨迹拟合的几何模型不得不引入大量高阶修正项。离线对准（alignment）和几何数据库构建难度激增；球面装配过程中曲面形变带来系统性残差，足以抵消球面结构宣称的本征位置分辨优势。

维度 2：磁场系统集成维度

1. 螺线管磁场与球面几何根本性不匹配

对撞机通用磁体为圆柱形螺线管，产生轴向（ z 方向）均匀磁场 B ，其圆柱对称性与 Barrel 探测器天然适配。若套用球面结构：两极区域远离磁体中心， B 场强度显著衰减，由动量误差公式 $\sigma\{pT\}/pT \propto 1/B$ 可知，两极 pT 测量误差将大幅放大。若试图定制球面磁场——超导磁体设计、线圈绕制、低温制冷成本将提升数倍，工程上不具备可行性。

2. 洛伦兹力分布不均，结构形变无法抑制

球面各区域磁场方向与导体夹角各不相同，支撑结构承受非对称 Lorentz 力，球面骨架各处应力差异巨大；微米级几何形变难以抑制。热膨胀与电磁应力耦合作用下，离线对准修正难度指数上升，无法维持微米级几何稳定性

维度 3：整机系统工程集成维度

1. 模块化制造、装配、维护体系完全失效

现有 Barrel+Endcap 采用成熟的层级化设计：Module \rightarrow Stave/Ring \rightarrow Barrel/Endcap。平面长条模块可标准化批量加工，独立完成电学/热学测试后逐级装配。球面结构下，每一块曲面模块的曲率均不相同 \rightarrow 不存在通用标准化件 \rightarrow 加工模具和测试工装成本极高；损坏模块无法单独替换，局部故障需拆解整层球面，维修停机时间不可承受。

2. 冷却与服务管线布线极度困难

两相 CO_2 微通道冷却管路在直线/平缓圆弧下流动最稳定；球面连续大曲率弯曲会导致冷媒流阻不均、换热效率急剧下降、局部热点无法消除。供电 FPC 柔性线缆及高速数据线沿球面铺设将承受不可逆弯折损伤，线缆寄生电容增大 \rightarrow 噪声上升 \rightarrow 信号完整性劣化。

3. 精密几何量测（Metrology）难度爆炸

数米尺度大型球面，激光扫描和 CMM 坐标测量缺乏统一基准坐标系。重力下垂与装配应力共同造成非对称曲面形变，离线对准算法难以从全局形变中分离出局部模块误差 \rightarrow 无法修正至微米精度。而当前 Barrel+Endcap 的圆柱/平面模块可逐块独立测量，对准算法成熟且经实验验证。

推荐拓扑：优化型圆柱 Barrel + 锥形 Endcap

球面洋葱皮方案在物理、磁场、工程集成三个维度均存在不可逾越的障碍。推荐的替代拓扑为：

- 桶部：保留多层同心圆柱面结构（Pixel \rightarrow Strip \rightarrow 气体径迹探测器），覆盖 $|\eta| \lesssim 1.5$ ；
- 端盖：将传统垂直平板端盖改为锥形（Conical）端盖，以减小桶部-端盖过渡区的 η 覆

盖间隙并优化材料预算分布；

- 过渡区：桶部最外层与锥形端盖最内层设置重叠区，确保径迹无缝衔接。

此方案保留了圆柱拓扑的全部工程优势（模块化量产、有序布线、成熟对准、可维护），同时以锥形端盖取代垂直平板端盖，进一步优化了桶部-端盖过渡区性能——是当前阶段唯一兼具物理性能与工程可行性的选择。