

Q1

Q1 理解: 通过计算得出在高动量极限条件下相对动量误差与 pitch, 磁场强度 B, 和有效弦长之间的关系, 考虑如何减少相对误差, 并指出不同方案的代价

高亮度大型强子对撞机 HL-LHC:

核心特点是亮度大幅提升(峰值亮度达到原 LHC 的 $5^{\sim}7$ 倍), 意味着单位时间、单位面积内发生的质子对撞事例数会急剧增加, 每年能积累的数据量是原 LHC 的十倍以上。

硅微条桶部径迹探测器:

整个径迹探测器是同轴圆筒形, 套在束流管外面, 对撞点在圆筒的中心。

硅微条:

这是探测器的灵敏介质, 本质是高纯度硅半导体做成的薄条形电极阵列: 带电粒子穿过硅片时, 会电离产生电子 - 空穴对, 在电场作用下被两侧的微条电极收集, 产生电信号;

哪个微条测到了信号, 就说明粒子从这个微条的位置穿过, 由此得到一个高精度的空间坐标点;

pitch(条距) 就是相邻两根微条之间的距离, 是决定位置测量精度的核心参数:

pitch 越小, 能分辨的位置越精细, 位置误差 σ_x 就越小。

相对动量测量误差 σ_{p_T} / p_T

(1) 先理解 p_T

p_T 叫横动量, 是粒子动量在垂直于束流方向上的分量。因为质子对撞是沿束流方向的, 碰撞的硬过程特征都体现在垂直方向上(纵向方向: 初态动量完全未知, 信息混杂横向方向: 初态动量为零, 严格守恒。

因此我们可以精确测量每个末态粒子的横动量大小和方向, 通过矢量相加是否平衡, 判断这些粒子是不是来自同一个硬碰撞过程; 还可以通过末态粒子的横动量组合, 计算出硬过程的不变质量、能量转移等核心物理量 —— 这些量不随纵向的整体平移改变, 而是硬过程本身的内禀属性。) 所以横动量是粒子物理实验里最核心的物理量之一, 题目里的动量误差讨论也都围绕 p_T 展开。

(2) 动量测量的基本原理

桶部探测器处在均匀轴向磁场中, 带电粒子受洛伦兹力会在垂直于磁场的平面内做圆周运动, 满足: $p_T = 0.3 \cdot B \cdot \rho$ 其中 B 是磁场强度, ρ 是轨迹的偏转半径。磁场越强、轨迹弯得越厉害(ρ 越小), 粒子动量就越大。

(3) 绝对误差与相对误差

绝对误差 σ_{p_T} : 测量得到的动量值和真实动量之间的不确定度, 单位和动量一致(GeV/c)。

相对误差 σ_{p_T} / p_T : 绝对误差除以动量本身, 是一个无量纲的比值, 代表“测量的精准程度”。比如测 100 GeV/c 的粒子, 绝对误差是 2 GeV/c, 相对误差就是 2%。

(4) 高动量极限的特点

粒子动量越高，轨迹越接近直线，偏转半径 ρ 越大，轨迹的“弯曲程度”（矢高 s ）就越小。这时候测量弯曲的相对误差会变大，就像用尺子量一根几乎直的铁丝的弯曲度，越直越难测准。所以高动量区间的动量分辨率是径迹探测器设计的核心难点，题目要求“在 $p_T=100 \text{ GeV}/c$ 处相对误差缩小一半”，就是典型的高动量性能提升需求。

a:

带电粒子在垂直于均匀磁场 B 的平面内受洛伦兹力做圆周运动，满足向心力关系：

$$p_T = 0.3 \cdot B \cdot \rho$$

矢高的几何关系 轨迹为一段圆弧，定义弦长为 L ，弧中点相对弦的偏移量为矢高 s 。由几何勾股定理：

$$\rho^2 = \left(\frac{L}{2}\right)^2 + (\rho - s)^2$$
 高动量极限下 $\rho \gg s$ ， s^2 项可忽略，

$$s \approx \frac{L^2}{8\rho}$$

整理得：

$$s = \frac{0.3BL^2}{8p_T}$$
 代入得，最后经过计算得出关系：

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{\text{pitch} \cdot p_T}{B \cdot L^2}$$

b: 三个方案:

方案 1: 减小硅微条的 pitch

改变参数: 将硅探测器的微条间距 (strip pitch) 缩小为原设计的 1/2。

方案 2: 提升探测器螺线管的磁场强度 B

改变参数: 将中心螺线管的磁场强度提升为原设计的 2 倍。

方案 3: 增大径迹探测器的有效测量弦长 L

改变参数: 扩大探测器径向覆盖范围 (外半径外扩或内半径内收)，使有效弦长 L 增大为原设计的根号 2 倍 (L^2 变为原设计的根号 2 倍)。

c:

方案 1: 减小 pitch

(1) 读出通道与前端电子学数量剧增: pitch 减半后，相同探测器面积下的微条数量翻倍，对应 ASIC 读出芯片、数据传输链路、供电线路的数量同步翻倍，探测器造价、数据带宽、总功耗大幅上升。

(2) 探测器噪声升高、信噪比下降: 更窄的微条会增大条间电容与体电容，信号输出幅度降低，等效噪声电荷 (ENC) 升高，可能导致位置分辨的提升幅度达

不到理论预期,甚至需要低噪声前置放大器补偿,进一步增加功耗与设计复杂度。

(3)加工与装配难度陡增:亚微米级的细 pitch 需要更高精度的硅微加工工艺,传感器良率下降、单片成本显著提高;同时探测器模块的对准、键合装配精度要求同步提升, **组装周期与成本增加**。

方案 2: 提升磁场强度

(1) 超导磁体技术呈指数级复杂化:大孔径探测器螺线管的场强提升受超导材料极限限制,场强加倍需更换为 Nb₃Sn 等高临界场超导材料,该材料脆性大、绕组工艺复杂,失超保护、机械应力控制难度呈非线性增长,规模化制造的技术成熟度极低。

(2) 机械结构与冷却系统成本激增:磁体洛伦兹力与 B² 成正比,场强加倍使磁体绕组与支撑结构承受的应力变为 4 倍,需要高强度支撑材料与复杂的预应力设计;同时超导磁体的制冷功率、低温系统规模大幅提升, **运维成本剧增**。

(3) 全探测器本底与干扰恶化:强磁场会显著偏转探测器内的低能次级粒子、 δ 电子, **升高辐射本底与假径迹率**;同时强磁场会对前端电子学、量能器等其他子探测器产生磁干扰,需要全系统的磁屏蔽与抗磁 redesign。

方案 3: 增大有效弦长 L

(1) 探测器物质总量显著增加:径向范围扩大使硅传感器总面积、支撑结构、冷却管道的总物质量大幅上升,带电粒子的多重库仑散射效应增强,会**恶化低动量区间的动量分辨率**;同时更多的核相互作用会产生大量次级粒子, **提升高亮度下的径迹重建难度**。

(2) 空间与造价约束极强:更大的径迹探测器需要更大孔径的超导螺线管,或压缩外部量能器、 μ 子探测器的空间,打破原有探测器的整体布局平衡;探测器整体体积、重量的增长也会**大幅提升建造、安装与运维成本**。

(3) 对准与形变控制难度提升:大尺寸探测器在辐射、温度变化下的机械形变更显著,径迹点的全局对准精度难以维持;同时长距离信号传输线的信号衰减、串扰问题加剧, **对读出电子学的布局与设计提出更高要求**。

d: 最不推荐方案与补偿分析

最不推荐的方案:提升探测器磁场强度(方案 2)

核心理由

在 HL-LHC/CEPC 这类大科学装置中,探测器螺线管属于核心基础设施,场强加倍的代价是全局性、硬约束性的,远高于另外两个方案:

技术可行性存在硬瓶颈:当前大孔径探测器螺线管(如 CMS 的 4T 磁体)已接近工程应用极限,场强翻倍需要的大尺寸 Nb₃Sn 超导绕组、超大应力支撑、失超保护等技术尚未成熟,研发周期与风险不可控,无法匹配实验的建设周期。

系统连锁代价不可承受：磁场升级不是单一部件更换，而是要求磁体、机械支撑、冷却、辐射屏蔽、各子探测器电子学的全链条重新设计，改造成本与工作量远高于探测器本身的升级，投入产出比极低。

物理收益边际递减：高动量下动量分辨率的提升可通过探测器布局优化、径迹拟合算法改进部分弥补，而强磁场带来的**辐射本底升高、低能粒子偏转反而会降低整体物理性能。**

坚持该方案的系统补偿措施

ASIC 架构：采用全数字前端 ASIC，在传感器端直接完成模数转换，减少模拟长线路在强磁场下的感应噪声；芯片增加辐射加固与磁兼容设计，提升强辐射、强磁场复合环境下的工作稳定性。

冷却系统：采用超流氦深度制冷方案提升磁体冷却效率，绕组设计分段式冷却通道与温度监测网络，降低失超风险；探测器前端采用嵌入式微通道液冷，抵消强磁场下的对流散热效率下降。

材料选择：磁体绕组采用高性能 Nb₃Sn 超导带材，搭配碳纤维复合材料作为主支撑结构，在承受高洛伦兹力的同时尽量降低辐射长度；传感器选用 n-in-n 型高抗辐照硅传感器，补偿升高的辐射本底。

服务线路：信号与供电线路采用扭绞双线 + 坡莫合金屏蔽层设计，抑制磁场感应噪声；线路沿磁力线方向排布，最小化电磁感应效应。

系统不可行的判定

若无法突破大孔径高场超导磁体的材料与工程极限（如绕组机械应力失控、失超保护失效），且强磁场导致的次级粒子本底无法通过探测器设计完全抵消，则该方案系统上不可行。本质原因是：磁场提升的瓶颈来自基础材料与大科学工程的物理极限，其带来的负面影响是全局性的，无法通过局部子系统的改进完全补偿，**强行落地会导致整体造价、技术风险与运维成本超出实验的可承受范围**

Q2

(a)

原则 1：全路径 50 Ω 可控阻抗匹配

为什么是 50 Ω？

50 Ω 是高速脉冲测量设备、同轴连接器、粒子探测器读出系统的统一行业标准；对于亚纳秒级 LGAD 定时脉冲，**只有全链路严格 50 Ω 阻抗匹配，才能消除信号反射、前沿畸变与额外时间抖动，准确测量器件极限时间分辨率。**

核心目标

消除高速脉冲在传输路径上的反射与振铃，完整保留探测器输出的原始快上升沿，避免因波形畸变引入额外时间抖动。

物理原理与对时间分辨的影响

当电脉冲的上升沿足够快时，走线不能再视为“零时延的导线”，而必须按传输线处理。判断标准是：当走线长度 \geq 上升沿对应电长度的 1/10 时，传输线效应不可忽略。

- LGAD 输出脉冲上升沿典型值约 200ps, 在 FR4 基板中信号传播速度约为光速的 60% (~18cm/ns), 对应电长度仅 3.6cm; 即使 1cm 的走线也已进入传输线效应区间。
- 若走线阻抗不连续、与后端连接器 / 示波器 / 放大器的 50Ω 标准阻抗不匹配, 脉冲到达阻抗突变点时会发生反射; 反射波返回入射端再次反射, 最终在脉冲前沿形成振铃、台阶、过冲等畸变。

对时间分辨的直接影响分为两类:

1. 时间游动 (Time Walk): 脉冲前沿畸变后, 触发阈值对应的时刻会随脉冲幅度变化而偏移 —— 幅度大的脉冲更早越过阈值, 幅度小的更晚。这种幅度相关的定时偏移会显著展宽时间差分布, 直接拉低测得的时间分辨率。
2. 随机抖动 (Jitter): 反射带来的波形不稳定会叠加随机噪声, 让触发时刻出现无规则波动, 额外引入数 ps 至数十 ps 的时间抖动, 完全掩盖探测器的本征极限性能。

具体设计要求

- 0.7mm 厚 FR4 基板 (介电常数 $\epsilon_r \approx 4.2$) 下, 表层微带线的 50Ω 线宽约为 1.2~1.3mm; 若走内层带状线, 线宽约 0.6~0.7mm, 需通过阻抗计算工具精准校核。
- 走线全程保持线宽一致, 禁止直角拐弯 (采用 45° 斜角或圆弧过渡), 避免线宽突变导致阻抗不连续。
- 焊盘、过孔处需做阻抗补偿 (例如焊盘下方挖空参考地), 消除局部宽铜皮带来的阻抗下降。
- 从传感器焊盘 → PCB 走线 → MMCX 连接器 → 外接同轴电缆, 全链路阻抗统一为 50Ω。

原则 2: 信号走线最短化与通道间严格等长

核心目标

最小化走线寄生参数对脉冲前沿的展宽效应, 消除通道间固定与时变时延差, 保证时间差测量的准确性。

物理原理与对时间分辨的影响

(1) 走线长度对上升沿的展宽

PCB 走线存在分布电阻 R、分布电感 L、分布电容 C, 等效为一阶低通滤波器, 会对快脉冲产生积分效应, 拖慢脉冲上升沿。

- 走线越长, 总寄生电感、电容越大, 输出脉冲的上升时间越长。
- 时间分辨的基本规律为: $\sigma_t \propto \text{SNR} t_r$ (上升时间越长、信噪比越低, 定时误差越大)。上升沿被拖慢后, 即使没有额外噪声, 定时精度也会天然下降。

(2) 通道不等长的时延差

时间分辨测试采用双探测器符合法: 以 DC-LGAD 的输出作为时间参考起点, AC-LGAD 的输出作为停止点, 两者时间差分布的半高宽即为联合时间分辨。

- 若参考通道与待测通道走线长度不一致, 会引入固定时延偏移 (Skew), 虽可通过校准抵消, 但长度差异伴随的寄生参数差异会导致两通道的上升沿变形程度不同, 引入无法校准的系统误差。
- 4 条 AC 微条通道间不等长, 会导致通道间定时一致性差, 无法准确对比不同微条的时间性能, 也会给多通道联合测量带来偏差。

(3) 键合丝的额外影响

传感器电极到 PCB 焊盘通过金丝键合连接，键合丝寄生电感约 $1\text{nH}/\text{mm}$ ；过长的键合丝会与探测器结电容形成 LC 谐振回路，在脉冲前沿产生振荡，严重畸变波形。

具体设计要求

- 传感器焊盘尽可能靠近芯片放置，键合丝长度控制在 $500\ \mu\text{m}$ 以内，越低越好。
- 所有高速信号走线总长度控制在 15mm 以内，尽可能贴近连接器摆放。
- DC 参考通道与 4 路 AC 通道的信号线物理长度严格相等，长度差控制在 0.1mm 以内，通过蛇形绕线补偿长度差（绕线需保证阻抗连续）。
- 长度补偿仅在走线的非敏感段进行，禁止在靠近传感器的前端绕线。

原则 3：完整连续地平面与分区隔离

核心目标

为高速信号提供最短回流路径，抑制地弹噪声与通道间串扰，降低噪声对定时精度的恶化。

物理原理与对时间分辨的影响

高速信号的回流电流并非走“最近的地引脚”，而是紧贴信号走线正下方的地平面流动——这是阻抗最低、回路面积最小的路径。

- 若地平面存在分割、开槽、孔洞，回流电流必须绕开缺口，导致回路面积大幅增加，回路电感急剧上升。一方面会进一步拖慢脉冲上升沿，另一方面大回路会更容易拾取空间电磁噪声，也会让不同通道的回流互相干扰（串扰）。
- 地弹噪声：当多个通道同时有信号电流注入地平面时，地平面的寄生阻抗会导致局部地电位波动，相当于给所有信号叠加了共模噪声。噪声叠加在脉冲前沿上，会让触发时刻随机跳动，直接引入时间抖动。

量化影响： 1mV 的前沿噪声，对应 200ps 上升沿、 100mV 幅度的脉冲，会引入约 2ps 的定时抖动；如果地噪声达到十几 mV ，额外抖动就会超过 20ps ，完全主导测量结果。

具体设计要求

- PCB 底层铺设完整的全铜 GND 平面，除必要的过孔、安装孔外，禁止在地平面上开长槽、大面积挖空。
- 采用“分区不分割”策略：高压偏置区、电源区、高速信号区、接口区用地沟（细铜条接地）分隔，各区地平面仍保持连通，避免出现地电位差。
- 每路传感器信号焊盘旁，就近放置 1 颗 0402 封装的高频去耦电容（如 100nF NPO 电容），缩短电源 / 偏置的回流路径。
- 所有高速信号线下方必须有连续的地平面，禁止跨沟、跨分割走线。

原则 4：入射窗口无遮挡与传感器共面近距排布

核心目标

保证 β 粒子以最小能量损失到达探测器灵敏区，同时控制粒子飞行时间的离散性，避免几何因素展宽时间分辨。

物理原理与对时间分辨的影响

（1）入射窗口的能量损失

Sr-90 β 源的最大 β 能量为 2.28MeV ，属于中低能 β 粒子，在物质中射程很短： 1mm 厚的 FR4 就能完全阻挡大部分 β 粒子，即使几十微米的铜层也会造成显著的能量损失。

- 若 PCB 在传感器上方保留铜层、厚阻焊， β 粒子穿过时会损失大量能量，导致探测器输出脉冲幅度下降、信噪比降低。
- 信噪比下降会直接导致定时误差增大；同时能量损失的随机性（朗道分布）会让脉冲幅度离散性变大，加剧时间游动效应，严重展宽测得的时间分辨。

（2）传感器间距的飞行时间展宽

符合测量的前提是同一个 β 粒子同时触发两个探测器。两个传感器间距越大，粒子从一个探测器飞到另一个探测器的时间越长；且由于粒子入射角度有发散，飞行时间会有离散，形成“几何展宽”。

- 例如间距 10mm 时， β 粒子（近光速）的平均飞行时间约 33ps；若入射角度有 $\pm 10^\circ$ 的分散，飞行时间差的展宽可达数 ps，直接叠加在时间差分布中，让测得的结果大于探测器真实本征分辨。

（3）机械形变的影响

0.7mm 的薄 PCB 刚性不足，若支撑不当易发生翘曲形变，会导致键合丝张力变化、传感器倾斜；一方面改变寄生参数引入时延漂移，另一方面导致粒子入射角度变化，带来幅度离散。

具体要求

- 在两个传感器的正上方区域做阻焊开窗 + 铜层移除：表层铜完全刻掉，仅保留极薄的阻焊层（或完全开窗露基材），确保 β 粒子几乎无能量损失入射到传感器。
- DC 参考 LGAD 与 AC 待测 LGAD 尽可能贴近排布，中心间距控制在 2~3mm，在保证焊盘布局空间的前提下越小越好，压制飞行时间展宽。
- PCB 四周设计加厚支撑边或安装孔，保证测试时板件平整，避免翘曲；两个传感器焊盘严格共面，键合丝拱高保持一致。

原则 5：高压偏置与信号的严格隔离

核心目标

阻断高压偏置线上的噪声向信号通路的耦合，避免增益波动与前沿噪声恶化时间分辨。

物理原理与对时间分辨的影响

LGAD 工作在雪崩增益模式，需要施加几十至几百伏的反向偏置高压；高压电源本身存在纹波，外界电磁干扰也容易耦合到高压线上。

- 高压走线与信号走线之间存在寄生电容，高压上的高频噪声会通过容性耦合直接注入到信号通路，叠加在脉冲前沿上，引入随机定时抖动。
- 偏置电压的缓慢波动会导致 LGAD 的雪崩增益发生变化，输出脉冲幅度随之起伏，进一步加剧幅度相关的时间游动，让时间差分布变宽。
- 若高压走线与信号线距离过近，串扰系数可达百分之几，几十伏的高压纹波会耦合出数百 mV 的信号噪声，完全淹没探测器的真实快信号。

具体要求

- 遵循 3W 隔离原则：高压走线与高速信号线的中心间距 ≥ 3 倍走线宽度，可将串扰幅度抑制到 10% 以下。
- 高压走线与信号线之间铺设接地屏蔽铜带（两端可靠接地），进一步切断容性耦合路径。
- 分层布局：传感器信号走 PCB 顶层，高压偏置走线走 PCB 底层，中间由完整地平面完全隔离，最大程度降低层间耦合。

- 高压输入端口增加两级 RC 低通滤波（如 $10M\Omega$ 电阻 + $100nF$ 高压陶瓷电容），滤除高压线上的高频噪声；在传感器焊盘旁就近接入滤波网络，避免噪声沿走线传播。

(b)

一、Flat Ribbon Cable 扁平排线

缺陷

1. 无阻抗匹配：LGAD 输出 $200ps$ 快脉冲，排线导线阻抗浮动，脉冲全程持续反射、振铃，前沿严重变形，直接引入几十 ps 量级时间游动；
2. 通道强串扰：平行导线近距离排布，通道间容性、感性串扰极强，4 路 AC-LGAD 信号互相干扰，定时阈值随机偏移；
3. 无屏蔽抗干扰：外界电磁噪声、偏置高压噪声极易耦合进弱传感信号，信噪比大幅下跌，完全无法做 ps 级时间分辨测量。

二、RJ45 Ethernet 网口

缺陷

1. 阻抗体系不兼容：系统全链路为单端 50Ω 射频体系，网口 100Ω 差分阻抗无法匹配单端 LGAD 信号，阻抗不连续带来剧烈反射；
2. 只能传数字，不能传原始模拟脉冲：网口内部有变压器、信号整形芯片，会直接削除 LGAD 微弱雪崩脉冲，无法保留原始上升沿；
3. 带宽与信号类型错配：时间分辨需要传输连续模拟波形，RJ45 仅传输离散数字数据包，无法实时采集脉冲前沿信息。

三、SMA 同轴连接器（侧卧型 / 竖立型）

缺陷

1. 机械高度过高：竖立型 $7.5mm$ 金属接头会突出 PCB 表面，直接遮挡传感器上方 $Sr-90$ β 放射源入射窗口； β 粒子穿透能力弱，金属壳体阻挡大部分 β 粒子，符合事例计数暴跌，且粒子能量损失带来脉冲幅度离散，恶化时间分辨；侧卧型 $4mm$ 仍有明显高度遮挡风险；
2. 寄生参数偏大：相比 MMCX，SMA 中心导体更长，寄生电感、电容更高，会额外引入 $\sim 3\sim 5ps$ 时间抖动，会干扰 LGAD 几十 ps 量级的本征时间分辨测量；
占用空间大：单路 SMA 底座宽度大，AC-LGAD 器件总宽度仅 $2.5mm$ ，4 通道 + 1 路参考共 5 路信号无法在窄侧边紧凑排布，会迫使 PCB 整体加宽，传感器间距拉大，引入粒子飞行时间几何展宽。

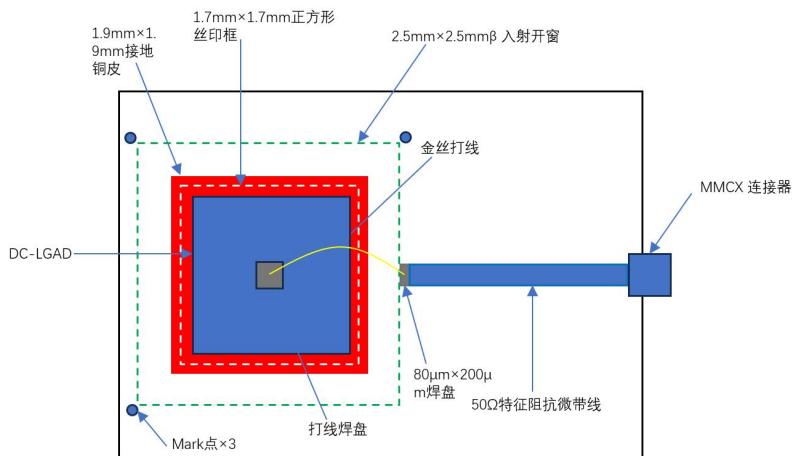
四、MMCX 同轴连接器

优势

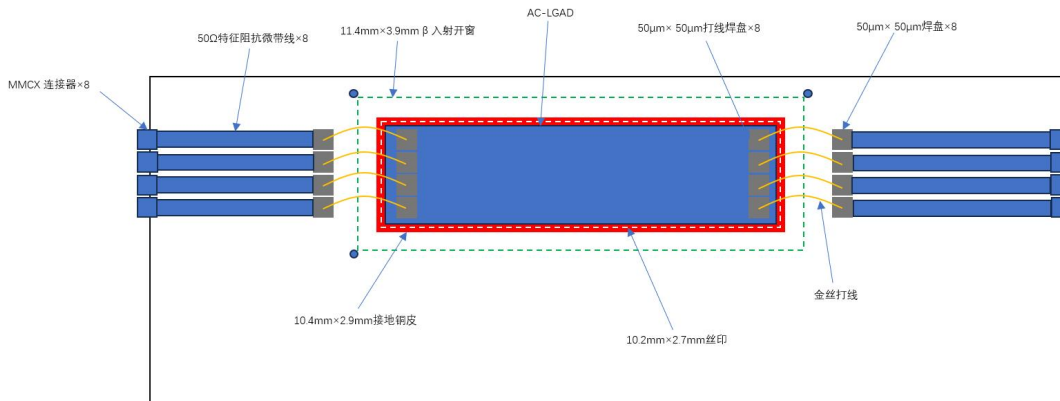
1. 标准 $50\ \Omega$ 射频同轴体系 和 PCB $50\ \Omega$ 微带线、外接同轴电缆、示波器输入阻抗完全匹配，整条信号链路无阻抗断点，彻底消除脉冲反射、前沿振铃，完整保留 LGAD 快上升沿，保证定时精度不受接口劣化。
2. 超低 1.5mm 贴装高度，无放射源遮挡 接头几乎贴平 PCB 板面，不会在 DC/AC-LGAD 传感器上方形成金属遮挡，Sr-90 β 粒子可以垂直无遮挡入射探测器，避免 β 能量损失、幅度离散带来的时间游动。
3. 微型化，适配窄幅传感器布局 AC-LGAD 器件总宽度仅 2.5mm，5 路信号（4 待测 + 1 参考）可密集排布在器件侧边，无需拉大传感器间距，DC 与 AC-LGAD 可紧贴放置（间距 2~3mm），最小化 β 粒子跨探测器飞行时间的几何展宽。
4. 极低寄生参数，额外抖动 $< 1\text{ps}$ 中心插针长度远短于 SMA，寄生电感、电容极小，接口自身引入的时间抖动远小于 LGAD 本征时间分辨，不会掩盖器件真实物理性能。单通道独立全屏蔽，通道隔离度高 每一路 MMCX 都是独立同轴屏蔽结构，通道之间金属外壳隔离，彻底消除 4 路 AC 微条通道间的串扰，各路脉冲互不干扰，保证多通道时间测量一致性。

C:

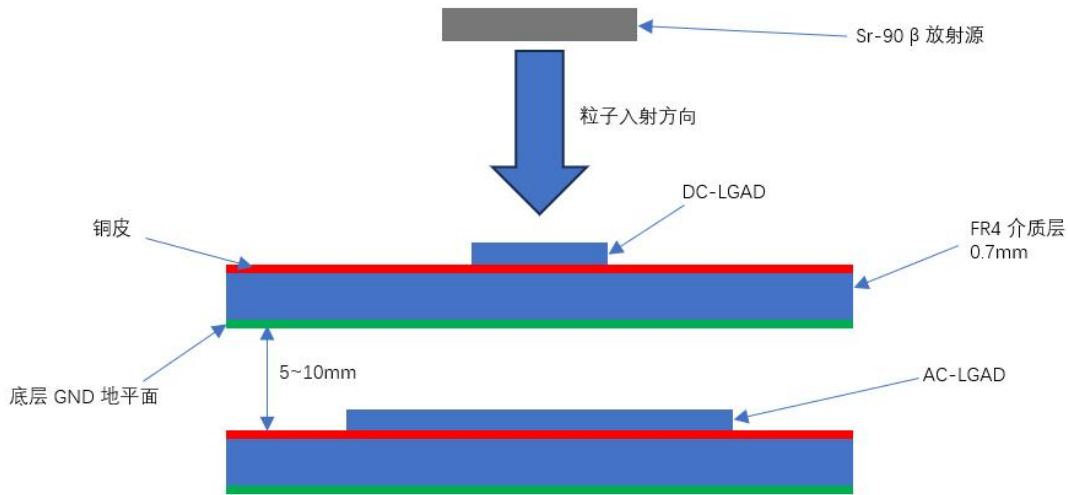
DC-LGAD 俯视图



AC-LGAD 俯视图



剖面图



Q3

反对“多层球面洋葱皮”拓扑方案

一、物理维度：

1. 径迹测量精度大幅劣化

粒子动量测量依赖粒子在垂直于轴向的偏转

同轴圆柱结构：粒子近似垂直入射各层径迹探测器，位置分辨率最高，径迹曲率测量均匀且精准；

球面结构：不同极角的粒子以不同倾斜角度入射探测器层，斜入射会导致电荷在多个探测单元间扩散，位置分辨率显著下降

2. 前向覆盖与束流集成存在先天缺陷

桶 + 端盖结构：天然预留束流管道通道，端盖可无缝延伸前向快速覆盖，前向探测器、辐射屏蔽易于集成；

球面结构：必须在前后极点处为束流管开孔，不仅破坏了 4π 覆盖的完整性，还会导致极点附近探测器模块异形化，前向区的探测盲区远大于桶 + 端盖结构。

二、磁场维度：

1. 磁场形态与探测器拓扑失配

下一代强子对撞机的高场磁体无一例外采用超导螺线管，磁场方向沿束流 z 轴，均匀场区为圆柱形空间。

桶 + 端盖探测器完全嵌套在螺线管的均匀场区内部，探测器层与磁场方向适配，粒子偏转平面与桶部探测器垂直，**动量测量精度最高；**

球面探测器若搭配螺线管磁体，球面的前后区域会处于磁场边缘的非均匀区，磁场方向与探测器法线夹角变化剧烈，动量测量的系统误差极大；若强行设计球形磁体，目前工程上完全无法实现大口径、高场强的超导球形线圈，线圈绕制、洛伦兹力支撑、低温制冷均无可行方案。

2. 空间利用率与成本失衡

螺线管磁体的孔径是探测器最宝贵的空间资源，孔径每增大一圈，超导线圈的价、制冷功耗都呈指数级上升。

桶 + 端盖结构可以最大化利用螺线管的圆柱形孔径，几乎无无效空间；

球面结构与圆柱形磁体之间会存在大量楔形无效空间，为了容纳相同探测层数，必须大幅增大磁体孔径，带来完全不成比例的成本与工程难度提升。

三、系统集成维度

1. 探测器模块无法标准化，成本失控

桶 + 端盖结构：桶部探测器模块为标准化矩形 / 长条形单元，端盖为扇形单元，均可批量生产，一致性好，造价低，后期更换、升级维护便捷；

球面结构：每一层、每一个位置的探测器模块都对应不同的曲率与尺寸，属于完全定制化的异形模块，无法批量生产，制造成本、装配工时会提升一个数量级以上，且全生命周期的维护升级几乎不可行。

2. 装配对准难度无法接受

径迹探测器的位置精度直接决定物理测量精度，要求微米级的对准误差。

同轴圆柱结构：可沿 z 轴逐层套筒式装配，配合光学对准系统，多层同心度与位置精度易于保障，工艺成熟；

球面结构：三维曲面装配，多层球面的同心度、每个模块的空间姿态都需要三维对准，装配难度、对准误差都远高于圆柱结构，最终会直接劣化物理性能。

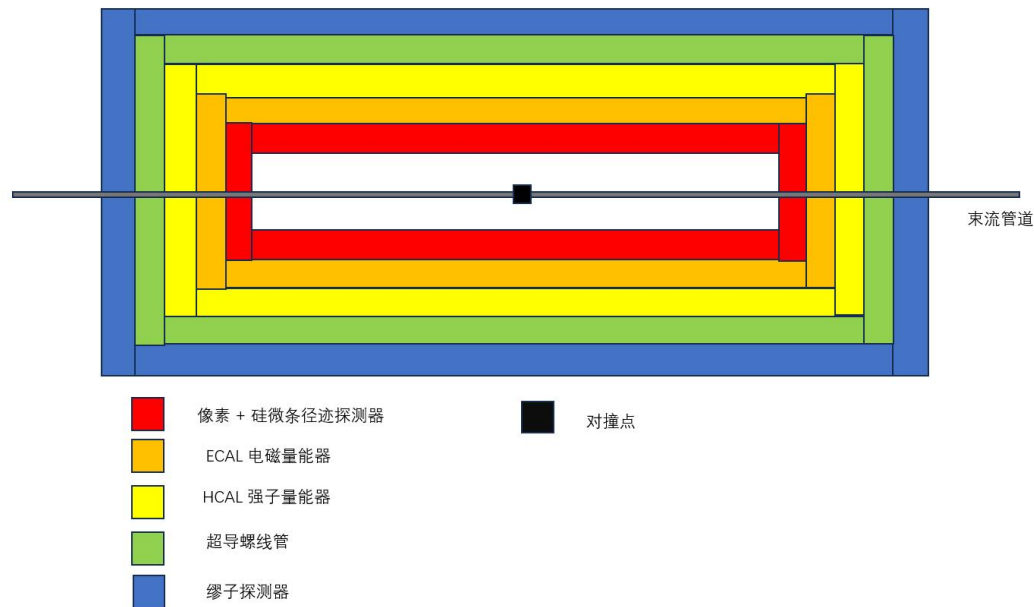
3. 服务系统集成困难

探测器的供电、数据读出、冷却管路、辐射屏蔽等服务系统需要均匀覆盖全探测器。

桶 + 端盖结构：可沿圆周、轴向规整布线布管，**热管理均匀**，服务通道标准化；
球面结构：服务管线需沿曲面排布，路径复杂，前后极点附近管线集成困难，热分布不均匀，**容易出现局部过热、读出电子学噪声升高**等问题。

我认为保持现有圆柱形桶部 + 垂直端盖结构更合理

大概剖面形状：



优点在与球形探测器的对比中已经写了