

Q1

一.

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，推导相对动量误差的简化表达式

考虑电荷为 q 的粒子在均匀磁场中运动，磁感应强度 B ，横向动量 p_T 满足：

$$p_T = qBR$$

在高能物理实验实用单位制中，上式可写为：

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

定义轨迹曲率

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{qB}{p_T}$$

高动量极限下偏转半径 $R \gg L$ (L 为探测器有效探测长度)，圆弧可近似为抛物线，取弦方向为 x 轴，横向偏移为 $s(x)$ ，抛物线形式为：

$$s(x) = \frac{\kappa}{2} x^2$$

在弦中点 $x=L/2$ 处，最大横向矢高为：

$$s_{max} = \frac{L^2}{8R} = \frac{\kappa L^2}{8}$$

曲率可通过矢高测量得到

$$\kappa = \frac{8 s_{max}}{L^2}$$

设硅微条探测器横向位置测量误差为 σ_x ，与微条间距 p (pitch) 有

$$\sigma_x \propto p$$

曲率的测量误差与位置测量误差满足误差传递关系

$$\sigma_\kappa \propto \frac{\sigma_x}{L^2}$$

对 $p_T = \frac{qB}{\kappa}$ 取微分，得到动量误差与曲率误差的传递关系：

$$\left| \frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \right| = \left| \frac{\sigma_\kappa}{\kappa} \right|$$

将 $\kappa = \frac{qB}{p_T}$ 与 $\sigma_x \propto p$ ， $\sigma_\kappa \propto \frac{\sigma_x}{L^2}$ 代入，最终得高动量极限下相对动量误差的简化表达式：

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

二.

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。

在相对动量误差简化表达式中，相对动量误差由 p_T ， p ， B ， L 四个两决定，其中 p_T 为入射粒子横动量，如要减小误差，自然的有三种方案：减小 p (pitch)，增加 B ，增加 L 。

方案一：将硅微条的间距 p 缩小为原来的一半。

方案二：将径迹区的磁感应强度 B 提升为原来的二倍。

方案三：将探测器的有效探测长度扩大为原来的 $\sqrt{2}$ 倍。

三. 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。

方案一：1.成倍增加探测器读出通道数，功耗上升，散热与引线材料增加

2.电子学设计难度增加，对制造工艺要求变高

方案二：1.需要更高场的超导磁体系统，发热变多，造价，运行成本上升

2. 磁体系统重量上升，对支撑结构要求提升，损毁风险提升

方案三：1.径迹探测器体积膨胀，对整体探测器尺寸造成影响

2.传感器，支撑结构，电子学元件等用量增加，造价大幅上升

四. 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。

方案二：增加磁感应强度到原来的二倍

CEPC 使用大口径超导螺线管磁体，本身就体积庞大，成本高，通过增大磁体性能来提升探测器性能本身类似“力大砖飞”的方法，磁场加倍后的对支撑结构的要求大幅提升，一旦发生失超，对周围设施造成的损失将导致严重后果，且本身对误差减小的效果并不显著，性价比不高。

磁场加倍后，还会导致低动量的粒子偏转半径大幅减小，无法完整穿过全部探测层，直接损失对低动量区间的探测能力。

Q2

一.

关键原则

原则一：阻抗受控传输线与最短信号路径

对时间分辨率的影响：AC-LGAD 信号上升时间极快，若走线阻抗不匹配，反射信号将叠加在原始脉冲前沿上，扭曲过阈/恒比甄别（CFD）时刻。走线过长时，寄生电容使信号边沿变缓，导致时基抖动（jitter）与噪声/slew rate 之比增大。

原则二：完整参考地平面与最小环路面积

对时间分辨率的影响：信号与其返回电流构成的环路面积越小，磁耦合拾取的 EMI 越低，AC-LGAD 在放大前的信号幅度仅数 mV， μV 级的电磁干扰叠加即足以改变过零时刻，产生额外的随机抖动

原则三：传感器偏压网络的隔离与多级滤波

对时间分辨率的影响：LGAD 的雪崩倍增增益对偏压极其敏感，若 HV 电源纹波或环境噪声耦合进入偏压线路，增益将发生调制，使信号幅度抖动并转化为时基游走（time walk）和额外抖动。干净的偏压是使增益稳定、信号形状一致的关键。

原则四：键合线长度最小化与交错双排焊盘

对时间分辨率的影响：每 mm 键合线引入 1 nH 串联电感。此电感与传感器的电极电容形成 LC 谐振回路，在信号前沿产生振铃（ringing）。振铃叠加在信号前沿的非单调变形会引入 CFD 的虚假过零点（walk），且振铃随键合参数（高度、弧度）变化带来通道间不一致性，破坏时间分辨率的均匀性。

二. 几种常见的数据接口和数据线类型

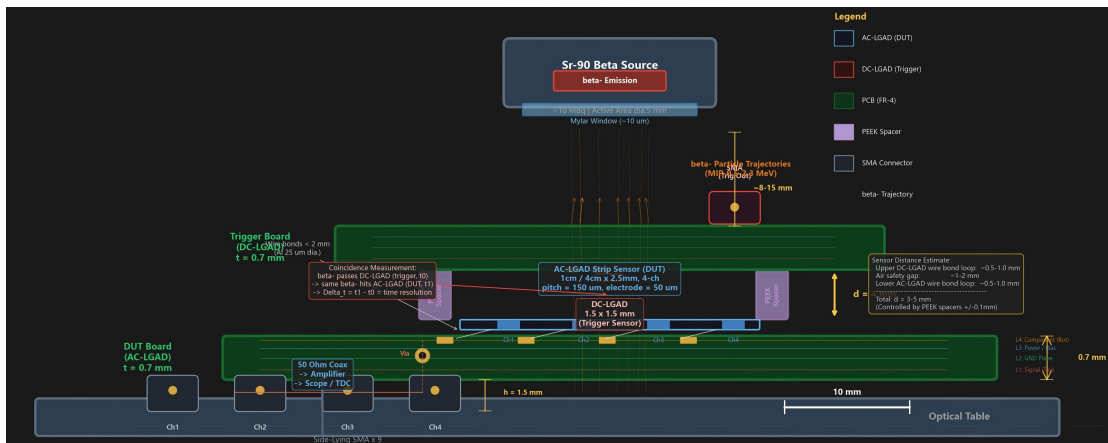
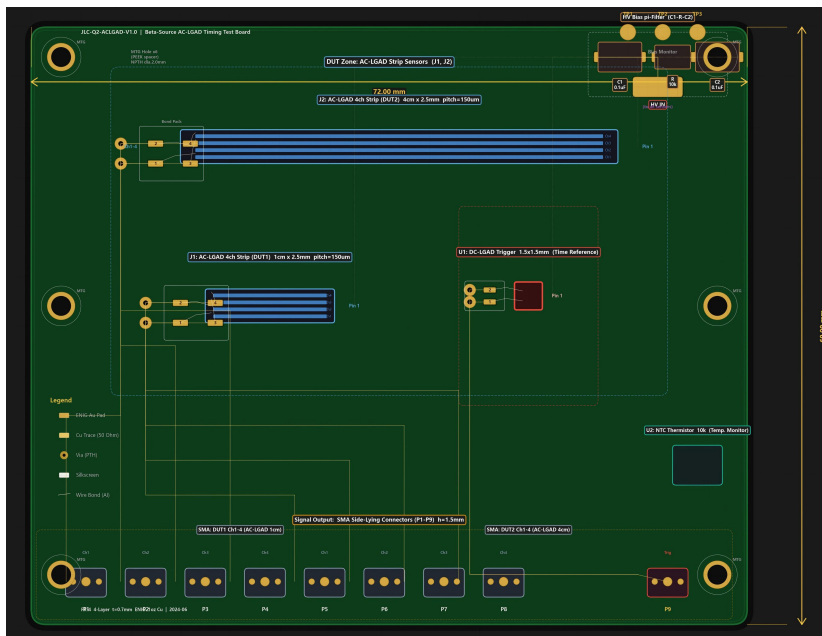
比较维度	SMA (侧卧)	MMCX (侧卧)	Flat Ribbon	RJ45
高度	1.5 mm (最低)	4 mm	6 mm	~10 mm

带宽	DC-18 GHz	DC-6 GHz	< 1 GHz	< 500 MHz
阻抗	50Ω (精准)	50Ω	无控制	100Ω (差分)
屏蔽效能	> 90 dB(同轴)	> 60 dB (同轴)	差 (平行线串扰)	中等 (双绞对内)
机械可靠性	螺纹锁紧	卡扣 (snap-on)	IDC 压接	RJ45 弹片

选择侧卧型 SMA 连接器

1.5mm 高使 β 源与传感器之间的距离可以足够近，对提高 β 粒子接受度至关重要。刚性同轴结构提供 > 90 dB 的屏蔽，在实验室存在多种 EMI 源（开关电源、步进电机、数字电路）的环境中，最大限度地抑制共模干扰。螺纹锁紧可靠，振动或意外触碰不会导致连接松动，维持稳定的接地接触。

三. 画出 PCB 的俯视图和剖面示意图



Q3.

强子对撞机的探测器为何不做成球形？

1. 物理：对撞产生的末态粒子具有绕束流轴的旋转对称性，大部分的粒子沿垂直束流方向飞出。圆柱形探测器的桶部恰好完全覆盖中心快度区。对撞点大致沿束流轴分布，并非都在理想原点，若为球形探测器，当对撞点不在原点时出射粒子在球面上会出现明显的斜入射，导致探测器相应参差不齐。
2. 磁场：带电粒子的动量测量依赖磁场偏转，探测器通常以沿束流轴的超导螺线管磁场为核心设计。圆柱形探测器与螺线管线圈的几何完全适配，可以获得大范围高度均匀的轴向磁场。若采用球型结构，无法高效布置螺线管线圈。
3. 集成：精密探测单元，如硅微条传感器等基本都为平面结构，圆柱形构型可以很方便地由平面模板拼接，而球型需要大量适配曲面的特殊模块，加工难度和制造成本较高。且圆柱形探测器可以通过拆分桶身，端盖的方式实现内部部件的安装维护，球型结构的内部空间可达性较差。



合理拓扑结构：只保留圆柱形桶部，去掉垂直端盖。

相比于球形探测器，更适配磁体结构几何，恰好覆盖中心快度区，且集成效果更好。
相比于圆柱形桶部+垂直端盖结构，去掉了较少探测到有效信息的端盖部分，节约了成本，且保留了原结构适配磁体结构，集成效果好的优势。