

1. Q1

a)

在均匀磁场  $B$  中,  $P_T$  与  $p$  关系为  $P_T \propto B \cdot p$   
再利用圆弧矢高近似公式, 对于径迹长度  $L$ , 矢高  $s \approx \frac{L^2}{8p}$   
联立两式即可得  $P_T \propto \frac{B \cdot L^2}{s}$   
 $\therefore \frac{\sigma_{PT}}{P_T} = \frac{\sigma_s}{s}$  代入  $s$  表达式可得  $\frac{\sigma_{PT}}{P_T} \propto \frac{\sigma_s \cdot P_T}{B \cdot L^2}$   
在高动量极限下, 位置测量误差占主导,  $\sigma_s \approx \sigma_x \propto \text{pitch}$   
 $\Rightarrow \frac{\sigma_{PT}}{P_T} \propto \frac{\text{pitch} \cdot P_T}{B \cdot L^2}$

b)

**方案一:** 将微条间距 (Pitch) 缩小一半。理由: 直接将探测器的本征位置分辨误差  $\sigma_x$  减半。

**方案二:** 将磁场强度 ( $B$ ) 增大一倍。理由: 磁场越强, 相同动量粒子的弯曲越明显, 矢高增大, 相对测量误差减小。

**方案三:** 将径迹探测长度 ( $L$ ) 增大  $\sqrt{2}$  倍。理由: 矢高与径迹长度的平方成正比, 增大外径可以显著增加粒子轨迹弯曲的偏离量。

c)

**Pitch 减半的代价:**

1) 功耗与发热剧增: 通道数翻倍会导致前端 ASIC 发热量巨大, 容易引发热失控。

2) 物质质量增加: 需要更多的数据走线、更复杂的读出芯片

和更粗的冷却管路，导致多次散射增加，可能在低动量区恶化分辨率。

3) 数据读出压力 (DAQ): 带宽需求翻倍，系统难以把数据可靠送出。

#### **B 场增倍的代价:**

1) 机械结构极限: 超强磁场会带来极其巨大的洛伦兹力，对支撑结构提出无法承受的刚性要求。

2) 成本与技术壁垒: 制造超导磁体的成本将呈指数级上升，且冷却极低温超导线圈的工程极其庞大。

#### **L 增大 $\sqrt{2}$ 倍的代价:**

1) 硅面积与造价爆炸: 探测器体积和所需硅片面积将按平方级增加，造价不可接受。

2) 机械几何稳定性极差: 支撑结构跨度变长，重力下垂和装配应力带来的形变将远超微米级，导致坐标系不可信

d)

**最不推荐: 方案一 (将 Pitch 缩小一半)。**

**理由:** 课件中明确指出“更小像素  $\neq$  更好”。单纯缩小 pitch 会引发功耗上升、引线材料增加和 DAQ 压力爆炸，完全违背了在物理收益与工程代价之间折中的“系统思维”。

**如果坚持该方案的补偿措施:**

1) ASIC/ 传感器: 采用单片集成式路线

(Monolithic/MAPS), 省去 bump bonding 工艺, 将硅片整体减薄, 极限压榨材料预算。

2) **冷却与支撑:** 采用更薄的钛管道和更高效的两相  $CO_2$  蒸发冷却, 配合石墨烯高导热膜来应对翻倍的发热量。

**系统不可行的底线:** 如果 DAQ 技术受限无法传出海量数据, 或者高密度布线引入的多次散射 (物质质量增加) 抵消了高动量区获得的精度提升, 这个方案在系统层面就是完全失败的

Q2

a)

**极低物质质量原则 (掏空设计):**  $\beta$  粒子 (电子) 极易发生多次库仑散射。PCB 在两个传感器 (AC-LGAD 和 DC-LGAD) 的正下方必须进行“挖空”或开槽处理, 确保粒子穿透时只有传感器本身, 没有 FR4 板材阻挡, 否则散射会改变粒子轨迹或能量, 导致时间测量产生巨大误差。

**严格对准与紧凑堆叠原则:** 为了确保同一个  $\beta$  粒子能先后穿过上层的待测传感器和下层的参考传感器, 两者在 Z 轴上的机械定位必须极度精准, 且间距要极短 (如控制在 1-2mm 内), 防止粒子大角度散射后飞出下层验收度。

**极短引线键合 (Wire Bonding) 原则:** 高时间分辨率依赖于极快的前沿信号。打线必须尽可能短且直接, 以降低寄生电感和电容, 防止高速信号产生振铃或前沿变缓。

**高频阻抗匹配走线原则:**PCB 数据信号线必须作为传输线(如 50 欧姆共面波导)设计,严格匹配阻抗,避免快时间信号在传输中发生反射和畸变。

b)

**选择:** MMCX 或 SMA 连接器 (侧卧或竖立型)。

**原因:** 由于这是测试皮秒级“时间分辨率”的实验,信号包含 GHz 级别的高频成分。RJ45(网口)和 Ribbon Cable(排线)主要用于低速数字信号或直流低频传输,会导致严重的高频衰减、串扰和反射。MMCX 和 SMA 是同轴射频连接器,能提供优异的宽带阻抗匹配,且 MMCX 体积更小,更适合高度受限的紧凑型双板堆叠测试场景。

c)

(目前还不太掌握 pcb 相关知识,后续会补充学习。)

Q3

**反对原因 (从三个维度):**

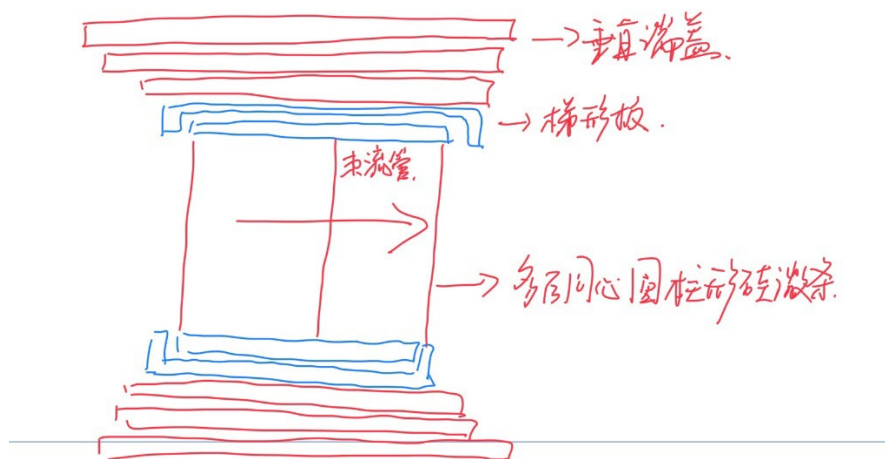
1. **物理与磁场维度:** 高能对撞机的核心磁场是由螺线管(Solenoid)产生的,其磁力线主要平行于束流束流管(Z轴),呈现圆柱状对称分布。圆柱形 Barrel 能够让粒子在穿过时,其运动方向与磁场垂直,从而获得最大程度的轨道弯曲(提供最佳的横动量  $p_T$  测量精度)。球面拓扑与螺线管磁场并不适配,且束流管

必须从中穿过，无法形成完美的闭合球面。

2. **系统工程与冷却维度：**前端电子学产生数千瓦的热量，必须使用超薄钛管道进行两相  $CO_2$  冷却。目前的 Barrel/Endcap 拓扑采用直形的支撑梯形板 (Stave)，内部可以嵌入平直的冷却管路。如果在球面上铺设微通道冷却管路，制造工艺将极其复杂，极易发生流体死区或应力破裂，彻底破坏热稳定性。
3. **集成与装配维度：**硅传感器芯片本身是刚性的平面二维晶圆切割产物。用一块块平面的硅片去拼接一个完美的“球面”，不可避免地会产生大量极其复杂的重叠 (Overlap)、缝隙和空间冲突。相反，圆柱形 (Barrel) 和垂直盘状 (Endcap) 是由平面的 Stave 和 Sector 直接组装而成，这种“层级化设计”极大地简化了装配、机械对准 (Metrology) 和后期维护替换。

更合理的拓扑结构及理由：

- **推荐结构：**保持并优化现有的圆柱形桶部+两端垂直端盖的组合拓扑。
- **示意图描述：**



- **优于球面的理由：**完美匹配螺线管磁场方向；可以利用平面晶圆实现模块化、层级化（Module → Stave）的大批量制造与拼装；支撑用的高刚性碳纤维（CFRP）和钛冷却管可以设计成笔直的桁架结构（Truss Frame），在保证机械稳定性的同时将“质量”降到最低。