

Q1: 位置分辨与动量误差的资源博弈

a)公式推导: 由 $p_T = 0.3BR$ 得 $R = \frac{p_T}{0.3B}$ 式(1)

由圆的几何关系得 $s = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}$, 高动量粒子轨迹很直, 所以 $R \gg L$, 可作近似 $\sqrt{R^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \approx R - \frac{L^2}{8R}$ 代入上式得

$$s \approx \frac{L^2}{8R} \text{ 式(2)}$$

将式(1)代入式(2)得, $s \approx \frac{0.3BL^2}{8p_T}$ 式(3)

又由误差传递公式 $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \approx \frac{\sigma_s}{s}$ 将式(3)代入得

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \approx \frac{\sigma_s}{s} = \frac{8p_T\sigma_s}{0.3BL^2} \text{ 式(4)}$$

又 $\sigma_s \approx C\sigma_x$ 代入式(4)得比例关系 $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T\sigma_x}{BL^2}$ 式(5)

假设位置测量误差 σ_x 与硅微条 pitch 近似成正比 (在二值读出、电荷分享可忽略的近似下), 即 $\sigma_x \propto \text{pitch}$, 代入式(5)得 $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{p_T \cdot \text{pitch}}{BL^2}$, $p_T=100 \text{ GeV}/c$

$$\text{得 } \frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto \frac{\text{pitch}}{BL^2} \text{ 式(6)}$$

b)三个独立的方案:

1)减小 pitch

理由: pitch 越小, 单点位置测量越精确, 轨迹拟合出的曲率误差越小, 因此动量分辨率提高。

2)增大磁场 B

理由: 由式(6)可以看出, 在 p_T 固定时, B 增大一倍, 相对动量误差就缩小一半。

3)增大 L

理由: 由式(6)可以看出, 相对动量误差与 L^2 成反比, 则 L 增大 $\sqrt{2}$ 倍, 相对动量误差就缩小一半。

c)工程代价:

1)减小 pitch

①**功耗和冷却压力增加**。更多通道需要更多前端放大器、判别器和数字读出逻辑, 功耗上升。功耗上升后, 需要更强冷却; 冷却管路、冷板和服务线路可能增加材料预算。

②**通道数大幅增加**。同样面积下 pitch 减半，微条数量约增加一倍。通道数增加会导致：通道数增加 → 功耗上升 → 散热与引线材料增加

这正对应课件第 17 页提到的观点：**更小像素或更小 pitch 不等于系统更好，因为通道数、功耗、DAQ 压力都会上升。**

2) 增大磁场 B

①**超导磁体系统难度大幅上升**。更高磁场意味着更大的磁能、更强的电磁力、更复杂的磁体保护系统和更严苛的低温系统。

②**造价和运行风险显著上升**。高场磁体的制造、安装、冷却、失超保护都非常昂贵，而且对实验整体可靠性影响巨大。

3) 增大 L

①**造价和装配复杂度增加**。面积随半径增加而增加，传感器数量、模块数量、机械结构都会增加。

②**探测器半径变大，整体尺寸增加**。会挤占量能器和磁体空间，影响整机布局。

d) 最不推荐方案：把磁场 B 加倍

理由：线圈径向厚度增加，需要更多匝数或更厚的导体，成本倍增。磁场增强，运行电流随之增强，系统发热加剧，冷却负担加重。而且一旦磁体方案改变，几乎所有子系统都要重新集成。比起其他方案实现起来更难，更没有性价比。

如果坚持这个方案，你会如何修改系统其他部分（如 ASIC 架构、冷却、材料选择、服务线路）来尽量补偿副作用？

冷却与材料：使用低 Z 高刚性复合材料骨架 + 超薄钛管道冷却或两相 CO₂ 冷却系统，减小因更高功耗或更复杂服务带来的工程造价。

ASIC 与服务：采用更低功耗前端、片上零抑制和高速串行读出，尽量不让更多冷却和数据线抵消动量分辨率收益。

服务线路方面：使用轻量化高速线缆或减少长距离模拟信号传输，来尽量降低服务线路带来的材料和空间代价。

Q2: β 放射源时间分辨测试的 PCB 设计

a) 原则一：AC-LGAD 与 DC-LGAD 要尽量近，且主动区要对准

β 源发出的电子不是严格垂直的一束平行粒子，而是有角度分布的。如果 AC-LGAD 和 DC-LGAD 距离太远，同一个电子在两块传感器上的命中位置会有明显横向偏移。如果间距过大可能会导致：

1) 粒子可能打到 AC-LGAD，但没打到 DC-LGAD 或者打到 DC-LGAD，但在 AC-LGAD 上打到边缘区域；

2) 符合事件纯度下降。

如何影响：间距 d 增大 → 符合事件纯度 ↓ → 所测时间分辨与真实值差值更大

原则二：高速信号走线必须短、直、等长

LGAD 脉冲上升沿很快，PCB 上的走线、过孔和连接器会直接改变波形。DUT 到连接器的信号线应短、直、等长，避免不必要过孔。否则波形反射和带宽损失会增加时间晃动。

如何影响：时间晃动 $\sigma_t \approx \frac{\sigma_V}{dV/dt}$ ，如果 PCB 走线导致信号反射、带宽损失等，

上升沿会变慢，即 $\frac{dV}{dt} \downarrow \rightarrow \sigma_t \uparrow$

原则三：打线要短、低、规则

打线本身有电感。打线越长，电感越大。对快信号来说，这些电感会造成：上升沿变慢、高频分量损失等，增大时间晃动。

如何影响：电感 $L \uparrow \rightarrow$ 高频响应差 \rightarrow 上升时间增大 $\rightarrow \sigma_t \uparrow$

原则四：连接器和厚器件不能挡在 β 粒子路径上

PCB 上的连接器、排针、SMA、MMCX、去耦电容、固定螺丝等厚器件都不能放在传感器正上方或正下方，否则会导致 β 粒子被吸收或发生散射。

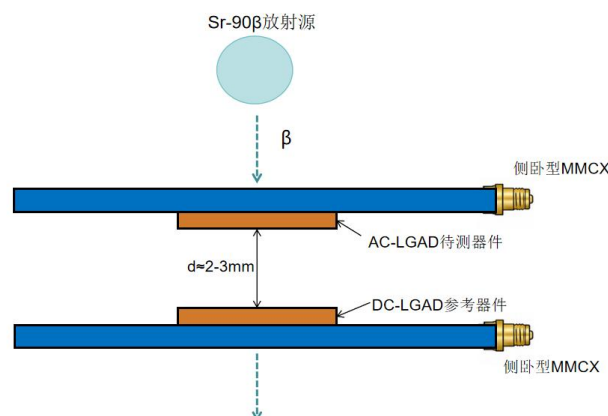
b)选择侧卧型 MMCX

侧卧型 MMCX 高度约 1.5 mm，是给定选项中最低的高速接口，有利于做面对面双板结构，减少机械间距。

MMCX 比 SMA 更小，适合多通道密集布置，版面间距不至于那么紧张。

MMCX 是 50Ω 同轴接口，适合 LGAD 快脉冲输出。

c)PCB 剖面示意图



Q3: 拓扑结构的选择：为何不建一个“球”？

反对建成一个球。

a)物理维度

1)强子对撞机不是一个完全球对称的实验。它有明确的束流方向，是称圆柱对称的。

2)粒子的飞行方向不是均匀分布的

两个粒子对撞的时候，因为它们带有很高的速度，而且两个粒子速度不完全一样，所以撞完之后大部分碎片沿着束流方向（前后）飞出去，只有少部分碎片从左右方向飞出，因此实际需要的是前后方向要厚、要密，因为那边粒子多；侧面可以薄一点，因为粒子少。球壳做不到这种区别对待，导致资源分配不合理。

b)磁场维度

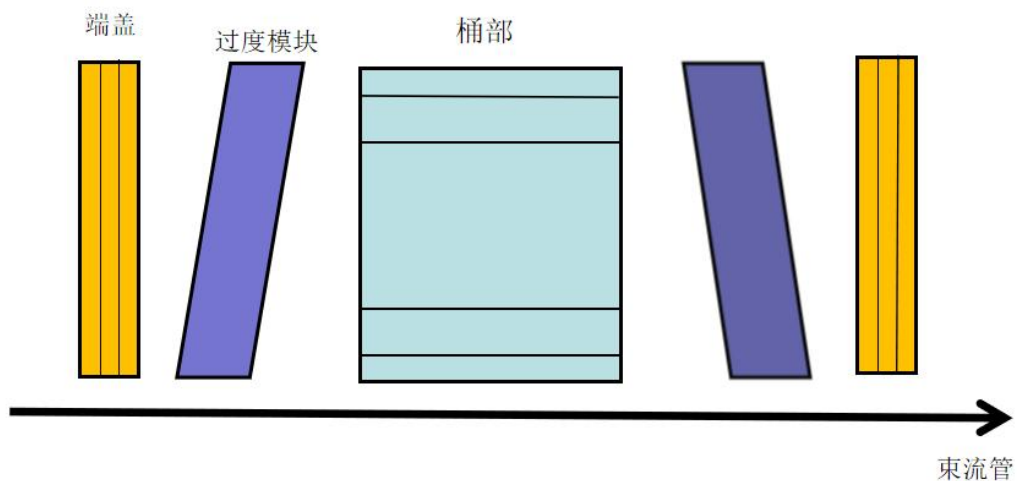
磁铁必须用圆柱形的

造一个对撞机所需的大磁场，最简单、磁场最均匀的办法就是圆柱形螺线管，而一个球面磁铁内部磁场必然不均匀。而磁场不均匀，粒子偏转的轨迹就算不准，算不准就意味着动量测错，整个实验数据就不可靠。

c)系统集成维度

1)圆柱形探测器每一层都是标准圆柱面，工厂可以批量生产完全一样的模块。球面探测器如果要拼成一个球，需要把球面切成很多小块，而且不同纬度的小块形状都不同，成本极高。

2)探测器里面有大量电缆、光纤、冷却管道。圆柱形设计可以从两头把线引出来。球面设计里面的线要穿过外面的壳才能接出来，就要在球壳上打洞，结构强度就下降，而且洞多了就没法保证密封。



该拓扑比球面结构更优，因为它顺应了强子对撞机沿束流轴的圆柱对称性。

如果粒子以很小角度擦过传感器，信号会变复杂，位置测量也会变差。斜放模块能让粒子入射角更接近合适范围，减少长边缘效应和效率损失。

