

一、

(a) .已知公式

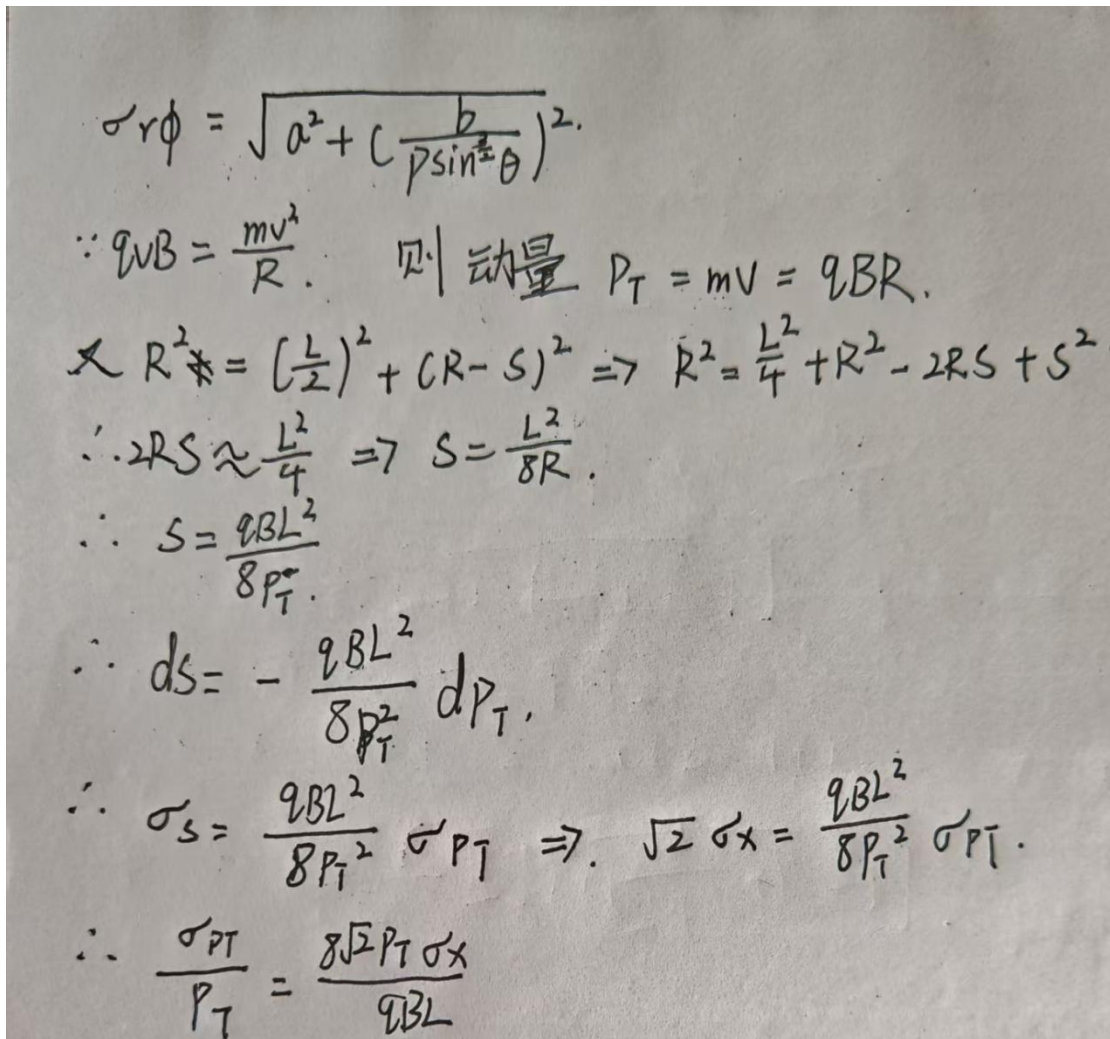
$$\sigma_{r\phi} = a \oplus \frac{b}{p(\text{GeV}) \cdot \sin^{3/2} \theta} (\mu\text{m})$$

a 项 (高动量极限) : 由探测器本身的空间位置分辨率。

- 取决于传感器像素尺寸、前端电子学噪声、机械对准与热形变误差等等。

b/p 项 (低动量区域) : 由多次库仑散射主导。

- 外推轨迹偏差 $\sigma_{d_0} = \theta \cdot r_1$
- b 项直接取决于第一层探测器的半径 r_1 以及系统的物质质量。


$$\begin{aligned} \sigma_{r\phi} &= \sqrt{a^2 + \left(\frac{b}{p \sin^{3/2} \theta}\right)^2} \\ \because qvB &= \frac{mv^2}{R} \quad \text{则动量 } p_T = mV = qBR \\ \text{又 } R^2 &= \left(\frac{L}{2}\right)^2 + (R-S)^2 \Rightarrow R^2 = \frac{L^2}{4} + R^2 - 2RS + S^2 \\ \therefore 2RS &\approx \frac{L^2}{4} \Rightarrow S = \frac{L^2}{8R} \\ \therefore S &= \frac{qBL^2}{8p_T^2} \\ \therefore ds &= -\frac{qBL^2}{8p_T^2} dp_T \\ \therefore \sigma_s &= \frac{qBL^2}{8p_T^2} \sigma_{p_T} \Rightarrow \sqrt{2} \sigma_x = \frac{qBL^2}{8p_T^2} \sigma_{p_T} \\ \therefore \frac{\sigma_{p_T}}{p_T} &= \frac{8\sqrt{2} p_T \sigma_x}{qBL} \end{aligned}$$

所以有：相对动量误差正比于横动量 p_T 、微条间距；反比于磁场强度 B 、探测层间距 L 的平方。

(b) .

方案 1：减小微条（改变位置分辨项）：

操作：将硅微条间距减半。

原理：硅微条间距减半， σ_x 同步减半，整体误差线性减半。

方案 2：提升磁场强度 B（改变磁场项）：

操作：磁场 B 提升至原来 2 倍。

原理：误差与 B 成反比，B 翻倍后整体误差缩小 1/2。

方案 3：增大层间距 L（改变探测层几何基线）：

操作：层间距 L 放大为原来的根号二倍。

原理：误差正比 $1/L^2$ ， L^2 变为 2 倍，整体误差缩小 1/2。

(c) .

方案 1：微条 pitch 减半（条间距缩小 1/2）

(1) . 通道数量翻倍，前端 ASIC、读出电子学成本/功耗激增

相同探测器面积下读出通道数加倍，ASIC 芯片用量、供电功耗、数据带宽翻倍；高辐射环境下芯片数量增加，辐射失效概率上升，冷却负荷大幅增加。

(2) . 条间电容串扰显著恶化，位置分辨反而退化

相邻微条电极距离更近，极间寄生电容暴涨，相邻通道信号耦合串扰严重，破坏“电荷共享可忽略”假设，实际 σ_x 无法达到理论减半，引入额外位置抖动，抵消动量精度提升收益。

(3) . 硅片加工、组装良率下降，机械装配公差收紧

窄间距微条光刻工艺精度要求提升，硅片制造成本上升；键合焊盘尺寸同步缩小，金线键合难度增加，探测器组装良率降低，维修更换成本提升。

方案 2：磁场强度 B 翻倍（超导磁场提升 2 倍）

(1) . 超导磁体系统造价、制冷负荷指数上升

磁场与超导线圈电流近似线性，但线圈应力、低温制冷功率随 B^2 增长；液氦/低温制冷机组规模翻倍，加速器整体运维能耗、制冷系统故障率大幅提升。

(2) . 探测器内部材料机械应力超标

磁体内部支撑结构、硅探测器模块、电缆支架承受洛伦兹力翻倍，必须加厚高强度支撑结构，增加探测器材料预算与内部物质厚度，额外粒子多重散射。

(3) . 外围设备电磁干扰（EMI）爆炸式增长

强磁场会干扰硅探测器前端 ASIC、精密读出电子学，必须增加多层磁屏蔽罩；屏蔽材料增加探测器物质质量，粒子穿过时多重散射增大，引入新的位置误差，抵消动量测量增益。

(4) . 束流系统兼容性变差——强磁场扰动束流轨道，需要升级校正磁铁、束流监测系统，加速器整体改造工程量极大。

方案 3：层间距 L 放大（探测层拉开距离）

(1). 探测器径向体积扩张，整体几何尺寸大幅增大
桶部探测器径向厚度增加，原有地下实验洞穴空间不足，需要扩建实验坑道；前端量能器、 μ 子探测器排布空间被挤压，其他子探测器设计全面受限。

(2). 粒子穿过探测器物质路径变长，多重散射误差激增
带电粒子穿越更多硅层、支撑材料，多重库仑散射带来额外位置抖动，该误差与 L 正相关，大幅抵消由基线拉长带来的动量精度提升。

(3). 探测器机械支撑结构刚度不足，形变误差增大
层间距拉大后，模块悬臂长度增加，重力、低温热胀冷缩带来的机械形变变大，层间相对位置偏移，引入大的系统位置误差；需要更厚重碳纤维支撑框架，进一步增加物质量。

(d) .

最不推荐【方案 2：磁场强度翻倍】

理由：

1. 系统耦合度最高，改动牵一发而动全身

磁场属于加速器中心子系统，磁体改造不只是探测器局部升级，会影响束流、制冷、屏蔽、所有内外层子探测器；而缩小 $pitch$ 、拉大层间距仅改动硅径迹探测器本体，影响范围局限。

2. 成本与能耗代价不可承受（HL-LHC 约束）

HL-LHC 预算、低温制冷功率存在硬上限，超导磁体磁场翻倍的制冷、线圈、土建改造费用远超另外两套方案；长期运行电费、低温系统运维人力成本持续居高不下。

3. 引入不可抵消的衍生系统误差

强磁场带来的电磁干扰、材料应力、束流扰动是全局性问题，多重散射、电子学噪声带来的附加误差很难通过后端算法完全补偿；而 $pitch$ 、层间距带来的误差仅局限于径迹重建，软件修正空间更大。

4. 工程周期极长，风险不可控

超导磁体研发、低温系统测试、坑道扩建周期长达十年量级，同步运行风险高；硅探测器几何改造可分批次迭代测试，风险更低。

强制坚持将 B 翻倍，系统性修改方案补偿副作用

1. ASIC 与电子学架构修改

全部前端 ASIC 增加多层高磁导率坡莫合金微型屏蔽罩，单通道独立磁屏蔽，隔绝局域磁场干扰；

采用差分模拟读出架构，降低共模磁场噪声；使用磁不敏感 CMOS 工艺制造读出芯片。

2. 冷却与材料选择补偿

升级大功率分布式低温制冷系统，分区独立冷却超导线圈，降低热负荷；探测器支撑全部采用零膨胀碳纤维复合材料，抵消磁场应力、热胀形变；电缆选用低磁导率无氧铜+双层屏蔽同轴电缆，减小感应噪声。

3. 服务线路与机械结构补偿

重新设计探测器内部电缆走线，全部沿磁场等势面布置，避免切割磁感线产生感应电压；

增加多层外部主动磁屏蔽体，分隔磁体区与电子学机房；
束流系统配套升级校正二极/四极磁铁，实时校正磁场带来的束流偏移。

4. 软件重建补偿

开发磁场非均匀性逐点校准数据库，径迹重建算法内置空间磁场畸变修正模型，实时修正磁场扰动带来的轨迹偏移误差。

二、

(a) .

原则 1：差分等长布线，严格控制传输线时延匹配

原理：时间分辨测量依赖上升沿时间差，传输线长度差会引入固定时延差。若走线差 1 mm，额外时延抖动约 6.25 ps，直接劣化 LGAD 几十 ps 量级的本征时间分辨。

原则 2：全通道等阻抗连续传输，无阻抗突变

原理：阻抗不连续会造成信号反射，波形边沿畸变、上升沿拖尾，触发阈值时刻随机偏移，新增定时抖动，掩盖器件真实时间性能。

原则 3：区分地隔离，模拟信号与数字参考地分割

原理：Sr-90 β 产生的 LGAD 信号是 nA 级弱脉冲，数字接口时钟、开关噪声会通过地耦合引入随机基线漂移，改变过阈定时点，增大时间分辨误差。

原则 4：传感器共面、放射源垂直入射布局，固定粒子飞行路径

原理：若粒子到达两个传感器的飞行距离随机变化，会引入粒子飞行时间抖动，不属于 LGAD 器件本征时间分辨，造成测量结果虚差。

原则 5：极小化传感器焊盘与引线寄生电容

原理：LGAD 输出脉冲上升时间与总寄生 RC 成正比，寄生电容 C_p 增大会拉长信号上升沿，定时抖动，人为恶化时间分辨。

(b) .

选择：MMCX 侧卧型（高度 1.5 mm）

选择理由：

1. 阻抗匹配：标准 50 Ω 射频连接器，完美匹配 LGAD 信号传输线阻抗，无高频反射；
2. 高度适配：侧卧高度仅 1.5 mm，不遮挡上方垂直入射的 Sr-90 β 射线，保证所有传感器灵敏区均匀受辐照；
3. 寄生参数低：体积小，引脚短，引线寄生电感/电容远小于 SMA，减小脉冲边沿畸变；
4. 通道密度高：PCB 单侧可密集排布 5 路 MMCX（1 路 DC 参考+4 路 AC 待测），布线距离短、等长易实现；
5. 测试便捷：搭配 50 Ω 低抖动射频线缆直连示波器/定时甄别器，直接采集模拟脉冲，无需数字转换引入额外时延误差。

(c) .

俯视图：

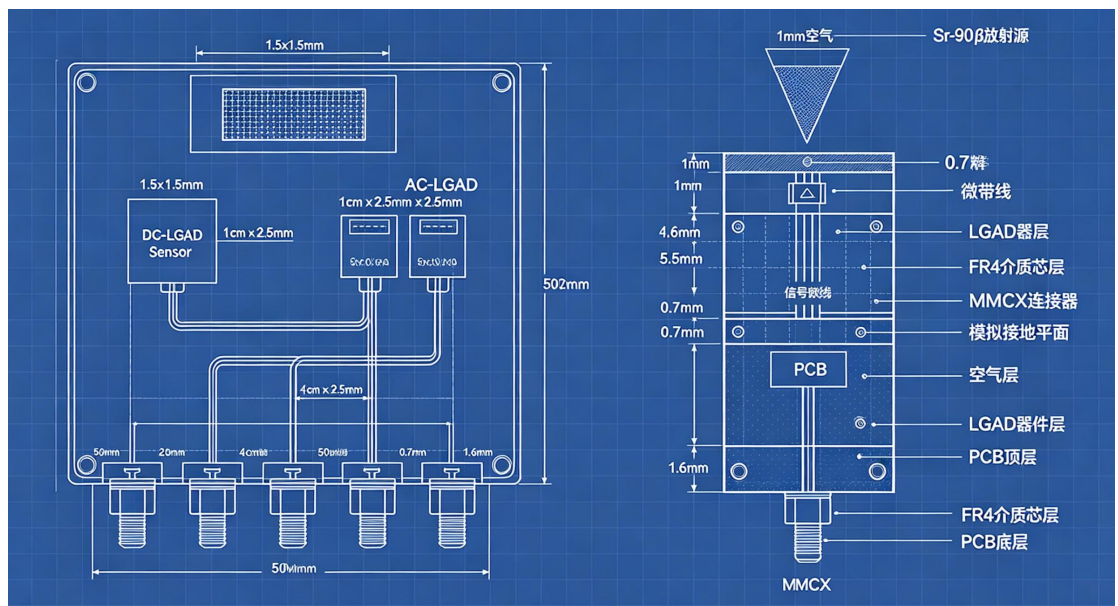
整体 PCB 为矩形，分区清晰，自上而下放射源照射方向：

1. 顶部放射源放置区：镂空窗口，正下方排布器件
2. 左侧：1.5×1.5 mm DC-LGAD 参考传感器，四周极小焊盘，50 Ω走线向左下方连接侧卧式 MMCX 通道 0（时间参考）
3. 右侧并排两组 AC-LGAD 待测器件：
 - 短条 AC：1 cm×2.5 mm 四通道，4 路电极引线向右下等分等长走线
 - 长条 AC：4 cm×2.5 mm 四通道，4 路电极与短条走线严格等长，连接 MMCX 通道 1~4

垂直剖面图（沿放射源入射中轴线剖切，单 PCB 单层器件）

从上至下分层标注：

1. 最上层：Sr-90 β放射源（垂直向下辐照）
2. 空气层（1 mm）：无遮挡，粒子直达传感器
3. 器件层：DC/AC-LGAD 传感器贴装于 PCB 顶层焊盘，器件厚度 0.7 mm
4. PCB 顶层：信号走线+局部接地铜箔
5. PCB 介质芯层（FR4，厚度 1.6 mm）
6. PCB 底层：完整模拟接地平面，密集接地过孔上下连通
7. 底部：侧卧式 MMCX 连接器，横向插接射频线缆，高度 1.5 mm 不向上突出遮挡射线



注：在 PCB 设计时，因为马上就是考试周，时间有点紧，再加上本身对 PCB 设计与绘画了解程度不深，利用 AI 的辅助，设计了一个图，后期有时间会再重新更严谨细致的思考这方面的问题。

三、

反对该提议

维度 1：粒子物理性能缺陷（核心物理层面）

1. 横动量测量精度大幅下降

螺线管磁场仅沿 z 轴，球面高 η 区域（前后向）粒子运动方向与磁场近乎平行，洛伦兹力极小，轨迹曲率极大。球面在高赓快度区无长径向测量弦长 L，相

对动量误差急剧恶化，对高 p_T 喷注、希格斯重建造成致命误差；而圆柱 Barrel 在中心 η 区拥有最长径向跨度，动量分辨最优。

2. 辐射剂量与 occupancy 分布极端不均

对撞顶点产生大量软粒子集中在小极角（前后向球面区域），球面内层前后段粒子通量远高于赤道区域：

- 高 occupancy 造成硅探测器堆积噪声、多重粒子叠加；

- 前后向辐照剂量比赤道高几倍，球面硅片老化速率不一致，需频繁更换全部球面层，维护成本爆炸；圆柱拓扑可单独加厚 Endcap 辐射屏蔽、单独替换端盖，分区优化。

3. 立体角覆盖冗余与无效材料

束流管道轴线附近极小角度无物理事例，但球面仍需完整铺设硅传感器，大量探测面积无有效物理数据，增加物质多层，带来额外多次散射；圆柱方案束流管道仅两端开口，无多余探测材料。

维度 2：磁场系统兼容性致命问题

1. 螺线管磁场与球面几何严重失配

主流强子对撞机磁场为圆柱形超导螺线管，磁场矢量严格沿 z 轴，等磁面为圆柱面，而非球面。球面各层与磁场夹角处处变化：

赤道球面层垂直磁场，动量测量有效；

前后向球面层平行磁场，几乎无法测量横动量；

磁场利用率两极分化，无法统一优化动量分辨。若为适配球面更换球形磁场线圈：球形超导磁体制造、缠绕、低温承压难度远超圆柱螺线管，储能、漏磁、冷却成本提升一个量级，HL-LHC/CEPC 等均无球形磁体工程方案。

2. 磁场边缘畸变无法修正

圆柱螺线管两端磁场本身发散，球面端区叠加磁场畸变，轨迹拟合修正参数复杂，系统误差难以刻度；圆柱 Endcap 可设计补偿线圈校正边缘磁场，球面无成熟补偿方案。

维度 3：机械、冷却、电子学工程代价（系统可行性）

1. 球面分层装配、定位精度无法满足硅径迹要求

硅微条位置分辨要求微米级层间定位（微米级同轴、共面）：

圆柱分层为圆筒，可通过中心轴基准精密加工、同轴定位，工装成熟；

同心球面每层曲率半径不同，三维球面定位工装极难制造，层间相对偏移易达到数十微米，直接破坏位置分辨，动量误差翻倍。

2. 冷却、布线结构无法模块化

球面是连续闭合曲面，无法分模块独立拆卸；硅探测器需低温冷却（ $-30\sim-40^\circ\text{C}$ 抑制漏电流）、大量前端 ASIC、服务线缆：

圆柱 Barrel 可分成 16/32 个扇形独立模块，单块损坏单独更换；Endcap 圆盘分扇区模块化；

球面任意一层破损，需拆解全部外层球面才能维护，停机检修时间大幅增加，对撞机束流运行效率暴跌。

3. 服务材料物质堆积恶化散射

球面内侧、外侧无平直走线通道，电缆、冷却管道只能沿球面曲率缠绕，多层服务材料叠加；带电粒子穿过材料发生多次库仑散射，额外位置抖动，劣化径

迹重建；圆柱方案线缆沿圆筒轴向平直布置，物质预算可控、均匀。

4. ASIC 与读出电子学布局困难

球面传感器单元为弧形，前端芯片、柔性 PCB 必须随曲率弯折，易出现应力开裂；圆柱硅片为平面矩形，ASIC 贴装、柔性电路工艺成熟，量产一致性高。

推荐最优拓扑：分层圆柱+分段锥形（替代球面方案）

1. 中心桶部：多层同轴圆柱硅探测器，覆盖 $|\eta| < 1.5$ ，每层圆筒由多块平面硅微条模块拼接成圆柱面，径向逐层嵌套；轴向长度匹配螺线管磁场有效区，最大化中心区动量测量弦长。

2. 前后向锥形端盖（替代传统平直圆盘）

放弃纯圆盘，采用分段截顶圆锥分层结构，沿束流 z 轴多层嵌套，匹配高赝快度粒子入射角度：

内层小锥靠近对撞顶点，外层大锥向外延伸；

每一层锥面与束流轴呈固定夹角，保证高 η 粒子仍能穿过多层硅，获取足够曲率测量点。

3. 束流管道：中心中空圆柱形束管，穿过所有中心，无多余探测材料覆盖极小极角。

优势：

1. 磁场匹配最优

完美适配现有轴向圆柱螺线管磁场，中心 Barrel 垂直磁场，动量分辨最优；锥形 Endcap 倾斜面在高 η 区仍能获得可观洛伦兹力，远优于球面平行磁场区域。

2. 工程模块化极强

Barrel 圆筒分扇形模块，Endcap 圆锥分层分扇区，单模块可独立拆装、冷却、单独刻度；辐射损伤严重的内层端盖可单独替换，无需拆解整个探测器。

3. 物质预算可控，多次散射更低

线缆、冷却管路沿圆柱/圆锥平直边缘布置，无球面缠绕带来的多层材料冗余；极小角度束流管道无多余硅传感器，减少无效辐射与散射。

4. 刻度与系统误差可控

圆柱+锥形几何具备旋转对称性，刻度样本（宇宙线、束流测试）可全局平均，球面几何无统一对称基准，刻度修正复杂度指数上升。

5. 辐照分布分区优化

高粒子通量的高 η 锥形端盖可单独加厚屏蔽、选用抗辐照硅、增加冷却功率；中心 Barrel 辐照温和，器件寿命更长，全探测器成本均衡