C+C 1.1 GeV/u无磁场实验
TPC 径迹 DCA 讨论

近代物理研究所
刘成洋

2026-11-20

Motivation

CEE 总体验收指标： CEE 整体的带电粒子动量重建分辨的设计典型值为 5%； eTOF、T0 和 iTOF 单子系统的时间分辨指标分别定于 80，50 和 50ps；质心系的空间总覆盖优于 50%；径迹探测器 MWDC 阵列和 TPC 的径迹重建残差优于 300μm，总体径迹重建效率优于 90%；硅像素束流定位探测器的束流定位精度优于 50μm；谱仪最高计数率 10^4 Hz（不包含 TPC 时），典型计数率达 10^3Hz。

track DCA

受 track重建质量影响

以及探测器的多重库伦散射影响

带误差hit生成

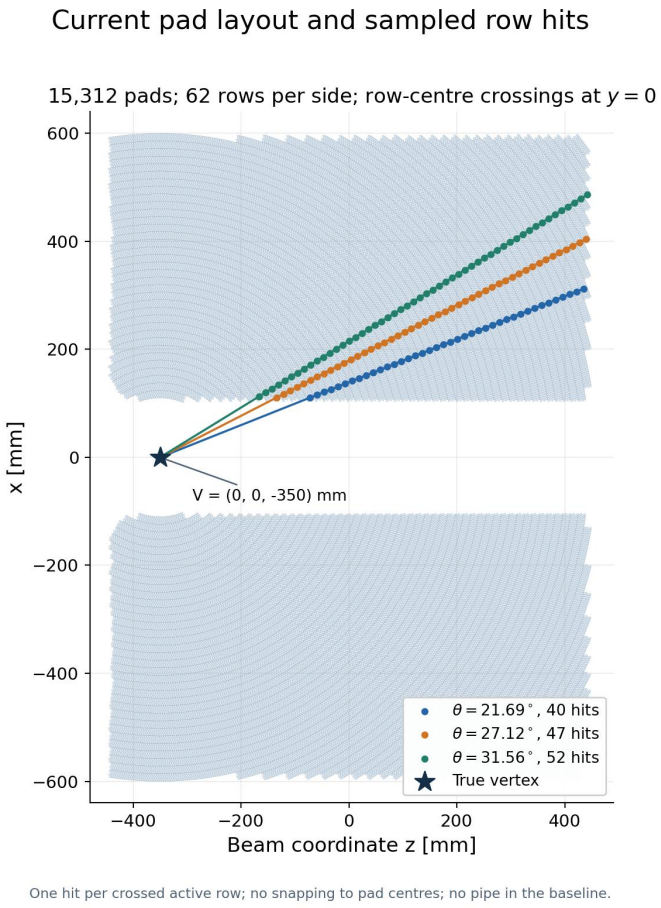
每穿过一排有效 pad，生成一个 hit

pad 的排列

共 15312 个 pad，分为两侧。
每侧 62 排，沿圆弧排列。
各排半径为 117–971 mm。
相邻排的径向间距为 14 mm。
圆心：(x,z) = (0,−350) mm。

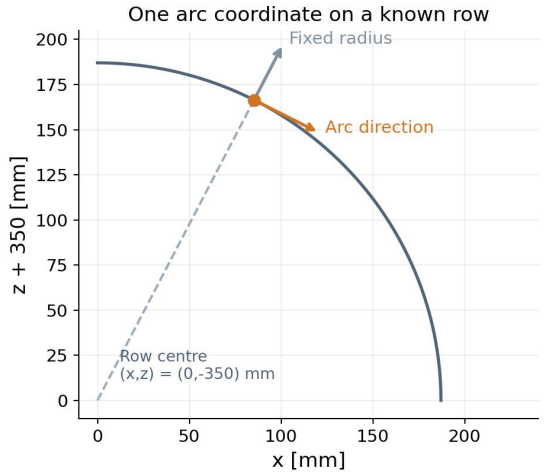
测量点（hit）的生成

固定pT以及快度假设许多条直线track
计算直线在各row半径处的交点，
再沿弧长和 y 加入测量误差。



在 LocalX 和 y 上分别加入均值为 0、标准差为 0.5 mm 和 0.6 mm 的独立高斯误差。

在 x–z 平面内，误差沿 pad 圆弧施加；半径由 hit 所在的 row确定，x、z 的变化相互关联。



从 pad 排上的测量点拟合径迹

无磁场直线拟合。原初顶点 V = (0, 0, −350 mm) 仅用于计算 DCA。

用哪些量拟合?

每个 hit 给出所在 pad 排的圆弧坐标 localX 和漂移坐标 y。用一条直线与该排圆柱面的交点预测这两个坐标。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \left[\left(\frac{\Delta \mathrm{LocalX}_i}{0.5\,\mathrm{mm}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta y_i}{0.6\,\mathrm{mm}} \right)^2 \right]$$

按各自测量误差给残差加权，调节直线的位置和方向，使 χ^2 最小。N 个 hit 提供 2N − 4 个自由度。

拟合后的两项读数

沿 y 投影径迹得到 d_1，再把顶点投影到含径迹且平行 y 的平面，得到 d_2。两项均以 mm 表示。

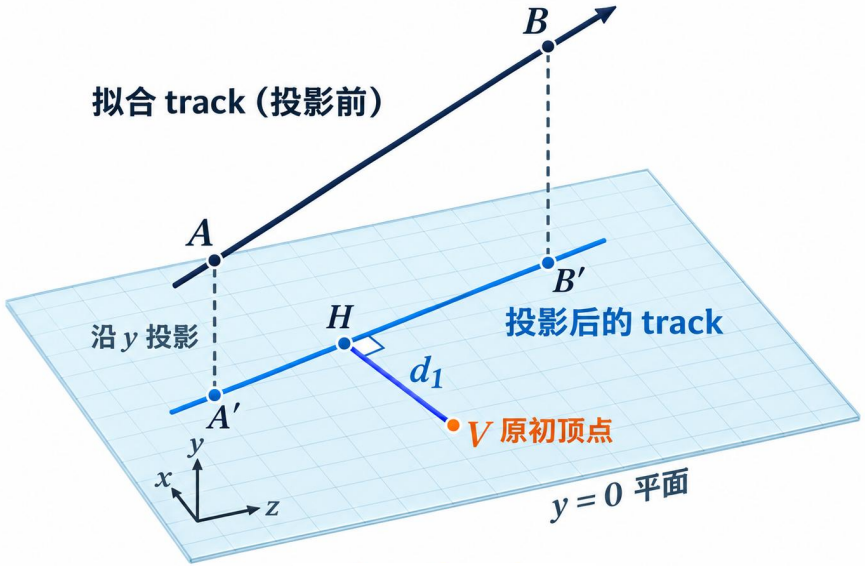
两组单 hit 精度

默认 localX / y 为 500 / 600 μm。后面另用 400 / 500 μm 重复 JAM 比较，拟合权重随精度一起调整。

两个正交方向上，径迹分别偏离顶点多少？

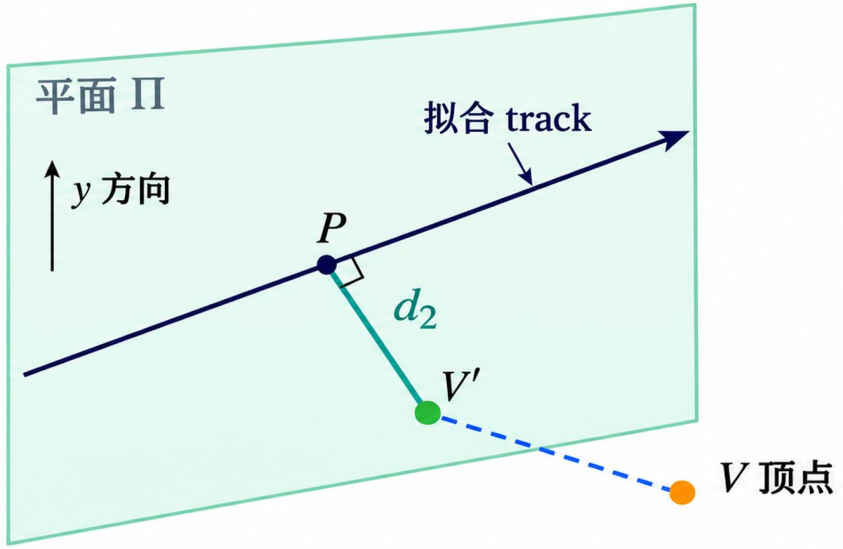
V 是原初顶点。两幅图中的 H 和 V′ 是同一点。图中线段给出长度，逐径迹计算 d_1 和 d_2 时保留正负号。

① 将 track 投影到 $y = 0$ 平面



$|d_1| = |VH|$

② 将顶点投影到径迹所在的平面



$|d_2| = |V'P|$

d_1 把径迹投到 y = 0

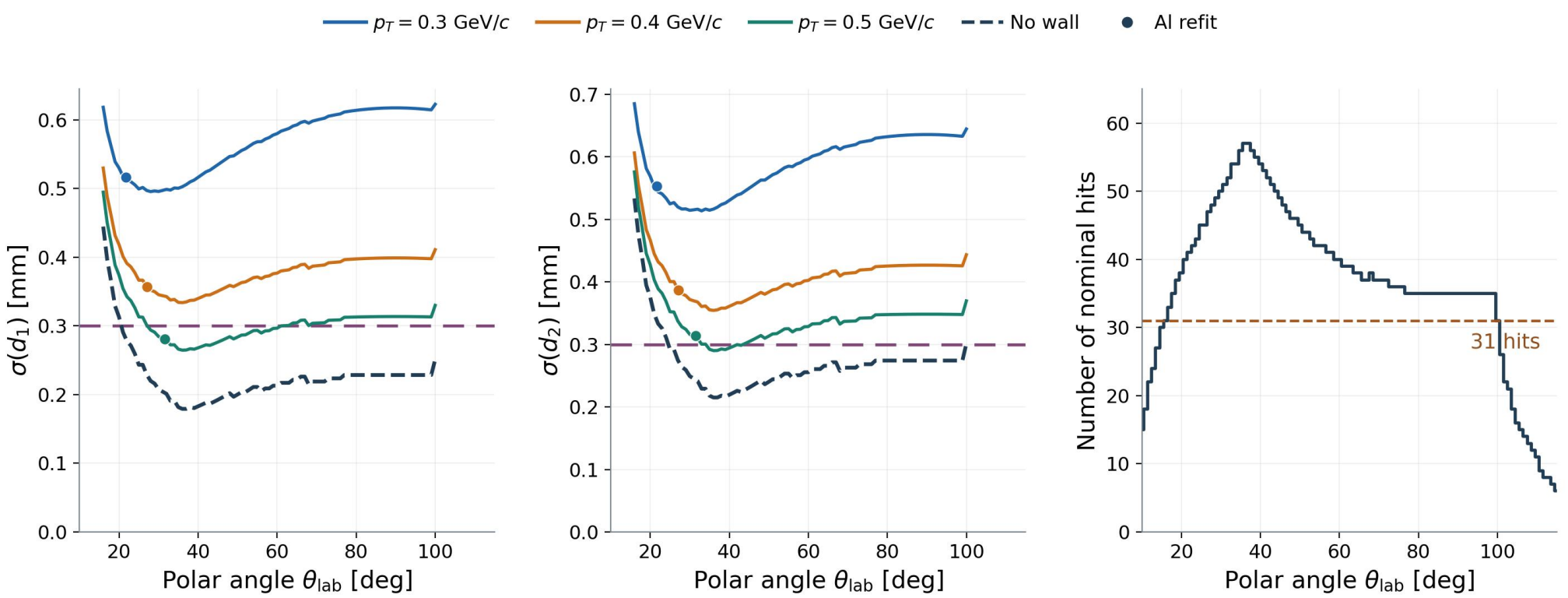
沿 y 把整条径迹投到经过 V 的 x–z 平面。H 是投影线上离 V 最近的点，取 VH 的有符号长度。

d_2 把顶点投到径迹所在平面

原径迹与 y 方向确定平面 Π。将 V 正投影到 Π 得 V′，再从 V′ 向原径迹作垂线，取 V′P 的有符号长度。

加入 1 mm 铝管后，两个 DCA 分布均变宽

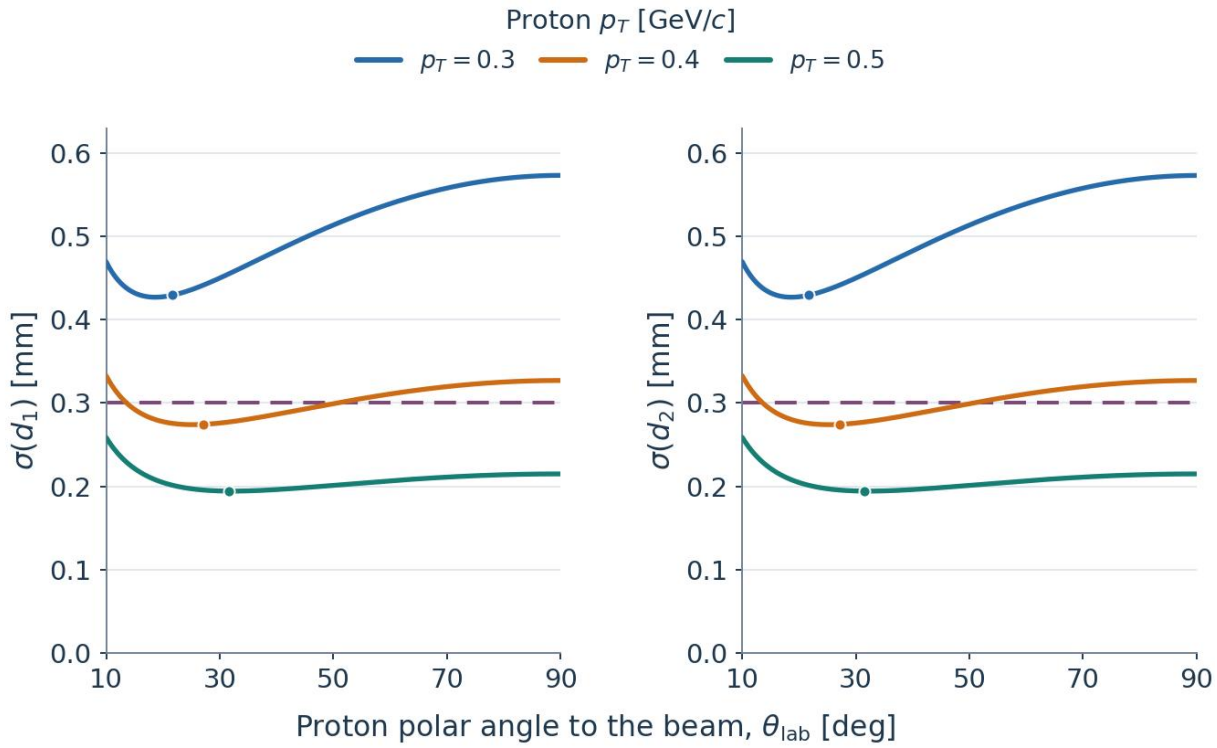
φ = 0°，pT = 0.3、0.4、0.5 GeV/c。每条入选径迹至少穿过 31 个有效 pad 排。



曲线按未散射时的 hit 位置做一阶误差传播。三个参考方向的点由逐条生成 hit 并重新拟合得到。

1 mm 铝管的散射给两个 DCA 分量带来多大展宽?

纯铝内、外半径为 39 和 40 mm。质子从顶点出发穿过一侧管壁，仅计算散射后出射直线的 DCA。



质心系纵向动量为零的参考质子

pT [GeV/c]	σ(d₁) [mm]	σ(d₂) [mm]
0.3	0.429	0.429
0.4	0.274	0.274
0.5	0.194	0.194

圆点对应三个参考方向。两个方向分别计算；散射在入射方向周围近似轴对称，所以两项宽度非常接近。

将铝管替换为碳纤维管减小散射

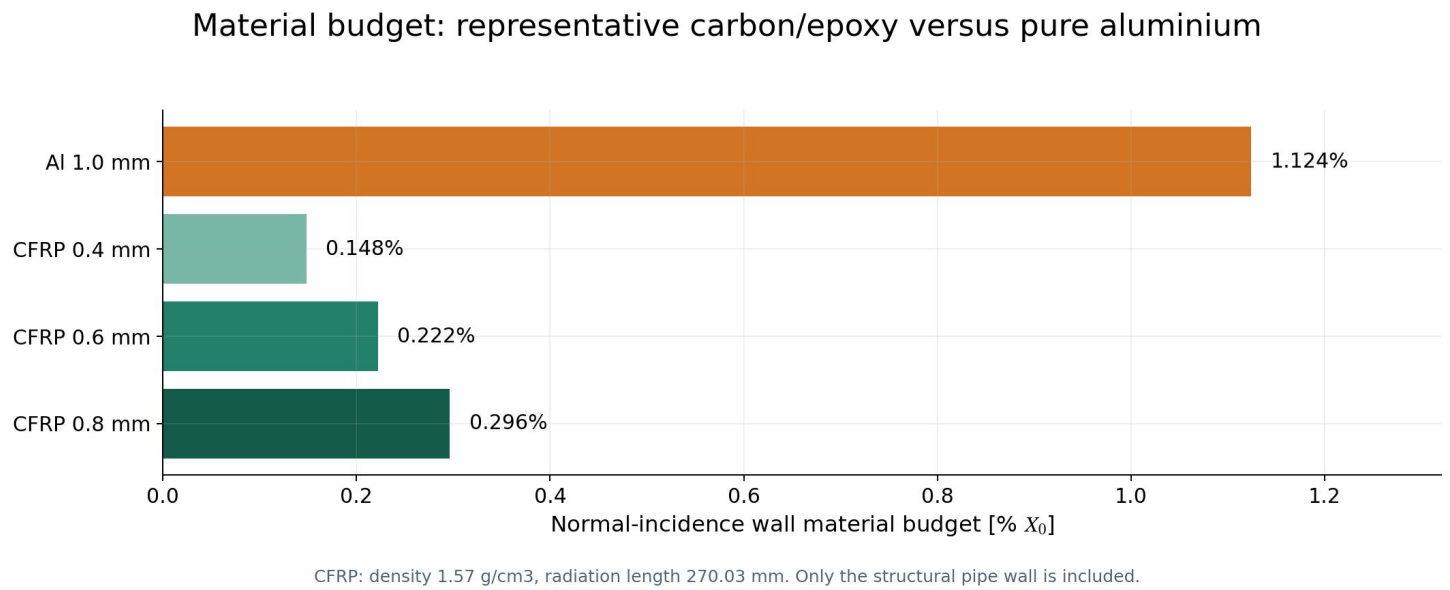
内半径 39 mm（内径 78 mm），管长 1.4 m

测试了三层碳纤维织物 / 环氧结构壁 下多重库伦散射的影响

三层织物约 0.585 mm，计算取 0.6 mm。

散射计算用碳纤维&环氧复合材料参数

采用公开资料构造代表性材料模型



等效 CFRP 参数

碳纤维 / 环氧质量比：63 / 37。
密度：1.57 g/cm³。
元素质量比 C / H / O：
91.12% / 2.59% / 6.29%。
辐射长度 X0 = 270.03 mm。

0.6 mm 的碳纤维优势

法向穿过管壁：0.222% X0。
1 mm 纯铝：1.124% X0。
碳纤维方案约为铝管的 20%。

密度、树脂比例和单层厚度参考 Hexcel 织物数据；树脂元素组成采用 LHCb 公开的通用环氧模型。
辐射长度按元素质量分数混合；

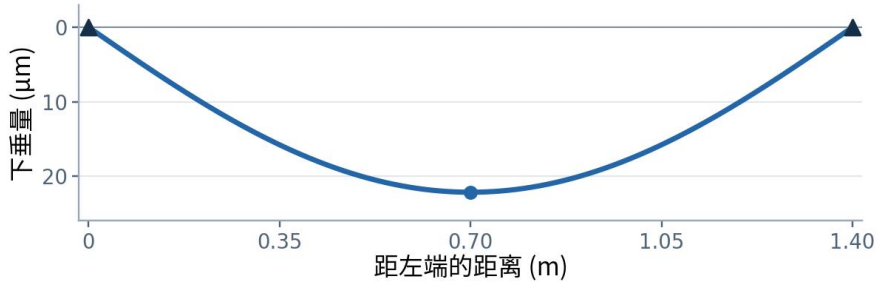
碳纤维管可行性分析： 自重导致的悬挂弯曲

将水平圆管看作一根梁，管壳自重沿全长均匀分布。

管长 L = 1.40 m，内径 78 mm，壁厚 0.60 mm，密度 1.57 g/cm³。管壳质量 0.326 kg，自重载荷 w = 2.28 N/m。轴向等效模量 E 取 45 GPa，圆环截面的惯性矩 I = 1.14 × 10^{-7} m^4。用梁的弯曲刚度 EI 计算各处下垂。

仅两端吊挂

两端同高，管端可转动。

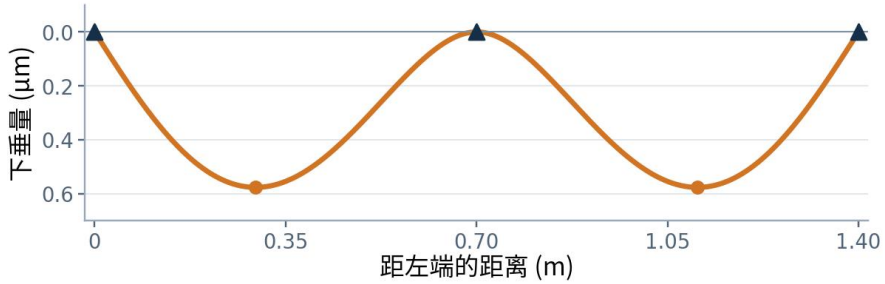


最大下垂 22.16 μm

出现在管子中央，距左端 0.700 m。

两端吊挂，加中央支撑

中央支撑与两端同高，管子连续跨过支撑。



最大下垂 0.576 μm

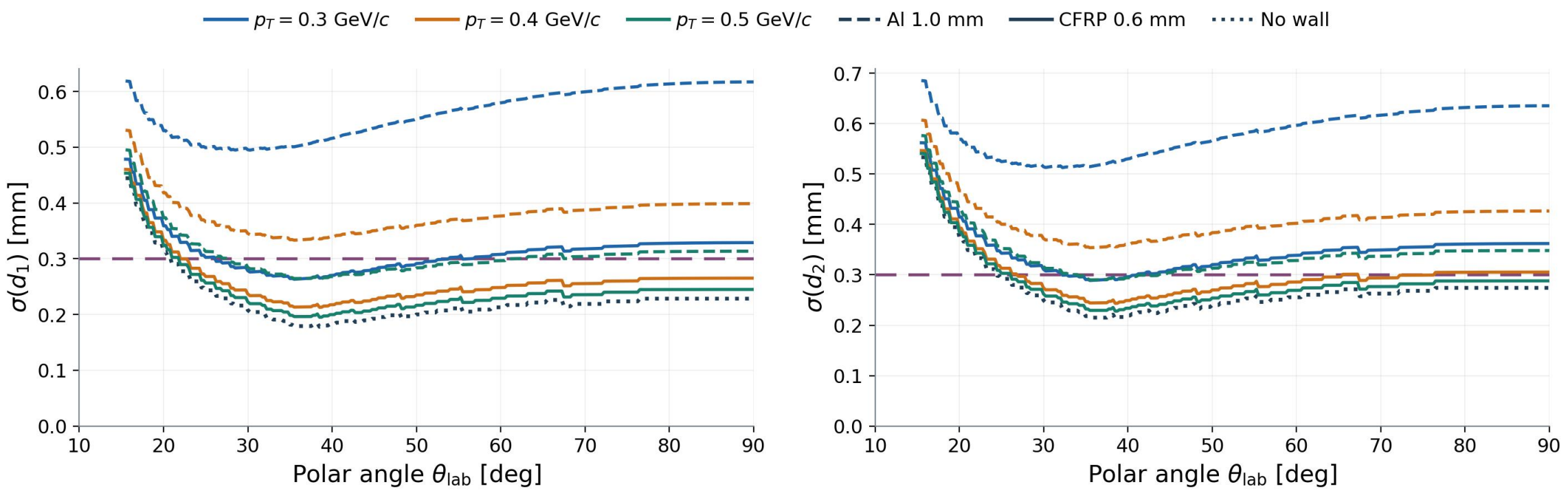
出现在距左端 0.295 m 和 1.105 m 两处。

两端简支时，中央下垂为 5wL⁴/(384EI)。加中撑后，令中央下垂为零，解得中撑向上的托力为 5wL/8 = 2.00 N。

三角标记为支撑点，两图纵轴刻度不同。mechanical_screen.py 给出解析解，作图时沿管长取 801 个点。

碳纤维和1mm铝比较

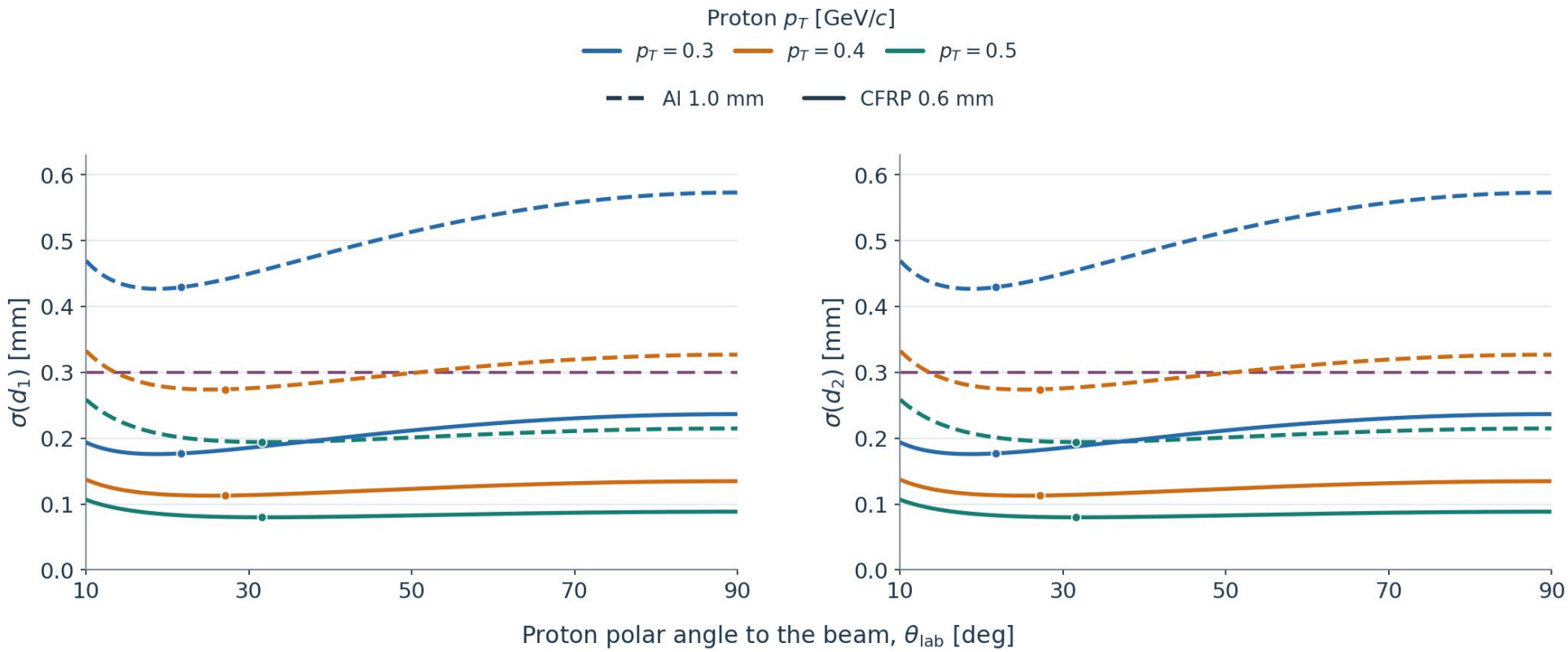
比较无管、1 mm 铝管和 0.6 mm 碳纤维管。φ = 0°，单 hit 的 localX / y 误差为 500 / 600 μm。



曲线是一阶误差传播的结果，覆盖每条径迹至少有 31 个有效 hit 的方向。

只考虑管壁散射时，铝管与碳纤维管的 DCA

同一入射方向比较 1 mm 纯铝和 0.6 mm 碳纤维。纵轴分别取出射直线的 σ(d₁) 和 σ(d₂)，均未加 hit 误差。



碳纤维带来的展宽只有铝的1/2

pT = 0.4 GeV/c、θ = 27.12° 时，铝管的两个分量均约 0.274 mm，碳纤维管均约 0.113 mm。

基于 C+C 1.1Gev 每核子动能的 JAM 数据研究

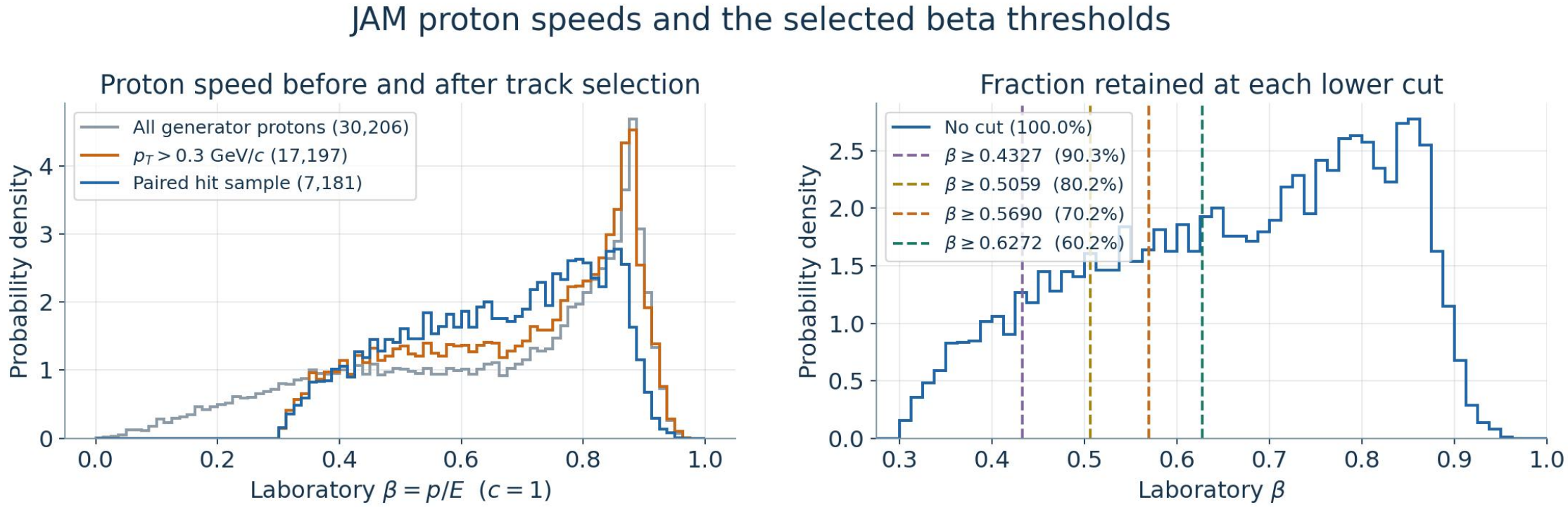
读取 10,000 个事件

原始质子 56,136 个。
按生成器规则排除旁观者
保留 30,206 个质子。
不固定质子的 pT、极角或方位角。

1、沿用前半部分的 pad 几何与 hit 误差。
2、径迹要求 Nhit > 30。
3、已知 hits 属于哪条径迹，再拟合无磁场直线;
4、不施加顶点约束。
5、生成点的微小偏移忽略，统一顶点 z = −350 mm。

JAM 质子的 β 分布与筛选条件

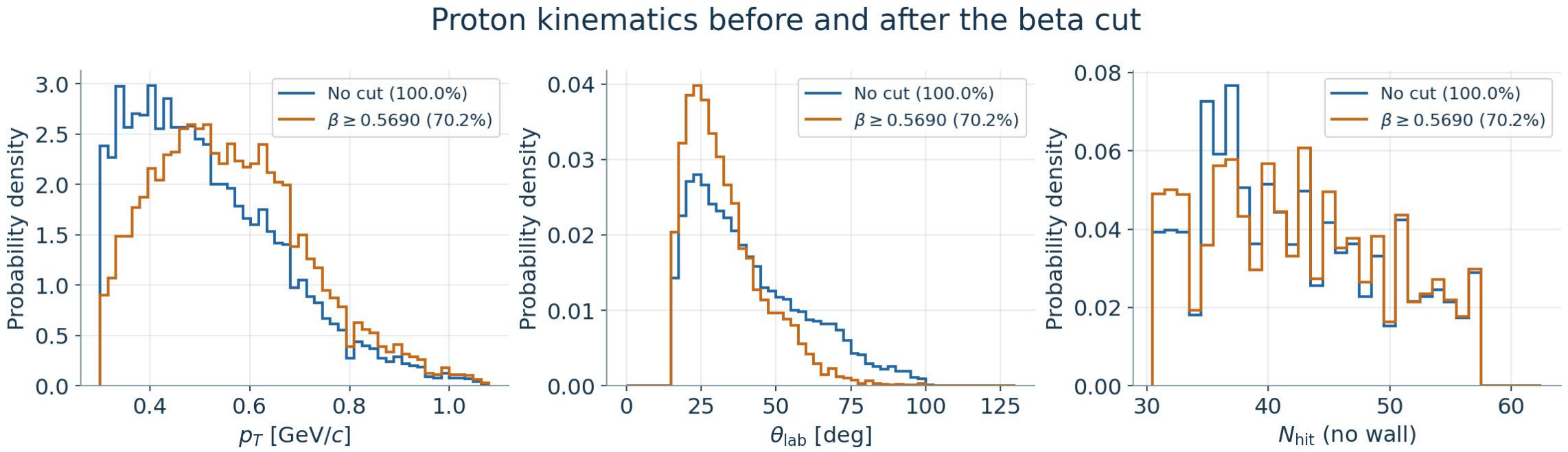
pT > 0.3 GeV/c，Nhit > 30。无管条件下有 7,201 条质子径迹，其中三种管壁条件均合格的 7,181 条作为 100%。



Paired hit sample: 7,181 tracks with more than 30 hits and a successful fit for all three material choices.

β ≥ 0.4327　6,481 条（90.25%）　　β ≥ 0.5059　5,761 条（80.23%）
β ≥ 0.5690　5,041 条（70.20%）　　β ≥ 0.6272　4,321 条（60.17%）

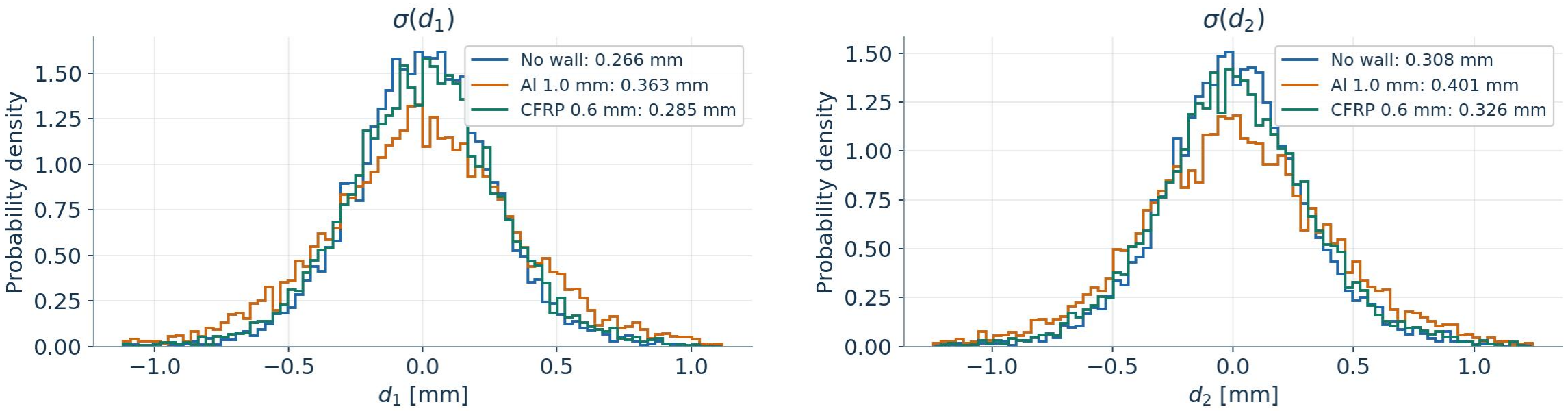
β cut 同时改变样本的动量和方向



提高 β 下限可以减少慢质子的散射，也会改变 pT、极角和 hit 数分布。
因此总 DCA 的变化同时受散射与几何外推影响

DCA sigma 计算方法

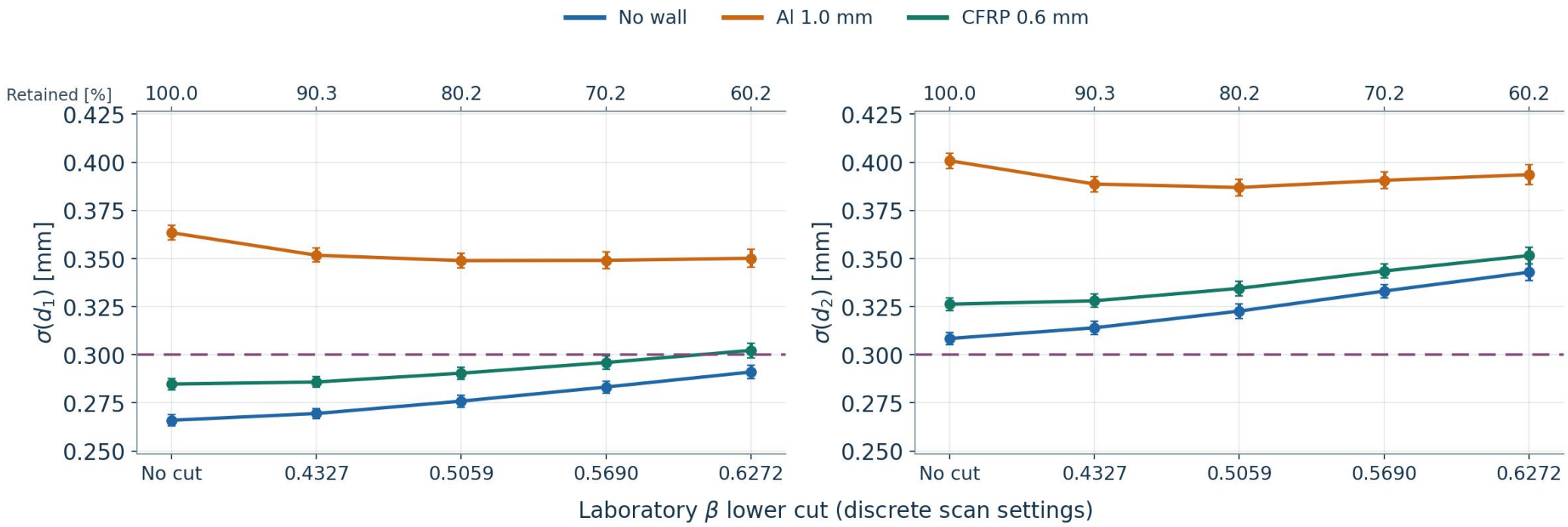
pT > 0.3 GeV/c，不加 β 筛选。nhitFit >30



两图分别给出 d_1 和 d_2 的带符号分布。图例中的 σ 是全部入选径迹的样本标准差，包含直方图显示范围以外的尾部。

不同β Cut下 DCA 的sigma

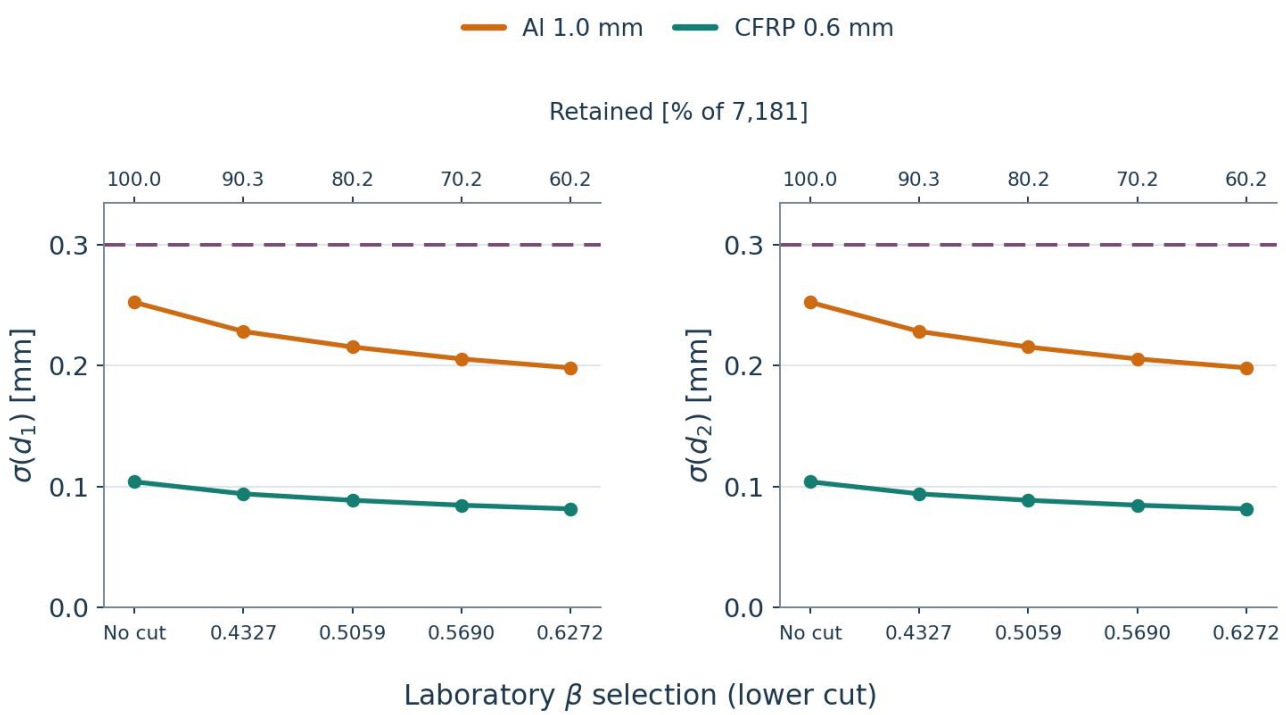
pT > 0.3 GeV/c，localX / y 为 500 / 600 μm。



也就是说当前无磁场实验用铝管几乎不可能依靠DCA达标

不同 β 下仅由管壁造成的DCA展宽

pT > 0.3 GeV/c。



各档管壁宽度　σ(d₁) / σ(d₂) [mm]

β cut	纯铝	碳纤维
无下限	0.252 / 0.252	0.104 / 0.104
0.4327	0.228 / 0.228	0.094 / 0.094
0.5059	0.215 / 0.215	0.089 / 0.089
0.5690	0.206 / 0.206	0.085 / 0.085
0.6272	0.198 / 0.198	0.082 / 0.082

单条径迹的 d_1 和 d_2 通常不同。对同一种管壁，两项宽度取到 0.001 mm 时相同，反映了散射的方位对称性。

为什么提高 β 下限后，无管样本的 DCA 反而变宽?

pT > 0.3 GeV/c，比较全部入选质子与约保留 70% 的质子。localX / y 为 500 / 600 μm。

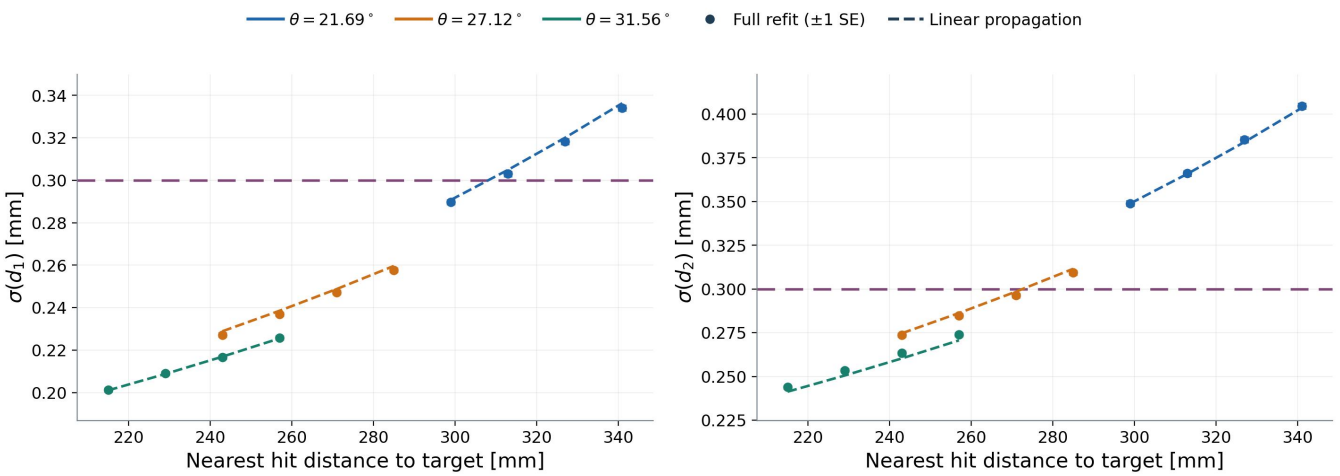
β 筛选	平均极角	首个 hit 到靶距离[1]	平均 hit 数	平均拟合跨度[1]
无下限	41.0°	234.0 mm	42.1	601.9 mm
β ≥ 0.5690	32.9°	265.8 mm	42.4	601.5 mm

向靶的外推距离增大

首个 hit 平均远了 31.8 mm，点数和拟合跨度几乎相同。
直线方向的小误差在外推时被放大，
无管的两个分量都变宽。

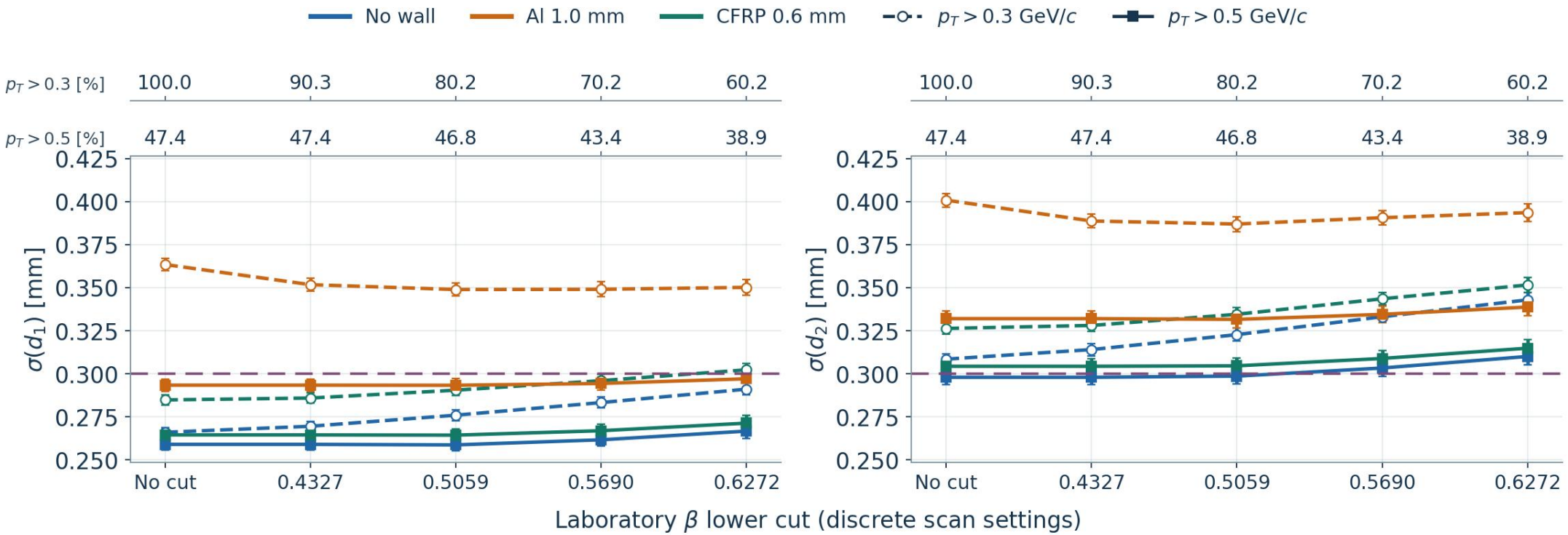
快质子在管壁中的散射变小

纯铝管壁单独造成的两项展宽均从
约 0.252 降至 0.206 mm，足以
抵消额外的外推误差。
带铝管时，两个分量都变窄。



比较不同pT cut下结果

单 hit 的 localX / y 为 500 / 600 μm，Nhit > 30。两组使用相同 β 下限，上轴保留率的分母均为 7,181 条。



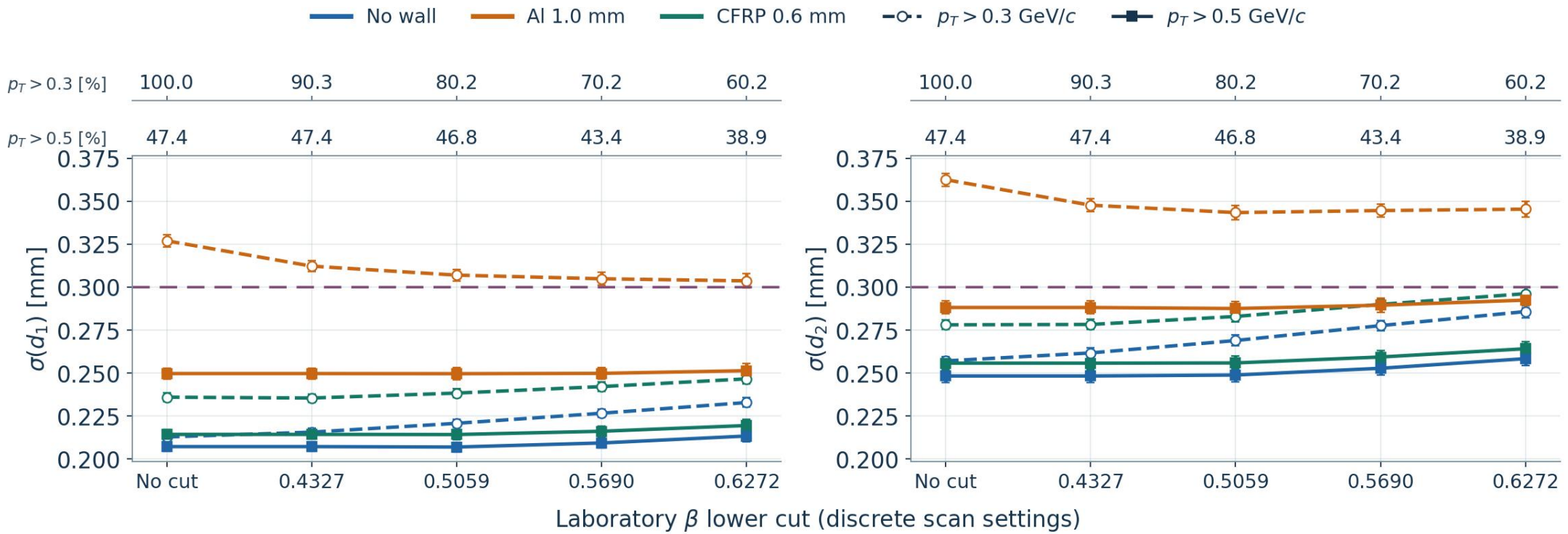
Upper axis: tracks retained / 7,181. Error bars: standard errors from 200 resamplings of complete JAM events.

采用更严格的Low pT cut确实会改善DCA的展宽

按图中从左到右的五档，提高 pT 门槛后分别少 3,779、3,079、2,403、1,923、1,530 条径迹。

单 hit 精度提高到 400 / 500 μm 后的 β 扫描

单 hit 的 localX / y 为 400 / 500 μm，Nhit > 30。两组使用相同 β 下限，上轴保留率的分母均为 7,181 条。



Upper axis: tracks retained / 7,181. Error bars: standard errors from 200 resamplings of complete JAM events.

对TPC来说如果我们可以把单hit精度做到xz方向400μm，y方向500μm。
或许在某些β Cut 还有 theta Cut下可以做到300μm的DCA展宽

400 / 500 μm 单 hit 精度下，同取 β ≥ 0.569006 的结果

单 hit 的 localX / y 为 400 / 500 μm。表中为全样本标准差，单位 mm，误差由 200 次整事件重抽样得到。

pT > 0.3 GeV/c

β ≥ 0.569006，5,041 条（70.20%）

管壁	σ(d₁)	σ(d₂)
无管	0.227 ± 0.003	0.278 ± 0.003
纯铝 1.0 mm	0.305 ± 0.004	0.345 ± 0.004
碳纤维 0.6 mm	0.242 ± 0.003	0.290 ± 0.003

pT > 0.5 GeV/c

β ≥ 0.569006，3,118 条（43.42%）

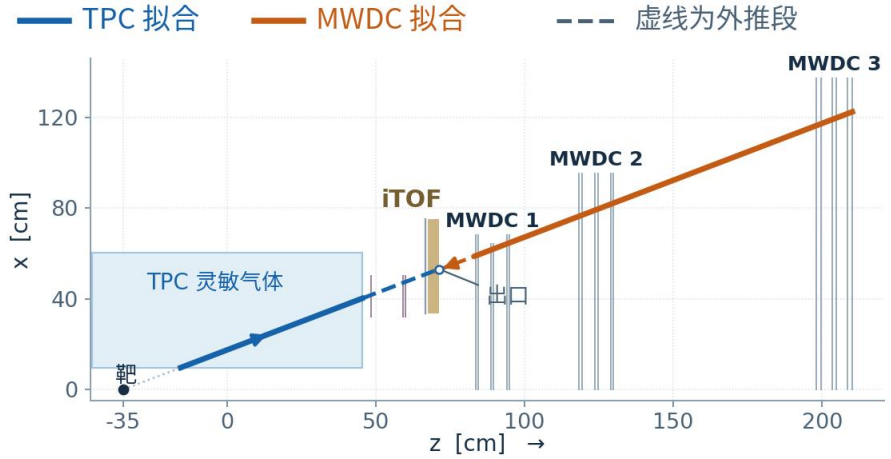
管壁	σ(d₁)	σ(d₂)
无管	0.209 ± 0.003	0.253 ± 0.004
纯铝 1.0 mm	0.250 ± 0.003	0.289 ± 0.004
碳纤维 0.6 mm	0.216 ± 0.003	0.259 ± 0.004

对TPC来说如果我们可以把单hit精度做到xz方向400μm，y方向500μm。
或许在某些β Cut 还有 theta Cut下可以做到300μm的DCA展宽

计算TPC 与 MWDC 的径迹在 iTOF 出口处的残差

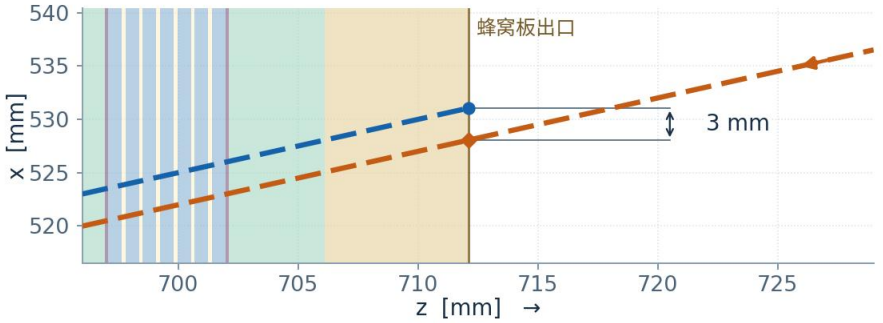
x–z 俯视投影。取 C+Pb Job2676 的实际几何，径迹从靶出发穿过正 x 侧的下游 iTOF 模块。

TPC 与 MWDC 的两条重建径迹



iTOF 出口局部放大

同一粒子的两条拟合线（示意）



出口处的 3 mm 横向错位为示意值。

TPC 出口至 iTOF 铝盖

空气段按穿越顺序排列，标注为沿 z 的厚度（mm）。



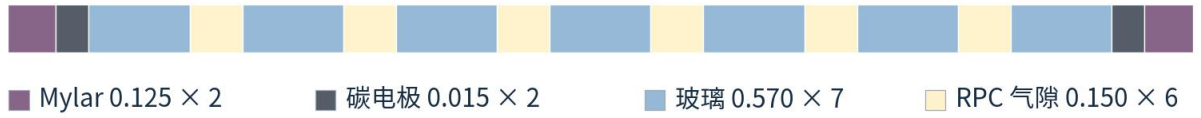
场笼膜	铝 0.10 μm / Mylar 25 μm / 铝 0.10 μm
两道密封窗	每道为铝 0.10 μm / Mylar 50 μm / 铝 0.10 μm

iTOF 内部：从入射铝盖到下游蜂窝板



相邻叠层之间各有两片 0.56 mm 的 PCB，正中一对夹一层铜读出条。

每组 MRPC 叠层的材料顺序



厚度单位为 mm（另标 μm 处除外）。此例的斜穿路程为法向厚度的 1.1184 倍。

几何输入　TPC_full.root · itof_vnomag2506tpccenter.root · mwdc_v10_avoidbeam_mylarhole.root

THANKS

BACK UP

同取 β ≥ 0.569006 时，两种 pT 门槛的 DCA 宽度

单 hit 的 localX / y 为 500 / 600 μm。每个材料、每个分量用全部入选径迹计算标准差，单位 mm。

pT > 0.3 GeV/c

β ≥ 0.569006，5,041 条（70.20%）

管壁	σ(d₁)	σ(d₂)
无管	0.283 ± 0.003	0.333 ± 0.004
纯铝 1.0 mm	0.349 ± 0.004	0.391 ± 0.004
碳纤维 0.6 mm	0.296 ± 0.003	0.344 ± 0.004

pT > 0.5 GeV/c

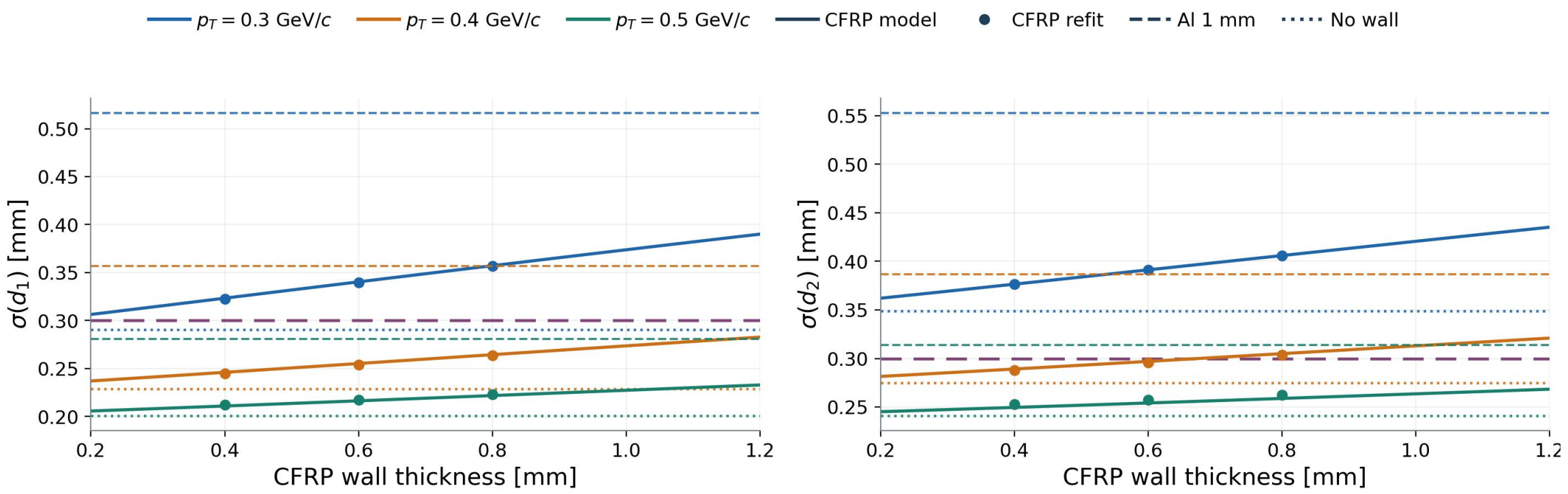
β ≥ 0.569006，3,118 条（43.42%）

管壁	σ(d₁)	σ(d₂)
无管	0.262 ± 0.004	0.303 ± 0.005
纯铝 1.0 mm	0.294 ± 0.004	0.334 ± 0.005
碳纤维 0.6 mm	0.267 ± 0.004	0.309 ± 0.005

± 为 200 次整事件重抽样得到的统计误差。同一 pT 门槛下，三种管壁条件使用同一批质子。

备份｜碳纤维管壁厚与两个 DCA 分量的关系

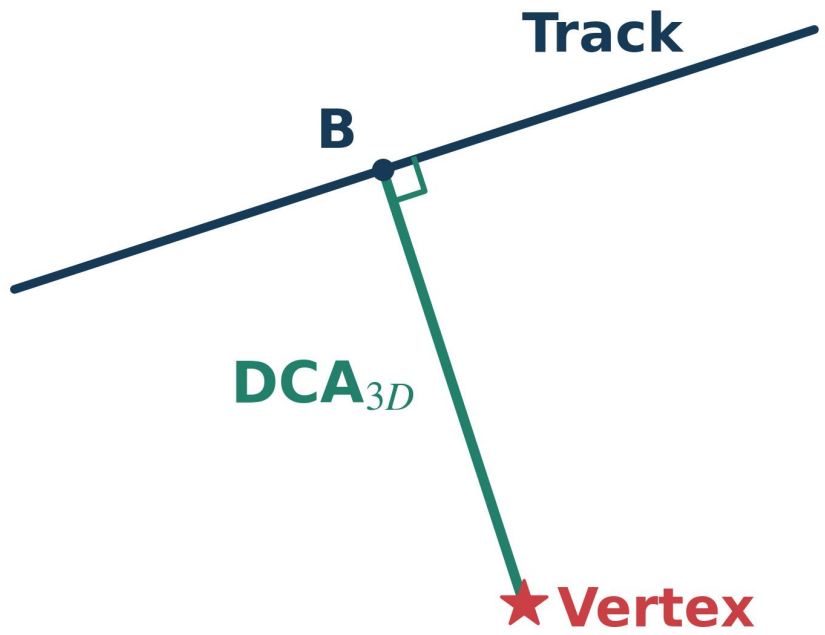
比较 0.4、0.6 和 0.8 mm 管壁。在每个参考方向内，只改变壁厚，保持 pad 布局及单 hit 精度相同。



圆点来自生成 hit 后的逐条拟合。曲线用测量基线和各壁厚的散射贡献做一阶误差传播。

备份｜三维 DCA 与两个正交分量

从原初顶点 V 向原径迹作垂线，垂足记为 B。三维 DCA 是线段 VB 的长度。



单条径迹

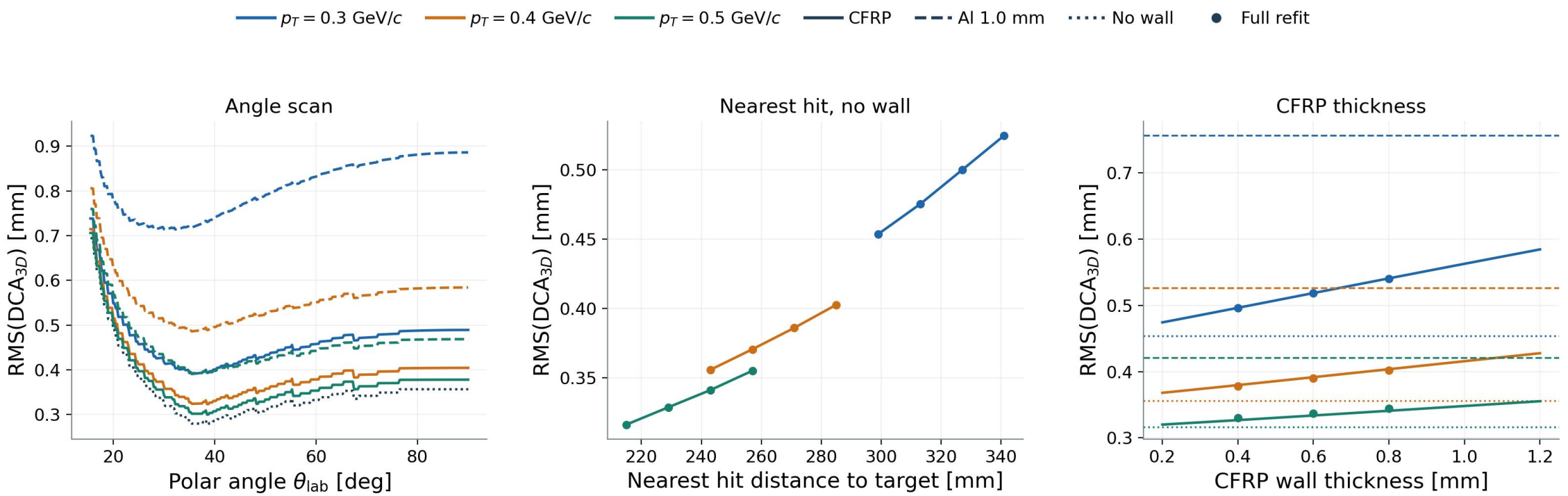
$DCA_3D = \sqrt{(d_1^2 + d_2^2)}$。$d_1$ 和 d_2 是顶点到径迹的最短位移在两个正交方向上的带符号分量。左图的垂足 B 对应第 5 页右图的 P。

一组径迹

报告 $RMS(DCA_3D) = \sqrt{\langle d_1^2 + d_2^2 \rangle}$。先逐条取平方，再对全部入选径迹求平均并开方。这个统计量包含两分量均值的贡献。

备份｜固定方向的三维 DCA

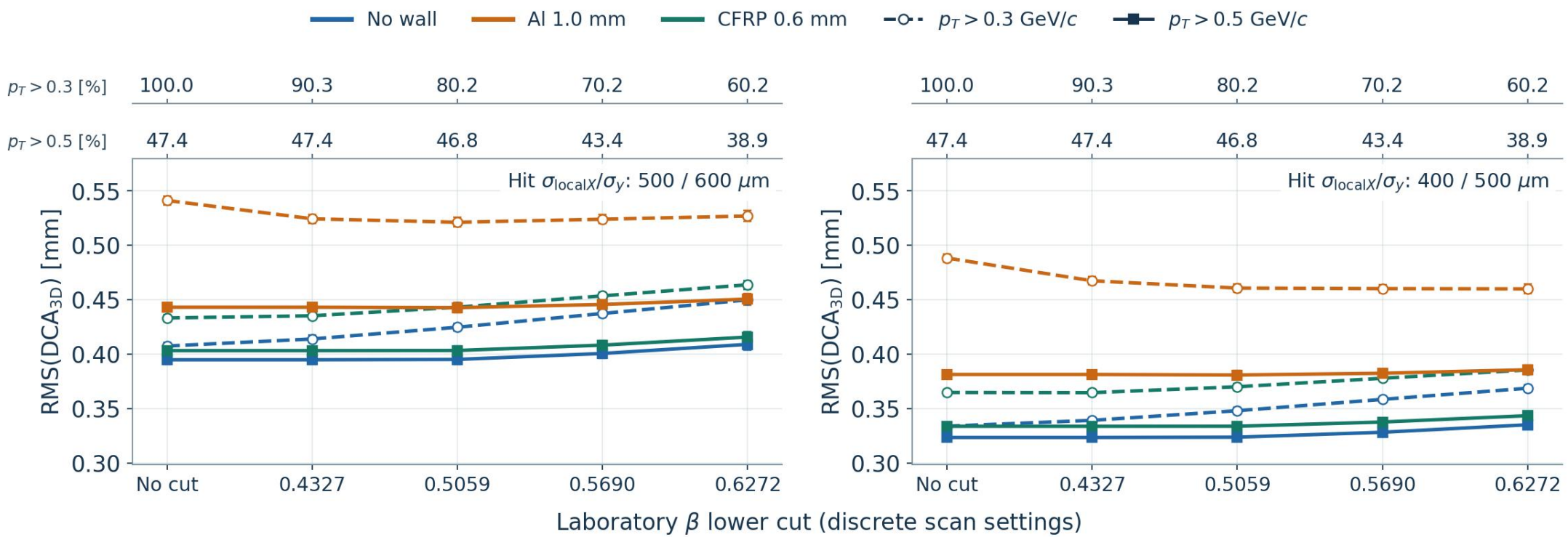
比较参考质子出射方向、删去最近的 pad 排、碳纤维壁厚三类设置。



三维 DCA 是原初顶点至原拟合直线的最短距离，各分布均以均方根汇总。

备份｜JAM 样本的三维 DCA

两种 pT 门槛、两组单 hit 精度，分别比较无管、纯铝、碳纤维时顶点到拟合直线的距离。

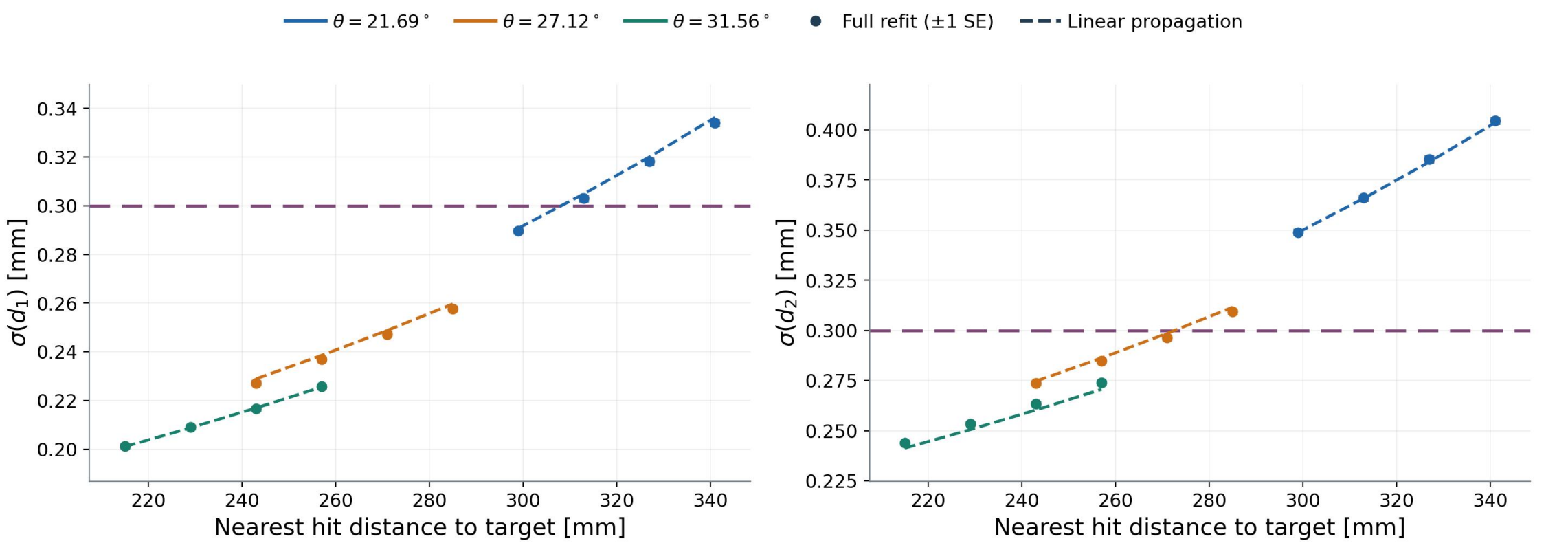


Upper axis: tracks retained / 7,181. Error bars: standard errors from 200 resamplings of complete JAM events.

对同一批质子逐条核对，$d_1^2 + d_2^2$ 等于三维最短距离的平方。不同管壁及 hit 精度使用配对样本。

删去最靠近靶的 hit 后，两个分量都变宽

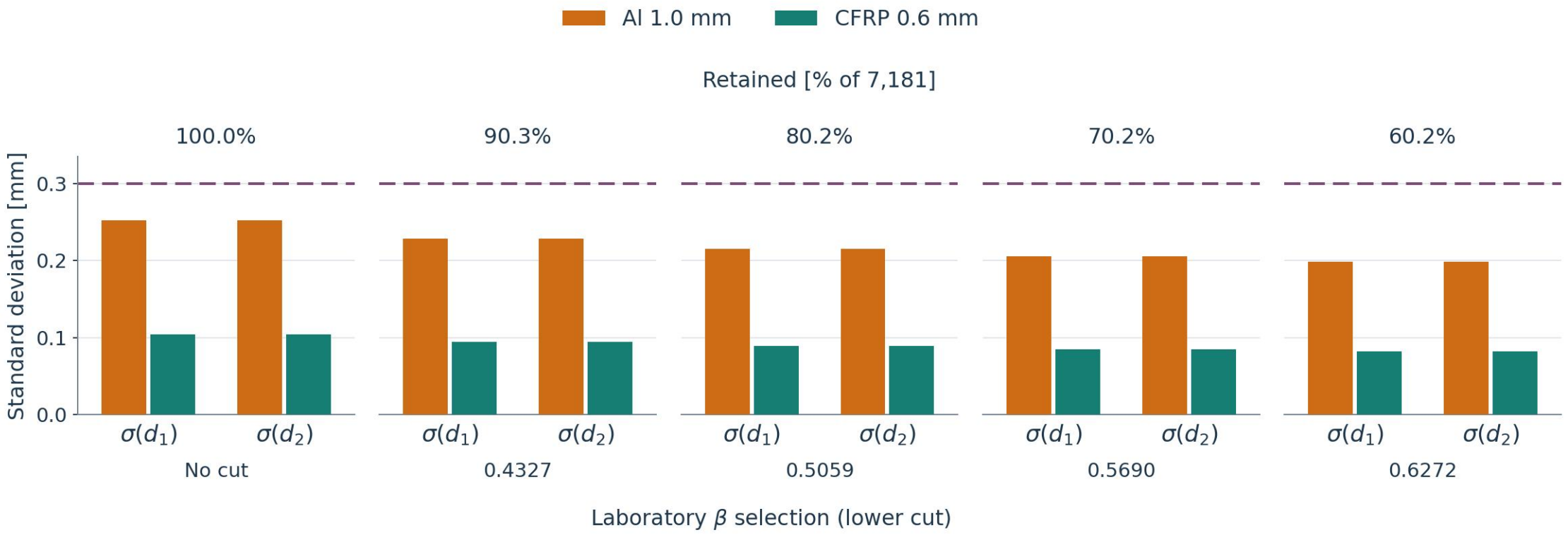
无管，每次去掉最内侧 0、1、2 或 3 个有效 pad 排，再用剩余 hit 拟合。每次拟合均至少使用 31 个 hit。



横轴是保留下来的最内侧 pad 排的半径，即首个 hit 在 x–z 平面内到靶的距离。删去三排后，两项宽度增大约 12%–16%。

只考虑管壁散射时，两个 DCA 分量各有多宽?

pT > 0.3 GeV/c。每一档 β 下限各画两组柱，分别比较铝管和碳纤维管对 σ(d₁)、σ(d₂) 的贡献。



β ≥ 0.5690 时保留 70.20%。铝管的两个分量均约 0.206 mm，碳纤维管均约 0.085 mm。

备份 | 如何从一次管壁散射算到 d_1 和 d_2?

入射质子经过 V，发生一次穿壁过程。在理想的无管情形，两分量均为零。

1　确定穿过的材料

由顶点和入射方向求质子进、出圆管的位置。用实验室系动量、速度和材料辐射长度求单投影散射角宽度。

2　生成出射直线

在垂直入射方向的两个正交轴上计算角度偏转，并保留穿壁期间横向位移与偏转的相关性。出口位置和出射方向共同确定直线。

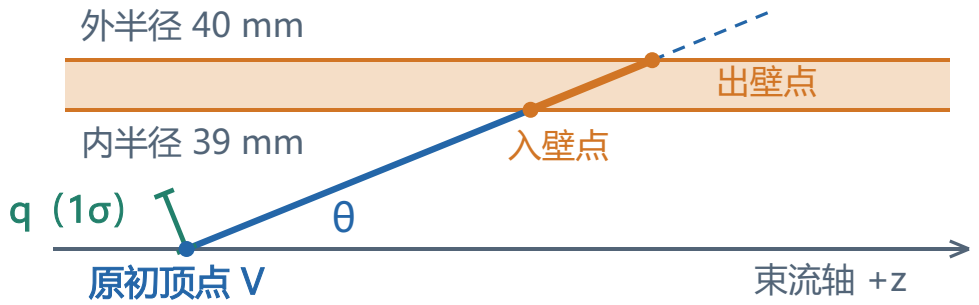
3　向原初顶点外推

对这条出射直线按第 5 页的几何定义计算 d_1 和 d_2。分别计算两个分量的均值和二阶矩，求各自的标准差。另以重复散射抽样核对，两个计算均保留有限壁厚造成的位置偏移。

备份｜质子穿过铝管时，多重库伦散射怎么算?

C+C，1.1 GeV/核子 · 逐个质子使用实验室系动量和方向 · 小角度高斯近似

质子在铝中实际走了多远?



θ 为入射径迹与束流轴的夹角。完整穿过一侧管壁时，
铝中路程 ℓ = 1 mm / sin θ。壁厚与 q 标尺均已放大。

一个投影上的角度宽度与位移宽度

用 PDG 式 (34.16) 求单个投影的角度标准差 θ0（rad）。
p 为质子总动量（GeV/c），β = v/c，纯铝 X0 = 88.96 mm。

$$\theta_0 = \frac{0.0136}{\beta p}\sqrt{u}\left[1 + 0.038\ln\left(\frac{u}{\beta^2}\right)\right], \quad u = \frac{\ell}{X_0}$$

$$L_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{s_1^2 + s_1 s_2 + s_2^2}{3}}, \quad q = L_{\text{eff}}\,\theta_0$$

s1 和 s2 是沿入射径迹从 V 到入壁点和出壁点的距离。
乘上有效距离后，角度宽度 θ0 对应一个方向的位移宽度 q（mm）。

两轴合成后，空间散射角有多宽?

散射绕入射方向对称。在二维高斯近似下，两条正交轴上
的分量 a、b 独立，均值为 0，标准差均为 θ0。小角度下，
空间夹角 α ≈ √(a² + b²)，其大小近似服从瑞利分布。
α 的均方根约为 √2 θ0，标准差约为 0.655 θ0。

反推到顶点附近，小 q 对应什么?

在每个方向上，联合抽取偏转角和与它相关的出口位移。
将出射直线反推到过 V 且垂直于入射径迹的平面，读出交点
相对 V 的两个带符号坐标。固定动量和入射方向，重复抽样，
两轴各自的标准差都是 q，左图的绿色括号标出其中一轴的 q。

参考质子　pT = 0.400 GeV/c，θ = 27.12°。单投影 θ0 = 3.165 mrad，理论 q = 86.65 mm × θ0 = 0.274 mm。

模拟 10 万次，空间夹角的均方根为 4.468 mrad，标准差为 2.075 mrad。两轴反推位移的标准差为 0.273 mm、0.274 mm。
DCA 研究再沿出射径迹生成 hit（每环一个），加入沿环 0.5 mm、漂移方向 0.6 mm 的误差，用至少 31 个 hit 拟合直线。

备份 | 什么是辐射长度？管壁占多少个 X0？

X0 是辐射长度。高能电子通过一个 X0 的材料，因韧致辐射，其平均能量降至初值的 1/e（约 37%）。
对同一动量的质子，实际路程与 X0 的比值越大，多重散射角的分布越宽。下表按垂直穿过一层管壁计算。

管壁材料	密度 ρ (g/cm³)	质量辐射长度 (g/cm²)	辐射长度 X0 (mm)	壁厚 t (mm)	材料预算 t / X0	报告中的用途
纯铝	2.699	24.01	88.96	1.0	1.124%	JAM 材料比较
碳纤维 / 环氧	1.570	42.40	270.03	0.6	0.222%	JAM 材料比较
碳纤维 / 环氧	1.570	42.40	270.03	0.4	0.148%	壁厚扫描
碳纤维 / 环氧	1.570	42.40	270.03	0.8	0.296%	壁厚扫描

质子斜穿完整侧壁时，用实际路程 t / sin θ 代替壁厚 t。θ 是入射径迹与束流轴的夹角。

碳纤维复合管采用的材料模型

按质量取 63% 碳纤维和 37% 环氧树脂，碳纤维按纯碳近似。
复合后 C、H、O 的质量分数为 91.12%、2.59%、6.29%。
用这些质量分数加权各元素质量辐射长度的倒数，
再用复合材料密度换算为长度。

管内氦气（供参考）

按 20 °C、1 atm，密度为 0.0001663 g/cm³。
质量辐射长度 94.32 g/cm²，X0 约 5.67 km。
径向穿过 39 mm 氦气约占 0.000688% X0。
报告中的散射比较只计管壁材料。

数据来源　PDG 元素材料表及质量分数混合公式（式 34.27）。
复合材料　Hexcel 8552 / AGP193-PW 数据表第 3 页（密度、树脂比例），LHCb-PUB-2022-003 附录 F.8（环氧组成）。

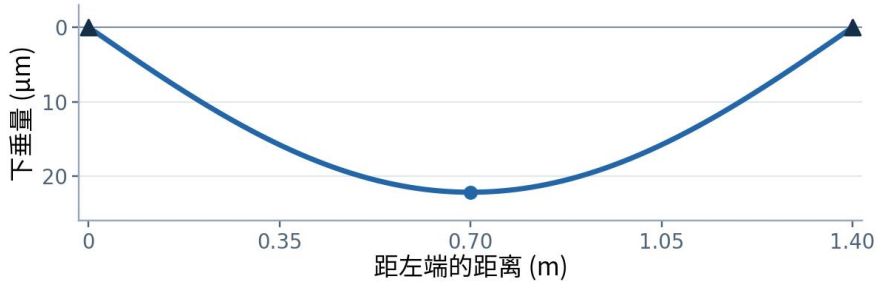
碳纤维管在自重下会弯多少?

将水平圆管看作一根梁，管壳自重沿全长均匀分布。

管长 L = 1.40 m，内径 78 mm，壁厚 0.60 mm，密度 1.57 g/cm³。管壳质量 0.326 kg，自重载荷 w = 2.28 N/m。轴向等效模量 E 取 45 GPa，圆环截面的惯性矩 I = 1.14 × 10^{-7} m^4。用梁的弯曲刚度 EI 计算各处下垂。

仅两端吊挂

两端同高，管端可转动。

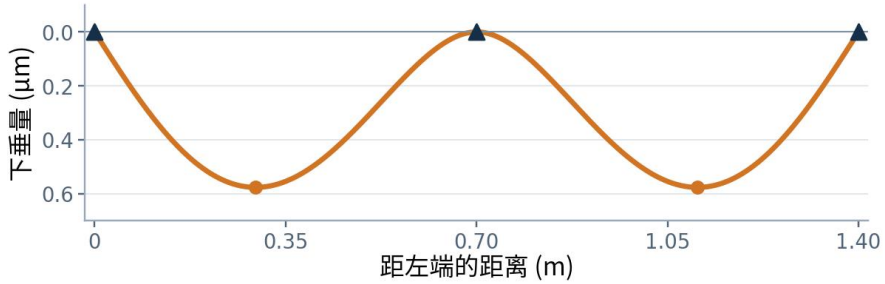


最大下垂 22.16 μm

出现在管子中央，距左端 0.700 m。

两端吊挂，加中央支撑

中央支撑与两端同高，管子连续跨过支撑。



最大下垂 0.576 μm

出现在距左端 0.295 m 和 1.105 m 两处。

两端简支时，中央下垂为 5wL⁴/(384EI)。加中撑后，令中央下垂为零，解得中撑向上的托力为 5wL/8 = 2.00 N。

备份 | 0.6 mm 碳纤维管的强度与氦气密封性

工作时管内、外总压都约为 1 atm。管壁受力取决于总压差，氦向外渗透取决于氦的分压差。

管壳承受多大的应力?

最大轴向弯曲应力

0.193 MPa / 0.048 MPa

分别对应两端吊挂、再加中央支撑。
用最大弯矩乘以外半径，再除以截面惯性矩。

如果管内总压比外侧高 1 kPa，管壁平均
环向拉应力约 0.065 MPa。

材料参照　AS4/8552 平纹试片在 25 °C 干态下，
经向拉伸和压缩强度分别为 828 和 883 MPa。

每天可能渗出多少氦?

按完整管壁估算的稳态渗透量

约 2.2 mL/天

假设管内是纯氦、管外几乎无氦，氦分压差约
1 atm。管壁面积约 0.346 m^2，厚 0.60 mm。

借用 IM7/8552 试片在 22.6 °C 的氦渗透系数，
按“渗透系数 × 面积 × 氦分压差 ÷ 壁厚”换算。

试片氦渗透系数为 1.81×10^{-17} mol/(m·s·Pa)。

气体体积按 22.6 °C、1 atm 计。管内容积约 6.69 L，
每天渗出量约占初始氦量的 0.033%。

样管验证　按实际铺层复核吊环处压陷和外压屈曲。装好端盖与接头，在工作压差下用外罩收集氦，
测整管总漏率。端封、接缝或贯通裂纹都可能使实测值高于管壁估算。

资料　Hexcel《HexPly 8552》第 3 页　·　Koord 等，Composites Part B 316 (2026)，表 1　·　ISO 20485 示踪气体检漏法

备份｜数据、图和整份讲稿的复现目录

目录中保留每张新图、逐档数值、拟合结果和程序。

完整路径

/public/home/cyliu/CeeNonMag/CeeRoot/macro/studies/cc1p1_dca_pt0p5/results/dca_common_beta

重做 JAM 的 β 扫描

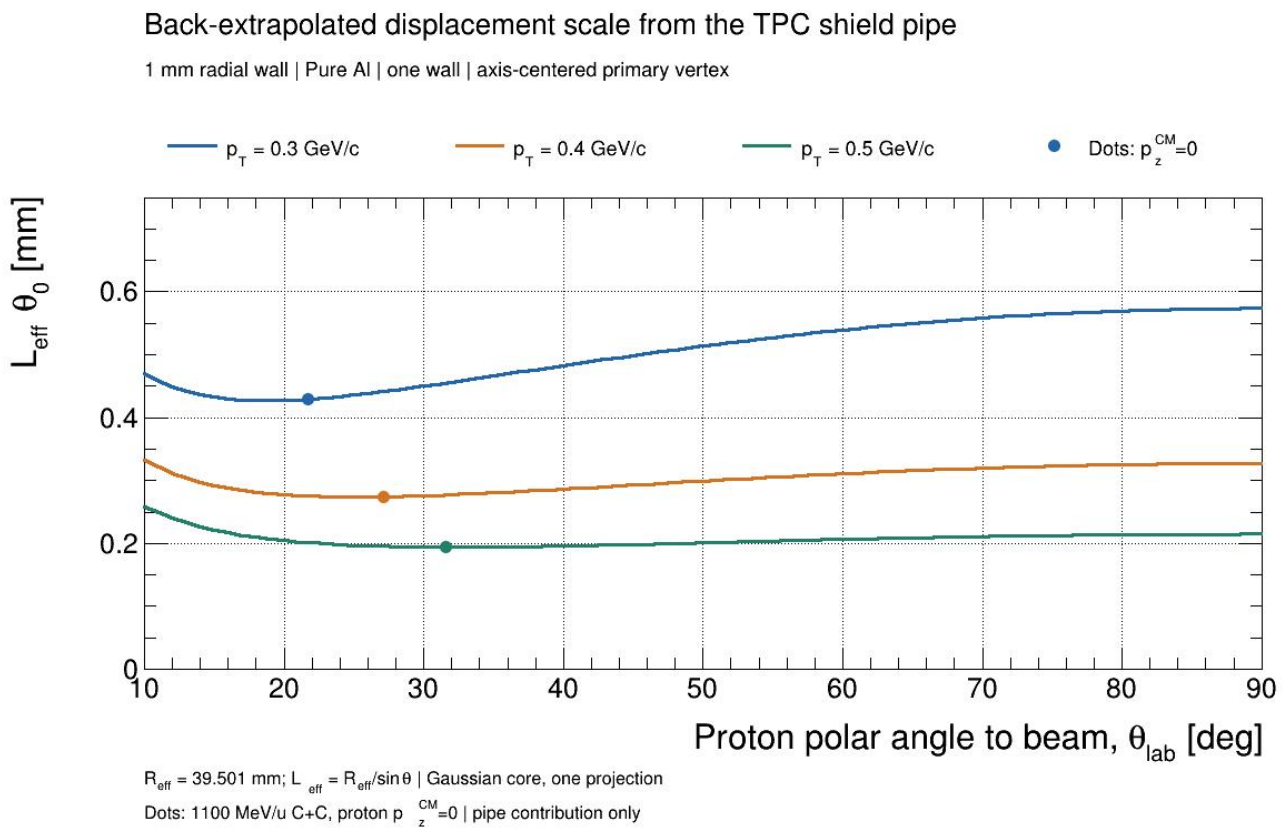
在此目录运行 bash reproduce.sh。
jam/ 保存逐档计数、DCA 宽度、统计误差及分布拟合结果。

管壁散射与讲稿

wall/ 保存仅考虑管壁时的 DCA 宽度、单投影位移 Q 和绘图程序。
inputs/ 保存原稿，deck/ 保存组装程序。

备份｜纯铝管的散射角与外推距离乘积

纯铝管壁厚 1 mm，内/外半径 39/40 mm；纵轴为 L_eff * θ0，单位 mm；未加入 hit 测量误差



顶点到管壁的有效距离

$$L_{\mathrm{eff}} = \frac{39.501\,\mathrm{mm}}{\sin\theta}$$

参考点（pT 单位：GeV/c）yCM=0

pT =0.3 → 0.429 mm

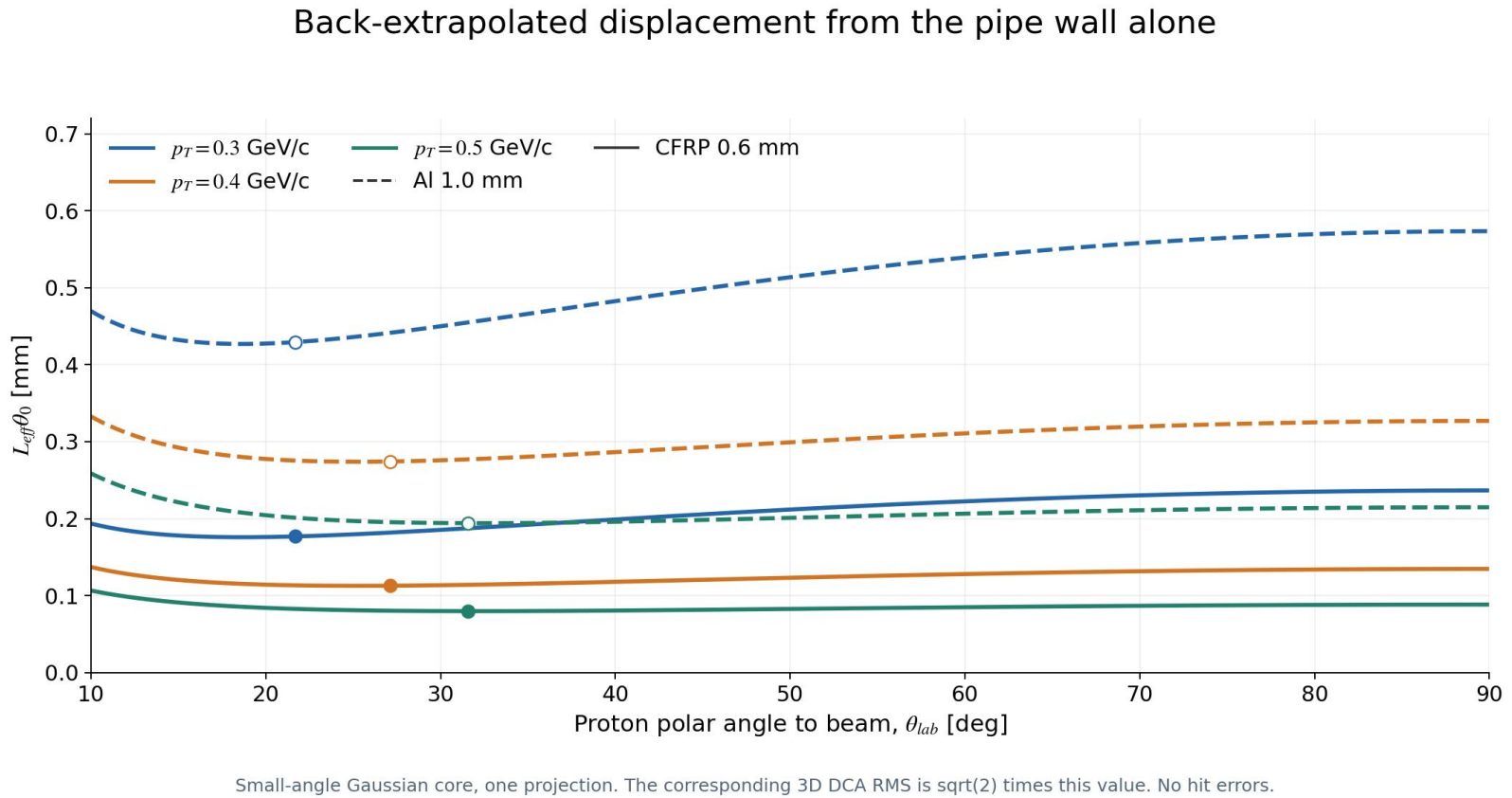
pT =0.4 → 0.274 mm

pT =0.5 → 0.194 mm

在 1.1 GeV/u 的 C+C 固定靶实验中，取核子对质心系纵向动量为零的质子。给定 pT 后，实验室出射极角随之确定。

备份｜铝管与碳纤维管的单投影位移估计

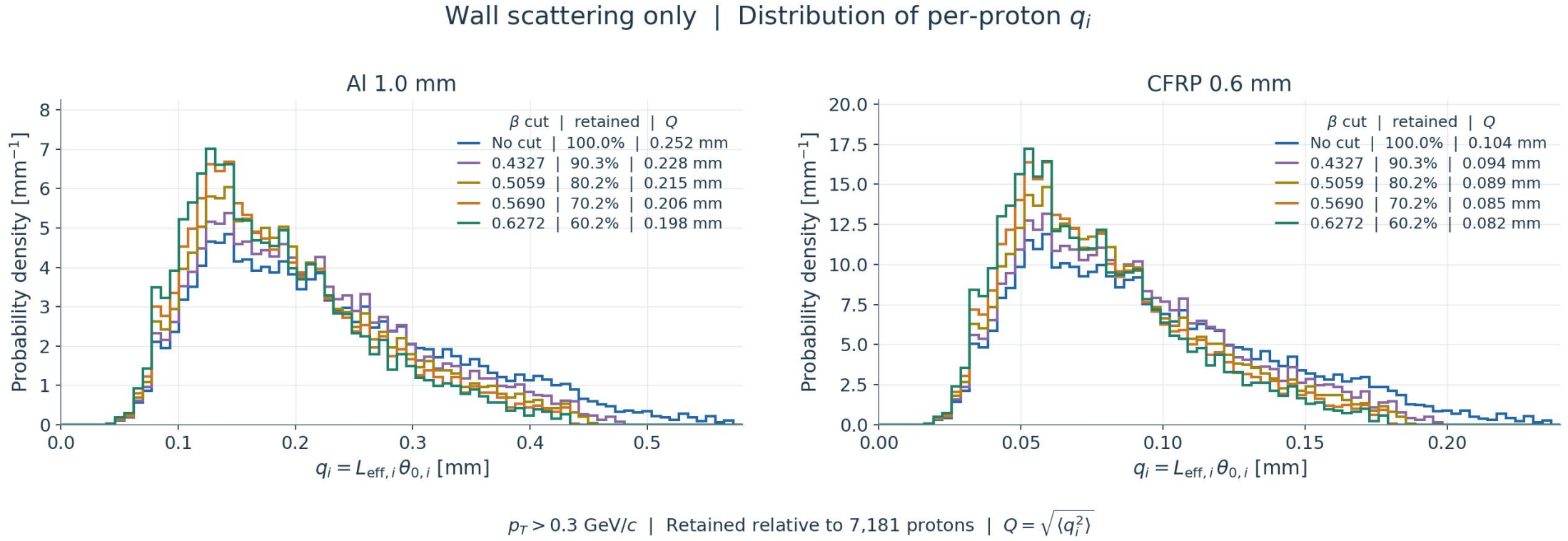
虚线：1 mm 纯铝；实线：0.6 mm CFRP；纵轴单位 mm，不含 hit 测量误差



三个参考方向的 L_eff θ₀ 分别为：纯铝 0.429、0.274、0.194 mm，碳纤维 0.177、0.113、0.080 mm。
该量是入射径迹法平面上的单投影位移尺度。

备份 | 各档 β 筛选下的单质子散射位移尺度

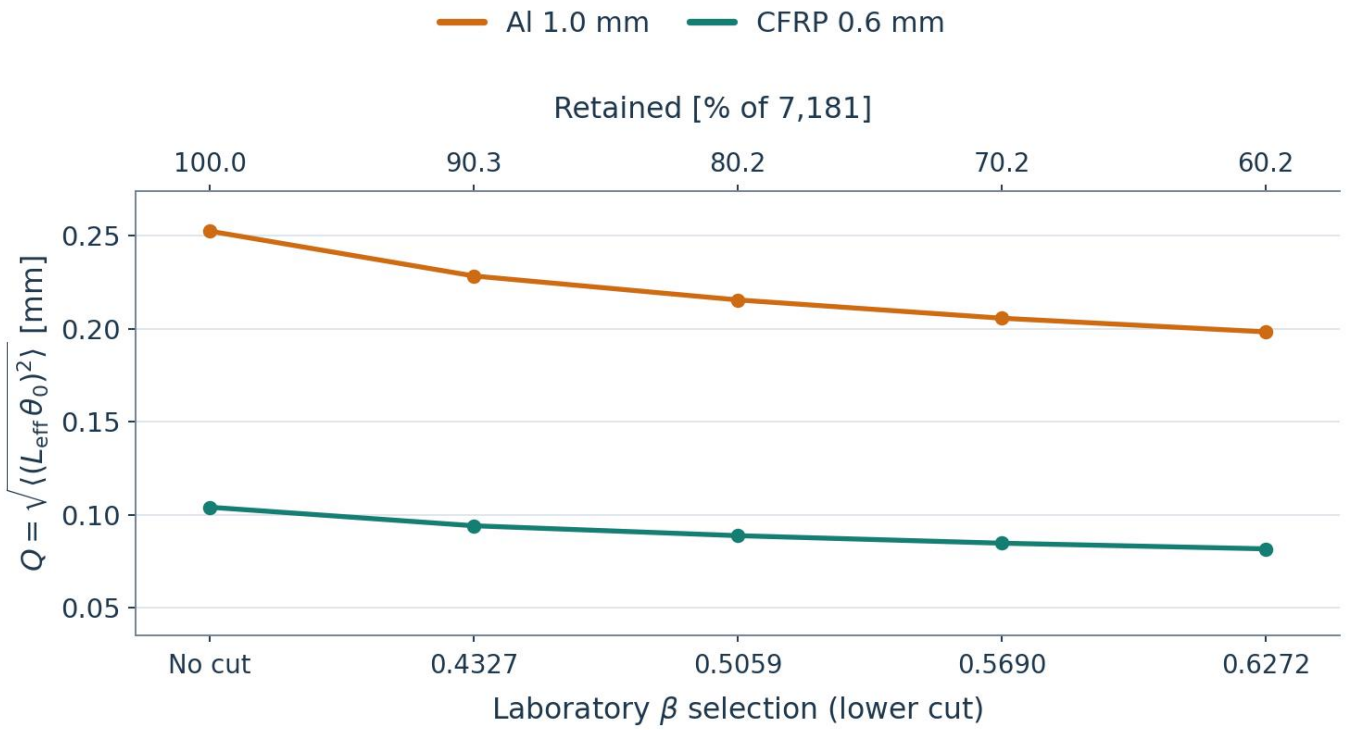
1 mm 纯铝与 0.6 mm 碳纤维；沿用同一批 JAM 质子及 β 筛选，只计算管壁散射



每条质子的 q 由其动量、穿壁路程和散射角宽度决定。图中横轴为 q，纵轴为选中质子的概率密度。

备份丨仅管壁散射的位移估计与 β 下限

Q = √⟨(L_eff * θ0)²⟩；这是仅由管壁产生的单投影散射位移宽度，单位 mm

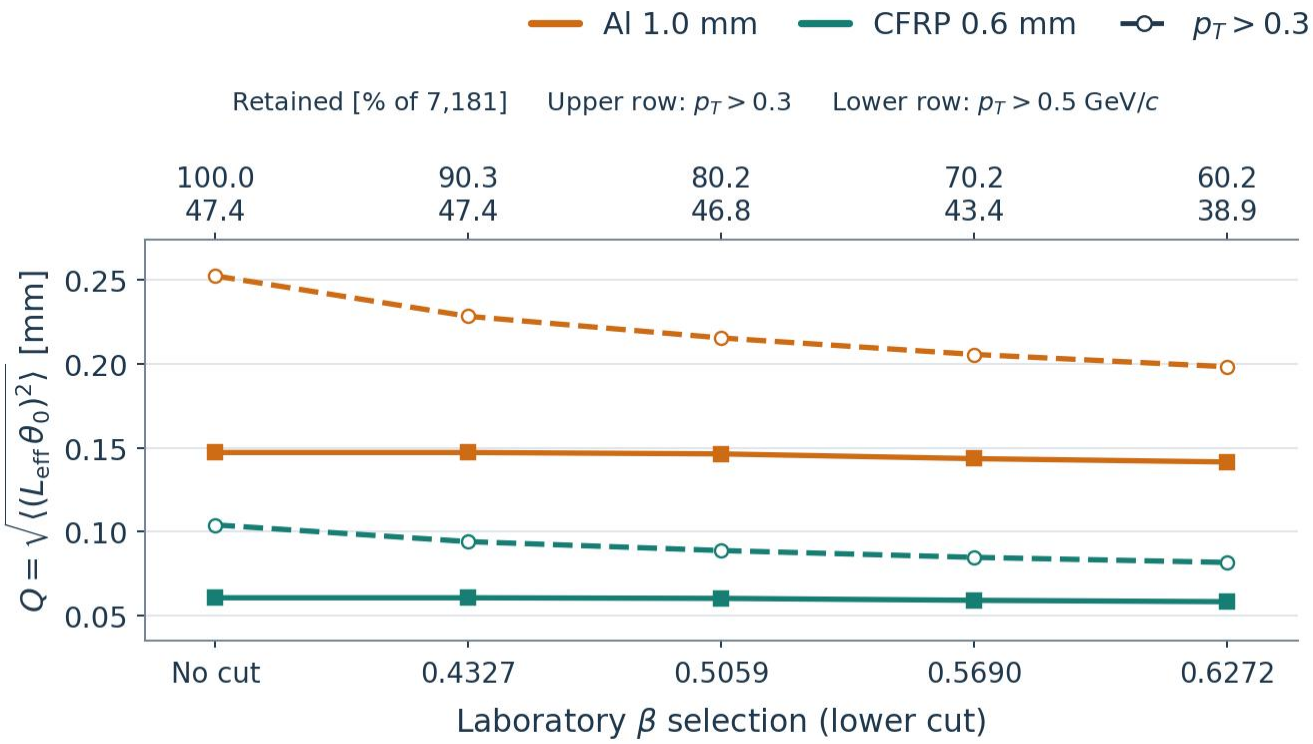


β 下限	Al 1 mm	CFRP 0.6 mm
无 β cut	0.252	0.104
β ≥ 0.4327	0.228	0.094
β ≥ 0.5059	0.215	0.089
β ≥ 0.5690	0.206	0.085
β ≥ 0.6272	0.198	0.082

β 越大 多次库伦散射对dca的影响越小

备份｜两种 pT 门槛的单投影位移估计

每条质子的 q 是有效距离与散射角宽度的乘积。纵轴 Q 取入选质子 q 的均方根。两组使用相同的 β 下限。



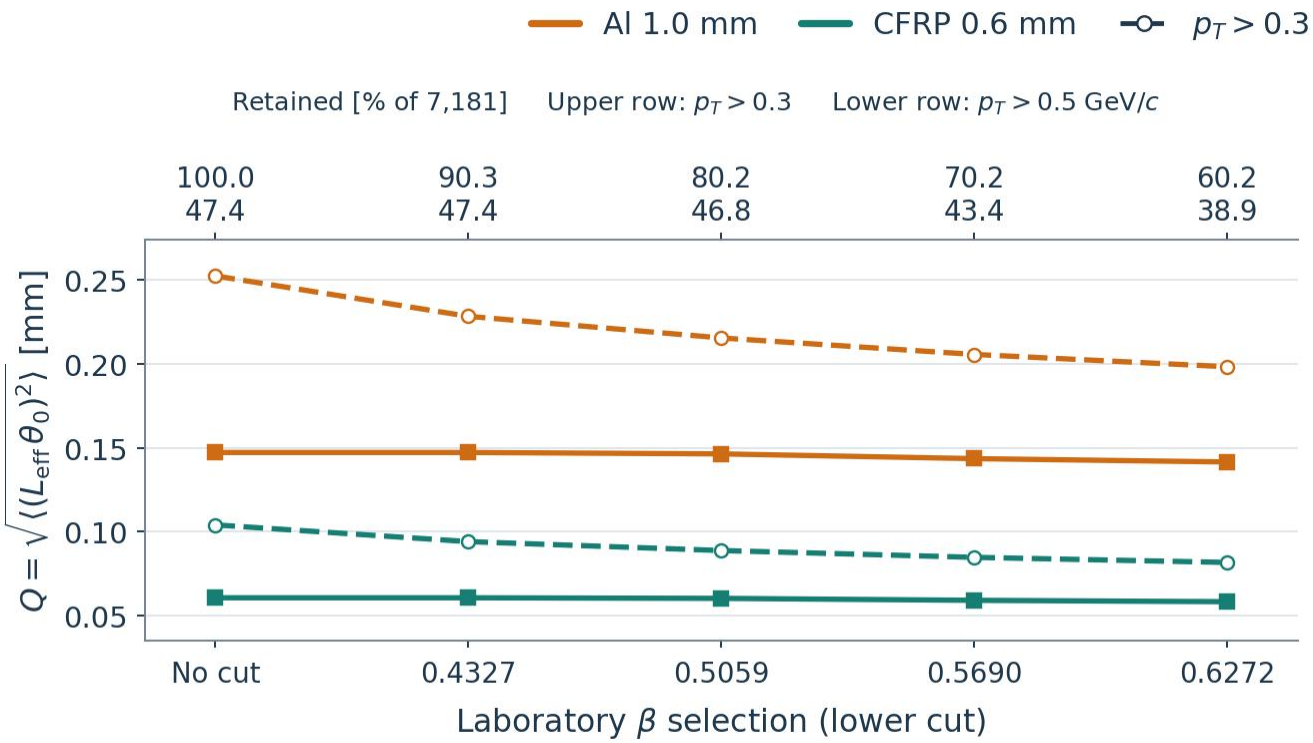
Retained protons

β cut	$p_T > 0.3$	$p_T > 0.5$
No cut	7,181	3,402
0.4327	6,481	3,402
0.5059	5,761	3,358
0.5690	5,041	3,118
0.6272	4,321	2,791

β ≥ 0.569006，pT 门槛从 0.3 提至 0.5 GeV/c 时，单投影位移 Q 的变化为 1 mm 铝管为 0.206 → 0.143 mm，0.6 mm 碳纤维管为 0.085 → 0.059 mm。

备份 | 400 / 500 μm 样本的单投影位移估计

对每条质子取 q = L_eff × θ₀，再求所选质子的均方根 Q。相同的质子和管壁给出相同的 Q。



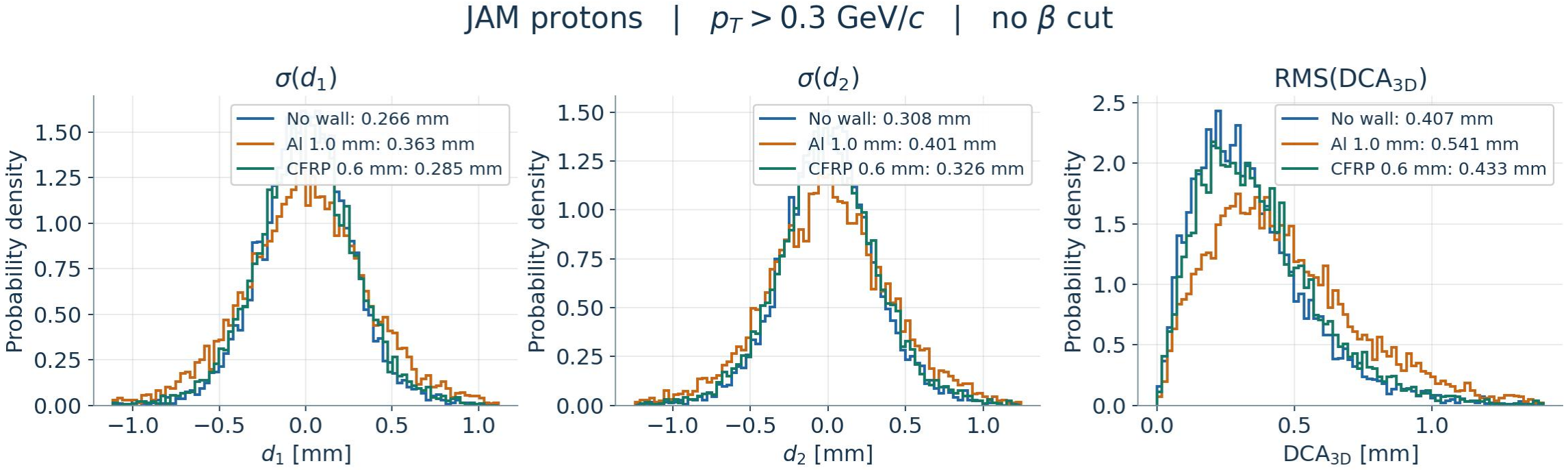
Retained protons

β cut	$p_T > 0.3$	$p_T > 0.5$
No cut	7,181	3,402
0.4327	6,481	3,402
0.5059	5,761	3,358
0.5690	5,041	3,118
0.6272	4,321	2,791

β ≥ 0.569006，pT 门槛从 0.3 提至 0.5 GeV/c 时，1 mm 铝管为 0.206 → 0.143 mm，0.6 mm 碳纤维管为 0.085 → 0.059 mm。两组 hit 精度选中的质子逐条相同，所以仅由管壁产生的 Q 也相同。

备份｜三种管壁条件下的 DCA 分布

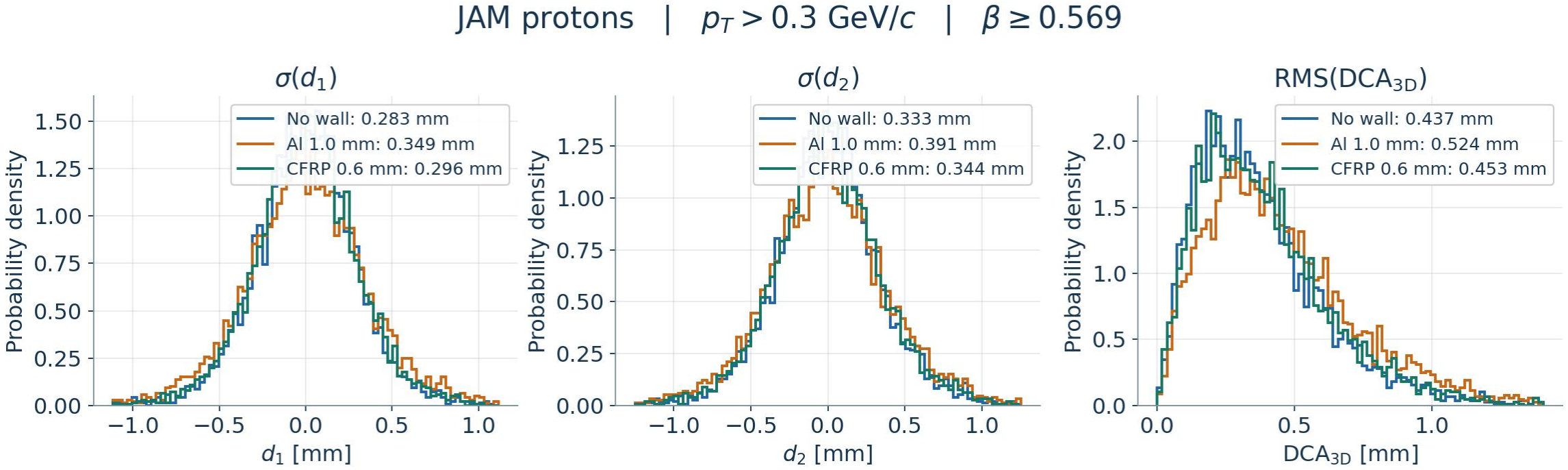
pT > 0.3 GeV/c，单 hit 的 localX / y 为 500 / 600 μm。无 β 下限，入选 7,181 条（100.00%）。



图例给出全样本宽度。前两列取 d_1 和 d_2 的样本标准差，第三列取顶点到原径迹的三维距离的均方根。

备份｜三种管壁条件下的 DCA 分布

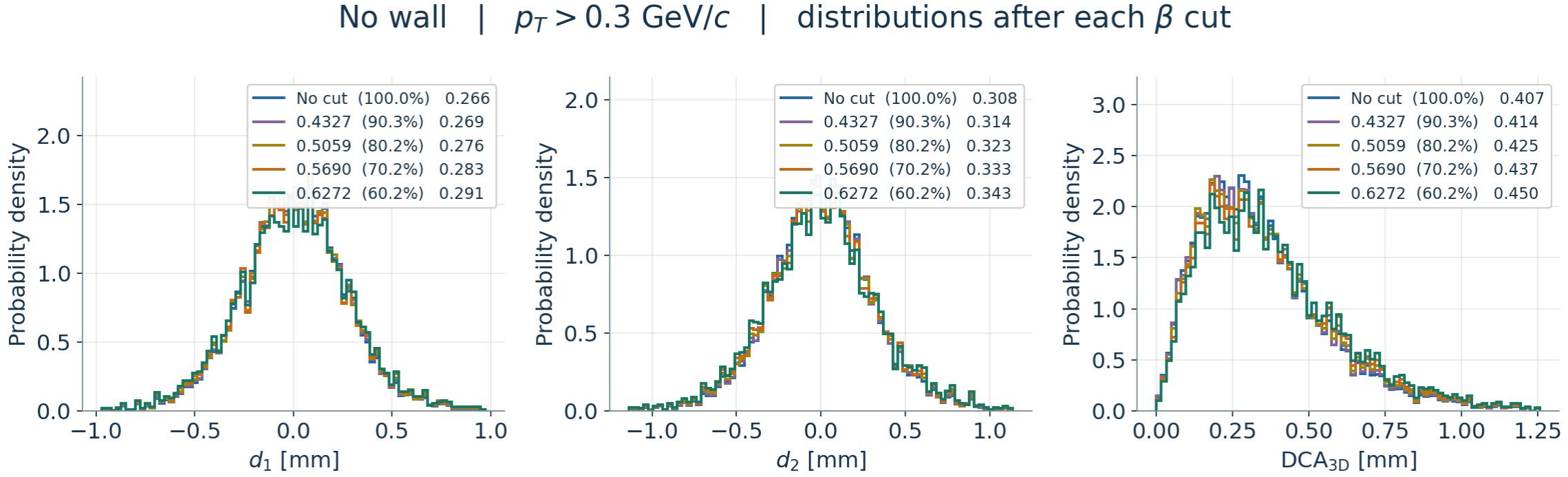
pT > 0.3 GeV/c，单 hit 的 localX / y 为 500 / 600 μm。β ≥ 0.569006，入选 5,041 条（70.20%）。



图例给出全样本宽度。前两列取 d_1 和 d_2 的样本标准差，第三列取顶点到原径迹的三维距离的均方根。

备份 | 无管条件下，不同 β 下限的 DCA 分布

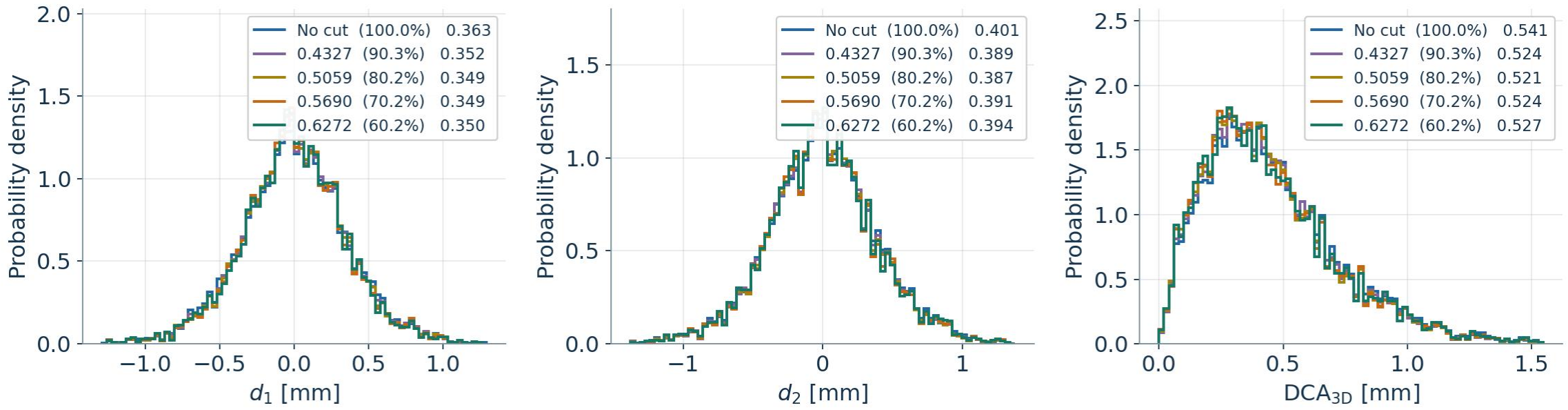
pT > 0.3 GeV/c，localX / y 为 500 / 600 μm。比较无 β 下限，以及 β ≥ 0.4327、0.5059、0.5690、0.6272 四档。



各颜色对应同一 pT 门槛的不同 β 下限。前两列的带符号距离取标准差，三维距离取均方根。

备份 | 纯铝 1.0 mm条件下，不同 β 下限的 DCA 分布

pT > 0.3 GeV/c，localX / y 为 500 / 600 μm。比较无 β 下限，以及 β ≥ 0.4327、0.5059、0.5690、0.6272 四档。

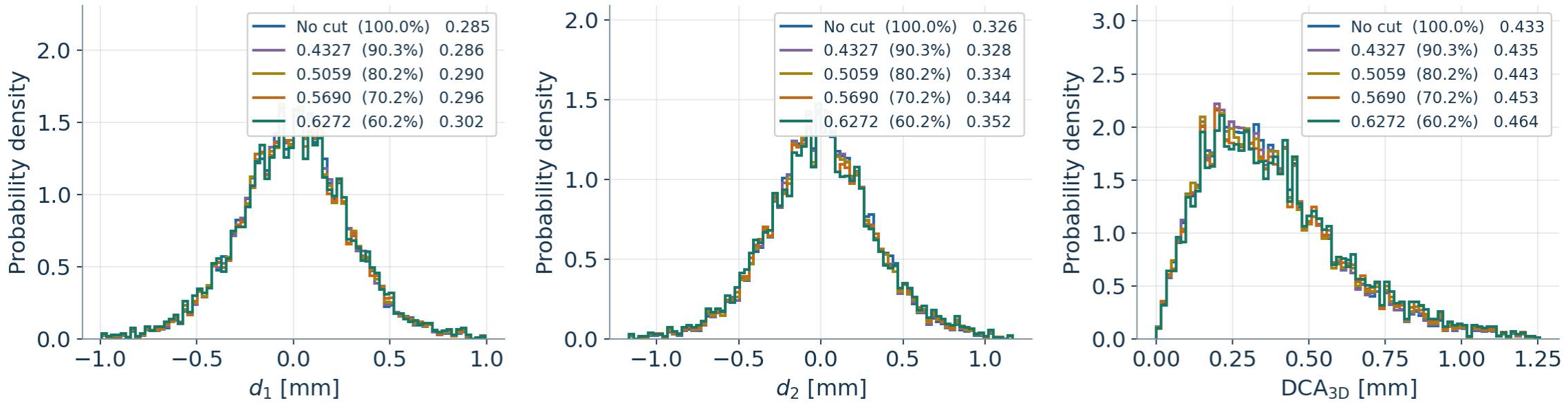


Legend: lower beta cut (tracks retained / 7,181) and full-sample width in mm. Each curve is normalized to its own sample.

各颜色对应同一 pT 门槛的不同 β 下限。前两列的带符号距离取标准差，三维距离取均方根。

备份 | 碳纤维 0.6 mm条件下，不同 β 下限的 DCA 分布

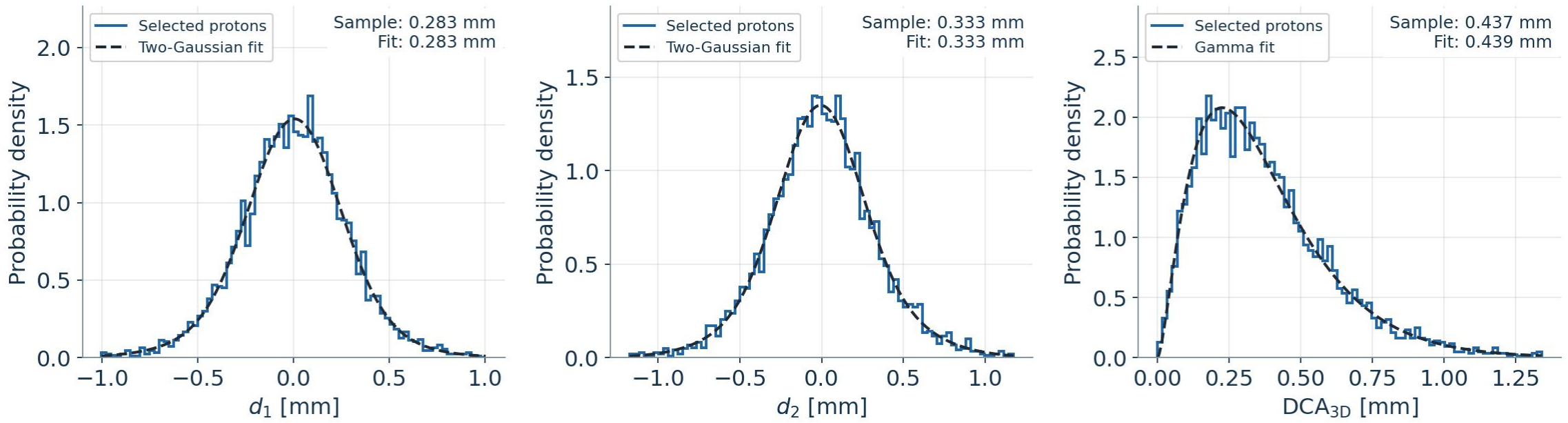
pT > 0.3 GeV/c，localX / y 为 500 / 600 μm。比较无 β 下限，以及 β ≥ 0.4327、0.5059、0.5690、0.6272 四档。



各颜色对应同一 pT 门槛的不同 β 下限。前两列的带符号距离取标准差，三维距离取均方根。

备份｜无管条件下，DCA 的样本宽度与拟合宽度

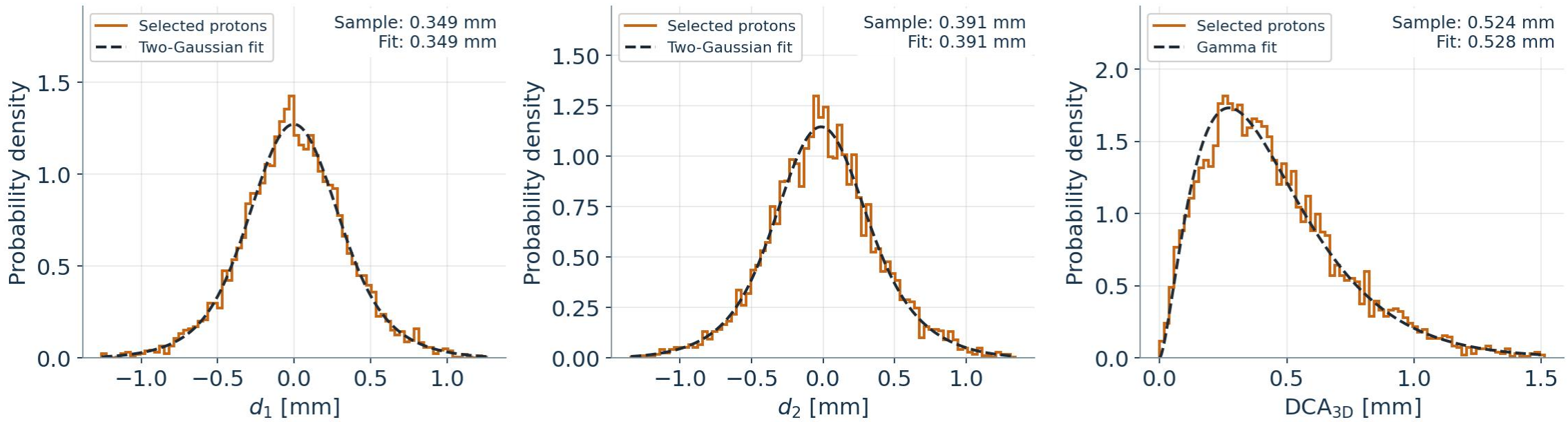
pT > 0.3 GeV/c，单 hit 的 localX / y 为 500 / 600 μm。β ≥ 0.569006，入选 5,041 条（70.20%）。



d_1、d_2 用双高斯拟合，取整个混合分布的标准差。三维距离用位置参数为零的 Gamma 分布拟合，取均方根。图中同时标出模拟样本的宽度。

备份 | 纯铝 1.0 mm条件下，DCA 的样本宽度与拟合宽度

pT > 0.3 GeV/c，单 hit 的 localX / y 为 500 / 600 μm。β ≥ 0.569006，入选 5,041 条（70.20%）。

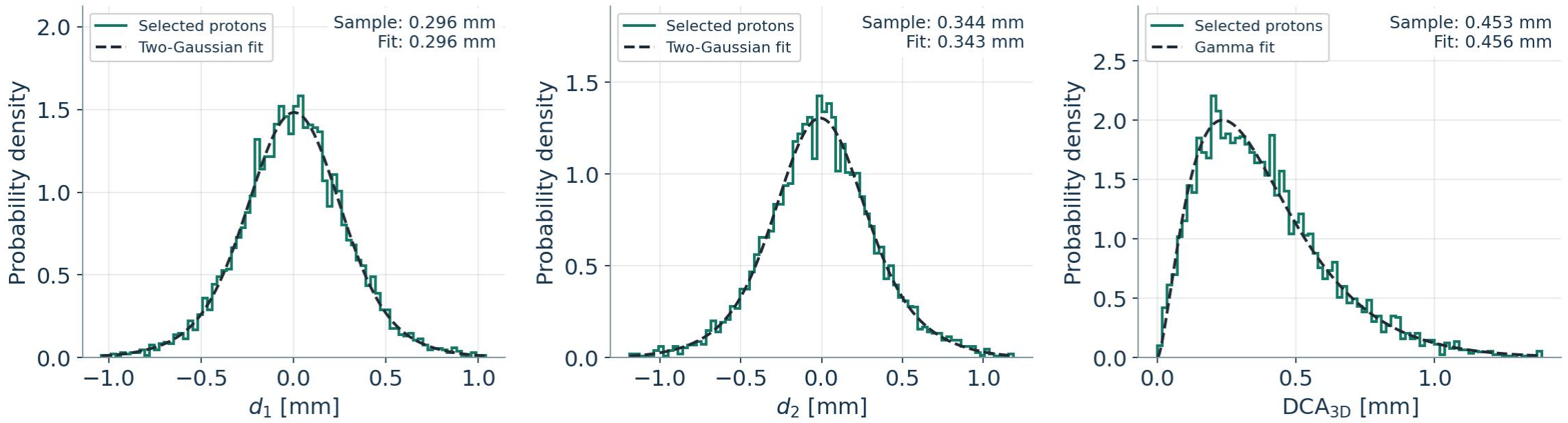


Fits use every selected track. Width is the standard deviation for signed components and the root mean square for the 3D distance.

d_1、d_2 用双高斯拟合，取整个混合分布的标准差。三维距离用位置参数为零的 Gamma 分布拟合，取均方根。图中同时标出模拟样本的宽度。

备份｜碳纤维 0.6 mm条件下，DCA 的样本宽度与拟合宽度

pT > 0.3 GeV/c，单 hit 的 localX / y 为 500 / 600 μm。β ≥ 0.569006，入选 5,041 条（70.20%）。

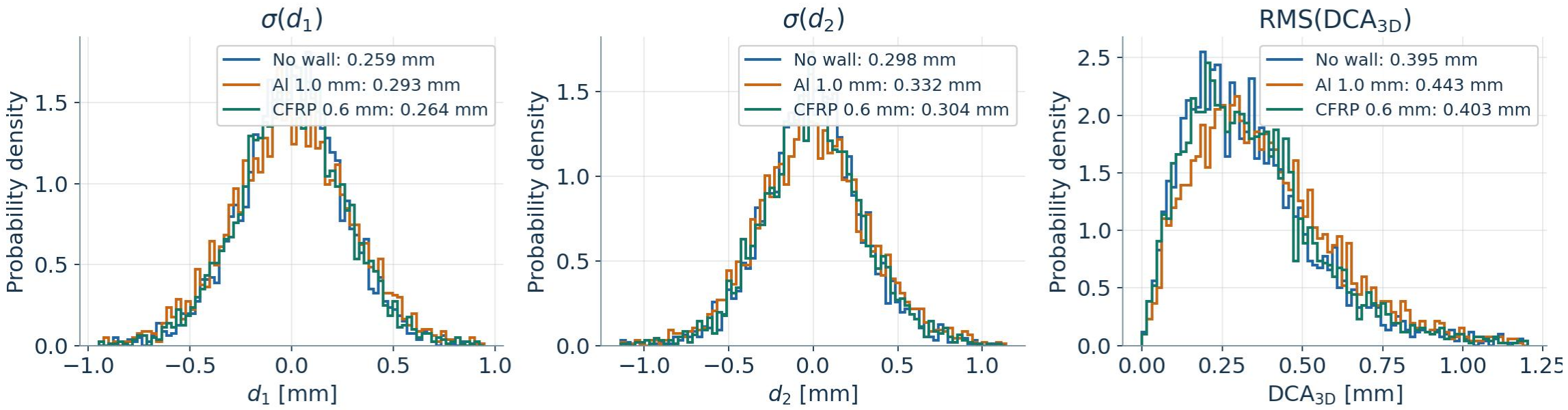


Fits use every selected track. Width is the standard deviation for signed components and the root mean square for the 3D distance.

d_1、d_2 用双高斯拟合，取整个混合分布的标准差。三维距离用位置参数为零的 Gamma 分布拟合，取均方根。图中同时标出模拟样本的宽度。

备份｜三种管壁条件下的 DCA 分布

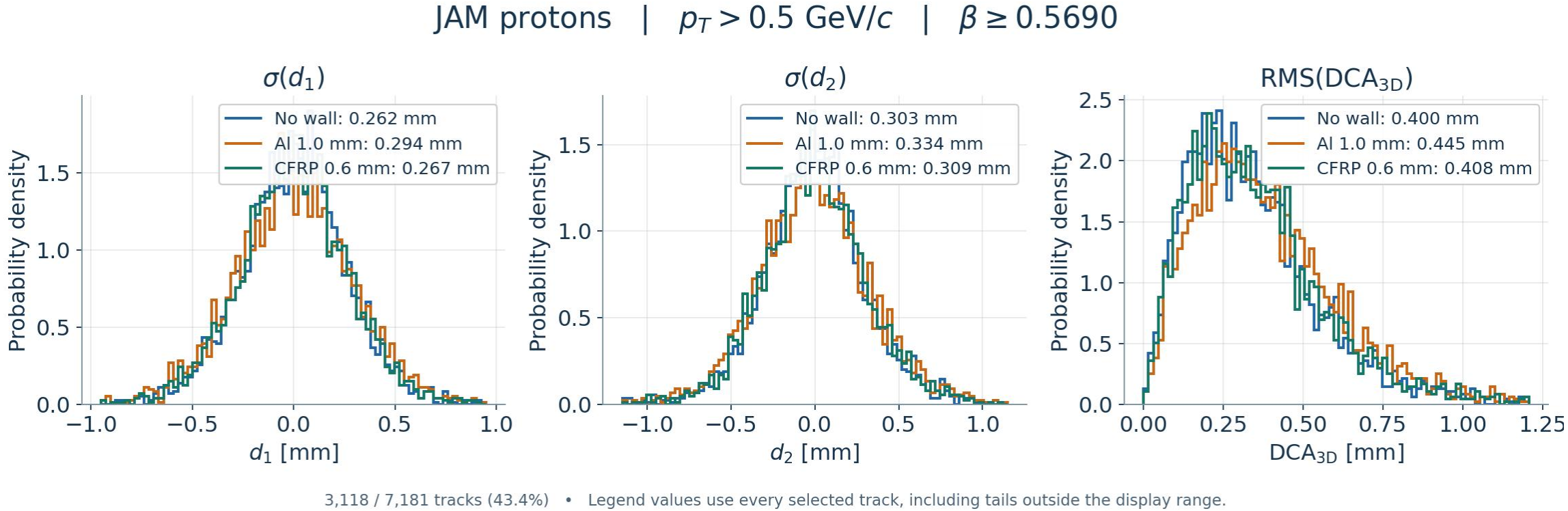
pT > 0.5 GeV/c，单 hit 的 localX / y 为 500 / 600 μm。无 β 下限，入选 3,402 条（47.38%）。



图例给出全样本宽度。前两列取 d_1 和 d_2 的样本标准差，第三列取顶点到原径迹的三维距离的均方根。

备份｜三种管壁条件下的 DCA 分布

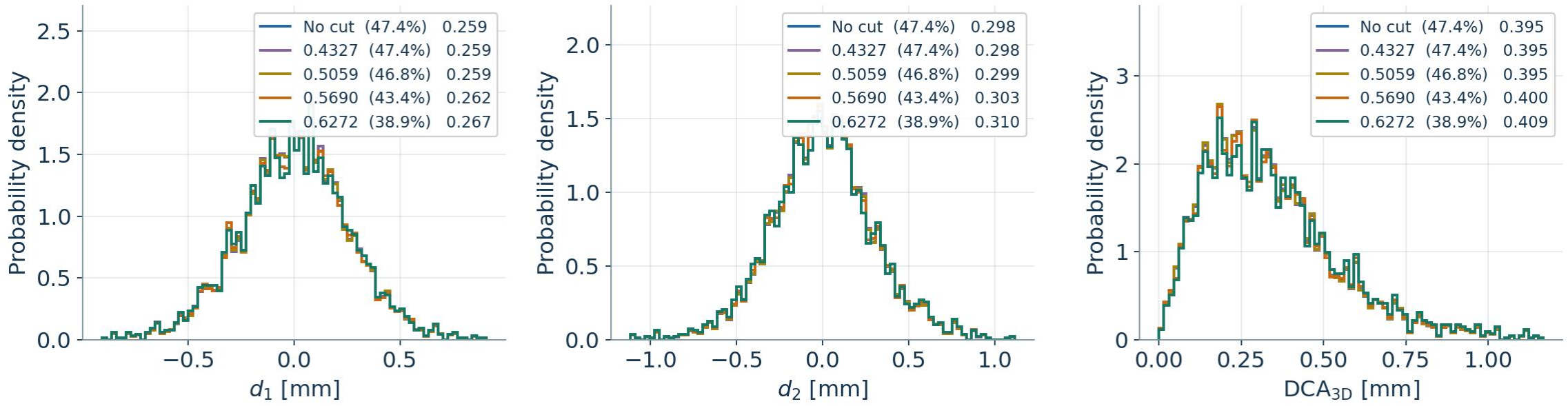
pT > 0.5 GeV/c，单 hit 的 localX / y 为 500 / 600 μm。β ≥ 0.569006，入选 3,118 条（43.42%）。



图例给出全样本宽度。前两列取 d_1 和 d_2 的样本标准差，第三列取顶点到原径迹的三维距离的均方根。

备份｜无管条件下，不同 β 下限的 DCA 分布

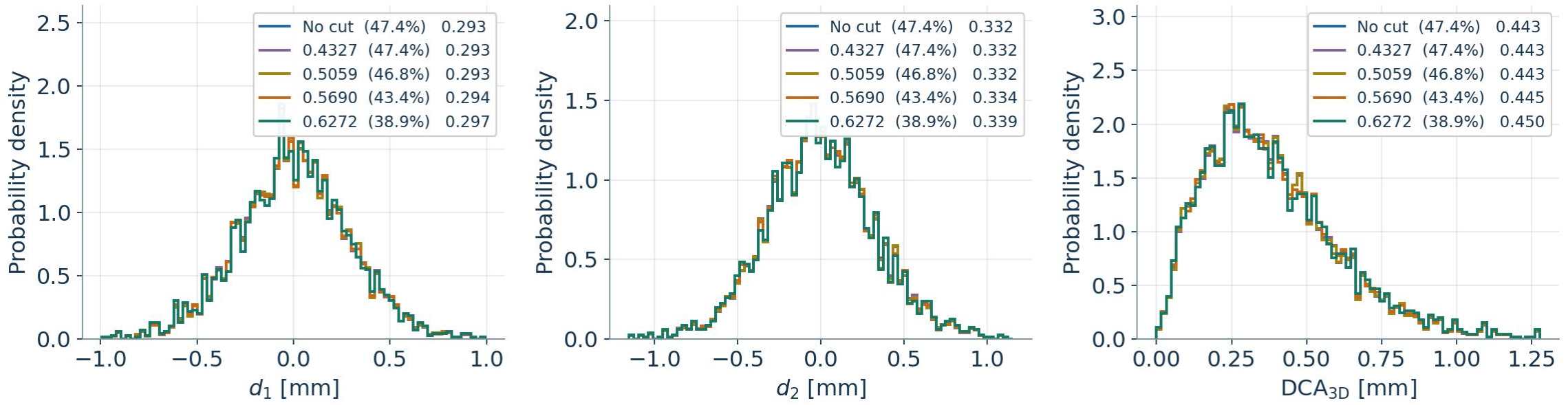
pT > 0.5 GeV/c，localX / y 为 500 / 600 μm。比较无 β 下限，以及 β ≥ 0.4327、0.5059、0.5690、0.6272 四档。



各颜色对应同一 pT 门槛的不同 β 下限。前两列的带符号距离取标准差，三维距离取均方根。

备份 | 纯铝 1.0 mm条件下，不同 β 下限的 DCA 分布

pT > 0.5 GeV/c，localX / y 为 500 / 600 μm。比较无 β 下限，以及 β ≥ 0.4327、0.5059、0.5690、0.6272 四档。

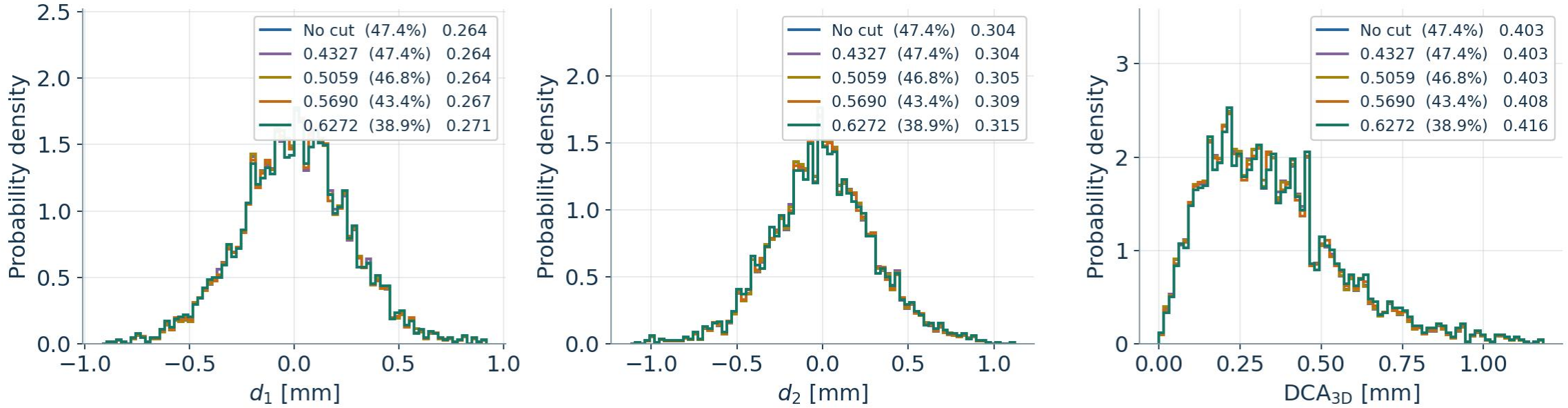


Legend: lower beta cut (tracks retained / 7,181) and full-sample width in mm. Each curve is normalized to its own sample.

各颜色对应同一 pT 门槛的不同 β 下限。前两列的带符号距离取标准差，三维距离取均方根。

备份 | 碳纤维 0.6 mm条件下，不同 β 下限的 DCA 分布

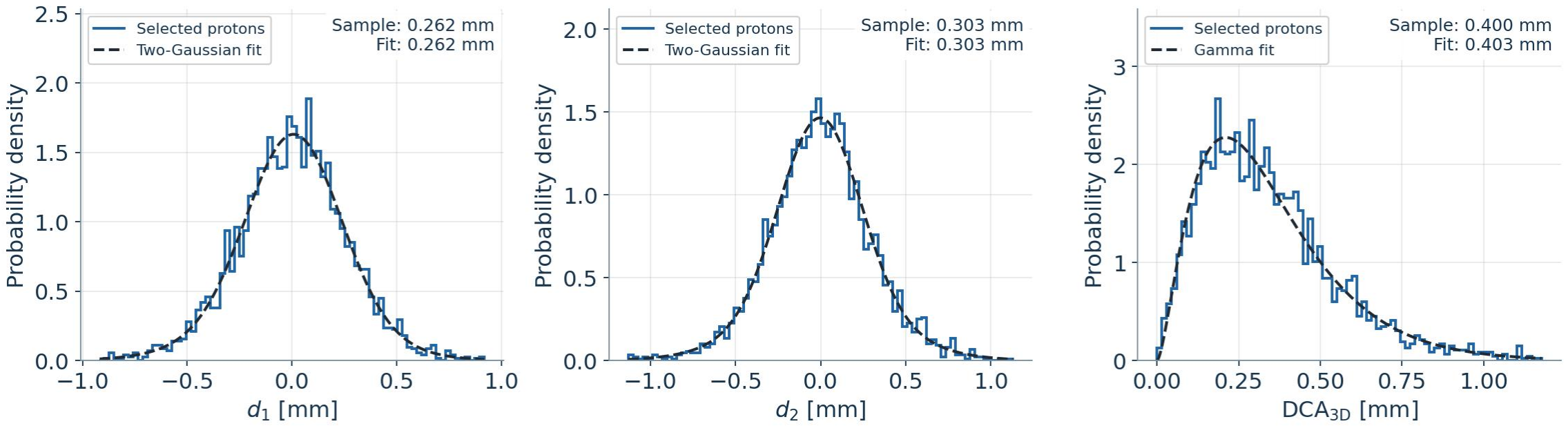
pT > 0.5 GeV/c，localX / y 为 500 / 600 μm。比较无 β 下限，以及 β ≥ 0.4327、0.5059、0.5690、0.6272 四档。



各颜色对应同一 pT 门槛的不同 β 下限。前两列的带符号距离取标准差，三维距离取均方根。

备份｜无管条件下，DCA 的样本宽度与拟合宽度

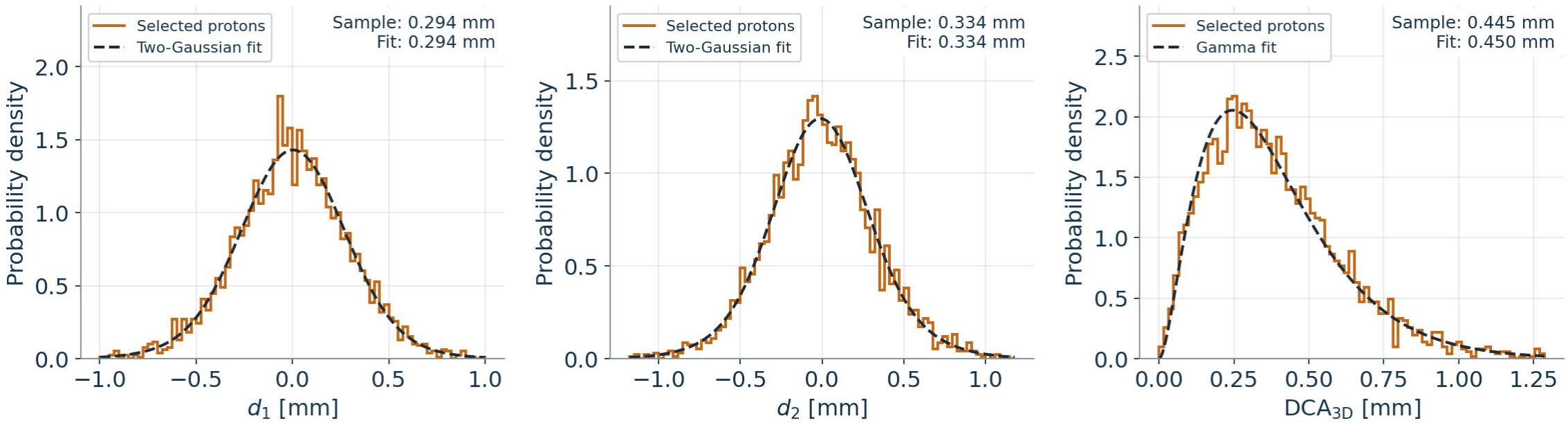
pT > 0.5 GeV/c，单 hit 的 localX / y 为 500 / 600 μm。β ≥ 0.569006，入选 3,118 条（43.42%）。



d_1、d_2 用双高斯拟合，取整个混合分布的标准差。三维距离用位置参数为零的 Gamma 分布拟合，取均方根。图中同时标出模拟样本的宽度。

备份 | 纯铝 1.0 mm条件下，DCA 的样本宽度与拟合宽度

pT > 0.5 GeV/c，单 hit 的 localX / y 为 500 / 600 μm。β ≥ 0.569006，入选 3,118 条（43.42%）。

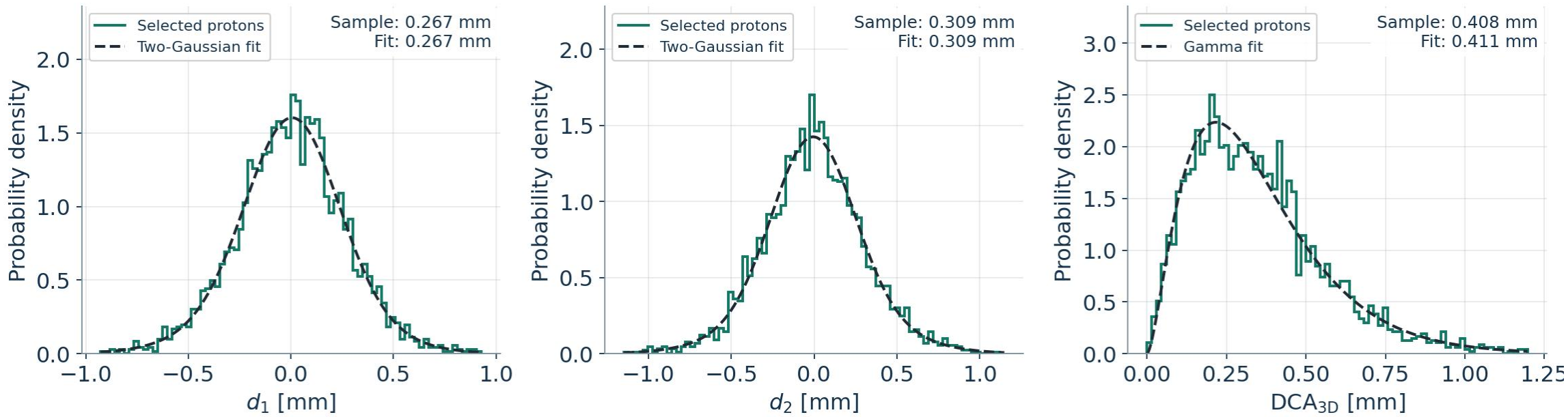


Fits use every selected track. Width is the standard deviation for signed components and the root mean square for the 3D distance.

d_1、d_2 用双高斯拟合，取整个混合分布的标准差。三维距离用位置参数为零的 Gamma 分布拟合，取均方根。图中同时标出模拟样本的宽度。

备份 | 碳纤维 0.6 mm条件下，DCA 的样本宽度与拟合宽度

pT > 0.5 GeV/c，单 hit 的 localX / y 为 500 / 600 μm。β ≥ 0.569006，入选 3,118 条（43.42%）。

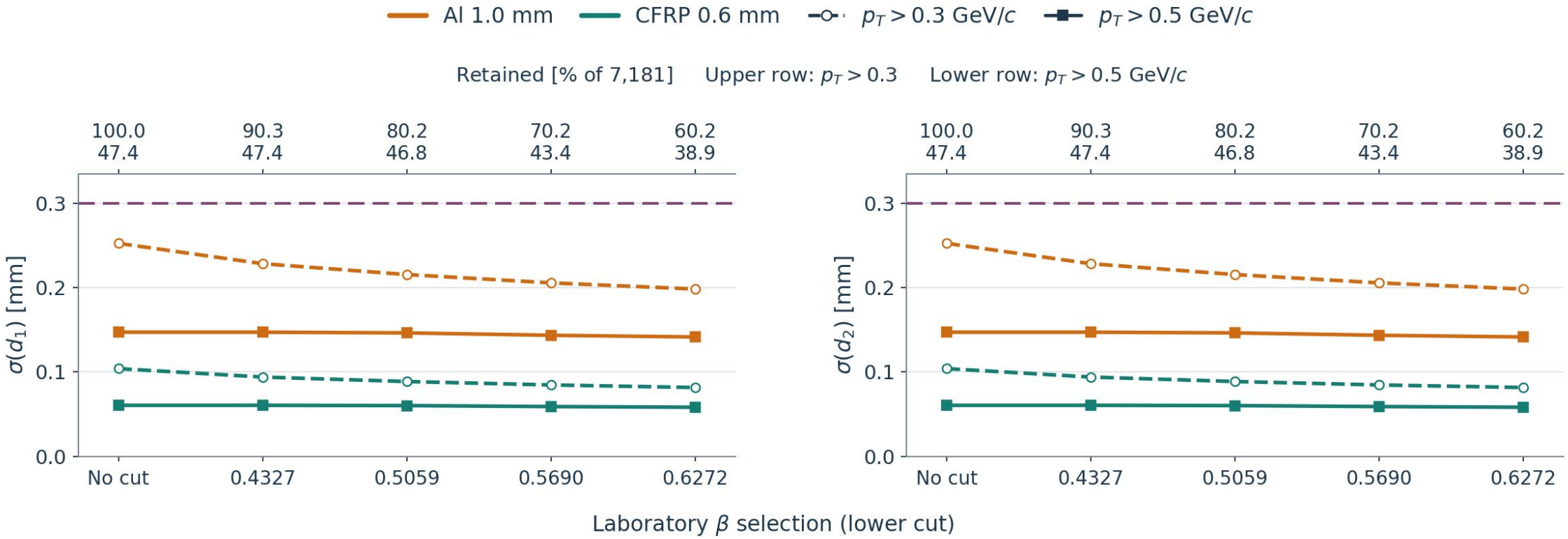


Fits use every selected track. Width is the standard deviation for signed components and the root mean square for the 3D distance.

d_1、d_2 用双高斯拟合，取整个混合分布的标准差。三维距离用位置参数为零的 Gamma 分布拟合，取均方根。图中同时标出模拟样本的宽度。

两种 pT 门槛下，管壁散射单独贡献多少 DCA?

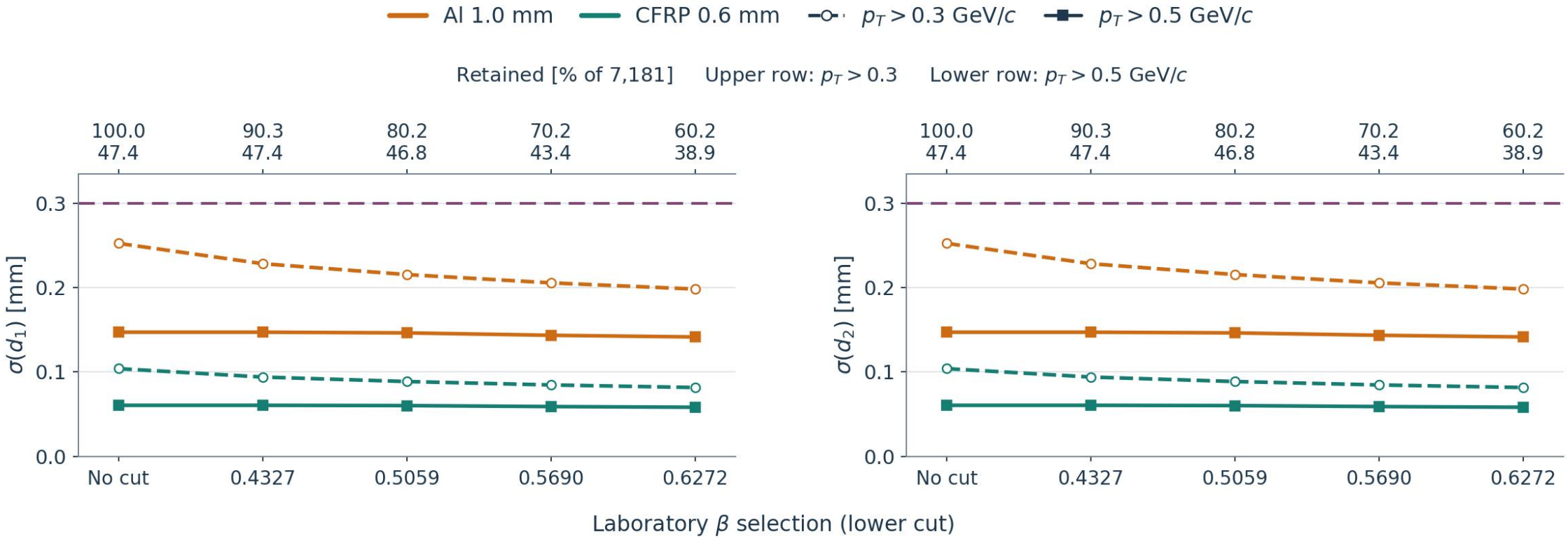
在相同 β 下限下比较 pT > 0.3 与 pT > 0.5 GeV/c 的质子。仅用散射后的出射直线计算 DCA。



β ≥ 0.569006，pT 门槛从 0.3 提至 0.5 GeV/c。两个投影分量的宽度取至 0.001 mm 时相同。
1 mm 铝管为 0.206 → 0.143 mm，0.6 mm 碳纤维管为 0.085 → 0.059 mm。

两组 hit 精度选中相同质子，纯管壁的 DCA 宽度相同

400 / 500 µm 分析入选的质子与 500 / 600 µm 分析逐条相同。出射直线只由入射质子和管壁散射决定。



β ≥ 0.569006，pT 门槛从 0.3 提至 0.5 GeV/c。两个投影分量的宽度取至 0.001 mm 时相同。
1 mm 铝管为 0.206 → 0.143 mm，0.6 mm 碳纤维管为 0.085 → 0.059 mm。