

BESIII径迹刻度

伍灵慧

wulh@ihep.ac.cn

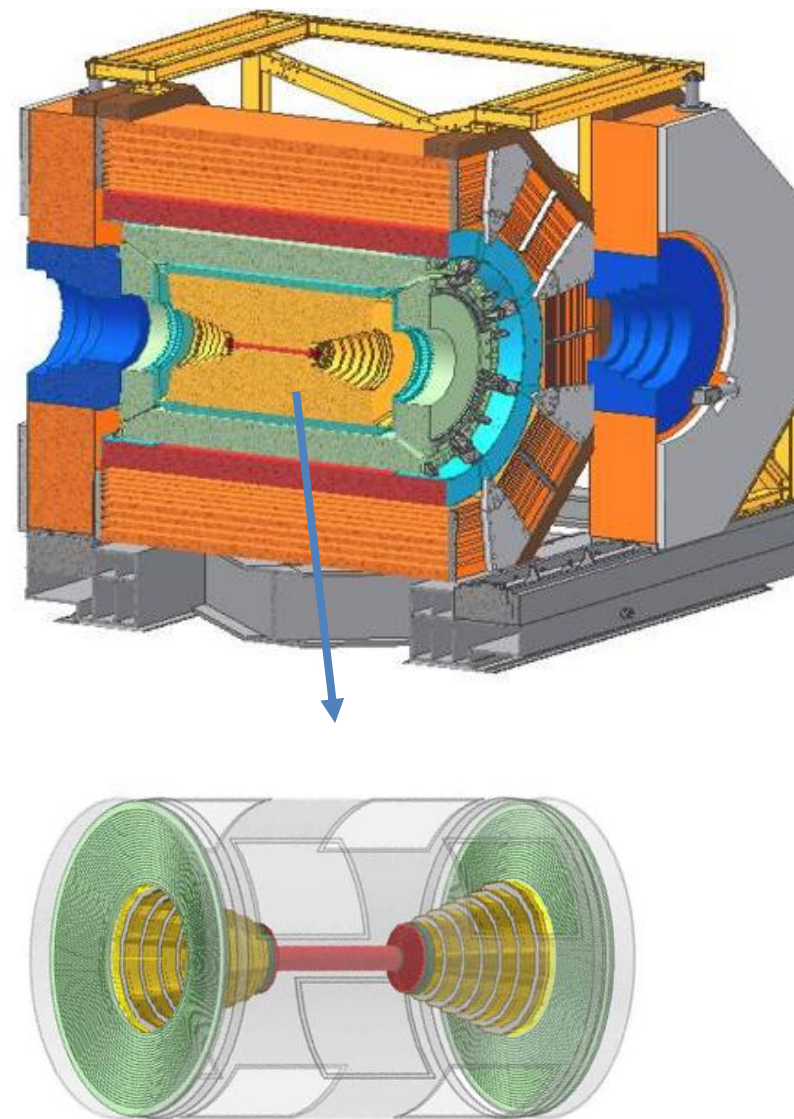
代表BESIII离线软件工作组

BESIII径迹探测

- BESIII采用漂移室(Multi-layer Drift Chamber)作为中心径迹探测器，对末态带电粒子的飞行轨迹、动量及能量损失进行测量

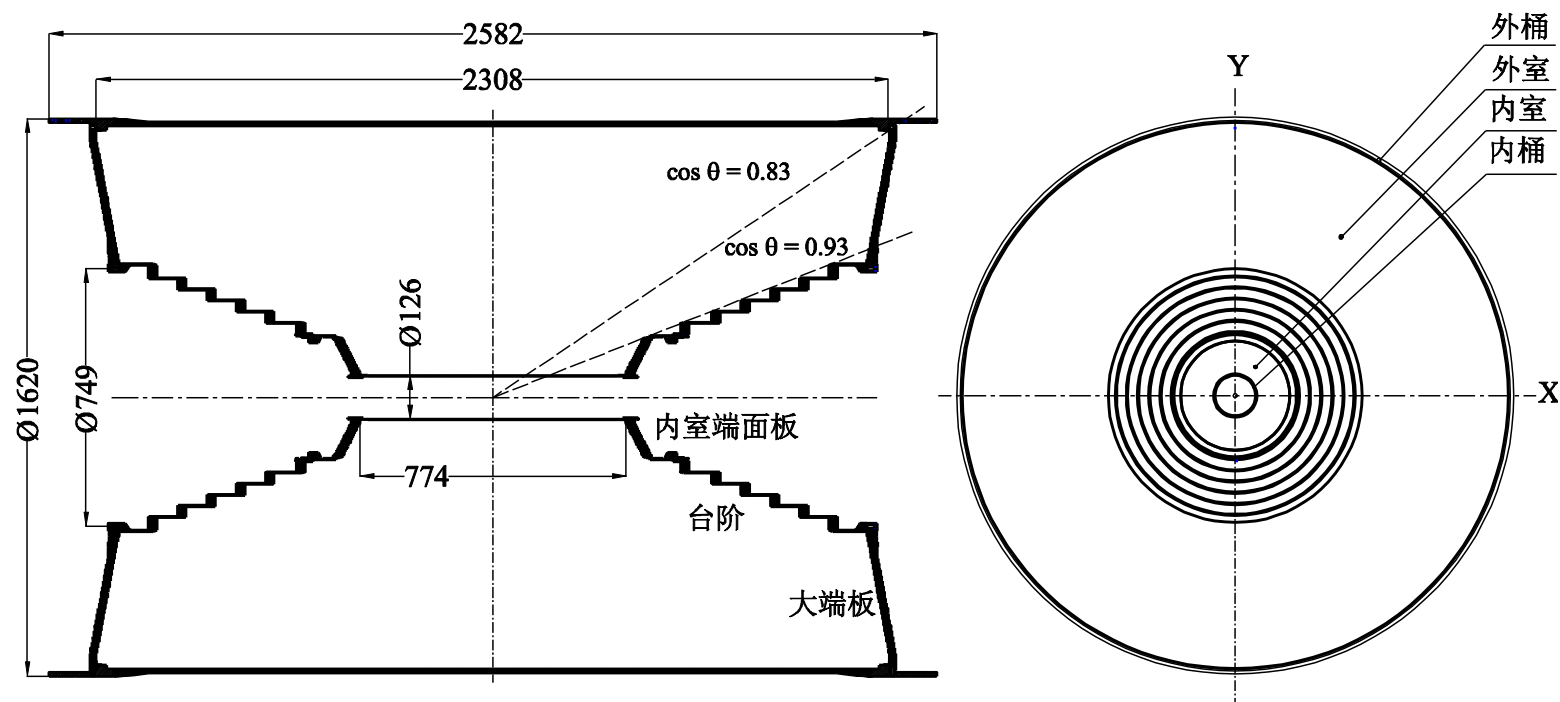
漂移室设计指标

子系统	BES III
主漂移室	$\sigma_{xy} = 130 \mu\text{m}$
	$\Delta P/P = 0.5\% @ 1\text{GeV}$
	$\sigma_{dE/dx} = 6\%$



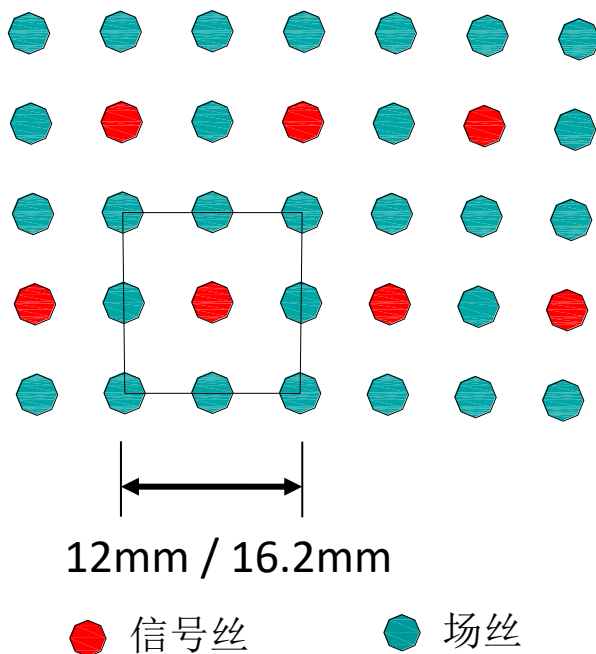
BESIII漂移室

- 内外半径分别为59mm和810mm，内外桶均使用碳纤维材料
- 端面板采用特殊的阶梯形结构，并将室体分为内、外室两部分，外室又分为台阶和大端板两部分，台阶部分由6个独立的圆环板组装而成
- 工作在1T磁场下
- 工作气体：He/C₃H₈(60/40)

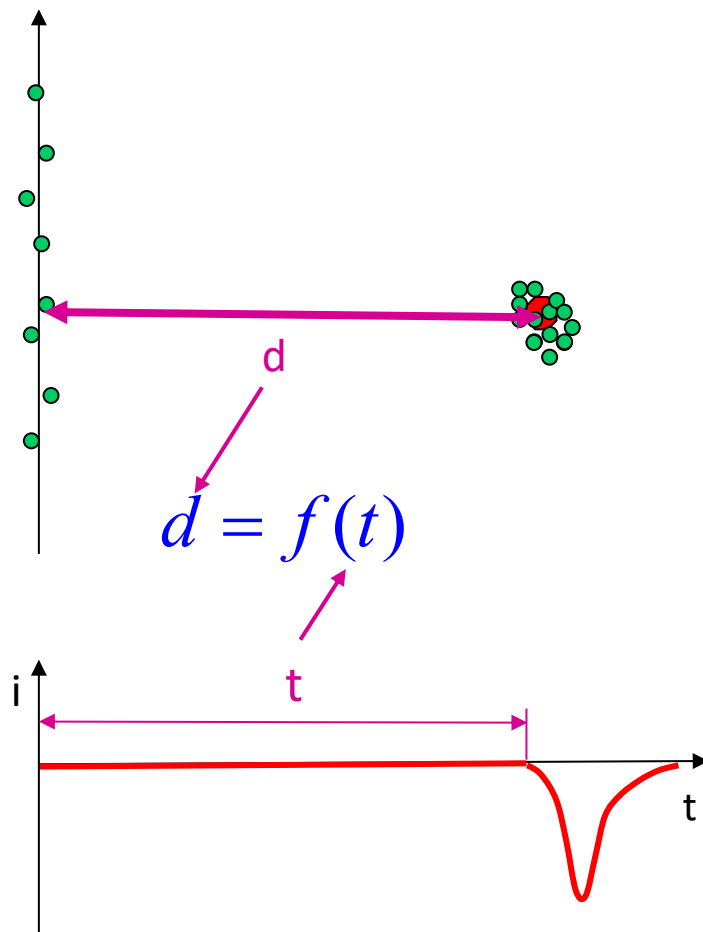


单元结构

- **小单元：** 漂移距离小、漂移时间短，提供触发信息快，死时间少，适合在高计数率下工作；电子扩散的贡献小，可以获得好的空间分辨；电荷积累少，有较长的工作寿命；单元尺寸小，可以在有限的空间中获得足够多的取样次数。



- 类正方形小单元结构
内室单元平均半宽6mm
外室单元平均半宽8.1mm
- 为了解决左右分辨，相邻丝层相错半个单元
- 信号丝： $\phi 25\mu\text{m}$ 镀金钨丝，6796根
- 场丝： $\phi 110\mu\text{m}$ 镀金铝丝，21884根



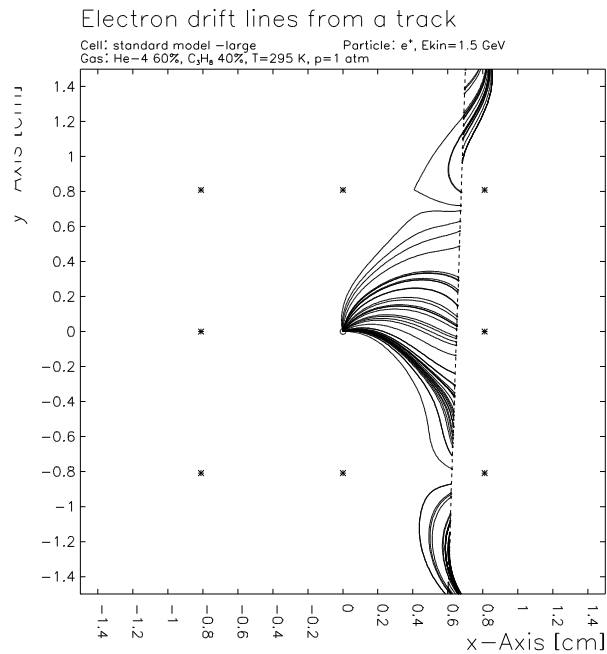
带电粒子穿过漂移室，电离产生电离电子和离子

电离电子在电场作用下向信号丝漂移，在信号丝附近发生雪崩放大，信号丝上产生信号

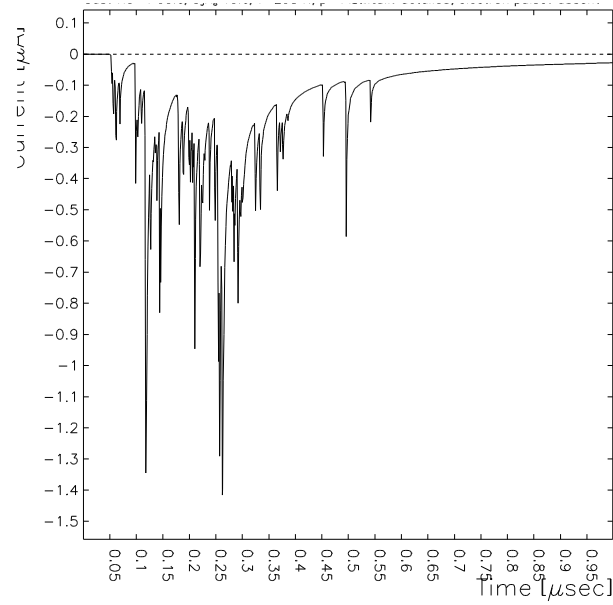
测量到的漂移时间通过时间-距离关系转换为漂移距离，这个函数关系通过离线刻度得到

带电粒子径迹探测

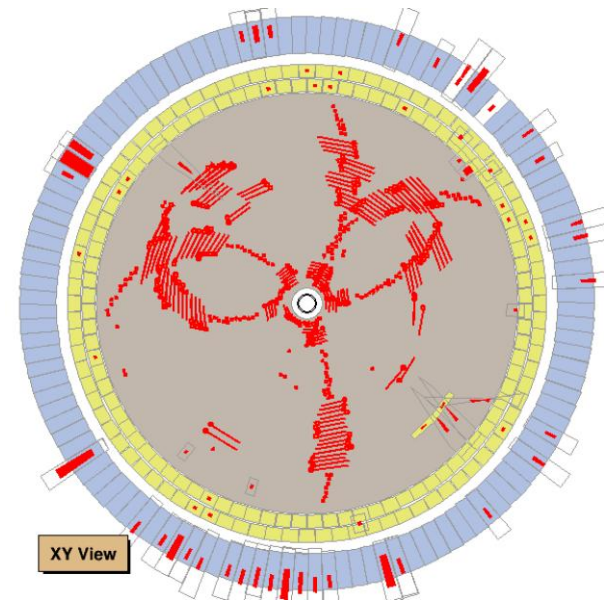
带电粒子进入MDC



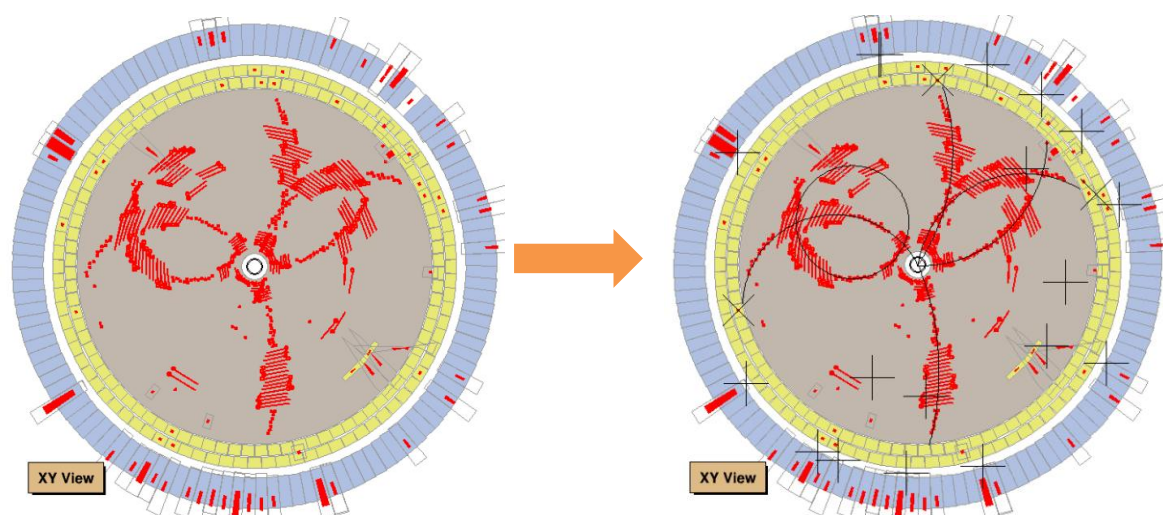
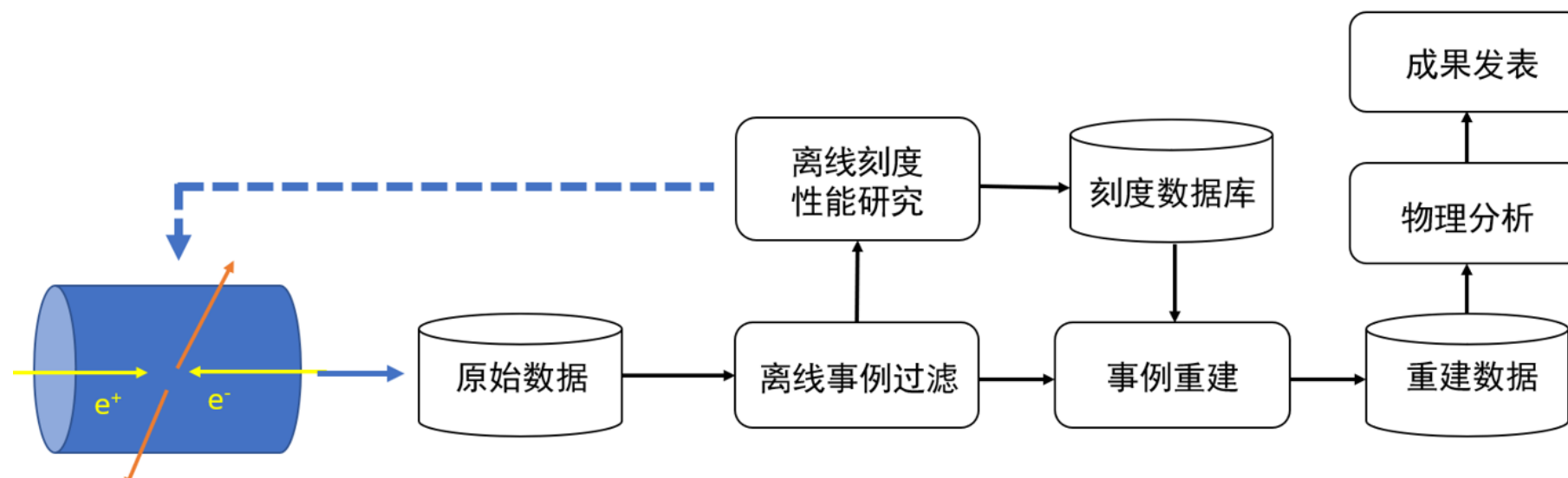
信号丝上产生信号



通过电子学、数据获取记录下所有着火单元的编号、时间、电荷



离线重建与刻度



重建： 探测器记录的原始数据转化为粒子的动量、能量和运动方向等物理量

刻度： 标定电子学信号与物理测量量之间转换关系，并消除实验外部条件（如温度、气压）和探测器本身条件（如入射位置、电缆长度）对信号探测的影响

MDC刻度内容

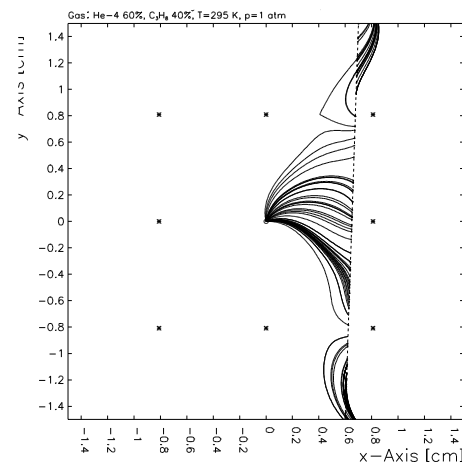
- 径迹重建中采用最小二乘法进行径迹拟合，定义残差 $r = d_{\text{meas}} - d_{\text{track}}$
 - d_{meas} : 径迹与信号丝间的测量距离 → X-T关系、T0、时间游动函数刻度
 - d_{track} : 拟合径迹与信号丝的距离（以下简称拟合距离）→ 信号丝位置校准
 - σ_i : 该测量点的权重（空间分辨）→ 空间分辨确定

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_{\text{hit}}} \frac{(d_{\text{meas}}^{(i)} - d_{\text{track}}^{(i)})^2}{\sigma_i^2}$$

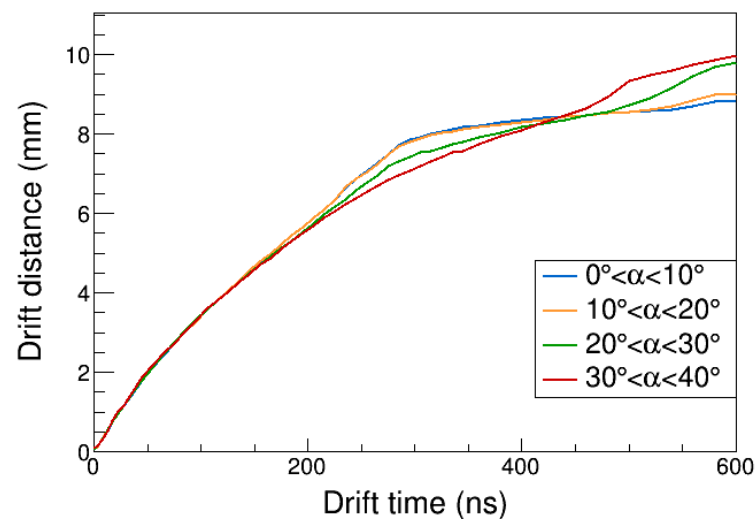
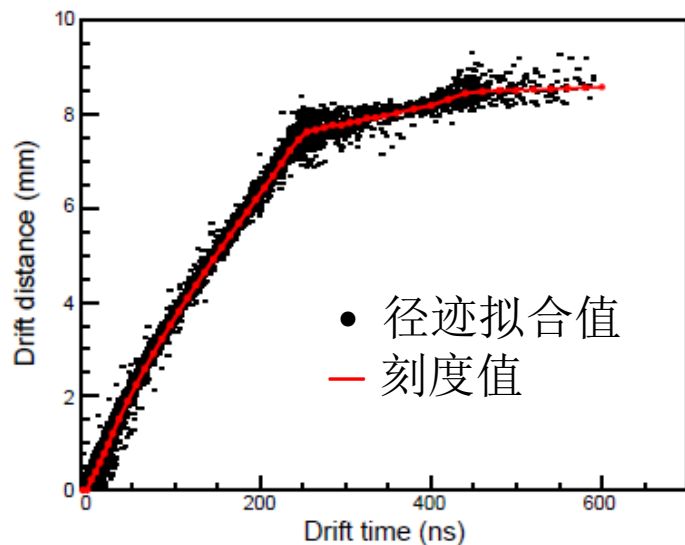
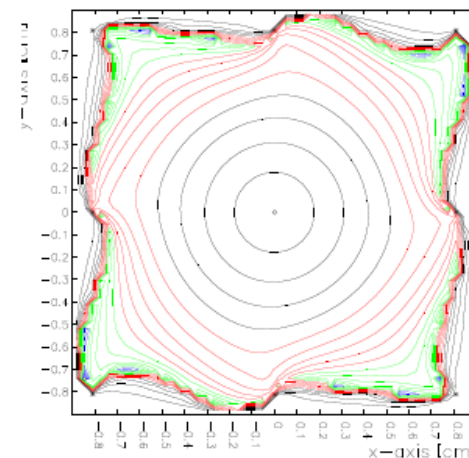
X-T关系

- 漂移距离-漂移时间关系
 - 电场不均匀导致漂移速度随位置、方向发生变化
 - 单元边界漂移线过度扭曲导致X-T函数不规则
 - 随入射角 (α) 变化

电离电子漂移线



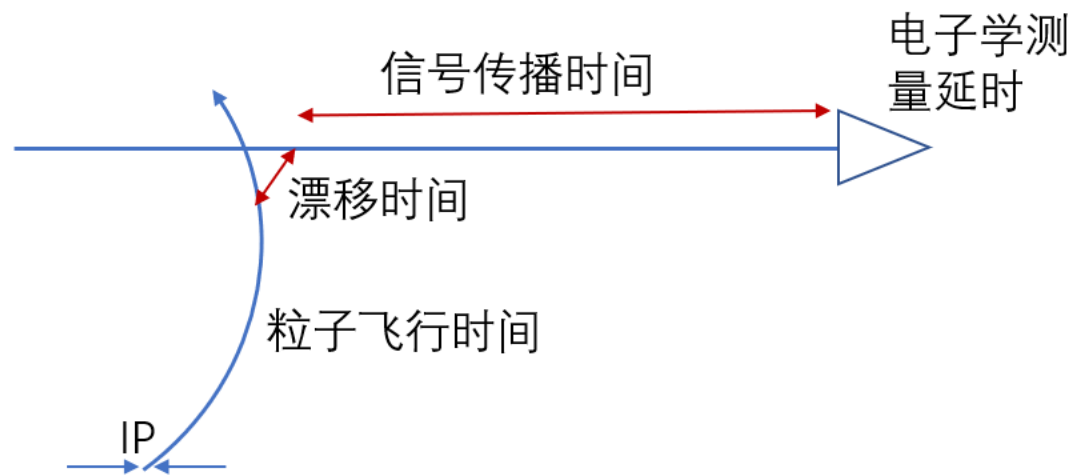
漂移等时线



时间刻度

$$T_{\text{drift}} = T_{\text{TDC}} - T_{\text{ES}} - T_{\text{flight}} - T_{\text{prop}} - T_{\text{elec}} - T_{\text{walk}}$$

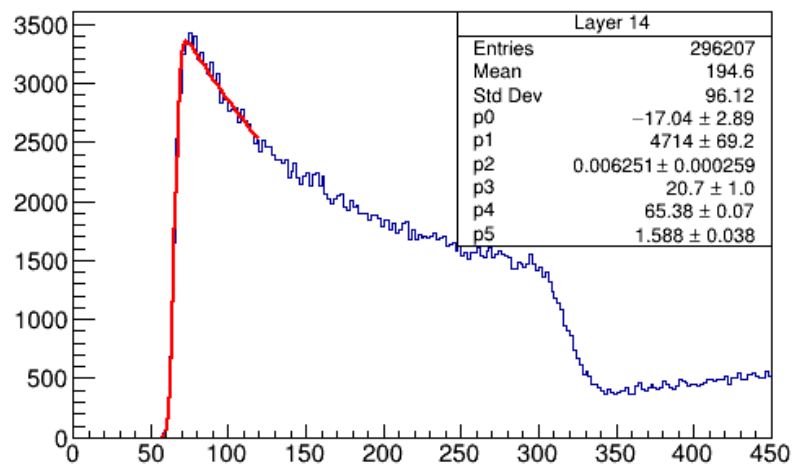
- T_{drift} : 漂移时间
- T_{TDC} : TDC测量得到的原始时间
- T_{ES} : 事例起始时间
- T_{flight} : 飞行时间
- T_{prop} : 信号在丝上的传播时间
- T_{elec} : 电子学时间零点
- T_{walk} : 时间游动



T0刻度

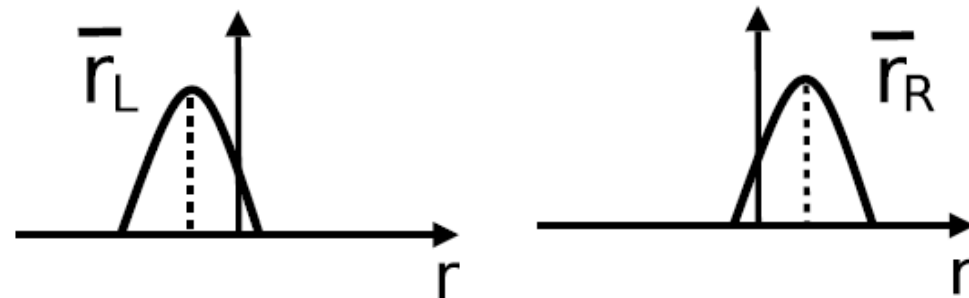
- 通过漂移时间分布前沿拟合获得每层初始值
- 基于径迹重建结果进行cell-by-cell精细刻度

T0 fit



$$f(t) = p_0 + p_1 \frac{e^{-p_2(t-p_3)}}{1 + e^{\frac{-(t-p_4)}{p_5}}}$$

Track-based cell-by-cell calibration

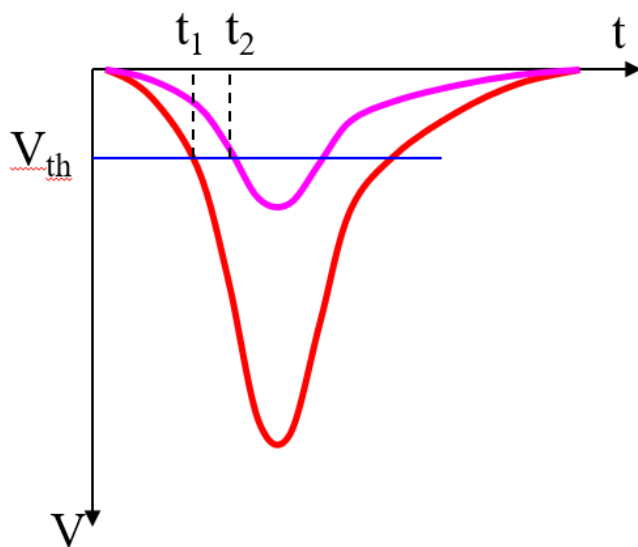


$$\Delta T_0 = \frac{\bar{r}_R - \bar{r}_L}{2v}$$

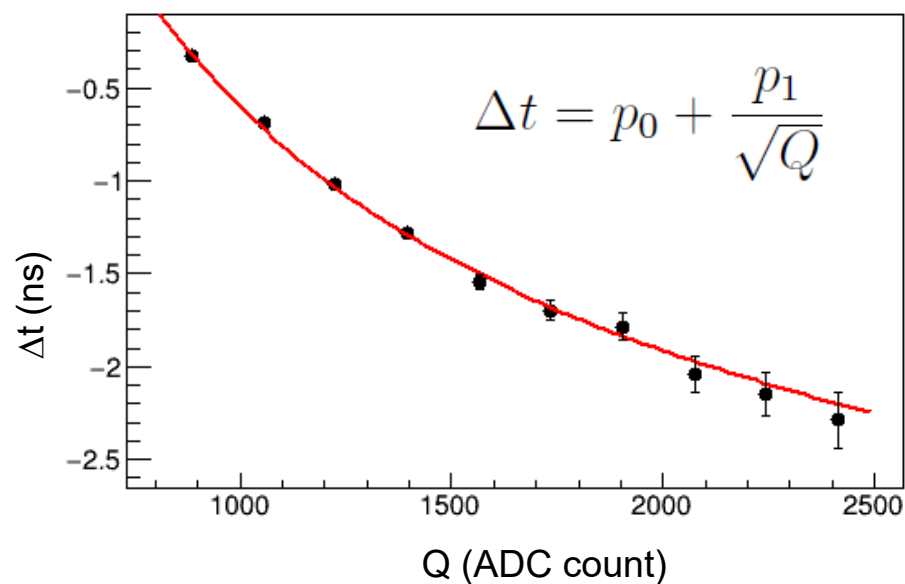
时间游动修正

- 信号幅度变化导致过阈时间不同
- 根据残差平均值随Q的变化得到每层的Q-T函数

时间游动效应



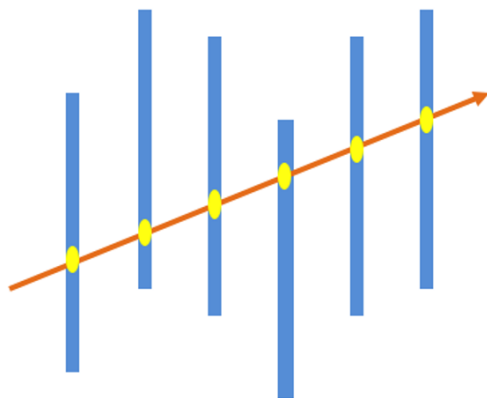
时间游动函数刻度



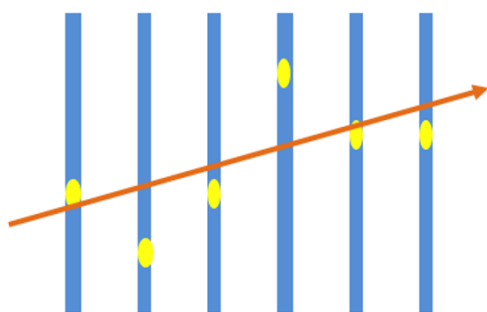
MDC校准

- Mechanical imperfection in the construction and assembly of the detector (a few hundred microns) may have significant impact on momentum measurement
- Track-based alignment is essential for track reconstruction

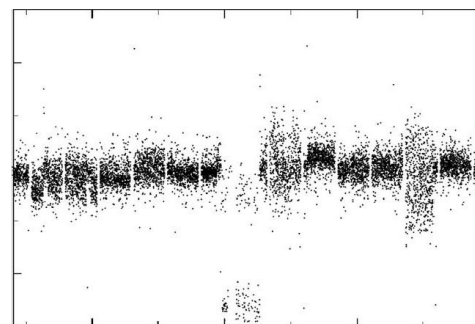
不完美的真实探测器



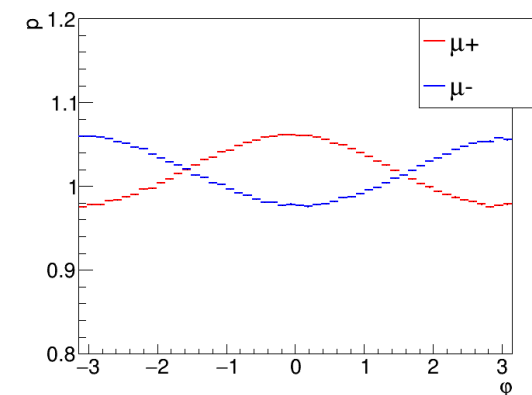
用完美探测器重建



位置残差偏移

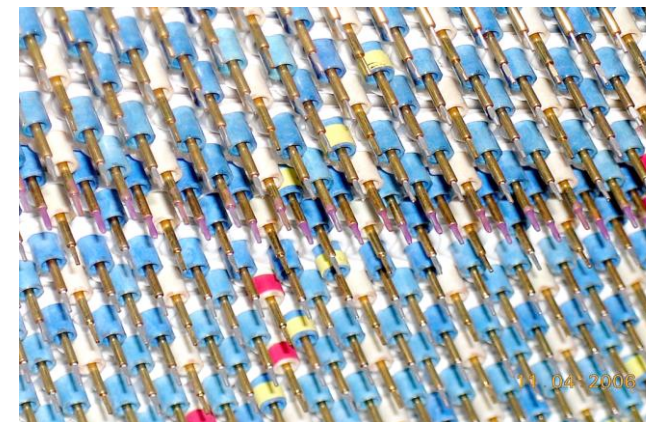
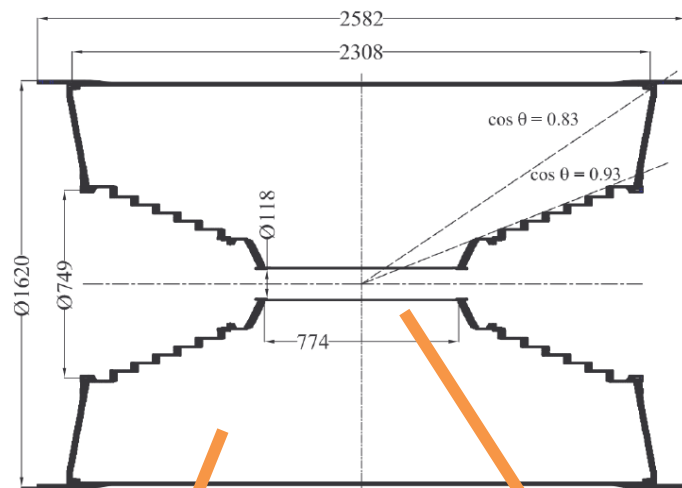


动量重建的系统误差



信号丝位置误差

- Mechanical imperfection in assembly of endplates (more than $200\mu\text{m}$)
 - 16 components: Inner section, 6 steps and outer section of both ends
- Single wire displacement ($\sim 40\mu\text{m}$)



Errors of single wire position

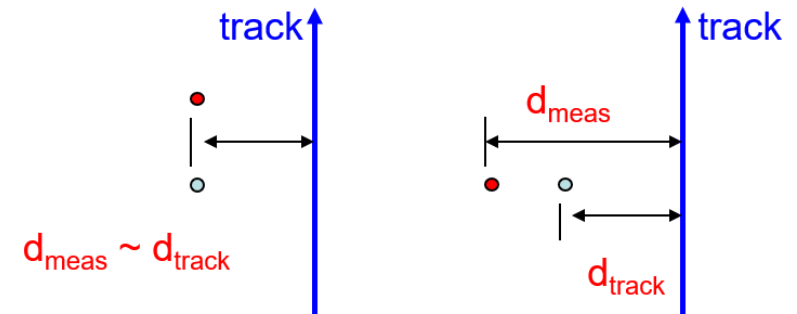
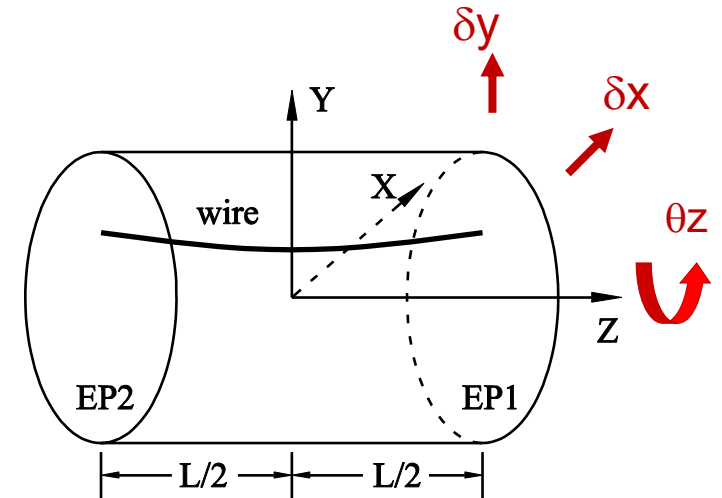
item	rms/ μm	
	sense wire	field wire
hole location	25.0	25.0
feedthrough in hole	6.3	6.3
crimp pin hole	12.5	12.5
wire in pin hole	31.3	10.0
total rms	42.4	30.3

Much less than the position error of endplates



端面板校准参数

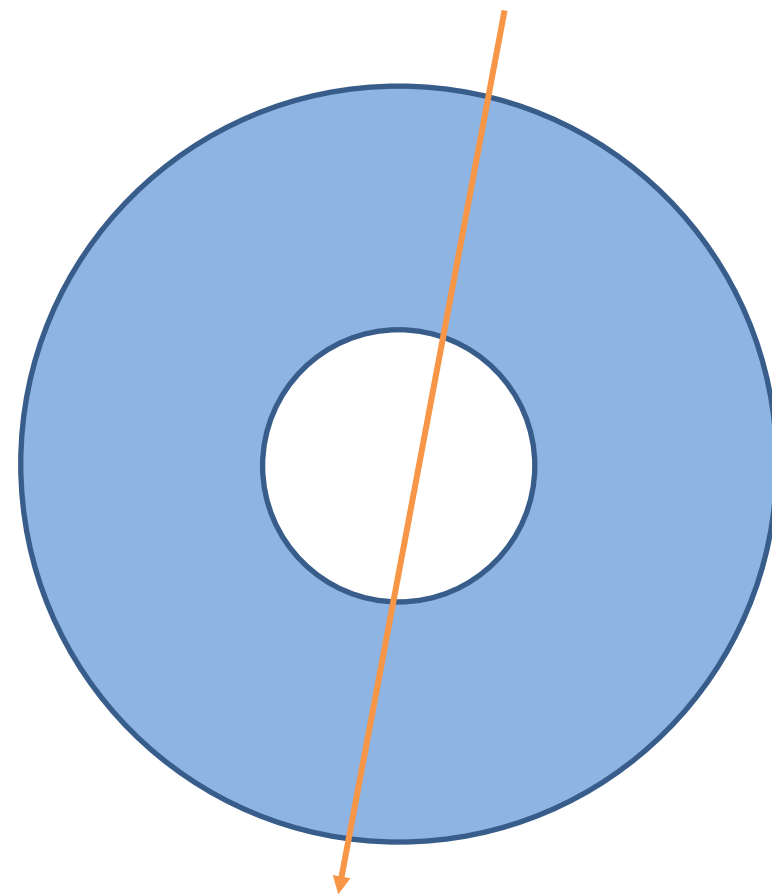
- 6 degree of freedoms for each component
 - Translation in x, y and z
 - Rotation in x, y and z
- Some degree of freedoms constrained to guarantee the stability and avoid weak modes
 - $\theta_x, \theta_y, \delta z$
- 48 alignment parameters in total and the average displacement of both big endplates fixed



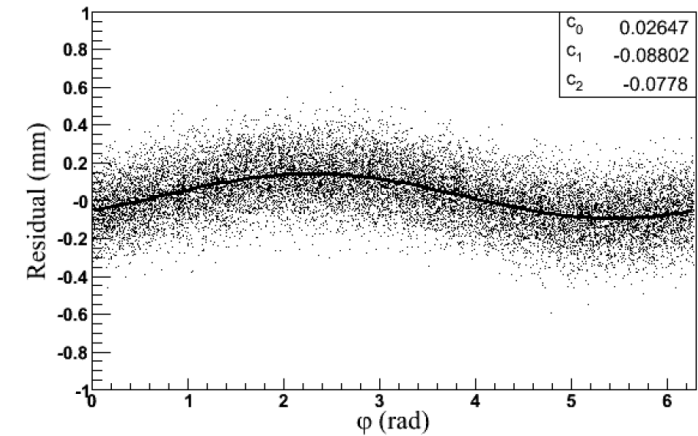
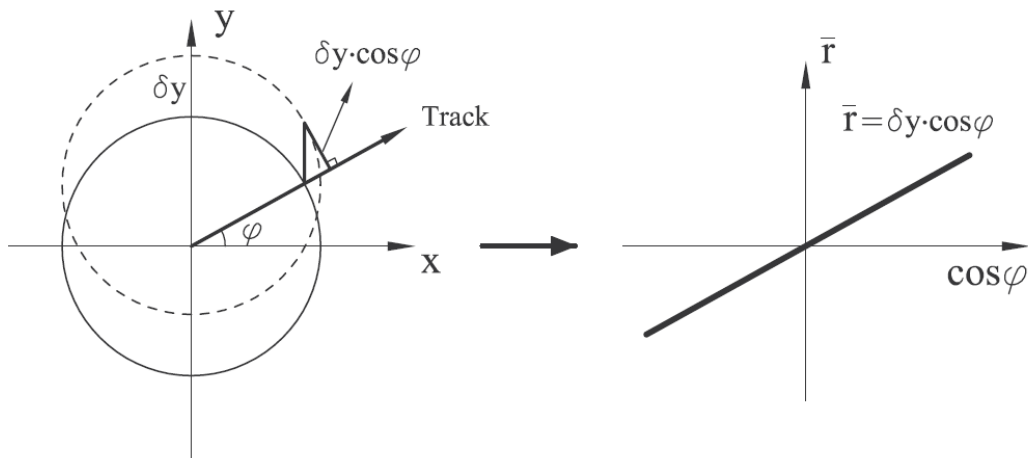
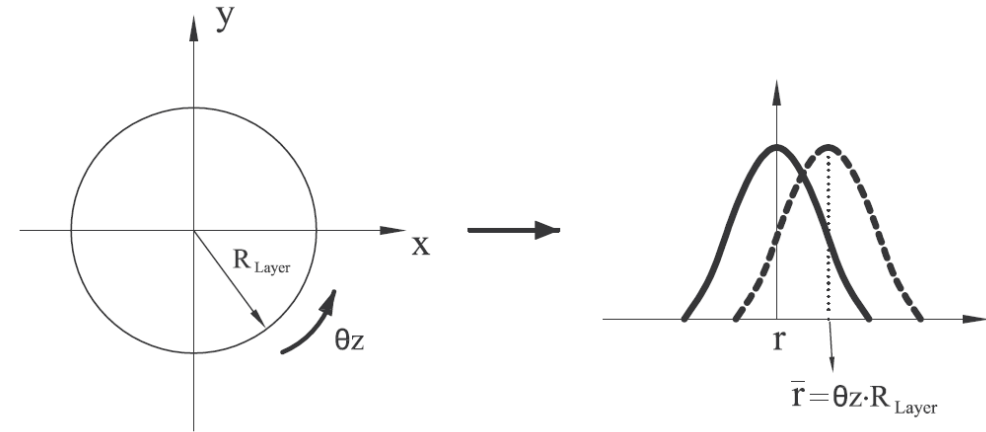
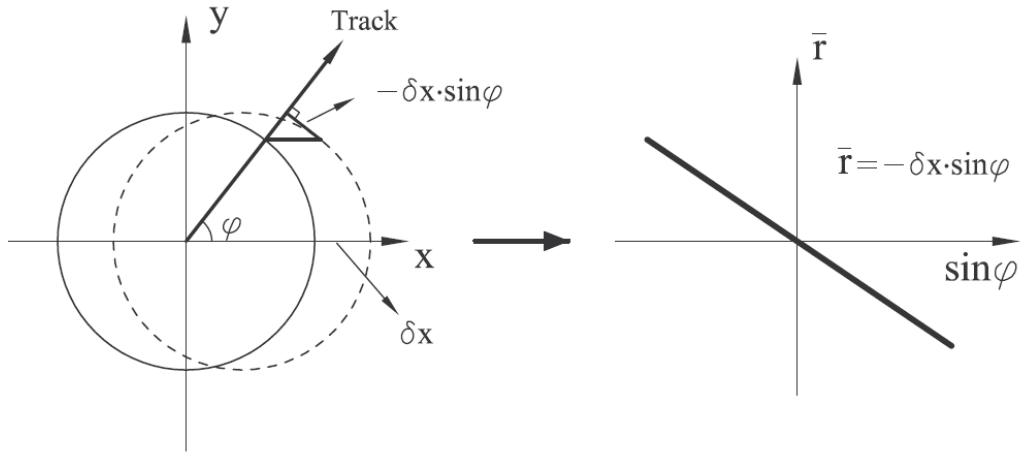
- Nominal wire position
- Actual wire position

MDC校准流程

- Preliminary result using parameterization of residual dependence to correct big displacements
 - Track fit using hits of the big outer endplate to align the inner components
- Precise alignment with Millepede matrix method
 - Millepedell implemented to combine cosmic and dimuon data samples



Parameterization of residual



- Estimate alignment parameters from fitting residual distribution
- Used for pre-alignment

Millepede方法

- Residual definition (measured value - fitted value)
- Constructing the Chi-Square of least square method
- Minimize Chi-Square and construct parameter equations
- Solve the equation to get the estimation of alignment parameters

$$d_{track} = f(\mathbf{p}^{local}; \mathbf{a}^{global})$$

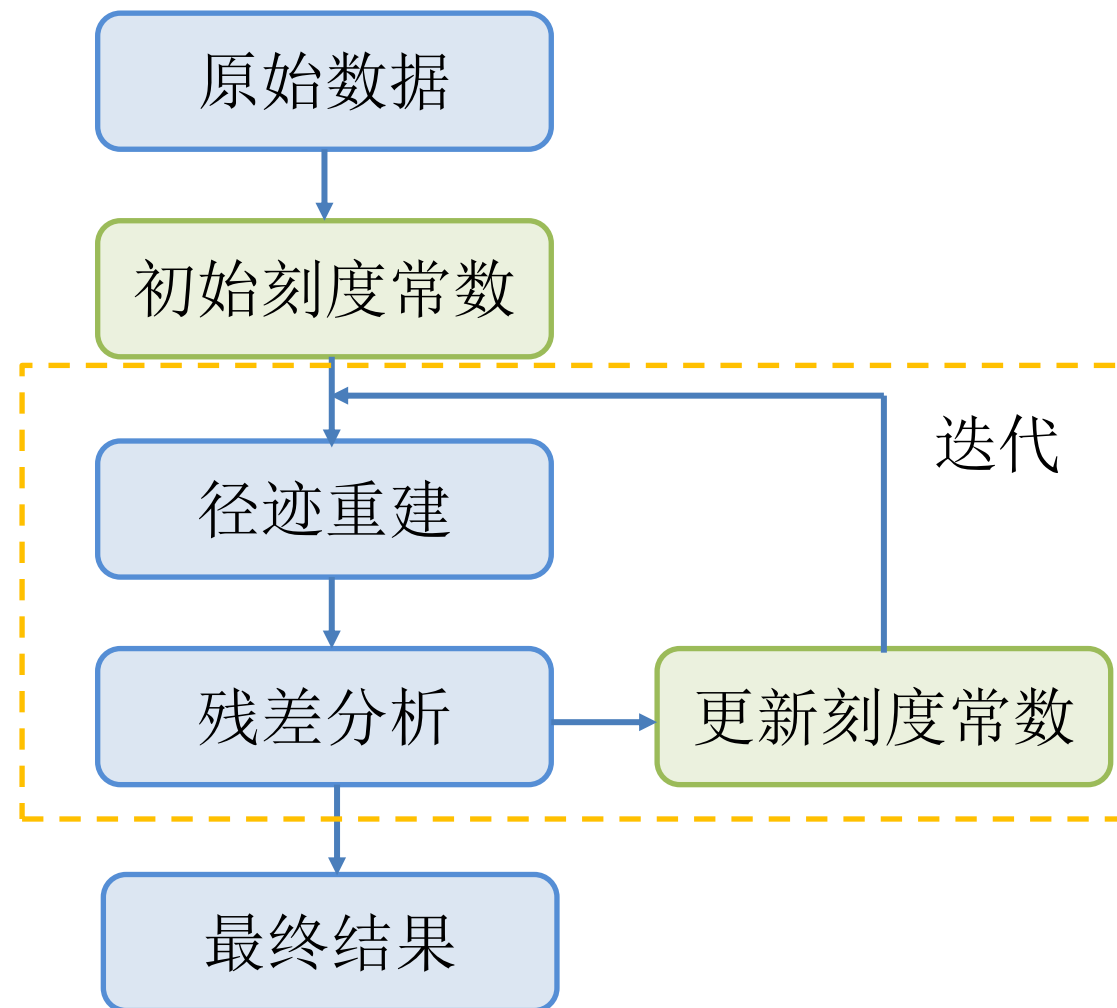
$$r_{ki} = d_{meas}^{(k,i)} - d_{track}^{(k,i)}$$

$$\chi^2 = \sum_{data\ sets} \left(\sum_{events} \left(\sum_{tracks} \left(\sum_{hits} w_{ki} r_{ki}^2 \right) \right) \right)$$

$$\left(\begin{array}{c|ccc} C & \cdots & H_k & \cdots \\ \hline \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ H_k^T & 0 & \Gamma_k & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \mathbf{a} \\ \vdots \\ \mathbf{p}_k \\ \vdots \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \mathbf{b} \\ \vdots \\ \boldsymbol{\beta}_k \\ \vdots \end{array} \right)$$

刻度流程

- 通过在线Bhabha进行第一轮刻度
 - X-T
 - T0
 - Q-T
- 挑选dimu、宇宙线进行校准
- 挑选radiative Bhabha更新大入射角X-T关系刻度
- 刻度基本思想：残差最小化 $r = d_{\text{meas}} - d_{\text{track}}$
- MDC刻度常数数目 $\sim 10^5$
- 刻度依赖重建，需要多次迭代



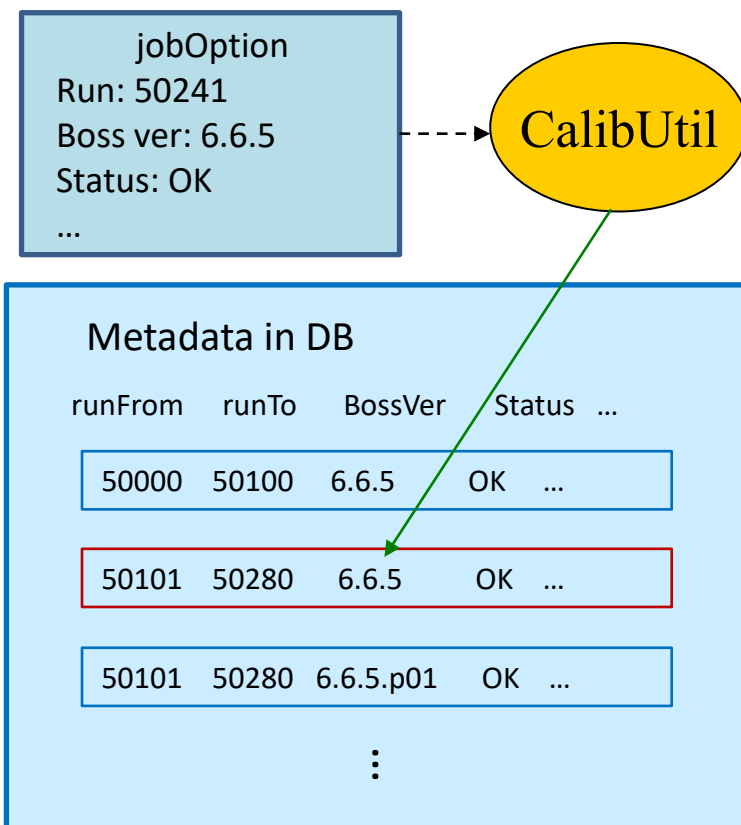
刻度常数管理

- 刻度常数保存在刻度数据库中
- 刻度框架根据用户jobOption设置查找对应的刻度文件

共找到2,183条。

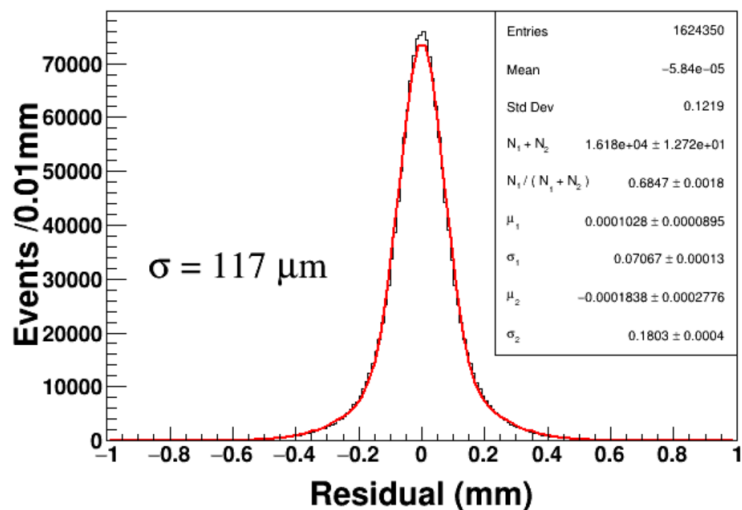
[[首页](#)/[上一页](#)]1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8[[下一页](#)/[尾页](#)]

编号	起始运行号	结束运行号	文件名称	状态	BOSS版本	刻度参数版本	事例类型	创建时间	文件是否保存	
2203	43810	43833	TofCalConst43810.root	OK	7.0.1	12	Bhabha	2016-08-15	true	☐
2204	43834	43885	TofCalConst43834-43885.root	OK	7.0.1	12	Bhabha	2016-08-15	true	☐
2205	43978	44011	TofCalConst43978-44011.root	OK	7.0.1	12	Bhabha	2016-08-15	true	☐
2212	44012	44035	TofCalConst43886-43947.root	OK	7.0.1	12	Bhabha	2016-08-16	true	☐
2213	44036	44101	TofCalConst44036-44082.root	OK	7.0.1	12	Bhabha	2016-08-16	true	☐
2214	44102	44151	TofCalConst44102-44151.root	OK	7.0.1	12	Bhabha	2016-08-16	true	☐
2218	44152	44191	TofCalConst44152-44191.root	OK	7.0.1	12	Bhabha	2016-08-16	true	☐
2219	44192	44262	TofCalConst44210-44245.root	OK	7.0.1	12	Bhabha	2016-08-16	true	☐
2220	44263	44325	TofCalConst44263-44298.root	OK	7.0.1	12	Bhabha	2016-08-16	true	☐

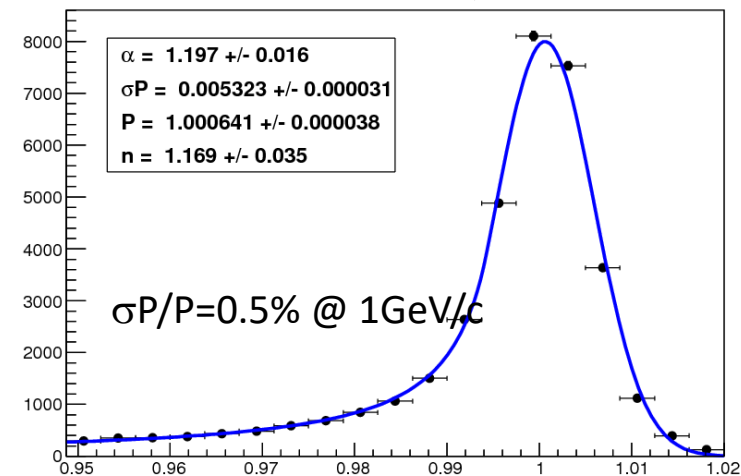


刻度校准后的MDC性能

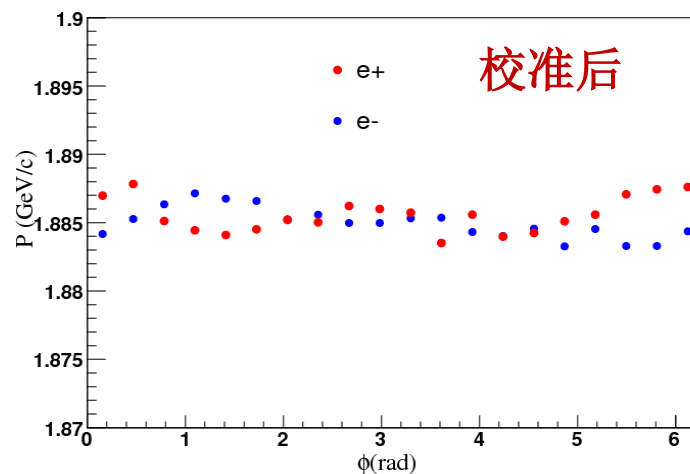
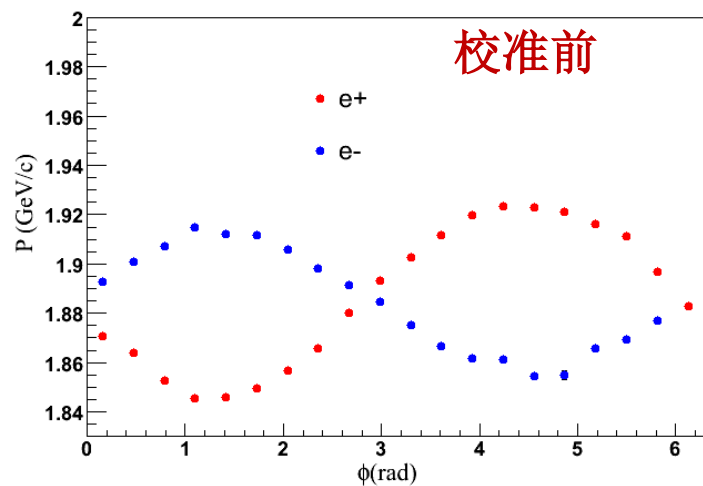
位置残差分布



动量分辨

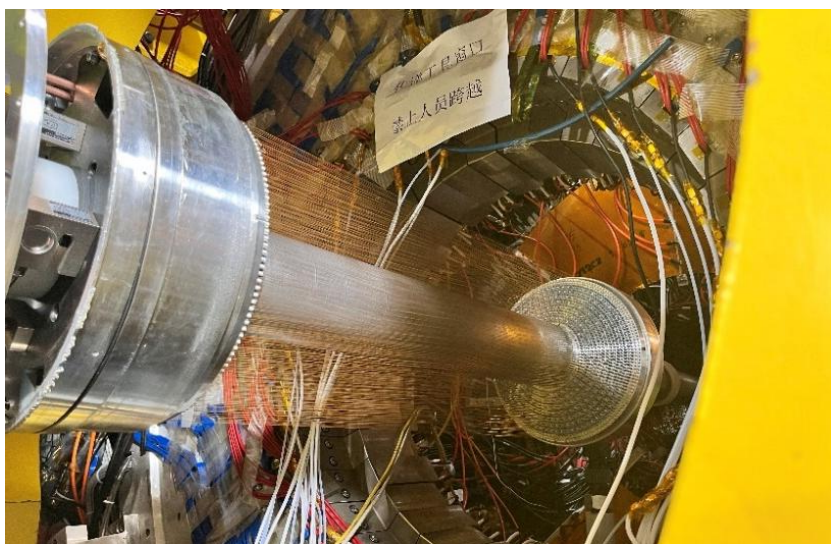
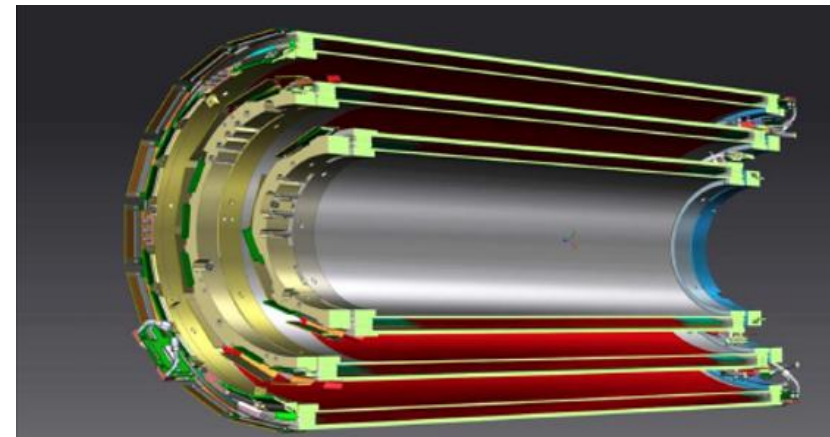


动量 vs ϕ



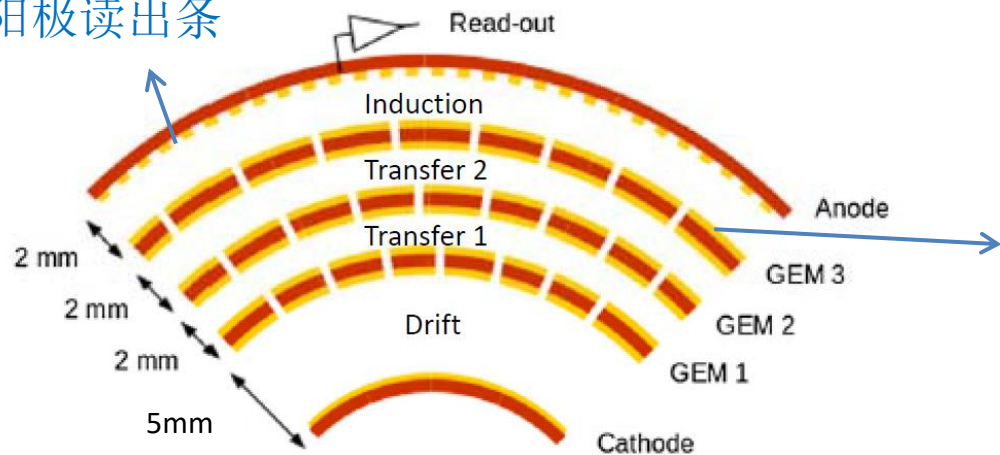
内径迹室升级 – CGEM探测器

- MDC内径迹室老化，增益逐年下降
- 2024年完成内径迹室升级，采用圆筒GEM（CGEM）探测器
- 今年先后开展了探测器联调、宇宙线测试、对撞取数

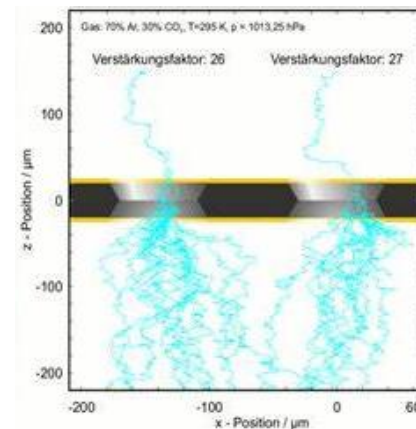
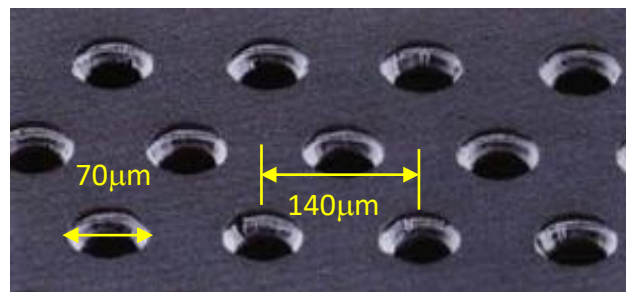


CGEM探测器结构及工作原理

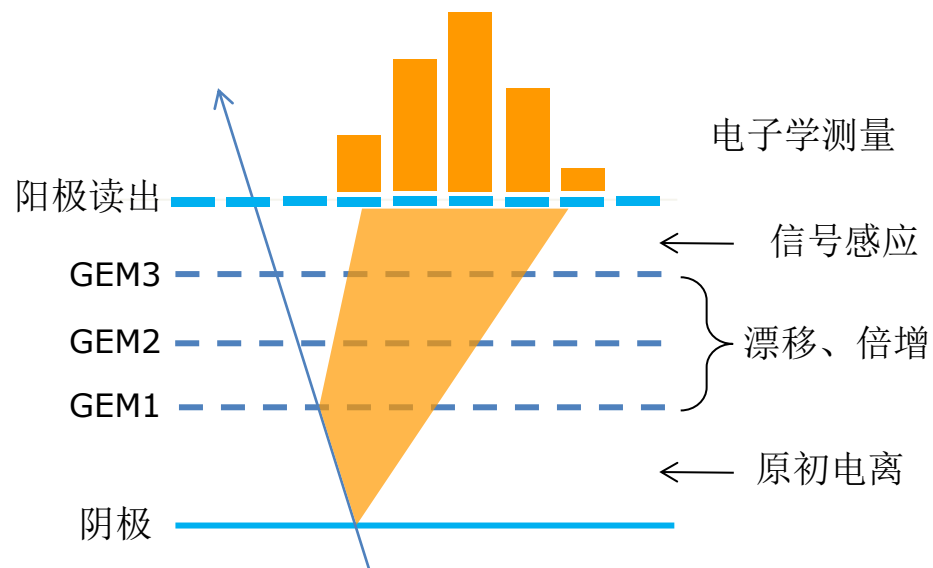
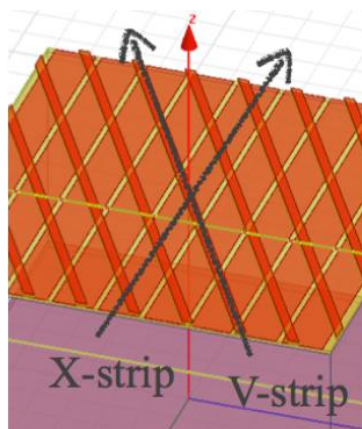
阳极读出条



GEM膜

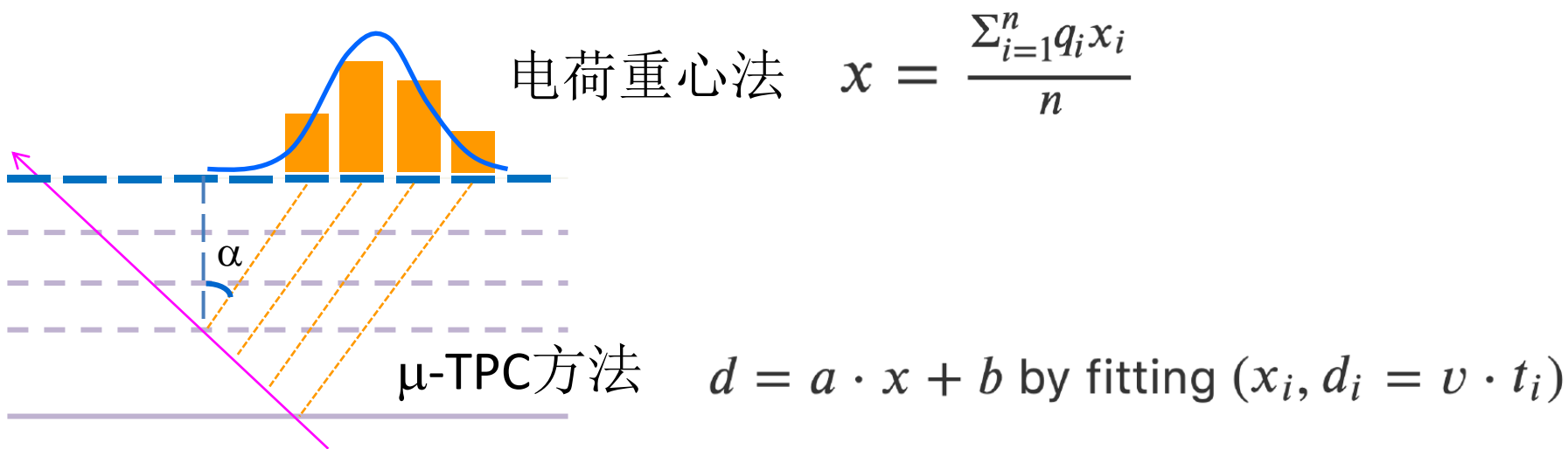


阳极读出条



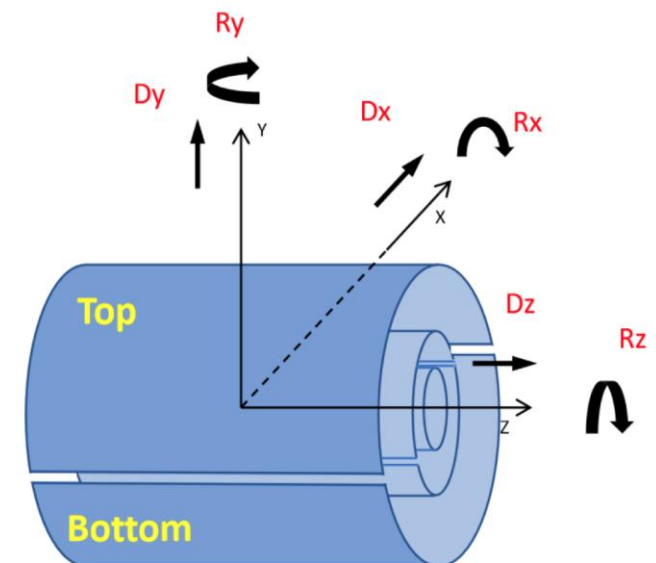
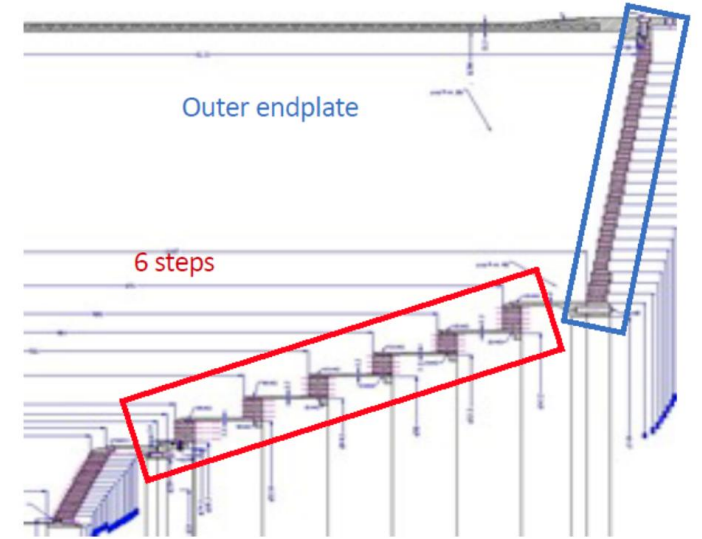
CGEM探测器刻度内容

- Lorentz角(α)刻度
- μ -TPC方法相关刻度
 - 漂移速度刻度
 - 电子学零点 ($T_{\text{reference}}$)刻度
 - Time-walk曲线刻度



Strategy of MDC+CGEM simultaneous alignment

- **Step I:** Preliminary alignment, especially for estimating the rotation around z of CGEM, with cosmic-ray data without magnetic field
 - Strong correlation between Lorentz angle and rotation of the cylinder around z (both cause a shift of clusters in ϕ)
- **Step II:** Preliminary calibration of the Lorentz angle combining the cosmic-ray data with magnetic field
- **Step III:** Precise alignment combining cosmic-ray and collision data, based on preliminary results from cosmic-ray data



CGEM数据及分析进展

• 数据获取

- 2025年3月，无磁场宇宙线取数
- 2025年4月，有磁场宇宙线取数
- 2025年5月，开始对撞取数

• 研究进展

- ✓ 基于原始分布的探测器性能检查
- ✓ CGEM cluster分布检查
- ✓ 宇宙线数据初步的性能检查

- 重建算法研究与优化
- 基于宇宙线数据校准
- μ -TPC刻度研究
- 模拟调试

进行中

软件研究的挑战

- 探测器在测试优化，取数条件不稳定
- 首轮实验数据分析，需要全面理解探测器，大量研究在逐步开展
- 实验数据复杂，本底、噪声等各种因素影响，需要开展深入分析，在此基础上优化重建软件、研究最佳的刻度策略

详细情况见2025夏季BESIII合作组会相关报告
<https://indico.ihep.ac.cn/event/25616>

总结

- 离线刻度对探测器最终性能有重要影响
- 完成了BESIII海量数据的刻度任务，为物理分析提供高质量输入数据
- CGEM数据分析及刻度研究仍在紧张进行中

- 加强物理与软件的交流合作！
- 欢迎大家为软件发展提供宝贵建议和人力支持！

谢谢大家！

Backup