

# ATLAS内探测器 在Run-2中的精确对准

报告人：彭柏融（第四组）

2026.6.16

## 01

### 引言与探测器概述

研究背景与动机

ATLAS探测器与内探测器结构

局部坐标系与可对准自由度

## 02

### 对准原理与形式化

径迹拟合与Newton-Raphson方法

Global  $\chi^2$  对准方法

## 03

### 内探测器对准策略

分层对准结构

时间相关对准

残差分布与对准性能

## 04

### 探测器稳定性与时间对准结果

IBL温度相关畸变与Pixel垂直运动

动态对准方案与性能

各子探测器最终对准精度

## 05

### 动量偏差

弱模式处理

Sagitta偏差

## 06

### 总结

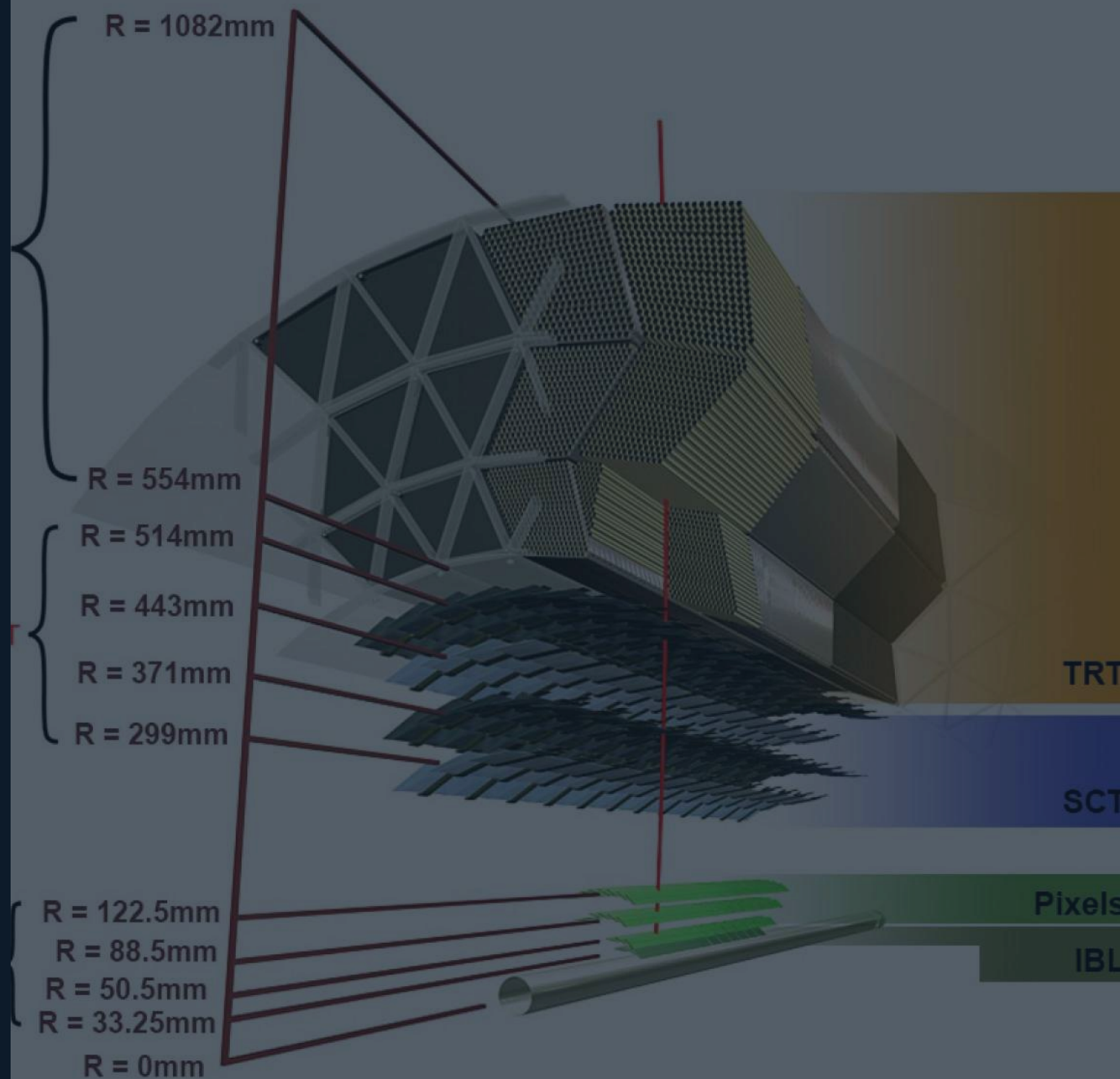
Run-2对准成果总结

关键性能指标

# 01

## 引言与探测器概述

ATLAS实验、内探测器结构与坐标系



- 精确重建带电粒子径迹是ATLAS实验所有物理测量的关键基础
- 内探测器提供精确位置测量（hits）——>重建径迹并估计径迹参数。

## 目标:

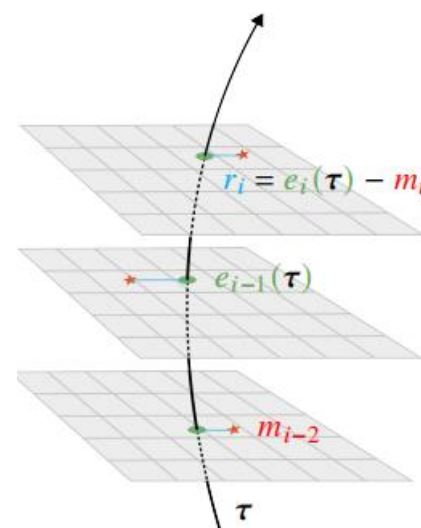
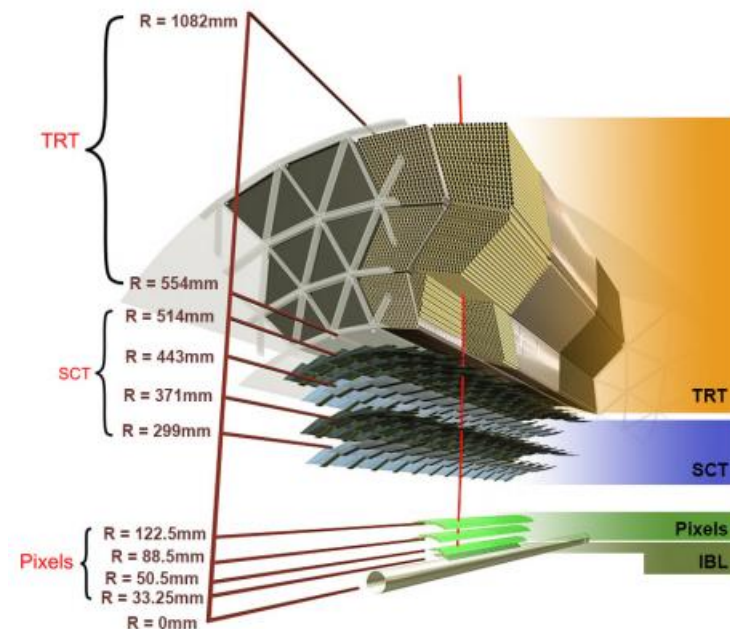
- 精确确定每个探测器模块的实际位置
- 跟踪变化(time)

## 精度要求:

- 高动量径迹的分辨率退化不得超过20%（相比完美对准的探测器）

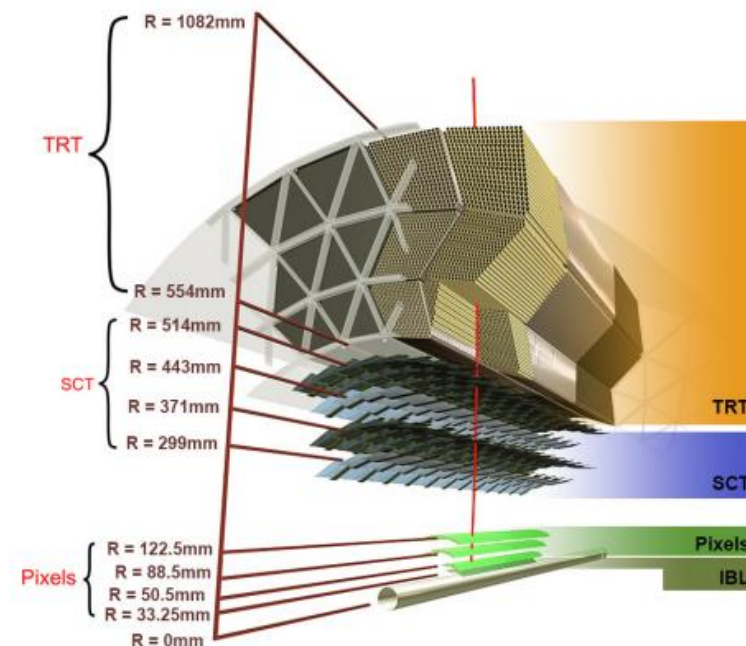
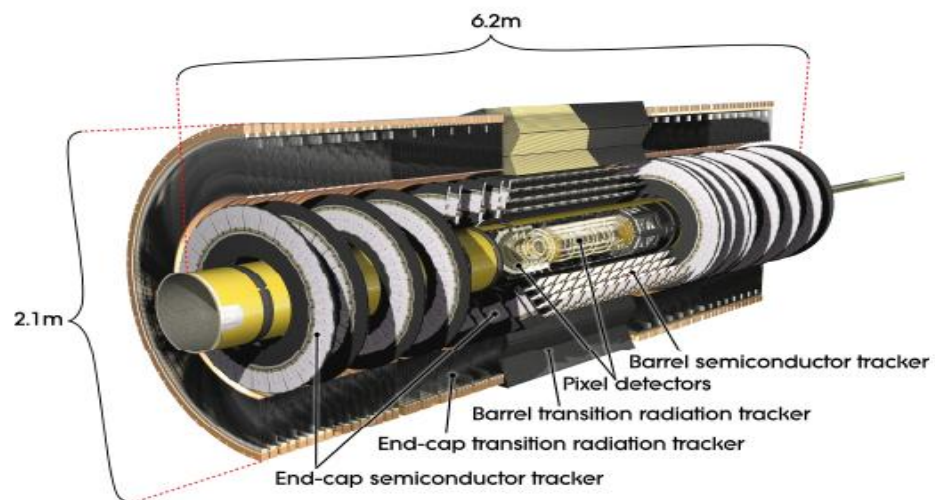
## Run-2 新挑战:

- 最内层新增IBL（Insertable B-Layer）探测层
- 更复杂的短时间尺度运动问题、更精细的时间相关对准策略。



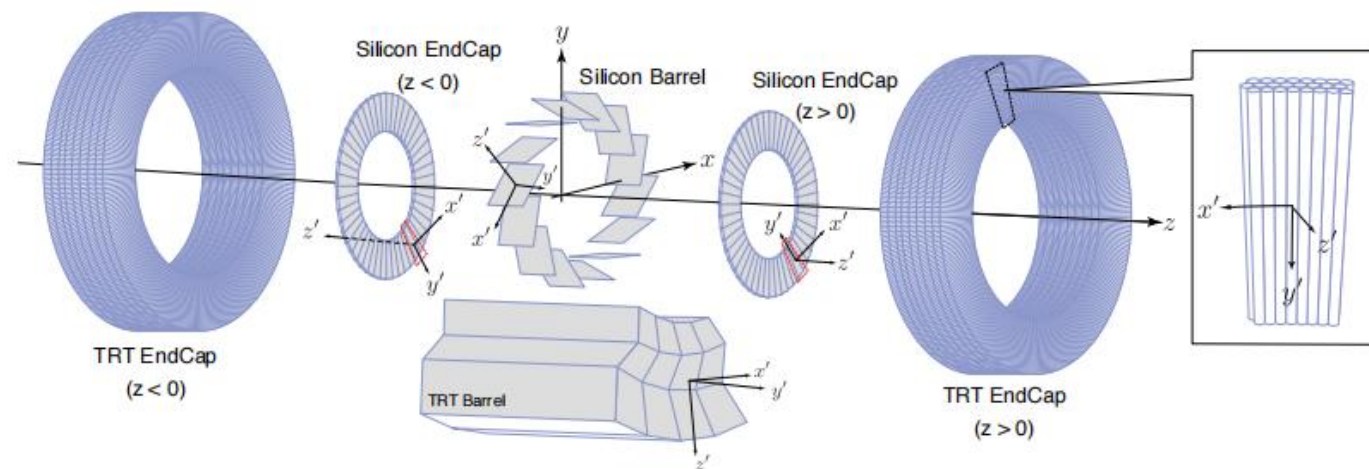
# ATLAS探测器与内探测器结构

子探测器	元件尺寸	本征分辨率 ( $r-\phi \times z$ )	桶层半径 [mm]	规模
TRT 跃迁辐射径迹仪	4 mm (diameter)	130 $\mu\text{m}$ ( $r-\phi$ only)	554 – 1082	350848根气体漂移管, 96个桶层模块+40个端盖
SCT 半导体径迹仪	80 $\mu\text{m}$	17 $\mu\text{m}$ ( $r-\phi$ only)	299, 371, 443, 514	4088个硅微条模块, 4个桶层+2个端盖
Pixel 像素探测器	50 $\times$ 400 $\mu\text{m}$	10 $\times$ 115 $\mu\text{m}$	50.5, 88.5, 122.5	1744个硅像素模块, 3个桶层+2个端盖
IBL Insertable B-Layer	50 $\times$ 250 $\mu\text{m}$	10 $\times$ 60 $\mu\text{m}$	33.25	280个硅像素模块, 排列在14个碳纤维stave上



局部坐标系（右手系，原点在传感器几何中心）：

轴	方向	说明
local-x	最灵敏方向	Pixel/IBL的短边（ $50\ \mu\text{m}$ ），SCT垂直于微条方向
local-y	长边方向	Pixel/IBL的长边（ $400/250\ \mu\text{m}$ ），SCT平行于微条方向，TRT局部y轴沿丝方向
local-z	垂直于x-y平面	指向探测器外侧



## 6个自由度（DoF）：

- 刚体变换
- 平移：

$$T_x \text{ (local-x)}$$

$$T_y \text{ (local-y)}$$

$$T_z \text{ (local-z)}$$

- 旋转：

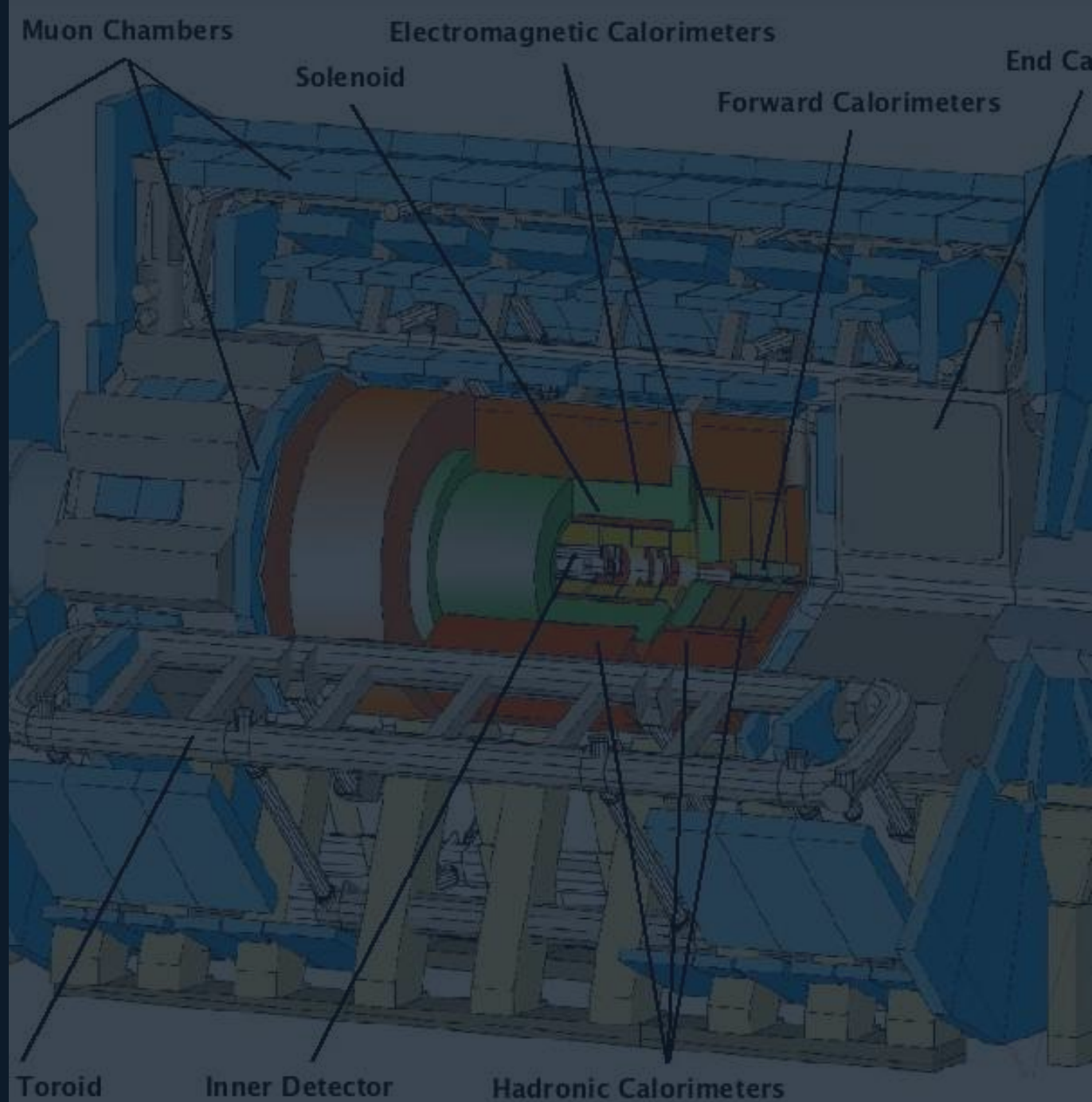
$$R_x \ R_y \ R_z$$

（绕对应轴的旋转角）

# 02

## 对准原理与形式化

Global  $\chi^2$  方法、Newton-Raphson 迭代



# 径迹拟合与Newton-Raphson方法

径迹参数化（在距z轴最近点定义）：

$$\tau = (d_0, z_0, \phi_0, \theta_0, q/p)$$

$d_0, z_0$  为横/纵向冲击参数

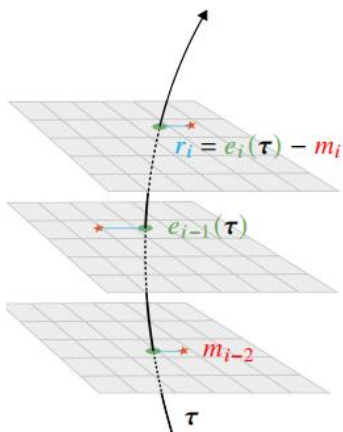
$\phi_0, \theta_0$  为方位角和极角

$q/p$  为电荷与动量之比

残差 (Residual) :

拟合径迹与探测器表面的交点位置 - 实际测量位置

$$r_i = e_i(\tau) - m_i$$



定义：径迹  $\chi^2$

$$\chi_{Track}^2 = r^T \Omega^{-1} r \quad \Omega \text{ 为测量值的协方差矩阵}$$

径迹拟合 = 找到一组  $\tau$ ，使得  $\chi^2$  最小

Newton-Raphson 迭代求解：

1. 计算  $\chi^2$  对径迹参数的一阶和二阶导数
2. 在当前迭代点评估导数，计算修正量
3. 更新径迹参数，重新拟合
4. 重复直至收敛（修正量  $< 0.1\mu\text{m}$ ）

$$\text{最小化条件: } \left(\frac{d\chi^2}{d\tau}\right)^T = 2G^T \Omega^{-1} r = 0 \quad \text{其中 } G = \frac{dr}{d\tau}$$

多重库仑散射(MCS)修正：

$$\chi_{Track}^2 = r^T \Omega^{-1} r + \theta^T \Theta^{-1} \theta$$

$\theta$  是散射角参数， $\Theta$  是其协方差矩阵

# Global $\chi^2$ 对准方法

定义: Global  $\chi^2$

$$\chi_{Global}^2 = \sum_i \chi_{Track}^2 \quad \tau = (d_0, z_0, \phi_0, \theta_0, q/p)$$

核心思想:

利用大量重建径迹构建全局  $\chi^2$ , 通过最小化  $\chi_{Global}^2$  确定对准参数  $\alpha$

$$\text{对准修正量: } X \equiv \Delta\alpha = - \left( \frac{d\chi_{Global}^2}{d\alpha^2} \Big|_{\alpha_0} \right)^{-1} \left( \frac{d\chi_{Global}^2}{d\alpha} \right)^T \Big|_{\alpha_0} = - M^{-1} Y$$

$$\alpha \text{ 的全导数算子: } \frac{d}{d\alpha_i} = \frac{\partial}{\partial \alpha_i} + \sum_j \frac{d\pi_j}{d\alpha_i} \frac{\partial}{\partial \pi_j}$$

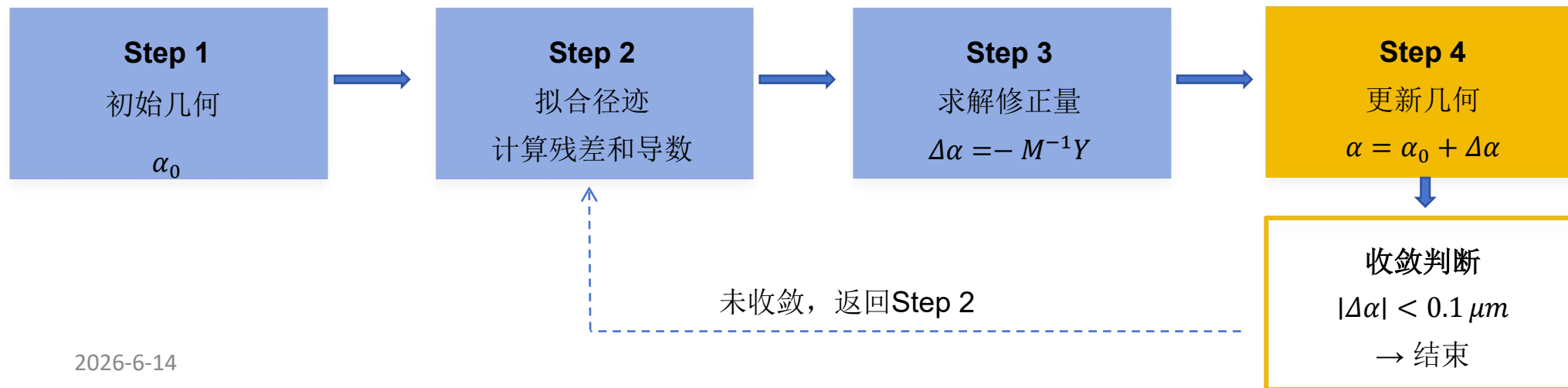
$$\text{最小化条件: } \frac{d}{d\alpha} \frac{\partial \chi_{Track}^2}{\partial \pi} = 0$$

一阶和二阶导数

$$Y \equiv \frac{d\chi_{Global}^2}{d\alpha} = 2 \sum A^T V^{-1} (V - HCH^T) V^{-1} \rho$$

$$M \equiv 2 \sum A^T V^{-1} (V - HCH^T) V^{-1} A$$

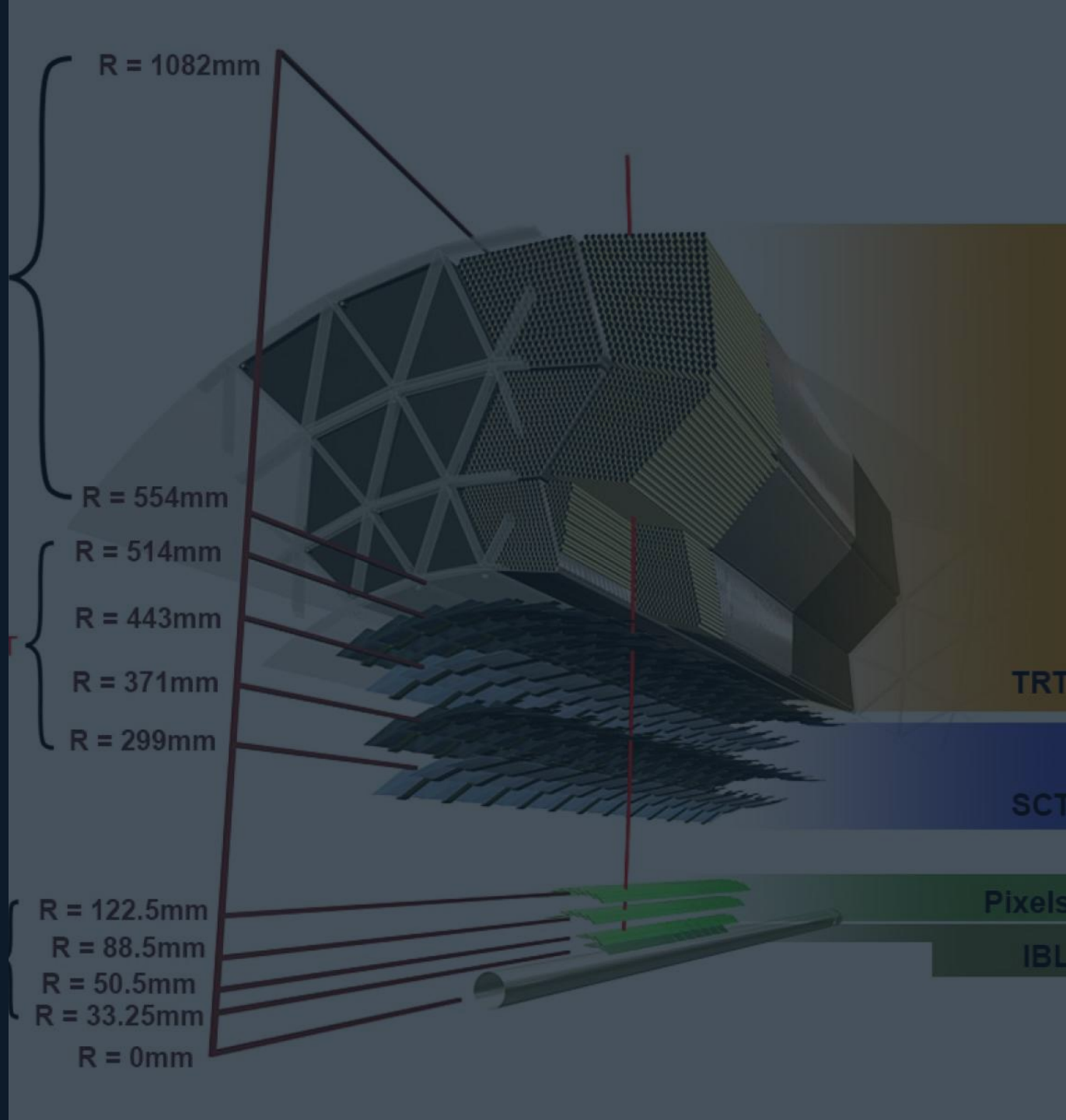
迭代流程:



# 03

## 内探测器对准策略

分层对准、时间相关对准与残差分析



# 分层对准结构和时间相关对准

## 分层对准结构:

策略: 最大物理结构——>单个模块/传感器、IBL 独立物理结构

级别	对准对象	自由度示例	说明
Level 1	IBL、Pixel、SCT端盖、TRT	All (SCT除Tz)	SCT桶部非常稳定, 被固定作为整个对准系统的“锚点”
Level 2 (Si)	Pixel/IBL各层圆筒、SCT各层、端盖各盘片	All	对准完成后, 这些层/盘片的位置就被固定
Level 2 (TRT)	TRT桶部模块、端盖轮盘	All (除Ty)	TRT自由度处理方式与硅探测器不同
Level 3 (Si)	单个硅模块 (Pixel、SCT)	All (部分Tx,Ty,Rz)	最精细的对准, 自由度最多 (~3.6万)
Level 3 (TRT)	单根TRT丝	Tx, Rz	自由度约35万, 用局部 $\chi^2$ 法处理

## 时间相关对准:

时间尺度	持续时间	原因	典型幅度
短时间尺度	单次LHC fill内 (数分钟至数小时)	热负载变化 (触发率变化→前端电子学功耗变化→温度变化)	IBL弯曲: ~10 $\mu$ m/fill; Pixel垂直移动: ~8 $\mu$ m
中等时间尺度	数天至一个月	环境条件变化 (磁场升降、电源循环、冷却系统循环)	通常导致显著的探测器位移
长时间尺度	数月至数年	机械松弛、辐射损伤累积效应	持续监测中

自动化对准: 对每个 LHC fill 执行 Level 1 自动对准

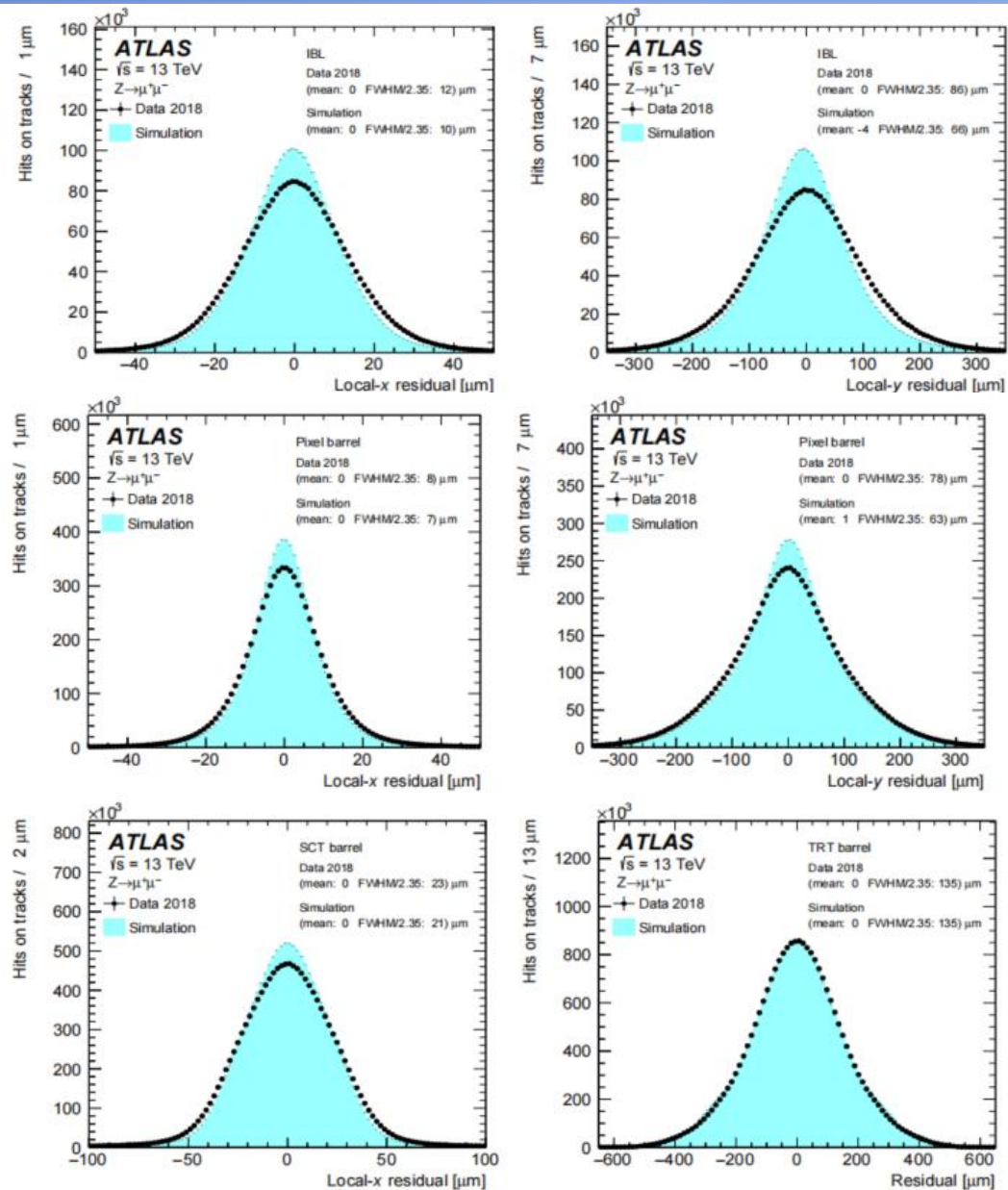
# 残差分布与对准性能

数据样本:  $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$  (2018年)  $r_i = e_i(\tau) - m_i$

子探测器	方向	Data [ $\mu\text{m}$ ]	MC [ $\mu\text{m}$ ]	备注
IBL	local-x	12	10	未校正传感器畸变
IBL	local-y	86	66	MC有4 $\mu\text{m}$ 偏差
Pixel barrel	local-x	8	7	良好一致
Pixel barrel	local-y	78	63	数据略宽
SCT barrel	local-x	23	21	良好一致
TRT barrel	local-x	135	135	一致

- IBL 残差最宽，主要因传感器畸变尚未校正
- Pixel 和 SCT barrel 数据略宽于模拟，可能原因：模拟中物质描述不完善
- TRT barrel 残差:  $\text{FWHM}/2.35 = 135 \mu\text{m}$  (数据与模拟一致)

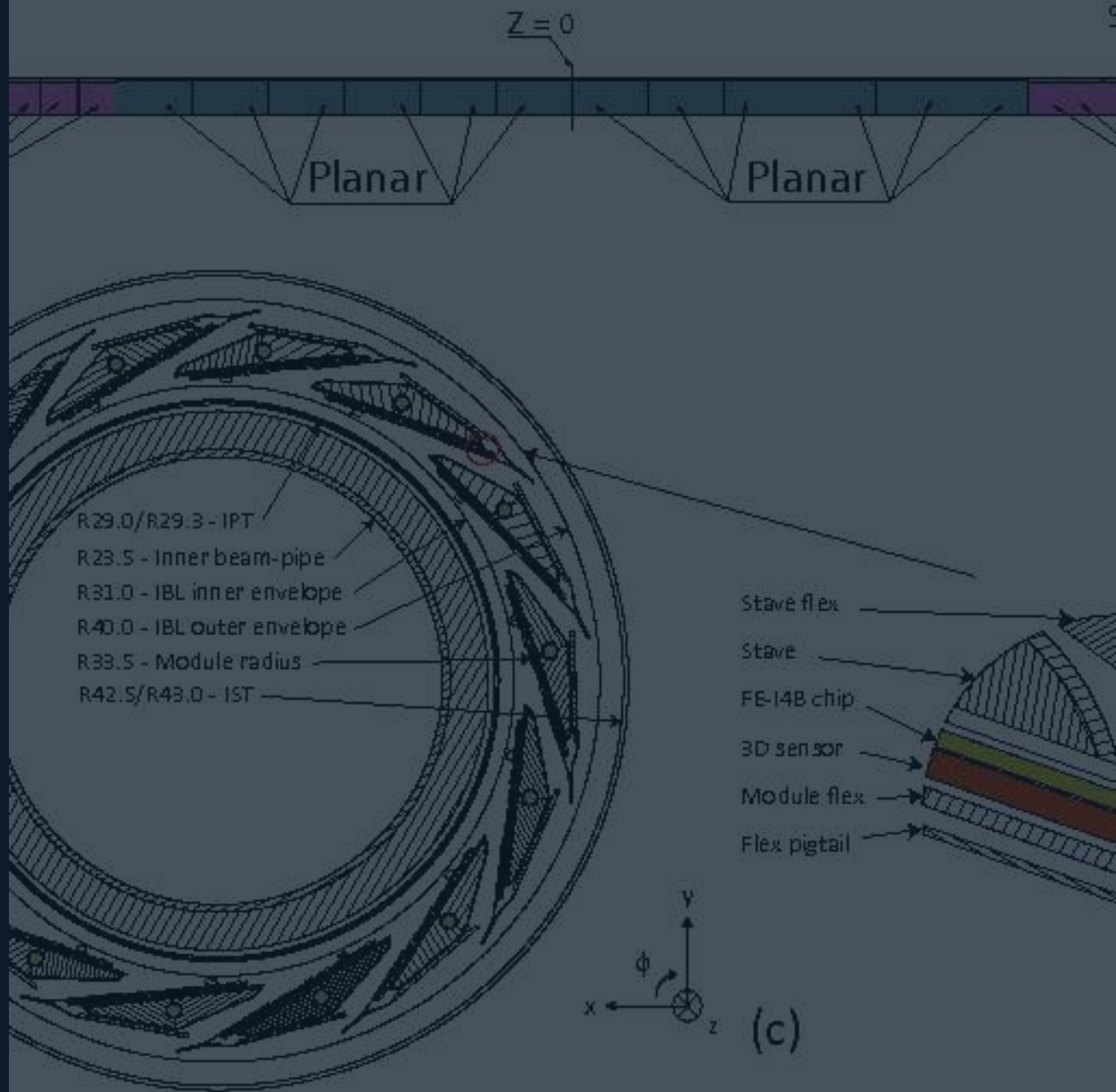
**核心结论:** 数据与模拟的残差分布一致性良好，表明对准精度达到设计要求。局部-x方向的高精度对准 (Pixel:  $\sim 8\mu\text{m}$ ) 确保了径迹重建的优良性能。



# 04

## 探测器稳定性与时间对准结果

短时间尺度运动、动态对准与Run-2稳定性评估



## IBL温度相关畸变

问题： IBL stave 数百 $\mu\text{m}$ 的畸变，取决于工作温度，主要local-x 方向

原因：不同热膨胀系数(CTE)材料间的紧密非对称机械耦合

机制：辐射损伤  $\rightarrow$  晶体硅中漏电流增加  $\rightarrow$  前端电子学电流上升  $\rightarrow$

模块温度升高  $\rightarrow$  热膨胀差异  $\rightarrow$  stave 弯曲

## 畸变模型（抛物线函数）

$$\delta x(z) = B - \frac{M}{z_0^2} (z^2 - z_0^2), \quad z_0 = 366.5 \text{ mm}$$

- $\delta x(z)$ : 全局z坐标处，模块在local-x方向的偏移量
- $z_0$ : stave两端固定点的坐标
- B: stave整体的平移（刚体位移）
- M: stave中心处的弯曲幅度
- 温度梯度:  $dM/dT = (-10.6 \pm 0.7) \mu\text{m}/\text{K}$

## 解决方案: $B_x$ 对准自由度

引入新的对准自由度 $B_x$ 参数化 IBL 畸变幅度 M:

- $B_x$ 关联每个模块沿 stave 的 local-x 坐标
- 使用抛物线函数
- 最小化 global  $\chi^2$  获得 $B_x$ 修正量

优势: 仅需少量数据即可确定变化程度，无需完整的 Level 3 对准

（后者需要大量数据，无法捕捉短时间尺度运动）

## Pixel探测器的垂直运动

问题: Pixel 探测器在 LHC fill 开始时的垂直位置变化（global-y 方向）

幅度: 向上移动达 **8  $\mu\text{m}$** 。

时间特征: 在 fill 开始后一个小时内发生，随后随亮度下降缓慢漂移，**0.2  $\mu\text{m}/\text{h}$**

机制: Pixel 探测器上电  $\rightarrow$  模块温度迅速升高  $\rightarrow$  Pixel 探测器体积温度逐渐升高  $\rightarrow$  双相冷却液密度降低  $\rightarrow$  质量负载 减小  $\rightarrow$  浮力增加  $\rightarrow$  探测器上升  $\rightarrow$  亮度下降  $\rightarrow$  电流/温度降低  $\rightarrow$  缓慢反向漂移

# 短时间尺度动态对准方案

为抑制 IBL 温度畸变和 Pixel 垂直运动等系统性短时间尺度形变，实施自动化动态对准方案。



## 时间粒度

- Fill 开始后前 60 分钟：每 **20 分钟** 执行一次
- Fill 后续阶段：每 **100 分钟** 执行一次

## 关键设计考量

平衡两个竞争效应：

1. 时间间隔必须**足够短**以捕捉特定形变的运动
2. 时间间隔必须**足够长**以获得精确的修正量

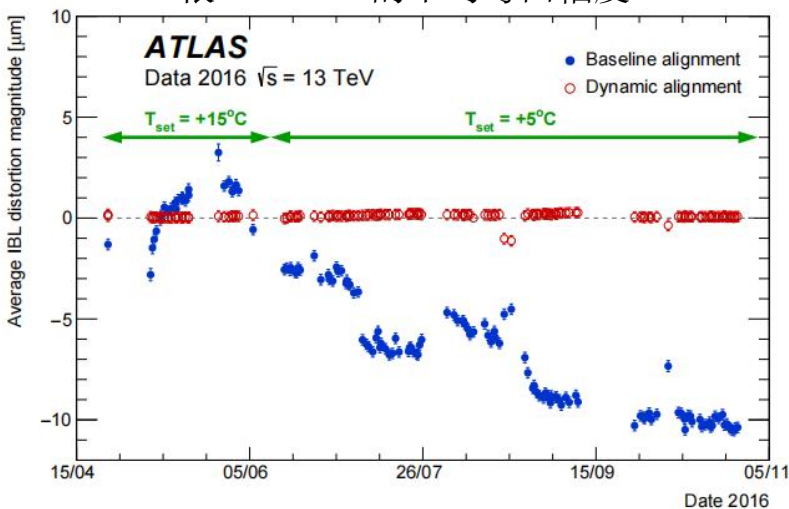
20/100 分钟的时间粒度经验证可：

- 有效抑制 IBL bowing ( $\sim 10\text{-}30\mu\text{m}$ )
- 有效跟踪 Pixel 垂直漂移 ( $\sim 8\mu\text{m}$ )
- 保持统计精度足够的对准修正

# Run-2 动态对准性能

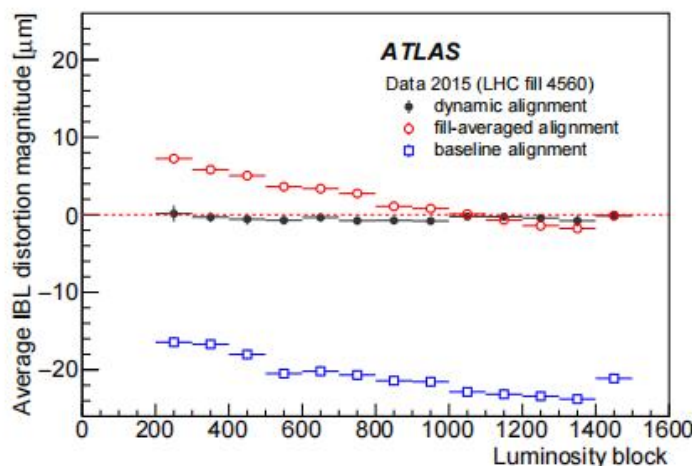
数据：2016 年 pp 碰撞，验证动态对准方案的性能

14根IBL stave的平均弯曲幅度



- 蓝色实心圆：基线对准（固定几何）下的弯曲幅度
- 红色空心圆：动态对准校正后的弯曲幅度

IBL局部x残差分布



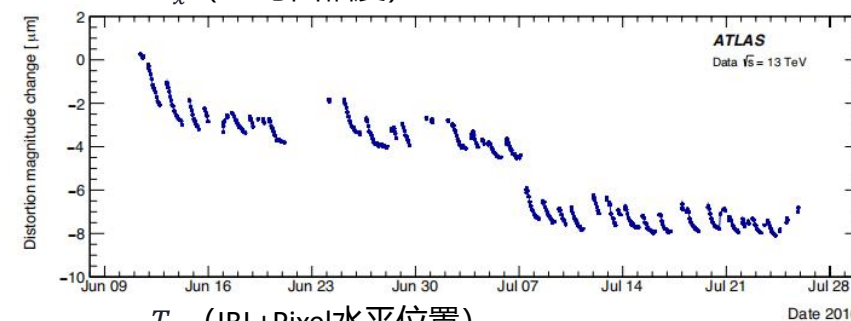
仅基线对准  
fill平均修正  
完整动态对准

关键结论：

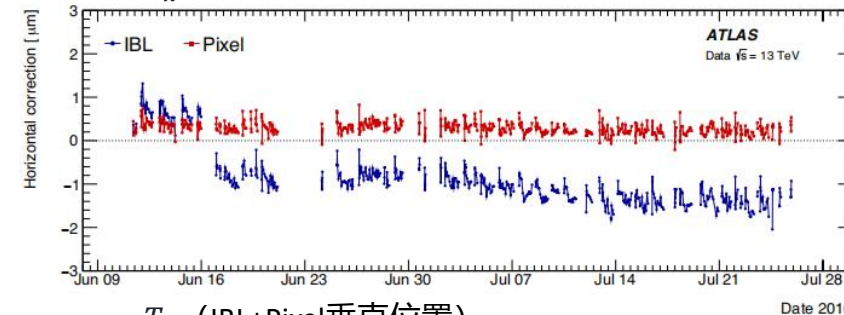
- 即使弯曲幅度高达 $30\mu\text{m}$ ， $B_x$ 方法也能将其精确校正
- 动态对准使残差宽度有巨大改善。
- Run-2期间探测器几何虽然不断变化，但变化是有规律的，并且能

够被动态对准系统有效跟踪

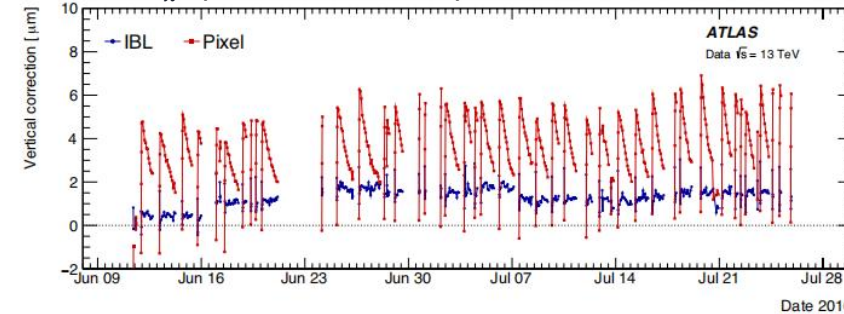
$B_x$  (IBL弯曲幅度)



$T_x$  (IBL+Pixel水平位置)



$T_x$  (IBL+Pixel垂直位置)



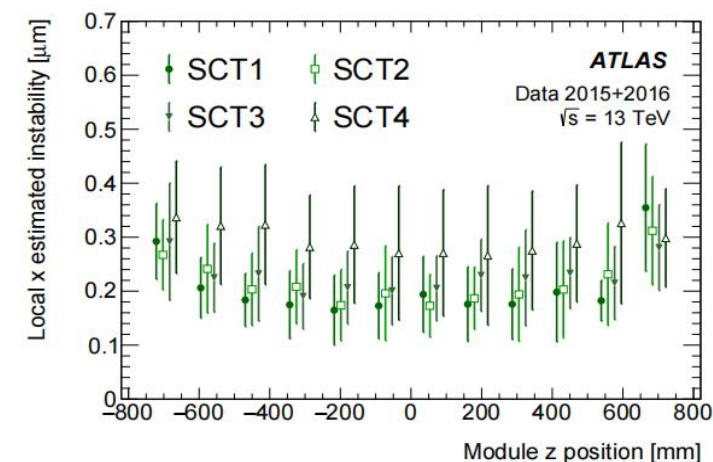
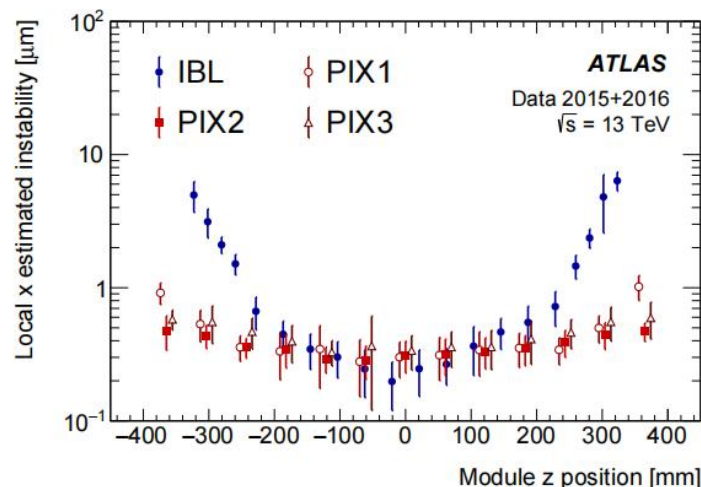
# 各子探测器最终对准精度

定义：精度  $\sigma_{x,y}^{time}$  (各模块位置变化的标准差)

$$\sigma_{x,y}^{time} = \sqrt{\sigma_{\langle r_{x,y} \rangle}^2 - \left(\frac{\sigma_{r_{x,y}}}{\sqrt{N}}\right)^2}$$

$\sigma_{\langle r_{x,y} \rangle}$ : 平均残差的分布宽度

$\frac{\sigma_{r_{x,y}}}{\sqrt{N}}$ : 统计不确定性



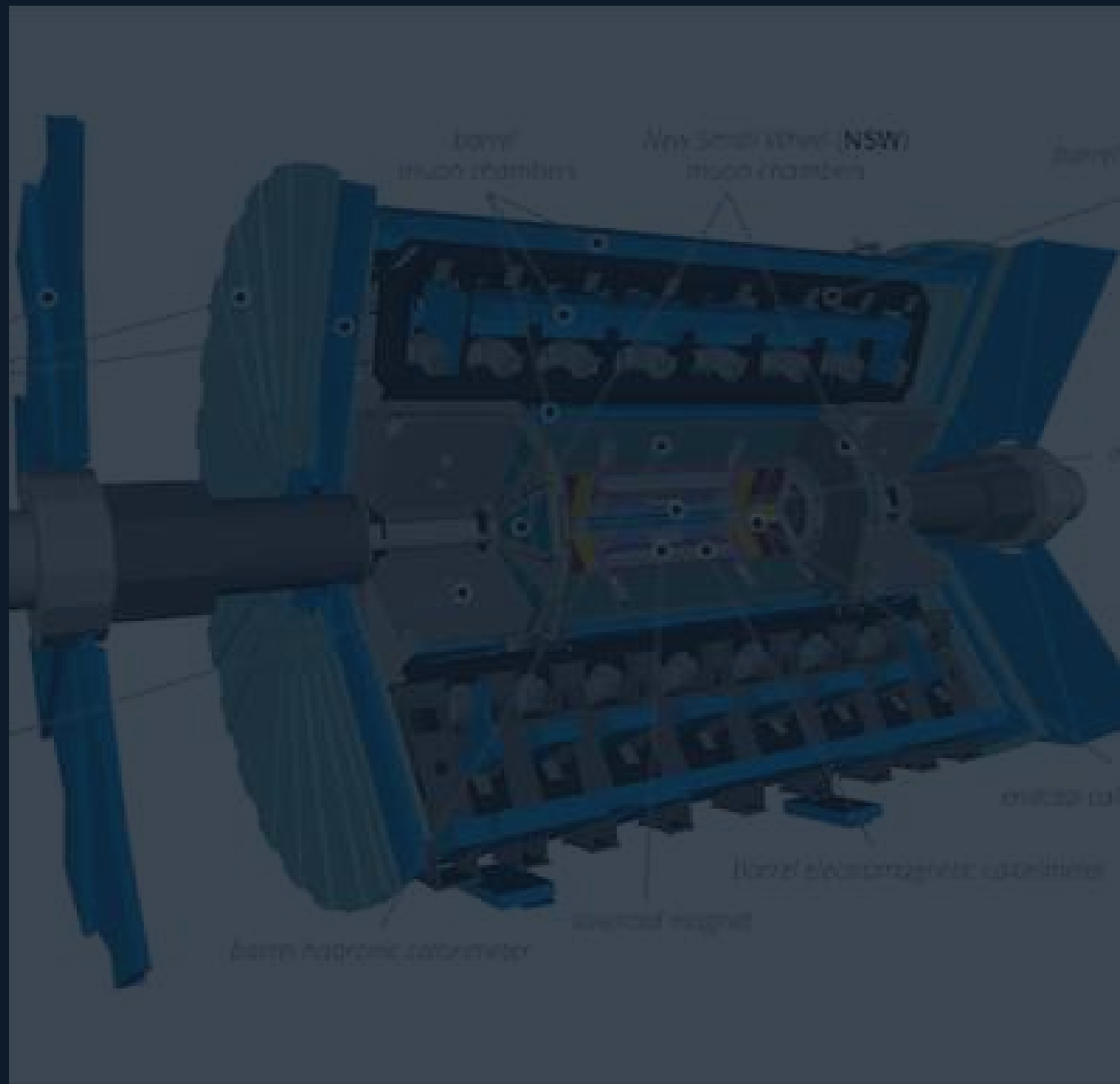
区域	local-x 精度	local-y 精度	本征分辨率	备注
Pixel barrel	< 0.5 $\mu\text{m}$	< 2 $\mu\text{m}$	~10 $\mu\text{m}$	核心区域，精度最高
SCT barrel	< 0.5 $\mu\text{m}$	< 2 $\mu\text{m}$	~17 $\mu\text{m}$	作为参考固定
IBL 外侧 ( $ \eta  > 2.5$ )	< 3 $\mu\text{m}$	< 15 $\mu\text{m}$	~10 $\mu\text{m}$	较宽，可能与local-z弯曲有关
Pixel 端盖	2–4 $\mu\text{m}$	4–7 $\mu\text{m}$	~10 $\mu\text{m}$	端盖盘片整体移动

- **结论：** 对准精度比要求（分辨率退化 <20%）基本满足  
在 IBL 温度畸变 (~10 $\mu\text{m}$ ) 和 Pixel 垂直运动 (~8 $\mu\text{m}$ ) 的背景下，此精度水平优异。
- **改进空间：** Pixel 端盖的不稳定性对应于端盖盘片相对基线对准的整体移动

# 05

## 动量偏差

弱模式引起的系统偏差评估与校正



## 弱模式 (Weak Modes)

- 使  $\chi^2$  几乎不变的几何畸变，导致对准求解的系统偏差
- 例如：全局平移/旋转、径向膨胀、弯曲面内的扭转等。需要通过外部约束消除或抑制。

## 径迹参数约束 (Track Constraints)

在  $\chi^2$  中添加约束项： $\chi_{cons}^2 = \rho^T V^{-1} \rho + (\pi - q)^T T^{-1} (\pi - q)$

束流约束：利用束流斑点位置约束径迹冲击参数

外部探测器约束：利用量能器等外部系统信息

物理事件约束：利用  $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$  等窄共振态的质量约束

## 对准参数约束 (Alignment Constraints)

$$\chi_{cons}^2 = \sum \rho^T V^{-1} \rho + (\alpha - \alpha_{cons})^T W^{-1} (\alpha - \alpha_{cons})$$

利用测量或机械约束的先验知识，将对准参数约束到初始值附近。

$W$  为对角协方差矩阵，控制各参数的容差。

弱模式类型	影响	约束方法
全局平移/旋转	奇异模式	固定参考模块
Sagitta畸变	动量偏差	$Z \rightarrow \mu\mu$ 质量约束
径向膨胀	动量尺度偏差	$J/\psi \rightarrow \mu\mu + Z \rightarrow \mu\mu$
IBL bowing	局部残差增大	$B_x$ 自由度

## 约束后的导数修正

添加约束后，一阶导数变为：

$$Y \rightarrow Y + 2w^{-1}(\alpha - a)$$

$$M \rightarrow M + 2w^{-1}$$

$$\text{对准修正量: } X \equiv \Delta\alpha = -M^{-1}Y$$

# Sagitta (弓形) 偏差

## Sagitta 畸变

弯曲面内垂直于径迹路径的位移  $\rightarrow$  电荷反对称曲率改变  
对正负电荷粒子产生相反的动量偏差

$$p' = p(1 + qp_T \delta_{sagitta})^{-1}$$

## Sagitta 偏差测量方法及结果

方法1:  $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$  衰变

利用双缪子不变质量对 sagitta 偏差的敏感性:

$$(m_{\mu\mu}^2 - m_Z^2)/m_Z^2 \approx p_T^+ \delta_s(\eta^+, \phi^+) - p_T^- \delta_s(\eta^-, \phi^-)$$

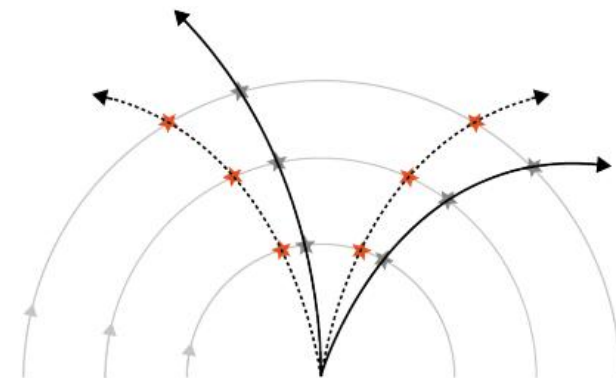
- 均值:  $0.018 \text{ TeV}^{-1}$ , RMS:  $0.085 \text{ TeV}^{-1}$
- 中心桶区基本无 sagitta 偏差
- 端盖区存在小的残余偏差

方法2:  $E/p$  比值 (电子/正电子)

利用电磁量能器作为外部参考:  $\delta_s = [(E/p)^+ - (E/p)^-]/2\langle E_T \rangle$

- 均值:  $0.064 \text{ TeV}^{-1}$ , RMS:  $0.116 \text{ TeV}^{-1}$
- 与  $Z \rightarrow \mu\mu$  方法相比有约  $0.05 \text{ TeV}^{-1}$  全局偏移

2026-6-14



## 残余 Sagitta 偏差评估

两种方法一致表明:

- 中心桶区 ( $|\eta| < 1.0$ ) 基本无 sagitta 偏差
- 端盖区存在局部残余偏差区域

残余 sagitta 偏差  $< 0.1 \text{ TeV}^{-1}$

对于 1 TeV 的粒子, 动量相对偏差  $< 0.01\%$

对应的探测器位移 (到最外层 SCT 端盖盘片):

$< 10 \mu\text{m}$  —— 对准精度优异

750,000+

总对准自由度

(硅模块 36,000 + TRT 700,000)

<0.5  $\mu\text{m}$

Pixel/SCT barrel

local-x 对准精度

<0.1

残余 Sagitta 偏差 动尺偏差

[ $\text{TeV}^{-1}$ ] ( $\epsilon$  s)

1. 高精度对准实现：ATLAS 内探测器在 Run-2 期间实现了高精度对准，采用基于 Global  $\chi^2$  的径迹对准方法，考虑了超过 750,000 个自由度。
2. 动态对准创新：引入  $B_x$  自由度参数化 IBL 温度畸变，自动化动态对准有效校正了 IBL 温度畸变 ( $\sim 30\mu\text{m}$ ) 和 Pixel 垂直运动 ( $\sim 8\mu\text{m}$ )，时间粒度达 20 分钟。
3. 弱模式有效控制：通过外部约束（束流约束、质量约束等）将残余 sagitta 偏差控制在  $<0.1 \text{ TeV}^{-1}$
4. 物理分析就绪：所有对准精度指标满足物理分析需求，残余径迹参数偏差对 ATLAS 物理分析无显著影响。

- ATLAS Collaboration, *Alignment of the ATLAS Inner Detector and its Performance in 2012* , ATLAS-CONF-2014-047 (2014),url:<https://cds.cern.ch/record/1741021> .
- ATLAS Collaboration,2015 start-up trigger menu and initial performance assessment of the ATLAS trigger using Run-2 data,ATL-DAQ-PUB-2016-001 (2016),url:<https://cds.cern.ch/record/2136007>.
- ATLAS Collaboration, Performance of the ATLAS Transition Radiation Tracker in Run 1 of the LHC:tracker properties,JINST 12 (2017)P05002,arXiv:1702.06473 [hep-ex].

# back up

参数	符号	单位	具体含义
横向冲击参数	$d_0$	mm	径迹在横向平面 ( $x-y$ ) 上, 距离对撞点 ( $z$ 轴) 的最短距离。带正负号, 表示径迹从对撞点的左侧还是右侧通过。
纵向冲击参数	$z_0$	mm	径迹在纵向 ( $z$ 方向) 上, 距离对撞点的距离。
方位角	$\phi_0$	rad	在横向平面 ( $x-y$ ) 上, 径迹从 $x$ 轴正向逆时针旋转到径迹方向的角度 (范围 $0$ 到 $2\pi$ )。
极角	$\theta_0$	rad	径迹方向与 $z$ 轴正方向的夹角 (范围 $0$ 到 $\pi$ )。 $\theta_0=0$ 表示沿束流线向前, $\theta_0=\pi/2$ 表示垂直于束流线。
电荷-动量比	$q/p$	$(\text{GeV}/c)^{-1}$	粒子电荷 $q$ ( $+1$ 或 $-1$ ) 除以动量 $p$ 。这个参数直接决定了粒子在磁场中的曲率——曲率 $\kappa \propto q/p \times B$

# back up



$$\tau = (d_0, z_0, \phi_0, \theta_0, q/p) \quad \chi_{Track}^2 = r^T \Omega^{-1} r$$

$$\rho \equiv \begin{pmatrix} r \\ \theta \end{pmatrix}, \quad V \equiv \begin{pmatrix} \Omega & 0 \\ 0 & \Theta \end{pmatrix}, \quad \pi \equiv \begin{pmatrix} \tau \\ \theta \end{pmatrix}, \quad \text{and } H \equiv \begin{pmatrix} G & S \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0 & \frac{\partial \theta}{\partial \theta} = \mathbf{I} \end{pmatrix}.$$

$$C = 2 \left( \frac{\partial^2 \chi_{Track}^2}{\partial \pi^2} \right)^{-1} = (H^T V^{-1} H)^{-1} \quad A \equiv \frac{\partial \rho}{\partial \alpha},$$

$$Y \equiv \frac{d\chi_{Global}^2}{d\alpha} = 2 \sum A^T V^{-1} (V - HCH^T) V^{-1} \rho$$

$$M \equiv 2 \sum A^T V^{-1} (V - HCH^T) V^{-1} A$$

# 长度尺度偏差测量结果

径向和纵向长度尺度偏差与**磁场强度偏差**存在简并：两者均导致  $p_T(1 + \varepsilon_s)$  形式的动量偏差。

若  $B \rightarrow B(1 + \varepsilon_s)$ ，则粒子动量按  $p_T(1 + \varepsilon_s)$  缩放。

利用  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  和  $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$  在不同  $\sin^2\alpha$  范围内的测量区分径向和纵向分量。

## 质量-尺度关系

$$m_{\mu\mu}^{*2} \approx m_{\mu\mu}^2 + 2m_{\mu\mu}^2\varepsilon_s + 2m_{\mu\mu}^2\varepsilon_{r'}\sin^2\alpha$$

其中  $\varepsilon_s = \varepsilon_z$ ,  $\varepsilon_{r'} = \varepsilon_r - \varepsilon_z$

## $\sin^2\alpha$ 方法原理

$$\sin^2\alpha = (\beta_T^+ - \beta_T^-)^2 / m_{\mu\mu}^2$$

不同共振态覆盖不同的  $\sin^2\alpha$  范围：

- $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ ：低动量缪子，覆盖全  $\sin^2\alpha$  范围 (0-1)
- $Z \rightarrow \mu\mu$ ：高动量缪子，仅覆盖小  $\sin^2\alpha$  范围 (~0-0.3)

通过拟合  $m^*/m_{PDG}$  随  $\sin^2\alpha$  的变化：

- 斜率  $\rightarrow \varepsilon_{r'}$  (径向-纵向差异)
- 截距  $\rightarrow \varepsilon_s$  (全局尺度偏差)

## 测量结果

$J/\psi \rightarrow \mu\mu$  (覆盖全  $\sin^2\alpha$  范围)：

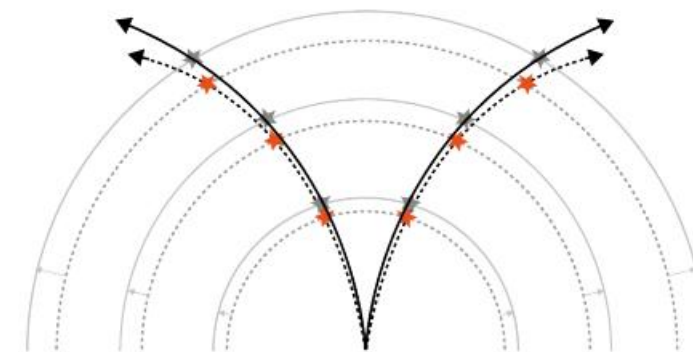
- $\varepsilon_s = (-0.85 \pm 0.04) \times 10^{-3}$
- $\varepsilon_{r'} = (0.03 \pm 0.06) \times 10^{-3}$

$Z \rightarrow \mu\mu$  (覆盖小  $\sin^2\alpha$  范围)：

- $\varepsilon_s = (-0.87 \pm 0.13) \times 10^{-3}$
- $\varepsilon_{r'} = (0.08 \pm 0.14) \times 10^{-3}$

两项研究一致性良好，  
表明存在全局动量尺度偏差：

$$\varepsilon_s \approx -0.9 \times 10^{-3}$$



## 偏差来源讨论

$\varepsilon_s \approx -0.9 \times 10^{-3}$  的来源无法完全确定：

- 磁场绝对尺度测量不确定度约  $0.2 \times 10^{-3}$  (比观测偏差小约4倍)
- 可能来源：
  - 磁场强度标度误差
  - 探测器全局径向/纵向尺度误差
  - 两者组合
- 该偏差在物理分析中通过动量校正因子处理