



# BESIII实验中的重建和刻度

孙胜森

高能物理研究所 实验物理中心

粒子物理数据分析基础和前沿研讨会

2016.9.11~9.12

# 北京正负电子对撞机 ( BEPCII )

束流能量：1.0~2.3GeV

直线加速器

BESIII  
探测器

2004：开始BEPCII升级  
BESIII建造

2008：试运行

2009-至今：BESIII物理运行

• 1989-2004 ( BEPC )

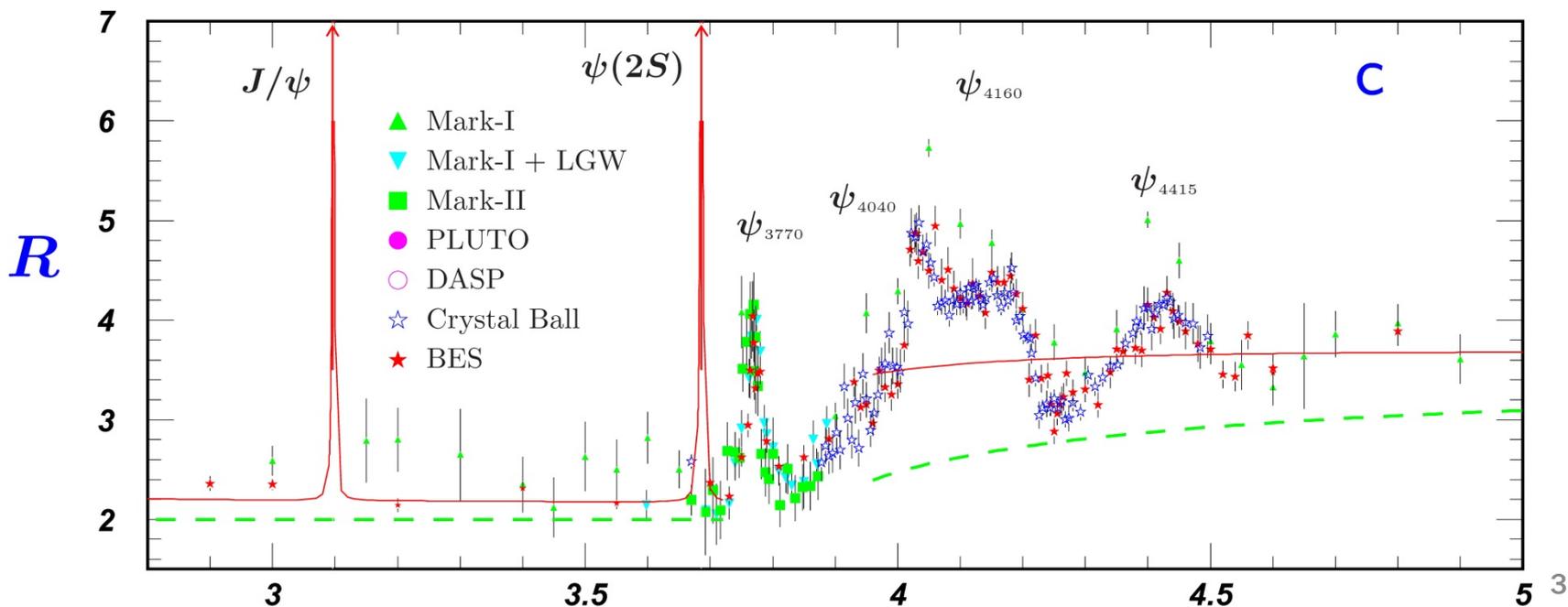
$$L_{peak} = 1.0 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

• 2009-至今 ( BEPCII )

$$L_{peak} = 1.0 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

# BEPC能区

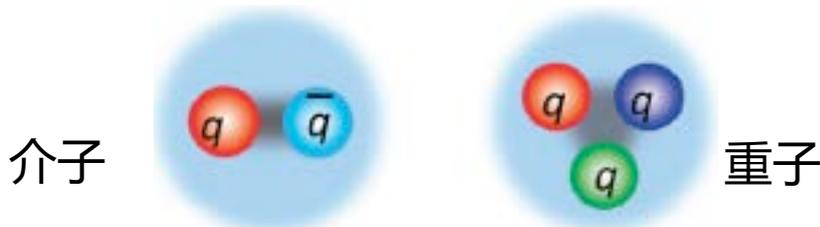
- 丰富的粒子/共振态：粲偶素和粲介子
- 近阈产生特性（成对产生 $\tau$ ， $D$ ， $D_S$ ，.....）
- 微扰QCD和非微扰QCD
- 新型强子态能区：胶球，混合态，多夸克态



# 新型强子态

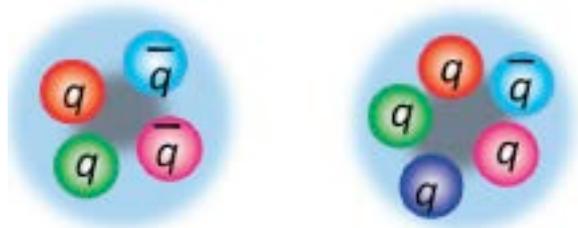
- 普通强子由2或3夸克组成：

夸克模型：



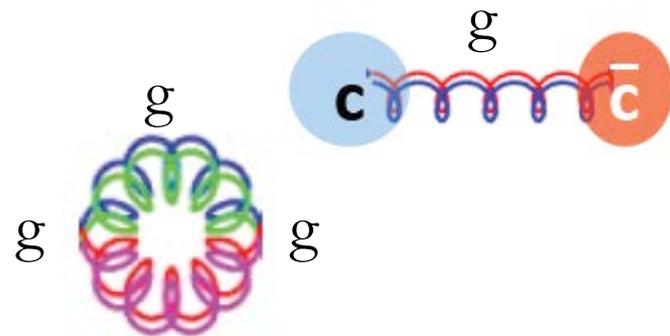
- QCD预言新型强子态的存在：

– 多夸克态：夸克数 $\geq 4$



– 混杂态： $q\bar{q}g$ ， $qqqg$ ，……

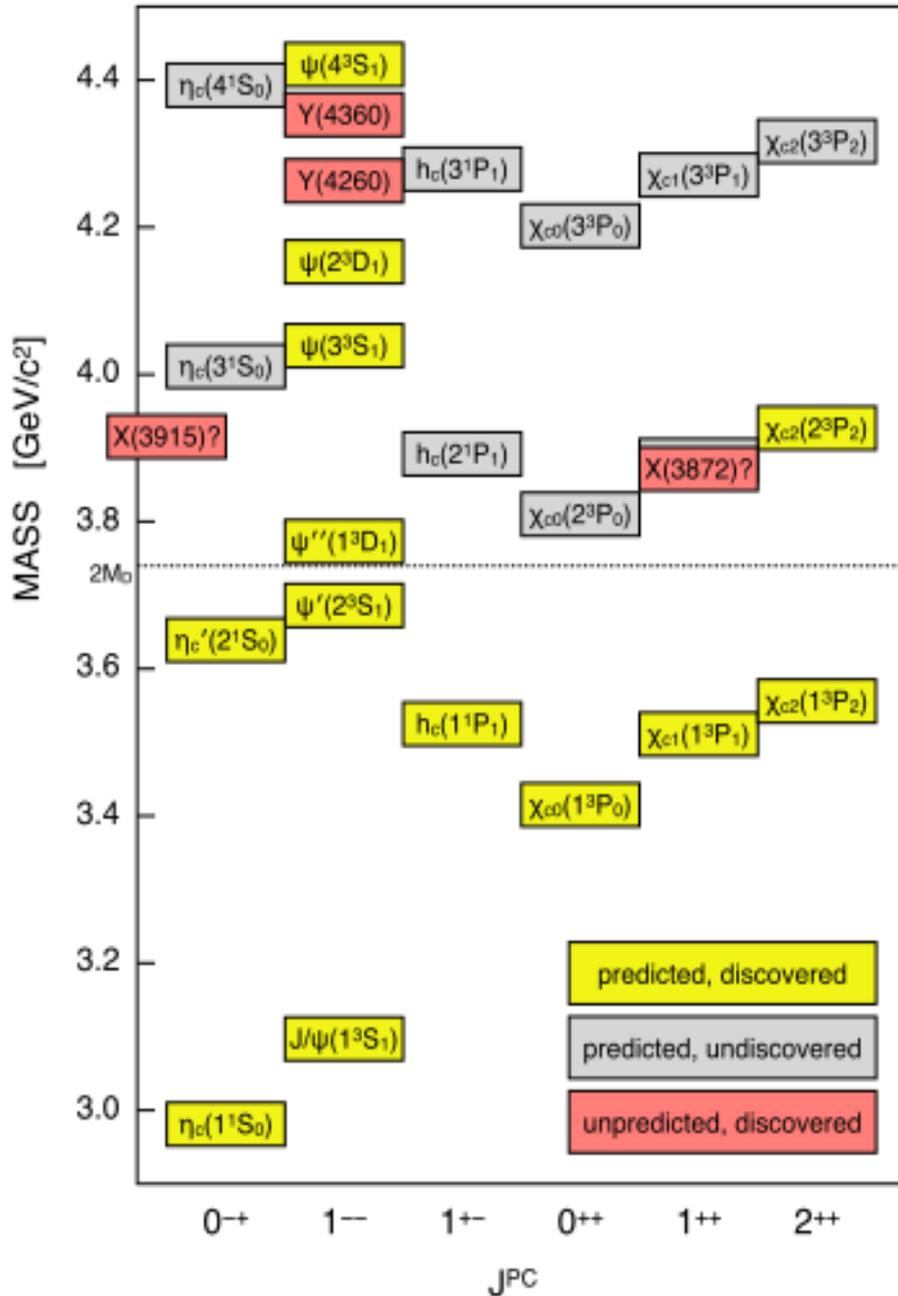
– 胶子球： $gg$ ， $ggg$ ，……



实验上还未确认新型强子态的存在！

# (类) 粲偶素谱现状

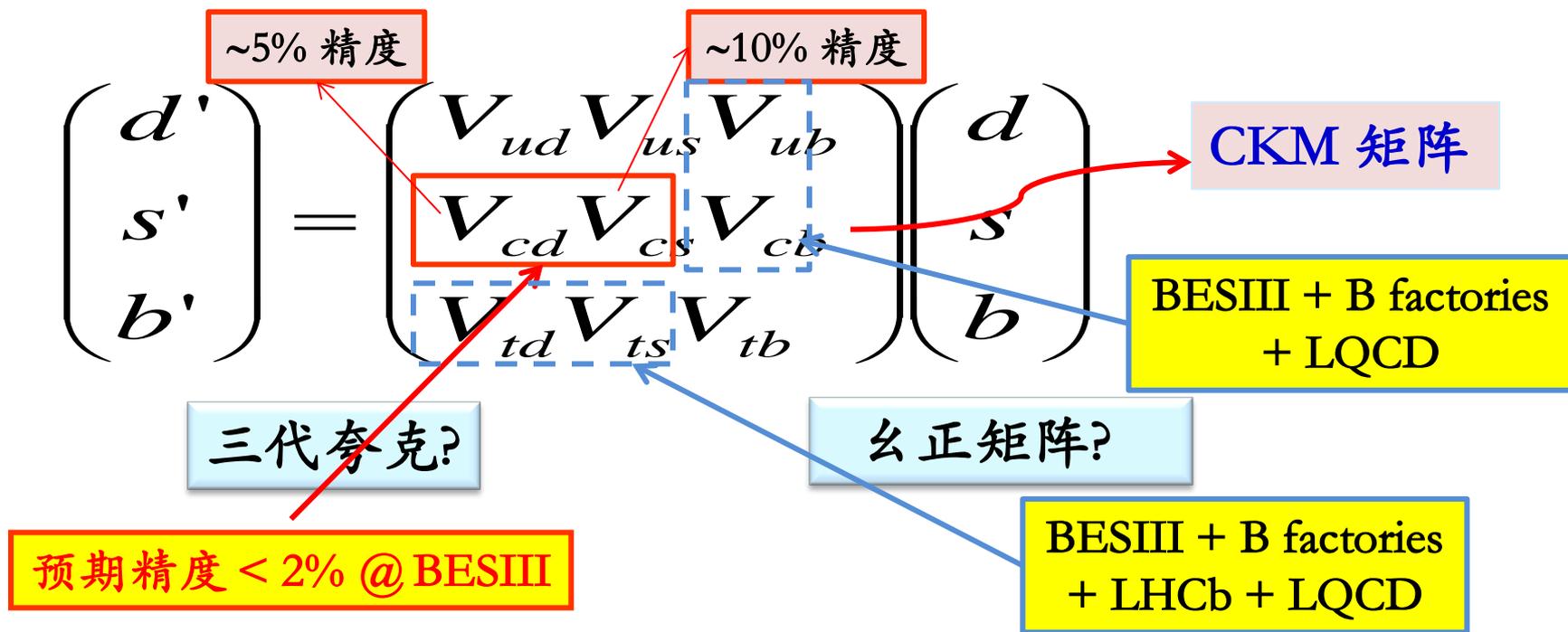
- 在DDbar阈下：  
理论预言的粲偶素态在实验上都被观测到
- 在DDbar阈上：  
许多预言的态没被发现；  
发现许多未预期的态



- |         |           |         |
|---------|-----------|---------|
| Z(4430) | X(3872)   | X(3915) |
| Z(4250) | XYZ(3940) | X(4160) |
| Z(4050) |           | Y(4008) |
| Z(3900) |           | Y(4140) |
|         |           | Y(4260) |
|         |           | Y(4360) |
|         |           | X(4350) |
|         |           | Y(4660) |

# 精确测量CKM矩阵元——检验EW理论

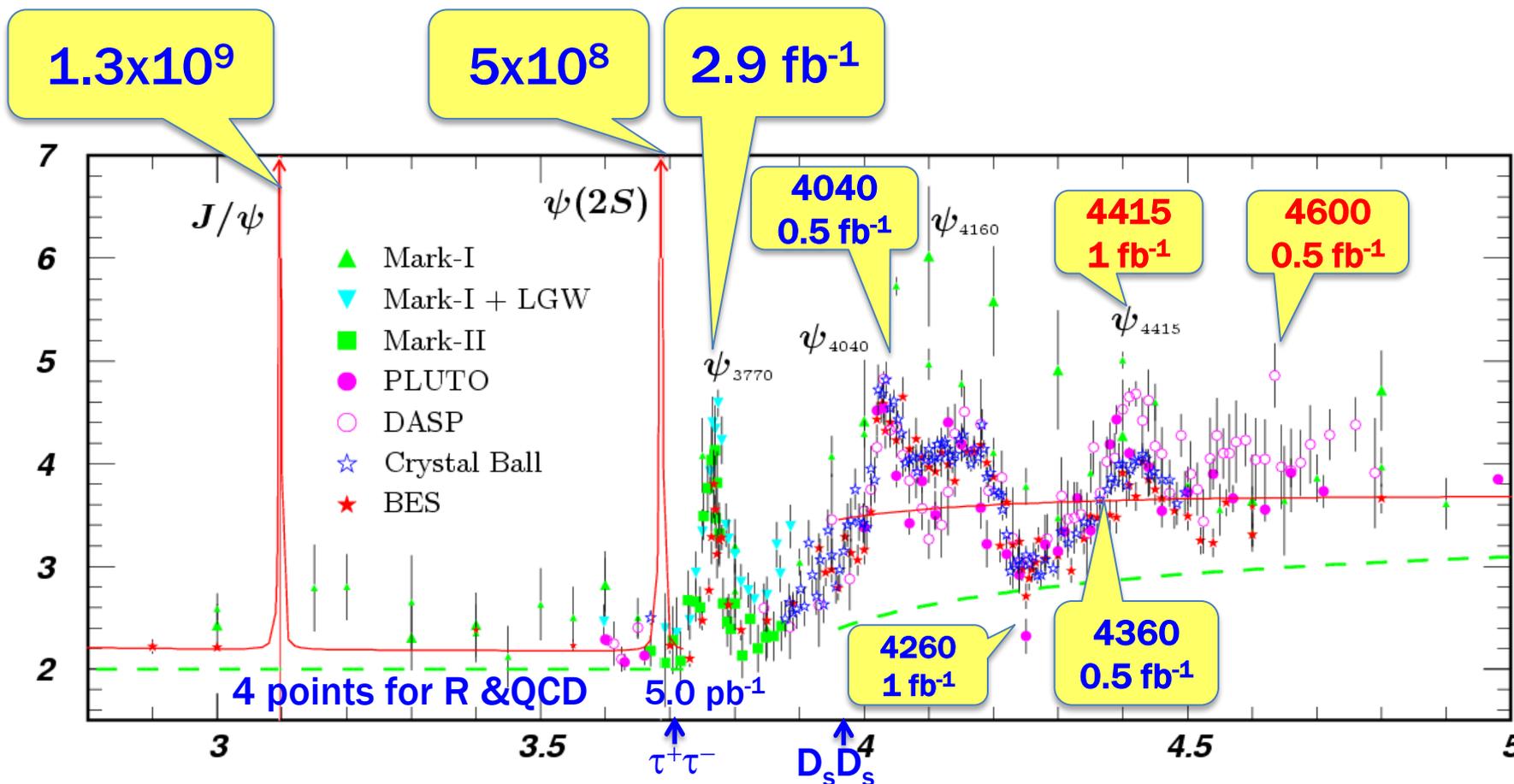
CKM矩阵元是标准模型的基本参数，描述由于弱相互作用引起的夸克场的混合。



CKM矩阵元的精确测量——精确检验标准模型，是否存在超出标准模型的新物理？

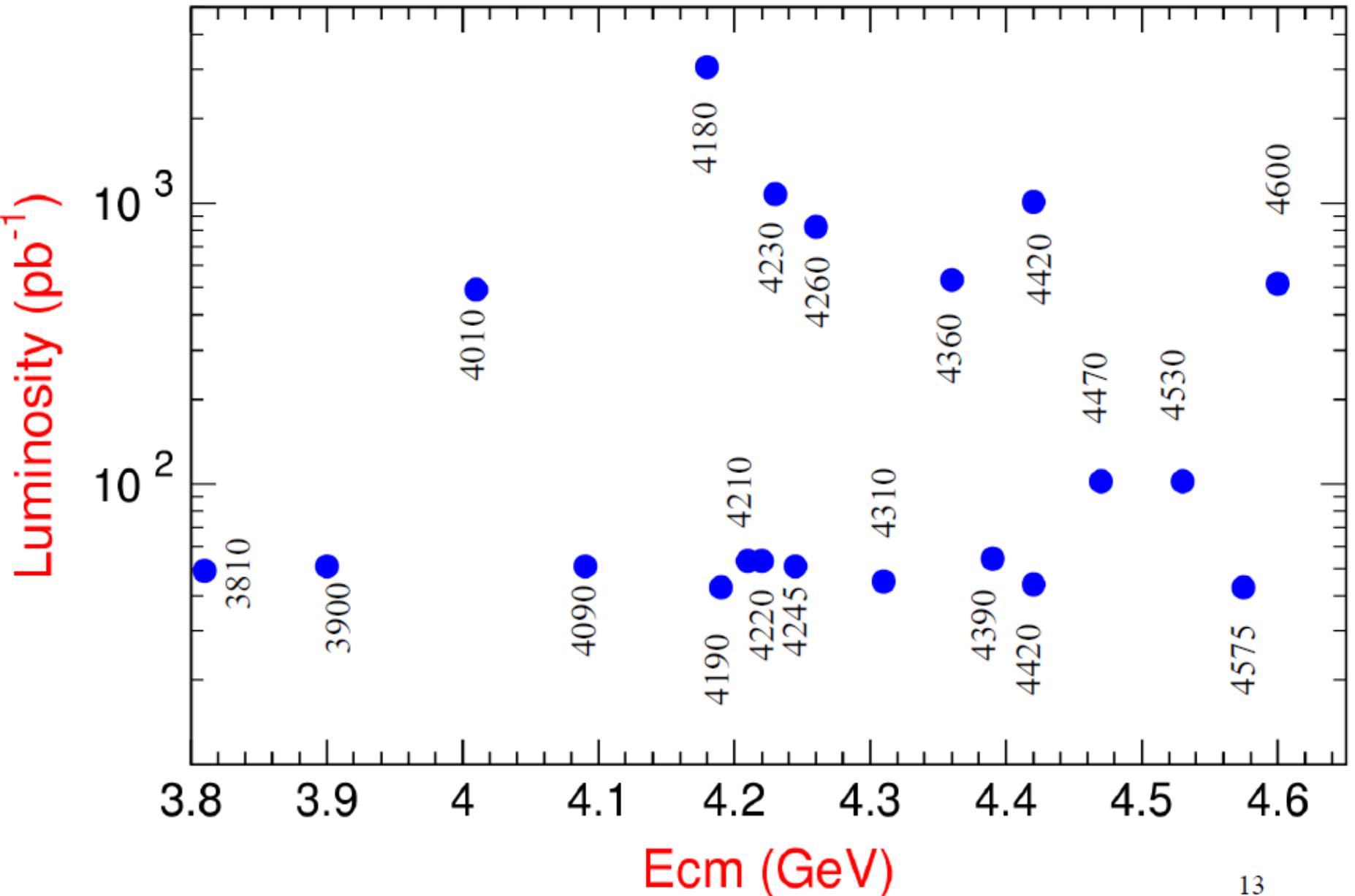
# BESIII数据样本

$R$



世界上最大的直接从 $e^+e^-$ 对撞产生的  
 $J/\psi$  ,  $\psi(2S)$  ,  $\psi(3770)$  ,  $Y(4260)$  , ... 数据样本

# BESIII data samples for XYZ study ( $>9/\text{fb}$ )



# BESIII探测器

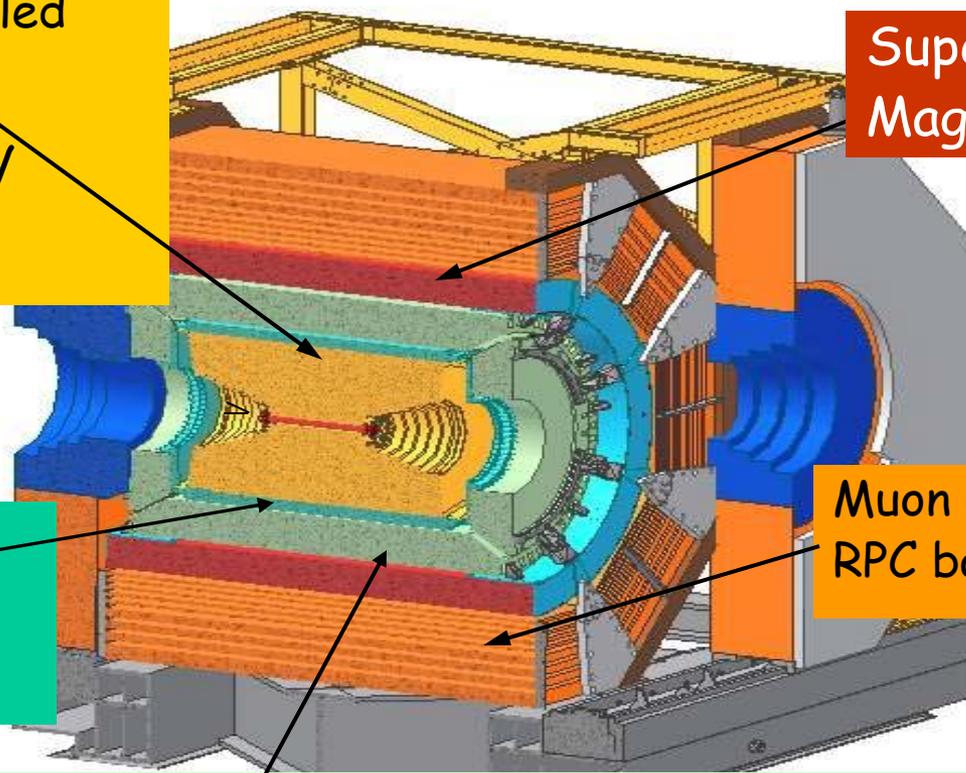
Main Drift Chamber (MDC):

Helium based small-celled

$$\sigma_{xy} = 130 \mu\text{m}$$

$$\Delta P/P = 0.5 \% @ 1 \text{ GeV}$$

$$\sigma_{dE/dx} = 6-7 \%$$



Super-conducting  
Magnet: 1.0 Tesla

TOF System:

$$\sigma = 90 \text{ ps barrel}$$

$$110 \text{ ps endcap}$$

Muon Chamber (MUC):  
RPC based

EM Calorimeter (EMC) :  $\Delta E/E = 2.5 \% @ 1 \text{ GeV}$

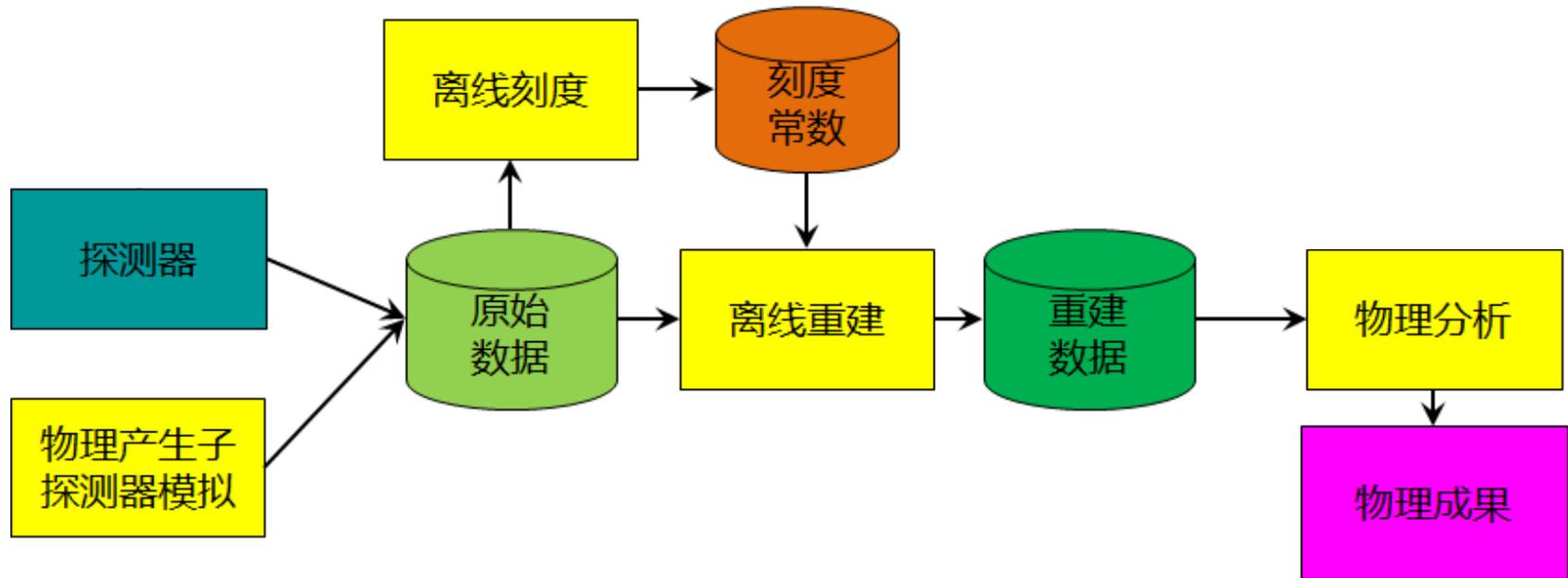
CsI crystal array

$$\sigma_{z,\phi} = 0.6 \text{ cm} @ 1 \text{ GeV}$$

# BESIII探测器的总体设计

- 物理目标： $\tau$ -粲能区高精度的物理研究
- 探测器设计要求：
  - 在10MeV至2.5GeV的能量范围内，能精确测量光子的能量，有非常好的能量分辨率、位置分辨率和光子识别能力
  - 在50MeV至2.5GeV的动量范围内，能精确测量带电粒子的动量与方向，即非常好的动量分辨率、顶点位置分辨率、出射位置分辨率等
  - 在50MeV至2.5GeV的动量范围内能很好地鉴别区分各种粒子，如光子、电子、 $\mu$ 子、质子、 $\pi$ 介子、 $K$ 介子等
  - 电子学和数据获取系统应适应多束团模式和高数据取数

# BESIII数据处理和物理分析流程



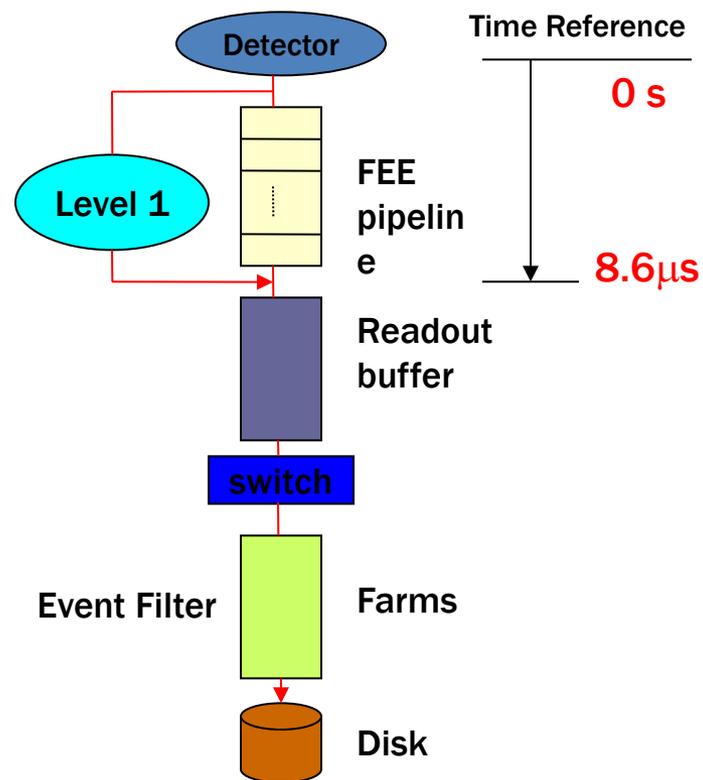
- **原始数据**：探测器电子学信号的时间和幅度信息
- **重建数据**：粒子的动量、能量和运动方向等物理量

**刻度**：消除实验的各种外部条件（如温度、气压）和探测器本身条件（如漂移室高压）对电子学信号与物理测量量之间转换关系的影响。

**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。

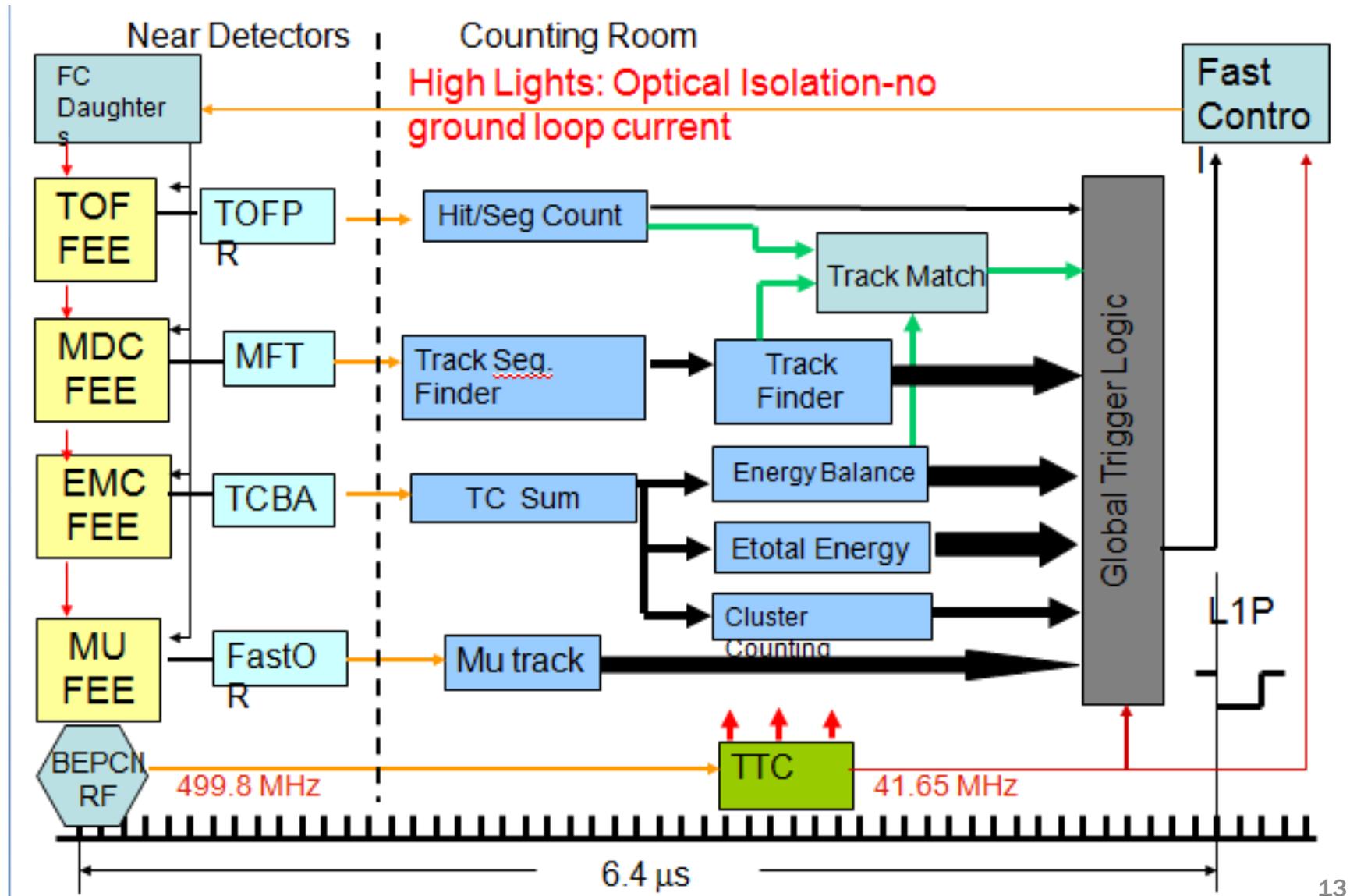
# BESIII触发判选系统

- 触发系统是快速实时事例选择和控制系统
- 事例率的估算
  - 好事例率： ~2000Hz
  - Bhabha： ~ 800Hz
  - 宇宙线： < 200Hz
  - 束流本底： <2000Hz
  - 总事例率： 4000Hz
- 排除比例 > 10:1
- 排除比例 > 10000:1
- 触发判选系统采用流水线方式
- L1延时：  $8.6\mu s$  ( ETOF )
- L1死时间：  $3\mu s$



BESIII FEE pipeline and Data flow

# BESIII触发判选系统



# 触发条件

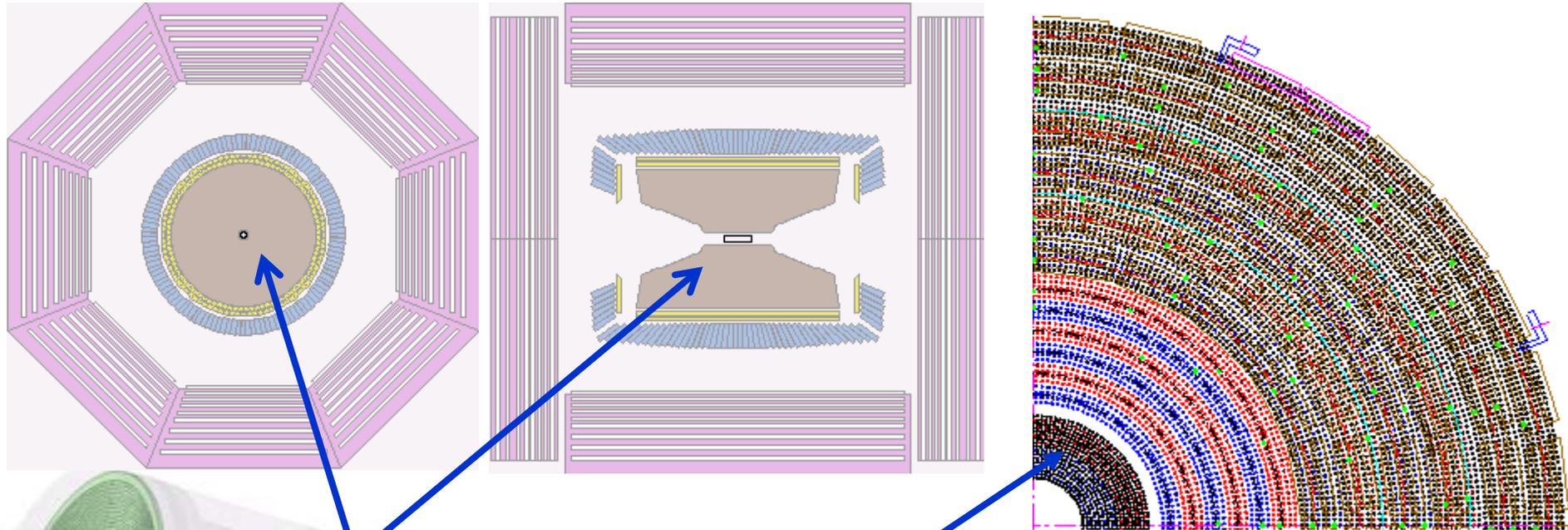
Detector	Trigger Condition	Numbering in GTL(00 – 47)	Comments
TOF 6	ETOF_BB	16	Endcap TOF Back to Back
	BTOF_BB	17	Barrel TOF Back to Back
	NETOF.GE.2	18	Endcap TOF hits number $\geq 2$
	NETOF.GE.1	19	Endcap TOF hits number $\geq 1$
	NBTOF.GE.2	20	Barrel TOF hits number $\geq 2$
	NBTOF.GE.1	21	Barrel TOF hits number $\geq 1$
	NTOF.GE.1	22	TOF hits number $\geq 1$
MDC 10	STrk_BB	38	Short Track Back to Back
	NStrk.GE.N	39	Short Tracks number $\geq N$
	NStrk.GE.2	40	Short Tracks number $\geq 2$
	NStrk.GE.1	41	Short Tracks number $\geq 1$
	LTrk_BB	42	Long Track Back to Back
	NLtrk.GE.N	43	Long Tracks number $\geq N$
	NLtrk.GE.2	44	Long Tracks number $\geq 2$
	NLtrk.GE.1	45	Long Tracks number $\geq 1$
	NITrk.GE.2	46	Inner Tracks number $\geq 2$
NITrk.GE.1	47	Inner Tracks number $\geq 1$	
EMC 16	NClus.GE.1	00	Number of Clusters $\geq 1$
	NClus.GE.2	01	Number of Clusters $\geq 2$
	BClus_BB	02	Barrel Cluster Back to Back
	EClus_BB	03	Endcap Cluster Back to Back
	Clus_Z	04	Cluster Balance in Z direction
	BClus_Phi	05	Barrel Cluster Balance in Phi direction
	EClus_Phi	06	Endcap Cluster Balance in Phi direction
	BEtot_H	07	Barrel total Energy Higher threshold
	EEtot_H	08	Endcap total Energy Higher threshold
	Etot_L	09	Total Energy Lower threshold
	Etot_M	10	Total Energy Middle threshold
	BL_EngZ	11	Energy Balance in "Z" direction
	NBclus.GE.1	12	Barrel Energy Difference Balance
	NEclus.GE.1	13	Endcap Energy Difference Balance
	BL_BBLK	14	Energy Block Balance
BL_EBLK	15	Endcap Energy Balance	

- TOF
  - 击中数 / 击中位置
  - 径迹匹配
- MDC
  - 径迹段寻找
  - 径迹寻找
- EMC
  - 能量平衡
  - 总能量
  - 簇团计数, 位置匹配
- 径迹匹配减少本底
- 48个触发条件

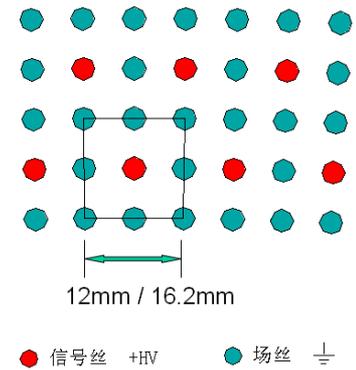
# 物理取数的触发表

			CH01	CH02	CH03	CH04	CH05	CH06	CH07	CH08	CH09	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16
			Y	Y	N	Y	Y	Y	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	N	N
EMC	Etot_L	09					Y								Y			
	NBclus.GE.1	12		Y				Y										
	NEclus.GE.1	13	Y															
	ECLUS_BB	3																Y
TOF	BTOF_BB	17				Y										Y		
	NETOF.GE.2	18																
	NETOF.GE.1	19	Y															
	NBTOF.GE.2	20		Y	Y								Y					
	NBTOF.GE.1	21					Y	Y										
	NTOF.GE.1	22													Y			
MDC	LTrk_BB	42				Y							Y					
	STrk_BB	38	Y															
	NLTrk.GE.N	43																
	NLTrk.GE.2	44		Y	Y			Y										
	NLTrk.GE.1	45					Y											
EMC	Nclus.GE.1	48									Y							Y
	Nclus.GE.2	49												Y				
	BEtot_H	55									Y							
	EEtot_H	56																
	Etot_M	58												Y				

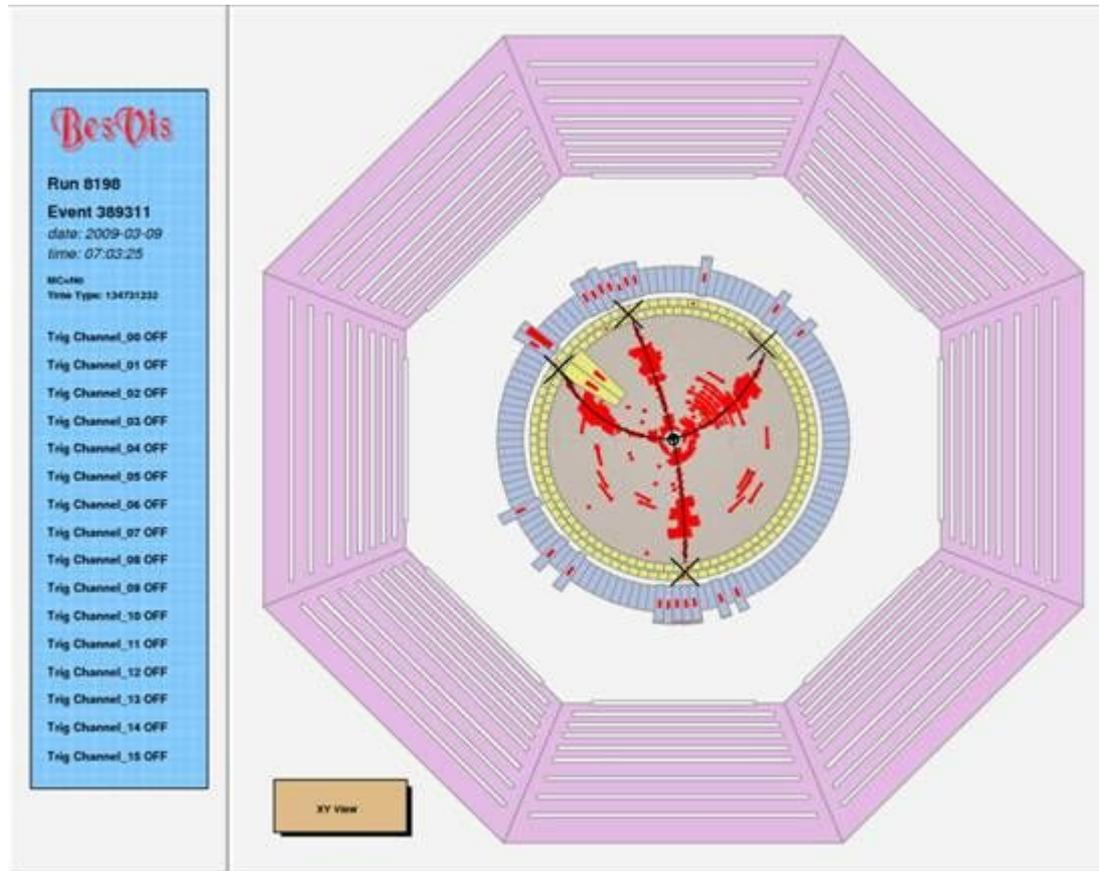
# BESIII主漂移室



- 43 layers (24S+19A)
- 6796 sense wires
- $\sigma_{XY} = 130\mu m$
- $\sigma(dE/dx) \approx 6\sim 7\%$
- $\frac{\Delta P_t}{P_t} = 0.5\%(1GeV)$

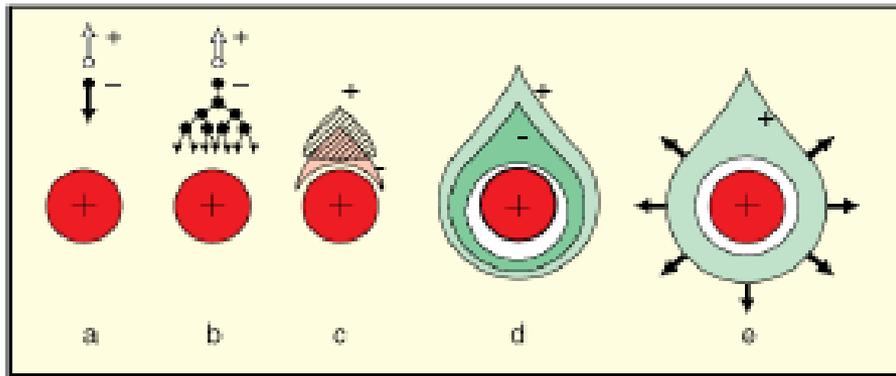
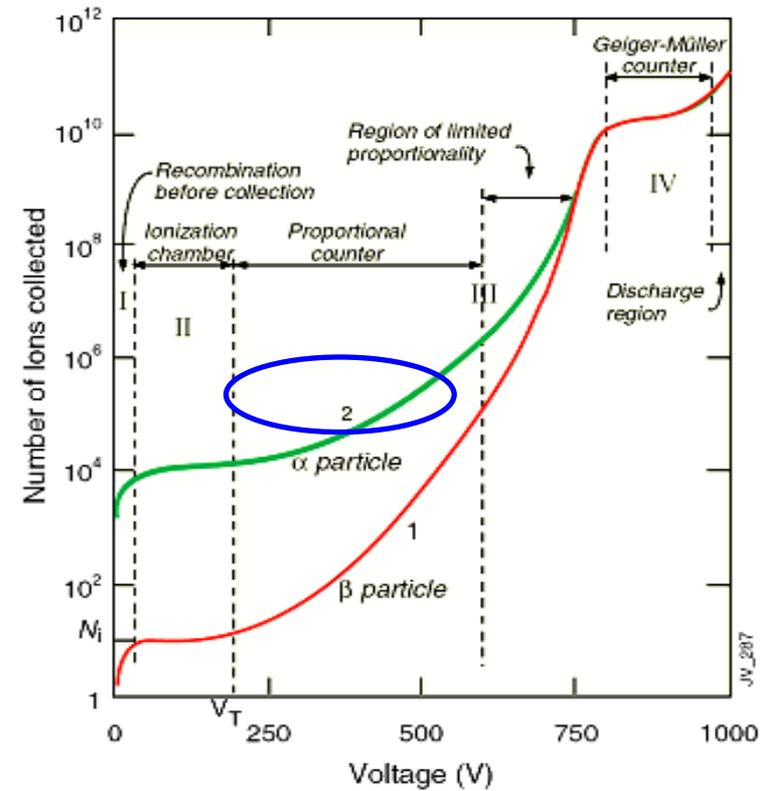
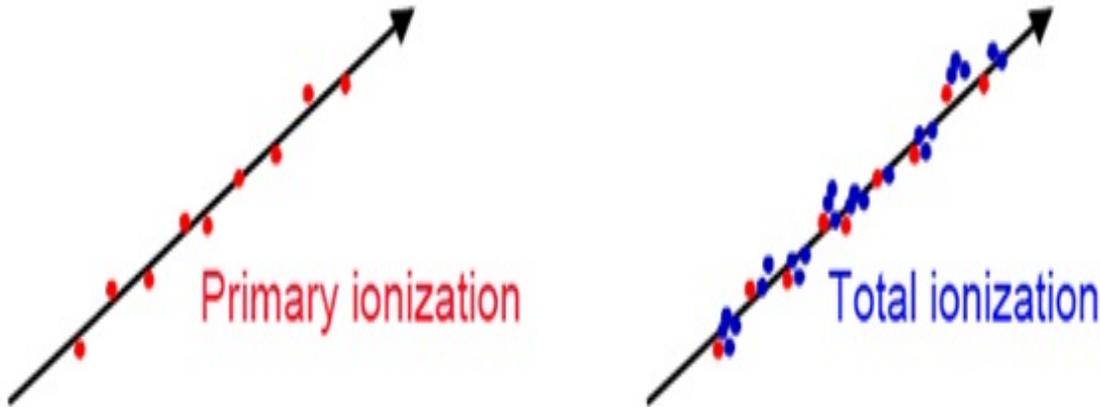


# BESIII主漂移室



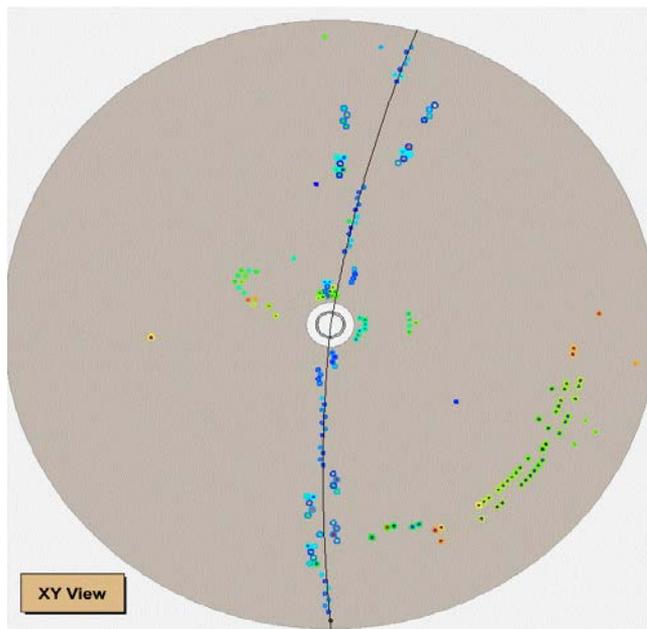
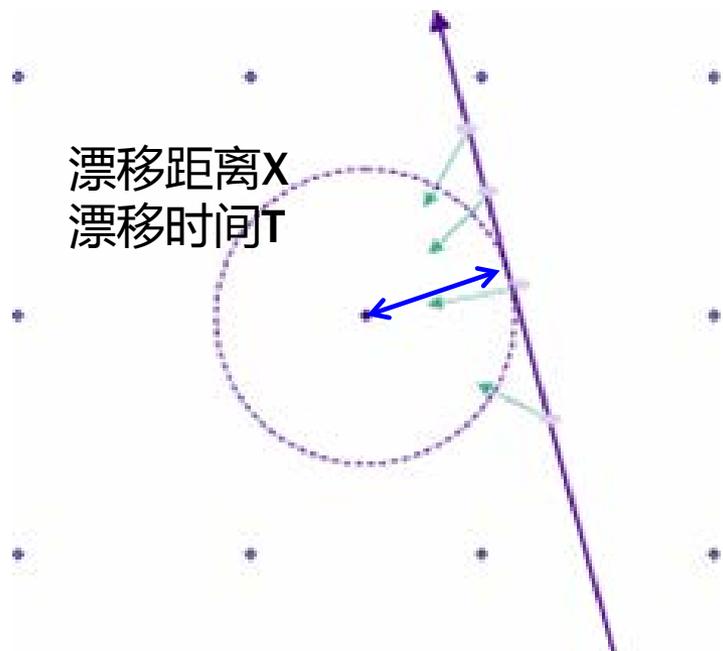
粒子动量  $P \approx 0.3 \cdot Z \cdot b \cdot \rho$  粒子偏转的曲率半径

# 漂移室工作原理

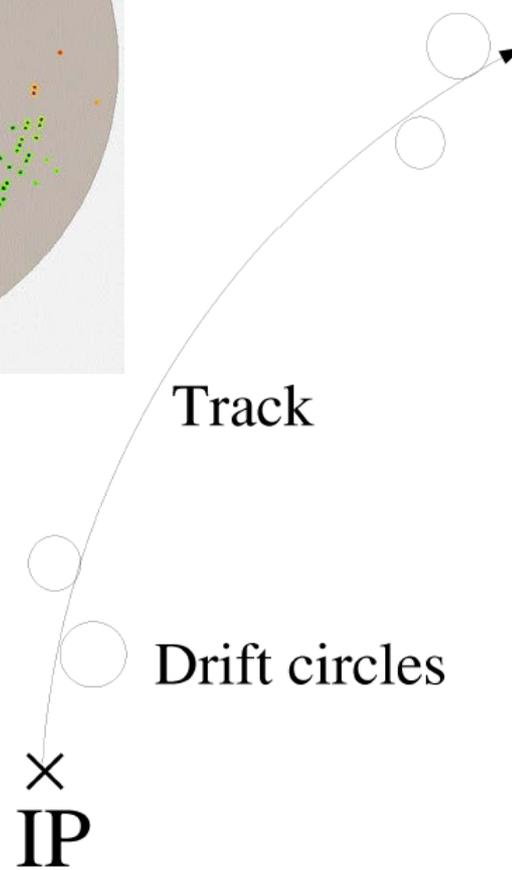


- 入射粒子径迹 (与气体介质作用)
- 原初电离 (电子-离子对)
- 雪崩倍增 (次级电子-离子对)
- 电子漂移 **测量漂移时间**

# 入射带电粒子径迹



漂移时间  $\rightarrow$  漂移距离  
原初电离的随机过程

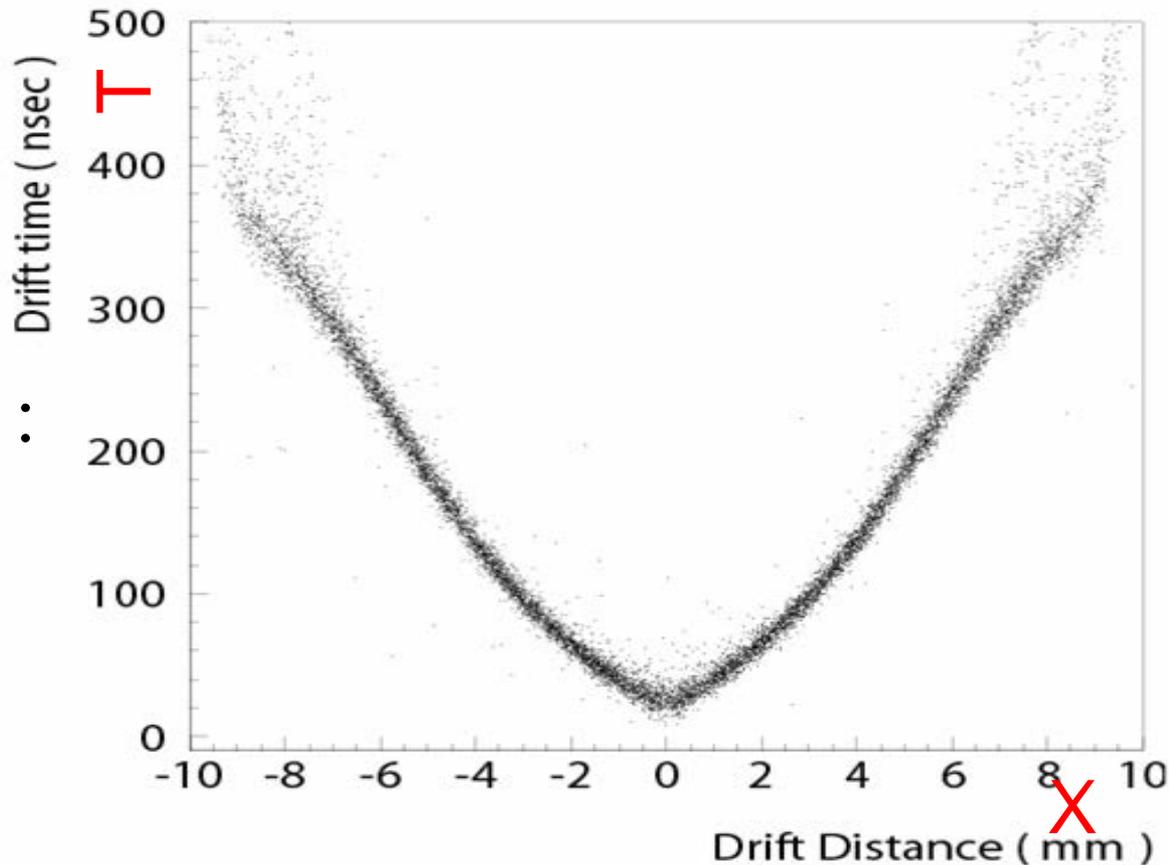


# 主漂移室刻度

## 漂移距离与漂移时间 ( X-T )

漂移室刻度/修正/校准 :

T 和 X



采用分段函数 :

5阶多项式 ( 线性区 ) &  
1阶多项式 ( 单元边缘 )

**Drift distance X:  
determined from track fitting**

# 主漂移室刻度 残差

- 利用原始击中信息，通过模式识别及径迹拟合重建出粒子的径迹，进而计算出粒子的动量。径迹拟合用最小二乘法：

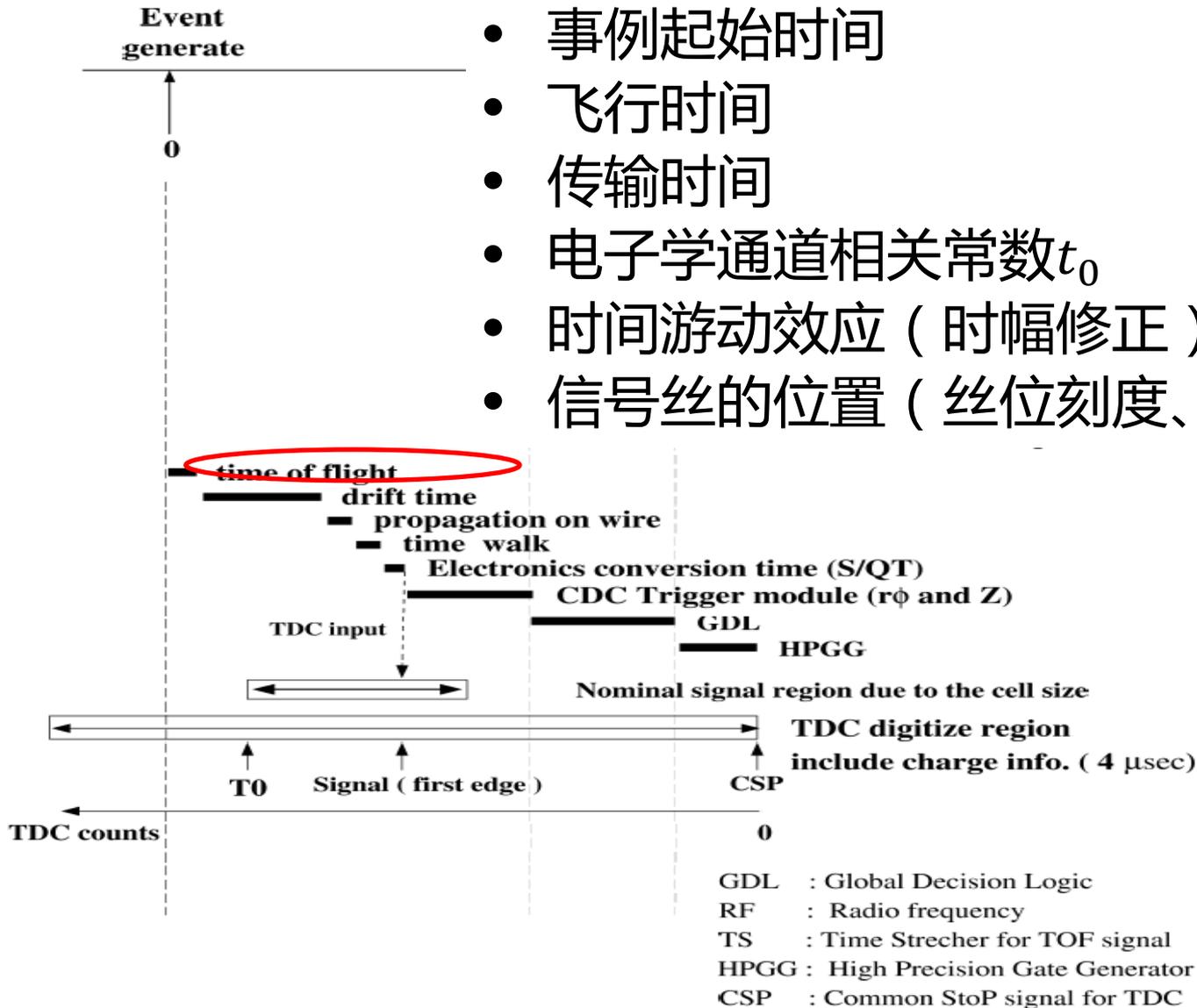
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(d_{meas} - d_{track})^2}{\sigma^2}$$

- $d_{meas}$  : 漂移时间计算的漂移距离
- $d_{track}$  : 重建（拟合）径迹到击中单元信号丝的距离

# 主漂移室刻度

## 漂移时间 $T$ 的依赖关系

- 事例起始时间
- 飞行时间
- 传输时间
- 电子学通道相关常数  $t_0$
- 时间游动效应 ( 时幅修正 )
- 信号丝的位置 ( 丝位刻度、丝下垂 )

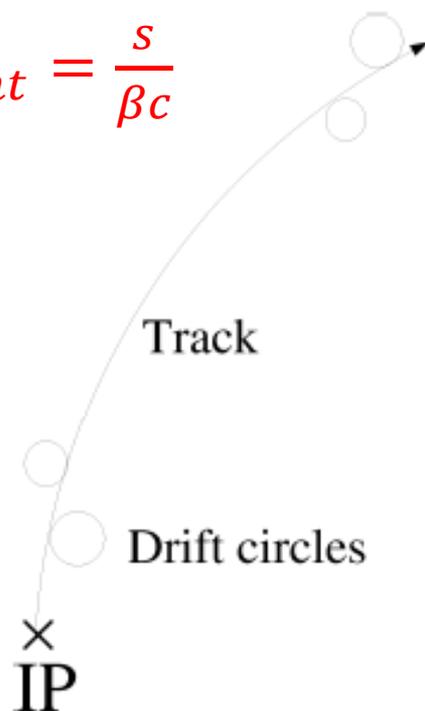


# 主漂移室刻度 飞行时间的贡献

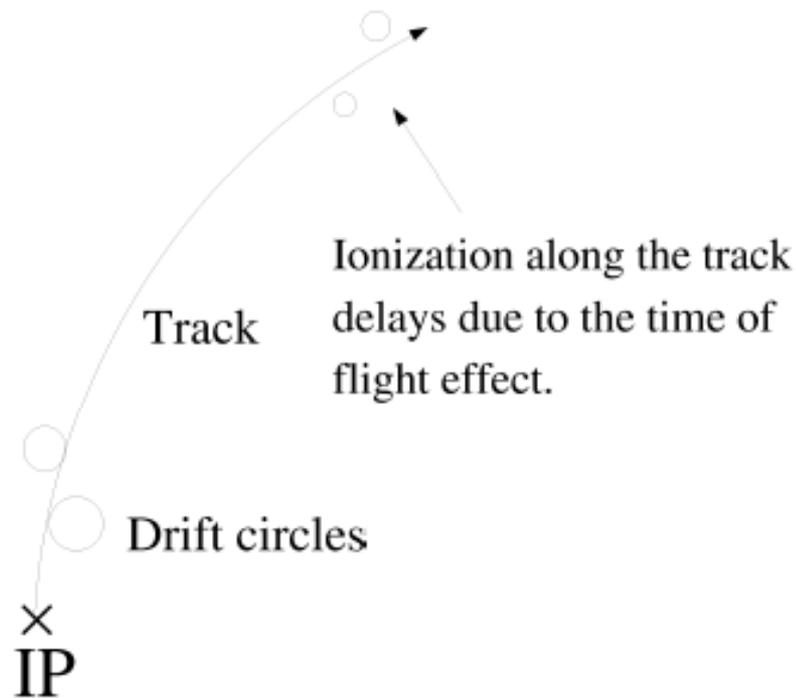
修正项： $\Delta t_{flight} = \frac{s}{\beta c}$

$s$ : 飞行长度

速度： $v = \beta c$

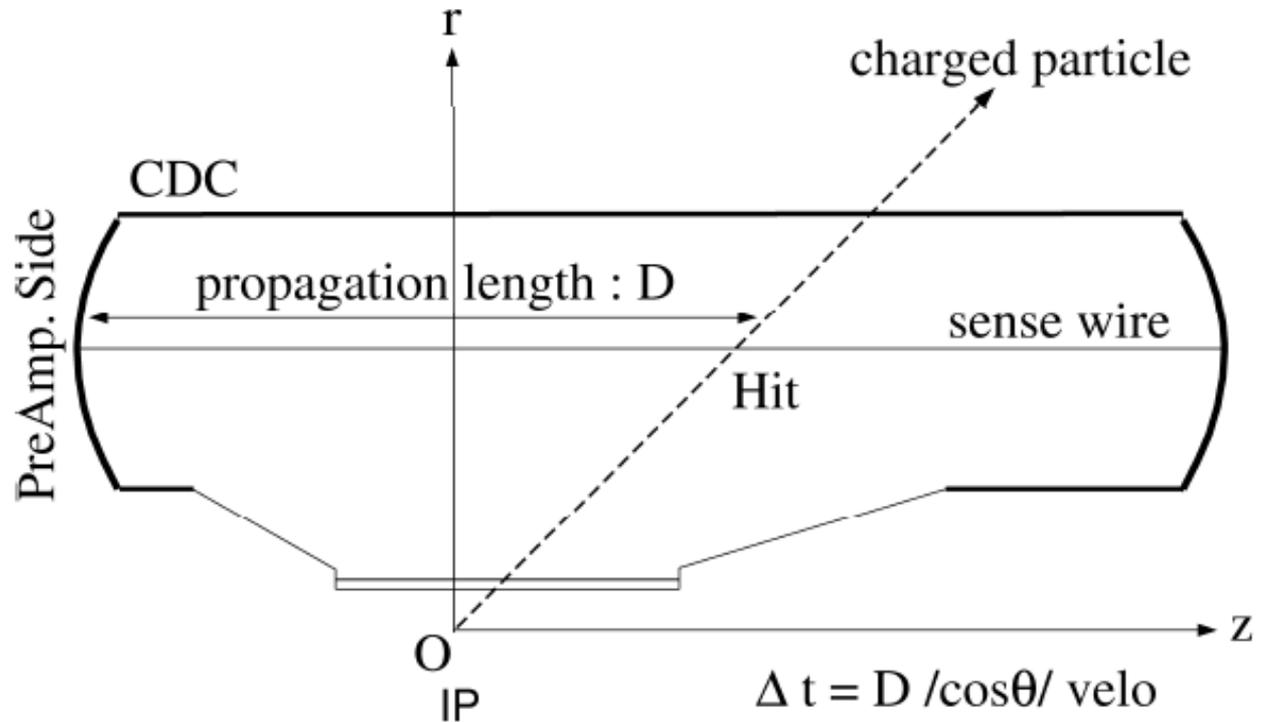


a) with correction



b) without correction

# 主漂移室刻度 传输时间延迟



- 修正项 :  $\Delta t = \frac{D}{\cos\theta \cdot v_{prop}}$
- $D$ : 传输长度
- $\theta$ : 丝的倾斜角
- $v_{prop}$ : 传输速度,  $\sim 3.6\text{ns/m}$

$$\Delta t = D / \cos\theta / \text{velo}$$

$\theta$ : stereo angle

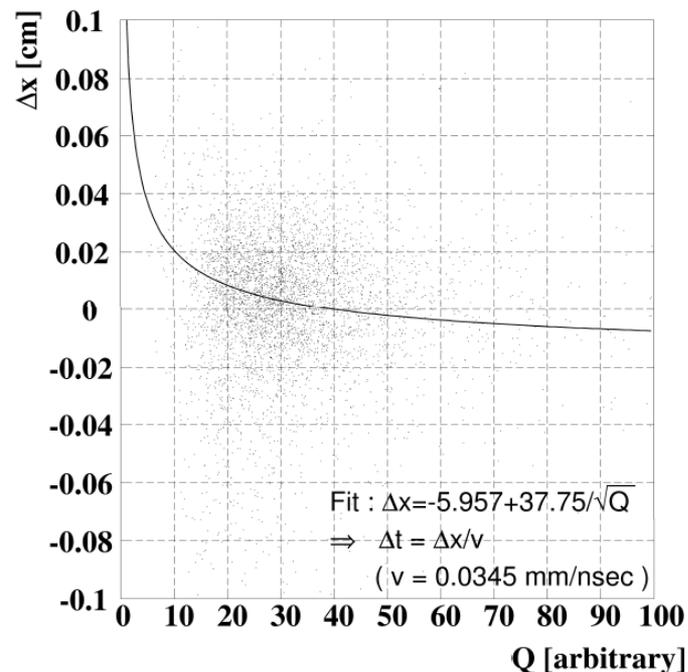
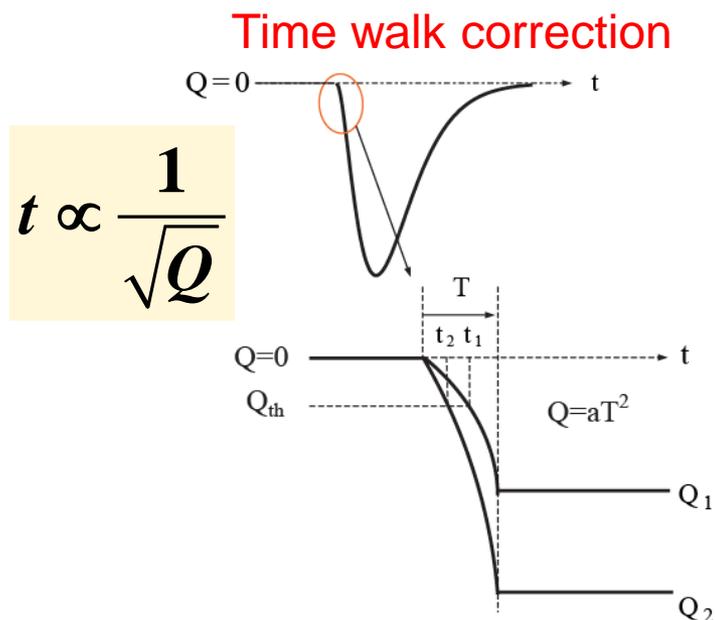
velo = 3.6 nsec/m

( = 2.78 m/nsec )

Hit timing = Hit timing -  $\Delta t$ .

# 主漂移室刻度

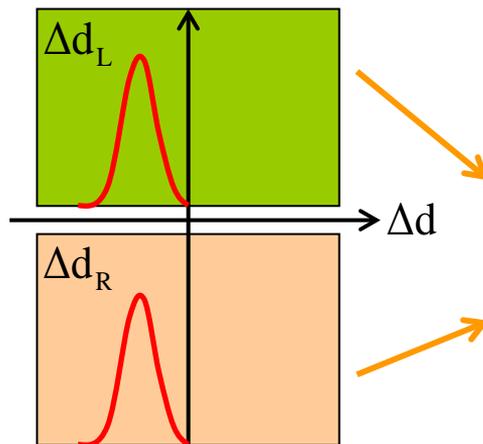
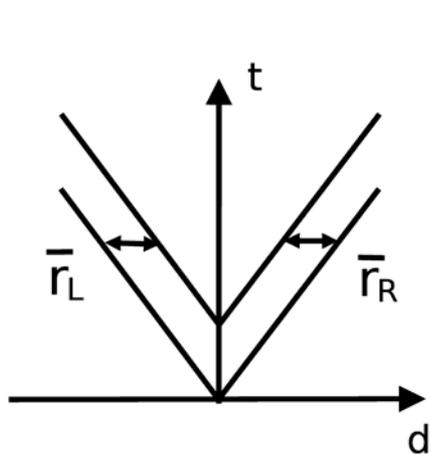
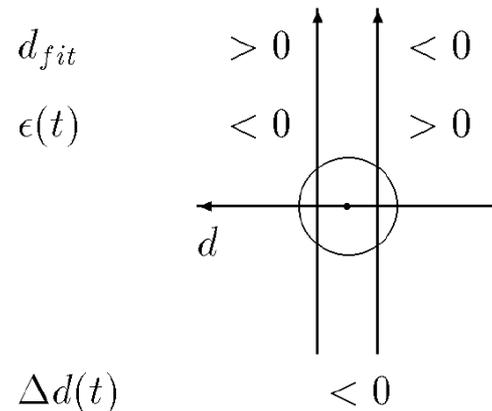
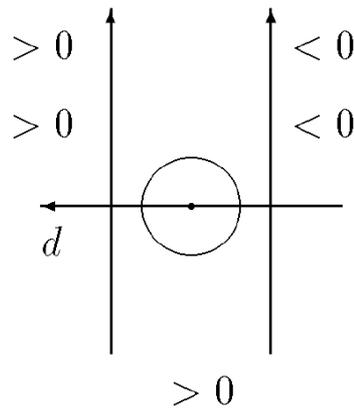
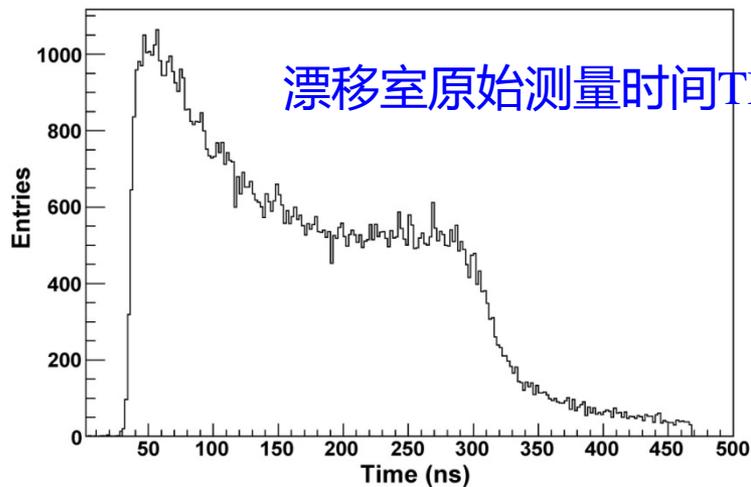
## 时间游动效应：Q-T



- 时幅修正： $\Delta t = a + \frac{b}{\sqrt{Q}}$
- 每层丝刻度（43层丝，43×2个参数）
- Q分成60个bin，利用残差×漂移速度得到 $\Delta t$

# 主漂移室刻度

## 单丝 $t_0$ 的精确刻度

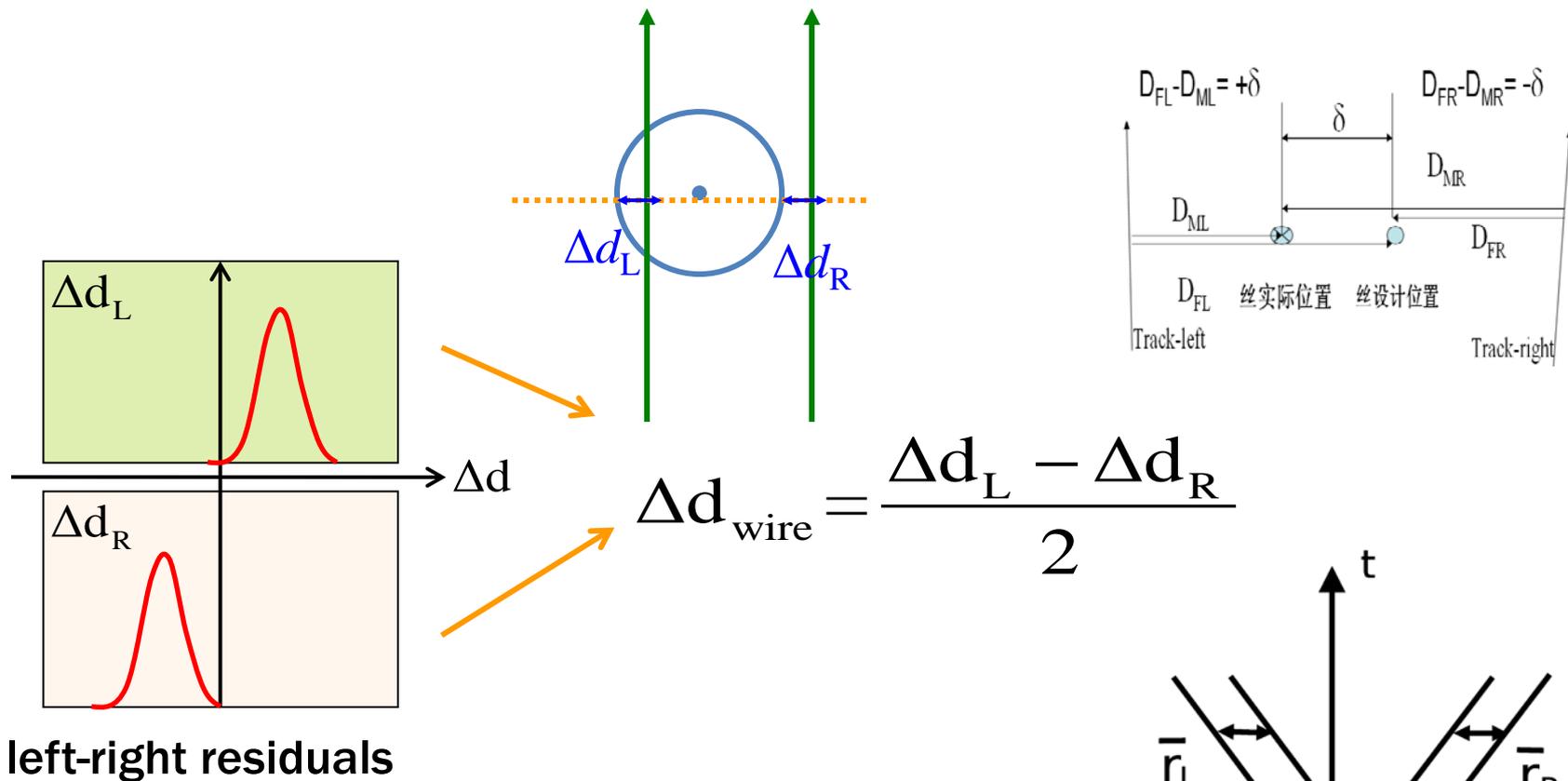


$$t_0^{new} = t_0^{old} + \frac{\Delta d_R + \Delta d_L}{2v}$$

$v$  : 漂移速度  
多次迭代刻度

漂移单元左右的残差

# 主漂移室刻度 丝的几何位置校准



left-right residuals

- 丝的几何位置 → 数据库
- 每根丝刻度得到丝位

# 主漂移室刻度

## 丝的几何位置校准和丝下垂效应

张力，重力和静电力

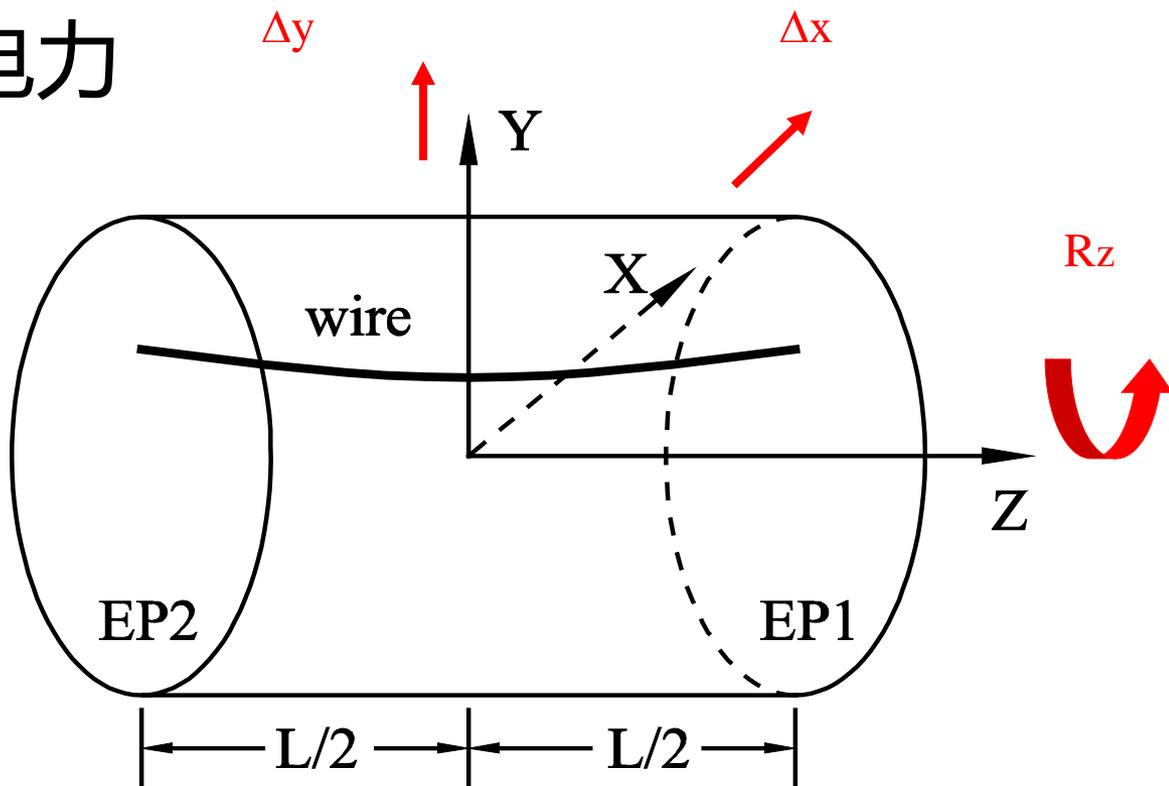
Y-Z 平面

$$T \frac{d^2 y}{dz^2} + \rho g = 0$$

→ 三维空间:

五个参量:

$x_1$   $y_1$   $x_2$   $y_2$  和  $T$



$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_{cor} - x_{fit})^2 + (y_{cor} - y_{fit})^2}{\sigma^2}$$

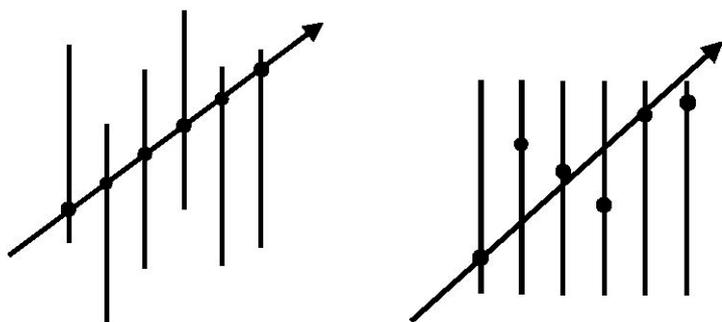
Cor 残差求得的丝位置 ( 上页 )  
Fit 是含有五个参量的结果

# 主漂移室刻度

## 探测器几何位置校准

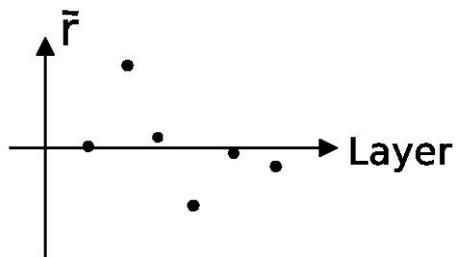
- 探测单元实际位置与理想位置之间的偏差
  - 机械安装精度
  - 在探测器运行以前测量初始位置
  - 利用控制样本做校准
  - 漂移室的校准
    - 利用对撞数据 / 宇宙线 数据得到精确的丝位
    - 加磁场和不加磁场的情况，测量结果会不一致
- 漂移距离受 Lorentz 力的影响

# 主漂移室刻度 漂移室几何位置校准

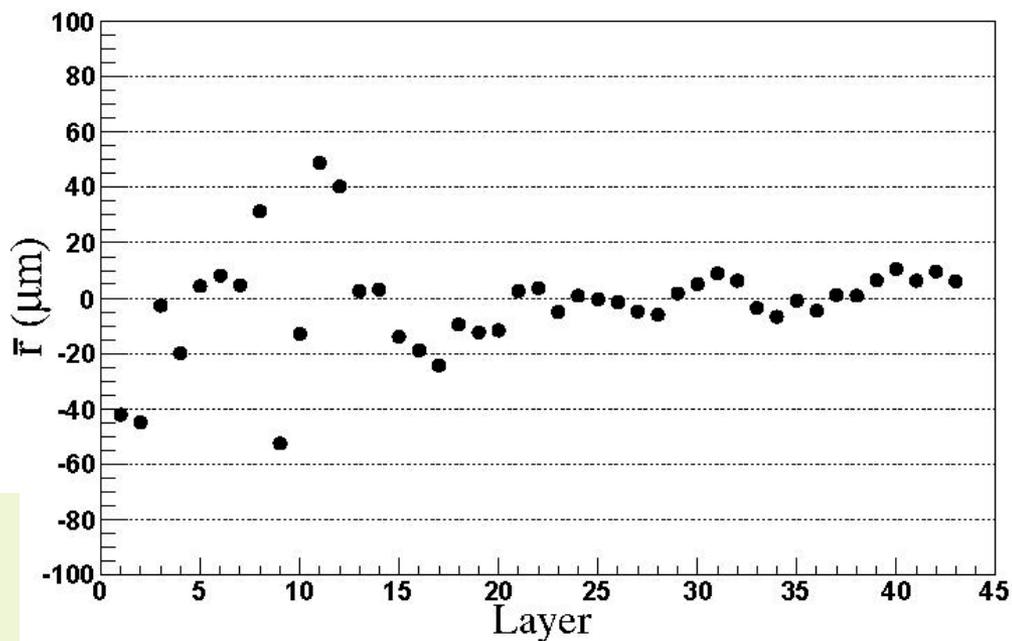
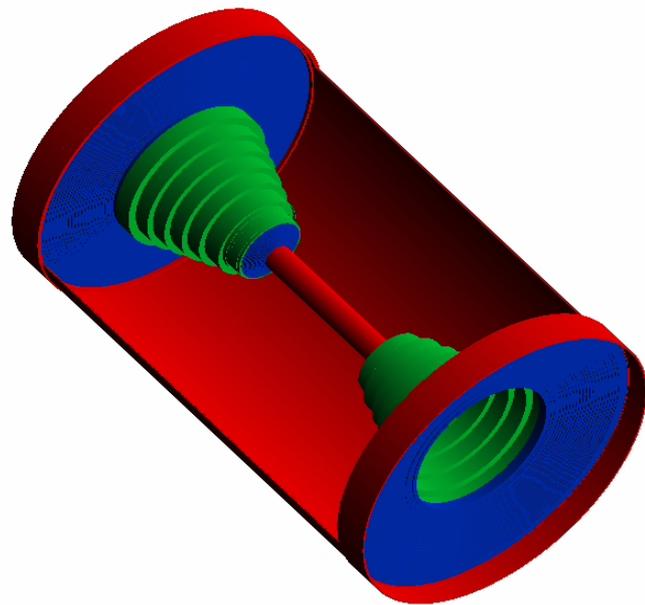


(a) 粒子穿过探测器的实际情况

(b) 非准直情况下进行径迹拟合的结果



(c) 非准直情况下得到的各层残差分布中心值 ( $\bar{r}$  为残差分布中心值)



选择大端板做为参考，  
校准台阶和内室

# 主漂移室刻度

## 漂移室几何位置校准

内室 ( $\times 2$ )

台阶  $\times 6$  ( $\times 2$ )

大端板 ( $\times 2$ )

独立参数的个数

$$2+6 \times 2+2=16$$

6个参数描述三维空间中的变换

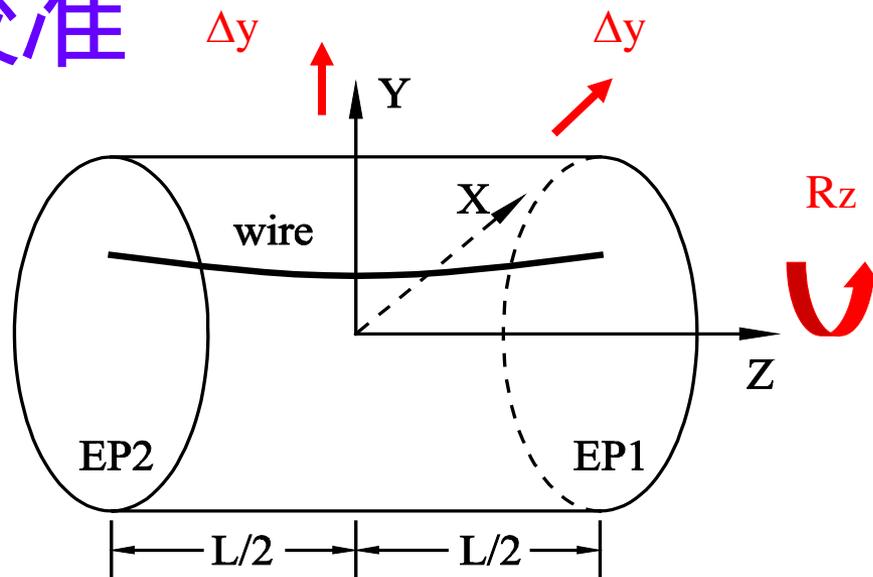
3 平移 :  $D_x, D_y, D_z$

3 旋转 :  $R_x, R_y, R_z$

一共96个校准参数

简化版本:  $D_x, D_y, R_z$

共 48 个校准参数



1. Millepede矩阵方法

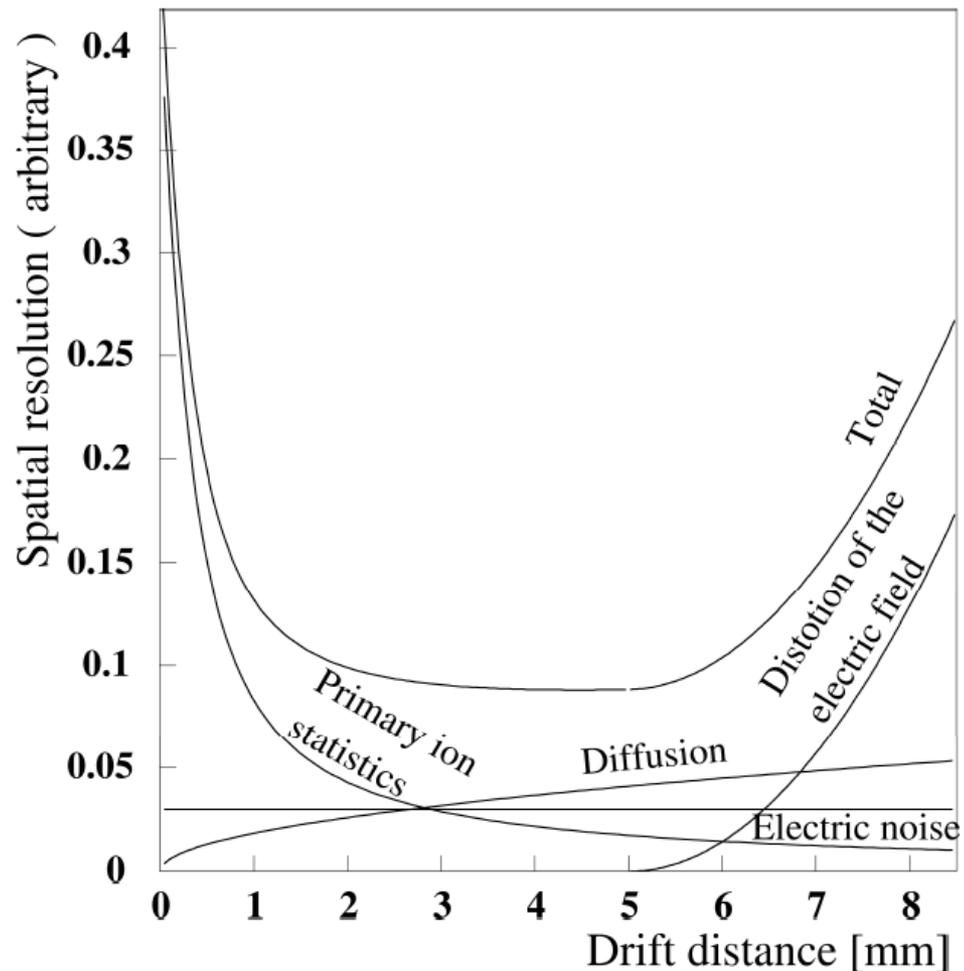
2. Kalman滤波方法

3. 残差分布法

$$r = R_z R_{layer} - D_x \sin \phi + D_y \cos \phi$$

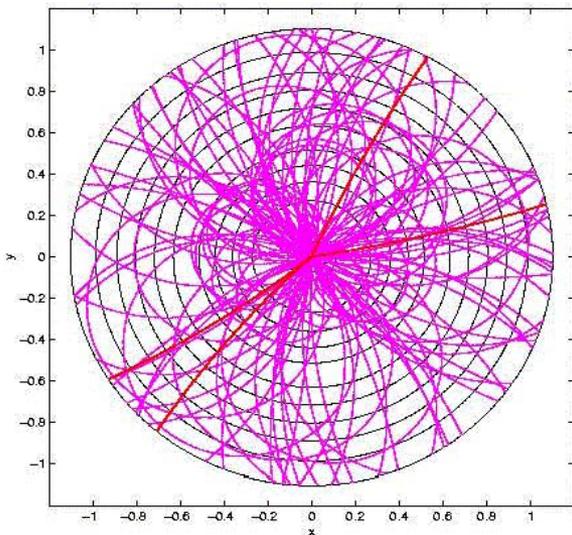
# 主漂移室刻度 单丝的空间分辨

- 残差 $\leftrightarrow$ 分辨 依赖于：
  - 初级电离的涨落
  - 扩散（电子在漂移路径上）
  - 电场在漂移单元边界的畸变
  - 电子学噪声
- 空间分辨影响径迹拟合的误差矩阵（效率）。在Monte Carlo模拟和数据分析中**十分重要**

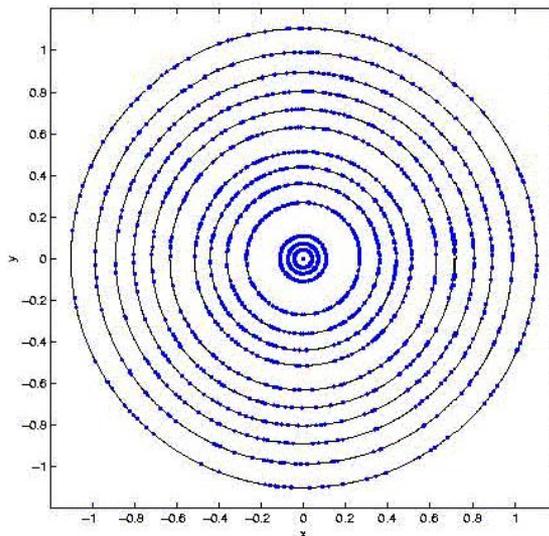


空间分辨随漂移距离的变化

# 主漂移室重建

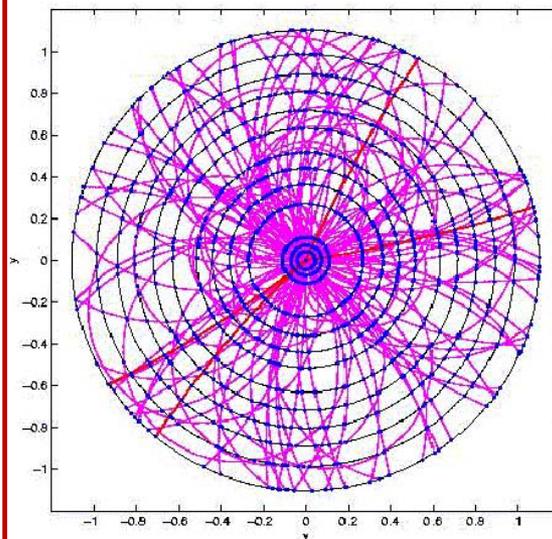


A generated event



Detector records

- 带电粒子径迹重建
  - 寻迹 (模式识别)
    - 确定每条径迹用到的击中
  - 径迹拟合 (参数估计)
    - 径迹参数+误差矩阵
  - 径迹的统计检验
    - 研究 $\chi^2$ , 残差, 去除“坏”点



Tracks reconstruction

# 主漂移室重建 寻迹方法

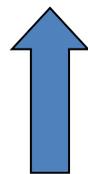
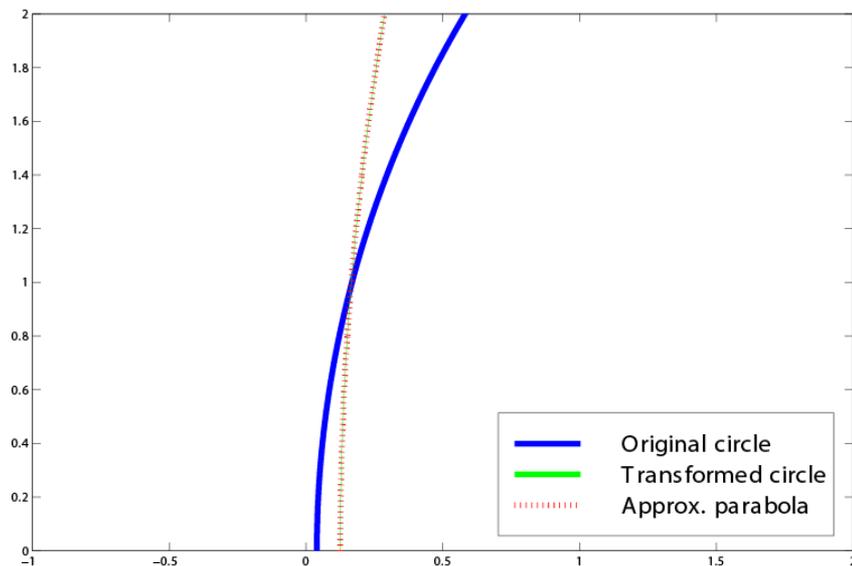
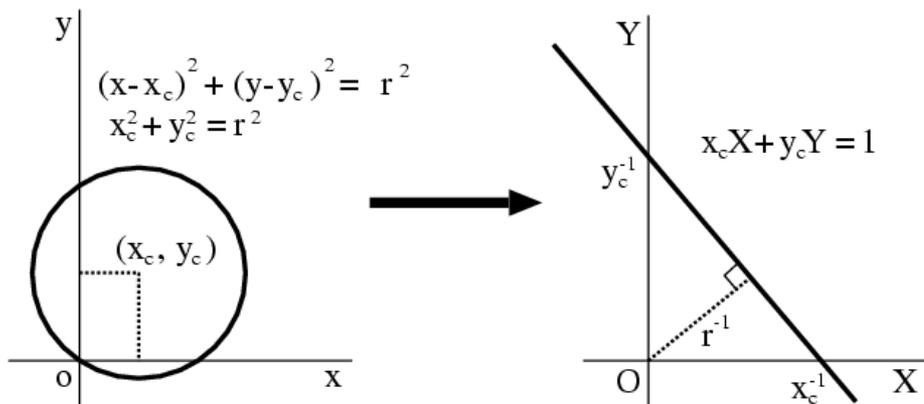
- 局域方法：从少数几个测量点开始，确定径迹的初始参数，由此可以预期下一个击中点的位置，并与测量值进行比较
  - 径迹跟踪 Track following
  - 径迹路径 Track roads
  - 径迹元 Track elements
  - Kalman滤波方法
- 全局方法：所有的测量点用相同的算法处理，生成一个径迹击中点列表集合，或者生成一个“中间表”使得下一步的寻迹更容易实现
  - 模板匹配 / 字典查找法  
Template matching
  - 直方图方法（霍夫变换）  
Histogram method ( Hough transformation )
  - 神经网络方法 Neutral Net

在对撞实验中,径迹在x-y平面内是一段圆弧  
通常采用局域和全局相结合的寻迹方法

# 主漂移室重建——寻迹方法

## 共形变换

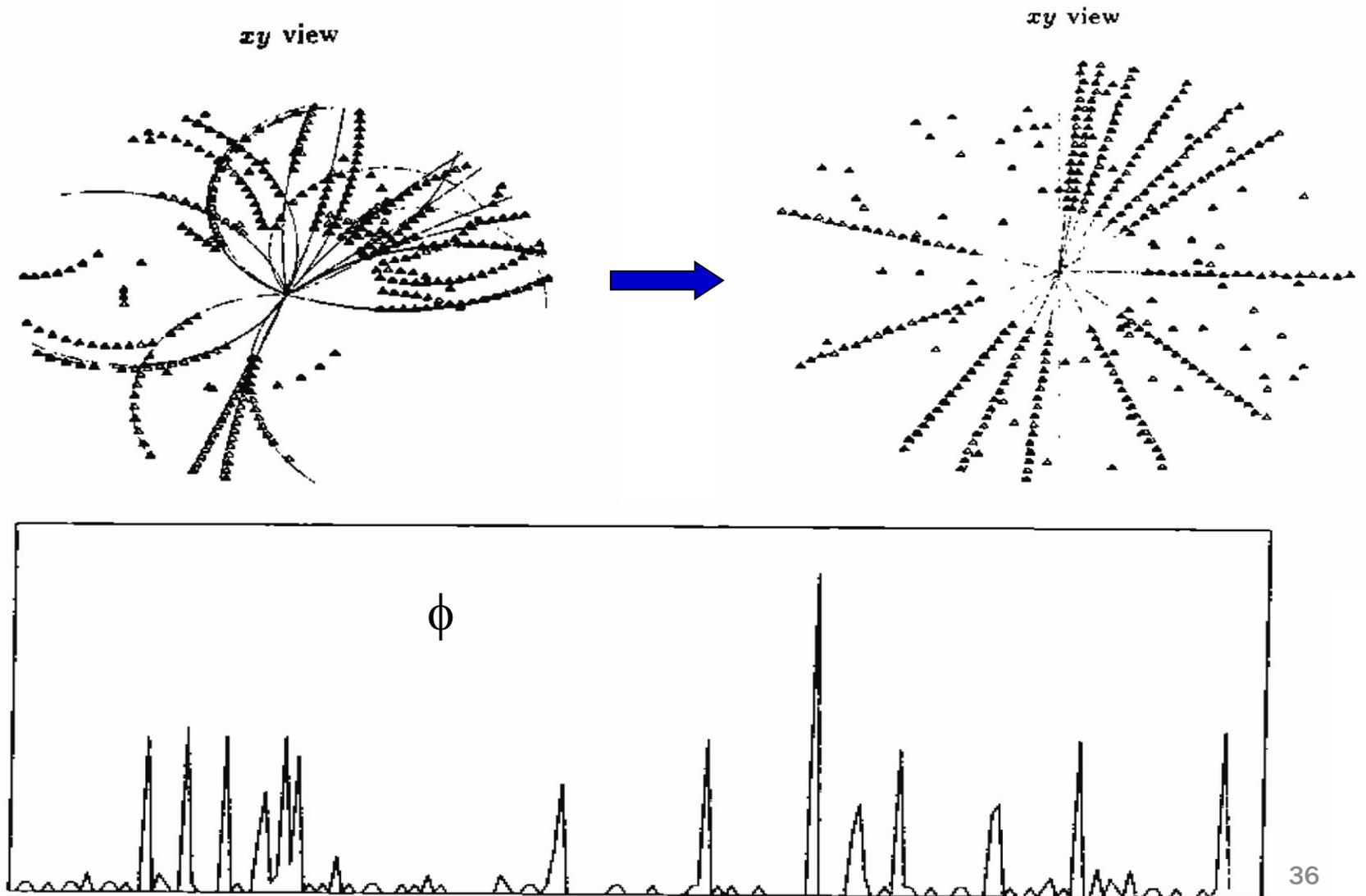
- 过原点的圆弧变换为直线，直线的截距与圆的半径成反比
- 不过原点的圆弧（截距通常都很小）则变为曲率较小的圆，这个圆可以用抛物线来近似
- 圆周拟合就变成了一个快速、线性的抛物线拟合



$$u = \frac{x}{x^2 + y^2} \quad v = -\frac{y}{x^2 + y^2}$$

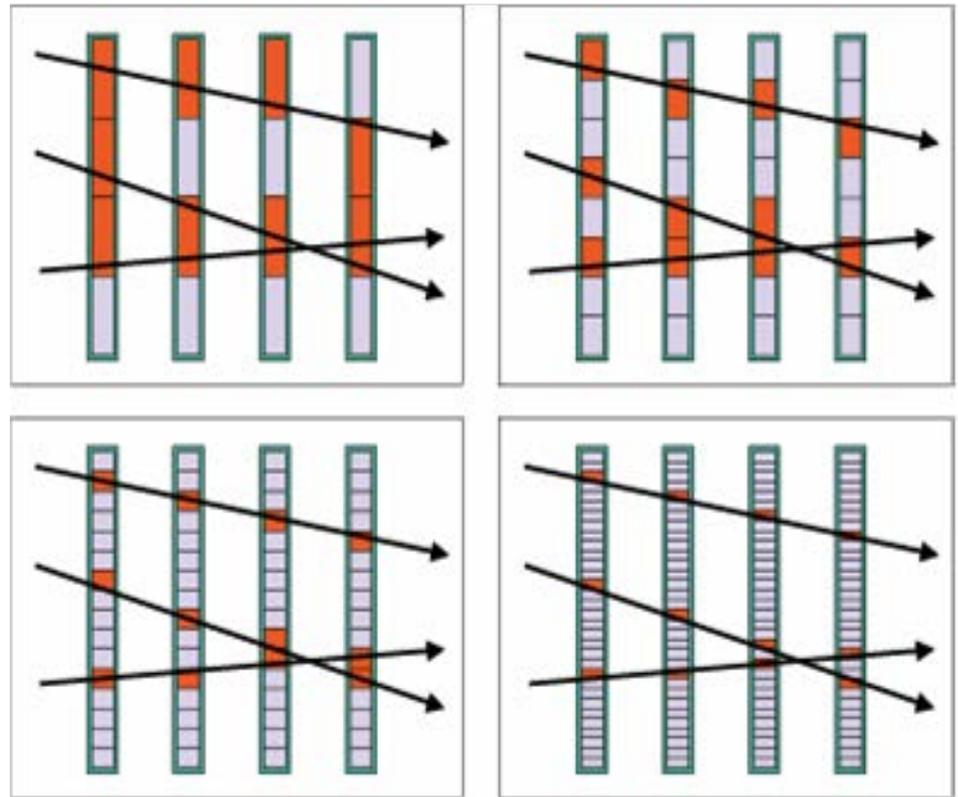
# 主漂移室重建—寻迹方法

## 直方图方法 ( TrkReco )



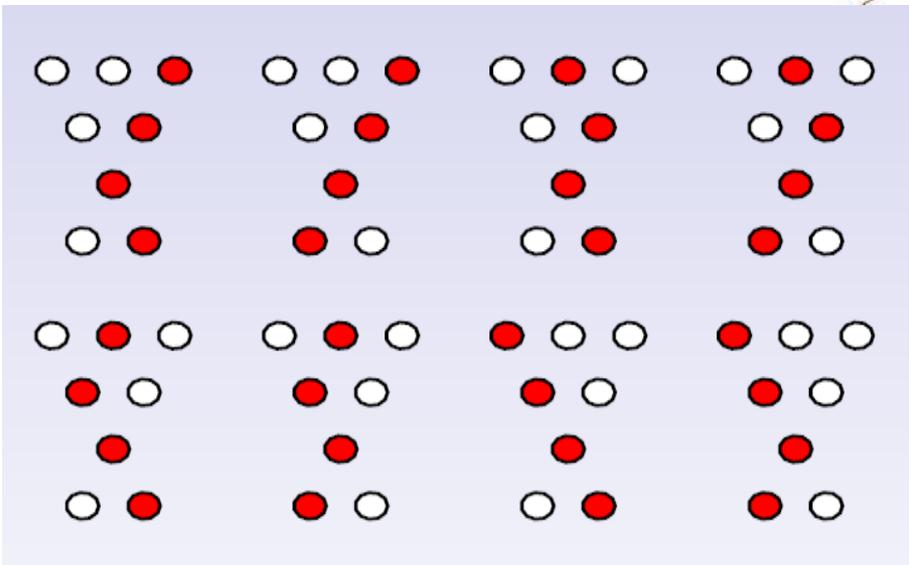
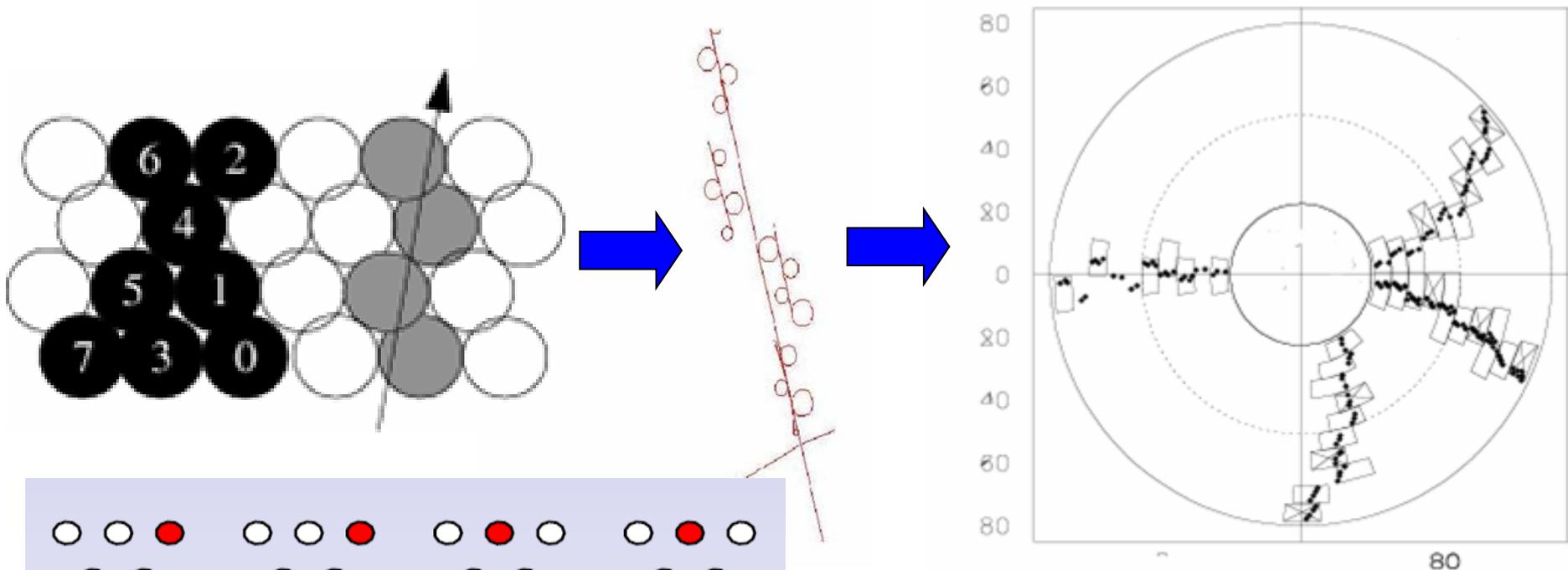
# 字典查找法 Template Matching

- 根据探测器单元的布局和几何，产生不同横动量的例子所有可能的击中组合列表（字典）
- 从硬件（触发电子学）的寻迹逻辑发展而来，寻迹速度较快，特别适合单元设计对称的漂移室
- 字典在设计时要考虑到探测器存在死道情况下的寻迹效率
- 为提高速度，又开发了“子字典”，继承序列的方法（树图寻找）



# 主漂移室重建——寻迹方法

## 径迹元方法/模板匹配 ( MdcPatRec )



在超层内，根据预先定义好的字典寻找小径迹段。如图示，4单元超层，共有8种可能的模式

从内超层开始，逐层向外寻找与之匹配的超层集合，形成径迹候选者

# 主漂移室重建——寻迹方法

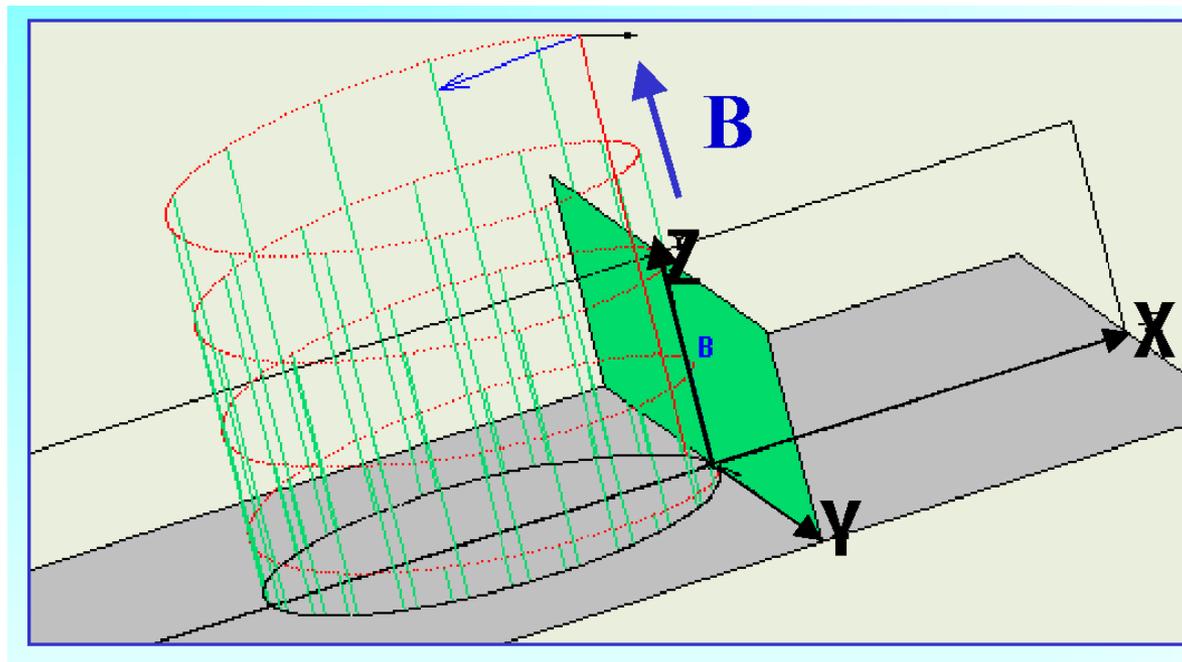
- 局域寻迹方法在探测器本底噪声高的情况下，常常出现“误寻找”，会耗费大量的机时。另外，在“匹配”窗口的选择时，需要对探测器的分辨情况了解的很好，实际情况下并不容易实现。
- 全局寻迹方法在探测器规模变大，对称性不好，磁场不均匀度增大的情况下，会导致算法对低动量径迹和二次衰变产生的径迹，寻迹效率下降
- 实验通常是二者相结合的算法
- 随着电子学技术的发展，有些复杂的寻迹算法已经被广泛应用到触发判选和在线事例筛选上去，有效地压低了本底事例率
- **BESIII**：在线事例筛选中使用直方图算法（ $\phi, 1/p_T$ ），查表的算法。离线重建时使用了局域寻迹和全局寻迹相结合的算法。在径迹段寻找中，采用了查表和直方图两种寻迹方法。Monte Carlo研究证实，两个软件包的工作状态都不错。

# 主漂移室重建——径迹拟合

- 通过寻迹把所有击中位置划分为不相关的子集，再通过径迹拟合得到径迹
- 对于对撞实验的径迹测量，分为对2维和3维数据的拟合，具体地
  - 2D Circle fitting ( 2维圆周曲线拟合，一般属于近似与快速的拟合方法 )
  - 3D Helix fitting ( 3维螺旋线拟合 )
- 主要拟合方法有如下两种：
  - Global least-square method ( 最小二乘法拟合 )
  - Kalman 滤波方法

# 主漂移室重建

## 带电粒子在磁场**B**中的运动

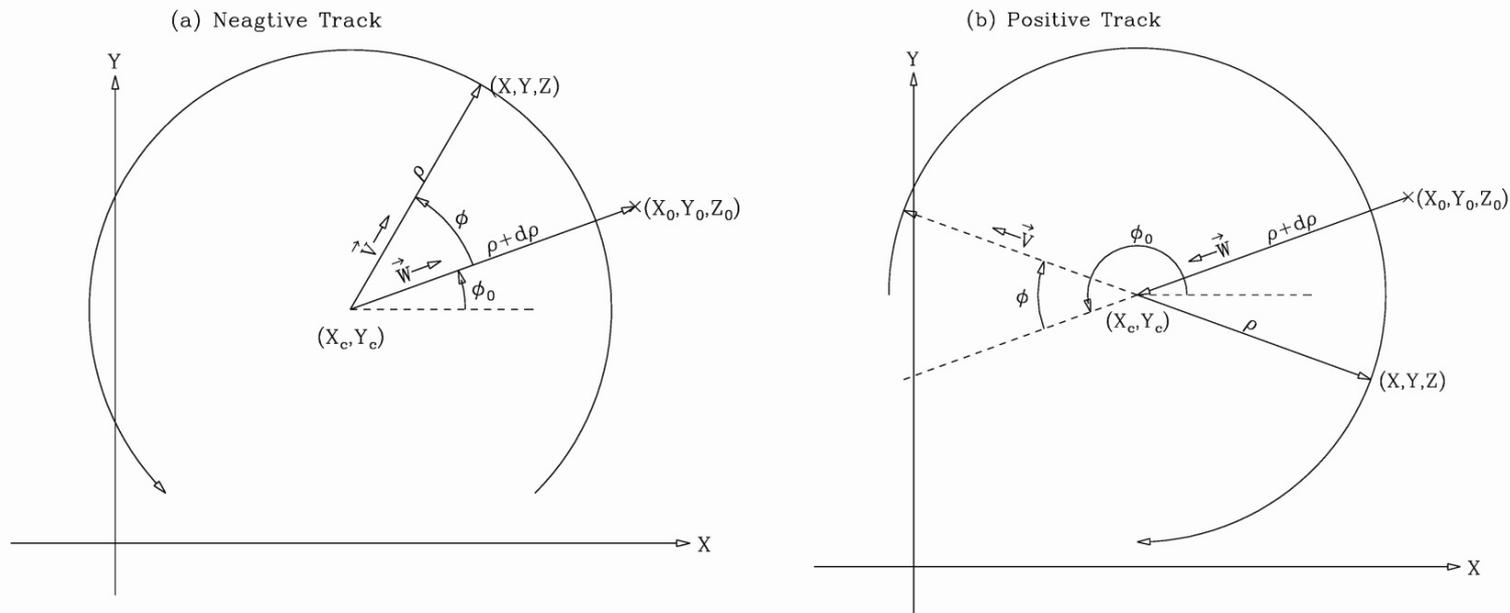


$$B \parallel z$$

- 带电粒子在均匀磁场中的运动 ( $B_x = B_y = 0, B_z = C$ )
  - 3 + 2 = 5个独立的参数
    - 在 $r - \phi$  ( $X - Y$ ) 平面内的圆 (3个自由度)
    - 在 $r - z$  ( $Y - Z$ ) 平面内的直线 (2个自由度)
  - 一个径迹开始的参考点 (3个自由度)

# 主漂移室重建

## 径迹参数 ( 螺旋线helix )



- 描述一条径迹：螺旋线helix用5个参数描述,参考点用3个参数
- 表示在 $x - y$ 平面 ( $d_\rho$ ) 和 $z$ 向距离 ( $d_z$ ) 离参考点 (一般取对撞中心) 最近的位置 (2个参数)
- 1个与 $x - y$ 平面偏转半径相关的参数 ( $\kappa$ ) , 1个用来表示在 $x - y$ 平面的方位角 ( $\phi_0$ ) , 1个表示 $z$ 向投影 (直线) 的斜率 ( $\lambda$ )
- 各个实验选取螺旋线参数的具体形式不完全相同

# 主漂移室重建

## 螺旋线Helix参数→物理量

5个Helix参数： $d_\rho$  ,  $d_z$  ,  $\kappa$  ,  $\phi_0$  ,  $\lambda$

$$x = x_0 + d_\rho \cos\phi_0 + \frac{\alpha}{\kappa} (\cos\phi_0 - \cos(\phi_0 + \phi))$$

$$y = y_0 + d_\rho \sin\phi_0 + \frac{\alpha}{\kappa} (\sin\phi_0 - \sin(\phi_0 + \phi))$$

$$z = z_0 + d_z - \frac{\alpha}{\kappa} \lambda \cdot \phi$$

$$p_x = -\frac{1}{\kappa} \sin(\phi_0 + \phi)$$

$$p_y = \frac{1}{\kappa} \cos(\phi_0 + \phi)$$

$$p_z = -\frac{1}{|\kappa|} \lambda$$

其中

$$\kappa = \frac{Q}{P_T} , \rho = \frac{\alpha}{\kappa} , \alpha = \frac{1}{cB}$$

粒子在做螺旋线运动时，其径迹参数的变化用偏转角 $\phi$ 来变换。也有使用粒子在xy平面走过的弧长来描述的。

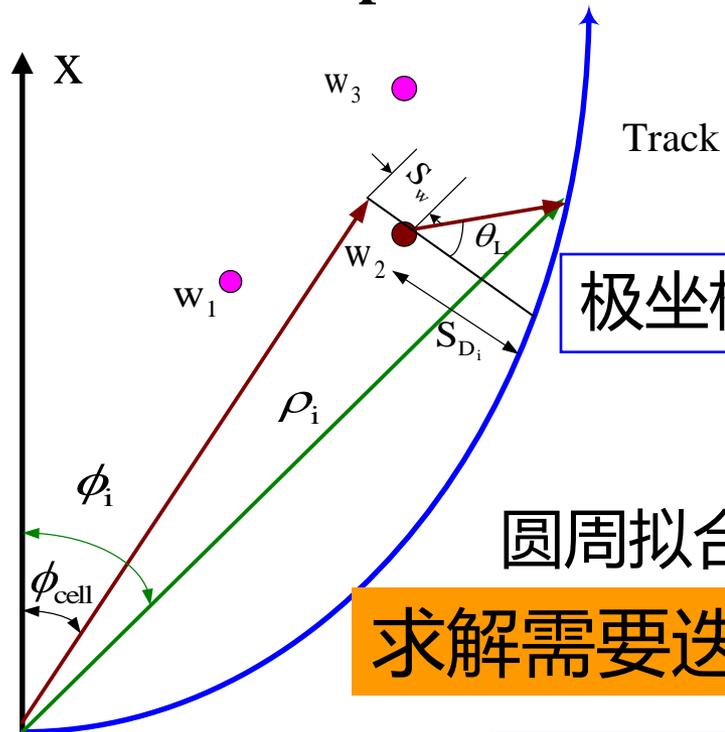
$$s_\perp = \rho \cdot \phi$$

物理量↔螺旋线Helix参数

# 主漂移室重建——径迹拟合

## 圆周曲线拟合：最小二乘法

3 parameters for each circle:  $x_c, y_c, R$



$$\rho_i = \rho_{w_i} + S_{D_i} \cdot \tan \theta_L$$

$$\phi_i = \phi_{cell} + (S_{D_i} + S_W) / \rho_i$$

极坐标

极坐标到X-Y坐标转化:  $(\rho_i, \phi_i) \rightarrow (x_i, y_i)$

圆周拟合的  
求解需要迭代

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum (d_i - R)^2$$

$$d_i = \sqrt{[(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2]}$$

当  $d_i \sim R$ , 近似有对

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \frac{\sum [(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 - R^2]^2}{(2R)^2}$$

求极小

# 主漂移室重建——径迹拟合

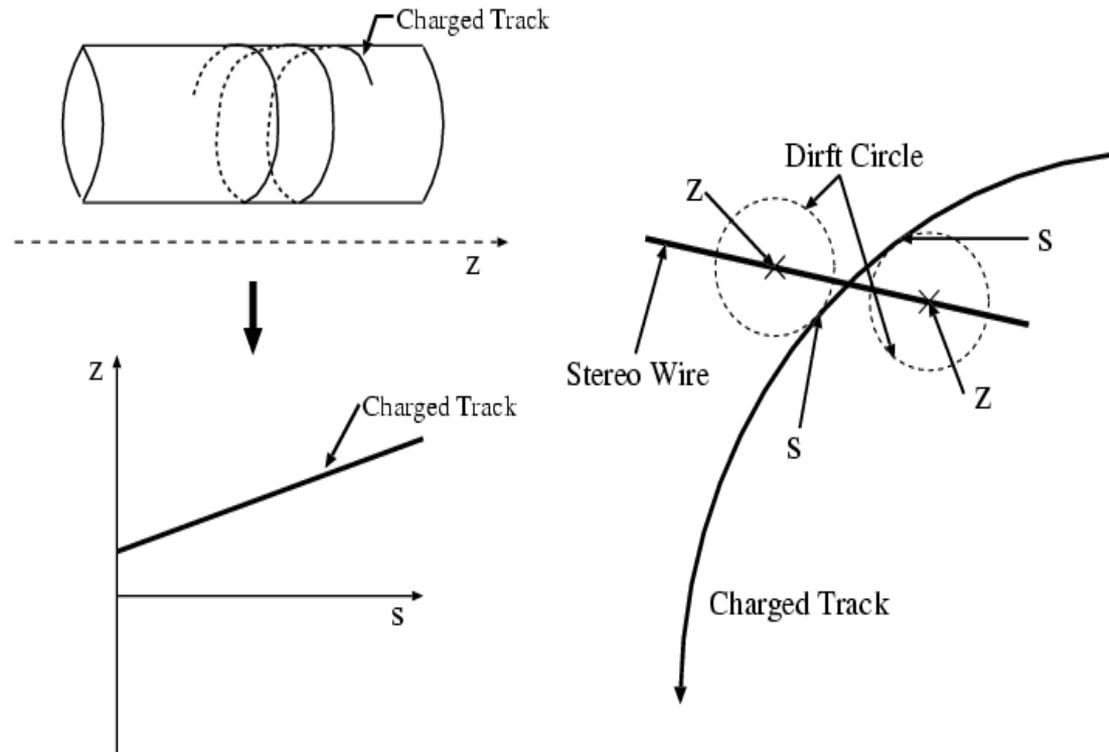
## 寻迹与z向拟合

- 根据轴丝(axial)层得到的投影圆周参数和斜丝(stereo)层的击中信息

- 利用 $z=0$ 处，圆周径迹与斜丝的交点位置确定候选的斜丝单元
- 利用斜丝的漂移圆与径迹圆的相切确定 $(s, z)$ 坐标
- z向直线拟合

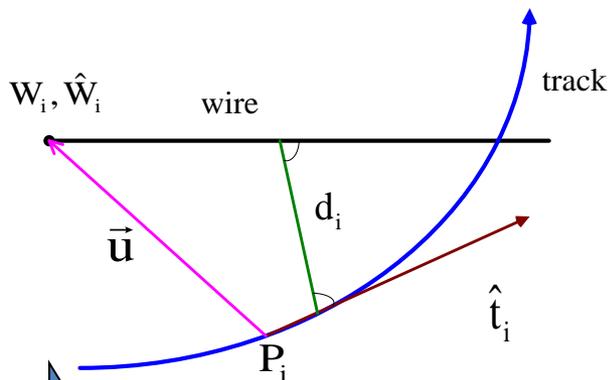
$$z = z_0 + s \cdot \lambda$$

得到参数 $z_0$ 和 $\lambda$



径迹在 $sz$ 平面是一条直线， $s$ 是径迹在 $xy$ 平面的弧长

# 螺旋线 Helix 拟合：最小二乘法

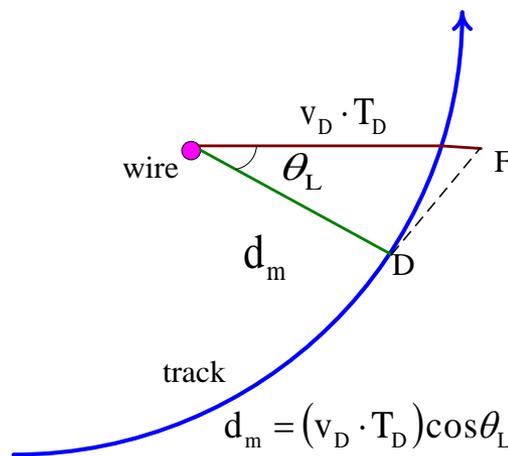


$$d_i = \vec{u}_i \cdot \hat{v}_i$$

$$\vec{u}_i = \vec{W}_i - \vec{P}_i, \quad \hat{v}_i = \frac{\hat{w} \times \hat{t}_i}{|\hat{w} \times \hat{t}_i|}$$

理论计算

漂移距离计算示意图



$$d_m = (v_D \cdot T_D) \cos \theta_L$$

实验测量

- 不考虑物质效应
- 从寻迹过程得到的径迹参数为初值
- 计算理论漂移距离及其对径迹参数的 Jacobian
- 多次迭代, 拟合过程中考虑丢点
- 考虑到磁场不均匀性, 采用分段螺旋线拟合

$$\alpha = \alpha_0 + V_\alpha A^T V_y^{-1} (d_m - d_\alpha)$$

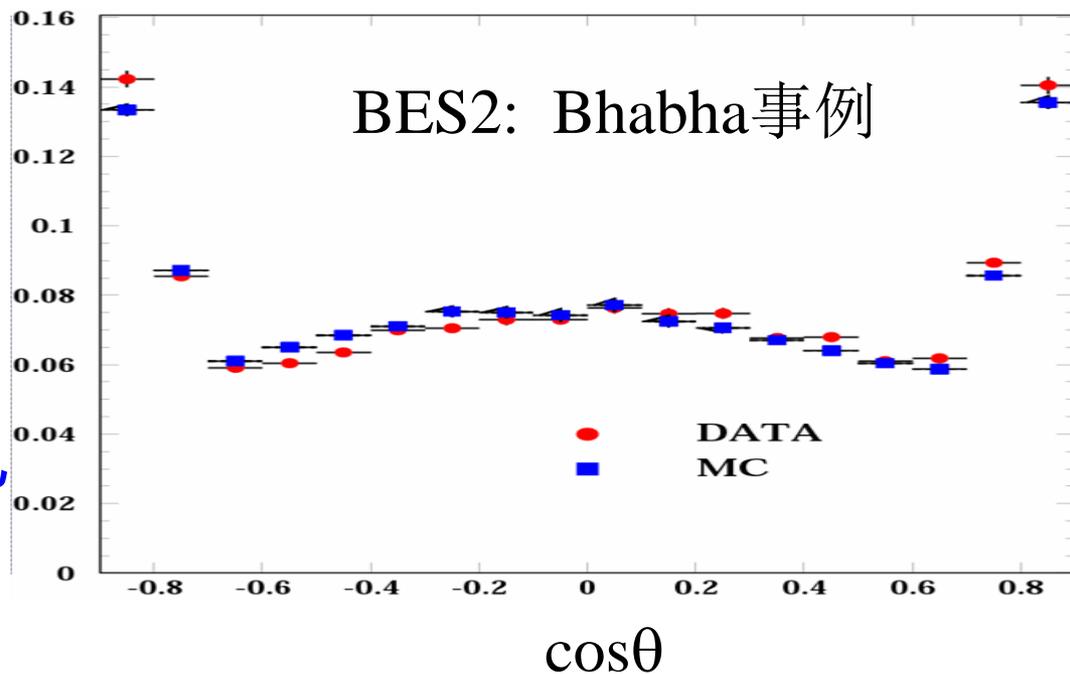
$$\chi^2 = (d_m - d_\alpha)^T V_y^{-1} (d_m - d_\alpha)$$

$$V_\alpha = \langle \delta\alpha \delta\alpha^T \rangle = (A^T V_y^{-1} A)^{-1}$$

$$A = \frac{\partial d}{\partial \alpha}, \quad V_y^{-1} = \text{diag} \left( \frac{1}{\sigma_d^2} \right)$$

# 主漂移室重建——径迹拟合 动量分辨

- 动量分辨
  - 与着火点的层数相关
  - 与单丝分辨相关
    - 与丝上收集到的电子数相关
  - 与多次散射  
( Multiple Scattering )
- BES3的动量分辨比BES2  
要提高四倍左右



$$p_{xy} = cBR \quad \kappa = \frac{1}{R}$$
$$(\Delta\kappa)^2 = (\Delta\kappa_{\text{res}})^2 + (\Delta\kappa_{\text{ms}})^2$$

# 主漂移室重建——径迹拟合

## Kalman Filter

- 理想的空间螺旋线拟合，没有考虑到：
  - 多次散射
  - 能量损失（束流管、漂移室内壁等）
  - 磁场的非均匀性
  - 丝下垂等
- 修正包括径迹参量及其误差矩阵
- Kalman filter由一系列递归数学公式描述
  - 高效的可计算的方法来估计过程的状态,可以估计信号的过去和当前的状态,甚至能估计将来的状态,即使不知道模型的确切性质
  - 应用广泛,功能强大.可用于粒子物理实验中的参数的优化估计,如径迹重建,顶点重建和运动学拟合等领域



# 一些基本的概念和标识

	State Vector	Error Matrix	State Vector Example
True Vector	$x$	$C$	5 helix parameters $d_\rho, d_z, \kappa, \phi_0, \lambda$
Predicted Vector	$x_k^{k-1}$	$C_k^{k-1}$	5 predicted helix parameters $d_\rho, d_z, \kappa, \phi_0, \lambda$
Measured Vector	$m_k$	$V_k$	Drift distance $d_{drift}$
Updated Vector	$x_k$	$C_k$	5 updated helix parameters $d_\rho, d_z, \kappa, \phi_0, \lambda$
Smoothed Vector	$x_k^n$	$C_k^n$	5 smoothed helix parameters $d_\rho, d_z, \kappa, \phi_0, \lambda$

Dynamic equation:

$$x(t_k) = Fx(t_{k-1}) + \eta, \text{cov}(\eta) = Q$$

# 状态向量表达式

系统传输方程：

把上一时刻的状态量影射到当前时刻的状态量

$$x_k = F_{k-1}x_{k-1} + \eta_{k-1} \quad \text{cov}(\eta_{k-1}) = Q_{k-1}$$

$F_{k-1}$ ：传输矩阵， $\eta_{k-1}$ ：随机的传输误差

---

测量响应方程：描述观测量与状态矢量的关系

$$m_k = H_k x_k + \varepsilon_k \quad \text{cov}(\varepsilon_k) = V_k$$

$H_k$ ：状态向量 $x_k$ 对测量量 $m_k$ 的增益矩阵

$\varepsilon_k$ ：测量误差

# 预测 Prediction

- 对将来时刻的状态矢量的估计

状态矢量的外延：

$$x_k^{k-1} = F_{k-1} x_{k-1}$$

误差矩阵的传递：

$$C_k^{k-1} = F_{k-1} C_{k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1}$$

外延的状态矢量及其误差矩阵只是一种“中间变量”

# 过滤 Filtering

- 状态矢量通常不能直接观测，通过测量模型与观测量联接
- 把预言的状态矢量与当前的“测量”量进行比较，从而更新当前的状态矢量

$$C_k = \left[ (C_k^{k-1})^{-1} + H_k^T V_k^{-1} H_k \right]^{-1}$$

$$x_k = C_k \left[ (C_k^{k-1})^{-1} x_{k-1} + H_k^T V_k^{-1} m_k \right]$$

矩阵求逆：  
状态矢量维数

$K_k$ ：  
Kalman  
增益矩阵

$$x_k = x_{k-1} + K_k (m_k - H_k x_k^{k-1})$$

$$K_k = C_k^{k-1} H_k^T \left[ V_k + H_k C_k^{k-1} H_k^T \right]^{-1}$$

$$C_k = (I - K_k H_k) C_k^{k-1}$$

矩阵求逆：  
观测量维数

# 平滑 Smoothing

- 利用所有测量的结果（最后一步），回推到以前的测量，并对各步的状态矢量进行更新
- 过滤与光滑相结合，可以有效地实现双向预测，并探测“坏点”

增益矩阵

$$x_{k-1}^n = x_{k-1} + A_{k-1} (x_k^n - x_k^{k-1})$$

$$A_{k-1} = C_{k-1} F_{k-1}^T (C_k^{k-1})^{-1}$$

$A_{k-1}$

$$C_{k-1}^n = C_{k-1} + A_{k-1} (C_k^n - C_k^{k-1}) A_{k-1}^T$$

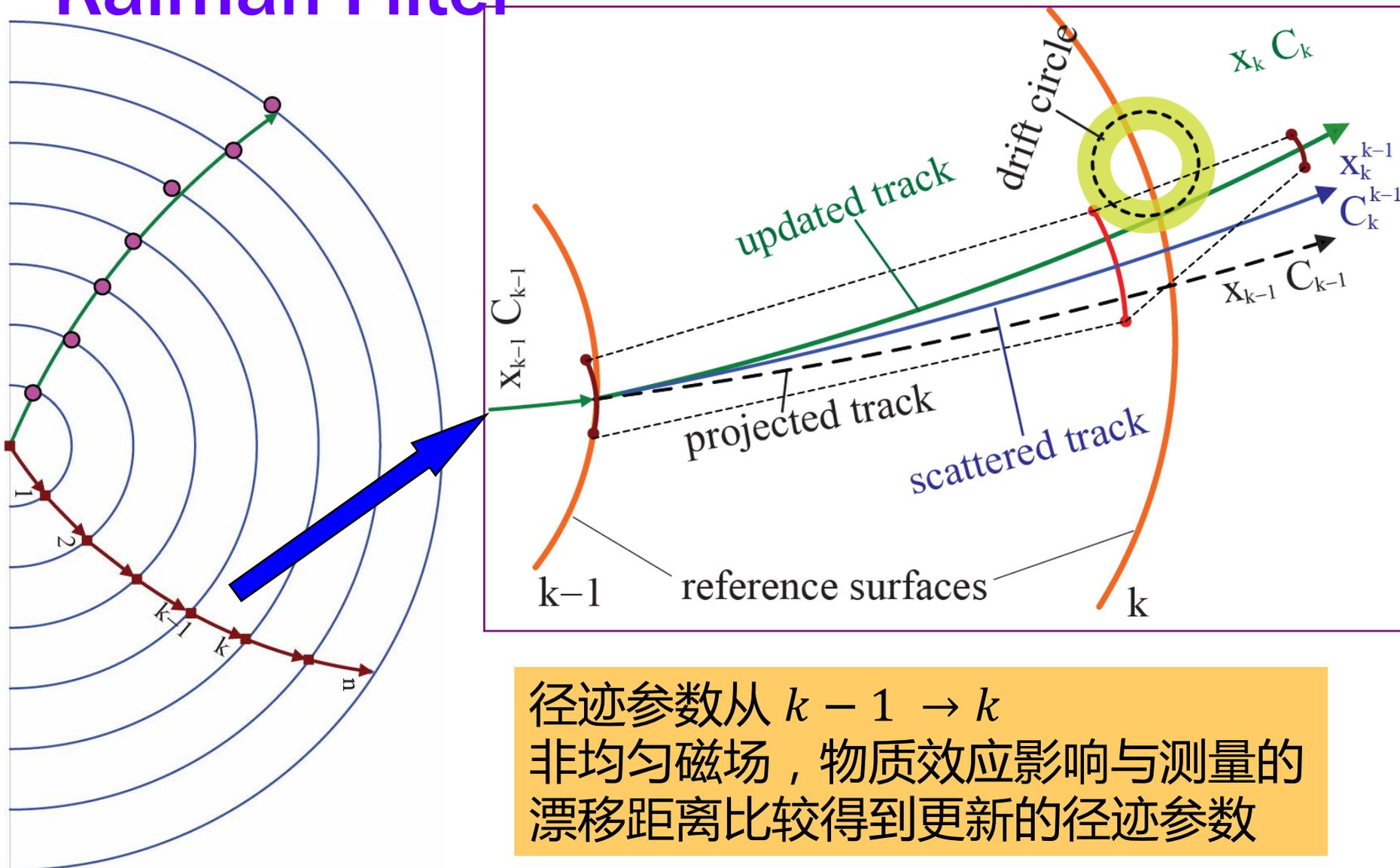
状态矢量的逼真化：

- 过滤比预言更真实
- 光滑比过滤更真实

常用光滑后的 $\chi^2$ 来检验拟合的优度

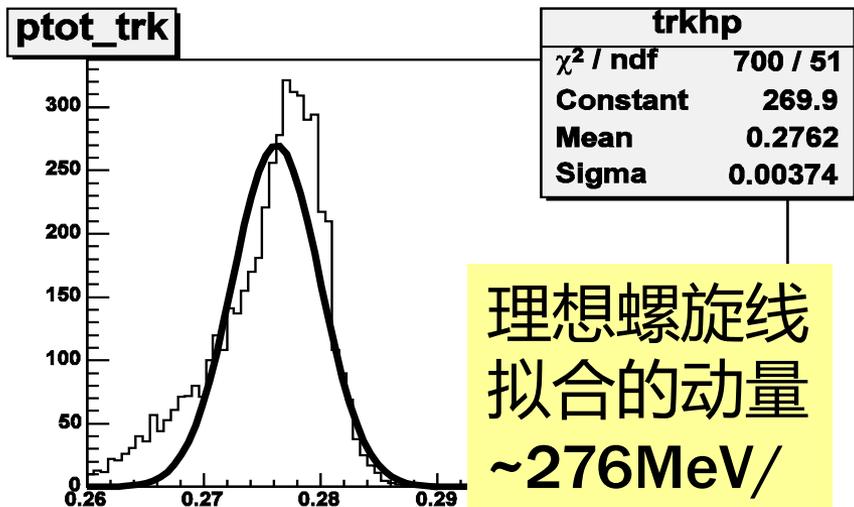
# 主漂移室重建——径迹拟合

## Kalman Filter

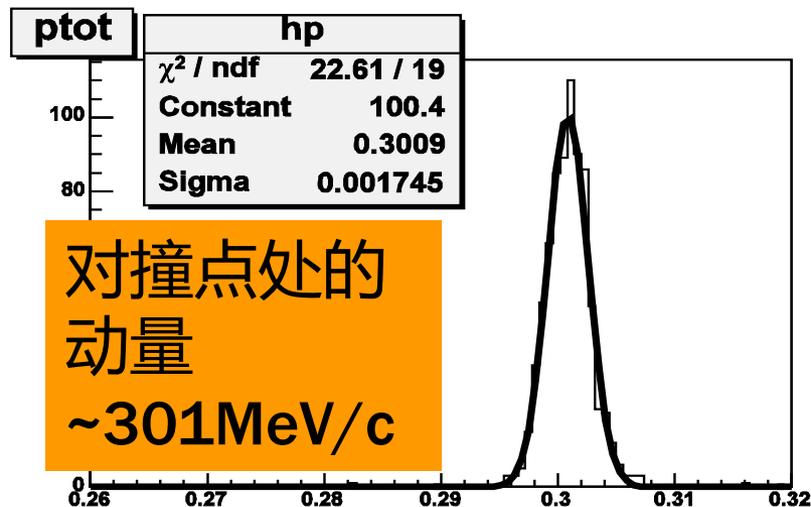


# 主漂移室重建——径迹拟合

## 动量分辨的改进

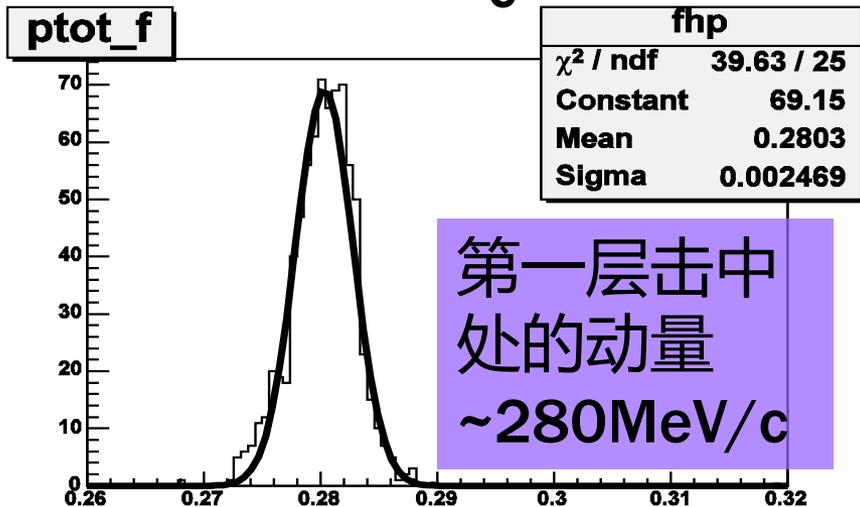


理想螺旋线  
拟合的动量  
~276MeV/

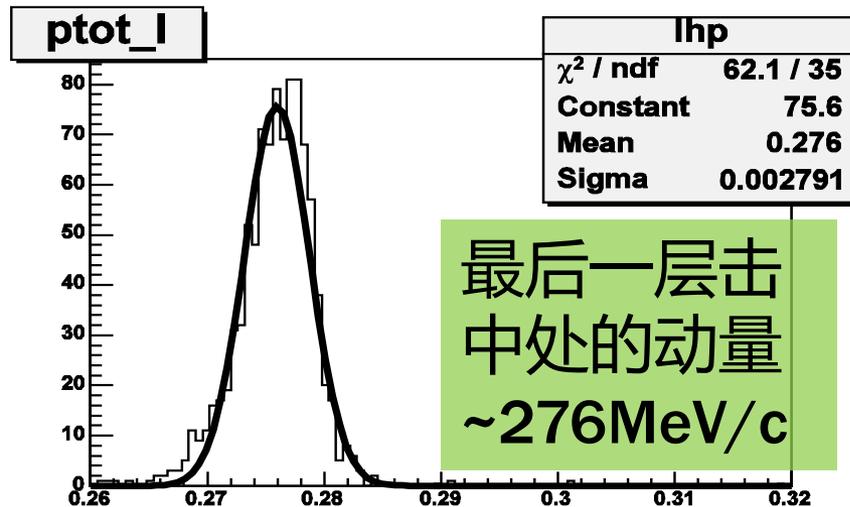


对撞点处的  
动量  
~301MeV/c

C



第一层击中  
处的动量  
~280MeV/c

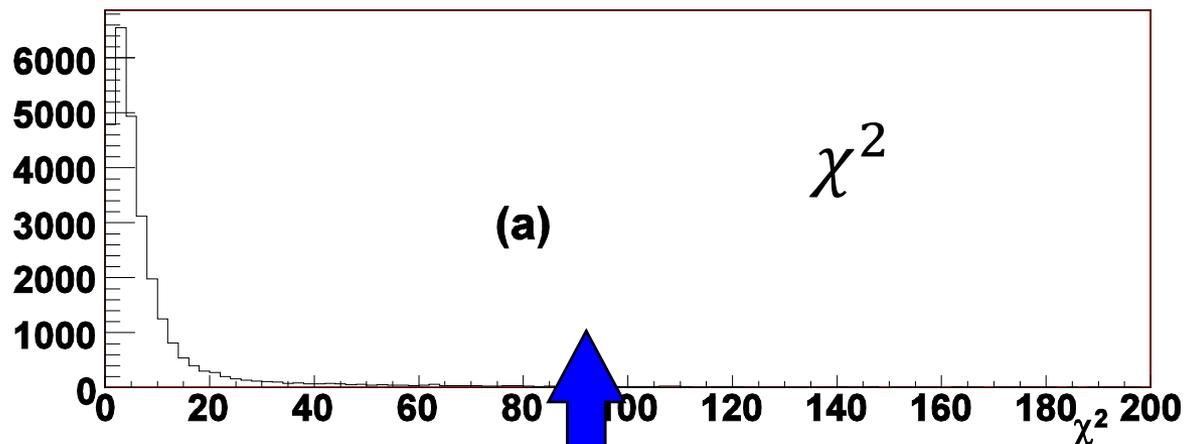


最后一层击  
中处的动量  
~276MeV/c

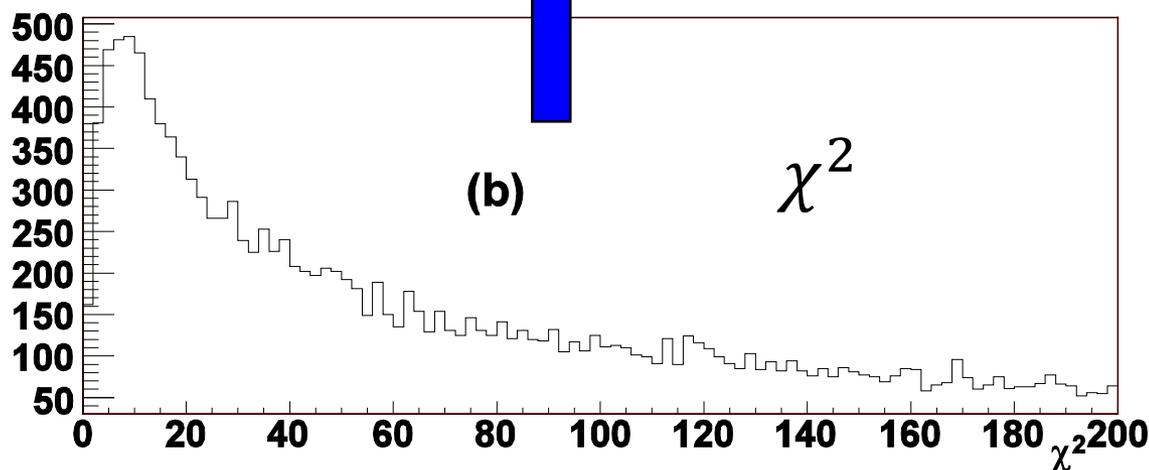
300MeV/c 的质子

# 主漂移室重建——径迹拟合 运动学拟合的改进

运动学拟合检验  
 $\chi^2$ 分布



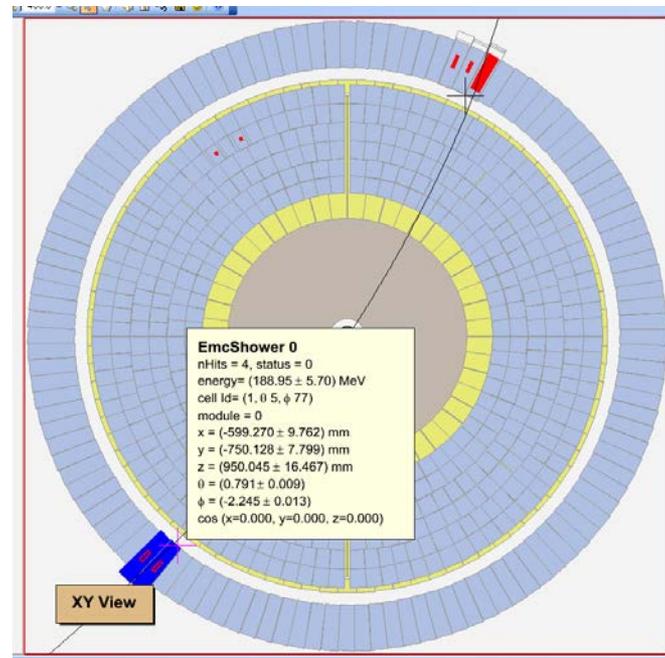
$\psi(2S) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$   
 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$



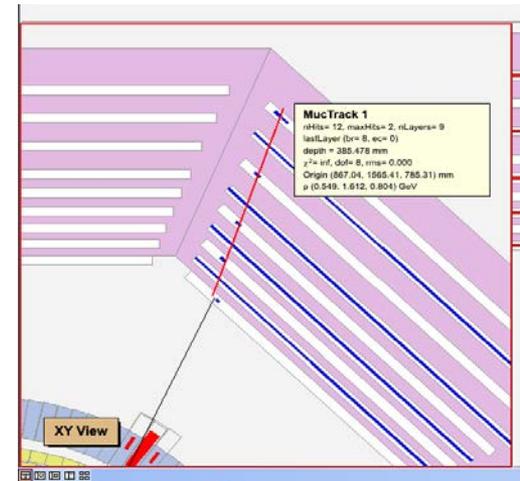
# 径迹外推

把漂移室径迹延伸，外推到外探测器，如TOF，量能器以及 $\mu$ 探测器给出带电径迹在外探测器上的击中位置，击中方向等信息。TOF和 $\mu$ 探测器的重建需要这些信息。

## TOF和量能器



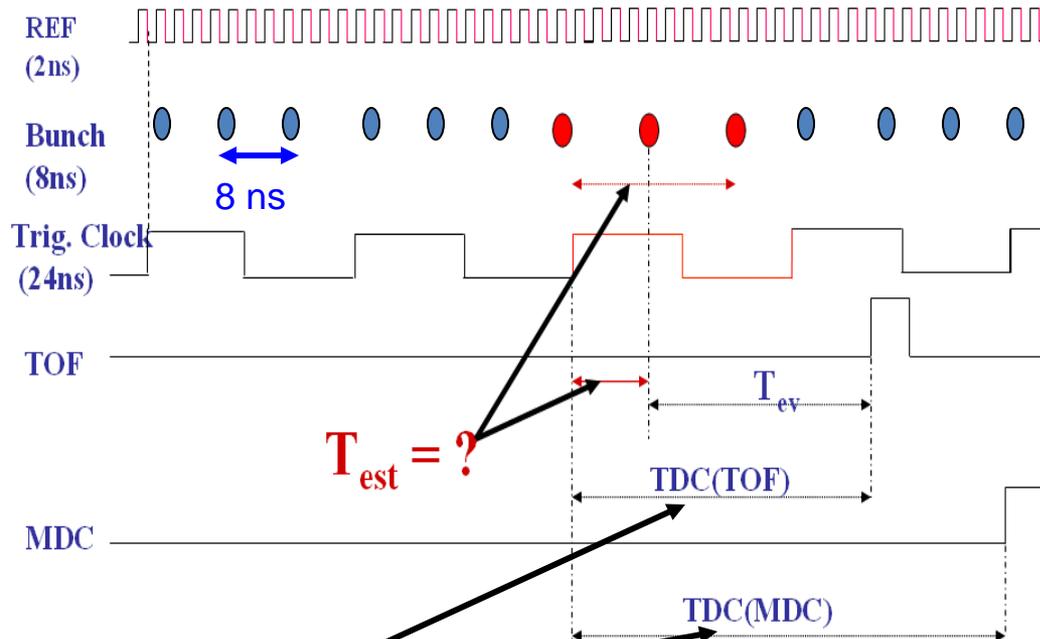
## $\mu$ 探测器



# 事例起始时间 ( Event Start Time $T_{est}$ )

RF 499.8MHz  
2ns

Trigger/DAQ  
Clock 24ns

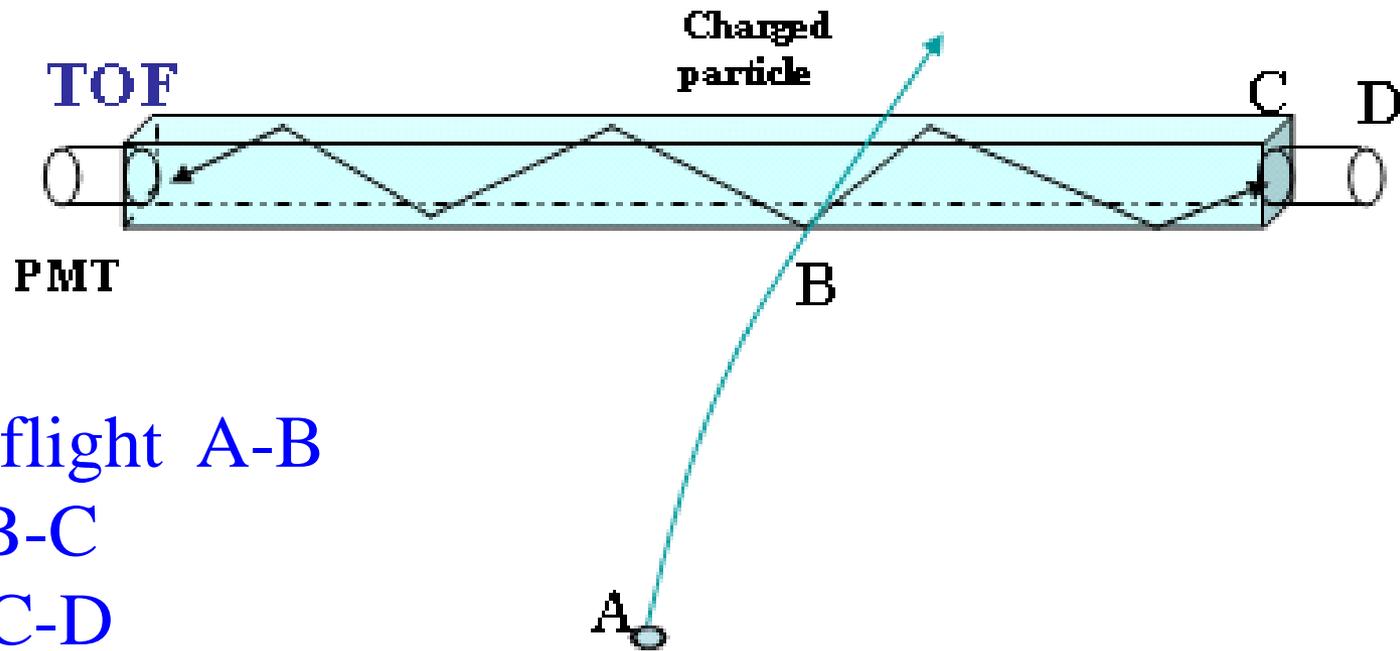


$$TDC = T_{ev} + T_{est}$$

$$T_{est} = ?$$

determined from  
offline data

# 利用TOF计算 $T_{est}$



$T_{tof}$ : Time of flight A-B

$T_{pro}$ : Time of B-C

$T_{pmt}$ : Time of C-D

$T_{elc}$ : delay time at electronic

$$T_{est} = TDC - T_{ev}$$

$$T_{ev} = T_{tof} + T_{pro} + T_{pmt} + T_{elc}$$

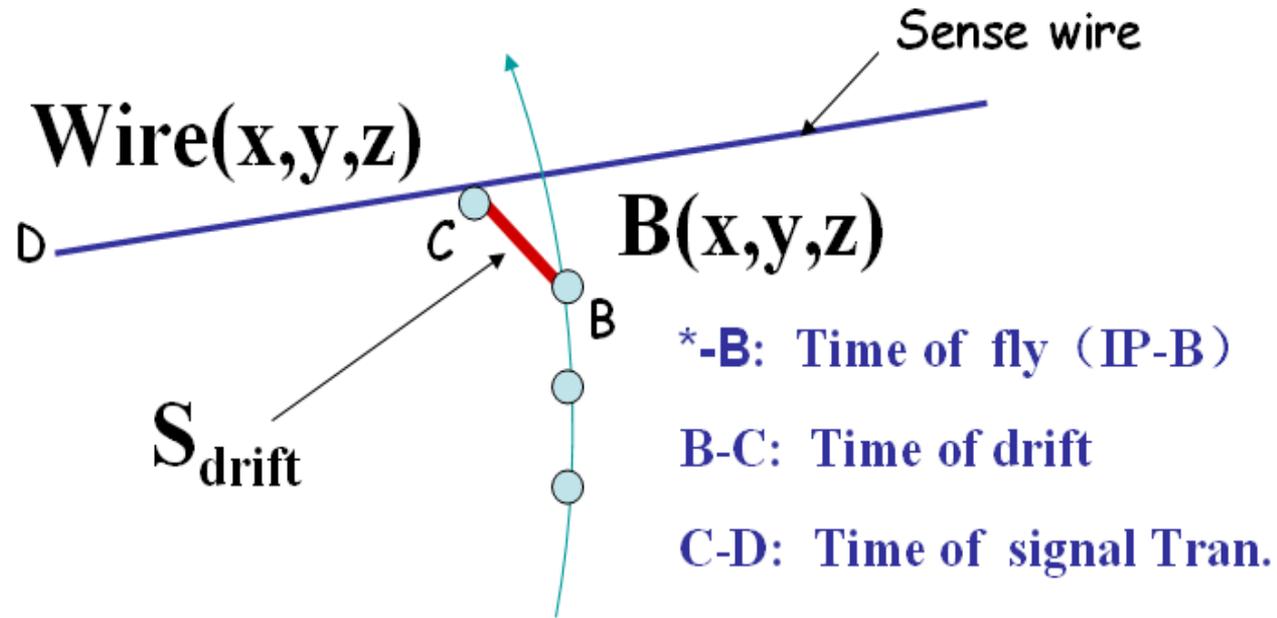
# 利用MDC计算 $T_{est}$

$T_f$ : Time of flight A-B

$T_{drift}$ : Time of B-C

$T_{wp}$ : Time of C-D

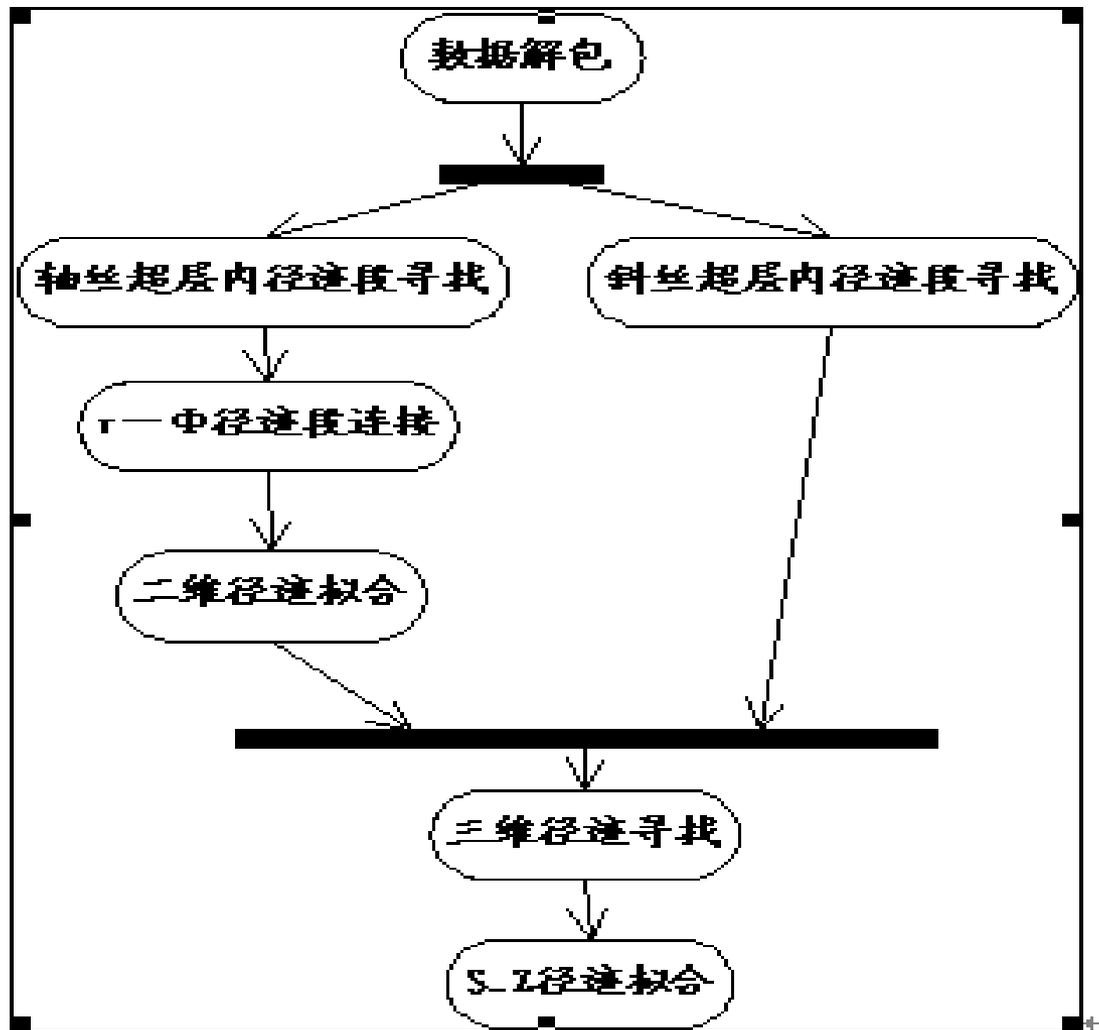
$T_{elc}$ : delay time at  
electronic



$$T_{est} = TDC - T_{ev}$$

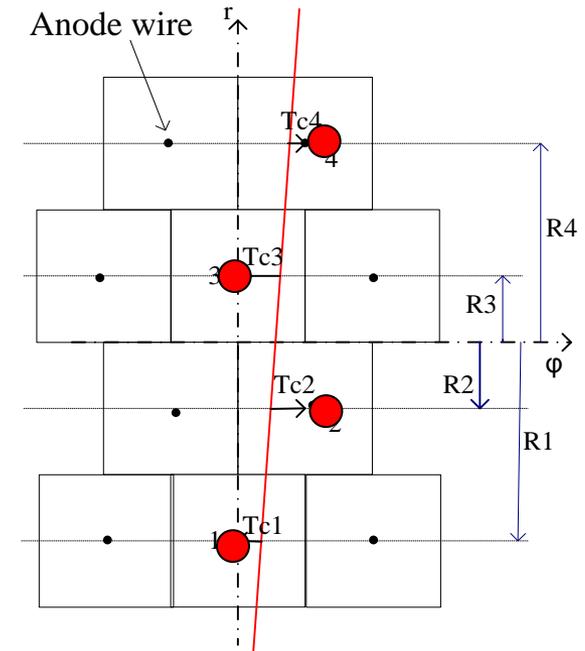
$$T_{ev} = T_f + T_{drift} + T_{wp} + T_{elc}$$

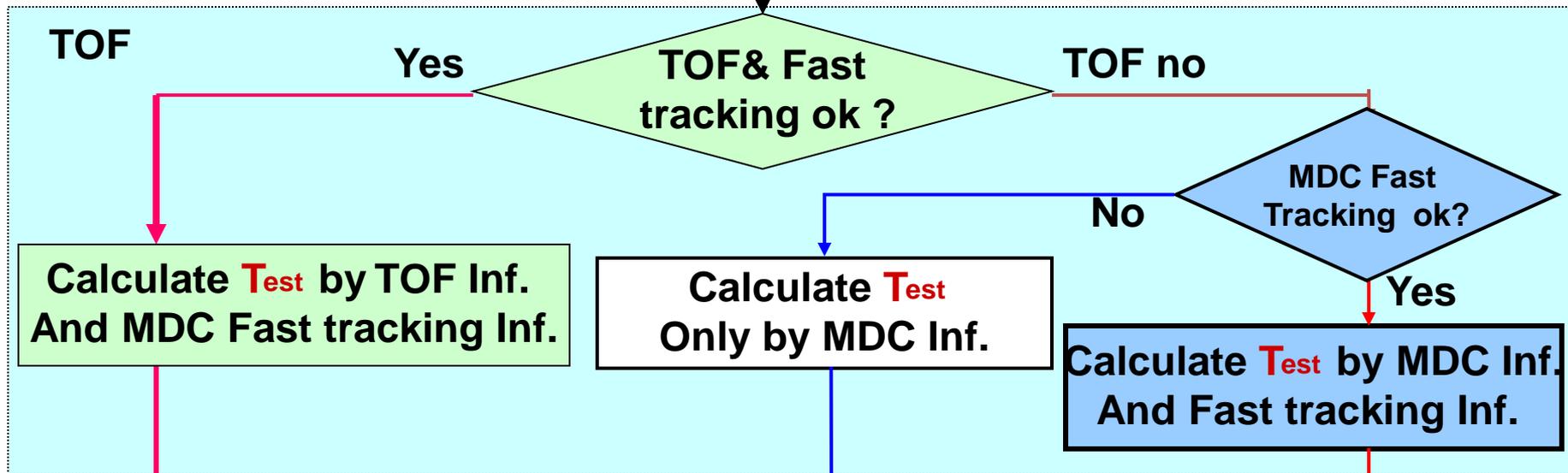
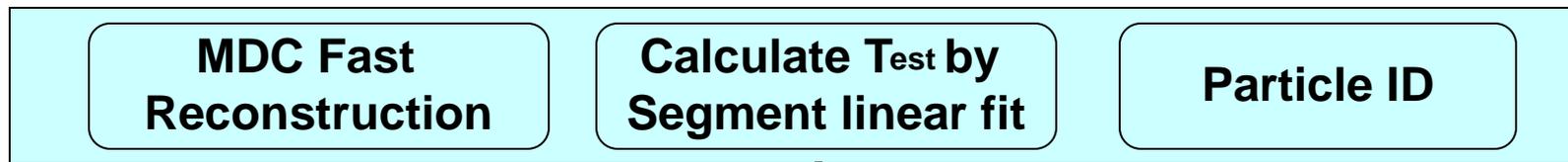
# 漂移室的快重建



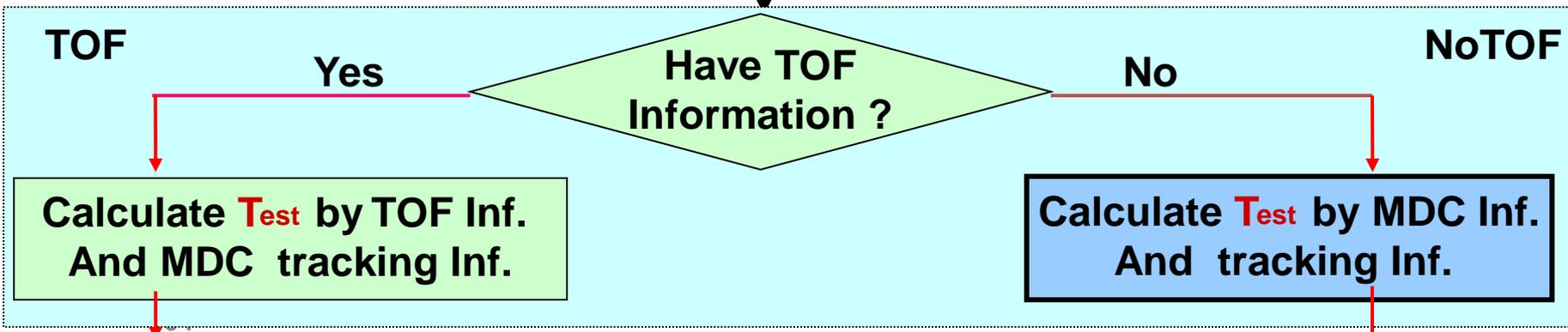
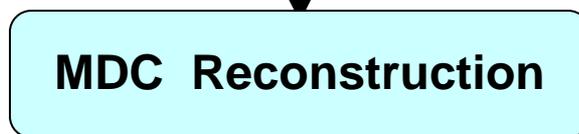
# $T_{est}$ ( MDC径迹拟合 )

- 快重建  $\rightarrow$  初始径迹参数
- 漂移时间的确定与  $T_{est}$  相关
- 以  $T_{est}$  为参数构建  $\chi^2$
- 以快重建定出的径迹为预期飞行轨迹，拟合定出  $T_{est}$



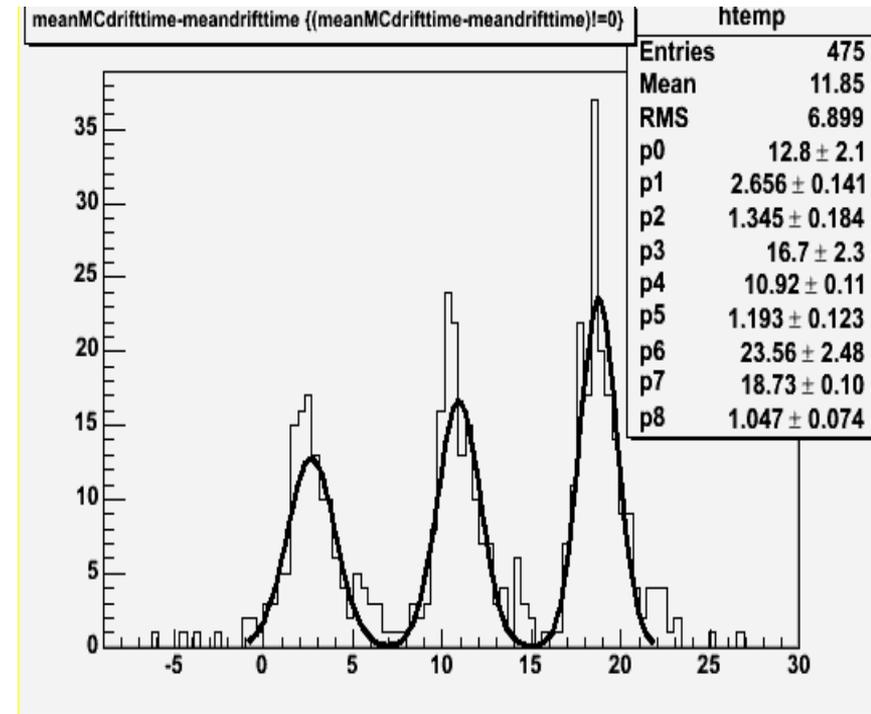
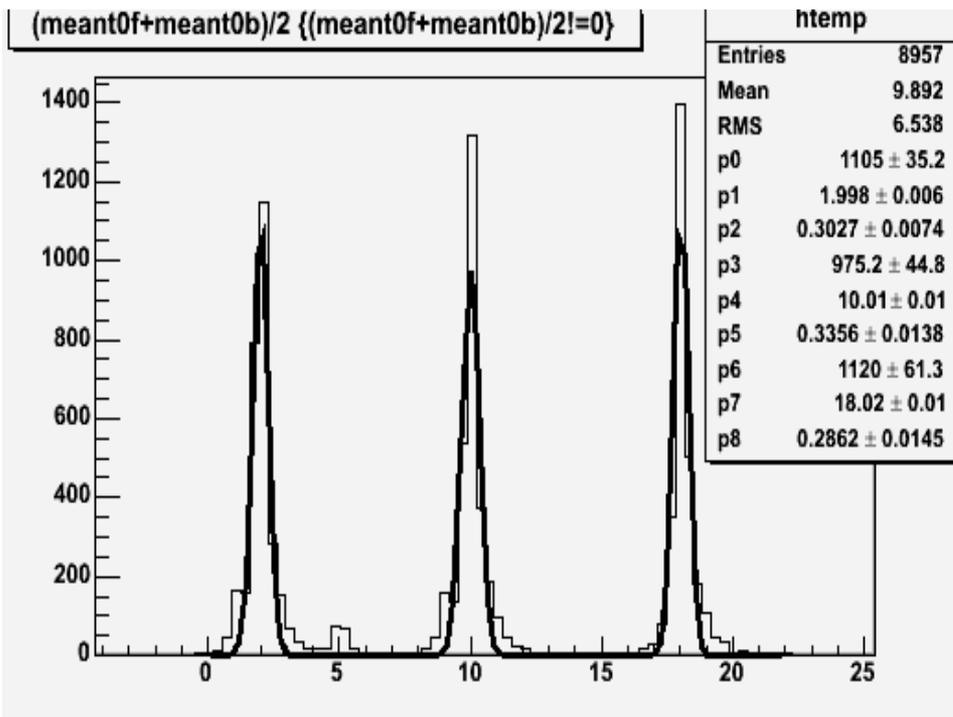


Yes



# $T_{est}$ 的确定

“hadrons”, 10000, set  $T_{est}$  to “2”, “10”, “18”



By TOF

$T_{est}$ : 1.998 ns  $\sigma$ : 0.30ns

$T_{est}$ : 10.01 ns  $\sigma$ : 0.33ns

$T_{est}$ : 18.02 ns  $\sigma$ : 0.29ns

By MDC

$T_{est}$ : 2.6ns,  $\sigma$ : 1.4ns

$T_{est}$ : 10.9ns,  $\sigma$ : 1.3ns

$T_{est}$ : 18.7ns,  $\sigma$ : 1.1ns

# 量能器

- 电磁量能器

- 光子(电子)能量和位置(方向)
- 主要指标：能量和位置分辨率

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

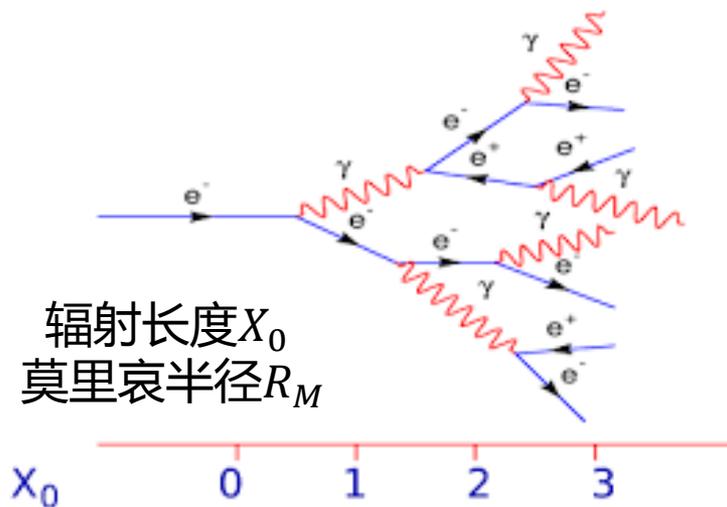
$$\sigma_{\theta, \phi} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus c$$

a: 取样 b: 噪声 c: 常数

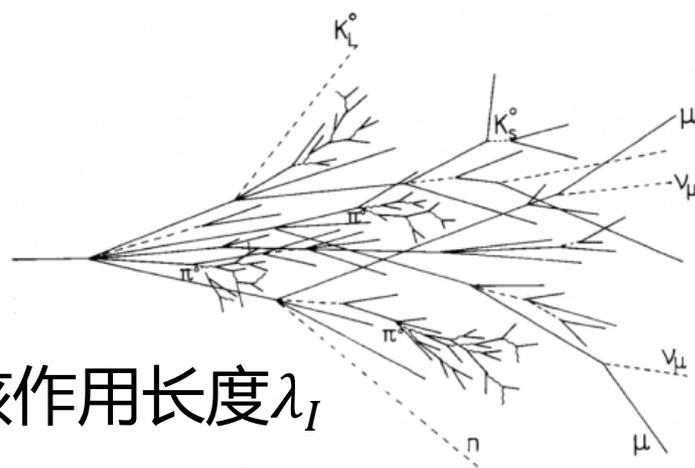
- 强子量能器

- 强子簇射的纵向横向发展
- 不可观测能量

$$\sigma_h/E = \sqrt{(\sigma_{int}^2 + \sigma_{samp}^2)/E + a}$$



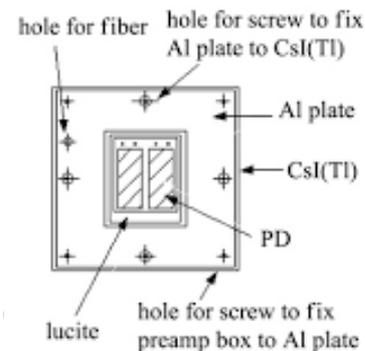
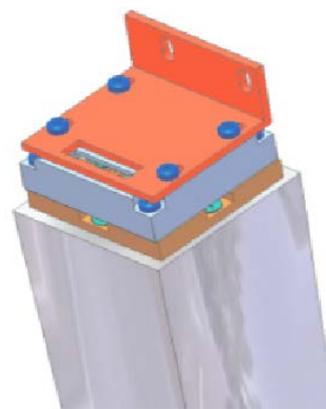
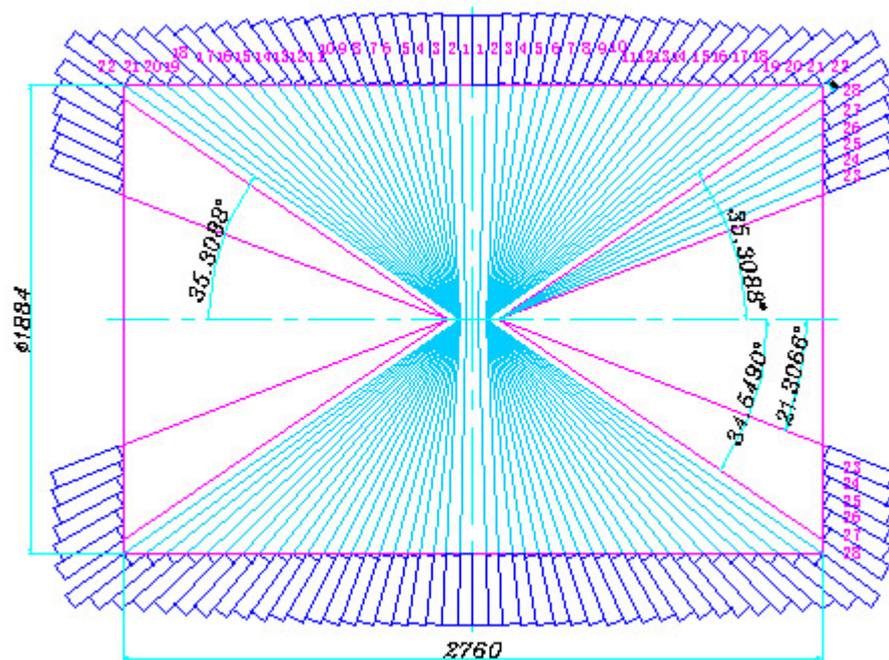
电磁簇射过程的简单图像



强子簇射过程的简单图像<sub>6</sub>

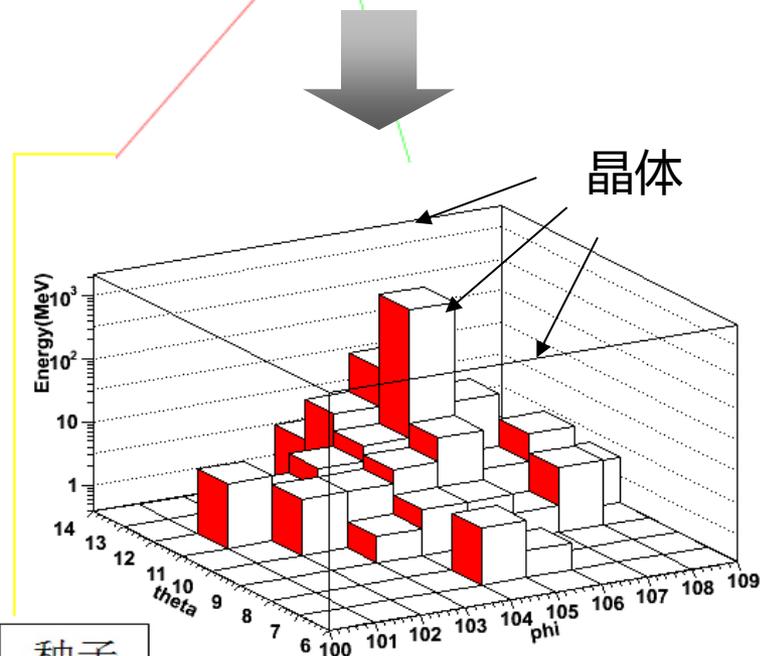
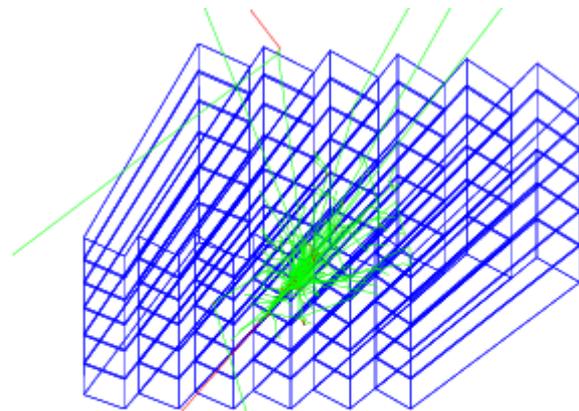
# 电磁量能器

- 全吸收型电磁量能器
- $6240\text{CsI(Tl)}$  晶体
- 颗粒度： $5 \times 5\text{cm}^2$ 和 $6.5 \times 6.5\text{cm}^2$ ，长度 $28\text{cm}(15X_0)$
- 读出装置：光二极管
- 能量分辨： $\sim 2.5\%$
- 位置分辨： $\sim 6\text{mm}$

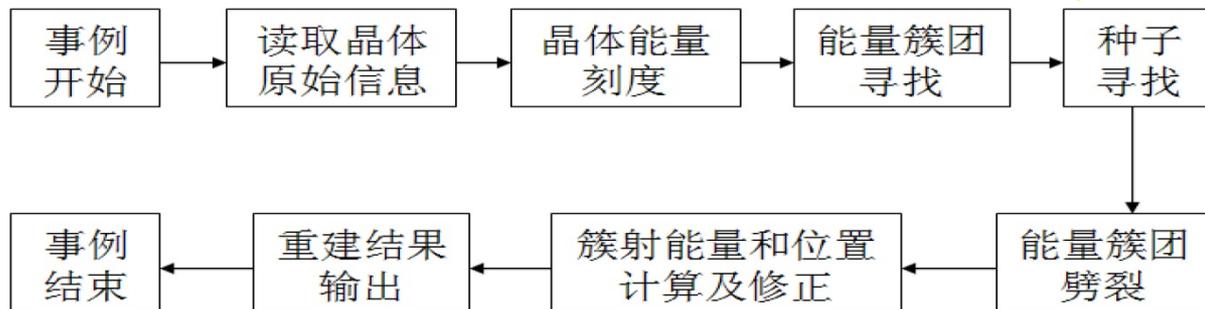


# 电磁量能器 簇射团的描述

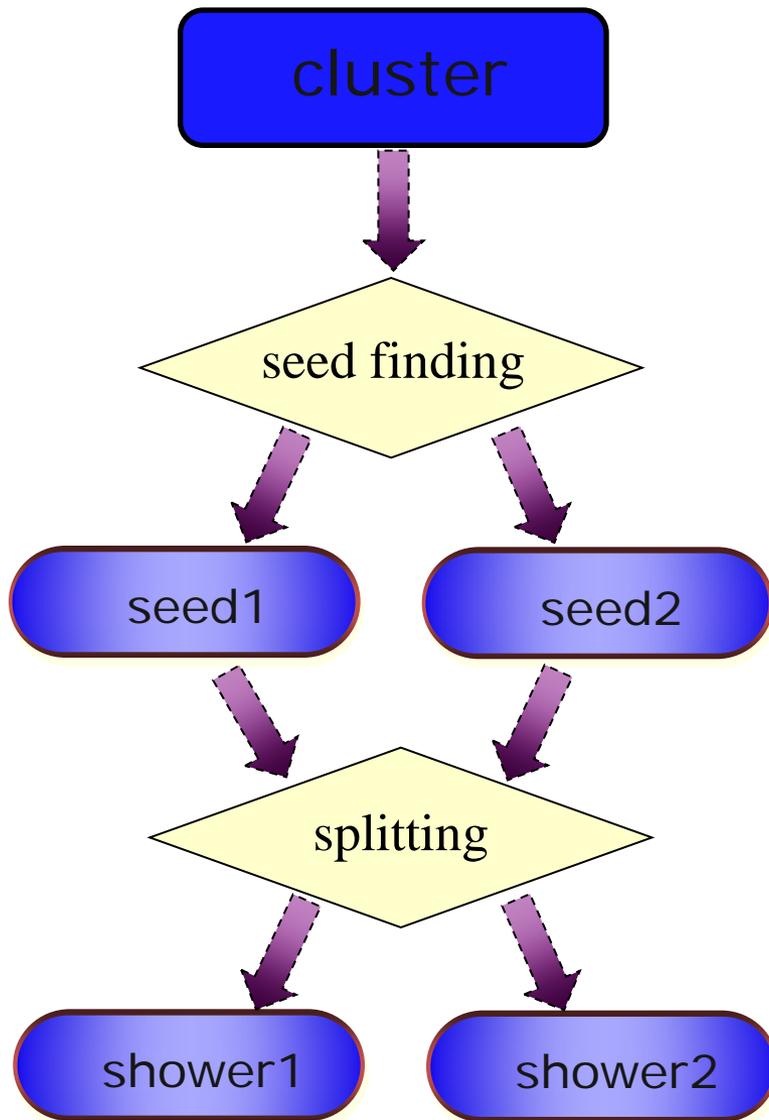
- 簇射团
  - 一系列沉积能量大于某个阈值的晶体的集合
- 簇射团的寻找
  - 迭代寻找相邻晶体
- 多个簇射团



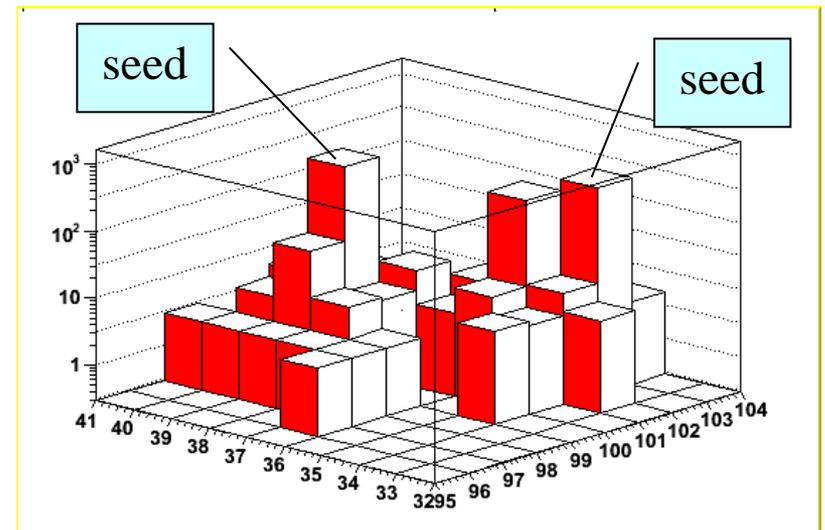
典型的1GeV光子形成的簇射团



# 簇射团的劈裂



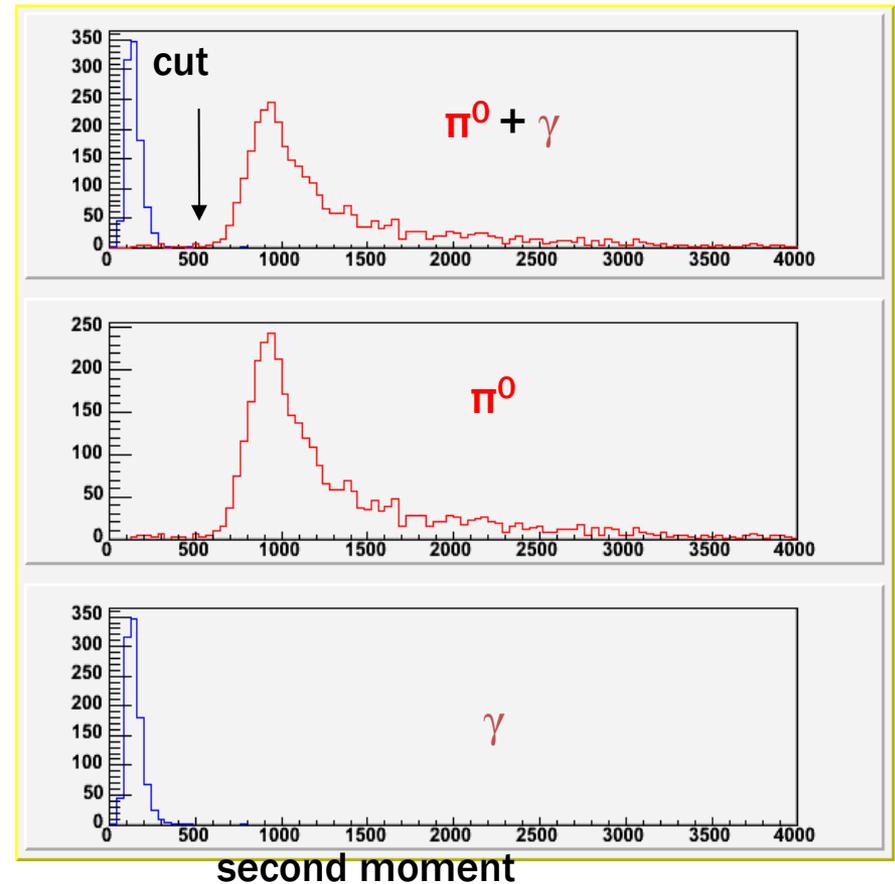
- 种子：局域最大
- 如果只有一个种子，只有一个簇射
- 如果存在多个种子，存在多个簇射，每个晶体对多个簇射都有贡献。



# 二次矩

$$S = \frac{\sum_i E_i r_i^2}{\sum_i E_i}, r_i = r_{hit} - r_{center}$$

- 二次矩用来描述簇射能量
- 用作簇射团劈裂的条件



# 电磁量能器刻度的主要内容

- 能量刻度

- 能量分辨率

- 探测单元的均匀性刻度
    - 能量泄露因子刻度
    - 辐照损伤，环境温度变化的监测与刻度

- 能量线性响应

- 粒子与量能器前物质相互作用造成的能量损失
    - 取样型量能器，次级粒子能损造成非线性效应

- 位置刻度

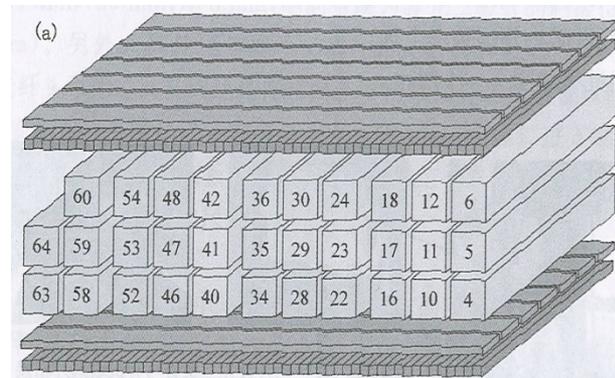
# 探测单元均匀性刻度

- 宇宙线或di-muon事例

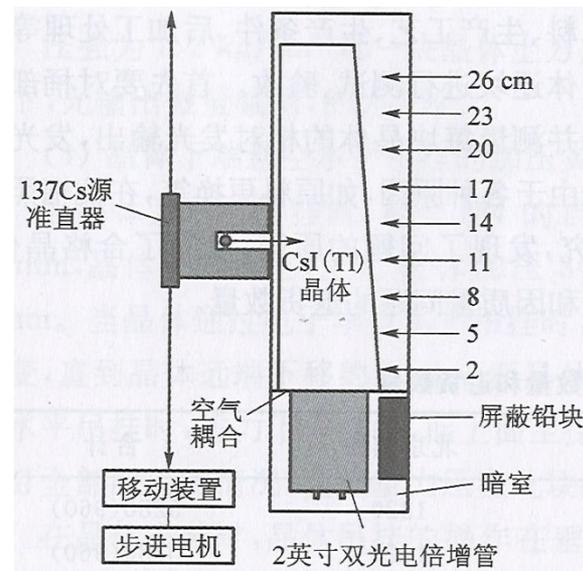
- 幅度大小校准，常常与读出单元配套
- 探测器建造期间常用
- 运行时，定时获取足量的宇宙线事例
- di-muon事例，探测器的系统校准

- 放射源，特殊光源

- 测量探测器单元不同位置的能量相应
- 通常随时间变化，影响分辨



晶体探测单元宇宙线测试



晶体探测单元光产额  
和光均匀性测试

# 能量泄露因子

- 探测器边界时，较为严重，其值随入射粒子的能量，入射位置变化。通常利用 Monte Carlo 方法获得：
  - EGS
  - Geant3
  - Geant4
- Monte Carlo 方法可以非常好地描述电磁相互作用。预先计算好数值，便于使用时查表

# 辐照损伤，环境温度变化的影响

- 探测器刻度常数具有时效性，在一定范围内有效。在运行取数期间，需要定期更新
- 辐照损伤效应是一个长期而缓慢的过程，探测器各部位受辐照影响不同，刻度常数的变化也随之不同
- 对气体探测单元的取样型量能器来说，通常夏天的幅度高，冬天低
- 晶体量能器对温度变化很敏感，要求严格控制。如：**BES3**量能器的环境温度变化要求控制在 **$\pm 1\text{C}$** 之内

# 刻度使用的物理事例类型

- 电子对事例: **Bhabha**
  - 电子能量=beam能量
- 光子对事例: **di-photon**
  - 光子能量=beam能量
- **Dimuon事例**
  - 能量沉积主要由电离过程造成, 近似为常数
- 选取含有光子和 $\pi^0$ 的事例, 检查能量线性响应以及能量分辨、位置分辨随能量的变化关系。一般情况下, 需要作二次刻度

# 量能器（CsI晶体）的刻度

- 入射粒子的能量转换为光信号，在电子学系统中又转换为电信号。刻度的目的就是得到原始数据记录的脉冲幅度与入射粒子能量的关系系数
- 探测器单元的均匀性刻度——探测单元的能量刻度
  - 刻度样本：Bhabha事例（di-photon事例）
  - 能量刻度常数 $C_i$ ——组成入射粒子簇射团的各块晶体分别乘上不同的系数 $C_i$ ，系数由最小二乘法求解
  - 刻度需要在每个探测单元上积累足够多的事例
  - 刻度常数随时间的长期变化需要进行监控
    - 辐照损伤效应的影响
    - 温度环境变化的影响，等等因素
- 能量响应刻度——簇射绝对能量刻度
  - 探测器前端物质的影响未解决
  - 用高动量粒子对探测器刻度之后，通常对低动量粒子存在非线性关系，需要选取物理事例样本（如 $\pi^0$ 样本）进行二次刻度

# 量能器刻度算法一

## 均匀性刻度——探测单元的能量刻度 (1)

探测单元的 脉冲幅度  $\rightarrow$  沉积能量 (不是真实能量!)

$$\begin{aligned} E_i^{dep} &= ADC_i \times C_i \\ &= ADC_i \times C_i^{Elec} \times g_i \\ &= E_i^{elec} \times g_i \end{aligned}$$

$ADC_i$ : 探测单元*i*的脉冲幅度

$C_i$ : 能量刻度系数

$C_i^{Elec}$ : 通过放射源和宇宙线测试得到的系数

$g_i$ : 需要求解的刻度常数  $\sim 1$

极小化下式,以求得刻度常数 $g_i$ :

Monte caro中  
簇射团的沉积能量  
预期沉积能量

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^N \frac{E_{exp}^k - \sum_i^{5 \times 5} g_i \cdot E_i^{elec}}{\sigma(\theta, \phi)}$$

数据中簇射团的  
沉积能量

$$E_{exp}^k = E_e(\theta, \phi) \times f(E_e, \theta, \phi)$$

$E_e(\theta, \phi)$  入射电子的动能 (真实能量)  
 $f(E_e, \theta, \phi)$  是能量泄露因子, 由MC获得

$k$  是簇射团的编号,  $i$  是探测单元编号

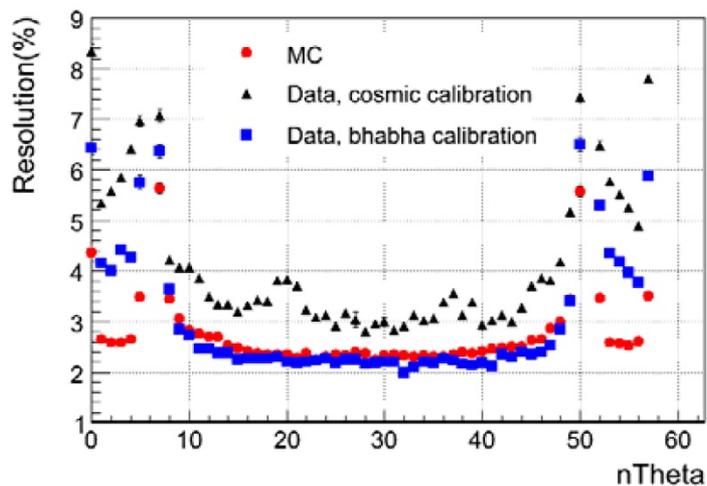
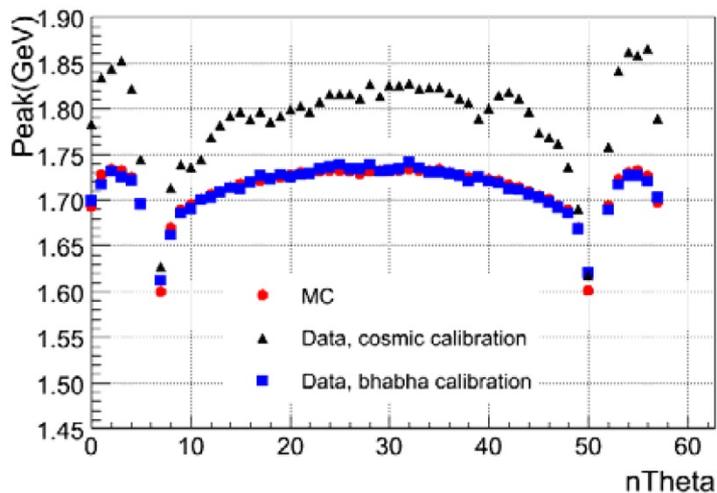
# 量能器刻度算法一

## 均匀性刻度——探测单元的能量刻度 ( 2 )

对 $\chi^2$ 求极小, 得到如下矩阵方程

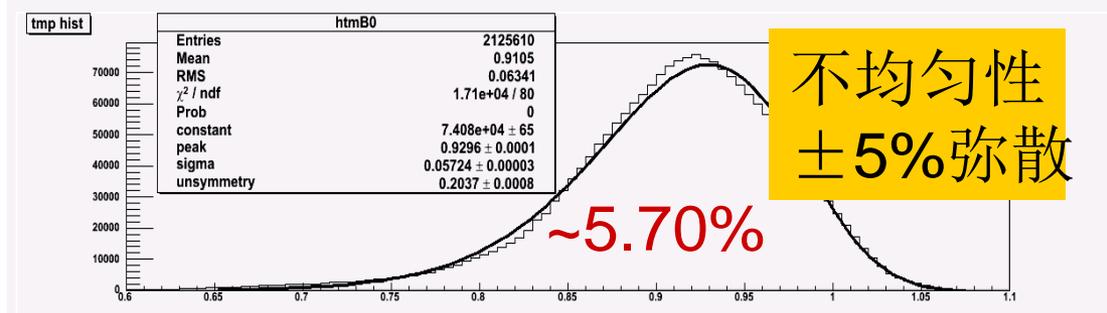
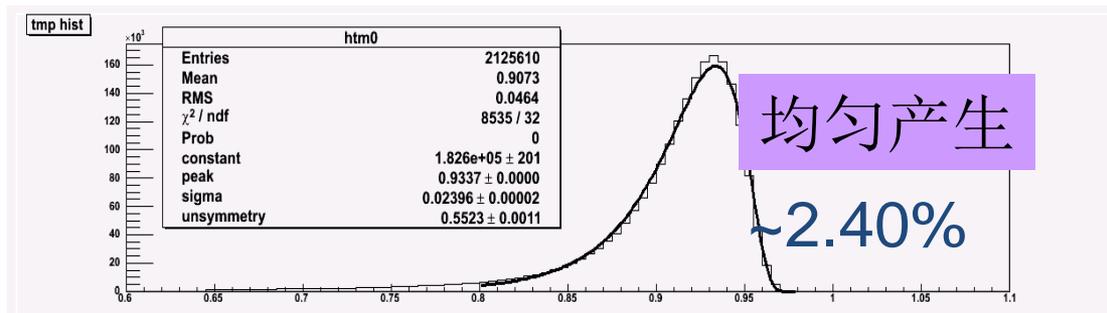
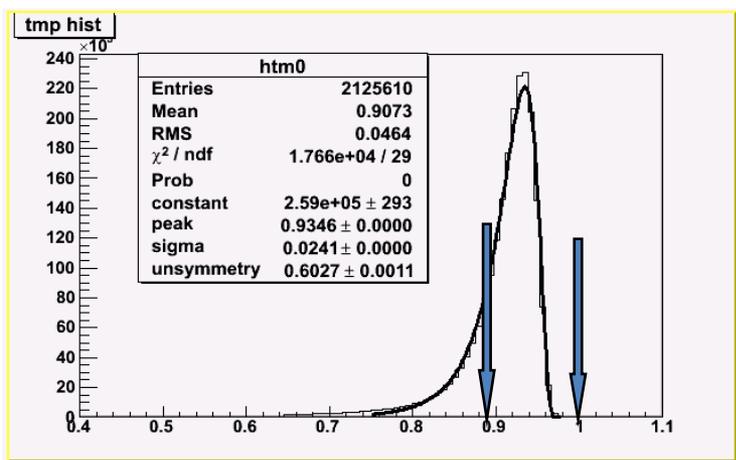
$$\sum_j g_j Q_{ij} = R_i, \text{ with } Q_{ij} = \sum_{k=1}^N \frac{E_{ik} E_{jk}}{\sigma_k^2}, R_i = \sum_{k=1}^N \frac{E_{ik} E_{\text{exp}}^k}{\sigma_k^2}$$

$Q$  是一个6240阶的稀疏方阵. 对 $Q$ 求逆, 可同时得到所有晶体的刻度常数 $g_i$ . 利用稀疏矩阵运算程序包(SLAP)来求解以上矩阵方程

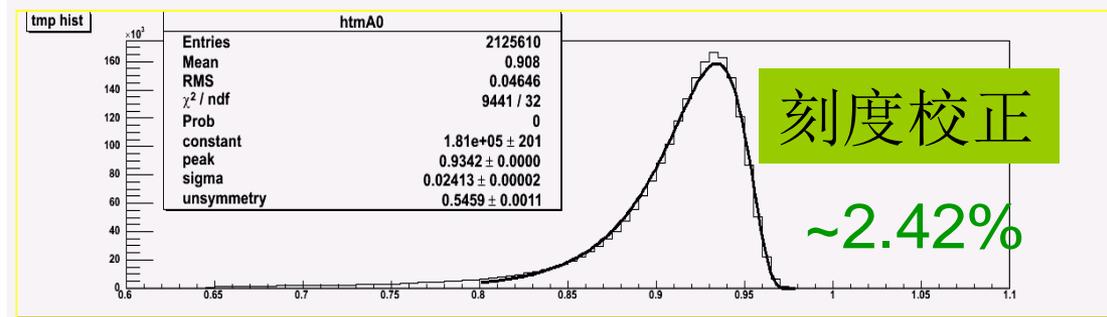


刻度前后,  $\sqrt{s} = 3.686 \text{ GeV}$ 处Bhabha事例的数据与Monte Carlo的沉积能量的比较: 峰位与分辨

# 均匀性刻度结果(MC模拟)

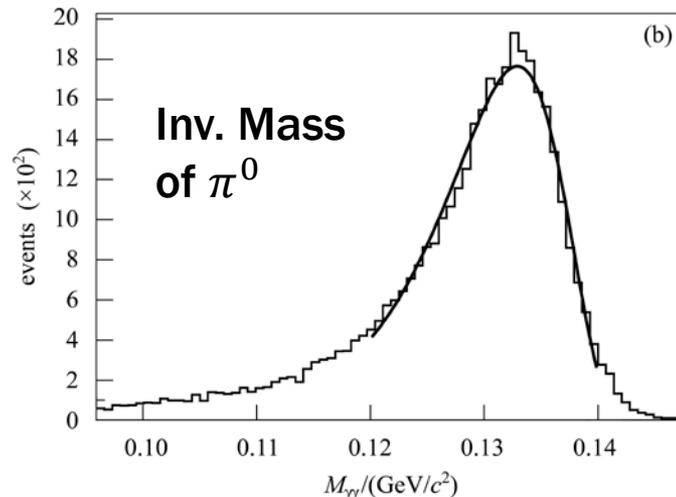
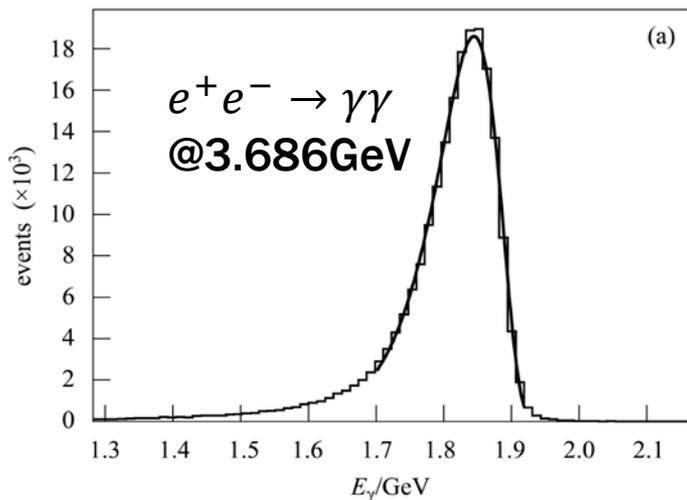


光子以及电子在晶体中的沉积能量分布左右不对称  
截掉低端的尾巴可以取得较好的刻度结果

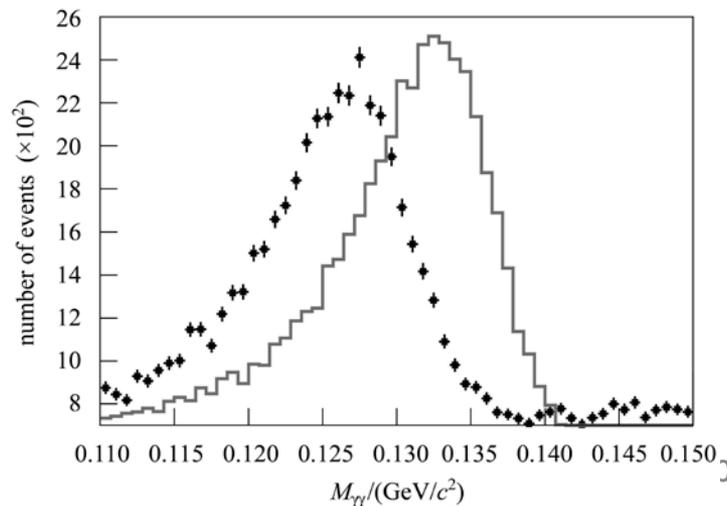
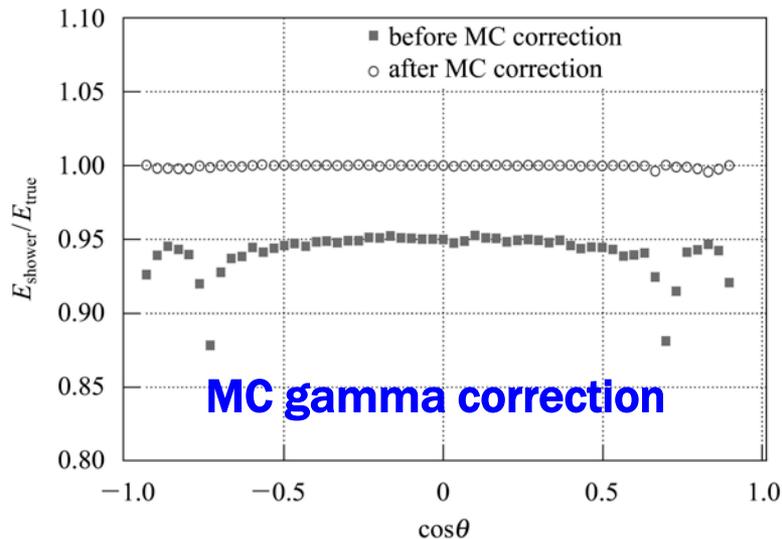


# 量能器刻度算法二

## 能量响应刻度——簇射绝对能量刻度 (1)



$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2 \cdot E_{low} \cdot E_{high} \cdot (1 - \cos\theta_{\gamma\gamma})}$$



# 量能器刻度算法二

## 能量响应刻度——簇射绝对能量刻度 (2)

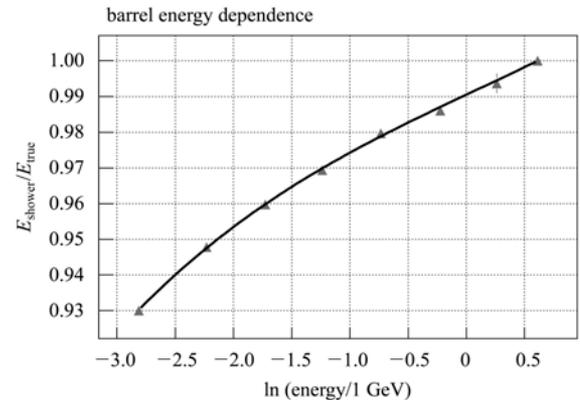
簇射团能量  $E_{shower} = \sum_i E_i^{dep}$   $\rightarrow$  粒子能量  $E_{true}$  的关系

定义刻度因子： $E_{shower}/E_{true} = \exp(\alpha_i)$

$$m_{\gamma\gamma}^{cor} = \sqrt{2 \cdot E_{low} \cdot \exp(-\alpha_{low}) \cdot E_{high} \cdot \exp(-\alpha_{high}) \cdot (1 - \cos\theta_{\gamma\gamma})}$$
$$= m_{\gamma\gamma}^{raw} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha_{low}}{2} - \frac{\alpha_{high}}{2}\right)$$

$$C_{ij} = \frac{\alpha_i}{2} + \frac{\alpha_j}{2} \pm \sigma_{ij}, \text{ with } C_{ij} = \ln m_{\gamma\gamma}^{data} - \ln m_{\gamma\gamma}^{exp}$$

定义  $\chi^2 = \sum_i \sum_j \frac{\left(\frac{\alpha_i}{2} + \frac{\alpha_j}{2} - C_{ij}\right)^2}{\sigma_{ij}^2}$ , 求极小得到



簇射团能量依赖的能量响应  $E_{shower}/E_{true} = a_0 + a_1 \cdot \ln E_{shower} + a_2 \cdot \ln^2 E_{shower}$  81

# 簇射位置修正

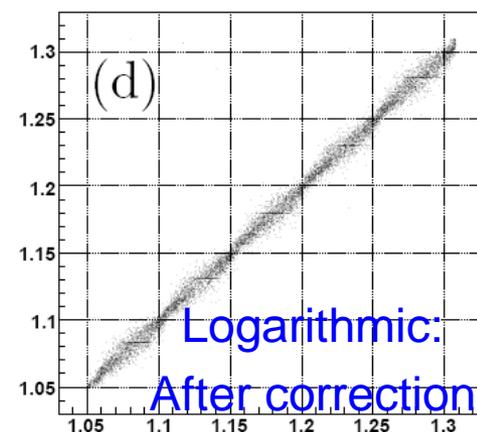
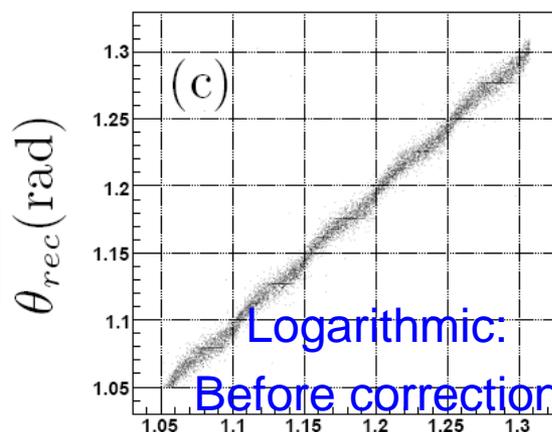
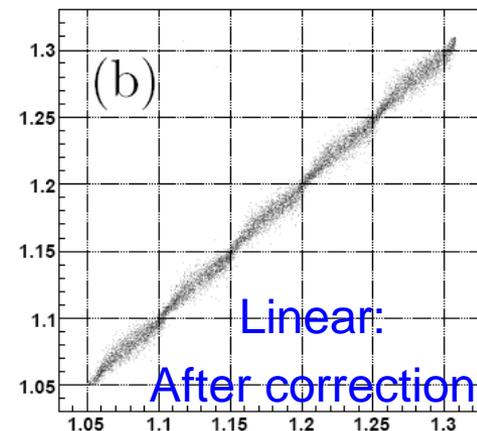
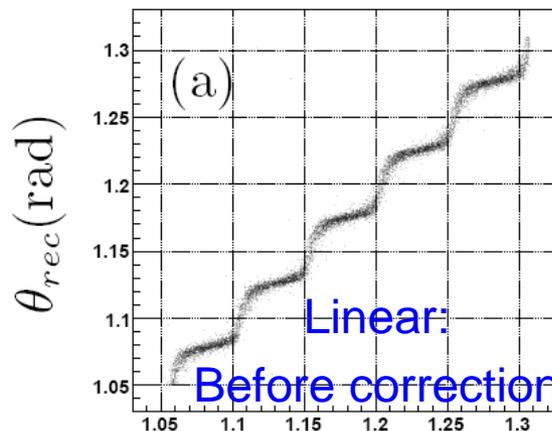
$$\mathbf{x}_c = \frac{\sum_j^N w_j(\mathbf{E}_j) \mathbf{x}_j}{\sum_j^N w_j(\mathbf{E}_j)}$$

位置加权

$$w_j^{(linear)}(E_j) = E_j$$

对数权重:

$$w_j^{(log)}(E_j) = \text{Max} \left\{ 0, a_0 + \ln(E_j) - \ln(E_{tot}) \right\}$$

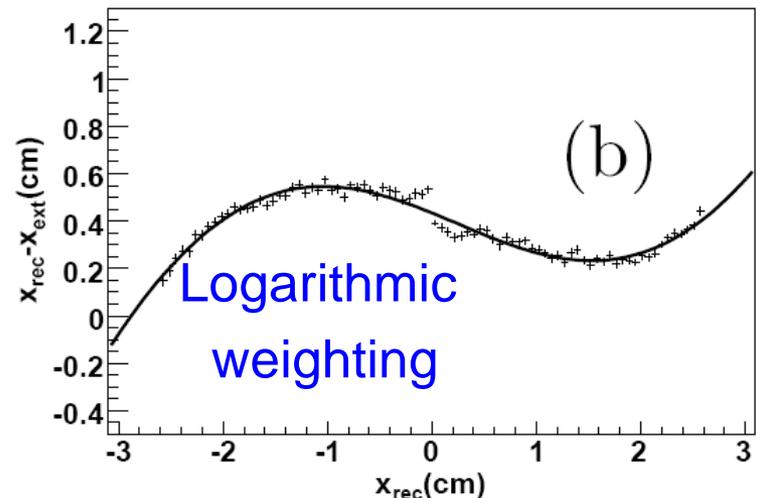
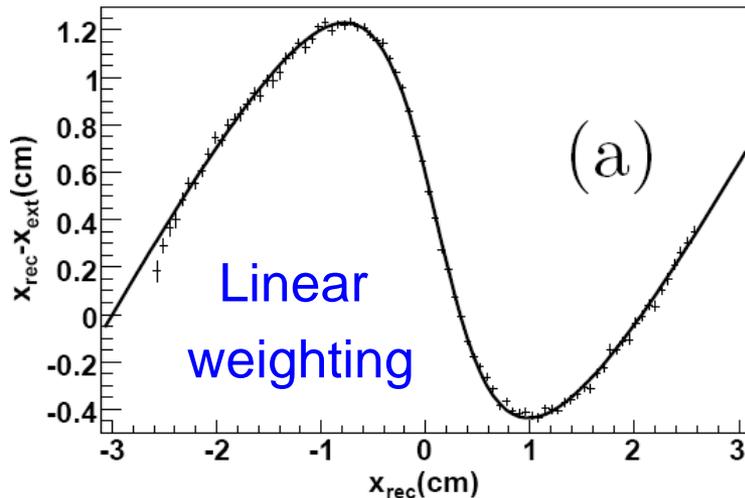


$\theta_{init}$  (rad)

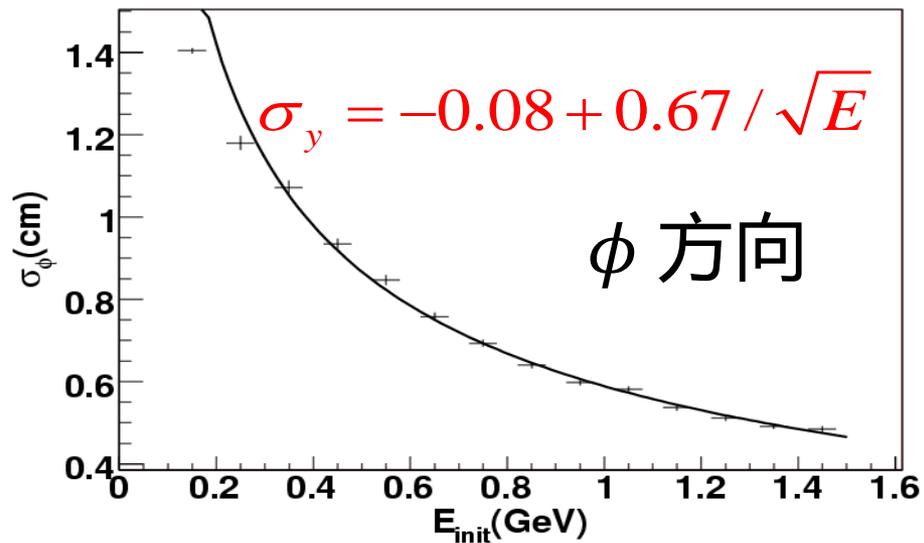
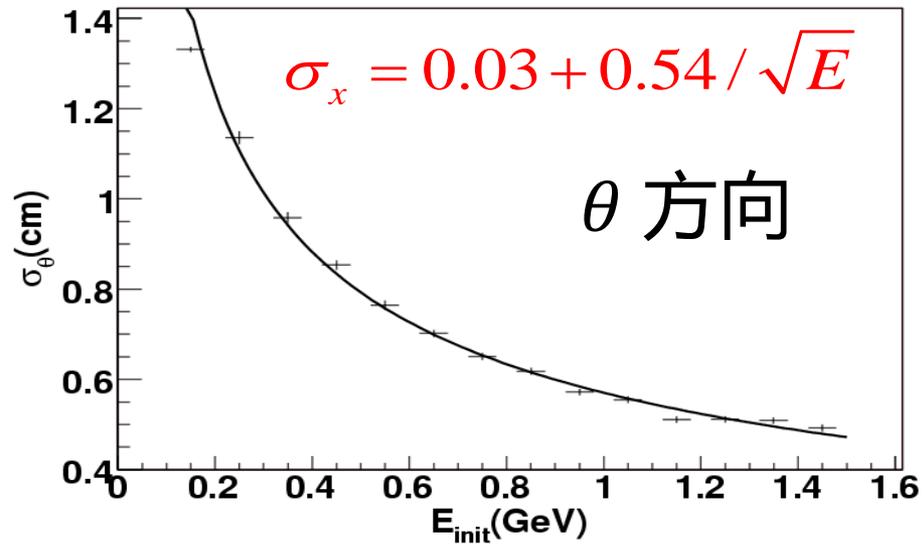
# 簇射位置修正

- $x_{rec}$  : 簇射团重建位置
- $x_{ext}$  : 主漂移室径迹外推位置
- $\Delta x = x_{rec} - x_{ext}$

$$\Delta x = p_0 \times \arctan(p_1 \times x + p_4) + p_2 \times x + p_3$$



# 簇射位置角分辨 ( 位置分辨 )



# 中性径迹测量参数与误差矩阵

- 中性径迹测量参数： $E$ ， $\cos\theta$ ， $\phi$

关联性

$$\left\{ \begin{array}{ccc} \frac{\sigma_E}{E} & \frac{\sigma_{E,\cos\theta}}{E} & \frac{\sigma_{E,\phi}}{E} \\ \frac{\sigma_{E,\cos\theta}}{E} & \sigma_{\cos\theta} & \sigma_{\cos\theta,\phi} \\ \frac{\sigma_{E,\phi}}{E} & \sigma_{\cos\theta,\phi} & \sigma_{\phi} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \sigma_{\cos\theta,\phi} = \frac{1}{N_b} \sum_{b=i}^{N_b} (\cos\theta_b - \langle \cos\theta \rangle)(\phi_b - \langle \phi \rangle) \\ \frac{\sigma_{E,Y}}{E} = \frac{1}{N_b} \sum_{b=i}^{N_b} \frac{(E_b - \langle E \rangle)}{E_b} (Y_b - \langle Y \rangle) \end{array}$$

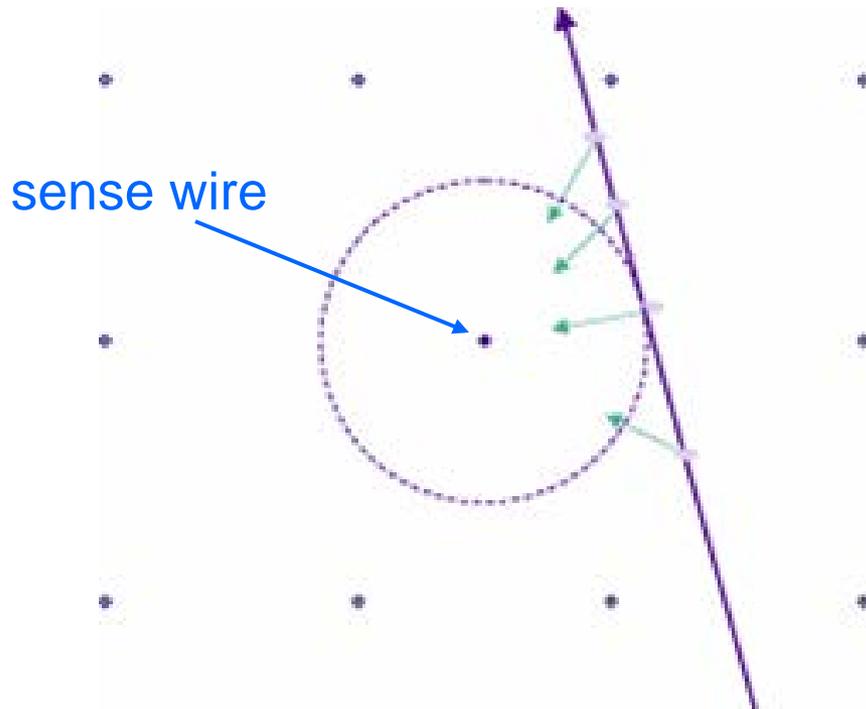
$$\left( \begin{array}{ccc} \sigma_E & \sigma_{E,\cos\theta} & \sigma_{E,\phi} \\ \sigma_{E,\cos\theta} & \sigma_{\cos\theta} & \sigma_{\cos\theta,\phi} \\ \sigma_{E,\phi} & \sigma_{\cos\theta,\phi} & \sigma_{\phi} \end{array} \right) \rightarrow \left( \begin{array}{ccc} 0.02778 & 2.91e-05 & -9.9e-06 \\ 2.91e-05 & 9.44e-03 & -5.37e-07 \\ -9.9e-06 & -5.37e-07 & 5.19e-03 \end{array} \right)$$

$$dE/dx$$

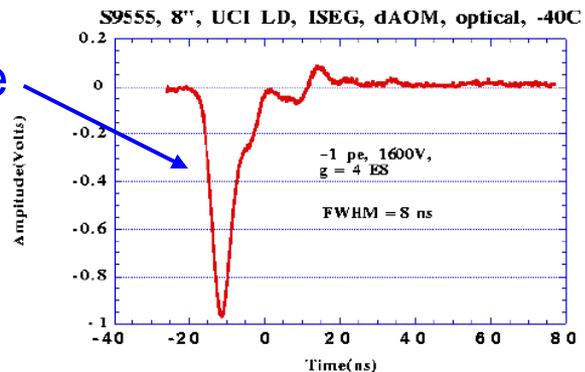
## MDC测量机制

- 测量信号丝上的**信号**
  - 时间 ( TDC )  
漂移时间 → 漂移距离 →  
径迹 → 动量
  - 电荷 ( ADC )  
正比于脉冲幅度

1. 电离和气体放大过程的统计涨落
2. 气体分子吸附、复合和扩散
3. 环境温度、气体压力
4. 电子学

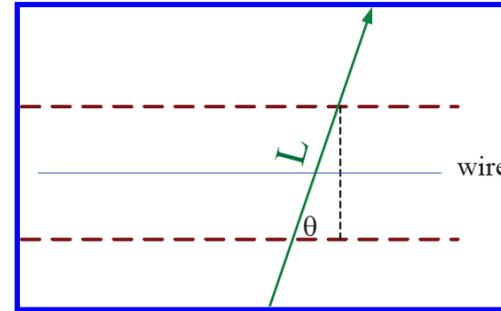


signal in  
sense wire



# 影响电荷Q的因素

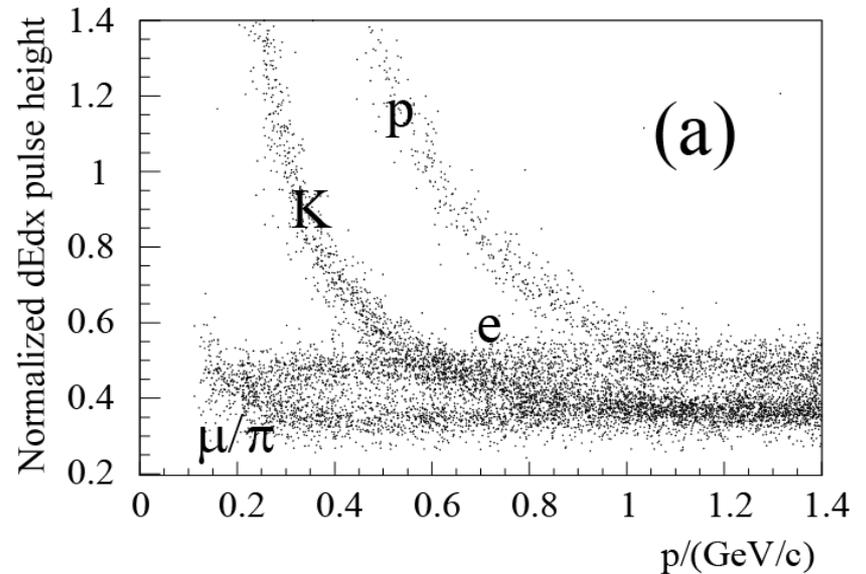
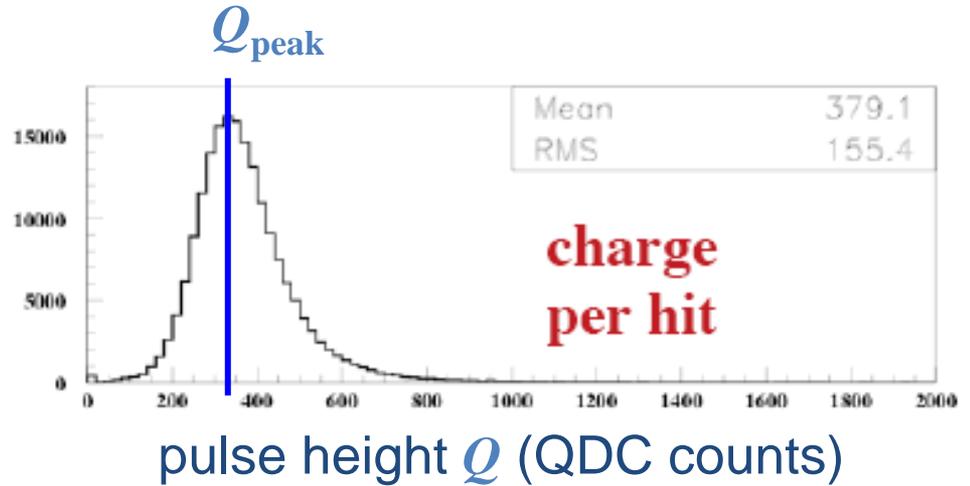
- 径迹长度：穿过单元时的取样长度不同



- 单丝增益和运行号（run号）增益（气体增益，不同的探测单元大小，电子学，高压，气压）
- 漂移室探测单元内电荷收集的非均一性
- 空间电荷效应

# $dE/dx$

- 大约30~32个离子对/cm
- 电子向丝漂移过程 (雪崩倍增)  $Q \propto \Delta E$
- 刻度：
  - 击中级别
  - 径迹级别
- 利用Monte Carlo 和真实数据的控制样本



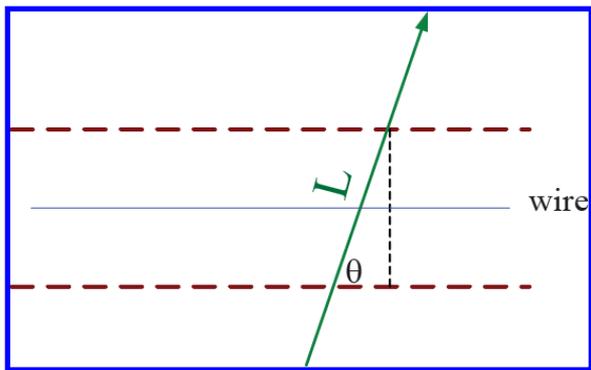
# “好击中” 选择条件（刻度重建）

- 击中质量：
  - 去掉明显不正常的测量值
  - 去掉距离探测单元中心太远，穿过边界的击中
  - 残差（径迹拟合-漂移时间）必须合理
- 径迹拟合挑选击中的不同条件
- 去掉那些穿过同一个探测单元的多径迹的击中

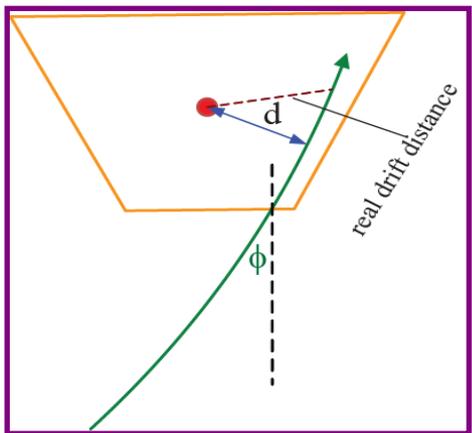
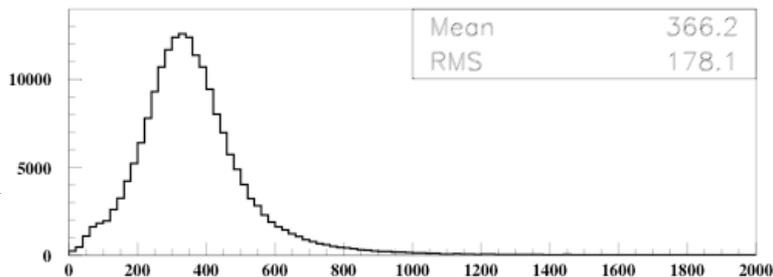
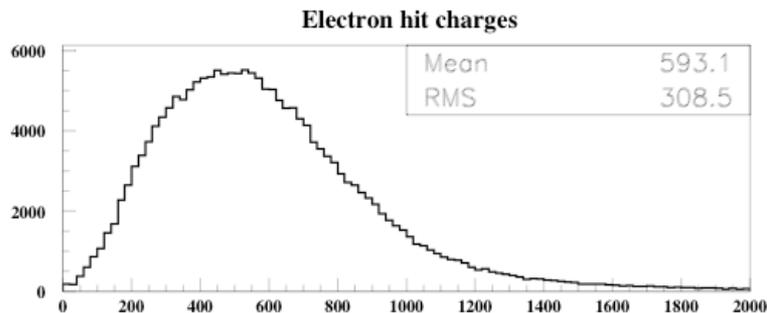
# 击中电荷量的径迹长度修正（重建）

r-z与r- $\phi$   
分别修正

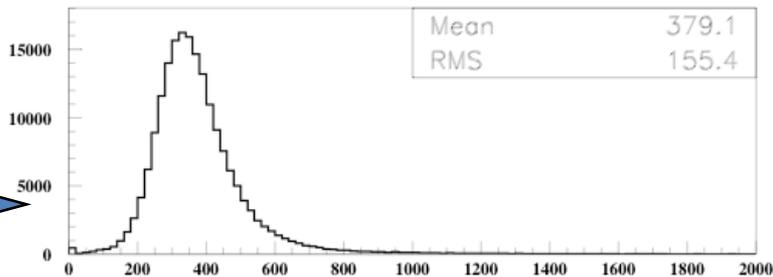
Raw charges



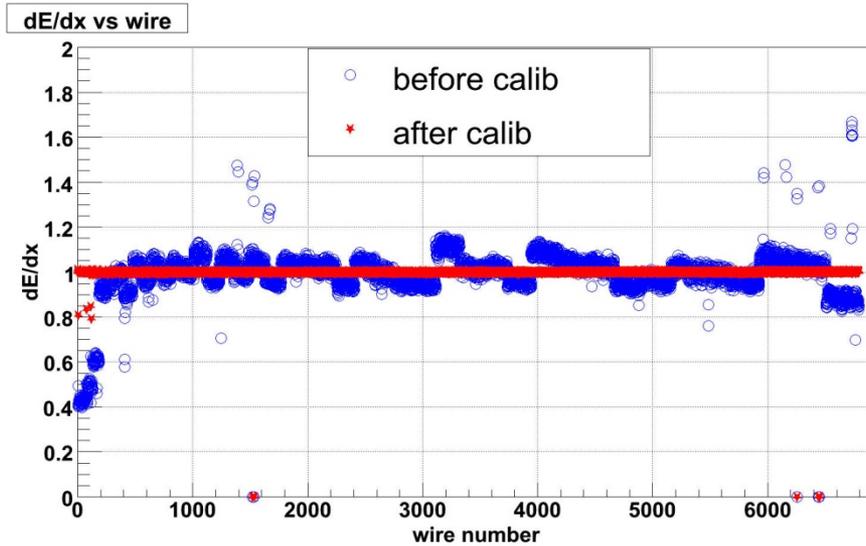
r-z修正



r- $\phi$ 修正

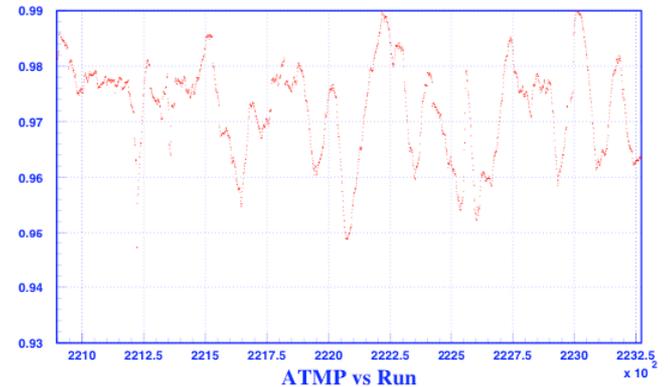
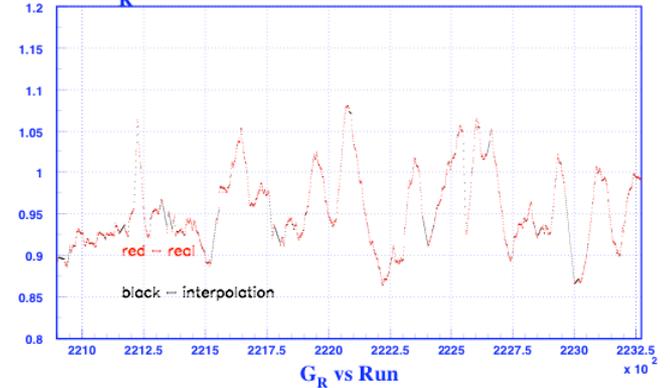


# 丝增益和run号增益



Wire gains:  
see super-layer structure  
in hits and gain

$G_R$  and ATMP for runs 220898-223271

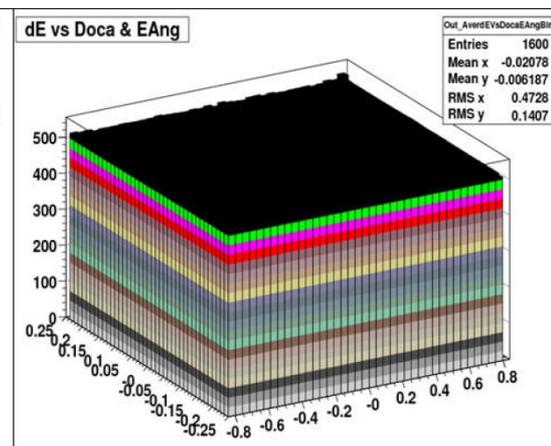
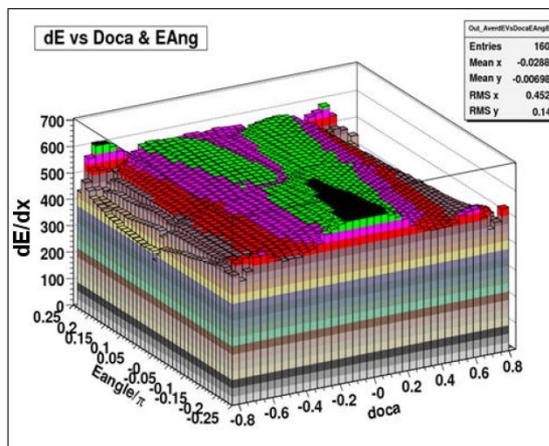
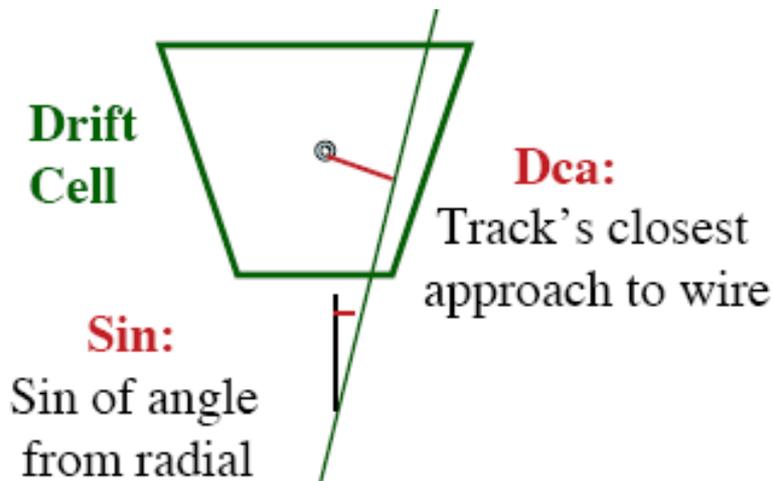


Run gains:  
see anti-correlation  
with atmospheric pressure

Calibration constants → database

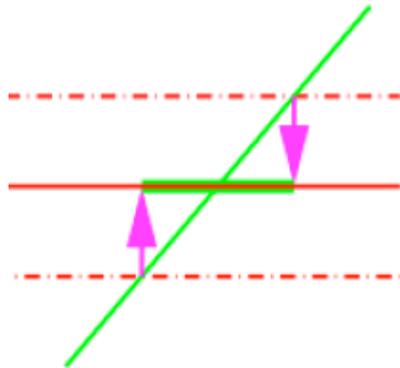
# Doca和入射角度联合修正

- 漂移室探测单元内电荷收集的非均匀性
- 径迹与信号丝在空间最近的距离 ( **D**istance of **C**losest **A**pproach **Doca** ) 和入射角度的“**Sin**” ( **DocaSin** )

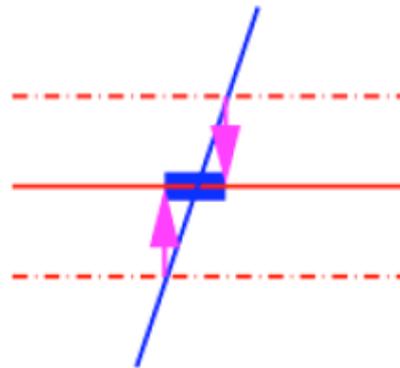


# 气体增益饱和（空间电荷效应）

- “离子鞘”产生的电场抵消了局部外加电场，限制了雪崩倍增过程的发展——空间电荷效应



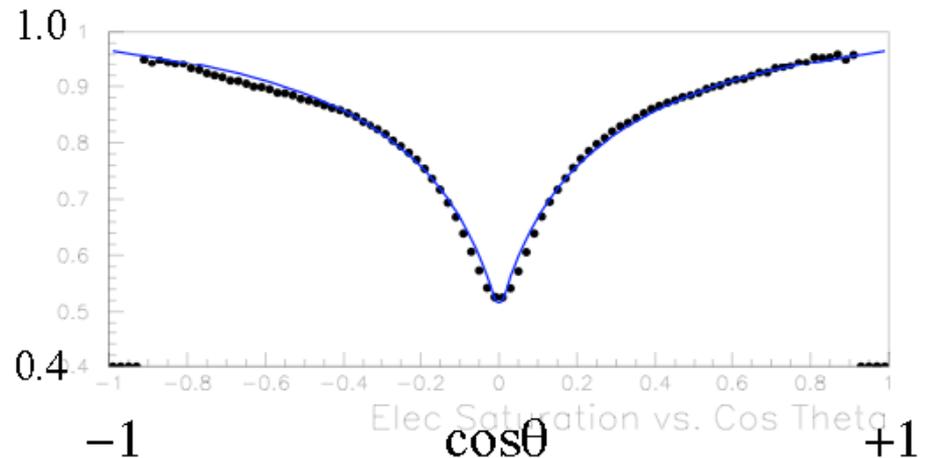
*Larger  $\cos\theta$ :  
less dense*



*Smaller  $\cos\theta$ :  
more dense*

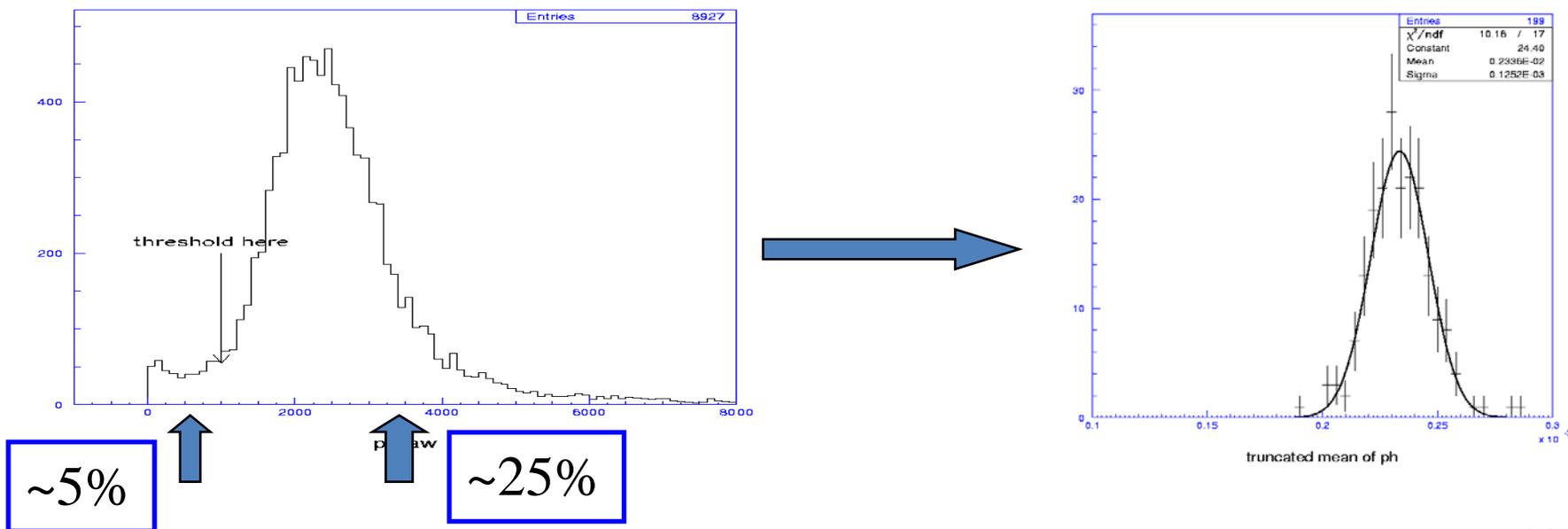
pulse height as a function of  $\cos\theta$   
(empirical  $TM \approx 0.1$ )

$$\frac{D}{|\cos\theta| + \delta}$$

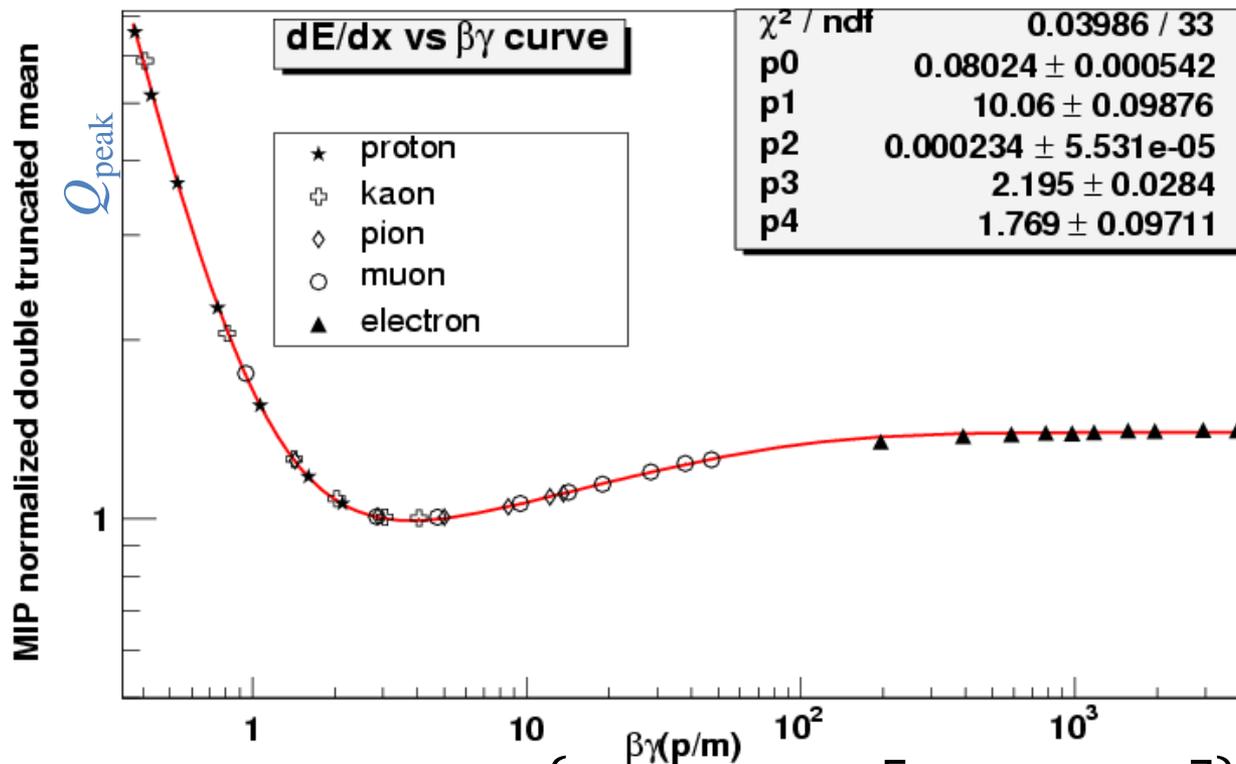


# 截断 ( Truncation: 击中级别 → 径迹级别 )

- 单个击中的不对称的Landau形状 → 高斯形状的径迹平均
- 低端5%的截断：去除噪声和本底
- 高端25%的截断：去除Landau尾巴 → 高斯形状的dEdx分布



# Bethe-Bloch 曲线



经验公式:

$$Q_{peak} = \frac{P_1}{\beta^{P_4}} \left\{ P_2 - \beta^{P_4} - \log \left[ P_3 + \left( \frac{1}{\beta\gamma} \right)^{P_5} \right] \right\}$$

基本思想

$dE/dx$  should depend only on  $\beta\gamma = p/m$

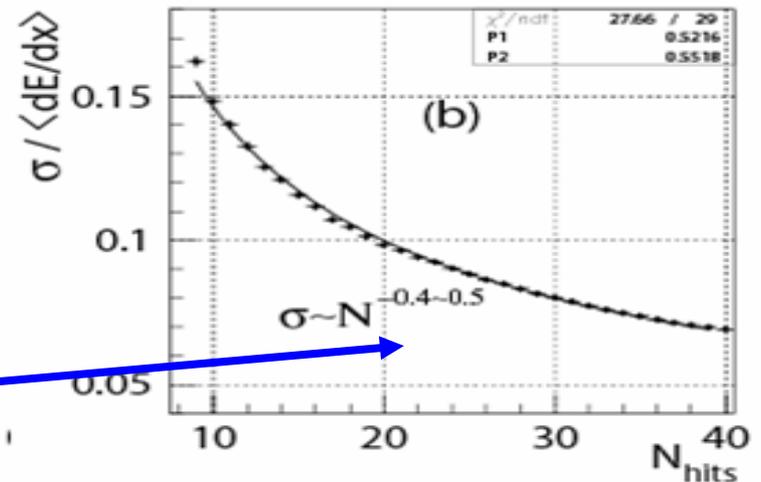
# $dE/dx$ 粒子分辨能力

- 预期值：利用经验公式得到的拟合中心值
- 测量值：对每根径迹所有层的截断平均
- 简单的预期分辨

$$\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{N_{hits}}}$$

- 真实情况

$$\sigma = \frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{mea} - \left(\frac{dE}{dx}\right)_{exp}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{exp}}$$

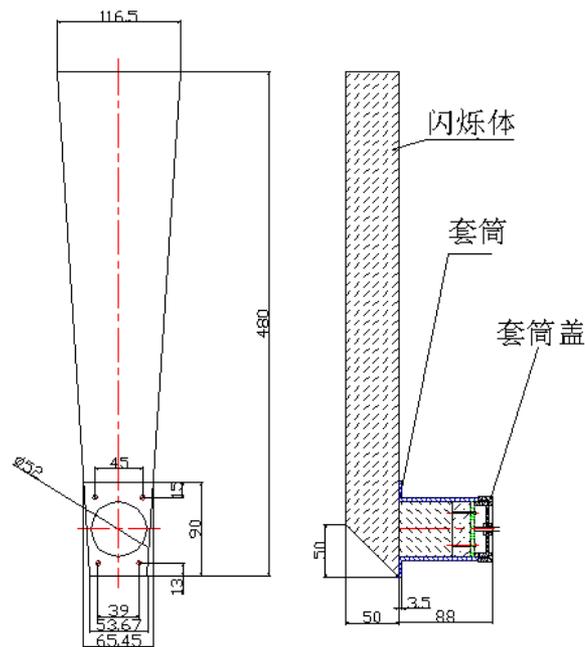
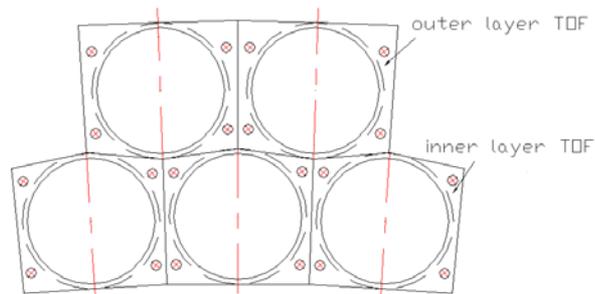
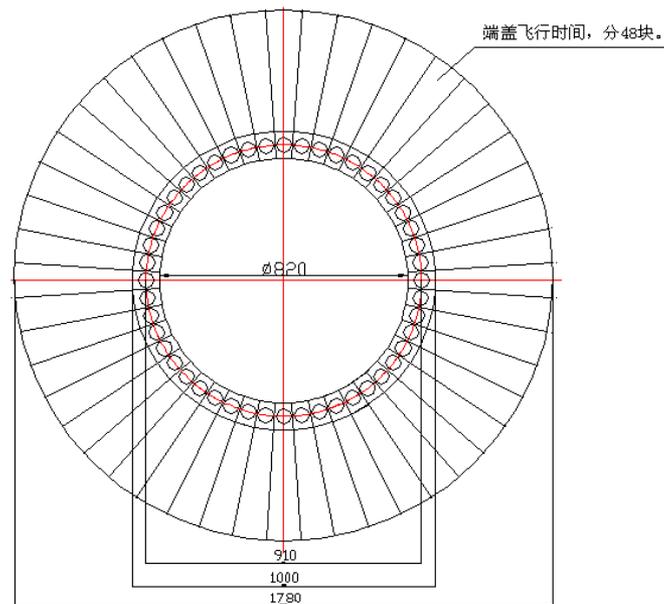
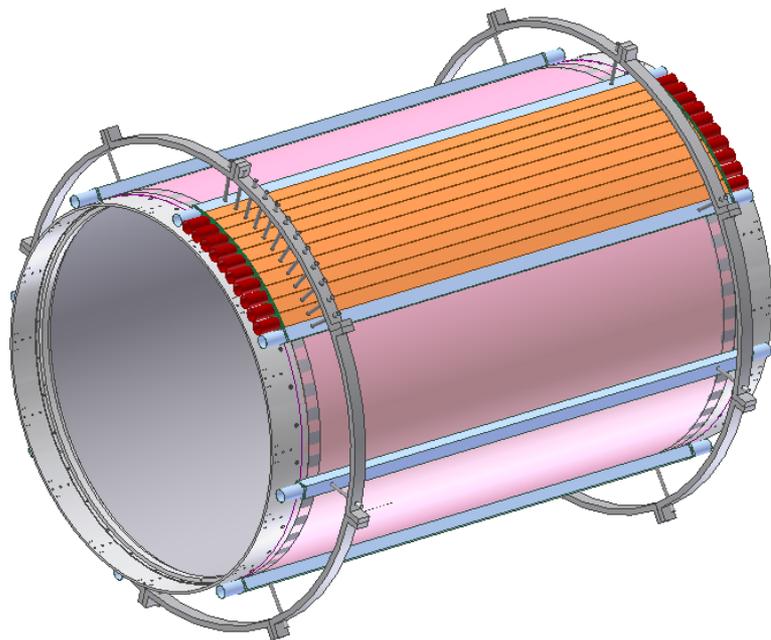


# TOF探测器模块

- 塑料闪烁体+光电倍增管
- 桶部双层：  
BC408
- 旧端盖单层：扇形BC404
- 新端盖：多气隙  
电阻性板室  
( MRPC )

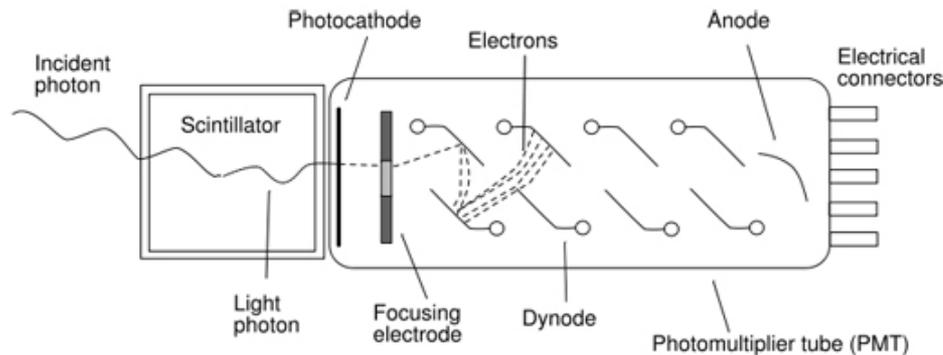
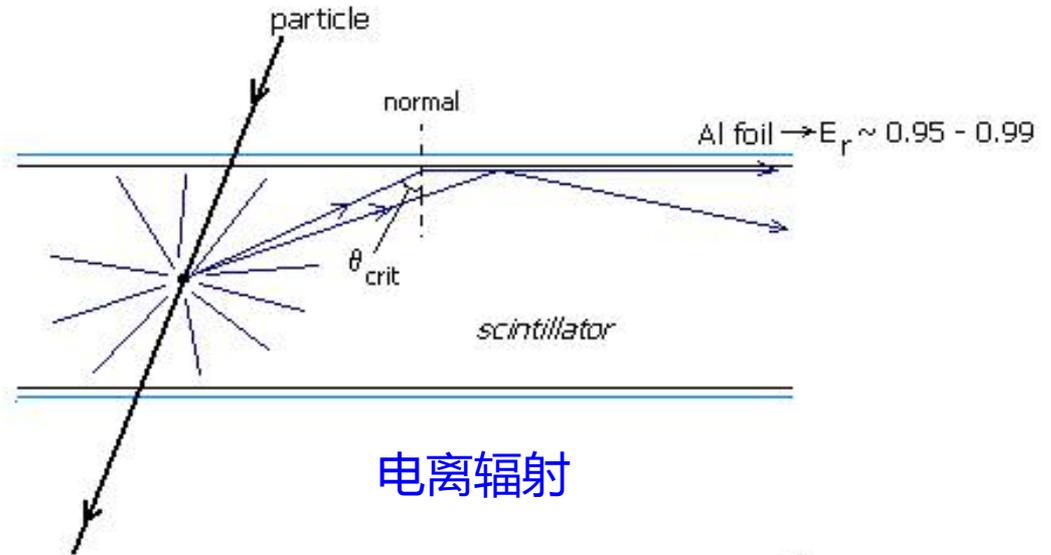


# TOF探测器结构

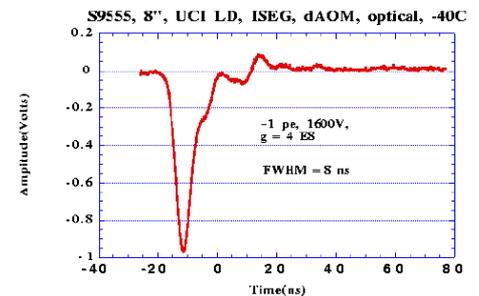


# 闪烁体与光电倍增管

- Scintillator & PMT
- 光电倍增管输出信号，测量量：
  - 时间 (TDC)
  - 脉冲幅度 (QTC)正比于产生的光子数目



PMT : PhotonMultiplier Tube



PMT 输出信号

# TOF 粒子鉴别的原理

- 利用径迹探测器得到的粒子的动量 $p$ ，飞行距离 $L$ ，和假设的粒子质量 $\rightarrow$ 预期时间

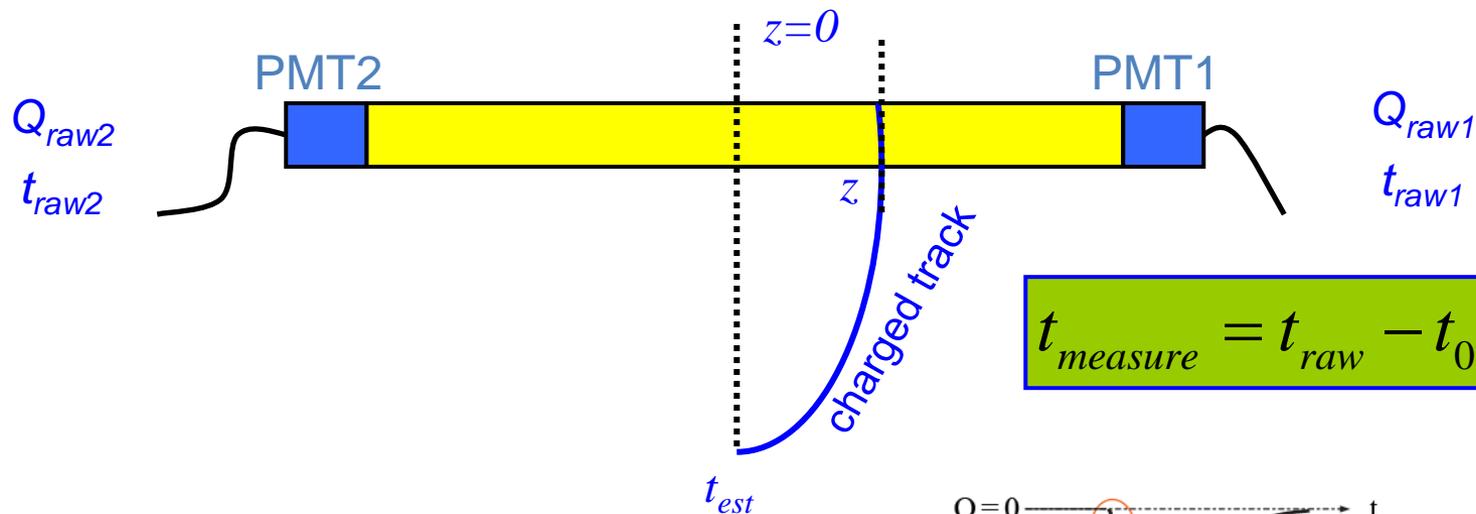
$$t_{predict}^i = \frac{L}{c \cdot \beta_i}, \quad \beta_i = \frac{|\vec{p}|c}{E_i}, \quad E_i = \sqrt{m_i^2 + p^2}$$

- 比较测量时间与预期时间差，实现粒子鉴别

$$\chi^2 = \frac{(t_{measure} - t_{predict}^i)^2}{\sigma^2} \quad \rightarrow \quad \text{正态分布}$$

- 在粒子动量，磁场大小和探测器几何确定的情况下，粒子鉴别能力由时间分辨决定。

# TOF时间刻度

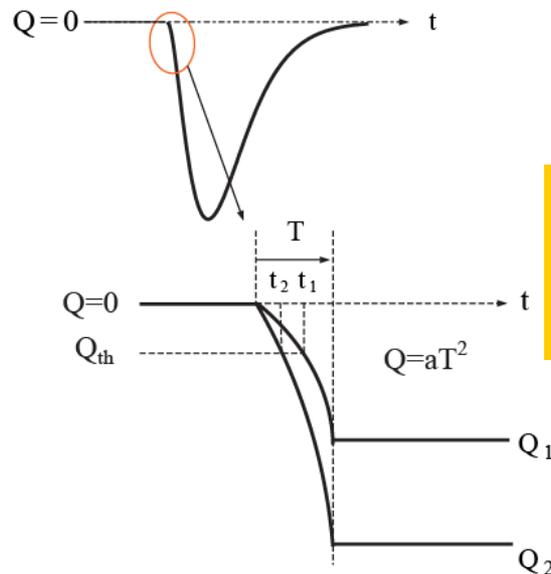


$$t_{measure} = t_{raw} - t_0 - t_{cor}$$

经验公式：

$$t_{cor} = P_0 + \frac{P_1 + P_2 \times z}{\sqrt{Q}} + \frac{P_3}{Q} + P_4 \times z + P_5 \times z^2 + P_6 \times z^3$$

$P_0 - P_6$ ：刻度常数



$$t \propto \frac{1}{\sqrt{Q}}$$

# TOF时间刻度

- 刻度常数

- $P_0$ : 时间延迟

- $P_1 - P_3$ : 时幅修正

- $P_4 - P_6$ : 等效速度的修正项

- 从MDC重建的径迹计算预期时间 (与测量时间无关)

$$t_{\text{predicted}} = L / \beta c, \quad L: \text{flight path}, \quad \beta = p / \sqrt{p^2 + m^2}$$

- 最小化 $\chi^2$ 方法

$$\chi^2(\text{counter, readout unit}) = \sum_{\text{events}} (t_{\text{measure}} - t_{\text{predicted}})^2$$

- $P_0 - P_6$ 的获得:

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial P_i} = 0, \quad i = 0, 1 \dots 6$$

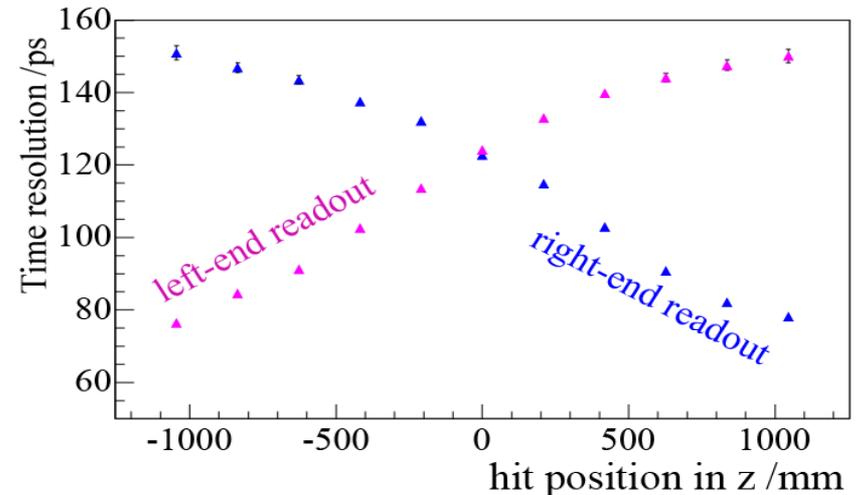
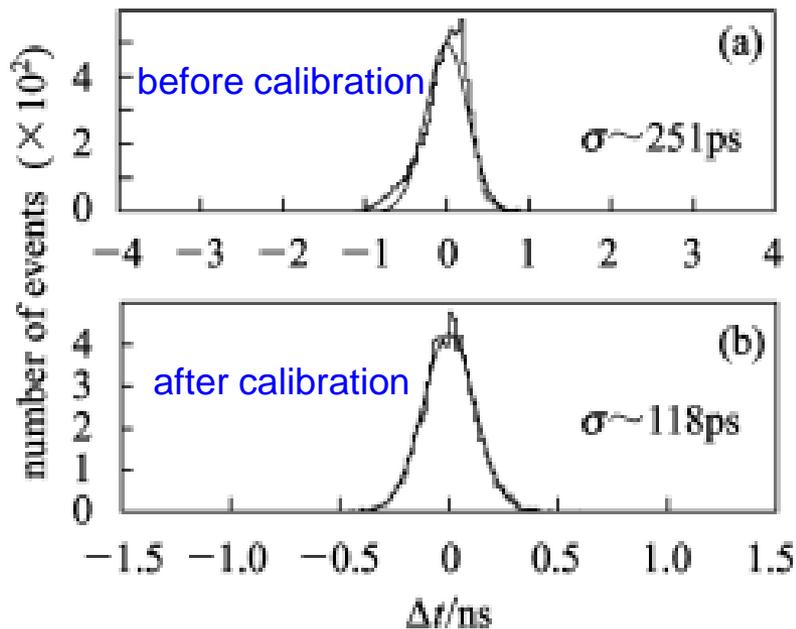
# TOF分辨 ( time resolution )

- 分辨的定义：  
测量时间—预期时间

$$\sigma^2 \equiv \frac{1}{n} \sum_{\text{events}} (t_{\text{measure}} - t_{\text{truth}})^2$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

- 刻度结果



resolution vs hit position for  
single PMT readout

# 合并测量结果

- 桶部双层TOF系统 → 一个带电粒子会击中1层或2层闪烁体（2个或者4个PMT输出信号）
  - 联合2 PMT的读出结果作为一层闪烁体的测量结果
  - 联合两层闪烁体的结果
  - 关联性（Correlation）必须考虑！
- 通常的合并方法（关联性）

$$\bar{t} = \sum_i w_i t_i, \quad \sum_i w_i = 1, \quad i : \text{each PMT readout}$$

# 测量的相关性

- 定义协方差矩阵

$$V_{ij} = \text{cov}[t_i, t_j] \equiv \frac{1}{n} \sum_{\text{events}} (t_{\text{measure}}^i - \overline{t_{\text{measure}}^i})(t_{\text{measure}}^j - \overline{t_{\text{measure}}^j})$$

$i, j$ : PMT readout

$$\Rightarrow \sigma_t^2 = \sum_{ij} w_i w_j V_{ij}, \quad w_i = \frac{\sum_k (V^{-1})_{ik}}{\sum_{jk} (V^{-1})_{jk}}$$

- 2PMT的情况:  $t_{\text{measure}}^1 = t_1 + t_c$ ,  $t_{\text{measure}}^2 = t_2 + t_c$

$$V = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_c^2 \\ \sigma_c^2 & \sigma_2^2 \end{pmatrix}$$

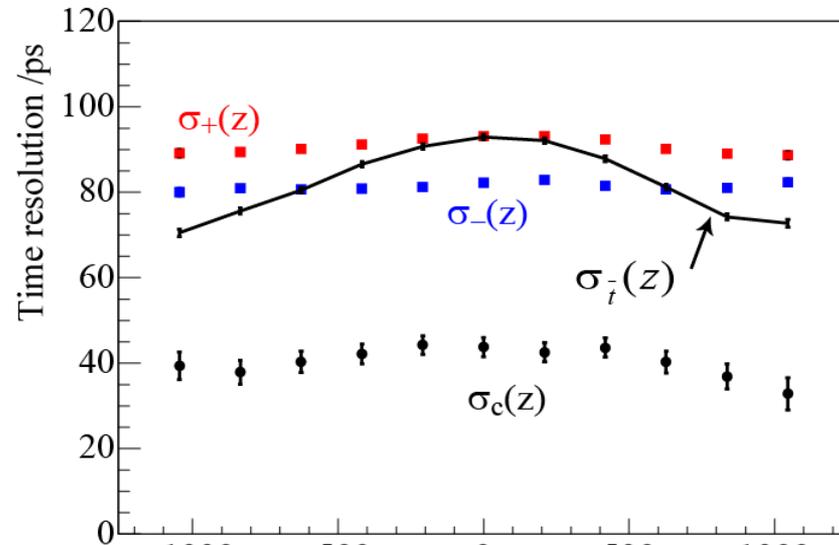
– 方便地得到:  $t_+ \equiv \frac{t_1 + t_2}{2}$ ,  $t_- \equiv \frac{t_1 - t_2}{2} \Rightarrow \sigma_c = \sqrt{\sigma_+^2 - \sigma_-^2}$

– 求解得到:  $w_1 = \frac{\sigma_2^2 - \sigma_c^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_c^2}$ ,  $w_2 = \frac{\sigma_1^2 - \sigma_c^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_c^2}$

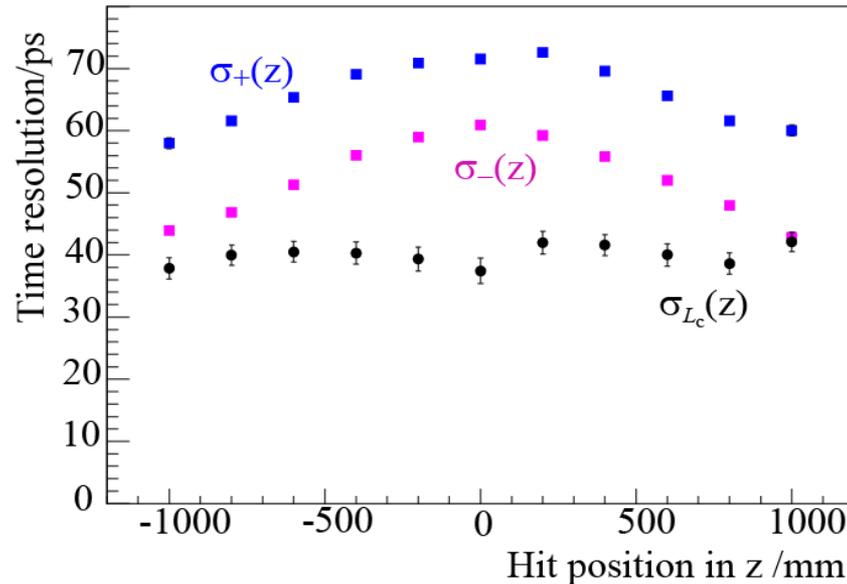
$$\sigma_t^2 = \frac{\sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2 - \sigma_c^4}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_c^2}$$

# 两步联合的关联性

$\sigma \approx 40ps$  大致是一个常数，描述了来自束团长度和对撞时间的不确定性的贡献



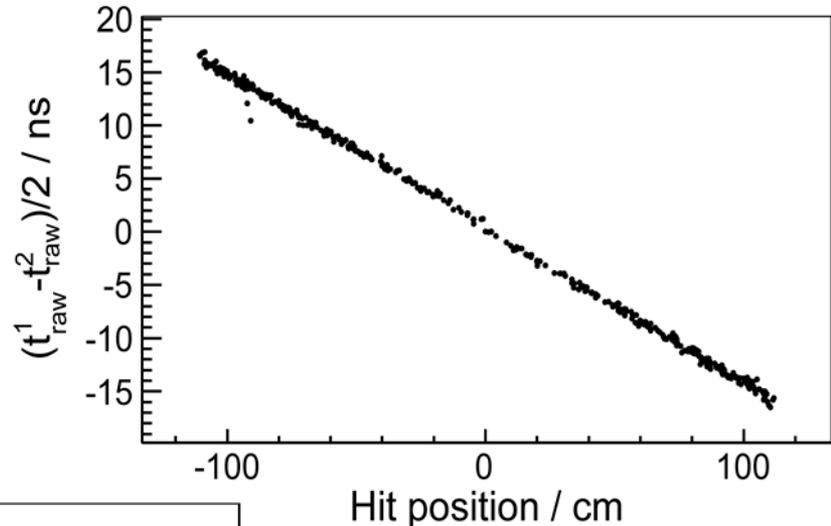
一层闪烁体两端测量时间的关联性



双层闪烁体测量时间的关联性

# 有效速度刻度和衰减长度刻度

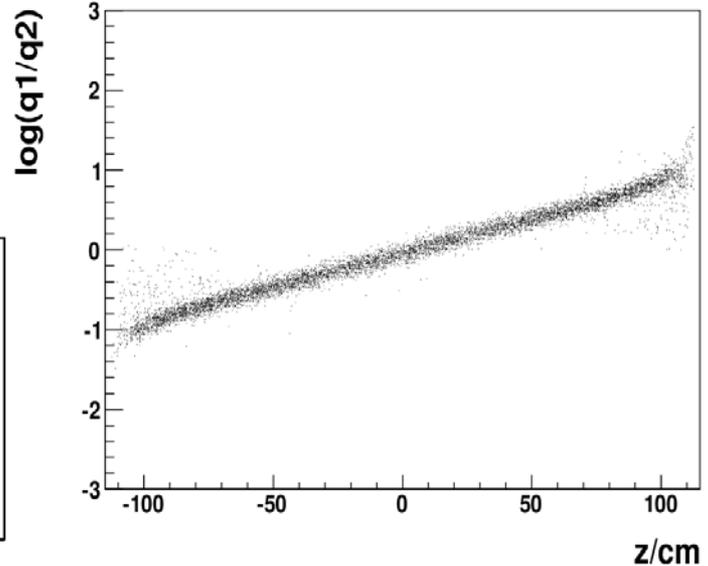
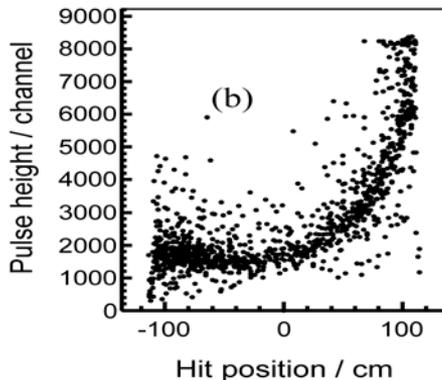
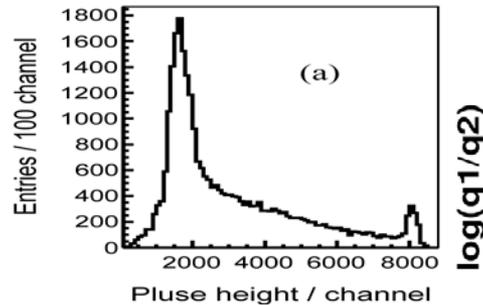
- 闪烁体中光传输的有效速度刻度
- 闪烁体衰减长度的刻度



$$Q_1 = A_1 \times \frac{Q_0}{\sin \theta} \times \exp\left(-\frac{l/2 + z}{L_{atten}}\right)$$

$$Q_2 = A_2 \times \frac{Q_0}{\sin \theta} \times \exp\left(-\frac{l/2 - z}{L_{atten}}\right)$$

$$\log\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right) = \log\left(\frac{A_1}{A_2}\right) - \frac{2 \cdot z}{L_{atten}}$$

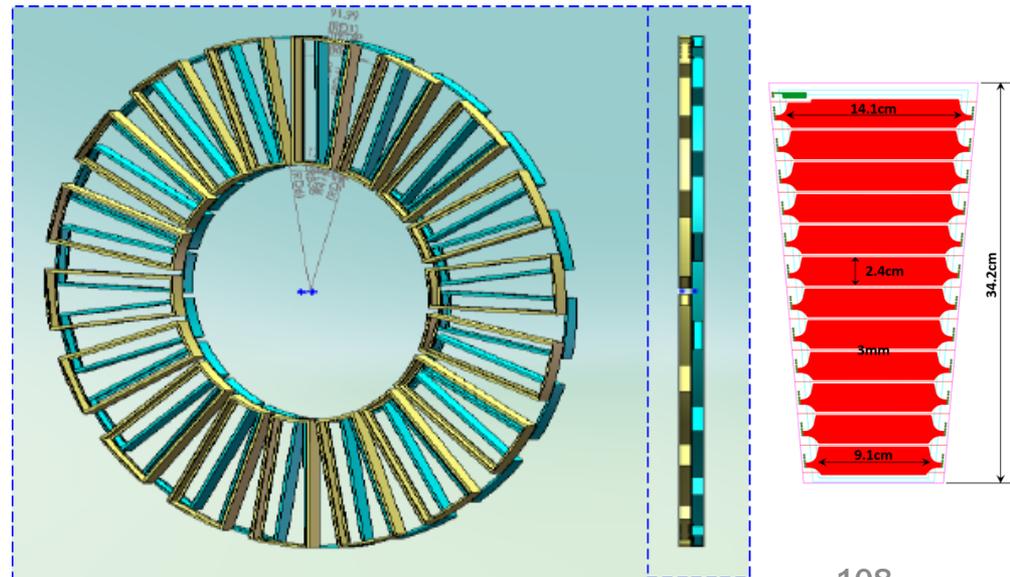
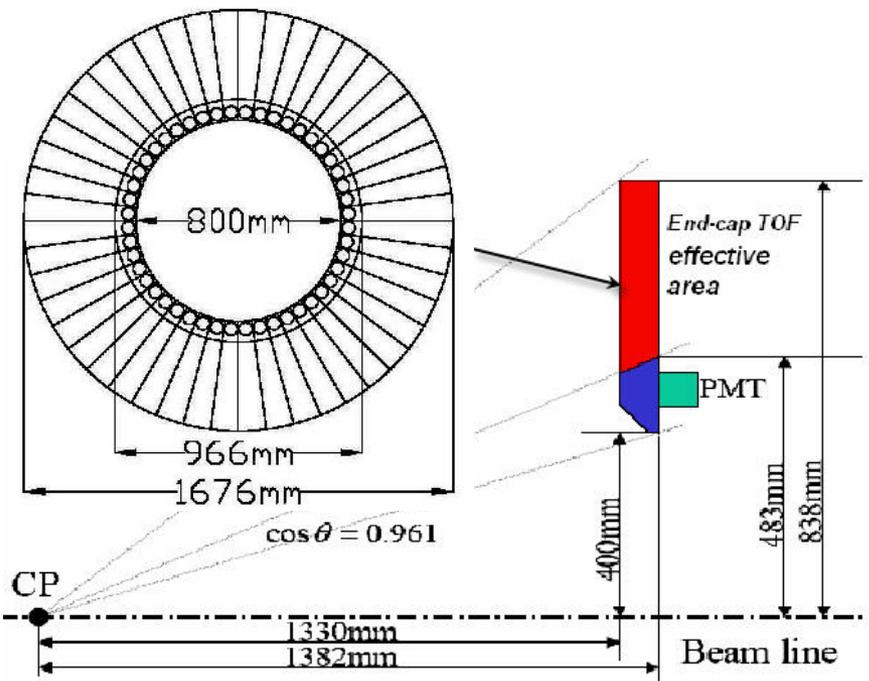
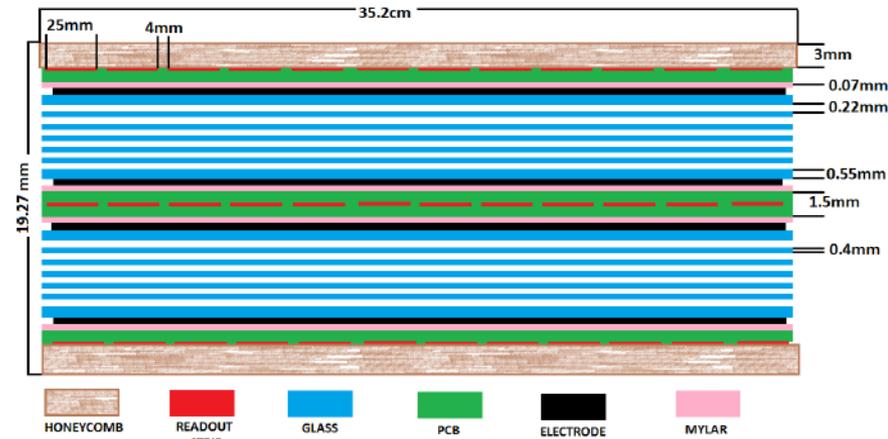


# 新的端盖MRPC-TOF

**OLD** **NEW**

Detector Modules	9672
Electronics Channel	96 $72 \times 12 \times 2 = 1728$
Time Resolution	138ps < 80~100ps

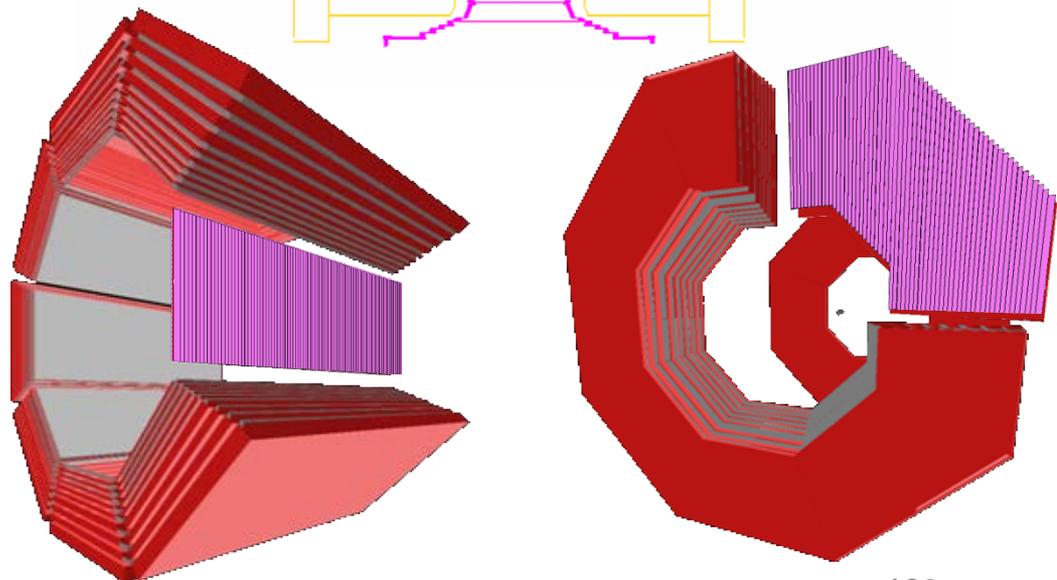
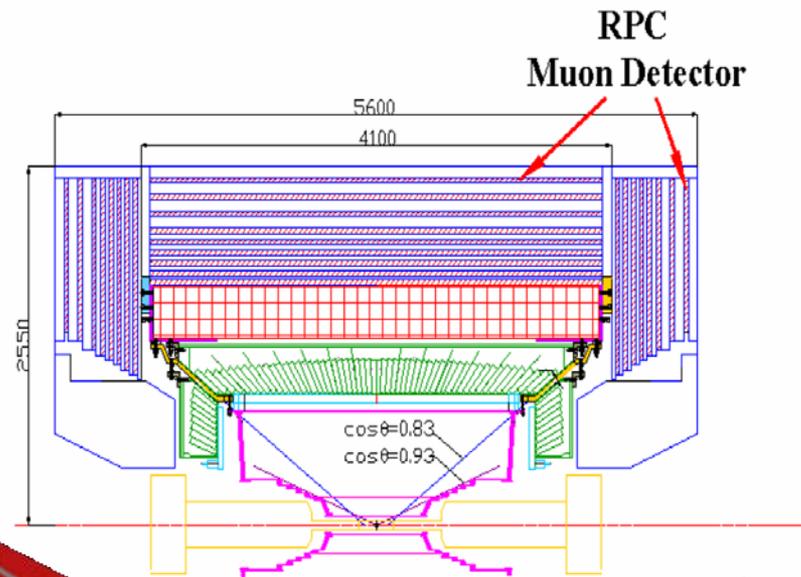
Scintillator MRPC



# $\mu$ 子探测器 ( MUC ) 结构

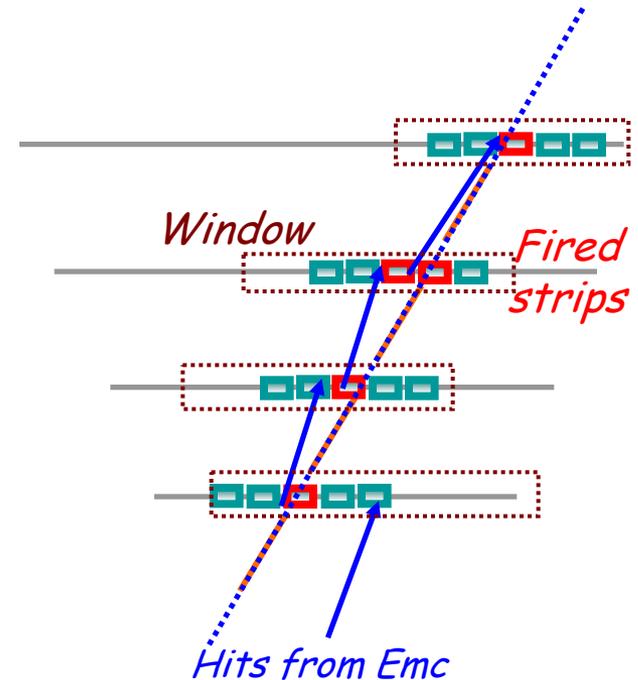
- 流光模式的阻性板室是灵敏探测器，吸收体是钨铁
- 桶部+端盖
- 阻性板室
  - 桶部：9层
  - 端盖：8层
- 一维读出条

4096 ( EC ) + 5056 ( BR )  
= 9152 strips



# MUC重建

- 击中信息→径迹：方向，位置，穿透深度等
- 重建步骤：几何构建，径迹寻找，径迹拟合，径迹参量计算
- 重建算法包括三种：
  - 外推重建：漂移室径迹做种子
  - 自重建：MUC击中做种子
  - 极点重建：EMC 或MUC击中联合对撞点外推，中性粒子



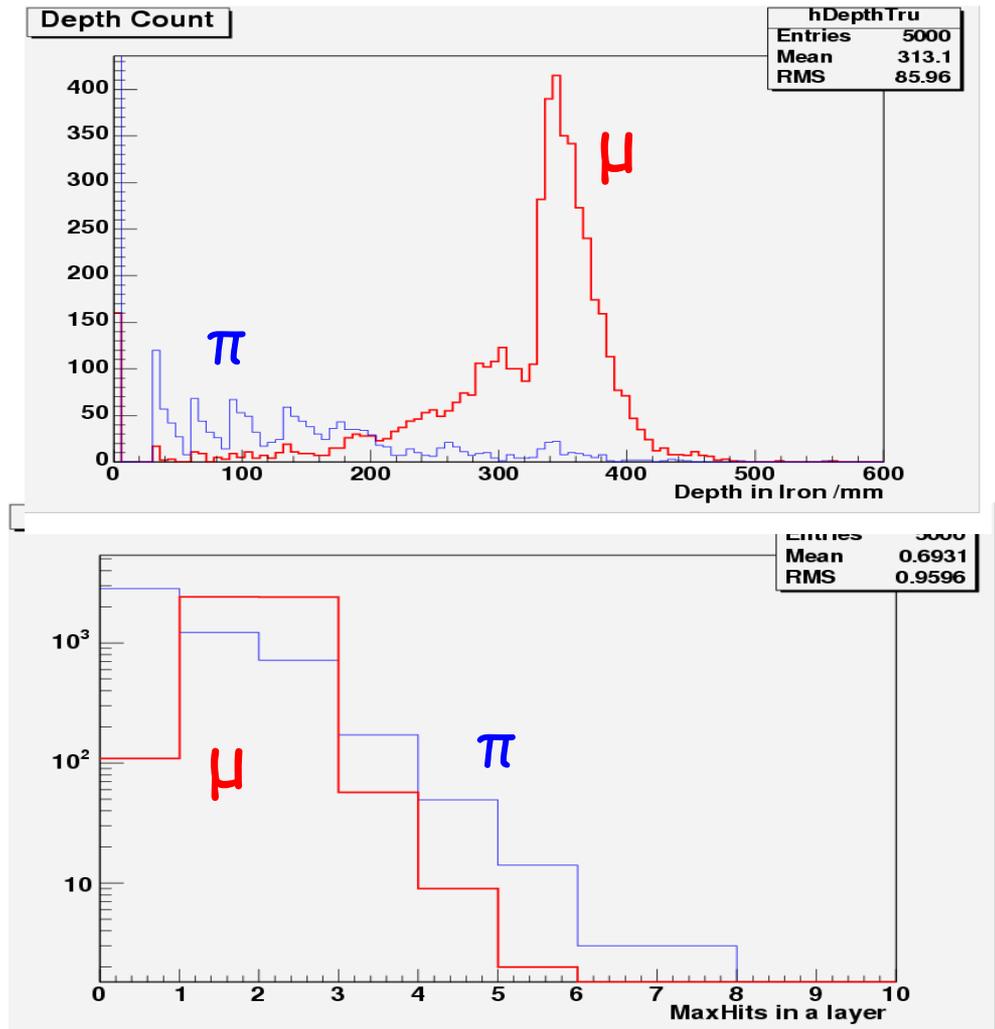
# $\mu/\pi$ 鉴别

- 输入参数：

1. 动量
2. 极角 $\theta$
3.  $\phi$
4. 径迹的入射深度
5. 一层包括的最大击中数
6. 径迹外推与第一层着火读出条的匹配
7. 径迹外推与MUC重建径迹的匹配
8. MUC径迹的 $\chi^2$
9.  $\Delta\phi$  (径迹的弯曲角)

- 算法：

神经网络 ( Artificial Neural Network ANN )



# 小结

	<b>MDC</b>	<b>MDC</b>	<b>EMC</b>
<b>Exps.</b>	<b>Spatial resolution</b>	<b>dE/dx resolution</b>	<b>Energy resolution</b>
<b>CLEO<sub>c</sub></b>	<b>110 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>5%</b>	<b>2.2-2.4 %</b>
<b>Babar</b>	<b>125 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>7%</b>	<b>2.67 %</b>
<b>Belle</b>	<b>130 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>5.6%</b>	<b>2.2 %</b>
<b>BESIII</b>	<b>115 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>&lt;5% (Bhabha)</b>	<b>2.4%</b>

	<b>TOF</b>
<b>Exps.</b>	<b>Time resolution</b>
<b>CDFII</b>	<b>100 ps</b>
<b>Belle</b>	<b>90 ps</b>
<b>BESIII</b>	<b>68 ps (BTOF) 60 ps (ETOF)</b>

- 探测器的性能与实验物理目标的实现密切相关
- 刻度与重建过程是不断深入了解和挖掘探测器和电子学本身固有潜力的过程