

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

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)

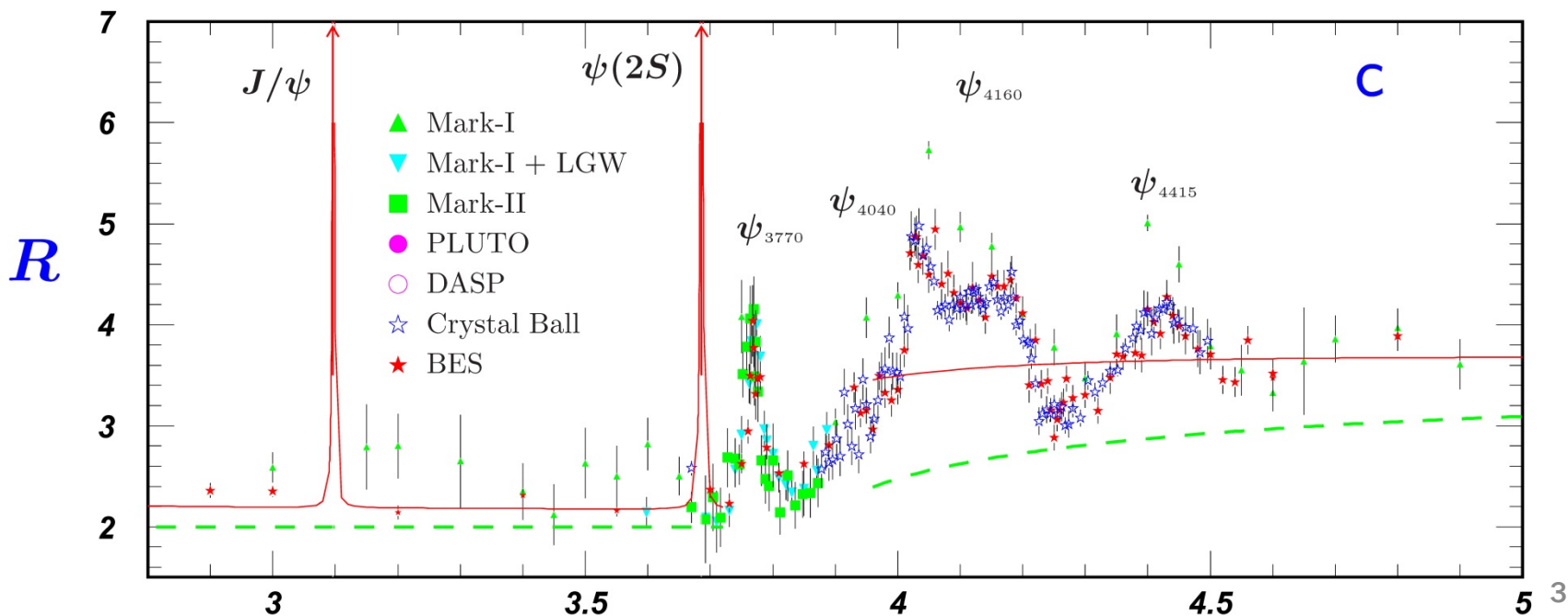
$$L_{peak} = 1.0 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

• 2009-至今 (BEPCII)

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

BEPC能区

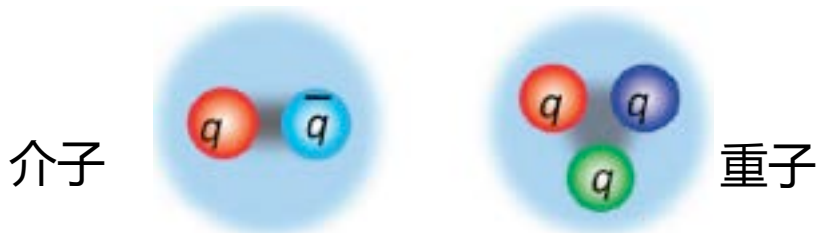
- 丰富的粒子/共振态：粲偶素和粲介子
- 近阈产生特性（成对产生 τ ， D ， D_S ，.....）
- 微扰QCD和非微扰QCD
- 新型强子态能区：胶球，混合态，多夸克态



新型强子态

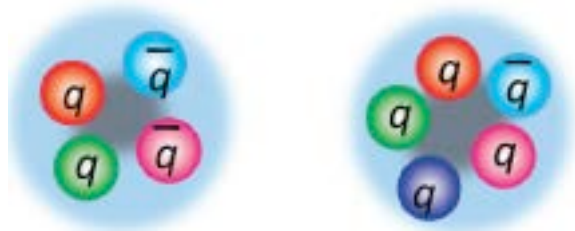
- 普通强子由2或3夸克组成：

夸克模型：

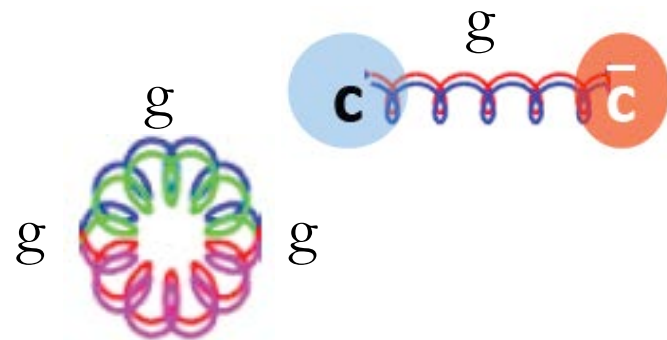


- QCD预言新型强子态的存在：

– 多夸克态：夸克数 ≥ 4



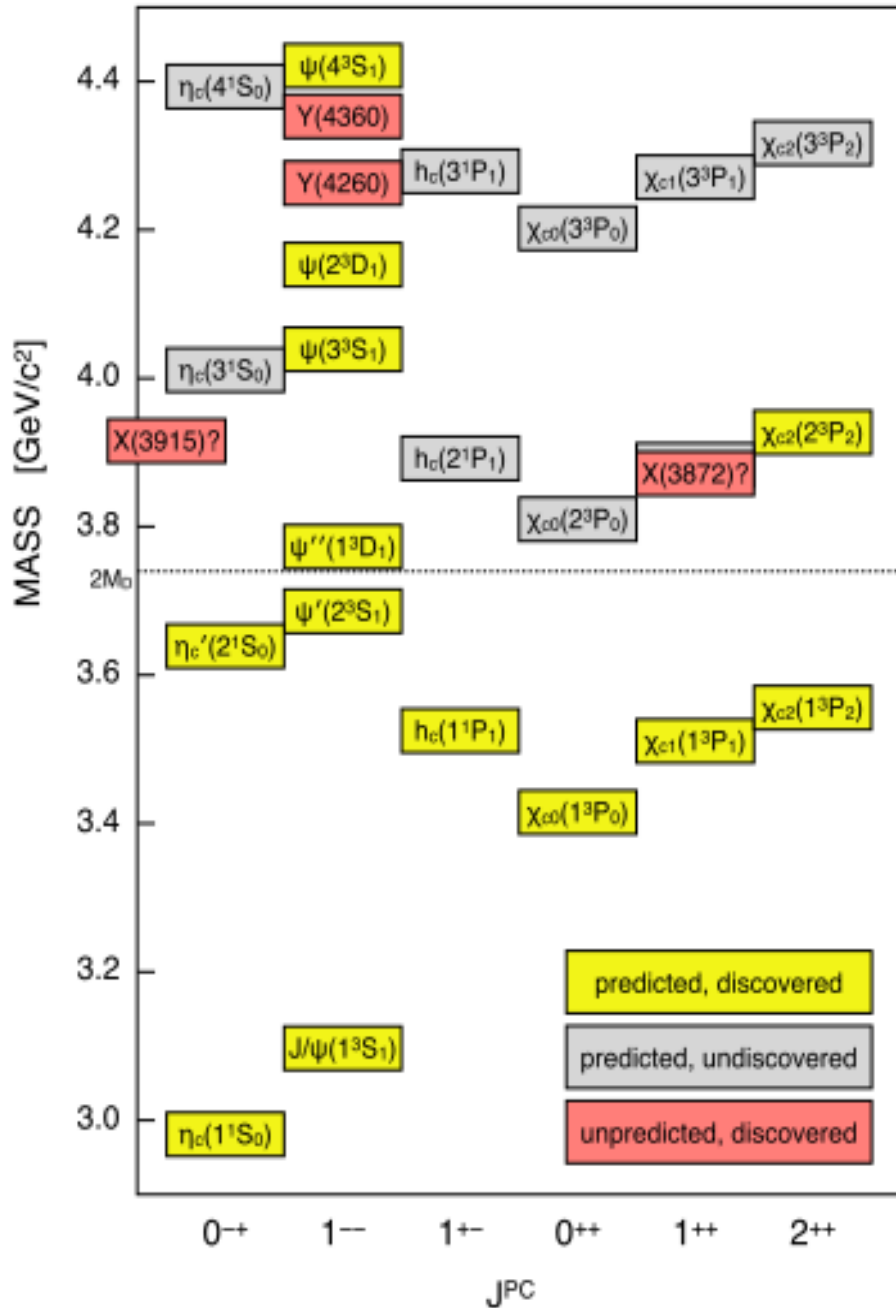
– 胶子球： gg , ggg ,



实验上还未确认新型强子态的存在！

(类) 粲偶素谱现状

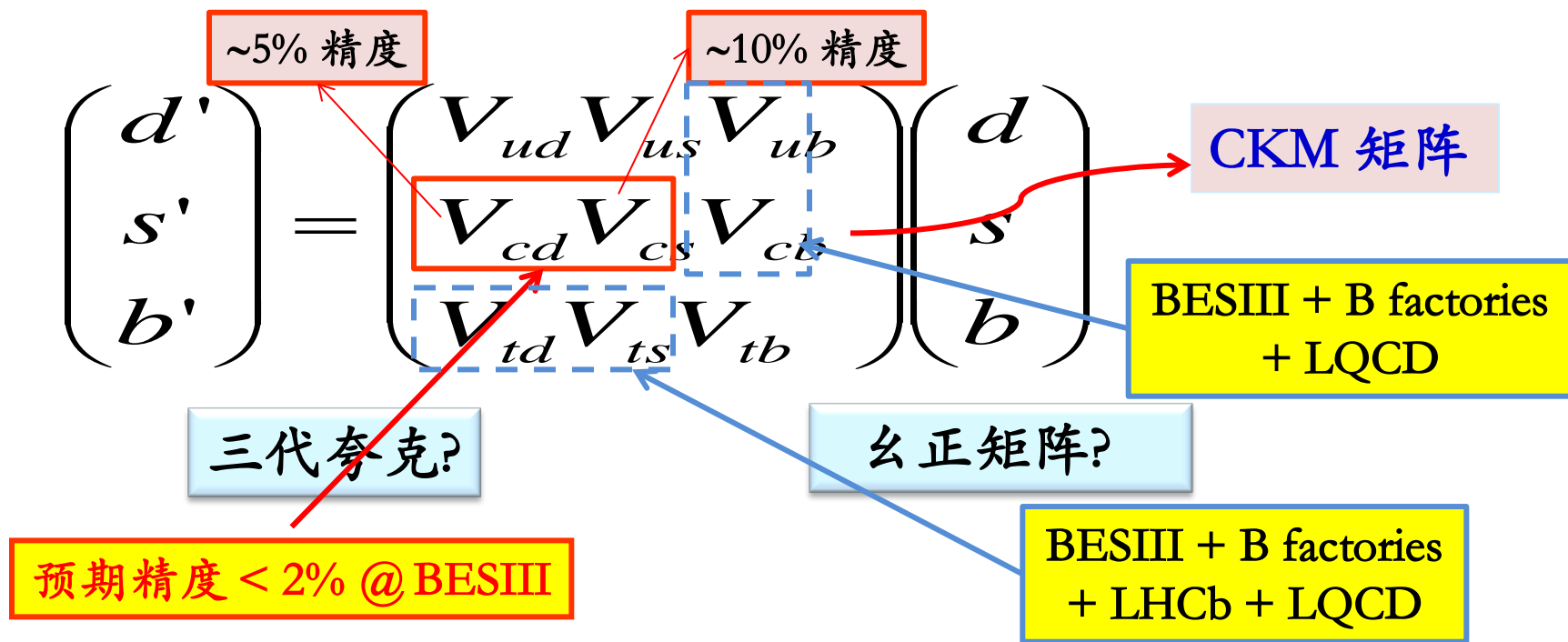
- 在DDbar阈下：
理论预言的粲偶素态在实验上都被观测到
- 在DDbar阈上：
许多预言的态没被发现；
发现许多未预期的态



- | | | |
|---------|-----------|---------|
| 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

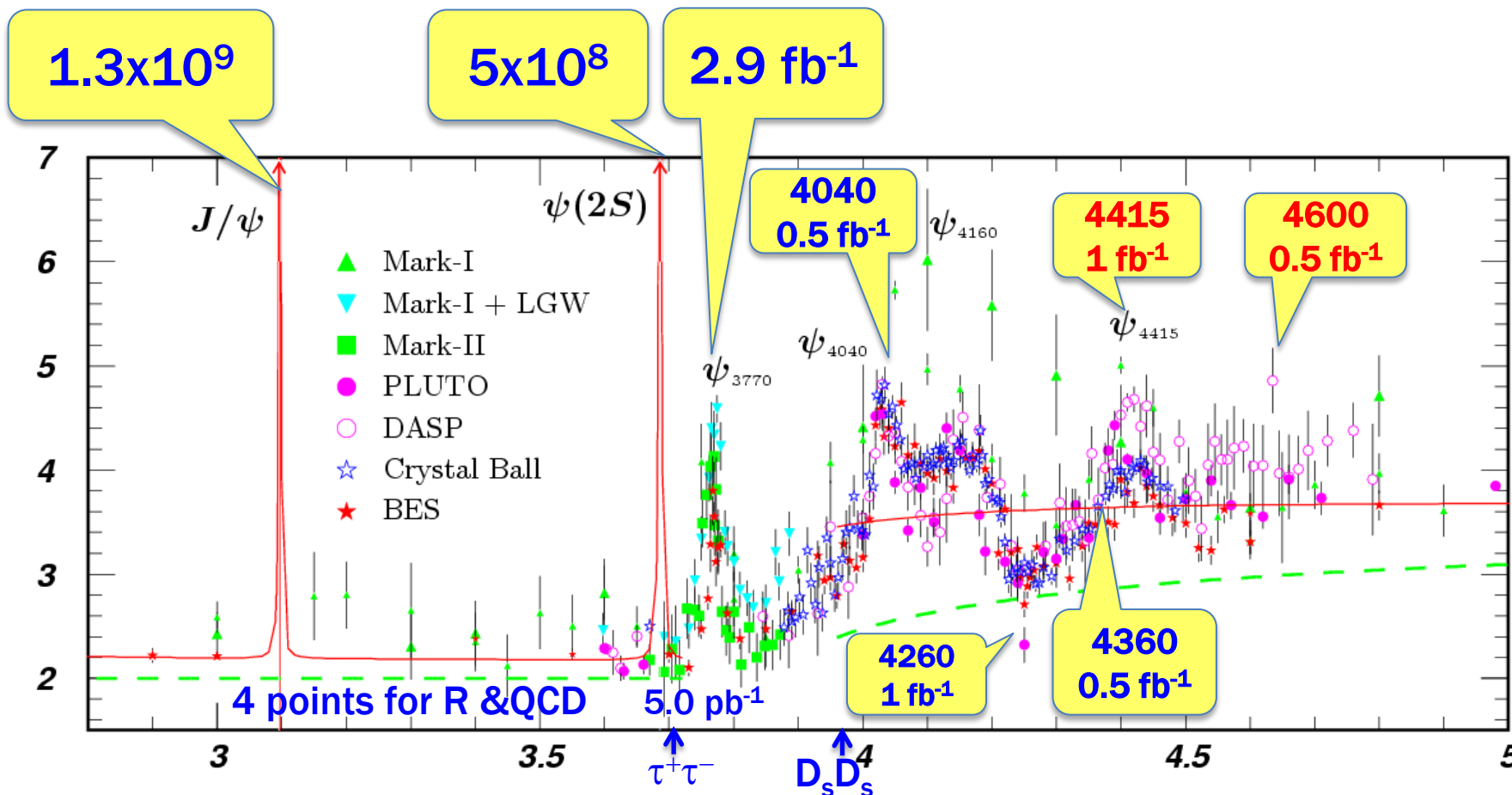
CKM矩阵元是标准模型的基本参数，描述由于弱相互作用引起的夸克场的混合。



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？

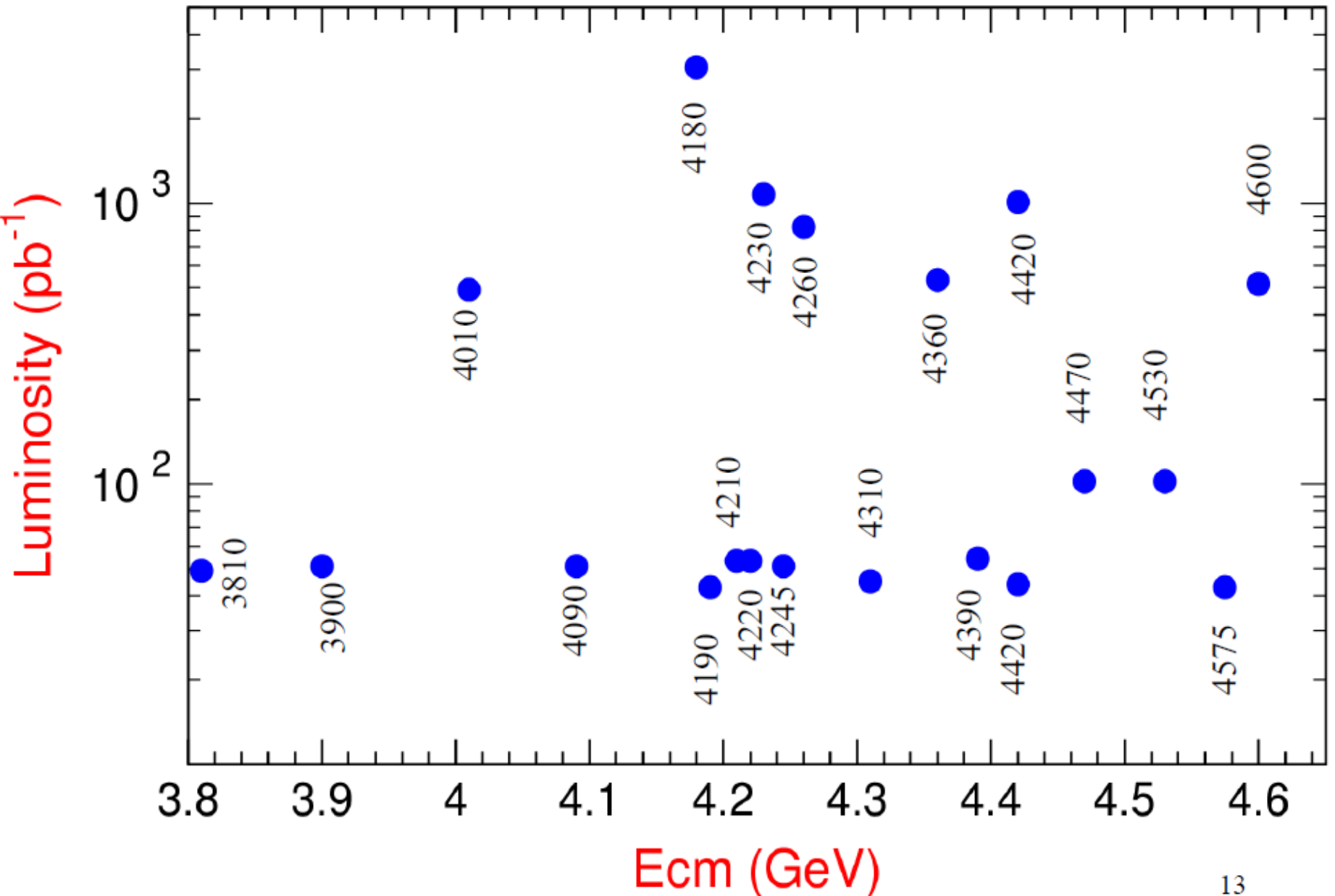
BESIII数据样本

R



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

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



BESIII探测器

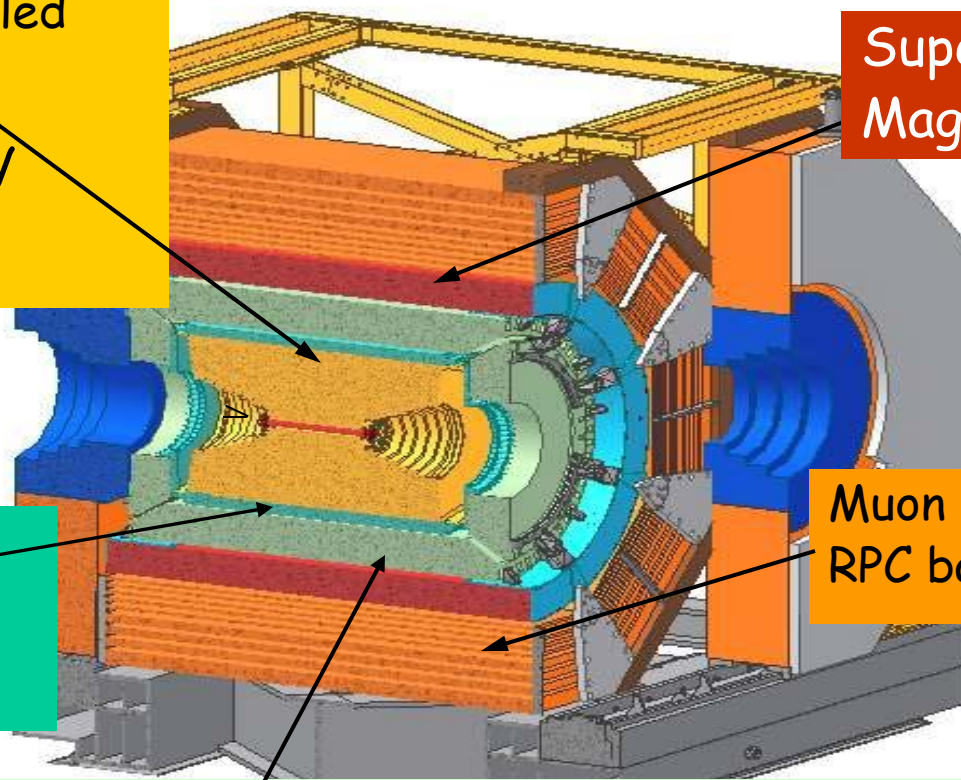
Main Drift Chamber (MDC):

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

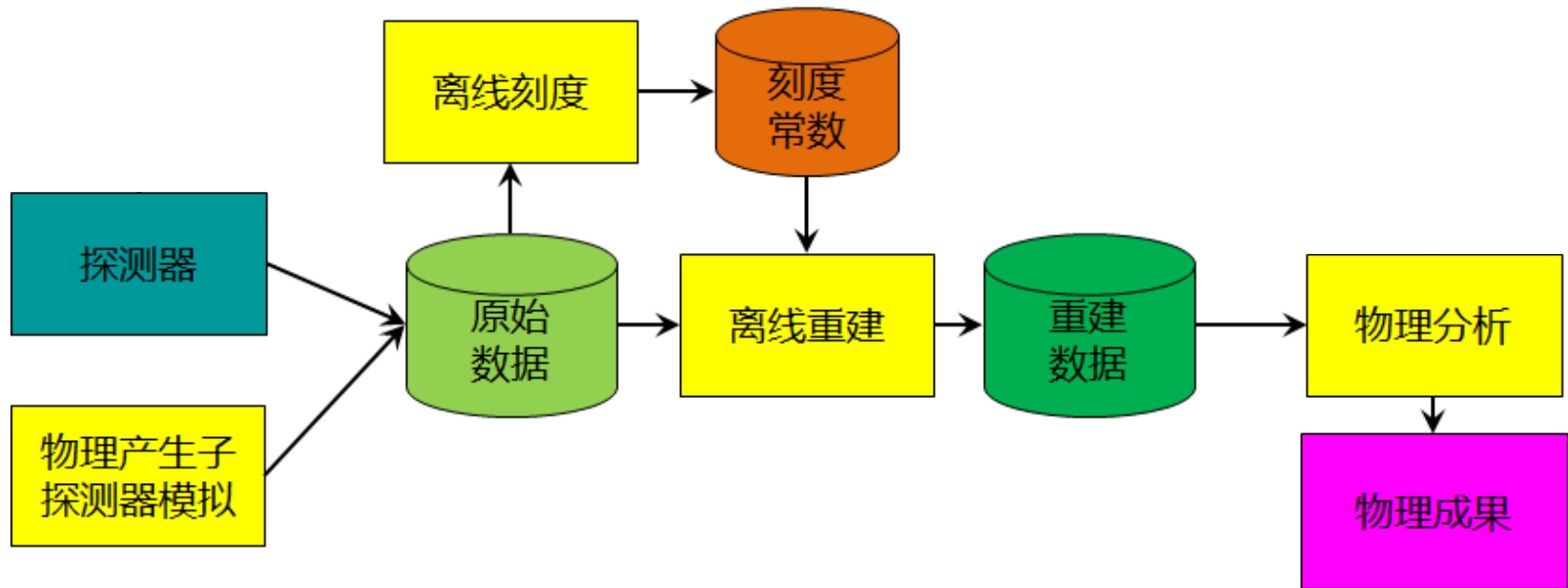
CsI crystal array

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

BESIII探测器的总体设计

- 物理目标： τ -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、 μ 子、质子、 π 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



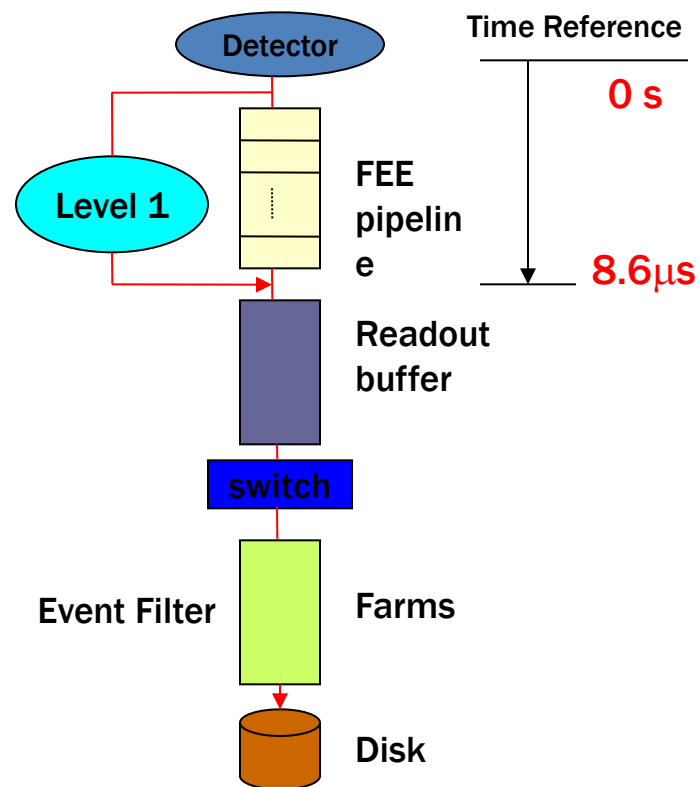
- **原始数据**：探测器电子学信号的时间和幅度信息
- **重建数据**：粒子的动量、能量和运动方向等物理量

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。

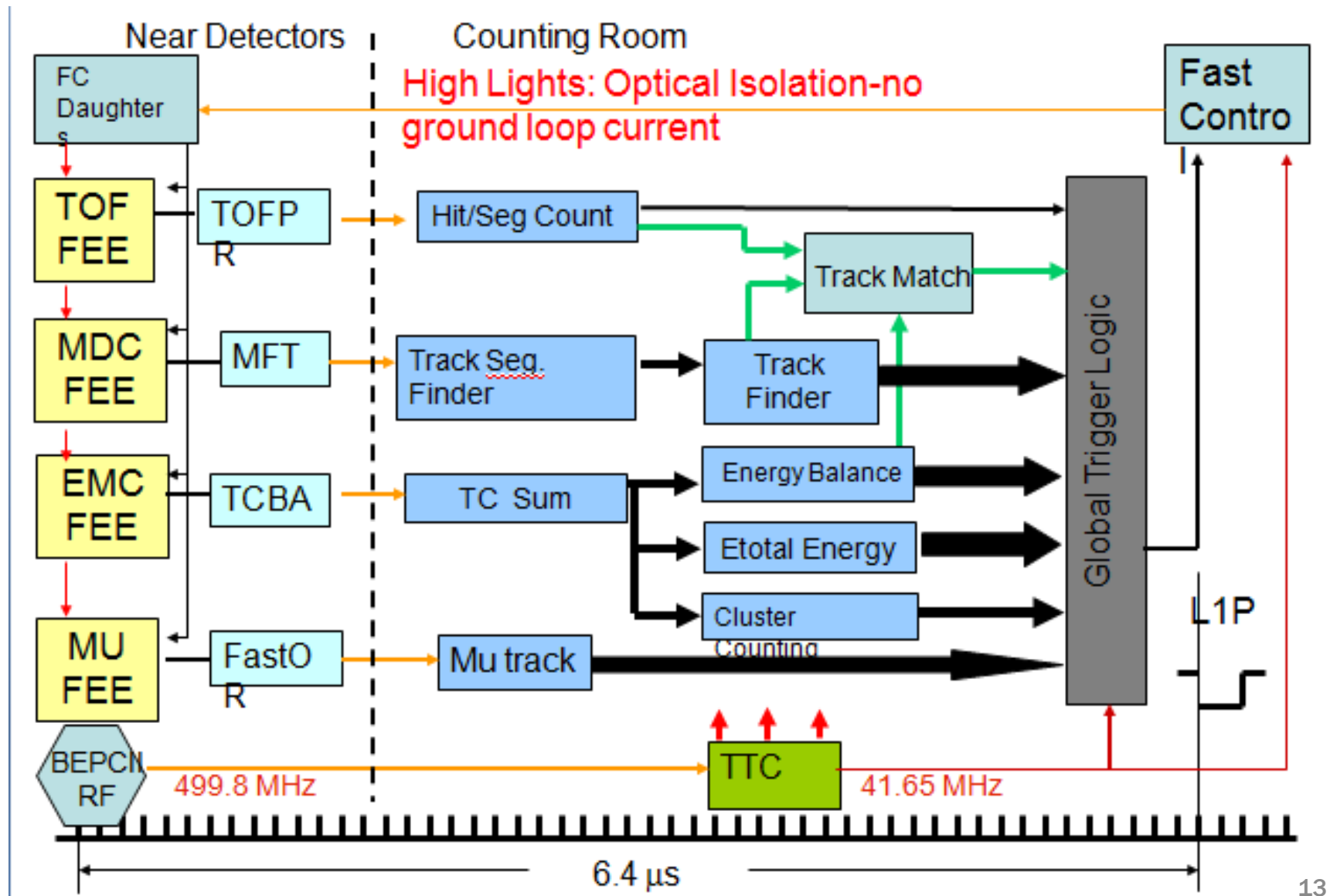
BESIII触发判选系统

- 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

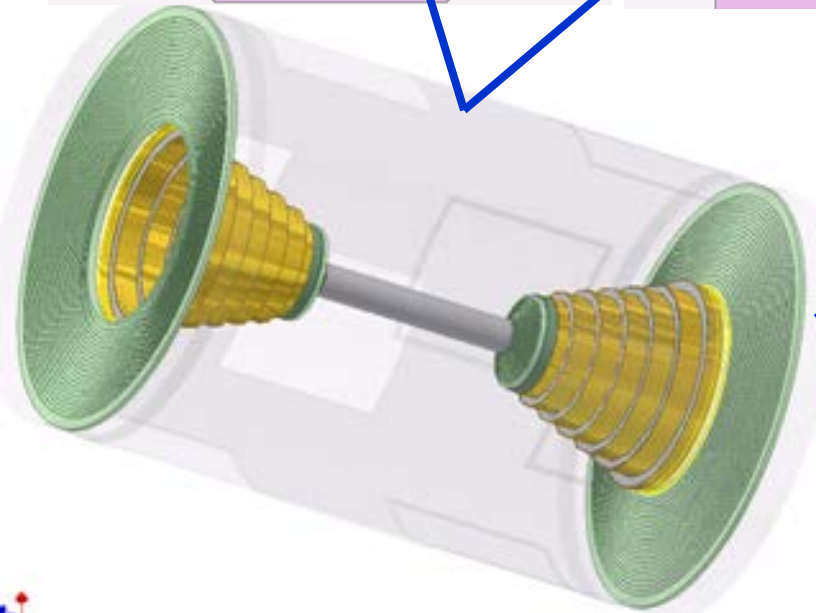
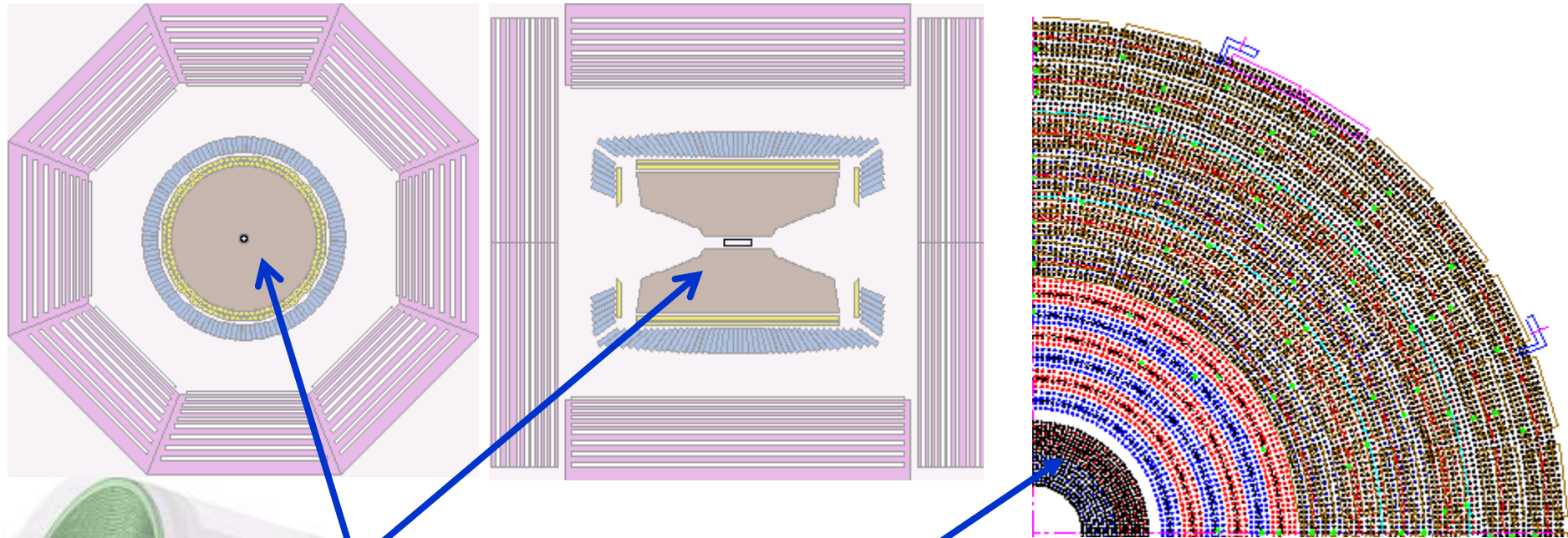
Detector	Trigger Condition	Numbering in GTL(00 – 47)	Comments
TOF 6	ETOF_BB	16	Endcap TOF Back to Back
	BTOF_BB	17	Barrel TOF Back to Back
	NETOF.GE.2	18	Endcap TOF hits number ≥ 2
	NETOF.GE.1	19	Endcap TOF hits number ≥ 1
	NBTOF.GE.2	20	Barrel TOF hits number ≥ 2
	NBTOF.GE.1	21	Barrel TOF hits number ≥ 1
	NTOF.GE.1	22	TOF hits number ≥ 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 ≥ 2
	NStrk.GE.1	41	Short Tracks number ≥ 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 ≥ 2
	NLtrk.GE.1	45	Long Tracks number ≥ 1
	NITrk.GE.2	46	Inner Tracks number ≥ 2
NITrk.GE.1	47	Inner Tracks number ≥ 1	
EMC 16	NClus.GE.1	00	Number of Clusters ≥ 1
	NClus.GE.2	01	Number of Clusters ≥ 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

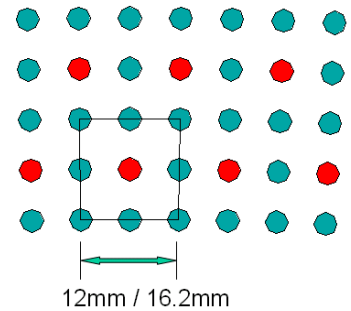
物理取数的触发表

			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

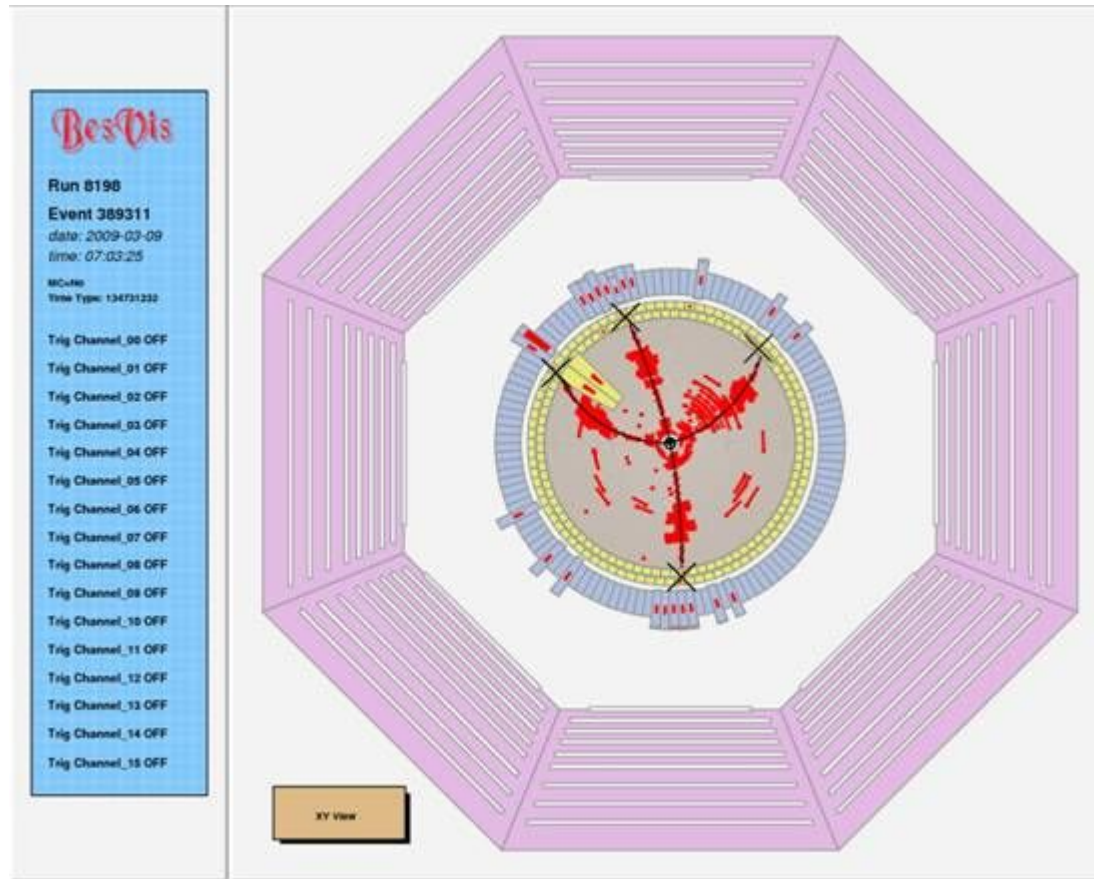


- 43 layers (24S+19A)
- 6796 sense wires
- $\sigma_{XY} = 130\mu m$
- $\sigma(dE/dx) \approx 6\sim 7\%$
- $\frac{\Delta P_t}{P_t} = 0.5\%(1GeV)$



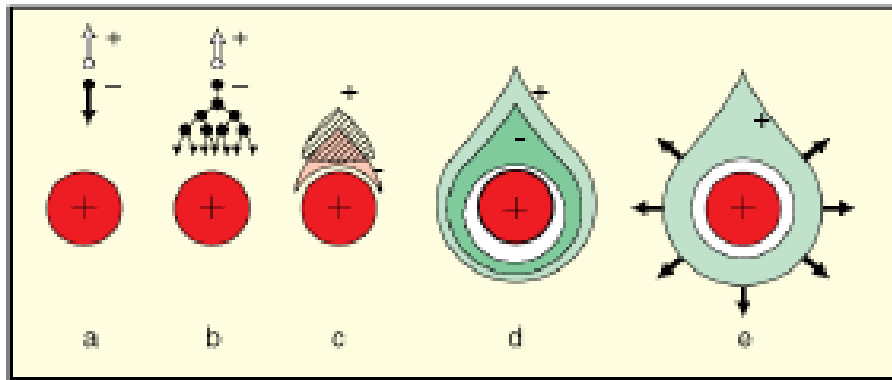
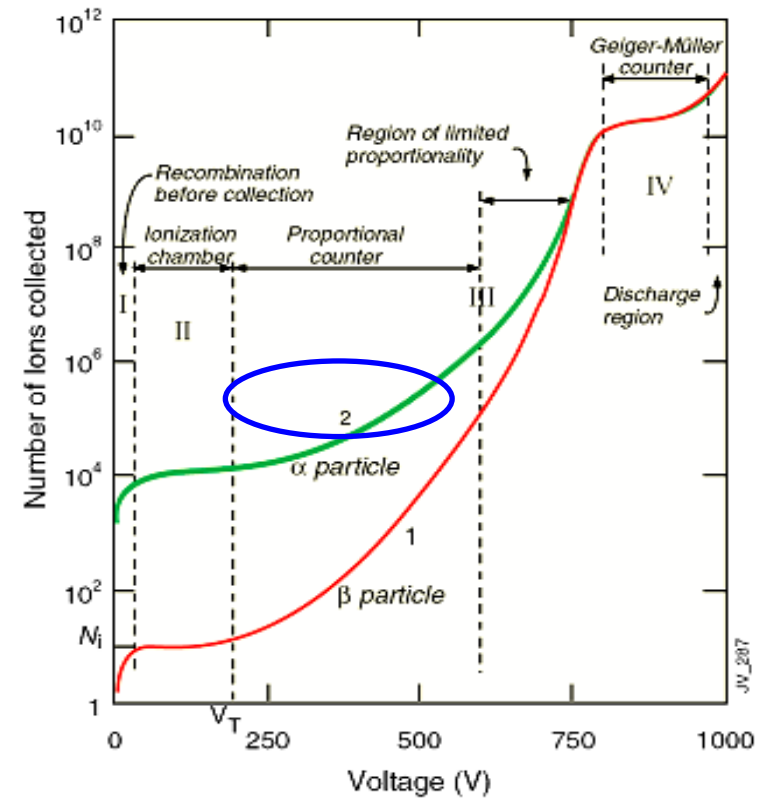
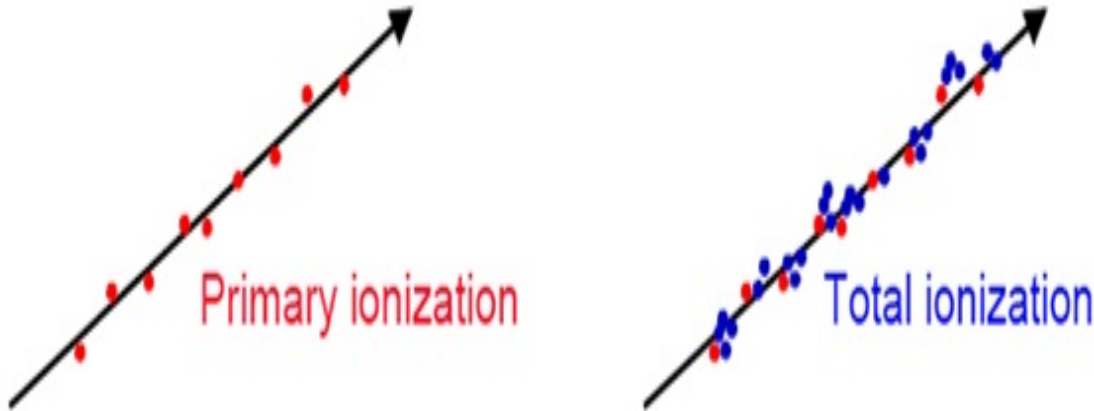
● 信号丝 +HV ● 场丝 \perp

BESIII主漂移室



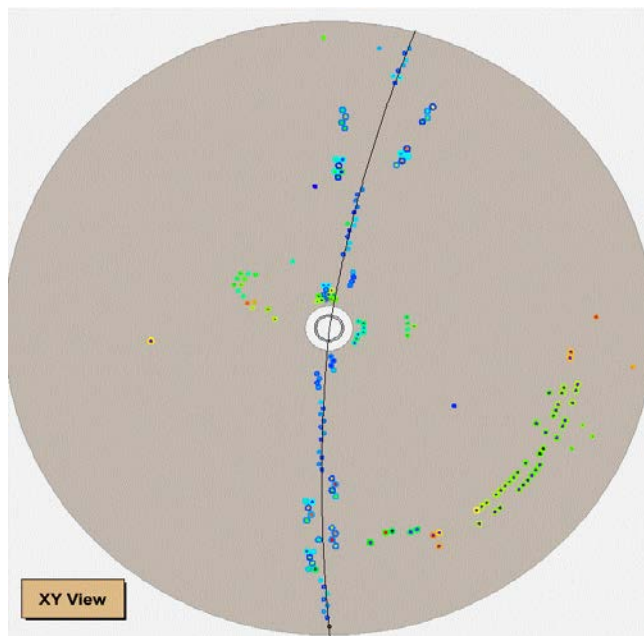
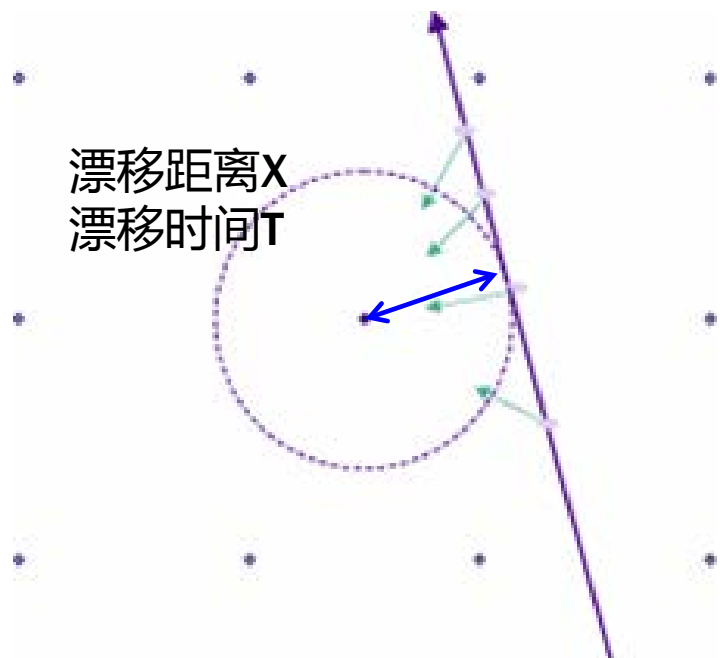
粒子动量 $P \approx 0.3 \cdot Z \cdot b \cdot \rho$ 粒子偏转的曲率半径

漂移室工作原理

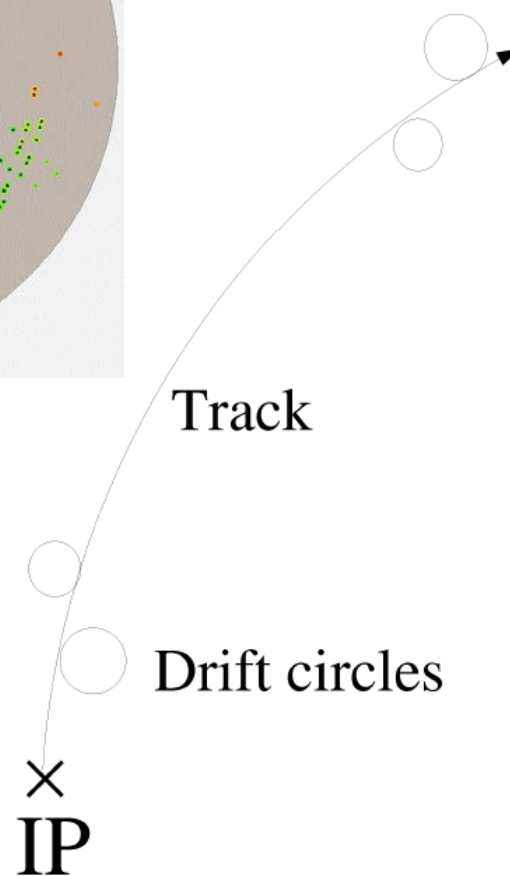


- 入射粒子径迹 (与气体介质作用)
- 原初电离 (电子-离子对)
- 雪崩倍增 (次级电子-离子对)
- 电子漂移 **测量漂移时间**

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

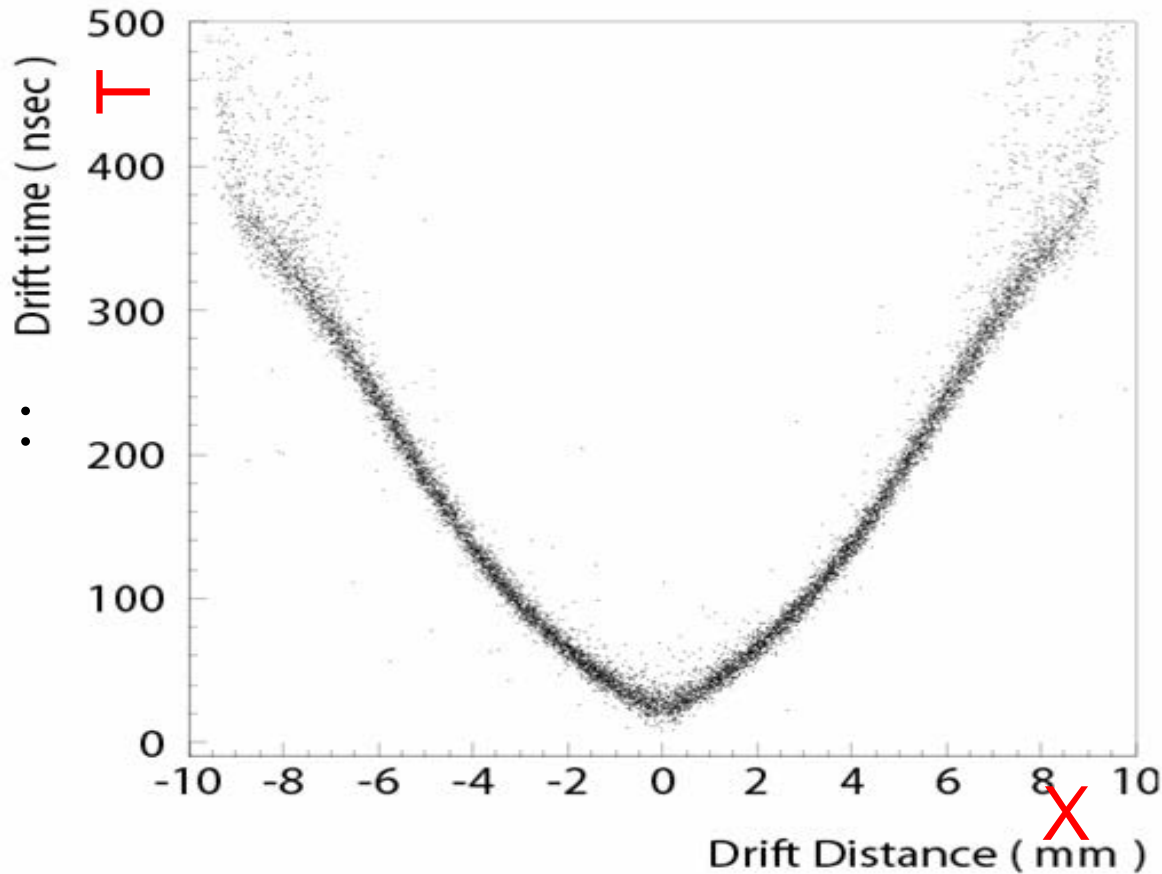


主漂移室刻度

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：

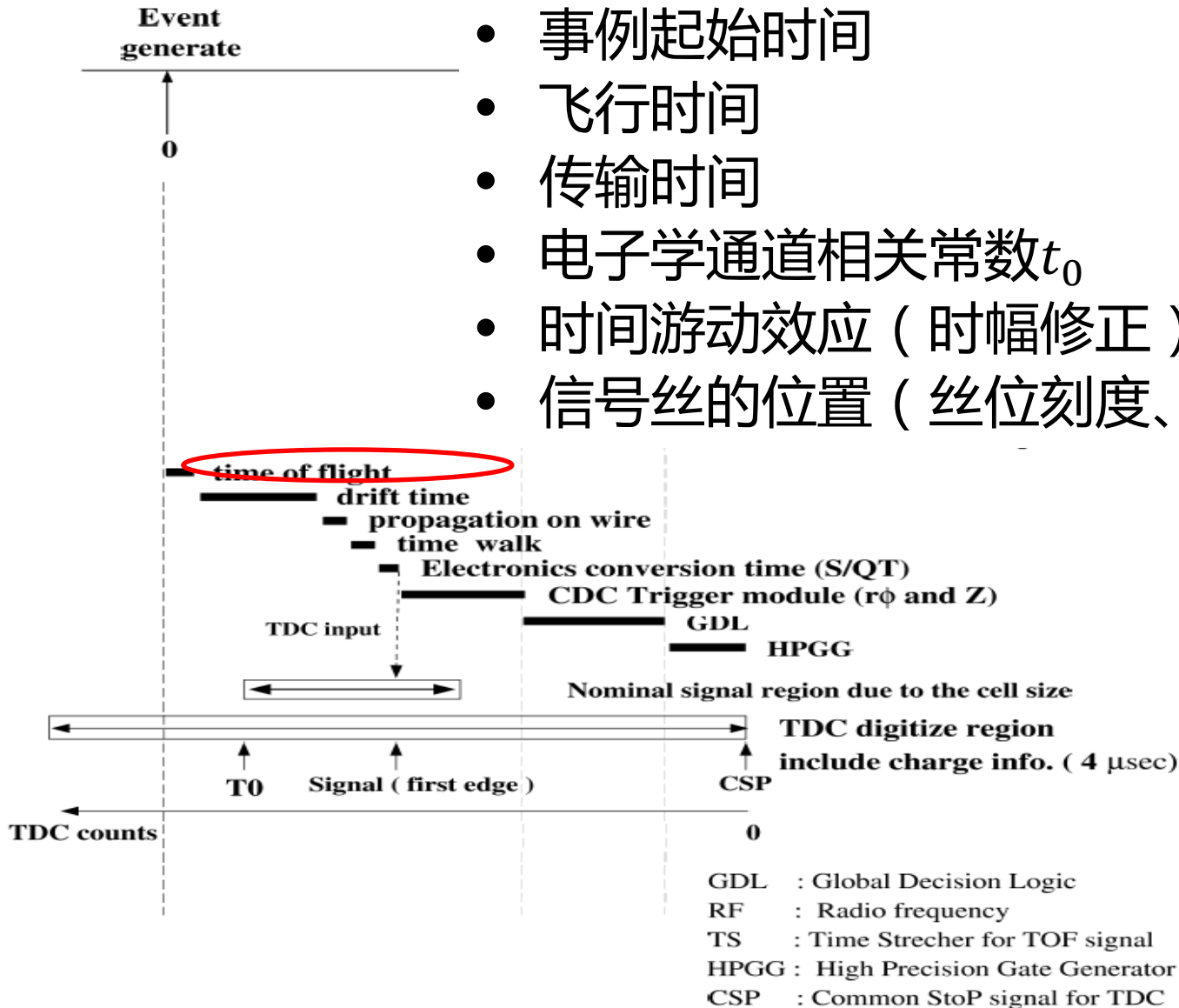
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(d_{meas} - d_{track})^2}{\sigma^2}$$

- 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)

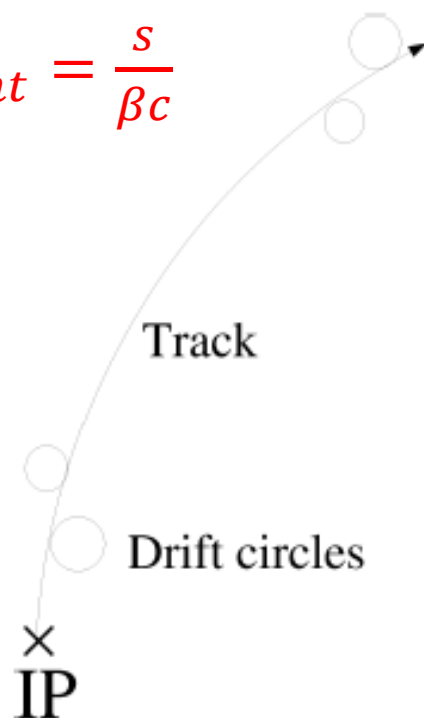


主漂移室刻度 飞行时间的贡献

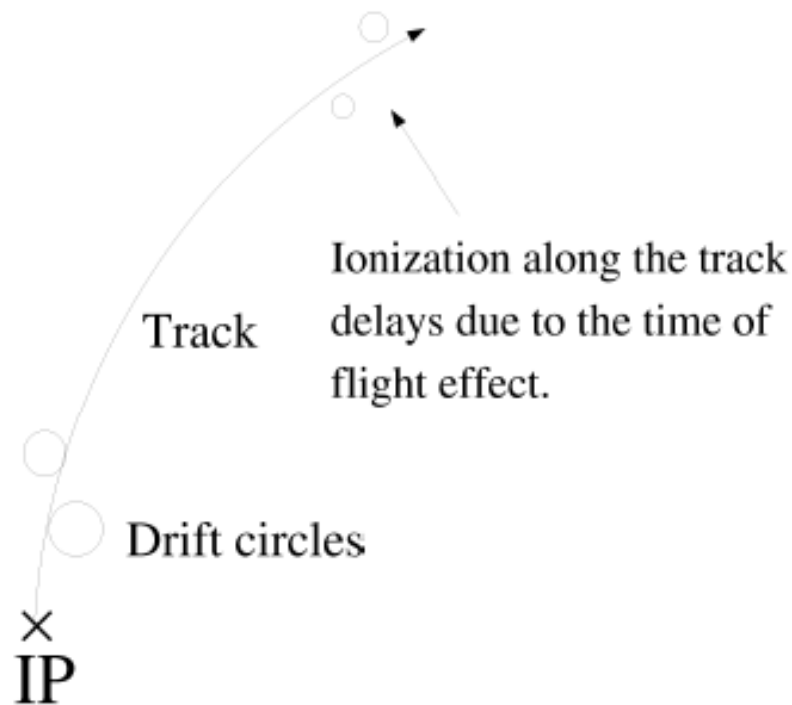
修正项： $\Delta t_{flight} = \frac{s}{\beta c}$

s : 飞行长度

速度： $v = \beta c$

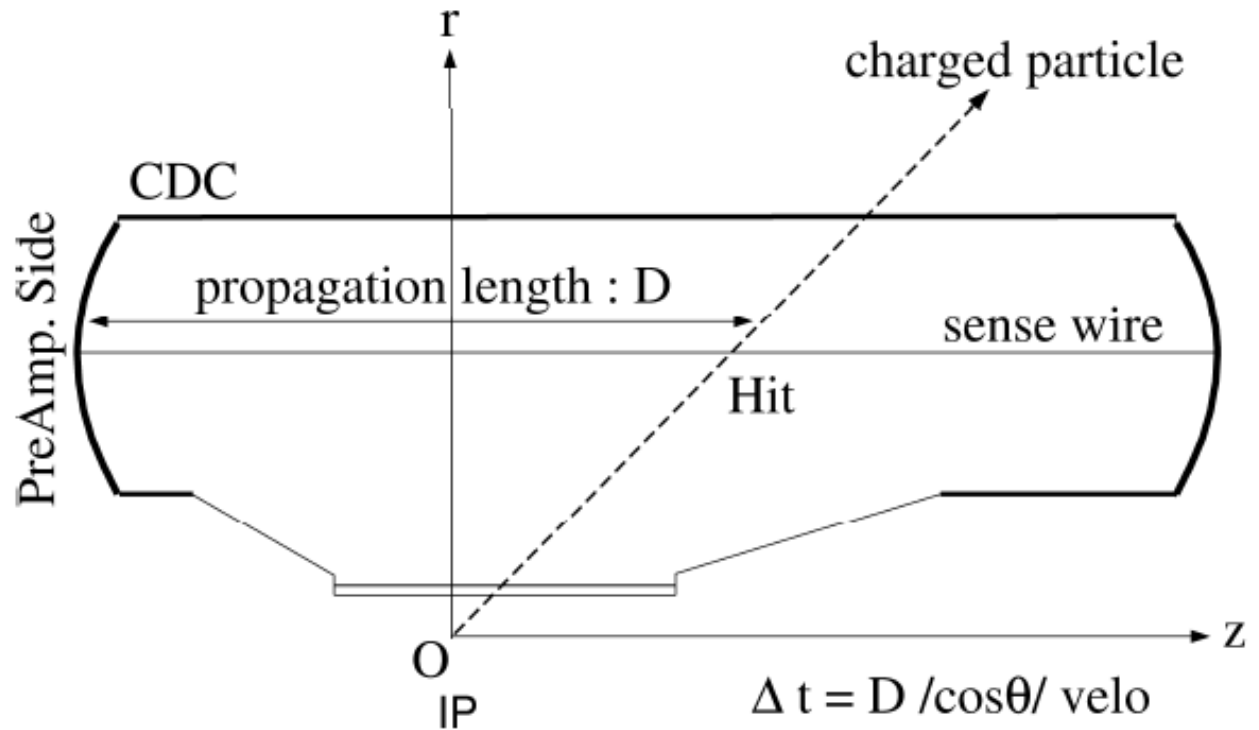


a) with correction



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
- θ : 丝的倾斜角
- v_{prop} : 传输速度, $\sim 3.6\text{ns/m}$

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

θ : stereo angle

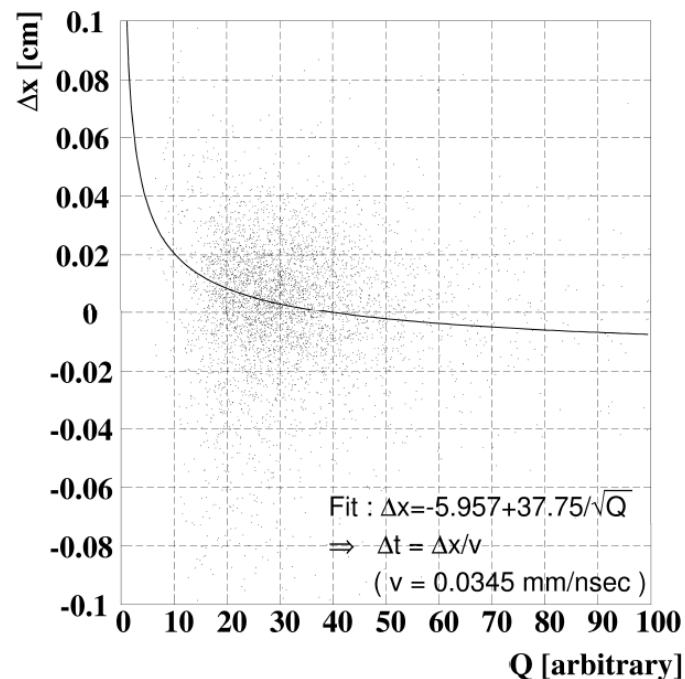
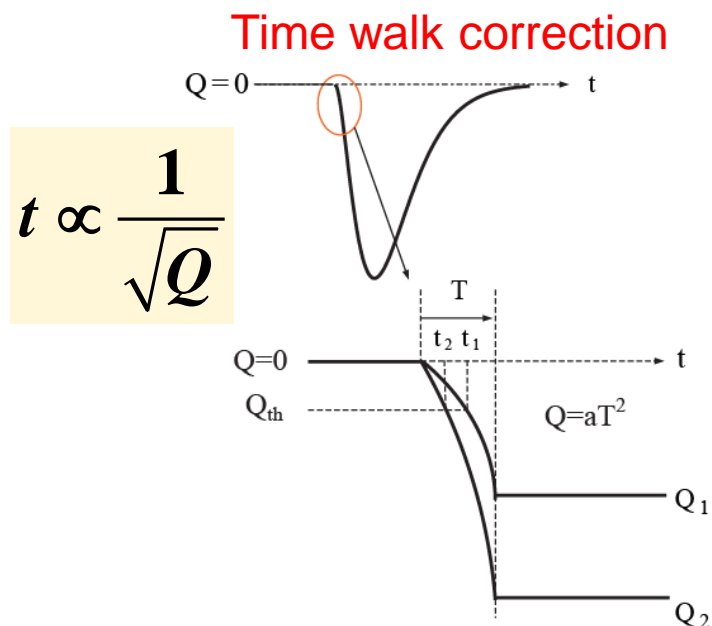
velo = 3.6 nsec/m

(= 2.78 m/nsec)

Hit timing = Hit timing - Δt .

主漂移室刻度

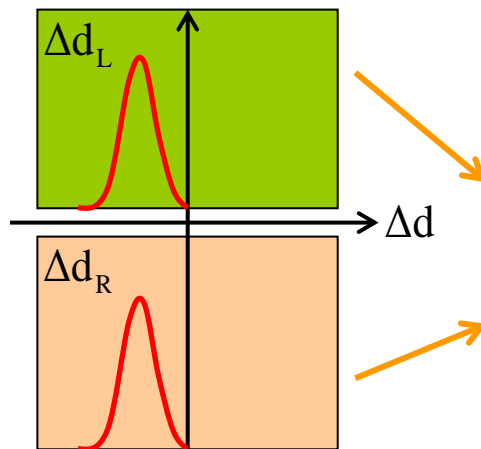
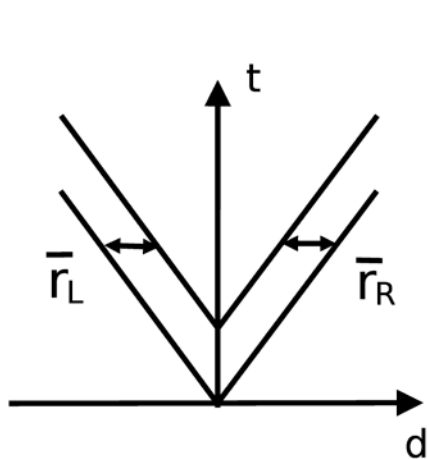
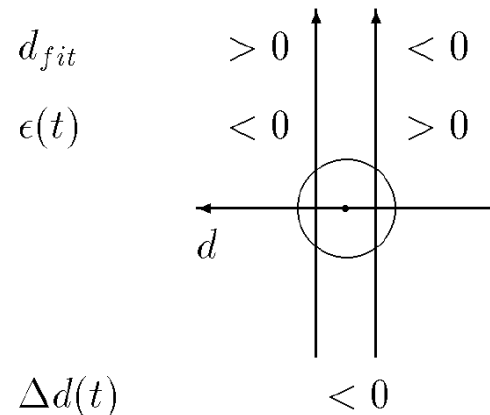
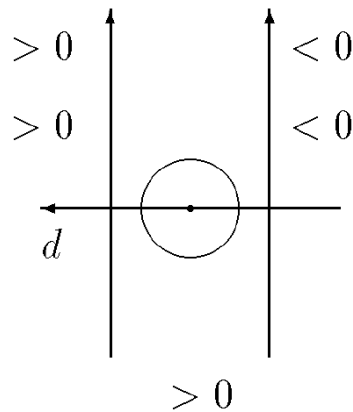
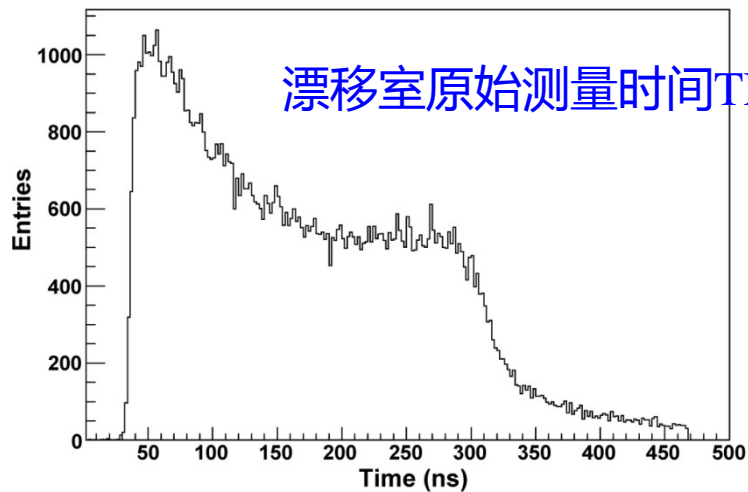
时间游动效应：Q-T



- 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 Δt

主漂移室刻度

单丝 t_0 的精确刻度

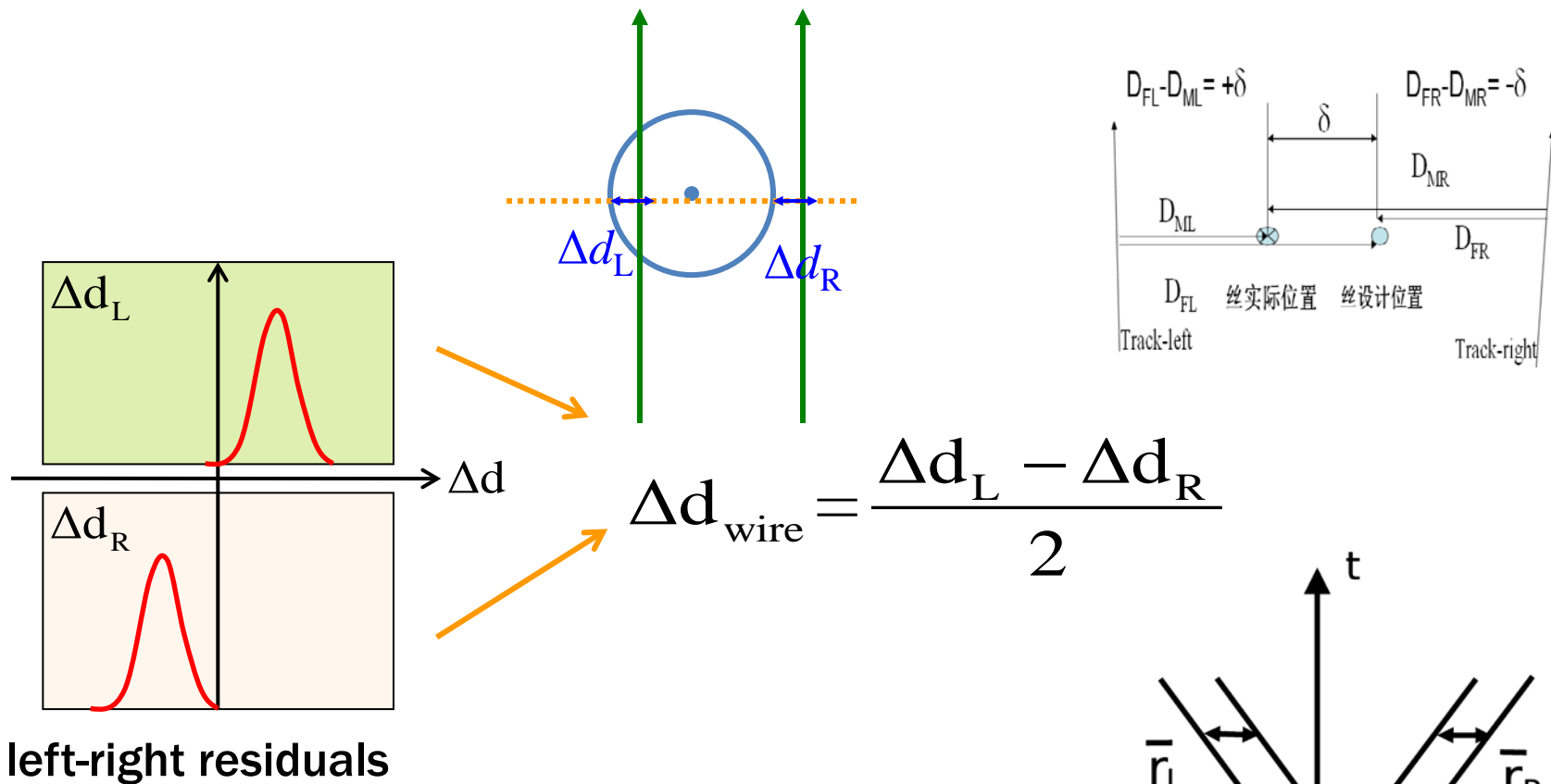


$$t_0^{new} = t_0^{old} + \frac{\Delta d_R + \Delta d_L}{2v}$$

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

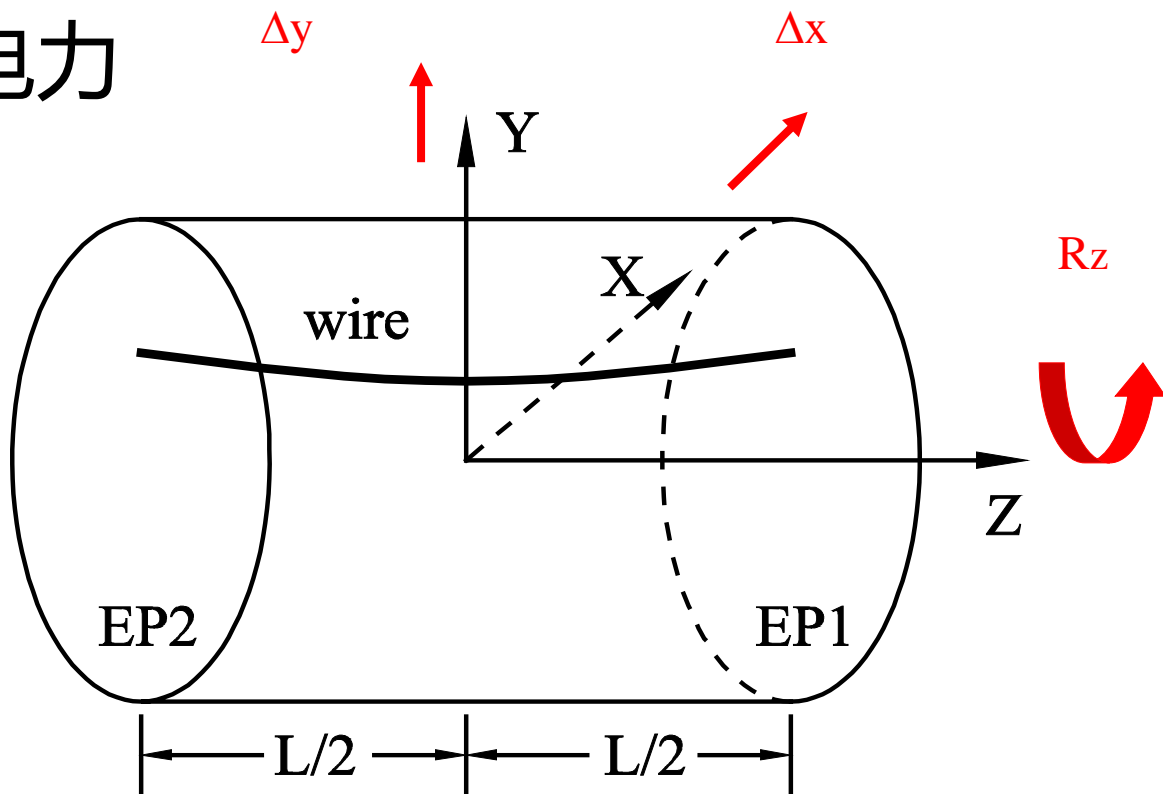
Y-Z 平面

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

→ 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

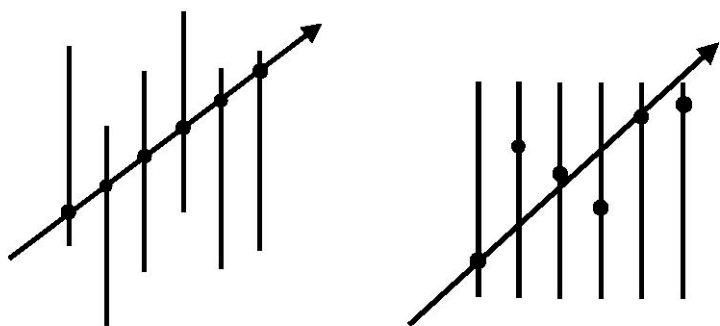
主漂移室刻度

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

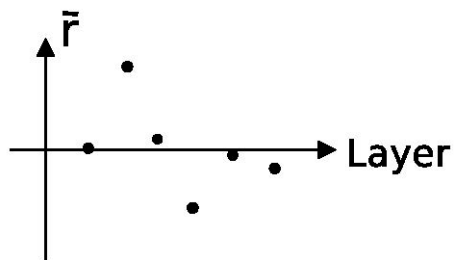
主漂移室刻度

漂移室几何位置校准

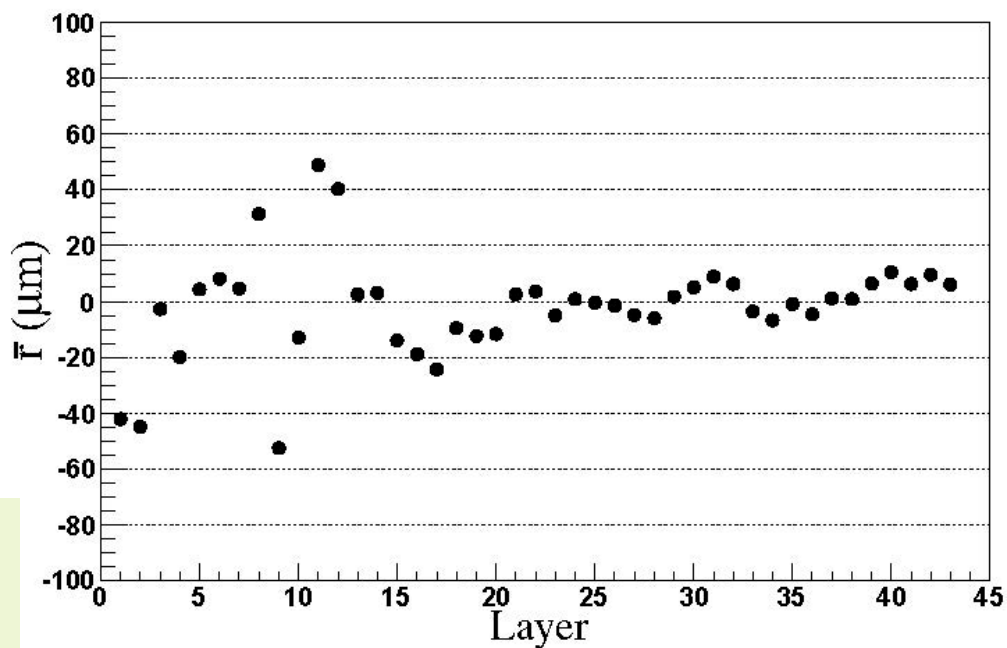
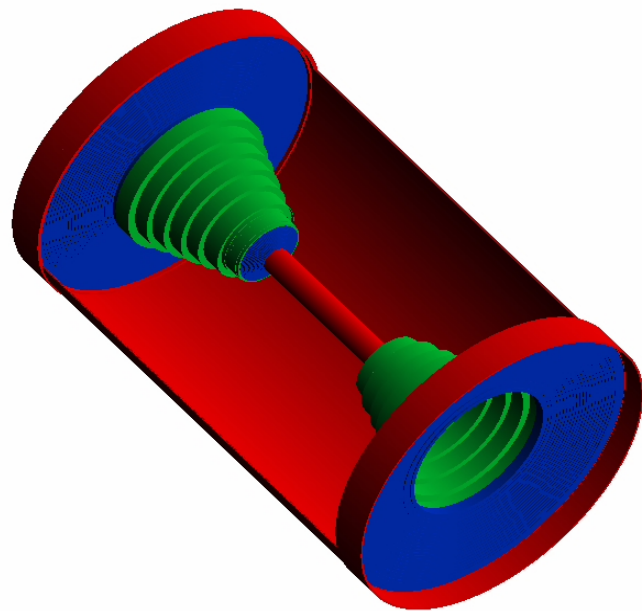


(a) 粒子穿过探测器的实际情况

(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

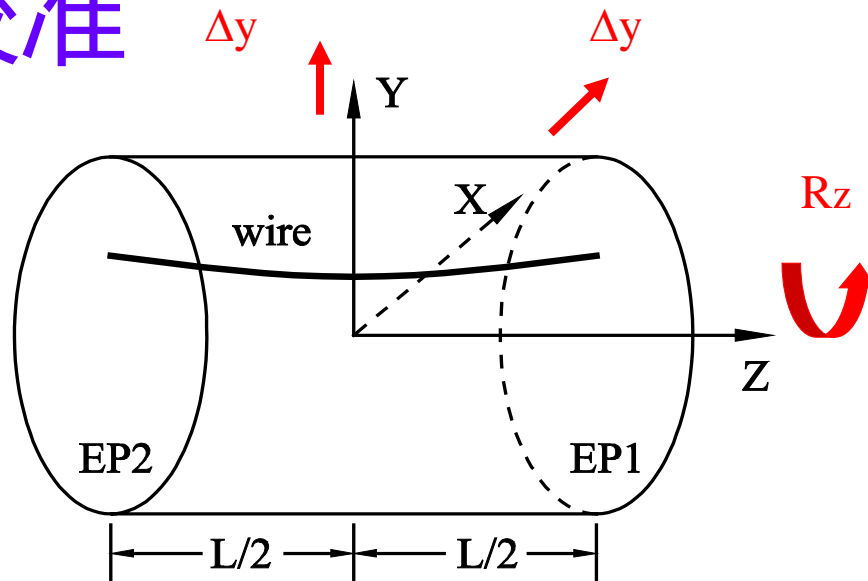
3 平移 : D_x, D_y, D_z

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

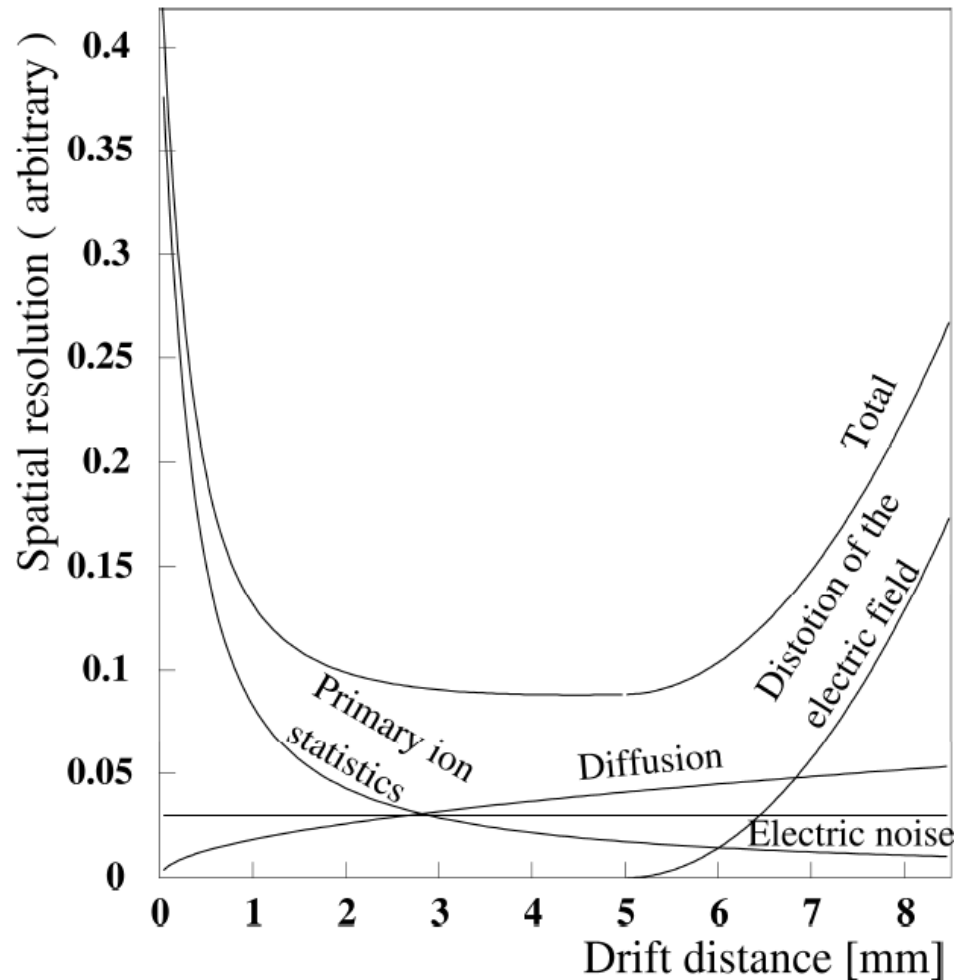
2. Kalman滤波方法

3. 残差分布法

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

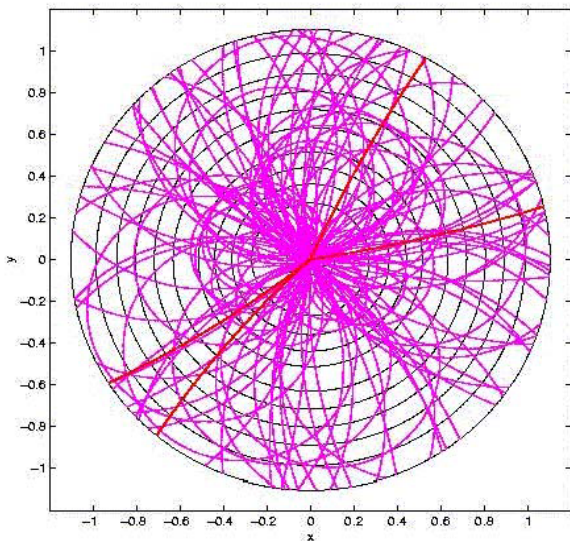
主漂移室刻度 单丝的空间分辨

- 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**

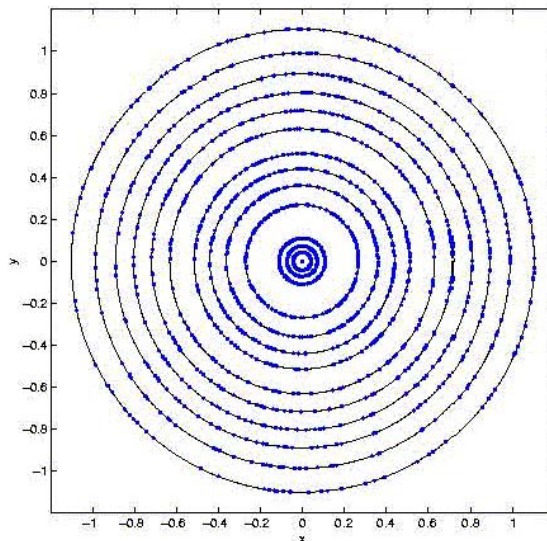


空间分辨随漂移距离的变化

主漂移室重建

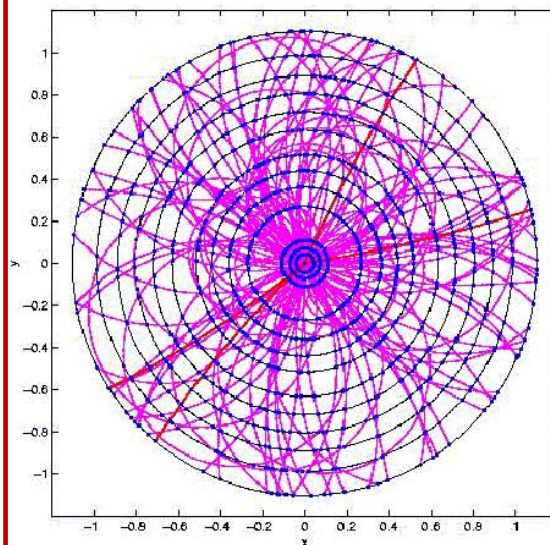


A generated event



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 χ^2 , 残差, 去除“坏”点



Tracks reconstruction

主漂移室重建 寻迹方法

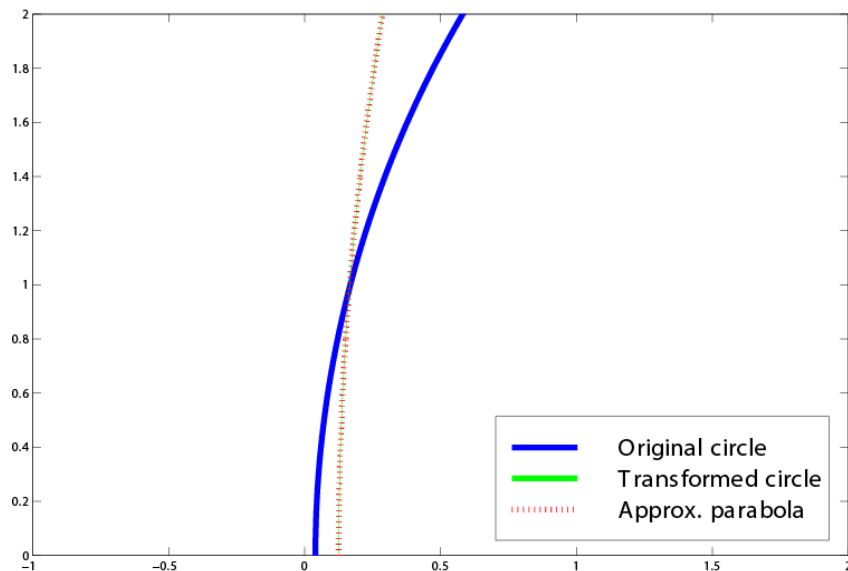
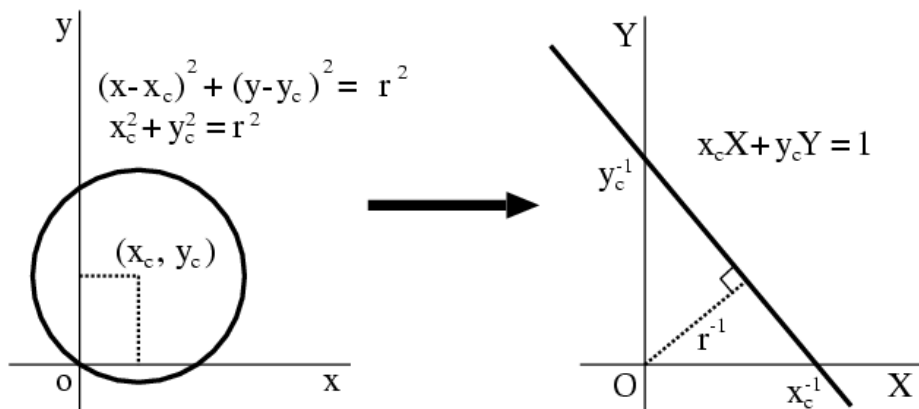
- 局域方法：从少数几个测量点开始，确定径迹的初始参数，由此可以预期下一个击中点的位置，并与测量值进行比较
 - 径迹跟踪 Track following
 - 径迹路径 Track roads
 - 径迹元 Track elements
 - Kalman滤波方法
- 全局方法：所有的测量点用相同的算法处理，生成一个径迹击中点列表集合，或者生成一个“中间表”使得下一步的寻迹更容易实现
 - 模板匹配 / 字典查找法
Template matching
 - 直方图方法（霍夫变换）
Histogram method (Hough transformation)
 - 神经网络方法 Neutral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

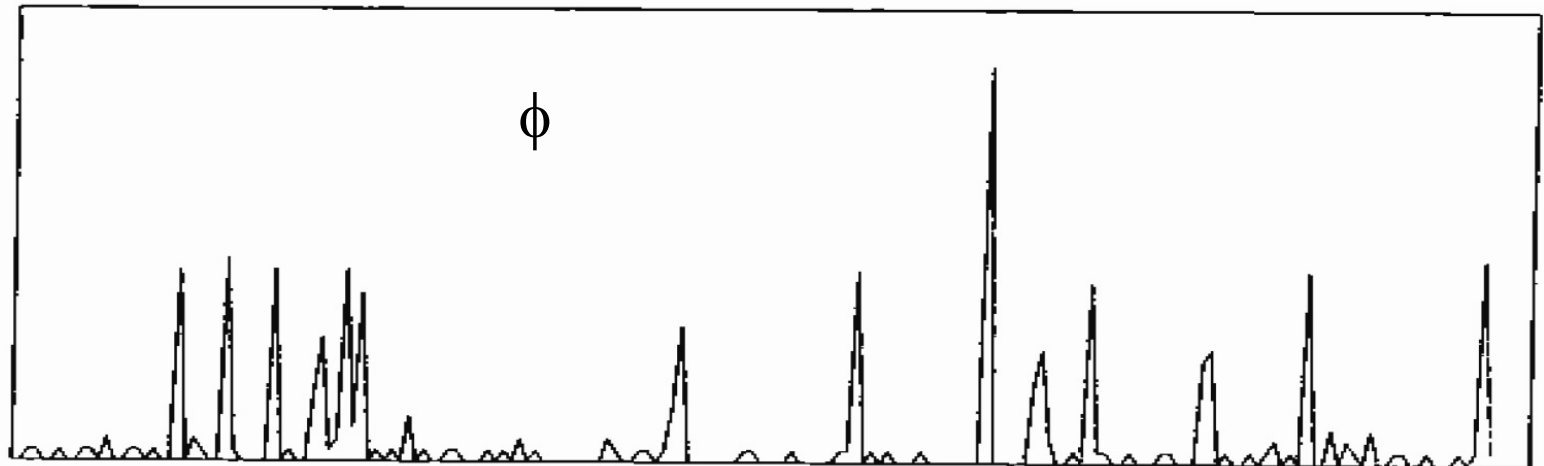
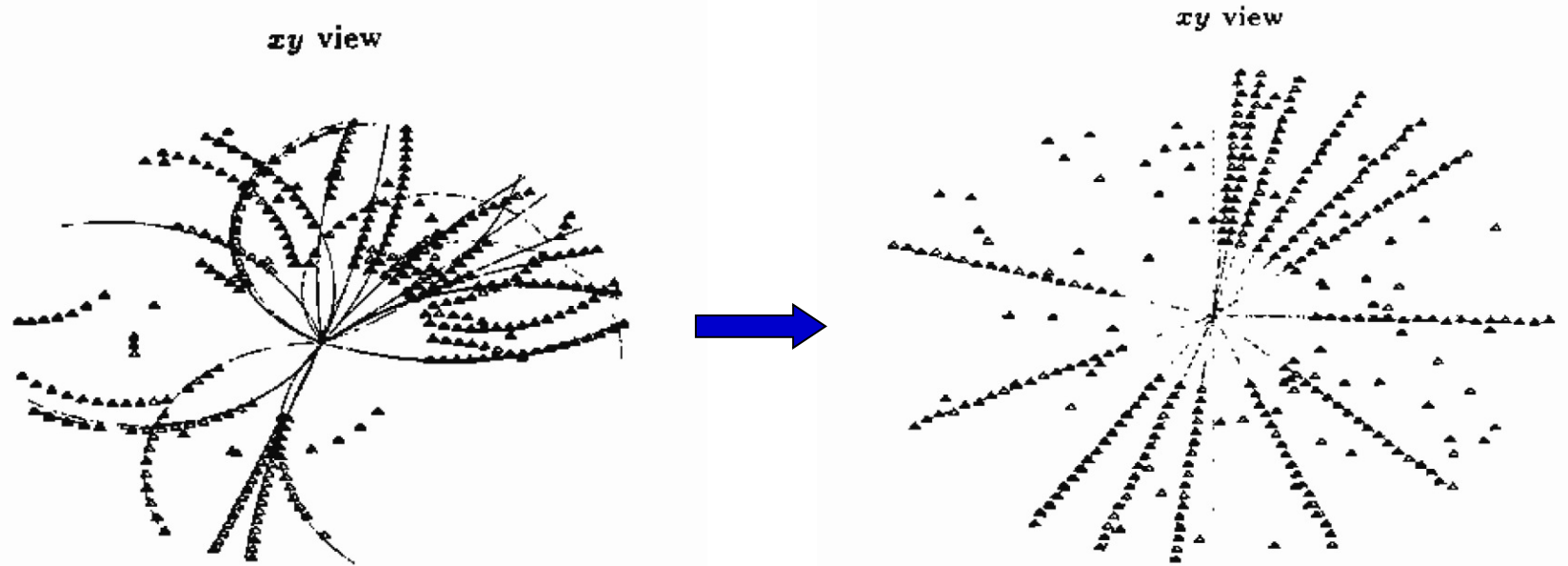
- 过原点的圆弧变换为直线，直线的截距与圆的半径成反比
- 不过原点的圆弧（截距通常都很小）则变为曲率较小的圆，这个圆可以用抛物线来近似
- 圆周拟合就变成了一个快速、线性的抛物线拟合



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

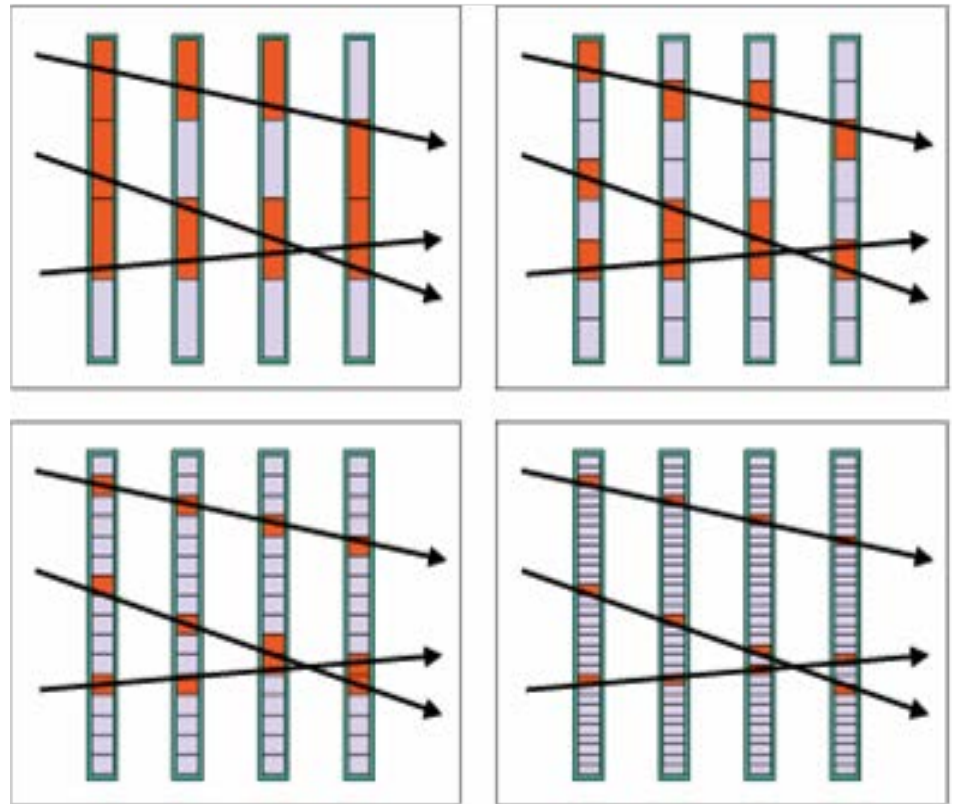
主漂移室重建—寻迹方法

直方图方法 (TrkReco)



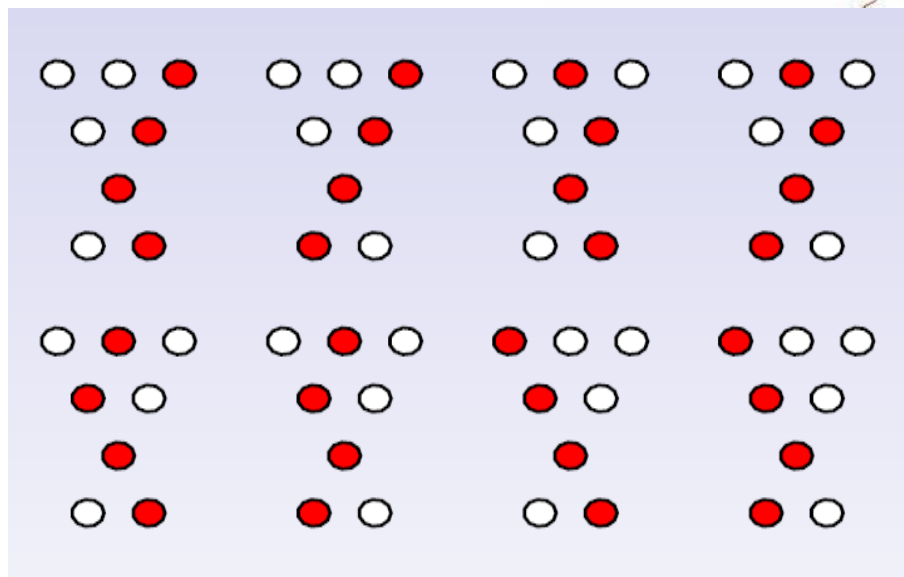
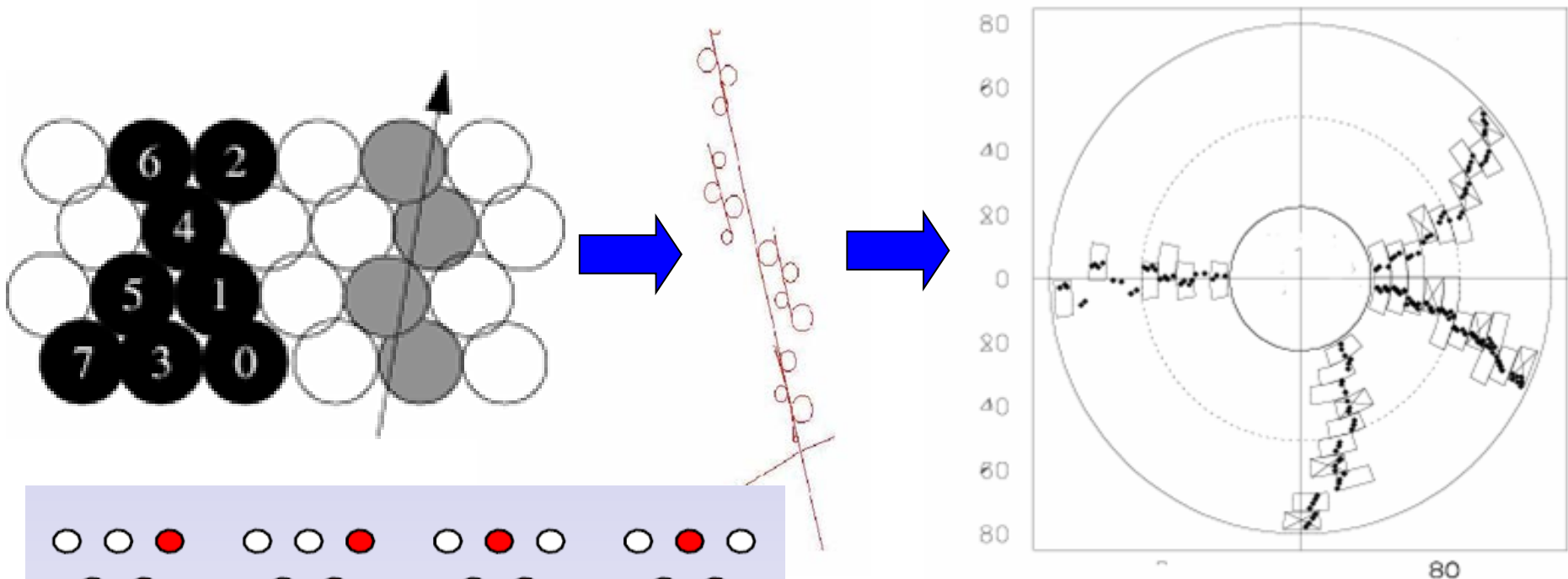
字典查找法 Template Matching

- 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。