

# CEPC径迹探测器介绍

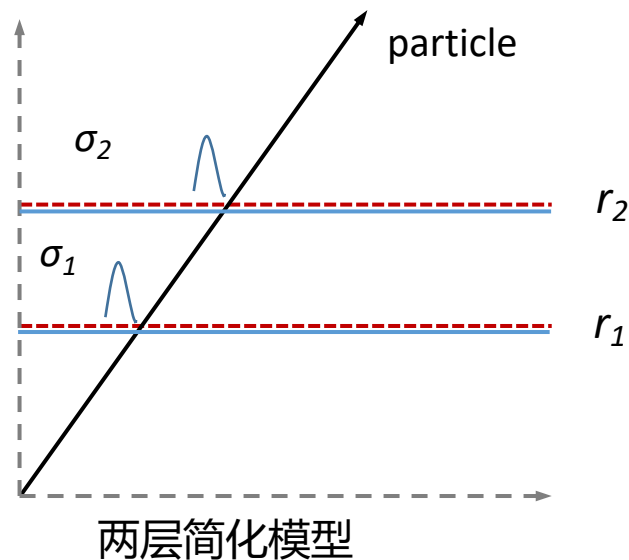
朱宏博

中国科学院高能物理研究所

2020年9月18日

# 带电粒子径迹探测：指向分辨

- 对撞点出射的带电粒子，穿过多层探测器形成击中（空间测量点），通过径迹寻找与拟合（径迹重建），获得粒子信息。

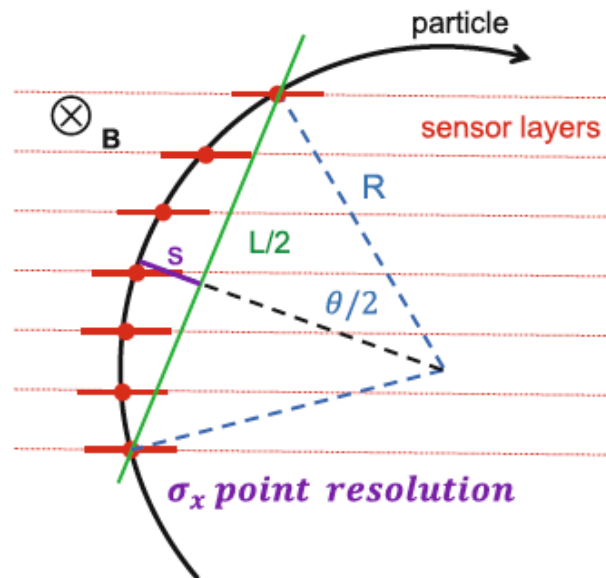


碰撞参数 $d_0$ 分辨：

$$\begin{aligned}\sigma_{d_0}^2 &= \sigma_{geom}^2 + \sigma_{MS}^2 \\ &= \left(\frac{\sigma_1 r_2}{r_2 - r_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2 r_1}{r_2 - r_1}\right)^2 + \sum_{j=1}^{n_{scatt}} (R_j \Delta\theta_j)^2\end{aligned}$$

# 带电粒子径迹探测：动量分辨

- 对撞点出射的带电粒子，穿过多层探测器形成击中（空间测量点），通过径迹寻找与拟合（径迹重建），获得粒子信息。



动量分辨：

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{p_T}}{p_T} &= \frac{\sigma_{p_T}}{p_T |_{res}} \otimes \frac{\sigma_{p_T}}{p_T |_{MS}} \\ &= \sigma_x \frac{p_T}{0.3 B \cdot L^2} \sqrt{\frac{720}{N+4}} \otimes \frac{0.0136}{0.3 B \cdot L} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \end{aligned}$$

# CEPC 径迹探测器性能要求

- 碰撞参数分辨率  $\rightarrow$  b/c夸克标记 (  $H \rightarrow b\bar{b}/c\bar{c}/gg$  )

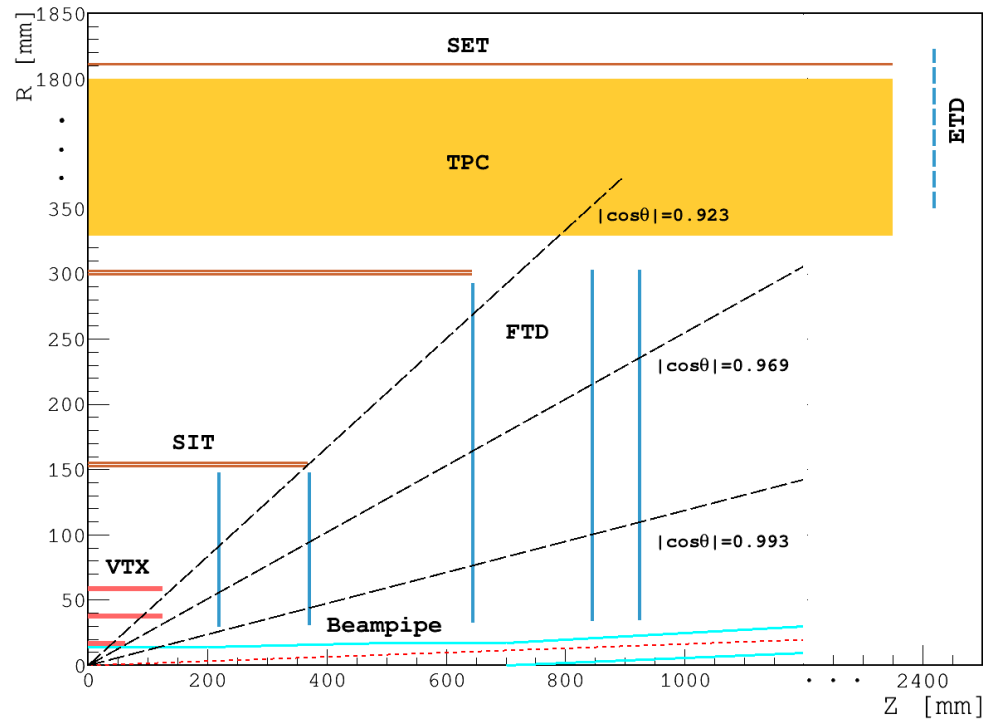
$$\sigma_{r\varphi} = 5 \oplus \frac{10}{p \cdot \sin^{3/2}\theta} \mu\text{m}$$

- 动量分辨率  $\rightarrow$  Higgs 反冲质量

$$\sigma_{1/p_t} = 2 \times 10^{-5} \oplus \frac{1 \times 10^{-3}}{p_t \sin\theta}$$

# CEPC 径迹探测器基本布局

- 硅探测器包裹气体探测器（时间投影室、漂移室）
  - 硅探测器：少量高精度空间测量点
  - 气体探测器：多个（连续）空间测量点提高动量分辨、 $dE/dx$  测量（粒子鉴别）



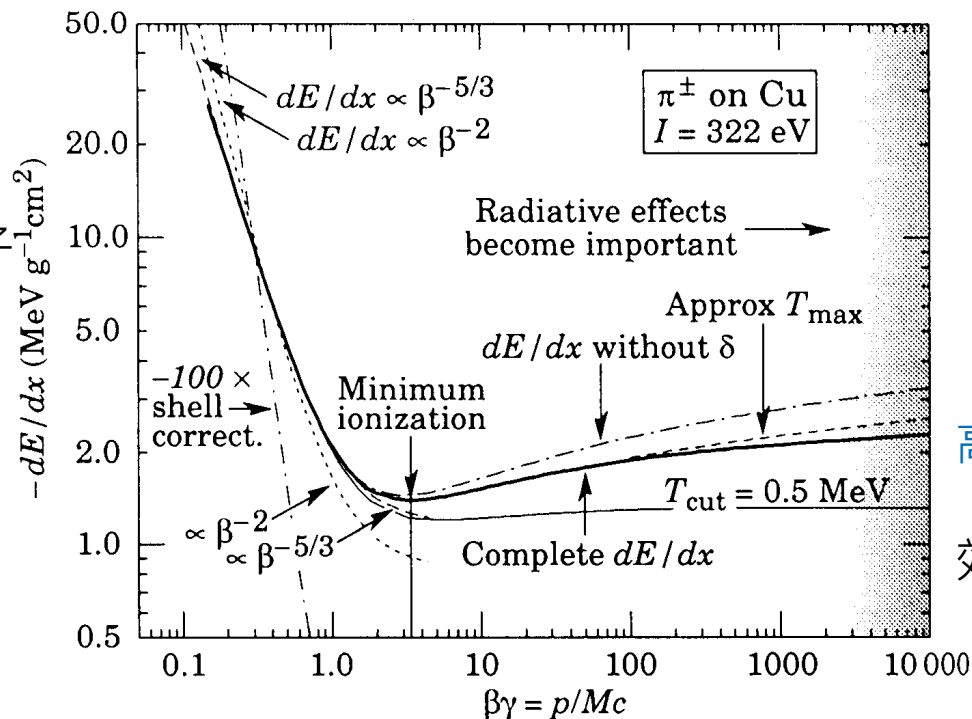
# 带电粒子与物质相互作用

- 电离能损：Bethe-Bloch公式

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K Z^2 \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

低能端： $1/\beta^2$

低速粒子受到原子核更强电势作用

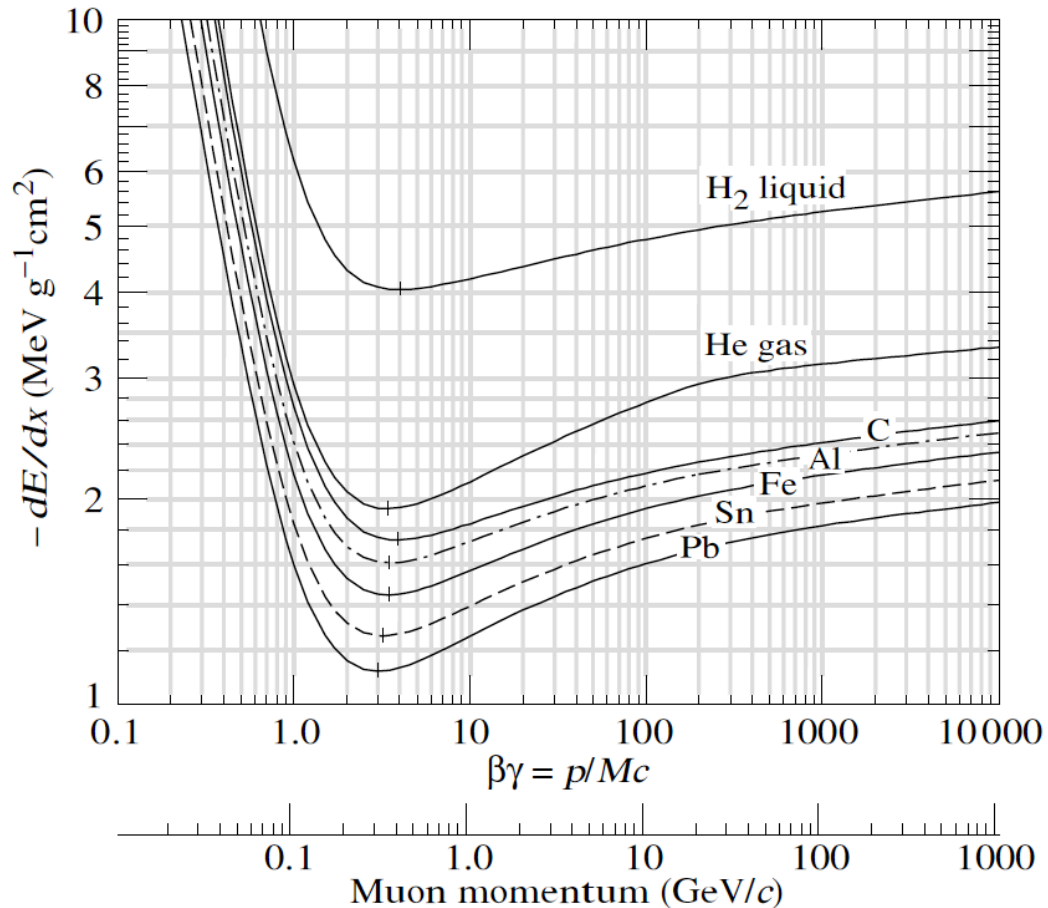


高能端：相对论上升  
( $\ln(\beta\gamma)^2$ )、密度  
效应趋于饱和 ( $\beta\gamma$ )

最小电离粒子 (MIP) :  $\beta\gamma = 3 \sim 4$

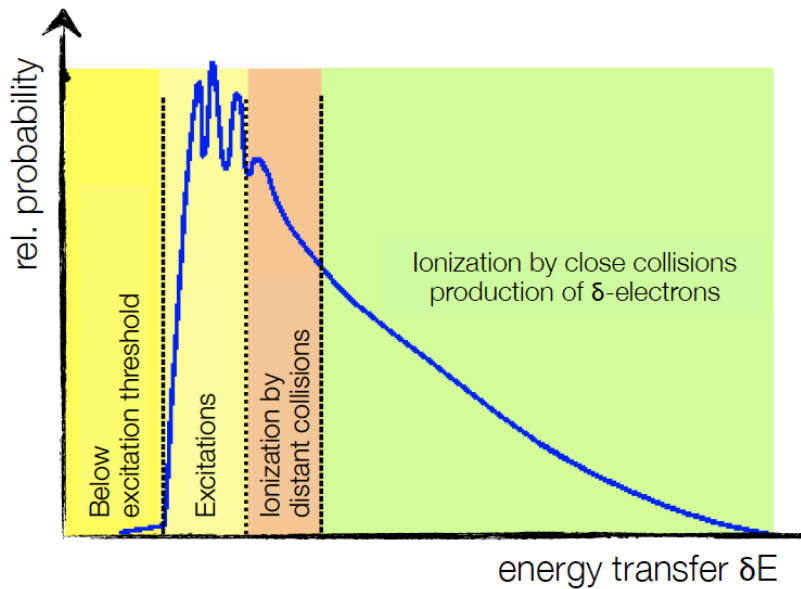
# 电离能损物质依赖

- 相同入射粒子能损与所穿过物质相关 ( 质量 $\sim A$  , 电荷 $\sim Z$  )

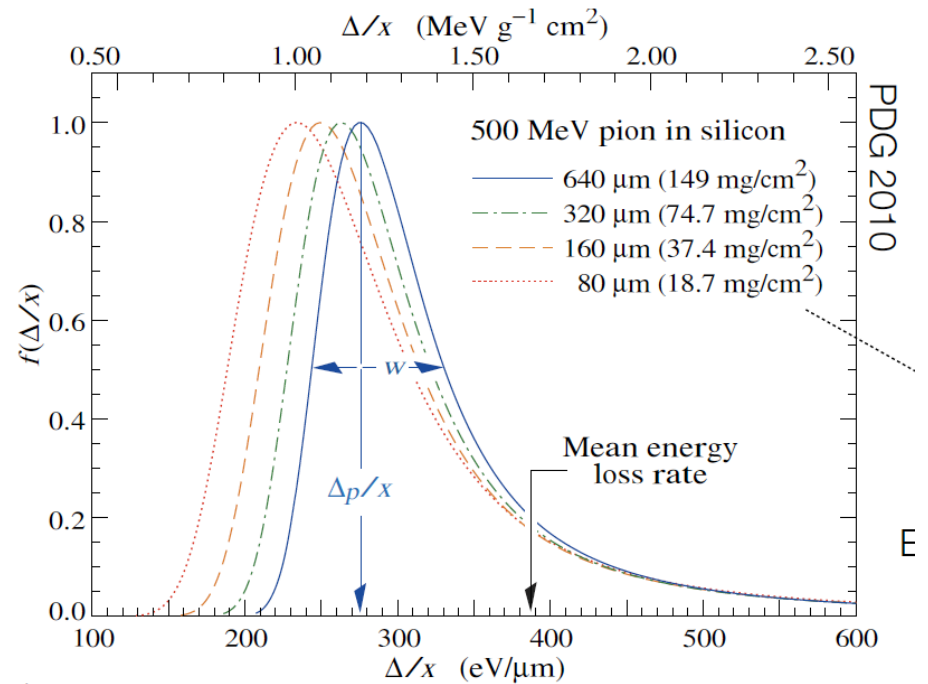


# 电离能损统计涨落

- Bethe-Bloch公式仅描述平均电离能损，实际存在涨落分布；穿过薄吸收体的电离能损近似朗道分布



## Energy Loss Straggling



最可几值 vs 平均值



# CEPC 硅探测器性能要求

- 设计要求：抗辐照（LHC）→ 高精度、低功耗（CEPC）

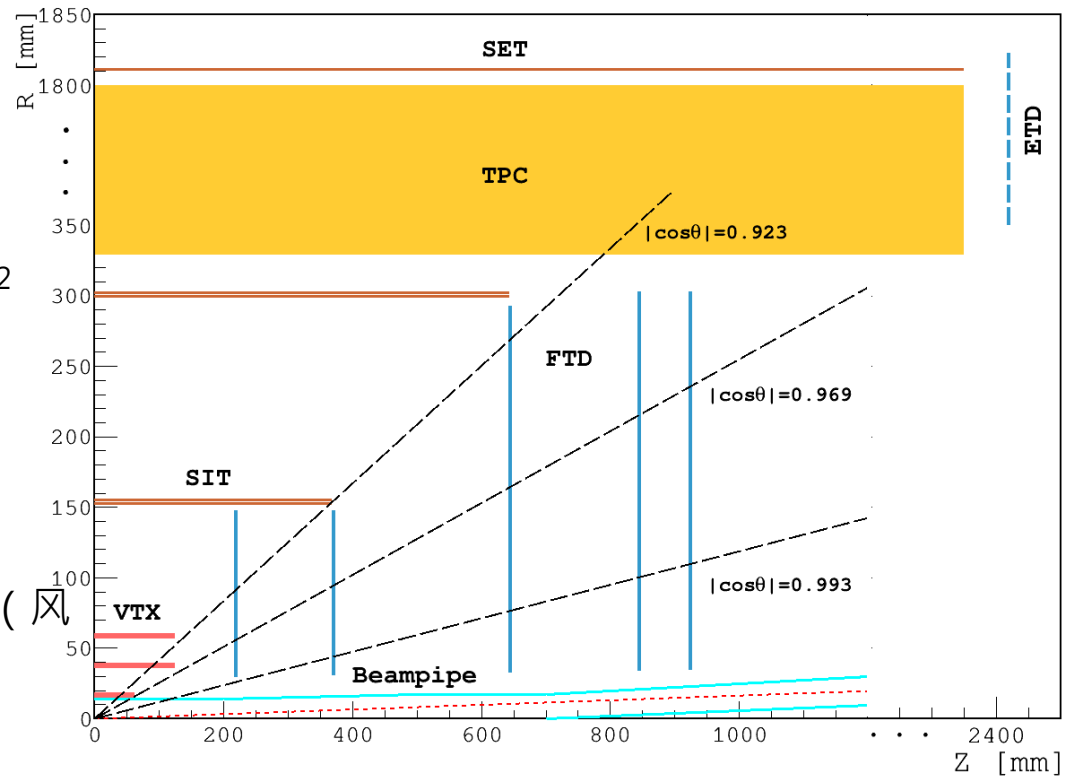
探测器布局概念：硅探测器包裹气体探测器(“Silicon Envelope”)

- 径迹探测器

- 空间分辨：7微米
- 时间分辨：10ns
- 低功耗：200 mW/cm<sup>2</sup>

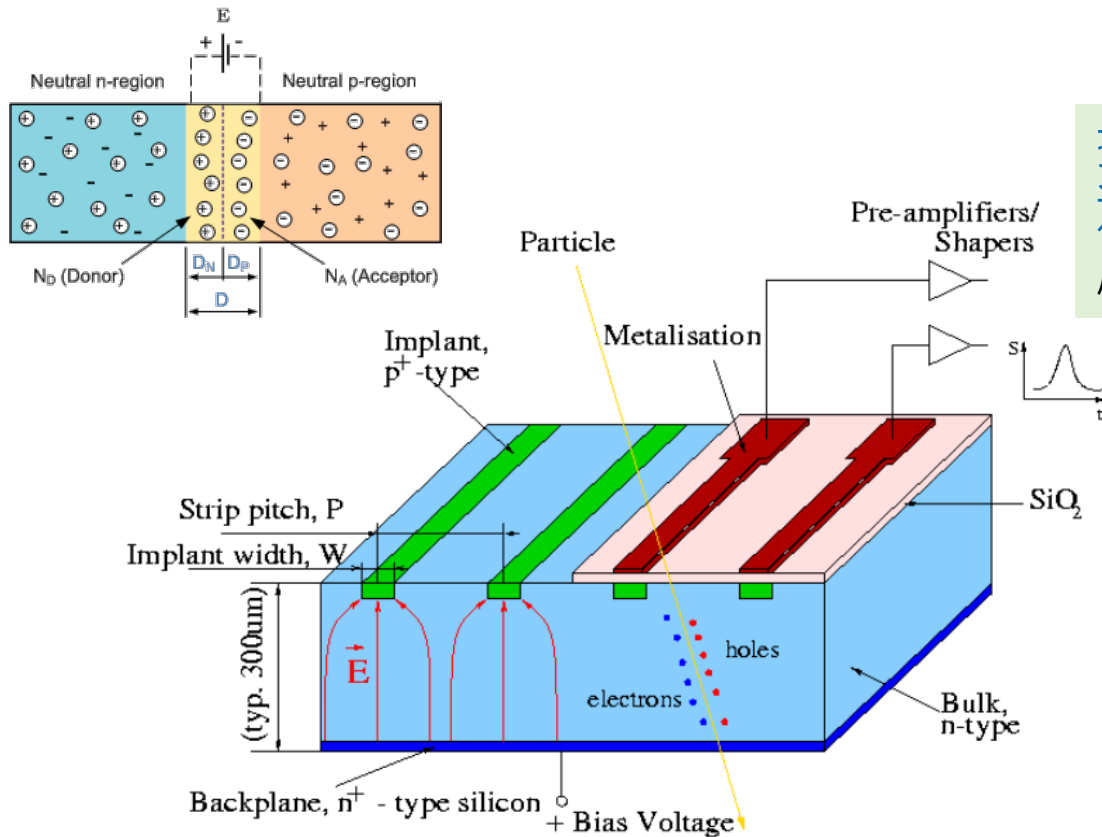
- 顶点探测器

- 空间分辨：3微米
- 低功耗：50 mW/cm<sup>2</sup> ( 风冷降低物质质量 )
- 抗辐照水平（每年）：  
1 MRad ( 总剂量 ) and  $2 \times 10^{12}$  n<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup> ( 非电离能损 )



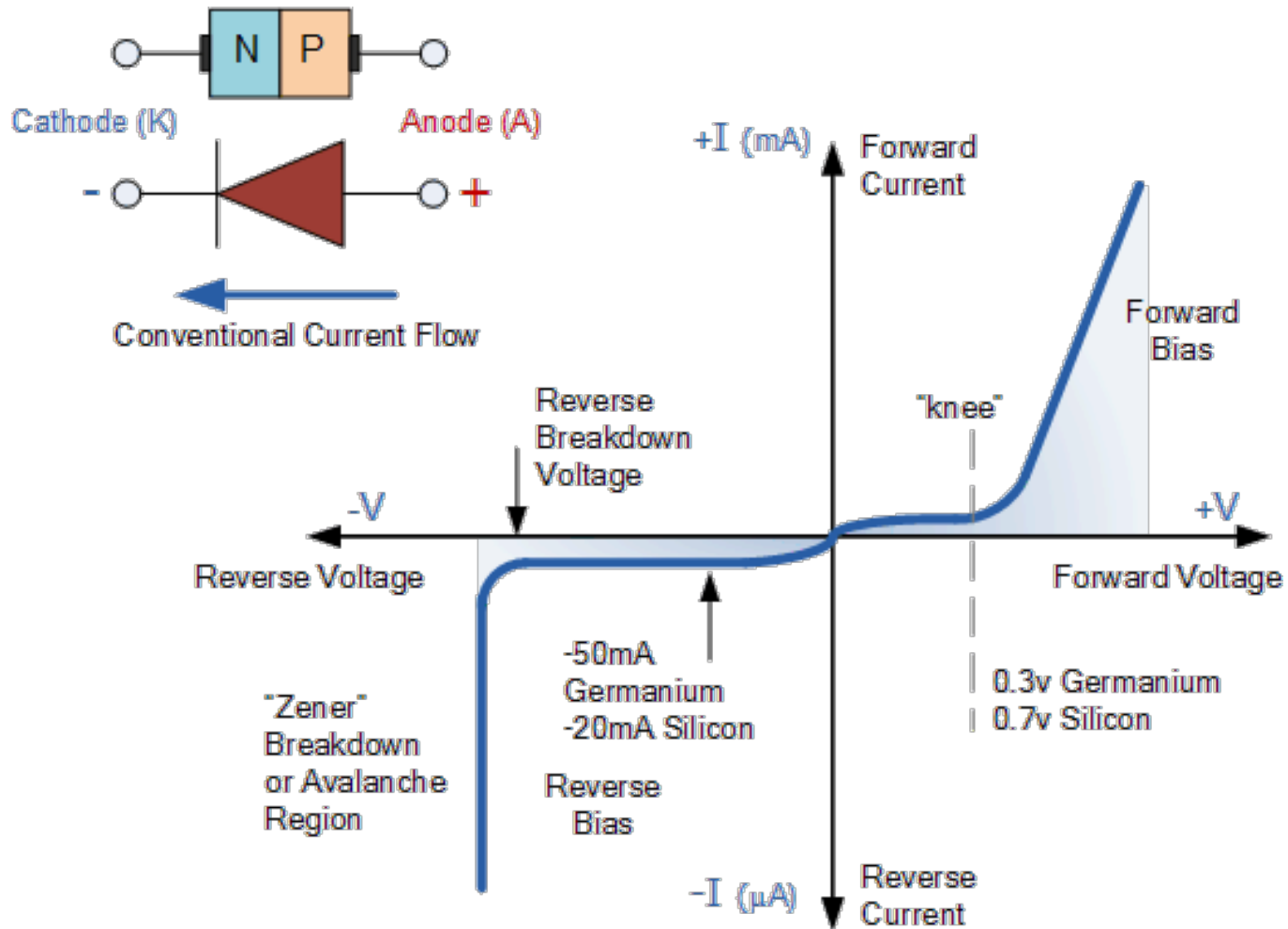
# 半导体探测器

- 带电粒子在半导体探测器的灵敏体积（耗尽区）内产生电子 - 空穴对，电子 - 空穴对在外电场的作用下漂移而输出信号。



接前端读出电子学芯片进行信号处理（放大、成形、滤波、甄别等等）

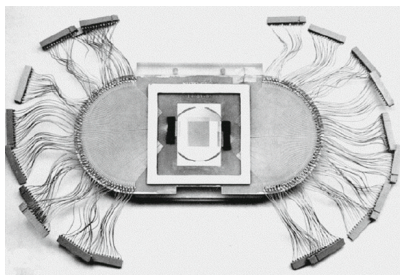
# PN结电压-电流曲线



# 硅探测器发展回顾

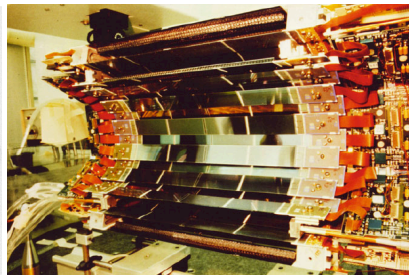
上世纪八十年代若干关键技术的突破，决定了之后硅探测器的广泛应用。

NA11



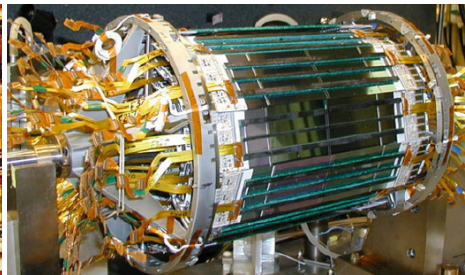
Proof of Principle

DELPHI



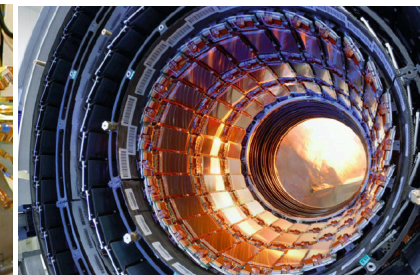
Innermost Tracking

CDF

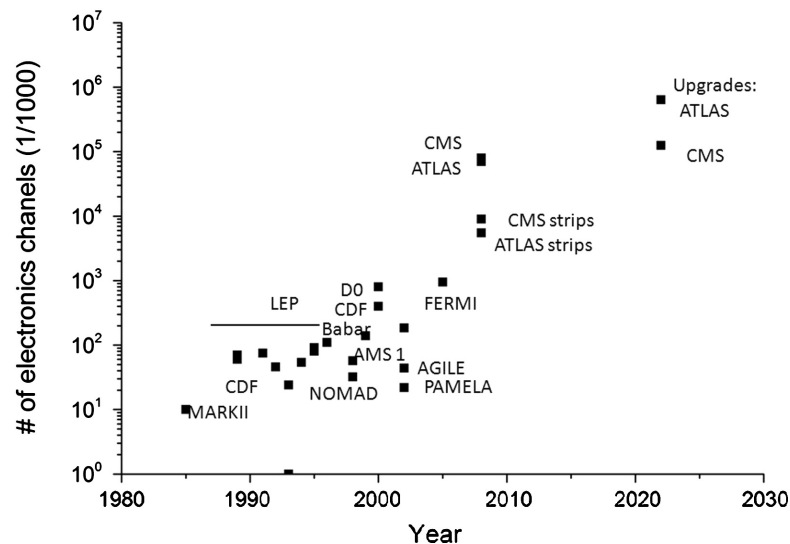
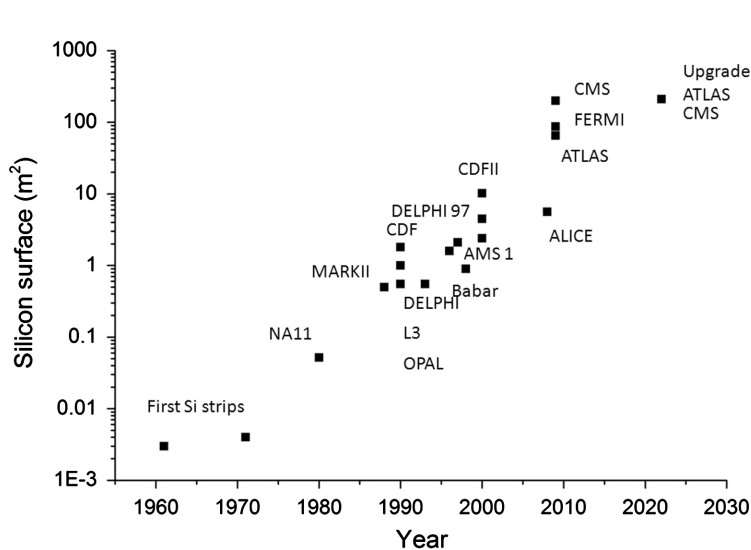


Hardon Collider

CMS

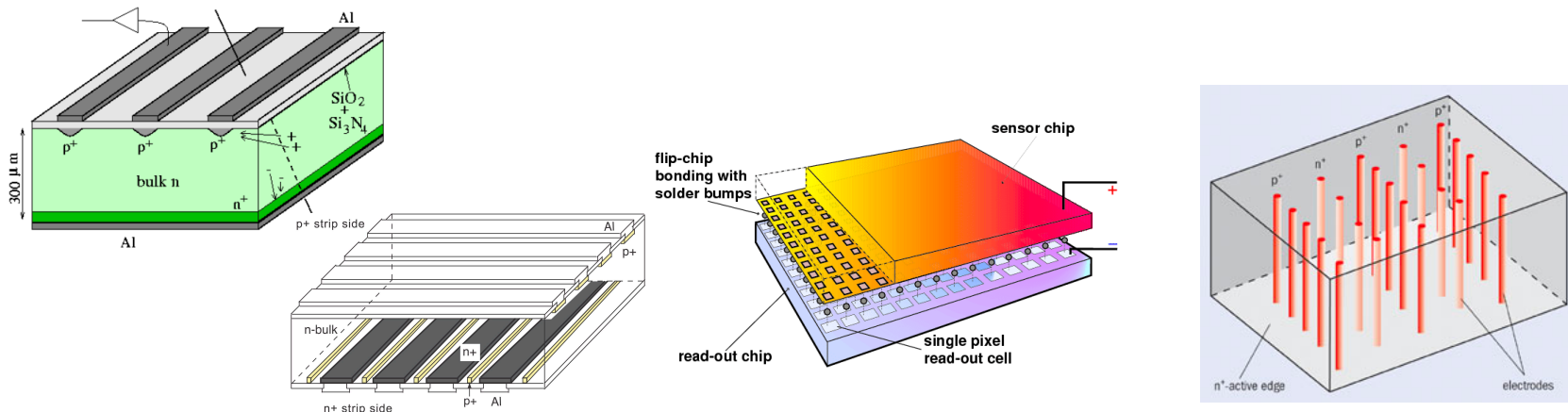


Area of O(100 m<sup>2</sup>)

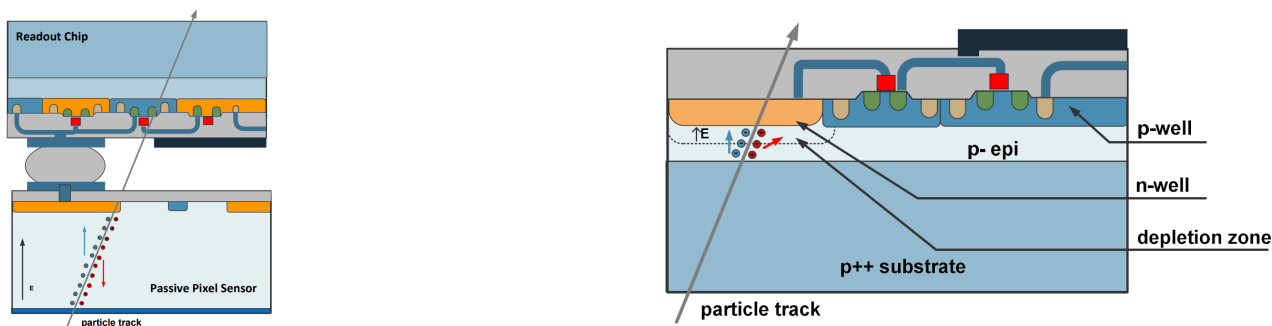


# 硅探测器基本分类

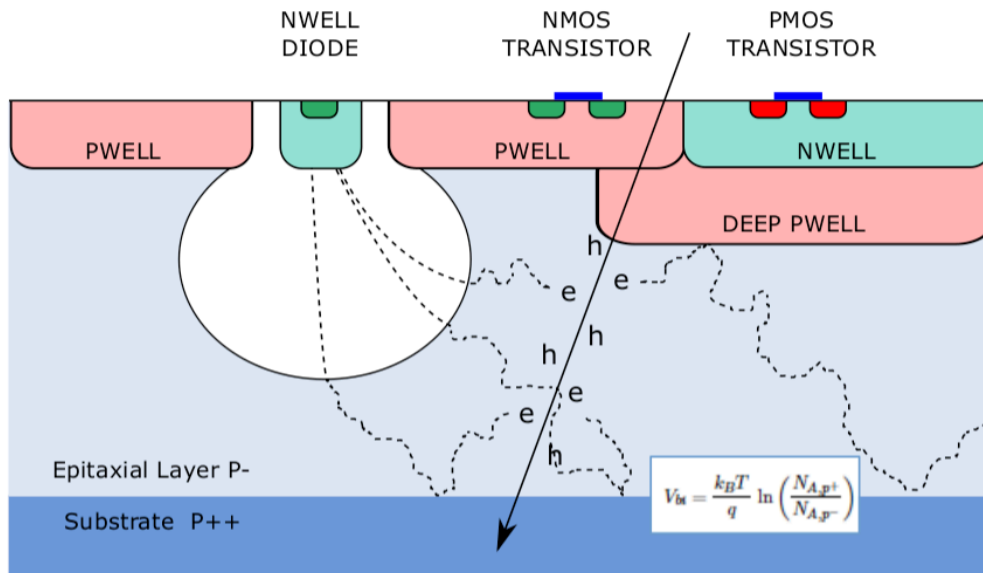
- 硅传感器分类（测量维度）：硅微条、硅像素（平面、3D）



- 按照传感器（探测灵敏区域）和读出电子学连接方式简单分类：混合式（Hybrid）、单片式（Monolithic）



# CMOS硅传感器



ALICE ALPIDE 剖面结构

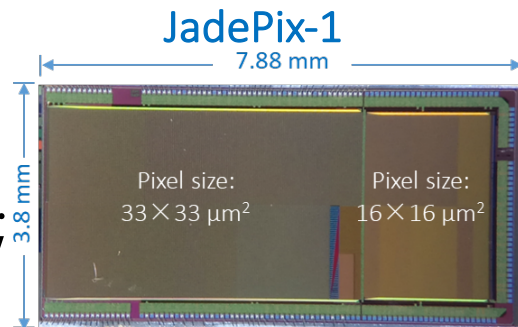
工艺要求：

图像传感器（CIS）工艺、支持多阱（像素内电子学）和高阻外延层（增大耗尽区）

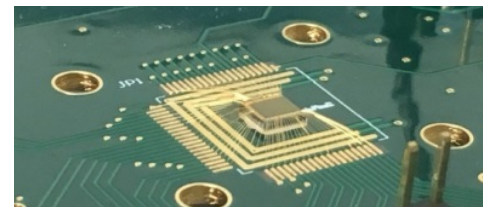
- 灵敏区与前端电子学集成于相同硅基衬底，结构紧凑、功耗低、造价低。基本工作原理：
  - 深N阱与低掺杂P型外延层构成PN结，带电粒子穿过形成电子-空穴对。电荷通过扩散（主体）和漂移被电极收集。
  - 电极链接至P阱中的读出电子学进行信号处理并对外输出数据（传统型只有N阱，无法实现CMOS电路）

# CEPC顶点探测器预研

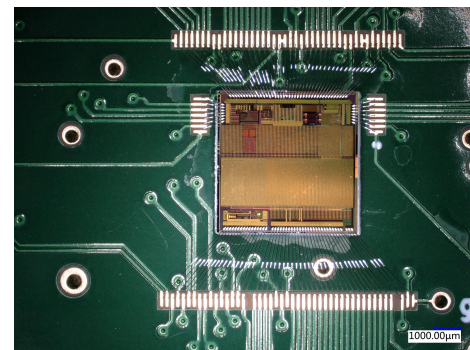
- 基于180 nm CMOS图像传感器工艺，设计硅像素探测器传感器
  - JadePix-1 电极几何优化，电荷收集效率研究；完成放射源测试、辐照测试和束流测试
  - JadePix-2 紧凑型像素设计，像素内放大电路；噪声水平测试；改进型JadePix-3
  - TaiChuPix 功能增强，Column Drained读出，两级FIFO结构；
- 逐渐过渡到满足性能要求的全尺寸芯片（位置分辨 $3\ \mu\text{m}$ ，抗辐照 $1\text{MRad/年}$ ， $50\ \text{mW/cm}^2$ ）
- 基于200 nm SOI工艺，设计硅像素探测器传感器（CPV系列），与KEK合作。



JadePix-2



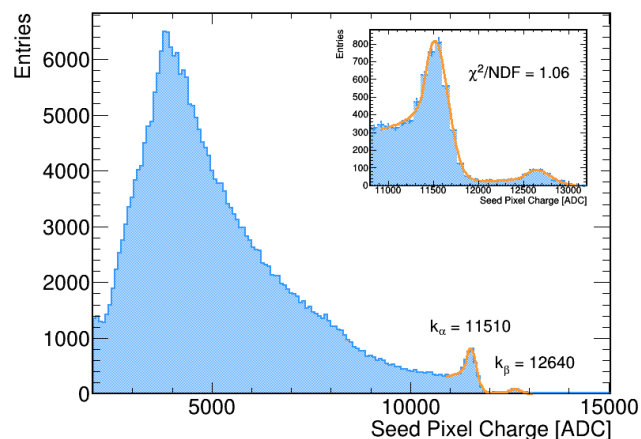
TaiChuPix-2



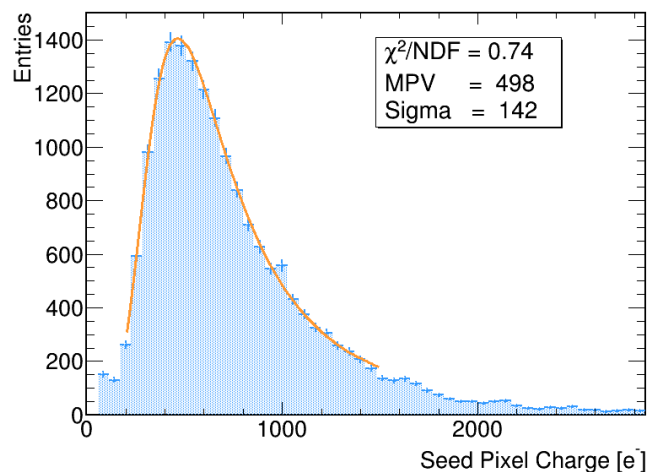
# JadePix-1测试结果

- 利用放射源和试验束流标定原型样片经受中子辐照后的电荷收集、位置分辨率的变化。

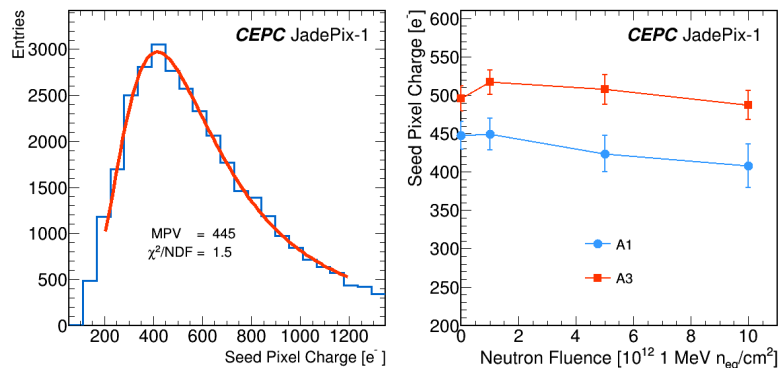
Fe-55源标定电路增益



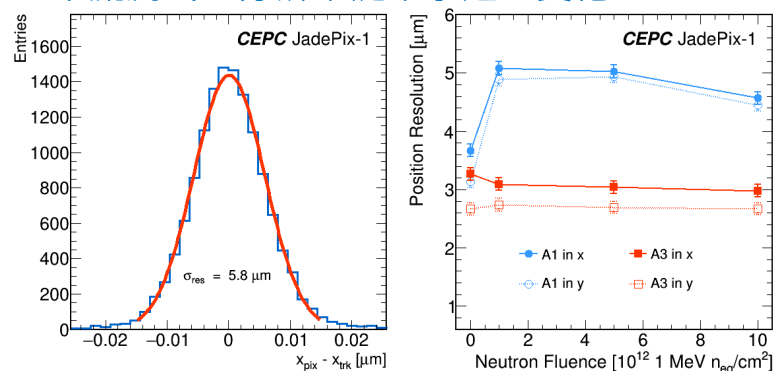
Sr-90源测量电荷收集



束流测试：电荷收集随中子通量变化



束流测试：分辨率随中子通量变化

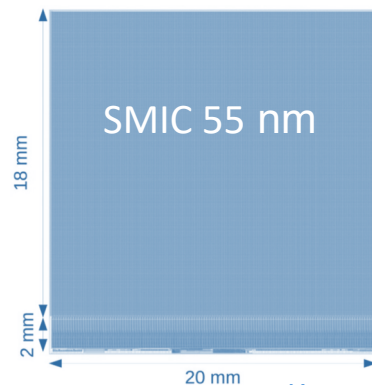
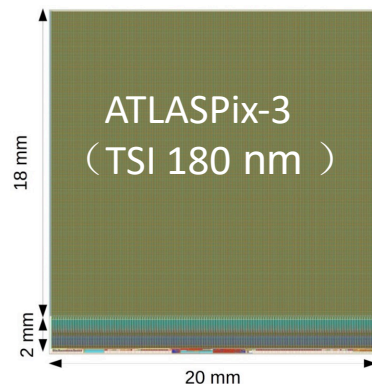
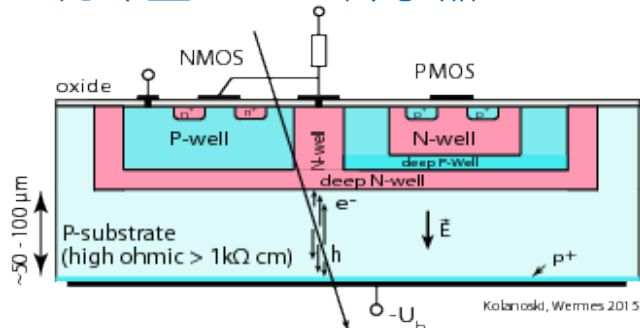




# 径迹探测器预研

- 基于高压CMOS工艺，设计符合CEPC径迹探测器要求的探测器
  - 耗尽型传感器，电荷漂移收集，提高时间分辨
  - 基于ATLAS CMOS Pixel设计（主要指标已经实现），调整电路设计，降低功耗
  - 尝试国产新工艺，准备测试结构验证性能
  - 最终指标：位置分辨率好于 $7\mu\text{m}$ ，时间分辨好于 $10\text{ns}$ ，功耗低于 $200\text{mW}/\text{cm}^2$
- 系统设计验证：基于ATLASPix-3以及ATLAS或ALICE硅像素探测器碳纤维支撑结构，建造Stavelet验证基本设计。
- 读出系统（联合科大等单位研制）、国产高压CMOS工艺；

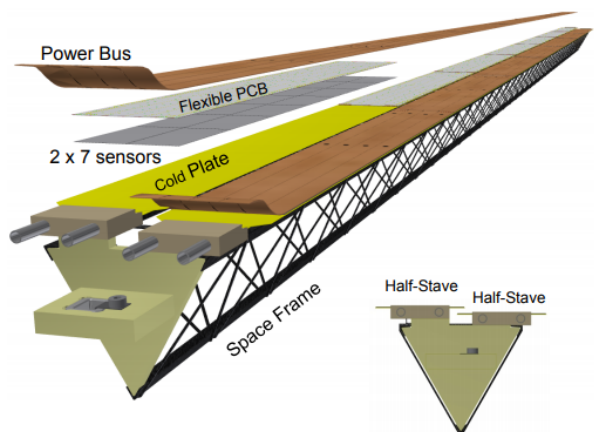
## 耗尽型CMOS传感器



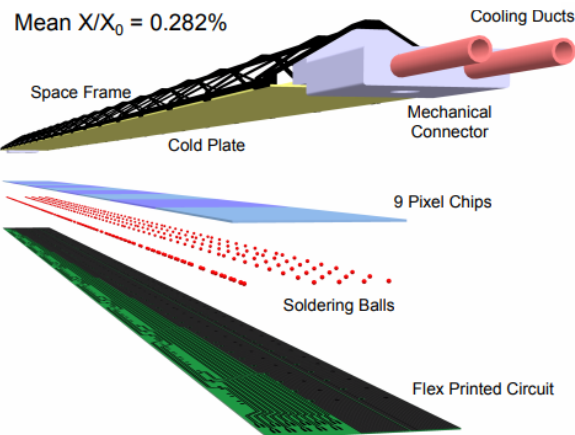
# 硅探测器支撑与冷却

- 轻质（低质量）、刚性结构长期稳定支撑硅探测器；高效冷却方式（低质量）带走电子学、电源线等产生的热量

ALICE 外层径迹： $\sim 0.8\% X/X_0$

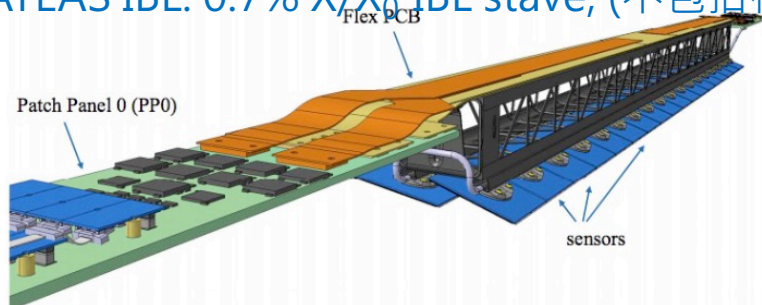


ALICE 内层径迹  $\sim 0.3\% X/X_0$



ATLAS ITK-Pixel:  $0.5\% X/X_0$  (不包括模块)

ATLAS IBL:  $0.7\% X/X_0$  IBL stave, (不包括模块)

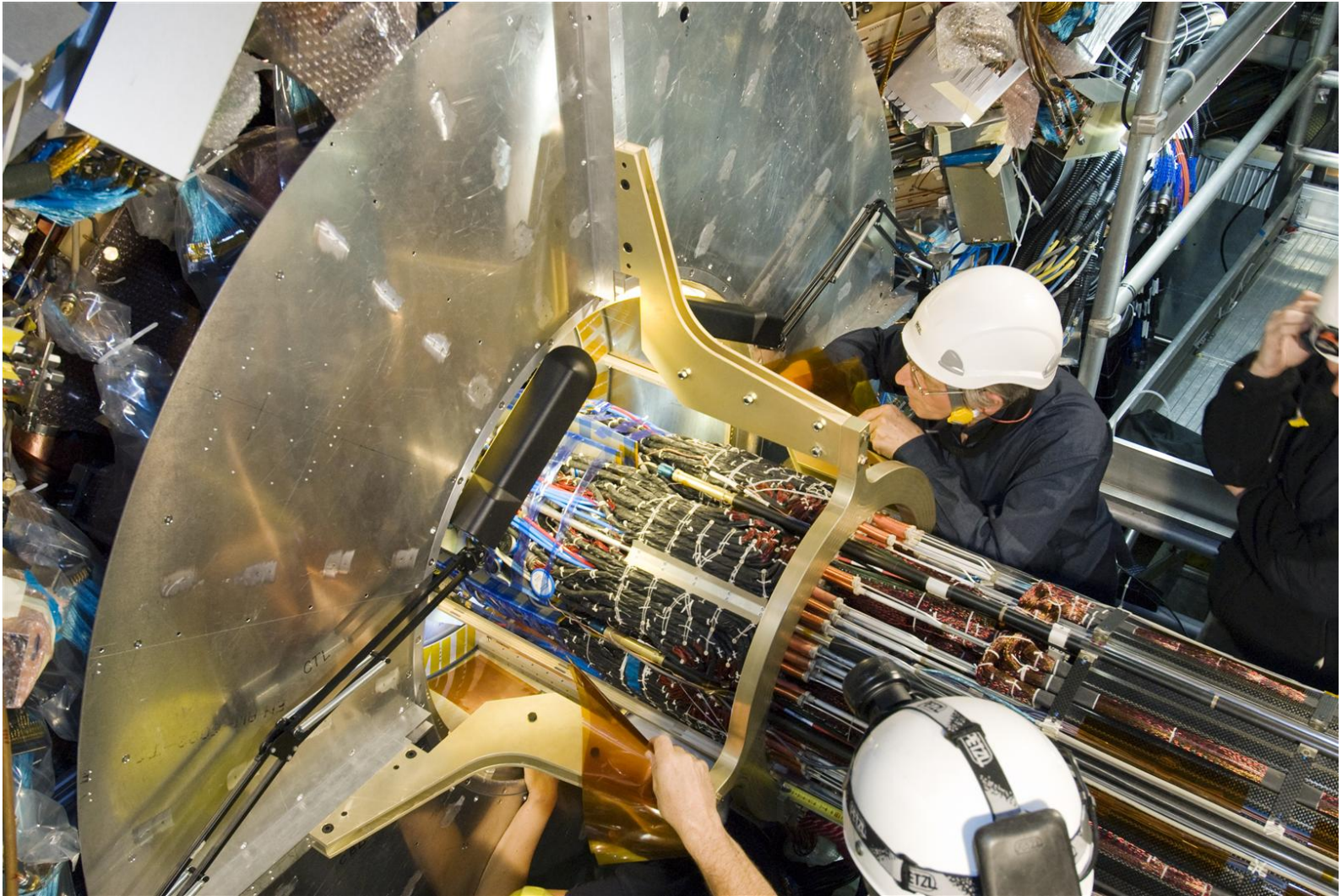


CEPC 设计要求：

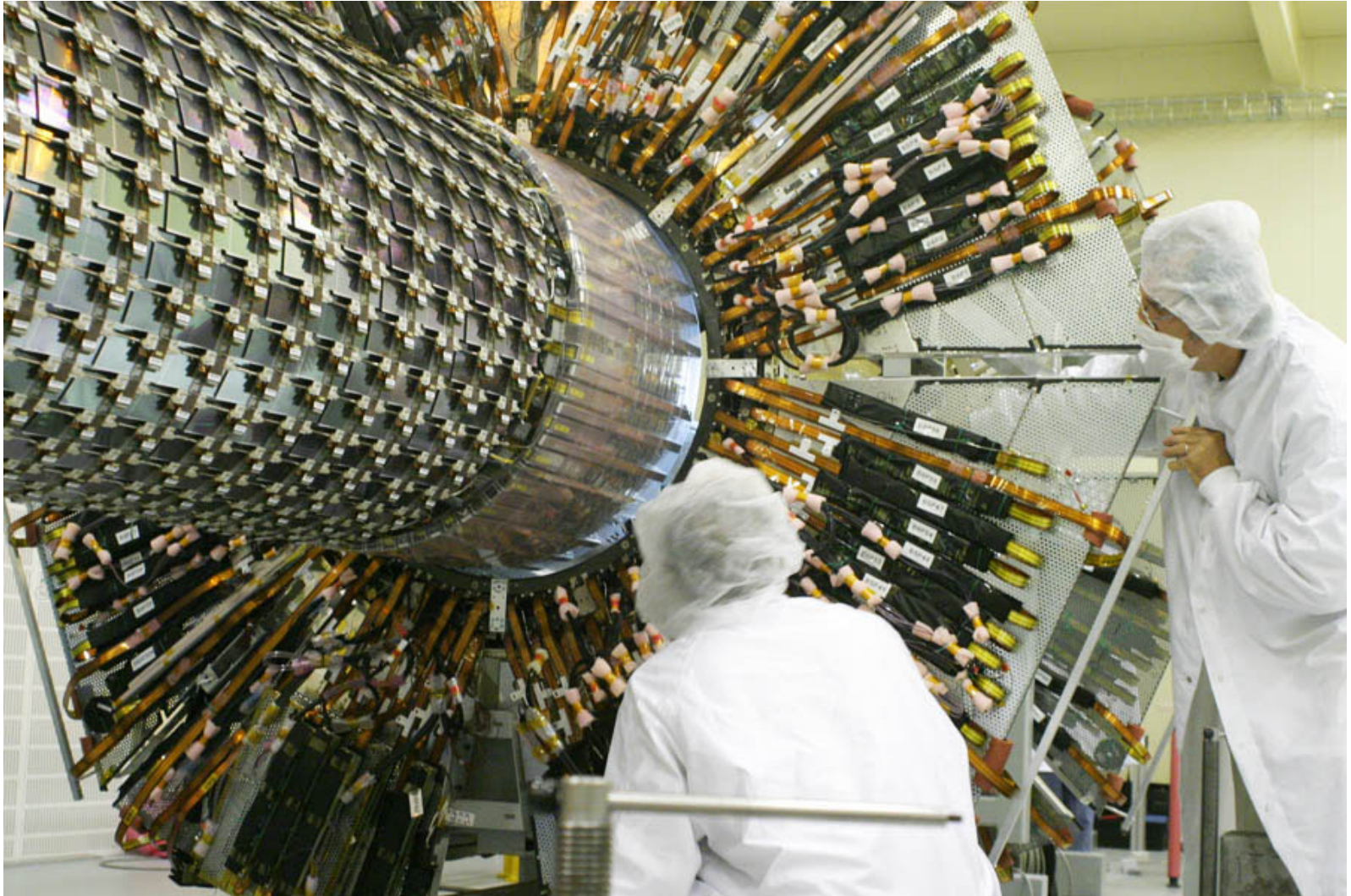
顶点探测器： $0.15\% X/X_0$

径迹探测器： $0.65\% X/X_0$

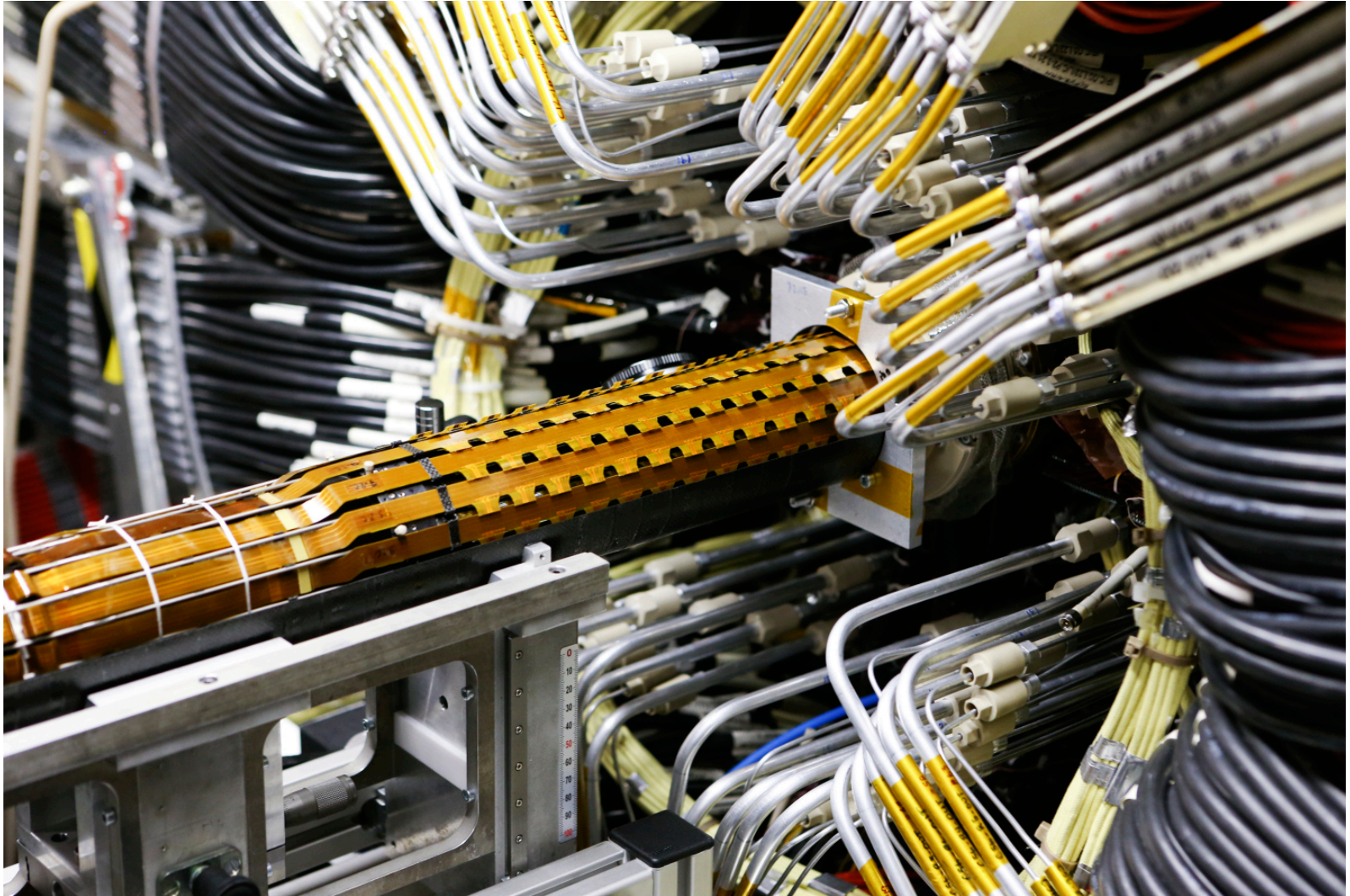
# ATLAS 硅像素探测器 (PIXEL) 安装



# ATLAS 硅微条探测器 (SCT) 安装

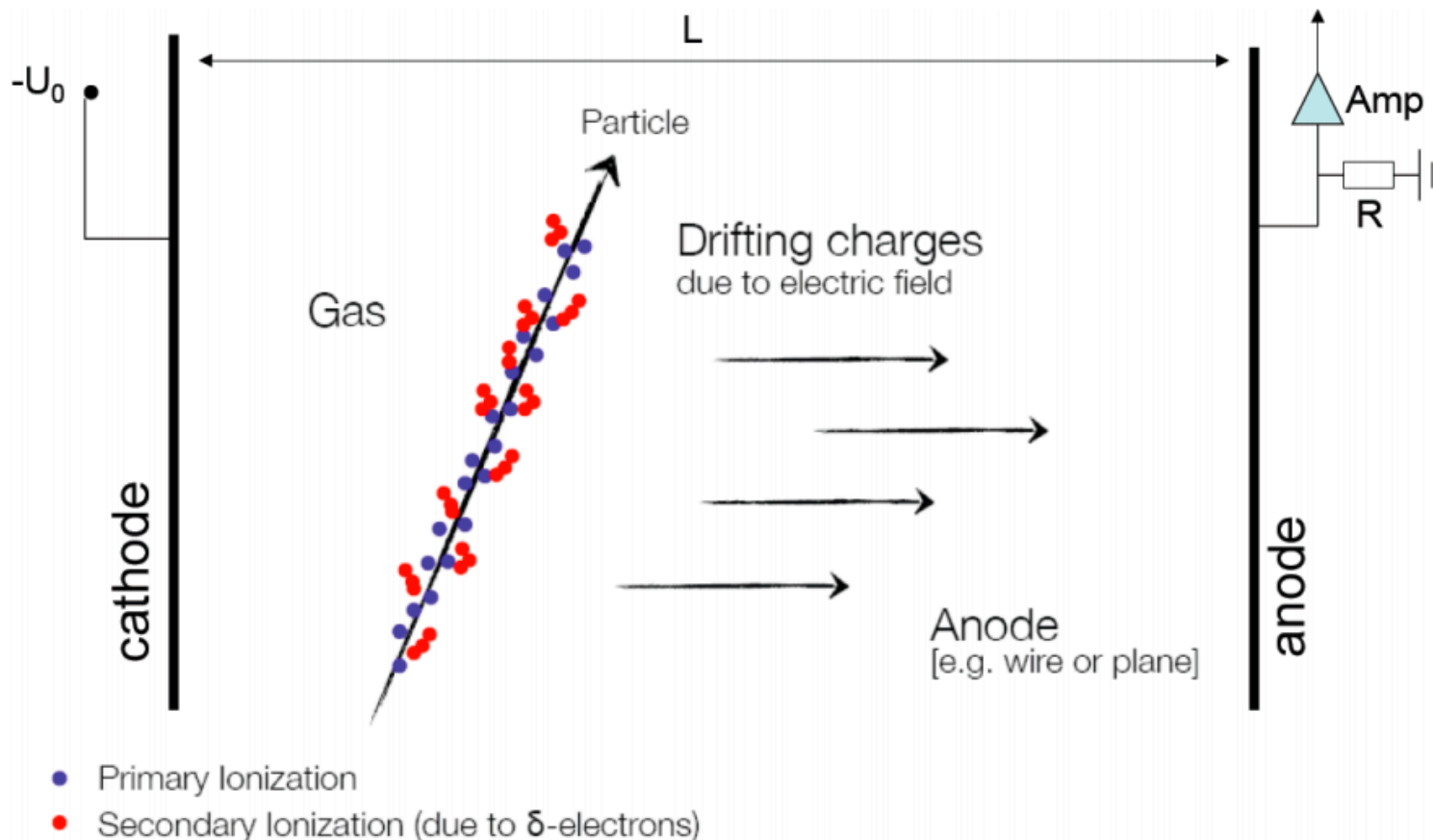


# ATLAS 硅像素探测器 (IBL) 安装



# 气体探测器工作原理

- 以气体为电离介质，通过收集粒子穿过气体时产生的电子和离子，实现对入射带电粒子的探测。



# 气体探测器相关参数

- 电离能
- 离子对电离能： $W_i$
- 平均原初离子对数： $n_p$
- 平均粒子对数： $n_T$

$$\langle n_T \rangle = \frac{L \cdot \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_i}{W_i}$$

Gas	$\langle Z \rangle$	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$E_i$ [eV]	$W_i$ [eV]	$dE/dx$ [keV/cm]	$n_p$ [cm <sup>-1</sup> ]	$n_T$ [cm <sup>-1</sup> ]
He	2	$1.66 \cdot 10^{-4}$	24.6	41	0.32	5.9	7.8
Ar	18	$1.66 \cdot 10^{-3}$	15.8	27	2.44	29.4	94
CH <sub>4</sub>	19	$6.7 \cdot 10^{-4}$	13.1	28	1.48	18	53
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	34	$2.42 \cdot 10^{-3}$	10.6	23	4.50	46	195

# 电离统计涨落

Ionization statistics:

Mean distance between two ionizations:  $\lambda = 1/(n_e \sigma_I)$

Mean number of ionizations:  $\langle n_p \rangle = L/\lambda$

$n_p$  Poissonian distributed:

$$P(n_p, \langle n_p \rangle) = \frac{\langle n_p \rangle^{n_p} e^{-\langle n_p \rangle}}{n_p!}$$

$P(0) = \exp(-L/\lambda)$  yields  $\lambda, \sigma_I$   
using (in)efficiency of gas-detectors

Mean free path  $\lambda$ :  
[typical values]

He	0.25 cm
Air	0.052 cm
Xe	0.023 cm

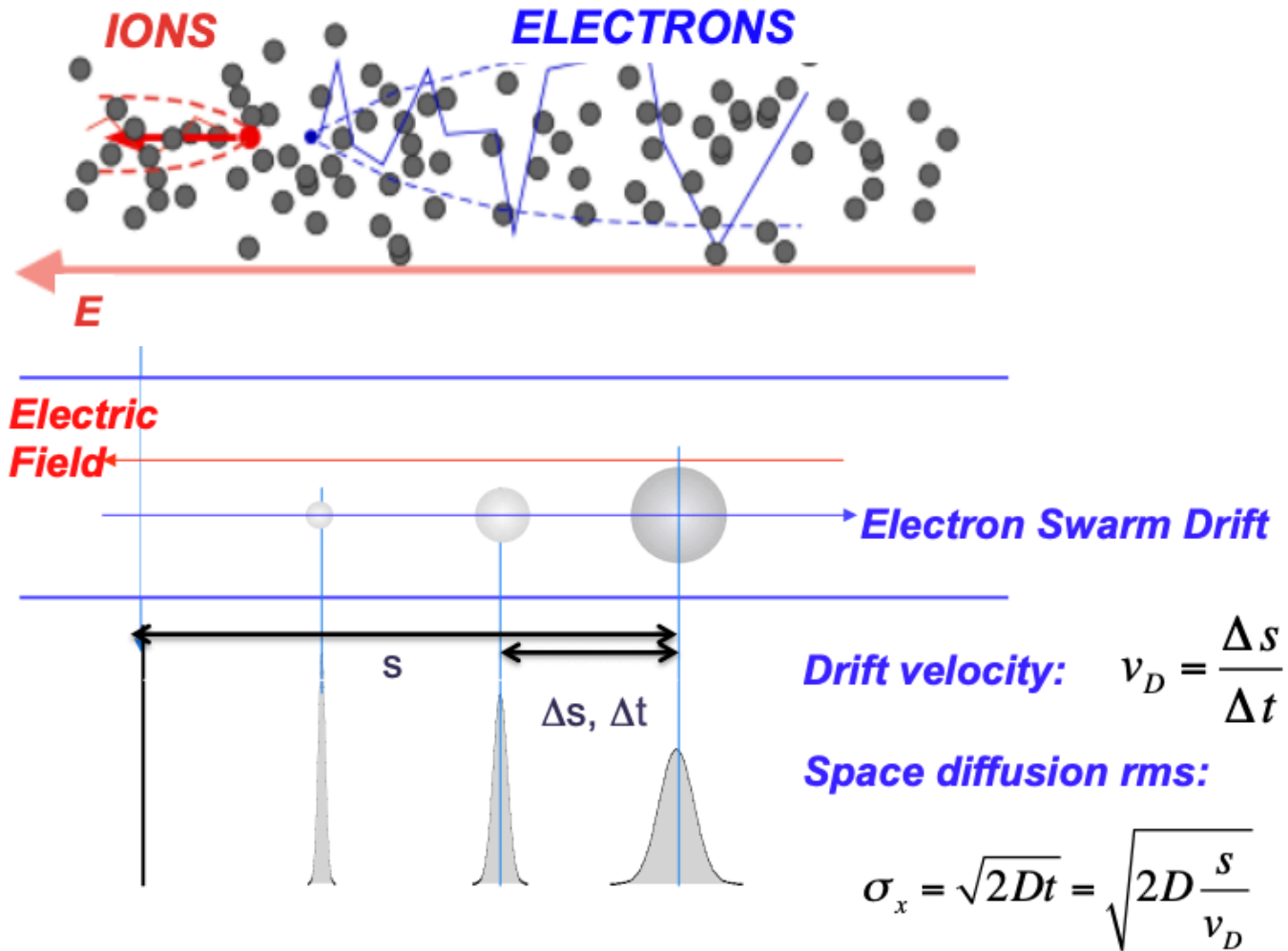
[ $\rightarrow \sigma_I(\text{He}) \approx 100 \text{ b}$ ]

$\sigma_I$  : Ionization x-Section  
 $n_e$  : Electron density  
 $L$  : Thickness

- 电荷迁移率  $\rightarrow$  影响气体探测器计数率
- 电荷扩散  $\rightarrow$  影响位置分辨率
- 电子学噪声水平 ( ENC  $\sim O(1000 e^-)$  )  $\rightarrow$  需要信号放大，通过碰撞电离产生雪崩放大，信号增益
- 电荷符合  $\rightarrow$  影响探测效率

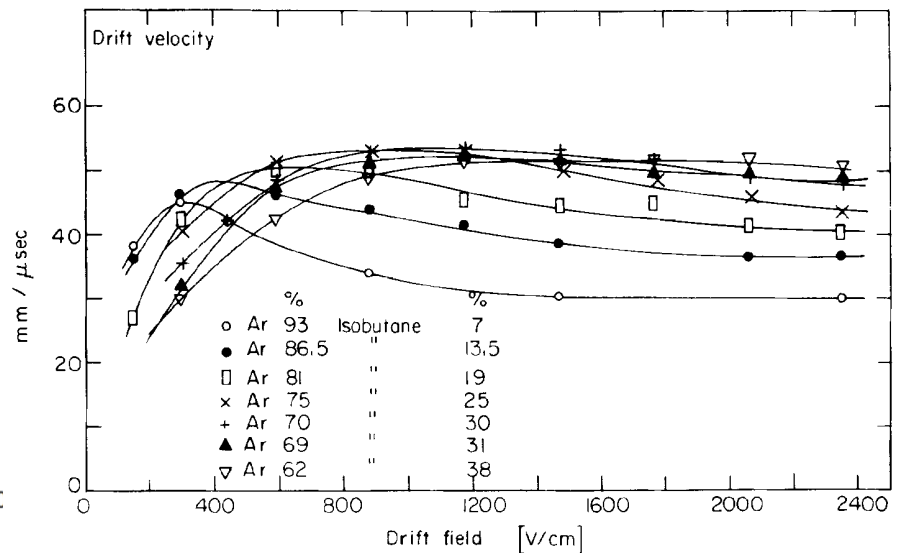
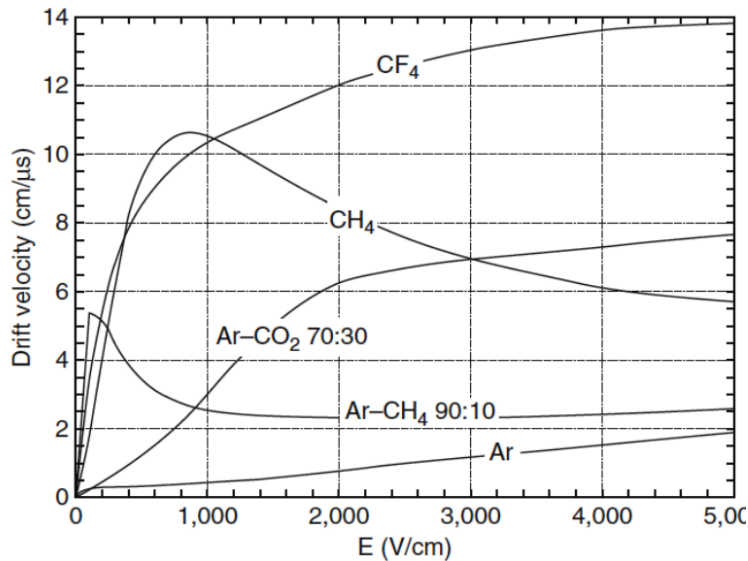


# 漂移与扩散



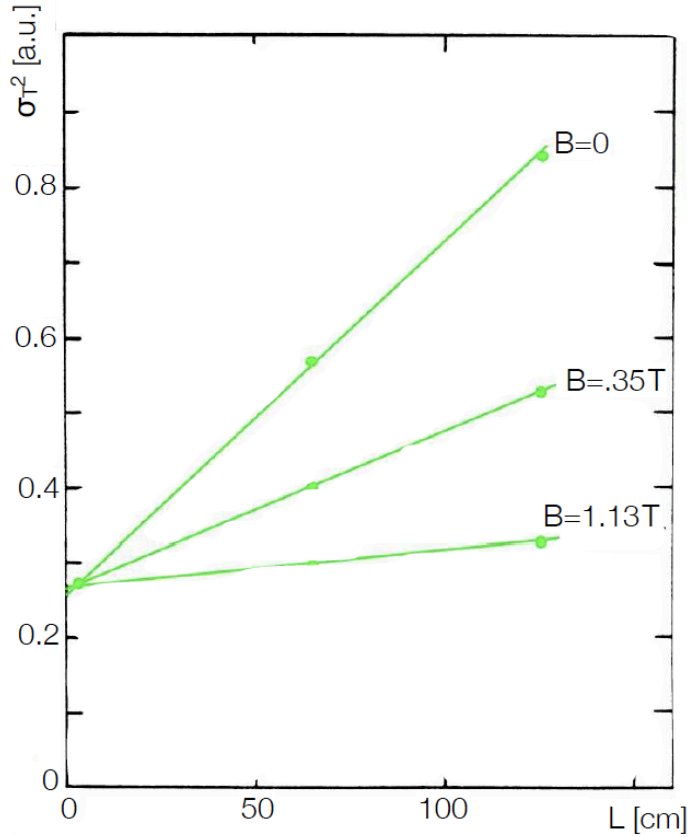
# 漂移速度

- 在外部电场作用下，电子/离子获得漂移速度  $\vec{v}_D = \mu_{\pm} |\vec{E}|$ ，且沿电场线方向运动。

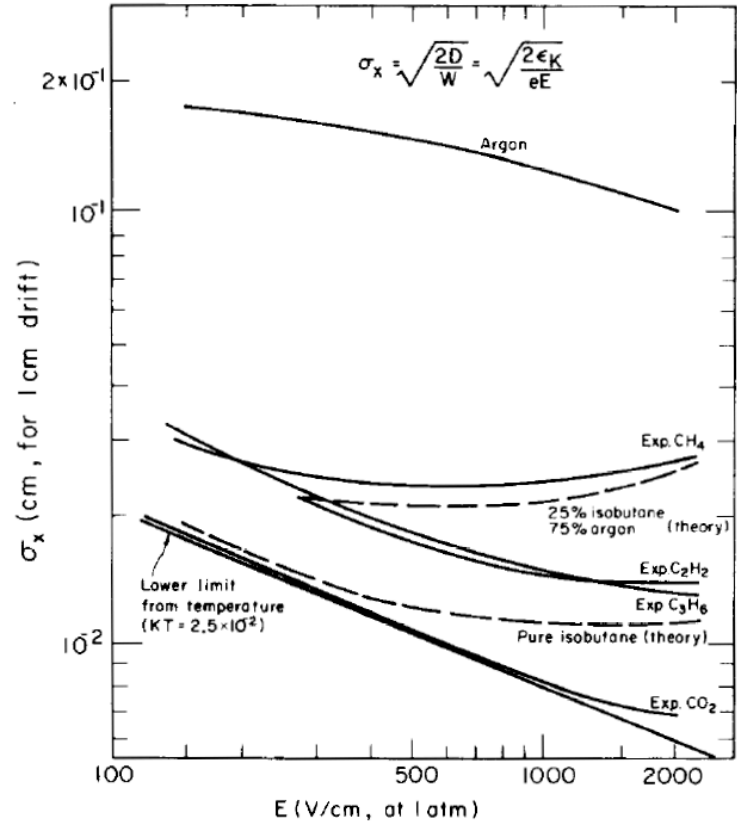


- $\tau \approx 1/v_D$  扩散效应随漂移速度提高而减弱（比如CF<sub>4</sub>）；恒定的漂移速度有利于提高空间分辨率（混合气体）

# 漂移与扩散

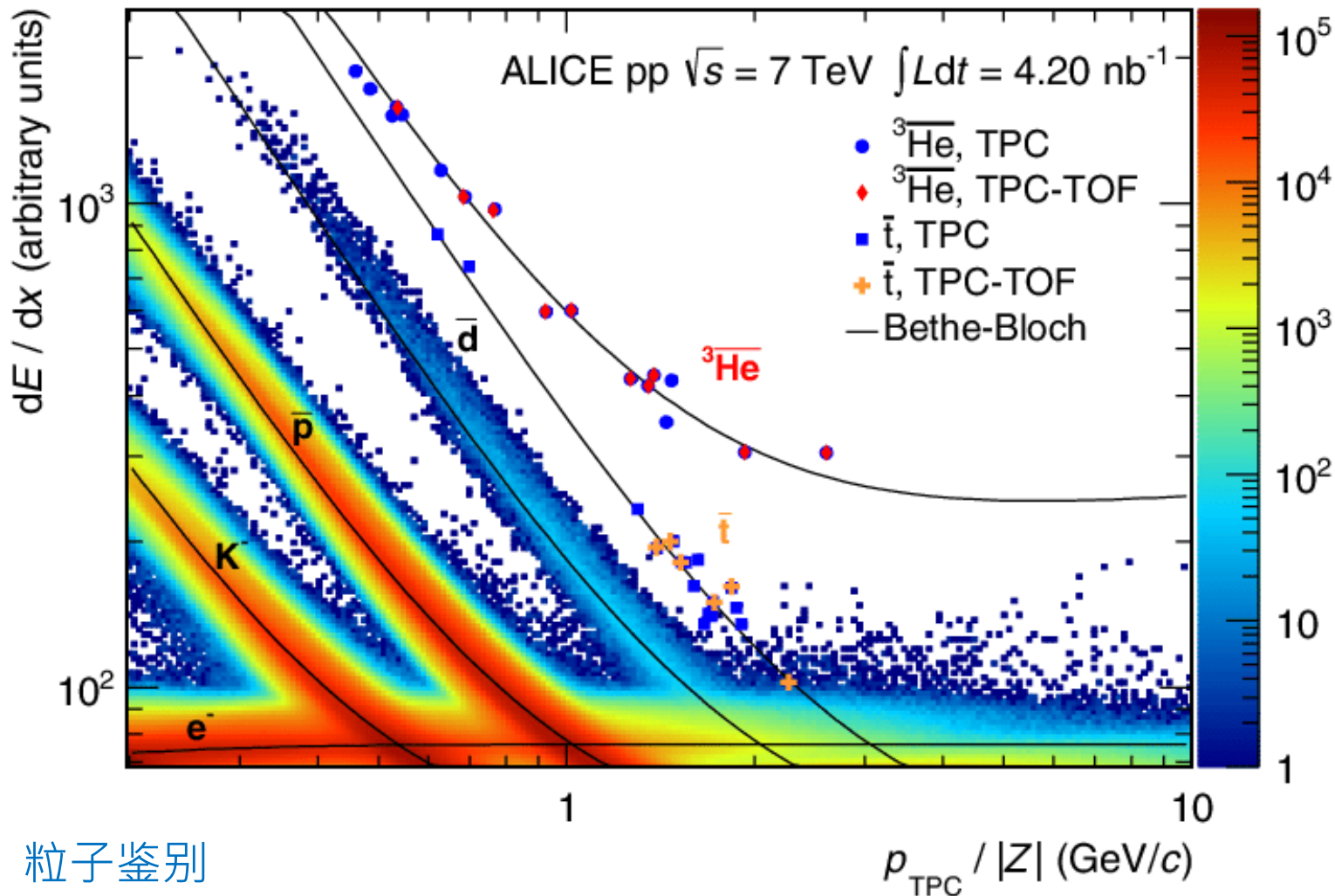


磁场减小横向扩散



电场减小纵向扩散

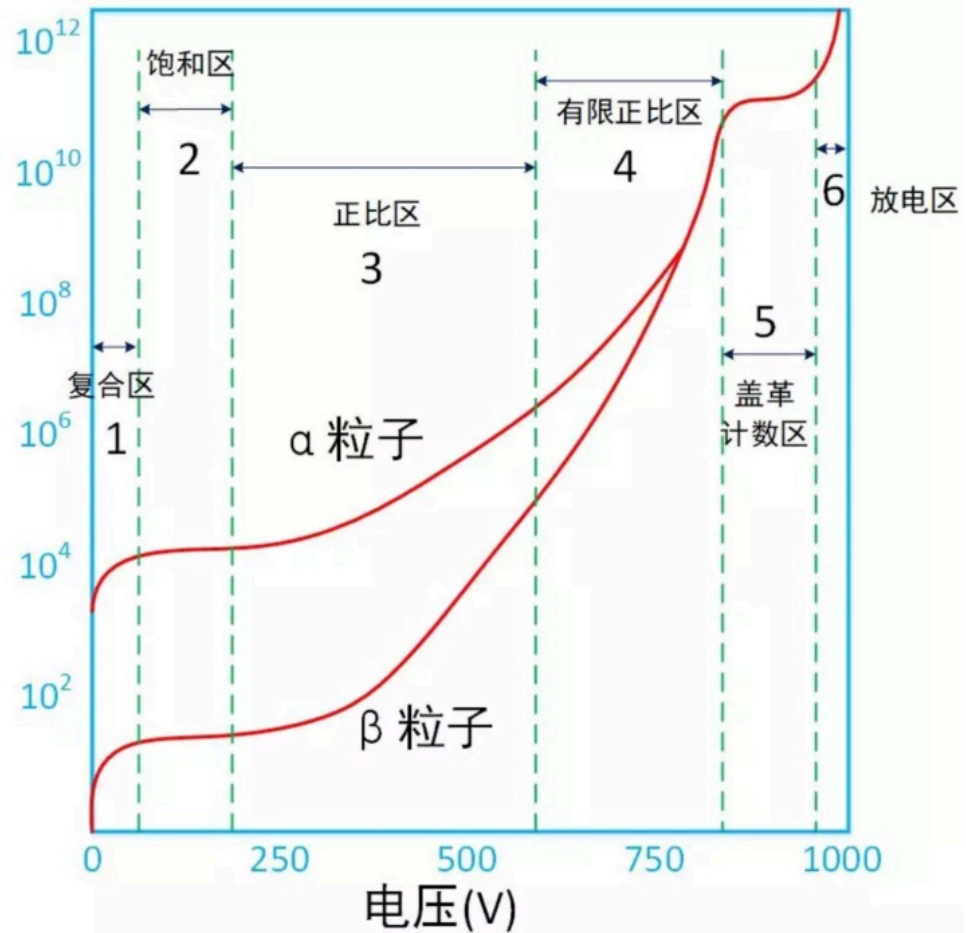
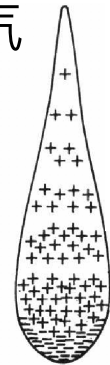
# 电离能损 ( dE/dx ) 测量



粒子鉴别

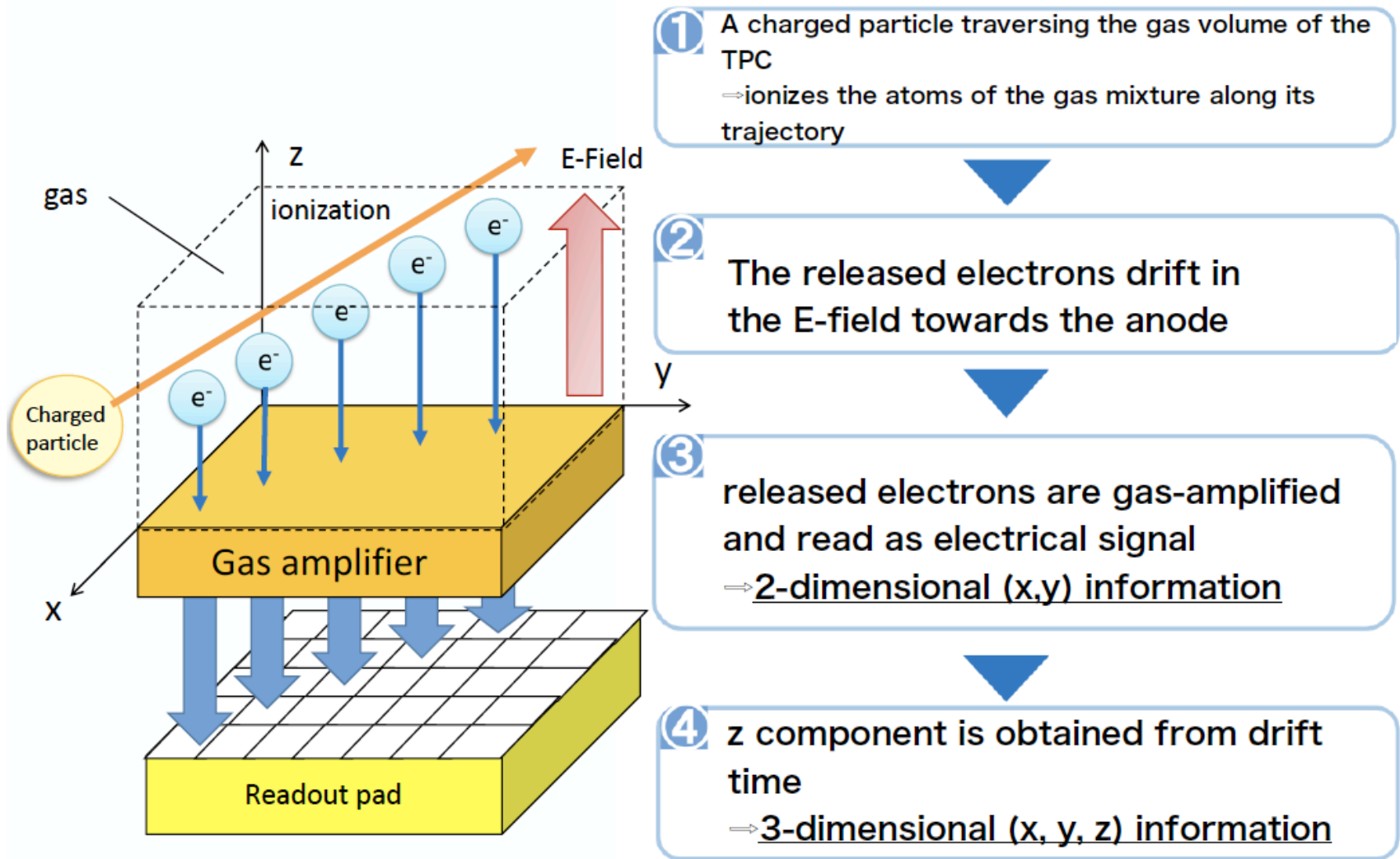
# 气体放大

- 电离室、正比计数器、盖革计数器等分类基于带电粒子在其中产生的离子对数，与电压之间的关系。
- “**雪崩效应**”：在高电场中，当带电粒子路过时，其产生的电子可以因此获得足够的能量，从而将气体分子进一步电离



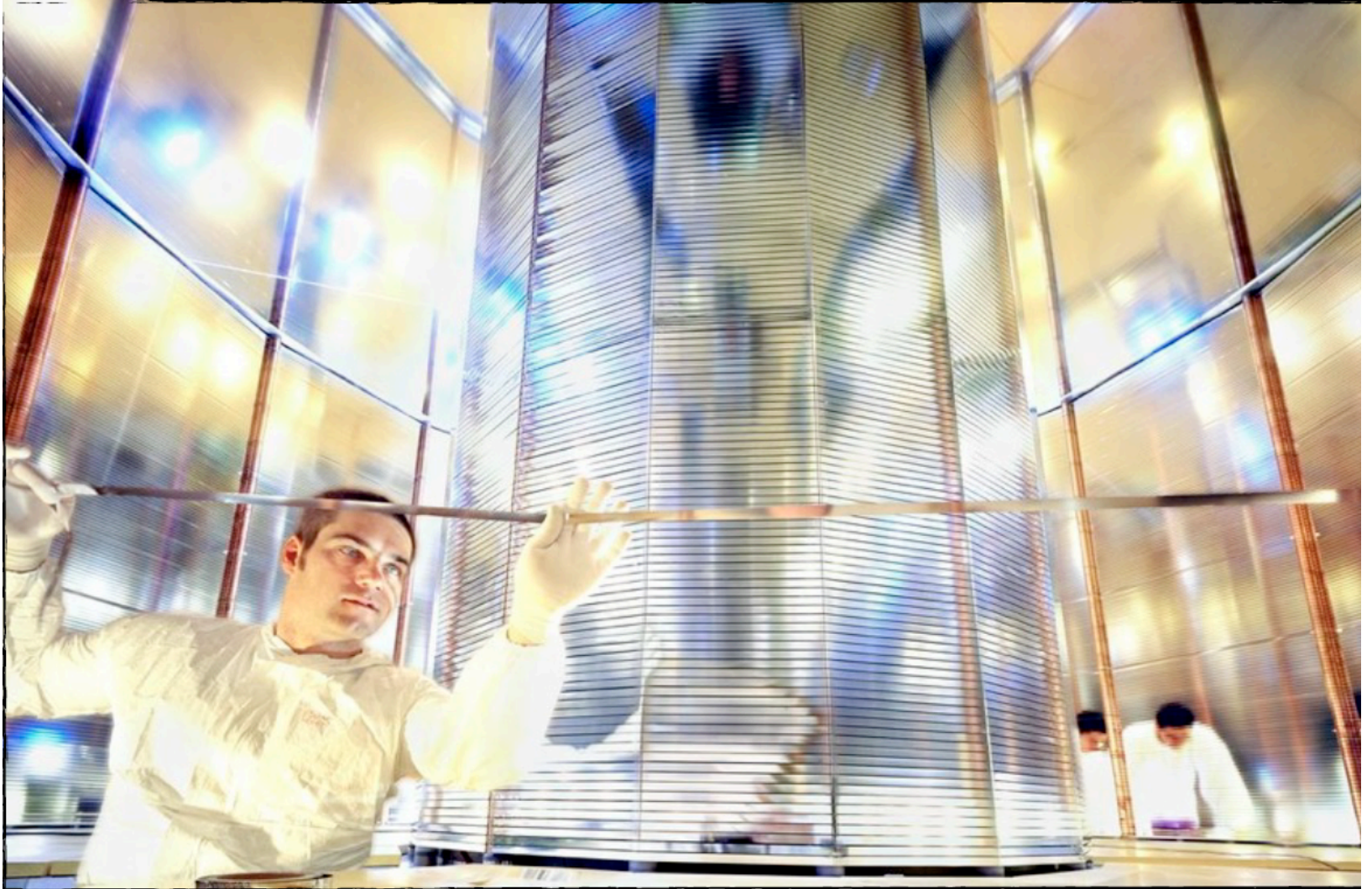
雪崩效应示意图

# 时间投影室 ( TPC ) 工作原理

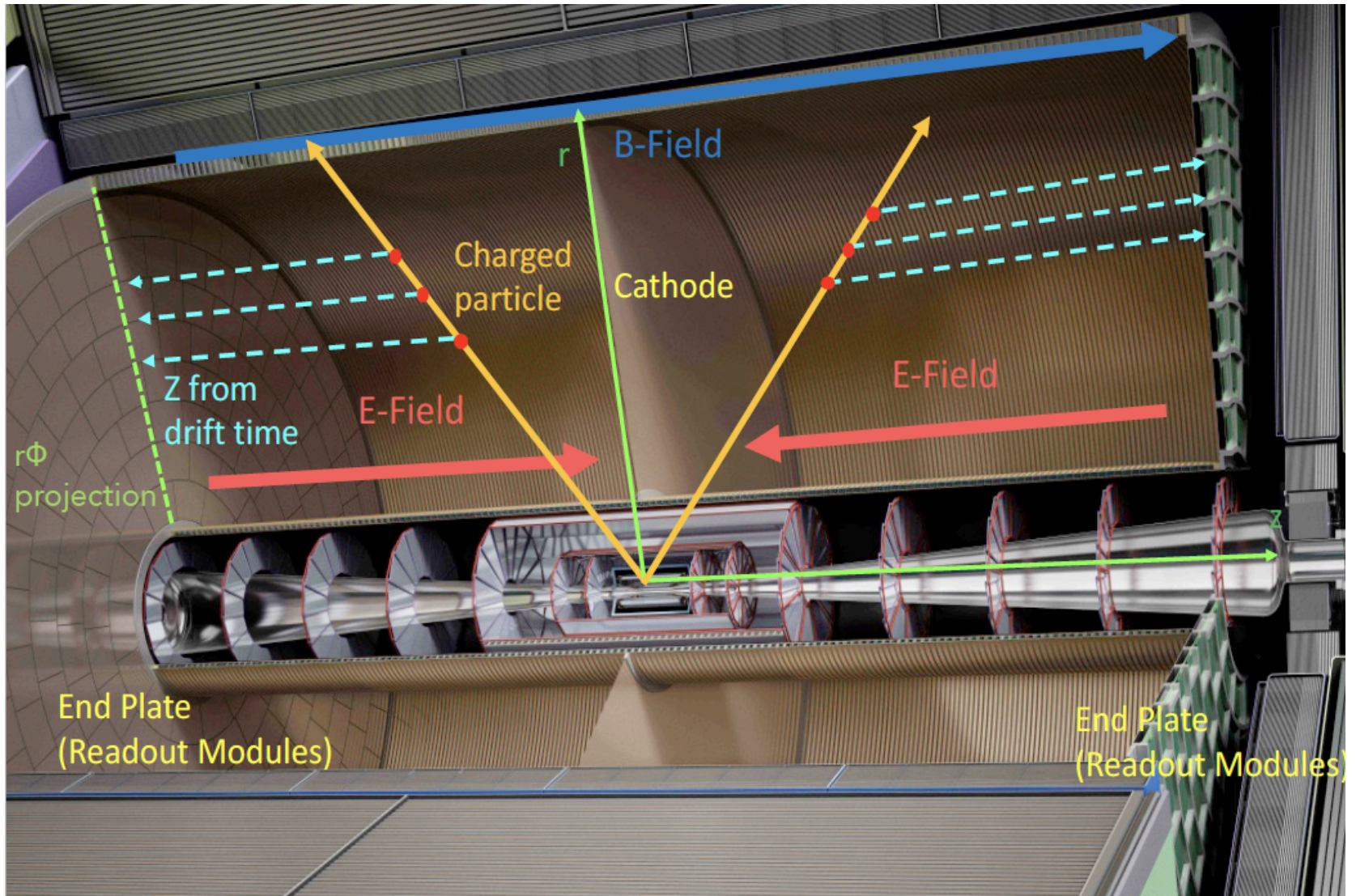


三维测量点

# 应用案例：ALICE TPC

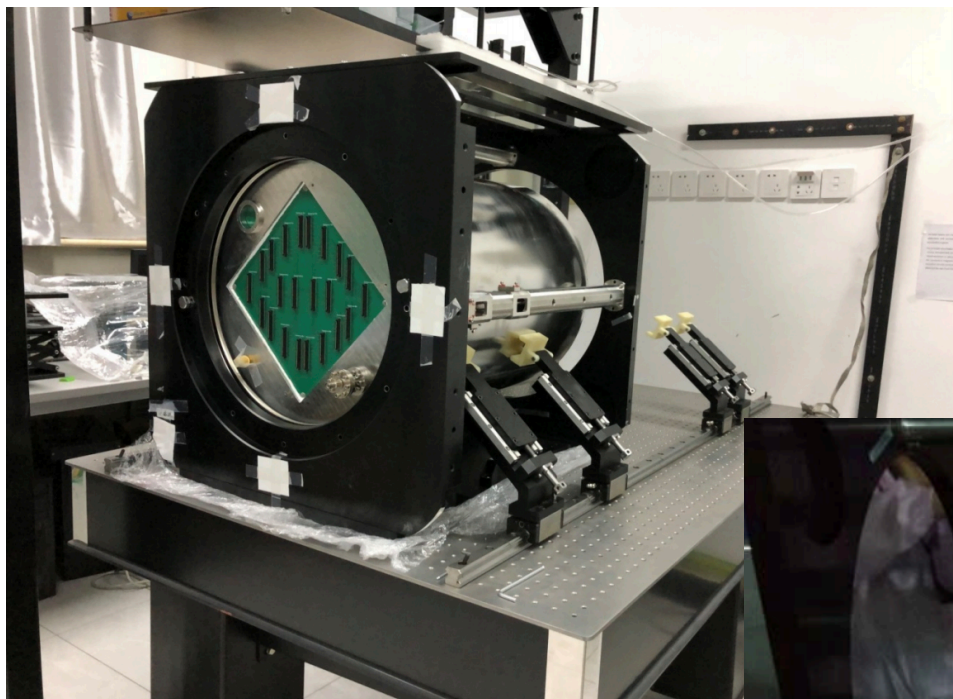


# ILD TPC 设计

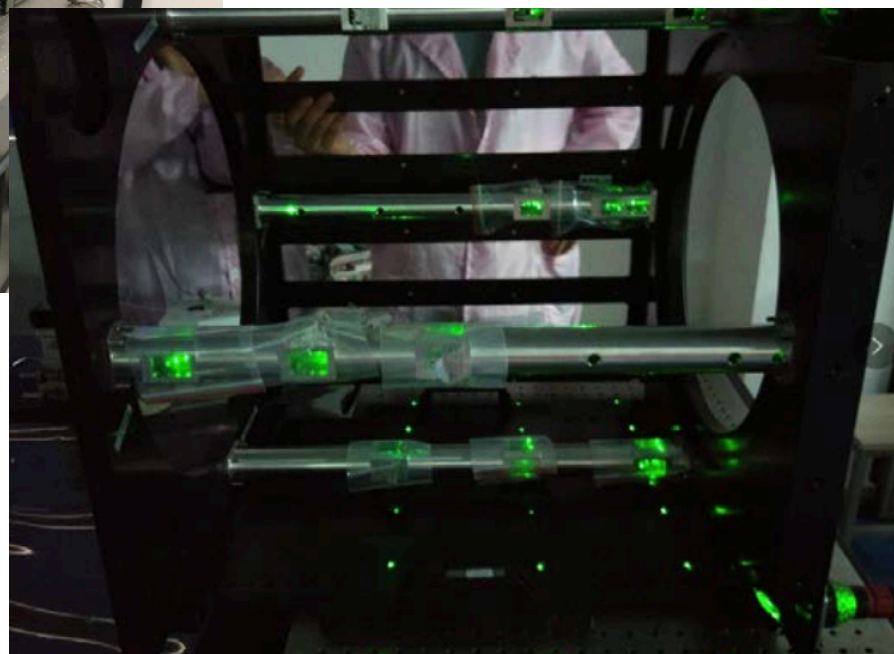




# CEPC TPC原型样机

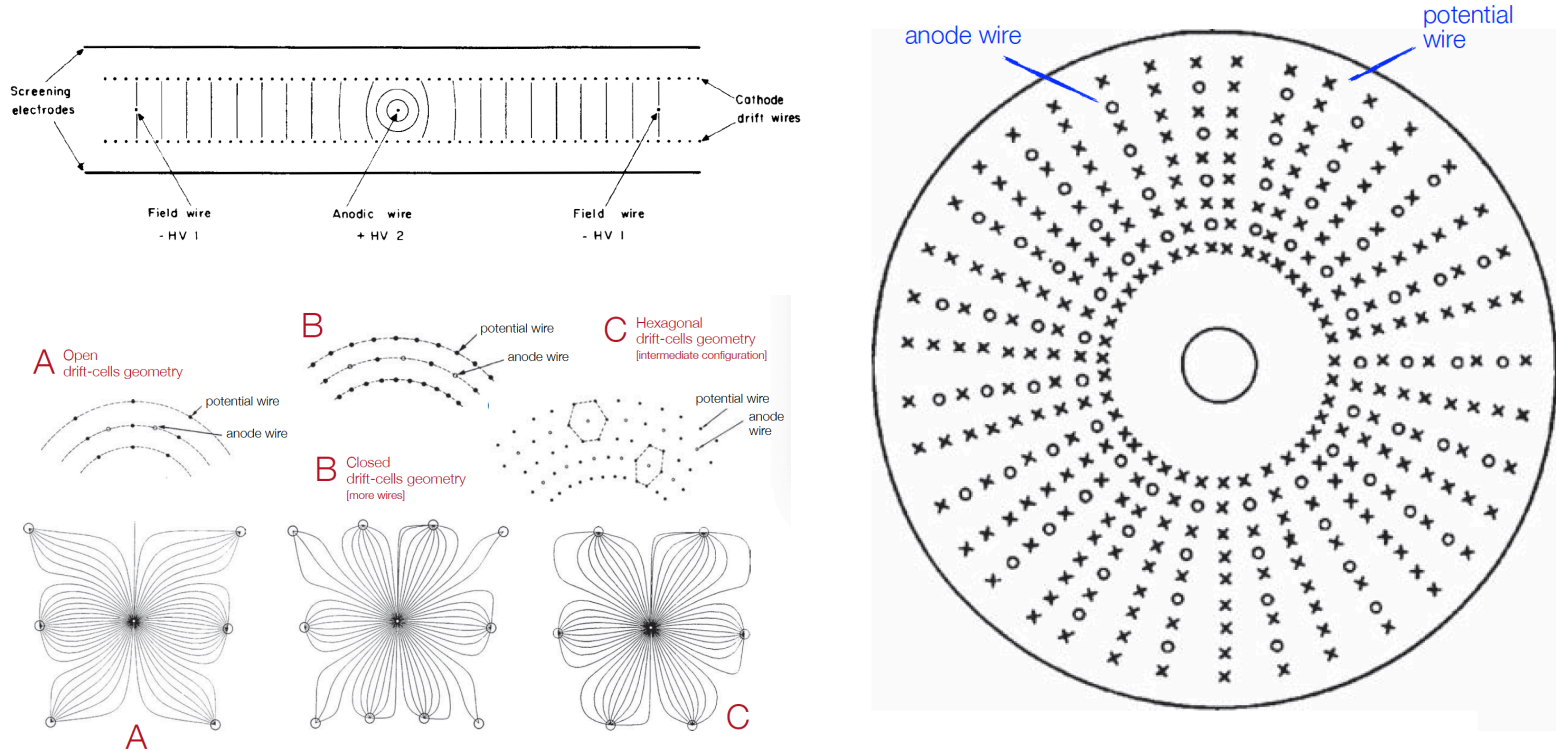


激光准直



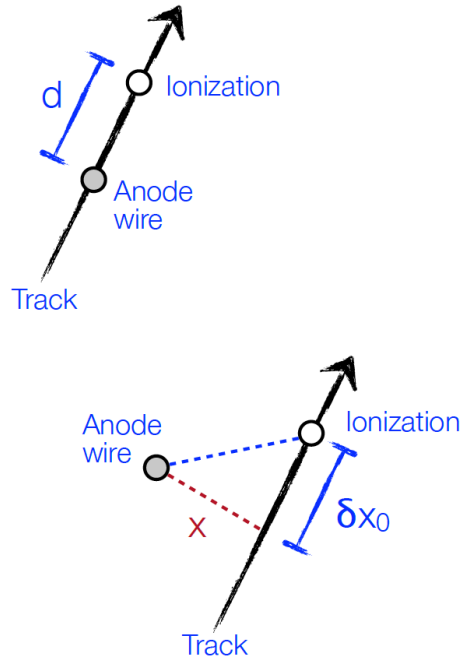
# 漂移室 ( Drift Chamber )

- 测量漂移时间，可以确定入射粒子位置。漂移单元由阳极、场电极和许多场丝组成。场电极和场丝加上适当的电位，以造成很大范围的均匀电场。电子的漂移速度与气体成分、电场分布有关。



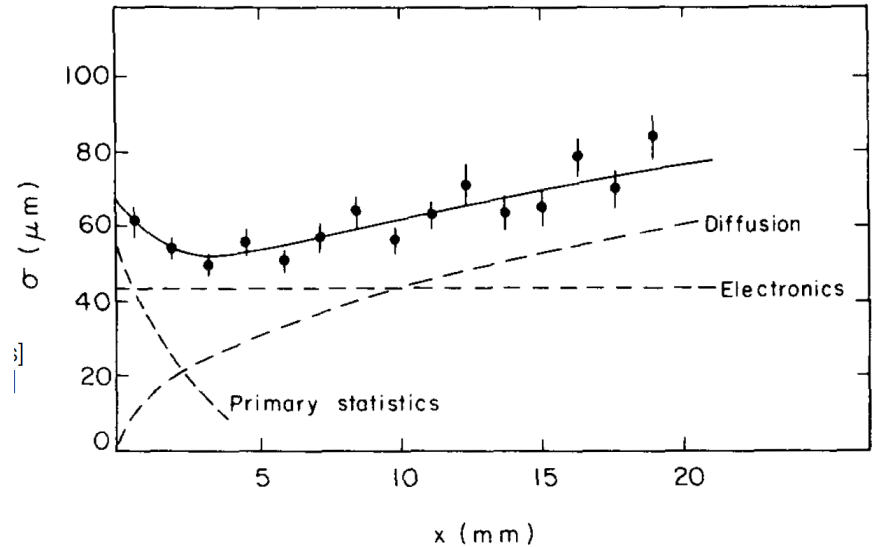
# 漂移室位置分辨率

$$\sigma_x^2 = \underbrace{\left(\frac{1}{64N^2}\right) \cdot \frac{1}{x^2}}_{1^{\text{st}} \text{ ionization statistics}} + \underbrace{\frac{2D}{v_d} \cdot x}_{\text{diffusion}} + \underbrace{\sigma_{\text{const}}^2}_{\text{electronics } \delta\text{-electrons}}$$

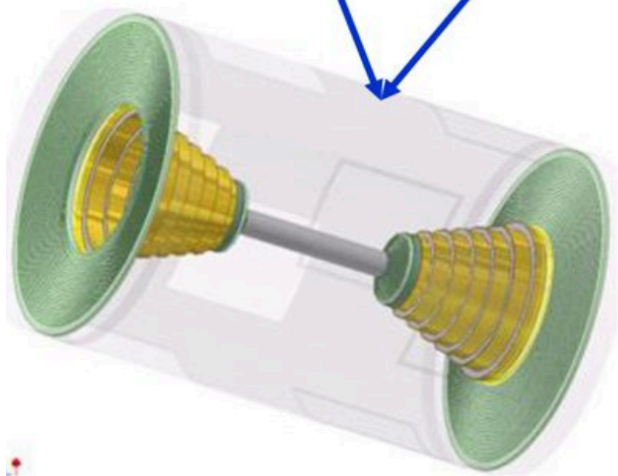
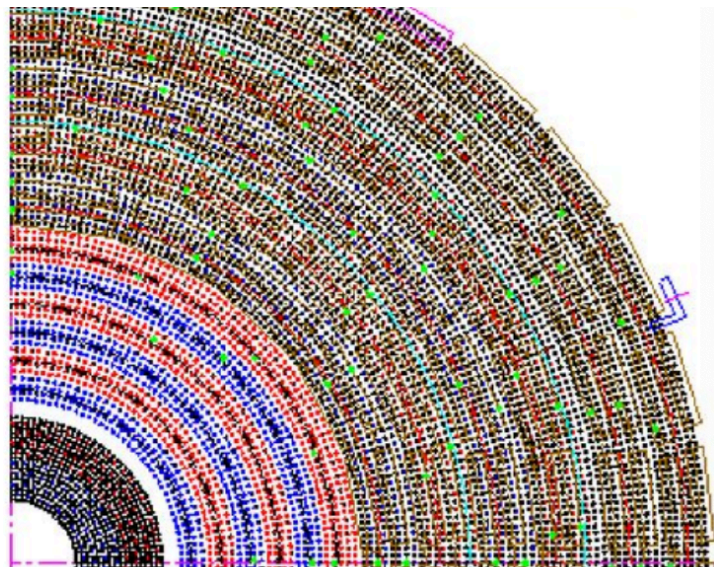
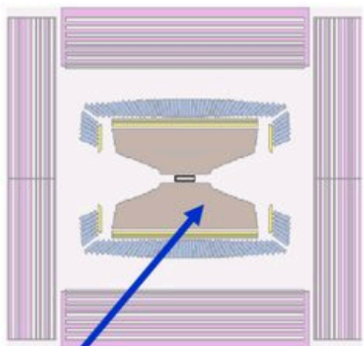
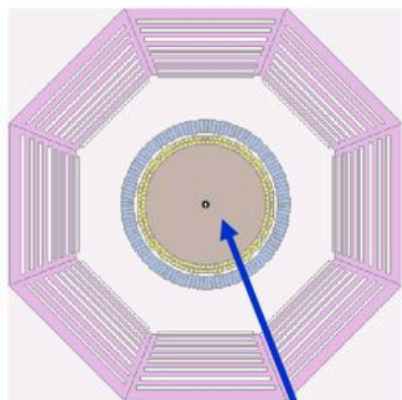


N: 单位长度内电离数 ;  $D \propto 1/n$  ( n : 粒子密度 )

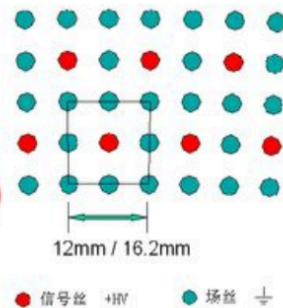
- 增加气压，有利于增加提高 N和n，提高位置分辨率



# 应用案例：BESIII 主漂移室 (MDC)



- 43丝层(24S +19A)
- 6796 信号丝
- $\sigma_{XY} = 130 \mu\text{m}$ ,
- $\Delta P_t/P_t = 0.5 \% (@1 \text{ GeV})$
- $dE/dx$  分辨 0.6-0.7%



# 应用案例：CDF漂移室



# 径迹探测器质量

- 尽量降低引入的质量，减小多次粒子散射效应。

$$\begin{aligned}\sigma_{d_0}^2 &= \sigma_{geom}^2 + \sigma_{MS}^2 \\ &= \left(\frac{\sigma_1 r_2}{r_2 - r_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2 r_1}{r_2 - r_1}\right)^2 + \sum_{j=1}^{n_{scatt}} (R_j \Delta\theta_j)^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} &= \frac{\sigma_{p_T}}{p_T |_{res}} \otimes \frac{\sigma_{p_T}}{p_T |_{MS}} \\ &= \sigma_x \frac{p_T}{0.3 B \cdot L^2} \sqrt{\frac{720}{N+4}} \otimes \frac{0.0136}{0.3 B \cdot L} \sqrt{\frac{x}{X_0}}\end{aligned}$$

# 设计（理想）到建成（现实）

**TABLE 5** Evolution of the amount of material expected in the ATLAS and CMS trackers from 1994 to 2006

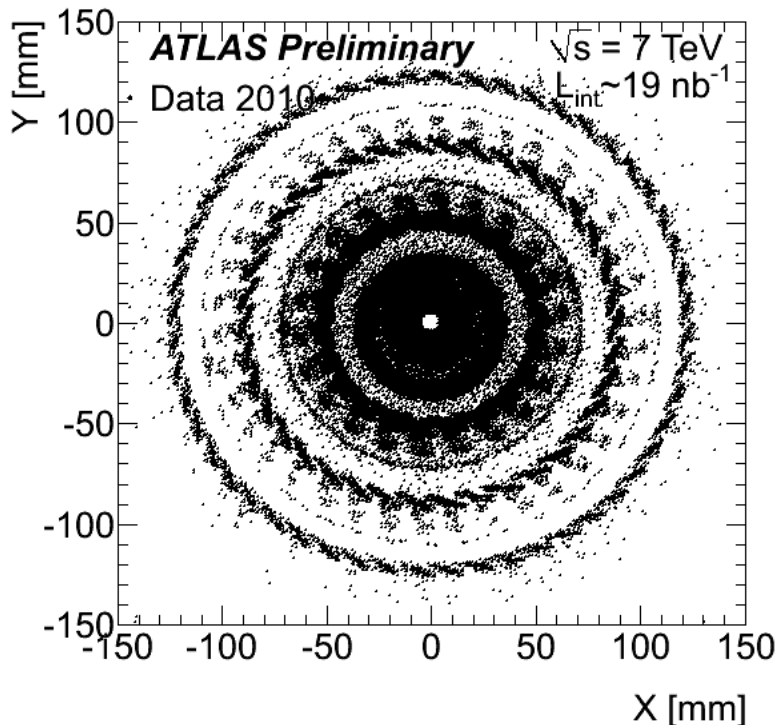
Date	ATLAS		CMS	
	$\eta \approx 0$	$\eta \approx 1.7$	$\eta \approx 0$	$\eta \approx 1.7$
1994 (Technical Proposals)	0.20	0.70	0.15	0.60
1997 (Technical Design Reports)	0.25	1.50	0.25	0.85
2006 (End of construction)	0.35	1.35	0.35	1.50

- 设计初期，很容易低估径迹探测器物质量：支撑结构、电缆、冷却结构等；探测器开始运行前，需要完整测量/估计物质量；运行后，可以利用实验数据确定物质量，甚至是结构细节。

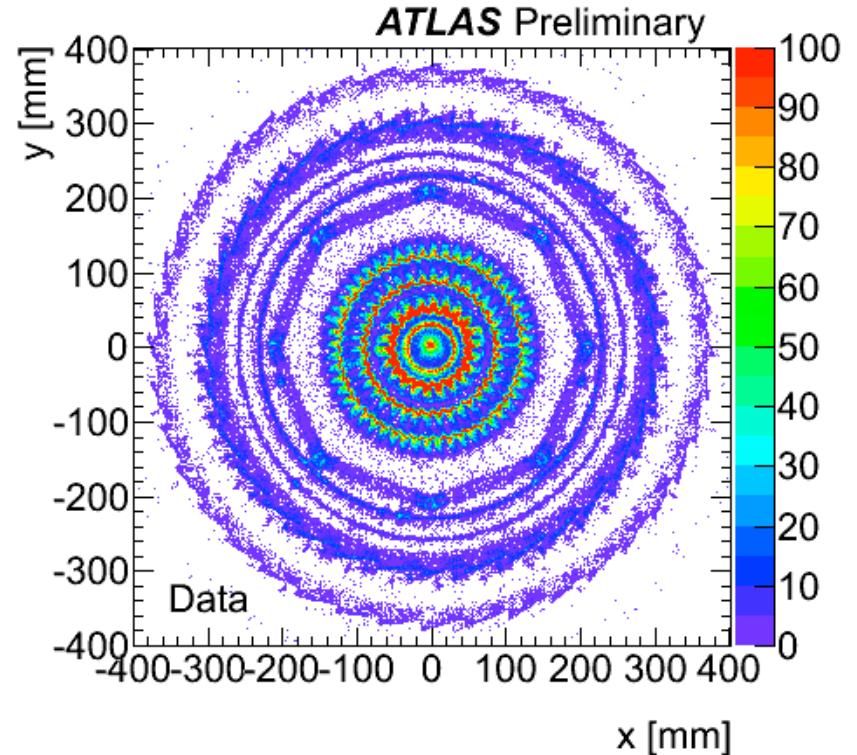
# 物质质量分布测量

- 可以使用X-光扫描的方法初步测量物质分部，然后通过重建强子作用或是转换光子的方法，准确测量物质质量

## Hadronic Interactions



## Photon Conversions





# 探测器调准 ( Alignment )

- **机械调准**：通过精确的**机械设计及安装**，可以实现毫米量级的位置精度；安装后，通过**激光频率扫描干涉 ( FSI )** 等方法，实现**10微米量级**的位置精度。

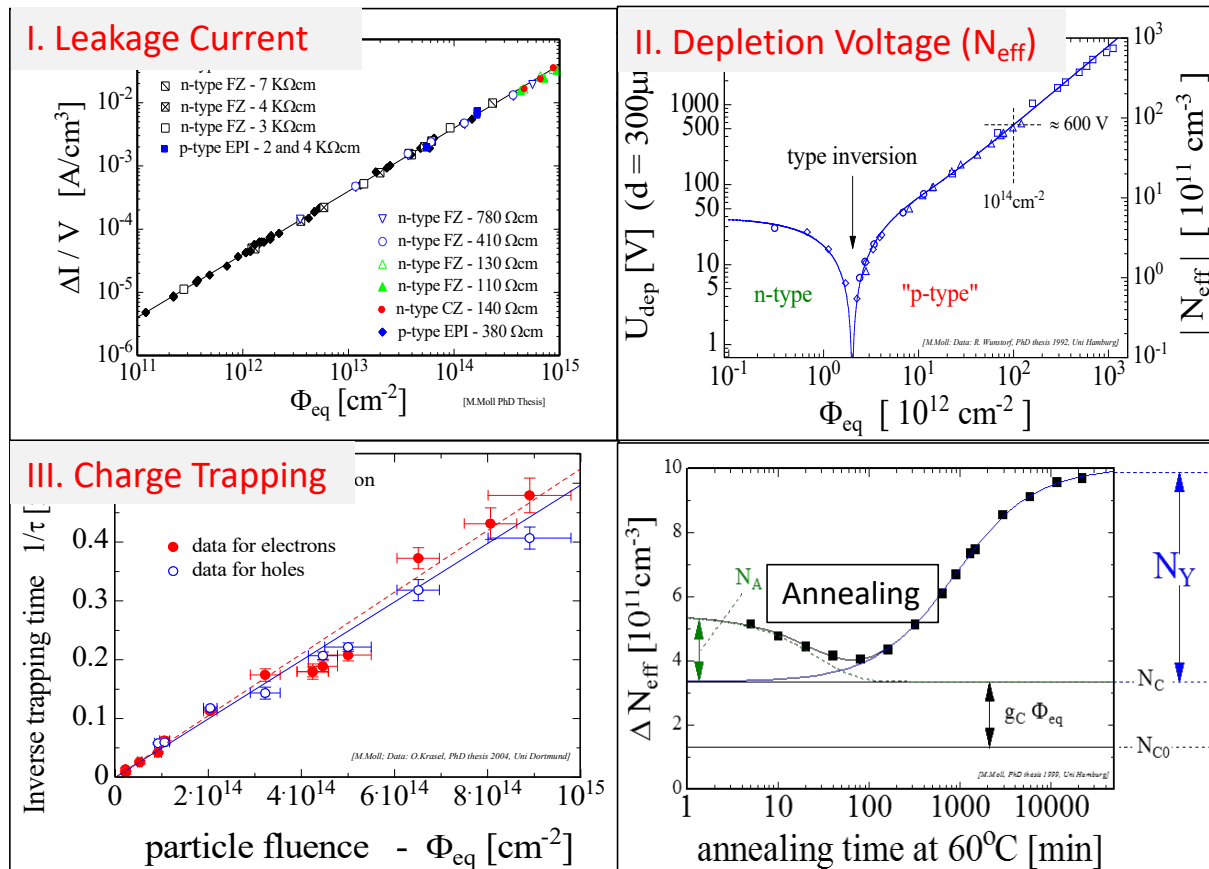


- **径迹调准**：通过**径迹重建**，根据其残差分布来修正探测器部件的位置信息，精度提高至几个微米
  - **带电粒子径迹来**：宇宙线和对撞出射带电粒子 ( **挑战**：电子对撞机径迹稀少，要求径迹探测器刚性 )

# 小结

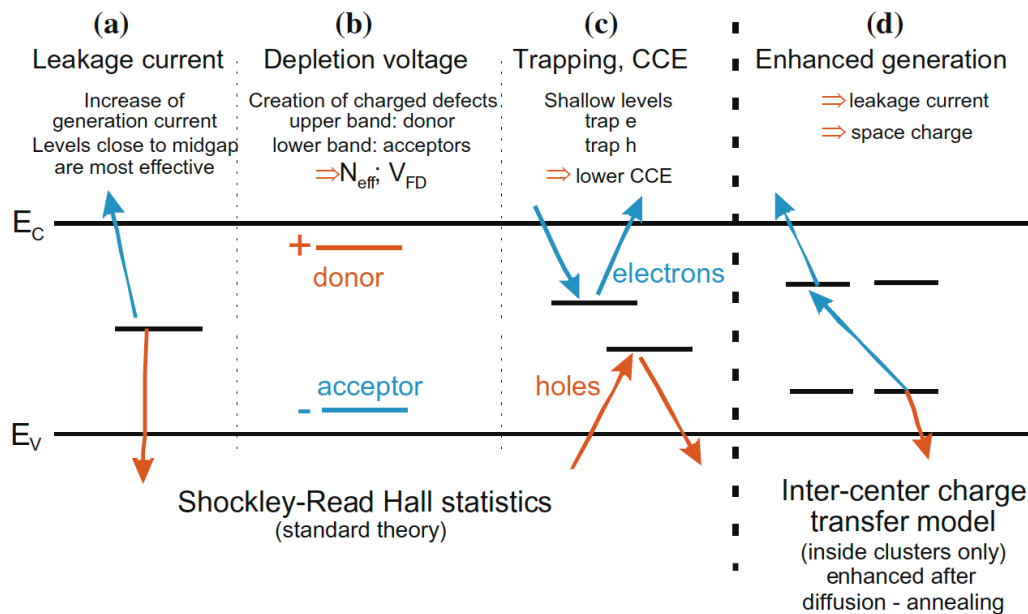
# 硅探测器辐照损伤：宏观现象

- 辐照损伤（体损伤、表面损伤）会导致硅探测器性能下降，主要表现有：漏电流增加、耗尽电压变化、电荷收集下降



# 硅探测器辐照损伤：微观机理

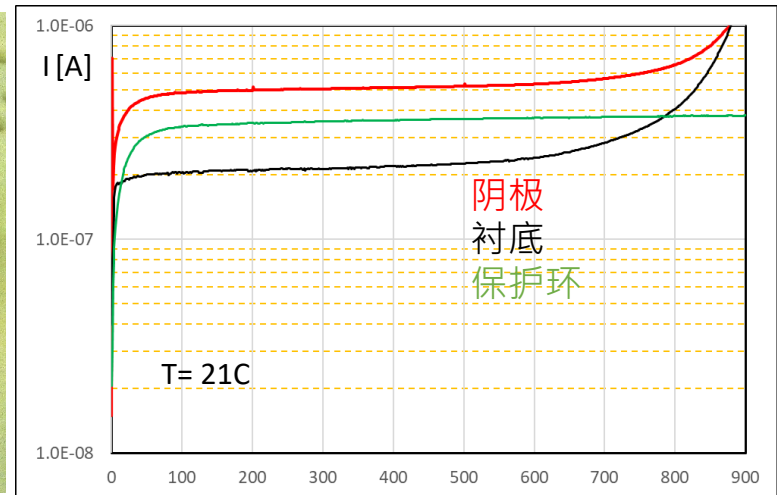
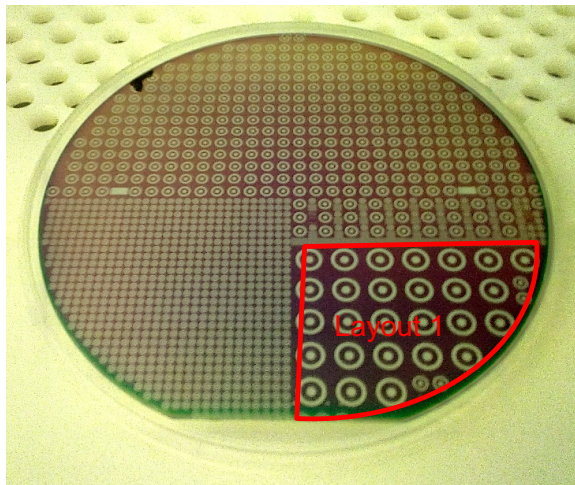
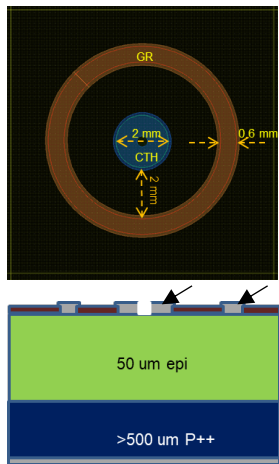
- 微观机理（能带理论、辐照损伤引入杂质态）解释宏观现象



- 微观损伤结构观测：深能级瞬态谱仪（DLTS）、热激发电流仪（TSC）、瞬态电流谱仪（TCT）等等
- 汉堡模型（预测漏电流、耗尽电压变化趋势）；佩鲁贾模型、德里模型等（简化受主、施主能级TCAD模型用于信号仿真）

# CMOS传感器辐照体损伤机理研究

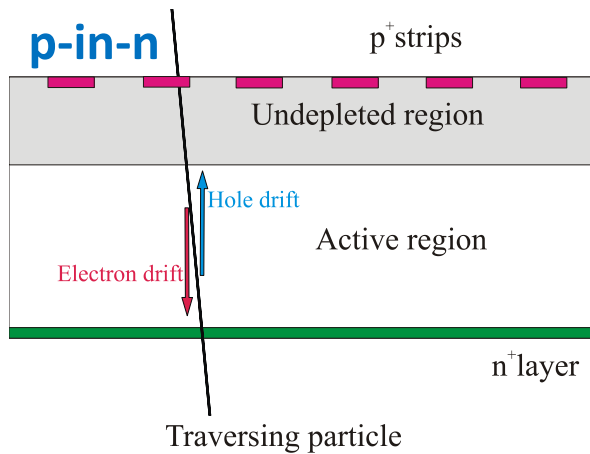
- 国际上 ( RD50 ) 经过长期研究，对高阻p型和n型衬底的硅传感器的体损伤已有充分研究，已经建立可靠的模型用于指导传感器的设计和优化。
- 但对基于外延层结构的CMOS传感器的体损伤研究较少。与英国卢瑟福实验室合作，定制肖特基结构研究底层机理。



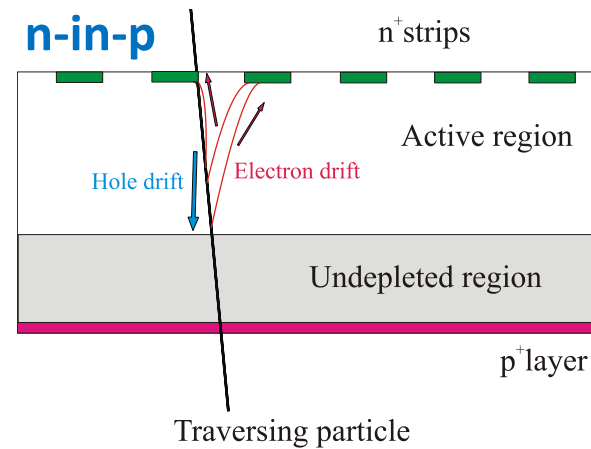
- 电荷收集、瞬态电流扫描、中子和质子辐照等测试即将开展

# 硅传感器技术：P型衬底

**n-type silicon after high fluences:**  
(type inverted)



**p-type silicon after high fluences:**  
(still p-type)



- **p-in-n** ( LHC常见 ) ，未全耗尽

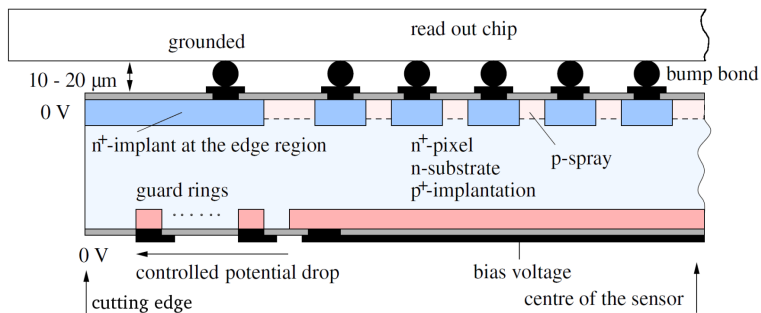
- 空穴漂移收集，容易俘获
- 电荷收集降低，影响探测效率；分辨率也受影响

- **n-in-p** ( HL-LHC主要类型 ) ，未全耗尽

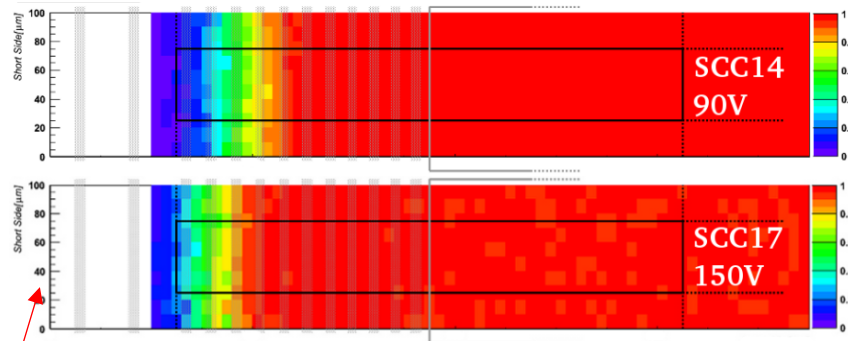
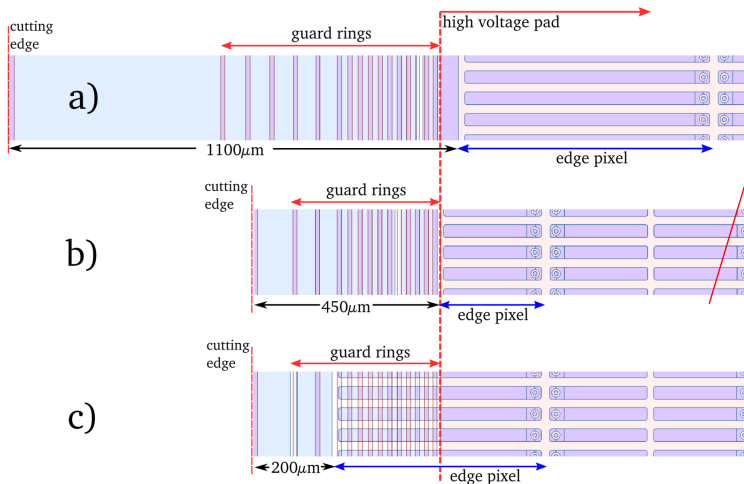
- 电子漂移收集，减小被杂质能级俘获概率
  - 有限电荷损失，性能下降小
- n-in-p 更抗强辐照**

# 硅传感器技术：窄边缘及边缘灵敏

- 优化保护环结构，减小传感器边缘死区



ATLAS IBL planar pixel sensor:  
1100 μm → 450 μm → 200 μm

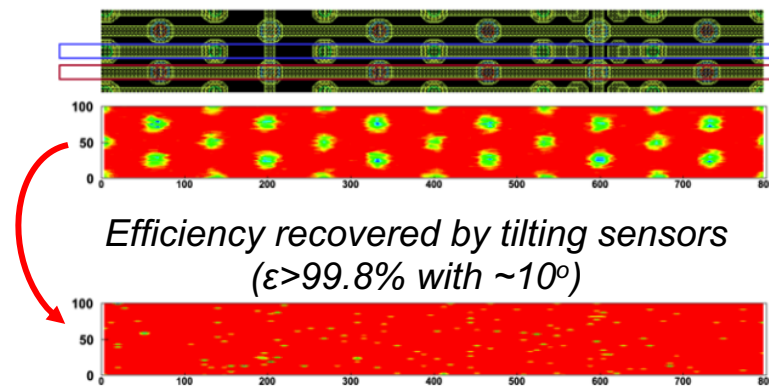
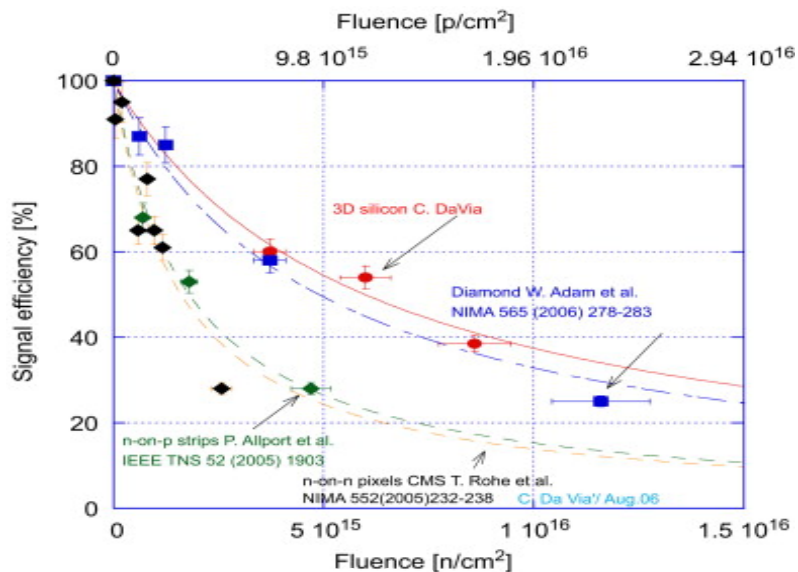
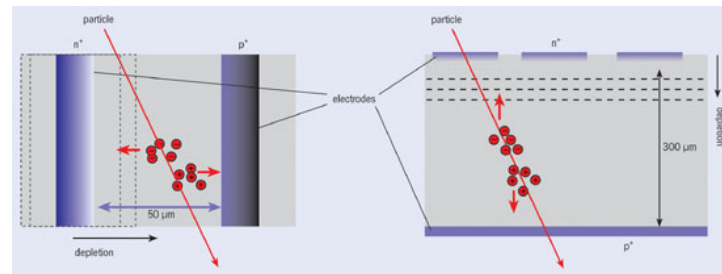


- 初始边缘死区1100 μm，其中
  - 保护环（600 μm）：足够的距离确保偏置高压有序下降
  - 安全距离（500 μm）：预留足够距离，避免切割破坏传感器性能
- 优化设计结合新型切割技术减小边缘死区，灵敏区延伸到保护环下方

# 硅传感器技术：3D传感器

First proposed in 1994, NIMA 395 (1997), p328

- 区别于平面工艺，电极垂直穿过硅传感器，重要优势：
  - 电极间距缩短，加快电荷收集，减小辐照后被杂质能级俘获的概率 → 抗强辐照、低偏置电压、灵敏边缘等



- 缺点：工艺复杂、空间响应不均匀（电极死区）、高体电容



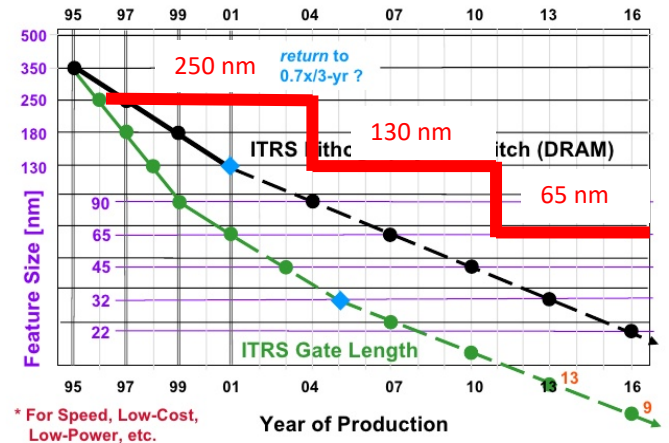
# 读出电子学ASIC

- ATLAS和CMS硅像素升级选择TSMC 65 nm CMOS工艺 ( RD53 )
  - 工艺抗辐照性能评估 → 设计加固
  - 复杂数模电路设计工具 ( Toolkit )
  - 设计、评估抗辐照电路单元 ( 共享IP )

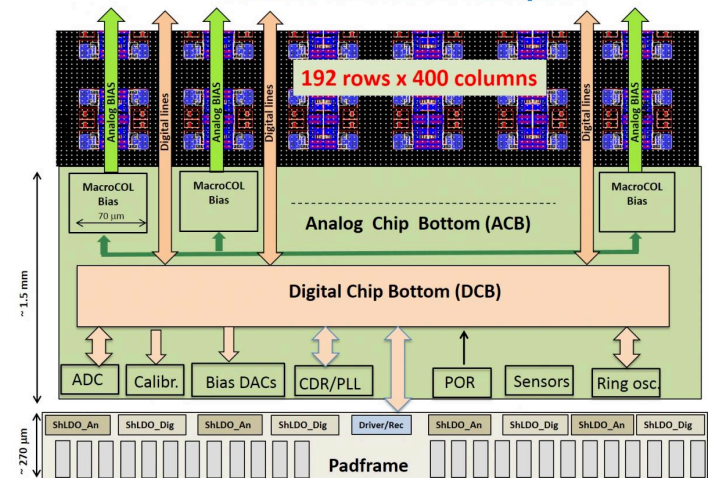
## 采用新工艺所需必要流程

- 跨合作组合作设计共享单元，最终芯片根据实验需求分开设计。
- 设计抗辐照指标：500 MRad ( 不足以支撑10年运行周期，最内层需更换 )

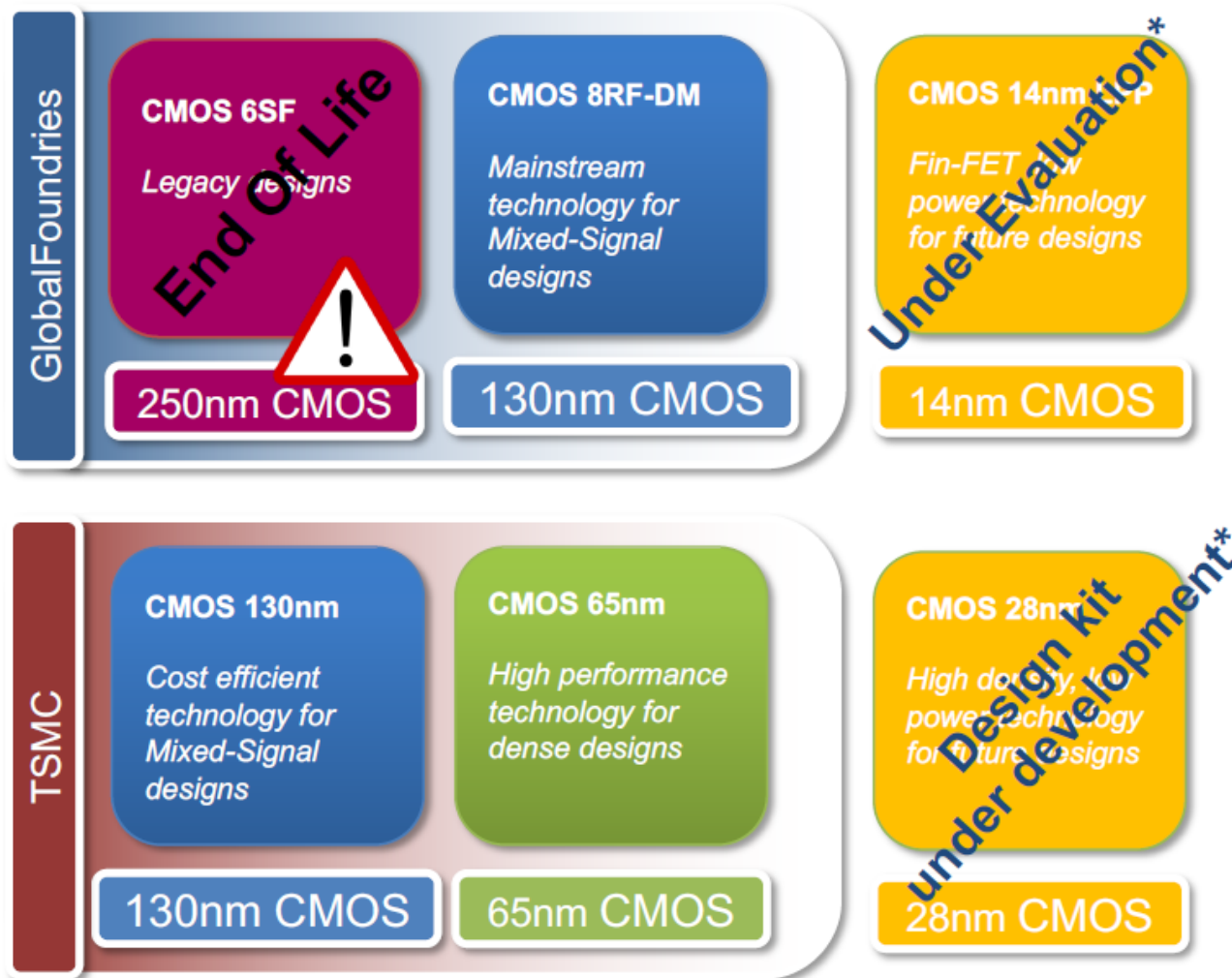
## Scaling -- Traditional Enabler of Moore's Law\*



## RD53A functional floorplan



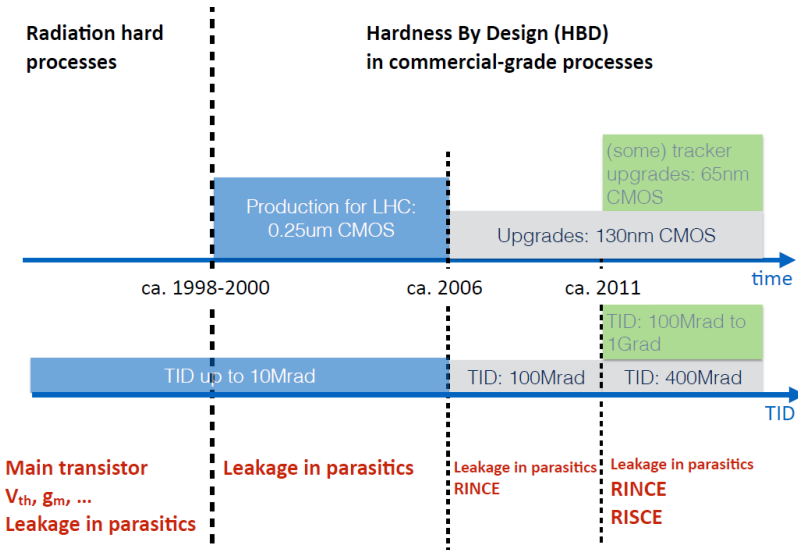
# CERN制程规划路线



\*Currently not for distribution to HEP institutes.

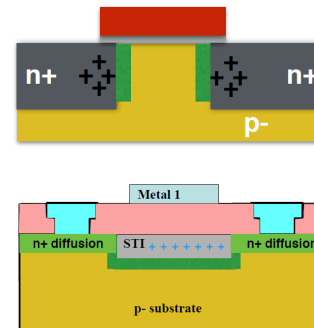
# 芯片辐照效应 I

- 总剂量效应 ( Total Ionization Dose, TID ) 氧化硅层电荷累积



F. Faccio, "Radiation hardness issues in 130nm and 65nm CMOS", ACES 2016

电荷累积 → 漏电流

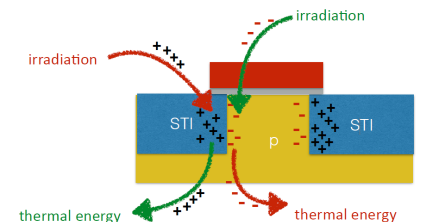


源漏间的漏电流  
环栅版图加固 (ELT)

器件间漏电流  
P+保护环

- 深亚微米工艺总剂量效应减弱 ( 栅氧厚度降低, 不易累积电荷 ), 漏电流依然存在, 且出现新的辐照效应

- Radiation-Induced Narrow Channel Effect (RINCE)
- Radiation-Induced Short Channel Effect (RISCE)

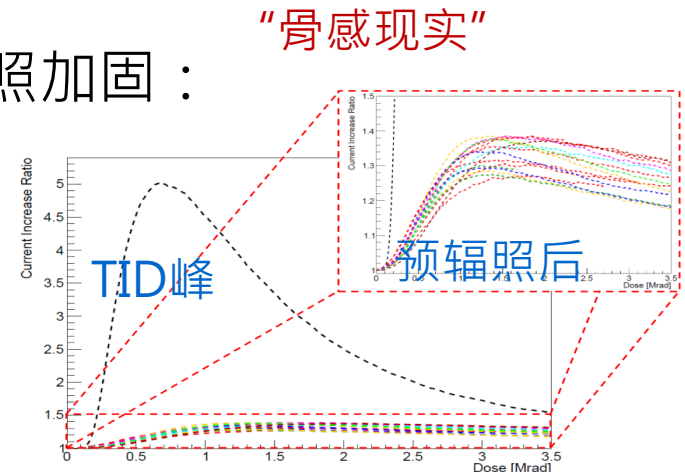


# 芯片辐照效应 II

- 单粒子效应 ( Single Event Effect , SEE ) : 单粒子翻转效应 ( SEU ) 、单粒子门锁 ( SEL ) → 时序逻辑触发器、锁存电路、存储电路等失效
  - 电路设计加固 : SEU 加固设计 ( 三模冗余、双节点互锁DICE电路结构 , SEL 加固设计 ( )
  - 系统结构层加固 : 错误检测与修复 ( 编码纠错 , 如汉明码等 )
  - 软件应用层加固 : 屏蔽底层硬件结构错误或重启 ( 重置 ) 模块

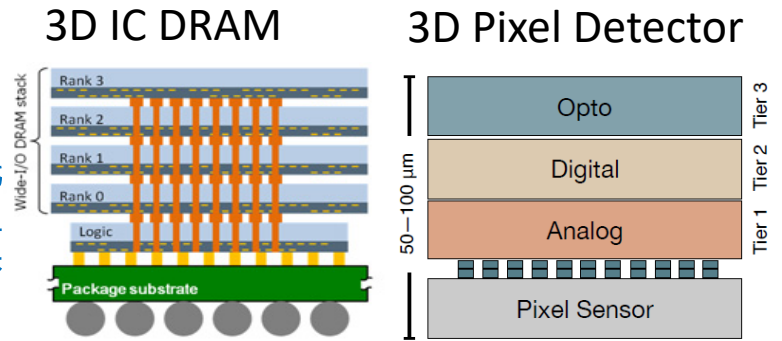
- ATLAS硅微条读出芯片ABCSTAR抗辐照加固 :

- 深亚微米工艺 : IBM/GF 130 nm CMOS
- 环栅版图加固 ( ELT )
- 三模冗余、汉明码 ( SEU待辐照确认 )



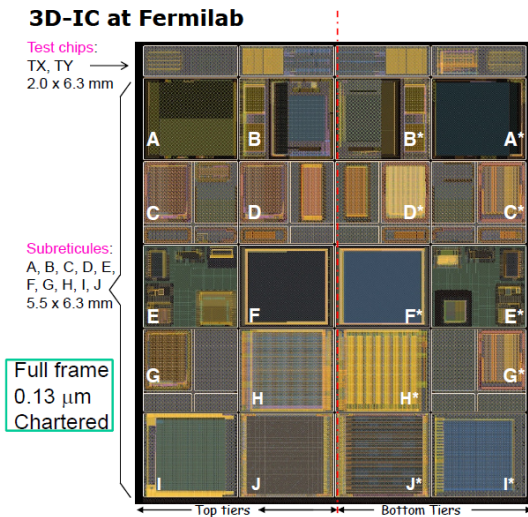
# 3D集成

- 3D集成 → “more than Moore”
  - 更高密度、更快电子学、更低功耗
  - 异质集成，独立优化（传感器、模拟电路、数字电路 ...）

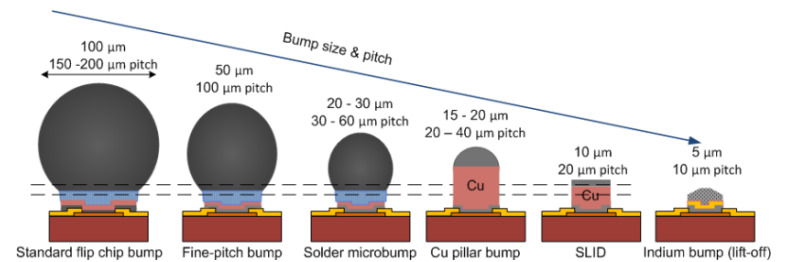


- Key elements: Through-Silicon Via (TSV), micro bump-bonding

## 1st MPW Run for HEP



- Design approach
  - Two tiers with a single mask set
  - Top tiers on left side and bottom tiers on right side of frame
- More than 25 two tier designs (circuits and test devices)
  - ATLAS pixels (FE-TC4)
  - CMS strip ROIC for track trigger
  - X-ray imaging (VIPIC)
  - B-factory (VIPIX) and Linear Collider (3D MAPS) pixels
  - Test circuits
- Plenty of issues and lessons learned by the HEP community (see next slide)



*T-Micro*

*2.5 μm diameter micro-bump provided by T-Micro*

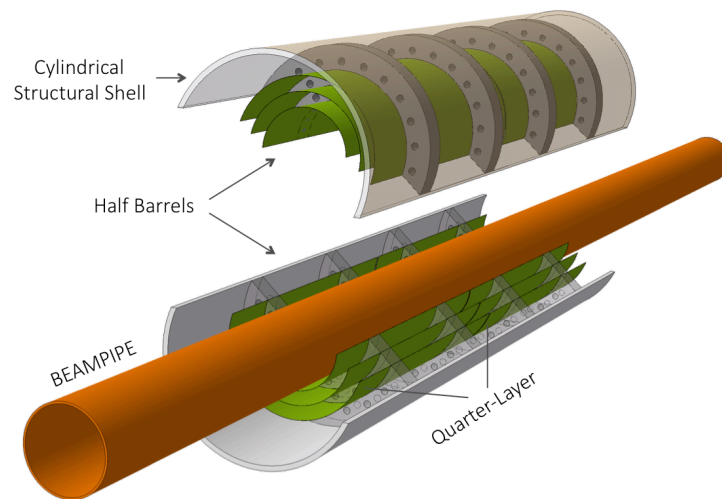
# 技术发展前瞻：自支撑

- 超轻（**极低质量**）CMOS硅像素探测器
  - 超薄（减薄至30微米以下），晶圆级别CMOS传感器（**工艺允许拼接**）
  - 超低功耗（低于 $20\text{mW}/\text{cm}^2$ ）→ 探测器每层物质质量低于 $0.1\% X_0$
  - 基本性能要求：高空间分辨率（3微米）、时间分辨（10ns）



超薄CMOS传感器（<30微米），可卷曲且状态稳定

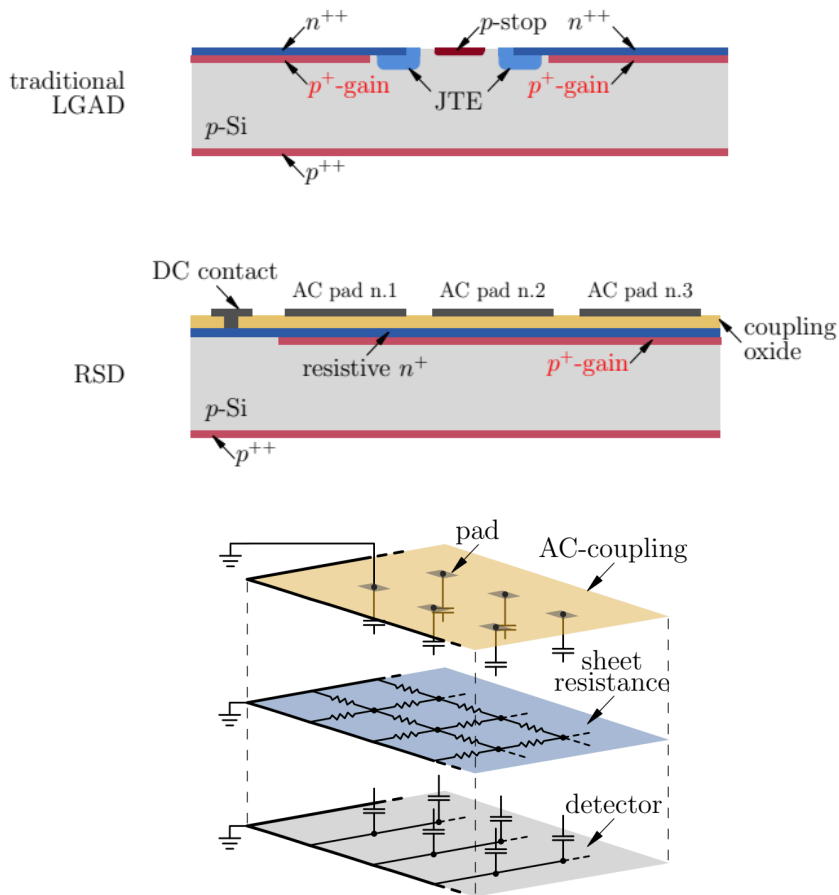
## ALICE ITS未来升级方案



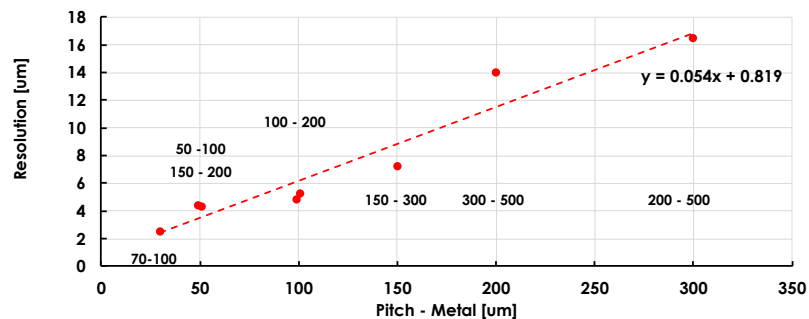
整张晶圆卷成半层探测器，硅自散热（**无膨胀系数匹配问题**），碳纤维泡沫支撑

# 技术发展前瞻：AC-LGAD

## Resistive AC-Coupled Silicon Detectors - RSD A new readout paradigm



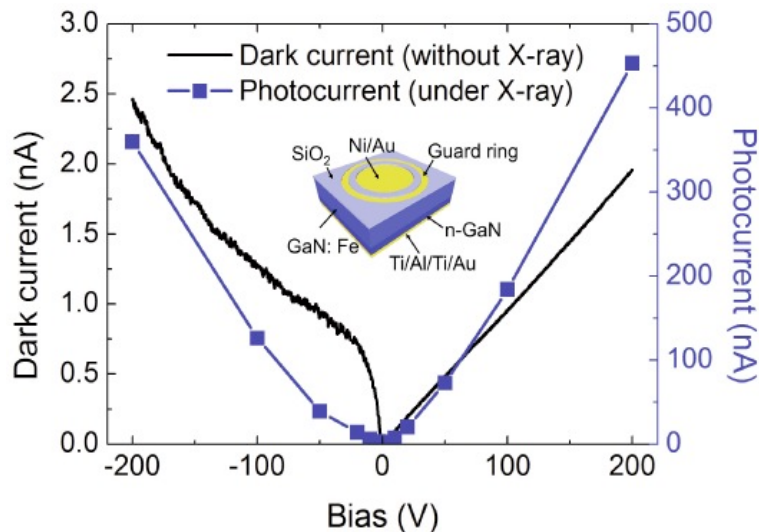
- 低增益雪崩二极管 ( LGAD ), 调节增益和传感器厚度实现快速时间分辨 (  $O(30\text{ps})$  )
  - HGTD ( ATLAS ) 、ETL ( CMS ) 量能器技术方案
- 阻性交流耦合硅探测器 ( RSD )
  - 在LGAD结构基础上，尽量消除死区 ( JTE区域 ) ，构建均匀电场利用电荷共享 ( Charge Sharing ) 及不同入射点响应，提高位置分辨



# 技术发展前瞻：氮化镓 ( GaN )

- 三代半导体氮化镓 ( GaN ) 具有宽禁带、高载流子迁移率、热导率高等特性，常用于制备高功率、高频器件。

Phys. Status Solidi RRL 5(5-6), 187-189 (2011).



## GaN探测器综述：

Appl. Phys. Rev. 2, 031102 (2015);

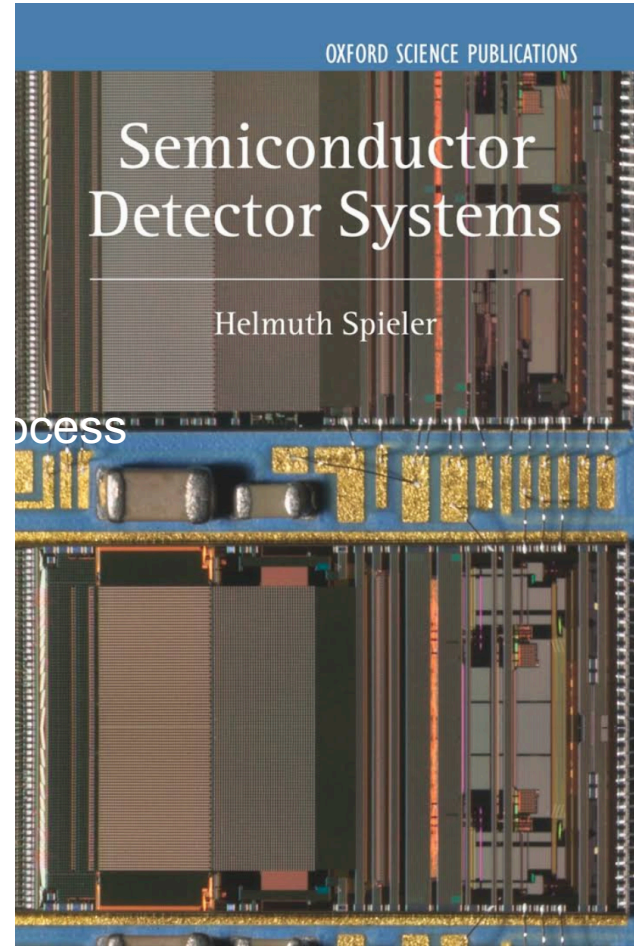
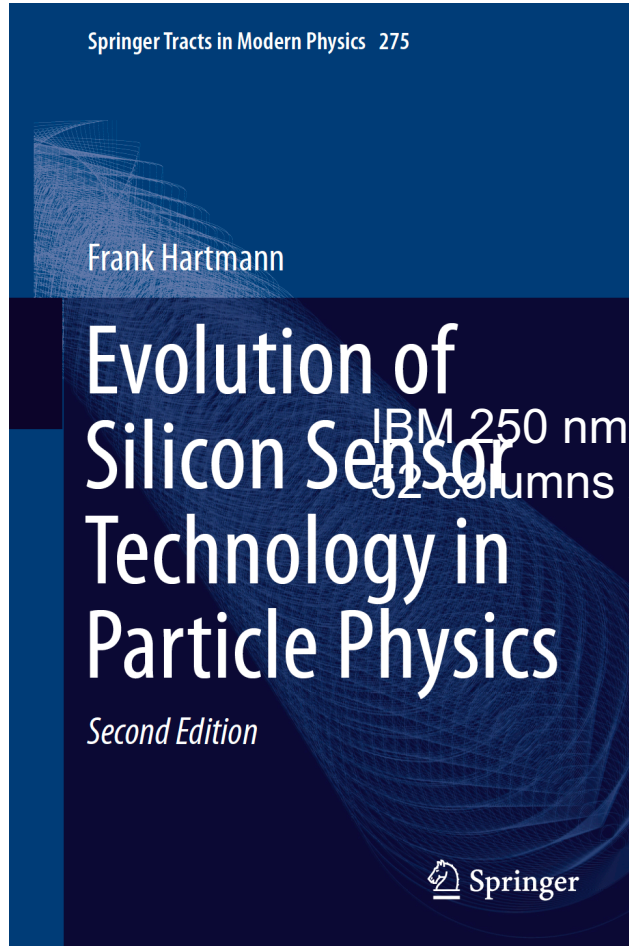
## GaN辐照损伤综述：

J. Vac. Sci. Technol., A 31(5), 050801 (2013)

- 器件潜力：与CMOS工艺兼容制备单片式、抗强辐照传感器
- 辐照损伤：目前制备的GaN晶圆纯度有限、杂质结构复杂，微观损伤（且机理有别于硅）很难准确分析



# 参考书籍



# 汉堡模型

有效载流子浓度变化

$$\Delta N_{eff}(\Phi_{eq}, t, T) = N_{C,0}(\Phi_{eq}) + N_A(\Phi_{eq}, t, T) + N_Y(\Phi_{eq}, t, T)$$

稳定项                  短期退火项          长期项 ( 逆退火 )

$$N_C(\Phi_{eq}) = N_{C,0}(1 - e^{-c\Phi_{eq}}) + g_c\Phi_{eq}$$

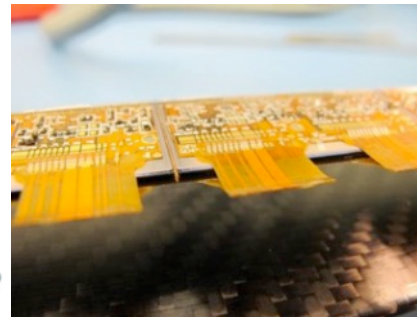
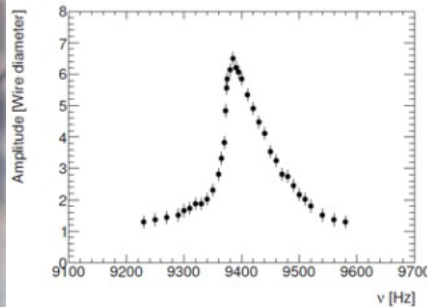
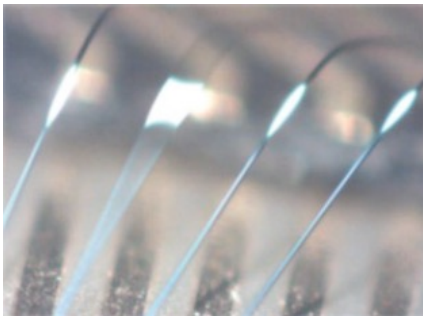
$$N_A(\Phi_{eq}, t) = \Phi_{eq}g_a e^{-\frac{t}{\tau_a}}; \quad N_A = g_a\Phi_{eq}$$

$$N_Y = N_{Y,0} \cdot (1 - e^{-t/\tau_Y})$$

- 汉堡模型在LHC实验上得到有效验证，可以可靠预测硅探测器所需的运行条件（[偏置电压设置](#)）。并通过[退火效应](#)，适当恢复探测器性能。

# 系统失误案例：IBL

- 绑定线共振：谱仪磁场环境中，交流电通过绑定线的频率与线的固有机电振动频率接近，形成共振。
  - 最早在CDF实验运行过程中发现该现象（经验教训）
  - 采用绑定线点胶封装解决（比如CMS FPIX），也是工业界常规方法
  - 实验运行中，避免使用接近的触发频率



- 支撑机械变形：总线（柔性PCB）与支撑结构（碳纤维）热胀系数不匹配，导致机械支撑产生形变。
  - 采取措施：温度控制精度0.2度，离线软件校准位置

# 新材料

NIMA 557(2), 479–489 (2006)

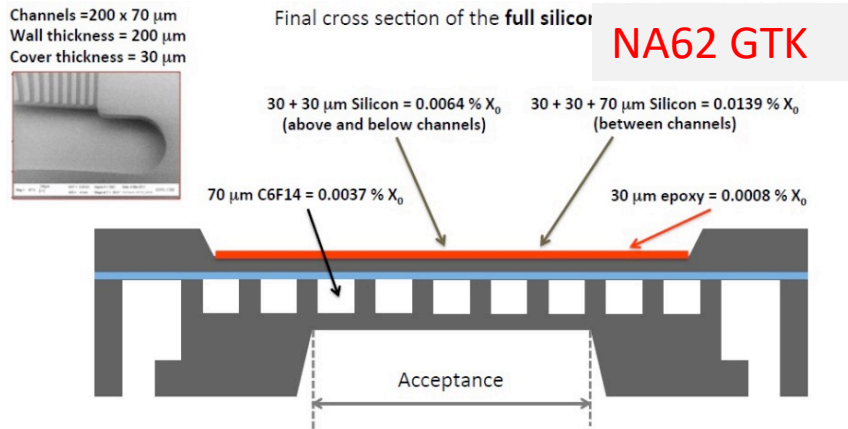
Table 1  
Material properties of major semiconductors for use as ionising radiation detectors

Property	Diamond	Si	a-Si(H)	4H-SiC	6H-SiC	GaN	GaAs	Cd(Zn)Te	TlBr	HgI <sub>2</sub>
Z	6	14	14	14/6	14/6	31/7	31/33	48/52	81/35	80/53
$E_g$ (eV)	5.5	1.12	1.7	3.3	3.03	3.39	1.4	1.4–1.6	2.7	2.1
$\mu_e$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	1800–2200	1450	1–10	800–1000	370	1000	≤8500	1000	40	100
$\mu_h$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	1200–1600	450	0.01–0.005	50–115	50	30	≤400		12	4
Saturated electron drift velocity (cm/s)	$2.7 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$		$2.0 \times 10^7$	$2.0 \times 10^7$		$1.2 \times 10^7$			
$e-h$ pair creation (eV)	13	3.6	4–4.8	7.8		8.9	4.3	4.4–4.7	5.9	4.2
eV/μm for MIPs	36	81		51						
Displacement (eV)	43	13–20		21.8		Ga–20 N–10	10			
Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.5	2.3	2.3	3.2		6.2	5.3	5.9–6.0	7.5	6.4
$\epsilon_R$	5.5			9.7	10		≈0.4			8.8
Breakdown voltage, (MV/cm)	10	0.5		4 <sup>a</sup>	2.4					

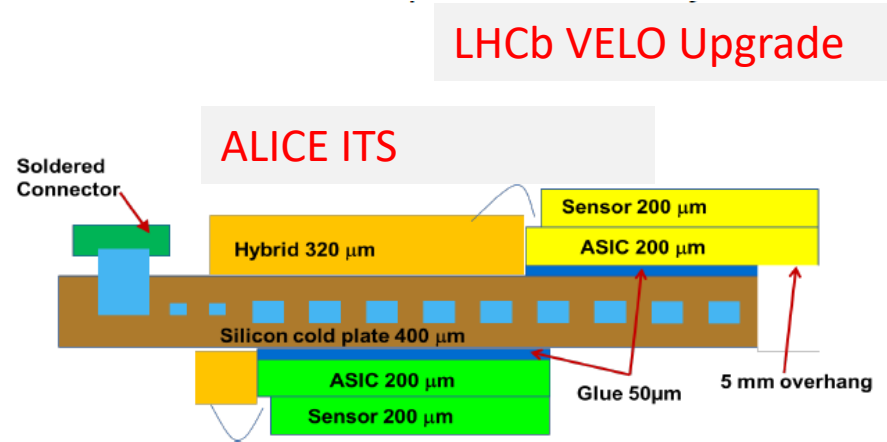
<sup>a</sup>Other data has 2.2 MV/cm.

# 微通道冷却

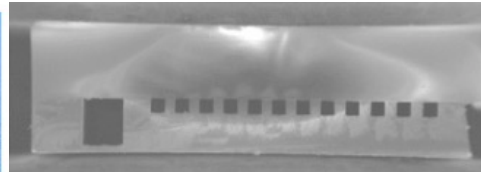
- 可以实现高制冷性能、低质量、低温度分布梯度



Liquid cooling (mono-phase  $\text{C}_6\text{F}_{14}$  @  $-20^\circ\text{C}$ )

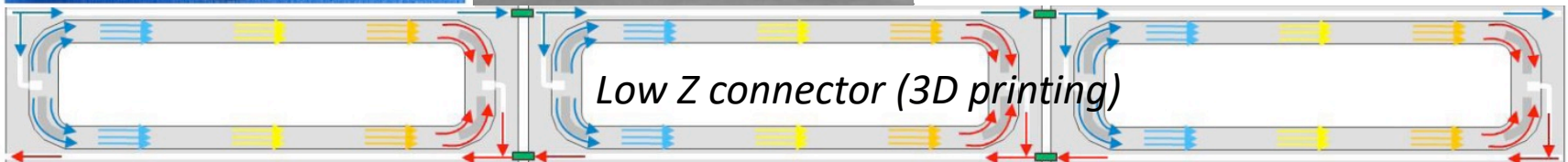


$\text{CO}_2$  evaporative cooling (high pressure!)



**ALICE ITS**

Two-phase (evaporative)  $\text{C}_4\text{F}_{10}$



# 热力学管理

**Fig. 1.37** Thermal runaway. For  $T > T_{\text{critical}}$ , the system will “thermally run away”, while for temperatures below the critical one  $T < T_{\text{critical}}$ , the system stabilizes at  $T_{\text{stable}}$

辐照损伤后漏电流增加，低温运行有利于控制漏电流

