



高能物理实验中的粒子探测器

刘建北

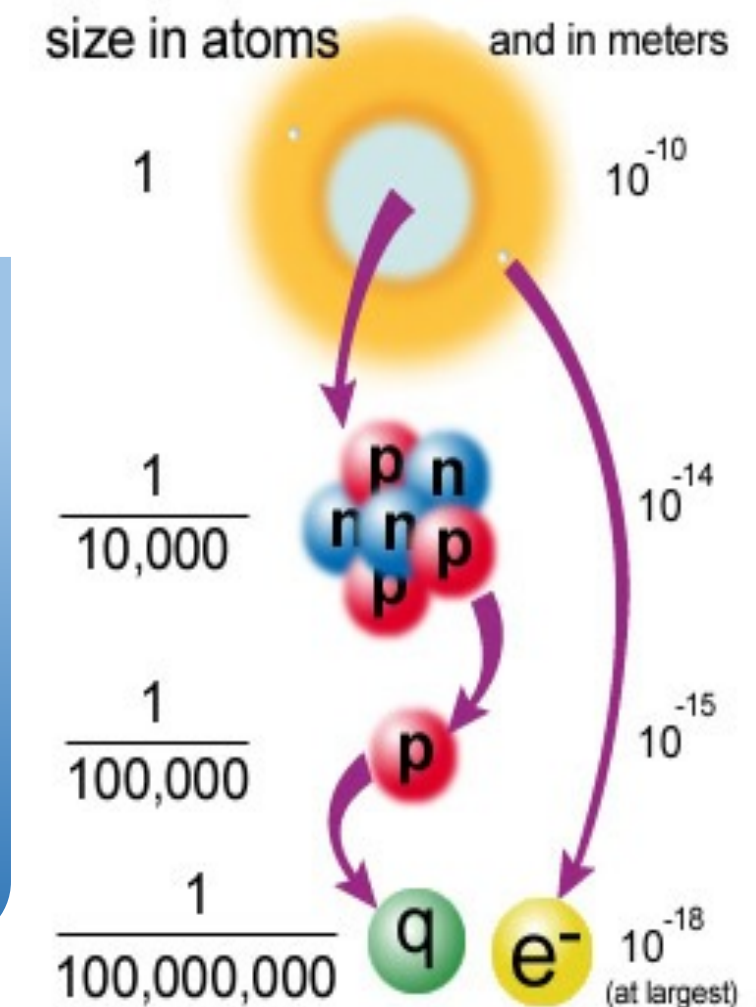
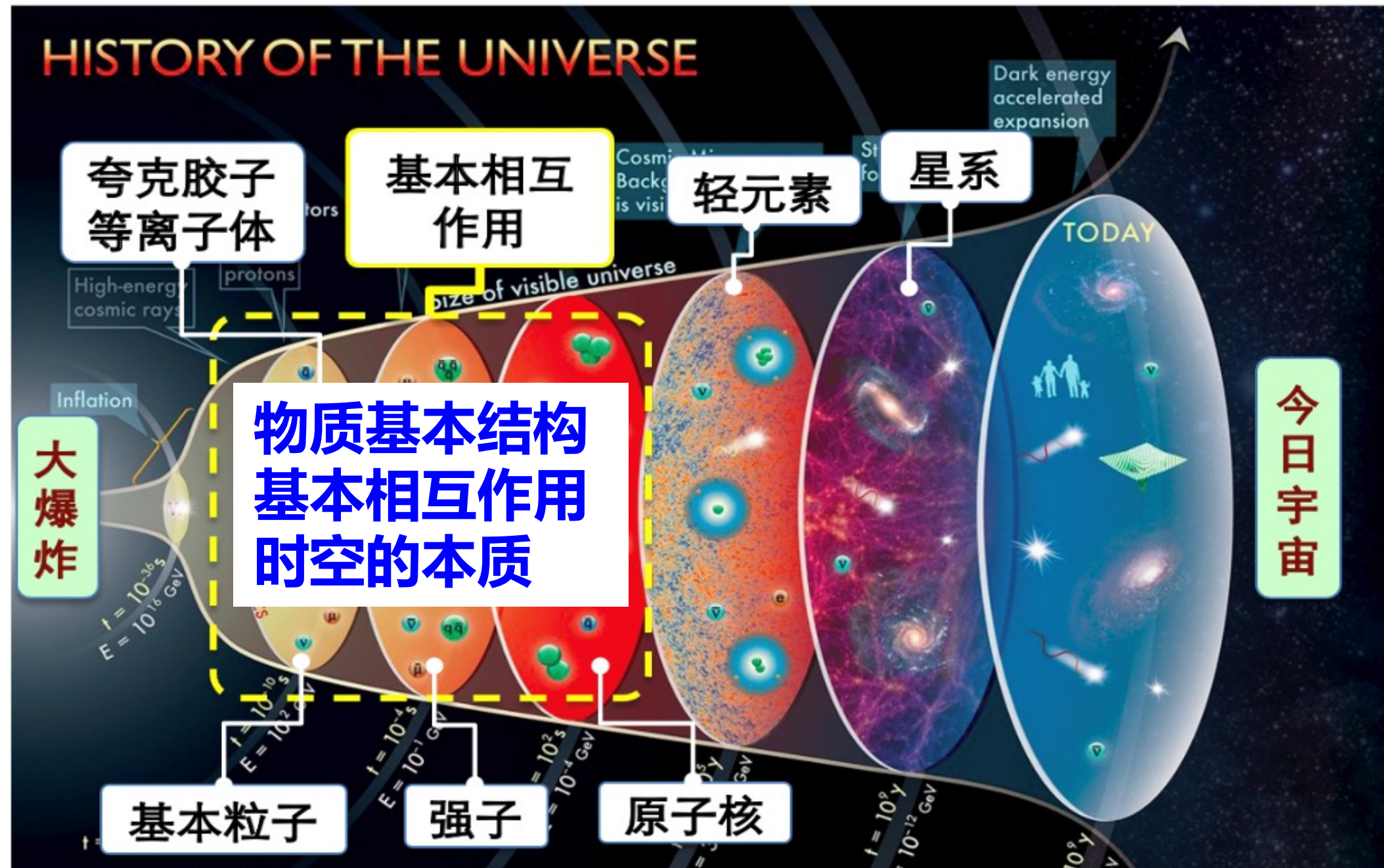
中国科学技术大学近代物理系

近代物理进展讲座

2025年10月28日

- **高能物理与对撞机**
- **粒子探测器简介**
- **探测器的性能要求与挑战**
- **探测器的发展现状与趋势**
- **总结**

高能物理的使命：探索物质最深层的结构



观测物质深层次结构需要**高能量**探针

E

$$\lambda = h/p$$

❖ 希格斯粒子的发现标志着高能物理进入了一个新时代

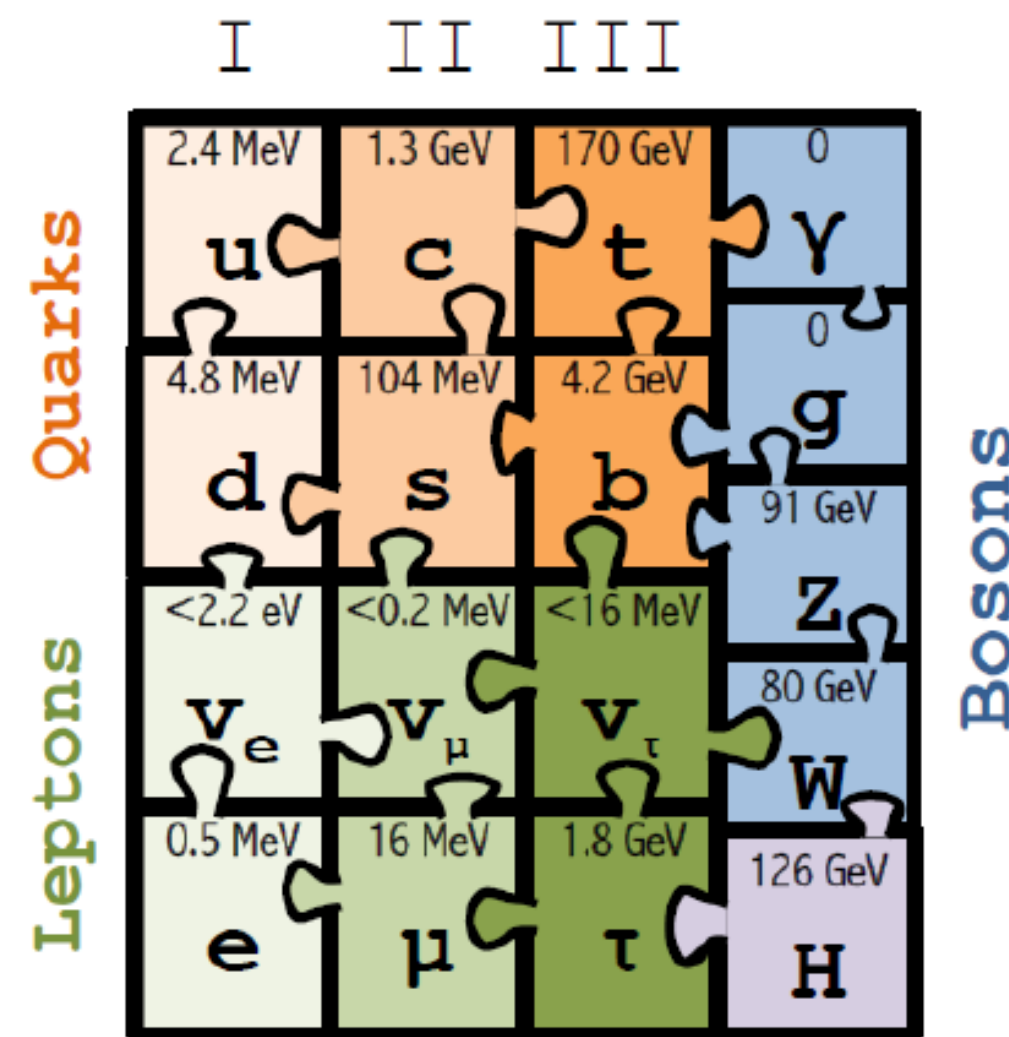
- ▶ 补全了最后一块拼图，标准模型变成了标准理论
- ▶ 但仍有很多未解决的根本问题：夸克如何形成物质、暗物质与暗能量、正反物质不对称、等级差、味结构、基本相互作用的统一、引力量子化 ...

→ 标准模型不是一个基本理论！

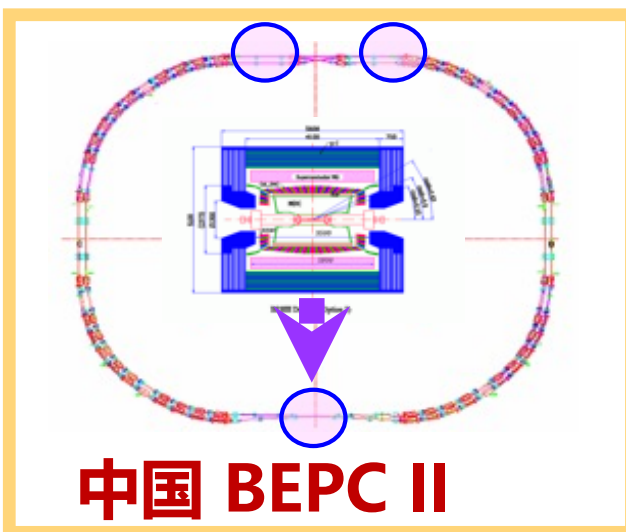
❖ 高能物理在新时代的使命：理解强相互作用和超越标准模型！寻找新物理！

❖ 没有确定的理论指导，新物理也许在更高能标上，或者在微弱效应中。

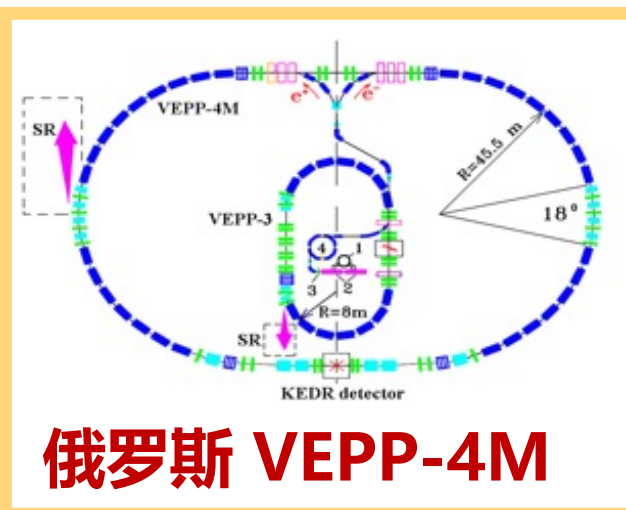
- ▶ **高能量**：通过在高能区产生新粒子和新现象直接发现新物理
- ▶ **高精度**：通过对重味夸克和轻子以及玻色子等的精确测量发现新物理迹象



对撞机 — 高能物理实验的利器



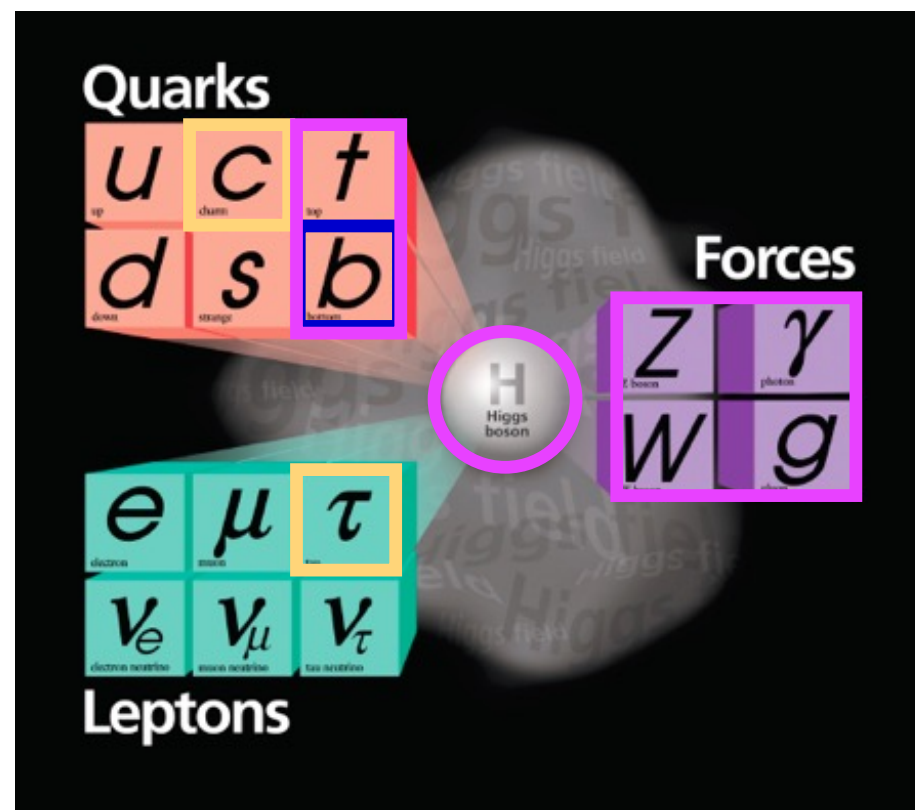
中国 BEPC II



俄罗斯 VEPP-4M



日本 SuperKEKB



欧洲 LHC



高精度前沿: 强子结构、奇特物质态、强相互作用本质、味物理与CP破坏...

高能量前沿: 质量起源、电弱对称破缺本质、Higgs新物理、超对称、暗物质、宇宙演化 ...

面对新时代高能物理的挑战，需要在高能量、高精度前沿进行多维度探索！

前沿对撞机 (计划)



BEPCII

2-5 GeV, $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



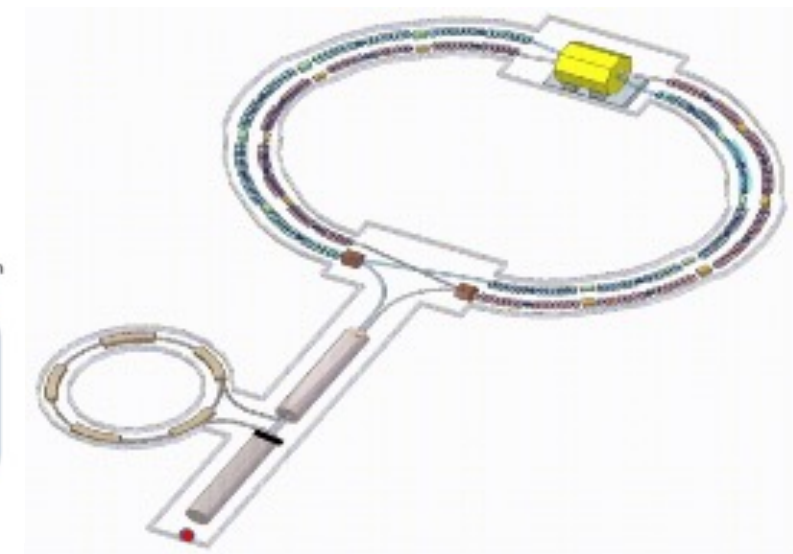
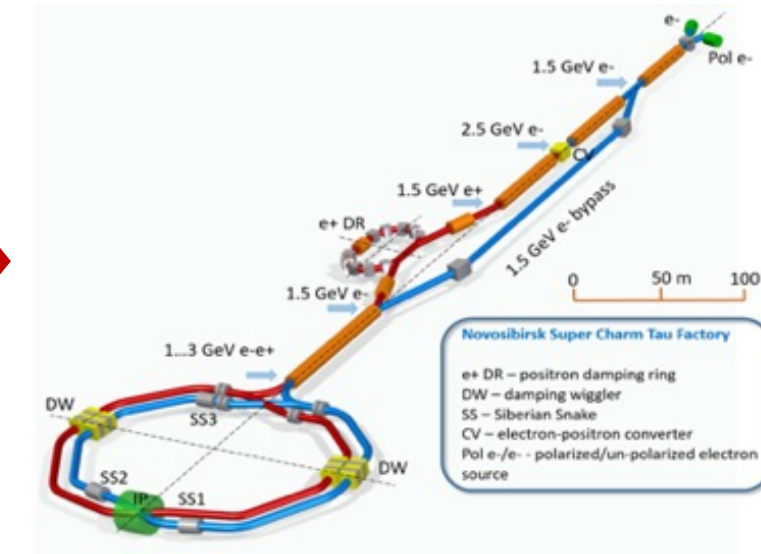
SKEKB

$\sim 10 \text{ GeV}$, $8 \cdot 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (目标)



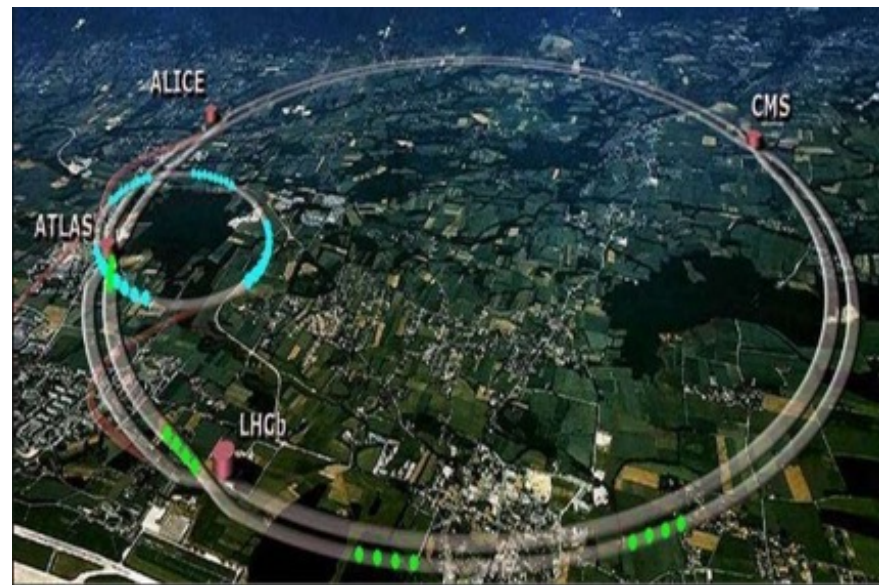
SCTF, **STCF**

2-7 GeV, $\sim 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

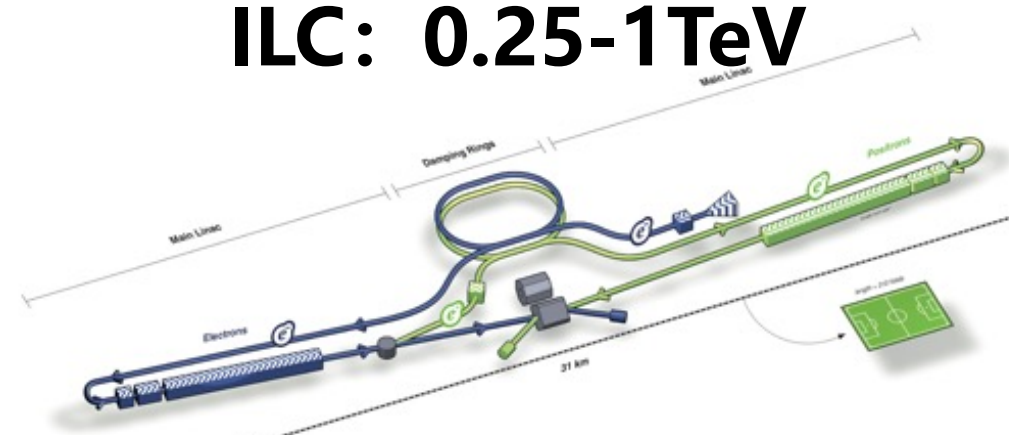


LHC (HL-LHC)

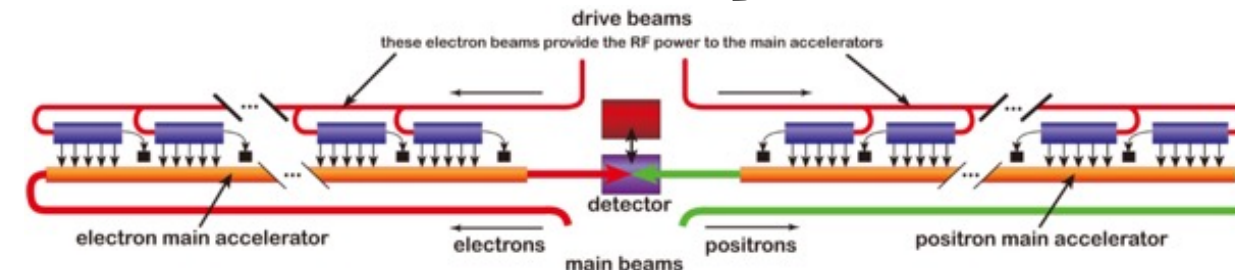
$\sim 14 \text{ TeV}$, $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (5-7倍)



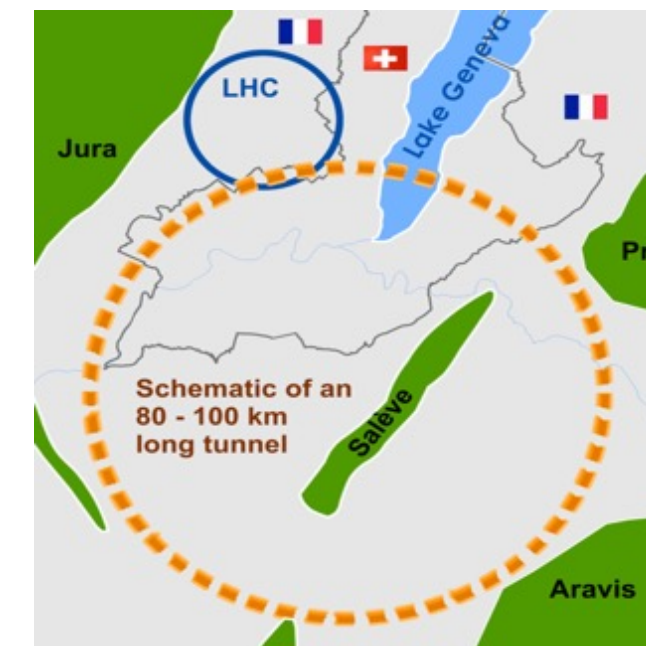
ILC: 0.25-1TeV



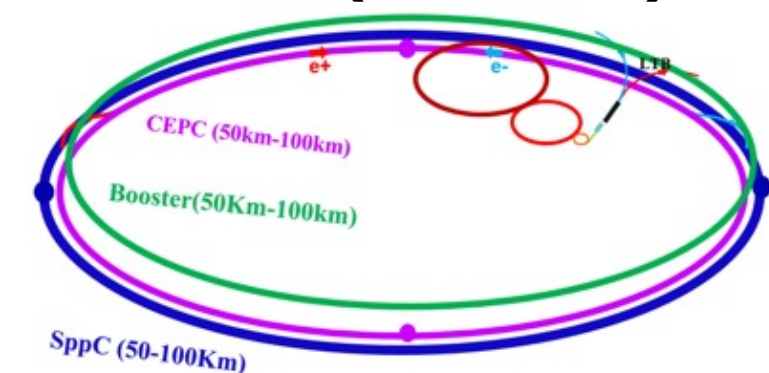
CLIC: 直到3TeV



FCC-ee, hh(100TeV)



CEPC(90-360GeV)
SPPS(100TeV)



高精度前沿

高能量前沿

❖ 粒子探测器用来探测粒子反应的末态产物，是进行高能物理实验不可或缺的核心工具。

❖ 探测器的发展由高能物理实验引导和驱动，而探测器技术的进步又极大促进高能物理实验的发展。

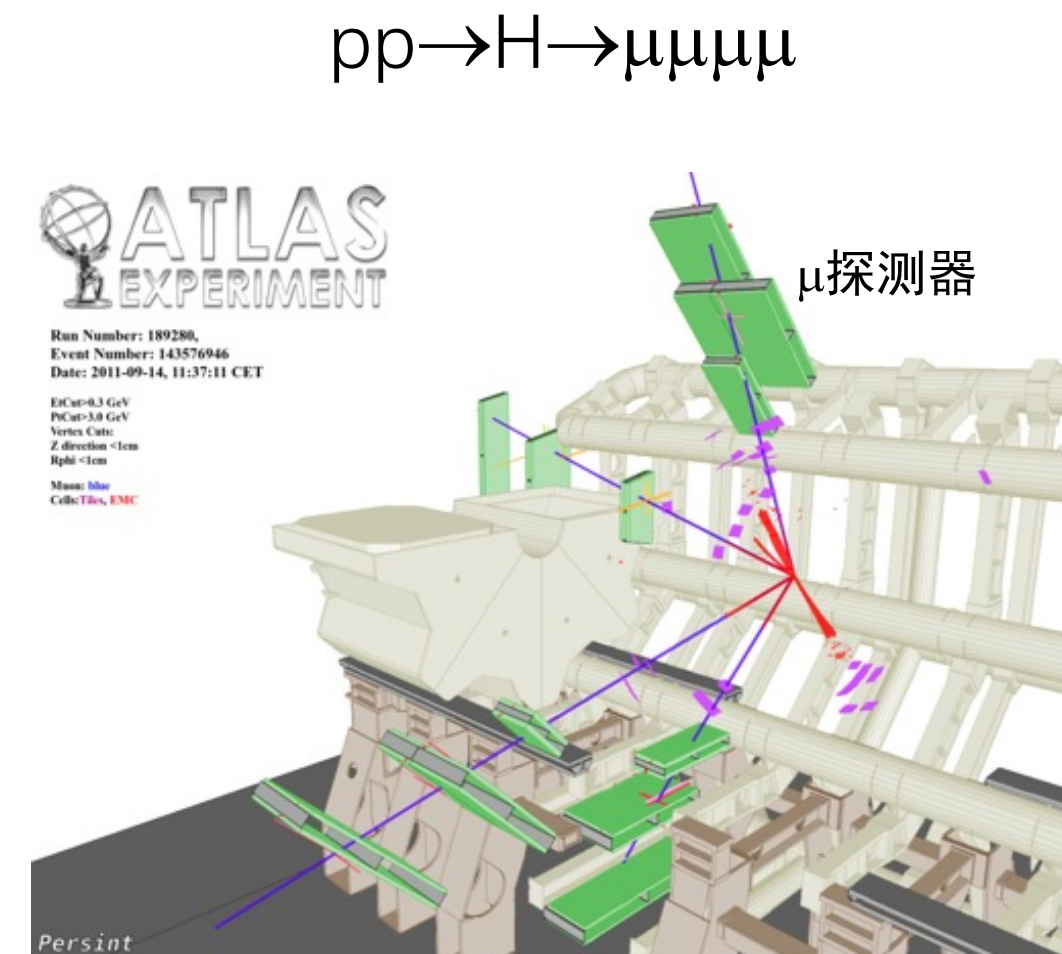
▶ MWPC→DC→TPC→RPC/MRPC→MPGD

▶ SPS→LEP→LHC→HL-LHC

❖ 探测器技术研发的针对性越来越强，具体实验导向越来越明确；越来越多的研发就是由实验合作组针对自身需求开展，具有明确的“边界条件”。

▶ ATLAS/CMS phase2 升级：硅像素探测器

▶ ILC/CLIC：粒子流量能器

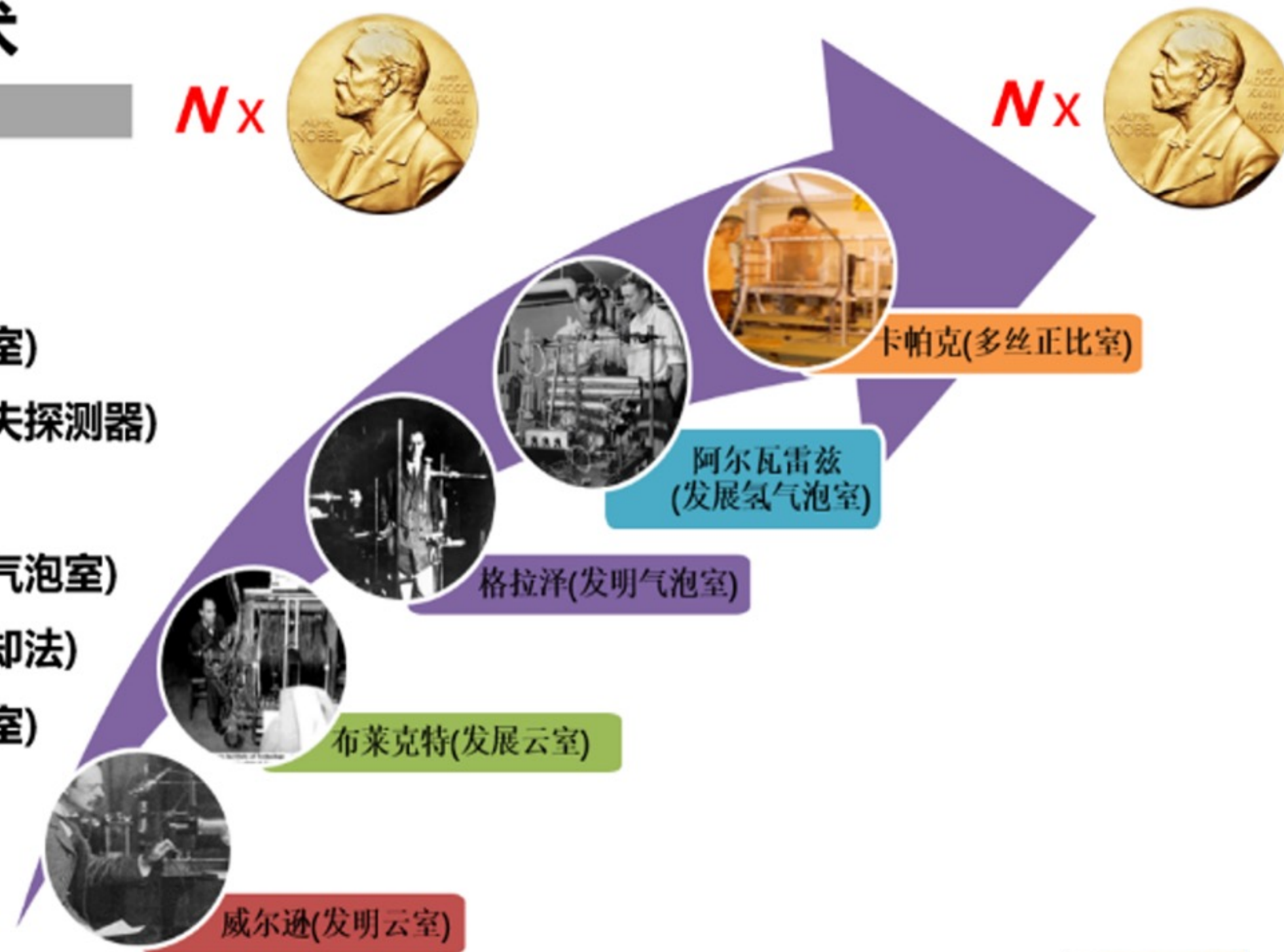


粒子发现史就是一部极好的探测器发展史



粒子探测技术

- ☐ 威尔逊(云室)
- ☐ 劳伦斯(加速器)
- ☐ 布莱克特(改进云室)
- ☐ 切伦科夫(切伦科夫探测器)
- ☐ 格拉泽(气泡室)
- ☐ 阿尔瓦雷兹(改进气泡室)
- ☐ 范德梅尔(随机冷却法)
- ☐ 卡帕克(多丝正比室)



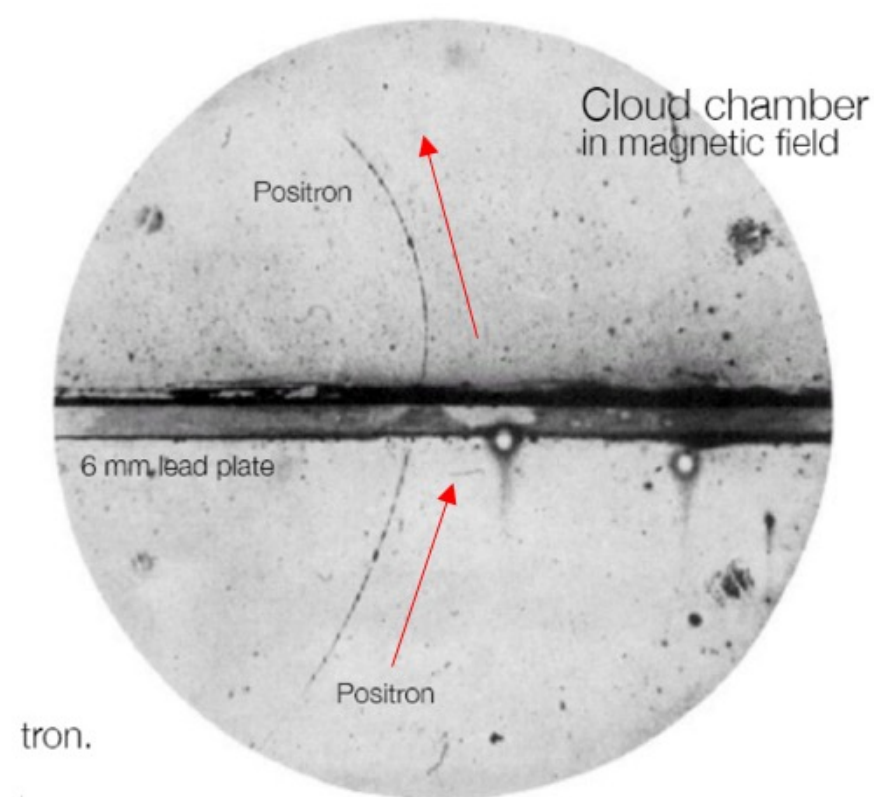
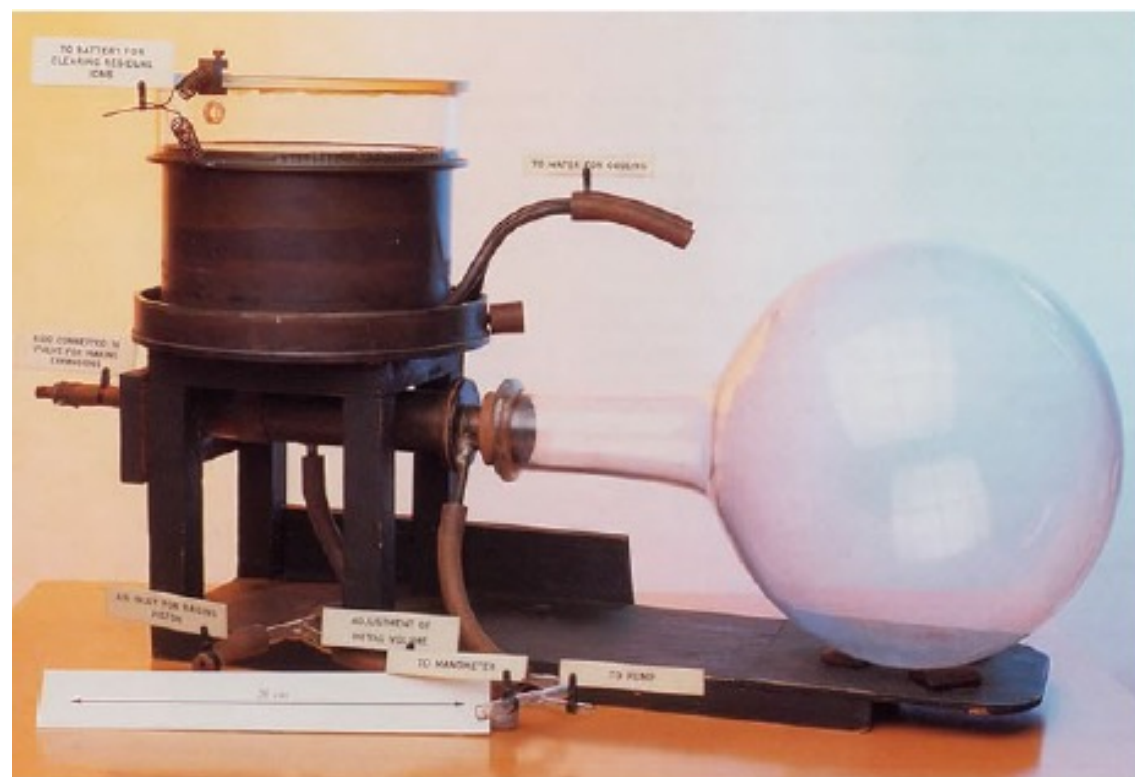
重大物理发现

- ☐ 伦琴(X射线)
- ☐ 贝克勒尔+居里夫妇(放射性)
- ☐ 查德威克(中子)
- ☐ 赫斯(宇宙线)
- ☐ 安德森(正电子)
- ☐ 鲍威尔(π 介子+核乳胶照相法)
- ☐ 塞格雷+张伯伦(反质子)
- ☐ 里克特+丁肇中(重夸克)
- ☐ 鲁比亚(中间玻色子)
- ☐ 佩尔(τ 轻子)
- ☐ 莱因斯/莱德曼/施瓦茨 等(中微子)
- ☐ 恩格勒/希格斯(希格斯粒子)

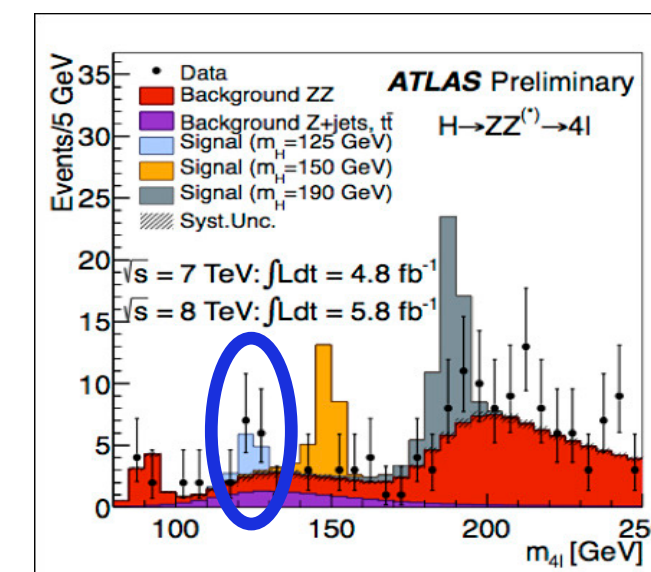
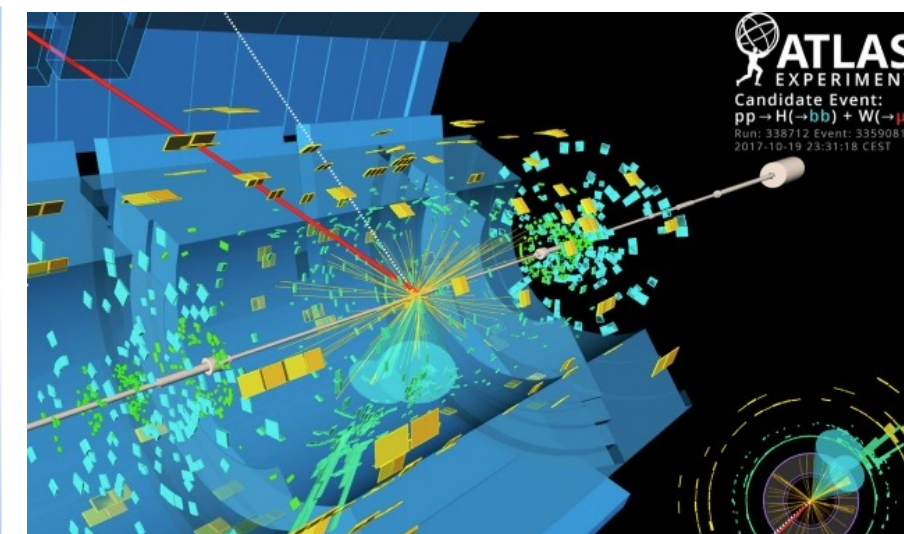
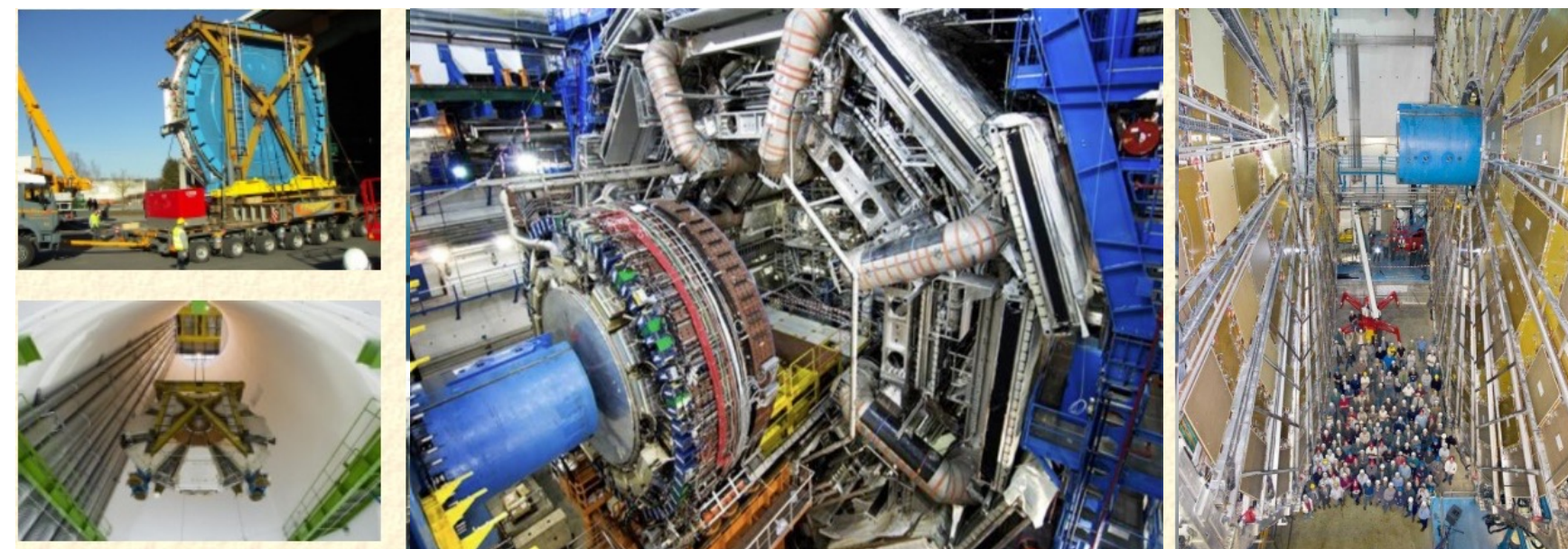
“New directions in science are launched by new tools much more often than by new concepts. The effect of a concept-driven revolution is to explain old things in new ways. The effect of a tool-driven revolution is to discover new things that have to be explained” — Freeman Dyson



粒子探测器的巨变

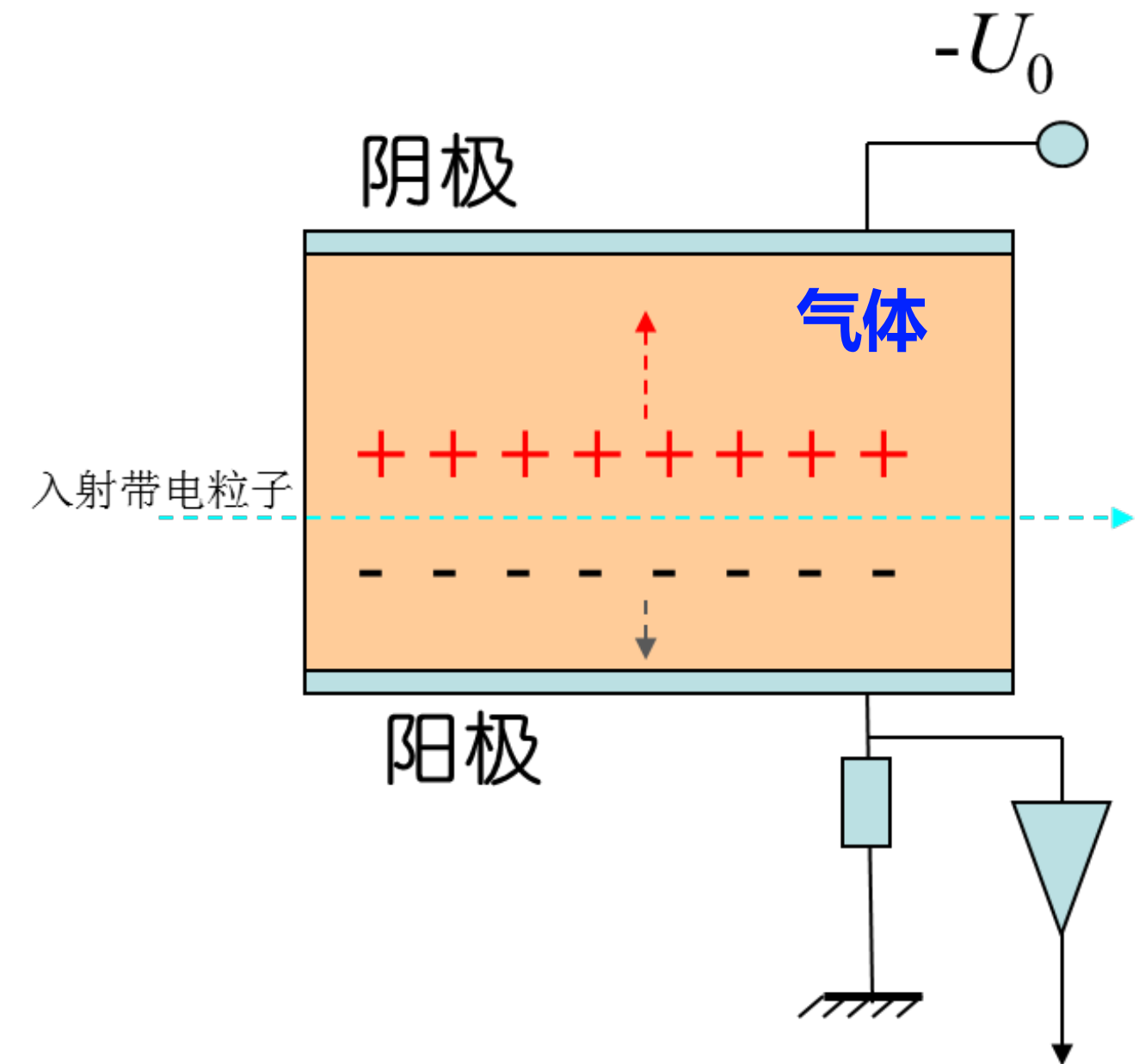


1933年在宇宙线中发现正电子



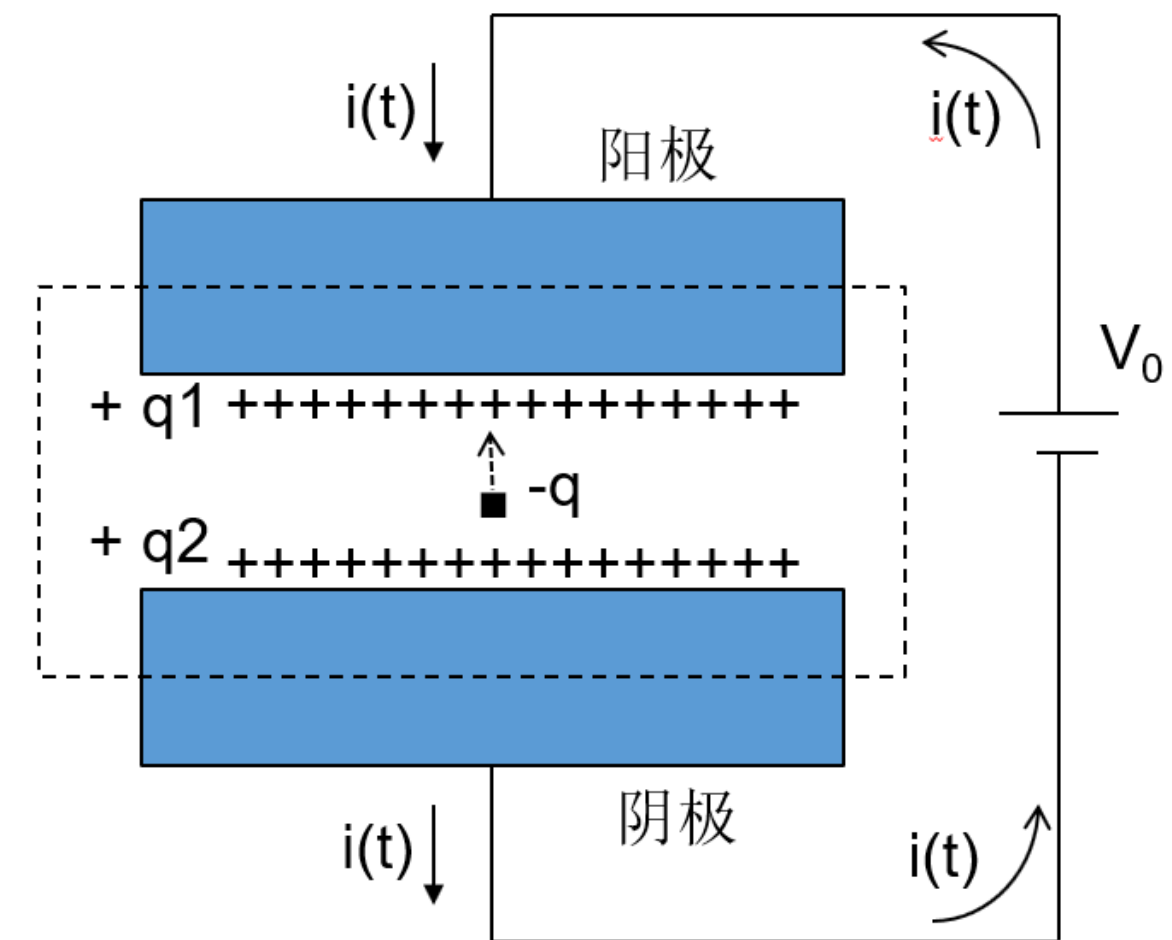
2012年在LHC上发现希格斯粒子

- ❖ 探测器工作过程主要包括：**粒子与探测器介质的相互作用（产生电、光、热），这些信号载体的传输与收集，信号产生和信号输出。**
- ❖ 以电离室为例：带电粒子射入电离室工作气体中，与气体分子碰撞使之电离，最终沿入射径迹产生一系列电子离子对。
- ❖ 电子和离子在外加电场的作用下沿反方向进行宏观定向漂移。
- ❖ **电子和离子在电极上感应的电荷在漂移过程发生变化，从而在外部回路中输出电信号。**



注意“感应电荷”与
“收集电荷”的区别

- ❖ 电离室灵敏体积内某点放置一电荷 $-q$ ，其在两电极内表面产生感应电荷 $+q_1$ 、 $+q_2$ ，由高斯定理得： $q_1 + q_2 - q = 0$ ，即 $q_1 + q_2 = q$
- ❖ 在漂移过程中， $-q$ 不断靠近阳极并远离阴极，因而 q_1 不断增大， q_2 不断减小， q_1 增大量等于 q_2 减小量。
- ❖ 相应地外部回路中产生电流 $i(t)$ ，“带走”了 q_2 的减小量，“提供”了 q_1 的增大量。 $i(t)$ 只存在漂移过程中，漂移过程一结束， $i(t)$ 即终止。当 $-q$ 抵达阳极瞬间， $q_1 = q$ ， $q_2 = 0$ ，因此外部回路流过的总电荷量等于初始 q_2 。



Ramo-Shockly定理

$$I(t) = -q \cdot E_w(x) \cdot u(t)$$

❖ “电基” 探测器: 气体探测器、半导体探测器

- ▶ 基于入射粒子在探测介质中产生的电荷。
- ▶ 在探测介质中建立电场, 这样产生的电荷在介质中移动, 从而在电极上感应出电信号。
- ▶ 探测介质要有足够高的电阻率, 电荷在探测器介质中要有足够长的寿命, 并且能够移动。

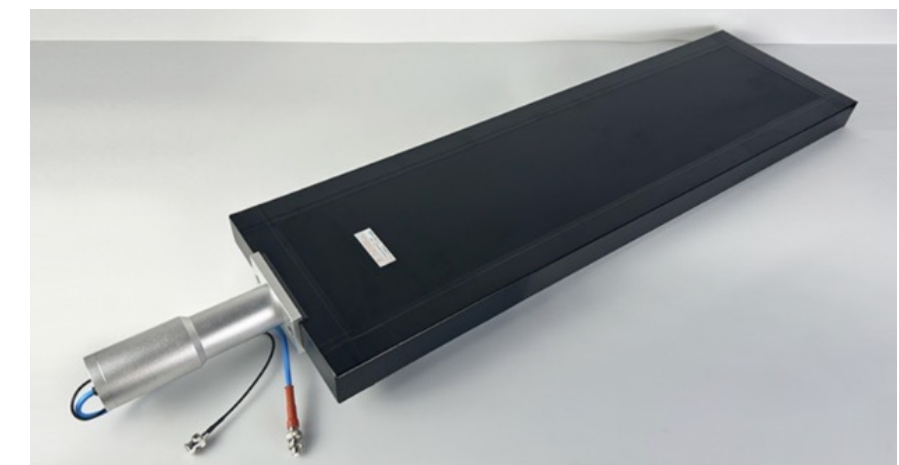
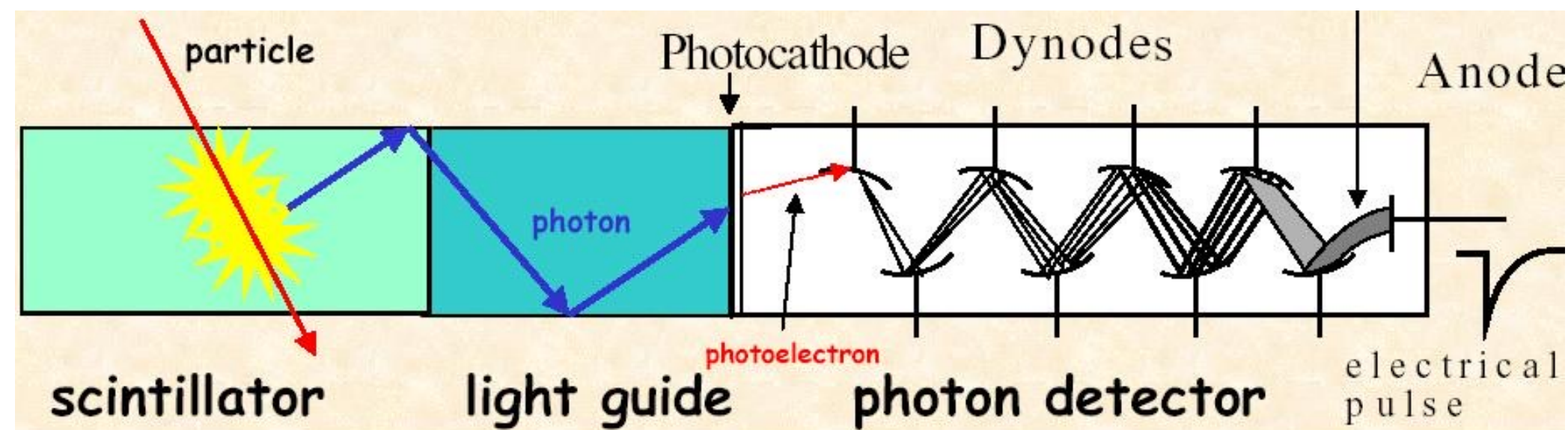
❖ “光基” 探测器: 闪烁探测器、契伦科夫与穿越辐射探测器

- ▶ 基于入射粒子在探测介质中产生的光。
- ▶ 光在介质中能传播并被收集, 然后再把光转变为电 (光电转换器件), 最终产生电信号。
- ▶ 突破了“电基”探测器对探测器介质选择的约束, 开辟了更为广阔探测器材料选择空间。

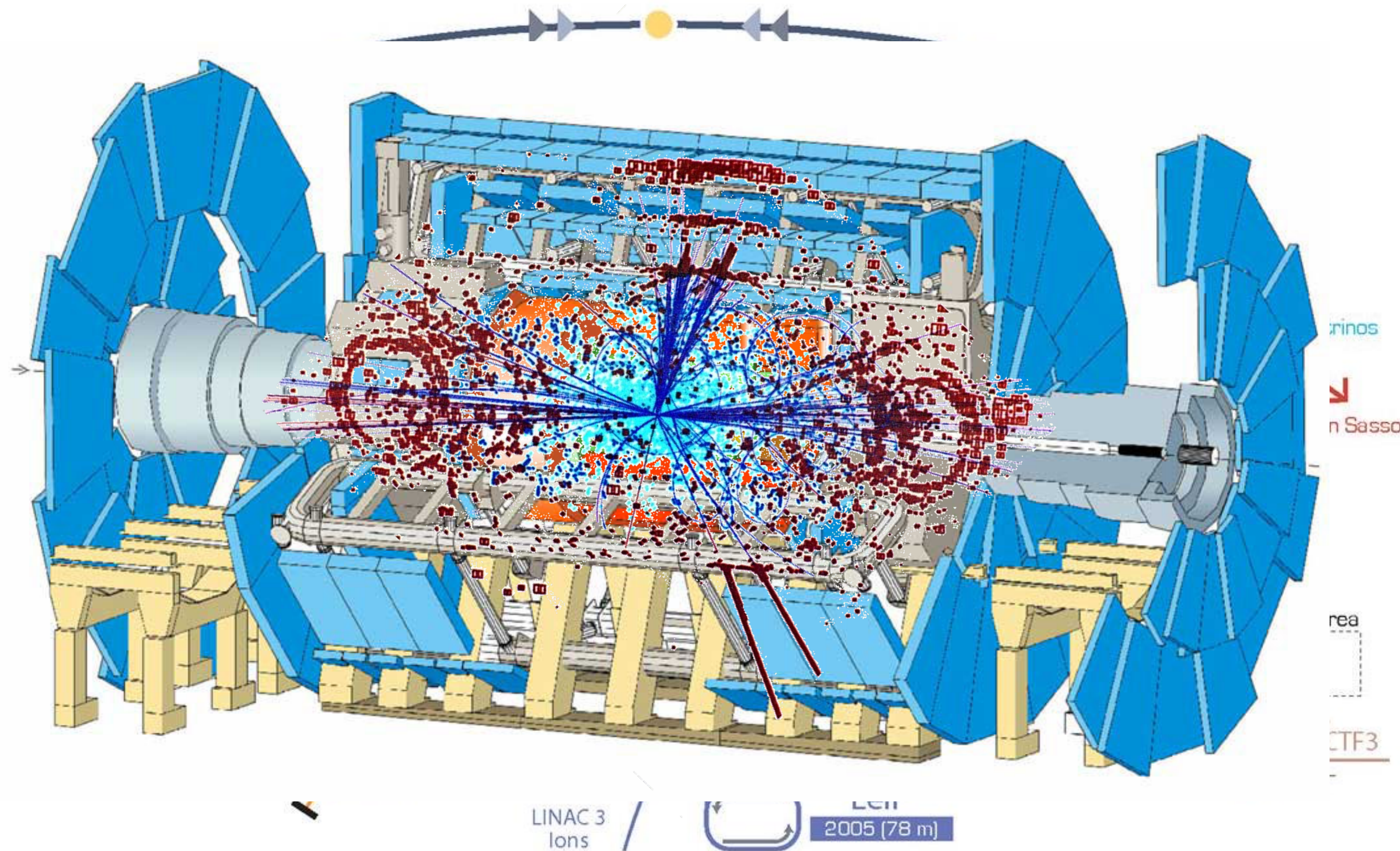
“光基”探测器一例：闪烁探测器



- ❖ 粒子入射闪烁体，损失能量，引起闪烁体原子分子电离和激发；
- ❖ 受激原子分子退激发出可见的或接近可见光的（闪烁）光子；
- ❖ 闪烁光子经过反射、透射等光传输过程，（有时经由光导）传输到光电转换器件；
- ❖ 光电转换（有时包含内放大—倍增）器件把闪烁光转换为电信号并放大；
- ❖ 电信号经电子学系统读出并处理。



对撞机实验中的粒子探测器：粒子探测系统



对撞机实验对粒子探测器的要求和挑战



❖ 对撞机的能量和亮度不断提高，对粒子探测器性能提出了苛刻要求，对粒子探测器技术提出了严峻挑战。



- **高亮度**：抗辐照，高计数，抗堆积
- **高能量**：高能动量测量，大动态范围
- **高精度**：高分辨，全覆盖，精密校准
- **大规模**：大面积，多通道，高性价比

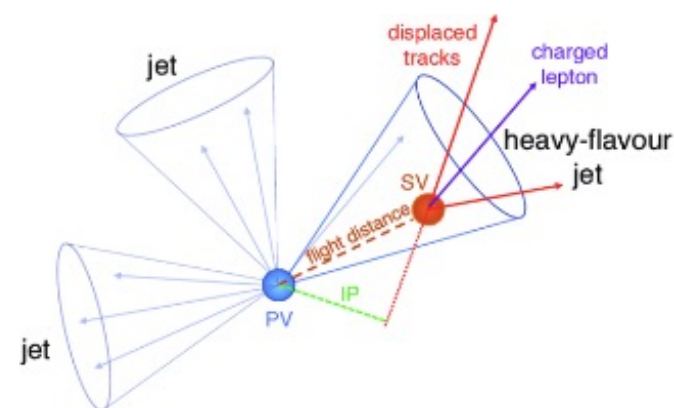
特别在对撞区、前向区、量能器

复杂条件下高效触发、寻径、
味标记和粒子鉴别

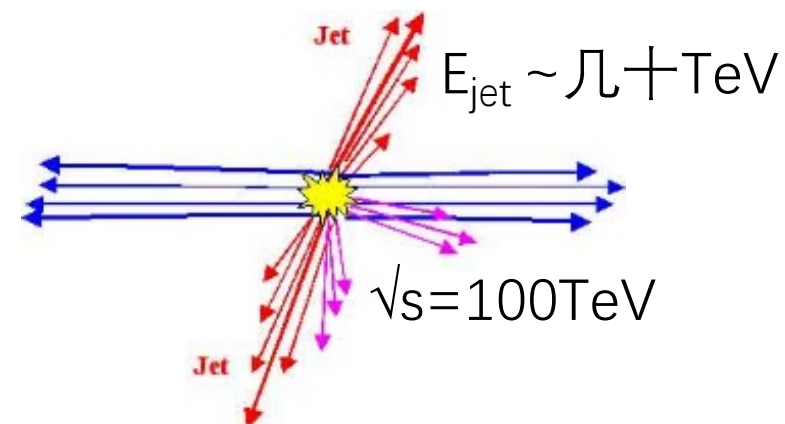
高亮度LHC上的堆积效应



顶点位置测量~几μm



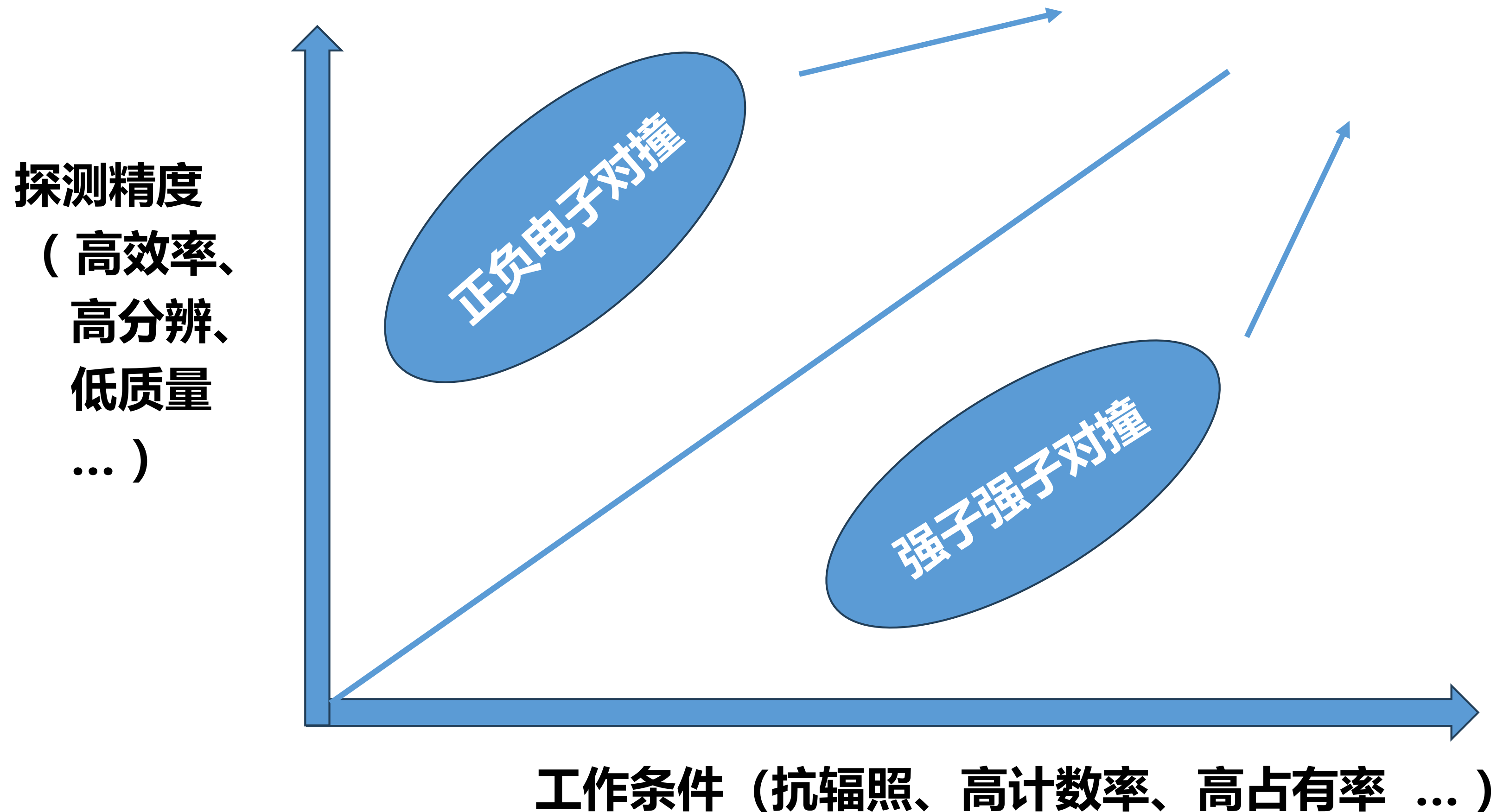
高能双喷注事例



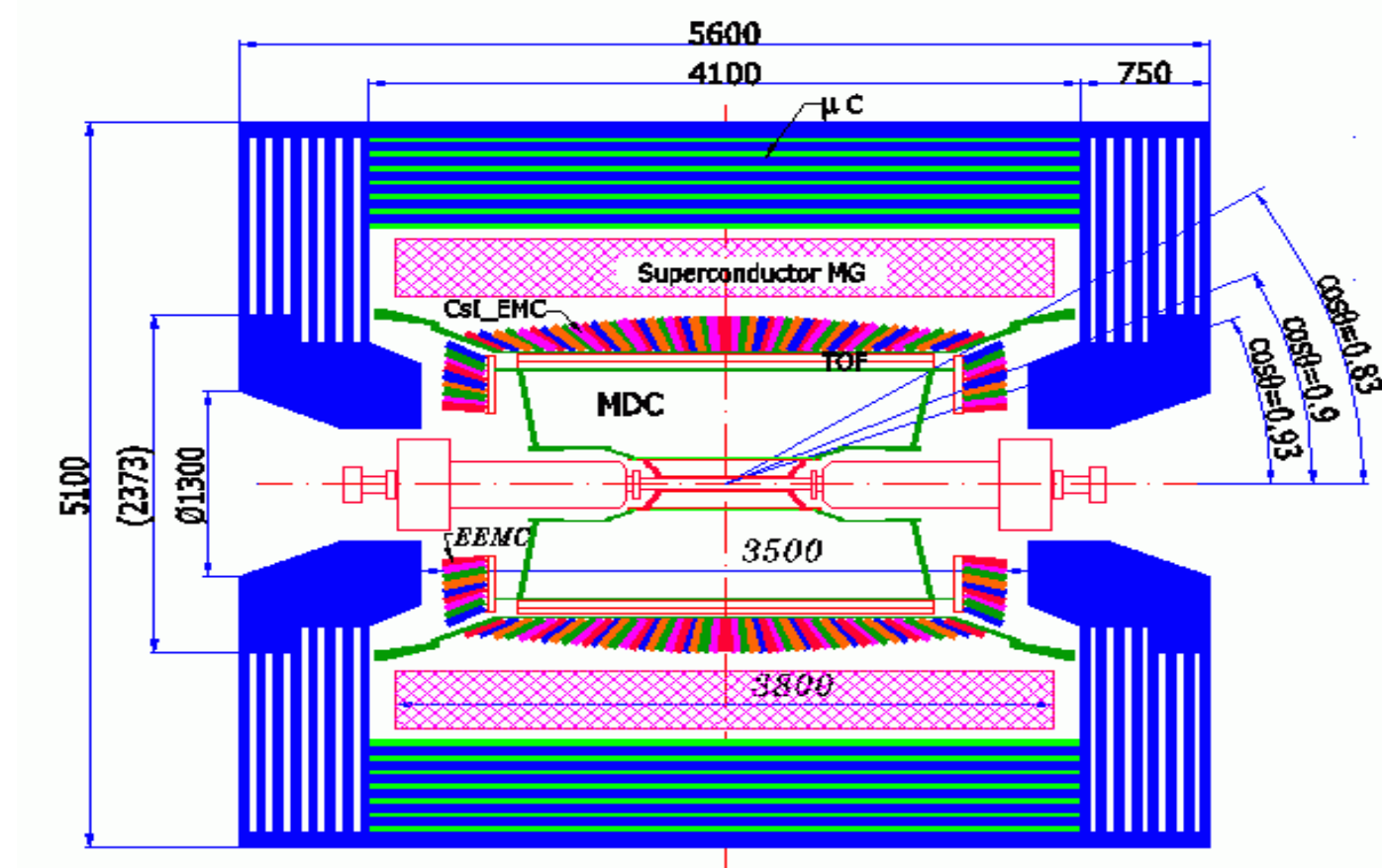
量能器通道~10⁸



对撞机实验对粒子探测器的要求和挑战



对撞机上的粒子探测系统



不同粒子:

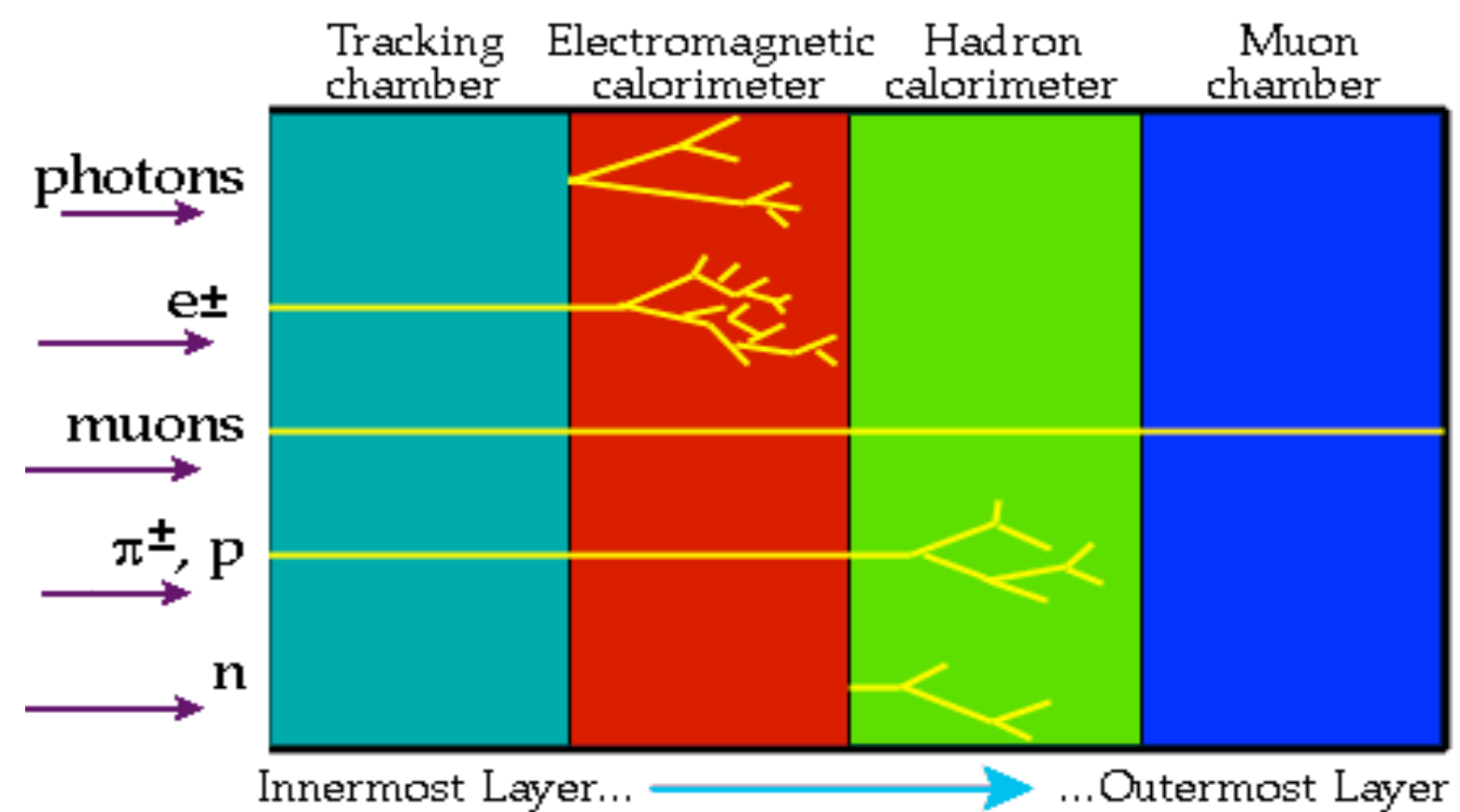
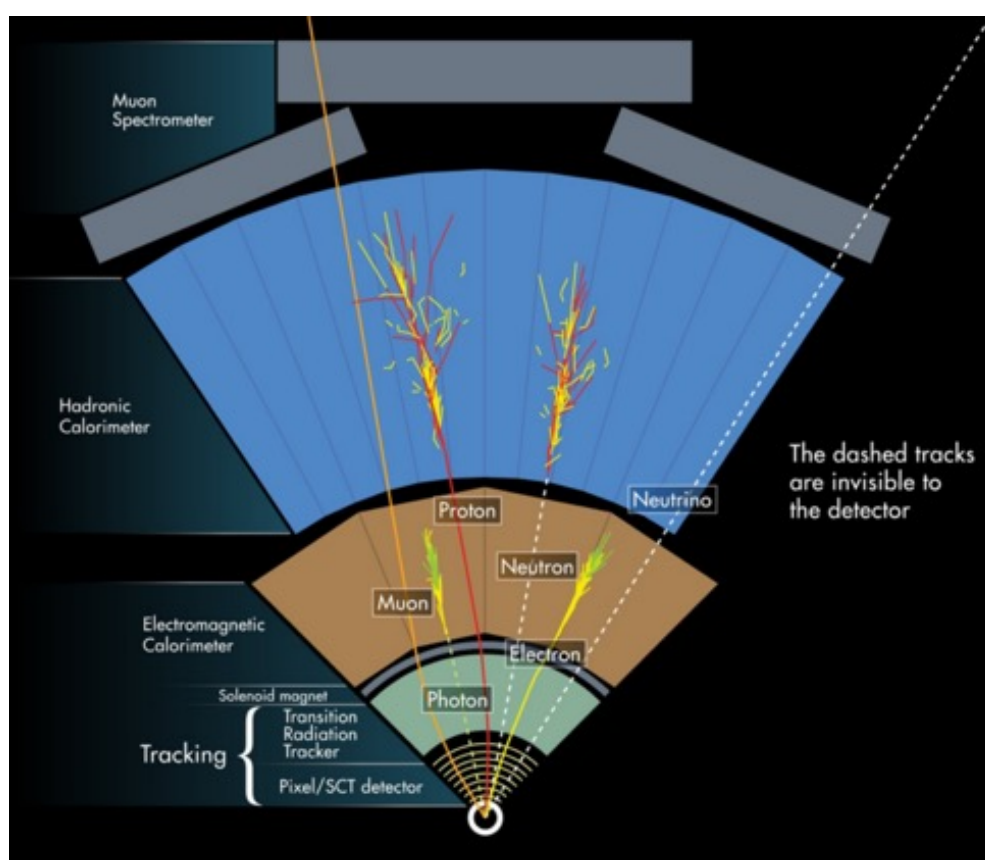


对撞点

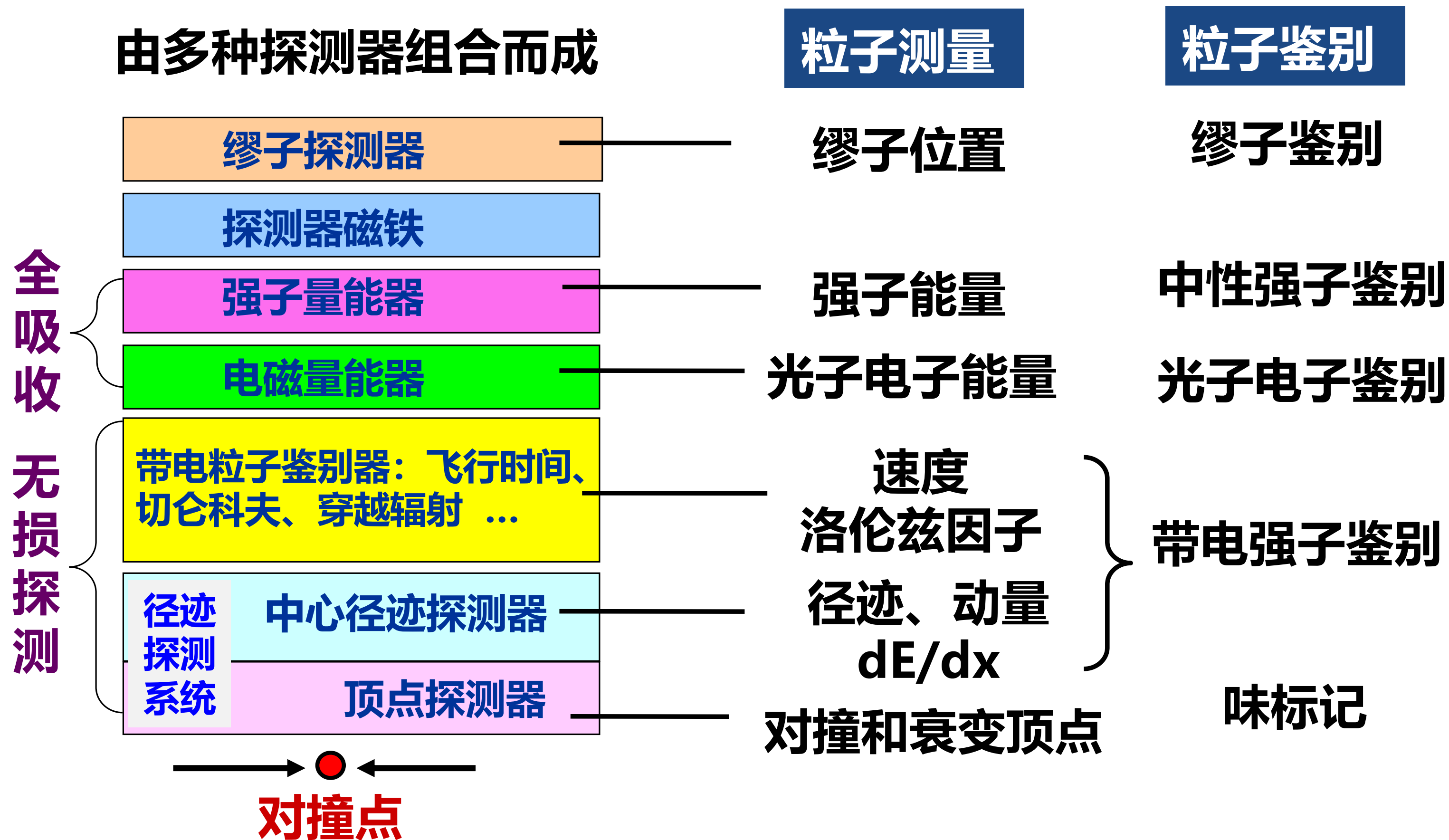
4T

超导磁铁

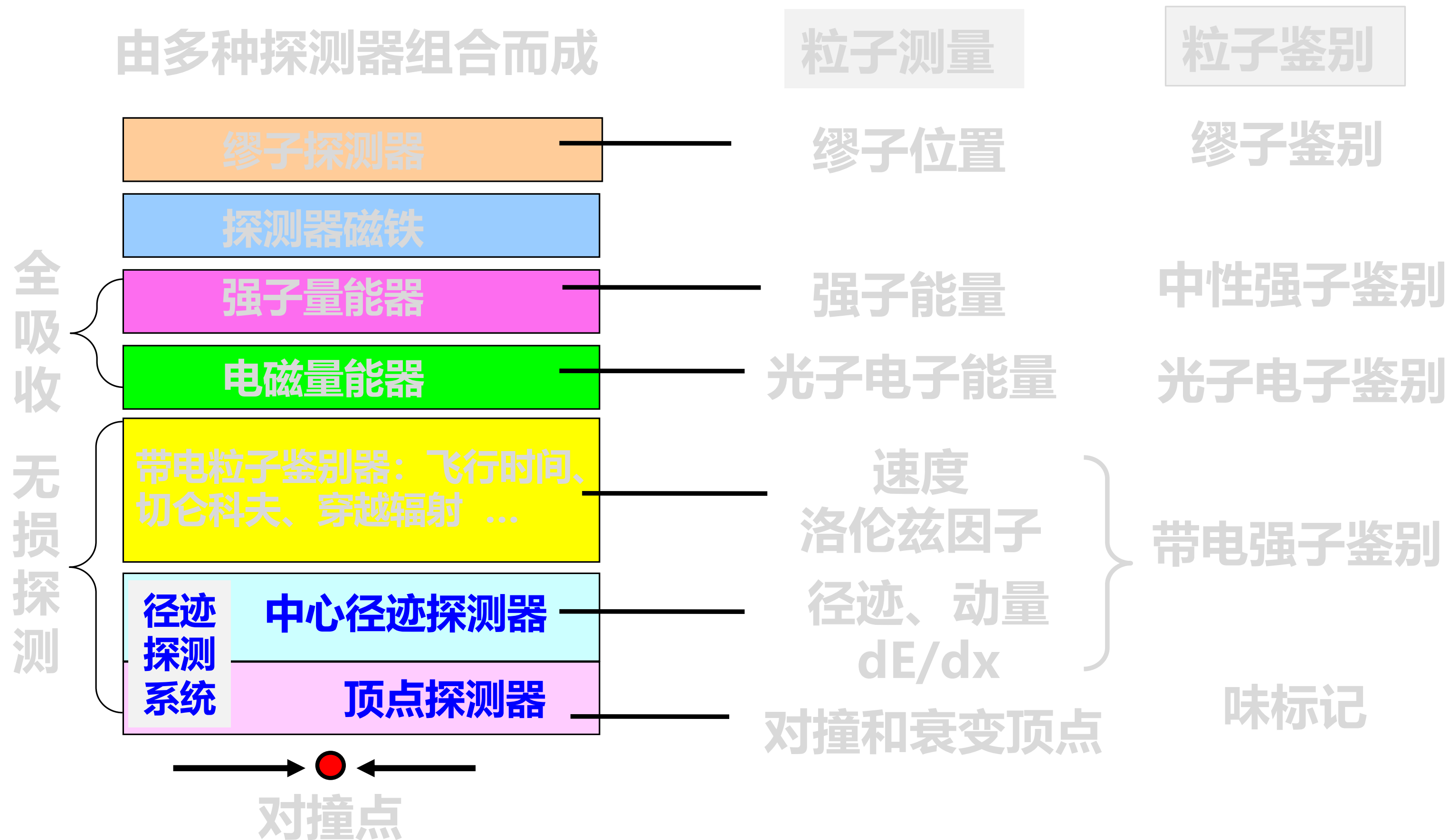
磁场回路轭铁

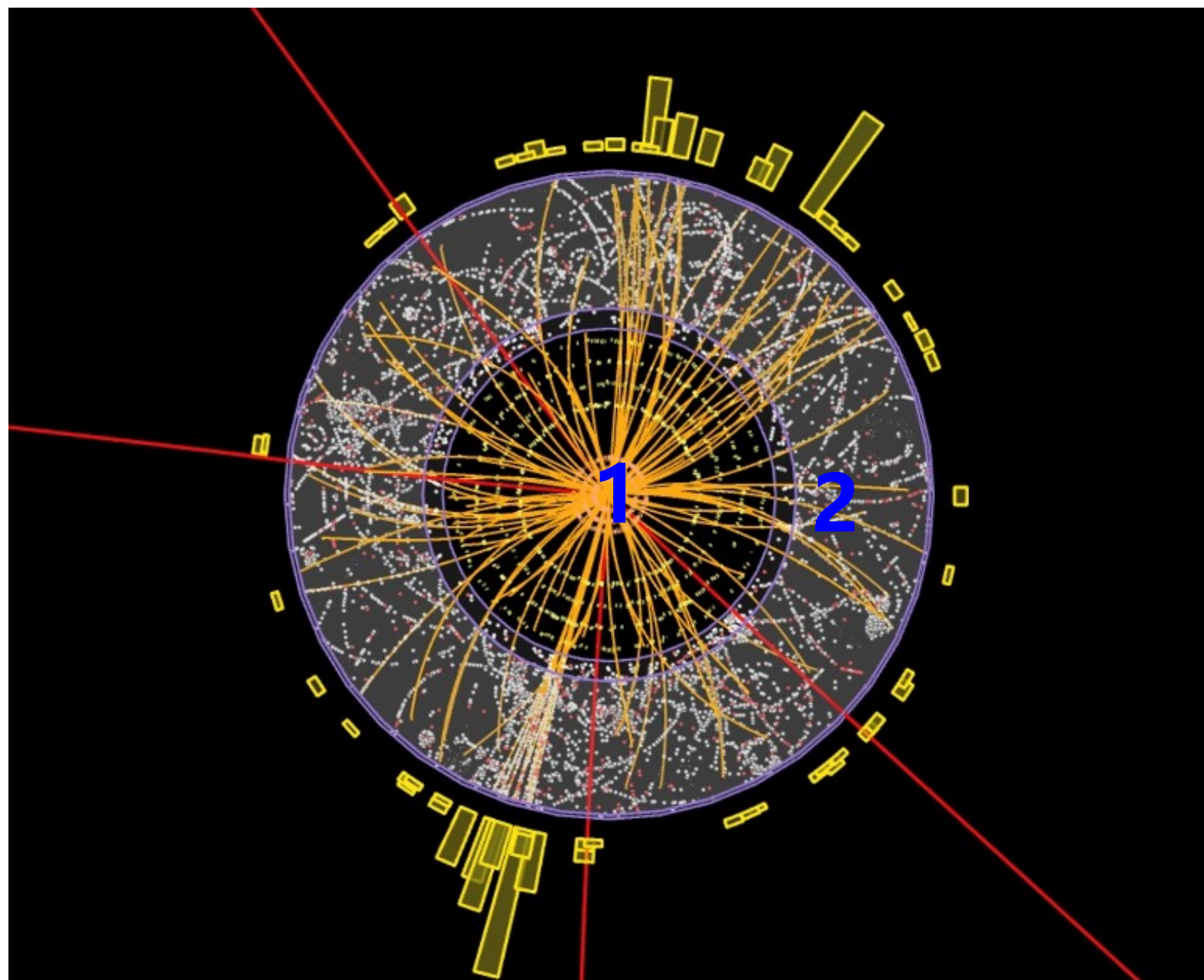


对撞机上的粒子探测系统



对撞机上的粒子探测系统





1. 内部区域

高计数率，较小面积，顶点测量

2. 中心区域

中等计数率，大体积，动量测量

❖前沿：硅径迹探测器

- ▶ 类型：硅像素、硅微条
- ▶ 特点：高位置分辨、高计数率能力、高造价
- ▶ 应用：顶点测量（例如 BELLE2），高本底环境（例如 LHC实验）

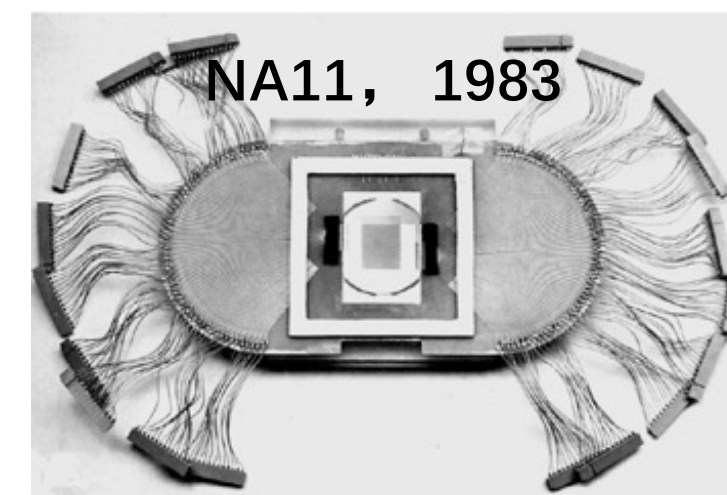
❖经典：气体径迹室

- ▶ 类型：漂移室、时间投影室
- ▶ 特点：低质量、大体积、低造价
- ▶ 应用：低能区（例如 BESIII），（相对）低计数率环境（例如 ILD）

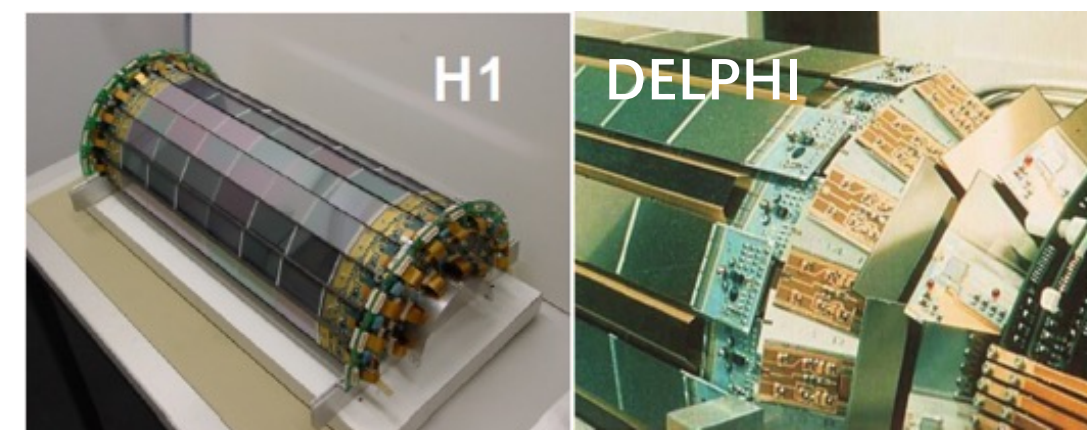
❖新颖：圆柱形微结构气体探测器、闪烁光纤径迹探测器

- ▶ 高计数率的气体径迹室、高精度大面积光纤探测器

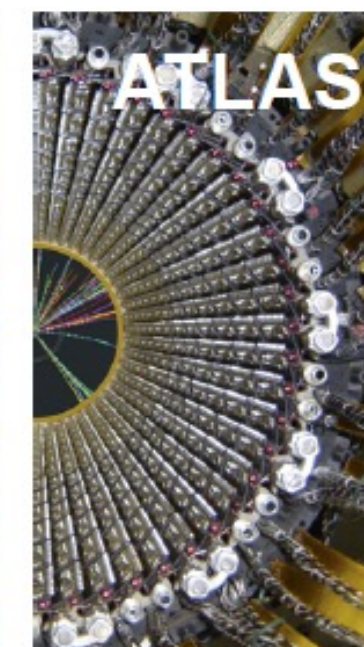
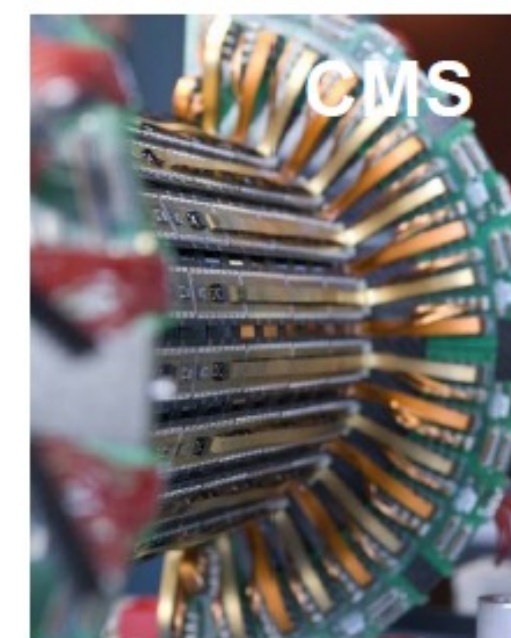
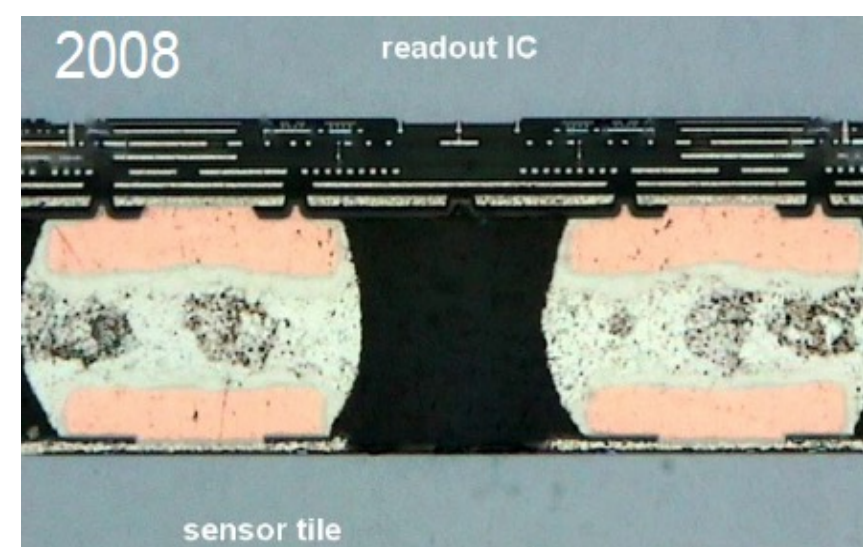
- ❖ 首个硅径迹探测器：1983年，NA11实验上的硅微条探测器，测量粲介子衰变长度，位置分辨达 $4.5\mu\text{m}$ 。
- ❖ 硅微条探测器广泛应用于顶点精确测量：MarkII, SLD, H1, ZEUS, LPE实验(4), CLEO, Belle, Babar, CDF, D0 ...
- ❖ 之后硅微条探测器扩展到中心径迹探测：LHC ...
- ❖ 高计数率的要求极大促进了硅像素探测器的发展：LHC、Belle2、ILC ...



80年代
~0.002 m²



90年代
~2 m²



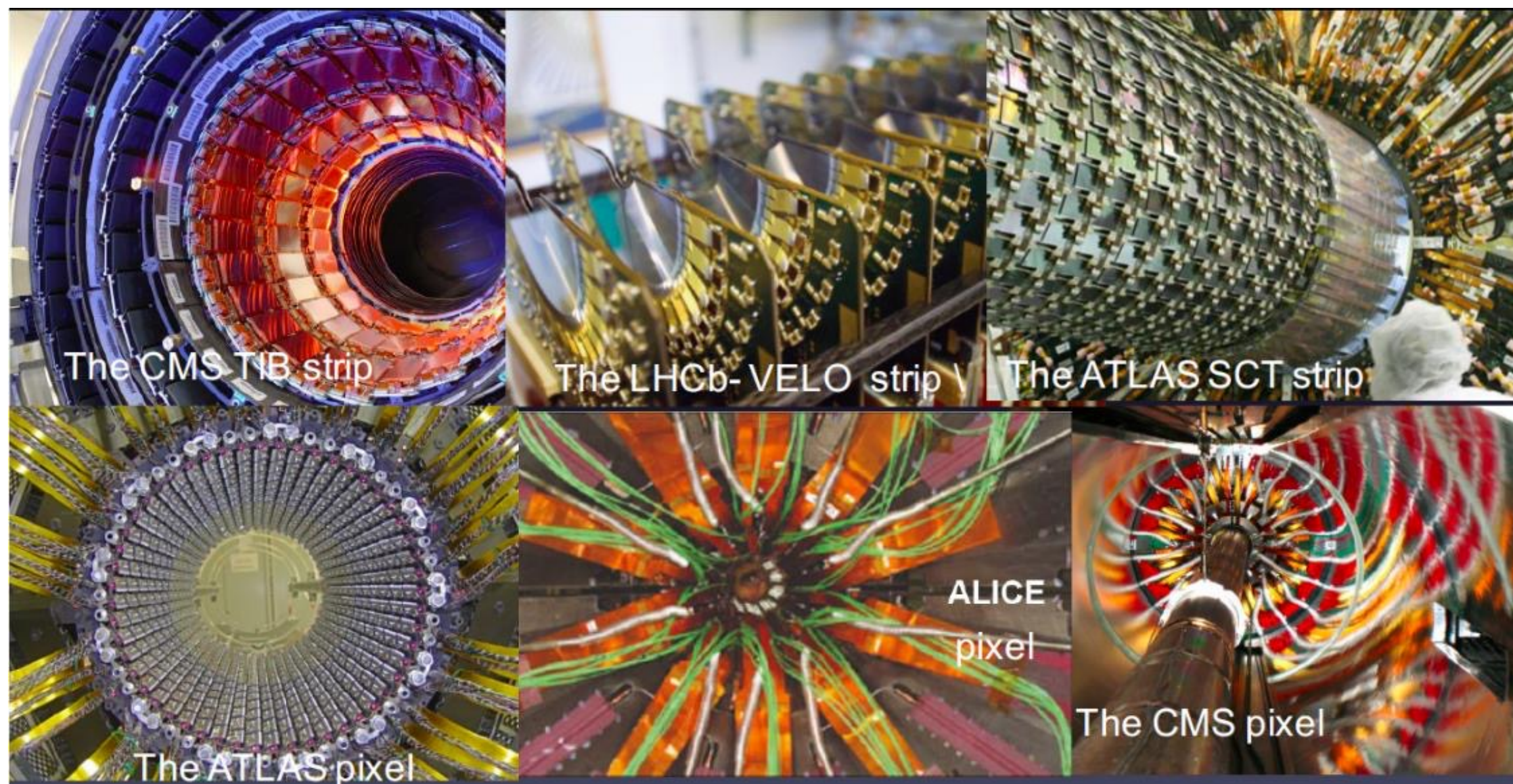
10年代
~200 m²

LHC实验上的硅径迹探测器



❖ LHC实验上有当前世界上最大规模的硅径迹探测器

- ▶ ATLAS: 像素(8千万通道)+微条(0.6千万通道), 62m^2
- ▶ CMS: 像素(6.6千万通道)+微条(1.1千万通道), 201m^2



硅微条探测器已经突破内部区域，扩展到了中心区域！

硅像素探测器紧靠反应点，承受着最高的辐照本底和计数率水平，是硅径迹探测器研发的重点和前沿。

混合型 (Hybrid) 硅像素探测器

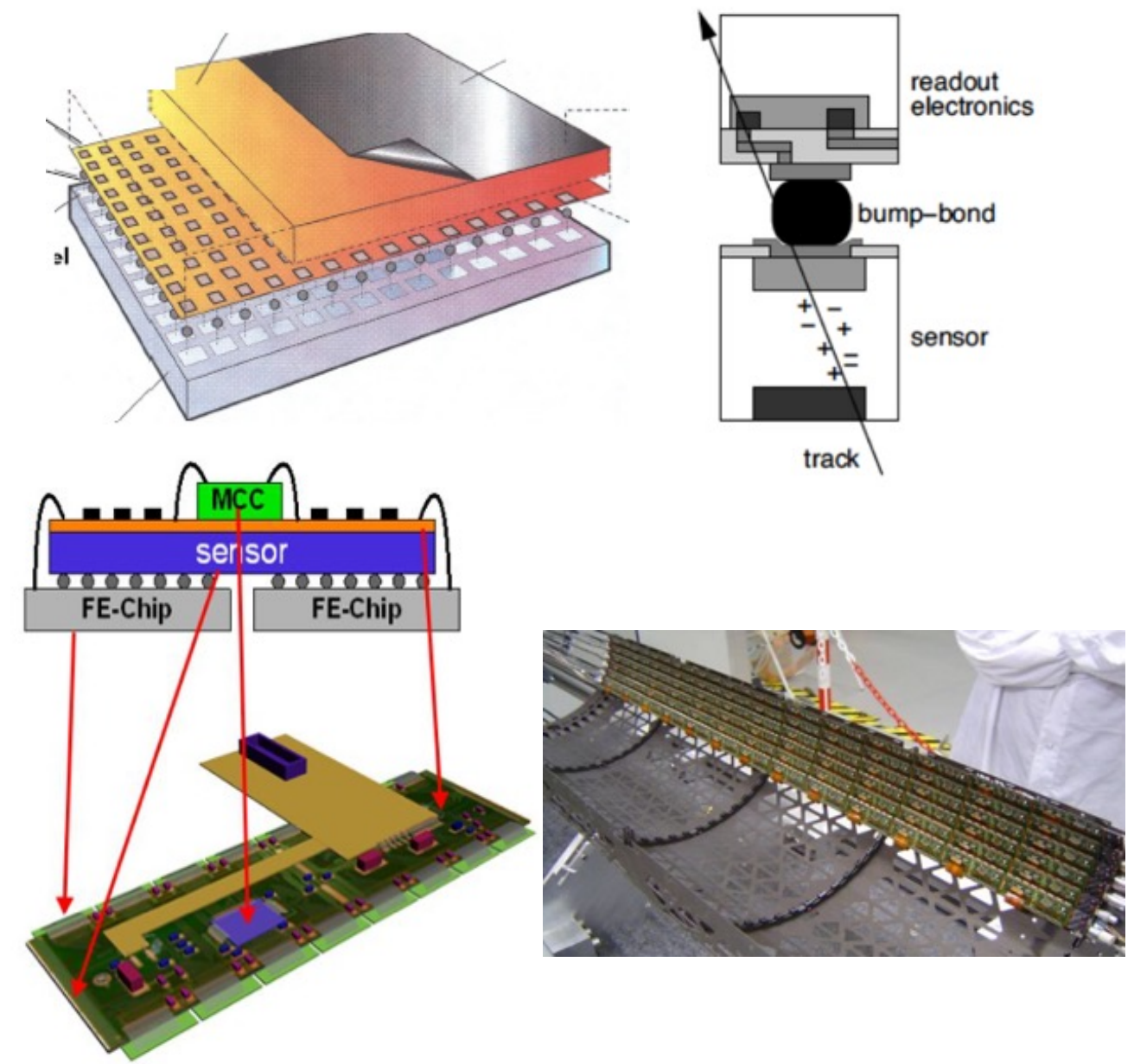


- ❖ 混合型硅像素探测器：传感器与信号处理分离，二者通过倒装焊技术连接。
- ❖ LHC上的硅像素探测器几乎都为平面混合型，代表了当前最成熟和先进的硅像素技术。

- ▶ ATLAS: $50\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$, $\sigma_{\text{sp}} \sim 10\text{-}20\mu\text{m}$
- ▶ CMS: $100\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$, $\sigma_{\text{sp}} \sim 10\text{-}20\mu\text{m}$
- ▶ n-in-n, $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$, 50MRad, $\sim 3\% \times X_0$

❖ 高效稳定运行

- ▶ ATLAS: $\sim 98\%$ (2016年)
- ▶ CMS: $\sim 99\%$ (2016年)



非常成功的大型硅像素径迹探测器！

❖ 优点

- ▶ 更短的漂移距离，更小的俘获效应
- ▶ 较低的偏置电压和功耗

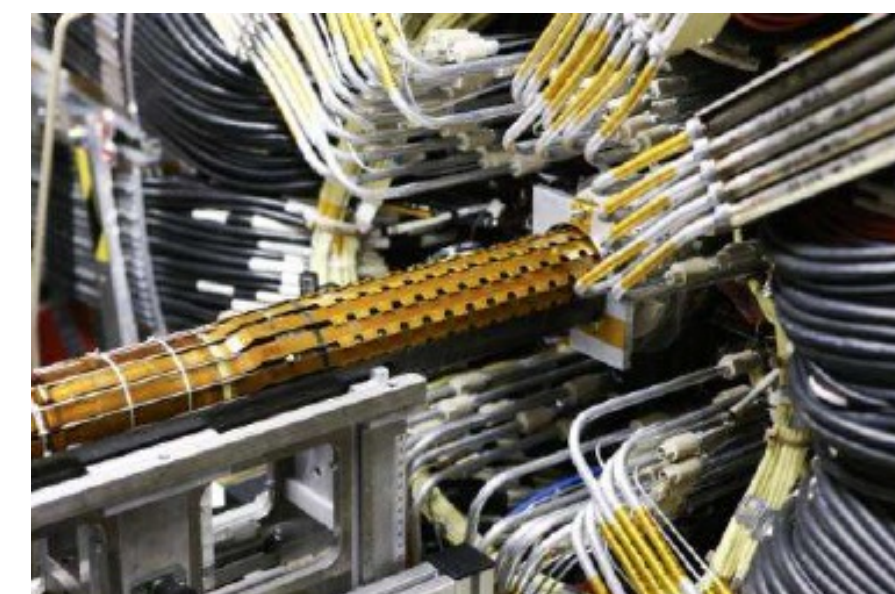
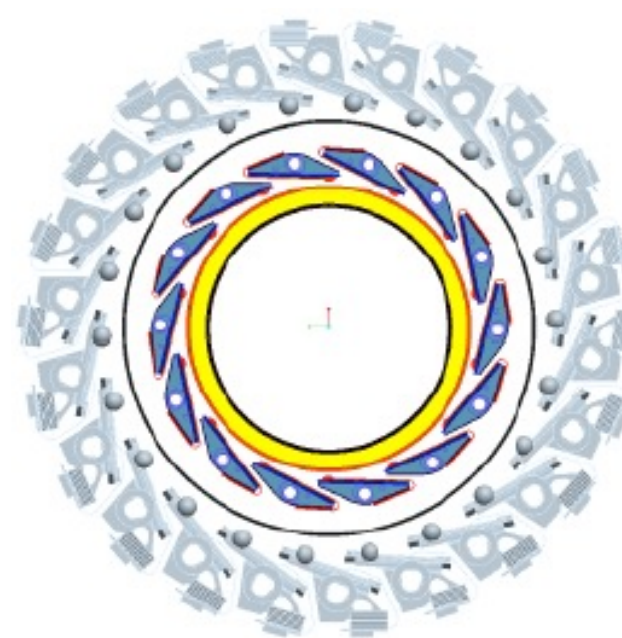
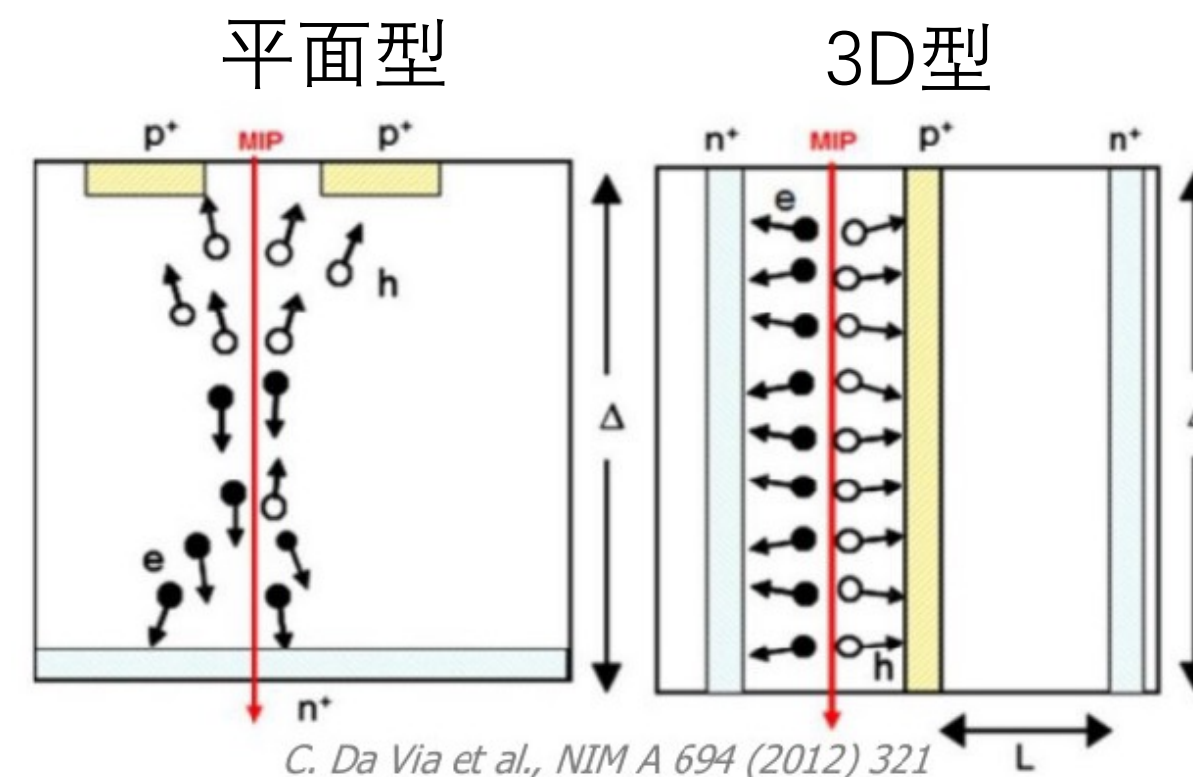
❖ 缺点

- ▶ 生产过程复杂，良品率低，成本高
- ▶ 电容较大，信噪比较差

❖ 3D型是目前最抗辐照的硅像素技术

❖ 实际应用：ATLAS-IBL (2014年安装)

1/4采用了3D技术



HL-LHC硅径迹探测器升级



❖ ATLAS和CMS正在建造**全新和全硅**的径迹探测器

❖ 最大的挑战在内部区域 — **像素**

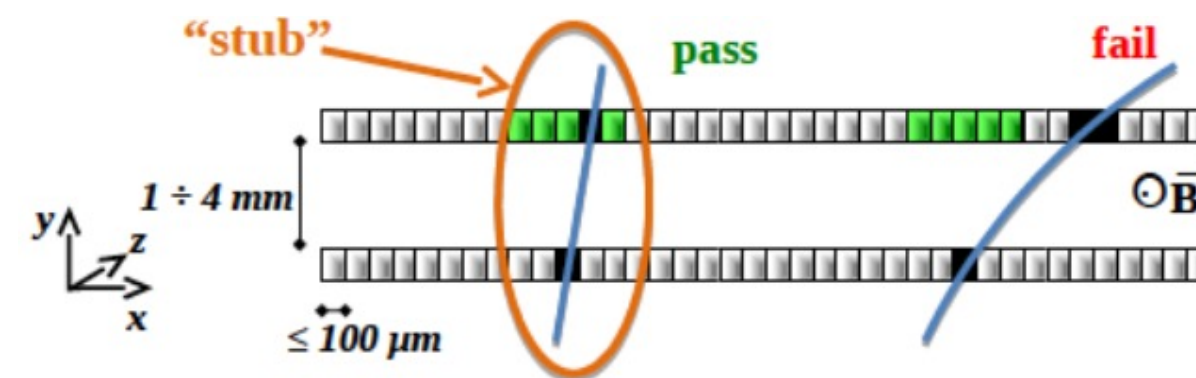
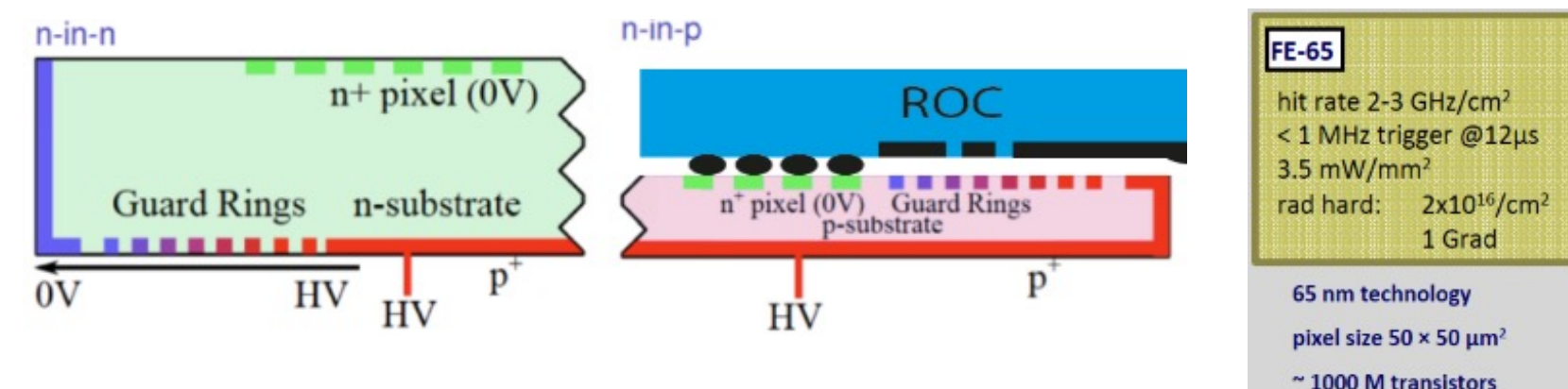
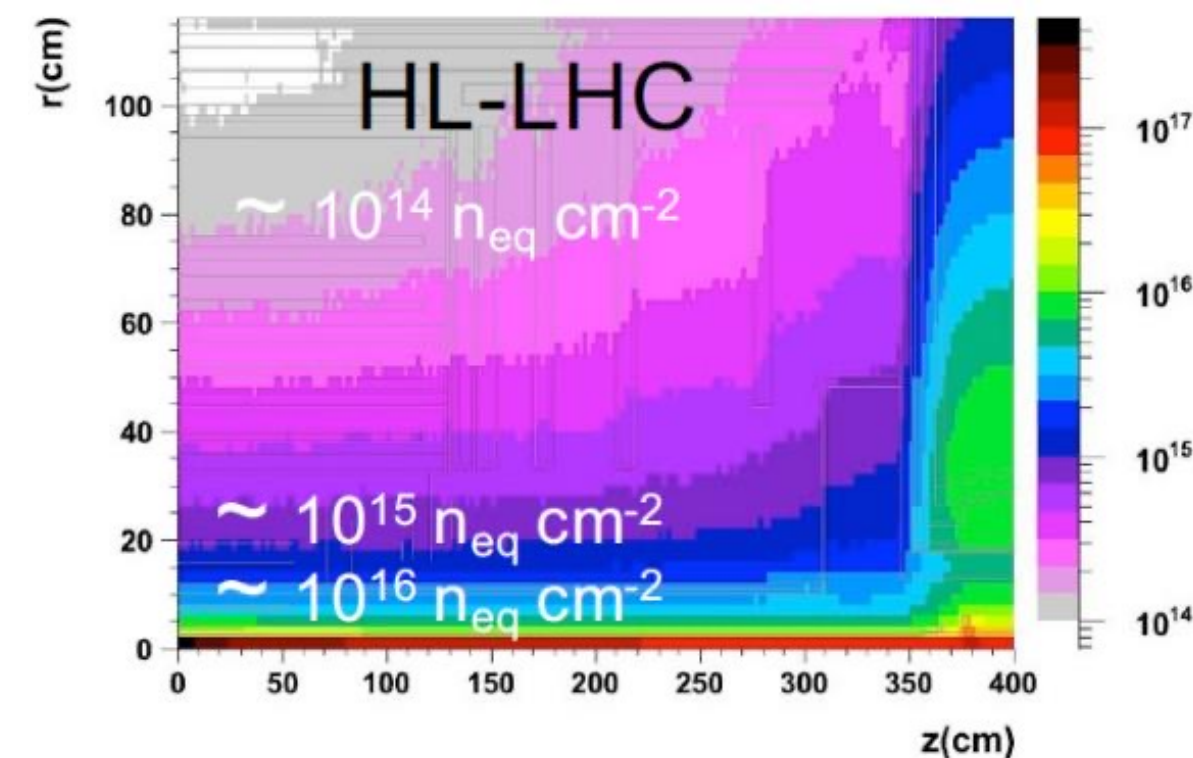
▶ $1\text{GHz}/\text{cm}^2$, $10^{16}n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$, $\text{TID} > 1\text{Grad}$

❖ **像素升级**

- ▶ 最内层: 3D型, $25\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$
- ▶ 其他层: 薄n-in-p平面型, $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ ($25\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$)
- ▶ 65nm工艺读出芯片

❖ **微条升级**

- ▶ n-in-p平面型传感器
- ▶ Pt模块(CMS): 实现L1触发



单片有源硅像素 (MAPS) 探测器



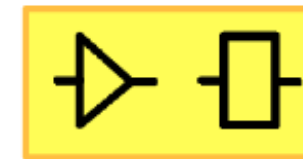
❖ 单片有源：把传感器与读出芯片合二为一

- ▶ 无需倒装焊，高性价比
低质量，小像素，低功耗
- ▶ 读出速度和抗辐照性能在不断提高

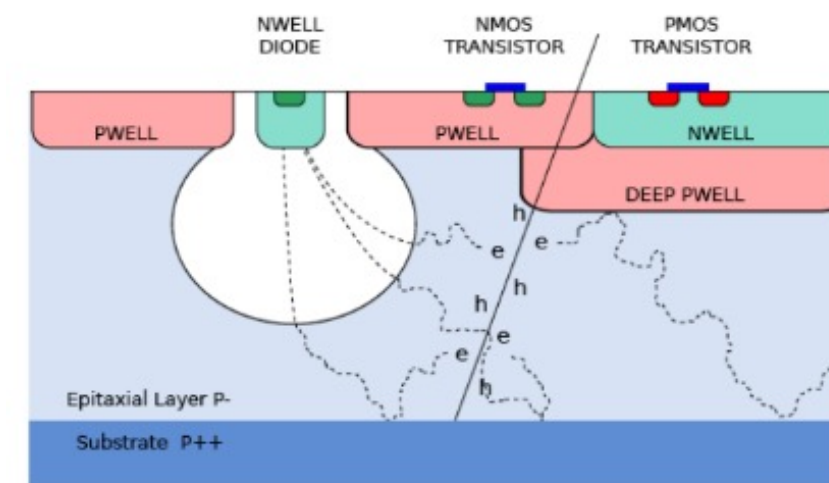
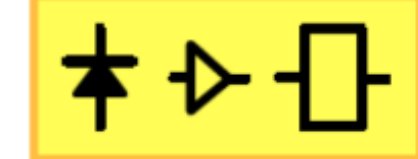
❖ 多种单片有源硅像素技术

- ▶ CMOS-MAPS: STAR, ALICE
- ▶ DEPFET: BELLE2
- ▶ DMAPS (HR/HV-CMOS), SOI

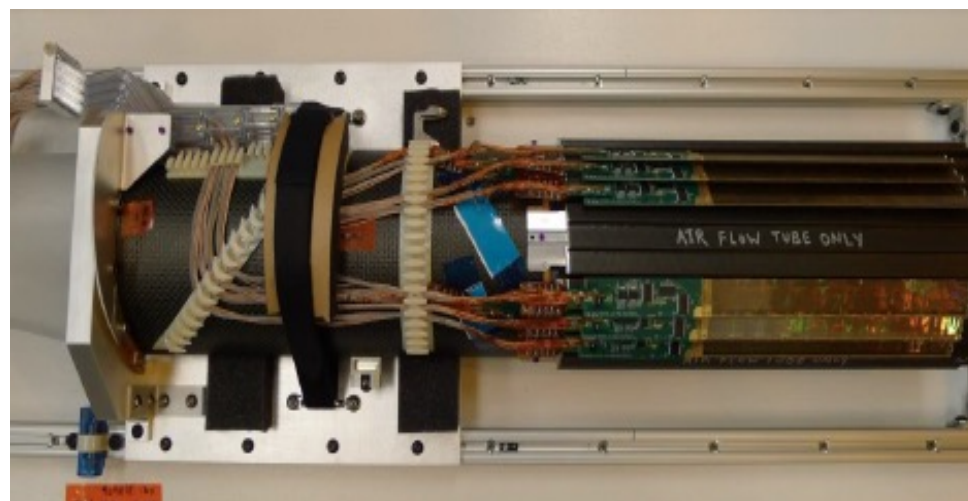
混合型



单一型

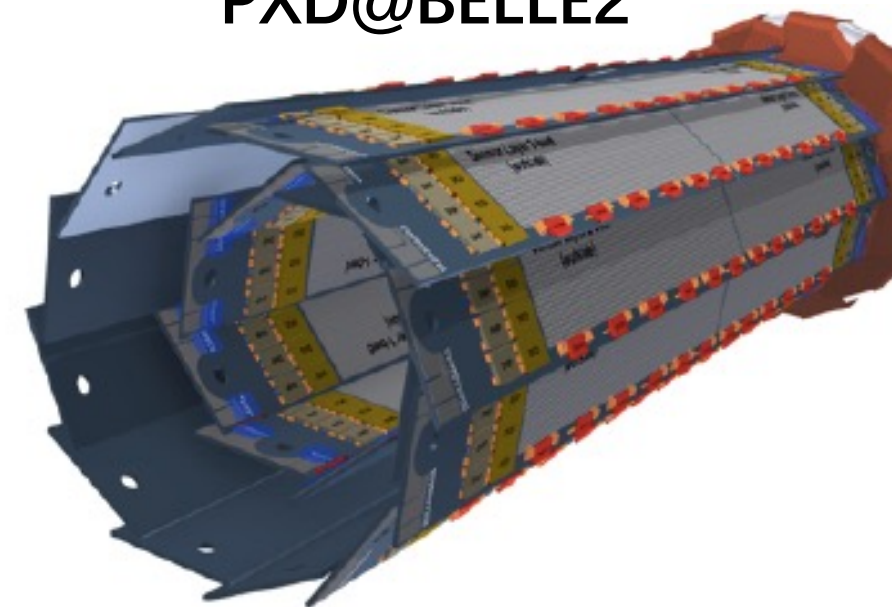


HFT@STAR



- 350 nm CMOS
- $< 30 \mu\text{m}$ pixels
- $0.37\% X_0$
- $50 \mu\text{m}$ thick
- frame time $< 200 \mu\text{s}$

PXD@BELLE2



Number of pixels per module	250 x 1536
Pixel size (r-phi, z)	$50 \mu\text{m} \times (60-75) \mu\text{m}$
Frame time	$20 \mu\text{s}$
Material budget per layer	$0.15\% X_0$
Resolution (r-phi, z)	$< 10 \mu\text{m}, < 20 \mu\text{m}$
Occupancy at 1.8 cm radius	$0.2 \text{ hits } \mu\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$
Radiation environment	$\sim 1 \text{ Mrad/year}$

ALICE ITS2 升级 (MAPS)



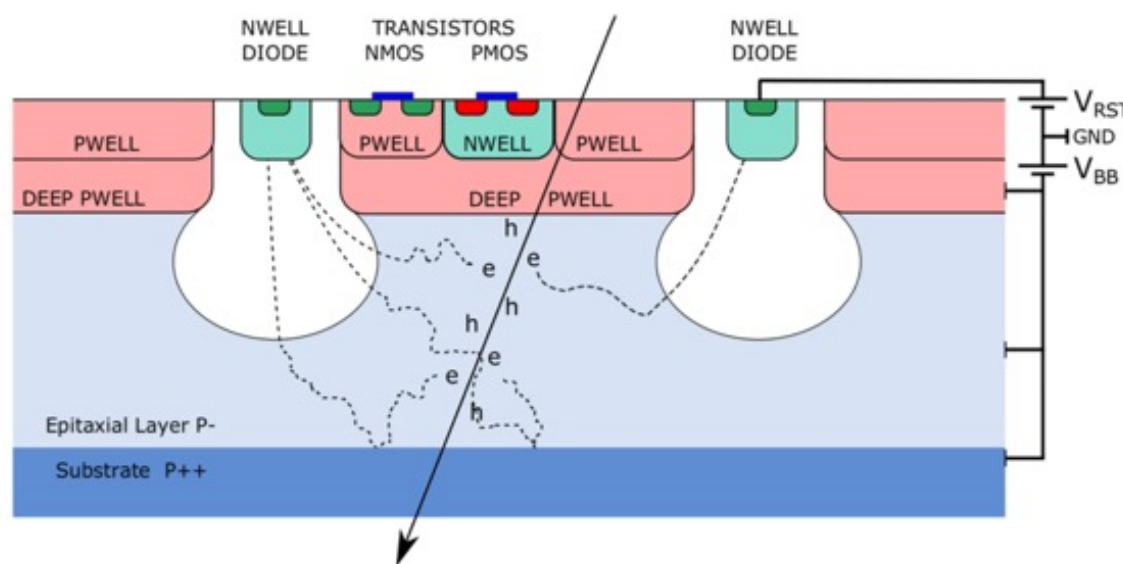
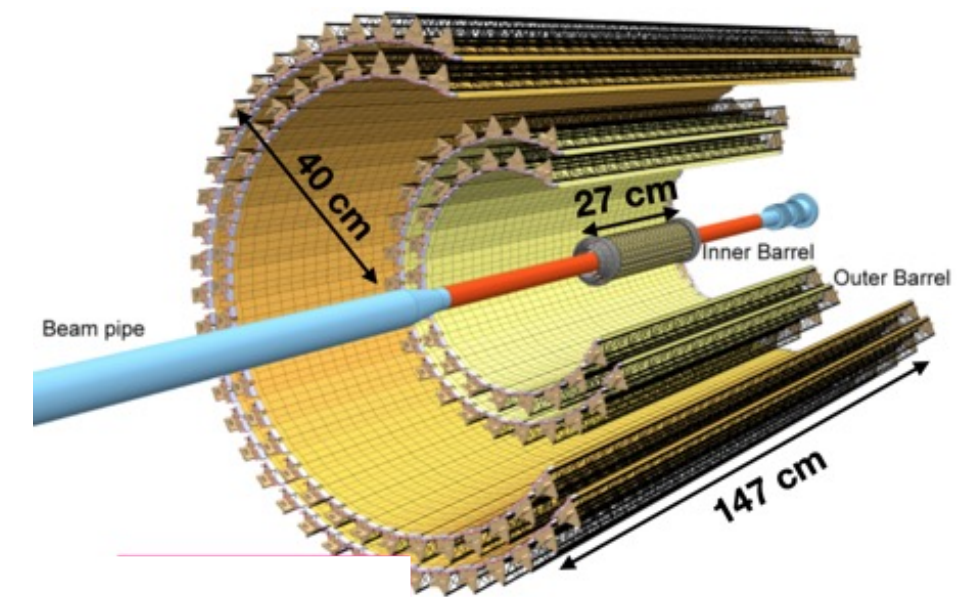
❖ ITS2升级主要目标：提高顶点重建精度，提高低动量径迹的效率和动量分辨。

▶ 更靠近对撞点，减小像素尺寸从而提高位置分辨，减小物质量，增加测量层数

❖ ITS2全部采用MAPS技术，最大的硅像素探测器！

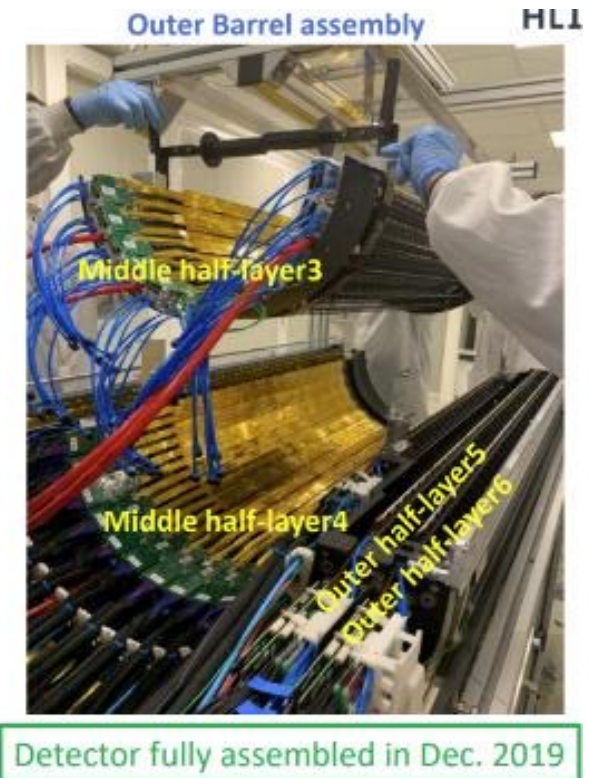
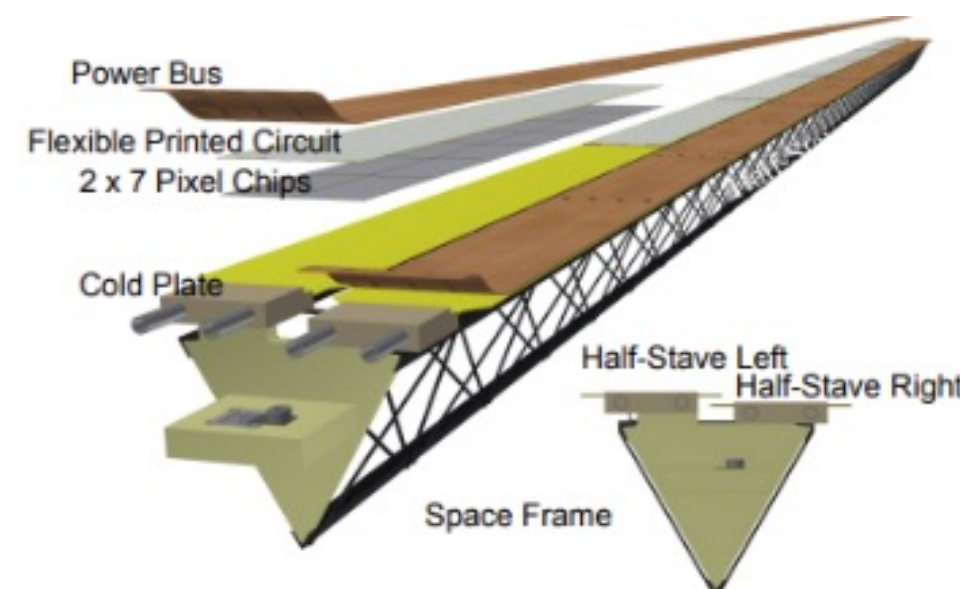
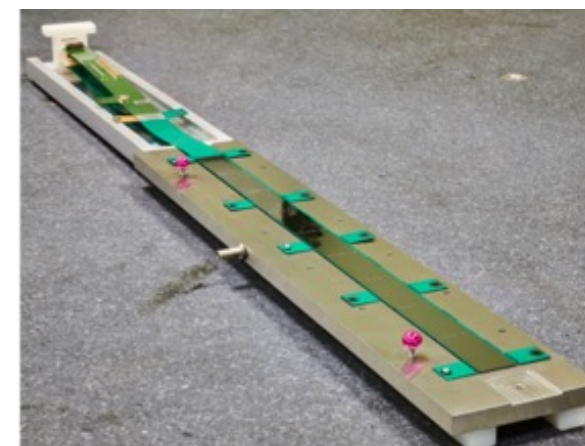
▶ 10m^2 ， 1.25×10^{10} 通道

▶ 顶点和径迹重建性能大幅提升



ALPIDE: $27\mu\text{m} \times 29\mu\text{m}$, $1.5 \times 3\text{ cm}^2$

位置分辨 $5\mu\text{m}$ ，积分时间 $<4\mu\text{s}$ ，功耗 $\sim 40\text{mW}/\text{cm}^2$ ，物质量 $\sim 0.35\%-0.85\%X_0$ ，
TID: $\sim 2700\text{ krad}$ ，NIEL: $\sim 1.7 \times 10^{13}\text{ neq}$



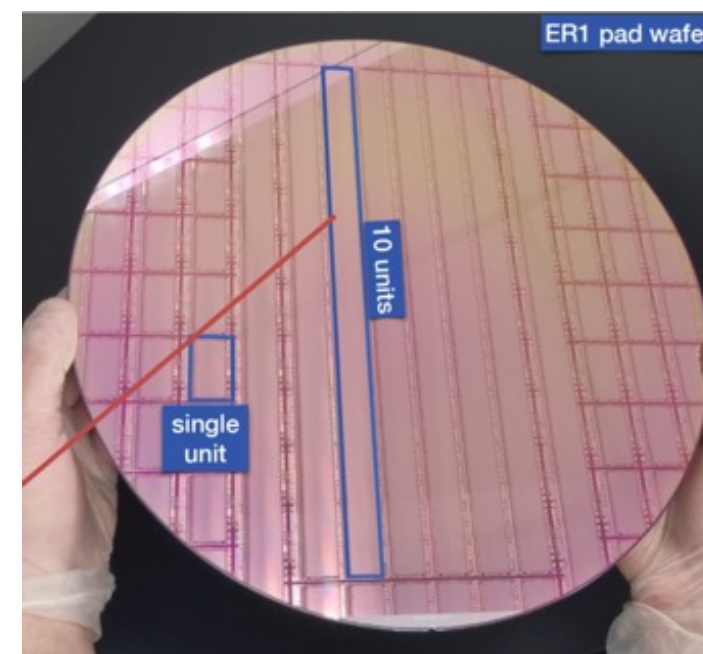
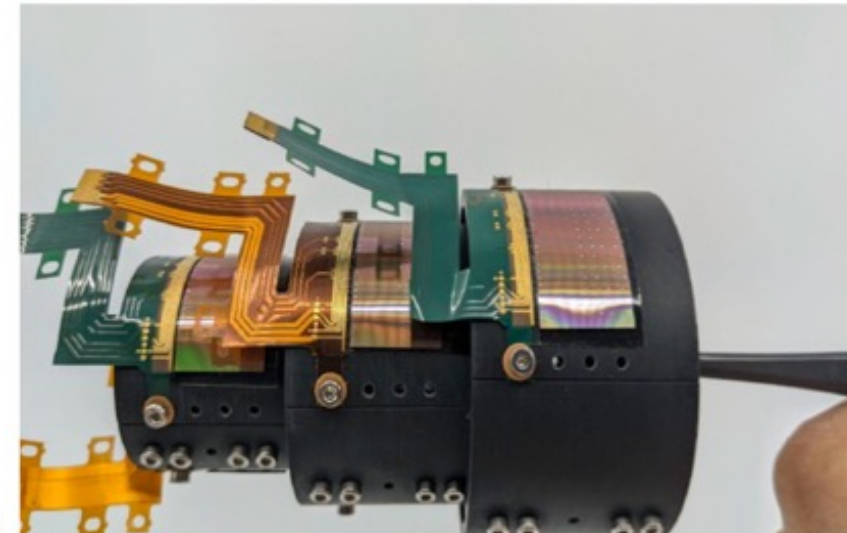
ALICE ITS3 & ALICE3 升级



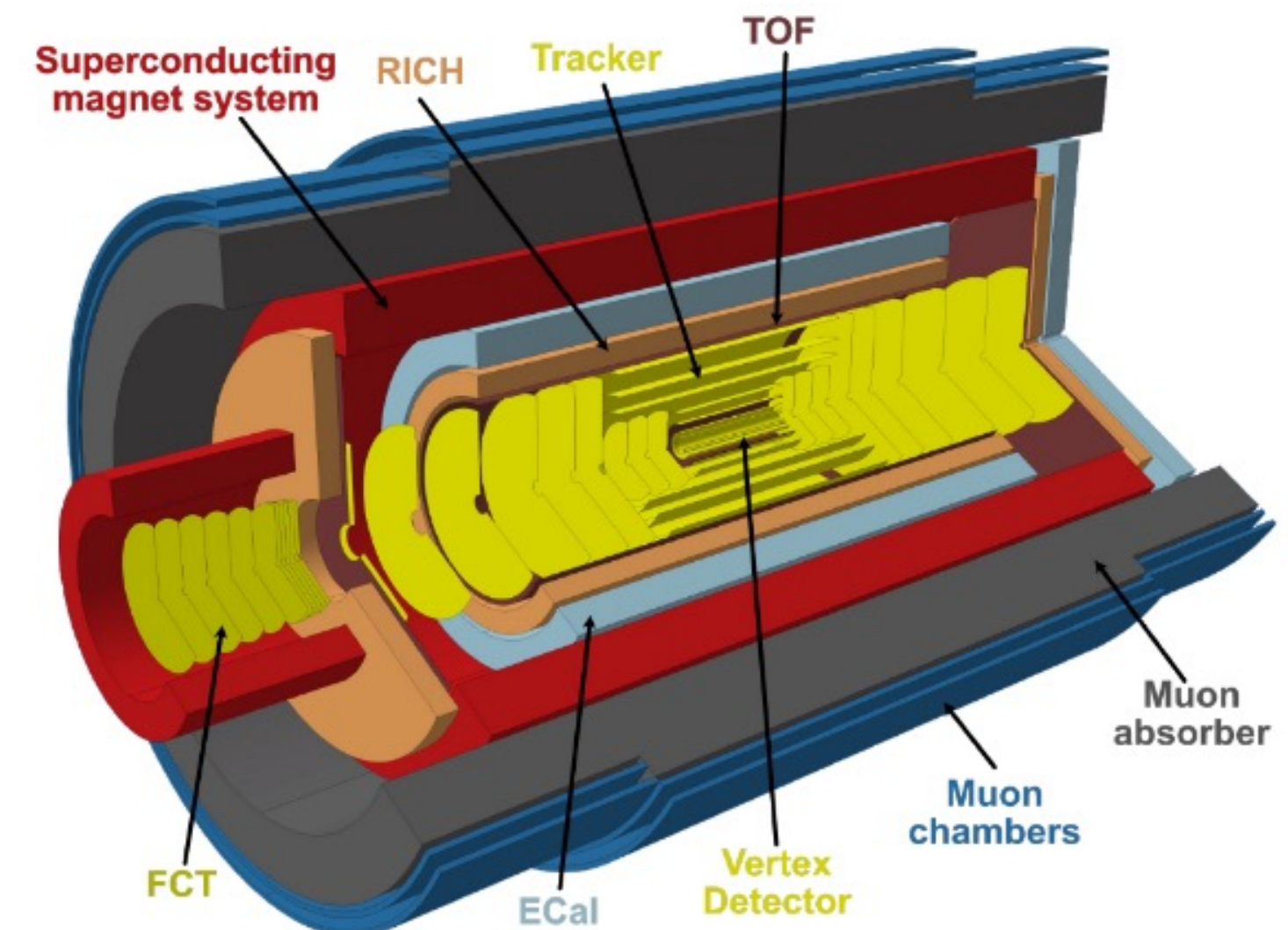
❖ **ITS3**: 采用拼接工艺的晶圆级MAPS芯片, 卷曲自支撑, **超低质量** $< 0.05\%X_0$, 更靠近对撞点。

❖ **ALICE3**: 整个径迹探测系统将采用 MAPS技术

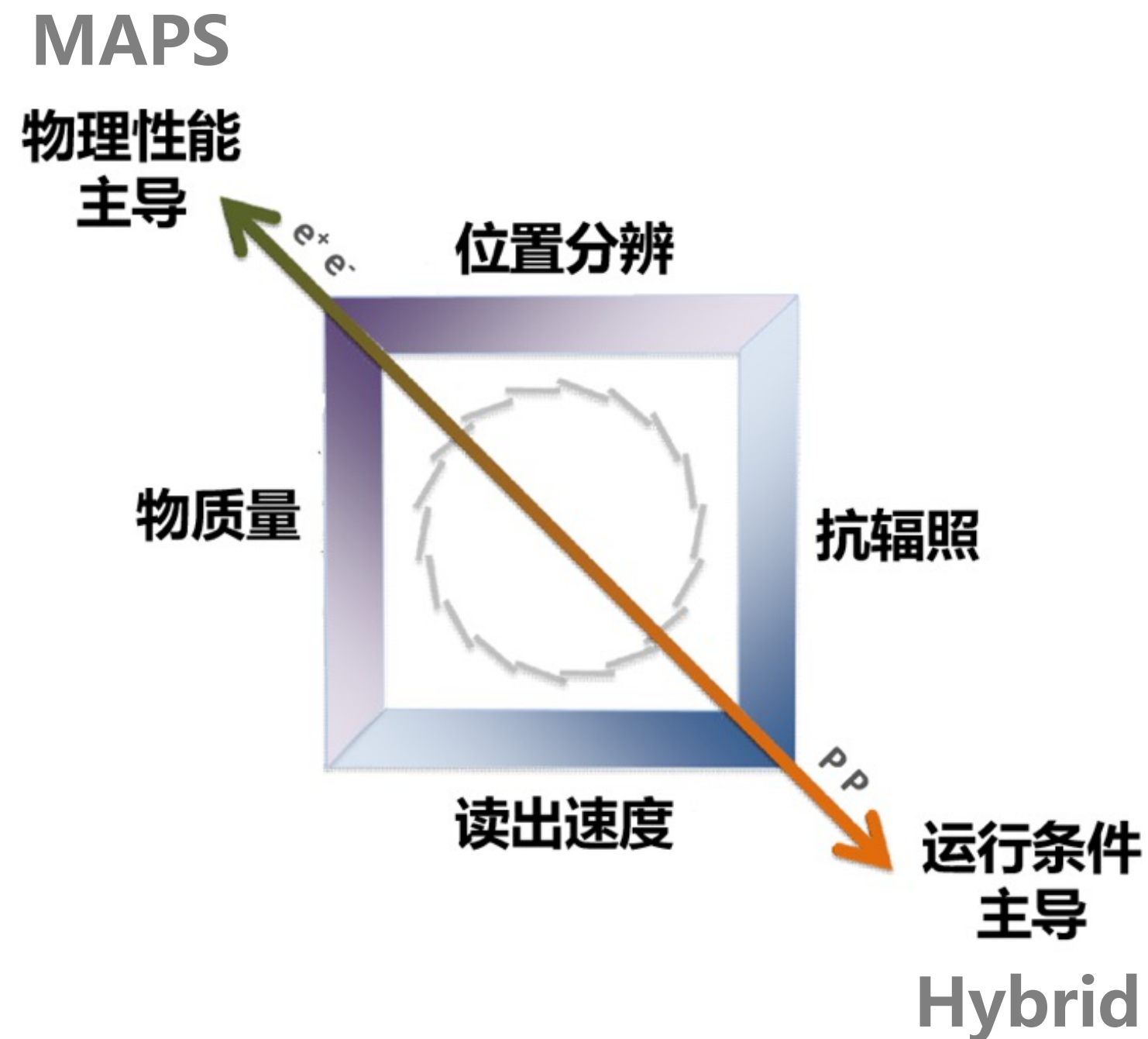
► **硅像素探测器**也将突破内部区域, 进入中心区域, 实现极大规模



$\sim 20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$



硅像素探测器的发展



不同实验近对撞点区域的计数率和辐照相关参数

	束团间隔	计数率	辐照强度	总电离剂量
	ns	kHz/mm ²	N _{eq} /cm ²	Mrad
LHC	25	1000	2*10 ¹⁵	80
HL-LHC	25	10000	2*10 ¹⁶	>1000
LHC-HI (ALICE)	20	10	>10 ¹³	0.7
RHIC	110	4	~10 ¹²	0.2
SKEKB	2	400	3*10 ¹²	10
ILC	350	250	10 ¹²	0.4

- LHC: 抗辐照、快读出 → 平面混合型
- HL-LHC: 更强的抗辐照和更快的读出, 更大面积 → 薄n-in-p平面混合型, 更低造价、更小像素、更多本地缓存, 新型传感器 (3D ...)
- 高精度实验: 低质量、更高位置分辨 → MAPS

- 混合型: 探索新型的集成技术 → 更小的像素尺寸, 更高性能
- 单片型: 很大的提升空间 → 拼接超大芯片、自支撑, 提高速度和抗辐照性能 (耗尽型)

❖ 漂移室、时间投影室等气体径迹室是中心径迹探测的传统技术选项。

- ▶ 特点：低质量($<1\%X_0$)、大体积($\sim m^3$)、廉价、合理的位置分辨($\sim 100\mu m$)、极多次测量 (几十)
- ▶ 应用：低能区 (例如 BES3、BELLE2) , 不太高的计数率环境 (例如 ILD、IDEA、CEPC)

❖ 硅探测器(近对撞点)+气体径迹室(中心区域)是径迹探测中常用的组合：优势互补

- ▶ BELLE2: PXD(硅像素)+SVD(硅微条)+CDC(中心漂移室)
- ▶ ALICE: ITS(内部硅径迹探测系统)+TPC
- ▶ ILD: VTX(硅像素)+SIT(硅微条)+TPC

随着硅径迹探测器技术的迅速发展，**硅微条已进入中心区域，硅像素也将进入。**

❖ 对于低能区实验，为控制多次散射的影响，通常只能采用低质量的气体径迹室

❖ 一些突出的研究课题

- ▶ 超大规模设计，极低质量设计，正离子反馈抑制，像素读出 ...

❖ 极低物质质量漂移室的设计和研发

- ▶ MEG-II、SCTF、STCF、IDEA

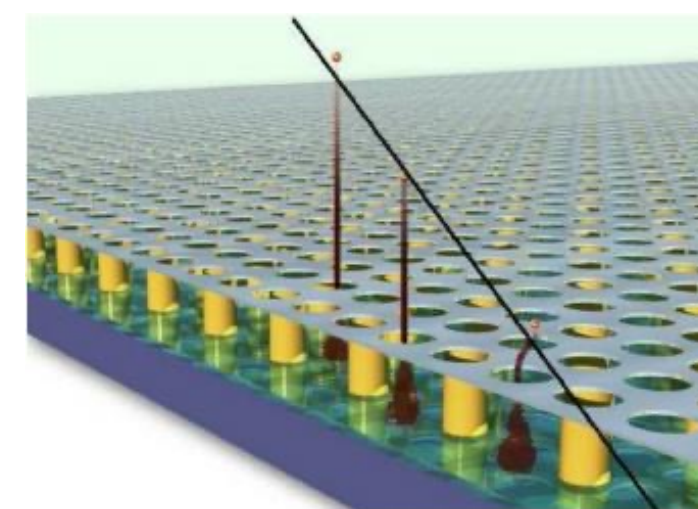
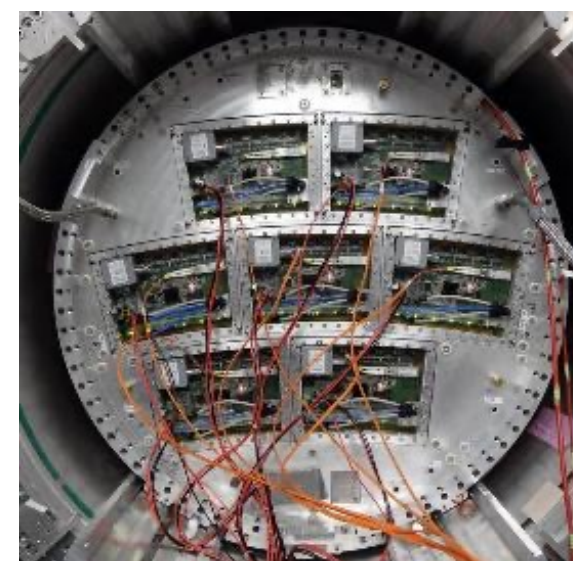
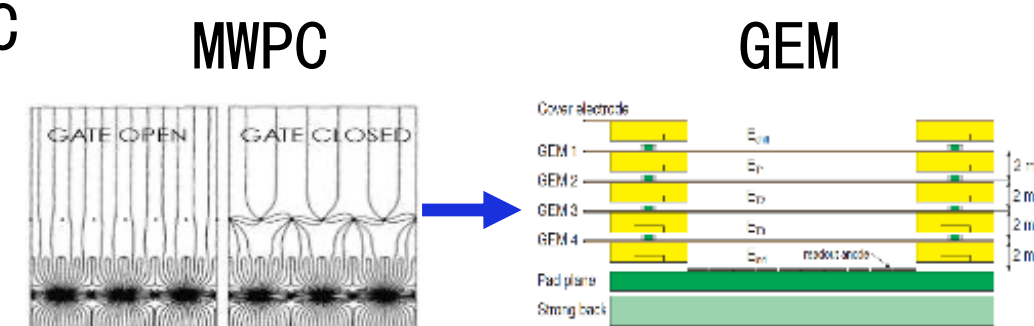
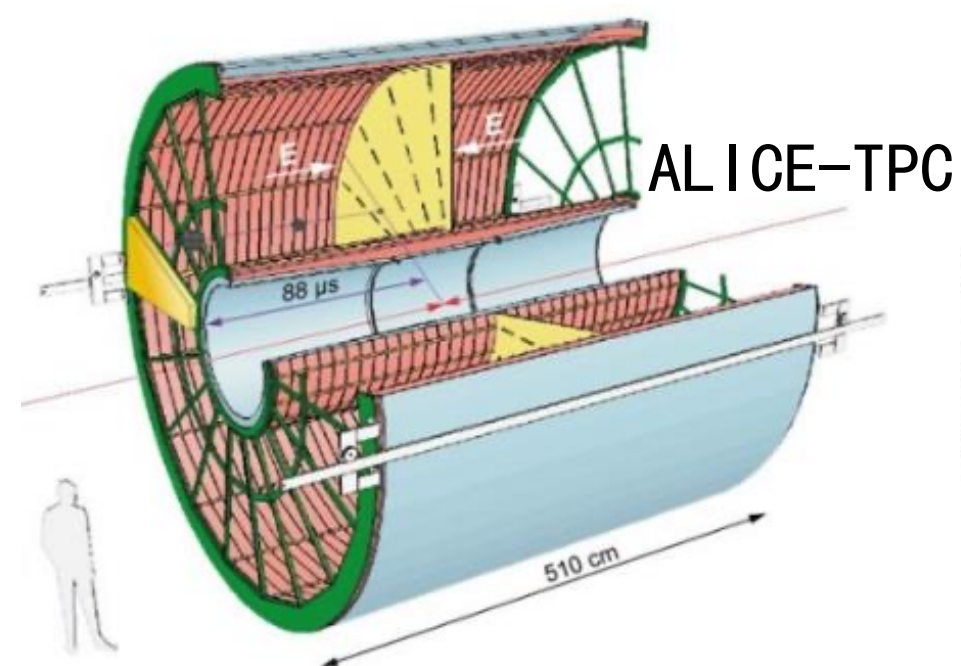
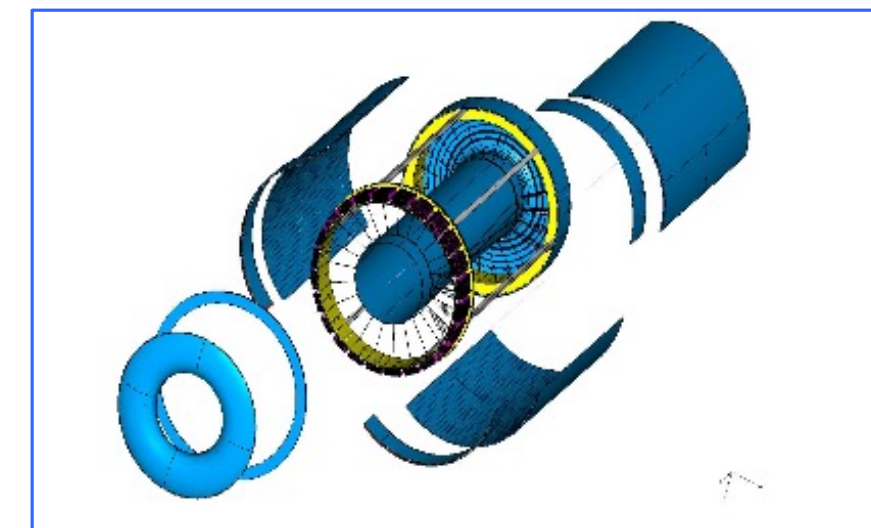
❖ BELLE2大型漂移室的成功建造和运行

❖ ALICE-TPC（目前世界最大TPC）的读出探测器升级

- ▶ MWPC→GEM，无开关门，连续读出
- ▶ 采用微结构气体探测器有效抑制离子反馈

❖ 超大TPC（ILC-TPC、CEPC-TPC）的设计和研发

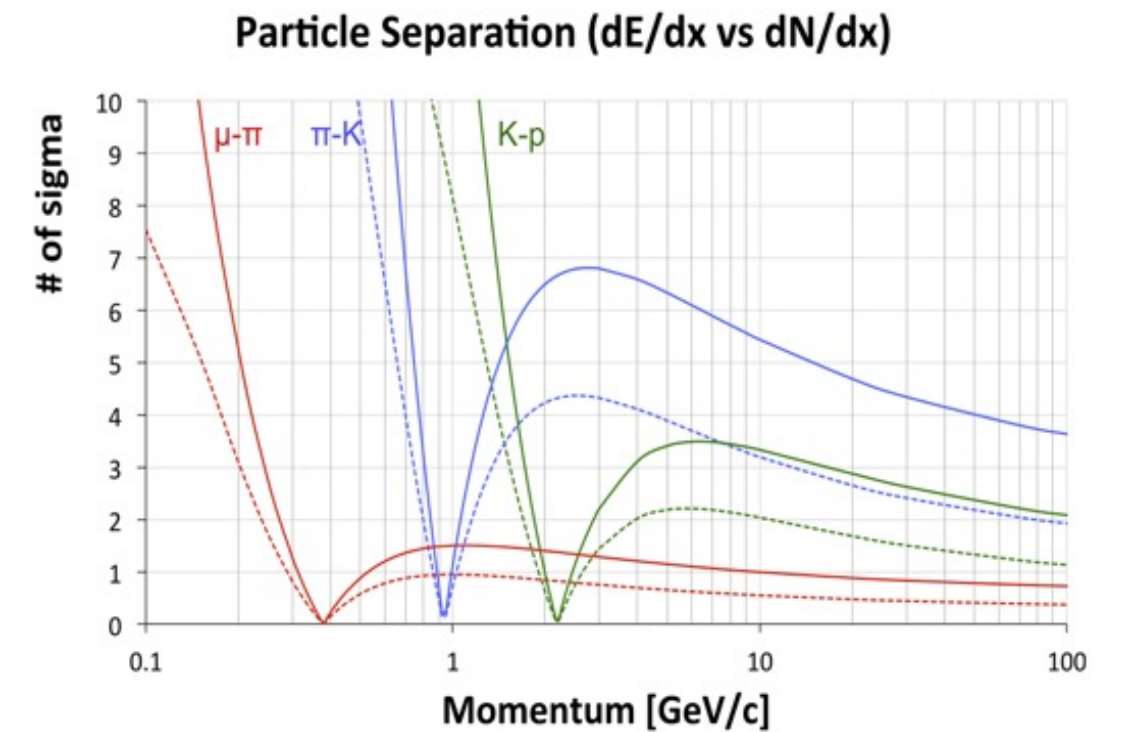
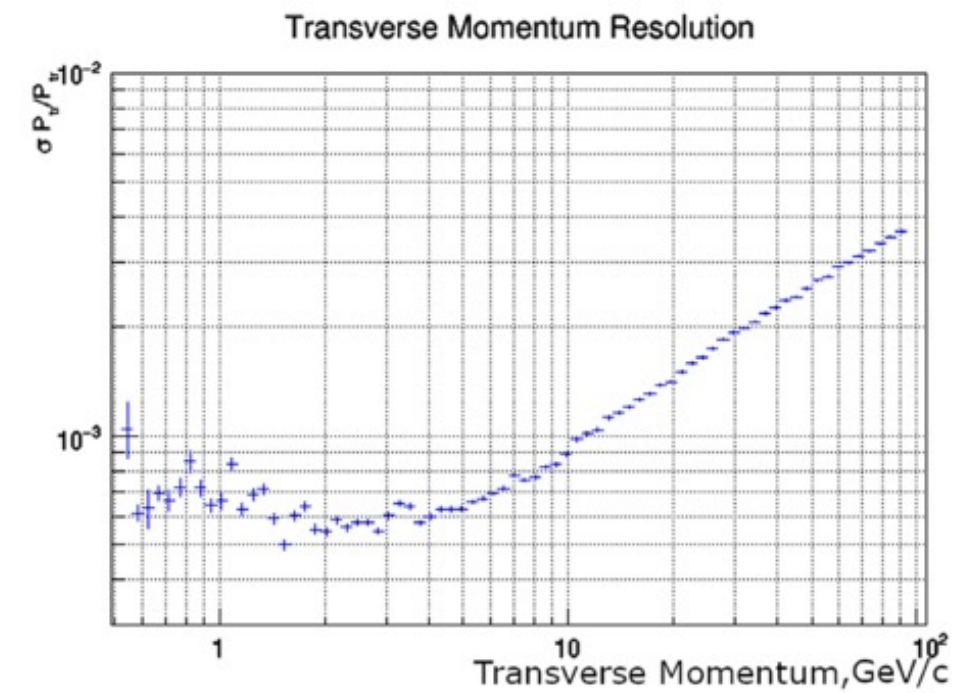
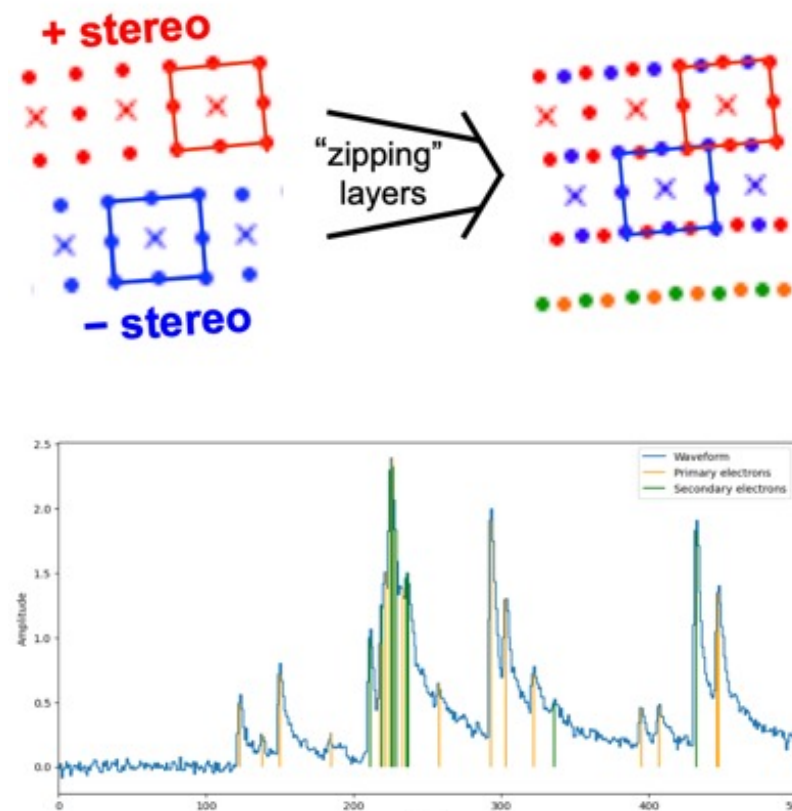
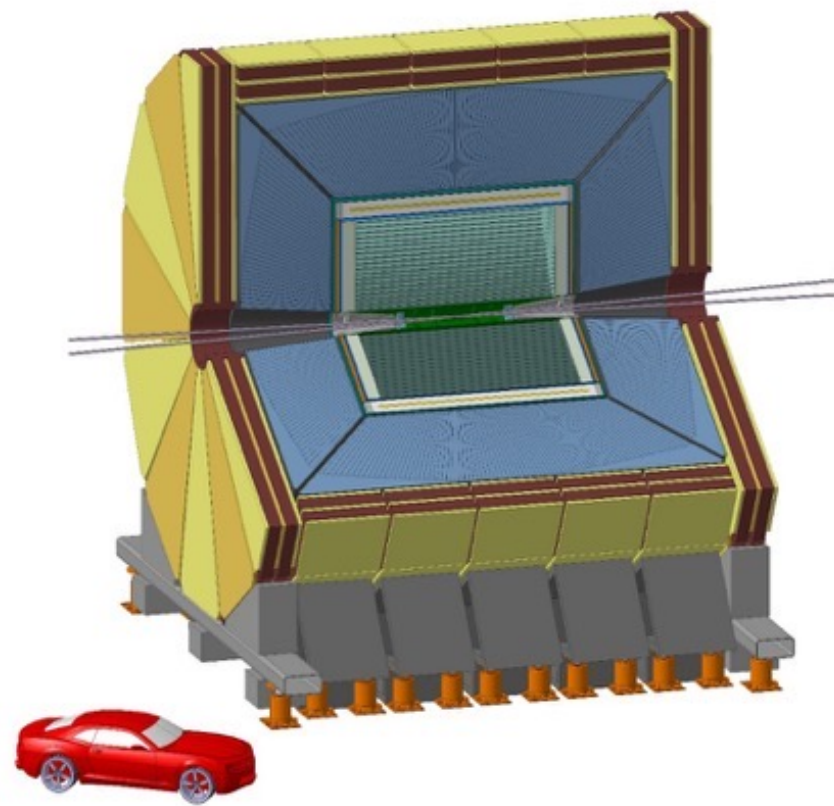
- ▶ GEM, MM, MM+GEM
- ▶ 像素读出



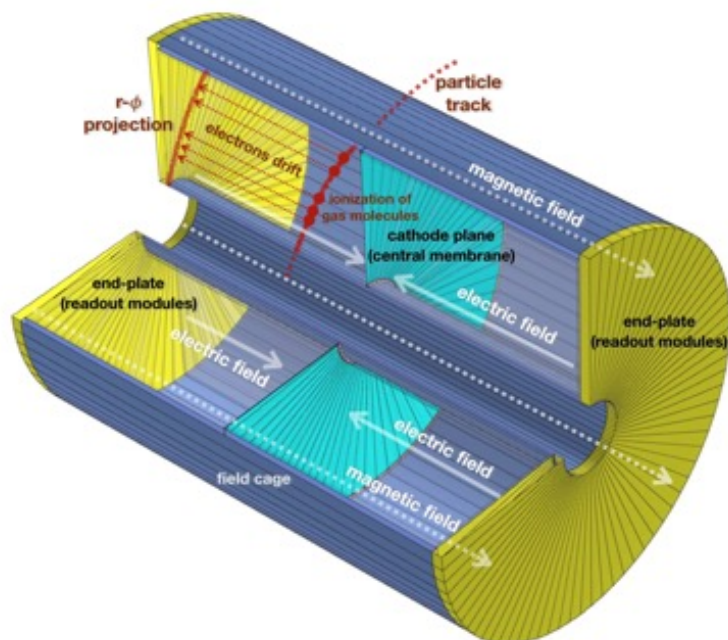
几个亮点



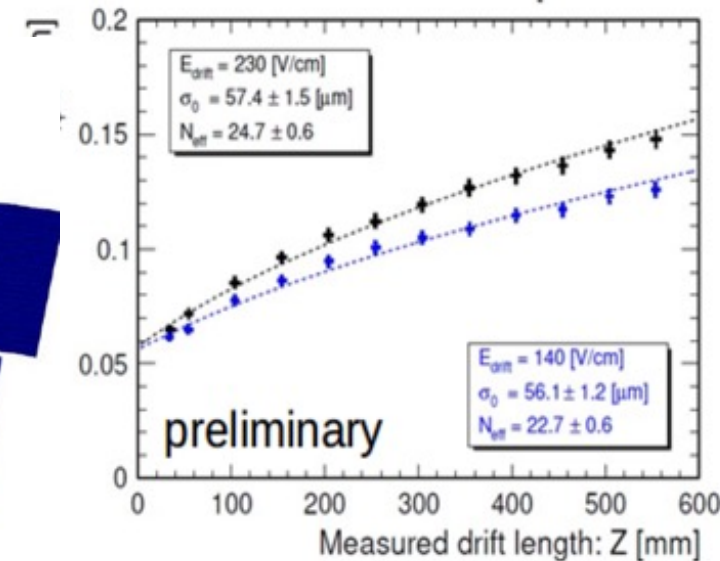
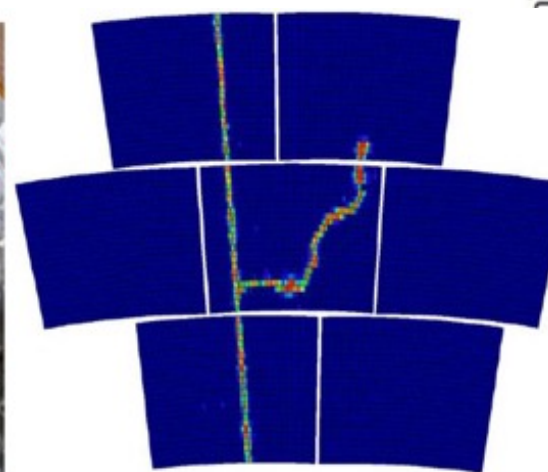
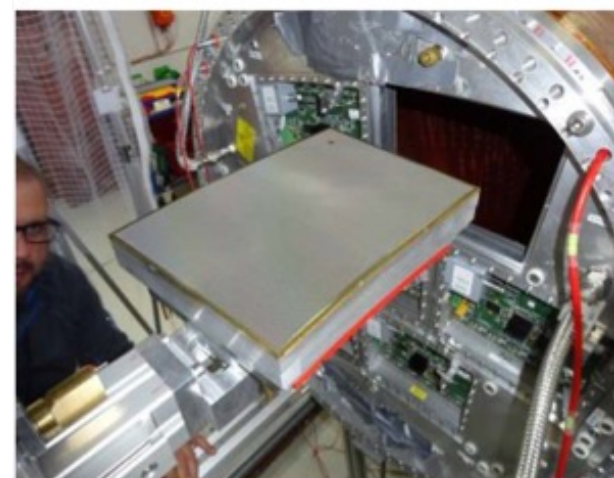
IDEA drift chamber: 4m长、2m半径; 高场丝信号丝比例, 分离式端盖板设计, $1.6\%X_0$; 电离团计数



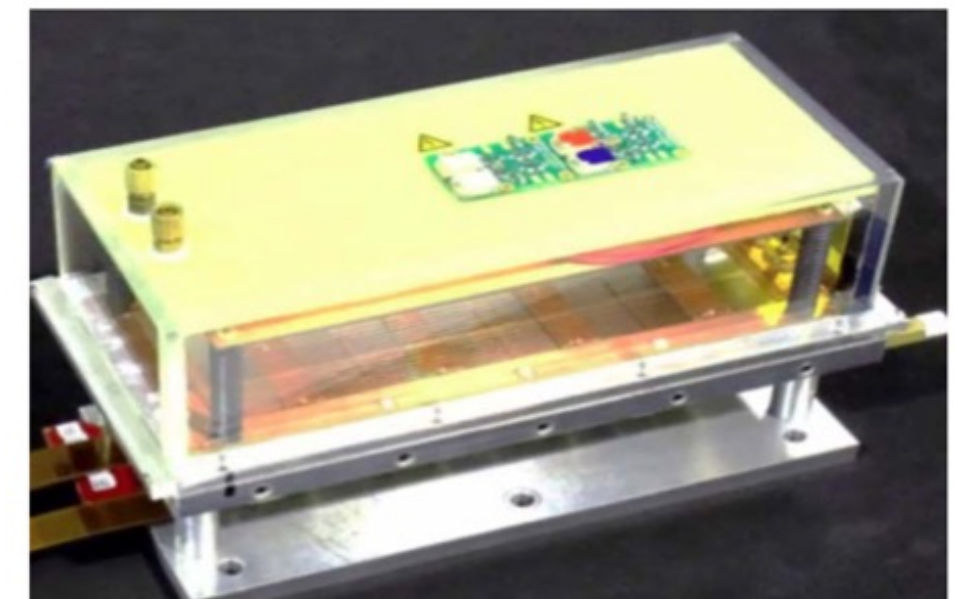
ILD TPC: 4.6m长、1.8m半径



LC-TPC prototype with Micromegas



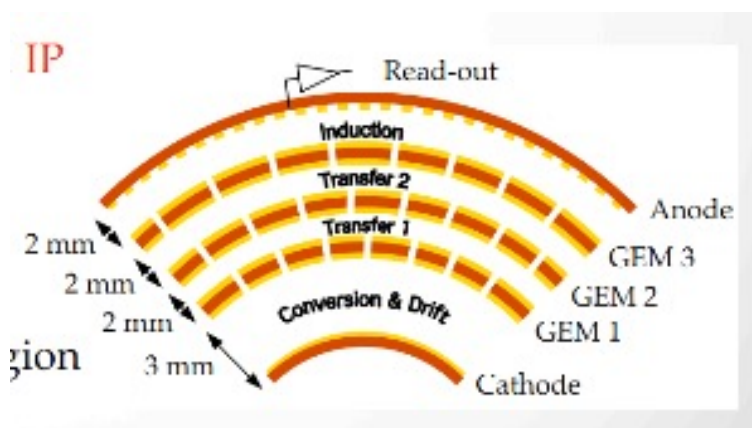
Pixelated TPC prototype with GridPixes



高计数率气体径迹室：圆柱形微结构气体探测器

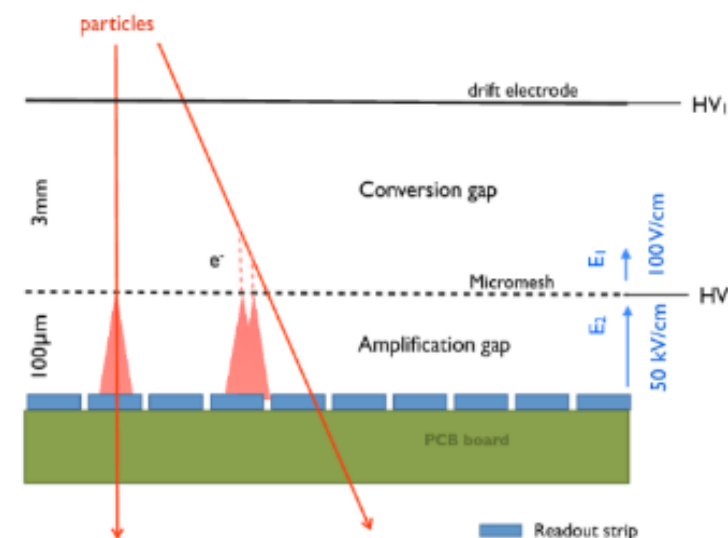


KLOE2 内部径迹探测器：圆柱形GEM径迹室，微结构气体探测器应用的一个突破。BESIII也在建造一个类似的圆柱GEM径迹探测器

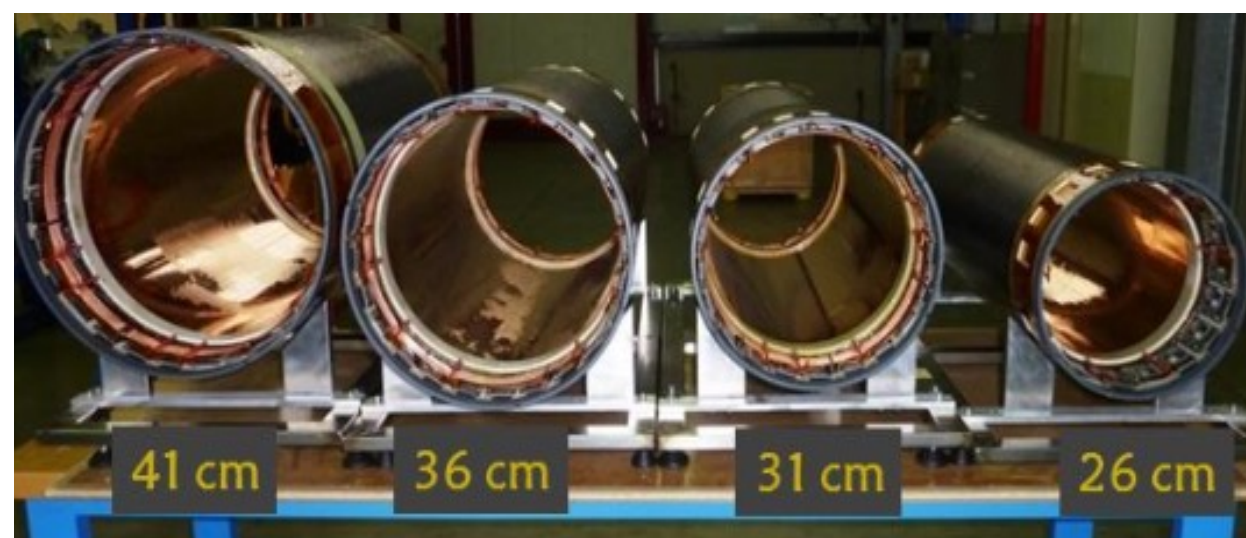


UV二维读出条

CLAS12 内部径迹探测器：圆柱形Micromegas径迹室

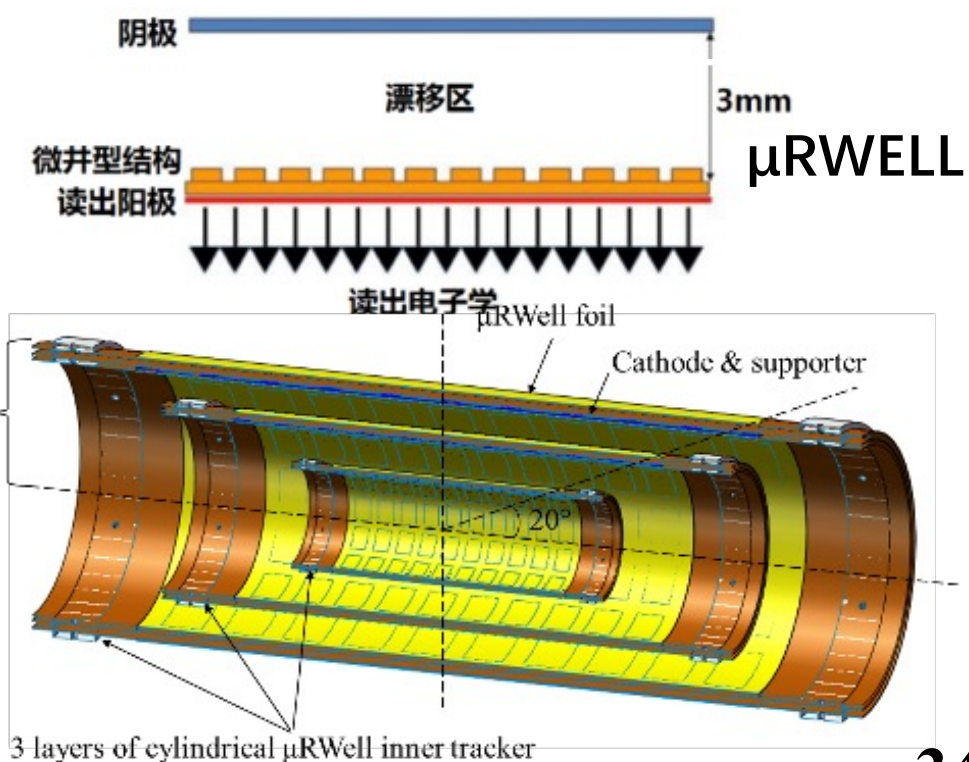
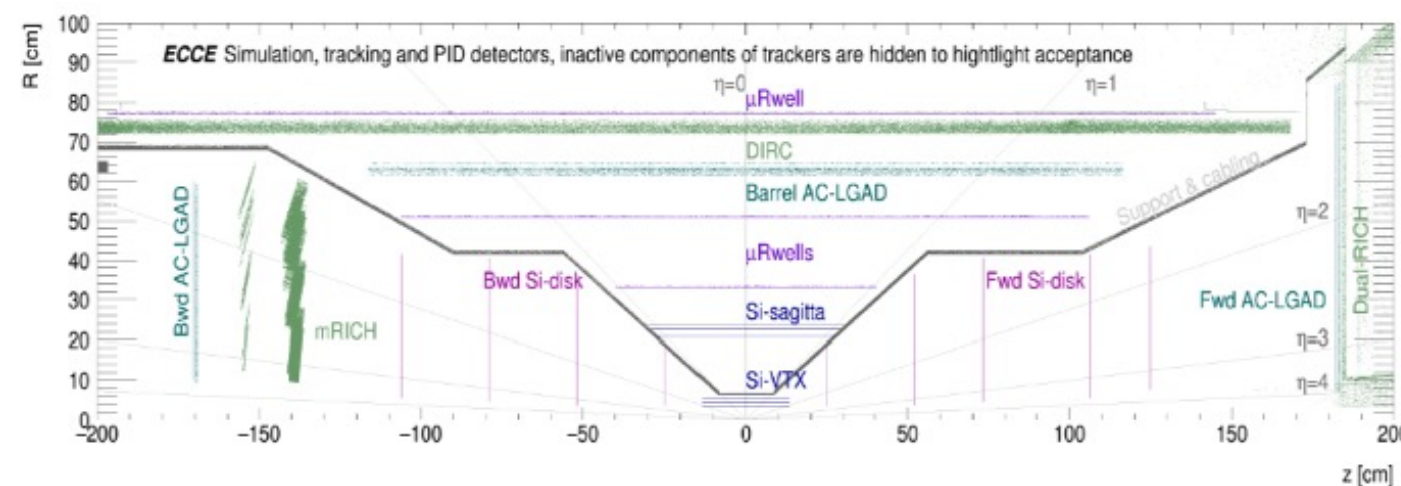


SCTF和STCF均提出
圆柱形 μ RWELL径迹室



$$\sigma_x < \sim 100 \mu\text{m}$$

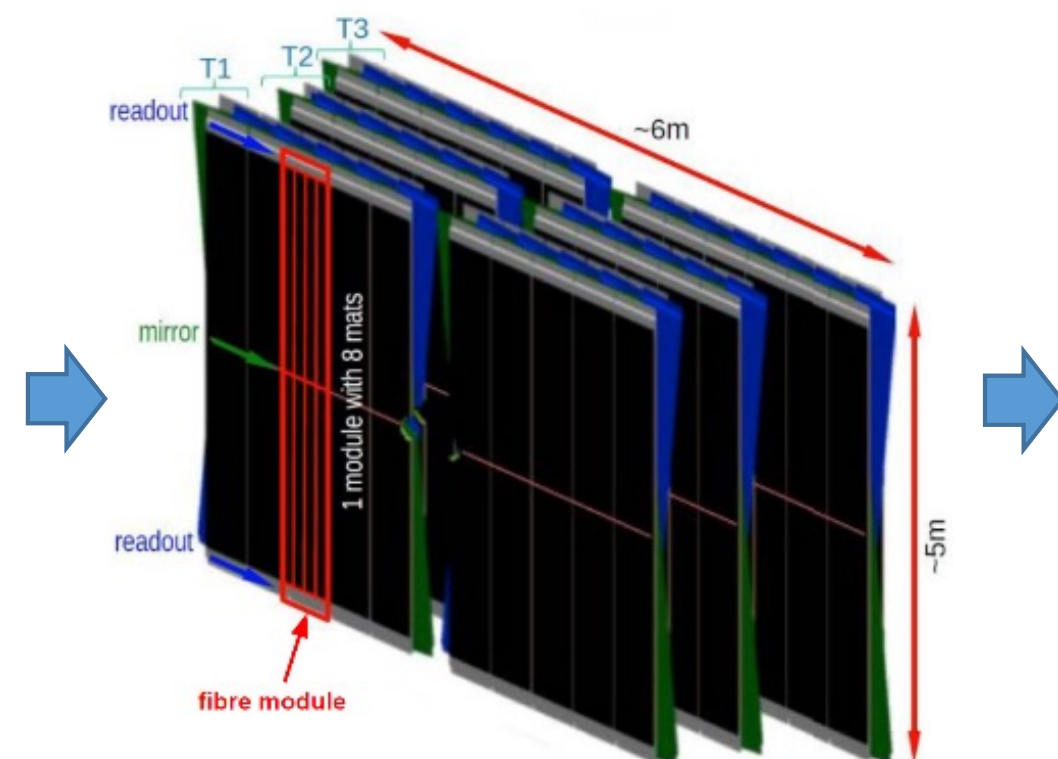
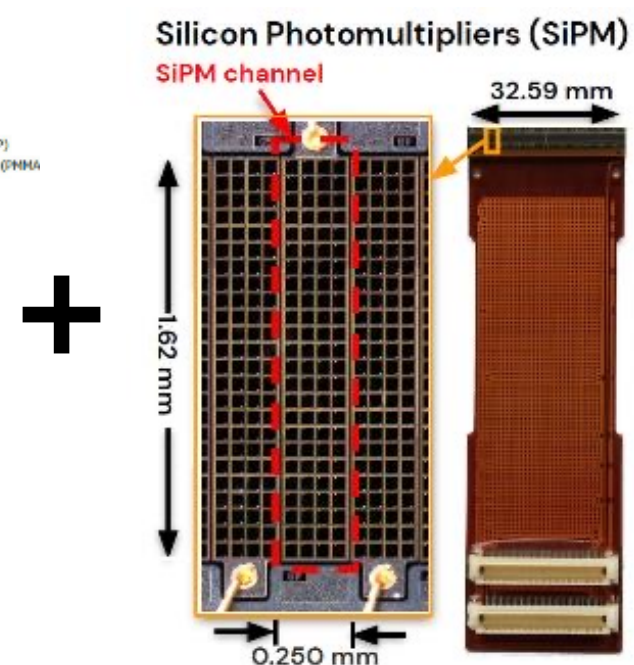
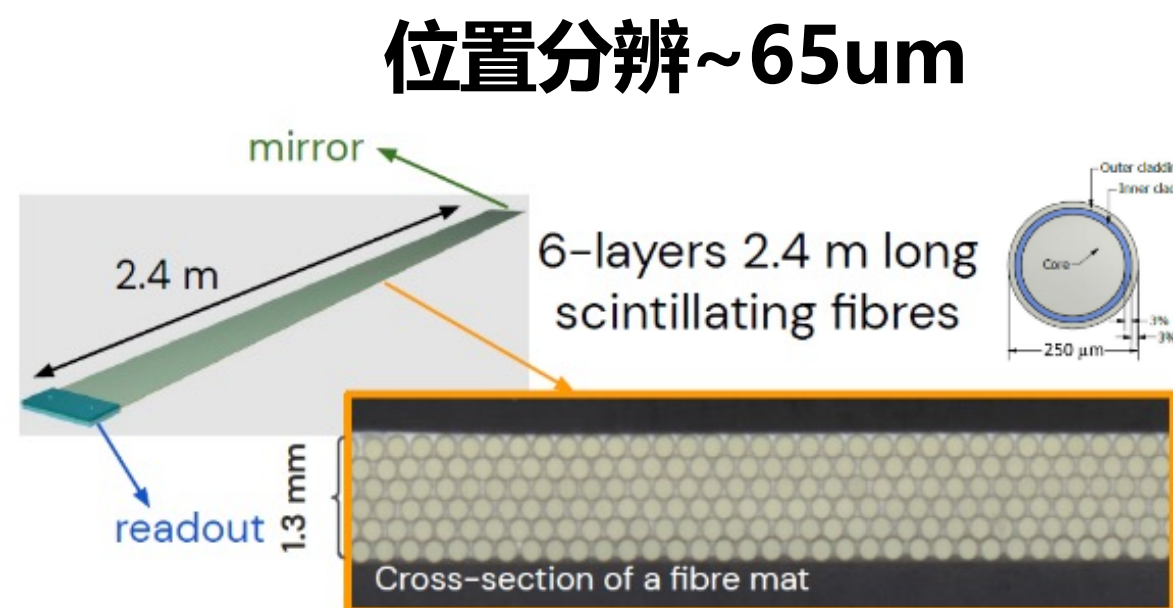
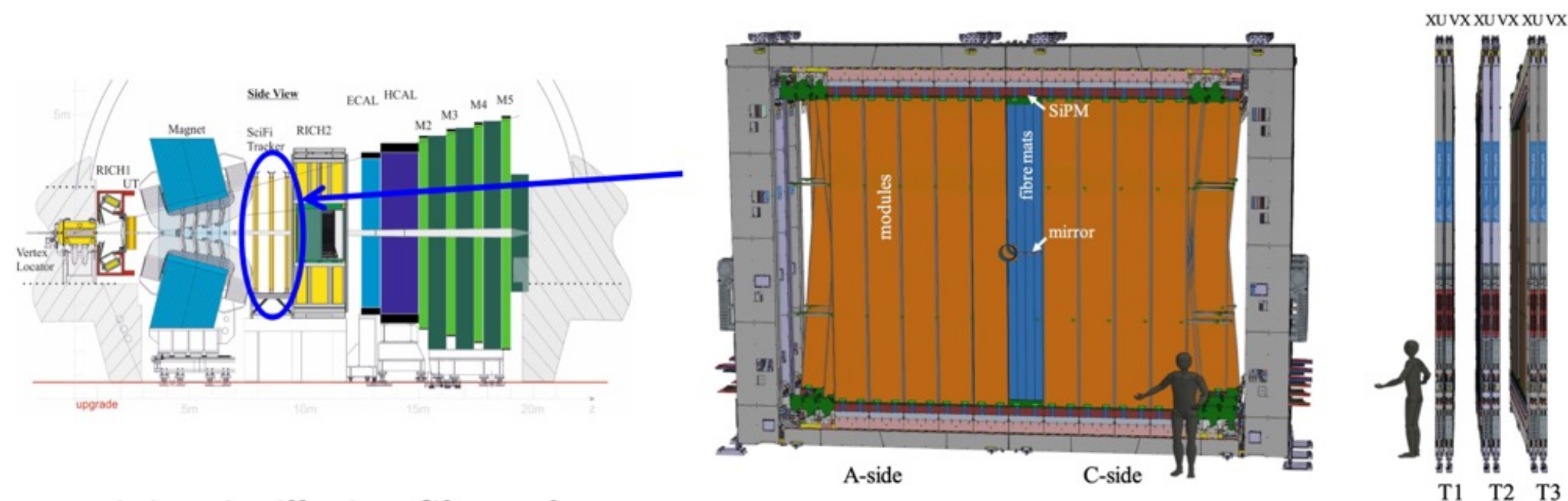
EIC-ECCE



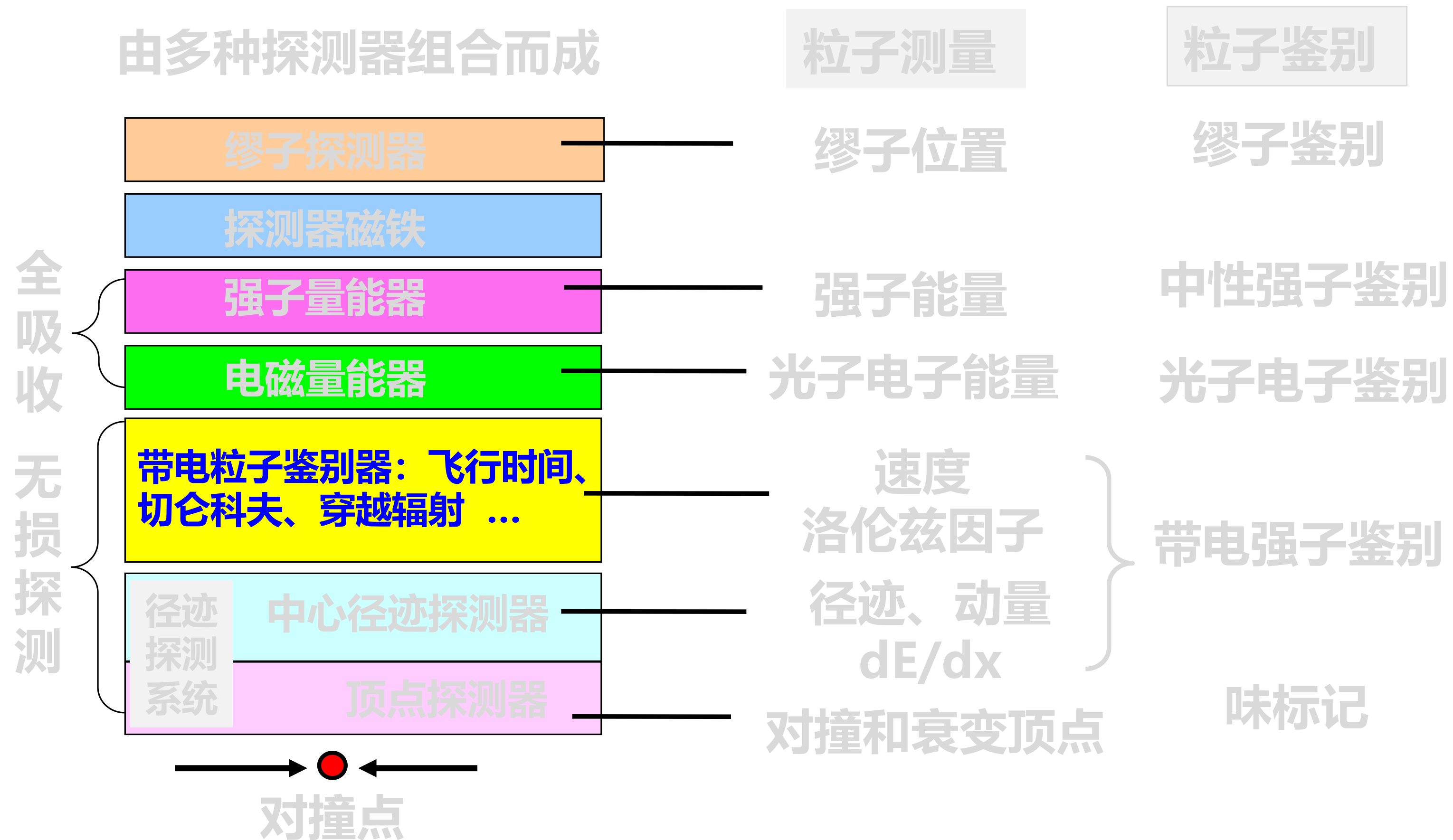
闪烁光纤径迹探测器



❖ LHCb实验SciFi探测器升级采用**闪烁光纤技术**，首次实现了这一技术在径迹探测中的大规模应用。



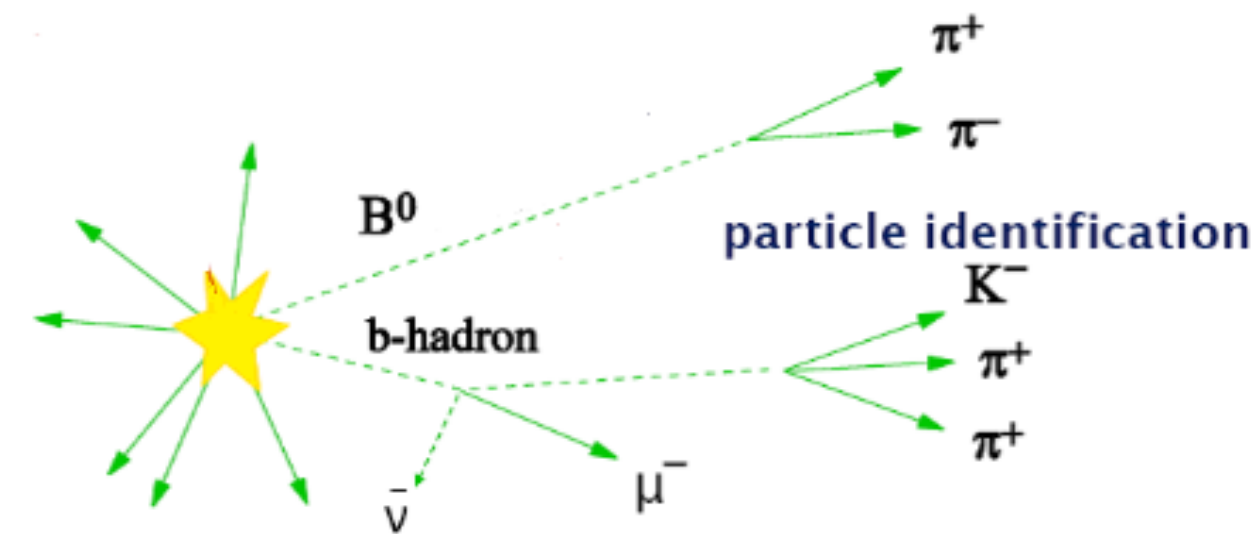
对撞机上的粒子探测系统



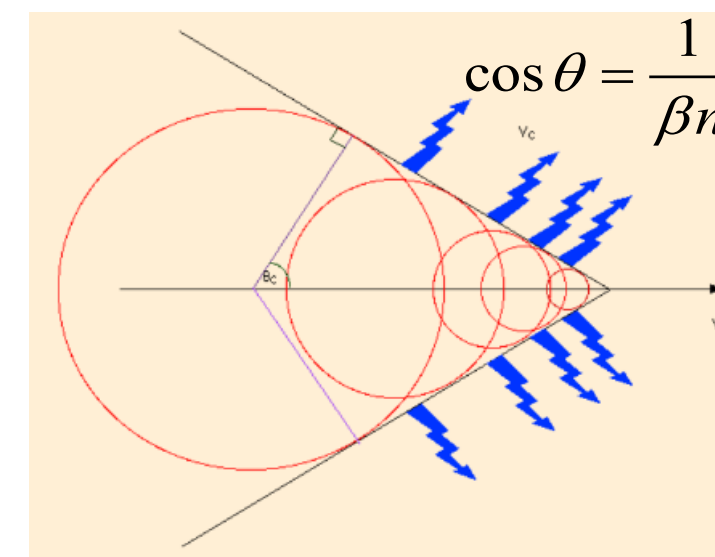
❖ 强子 (π , K , p) 鉴别对于高能物理精确测量以及微弱信号的寻找极为关键，强子鉴别还能提高味标记性能。

❖ 主要技术路线

- ▶ 飞行时间 (TOF) 探测器：要求高时间分辨 $\beta = \frac{L}{TOF \cdot c}$
- ▶ 阈式契伦科夫探测器：探测方式简单
- ▶ 内反射契伦科夫探测器 (DIRC)：动量范围较大，结构紧凑
- ▶ 环形成像契伦科夫探测器 (RICH)：大动量范围
- ▶ 穿越辐射探测器：极高动量



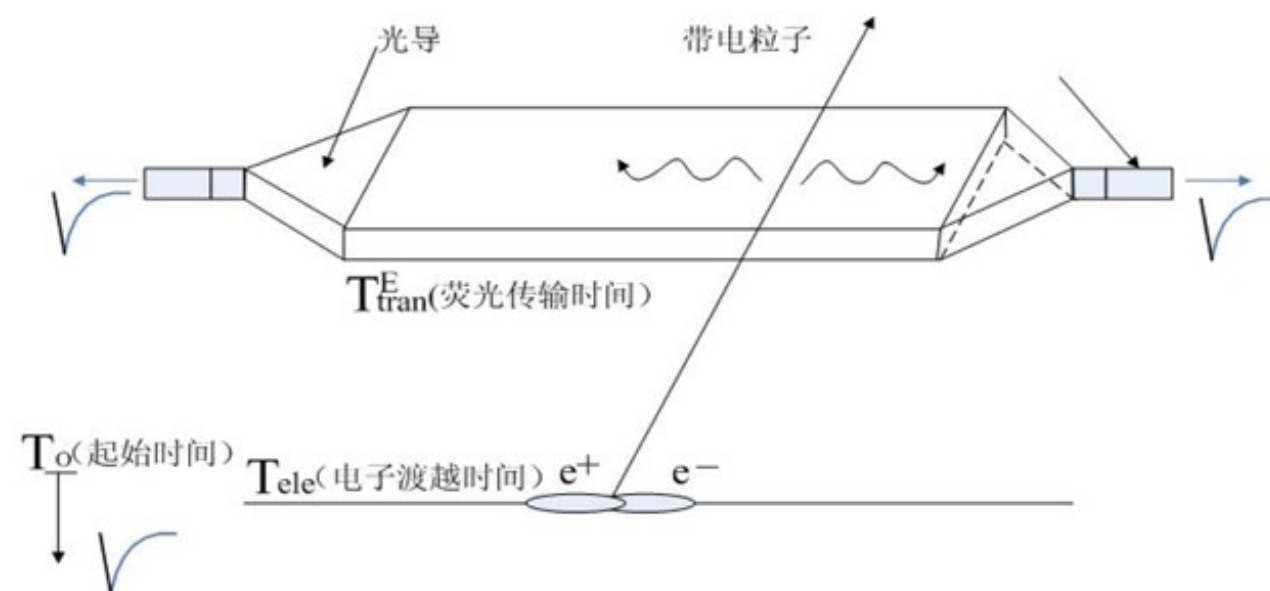
$$\beta = \frac{1}{n \cdot \cos \theta}$$



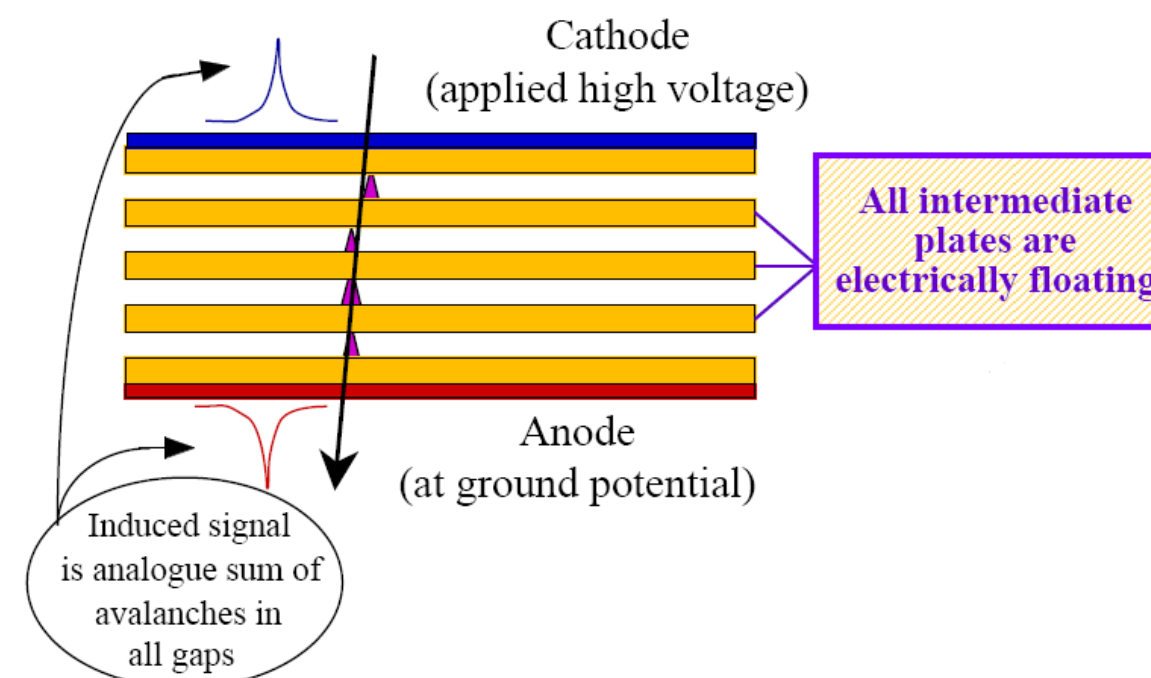
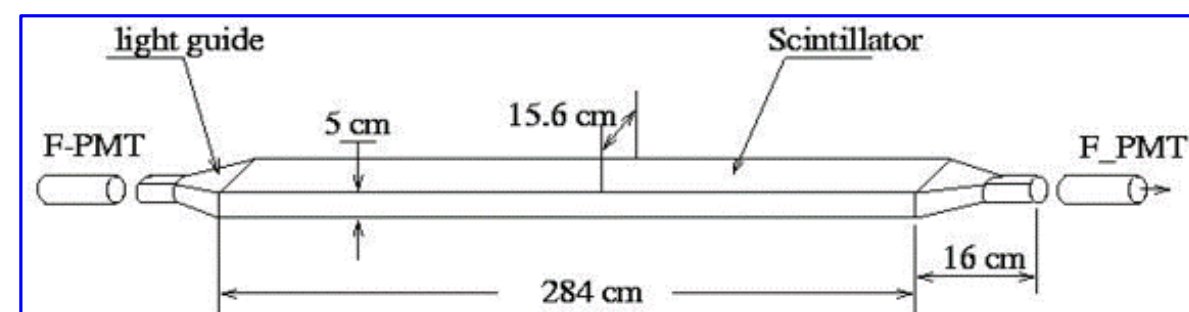
❖ 本质上都是利用粒子静止质量的差别进行粒子鉴别，都需要结合径迹探测器的径迹和动量测量（动量 + 速度 $\rightarrow$ 静止质量）。

❖ 传统技术：塑闪+PMT、多气隙阻性板室 (MRPC)

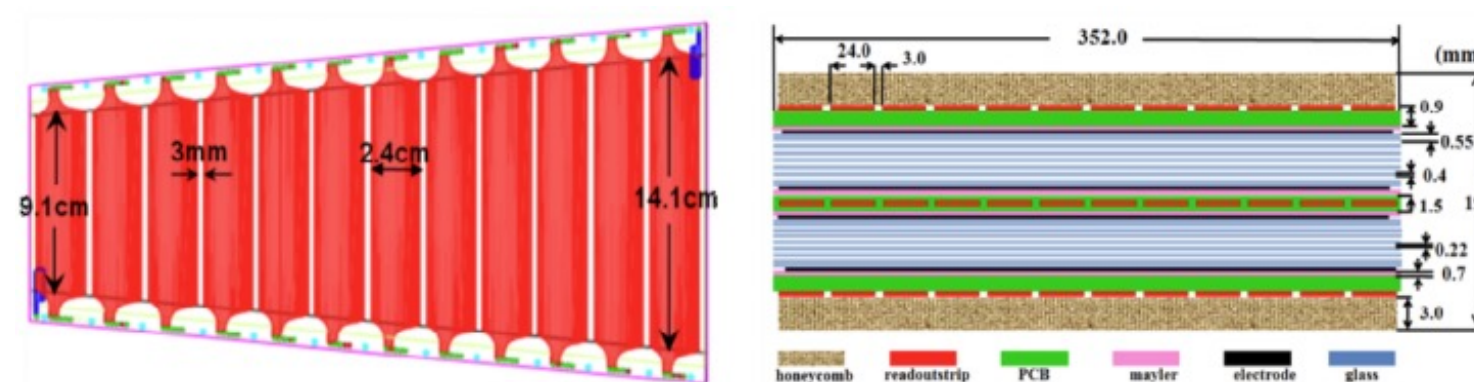
► BELLE、BES、ALICE、STAR、CBM ...



BESIII-塑闪: 100 ps(单), 80 ps(双)

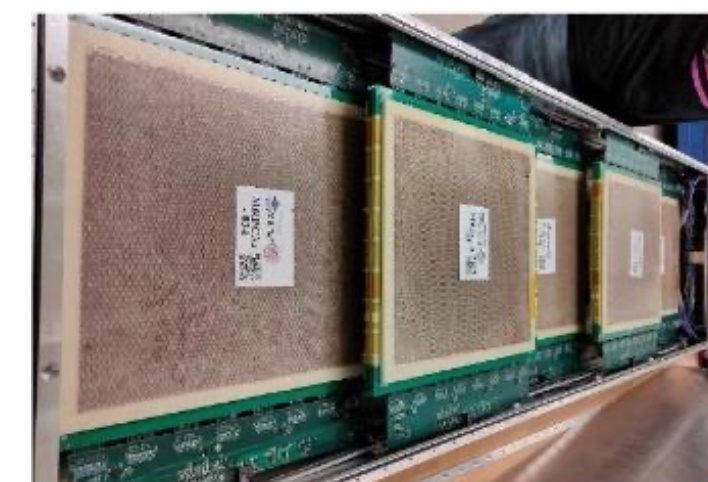
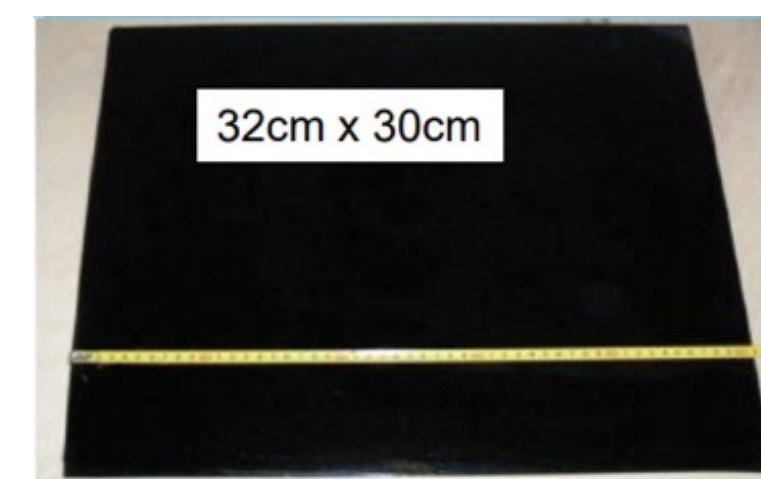


BESIII-玻璃MRPC: 60 ps



MRPC具有很高的时间分辨，还能同时进行位置测量，成为TOF技术中的重要探测器之一。

CBM-低阻玻璃MRPC
80 ps @50kHz/cm²

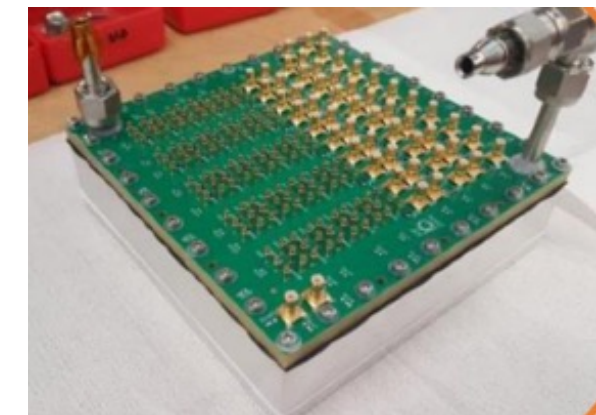
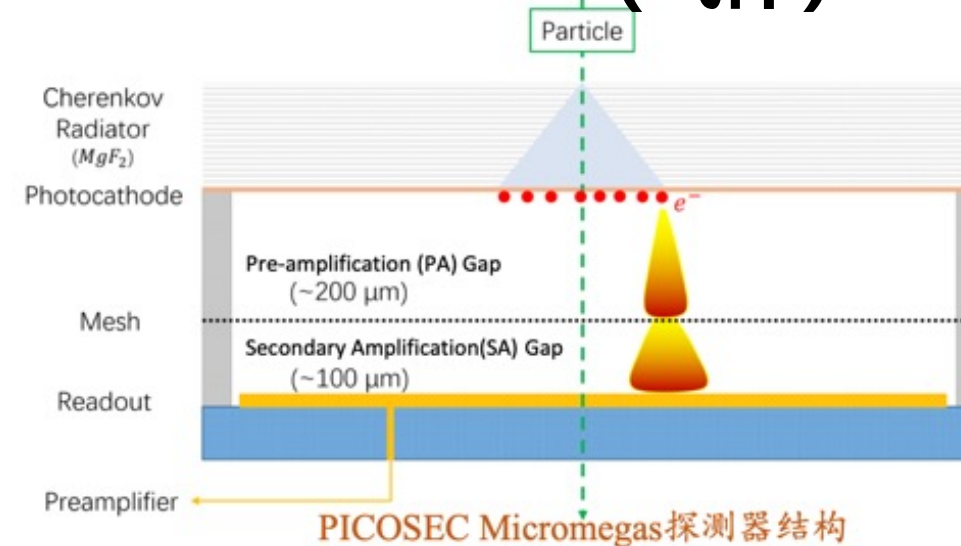


寻找低阻材料，提高计数率能力成为MRPC技术研究的重要方向

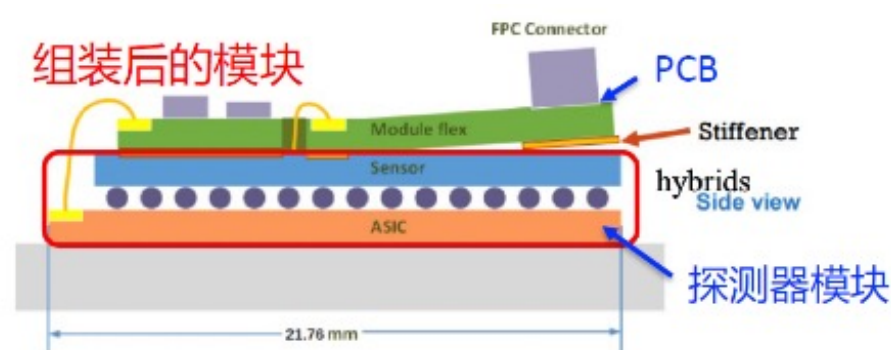
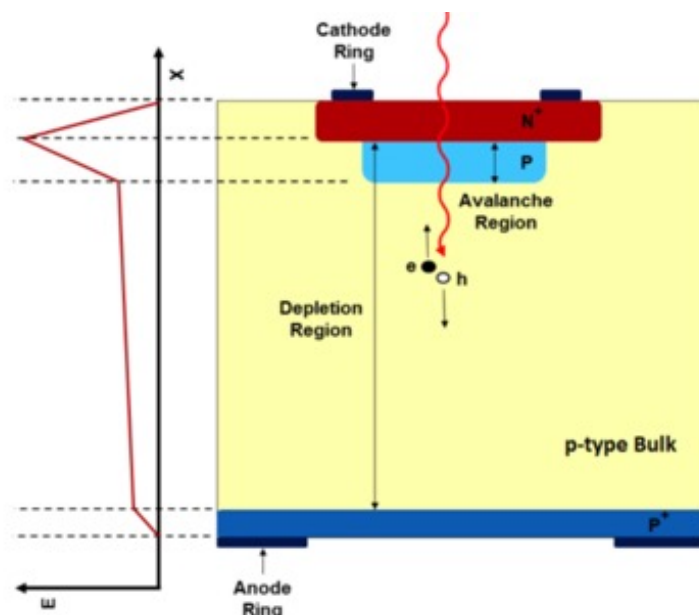
❖ 技术前沿与挑战：抗辐照、高计数率、高颗粒度、超高时间分辨（30ps）

- ▶ PANDA：闪烁体+SiPM
- ▶ CMS：LYSO+SiPM
- ▶ CMS、ATLAS：LGAD
- ▶ PIC-SEC Micromegas

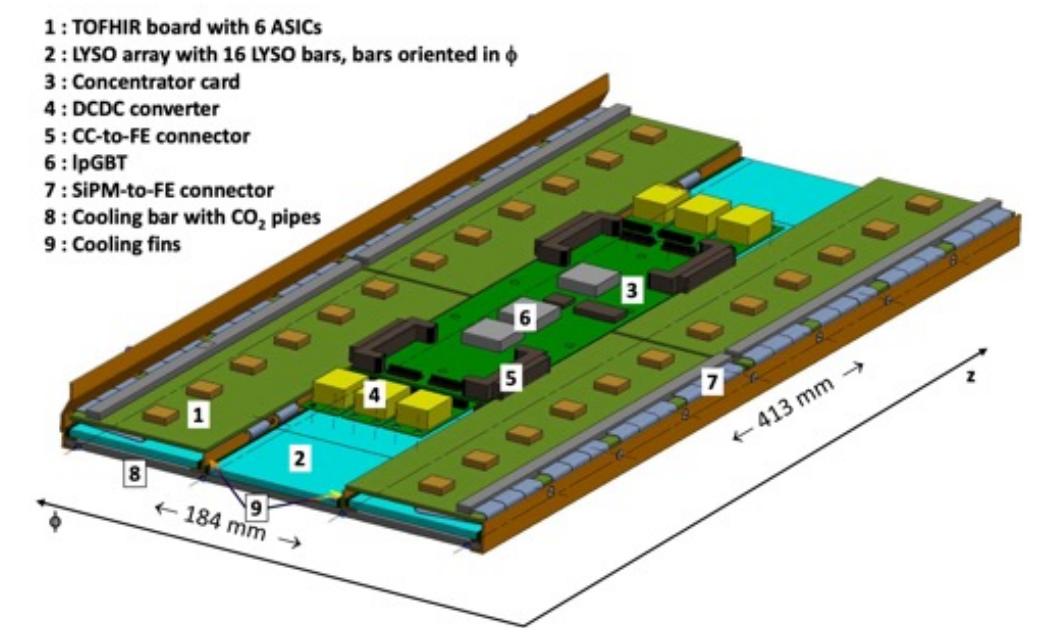
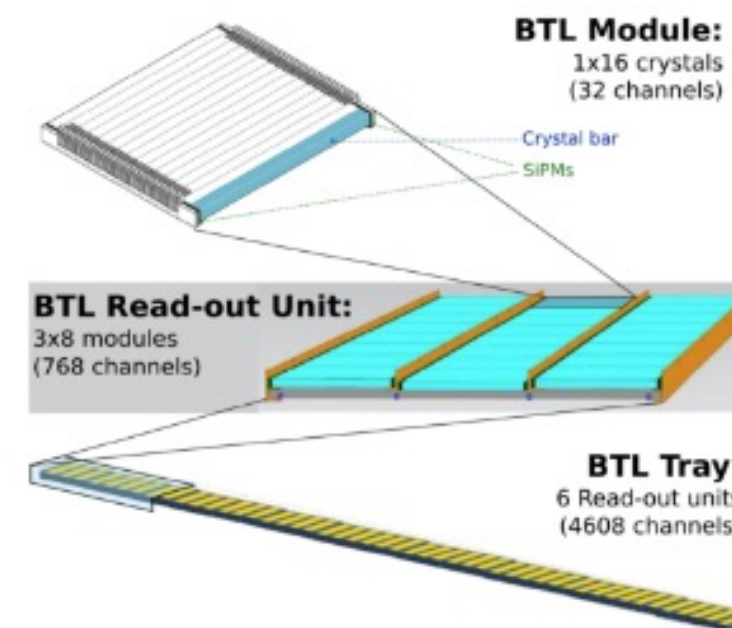
PICSEC-MM (气体)： $10 \times 10 \text{ mm}^2$, **$\sim 30 \text{ ps}$**



LGAD (半导体)： $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$, **$\sim 30 \text{ ps}$**
 $8.3 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ and 7.5 MGy



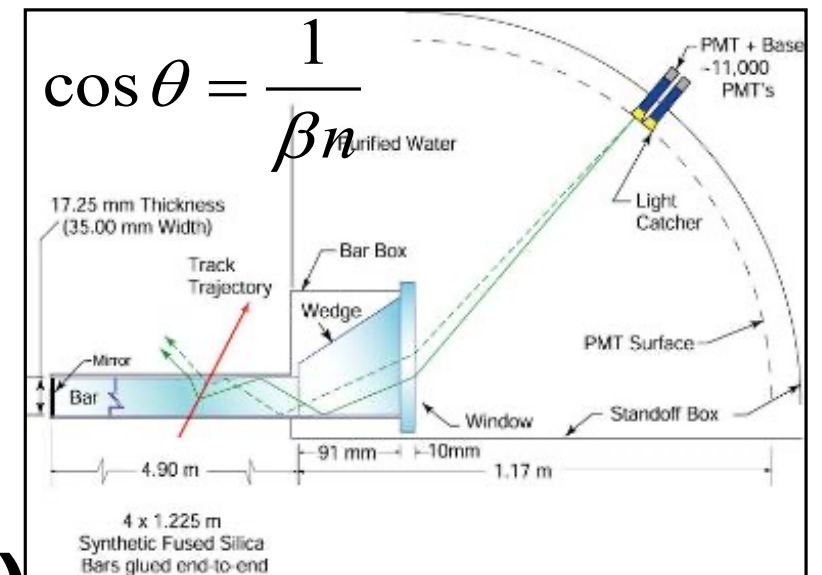
LYSO+SiPM (闪烁体)： $3 \times 3 \times 57 \text{ mm}^3$, **$\sim 30 \text{ ps}$**



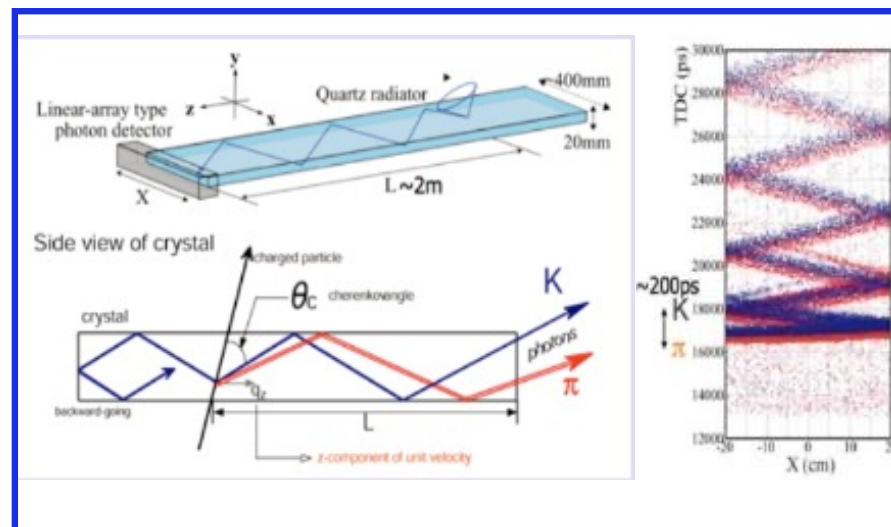
DIRC探测器



- ❖ BaBar-DIRC: 首个DIRC探测器，主要测量位置/角度，时间精度要求不高。
- ❖ 结合位置+精确时间测量，DIRC类探测器在粒子鉴别中有很大的应用潜力。
- ❖ 光探测通常采用多阳极MCP-PMT：单光子灵敏、高时间分辨、抗磁性好、可以有很好的位置分辨。
- ❖ 石英是目前唯一可行的辐射体：适用于动量不是很高的情况（例如几个GeV/c）

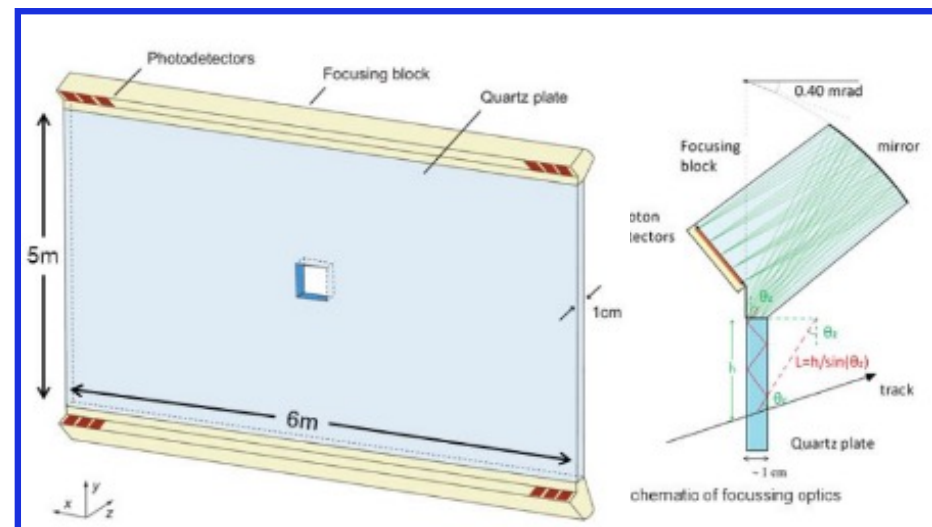


BeIIe2-TOP（完成建造）



- 位置+时间(传播时间为主)
- 多阳极MCP-PMT
- 波形采样ASIC
- 单光子<100ps

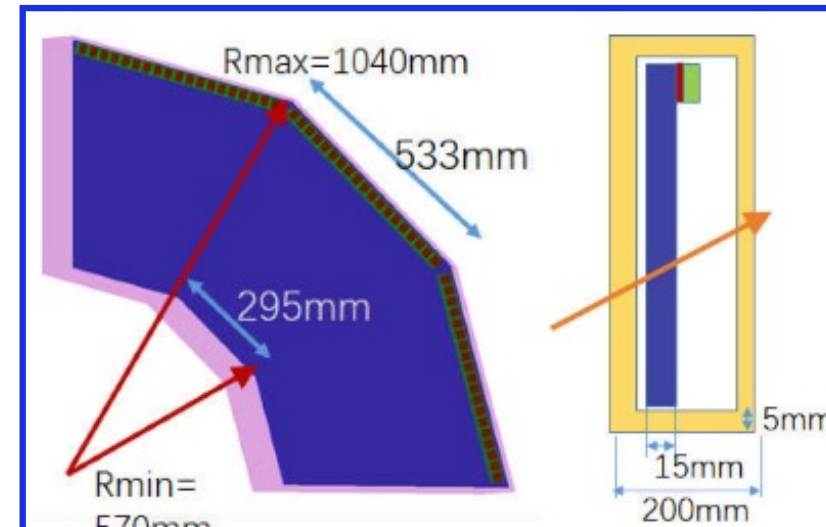
LHCb-TORCH（研发中）



- 位置+时间(飞行时间为主)
- 多阳极MCP-PMT
- NINO+HPTDC
- $\sigma_{TOF}=10-15ps/track$
- PMT读出颗粒度~0.4mm

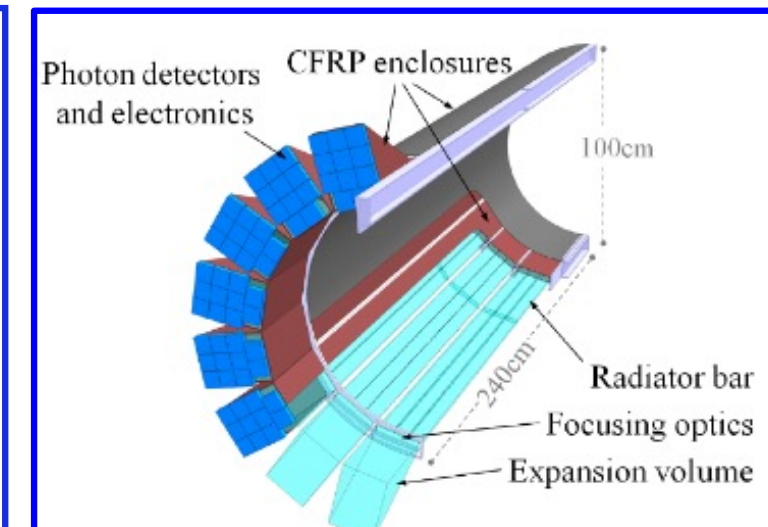
本质上是一个飞行时间探测器

STCF-DTOF（研发中）



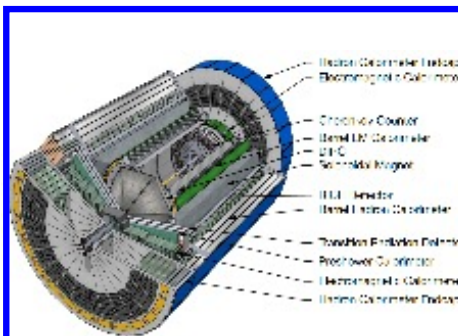
- 位置+时间
- 多阳极MCP-PMT
- 前放+TDC
- $\sigma_{TOF}=30ps/track$

PANDA-DIRC（研发中）



- 位置+时间
- 具有较大的光学扩展区
- 多阳极MCP-PMT
- 成像为主

EIC实验



Finally, detection of internally reflected Cerenkov light (DIRC) is under consideration for a high performance DIRC (hpDIRC), and would outperform the DIRC at BaBar and PANDA

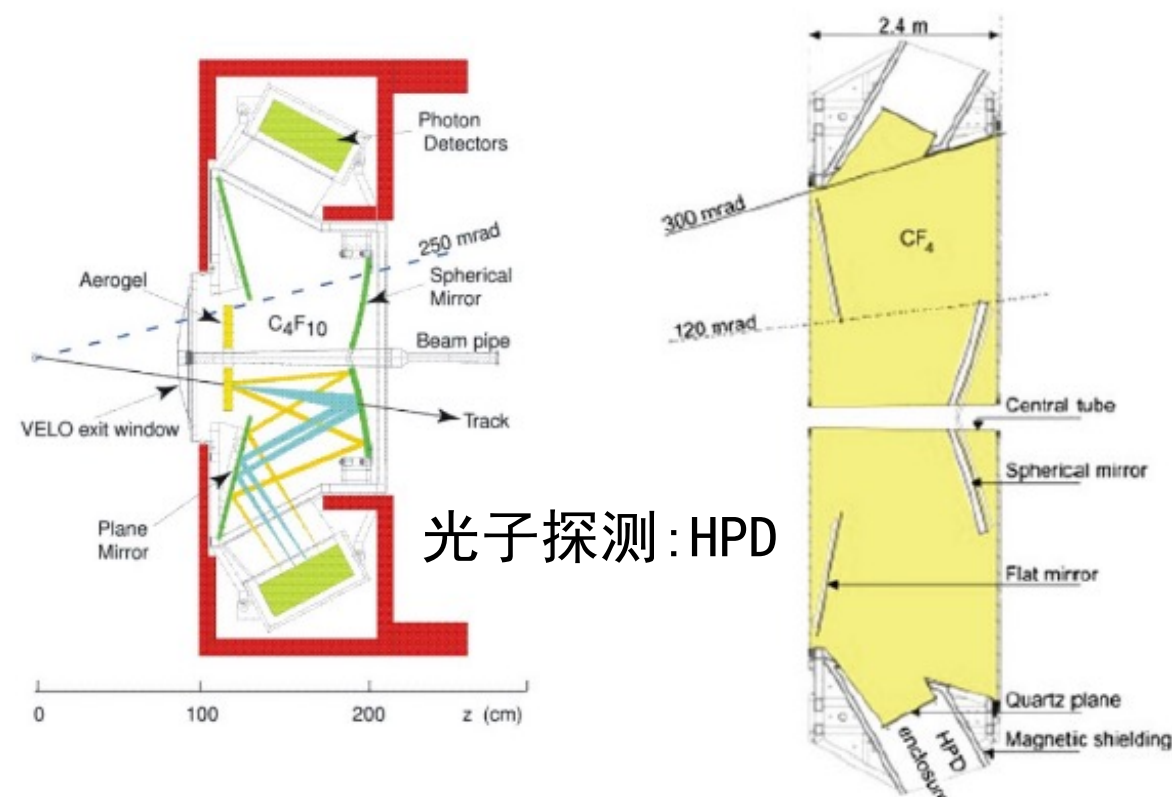
RICH探测器



❖ 最早应用在大型实验中的RICH: CRID@SLD, RICH@DELPHI

❖ 大动量范围/高动量粒子鉴别的重要技术选项可以高达 (100GeV/c) 。

LHCb-RICH1, RICH2



光子探测: HPD



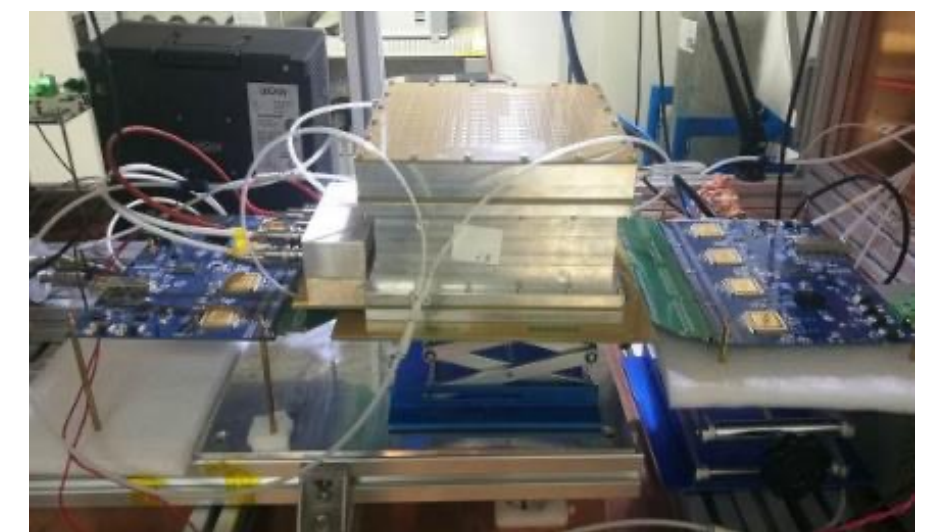
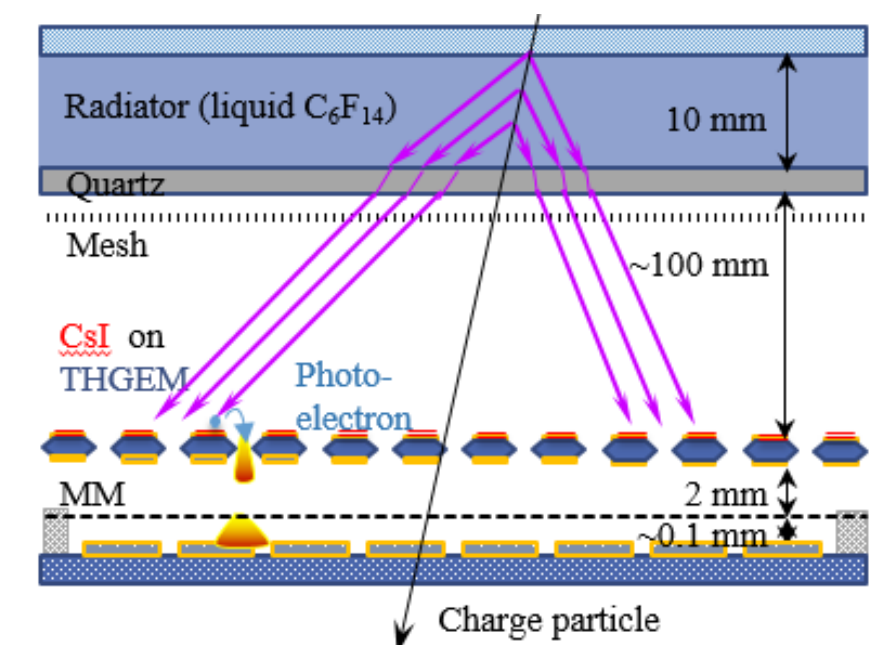
RICH1: Aerogel $L=5\text{cm}$ $p: 2 \rightarrow 10 \text{ GeV/c}$
 $n=1.03$ (nominal at 540 nm)
 C_4F_{10} $L=85\text{cm}$ $p: < 70 \text{ GeV/c}$
 $n=1.0014$ (nominal at 400 nm)
Upstream of LHCb Magnet
Acceptance: $25 \rightarrow 250 \text{ mrad}$ (vertical)
 300 mrad (horizontal)
Gas vessel: $2 \times 3 \times 1 \text{ m}^3$

RICH1: 10-65GeV

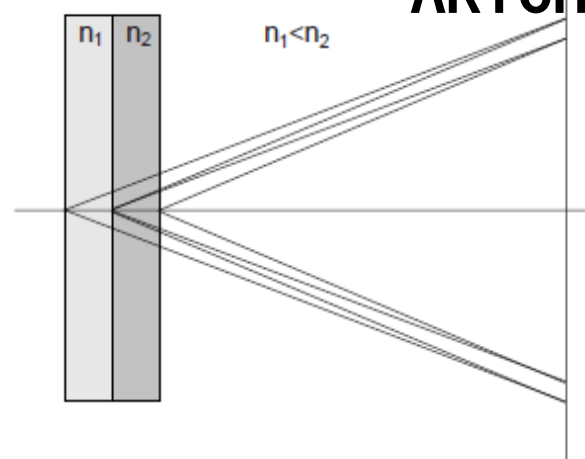
RICH2: CF_4 $L=196\text{cm}$ $p: < 100 \text{ GeV/c}$
 $n=1.0005$ (nominal at 400 nm)
Downstream of LHCb Magnet
Acceptance: $15 \rightarrow 100 \text{ mrad}$ (vertical)
 120 mrad (horizontal)
Gas vessel: 100 m^3

RICH2: 15-100GeV

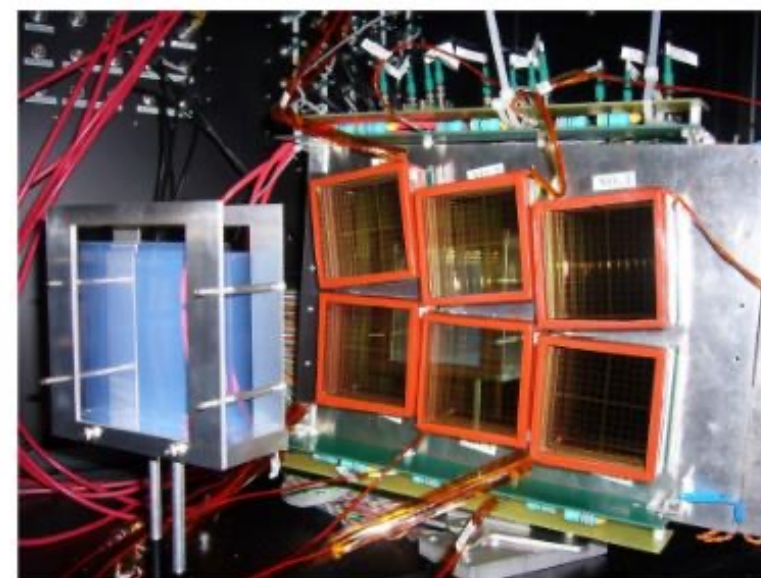
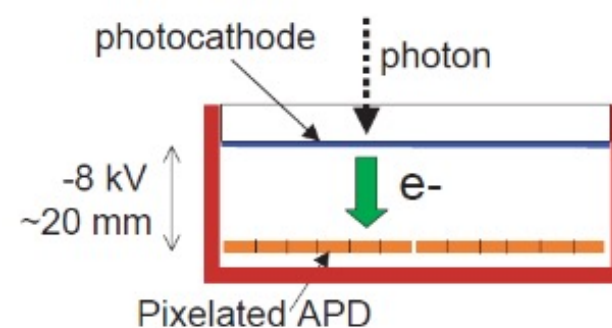
STCF-RICH



Belle2-ARICH

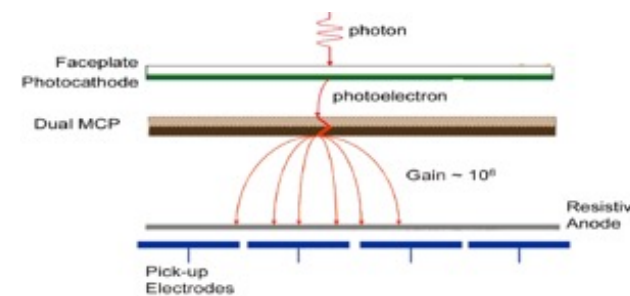
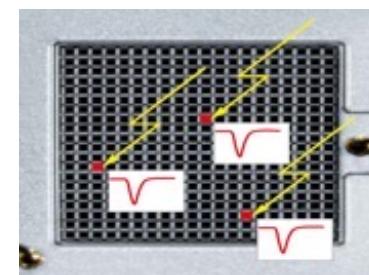
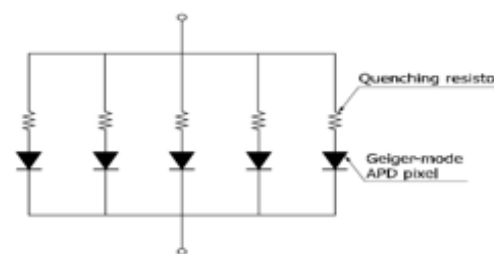


光子探测: HAPD

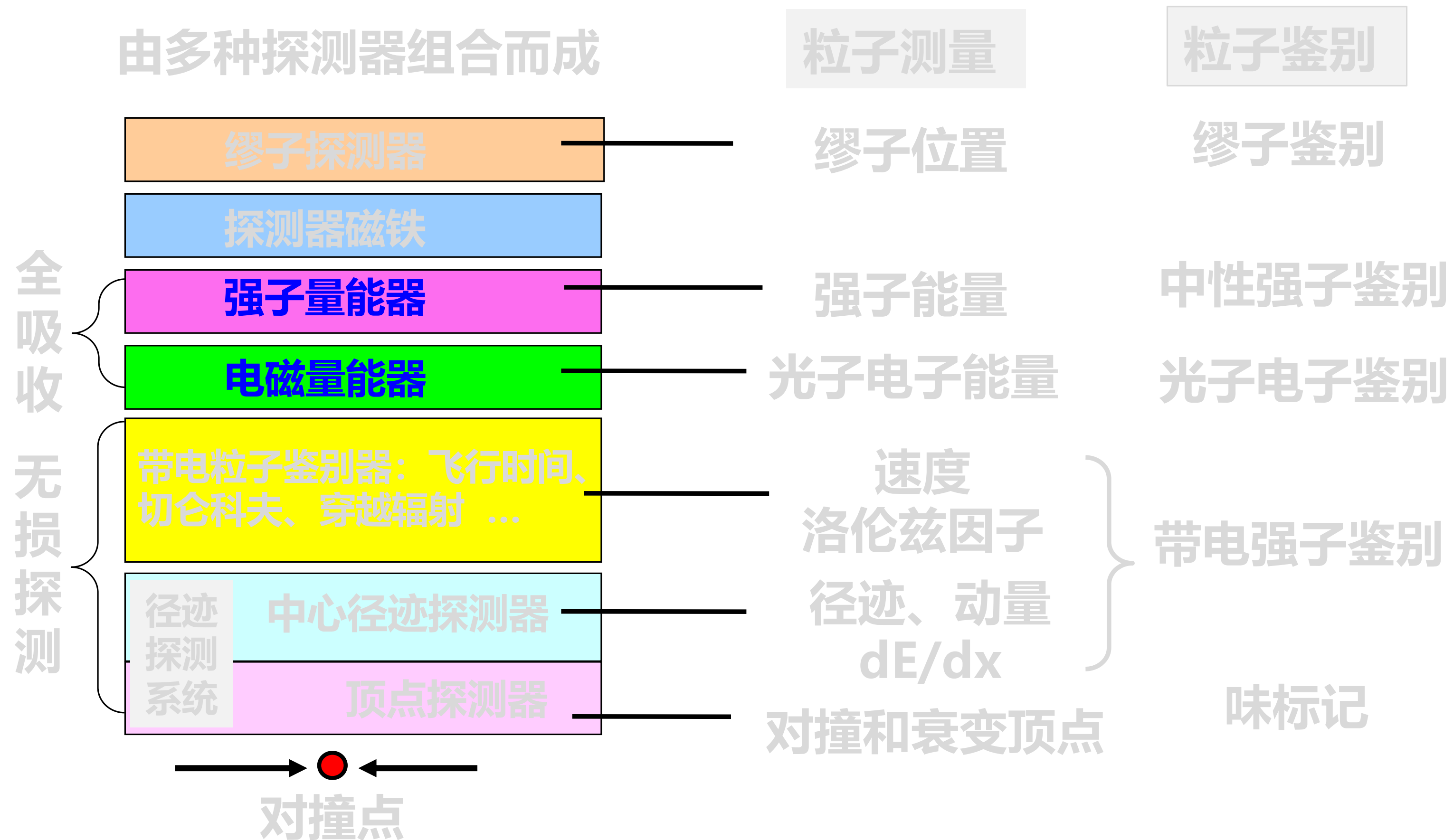


- double aerogel, $n_0=1.050, 1.065$
- $d=19.8, 19.9\text{mm}$
- $\theta_c=336\text{mrad}$
- $\sigma_\theta=15.8\text{mrad}$
- $N_{\text{det}}=11.4$
- $>5\sigma \pi/K$ 分辨 $\sim 4\text{GeV}$

- ❖ 在契伦科夫探测器中，单光子探测是一个关键环节，也通常是一个重要制约因素。
- ❖ 当前实验对光探测器的各种要求包括：高增益($> \sim 10^5$)、单光子灵敏、极高的时间分辨($< 50\text{ps}$)、抗磁、高量子效率、高计数率能力($\sim$ 几 MHz/cm^2)、低暗计数、大面积、长寿命等。
- ❖ 微结构气体探测器结合光转换层为大面积高计数率下的单光子探测提供了一个高性价比的解决方案，但其制作和操作较复杂，还有光电转换层的老化问题。
 - ▶ COMPASS-RICH: CsI + (THGEM+MicroMegas)
- ❖ 新型光电器件和光探测器成为探测技术研究的一个热点
 - ▶ SiPM
 - ▶ MCP, LAPPD
 - ▶ ...



对撞机上的粒子探测系统



❖ 量能器是最“多才多艺”的探测器，

- ▶ 带电粒子，中性粒子
- ▶ 能量、位置、角度、时间

❖ LHC实验上具有类型丰富的量能器

- ▶ ATLAS：铅+液氩，铁+塑闪+PMT
- ▶ CMS：PbWO₄晶体+APD，铜+塑闪+PMT
- ▶ LHCb：吸收体+塑闪，Shashlik
- ▶ ALICE：吸收体+塑闪，Shashlik

❖ 高精度晶体量能器 $\sigma_E/E \sim 2\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$

- ▶ BELLE、BESIII：CsI晶体+PD
- ▶ SCTF、STCF：pCsI晶体+APD

□ 能/动量分辨

量能器 $\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$

径迹探测器 $\frac{\sigma_p}{p} \sim \frac{1}{p}$

□ 探测器尺寸

量能器 $L \sim \ln \frac{E}{E_c}$

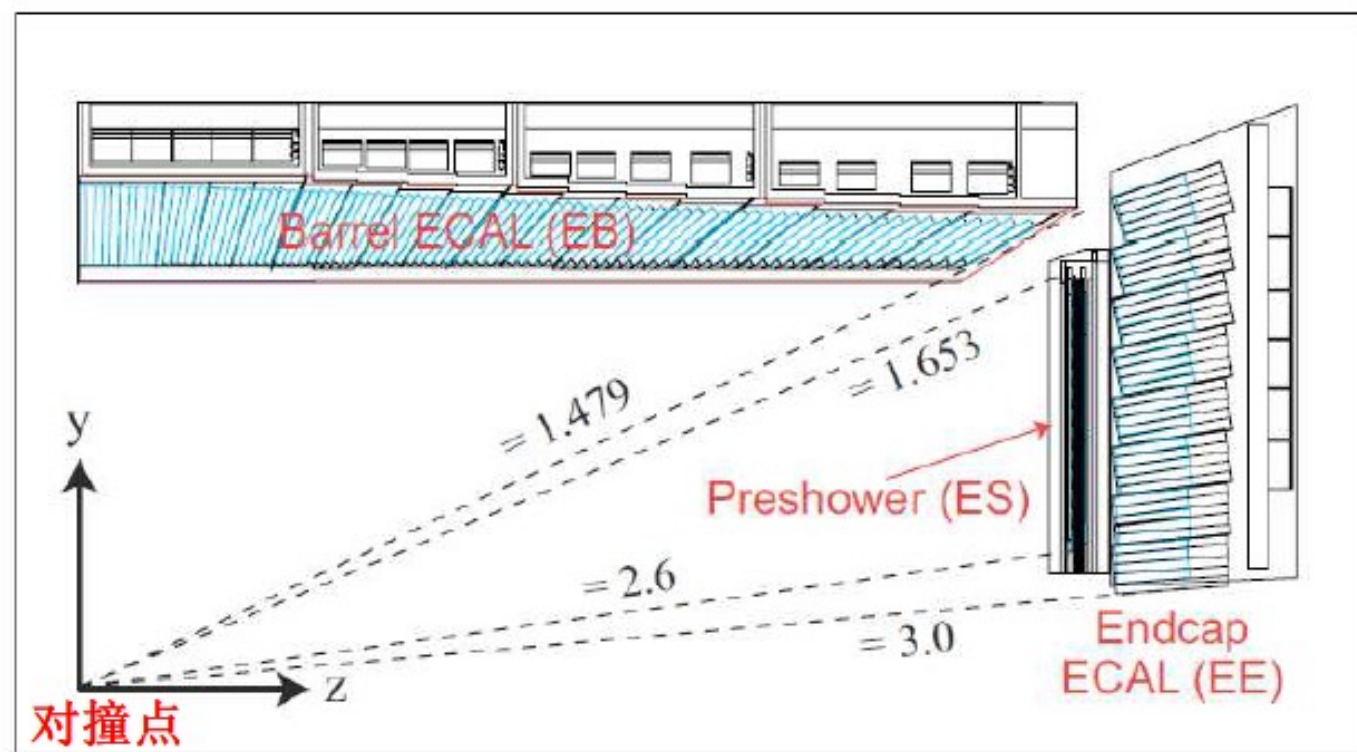
径迹探测器 $\frac{\sigma_p}{p} \sim \frac{1}{L^2}$

量能器对高能粒子的测量具有独特优势。

晶体量能器是很多高精度实验的技术选项，晶体是其关键部件：光产额、发光时间、抗辐照 ...

具有高计数率（抗堆积）能力的晶体量能器是下一代高精度前沿实验的关键探测器：快速而精确！

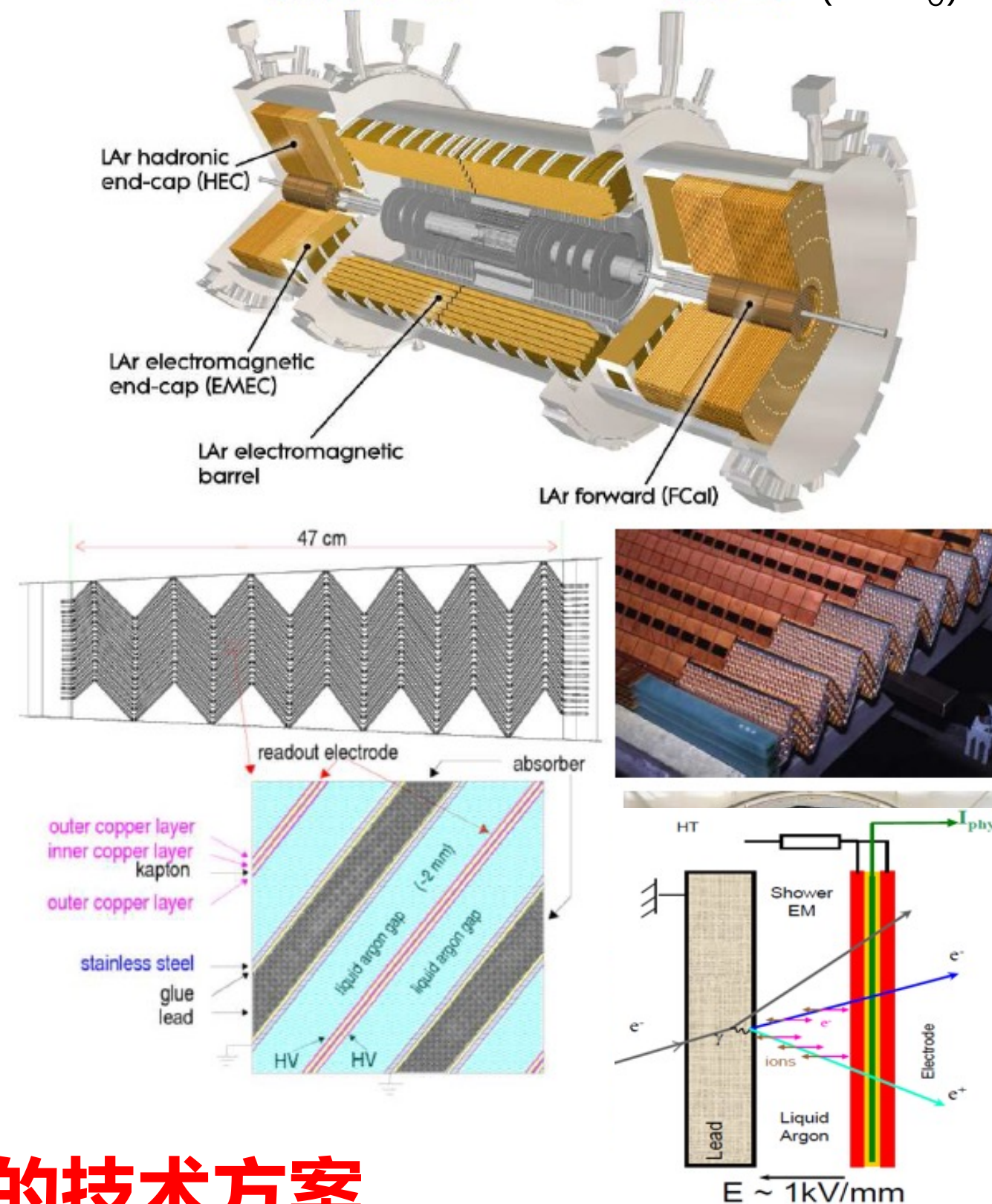
CMS实验上的电磁量能器 全吸收型, PbWO_4 晶体阵列 ($25X_0$)



PbWO_4 晶体模块



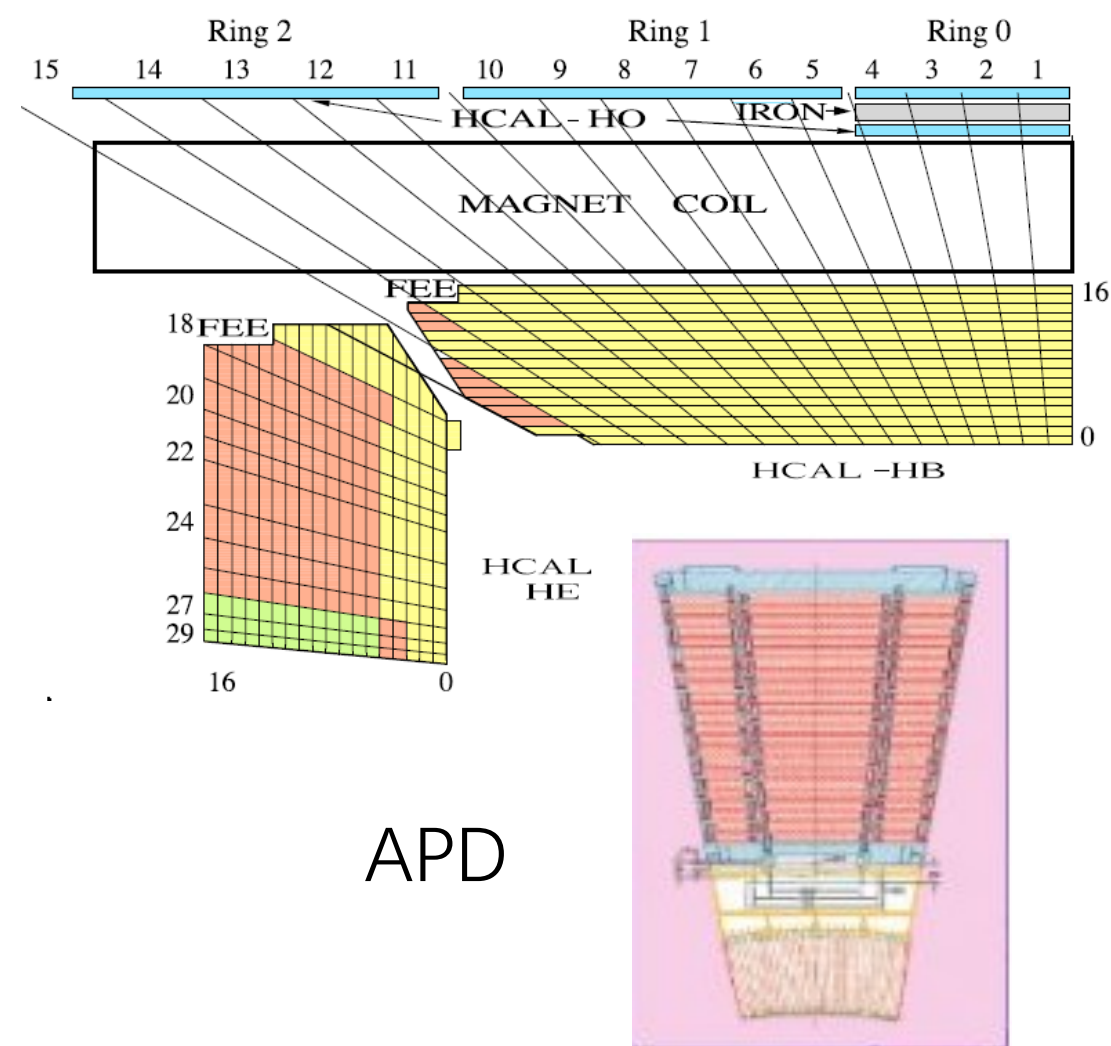
ATLAS实验上的电磁量能器 取样型, $\text{Pb} + \text{液氩}$ ($25X_0$)



两种互补的技术方案

CMS-HCAL

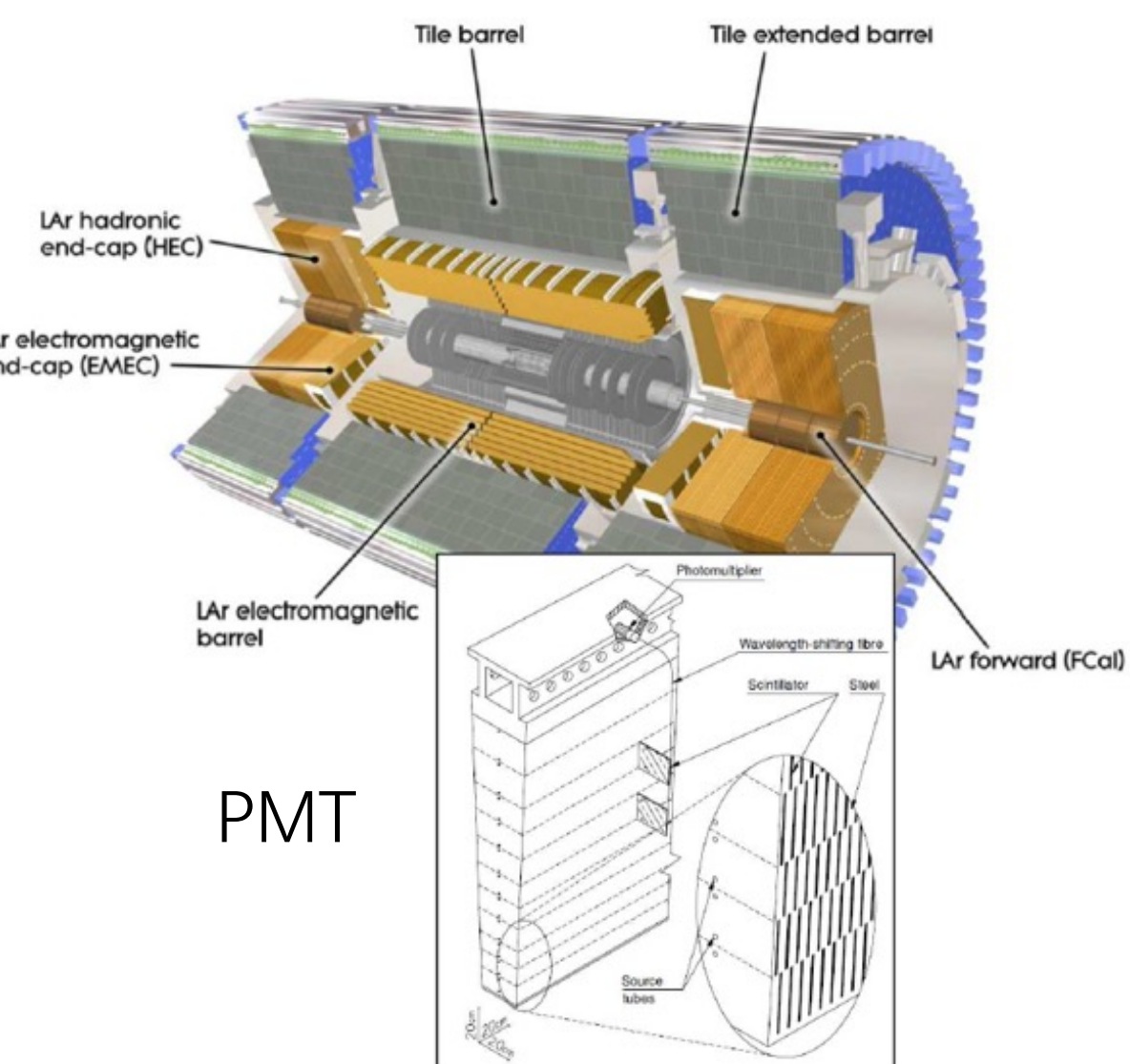
取样型，铜+塑料闪烁体 (7λ)



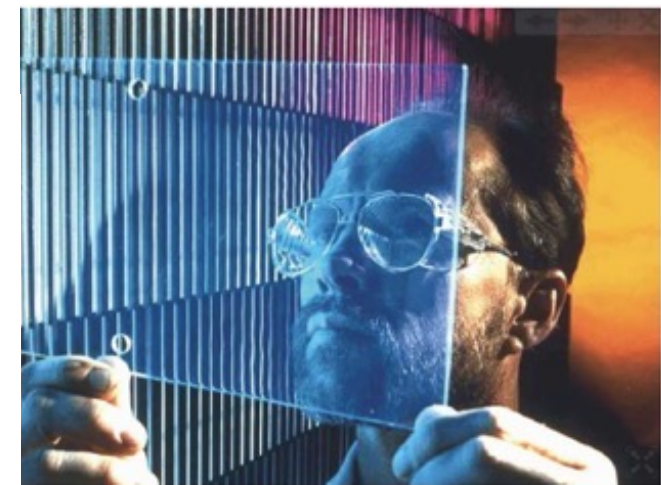
ECAL和部分HCAL在线圈内部

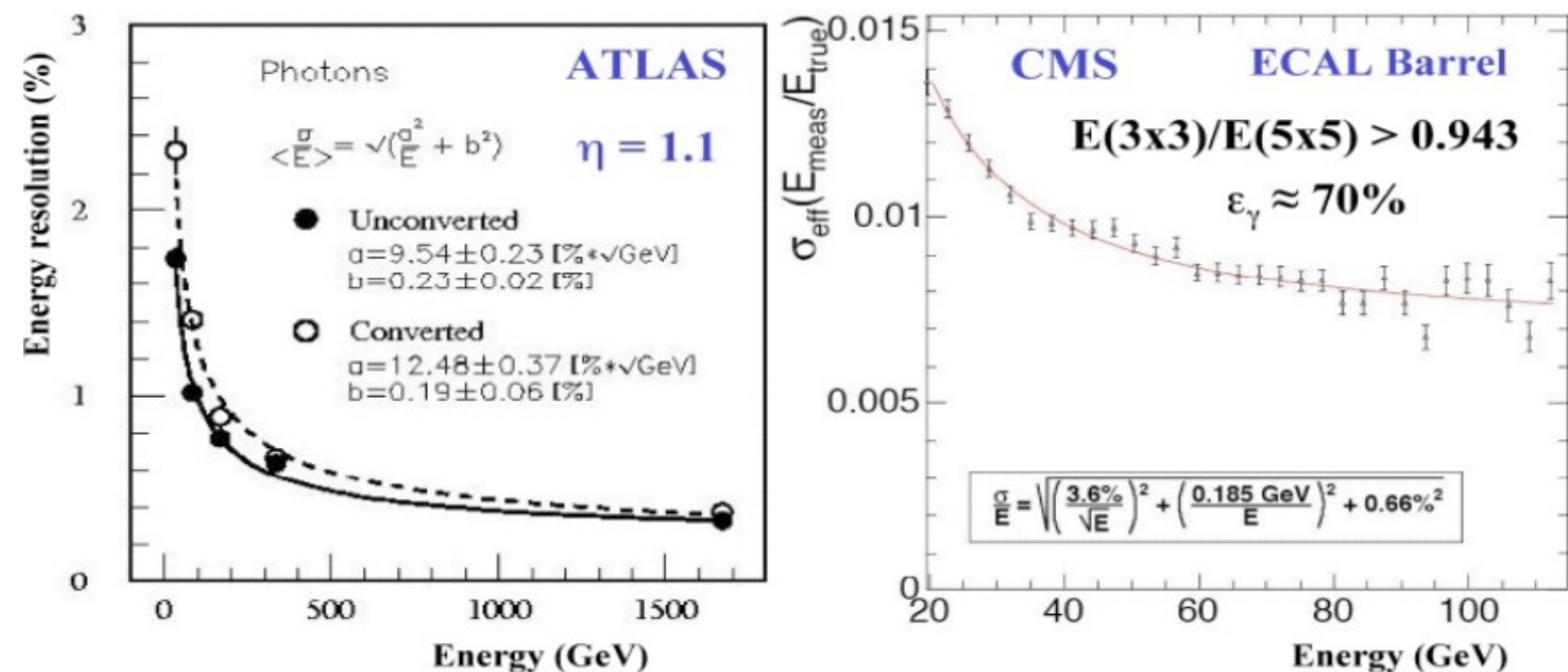
ATLAS-HCAL-Barrel

取样型，铁+塑料闪烁体 (10λ)



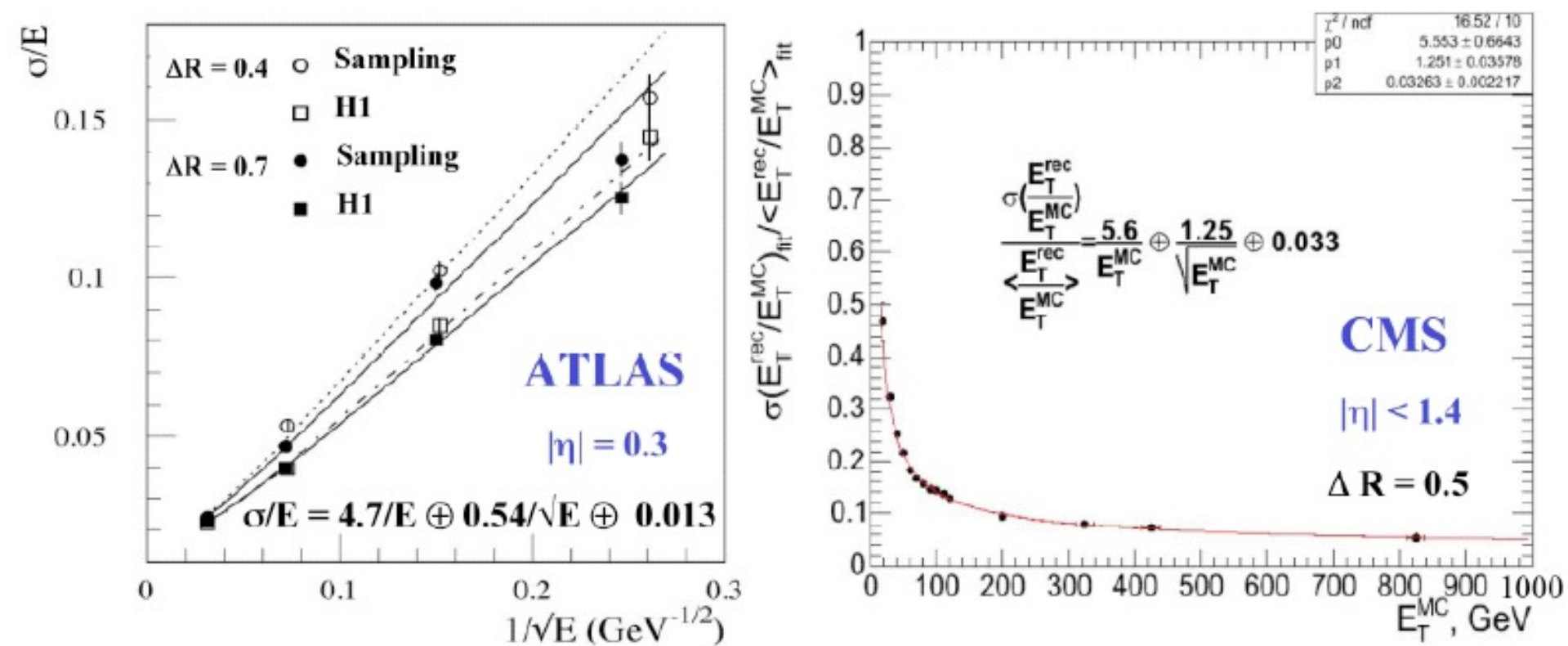
ECAL和HCAL都在线圈外





100GeV光子能量分辨

- ATLAS~1.1%
- CMS~0.8%



1TeV Jet 能量分辨

- ATLAS~2%
- CMS~5%

不同的技术和设计决定了不同的性能

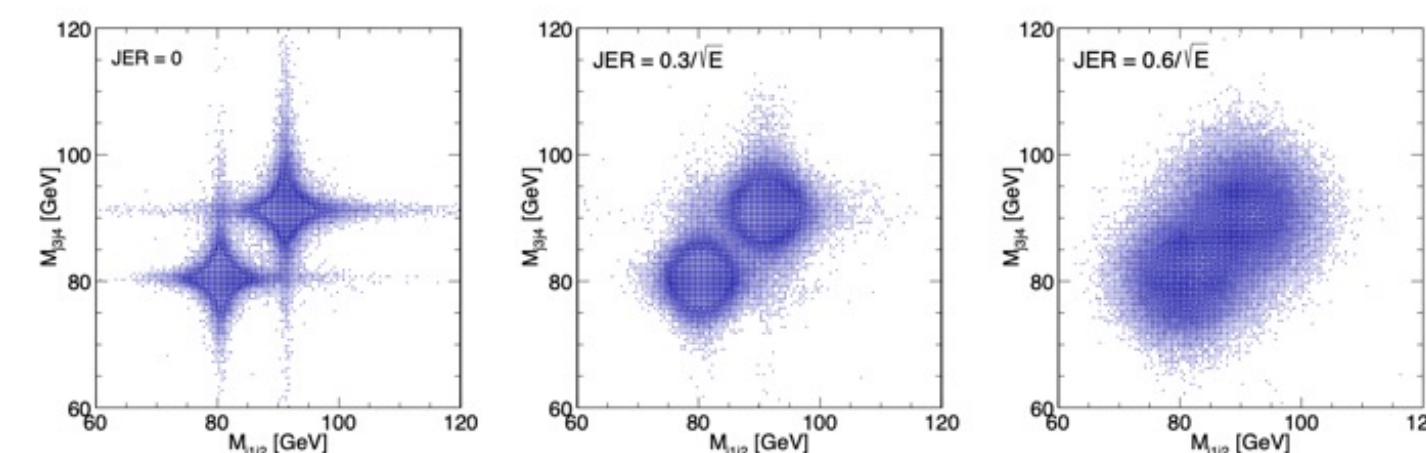
❖ 在强子衰变末态中分辨W与Z玻色子 → 强子喷注能量分辨率提高1倍

❖ 关键：如何克服强子簇射巨大涨落的影响？

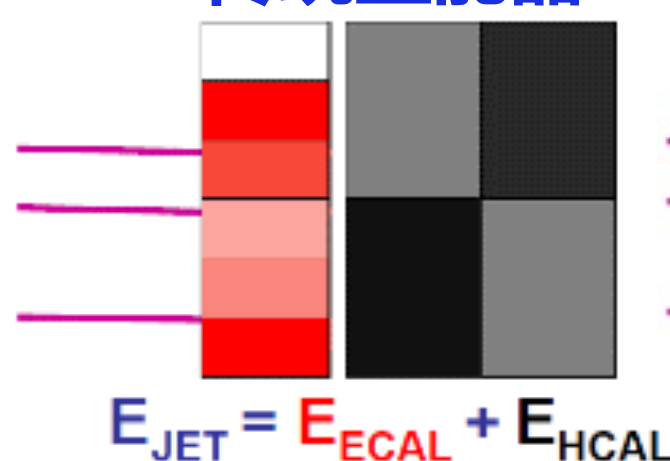
$$\sigma_E/E \sim 60\%/\sqrt{E(\text{GeV})} \rightarrow 30\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$$

❖ 两种途径

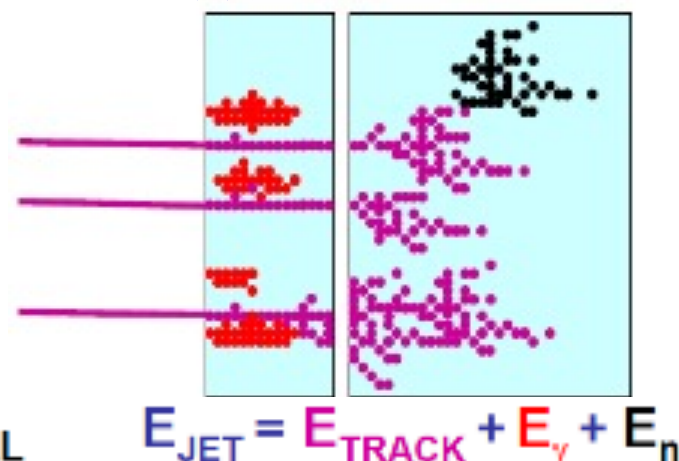
- ▶ 粒子流算法 → 成像型量能器（极高颗粒度，海量通道）
- ▶ 改善单个强子能量分辨 → 双读出量能器（契伦科夫光+闪烁光）



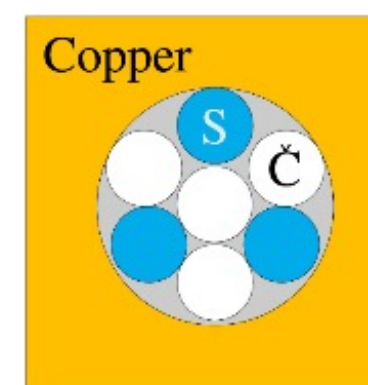
传统量能器



成像型量能器



双读出量能器



Copper

$$\left. \begin{aligned} C &= E \left[f_{\text{em}} + \frac{1}{(e/h)_C} \times (1 - f_{\text{em}}) \right] \\ S &= E \left[f_{\text{em}} + \frac{1}{(e/h)_S} \times (1 - f_{\text{em}}) \right] \end{aligned} \right\} \text{where } \chi = \frac{1 - 1/(e/h)_S}{1 - 1/(e/h)_C}$$

$$E = \frac{S - \chi C}{1 - \chi}$$

重建并分辨出单粒子簇射，与径迹进行匹配，量能器中带电强子的能量沉积用径迹探测器的测量结果取代。

在每个簇射事例中测量电磁贡献所占比例

成像型量能器

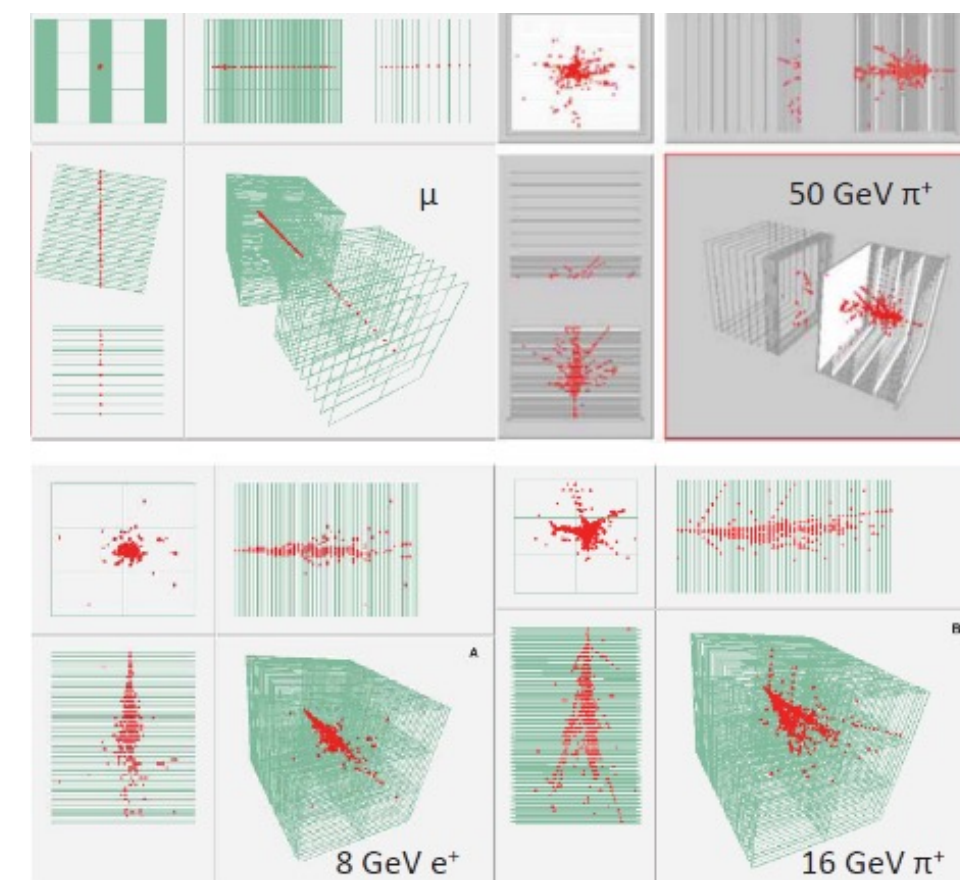
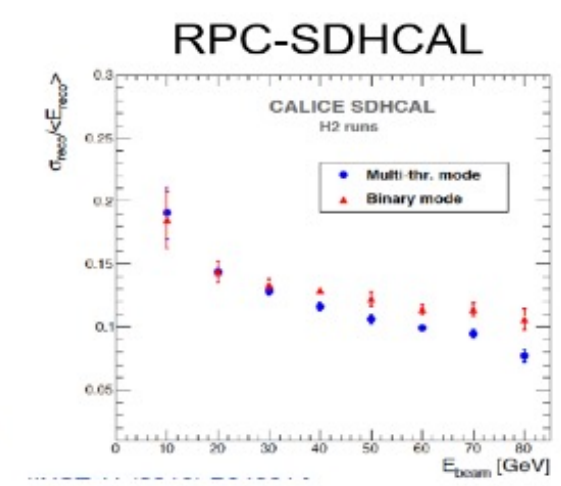
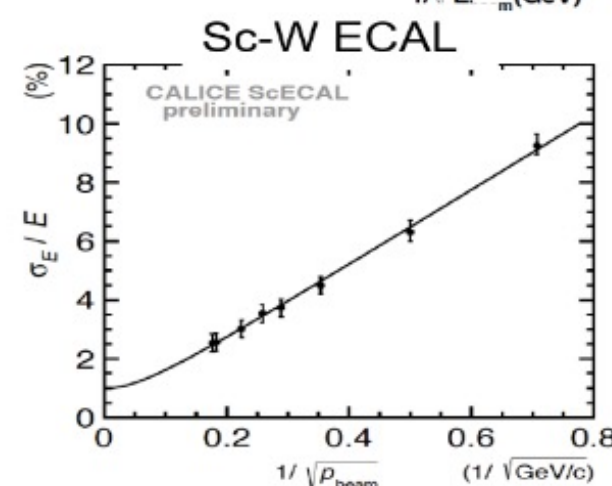
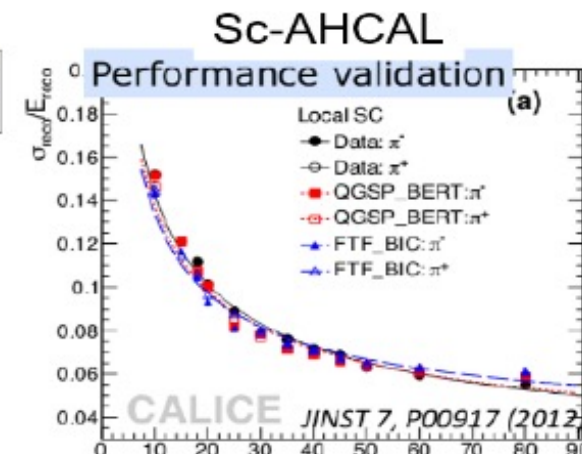
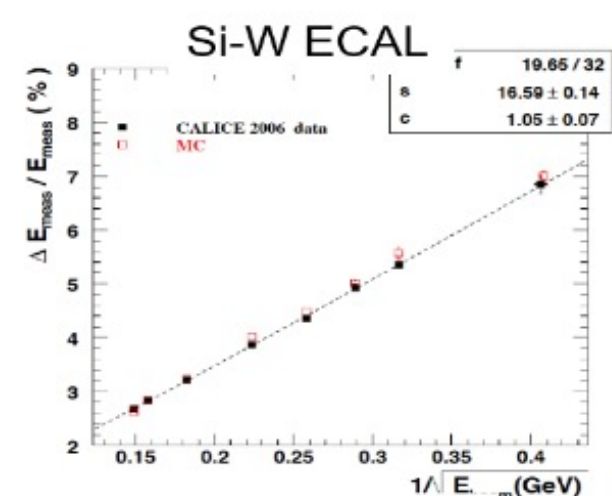
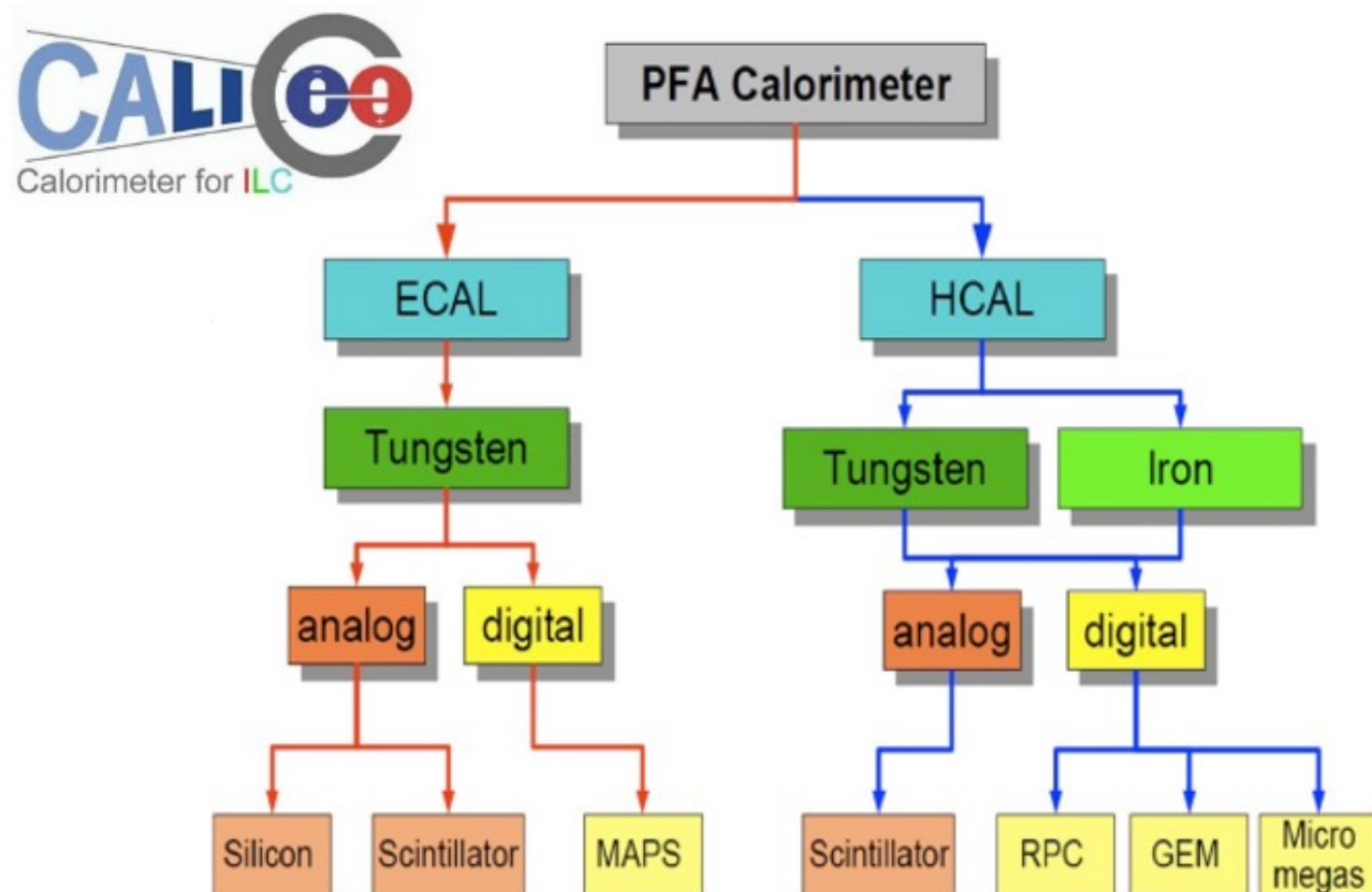
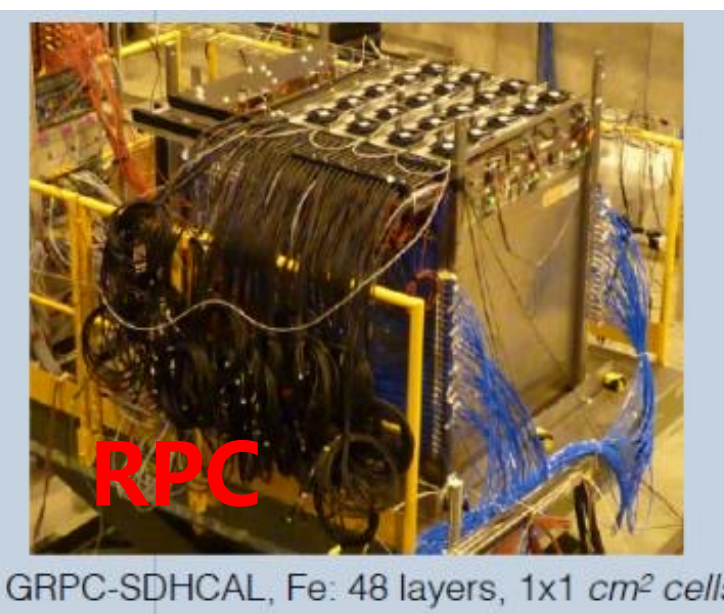
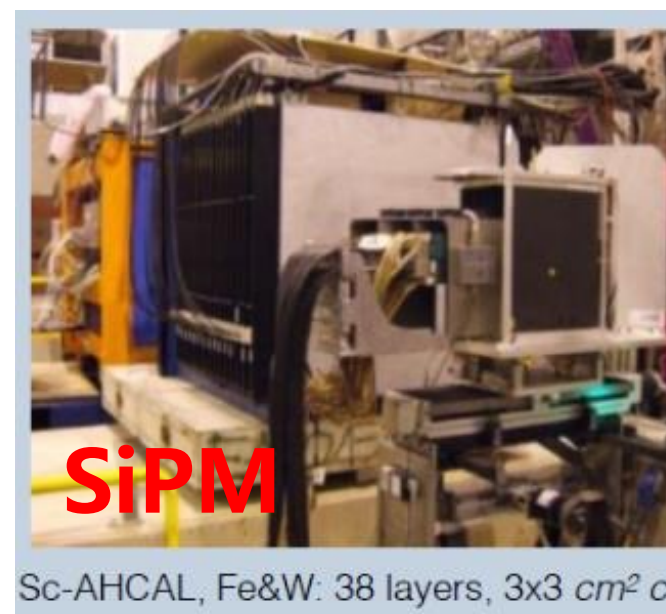


- ❖ 针对各种技术方案，建造了多个物理样机，通过束流测试完成了原理验证。
- ❖ 由物理样机转向技术样机，解决工程建造问题。

ECAL



HCAL



成像型量能器的应用 — CMS端盖量能器升级

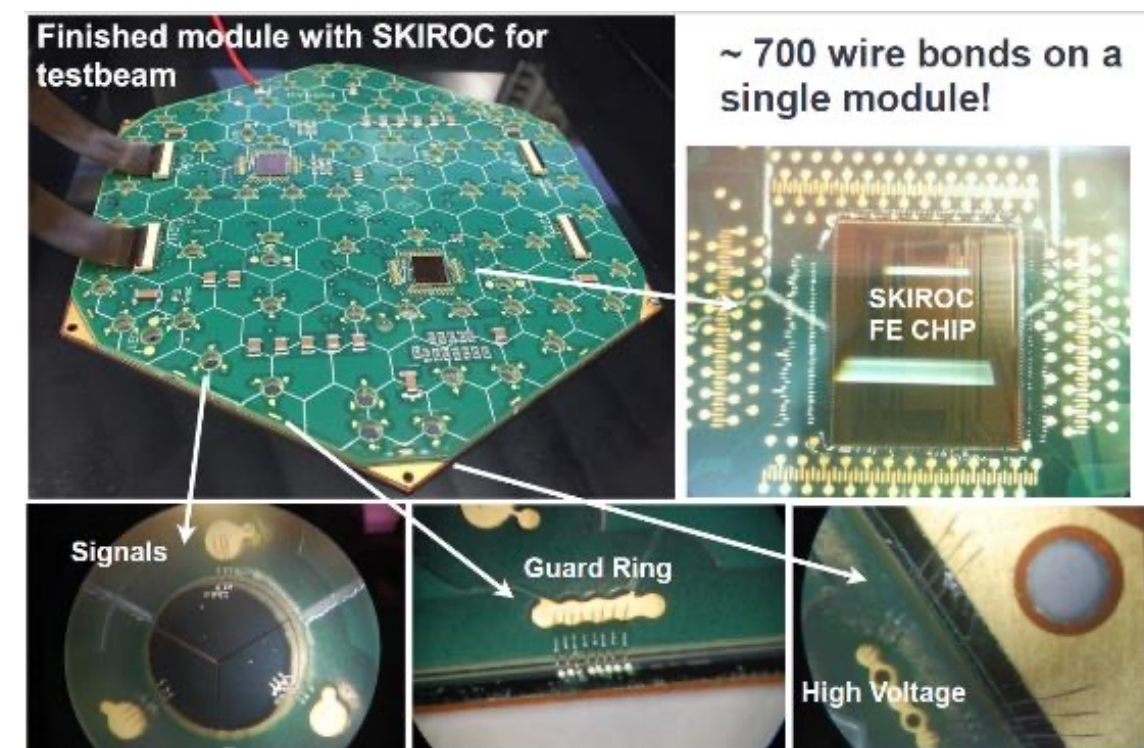
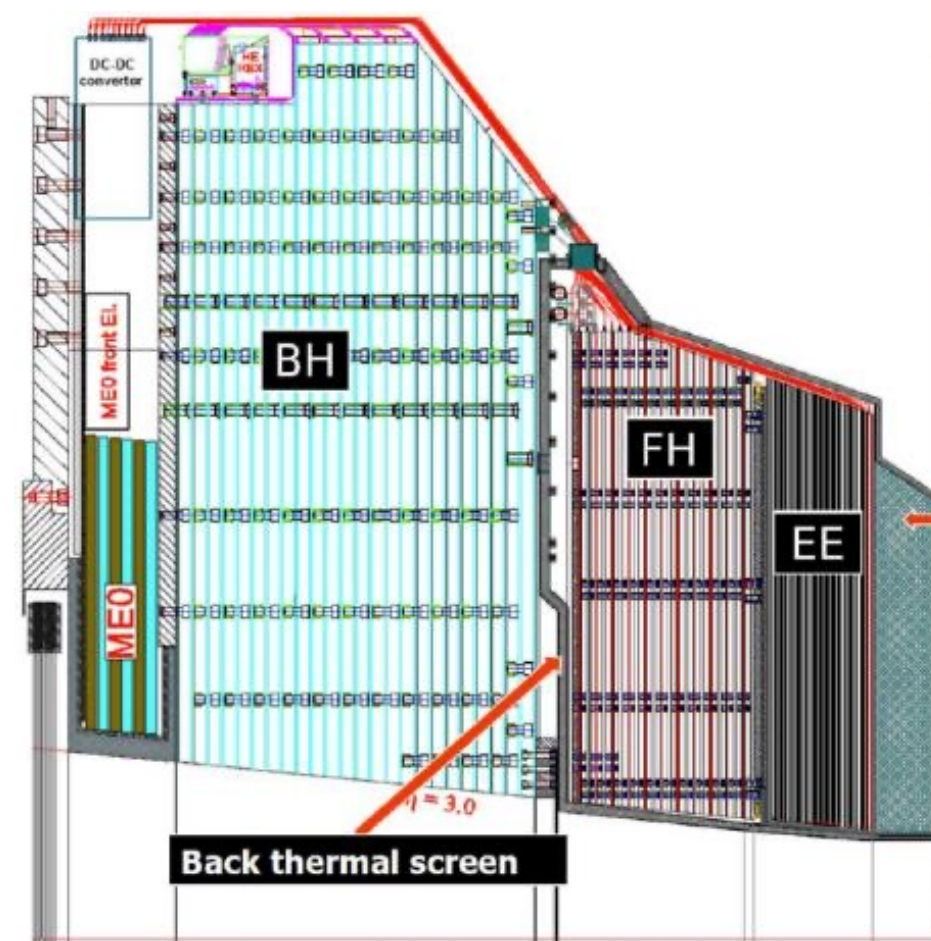


❖ CMS端盖量能器升级-HGCAL

- ▶ FE: Si+W, 28层, $25X0+1.3\lambda$
- ▶ FH: Si+Fe, 12层, 3.5λ
- ▶ BH: Sc+Fe, 11层, 5.5λ

❖ 关键参数

- ▶ 593m^2 Si, 单元颗粒度 $0.5\text{-}1\text{cm}^2$, $\sigma_t \sim 50\text{ps}$
- ▶ 6百万通道, 21660个模块, 92000个FE-ASIC
- ▶ 功耗115kW
- 成像型量能器不仅能显著提高喷注能量分辨, 也能有效去除高亮度下的堆积效应。
- CMS-HGCAL将是第一个应用于实验中的大型成像型量能器。



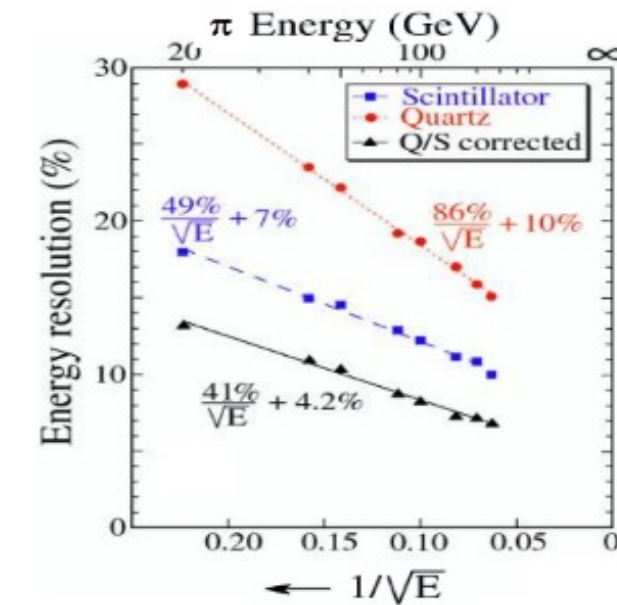
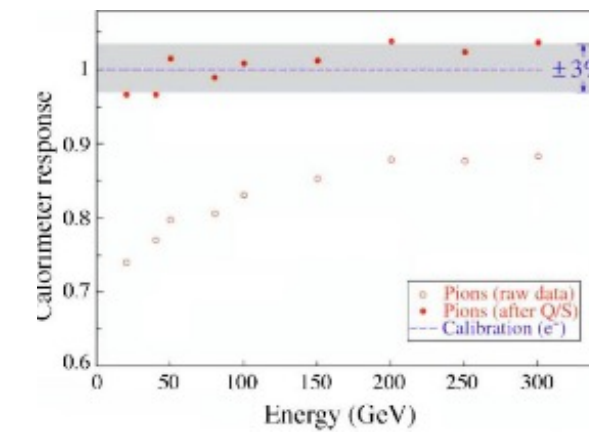
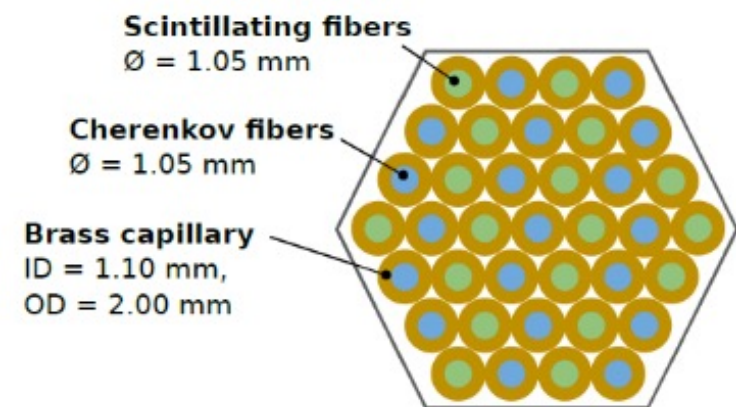
双读出量能器



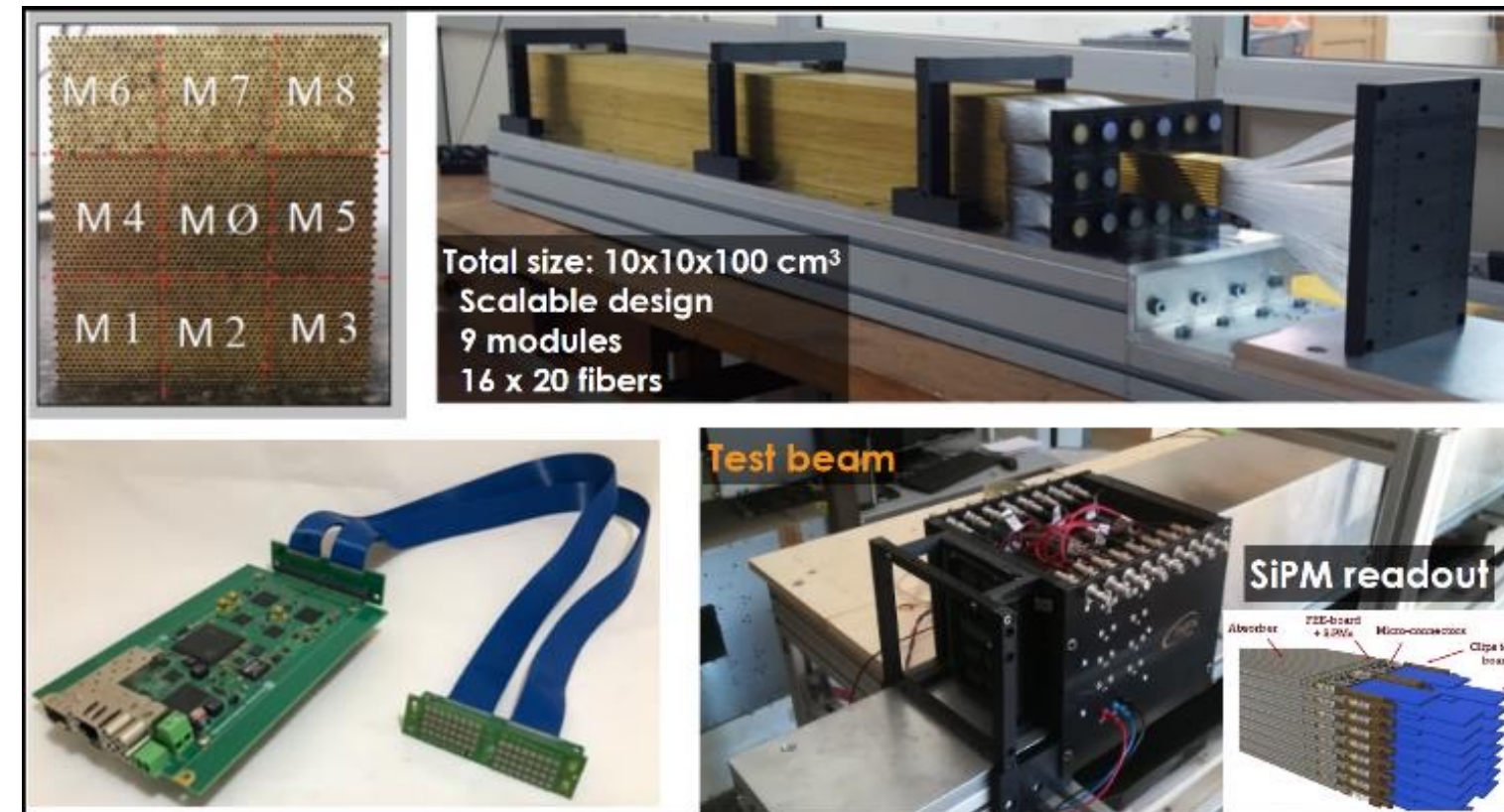
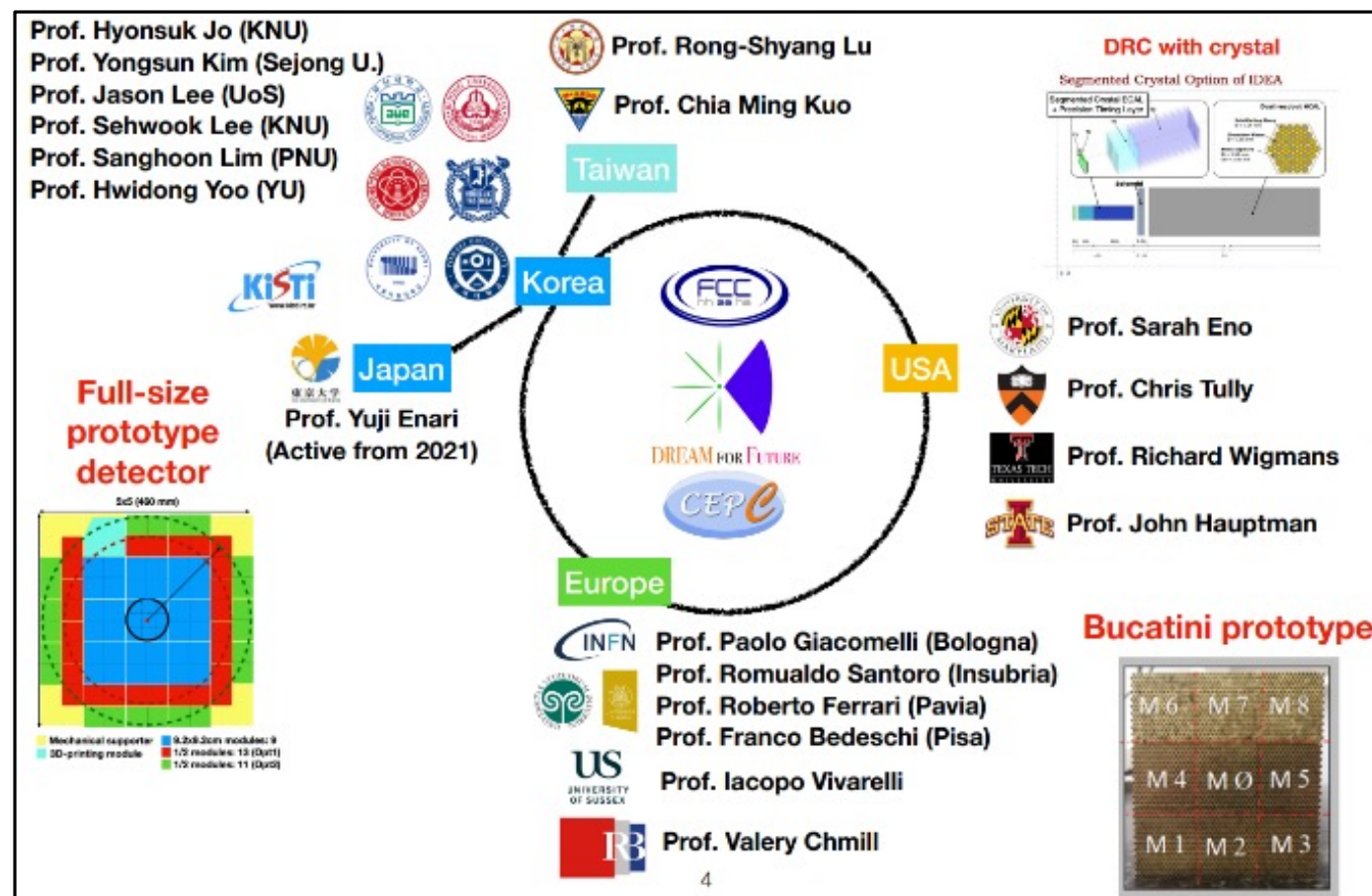
❖ DREAM: Dual READout Method–CERN RD52项目

- ▶ 同时测量闪烁光（非相对论电磁成分+强子成分）和契伦科夫光（相对论电磁成分）

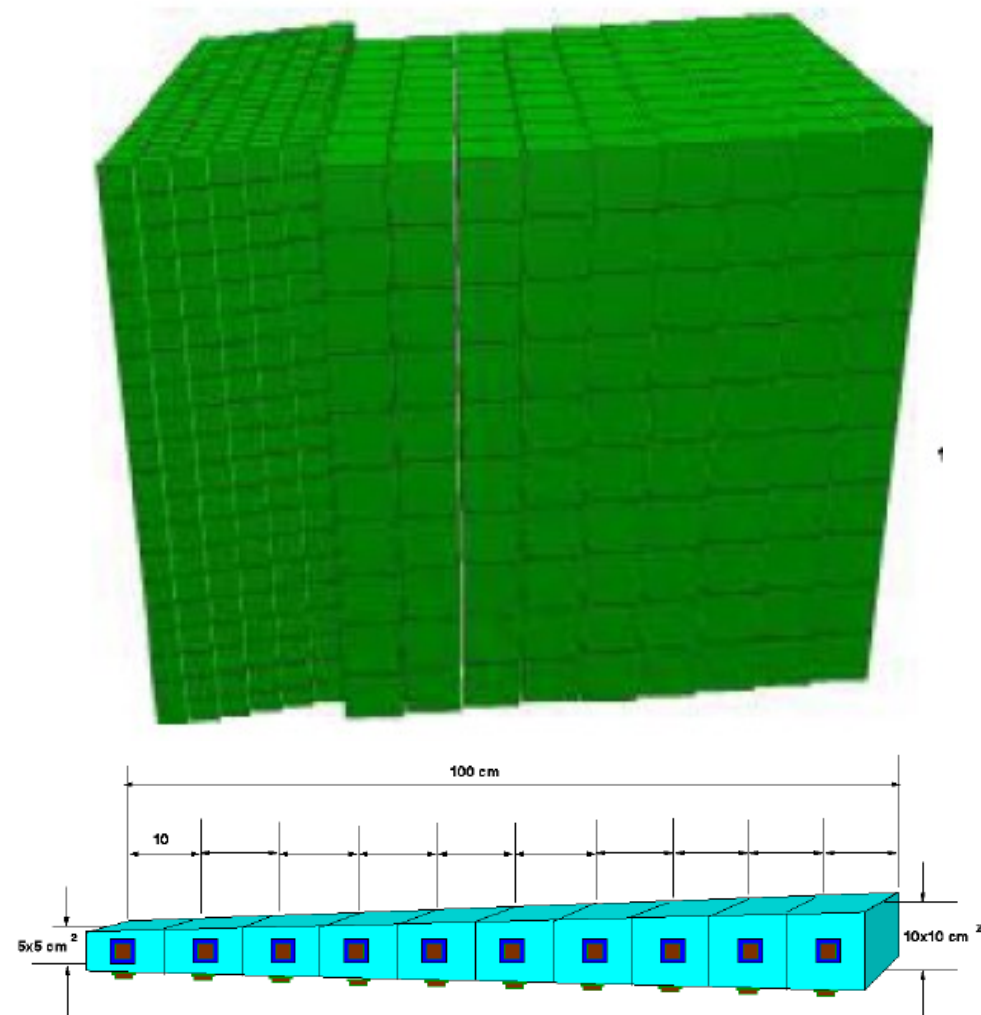
DREAM原型



FCC、CEPC

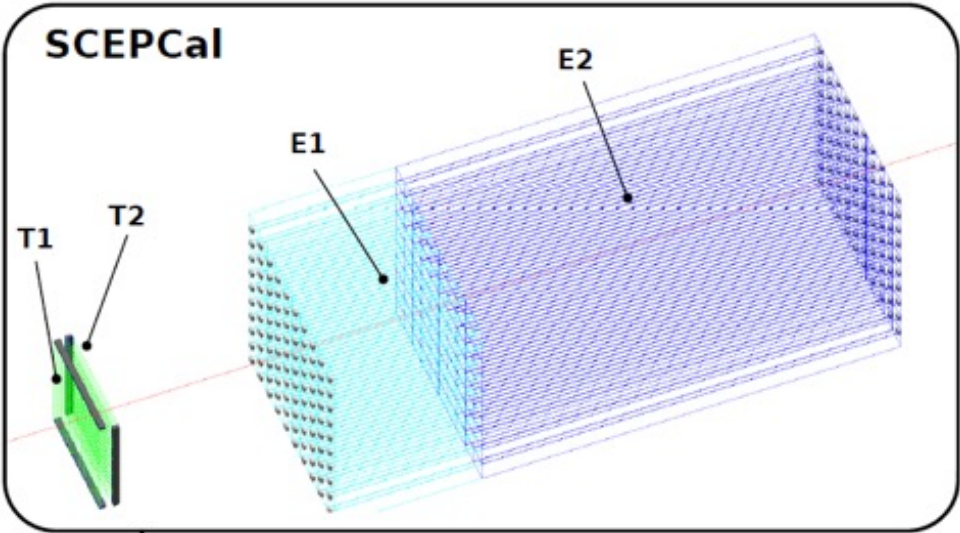
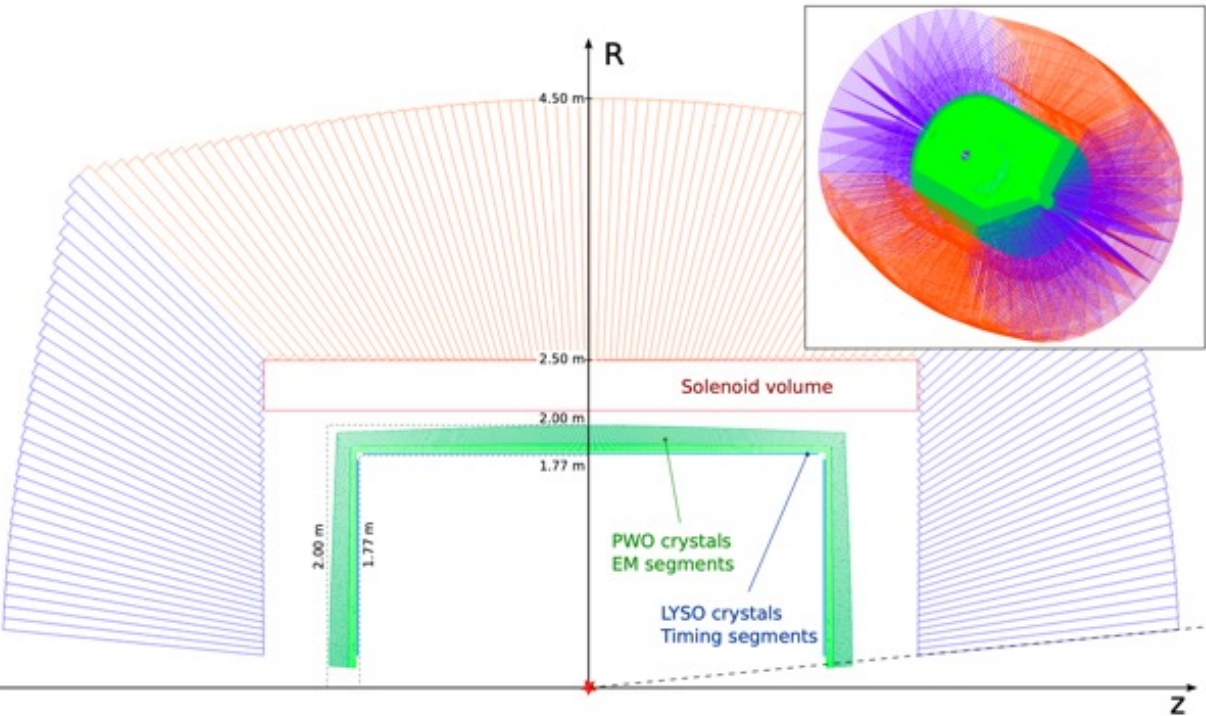


- ❖ 全吸收型量能器，采用双读出改善强子能量分辨。
- ❖ 通过方向、波长或信号时间特征区分闪烁光和契伦科夫光。
- ❖ 找到合适的晶体和读出方法是关键！

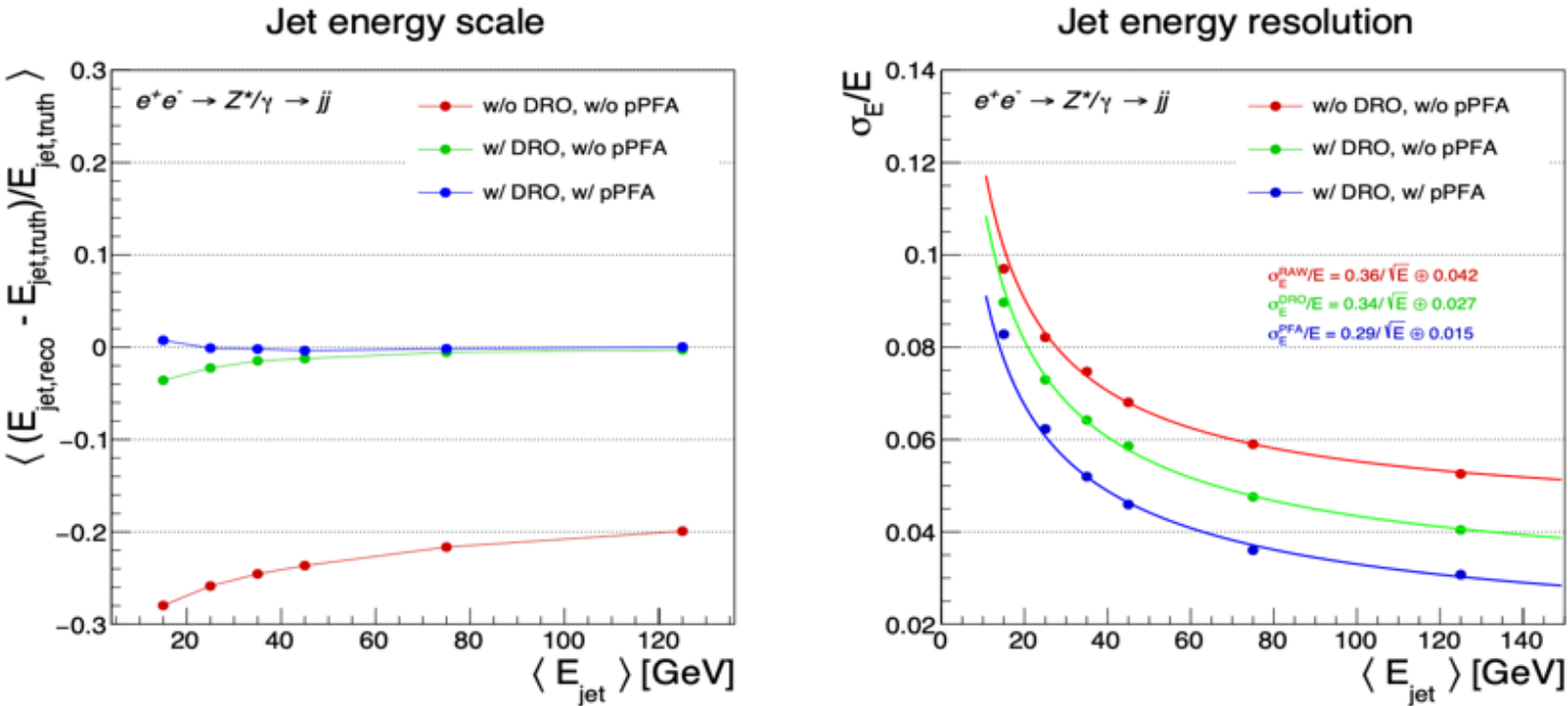


Parameters	$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO)	PbWO_4 (PWO)	PbF_2	PbClF	$\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (BSO)
ρ (g/cm ³)	7.13	8.29	7.77	7.11	6.8
λ_l (cm)	22.8	20.7	21.0	24.3	23.1
n @ λ_{max}	2.15	2.20	1.82	2.15	2.06
τ_{decay} (ns)	300	30/10	?	30	100
λ_{max} (nm)	480	425/420	?	420	470
Cut-off λ (nm)	310	350	250	280	300
Light Output (%)	100	1.4/0.37	?	17	20
Melting point (°C)	1050	1123	842	608	1030
Raw Material Cost (%)	100	49	29	29	47

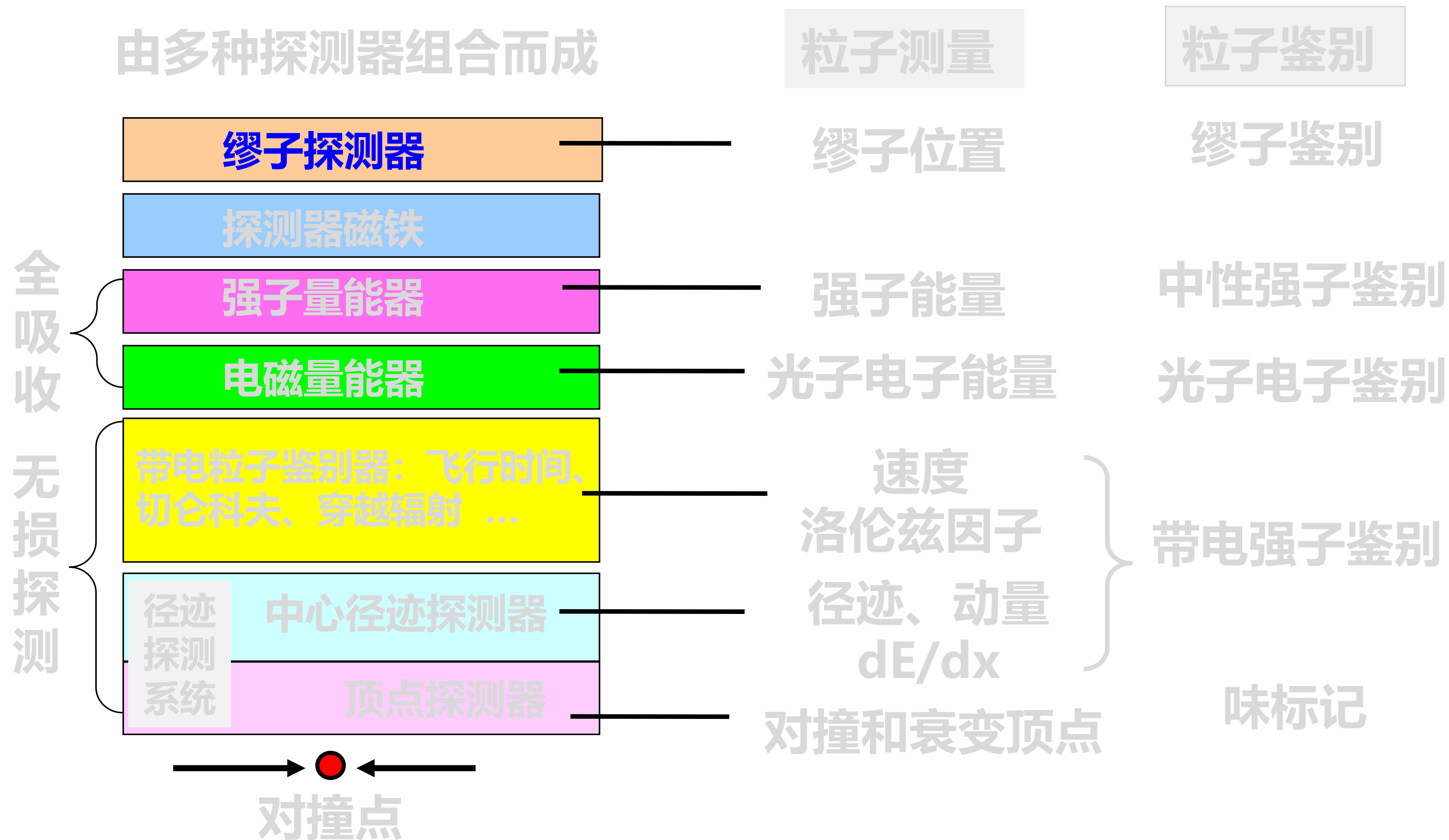
❖ 一种结合成像型和双读出概念的晶体电磁量能器概念，可以与光纤双读出取样型量能器组合，形成一个高性能的量能器系统，兼顾电磁和强子能量测量。



	High granularity Si/W ECAL and scintillator based HCAL	Fiber-based dual-readout calorimeter	Hybrid crystal and dual-readout calorimeter
N. of longitudinal layers	> 40	1	5
ECAL cell cross-section	25–100 mm ²	2–144 mm ²	100 mm ²
HCAL cell cross-section	100–900 mm ²		400–2500 mm ²
EM energy resolution	15–25%/√E	10–15%/√E	≈ 3%/√E
HAD energy resolution	45–55%/√E	25–30%/√E	≈ 25–30%/√E

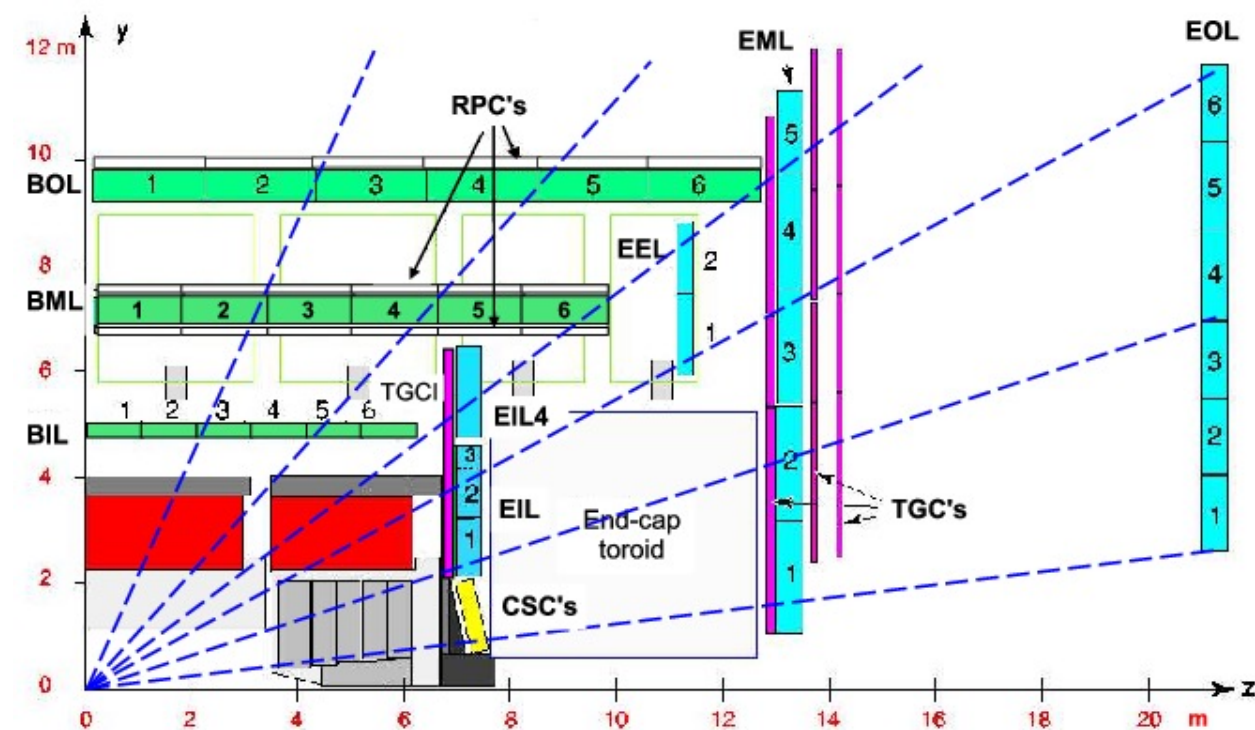


对撞机上的粒子探测系统



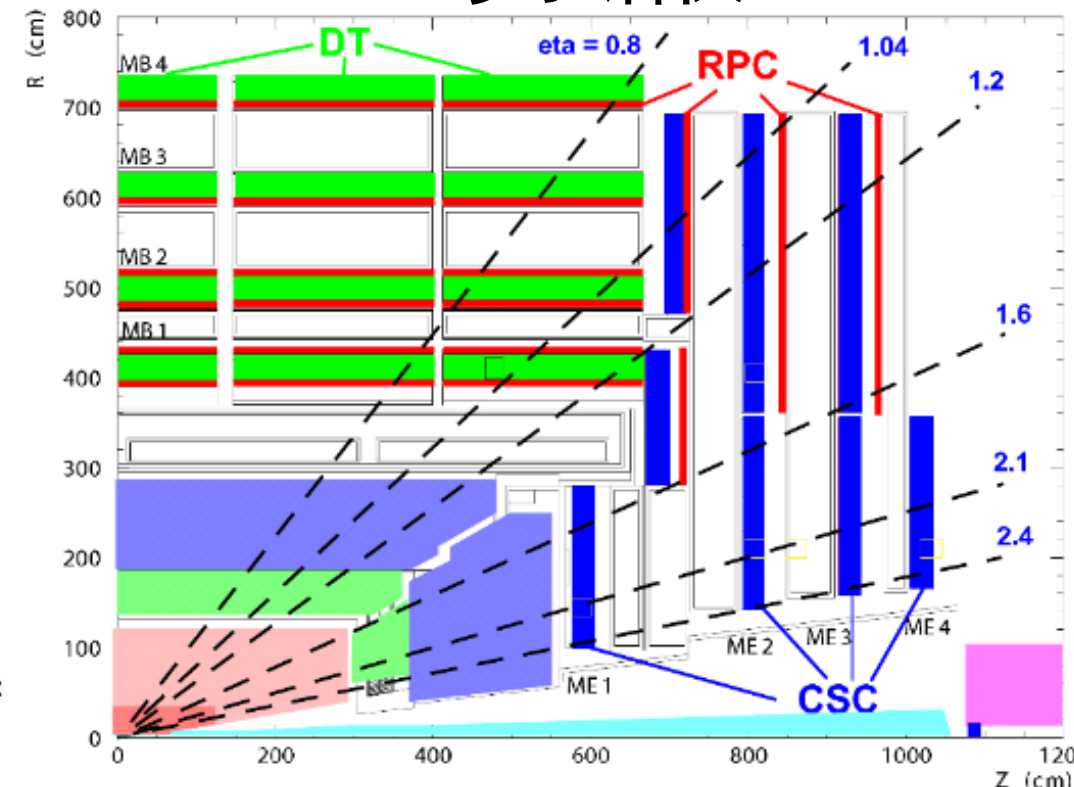
❖ 缪子是物理上非常重要的末态粒子。缪子探测器位于最外部，其特点是探测面积极大，因此气体探测器仍然处于主导地位。

ATLAS缪子谱仪



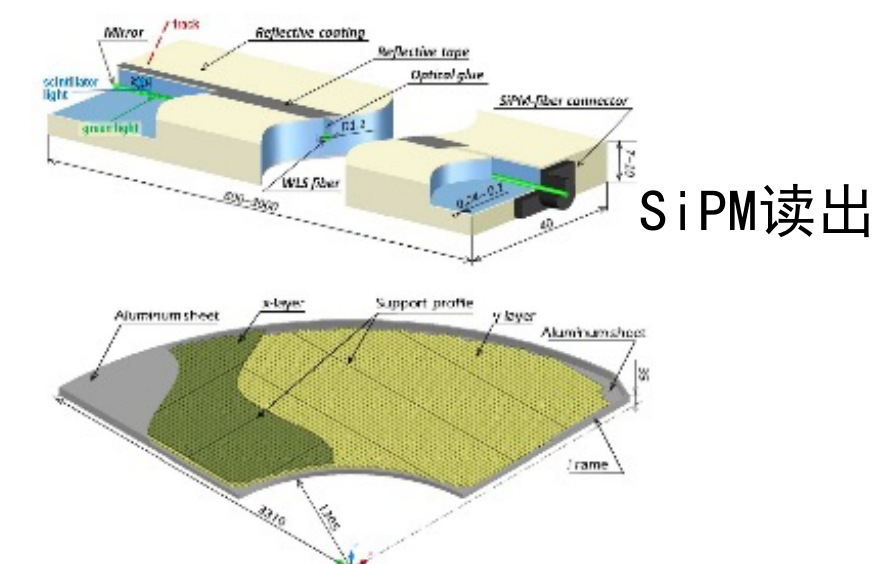
MDT: 监控漂移管
CSC: 阴极条室
TGC: 窄间隙室
RPC: 阻性板室

CMS缪子谱仪



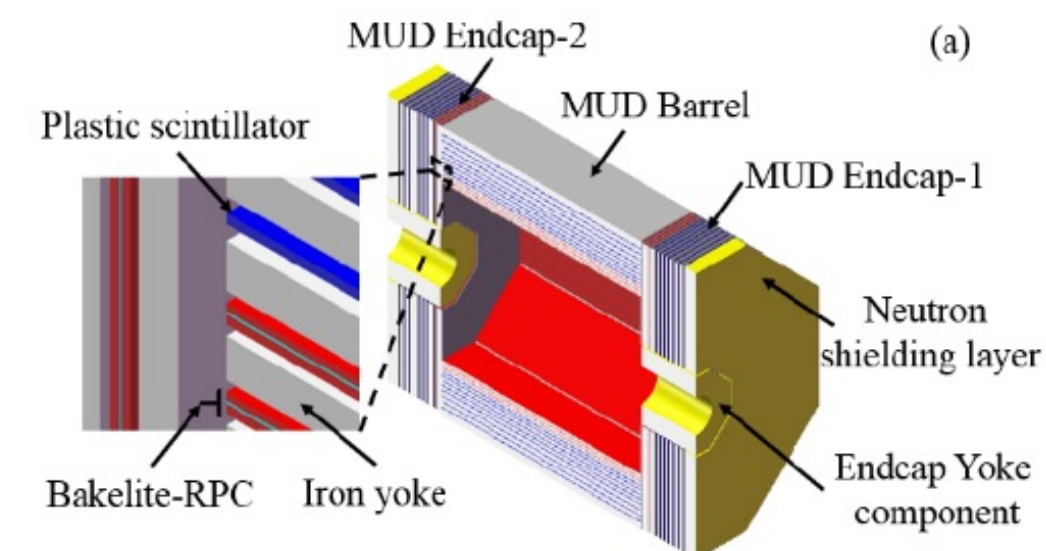
DT: 漂移管
CSC: 阴极条室
RPC: 阻性板室

BELLE2 KLM探测器：塑闪条



SiPM读出

STCF缪子探测器：RPC+塑闪条



全部是气体探测器，并且除RPC外，全部都是丝室！

ATLAS/CMS缪子探测器升级

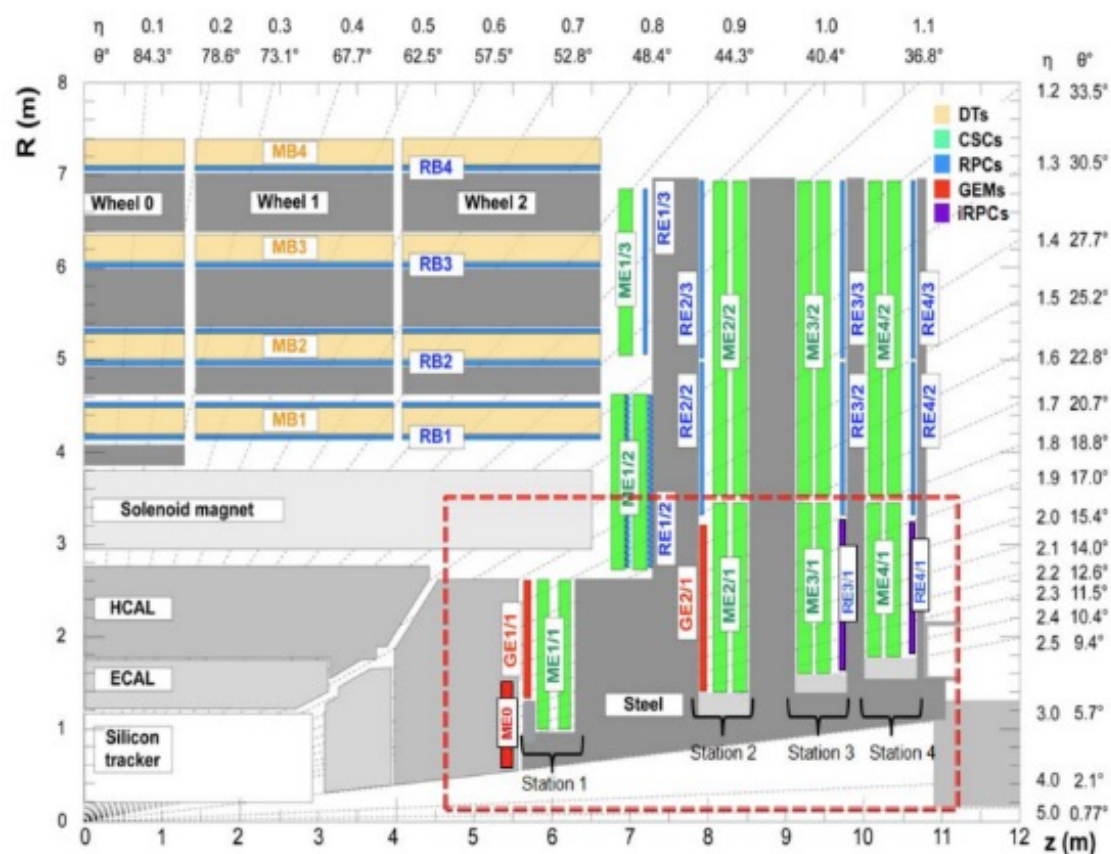


❖ Phase1

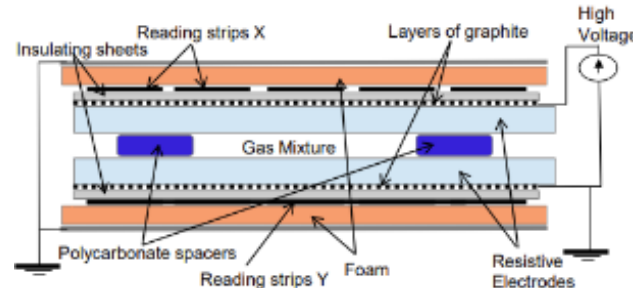
- ▶ ATLAS: 更换MDT/TGC/CSC → **MicroMegas**/sTGC
 - 增强端盖Muon触发能力
- ▶ CMS: 安装**GEM**(GE1/1)
 - 增强端盖Muon触发能力

❖ Phase2

- ▶ ATLAS: 安装**窄气隙RPC**+sMDT(BI)
 - 增强桶部Muon触发能力
- ▶ CMS: 安装**GEM**(GE2/1, ME0), RPC(RE3/1, RE4/1)
 - 增强Muon触发冗余性和Muon探测器接受度



新一代RPC



	Atlas Standard RPC	BIS78 RPC
Detector		
Gas Gap width	2 mm	1 mm
Electrode Thickness	1.8 mm	1.2 mm
Gas Mixture	95% TFE, 4.7% i-C4H10, 0.3% SF6	95% TFE, 4.7% i-C4H10, 0.3% SF6
Time Resolution	1 ns	~0.4 ns
Space Resolution	6 mm	1 mm
Gaps per chamber	2	3
Readout electronics	2D orthogonal	2D orthogonal

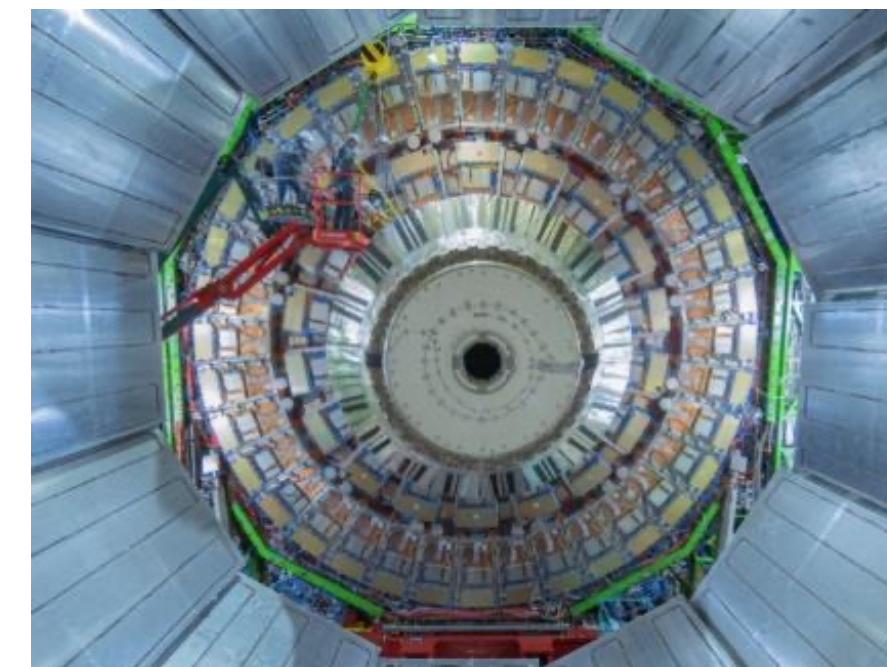
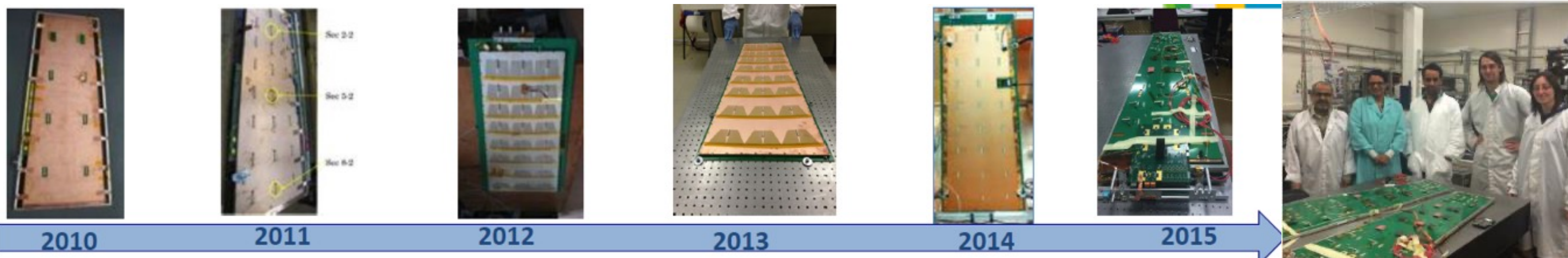
随着对撞机亮度升级，计数率和本底水平不断升高，**微结构气体探测器**开始进入了端盖和前向的缪子探测中。

大面积微结构气体探测器



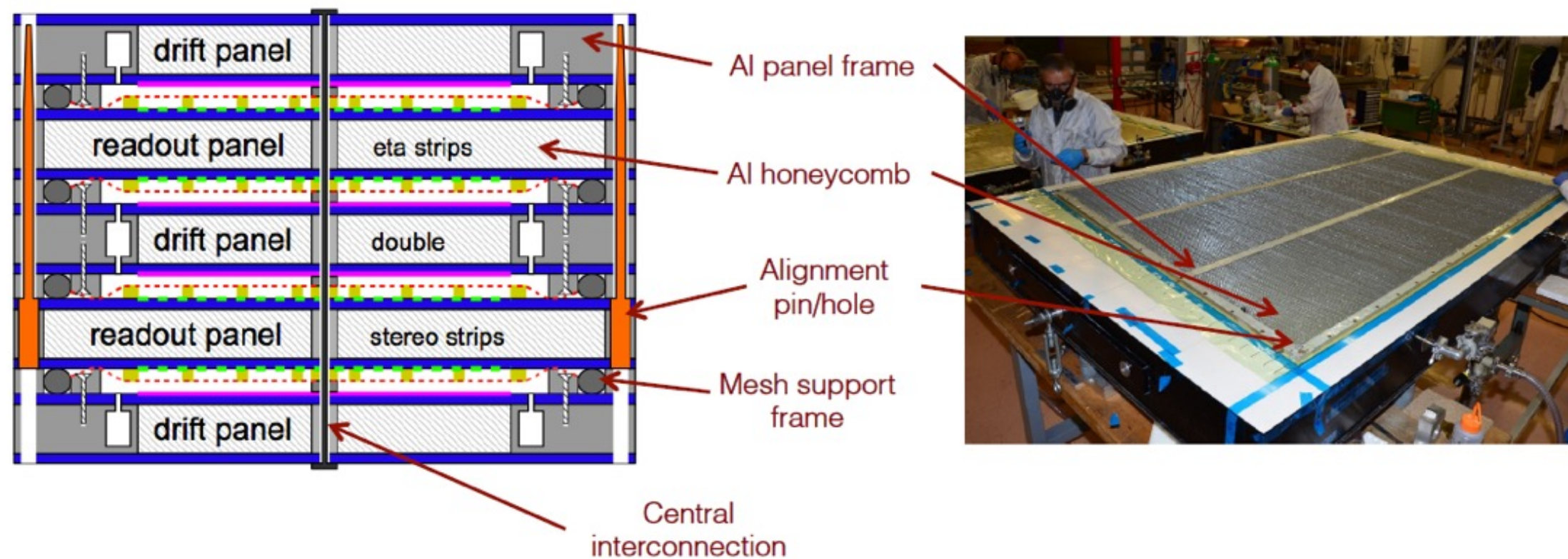
CMS GE1/1 GEM

~ 1000平米



ATLAS NSW MicroMegas

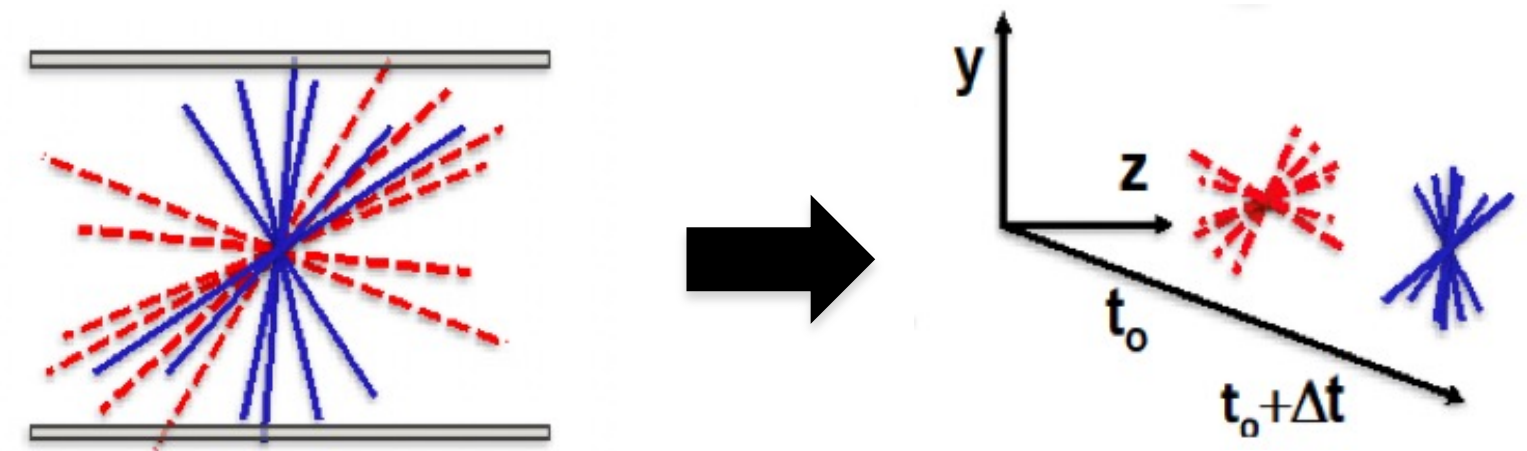
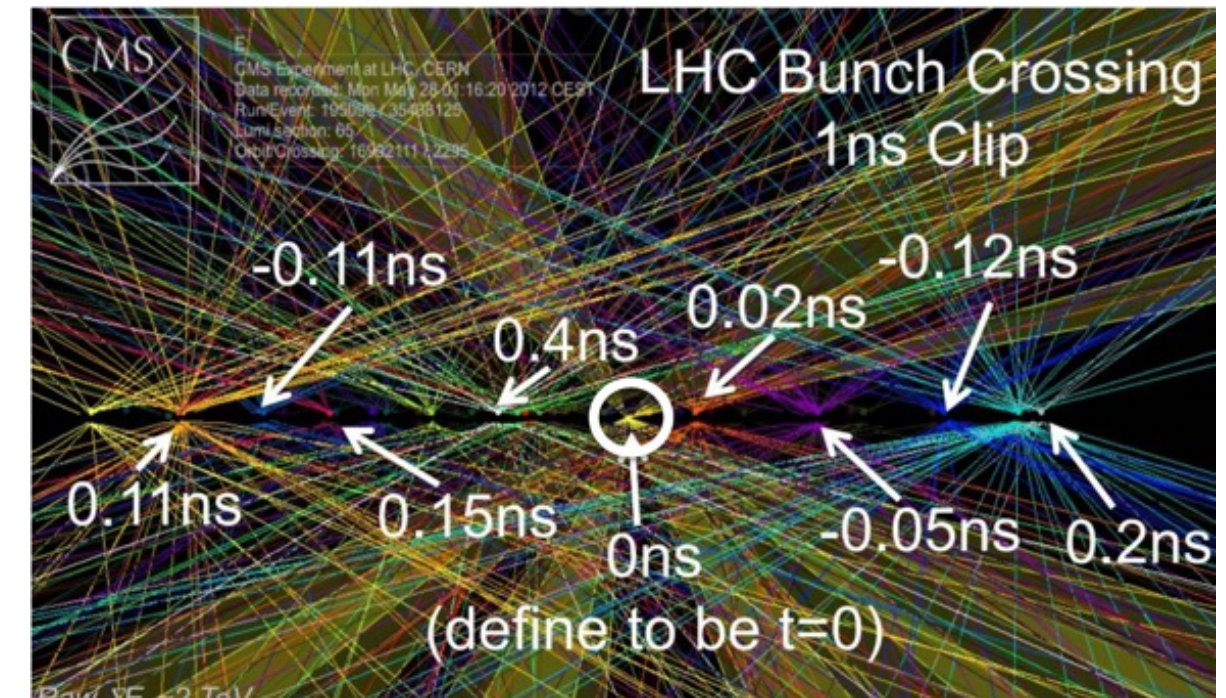
~ 1200平米



超快精确定时成为下一代关键探测技术



- ❖ 下一代高能物理实验的一个重要特征就是要在时间维度上增加或增强粒子探测系统各部分的探测能力。
- ❖ 全方位的超快精确定时能力将强烈影响未来高能物理实验的能力和潜力
 - ▶ 去除束流和堆积本底
 - ▶ 增强在线触发能力
 - ▶ 改善事例重建性能
 - ▶ 为寻找新物理信号提供额外手段



重要发展趋势：集成精确定时功能，集多种测量功能于一体

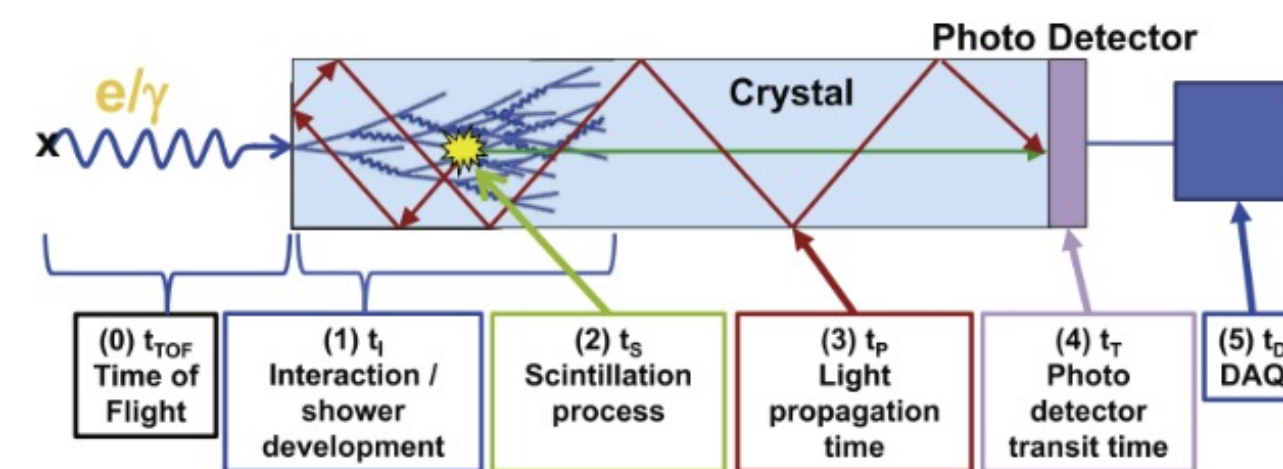
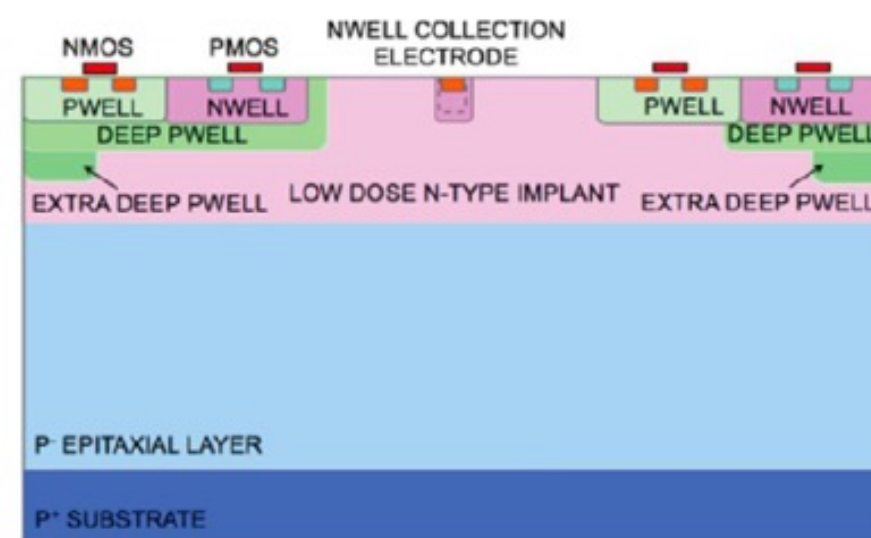
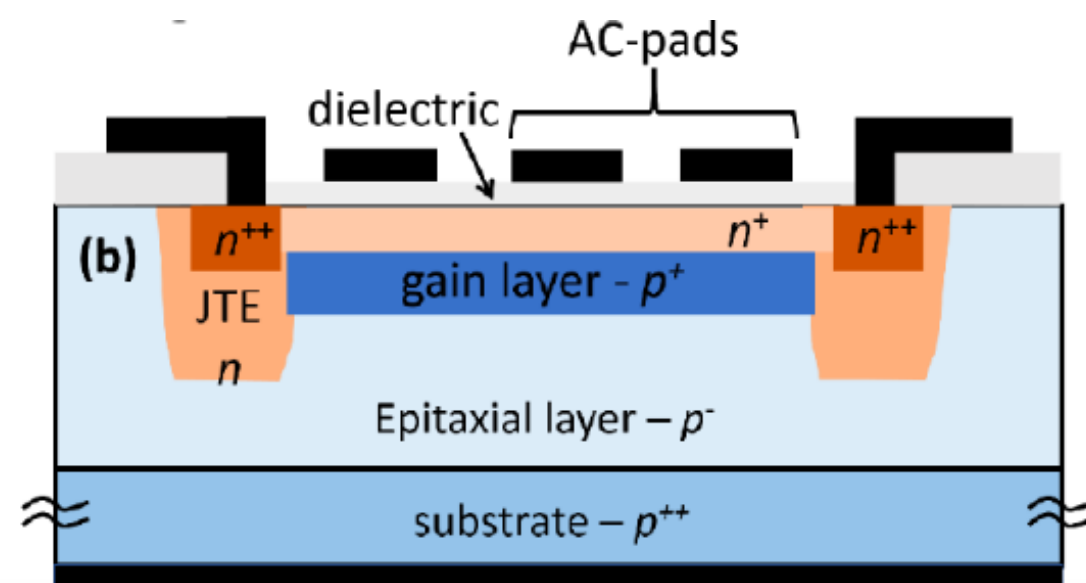


❖ 位置+时间：四维径迹探测器 (4D tracker: $\sigma_x \sim < 10\mu\text{m} + \sigma_t \sim < 100\text{ps}$)

► AC-LGAD, 3D hybrid, DMAPS ...

❖ 能量+时间：定时量能器

❖ 位置+能量+时间：五维量能器 (定时PFA量能器)



实现探测系统全方位的超快精确定时能力

❖ 硅像素技术（包括读出以及二者的集成）

- ▶ 混合型、单片型、高精度定时

❖ 更高计数率能力的大体积气体径迹室（超小单元漂移室，像素读出TPC）

❖ 大面积微结构气体探测器（MPGD）技术（包括低质量圆柱形）

❖ 新型量能器技术

- ▶ 快速高分辨晶体量能器、强子能量精确测量、高精度定时

❖ 高计数率高精度定时技术(<30ps)

- ▶ 半导体、闪烁体、气体

❖ 快响位敏单光子探测技术

- ▶ 真空（MCP）、固体（SiPM）、气体（MPGD）

❖ 径迹测量

- ▶ 硅像素是重点，单片有源型开启了一个硅的新时代，即将进入中心区域。
- ▶ 提高计数率能力是气体径迹室的发展重点

❖ 时间测量

- ▶ 高计数率高颗粒度下的超快定时是前沿

❖ 能量测量

- ▶ 快速发光晶体十分重要，高颗粒度和双读出是前沿。

❖ 粒子鉴别

- ▶ 契伦科夫是核心，高时间分辨的DIRC技术是个热点。

❖ 缪子探测

- ▶ 传统气体探测器依然主导，微结构气体探测器开始进入。