

# 粒子探测技术

**刘建北**

**核探测与核电子学国家重点实验室  
中国科学技术大学**

第十一届华大QCD讲习班  
华中师范大学  
2023年10月25日

# 引言

- 什么是粒子？

- 自然界中或人工实验中各类反应产生的各种末态粒子和辐射，例如： $\alpha$ 粒子、电子、X和Y射线、质子、中子、 $\mu$ 子、 $\pi$ 介子、K介子、重离子等。

- 什么是粒子探测？

- 通过粒子与物质的相互作用，测量粒子的各种特征和属性（径迹、能量、动量、电荷、质量…）并识别粒子。

- 粒子探测器

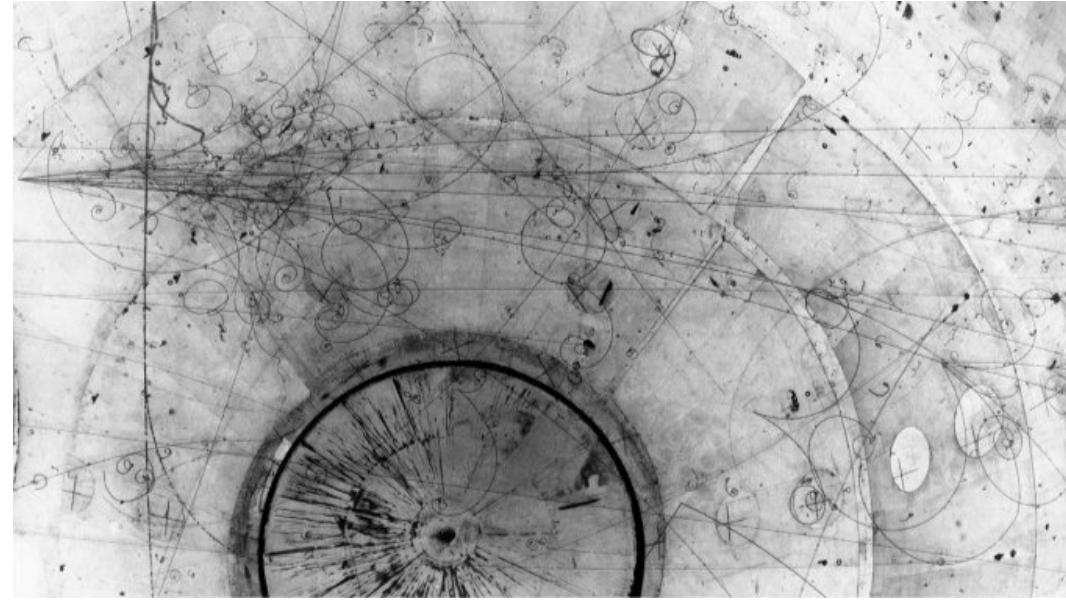
- 用于粒子探测的仪器或设备

- 谱仪

- 由多个具有不同功能的探测器组成的粒子探测系统

# 实验工具

- 粒子探测器是核与粒子物理实验不可或缺的工具。
- 粒子探测技术的不断发展与革新为核与粒子物理的不断深入发展提供重要实验基础。



*但绝不仅仅是工具！*

**“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”**

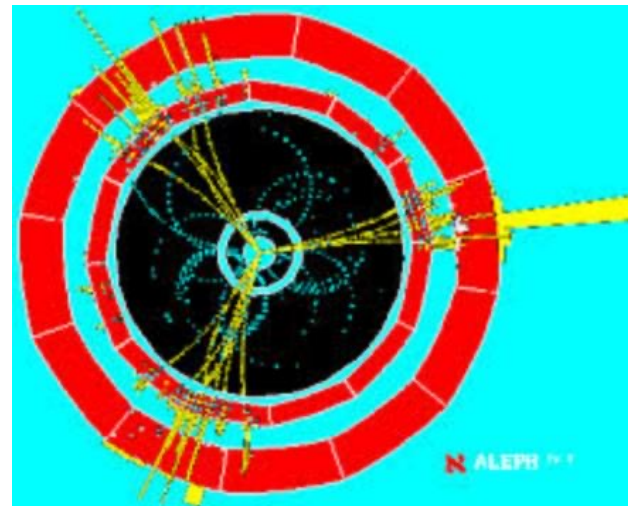
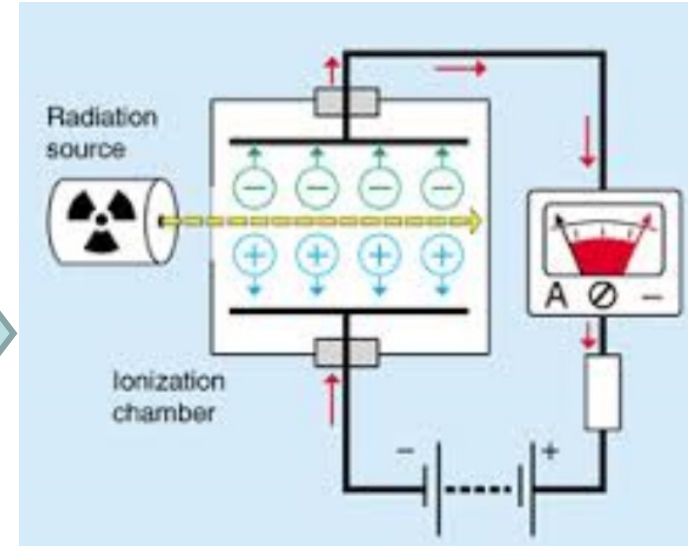
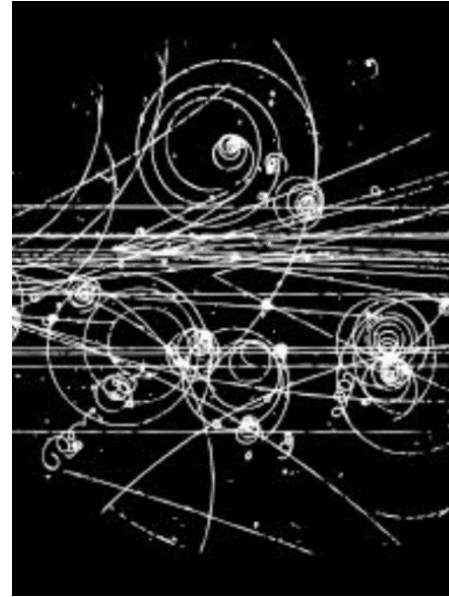
**— Freeman Dyson**





# 粒子探测实例

人类首幅X射线照片

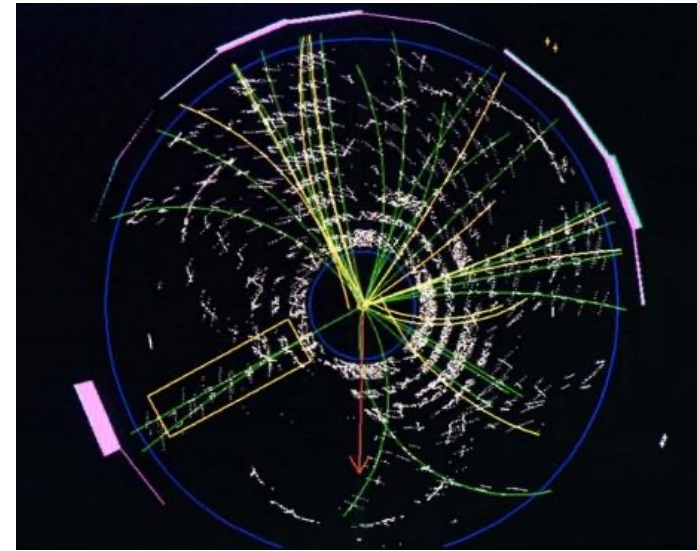
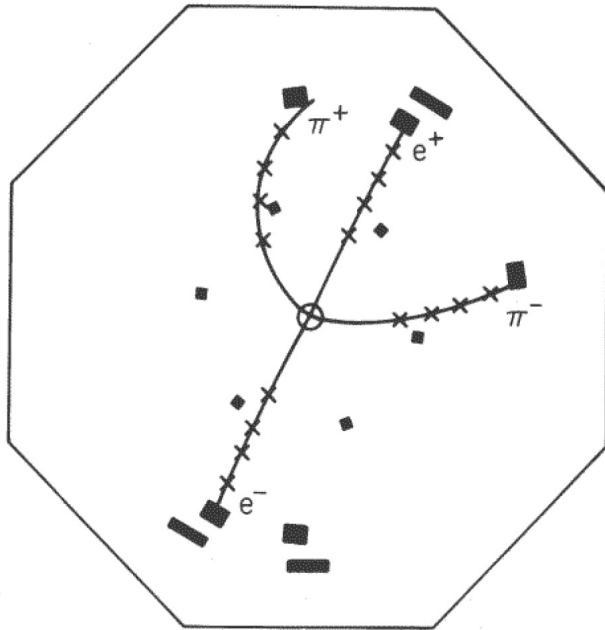




# 为什么要不断研发新的探测技术

- 因为“实验越来越难，要求越来越高”。

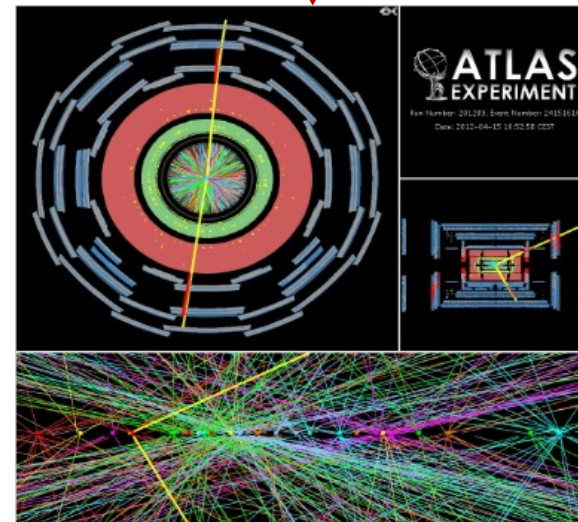
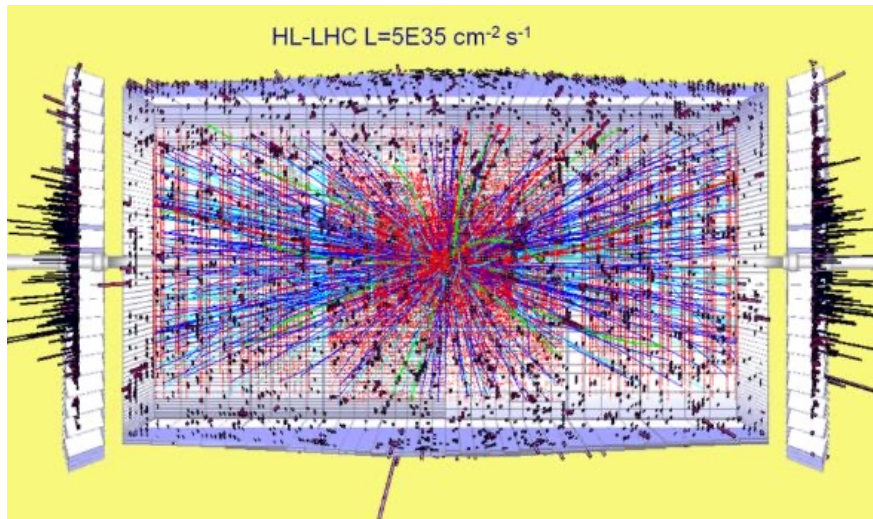
1974年



1995年

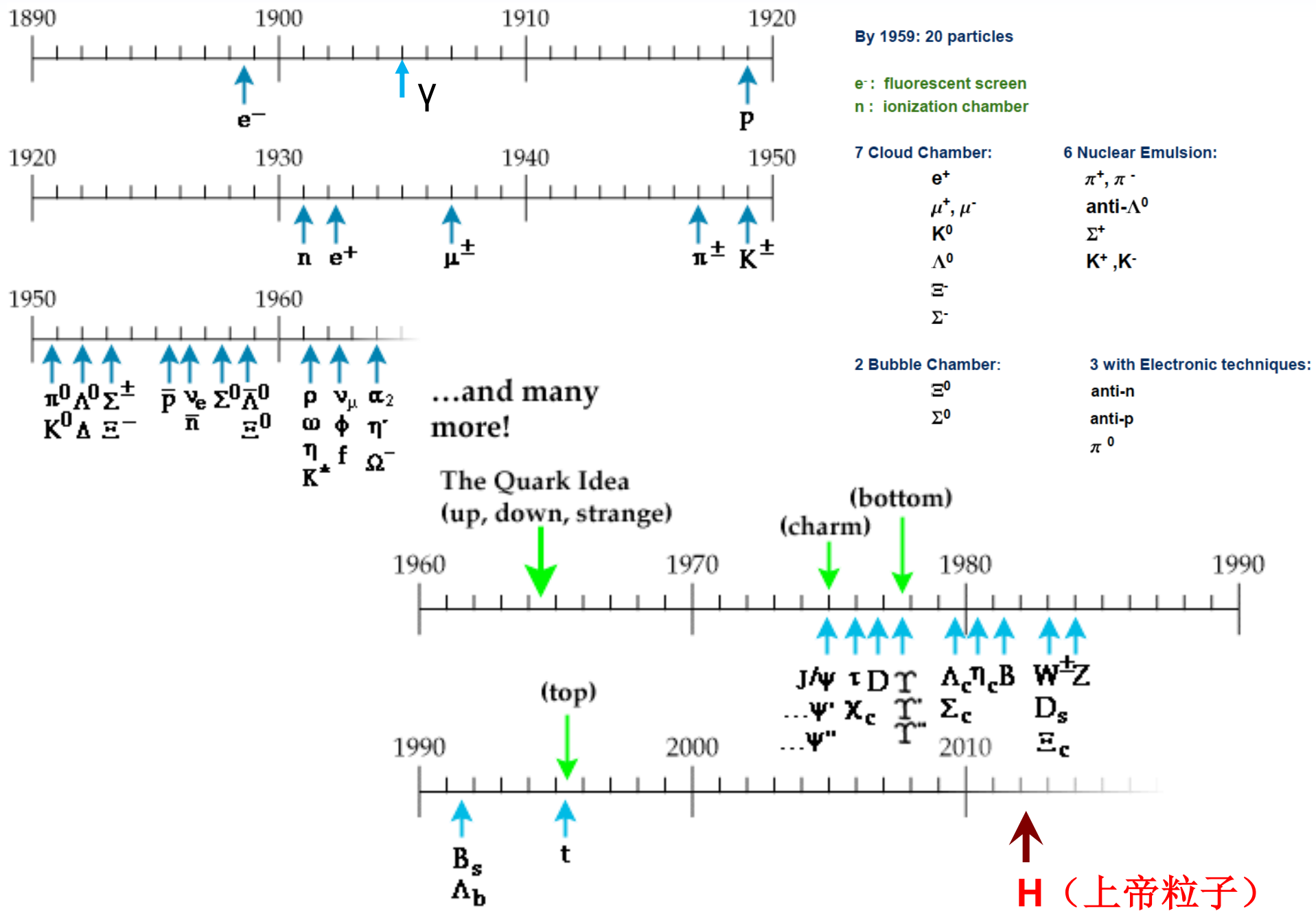


2027年?



2012年

# 粒子发现史



# 也是探测技术的发展史

## — 获诺奖的探测器大师



**C. T. R. Wilson** 发明通过蒸气凝结观察带电粒子径迹的方法和技术-云室 (1927年)



**P. M. S. Blackett** 发展云室技术，在核物理与宇宙线研究中做出突出贡献 (1948年)



**C. F. Powell** 发明乳胶成像技术，在宇宙线中发现 $\pi$ 介子 (1950年)



**D. A. Glaser** 发明气泡室 (1960年)



**L. W. Alvarez** 发展氢气泡室及数据处理技术，发现大量共振态 (1968年)

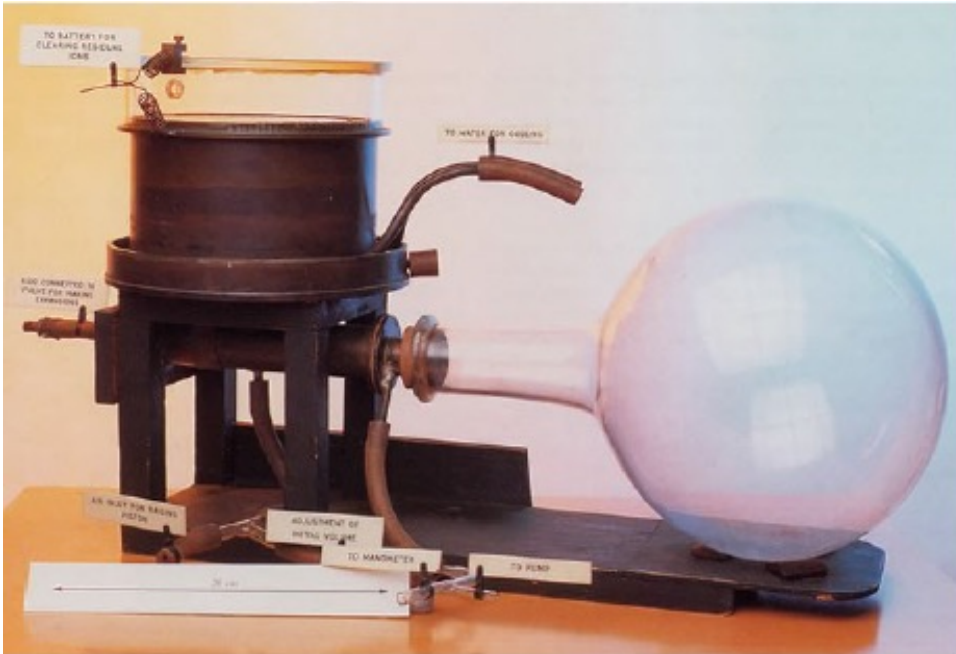


**G. Charpak** 发明多丝正比室并发展气体丝室技术 (1992年)





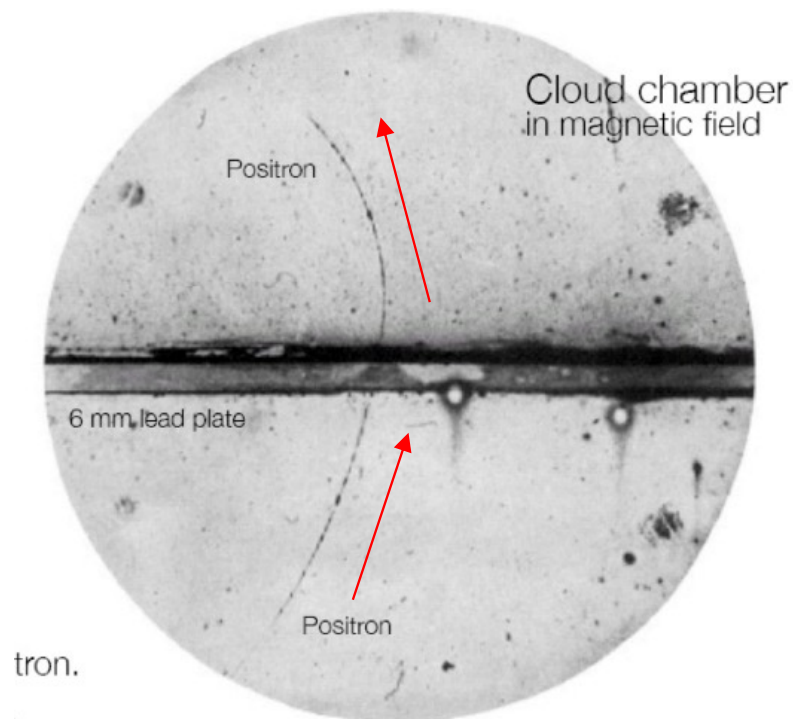
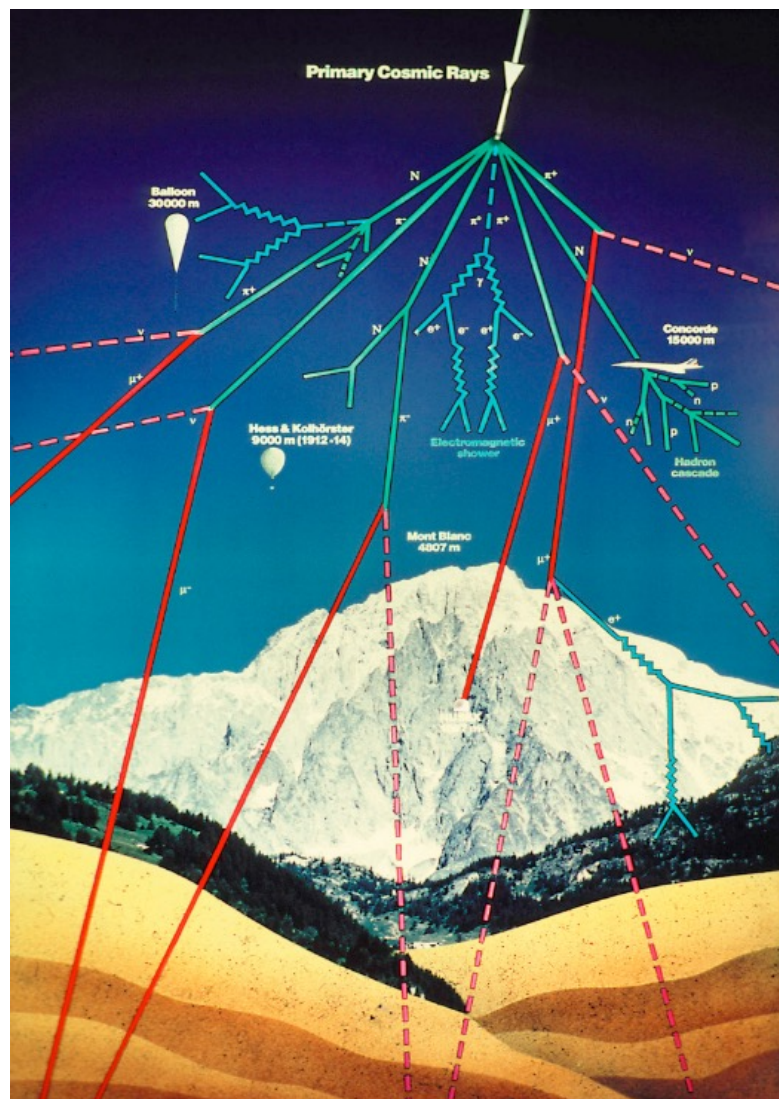
# 云室



- 云室含有过饱和蒸汽
  - 带电粒子在蒸汽中产生电离
  - 电离产生的离子成为凝结核，其周围形成水雾
  - 沿带电粒子的径迹上将留下一连串水雾
- 如果加有磁场，正负带电粒子将沿不同方向偏转

# 正电子的发现

- Carl David Anderson于1933年在宇宙线中发现正电子，并因此获1936年度诺贝尔奖。

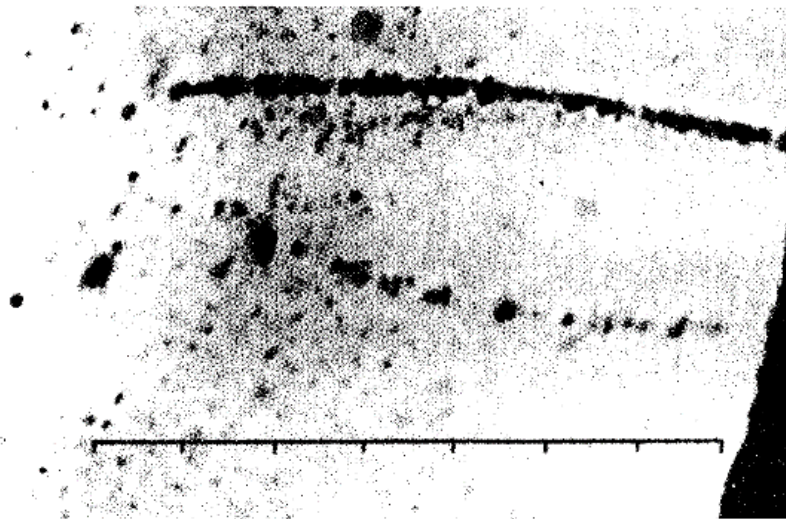


- 云室直径15cm, 15000 Gauss磁场.
- 一个63 MeV的正电子通过一个 6mm厚的铅板, 离开时能量为 23MeV.
- 损失能量和穿行特点与电子相符, 但电荷相反



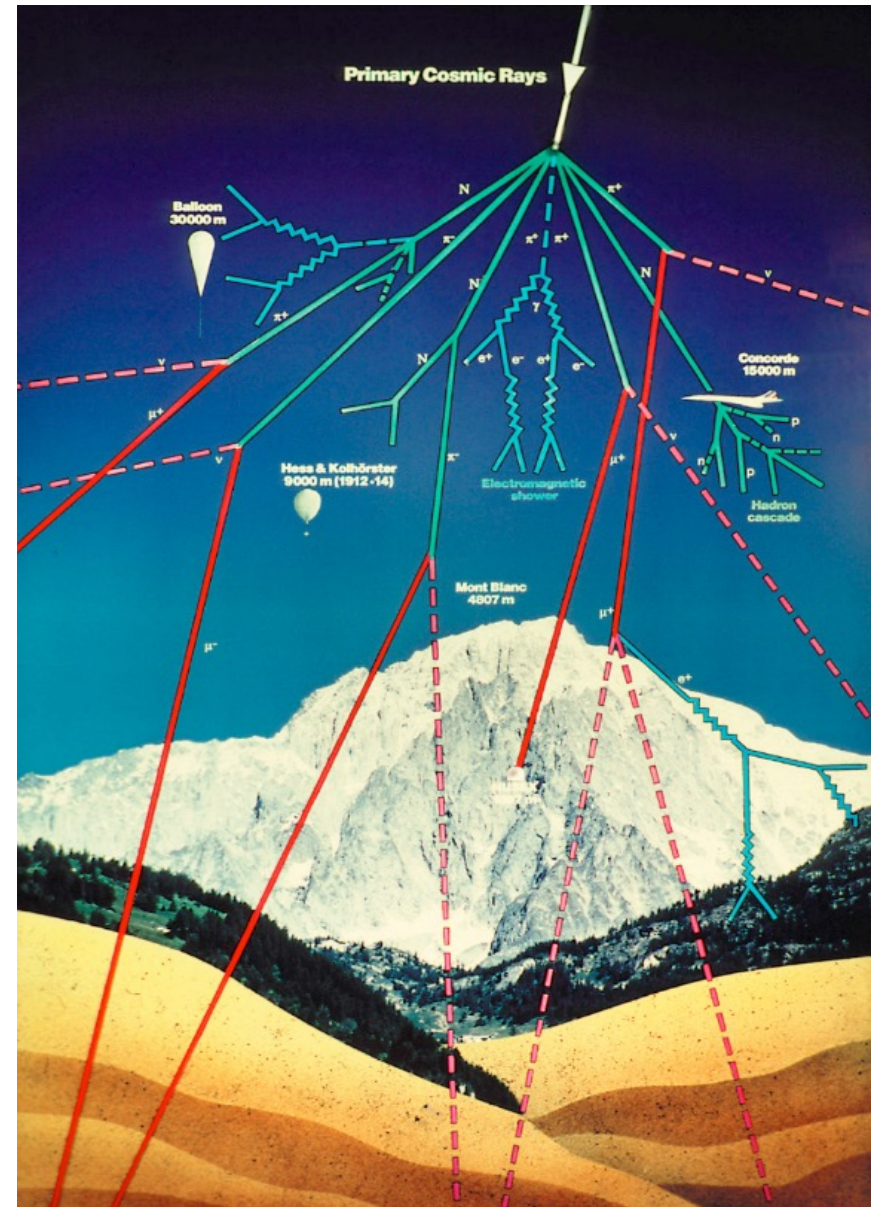
# $\mu$ 子的发现

- Carl David Anderson 和 Seth Henry Neddermeyer 于 1936 年用云室在宇宙线中发现  $\mu$  子



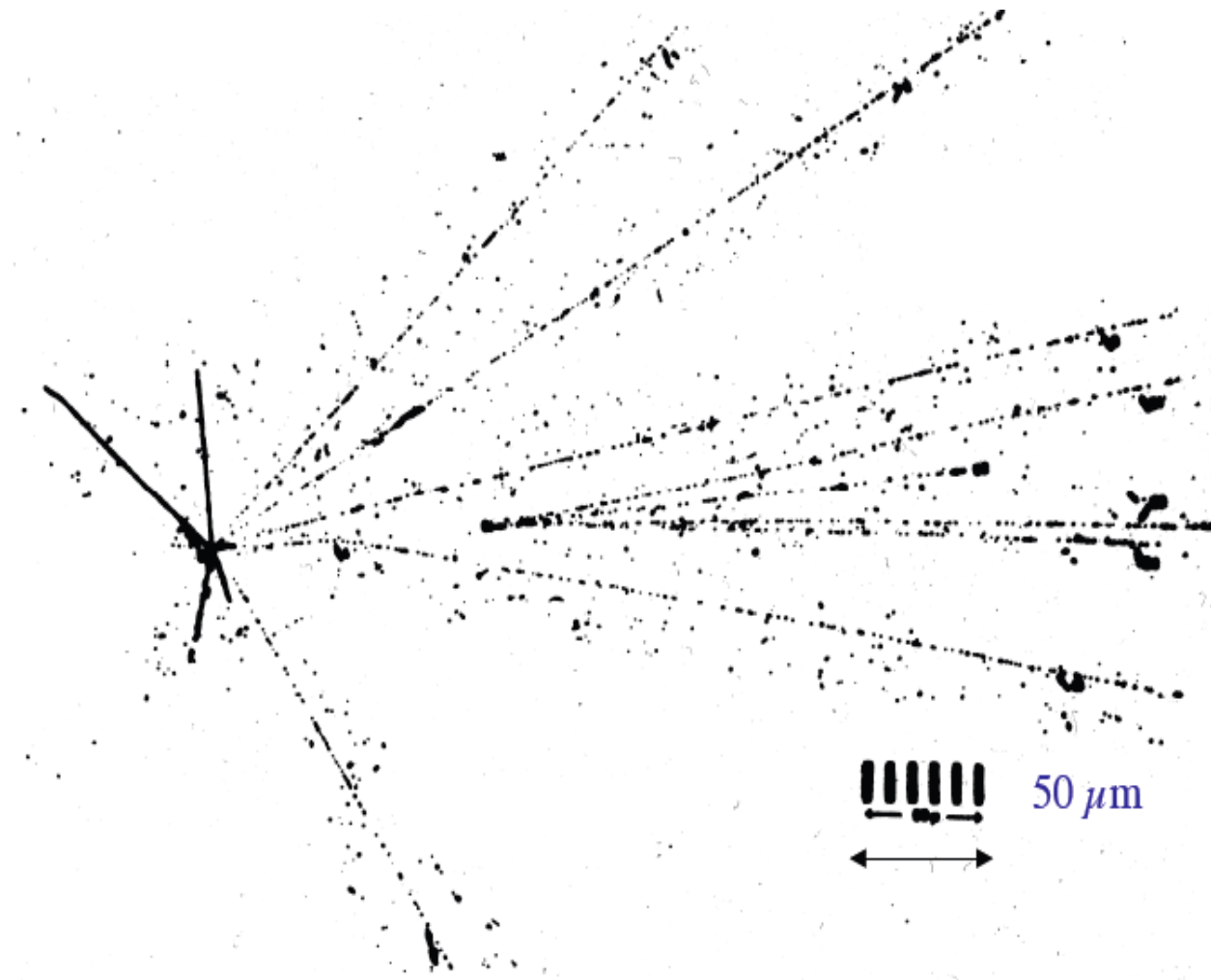
"The other double trace of the same type (figure 5) shows closely together the thin trace of an electron of 37 MeV, and a much more strongly ionizing positive particle with a much larger bending radius. The nature of this particle is unknown; for a proton it does not ionize enough and for a positive electron the ionization is too strong. The present double trace is probably a segment from a "shower" of particles as they have been observed by Blackett and Occhialini, i.e. the result of a nuclear explosion".

Kunze, P., Z. Phys. 83, (1933) 1





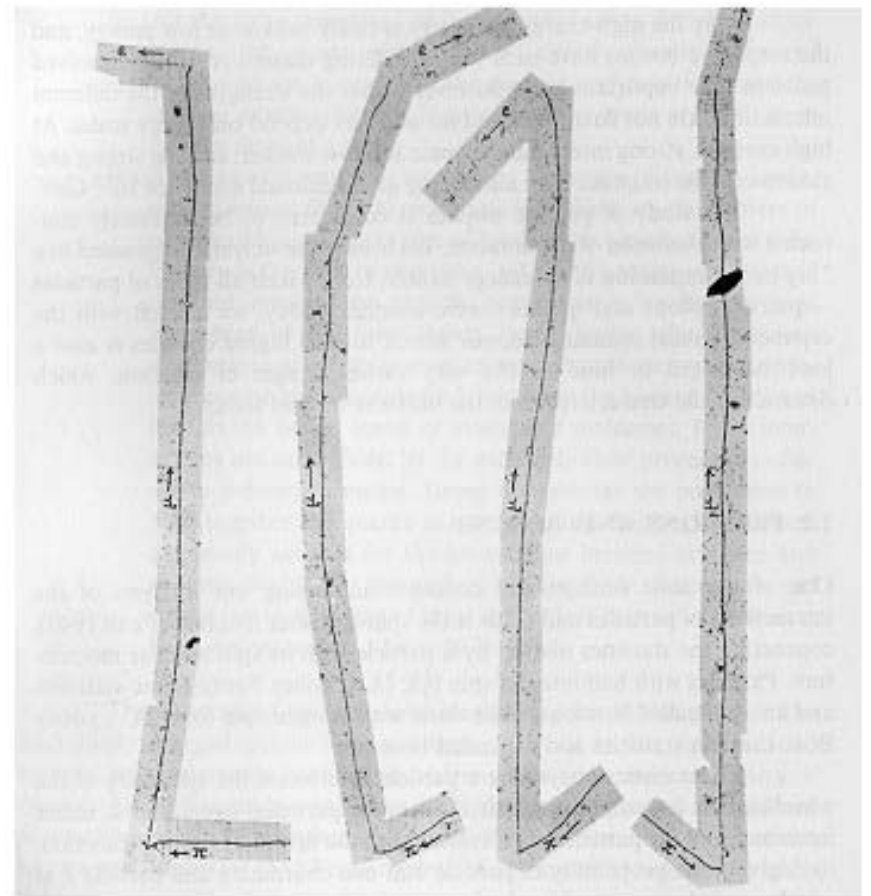
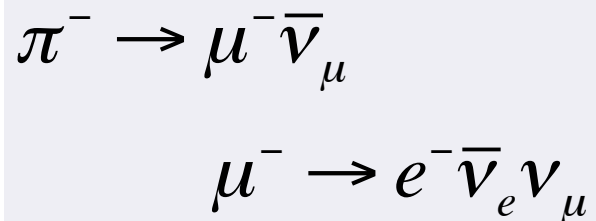
# 核乳胶成像



AgBr晶粒的使用可获得微米量级的位置分辨

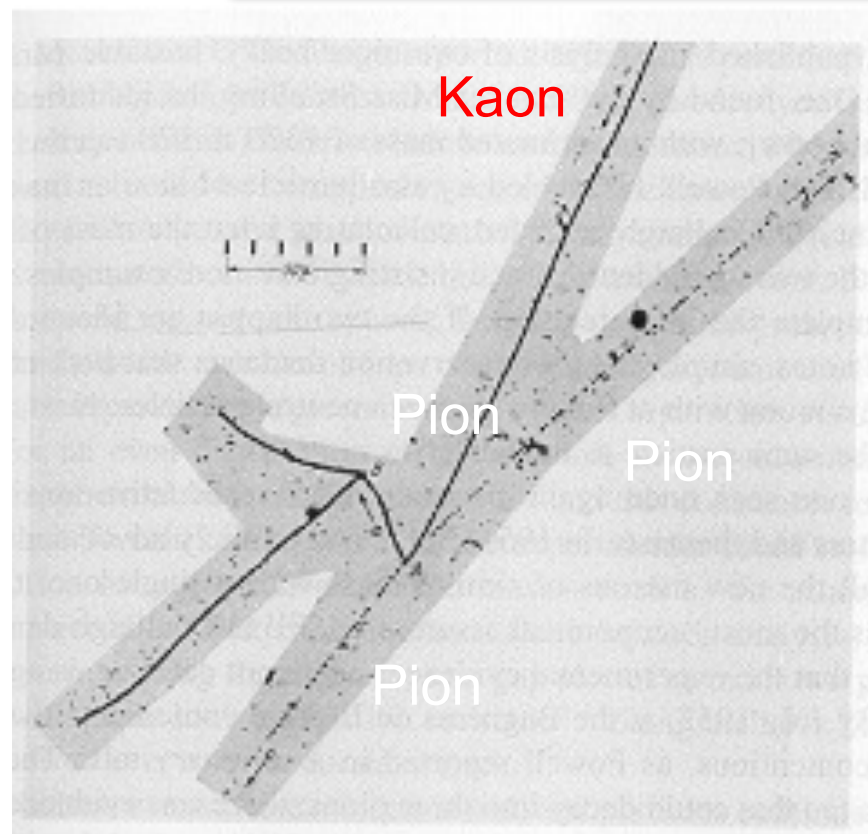
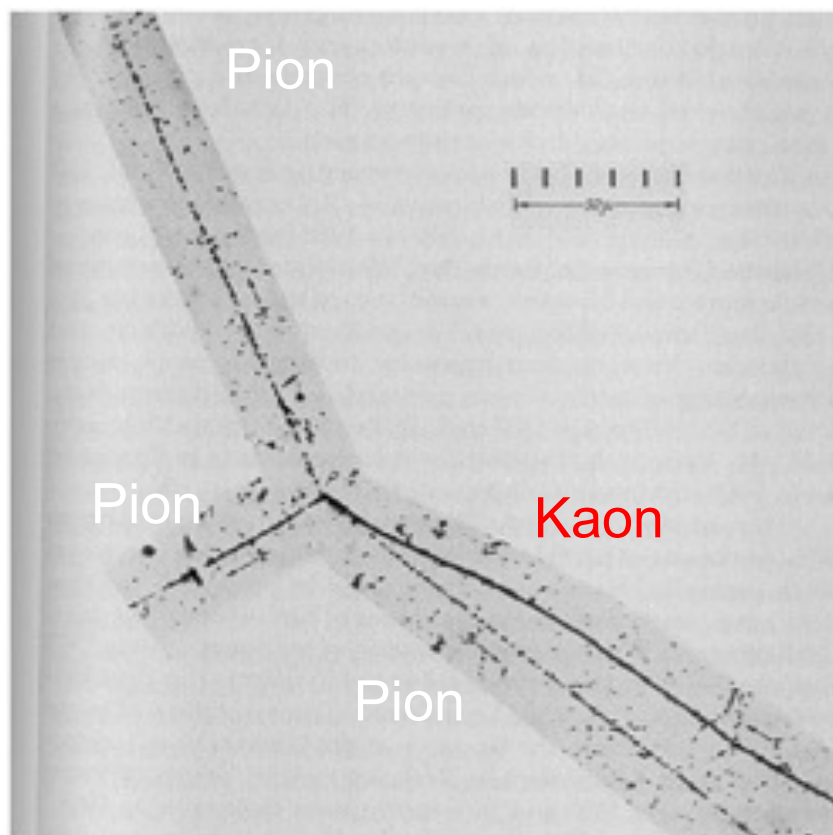
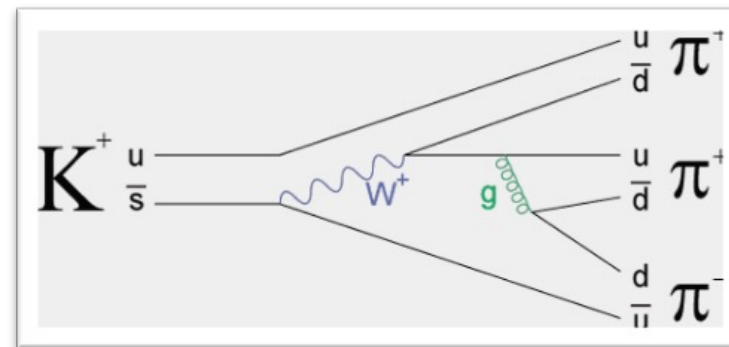
# $\pi$ 介子的发现

- Cecil Frank Powell 等人于1947年利用核乳胶在宇宙线中发现了  $\pi$ 介子，1950年度诺贝尔奖
- 核乳胶暴露于宇宙线中，发现某种粒子衰变到  $\mu$ 子和不可见的同伴。
- 确定的  $\mu$ 子衰变长度表明这是一个两体衰变。



# K介子的发现

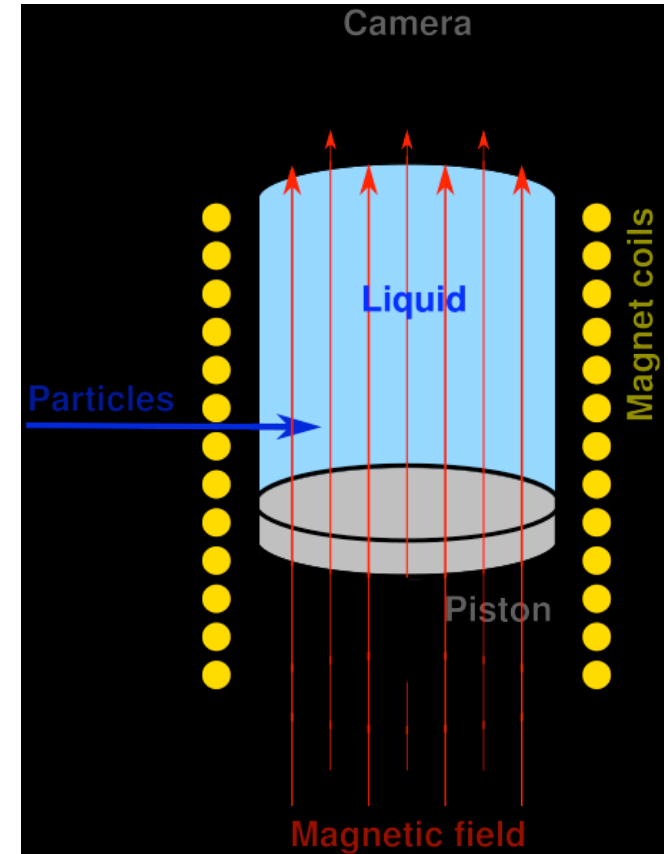
- K介子到3个π介子的衰变于1949年用核乳胶首次发现。





# 气泡室

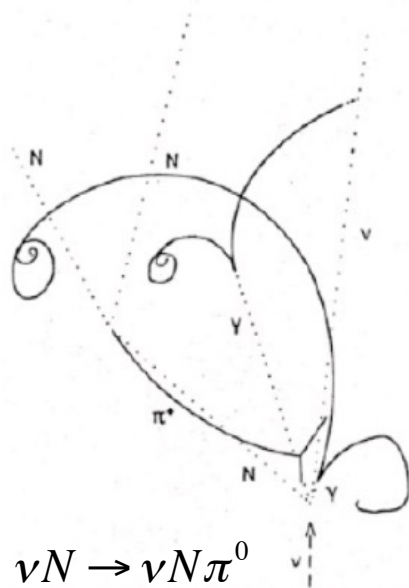
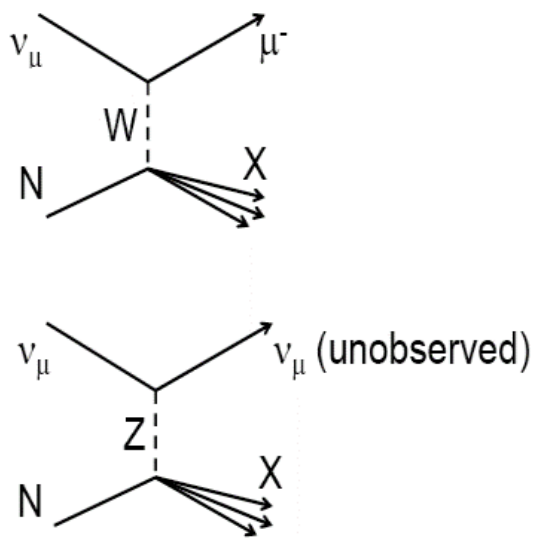
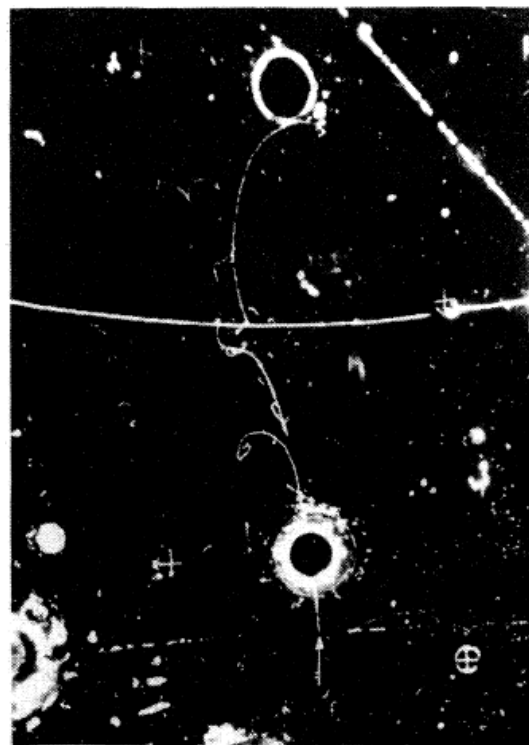
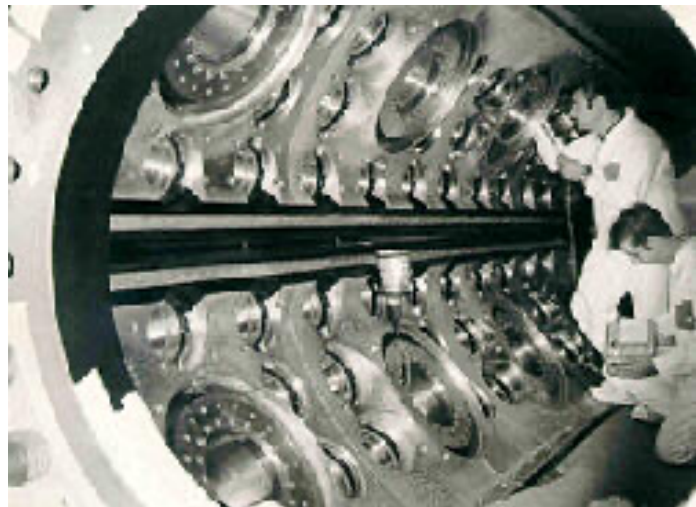
- Donald Arthur Glaser 于1952年发明，获1960年诺贝尔奖。
- 气泡室充满了超热的透明液体，带电粒子通过会引起沸腾，沿着其径迹上产生气泡。
- 气泡室的尺寸自问世起迅速增大：
  - 1954: 2.5' ' (6.4 cm)
  - 1954: 4' ' (10 cm)
  - 1956: 10' ' (25 cm)
  - 1959: 72' ' (183 cm)
  - 1963: 80' ' (203 cm)
  - 1973: 370 cm



- 据说 Glaser 是从一杯啤酒中的泡泡中获得启发，并且他在早期实验中使用啤酒填充模型气泡室。



# 中性流的发现



- Gargamelle, 一个非常大的液氟气泡室，在巴黎 Ecole Polytechnique 建造, 1970年运到CERN。
- 直径2 m，长4m，填充20大气压的氟，磁场2 T。
- Gargamelle 在 1973 年发现了中性流过程。

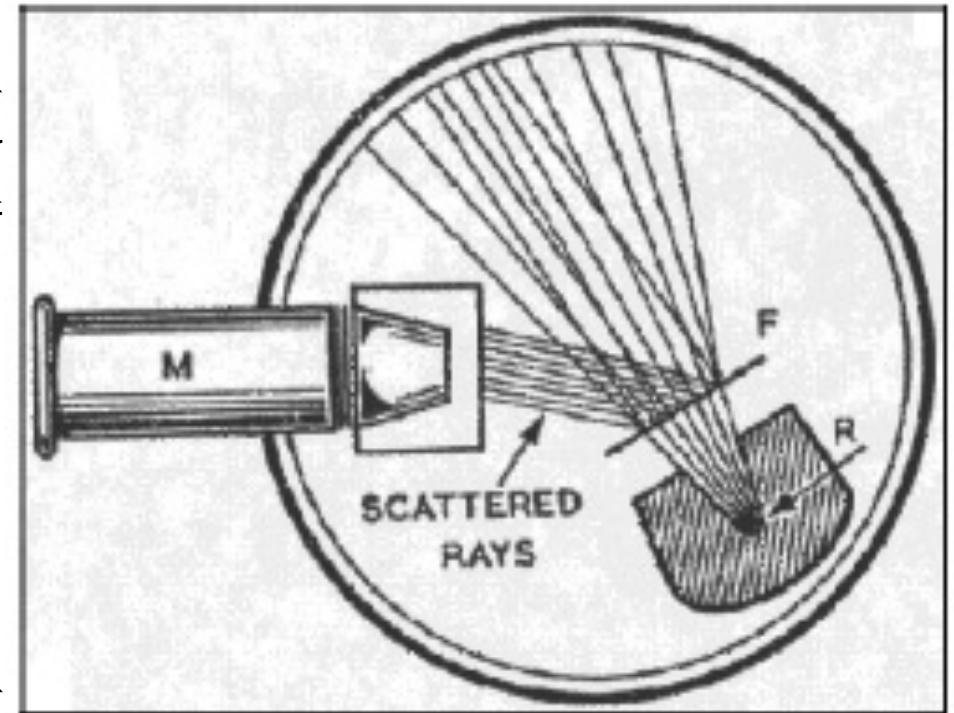


# 探测器的“现代化”

■ “电子化、逻辑化”的探测器逐渐取代了前面的“直观”探测器

- 闪烁计数器
- 火花计数器
- 多丝正比室
- ...

■ 使用这种探测器，粒子不再被直接地“看到”，而是通常有光或电信号产生，并有符合触发等控制。通过探测器输出信息可以间接地“重现出”粒子。

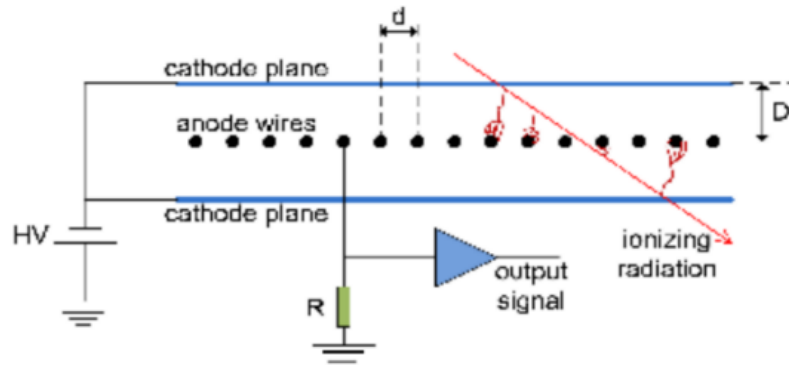


闪烁屏探测带电粒子:

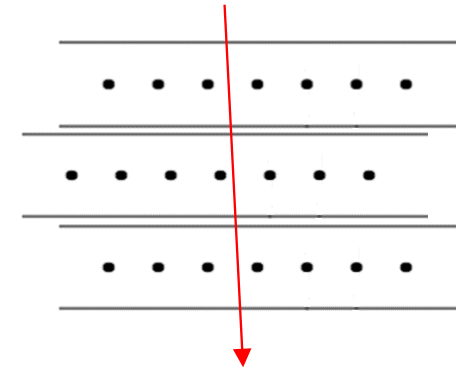
■ 1911 年的 Rutherford 实验:

- ZnS 闪烁屏作为探测器
- 如果一个  $\alpha$  粒子击中屏幕, 会有闪烁光发出并被探测到

# 多丝正比室



多丝正比室



多丝正比室探测粒子径迹

G. Charpak, 1968年发明多丝正比室，1992年获诺贝尔奖。  
粒子探测技术发展中的一次革命，开启了现代高能物理实验的大门

- 一个带电粒子穿过探测器工作气体，经电离产生电子离子对。
- 金属丝加高压，每根丝工作在正比模式。
- 电离电子向丝漂移，并在丝附近产生雪崩放大。
- 雪崩电荷在丝上感应出信号，每根丝的信号单独读出。

广泛地运用到现代核与粒子物理实验中作为径迹探测器。

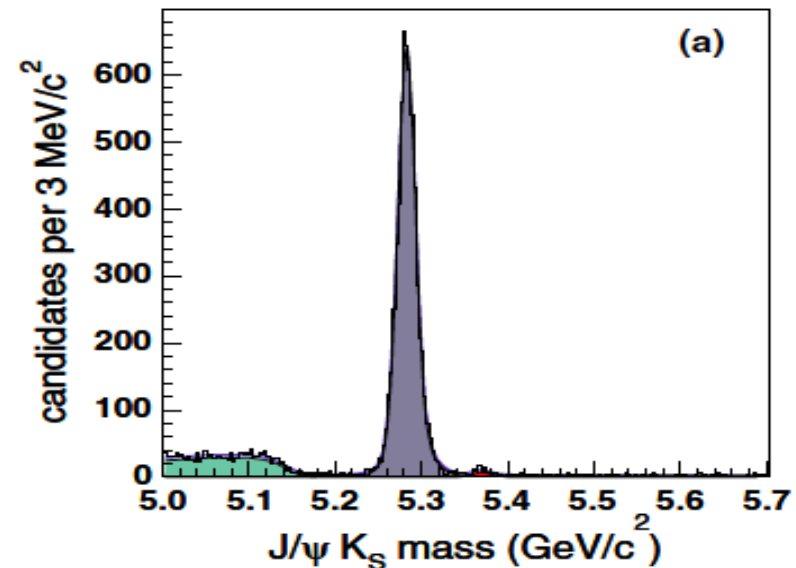
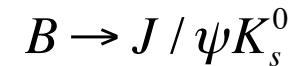
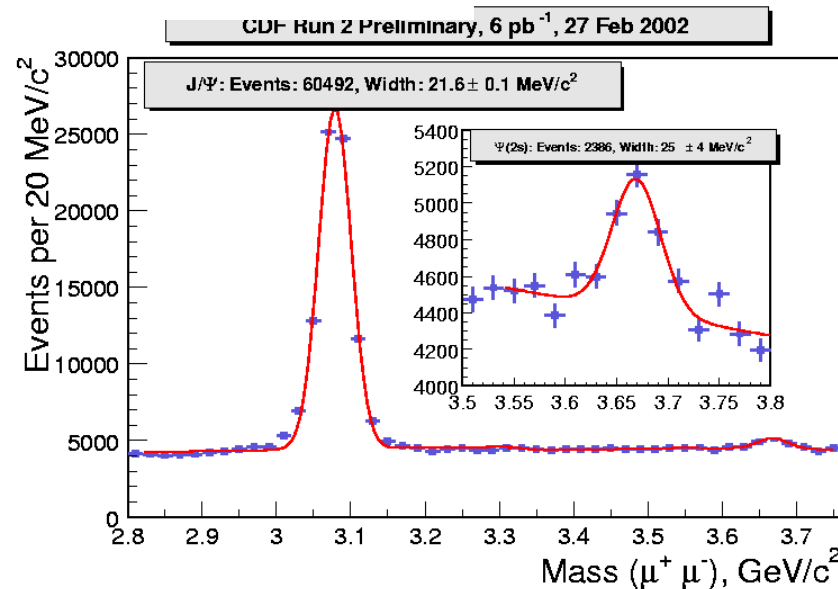
# 不稳定粒子的重建

$$m_{inv,x}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2$$

$$E_x = E_1 + E_2$$

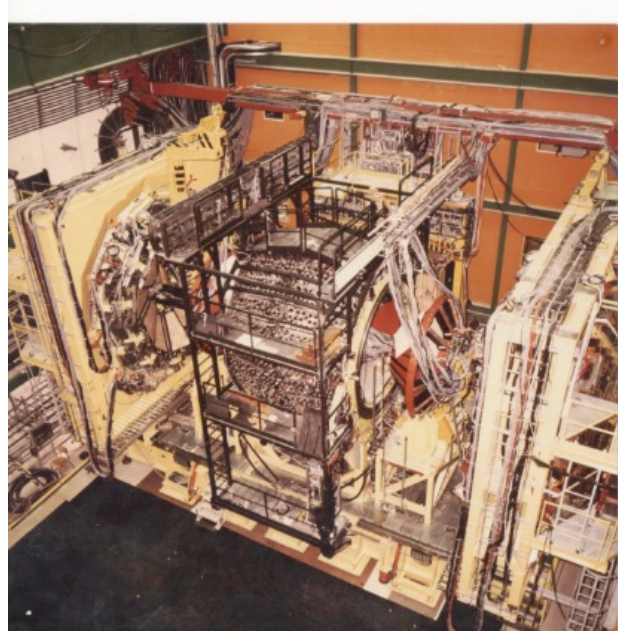
$$\vec{p}_x = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

通过探测不稳定粒子的衰变产物，重建不稳定粒子的属性。

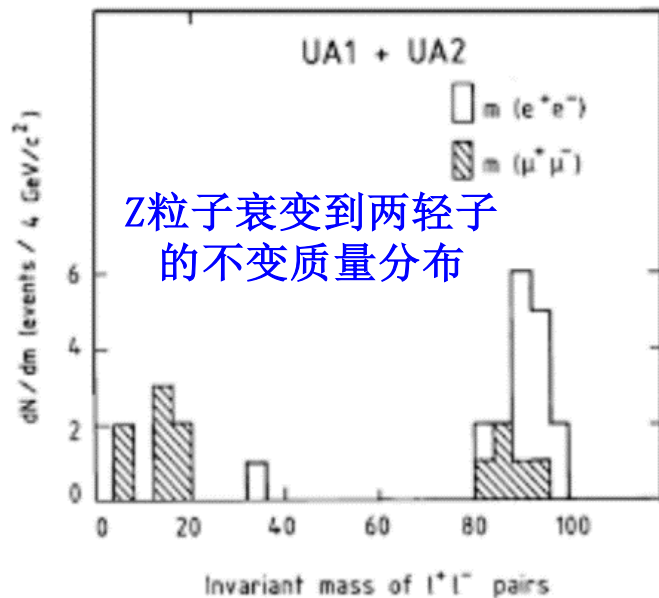
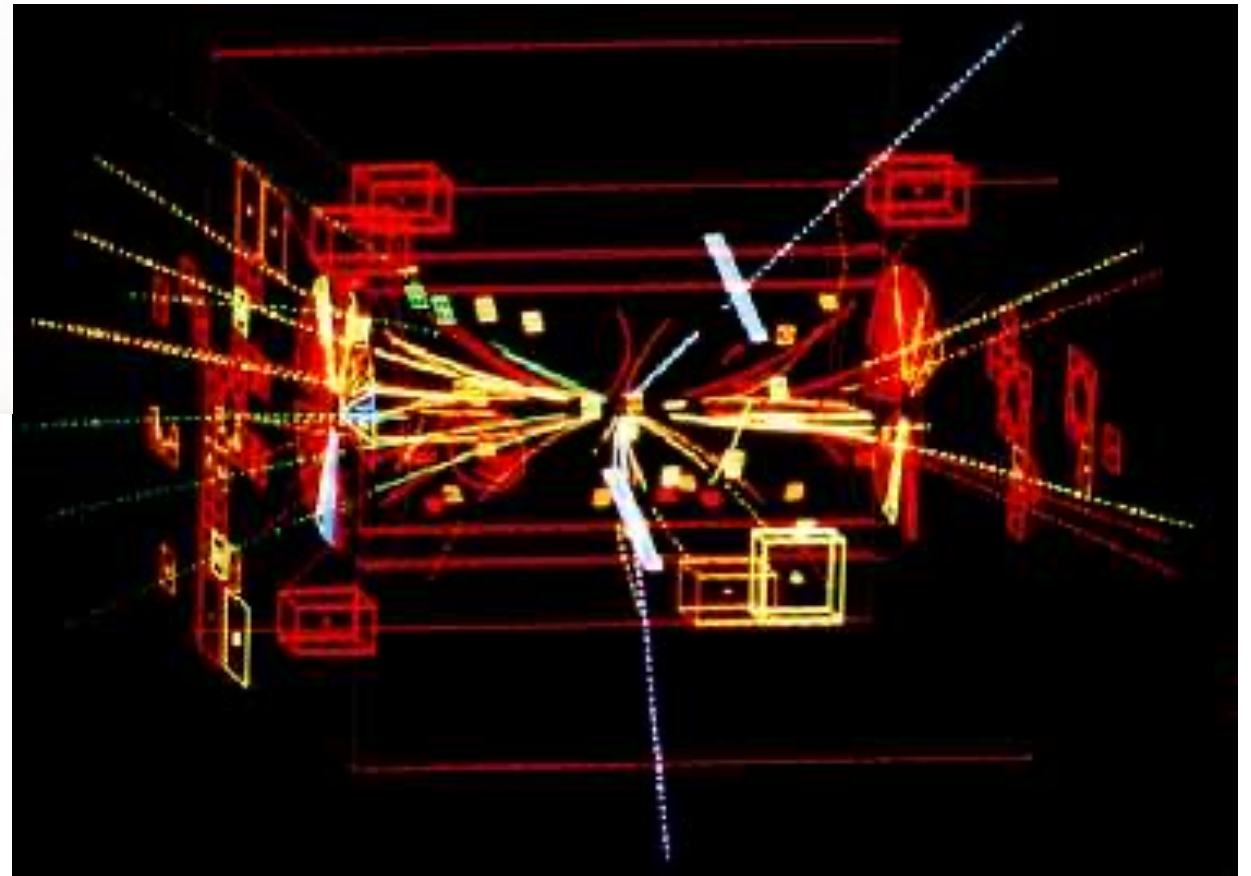


19

# 不稳定粒子的重建



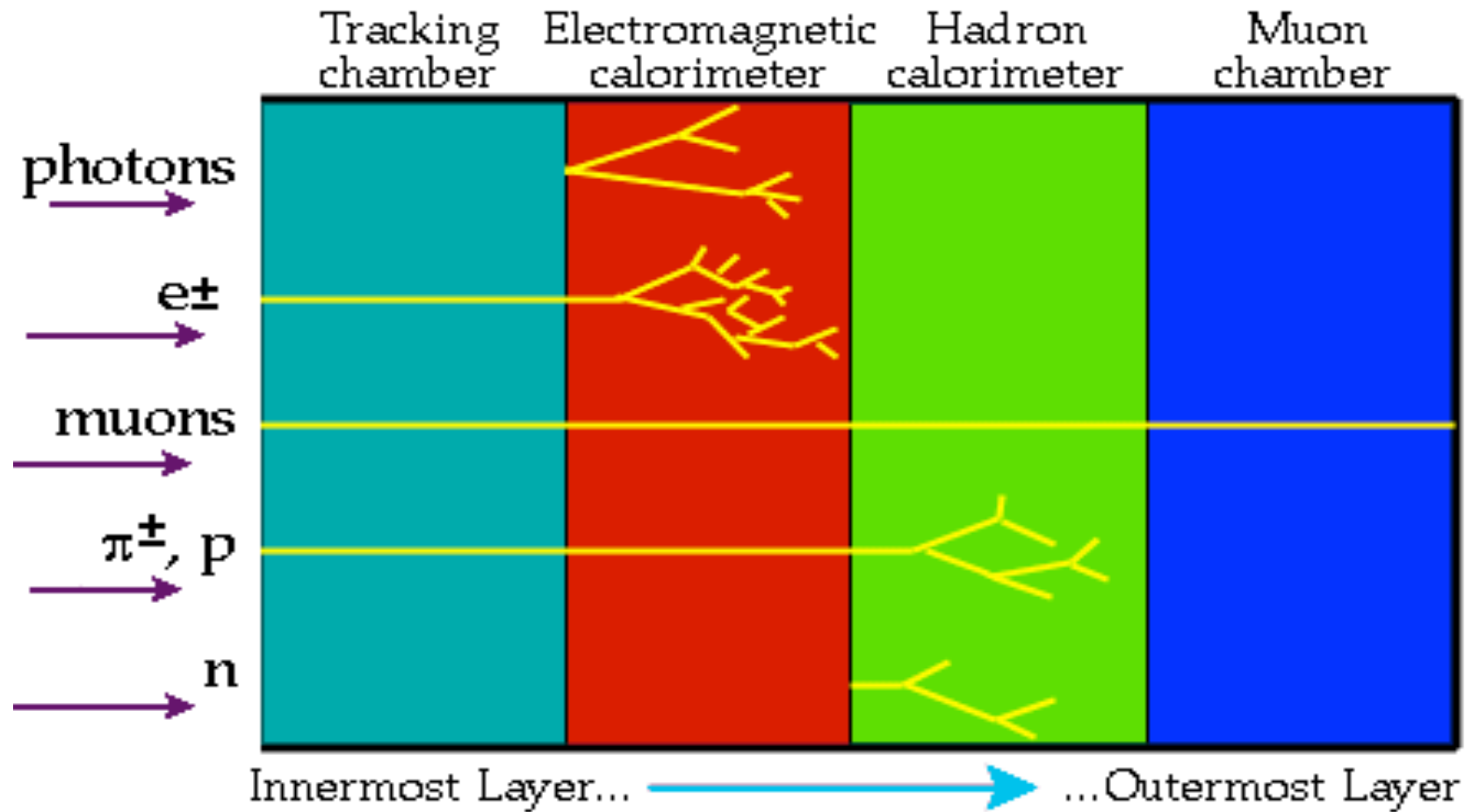
W 和 Z 粒子的发现, Rubbia, Van der Meer, 1983年  
1984年度诺贝尔奖



两条显示为白色的带电径迹展示了一个Z粒子衰变到正负电子对的情形。



# 多种粒子的测量与识别

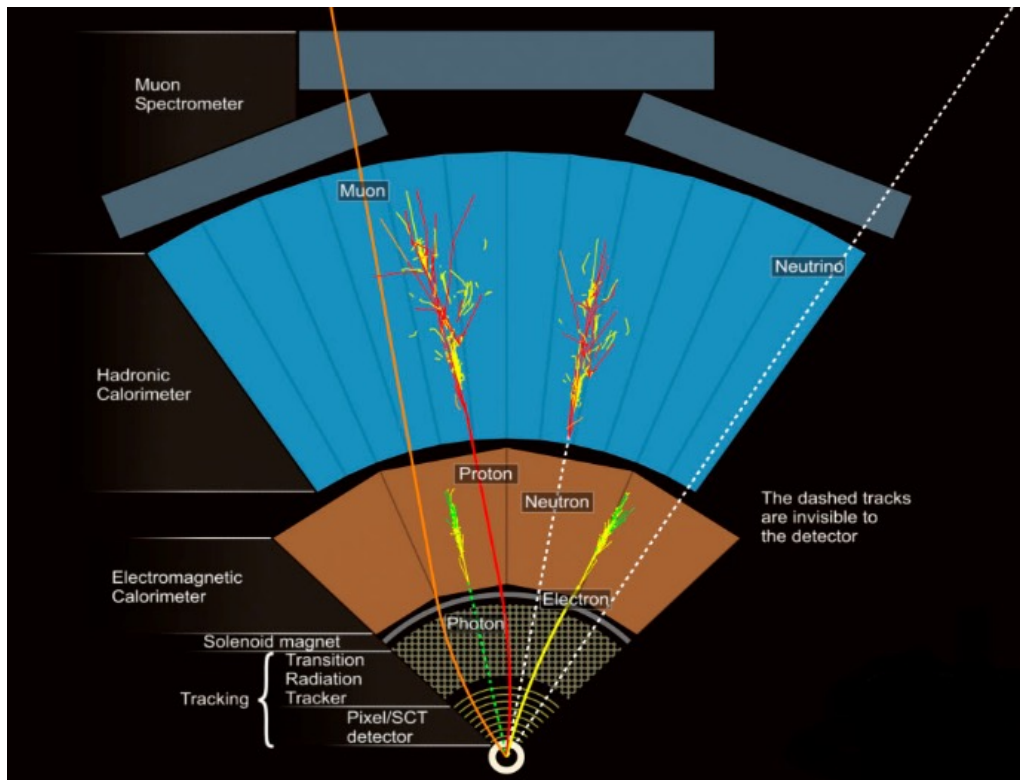


- 通过多个不同种类和功能探测器的组合才能实现多种粒子的测量和识别 → 需要有综合性探测系统 → 粒子探测谱仪

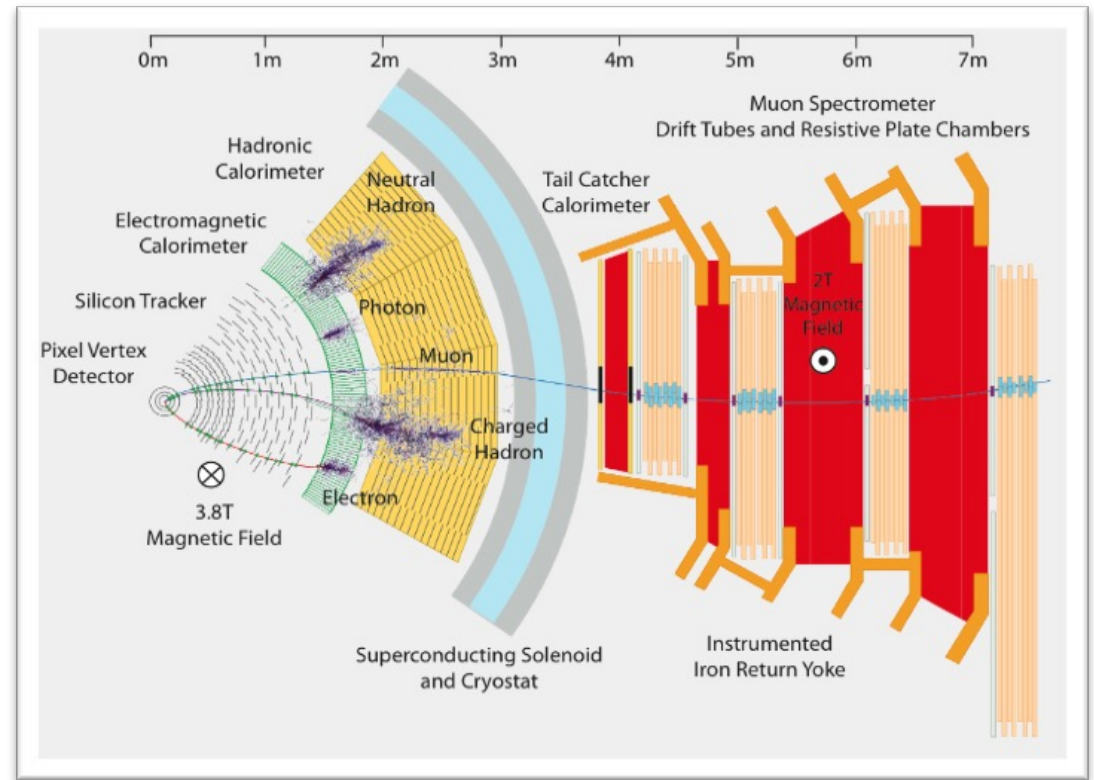
# 现代大型磁谱仪

— “上帝粒子” 的发现

## ATLAS探测器



## CMS探测器



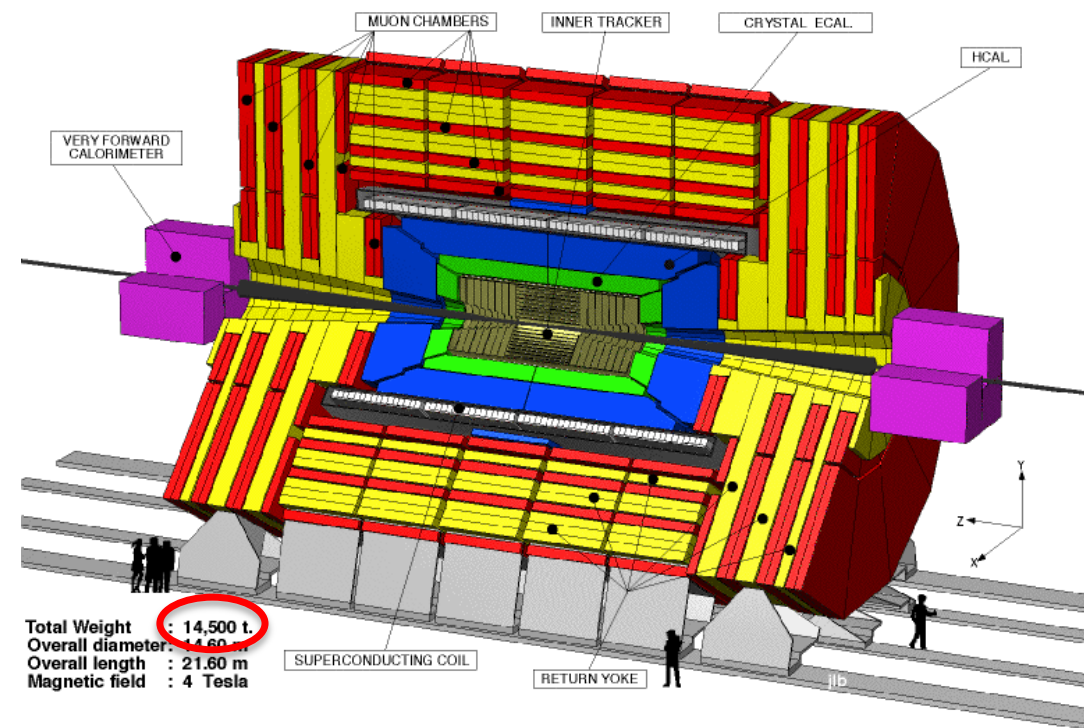
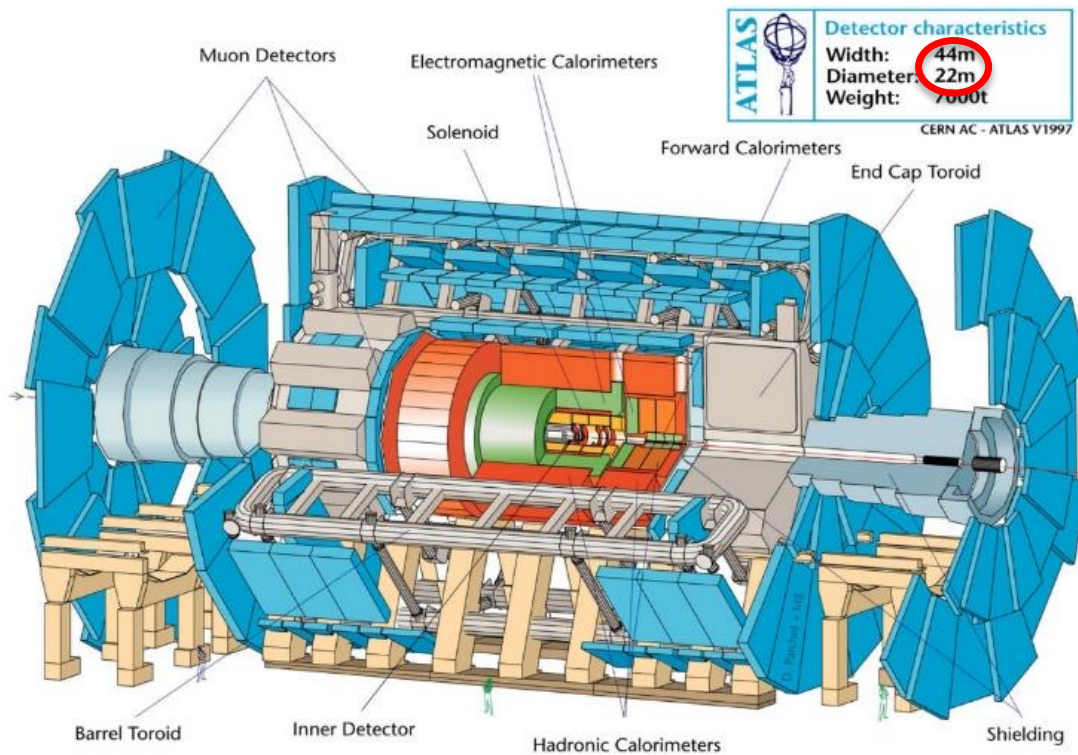
- 具有多重探测目标的大型综合精密探测系统
- 满足现代粒子物理实验的要求



- 2012年ATLAS和CMS同时发现Higgs粒子。
- 2013年度诺贝尔物理奖颁发给了发明Higgs理论机制的理论家。

# ATLAS 和 CMS

- ATLAS: 对撞实验中最大的探测器
- CMS: 对撞实验中最重的探测器





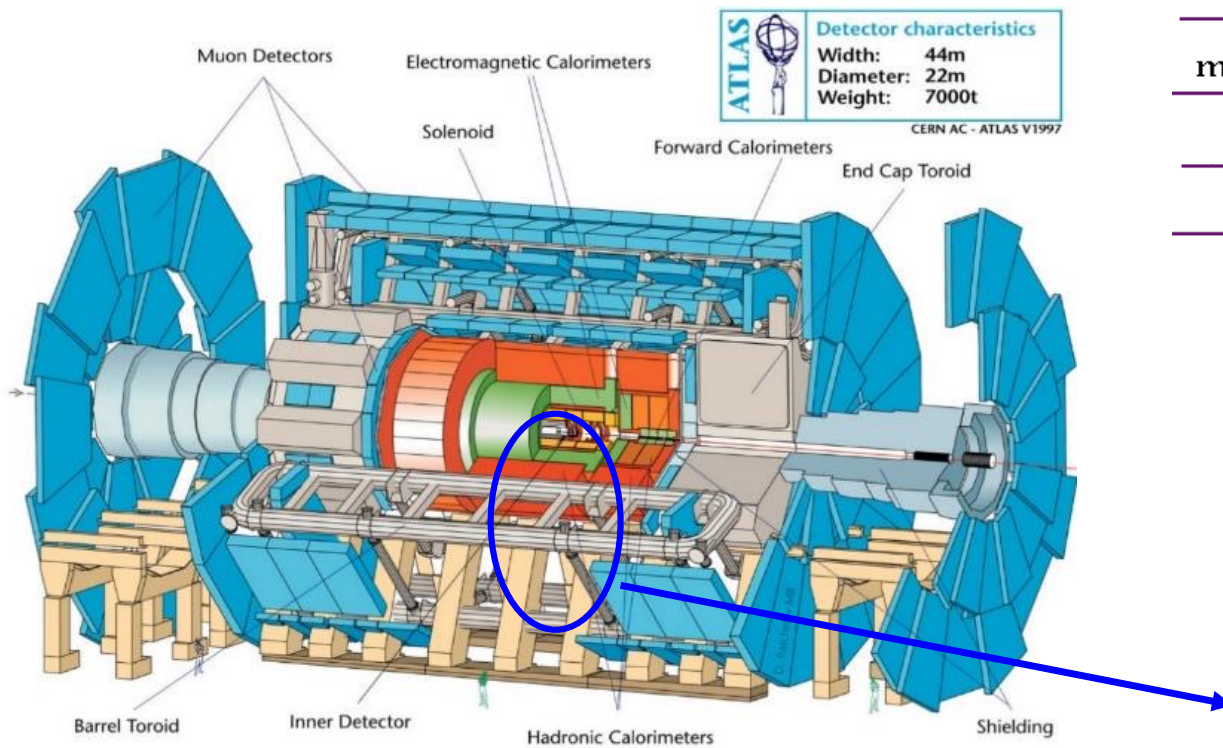
# ATLAS 和 CMS





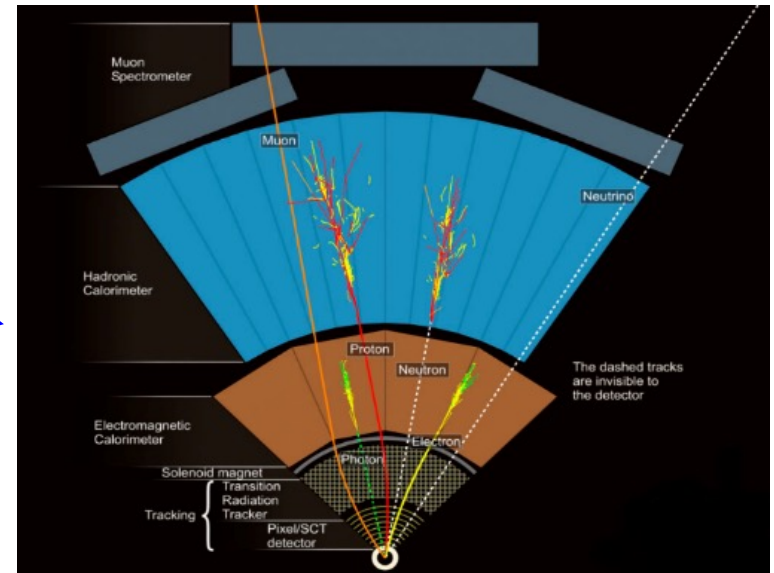
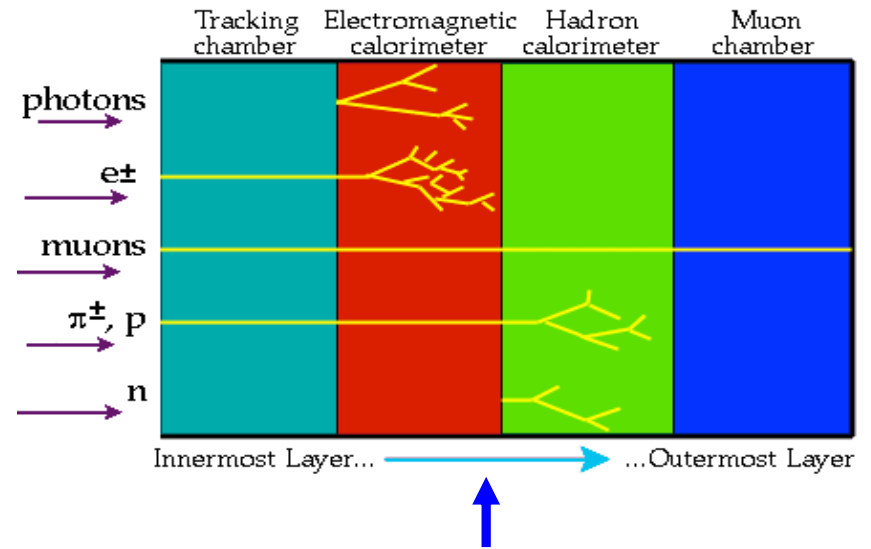
# 现代粒子探测系统原理再解

一个实际的探测器系统



**ATLAS** Detector characteristics  
 Width: 44m  
 Diameter: 22m  
 Weight: 7000t  
 CERN AC - ATLAS V1997

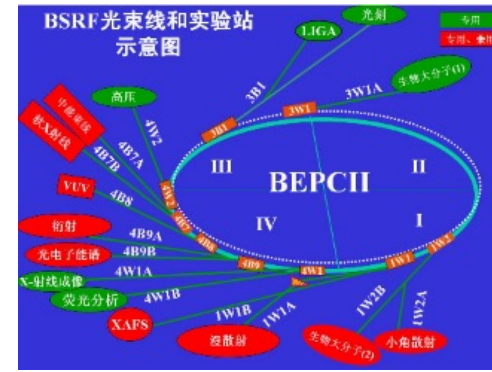
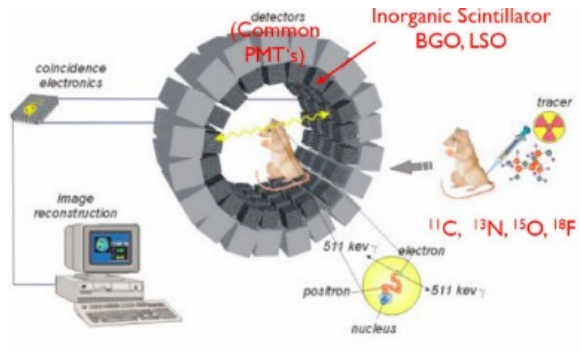
探测器系统工作原理



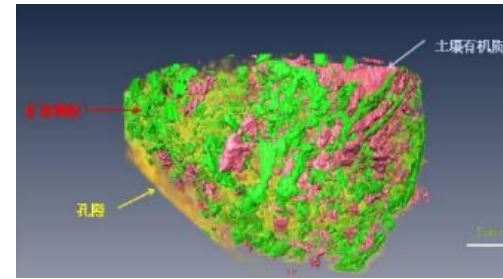
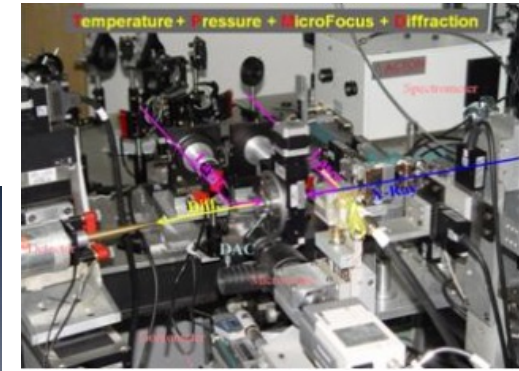
探测器系统截面示意图

# 粒子探测技术的广泛应用

## 医学成像



## 同步辐射装置



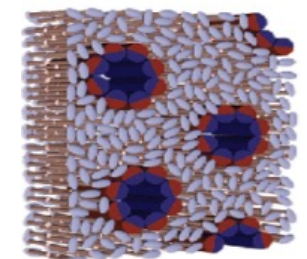
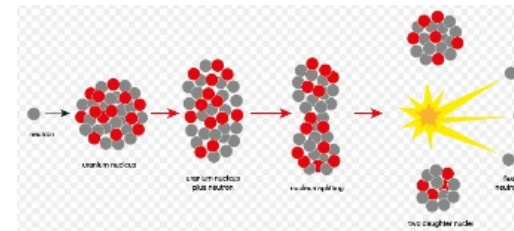
## 国土安全



## 工业探伤



## 散裂中子源



# 粒子探测的物理基础

粒子不能被直接观测，只有当它们与物质发生相互作用并转移能量时才能被探测到

- 带电粒子和物质的相互作用
- 光子和物质的相互作用
- 强子和物质的相互作用
- 高能粒子在物质中的簇射效应

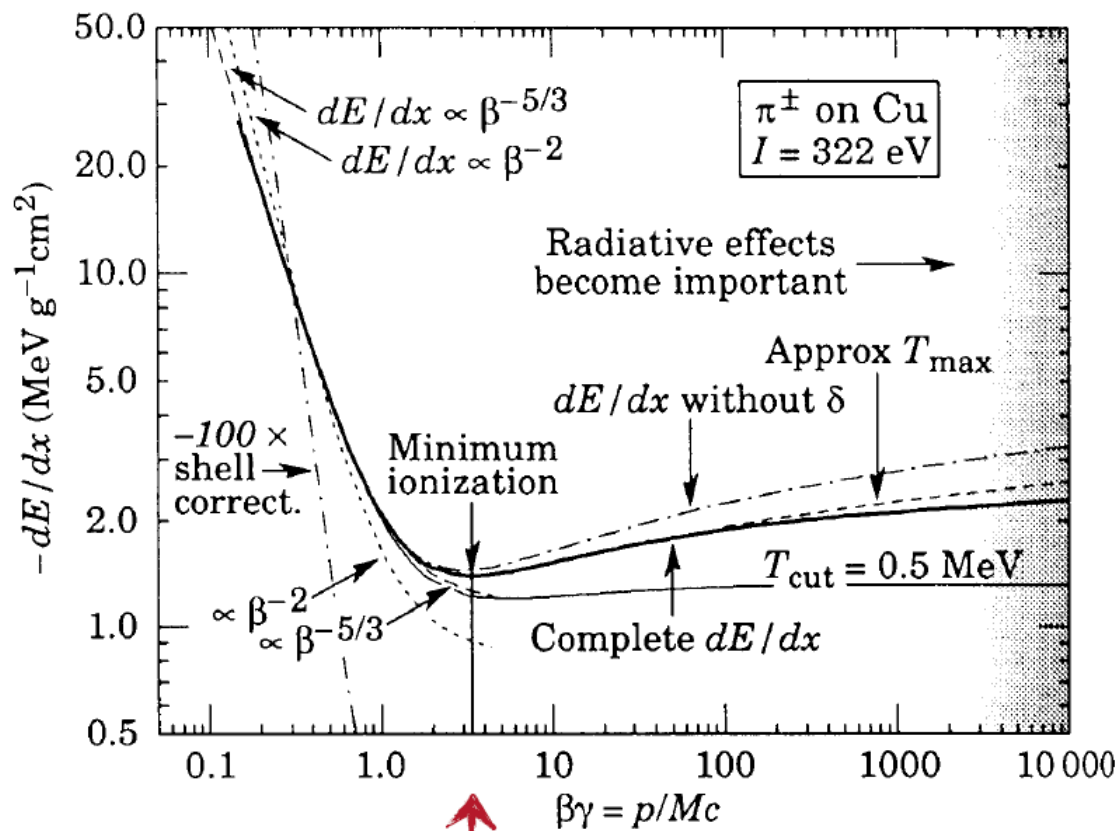
# 带电粒子和物质的相互作用

- **非弹性碰撞（导致带电粒子损失能量）**
  - 带电粒子与核外电子
    - **原子的电离和激发**（最重要的相互作用形式）
  - 带电粒子与原子核
    - 韧致辐射，电子对直接产生，光核作用（只对很高能量的入射粒子重要，并且后两者的贡献通常很小）
- **弹性碰撞（通常不会导致显著的能量损失）**
  - 带电粒子与核外电子（影响很小，通常忽略）
  - 带电粒子与原子核（卢瑟福散射）
    - 多次库仑散射
- **契伦科夫辐射,穿越辐射（能量损失很小）**

（仅限于与粒子探测相关并属于电磁相互作用范畴的各种具体相互作用）



# 非弹（带电粒子与核外电子）：电离能量损失



$\beta\gamma = 3-4$  最小电离

- $dE/dx$ 首先按速度平方反比下降,  $\sim 1/\beta^2$
- 在 $\beta\gamma=3-4$ 附近,  $dE/dx$ 达到最小, 称之为最小电离, 满足该条件的入射粒子称之为最小电离粒子
- 然后 $dE/dx$ 大致随 $\ln(\beta\gamma)^2$ 抬升, 称之为相对论上升, 起因是入射粒子电场随速度增加逐渐集中到垂直平面, 场强增加。
- 当 $\beta\gamma$ 非常大的时候,  $dE/dx$ 区域饱和, 与介质极化从而屏蔽入射粒子电场有关, 此效应与介质密度相关, 称之为密度效应。

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

# 电离能损的统计涨落：朗道分布

$$L(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}(\lambda + e^{-\lambda})\right\}$$

与最概然能损之间的偏差

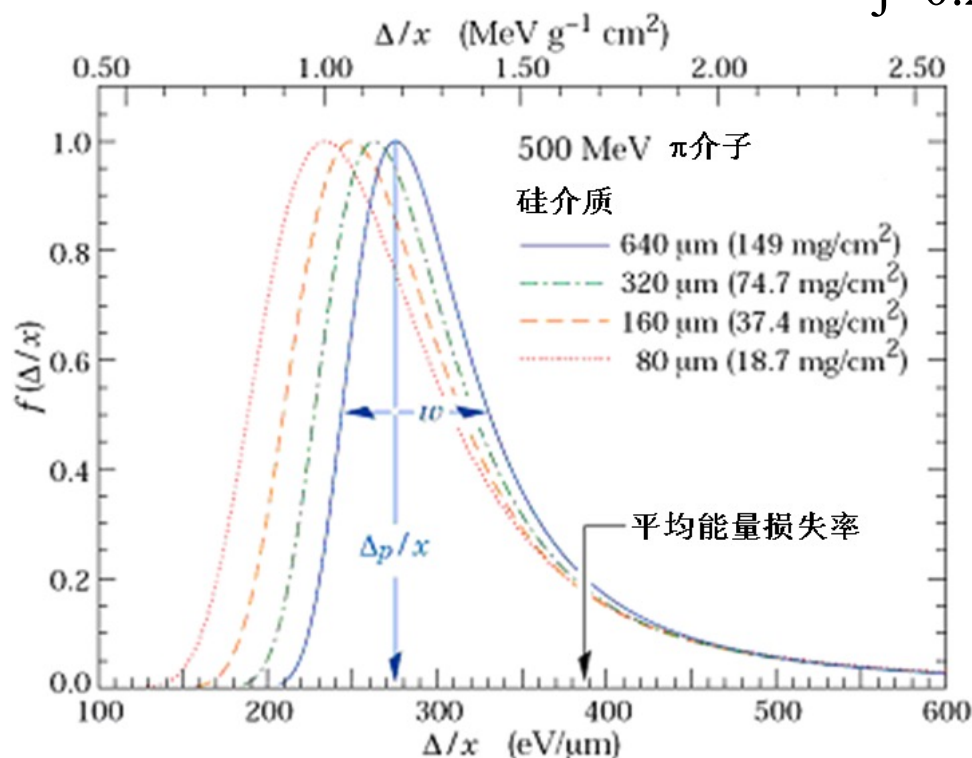
实际能损  $\rightarrow$   $\lambda$   $\leftarrow$  最概然能损

$$\lambda = \frac{\Delta E - \Delta p}{\xi}$$

能损分布中对应最大概率处的能损

$$\Delta p = \xi \left[ \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} + \ln \frac{\xi}{I} + j - \beta^2 - \delta \right]$$

$j=0.2$ ,  $\xi=(K/2)z^2(Z/A)(x/\beta^2)\text{MeV}$ ,  $x$ 单位 $\text{g}/\text{cm}^2$



• 薄层吸收体中能量损失统计涨落很大！

• 这种涨落与大能量转移散射过程有关，入射粒子有可能在单次电离过程中将相当大的能量传递给介质原子中的电子，以至于这种电子有足够能量产生次级电离过程 -  $\delta$ 电子。

# 非弹（带电粒子与原子核）：辐射能量损失

- **轫致辐射：**当入射带电粒子受介质原子尤其是原子核库仑场的作用，其运动速度的大小或方向发生改变，即发生加速度时，会发出电磁辐射，即轫致辐射，而同时入射粒子相应地损失能量。



$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{轫致}} = 4\alpha N_A \frac{Z(Z+1)}{A} z^2 \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2}\right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}}$$

- 轫致辐射能量损失正比入射粒子能量。入射粒子能量越高，轫致辐射效应越重要。
- 轫致辐射能量损失与原子序数平方成正比
- 轫致辐射能量损失反比于其质量的平方，电子的轫致辐射能量损失显著，重带电粒子辐射能量损失一般可以忽略。



# 辐射长度 $X_0$

将电子韧致辐射能量损失表达式改写为

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0}$$

:

则有  $\langle E \rangle = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}}$

此式定义了一个新的物理量 $X_0$ ，称为辐射长度，表示一个高能电子通过韧致辐射能量损失到原始能量的1/e时在介质中所经过的平均路程。

对比电子韧致辐射能量损失公式，可得：

$$X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z(Z+1)r_e^2 \ln(183/Z^{1/3})} [g/cm^2]$$

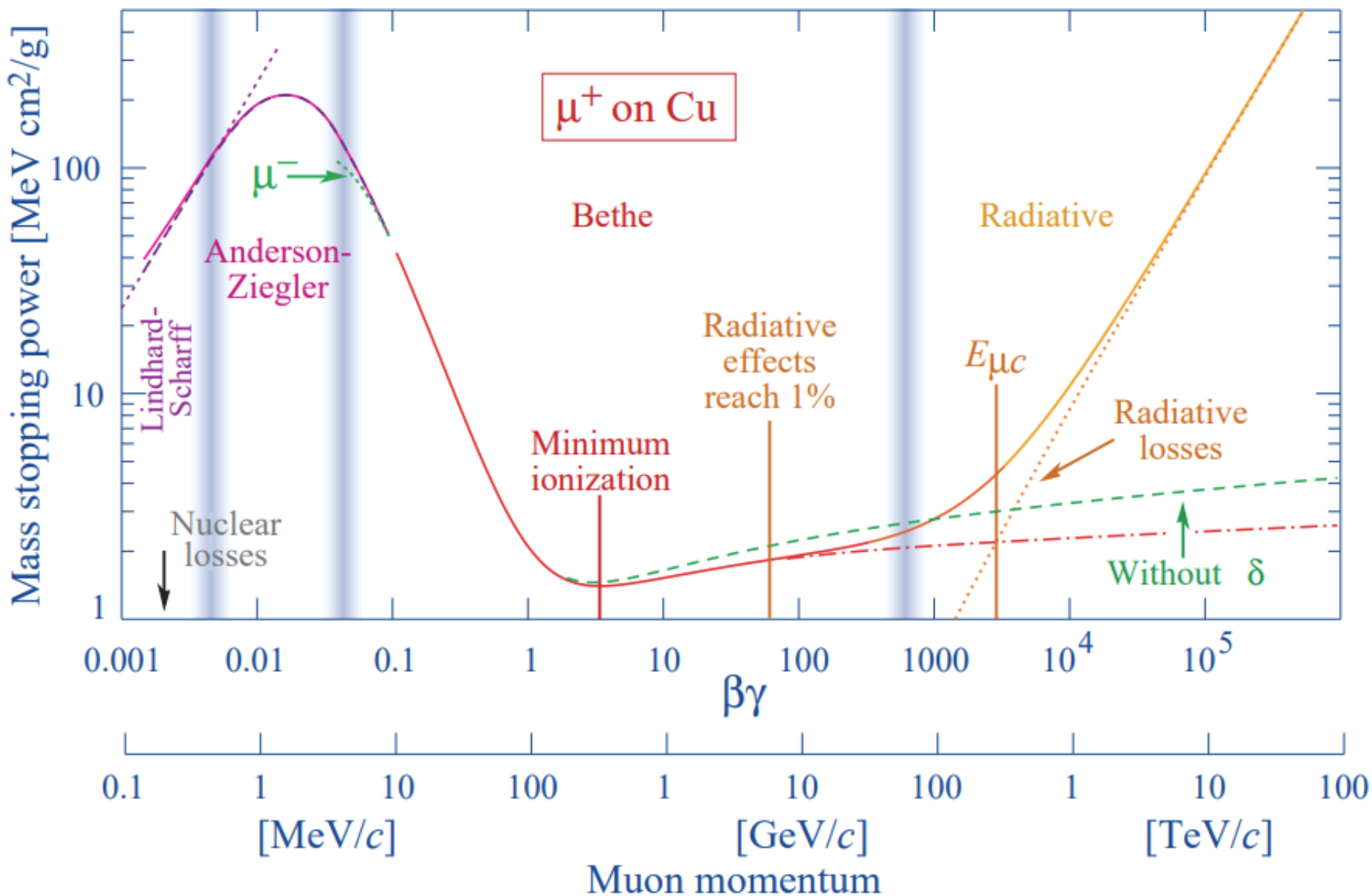
考虑更多因素后，估计辐射长度的一个常用经验公式是

:

$$X_0 = \frac{716.4A}{Z(Z+1)\ln(287/\sqrt{Z})} [g/cm^2]$$

辐射长度是表征物质引起辐射能量损失能力的一个重要物理量，取决于物质本身的性质。

# 能量损失（电离+辐射）的全貌

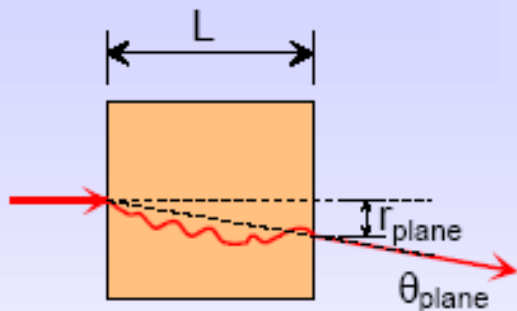


# 弹性（带电粒子与原子核）：多次库伦散射

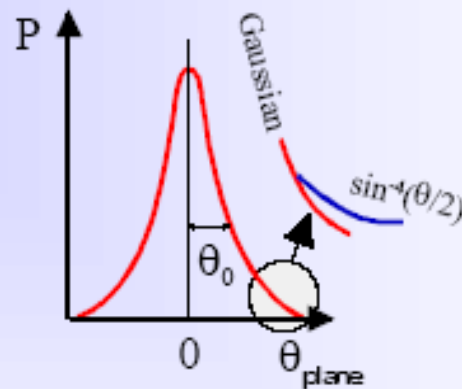
- **库伦散射**: 带电粒子穿过物质时受**原子核和核外电子库仑势**的影响（主要是原子核的影响，电子的影响可忽略），偏离原来的运动方向，这种现象称为库伦散射（弹性碰撞）。
- **多次库伦散射的分布**可以由Moliere理论描述，对小角度散射其分布近似为高斯分布，较大角度偏转不再服从高斯分布。

In a sufficiently thick material layer a particle will undergo ...

## Multiple Scattering



Approximation  $\theta_0 \propto \frac{1}{p} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$



$X_0$  is radiation length of the medium

Scattering does not lead to significant energy loss

$$\theta_{plane}^{rms} = \sqrt{\langle \theta_{plane}^2 \rangle} = \frac{13.6}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left( 1 + 0.038 \ln \frac{x}{X_0} \right)$$

低动量粒子受多次散射影响显著。辐射长度近似与 $Z(Z+1)$ 成反比，因此，如果需要减少多次散射效应，探测器应尽量选用原子序数低的材料制作，探测器的物质质量要保持尽量低。



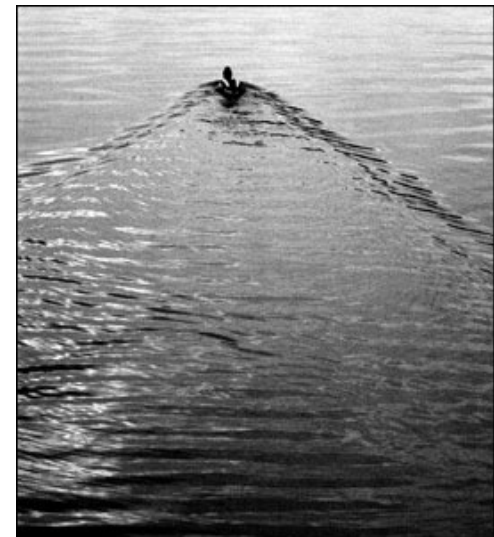
# 契伦科夫辐射

- 匀速带电粒子穿过均匀透明介质，当其运行速度超过光在该介质中的速度 $c/n$ 时，会有微弱的定向光辐射发射，称为切伦科夫辐射。

**Pavel Cherenkov,**  
1934发现切伦科夫辐射



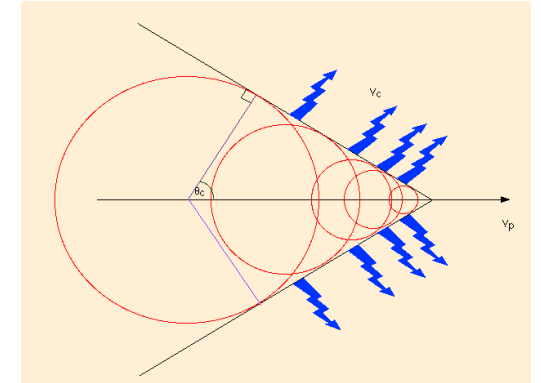
**Cherenkov, Frank, Tamm**  
因发现和解释切伦科夫效应  
获1958年诺贝尔物理奖。



# 切伦科夫辐射的特点

(1) 切伦科夫辐射角

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{1}{n\beta} \right) \quad \beta = \frac{v}{c}$$



(2) 阈速度

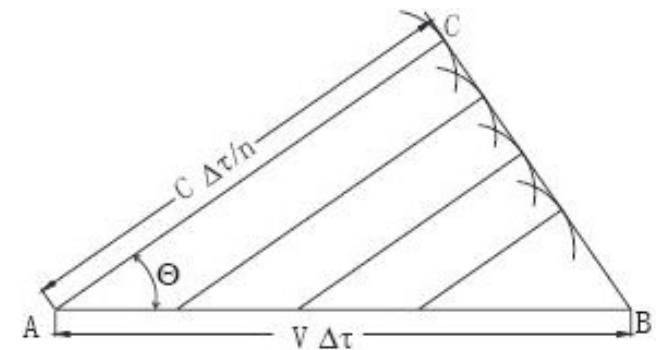
$$\beta_{\text{阈}} = \frac{1}{n}$$

(3) 阈动能

$$E_{\text{阈}} = m_0 \left[ \frac{n}{(n^2 - 1)^{1/2}} - 1 \right]$$

(4) 最大辐射角

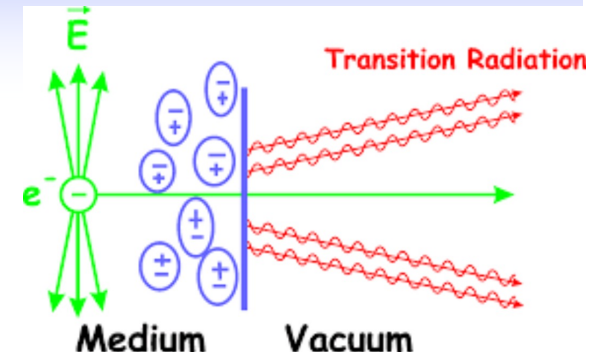
$$\theta_{\text{max}} = \cos^{-1} \frac{1}{n}$$



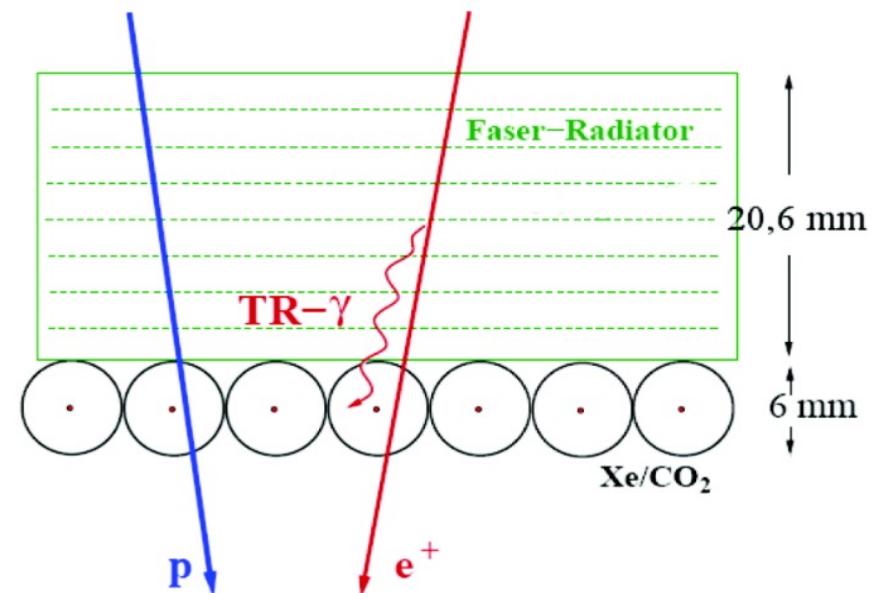
(5) 辐射比较微弱，能谱为连续谱，强度近似与波长平方成反比，光谱偏紫。

$$\frac{dW}{dl} = \frac{z^2 e^2}{4\pi} \int_{n\beta > 1} \mu \sin^2 \theta \frac{2\pi c}{\lambda} d \frac{2\pi c}{\lambda} = -\pi z^2 e^2 \int_{n\beta > 1} c^2 \mu \sin^2 \theta \frac{1}{\lambda^3} d\lambda$$

# 穿越辐射

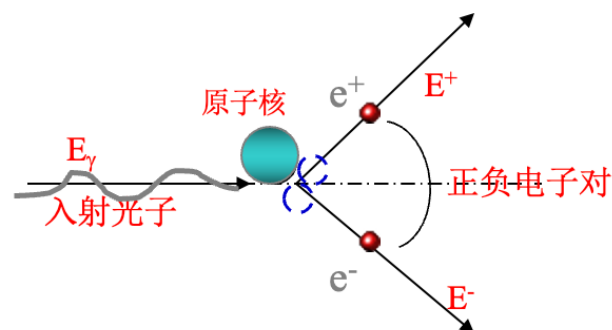
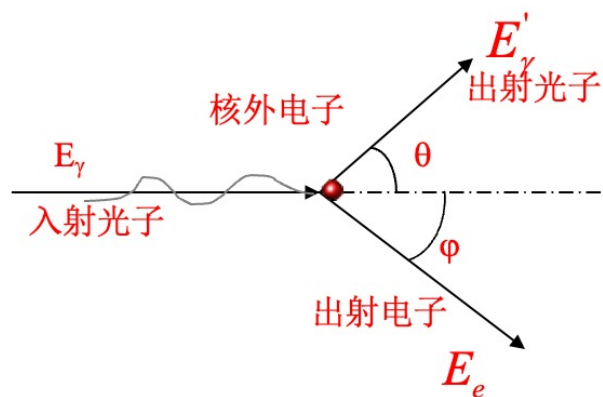
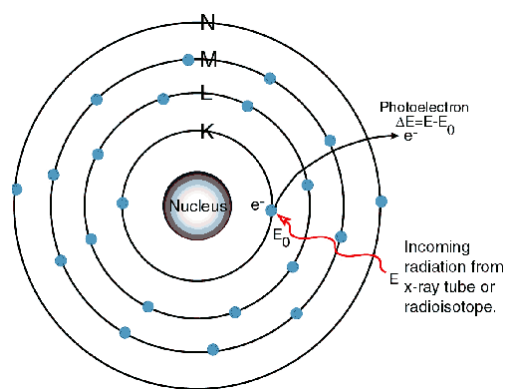


- **穿越辐射**：高能带电粒子穿越两种介电常数不同的介质交界面时发生的辐射。
- 穿越辐射能量与入射粒子的 $\gamma$ 因子( $E/m_0$ )成正比
- 穿越辐射基本朝前发射,典型的发射角  $\theta = \frac{1}{\gamma}$
- 辐射非常微弱, 能谱连续分布,从可见光一直到X光区。
- 由于穿越辐射很弱, 通常将多层介质 (辐射体) 堆叠起来, 形成大量的介质交界面, 从而增强总辐射强度。



# 光子和物质的相互作用

- 光子（包括X射线和 $\gamma$ 射线）是中性粒子，与物质的相互作用是一种**单次性**的随机事件。光子与物质的相互作用主要有三种形式：**光电效应、康普顿散射、电子对产生**
- 光子通过以上形式的相互作用产生次级电子，损失全部或部分能量，并转换为次级电子的能量。对光子的探测是通过这些次级电子与物质的相互作用进行的，称之为**间接探测**。
  - 即首先把光子“转换”为带电粒子，然后通过探测这些次级带电粒子实现光子的探测





# 光子与物质相互作用总截面

$$\sigma_{\text{总}} = \sigma_{\text{光电}} + \sigma_{\text{康普顿}} + \sigma_{\text{对产生}}$$

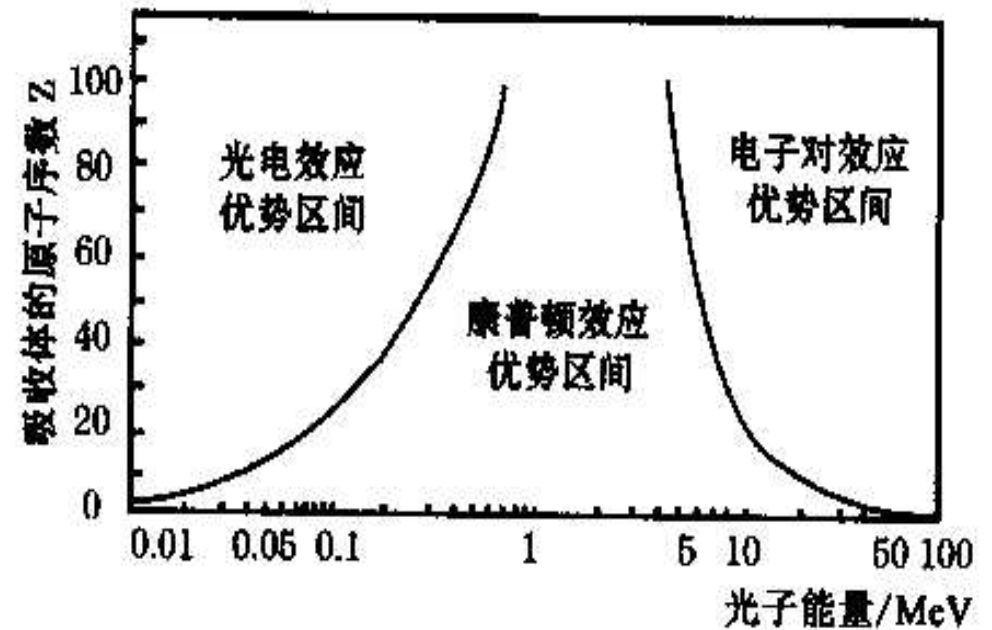
- 对低能光子和原子序数高的物质光电效应占优势
- 对中能光子和原子序数低的物质康普顿效应占优势
- 对高能光子和原子序数高的物质电子对效应占优势

$$\sigma_{\text{photo}}^K = \left( \frac{32}{(E_\gamma / m_e c^2)^7} \right)^{1/2} \alpha^4 Z^5 \sigma_{\text{Th}}^e \quad [cm^2 / atom]$$

$$\sigma_c^{\text{atom}} = Z \sigma_c^e \quad \therefore \sigma_c \propto Z$$

$$\sigma_{\text{对}} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left( \frac{7}{9} \ln \frac{183}{Z^{1/3}} - \frac{1}{54} \right)$$

$$\sigma_{\text{光电}} \propto Z^5, \quad \sigma_{\text{对产生}} \propto Z^2, \quad \sigma_{\text{康普顿}} \propto Z$$

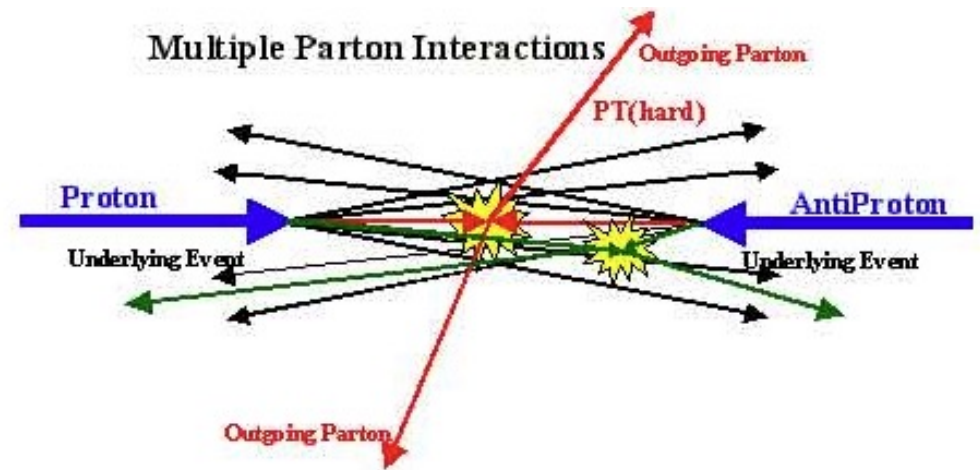
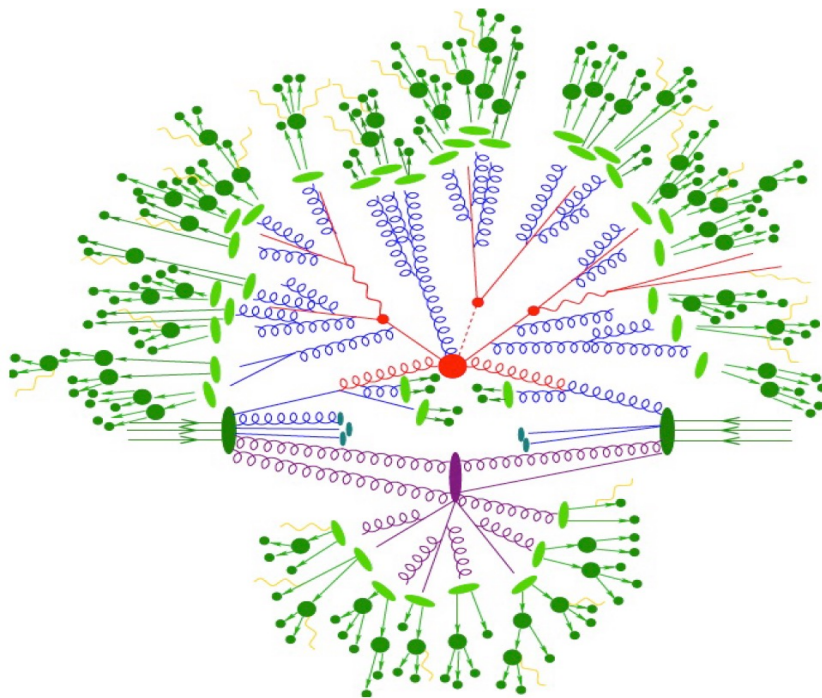
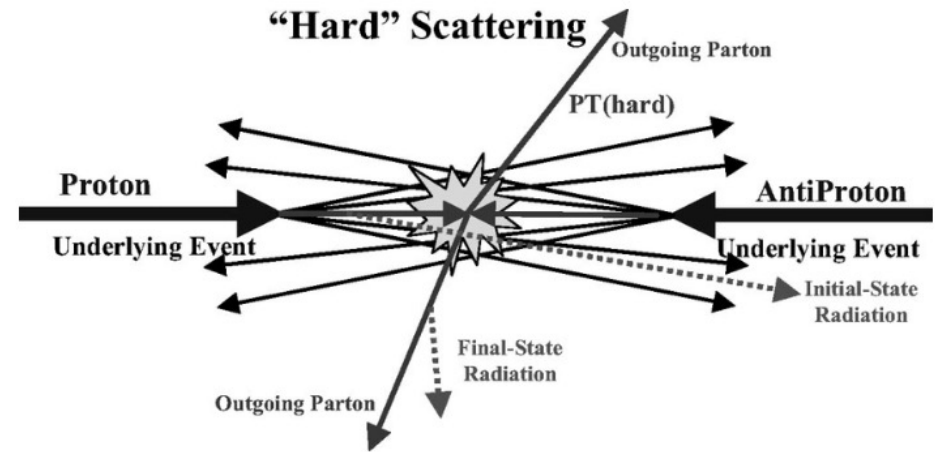
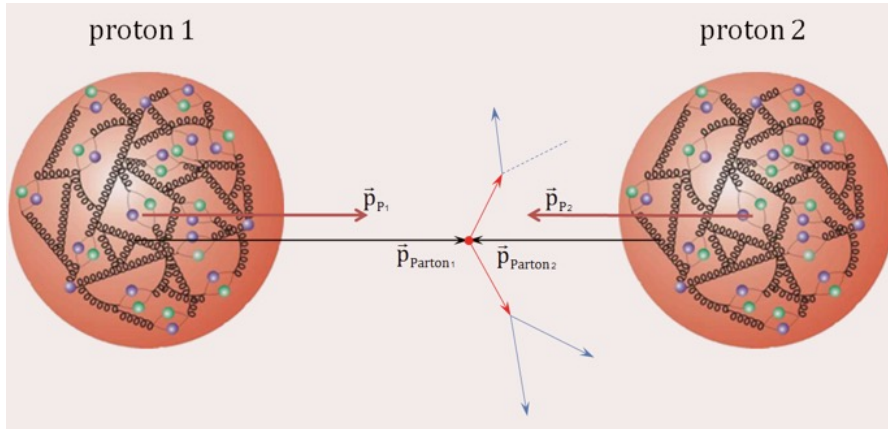


# 强子与物质的强相互作用

- 强子（例如：质子、中子、 $\pi$ 介子、K介子等）在通过介质时能与介质原子的原子核发生强相互作用
  - $p+p \rightarrow p+p$ ,  $n+p \rightarrow n+p$ ,  $\pi+N \rightarrow \pi+N$  ...
  - $n+N \rightarrow N^*$ ,  $\pi+N \rightarrow \Delta \rightarrow \pi+\Delta'$  ...
- 相互作用过程可分为弹性散射和非弹性散射两大类
  - 弹性散射(**elastic scattering**): 参与相互作用的粒子的内部状态始终没有改变
  - 非弹性散射(**inelastic scattering**): 粒子内部状态发生了改变, 通常还伴随有次级粒子的产生

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{elastic}} + \sigma_{\text{inelastic}}$$

# 非弹性散射一例：高能强子对撞





# 相互作用长度

- 相互作用长度  $\lambda=1/\Sigma$ ，即平均自由程。其中，
  - $\Sigma=N*\sigma$ ， $\sigma$ 为反应过程截面
  - $N$ 为单位体积内的原子数
- 粒子束在介质中通过一定距离  $x$  后的衰减由  $\lambda$  决定

$$N=N_0e^{-x/\lambda}$$

- 强子在物质中的相互作用长度

- 核碰撞长度  $\lambda_T$ ：

- 反映总相互作用的贡献  $\lambda_T = \frac{A}{N_A \rho \sigma_{total}} \quad [cm]$

- 核相互作用长度  $\lambda_I$ ：

- 反映非弹性散射的贡献  $\lambda_I = \frac{A}{N_A \rho \sigma_{非弹}} \quad [cm]$

由于  $\sigma_{total} > \sigma_{inelastic}$

因此  $\lambda_I > \lambda_T$

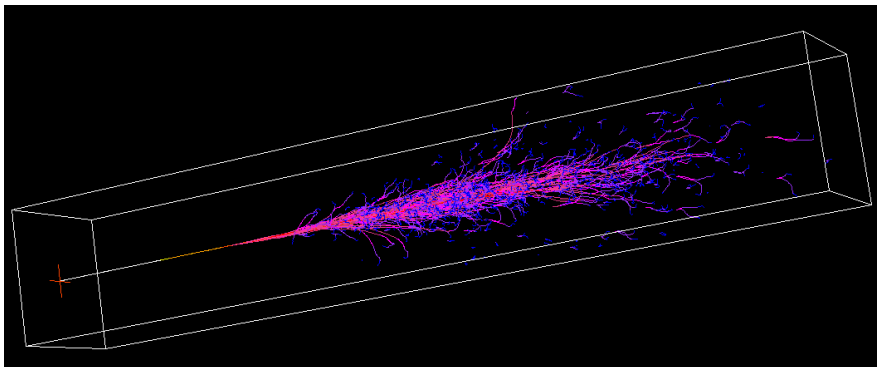
# 高能粒子在物质中的簇射效应

- 当入射粒子能量很高时，其与物质的相互作用变得复杂，一个显著的特点是：高能粒子与物质原子相互作用，通过**级联过程**会产生越来越多的各种次级粒子——**高能簇射**。

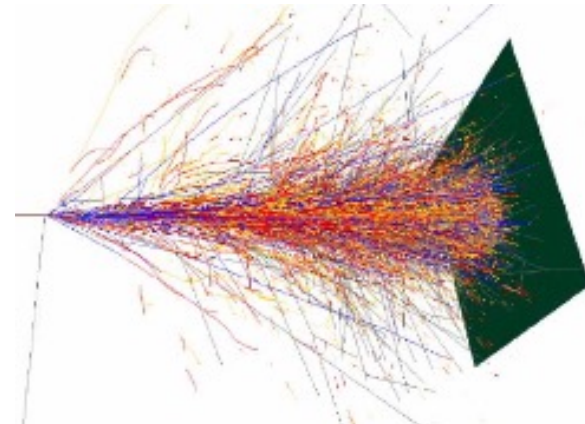
## 高能簇射

**电磁簇射：** 高能电子或 $\gamma$ 光子与介质原子通过电磁相互作用产生电子 -  $\gamma$ 光子 - 电子的级联过程

**强子簇射：** 高能强子与介质原子核通过强相互作用产生次级强子的级联过程

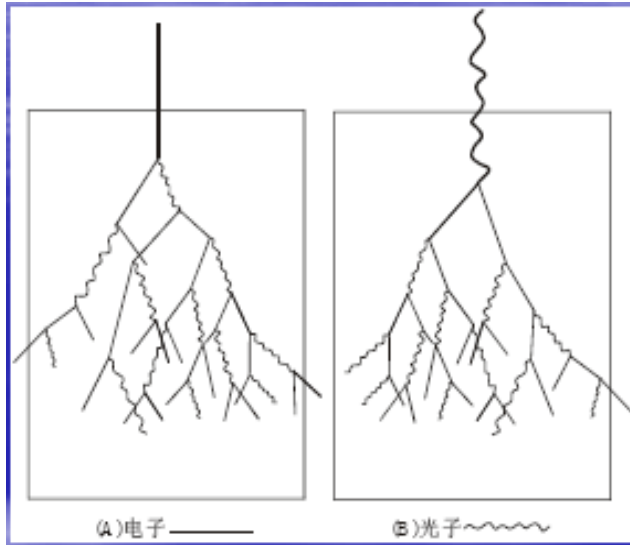


电磁簇射



强子簇射

# 电磁簇射



高能电子或光子通过介质，发生相互作用，高能电子**韧致辐射**产生 $\gamma$ 光子，高能 $\gamma$ 光子产生**正负电子对**，正电子湮灭产生一对 $\gamma$ 光子……，这样不断发生**电子— $\gamma$ 光子—电子**的级联过程，产生大量电子和 $\gamma$ 光子的现象。

- 辐射长度 $X_0$ ：决定电磁簇射的**发展纵深**

$$\langle E \rangle = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}}$$

$$X_0 = \frac{716.4A}{Z(Z+1)\ln(287/\sqrt{Z})} [g/cm^2]$$

发展深度与入射能量呈对数关系

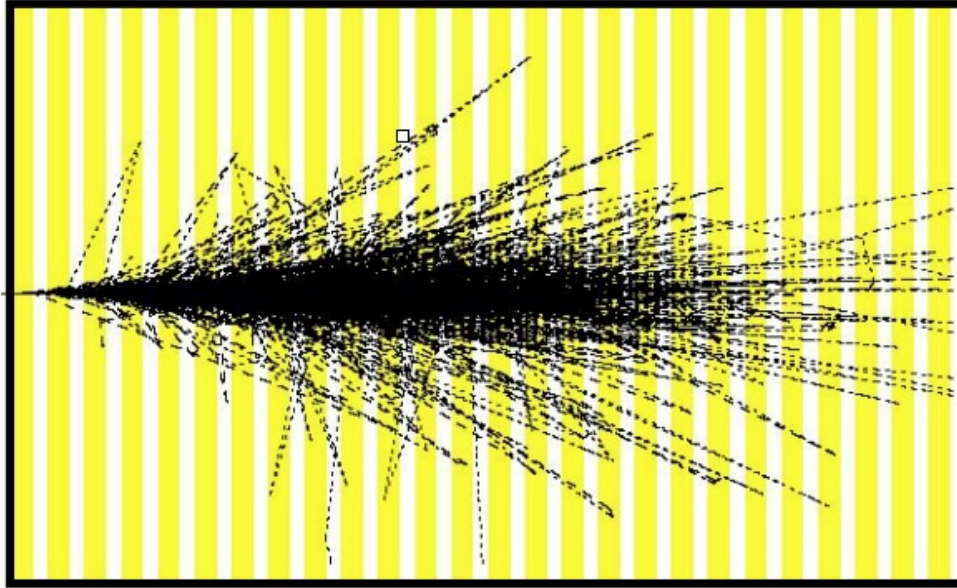
- 莫里哀半径 $R_M$ ：表征电磁簇射的**横向展宽**

$$R_M = X_0 \left( \frac{E_s}{E_c} \right) \quad E_s = \sqrt{\frac{4\pi}{\alpha}} m_e c^2 = 21.2 MeV \quad \text{常数能量}$$

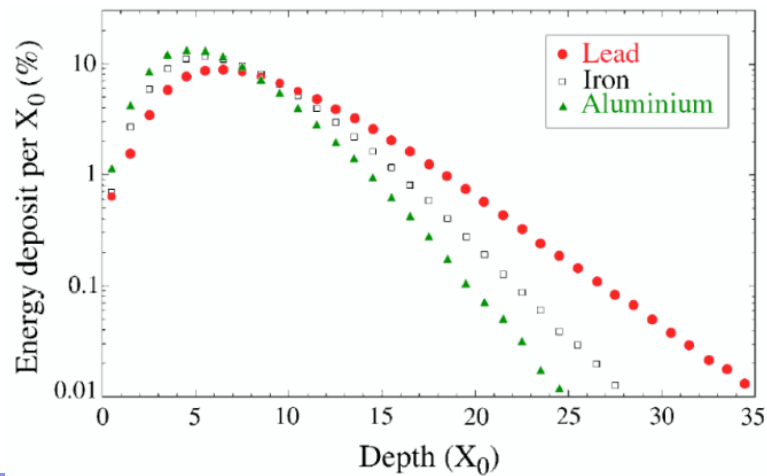


# 电磁簇射

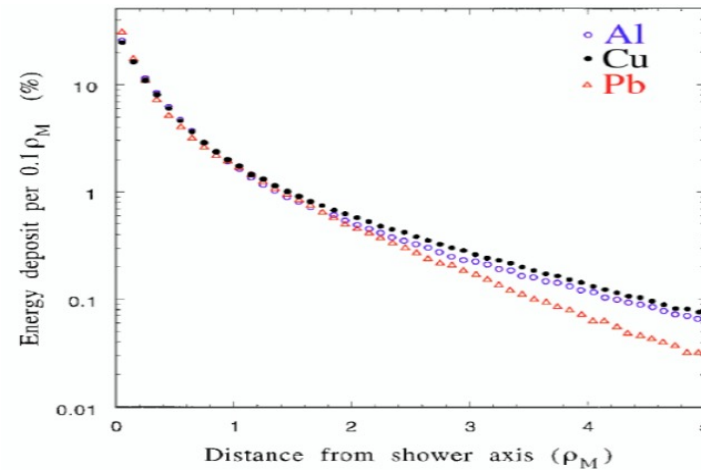
$E_e = 27.5 \text{ GeV}$



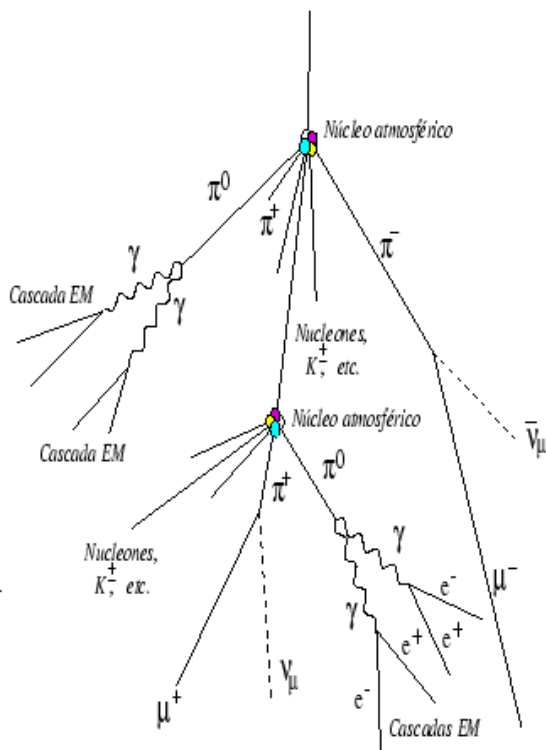
纵向发展



横向展开



# 强子簇射

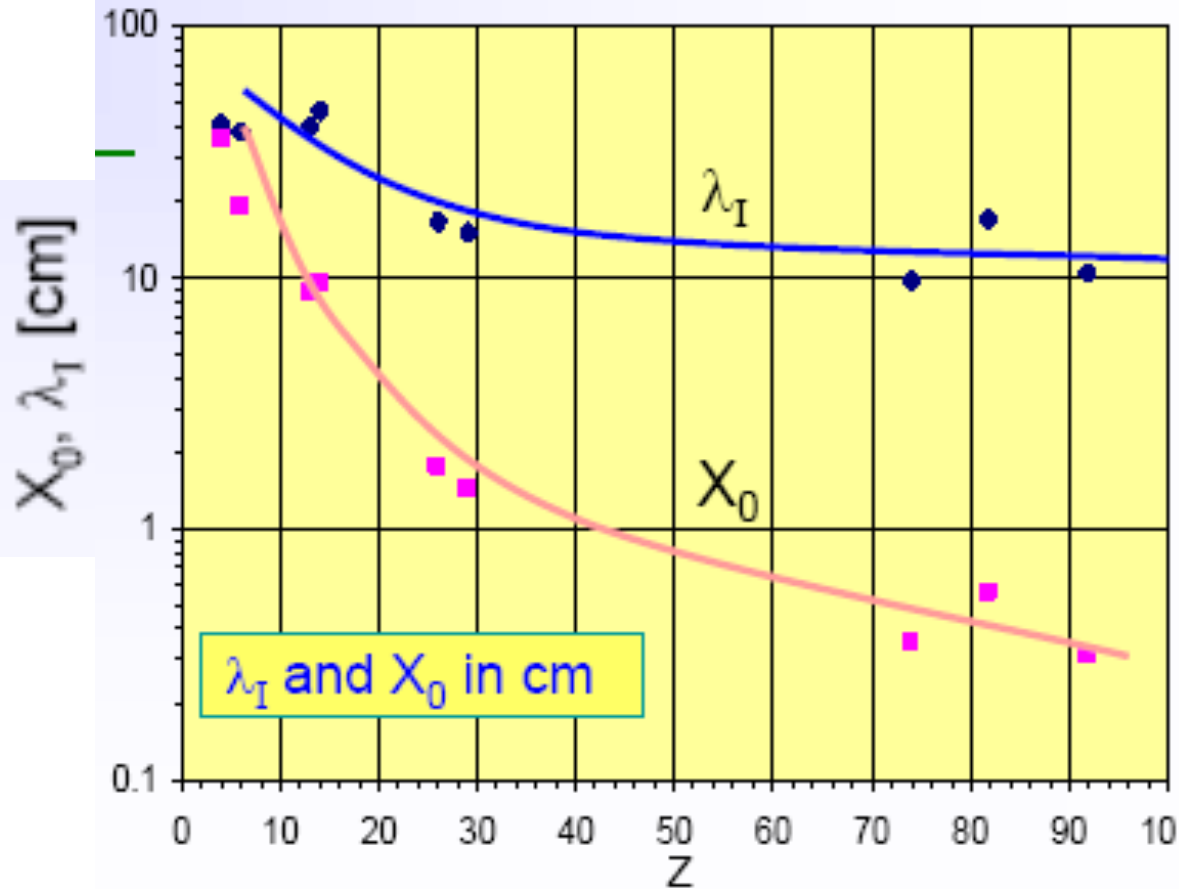


高能强子通过介质，与介质原子核发生强相互作用（大能量转移的非弹性散射），产生多个次级强子，高能次级强子继续与原子核发生强相互作用，产生更多的次级粒子：强子、电子、 $\gamma$ 光子、中子、 $\mu$ 子、中微子、核碎片等，其中大多数是 $\pi$ 介子和核子。

- 纵向发展主要由核相互作用长度决定，横向发展主要由次级粒子的横向动量决定。簇射的成分复杂：
  - 强子级联成分：强子与原子核的反应，类似电磁级联过程，但由核相互作用长度 $\lambda_1$ 表征，而不是电磁级联中辐射长度 $X_0$
  - 电磁级联成分：来源于 $\eta/\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 等过程中产生的高能 $\gamma$ ，遵从和前述电磁簇射一样的规律
  - 不可见成分：介子衰变产生的中微子和 $\mu$ 子、原子核的结合能、部分中子等。

# 两种簇射的尺度比较

For  $Z > 6$ :  $\lambda_I > X_0$



Material	Z	A	$X_0$ (cm)	$\lambda_I$ (cm)
Lead	82	207	0.56	17.1
Copper	29	63.5	1.44	15.1
Iron	26	56	1.77	16.8
Silicon	14	28	9.4	45.5
Al	13	27	8.9	39.4
C	6	12	19	38.1
He(gas)	2	4	5.3E5	3.6E5

强子簇射的发展尺度要远大于电磁簇射

→ 强子能量器的尺度要远大于电磁量能器



# 常用的粒子探测器

- 气体探测器
- 半导体探测器
- 闪烁探测器
- 契伦科夫探测器、穿越辐射探测器

# 气体探测器

- ❖ 使用气体作为工作介质，利用入射带电粒子在气体中产生的电离效应探测带电粒子
  - 物质量少，对被测粒子的影响小；可以获得较快的时间响应和较好的空间分辨；灵敏体积大小和形状灵活；可以有较长的工作寿命；造价低，可以大面积制作。
- ❖ 入射带电粒子在气体介质中产生电离，损失能量，沿入射径迹上产生电子离子对。电离产生的电荷（电子和离子）在气体中进行输运（扩散、复合、吸附、漂移等），收集（并可能放大）电离产生的电荷，产生感应电信号。

# 气体探测器分类

## ❖ 基本的气体探测器

- 电离室、正比计数器、GM计数器

## ❖ 气体径迹室

- 多丝正比室、漂移室、时间投影室

## ❖ 平行板气体探测器

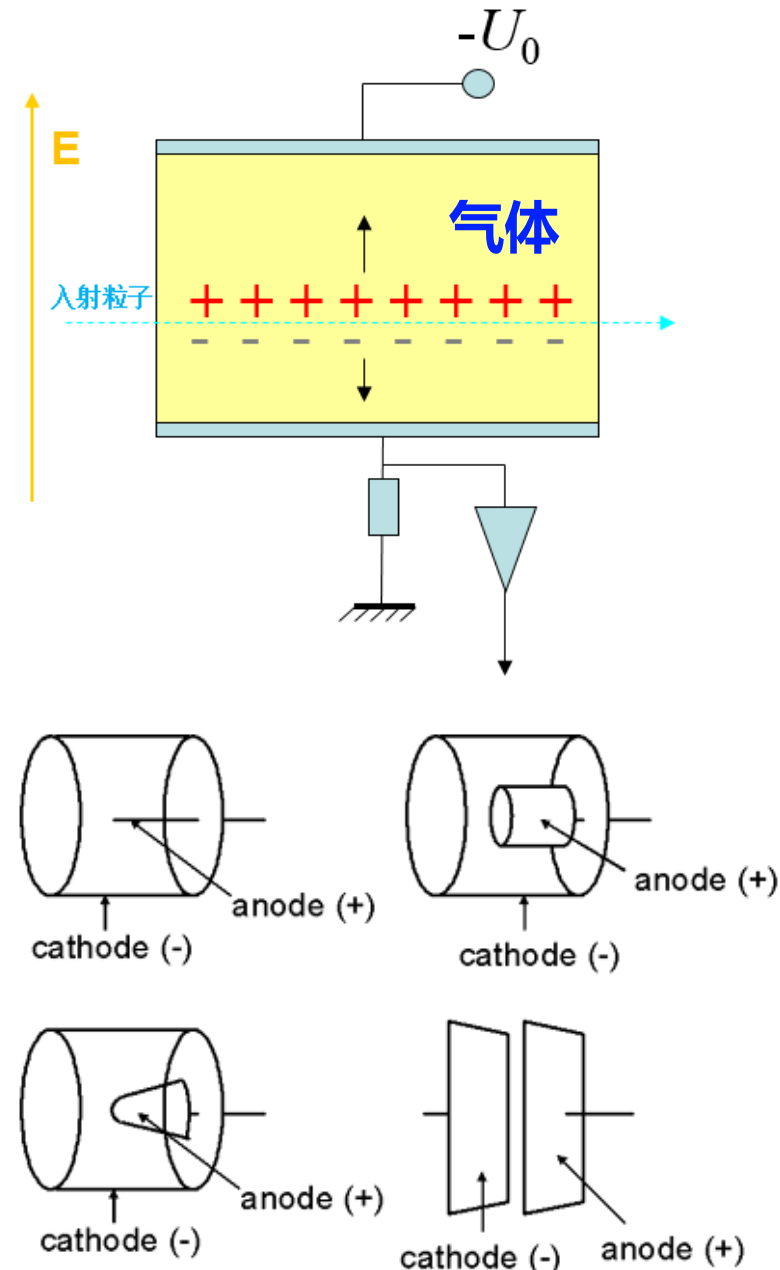
- 火花室、平行板室、阻性板室、多气隙阻性板室

## ❖ 微结构气体探测器

- GEM、THGEM、Micromegas、uRWELL ...

# 电离室的结构

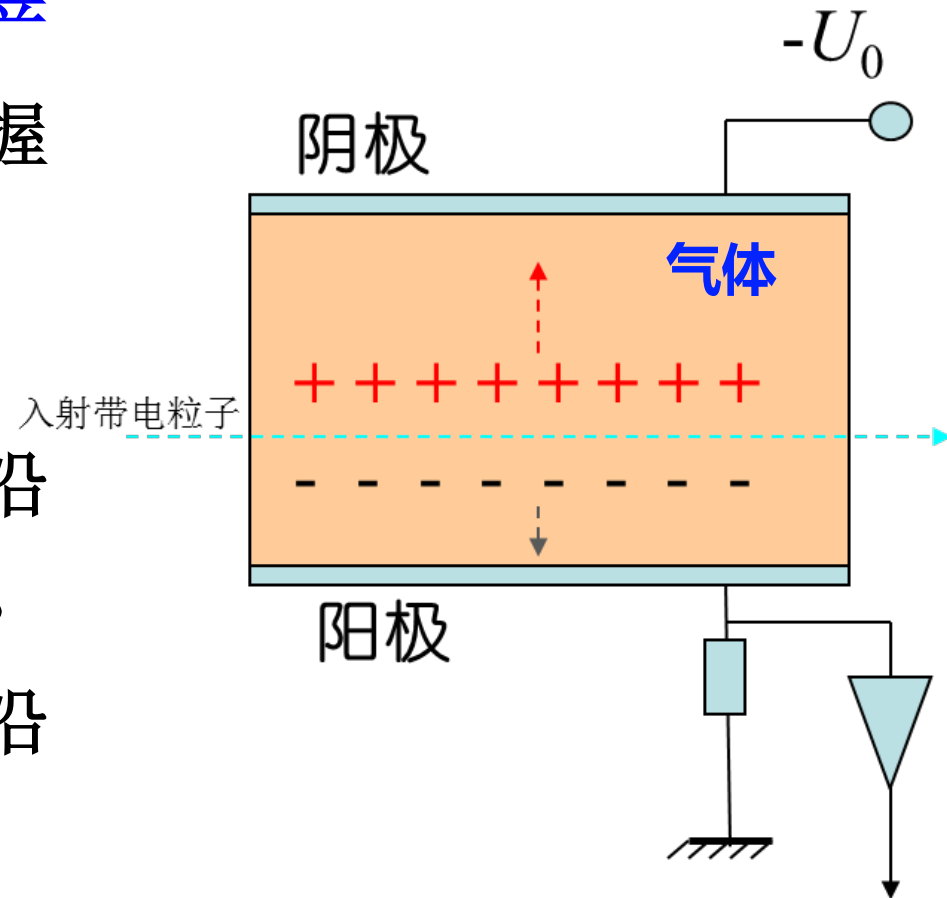
- 电离室主体由两个处于不同电位的电极组成，之间充满工作气体。
- 电极大多是平行板和圆柱形，也有球形和其它形状。
- 平板电离室的两个电极可以是圆形或方形或其他形状的金属板。
- 圆柱形电离室中心的电极一般是一个圆棒或一根金属丝，圆柱外壳用不锈钢、铝、铜等材料制成。
- 电极之间须用绝缘材料隔开，这也是电离室的关键部件之一。





# 电离室的工作机制

- 电离室的工作机制主要包括**信号产生**和**信号输出**过程，是学习和掌握其他探测器工作原理的基础。
- 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。



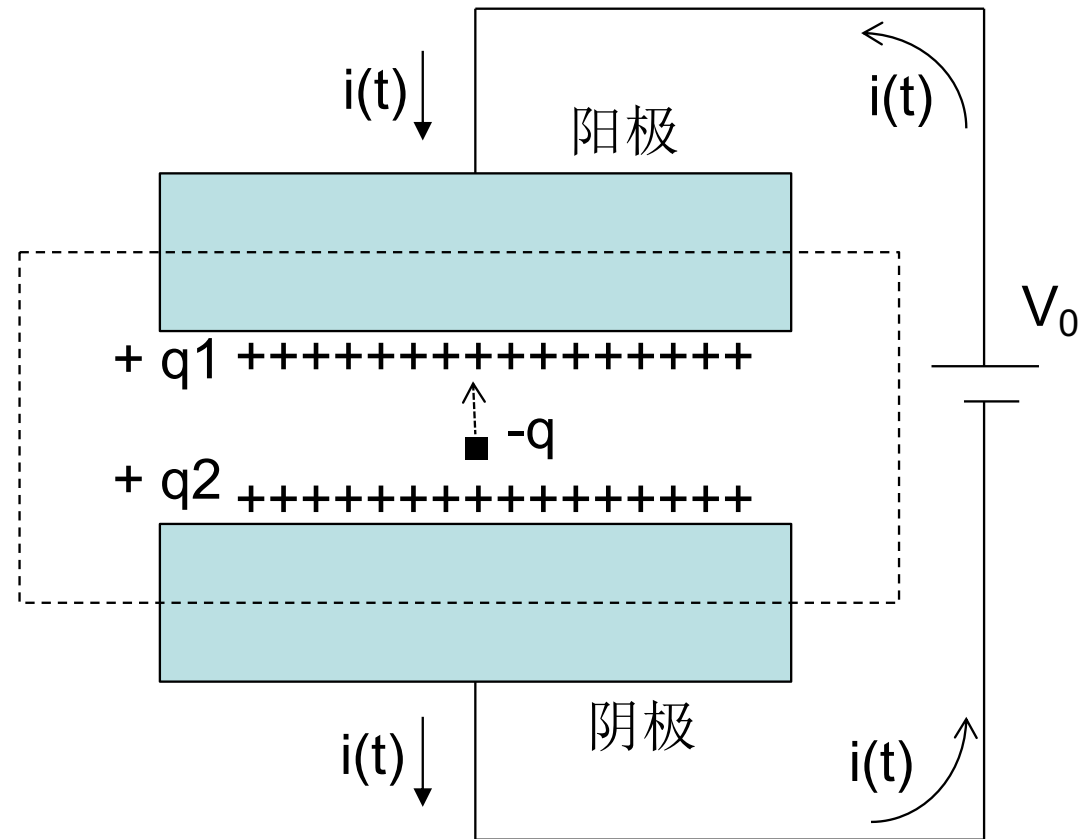
注意“感应电荷”与“收集电荷”的区别

# 信号产生

- 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：

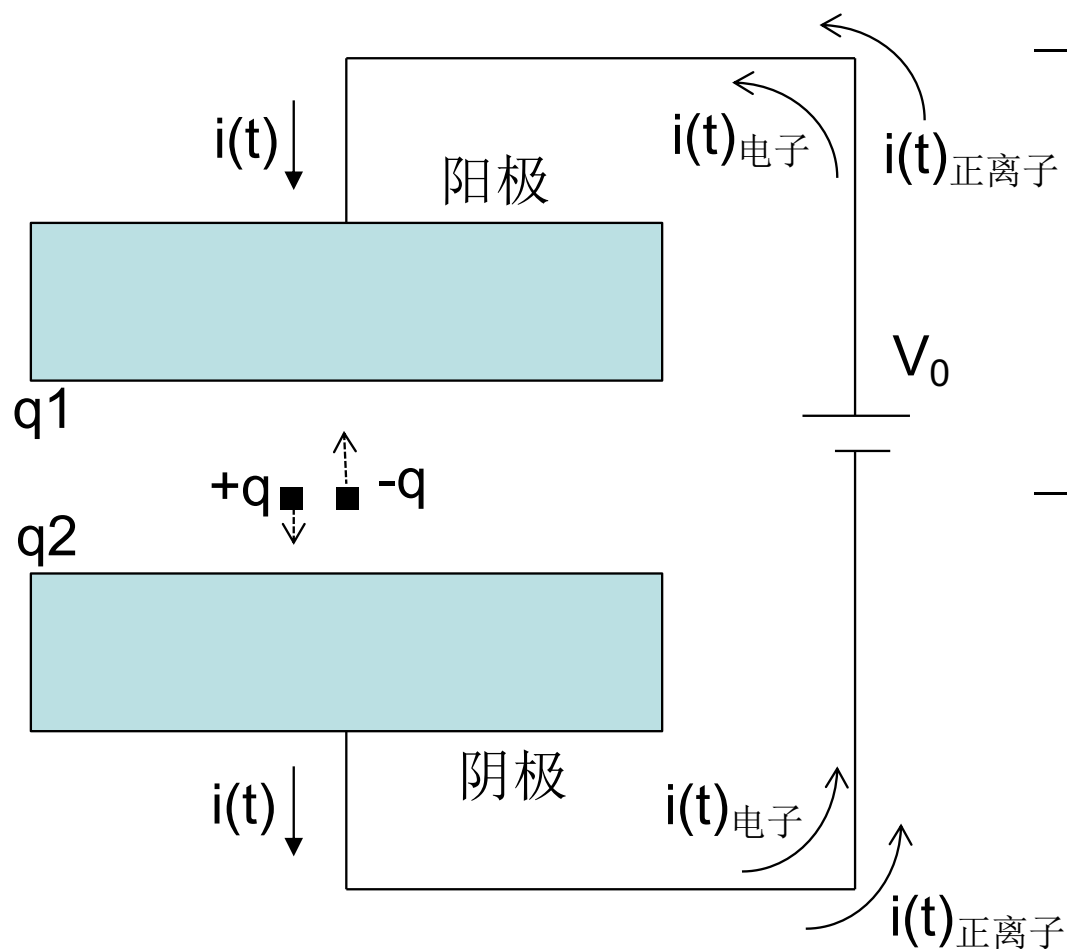
$$q_1 + q_2 - q = 0, \text{ 即 } q_1 + q_2 = q$$

- 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 $q_2$ 。

- 实际探测中，电子和正离子总是在同一地点成对产生，运用类似分析，得到电子和正离子各自产生的电流信号，**外部回路的实际信号为两者的叠加。**



- 电子和正离子在初始时刻时重叠，两者在电极上的感应电荷符号相反，大小相等，因而总感应电荷量等于0。
- 随着电子和正离子朝相反方向漂移，在某一电极上电子和正离子的感应电荷一方在减小，另一方在增大，总感应电荷发生变化，外部回路产生电流。

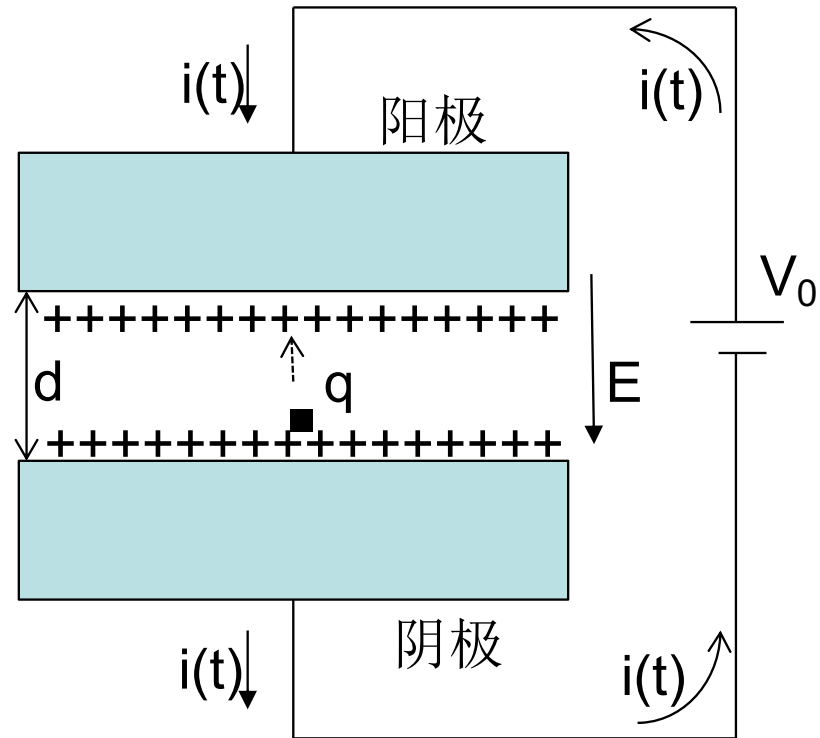
— 流过的**总电荷量为 $q_1+q_2=q$** ，与电离地点无关。

# 信号输出

- 电场对电荷 $q$ 做功，功率为 $q \cdot E \cdot u$ （ $u$ 为漂移速度），电源提供的功率为 $V_0 \cdot i(t)$ ，“借用”能量守恒， $V_0 \cdot i(t) = q \cdot E \cdot u$ ，故有

$$i(t) = (q \cdot E \cdot u) / V_0 = (q \cdot u) / d$$

- $i(t)$ 只取决于电极距离和漂移速度。实际信号回路中会有负载， $i(t)$ 在负载上会有压降 $dU$ ，从而影响电场强度 $E$ ，进而影响漂移速度，但由于 $V_0 \gg dU$ ，故这种影响可以忽略，即 $i(t)$ 不受外部负载影响。因此，**电离室是个理想的电流源。**



- 一对电子正离子相互反向漂移产生的总电流信号：

$$i(t) = i^+ + i^- = e \cdot (u^+ + u^-) / d$$



# Ramo-Shockley定理

- 刚才利用能量守恒推导感应电流信号的方法并不严格，而且没有普适性。严格推导的结果是Ramo-Shockly定理：

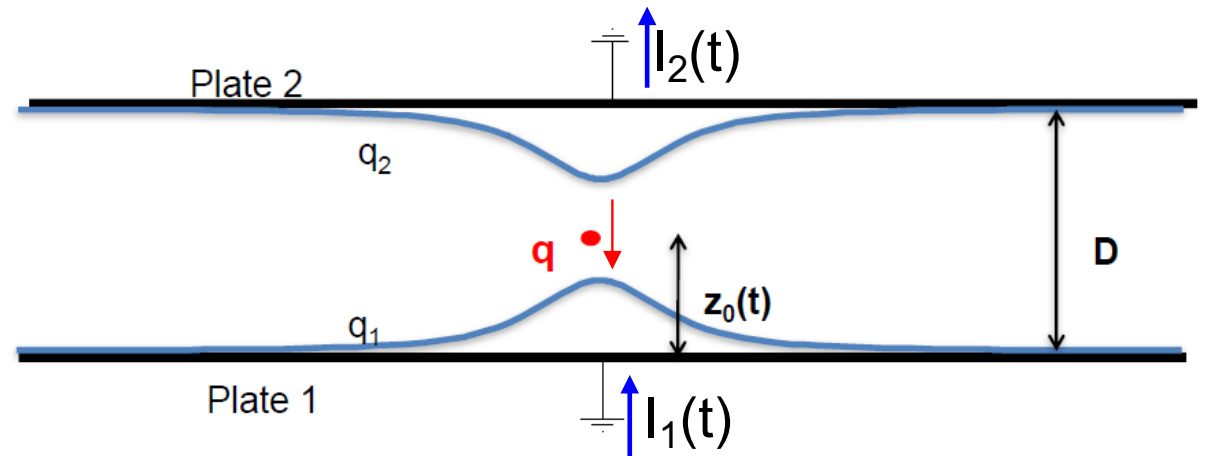
- 将待求感应电流信号的电极置于1V的电位，其它电极均处于零电位；
- 计算此时的电场分布，再除以1V，称之为权场 $E_w(\mathbf{x})$ ，因此权场的量纲为 $1/m$ （距离的倒数）；
- 电荷在实际电场（即探测器在实际工作电压下形成的电场，不是权场！）中运动，速度为 $\mathbf{u}(t)$ ；
- 待求电极上的感应电流 $I(t) = -q \cdot E_w(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{u}(t)$

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

$E_w(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{u}(t)$ 均为矢量，它们的乘积为两矢量的点积。电荷 $q$ 也带有符号，正电荷为正，负电荷为负。电流从电极流出为正，反之为负。

# 感应电流

- 平行板



$$q_1 = -q \left(1 - \frac{z_0}{D}\right)$$

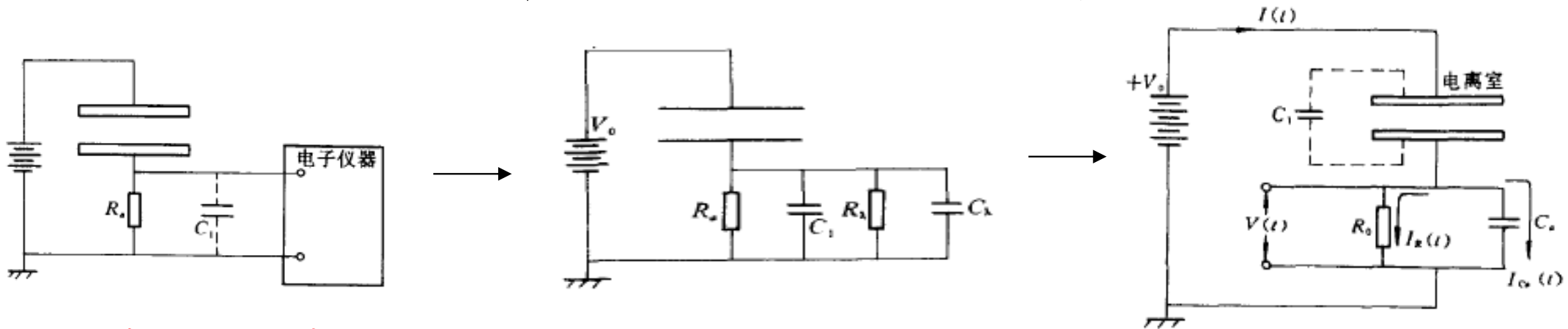
$$q_2 = -q \frac{z_0}{D}$$

在任意时刻上下极板的感应电荷之和为  $-q$

$$I_1(t) = -\frac{dq_1(t)}{dt} = -\frac{qv}{D} \quad I_2(t) = -\frac{dq_2(t)}{dt} = +\frac{qv}{D}$$

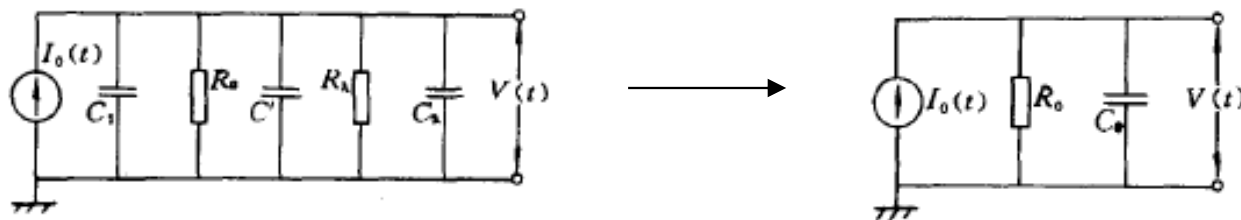
感应电流  $I_1$  和  $I_2$  大小相等，方向相反（ $I_1$  流入电极， $I_2$  流出电极）相当于从一个极板流向另一个极板。

- 实际输出回路中有各种负载（电阻，电容）



## 等效输出回路

- 电离室等效电流源  $I_0 = (q^+ \cdot u^+ + q^- \cdot u^-) / d$
- 输出回路时间常数:  $R_0 C_0$

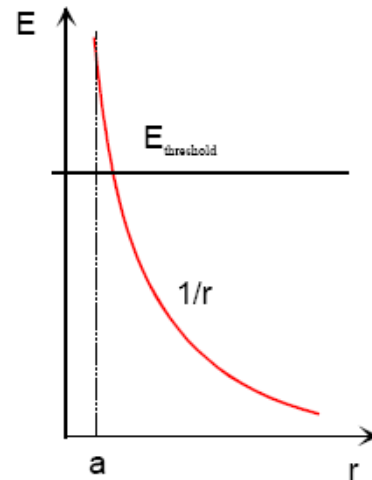
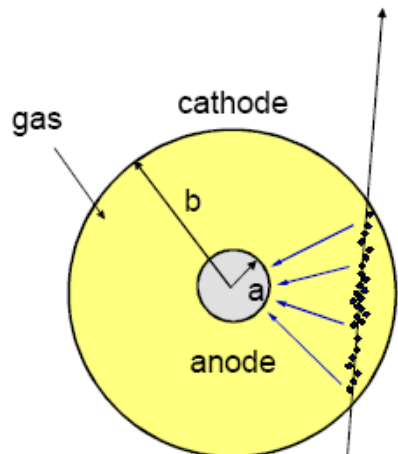
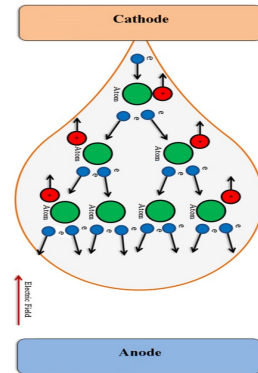
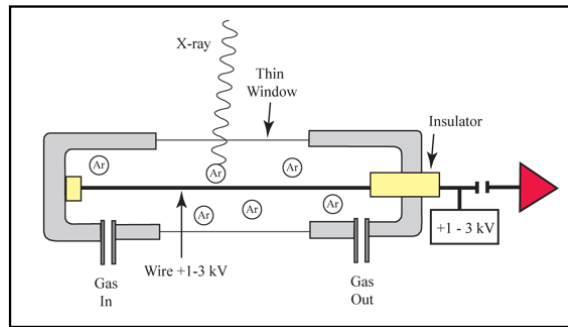


$$I_0(t) = V(t)/R_0 + C_0 \cdot dV(t)/dt$$

$$I_0(t) = \frac{1}{R_0} \int_0^t P_0(t-\tau) e^{-\tau/R_0 C_0} d\tau + C_0 \frac{dV(t)}{dt}$$

由此方程出发可以得出各种条件下的输出电压信号

# 正比计数管



$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

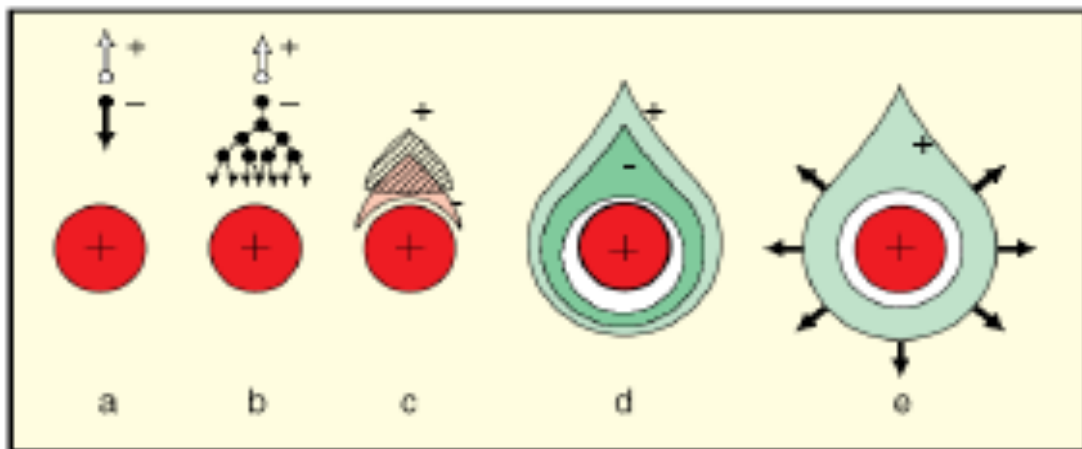
$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{r}{a}$$

$C = \text{capacitance / unit length}$

- 工作于**正比区**，发生**气体放大现象**。
- 电子在与气体分子碰撞之间从外场获得足够加速，以至于能在气体分子中产生电离，产生的电离电子再次被加速并产生电离，逐次倍增进而形成雪崩。
- 阳极上收集的总电荷数 $N$ 是初始电离电荷数 $N_0$ 的 $M$ 倍， $M$ 由计数器结构、工作气体和工作电压决定，与初始电离无关，称之为**气体放大倍数或气体增益**：
- 正比计数器的形式可以很多，主要是圆柱形，也有球形或盘形等，但所有正比计数器的共同特点是，**阳极必定是细丝**，以便在其附件产生小范围的强电场区域。



# 电子倍增（气体放大）



- 引入**第一汤逊系数 $\alpha$** 描述电子倍增过程。  
 $\alpha$ 具体定义为：**电子在单位距离上与气体分子发生电离碰撞的次数**。（ $1/\alpha$ 成为平均电离自由程）

$$\alpha = N \cdot \sigma$$

$N$ 为单位体积内气体分子数  
 $\sigma$ 为碰撞电离截面

电子经过 $dr$ 距离后发生 $\alpha dr$ 次电离碰撞，每次碰撞产生一个电离电子（即增加一个电子），因此 $n_0$ 个电子经过 $dr$ 距离后新增电子数为：

$$dn = n_0 \alpha dr$$

- 电子倍增过程由于横向扩散发展呈液滴状。
- 由于电子漂移速度比离子大三个量级，电子很快被阳极收集，剩下正离子云向阴极漂移。

在距离阳极中心为 $r_c$ 处开始发生电子倍增，电子倍增最终在阳极丝表面（即距离为 $a$ 处）停止，因此有：

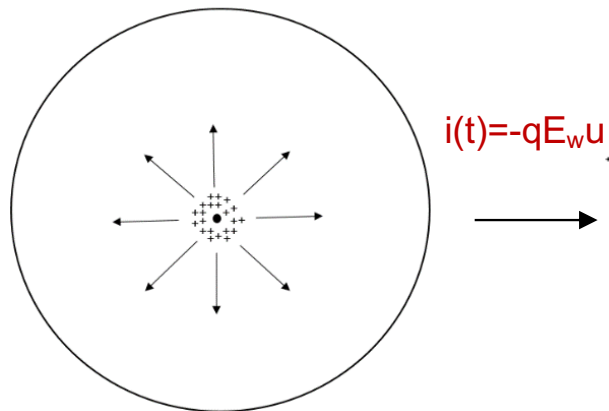
**气体放大倍数  $M$**

$$M = \frac{n}{n_0} = \exp \left[ \int_a^{r_c} \alpha(r) dr \right]$$

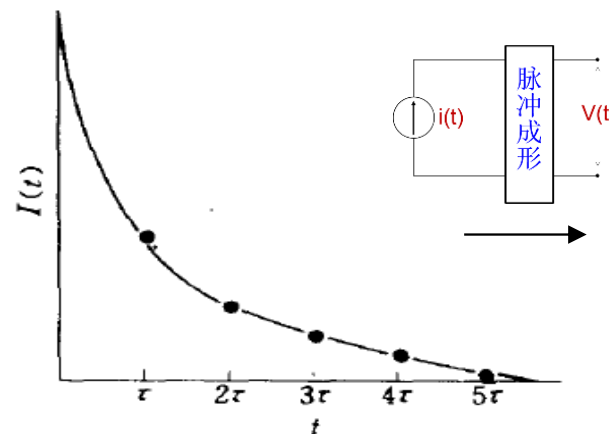
# 输出信号

- 电子雪崩发生在阳极丝表面几十个微米处。
- 雪崩产生的电子被阳极很快收集，运动的距离很短，对信号幅度的贡献很小，只有百分之几。
- 雪崩产生的离子以很慢的速度向阴极漂移，贡献了输出信号的大部分。
- 通过选择不同的脉冲成形时间常数，可以获得不同的脉冲形状，满足不同需求。

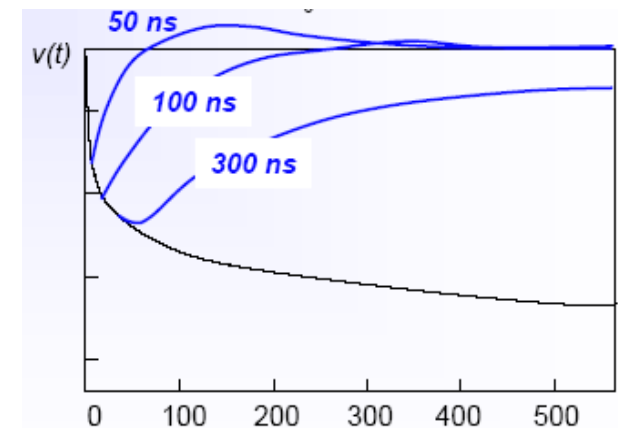
雪崩产生的正离子的漂移



感应电流信号



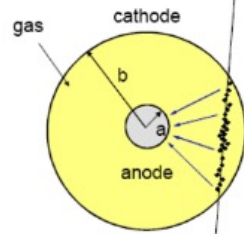
输出电压信号



# 从“计数测量”到“径迹测量”

计数测量

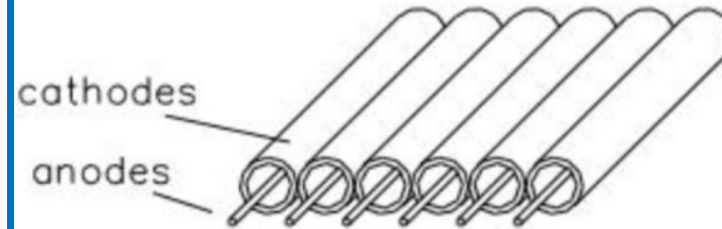
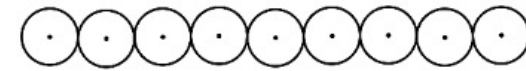
正比计数管



$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{r}{a}$$

正比计数管阵列

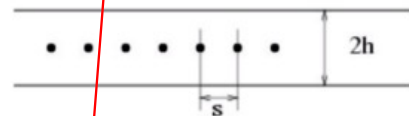


将相互连接的阴极管“打通”

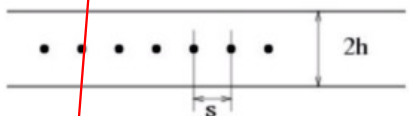
径迹测量

多丝正比室阵列

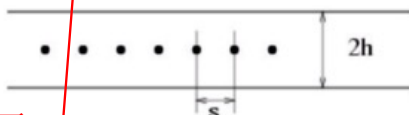
位置测量1



位置测量2

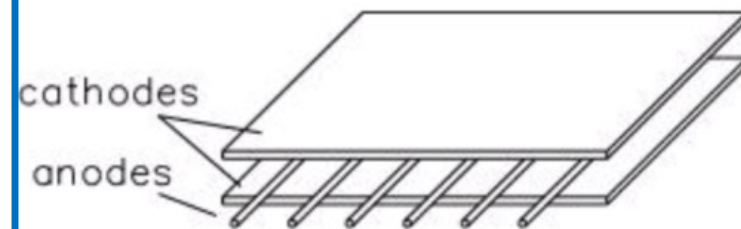


位置测量3



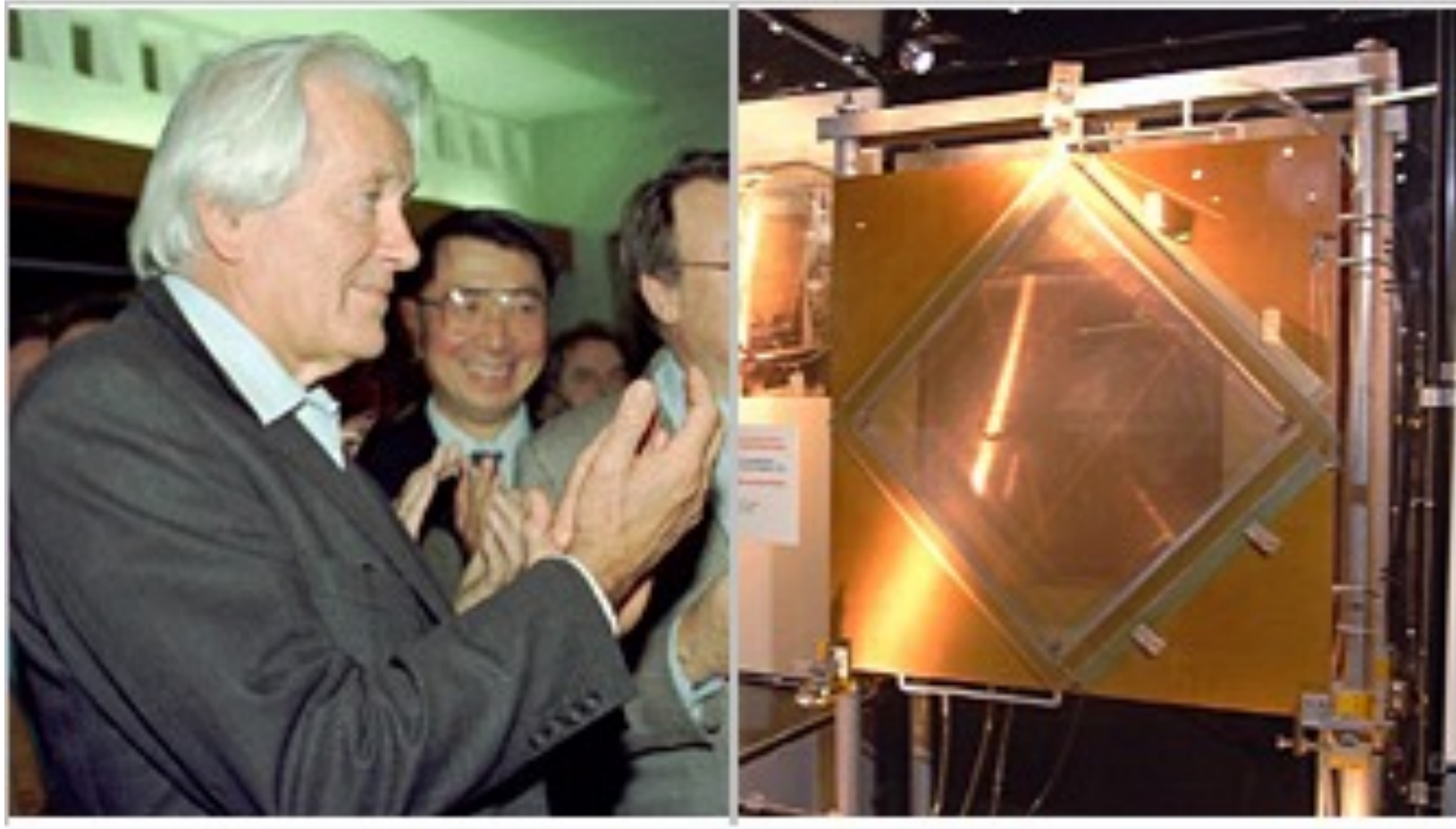
带电粒子

多丝正比室



# 多丝正比室

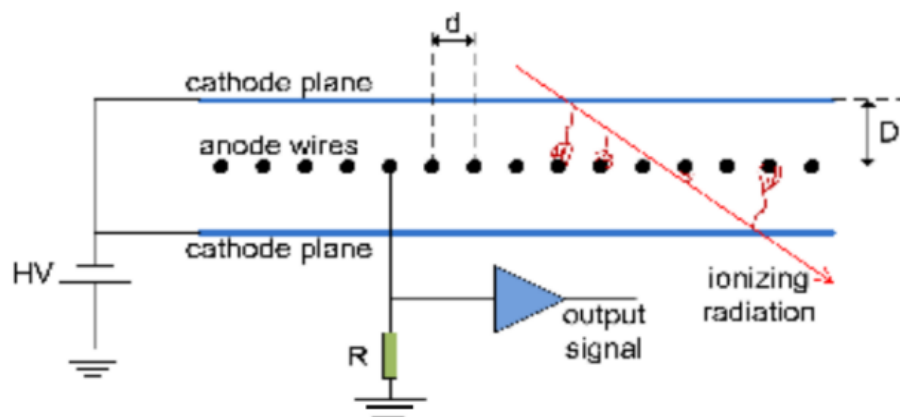
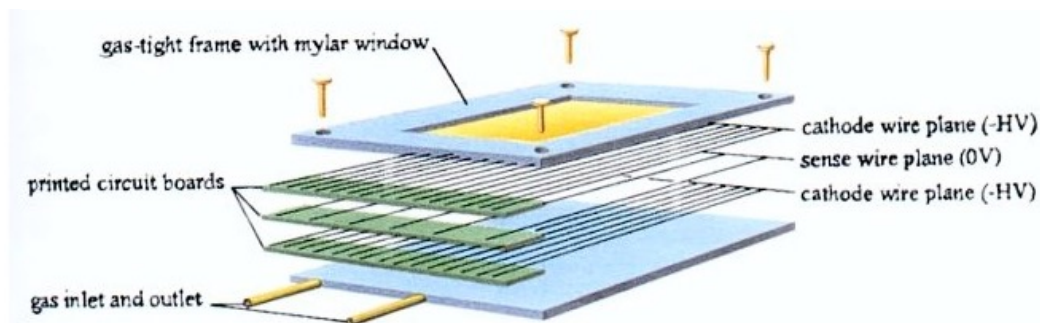
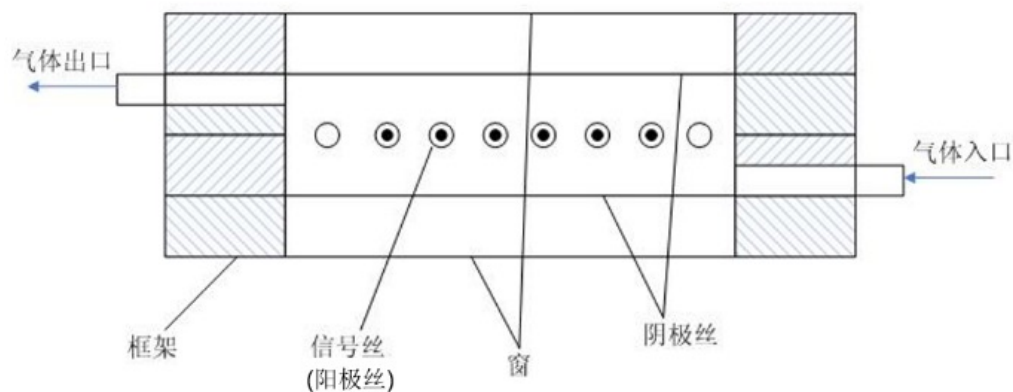
**Multi Wire Proportional Chamber (MWPC)**  
**G.Charpak 1968 , Nobel Prize 1992**



粒子探测技术发展中的一大革命，开启了现代高能物理实验的大门



# MWPC的基本结构和原理

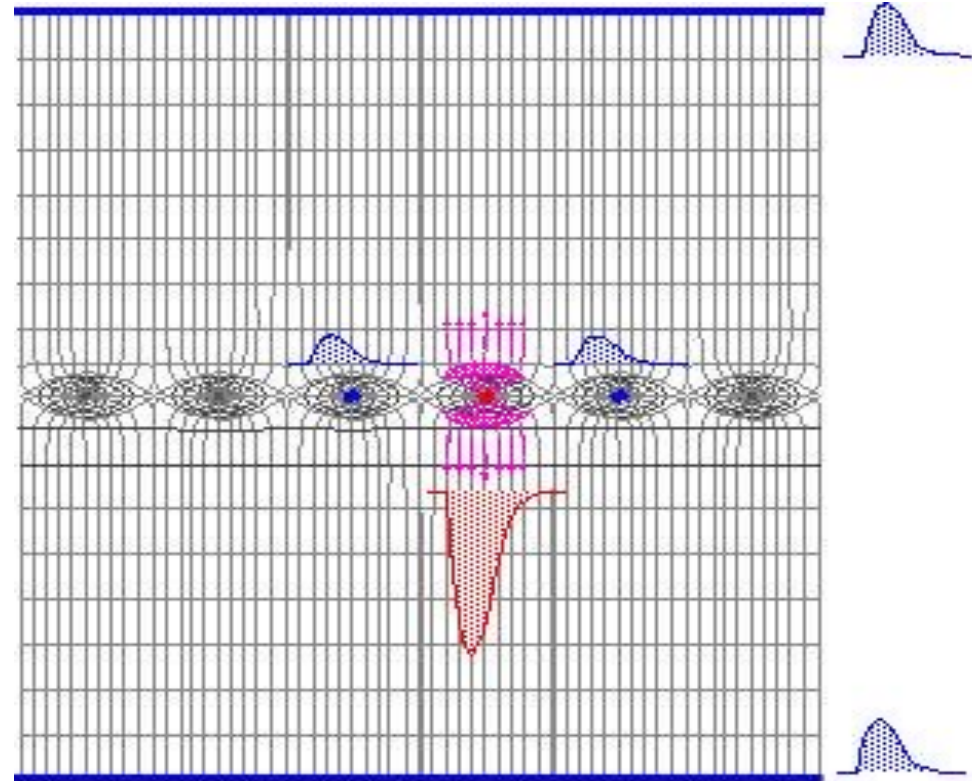


- MWPC由上下阴极平面和中间的阳极丝面构成，并密封在一个室体中，充有工作气体。
- 阳极面和阴极面之间加有工作电压，形成一定的电场分布，形成了MWPC的灵敏体积。
- 入射带电粒子穿过MWPC的灵敏体积，将工作气体电离，产生电子离子对。
- 电离产生的电子和正离子在电场作用下分别朝阳极和阴极漂移。电子漂移到阳极丝附近的高电场区域后产生气体雪崩放大。
- 气体放大过程产生的电子被阳极迅速收集，而正离子则朝阴极“缓慢”漂移，并输出电流信号。

工作机制与正比计数器非常相似

# 感应信号

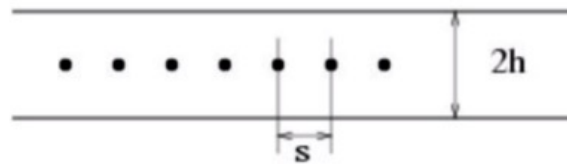
- 雪崩产生的**正离子**向阴极漂移时，在**中心丝上引起的是负脉冲**，而在**邻近阳极丝和阴极上引起的是正脉冲**。每一根阳极丝接一个只对负脉冲灵敏的放大器，就可根据哪一根丝有信号输出确定射线穿过MWPC的位置。



- MWPC内邻近阳极丝由于与中心丝的电容耦合，会感应出负脉冲，幅度约是中心丝信号幅度的 $1/5-1/10$ 。这一负脉冲与前述的正脉冲部分抵消。

# 如何提高位置测量精度

## 多丝正比室



多丝正比室的位置测量精度受限于阳极丝的距离 $s$ 。缩小 $s$ 可以提高位置测量精度，但由于静电斥力， $s$ 不能太小，另一方面，缩小 $s$ 也意味着增加信号读出通道数。



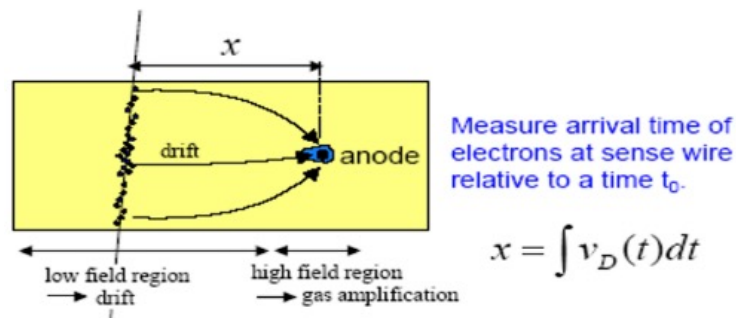
位置测量精度可否超越丝距带来的限制 ( $s/\sqrt{12}$ ) ?



测量带电径迹穿过探测器时与丝的距离 $x$  (电子的漂移距离)



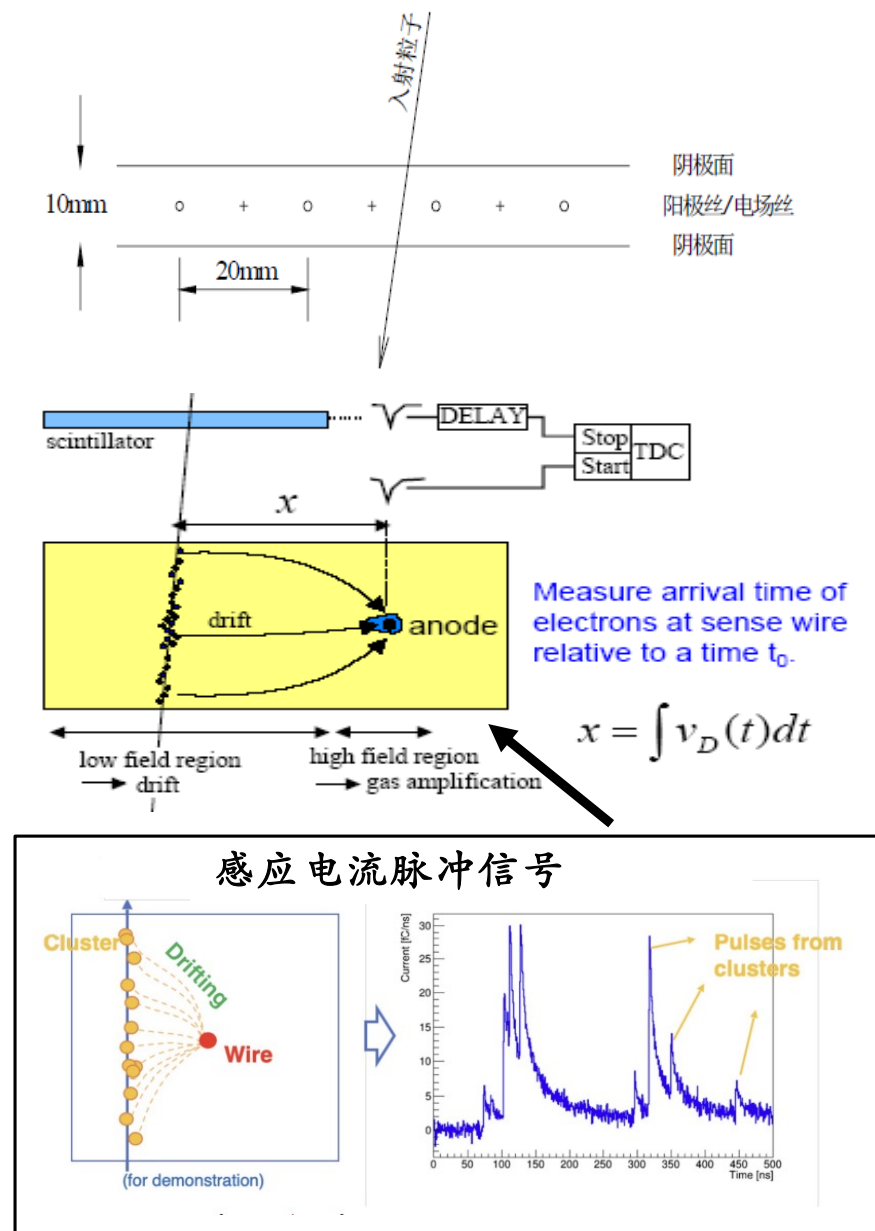
径迹位置 = 阳极丝的位置  
+ 电子漂移距离



位置测量精度显著好于丝距

漂移室

# 漂移室的基本结构和原理



- 漂移室由**多个漂移单元**组成，被密封在一个室内，充有工作气体。
- 每个漂移单元由阳极丝、电场丝和阴极面构成（有些漂移室设计有多种电场丝，处在不同电位，甚至也可以没有电场丝，阴极面也可能由丝构成）。
- 通过使阳极丝、场丝和阴极面各自处在适当的电位，可以在**漂移单元**内很大范围内形成**均匀电场**。
- 设入射粒子穿过漂移单元的时刻为 $t_0$ ，随即瞬间在漂移单元内产生电离，电离电子在单元内的均匀电场作用下**以比较稳定的速度向阳极漂移**，到达阳极丝表面附近产生雪崩放大，雪崩产生的正离子背离阳极丝漂移，**此时有脉冲信号输出**。设原初电离电子的漂移时间为 $\Delta t$ ，脉冲信号产生的时间为 $t$ ，则 $t = t_0 + \Delta t$ 。再假设阳极丝位置为 $x_0$ ，电子漂移速度为 $W$ ，则入射粒子的位置 $x$ 为：

如果电子漂移速度为一个严格的常数，则有：

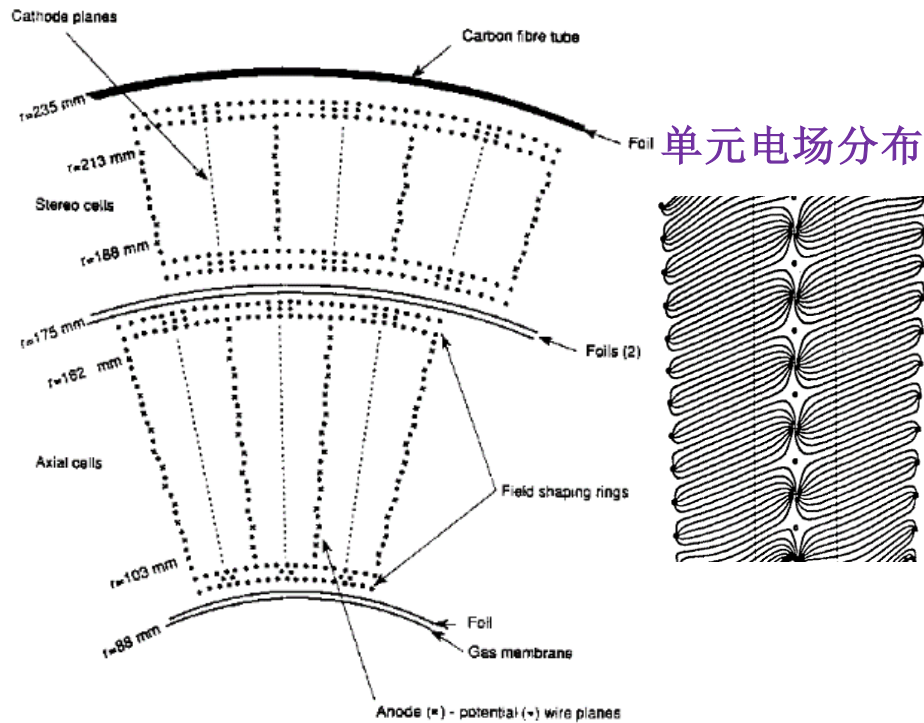
$$x = x_0 + (t - t_0)W$$

$$x = x_0 + \int_{t_0}^t W dt$$



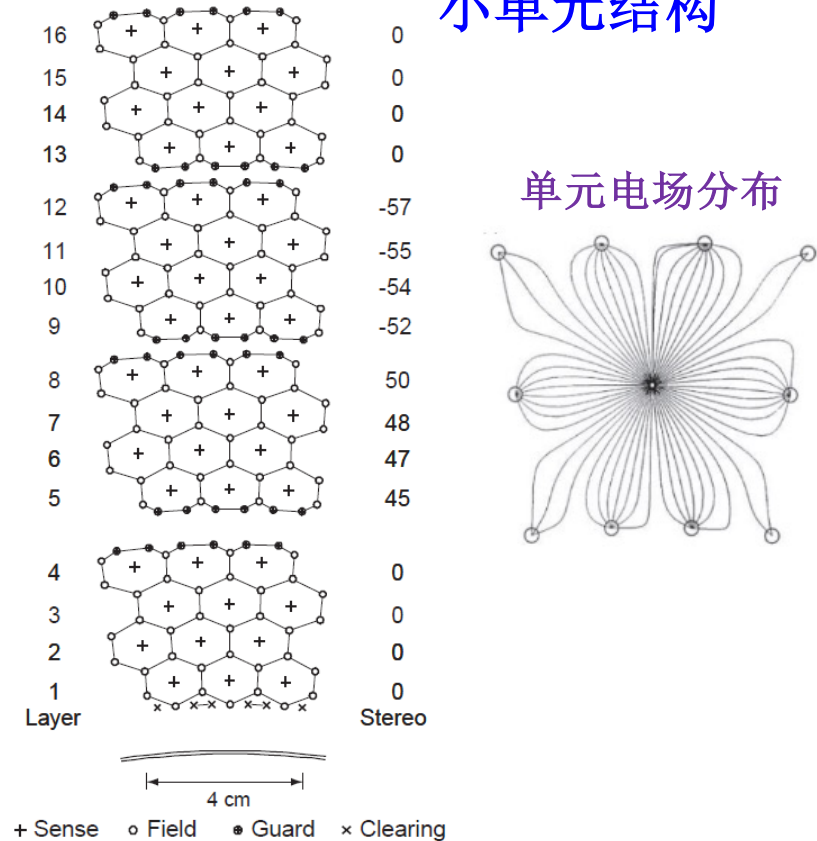
# 圆柱形漂移室

## 喷注室单元结构：大单元结构



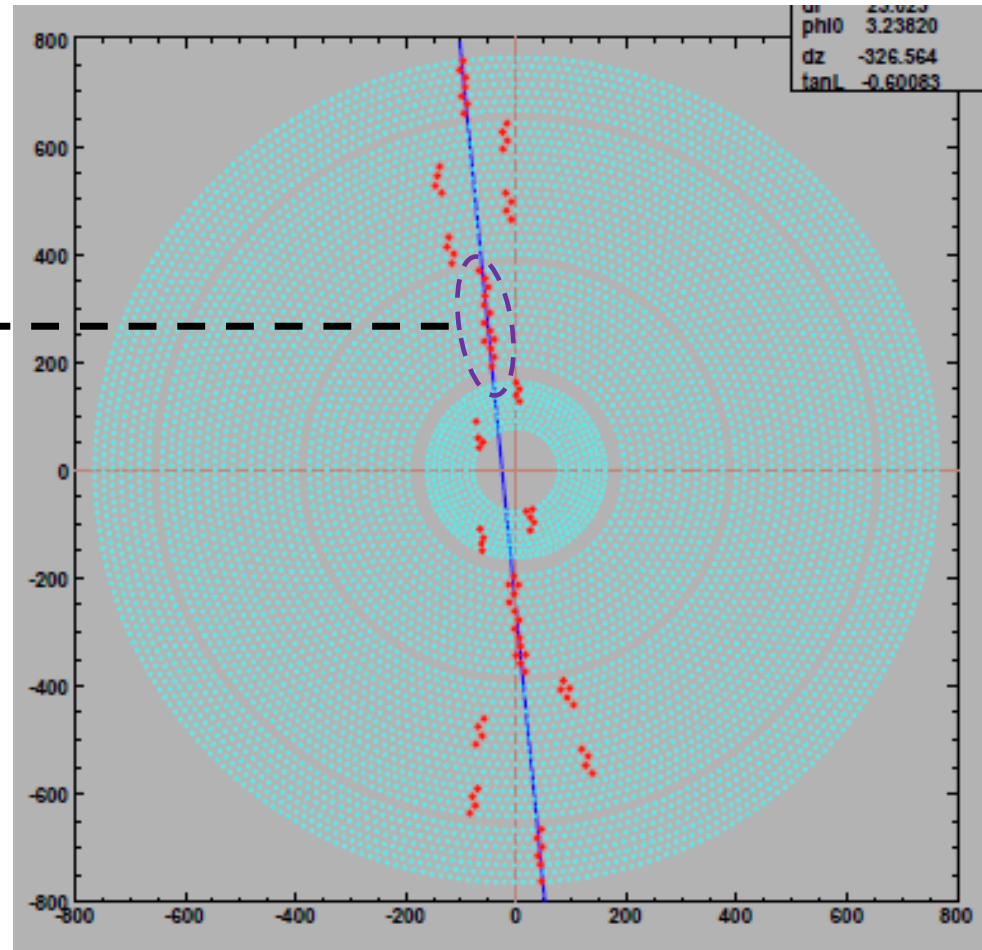
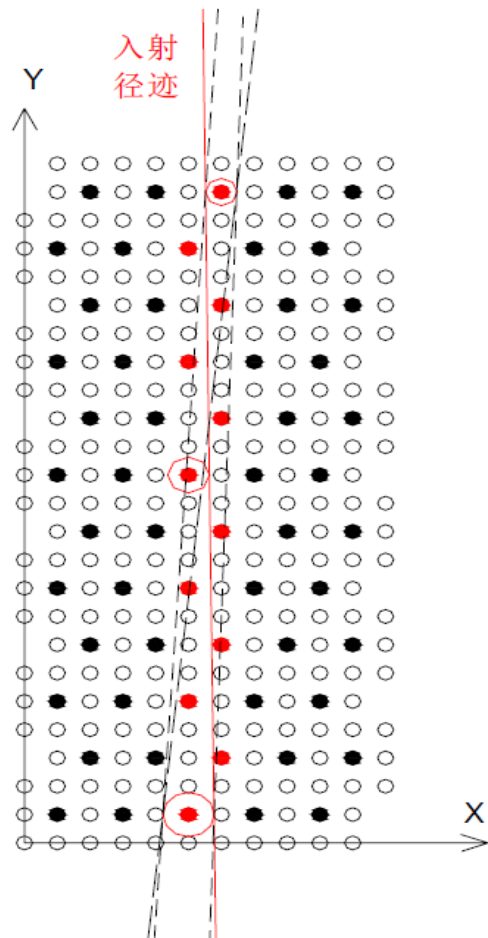
- 单元电场均匀，漂移速度接近常数，刻度简单
- 边缘效应小，慢漂移的死区小
- 单元电荷收集区域均匀，界限明确，便于  $dE/dx$  刻度
- 自然的信号丝分组，便于左右分辨和径迹寻找

## 小单元结构



- 漂移距离短：响应快，计数能力高；扩散效应小，空间分辨率好。
- 单元小：每个单元接受到的辐照剂量小，寿命长
- 丝层间的死区少，有利于  $dE/dx$  测量
- 丝间距不会很小，丝张力不必很高

# 对带电粒子的径迹测量



入射粒子穿过的每个漂移单元测得的漂移时间为  $\{t_{t/z}^{od}\}$   
 结合电子漂移速度  $\sim 3$  可以得到每个单元对应的漂移距离

$$k_{t/z}^{od} = \{t_{t/z}^{od}\} \cdot \sim$$

假定入射粒子径迹为一条倾斜角为  $\theta$ ，截距为  $X_0$  的直线，  
 则位置在  $(x_{ch}, y_{ch})$  的信号丝到这条直线的距离为

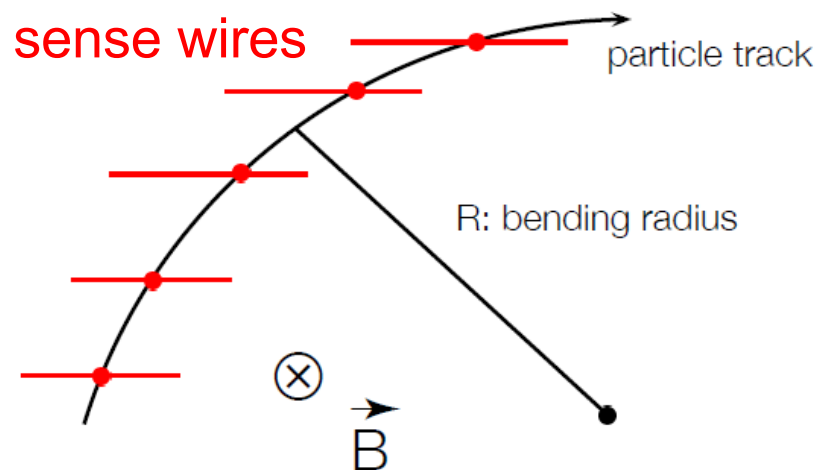
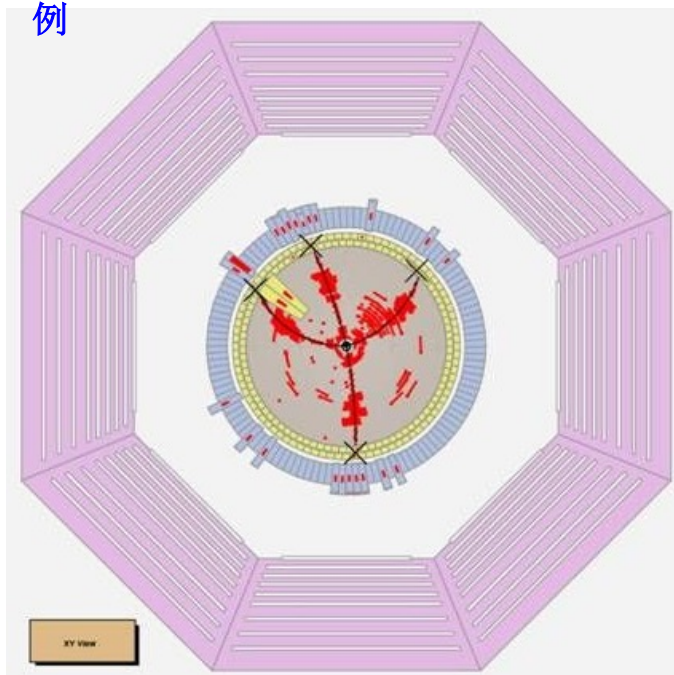
$$k_{t/z}^{od} = \frac{y_{ch} - X_0 \tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}}$$

利用最小二乘法进行径迹拟合，得到  
 径迹参数  $\theta$  和  $X_0$ ，完成径迹测量：

$$\chi^2 = \sum_{hit} \frac{(d_{mes}^{hit} - d_{track}^{hit})^2}{\sigma_{\Delta}^2}$$

# 对带电粒子的动量测量

BESIII记录到的一个正负电子对撞事例

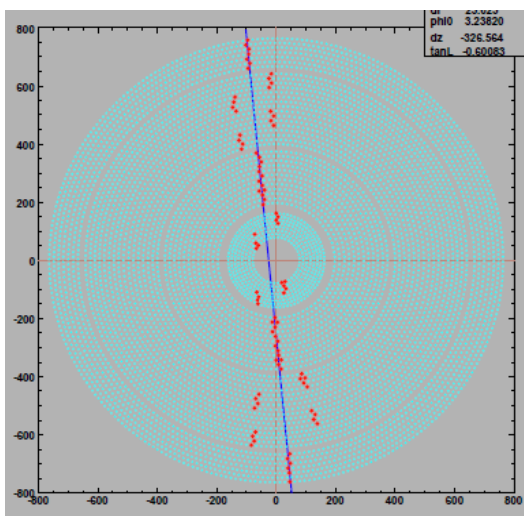
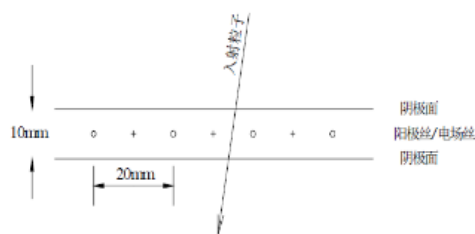


在漂移室中引入轴向磁场，测量带电粒子在磁场中的径迹，通过径迹在磁场中偏转曲率半径获得粒子的动量信息。

$$\frac{mv^2}{R} = evB \quad \rightarrow \quad p = eB \cdot R$$

$$p \left[ \frac{\text{GeV}}{c} \right] = 0.3B [\tau] \cdot R [\text{m}]$$

# 二维位置测量 → 三维位置测量

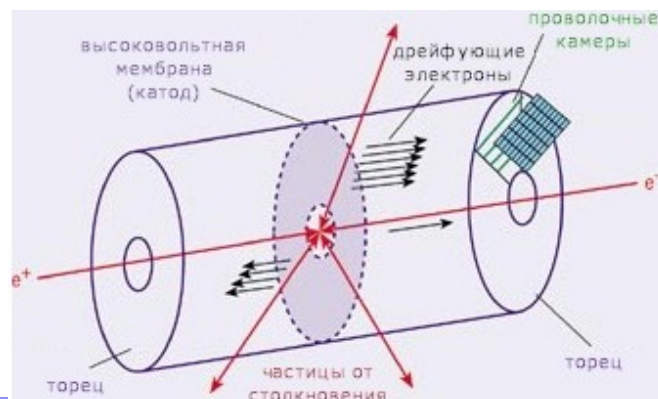


## 漂移室

漂移室直接测量垂直于丝的平面内的二维位置，对于沿着丝方向的位置则只能采用间接方式测量（斜丝）。

可否直接测量沿着丝方向（轴向）的位置？

让电离电子沿轴向漂移，并在给定横向平面上收集：（1）测量漂移时间能得到漂移距离从而得到电离的轴向位置；（2）电子在此横向平面中的位置等于电子产生时（即电离点）的横向二维位置。

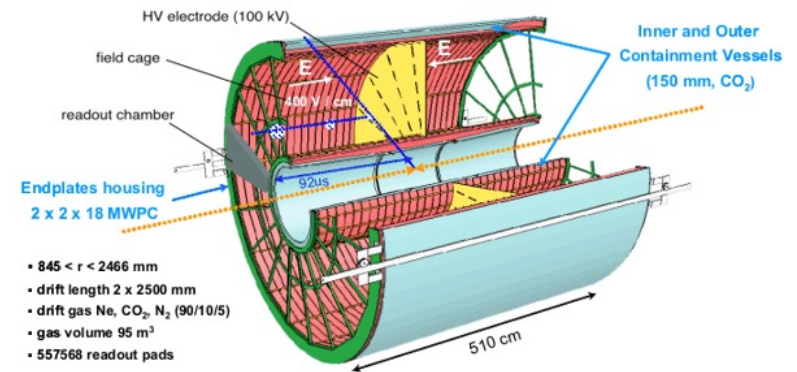
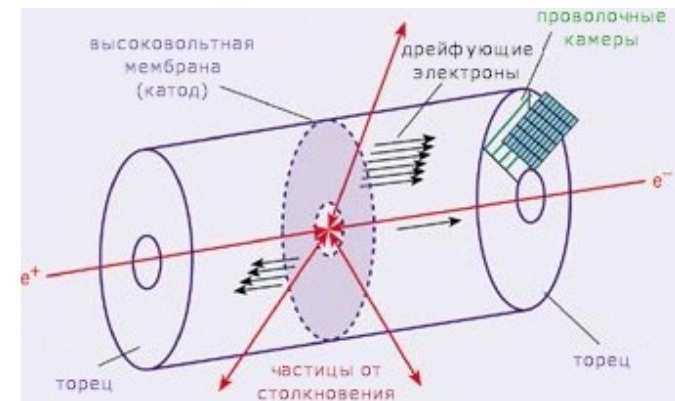
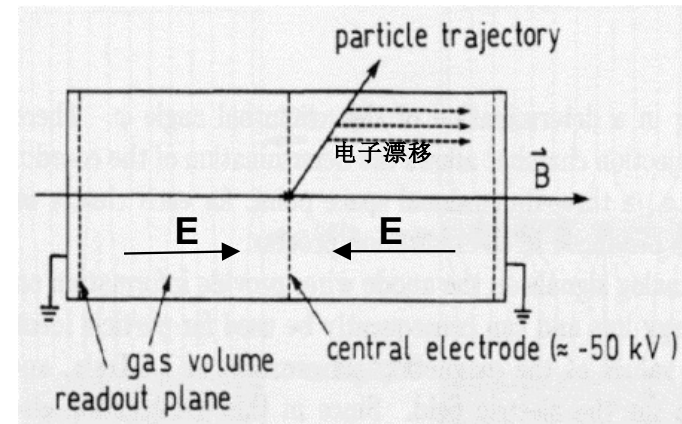


## 时间投影室



# 时间投影室的基本结构和原理

- 时间投影室通常为一个充满气体的圆柱形室体，与漂移室不同，**内部无电极丝**。圆柱内壁和两端（以及中央）设置有电极，在适当的电压配置下在室内形成一个均匀的轴向电场。室体两端为电荷放大并收集区域，配置有信号读出结构。
- 入射带电粒子在室内的工作气体中沿入射径迹上产生电离，电离产生的电子沿电场方向漂移，最终到达两端被放大和收集，并在读出结构上感应出信号。
- **通过测量电子的漂移时间，结合电子漂移速度可以得到入射粒子原初电离点的轴向(Z)位置信息。**由于电子始终沿轴向漂移，其在XY平面内的位置在漂移过程中不变，因而其在室体两端被测量到的XY坐标即是原初电离点的XY坐标。



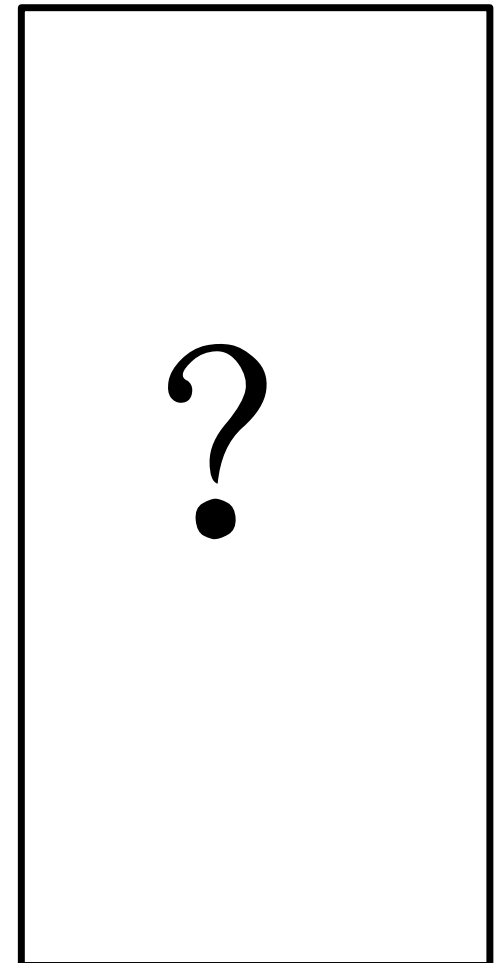
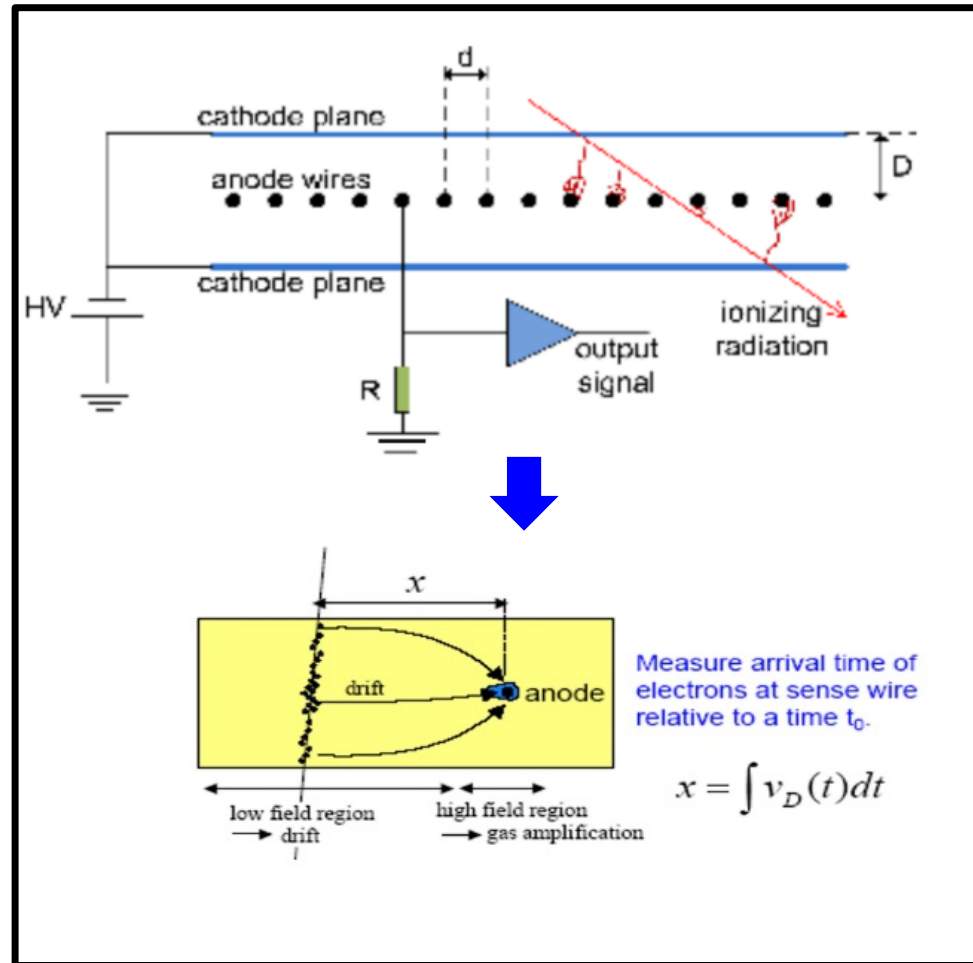
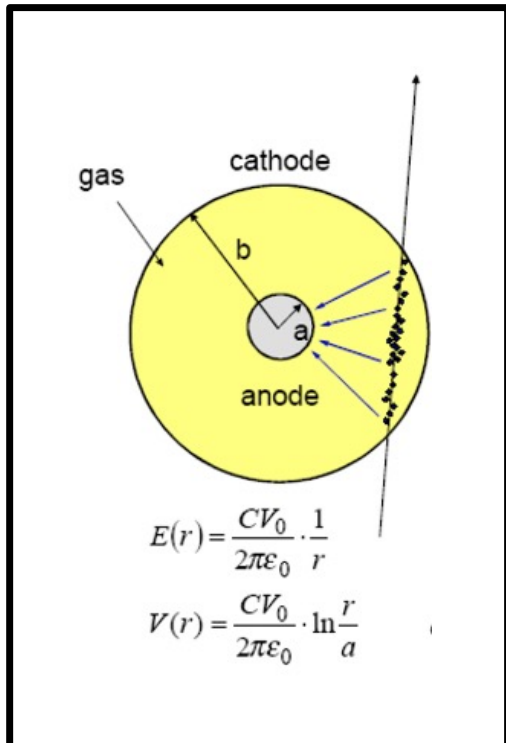
时间投影室是一个“三维(XYZ)”径迹探测器!

计数测量  
能量测量

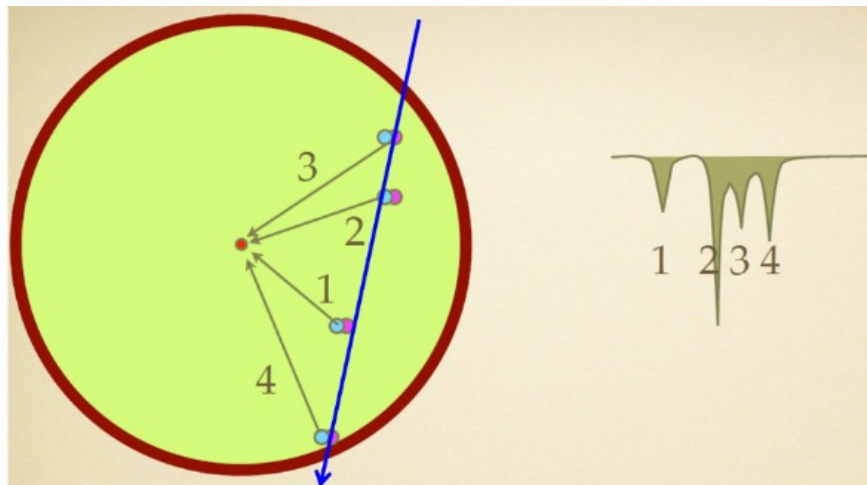


位置/径迹测量

时间测量  
快速定时



# 如何提高响应速度和时间分辨？



具有丝结构的气体探测器（正比计数器、多丝正比室、漂移室...）的典型特点：

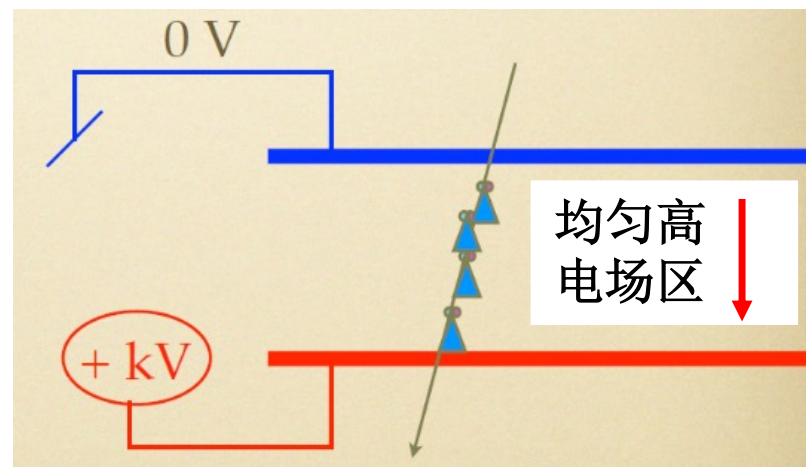
原初电离团中的电子在有限的速度下先后漂移到阳极丝附近的高电场区，不同电离团的到达时间差别比较大。随即，电子在高场区引发雪崩放大，产生的电子和正离子分别朝阳极和阴极漂移，电子漂移路程可忽略，离子漂移则感应出一系列的脉冲信号，对应先后到达阳极附近的原初电离团。

响应比较慢，输出信号的时间晃动比较大，只有首先到达阳极的少数原初电子对时间测量有贡献，其余电子对于时间测量都“浪费掉了”。

可能的改善办法

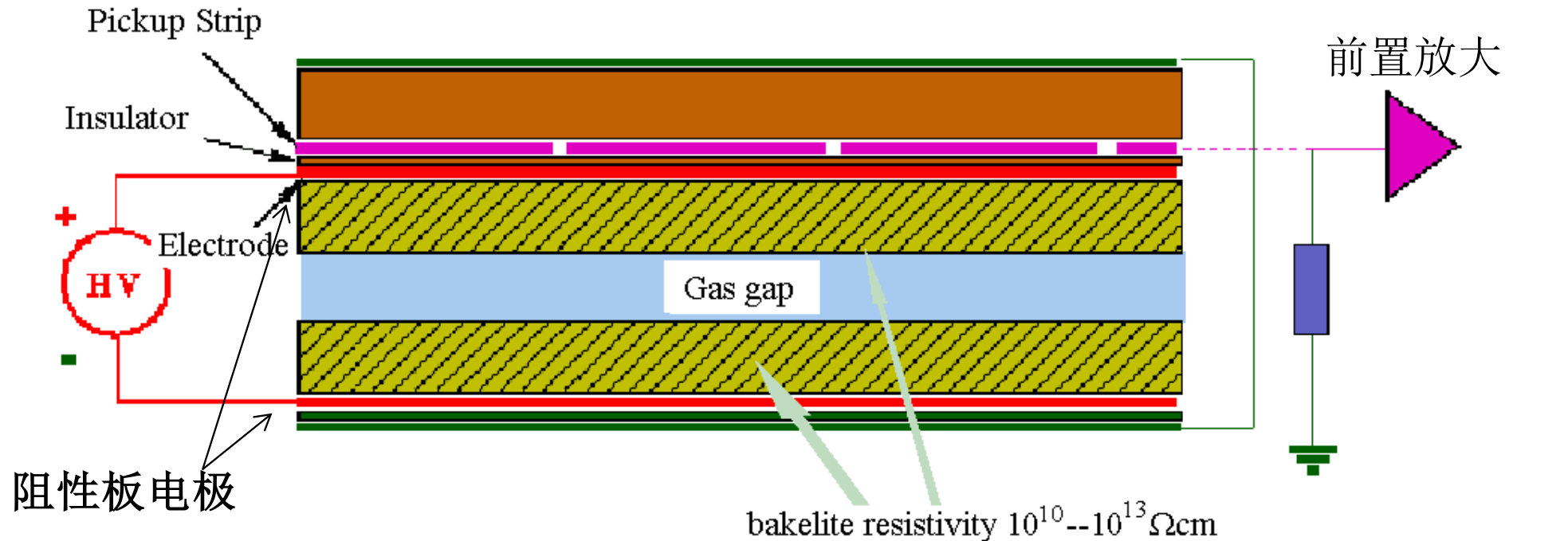
在探测器灵敏体积内产生足够高的**匀强电场**，使得对于所有原初电离，**雪崩放大**能够**就地、立刻进行**，这样所产生的信号是所有这些同时发生的雪崩信号的和，并且是相对于粒子入射的**即时信号**。

匀强高电场 → 平行板电极 →



# 阻性板室 (RPC)

感应电极：在电荷漂移过程中，感应出信号。



常用阻性板材料  
酚醛树脂板或玻璃板

典型参数  
电阻率:  $10^{10}$ - $10^{13}$   $\Omega\cdot\text{cm}$   
板厚: 2mm  
气隙: 2mm

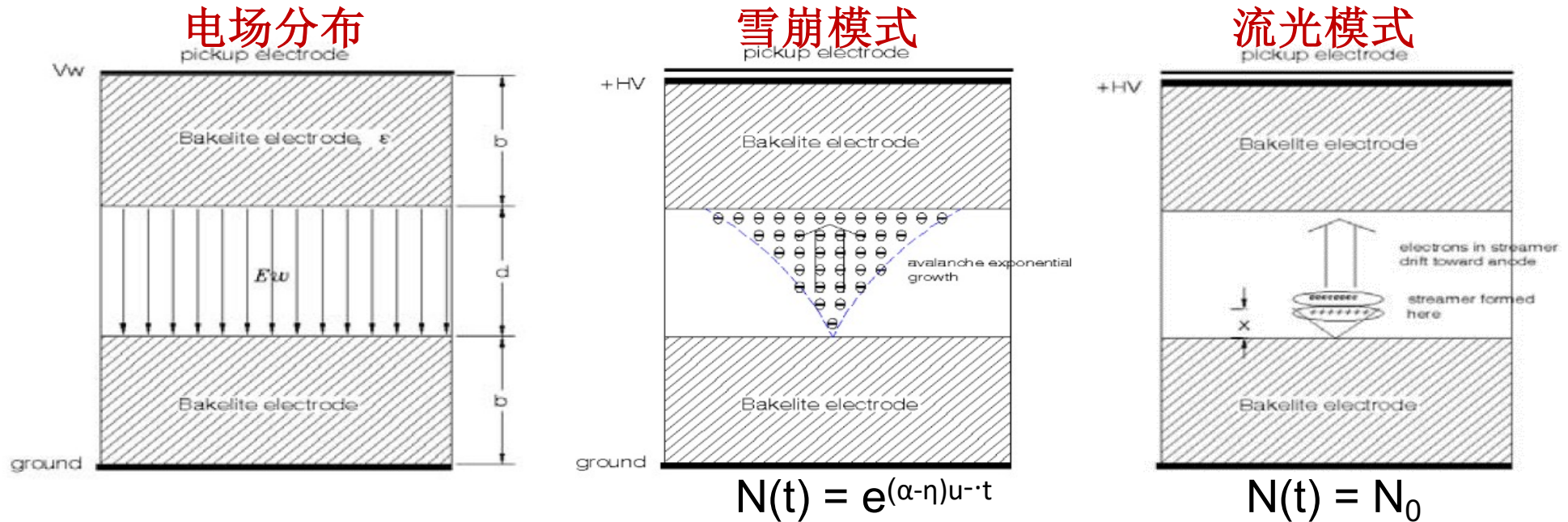
常用工作气体之一  
氟里昂+i-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>+SF<sub>6</sub>

- 加高压的电极（上图鲜红色）通常为喷在阻性板外表面上的薄石墨层，面电阻为 $\sim\text{M}\Omega/\square$ ；
- 信号感应电极可以灵活排列，以获得指定方向的位置测量；
- 阻性板之间的间隙对气体增益影响很大，因此，必须要保证阻性板间隙的均匀性，为此阻性板之间需要有支撑结构（例如使用鱼线）。



# 放电机制和信号感应

- 阻性板室可以工作在雪崩模式或流光模式
- 放电产生的电子快速向阳极漂移,产生快信号,正离子则缓慢漂向阴极.



**忽略正离子慢感应信号，只考虑电子感应信号：**

$i^-(t) = e_0 N(t) \cdot u^- \cdot E_w$ ,  $N(t)$ : 电子数,  $u^-$ : 电子漂移速度,  $\epsilon$ : 阻性极板介电常数,  $\alpha$ 为第一汤逊系数,  $\eta$ 为吸附系数, 权场  $E_w = 1/(2b/\epsilon + d)$ , 因而  $i^-(t) = e_0 N(t) \cdot u^- / (2b/\epsilon + d)$ , 积分后能得到总感应电荷  $Q_{ind}$ 。

雪崩模式:  $Q_{ind}/Q_{total} = \epsilon / [(2b+d \epsilon) (\alpha - \eta)]$ , 典型值  $\sim 4\%$

流光模式:  $Q_{ind}/Q_{total} = [(d-x) \epsilon] / (2b+d \epsilon)$ , 典型值  $\sim 60\%$

# 多气隙阻性板室 (MRPC)

可否进一步提高RPC的时间分辨？

→ 限制RPC时间分辨的主要因素是什么？

对于普通RPC，在正常电压配置下，只有穿越了大部分气隙的雪崩过程才能产生足够强的信号（超过甄别阈）

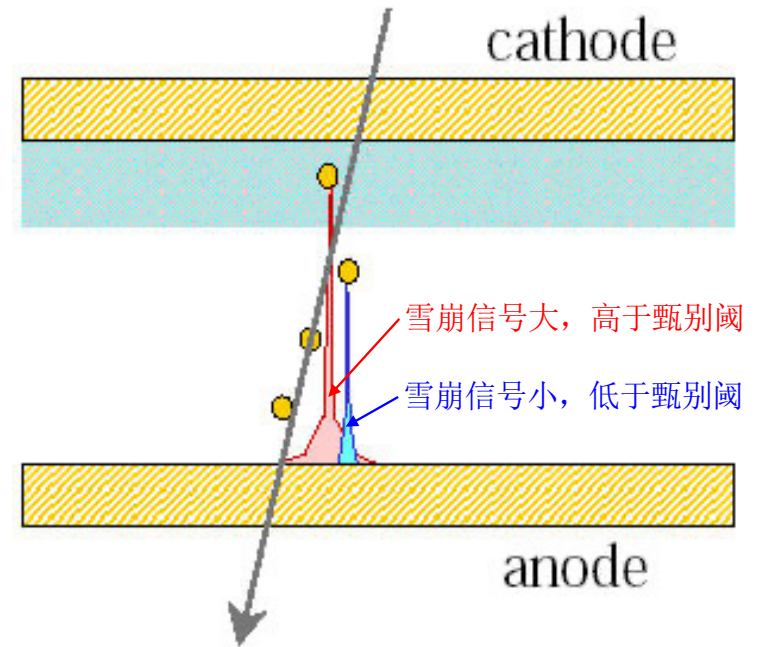
→ 在实际运行中，只有靠近阴极的少数原初电离对时间测量有贡献。

模拟给出  $\sigma_t = \frac{1.28}{(\alpha - \eta)v}$ ，其中  $\alpha$  为汤生系数， $\eta$  为吸附系数， $v$  为漂移速度。

因此要提高时间分辨可以通过增强电场从而提高 $\alpha$ 和 $v$ 来实现，但是：

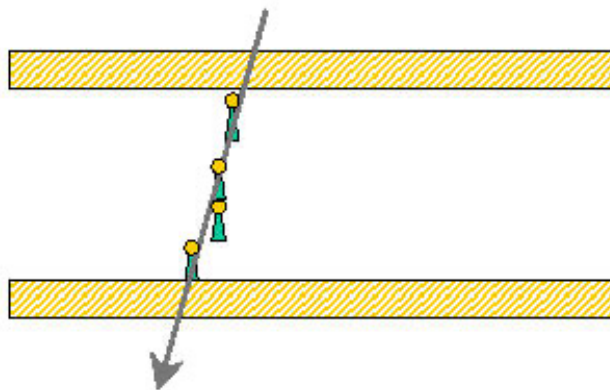
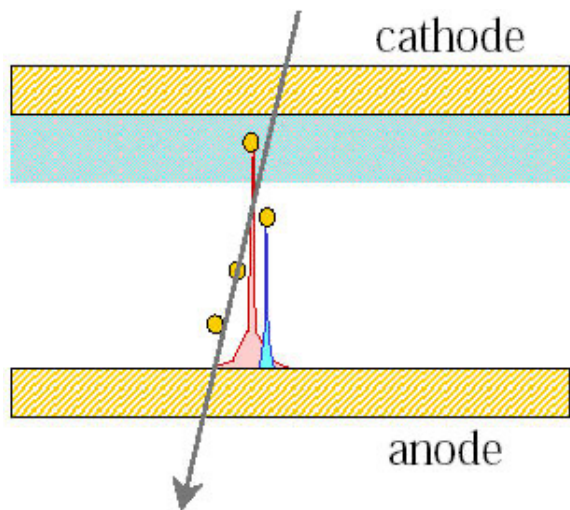
→ 电场过高会产生流光放电 → 制约了电场强度的进一步提高！

**解决办法：从单气隙到多气隙 (RPC→MRPC)**

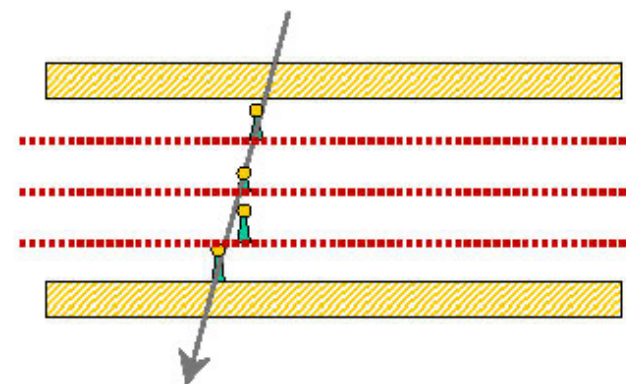


# 从单气隙到多气隙：RPC→MRPC

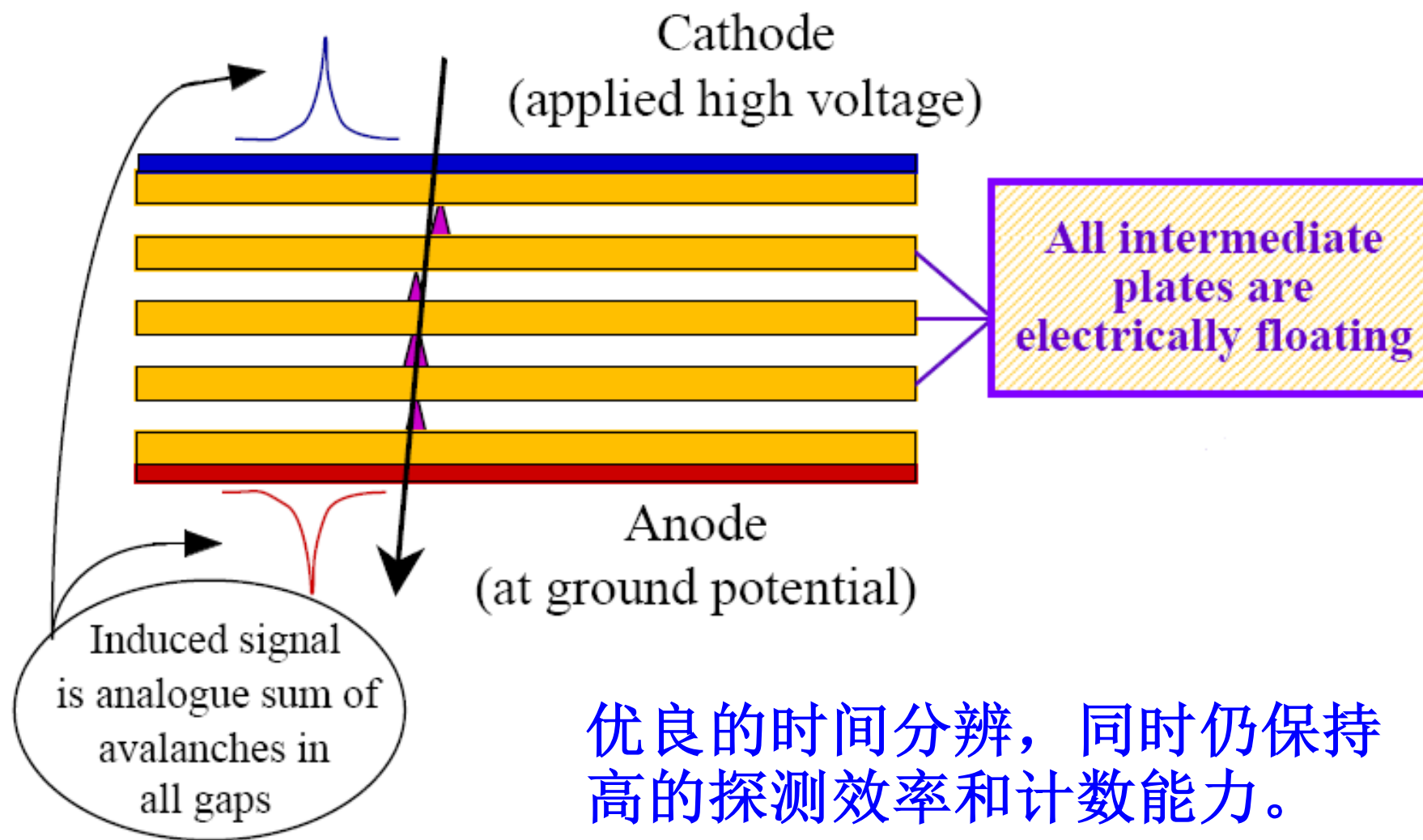
减小气隙能限制雪崩的发展，减小流光发生的概率→从而允许增高气隙电场强度→增大 $\alpha$ ，加快漂移雪崩过程→改善时间分辨



窄气隙信号小，将多个窄气隙叠加，电极感应信号为各气隙贡献之和，从而保证了探测效率，而窄气隙的高时间分辨特点依然得到保留。



# 结构和性能





# 什么是微结构气体探测器？

Google

micropattern gaseous detectors



Sign in

All

**Images**

News

Videos

More

Settings

Tools

SafeSearch on

cern

rd51

resistive

electron multiplier

gem

mpgd

micromegas

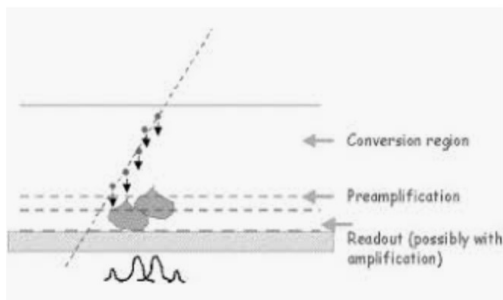
mhsp

protected micropattern

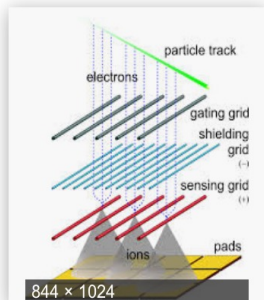
chambers

figure

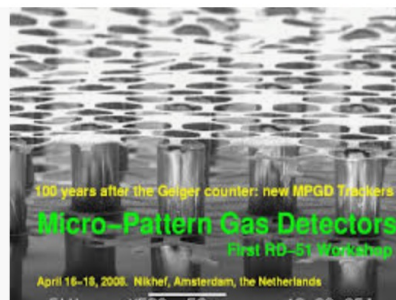
vuv electroluminescence



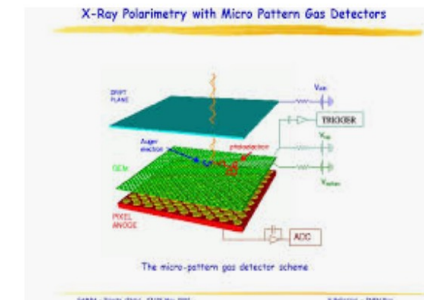
Micro-pattern gaseous detectors ...  
sciencedirect.com



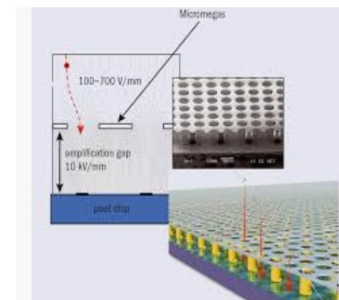
Micro Pattern Gas Detectors  
lctpc.org



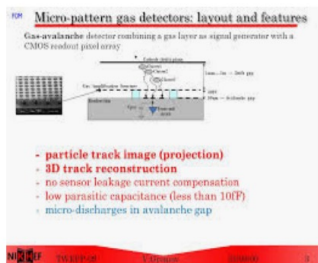
Micro-Pattern Gas Detectors (RD-51 ...  
nikhef.nl



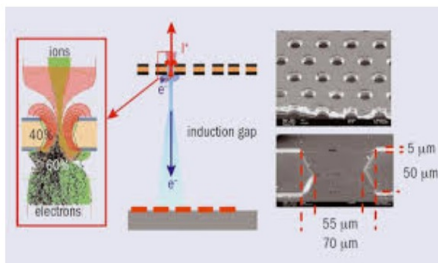
X-Ray Polarimetry with Micro Pattern ...  
slideplayer.com



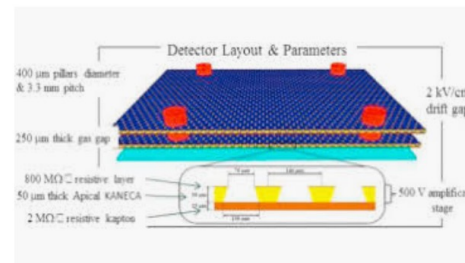
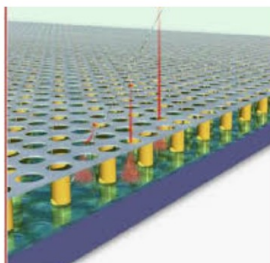
micropattern detectors – CERN Courier  
cerncourier.com



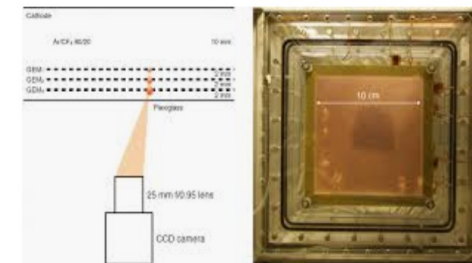
a prototype of a Front-end Pixel ...  
slideplayer.com



micropattern detectors – CERN Courier  
cerncourier.com

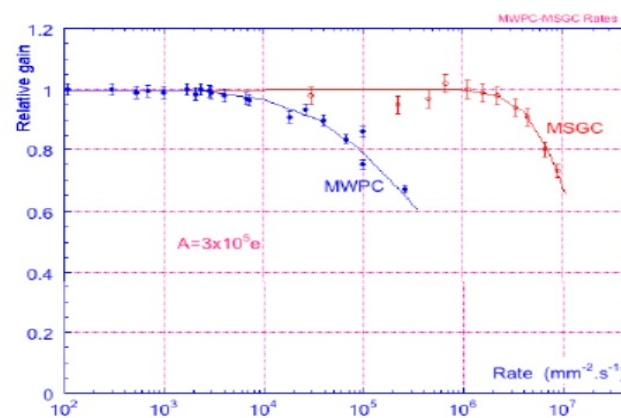
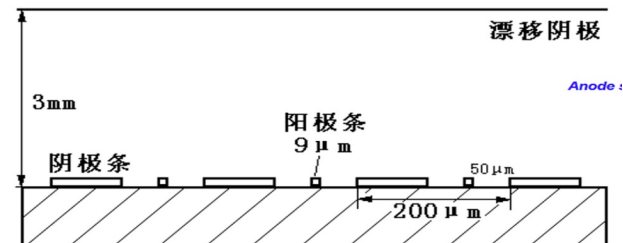
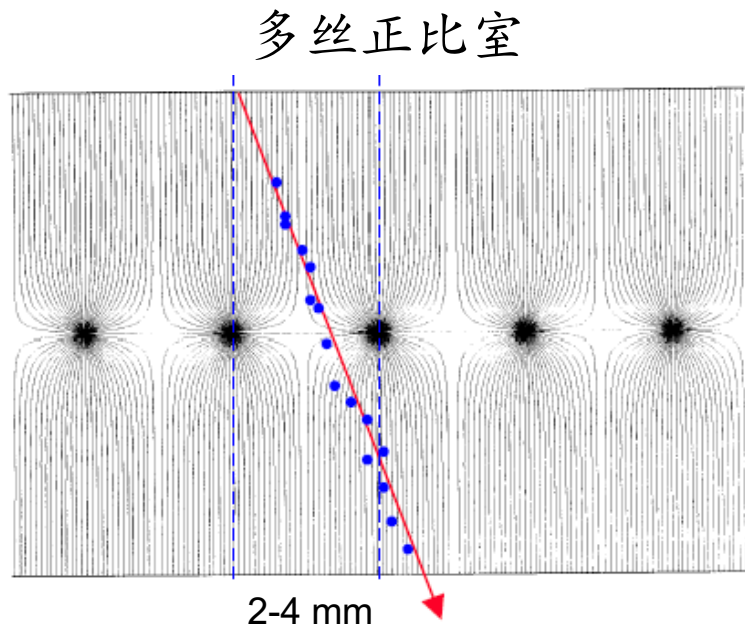


The μ-RWELL: A compact, spark protected ...  
sciencedirect.com



电极距离极小(<1mm)的高颗粒度气体探测器

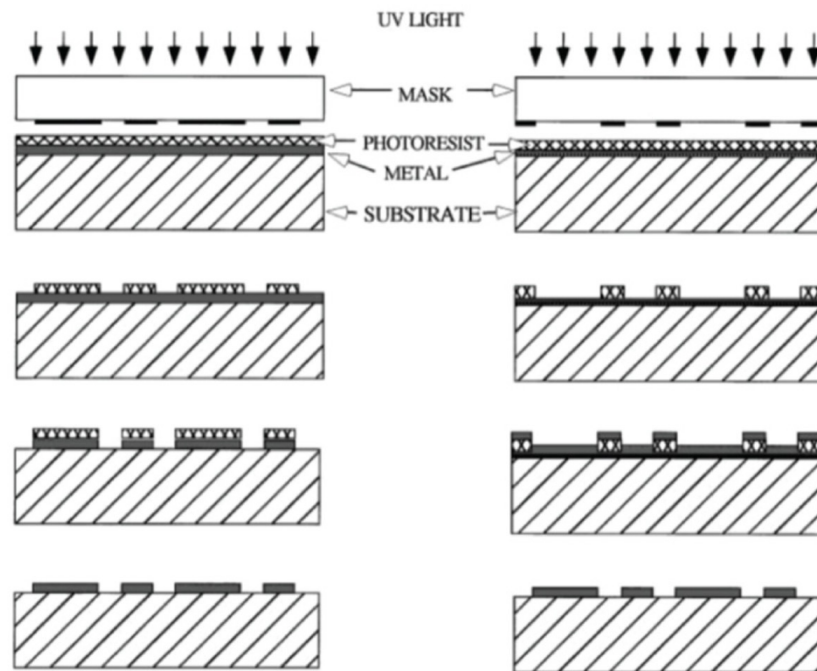
# 为什么要“微结构”？



- 传统丝室计数率能力低、位置分辨不够高，不能满足高计数率高精度实验的要求。
- 缩小电极之间的距离能克服以上不足 → **微结构**
  - 加快离子收集速度 → **高计数率能力**
  - 提高探测颗粒度 → **高位置分辨**

# 如何实现“微结构”

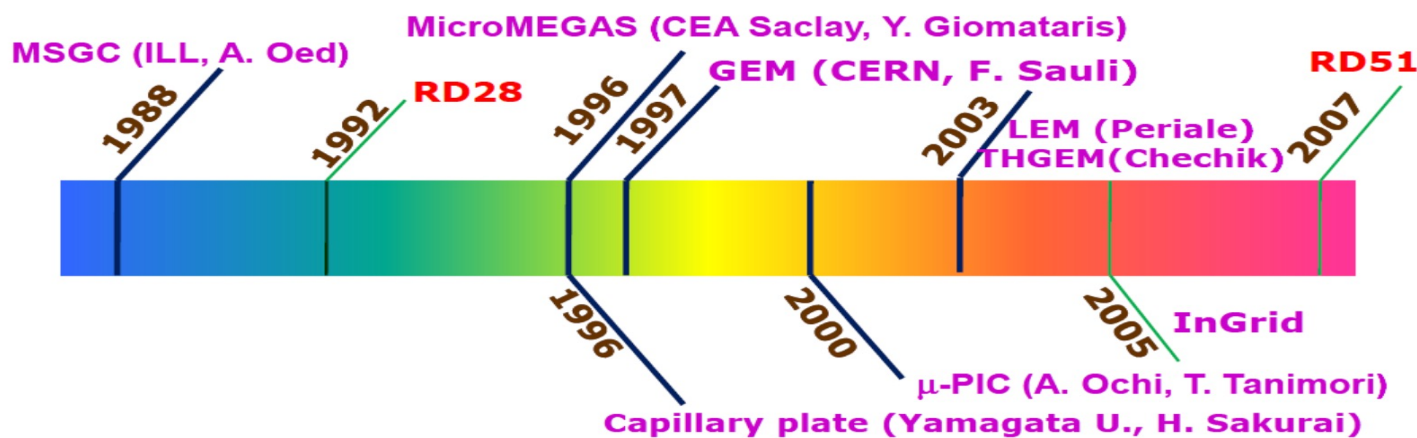
- 真正的突破：1988年，A. Oed 将微电子制造中的光刻工艺引入气体探测器制作中，并制作出了第一个微结构气体探测器 → 微条室 (MSGC)



光刻工艺的引入引发了微结构气体探测器的蓬勃发展

# 发展历程

- 高计数率下的老化效应和强电离诱导的打火损伤限制了微条室的应用。
- 但二十多年来，光刻技术、微电子工艺和印刷版电路技术的进步极大促进了微结构气体探测器的发展。
- 各种新的微结构概念不断涌现，相关技术不断发展。
- 2007年成立RD51合作组
- 目前比较主流和成熟的技术
  - MicroMegas、GEM、THGEM

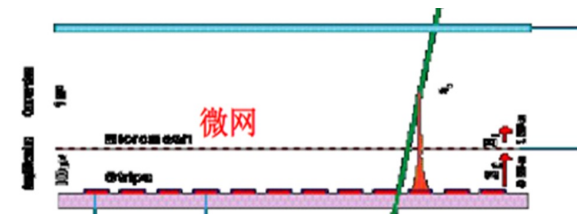
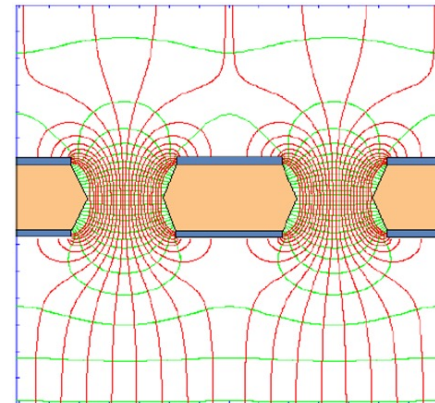
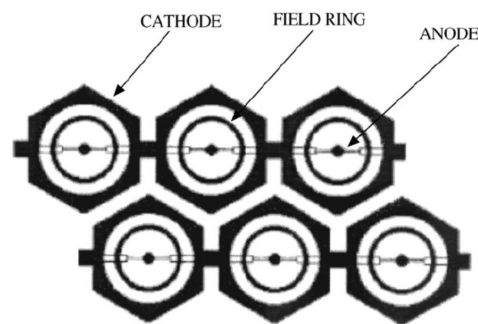
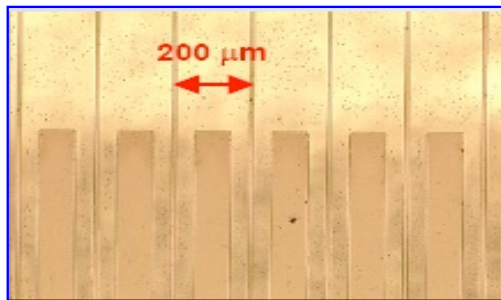


注：此图显示的只是所有开发的微结构气体探测器的一部分

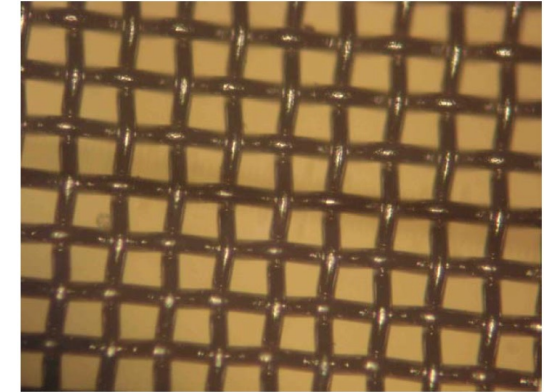
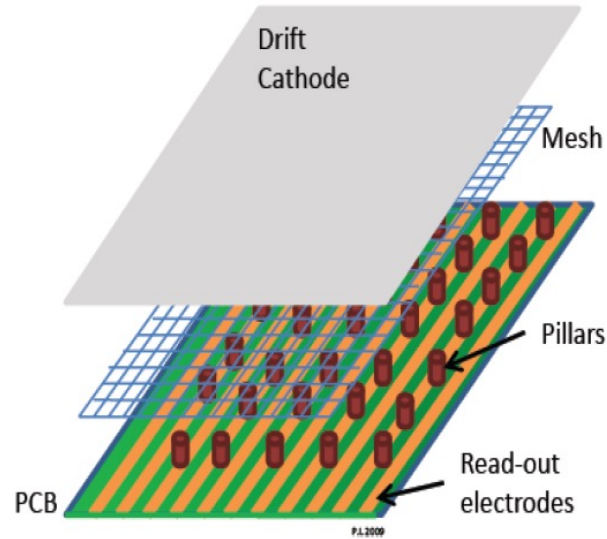
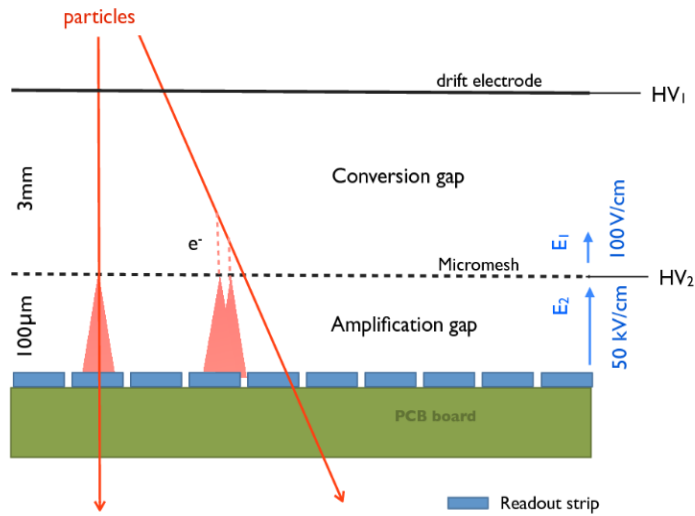


# 特点和分类

- 微结构气体探测器：电极距离极小( $<1\text{mm}$ )的高颗粒度气体探测器。
- 性能特点（趋势）：高计数率能力、高位置分辨、好的时间分辨和能量分辨、抗辐照、离子和光子反馈小、大面积、低造价
- 主要类型：条型、点型、孔型、平行面型

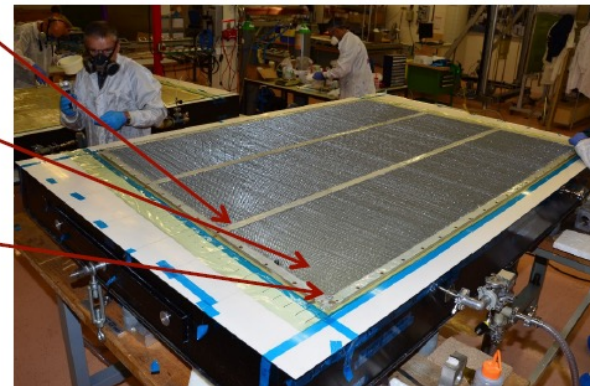
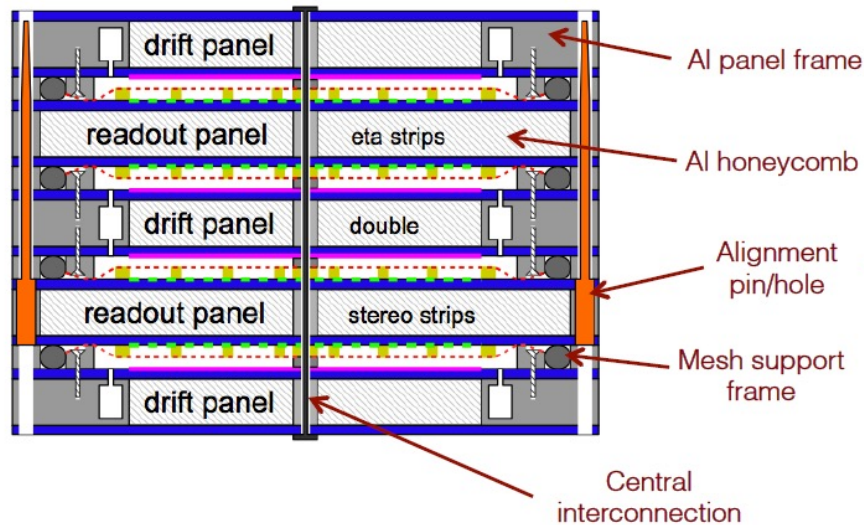


# MicroMegas



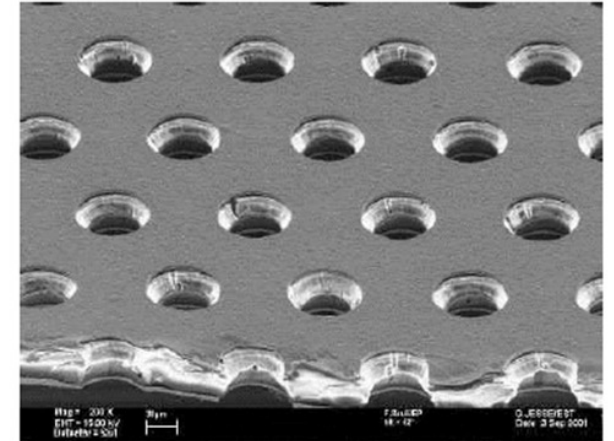
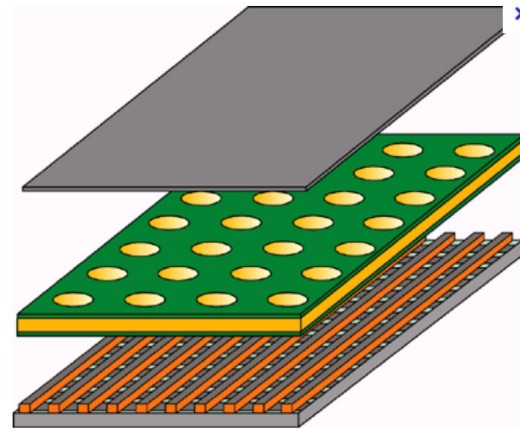
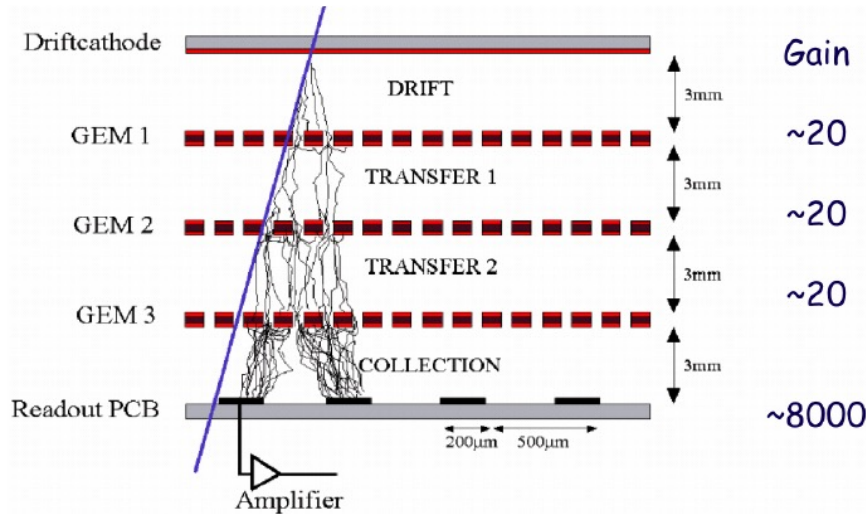
MIP: 位置分辨 $<100\mu\text{m}$ , 时间分辨 $<10\text{ns}$ , 效率 $>98\%$ , 计数率能力 $>1\text{MHz}/\text{cm}^2$

ATLAS实验NSW升级中的MicroMegas, 单个探测器面积 $\sim 2\text{--}3\text{m}^2$ , 总面积 $\sim 1200\text{m}^2$



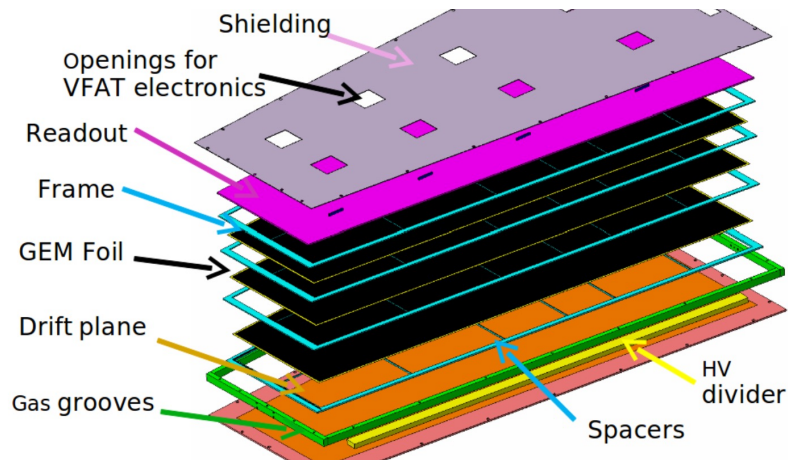


# GEM



MIP: 位置分辨 $<100\mu\text{m}$ , 时间分辨 $<10\text{ns}$ , 效率 $>98\%$ , 计数率能力 $>1\text{MHz}/\text{cm}^2$

CMS实验MUON升级中的GEM (GE1/1), 单个探测器面积 $\sim 0.3\text{m}^2$ , 共144个GEM室



# 气体探测器的局限

## 位置分辨不够好

- 扩散效应较大
- 漂移距离较长

## 时间响应不够快，计数率能力不够高

- 漂移距离较长
- 漂移速度较慢

## 实现能量测量所需体积较大

- 密度小，反应率低

注：以上缺点或不足并不是绝对的，或者不能克服的，例如：微结构气体探测器可以有很好的位置分辨，而MRPC的时间分辨也很高。



# 气体探测器→固体探测器

## 密度提高三个数量级

- 带电粒子计数测量

单位长度产生的电子离子数量提高约3个数量级

- 带电粒子能量测量

探测器体积较小、紧凑，能量分辨较好

- 光子探测

效率高，能量分辨较好

## 此外

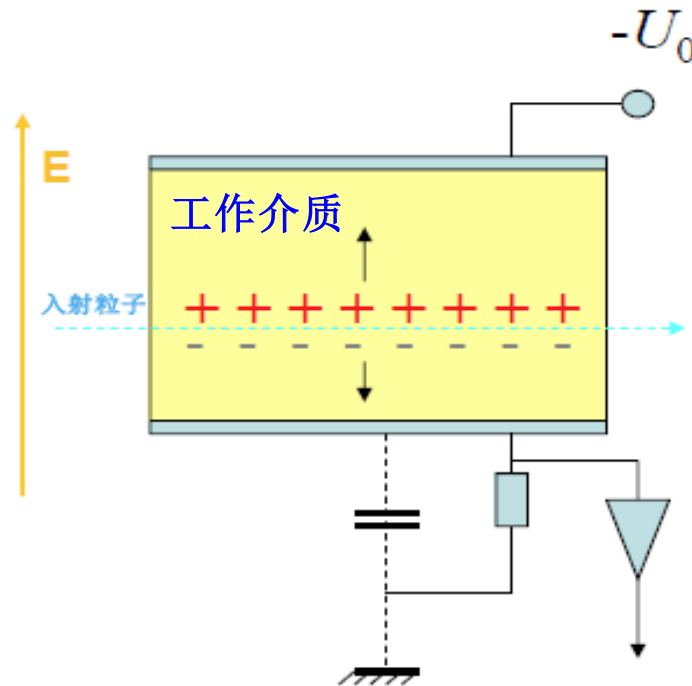
- 时间响应较快
- 可以实现很好的位置分辨

注：以上优点也并不是绝对的。

# 固体的选择

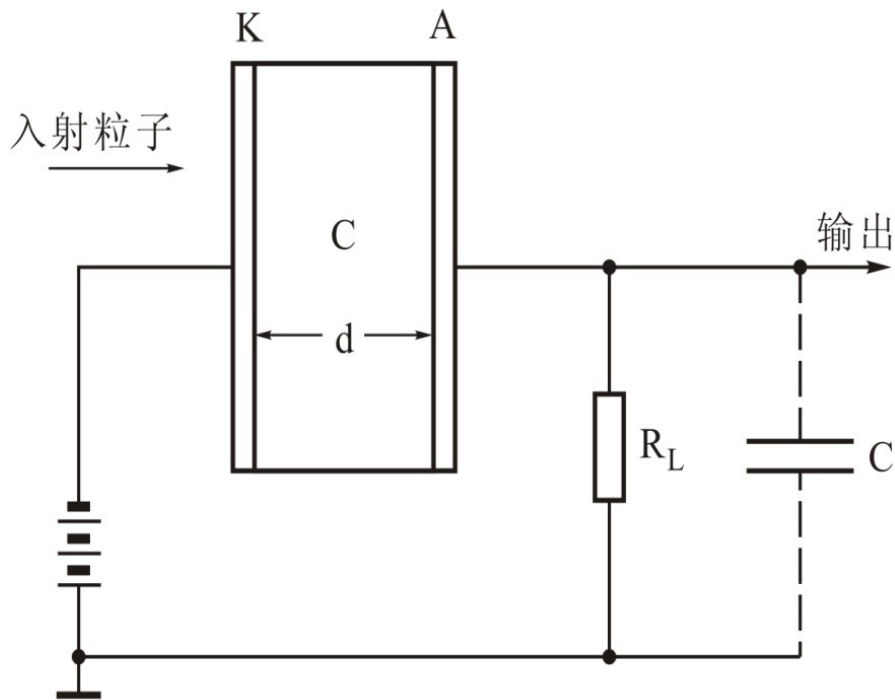
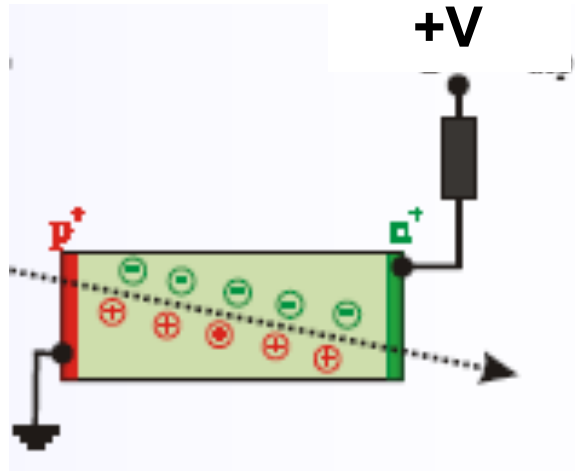
## 采用固体作为工作介质

- 导体？
- 绝缘体？
- 半导体？



- 导体：电极之间“短路”，无法工作。
- 绝缘体：入射粒子电离产生的电荷极易俘获或复合。
- 半导体：有可能克服以上问题，成为电离型探测器的工作介质！

# 半导体探测器的工作原理



半导体探测器的输出电路

- PN结加上反向偏压，耗尽层扩展，甚至可以全耗尽。
  - 耗尽层具有很高的电阻率，漏电流很小，可以有很好的信噪比。
  - 外加电压几乎全部加在耗尽层，形成高电场区。
  - 耗尽层内载流子的寿命仍然足够长。
- 以上特点使得反向偏压下PN结的耗尽层成为理想的粒子探测灵敏区
  - 带电粒子穿过耗尽层，产生电子空穴对。电子空穴在高电场下分别向正负电极快速漂移，与此同时在电极上感应出信号。信号幅度正比于电子空穴对数目，即正比于入射粒子的能量损失。

# 半导体探测器的主要特点

- 优点

- 时间响应快，计数能力高
- 可以有很宽的能量响应线性范围和很高的能量分辨
- 可以有非常好的位置分辨
- 具有很好的工业基础
- 与读出电子学容易集成

- 缺点

- 一般无内部放大机制，信号较小
- 物质质量较多
- 整体造价高（包括附带的读出电子学系统以及冷却系统等）

*两大主要应用方向：能量测量和位置测量*

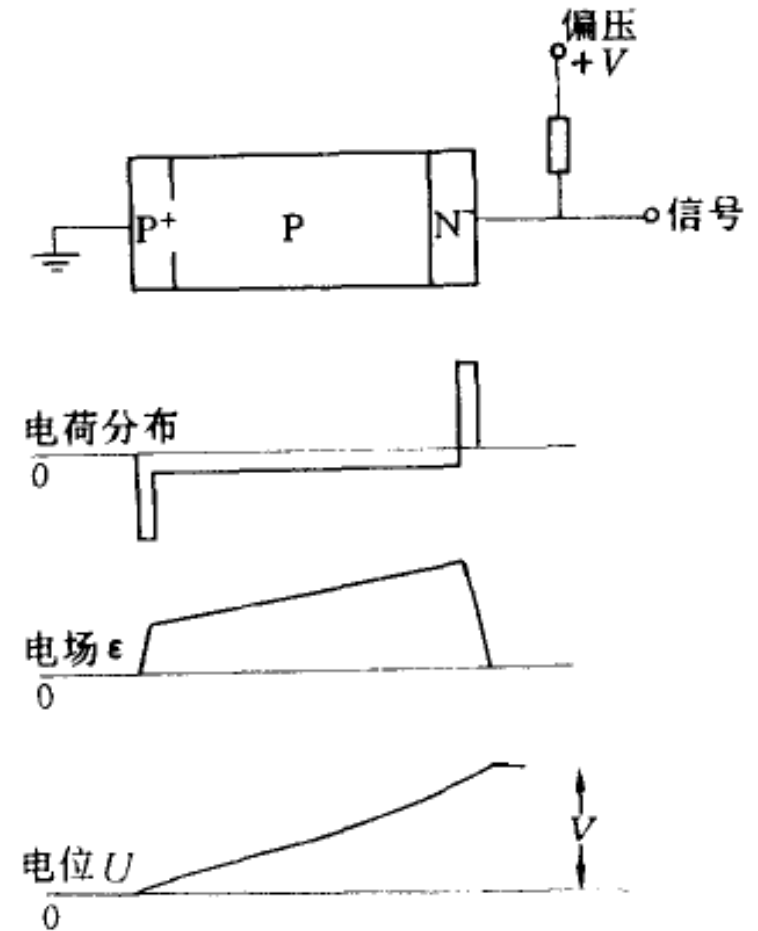


# 能量测量半导体探测器

- PN结型半导体探测器
- 锂漂移型半导体探测器
- 高纯锗半导体探测器
- 化合物半导体探测器
- 特殊类型半导体探测器

# 高纯锗探测器的构成和特点

- **HpGe探测器的基本结构通常为 $N^+-P-P^+$ 结构。**
- **HpGe探测器对 $\gamma$ 射线有很高的探测效率和能量分辨。**
- **易制备成大灵敏体积的探测器，可在室温下储存，在低温下(170K)工作，性能仍很好。**

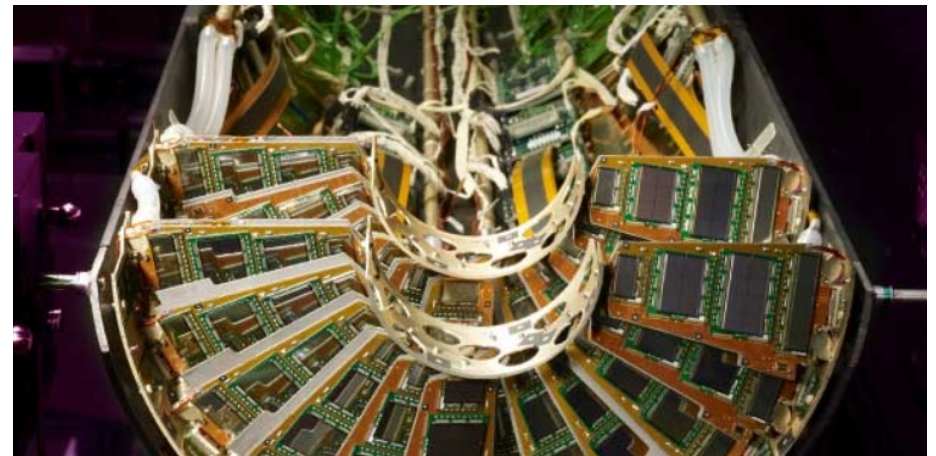
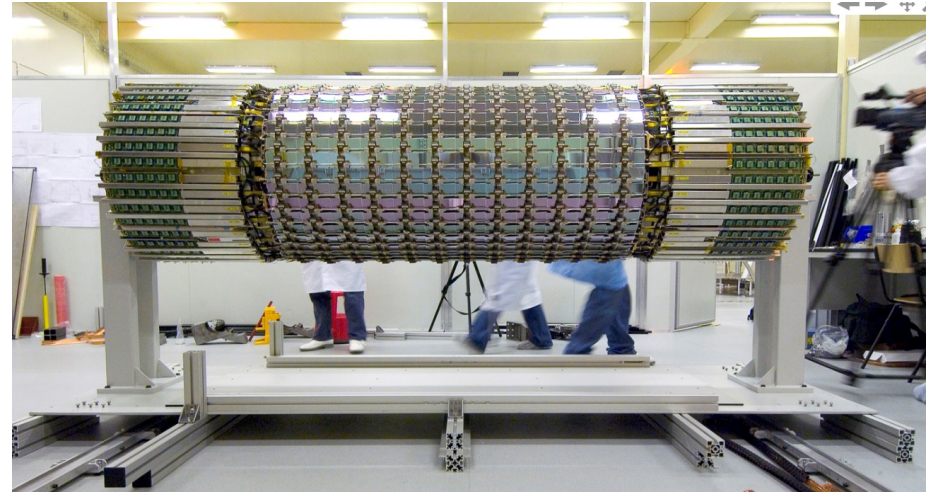


# 化合物半导体探测器

- 硅和锗两种单晶材料在半导体探测器中得到了广泛的应用。主要原因在于它们优良的载流子传输性能，即使在大体积下也不会出现严重的载流子损失。
- 但是它们也有不足。首先是它们的禁带宽度小，很多情况下必须要在低温下使用。另外，为提高 $\gamma$ 探测效率，我们仍希望能找到原子序数比Ge高的半导体材料。
- 一些化合物半导体材料具备的性质可以克服这些不足，例如 CdTe、CdZnTe、GaAs ...

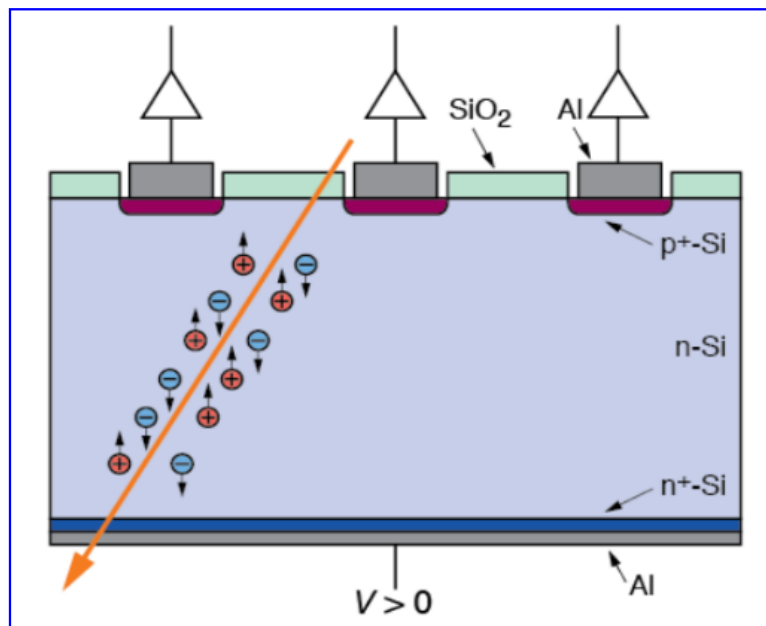
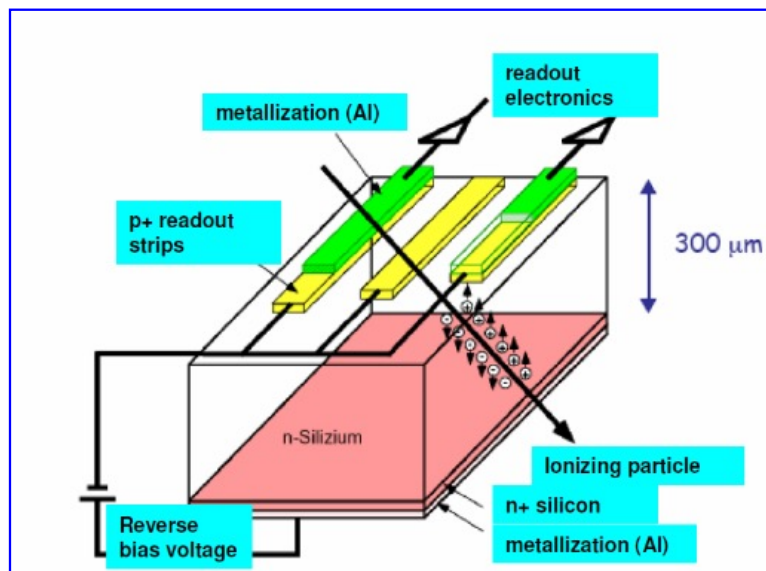
# 位置测量半导体探测器

- 硅微条探测器
- 硅像素探测器
- 硅漂移室
- ...





# 硅微条探测器的基本结构和工作原理

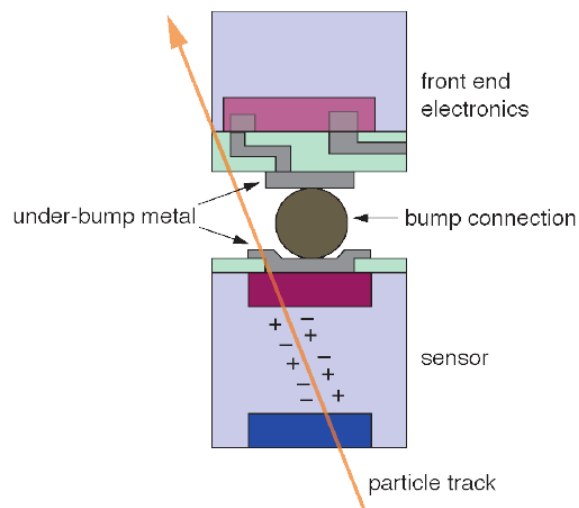
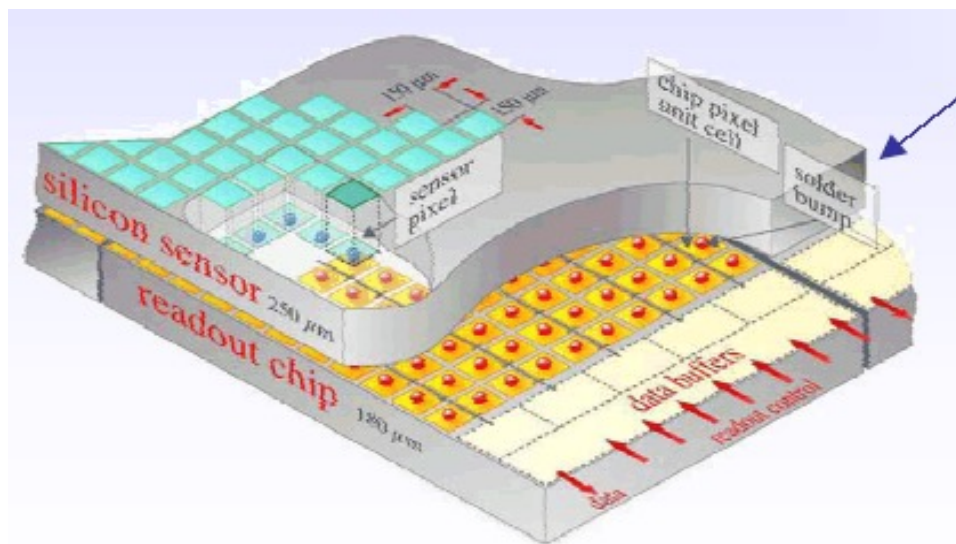


- N型硅半导体表面制作出高掺杂的P<sup>+</sup>微条，每个微条与N型半导体形成一个PN结，微条上附铝条形成微条电极(阴极)，微条之间用SiO<sub>2</sub>隔离。N型半导体底面制成高掺杂的N<sup>+</sup>层，其外表面附上一层铝，形成面电极(阳极)。
- 通过铝电极给这种条型PN结加上反向偏压，中间的耗尽层在外电场作用下随偏压升高而变厚，最终几乎扩展到整个N型硅，死区变得很小。
- 耗尽层电阻率很高，在反向电压下漏电流很小，电压几乎全加在其上，在其内产生了一个高电场。耗尽层因此成为一个灵敏区。
- 当有带电粒子穿过耗尽层时，产生电子空穴对。在高电场作用下，电子空穴分别向正负电极漂移并在电极上感应出信号。由于较高的载流子迁移率和很薄的灵敏区(~300μm)，感应信号的宽度通常很窄(~5ns)。
- 微条电极的感应信号被引出并送给电子学系统处理。有感应信号的微条电极的位置就代表了入射径迹的位置。

以上是N型硅微条探测器。如果采用P型硅半导体作为基体，再交换P<sup>+</sup>和N<sup>+</sup>掺杂，就可以得到P型硅微条探测器。

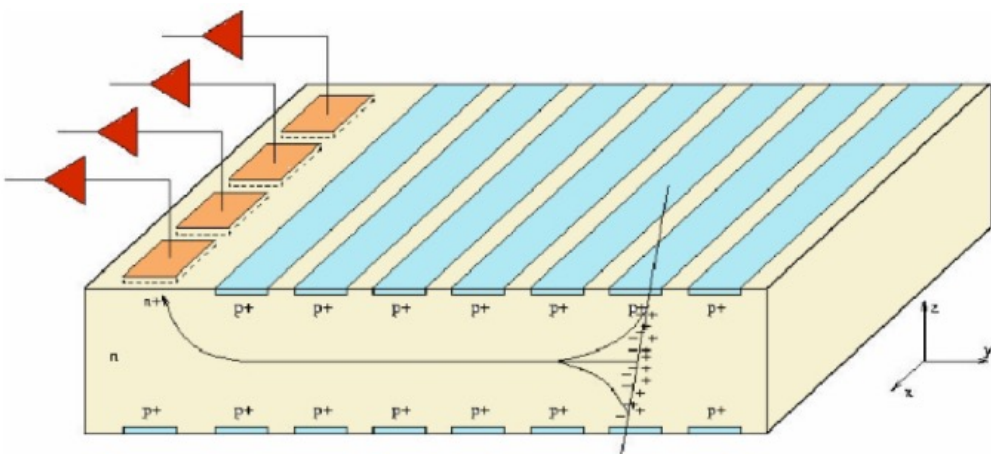
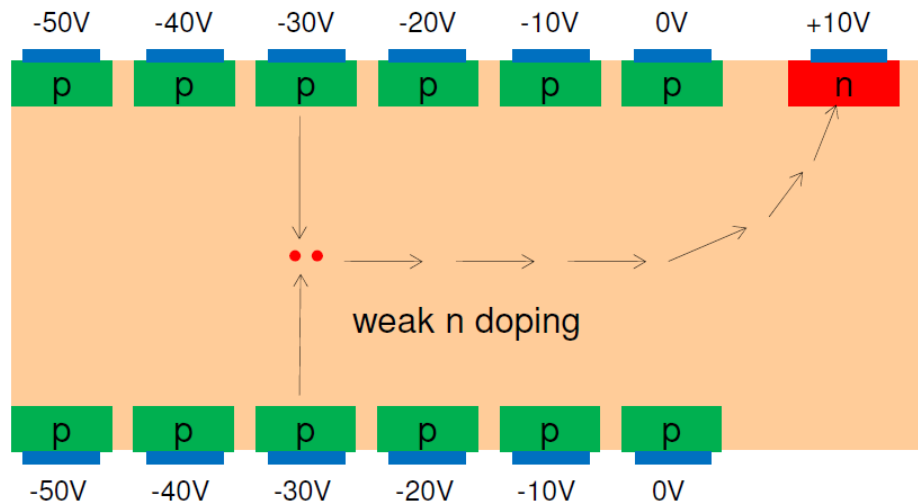
# 硅像素探测器的基本结构和工作原理

## 混合型硅像素探测器



- 由许多非常小的PN结组成，每个PN结如同二维平面中的一个像素，直接连接单独的读出电子学通道，构成一个独立的探测单元，能够非常快地提供二维位置信息。
- 像素探测器位置分辨取决于像素之间的间距，在通常情况下，具有非常好的二维位置分辨，相应地还具有极高的计数率能力。
- 探测像素制作的具体技术取决于具体的应用场合。
- **代价**：单位面积上需要极大的电子学通道数。

# 硅漂移室的基本结构和工作原理

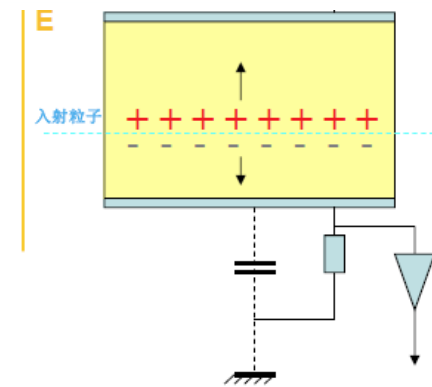


- 在n型硅片的两个表面制作重掺杂 $p^+$ 条, 中间是一层未耗尽区, 在边缘形成一个 $n^+$ 微条与中间未耗尽区相连。外加一定负偏压可使整个硅片实现全耗尽。
- 硅片内部的电位分布在垂直方向成为抛物线型, 中心的电位最高; 在水平方向,  $n^+$ 电位最高, 远离 $n^+$ 方向沿 $p^+$ 条逐渐递减。
- 带电粒子穿过耗尽区产生电子空穴对, 电子向耗尽区中部漂移聚集, 同时沿水平方向朝 $n^+$ 电极漂移, 在接近 $n^+$ 电极时偏转向 $n^+$ 电极漂移, 此时在 $n^+$ 电极上感应出信号。
- 通过测量电子从产生到到达 $n^+$ 电极位置的时间结合电子漂移速度可以得到入射径迹在水平方向的位置; 通过对 $n^+$ 电极的分段, 可以得到入射径迹沿微条方向的位置。

- 气体稀薄、密度小，作为探测介质存在一些不足：  
气体探测器 → 固体探测器

## 固体的选择：

- 导体？
- 绝缘体？
- 半导体？



外加电场使电离产生的电子和离子分别沿电场的反正方向作漂移运动，有利于电荷的有效收集。

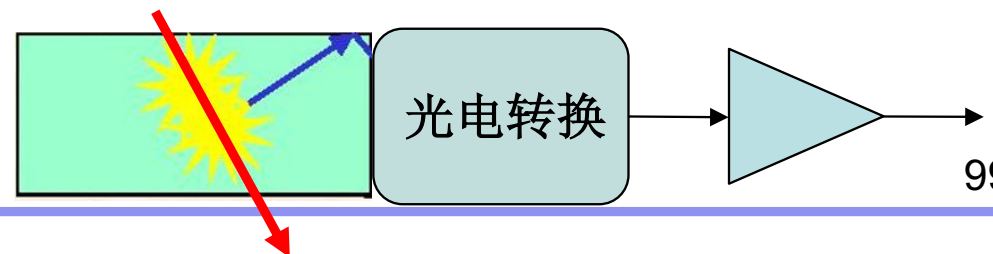
- 导体：电极之间“短路”，无法工作。
- 绝缘体：入射粒子电离产生的电荷被俘获或复合，无法移动。
- 半导体：通过“耗尽载流子”获得高阻（耗尽区），成为电离型探测器的工作介质！

入射粒子进入探测介质：电离，激发

电离：产生电荷 → 电荷移动 → 感应出电信号：半导体可以成为探测介质

电离，激发：复合，退激 → 发光 → 光传播和收集 → 光探测 → 闪烁探测器

绝缘体也可能成为探测介质！



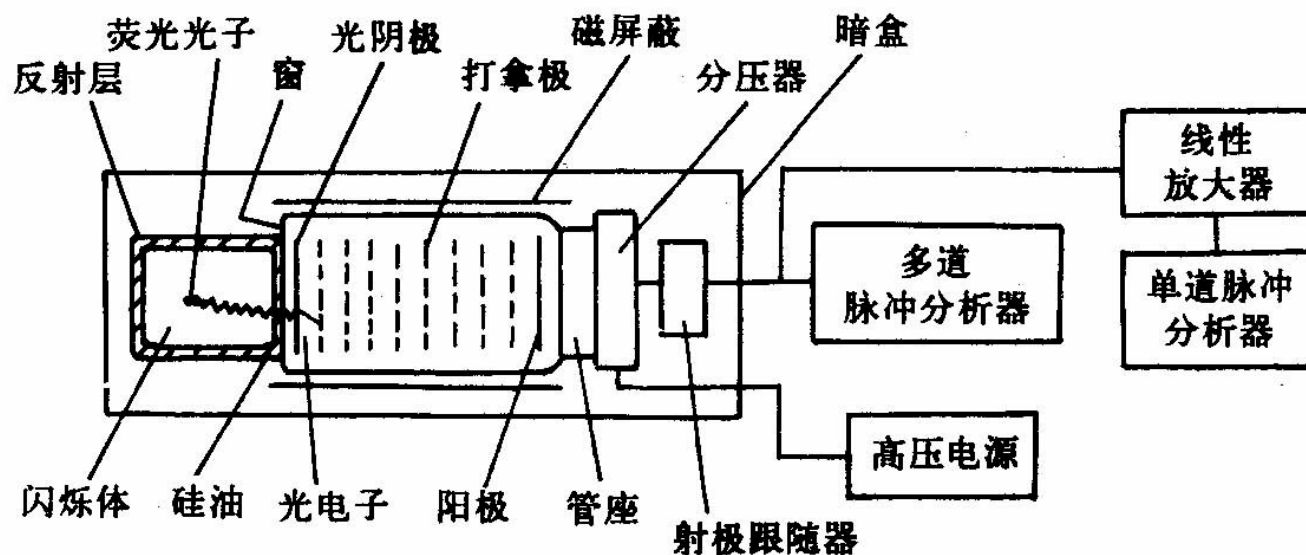


# 探测器分类：“电”与“光”

- “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。
- “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。

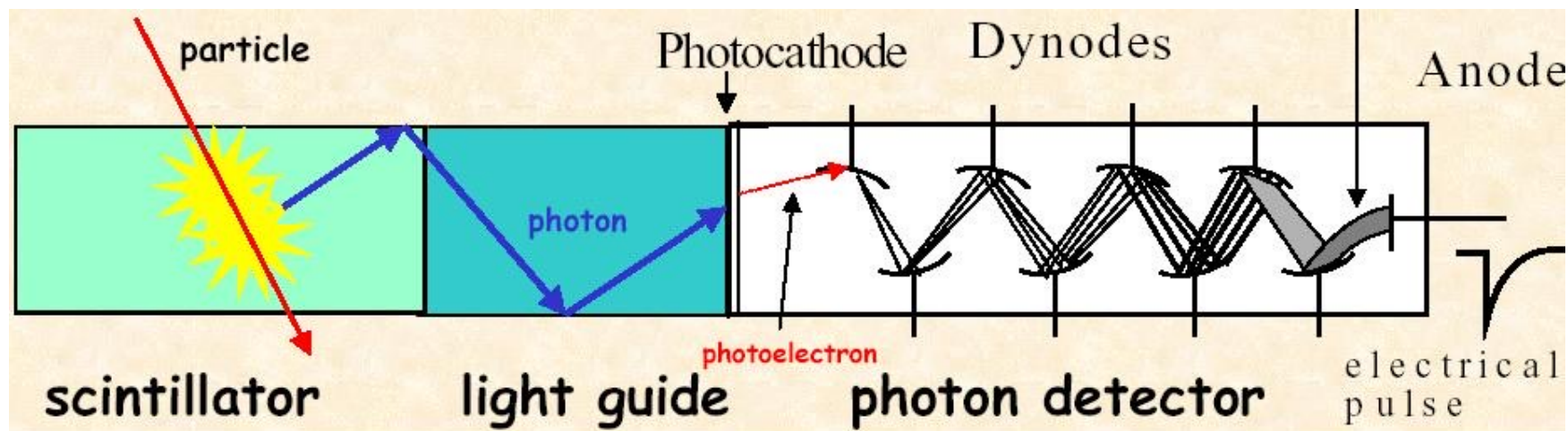
# 闪烁探测器典型组成

闪烁探测器 { 闪烁体  
/闪烁体与光电转换器件之间经常配以) 光导) 0  
光电转换及倍增器件/如光电倍增管0  
电子学系统



# 工作原理和过程

- 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。



# 闪烁体的分类

闪烁体主要包括以下三种类型：

## (1) 无机闪烁体

碱金属卤化物晶体或其他无机晶体以及玻璃体等

## (2) 有机闪烁体

有机晶体，有机液体，塑料闪烁体等

## (3) 气体闪烁体

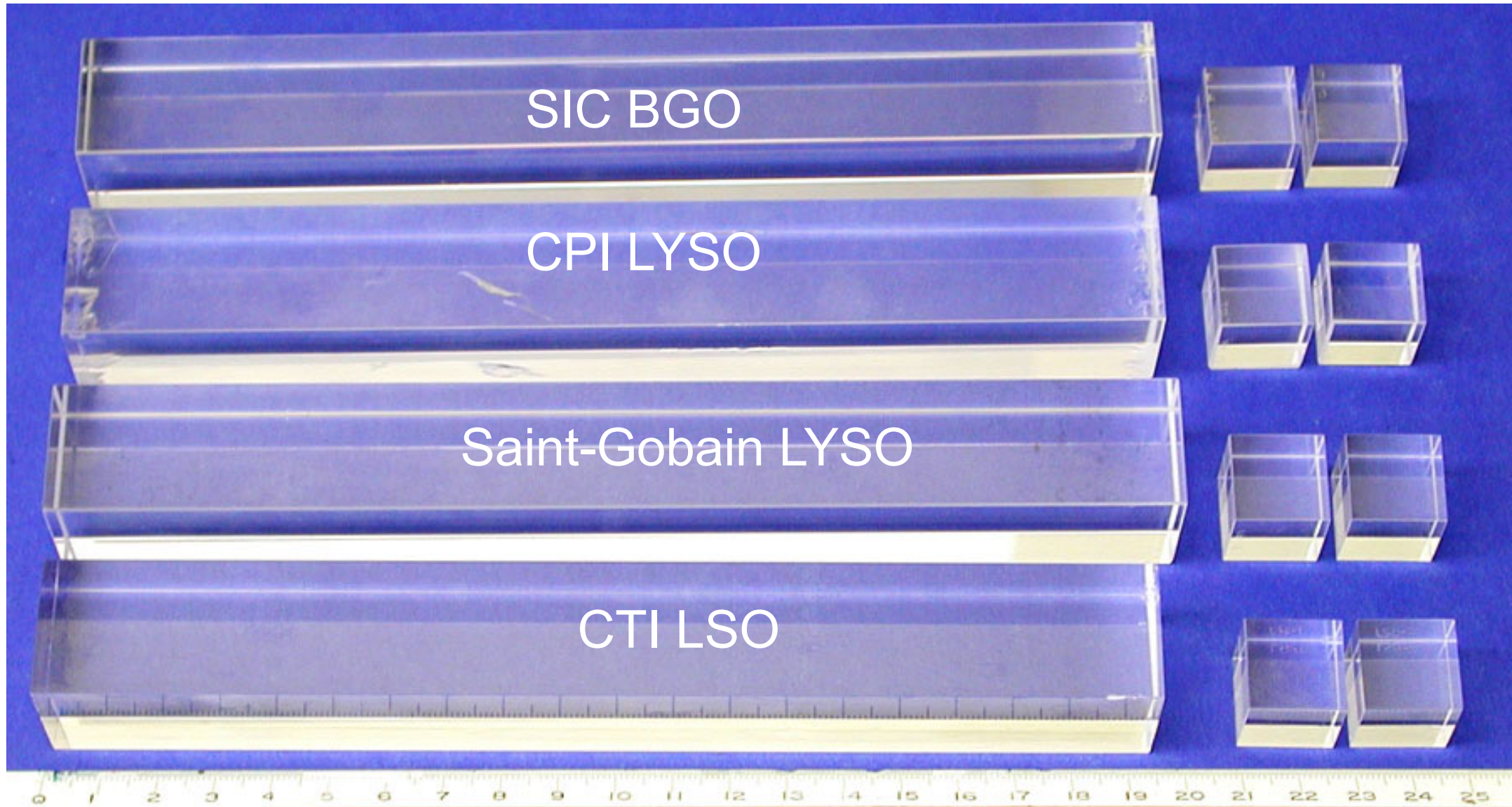
如氩和氙等

一般而言，无机闪烁体的光产额较高，但发光时间较长；而有机闪烁体的发光时间较短，但光产额较低。

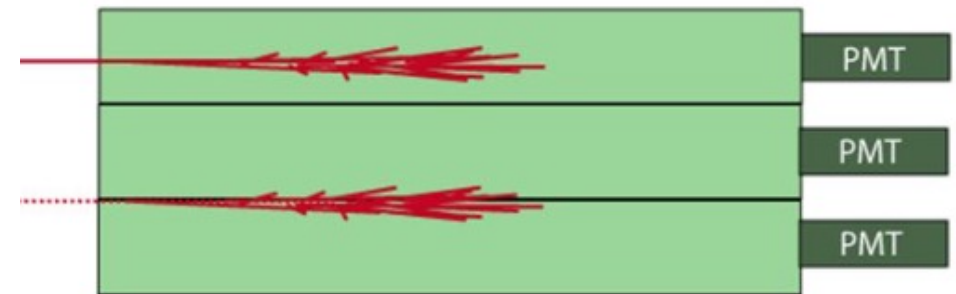
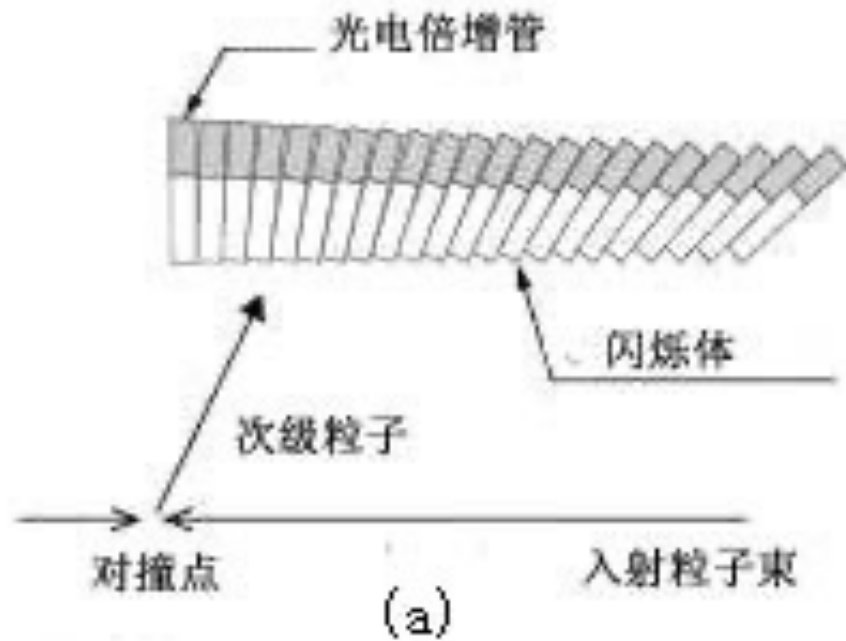


# 无机闪烁晶体

条形:  $2.5 \times 2.5 \times 20$  cm ( $\sim 18X_0$ ), 方块:  $1.7$  cm<sup>3</sup> ( $\sim 1.5X_0$ );



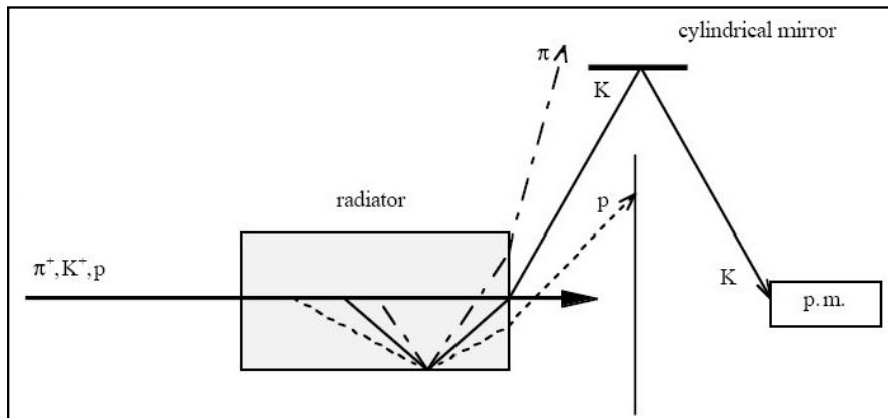
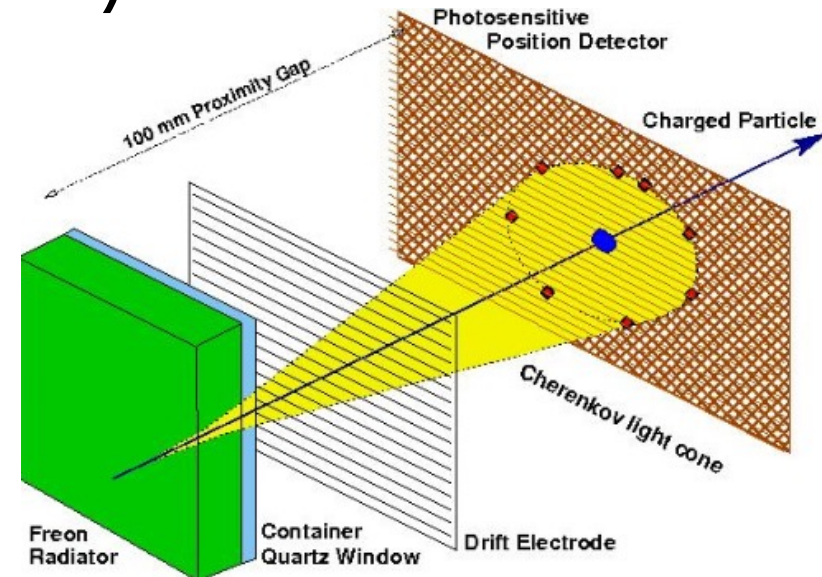
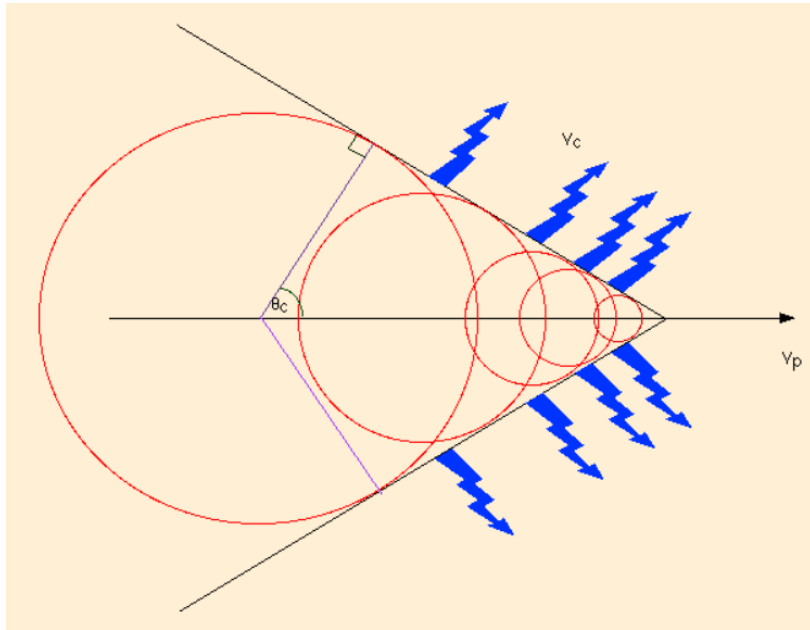
# 全吸收型量能器



- 能量吸收体即为探测灵敏体积。
- 入射粒子的能量全部都转换为输出信号，因而具有很好的能量分辨。
- 造价较高。
- 位置分辨较差。

# 契伦科夫探测器

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



工作过程：粒子进入契伦科夫光辐射体 → 契伦科夫光的传播和收集 → 契伦科夫光的探测（计数、位置/角度）



# 切伦科夫探测器的速度测量

- 带电粒子在介质中产生切伦科夫辐射，切伦科夫探测器通过测量切伦科夫辐射的发射角度 $\theta$ ，并结合介质折射率 $n$ ，就可确定粒子速度：

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad \longrightarrow \quad \beta = \frac{1}{n \cos \theta}$$

- 速度分辨：速度测量的准确度，决定了能分辨的粒子最小速度差。

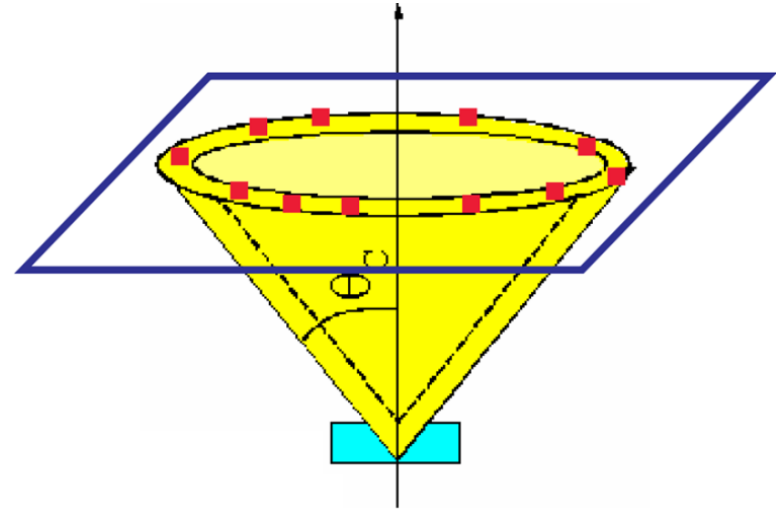
$$\because \cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad \therefore -\sin \theta d\theta = \frac{d\beta}{n\beta^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{d\beta}{\beta} = \operatorname{tg} \theta d\theta$$

速度分辨由角度测量的准确度（即角分辨）决定，同时还和发射角的大小有关，在角分辨一定的情况下，发射角越大，速度分辨越差。

# 环形成像切伦科夫计数器(RICH)

## Ring Imaging Cherenkov Counter

- RICH探测器把切伦科夫光锥投影到某个光探测平面，通过测量投影圆环来确定切伦科夫角。需要有大面积高灵敏度的光探测器。



- 最初的概念设计中，由中心位于相互作用点，半径为 $R_m$ 的球面镜和一个与球面镜同心，半径为 $R_d$ 的光探测器组成， $R_d = R_m/2$ 。由从相互作用点发射的带电粒子经过辐射体产生切伦科夫光锥，再经过球面镜聚焦在光探测器上形成环形像。
- RICH技术可以实现从极大动量范围内的粒子鉴别。使用长辐射体的RICH可以进行高达700 GeV/c动量上的粒子鉴别。



# 内反射型切伦科夫计数器

- 内反射型的切伦科夫计数器  
Detection of Internally Reflected Cherenkov light (DIRC)

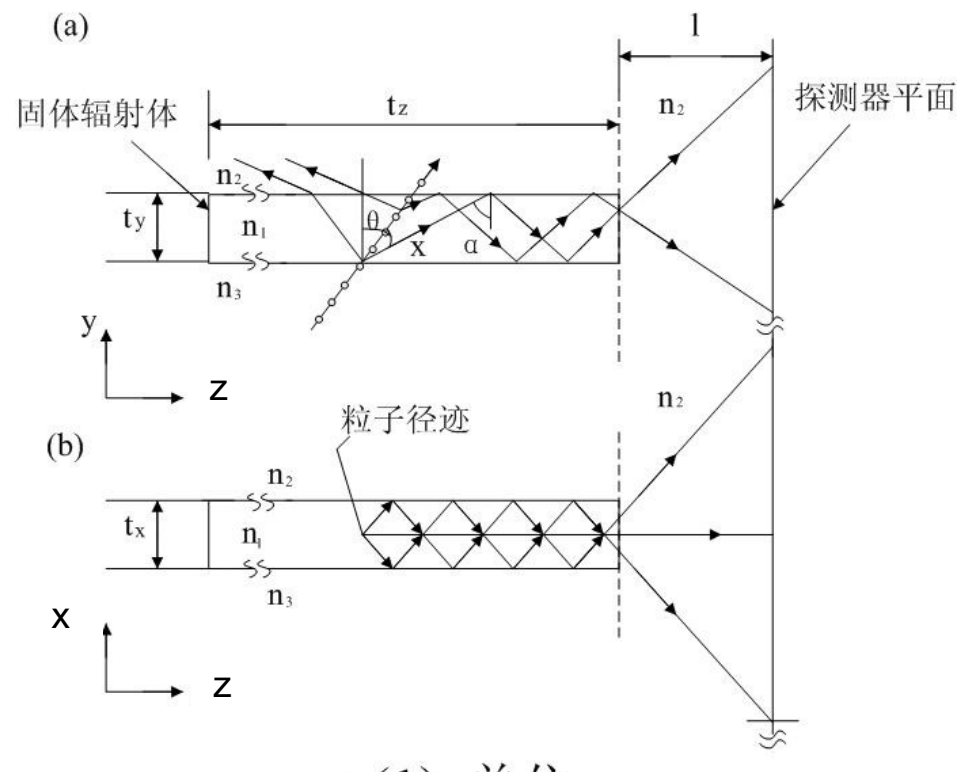
辐射体兼有切伦科夫辐射体和光导的双重作用。高速带电粒子以 $\theta$ 角入射，其切伦科夫角满足

$$\cos \alpha = 1/n_1\beta$$

切伦科夫光在辐射体界面的入射角

$$\alpha = \theta + x, \text{ 满足 } \alpha > \sin^{-1}(n_3/n_1) \approx \sin^{-1}(1/n_1)$$

的C光将在辐射体内发生全反射，向辐射体端部传送，最后进入 $n_2$ 介质，在光探测器平面上成像。成像的位置与切伦科夫角相关。



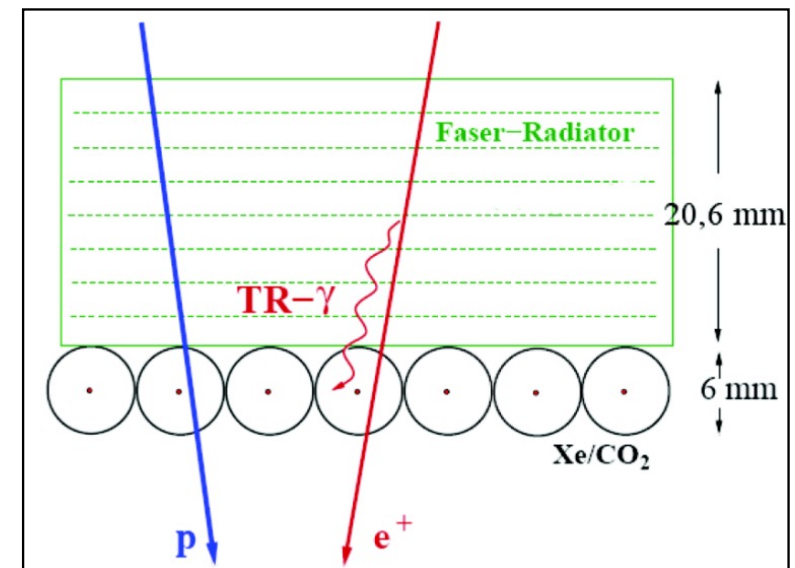
# 穿越辐射探测器

## • 辐射体

- 采用两种电介质交替组成的多层辐射体叠堆结构，包含了大量的电介质界面。
- 入射粒子穿过这些界面，在每个界面产生向前的穿越辐射（X射线），彼此相干叠加，在传输过程中还会被电介质吸收，最后从叠堆结构输出。

## • X射线探测器

- 辐射体输出的X射线进入探测器灵敏体积并被探测。
- 穿越辐射很弱，因此对X射线要有高的灵敏度。
- 穿越辐射与入射带电粒子夹角很小，所以入射带电粒子同时也会进入探测器，形成背景。因此，要求探测器具有较强的区分X射线和带电粒子的能力。



# 总结

- 介绍了粒子探测的物理原理、概念及相关基础知识，包括：微观粒子和辐射与物质相互作用的物理机制和规律，以及在此基础上粒子和辐射探测的基本原理和方法。
- 以核与粒子物理实验为背景，介绍了各种粒子探测器的工作原理与机制、构造、性能和应用，以及这些探测器上的信号感应和输出过程。具体探测器类型包括：气体探测器、半导体探测器、闪烁探测器、切伦科夫探测器、穿越辐射探测器等。
- 下午将介绍高能物理实验中的大型粒子探测磁谱仪中各种具体探测器的发展现状和趋势。