

# 粒子物理实验中的电子学

安琪

核探测与核电子学国家重点实验室  
中国科学技术大学近代物理系

2017-11-13

# 主要内容

- 基本的两类粒子物理实验
- 粒子物理实验中电子学的特点
- 粒子物理实验电子学系统的基本构成

# 基本的两类粒子物理实验

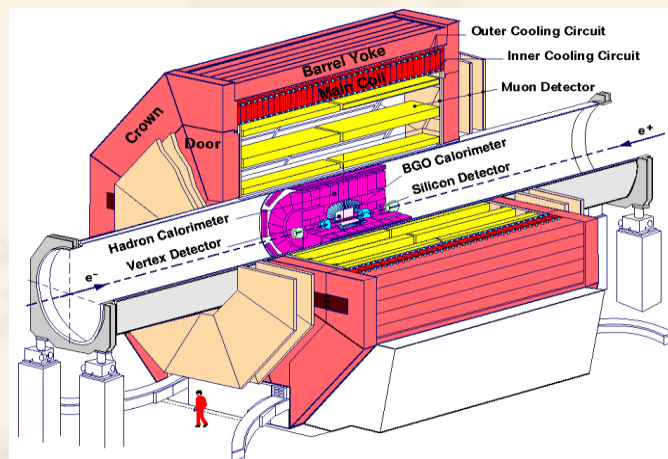
- 加速器物理实验
- 非加速器物理实验  
(宇宙线、反应堆)

# 对撞加速器物理实验的探测器系统 — 谱仪

几乎所有对撞加速器物理实验中的谱仪都是一系列探测器层围绕束流管道再加上一定的磁场（由螺旋管线圈产生）组成。通常由内到外依次是：

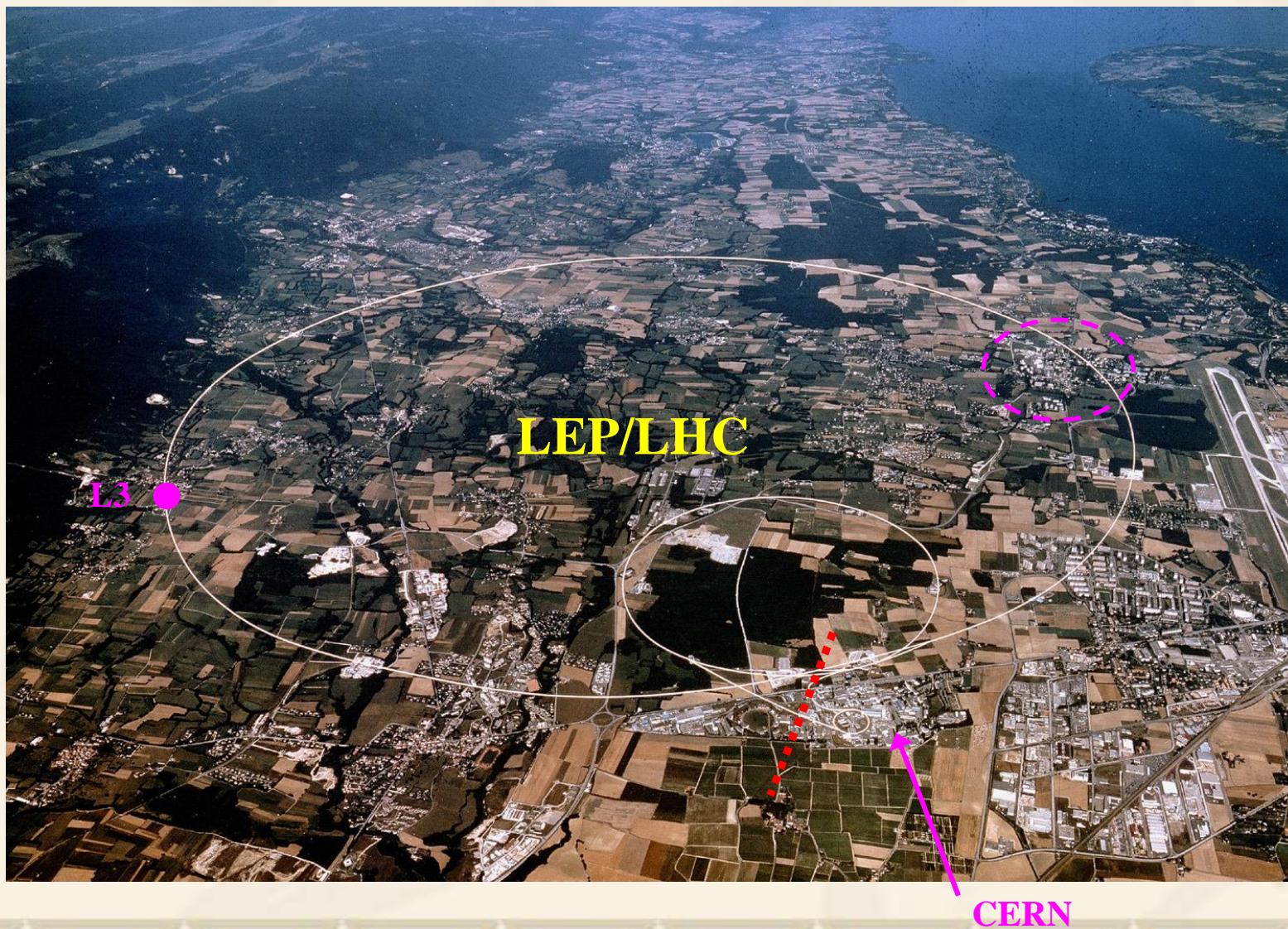
- 高精度定位的顶点探测器
- 中心径迹探测器
- 粒子鉴别器
- 二次径迹探测器和闪烁计数器
- 电磁量能器
- 强子量能器
- $\mu$ 子鉴别器

.....



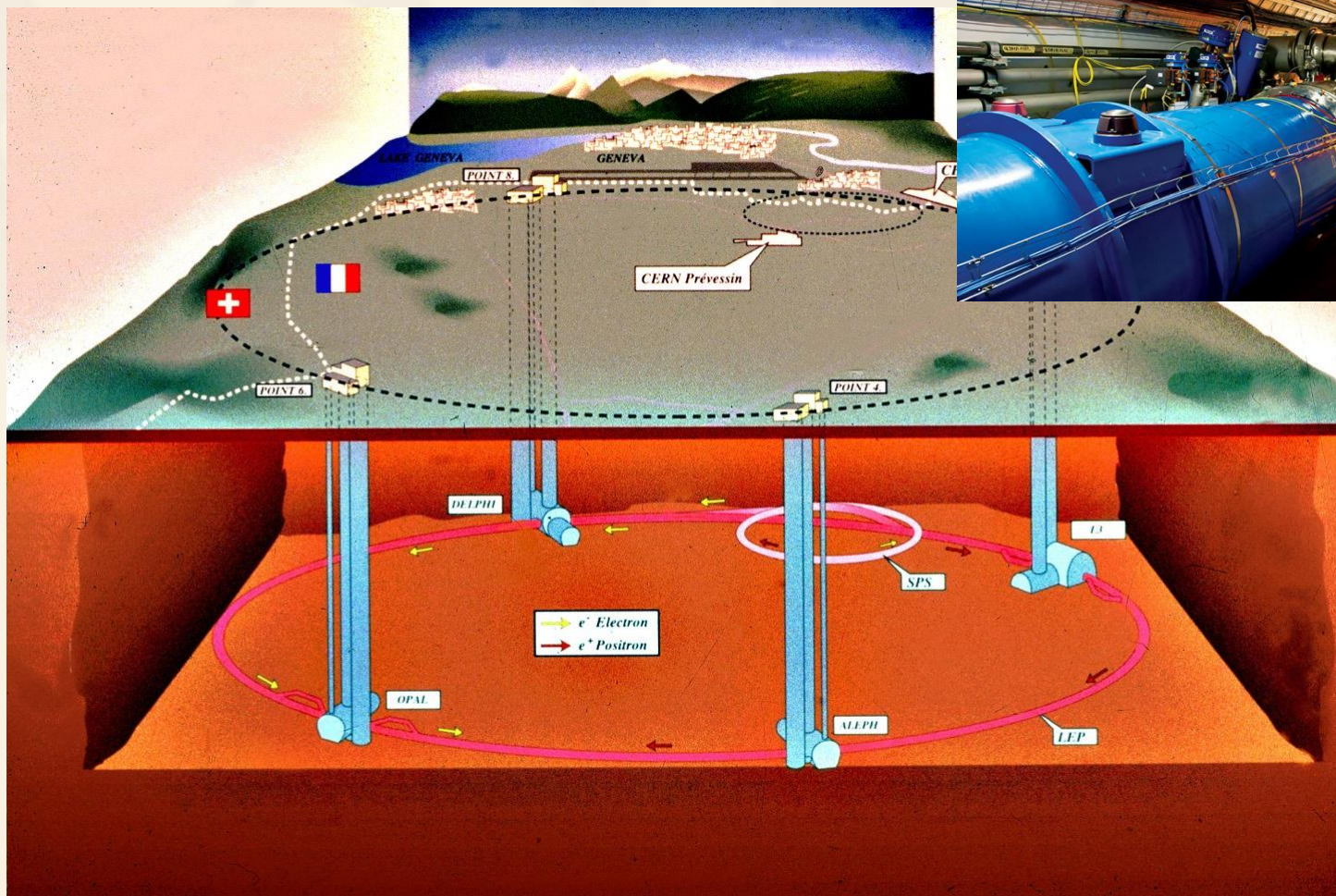


# 欧洲粒子物理实验室 (CERN)



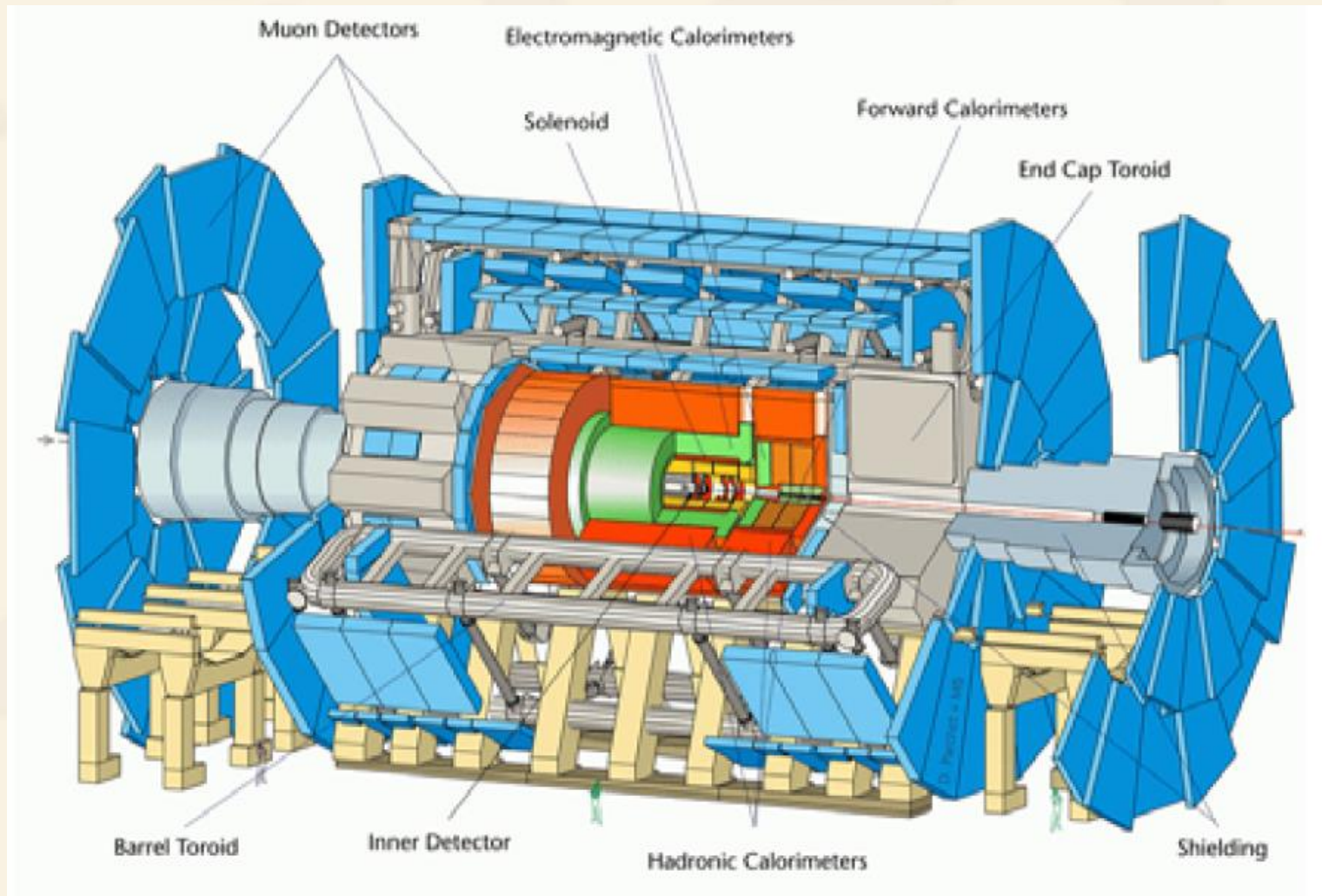


# LEP/LHC 加速器环





# ATLAS Detector



# CMS Detector

31 Nations, 150 Institutions, 1870 Scientists

## TRIGGER & DATA ACQUISITION

Austria, CERN, Finland, France, Greece, Hungary, Italy, Korea, Poland, Portugal, Switzerland, UK, USA

## TRACKER

Austria, Belgium, CERN, Finland, France, Germany, Italy, Japan\*, Switzerland, UK, USA

## CRYSTAL ECAL

Belarus, CERN, China, Croatia, Cyprus, France, Italy, Japan\*, Portugal, Russia, Switzerland, UK, USA

## PRESHOWER

Armenia, Belarus, CERN, Greece, India, Russia, Taiwan (PC), Uzbekistan

## RETURN YOKE

Barrel: Czech Rep., Estonia, Germany, Greece, Russia  
Endcap: Japan\*, USA

## SUPERCONDUCTING MAGNET

All countries in CMS contribute to Magnet financing in particular:  
Finland, France, Italy, Japan\*, Korea, Switzerland, USA

FEET  
Pakistan China

## FORWARD CALORIMETER

Hungary, Iran, Russia, Turkey, USA

## HCAL

Barrel: Bulgaria, India, Spain\*, USA  
Endcap: Belarus, Bulgaria, Russia, Ukraine  
HO: India

## MUON CHAMBERS

Barrel: Austria, Bulgaria, CERN, China, Germany, Hungary, Italy, Spain,  
Endcap: Belarus, Bulgaria, China, Korea, Pakistan, Russia, USA

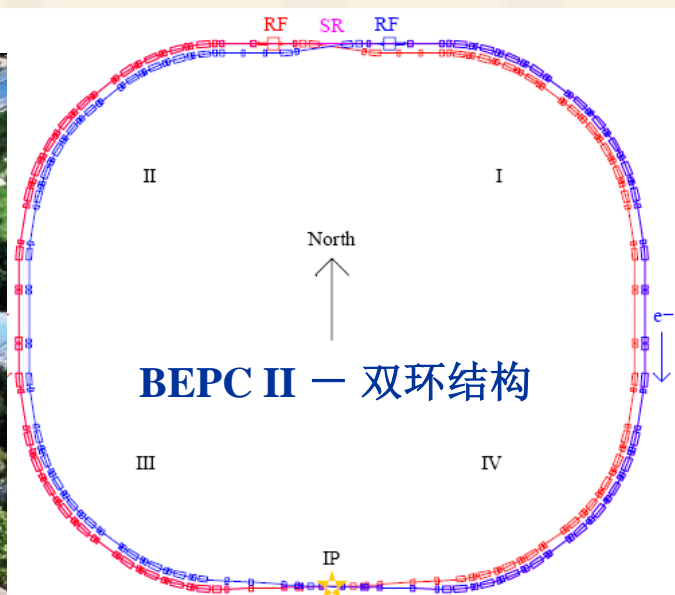
\* Only through industrial contracts

Total weight : 12500 T  
Overall diameter : 15.0 m  
Overall length : 21.5 m  
Magnetic field : 4 Tesla



# 北京正负电子对撞机重大改造工程 (BEPCII / BESIII)

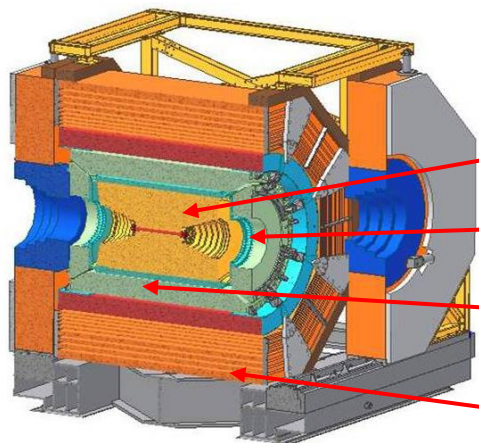
11 countries, 52 institutions, 351 authors





# 北京谱仪的升级改造 (BESIII)

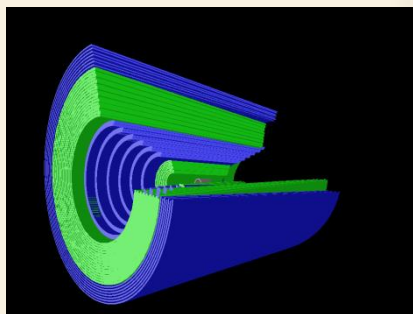
## 四个主要子探测器



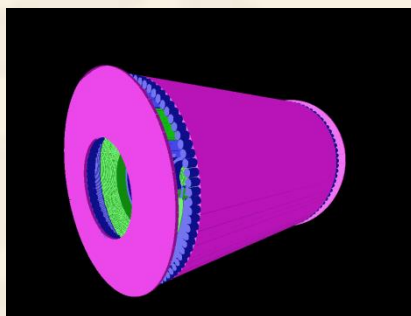
- 主漂移室 (MDC)
- 飞行时间探测器 (TOF)
- 电磁量能器 (EMC)
- $\mu$ 子鉴别器 (MUON)

- 对撞周期8ns, L1事例  
判选延迟6.4 $\mu$ s  
采用流水线技术
- L1事例率: 4KHz  
实时数据处理和传输

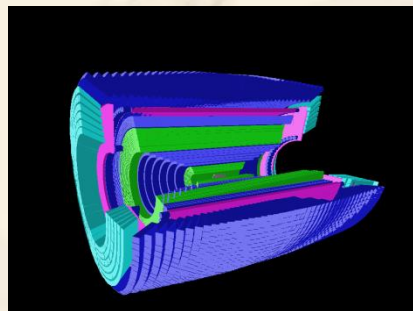
09年7月已通过国家验收



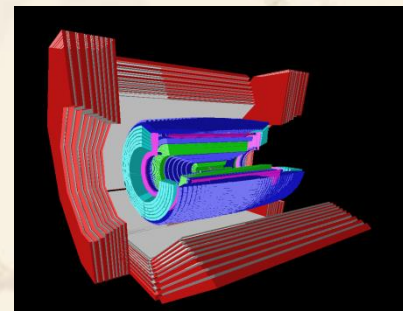
MDC



TOF



EMC

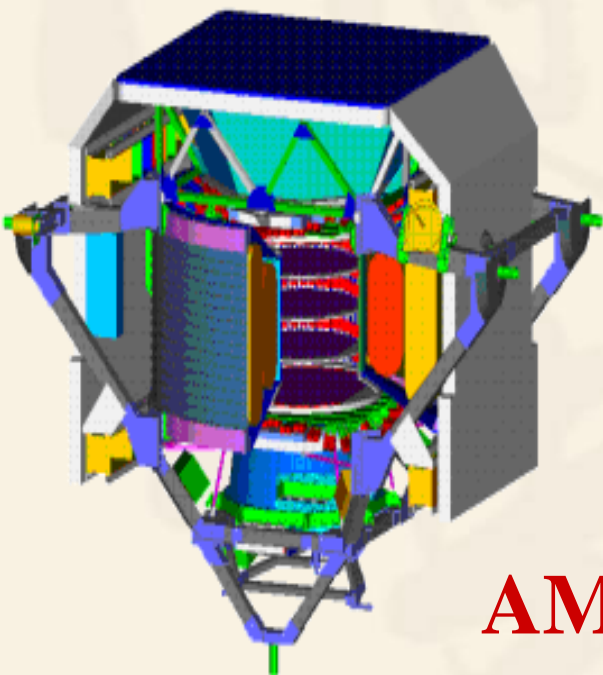
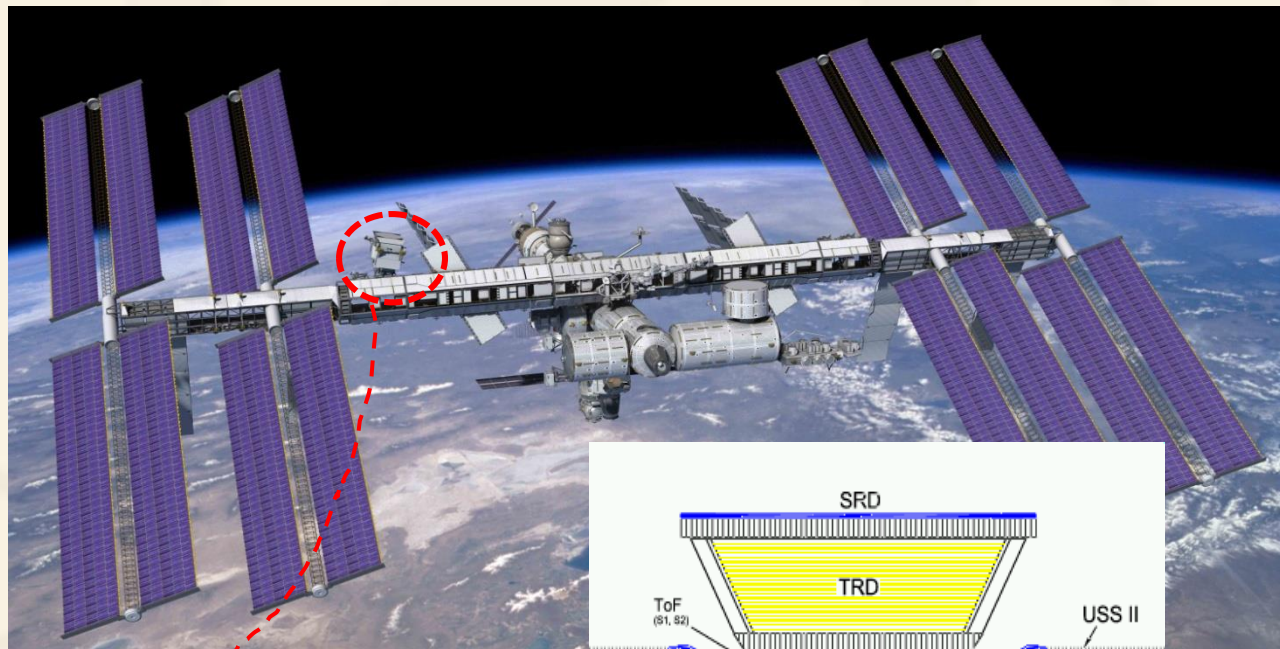


MUC

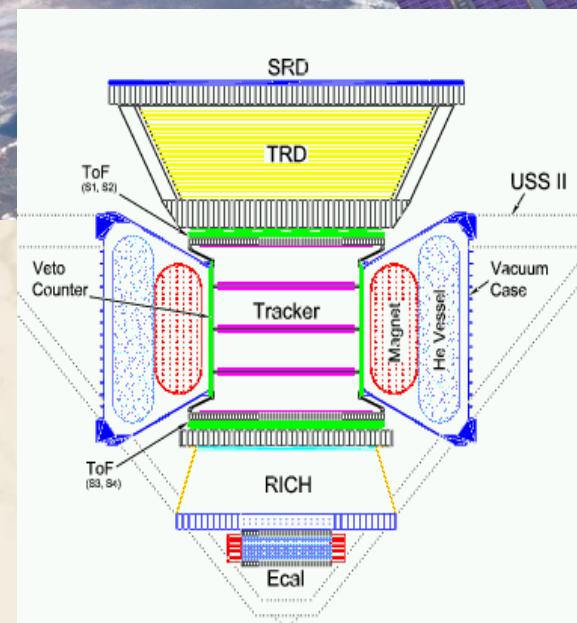


# 宇宙线粒子物理实验（非加速器物理）

国际空间站上的  
AMS磁谱仪



**AMS-02 Detector**



# 暗物质粒子探测卫星（DAMPE）

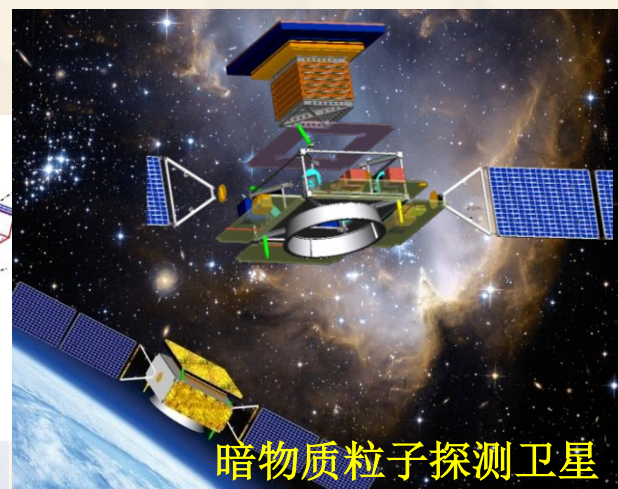
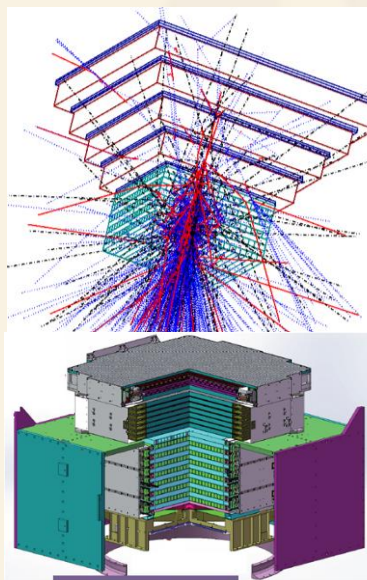
## ■ 星基空间暗物质探测实验

## ■ 探测器阵列

- ◆ 硅探测器
- ◆ 塑料闪烁体的径迹探测器
- ◆ **BGO量能器**
- ◆ 中子探测器
- ◆ **PMT读出**

## ■ 电子学挑战

- ◆ 低噪声、 $10^6$ 大动态范围的电荷测量；
- ◆ 抗辐射电子学设计；
- ◆ 绝对的电子学稳定性、可靠性和低功耗要求；
- ◆ 恶劣的空间自然环境等影响。



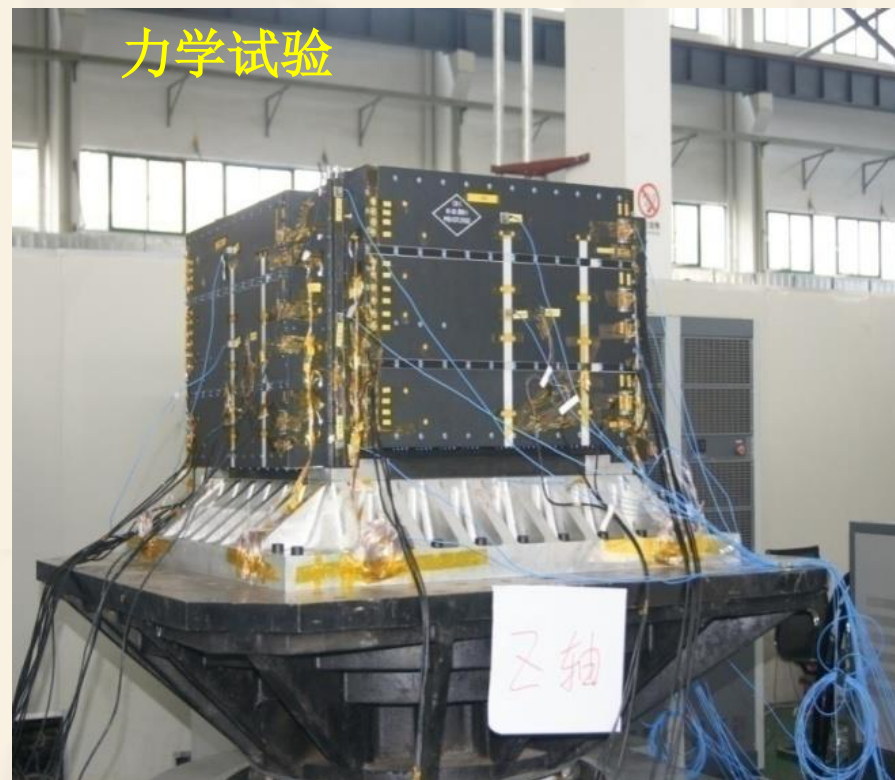


# BGO量能器正样飞行件总装



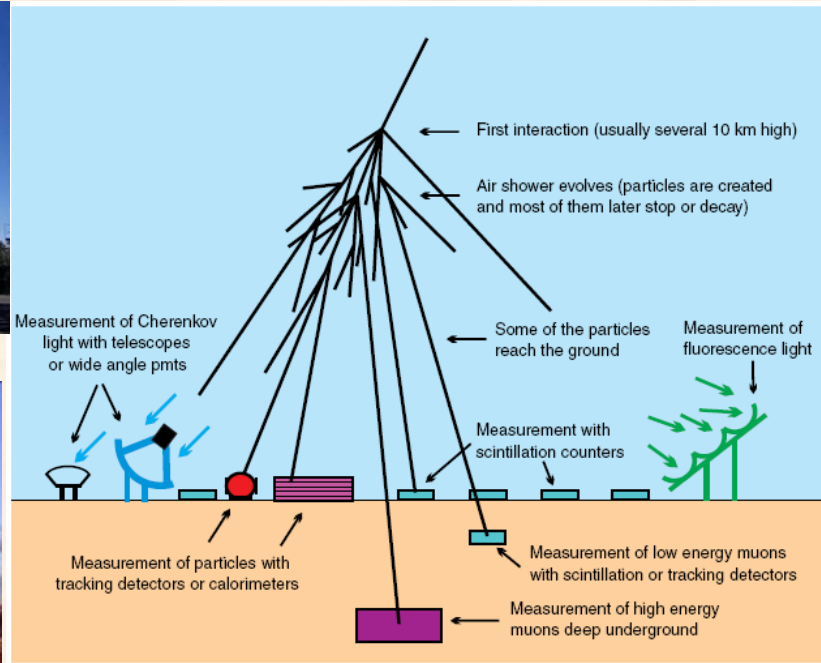
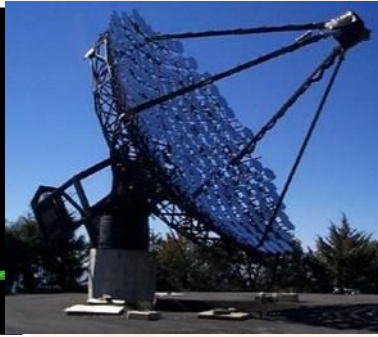
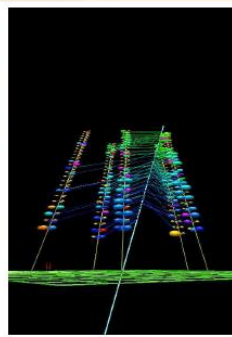
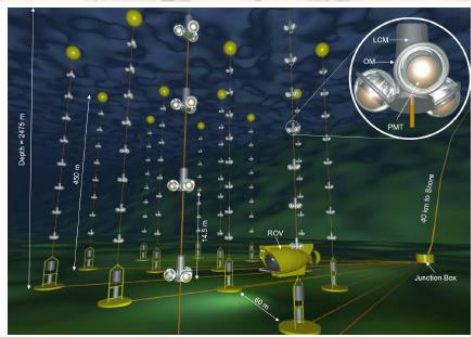


# BGO量能器的部分环境模拟试验





# 广延大气簇射及各种地面/下探测技术





# 高海拔空气簇射观测站 (LHAASO)

■ 四川省-稻城亚丁

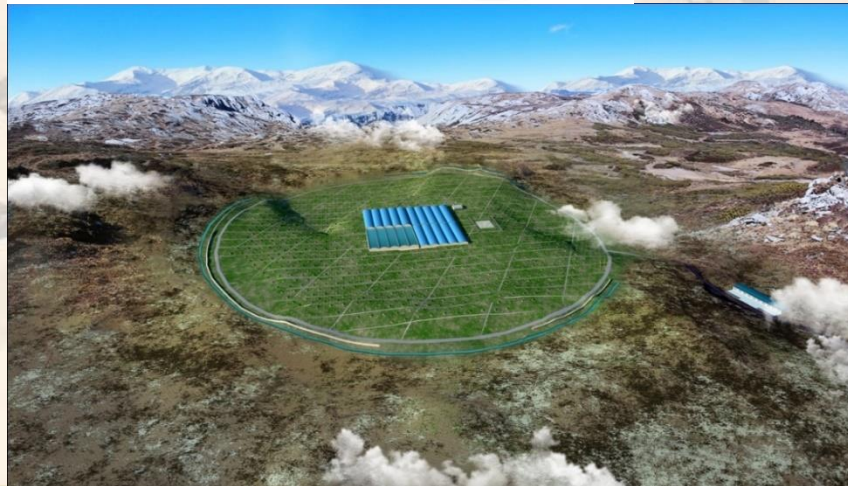
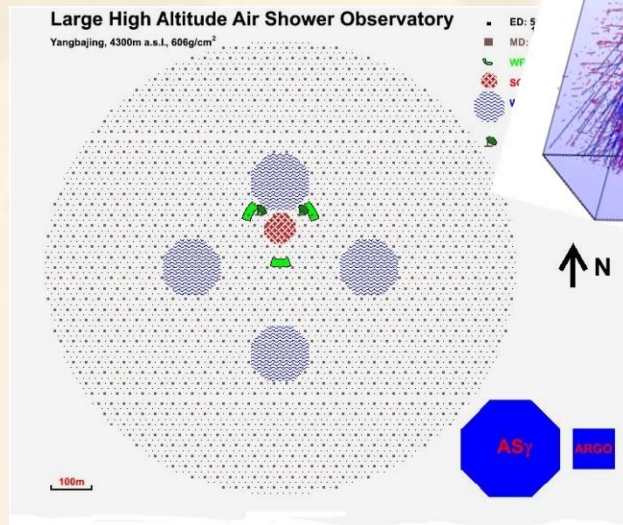
优势：高海拔和大规模

■ 探测广延大气簇射产生的次级粒子

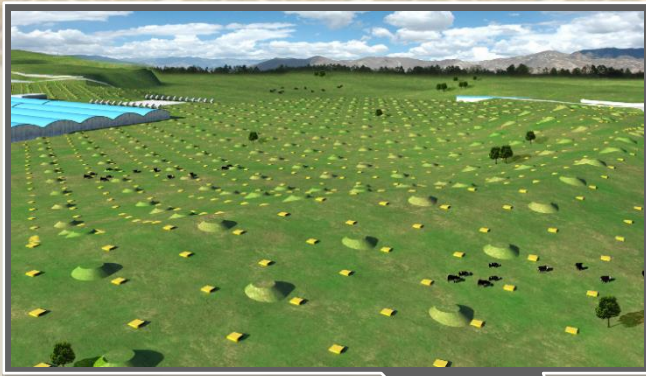
■ 科学目标：高能宇宙线起源以及相关宇宙演化、高能天体演化和暗物质的研究

■ LHAASO探测器

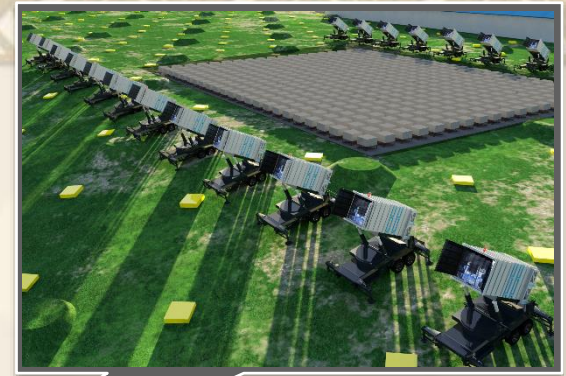
- ◆ 1平方公里地面簇射粒子阵列ED
- ◆ 9万平方米水契伦科夫探测器WCDA
- ◆ 大气荧光探测器
- ◆ 两台契伦科夫成像望远镜
- ◆ 簇射中心探测器等







**KM2A:**  
5635 EDs  
1221 MDs

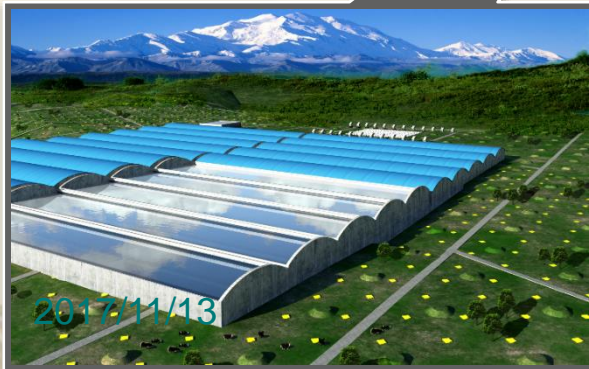


**WFCTA:**  
24 telescopes  
1024 pixels each



**WCDA:**  
3600 cells  
90,000 m<sup>2</sup>

**SCDA:**  
452 detectors

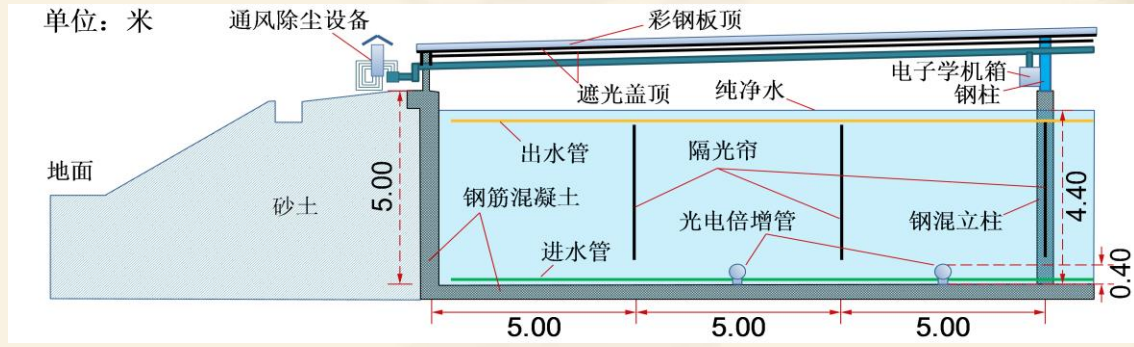
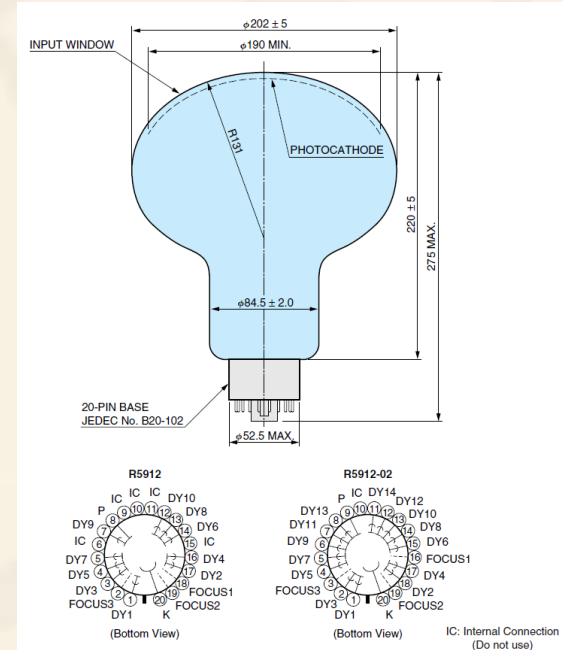
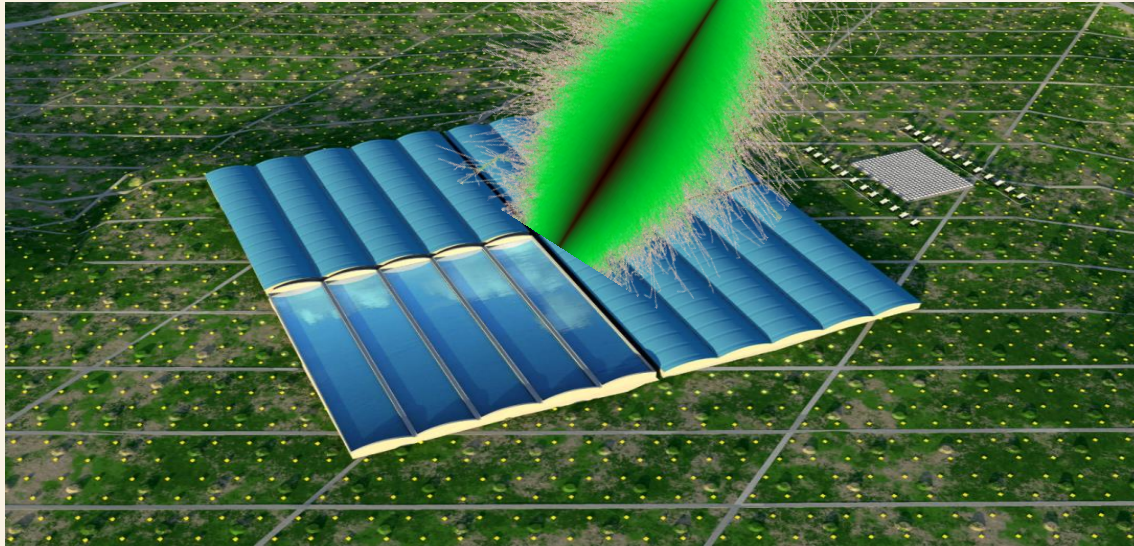


广西南宁 粒子探测技术讲习班





# WCDA (Water Cherenkov Detector Array)



**PMT: Hamamatsu R5912, 8 inch**

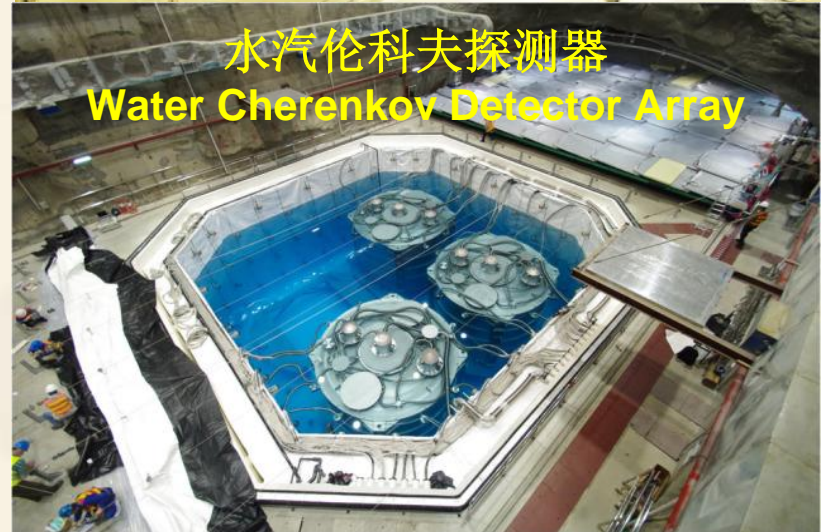
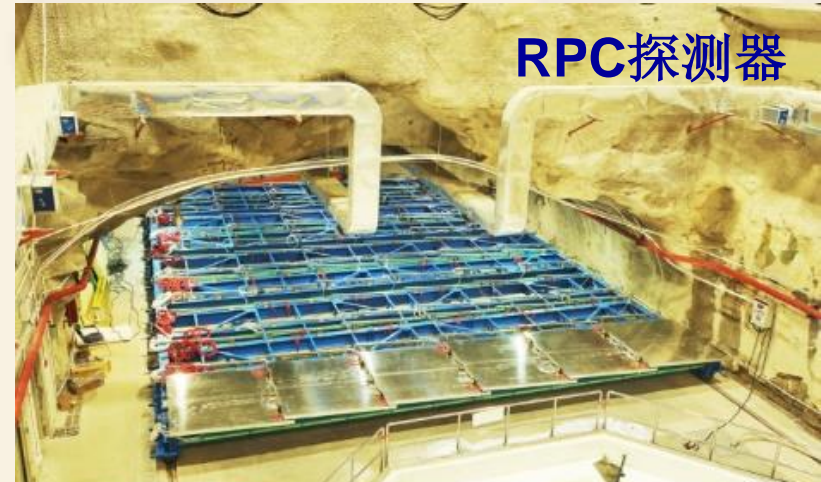




# 大亚湾中微子物理实验



2012年3月宣布发现新的中微子振荡模式，  
在精确测量 $\theta_{13}$ 值方面取得国际领先。



随着粒子物理学科学目标的需求和  
技术的发展，所有类型的粒子物理实验，  
其探测器系统都呈现着两个显著的特点：

规模越来越大；

探测单元却越来越小。



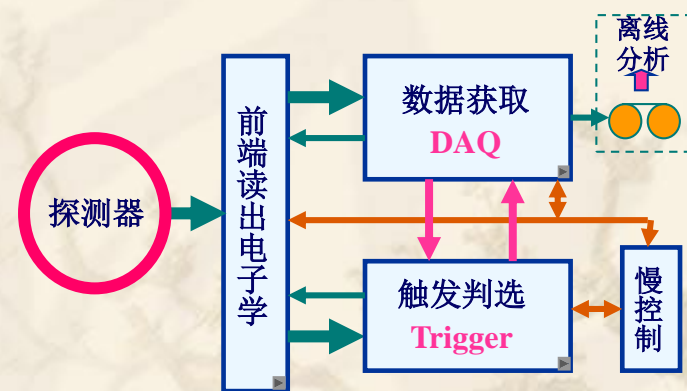
- 基本的两类粒子物理实验
- **粒子物理实验中电子学的特点**
- 粒子物理实验电子学系统的基本构成

# 粒子物理实验电子学系统的作用

一个粒子物理实验要使用多种探测器构成一个复合的复杂实验装置，以实现其物理目标。

从信息的角度出发，各种探测器把粒子通过时产生的信息转换成“**电信号**”，探测器就相当于各种传感器，**物理量** → **电信号**。

所有探测器输出的电信号由电子学系统加以处理，转化成数字信号（**前端读出电子学**），形成事例数据；并由一个特殊的电子学系统（**触发判选系统**）进行实时的筛选，剔除大量的伪事例数据；最后，通过筛选保留的物理上感兴趣的事例数据由数据获取系统（**DAQ系统**）收集，装配成一个完整的事例数据，并进行记录，提供给物理学家进行所谓的**离线分析**。





# 粒子物理实验电子学系统的特点

- “快信号”：纳秒，亚纳秒脉冲信号处理。
  - “随机性”：信号幅度，时间特性和信号形状。
  - “环境恶劣”：强磁场，强电场的极端条件，高本底噪声和干扰。
  - “巨大的电子学通道数”：几万~几十万~几百万的电子学通道。
  - “高速、高精度的实时数字化”：ADC, TDC等。
  - “无法应对的原始数据”：必须实施压缩数据，剔除“伪事例”。
  - “高速、大流量的数据传输”：使用所有最先进的数据传输技术。
  - “海量的数据处理”：超级存储和计算能力。
  - “长时间稳定工作”：数月，数年不停机；工作寿命长达十年，二十年。
- .....

# BES 读出电子学系统





# 大亚湾中微子实验读出电子学系统



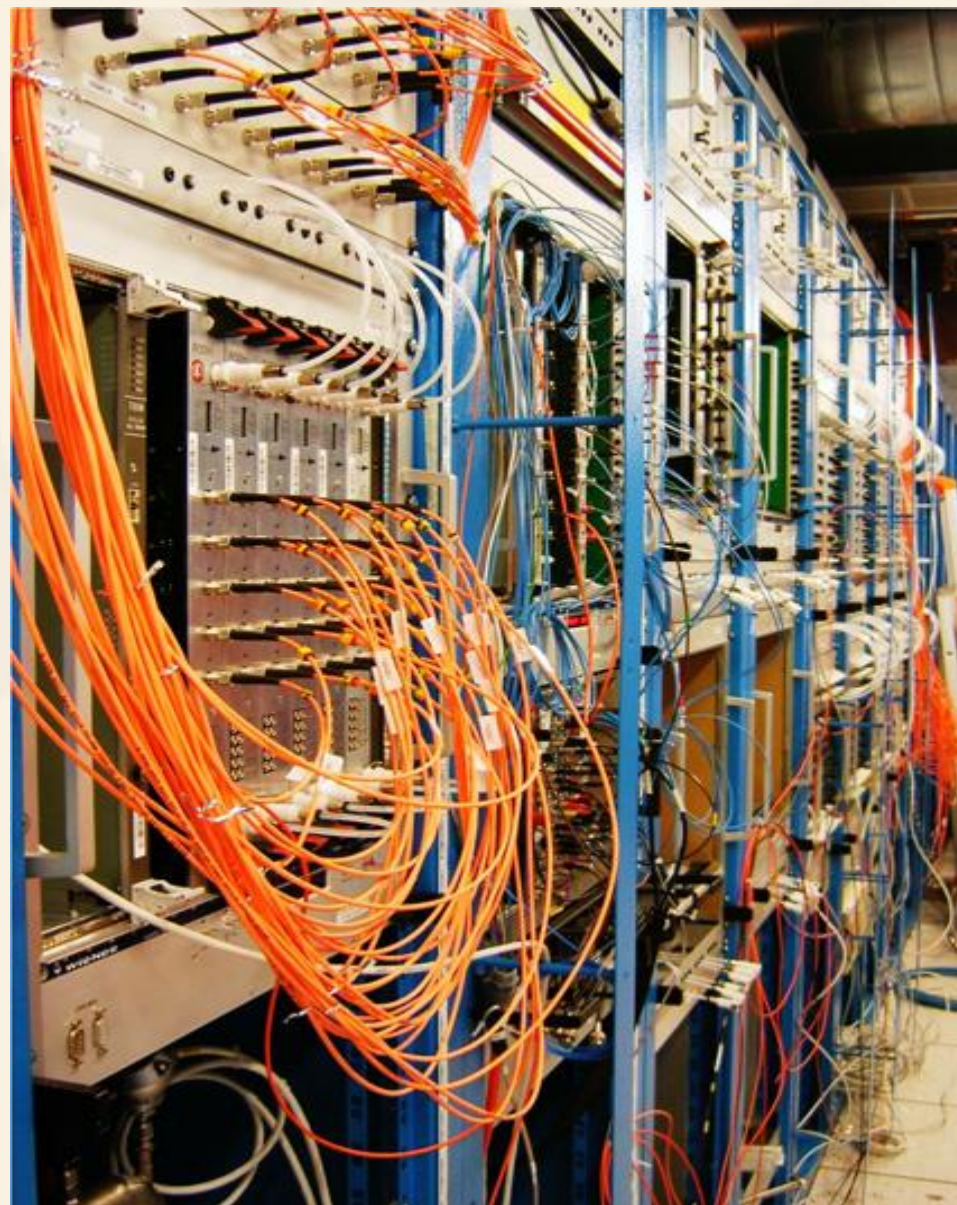
2017/11/13

广西南宁 粒子探测技术讲习班

25



# ATLAS实验读出 电子学系统





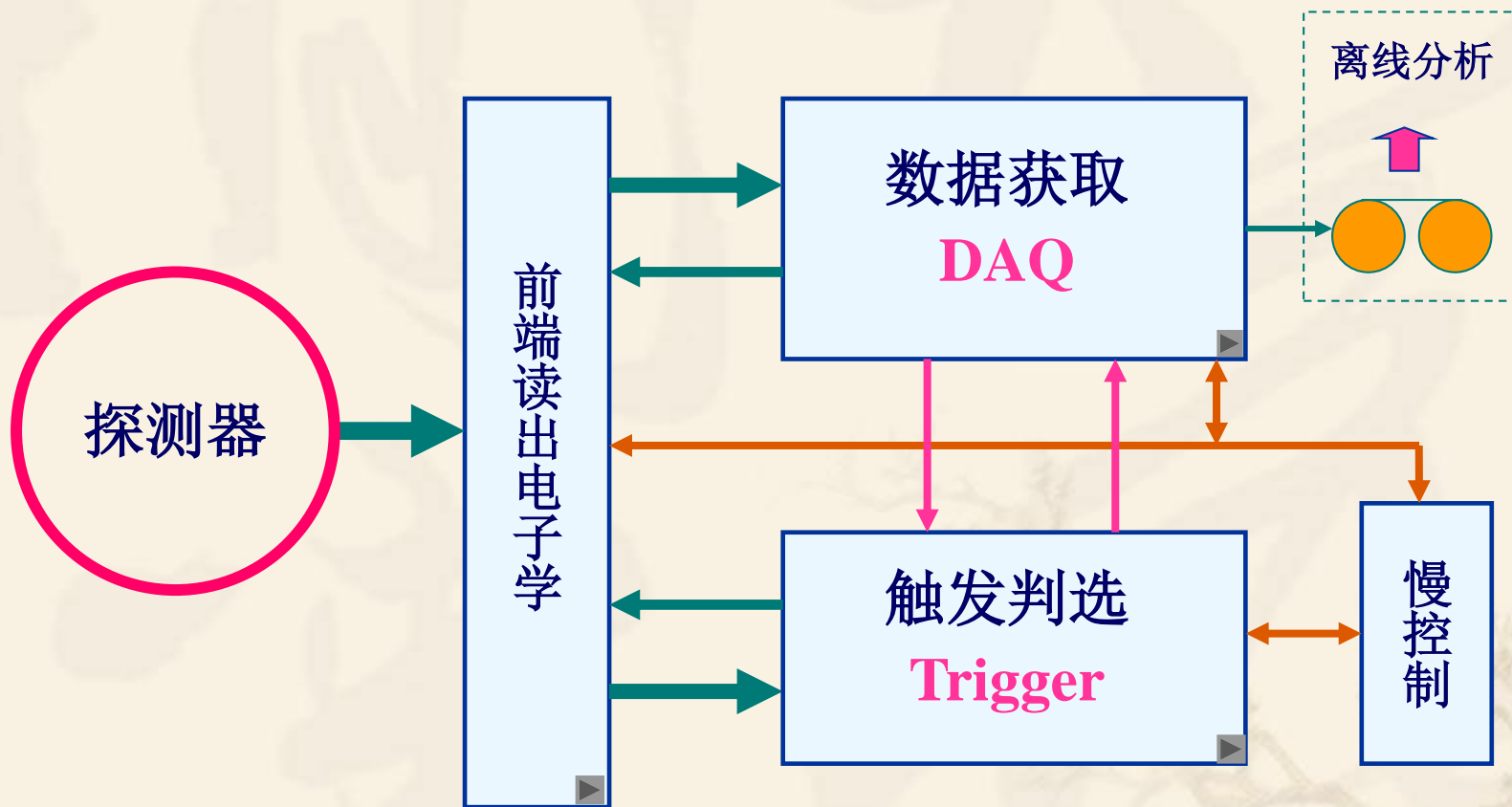
- 基本的两类粒子物理实验
- 粒子物理实验中电子学的特点
- **粒子物理实验电子学系统的基本构成**

# 电子学系统的基本构成

- 前端读出电子学  
Front-End Readout Electronics
- 触发判选系统  
Trigger System
- 数据获取系统  
Data Acquisition System (DAQ)
- 慢控制  
Slow Control



# 电子学系统的基本构成



# 前端读出电子学

- 前端读出电子学的功能是将探测器输出的微弱电信号放大，数字化后将其转化为能够反映粒子特性的数据，供DAQ系统重建物理事例和记录。
- 前端读出电子学将探测器输出的信号经过初步处理后，可以向触发判选系统提供探测器的哪些部分被粒子击中，以及粒子在探测器中能量沉积等信息，作为触发判选的原始条件。
- 前端读出电子学需要对数据进行必要的预处理，如：数据压缩，数据归一化等。





# 触发判选系统

粒子物理实验中进行快速实时事例选择和控制的一个特殊电子学系统。

- 触发判选系统的功能是对前端电子学提供的数据进行实时分析，从大量的假事例（本底）数据中挑选出物理上感兴趣的事例，而将假事例（本底）数据舍弃。
- 决定前端电子学及数据获取系统对每次对撞应执行的动作。

# 数据获取系统

数据获取系统的功能是将读出电子学系统数字化的数据（探测器产生的）收集并装配成一个完整的事例数据，记录在海量存储器（磁带或磁盘）中。

系统初始化和实时监控。



# 前端读出电子学的组成

- 谱仪需要测量束团对撞后次级粒子的各种物理量，包括：位置，动能，能量，速度，电离能损，飞行时间等。
- 这些物理量的最终表现形式，主要有三种：
  - ◆ 电荷（能量）；
  - ◆ 时间；
  - ◆ 事例计数。
- 针对不同实验的物理目标和探测器，各子探测器的读出电子学系统差别可能很大。

# 电荷（能量）测量

粒子通过探测器时是探测器产生电离，激发或光电转换等过程，输出信号的电荷量往往正比于粒子在探测器中消耗掉的能量。

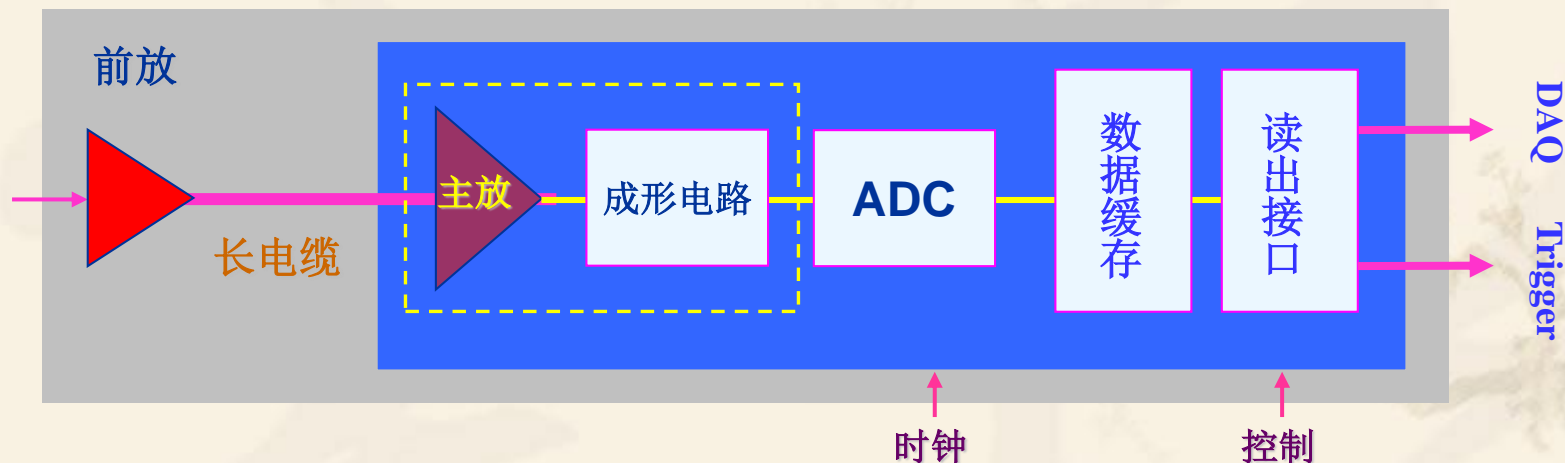
$$N = \theta \cdot E$$

**N**: 输出信号的电子电荷的平均数

**E**: 粒子在探测器中消耗掉的能量

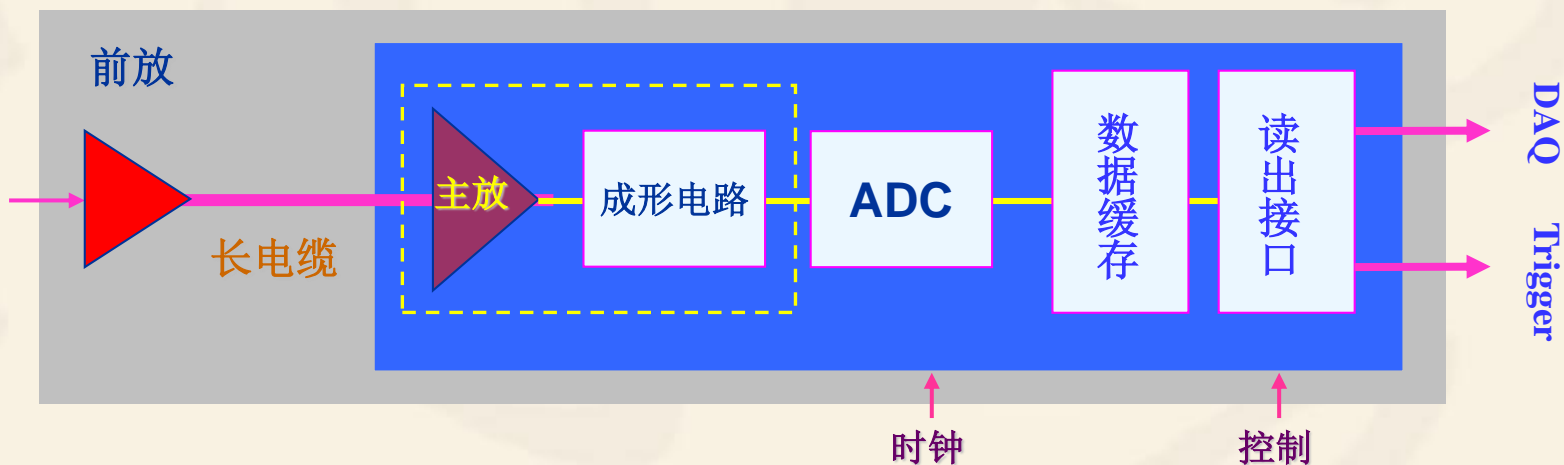
**$\theta$** : 探测器的平均能量—电荷转换系数

电荷（能量）测量概念框图





# 电荷（能量）测量



**前放 (Pre-Amp)** : 信号放大、阻抗变换和驱动;

**成形放大 (Shapping)** : 幅度放大和最佳滤波, 或波形放大;

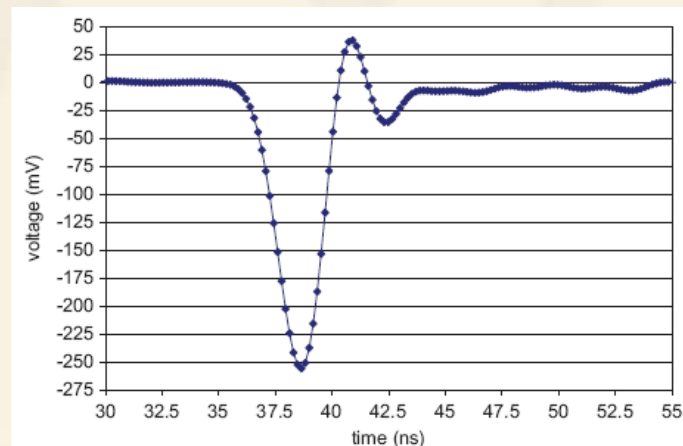
**数字化 (ADC、QDC)** : 数字化 (能量峰值、或波形数字化);

**数据缓存** : 暂存数据, 等候命令输出;

# 波形数字化

## ■ 优点

- ◆ 很方便同时获取时间与能量信息；
- ◆ 消除了传统电荷积分放大带来的“堆积”效应，死时间小，适应于高亮度、高事例率的物理实验；
- ◆ 此外，波形数字化还可以使物理学家采用任何可能的数字处理方法来处理波形数字化的信号数据。



## ■ 长期以来，波形数字化一直是物理学家梦寐以求的信号读出方法

## ■ 主要的技术途径

- 高速ADC芯片，主要类型有：FlashADC，Pipeline ADC，Folding ADC
- Time Interleaved ADC (TIADC)
- SCA + ADC



# 前置放大器 (Pre-Amp)

## ■ 积分型放大器

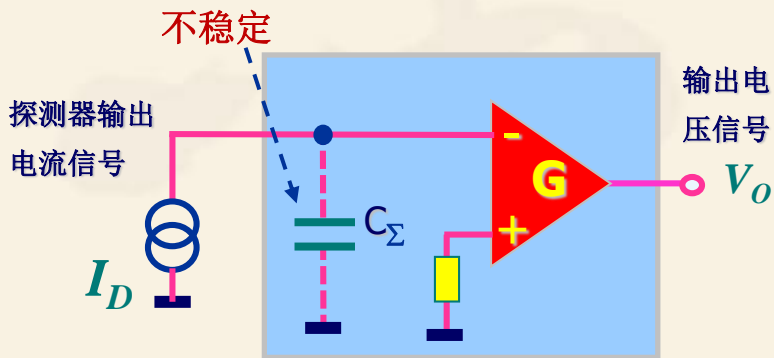
输出信号幅度正比于其输入电流对时间的积分，即输出信号的幅度与探测器输出的总电荷量成正比。

### ■ 电压灵敏前放

$$V_o = - \int i dt / C_F = - Q / C_\Sigma$$

$$C_\Sigma = C_D + C_s + C_A$$

$C_D$ : 探测器等效电容;  $C_s$ : 分布电容;  $C_A$ : 放大器输入电容

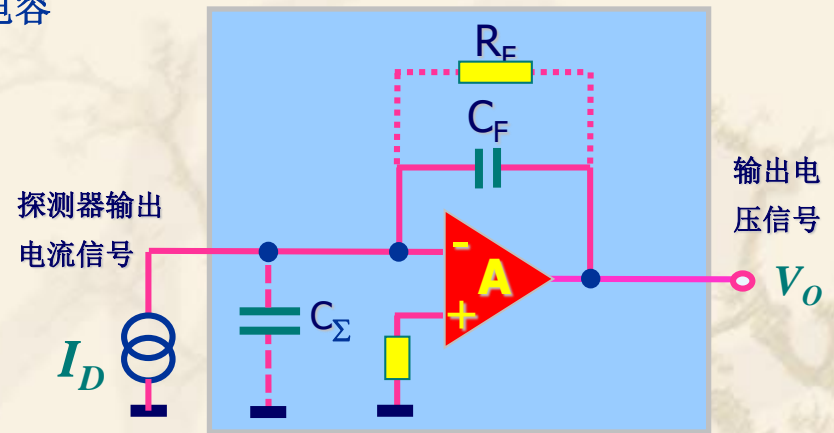


电压灵敏前放

### ■ 电荷灵敏前放

$$V_o = - \int i dt / C_F = - Q / C_F$$

$$(1+A) C_F \gg C_\Sigma$$



电荷灵敏前放

# 成形放大 (shaping AMP)

- 噪声
- 堆积畸变
- 弹道亏损



- 幅度放大
- 滤波器（成形）设计

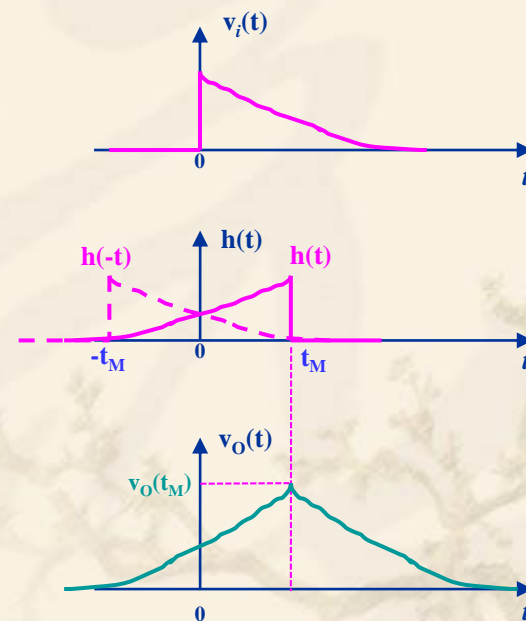
## ■ 匹配滤波器

对于叠加与白噪声上的信号，滤波器的频域响应为输入信号频谱的复共轭时可以获得最佳的信噪比，这样的滤波器被称为**匹配滤波器**。

$$\text{匹配滤波器的冲击响应: } h(t) = \frac{k}{d^2} v_i(t_M - t)$$

滤波器的冲击响应为输入信号波形的镜像，但延迟了一个输出信号的达峰时间 ( $t_M$ )。

最佳滤波器输出信号是输入信号与滤波器冲击响应的卷积。





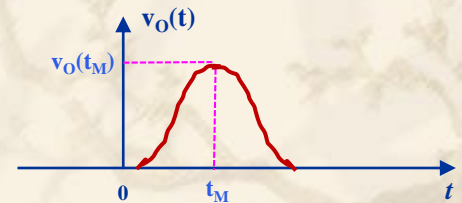
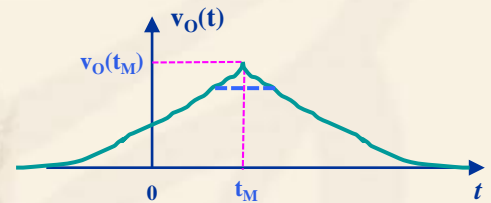
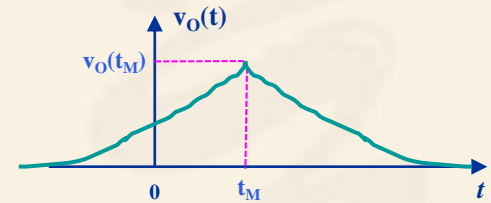
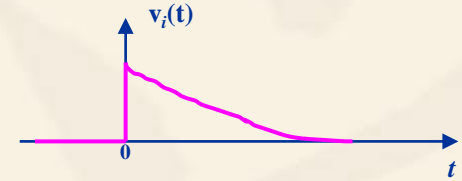
# 成形电路

■ 最佳滤波 → 匹配滤波器

■ 考虑弹道亏损效应的最佳滤波

■ 可以实现的成形滤波电路

◆ CR-RC成形，基线恢复



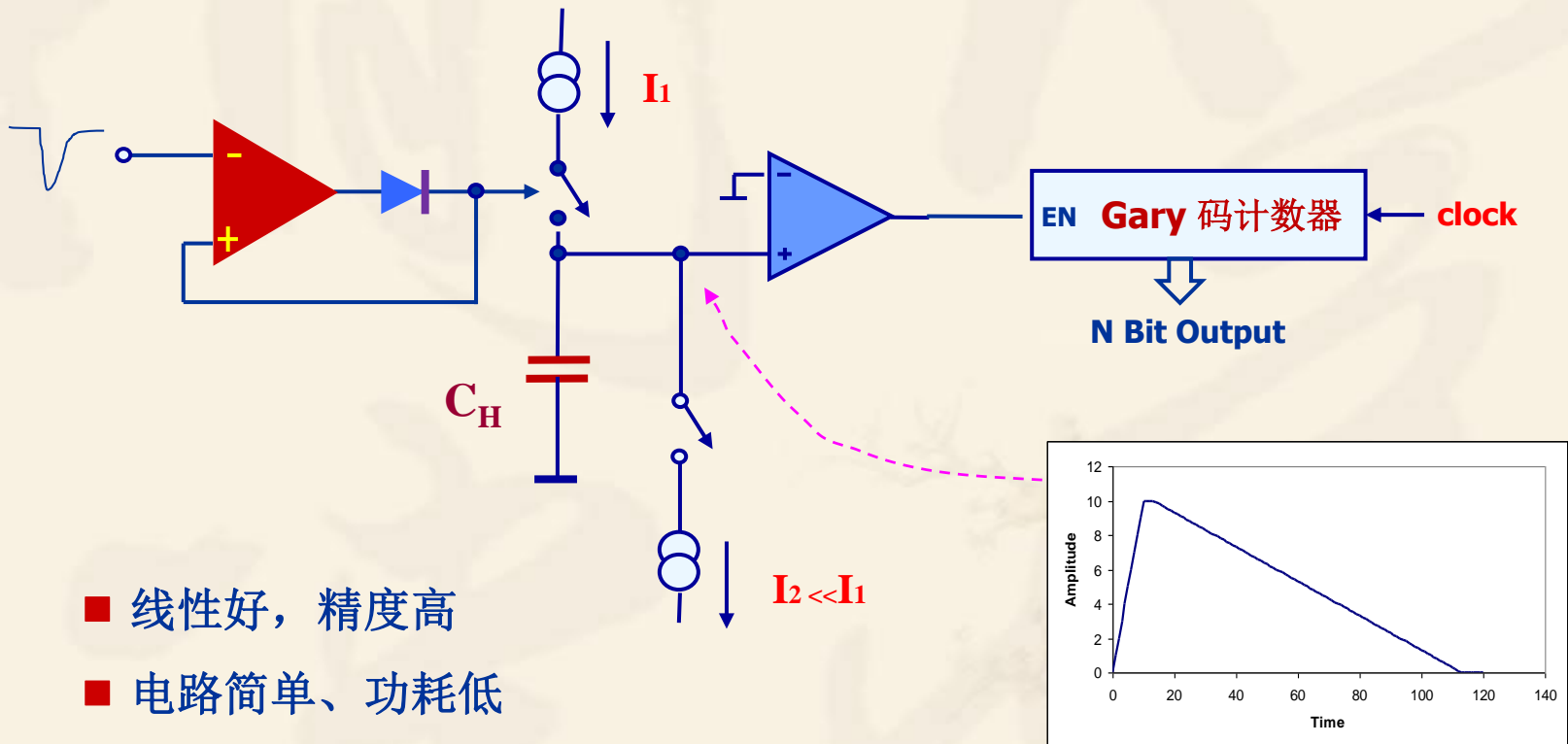
# 模拟—数字变换

## Analog—Digital Conversion (ADC)

- 线性放电型ADC
- 逐次比较型ADC (SAR ADC)
- 流水线型ADC (Pipeline ADC)
- 闪电型ADC (Flash ADC)
- 折叠型ADC (Folding ADC)



# 线性放电型ADC



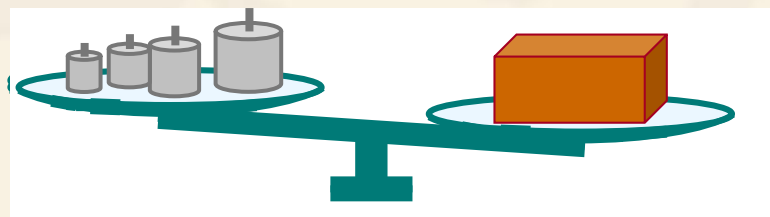
- 线性好，精度高
- 电路简单、功耗低
- 速度慢

# 逐次比较型ADC

(Successive Approximation ADC, 简称: SAADC)

## 电路组成:

- 取样/保持电路 (SHA)
- 高速比较器 (Comparator)。
- 逐次比较寄存器 (SAR)。
- 高速数字/模拟变换器 (DAC)。
- 控制和定时逻辑 (Control & Timing)。



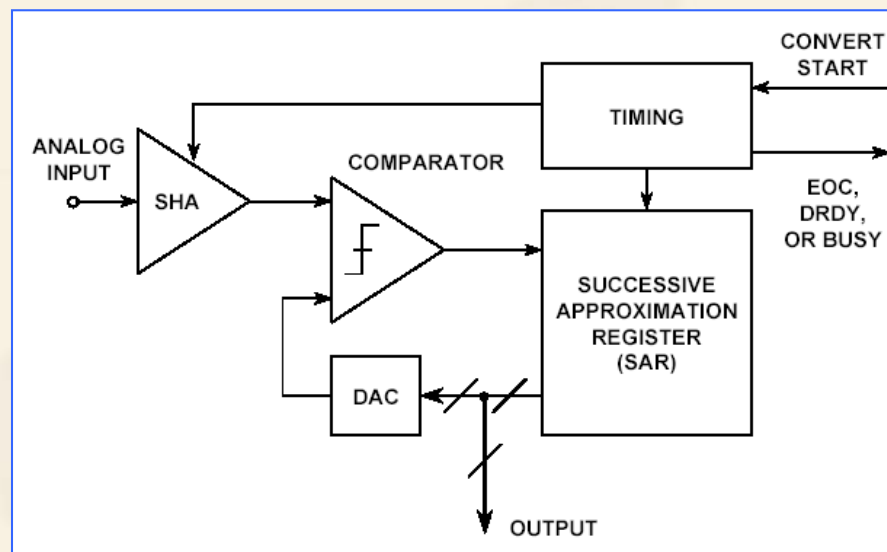
有效砝码的总重量逐次逼近重物的重量

## 工作原理:

将输入模拟信号与不同的参考电压做多次比较,使变换所得的数字量在数值上逐次逼近输入模拟量对应值。

## 特点:

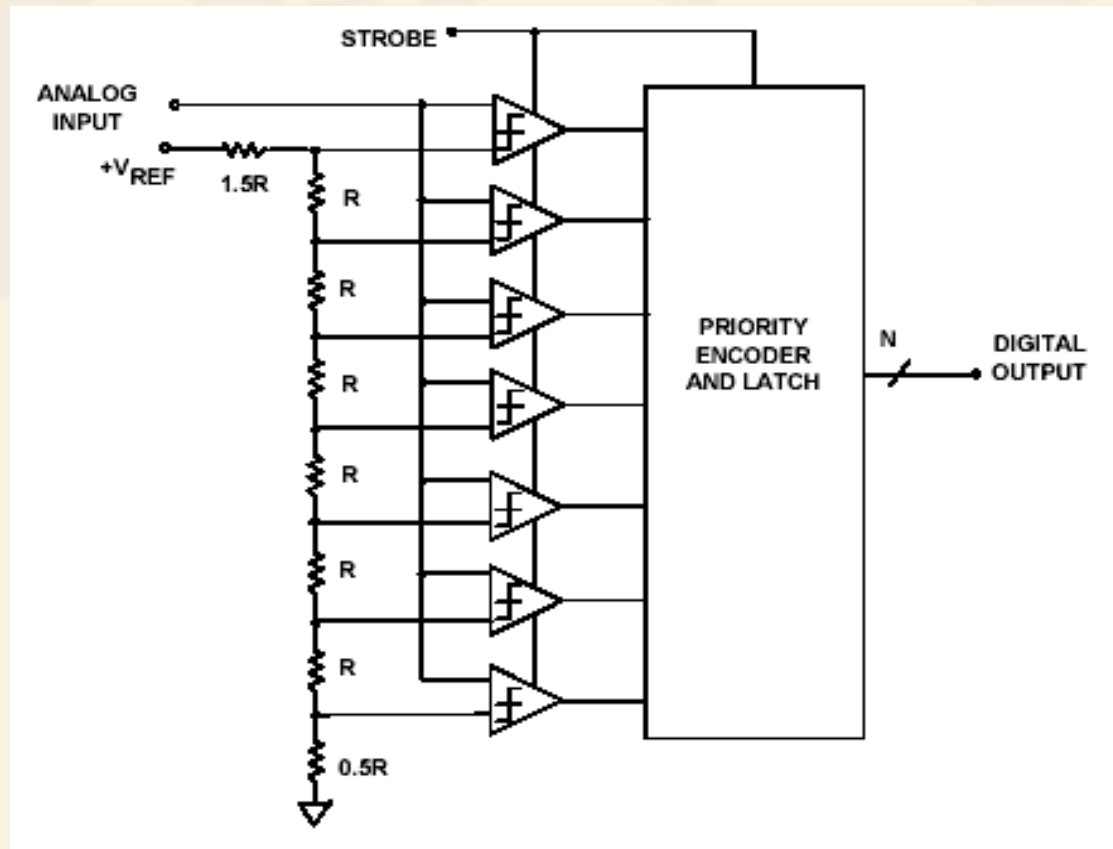
- n位ADC完成一次变换需要n个时钟周期 (100KSPS ~ 10MSPS)。
- 低功耗,低成本。
- 8~16位分辨。



SAADC 原理电路图



# Flash ADC结构



- 最高采样速度的ADC
- $2^n-1$ 个高速比较器
- 功耗大

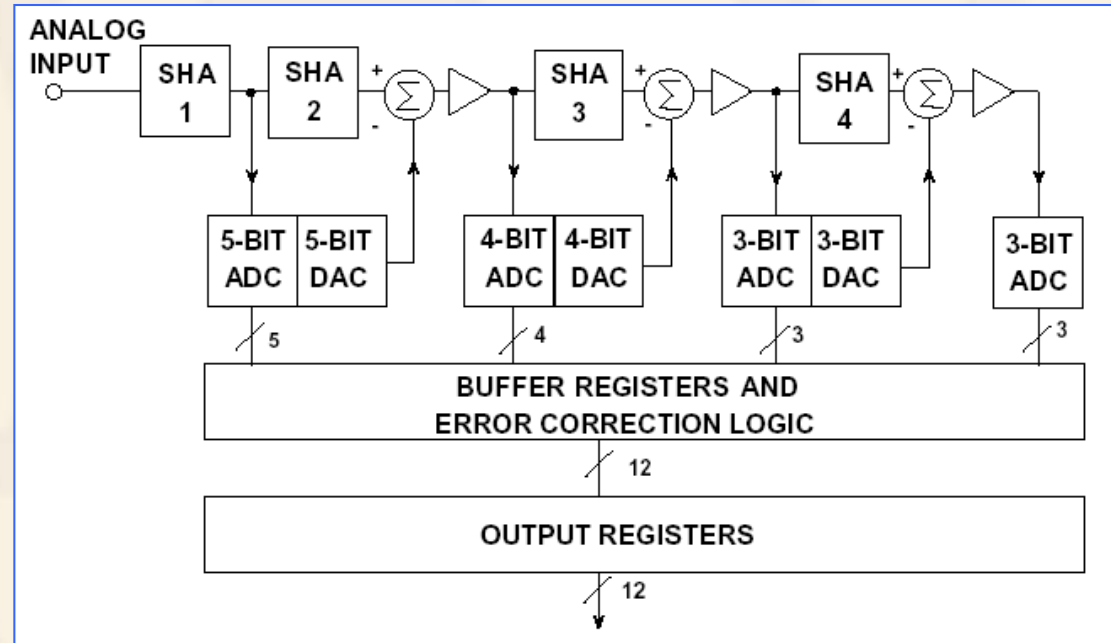
# 流水线型ADC

## 电路组成:

- 输入取样-保持放大器
- 多级并行比较ADC电路
  - 取样-保持电路
  - 并行比较ADC
  - 高速DAC
  - 高速相减和放大电路
- 缓冲寄存器和误差修正电路
- 输出寄存器

## 工作原理:

每一级均增加一个取样-保持电路，因此每一级ADC变换完毕后，其取样-保持电路就可以进行新的取样-保持，而不必象分级并行比较器型ADC那样。只有等整个变换过程结束后，输入取样-保持电路才能接收新的取样值。因此，流水线型的速度进一步提高。



Pipelined ADC原理方框图

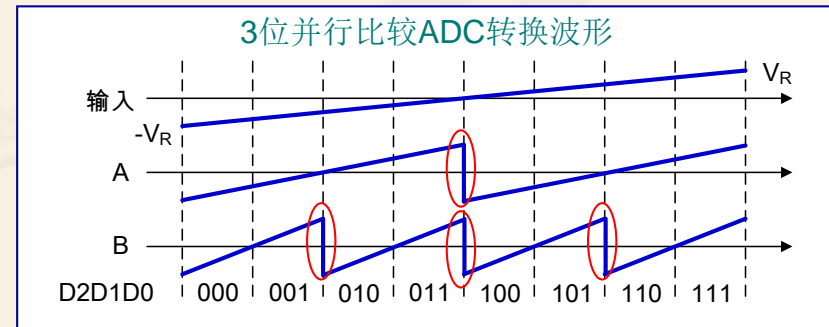
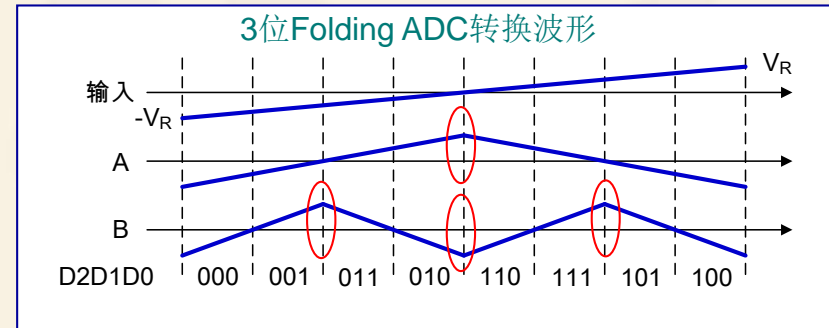
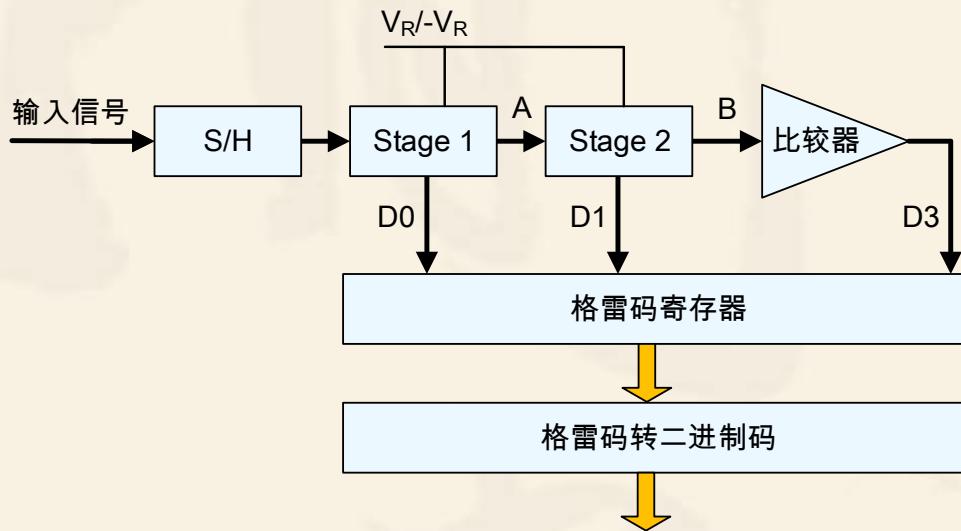
## 特点:

- 变换速度快，10MSPS~200MSPS。
- 低功耗，低成本。
- 10~16位分辨。



# Folding ADC

- Folding ADC的基本概念与分级并行比较ADC的概念相同，因此相对于高速Flash ADC，其使用资源更少，可以实现高精度的设计



Analog Device Tutorial MT-025, ADC Architectures VI: Folding ADCs, by Walt Kester

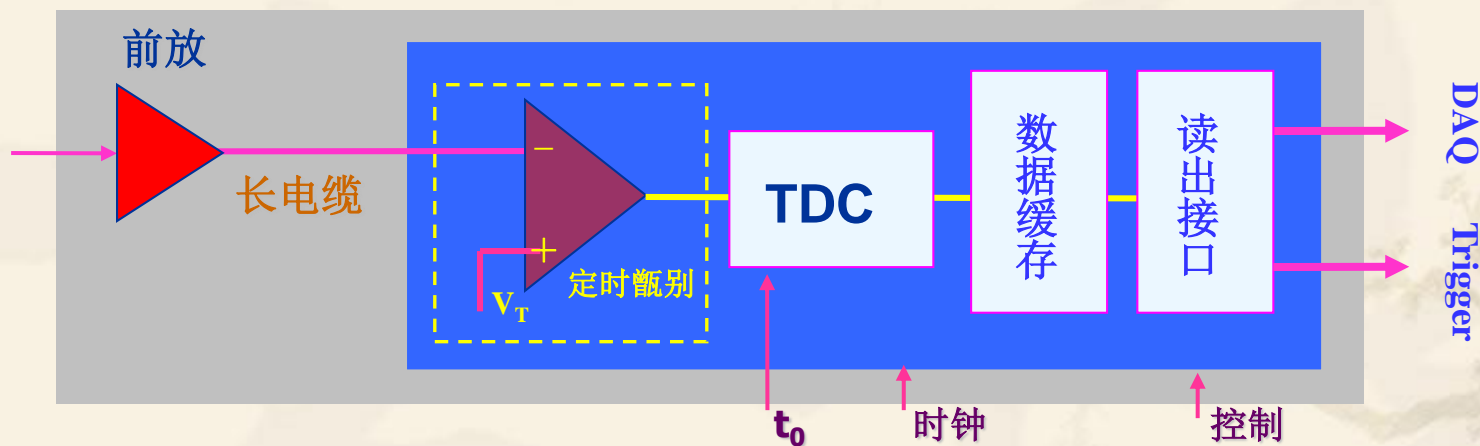
- 不同之处在于其输出编码为格雷码，相应的每一级输出信号波形更加缓和，因此适应于更高工作速度情况，及采样率可以做到更高。
- 因此，Folding ADC是当代超高速、高精度ADC领域的一个重要设计技术

# 时间测量

时间测量就是测量探测器输出信号的出现时间。信号的出现是指针对某一参考信号 ( $t_0$ ) 的时间间隔。一个时间测量系统要解决两个问题：

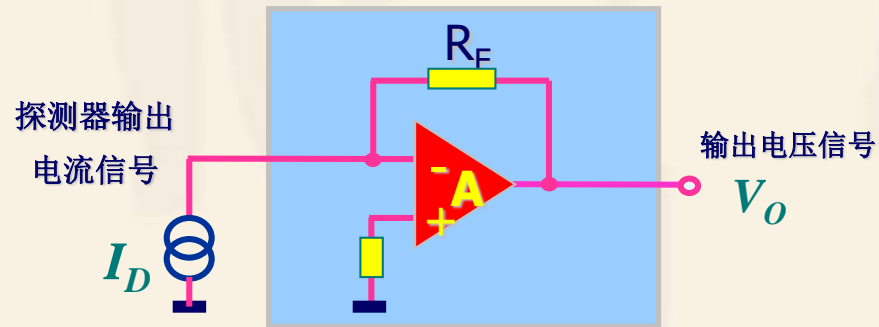
- 由定时甄别器电路确定信号的出现时刻；
- 由时间—数字变换 (TDC) 电路将被测信号和参考信号 ( $t_0$ ) 之间的时间间隔转换成数字数据。

时间测量概念框图





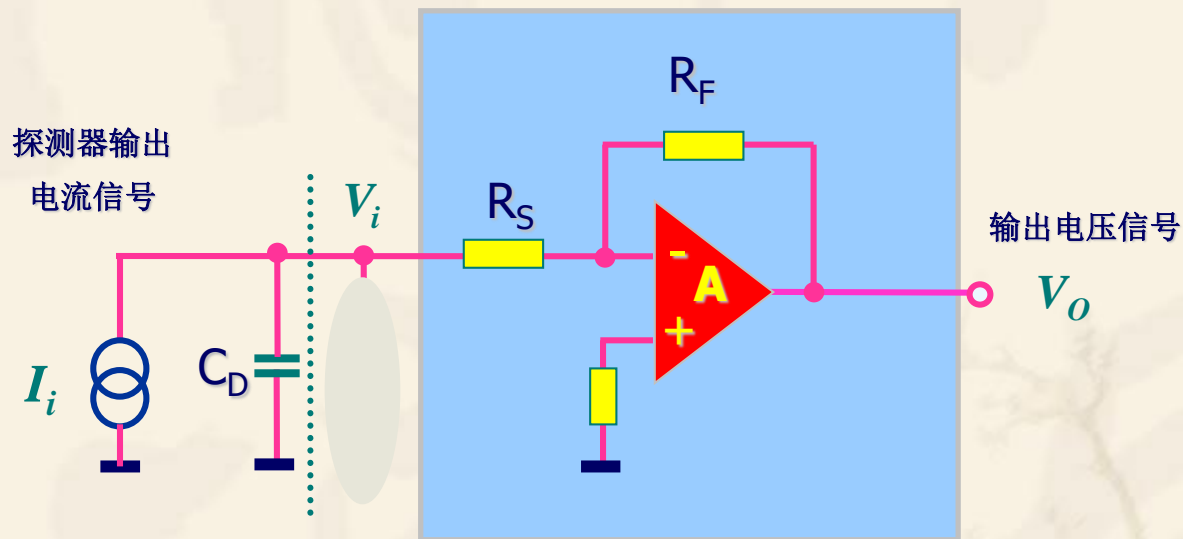
# 电流灵敏前放



$$V_O = -I_D R_F$$

- 快时间响应，保持输入信号的波形；
- 相对大的噪声

# 电压快前放



$$\frac{V_O}{V_i} = - \frac{R_f}{R_s}$$

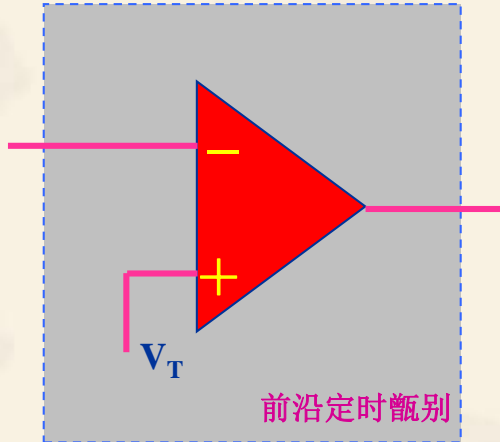
- 电压放大
- 低噪声
- 快响应



# 定时甄别方法

1. 前沿定时甄别；
2. 过零定时甄别；
3. 恒比定时甄别。

# 前沿定时甄别



设输入信号函数为： $f(t)$ ，幅度为： $A$ ，则有：

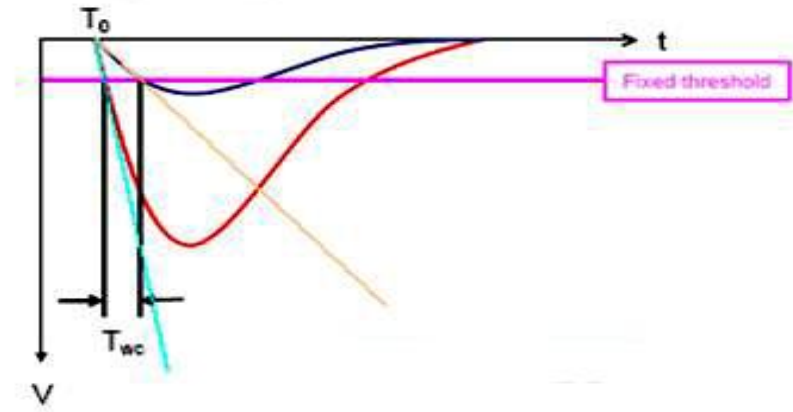
$$Af(t) - V_T = 0$$

$$Af(t) = V_T$$

优点：时间晃动小；

缺点：时间游动效应

## “时间游动”效应 (Time Walk)



触发比： $f = \frac{Q_T}{Q} = \frac{V_T}{V}$

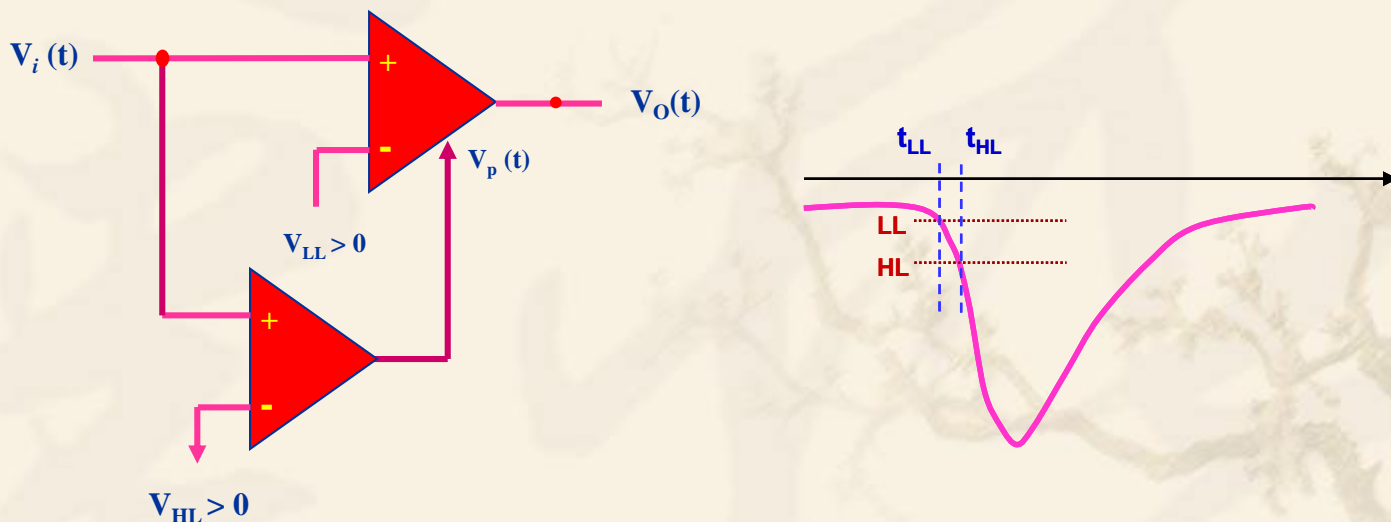
对于时间晃动特性，希望较大的触发比；而时间游动效应则希望较小的触发比。



# 双阈甄别（预甄别）技术

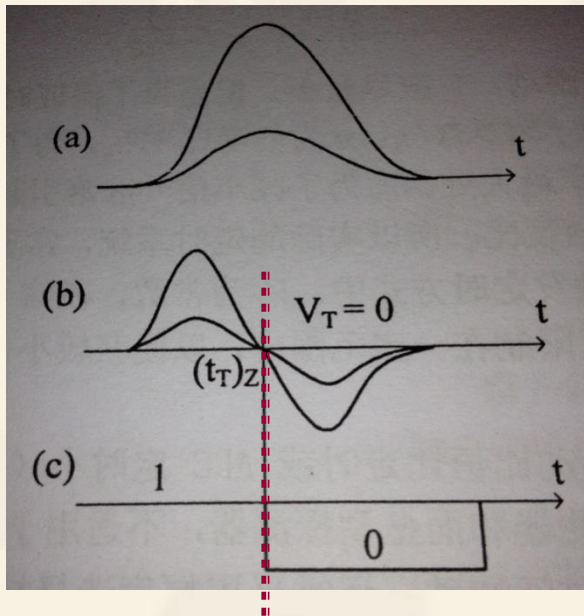
在现代的粒子物理实验中，人们通常使用简单的前沿定时方法，并且利用同一信号的幅度（电荷）测量对幅度-时间游动带来的定时误差进行修正，这已基本上成为一种标准方法。在实用时，经常采用所谓的双阈甄别技术。

在双阈方法中，高阈（ $V_{HL}$ ）和低阈（ $V_{LL}$ ）甄别器对同一信号进行甄别，只有高于高阈的信号，电路才有输出。这样做的目的是利用高阈来剔除噪声和干扰信号，同时又保持低阈甄别的时间信息。

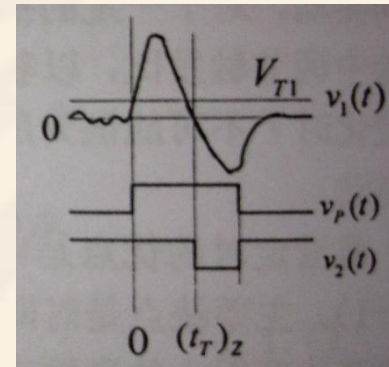
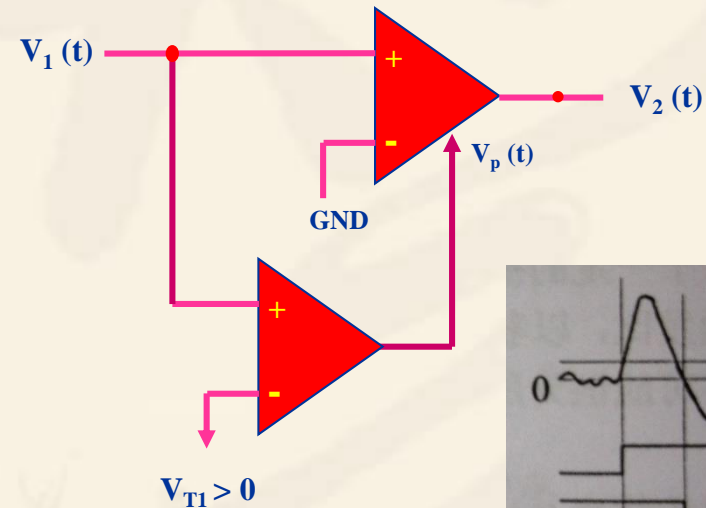
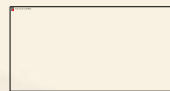


# 过零定时甄别

- 前沿和脉宽相同，仅幅度不同的信号，其微分后的过零点时间总是相同



$$Af(t) - V_T = 0$$



- 带预甄别的过零定时甄别  
避免噪声触发

# 恒比定时甄别

$$Af(t) - V_T = 0$$

$$Af(t) - pA = 0$$

## ■ 信号分为3路:

延迟信号:  $Af(t-t_d)$ , 衰减信号  $pA(t)$ , 预增别信号  $V_p(t)$

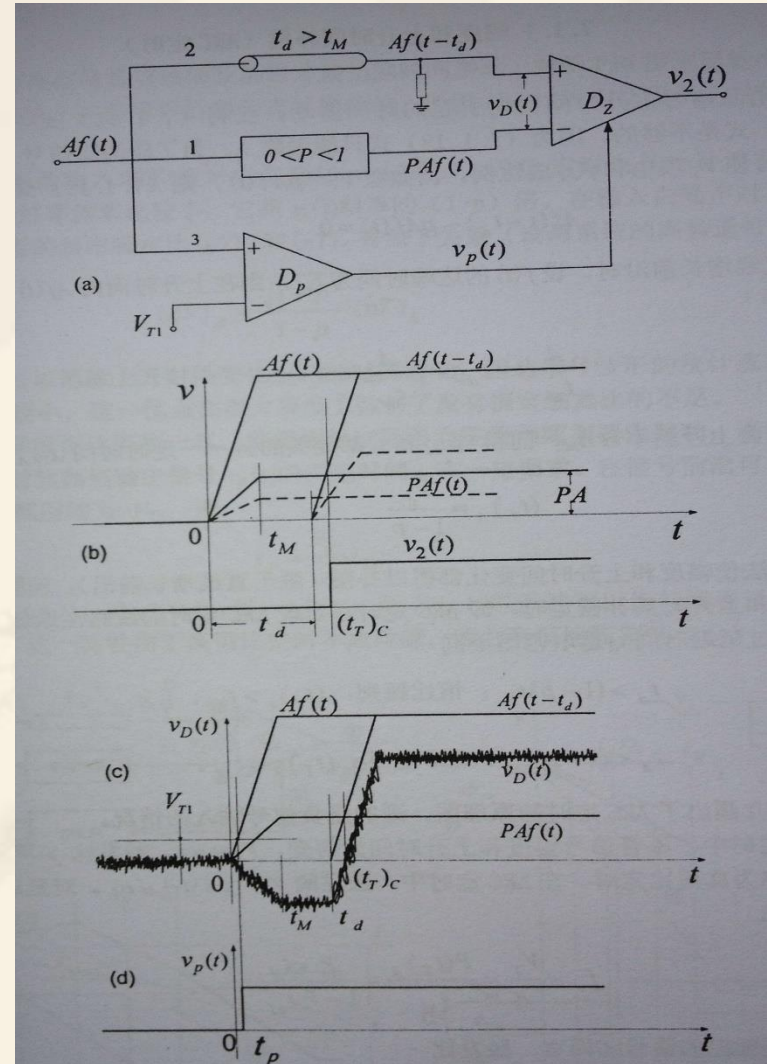
$$Af(t-t_d) - pA = 0$$

$$f(t-t_d) = p \quad \text{与幅度} A \text{无关}$$

## ■ 触发比

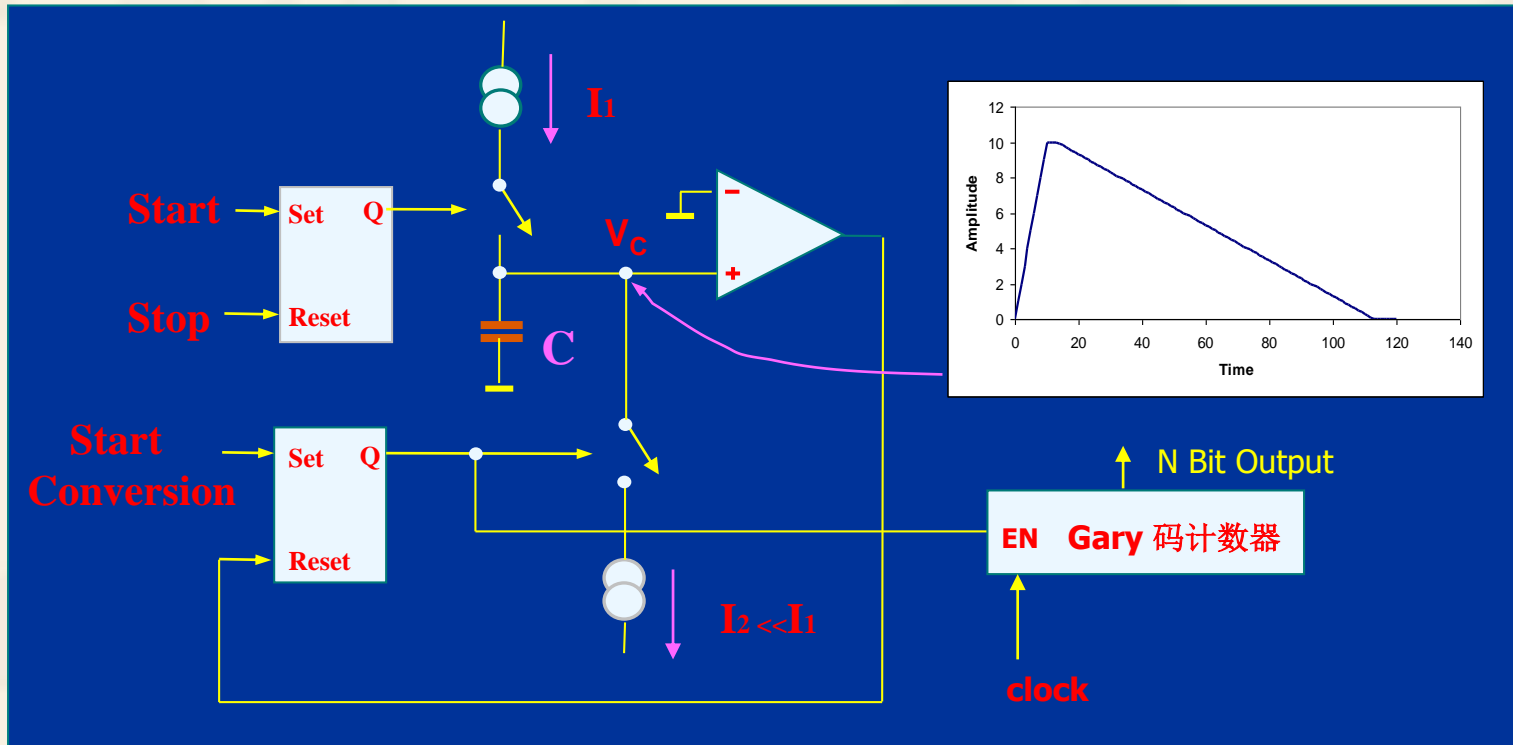
$$f = \frac{pA}{A} = p$$

使用时可以通过调节衰减系数  $p$ , 可以很方便地调节触发比, 使时间晃动最小。

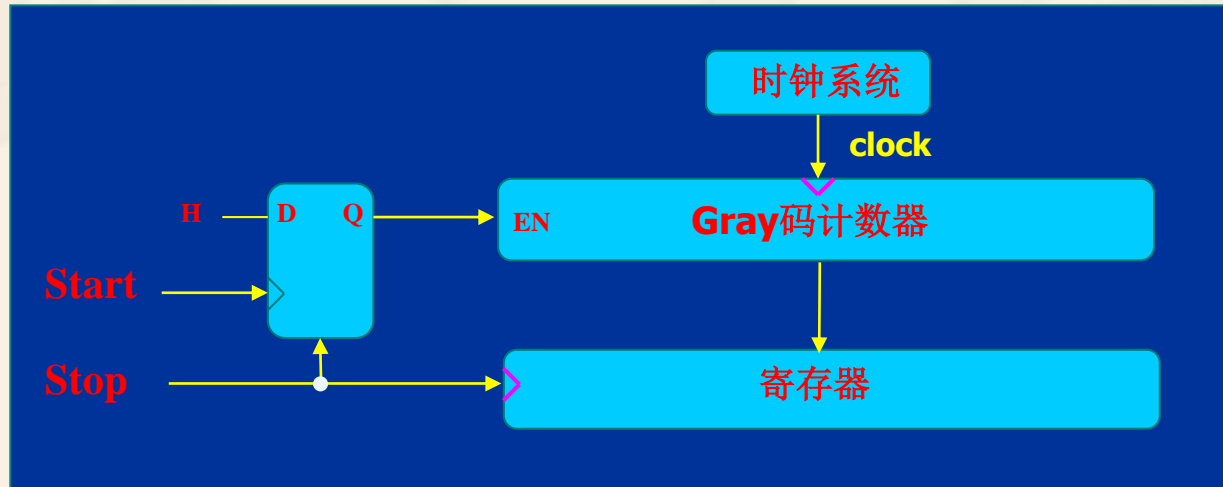




# 线性放电型TDC



# 全数字计数器TDC



- 电路简单，全数字电路，易集成化
- 大尺度时间测量范围
- 需要高频，高精度时钟
- 时间分辨取决于时钟频率

# 全数字计数器技术 + 时间内插

## “粗”计数 + “细”时间测量组合

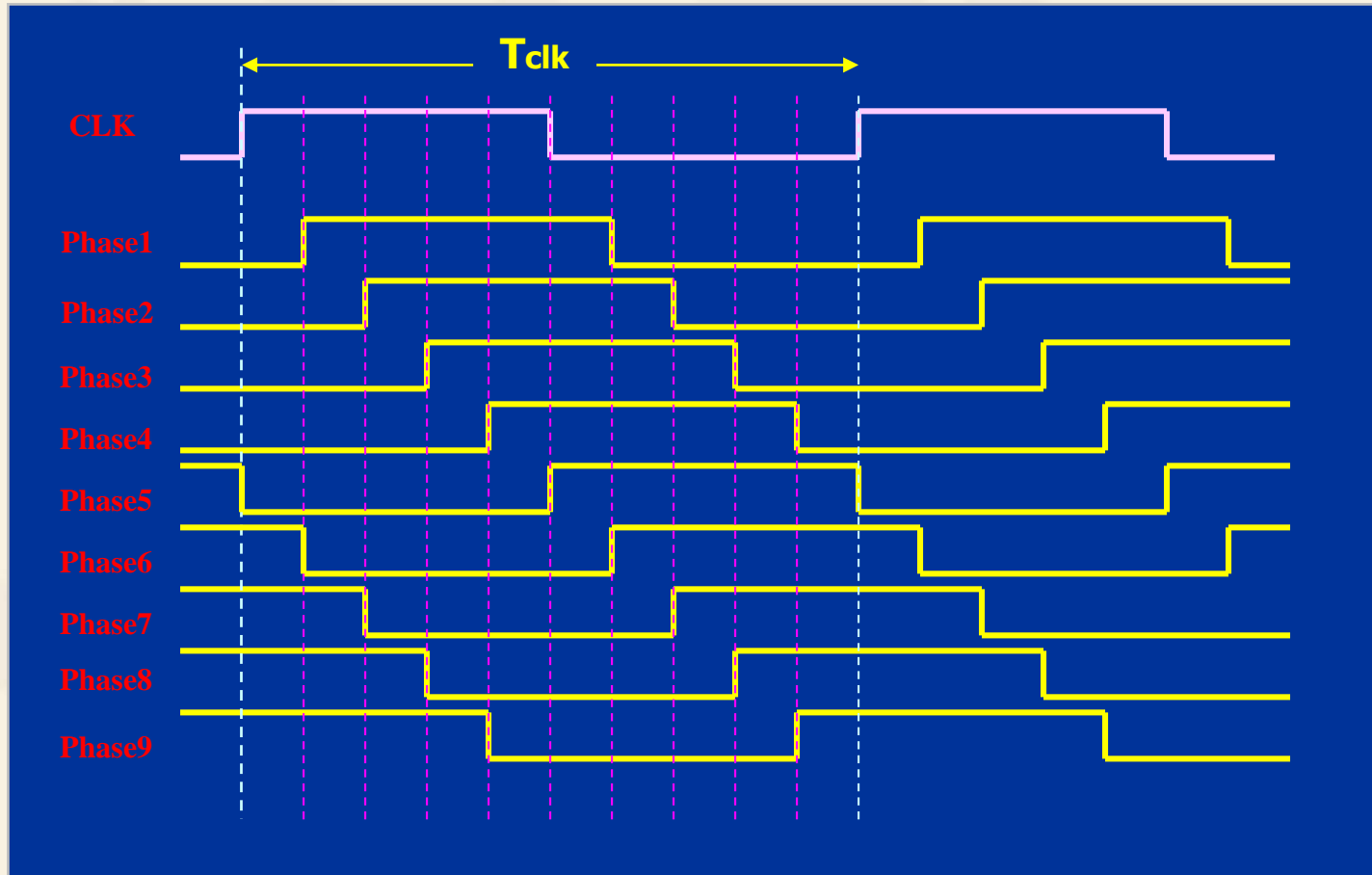
事实上，单纯使用某一种技术难以满足当前粒子物理实验所需要的高精度时间分辨、大尺度测量范围，大尺度通道数，低成本等综合性能要求。

目前主流的解决方案是所谓的“粗”计数（**Coarse Counting**）+“细”时间测量（**Fine Measurement**）组合。

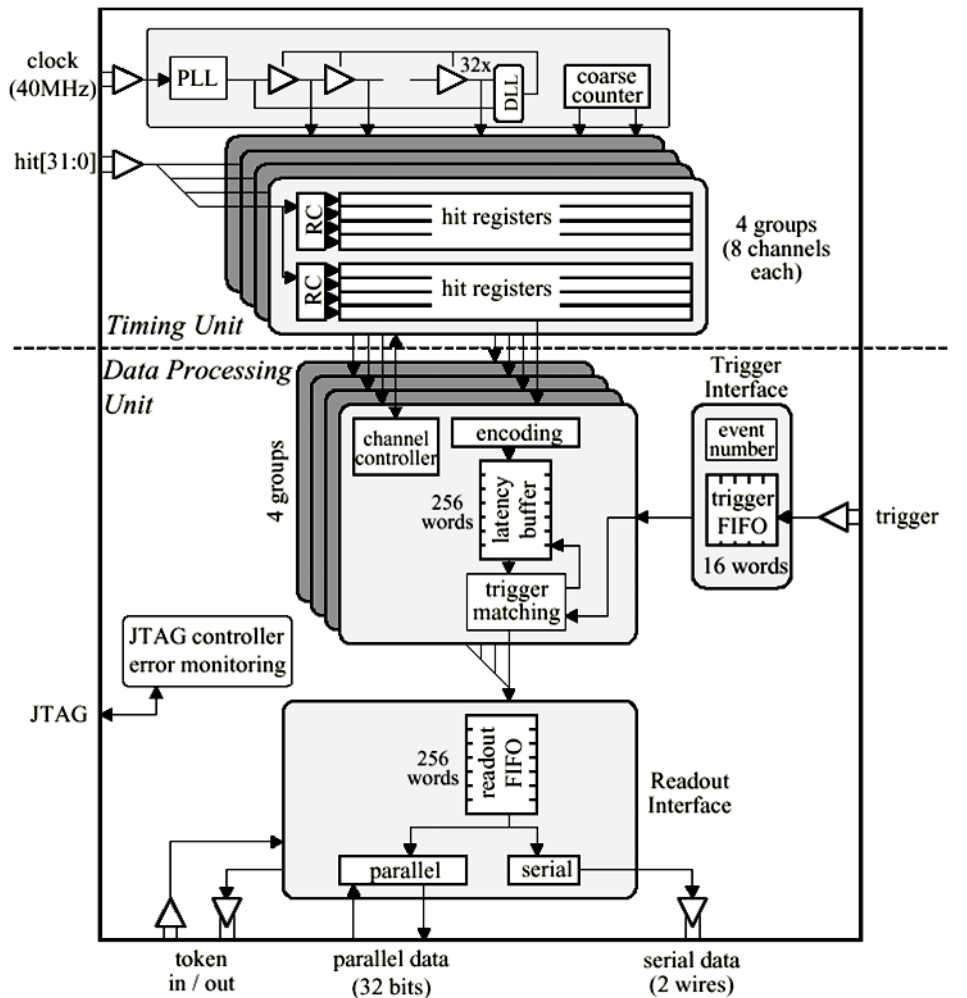
在这种组合中，“粗”计数一般由高性能的**Gray**码计数器实现，就是前述的数字计数器型**TDC**。使用的参考时钟频率一般在数百兆赫兹，实现几个**ns**的时间分辨；而“细”时间测量的实现则依靠时间内插技术（**Time Interpolation**），在一个时钟周期内进行时间内插，达到亚纳秒（**100 ps ~ 10ps**）的时间分辨。



# 时间内插原理

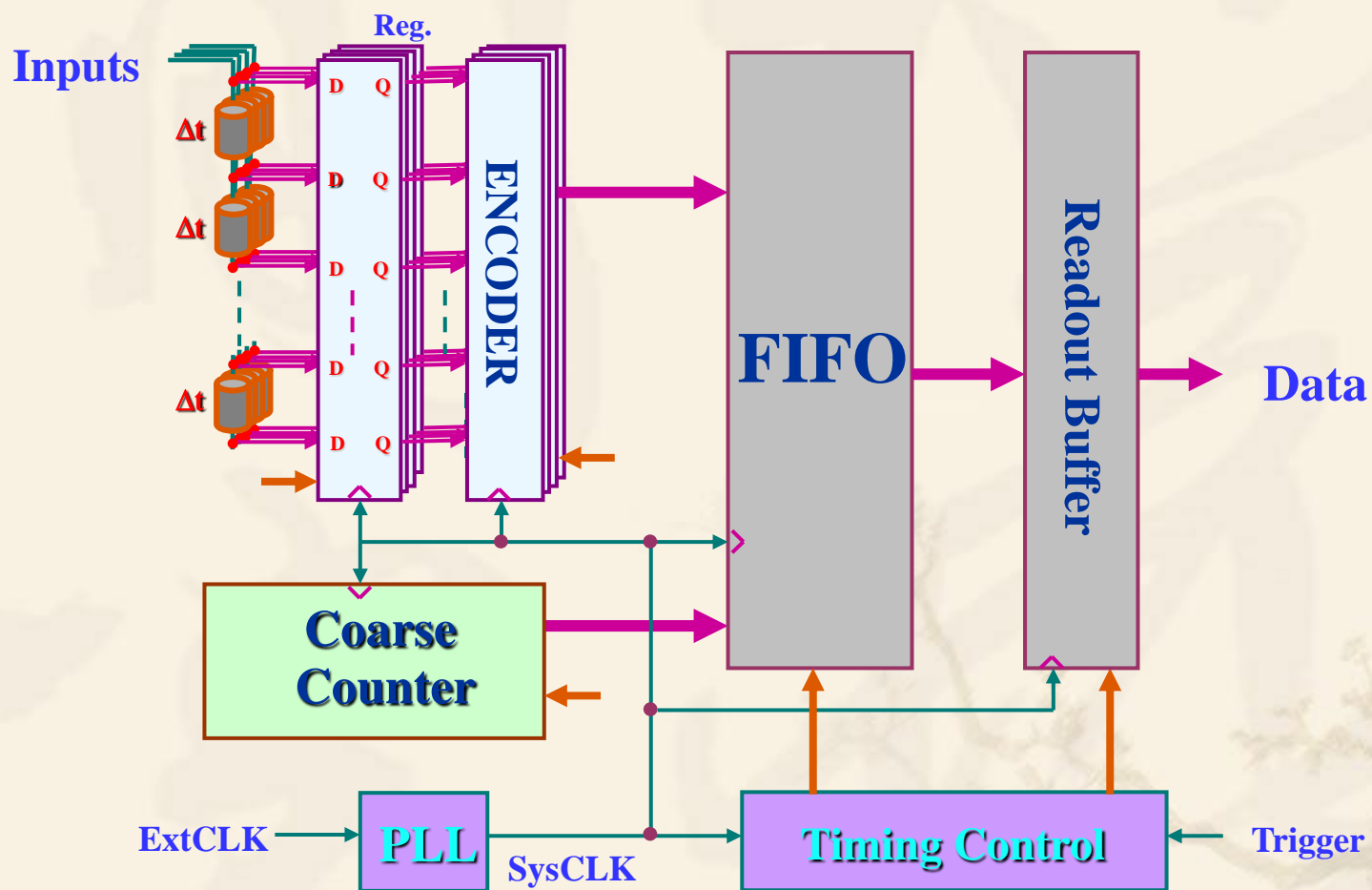


# HPTDC方框原理图



- **PLL**技术提供多种系统时钟
  - 输入时钟：**40 MHz**
  - 输出时钟：**40 ~ 320 MHz**
- **DLL**技术提供**32**个精确延迟
  - 相当于时钟分相技术
  - **780 ps, 390 ps, 195 ps, 100 ps**  
取决于使用的时钟
- **RC**延迟线内插，进一步提高分辨
  - **4 RC**延迟线内插
  - **25 ps**
- “粗”计数器
- 触发匹配
- 工作模式设定：**JTAG**技术
- **BGA**封装

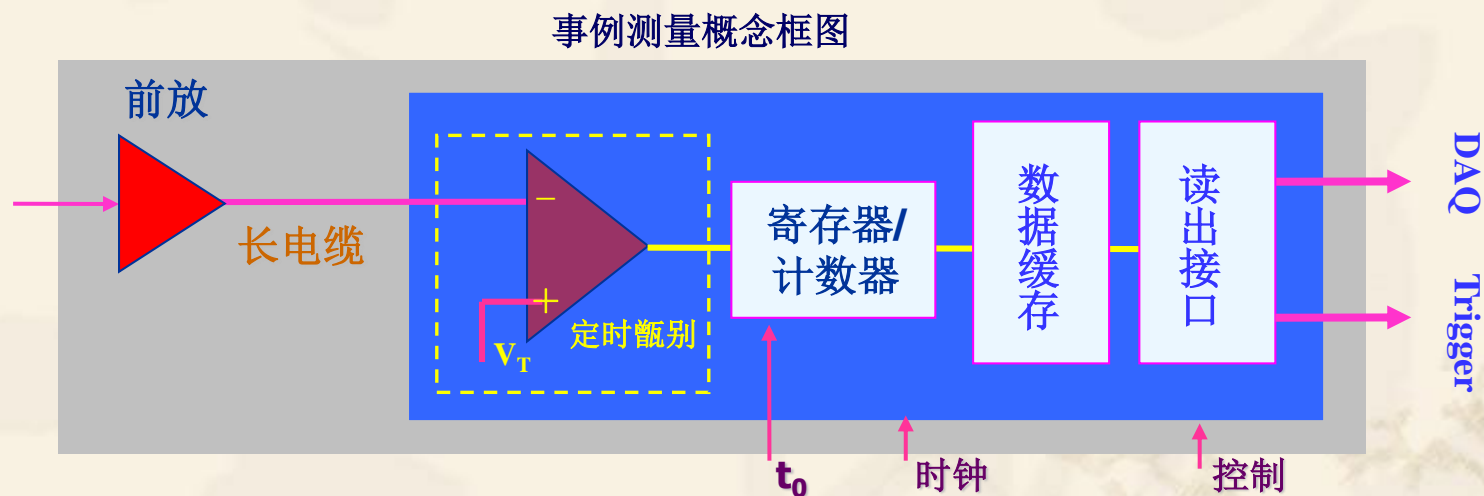
# 基于FPGA的TDC原理方框图





# 事例测量概念框图

某些探测器可能只需要知道是否有粒子击中相应的位置，并不需要测量信号的电荷或时间，如：BES III的 $\mu$ 子探测器。这种情况下，只需要对探测器输出的信号进行必要的放大和甄别，得到“是”或“否”的信息，并进行记录即可。这就是所谓的事例计数测量。



# BES III $\mu$ 子鉴别器电子学读出系统



测量 $e^+ e^-$ 反应末态中的 $\mu$ 子，通过多层测量给出他们的位置和飞行轨迹

# 触发判选系统

## 对触发判选的要求：

- 对好事例判选效率要高。尽量接近100%。即使做不到100%，其效率也要确切可知，以便在物理分析时进行校正。
- 尽可能多地排除假事例，至少要达到数据获取系统能接受的程度。
- 判选速度要快，目前普遍采用流水线作业模式。
- 灵活可变，以适应不断变化的实验条件和物理要求。目前的理念是“可重构系统”设计。



# 触发判选系统的仿真设计 (Simulation)

- 触发判选的实现强烈地依赖物理实验的需求和探测器的具体结构，所以每个探测器系统都有其独特的触发判选系统。
- 必须根据具体实验的物理目标和探测器结构对具体的触发方案进行模拟计算和仿真，证明它对好事例的判选效率足够高，并且有足够好的本底排除。
- 根据模拟计算和仿真的结果进行实际的电子学系统设计。

# 触发判选系统的构成

## ■ 触发子系统

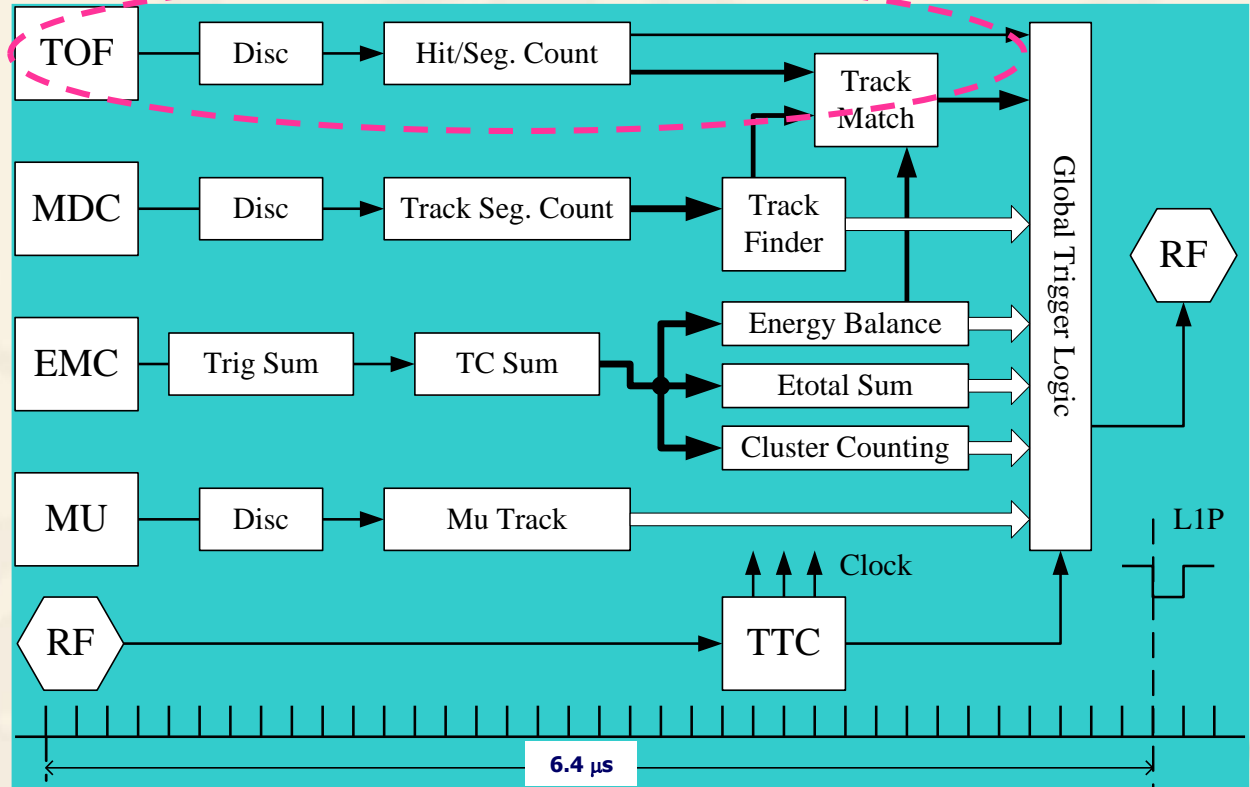
相当于模式识别的特征抽取。

对从各对应子探测器来的信号进行处理，得到一些特征信号，即触发条件。

## ■ 总触发

相当于模式识别的判定分类。

汇集所有特征信号，按照所规定的触发条件表进行分类判选。



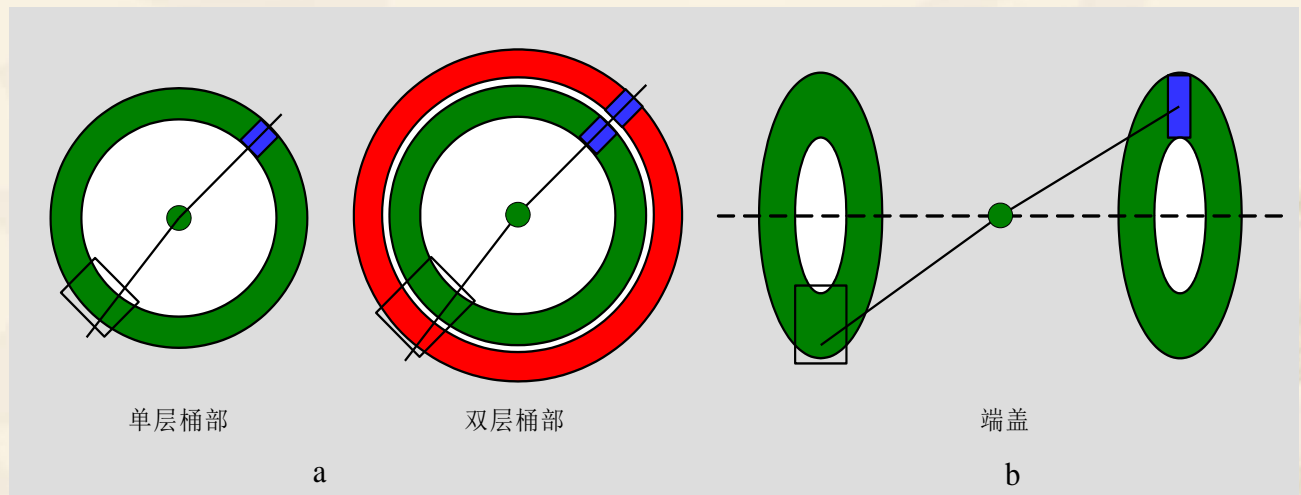
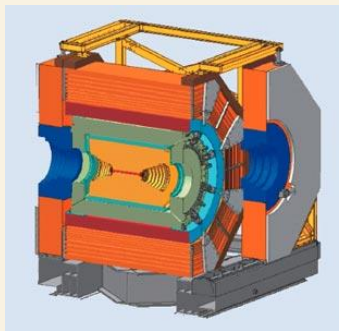
BES III 触发判选系统

## ■ 时钟系统

# TOF背对背信息

**桶部背对背**信息如下图a所示。对应于每一个击中，无论是单层TOF还是双层TOF的方案，都可能有一个对面相应的区域也产生击中，形成背对背信息。只要有这样的情况发生，那么就认为该次事例桶部产生了**背对背**信息。

**端盖背对背**信息如下图b所示。同理，对应于每一个击中，也都可能有一个对面相应的区域产生击中，形成背对背信息。只要有这样的情况发生，那么就认为该次事例端盖产生了**背对背**信息。

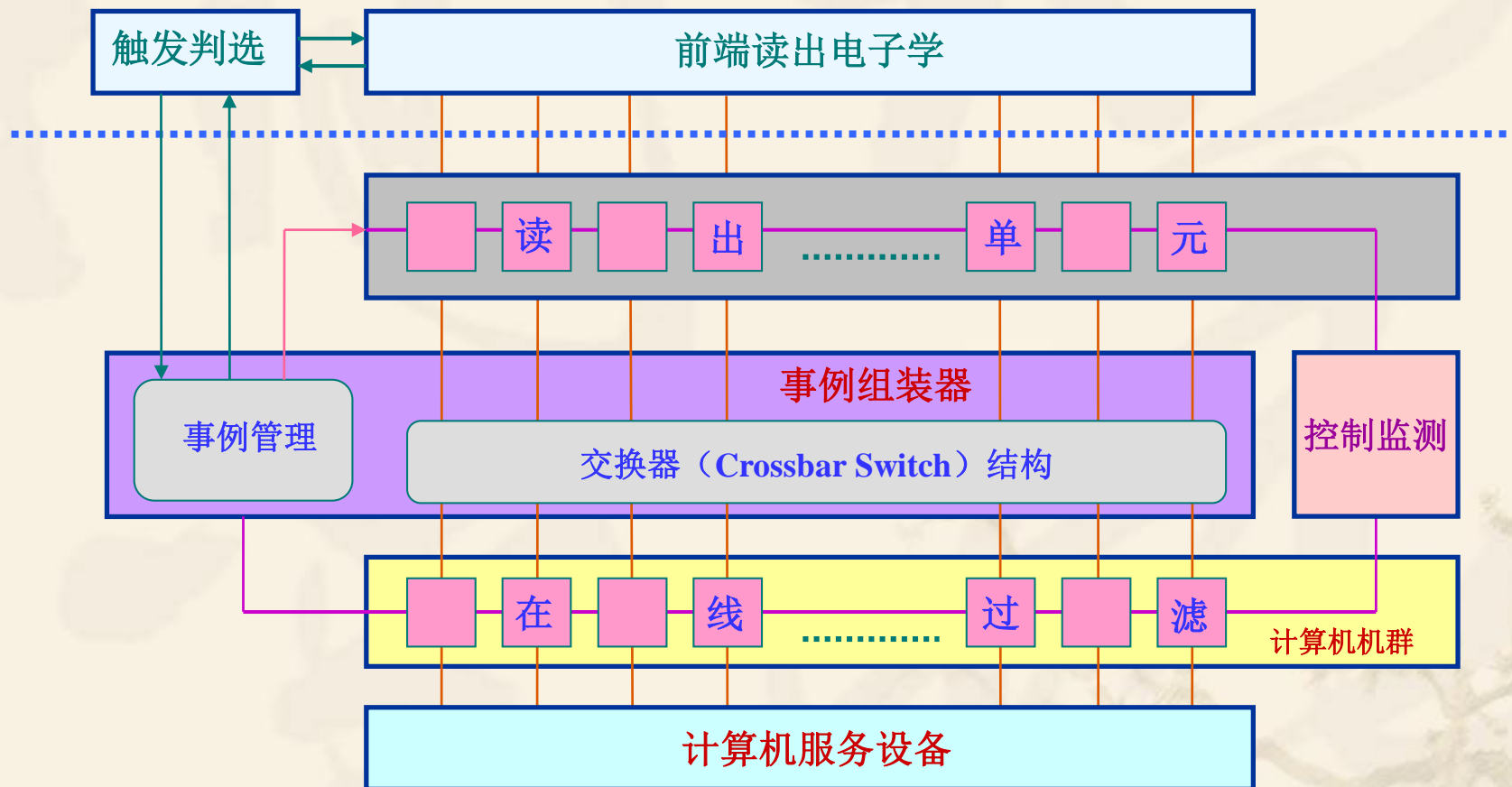




# 数据获取系统的任务

- 整个电子学系统运行的初始化、系统刻度和记档。
- 读取读出电子学系统的数据（来自各探测器）。
- 事例数据的预处理和装配，重建分析和记录。
- 探测器运行情况的监测  
抽样分析事例，建立各种直方图并显示。

# 数据获取系统的构成



# 高速数据传输

## ■ 总线系统

**CAMAC** (1969) ;  
**FastBus** (1983) ;  
**VME**和**VME64xP**, .....

PXI/PXIe

xTCA

Computer Automated  
Measurement & Control

## ■ 光纤（串行数据的点一点传输）

**GLink**, .....

## ■ 以太网（Ethernet）：千兆网/万兆网

## ■ 基于纵横开关（Crossebar Switch）的网络交换系统



# 实时操作系统

在数据获取系统中，一切过程都是实时进行的，要求计算机对外界事例的响应速度快，且是可以确切预期的。所以都是使用所谓的实时操作系统。

- 快速的优先级中断响应和进程调度（10 $\mu$ S级）
- 良好的进程间通讯手段
- 方便访问外部I/O资源（如VME总线等）
- VxWork, VMEExec, pSOS, Lynxos, OS9和RTLinux等

# 计算机机群 (Computer Farm)

- 并行计算机系统

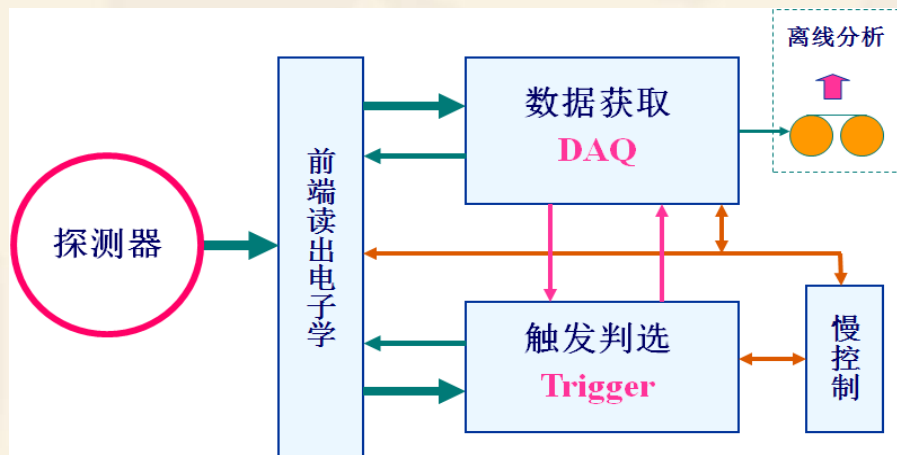
美国 哥伦比亚大学  
物理系李政道研究室

- 微处理器, DSP, PC机, 工作站, ……

# 传统触发与“无触发（Triggerless）”

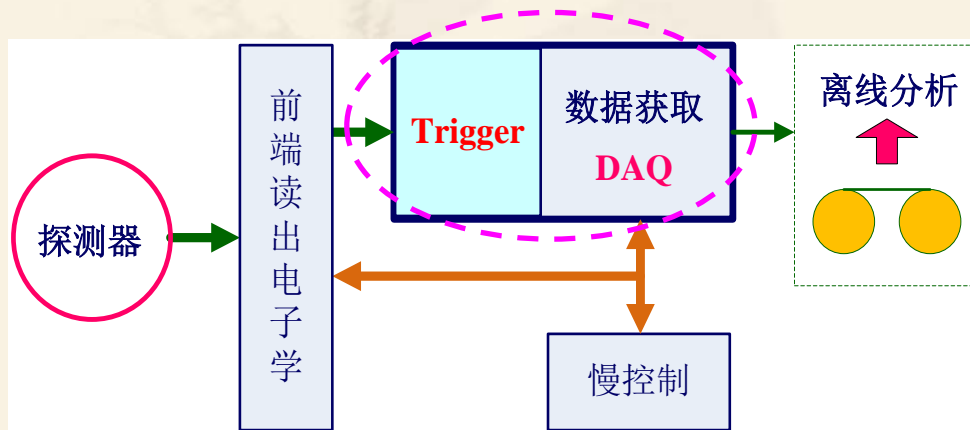
## 传统触发

- ◇ 基于硬件电路实现触发判选
- ◇ 触发信号需送至前端电子学进行数据读取



## “无触发理念”

- ◇ 前端电子学所有数据送至后端进行触发判选
- ◇ 不需要触发信号的前馈
- ◇ 最大限度的减少触发硬件,甚至没有
- ◇ 更灵活的触发判选算法



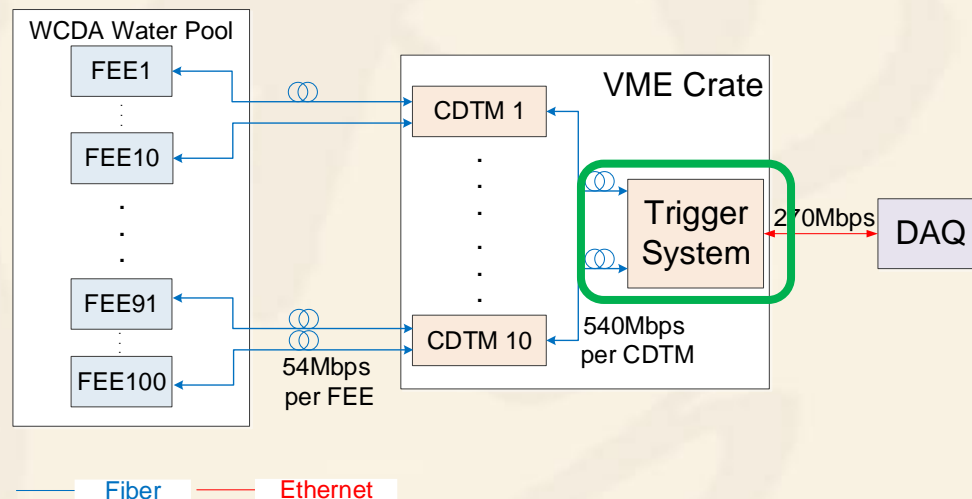
## 触发判选与DAQ的融合



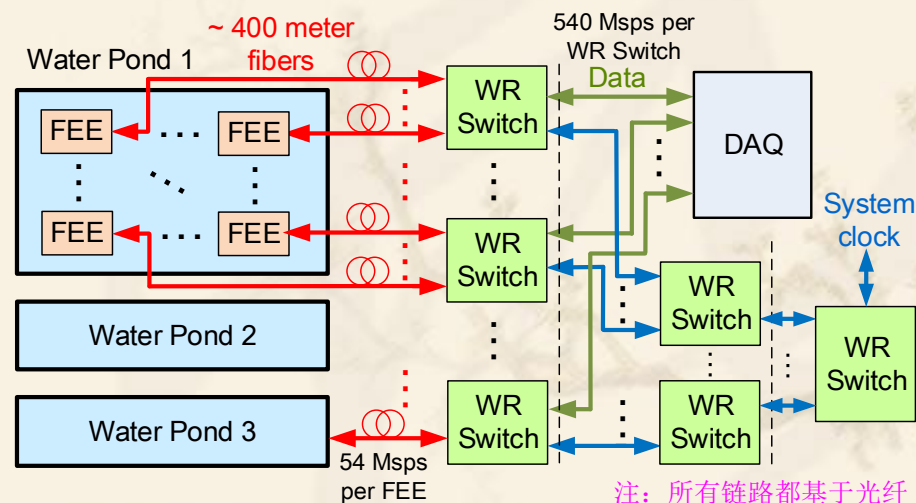
# LHAASO WCDA读出电子学的触发

两种“Triggerless”的方案：

- (1)
- ◇ 前端FEE无需接收触发信号，将所有数据汇总到触发模块
  - ◇ 基于FPGA进行实时触发判选后传输至DAQ。



- (2)
- ◇ 完全的Triggerless，将所有数据通过WR交换机汇总后直接传输至DAQ。
  - ◇ 前端FEE实现基于千兆位以太网TCP/IP和WR标准的数据及时钟传输



谢谢!