

# 粒子物理实验中的电子学

安琪

中国科学技术大学-中科院北京高能物理研究所

“核探测技术与核电子学”联合实验室

2006-4-25

# 报告内容

- 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
- 发展趋势
- 在其它领域中的应用

# 粒子物理实验中电子学的特点

# 两个极限尺度的物质世界

人类对两个极限尺度的物质世界—物质结构的“小宇宙”和星体世界的“大宇宙”—不断认识的历史是人类科学发展史的重要组成部分。

20世纪50年代以来，物质结构的研究进入了核子夸克层次，要求轰击粒子的能量越来越高，逐渐从原子核物理领域进入了所谓的高能物理（粒子物理）领域，包括宇宙线物理和使用高能量和高粒子束流强度的加速器（固定靶和对撞机）物理。

几十年来，科学家们一直在粒子探测器、电子学方法和数据获取方面做出不懈的努力，以适应更高能量、更复杂的粒子物理实验，如高精度的能量分辨和位置分辨，精密的时间间隔测量，快速、实时的事例触发判选，高速、大规模的数据传输和处理等。

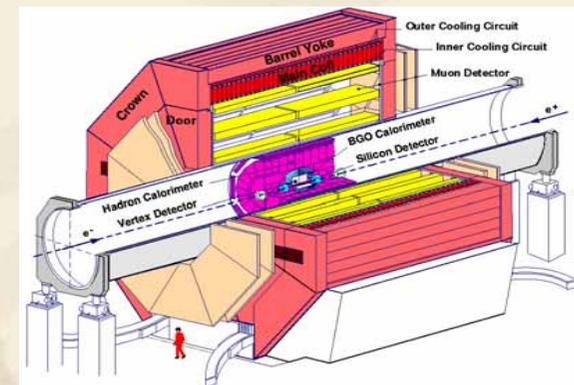
## 6位科学家获诺贝尔物理奖

# 对撞加速器物理实验的探测器系统 - 谱仪

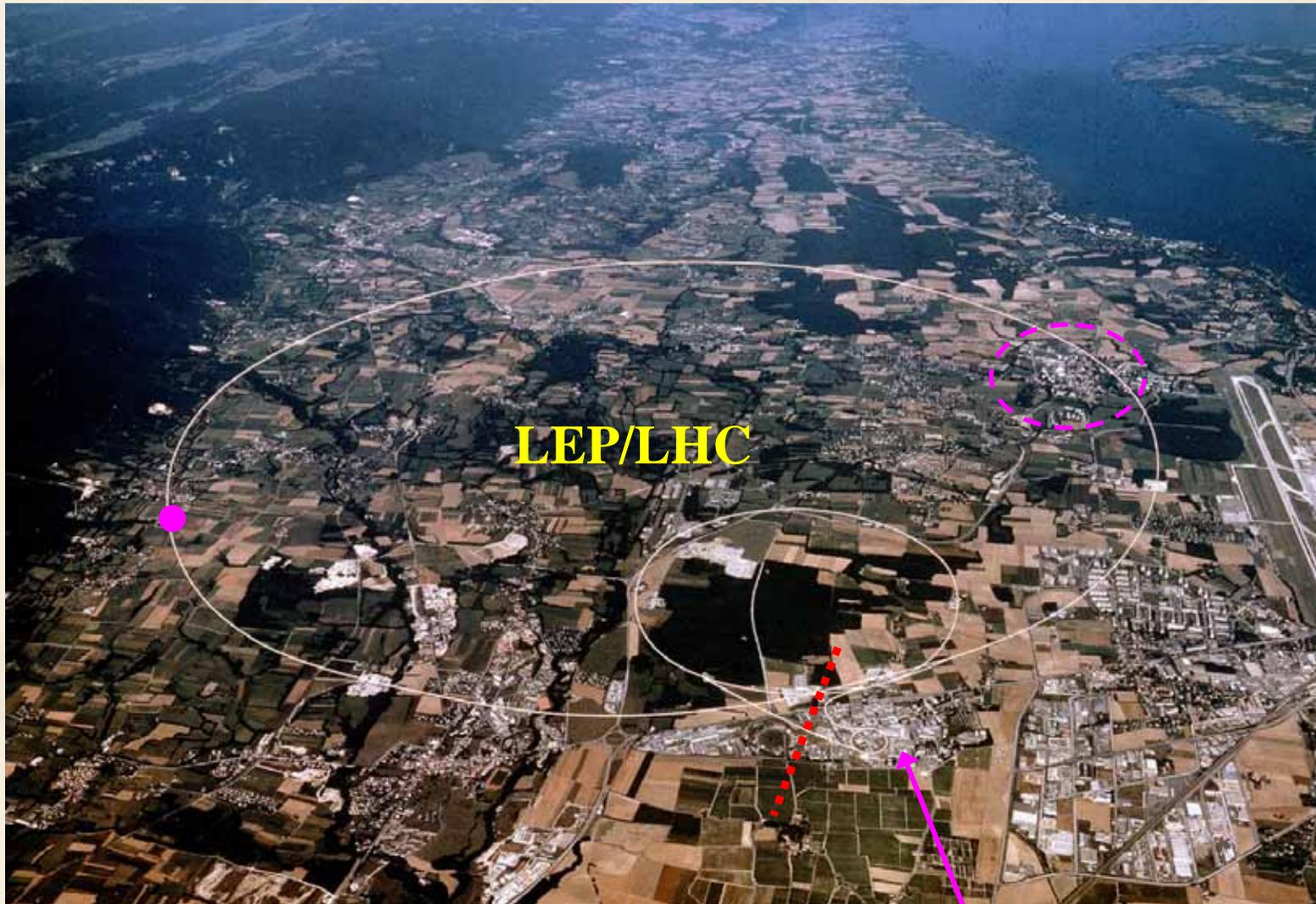
几乎所有对撞加速器物理实验中的谱仪都是一系列探测器层围绕束流管道再加上一定的磁场（由螺旋管线圈产生）组成。通常由内到外依次是：

- 高精度定位的定点探测器
- 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

此外还有亮度监测器



## 欧洲粒子物理实验室 ( CERN )

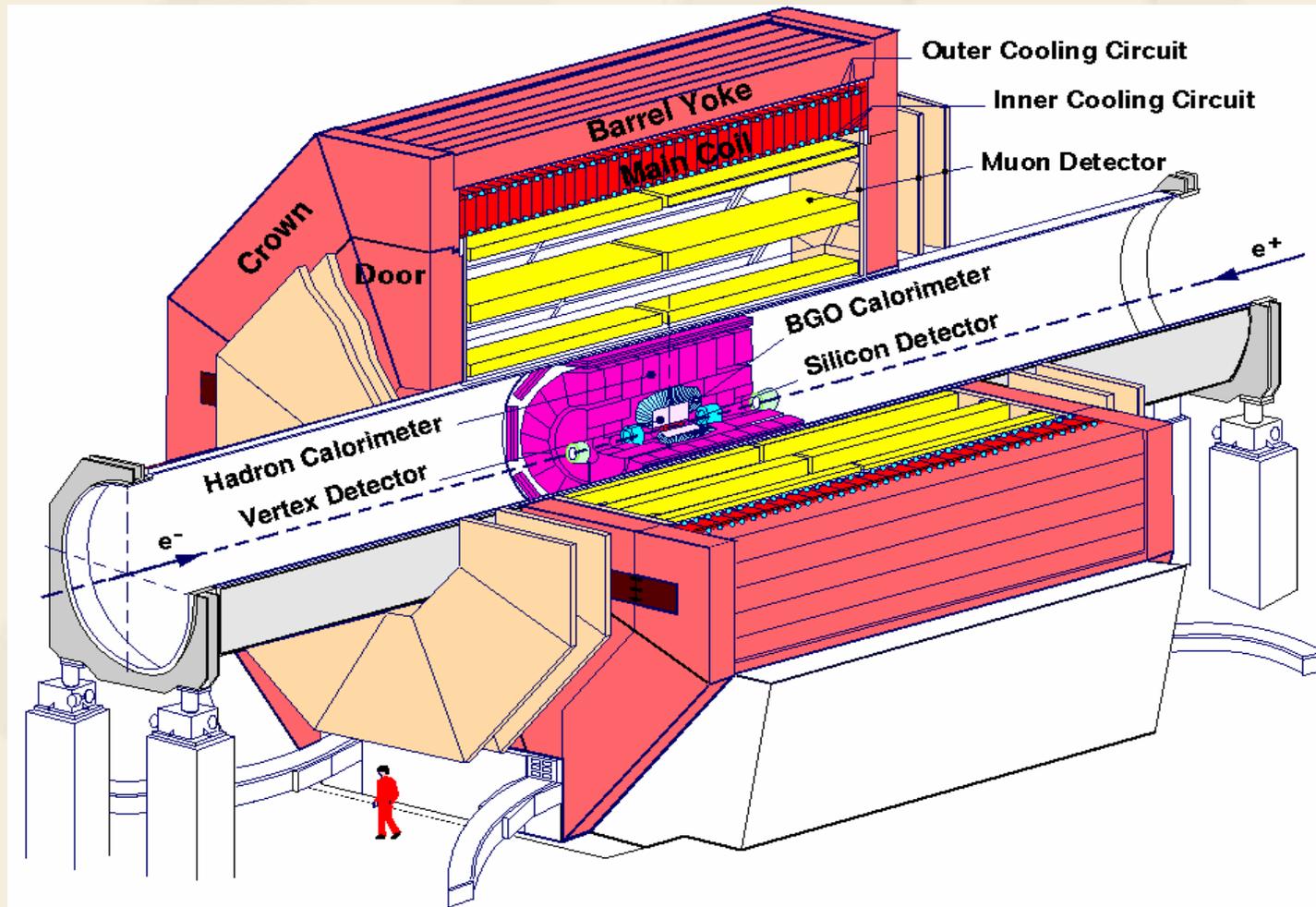


2006-4-26

粒子物理实验中的电子学

6

# L3 Detector





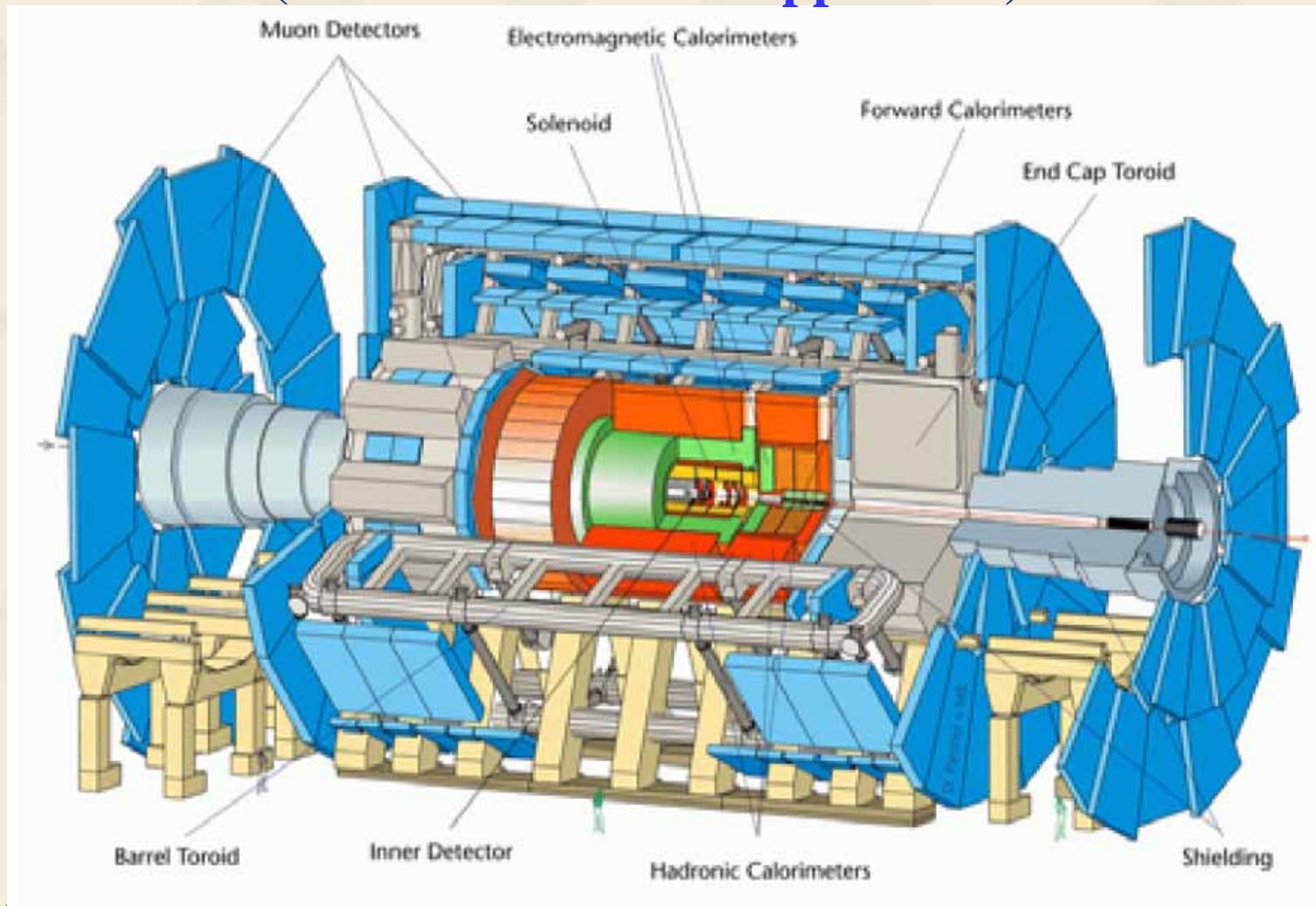
2006-4-26

粒子物理实验中的电子学

8

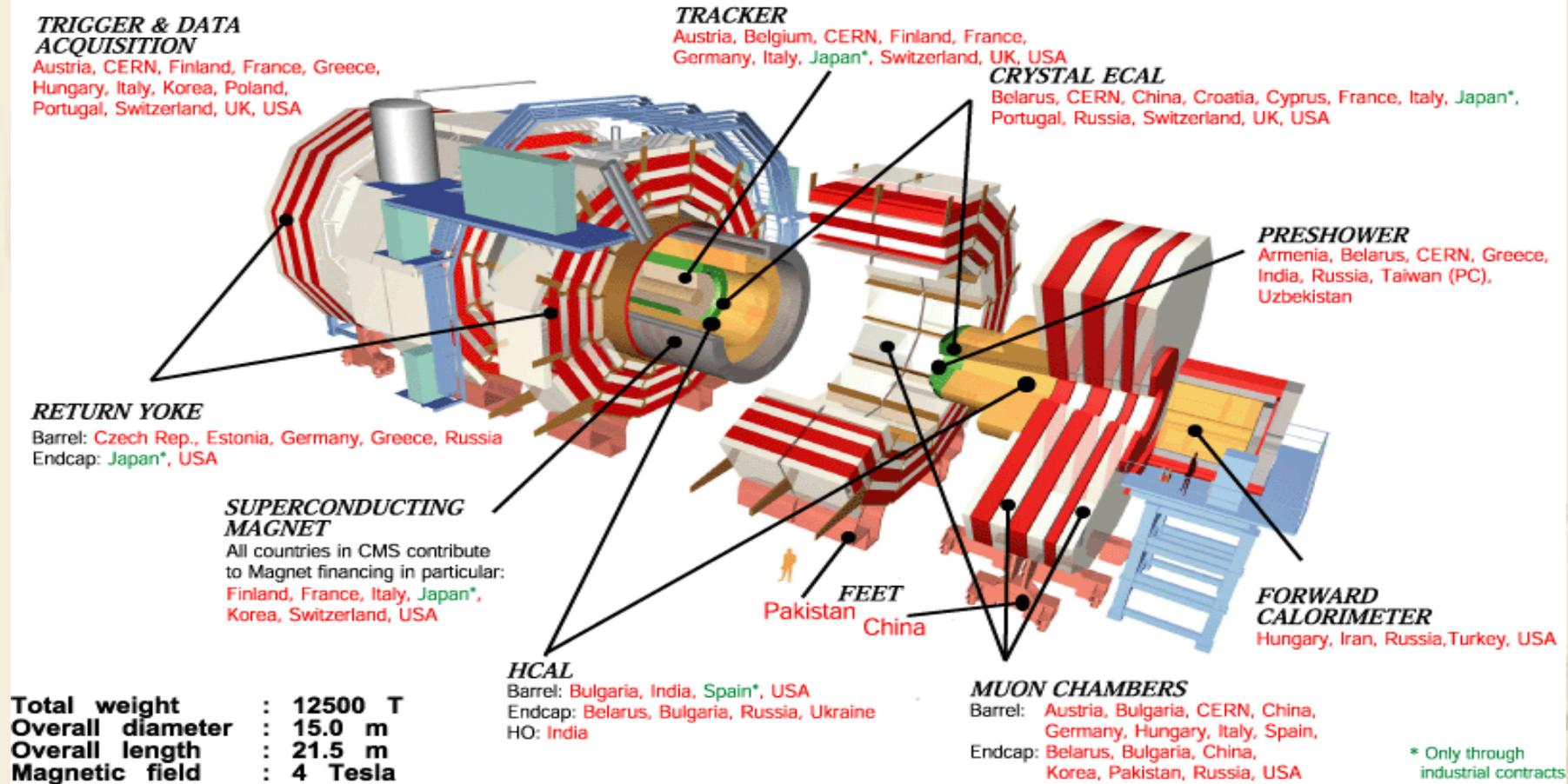
# ATLAS Detector

(A Toroidal LHC ApparatuS)

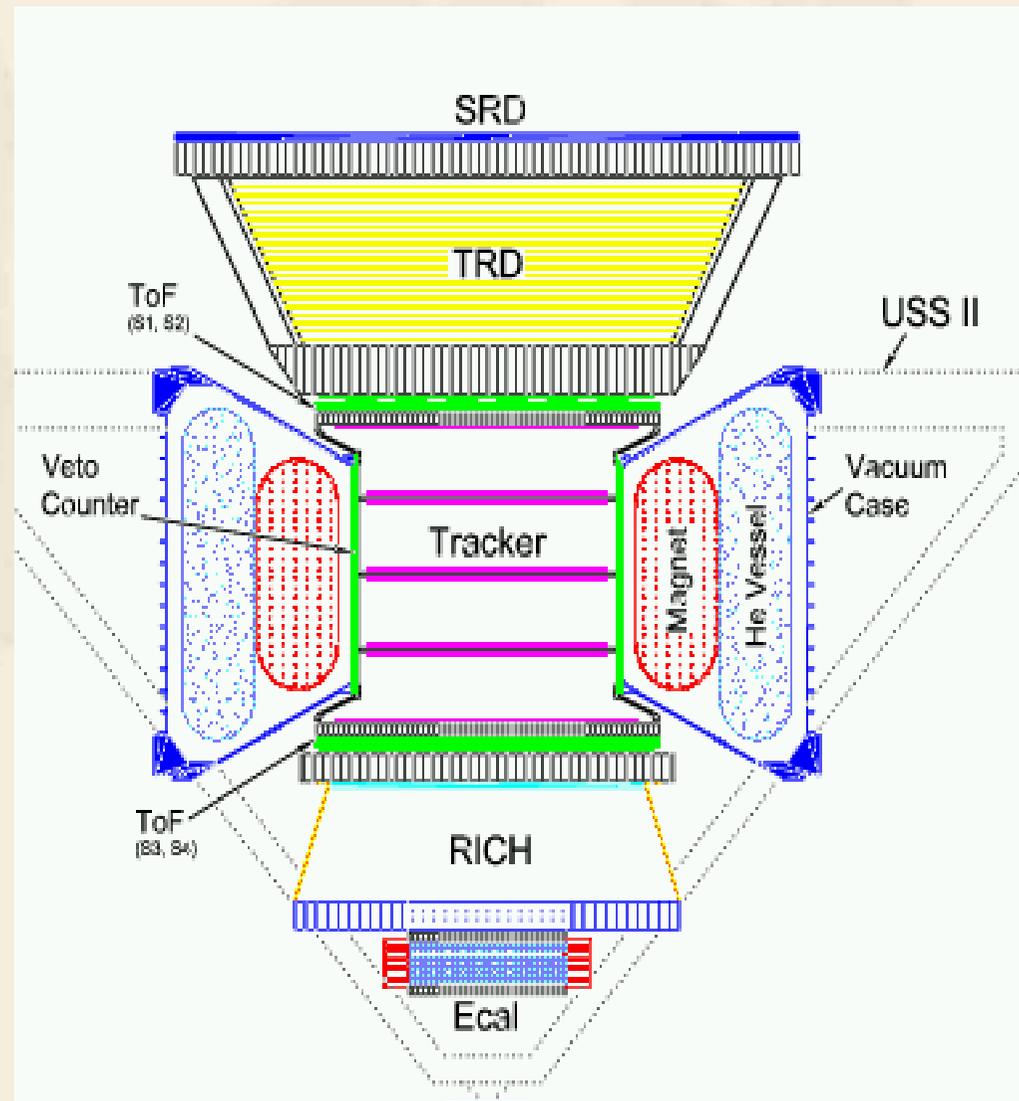
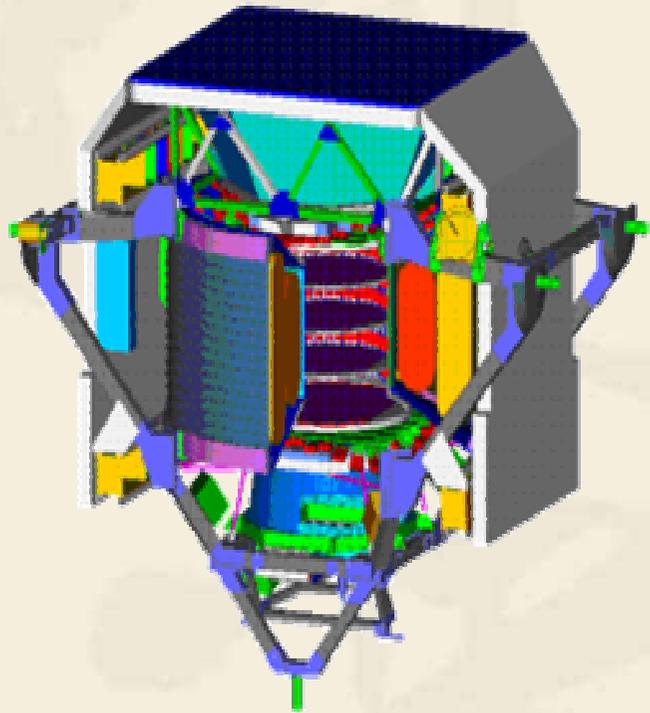


# CMS Detector

31 Nations, 150 Institutions, 1870 Scientists



# AMS Detector



# 北京正负电子对撞机

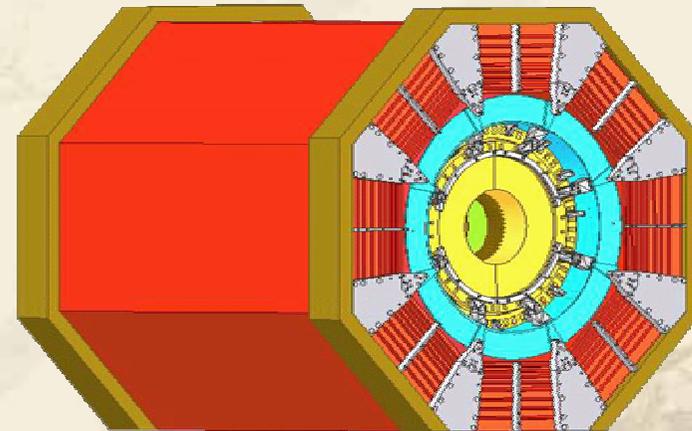
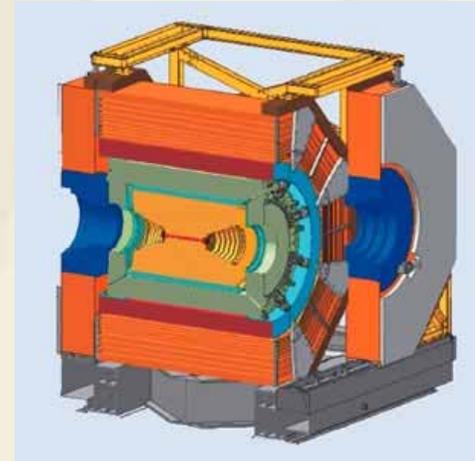


- 1, 2. 1st I.R. Experi. hall
- 3. Power Station of ring main, and computer control
- 4. RF Station
- 5. Tunnel of storage ring
- 6. Tunnel of Linac
- 10. Nuclear phy. Experi. hall
- 12. East hall for S. R. experi.
- 14. Computer center
- 7. Tunnel of Trans. line
- 8. Klystron gallery
- 9. Tunnel of Trans. line
- 11. Power sta. of trans. line
- 13. West hall for S. R. experi.

# 北京正负电子对撞机

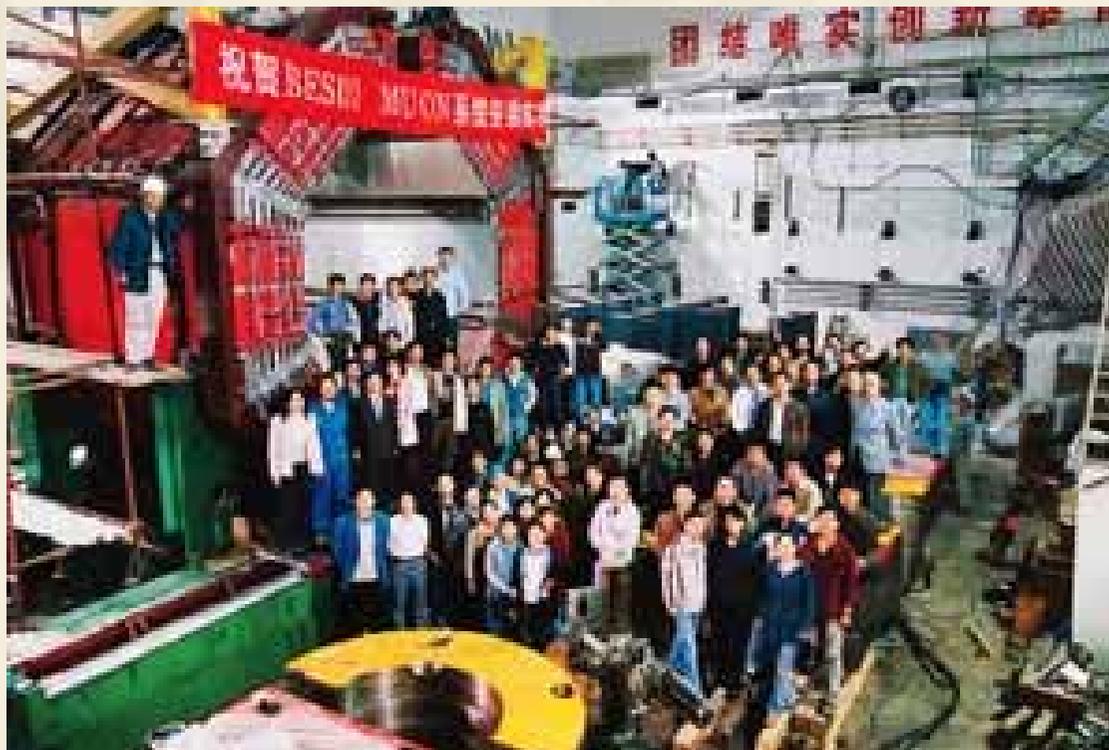


# 北京谱仪 ( BES )



**BESIII**

# BESIII $\mu$ 探测器



# 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粒子物理实验装置，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**”，相当于各种传感器。

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

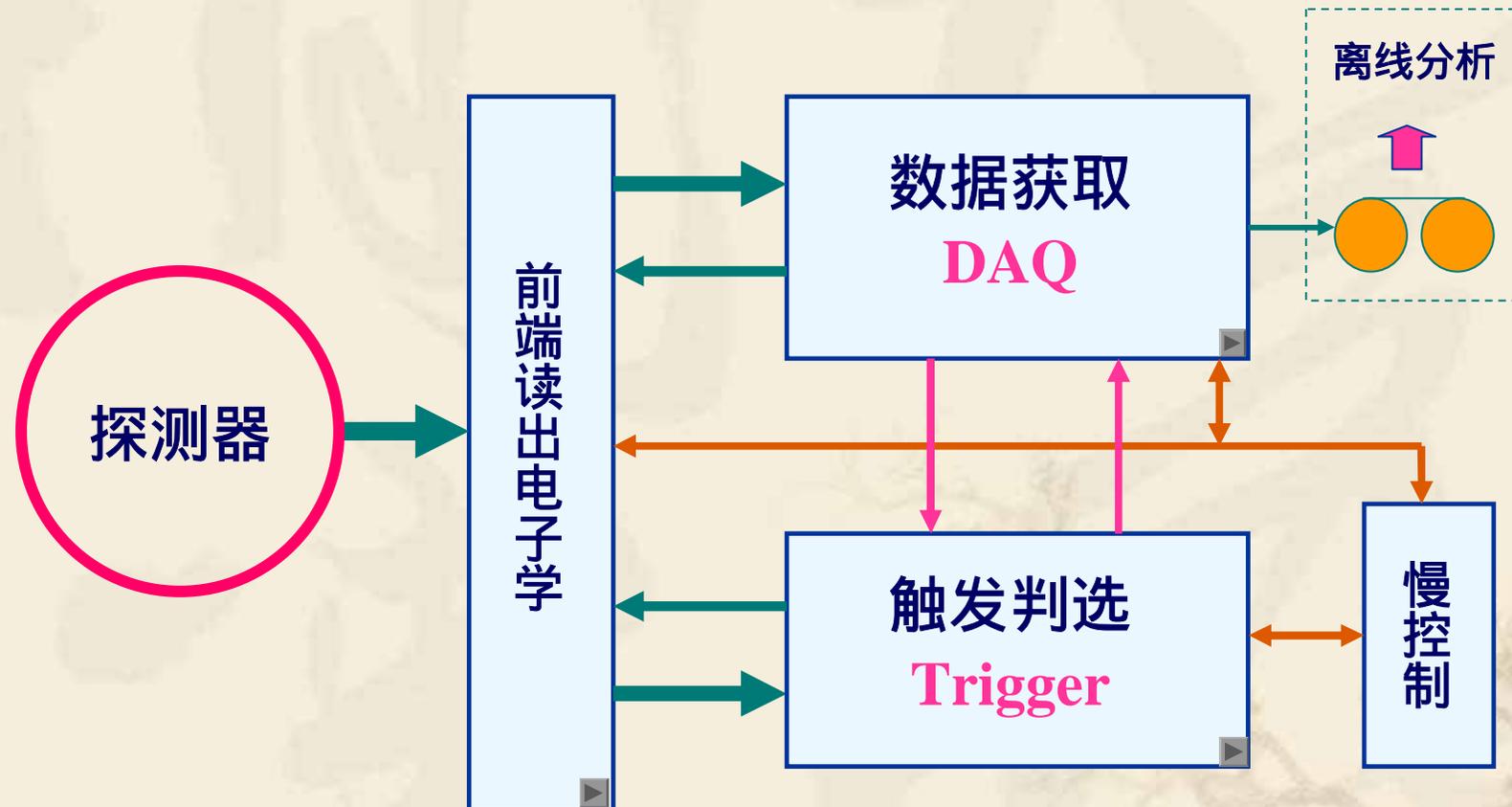


# 粒子物理实验电子学系统 的基本构成

# 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。

# 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）测量；
  - ◆ 时间测量；
  - ◆ 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。

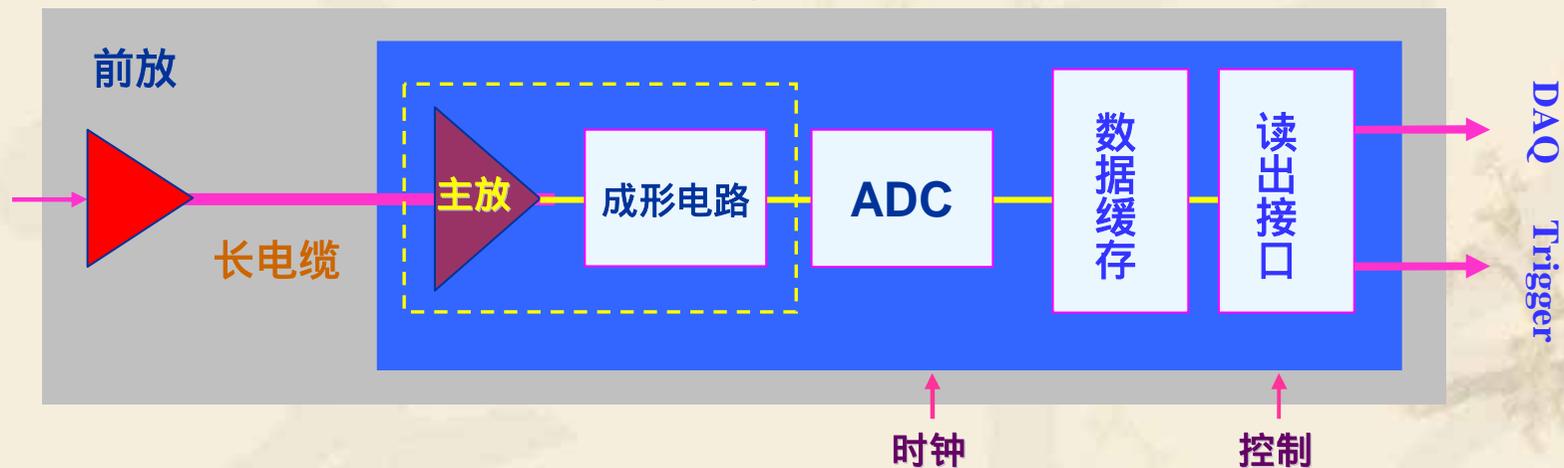
$$N = \theta \cdot E$$

**N**: 输出信号的电子电荷的平均数

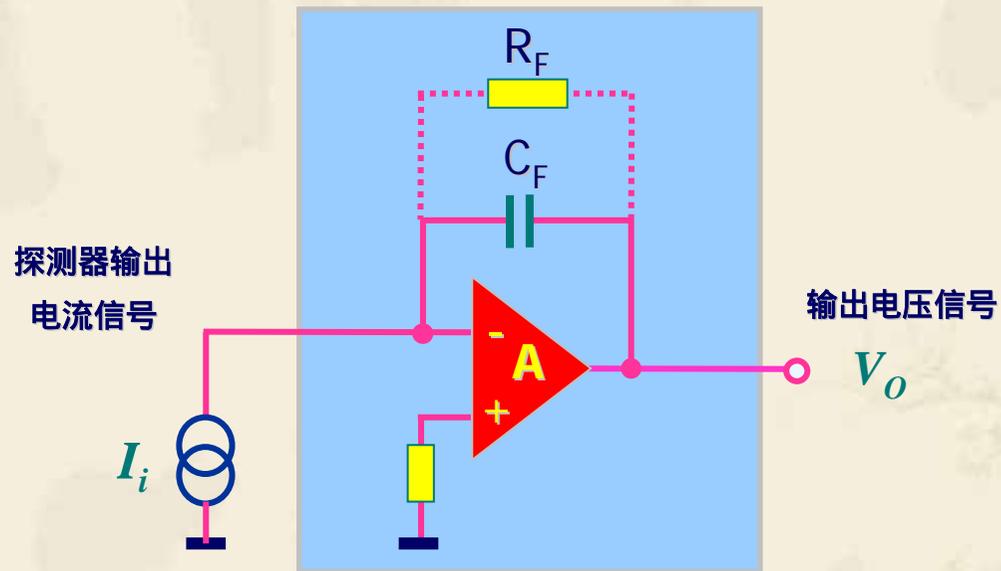
**E**: 粒子在探测器中消耗掉的能量

**$\theta$** : 探测器的平均能量 - 电荷转换系数

电荷（能量）测量概念框图



# 电荷灵敏放大器



$$V_o = -\frac{Q}{C_f} = -\frac{\int i dt}{C_f}$$

- 电荷积分
- 低噪声
- 快响应

# 模拟 - 数字变换

## Analog - Digital Conversion ( ADC )

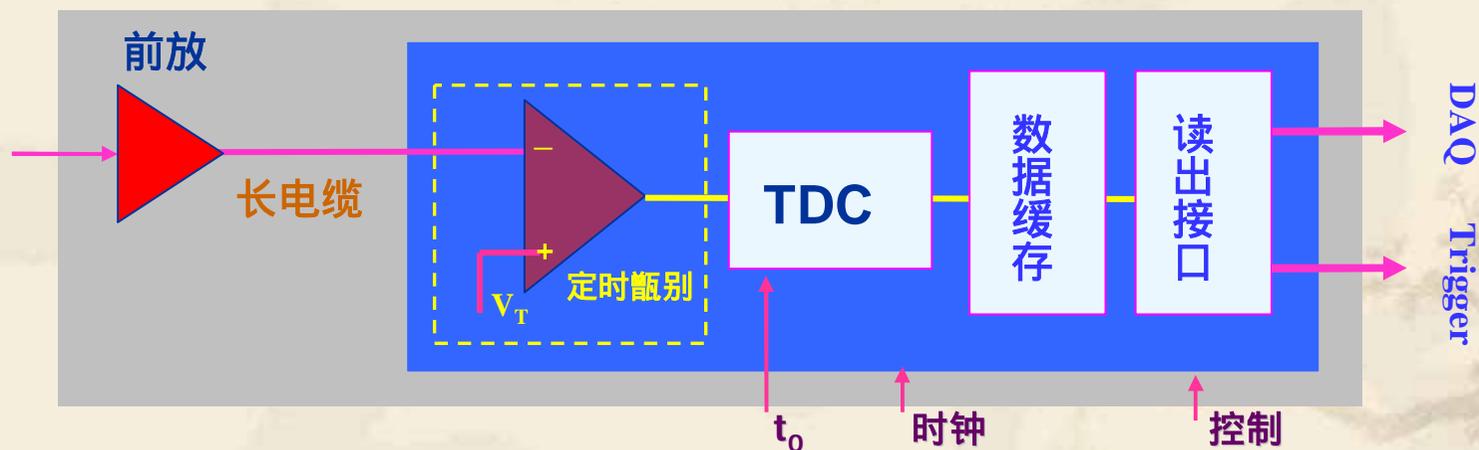
- 线性放电型ADC
- 逐次比较型ADC ( SAR ADC )
- 流水线型ADC ( Pipeline ADC )
- 闪电型ADC ( Flash ADC )

# 时间测量

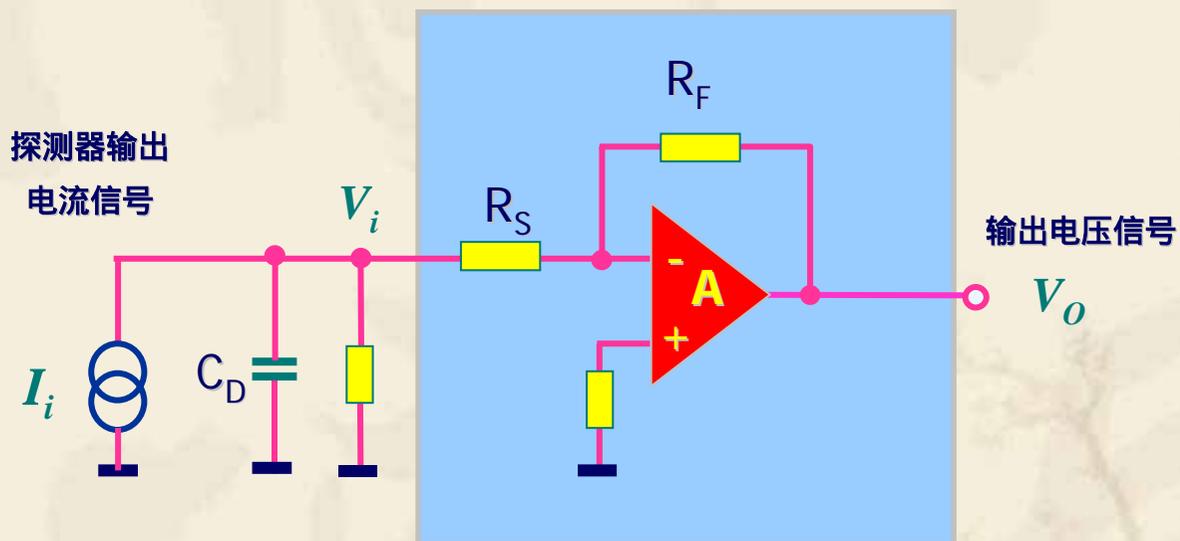
时间测量就是测量探测器输出信号的出现时间。信号的出现是指针对某一参考信号 ( $t_0$ ) 的时间间隔。一个时间测量系统要解决两个问题：

- 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



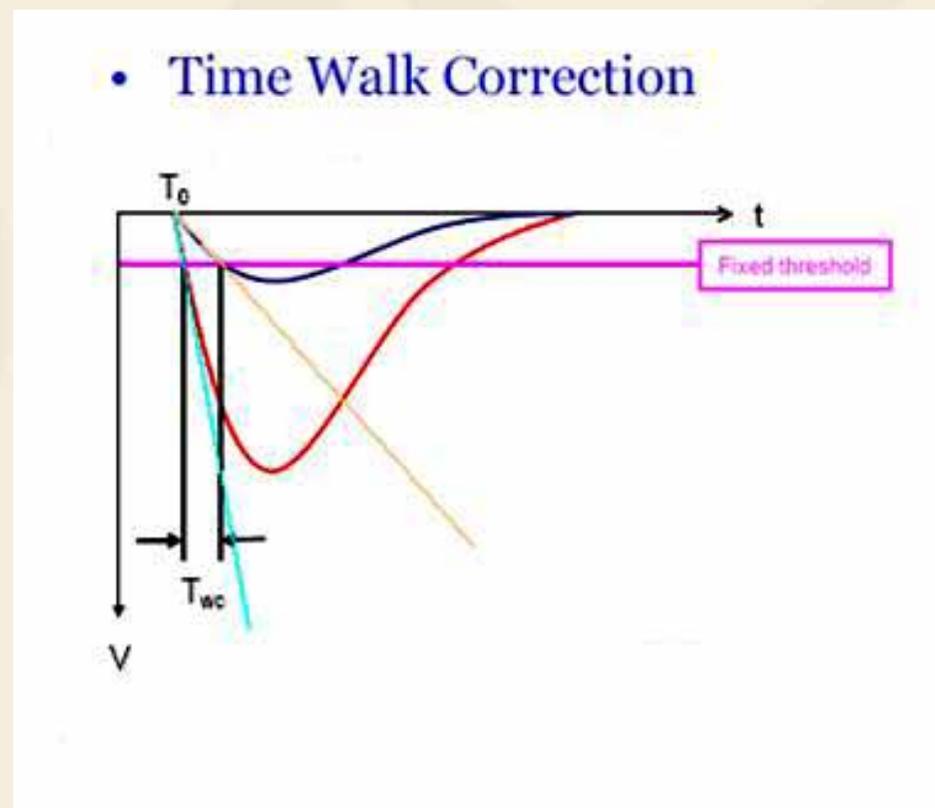
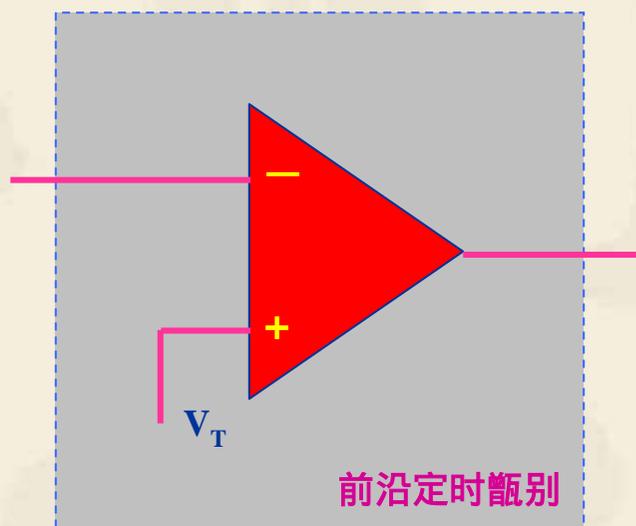
# 电压灵敏放大器（快前放）



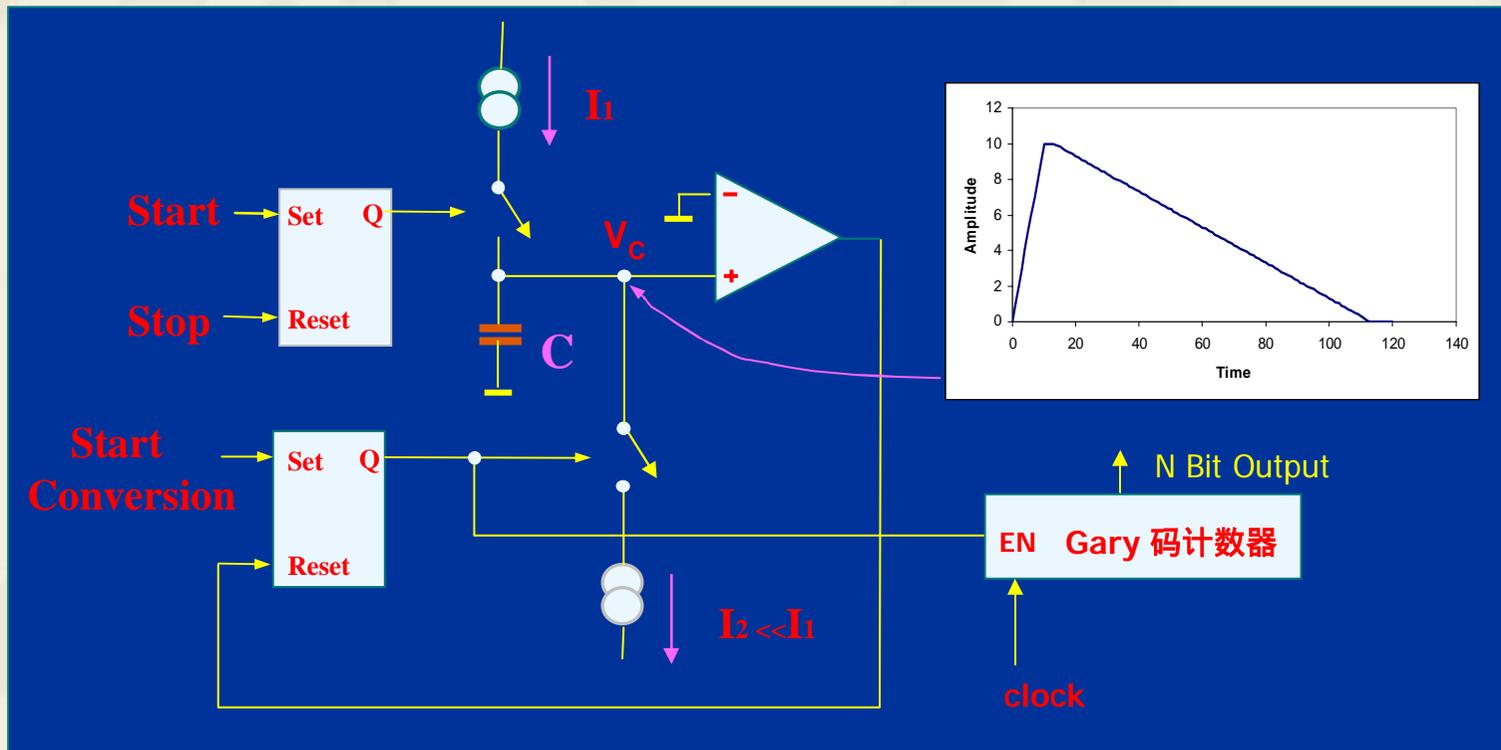
$$\frac{V_o}{V_i} = - \frac{R_f}{R_s}$$

- 电压放大
- 低噪声
- 快响应

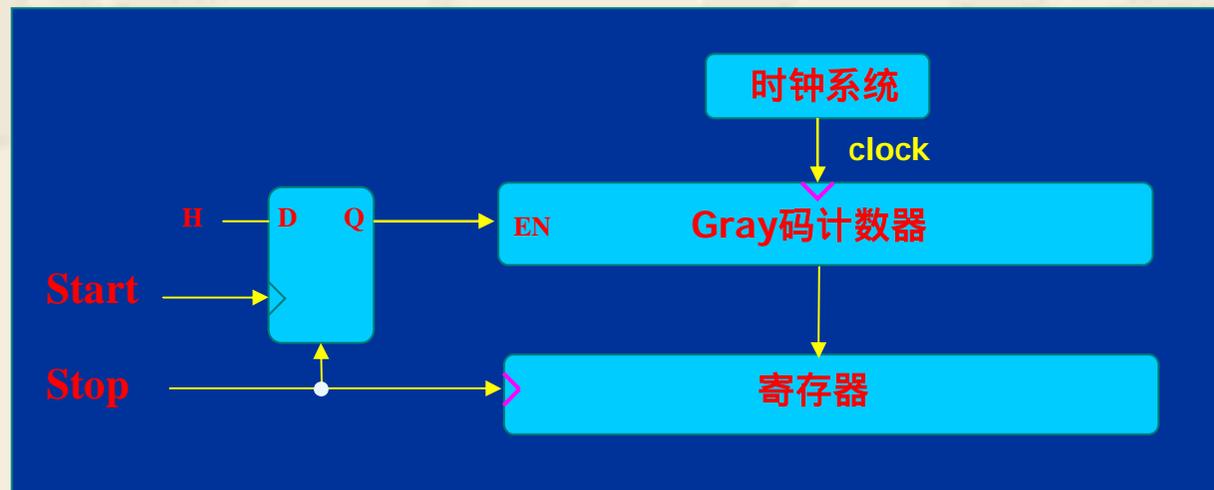
# “时间游动 ( Time Walk ) ”效应



# 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

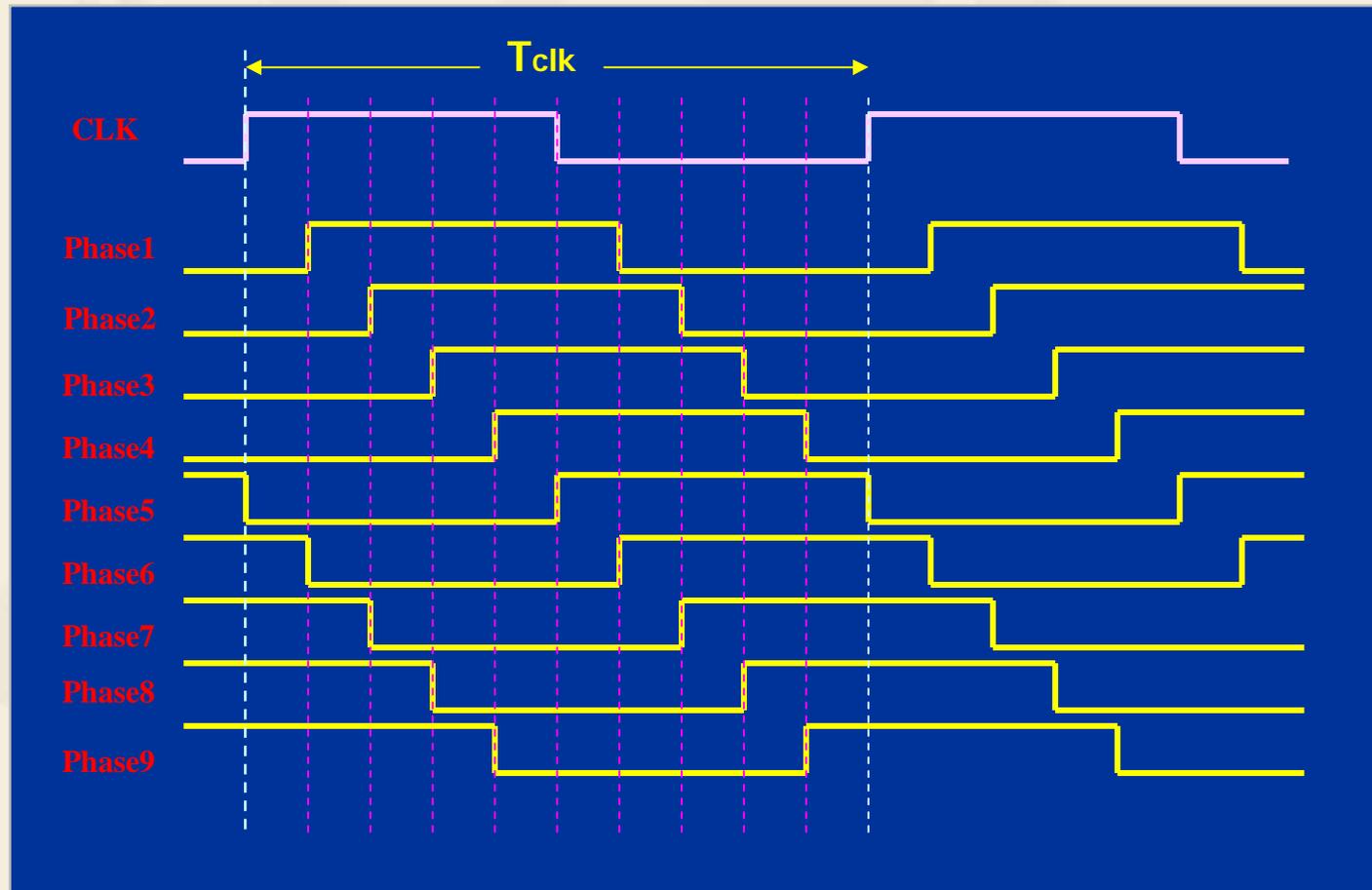
## “粗”计数 + “细”时间测量组合

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。

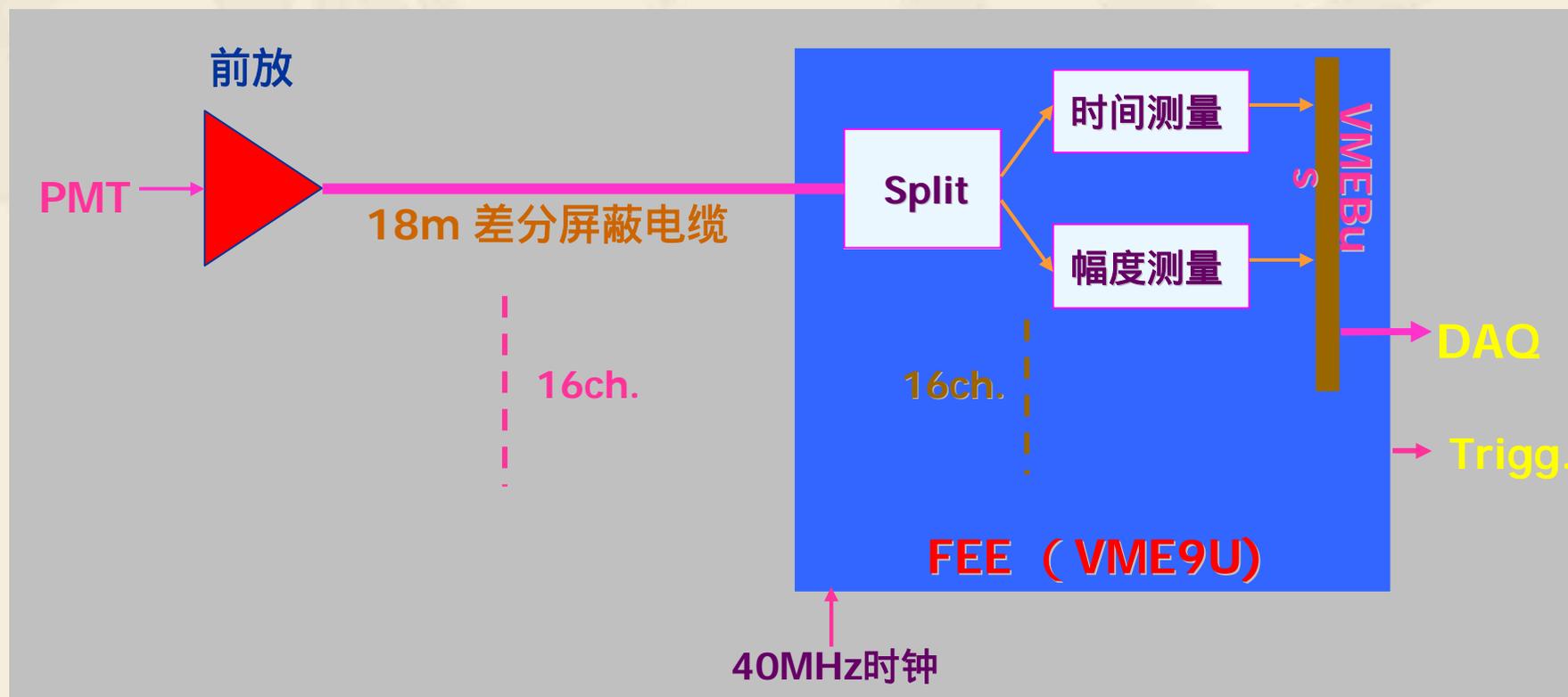
在这种组合中，“粗”计数一般由高性能的Gray码计数器实现，就是前述的数字计数器型TDC。使用的参考时钟频率一般在数百兆赫兹，实现几个ns的时间分辨；而“细”时间测量的实现则依靠时间内插技术（Time Interpolation），在一个时钟周期内进行时间内插，达到亚纳秒（100 ps ~ 10ps）的时间分辨。

# 时间内插原理

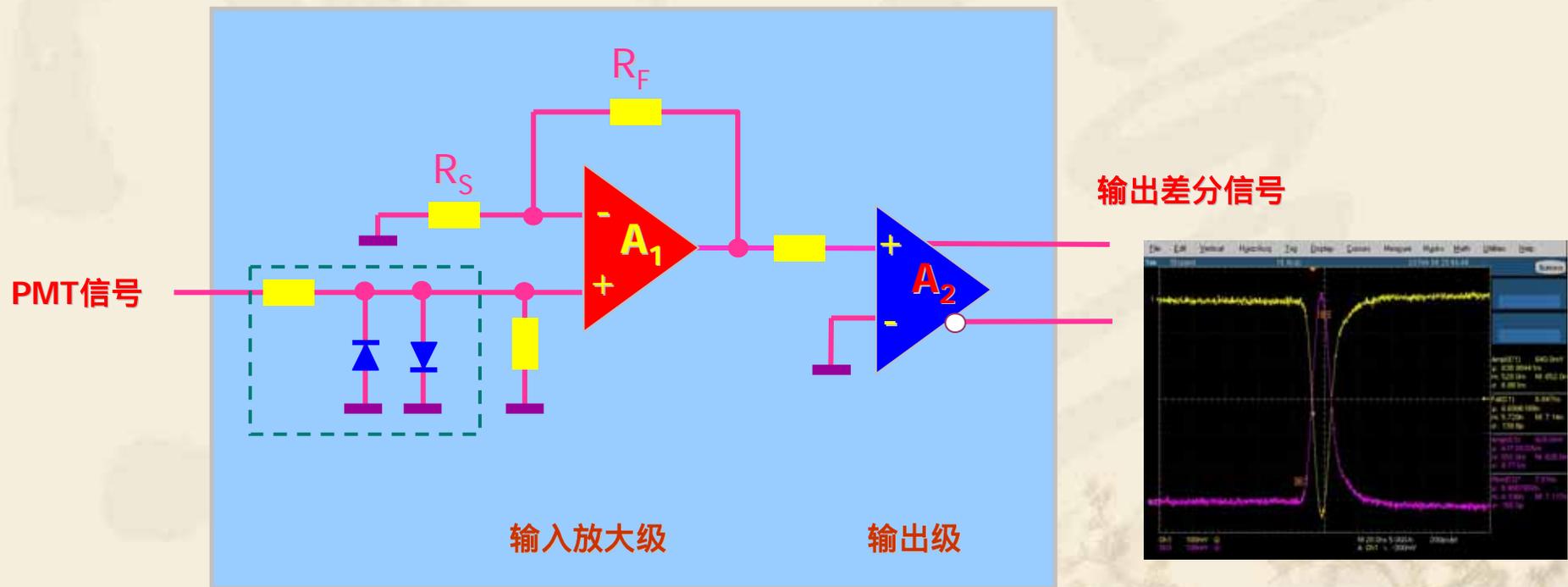


# BES III Time of Flight ( TOF )

## 读出电子学系统概念框图



# BESIII TOF快前放（电压放大）



# BESIII TOF读出电子学



2006-4-26

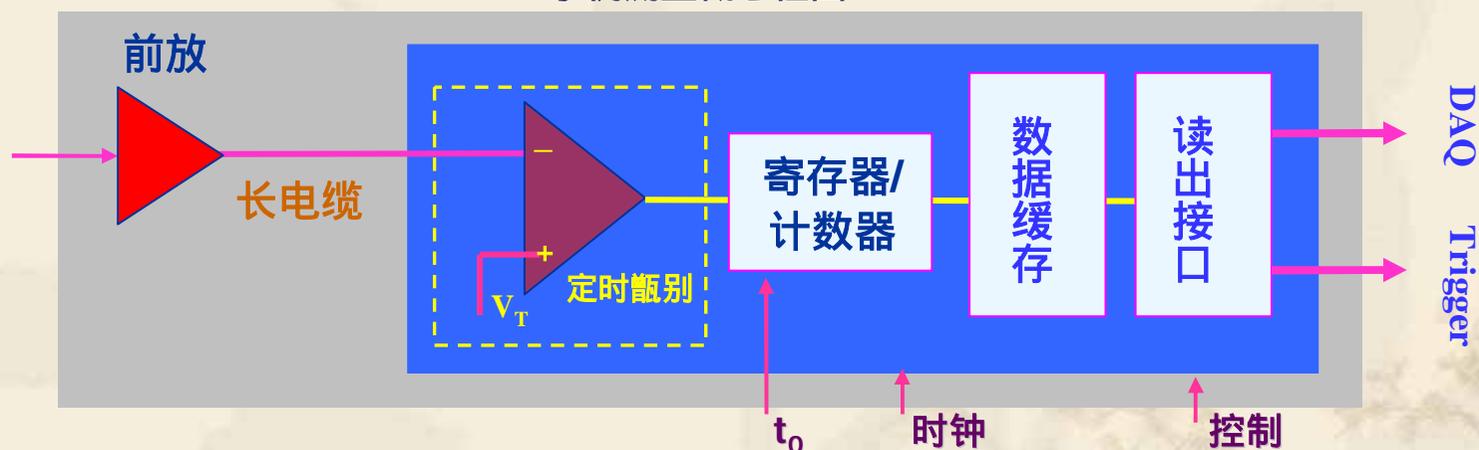
粒子物理实验中的电子学

38

# 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。

事例测量概念框图



# 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，以便再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。

# 触发判选系统的模拟设计 ( Simulation )

- 触发判选的实现强烈地依赖探测器的具体结构，所以每个探测器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，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

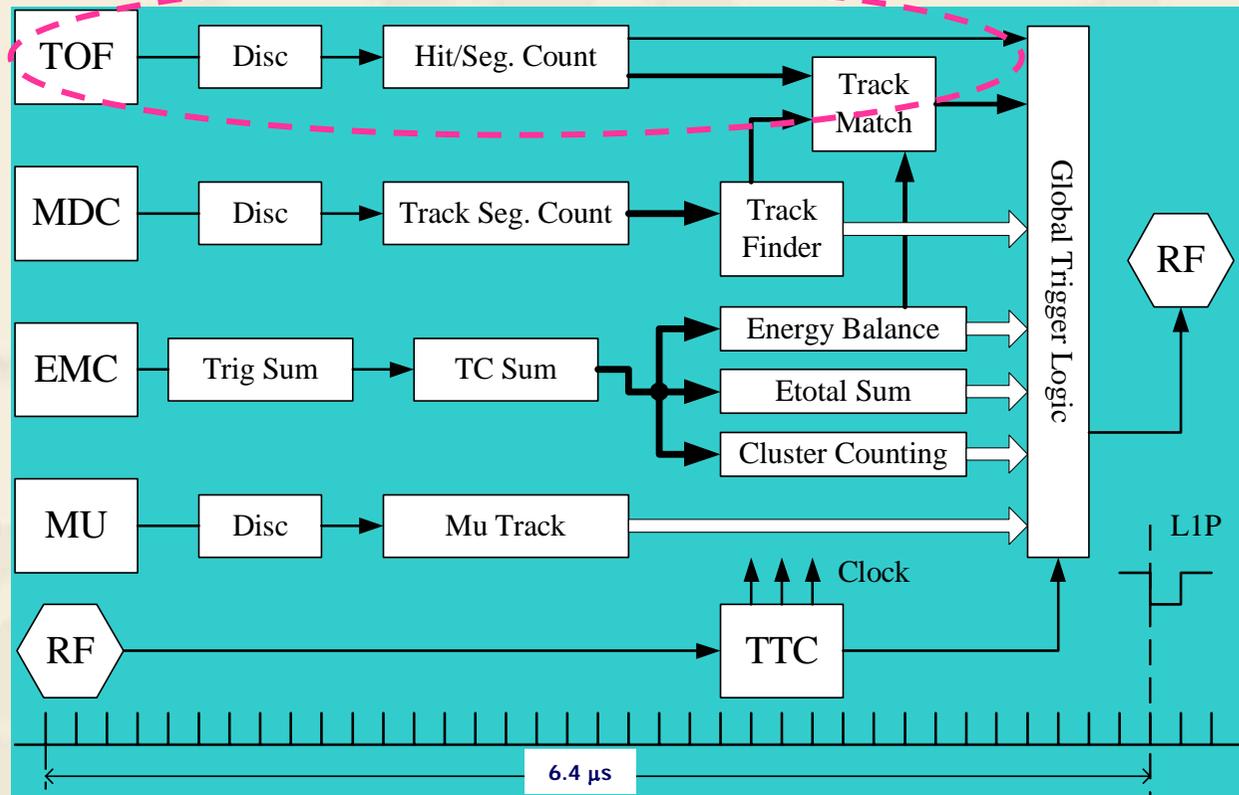
相当于模式识别的特征抽取。

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。



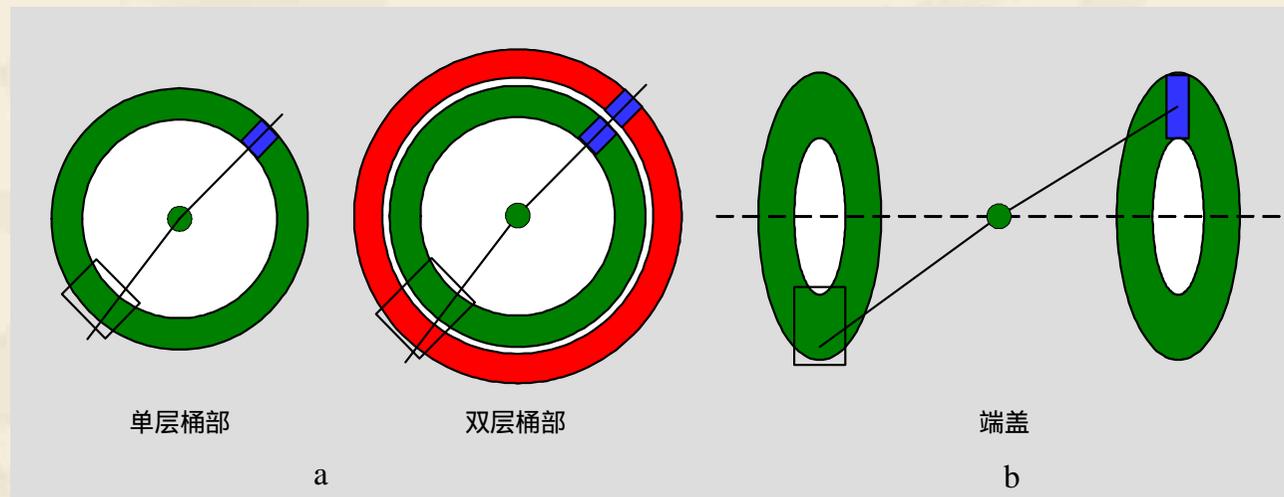
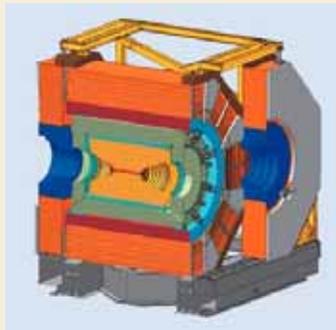
BES III 触发判选系统

## ■ 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。



## 正在调试中的TOF触发系统



2006-4-26

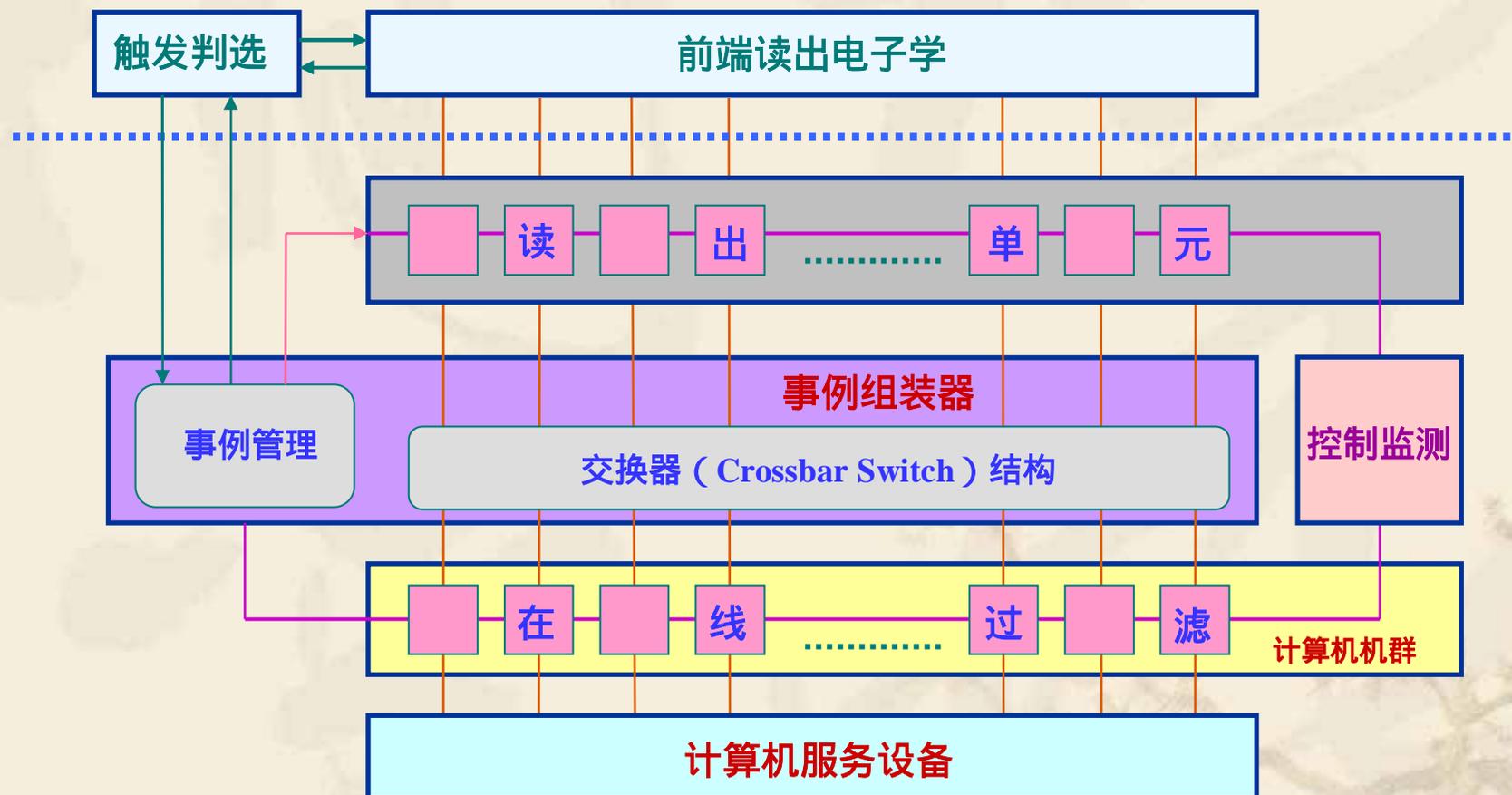
粒子物理实验中的电子学

45

# 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 , .....
  - 光纤 ( 串行数据的点 - 点传输 )  
GLink , .....
  - 以太网 ( Ethernet )
  - 基于纵横开关 ( Crossebar Switch ) 的网络交换系统
- Computer Automated Measurement & Control

# 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（ $10\mu\text{S}$ 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 , .....

IBM “蓝基因”  
32768个处理器

曙光 “4000A”  
2560个处理器

# 发展趋势

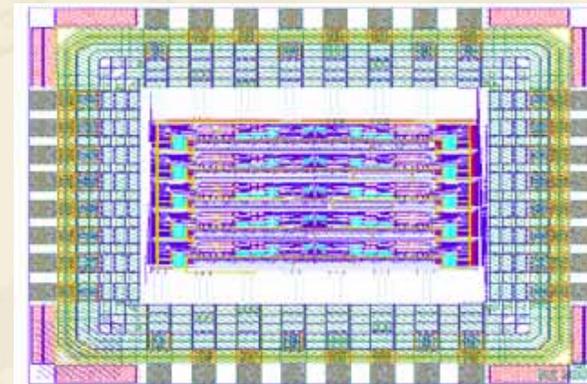
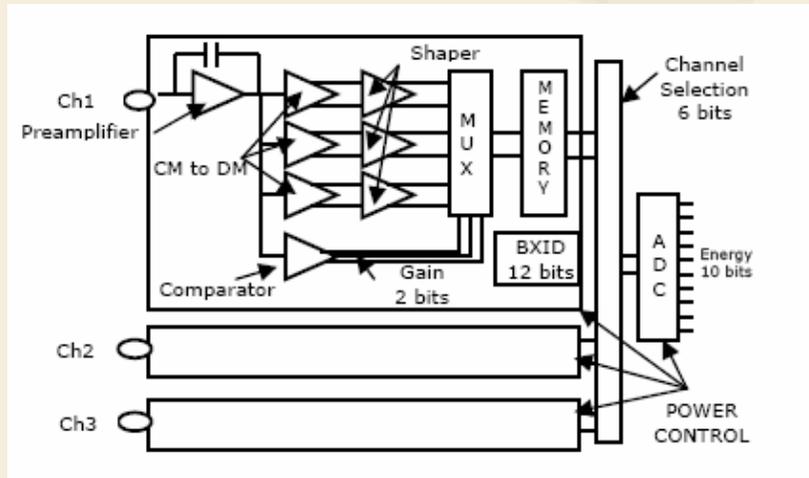
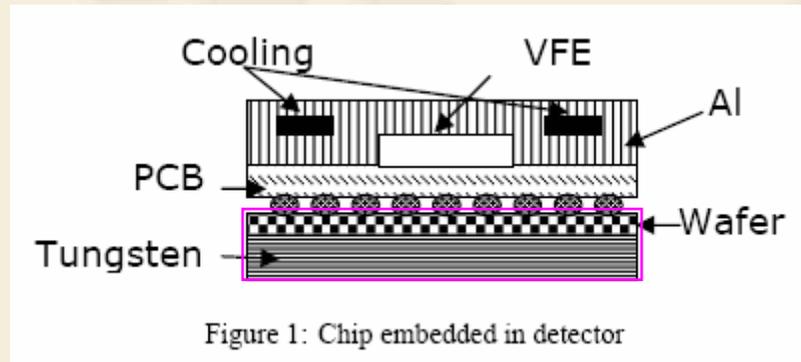
# 前端读出电子学的发展趋势

- 密度更大
- 通道数更多
- 速度更快

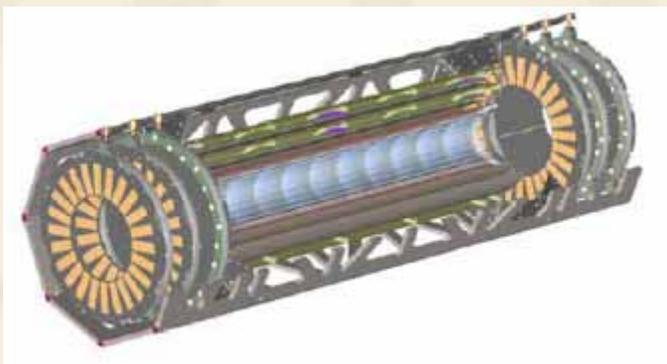
- ◆ 前端电路与探测器的一体化设计
- ◆ 数字化尽可能地前移
- ◆ 专用集成电路（ASIC）的设计
- ◆ 光传输技术的进一步发展

# 下一代直线对撞机电磁量能器前端读出电子学

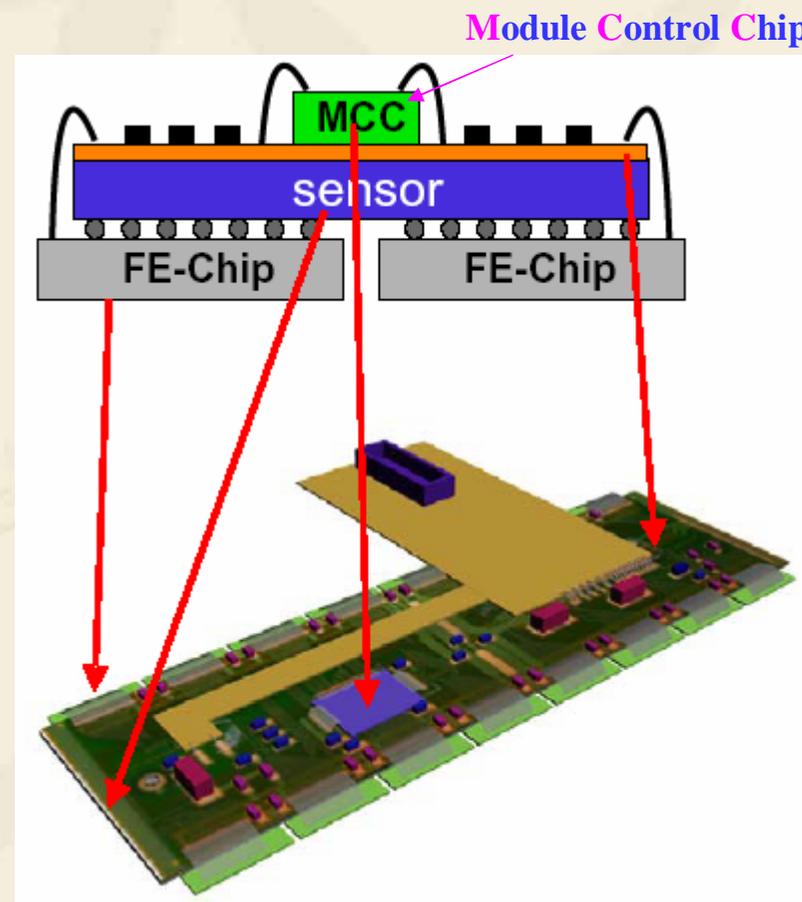
- 与ECAL探测器直接安装在一起
- 电子学通道数：34 Millions
- 每个芯片：36Ch. (0.35 $\mu\text{m}$  CMOS)
- Pre\_Amp. , Shaper & ADC
- LAL Orsay , France



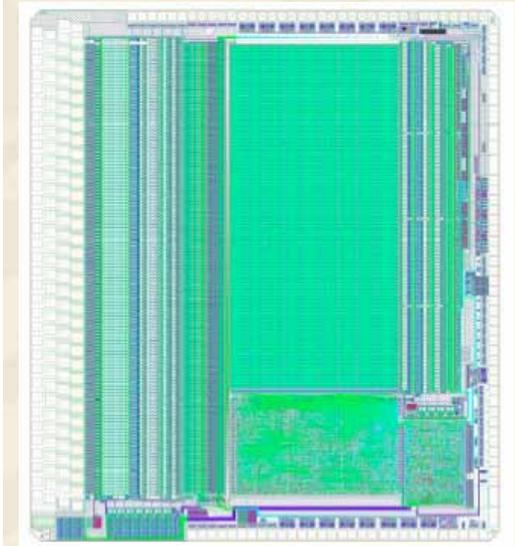
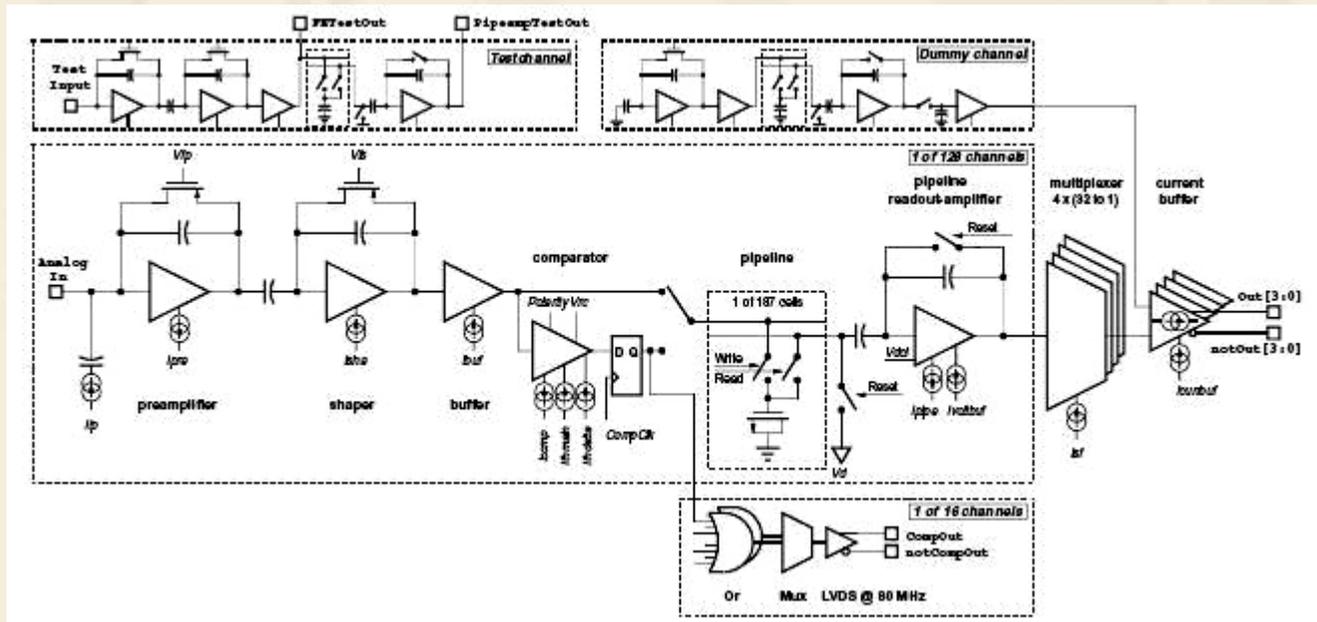
# ATLAS 顶点探测器的前端读出电子学



- 氧化硅点阵探测器  
1744单元  
三层
- 一个单元：  
1个传感器阵列（46080个点阵）  
16个FE芯片和1个MCC芯片



# Beetle : 硅条探测器读出芯片



■ Pre\_Amp + Shaper

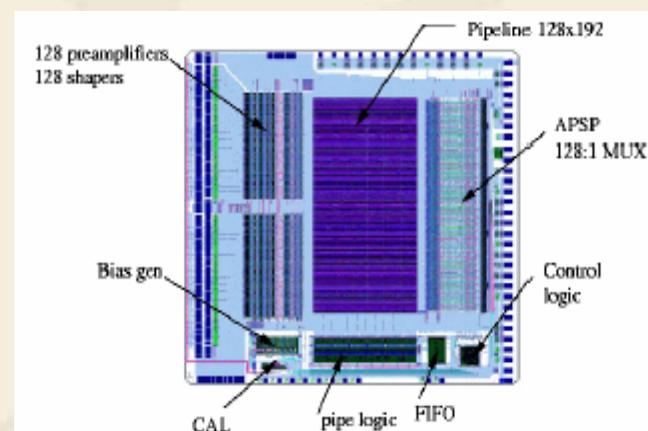
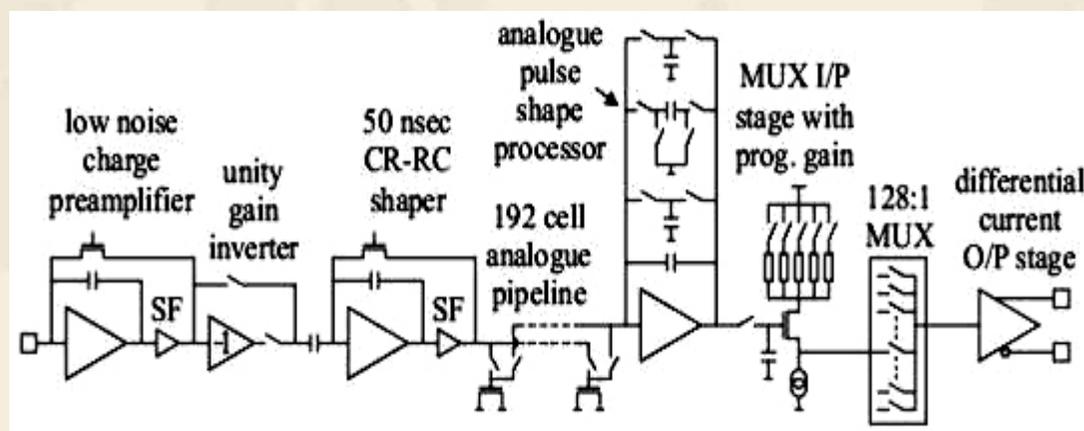
■ 通道数 : 128

■ 流水线工作模式

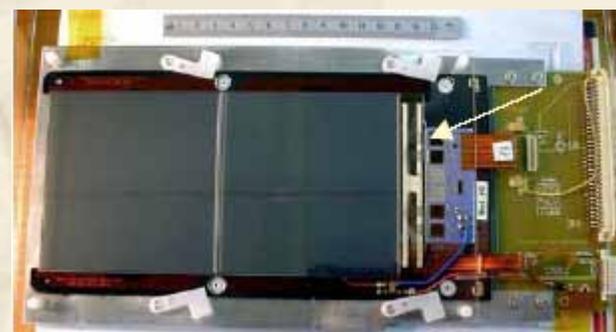
■ 输出 : 模拟/数字信号

■ 德国汉堡大学等

# APV25 : 硅微条径迹探测器读出芯片



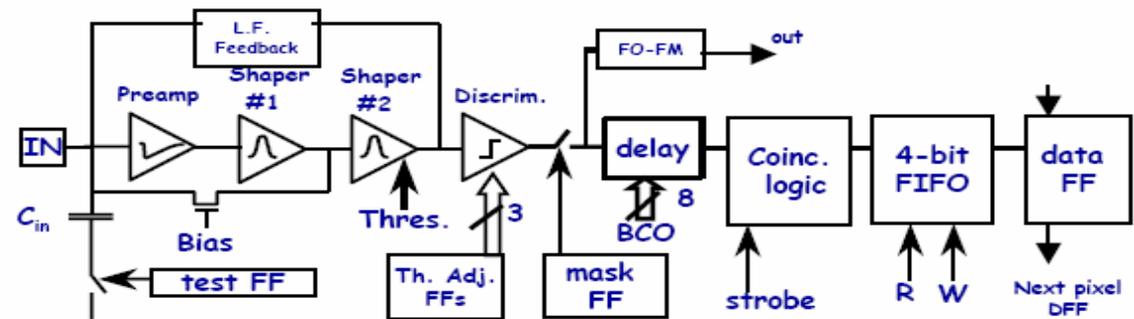
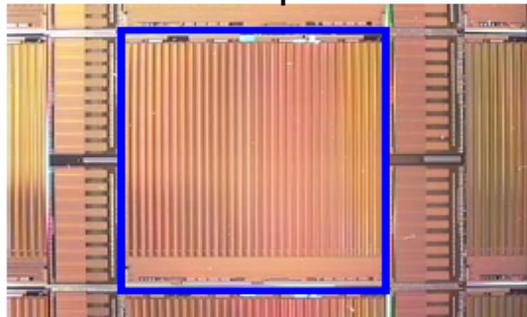
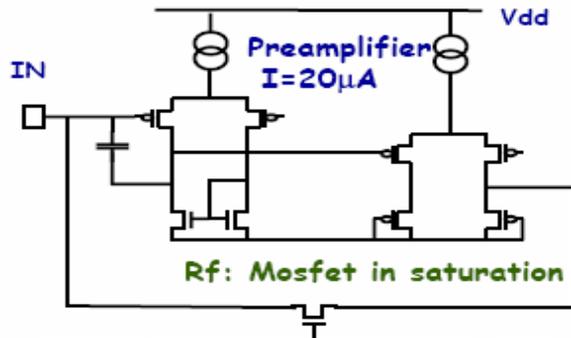
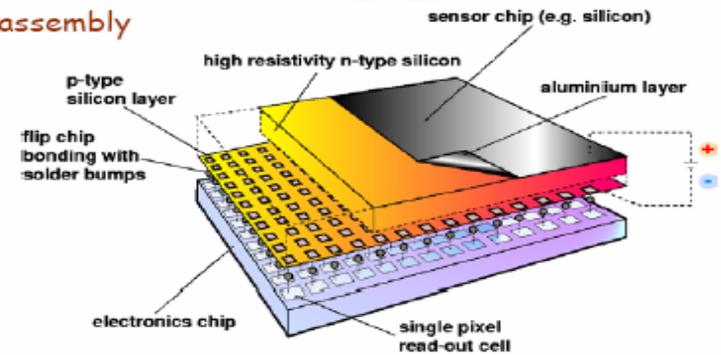
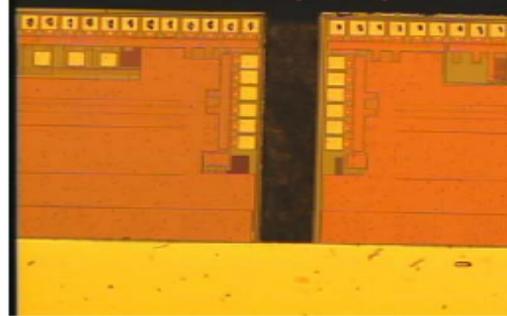
- 通道数 : 128
- 电荷灵敏Pre\_Amp
- CR - RC成形电路
- 流水线工作模式
- 可编程增益
- 128 : 1多路器 (MUX)
- 差分输出



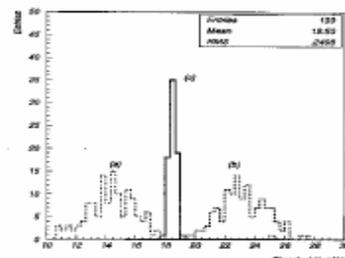
# Alice-LHCb pixel detector 8192 ch

- ✓ 8192 pixel cells/die
- ✓ 13 millions transistors/die
- ✓ 5 dies /detector
- ✓ Differential preamp
- ✓ Power/die: 0.8W
- ✓ Pixel size: 50 x 450  $\mu\text{m}$
- ✓ All processing functions on pixel
- ✓ ENC = 100 e- rms @  $C_{det} = 0.1 \text{ pF}$
- ✓ Threshold mismatch: 150 e- rms
- ✓ Vdd = 1.8V

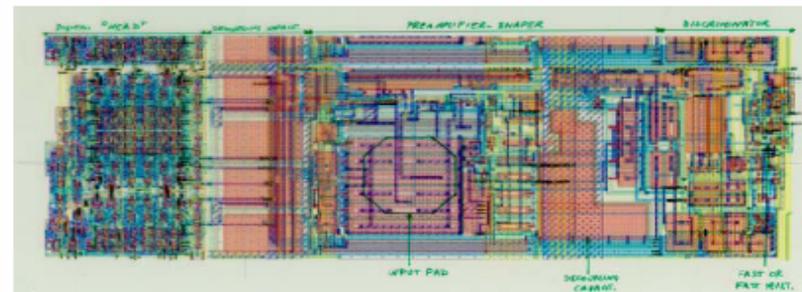
ALICE Detector-chip bump bonded assembly



Analog test input



Omega-2 mismatch correction

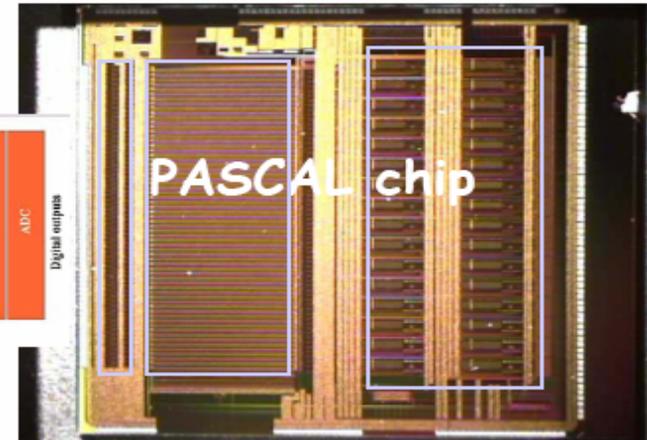
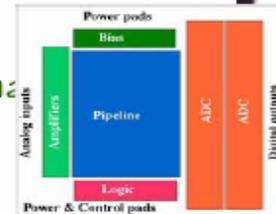


After M. Campbell, W. Snoeys, R. Dinapoli, G. Anelli

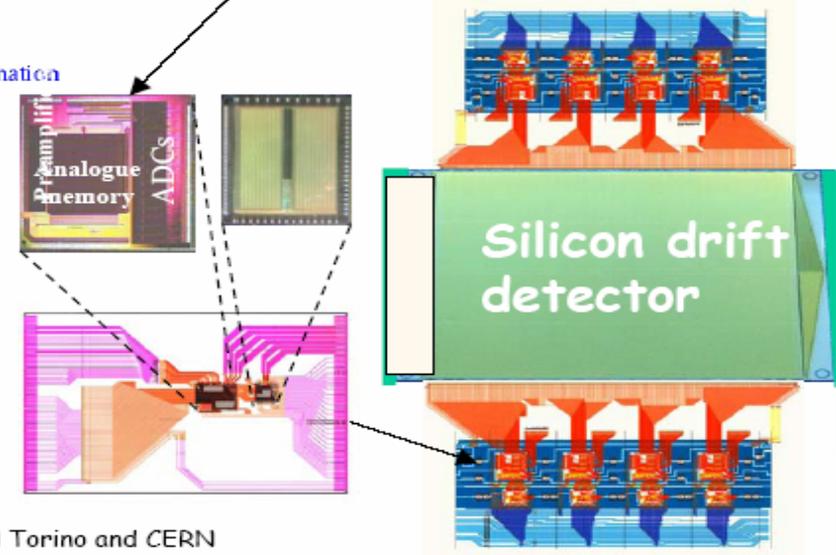
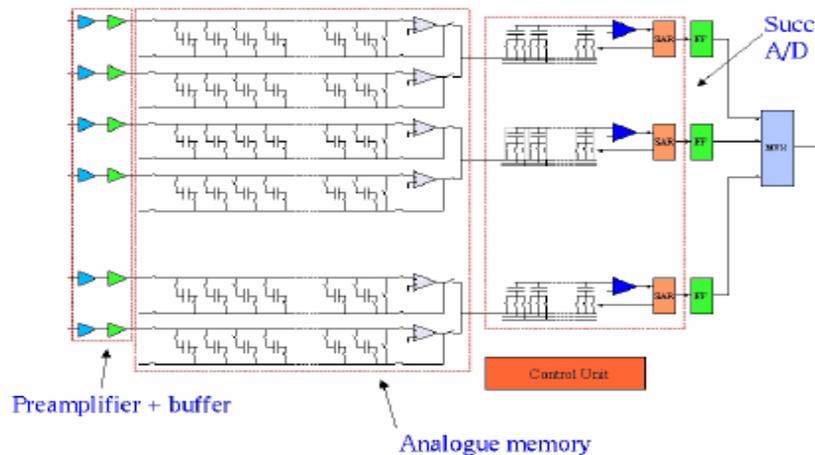
# ALICE实验 ( CERN ) 的PASCAL芯片

-PASCAL readout chip (time-space projection)

- Analog-digital readout architecture
- Preamplifier shaper 40ns peaking time
- Analog memory 256 cells deep x 64 channels  
40-80Mhz writing speed
- 32 x 10bit-ADC 5Msamples/s ADC
- Readout system equivalent to 40MHz 10bit ADC with 2mW/channel



-Block diagram



After G. Anelli, P. Giubellino, A. Rivetti, G. Mazza INFN Torino and CERN



# 在其它领域中的应用

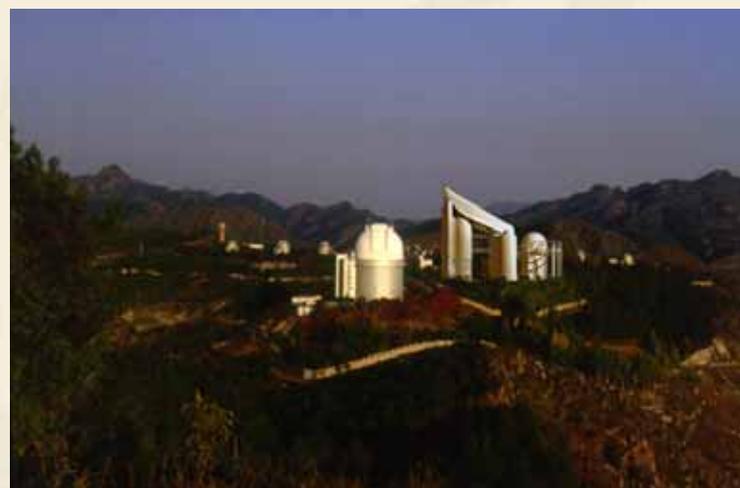
- 基础科学研究
- 国防领域
- 工业领域

.....

# LAMOST观测控制系统

大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST), 同时跟踪观测4000天体目标的光谱, 在LAMOST建成之后数年内, 对北天区的2万平方度的 $10^7$ 个目标进行巡天观测。

根据科学目标的要求, 产生适合观测条件的观测计划和观察流程, 使望远镜按照观测流程自动地完成观测任务

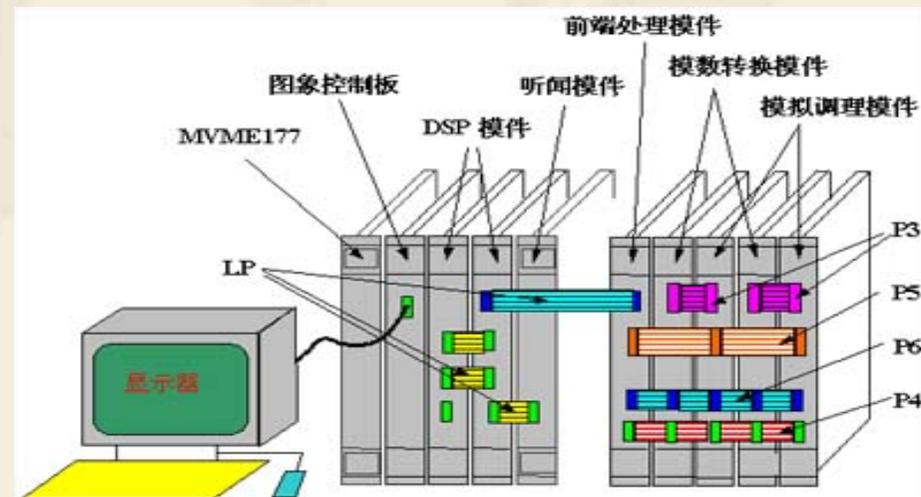


北京天文台兴隆观测站

# 数字声纳系统

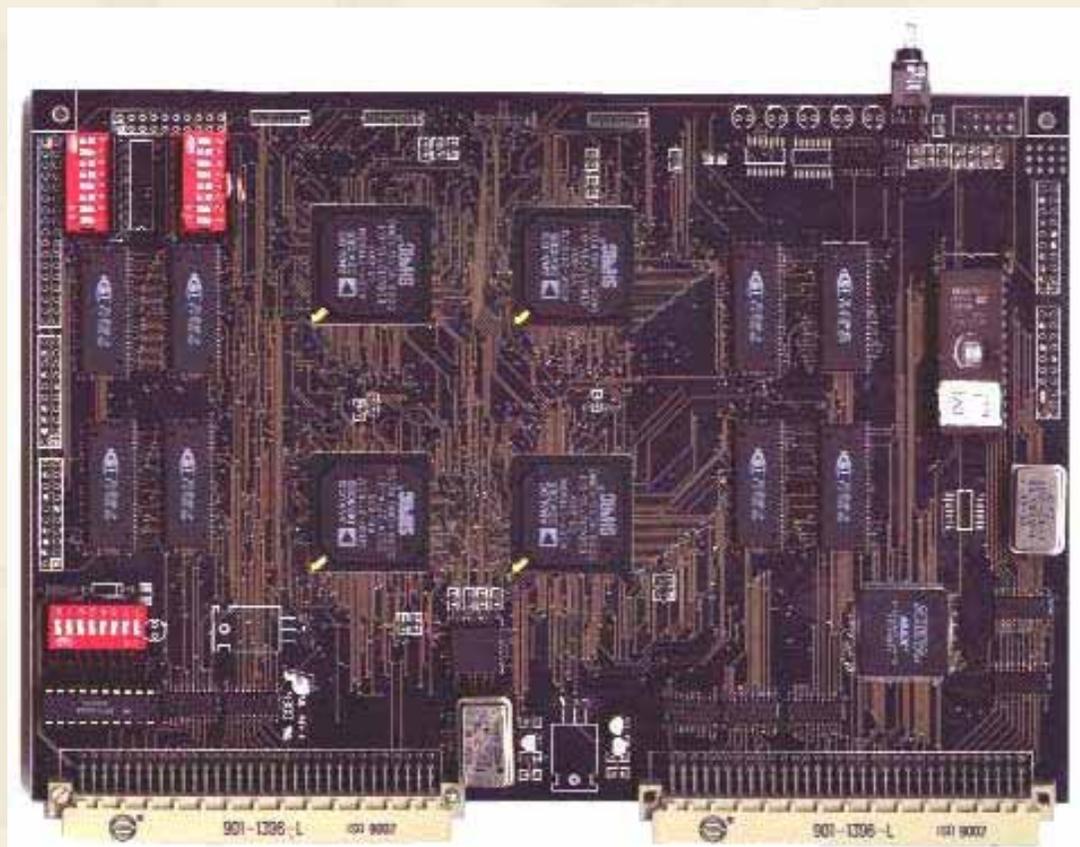
本项目是海军新一代声纳系统研制项目中的一个重要部分。项目的研制重点是建立一个先进的，灵活的声纳信号处理平台并完成声纳信号的处理工作，即完成模拟信号处理、模数转换及声纳信号的实时处理，

- VME系统平台
- 24通道模拟信号处理
- 24通道A/D变换
- 多DSP矩阵处理器
- VxWork实时操作系统



数字声纳系统示意图

# 数字声纳- DSP 板 (VME)



# 机载海洋地貌激光探测系统

**简介：**系统分为两大部分，A/D转换部分和数据传输控制部分。其中数据传输部分作成PC机的插卡插在计算机的PCI扩展插槽内，将A/D采样得到的数据传递给计算机，并产生相关的控制信号进行系统的操作控制。A/D转换部分作成一个模块置于计算机外部，通过电缆和计算机进行通信。



**8位，500 Msps 数据采集系统**

# 相控阵雷达多通道同步数据采集系统

系统由8个独立的数据采集通道和一个时钟分配器组成，强调各通道之间的同步一致性，各通道之间的信号非一致性晃动 $3 < 100\text{ps}$ 。



8通道同步数据采集系统

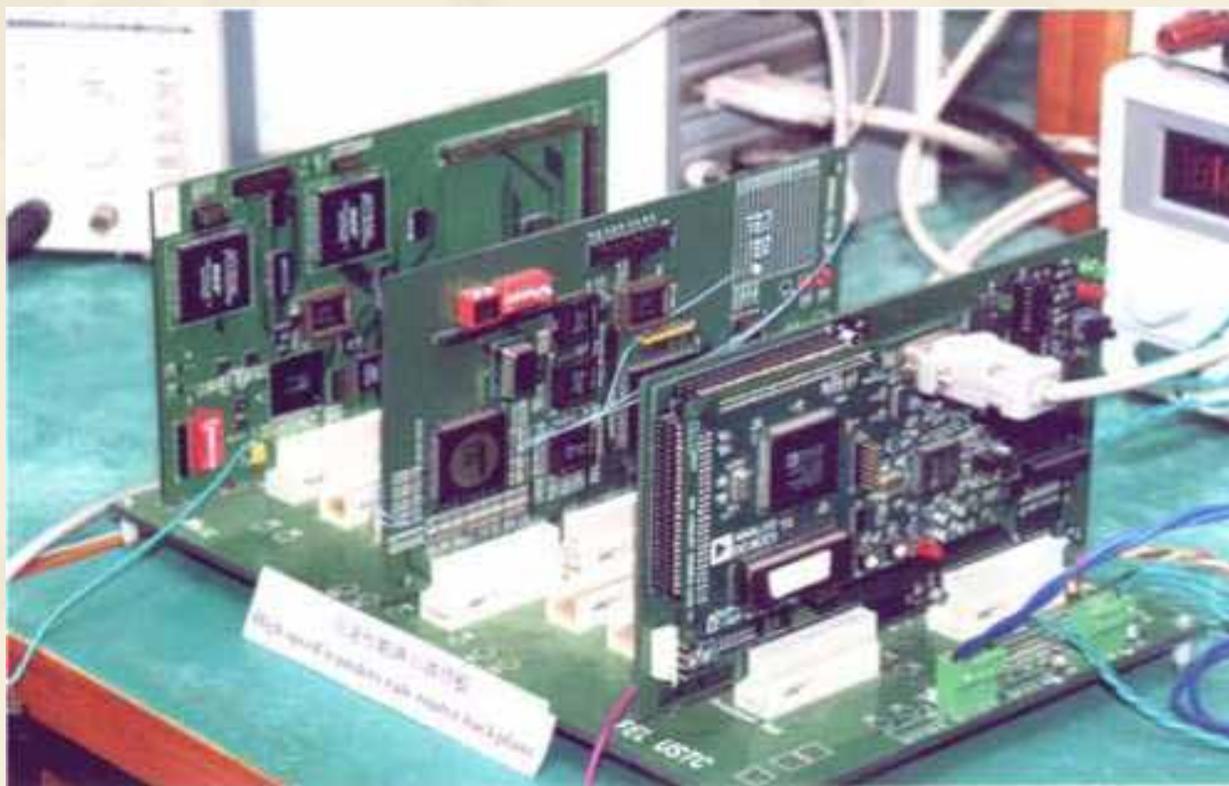
## 2.5G ATM IP 宽带网络测试仪

该测试仪针对目前的主流网络技术，支持ATM、MAC和IP的线速、实时产生和分析测试，具有2.5G的峰值处理能力，兼容多种网络协议，如IP、TCP、UDP等。该测试仪的设计采用了许多先进的技术和方法。例如：QOS测试项中的时延测试（平均时延、最大时延、时延分布直方图）均采用硬件实现，

该测试仪为国内首例全面实现2.5G ATM/POS\GE\FE的宽带测试仪，填补了国内高端宽带测试仪领域的空白。



## 路由器底层核心技术 - 交换开关系统的测试



# 无线通信测试平台的研制



# “龙芯”计算机系统中的北桥设计

- ❖ 与中科院北京计算所合作项目，为“龙芯”2号计算机系统设计中“北桥”芯片。
- ❖ 全部逻辑在一片FPGA芯片中完成。
- ❖ 速度满足PCI 66M 时钟频率要求。



北桥芯片

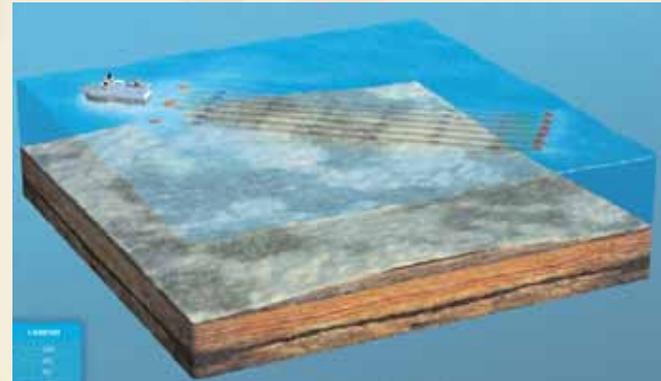
# 国家“863”高技术攻关： “海上时移地震采集关键设备研制”

2005年取得了重要的成果，各项指标已达到要求，完成了试验样机的系统集成，进行了两次海试。2005年3月和11月，11月海试在中国南海的莺歌海域，试验非常成功。

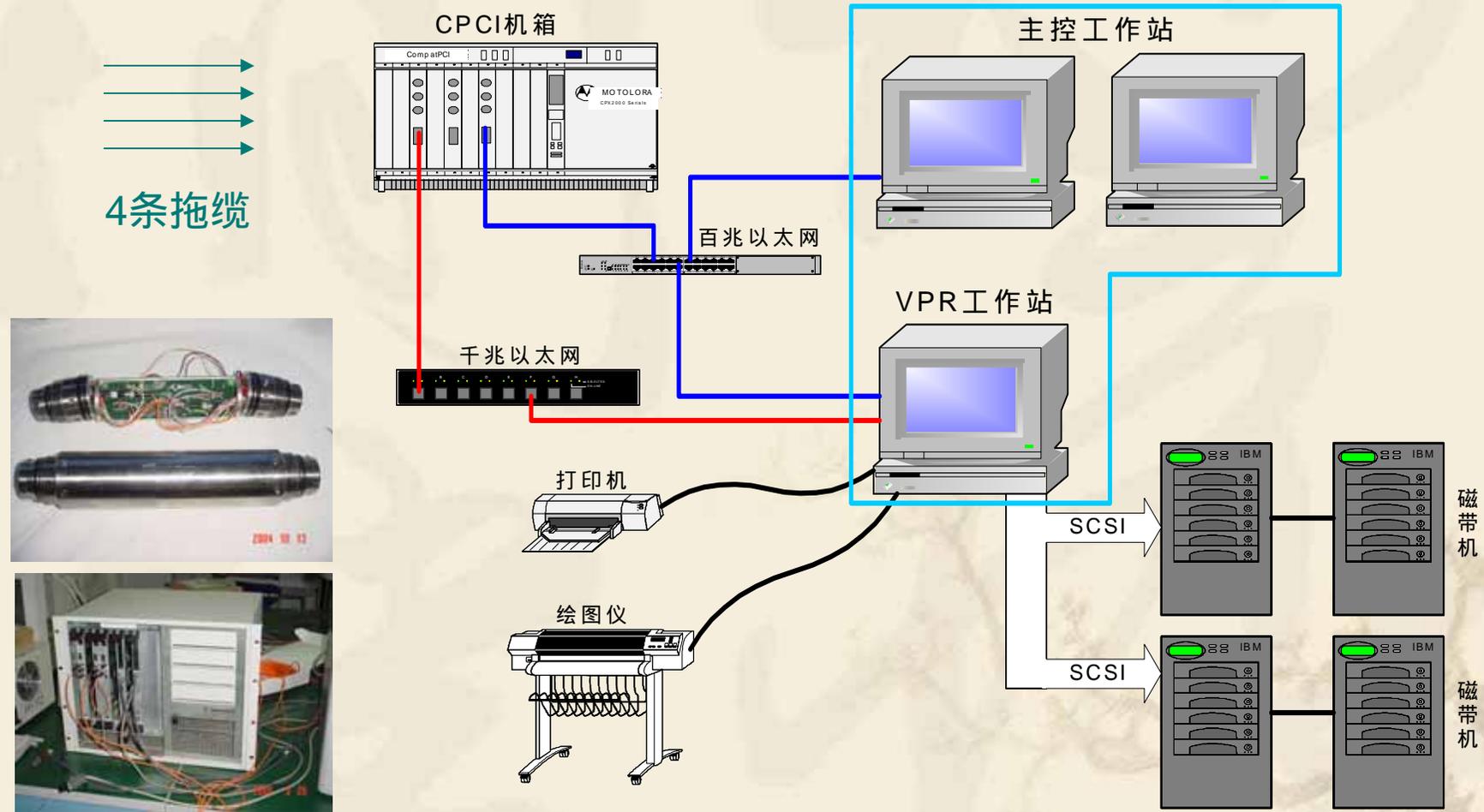
主要指标如下：

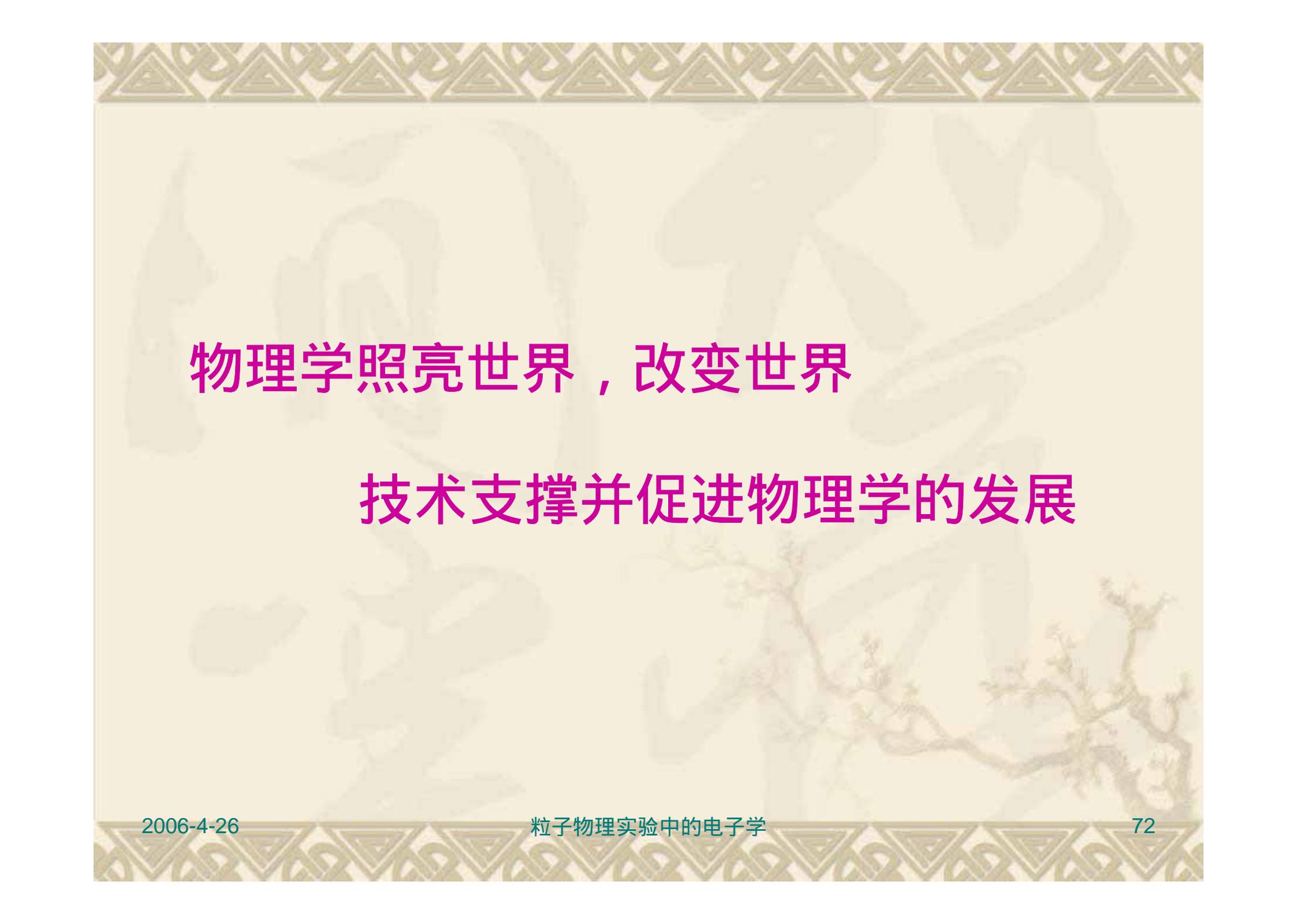
- ◆ 位置分辨率：**3.125米**；（进口：12.5米）
- ◆ 动态范围：不小于115dB；
- ◆ 谐波畸变：小于106dB；
- ◆ 实时数据率：26MB/s；

2006年1月4日通过了科技部组织的  
国家863课题结题验收。



# 系统总体结构图





物理学照亮世界，改变世界

技术支撑并促进物理学的发展