

Dominican Teachers Programme 2016

<http://indico.cern.ch/event/507120/>

# • Principios de los Detectores de Partículas •

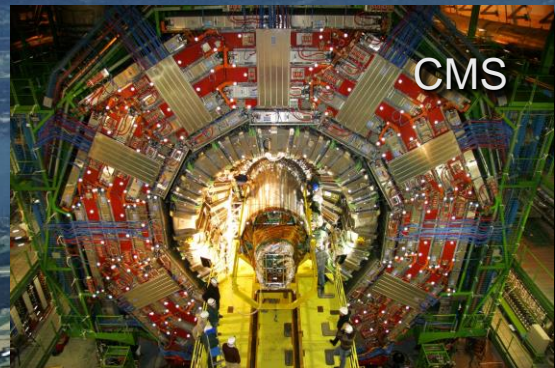
Mar Capeans

CERN, June 14<sup>th</sup> 2016

# • Contenido •

1. Retos de los detectores en el LHC
2. Paso de partículas a través de la materia
3. Tecnología de detectores
4. Cómo funcionan los experimentos

# New Era in Fundamental Science



CMS



LHCb



ATLAS



Exploration of a new energy frontier  
in p-p and Pb-Pb collisions



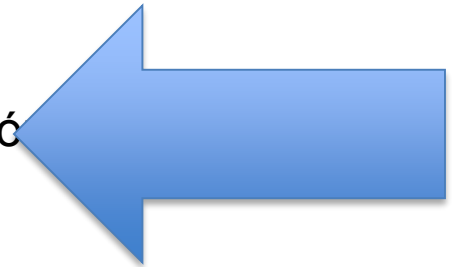
LHC ring:  
27 km circumference



ALICE

# • Herramientas de la Física de Partículas •

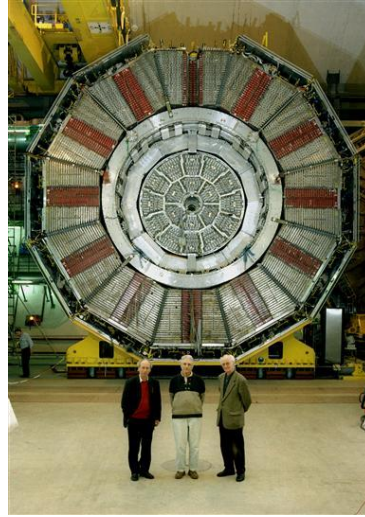
- **Aceleradores**
  - Luminosidad, energía...
- **Detectores**
  - Eficiencia, rapidez, granularidad, resolución
- **Trigger/DAQ (Online)**
  - Eficiencia, compresión, filtro...
- **Análisis de datos (Offline)**
  - Física



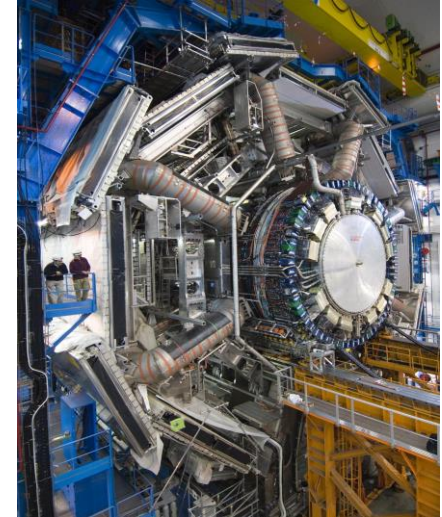
# • Registrando sucesos •



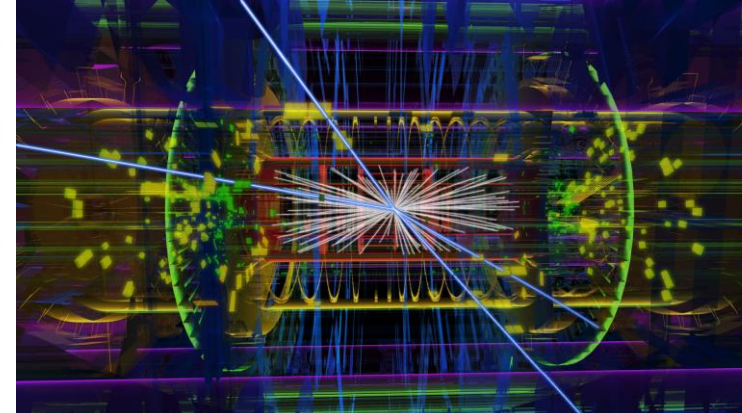
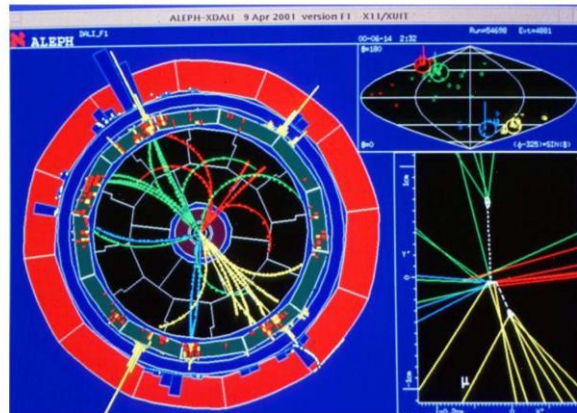
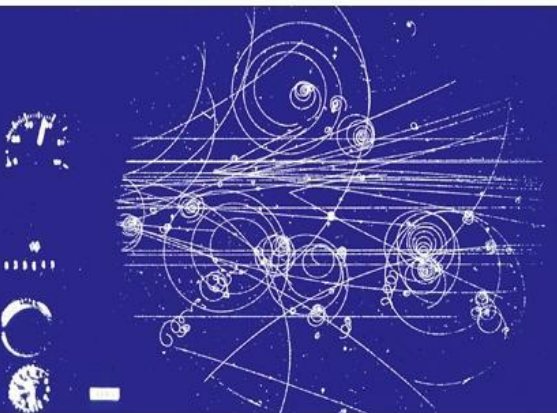
**50's – 70's**



**LEP: 88 - 2000**

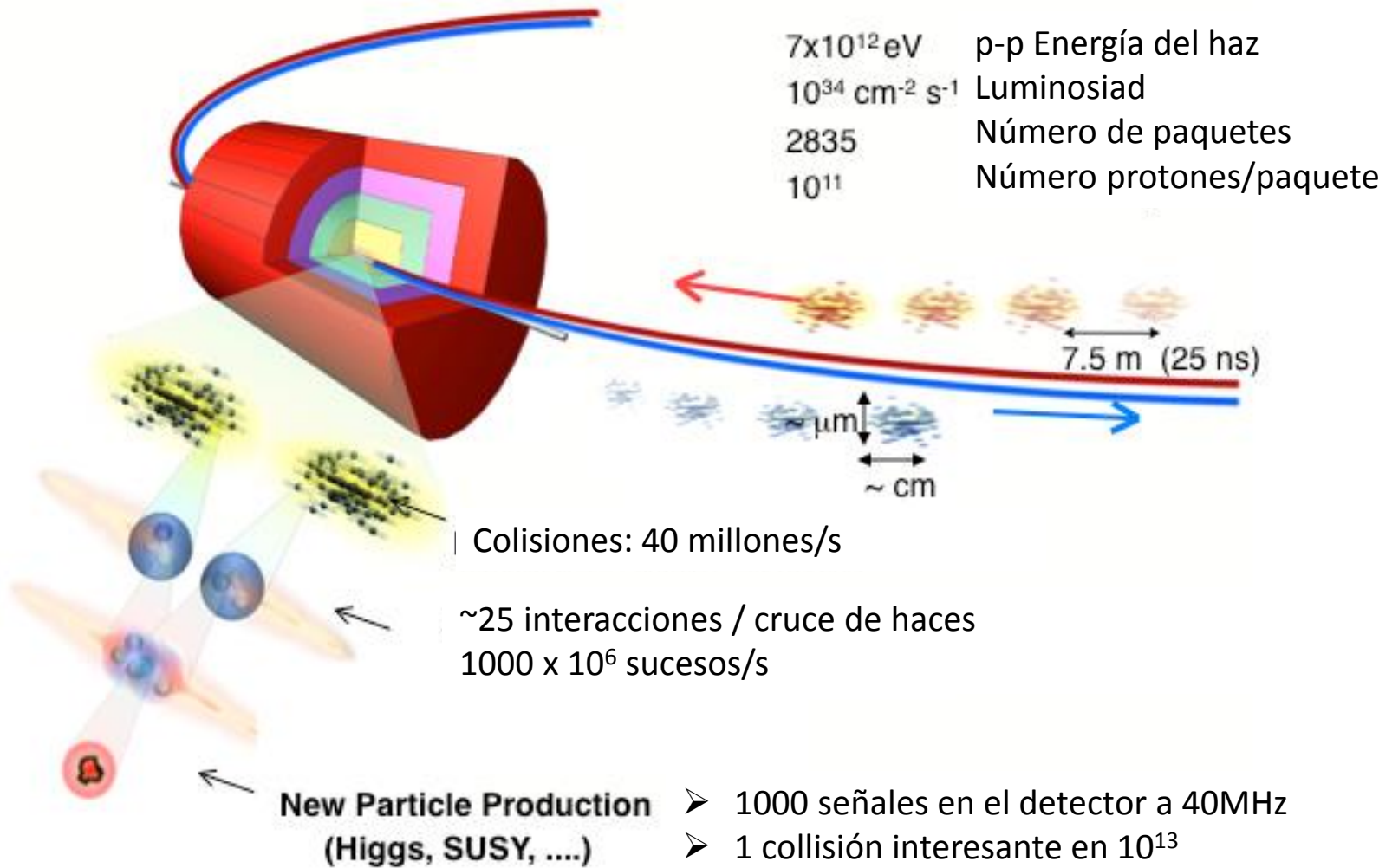


**LHC**



# • Suceso en ATLAS •

# • LHC •



# • Condiciones de trabajo difícilísimas •

- Cruces cada 25 ns .... **Detectores rápidos (ns)** .... Identificación suceso a suceso para no mezclar señales no correlacionadas... Lectura a 40 MHz .... 1 Pbytes/s de datos

En cada cruce ~ 20 sucesos independientes superpuestos ~ 1000 partículas individuales que hay que identificar cada 25 ns ... **la alta densidad de partículas implica alta granularidad** en los detectores... **100 M canales/componentes activos**

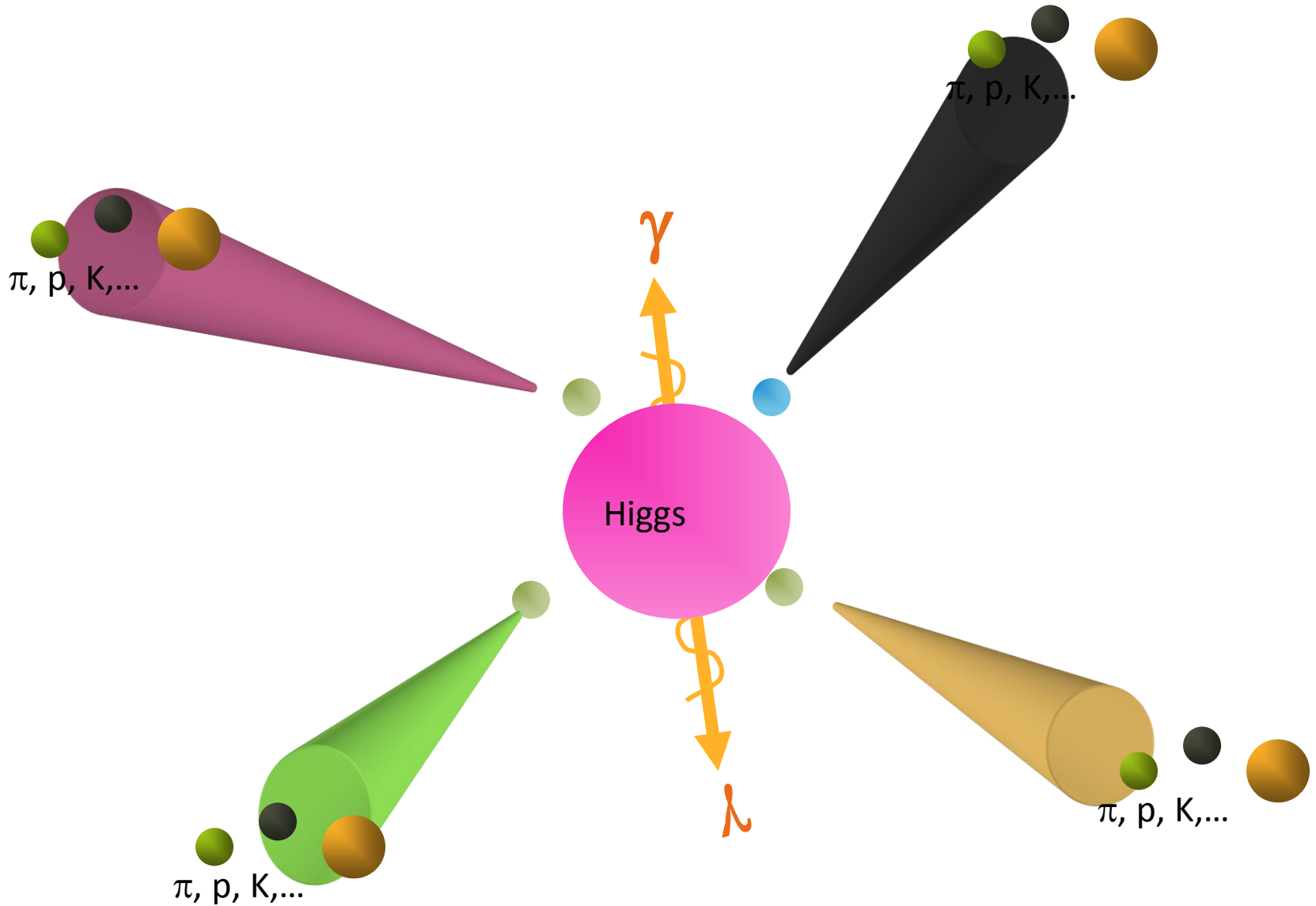
- **Flujo de neutrones y fotones altísimos**, capaces de comprometer las propiedades de los materiales utilizados, la electrónica... los detectores
- **Altos campos magnéticos en grandes volúmenes**, lo que implica el uso de **superconductividad (criogenia)** y atención a los **componentes** (electrónica, estrés mecánico...)
- **Radioactividad inducida** en materiales (activación) lo que añade complejidad al **proceso de mantenimiento**



# • Suceso artístico •



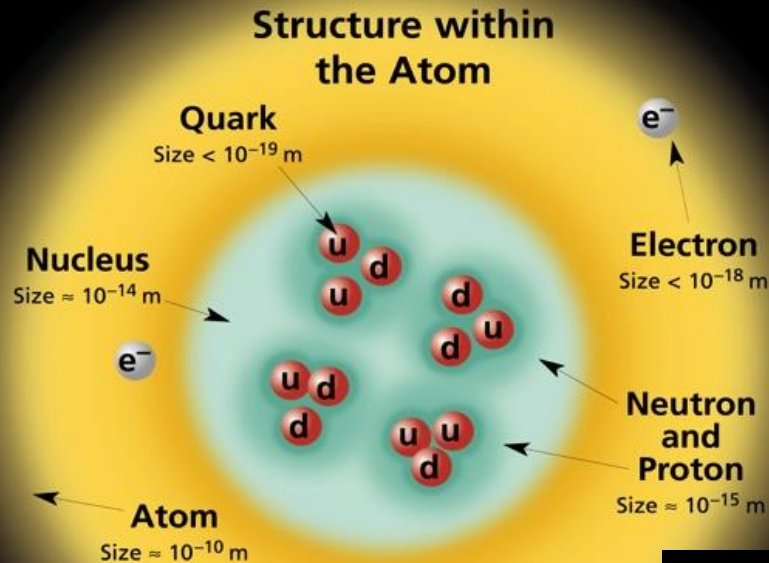
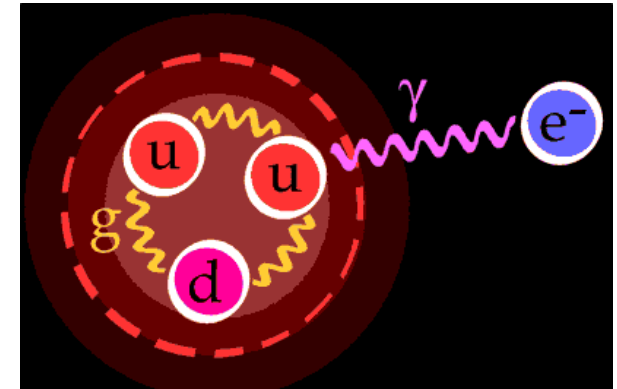
# • Suceso artístico •



# • Detección •

- **Sólo unas pocas de las numerosas partículas conocidas tienen una vida suficientemente larga como para dejar huellas en un detector**
- La mayoría de las partículas son medidas a través de los productos de desintegración y de sus relaciones cinemáticas (masa invariante)
- Algunas partículas de corta duración (b, c) dejan pistas (trazas cortas) antes de decaer, por lo que su identificación se basa en la medición de trazas cortas
- Construimos detectores para registrar:  $e^{\pm}$ ,  $\mu^{\pm}$ ,  $\Upsilon$ ,  $\pi^{\pm}$ ,  $K^{\pm}$ ,  $K_0$ ,  $p^{\pm}$ , n
- Sus diferencias (masa, carga, y como interactúan con la materia) son las claves para su identificación

# • Interacciones •



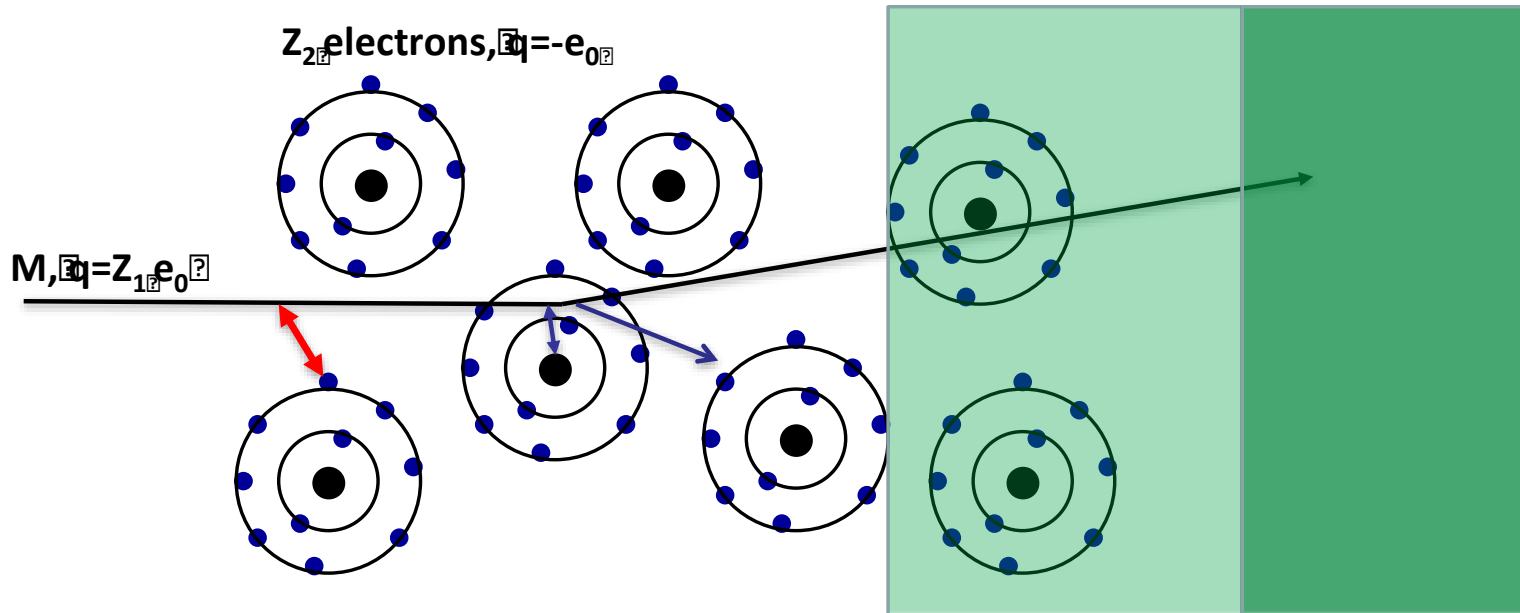
If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

## PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong	
				Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	$W^+$ $W^-$ $Z^0$	$\gamma$	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at: for two protons in nucleus	$10^{-41}$	0.8	1	25	Not applicable to quarks
	$10^{-41}$	$10^{-4}$	1	60	Not applicable to hadrons
	$10^{-36}$	$10^{-7}$	1	Not applicable to hadrons	20

# • Interacción EM de las Partículas •

Slide: W.Riegler, CERN



Interaction with the atomic electrons. The incoming particle loses energy and the atoms are excited or ionized.

Interaction with the atomic nucleus. The particle is deflected (scattered) causing multiple scattering of the particle in the material. During this scattering a Bremsstrahlung photon can be emitted.

In case the particle's velocity is larger than the velocity of light in the medium, the resulting EM shockwave manifests itself as Cherenkov Radiation. When the particle crosses the boundary between two media, there is a probability of the order of 1% to produced and X ray photon, called Transition radiation.

11/09/2011

# • Partículas Neutras •

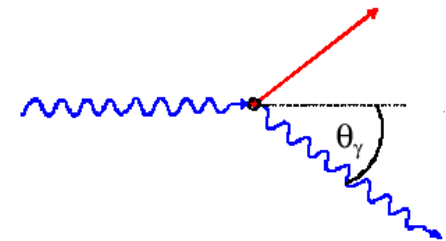
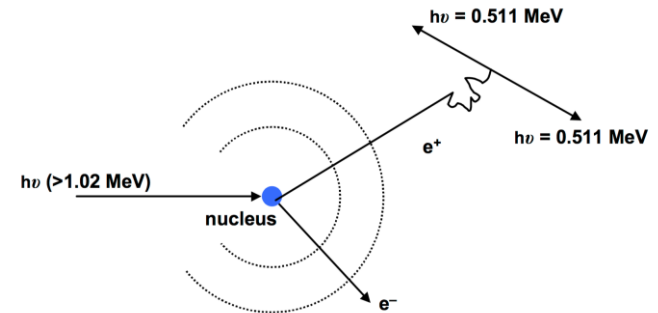
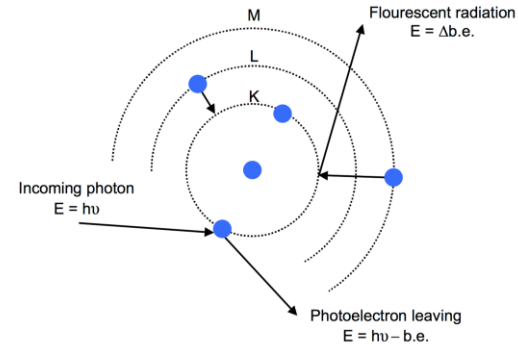
- **Efecto fotoeléctrico ( $Z^5$ )**; absorción de un fotón por un átomo, **expulsando un electrón**

*Se usa en varios detectores, muy importante en los detectores aplicados a la medicina*

- **Producción de pares ( $Z^2+Z$ )**; esencialmente bremsstrahlung; umbral a  $2 m_e = 1.022 \text{ MeV}$ . Domina a altas energías.

*El mas importante en HEP, Inicia las EM showers en los calorímetros*

- **Scattering Compton ( $Z$ )** dispersión de un fotón contra un electrón libre (fórmula de Klein Nishina). Este proceso tiene restricciones cinemáticas bien definidas; para energías por encima de unos pocos MeV 90% de la energía se transfiere.



# • Tecnología de los Detectores •

- **Interacciones de las partículas con la materia (= detectores)**
- **Conversión en señales eléctricas**; medida de la posición y la energía canal a canal en los detectores
- Tres efectos/**tecnologías** en los detectores:
  - En un **semiconductor** miramos a la creación de pares e-/h
  - En **detectores de gas**, miramos a la creación de pares e-/ión
  - En **centelladores**, utilizamos la excitación y rápida de-excitación que genera luz en el rango visible
  - *Y otros: Cerenkov, Radiación de transición, ....*

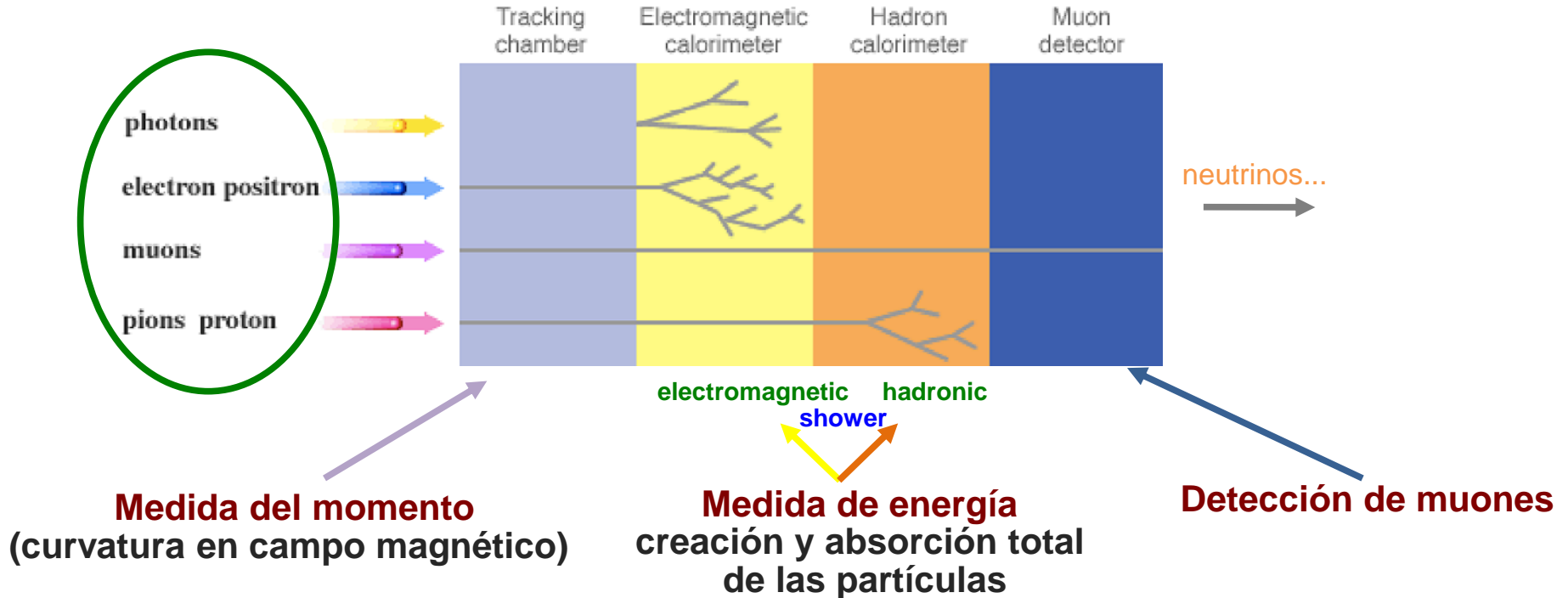
y el resto es filtrado de señales (trigger, DAQ), tratamiento de datos y análisis

# • Interacciones en el Detector •

Baja densidad → Alta densidad

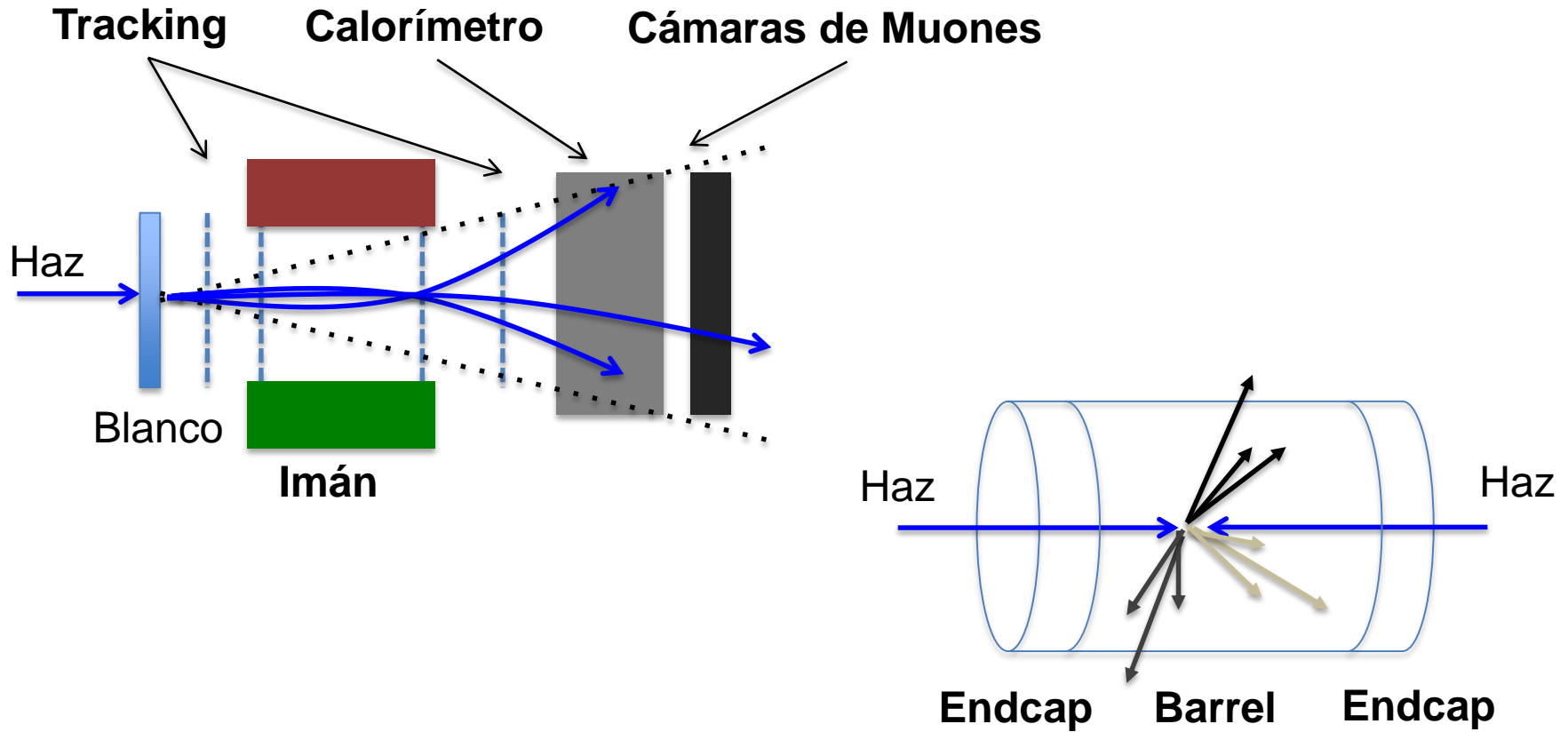
Alta precisión → Menor precisión

Alta granularidad → Menor granularidad

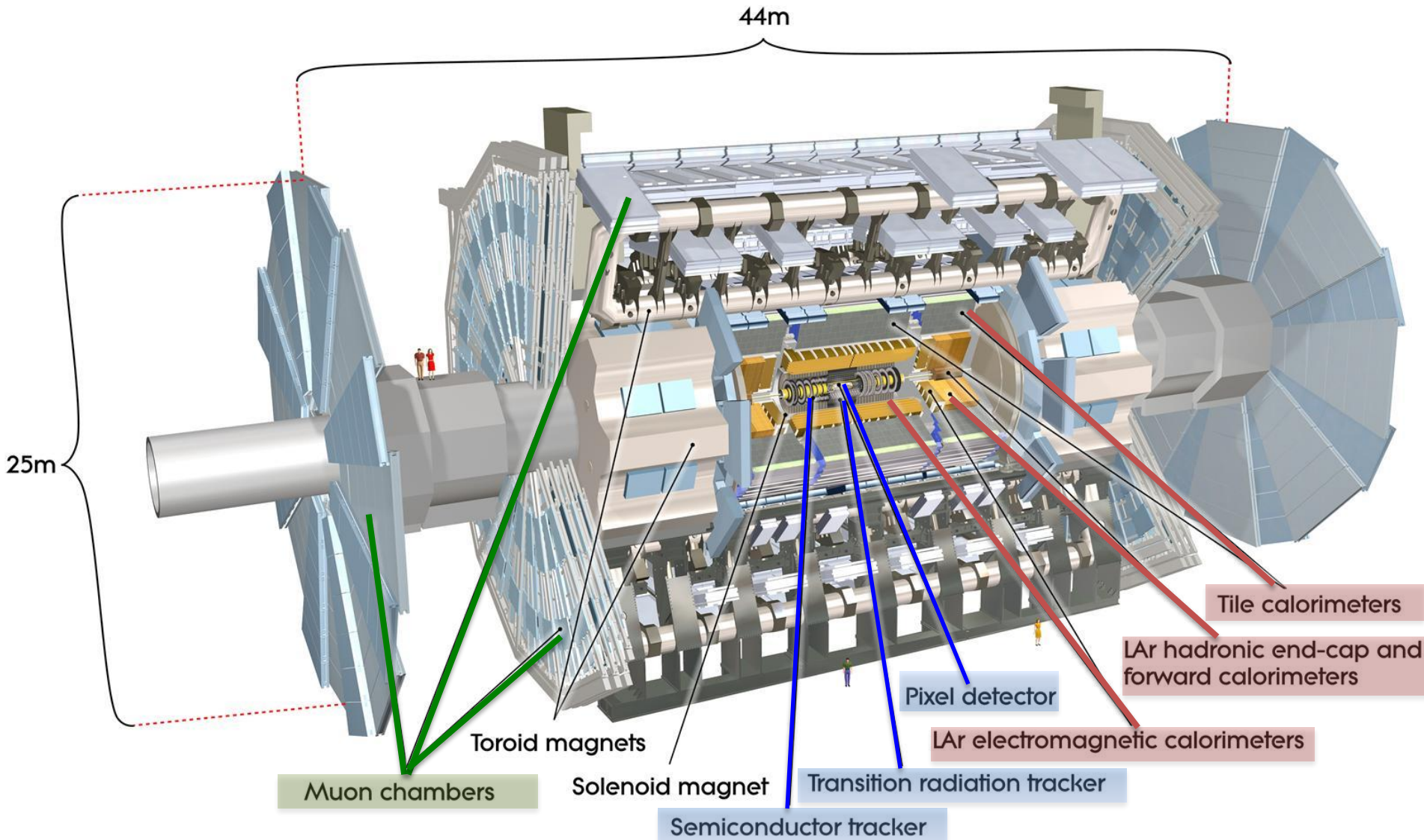




# • Configuración de los Detectores •



# • Detector ATLAS •



# CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes  
Overall diameter : 15.0 m  
Overall length : 28.7 m  
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE  
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS

Pixel ( $100 \times 150 \mu\text{m}$ )  $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$  channels  
Microstrips ( $80 \times 180 \mu\text{m}$ )  $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$  channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID

Niobium titanium coil carrying  $\sim 18,000\text{A}$

MUON CHAMBERS

Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers  
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER

Silicon strips  $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$  channels

FORWARD CALORIMETER

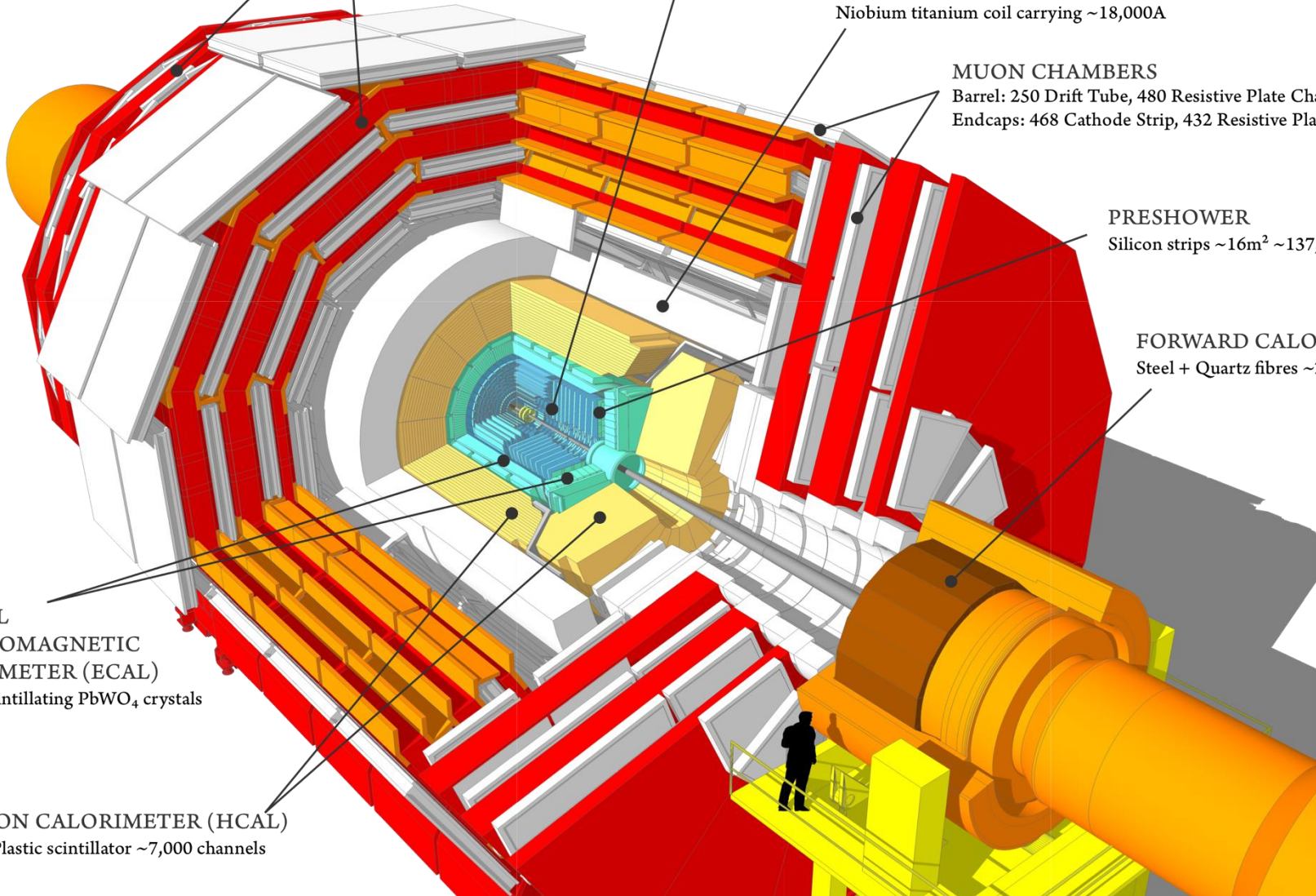
Steel + Quartz fibres  $\sim 2,000$  Channels

CRYSTAL  
ELECTROMAGNETIC  
CALORIMETER (ECAL)

$\sim 76,000$  scintillating  $\text{PbWO}_4$  crystals

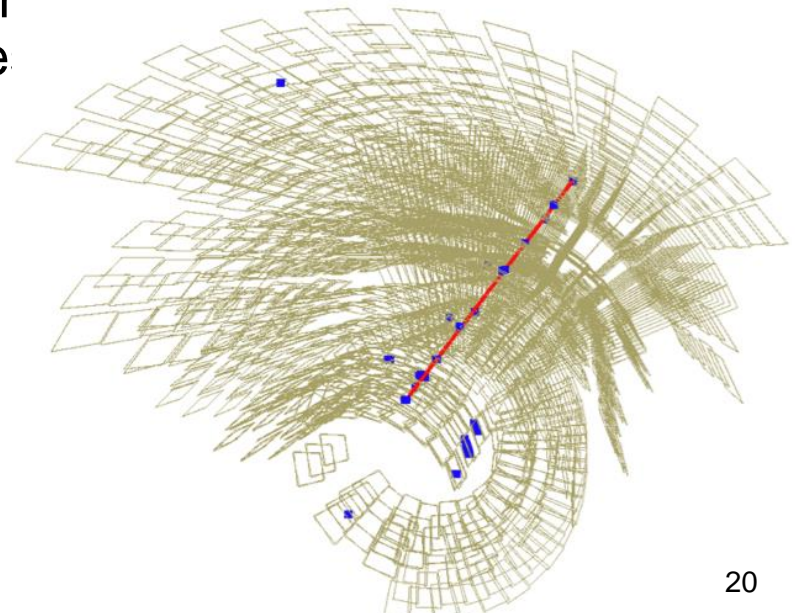
HADRON CALORIMETER (HCAL)

Brass + Plastic scintillator  $\sim 7,000$  channels

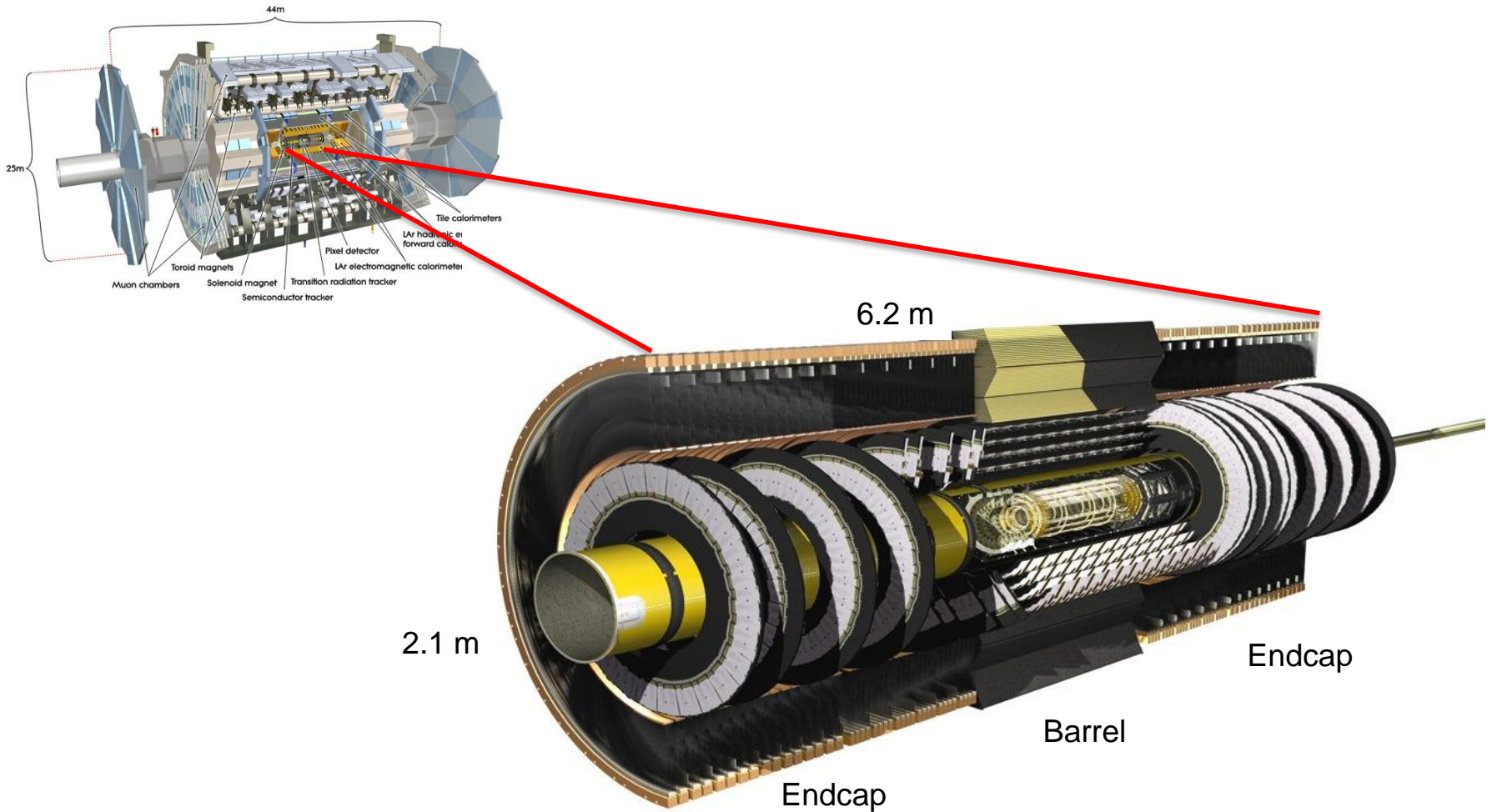


# • Trackers •

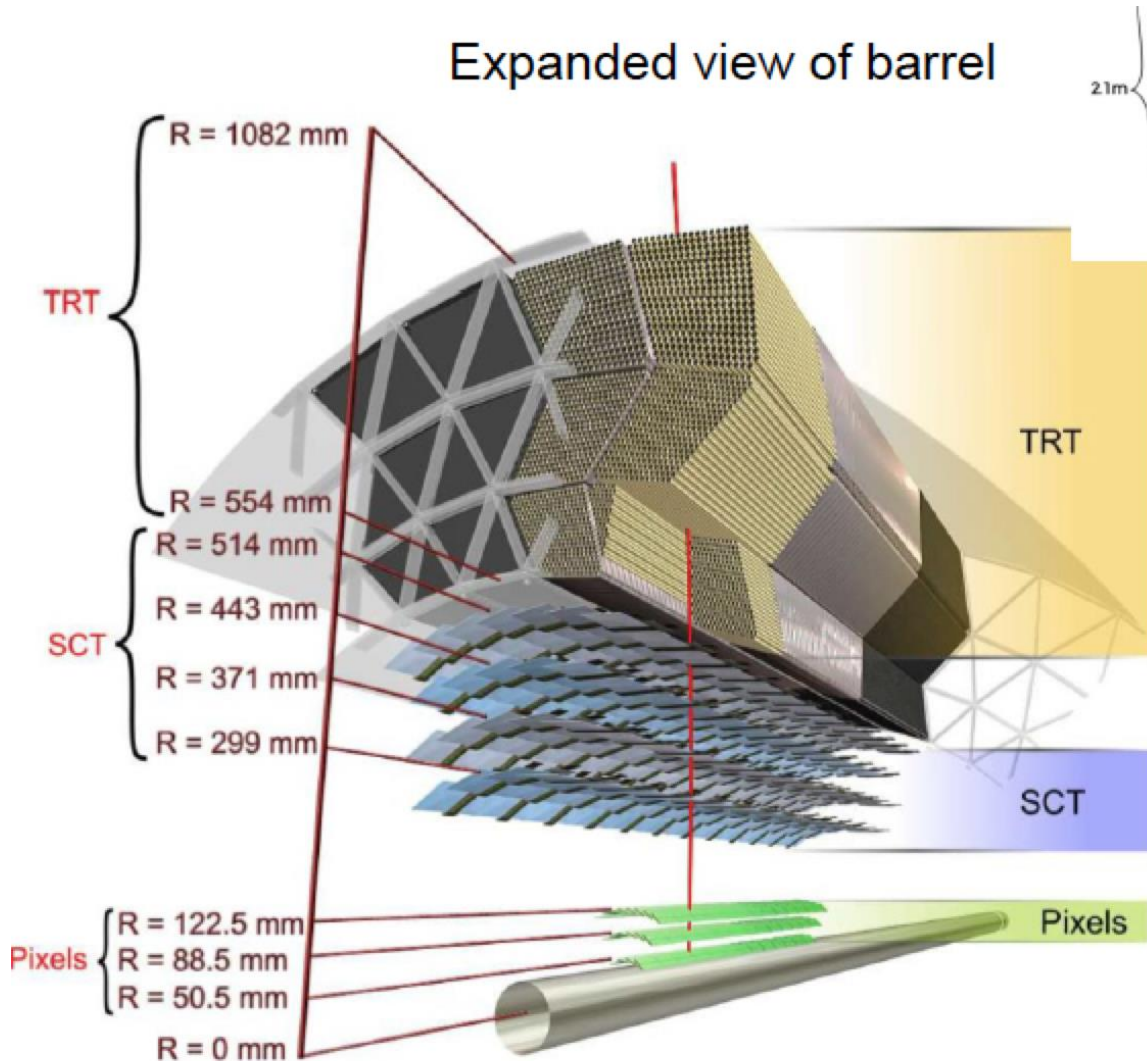
- Miden las trayectorias de **partículas cargadas** emergentes de las colisiones
- Determinan **carga y impulso** (en el campo magnético) de las partículas
- Las **trazas** se construyen a partir de varios puntos medidos en el espacio
- Rastrean señales compatibles con las 'showers' en los calorímetros o trazas en los sistemas muones
- Contribuyen a la identificación de par energía en el tracker o con detectore. **Detector compacto, en un campo magnético, que registra el mayor numero de señales posible, pero ligero para minimizar las interacciones de las partículas cargadas (y neutras) antes de que lleguen a los calorímetros.**



# • ATLAS Tracker •



# • ATLAS Tracker •



## TRT (Straws-Gas)

350 kchannels  
36 track points  
 $\sigma \sim 130$  mm

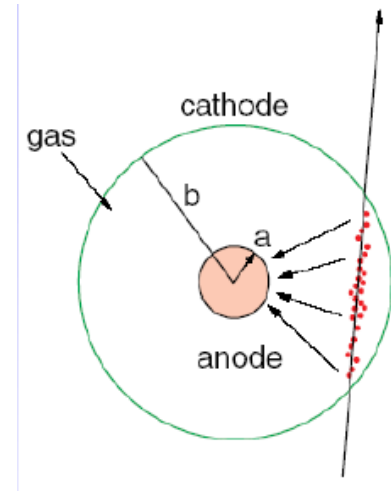
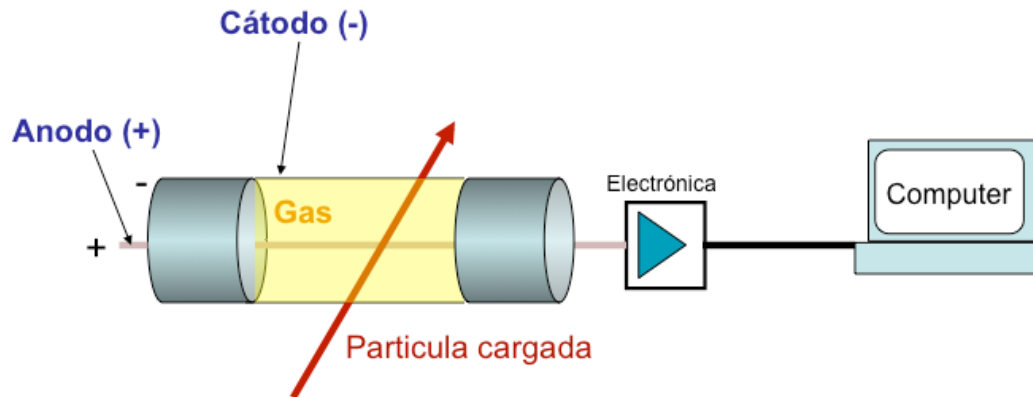
## SCT (Silicon strips)

6.2 Mchannels  
4 track points  
 $\sigma \sim 16$  mm

## Pixel (Silicon pixels)

80 Mchannels  
3 track points  
 $\sigma \sim 10$  mm

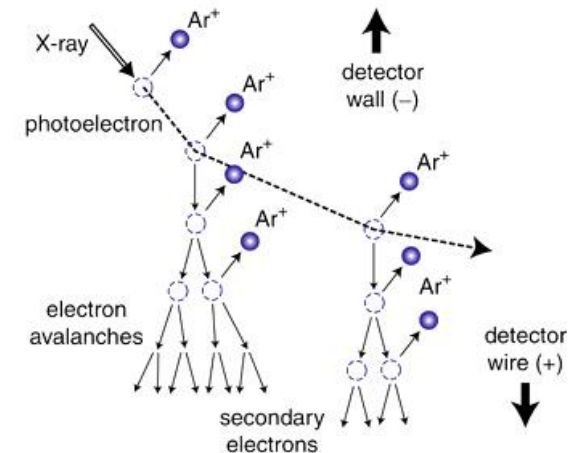
# • Detectores de Gas •



Una partícula cargada atravesando gas pierde energía cuando interacciona con los átomos de gas. Este proceso resulta en:

- **Excitación:** la partícula transfiere una cantidad determinada de energía al átomo de gas
- **Ionización:** la partícula libera un electrón del átomo de gas, y deja un ion cargado positivamente

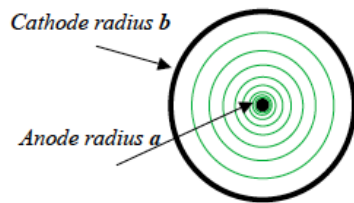
Los electrones primarios tienen suficiente energía cinética para ionizar otros átomos del gas.



# • Amplificación •

- La distancia media entre interacciones primarias es  $\sim 200\text{-}300 \mu\text{m}$ , y una interacción primaria produce solo unas pocas interacciones secundarias
- 100 pares no son fáciles de detectar, ya que el ruido típico de un amplificador de señal es  $\sim 1000 e^-$

## • THIN ANODE WIRE MULTIPPLICATION REGION

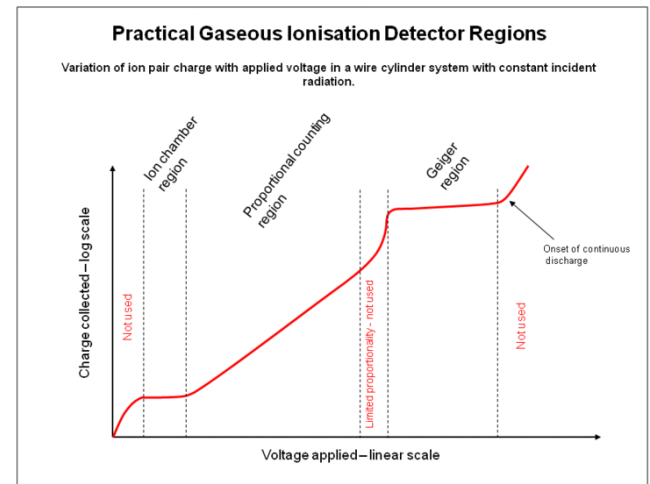
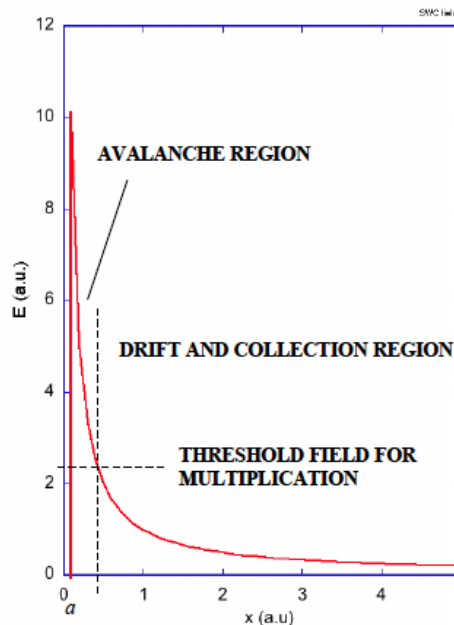


ELECTRIC FIELD AND POTENTIAL:

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

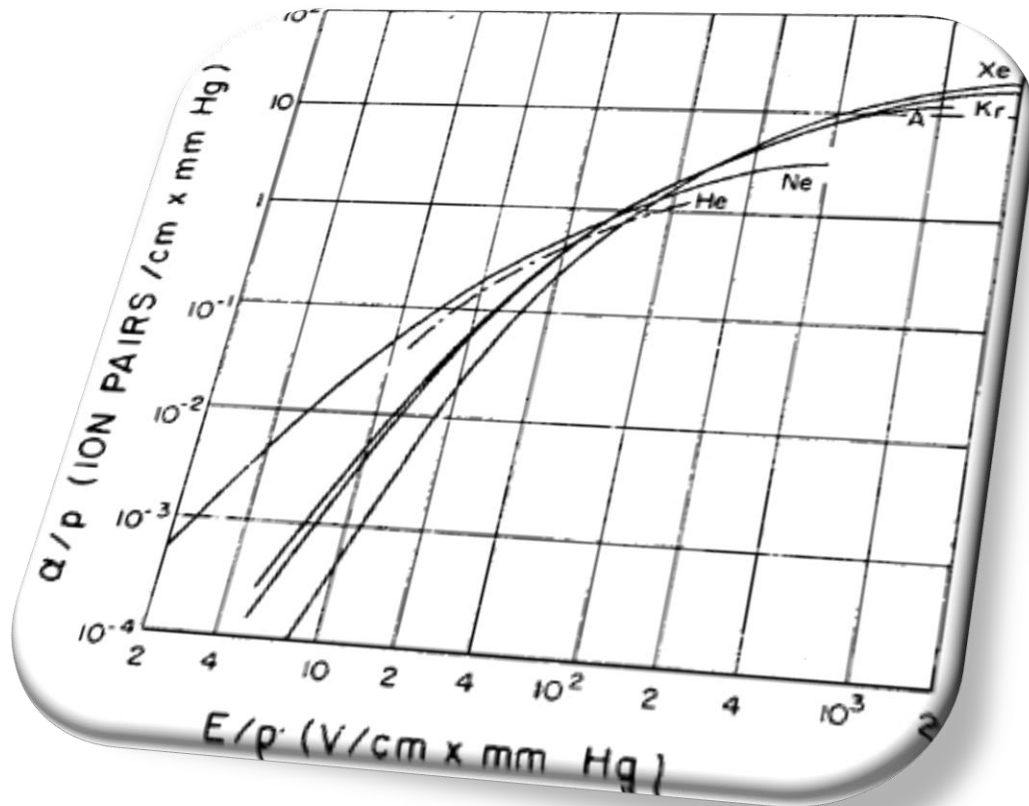
$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{a}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(b/a)} \quad \text{capacitance per unit length}$$





# • Gases •



Los gases nobles requieren el campo eléctrico mas bajo para la formación de la avalancha

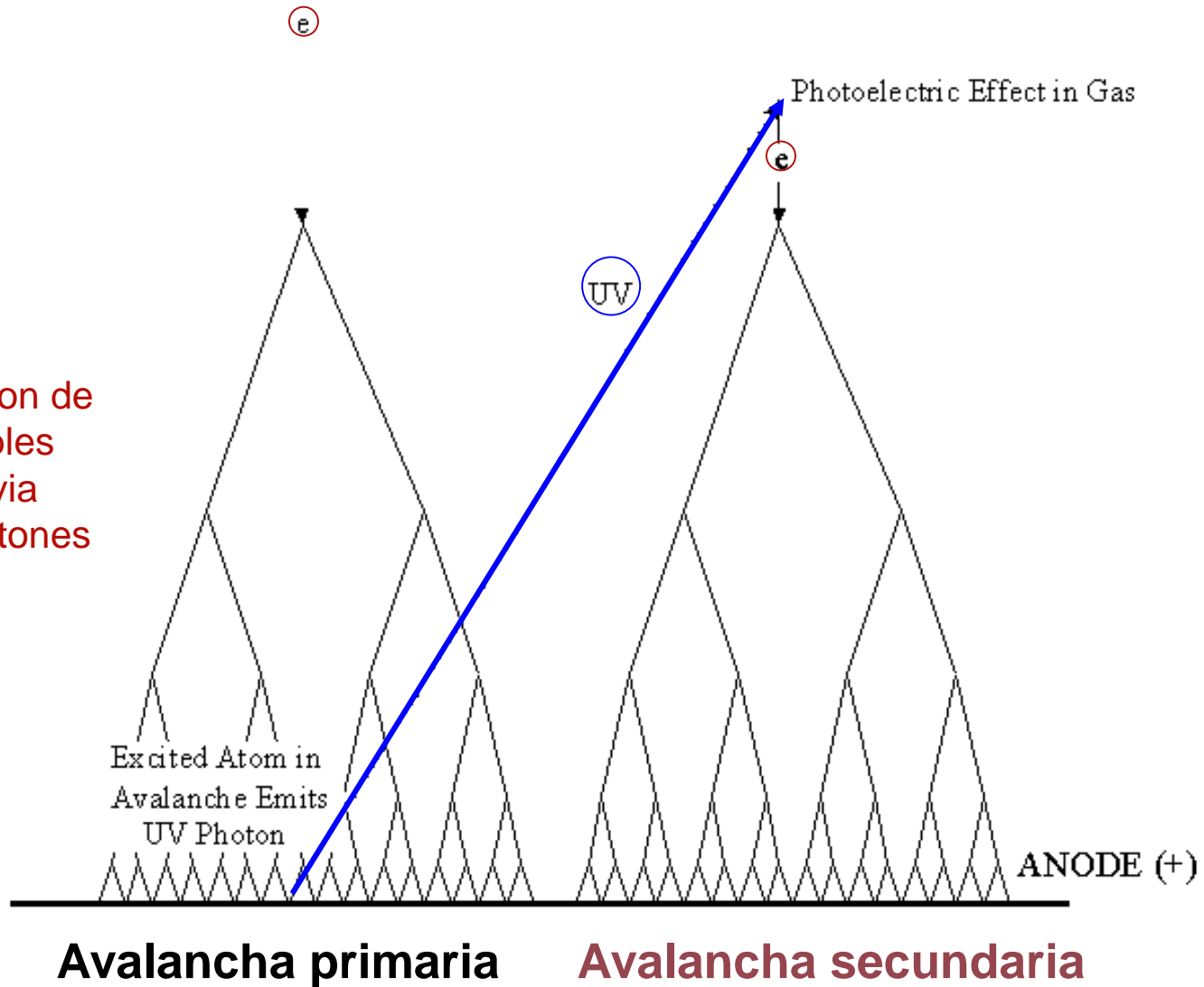
VIII A		18	
2	□	<b>He</b>	
		4,00	Helio
10	□	<b>Ne</b>	
		20,18	Neón
18	□	<b>Ar</b>	
		39,98	Argón
36	□	<b>Kr</b>	
		83,80	Kriptón
54	□	<b>Xe</b>	
		131,29	Xenón
86	□	<b>Rn</b>	
		(222,02)	Radón

Ligero

Abundante  
Inerte  
Barato

Costoso

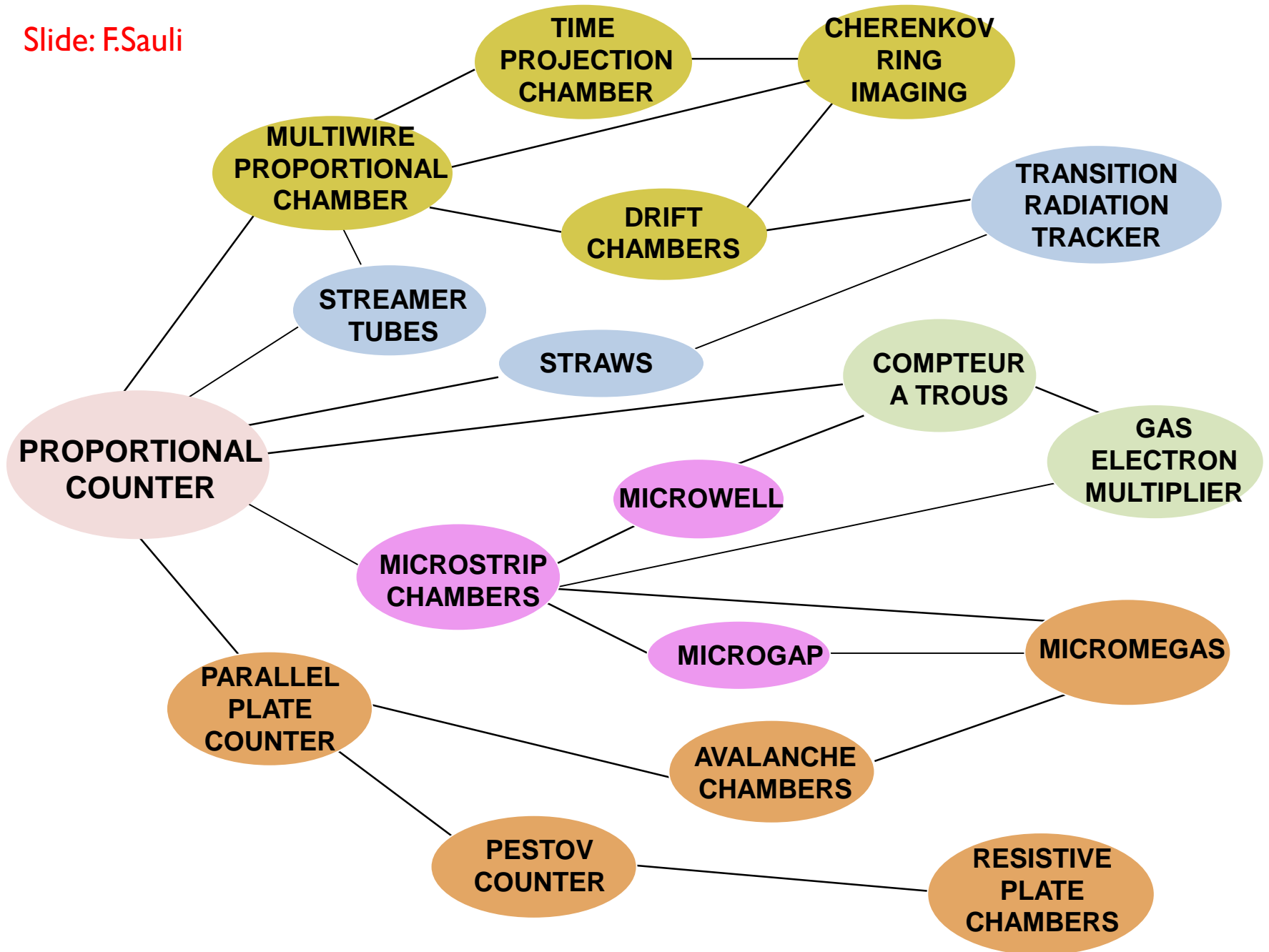
La de-excitation de los gases nobles ocurre solo via emisión de fotones



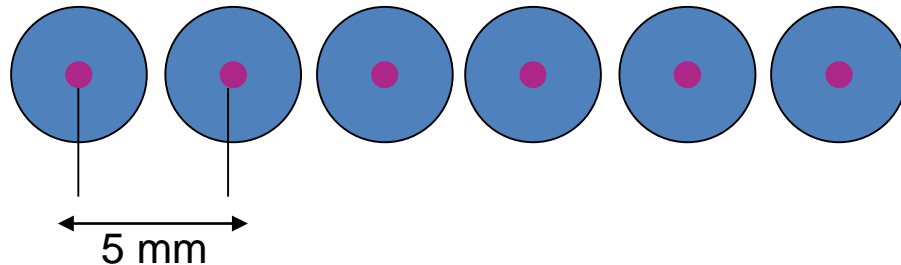
# • Gas en los detectores del LHC •

Function	Detector	Gas in LHC
<b>High Precision Trackers</b> Spatial resolution $\sim < 0.1$ mm	<b>MSGC, GEM, MicroMegas</b>	Ar-CO <sub>2</sub> 70-30 Ar-CO <sub>2</sub> -CF <sub>4</sub> 60-20-20 Others...
	<b>ALICE TPC</b>	Ne-CO <sub>2</sub> 90-10
	<b>LHCb Straw Tubes</b> <b>ALICE, ATLAS Straw Tubes (TR)</b>	Ar-CF <sub>4</sub> -CO <sub>2</sub> 75-15-10 Xe-CO <sub>2</sub> (80-20)
<b>Muon tracker</b> Spatial resolution $\sim$ mm	<b>ATLAS MDT</b>	Ar-CO <sub>2</sub> 97-3
	<b>CMS DT</b>	Ar-CO <sub>2</sub> 85-15
	<b>LHCb MWPC</b>	Ar-CO <sub>2</sub> -CF <sub>4</sub> - 50-40
<b>Trigger chambers</b> <b>FAST</b>	<b>RPC</b>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub> -iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> -SF <sub>6</sub> 90-5-5

*Quencher Gas*

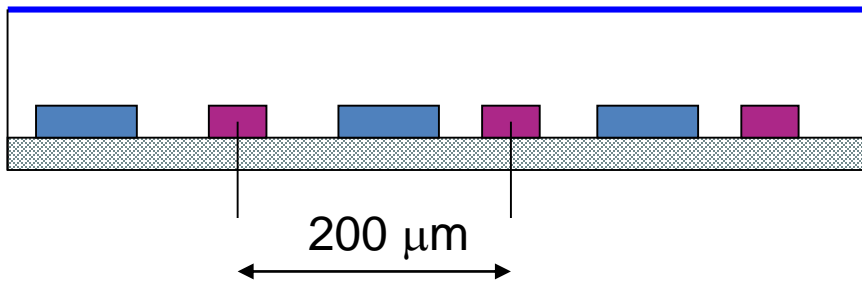


# • Tendencias •



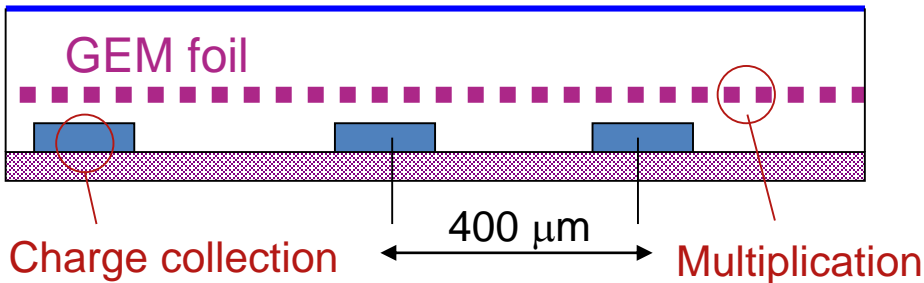
## STRAW TUBES

Distancia ánodo-cátodo: 2 mm  
Resolución espacial~ 130-300  $\mu\text{m}$



## MICRO STRIP GAS CHAMBERS (MSGC - A.Oed,1988)

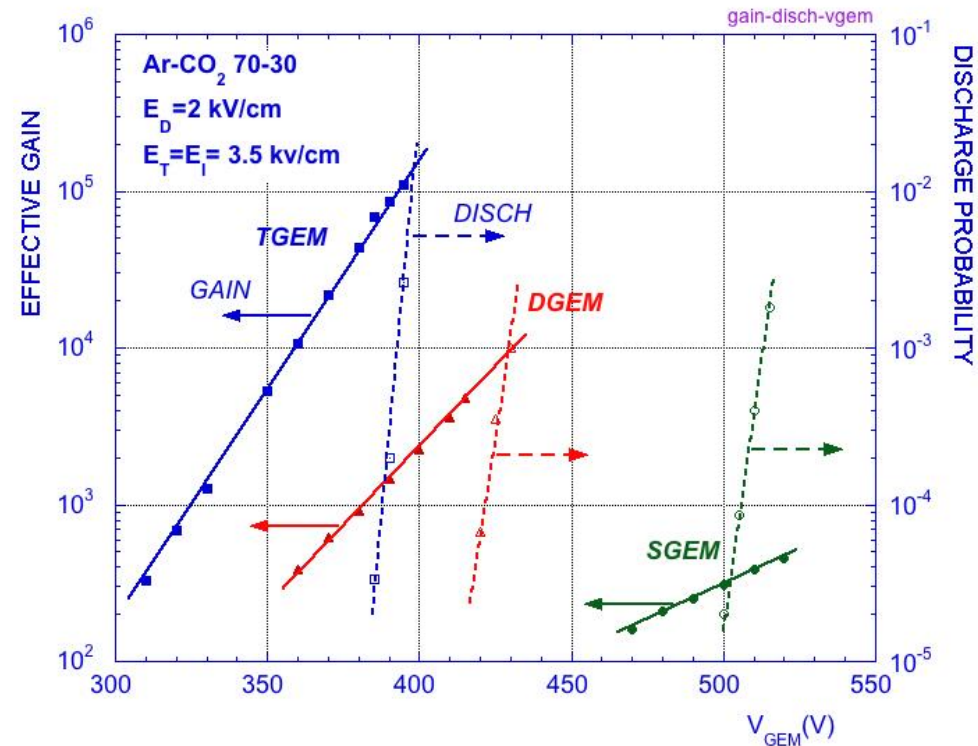
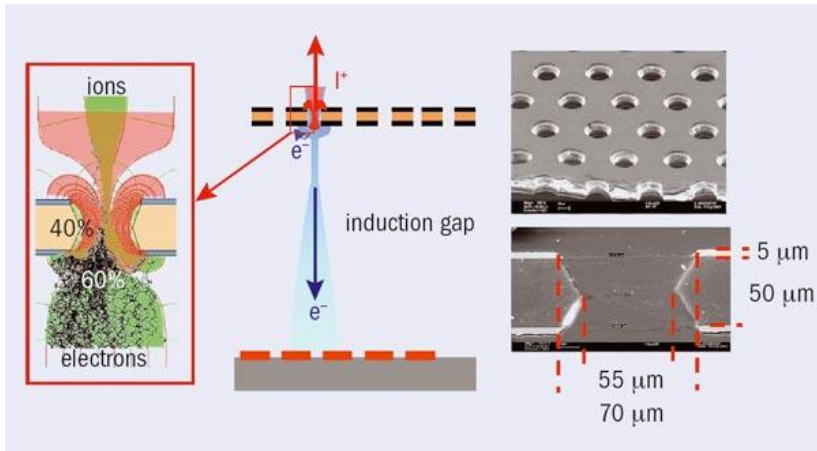
Tecnología industrial  
Semiconductores  
Distancia ánodo-cátodo: 40  $\mu\text{m}$   
Resolución espacial~ 40  $\mu\text{m}$



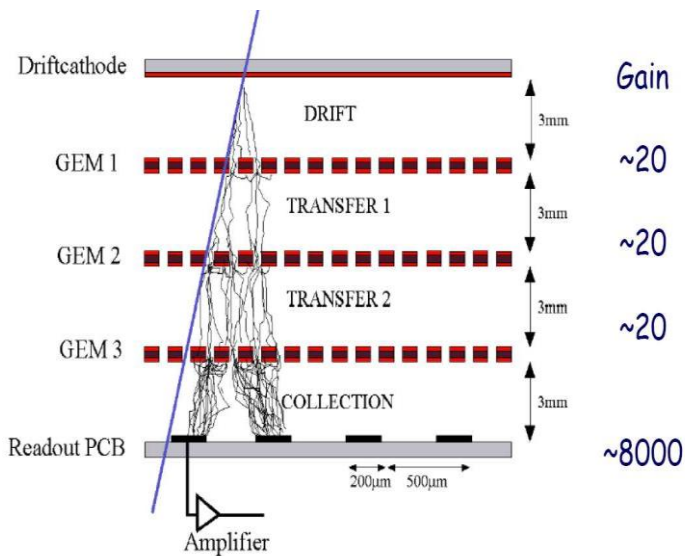
## Gas Electron Multiplier (GEM – F.Sauli, 1998)

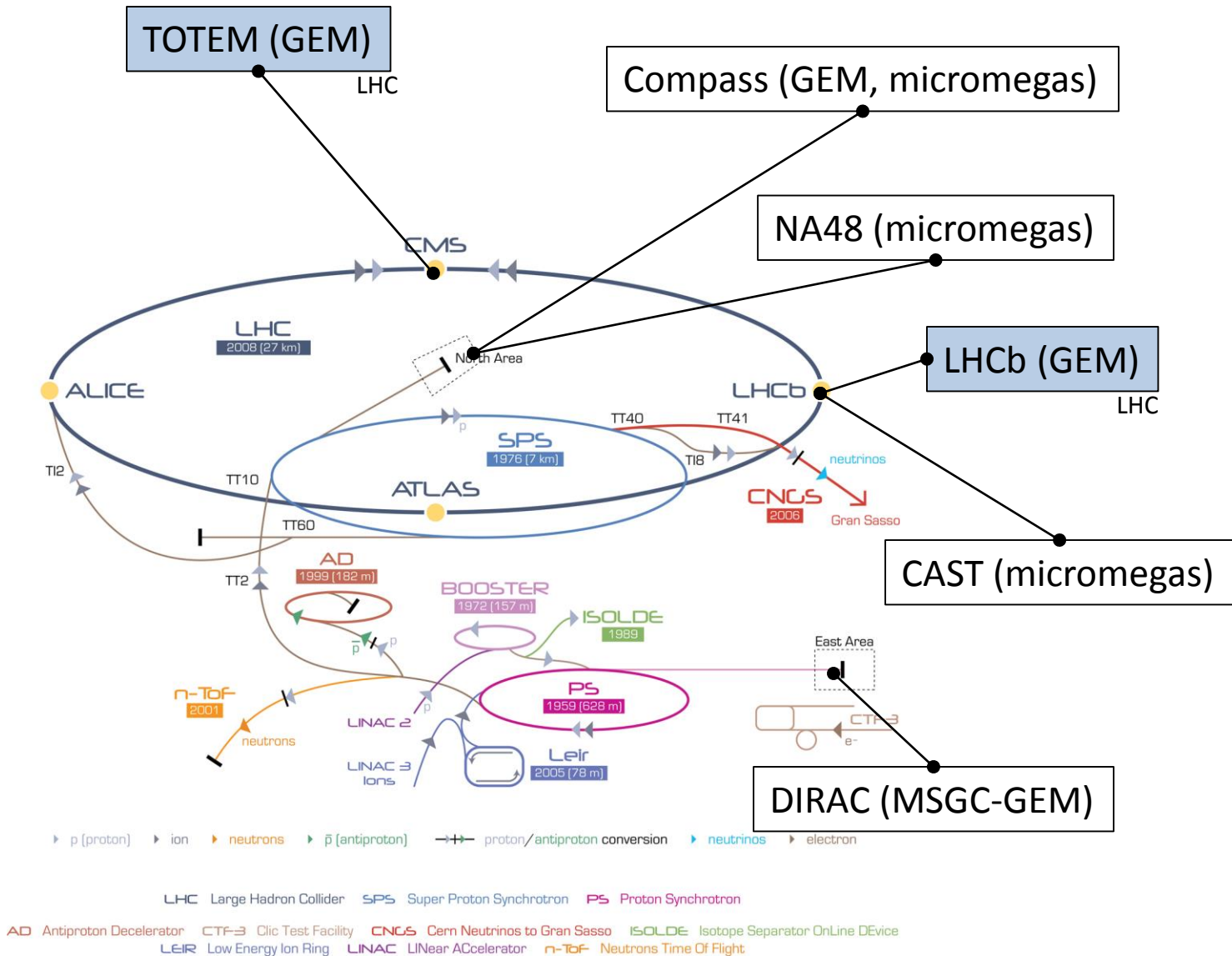
Resolución espacial~ 50  $\mu\text{m}$   
Resolución temporal mejor que 10 ns

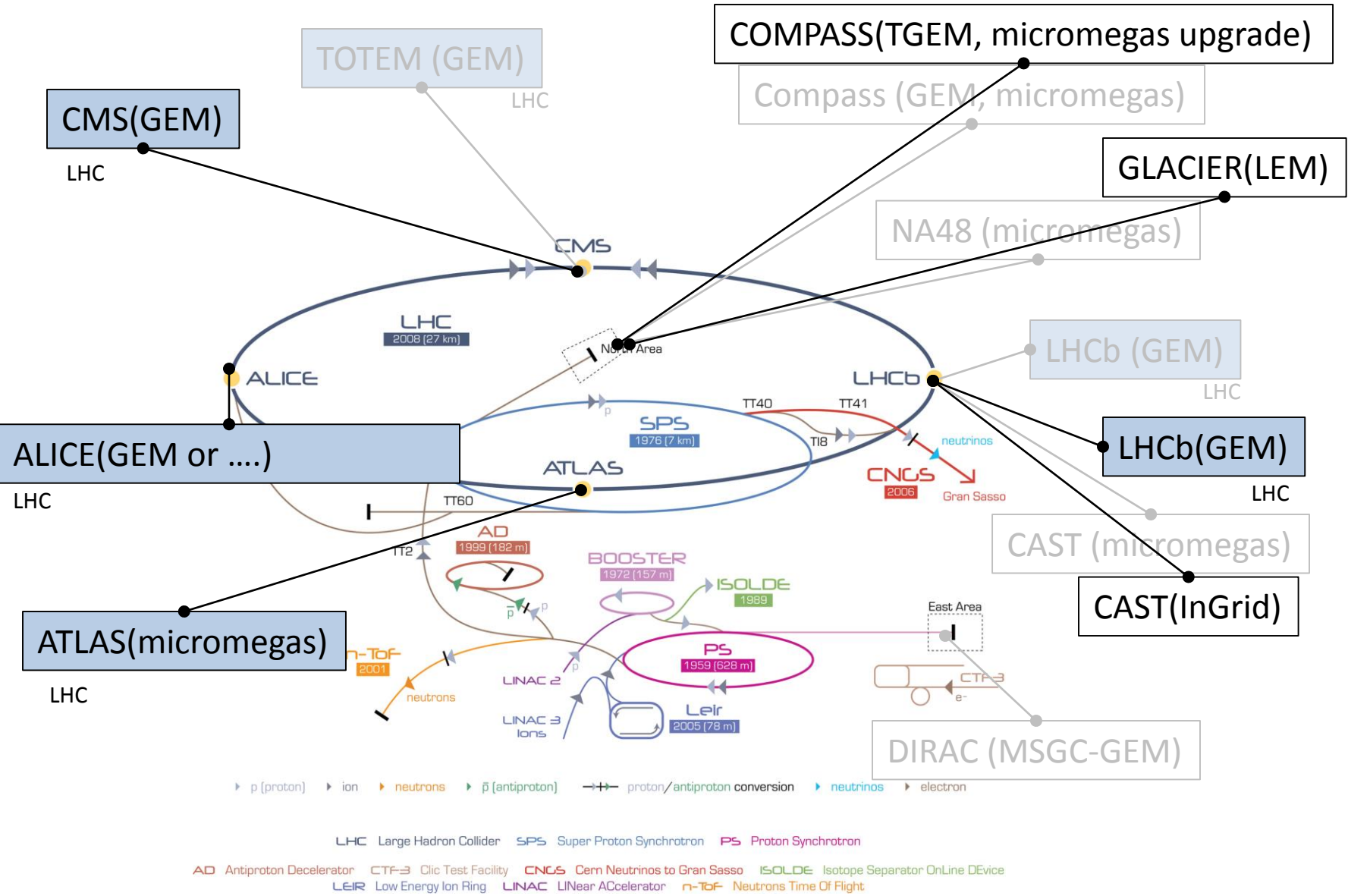
# • Multi-GEM detectors •



S. Bachmann et al Nucl. Instr. and Meth. A479(2002)294

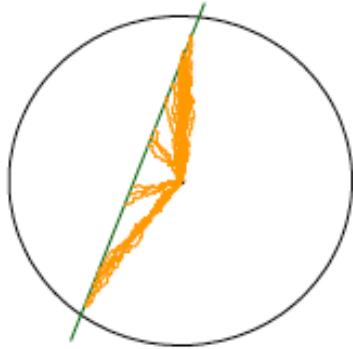








# • Resolución Temporal •



Geometrías cilíndricas -convencionales- tienen una limitación importante:

Los electrones primarios tienen que derivar hasta el hilo antes de que comience la multiplicación de carga, limitando la resolución temporal a  $\sim 0.1\mu\text{s}$



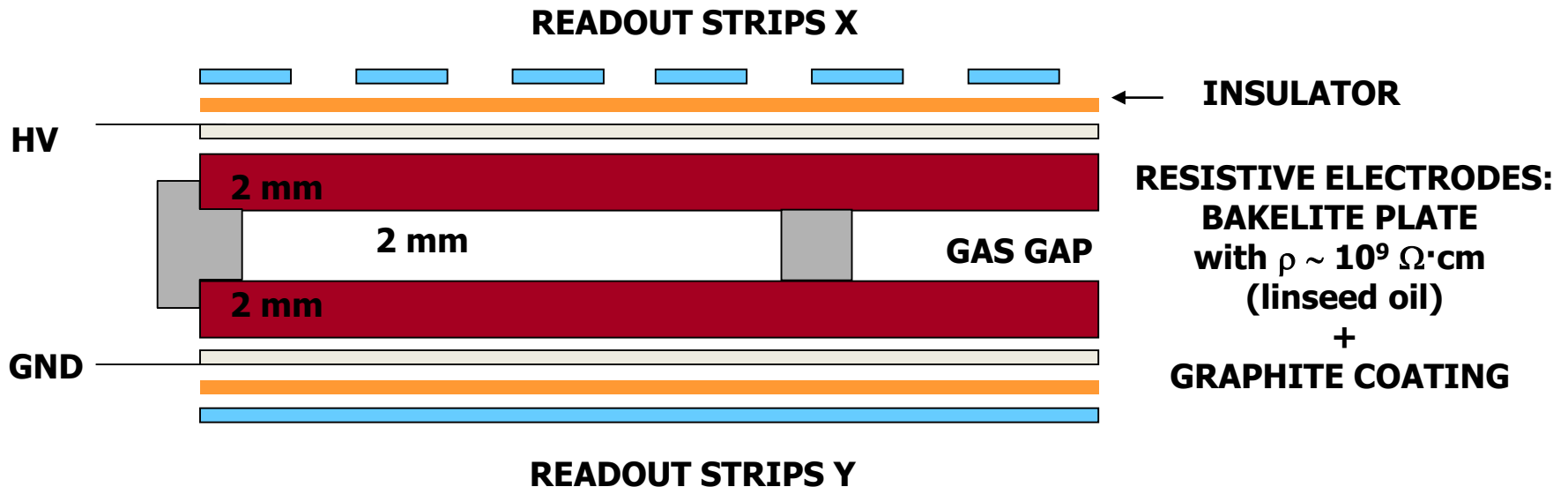
**En una geometría de placas paralelas la multiplicación de carga se inicia inmediatamente porque todo el volumen de gas está activo (campo eléctrico uniforme y muy intenso). Esto se traduce en una mejor resolución temporal ( $\square$  1 ns)**

# • RPC •

## Resistive Plate Chambers

Tecnología desarrollada en los años 80 para realizar sistemas robustos, de gran área (> 5000 m<sup>2</sup> en el LHC) y asequibles:

- **Resolución temporal:** < 1 ns a ps
- Resolución espacial: ~mm
- Capacidad de conteo: hasta ~100 Hz/cm<sup>2</sup>



# • Detectores de Gas •

- Resolución espacial
- Buen dE/dx
- Alta capacidad de contaje
- Señales rápidas y grandes
- Ligeros (poco material)
- Amplia cobertura (>1000 m<sup>2</sup>)
- Geometría flexible

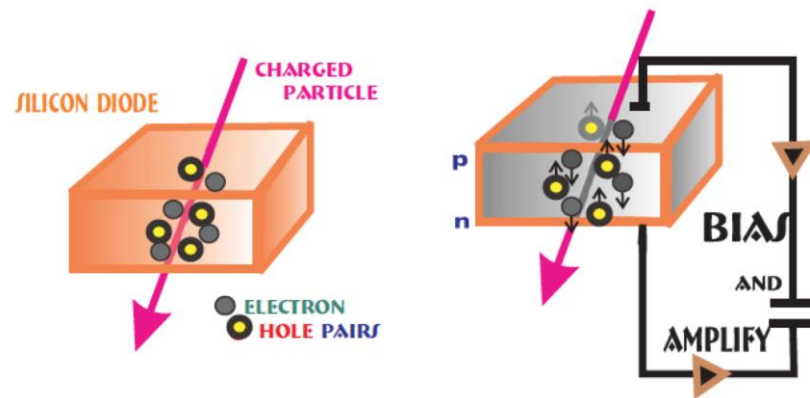
▶ <i>Intrinsic resolution:</i>		
▶ Geiger counter:	~1 cm	tube is hit or not
▶ MWPC:	~1 mm	detect which wire is hit
▶ drift chambers:	150-250 $\mu\text{m}$	measure drift time
▶ LHC experiments:	50-200 $\mu\text{m}$	gas, electronics ...
▶ micropattern detectors:	20- 50 $\mu\text{m}$	small scale electrodes

# • Semiconductores •

- Se utilizan en Física Nuclear para medidas de energía desde los 50
- Aparecen en HEP en los 70
- Se pueden considerar 'Solid state ionization chamber', miembro de la gran familia de detectores de ionización.

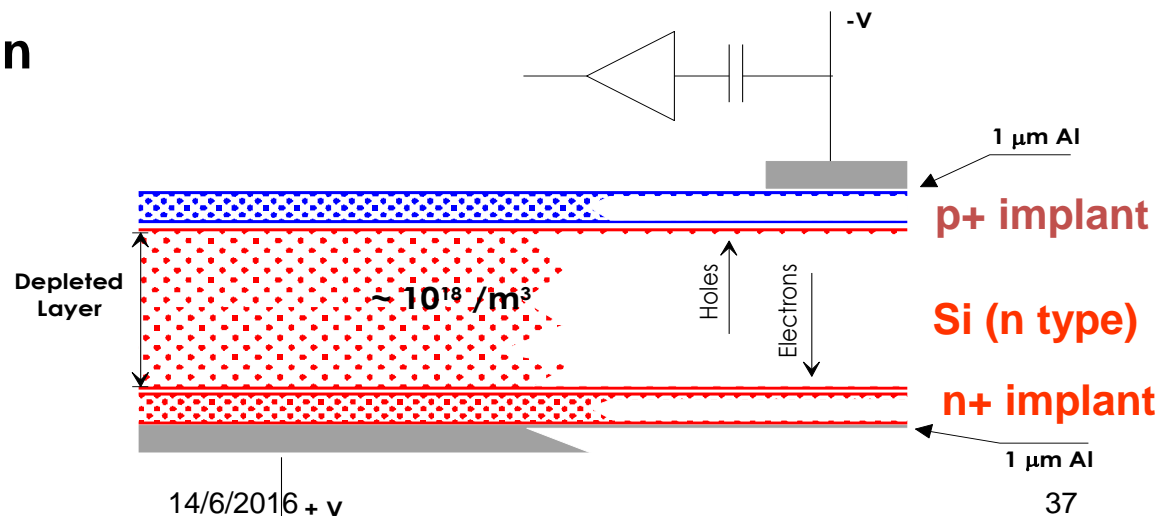
When a charged particle traverses Si, it produces ionizing and non-ionizing E loss. The latter produces radiation damage, while ionization loss causes the creation of e-hole pairs which produce the signal.

The number of pairs depends on the amount of ionization, thus on the charge and momentum of the incoming particle and thickness of material.

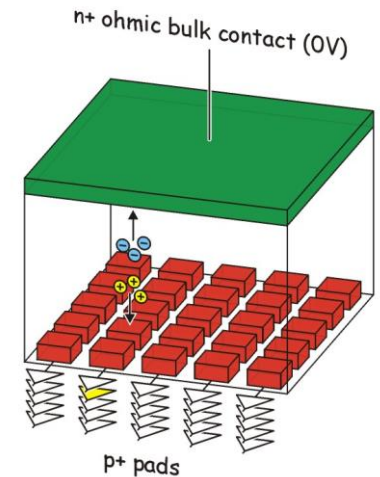
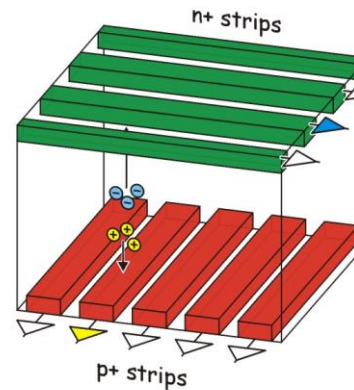
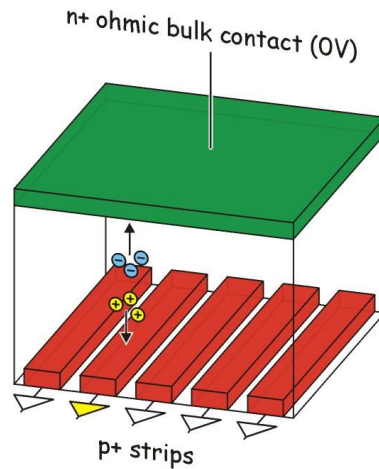
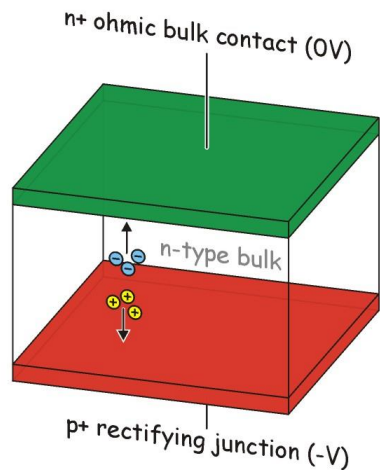


# • Semiconductores •

- Excelente **resolución energética**
  - Silicio: un par e-hole por cada 3.6 eV cada vez que pasa una partícula
  - Gas: se requieren 30 eV para ionizar una molécula de gas
  - Alta ionización primaria, no se necesita amplificación. El grosor de un detector típico (200-300  $\mu\text{m}$ ) resulta en  $3.2 \times 10^4$  e-/hole pares
- **Resolución espacial:**  $\sim 10\mu\text{m}$ , los mejores  $\sim 1\mu\text{m}$
- **Duración de la señal:**  $\sim 10\text{ns}$ , los mejores 1-2ns
- Alta **granularidad**
- **Finos**, se pueden colocar cerca del punto de interacción
- Resistentes a la **radiación**
- Proceso **industrial**



# • Strips VS Pixels •



## Strips

- Cada pista (strip) está conectada a un canal de lectura electrónica
- Primeros prototipos : ~1980
- Distancia entre pistas: ~ 10-100 micras
- Resolución espacial: ~micras, midiendo la carga entre pistas adyacentes (Cluster CoG)

## Pixels

- Resolución 2D
- Primeros prototipos : ~1990
- Pixel (en HEP): ~50  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$
- Se utilizan para:
  - Tracking = Rastrear partículas: detección de partículas cargadas individuales
  - Imaging = contar/integrar partículas o  $\gamma$

# • Pixels •

**Su desarrollo depende íntimamente del progreso en microelectrónica y las tecnologías de interconexión (sensor y chip)**

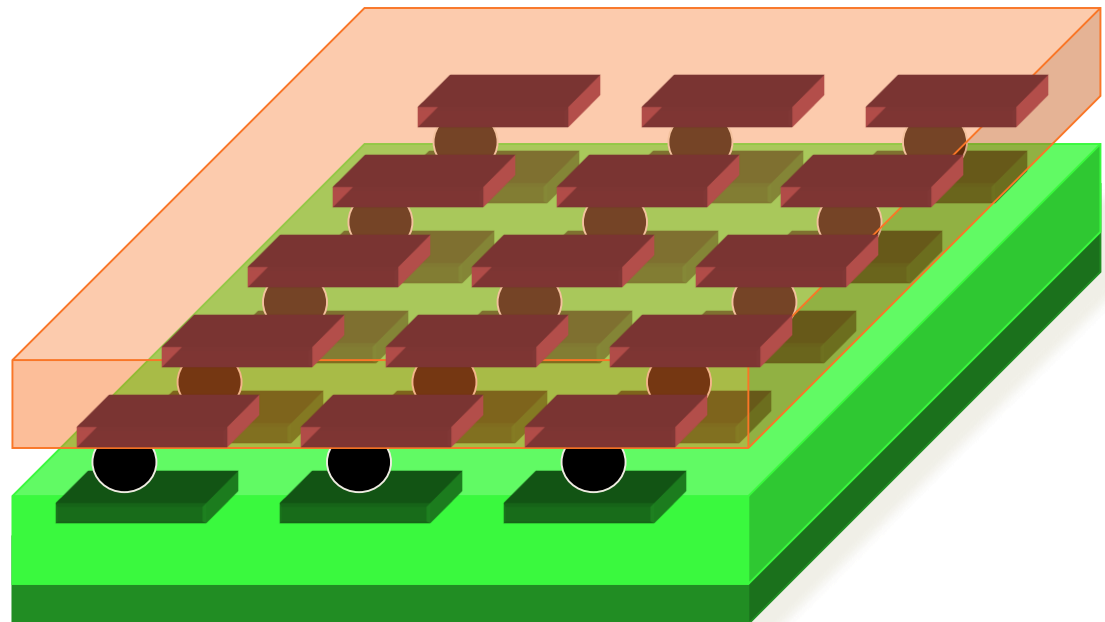
- Cada célula se conecta a un canal de lectura electrónica
- El tamaño de la microelectrónica de lectura debe coincidir con el tamaño de la celda píxel

## **Detectores Pixel Híbridos**

**Readout Chip**

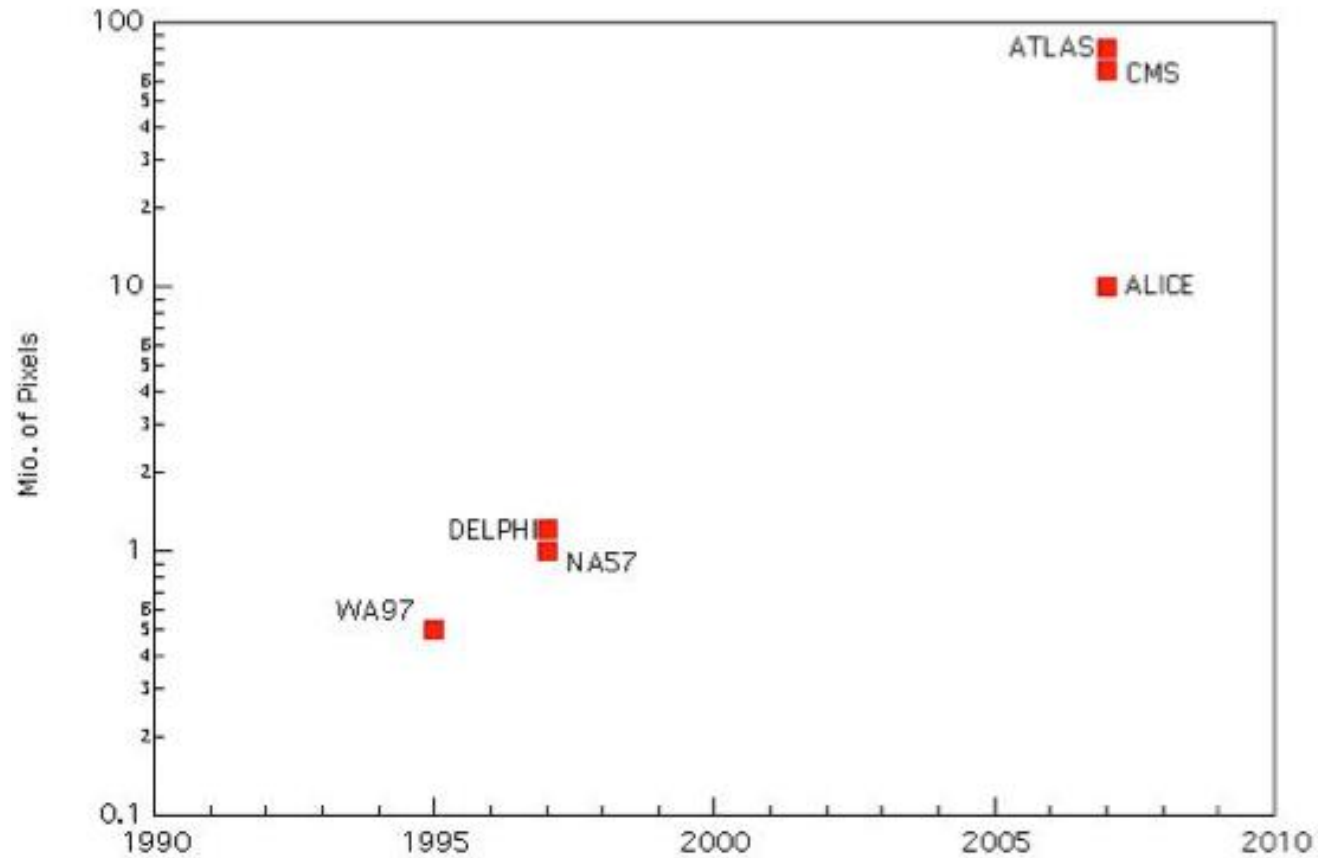
**Bump Bonds**

**Si Sensor**



# • Hybrid Silicon @ LHC •

Slide: P.Riedler (CERN)





# ATLAS, Barrel SCT module

Hybrid assembly  
with readout chips

12.8 cm

4 Silicon sensors

280  $\mu\text{m}$  thick

2.3° stereo angle  
Overlap in  $\phi$  &  $z$  to  
adjacent modules

6 binary readout  
chips on either  
sensor side;  
sig:noise = 14:1

768  $p^+$  microstrips Cell  
size: 80  $\mu\text{m}$  [ $\phi$  pitch]  $\times$  13  
cm [ $z$ ]

Overall  $6.3 \cdot 10^6$  channels

Be module baseboard  
with mounting points &  
central TPG

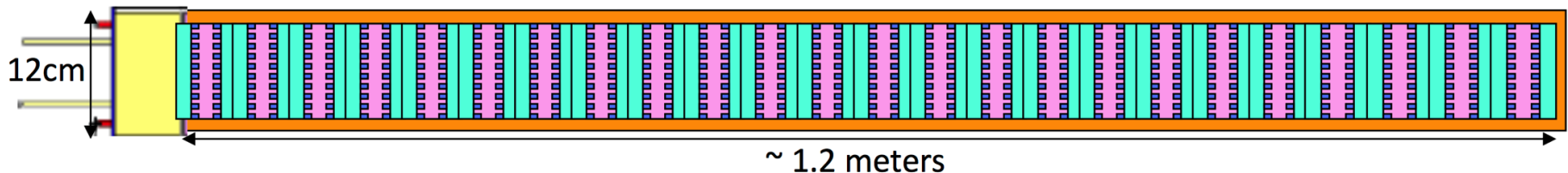
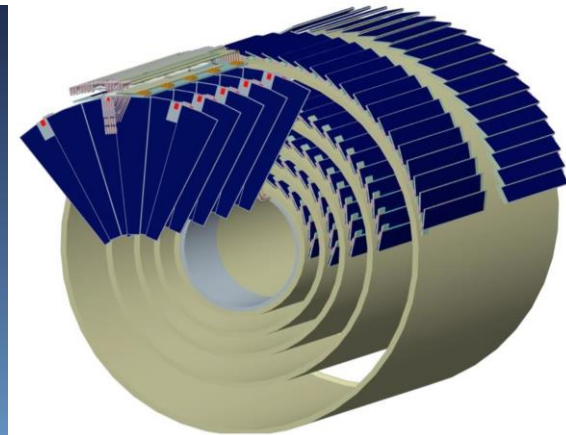
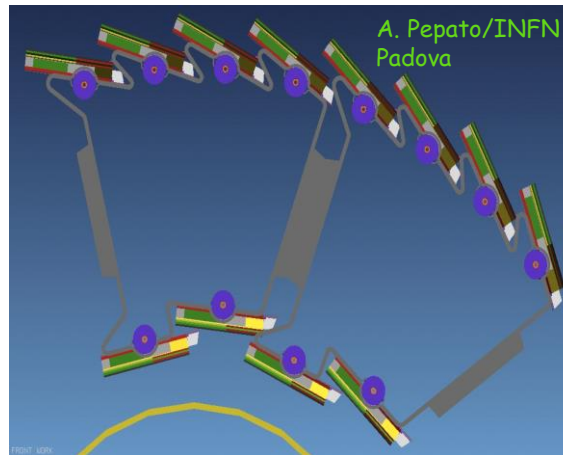
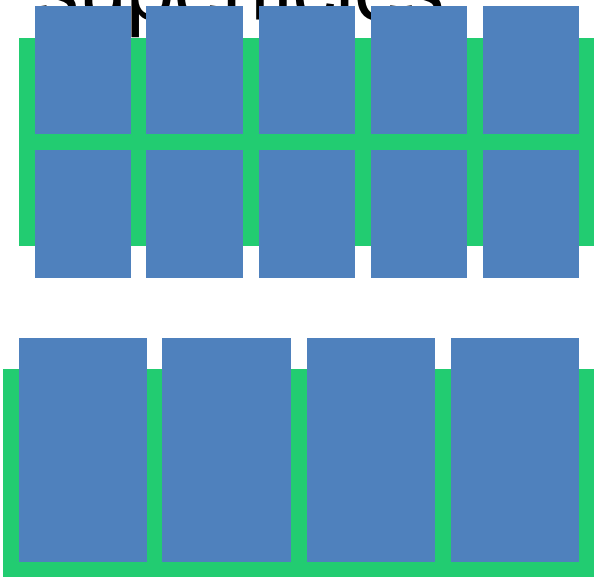
TPG (thermal pyrolytic  
graphite) plate for sensor  
cooling

Connector  
Power & data

Fully equipped double sided electrical module with baseboard and readout hybrids

# • Sistemas •

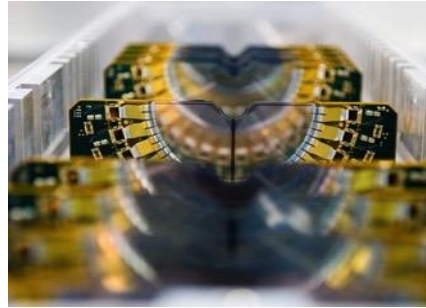
- Cómo cubrir eficazmente grandes superficies



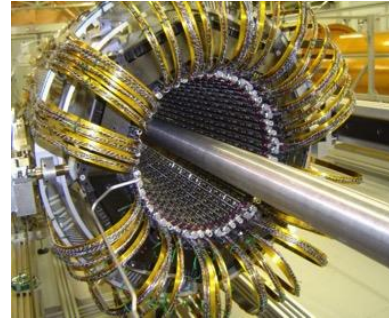
# • Silicon @ LHC •



**ALICE Pixel Detector**



**LHCb VELO**



**ATLAS Pixel Detector**



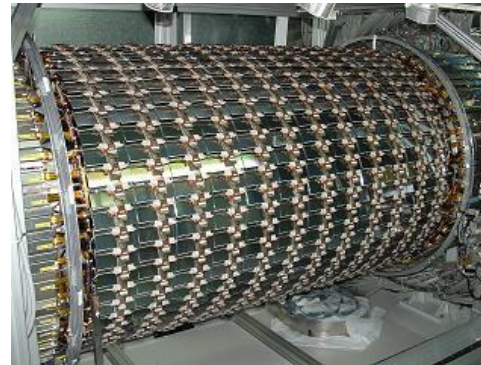
**CMS Pixel Detector**



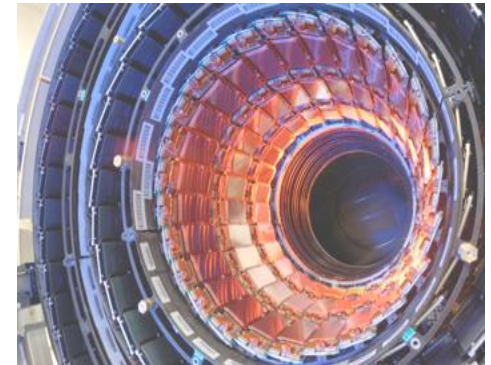
**ALICE Drift Detector**



**ALICE Strip Detector**



**ATLAS SCT Barrel**



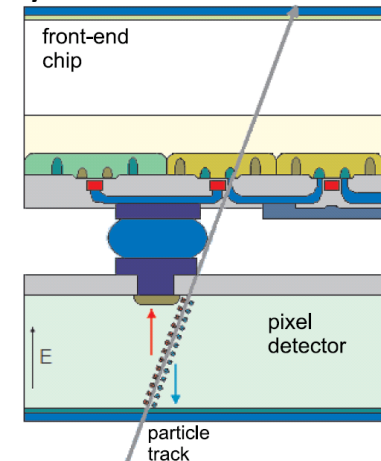
**CMS Strip Tracker IB**

# • Pixels Monolíticos •

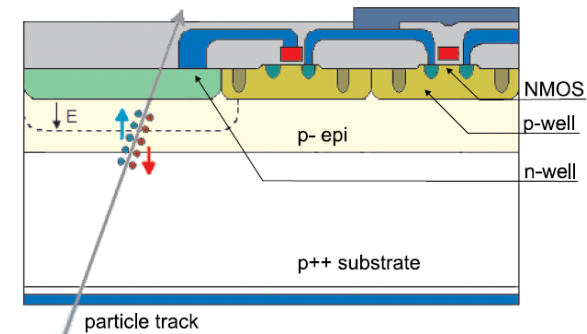
## Detección de radiación en el circuito CMOS (~90's)

- + El proceso de la señal se integra en el sensor (diseño compacto)
- + Celdas (5-50 $\mu\text{m}$ )
- + No existen interconexiones externas
- + Sistemas ligeros, finos  $\sim 20\mu\text{m}$
  
- Señal  $\sim 80\text{e-h}/\mu\text{m}$ :  $< 1000\text{ e-h}$
- Menos resistentes a la radiación que los sistemas híbridos
- Proceso de fabricación complejo

Hybrid Pixel Detector



CMOS (Pixel) Detector



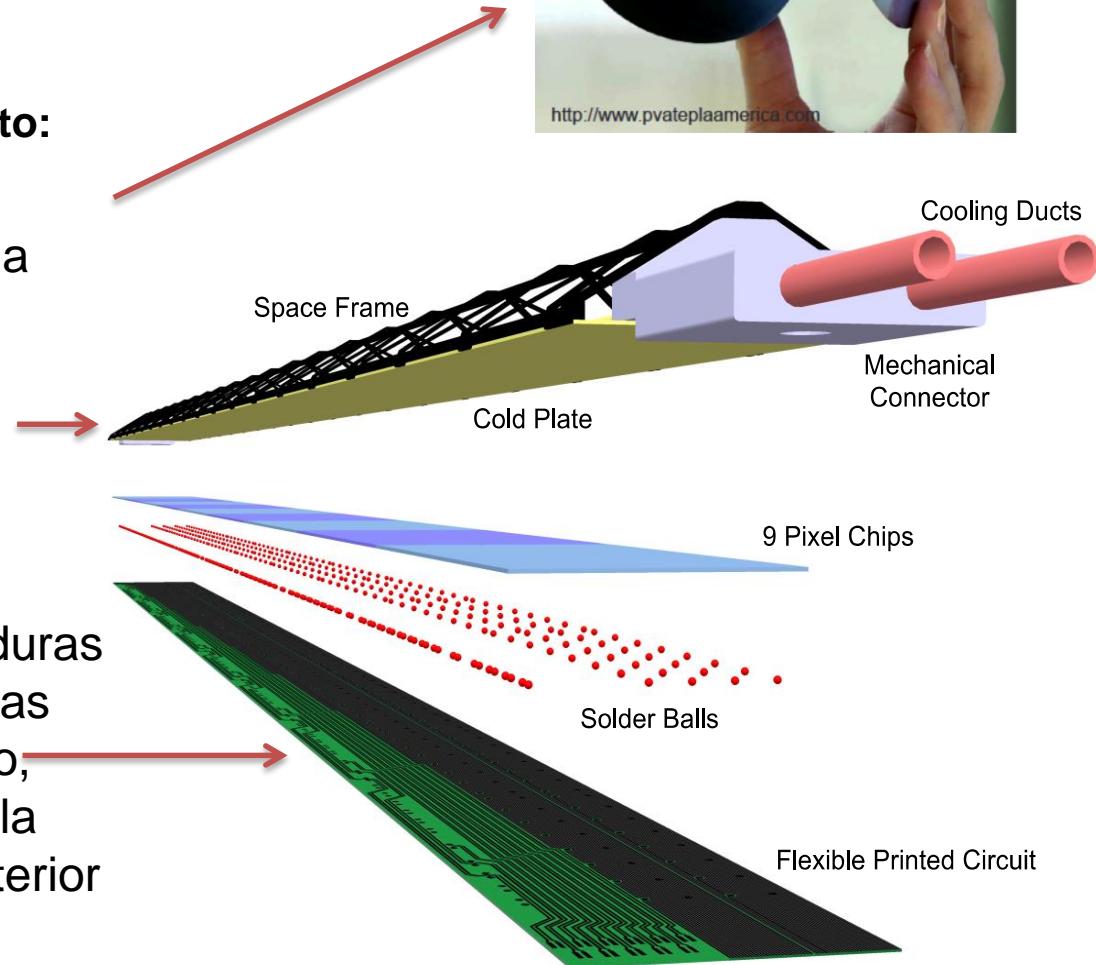
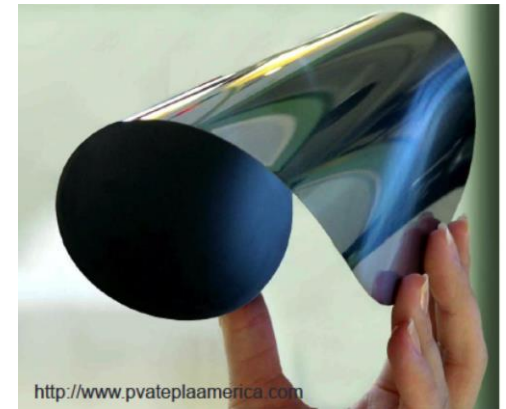
Existen muchos otros tipos de detectores pixel (Thin Film on ASIC, DEPFET, CCD) , pero están en una fase inicial de desarrollo o aun no se han utilizado en HEP

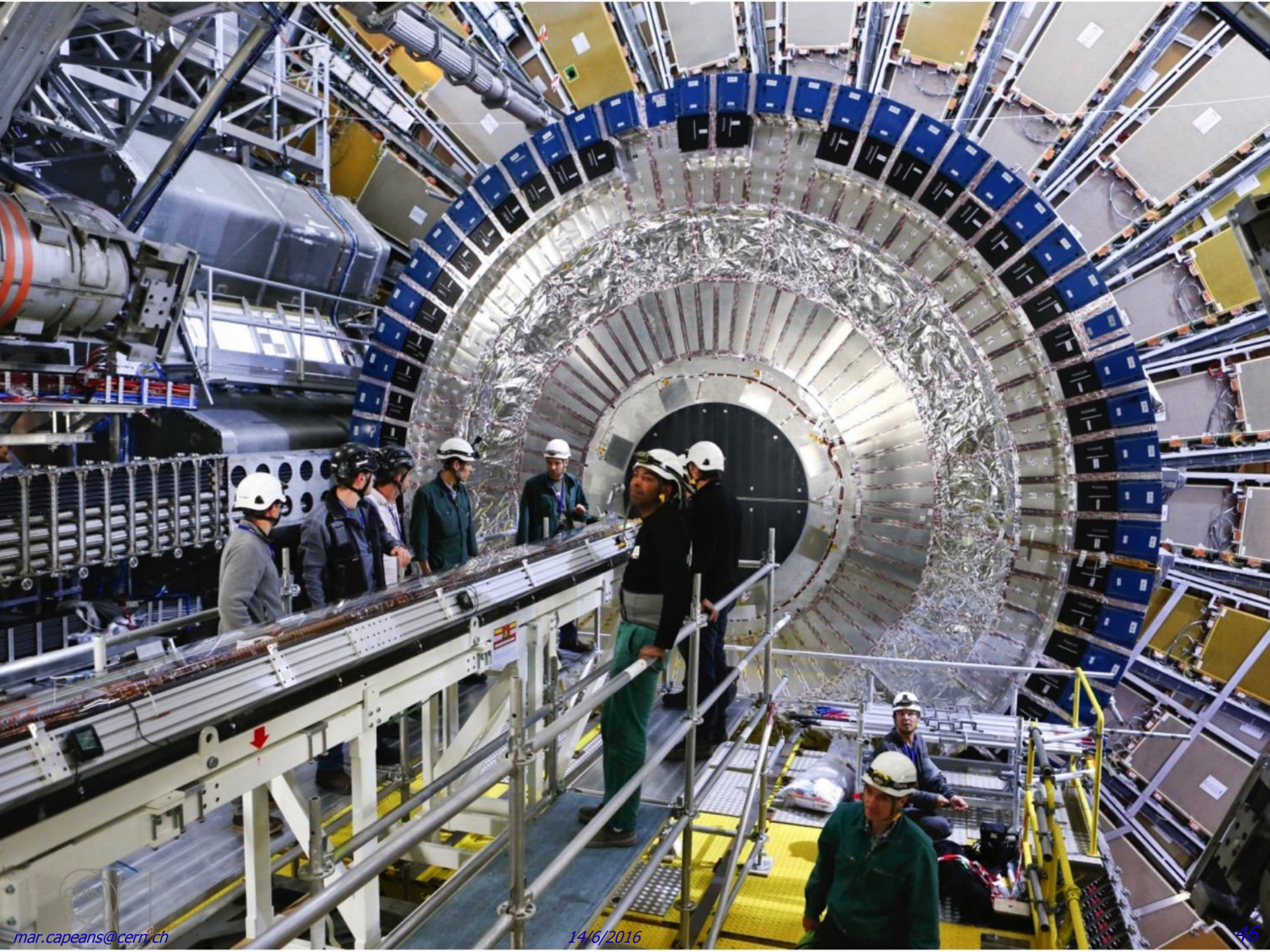
# Tendencias

## ALICE ITS

Detector súper ligero, súper compacto:

- Sensores de silicio de  $50\ \mu\text{m}$  de espesor: incluye los sensores y la electrónica de lectura
- Integración de la estructura mecánica con el sistema de refrigeración de los modules
- Optimización de los servicios: sensores conectados (via soldaduras laser) a cables realizados con tiras de poliamida y pistas de aluminio, que alimentan la electrónica y a la vez transmiten las señales al exterior

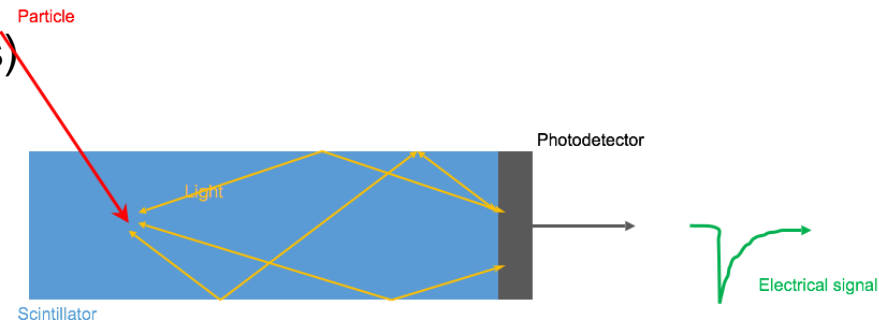




# • Centelleadores •

- Centelleadores son materiales que produzcan chispas o destellos de luz cuando la radiación ionizante pasa a través de ellos. La partícula cargada excita los átomos en el centelleador, e- vuelve a estado fundamental emitiendo un fotón
- Tipos de centelleadores
  - Inorganic crystalline scintillators (NaI, CsI, BaF<sub>2</sub>...)
  - Nobel Gas (Ar)
  - Organic (Liquids or plastic scintillators)

- Multitud de geometrías

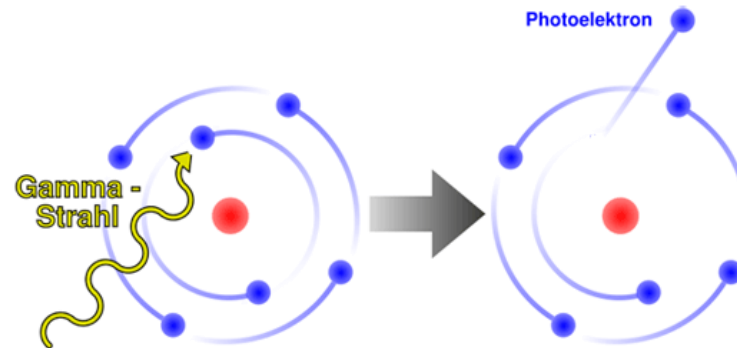


- La cantidad de luz producida en el centelleador es muy pequeña. Debe ser amplificada para que pueda ser registrada.

# • Photo-detectors •

**Objetivo: convertir la luz en señales electrónicas detectable**

**Principio: Uso del efecto fotoeléctrico para convertir fotones en fotoelectrones**



Muchos materiales fotosensibles son semiconductores, pero este efecto también pueden observarse en gases y líquidos.

Detección de fotones implica a menudo materiales como K, Na, Rb, Cs (metales alcalinos), que tienen una electronegatividad muy pequeña, por tanto una tendencia más alta para liberar electrones.



# SciFi in numbers

Fibre mat

↓ × 8

SciFi Module

↓ × 12

Detector Layer

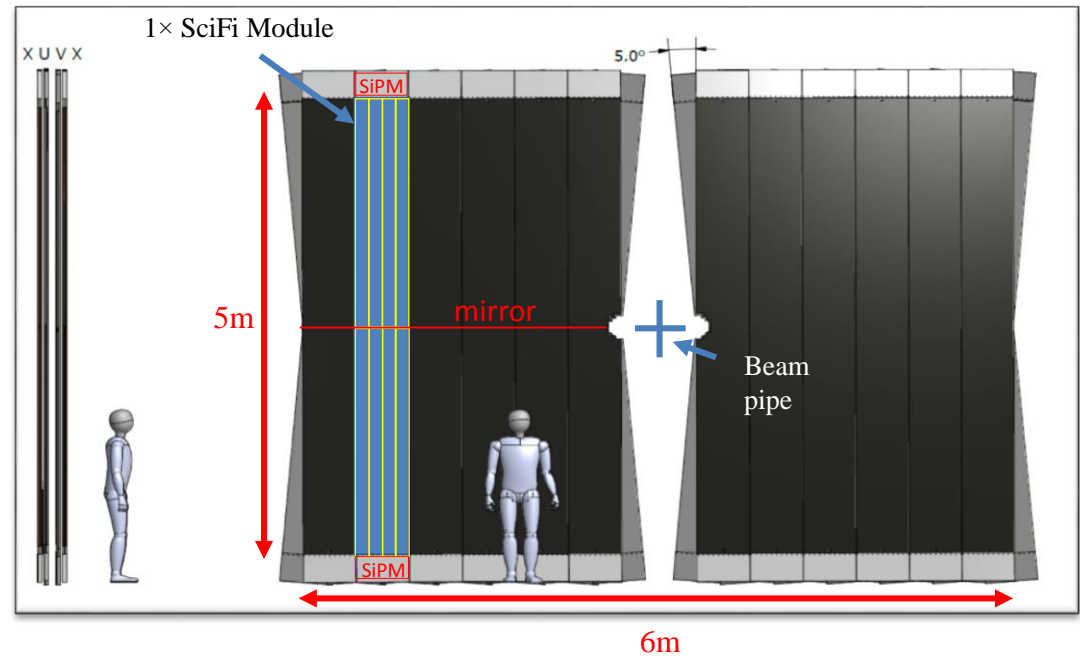
× 4 (stereo angles  
0°, +5°, -5°, 0°)

↓

Tracking Station

↓ × 3

## Scintillating Fibre Tracker



- 1152 mats, 144 modules
- **360 m<sup>2</sup>** total area
- almost **11,000 km** of fibre
- **~590'000** SiPM channels

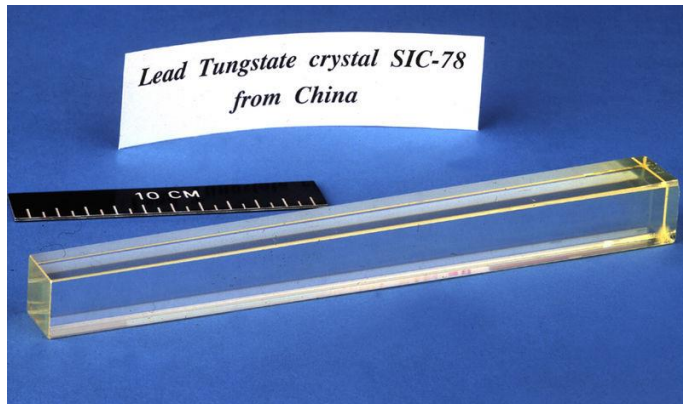
# • Calorímetros •

- El objetivo es medir la energía de la partícula entrante (partículas neutras o cargadas)
- Para las partículas (absorben toda su energía) en el volumen del detector –en varios puntos-... excepto los muones (pesado) y neutrinos (interacción débil).
- 2 tipos de calorímetros
  - Electromagnético (fotón y electrón showers)
  - Hadrones (pión, protón, neutrón ...)
- 2 configuraciones
  - Calorímetro homogéneo: absorber = detector activo
  - Sampling Calorimeter: absorber intercalado con el detector activo

# • Calorímetros •

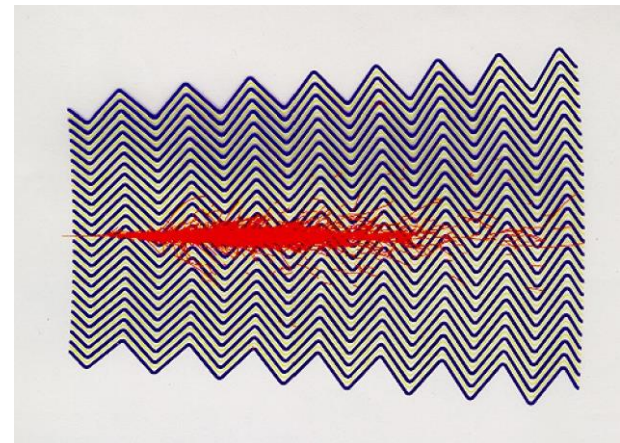
## Homogeneous EM Calorimeter (CMS)

- Excelente resolución energética
  - Toda la shower esta contenida el detector (no se pierde en el absorber pasivo)
- Inconvenientes
  - Granularidad limitada, no dan información de la forma de la shower en la dirección longitudinal



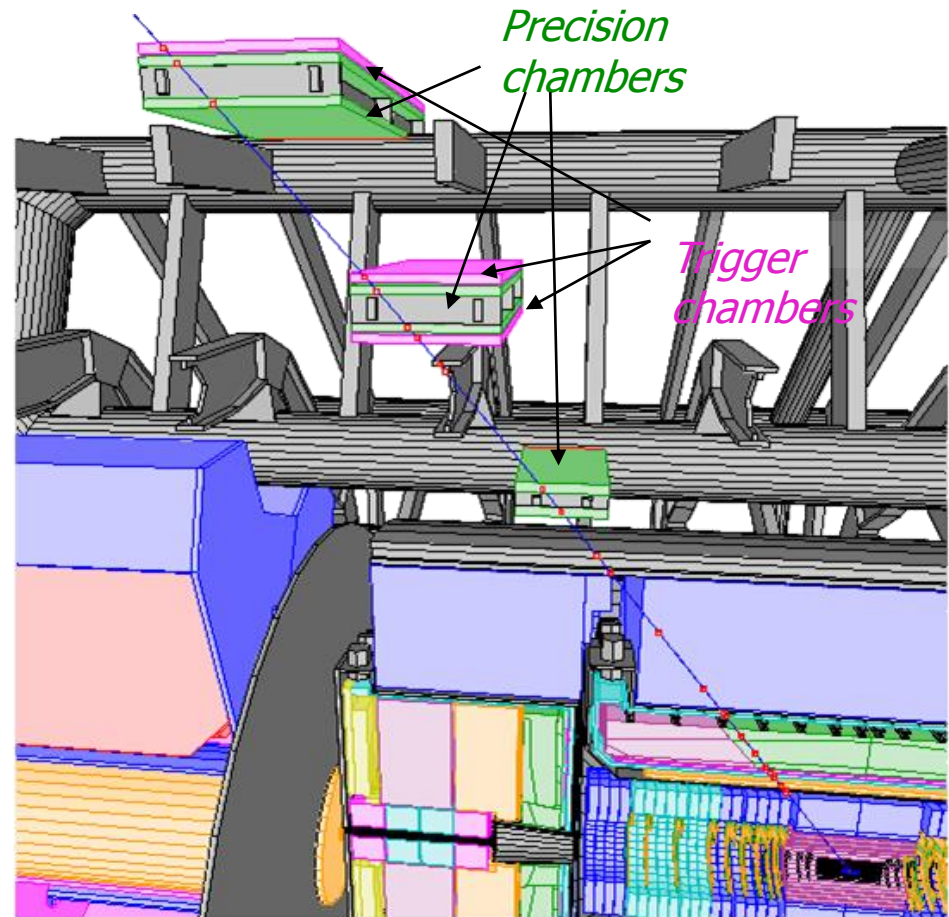
## Sampling EM Calorimeter (ATLAS)

- Absorbers: hierro, plomo... y gran variedad de detectores intercalados: detector de gas (MWPCs), centelleadores plasticos, LAr, LKr...
- ATLAS utiliza LAr con absorber de acero en forma de acordeón.
- El LAr se ioniza y la carga se recoge en pads – alta granularidad-

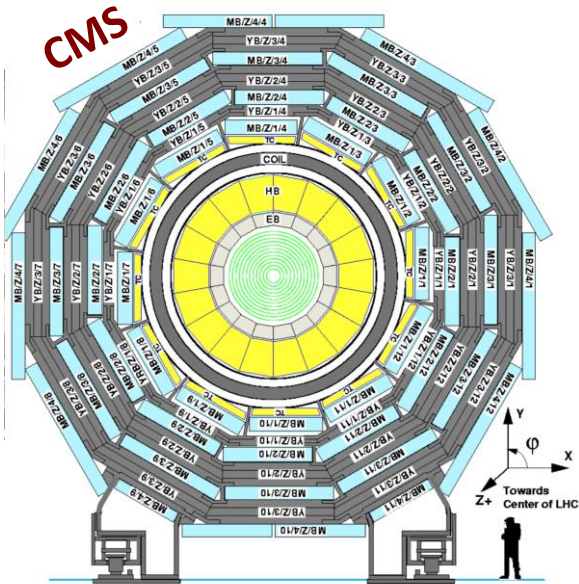


# • Detección de Muones •

- Los muones son partículas cargadas como los electrones y positrones, pero 200 veces más pesados.
- Debido a que los muones pueden penetrar varios metros de hierro sin interactuar, a diferencia de la mayoría de las partículas no son paradas por los calorímetros. Por lo tanto, las cámaras para detectar muones se colocan en el borde mismo del experimento y son los muones las únicas partículas que dejan una señal.
- Principio de detección: detectores de ionización (gas), similar a los trackers de precisión, pero por lo general de menor resolución espacial.
- Son detectores rápidos y son parte del sistema de trigger para seleccionar evento



# • Detección de Muones •



## DRIFT TUBES (DT)

Coertura central  
Tracking ( $100 \mu\text{m}$ ) y trigger

*Tecnología 'tradicional'*

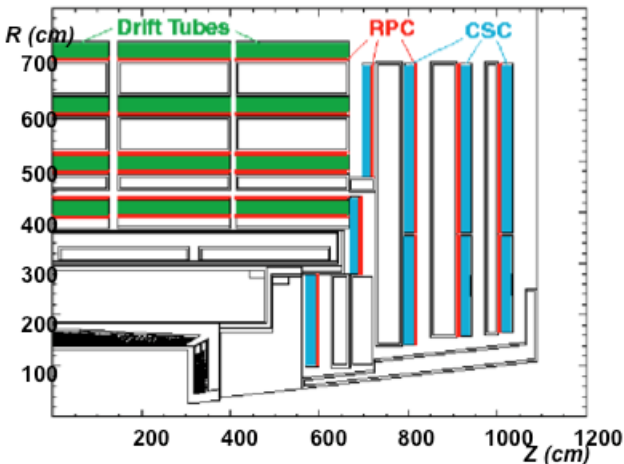
## CATHODE STRIP CHAMBERS (CSC)

Coertura hacia delante ( $6000 \text{ m}^2$ )  
Tracking ( $1 \text{ mm}$ ) y trigger  
540 detectores,  $0.5 \text{ MCanales}$

*Diseñados para operación en campo magnético intenso y fondo de neutrones  $\sim 1 \text{ kHz/cm}^2$*

## RESISTIVE PLATE CHAMBERS (RPC)

Coertura central y hacia delante  
Trigger redundante ( $3 \text{ ns}$ )  
612 detectores

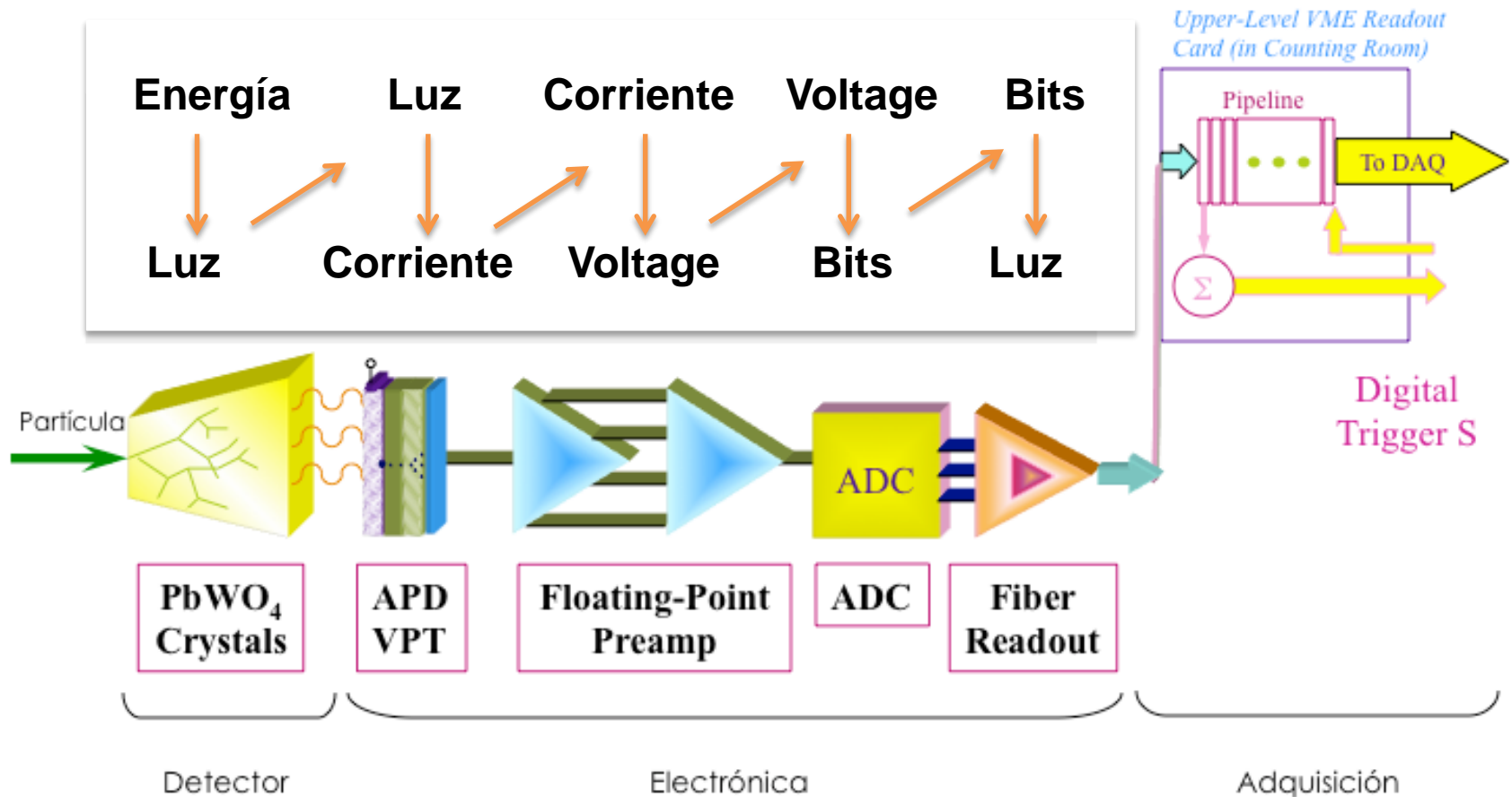




**ATLAS Muon system**  
**12 000 m<sup>2</sup>**  
**1.1 Mchannels**  
**Alignment precision  $\leq \pm 30$  mm**



# • Señales •

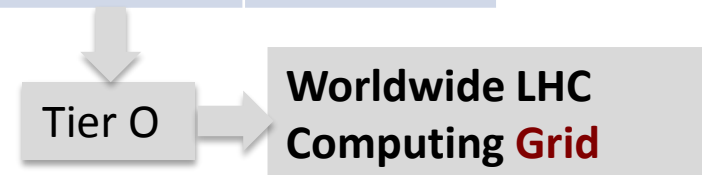




# • Datos y Filtros •

- Si todos los datos generados se registrasen, se necesitarían 100,000 CDs / s
- Equivalen 50 000 millones de llamadas de teléfono realizadas al mismo tiempo
- ATLAS solo graba una fracción de todos los datos, que equivale a 27 CDs / min
- Primera selección de datos con un sistema de trigger en 3 niveles:

Trigger	Método	Entrada Sucesos/s	Salida Sucesos/s	Factor de reducción
Nivel 1	HW (F, Calo)	40 000 $10^3$	100 $10^3$	400
Nivel 2	SW (RoI, ID)	100 $10^3$	3 $10^3$	30
Nivel 3	SW	3 $10^3$	0.2 $10^3$	15



# • Experimentos •

- **El detector ATLAS:**

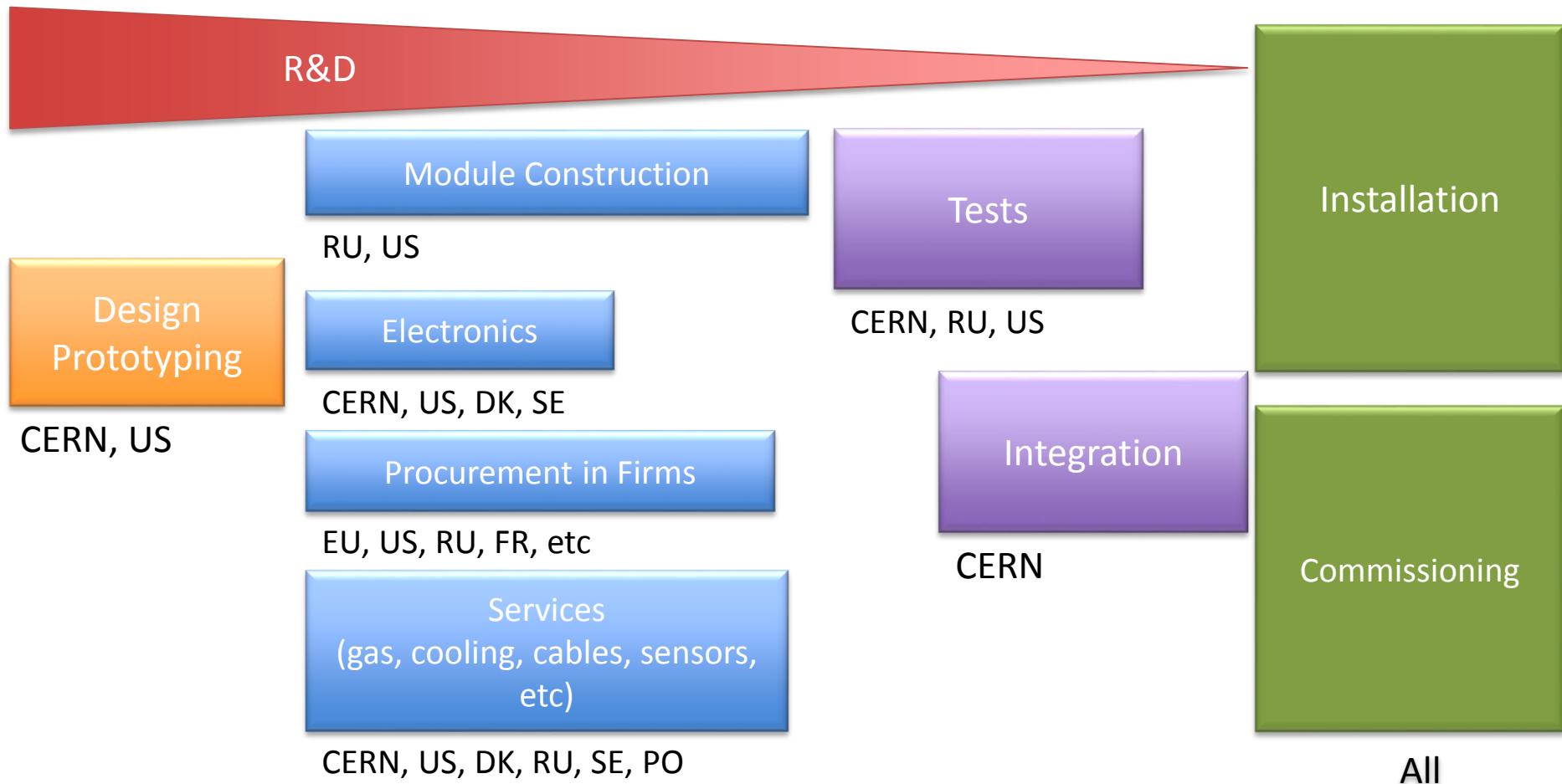
- 25 m de diámetro, 46 m de largo, 7 000 t
- Para la construcción de la caverna experimental se extrajeron 300 000 t de roca
- La ingeniería civil empezó en 1997, la infraestructura (3000 km de cables) y los detectores se empezaron a instalar en 2003. Primeros datos de física en 2010.
- La construcción de los detectores (diseño, construcción, tests) llevó ~20 años
- 3000 PCs analizan los datos en tiempo real, y el análisis detallado se realiza con ~ 100 000 PCs

- **Los experimentos internacionales**

Experimento	Países	Instituciones	Científicos
ALICE	36	131	~1200
ATLAS	38	177	~ 3000
CMS	42	182	~ 3000
LHCb	16	65	~ 700

# • Distributed/Collaborative Projects •

Example, the ATLAS Transition Radiation Tracker *(non-exhaustive list!)*

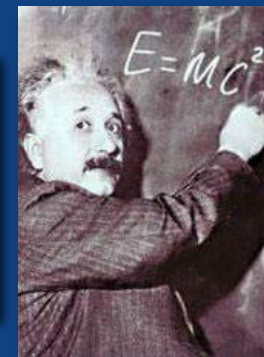




# La misión del CERN

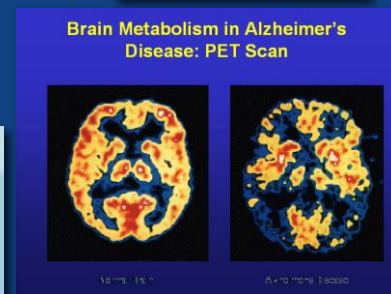
## ❑ Push back the frontiers of knowledge

E.g. the secrets of the Big Bang ...what was the matter like within the first moments of the Universe's existence?



## ❑ Develop new technologies for accelerators and detectors

Information technology - the Web and the GRID  
Medicine - diagnosis and therapy



## ❑ Train scientists and engineers of tomorrow

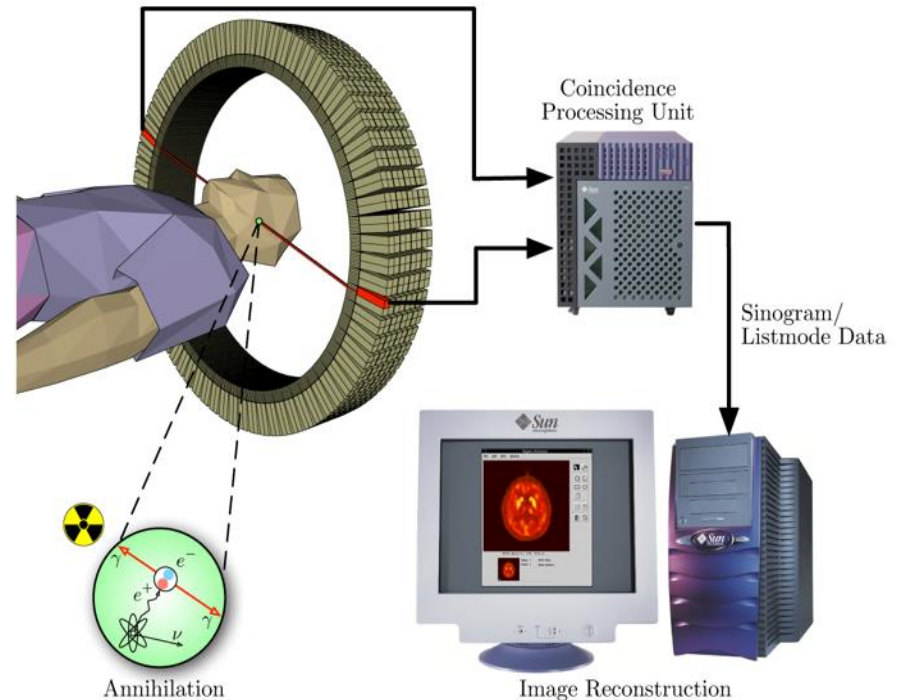


## ❑ Unite people from different countries and cultures



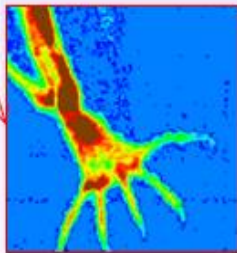
# • Escáner (PET y antimateria) •

- En 1932 Anderson descubre la antipartícula del electrón (predicha por Dirac en 1928)
- El fluor-18 y el Carbonio-11 emiten positrones que se aniquilan al encontrar electrones produciendo 2 fotones
- Décadas después este proceso ha encontrado una aplicación en el PET (Tomografía por Emisión de Positrones) para el diagnóstico en oncología y neurología



# • Campos de Aplicación •

Radiography with GEM (X-rays)



## **Fast and Thermo Neutron Detection**

*Non-destructive diagnostic, Biology, Nuclear plants, ...*

## **Xray Low Energy**

*Radioactive waste...*

## **Pixelated GEMs**

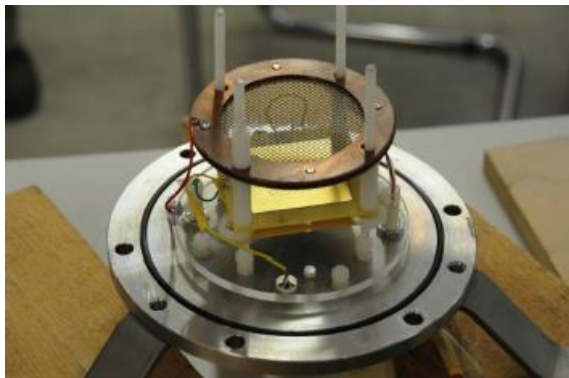
*Microdosimetry, Direct measurements with real tissue, Radon monitors....*

## **Gamma High Fluxes**

*Radiotherapy...*

## **High Intensity Beam Monitors**

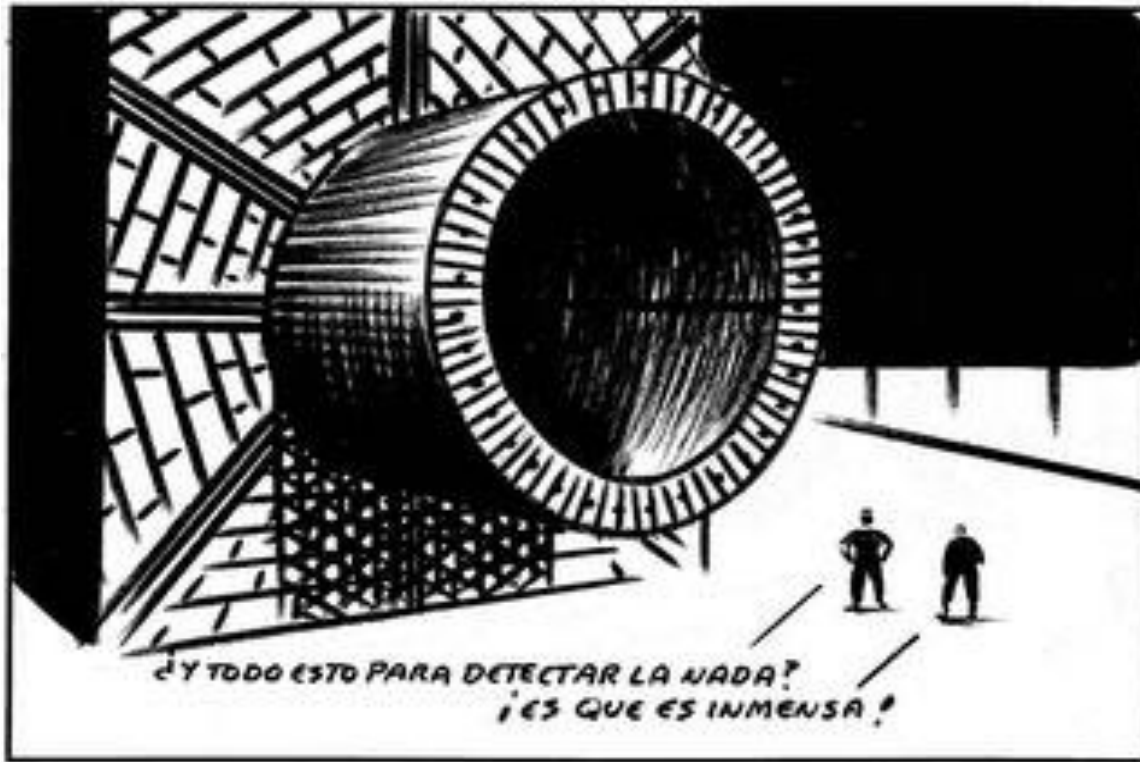
*Hadrontherapy, Ions beam monitoring...*



Highly sensitive GEM-based UV  
flame and smoke detector

*RETGEM-based detectors are able to  
reliably detect a 1.5 m<sup>3</sup> fire at a ~1 km  
distance*

*Ref. <http://arxiv.org/pdf/0909.2480.pdf>*



elroto@inicia.es

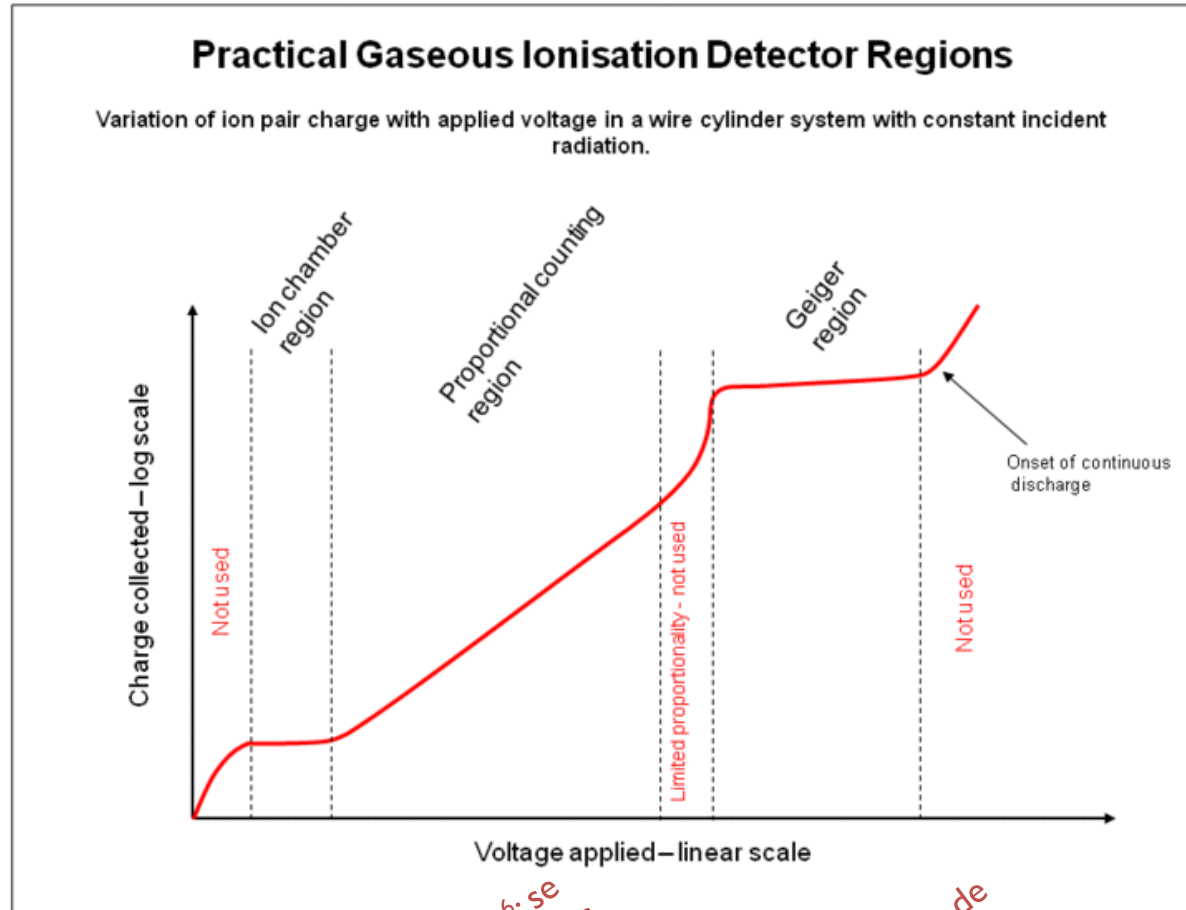


- *The Particle Detector BriefBook* <http://www.cern.ch/Physics/ParticleDetector/BriefBook/>
- CERN summer student lectures by W.Riegler:  
<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=134370>
- ICFA Schools on Instrumentation
  - The last one:  
<http://fisindico.uniandes.edu.co/indico/conferenceTimeTable.py?confId=61#20131125>
- **BOOKS:**
- K. Kleinknecht - Detectors for Particle Radiation, C.U.P. 1990
- R.K. Bock & A. Vasilescu - The Particle Detector BriefBook, Springer 1998
- R. Fernow - Introduction to Experimental Particle Physics, C.U.P. 1986
- **W.R. Leo - Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer-Verlag 1987**
- G.F. Knoll - Radiation Detection and Measurement, Wiley 1989
- **CERN Notes:**
- Fabjan & Fischer - Particle Detectors CERN-EP 80-27, Rep. Prog. Phys. **43** (1980) 1003
- F. Sauli - Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers, CERN 77-



# Spare Slides

# • Regiones de Operación •

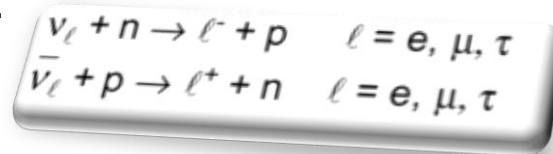


Recombinación  
Ionización (plateau)  
Ganancia hasta  $10^6$ ; se necesita amortiguar las avalanchas secundarias  
dispersión del campo E  
avalanchas secundarias  
avalanchas, alta emisión de fotones, breakdown

# • Neutrinos •

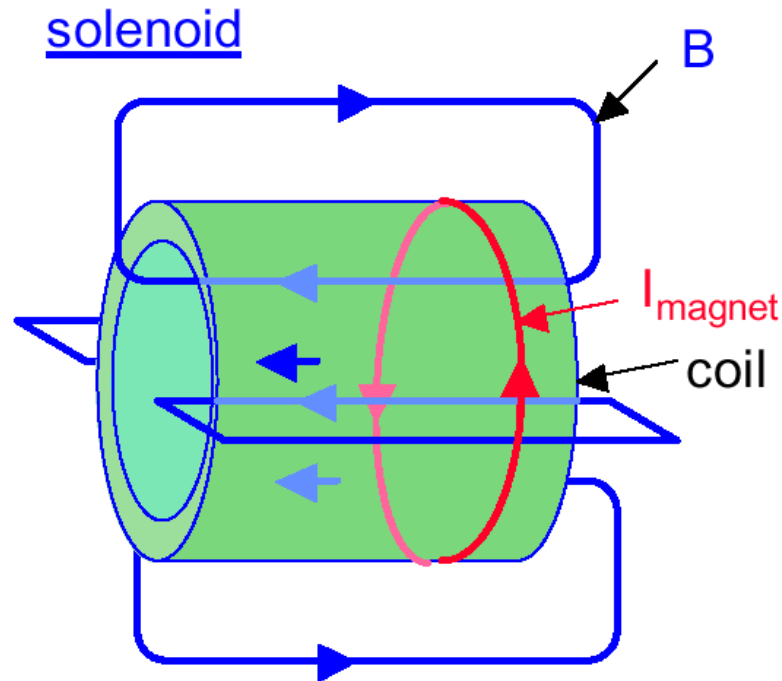
- Neutrinos interactúan ligeramente
- Para detectarlas, necesitamos primero una partícula cargada:

Reacciones posibles:

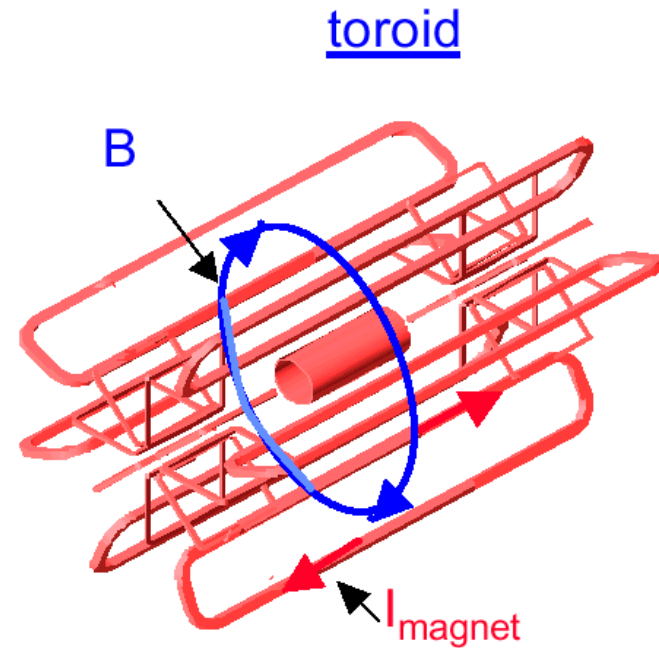


- Cross-section  $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$  es del orden  $10^{-43} \text{ cm}^2$ 
  - Eficiencia de detección  $\varepsilon_{\text{det}} = \sigma \times N^{\text{surf}} = \sigma \rho N_A d / A$
  - 1m hierro:  $\varepsilon_{\text{det}} \sim 5 \times 10^{-17}$
- La detección de Neutrinos requiere detectores enormes y muy pesados (kT) y flujos muy elevados de neutrinos
- En experimentos como los del LHC, detectores herméticos pueden detectar neutrinos indirectamente: se suma toda la energía visible y el momento, y se atribuye *missing energy and momentum* a los neutrinos

# • Campos magnéticos •

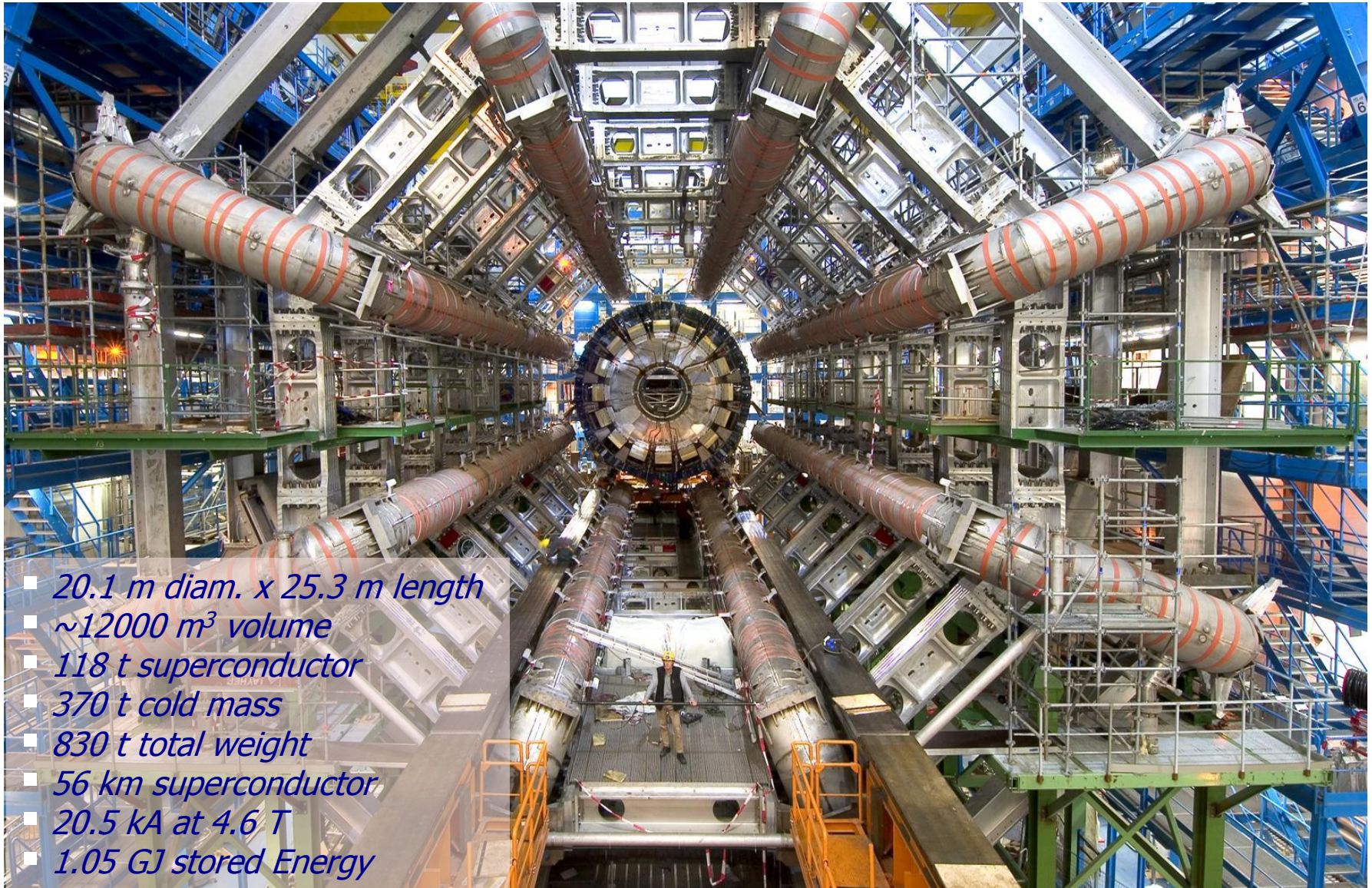


- + Large homogenous field inside coil
- Weak opposite field in return yoke
- Size limited (cost)
- Rel. high material budget



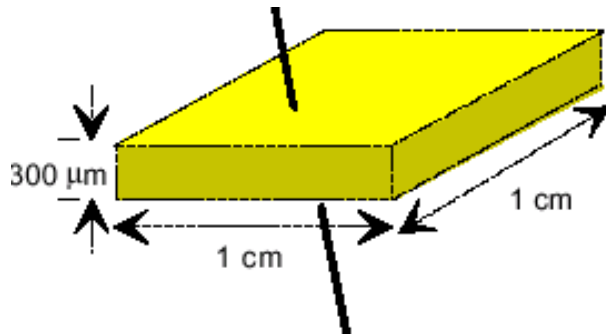
- + Field always perpendicular to p
- + Rel. large fields over large volume
- + No return yoke needed
- + Rel. low material budget
- Non-uniform field
- Complex structure

# • ATAS Toroidal Magnet •



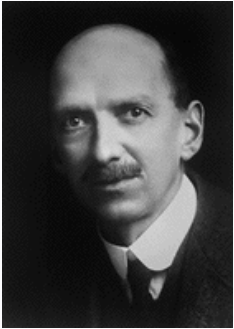
- 20.1 m diam. x 25.3 m length
- ~12000 m<sup>3</sup> volume
- 118 t superconductor
- 370 t cold mass
- 830 t total weight
- 56 km superconductor
- 20.5 kA at 4.6 T
- 1.05 GJ stored Energy

# • Semiconductors •



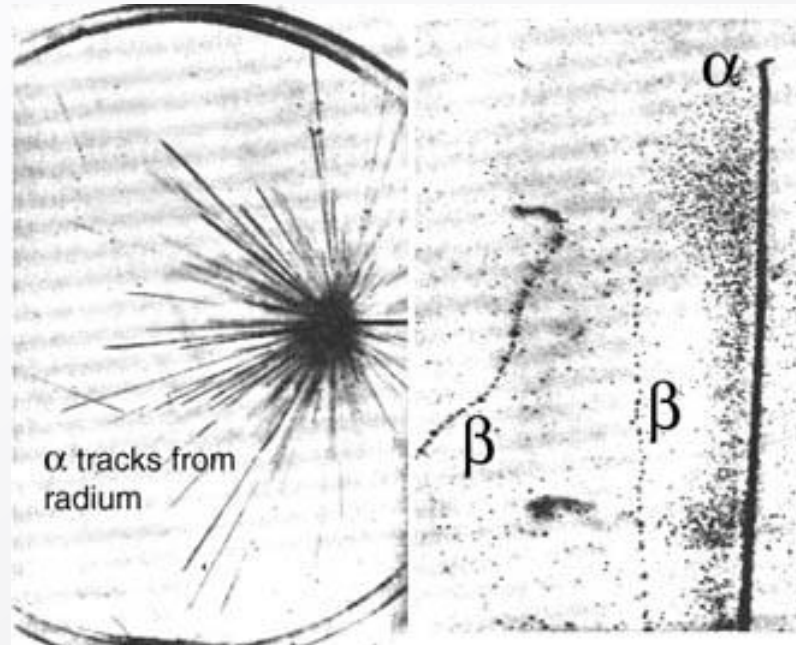
Current conduction in a semiconductor occurs through the movement of free electrons and "holes", collectively known as charge carriers. Adding impurity atoms to a semiconducting material, known as "doping", greatly increases the number of charge carriers within it. When a doped semiconductor contains mostly free holes it is called "p-type", and when it contains mostly free electrons it is a "n-type". Semiconductor materials used in electronic devices are doped under precise conditions to control the location and concentration of p- and n-type dopants. A single semiconductor crystal can have many p- and n-type regions; the p-n junctions between these regions are responsible for the useful electronic behaviour.

- Intrinsic silicon will have electron density = hole density;  $1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  (from basic semiconductor theory)
- In the volume above this would correspond to  $4.5 \times 10^8$  free charge carriers; compared to around  $3.2 \times 10^4$  produced by MIP (Bethe Bloch loss in 300 μm Si divided by 3.6 eV)
- Need to decrease number of free carriers; use depletion zone (reduce temperature would also help but one would need to go to cryogenic temperatures)



C. T. R. Wilson

## 1912, Cloud chamber



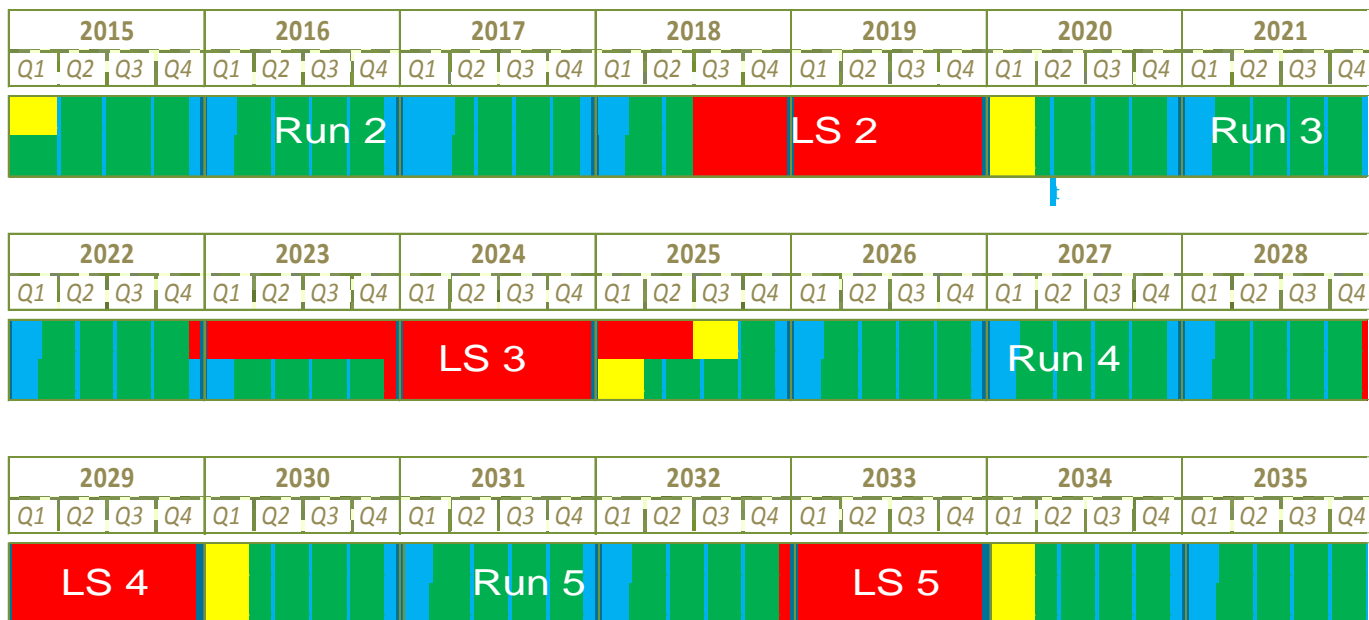
First tracking  
detector

The general procedure was to allow water to evaporate in an enclosed container to the point of saturation and then lower the pressure, producing a **super-saturated volume of air**. Then the passage of **a charged particle would condense the vapor into tiny droplets**, producing a visible trail marking the particle's path.

# • Futuro •

La prioridad es la explotación del LHC hasta su potencial máximo...

- 2008 – 2012      7-8 TeV ~ 2000 Higgs
- 2015 – 2018      13-14 TeV





# • Ex. Detector Upgrade LS1 •

## ATLAS Tracker (Pixel System Upgrade)

### Motivation:

- Pattern recognition robustness for higher track multiplicity
- Controlling detector occupancy at high luminosity
- Tracking precision for excellent vertex detector performance

### Actions

- Removed Pixel detector to surface
- Redone all services, doubling readout speed for Layer 2
- Repair non-working modules, recovered from 95% to 98%
- New, smaller beam pipe
- Added new innermost sensing layer (IBL), using most advanced technology for sensors, electronics, and thermal management
- Installed a new array of telescopes for beam monitoring



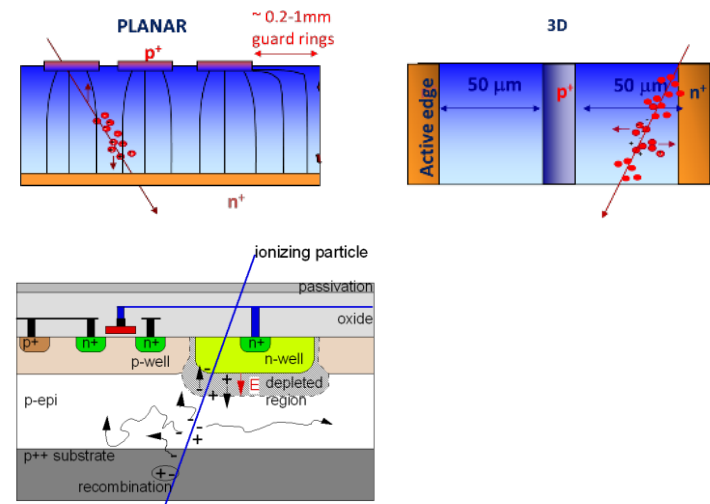
# • Further Detector Upgrades •

The discovery of the Higgs boson is the start of a major programme of work to measure this particle's properties with the highest possible precision for testing the validity of the Standard Model and to search for further new physics at the energy frontier

- Must replace inoperable detector elements (rad damage)
- Must upgrade electronics to cope with increased rates

## Trackers R&D Efforts

- Improved radhard
- Optimization of sensor thickness (reduced leak current) and geometry (better overlap, less material)
- 3D sensors
- Combine sensor and electronics in one chip (MAPS on CMOS)
- On detector thermal management (CO<sub>2</sub>)
- ...
- Scintillating Fiber Tracker (LHCb)



# • Detector Upgrades •

- **Calorimeters R&D Efforts**, towards rad tolerant systems
  - Rad-tolerant crystal scintillators (LYSO, YSO, Cerium Fluoride), WLS fibres in quartz capillaries, rad-tolerant photo-detectors (e.g. GaInP), change layout of tile calorimeter using WLS fibres within scintillator to shorten the light path length, High granularity Particle flow / Imaging Gas Calorimetry (CALICE)...
  - *Electronics upgrades*: On-detector front-end electronics with sufficient resolution and large dynamic range
- **Muon systems R&D Efforts**
  - Improved rate capability and timing, using novel detector technologies (e.g. MPGD)
- **Electronics**
  - Development of new front-end chips to cope with increased channel densities, develop high density interconnects, optimize power distribution, develop High speed links ( $\geq 10$  Gbps)
- **Trigger/DAQ/Offline computing**
  - New trigger strategies, processing, networks, storage, CPU, CLOUD-computing...