

Spanish Teacher Programme 2018

<https://indico.cern.ch/e/ESTP18-1>

Introducción a los Detectores de Partículas

Mar Capeans

CERN

June 26th 2018

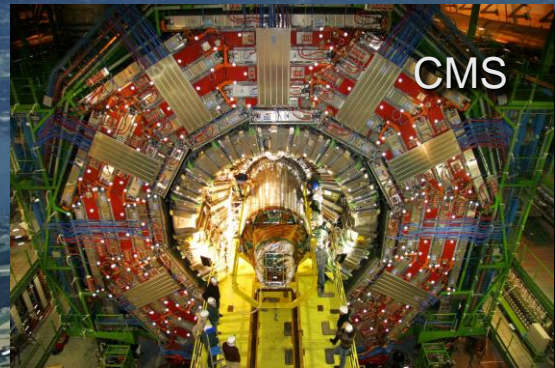
• Perspectiva de esta charla •

- Tecnologías de detectores de partículas
- Como se diseñan y utilizan los detectores en experimentos de Física de Partículas
- Tendencias, I+D detectores



- Visión más académica y en profundidad:
 - **CERN Summer students lectures** (5 horas sobre detectores):
<https://indico.cern.ch/event/632096/>
 - **Semiconductor Radiation Detectors** - Device Physics, G.Lutz, Springer
 - **Gaseous Radiation Detectors**, F.Sauli, Cambridge University Press, 2014
 - **Calorimetry**, R. Wigmans, Oxford Science Publications, 2000

New Era in Fundamental Science



CMS



LHCb



ATLAS



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

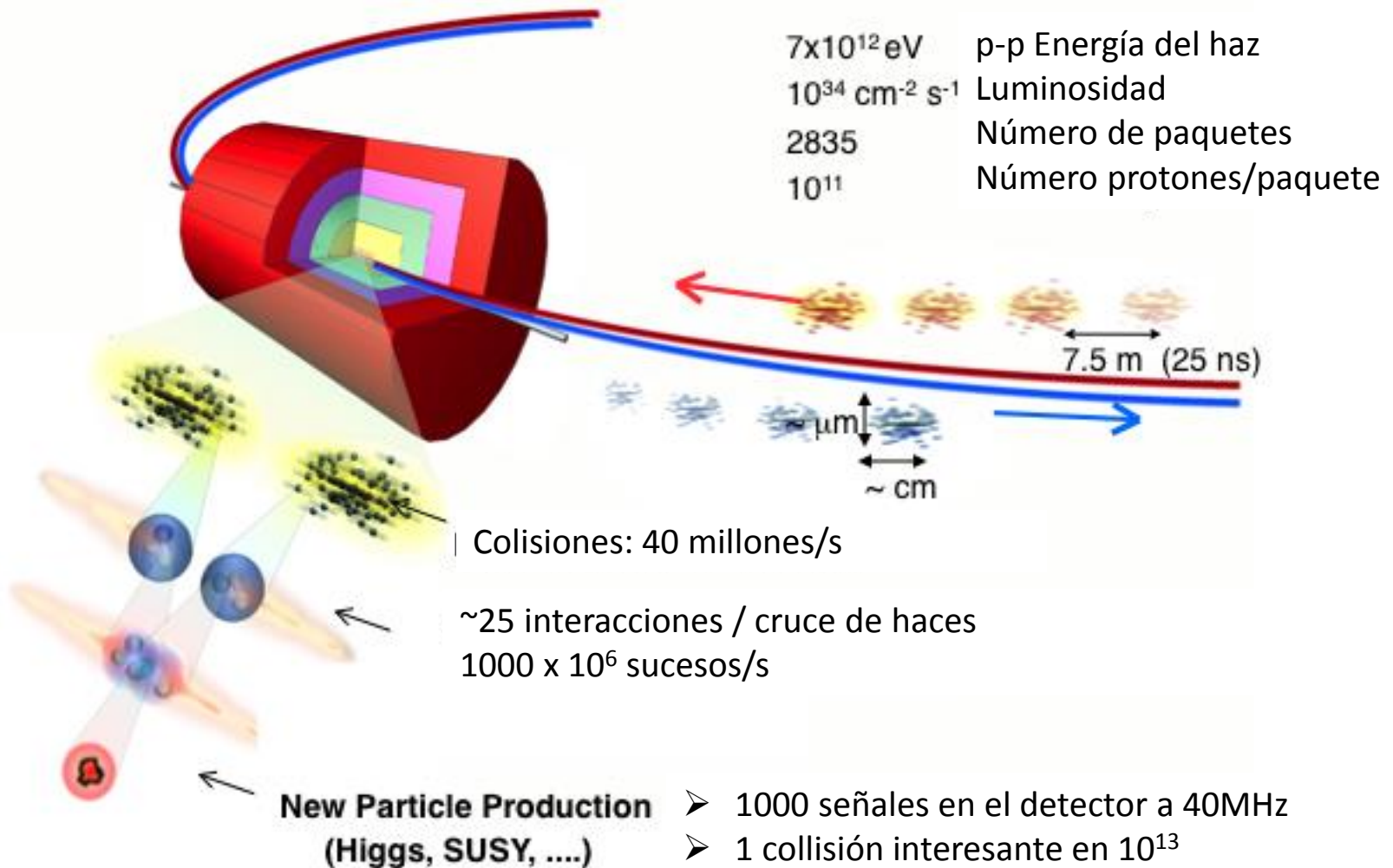


LHC ring:
27 km circumference



ALICE

• LHC •



• Condiciones de trabajo de los detectores en el LHC•

- Cruces cada 25 ns... **Detectores rápidos (ns)**...Lectura a 40 MHz ... 1 Pbytes/s de datos

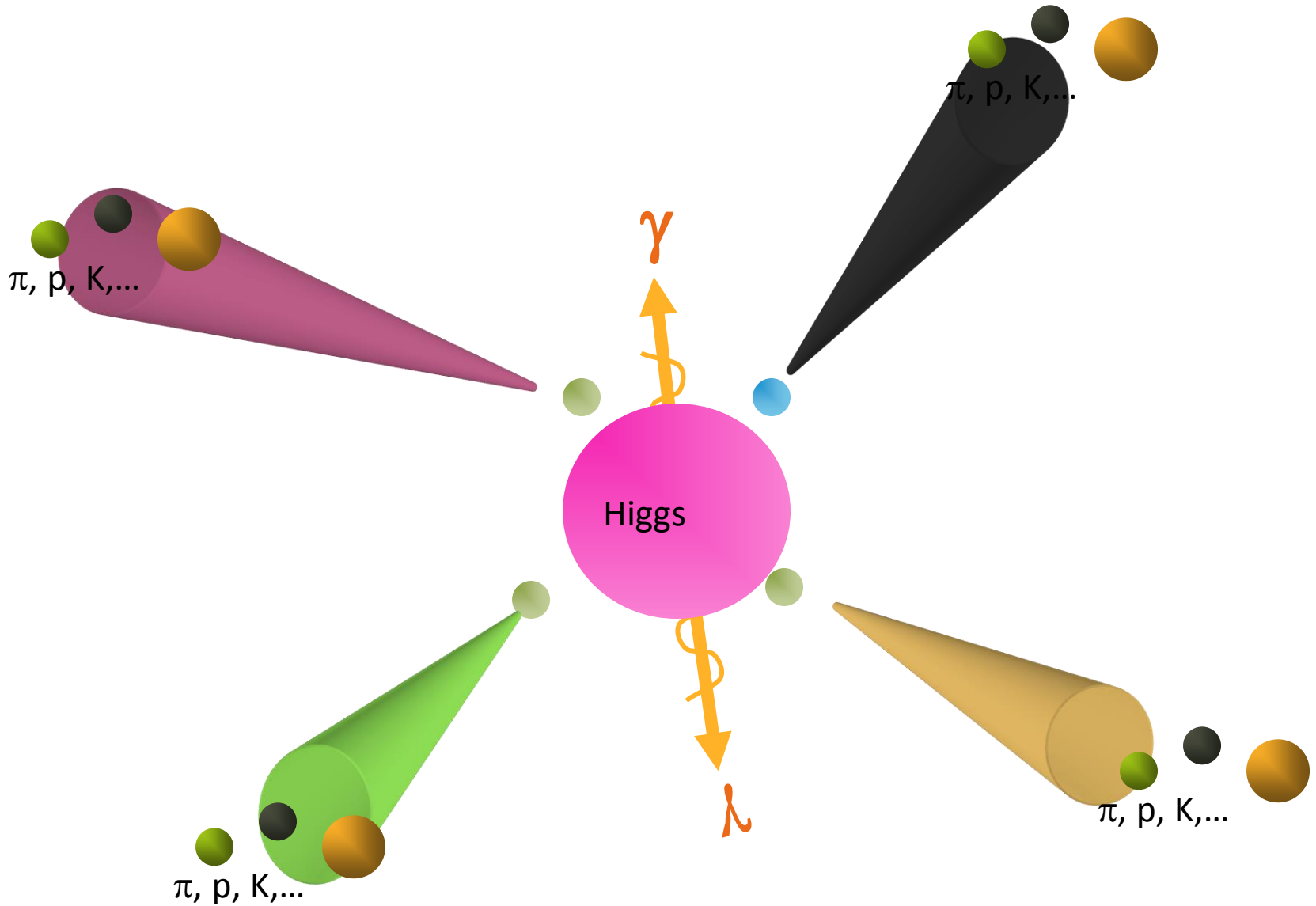
En cada cruce ~ 20 sucesos independientes superpuestos ~ 1000 partículas individuales que hay que identificar cada 25 ns ... **la alta densidad de partículas implica alta granularidad** en los detectores... **100 M canales/componentes activos**

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

• Suceso artístico •



• Suceso artístico •



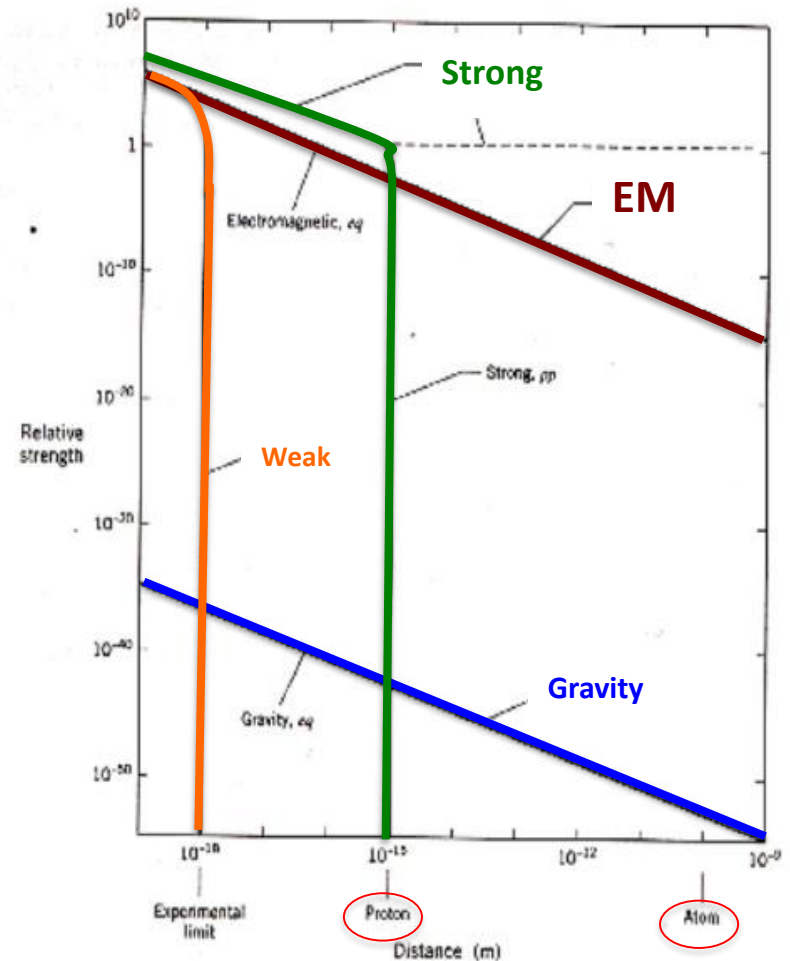
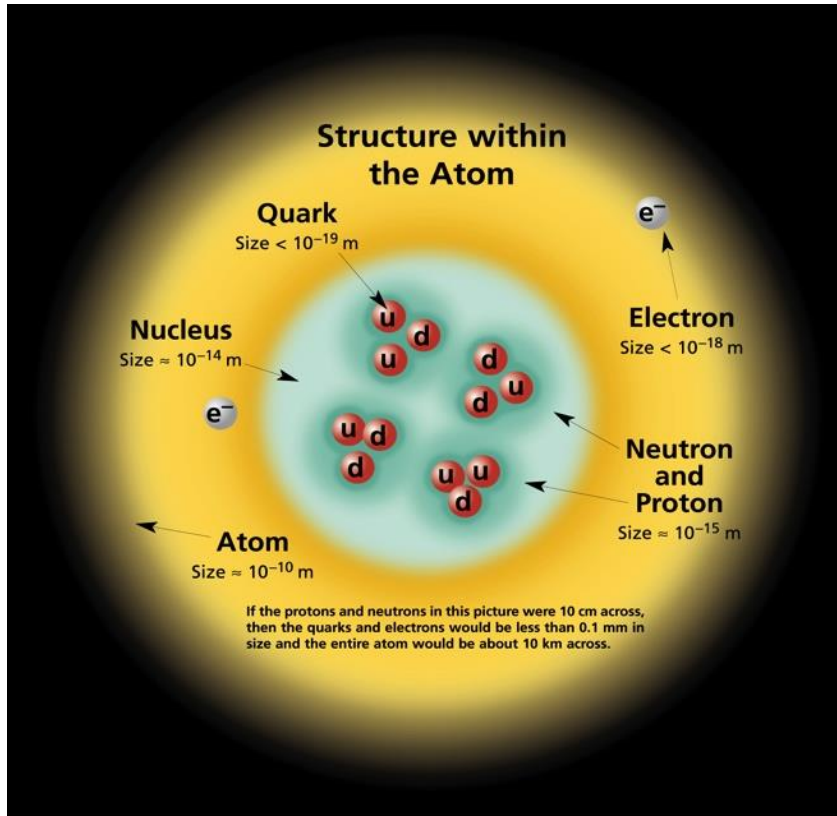
• Detección •

- **Sólo unas pocas de las numerosas partículas conocidas tienen una vida suficientemente larga como para dejar huellas en un detector**
- Construimos detectores para registrar: e^\pm , μ^\pm , Υ , π^\pm , K^\pm , K_0 , p^\pm , n
- La mayoría de las partículas son medidas a través de los productos de desintegración y de sus relaciones cinemáticas (masa invariante)





• Interacciones •

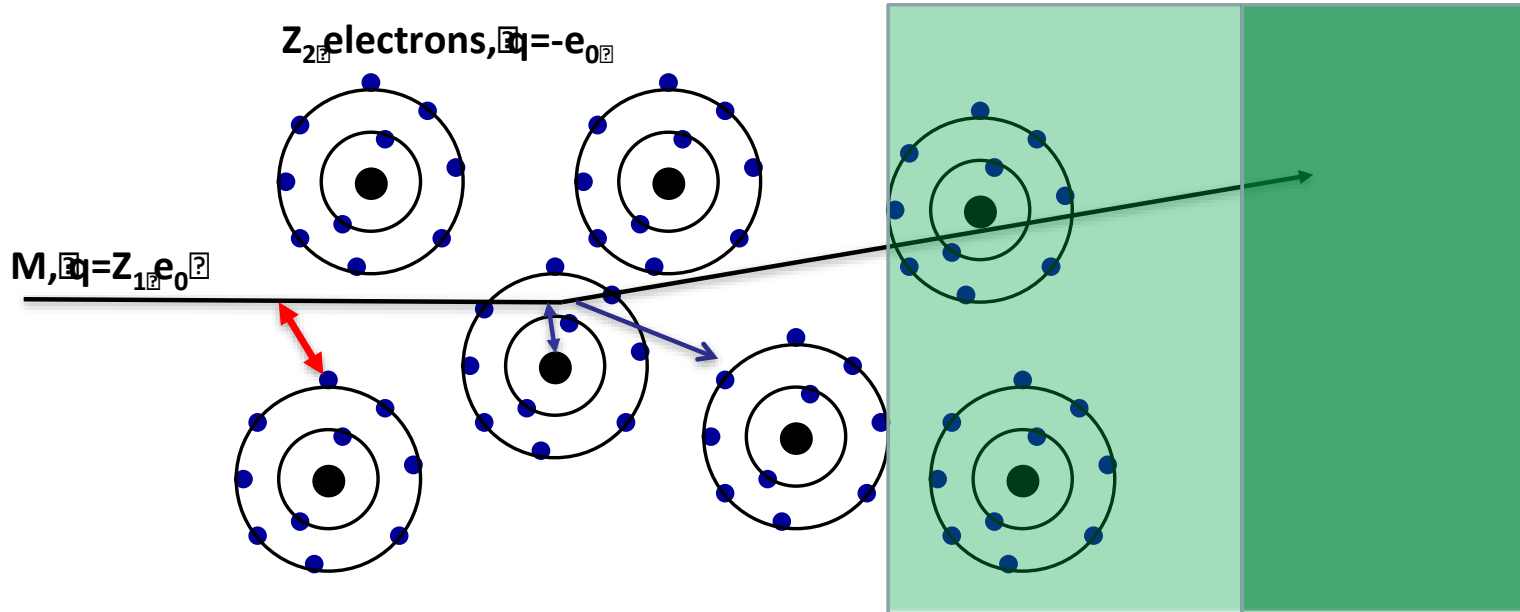


PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property \ Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
		(Electroweak)		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	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:		0.8	1	25	Not applicable to quarks
		10^{-41}	1	60	
for two protons in nucleus		10^{-36}	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 •

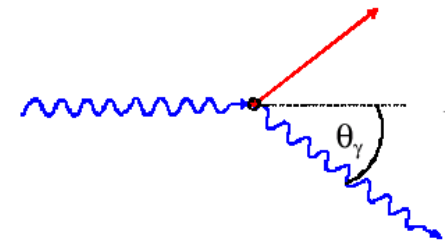
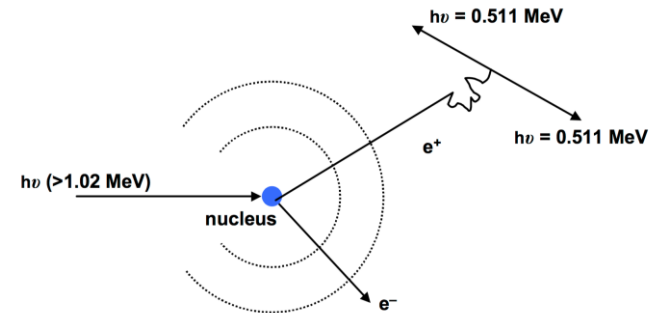
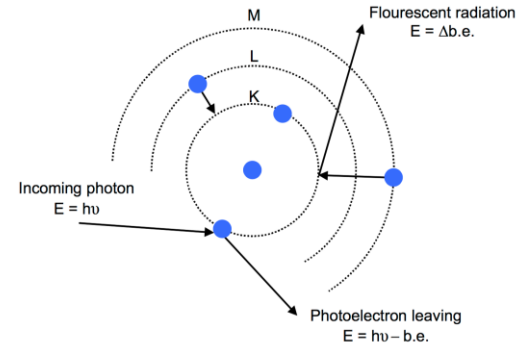
- **Efecto fotoeléctrico (Z^5)**; absorción de un fotón por un átomo, **expulsando un electrón**

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 alta 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.



• Detección de Partículas •

- En general, no podemos "ver" la reacción en sí, pero sólo los productos finales de la reacción
- Con el fin de reconstruir el mecanismo de reacción y las propiedades de las partículas involucradas, queremos la máxima información sobre los productos finales
- **El detector de partículas ideal debe**
 - Garantizar cobertura del ángulo sólido completo (sin grietas, segmentación fina)
 - Medir el momento y/o energía
 - Detectar, rastrear e identificar todas las partículas (masa, carga)
 - Responder rápidamente, sin tiempo muerto
 - Convertir la información en señales (eléctricas)



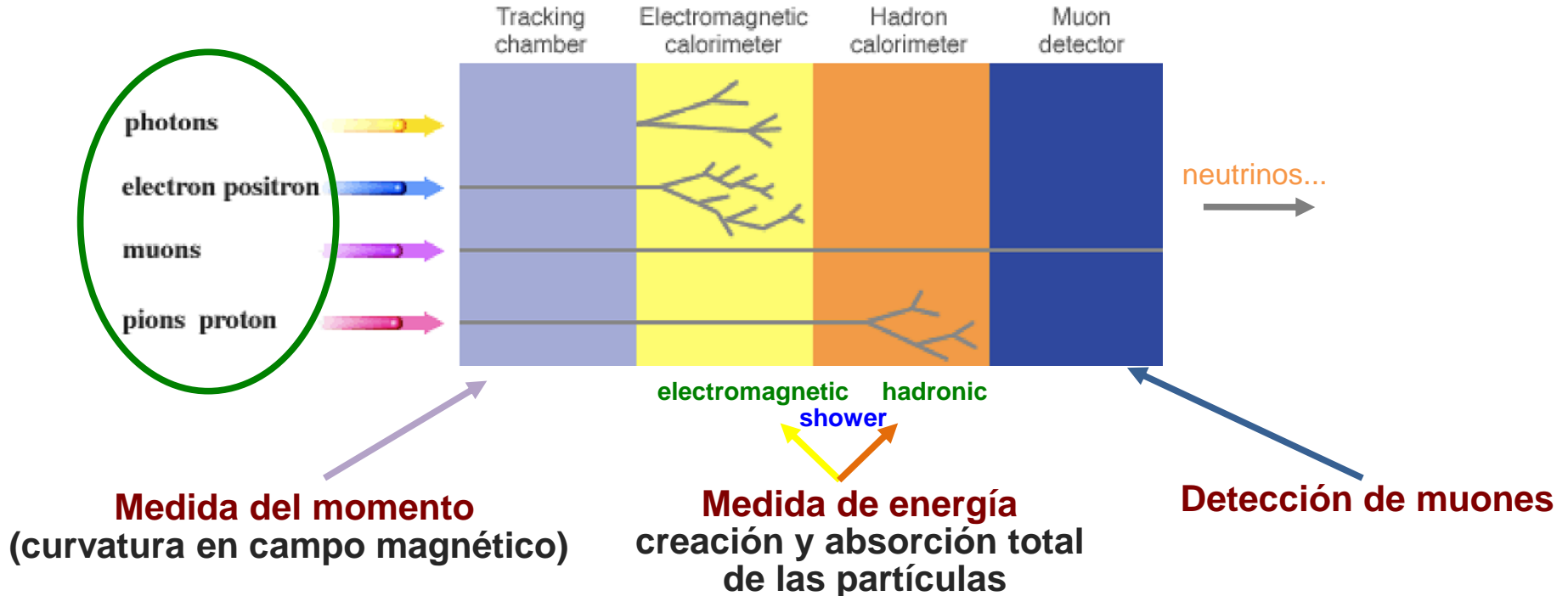
- Limitaciones prácticas: tecnología, espacio, presupuesto, etc.

• Interacciones en el Detector •

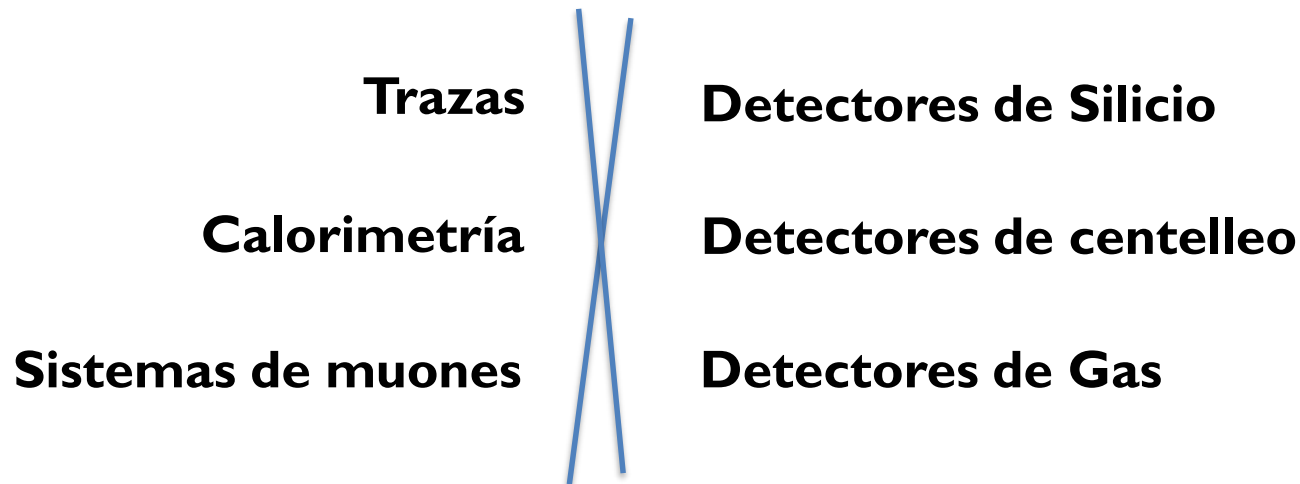
Baja densidad → Alta densidad

Alta precisión → Menor precisión

Alta granularidad → Menor granularidad



• Función VS Tecnología •



Detector: combinación de tecnologías que registran el efecto de la interacción de las partículas con la materia

Física

Condiciones de operación

Resolución

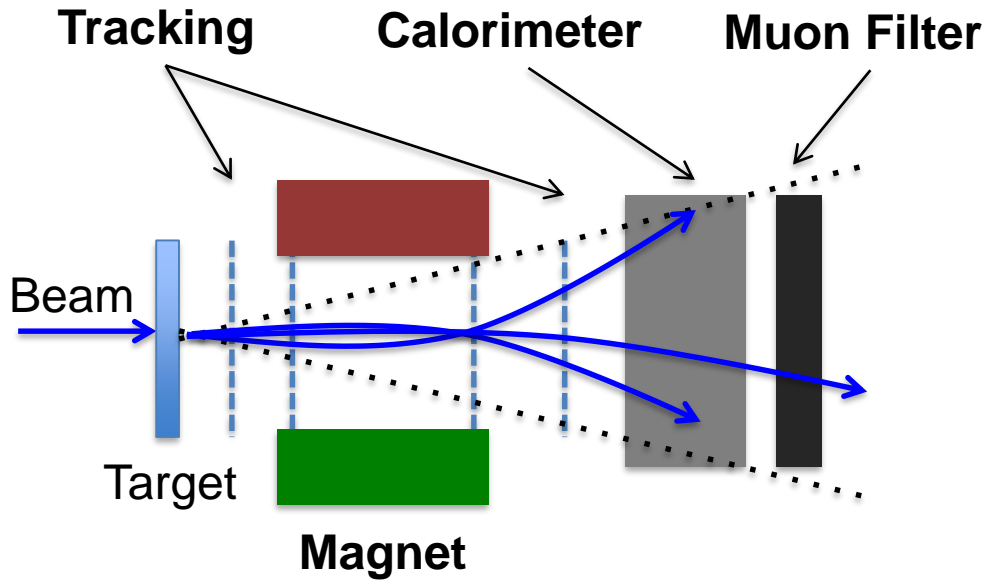
Fabricación

Coste (área, electrónica...)

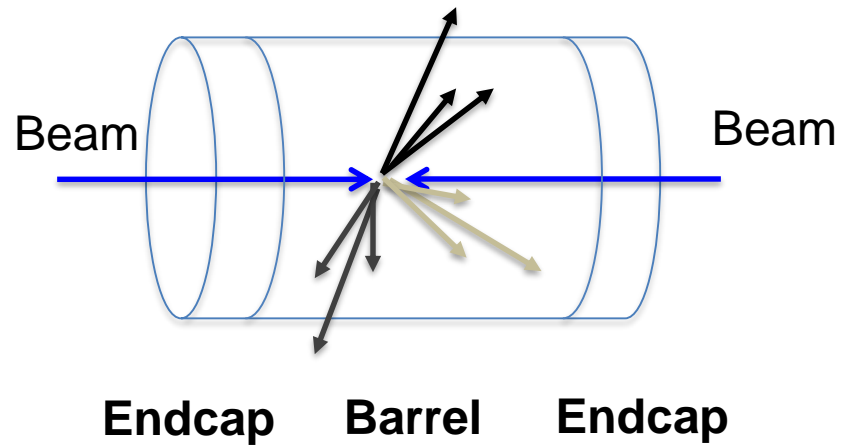
Tiempo de vida

• Detectores •

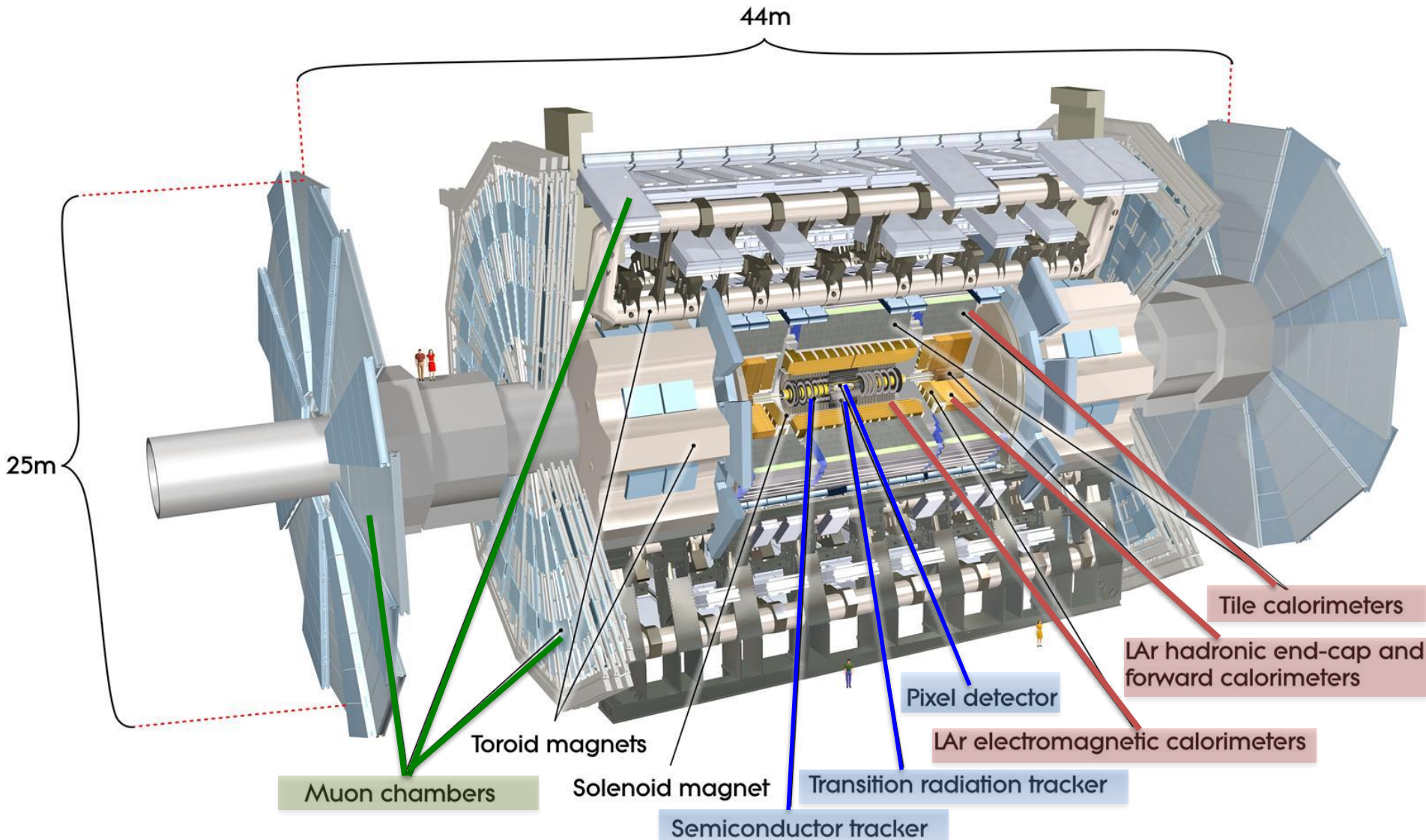
Fix Target Geometry



Collider Geometry



• 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

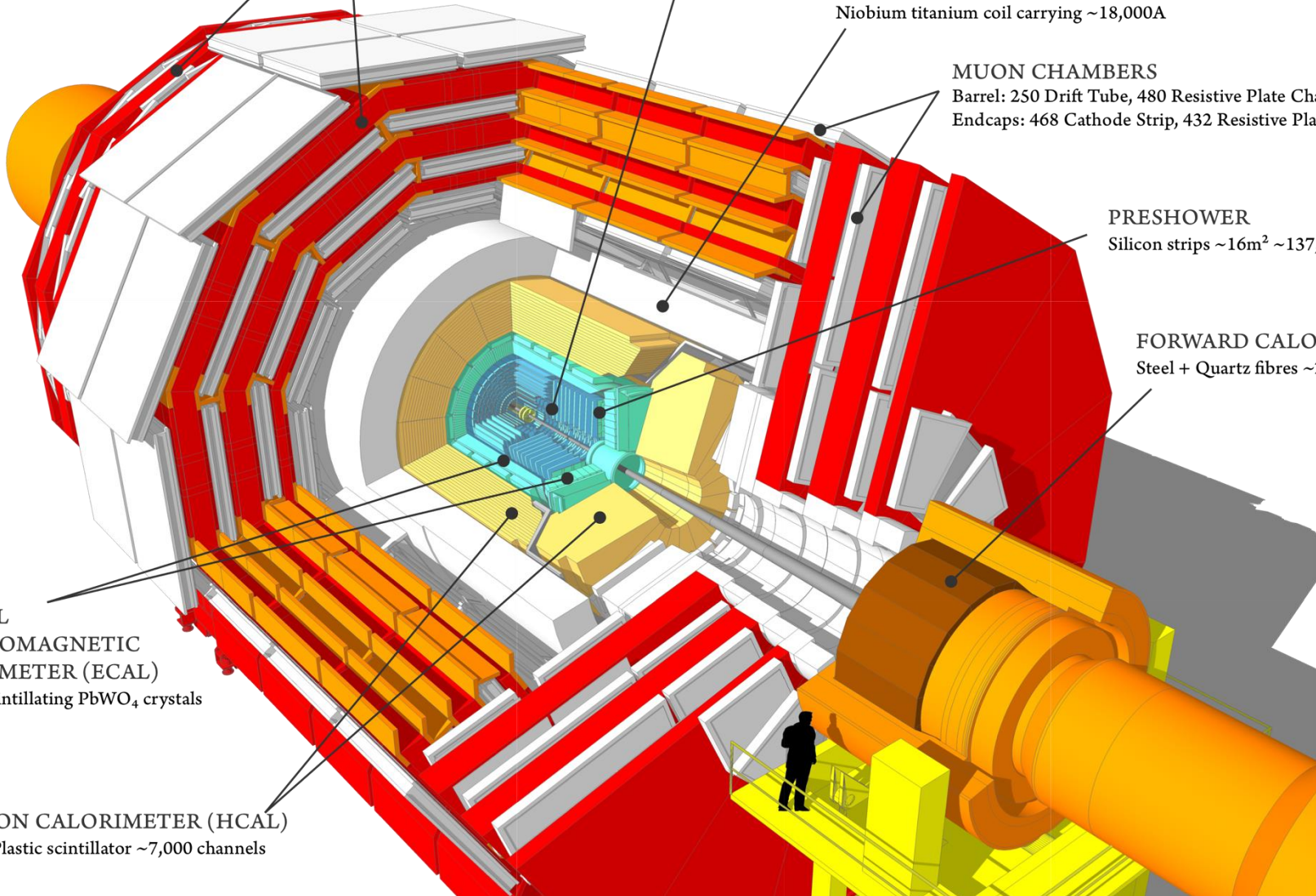
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

CRYSTAL
ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)

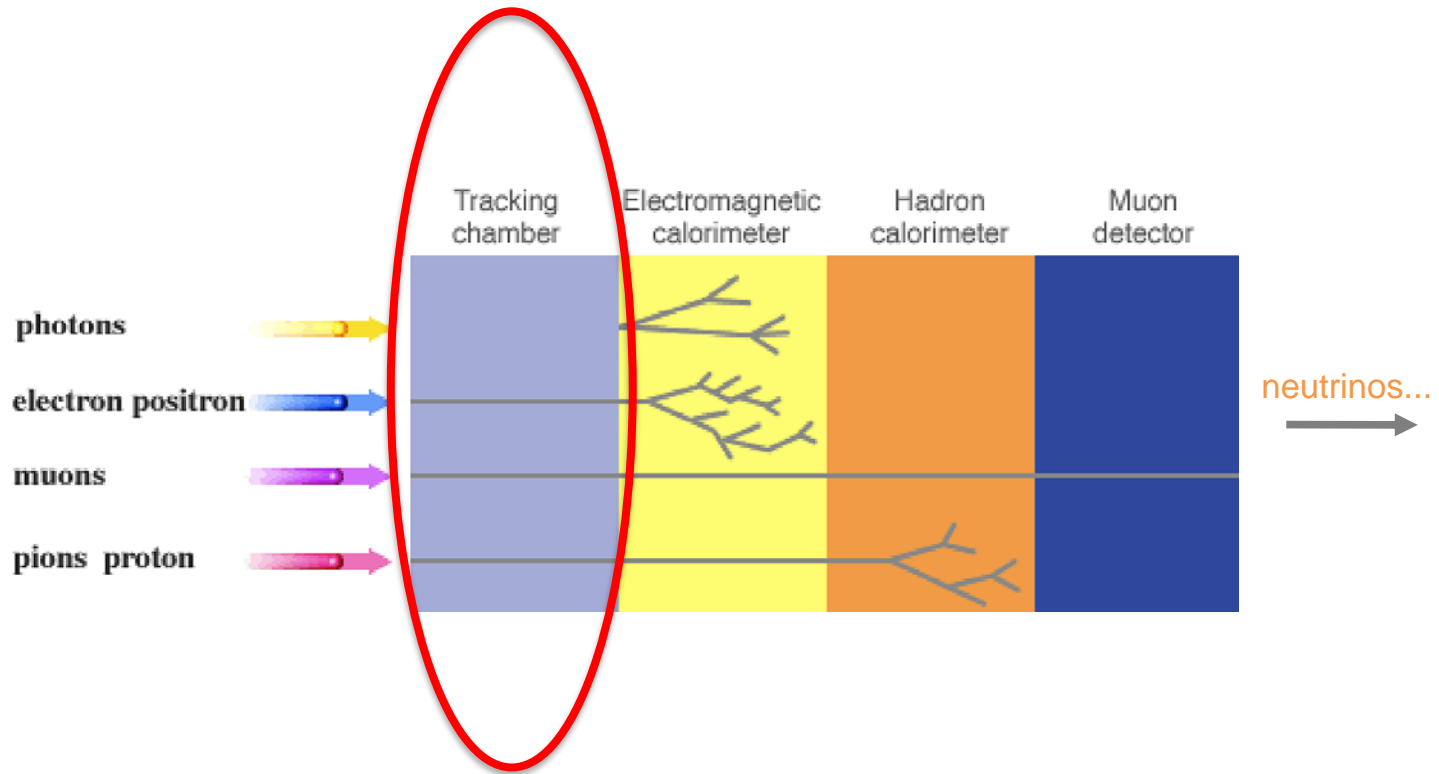
$\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)

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

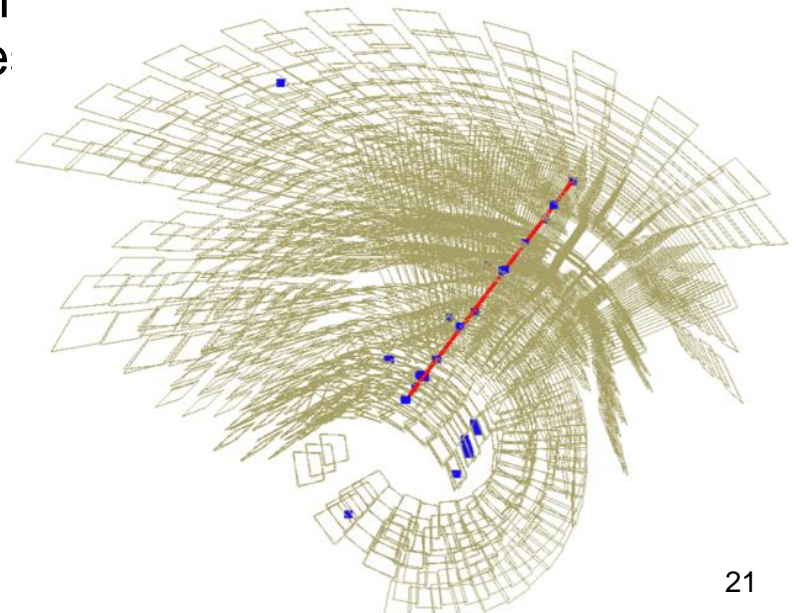


• Interacciones en el Detector •



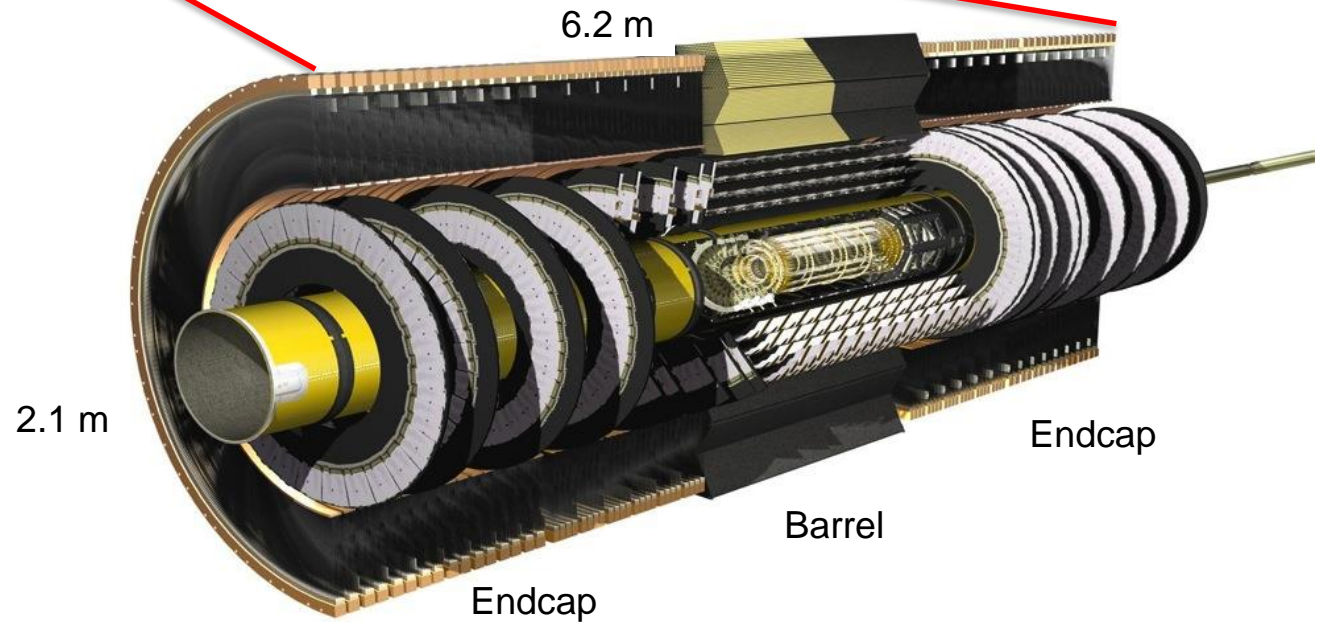
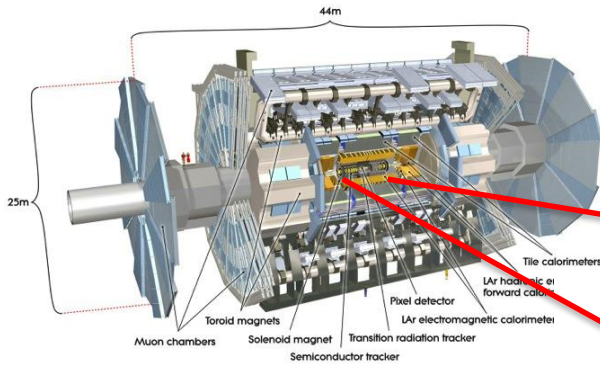
• Detectores de Trazas •

- 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 señales en los calorímetros o trazas en los sistemas muones
- Contribuyen a la identificación de par energía en el tracker o con detectores: **Detector compacto, en un campo magnético, que registra el mayor número de señales posible, pero ligero para minimizar las interacciones de las partículas cargadas (y neutras) antes de que lleguen a los calorímetros.**



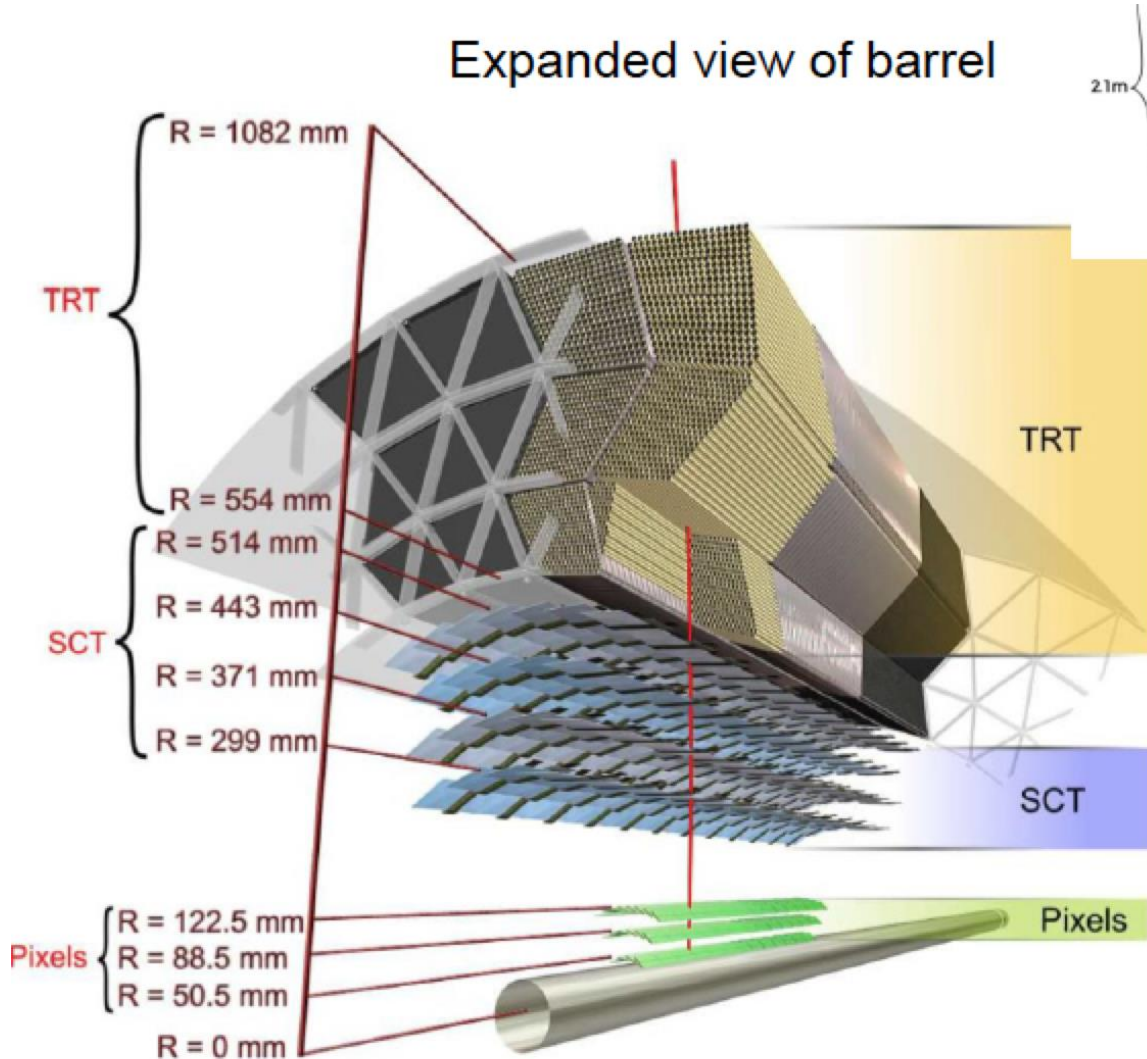
• ATLAS Tracker •

~87 M canales electrónicos



• ATLAS Tracker •

Expanded view of barrel



Precisión
Granularidad

TRT (Straws-Gas)

350 kchannels
36 track points
 $\sigma \sim 130 \mu\text{m}$

SCT (Silicon strips)

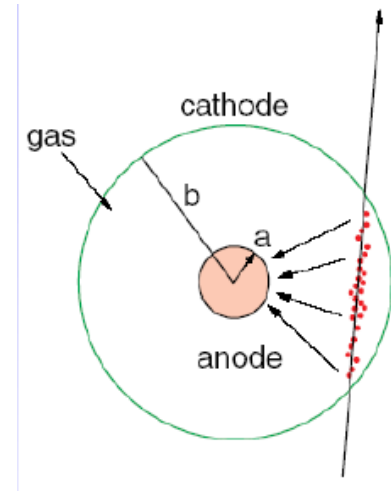
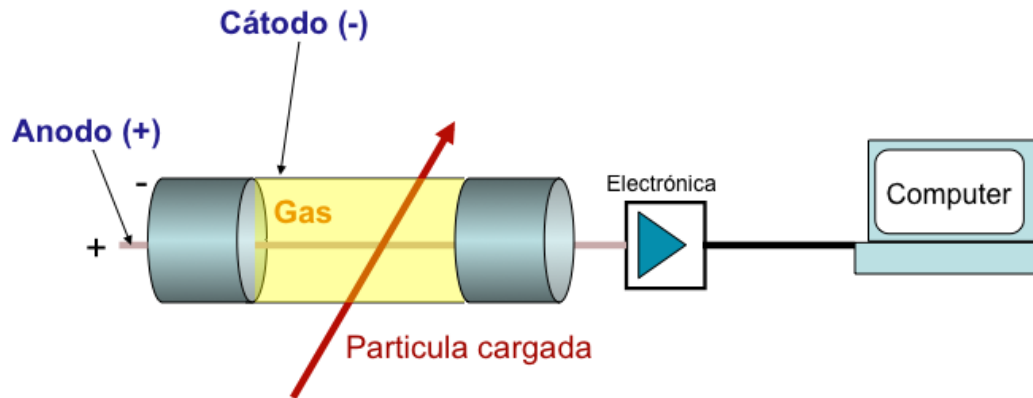
6.2 Mchannels
4 track points
 $\sigma \sim 16 \mu\text{m}$

Pixel (Silicon pixels)

80 Mchannels
3 track points
 $\sigma \sim 10 \mu\text{m}$



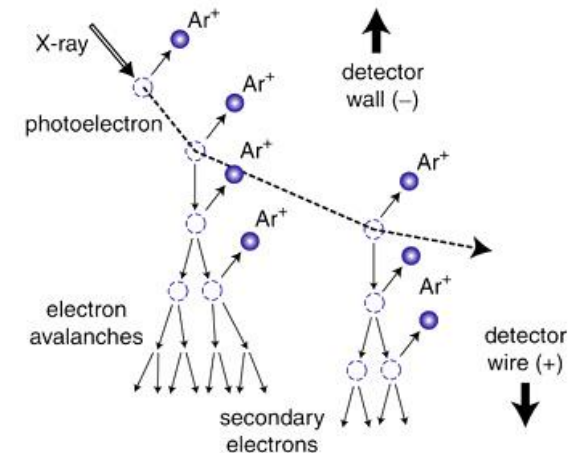
• Detectores de Gas •



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

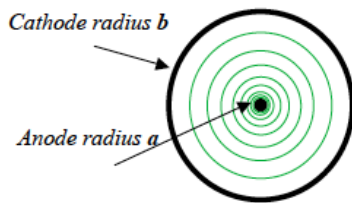
Los electrones primarios tienen suficiente energía cinética para ionizar otros átomos del gas.



• 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

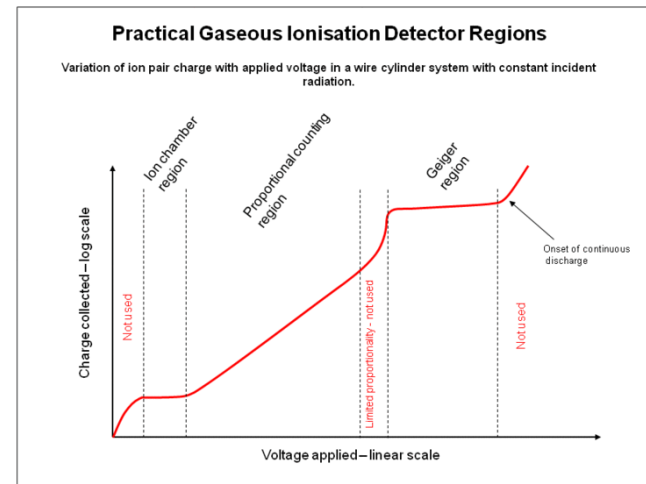
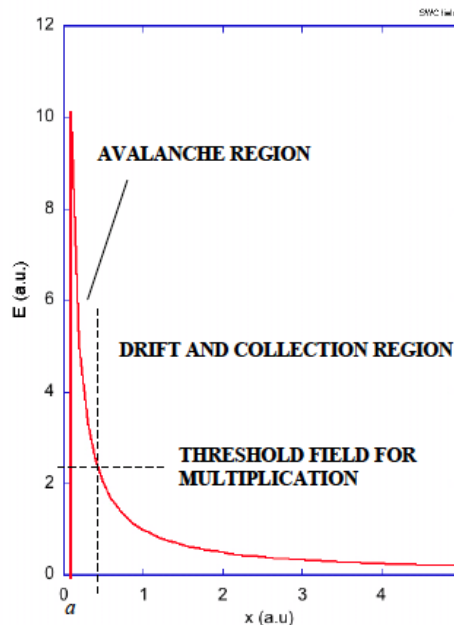


ELECTRIC FIELD AND POTENTIAL:

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

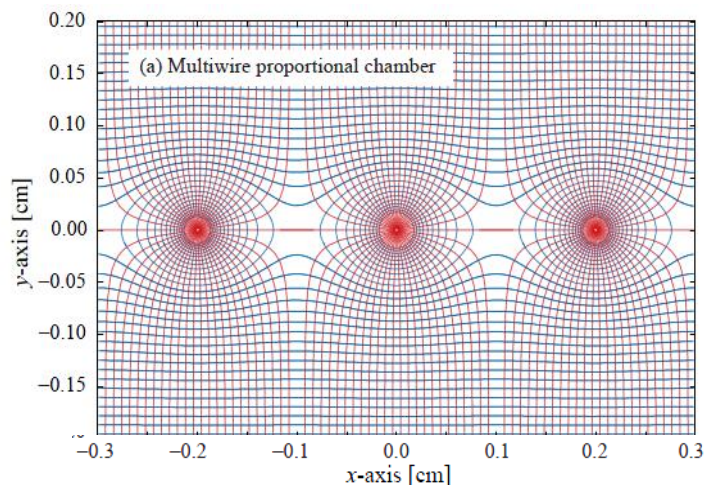
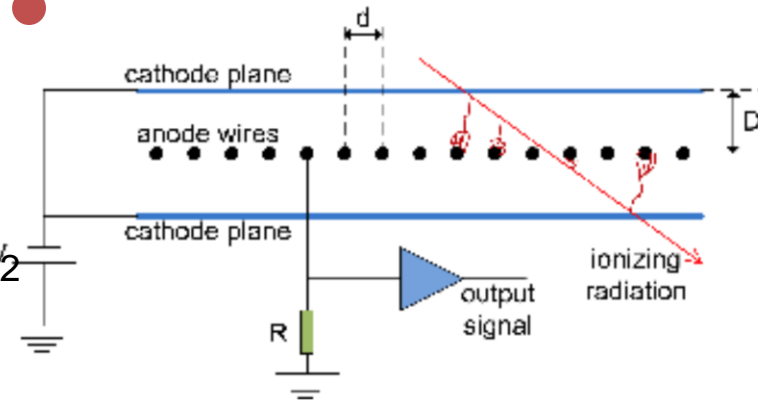
$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{a}$$

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



• MWPC •

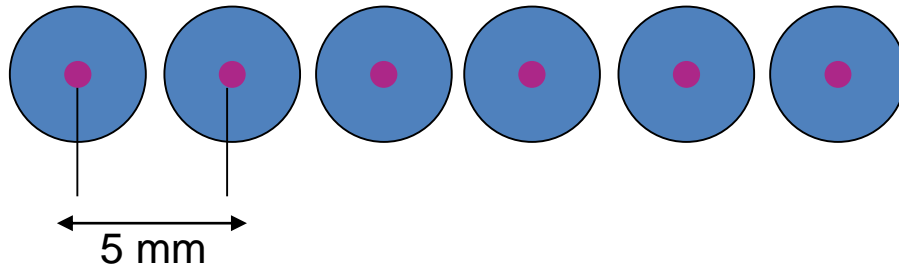
- Activos continuamente
- Eficientes en altos flujos de partículas $\sim \text{MHz}/\text{cm}^2$
- Precisión sub-mm ($\sim \text{distancia hilos}/\sqrt{12}$)
- **Primer detector electrónico, permite hacer física (moderna) de alta estadística**
- **Limitaciones para el LHC: flujo de partículas, resistencia a la radiación, resolución espacial...**



G.Charpak, Premio Nobel 1992

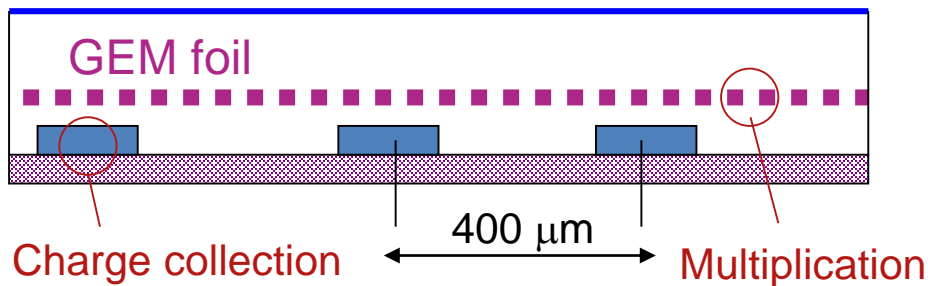


• Tendencias •



STRAW TUBES

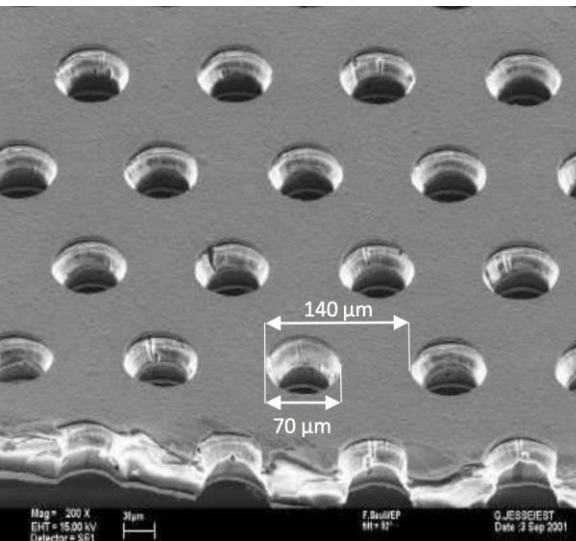
Distancia ánodo-cátodo: 2 mm
Resolución espacial~ 130-300 μm



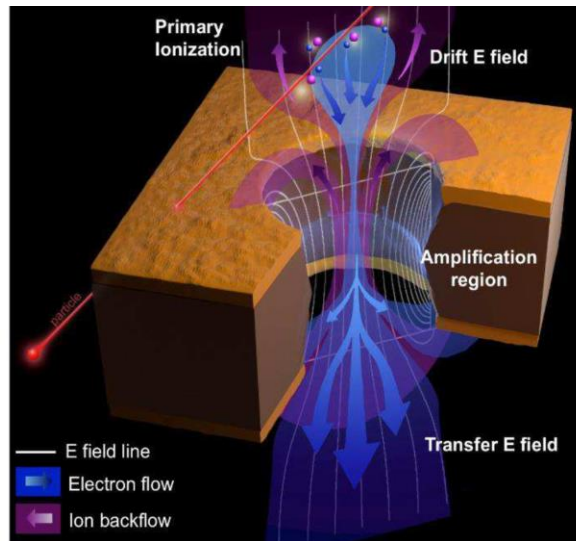
Gas Electron Multiplier (GEM – F.Sauli, 1998)

Resolución espacial~ 50 μm
Resolución temporal mejor que 10 ns

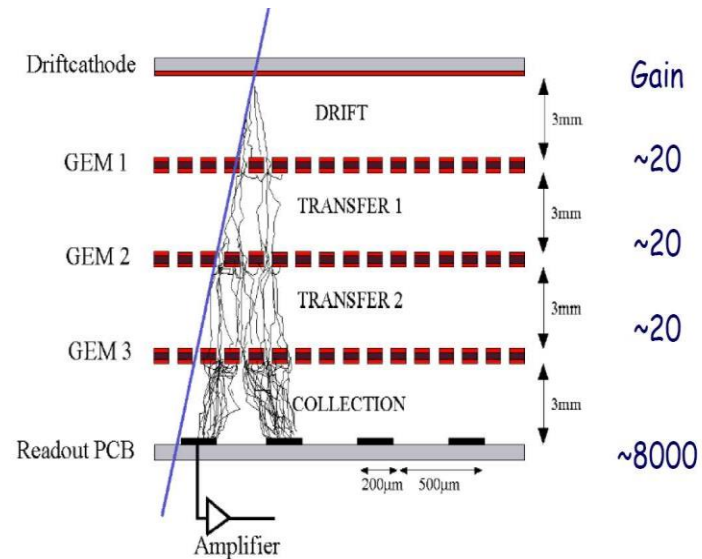
• GEM detectors •



Gas Electron Multiplier (GEM)



Amplificación en el GEM



Detector Triple-GEM

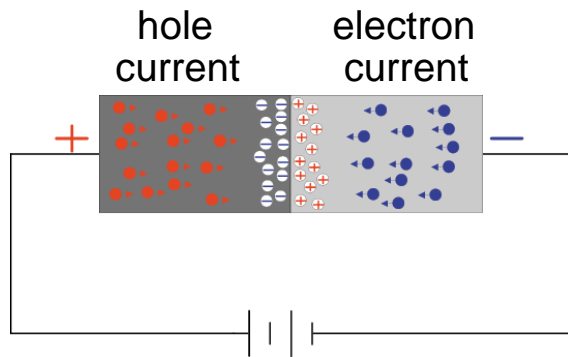
• Detectores de Gas •

- Resolución espacial
- Buen dE/dx
- Alta capacidad de contaje
- Señales rápidas y grandes
- Ligeros (poco material)
- Amplia cobertura ($>1000 \text{ m}^2$)
- Geometría flexible

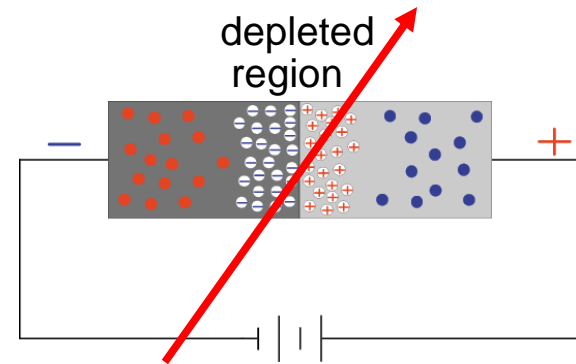
▶ <i>Intrinsic resolution:</i>		
▶ Geiger counter:	~1 cm	tube is hit or not
▶ MWPC:	~1 mm	detect which wire is hit
▶ drift chambers:	150-250 μm	measure drift time
▶ LHC experiments:	50-200 μm	gas, electronics ...
▶ micropattern detectors:	20- 50 μm	small scale electrodes

• Semiconductores •

(~solid state or silicon detectors)



Current flow through diode if connects like this



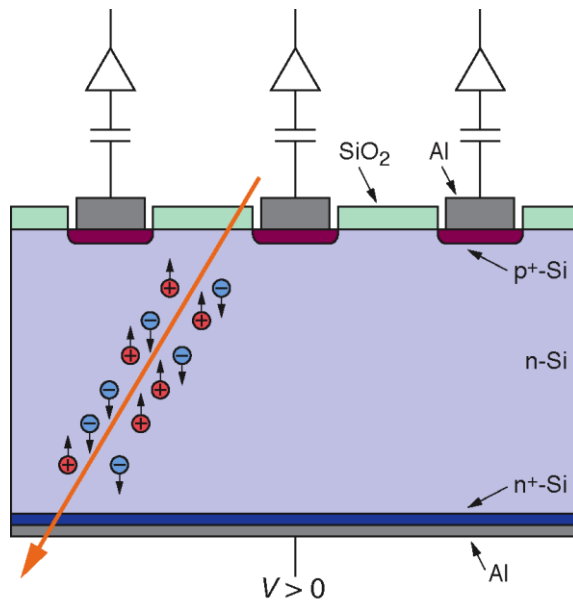
Charged particle can create new electron/hole pairs in depletion area sufficient to create a signal

Please watch this fun video on transistors
<https://www.youtube.com/watch?v=lcrBqCFLHIY>



- 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 μm) resulta en 3.2×10^4 e-/hole pares

• Semiconductores •



Creación de pares e^-h^+

Deriva de las cargas a los electrodos

El movimiento de las cargas (corriente) crea una señal eléctrica, que se amplifica con la electrónica directamente conectada a cada pista

- **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**

ATLAS, Barrel SCT module

Hybrid assembly
with readout chips

12.8 cm

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

4 Silicon sensors

280 μm thick

2.3° stereo angle
Overlap in ϕ & z to
adjacent modules

768 p^+ microstrips Cell
size: 80 μm [ϕ pitch] \times 13
cm [z]

Overall $6.3 \cdot 10^6$ channels

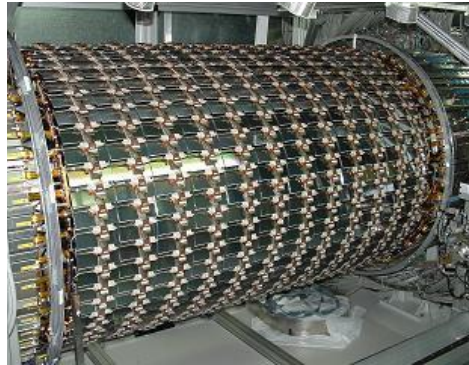
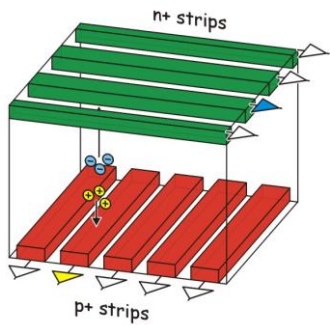
Be module baseboard
with mounting points &
central TPG

TPG (thermal pyrolytic
graphite) plate for sensor
cooling

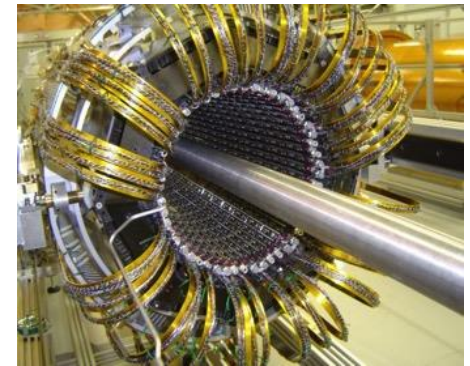
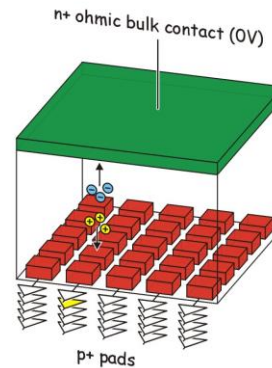
Connector
Power & data

Fully equipped double sided electrical module with baseboard and readout hybrids

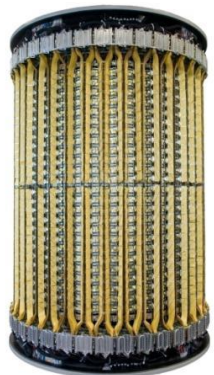
• Silicon @ LHC •



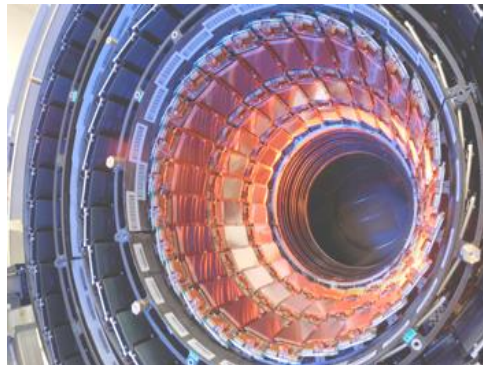
ATLAS SCT Barrel



ATLAS Pixel Detector



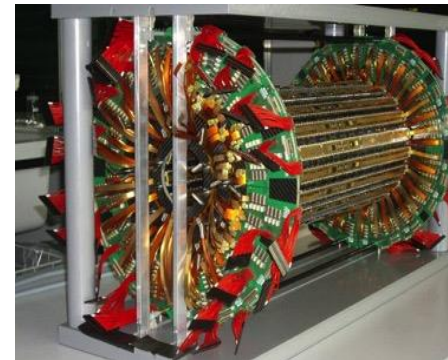
ALICE Strip Detector



CMS Strip Tracker IB



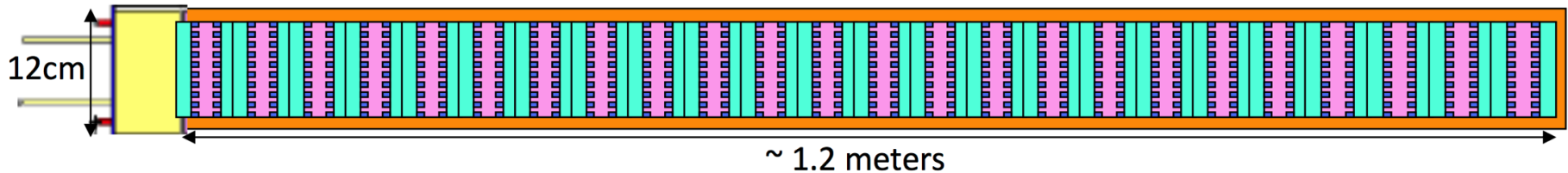
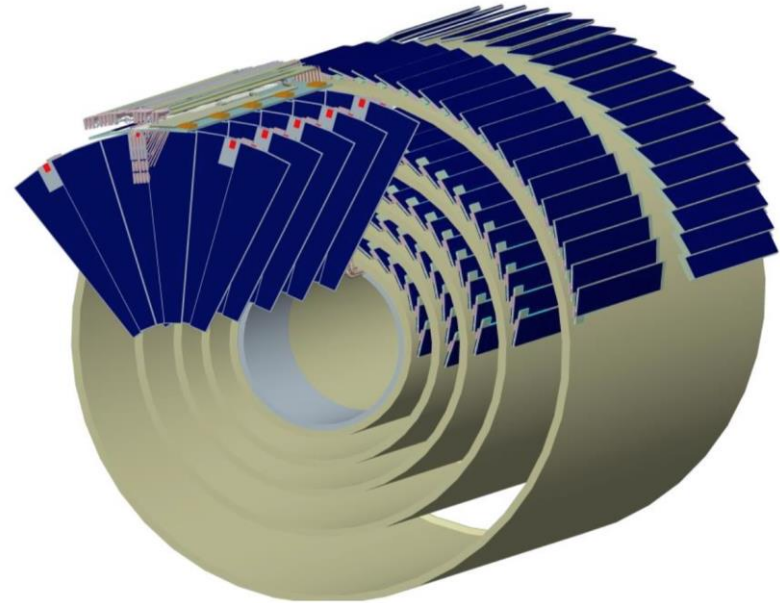
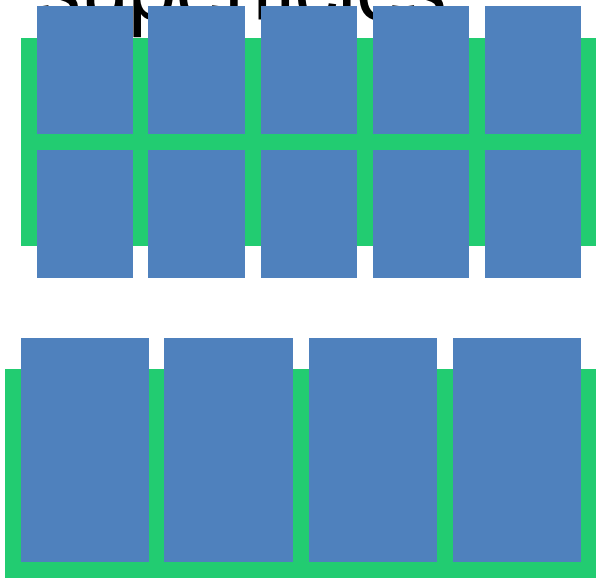
ALICE Pixel Detector



CMS Pixel Detector

• Sistemas •

- Cómo cubrir eficazmente grandes superficies



• Sistemas •

- Sensor
- Electrónica de lectura
- Interconexión



- Soportes mecánicos
- Sistemas térmicos, refrigeración de la electrónica y detectores
- Distribución de potencia, señales...
- Servicios: cables, tubos, fibras...
- Sensores auxiliares: alineamiento, T, P, H....

Campos de Trabajo

- Sensores
- Electrónica de lectura
- Interconexión sensor/electrónica
- Soportes mecánicos
- Sistemas térmicos/refrigeración
- Distribución de potencia, señales...
- Servicios: cables, tubos, fibras...
- Sensores auxiliares: alineamiento, T, P, H....
- Test, control (IT)
- Sistemas de instalación

Física y Física aplicada

Ingeniería mecánica

Metrología de precisión

Técnicas de fabricación y ensamblaje

Materiales

Instrumentación científica

Ingeniería eléctrica

Electrónica analógica y digital, optoelectrónica

Microelectrónica para detectores

Redes de computación y de comunicaciones

Informática de sistemas y de datos

Control y adquisición de datos

Controles industriales, seguridad de sistemas

Instrumentación de proceso

Fluidos, sistemas de ventilación y enfriamiento

Mantenimiento de sistemas

Evaluación y protección contra radiaciones

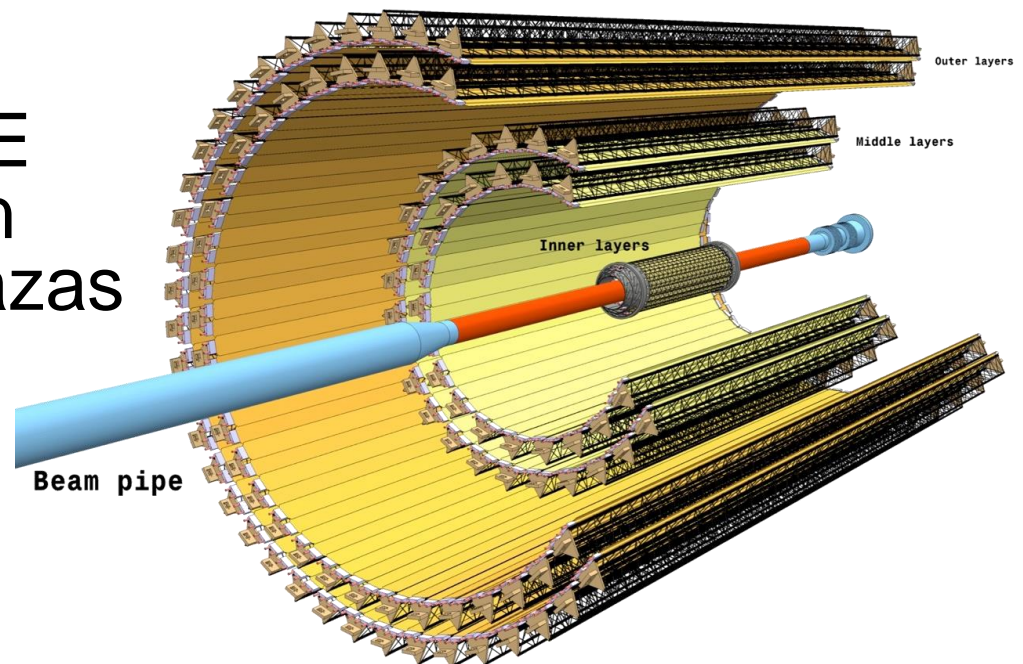
Mejora permanente de los detectores



El experimento ALICE está construyendo un nuevo detector de trazas

(Ref. CERN-LHCC-2013-024)

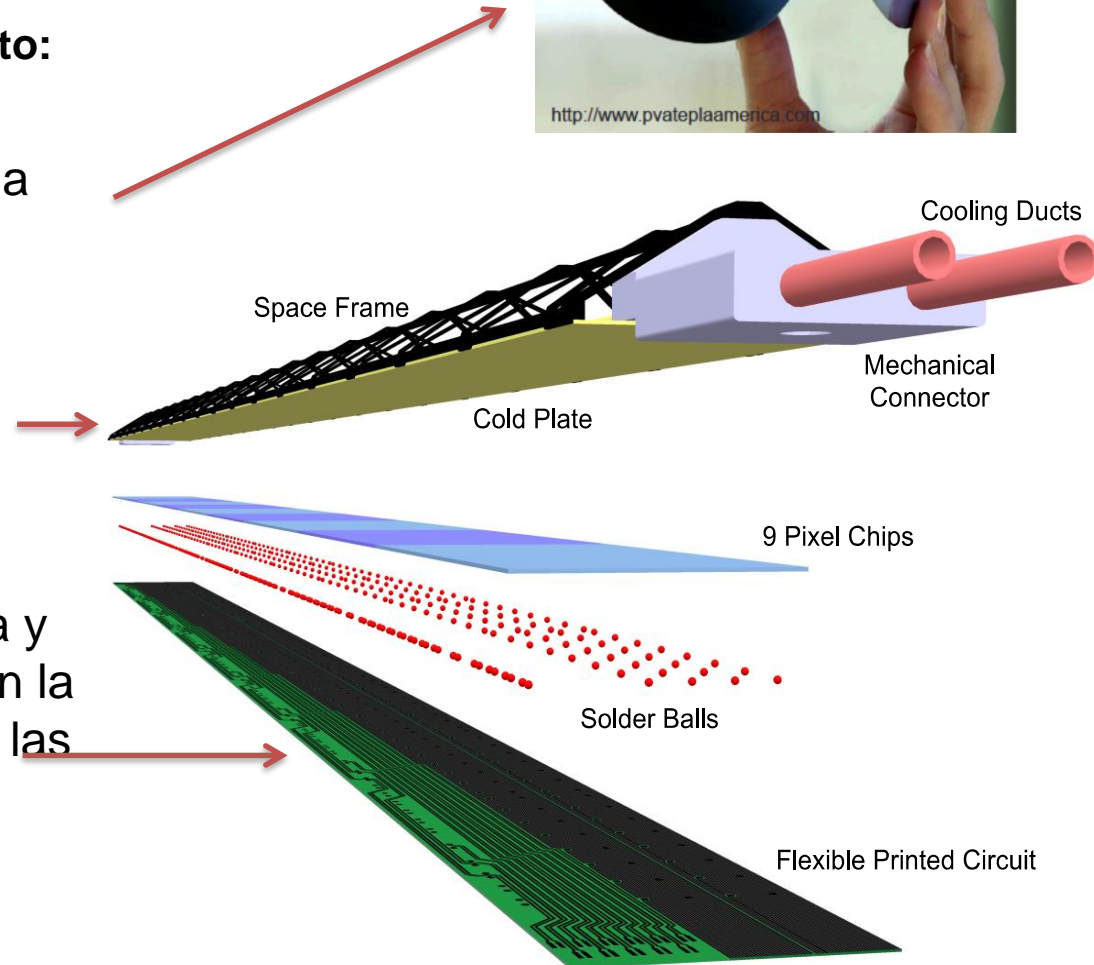
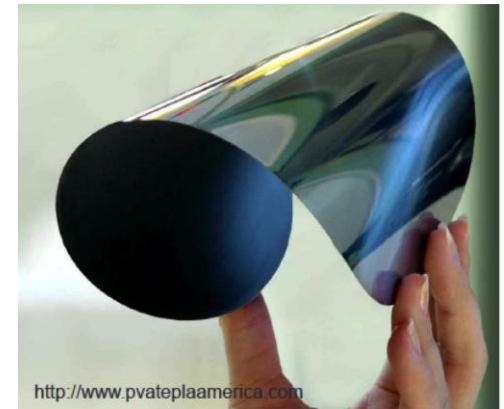
- Más próximo al punto de interacción
- Más ligero
- Con más canales electrónicos
- Con mayor resolución
- Más rápido



ALICE ITS

Detector súper ligero, súper compacto:

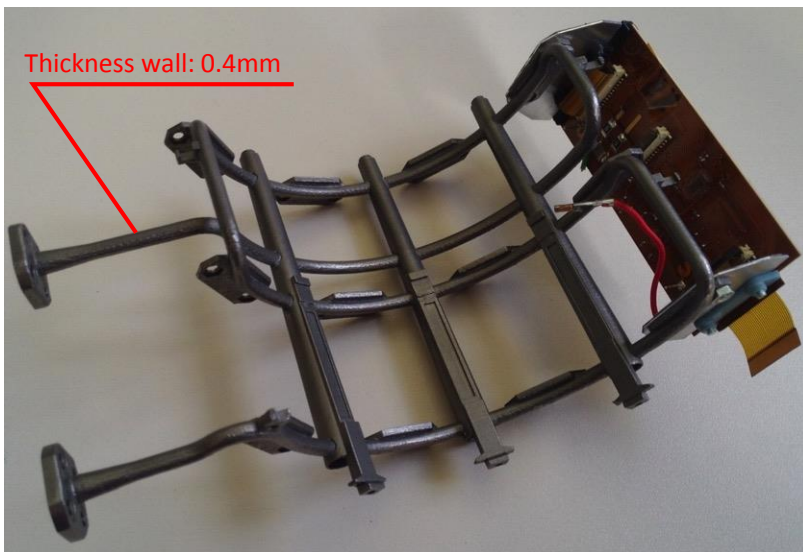
- Sensores de silicio de 50 μm de espesor: incluye los sensores y la electrónica de lectura
- Integración de la estructura mecánica con el sistema de refrigeración de los modules
- Optimización de los servicios: sensores conectados a cables realizados con tiras de poliamida y pistas de aluminio, que alimentan la electrónica y a la vez transmiten las señales al exterior



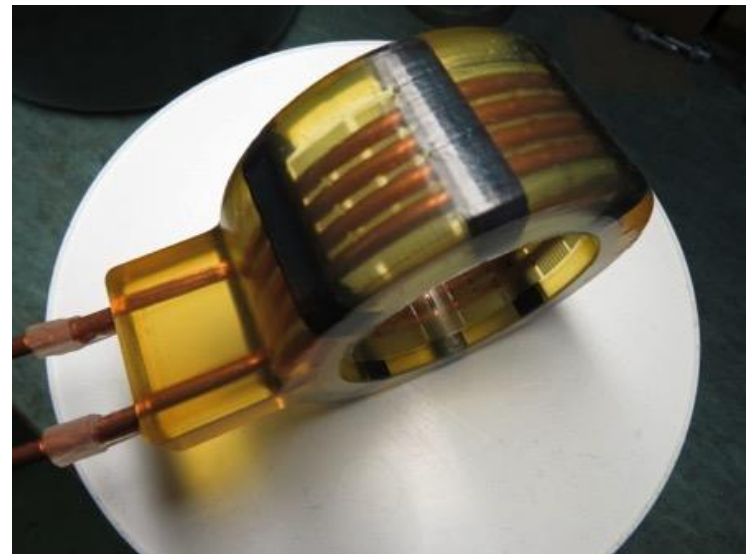
Impresión 3D

Componentes multifuncionales, prototipos 1:1, reparaciones in situ, geometrías complicadas, producciones pequeñas...

Soporte de tarjetas electrónicas, tuberías de enfriamiento complejas con conexiones de entrada y salida (15 bar)

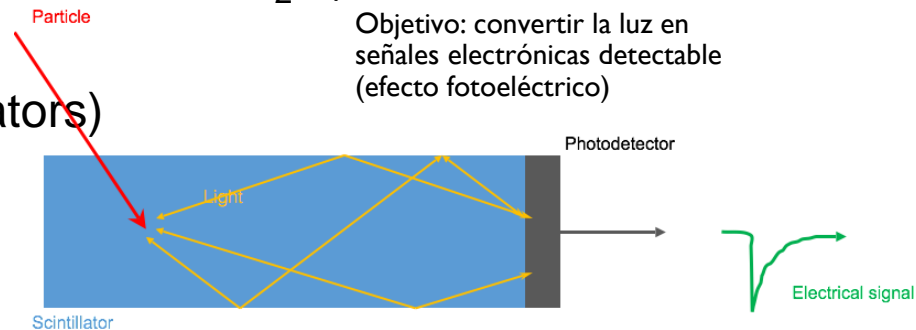


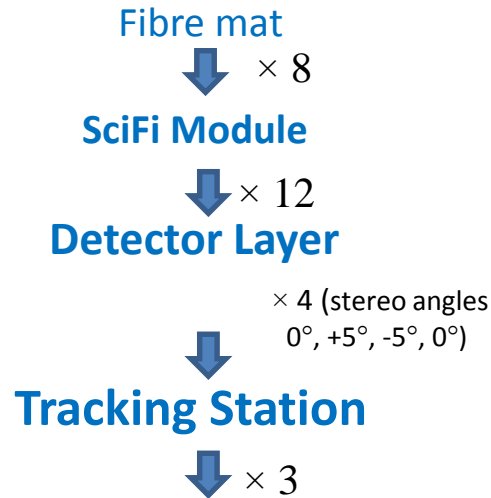
Antena RF: 2 Soportes en resina epoxi 3D para reemplazar 11 componentes mecanizados previamente en G11



• Centelleadores •

- Centelleadores: materiales que producen chispas o destellos de luz cuando la radiación ionizante pasa a través. **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, BaF₂...)
 - 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.
- Usos: calorímetros, identificación, detectores de trazas



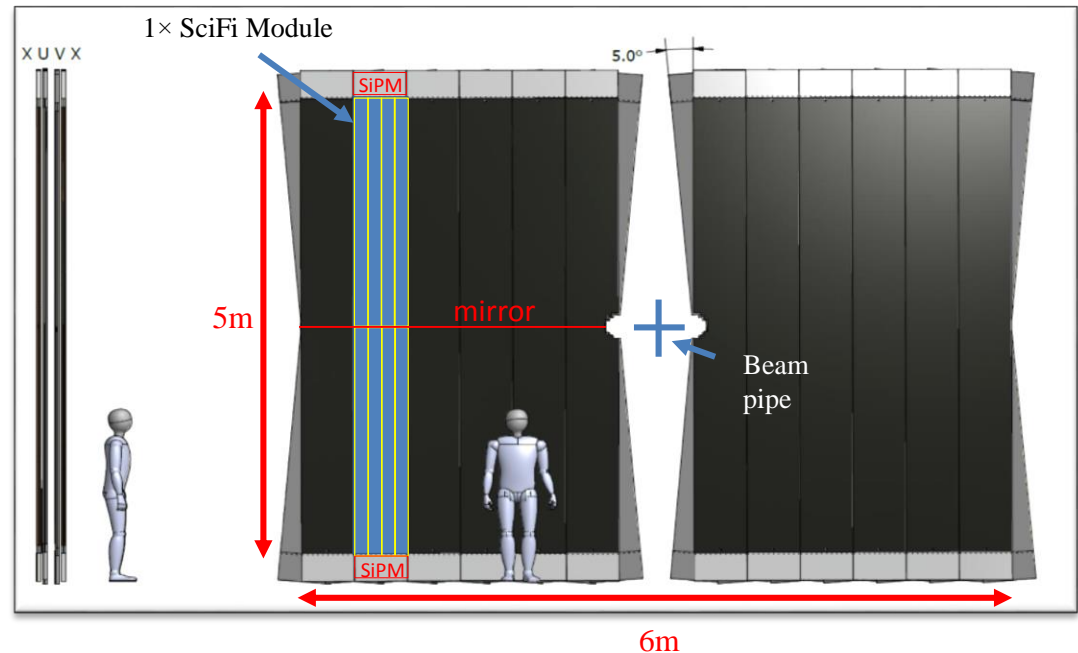


Scintillating Fibre Tracker

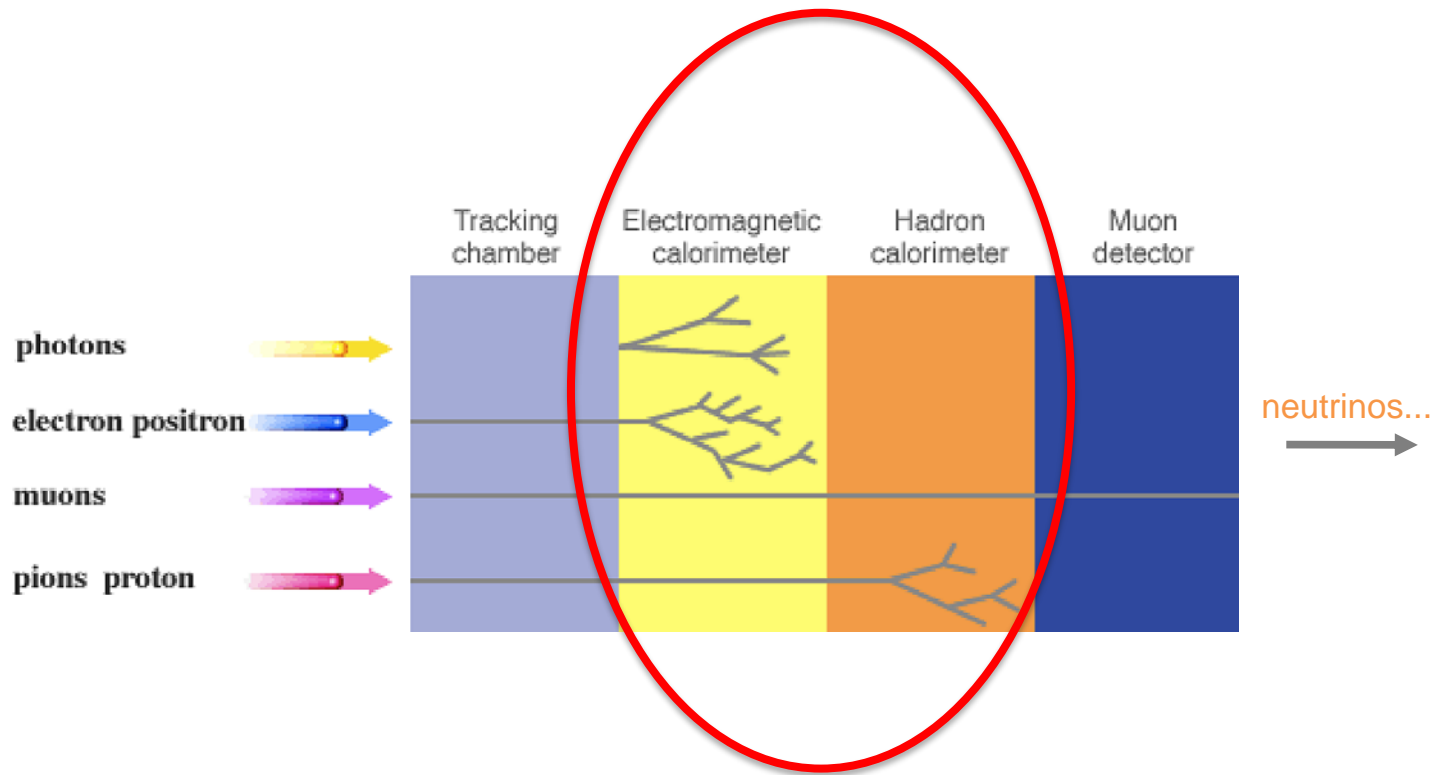
- 1152 mats, 144 modules
- **360 m²** total area
- almost **11,000 km** of fibre
- **~590'000** SiPM channels

SciFi, Detector de trazas en LHCb

Una tecnología única que puede funcionar de forma similar a un rastreador de silicio, pero lo suficientemente rentable como para cubrir los 30 m² de aceptación de cada capa. El resultado es un detector ligero y uniforme, sin necesidad de que los cables, o los servicios de refrigeración entren en la región de detección.

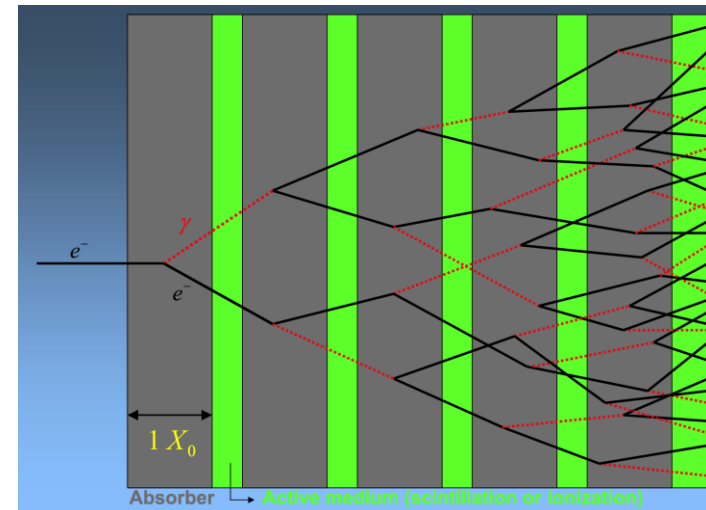


• Interacciones en el Detector •



• Calorímetros •

- El objetivo es medir la energía de la partícula entrante (partículas neutras o cargadas)
 - **Paran las partículas** (absorben toda su energía) en el volumen del detector excepto los muones (pesado) y neutrinos (interacción débil).
1. La(s) partícula incidente interactúa con el material calorimétrico pasivo y activo
 2. Se inicia un proceso en cascada: el desarrollo de la cascada depende del tipo de partícula y del material del detector
 3. La energía visible (calor, ionización, excitación de los átomos, luz de Cherenkov) depositada en los medios activos del calorímetro produce una señal detectable
 4. La señal final es proporcional a la energía total depositada por la partícula
 5. La calibración del calorímetro establece una relación precisa entre la 'energía visible' detectada y la energía de la partícula entrante



• Calorímetros •

Electromagnético

Fotones y cascadas de electrones
(γ, e, π^0)

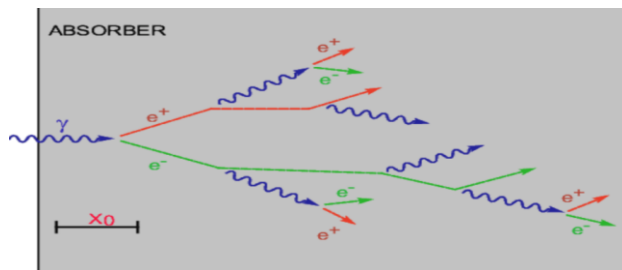
Hadrónico

Hadrones cargados y neutros, jets (π, ρ, n)

Cascada EM

La pérdida de energía resulta de diferentes mecanismos, a alta energía los procesos más importantes son:

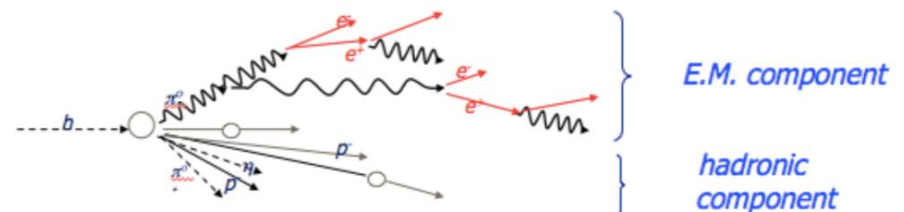
- Photons: **Pair productions** $dE_\gamma/E_\gamma = - (7/9)dx/X_0$
- Electron/Positrons: **Bremsstrahlung** $dE_{e^\pm}/E_{e^\pm} = - dx/X_0$



Cascada Hadronica

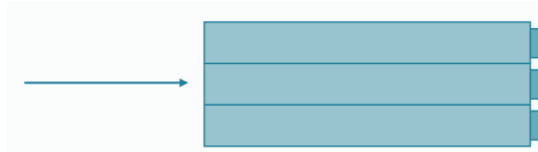
Se desarrollan como resultado de la interacción inelástica con los núcleos del medio, a través de un proceso en cascada

Una multitud de efectos se producen en el desarrollo de la cascada, los calorímetros hadrónicos son más complicados de optimizar y tienen una resolución intrínseca menor

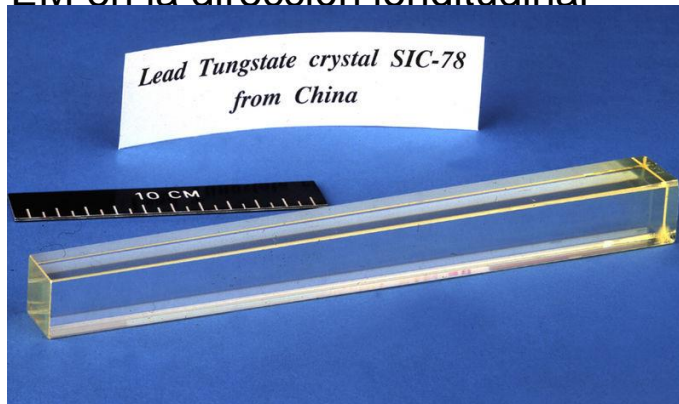


• Calorímetros •

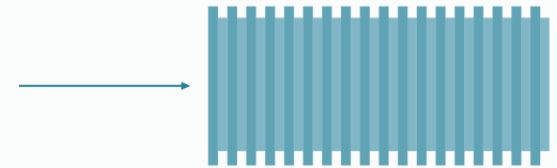
Homogeneous EM Calorimeter (CMS)



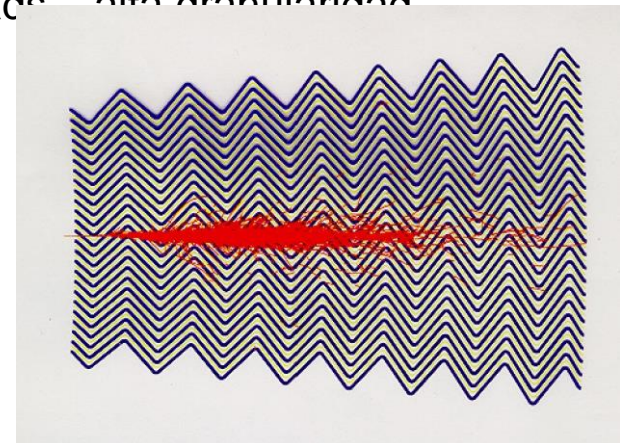
- Excelente resolución energética
 - Toda la *shower* esta contenida el detector (no se pierde en el absorber pasivo)
- Inconvenientes
 - Granularidad limitada, no dan información de la forma de la cascada EM en la dirección longitudinal



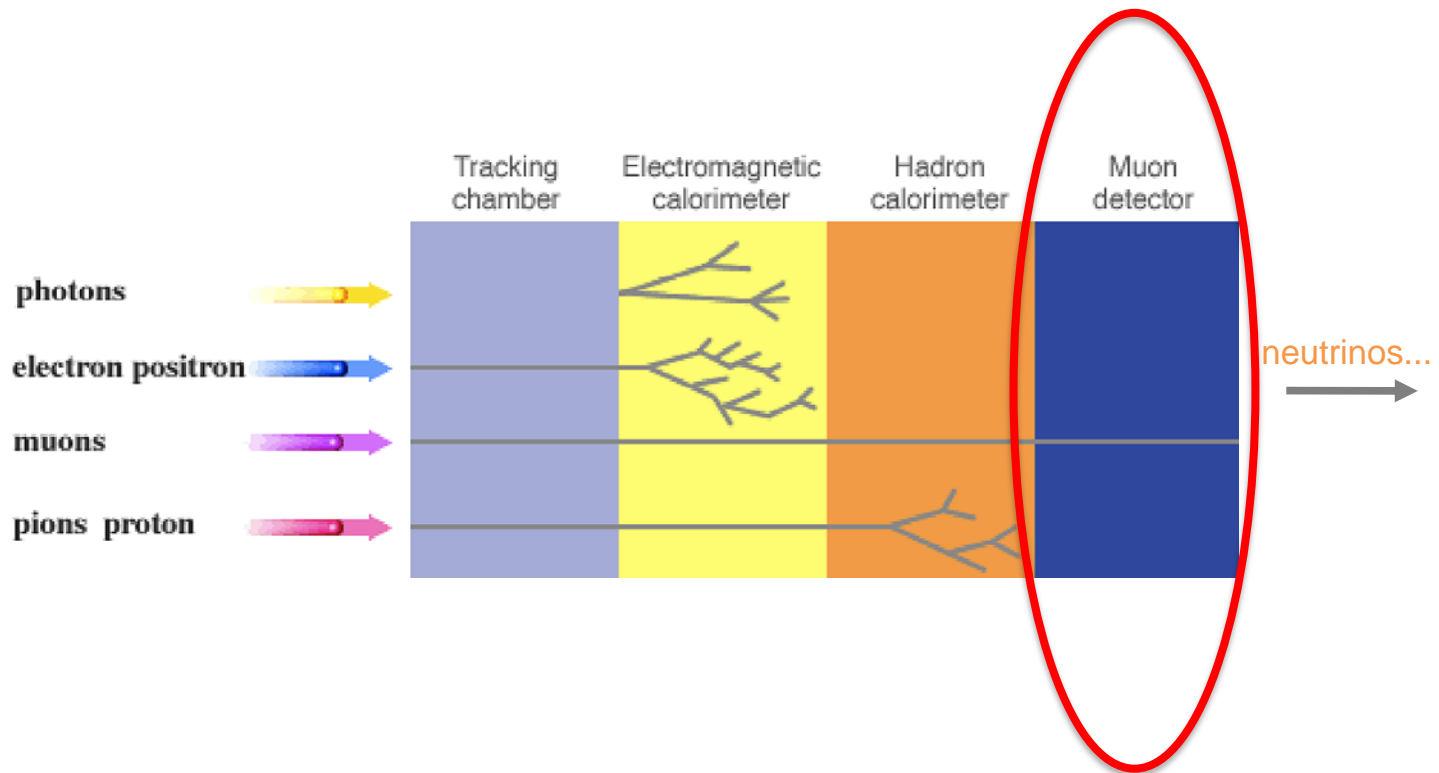
Sampling EM Calorimeter (ATLAS)



- 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

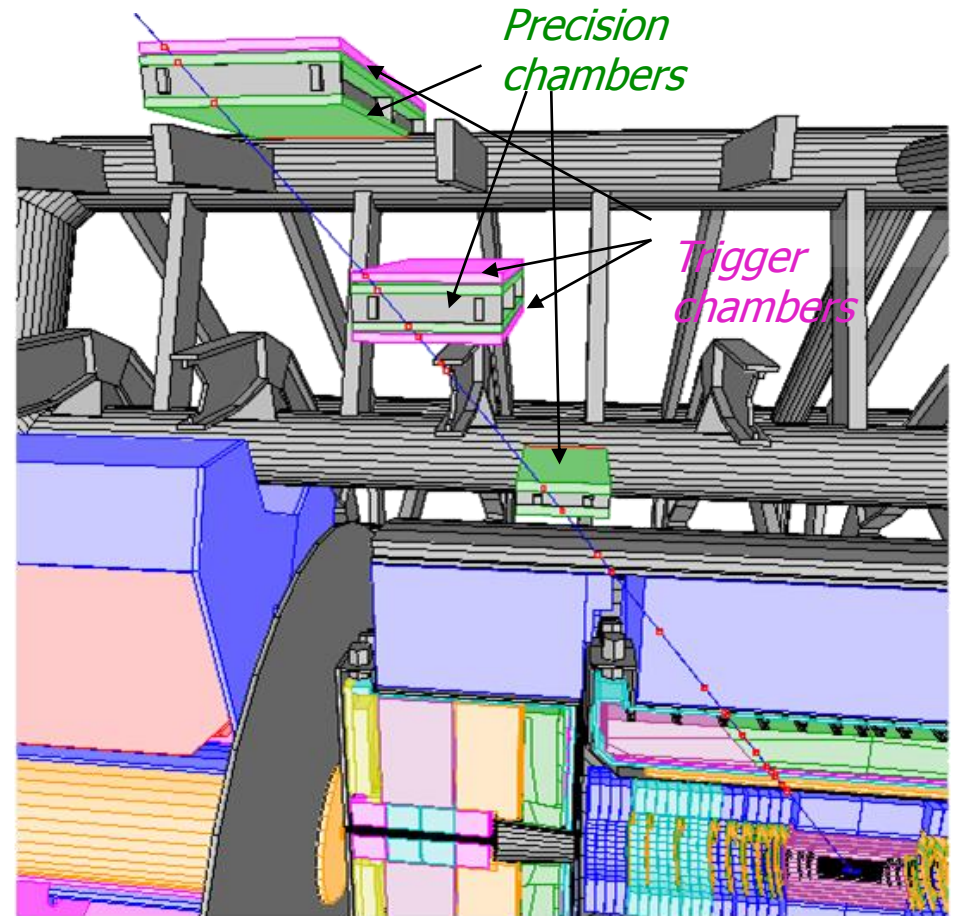


• Interacciones en el Detector •

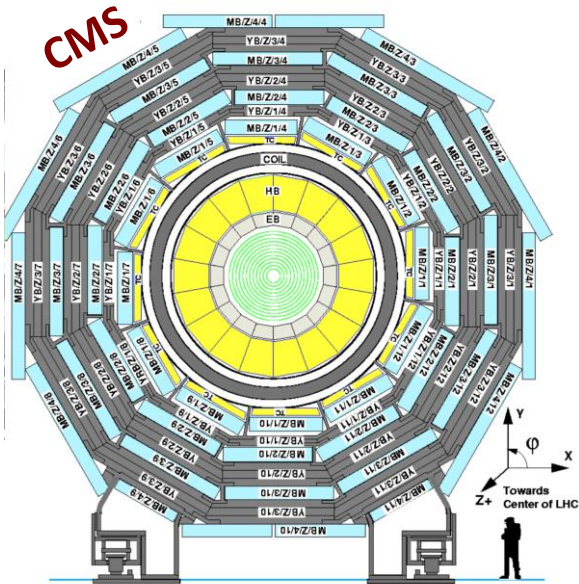


• Detección de Muones •

- 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 eventos



• Detección de Muones •



DRIFT TUBES (DT)

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

Tecnología 'tradicional'

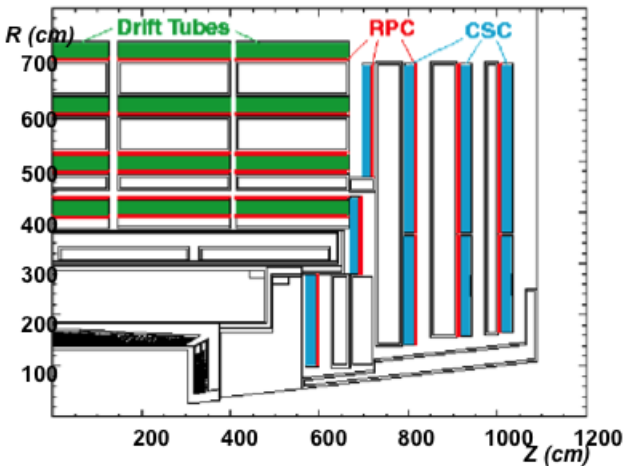
CATHODE STRIP CHAMBERS (CSC)

Coertura hacia delante (6000 m^2)
Tracking (1 mm) y trigger
540 detectores, 0.5 MCanales

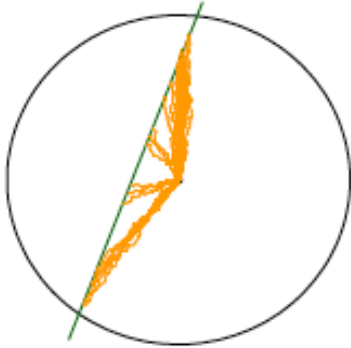
Diseñados para operación en campo magnético intenso y fondo de neutrones $\sim 1 \text{ kHz/cm}^2$

RESISTIVE PLATE CHAMBERS (RPC)

Coertura central y hacia delante
Trigger redundante (3 ns)
612 detectores



• Resolución Temporal •



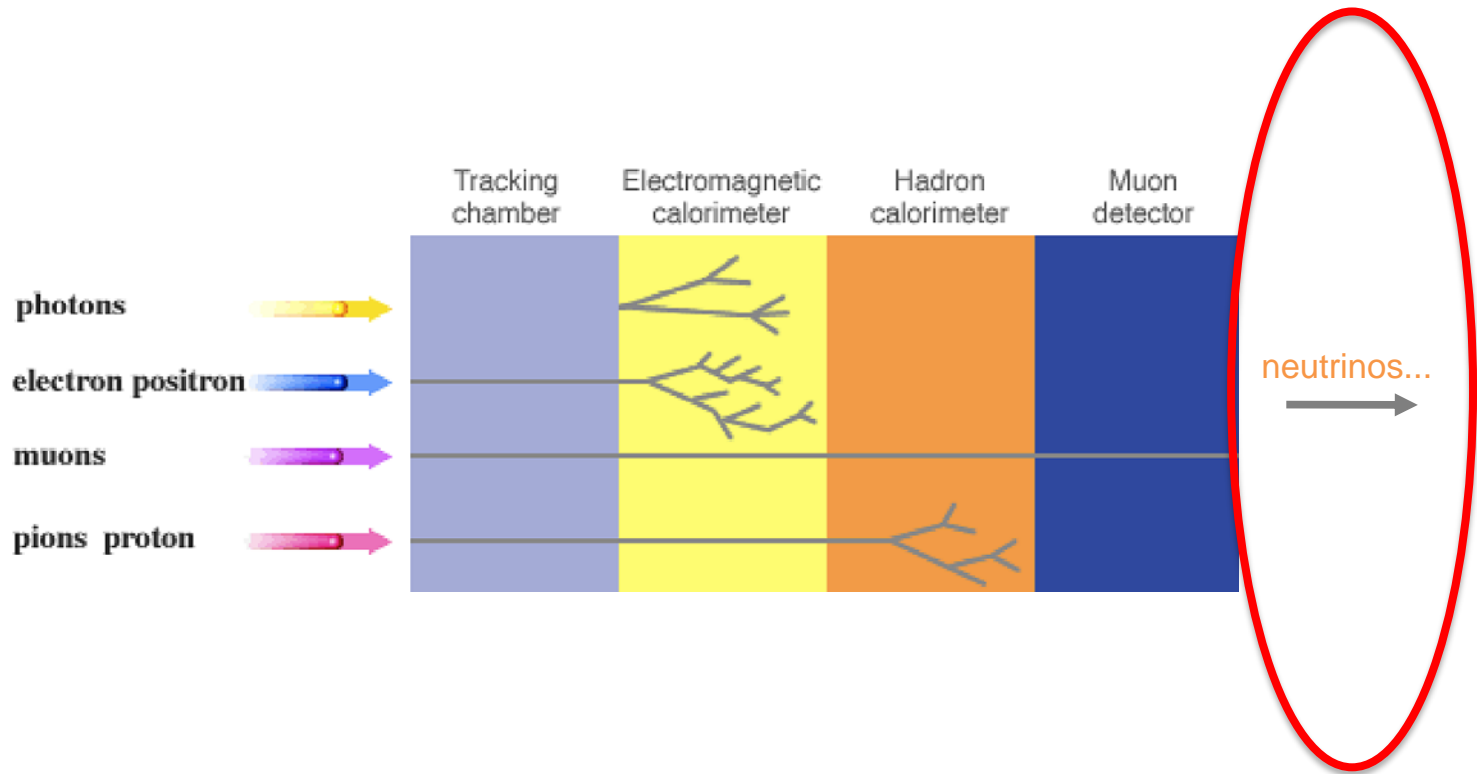
Geometrías cilíndricas -convencionales- tienen una limitación importante:

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 (1 ns)

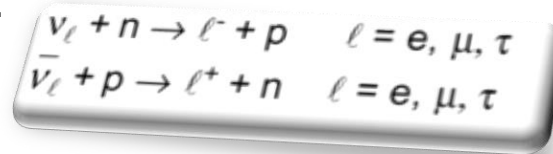
• Interacciones en el Detector •



• Neutrinos •

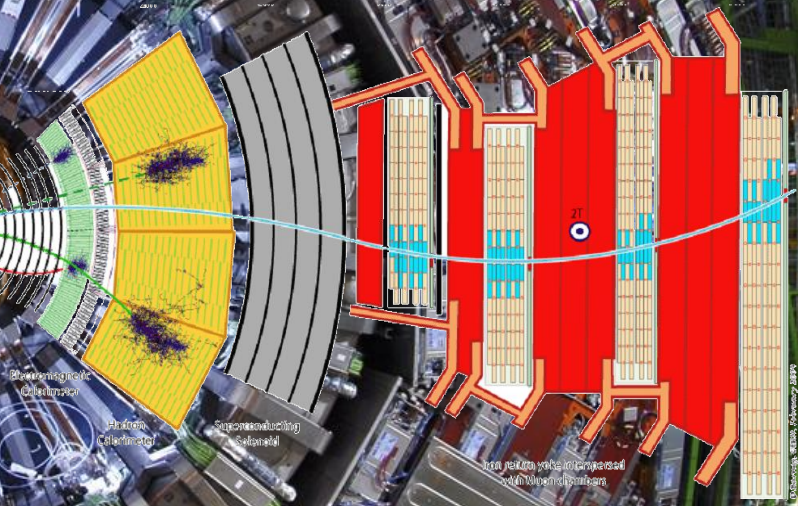
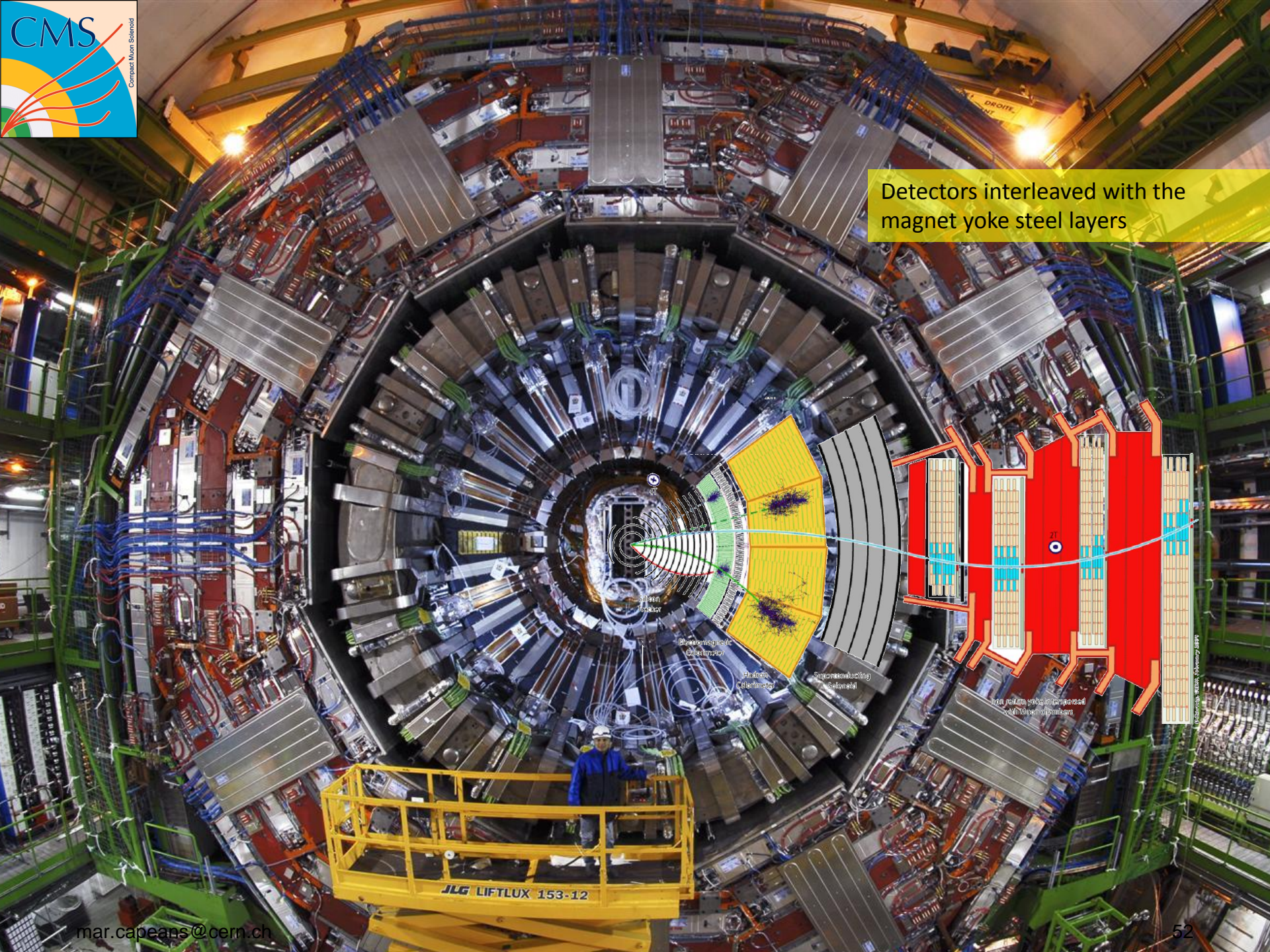
- **Neutrinos interactúan ligeramente**
- Para detectarlas, necesitamos primero una partícula cargada:

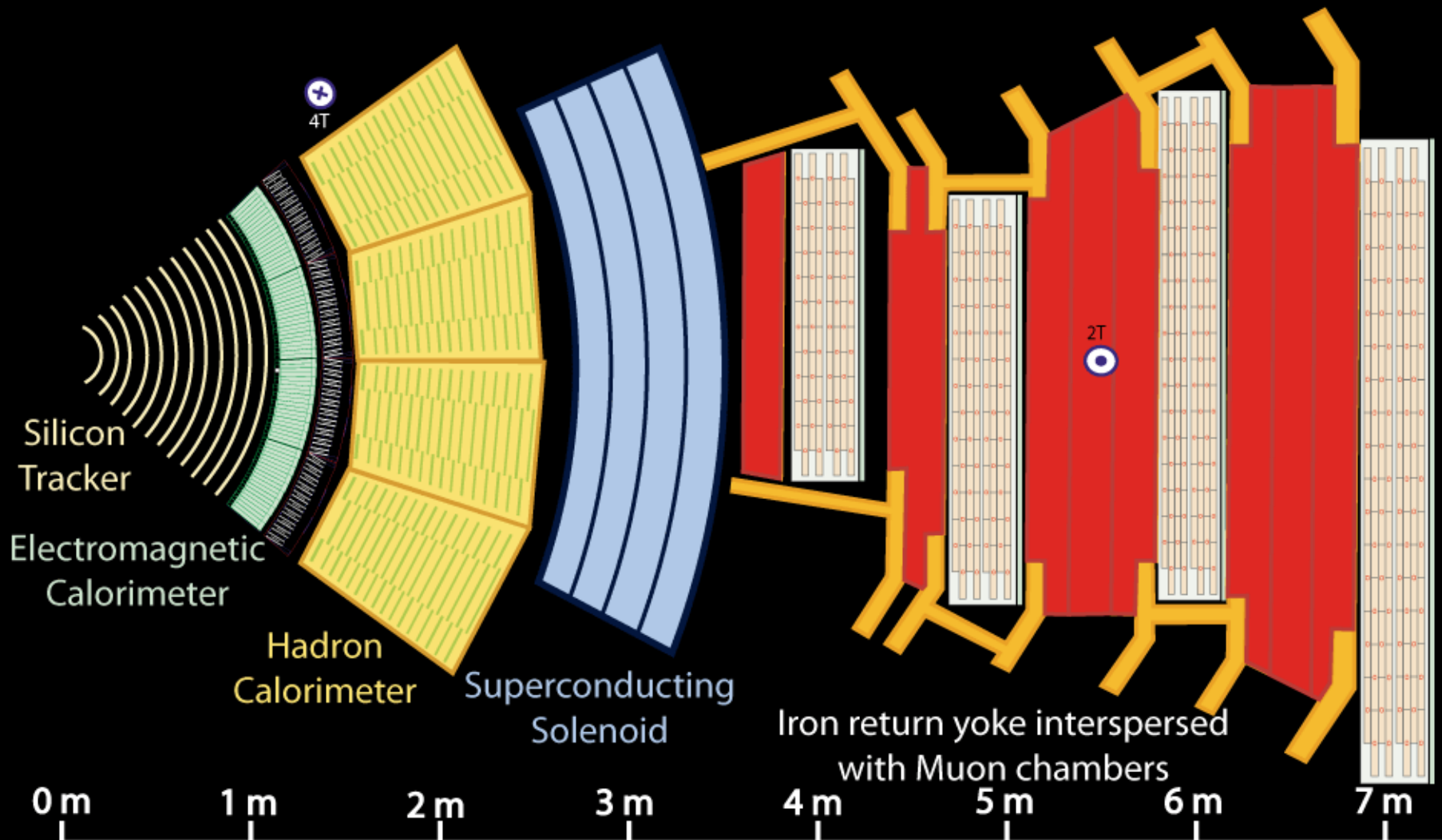
Reacciones posibles:



- Cross-section $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$ es del orden 10^{-43} 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**

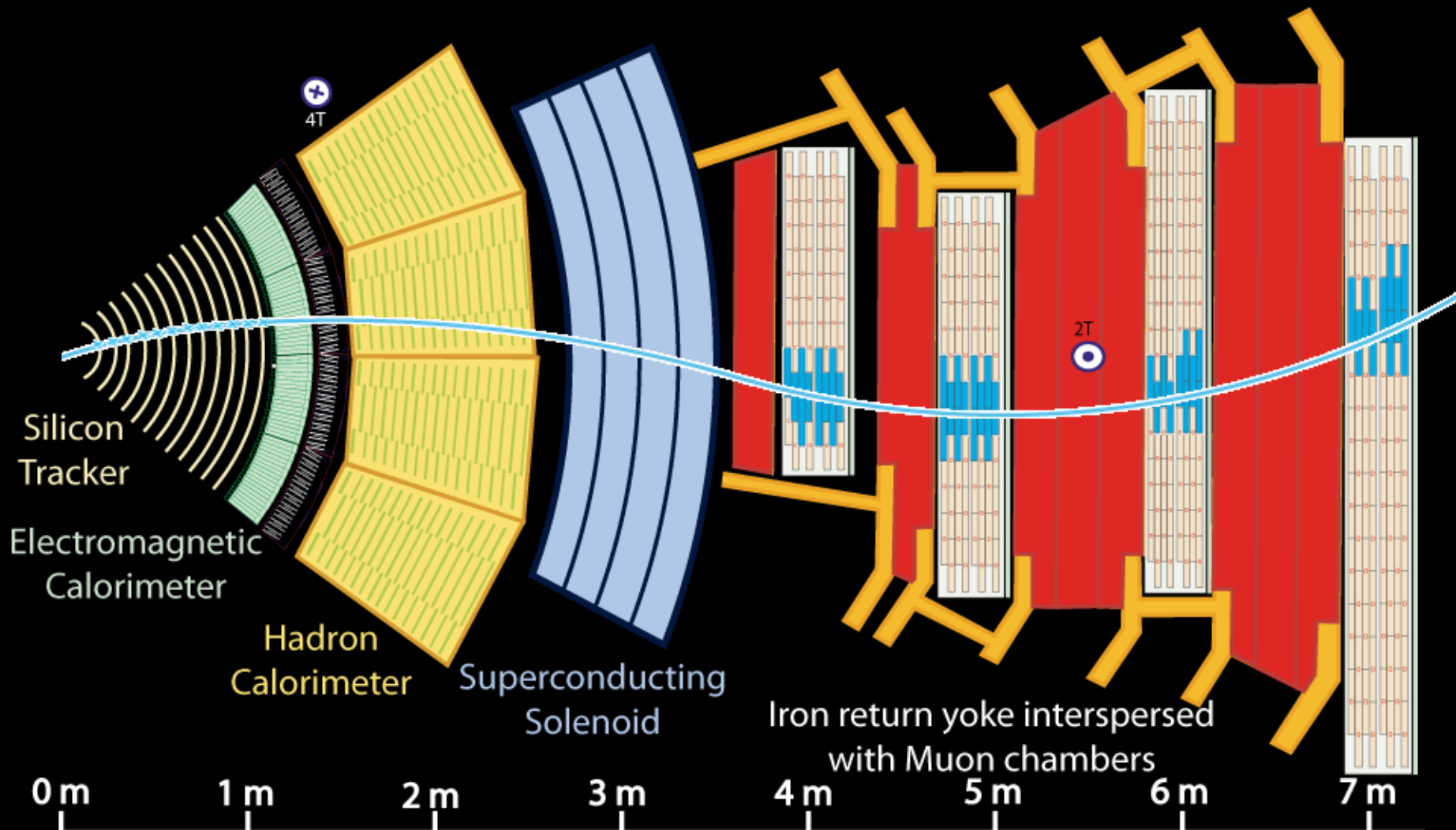
Detectors interleaved with the magnet yoke steel layers





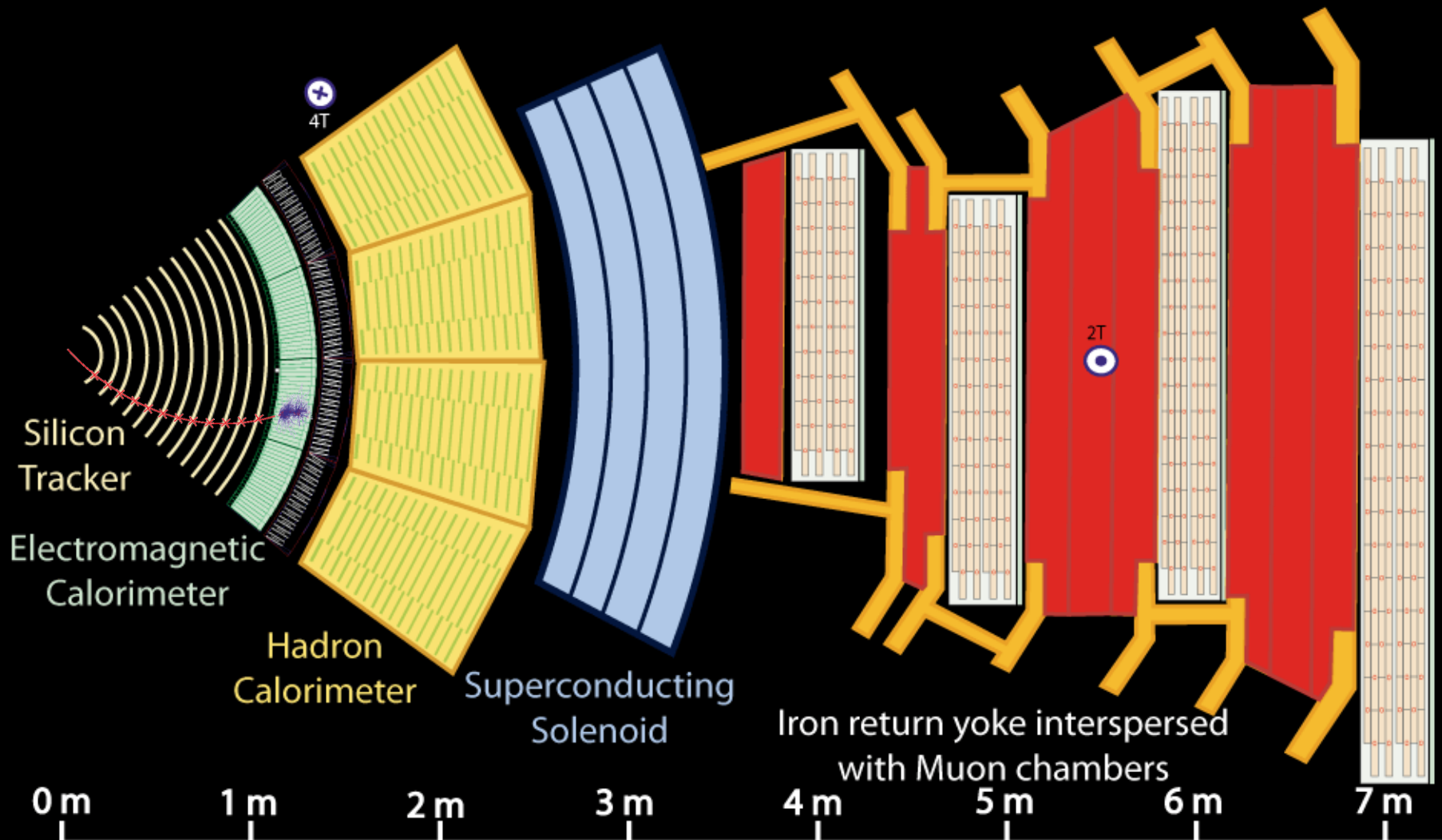
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



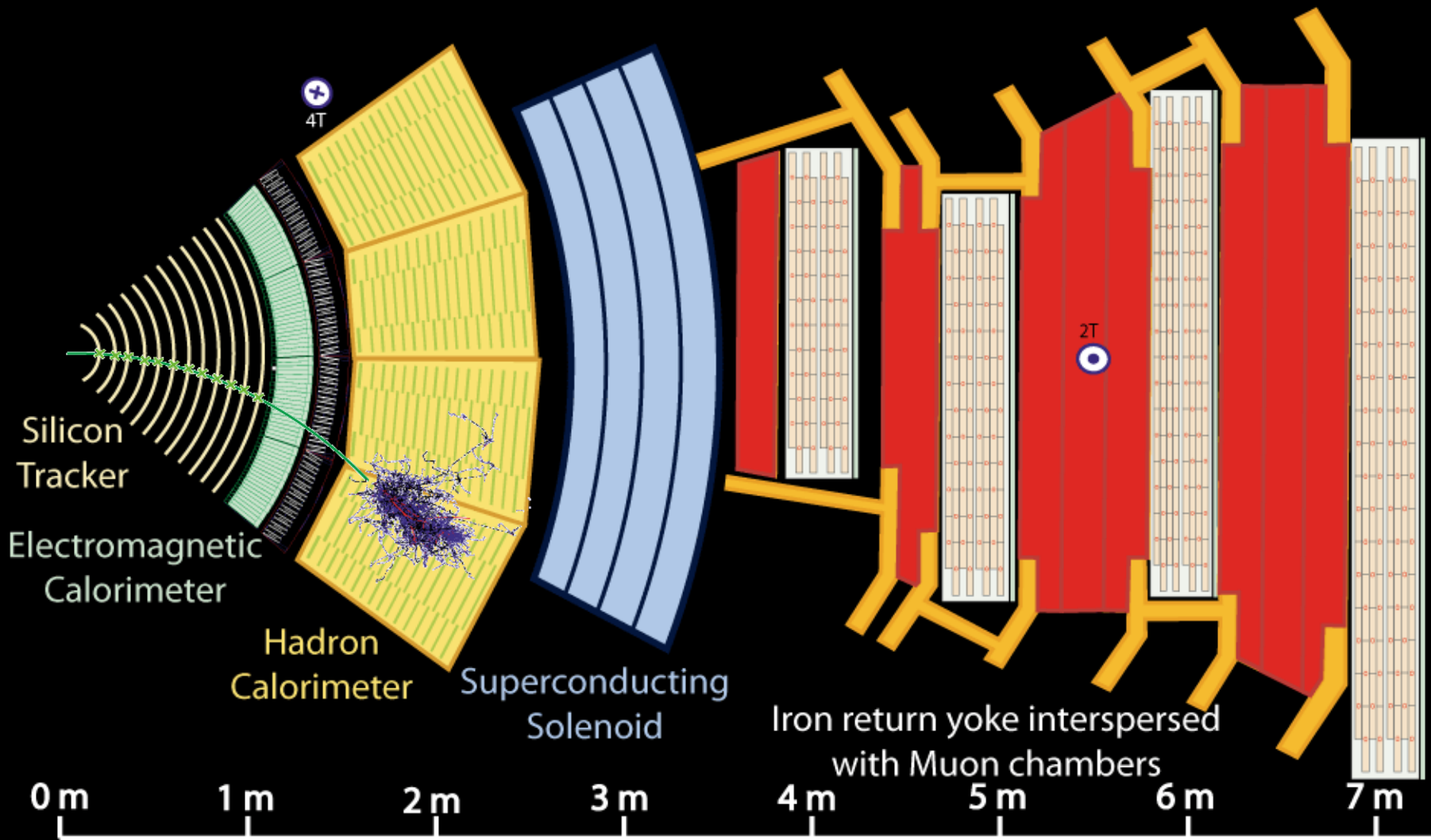
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



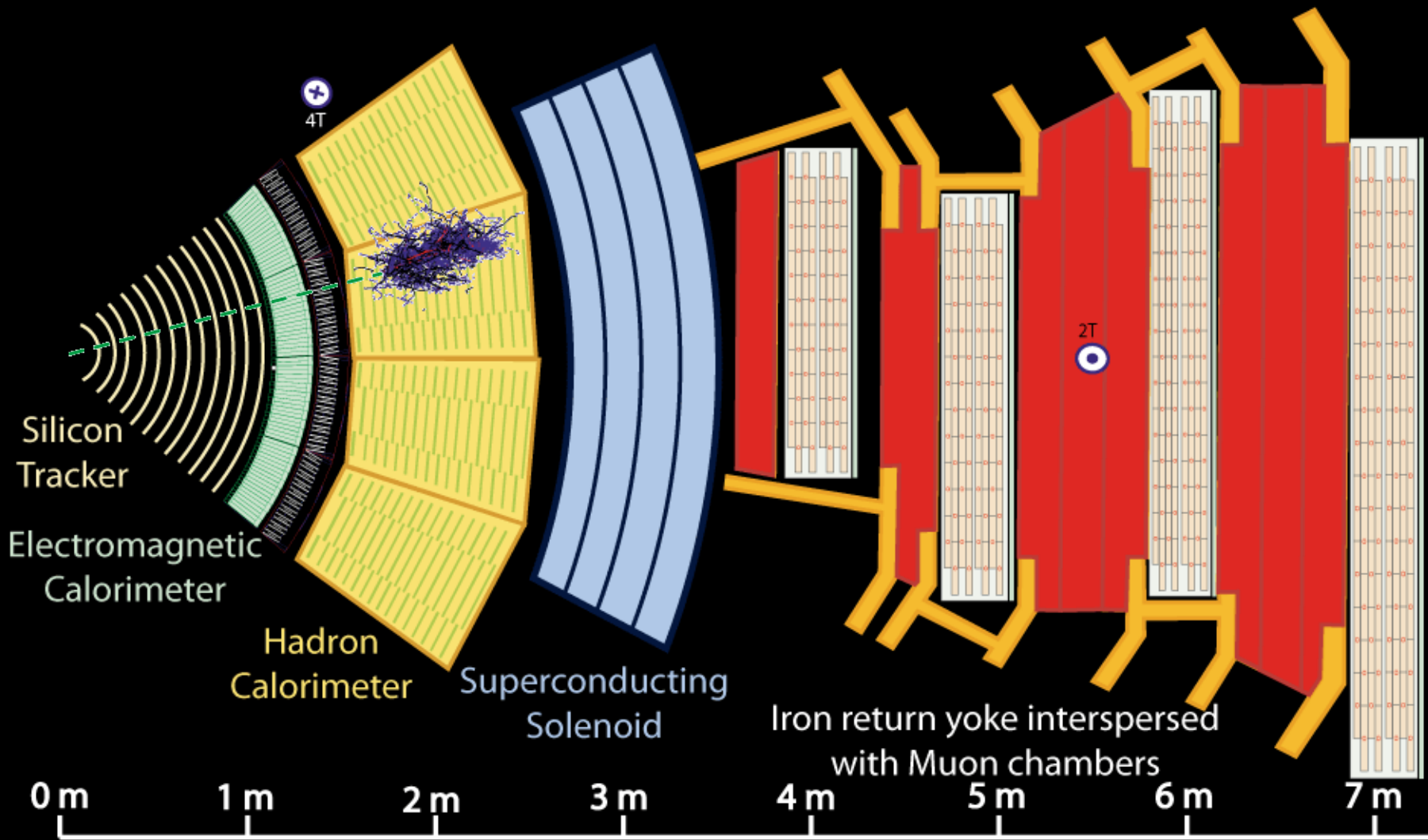
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

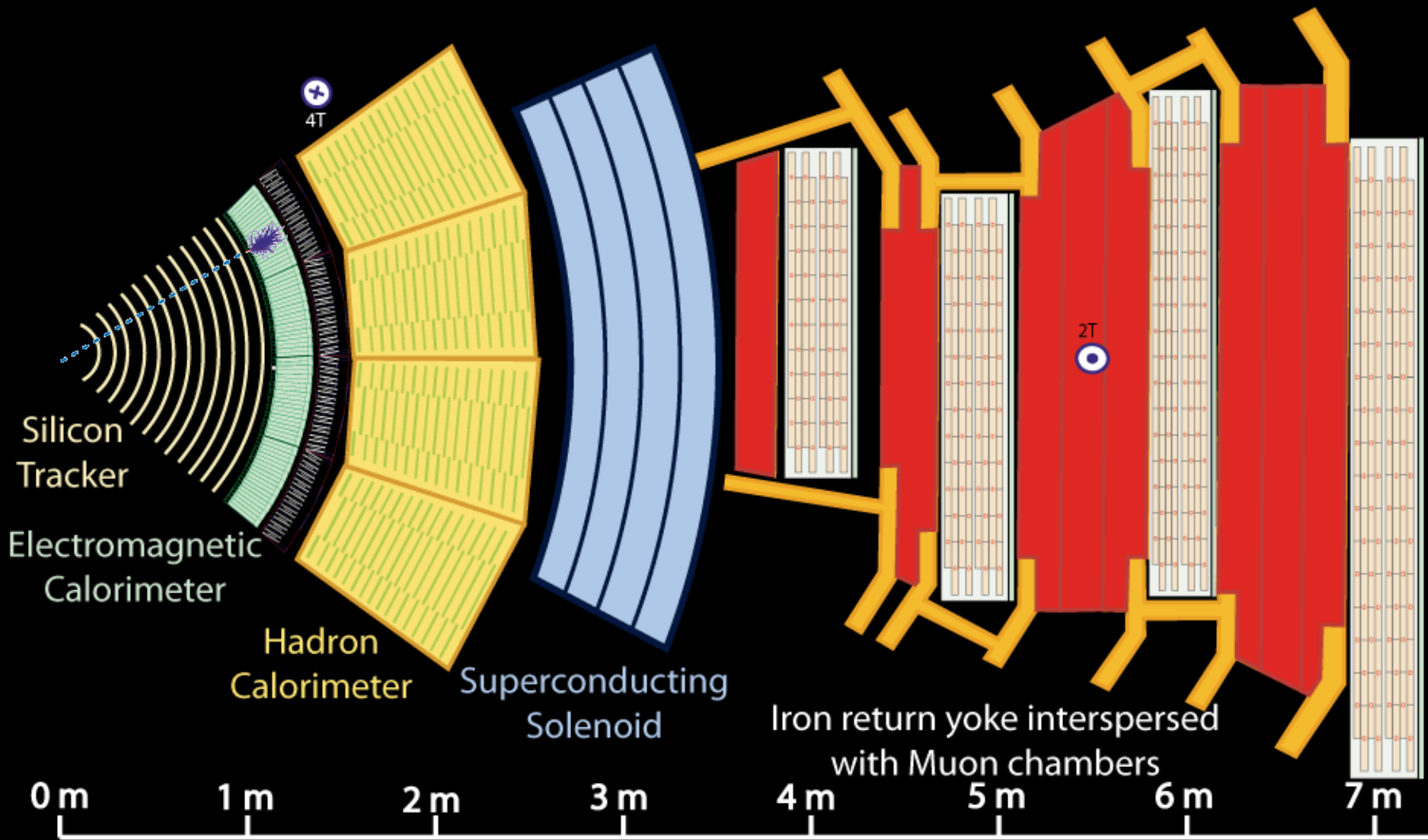
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

— Muon

— Electron

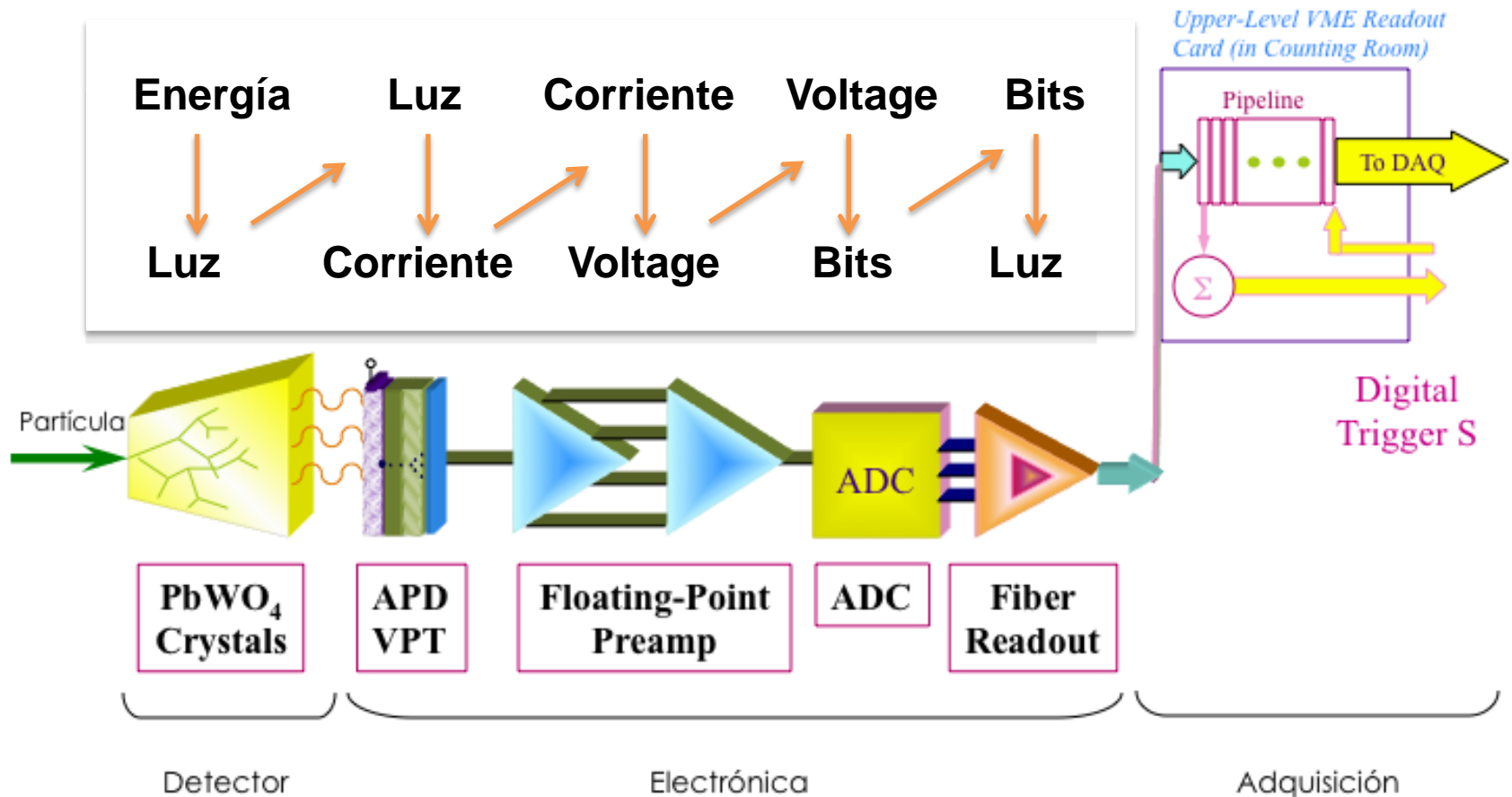
— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



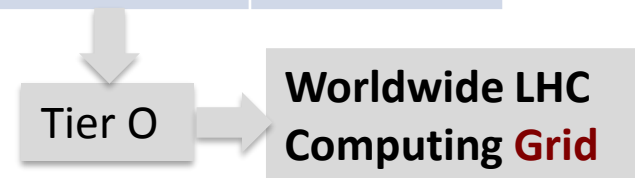
• Señales •



• 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
- Primera selección de datos con un sistema de filtrado (*trigger*) en 3 niveles:

Trigger	Método	Entrada Sucesos/s	Salida Sucesos/s	Factor de reducción
Nivel 1	HW (μ , 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:**

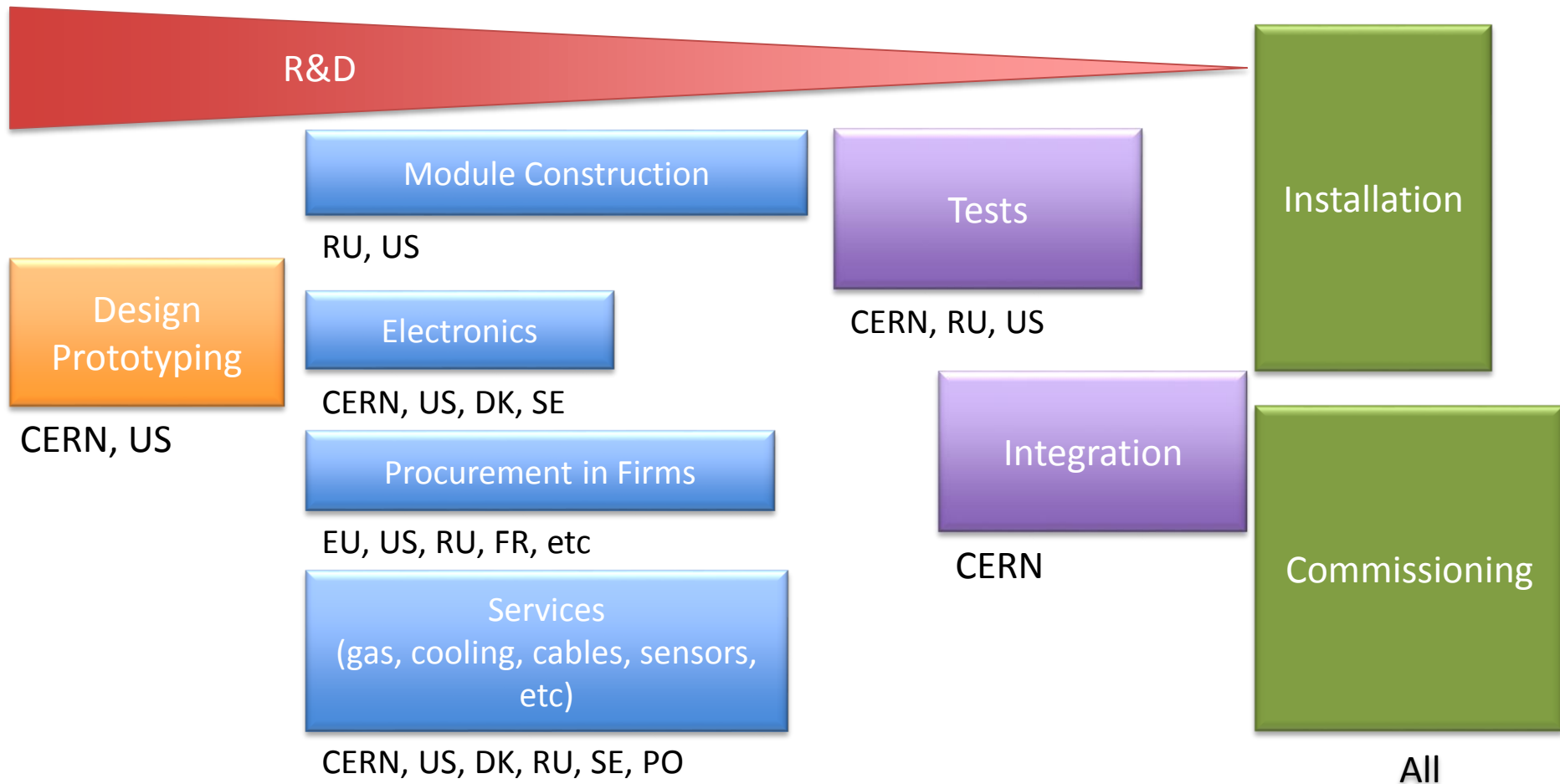
- 25 m de diámetro, 46 m de largo, 7 000 t
- Para la construcción de la caverna experimental se extrajeron 300 000 t de roca
- La ingeniería civil empezó en 1997, la infraestructura (3000 km de cables) y los detectores se empezaron a instalar en 2003. Primeros datos de física en 2010.
- La construcción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

- **Los experimentos internacionales**

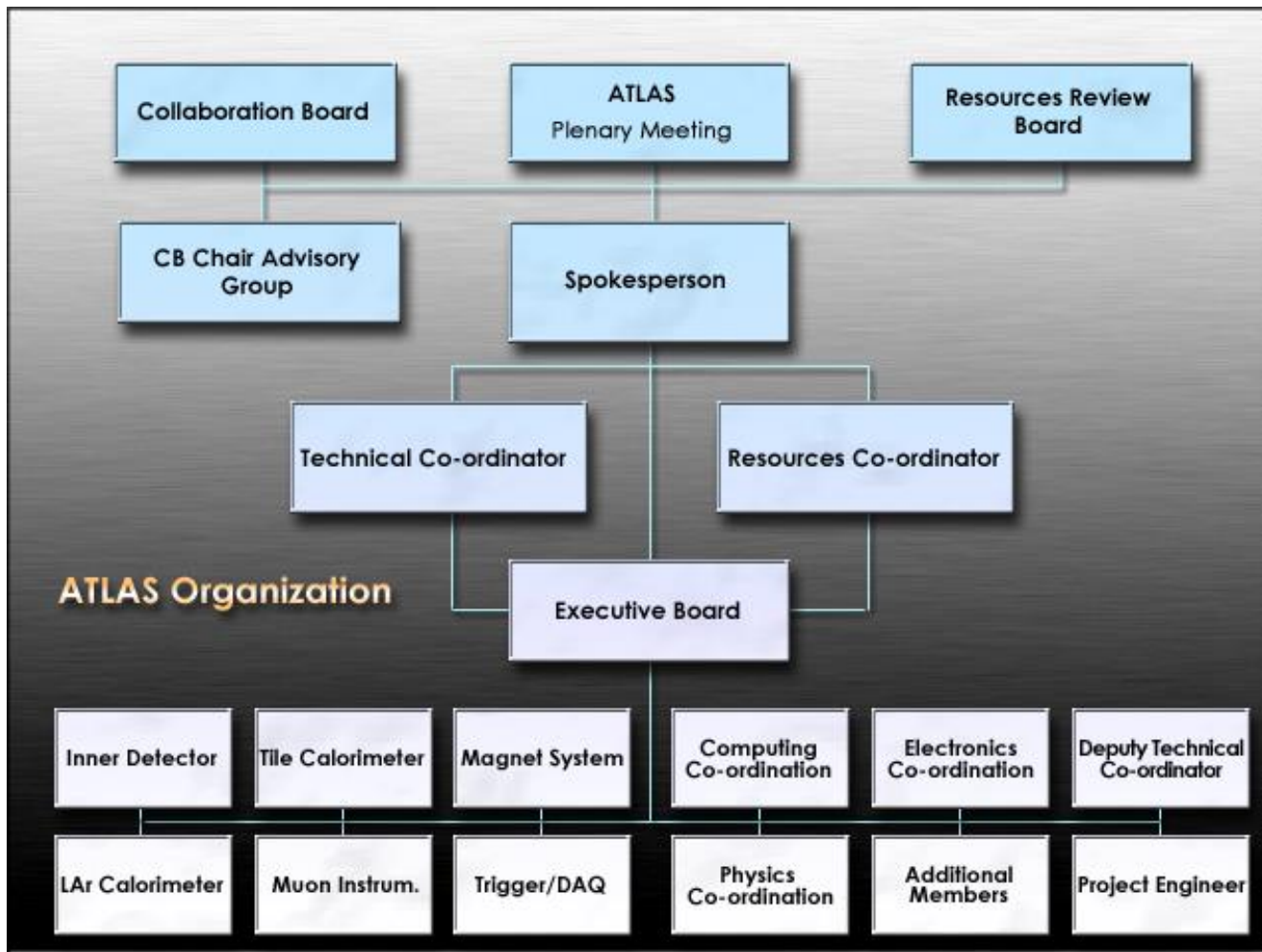
Experimento	Países	Instituciones	Científicos
ALICE	37	154	~1500
ATLAS	38	182	~ 3000
CMS	46	182	~ 3500
LHCb	16	69	~ 800

• Colaboración y Distribución •

Ejemplo: ATLAS Transition Radiation Tracker

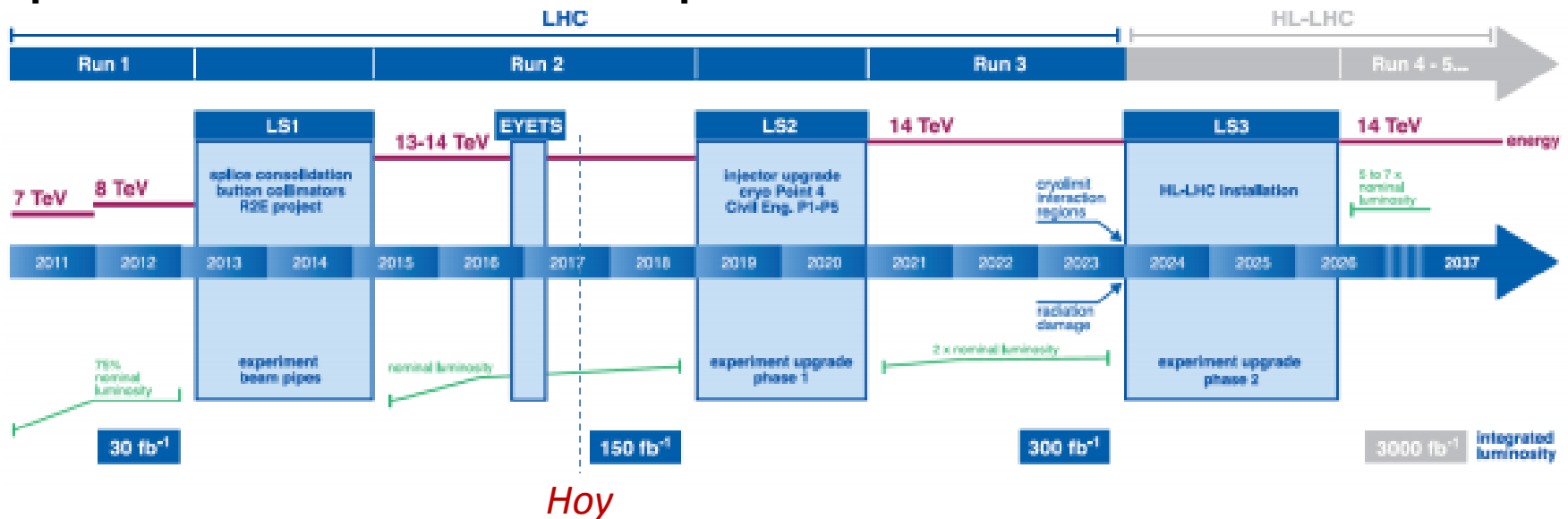


• Gestión de un experimento •



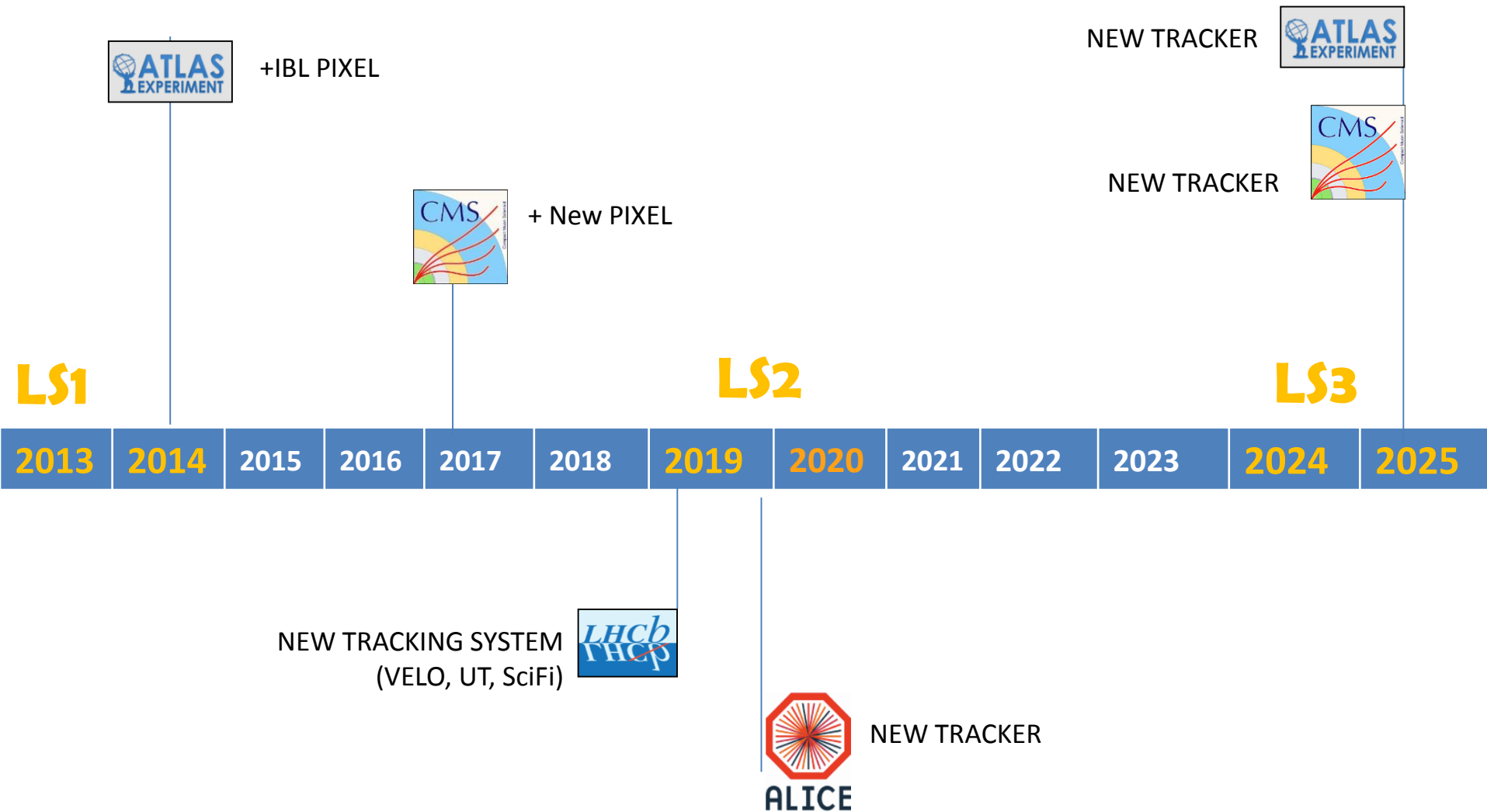
• Futuro •

El descubrimiento del bosón de Higgs es el inicio de un importante programa de trabajo para medir las propiedades de esta partícula con la mayor precisión posible, probar la validez del Modelo Estándar, buscar nueva físicas en la frontera energética. **La prioridad del CERN es la explotación del LHC a su máximo potencial.**






- Reemplazar los elementos del detector inoperables o dañados
- Actualizar los detectores y la electrónica para hacer frente a las nuevas condiciones (más partículas, más radiación, más precisión, etc)

• LHC Tracker Upgrades •



• Diverse R&D •

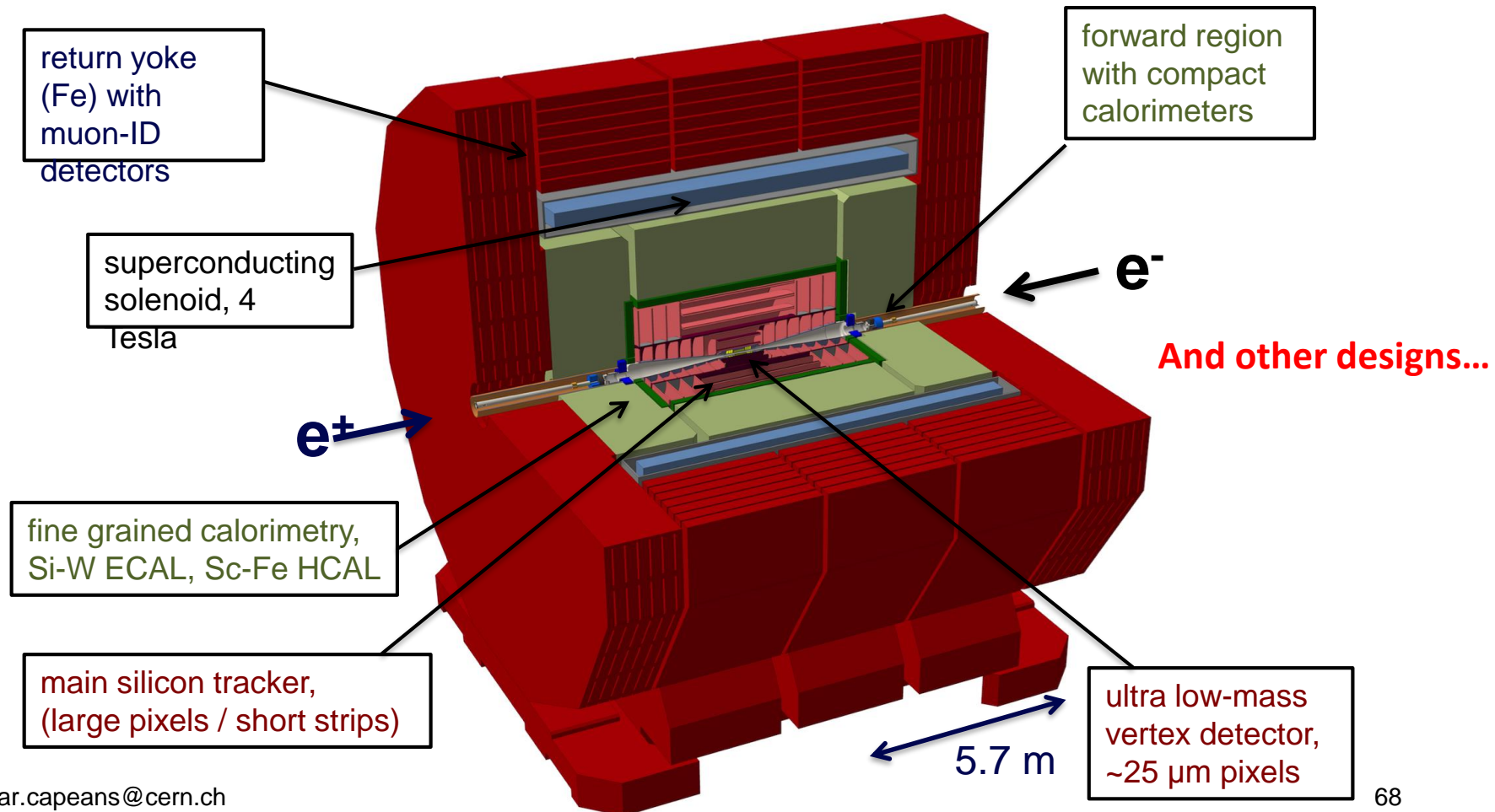
Driven by Study Projects

- **LCD**  
 - The Linear Collider Detector focuses on physics and detector studies for a future e+e- collider at the TeV-scale
- **FCC** 
 - The Future Circular Collider Study explores different designs of circular colliders (100 TeV) for the post-LHC era
- **Neutrino Platform**
 - Fundamental research in neutrino physics at particle accelerators worldwide

• CLIC Detector •

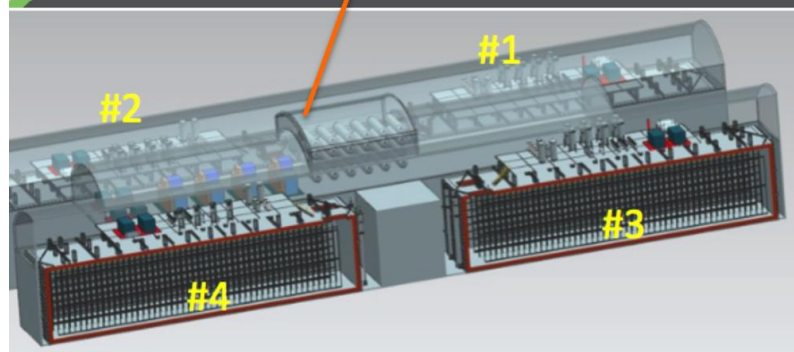
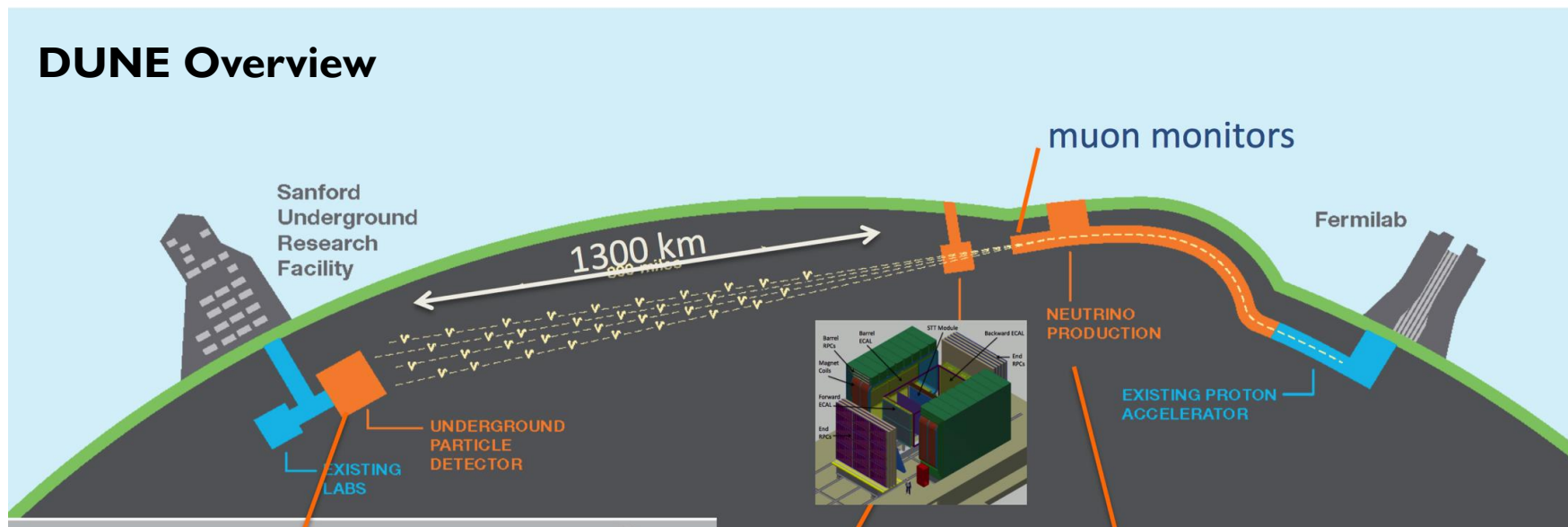
LHC: high rates of QCD backgrounds, need of complex triggers and high levels of radiation.

Linear colliders imply collisions e^+e^- that are pointlike, with initial state well-defined and therefore with a clean experimental environment: possible trigger-less readout, and most important, low radiation levels. **Makes it easier to use new technologies.**



• Neutrino Detectors •

DUNE Overview



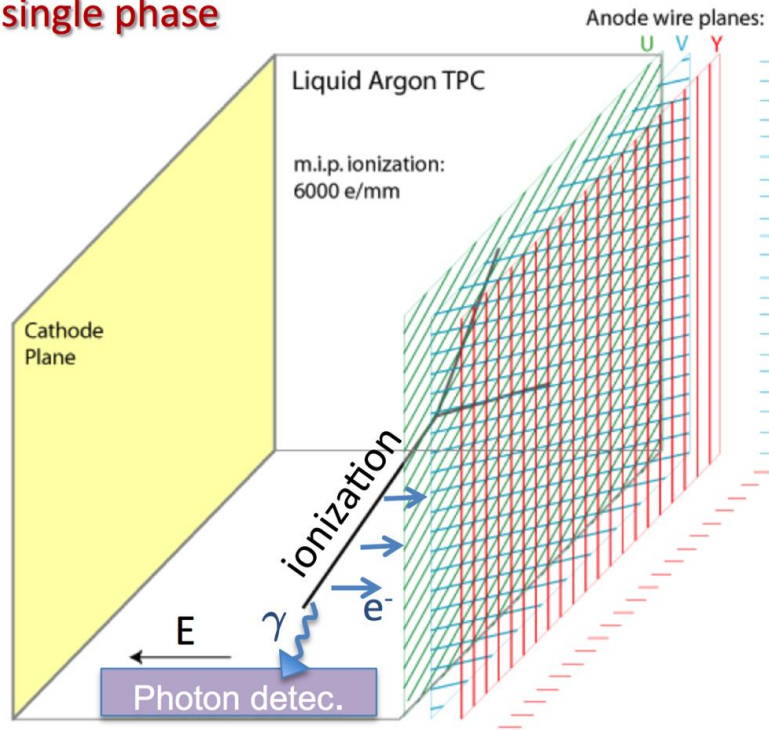
high precision
near detector
at 574m

Wide band, high purity ν_μ beam with peak flux
at 2.5 GeV operating at ~ 1.2 MW and upgradeable

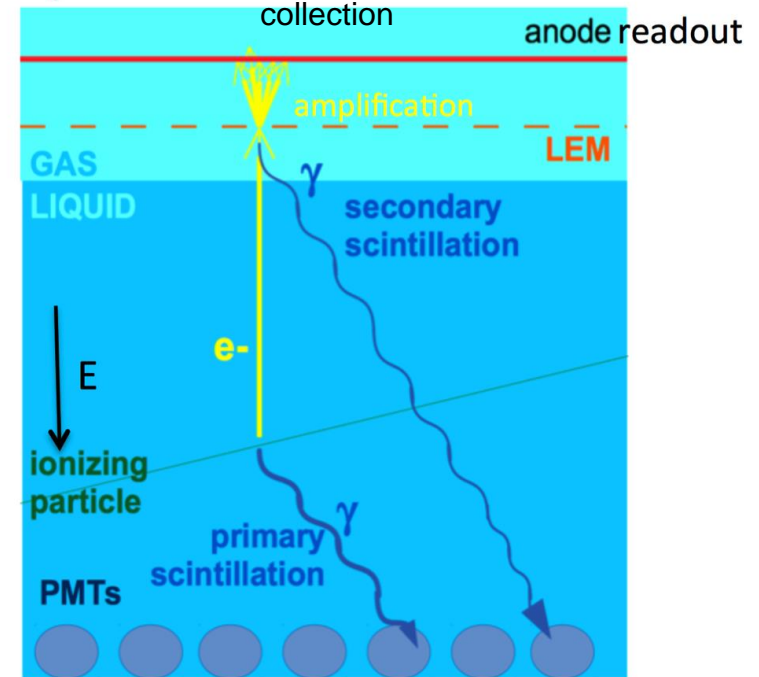
- four identical cryostats deep underground
- staged approach to four independent 10 kt LAr detector modules
- Single-phase and dual-phase readout under consideration

• LAr TPC Technologies •

single phase



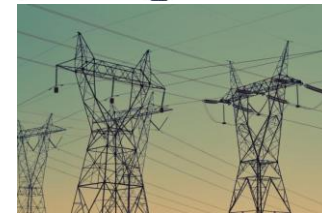
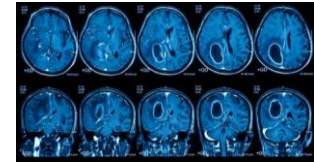
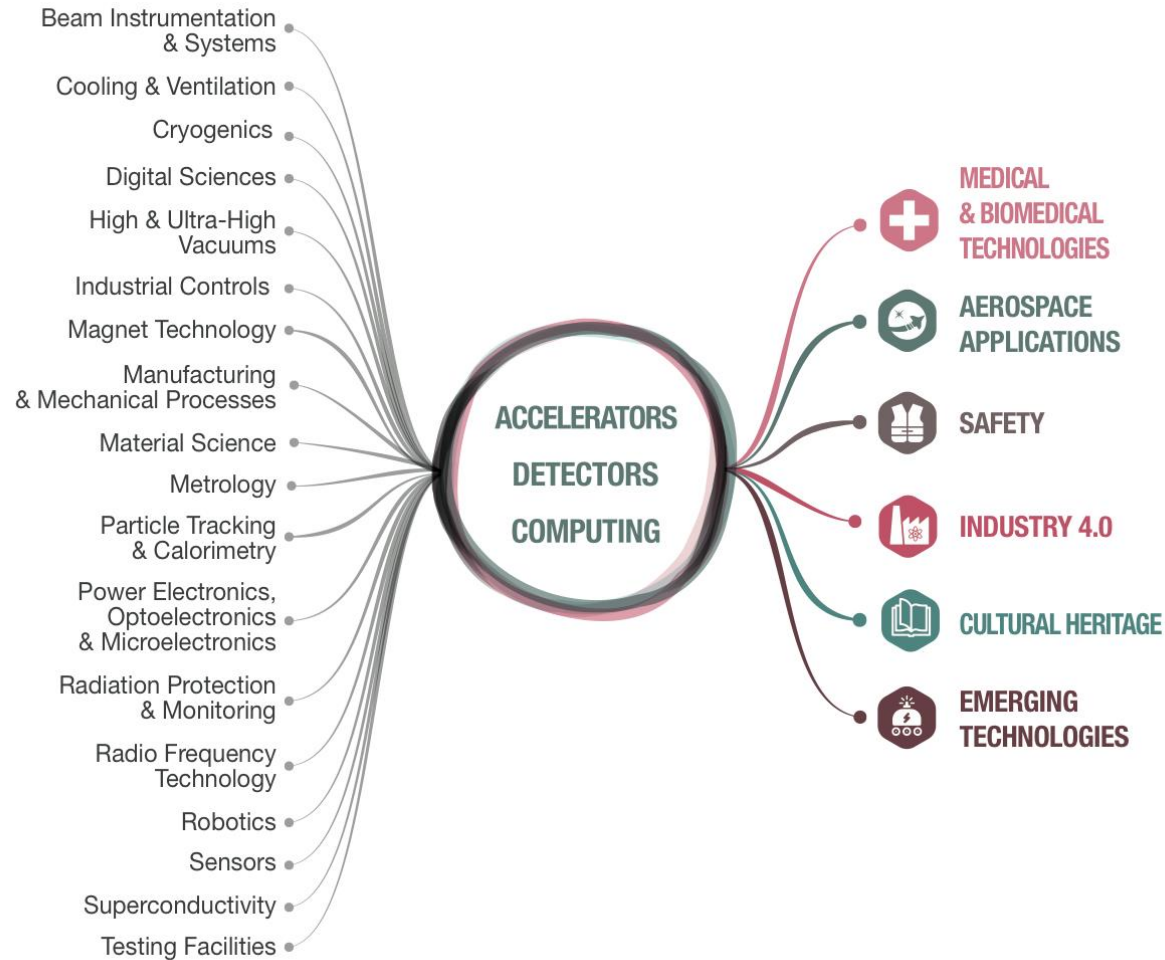
dual phase



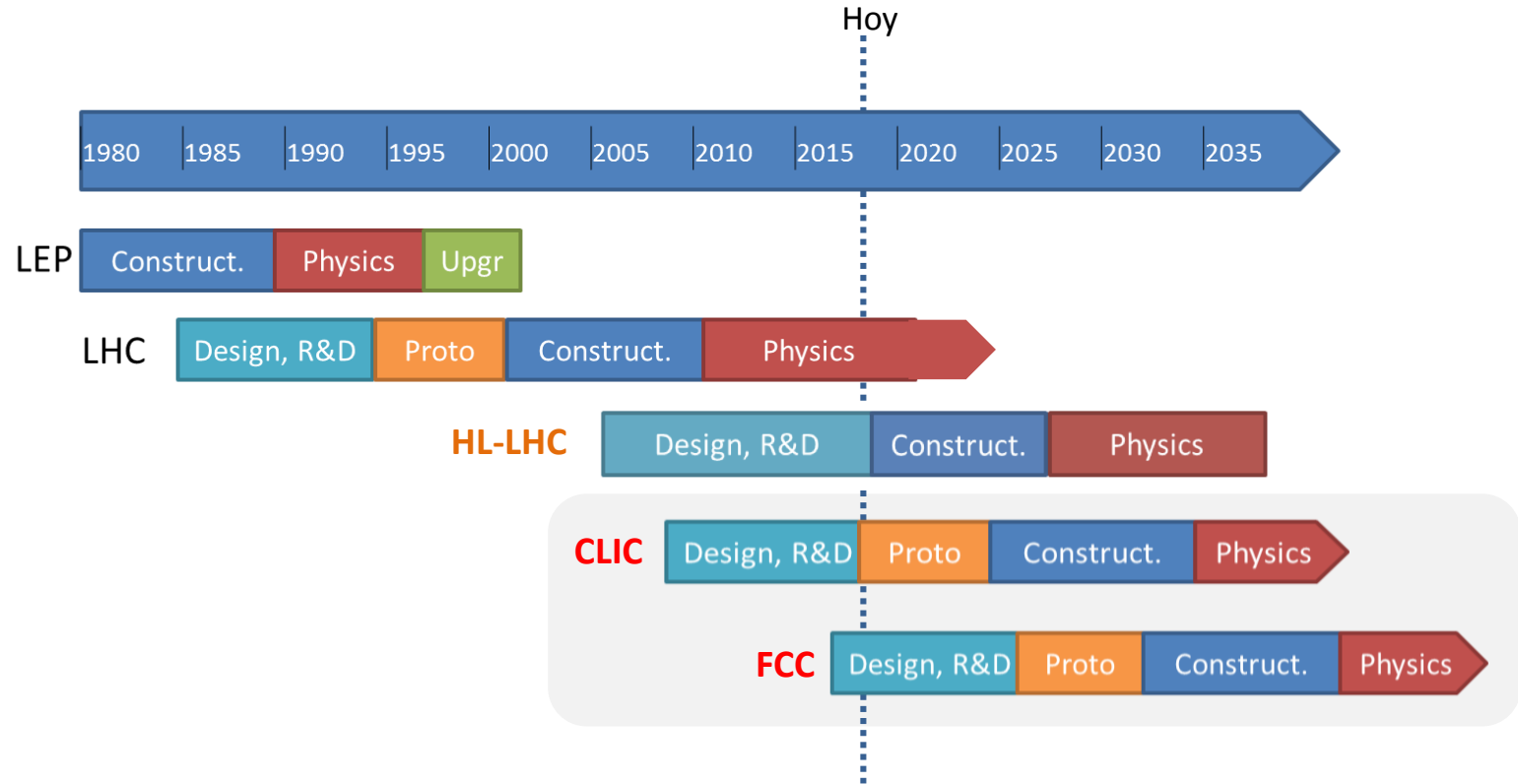
Ionization charge extracted into Ar-gas phase, charge amplification via large electron multipliers (LEM) before readout, 2 dimensional charge collection

- Ionization: $\sim 60,000 \text{ e}^-/\text{cm}$ for mip (for $E \approx 500\text{V}/\text{cm}$)
 → Provides detailed imaging, calorimetric and particle identification (PID)
- Scintillation: $\sim 24,000 \text{ } \gamma/\text{MeV}$ (for $E \approx 500\text{V}/\text{cm}$)
 → offers event trigger (t_0) information + improved calorimetric information

Transferencia de conocimiento y tecnología



¿Físicos o Tecnólogos?



• Para vuestros alumnos •

- La comprobación experimental es la clave para los descubrimientos y el avance del conocimiento. Tenemos que inventar y desarrollar nuevas tecnologías para los experimentos.
- Existe una relación muy estrecha entre los descubrimientos en Física y los desarrollos en instrumentación (Aceleradores, Detectores, Electrónica e Informática)
- La tendencia en instrumentación es el desarrollo de diseños cada vez más integrados, realizados en estrecha colaboración entre físicos, expertos en microelectrónica, ingenieros mecánicos/térmicos, científicos de materiales y micro/nanotecnologías, ciencias de la

Los físicos experimentales contribuyen al ciclo completo:

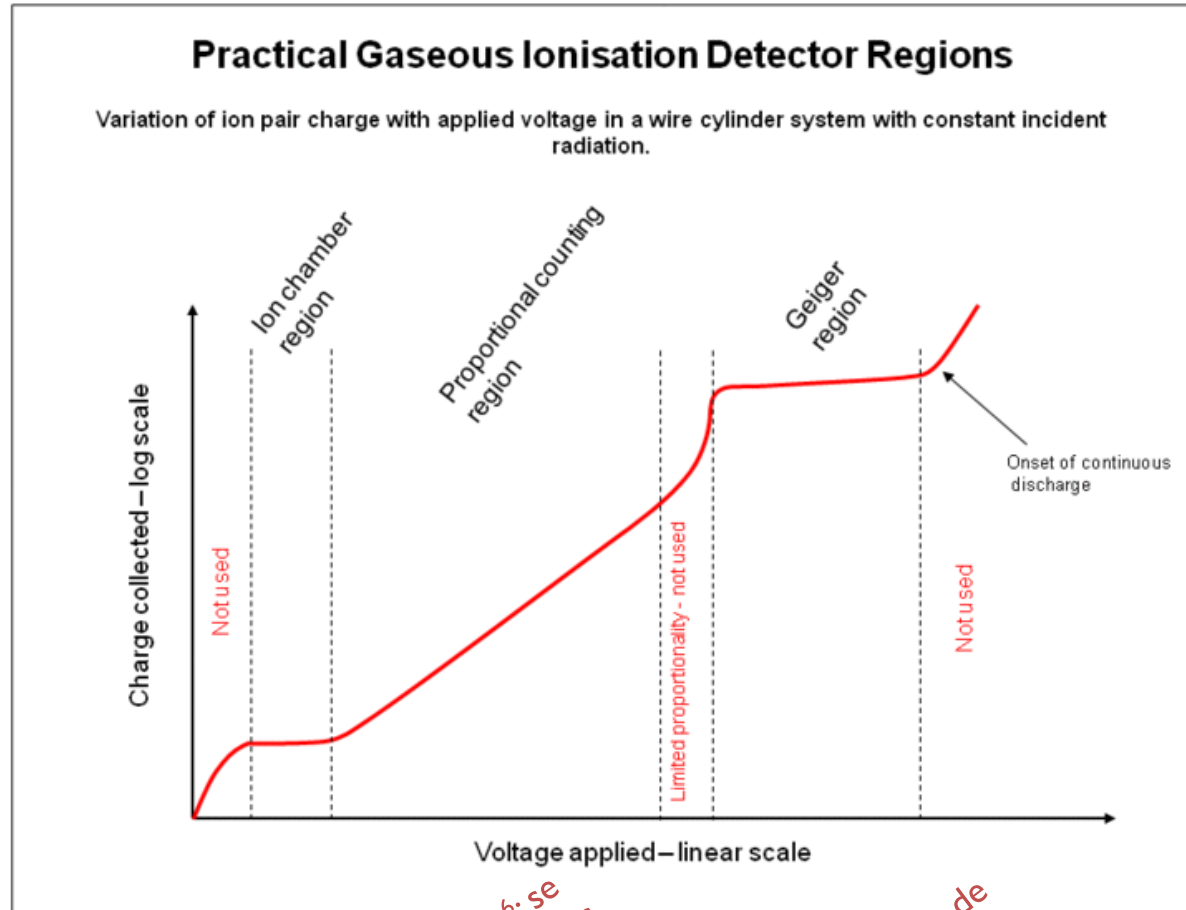




- *The Particle Detector BriefBook* <http://www.cern.ch/Physics/ParticleDetector/BriefBook/>
- CERN summer student lectures by W.Riegler:
<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=134370>
- ICFA Schools on Instrumentation
 - The last one:
<http://fisindico.uniandes.edu.co/indico/conferenceTimeTable.py?confId=61#20131125>
- **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-

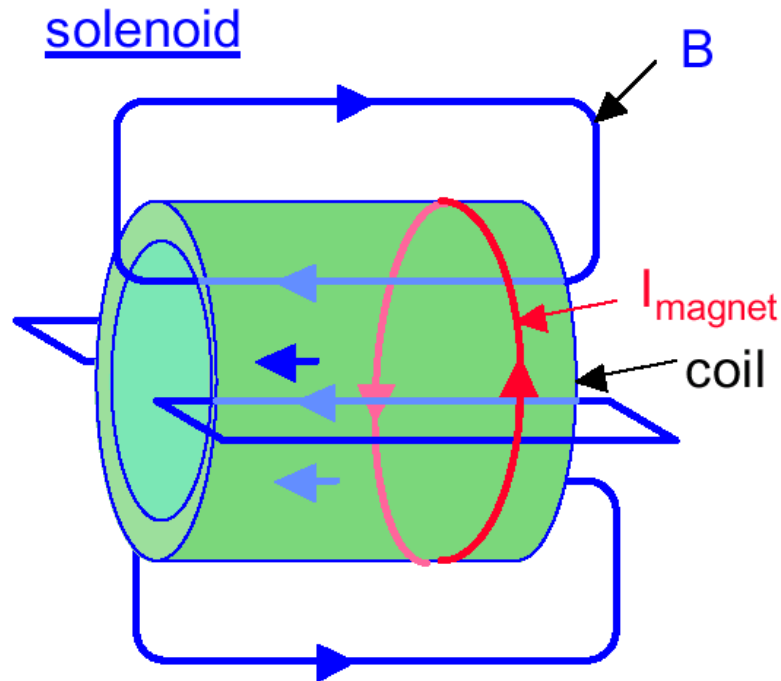
Spare Slides

• Regiones de Operación •

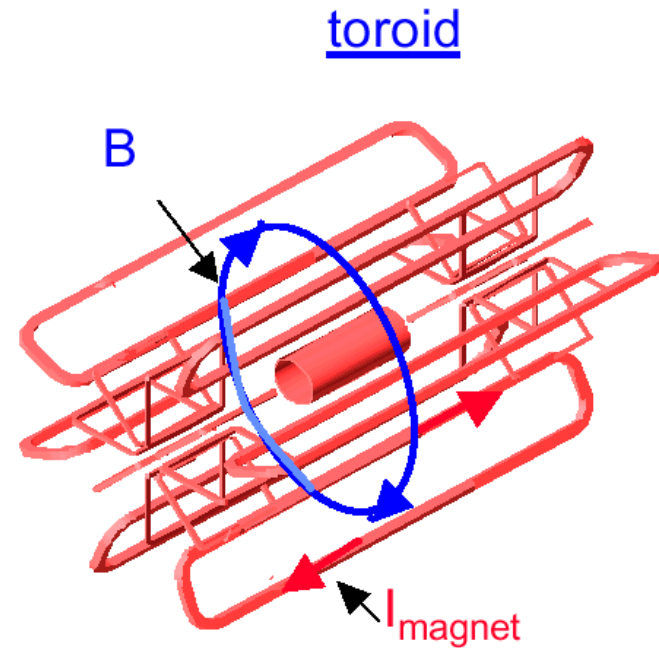


Recombinación
Ionización (plateau)
Ganancia hasta 10^6 ; se necesita amortiguar las avalanchas secundarias
dispersionan el campo E
avalanchas secundarias
avalanchas, alta emisión de fotones, breakdown

• Campos magnéticos •

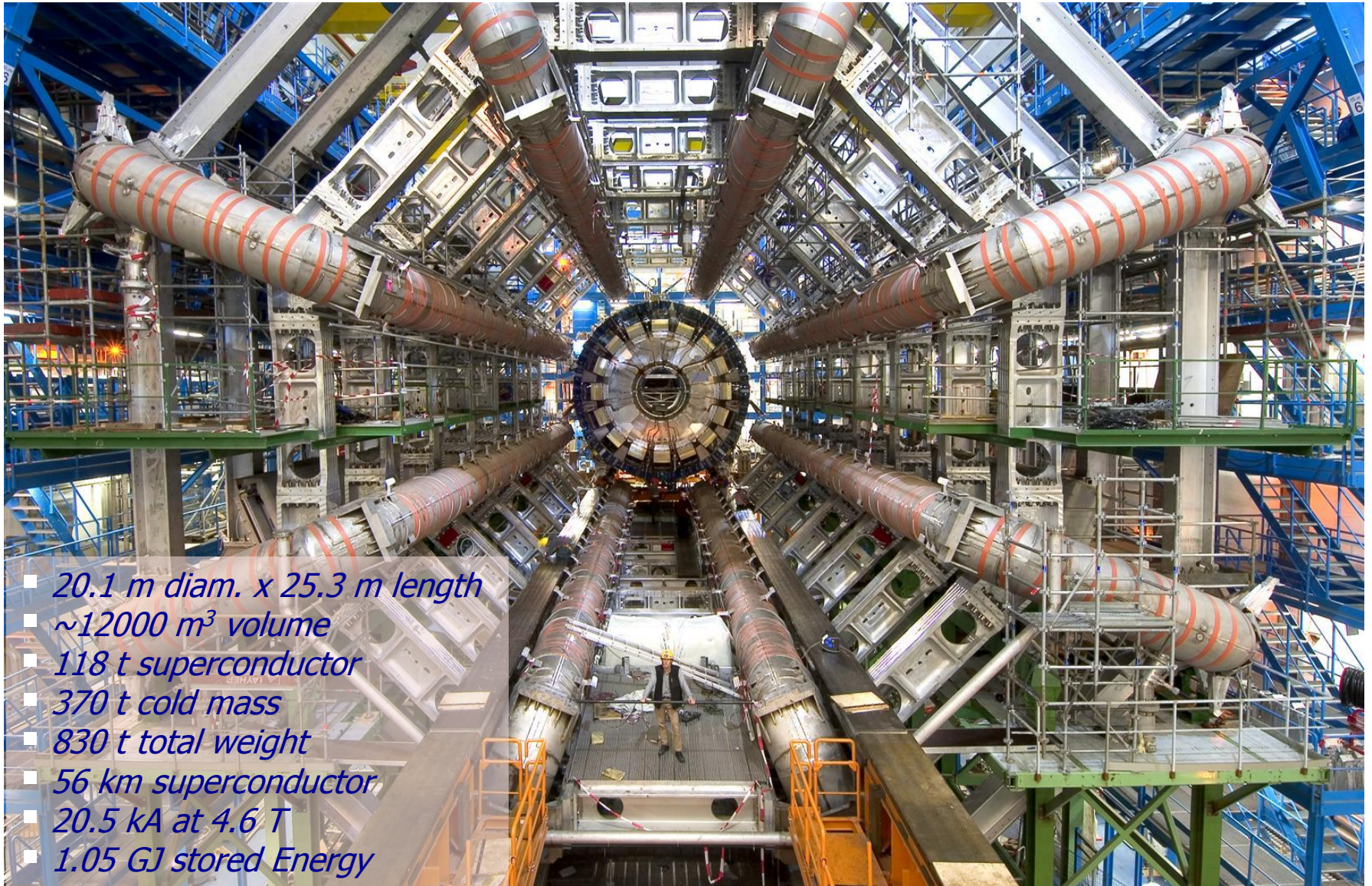


- + Large homogenous field inside coil
- Weak opposite field in return yoke
- Size limited (cost)
- Rel. high material budget



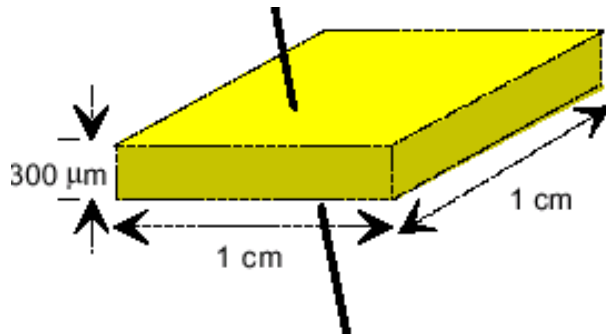
- + Field always perpendicular to p
- + Rel. large fields over large volume
- + No return yoke needed
- + Rel. low material budget
- Non-uniform field
- Complex structure

• ATAS Toroidal Magnet •



- 20.1 m diam. x 25.3 m length
- ~12000 m³ 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 •



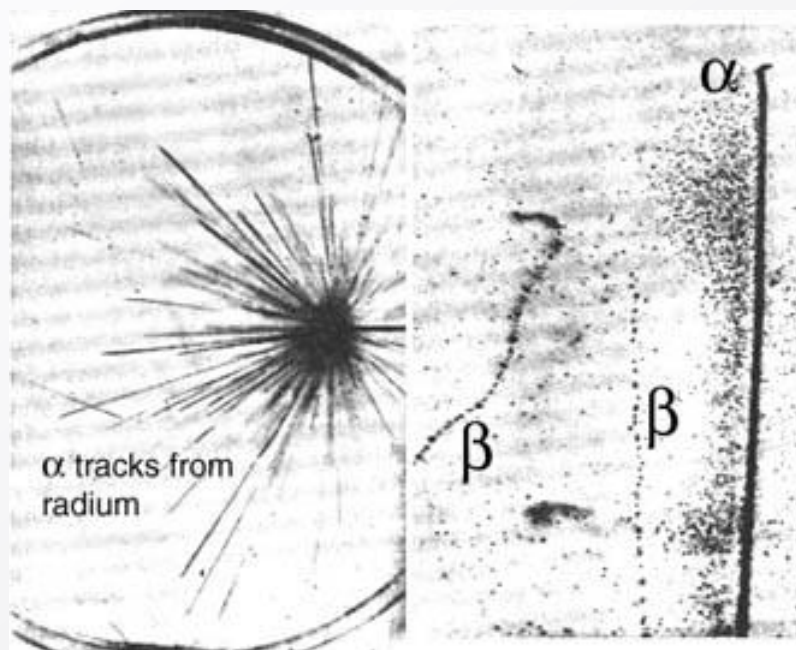
Current conduction in a semiconductor occurs through the movement of free electrons and "holes", collectively known as charge carriers. Adding impurity atoms to a semiconducting material, known as "doping", greatly increases the number of charge carriers within it. When a doped semiconductor contains 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 4.5×10^8 free charge carriers; compared to around 3.2×10^4 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

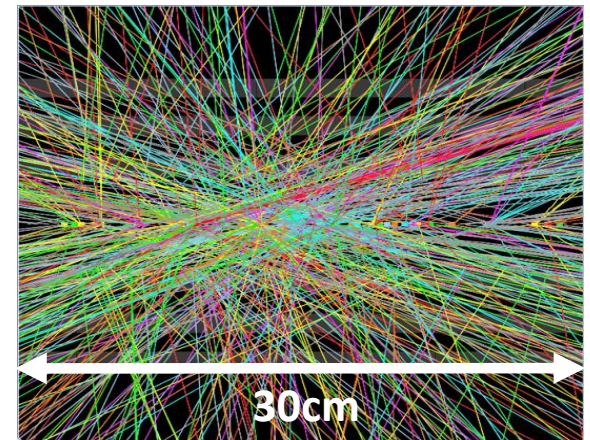
The general procedure was to allow water to evaporate in an enclosed container to the point of saturation and then lower the pressure, producing a **super-saturated volume of air**. Then the passage of **a charged particle would condense the vapor into tiny droplets**, producing a visible trail marking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

• Tracker Upgrades •

Challenges for HL-LHC

- Collisions to start mid-2026
- Maximum leveled instantaneous luminosity of $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Currently $\sim 1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- 3,000 fb⁻¹ Integrated luminosity to ATLAS/CMS over ten years of operation
- 200 (mean number of) proton-proton interactions per bunch crossing. Design was 23, recently extended capability to > 50 pp interactions per bunch crossing
- Higher particle fluences: increased radiation tolerance
- Higher occupancies: finer segmentation
- Larger Area ($\sim 200 \text{ m}^2$ for strips and 16 m^2 for pixels): cheaper sensors, ease of construction, distributed production
- Low noise and power

	Silicon Area (m ²)	MChannels
Pixel	8.2	638
Strip	193	74



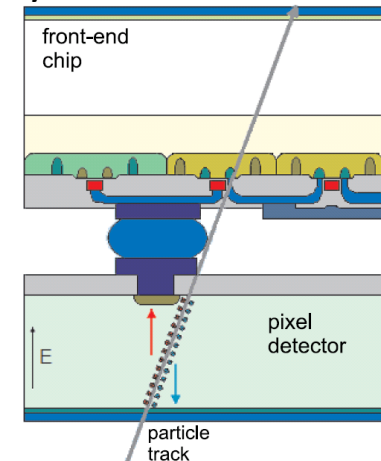
• Pixels Monolíticos •

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

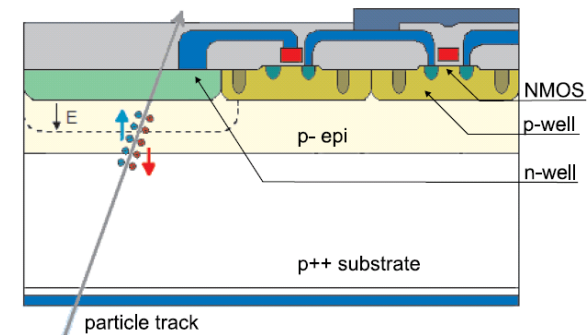
- + El proceso de la señal se integra en el sensor (diseño compacto)
- + Celdas (5-50 μm)
- + No existen interconexiones externas
- + Sistemas ligeros, finos $\sim 20\mu\text{m}$

- 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

• HL-LHC 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 (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 (≥ 10 Gbps)
- **Trigger/DAQ/Offline computing**
 - New trigger strategies, processing, networks, storage, CPU, CLOUD-computing...