

Introducción a los detectores de partículas

Ejemplos históricos. Principios generales de detección de partículas. Hincapié en detectores para experimentos de Partículas de Altas Energías

Silvia Goy López (CIEMAT)

Detectores

- Detector: Aparato que sirve para detectar, **descubrir la existencia de algo que no era patente**
- En Física de Partículas podemos reconocer y medir las propiedades de las partículas por las huellas que dejan en los detectores (por cómo interaccionan en los detectores)
- Queremos saber el **tipo** de partícula, su **energía**, la **carga** eléctrica, el punto donde se originó, y su **trayectoria de manera precisa**
- Las “huellas” dependen no sólo del tipo de partícula sino también del material en que se producen

Cómo se diseña un detector depende del tipo de partícula a detectar, en qué condiciones, de las tecnologías de detección disponibles y su coste



Primeros detectores de partículas ~1930

- Cámara de niebla

- Inventada por C. Wilson para estudiar la formación de nubes y lluvia
- Forma básica: entorno cerrado que contiene **vapor de agua** superenfriado y supersaturado
- El paso de una **partícula cargada** pasa por el medio **ioniza** las moléculas de vapor (ia EM)
- Alrededor de los iones se forman gotas de líquido
- El paso de las partículas va produciendo una estela o **traza que se puede ver y fotografiar**-> puede usarse como detector de partículas
- Cuando se aplica un **campo magnético** vertical, las partículas cargadas se curvan en sentidos opuestos dependiendo del signo de su **carga**

Fotografía con rayos cósmicos 1932

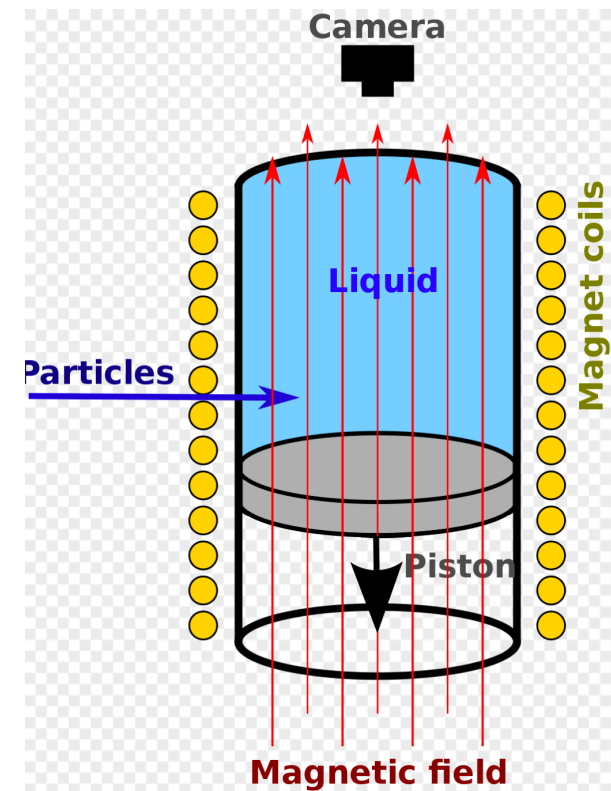


Wilson premio Nobel 1927 por cámara de niebla

Anderson premio Nobel 1936 por descubrimiento del positrón (predicho por Dirac en 1928)

Primeros detectores de partículas ~1960-1980

- Cámara de burbujas
 - Principio similar al de cámara de niebla pero usando (ex) hidrógeno líquido a una temperatura algo más baja que su temperatura de ebullición
 - Funcionamiento sincronizado con la llegada de un haz de partículas cargadas (**experimento controlado**)
 - Pistón disminuye repentinamente la presión->hidrógeno líquido sobrecalentado
 - El paso de una partícula cargada cerca de un átomo, es suficiente para originar una burbuja
 - La traza de burbujas puede fotografiarse
 - Permite detectar partículas con una **frecuencia de algunos Hz**
 - La cámara de burbujas fue durante un largo periodo el detector de partículas por excelencia, permitiendo gran número de estudios y descubrimientos



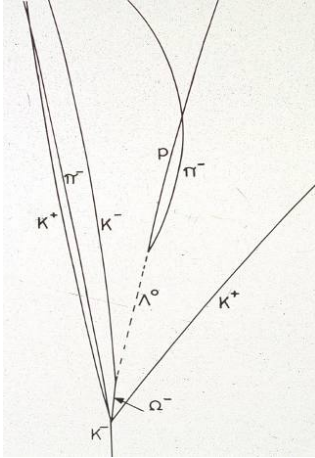
En 1960 se otorgó a Donald Arthur Glaser el Premio Nobel de Física por el invento de la cámara de burbujas en 1952.

Primeros detectores de partículas ~1960-1980

Particle colliding with a proton in liquid hydrogen
- A "Bubble Chamber"



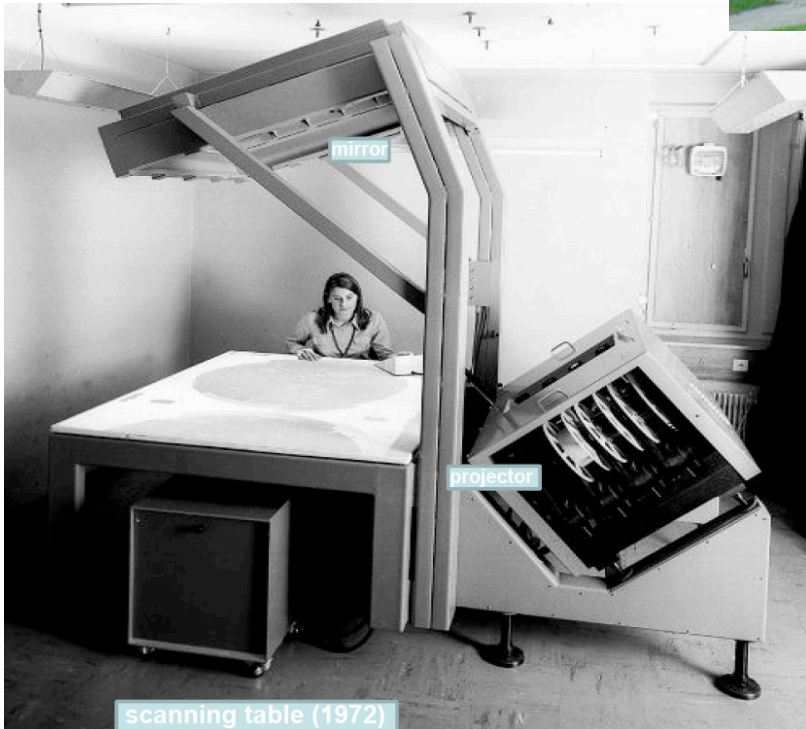
Many people employed to look through these photos to understand what happened!



Gargamelle (1970 -1979)
Detect neutrinos and antineutrinos, with a heavy liquid (Freon)



BEBC (1967-1984)
Campo B de 3.5 T
6,3 millones de colisiones
3000 km de película

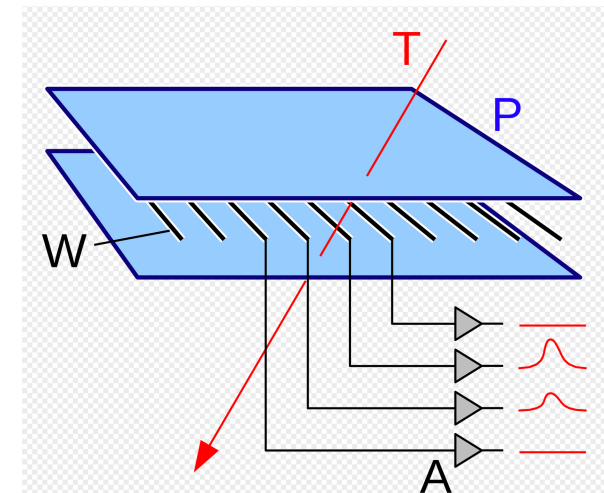
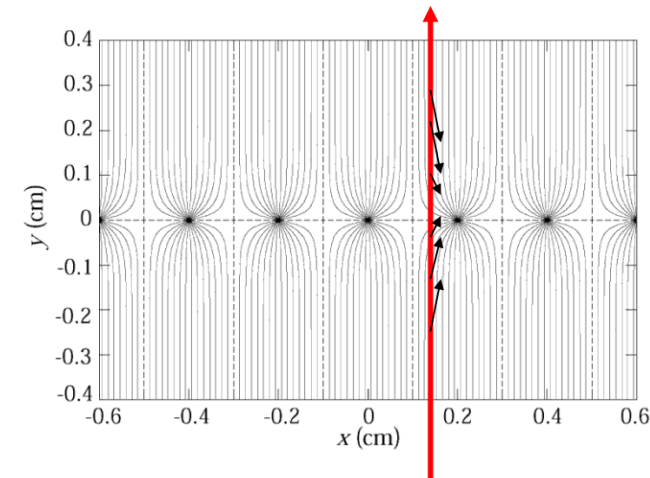
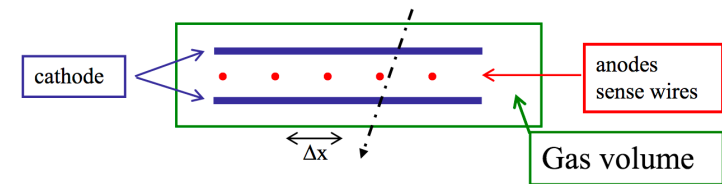


Discovery of neutral currents->
major step towards verification of
the electroweak theory.

- Limitaciones de las cámaras de burbujas:
 - Solo pueden detectar unas cuantas partículas por segundo (**Hz** vs LHC 40 MHz de cruces de haces)
 - **No existe un mecanismo de disparo (trigger)** que permita decidir de forma rápida si merece la pena 'guardar' el suceso (fotografiarlo) o no, hay que fotografiar todas las interacciones.

Primeros detectores de partículas >~1970

- Las cámaras multihilos proporcionales (MWPC)
 - Permiten determinar la dirección y energía de la partícula incidente
 - Partícula cargada ioniza moléculas de gas, produciendo una **señal en los hilos conductores conectados a alta tensión** (ánodos) y **leídos independientemente** con circuitos electrónicos.
 - Hilos separados ~2 mm -> configuración más básica **resoluciones de posición cientos de micras**
 - La **carga** recogida es **proporcional al efecto de ionización** de la partícula incidente
 - Permitía detectar del orden de **1000 partículas por segundo**
 - Constituyen el **primer detector electrónico**:
 - la detección de la partícula produce señales electrónicas rápidas, que se pueden usar para decidir si proceder con la adquisición de datos (**trigger**)
 - Se producen datos que se pueden analizar en ordenadores
 - Permite hacer física de alta estadística
 - Precursor de muchos otros detectores de este tipo



La invención en 1968 de este detector le valió a Georges Charpak el Premio Nóbel de Física de 1992.

La vida en un hilo

Biografía [\[editar \]](#)

Charpak nació en la ciudad de Dąbrowica en [Polonia](#) (moderna Dubrovysia, [Ucrania](#)) de una familia [judía](#) de origen polaco-ucraniano. La familia de Charpak emigró de Polonia a [París](#) cuando él tenía siete años de edad.

Durante la [Segunda Guerra Mundial](#) Charpak se enroló en la [Resistencia francesa](#) fue hecho prisionero por las autoridades de la [Francia de Vichy](#) en 1943. En 1944 fue deportado al [campo de concentración nazi](#) de [Dachau](#), donde permaneció hasta que el campo fue liberado en 1945. Después de graduarse en el liceo de [Montpellier](#), en 1945 entró a la [École des Mines](#), en París, una de las más prestigiosas escuelas de ingeniería en Francia. El año siguiente se nacionalizó como ciudadano francés.

Se graduó en 1948, obtuvo su grado de [ingeniero de minas](#) y empezó a trabajar para el [Centre National de la Recherche Scientifique](#) (CNRS). Recibió su doctorado en 1954 de [física nuclear](#) en el [Collège de France](#), París, donde trabajó en el laboratorio de [Jean Frédéric Joliot-Curie](#). En 1959 él se unió al [staff del CERN](#) en [Ginebra](#) y en 1984 se convirtió en profesor de la Escuela de Estudios Avanzados en Física y Química en París.

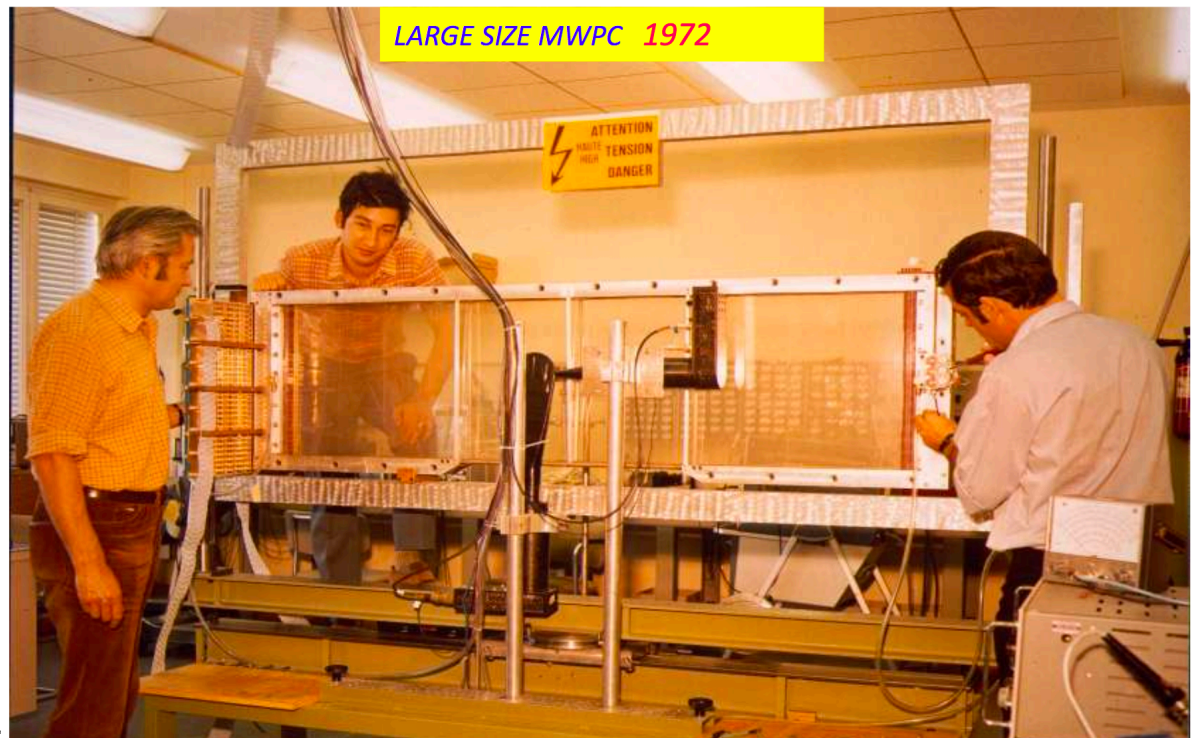
Se hizo miembro de la [Academia de las Ciencias francesa](#) en 1985. En 1992, recibió el Premio Nobel de Física "por el invento y desarrollo de detectores de partículas, en particular la cámara multicable".

En Francia, Charpak fue un defensor decidido de la [energía nuclear](#). Fue miembro del comité que publica el [Bulletin of the Atomic Scientists](#).



Información personal

Nombre de nacimiento Georges Charpak

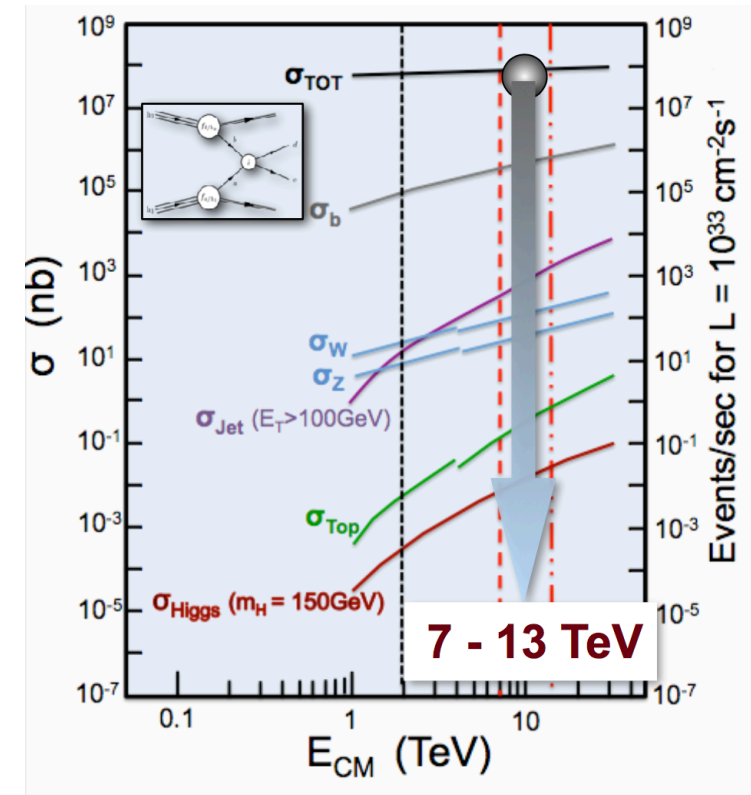


**Detector central de experimento UA1: descubrimiento bosones Z,W junto con UA2
(Premio Nobel a C. Rubia y S. Van der Meer en 1984)
Ahora en el microcosmos**



Qué queremos detectar y en qué condiciones?

- En experimentos del LHC queremos detectar procesos raros
 - Necesitamos producir muchas colisiones (LHC: 1000 millones colisiones pp por segundo)
 - No podemos guardar la información de todas las colisiones
 - Los detectores deben producir **señales rápidas**
 - Con posibilidad de **tomar decisiones rápidas** (lógica de trigger electrónico)
 - La reconstrucción del suceso se hace también de forma electrónica (código se ejecuta en ordenadores)
- En cada cruce de haces ~1000 partículas que identificar/reconstruir cada 25 ns -> necesitamos **alta granularidad con poca ocupancia**, sobre todo cerca del punto donde se produjo la colisión (IP) -> **muchos canales (~100M)** con muy buena resolución temporal y buena sincronización
- Alto flujo de partículas compromete las propiedades de los materiales -> detectores y electrónica deben ser **resistentes a la radiación**



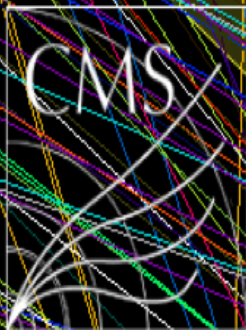
Qué queremos detectar y en qué condiciones?

- En LHC se producen colisiones de protones a **muy alta energía** (13 TeV), necesaria para producir (nuevas) partículas de alta masa
- Energías de las partículas finales a detectar y a medir con precisión son del orden de \sim GeV
 - **Detectores grandes**

Prefix	Symbol(s)	Power of 10
kilo-	k or K **	10^3
mega-	M	10^6
giga-	G	10^9
tera-	T	10^{12}
peta-	P	10^{15}
exa-	E	10^{18} *

Electronvoltio <https://es.wikipedia.org/wiki/Electronvoltio>

El **electronvoltio** (símbolo **eV**) es una **unidad de energía** que representa la variación de **energía** que experimenta un **electrón** al moverse desde un punto de potencial V_a hasta un punto de potencial V_b cuando la diferencia $V_{ba} = V_b - V_a = 1$ V, es decir, cuando la **diferencia de potencial** del **campo eléctrico** es de 1 **voltio**. Su valor es $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ J.¹

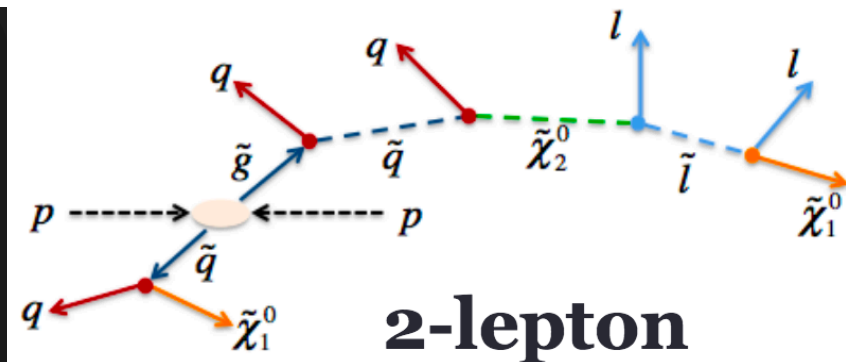
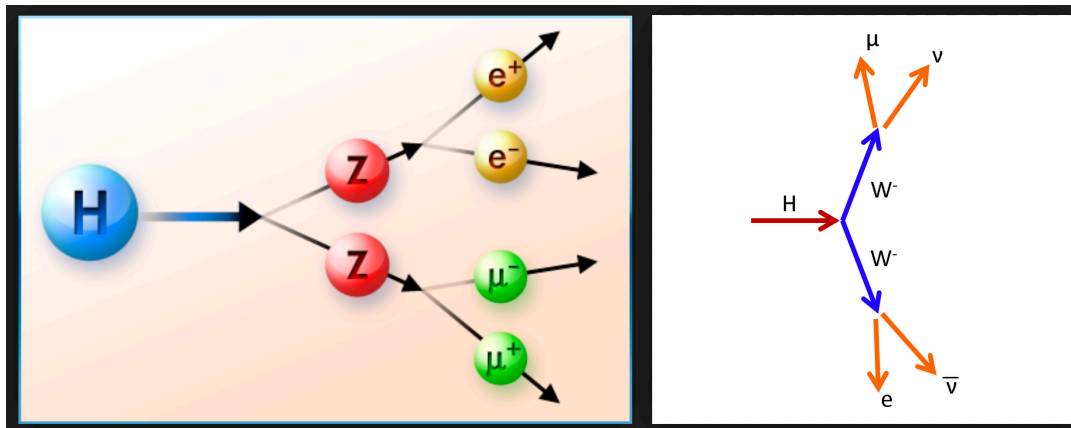


Event
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon May 28 01:16:20 2012 CEST
Run/Event: 195098 / 35488125
Lumi section: 65
Orbit/Crossing: 16992111 / 2295

2012 Data at 8 TeV. Event with:
Raw $\Sigma ET \sim 2$ TeV
14 jets with $ET > 40$ GeV
Estimated pile up ~ 50

Qué queremos detectar y en qué condiciones?

- En experimentos del LHC chocamos protones para producir nuevas partículas ($E=mc^2$)
- Queremos **detectar partículas suficientemente estables** (detectables, pueden interaccionar con el material del detector y producir señales) y en general de alta energía
- Gran parte de las partículas que se producen en colisiones se desintegran rápidamente en otras más estables.
 - **Inferimos las propiedades de la partícula inicial identificando y midiendo las propiedades (el impulso (p) o energía (E)) de las partículas finales detectadas.**
- Esto sucede así también en procesos de **Física Nueva**: las partículas nuevas acabarían desintegrándose en partículas conocidas que dejarían señales en nuestros detectores.

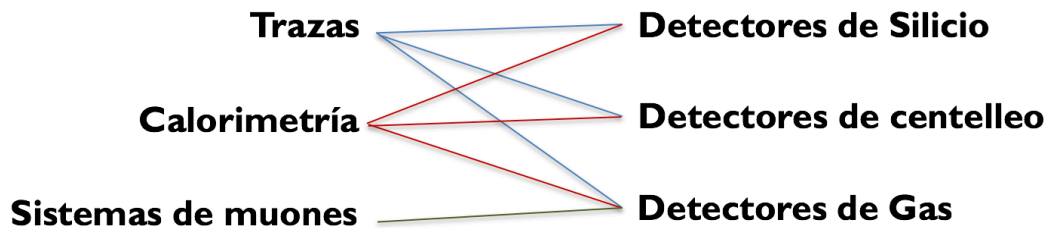
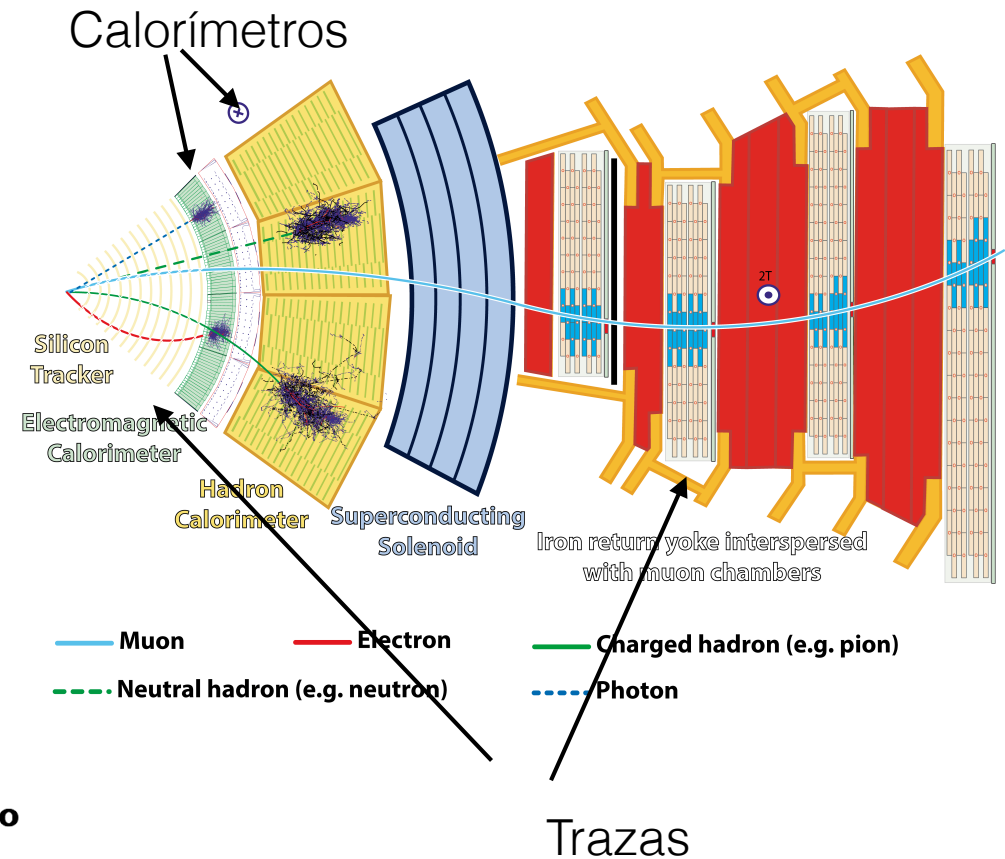


Qué queremos detectar y en qué condiciones?

- En experimentos del LHC chocamos protones para producir nuevas partículas ($E=mc^2$)
- Queremos **detectar partículas suficientemente estables** (detectables, pueden interaccionar con el material del detector y producir señales) y en general de alta energía
 - Gran parte de las partículas que se producen en colisiones se desintegran rápidamente en otras más estables.
 - **Inferimos las propiedades de la partícula inicial identificando y midiendo las propiedades (el impulso (p) o energía (E)) de las partículas finales detectadas.**
 - Esto sucede así también en procesos de **Física Nueva**: las partículas nuevas acabarían desintegrándose en partículas conocidas que dejarían señales en nuestros detectores.
 - De los cientos de partículas conocidas, las que son más frecuentes y suficientemente estables son: fotones (g), leptones (e^{+-} , μ^{+-}) y algunos hadrones (π^{+-} , K^{+-} , K^0 , p^{+-} , n ,...)
- **La misión del detector es DETECTAR con alta eficiencia, IDENTIFICAR y MEDIR el impulso (p) o energía (E) de estas partículas, para poder reconstruir el estado inicial.**

Detectores en LHC

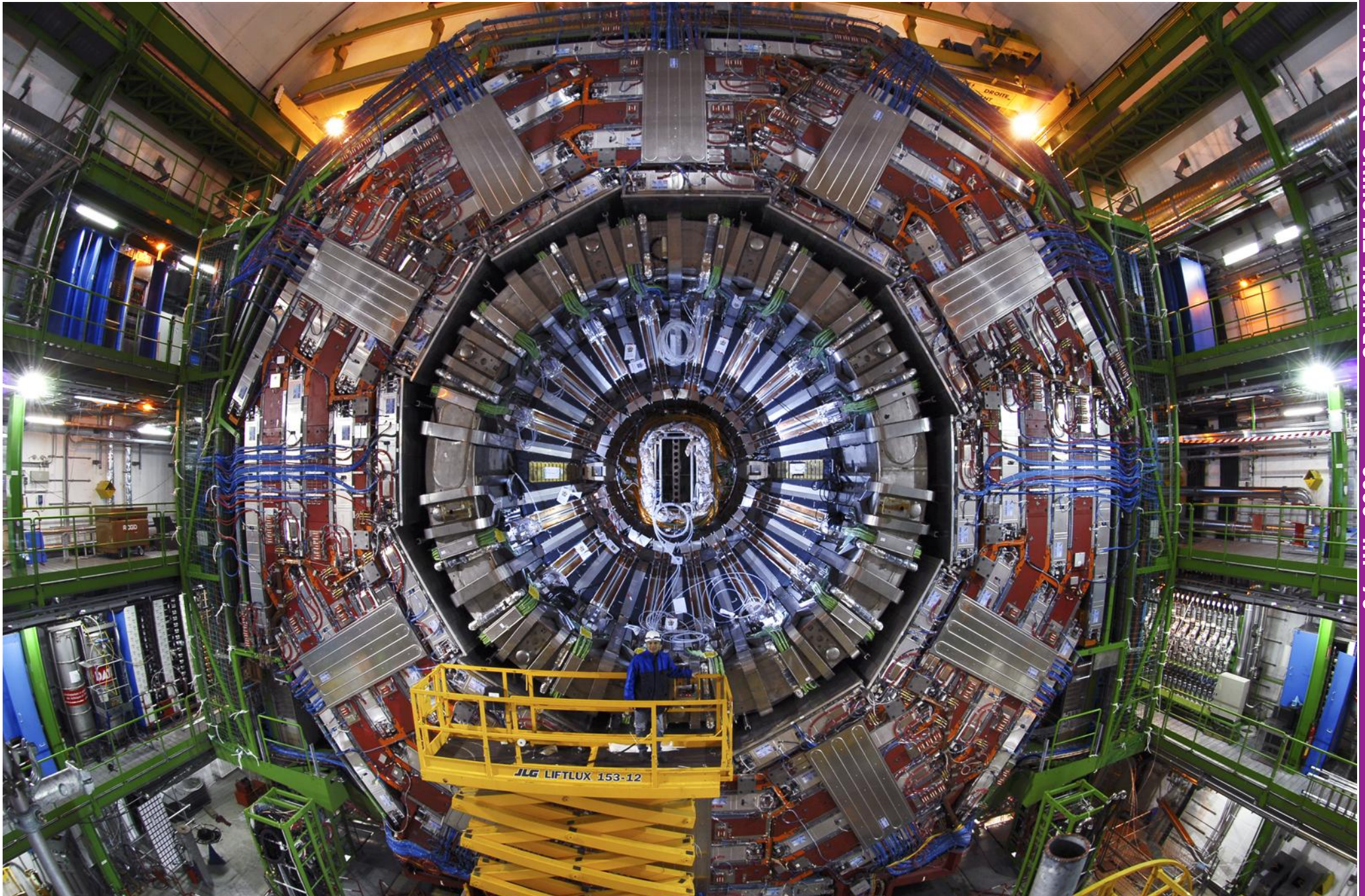
- Dadas estos requisitos, qué tipo de detectores se pueden construir para detectar y medir las propiedades de las partículas?
- Ejemplo CMS: configuración típica en experimentos de colisiones de altas energías
 - Detector de trazas interno
 - Calorímetros (EM,HAD)
 - Detector de trazas de muones



CMS Detector

CMS DETECTOR

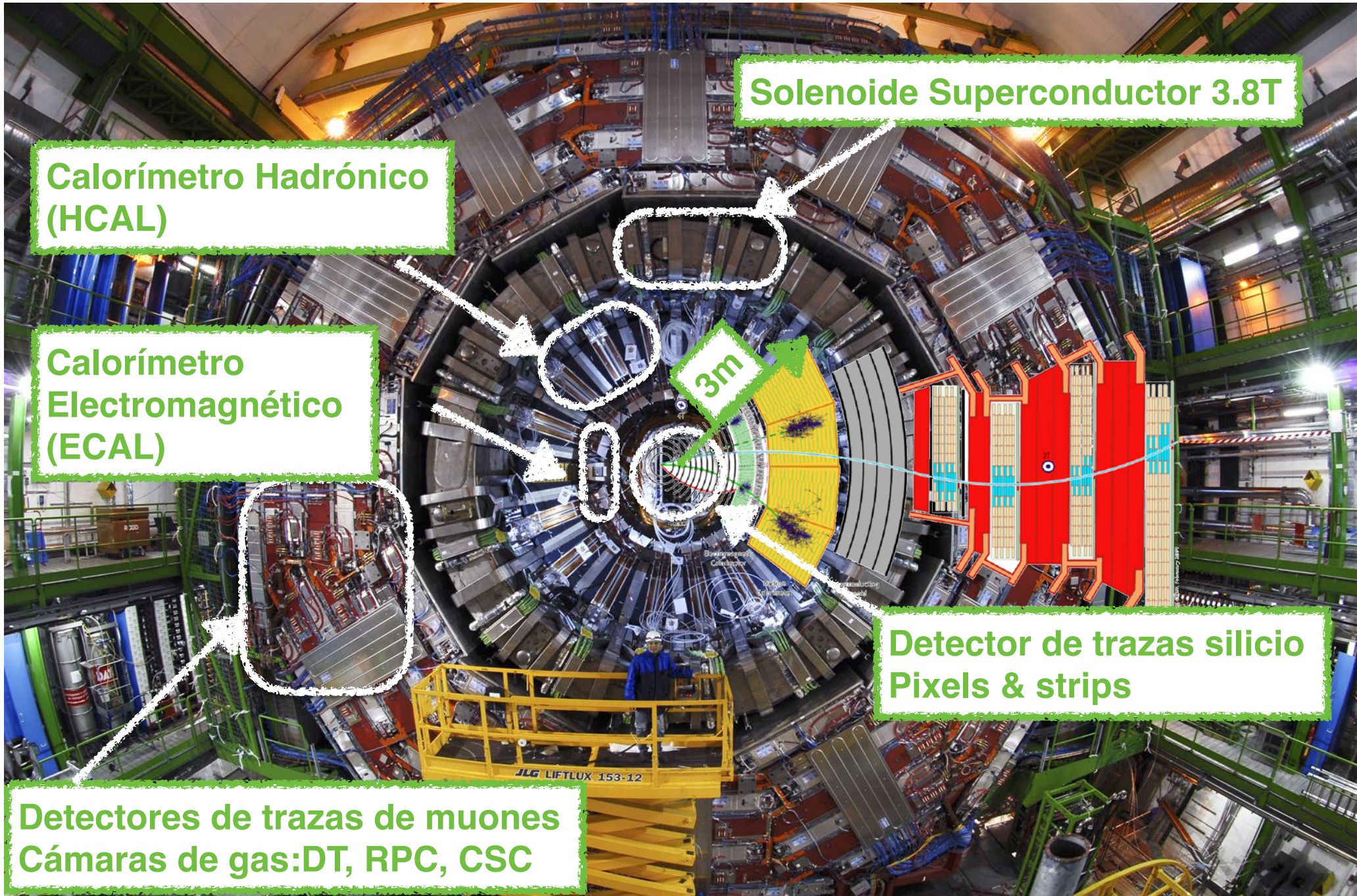
Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T



CMS Detector

CMS DETECTOR

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



Calorímetro Hadrónico (HCAL)

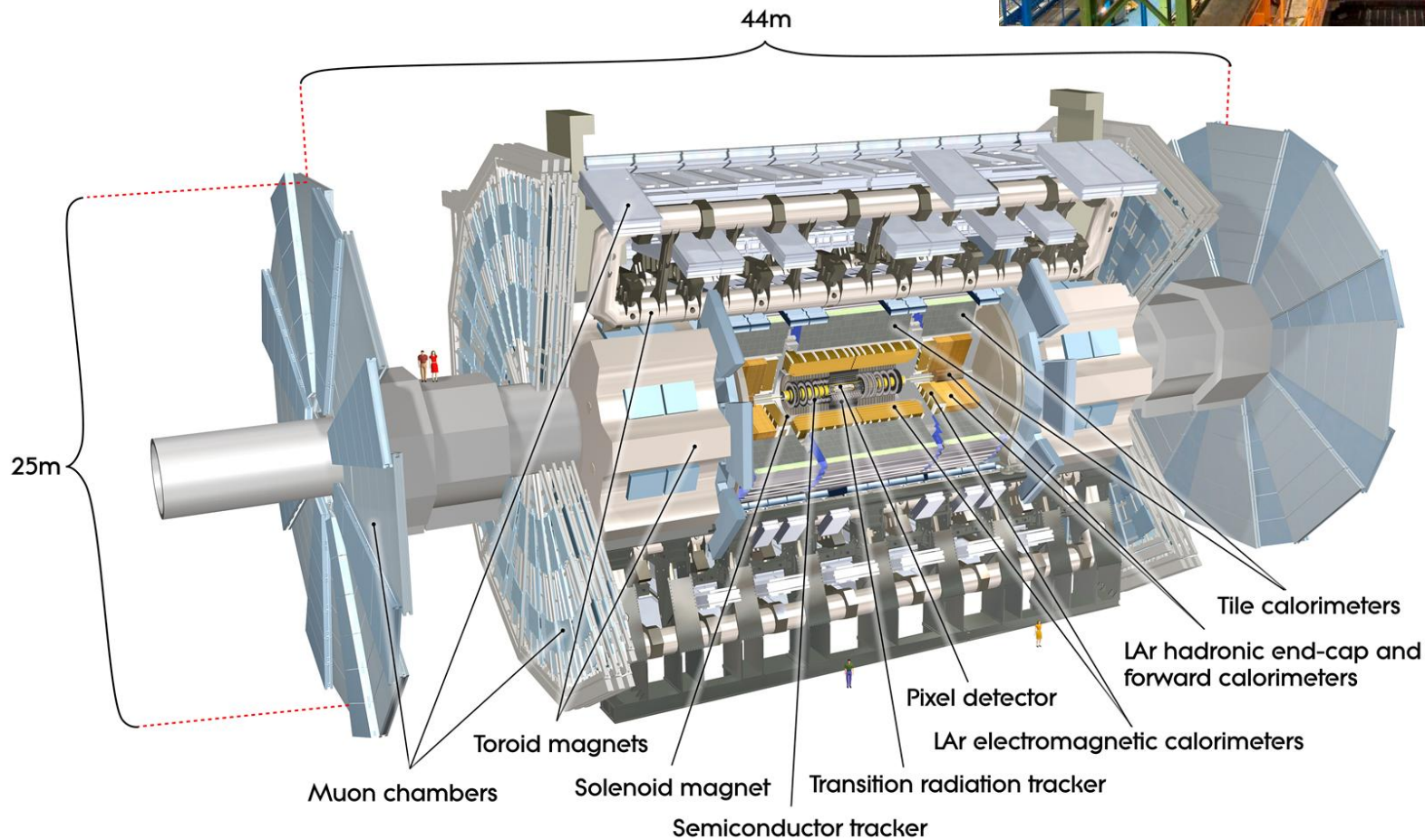
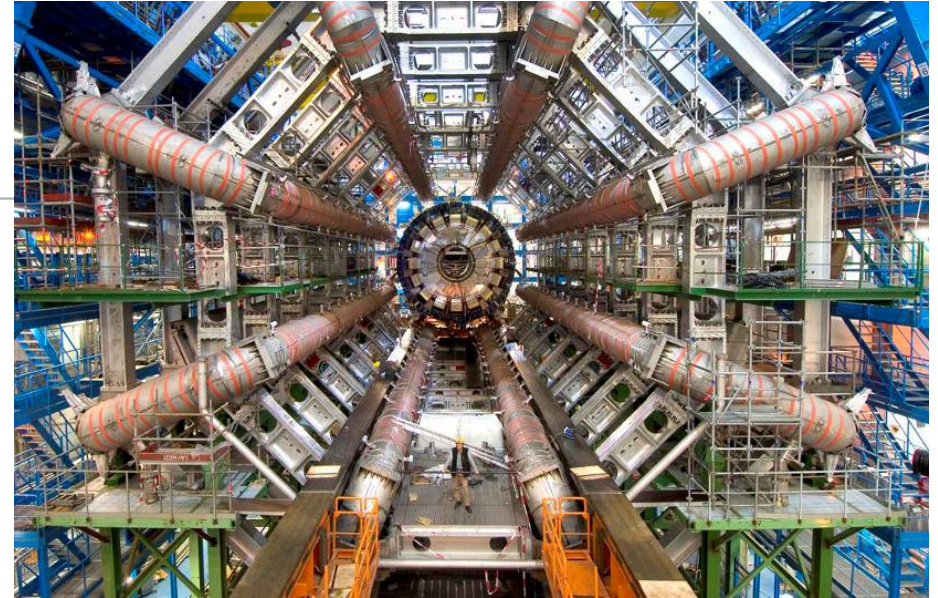
Calorímetro Electromagnético (ECAL)

Solenoid Superconductor 3.8T

Detector de trazas silicio
Pixels & strips

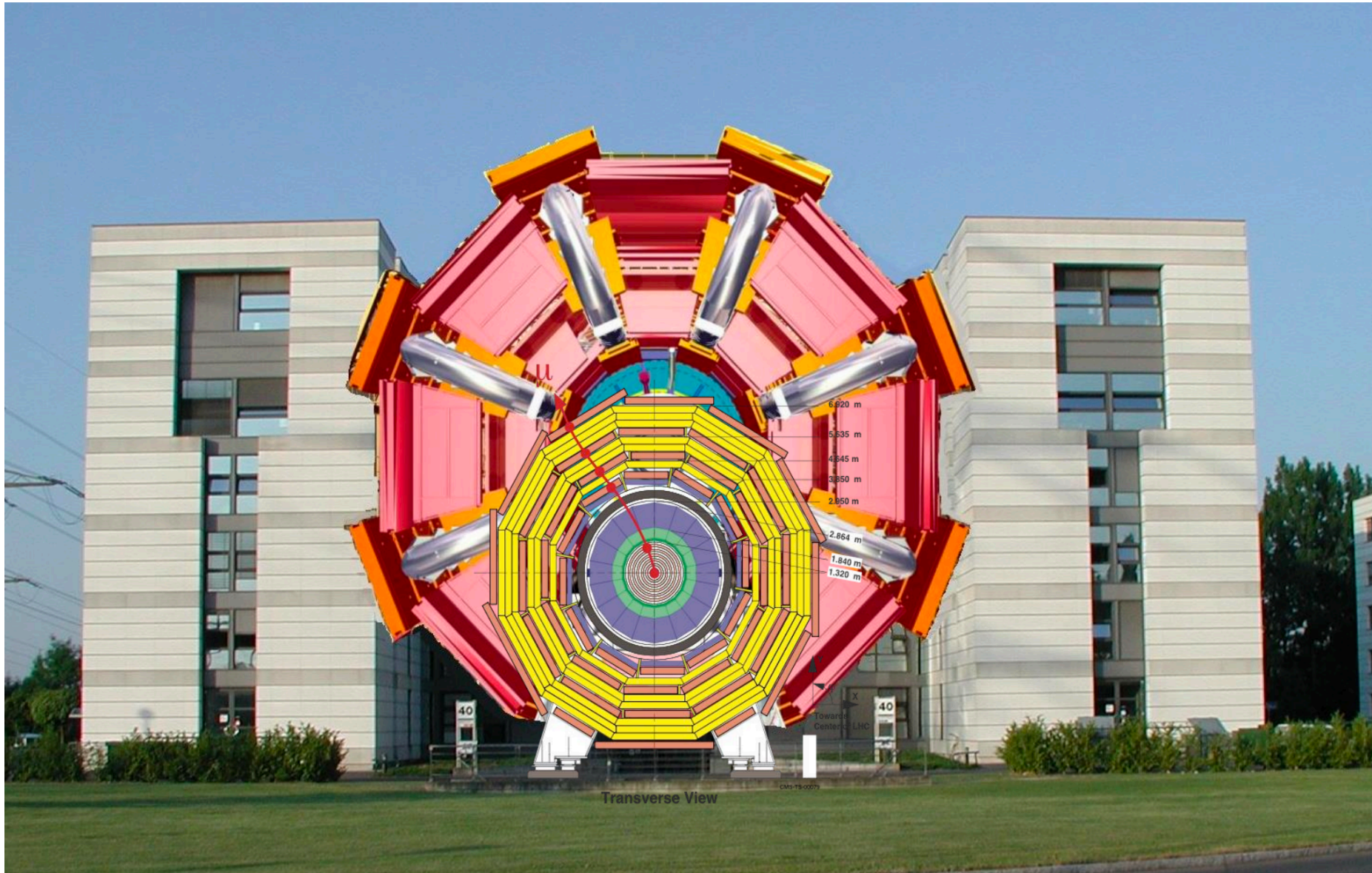
Detectores de trazas de muones
Cámaras de gas:DT, RPC, CSC

ATLAS Detector



ATLAS y CMS: Son grandes...

- Para medir con precisión propiedades de partículas de alta energía



Principios físicos de detección

Interacciones de las partículas

- Para detectar una partícula hay que 'verla' de alguna manera, i.e. tiene que **interaccionar con el medio**, si no es invisible.
- Distintas partículas interaccionan de distinta forma con la materia-> **identificación**
 - **Fuerza electromagnética (EM) actúa en todas las partículas cargadas, con el fotón como mediador**
 - **Partículas hadrónicas** (formadas de quarks y gluones) **sienten la fuerza fuerte**
 - Tenemos que ser capaces de convertir esa interacción en una **señal eléctrica**, que proporcione **medida de impulso/energía**

Las tres generaciones de la Materia (Fermiones)

	I	II	III	
masa→	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0
carga→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre→	u up	c charm	t top	γ photon
	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ fuerza débil
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptones	e electron	μ muon	τ tau	W[±] fuerza débil

Bosons (Fuerzas)

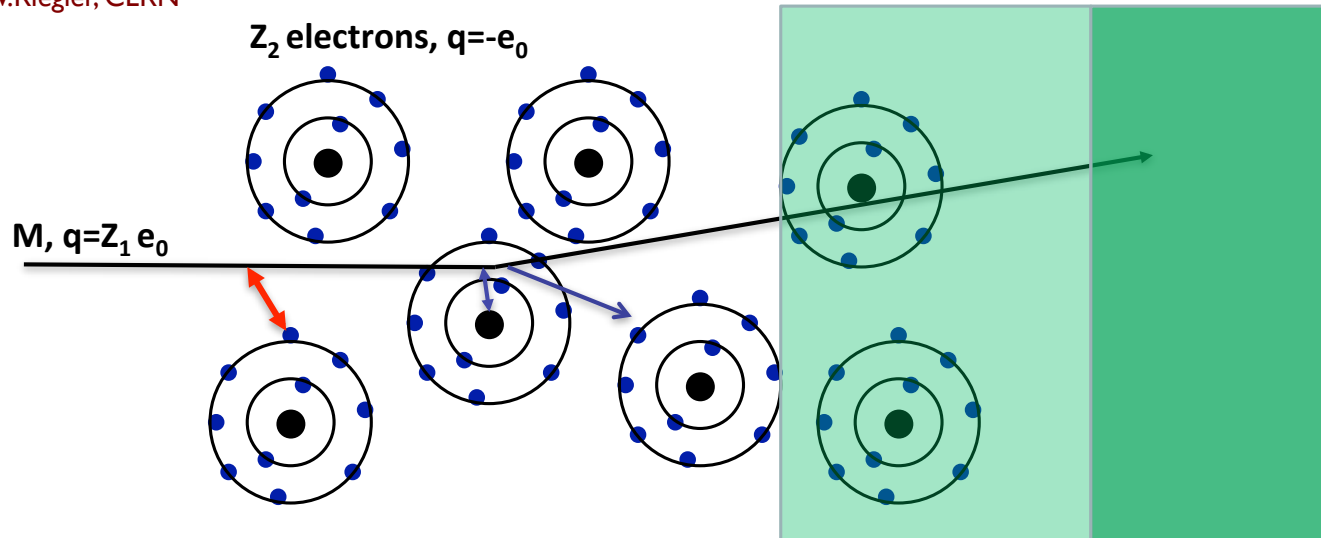
PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

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:	10^{-18} m $3 \cdot 10^{-17}$ m	10 ⁻⁴¹	0.8	1	25	Not applicable to quarks
for two protons in nucleus		10 ⁻⁴¹	10 ⁻⁴	1	60	Not applicable to hadrons
		10 ⁻³⁶	10 ⁻⁷	1		20

Interacción EM : Partículas cargadas

Electromagnetic Interaction of Particles with Matter

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 produce and X ray photon, called Transition radiation.

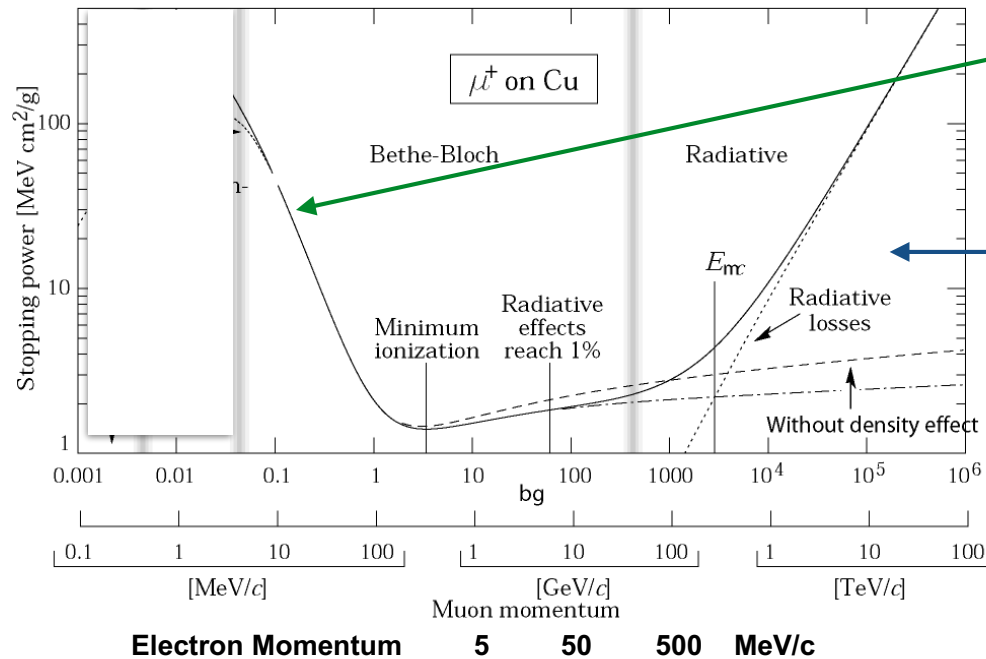
11/09/2011

- Señales producidas por partículas cargadas en procesos de **ionización/excitación** son la base de los **detectores de trazas**
- El proceso de **bremsstrahlung para electrones**, junto con la **producción de pares para fotones**, son la base de los detectores de **calorimetría** electromagnética.

Interacción EM : Partículas cargadas

- Curva Bethe-Bloch describe la pérdida de energía de una partícula cargada por interacción electromagnética al atravesar un medio

such as copper to about 1% accuracy for energies between about 6 MeV and 6 GeV



Zona de pérdidas por ionización

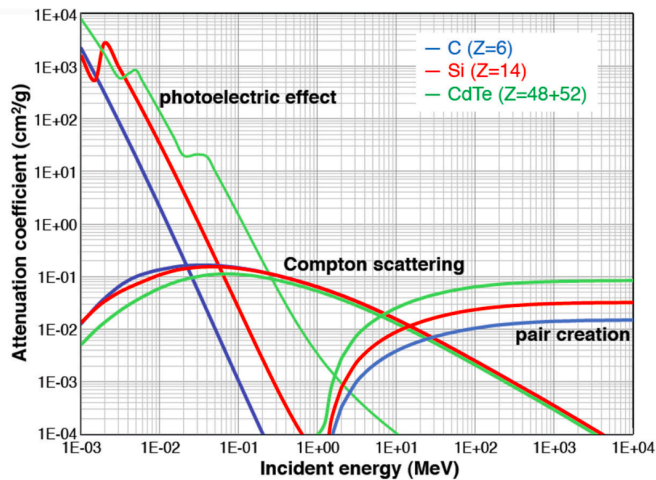
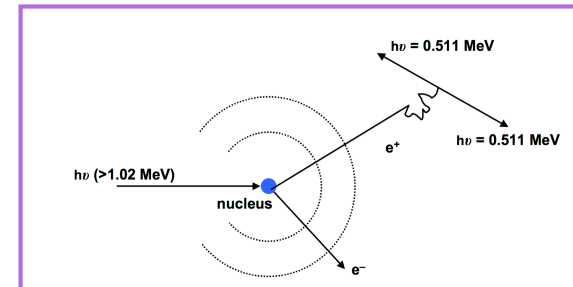
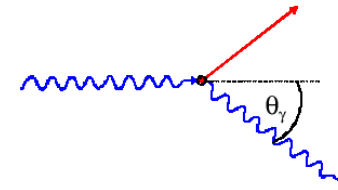
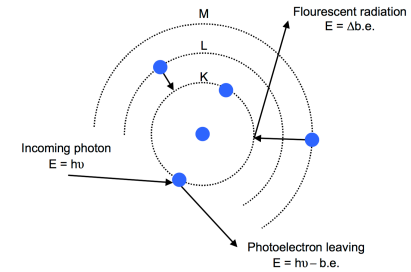
Zona de pérdidas por radiación

Longitud de radiación: Grosor del material que reduce la energía media de un haz de electrones por un factor e.

- Transición de una zona a otra se produce a \sim MeV para e^{\pm} , \sim GeV para μ^{\pm}
- Para energías típicas en LHC (100 GeV), **los electrones y positrones pierden energía mediante radiación de fotones**, mientras que los muones están en la zona de pérdida de energía mínima.
 - Un muon de 1 GeV puede atravesar 1m de hierro
 - Un electrón depositaría su energía radiando fotones (sería absorbido en el medio, es lo que pasa en los calorímetros)

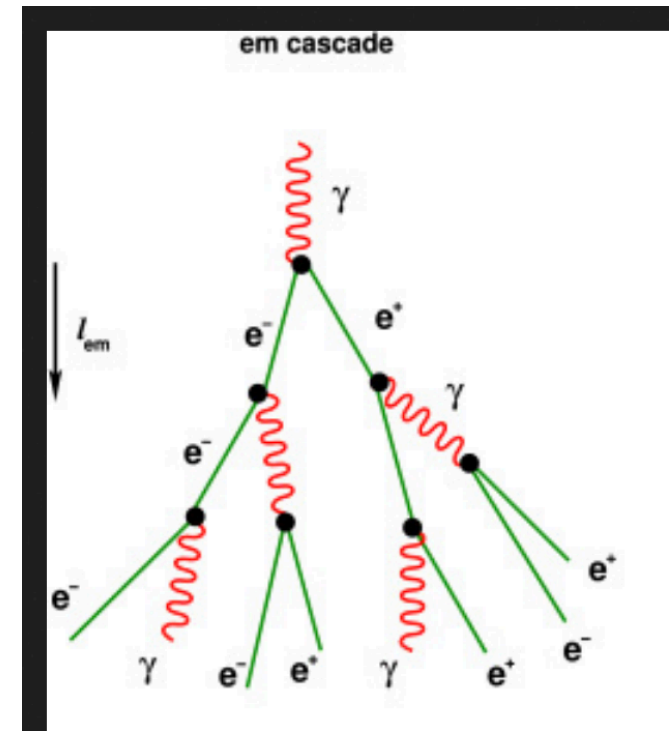
Interacción EM : Fotones

- **Efecto fotoeléctrico:** absorción de un fotón por un átomo, expulsando un electrón
 - Se usa en varios detectores de fotones
 - Dominante a bajas energías
- **Dispersión de Compton:** dispersión de un fotón contra un electrón libre
- **Producción de pares:**
 - Domina a altas energías (umbral $2 \times m_e = 1.022 \text{ MeV}$)
 - El más importante en experimentos de altas energías, inicia las cascadas en los calorímetros



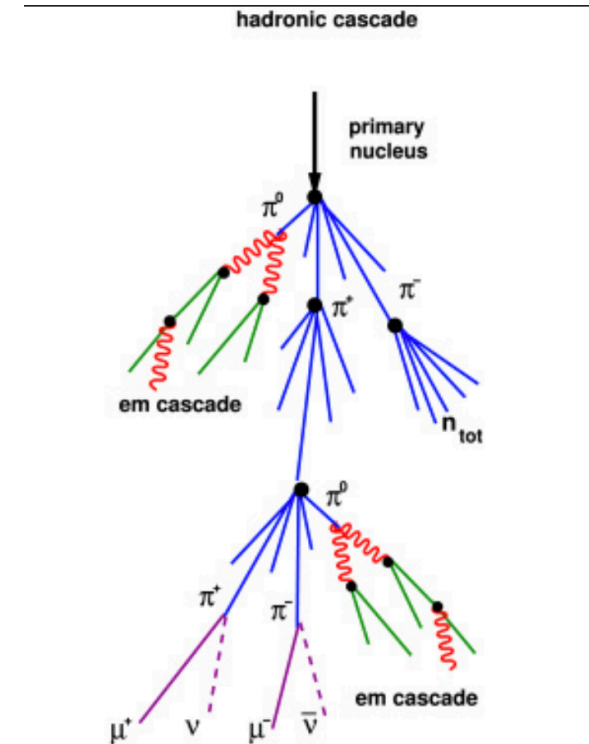
Interacción EM

- A energías de LHC electrones incidentes en el material de los calorímetros radian fotones, y los fotones producen pares e^+, e^-
- Esto produce las llamadas **cascadas electromagnéticas**
 - En los calorímetros idealmente se absorbe toda la energía del electrón/positrón o del fotón
 - Se debe producir 'de alguna manera' una señal detectable que permite medir la energía de la partícula incidente
- Los **muones** pierden energía solo por ionización/excitación en el medio, **pueden atravesar grandes cantidades de materia**



Interacción Fuerte

- Un hadrón, al penetrar en el material ionizará el material hasta que se aproxime lo suficiente a un núcleo como para experimentar una **interacción fuerte, creando partículas secundarias**: nuevos hadrones, frecuentemente piones, neutrones, fotones, muones, etc
- Esto produce las llamadas **cascadas hadrónicas** en los calorímetros hadrónicos, donde se producen señales que permiten medir la energía del hadrón incidente
 - En las cascadas hadrónicas no toda la energía del hadrón incidente se convierte en energía detectable debido a la presencia de neutrinos, muones, energía de ligadura y retroceso nuclear



Longitud de interacción, λ_I

Recorrido libre medio de una partícula antes de que experimente una **reacción nuclear inelástica**

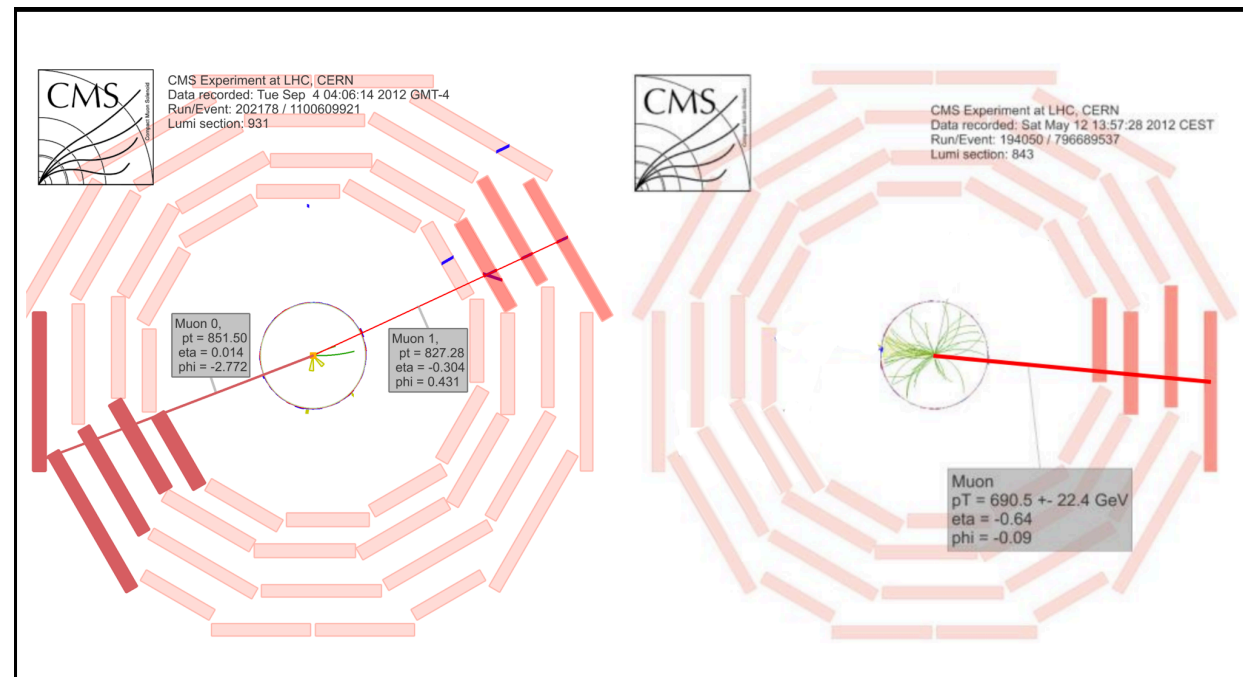
$$\lambda_I = \frac{A}{N_A \rho \sigma_i}$$

A = peso atómico
 N_A = Número de Avogadro
 ρ = Densidad del material
 σ_i = Sección eficaz inelástica

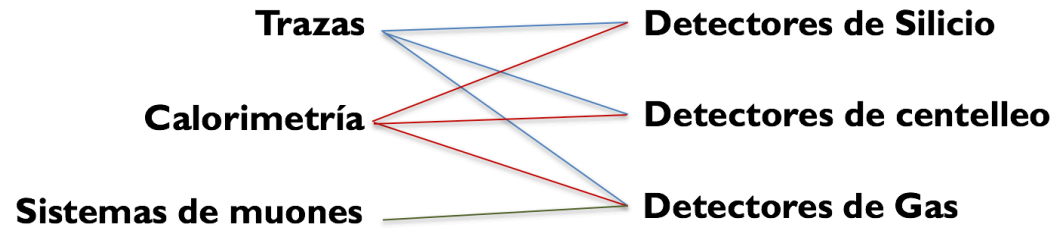
Equivalente al X_0 en las e.m

Y qué pasa con los neutrinos?

- No sienten la fuerza EM (no tienen carga) ni fuerte (no están hechos de quarks)
- Para detectarlos de forma directa se usan grandes volúmenes de materiales muy densos, para aumentar probabilidad de interacción
- En el LHC se hace una **reconstrucción indirecta**
 - Hay que identificar y medir todas las demás partículas presentes, y por principios de conservación de energía (impulso en el plano transverso) se puede reconstruir la presencia de neutrinos en el suceso con una energía dada
- **Detector hermético**



Tipos de detectores y tecnologías



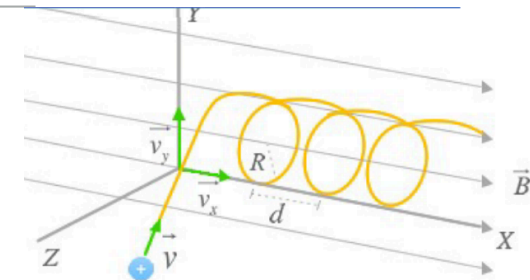
Detectores de trazas

Ley de Lorentz:

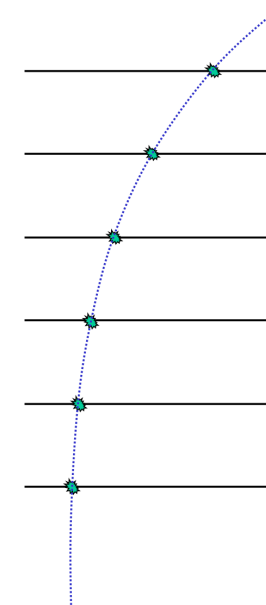
$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$R = \frac{m \cdot v}{|q| \cdot B}$$

- Principio: serie de **medidas de posición** que permiten medir la curvatura de partículas cargadas en un **campo magnético**.
 - Las **trazas** se construyen a partir de varios puntos medidos en el espacio
 - En algunos casos se usa también la medida de energía depositada para hacer identificación de partículas
 - **Determinación del impulso midiendo la curvatura**
 - Determinación del signo de la carga
- Idealmente ligeros
 - Suficiente material para producir señal medible en cada 'punto' pero suficientemente poco para evitar al máximo modificar trayectoria/ propiedades de la partícula por dispersión múltiple
- Alta granularidad cerca del IP, resolución espacial necesaria de $\sim 10 \mu\text{m}$
- **Necesita un campo magnético grande**
 - Cuanto mayor es el impulso de la partícula mas difícil es doblarla... para medir curvatura con precisión hay que doblar la trayectoria lo más posible...
 - **Precisión aumenta con número de puntos medidos y la longitud**



$$\frac{\delta p}{p} = \frac{\delta s}{s} = \frac{8}{q} \frac{1}{L^2 B} p \delta s$$



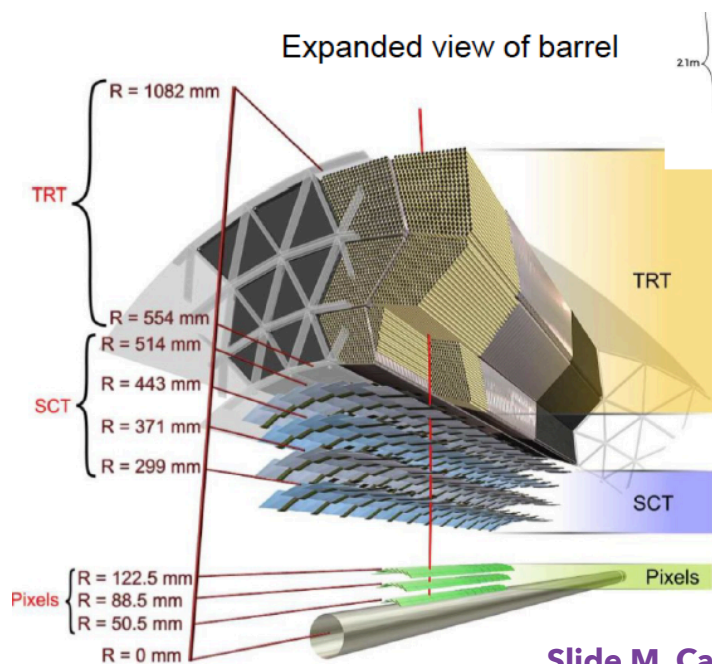
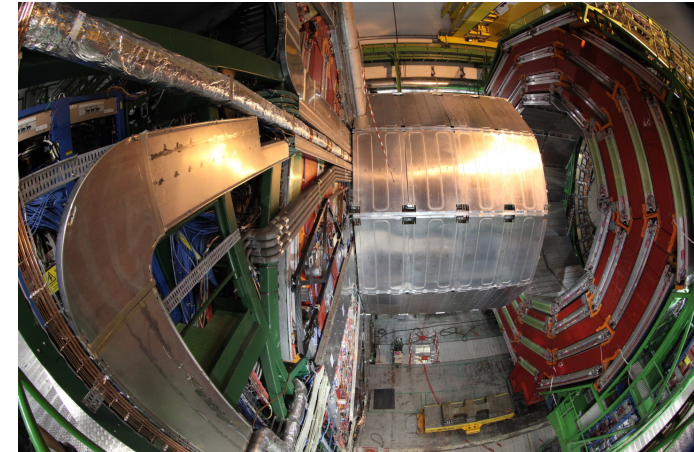
for $L = 1 \text{ m}$, $B = 4 \text{ T}$, $p = 100 \text{ GeV}$

$$\frac{\delta p}{p} = 1\% \text{ for } \delta s \approx 15 \mu\text{m}$$

➔ need hit reconstruction at this level of prec. !

Detectores de trazas

- Se pueden usar distintas tecnologías
 - **CMS:** detector de trazas de silicio de 1.2m de radio dentro de un **solenoid** superconductor que proporciona un campo magnético de 3.8T (x 100000 campo terrestre)
 - 80M pixels de 100x150 μm^2
 - 9M de strips de 10-20cm x 80-200 μm
 - **ATLAS:** diversas tecnologías dentro a un solenoide de 2T



TRT (Straws-Gas)

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

SCT (Silicon strips)

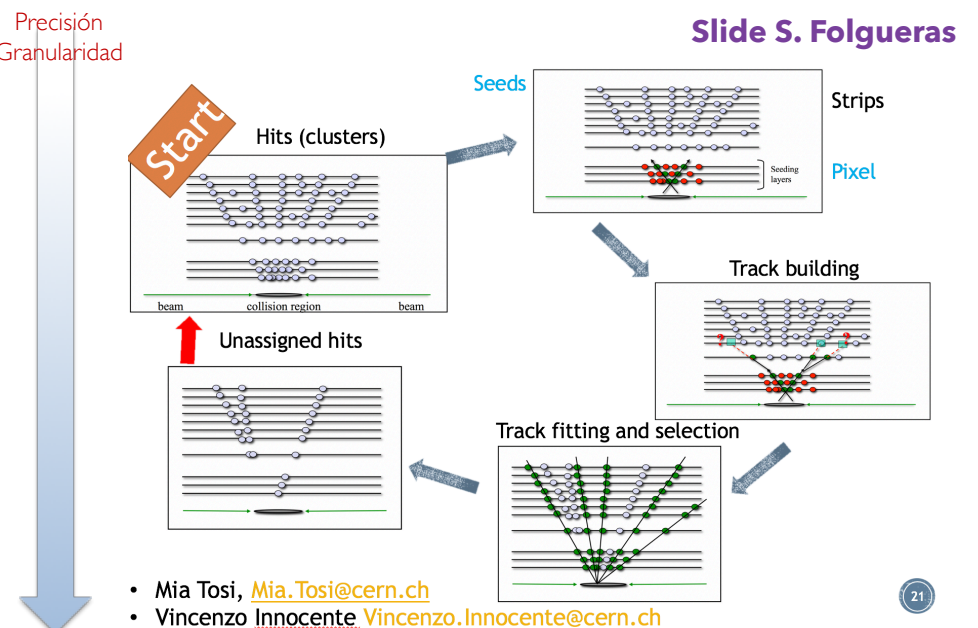
6.2 Mchannels
4 track points
 $\sigma \sim 16 \mu\text{m}$

Pixel (Silicon pixels)

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

Slide M. Capeáns

Precisión
Granularidad



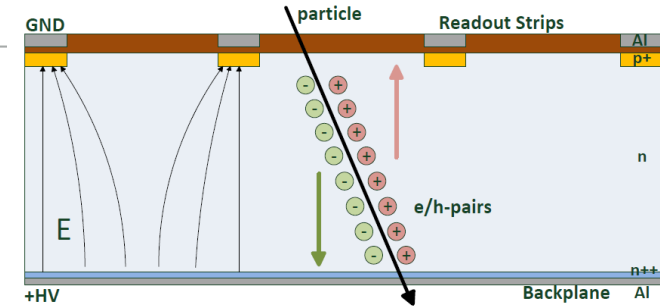
- Mia Tosi, Mia.Tosi@cern.ch
- Vincenzo Innocente Vincenzo.Innocente@cern.ch

21

Detectores de silicio

- Principios de funcionamiento

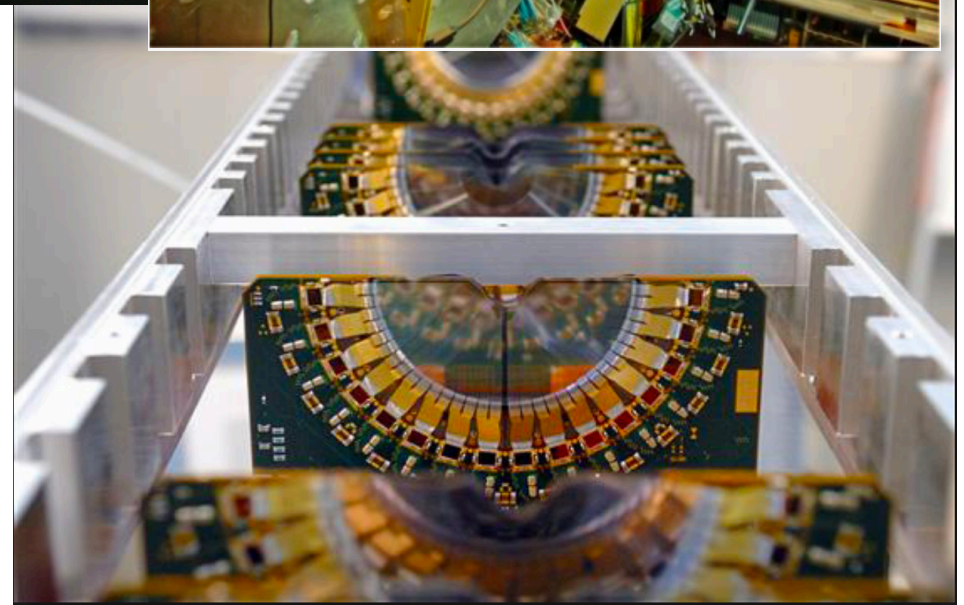
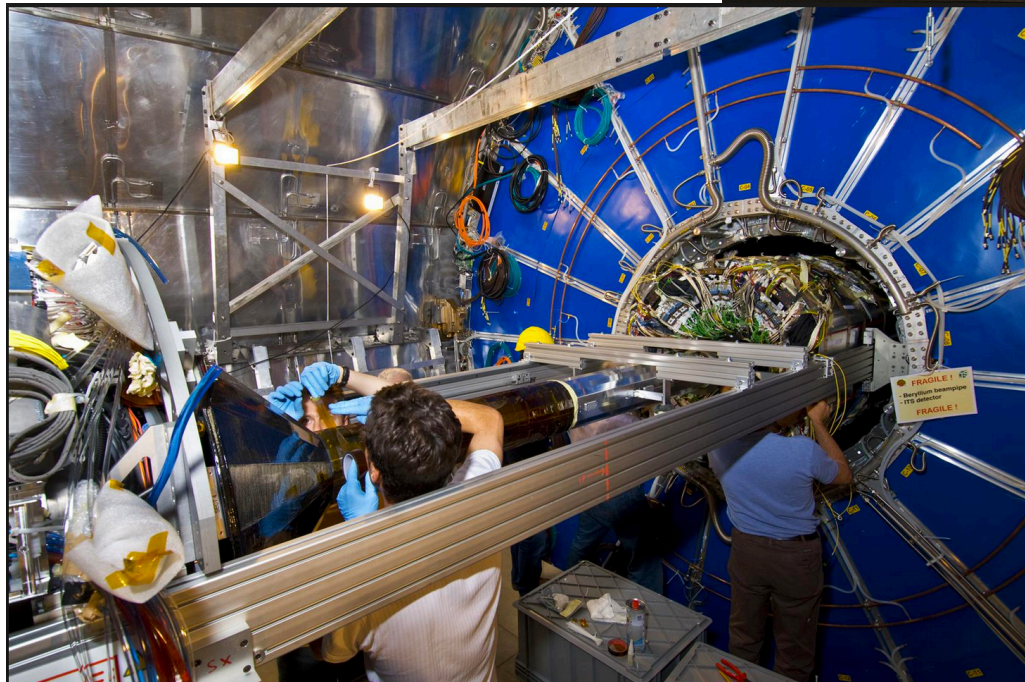
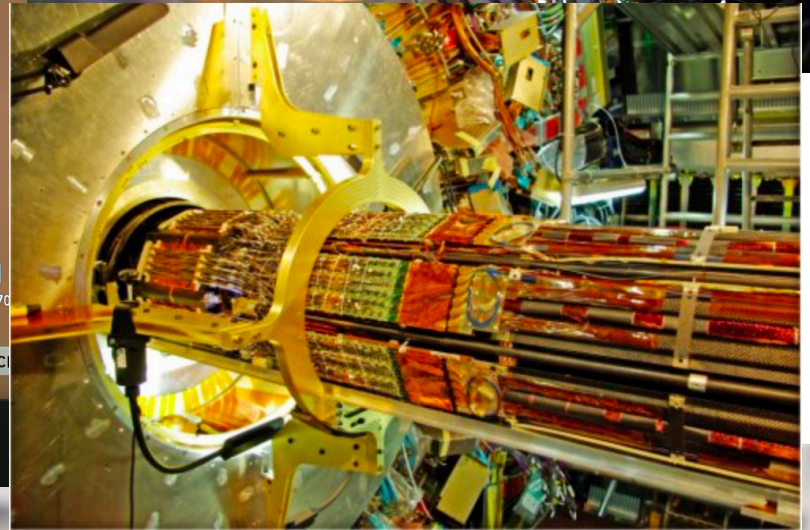
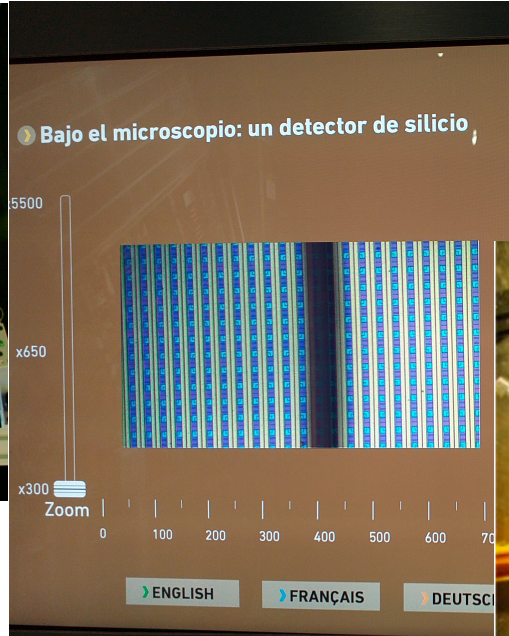
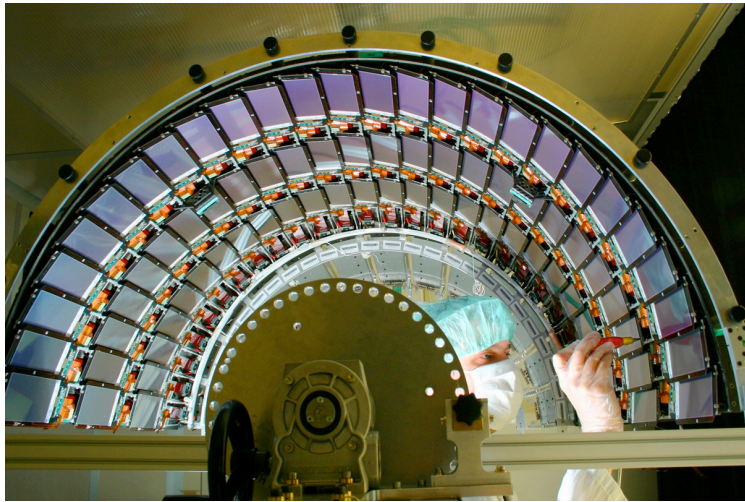
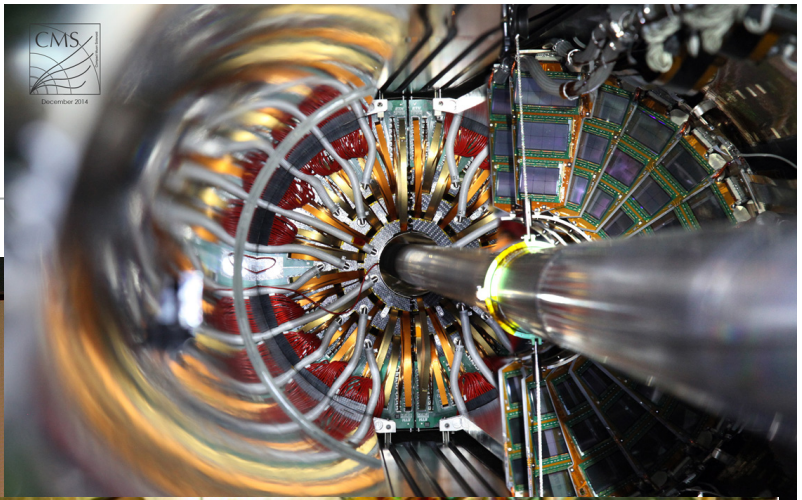
- Partícula incidente crea de pares e^-h^+
- Deriva de las cargas a los electrodos
- El movimiento de las cargas (corriente) crea una **señal eléctrica**, que se recoge con la **electrónica directamente conectada a cada pista**



- Características de funcionamiento:

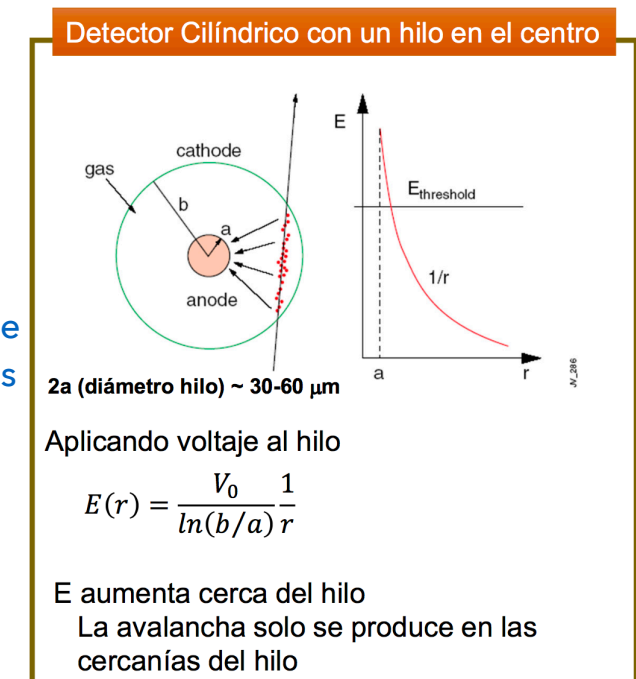
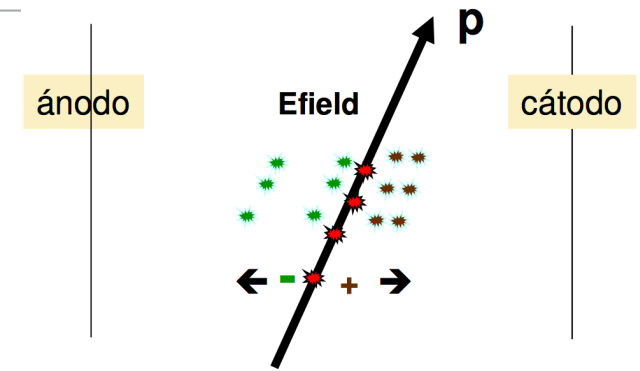
- Silicio: Alta ionización primaria->no se necesita amplificación en el medio y pueden ser **finos**
 - un par e-hole por cada 3.6 eV (vs 30 eV para ionizar una molécula de gas)
 - El grosor de un detector típico ($\sim 200 \mu\text{m}$) resulta en 3.2×10^4 pares
- **Resolución espacial: $\sim 10 \mu\text{m}$** , los mejores $\sim 1 \mu\text{m}$
- **Duración de la señal: $\sim 10 \text{ ns}$** , los mejores 1-2 ns
- Se pueden producir con muy alta **granularidad**
- **Resistentes a la radiación**-> se pueden poner cerca del punto de interacción
- Proceso industrial
- Gran atención a **minimizar material** en soporte, cables, sistema de refrigeración... para disminuir efectos de dispersión múltiple

Detectores de silicio en LHC



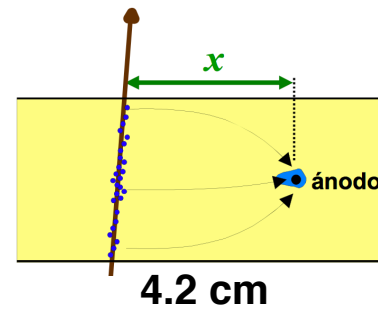
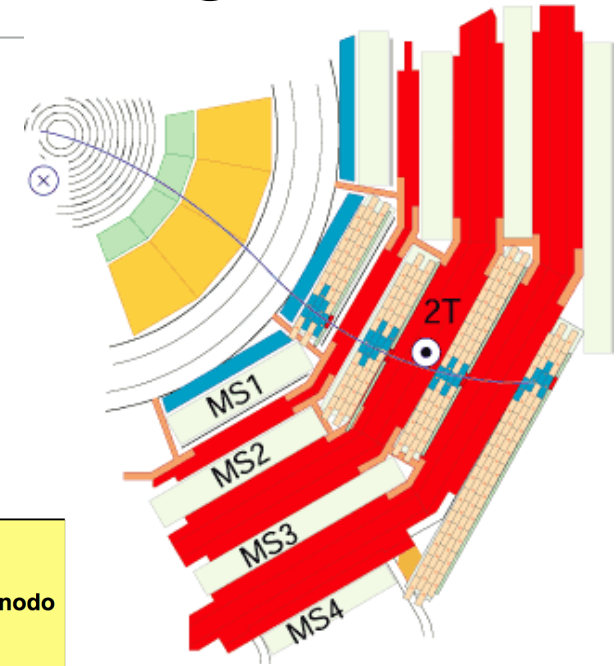
Detectores gaseosos

- Se basan en **ionización**:
 - Una partícula cargada ioniza las moléculas del gas, creando pares ion-electron, que pueden a su vez ionizar el medio de nuevo
- Si aplicamos un **campo eléctrico** al gas, los iones y electrones, experimentan fuerzas en sentido contrario, y pueden llegar hasta el ánodo/cátodo
- Si el campo aplicado es suficientemente grande se puede producir además una **avalancha de electrones**, ie, **amplificación** de la señal para que sea detectable
 - Distintos métodos para producir amplificación (ej hilos)
- Los electrones e iones producidos en el detector inducen una carga en los electrodos de la cámara variando el voltaje inicial de los mismos que se puede "leer" a través de un **circuito eléctrico externo**
 - Se puede leer tanto la carga producida en el detector como el tiempo de llegada de la señal
- Usados muy frecuentemente como **detectores de trazas de muones**: suficiente **resolución temporal y espacial** y relativamente **bajo coste** para cubrir grandes superficies
- Desarrollo e investigación durante décadas ha dado lugar a muchos tipos de detectores con configuraciones y prestaciones distintas
 - Se pueden conseguir muy buenas resoluciones, soportando altas frecuencias de colisiones y grandes flujos de partículas

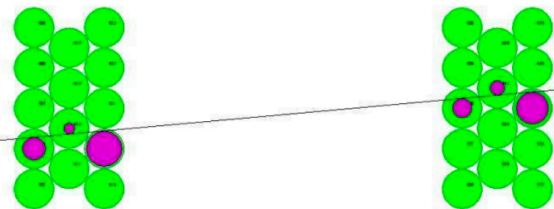
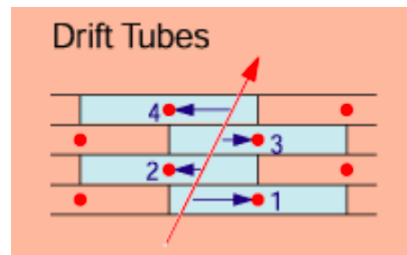
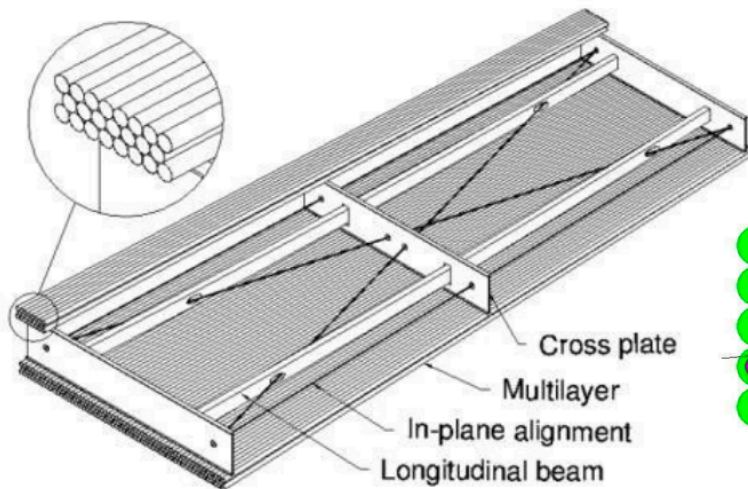


Detectores gaseosos para trazas en LHC

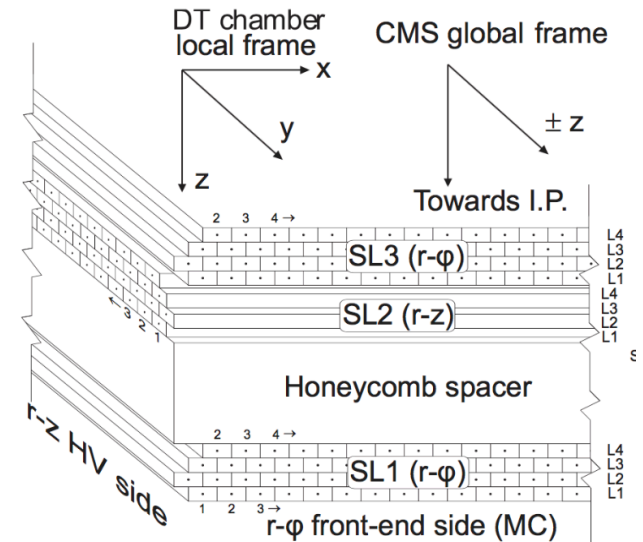
- **Ej 1: Cámaras de deriva:** miden trazas de muones usando un campo magnético
 - En CMS líneas de campo del solenoide presentes en el hierro, que se usa además como absorbente
 - En ATLAS imanes toroidales dedicados
- **Medida precisa del tiempo de llegada de la señal** proporciona la **posición** por la que pasó la partícula (50-200 μm) con relativamente **pocos canales**
- Buena resolución temporal, se pueden usar en el sistema de **trigger**



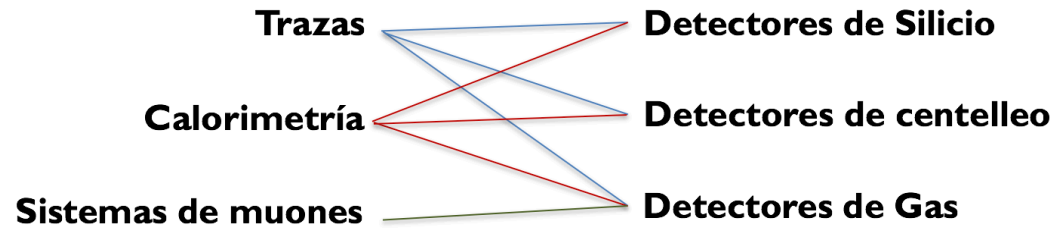
ATLAS Muon Chambers



ATLAS MDTs, 80 μm per tube

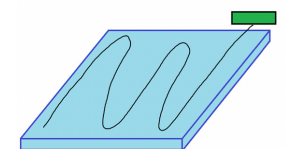
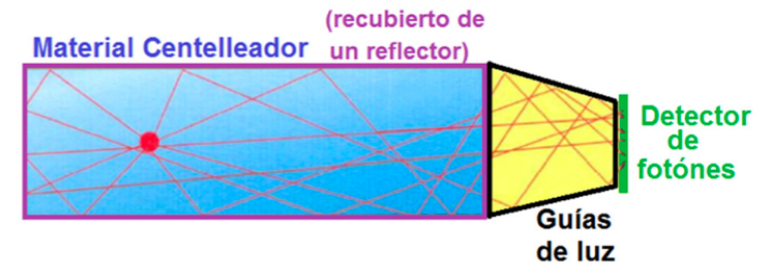


Tipos de detectores y tecnologías



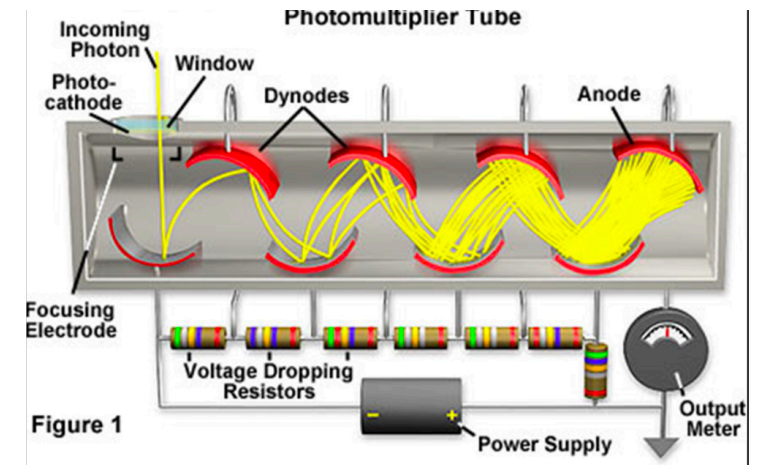
Centelleadores

- Las partículas incidentes pueden **excitar electrones** de átomos o moléculas en el medio
- En algunos casos los estados excitados pueden decaer **emitiendo luz**
 - Normalmente luz en el **rango UV, visible**
 - En muchos casos la luz que se emite es reabsorbida en el mismo material pero en otros no.
- Varios tipos de materiales centelleadores, con mecanismos de producción de luz diferentes:
 - **Orgánicos** (ej plásticos): proceso molecular
 - **Inorgánicos** (cristales): proceso en la red cristalina
 - **Gases (líquidos) nobles**: excitación atómica
- La cantidad de luz producida en el centelleador es muy pequeña.
 - Debe ser **amplificada** para que pueda ser registrada por **foto detectores**
- Además se pueden usar materiales o guías de luz WLS (wave length shifters): absorbe la luz emitida y la re-emite con una longitud de onda diferente
 - Permite **adaptar la longitud de onda** al rango de detección del detector de fotones



Detectores de fotones

- Distintos detectores cuyo objetivo es **transformar la luz en una señal eléctrica medible**. Distintos tipos
 - De vacío
 - De estado sólido
 - Híbridos
- Foto detectores de vacío, ex: **PMT - Photo Multiplier Tube**
 - En el **fotocátodo** el fotón producirá un electrón por efecto **fotoeléctrico** (eficacia depende de la longitud de onda)
 - Una vez que el electrón entra en el tubo de vacío se **acelerará** por el **campo eléctrico** y se dirigirá al electrodo (dinodo) donde puede producir electrones secundarios-> **proceso de avalancha**
 - El último electrodo es un ánodo donde se recogen los electrones y se produce la señal.
 - La respuesta de un PMT es muy rápida $<ns$, pero se ven afectados por el campo magnético



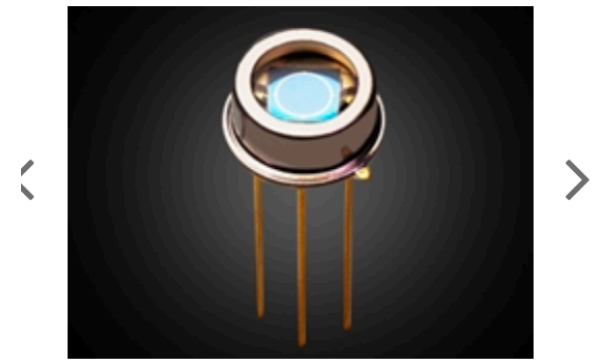
Detectores de fotones

- Detectores de estado sólido: **APD - Avalanche Photo Diodes**

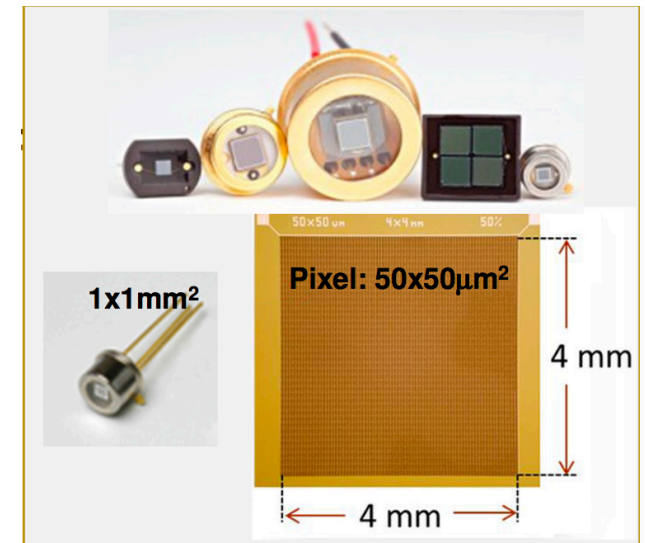
- La **absorción de un fotón incidente produce pares electrón-hueco**
- Si en un diodo pn o pin operando con un V en **polarización inversa** (reverse bias) **aumentamos V** suficientemente, el campo E generado puede acelerar los e- producidos por la partícula incidente con una energía suficiente para crear nuevos pares e-h+ -> **avalancha**, puede producir ganancias de x 100

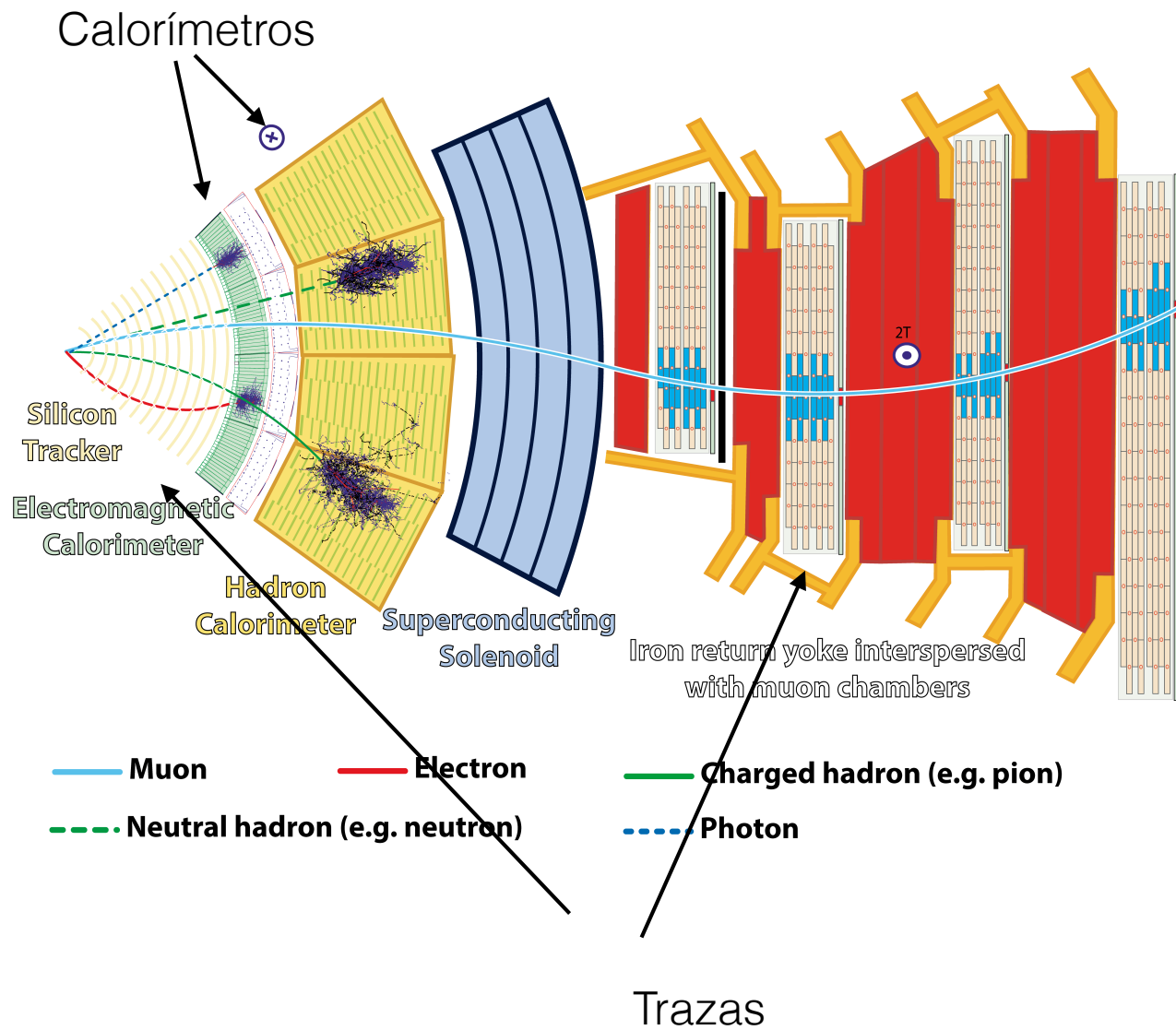
- Detectores de estado sólido: **SiPM -Silicon Photomultipliers**

- Un SiPM es una **matriz de pixels APD** (~1000 pixels/mm²) leídos en paralelo, cada uno 20-100µm
- La señal en cada pixel es independiente del número de fotones incidentes -> Sumando las señales de todos los pixeles podemos **contar el número de fotones** que han atravesado el detector



Hamamatsu S2384, S2385, S12023 Series
Si APD



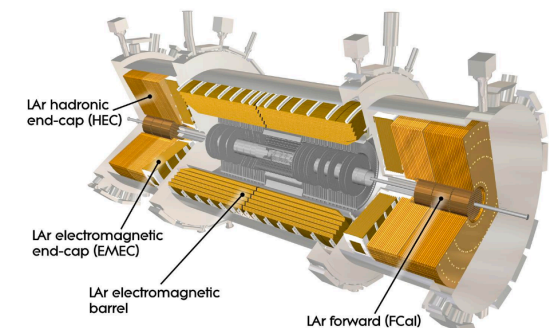
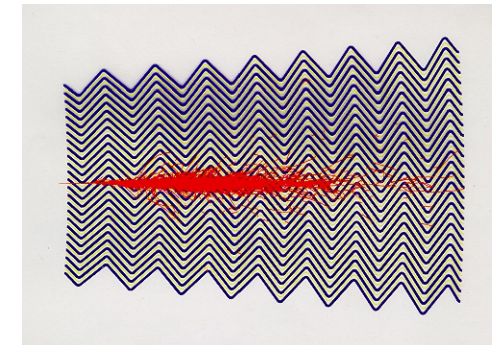
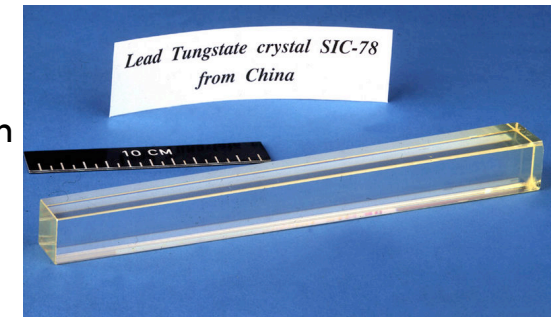


Calorímetros

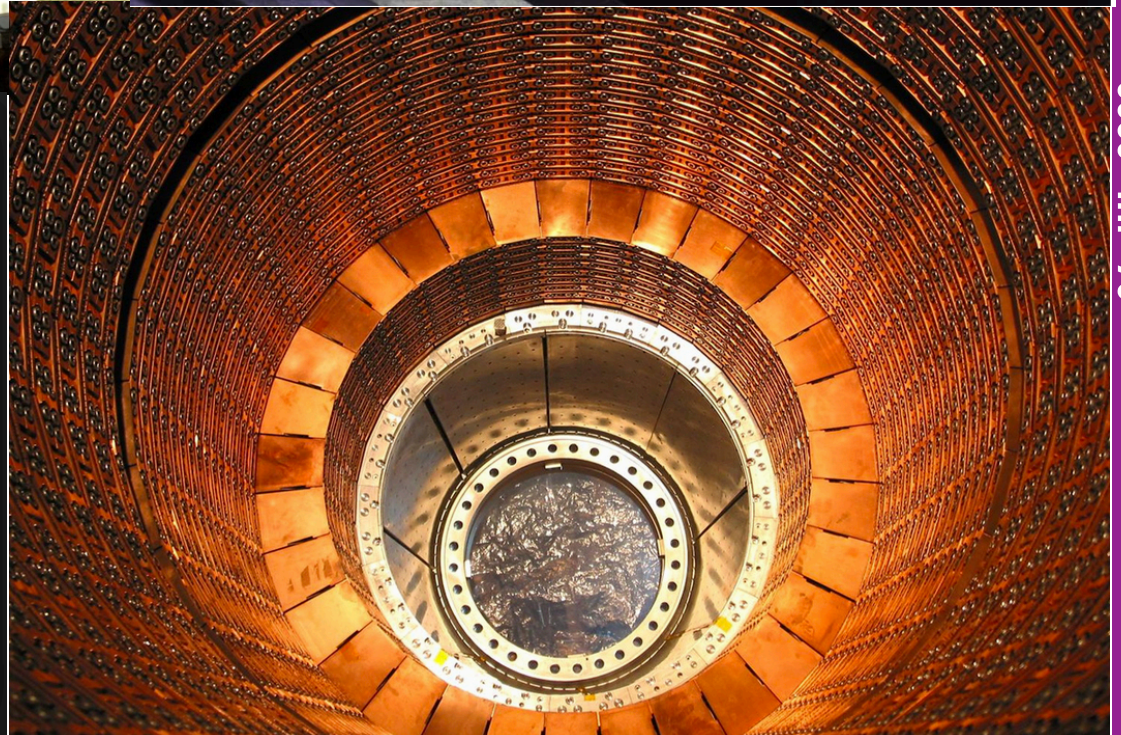
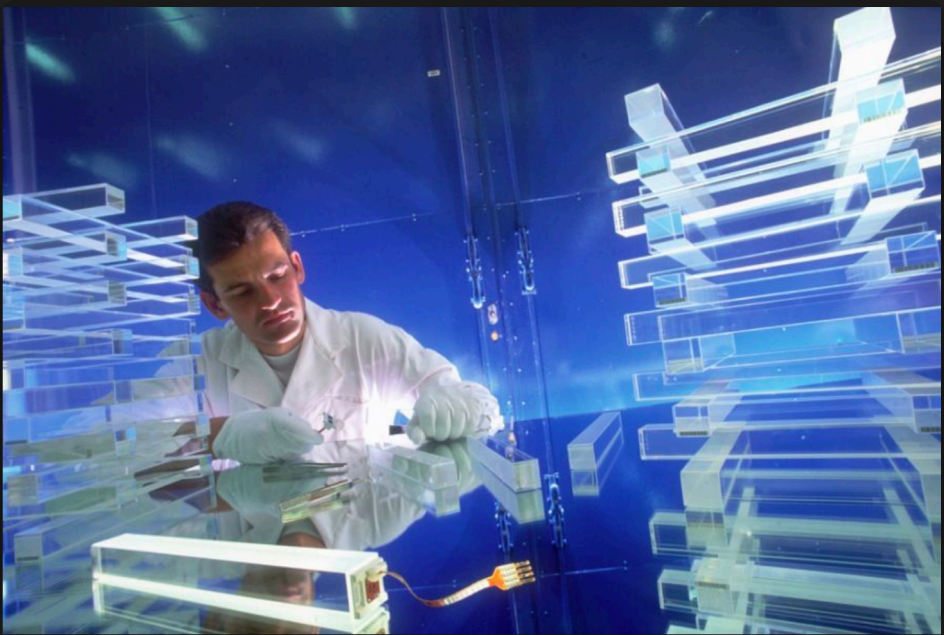
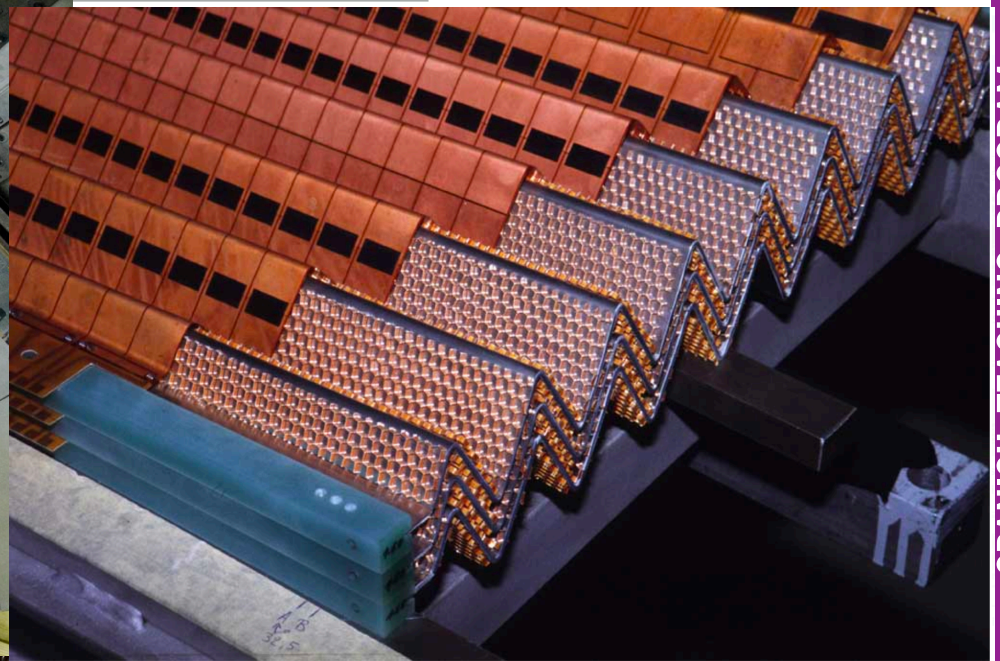
- Detectores donde se desarrollan **cascadas, absorbiendo la energía de la partícula incidente**, sea neutra o cargada (detectores de trazas para partículas cargadas distintas de muones tienen que situarse antes de los calorímetros)
 - Calorímetros **Electromagnéticos**: fotones y electrones de alta energía
 - Calorímetros **Hadrónicos**: partículas que actúan mediante la fuerza fuerte (K, pi, etc)
- Se eligen **materiales densos**. Pueden ser relativamente **compactos** (contrario a los detectores de trazas)
- Cuanta **más alta la energía con más precisión se mide** (contrario a los detectores de trazas)
- Pueden ser homogéneos o 'de muestreo'
 - **Homogéneos**: la cascada se desarrolla en el medio activo que produce una señal y sirve de detector
 - Muy buena precisión en la medida de la energía de la partícula incidente
 - **De Muestreo**: se intercala un medio pasivo donde se desarrolla la cascada, con un medio activo donde las partículas de la cascada producen una señal detectable
 - Menor precisión en la medida de energía
 - Proporciona información sobre 'forma' de la cascada (generalmente mejor medida de posición y posibilidad de identificación)
- Proceso de **calibración** es fundamental: relación exacta entre la señal medida y la energía de la partícula.
- Detectan partículas neutras y cargadas -> proporcionan **detección indirecta de neutrinos**

Calorímetros Electromagnéticos

- **CMS homogéneo: cristales de tungstenato de plomo**
 - Los electrones/fotones se absorben completamente produciendo centelleo en el cristal
 - La luz producida atraviesa el cristal transparente y se mide usando foto detectores
 - Gran trabajo de investigación en desarrollo de cristales con características adecuadas: PbWO₄
 - Longitud de radiación 0.89 cm-> cascada contenida en 23cm-> compacto
 - Proceso de centelleo suficientemente rápido (5ns)-> trigger
 - Pero relativamente baja producción de fotones
 - Aprox. 76000 cristales de medidas ~2x2x23 cm
- **ATLAS de muestra: 'acordeón' de plomo y acero inoxidable con Argón líquido como medio activo**
 - El LAr se ioniza y la carga se recoge en electrodos segmentados -alta granularidad
 - Necesita criostatos para mantener el Ar líquido a 88K

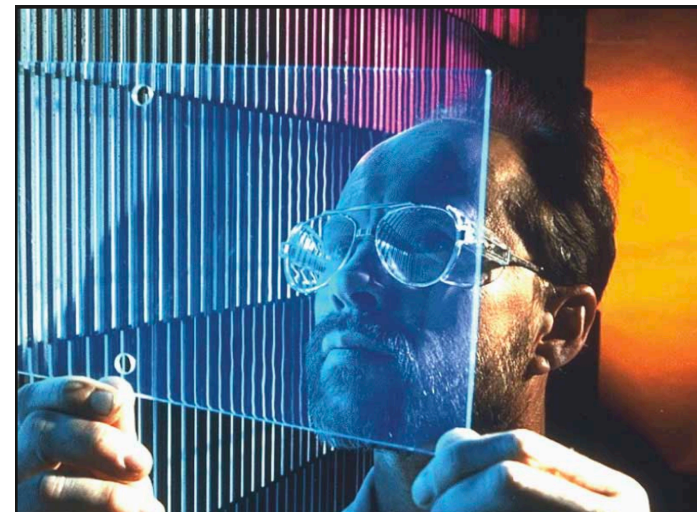
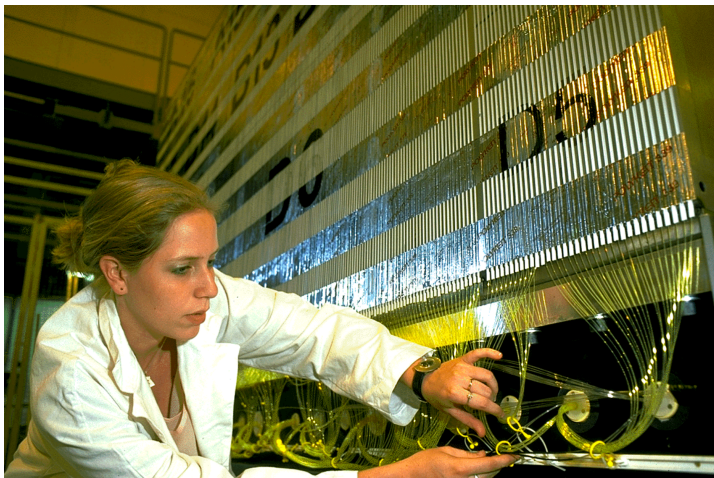
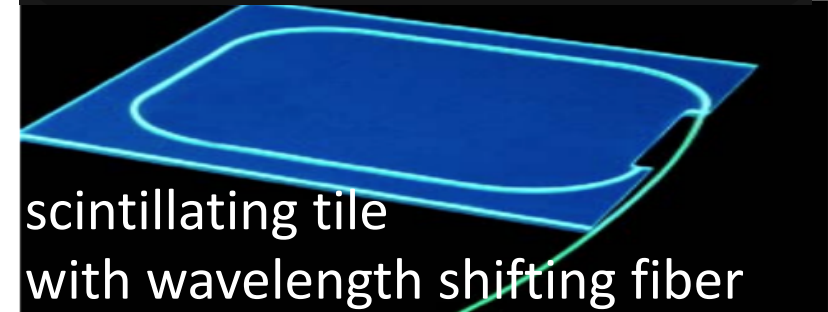


Calorímetros Electromagnéticos



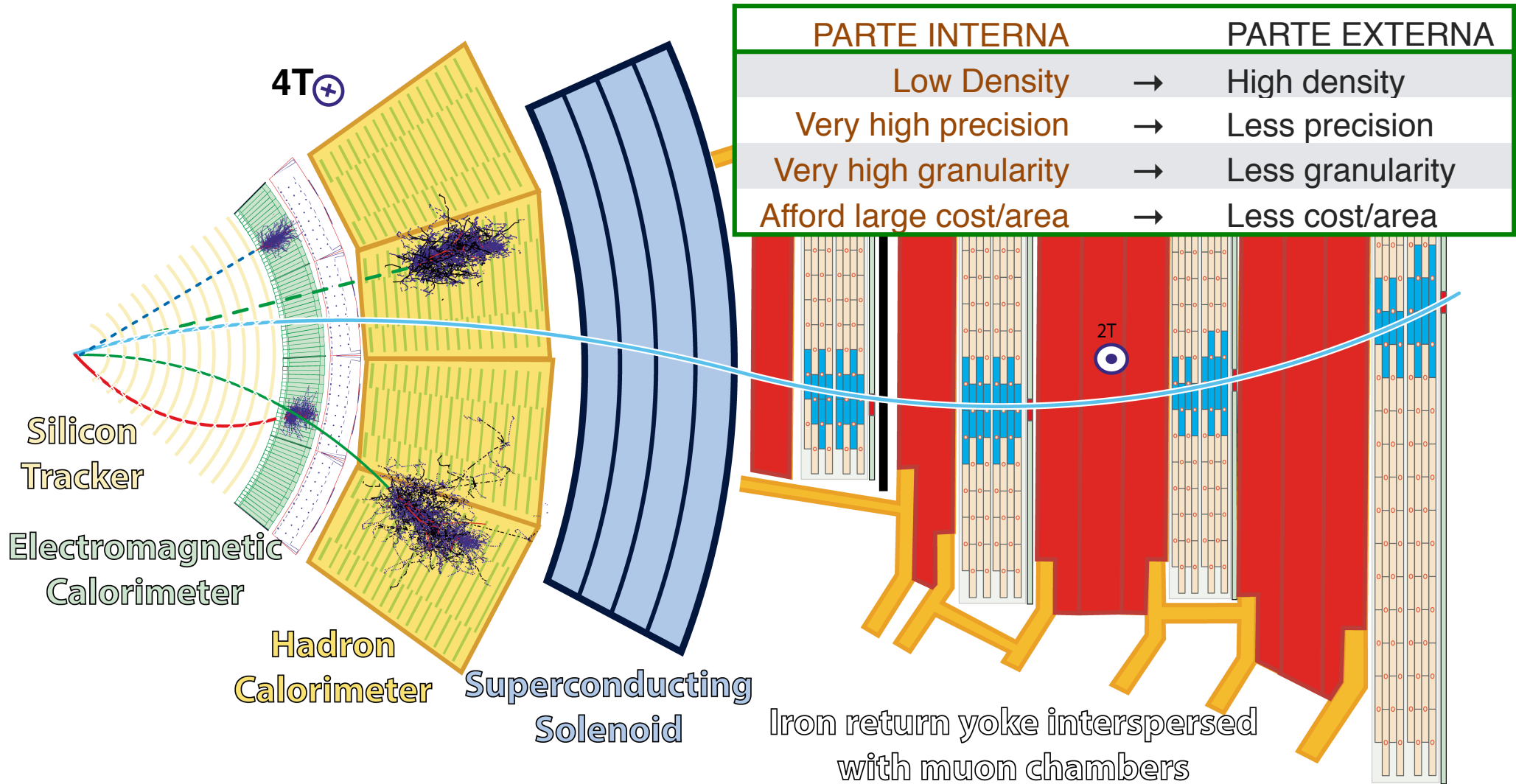
Calorímetros Hadrónicos

- Normalmente son **de muestreo**
- Son **grandes y pesados**: longitud de interacción hadrónica a es 5-10 mayor que la electromagnética X_0
- Como parte de la energía es 'invisible' (excitaciones nucleares, neutrones lentos) la resolución de los calorímetros hadrónicos es peor que la de los EM
- **CMS: capas de bronce** como medio pasivo y 70000 **baldosas de plástico centelleante** como medio activo con fibras incrustadas para conducir y cambiar la longitud de onda de la luz. Lectura con foto detectores.
- **ATLAS: capas de acero** con baldosas de plástico centelleante. Luz transmitida a ~ 10000 PMTs



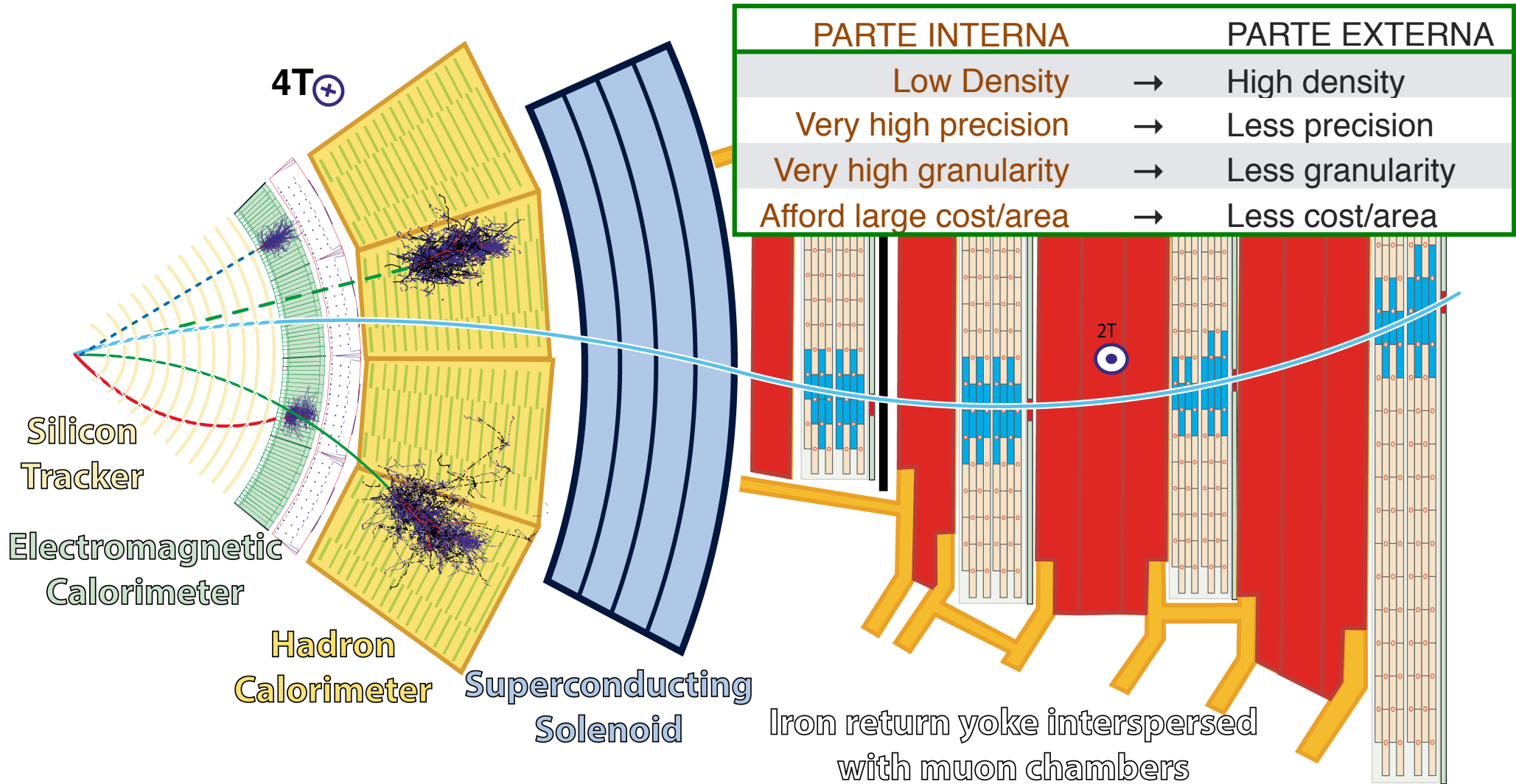
Resumen detector "típico": CMS

Particle identification and reconstruction using information from all subdetectors



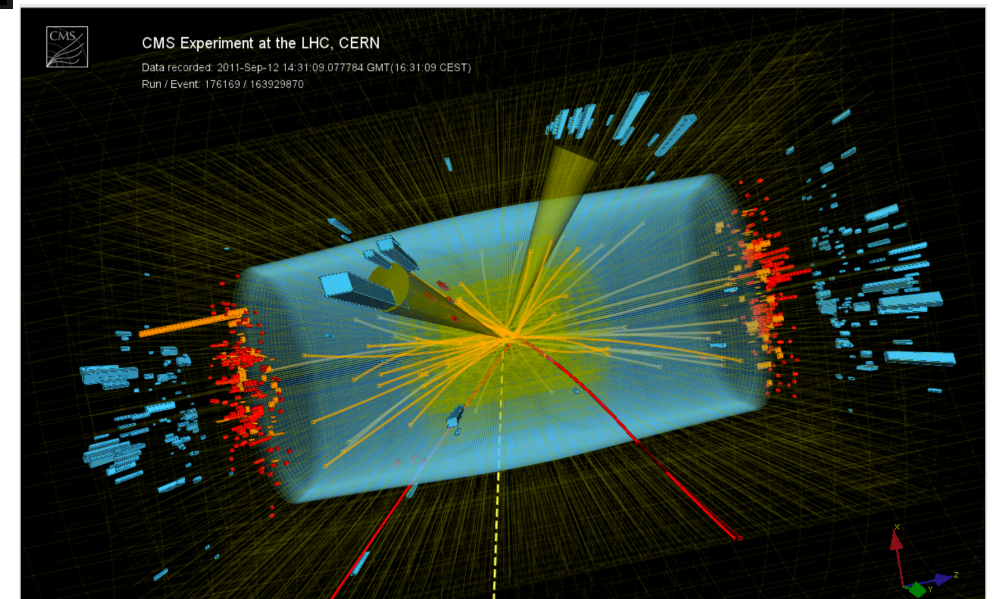
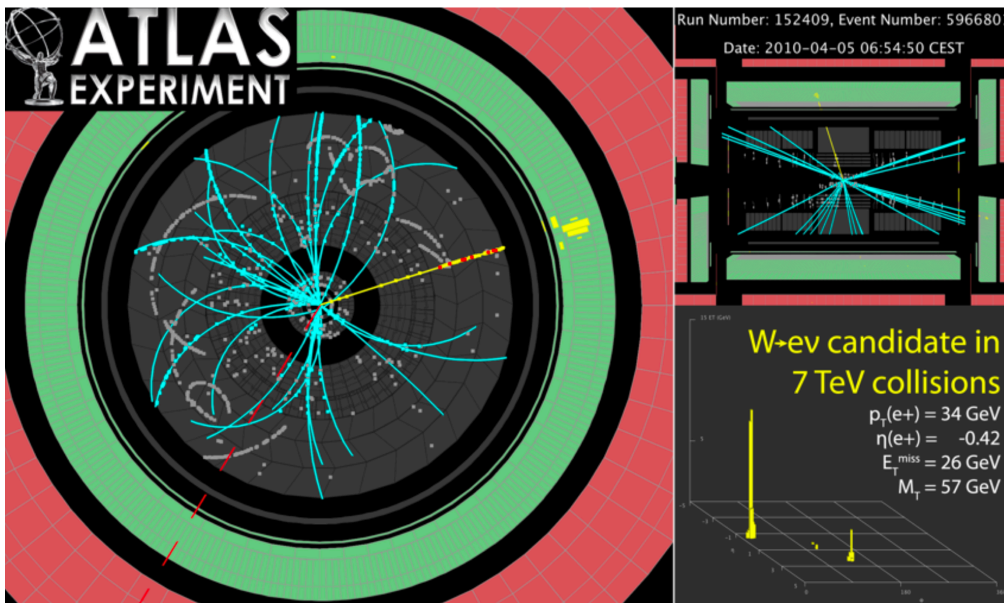
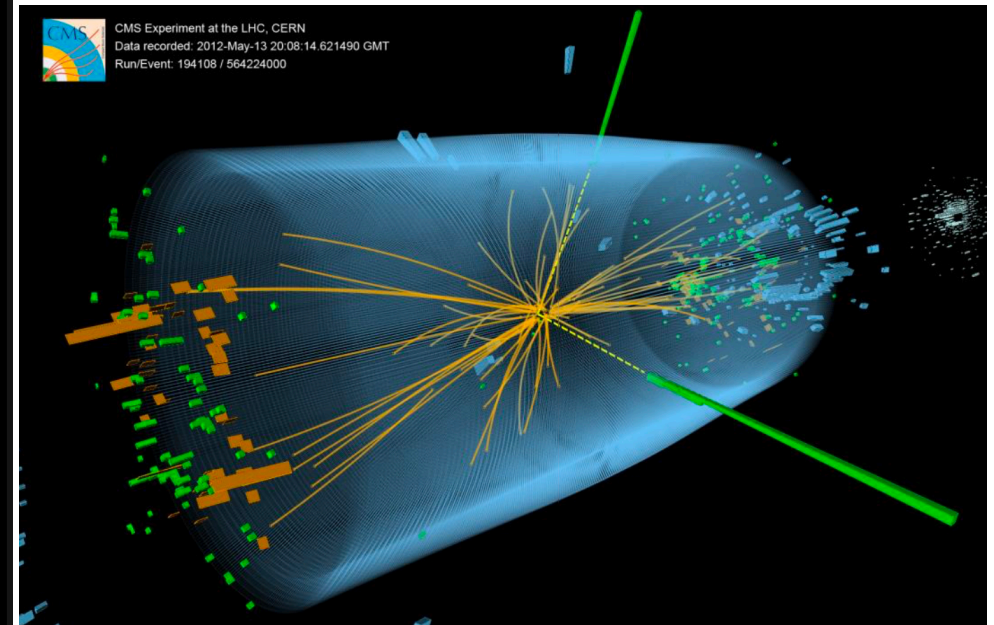
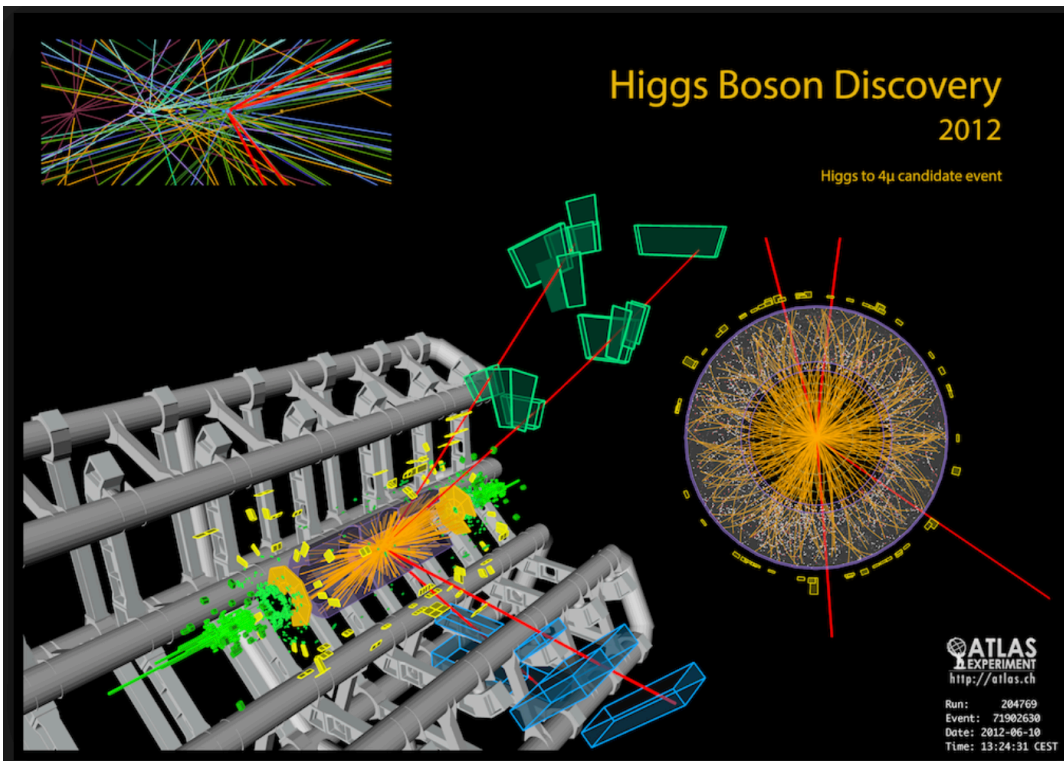
Resumen detector "típico": CMS

Particle identification and reconstruction using information from all subdetectors



- Muon
- Electron
- Charged hadron (e.g. pion)
- - - Neutral hadron (e.g. neutron)
- - - Photon

Event Displays de ATLAS y CMS



Visualization of a measured CMS event with two muons and two b-tagged jets

Conclusiones

- Con este tipo de detectores en el LHC se ha descubierto una partícula nueva, de características compatibles con el bosón de Higgs

En 2013 se otorgó a F. Englert y P. Higgs el Premio Nobel de Física por sus estudios y predicciones teóricas del mecanismo y de la partícula fundamental

- Plan establecido para seguir usando el LHC para progresar en la comprensión de las leyes fundamentales de la naturaleza
 - Mejoras en los detectores para el futuro HL-LHC, que ofrecerá luminosidades mucho mayores
- Además se están trazando ahora una serie de líneas a más largo plazo para el futuro de la física de partículas de altas energías
- En cualquier caso, la esperanza es que las nuevas generaciones quieran, puedan y tengan la educación necesaria para seguir participando en esta empresa
 - En gran medida será gracias a ustedes!

Algunas Referencias

- Charlas anteriores en este programa de Cristina Fdez Bedoya (CIEMAT) y Mar Capeáns (CERN)
 - https://indico.cern.ch/event/977476/contributions/4204920/attachments/2188352/3699251/CFB_detectores_esp21_CERN.pdf
 - <https://indico.cern.ch/event/742158/timetable/>
- Cursos de MaryCruz Fouz y Jesús Puerta (CIEMAT) para Master en Física Experimental de Partículas y Cosmología de UCM
 - <http://wwwae.ciemat.es/masterUCM/FisExpCosm/>
- Introduction to particle detectors by D. Barney
- Summer Student Lectures W. Riegler (CERN)
 - <https://indico.cern.ch/category/345/>
- Introduction to Silicon Detectors .Marc Weber, Rutherford Appleton Laboratory
- CERN Courier
 - <https://cerncourier.com/particle-identification-in-alice-boosts-qgp-studies/>
- Wikipedia
- Libros:
 - K. Kleinknecht - Detectors for Particle Radiation, C.U.P. 1990

Algunas referencias

<https://www.youtube.com/watch?v=iYRQpcJVQx8>.

☰ YouTube^{CH}

Search



ATLAS - Episode 2 -The Particles Strike Back (Part 1)

102,740 views

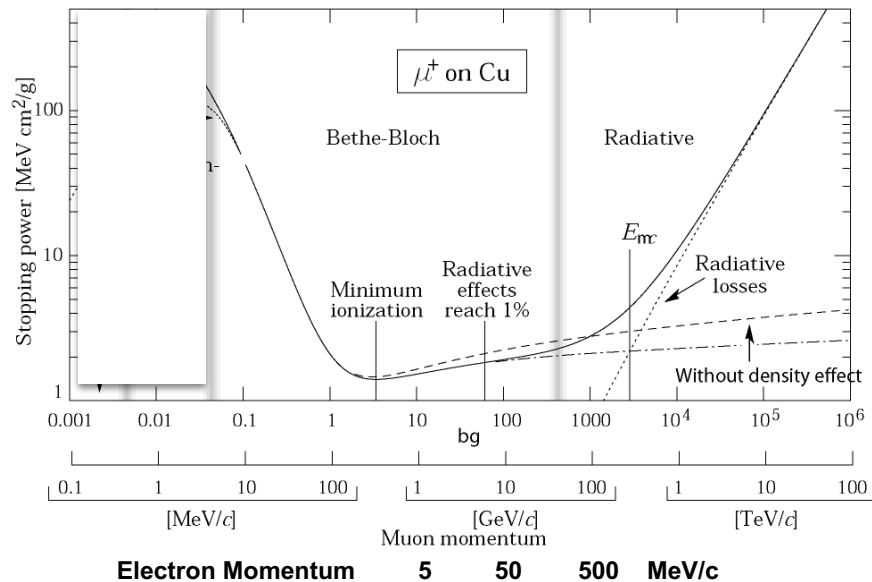
👍 323 🗨️ 6 ➦ SHARE 📌 SAVE ⋮

Back up

Interacción EM : Partículas cargadas

- Perdida de energía de una partícula cargada por interacción electromagnética: forma característica

such as copper to about 1% accuracy for energies between about 6 MeV and 6 GeV



Zona de pérdidas por ionización:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = -2\pi r_e^2 m_e c^2 \frac{Z_1^2}{\beta^2} N_A \frac{Z}{A} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 F}{I}$$

Slide:W.Riegler, CERN

Zona de pérdidas por radiación:

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

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

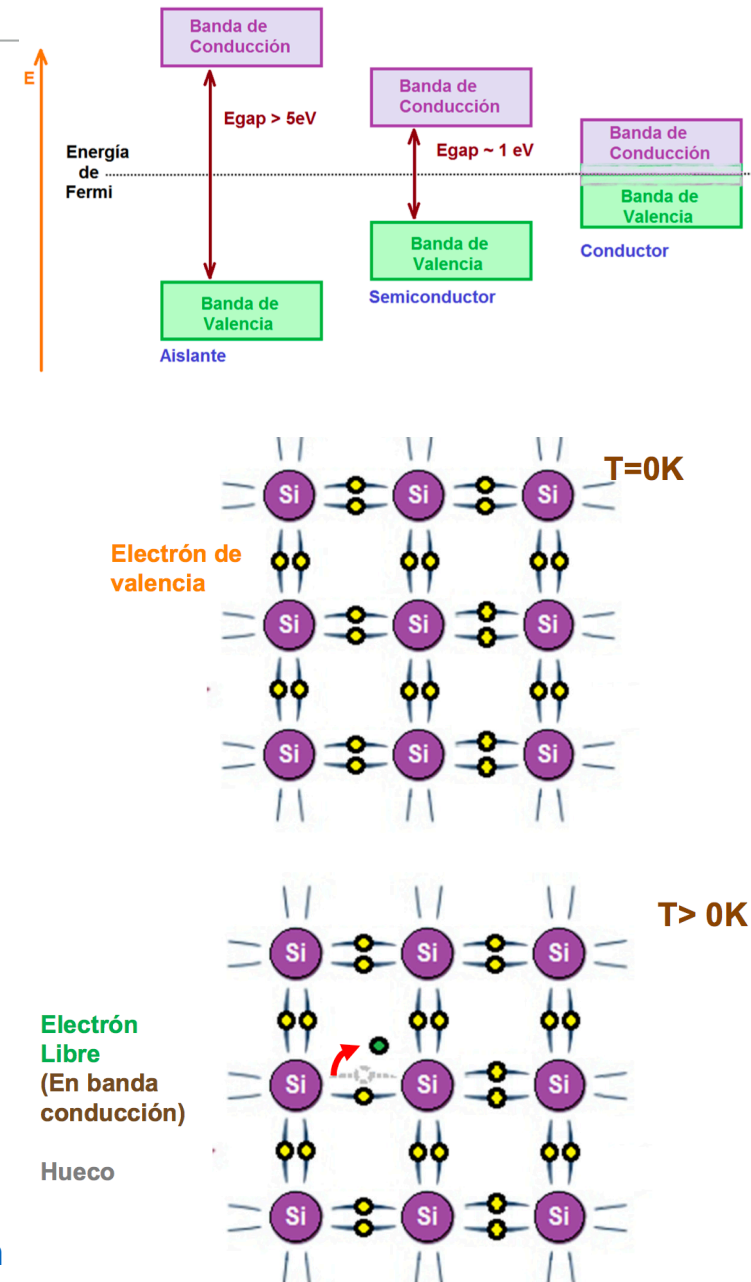
$$\text{with } X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}}}$$

Longitud de radiación: Grosor del material que reduce la energía media de un haz de electrones por un factor e.

- Transición de una zona a otra se produce a ~ MeV para e[±], ~ GeV para μ[±]
 - Para energías típicas en LHC (100 GeV), **los electrones y positrones pierden energía mediante radiación de fotones**, mientras que los muones están en la zona de pérdida de energía mínima.
 - Un muon de 1 GeV puede atravesar 1m de hierro
 - Un electrón depositaría su energía radiando fotones (sería absorbido en el medio, es lo que pasa en los calorímetros)

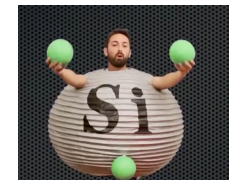
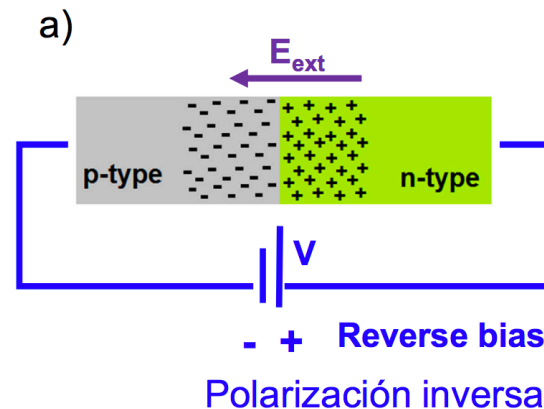
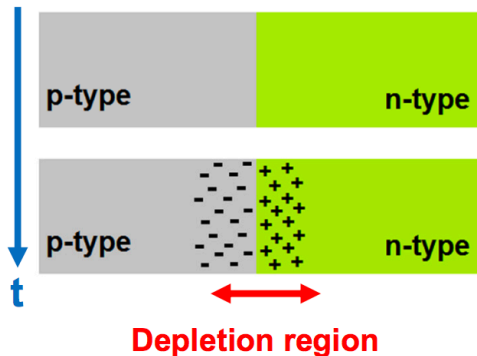
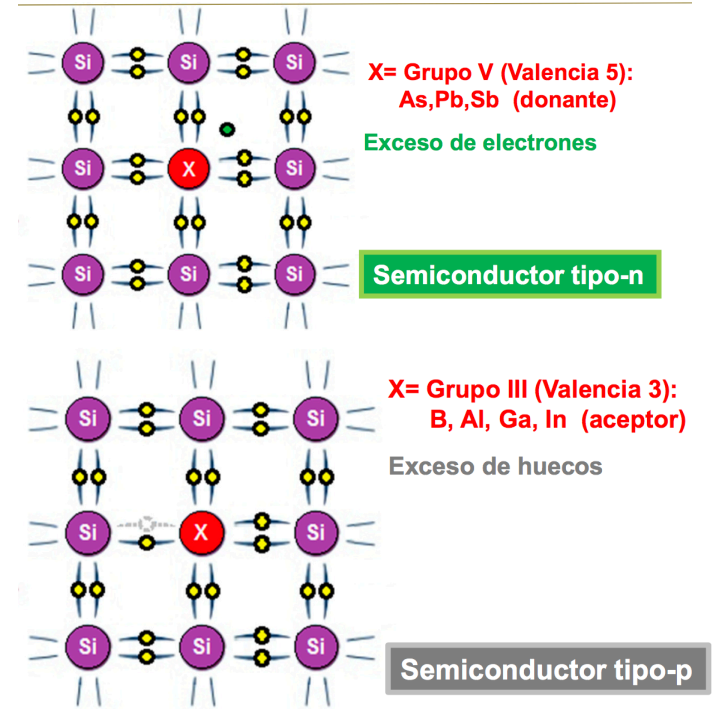
Detectores de silicio

- Basados en la física de semiconductores
- En un sólido los niveles atómicos dan lugar a bandas continuas de energía.
 - Los e- de la banda de valencia están ligados a un átomo, los de la banda de conducción pertenecen a todo el material.
- Si $T \neq 0$ los electrones pueden excitarse térmicamente y pasar a la banda de conducción. Quedará entonces un hueco en la banda de valencia.
 - Los e- de la banda de conducción y los huecos pueden moverse por el material.
- **Cuando una partícula atraviesa un material semiconductor puede ionizar y producir un par electrón-hueco . Si aplicamos un campo eléctrico podemos recoger la señal.**
- Sin embargo, a temperatura ambiente el número de electrones libres es órdenes de magnitud superior al número de electrones que puede generar una partícula por ionización
 - Solución: uniones p-n



Detectores de silicio

- Los semiconductores se pueden dopar, obteniendo materiales con exceso de electrones (tipo n) o de huecos (tipo p)
- Si se unen p-n los huecos se difundirán a través de la unión hacia el material tipo-n, los electrones se difundirán a través de la unión hacia el material tipo-p
- Mediante **uniones p-n** se puede generar una **zona sin cargas libres** que se puede usar para detección de partículas
- Si aplicamos un campo eléctrico externo podemos mejorar la recolección de carga y aumentar la zona donde puede detectarse la señal



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

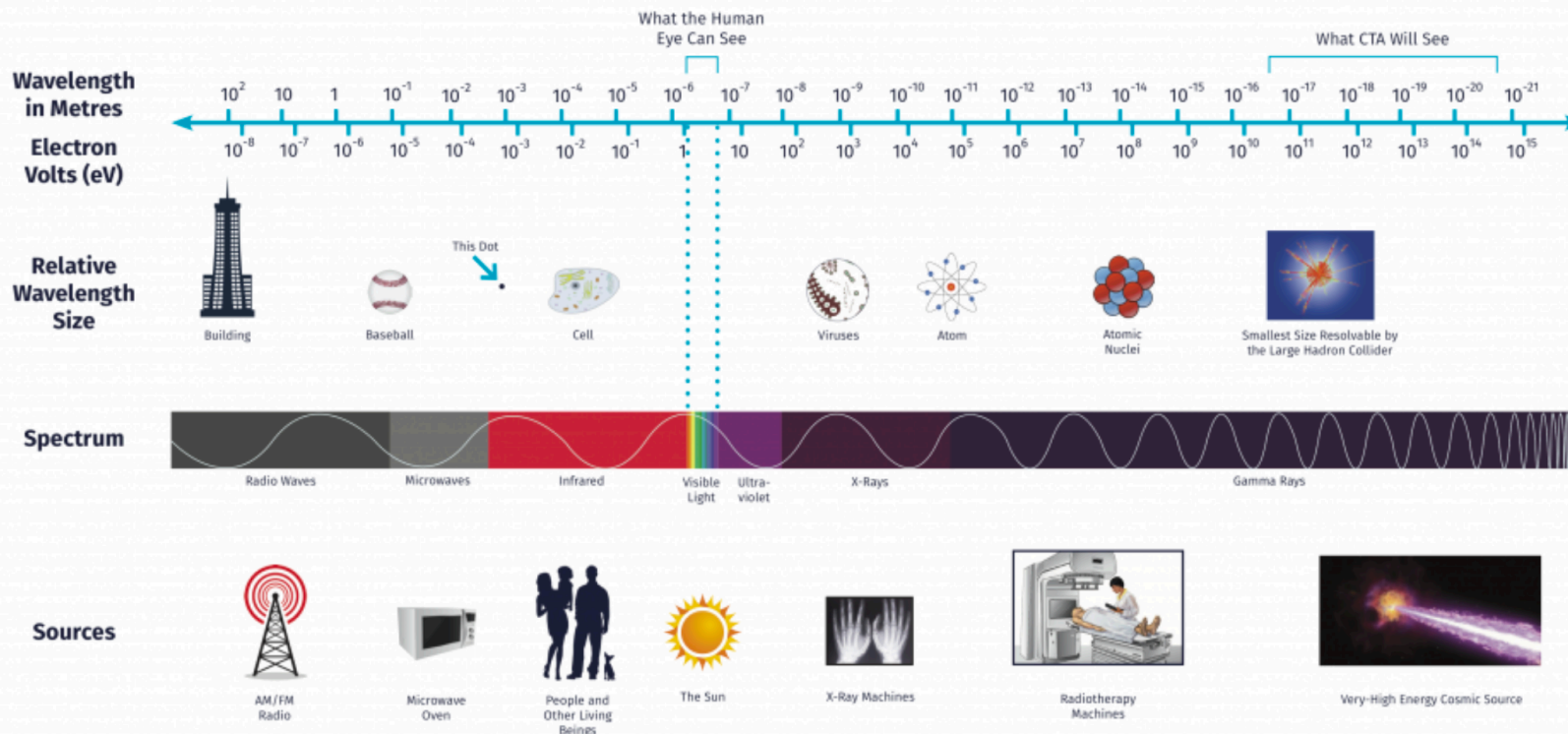
Qué queremos detectar y en qué condiciones?

- En LHC se producen colisiones de protones a **muy alta energía** (13 TeV), necesaria para producir (nuevas) partículas de alta masa
- Energías de las partículas finales a detectar y a medir con precisión son del orden de \sim GeV

- **Detectores grandes**



The Electromagnetic Spectrum



Prefix	Symbol(s)	Power of 10
kilo-	k or K **	10^3
mega-	M	10^6
giga-	G	10^9
tera-	T	10^{12}
peta-	P	10^{15}
exa-	E	10^{18} *

Interacciones de las partículas

- Para detectar una partícula hay que 'verla' de alguna manera, i.e. tiene que **interaccionar con el medio**, si no es invisible.
- Distintas partículas interaccionan de distinta forma con la materia-> **identificación**
 - Tenemos que ser capaces de convertir esa interacción en una **señal eléctrica**, que proporcione **medida de impulso/energía**
- Cuatro interacciones fundamentales
 - La fuerza gravitatoria, afecta a todas la partículas con masa. Es mucho mas débil que todas las demás
 - Fuerza débil responsable de las desintegraciones de las partículas
 - **Fuerza electromagnética (EM) actúa en todas las partículas cargadas, con el fotón como mediador**
 - **Partículas hadrónicas** (formadas de quarks y gluones) **sienten la fuerza fuerte**

Las tres generaciones de la Materia (Fermiones)

	I	II	III	
masa→	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0
carga→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre→	u up	c charm	t top	Y photon
Quarks	6 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	<0.19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	<18.2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	90.2 GeV 0 1 Z⁰ fuerza débil
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	106 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.78 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80.4 GeV ± 1 1 W[±] fuerza débil
Leptones				Bosons (Fuerzas)

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:	10 ⁻⁴¹	0.8	1	25	Not applicable to quarks
for two protons in nucleus	10 ⁻⁴¹	10 ⁻⁴	1	60	Not applicable to hadrons
	10 ⁻³⁶	10 ⁻⁷	1		20

CMS Detector: Design requirements (Physics)

The detector requirements for CMS to meet the goals of the LHC physics programme can be summarised as follows:

- Good muon identification and momentum resolution over a wide range of momenta and angles, good dimuon mass resolution ($\approx 1\%$ at 100 GeV), and the ability to determine unambiguously the charge of muons with $p < 1$ TeV; Robust, fast muon system high resolution. Large B field
- Good charged-particle momentum resolution and reconstruction efficiency in the inner tracker. Efficient triggering and offline tagging of τ 's and b -jets, requiring pixel detectors close to the interaction region;
- Good electromagnetic energy resolution, good diphoton and dielectron mass resolution ($\approx 1\%$ at 100 GeV), wide geometric coverage, π^0 rejection, and efficient photon and lepton isolation at high luminosities; High resolution electromagnetic calorimeter
- Good missing-transverse-energy and dijet-mass resolution, requiring hadron calorimeters with a large hermetic geometric coverage and with fine lateral segmentation.

The design of CMS, detailed in the next section, meets these requirements. The main distinguishing features of CMS are a high-field solenoid, a full-silicon-based inner tracking system, and a homogeneous scintillating-crystals-based electromagnetic calorimeter.

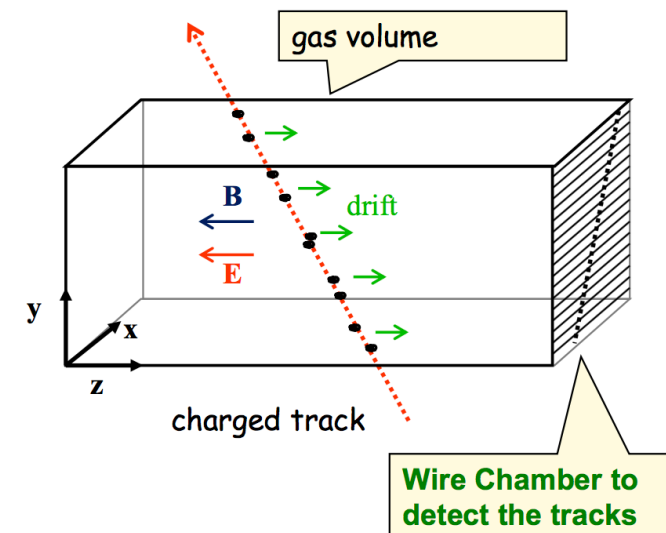
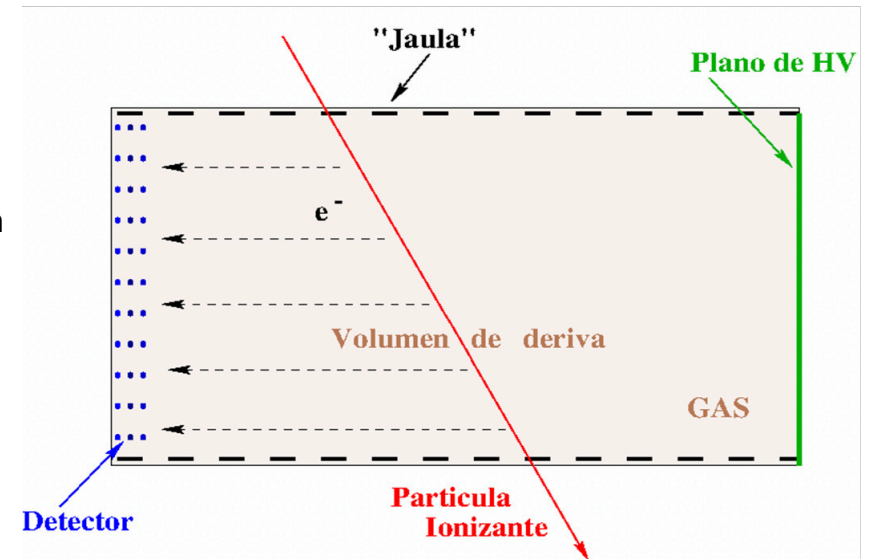
Qué queremos detectar y en qué condiciones?

- En LHC se producen colisiones de protones a **muy alta energía** (13 TeV), necesaria para producir (nuevas) partículas de alta masa
- Energías de las partículas finales a detectar y a medir con precisión son del orden de \sim GeV
 - **Detectores grandes**

Prefix	Symbol(s)	Power of 10
kilo-	k or K **	10^3
mega-	M	10^6
giga-	G	10^9
tera-	T	10^{12}
peta-	P	10^{15}
exa-	E	10^{18} *

Detectores gaseosos para trazas en LHC

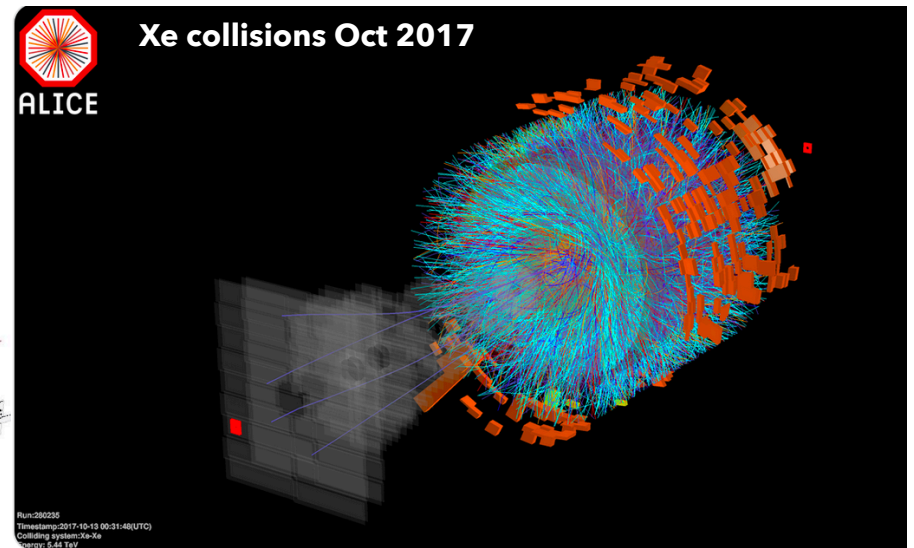
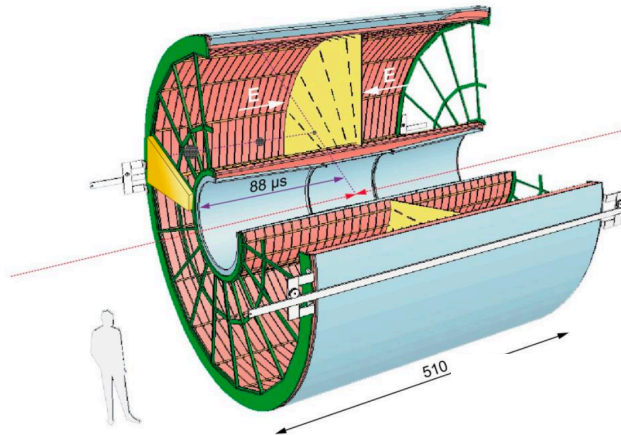
- **Ej 3: Cámara de Proyección Temporal (TPC)**
 - Técnica similar a cámara de deriva
 - **Gran volumen relleno de gas** (puede ser un líquido) con campo eléctrico y magnético paralelos
 - Al pasar la partícula se producen electrones que derivan a un detector situado en el ánodo
 - Se mide la traza en 2D en el detector
 - Midiendo el tiempo de llegada de los electrones se puede hacer reconstrucción 3D
 - Se pueden cubrir volúmenes muy grandes (L hasta 2.5m) con poquísimo material (gas)-> **poca dispersión múltiple**-> muy buena resolución incluso para partículas de bajo impulso
 - Se pueden usar para **identificar** partículas, ya que la altura de los pulsos detectados es proporcional a la cantidad de ionización producida
 - **Limitación en la frecuencia de sucesos** (tiempos de deriva 10-100 us)



Detectores gaseosos para trazas en LHC

ALICE TPC: Detector Parameters Slide W. Riegler

- Gas Ne/ CO₂ 90/10%
- Field 400V/cm
- Gas gain >10⁴
- Position resolution $\sigma = 0.25\text{mm}$
- Diffusion: $\sigma_t = 250\mu\text{m} \sqrt{cm}$
- Pads inside: 4x7.5mm
- Pads outside: 6x15mm
- B-field: 0.5T



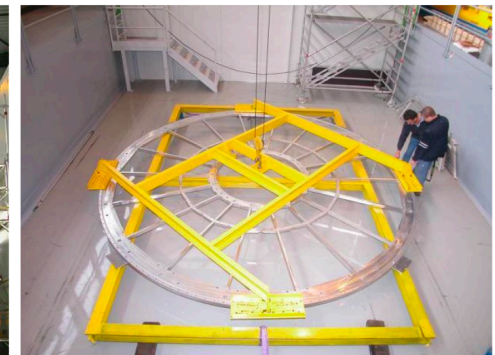
ALICE TPC: Pictures of the Construction Slide W. Riegler



Precision in z: 250 μm



End plates 250 μm

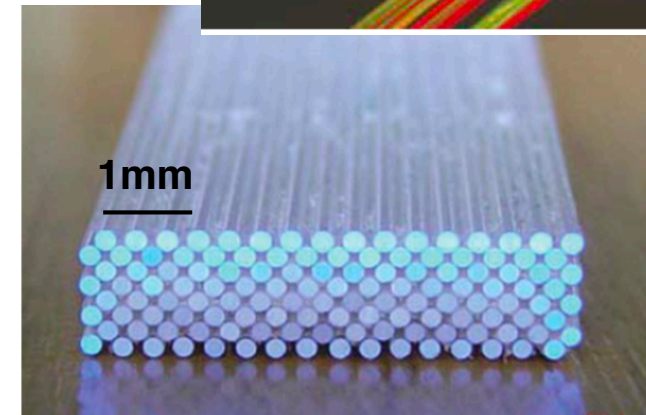
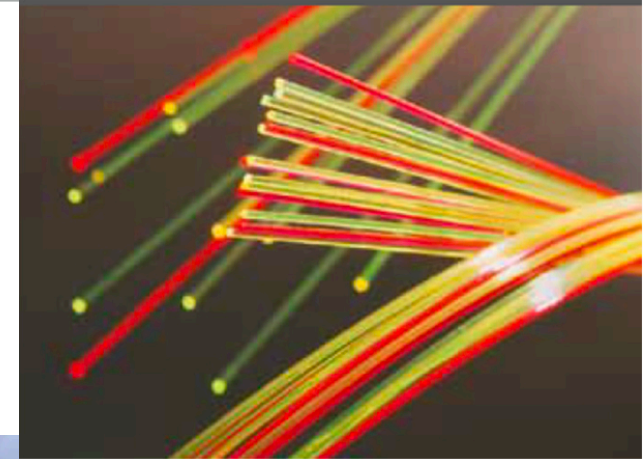


Wire chamber: 40 μm

Detector de trazas con centelleadores: LHCb

- También podríamos optar por usar **fibras de plástico centelleadoras** en las cuales se produce la señal que luego ella misma conduce hasta el detector de fotones por reflexión .
- **SciFi, nuevo detector de trazas en LHCb**
 - Una tecnología única que puede funcionar de forma similar a un rastreador de silicio (~100 μm de resolución espacial), pero lo suficientemente rentable como para cubrir 360 m^2
 - 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

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



Slide: C.Joram, CERN

