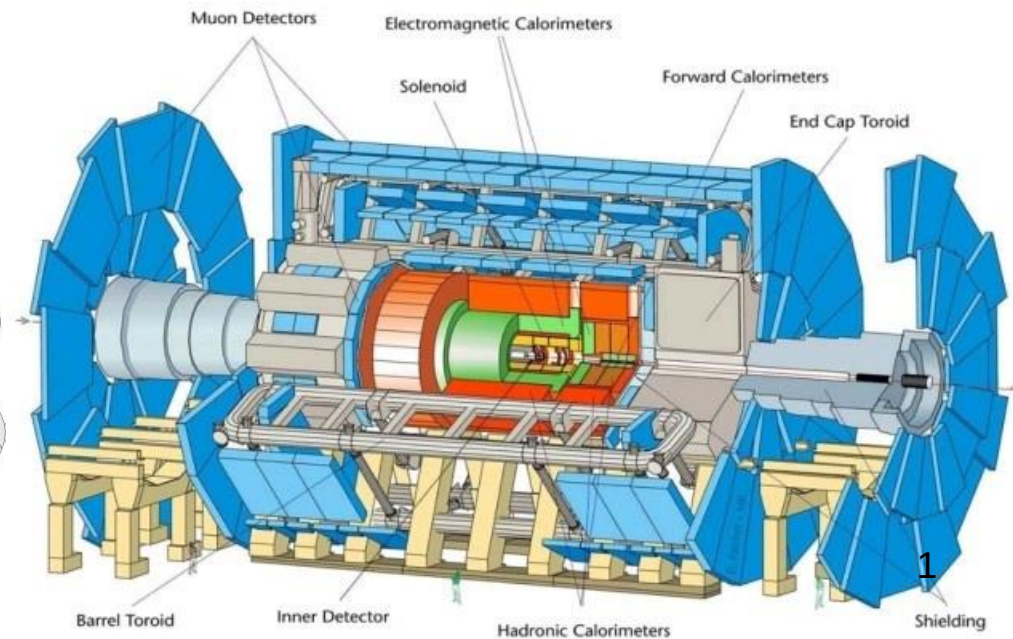
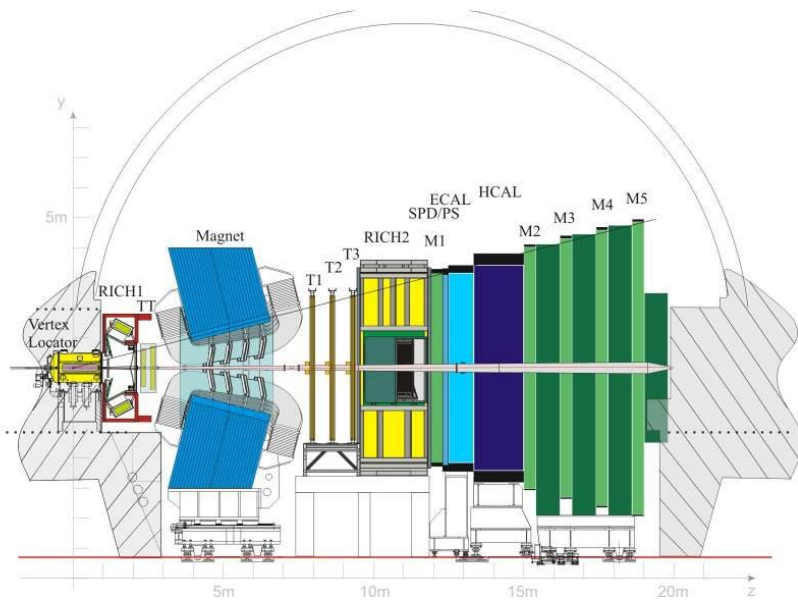




**Los detectores más grandes y sofisticados jamás construidos**

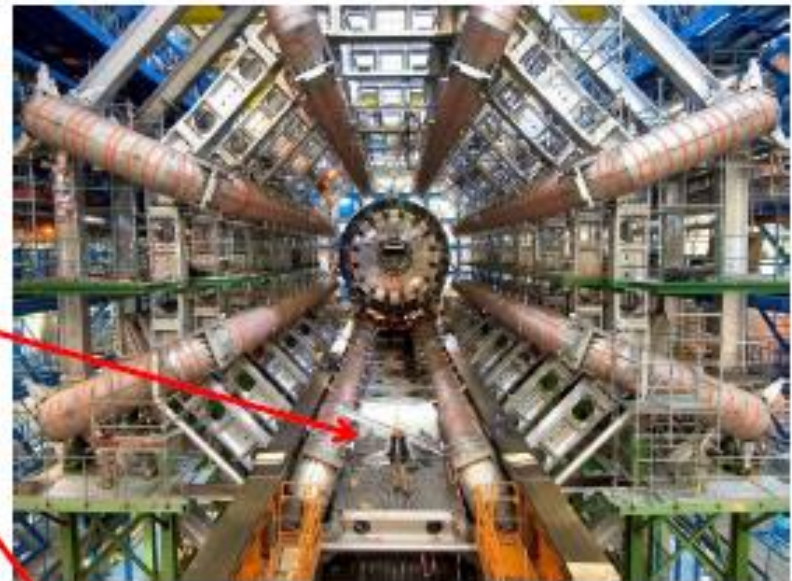




# The ATLAS and CMS Experiments – at the Leading Edge

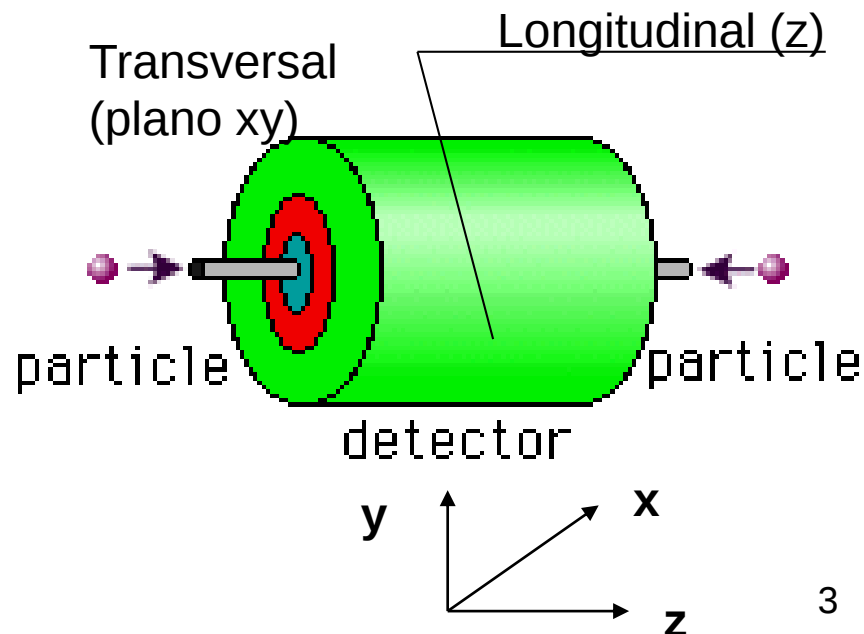
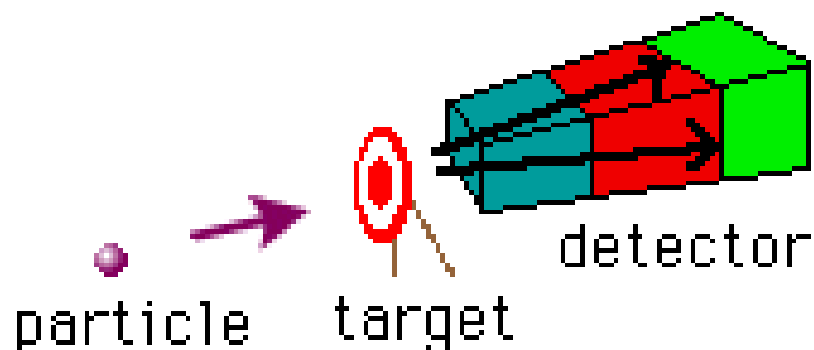
Each detector is like a 100 megapixel camera which takes 40 million pictures per second. The largest and most complex scientific instruments ever built.

- Highest energy proton collider
- 1 billion interactions per second
- First silicon pixels in a proton collider
- First all silicon tracker
- 100 million channels of radiation hard electronics
- Calorimeter with 60,000 PbWO<sub>4</sub> crystals
- First use of accordion liquid argon calorimeter
- Largest magnetic toroids
- Largest magnetic solenoid
- Selection of one in 10 million interactions at a 40 MHz speed.
- Enormous data logging rate – 1 million CD per year
- Worldwide grid computing analysis



# Forma del detector

- **Fixed Target:** With a fixed-target experiment the particles produced generally fly in the forward direction, so detectors are cone shaped and are placed "downstream."
- **Colliding Beams:** During a colliding-beam experiment, the particles radiate in all directions, so the detector is spherical or, more commonly, cylindrical.



# Where Are the Particles?

M. física:  
rapidez  $y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z c}{E - p_z c}$

$$E = M_T \cosh y, M_T^2 = M^2 + P_T^2$$

$$y \rightarrow \eta = -\log(\tan \theta / 2), P \gg M$$

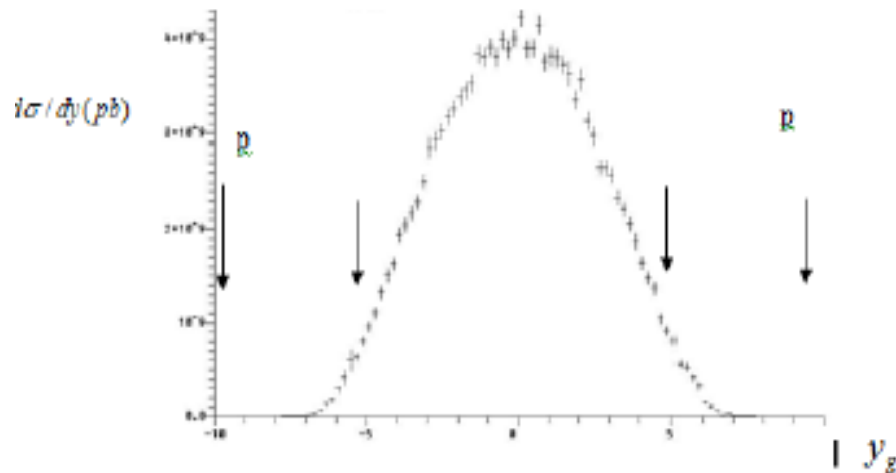
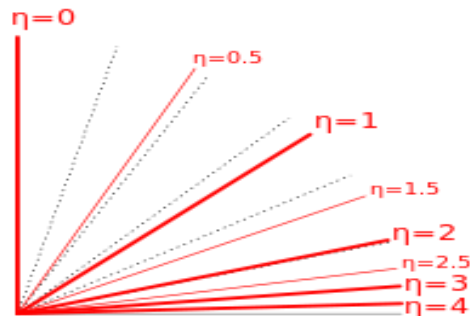
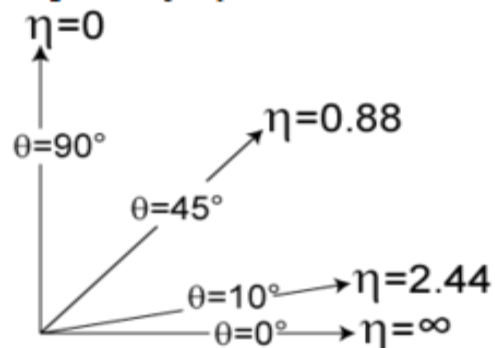
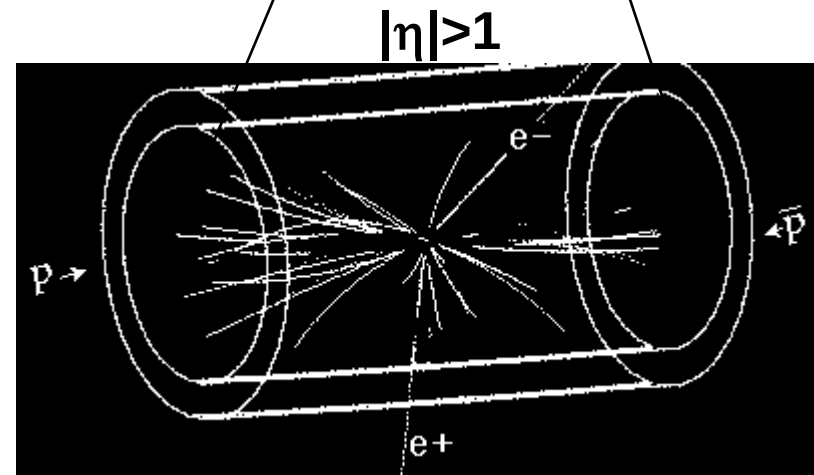


Figure 5: Rapidity distribution of low transverse momentum gluon jets at the LHC.



$$\eta \equiv -\ln \left[ \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) \right],$$

Tapones  
(endcaps)

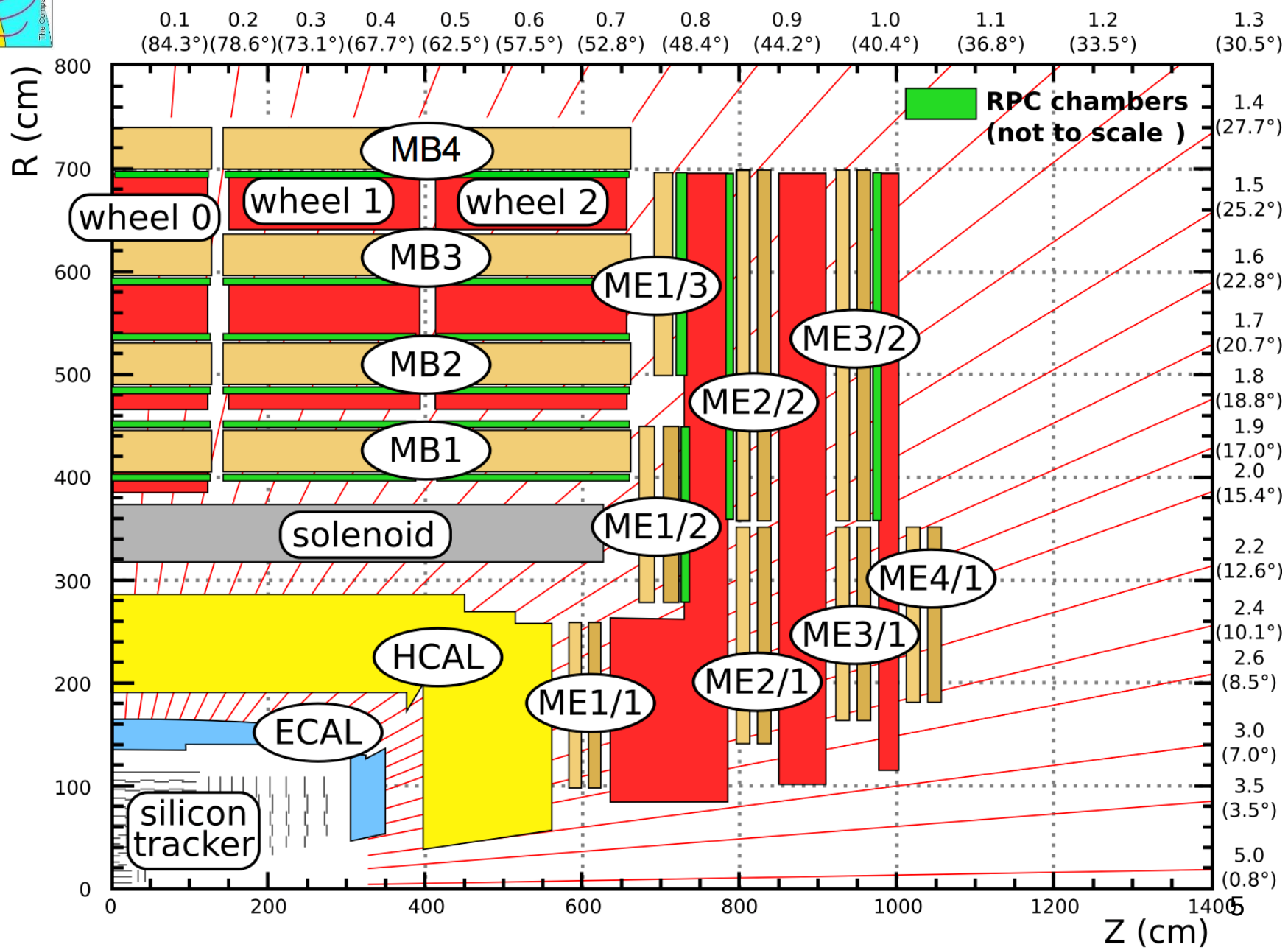


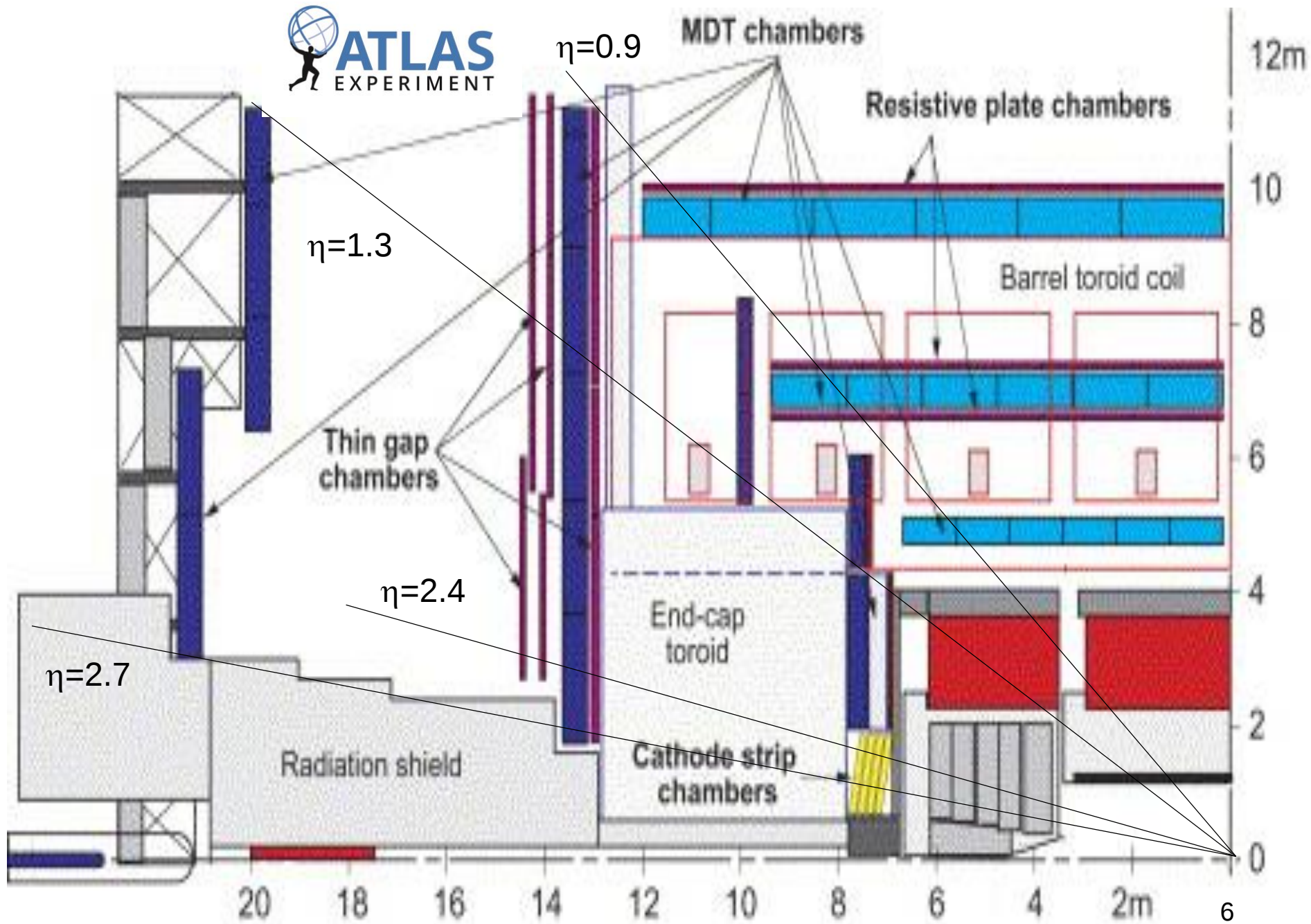
$$-1 < \eta < 1$$

Zona central  
(barrel)

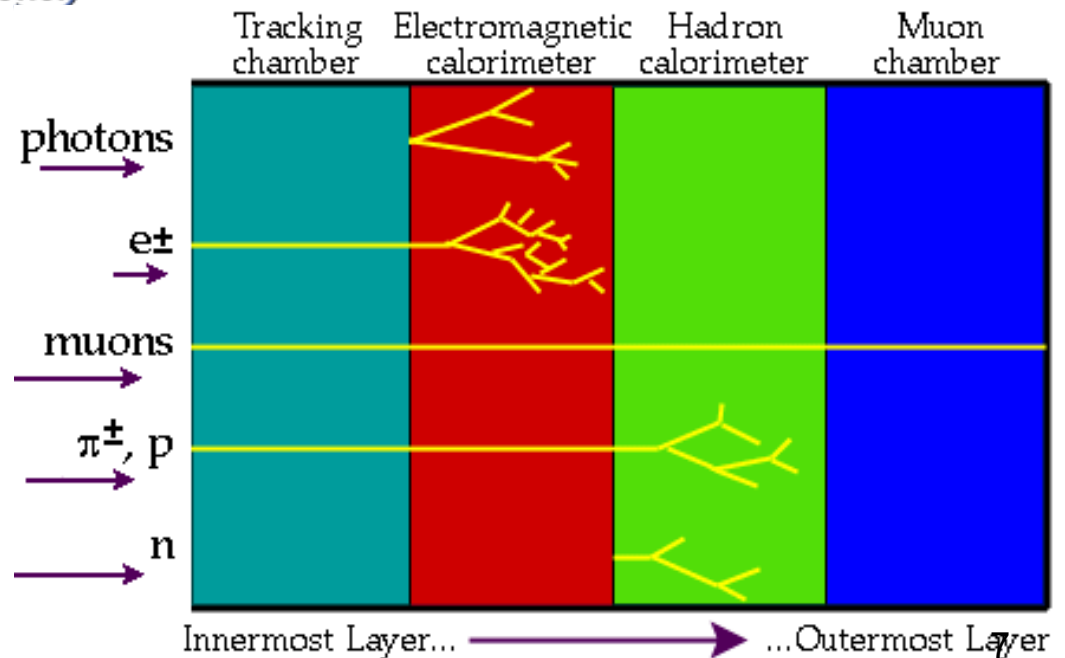
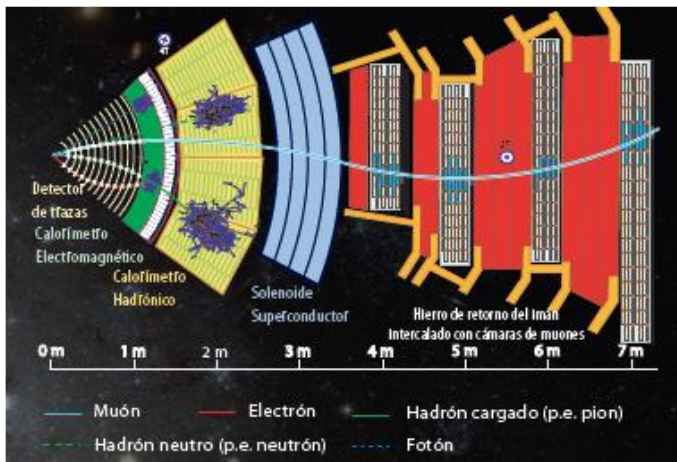
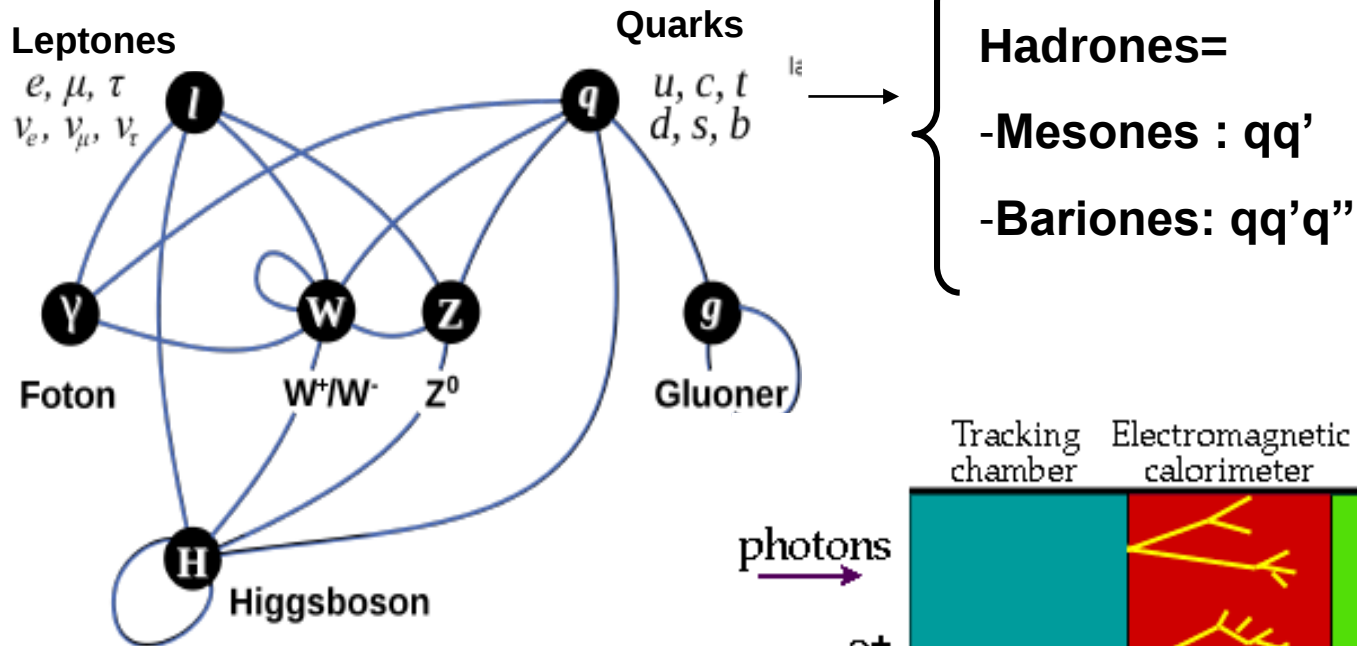
Pseudorapidez  $\eta$

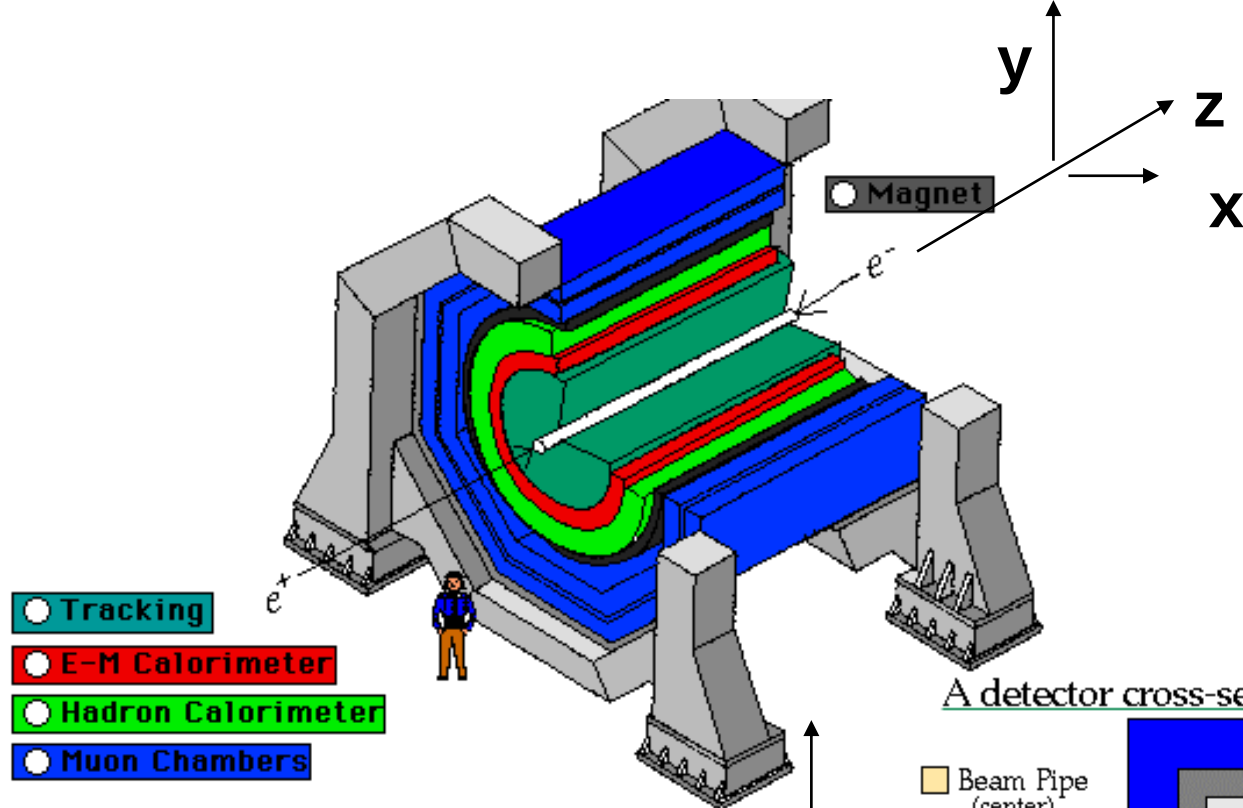
Alto momento transversal  $p_T$



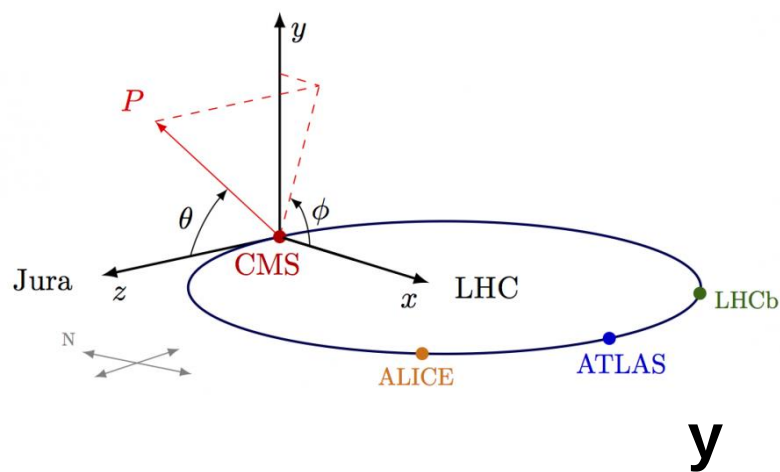


# Aprovechando las interacciones

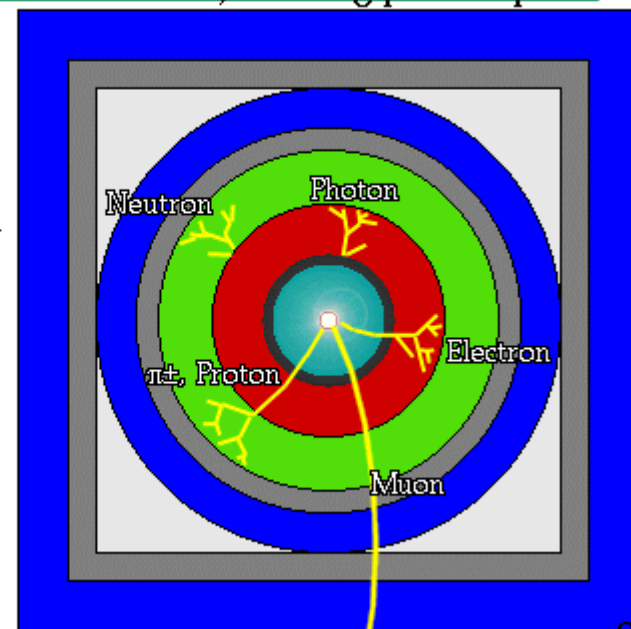


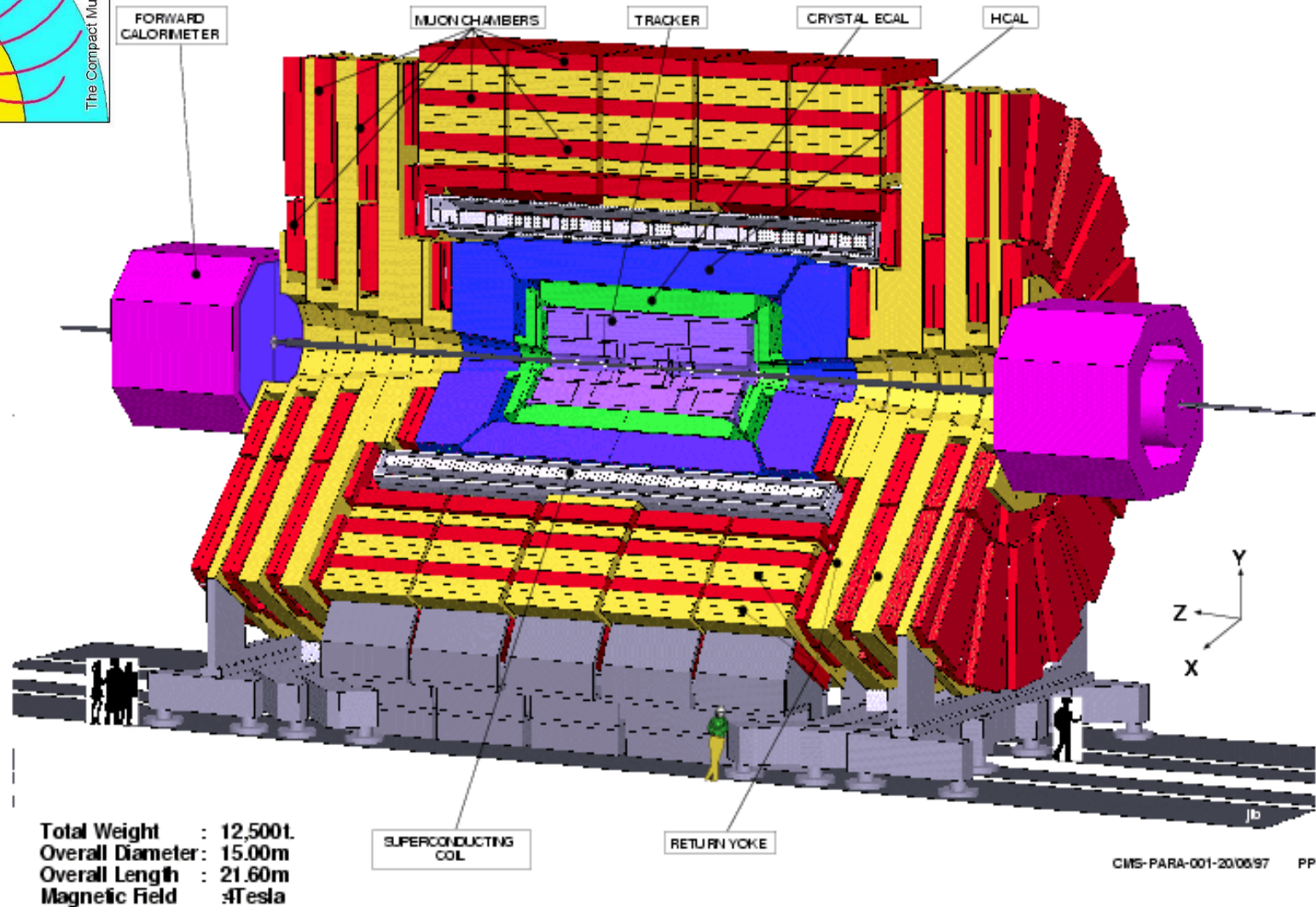


A detector cross-section, showing particle paths

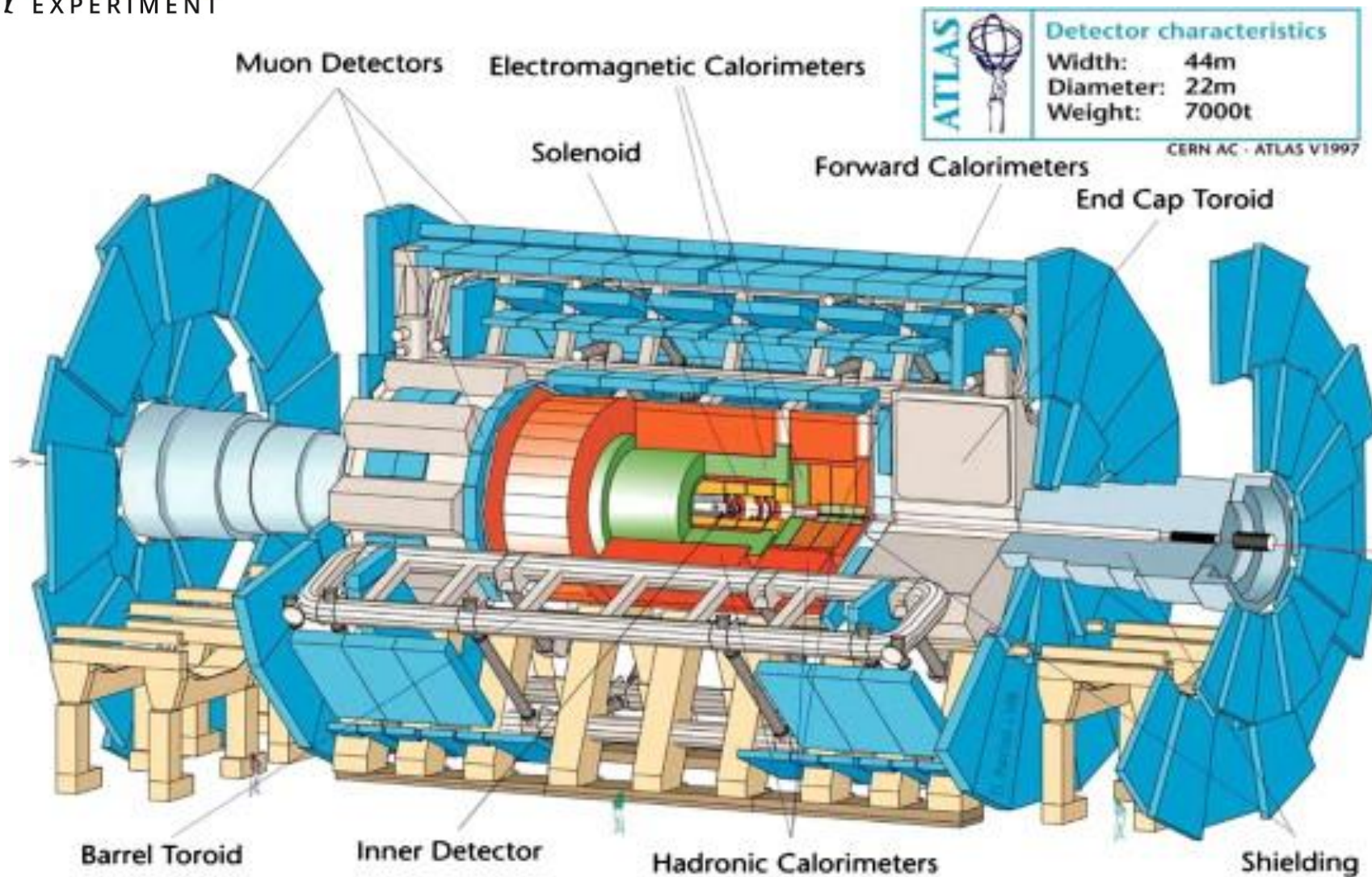


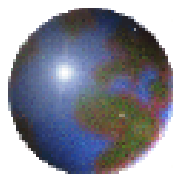
- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers





CMS está compuesto por 15 grandes secciones junto con muchas más piezas de menor tamaño; las distintas partes del detector forman capas concéntricas alrededor del conducto principal por el que circula el haz de 9 protones, de tal manera que cada sección luce como una rebanada de cebolla





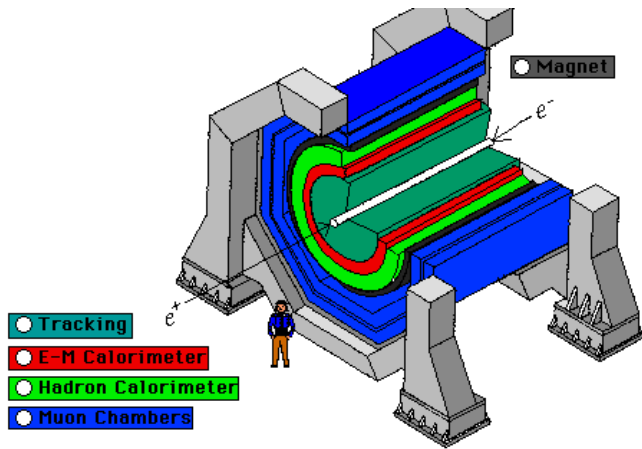
# Subsystems and SM Particles

**Table 1**  
**Particles of the SM and Detection**  
**And Identification in Detector Subsystems**



| Particle                                                                            |        | Signature                           | Generic Subsystem                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| $u, c, t \rightarrow W + b$<br>$d, s, b$<br>$g$                                     | Quarks | Jet of hadrons<br>( $\lambda_o$ )   | Calorimeter<br>ECAL+HCAL                  |
| $e, \gamma$                                                                         |        | Electromagnetic shower<br>( $X_o$ ) | Calorimeter<br>ECAL<br>Tracker            |
| $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$<br>$W \rightarrow \mu + \nu_\mu$                         |        | Missing transverse energy<br>(MET)  | Calorimeter<br>ECAL+HCAL                  |
| $\mu, \tau \rightarrow \mu + \nu_\tau + \bar{\nu}_\mu$<br>$Z \rightarrow \mu + \mu$ |        | Only ionization<br><u>dE/dx</u>     | Muon absorber and<br>detectors<br>Tracker |
| $c, b, \tau$                                                                        |        | Secondary decay vertices            | Vertex + Tracker                          |

**Whatever the New Physics is, it will cascade down to SM particles: q, g, leptons, gauge bosons. Favor W,Z for EWSB and leptons because they can be selected in a sea of QCD (S/B).**

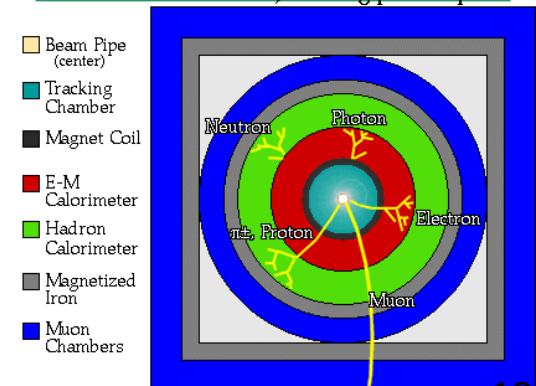


# Tracker

(detector de trazas)

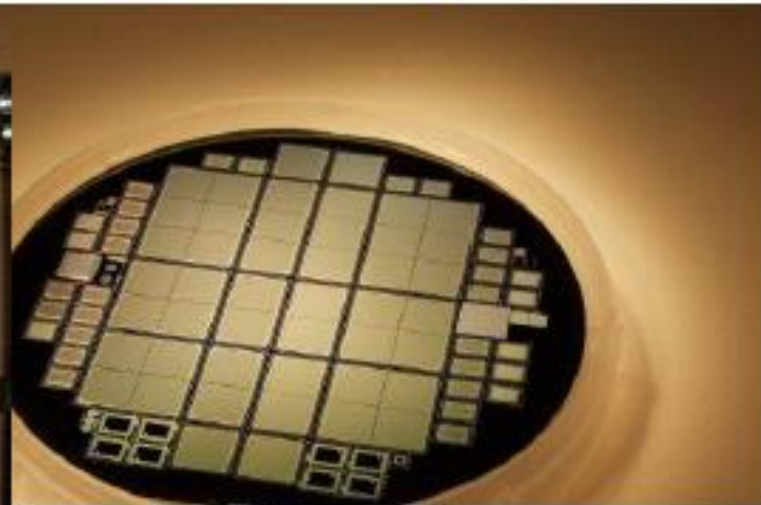
The inner region of the detector is filled with highly segmented sensing devices of various kinds, so that charged particle trajectories can be very accurately determined.

A detector cross-section, showing particle paths

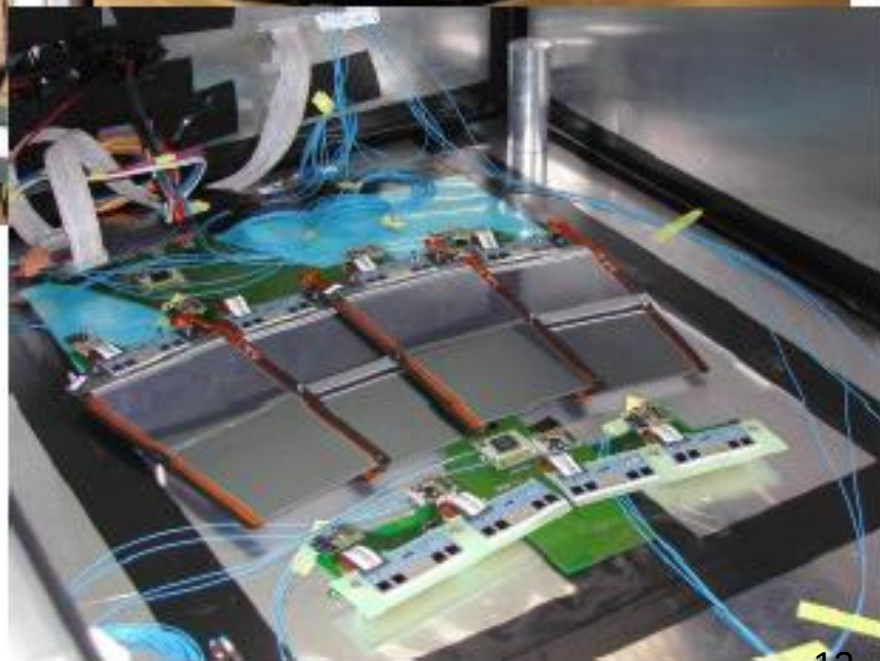




# Tracking - Pixels and Strips



“vertex” pixels  $\sim 200 \text{ } \mu\text{m} \times 200 \text{ } \mu\text{m}$ . Silicon strips  $\sim 200 \text{ } \mu\text{m} \times 20 \text{ cm}$ . For  $V=50 \text{ V}$ ,  $d = 300 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $uE = 42 \text{ } \mu\text{m/nsec}$ ,  $\text{time} \sim 7 \text{ (21) nsec}$  for e (h). 100 M pixels,  $|y| < 2.5$ .



## Why Silicon Detectors?

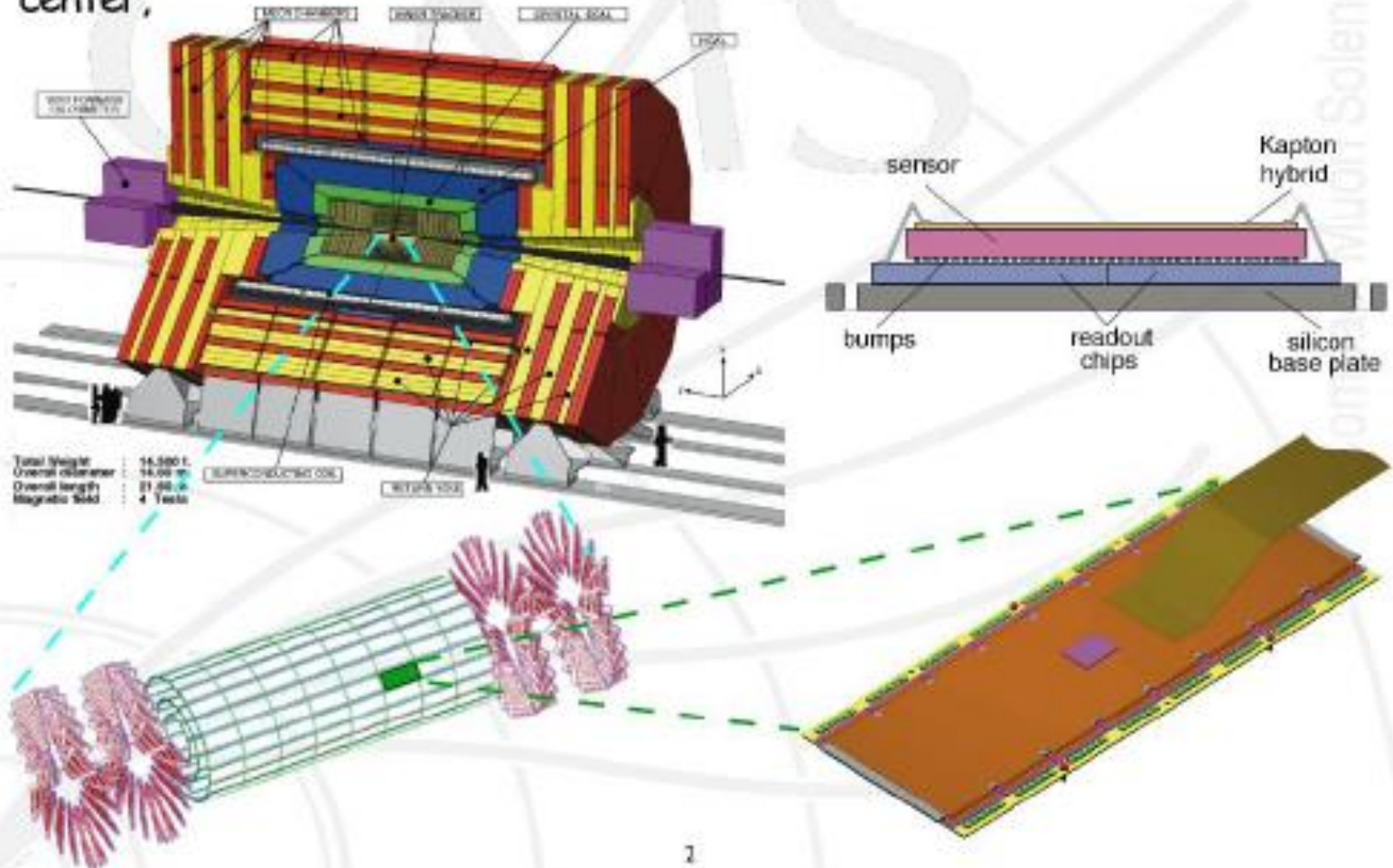
### Material Properties enable Excellent Energy Resolution

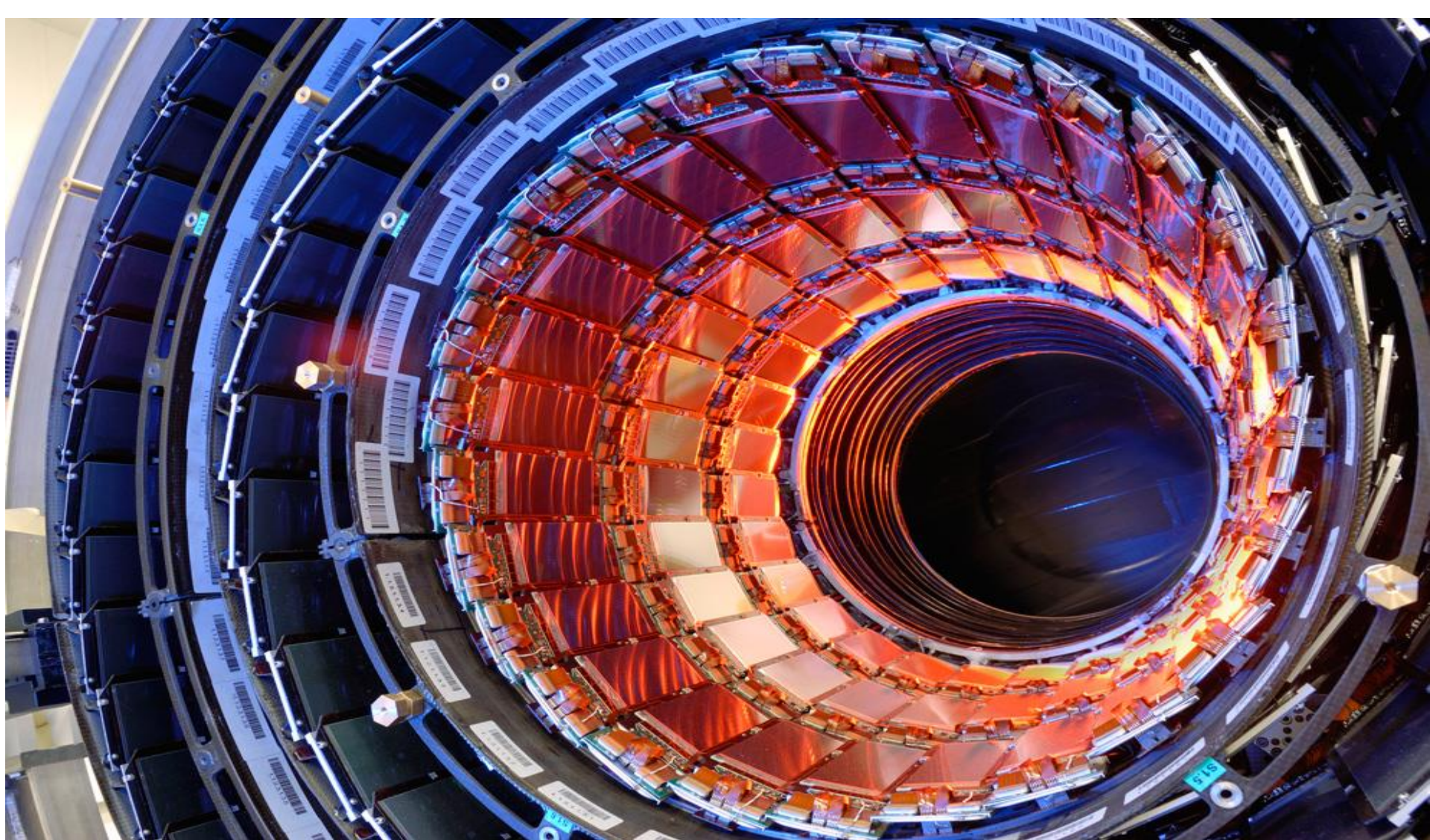
- Any energy deposition with  $E > \text{band gap}$  can create a detectable e-h pair  $\rightarrow$  large number of charge carriers
- Long charge carrier lifetime in (achievable) crystals
- Large number of charge carriers  $\rightarrow$  small statistical fluctuation of the number  $\rightarrow$  good energy resolution

| Material            | Average energy to create 1 mobile charge carrier (pair)    |
|---------------------|------------------------------------------------------------|
| NaI (gold standard) | >50 eV (per scin. $\gamma$ – doesn't include detection QE) |
| Si                  | 3.62 eV (band gap = 1.12 eV)                               |
| Ge                  | 2.98 eV (band gap = 0.74 eV)                               |
| CdTe                | 4.43 eV (band gap = 1.47 eV)                               |
| Ar                  | 26 eV                                                      |
| Xe                  | 22 eV                                                      |

# CMS Pixel Tracking System

CMS contains 66 million element hybrid-pixel based tracking system at its center,

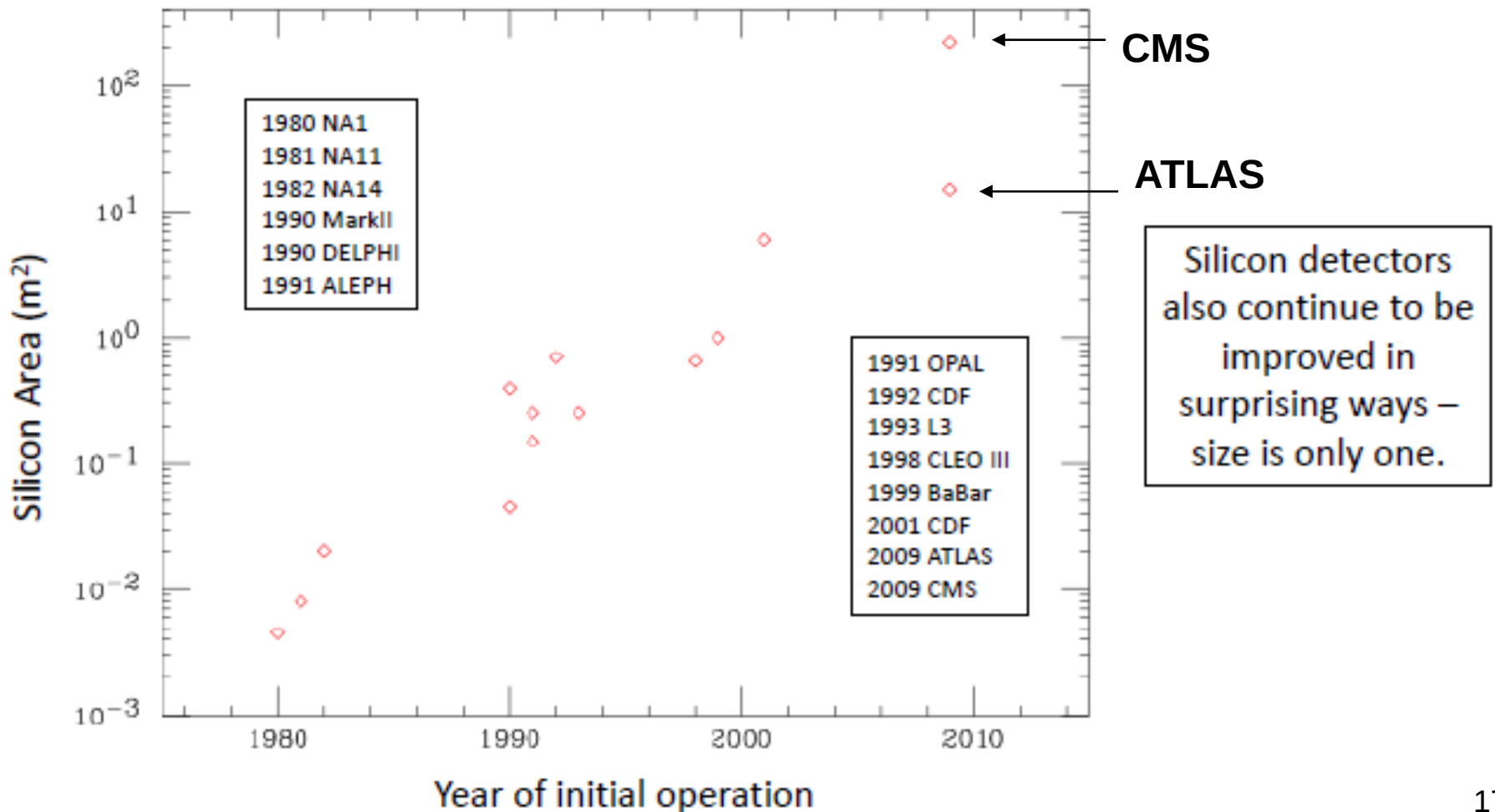




**El detector de trazas es la parte del detector más cercana al punto de colisión y gracias a esto tiene una densidad de sensores increíblemente alta, su sección interior posee 6000 conexiones por centímetro cuadrado. Un total de 75 millones de mediciones son tomadas a lo largo de todo el detector, sus delicados sensores de silicio podrían cubrir el área de un campo de tenis**

# Silicon Detectors in HEP

(representative selection, approx dates)





# Vertex Detectors

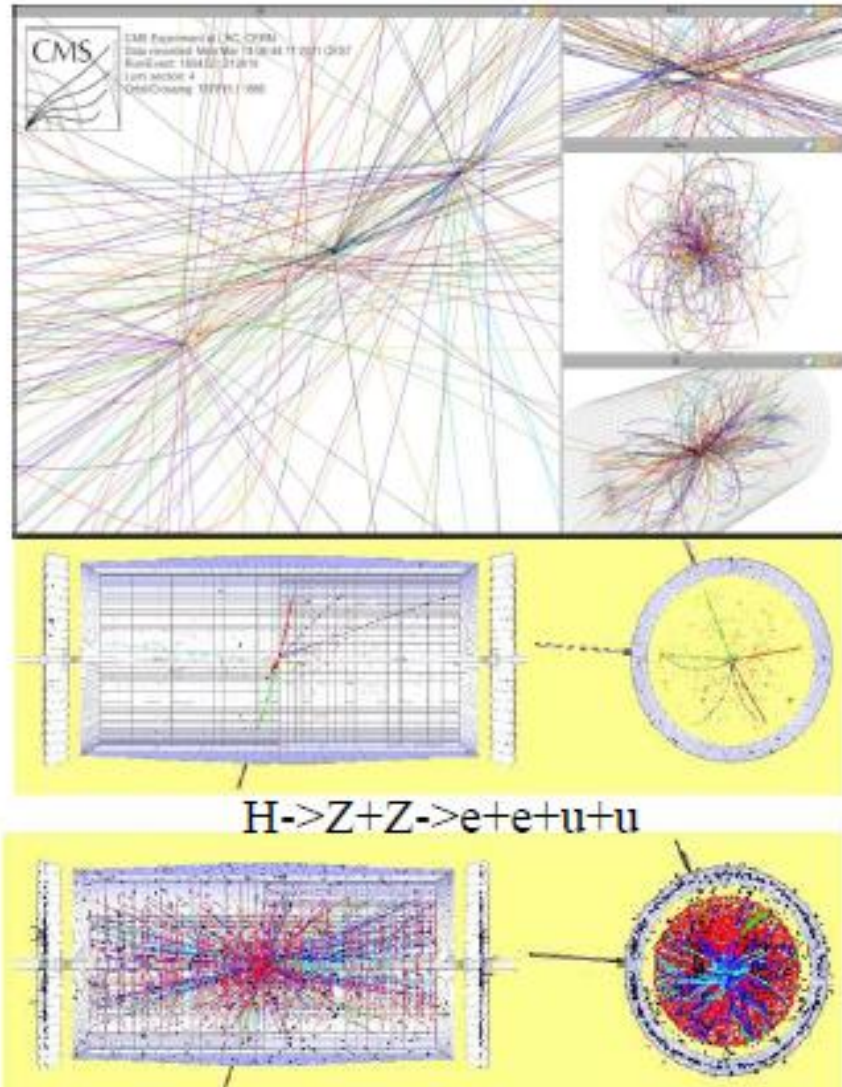
$$(c\tau)_\tau = 87 \mu m$$

$$(c\tau)_b \sim 475 \mu m$$

$$(c\tau)_c \sim (123, 312) \mu m \quad (D^0, D^\pm)$$

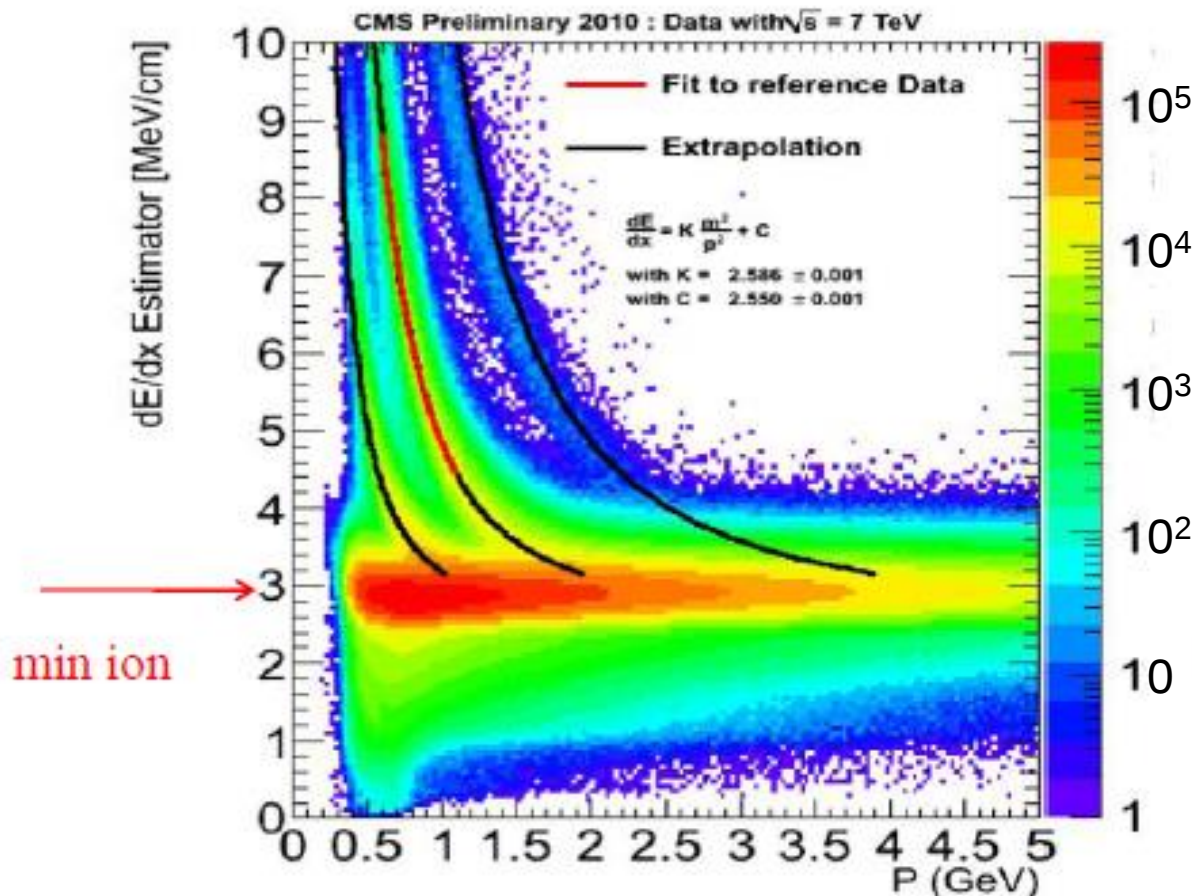
**Pixel size scale set  
by the lifetimes.  
PU is a problem  
so that means  
occupation of a  
pixel must be  
small in order to  
do robust  
tracking.**

EDIT 2012, Feb. 13-24, 2012





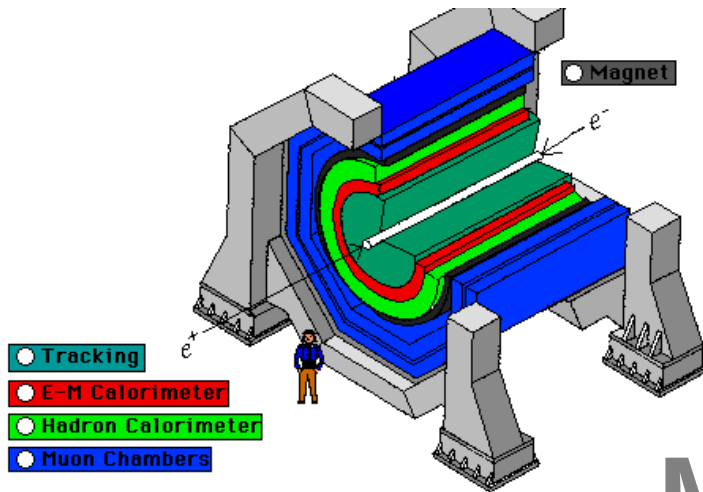
# Particle ID – dE/dx in Tracker



Use energy deposited in several Si strip layers to measure dE/dx. Useful for particle id. Once commissioned, use in heavy stable particle searches.

$$dE / dx \sim 1 / \beta^2 \sim M^2 / P^2$$

-mass  
measurement  
using P and dE/dx  
from tracker

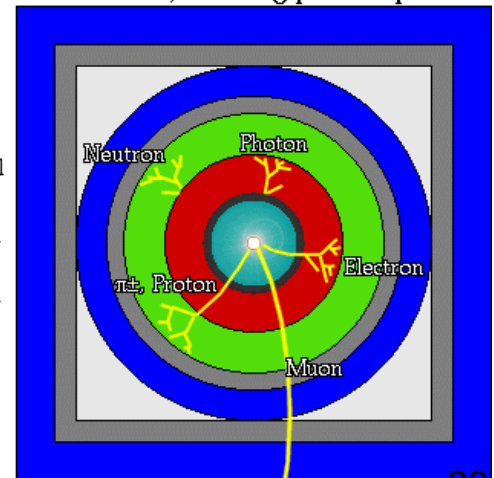


# Magnet (imán)

The path of a charged particle curves in a magnetic field. The radius of curvature and direction tell the momentum and the sign of the charge

A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers

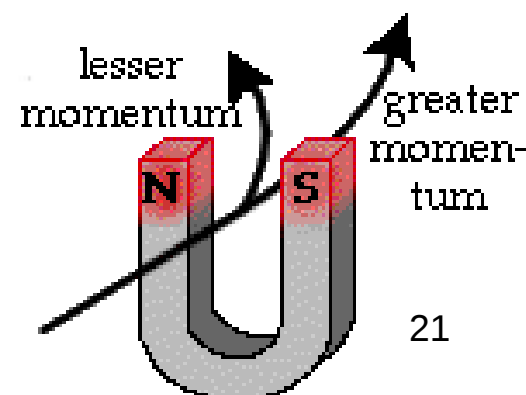
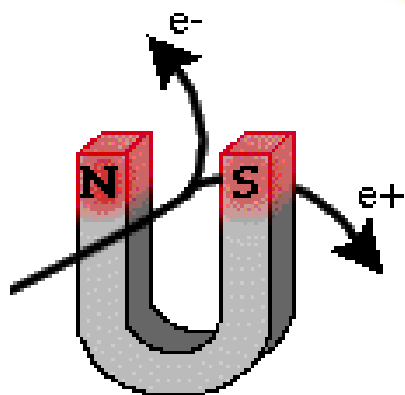
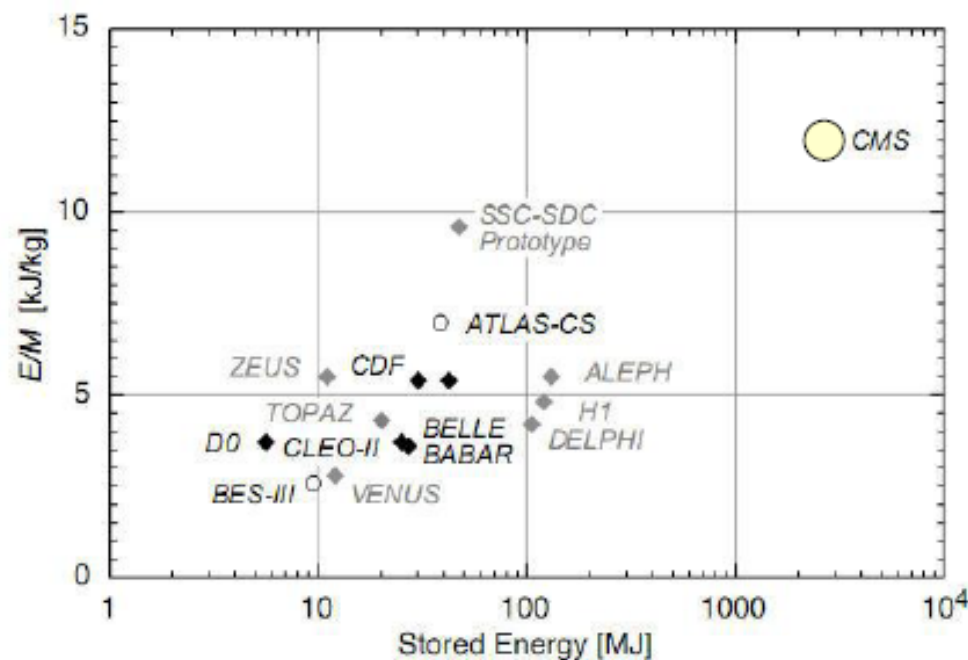




# Solenoid Magnet

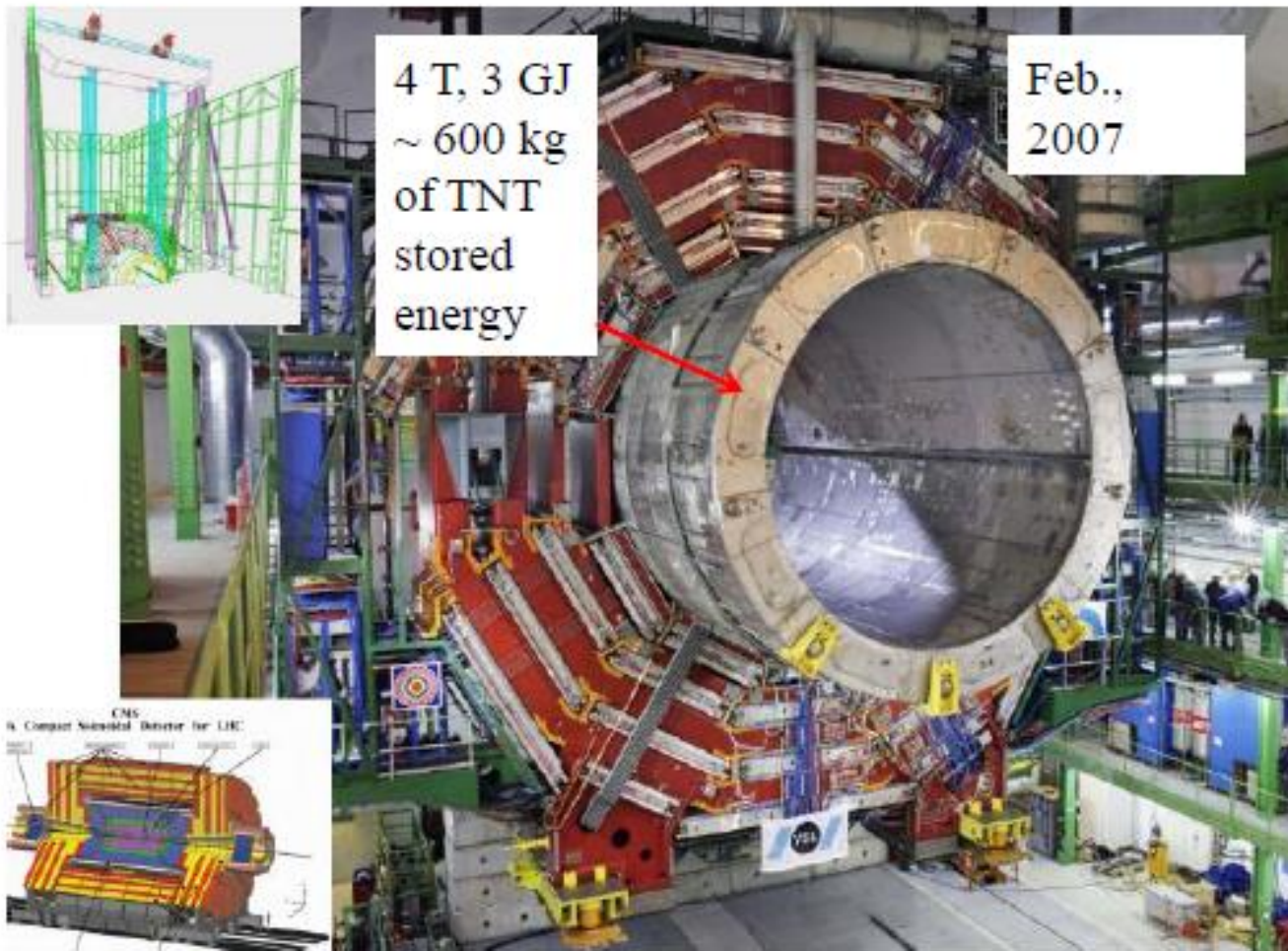
$$B = \mu_0 n I$$

Conductors of size 2 cm in z all stacked by 4 in r for a total of  $n = 200$  turns/m. Then to achieve a field of 5 T, 20.8 kA of current is required



# Compact Muon Solenoid

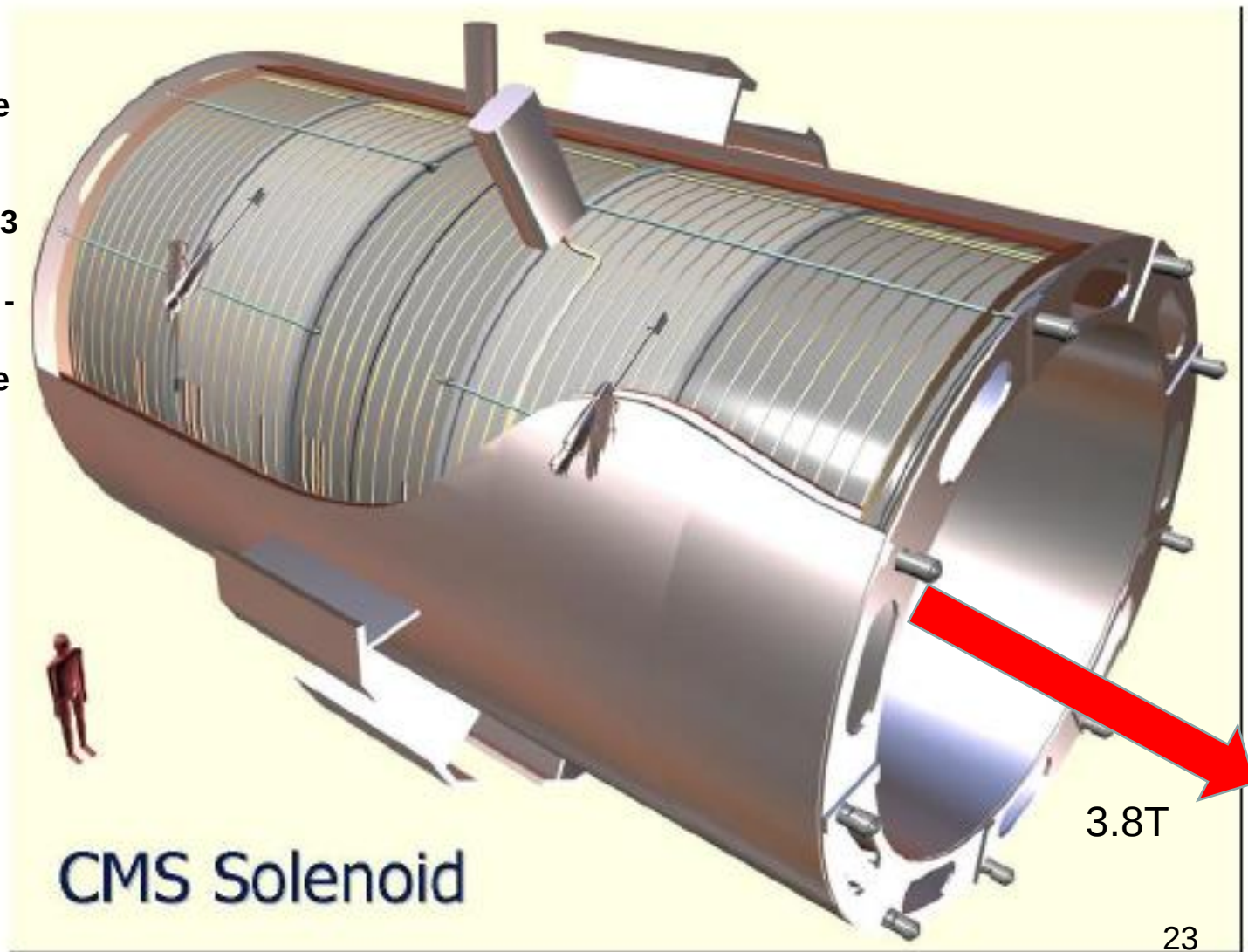
## World's Largest Solenoid



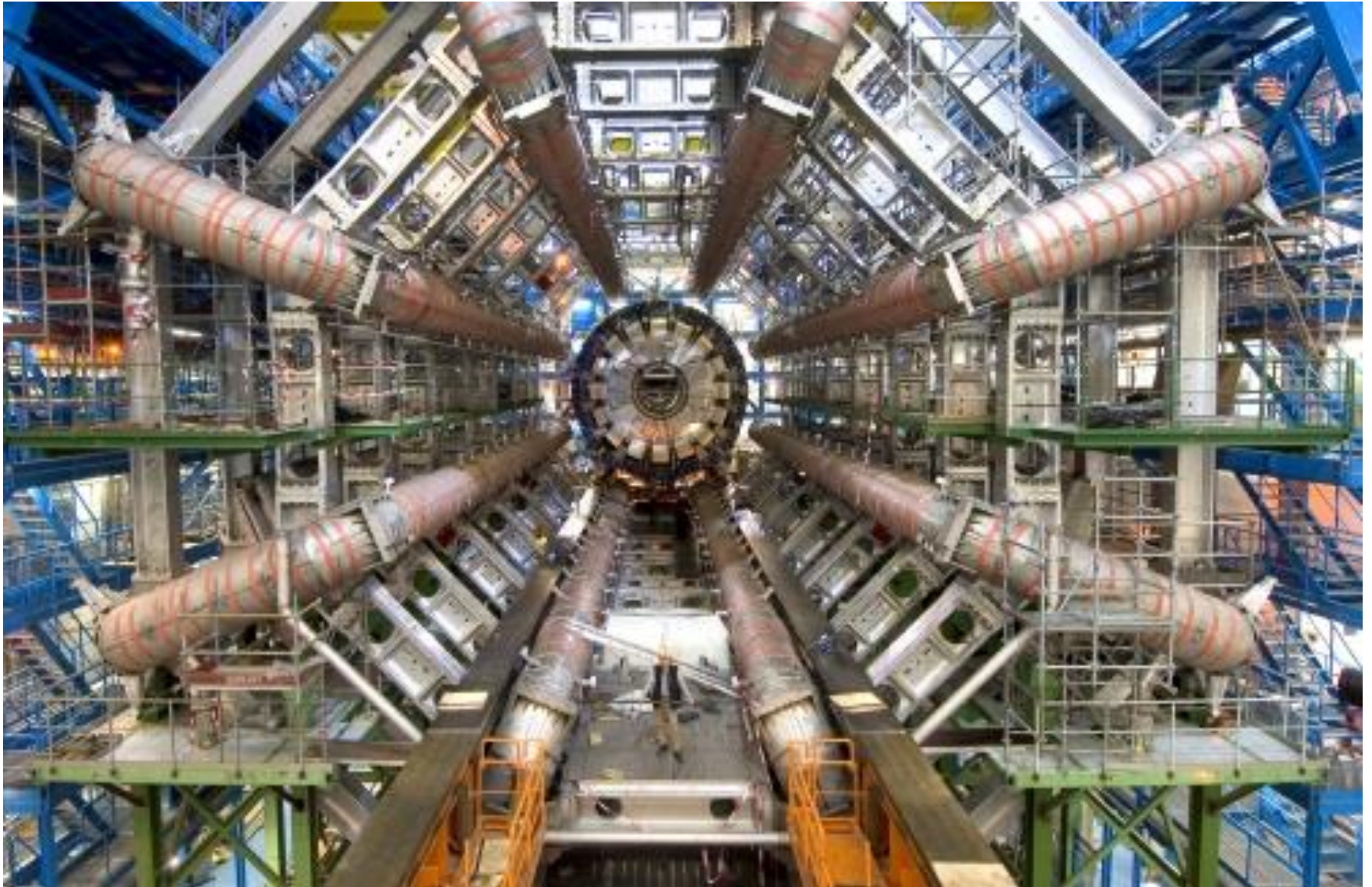


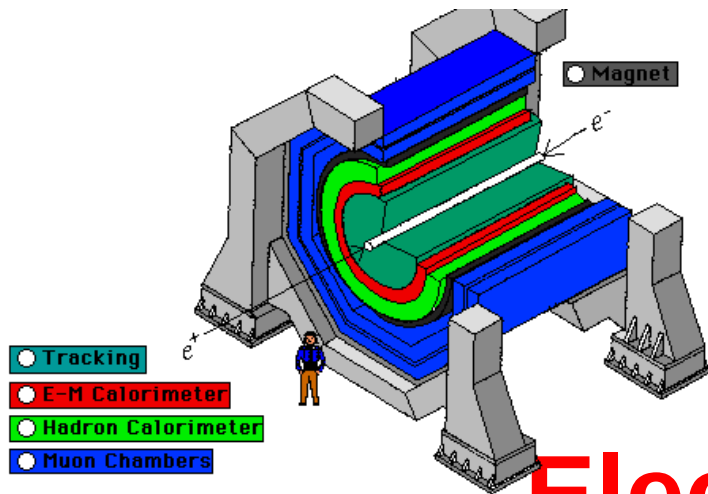
# CMS Solenoid Design

El paso de ~20.000 amperios a través de una bobina superconductora de niobio y titanio, de 13 m de largo y 6 m de diámetro, enfriada a  $-270^{\circ}\text{C}$ , produce un campo magnético de 4 teslas (unas 100.000 veces más intenso que el terrestre). Este campo curva las trayectorias de las partículas cargadas, permitiendo su separación y la medida de sus momentos



Entre 2 y 8 T



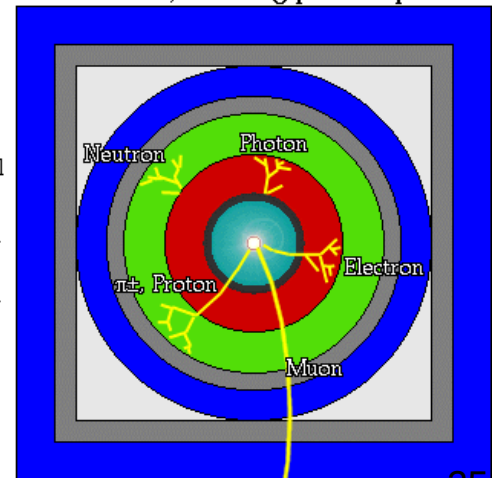


# Electromagnetic Calorimeter (ECAL)

This device measures the total energy of  $e^+$ ,  $e^-$ , and photons. These particles produce showers of  $e^+/e^-$  pairs in the material. The  $e^-$ 's (or  $e^+$ 's) are deflected by the electric fields of atoms, causing them to radiate photons. The photons then make  $e^-/e^+$  pairs, which then radiate photons, etc. The number of final  $e^+$ ,  $e^-$  pairs is proportional to the energy of the initiating particle.

A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers

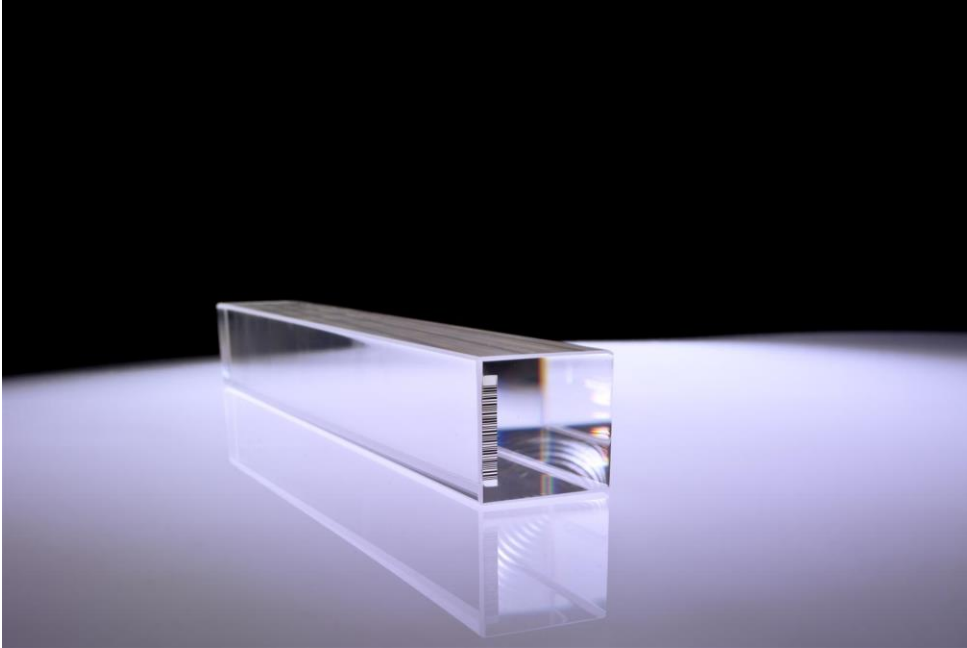


# CMS ECAL

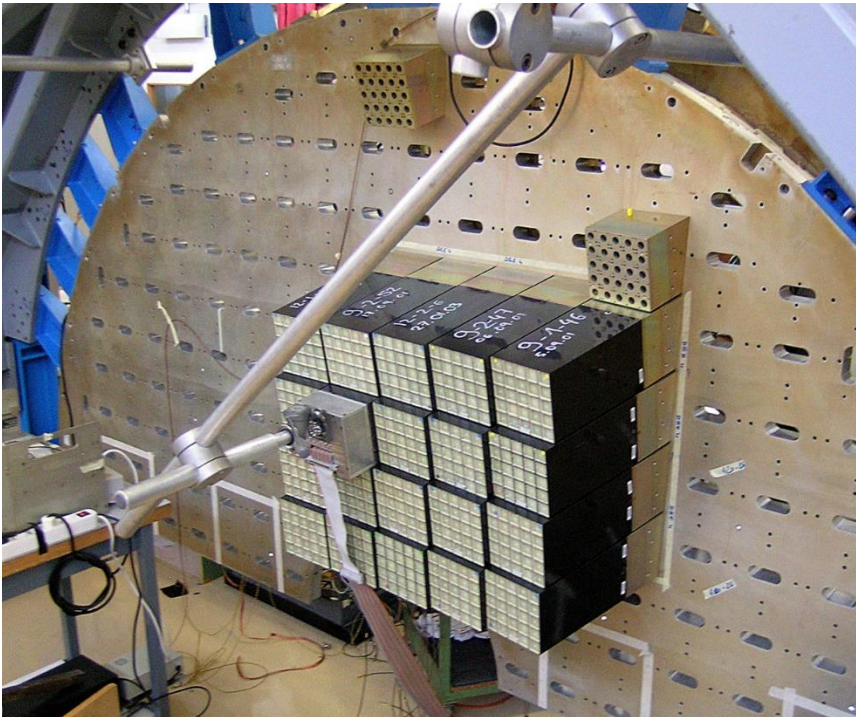
- Cerca de 80.000 cristales de tungstenato de plomo ( $\text{PbWO}_4$ ) son usados para medir con gran precisión las energías de electrones y fotones.
- Un detector previo a las cascadas (preshower) basado en detectores de silicio, colabora en la identificación de partículas en el detector a bajo ángulo.



# CMS ECAL



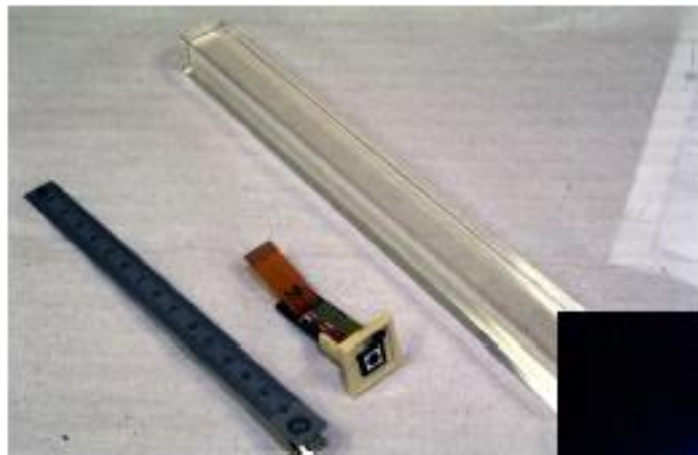
- El calorímetro electromagnético (ECAL) contiene 75 648 cristales de tungstanato de plomo, cada uno de ellos tardó 2 días para ser construido. El 85% de la masa de este material es metal, sin embargo es completamente transparente.
- Cada cristal pesa más de 1.5 kg con un tamaño similar al de una taza de café.





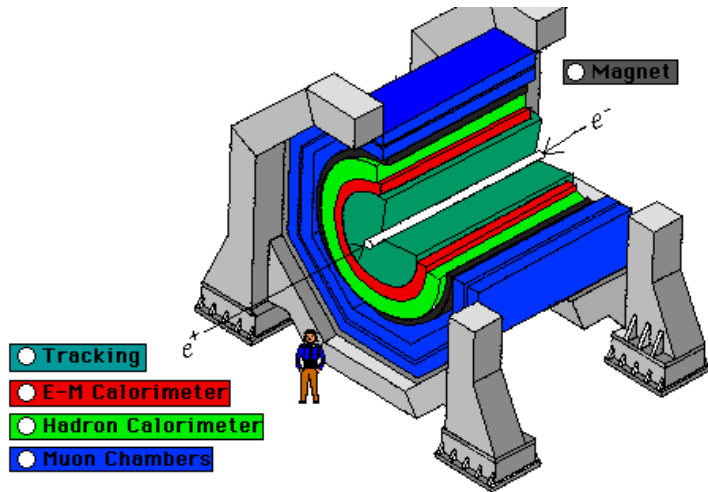
# ECAL Crystals - Testing

$$(D_o = 3)(N_I = 25)(\delta\eta)^2 / 2\pi = 0.0087$$



The Moliere  
radius size at  $r = 1$   
m, the probability  
of a tower hit per  
bx is small.



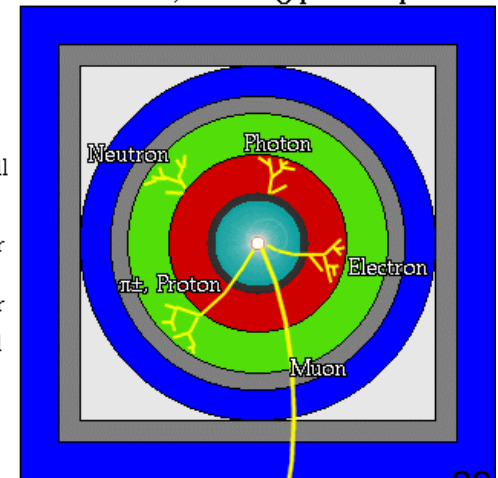


# Hadronic Calorimeter (HCAL)

This device measures the total energy of hadrons. The hadrons interact with the dense material in this region, producing a shower of charged particles. The energy that these charged particles deposit is then measured.

A detector cross-section, showing particle paths

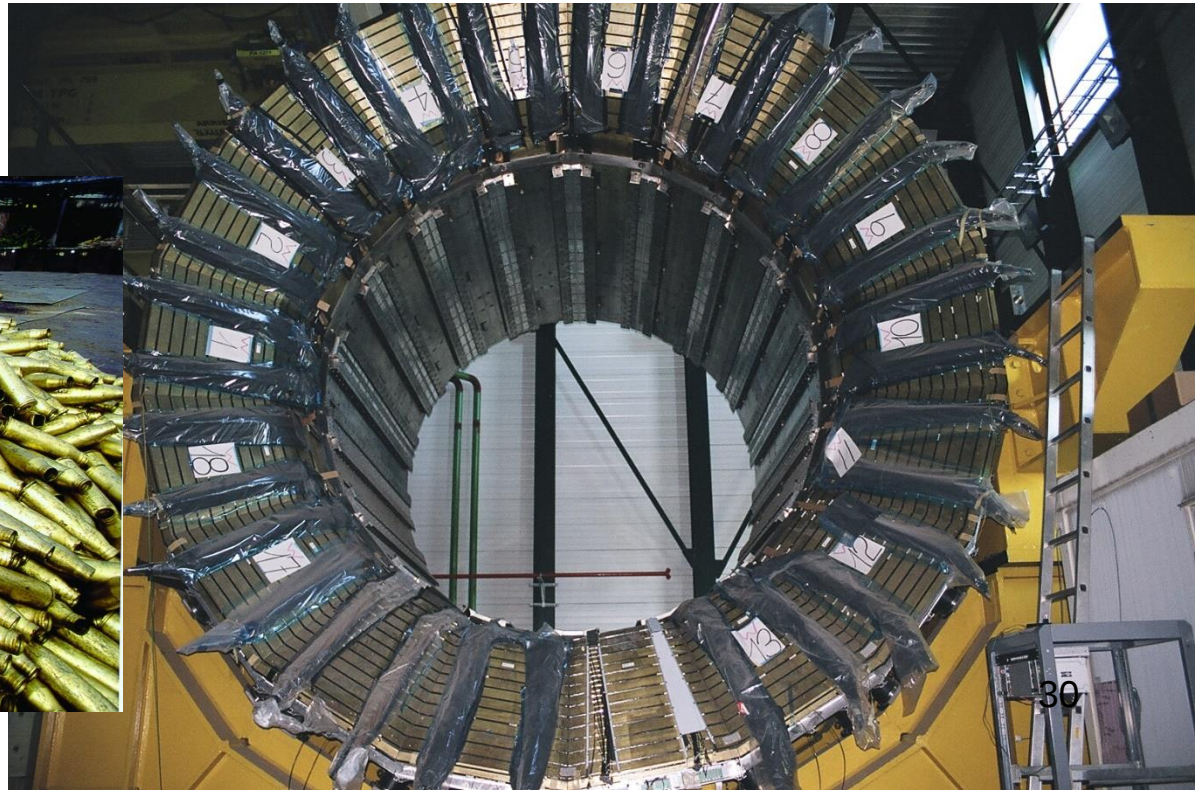
- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



- Varias capas de material denso (latón o acero), con fibras de cuarzo o plásticos de centelleo intercalados, permiten determinar la energía de hadrones, es decir, partículas como los protones, neutrones, piones y kaones.

# CMS HCAL

- En el calorímetro hadrónico (HCAL) del CMS se usó más de un millón de casquillos de bala del ejército ruso en la Segunda Guerra Mundial. El HCAL también dio la oportunidad de colaborar con el CMS a estudiantes de secundaria en Estados Unidos: ellos construyeron 400 componentes para la lectura del HCAL como parte del programa QuarkNet





# HCAL Assembly – ATLAS/CMS

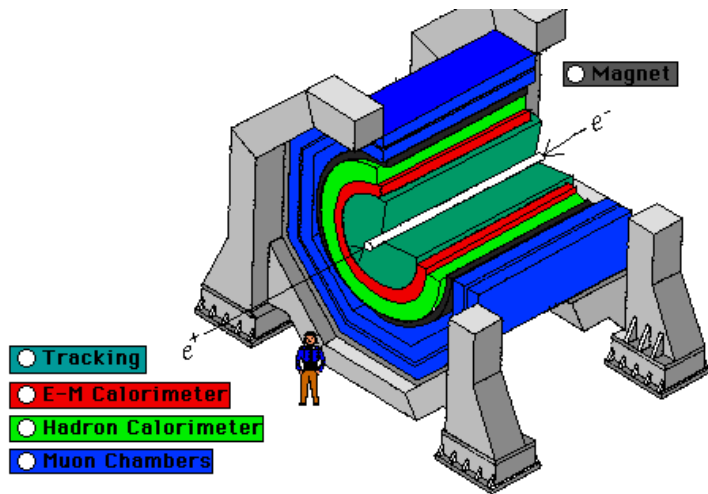


(b)

ATLAS - Tilecal



CMS - HCAL

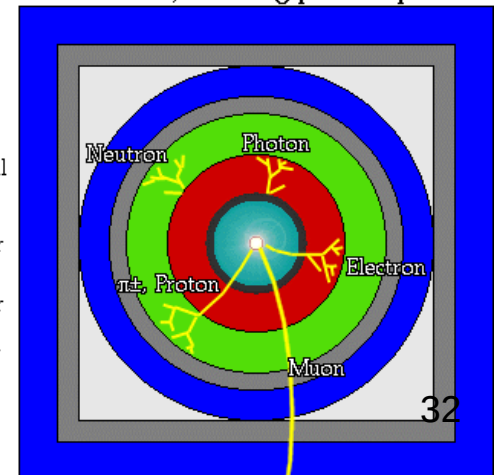


# Muon chambers (cámaras de muones)

Only muons and neutrinos get this far. The muons are detected, but the weakly interacting neutrinos escape. The presence of neutrinos can be inferred by the "missing" energy.

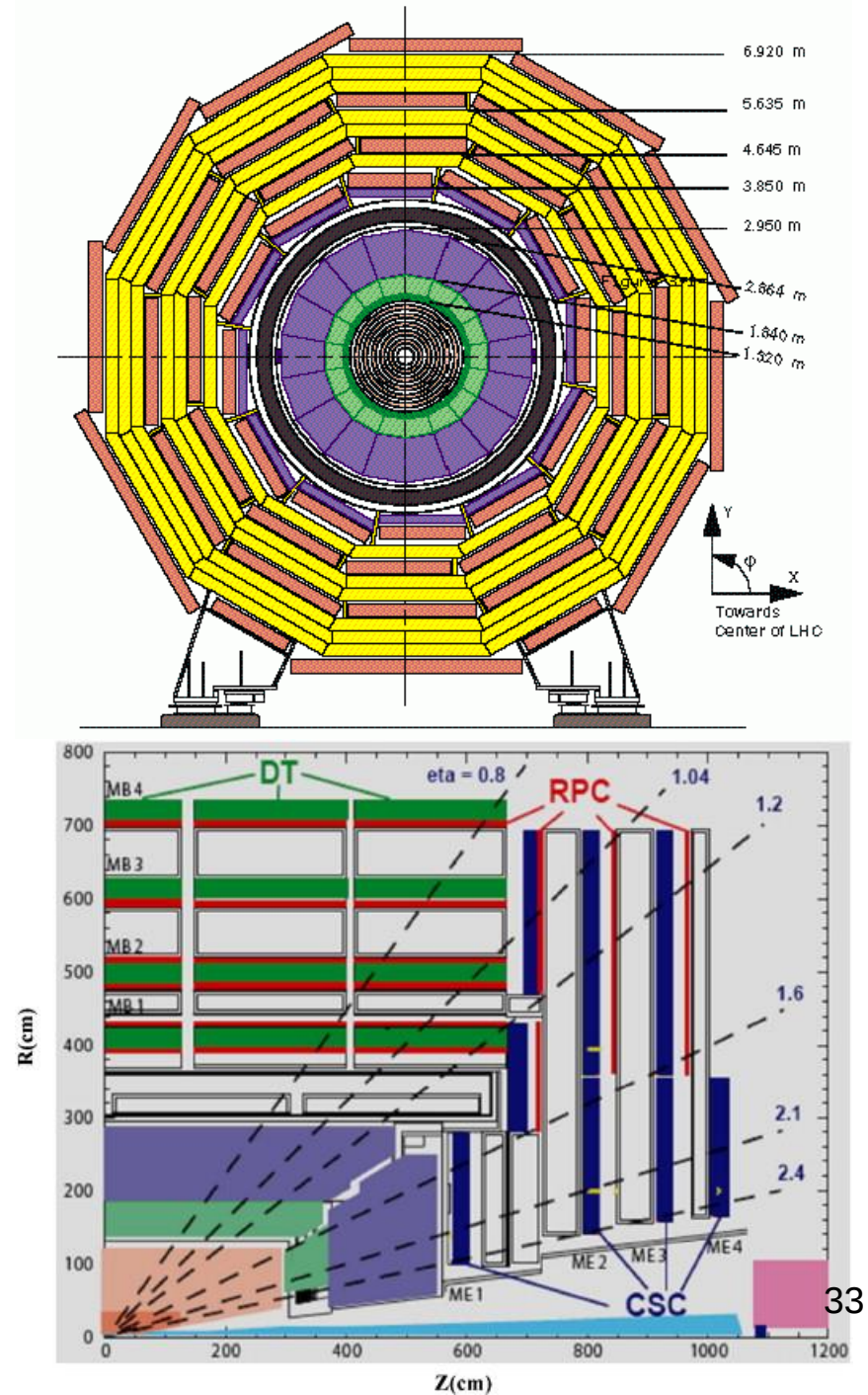
A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers

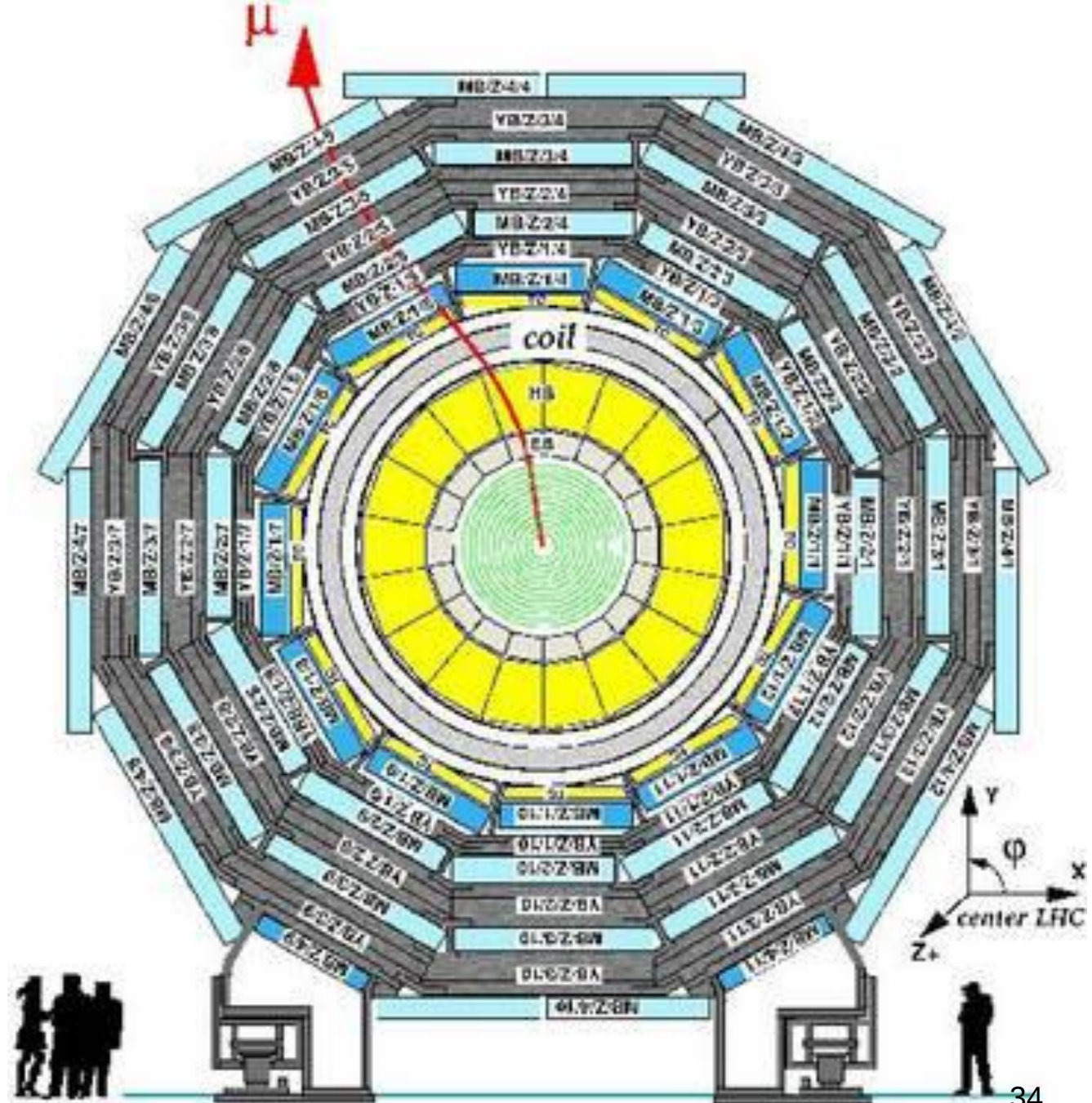


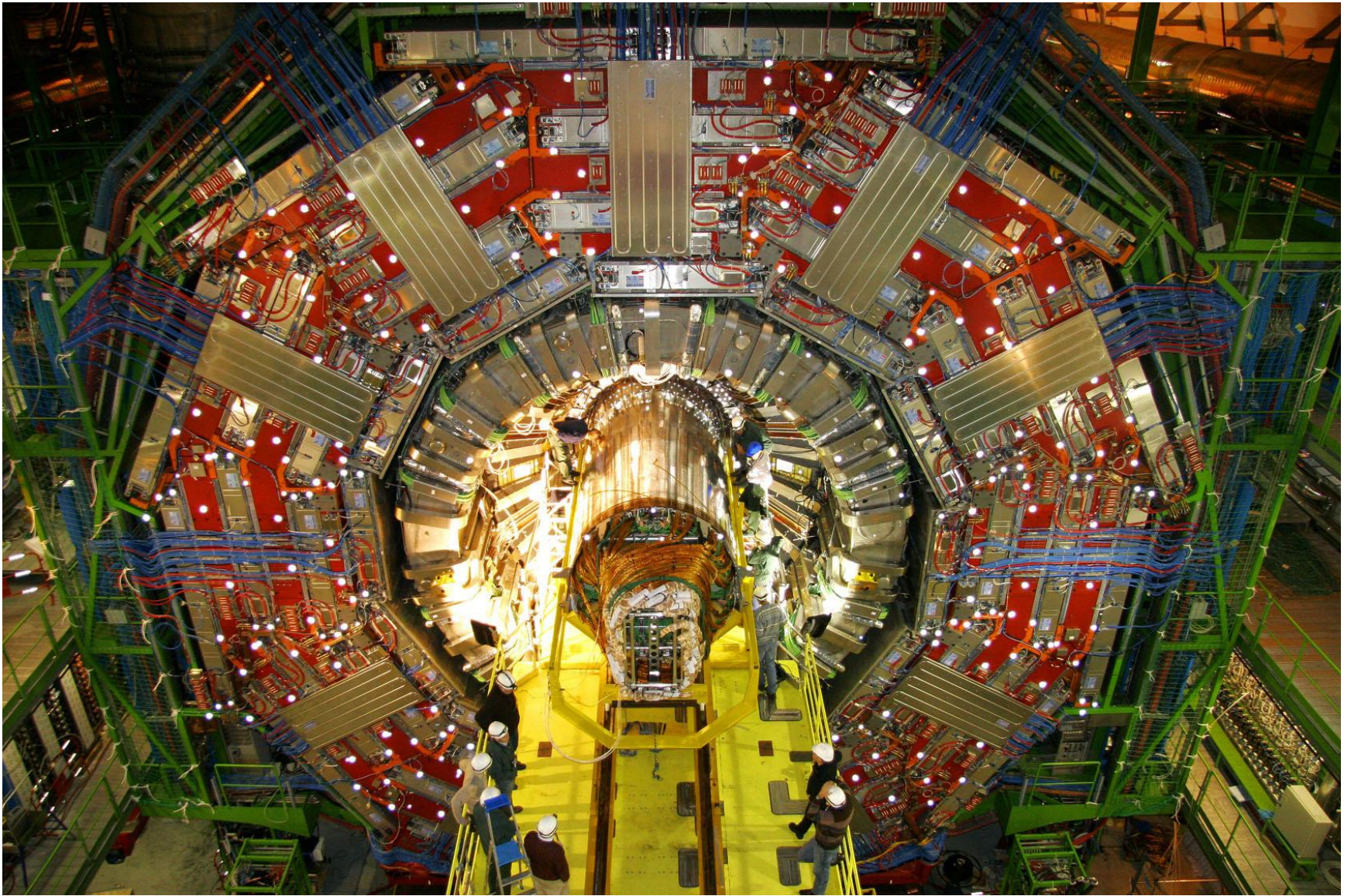
# Muons

- Para identificar los muones y medir sus momentos, CMS usa tres tipos de detectores: tubos de deriva, cámaras de tiras catódicas y cámaras de planos resistivos.



El detector contiene 1400 cámaras de muones, las cuales son una clase de detectores de partículas. Éstas contienen 2 millones de cables, cada uno tan delgado como un cabello humano. Las cámaras están alineadas con el detector de trazas central con una precisión de una sexta de milímetro





# ¿Qué tiene el Muón que no tenga yo?

| Partícula                                | Carga | Tipo              | Masa (GeV) | Vida media ( $\tau$ )    | $c\tau$ (m)  |
|------------------------------------------|-------|-------------------|------------|--------------------------|--------------|
| $e^\pm$                                  | 1     | Lepton            | 0.00051    | $> 4.6 \cdot 10^{26}$ yr | .....        |
| $\mu^\pm$                                | 1     | Lepton            | 0.105      | 2.19 $\mu$ s             | 658m         |
| $\tau^\pm$                               | 1     | Lepton            | 1.776      | 290.6 $10^{-9}$ $\mu$ s  | 87.1 $\mu$ m |
| $\pi^\pm$<br>( $\bar{u}d$ ó $\bar{d}u$ ) | 1     | Mesón más ligero  | 0.139      | 2.6 $10^{-2}$ $\mu$ s    | 7.8m         |
| p<br>(uud)                               | 1     | Barión más ligero | 0.938      | $> 10^{35}$ años         | ....         |

- ¿O por qué el Muon es Minimum Ionizing Particle (**MIP**)?
- Depende:

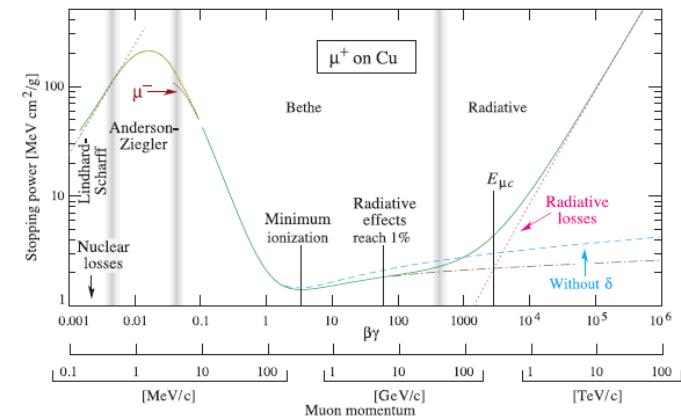


Fig. 30.1: Stopping power ( $= -dE/dx$ ) for positive muons in copper as a function of  $\beta\gamma = p/Mc$  over nine orders of magnitude in momentum (12 orders of magnitude in kinetic energy). Solid curves indicate the total stopping power. Data below the break at  $\beta\gamma \approx 0.1$  are taken from ICRU 49 [4], and data at higher energies are from Ref. 5. Vertical bands indicate boundaries between different approximations discussed in the text. The short dotted lines labeled " $\mu^-$ " illustrate the "Barkas effect," the dependence of stopping power on projectile charge at very low energies [6].

# Ecuación de Bethe

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]. \quad (30.4)$$

It describes the mean rate of energy loss in the region  $0.1 \lesssim \beta\gamma \lesssim 1000$

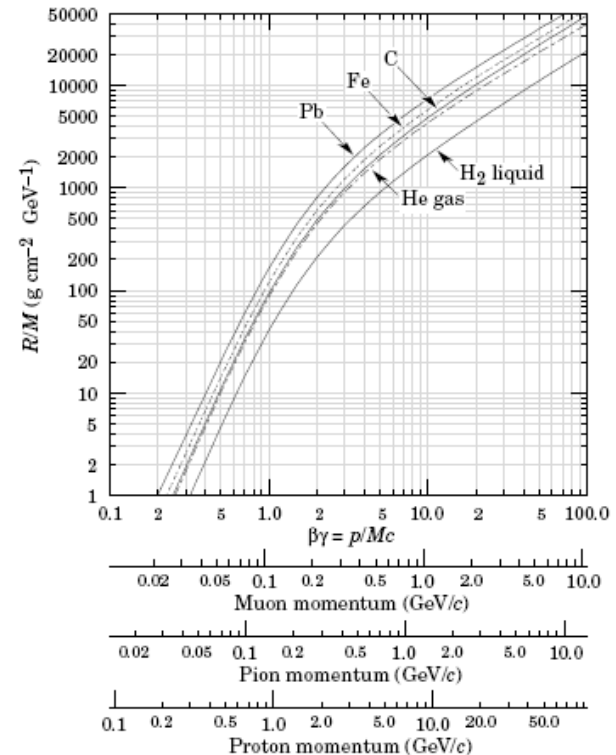
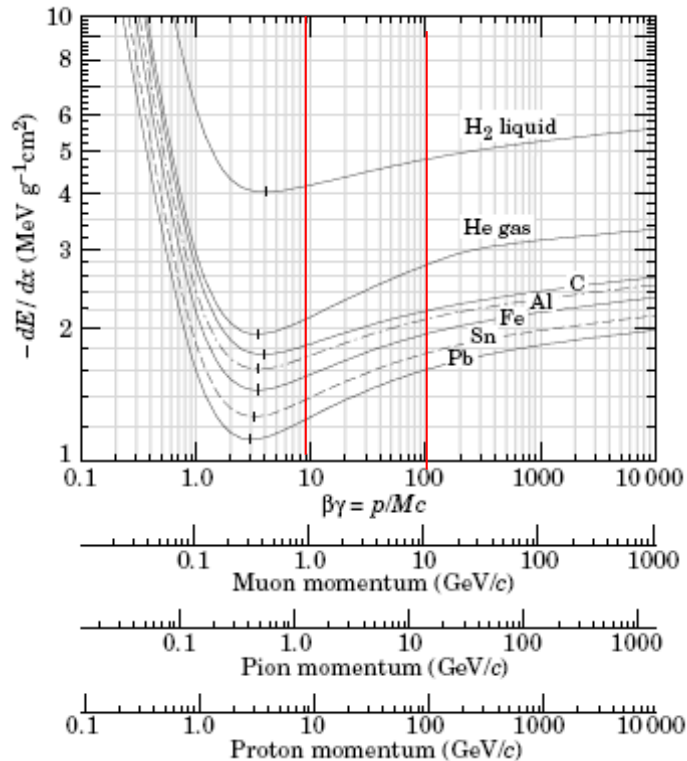


Figure 30.4: Range of heavy charged particles in liquid (bubble chamber) hydrogen, helium gas, carbon, iron, and lead. For example: For a  $K^+$  whose momentum is  $700 \text{ MeV/c}$ ,  $\beta\gamma = 1.42$ . For lead we read  $R/M \approx 396$ , and so the range is  $195 \text{ g cm}^{-2}$ .

The mass scaling of  $dE/dx$  and range is valid for the electronic losses described by the Bethe equation, but not for radiative losses, relevant only for muons and pions.

For a particle with mass  $M$  and momentum  $M\beta\gamma c$ ,  $T_{\max}$  is given by

$$T_{\max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e/M + (m_e/M)^2}. \quad (30.5)$$

**Nota:** Para electrones, la pérdida de energía es ligeramente diferente debido a su masa tan pequeña y la imposibilidad de distinguirlos de los electrones del medio, y a que sufren pérdidas mucho mayores por radiación de frenado (Bremsstrahlung). Bremsstrahlung  $\sim m^2$

# ¿Cuánto vive una partícula?

Principio de incertidumbre

$$\Delta E \Delta t > \frac{\hbar}{2}$$



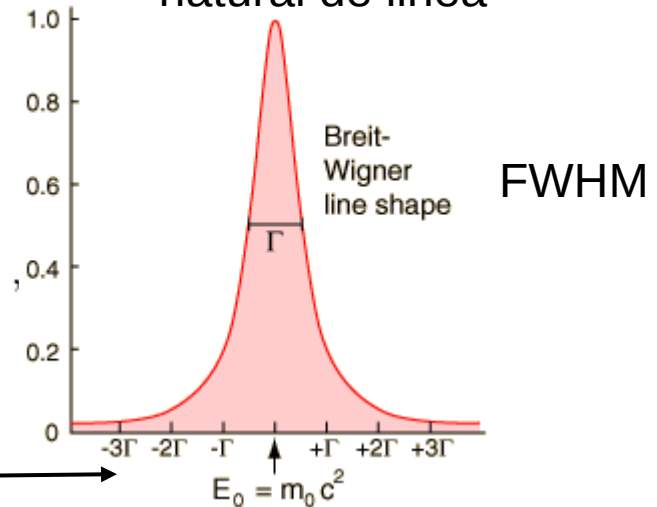
$$\tau = \Delta t$$

$$\Delta E = \frac{\Gamma}{2} = \frac{\hbar}{2\tau}$$

Breit-Wigner

$$f(E) = \frac{k}{(E^2 - M^2)^2 + M^2 \Gamma^2}$$

$\Gamma$  = ancho natural de línea



$\Gamma \rightarrow 0 \equiv \tau \rightarrow \infty$  Partícula estable (e.g. electrón)  
 $\Gamma \rightarrow \infty \equiv \tau \rightarrow 0$  Partícula inestable (e.g. quark top,  
 $\Gamma \approx 2.0 \pm 0.5 \text{ GeV} \rightarrow \tau = 5 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ )

Similar a una gaussiana en el pico pero las colas son más planas

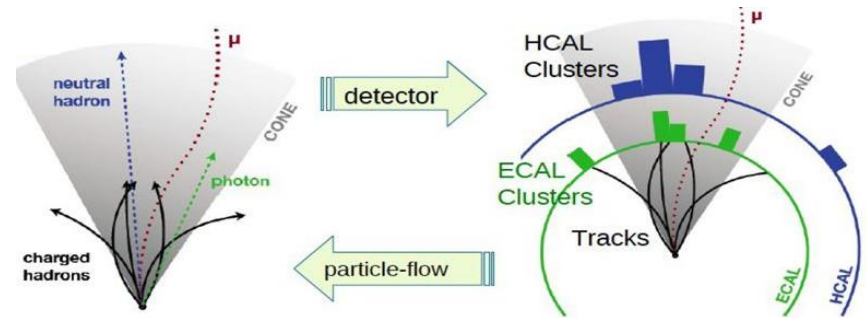
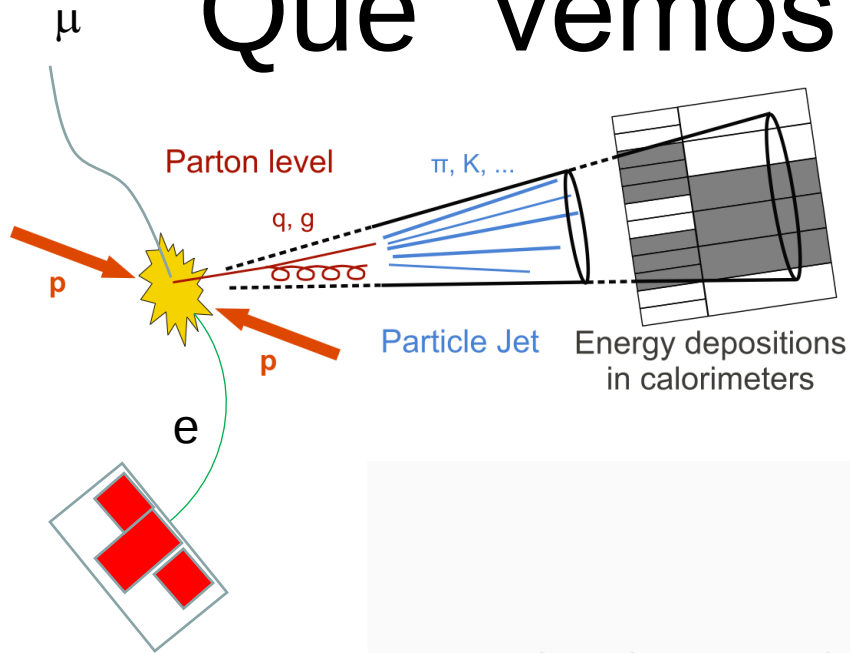
$$|\psi_i(t)|^2 = e^{-\Gamma t}$$

T. Fourier



$$I_i(\omega) = |\phi_i(\omega)|^2 = \frac{1}{(\omega - \omega_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}$$

# Qué “vemos” en el detector?

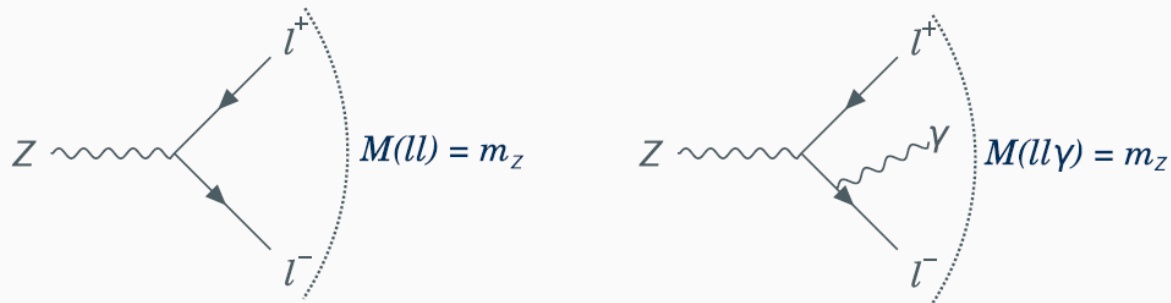


$$M^2 = \left( \sum_i \mathbf{P}_i \right)^2$$

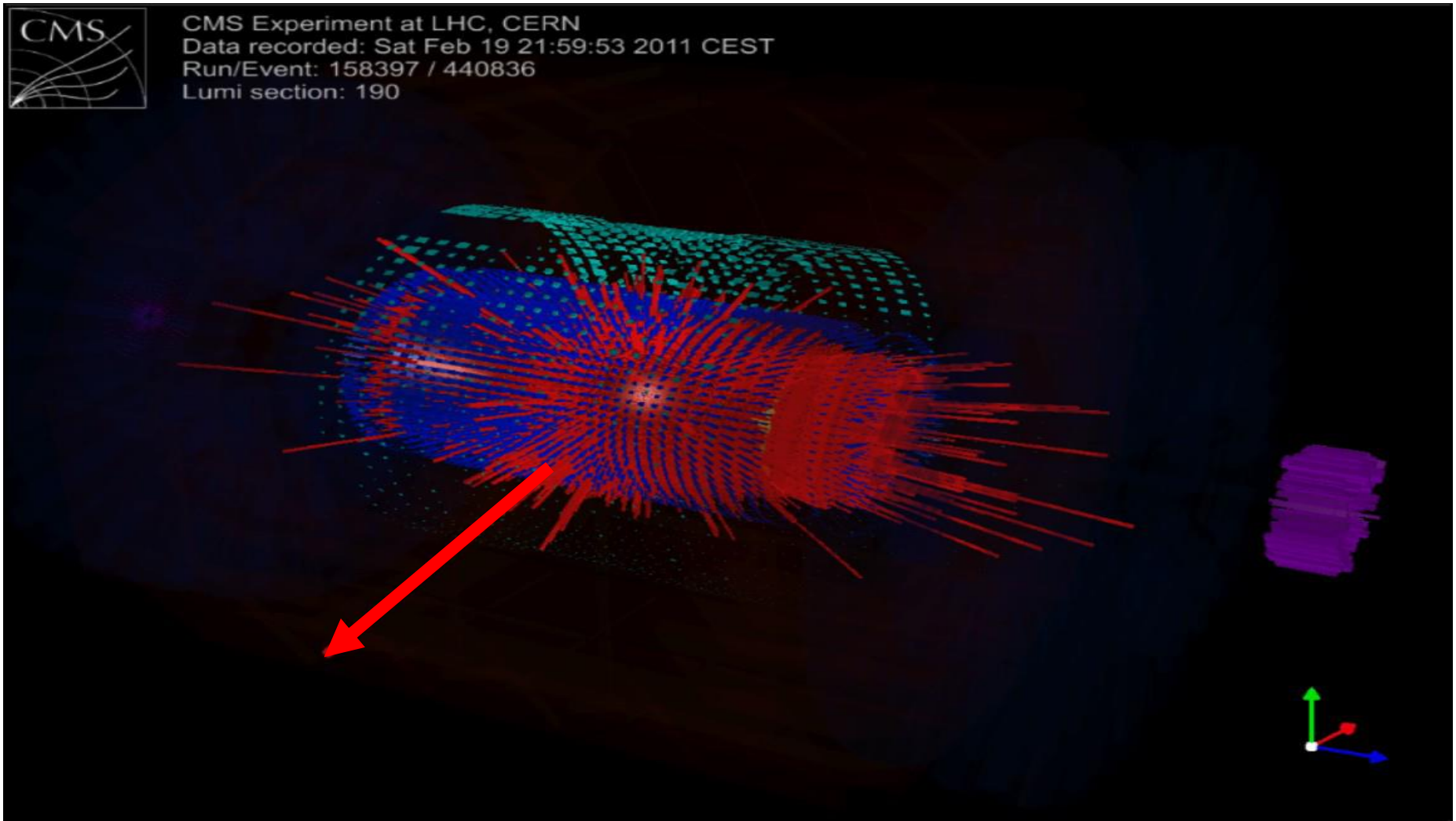
con  $\mathbf{P}$  el *cuadrimomento* de cada partícula de un estado:

$$\mathbf{P} = (E, \vec{p}) = (E, p_x, p_y, p_x)$$

- Para una partícula,  $M^2 = \mathbf{P}^2 = m^2$ .
- La masa invariante *se conserva* en los estados inicial y final.



# ¿Y los neutrinos?



**Solo por interacción débil con nucleos o electrones:** se calcula la energía transversa faltante (MET) fruto de la conservación de energía en la colisión de todas las partículas detectadas, en el plano transversal (x-y)

# MET= Missing Transverse Energy

Transverse =  
Plano X-Y

CMS experiment at LHC, CERN

data recorded; Wed Jun 13 21:51:54 2012 PDT

Run/event: 196250/615309469

Lumi section: 385

Orbit/crossing:100914568/2074

HT = 1009 GeV

jet pT = 168 GeV

b-tagged jet

jet pT = 268 GeV

jet pT = 302 GeV

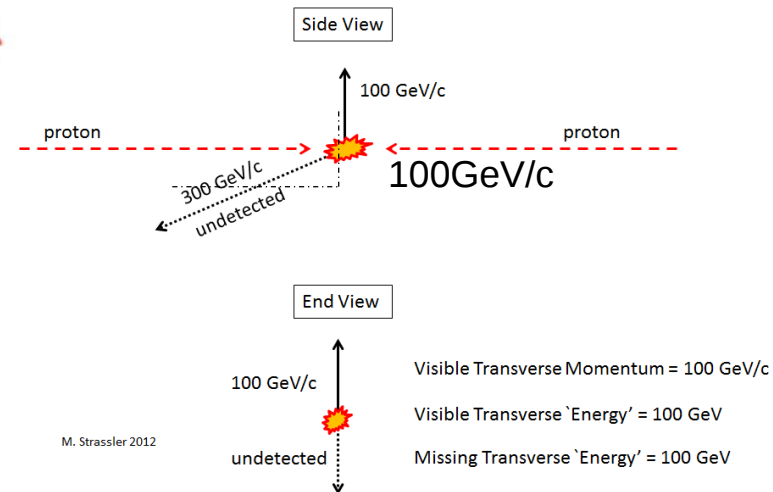
b-tagged jet

jet pT = 104 GeV

jet pT = 167 GeV

b-tagged jet

MET = 269 GeV



$$MET = |\sum_{i=0}^n \vec{p}_{Tc}^i|$$

## El detector y sus detectives

CMS es un detector de gran tamaño, muy avanzado tecnológicamente, formado por distintas capas, cada una de ellas destinada a un fin específico. Todas estas capas permiten a los científicos de CMS identificar y medir con precisión las energías y los momentos de las partículas producidas en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN.



### El Calorímetro Electromagnético

Cerca de 80.000 cristales de tungstenato de plomo ( $PbWO_4$ ) son usados para medir con gran precisión las energías de electrones y fotones. Un detector previo a las cascadas (preshower) basado en detectores de silicio, colabora en la identificación de partículas en el detector a bajo ángulo.



### El Calorímetro Hadrónico

Varias capas de material denso (latón o acero), con fibras de cuarzo o plásticos de centelleo intercalados, permiten determinar la energía de hadrones, es decir, partículas como los protones, neutrones, piones y kaones.



### Los detectores de muones

Para identificar los muones y medir sus momentos, CMS usa tres tipos de detectores: tubos de deriva, cámaras de tiras catódicas y cámaras de planos resistivos.



## El detector de trazas

Sensores de silicio (tiras y píxeles) con una segmentación muy fina permiten medir la trayectoria de las partículas cargadas y sus momentos. También permiten determinar la posición de desintegración de partículas inestables de larga vida media.

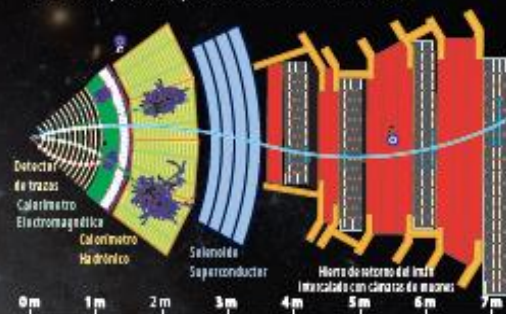


### Solenoide superconductor

El paso de 20.000 amperios a través de una bobina superconductor de niobio y titanio, de 13 m de largo y 6 m de diámetro, enfriada a  $-270^{\circ}C$ , produce un campo magnético de 4 teslas (unas 100.000 veces más intenso que el terrestre). Este campo curva las trayectorias de las partículas cargadas, permitiendo su separación y la medida de sus momentos.

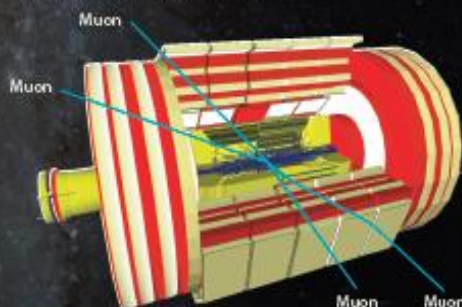
## Reconocimiento de patrones

Las nuevas partículas producidas en CMS serán en general inestables y se desintegrarán rápidamente en una cascada de partículas más ligeras, más estables y mejor conocidas. Las partículas que atraviesan CMS dejan tras de sí unos patrones característicos, o "firmas" en las diferentes capas, permitiendo su identificación. La presencia (o no) de nuevas partículas puede ser inferida de este modo.

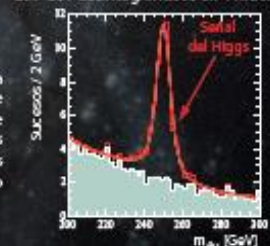


### Sistema de adquisición de datos (Trigger)

Para ser capaces de producir partículas que se crean con una frecuencia muy baja, tales como el bosón de Higgs, los haces del LHC colisionan hasta 40 millones de veces por segundo. Las señales dejadas por las partículas son analizadas por medio de un sistema electrónico rápido con el fin de guardar (o "disparar") la adquisición de sólo aquellos sucesos que puedan mostrarnos nuevos procesos físicos (unos 100 por segundo), tales como la partícula de Higgs desintegrándose en cuatro muones de la figura de abajo. Esto reduce el flujo de datos a un nivel manejable. Estos sucesos de interés son almacenados para su posterior análisis detallado.

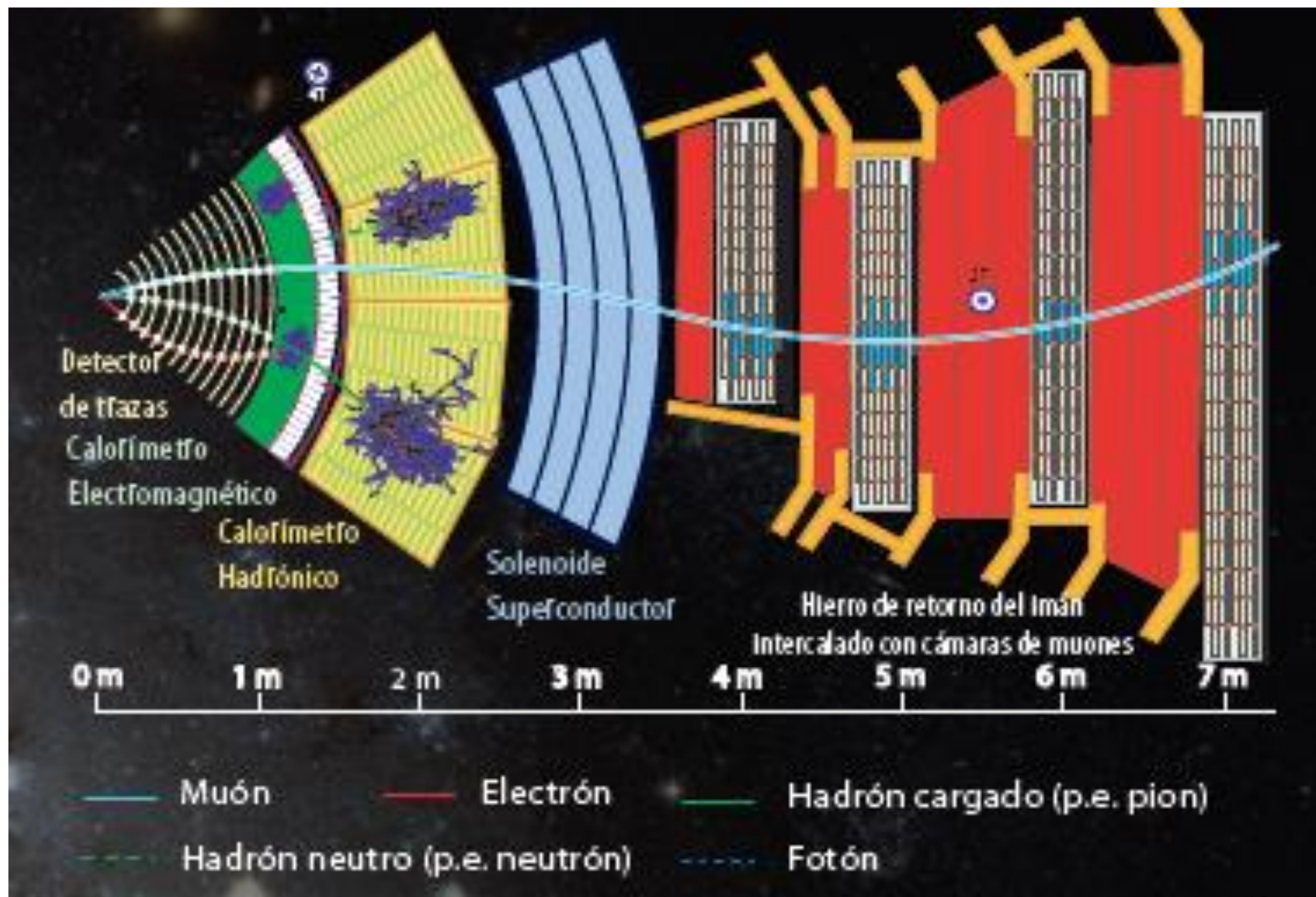


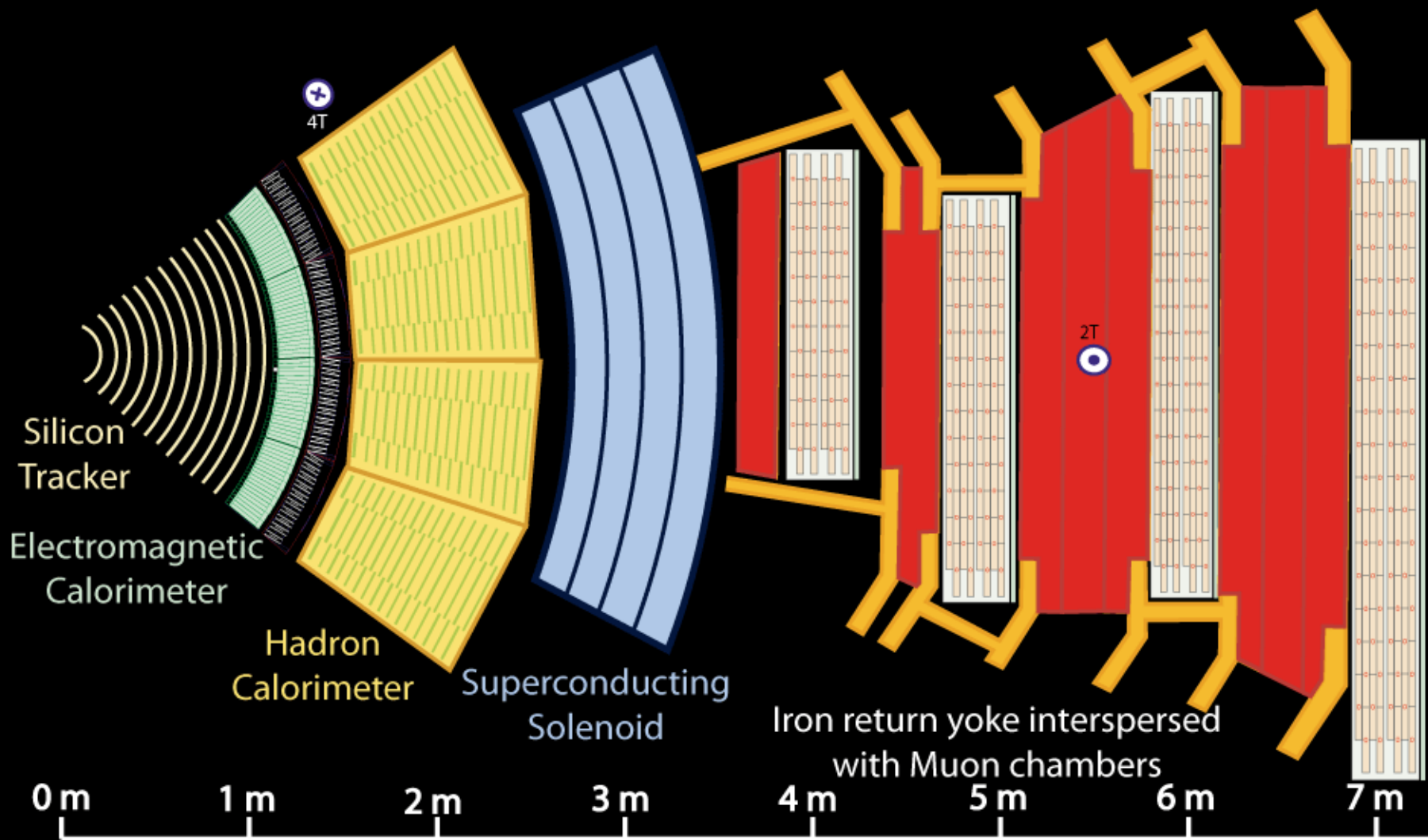
Simulación de un bosón Higgs de 250 GeV desintegrándose en 4 muones



### Análisis de datos

Físicos de todo el mundo utilizan las técnicas informáticas más punteras (tales como el Grid) para escudriñar entre los millones de sucesos de CMS y producir gráficas como la de la izquierda (una simulación) que puedan indicar la presencia de nuevas partículas o fenómenos.





Key:

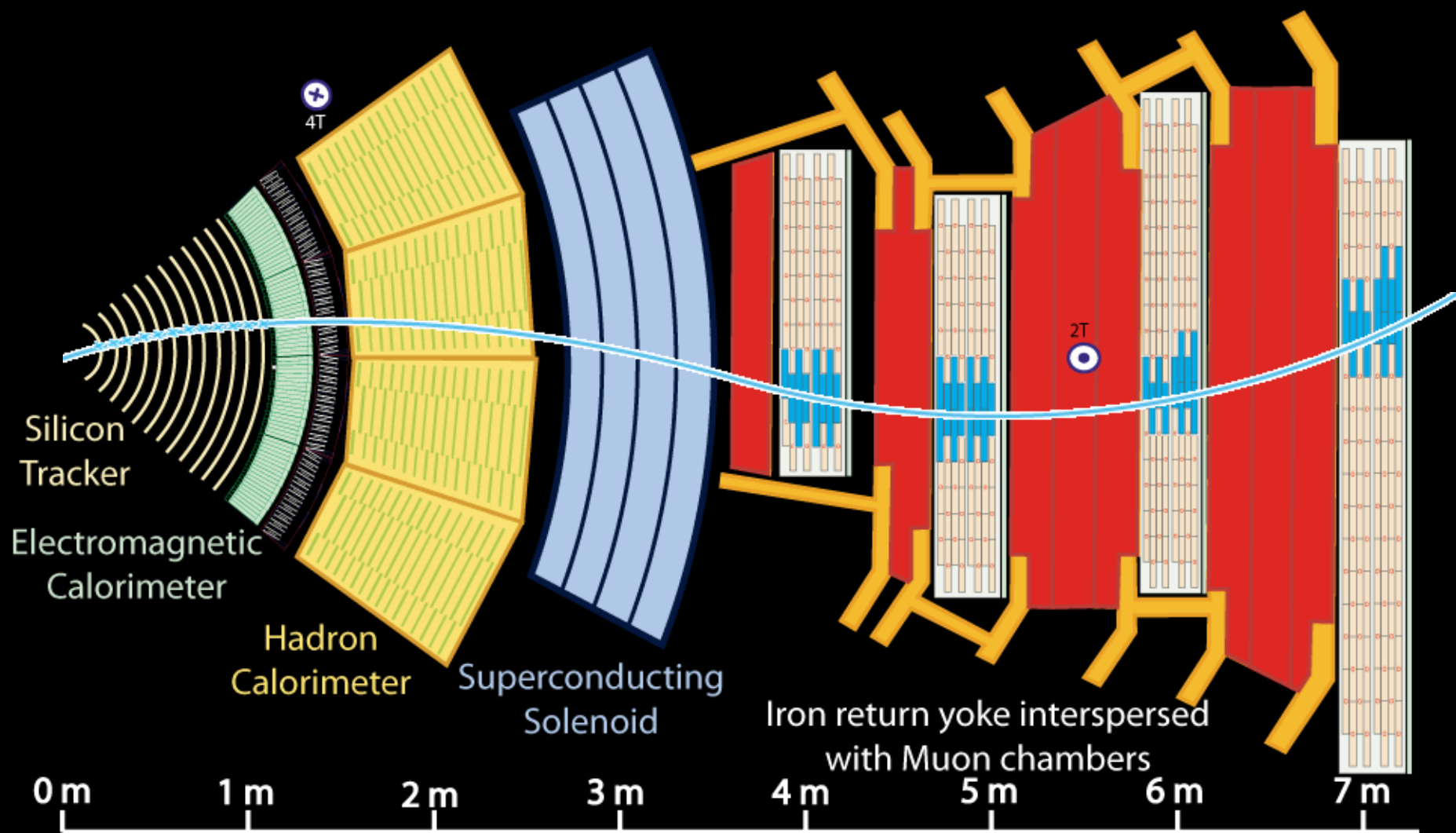
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

- - - Photon



Key:

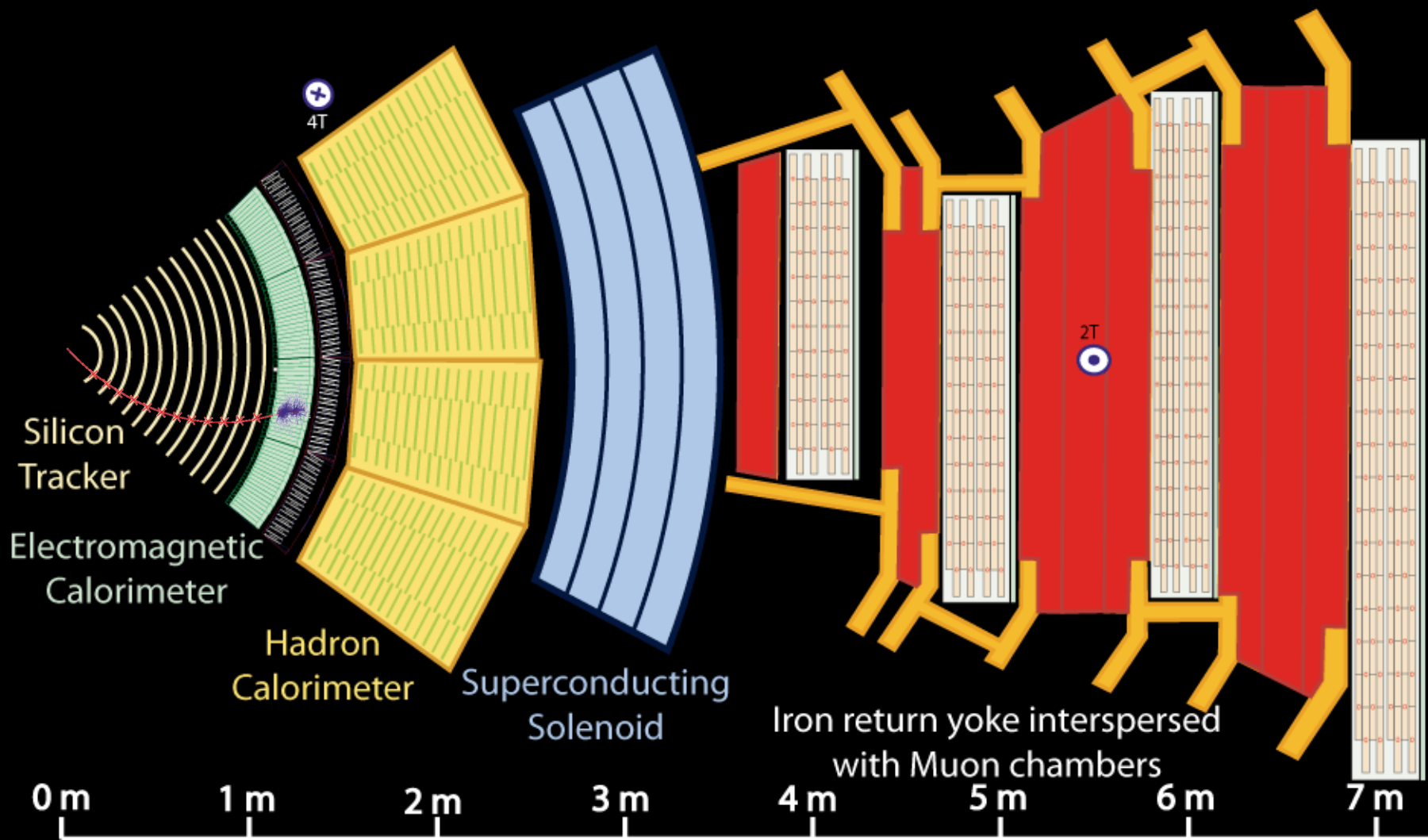
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

- - - Photon



Key:

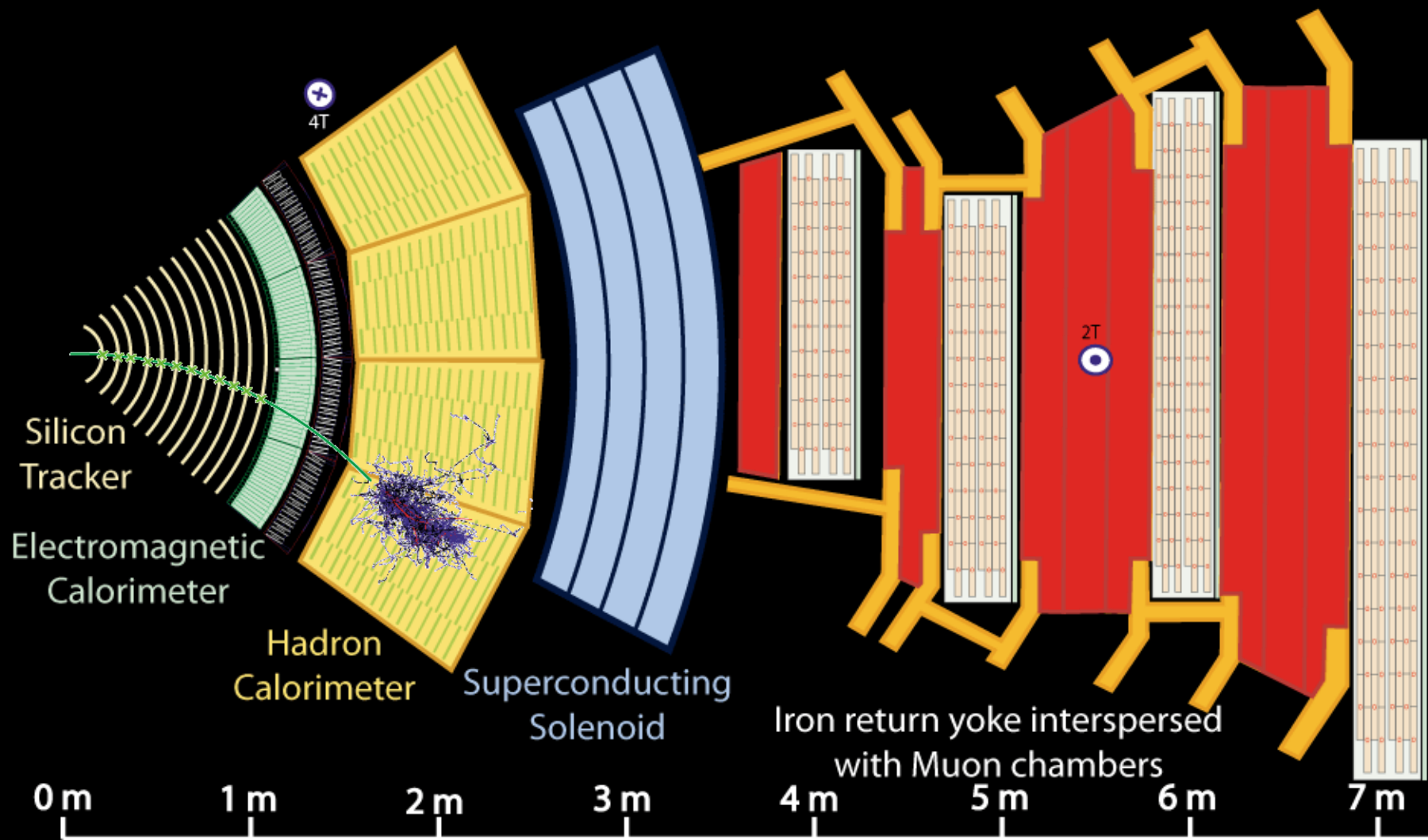
— Muon

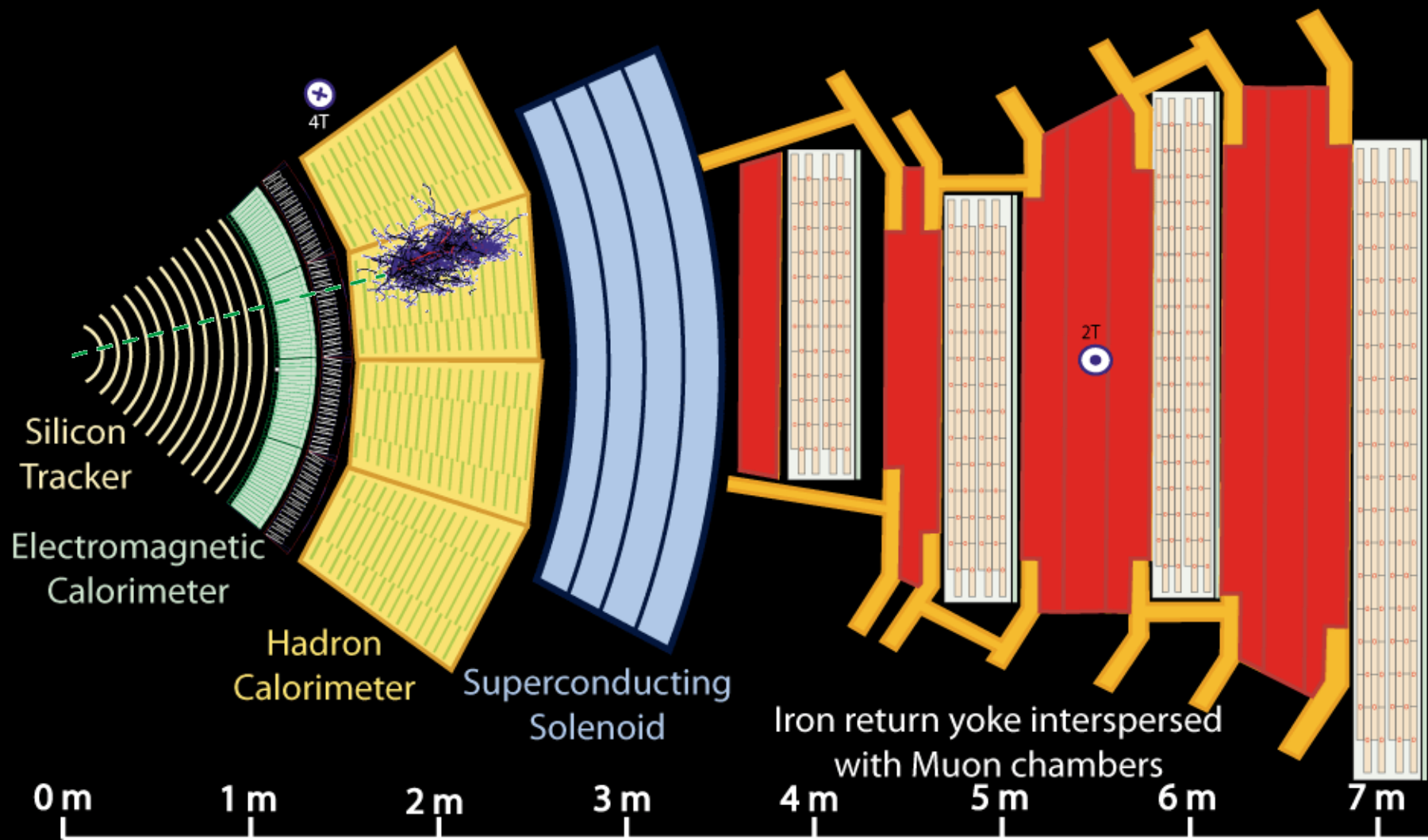
— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

- - - Photon





Key:

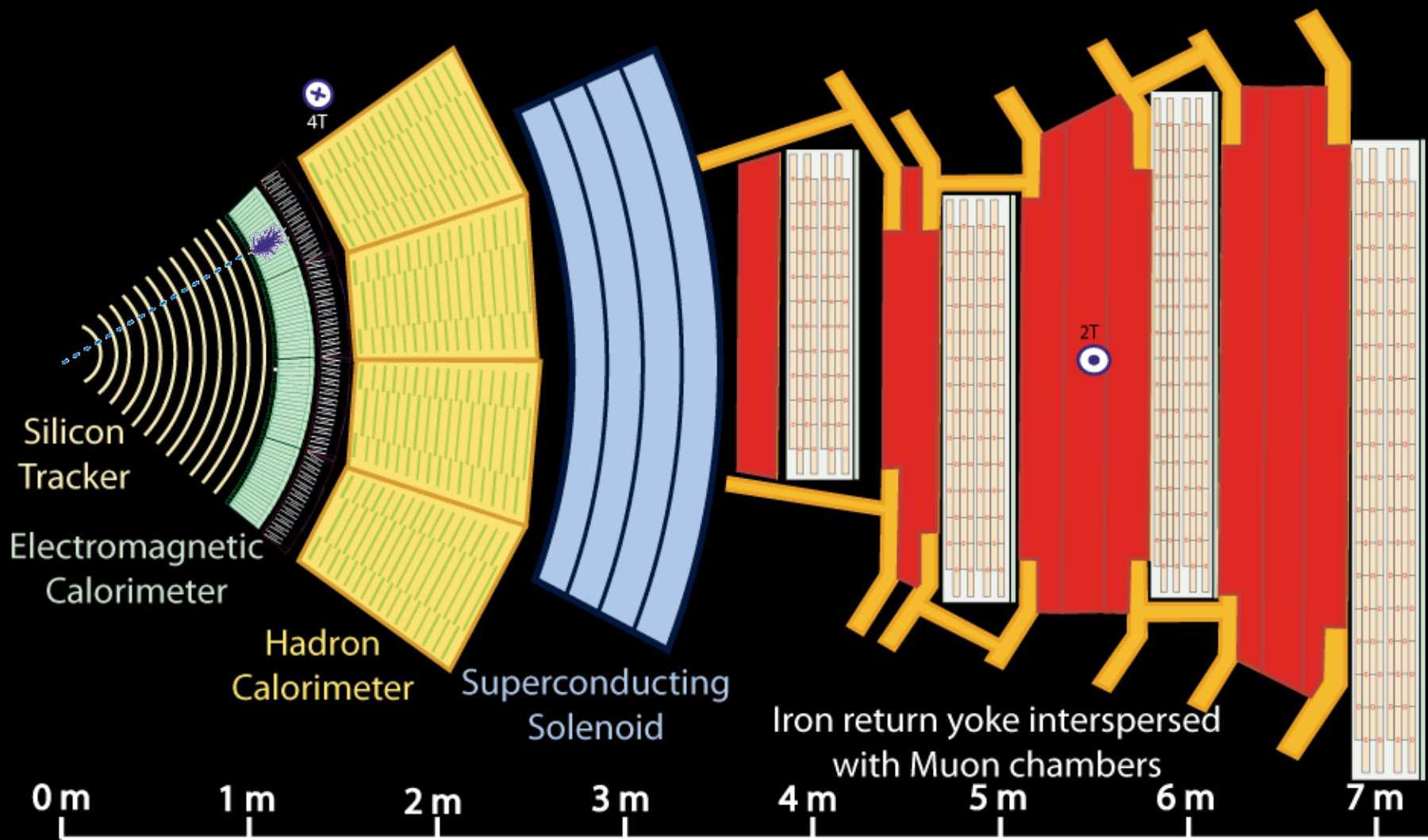
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

- - - Photon



Key:

— Muon

— Electron

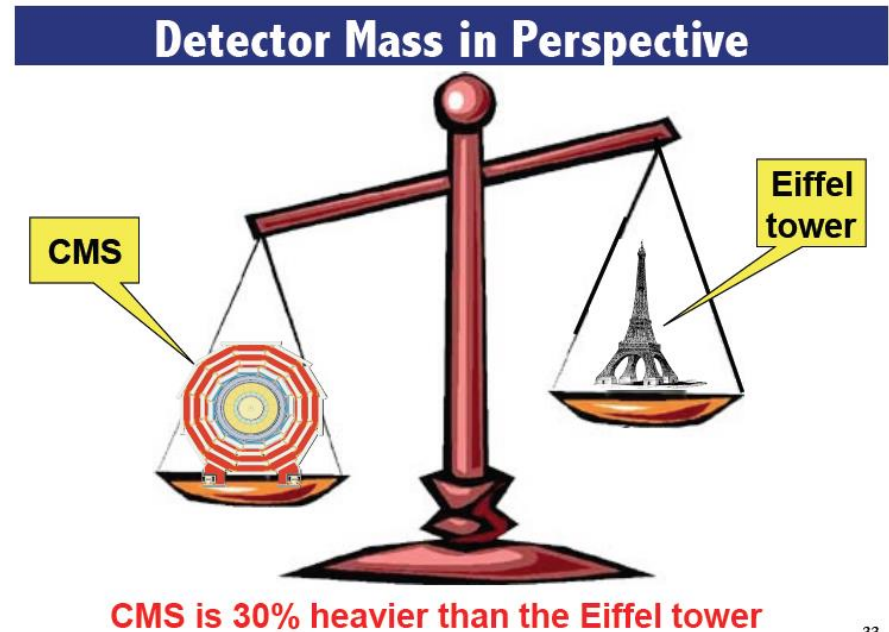
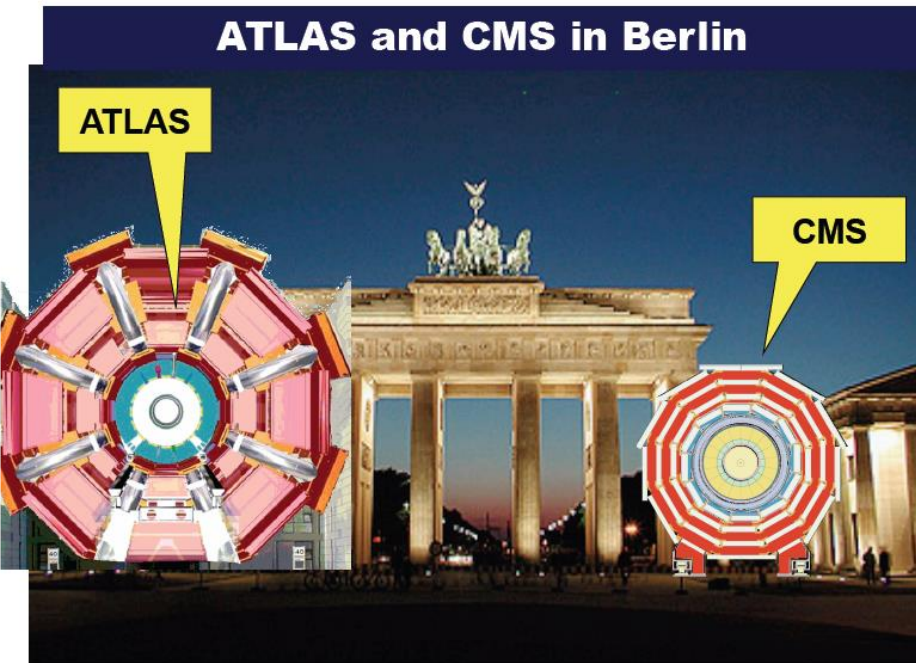
— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

- - - Photon

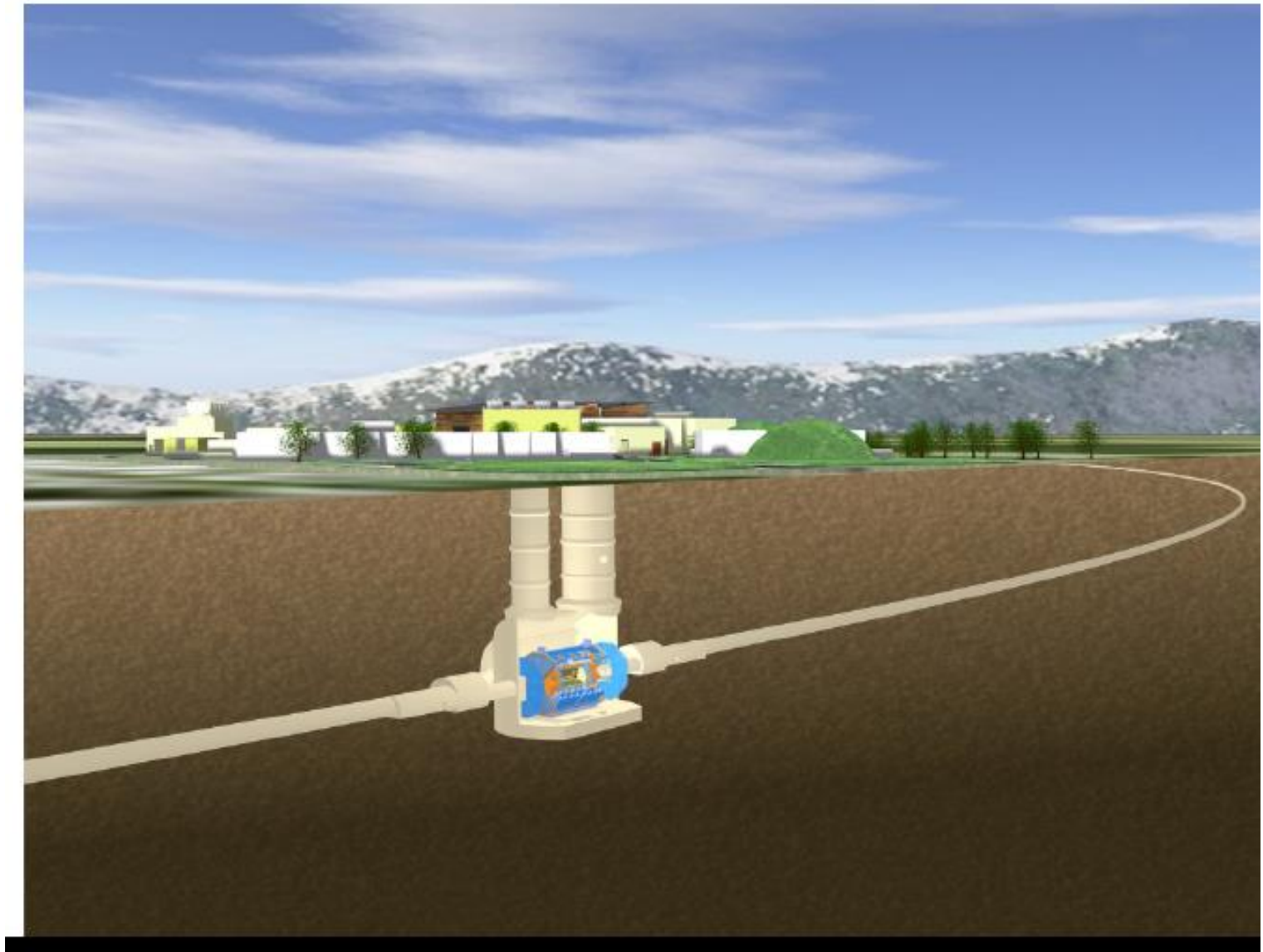
¿Qué pinta tienen los detectores?

# Los detectores a escala...

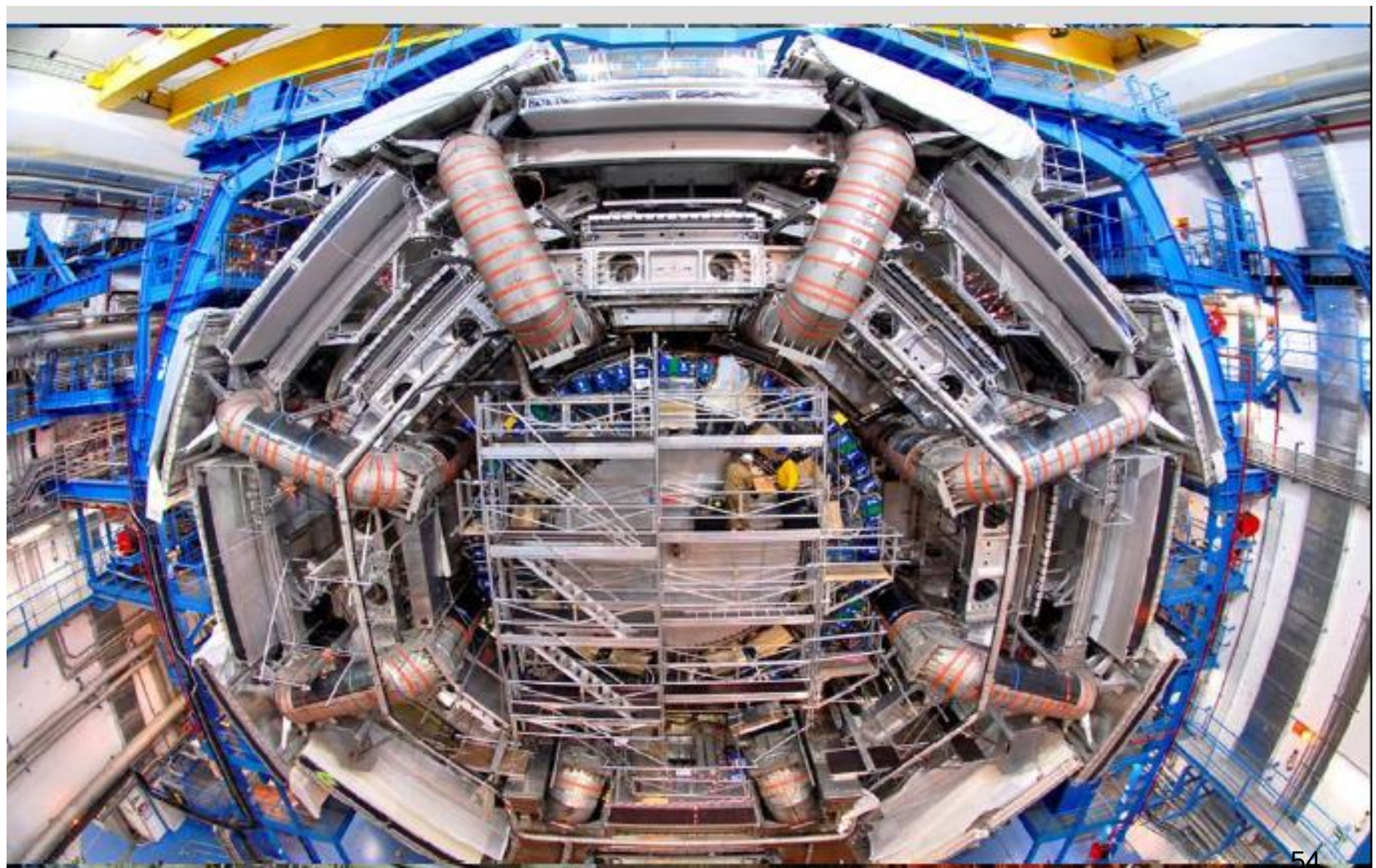


33

**ATLAS, en cambio, flota!!!!**







10 pisos de altura!!





