

DETECTORES DE PARTÍCULAS

Programa en lengua española para profesores

Ignacio Redondo, CIEMAT

1. La importancia de la instrumentación en ciencia
 - Que es un detector moderno?
2. Algunos fenómenos físicos útiles para la experimentación
3. Algunas tecnologías de detección :
 - Ayer, hoy (Atlas/CMS)..
4. Como diseñar los mejores detectores de partículas?
 - ...y mañana

Tengo mis sesgos:

Soy miembro del experimento CMS del LHC desde 2009. Me dedico a la Física Experimental de Partículas desde 1997, sobre todo a la operación, construcción, mejora y diseño de detectores: ZEUS, H.E.S.S, CDF,CMS

Experimentar es la base del conocimiento *científico*

- *El agua es el comienzo de todas las cosas*, Tales, Siglo VI A.C

....

- *Todo esta hecho de átomos* ← Demócrito, Siglo V A.C.

....

- *4 elementos: Tierra, agua, fuego, aire*. Aristóteles, Siglo IV A.C.

....

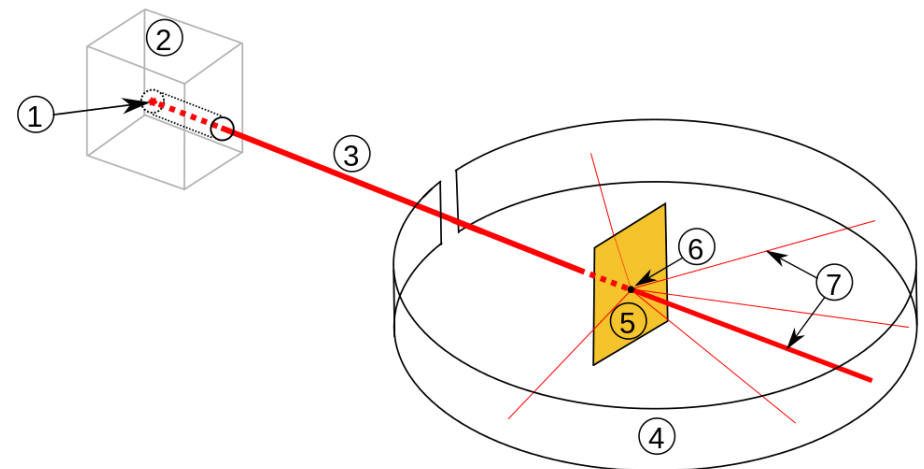
Infinitos debates teóricos +

Un par de milenios de experimentation...

Mendeleiev 1869

Rutherford 1911

Reihen	Gruppe I. — R ⁰	Gruppe II. — R ⁰	Gruppe III. — R ⁰	Gruppe IV. RH ⁴ R ⁰	Gruppe V. RH ⁴ R ⁰	Gruppe VI. RH ⁴ R ⁰	Gruppe VII. RH ⁴ R ⁰	Gruppe VIII. — R ⁰
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fo=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=86	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	—
9	(—)	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	—
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	—



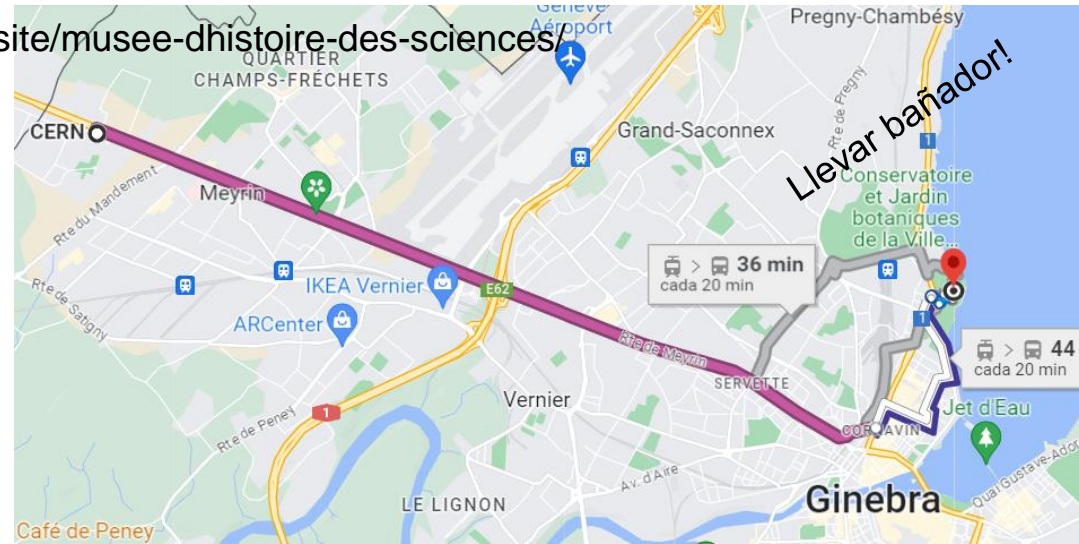
Museo de la Ciencia de Ginebra en la Pearl du Lac

<http://institutions.ville-geneve.ch/fr/mhn/votre-visite/musee-dhistoire-des-sciences/>



Tube de Crookes
MHS 2235
Aluminium, bois, fer, verre, 19^e siècle

1887 Rayos catódicos : **el electrón**

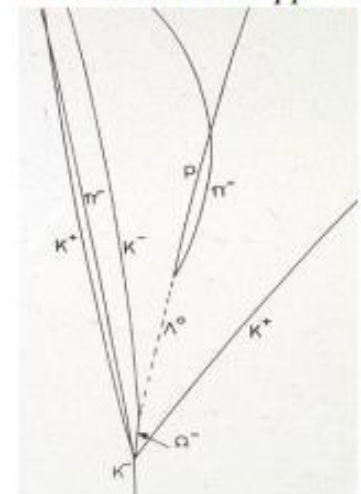


Muy recomendable colección de instrumentos científicos

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)

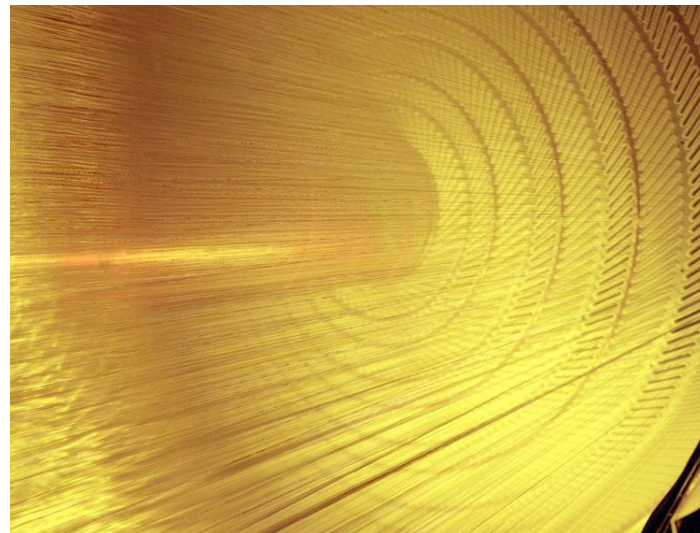


BEBC (1967-1984)
Campo B de 3.5 T
6,3 millones de colisiones
3000 km de película



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

- Limitaciones
 - de los metodos fotograficos → camaras de hilos
 - Limitaciones de metodos analogicos
- Digitalización



NOBEL PRIZES FOR INSTRUMENTATION

[http://www.lhc-closer.es/
php/index.php?
i=1&s=9&p=2&e=0](http://www.lhc-closer.es/php/index.php?i=1&s=9&p=2&e=0)



1927: C.T.R. Wilson, Cloud Chamber



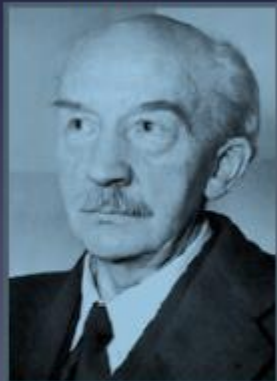
1939: E. O. Lawrence, Cyclotron



1948: P.M.S. Blacket, Cloud Chamber



1950: C. Powell, Photographic Method



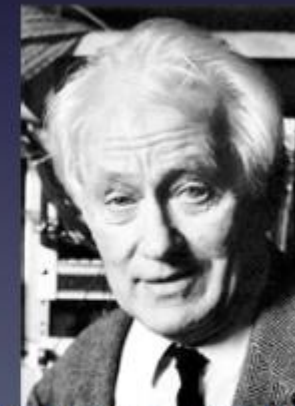
1954: Walter Bothe, Coincidence method



1960: Donald Glaser, Bubble Chamber



1968: L. Alvarez, Hydrogen Bubble Chamber



1992: Georges Charpak, Multi Wire Proportional Chamber

- “New directions in science are launched by **new tools** much more often than by new concepts.
 - The effect of a concept-driven revolution is to explain old things in new ways.
 - The effect of a tool-driven revolution is to discover new things that have to be explained”

Freeman Dyson

(Físico Teórico)

- Nowadays evolution of HEP Detector Systems is driven by

Smart Customization of Technology

- rather than high-end technology development, which requires huge resources

Smart technologists

+

Challenging Scientific Goals

■ J. Kemmer 1979

NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS 169 (1980) 499-502, © NORTH HOLLAND PUBLISHING CO

FABRICATION OF LOW NOISE SILICON RADIATION DETECTORS BY THE PLANAR PROCESS

J. KEMMER

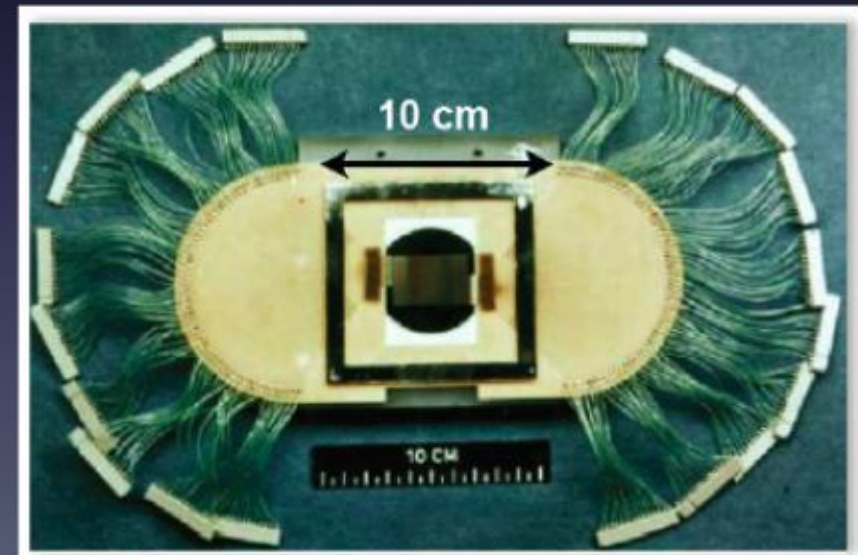
Fachbereich Physik der Technischen Universität München, 8046 Garching, Germany

Received 30 July 1979 and in revised form 22 October 1979

Dedicated to Prof. Dr. H.-J. Born on the occasion of his 70th birthday

By applying the well known techniques of the planar process—oxide passivation, photo engraving and ion implantation, Si pn-junction detectors were fabricated with leakage currents of less than $1 \text{ nA cm}^{-2}/100 \mu\text{m}$ at room temperature. Best values for the energy resolution were 10.0 keV for the 5.486 MeV alphas of ^{241}Am at 22°C using $5 \times 5 \text{ mm}^2$ detector chips.

- NA11 at CERN
 - First use of a position-sensitive silicon detector in HEP experiment
 - Measurement of charm quark lifetimes
 - 1200 diode strips on $24 \times 36 \text{ mm}^2$
 - 250-500 μm thick bulk material
 - 4.5 μm resolution



Permiten acceder a precisiones diminutas $O(\mu\text{m})$, granularidades elevadas

Proceso de "medida" :

- **Detector/"Hardware"**



- Fundamento físico: Óptica
- Registro de señal : Sensor digital $N \times M$ pixels

- **Inteligencia&operación automática/electrónica**

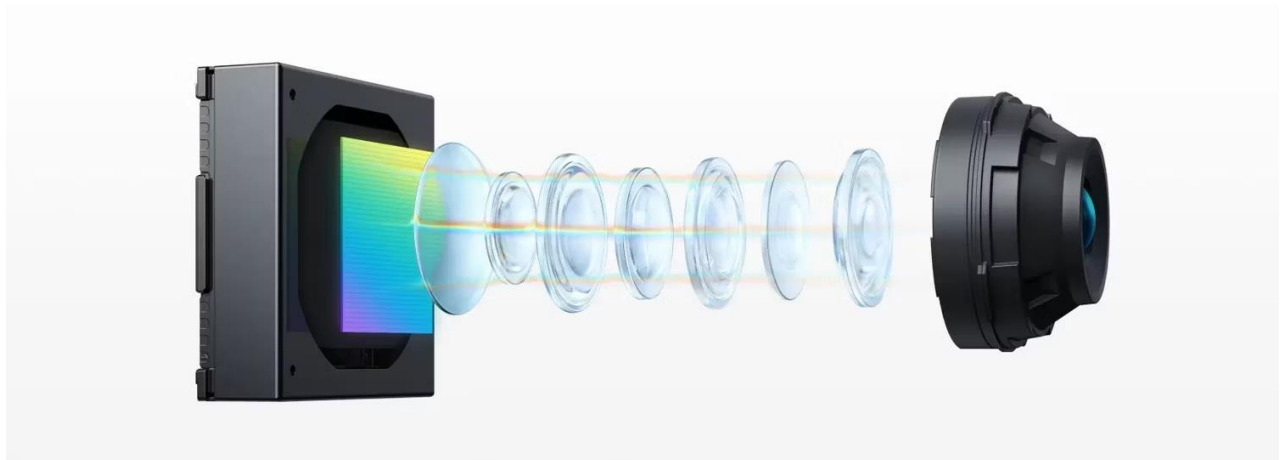


- Encuadre, auto-enfoque, buscar caras ...
- Disparo, auto-flash, combinar cámaras... → **Imagen**

- **Análisis /"Software"**



- + Archivar (álbum, nube) y/o retocar imagen
- + Publicar en red social





Interacción radiación-materia

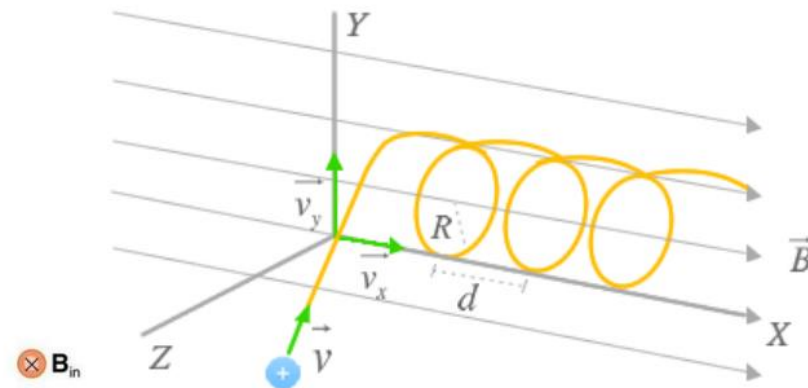
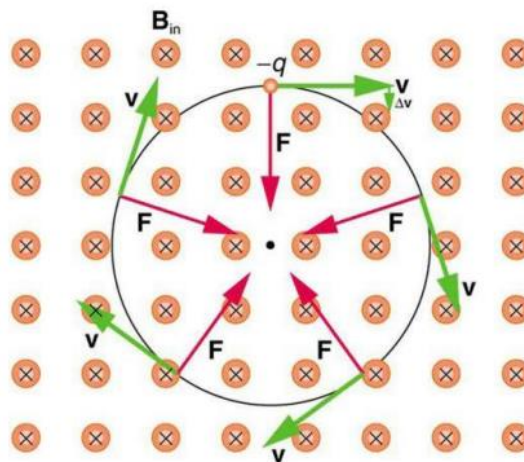
1. Las partículas cargadas se curvan en un campo magnético según su momento, \rightarrow se miden en detectores de trazas que deben medir la trayectoria de las partículas perturbándolas lo menos posible, deben ser “transparentes”

Ley de Lorentz:

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

Igualando con la fuerza centrípeta, $a_n = \frac{|q| \cdot v \cdot B}{m} = \frac{v^2}{R}$

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

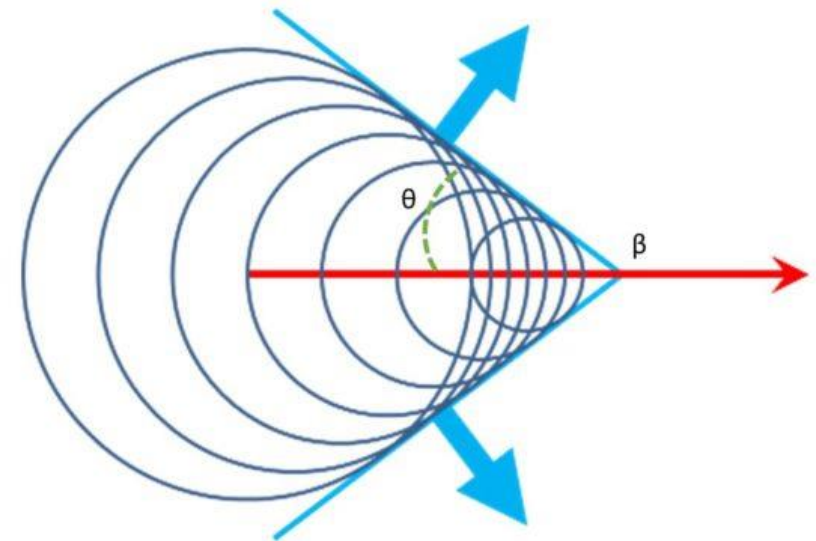
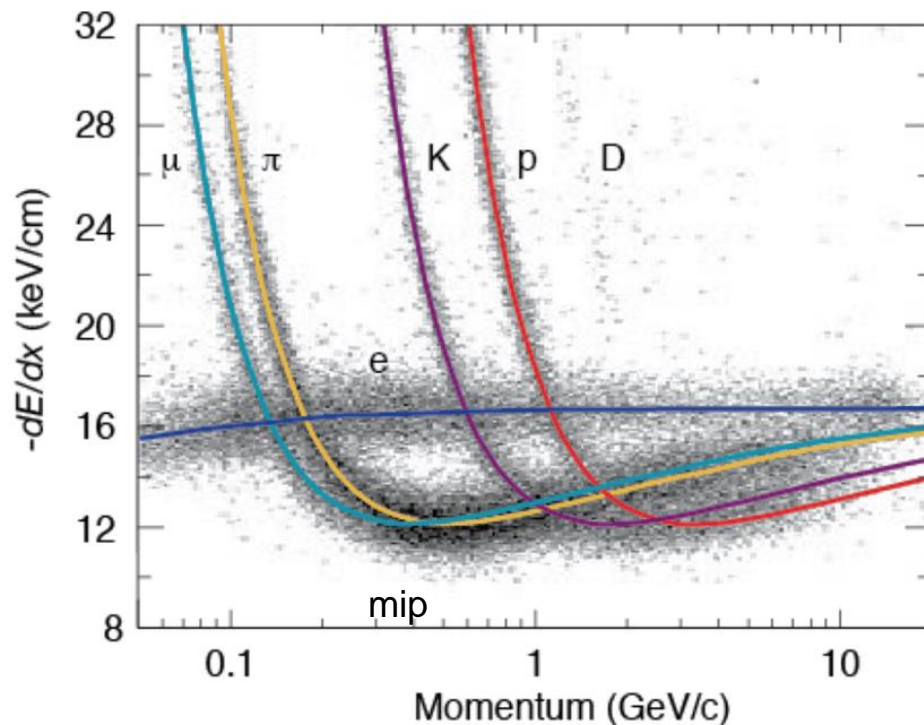


2. las neutras (neutrones, fotones, neutrinos,...) no. \rightarrow se miden en “calorímetros” que deben, al contrario, parar la partícula.



- Las partículas cargadas ionizan el medio que atraviesan generando carga, que, amplificada, es la señal que el detector debe registrar
- La ionización depende de la partícula y el medio

Efecto cherenkov. Las partículas se mueven a velocidades relativistas $>$ la de la luz en el medio, emitiendo luz azulada en un cono (como un barco en la superficie del agua)



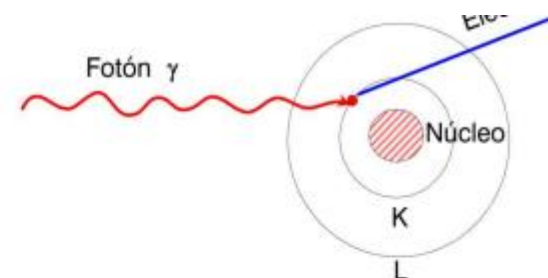


Partículas electromagnéticas: e⁺- y fotones

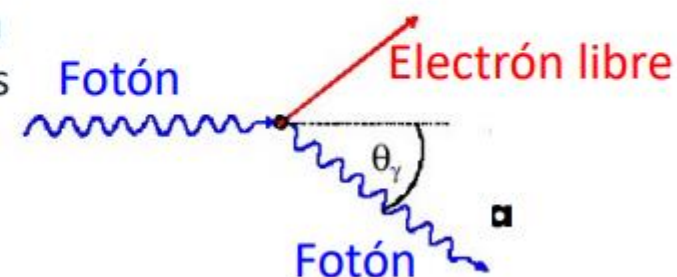
**Fotón
baja
energía**



Efecto fotoeléctrico absorción de un fotón por un átomo, **expulsando un electrón**

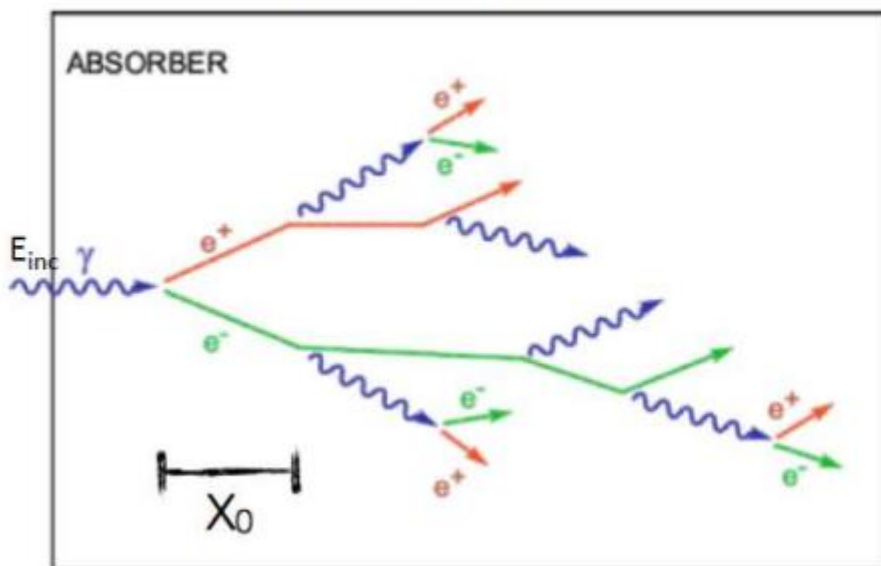
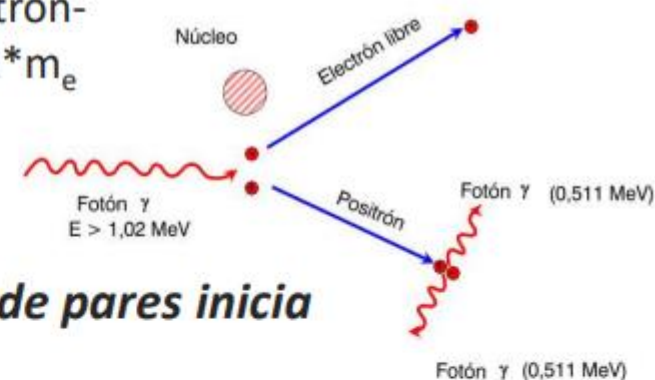


Dispersión Compton dispersión de un fotón contra un electrón libre (fórmula de Klein Nishina). Para energías por encima de unos pocos MeV 90% de la energía se transfiere.



**Fotón alta
energía**

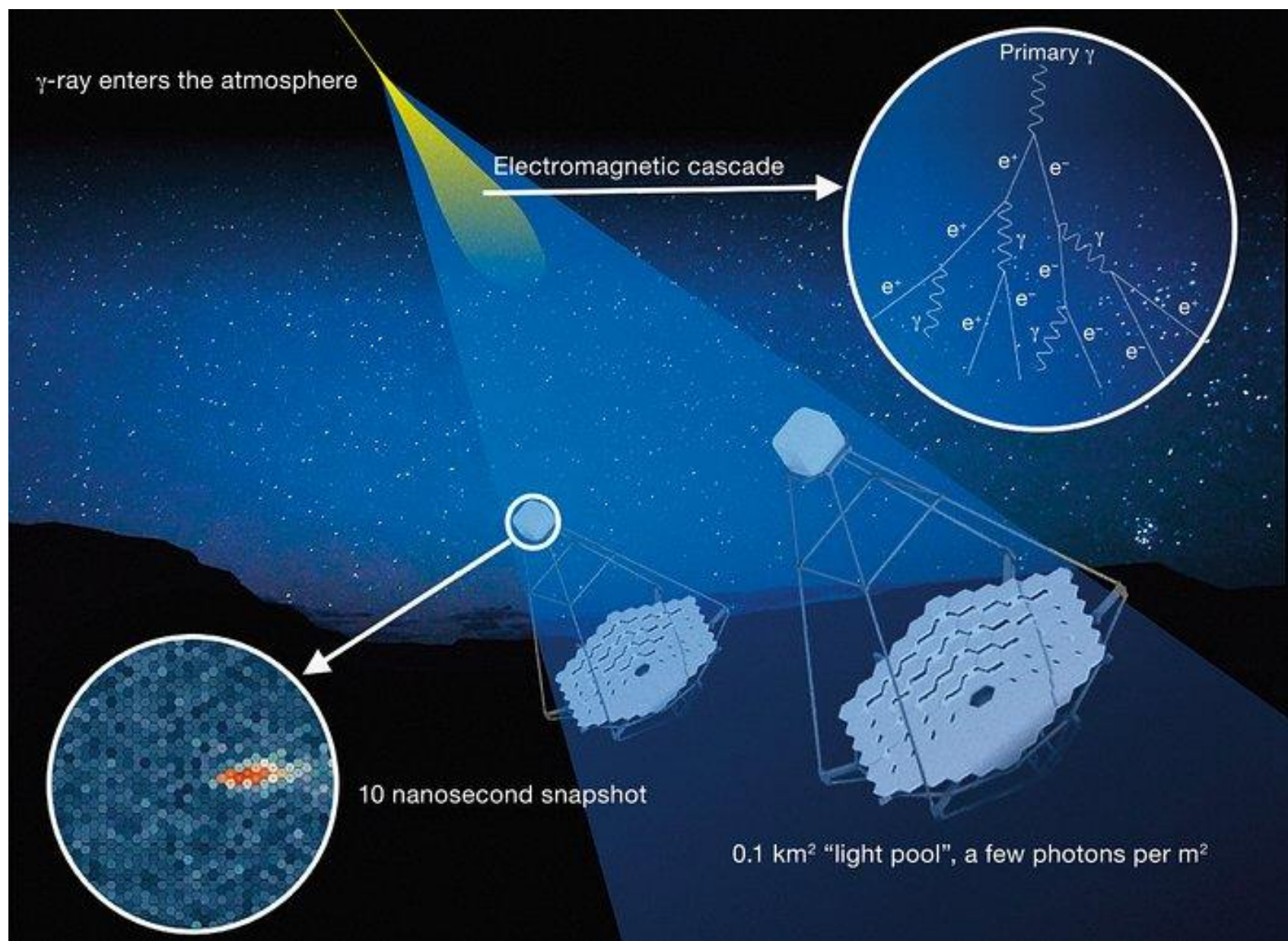
Producción de pares fotón que produce un par electrón-positrón. Esencialmente bremsstrahlung; umbral a $2 \cdot m_e = 1.022 \text{ MeV}$.



La producción de pares inicia las CASCADAS ELECTROMAGNÉTICAS en los calorímetros

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

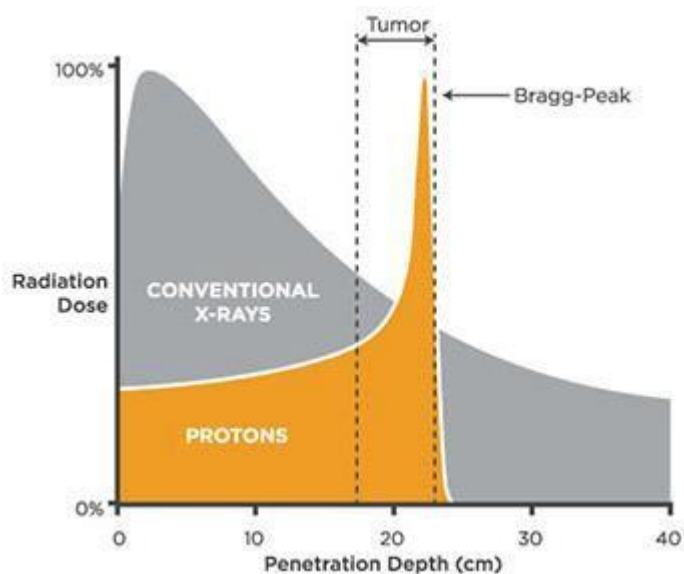
Longitud de radiación (X_0): Grosor del material que reduce la energía media de un haz de electrones por un factor e.



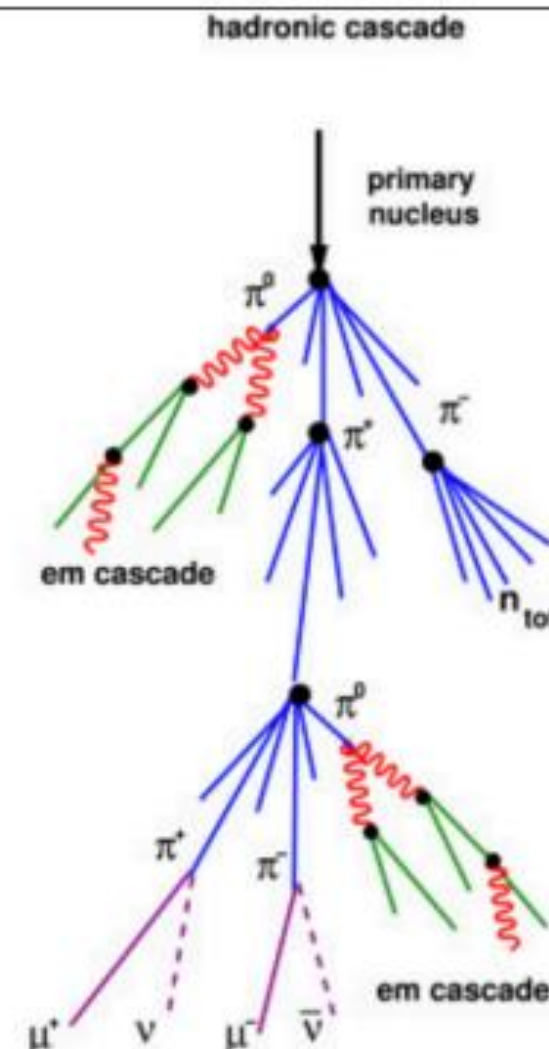


- Sufren colisiones elásticas (bolas de billar), especialmente neutrones
- Eventualmente generan una cascada mas compleja, irregular y difícil de modelizar que la electromagnética
- Mas penetrante que la electromagnética

[Esta característica, y el que para bajas energías deposita toda su energía justo cuando se esta parando es el fundamento de la hadronterapia]

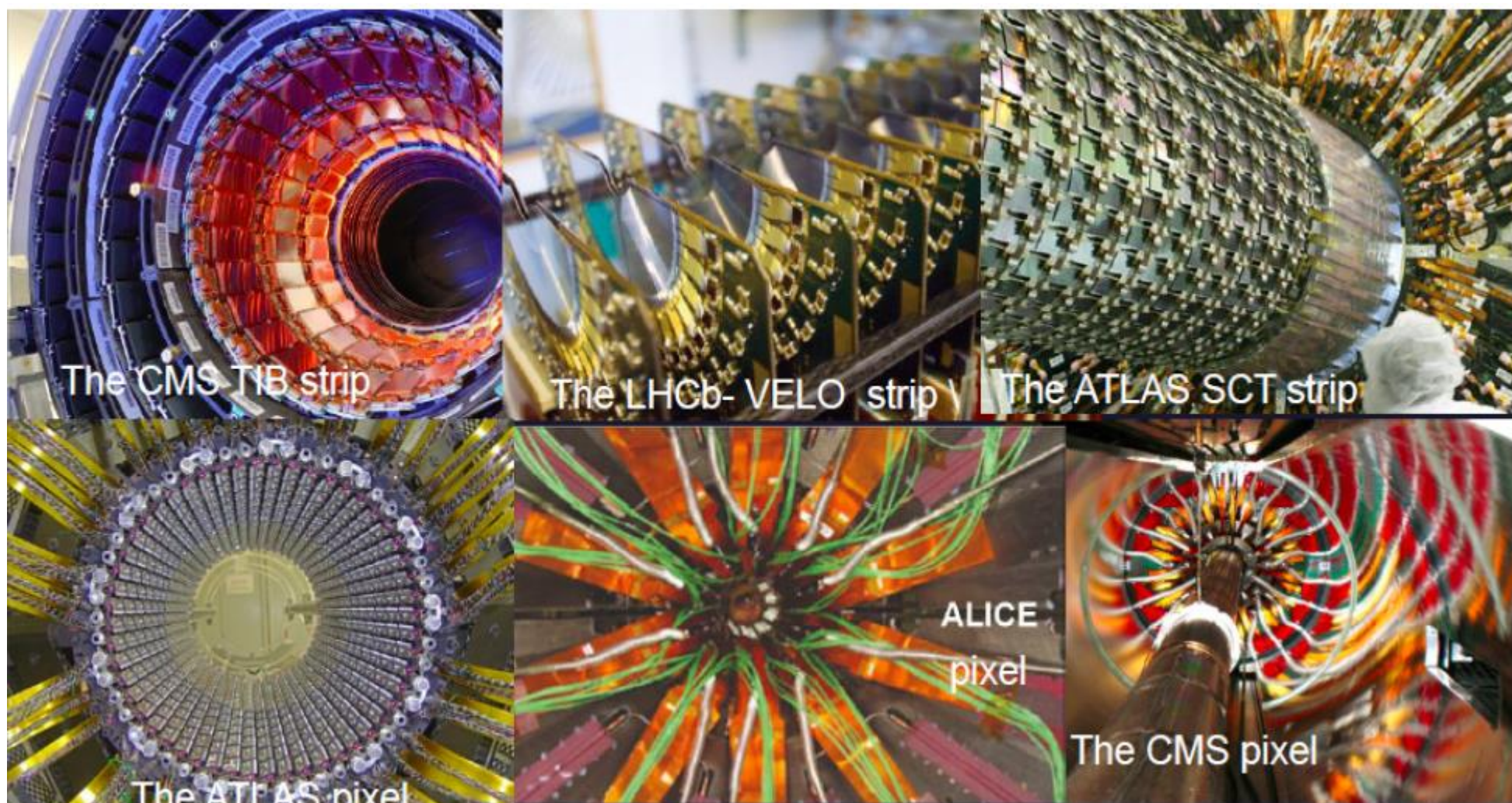


I. Redondo





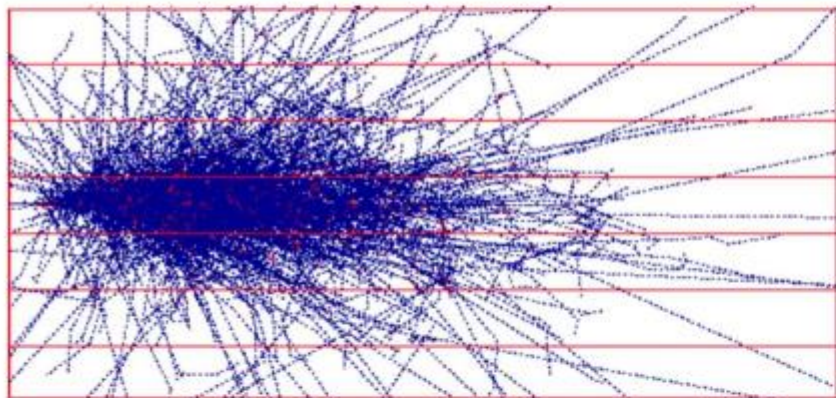
Capas de finos ($O(100\text{ um})$) sensors de silicio. Ultima gran revolución



Su capacidad para medir vértices secundarios permitió hacer toda la física de los mesones B



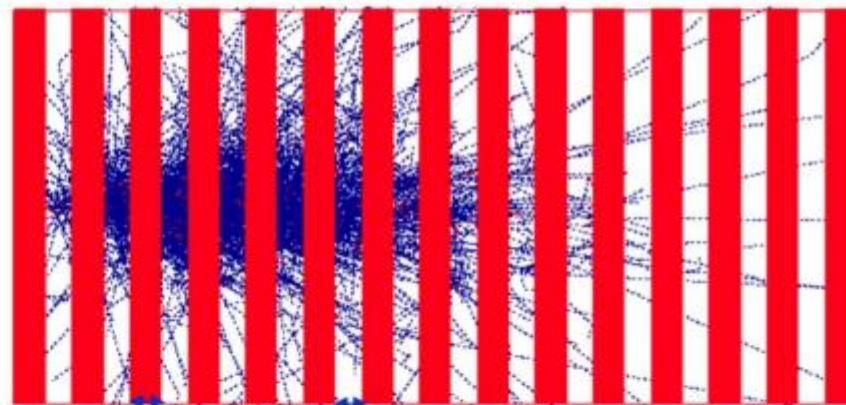
- Calorímetro homogéneo (homogeneous)
- Toda la energía se deposita en el medio activo.



- Excelente resolución de energía.
- Sin información longitudinal de la forma de la cascada.
- Costoso

- Calorímetro de muestreo (sampling)

- La cascada se muestrea en capas del medio activo (bajo Z) alternadas con un medio denso (alto Z).

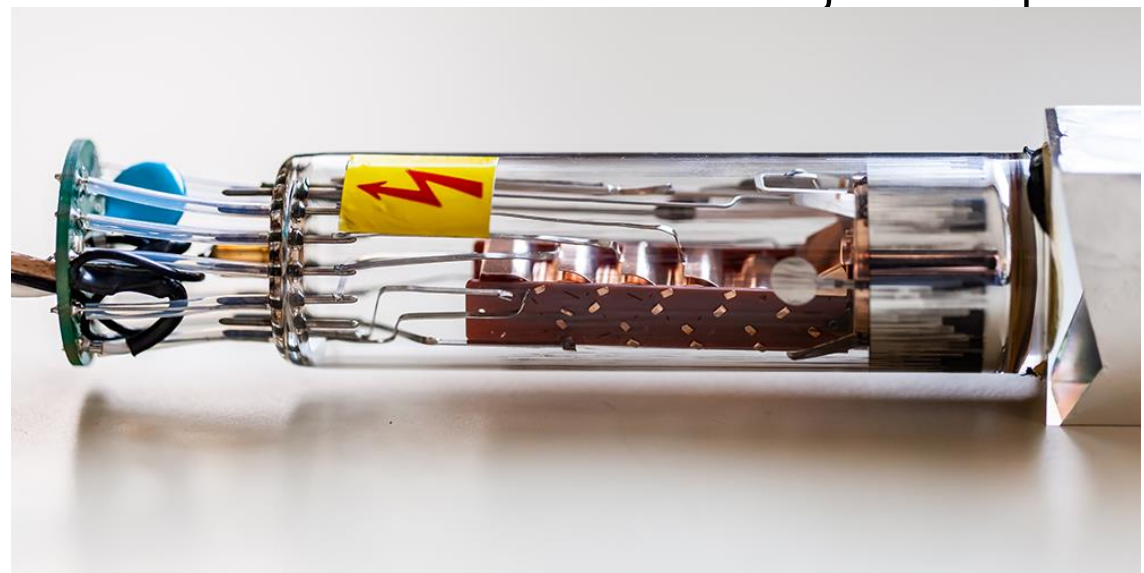
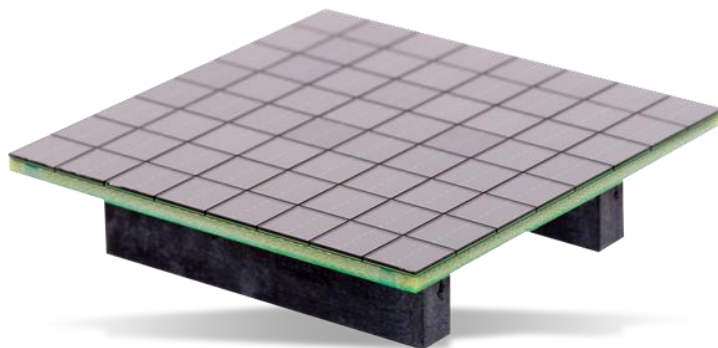


- Resolución de energía limitada
- Información detallada de la forma de la cascada.
- Menos costoso

Nuevas tendencias: Calorimetría con mucha granularidad espacial



- Uno de los métodos más empleados en calorimetría es el tener materiales centelleadores como medio activo.
 - La luz producida es conducida a fotodetectores
- El fotomultiplicador es un tubo de vacío, cuya fina ventana está optimizada para que el foto produce un electrón por efecto fotoeléctrico.
 - El electrón es dirigido a una red de ánodos donde se amplifica la carga muy eficazmente ($\times 10^5$) aplicando diferencias de potencial altas.
- Fotodetectores rápidos hechos de Silicio no sufren bajo campo magnético



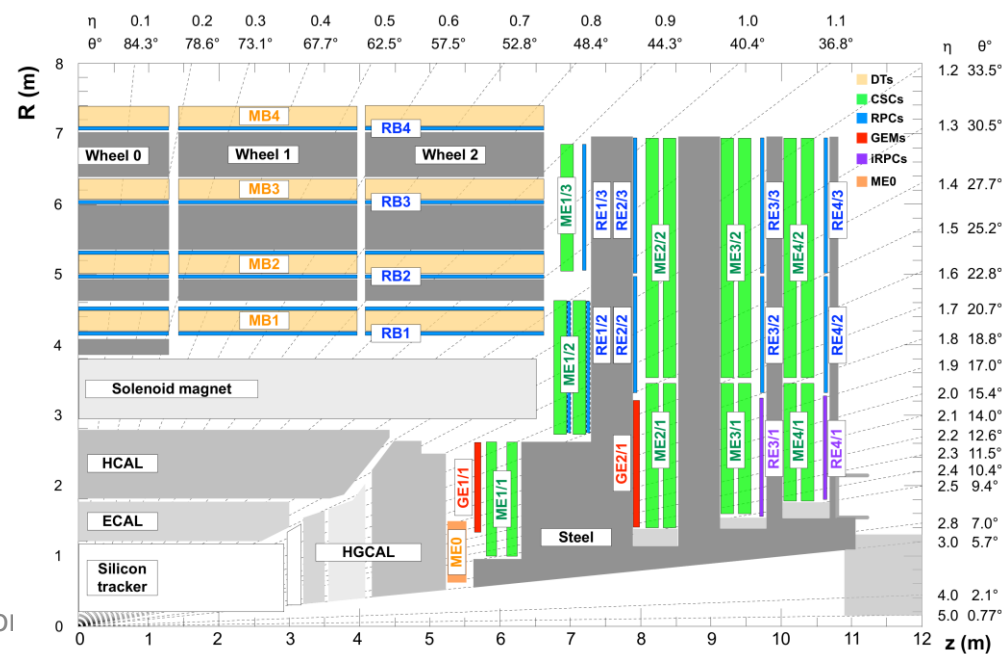
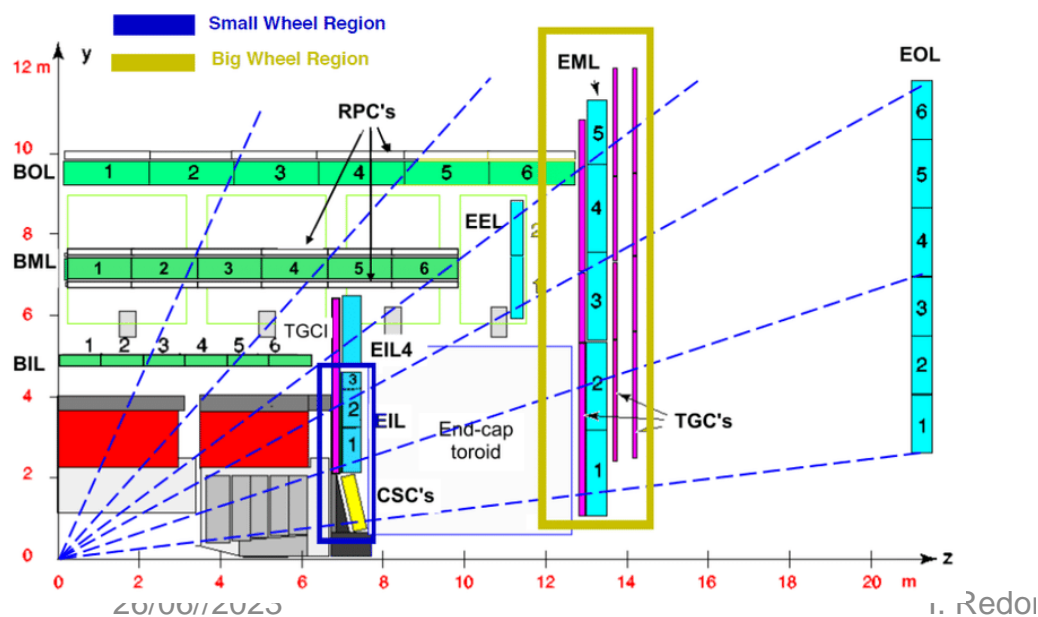


Detectores de muones

- Debido a su mayor masa, el Muon no radia fácil, con lo que es capaz de atravesar el detector entero.

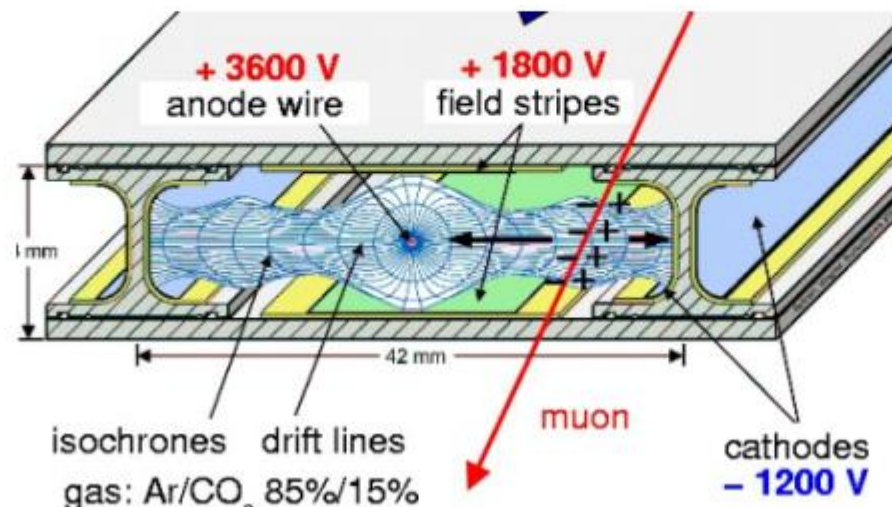
[los muones de los cascadas en la parte alta de al atmosfera llegan al suelo, nos atraviesan con un flujo $\sim 1 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$]

- Los detectores de muones deben realizar las mismas funciones que los de trazas pero cubriendo una gran superficie, por lo que requieren tecnologías económicas por unidad de area
- Muy habitualmente detectores de gas, también de fibras, suficientemente rápidos para poder generar una lógica de disparo



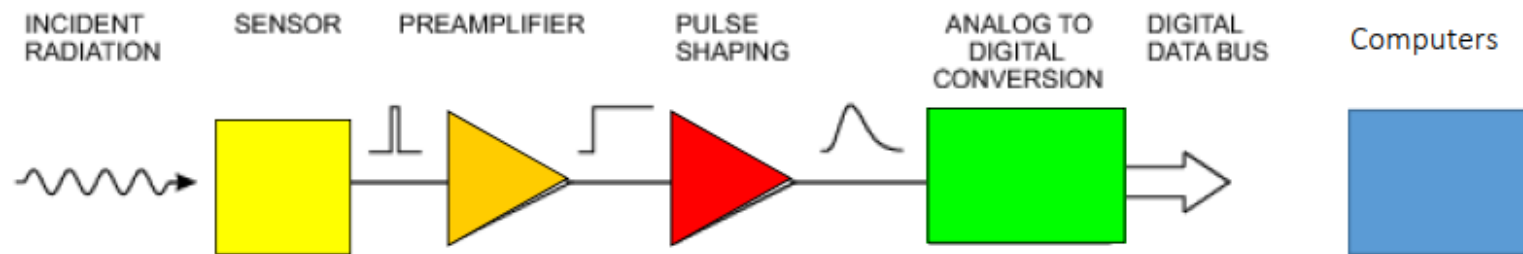


- Ionization charge drifts at constant speed
 - Induced signal while drifting below threshold
- Smart field distribution such that avalanche starts only close to the collecting wire
 - Signal goes above threshold
 - This allows to convert avalanche start-time to a precise coordinate
 - Drifting time (~ 20 ns) acts in practice as an electronics pipeline





Amplification, shaping, digitization



Analogic part:

- Noise,
- Lineality,
- Speed,
- Cross talk,
- Keep the relevant part of the signal



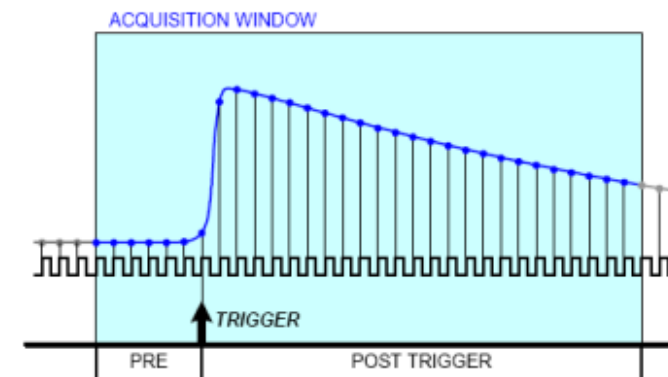
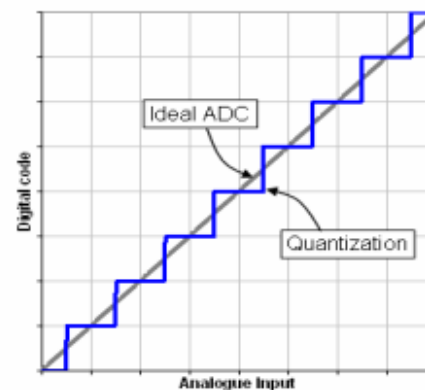
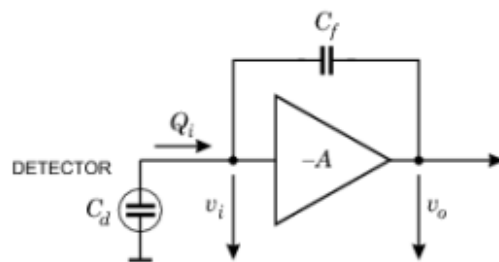
Digital Conversion:

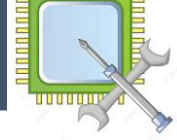
- Resolution,
- Dynamic range
- Lineality
- Dead time, etc

**ADC, TDC, QDC,
CFD, Scaler, peak
sensing ADC....**



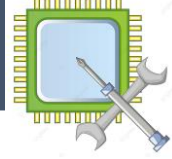
Waveform digitizer



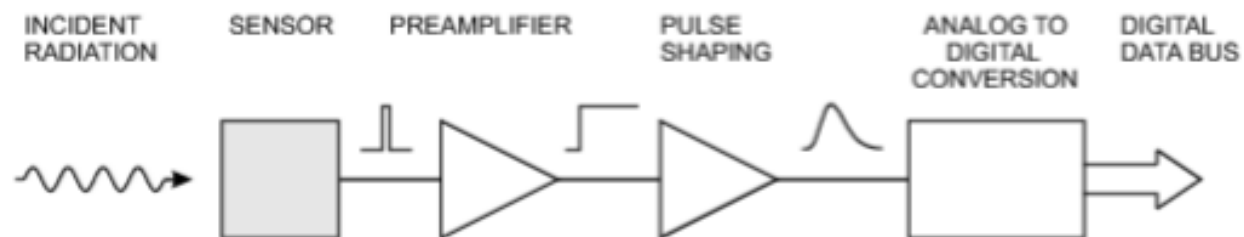


- El ruido de fondo deja señal en el detector
 - Partículas fuera del tiempo, materiales activados, radiactividad natural, cósmica,...
- Ruido analógico
 - Ruido térmico
 - Disparo
 - Pick-up, ruido de modo común, *cross-talk*,..
- Ruido digital
 - Errores de bits, bloqueo de enlaces, falta de linealidad,...

Requerir coincidencias entre detectors ayuda en cierta medida



- Los experimentos en colisionadores tienen ventajas
 - El acelerador da una señal de “reloj” que define cuando los haces se cruzan en el punto de interacción y hay que buscar señales en el detector.
- LHC usa un reloj de 40 MHz clock, 25 ns de espacio entre cruces de haces
 - Los Experimentos de astroparticulas que observan necesitan electrónica rápida para compensar esta desventaja.
 - ➔ La Electrónica rápida consume más, disipa más con lo que se necesita sistemas de refrigeración para Fast electronics consumes more power, more power require más refrigeración, más refrigeración es mas material...
- La señal generada en los detectors por las partículas generadas en la collision son integradas eficientemente, amplificadas, registradas, digitalizadas, leídas, guardadas, distribuidas,...





Muon tracking detector

Maximize field between layers to increase pt resolution →

increase magnetic material between layers →

increase multiple scattering and (even worse), increase radiation probability at high energy

Vertex detectors

Conflicts

Custom integrated circuits essential for vertex detectors in HEP.

Requirements

1. low mass to reduce scattering
2. low noise
3. fast response
4. low power
5. radiation tolerance

reduction in mass ⇒ thin detector

radiation tolerance ⇒ thin detector

thin detector ⇒ less signal ⇒ lower noise required

lower noise ⇒ increased power

fast response ⇒ increased power

increased power ⇒ more mass in cabling + cooling

immunity to external pickup ⇒ shielding ⇒ mass

+ contain costs

How to deal with these conflicting requirements?

Conflicts and compromises in each subdetector and then at the global integration...

El mejor detector no es el que tiene las mejores individualidades²⁴

No solo es precisión y rapidez del detector (y para que observable?)



+Redundancia

+Minimar fracción de fallos

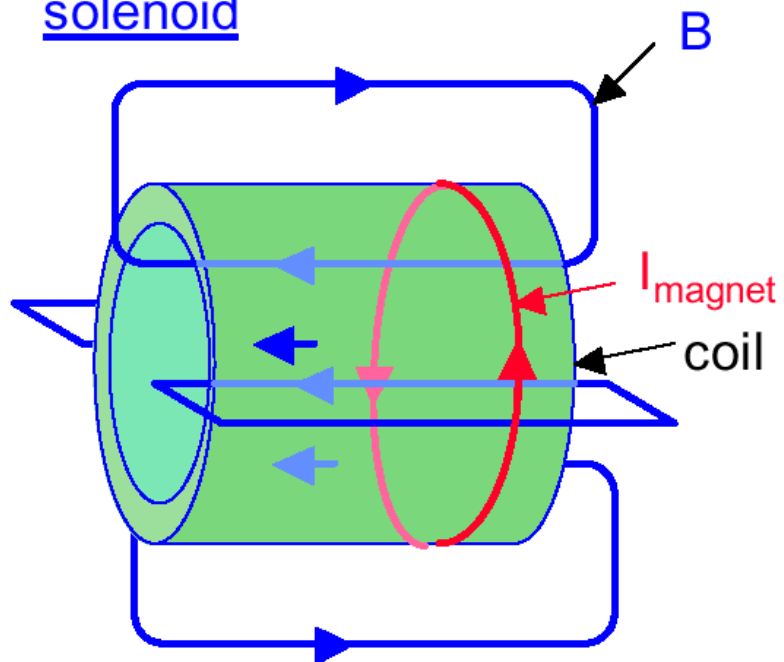
+Eficiencia de toma datos

+Hermeticidad...



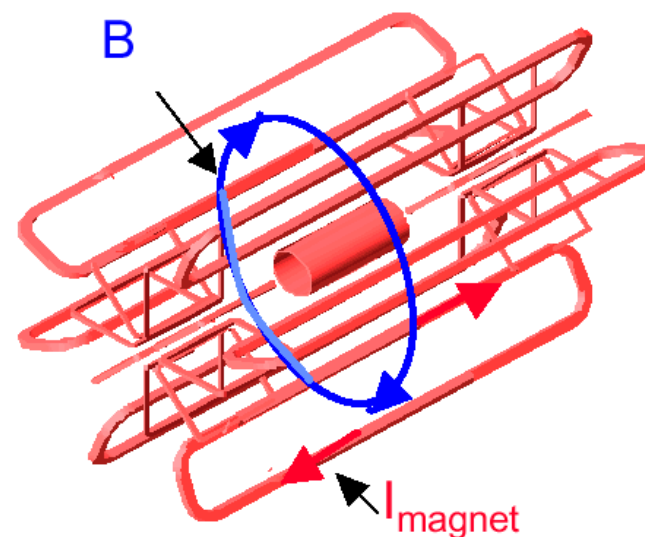
Magnetic field configurations:

solenoid



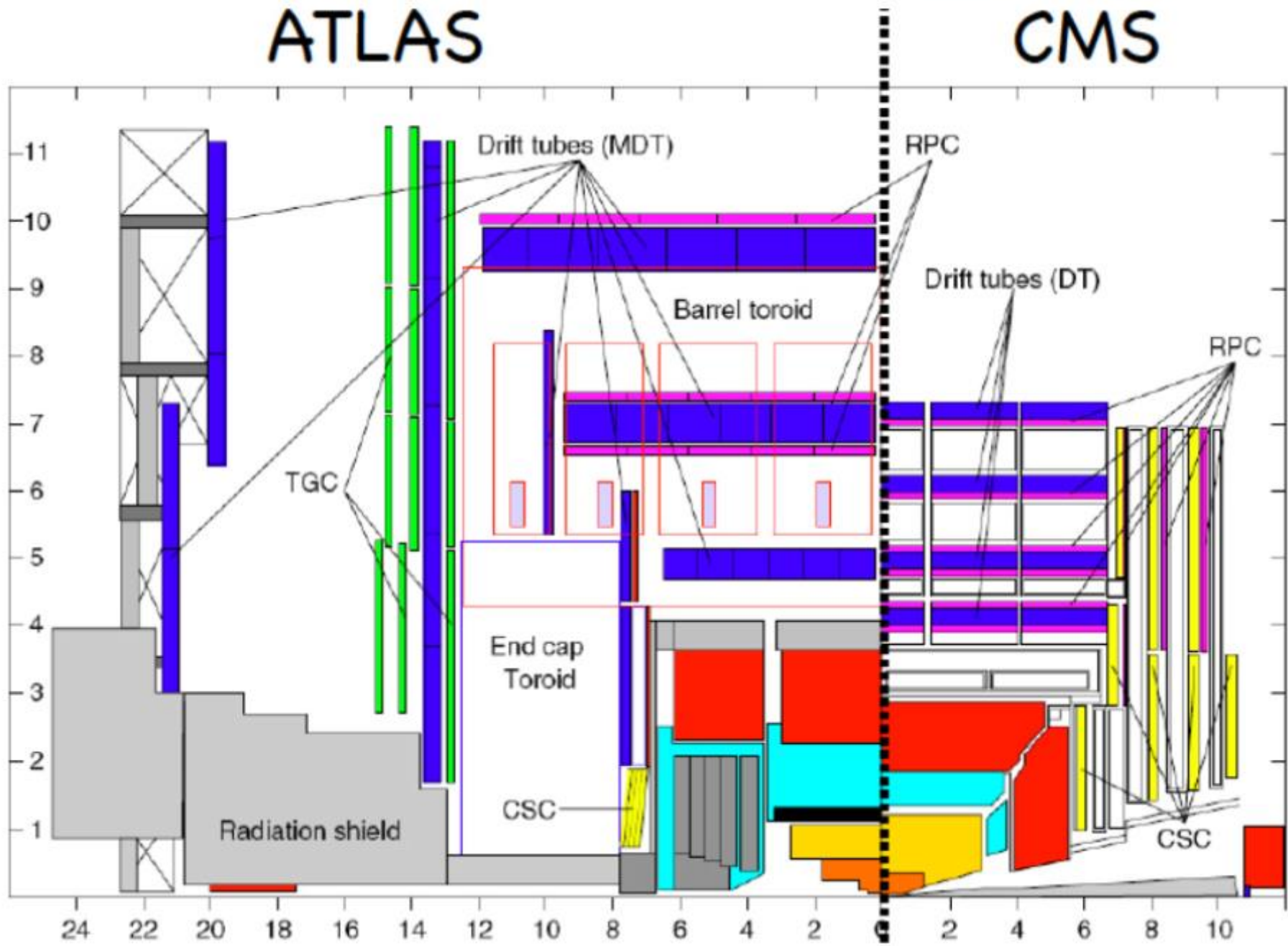
- + Large homogenous field inside coil
- Weak opposite field in return yoke
- Size limited (cost)
- Rel. high material budget

toroid



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

Dos experimentos representan un seguro



The choice of the magnet system shaped the experiments in a major way. The magnet is required to measure momenta and directions of charged particles near vertex and also to at the outer muon detectors

ATLAS choice: separate magnet systems (“small” 2 T solenoid for tracker and huge toroids with large BL^2 for muon spectrometer)

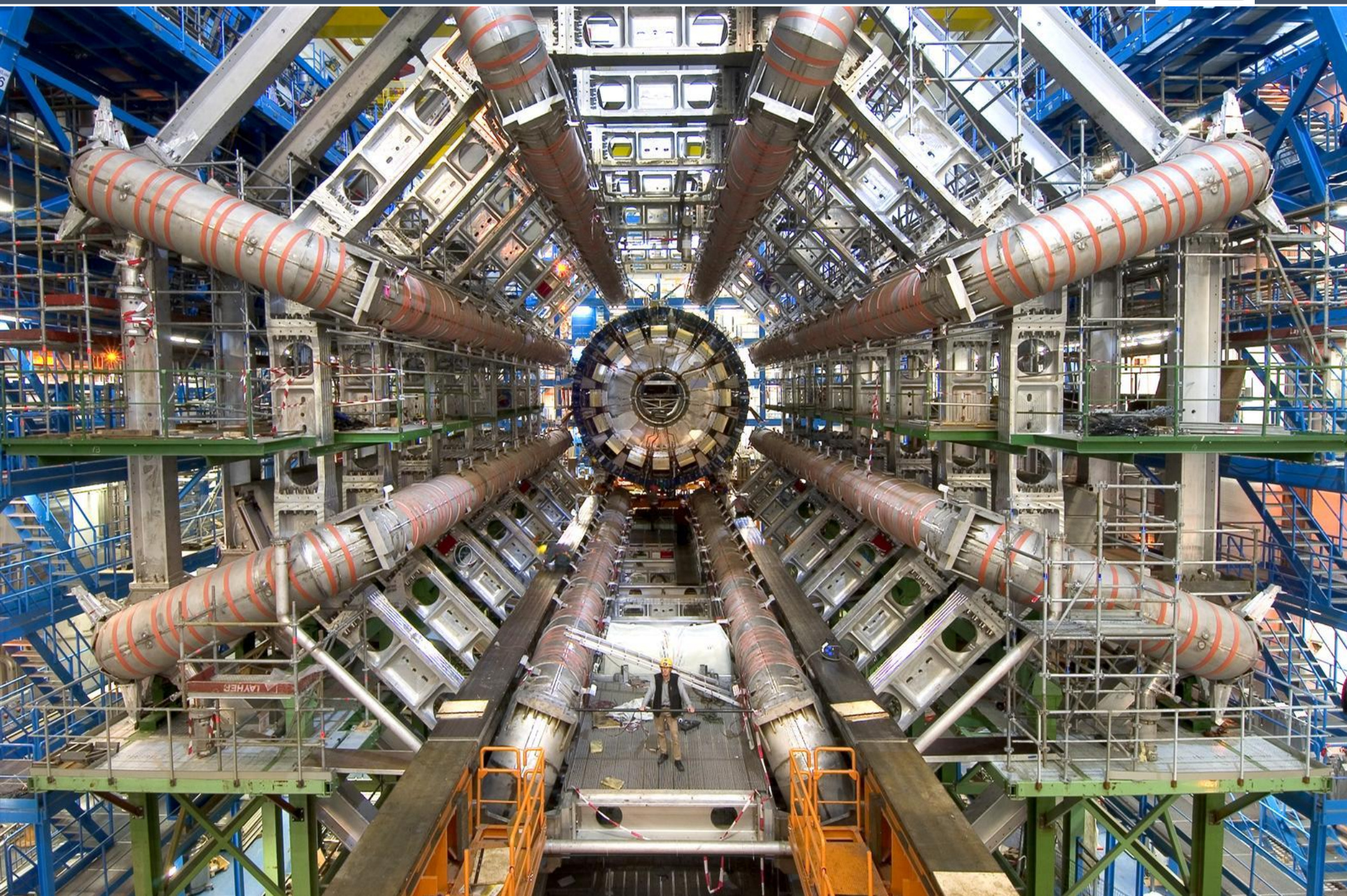
Pros: large acceptance in polar angle for muons and excellent muon momentum resolution outside, without using inner tracker

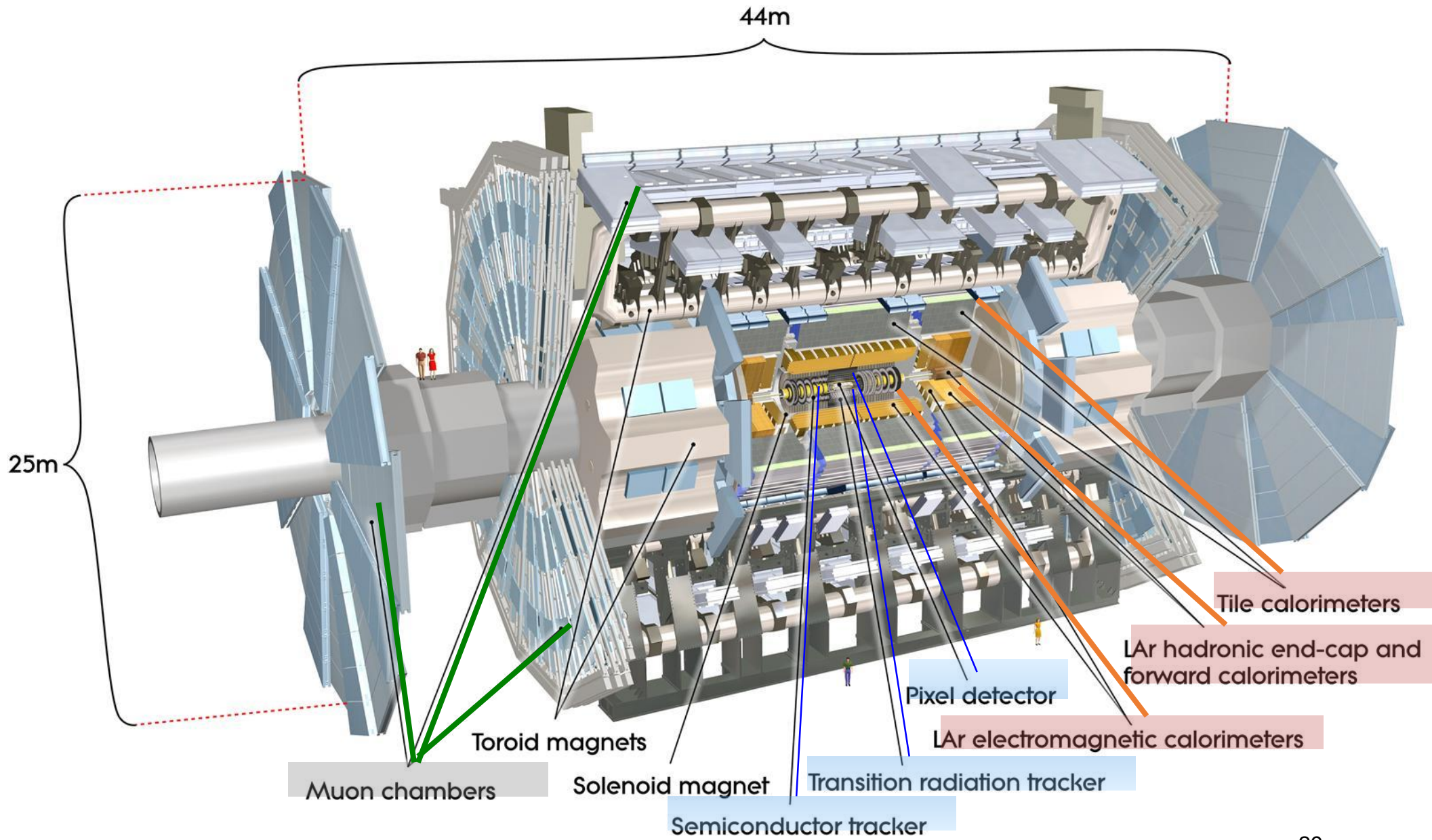
Cons: very expensive and large-scale toroid magnet system with complicated field configuration

CMS choice: one large 4 T solenoid with instrumented return yoke

Pros: excellent momentum resolution using inner tracker and more compact experiment with well defined field configuration

Cons: limited bending power for endcap and limited space for calorimeter inside coil







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

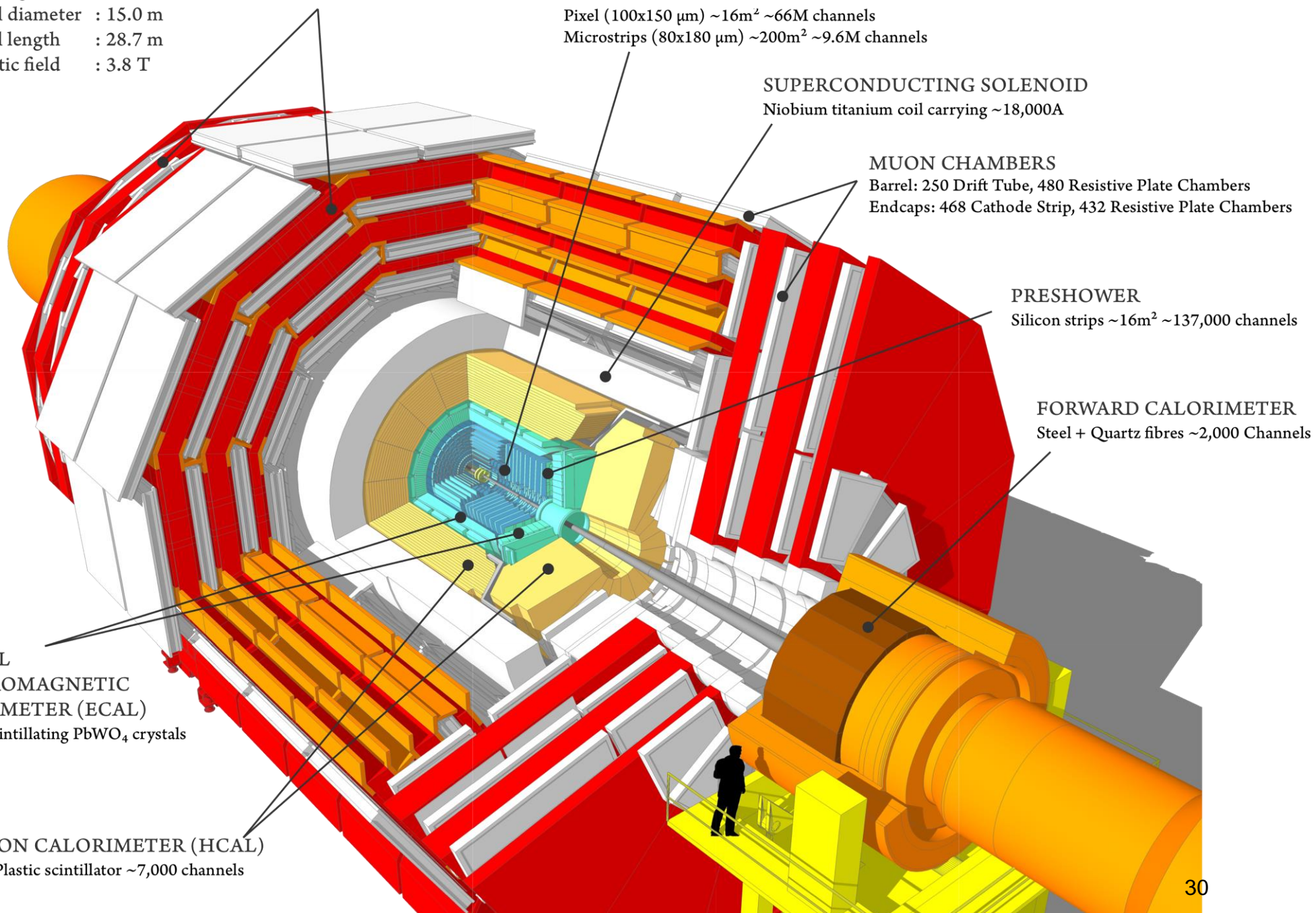
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

CRYSTAL
ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)

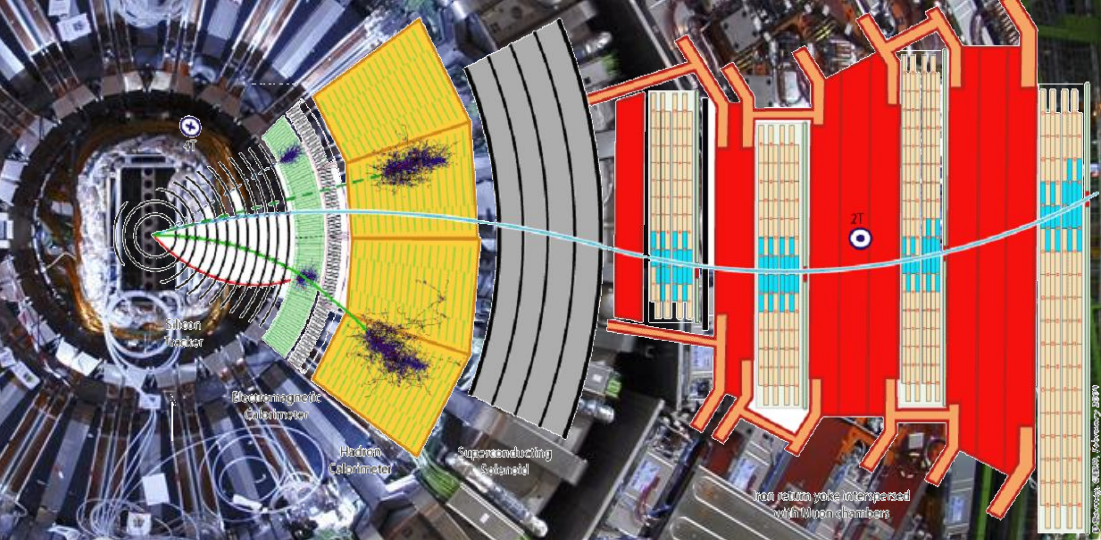
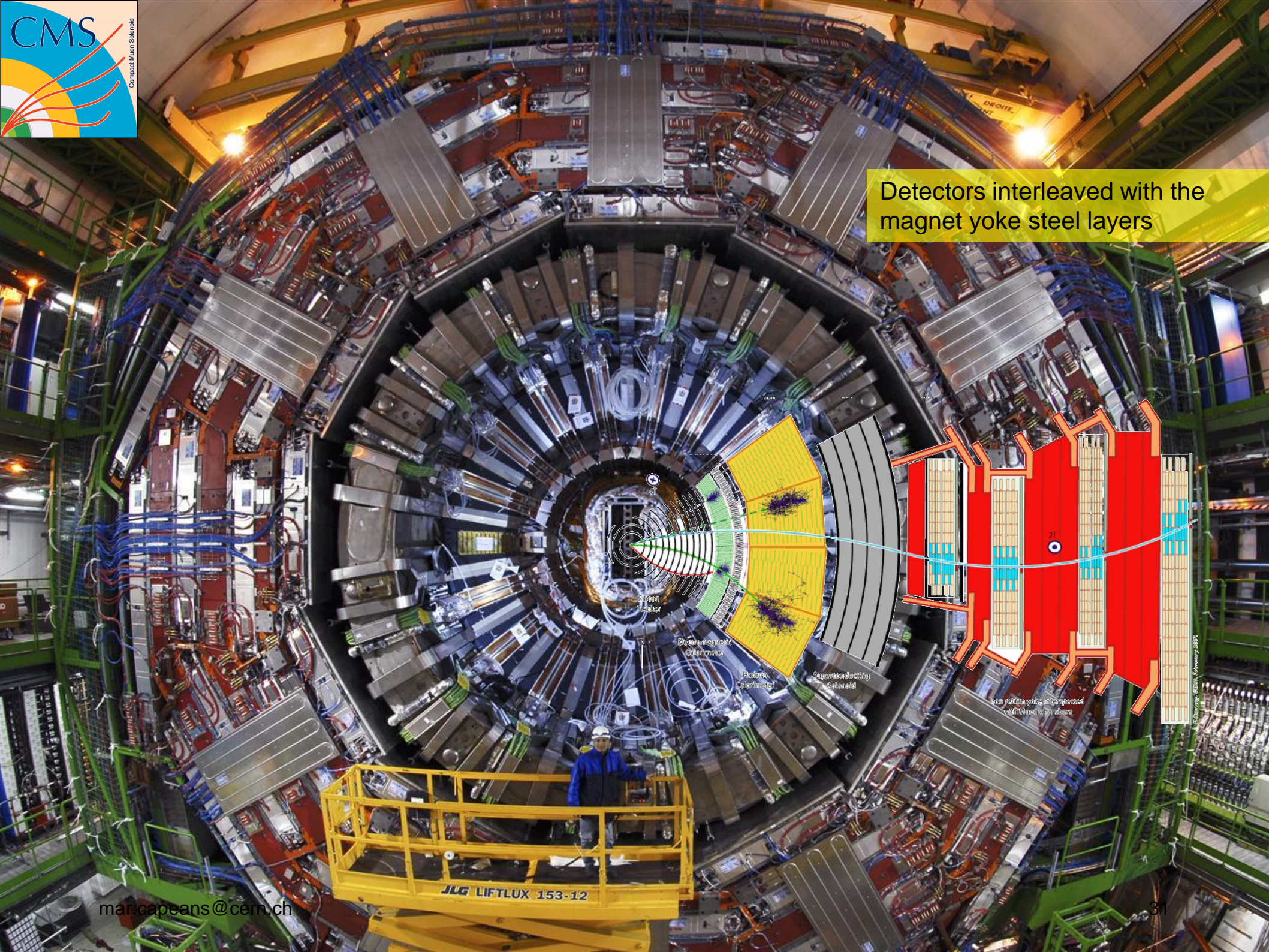
$\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

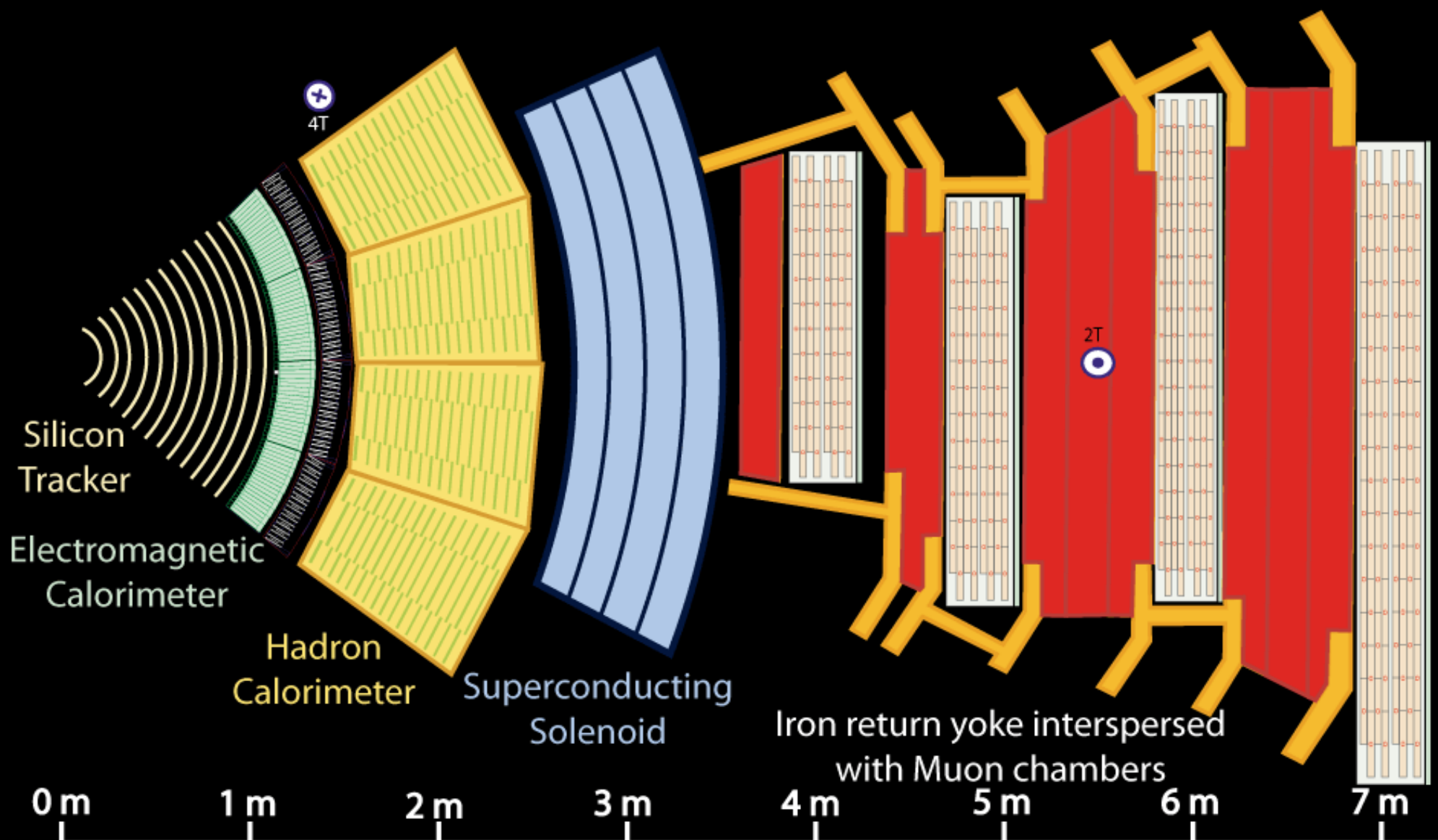
HADRON CALORIMETER (HCAL)

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



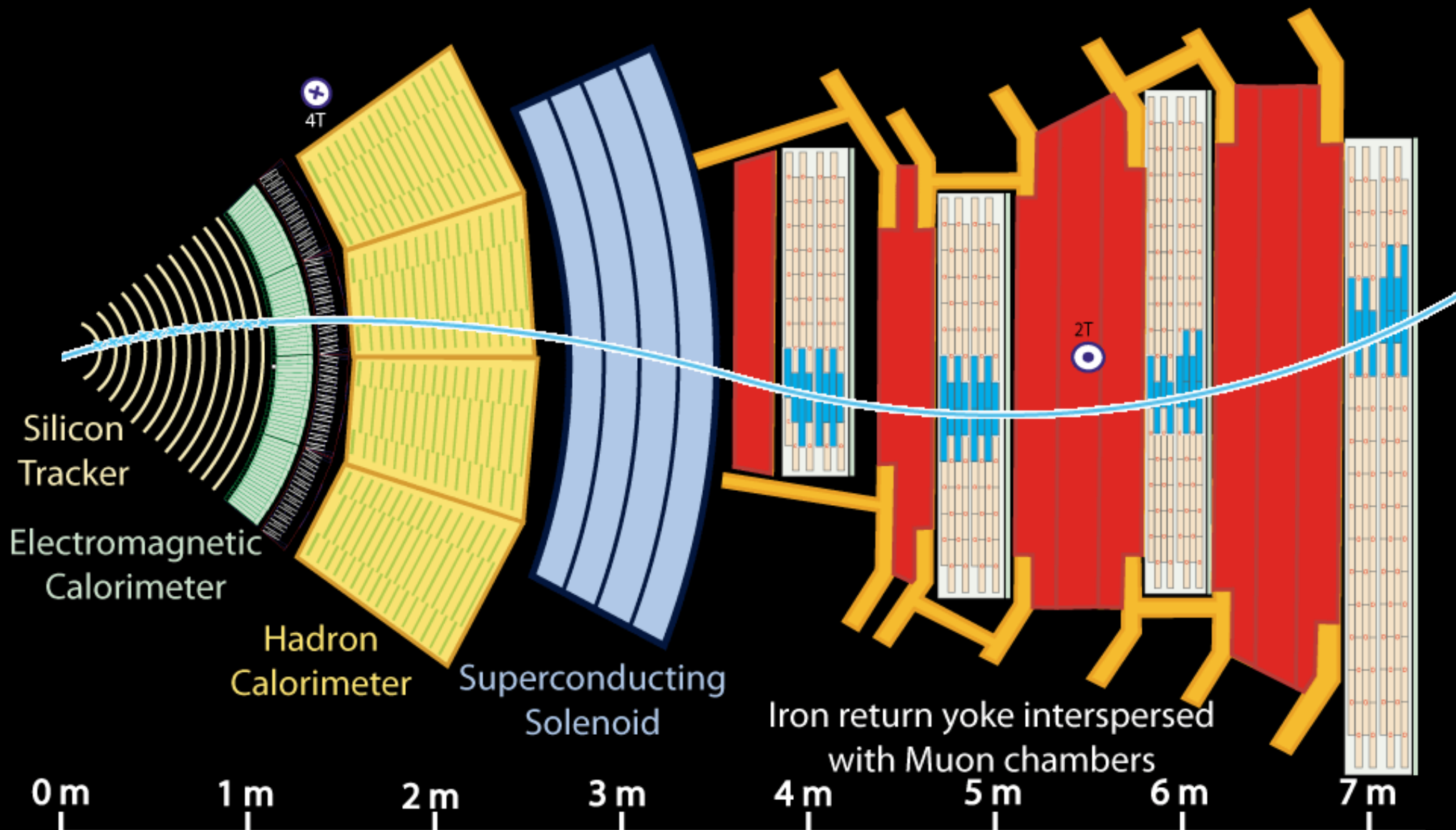
Detectors interleaved with the magnet yoke steel layers





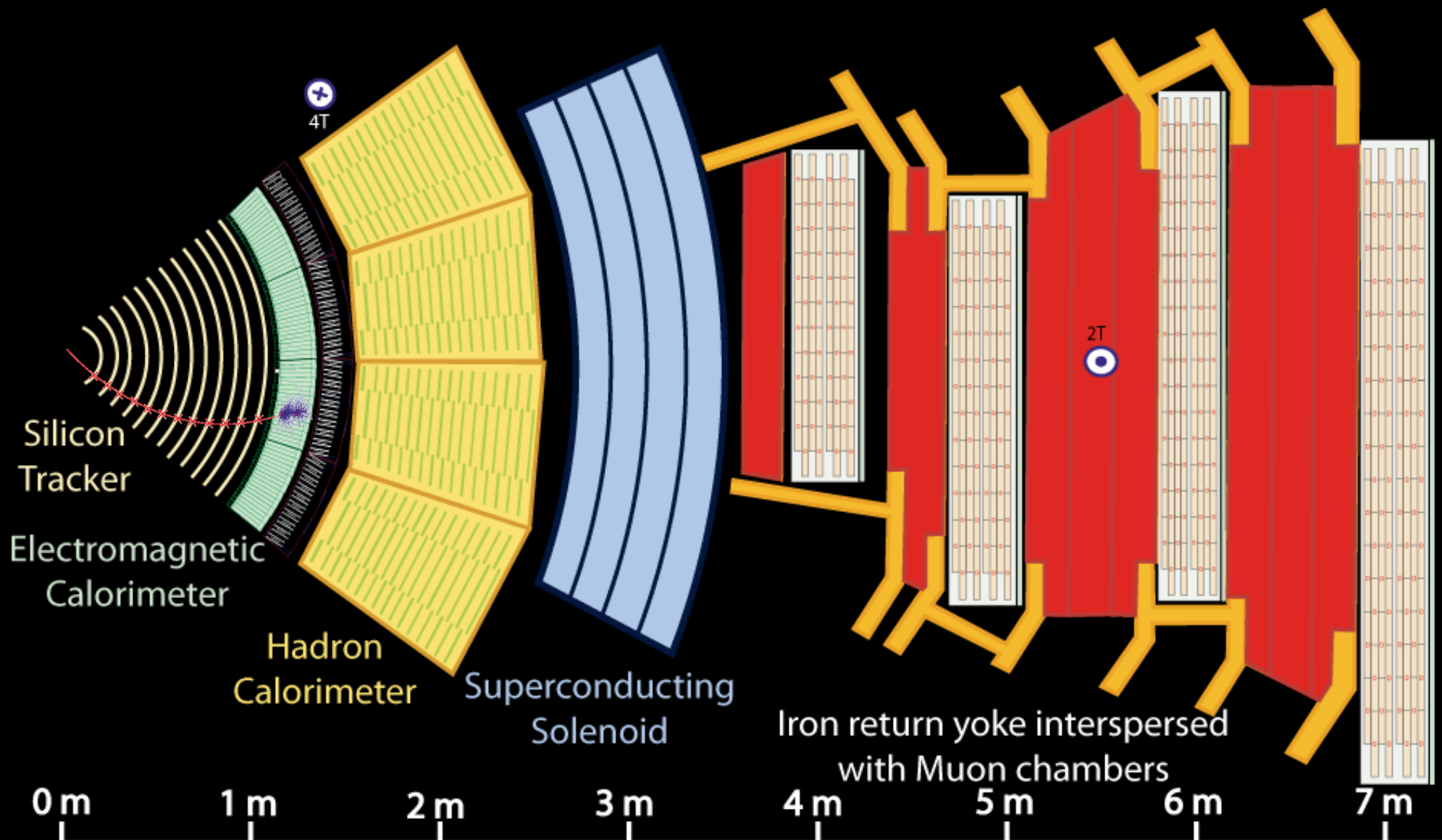
Key:

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



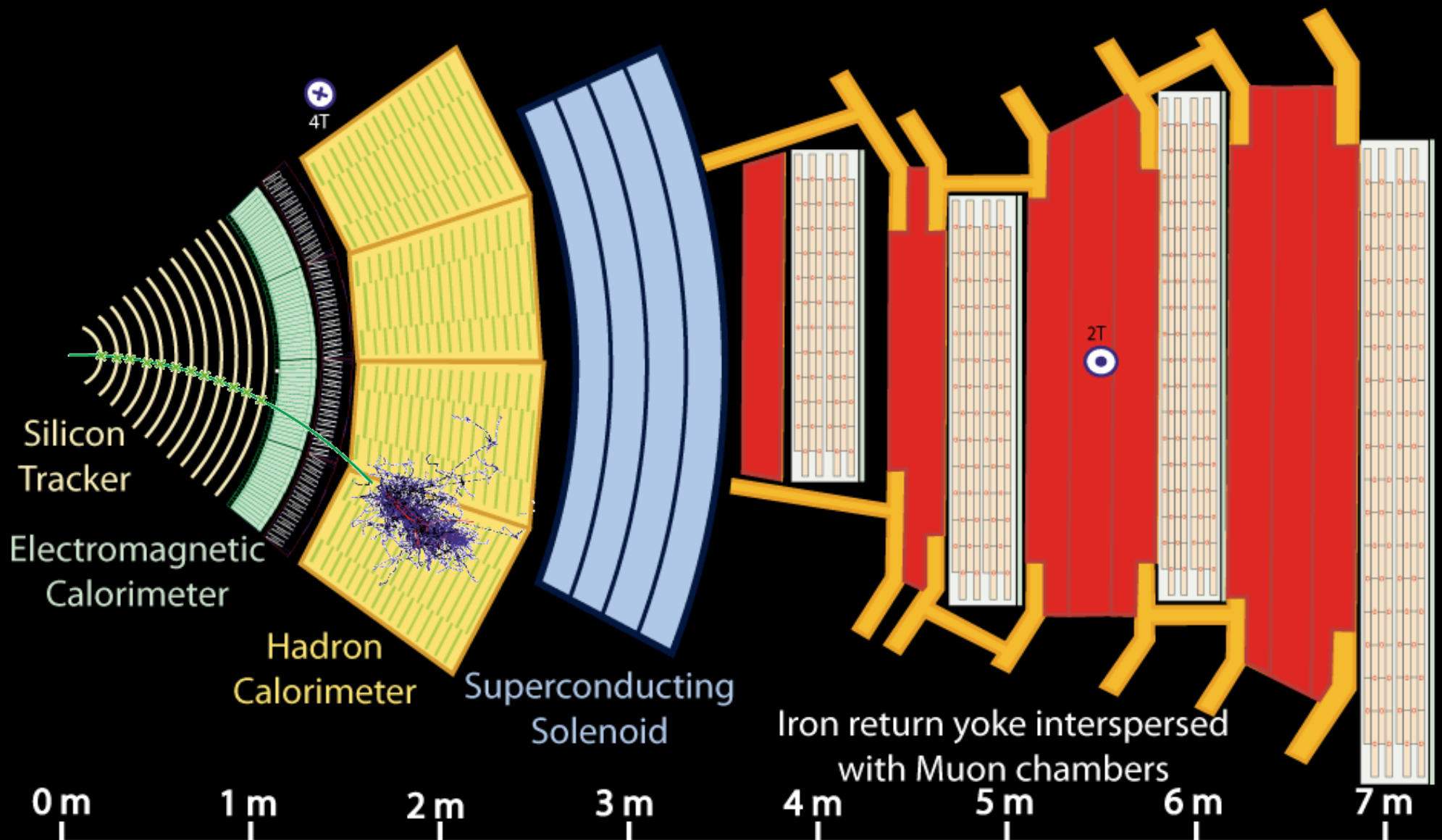
Key:

- 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:

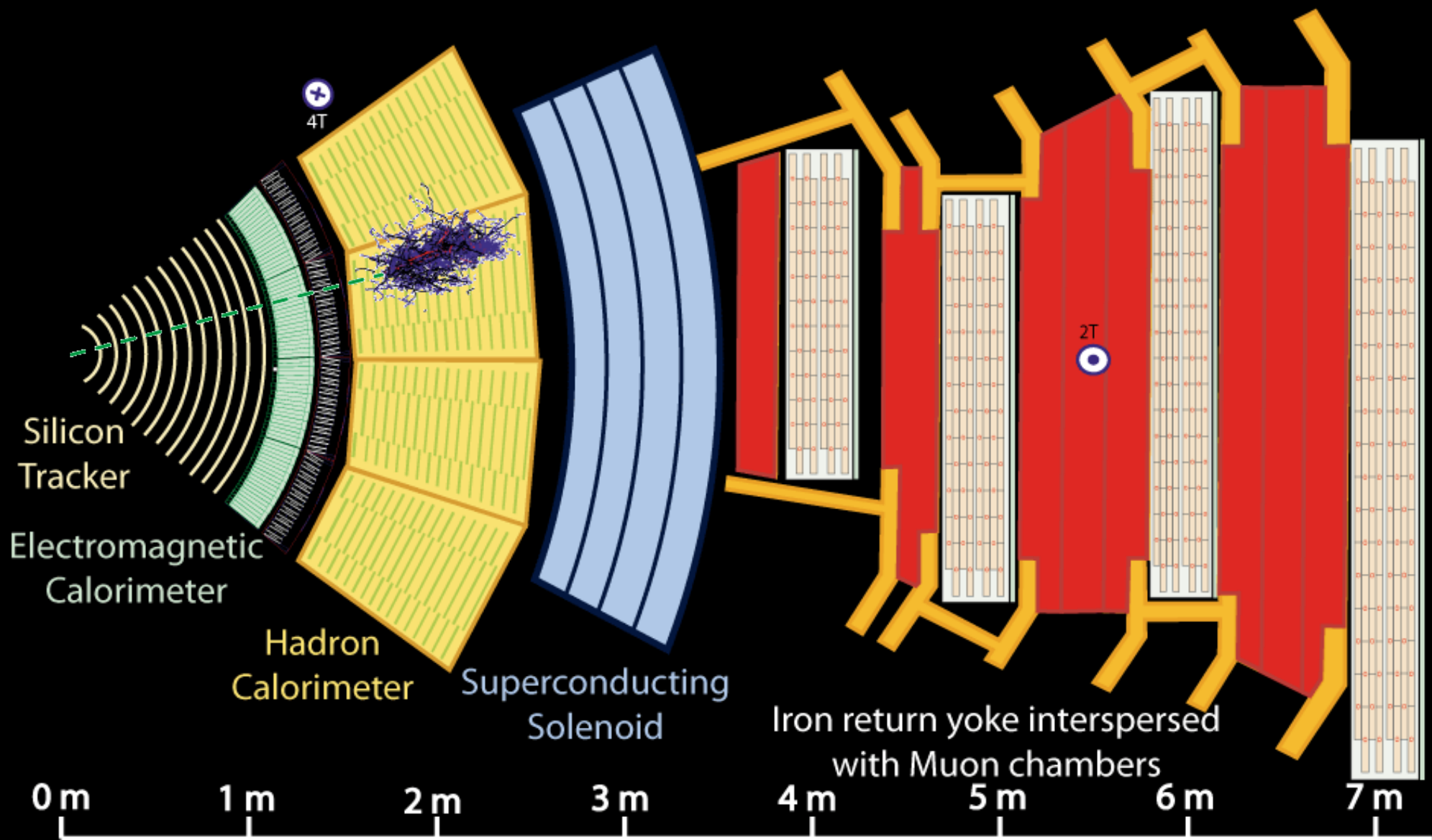
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

- - - Photon



Key:

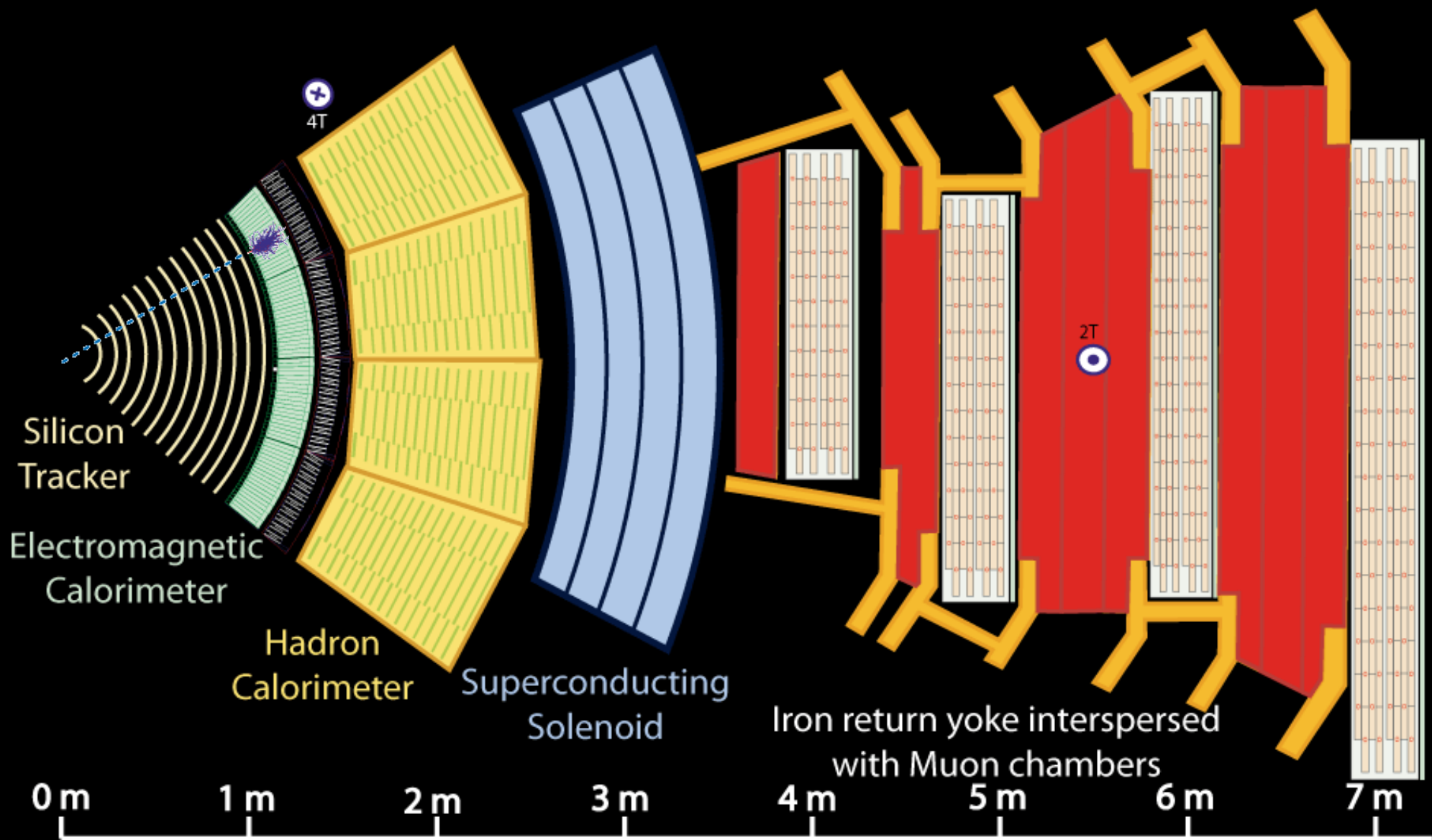
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

- - - Photon



Key:

— Muon

— Electron

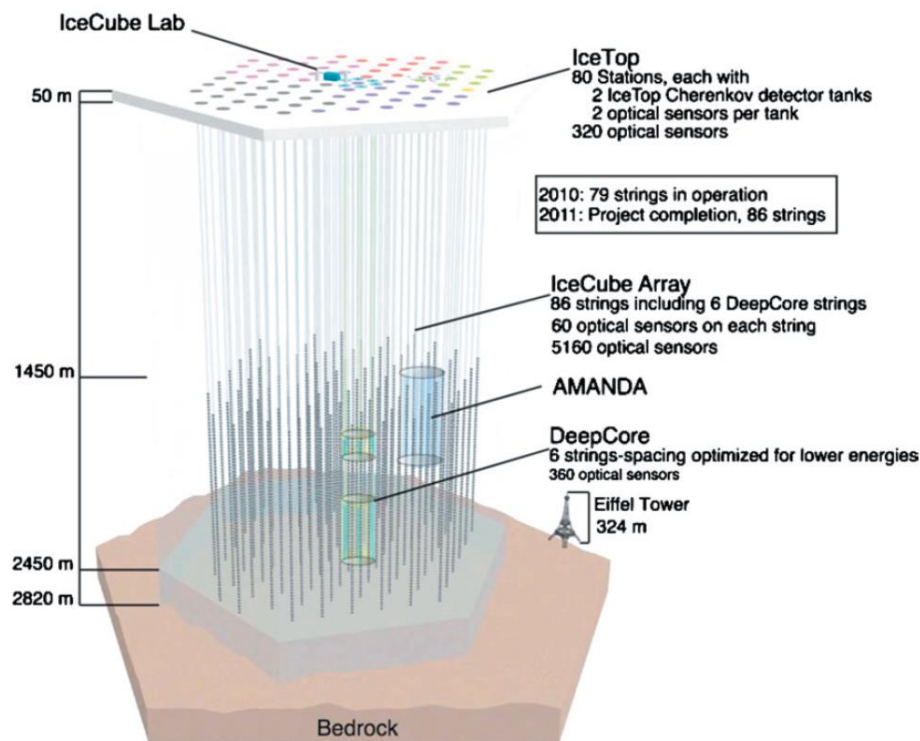
— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

- - - Photon



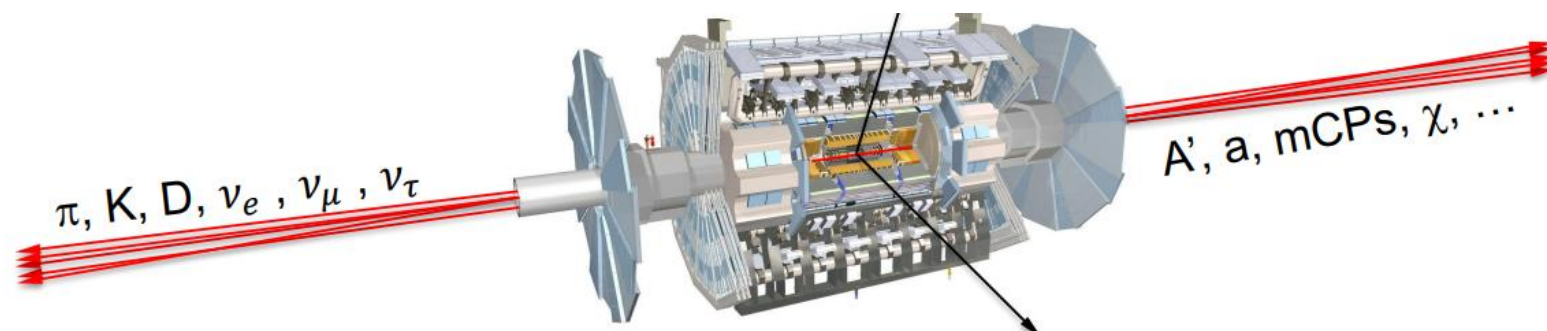
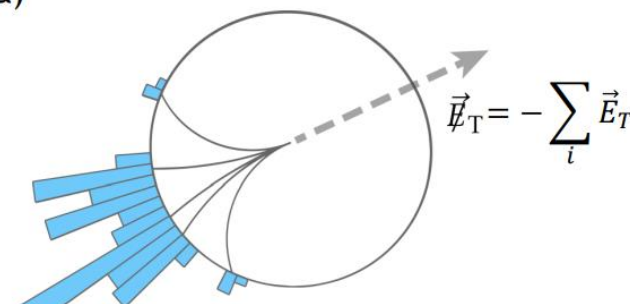
- No tienen carga eléctrica, ni fuerte, solo interaccionan débilmente.
- Para detectar directamente los neutrinos se necesita áreas de detección muy masivas:
 - Gigantescos tanques subterráneos : Kamiokande, DUNE
 - En el mar : Antares
 - En el hielo de Antartida : icecube



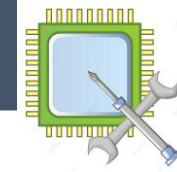


- En colisionadores la presencia de neutrinos se identifica indirectamente imponiendo conservación del momento transverso
- También hay observables cuyo valor depende del número de partículas invisibles en los que puede decaer (anchura del Z)

En experimentos como los del LHC, **detectores herméticos** pueden detectar neutrinos **indirectamente** (la energía se conserva)

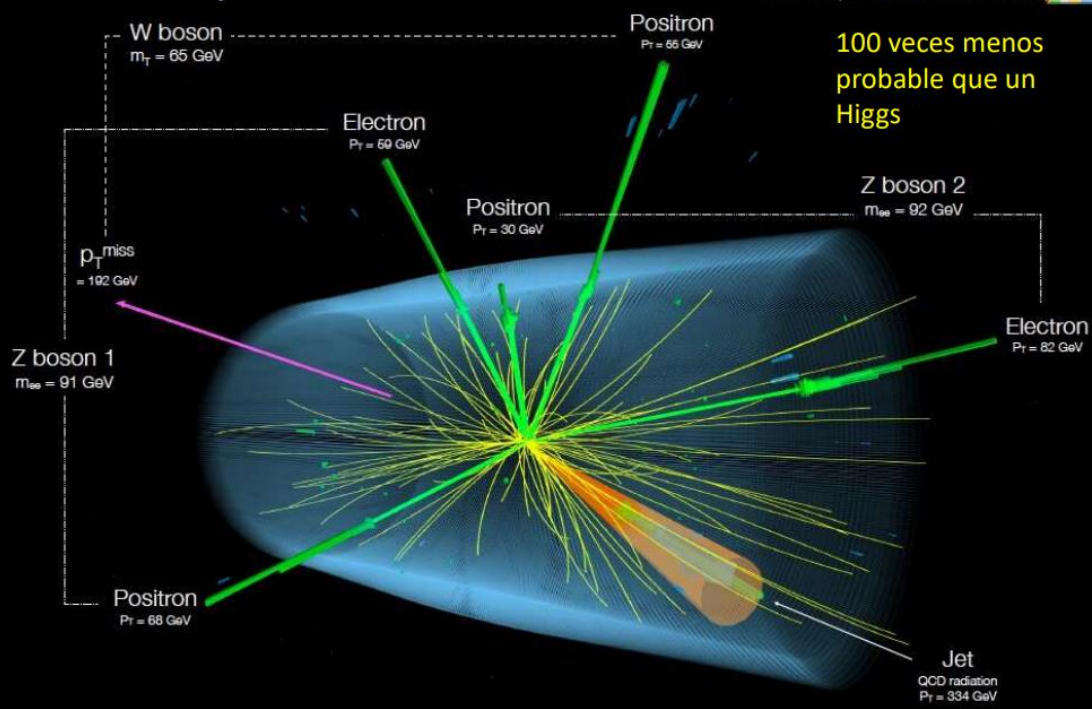


- Se escapa un gran flujo de neutrinos por el tubo de haz, (una pequeña fracción) de estos se acaban de detectar un experimento situado a unos cientos de m de distancia de Atlas: FASER



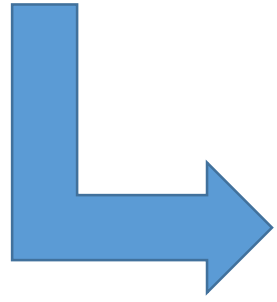
40 Millones de cruces x 60-200 eventos-cruce

- ... pero la mayoría de los eventos no son interesantes
 - (y hasta ahora no teníamos dinero/tecnología para tenerlo todo escrito en disco)
- Por lo general, el sistema electrónico de disparo proporciona una decisión en línea de qué eventos conservar en función de una muestra "astuta" de la información disponible en el detector
- Solían ser valores analógicos simples (para evitar la digitalización)
 - Hoy disparamos con operaciones digitales complejas gracias a FPGA
- Utilizado en detectores relativamente rápidos: calorímetros y muones
 - Se está trabajando en la utilización de detectores de traza
- Alternativamente, la tecnología de red comercial actual empieza a permitir leer TODO y analizarlo en granjas de pc
 - Sistema sin disparo



100 veces menos probable que un Higgs

“Reconstruir el evento” es pasar de los “objetos” identificados (fotones, electrones, muones, trazas de articulas cargadas y jets en el calorímetro a las partículas del modelo estándar



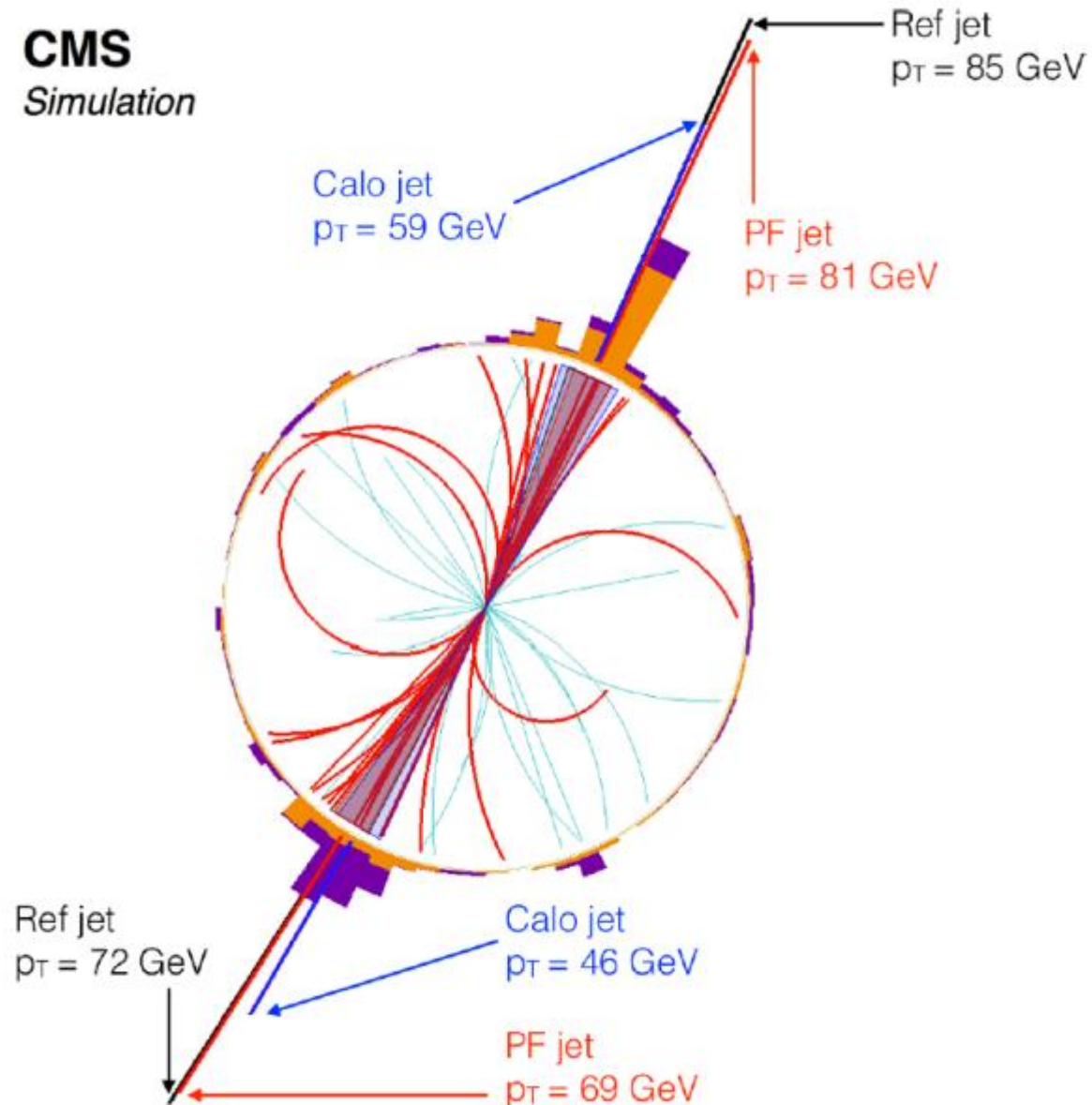
Buscamos sucesos raros, de ahí que se requieran muchas colisiones: a dia de hoy superponemos unas 60 en cada evento

26/06//2023

	charge → 2/3 spin → 1/2	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS		d down	s strange	b bottom	γ photon	
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	GAUGE BOSONS

“Particle Flow” combina la excelente resolución en momento de las trazas para partículas cargadas con la medida calorimétrica y distingue la diferente respuesta de los muones.

Campo fértil de aplicación de aprendizaje automático y en general técnicas de minado de datos.



Como serán los detectores del futuro?

- High Lumi-LHC representa un desafío para los detectores, que ya están en su fase de producción
 - Mayor tasa de colisiones → Mas eventos superpuesto por cruce
 - Mayor radiación
 - Mayor tasa de datos que leer del detector y luego procesar
- Detectores de trazas mas resistentes a la radiación
- Se apuesta por el uso de medidas temporales mas precisas para separar los eventos superpuestos.
- Se intenta mejorar la inteligencia online para aplicar las técnicas mas precisas que anteriormente solo se usaban en el análisis de datos, incluyendo el uso de las trazas en el disparo de primer nivel

Institutos Españoles involucrados en mejoras de detectors en LHC

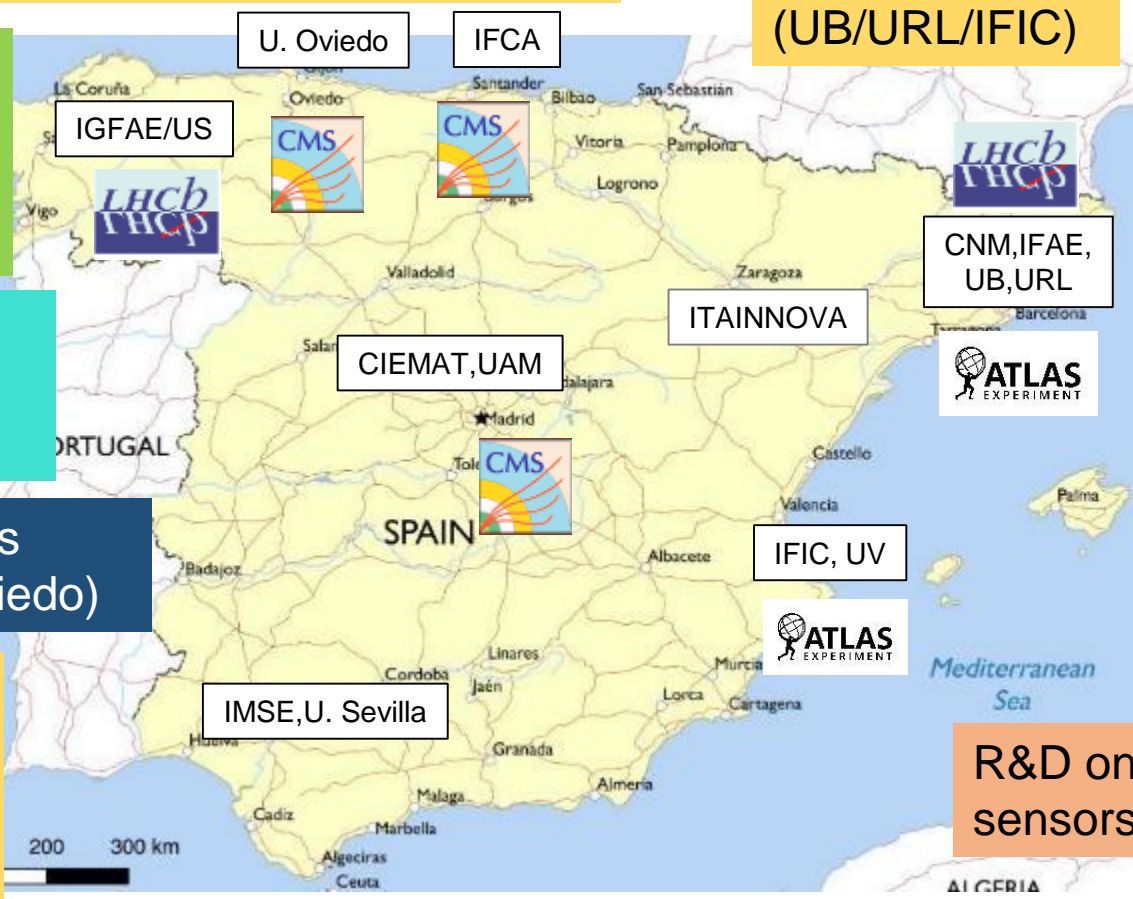
Contribuciones significativas en LHCb (VELO, SciFi & CALO upgrade projects), Atlas (Strip Tracker, Pixel, HGTD, TileCal upgrade project) y CMS (Pixel, ETL, Muon and Trigger upgrade projects.)

High performance backend electronics systems (IFIC/UV, IGFAE/US, CIEMAT)

Design and QA of ASICs (UB/URL/IFIC)

Silicon sensors modules (HDI, ROC and Sensors) production and integration (IFIC, CNM, IGFAE/US, IFAE IFCA/ITAINNOVA/ U. Sevilla)

Studies on gaseous detectors at high radiation (CIEMAT/ U. Oviedo)



CMS chambers shielding (CIEMAT)

New trigger algorithms (CIEMAT/UAM/U. Oviedo)

Design and production of new on detector radiation tolerant electronics (CIEMAT)

Design and production of precise tracker mechanics (IFIC)

R&D on novel silicon sensors (CNM, IFAE, IFCA)

R&D on Power systems (IFCA/ITAINNOVA/ U. Sevilla)

R&D on silicon sensors for timing applications (CNM, IFCA, IFAE)

R&D on pixel system high density interconnections (IFCA/ITAINNOVA)

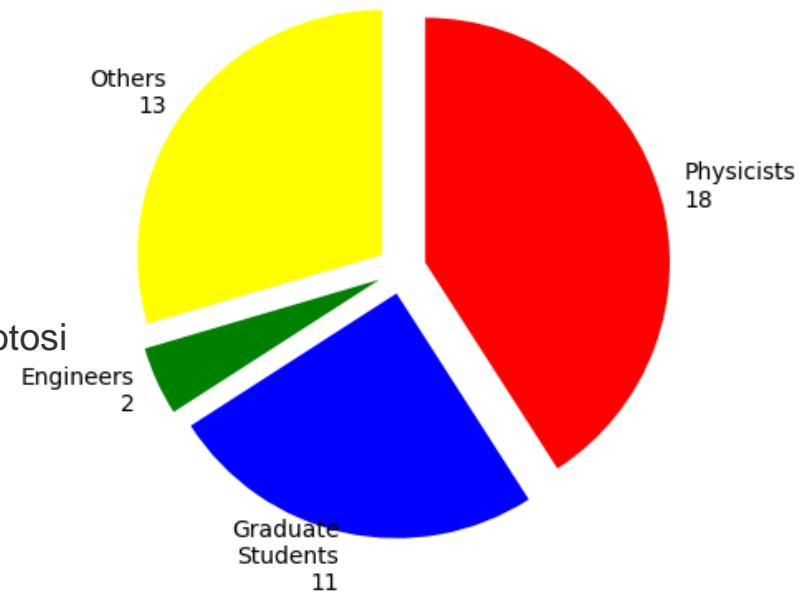
México en el CERN

- Físicos mexicanos individuales han estado trabajando en experimentos en el CERN desde UA1 (en la década de 1980). Varios institutos han estado participando en ALICE y otros institutos se han unido a CMS, NA62, AMS y experimentos en ISOLDE (Física nuclear)
- En [CMS](#), construyen cámaras de muones RPC (Resistive Plate Chambers).
 - Han liderado pruebas de irradiación de las mismas (Salvador Carrillo, Cecilia Uribe)



26/06//2023

I. Redondo

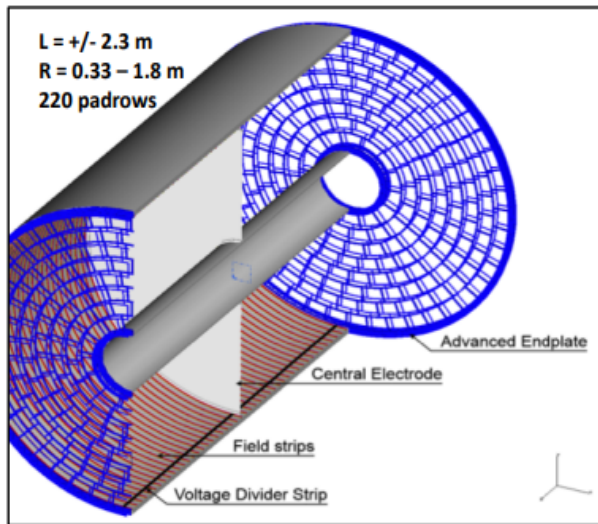


Como serán los detectores del futuro colisionador e+e-?

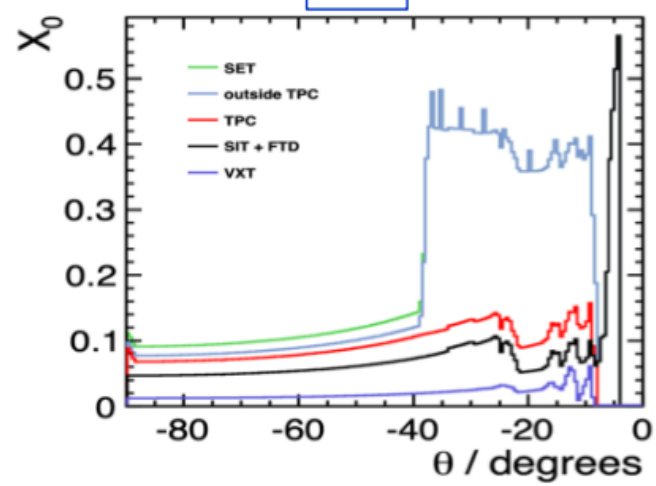
Mogens Dam / NBI Copenhagen CERN EP Seminar on Future Colliders

Tracking systems and material budgets

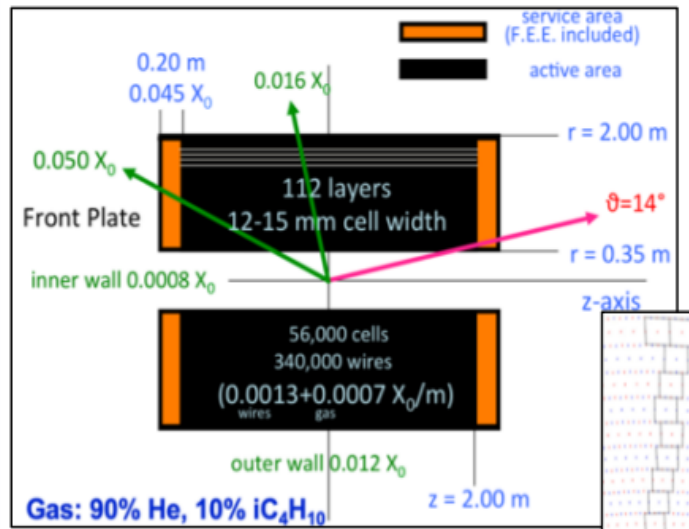
ILD TPC



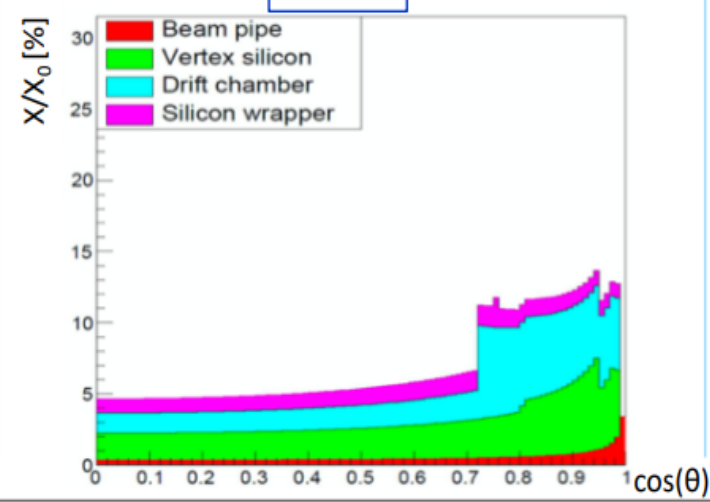
ILC TDR



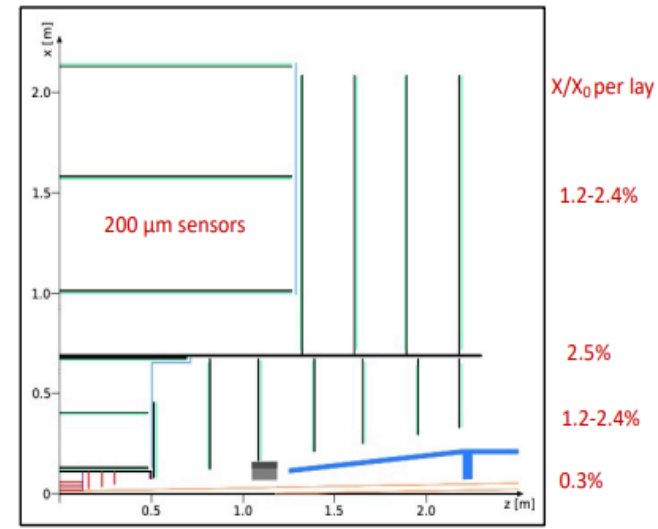
IDEA Drift Chamber



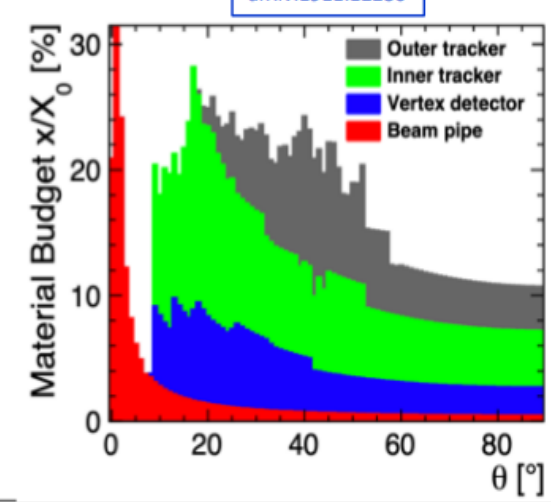
FCC-ee CDR



CLD - Full Silicon tracker

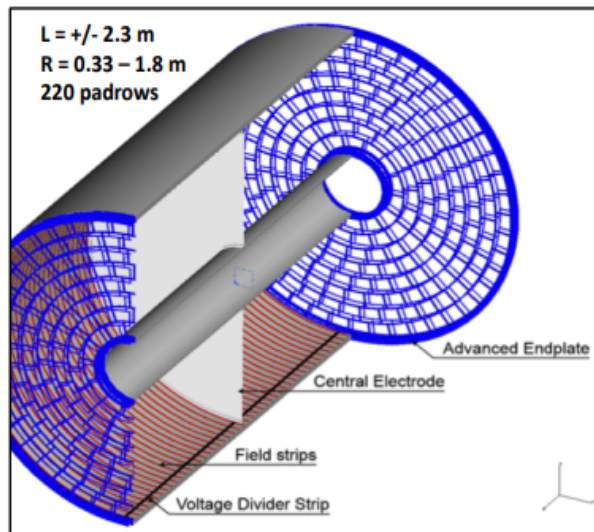


arXiv:1911.12230



Tracking systems overview

ILD TPC



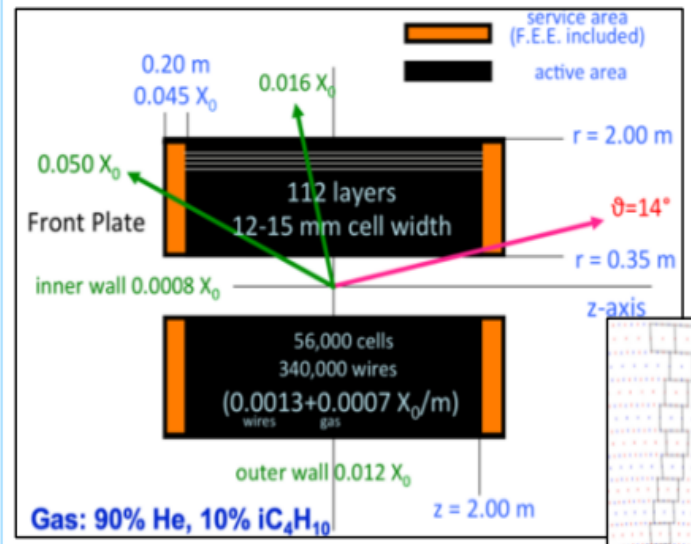
Pros:

- Low material budget (in barrel)
- Proven technology, e.g. aleph and delphi at LEP
- Continuous tracking; advantage for secondary vertex finding
- Particle ID via dE/dx measurement

Challenges:

- Not obvious if can be operated at $\sim 100 \text{ kHz}$ FCC-ee physics rate

IDEA Drift Chamber



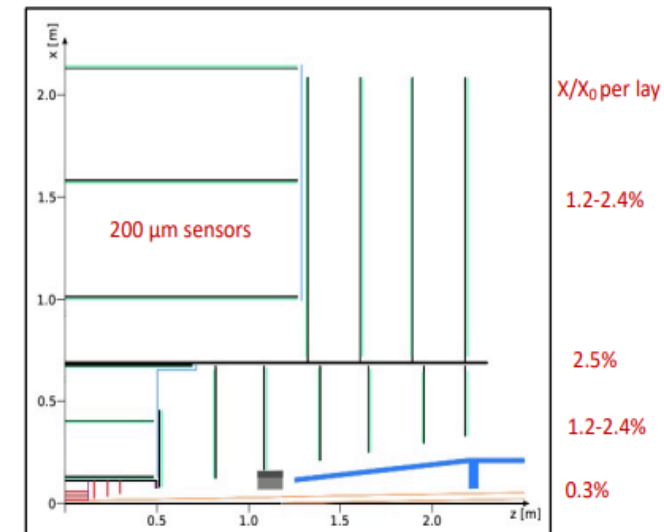
Pros:

- Very low material budget
- Proven technology: KLOE at DaΦne
- Continuous tracking; advantage for secondary vertex finding
- Particle ID via dE/dx (dN/dx) measurement

Challenges:

- Need to prove operation at $\sim 100 \text{ kHz}$ FCC-ee physics rate and realistic backgrounds via full simulation studies

CLD - Full Silicon tracker



Pros:

- Very precise space points
- Proven technology, e.g. LHC detectors
- No gas system

Challenges:

- No precise Particle Identification
 - Possibly TOF
- Optimisation of sensor thickness for lower material budget
- Design of (light) cooling system for operation at continuous collisions

Como serán los calorímetros del futuro colisionador e+e-?

CALICE,
(también noble líquido con alta granularidad)

IDEA,
Calorimetria dual

Optimised for PFA:

- Very fine resolution "Imaging Calorimeters"
 - Linear Colliders: [ILD](#), [SiD](#), [CLICdp](#)
 - Circular Colliders: [CLD](#), [CEPC Baseline](#)

Example, CLD

HCAL

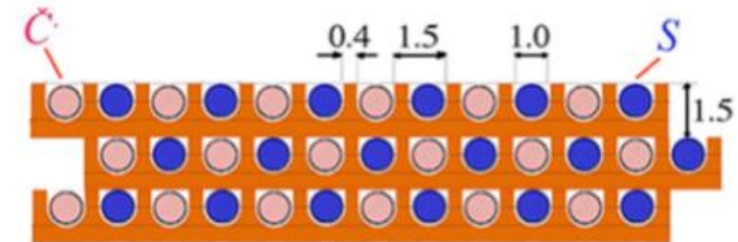
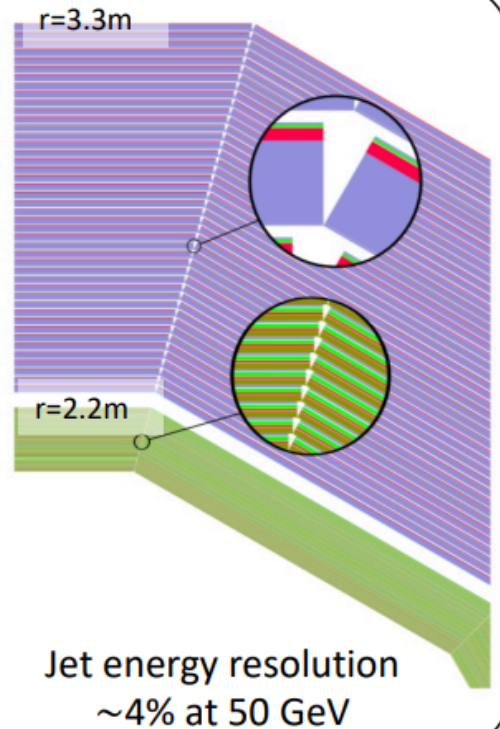
- 44 layers, 19 mm steel absorber, 5.5 (+1) λ
- 3 mm thick scintillator tiles with 3 × 3 cm² granularity

ECAL

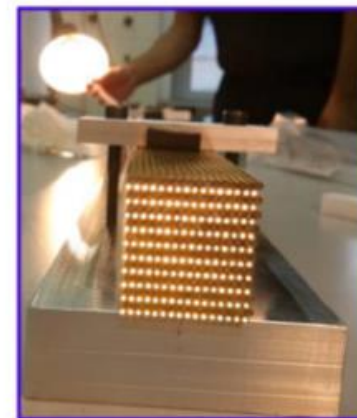
- 40 layers, 1.9 mm tungsten absorbers, 22 X_0
- 0.5 mm thick silicon sensors with 5 × 5 mm² granularity

$$\frac{\sigma}{E} \approx \frac{16\%}{\sqrt{E}}$$

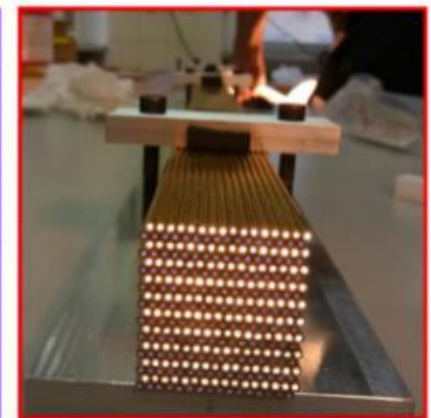
- Optimisation studies ongoing



- Measure simultaneously:
 - Scintillation signal (*S*)
 - Cherenkov signal (*C*) (mainly from e^{+/-})
- Calibrate both signals with e⁻
- Unfold event-by-event using *C* and *S* signals to obtain energy corrected for non-compensation ($h/e < 1$)



Scintillation fibers



Cherenkov fibers

- Históricamente los desarrollos instrumentales han sido la base de descubrimiento científicos.
 - Por otro lado los desarrollos instrumentales ocurren espoleados por desafíos científicos.
- La instrumentación para detectores de partículas son tecnologías de nicho que innovan en su campo nutriéndose de desarrollos en la industria.
 - A posteriori hay un camino de vuelta de aplicaciones comerciales.
- Los detectores del LHC son únicos, artesanía a nivel industrial, condensan el saber-hacer de generaciones de físicos, ingenieros y técnicos.
 - Hay muchos otros experimentos y detectores, que apenas he tocado.

- Charlas de detectores de este programa en años precedentes
 - Mar Capeans, Cristina Fernandez, Silvia Goy, Santiago Folgeras.
- Cursos específicos, en profundidad :
 - Daniela Bortoletto's CERN summer student lecture <https://indico.cern.ch/event/243645/>
 - Werner Riegler CERN Lectures <https://indico.cern.ch/event/266879/>
 - Helmut Spierer Tutorials <http://www-physics.lbl.gov/~spieler/>
- Libros de referencia de detectores:
 - Semiconductor Radiation Detectors - Device Physics, G.Lutz, Springer
 - Gaseous Radiation Detectors, F.Sauli, Cambridge University Press, 2014
 - Calorimetry, R. Wigmans, Oxford Science Publications, 2000