Experimentos de colisionadores

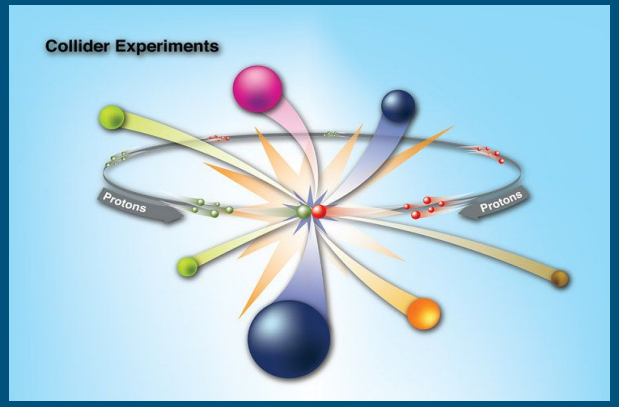
Jesús Puerta Pelayo

Programa CERN para profesorxs españolxs – *Junio 2022*

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
Ciemat Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
cfp CIEMAT física de partículas

Aceleradores para investigar en altas energías

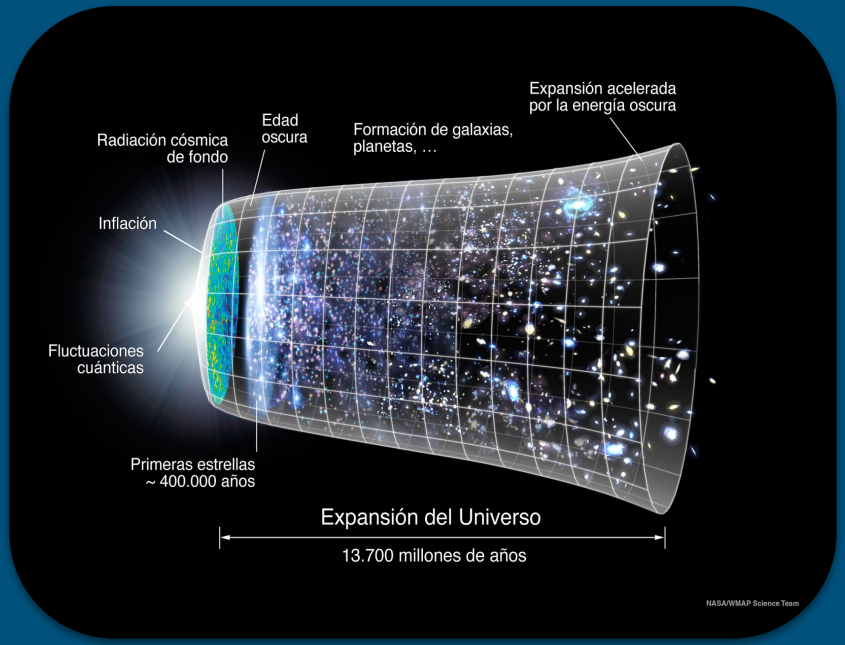
Máquinas desarrolladas para **investigación básica**, con innumerables aplicaciones.



En investigación básica creamos de forma controlada **estados de alta energía** en laboratorio colisionando partículas (elemantales o no)

Su **energía cinética** se utiliza para explorar regímenes de alta energía.

Para eso se ACELERAN

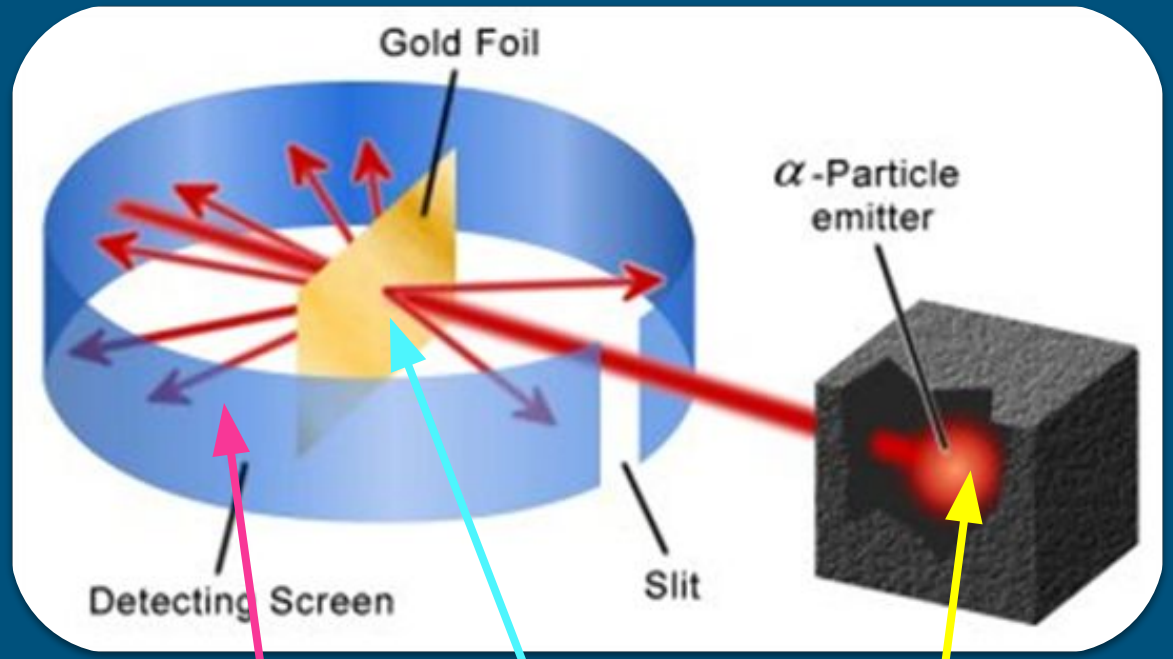


El descubrimiento de nuevas partículas pasa por la capacidad de contar con energía suficiente para poder **crearlas.**

Los colisionadores son una de las **principales herramientas** con las que contamos para experimentar en física de partículas

Los colisionadores repiten lo que la Naturaleza nos proporciona, pero de forma controlada, con mayor intensidad y mayor frecuencia

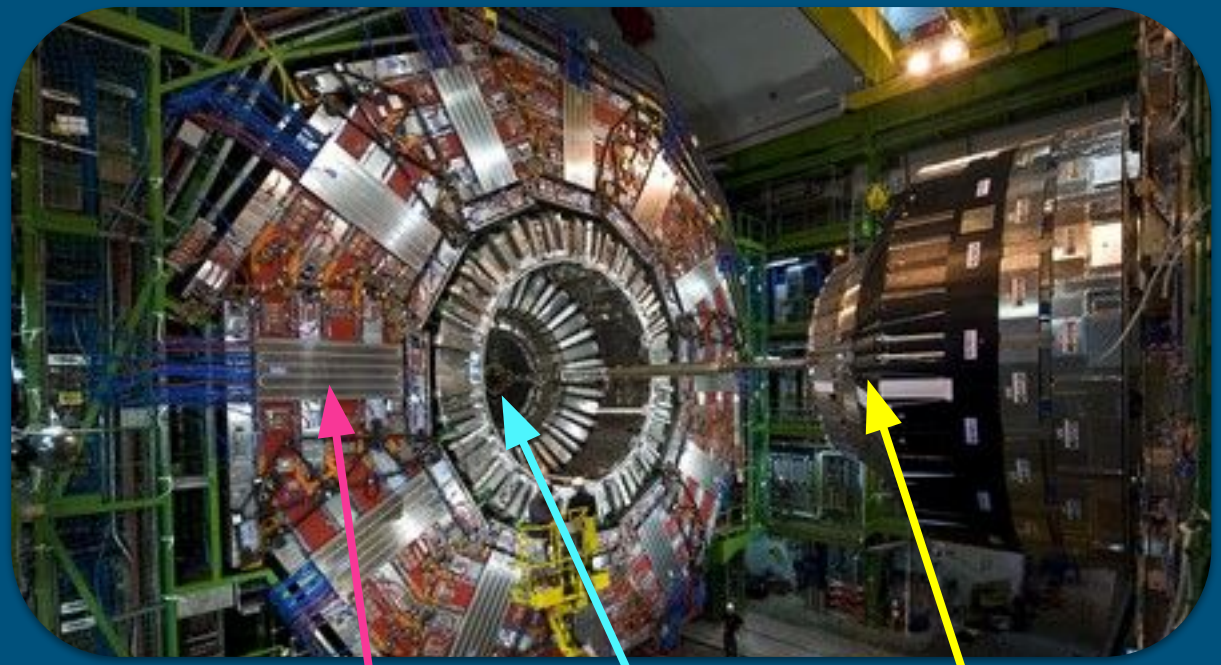
Los experimentos de LHC



“Acelerador”

Colisión

Detector

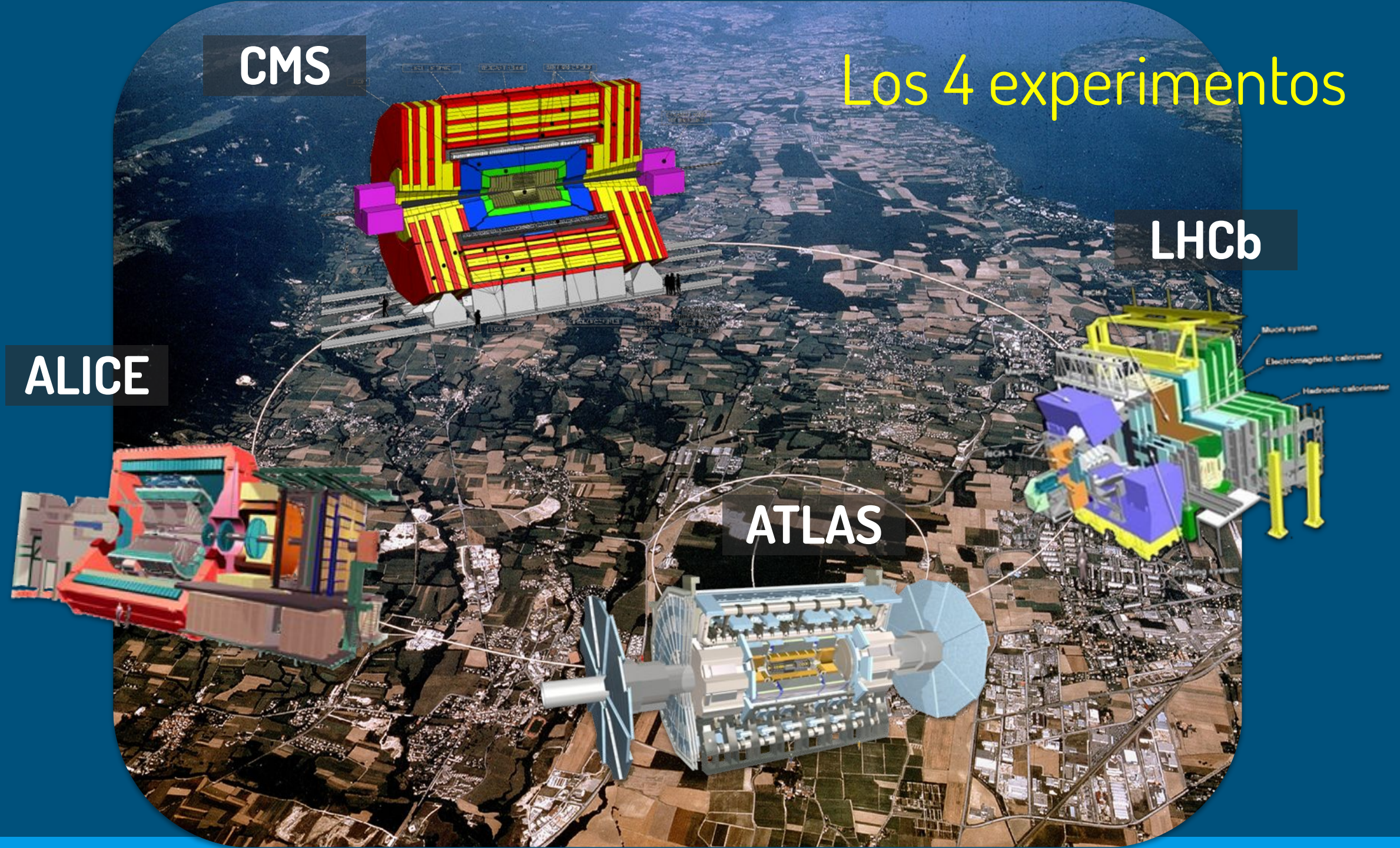


Acelerador

Colisión

Detector

Los 4 experimentos

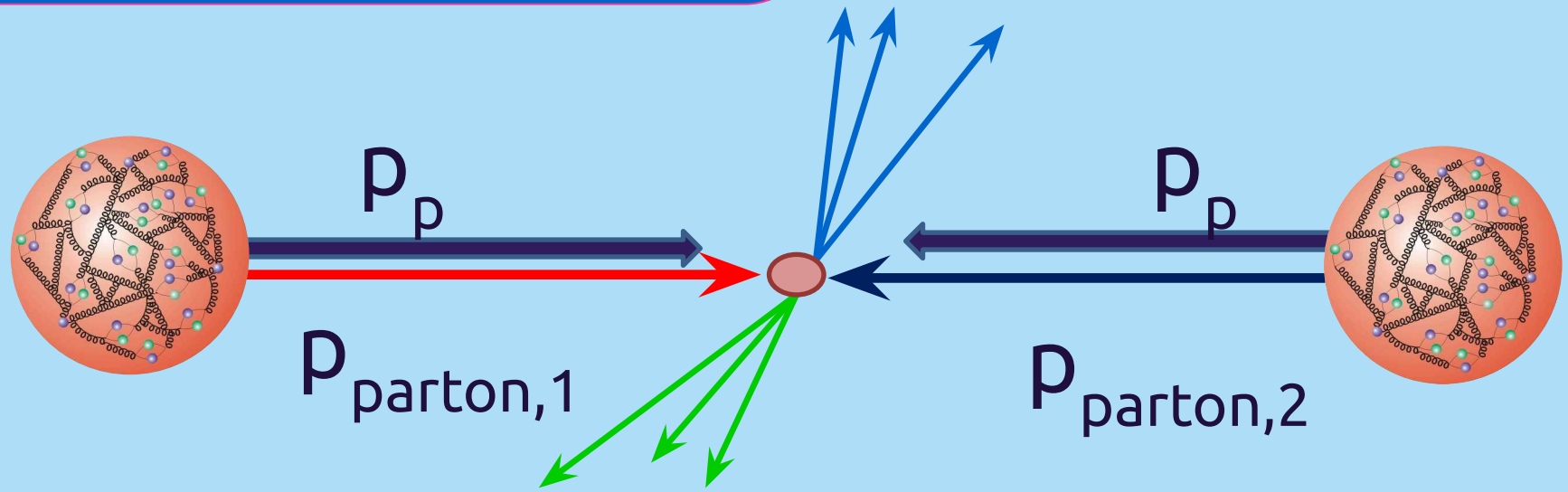


¿Qué ocurre en las colisiones?

s = (energía en el sistema CM de la interacción)^2
√s = 7 / 8 TeV (run I) o 13 TeV (run II) de LHC.
ŝ = (energía en el sistema CM de la interacción *elemental*)^2
pp: interacciones entre partones □
$\hat{s} = x_1 \times x_2 \times s$ □ $\sqrt{\hat{s}} < \sqrt{s}$ ($\sqrt{\hat{s}} \approx 1, 2$ TeV)

En un colisionador hadrónico √ŝ no toma un valor fijo (0., √s)

Con una única energía de haces incidentes barremos un amplio rango

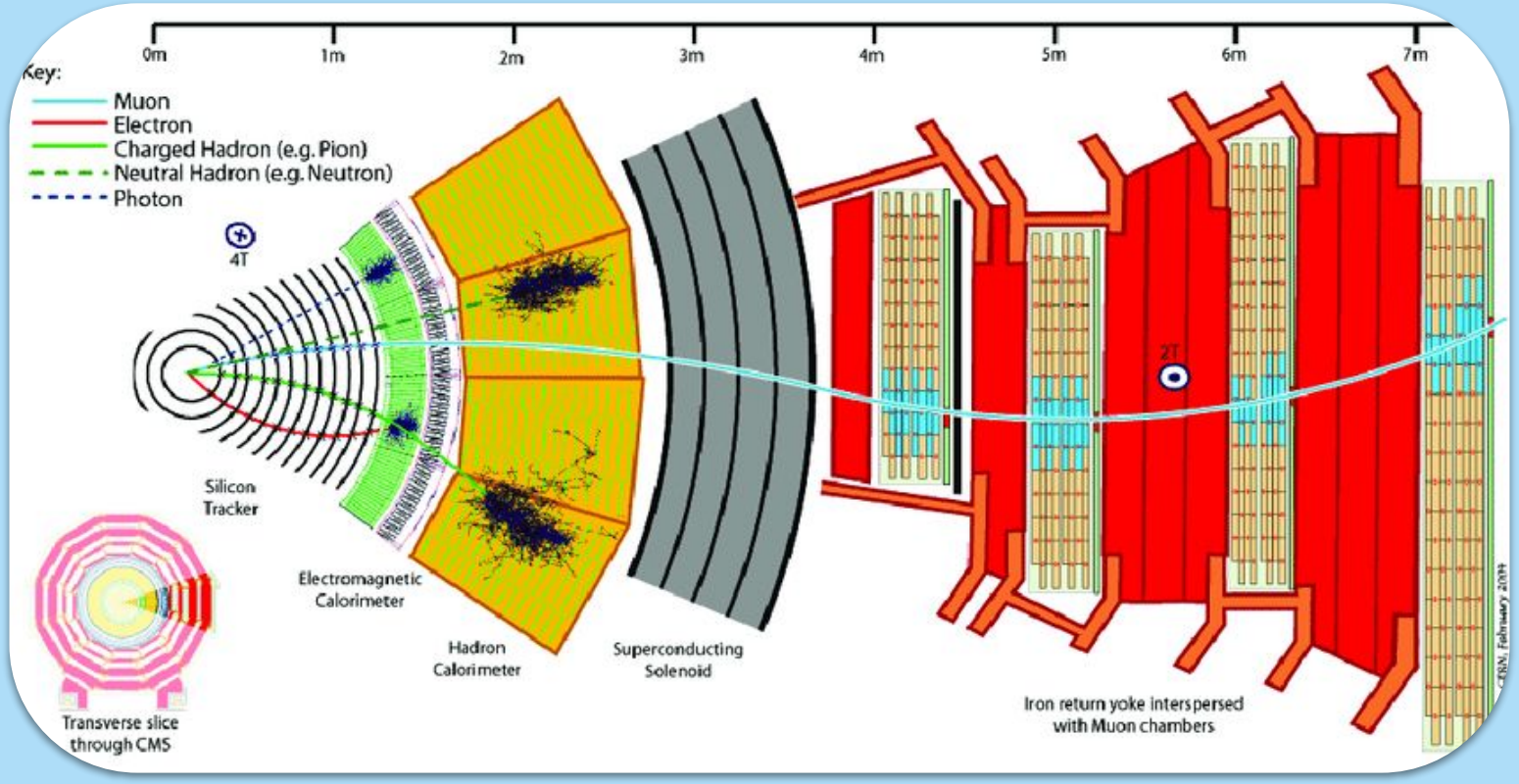


¿Cómo analizamos las colisiones?

1

Identificación y reconstrucción de las distintas partículas / objetos producidos en las colisiones

De las señales electrónicas de los detectores a la identificación de la partícula resultante

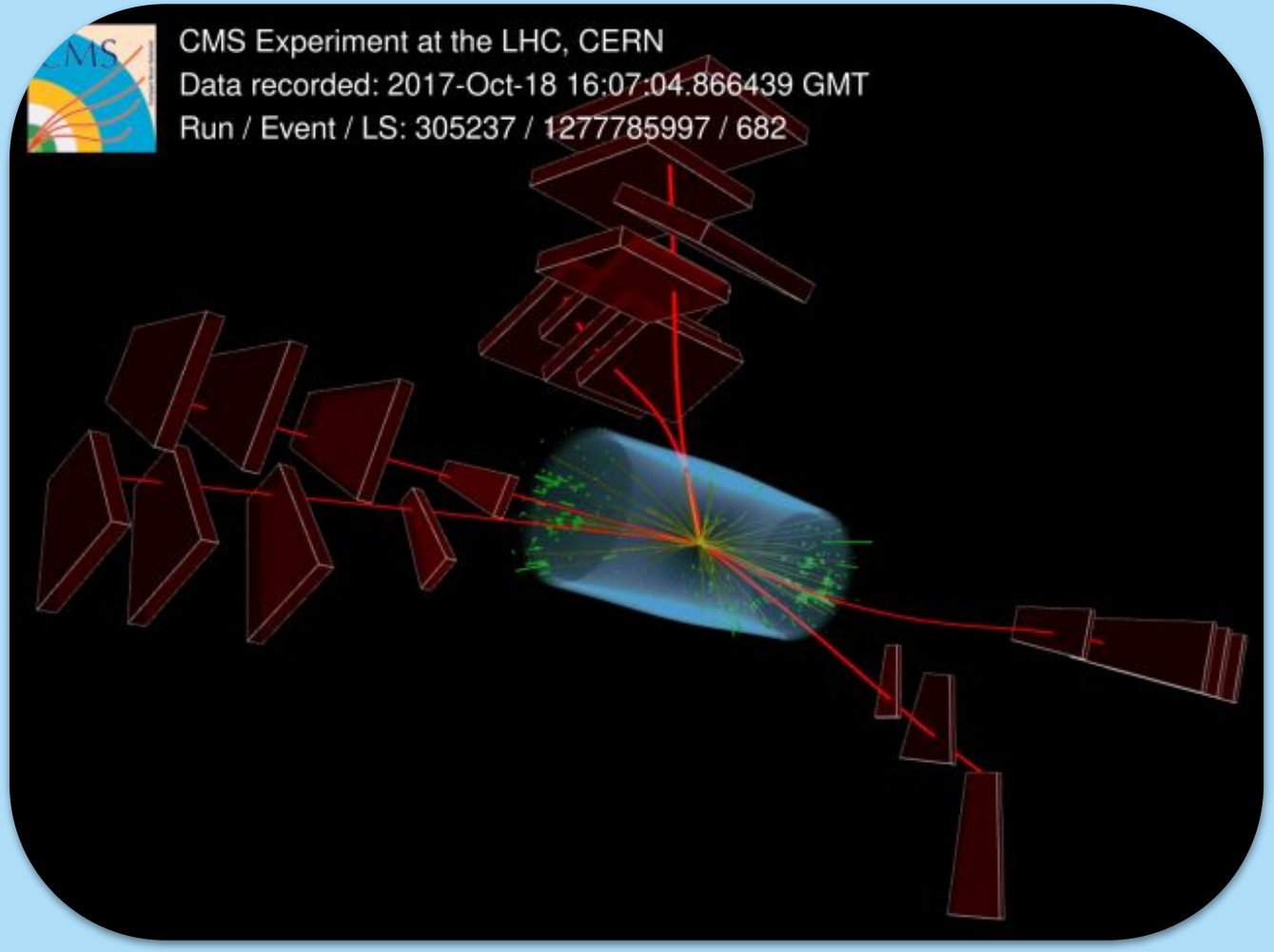


¿Cómo analizamos las colisiones?

2

Discriminación y reconstrucción de eventos (procesos físicos)

Cada proceso tiene una signatura experimental diferente basada en su estado final. Seleccionar eventos de interés entre la muestra es la misión del sistema de disparo (trigger)

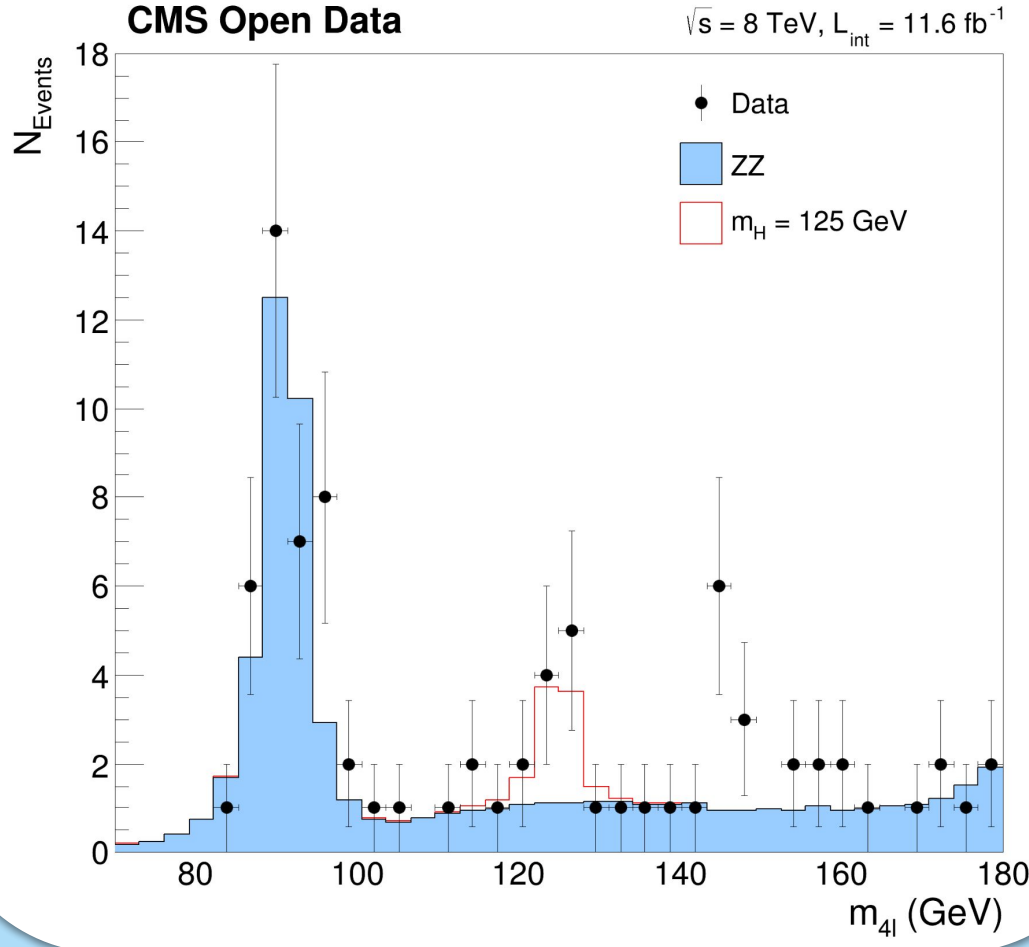


¿Cómo analizamos las colisiones?

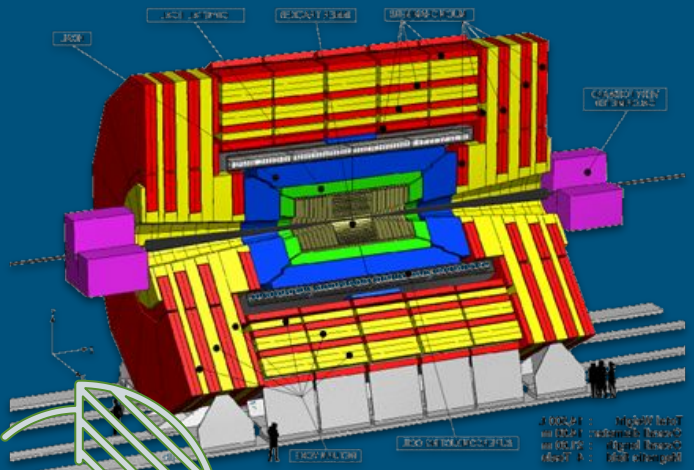
3

Selección y análisis

Selección de eventos con topologías similares al proceso buscado, comparación con simulaciones y análisis estadístico

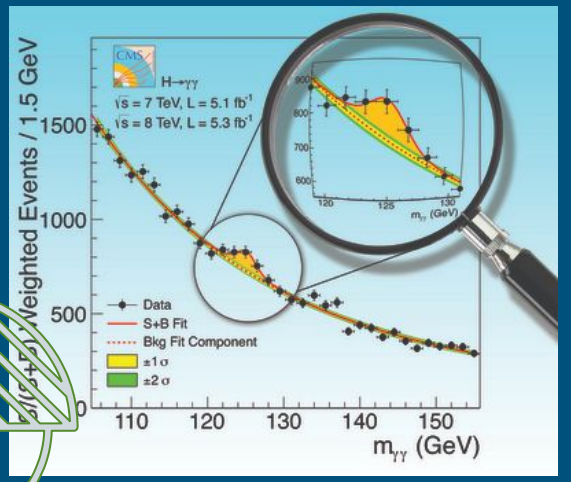


Detección



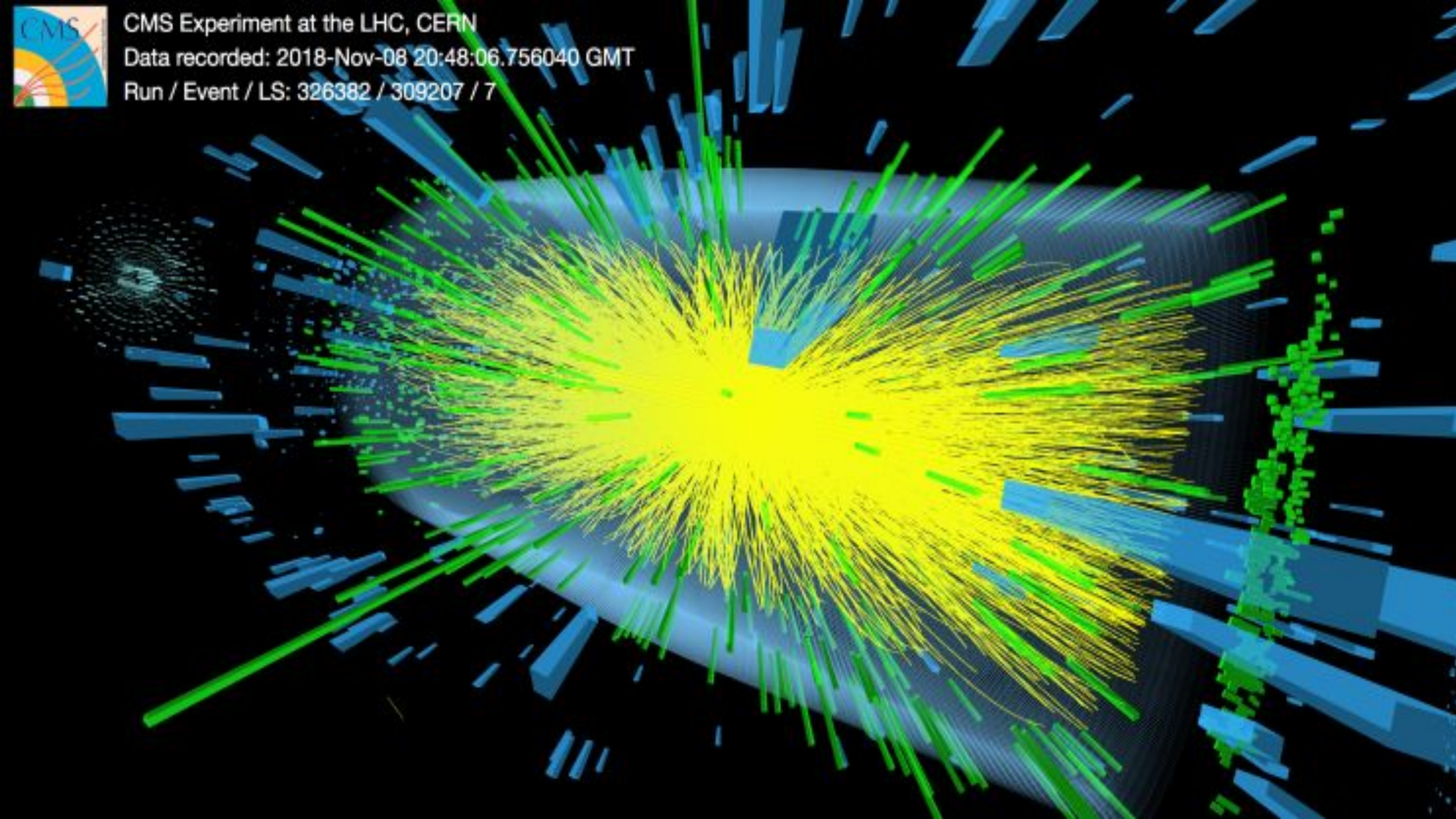
Selección

Análisis



Detección

Física de detectores de partículas

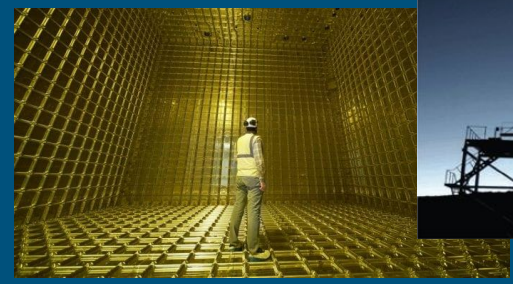

CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2018-Nov-08 20:48:06.756040 GMT
Run / Event / LS: 326382 / 309207 / 7

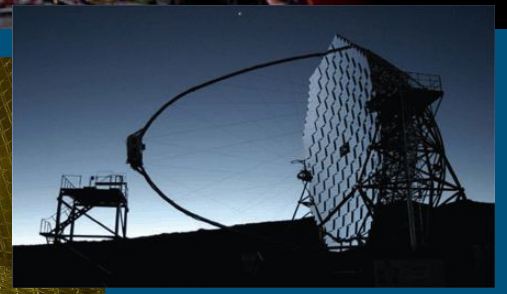
- **En experimentos de colisiones es fundamental ser capaces de medir con precisión el proceso completo.**
  - Todo ello pasa por ser capaces de **observar** todos los productos resultantes de la colisión.

- Los experimentos se componen pues de **aparatos que miden y estudian esos productos** de modo que pueda reconstruirse el proceso original

- Un experimento suele estar compuesto por **varias capas** de detectores distintos

- Otros experimentos (no colisionadores) pueden ser de muy distintos tipos dependiendo de la fuente y del objetivo del proceso físico a medir (***aceleradores, neutrinos, radiación cósmica***, etc.), pero todos ellos se basan en el mismo concepto:
  - La detección de partículas se basa en **interacción con la materia**





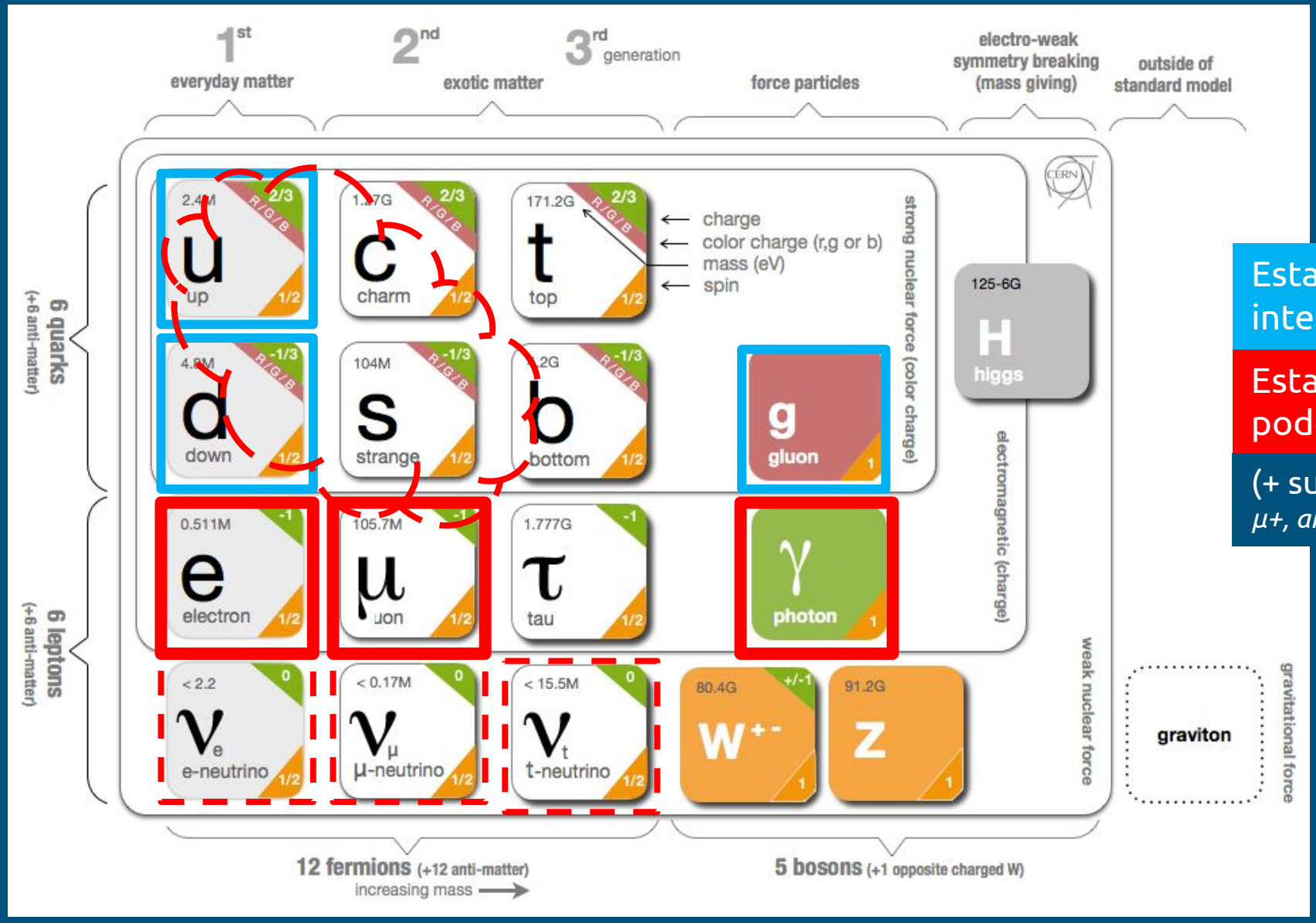
Interacción de partículas con la materia

Una partícula al pasar a través de la materia puede interaccionar y perder energía.
Los procesos por los que se pierde energía dependen del tipo de partícula.

Para partículas cargadas medimos el rastro dejado a su paso en algún material

La mayoría de partículas podrán ser absorbidas, midiendo así su energía con calorímetros.

En un experimento se superponen varias etapas de detectores complementarios. Toda la información se pone en común para reconstruir una “foto” del proceso original.

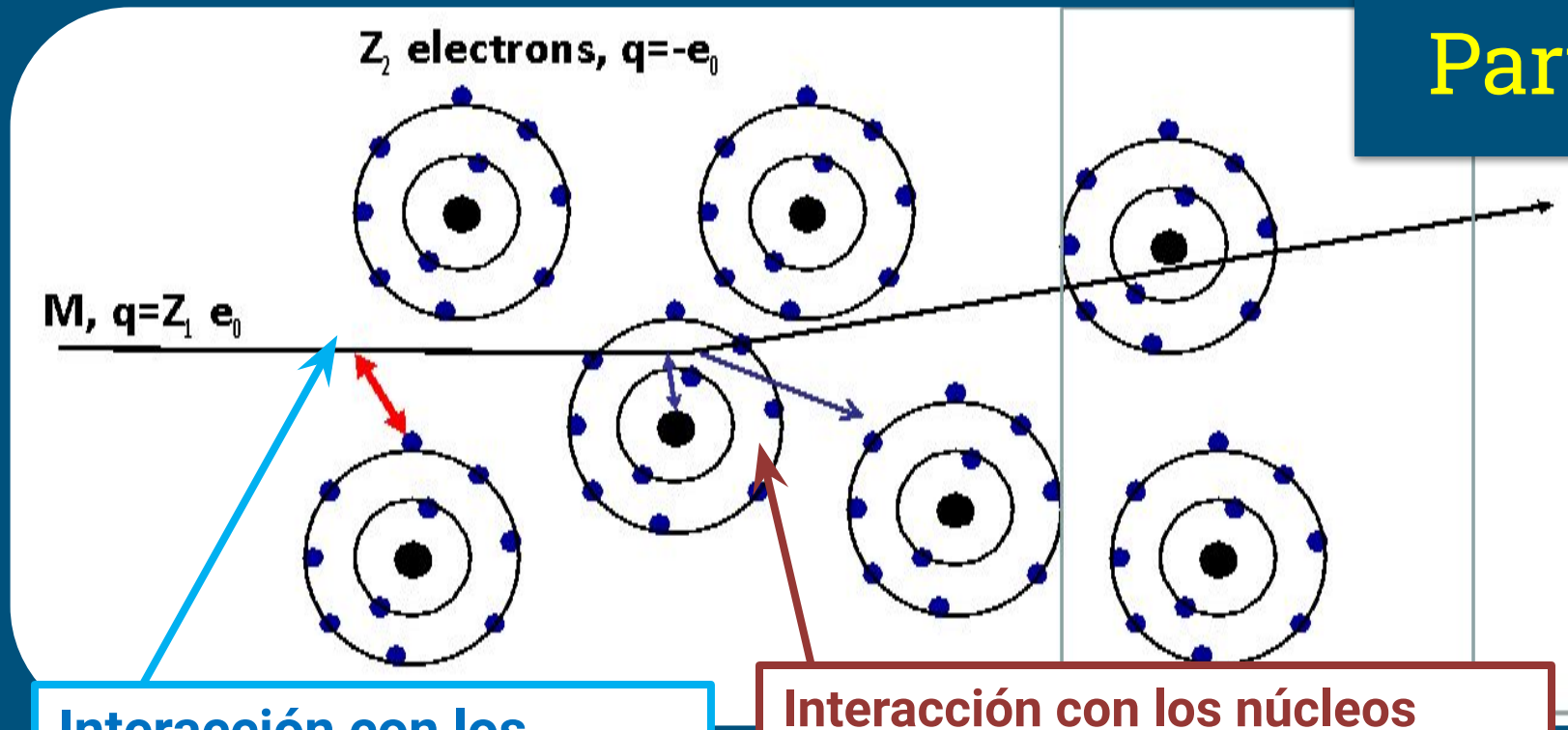


Estas son las que interaccionan

Estas son las que podemos medir

(+ sus antipartículas)
μ+, anti-u, anti-d, e+…

Partículas cargadas



Al atravesar el medio material interaccionan **electromagnéticamente** con sus átomos

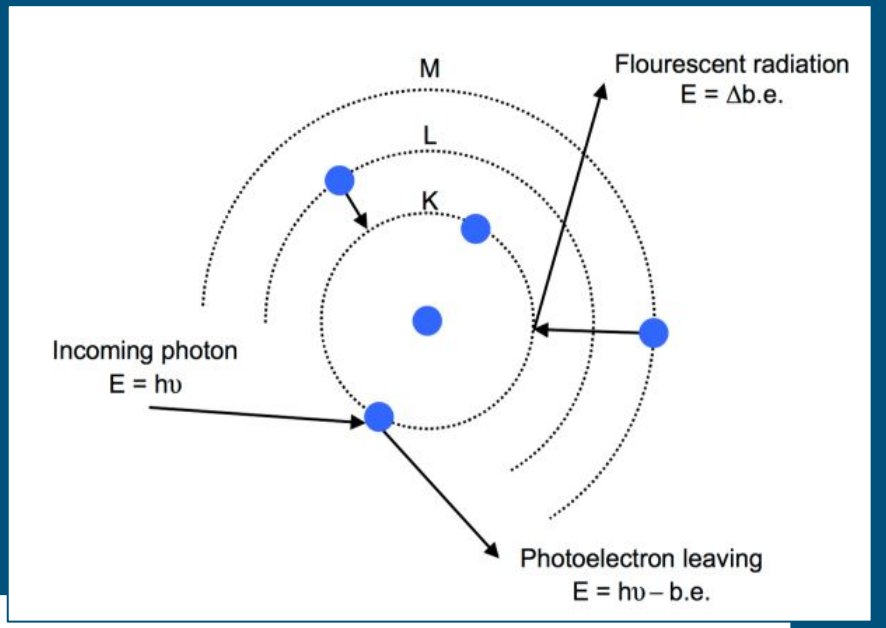
Interacción con los electrones atómicos:
La partícula incidente pierde parte de su energía en **excitar** los electrones o arrancarlos del átomo (**ionización**)

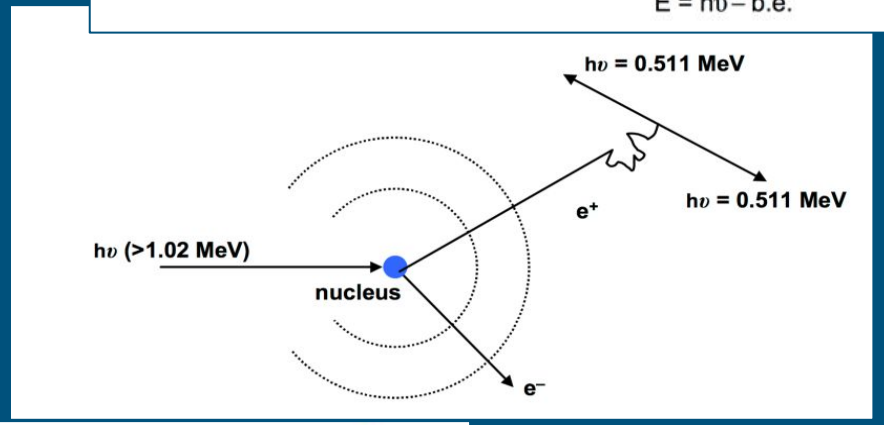
Interacción con los núcleos atómicos:
La partícula es desviada sufriendo dispersión múltiple en el material. En este proceso de dispersión puede perder energía en forma de emisión de fotones (Bremsstrahlung)

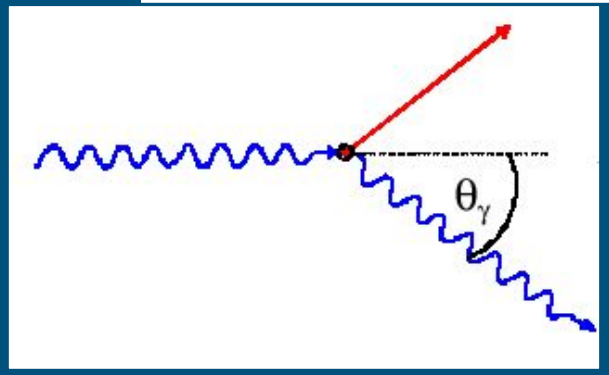
Si la velocidad de la partícula es mayor que la velocidad de la luz en el medio que atraviesa, se genera una onda EM de choque que se conoce como Radiacion Cherenkov. Además, cuando la partícula cruza el punto de transición entre dos materiales distintos se pueden producir Rayos X (Radiación de transición)

Partículas neutras

- **Efecto fotoeléctrico** (Z^5); absorción de un fotón por un átomo, **expulsando un electrón**
- **Producción de pares** (Z^2+Z); esencialmente *bremsstrahlung*. Domina a altas energías.
- **Scattering Compton** (Z) dispersión de un fotón contra un electrón libre.







No hay un único proceso...

Dependiendo del tipo de partícula o proceso que se quiera estudiar tenemos que **diseñar un detector** para medirla. Los procesos se miden combinando varios tipos de detectores.

Sólo unas pocas de las numerosas partículas conocidas tienen una vida suficientemente larga como para dejar huellas en un detector (e±, μ±, Y, π±, K±, Ko, p±, n). **El resto son medidas a través de los productos de desintegración** y de sus relaciones cinemáticas

Algunas partículas de corta duración (b, c) dejan pistas (trazas cortas) antes de decaer, por lo que su identificación se basa en la medición de trazas cortas y vértices de interacción.

Las diferencias entre tipos de partículas (masa, carga, y como interactúan con la materia) son las claves para su identificación

Tipos de detectores

- Detectores de posición
  - Gaseosos
  - Estado sólido
- Calorímetros
  - Electromagnéticos
  - Hadrónicos
- Fotodetectores
- Centelleadores
- Otros

Un poco de historia:
la cámara de burbujas

• Principio similar al de cámara de niebla pero usando **hidrógeno líquido** a una temperatura algo más baja que su temperatura de ebullición.

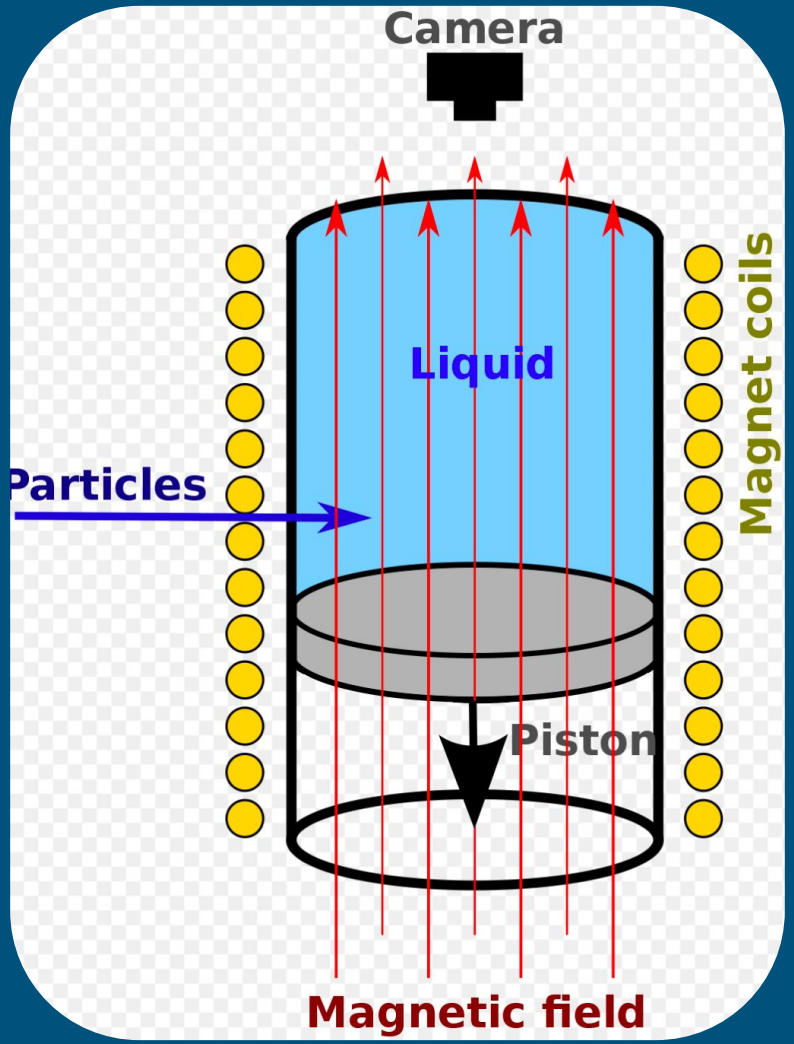
• Pistón disminuye repentinamente la presión, dando lugar a hidrógeno líquido sobrecalentado

• Partículas cargadas ionizan, suficiente para originar **burbujas** que crean una traza fotografiable.

• Pueden ser voluminosas, y al estar rellenas con un material denso, se producirán más interacciones, lo que aumenta la probabilidad de detectar nuevas partículas.

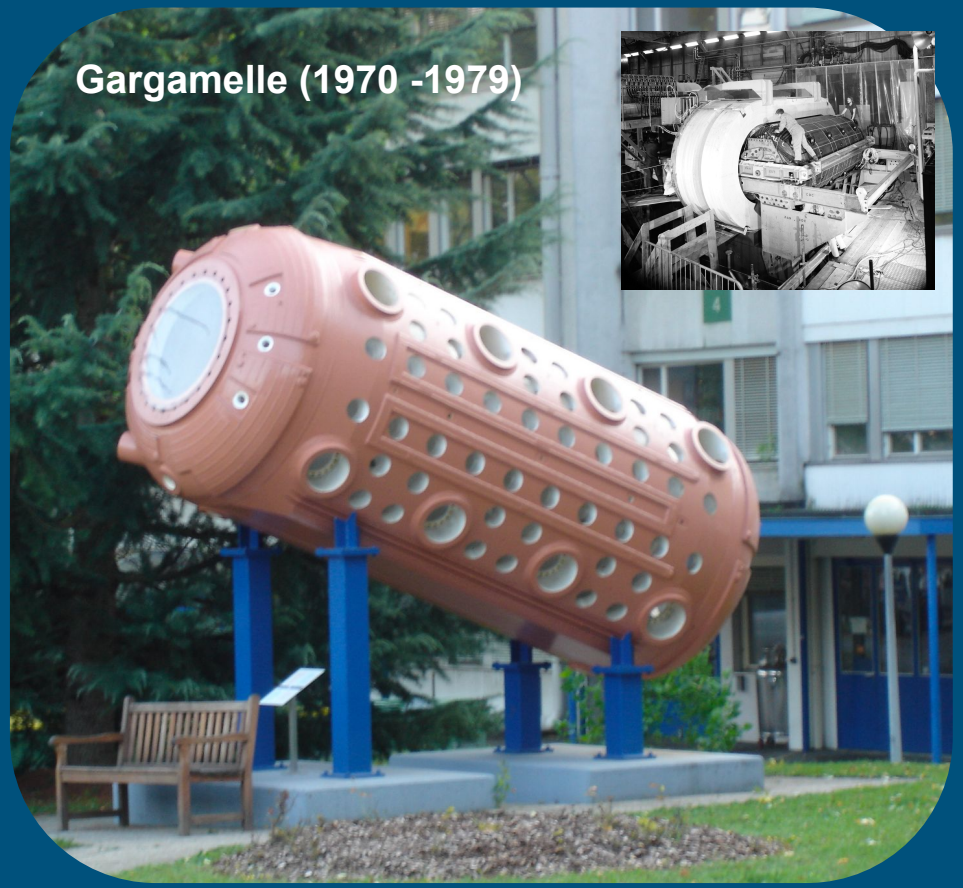
• Permite detectar partículas con una frecuencia de algunos Hz

• La cámara de burbujas fue durante un largo periodo el detector de partículas por excelencia



Nobel 1960: Donald Arthur Glaser por invención de cámara de burbujas (1952)

Cámaras de burbujas ilustres

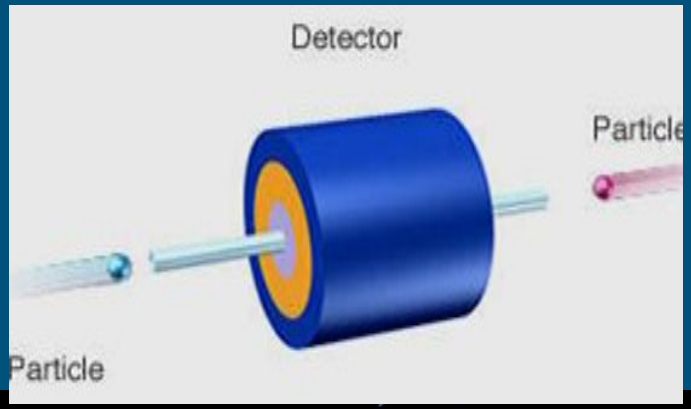


L**imitaciones de las cámaras de burbujas:**

- Solo pueden detectar unas cuantas partículas por segundo (Hz vs LHC 40 MHz de cruces de haces)
- No existe un mecanismo de disparo (trigger), hay que fotografiar todas las interacciones.

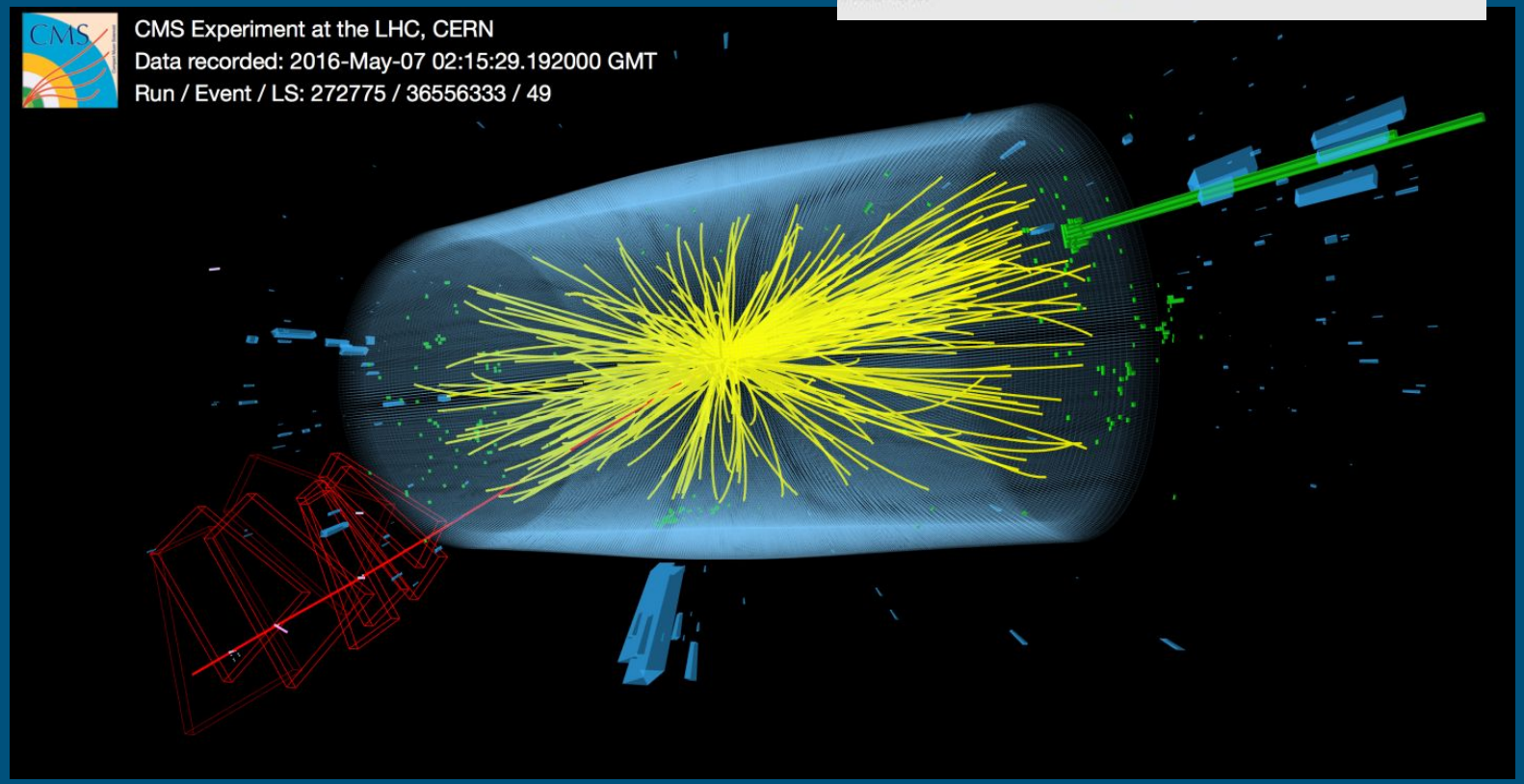
Experimentos de colisionadores

Dispositivos encargados de recoger y estudiar los productos de colisiones de partículas procedentes de un acelerador.

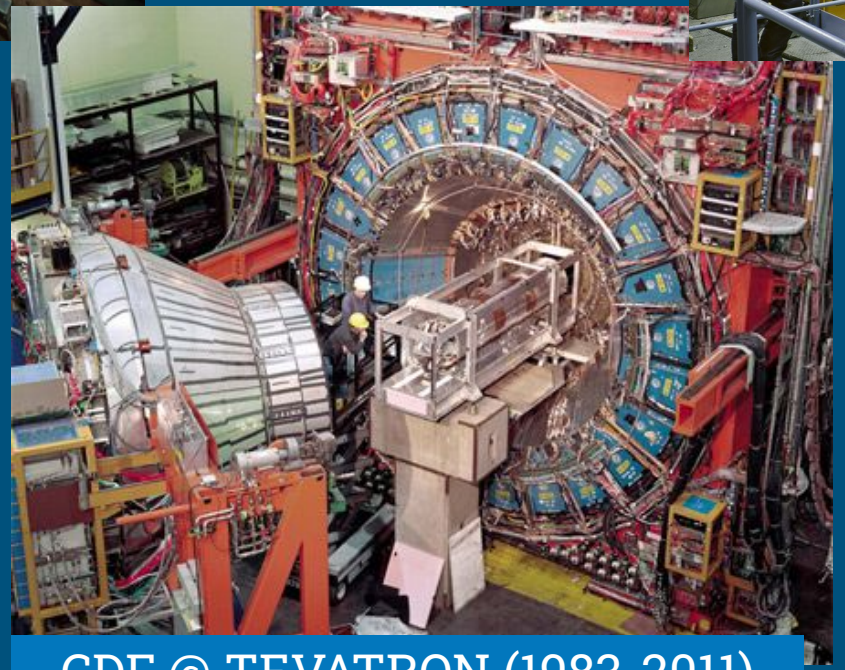


Varios tipos, pero en general, estructuras similares y conceptos similares:

- Detectores lo más **herméticos** posibles (para medir todos los productos resultantes)
- **Varias capas**, cada una dedicada a un tipo de partícula o proceso (concéntricas con respecto al haz)



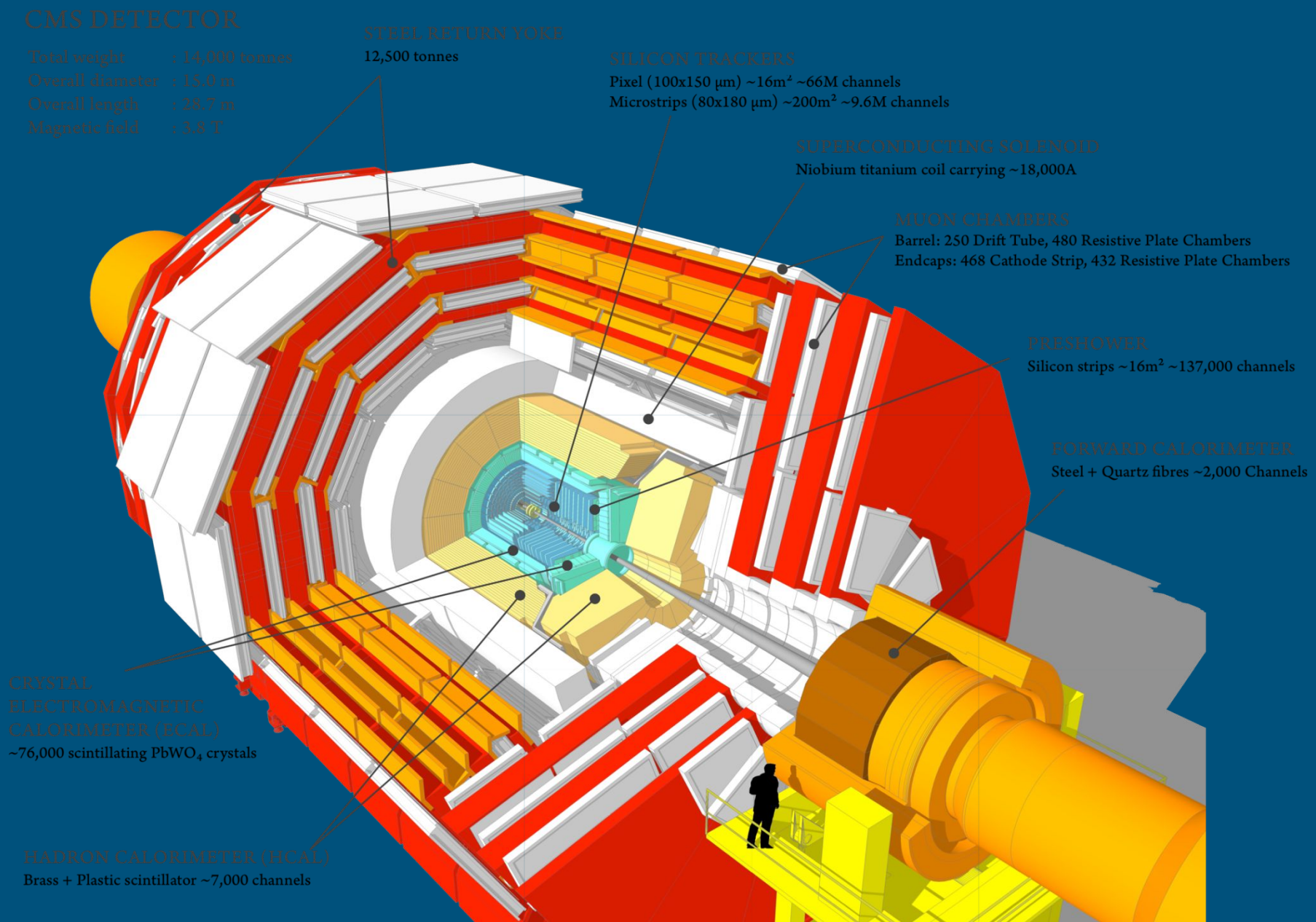
L3 @ LEP (1989-2000)



CDF @ TEVATRON (1983-2011)

UA1 @ SPS (1981-1991)

Experimento Compact Muon Solenoid (CMS)

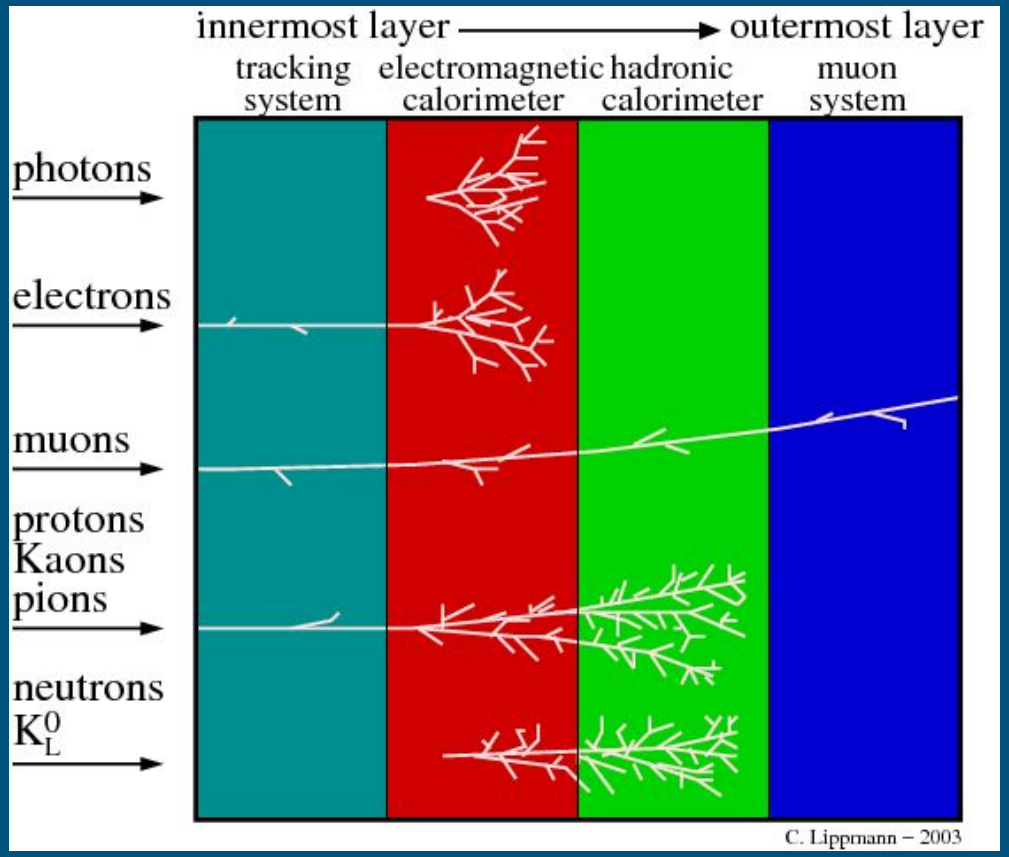


Experimentos de colisionadores

Para cada objeto hay que medir:

- Posición
- Energía
- Identificación

Medida de trayectorias



Medida de energía
Absorción total de las partículas. Medida de curvatura en B

Detección de muones

Poca cantidad de material → Alta densidad

Alta precisión → Menor precisión

Alta granularidad → Menor granularidad

Requisitos de CMS

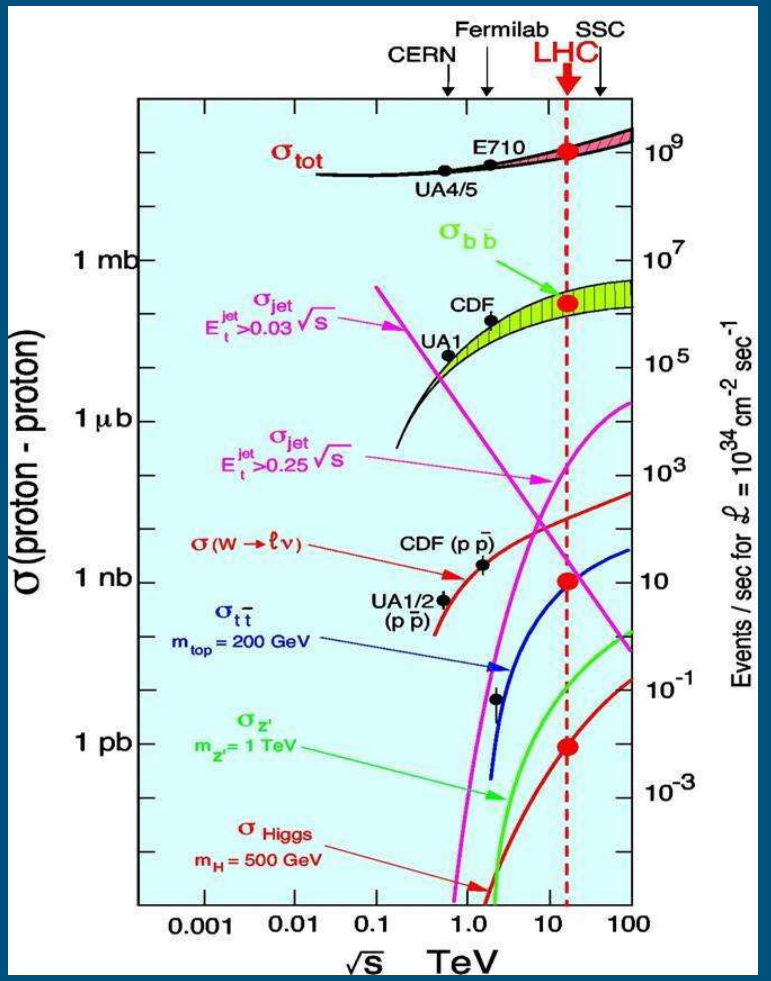
Uno de los objetivos fundamentales del experimento CMS es la búsqueda de nuevas partículas:

- Boson(es) de Higgs, partículas supersimétricas (candidatos a materia oscura), dimensiones extra (gravitones, micro-agujeros negros, Z', etc.)… ¡¡ u otras cosas inesperadas!!

Las medidas de precisión son cruciales para poner al límite el ME: secciones eficaces, masas, anchuras de desintegración, asimetrías, etc

Requisitos CMS:

- Identificación y medida precisa de leptones de alto momento transverso (reconstrucción de resonancias de alta masa)
- Medida precisa de energía en chorros hadrónicos
- Hermeticidad: Medida precisa de energía faltante transversa (MET)



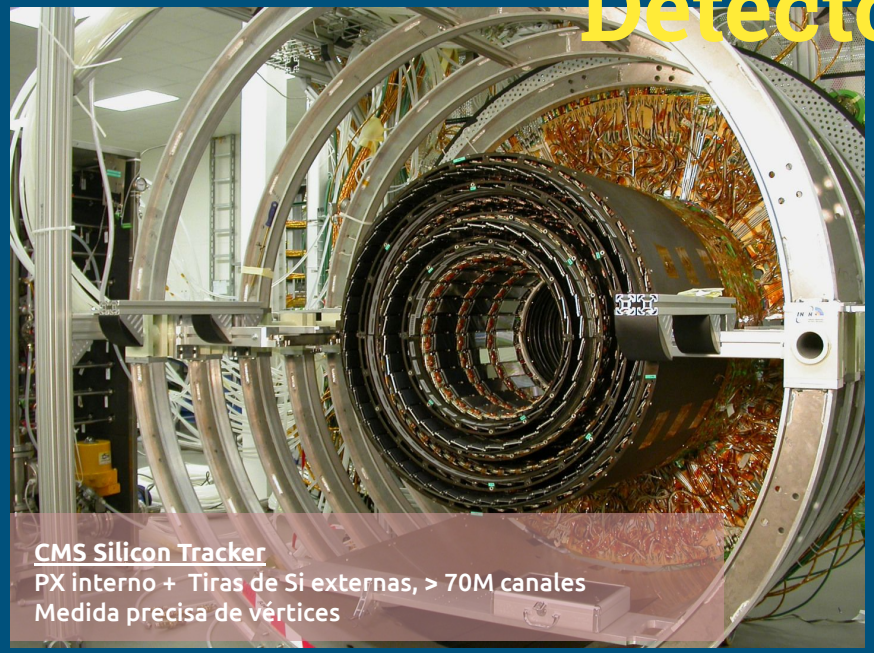
Objetivos del detector

1: Medir el paso de las partículas (reconstruir trayectorias)

2: Medir su energía / momento

3: Identificar el tipo de partícula

1: Medir trayectorias de partículas. Detectores internos de trazas



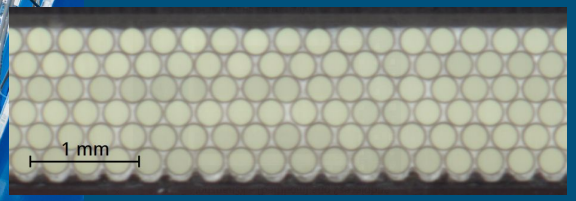
CMS Silicon Tracker
PX interno + Tiras de Si externas, > 70M canales
Medida precisa de vértices

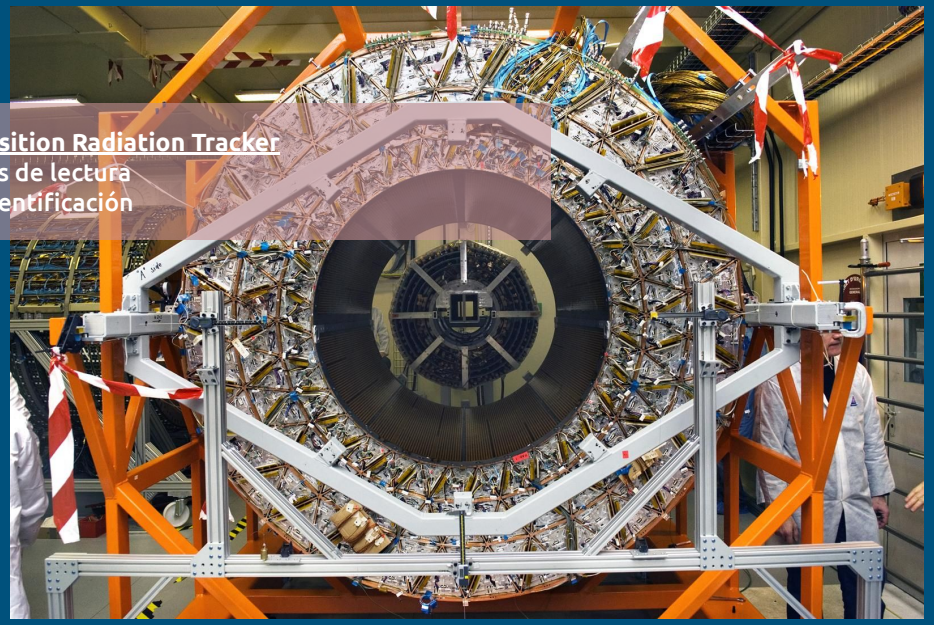
Parte interna de todos los detectores: medida de partículas cargadas.

Multiplicidad
Precisión
Poco material

ALICE TPC
>560k canales
Medida & identificación

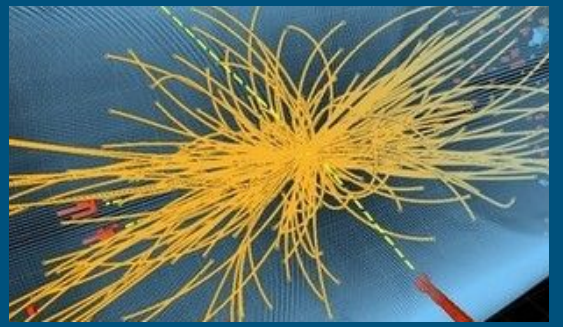
LHCb SciFi
Fibras centelleadoras y SiPM (100 μm)
580k canales

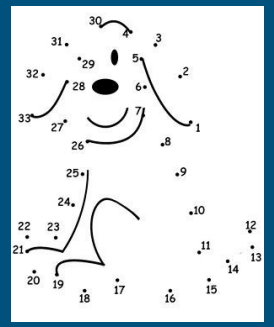




ATLAS Transition Radiation Tracker
350k canales de lectura
Medida & identificación

Detectores de trazas

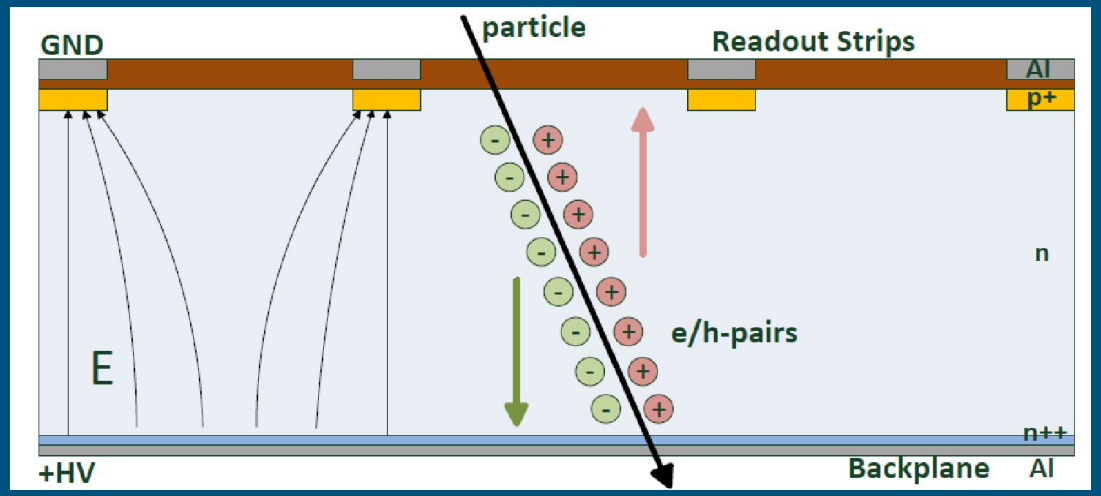




Las trazas se construyen a partir de **varios puntos** medidos en el espacio. Más próximo al punto de interacción, alta densidad de señales, registra **partículas cargadas**. Muy herméticos.

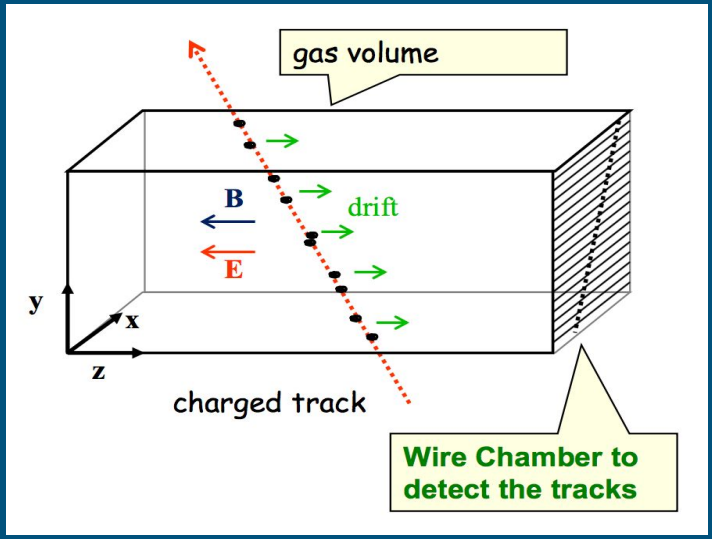
Silicio

Se generan pares electrón-hueco cuando una partícula ionizante atraviesa el detector. Se separan mediante un campo eléctrico y "deriva" hacia los electrodos.

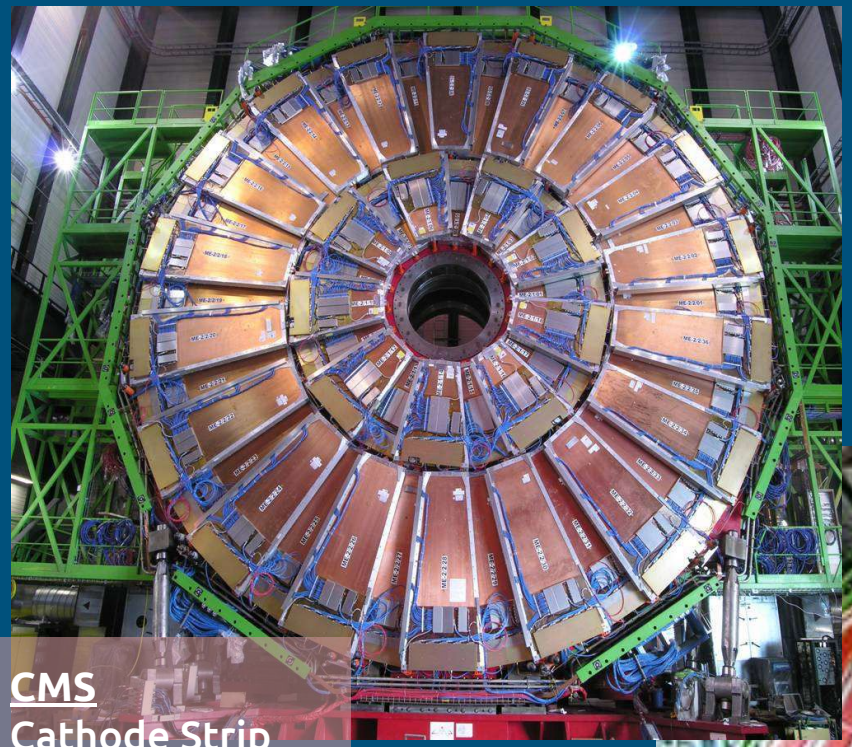


Gaseosos

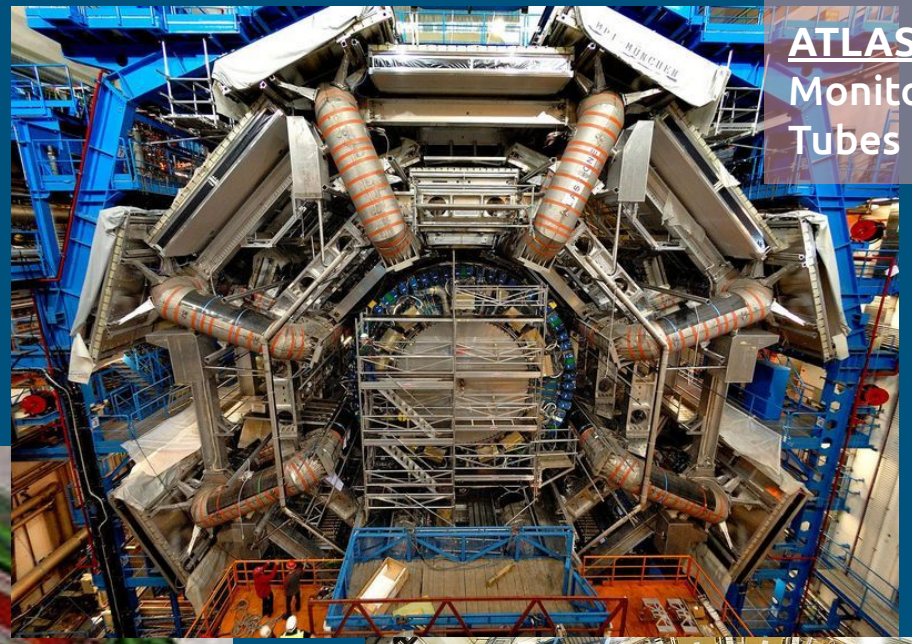
También se basan en ionización, también sometido a un campo E. Se produce una avalancha /, amplificación de la señal para que sea detectable



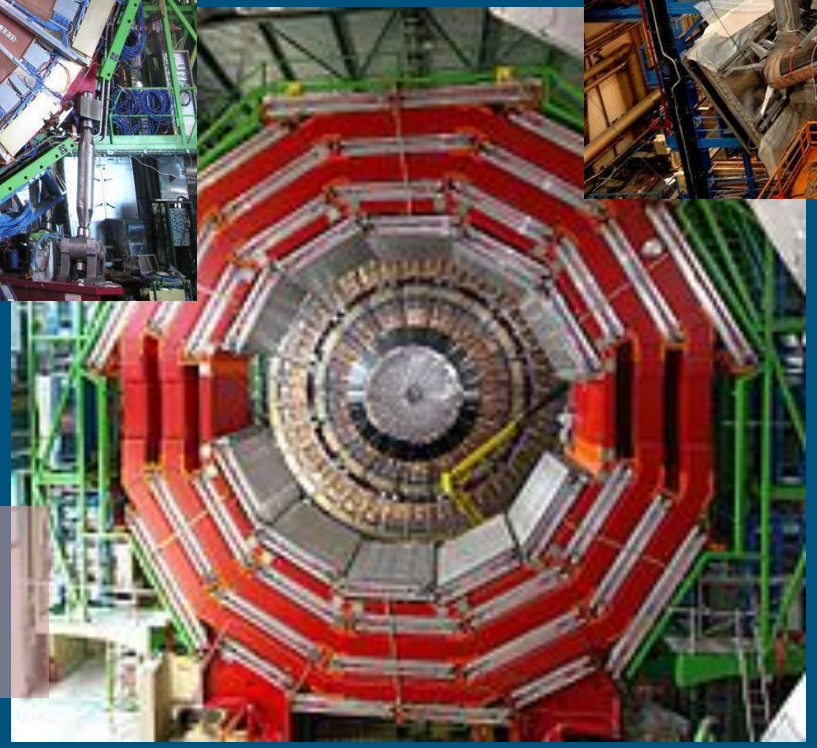
¿Qué pasa con las que escapan?



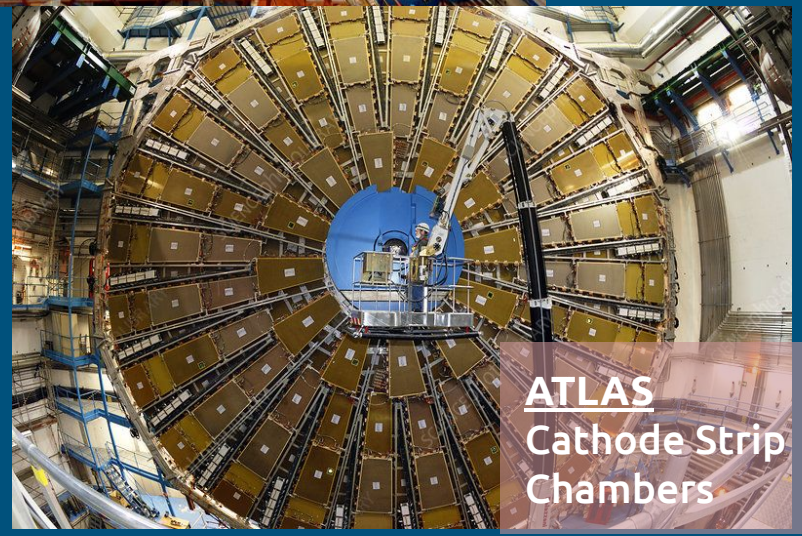
CMS
Cathode Strip Chambers



ATLAS
Monitored Drift Tubes



CMS
Drift Tube Chambers



ATLAS
Cathode Strip Chambers

Detección de Muones

Los **muones** son partículas cargadas como los electrones y positrones, pero **200 veces más pesados**.

Interaccionan 40000 veces menos que los electrones.

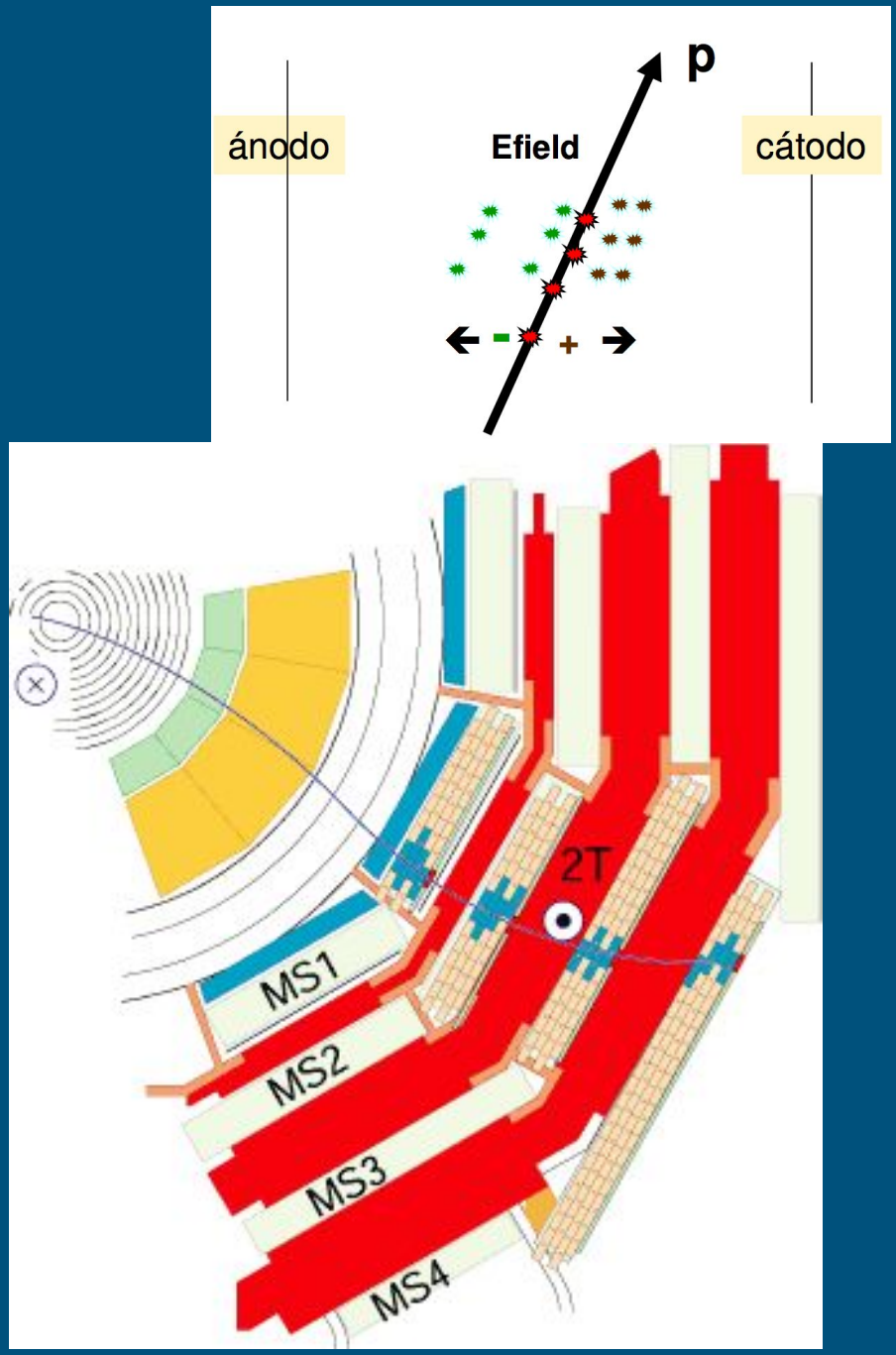
Escapan de los calorímetros

Las cámaras para detectar muones se colocan en la capa más externa del experimento y son los muones las únicas partículas que dejan una señal.

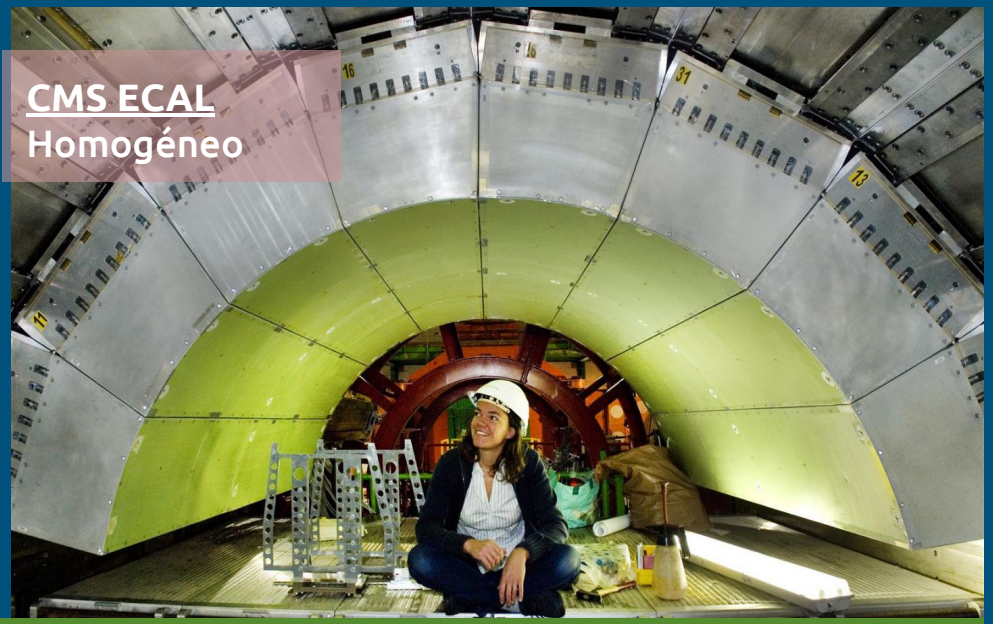
Principio de detección: **detectores de ionización** (gas), similar a las cámaras de trazas, pero por lo general de menor resolución espacial.

Hay que cubrir volúmenes enormes ($$)

Señal limpia, clave para seleccionar eventos.



2. Midiendo momento



CMS ECAL
Homogéneo

Absorbiendo & midiendo (calorímetros)

ATLAS TileCal
Muestreo (Had)

Solenoide
CMS

Medidas indirectas

Toroides
ATLAS

Calorímetros

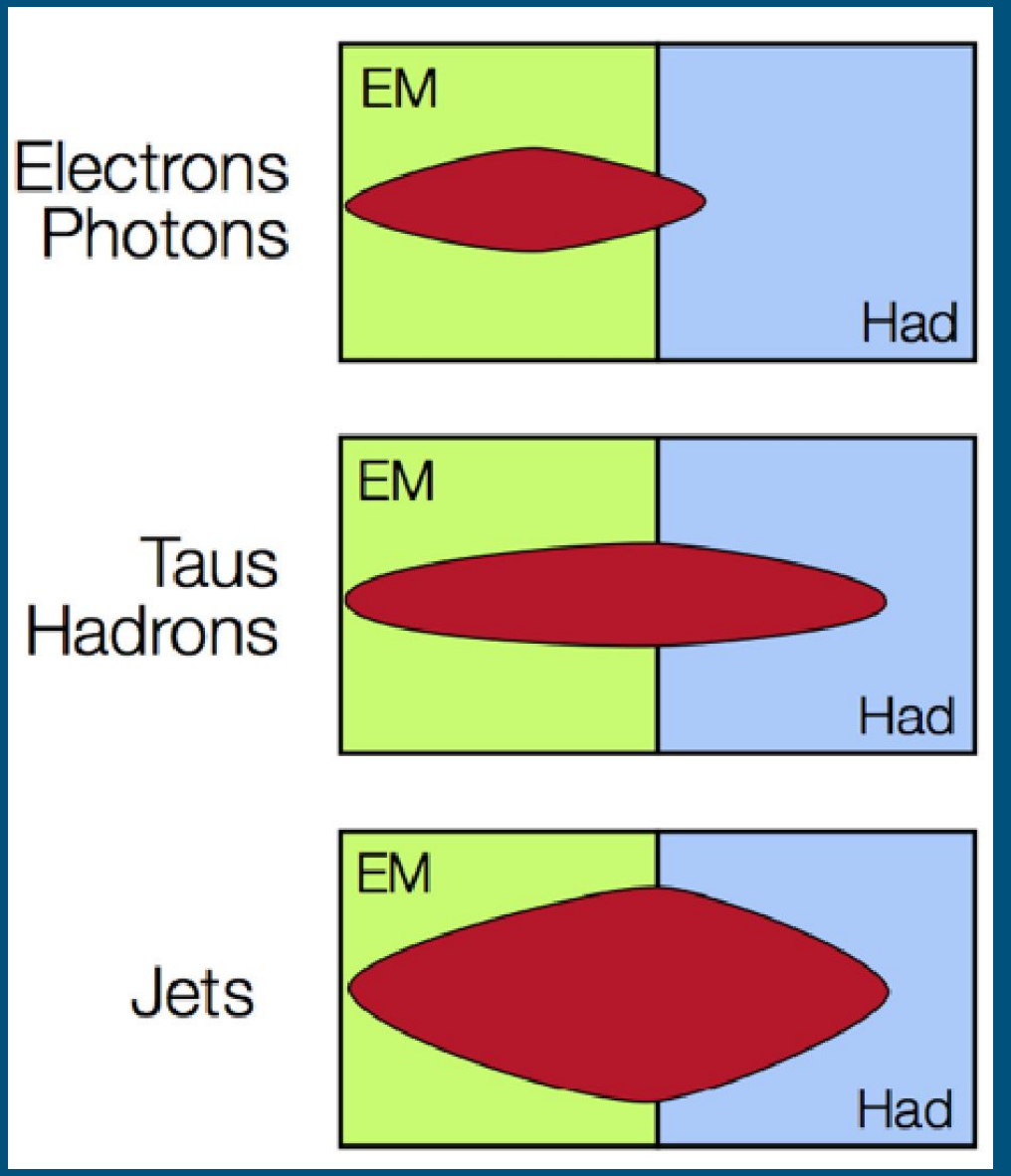
Convierten la energía de las partículas incidentes en una respuesta de una forma **destructiva**.

Las partículas **NO** salen del calorímetro

- Excepto muones y neutrinos

Dos tipos de calorímetros:

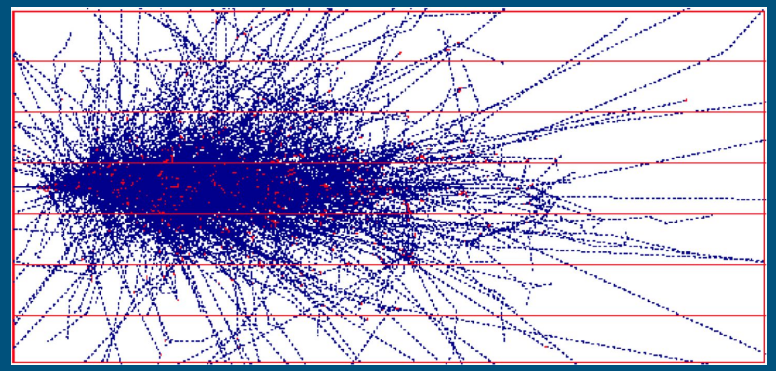
- **Electromagnético** (ECAL), para detectar electrones y fotones.
- **Hadrónico** (HCAL), hadrones neutros y cargados.



Calorímetros

Calorímetro homogéneo

Toda la energía se deposita en el medio activo.



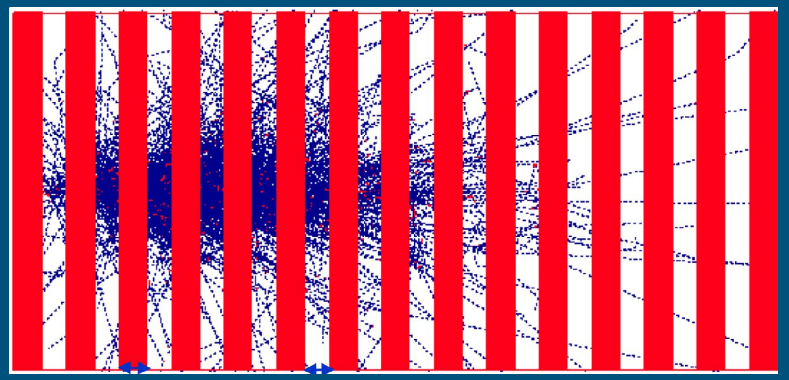
Excelente resolución de energía.

Sin información longitudinal de la forma de la cascada.

Costoso

Calorímetro de muestreo

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



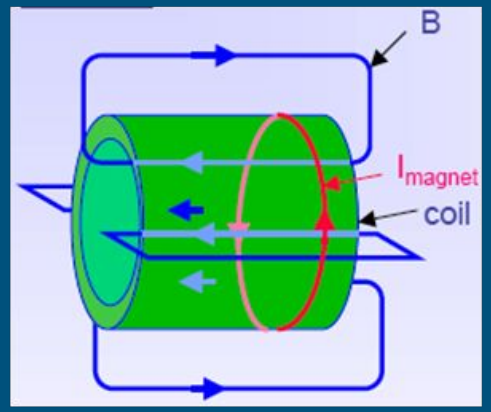
Resolución de energía limitada

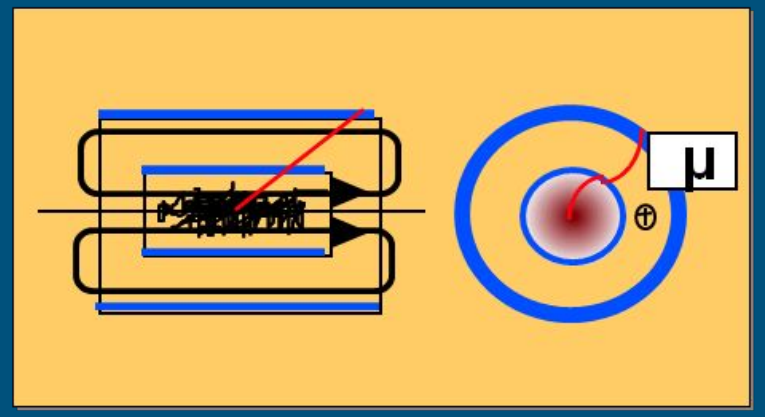
Información detallada de la forma de la cascada.

Menos costoso

Campo magnético

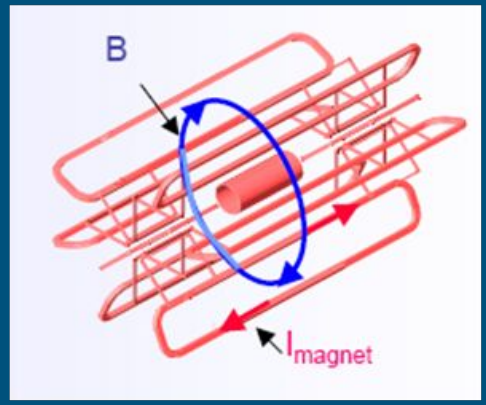
CMS: Solenoide + hierro de retorno

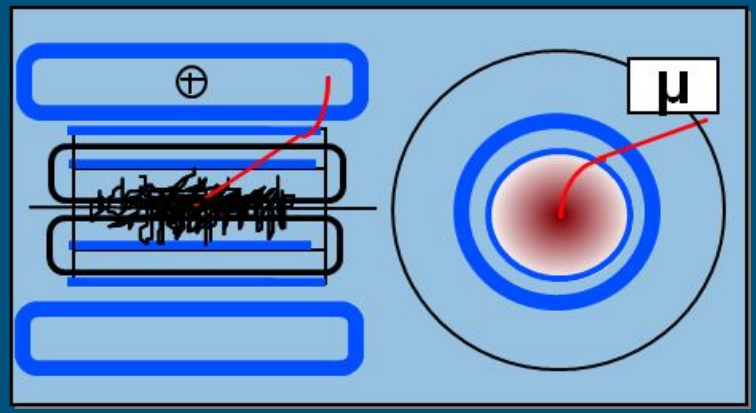




+ Campo homogéneo dentro del solenoide
+ Alto poder de curvatura
- Resolución limitada por dispersión múltiple

ATLAS: Pequeño solenoide + Toroide (en aire)



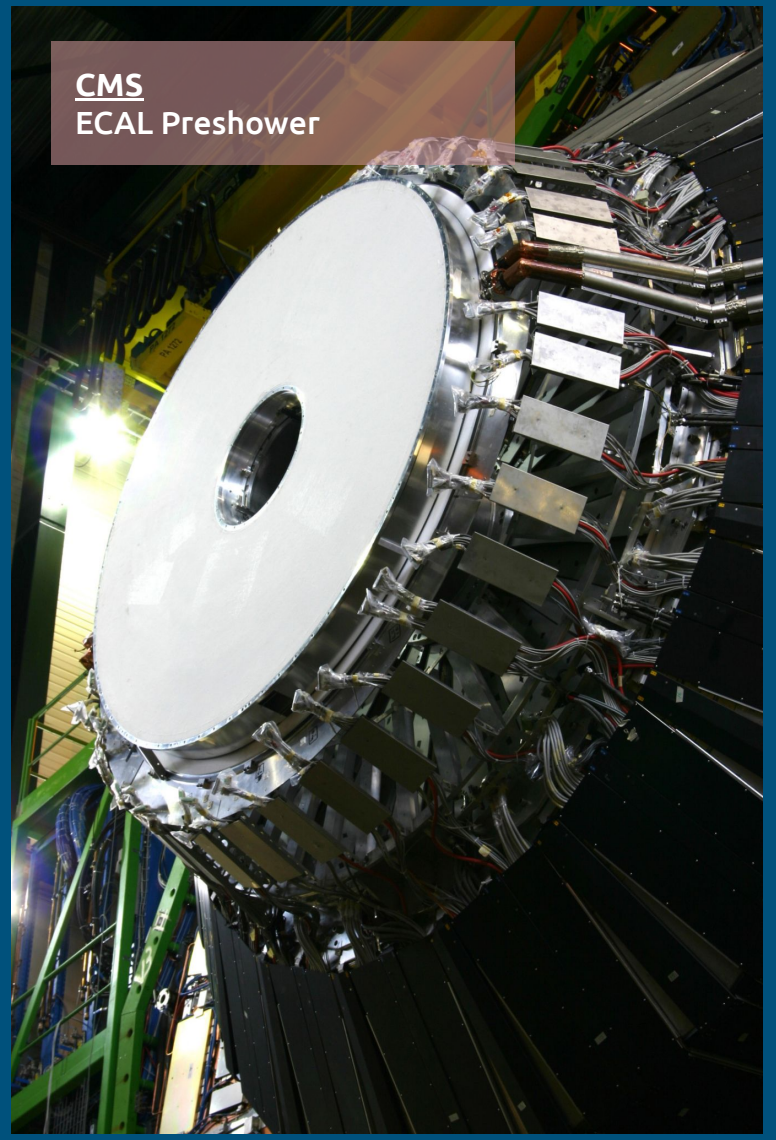


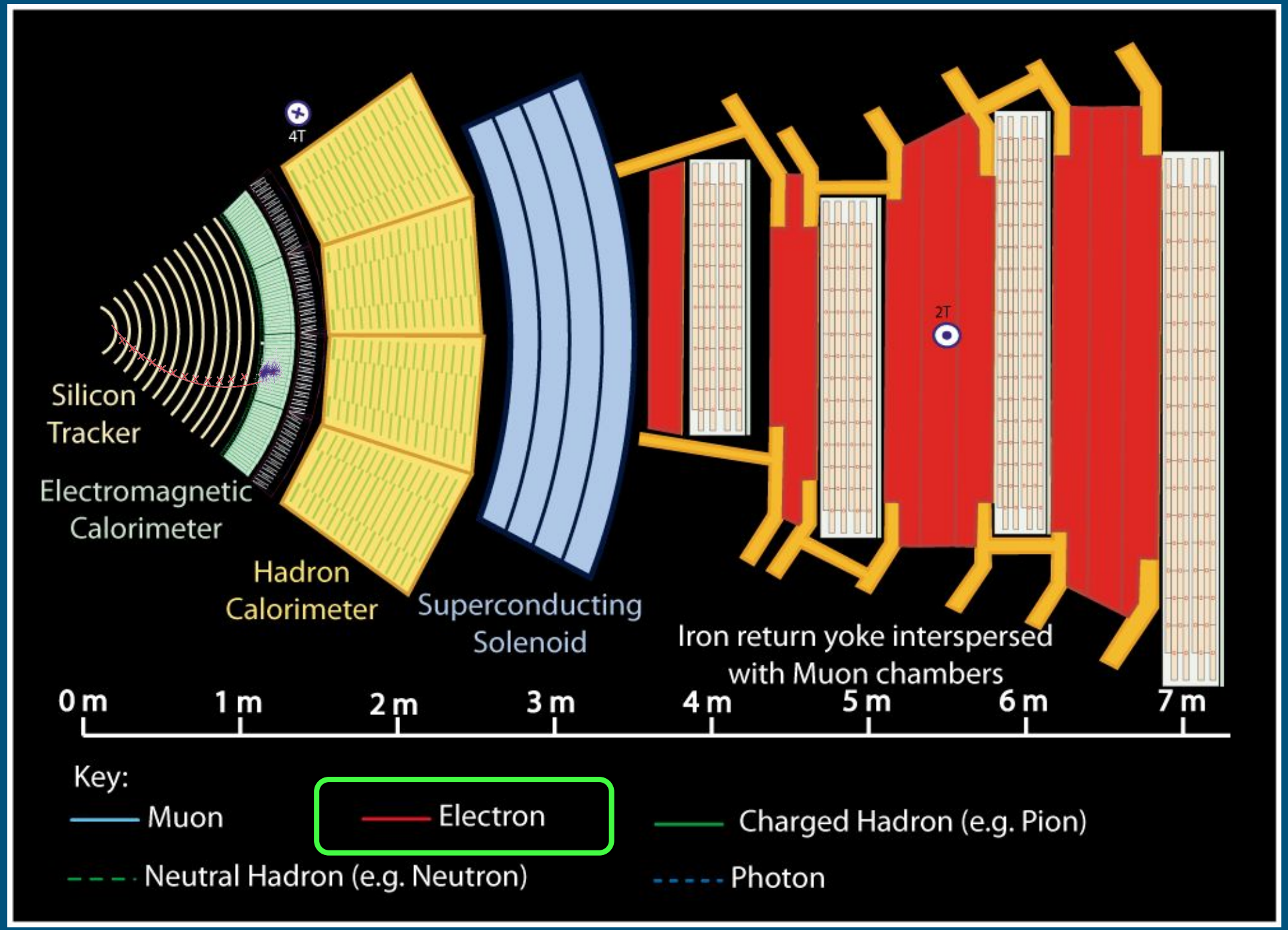
- Campo no uniforme,
+ Curvatura perpendicular al momento en todo el volumen del detector
+ Sin dispersión múltiple

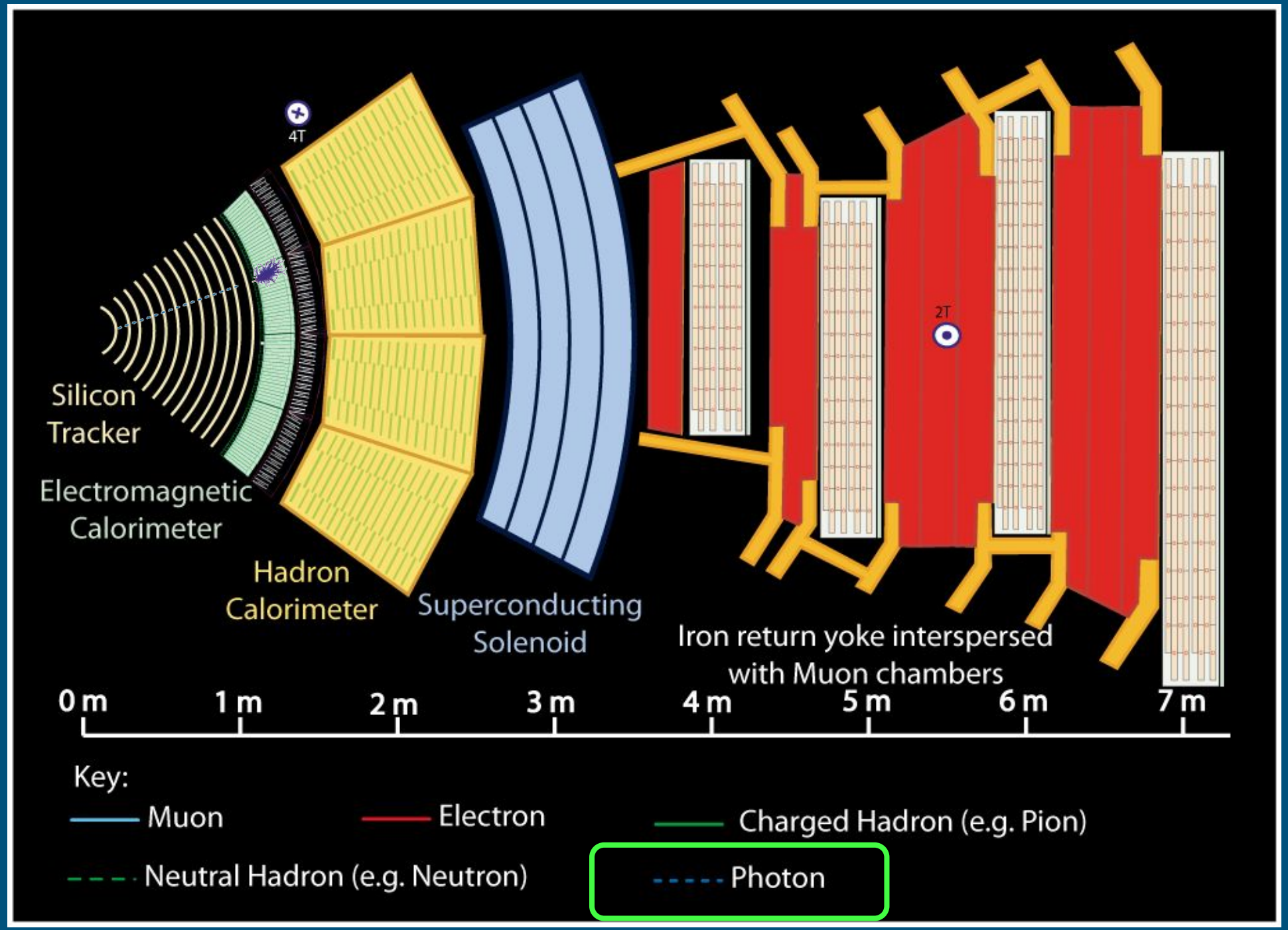
La presencia de material empeora la resolución en energía debido a la dispersión. Por otro lado, el material actúa como filtro permitiendo una mejor identificación de muones.

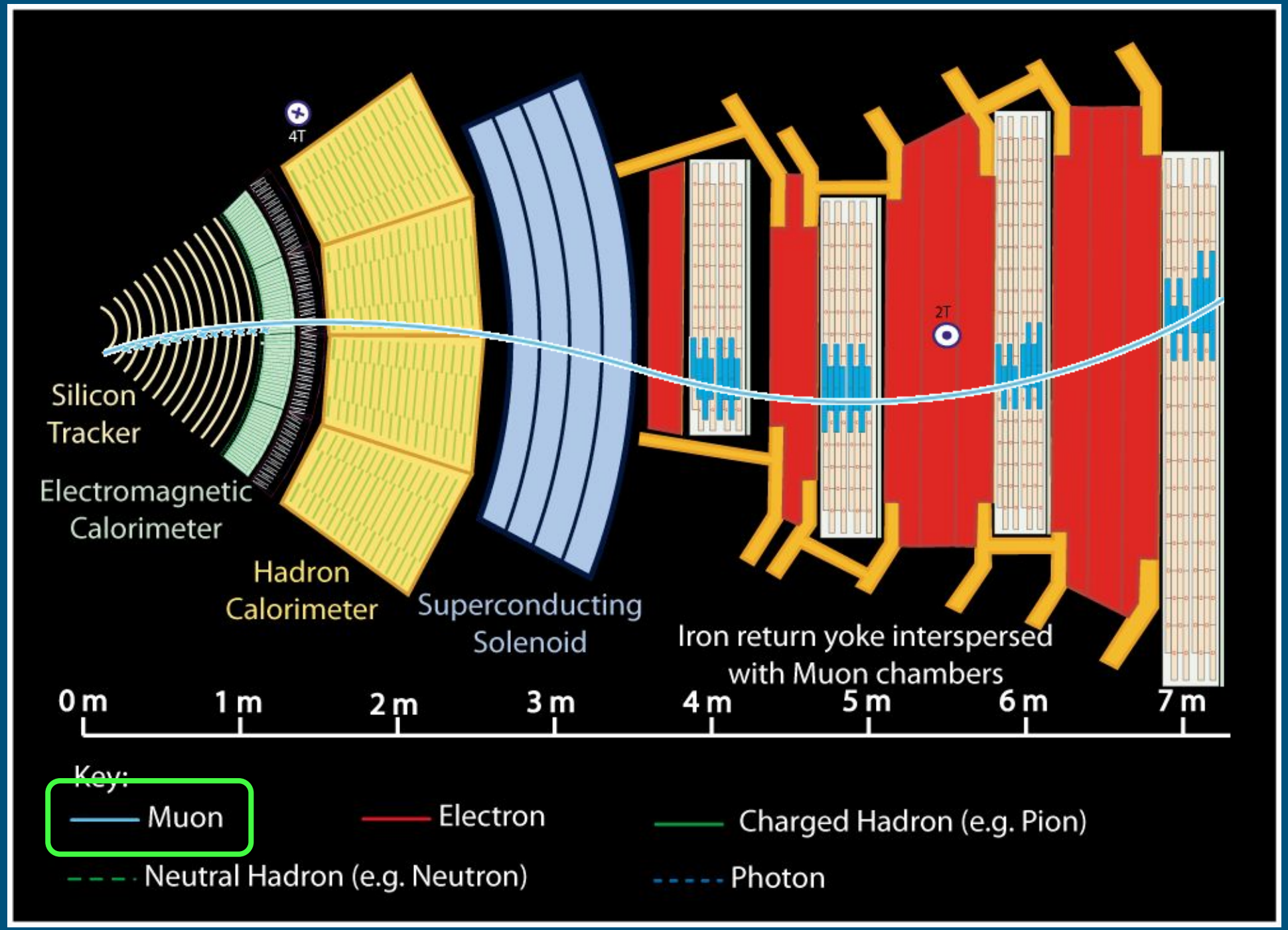
3. Identificando partículas

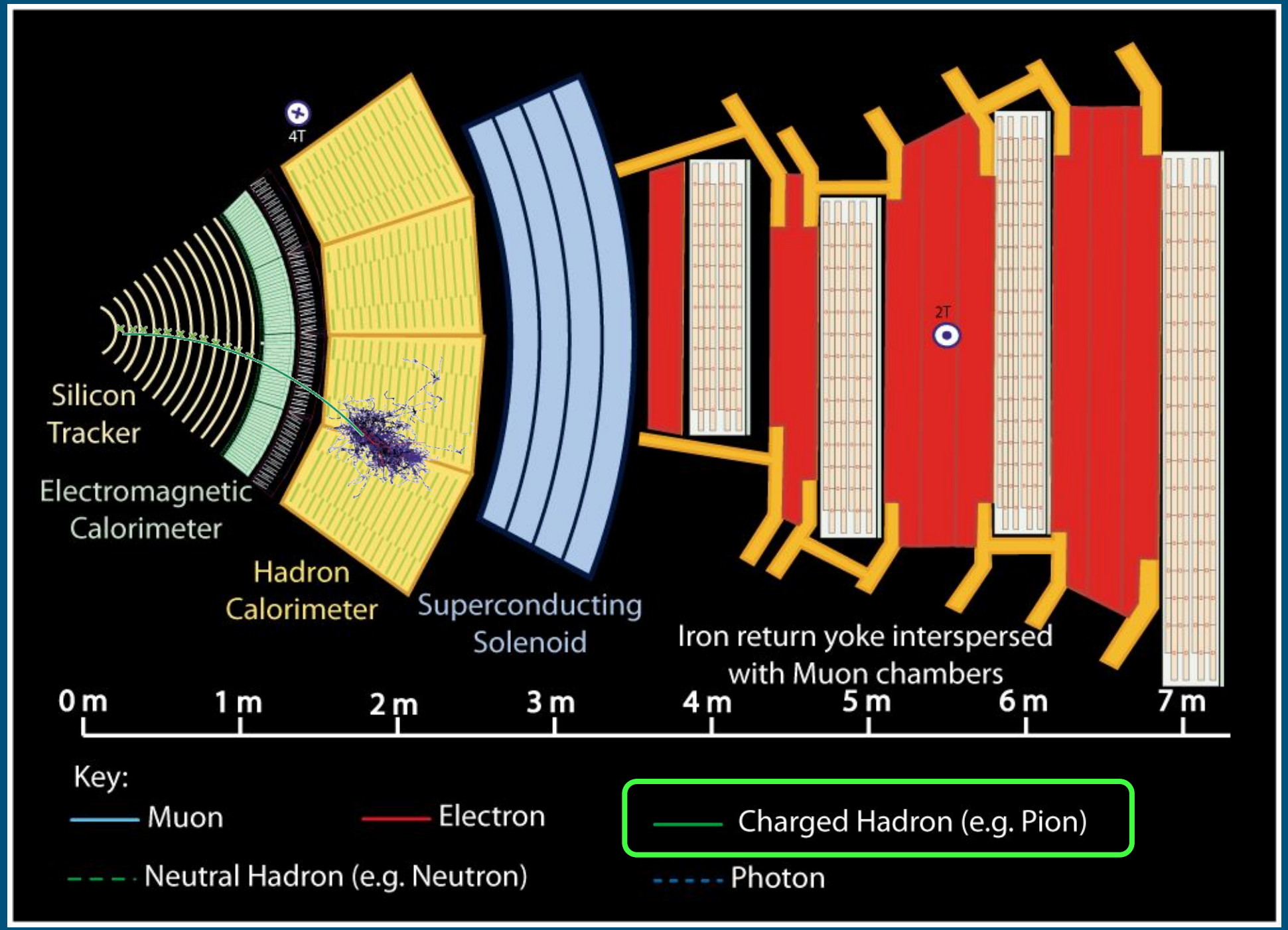
Con detectores específicos…

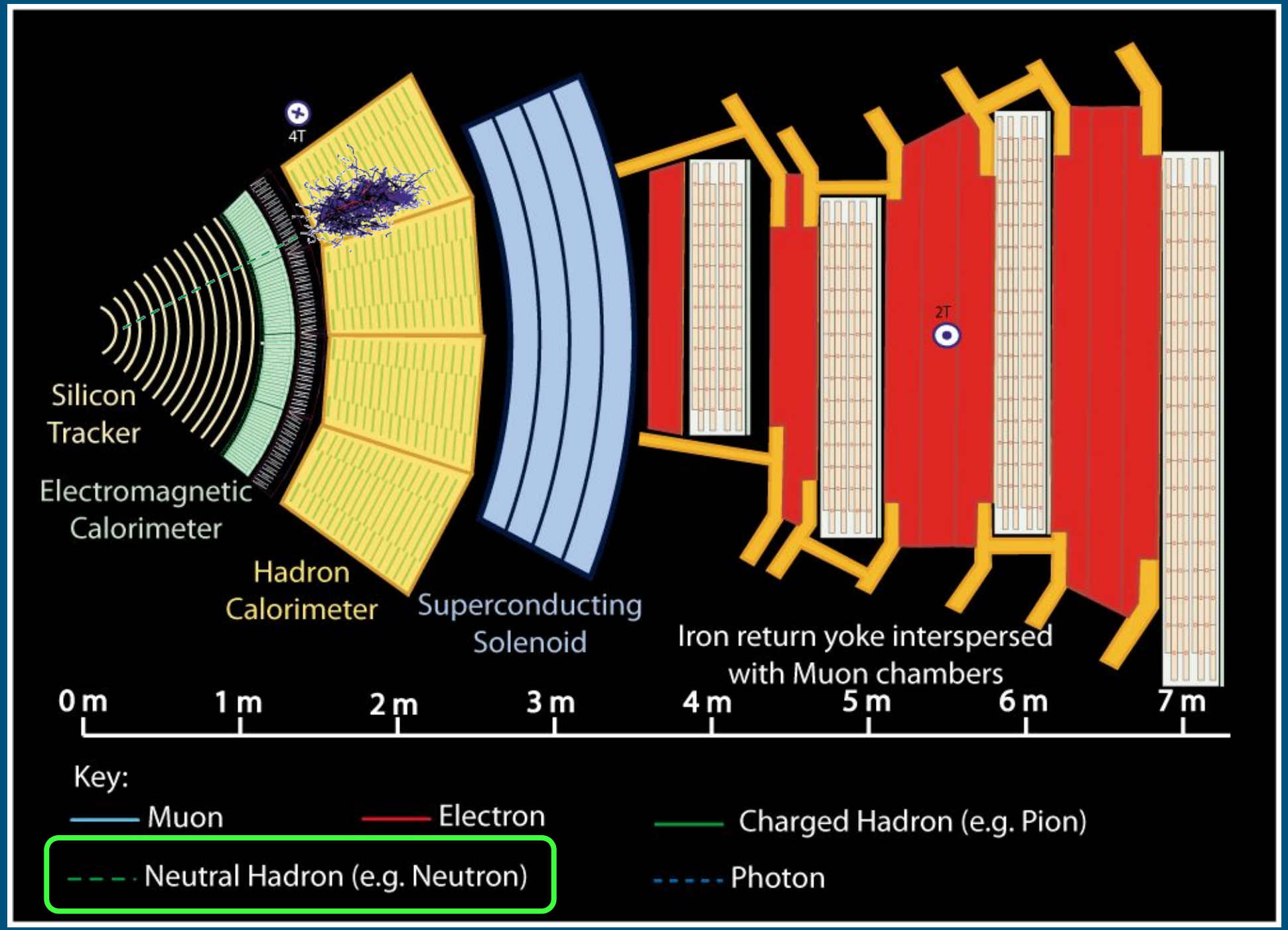


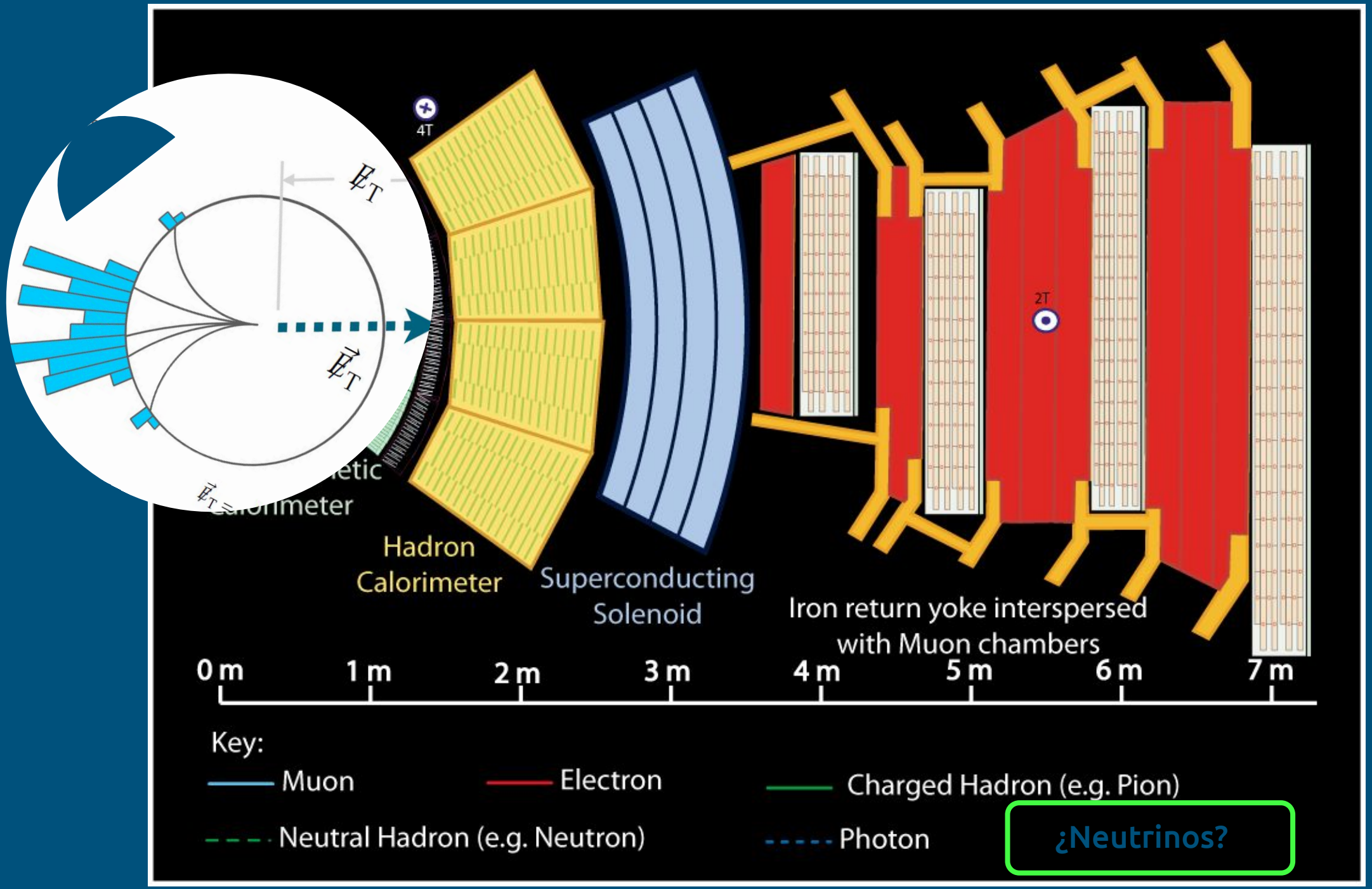

4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon


4T
2T
Hadron
Calorimeter
Superconducting
Solenoid
Iron return yoke interspersed
with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon
¿Neutrinos?

DISEÑO DE CMS

Espectrómetro de muones y sistema de disparo (trigger) de altas prestaciones

- Excelente identificación de muones y medida de momento
- Sistema de trigger eficiente, medida del signo de muones ~TeV dp/p < 10%

Calorímetro electromagnético de alta resolución

- ~ 0.5% @ Et ~ 50 GeV

Potente sistema interno de medida de trayectorias

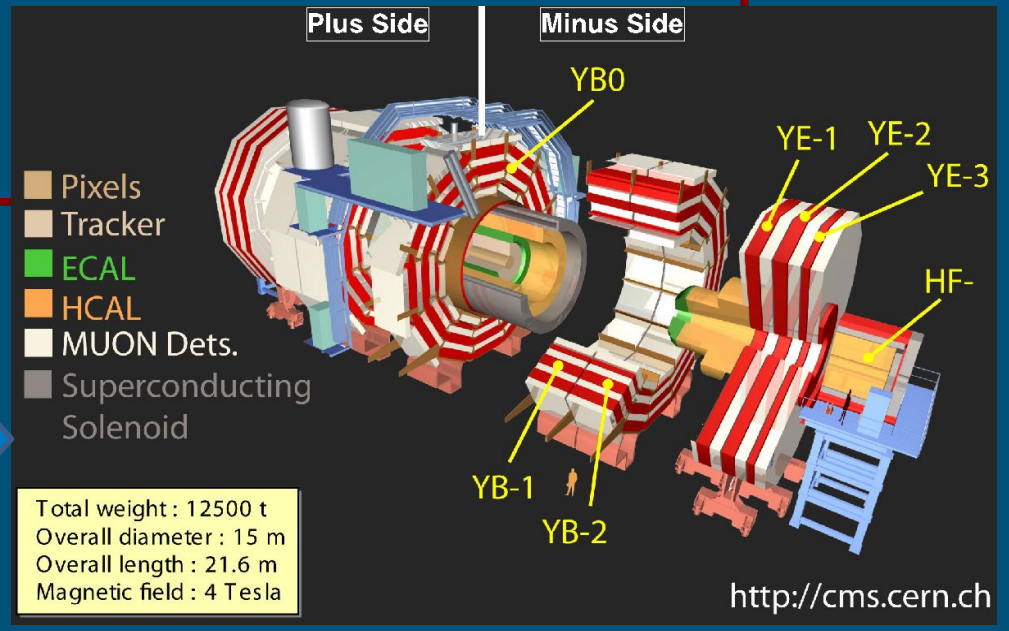
- Resolución en momento 10x mejor que en LEP

Calorímetro hadrónico hermético

- Buena medida de energía faltante

Por encima de todo, un potente imán que permita medir los momentos de las partículas

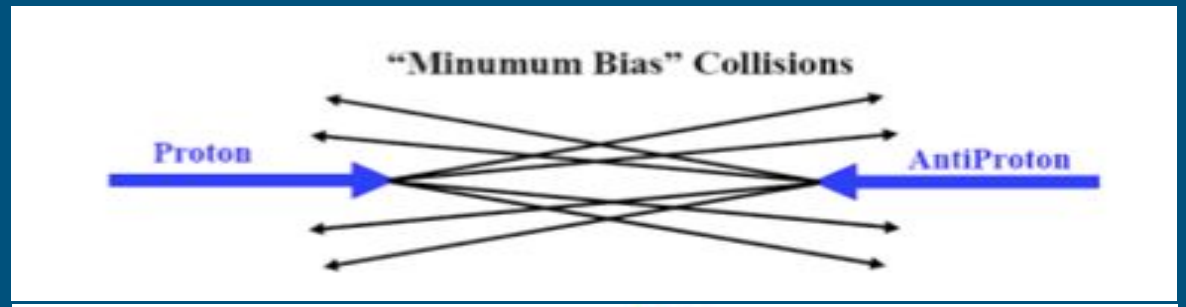
CMS: Extenso detector de trazas de Si en un campo magnético uniforme, un HCAL de alta cobertura, un ECAL finamente segmentado y un eficiente sistema de muones

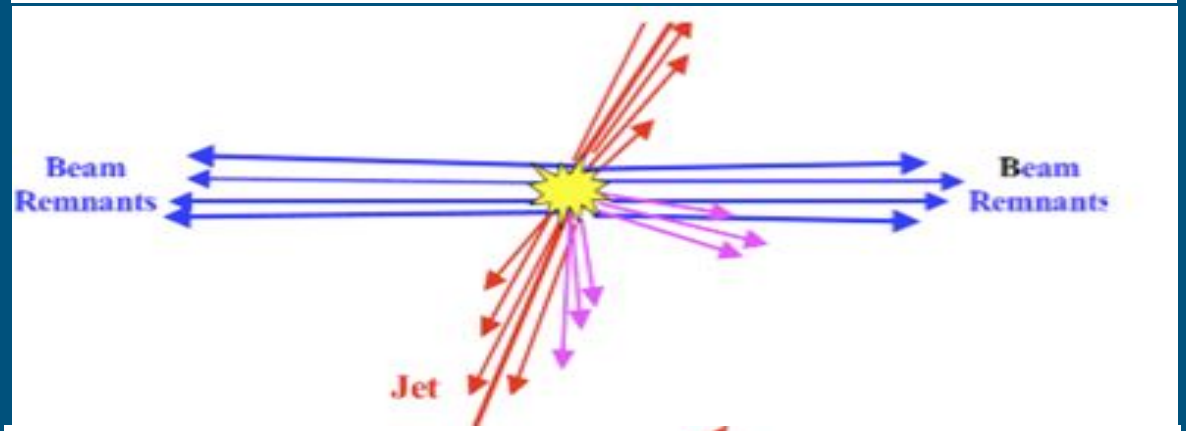


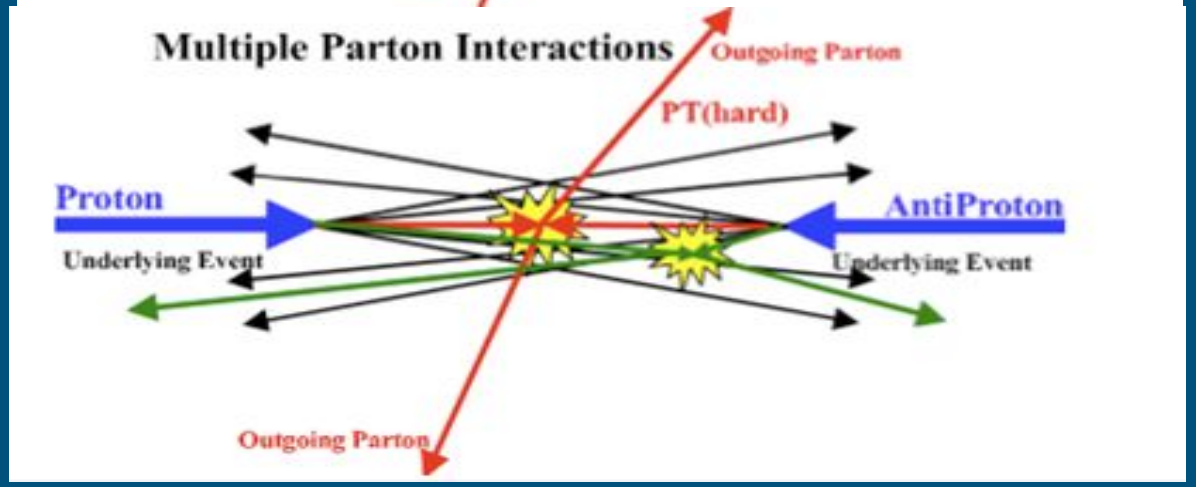
Selección

Sistema de disparo de la adquisición de datos o *trigger*

El trigger: la aguja en el pajar







La mayoría de interacciones p-p no son interesantes (colisiones periféricas con multiples partículas de bajo momento transverso en el estado final); son los llamados sucesos de *minimum bias ("bajo sesgo")*

En muy pocos casos, lo que se obtiene es una colisión "dura", en la que 2 partones colisionan, produciendo sucesos de alta energía, y partículas de alto pt en el estado final.

Normalmente estos procesos vienen acompañados de muchos otros sucesos de minimum bias en el mismo suceso.

Los procesos interesantes (p.ej. Higgs) y de nueva física son extremadamente poco frecuentes. La probabilidad de producir un determinado suceso en una colisión pp viene determinada por la sección eficaz de dicho proceso.

El trigger: la aguja en el pajar

$$R = \mathcal{L}\sigma$$

$$\mathcal{L} = f\frac{n_1 n_2}{A}$$

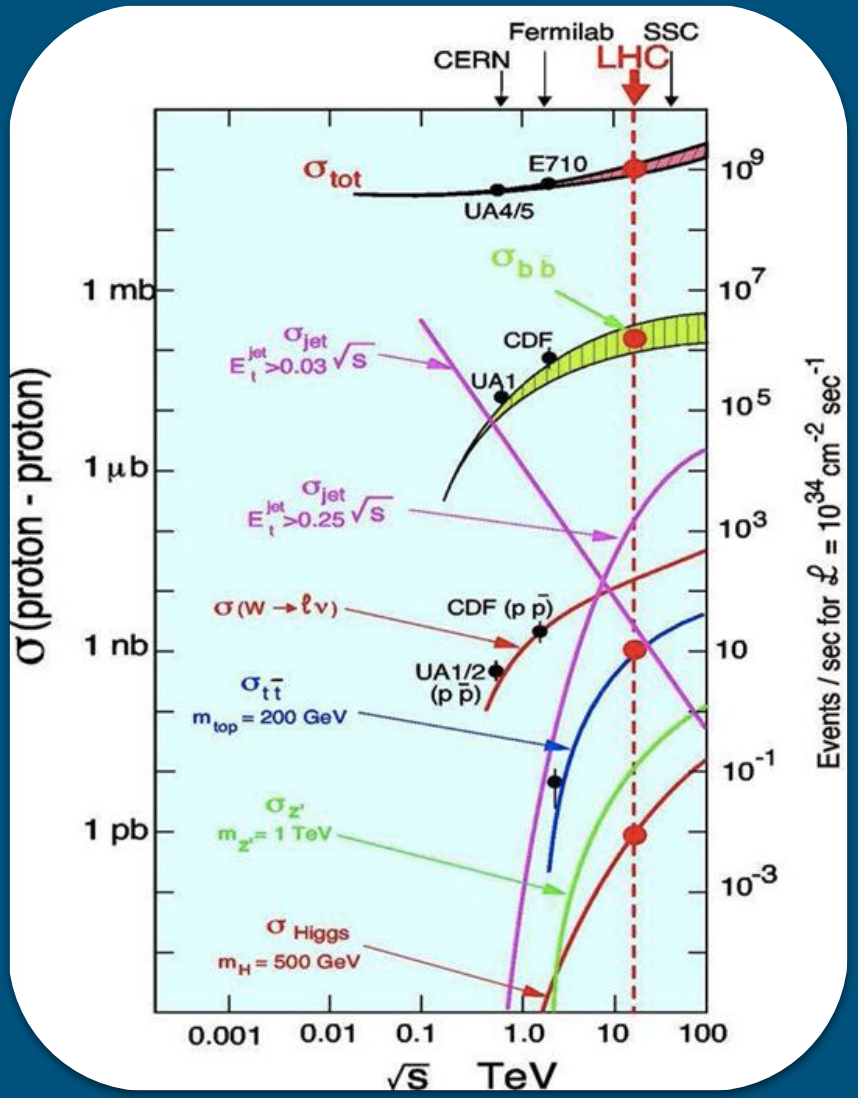
Protones por haz

Frecuencia de colisiones
40 MHz (25 ns entre paquetes)

Sección hábil de colisión

Se busca la máxima **LUMINOSIDAD** posible...

... aunque esto implica **RETOS** para el detector



Almacenar todos los datos es inviable

Tamaño medio de suceso ~ 1 Mbyte

~ 1MB/suceso x 40 x10^6 = 40 TB/s

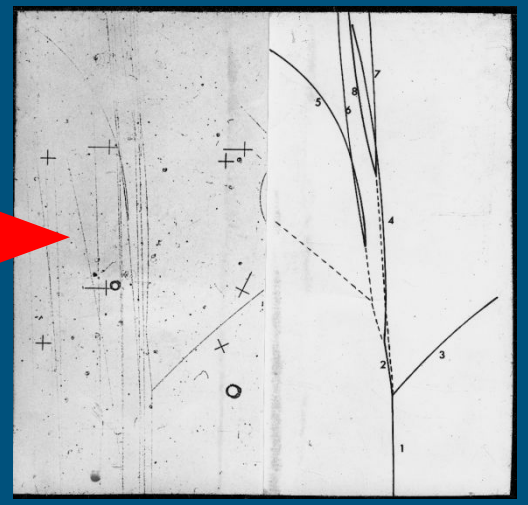
Es necesario filtrar 1 de cada 1.000.000.000.000 sucesos

¿Cómo pasar de 1GHz a 100Hz?

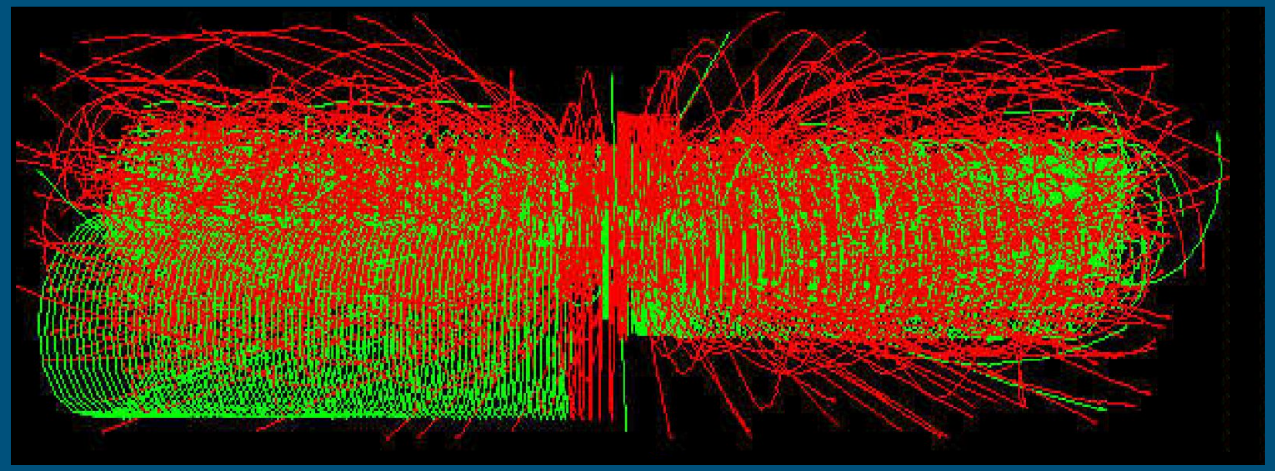
Sistema de discriminación de datos (TRIGGER)

El reto del trigger

Mirar a todos los sucesos en todos los cruces de haces, seleccionar los potencialmente interesantes y almacenarlos para análisis



- En LHC hay que identificar sucesos como este (1 in 10^{12})
- … escondidos entre unos 25 sucesos de min bias simultáneos
- … y esto, cada 25 ns…



Análisis

Estudio de los datos recogidos

Análisis de física en LHC

MEDIDAS DE PRECISIÓN (SM)

Medidas de precisión del SM a las energías de LHC

- → Parámetros
- → Ruptura de Simetría EW (Higgs)
- → QCD
- → BSM a partir de desviaciones en medidas globales de precisión (anomalías)

BÚSQUEDAS (BSM)

Nuevos procesos, nuevas partículas más allá del SM

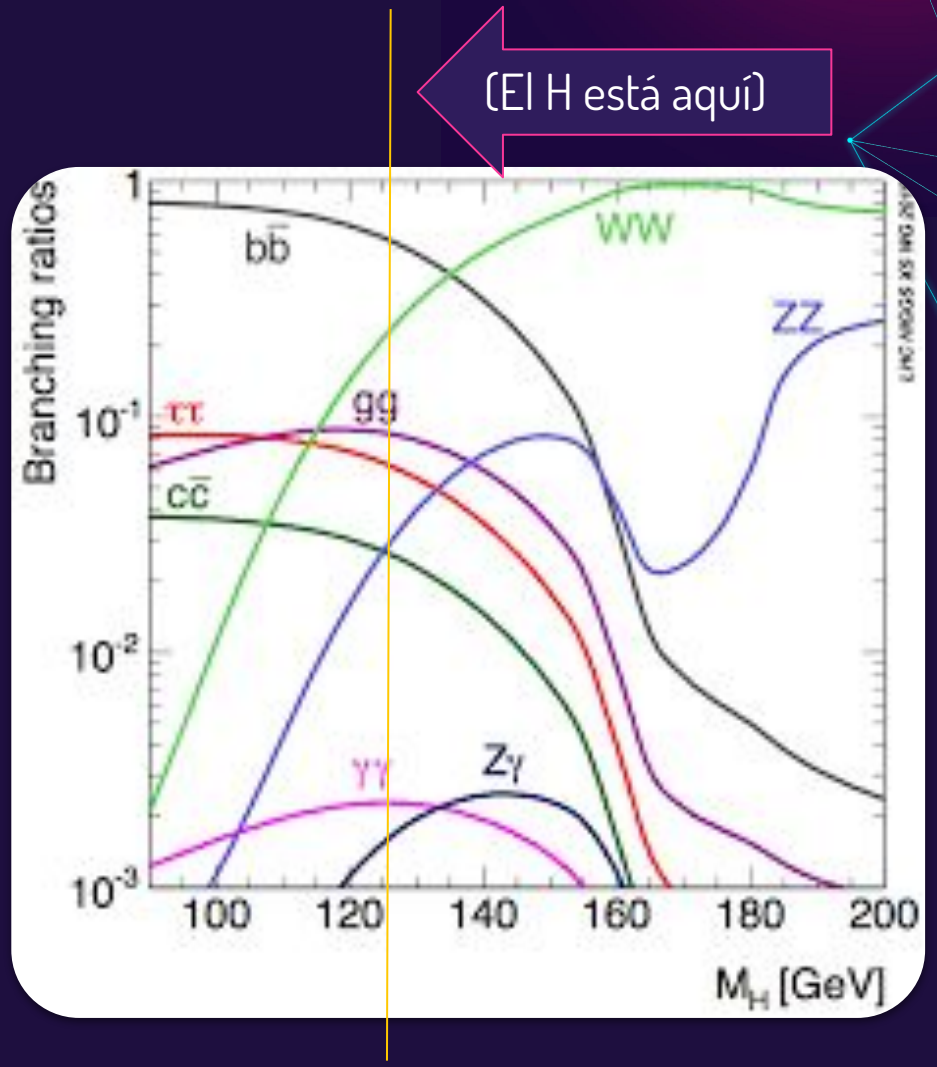
- → SUSY baja energía
- → Nuevas resonancias
- → Materia oscura
- → ...

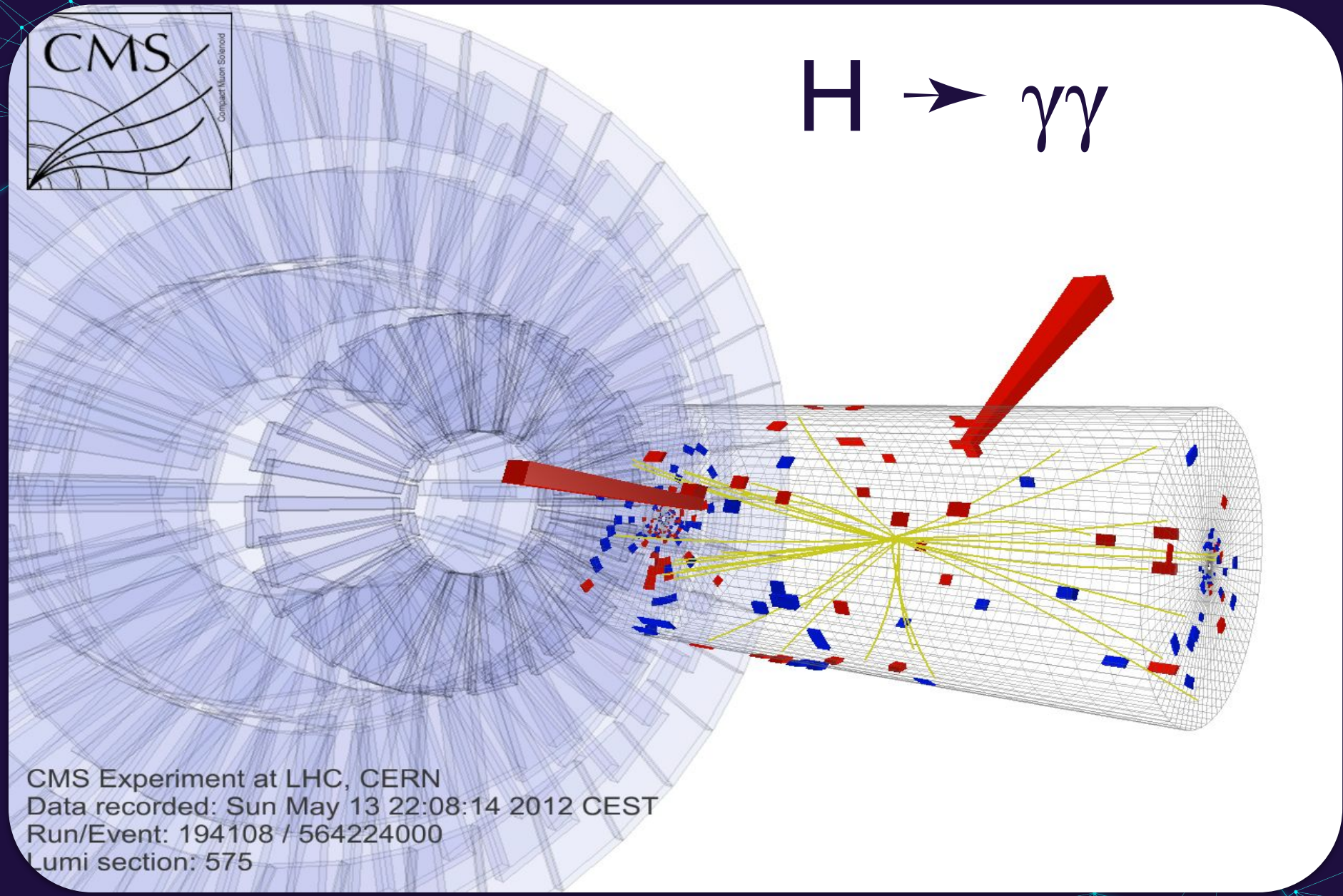
Búsqueda y estudio del bosón de Higgs

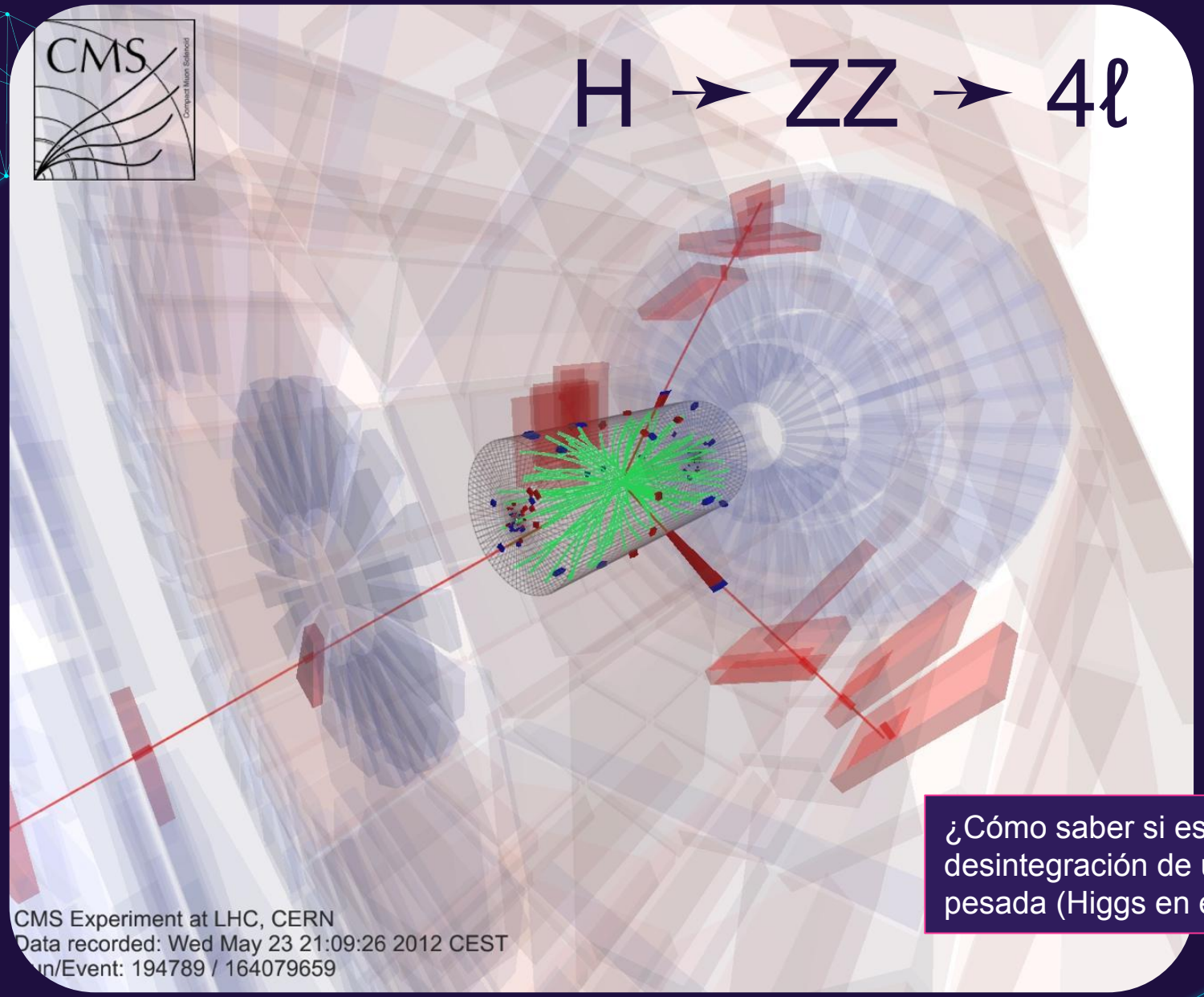
Vuelta al pasado: ¿Cómo se encontró el Bosón de Higgs?

El Higgs no es una partícula estable: inmediatamente **se desintegra** en partículas más ligeras.

Los modos de desintegración más abundantes **NO** son necesariamente los que mejor se observan experimentalmente.




CMS
Compact Muon Solenoid
H → γγ
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun May 13 22:08:14 2012 CEST
Run/Event: 194108 / 564224000
Lumi section: 575



¿Cómo saber si estos 4l proceden de la desintegración de una partícula original más pesada (Higgs en este caso)

Masa invariante

$$E = \sqrt{(\vec{p} \cdot c)^2 + (m_0 \cdot c^2)^2}$$

m_0 masa en reposo o “masa Invariante”.

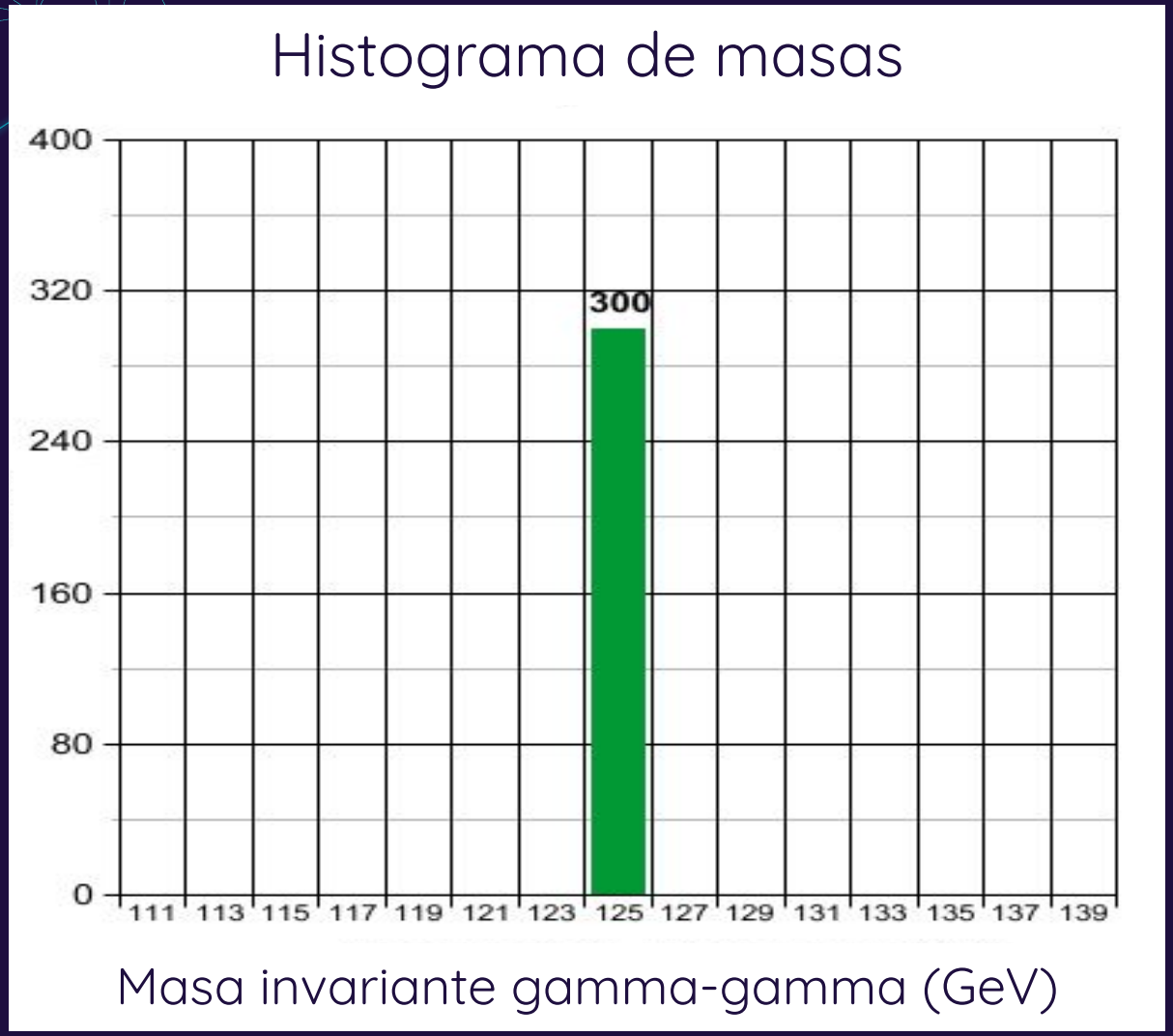
Dado que esta cantidad se conserva, podemos usarla para **inferir** la masa de una partícula "madre" a partir de la energía y el momento de los productos de desintegración.

En el caso de un H que se descompone en un par de fotones la suma de las energías y los momentos de ambos fotones conducen a la masa del H de la siguiente manera:

$$M_x^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1p_2\cos\theta =$$

300 bosones de Higgs

Simulación



$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1p_2\cos\theta$$

Masa y virtualidad

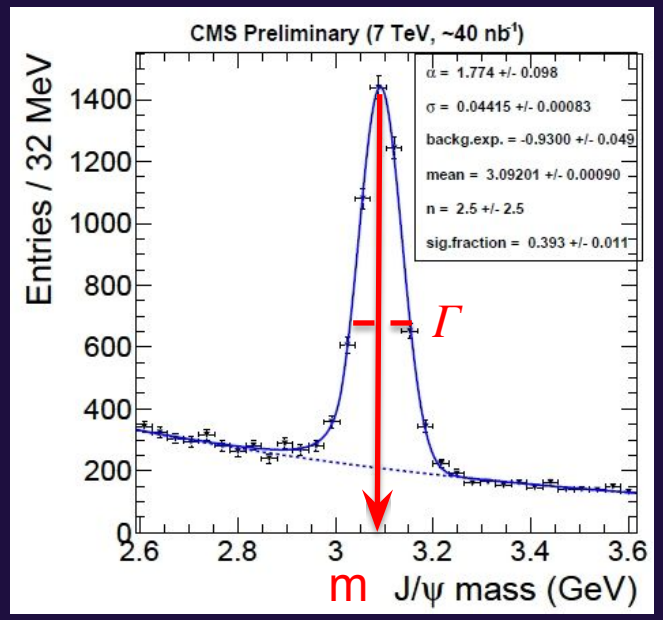
Masa ≠ valor fijo ⇒ $\Delta E \Delta t \approx \hbar \Rightarrow \Delta M \Delta t \approx \hbar$

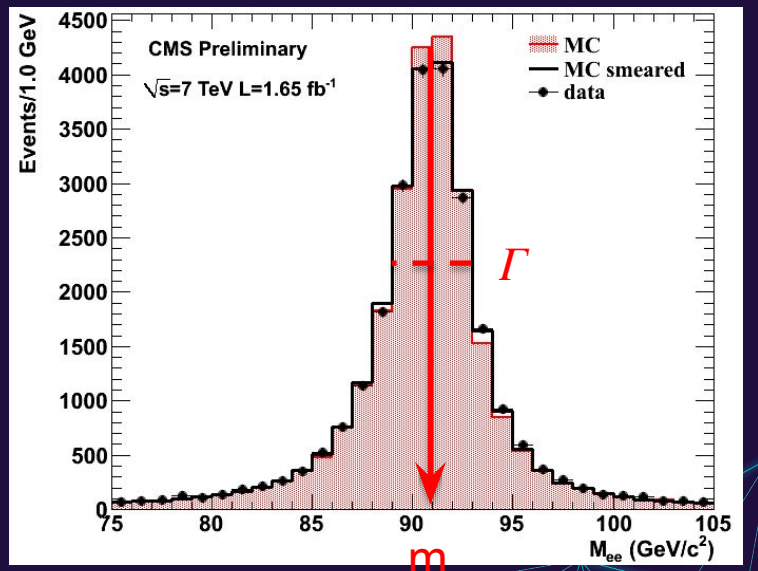
$$\Delta M \overset{\hbar}{\approx\!\!\Rightarrow} \Delta t$$

anchura natural de la partícula (Γ)

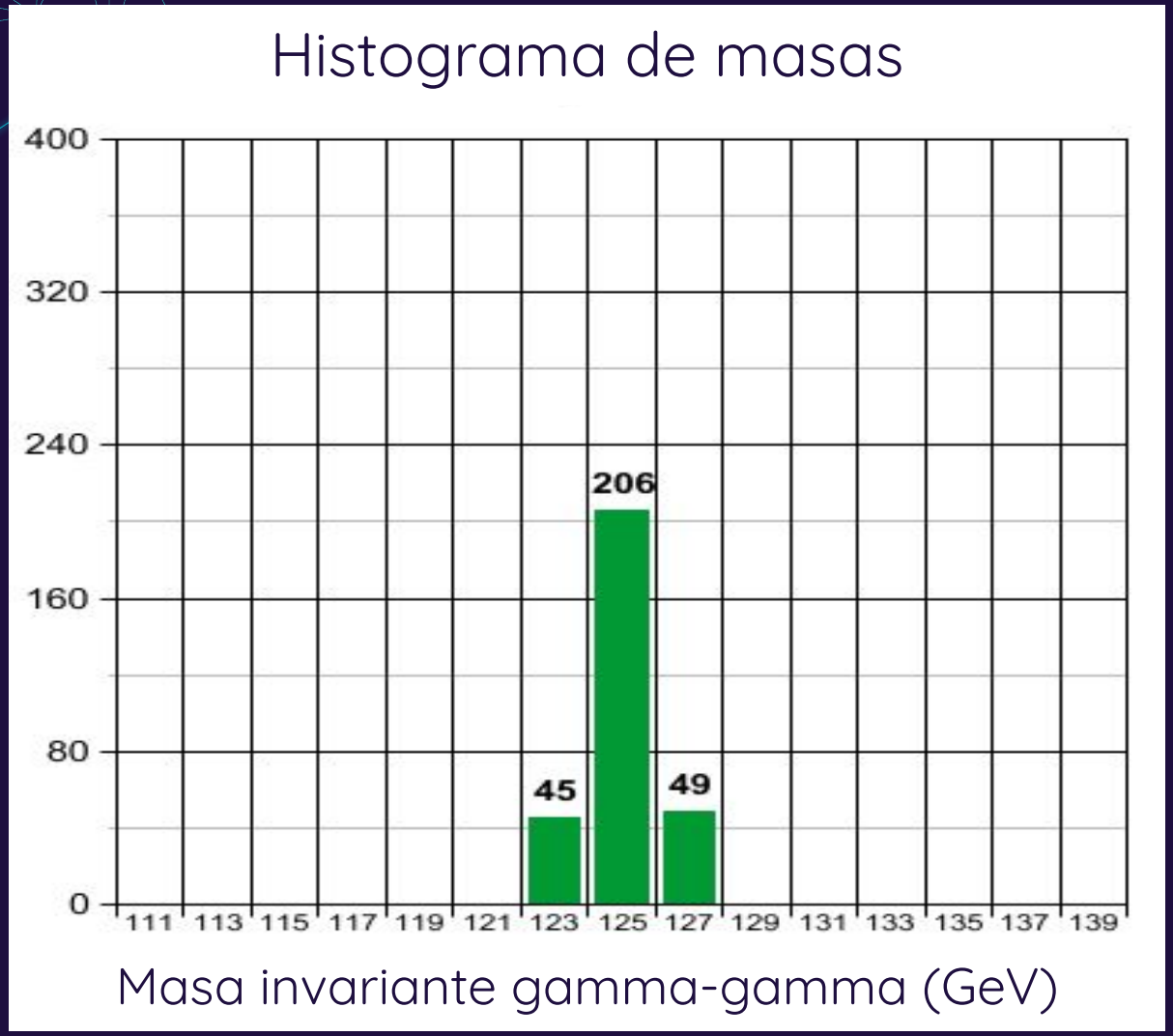
La masa tiene una distribución de probabilidad (resonancia) con anchura $\Gamma = \hbar/\tau$ y valor medio m.

Las partículas tienen una masa ≠ m y solo vive un tiempo Δt.





Masa y virtualidad



Simulación

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1p_2\cos\theta$$

Procesos de fondo

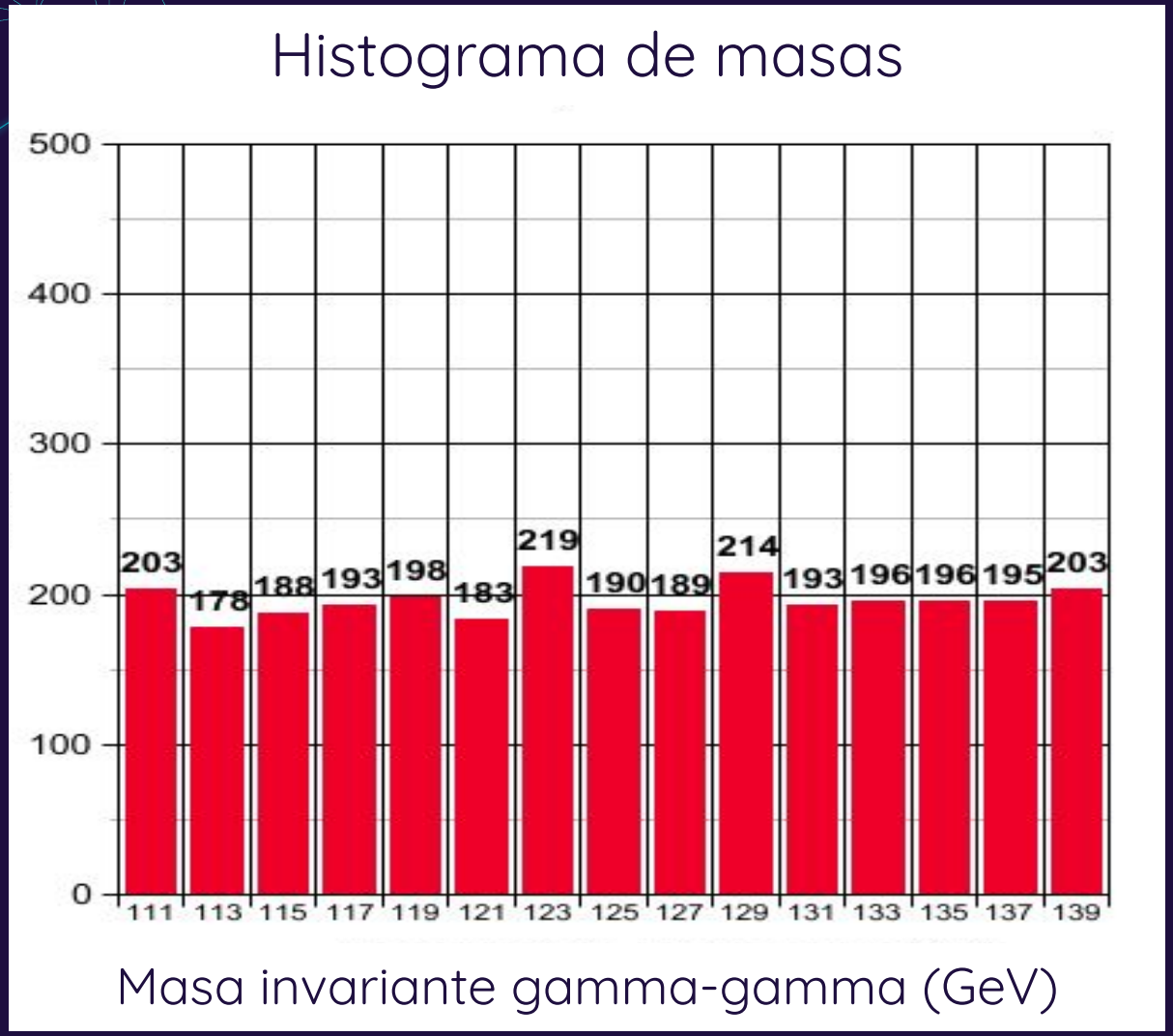
En una situación real: una vez reconstruido el evento y medidas las propiedades de los componentes, *¿cómo estamos seguros de que el evento es lo que decimos que es?*

☹ NO podemos estar seguros. Sólo vemos el estado final

- En general muchos procesos primarios distintos pueden generar el mismo estado final.
- Hay que comparar con simulaciones estadísticas (Montecarlo)
- Técnicas de análisis avanzadas explotan la cinemática de los sucesos para aumentar señal sobre fondo (S/B). ¡Tarea harto difícil !

Procesos de fondo

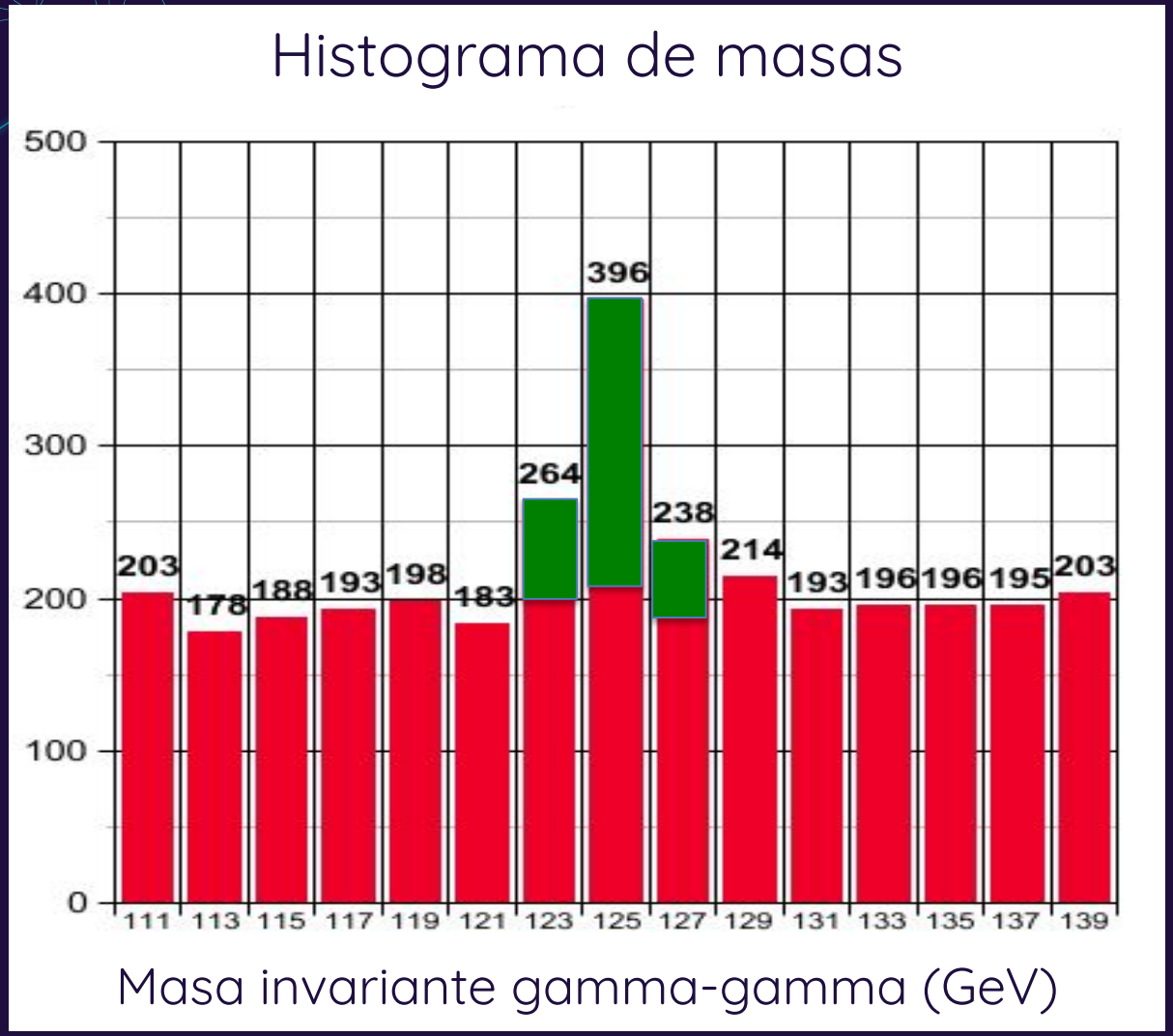
Simulación



$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1p_2\cos\theta$$

Fondo + señal

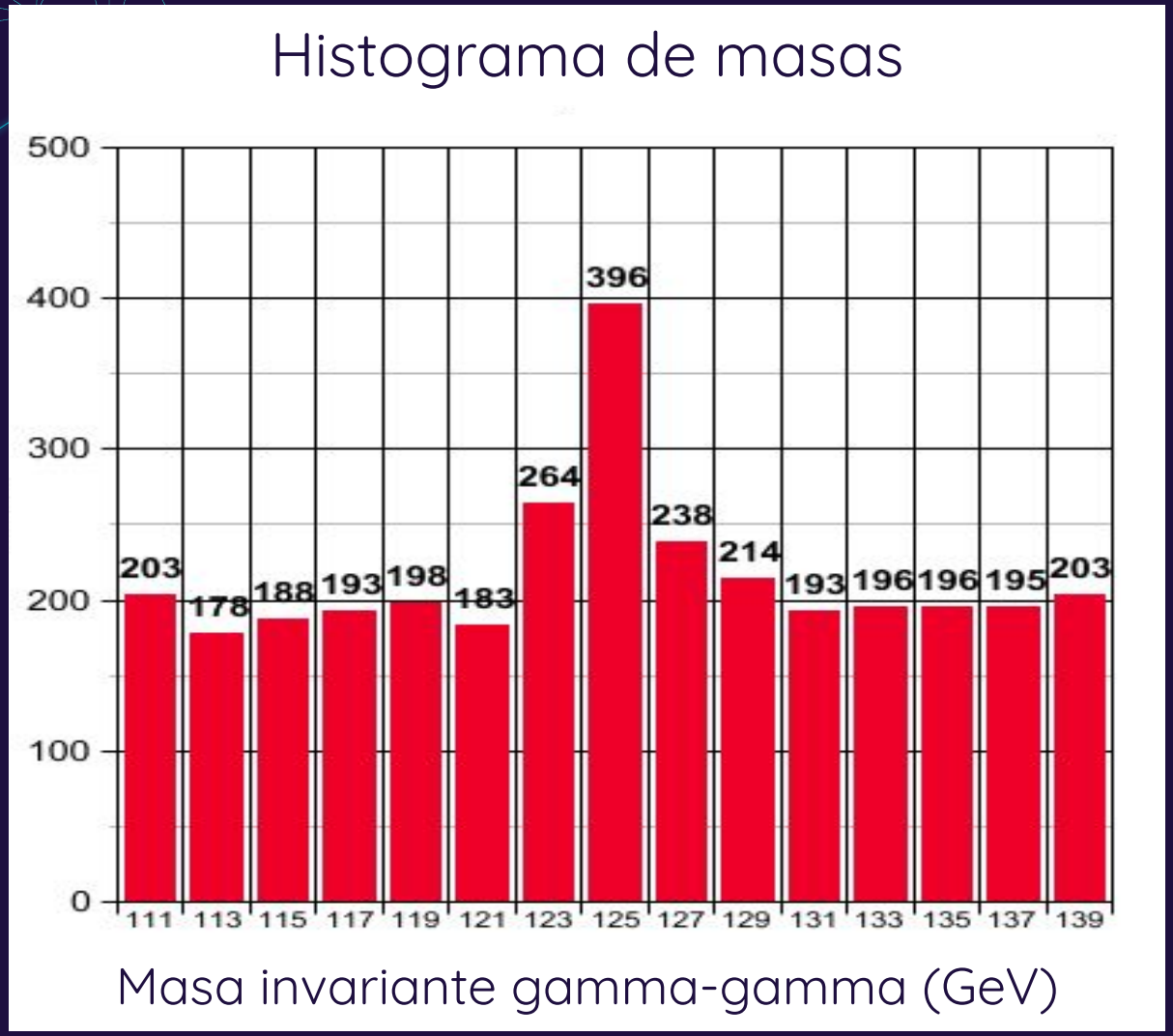


Simulación

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1p_2\cos\theta$$

“Datos reales”



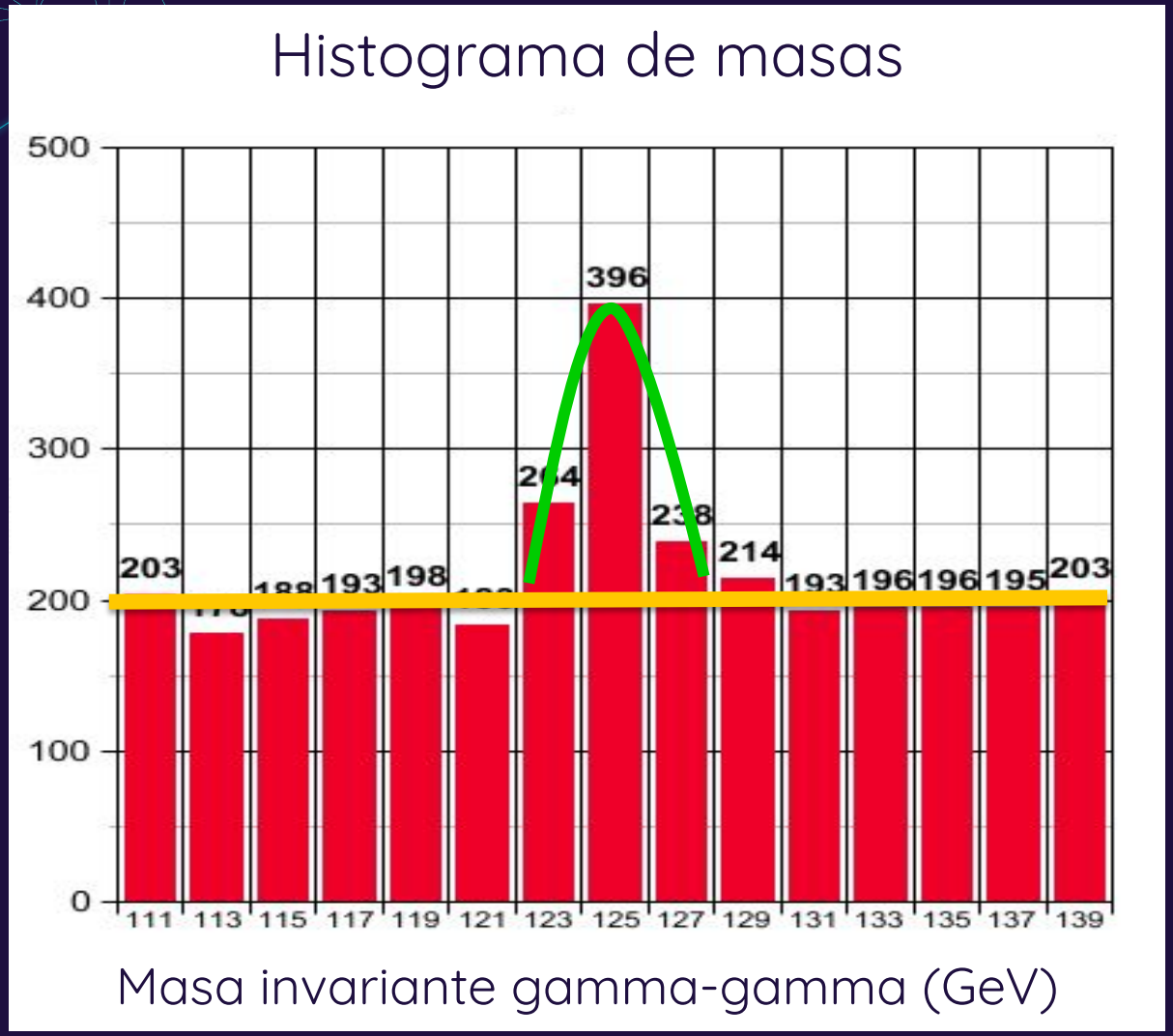
Simulación

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1p_2\cos\theta$$

Extracción de la señal

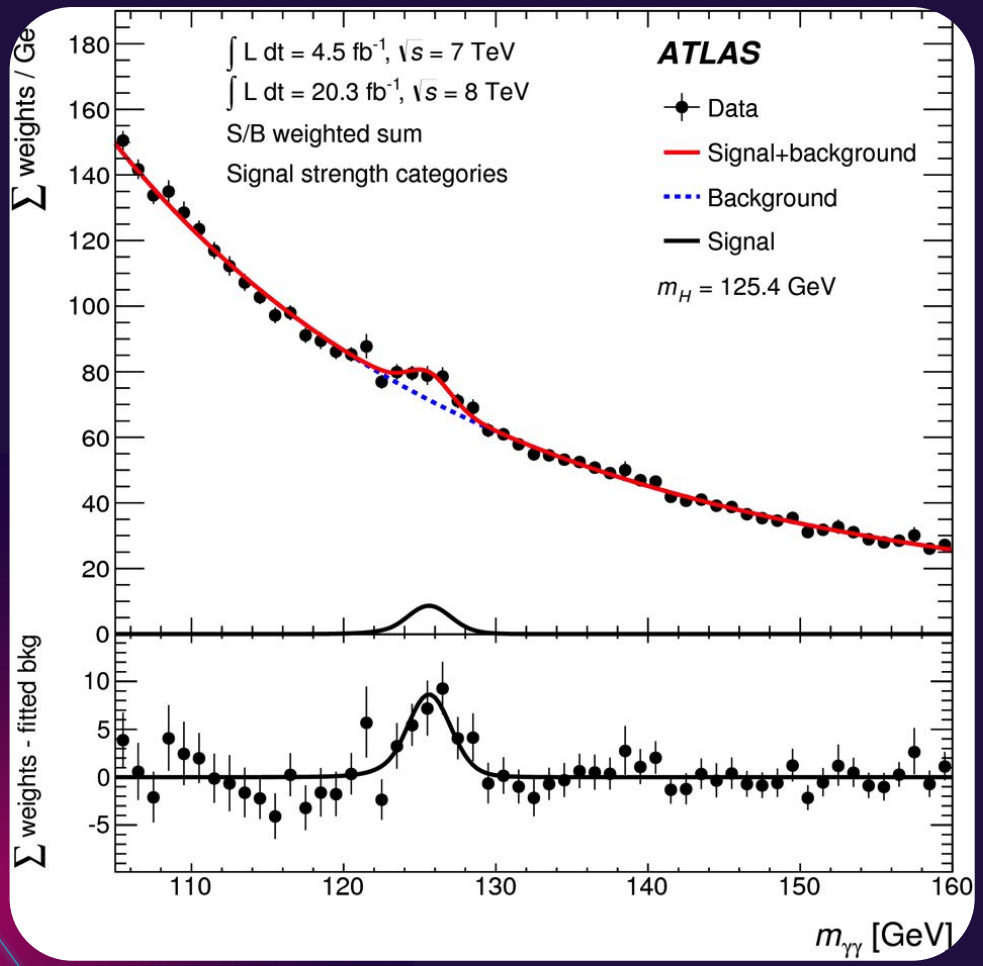
Simulación



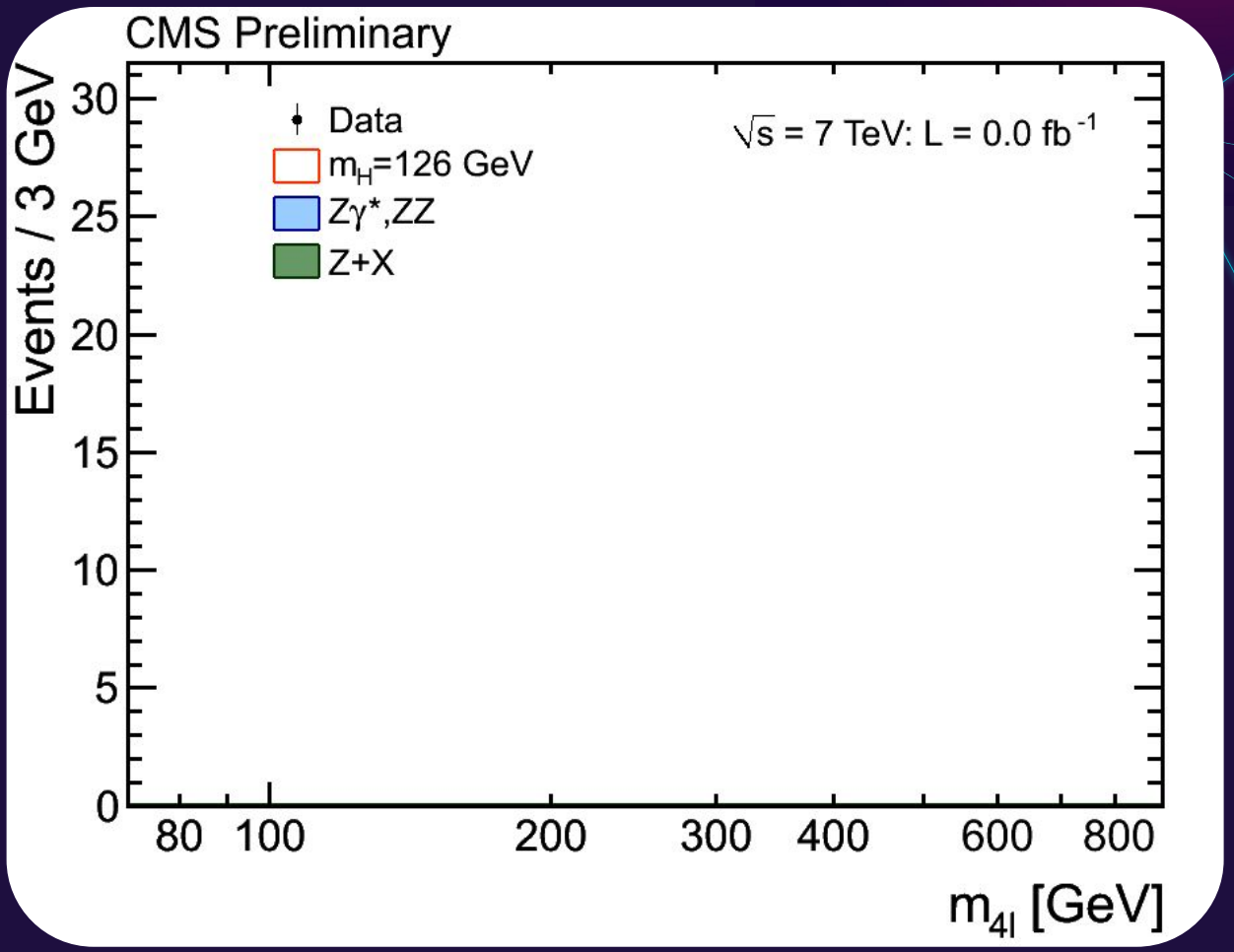
$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1p_2\cos\theta$$

… y así observamos el Higgs por primera vez



H → γγ

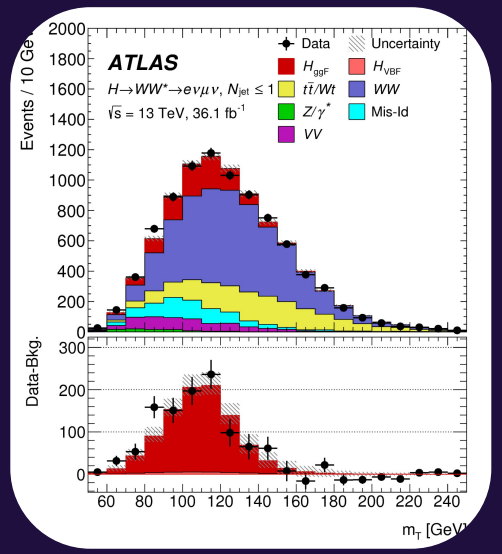


H →ZZ →4l

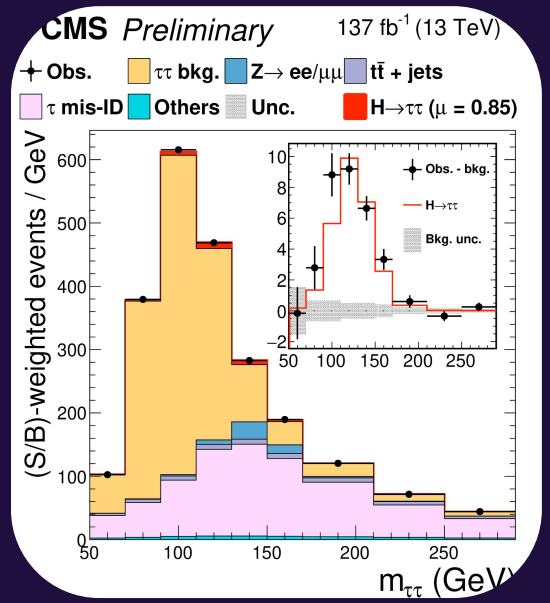
Otros modos de desintegración

Mucho más difíciles de observar a causa de sus topologías y los altos fondos

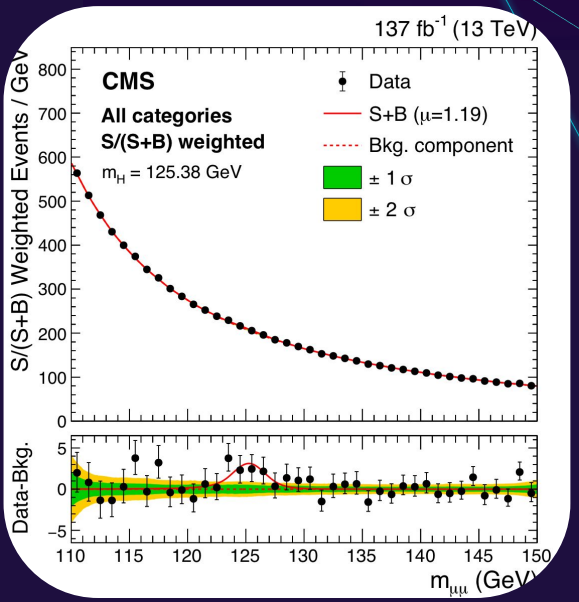
H→WW→2l2nu

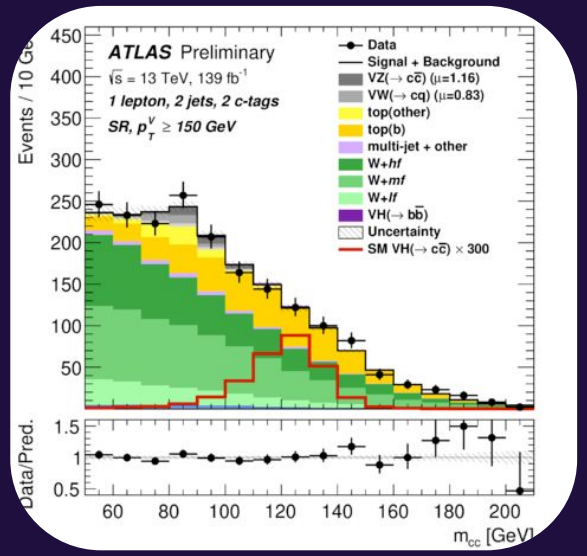


H→ττ

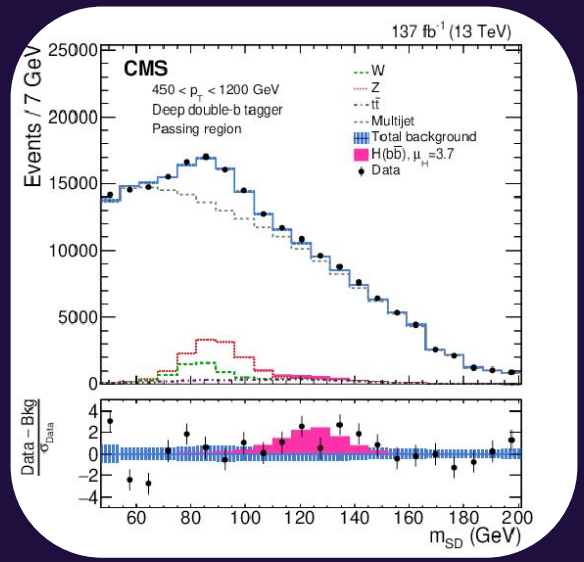


H→μμ





H→cc



H→bb

Ese es el procedimiento para buscar nuevas partículas

¿Cómo se estudian las que conocemos?

Midiendo todo lo medible sobre ellas

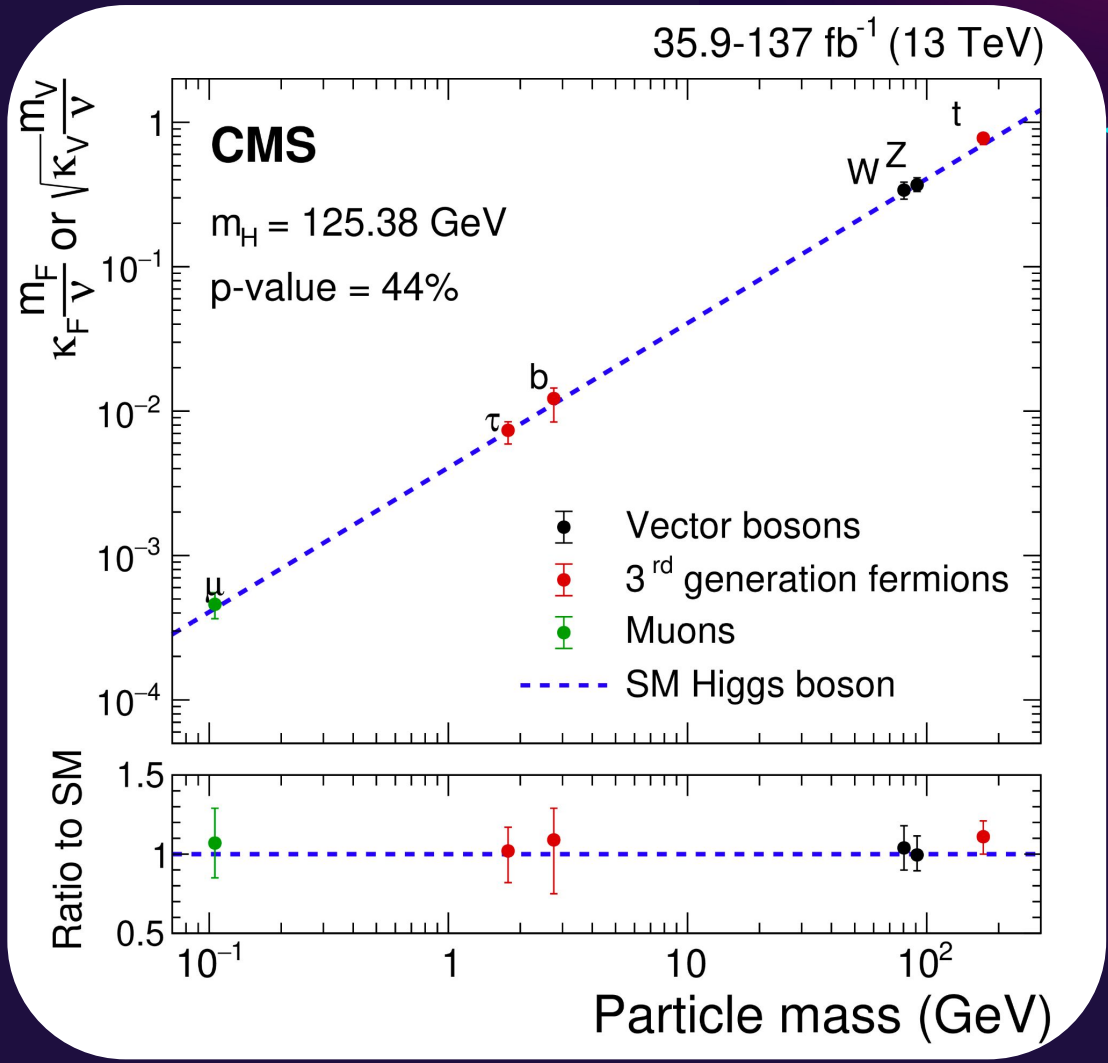
- *Masas*
- *Carga*
- *Spin…*
- *Probabilidades de producción (sección eficaz)*
- *Acoplos a otras partículas*

¿Ejemplo? Lo veréis en un rato…

¿Qué otras características del Higgs podemos medir?

Su acoplo a otras partículas

La **masa** de las partículas elementales es **proporcional a su acoplo** con el campo de Higgs.

🙂Establecido el acoplamiento del Higgs a los bosones vectoriales y a la tercera generación de fermiones (top, b, tau)
😏Evidencia de acoplamiento a la segunda generación.

La magnitud del acoplo del Higgs a otras partículas es **muy sensible** a desviaciones producidas por física más allá del SM.