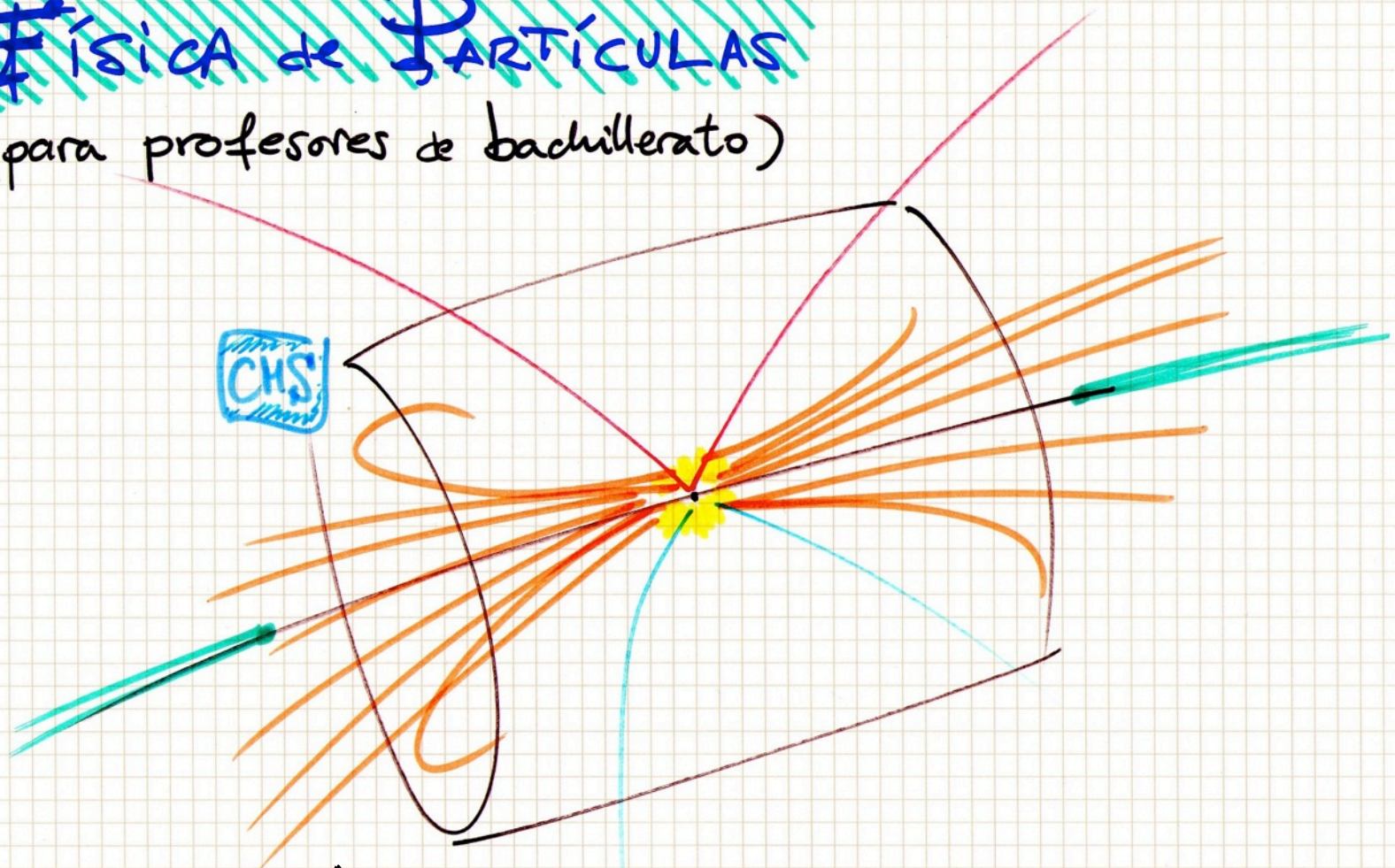


FÍSICA de PARTÍCULAS

(para profesores de bachillerato)



Detectores de partículas

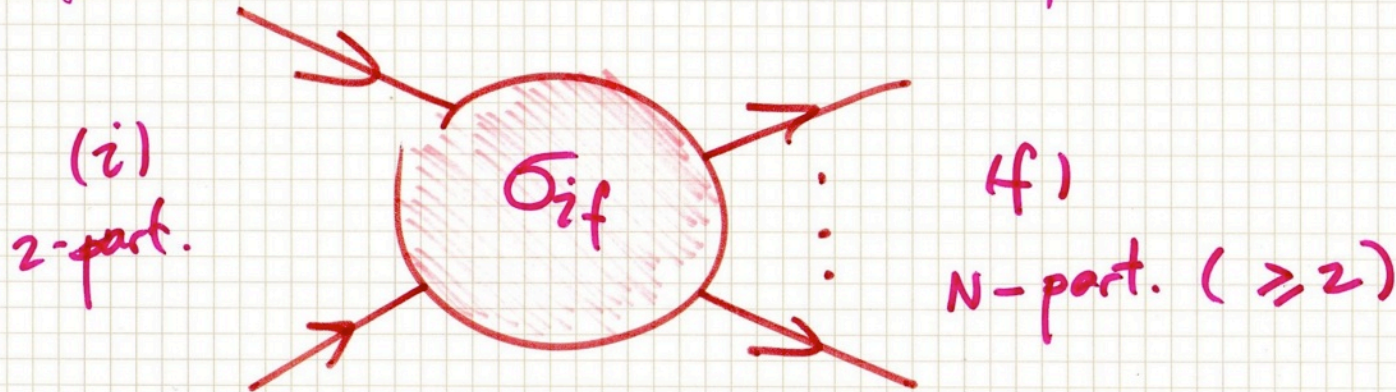
PABLO GARCÍA ABÍA
CIEMAT, Madrid

CERN, 25 de Junio de 2014

FÍSICA EXPERIMENTAL

Estados iniciales (i) y finales (f)

En general, los procesos de colisión son de la forma $i \rightarrow f$:



Se conservan los números cuánticos, el momento, la energía:

$$\bullet N_{C_i} = N_{C_f} \quad \bullet E_i = E_f \quad \bullet \sum \vec{p}_i = \sum \vec{p}_f$$

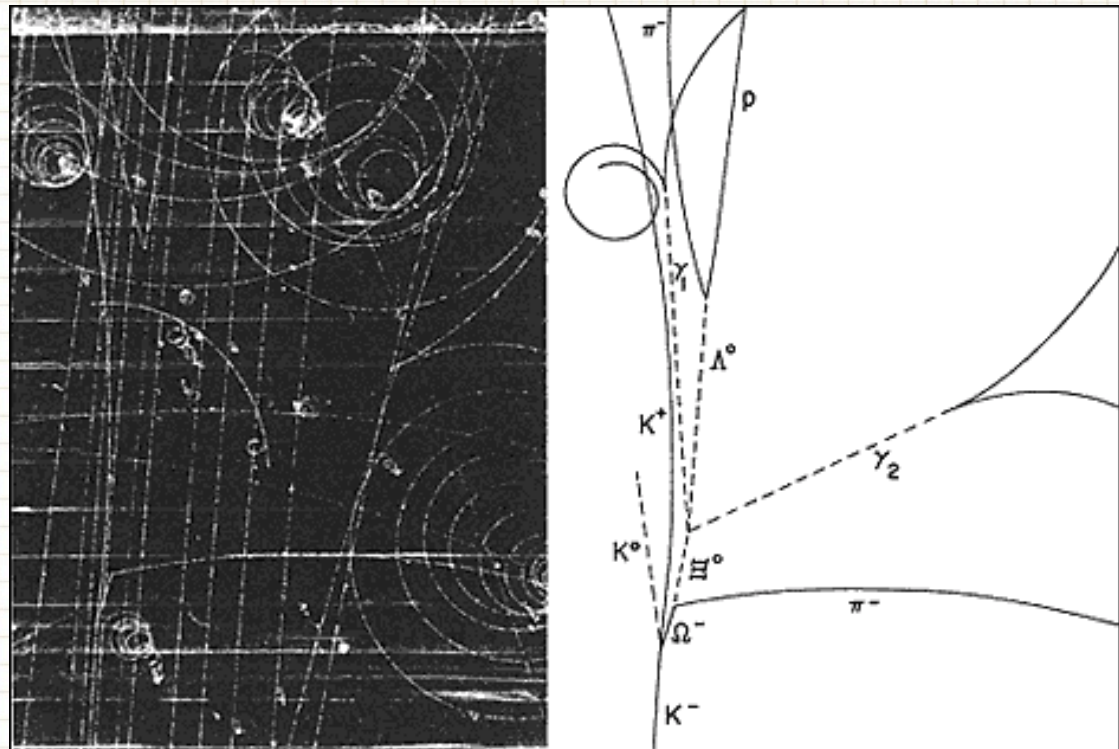
La sección eficaz, σ_{if} , es una función de los números cuánticos!

σ_{if} se puede calcular en el modelo estándar y medir en los experimentos.

Por conservación de energía-momento se infiere el momento (energía, masa y carga) de las partículas no detectadas:

$$\vec{p}_{\Lambda^0} = \vec{p}_p + \vec{p}_{\pi^-}$$

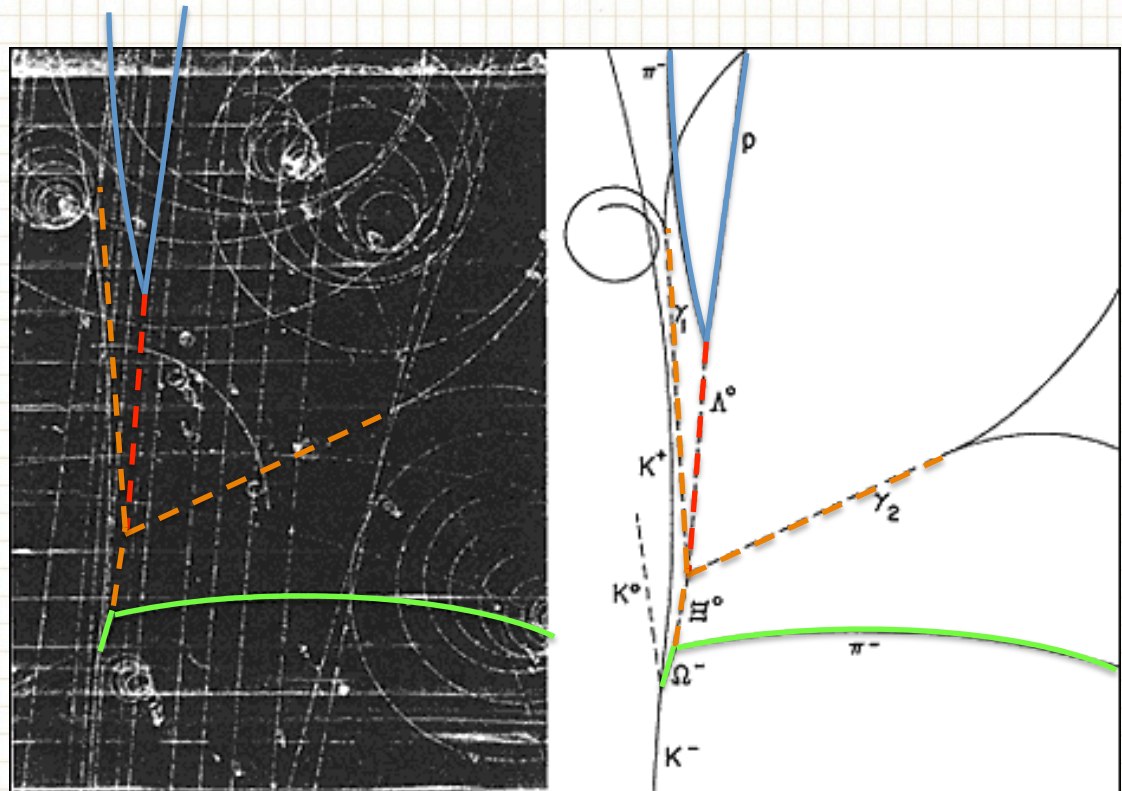
$$E_{\Lambda^0} = E_p + E_{\pi^-}$$



Por conservación de energía-momento se infiere el momento (energía, masa y carga) de las partículas no detectadas:

$$\vec{p}_{\Lambda^0} = \vec{p}_p + \vec{p}_{\pi^-}$$

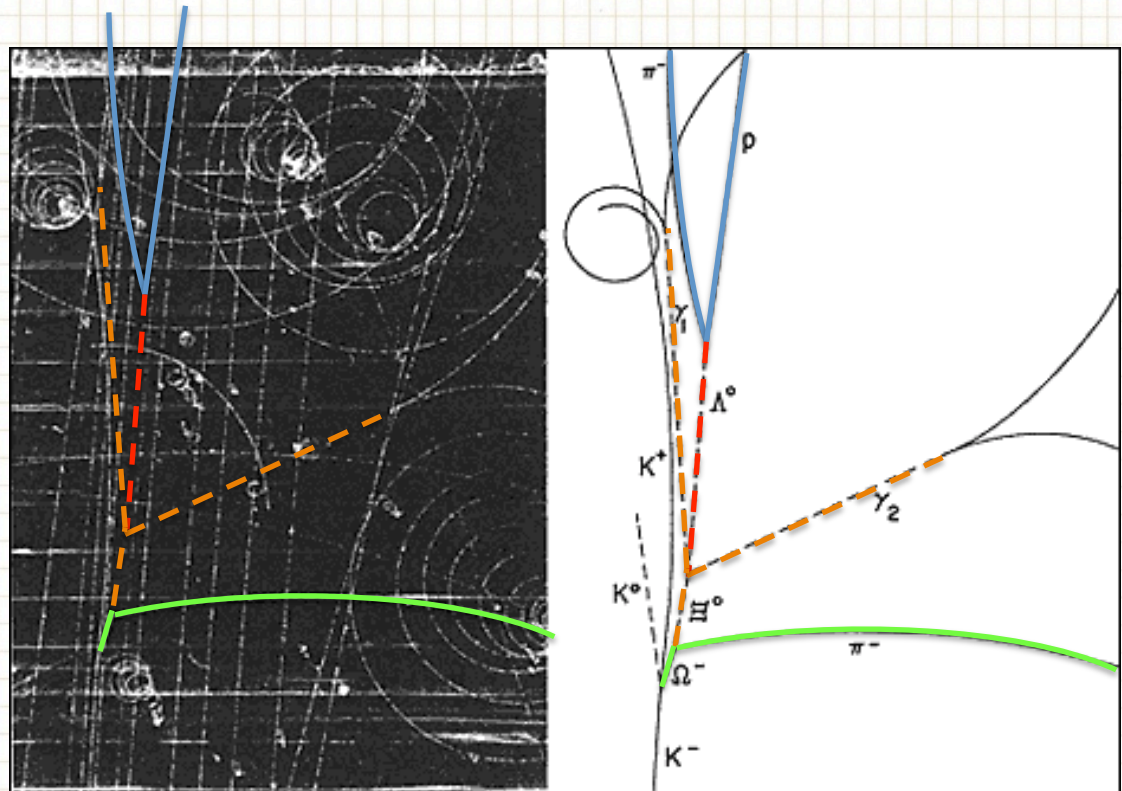
$$E_{\Lambda^0} = E_p + E_{\pi^-}$$



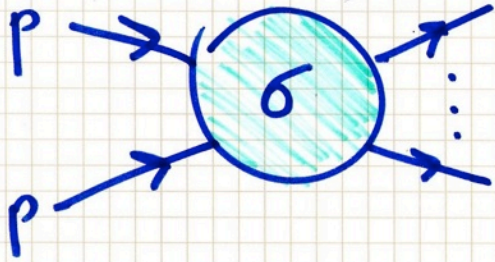
Por conservación de energía-momento se infiere el momento (energía, masa y carga) de las partículas no detectadas:

$$\vec{p}_{\Lambda^0} = \vec{p}_p + \vec{p}_{\pi^-}$$

$$E_{\Lambda^0} = E_p + E_{\pi^-}$$



LHC



$$\sigma \equiv \sigma(\text{M.E.} + ?)$$

NEW?

luminosidad

■ Núm. de procesos $i \rightarrow f$: $N_f = \sigma_{if} \cdot \mathcal{L}_i$

sección eficaz

donde $i = q\bar{q}, qq, q\bar{q}, \dots$
 $f = q\bar{q}, Z, W, ZZ, H, \dots$

■ Los experimentos detectan las partículas del estado f para determinar con precisión $\sigma_{if}(\text{exp.})$ y compararla con $\sigma_{if}(\text{M.E.})$:

$$\dot{\sigma}_{if}(\text{exp}) = \sigma_{if}(\text{M.E.}) \circ \sigma_{if}(\text{M.E.} + \underline{\text{nueva física}})?$$

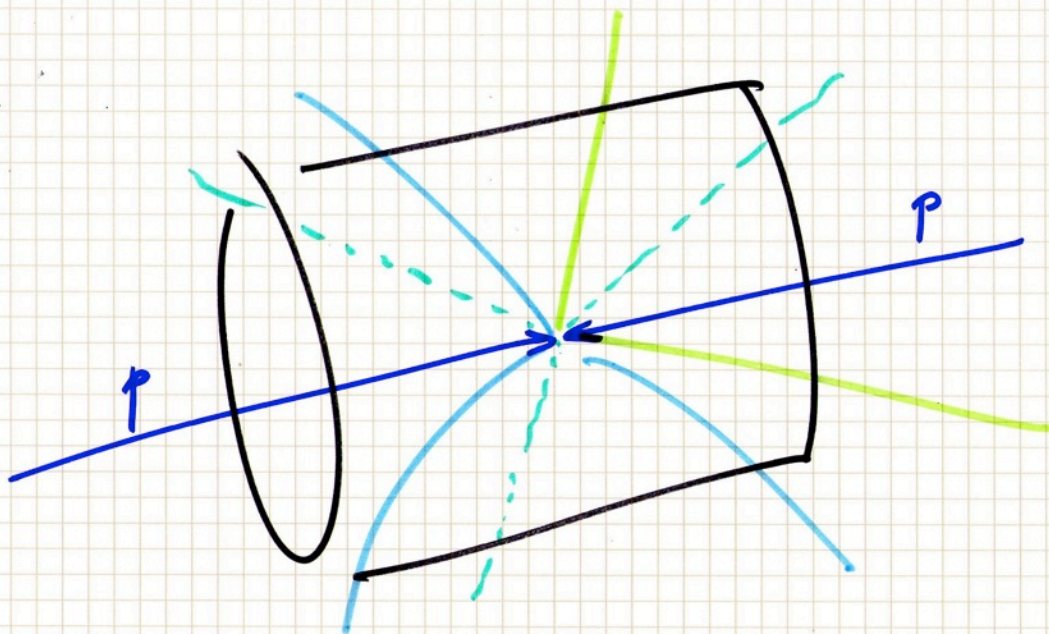
p.e. Higgs: $\sigma(\text{exp}) = \sigma(\text{M.E.} + \text{Higgs}) \neq \sigma(\text{M.E. no Higgs}) \quad \text{!!}$

LHC

¿CÓMO OBTENEMOS σ (exp.)?

$i \rightarrow$ LHC

$f \rightarrow$ CMS



DETECTOR: registra señales \rightarrow identifica partículas \rightarrow mide propiedades:
 \vec{p} , carga, masa, vida media.

combina información de las partículas individuales para
determinar el proceso $i \rightarrow f$.

RETOS

✓ Identificar partículas
sin confusión.



✓ Medir propiedades con la
mayor precisión posible
para todas las partículas.



✓ Determinar de forma
inequívoca el proceso $i \rightarrow f$.



DIFICULTADES

✗ Señales perdidas o espúreas
dificultan identificación partículas.

✗ Precisión limitada del detector
dificulta discernir unos procesos
de otros. Muchas partículas ...
¡ no se detectan !

✗ Hay muchos procesos similares
a $i \rightarrow f$: complica determinar
 σ_{if} a causa de la contaminación.

SOLUCIÓN

☑ aceleradores: proporcionan un estado inicial bien definido.

E y L conocidos con precisión.

- ⊙ alta E : para estudiar $n.E.$ y más allá
- ⊙ alta L : elevado núm. de colisiones \rightarrow muestras bien pobladas que nos permiten buscar señales ínfimas.

nueva física

☑ detectores: ⊙ herméticos \rightarrow detectar todas las partículas visibles de " f ".

⊙ grandes \rightarrow medir con precisión \vec{p} de las partículas.

⊙ muy segmentados \rightarrow medir la E e identificar las part. individualmente.

⊙ rápidos \rightarrow registrar todos los procesos $i \rightarrow f$ (computación distribuida)

⊙ y... ¡BARATOS!

¡¡ RETO CIENTÍFICO, TECNOLÓGICO Y HUMANO !!

¿ QUÉ DETECTAMOS Y MEDIMOS ?

La materia está hecha de partículas elementales que experimentan las interacciones descritas por el M.E.

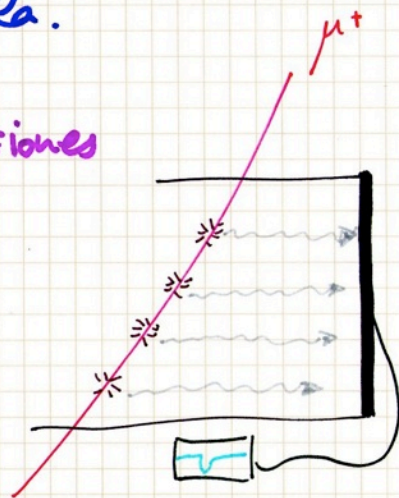
Las partículas (f) que interaccionan con la materia pierden E a través de diferentes procesos, que dependen del tipo de partícula.

Ⓐ Partículas cargadas relativistas: pierden E por colisiones con e^- atómicos \rightarrow excitación e ionización.

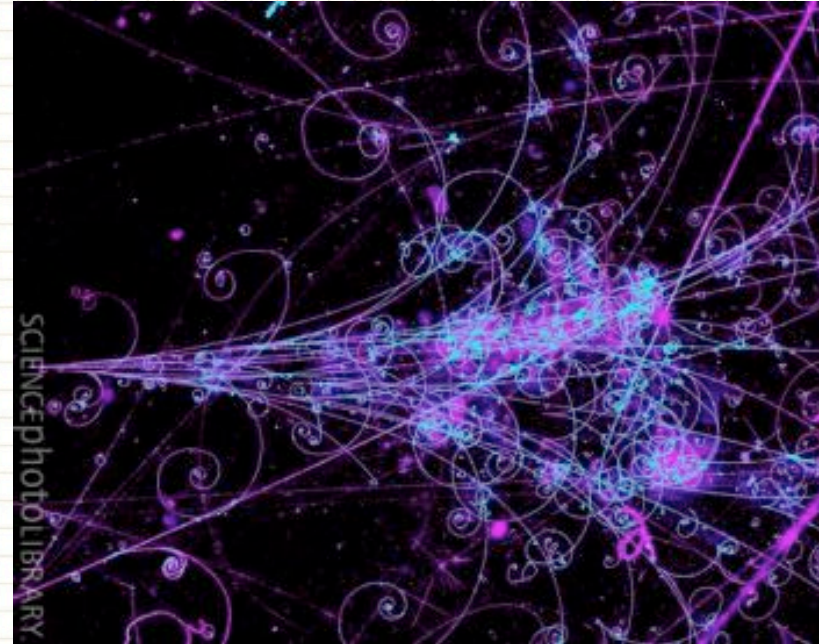
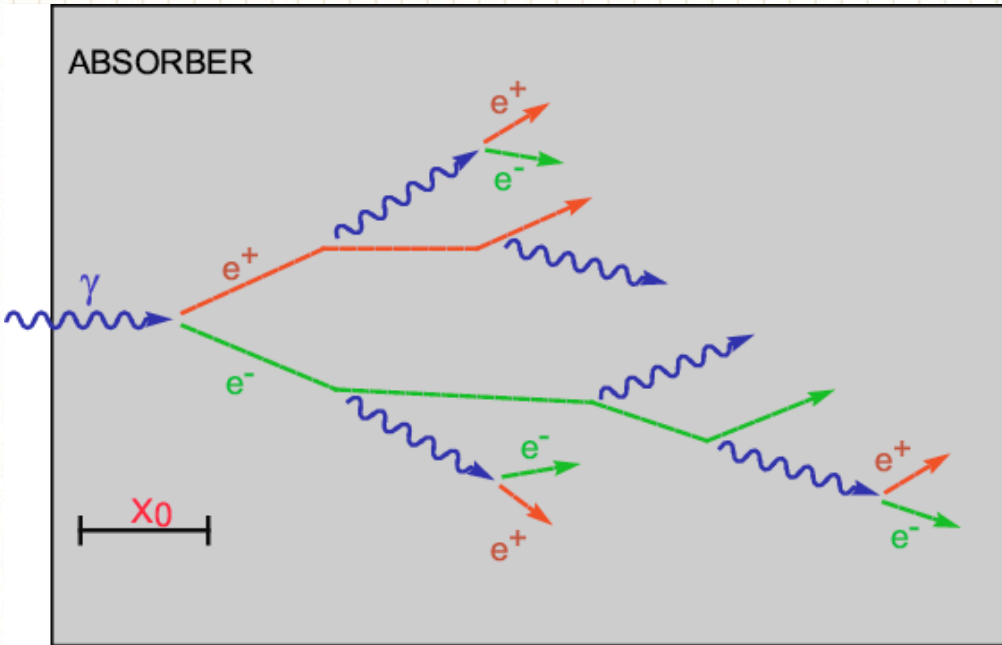
Ⓑ e^- y e^+ producen γ (bremstrahlung) debido a las interacciones con los campos \vec{E} nucleares.

Ⓒ Hadrones: int. con los núcleos y producen mesones cargados y neutros. Los núcleos absorben parte de la E que liberan emitiendo nucleones.

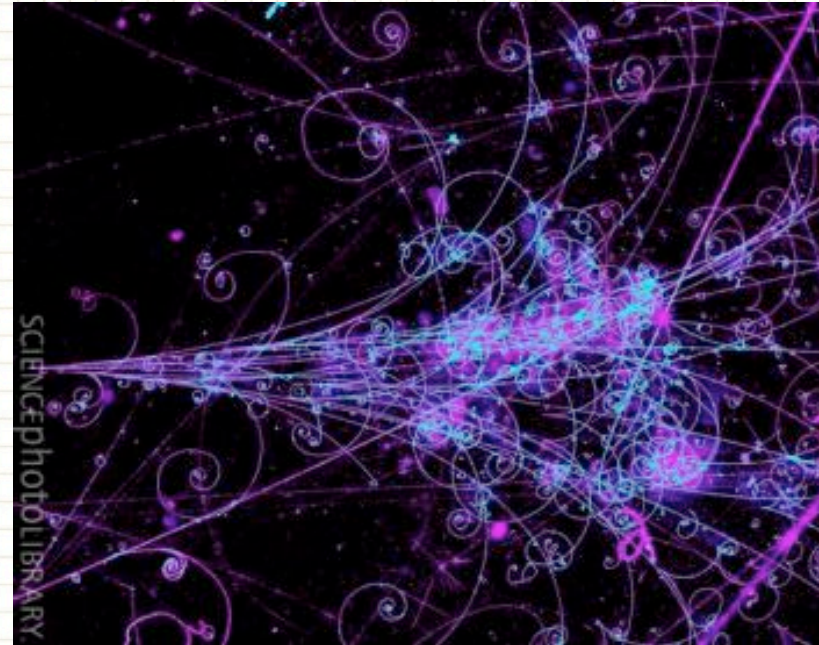
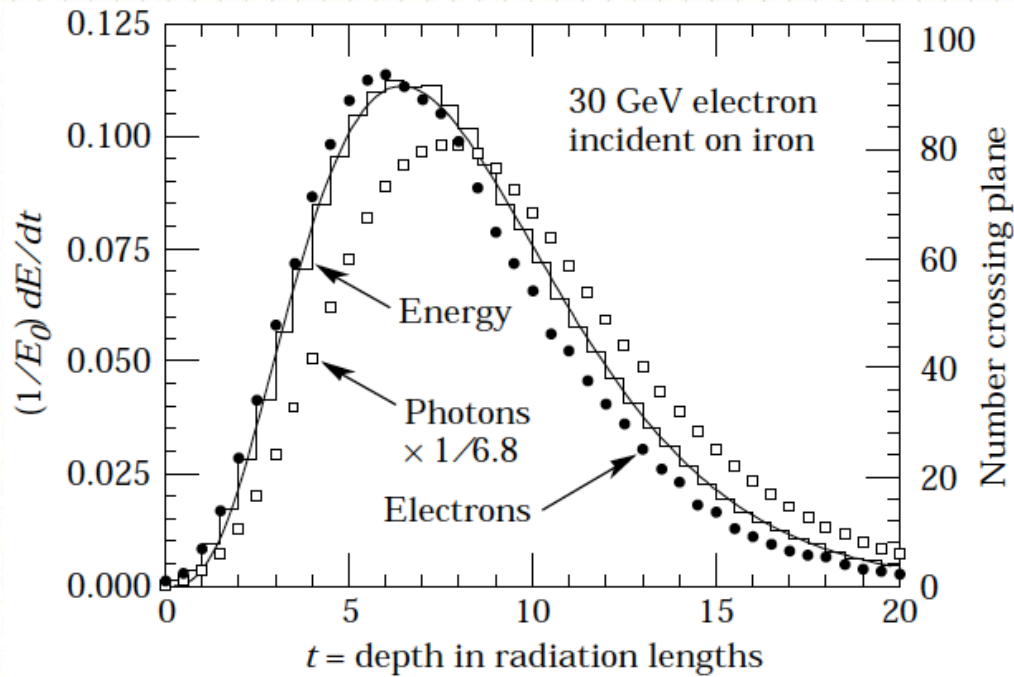
Ⓓ π : son absorbidos completamente, produciendo países e^+e^- .



cascadas electromagnéticas

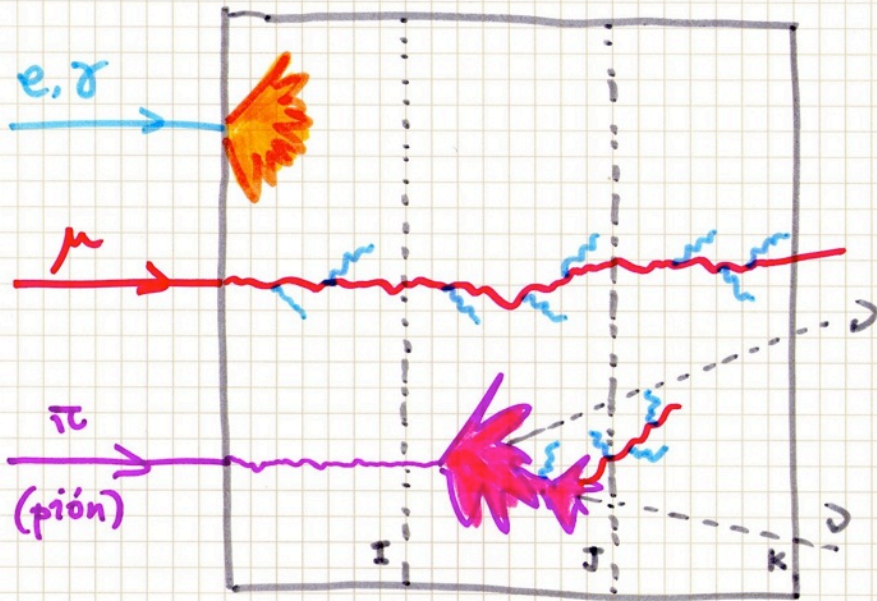


cascadas electromagnéticas



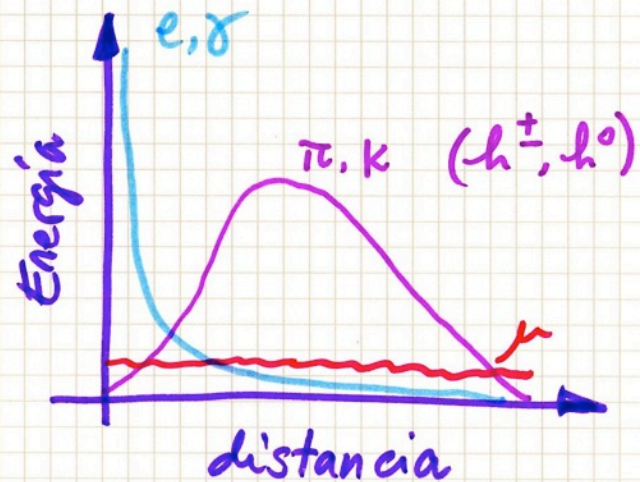
perfil lateral del depósito de energía
de electrones/positrones y fotones

Las señales debidas a los procesos A, B, C y D nos ayudan a identificar las partículas.



I, J, K → Detectores

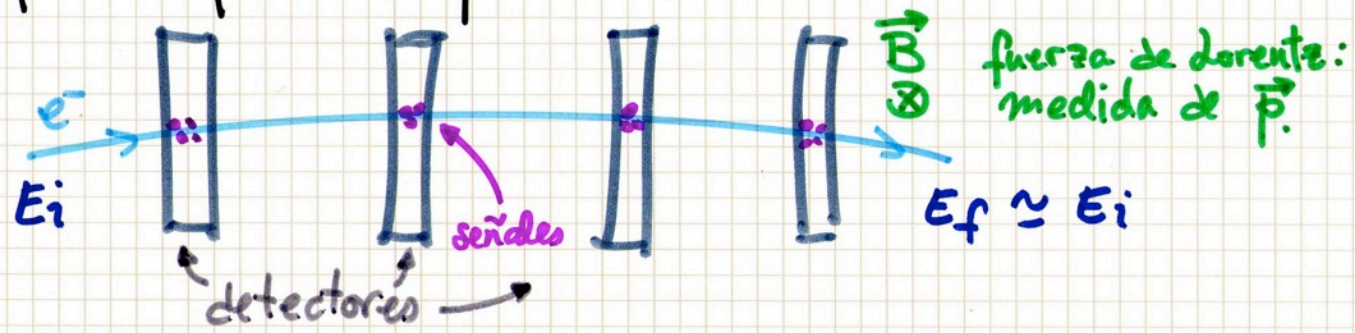
- e, μ, γ : int. electromagnética
- ν → invisible $\ddot{\nu}$
- h^{\pm} → Q.C.D. e int. E.M.
- h^0 → Q.C.D



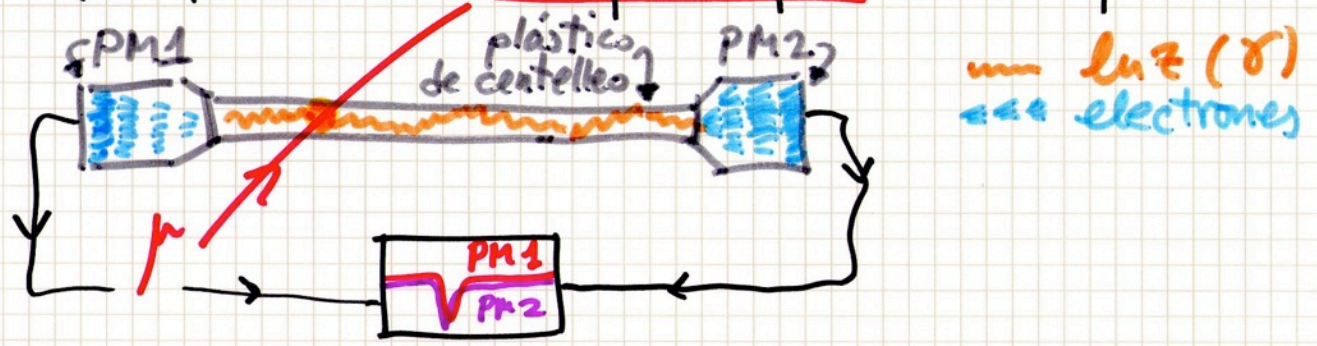
TIPOS DE DETECTORES

① D. de trazas: apenas alteran la trayectoria de las partículas (pierden poca ϵ) permitiendo su medida sin alterarla.

p.e: gas (TPC)
silicio



② de centelleo: detectan minúsculos depósitos de luz, midiendo con gran precisión el tiempo de paso de las partículas.

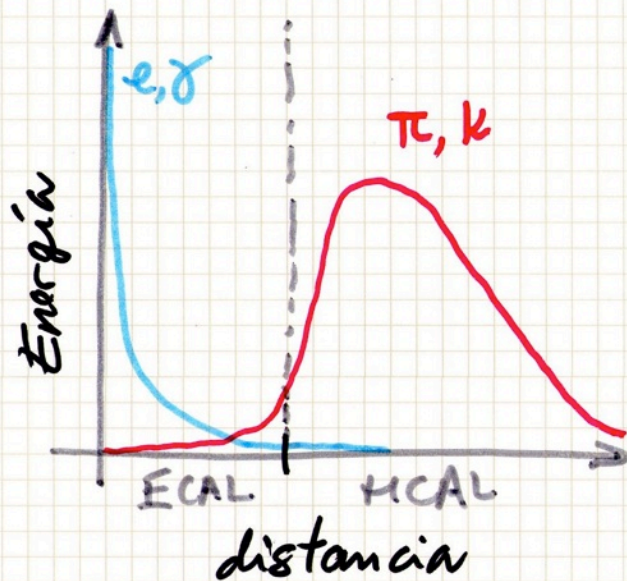
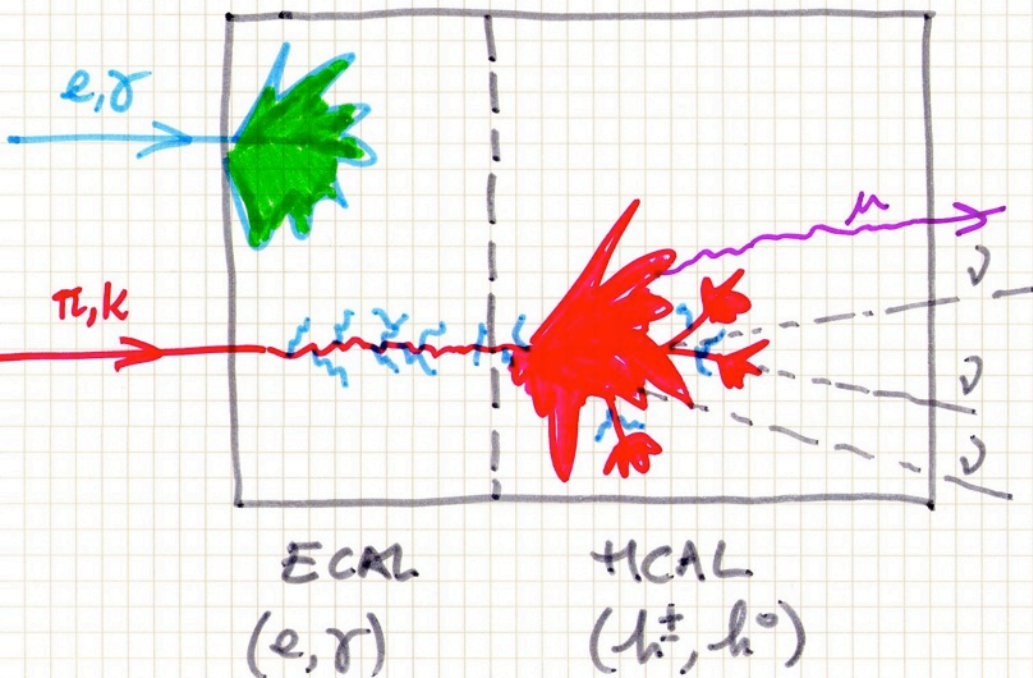


② calorímetros: "impiden" el paso de las partículas, midiendo su energía (en el proceso de detención) y posición de impacto (a veces, dirección).

Son densos y homogéneos. Los hay electromagnéticos y hadrónicos.
(cristales, latón, plomo...)

ECAL

HCAL



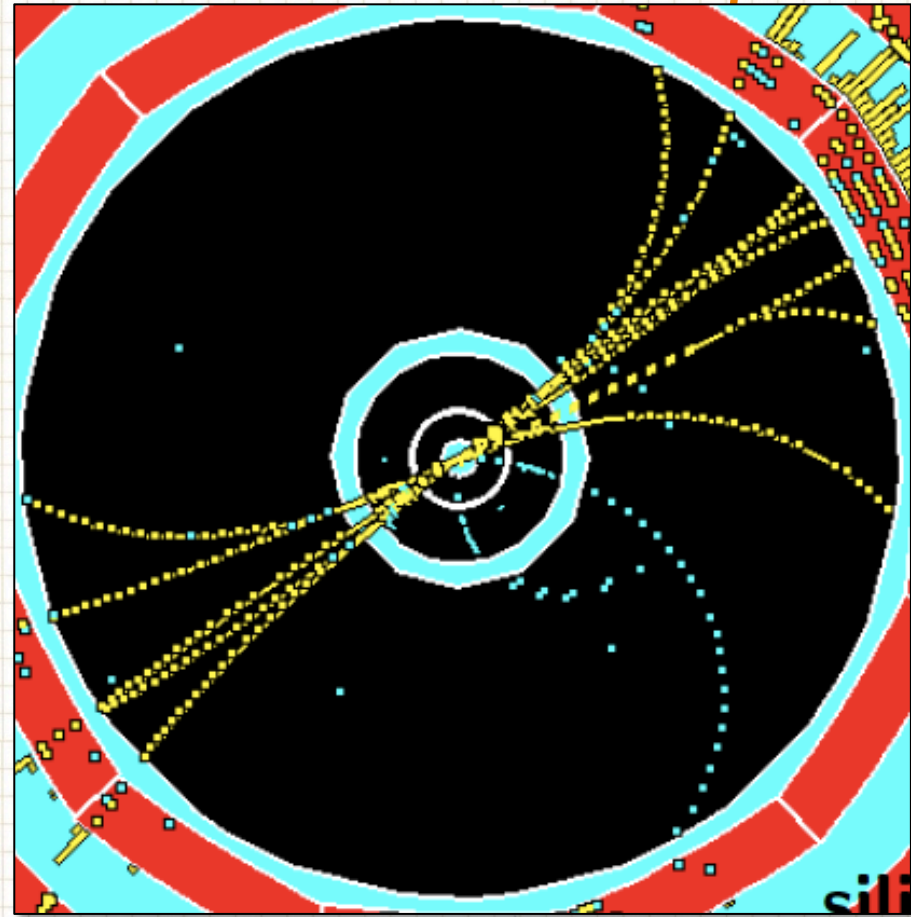
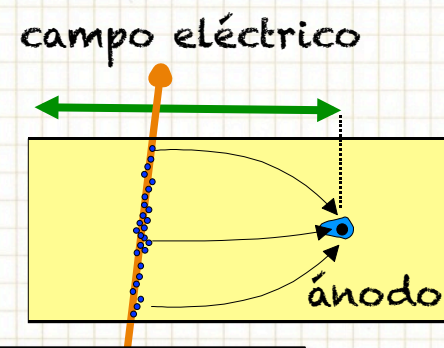
detector de trazas

TPC del experimento
ALEPH del acelerador
LEP (CERN).

Detector gaseoso:

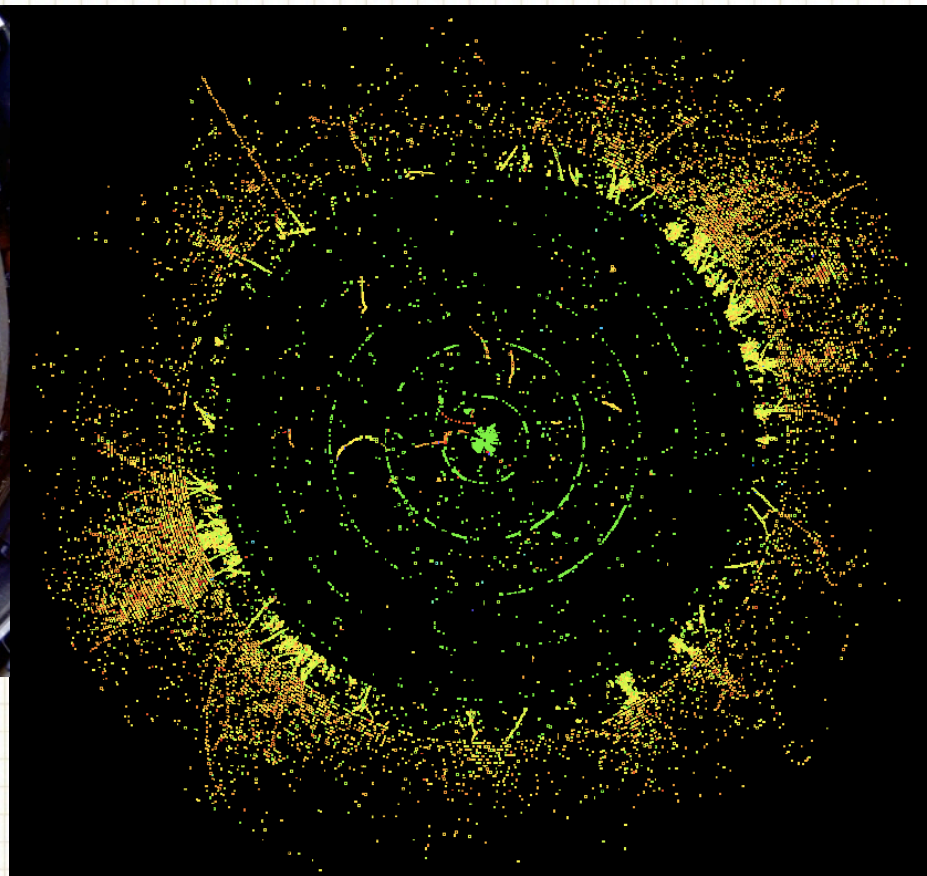
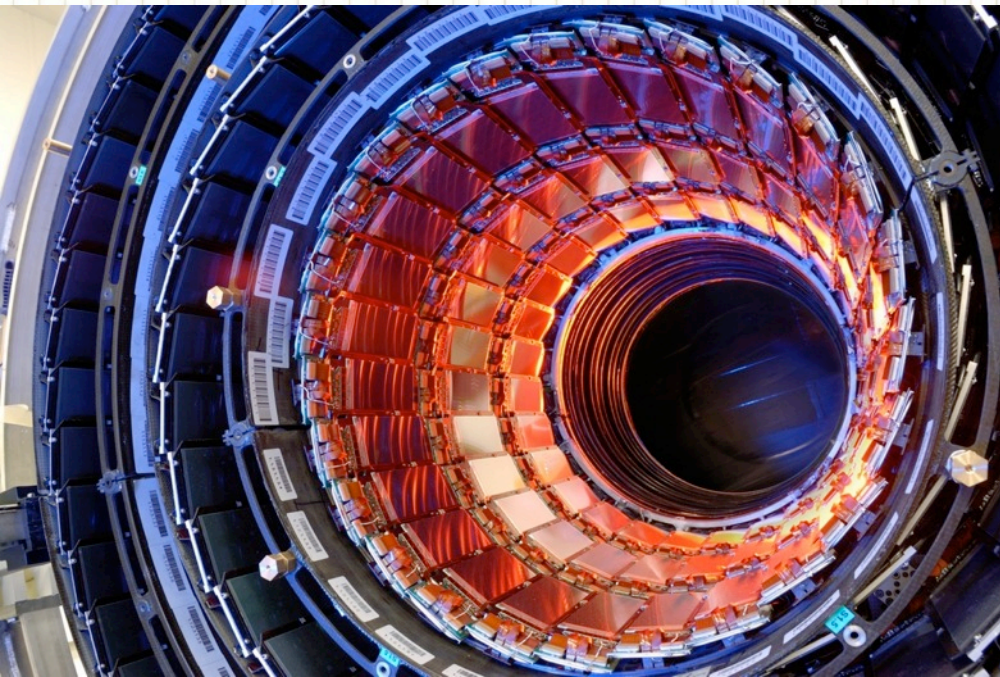
La ionización producida en el gas por las partículas cargadas produce una descarga que se propaga por la cámara y es detectada por dispositivos electrónicos.

Detector muy preciso,
pero lento.



La curvatura es inversamente proporcional al momento de las partículas

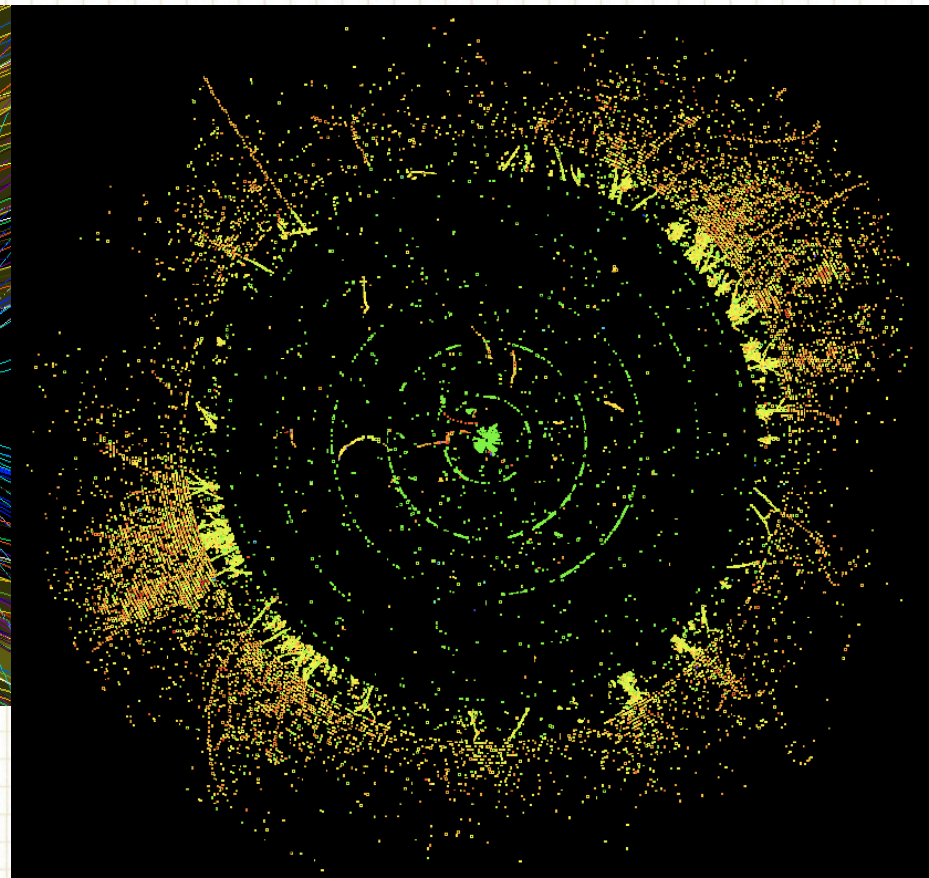
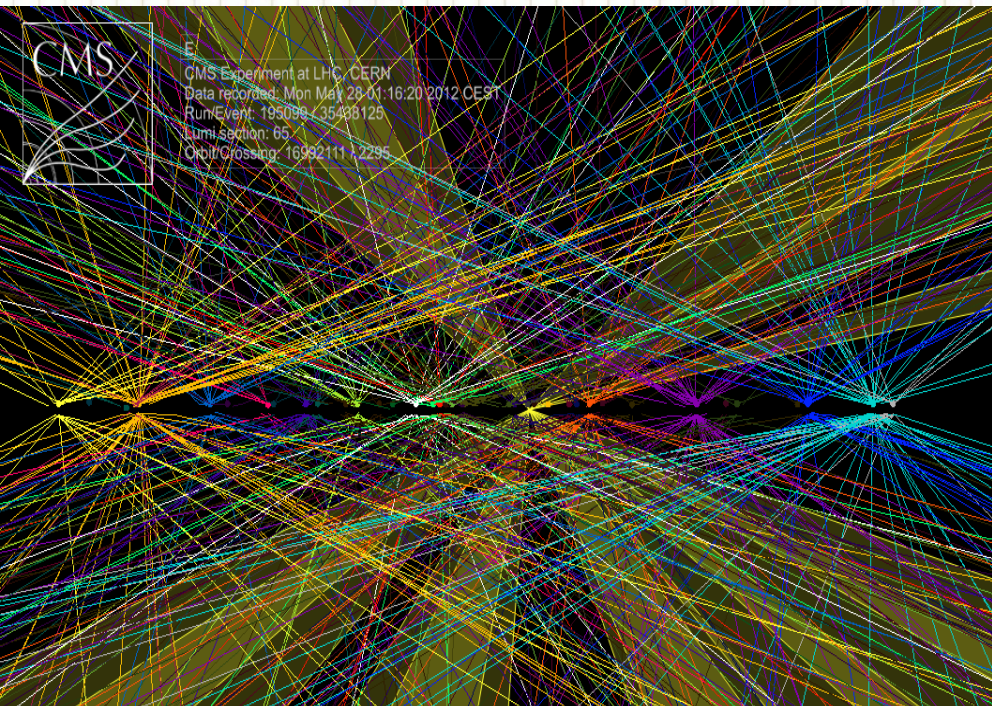
detector de Silicio del experimento CMS del acelerador LHC



La ionización producida en el material semiconductor (Si) por las partículas cargadas produce una corriente que es detectada por tarjetas electrónicas ultrarrápidas.

Detector muy preciso y rápido, ideal para LHC.

detector de Silicio del experimento CMS del acelerador LHC

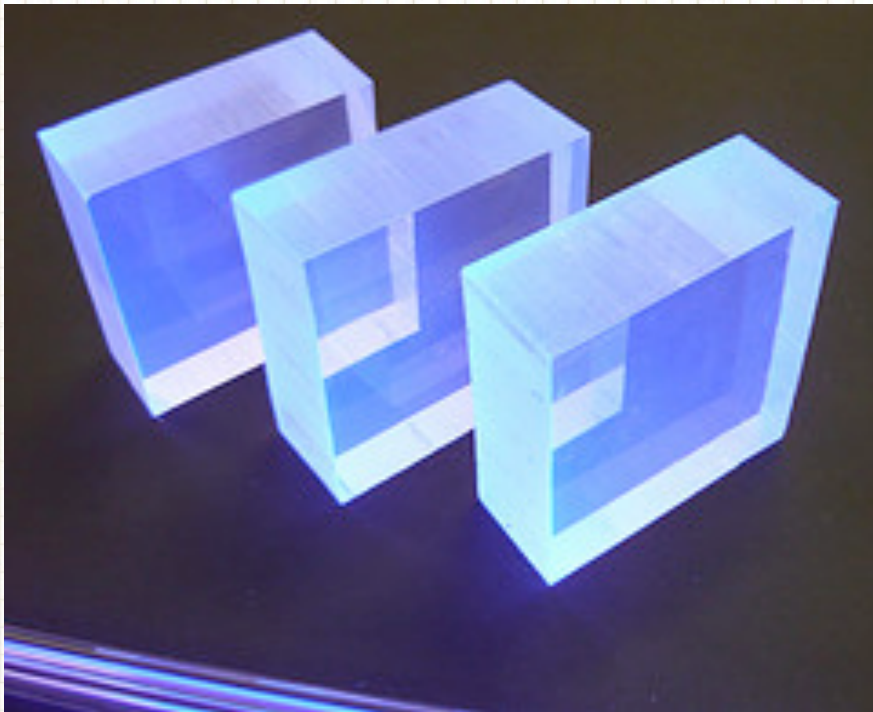


La ionización producida en el material semiconductor (Si) por las partículas cargadas produce una corriente que es detectada por tarjetas electrónicas ultrarrápidas.

Detector muy preciso y rápido, ideal para LHC.

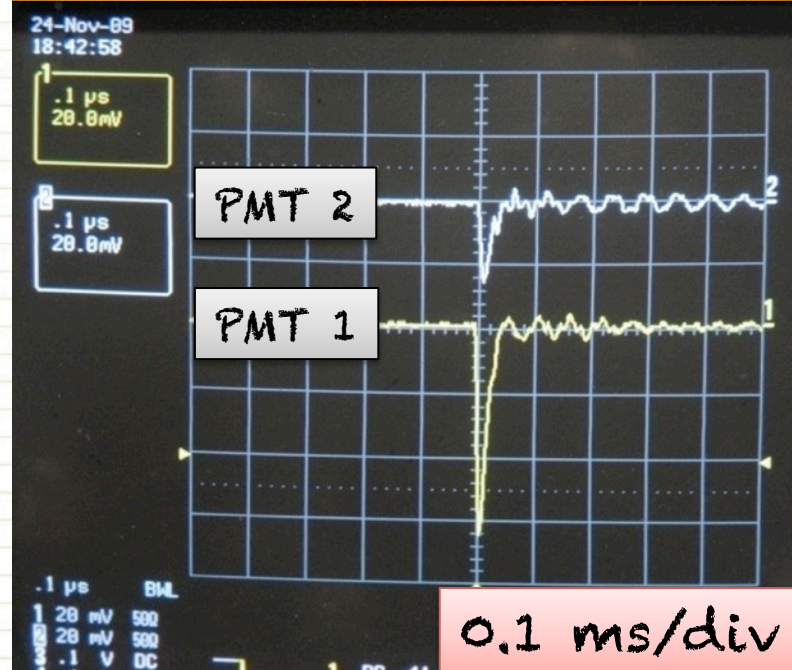
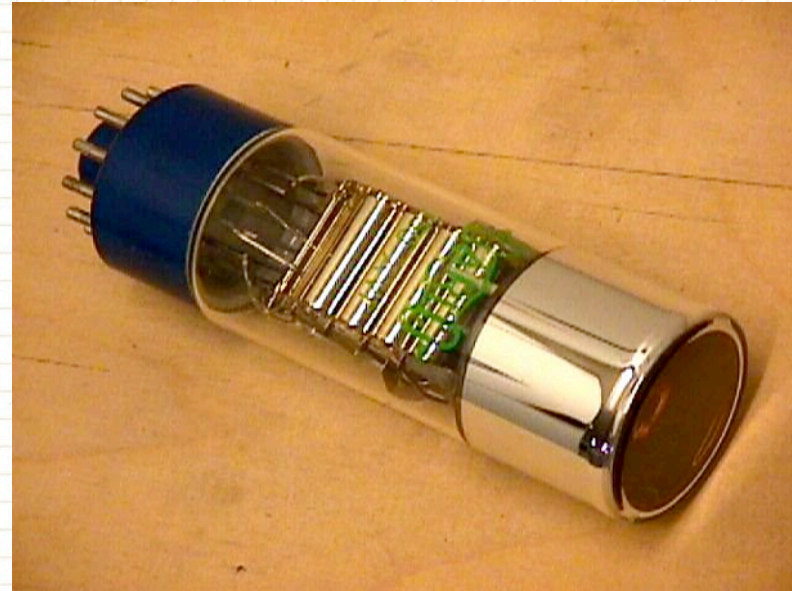
plásticos de centello y PMTs (fotomultiplicadores)

plástico centelleador
emitiendo luz UV



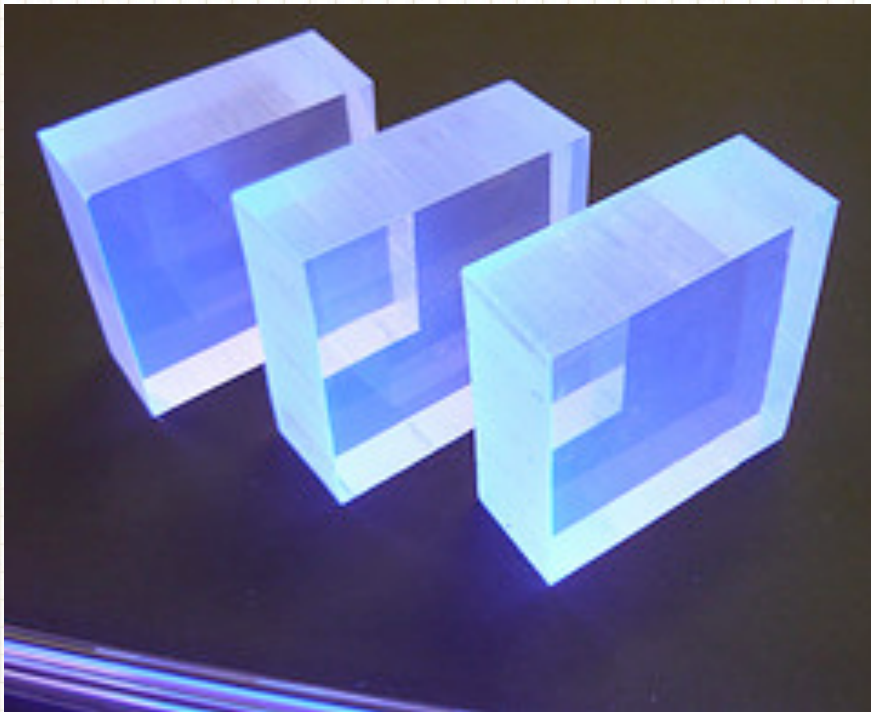
Detectores muy rápidos y con muy buena resolución temporal.

Muy apropiados para TRIGGER.



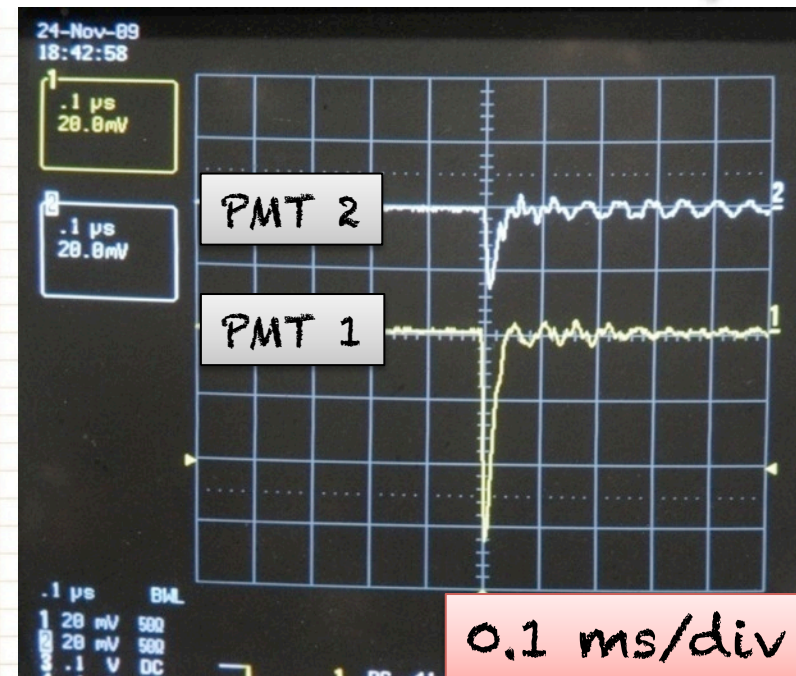
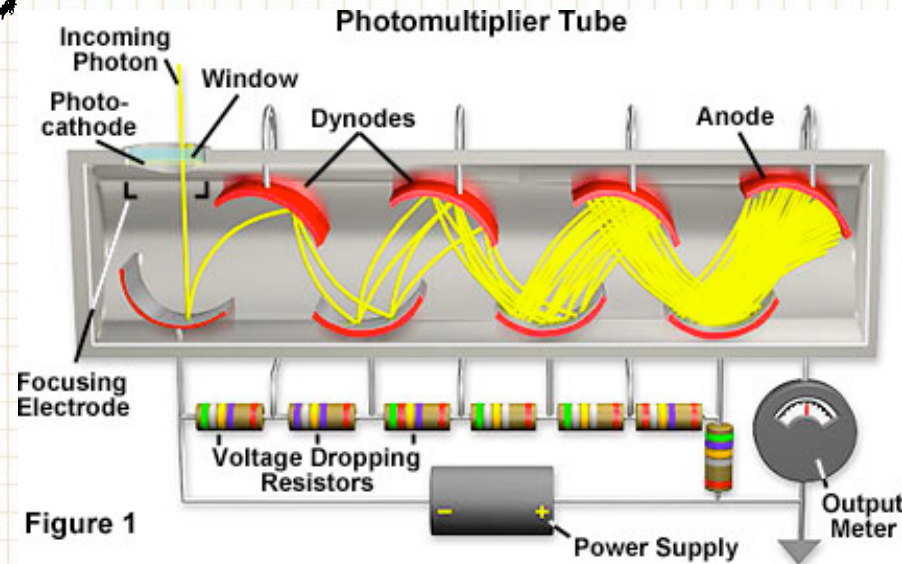
plásticos de centello y PMTs (fotomultiplicadores)

plástico centelleador emitiendo luz UV



Detectores muy rápidos y con muy buena resolución temporal.

Muy apropiados para TRIGGER.



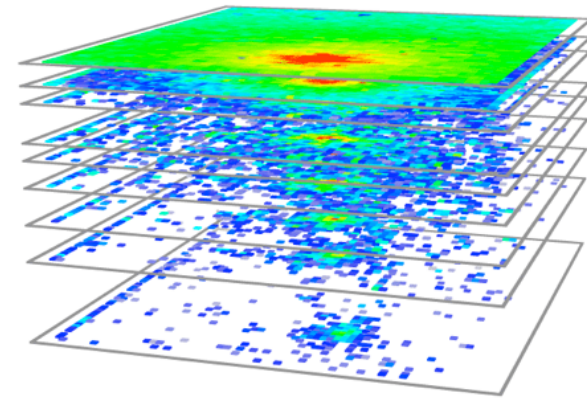
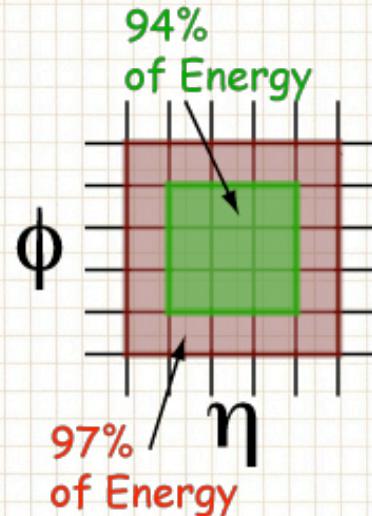
calorímetros

De muestreo:

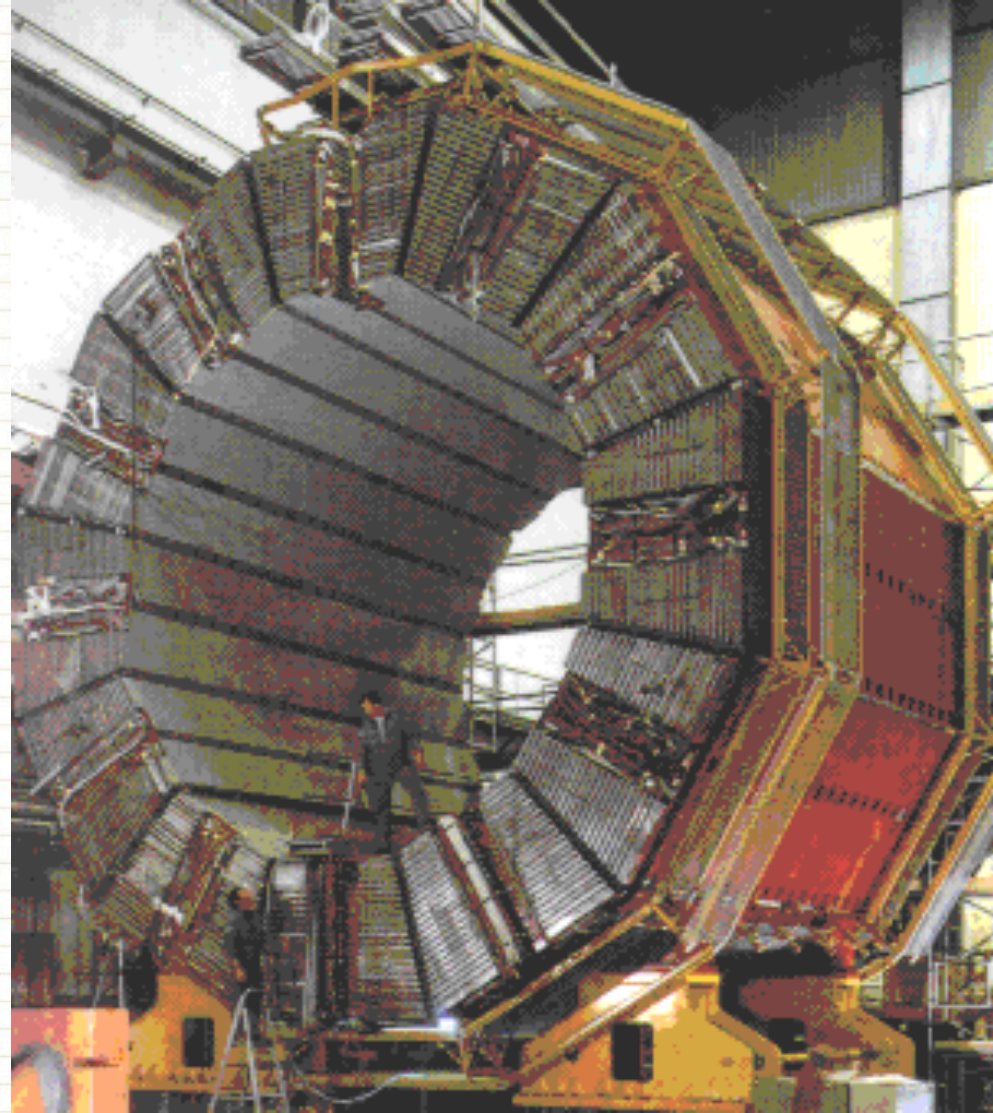
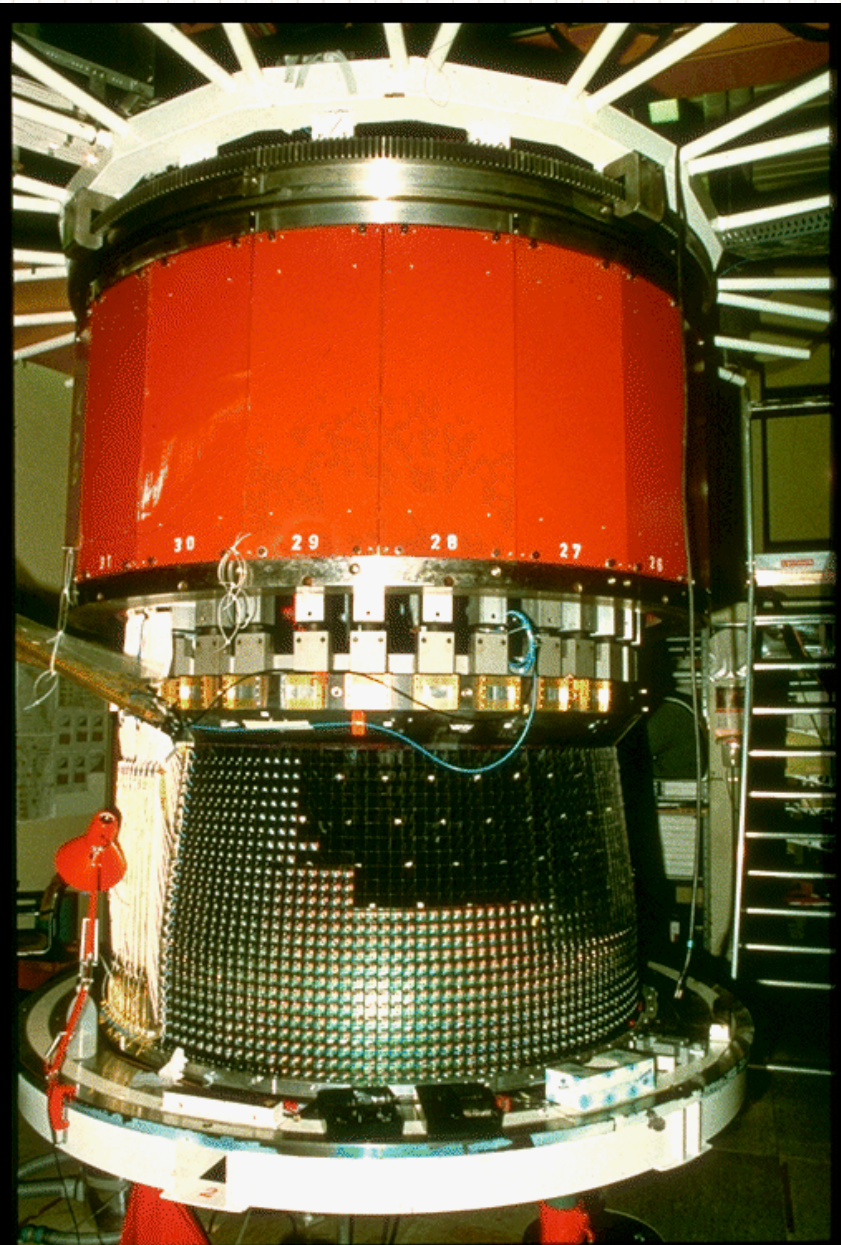
- sandwich de absorbente metálico de alta densidad y material activo que genera la señal.

Homogéneos:

- todo el volumen del calorímetro es sensible, normalmente cristales de centelleo de alta densidad: BGO, PbWO_4 , NaI.

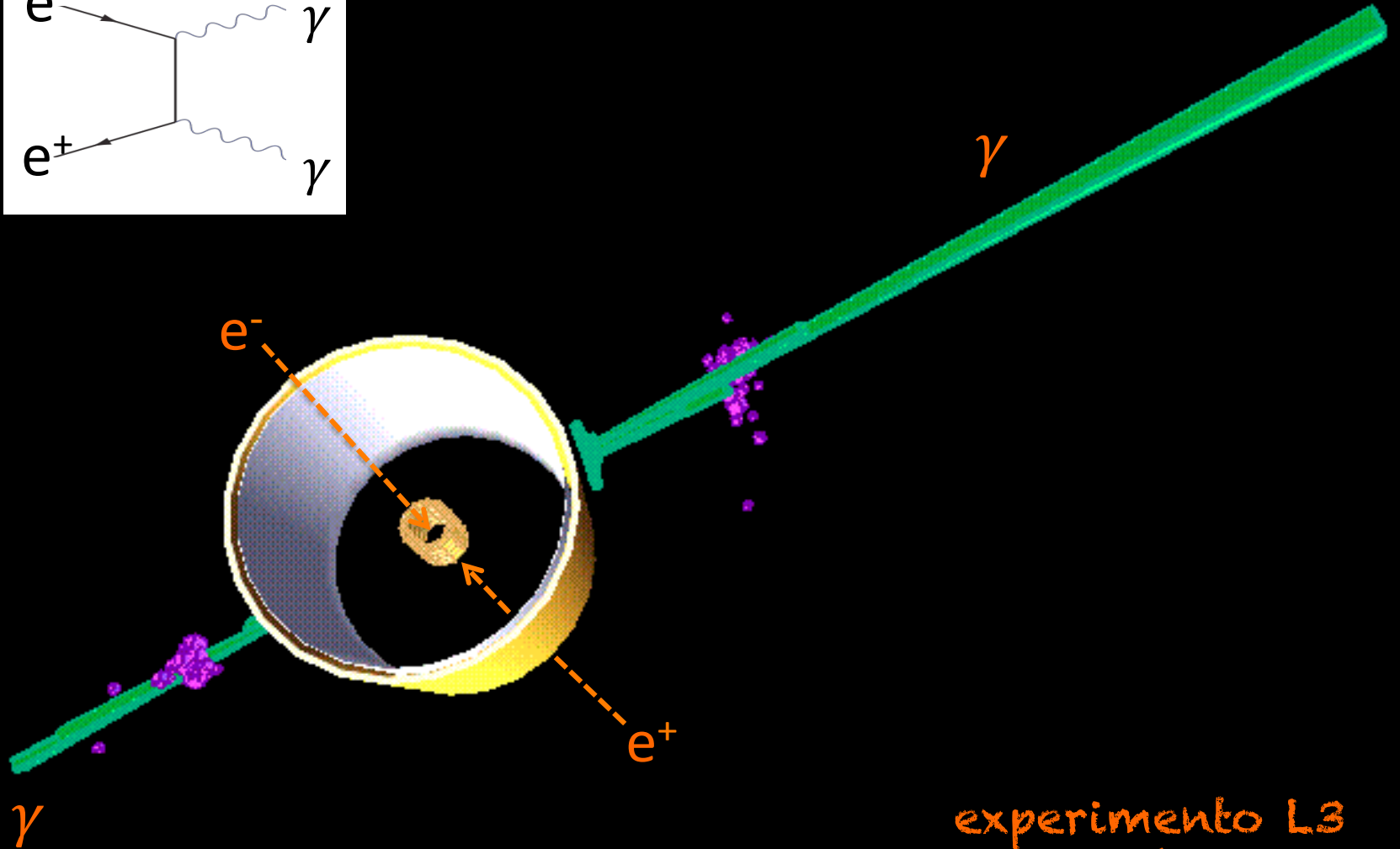
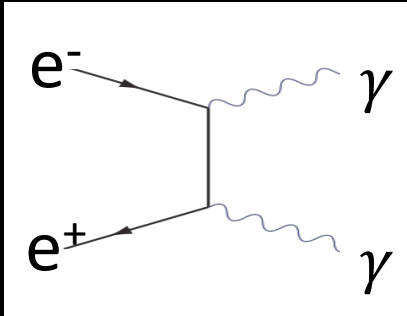


ECAL homogéneos de L3,
hecho de cristales de BGO.



HCAL de muestreo de ALEPH:
hierro como material pasivo,
intercalado con tubos de
descarga.

colisión $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

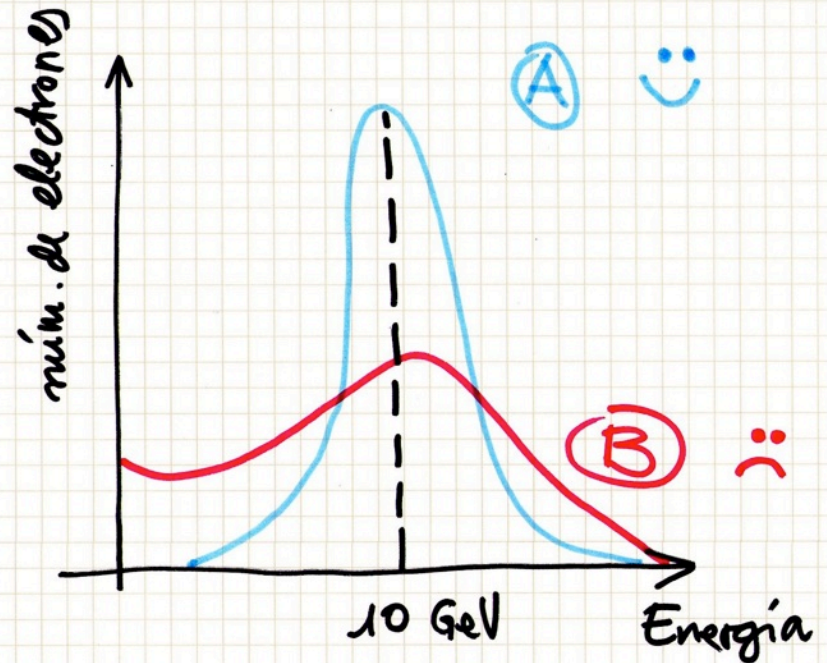
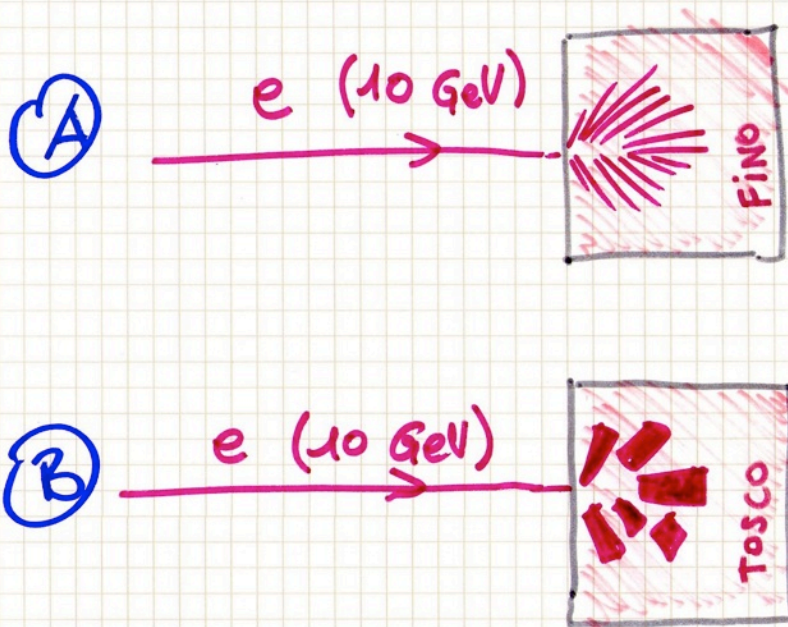


experimento L3
acelerador LEP

RESOLUCIÓN EXPERIMENTAL

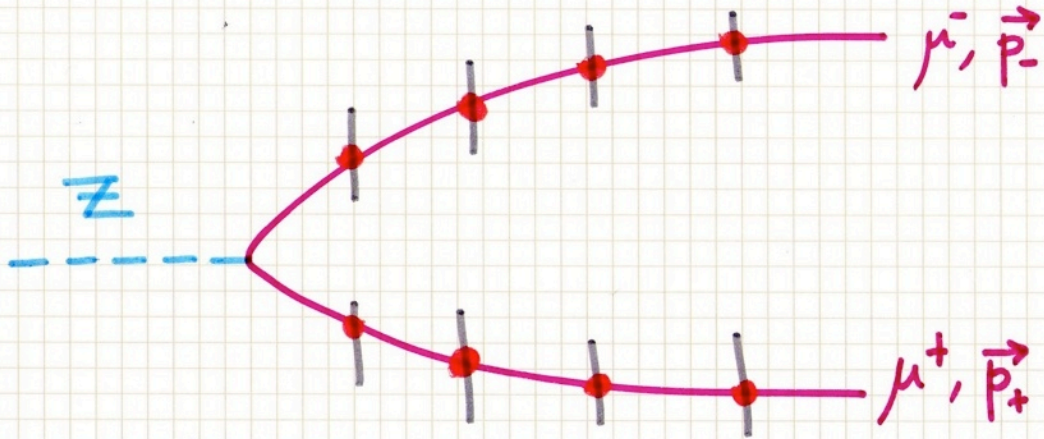
MUY IMPORTANTE

Es la respuesta del detector, es decir, lo "fino" que está segmentada mi regla de medir.

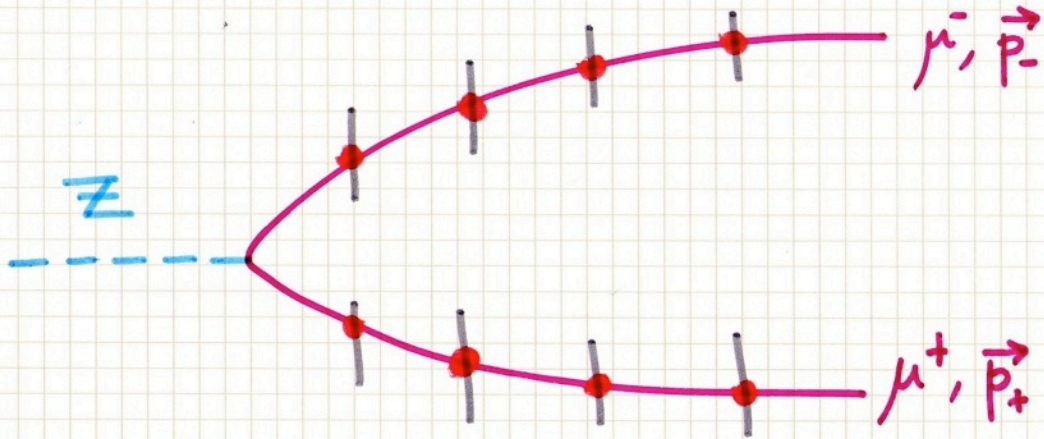


DETECTORES con buena resolución: trazas largas, calorímetros muy segmentados y homogéneos, elementos fiables y bien posicionados.

EJEMPLO: $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$



EJEMPLO: $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$



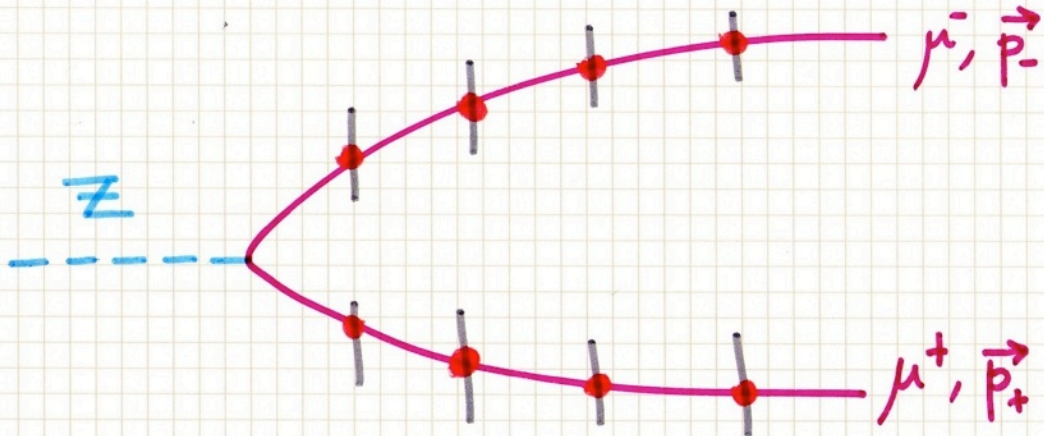
$$M^2 = (E_1 + E_2)^2 - |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|^2$$

$$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2)$$

$$M^2 = 2p_1 p_2 (1 - \cos \theta)$$



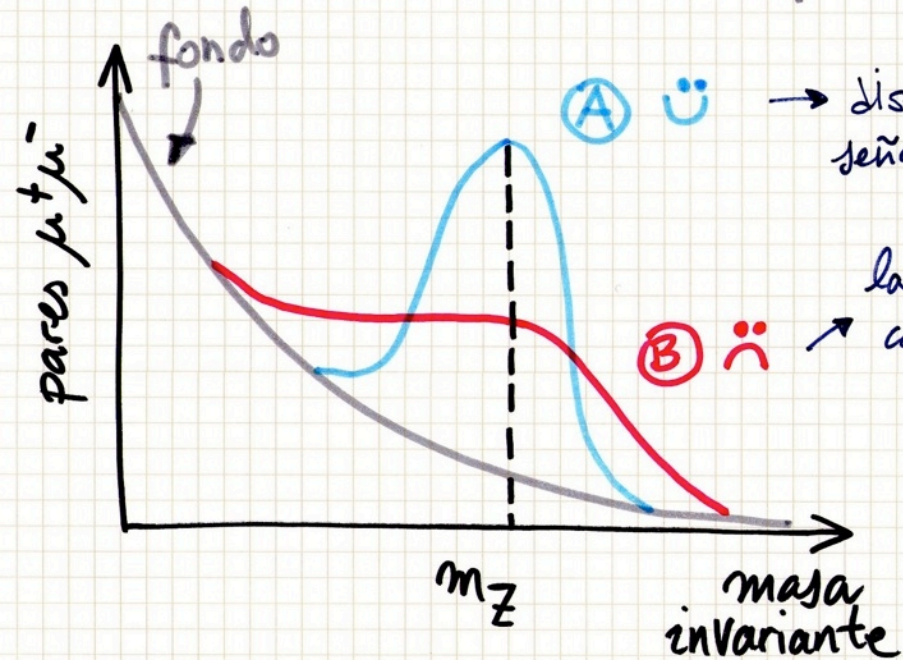
EJEMPLO: $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$



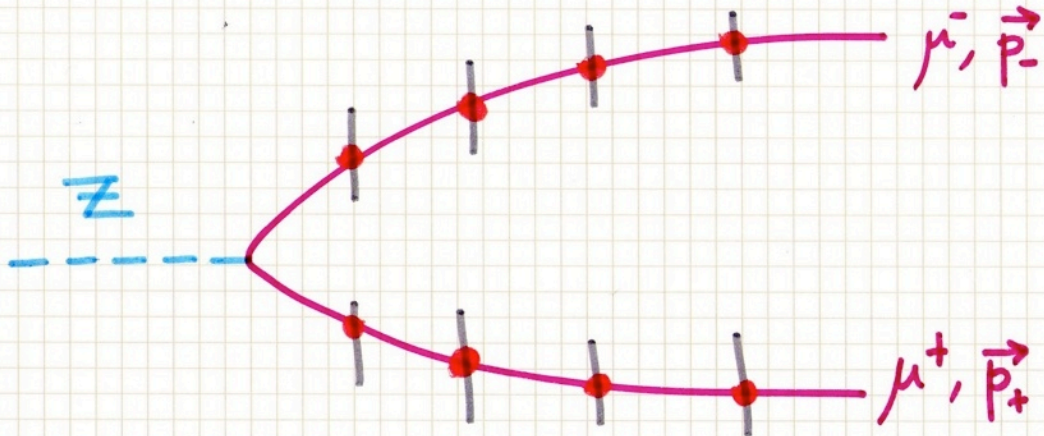
$$M^2 = (E_1 + E_2)^2 - |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|^2$$

$$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2)$$

$$M^2 = 2p_1 p_2 (1 - \cos \theta)$$



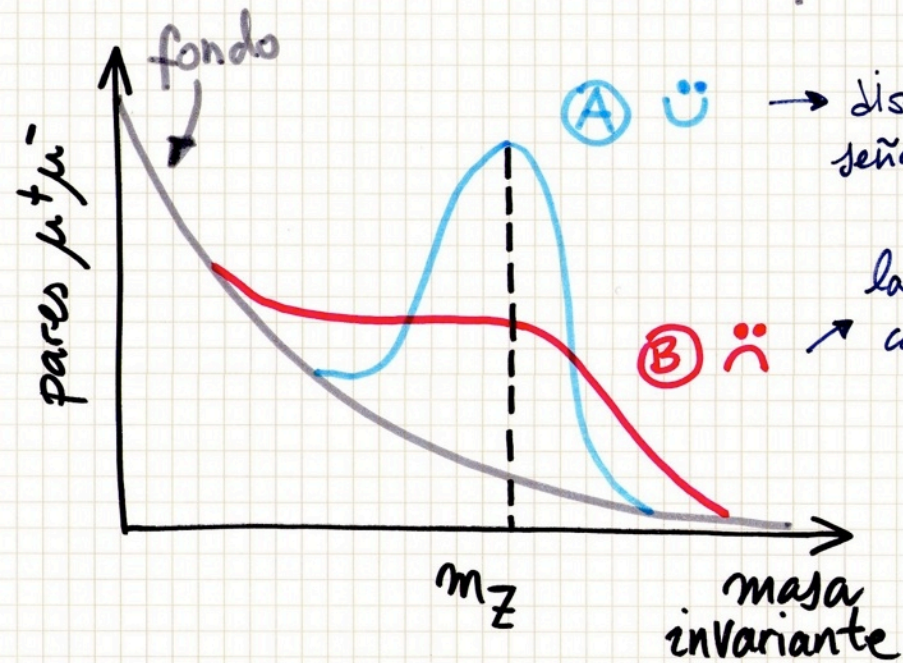
EJEMPLO: $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$



$$M^2 = (E_1 + E_2)^2 - |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|^2$$

$$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2)$$

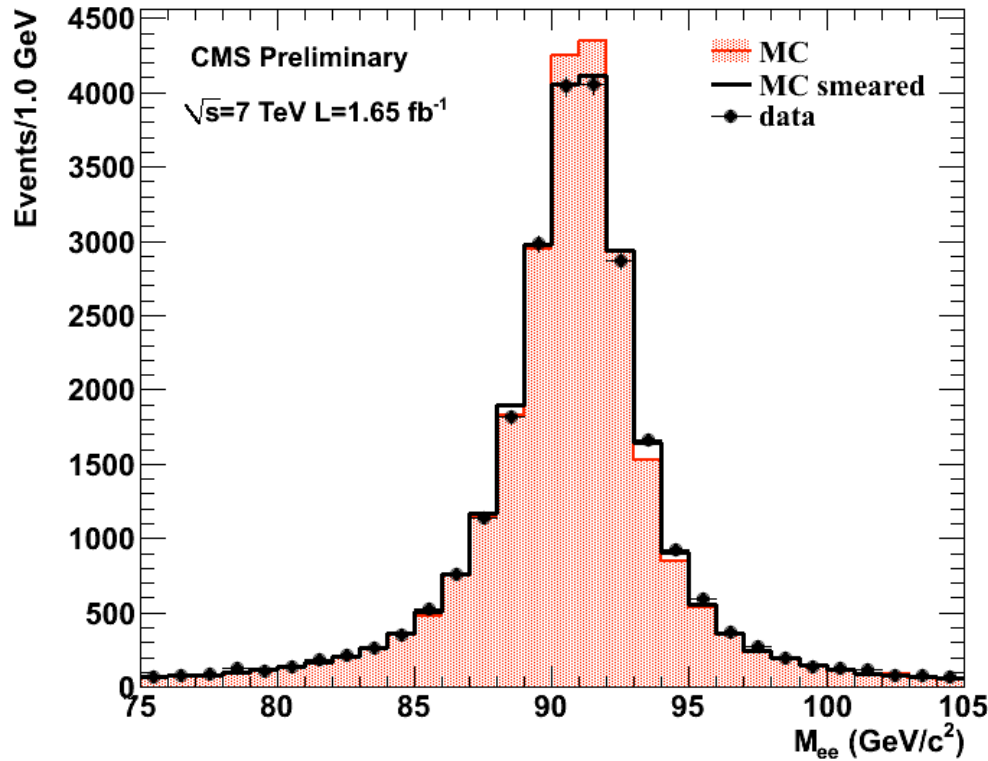
$$M^2 = 2p_1 p_2 (1 - \cos\theta)$$



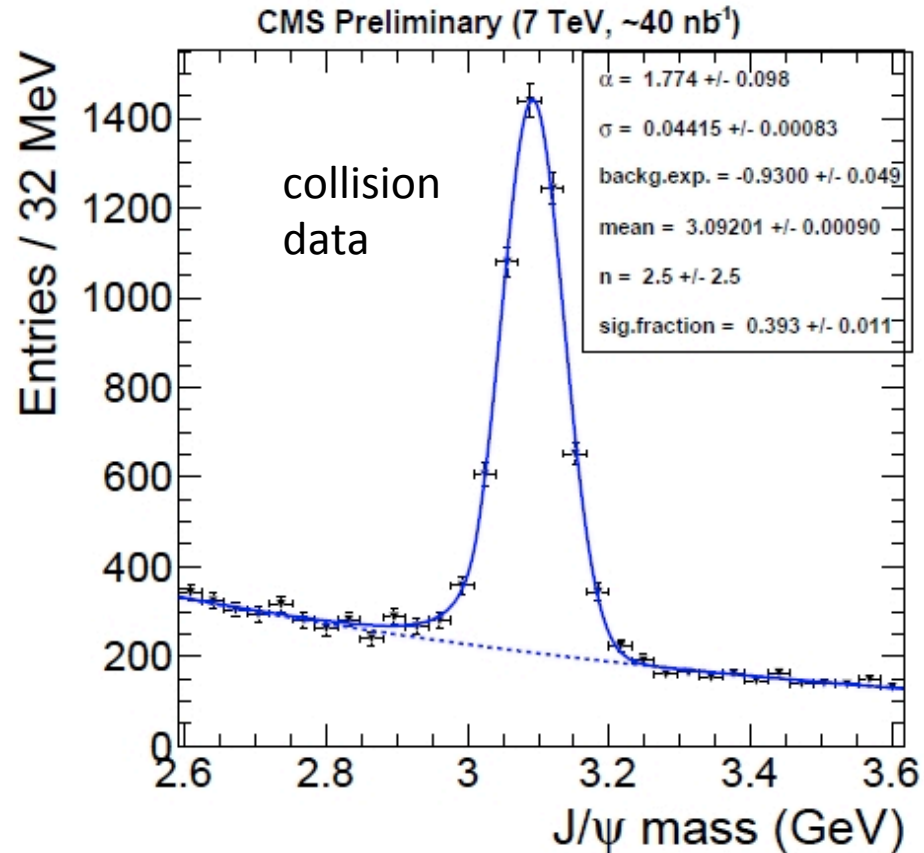
¡¡ Tenemos que conocer la resolución del detector para observar lo que estamos buscando !!

medida del momento, masa invariante

masa invariante de pares e^+e^- (boson Z)



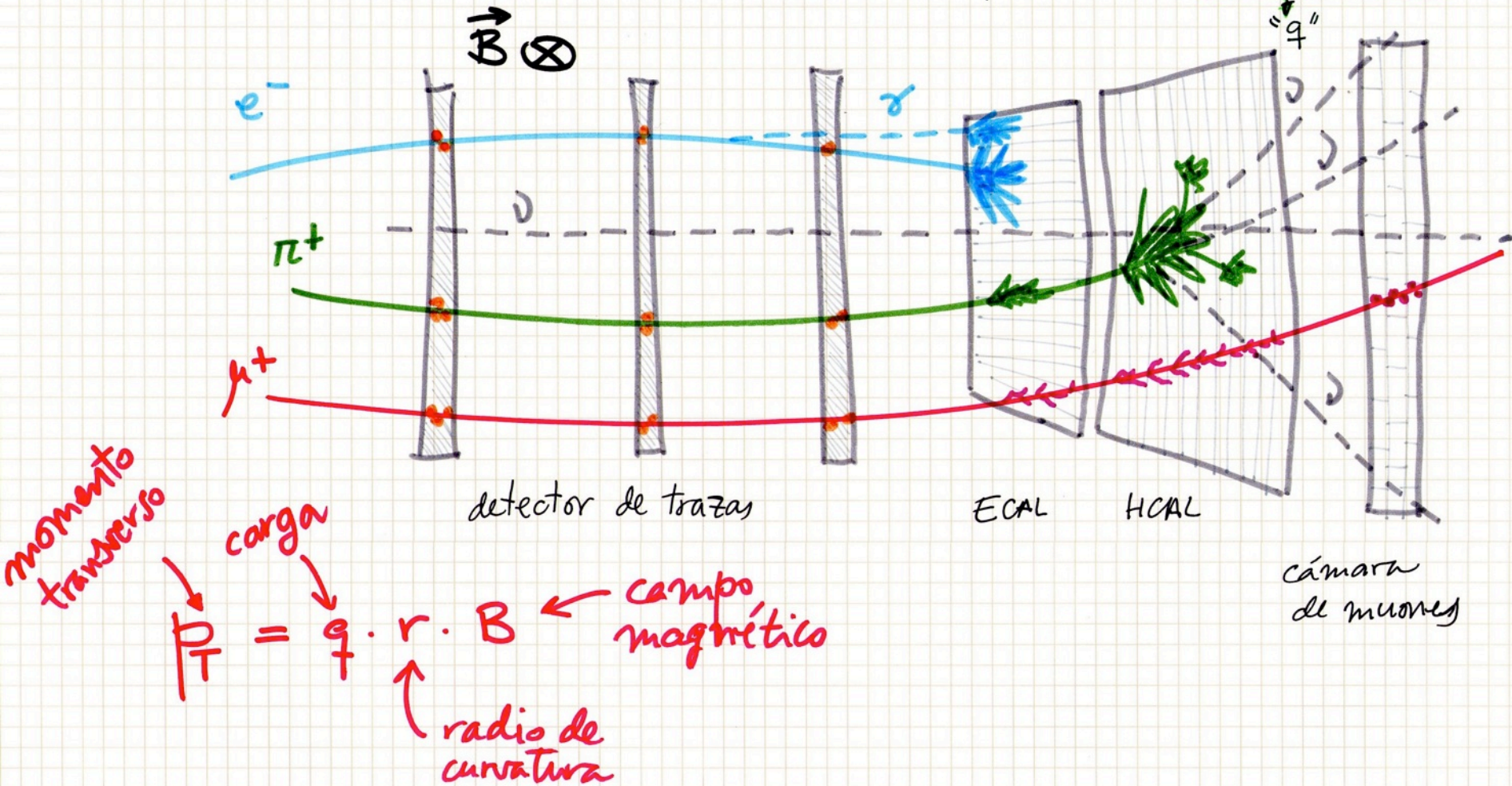
$$Z \rightarrow e^+e^-$$

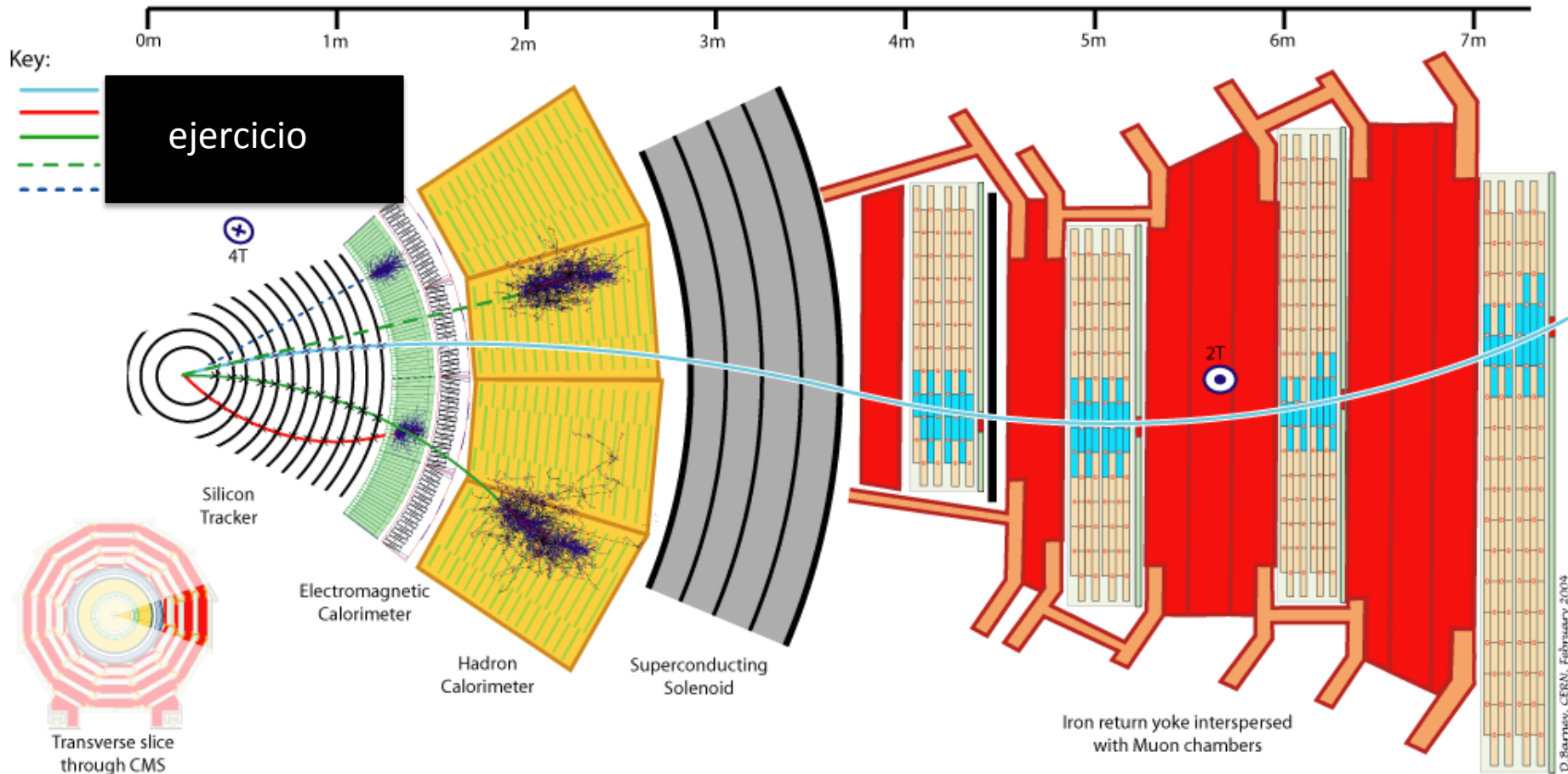


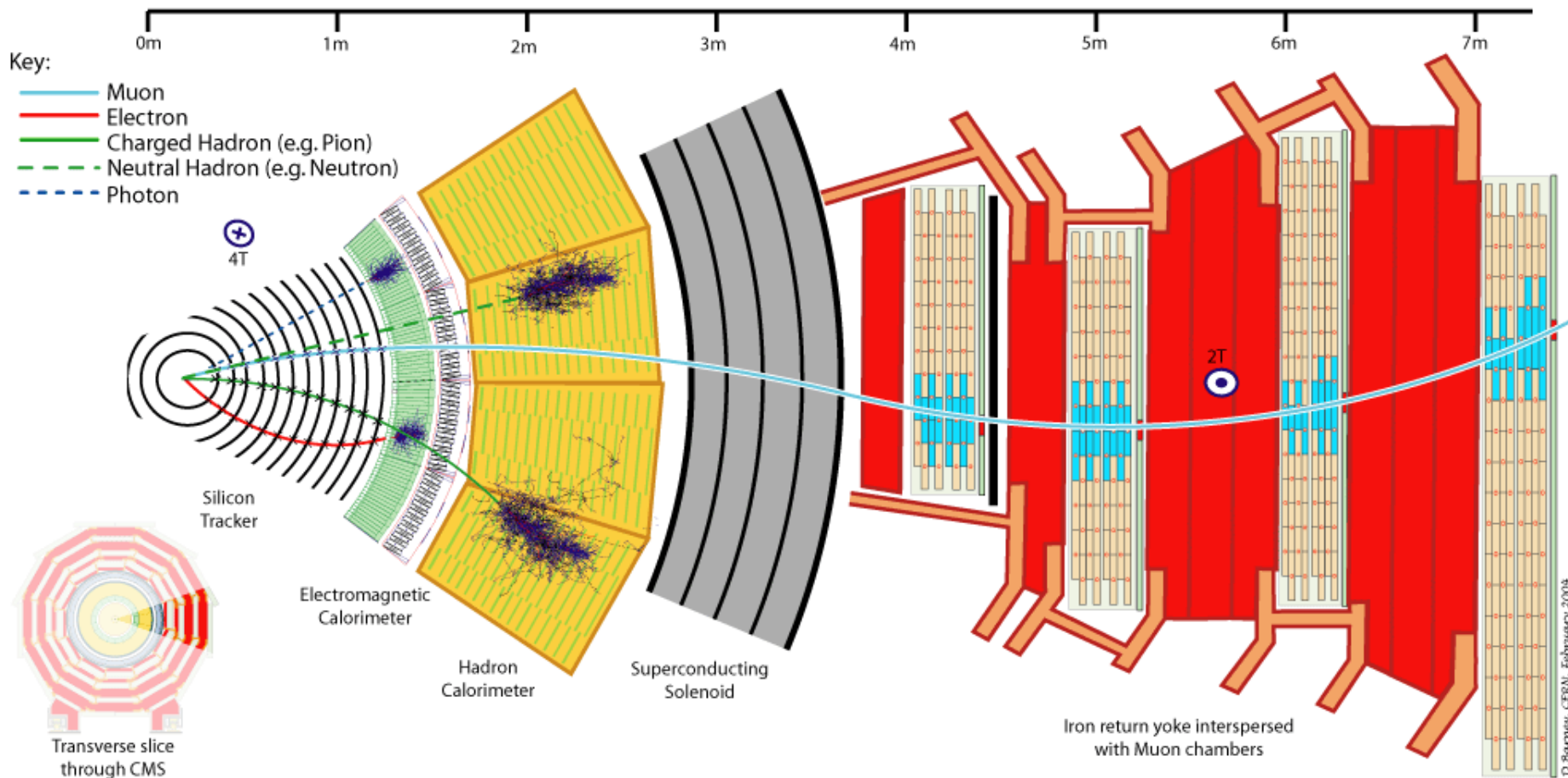
$$J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$$

RECONSTRUCCIÓN DE SUCECOS

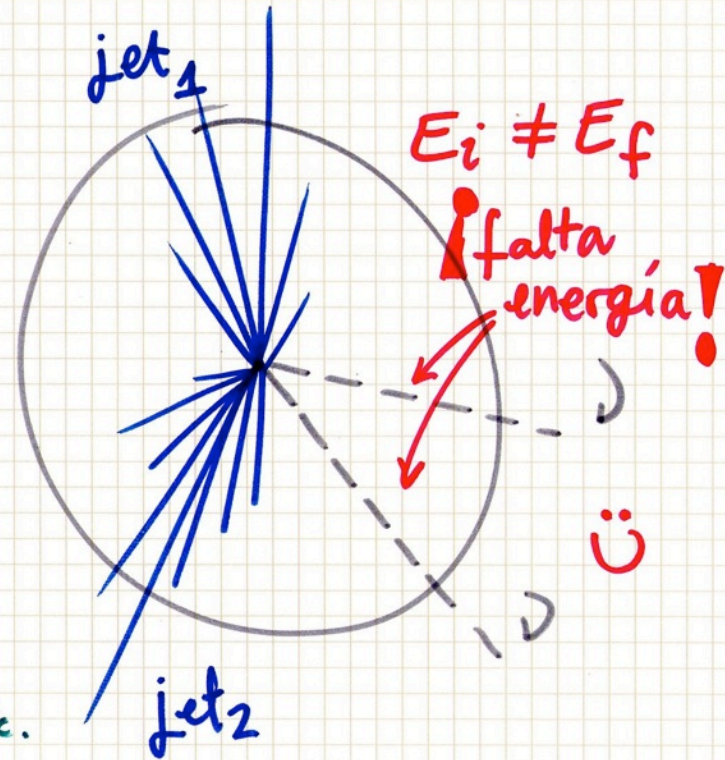
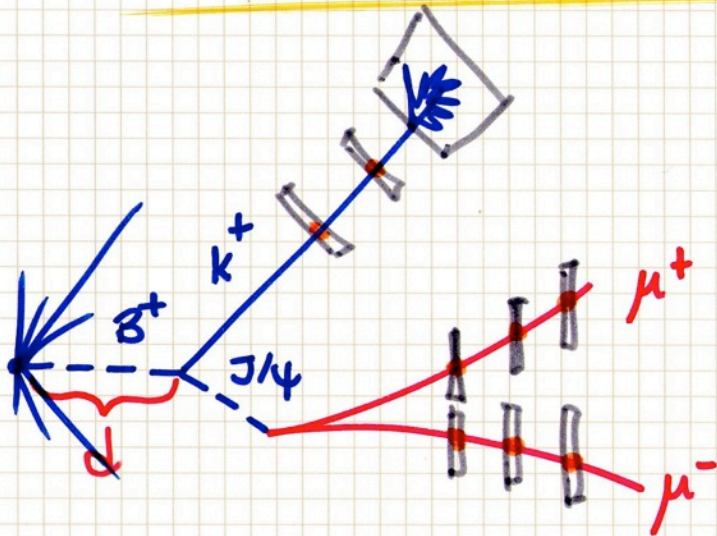
Intercalando con inteligencia diferentes detectores conseguimos medir las trayectorias y energías de "todas" las partículas: \vec{p} , carga, E .



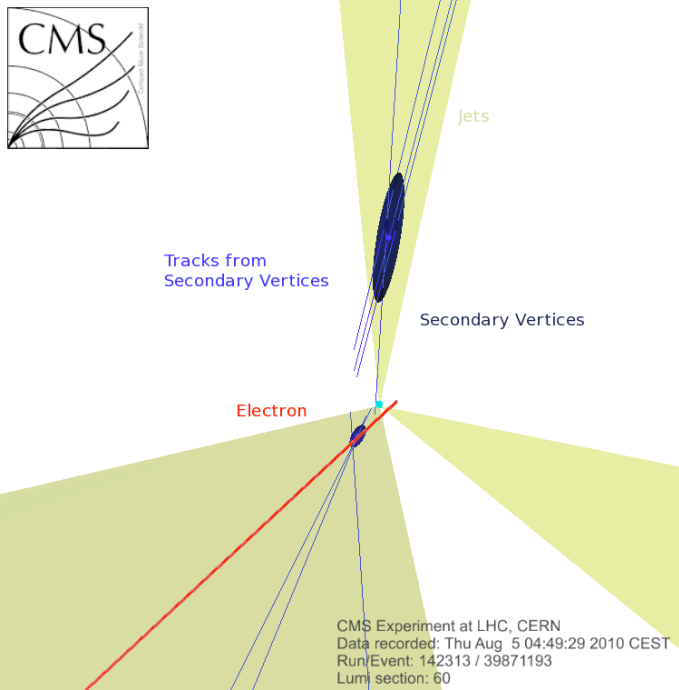




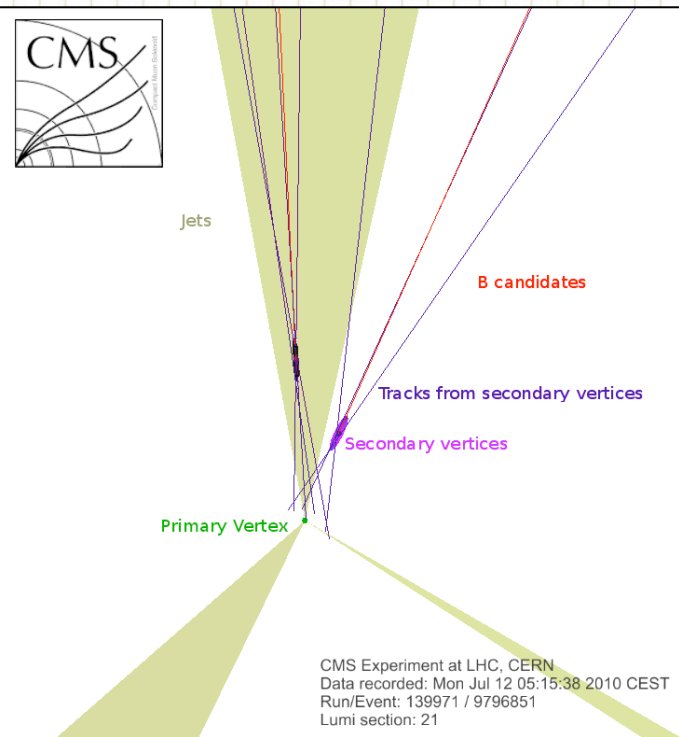
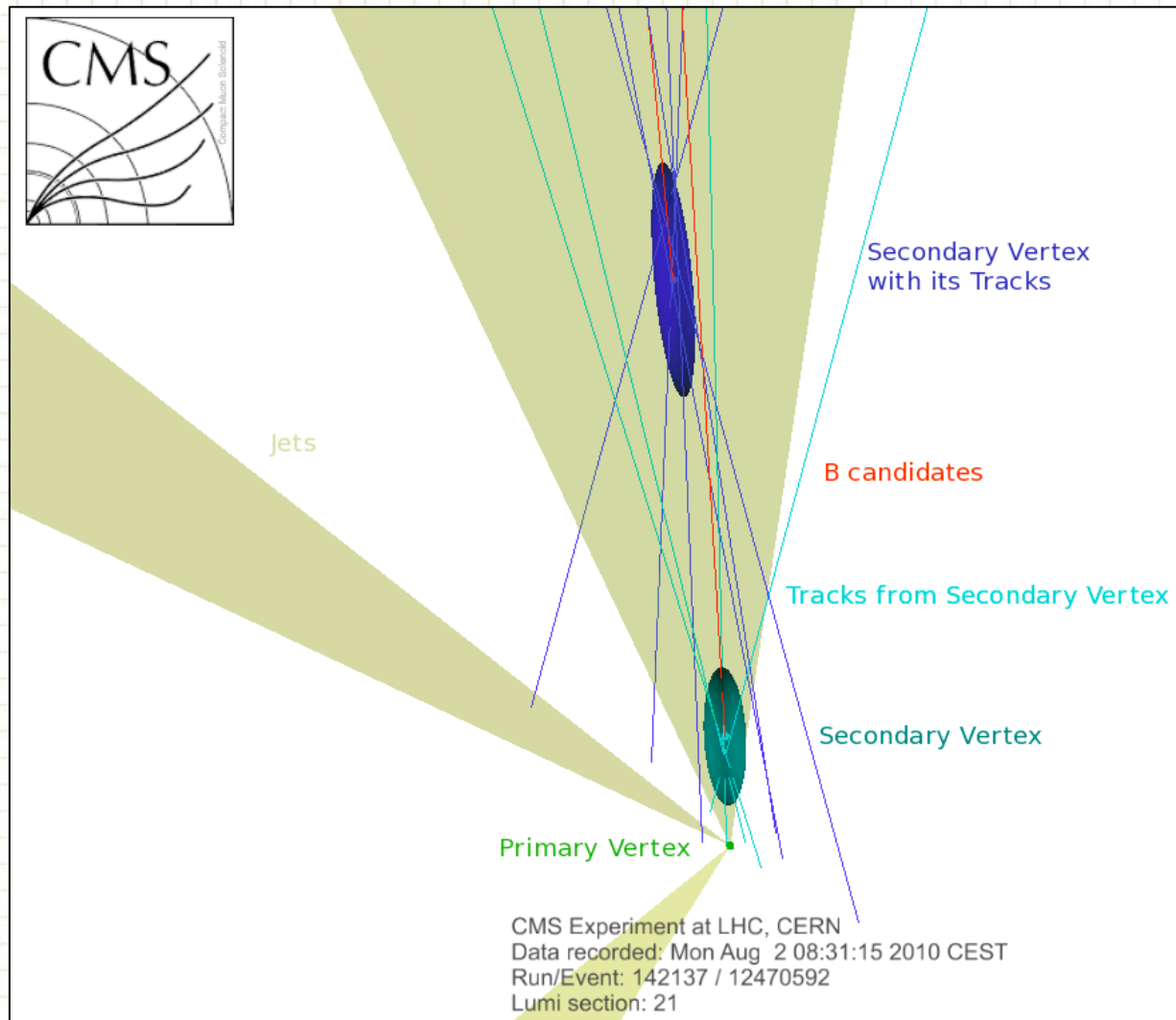
Combinando las señales de varios detectores y trazas obtenemos información/medidas de partículas que se han desintegrado antes de alcanzar el detector, o de aquellas que no hemos detectado (D)



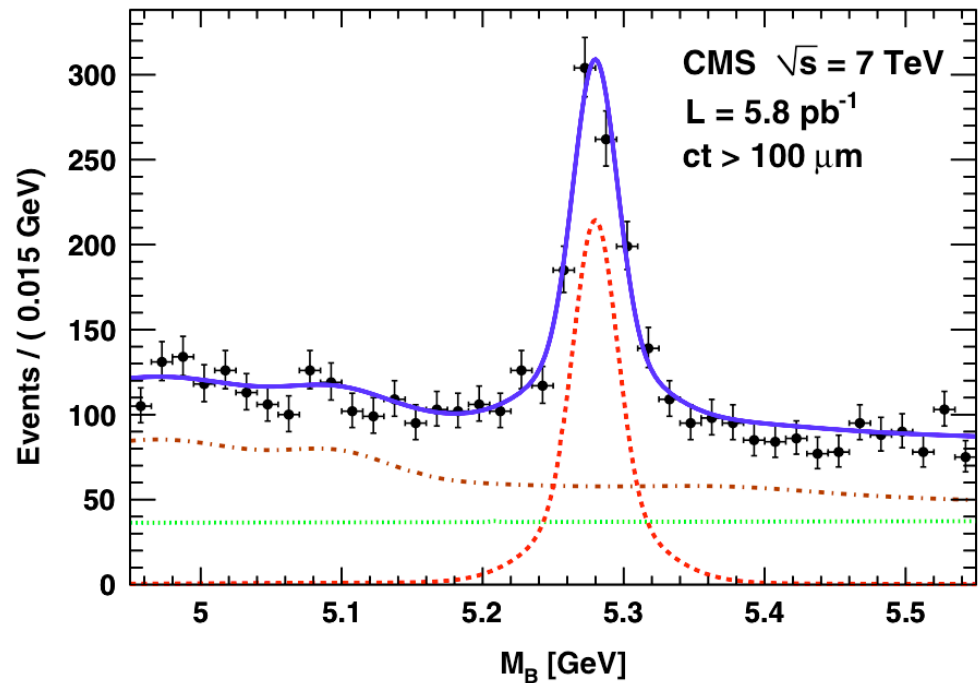
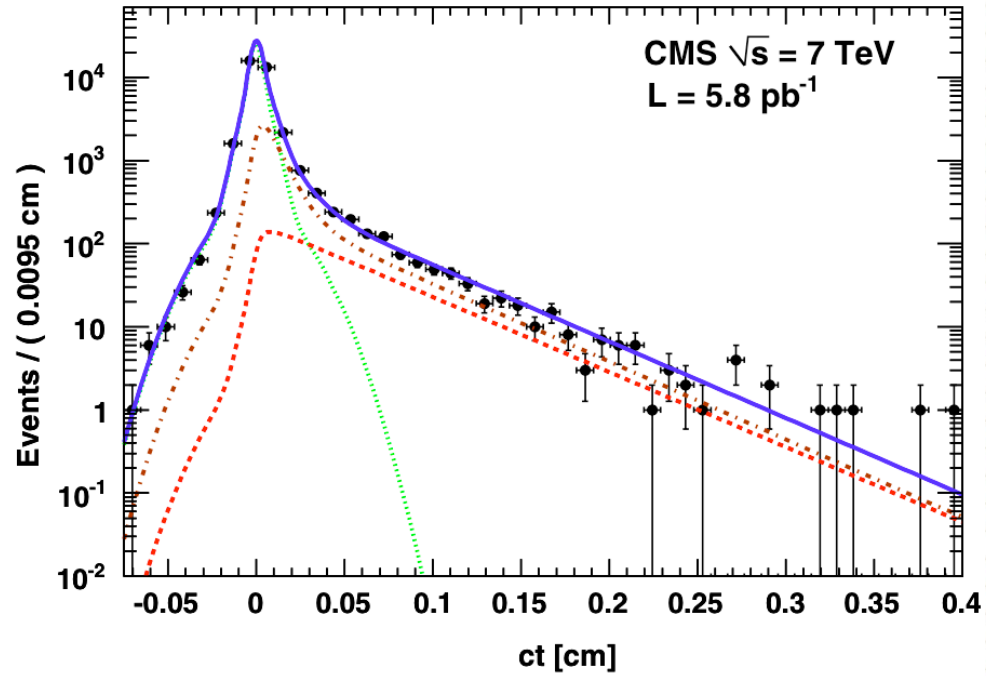
Puedo medir masas ($m_{j\pi}$), energía faltante (D), vidas medias ($\tau_B \sim d$), etc.



vértices secundarios



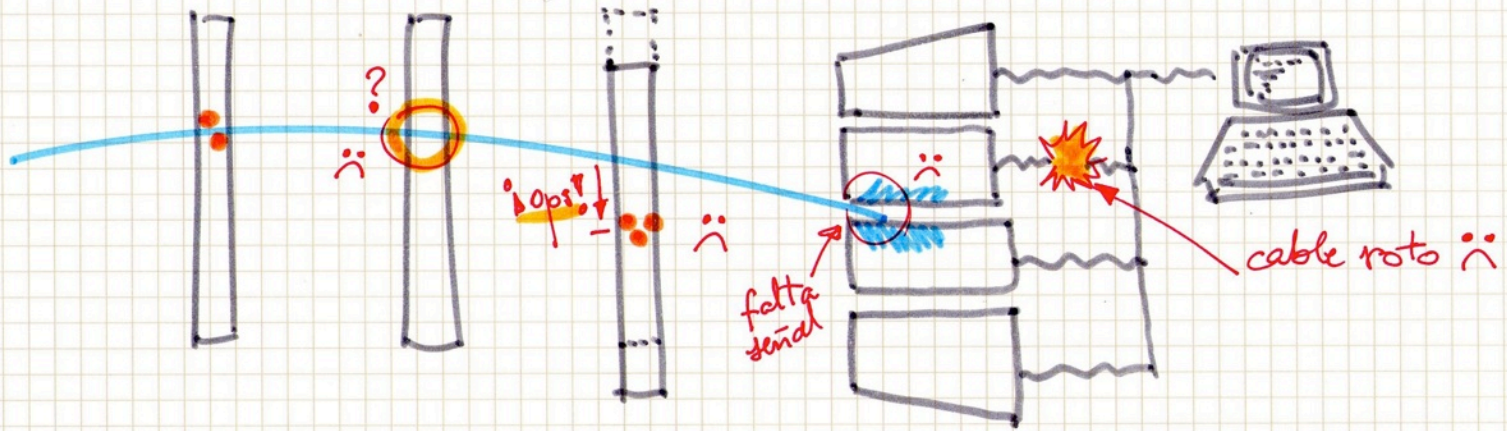
vida media y
masa del mesón B



IMPORTANTE

INEFICIENCIAS

- No es todo tan fácil como parece. A veces faltan señales, se reconstruyen de forma ineficiente, un detector está mal posicionado, hay huecos entre los elementos del detector, etc.



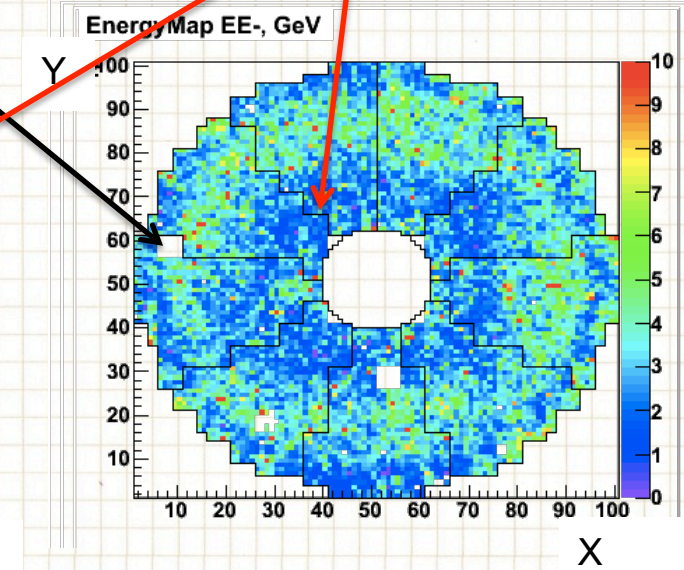
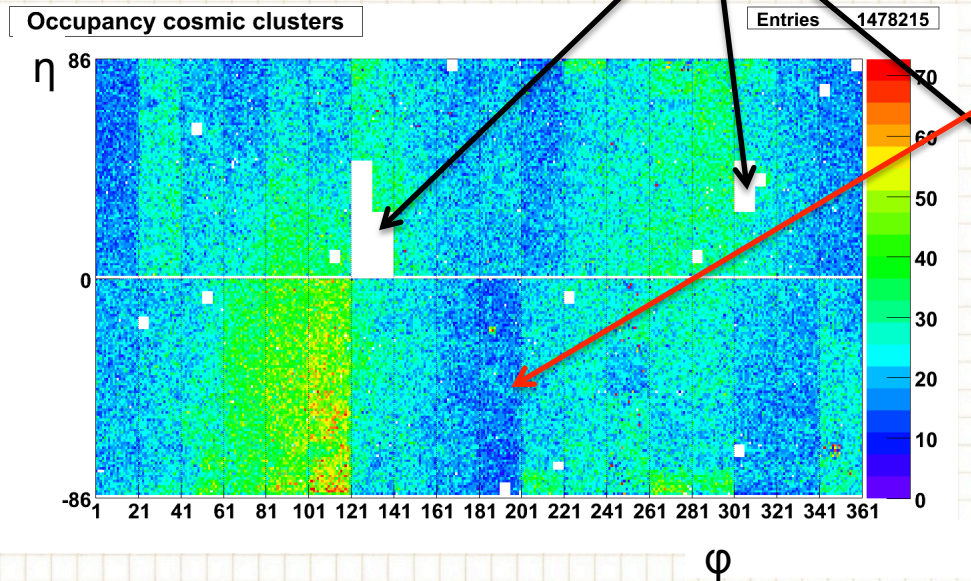
- Algunos de estos errores se pueden corregir (calibración, alineamiento), otros no (mala resolución, problemas de hardware).

ES CRUCIAL CONOCER EN DETALLE LAS INEFICIENCIAS

ineficiencias del detector

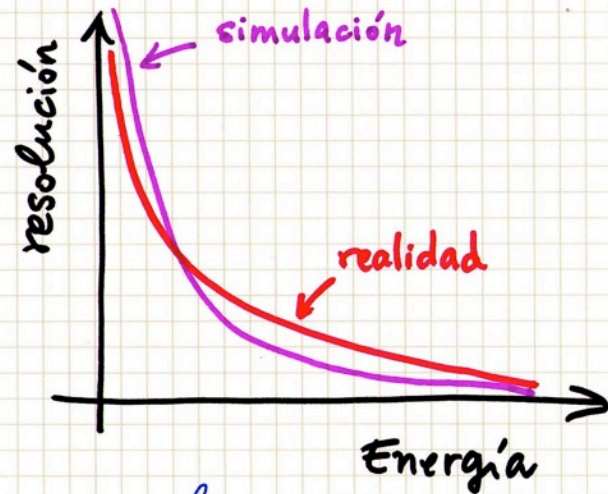
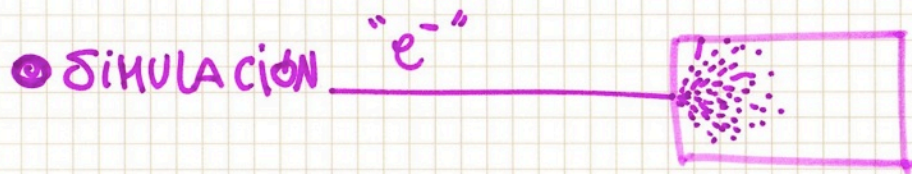
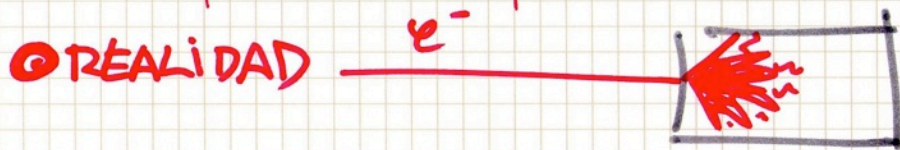
regiones muertas

regiones ineficientes



SIMULACION DEL DETECTOR

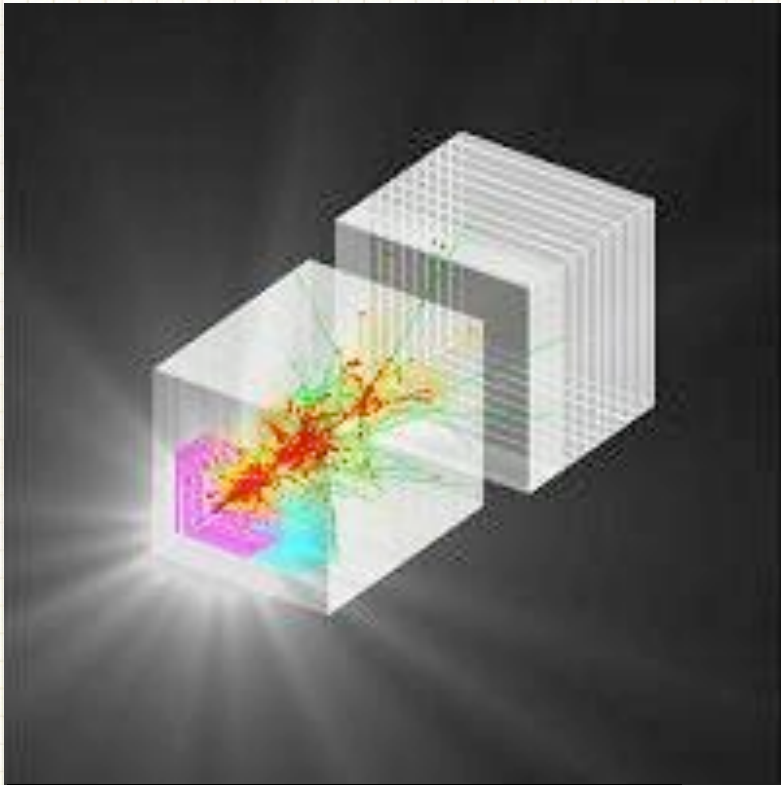
- Para verificar que nuestro detector se comporta según su diseño utilizamos programas de simulación (GEANT4) que reproducen las señales que partículas hipotéticas dejarían en un modelo numérico del detector.



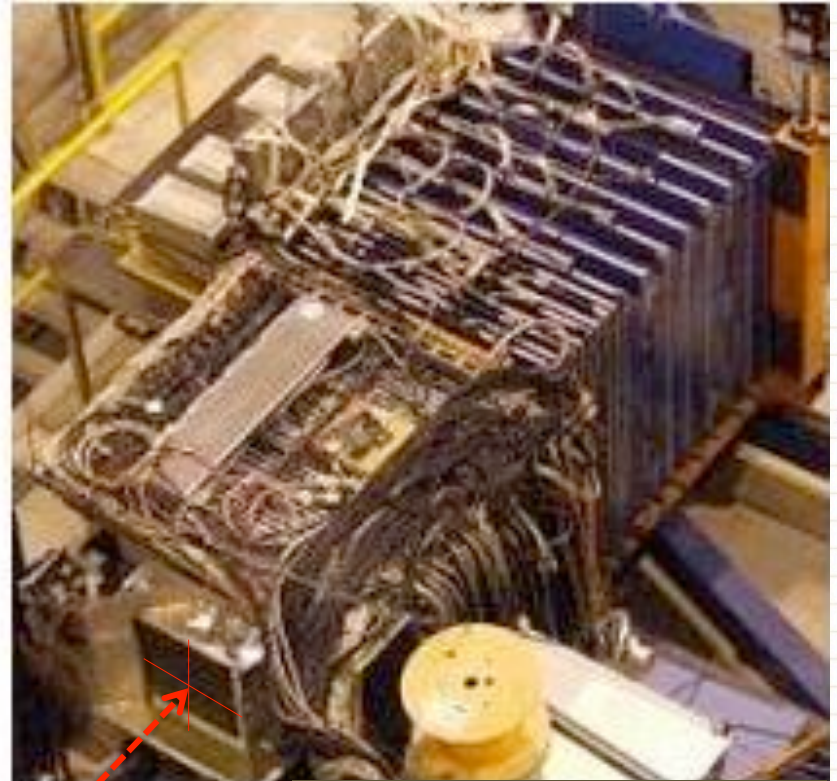
- Para comparar los modelos de física (U.E. y otros) con los experimentos, se hacen pasar las "partículas" procedentes de programas tipo "diagrama de Feynman" por el programa de simulación del detector.

¡¡ ESTA ES UNA PIEZA CLAVE DE LOS ANALISIS !!

simulación del detector



modelo numérico con
interacciones simuladas



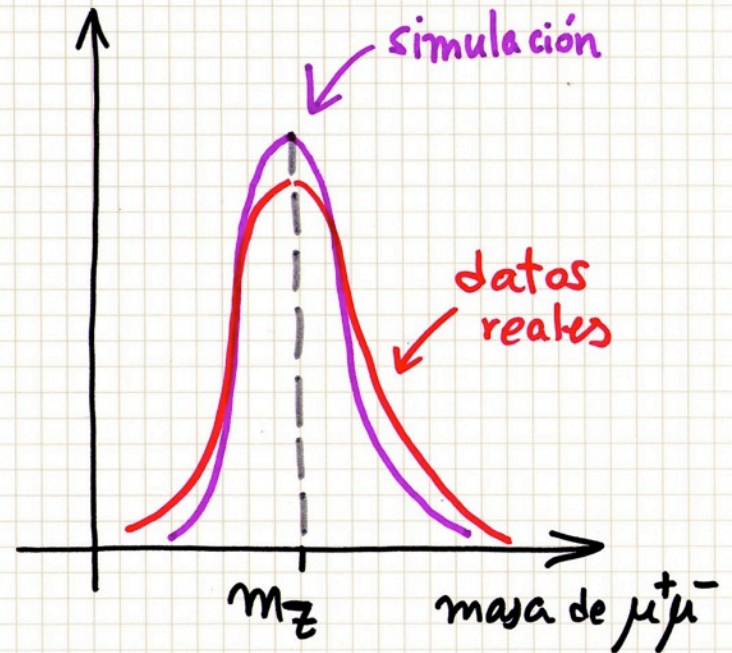
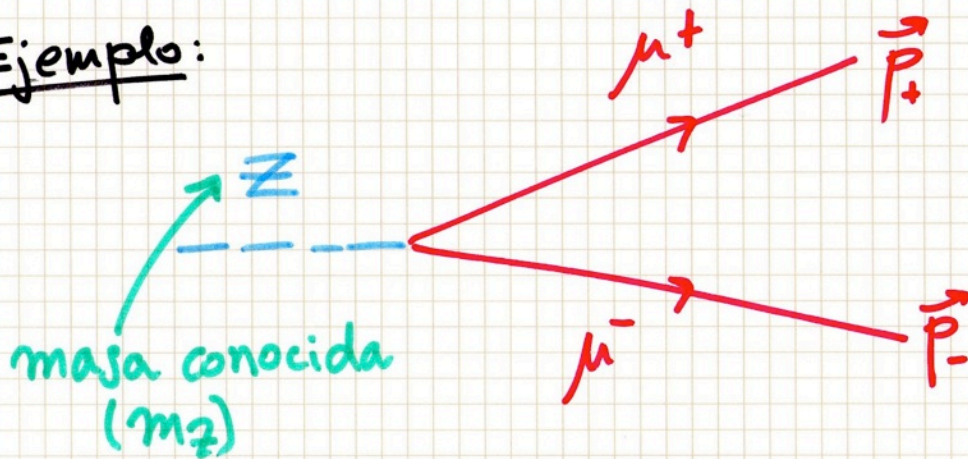
haz de
partículas

detector real en
un haz de prueba

Hay que trabajar mucho para asegurarse de que la simulación es fiel a la realidad, para así poder fiarnos de las predicciones.

Para ello utilizamos muestras de control.

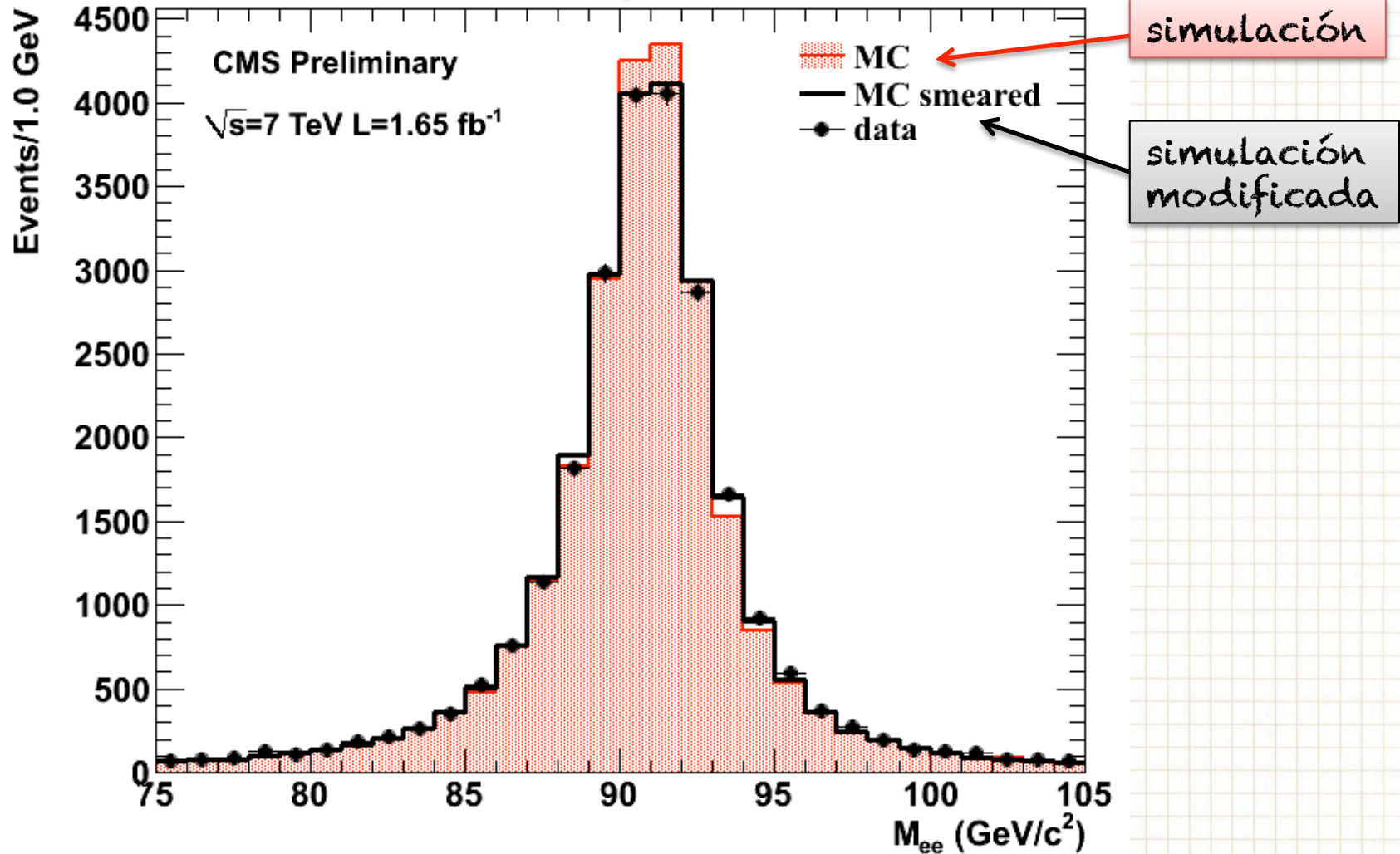
Ejemplo:



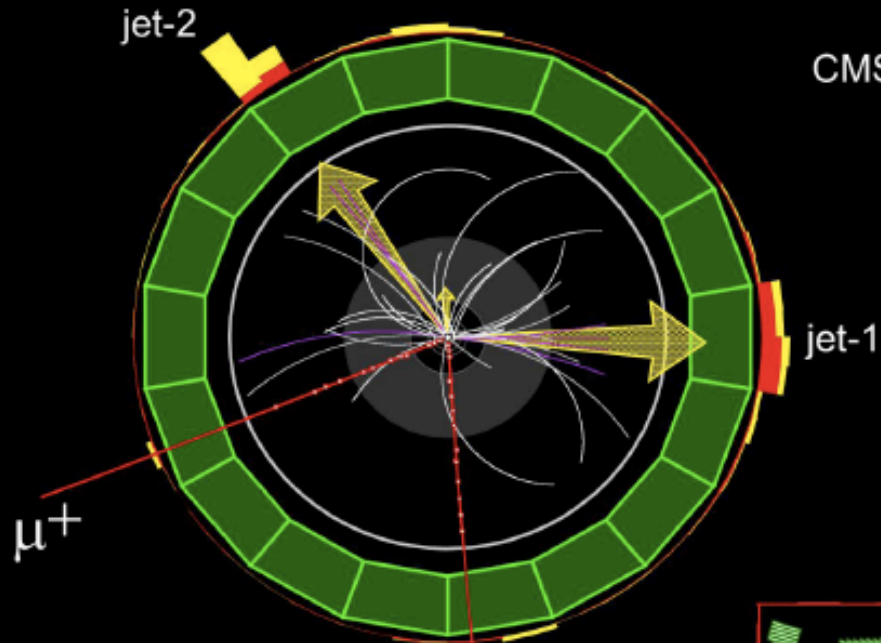
Si la simulación es muy optimista, como en el ejemplo, hay que estropearla adecuadamente: modificar la simulación de \vec{P}_μ .

medida de la energía en la simulación

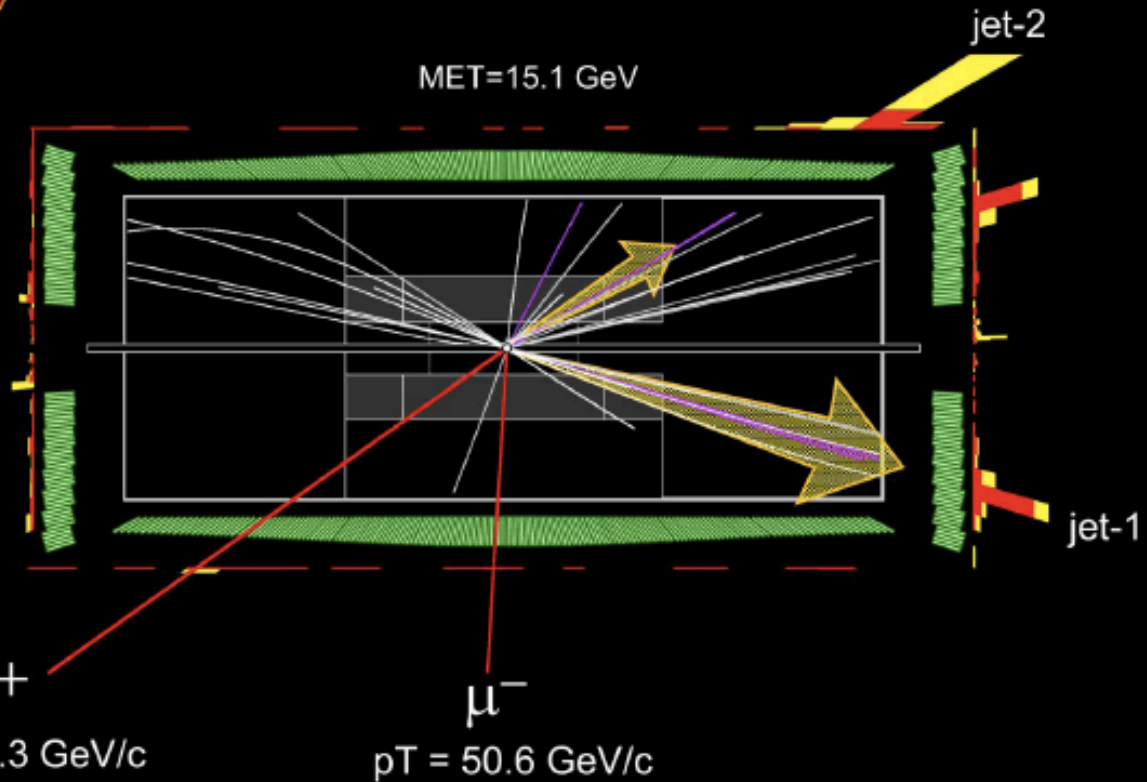
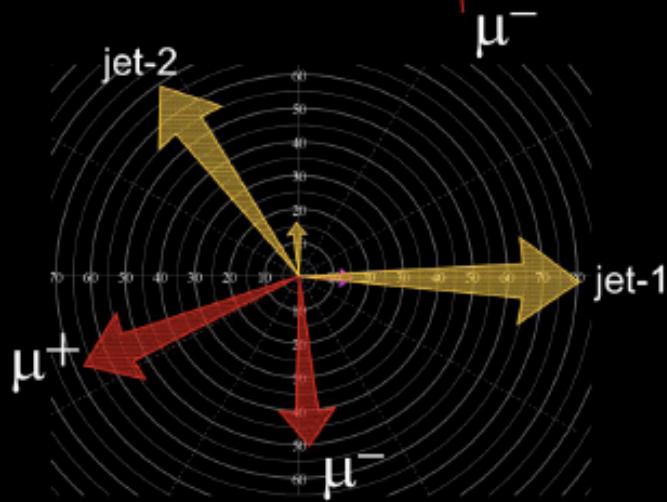
masa invariante de pares e^+e^- : $Z \rightarrow e^+e^-$



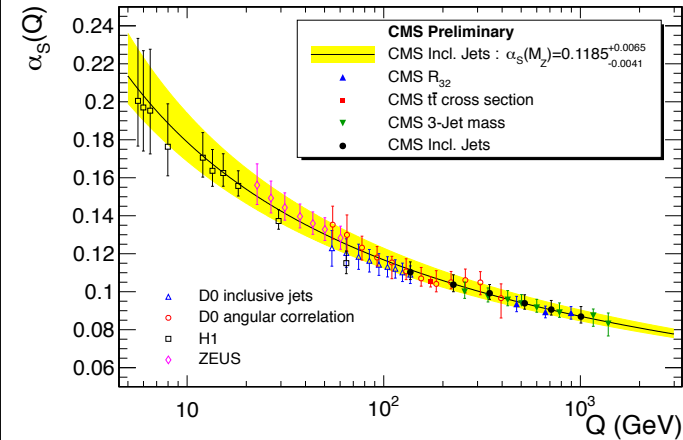
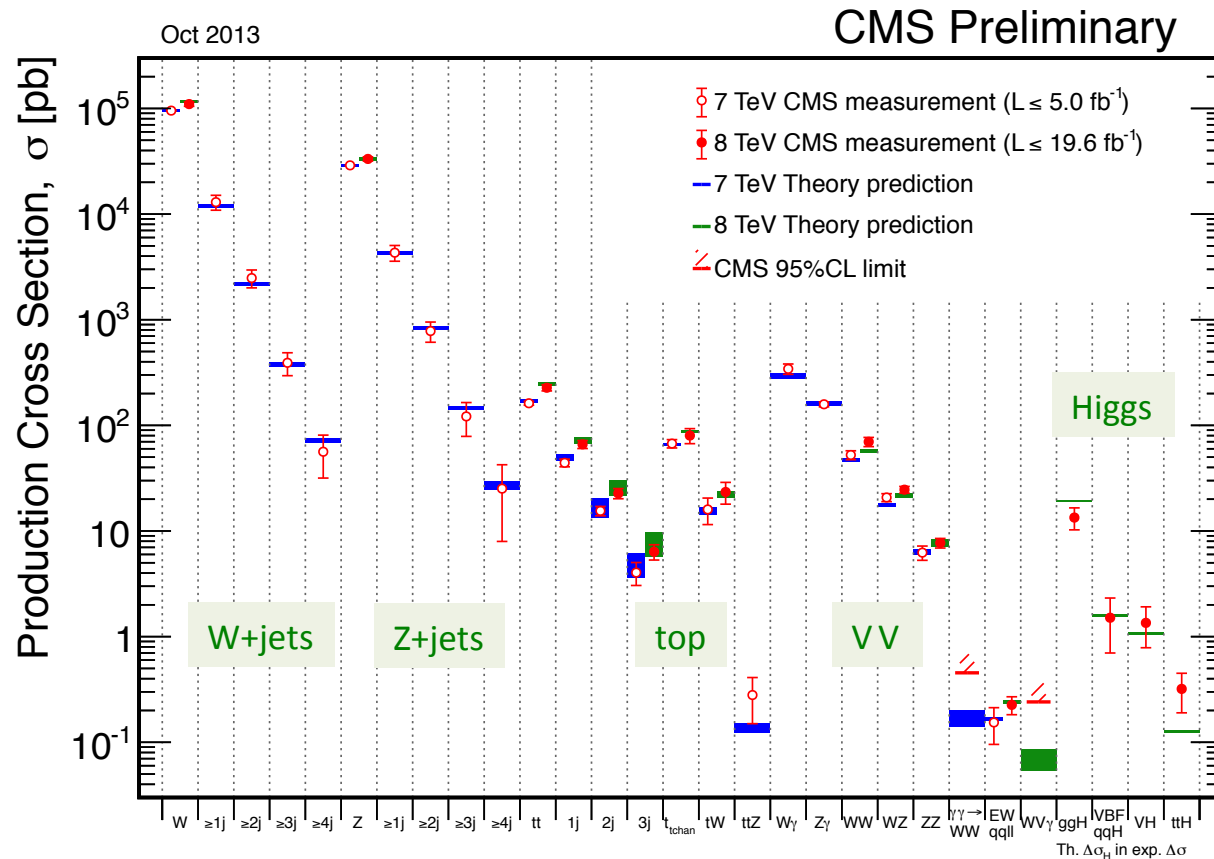
CMS Experiment at the LHC, CERN
Run 135149, Event 125426133
Sunday May 9 2010, 05:24:09



Z+jets candidate
 $M = 93.2 \text{ GeV}/c^2$
 $p_T = 97.0 \text{ GeV}/c$

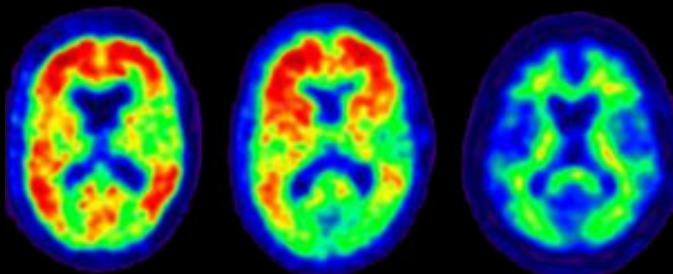


Medidas precisas del modelo estándar, la clave del descubrimiento



Nuevas medidas de $\alpha_s(Q)$ a partir de varios procesos.

Estas medidas requieren buena comprensión del detector y de las predicciones del modelo estándar, que son fondo para las señales de nueva física.



Alzheimer's Disease

Normal Amyloid positive

Normal Amyloid negative



Los detectores de física de partículas benefician a la sociedad

