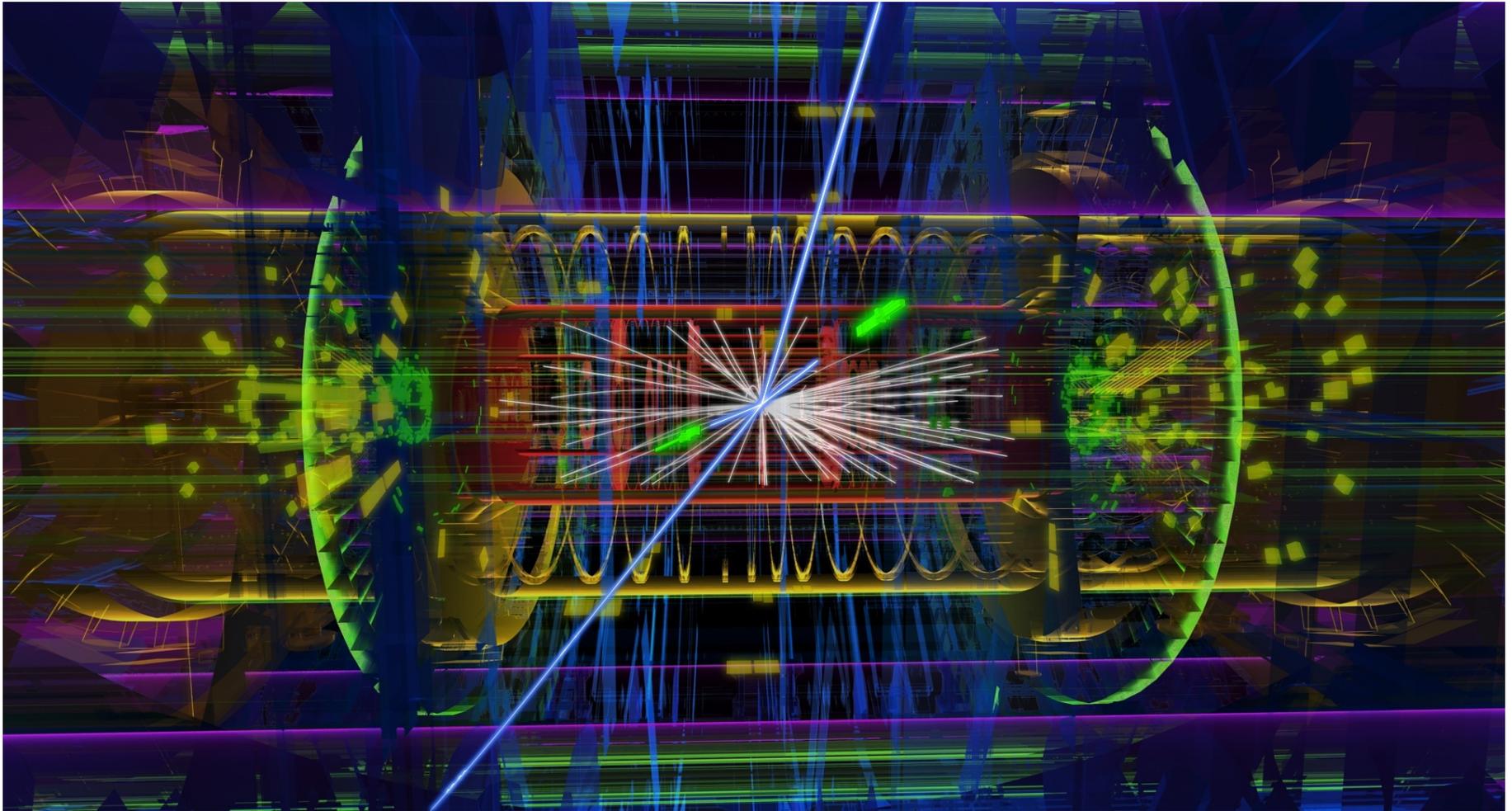


# ¿Cómo se detecta una partícula?



**Gustavo Otero y Garzón**

*Noviembre de 2018, UBA*



# ¿Cómo se crean partículas?

$$E = m \cdot c^2$$

- La ecuación de Einstein expresa que energía y masa son dos versiones de una misma cosa

¿ Cuánta energía se necesita para crear un electrón?

$$\longrightarrow E = m_e c^2 = 8 \times 10^{-7} \text{ g km}^2/\text{seg}^2 = 0.5 \text{ MeV}$$

$$E^2 - c^2 \cdot P^2 = m^2 \cdot c^4$$

- Masa-energía para el caso mas general de una partícula en movimiento

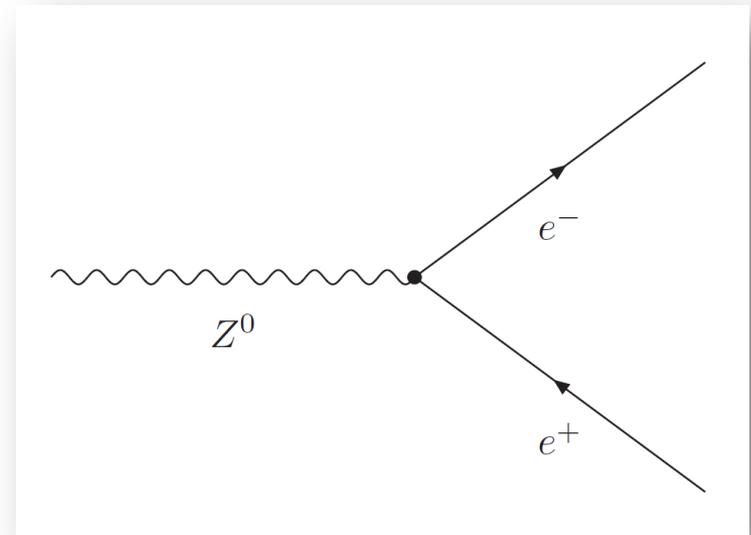
¿Cuánta energía es 0.5 MeV?

→ Un protón viajando a 3000 Km/s equivale a 0.5 MeV

# Vida media

- Las partículas tienen características únicas
  - Interactúan mediante distintas fuerzas y de distinta manera
- Pueden decaer en otras más livianas dependiendo de sus características
  - En promedio, tienen un “tiempo de vida” ( $\tau$ ) característico
  - Si inicialmente hay un cierto numero de partículas, transcurrido un tiempo  $\tau$  habrá 2/3 menos

| Partícula | Vida media          |
|-----------|---------------------|
| electrón  | $>10^{26}$ años     |
| protón    | $>10^{29}$ años     |
| neutrón   | 15 minutos          |
| H         | $10^{-22}$ segundos |
| Z         | $10^{-25}$ segundos |



# Interacciones de partículas con materia

Los experimentos de Física de Partículas se diseñan para **detectar** e **identificar** partículas producidas en colisiones de altas energías

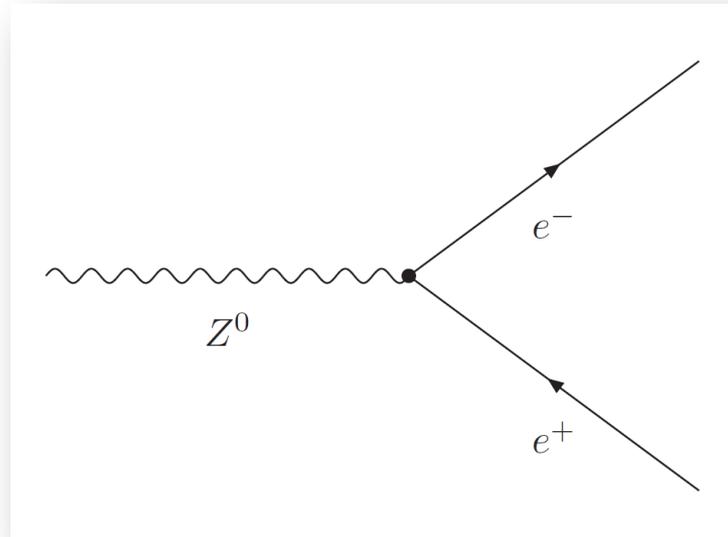
- Partículas relativistas pueden ser “estables” o no

$$d_{recorrida} = \gamma v \tau$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- Partículas relativistas con  $\tau \sim 10^{-10}$  s se propagan algunos metros
- Partículas con vidas medias menores decaen antes de alcanzar un detector!
- Solo podemos detectar partículas “estables”
  - electrón, muón, protón, neutrón, pion,  $K_L$ , fotón, neutrinos (?)

# Decaimientos y masa invariante



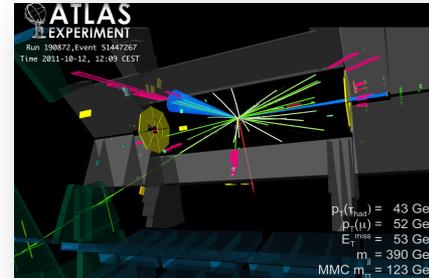
- La energía y el momento se conservan en un decaimiento
- “Genética”: las partículas “hijas” portan la información de sus “madres”

$$(E_1 + E_2)^2 - c^2 \cdot (P_1 + P_2)^2 = m^2 \cdot c^4$$

# ¿Cómo identificar a la “madre”?

- Si buscamos el Z decayendo a  $e^+e^-$ :

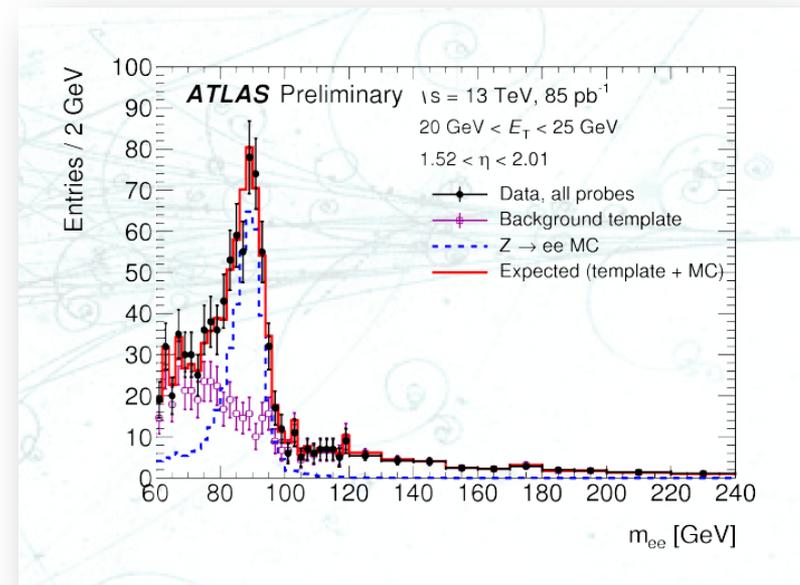
- Identificar eventos con un par  $e^+e^-$



- No sabemos si este par proviene de un Z o no tiene nada que ver con él (fondos)

- Pero si vienen de un decaimiento, la masa invariante **ES** la masa de la madre

- Hay que contar cuantos eventos tienen partículas “hijas” para distintos valores de masa invariante



# Tipos de interacción con la materia

Las técnicas de detección de partículas dependen de la naturaleza de su interacción con la materia

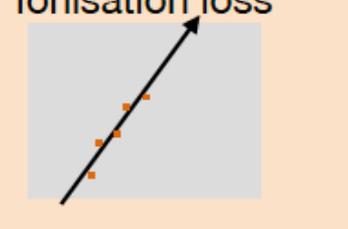
[1]

| Type                | particles             |
|---------------------|-----------------------|
| Multiple Scattering | all charged particles |



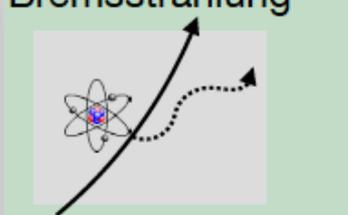
[2]

|                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| Ionisation loss | all charged particles |
|-----------------|-----------------------|



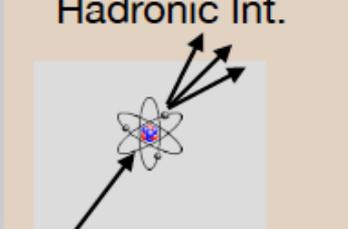
[3]

| Type           | particles                             |
|----------------|---------------------------------------|
| Bremsstrahlung | all charged particles, dominant for e |



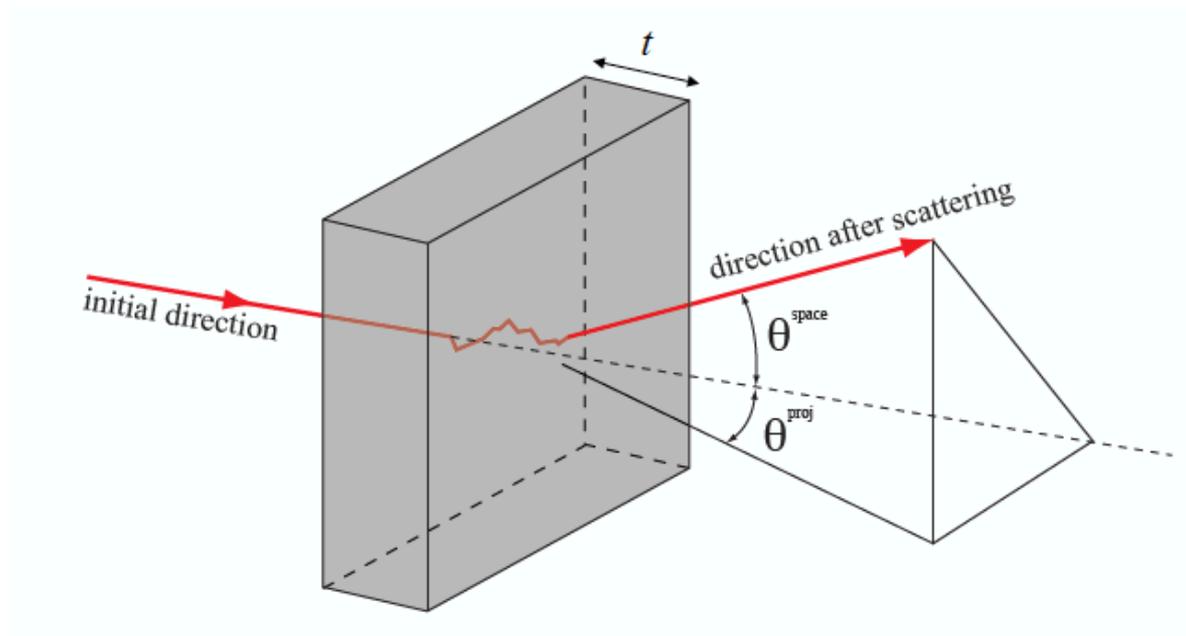
[4]

|               |                        |
|---------------|------------------------|
| Hadronic Int. | all hadronic particles |
|---------------|------------------------|



# [1] Scattering múltiple

- Una partícula cargada sufre múltiples deflexiones al atravesar un medio
  - **Coulomb scattering con los átomos**



$$\theta_{proj} = \frac{13.6}{\beta_{cp}} Z \sqrt{x/X_0} [1 + 0.038(x/X_0)]$$

# [2] Interacción de partículas cargadas

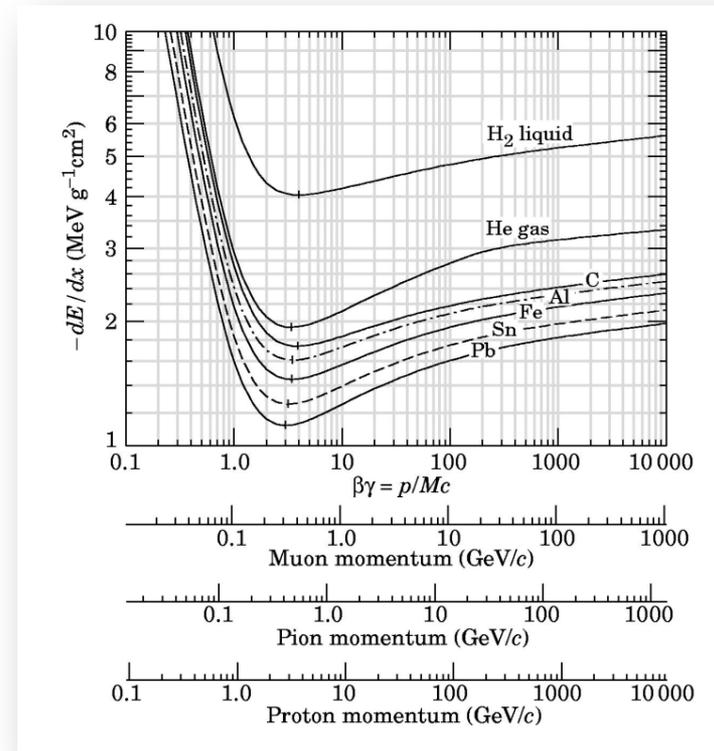
- Al atravesar un medio, una partícula relativista cargada interactúa electromagnéticamente con los electrones atómicos

- Pérdida de energía por ionización**
- Descrito por la ecuación de Bethe-Bloch**

$$\frac{dE}{dx} \approx -4\pi\hbar^2 c^2 \alpha^2 \frac{nZ}{m_e v^2} \left\{ \ln\left(\frac{2\beta^2 \gamma^2 c^2 m_e}{I_e}\right) - \beta^2 \right\}$$

$$I_e \sim 10ZeV$$

- A bajas velocidades  $dE/dx$  es máxima
- A  $v \sim c$ ,  $dE/dx$  tiene un leve “relativistic rise”
- Muy poca dependencia con el tipo de material
- $\beta\gamma \sim 3$  : **Minimum Ionisation Particle (MIP)**
- Ejemplo:  
un  $\mu$  de 10 GeV pierde 2 MeV/cm en hierro



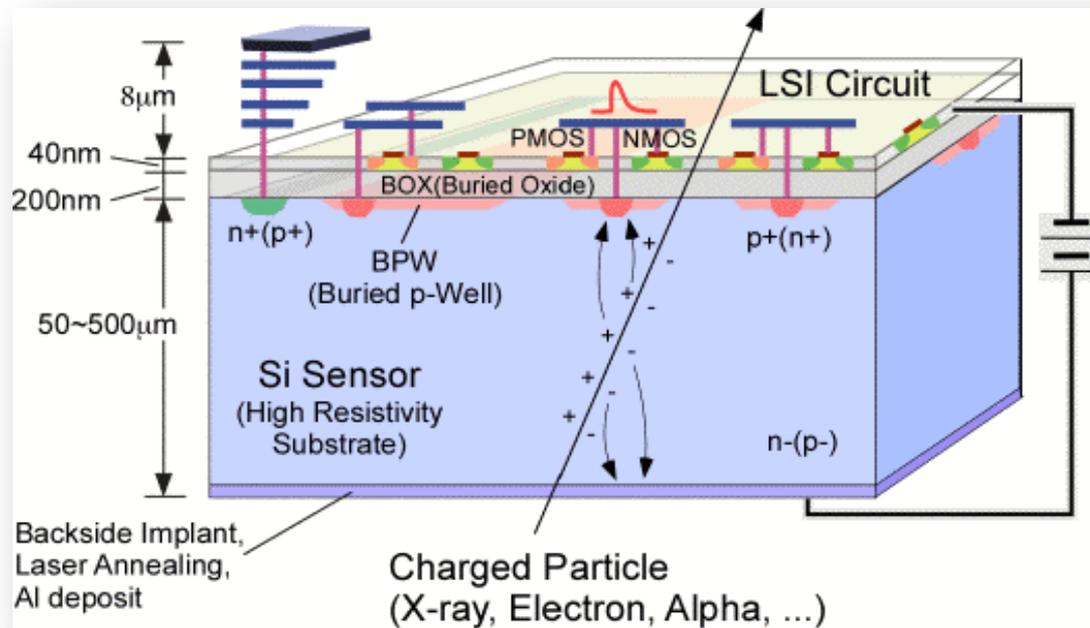
# [2] Detectores de trazas

El objetivo de un detector de trazas es la determinación del momento de una partícula cargada

- Una partícula cargada atraviesa un material dejando un **rastro** de átomos ionizados
  - Es posible reconstruir su trayectoria (traza)
- Mecanismos más usados
  - **Semiconductores (Silicio)**
  - **Tiempo de deriva de electrones ionizados en un gas**
  - **Centelladores**

# [2] Detectores de Silicio

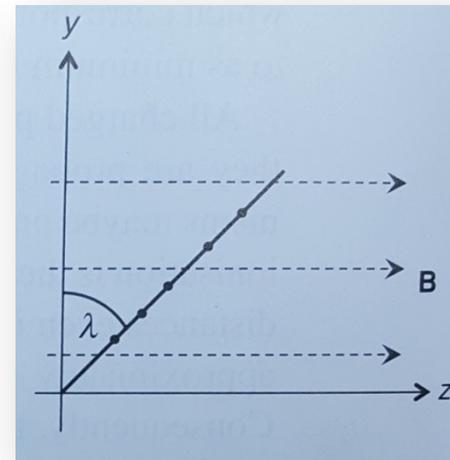
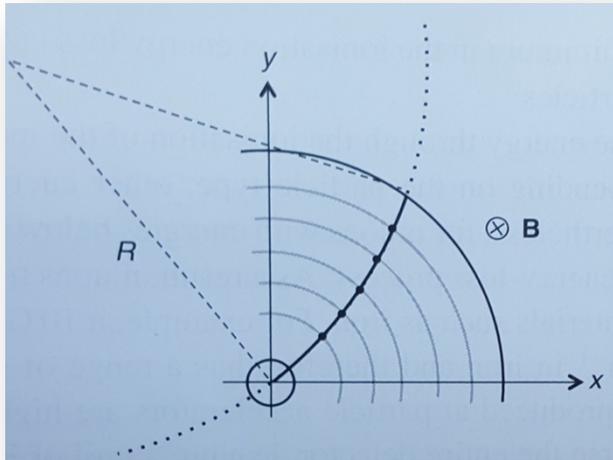
- Al atravesar silicio una carga genera pares electrón-agujero por ionización
  - Con dopaje el silicio funciona como un diodo
  - Alto “reverse bias voltage” depleta de cargas libres al silicio en presencia de un campo E



resolución típica: 1% a 100GeV

# [2] Tracking

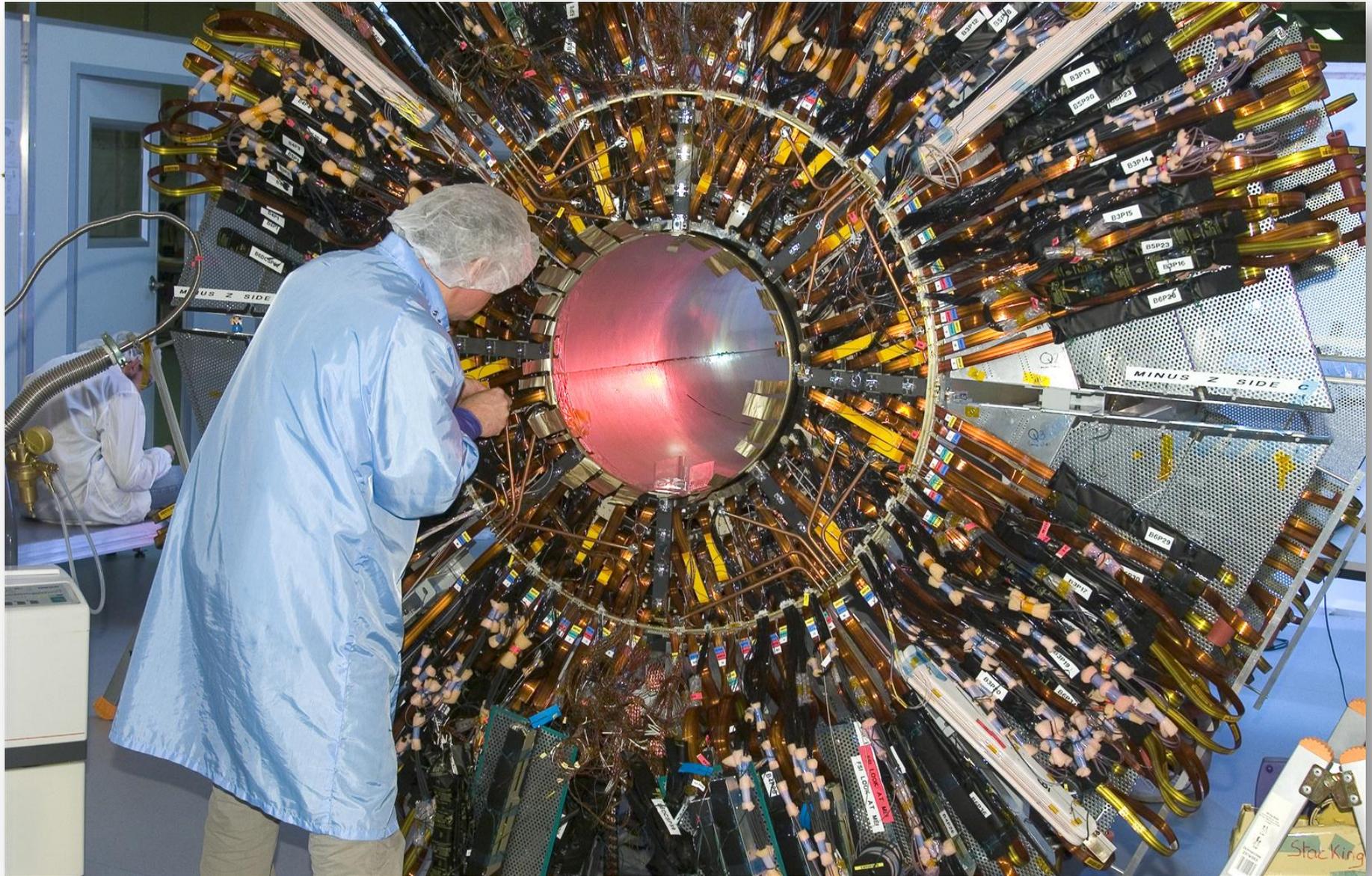
- **Detector de silicio (permite reconstruir trazas y medir momentos)**
  - Muchas capas circulares concéntricas
  - Una partícula deja “hits” en cada capa
  - Los hits permiten reconstruir una trayectoria
  - En presencia de un campo B uniforme (solenoides) la trayectoria se curva por la fuerza de Lorentz



$$p \cos \lambda = 0.3BR$$

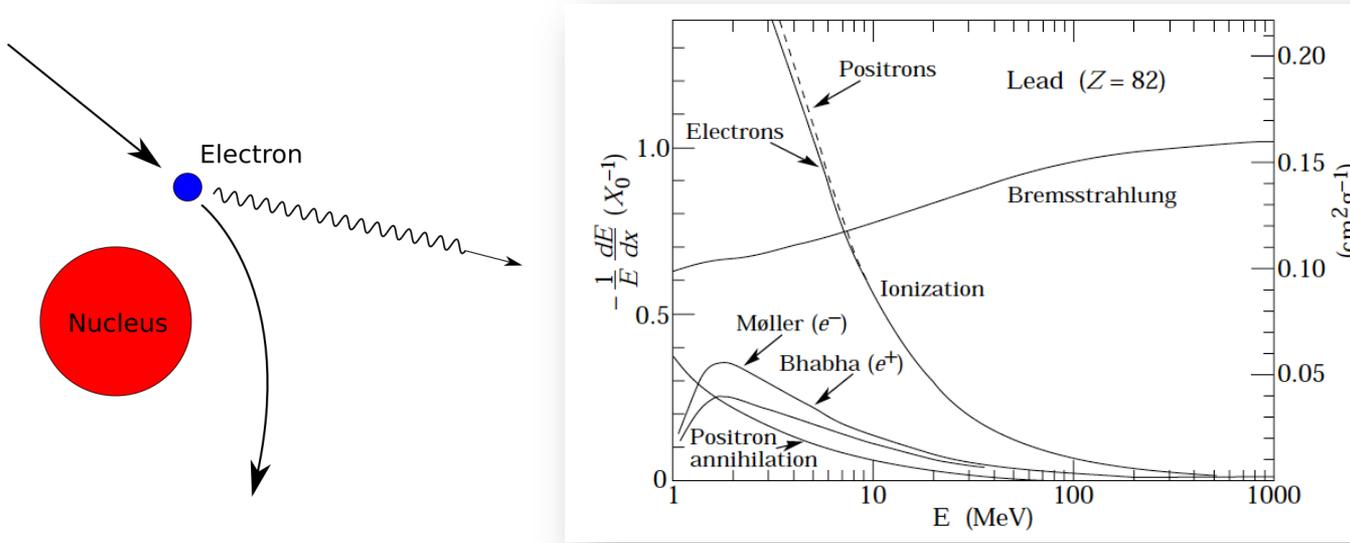
**Ejemplo: un  $\pi^+$  de 100GeV en un campo de 4T tiene un R de 100m**

## [2] Detector de trazas



# [3] Interacción y detección de $e^-$ y $\gamma$

- A bajas energías los  $e^-$  la pierden mayormente por ionización
- Por encima de una  $E_c$  el mecanismo dominante es bremsstrahlung



$$E_c \sim \frac{800}{Z} \text{ MeV}$$

- En los experimentos actuales  $E > \text{GeV}$ 
  - El rate de bremsstrahlung va como  $m^{-2}$ , por eso para  $e^-$  domina bremsstrahlung pero para  $\mu$  domina la ionización
- Fotones:
  - A bajas energías domina la interacción vía efecto fotoeléctrico
  - A  $E_\gamma \sim 1 \text{ MeV}$  domina el scattering Compton
  - A  $E_\gamma > 10 \text{ MeV}$  domina la producción de pares  $e^+e^-$

# [3] Longitud de radiación ( $X_0$ )

- Las interacciones de  $e^-$  y  $\gamma$  con la materia se caracterizan por la longitud de radiación ( $X_0$ )
  - Distancia media en la cual un  $e^-$  pierde energía en un factor  $1/e$
  - 7/9 de la distancia media de conversión de un  $\gamma$  en un par  $e^+e^-$

$$X_0 \approx \frac{1}{4\alpha n Z^2 r_e^2 \ln(287/Z^{1/2})}$$

Ejemplo:  $X_0(\text{Fe}) = 1.8\text{cm}$ ,  $X_0(\text{Pb}) = 0.6\text{cm}$

- La pérdida por radiación es independiente del material cuando el espesor se expresa en  $X_0$ 
  - La pérdida por bremsstrahlung se expresa como
- Materiales con alto  $Z$  tienen  $X_0$  chico
  - Menos volumen para la misma pérdida de  $E$

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

# [3] Lluvias electromagnéticas

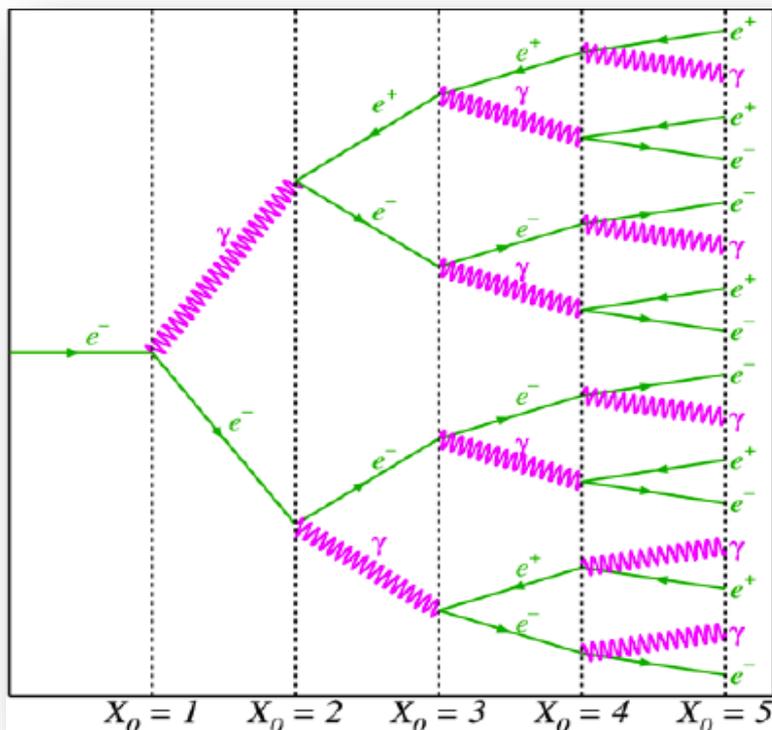
- Un  $e^-$  radia un  $\gamma$  por bremsstrahlung, quien a su vez produce un par  $e^+e^-$ , generando una **lluvia EM**

- En cada interacción se duplica el número de partículas

$$\langle E \rangle \approx \frac{E}{2^x}$$

- Al llegar a una  $E_c$  la pérdida de energía pasa a ser por ionización

$$X_{max} = \frac{\ln(E/E_c)}{\ln 2}$$



Ejemplo:  $E_c(\text{Pb}) \sim 10$  MeV, para una lluvia de 100 GeV,  $X_{max} \sim 13 X_0$  (10cm)

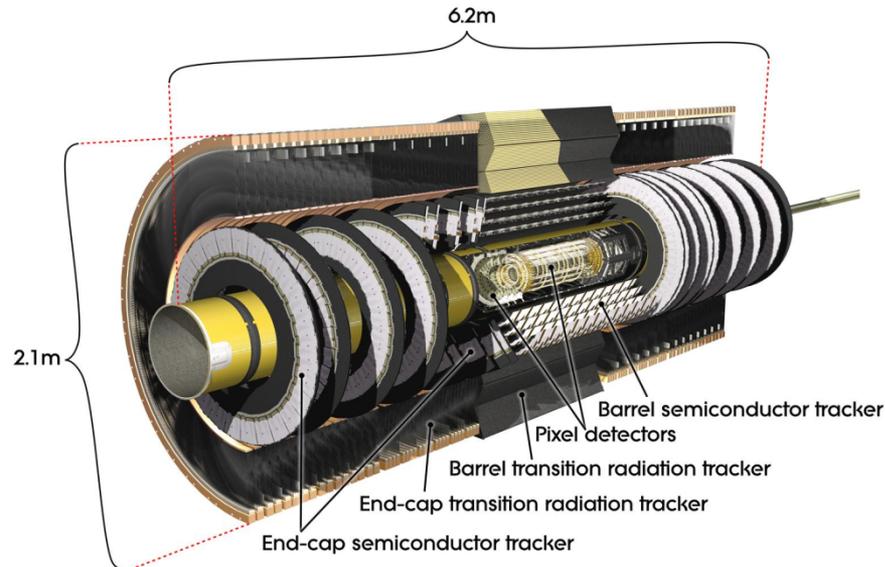
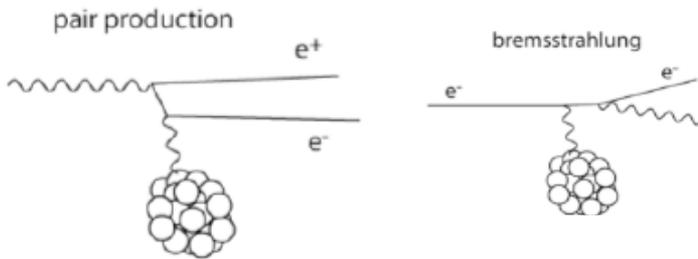
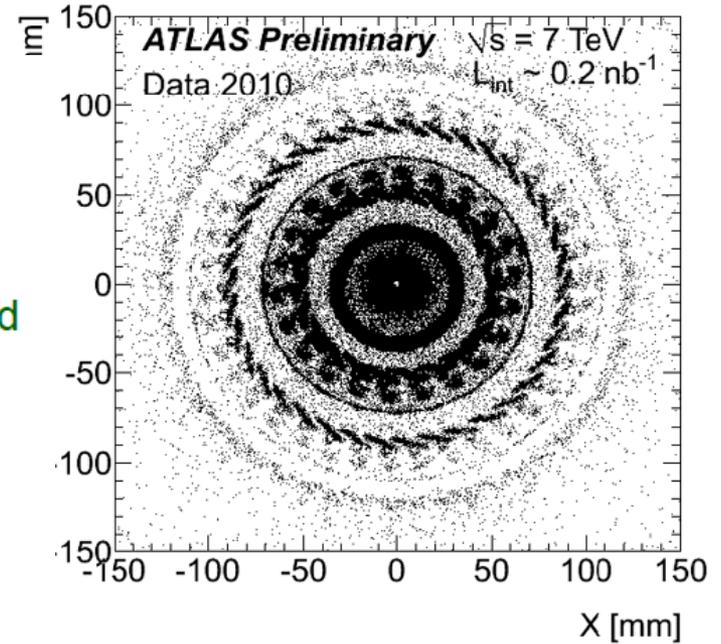
# Fotones convertidos

Complications:

- Electrons radiate photons
- Photons pair produce electrons (conversions)

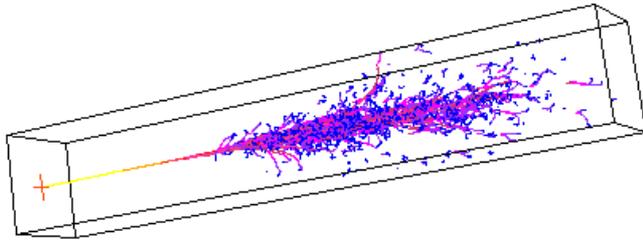
However, can be useful:

- Can use photon conversions to *x-ray* the detector and determine material before calorimeter (i.e. tracker)

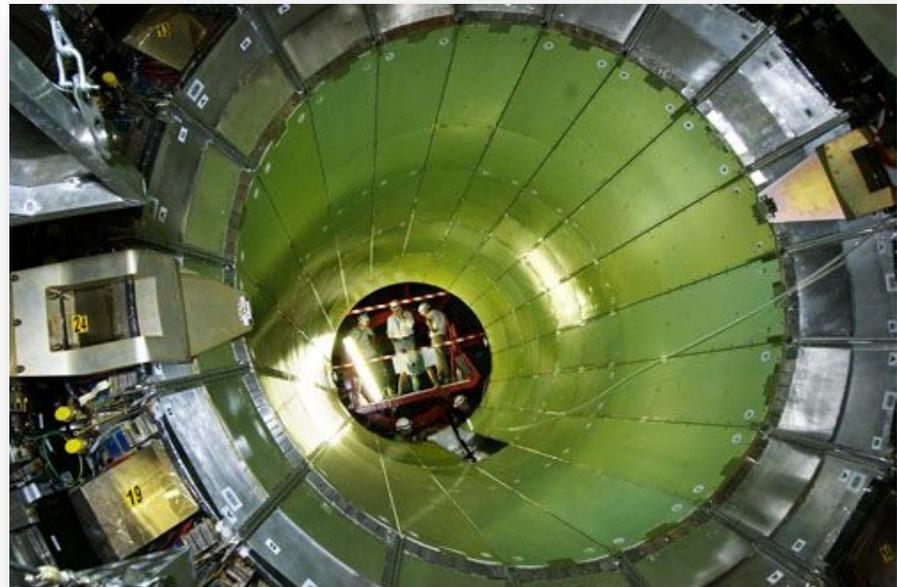


# [3] Calorímetro (EM)

- Las lluvias pueden contenerse en un **Calorímetro**
  - El objetivo es **medir la Energía** (de partículas cargadas y neutras)
    - Usar materiales pesados para favorecer las lluvias EM
    - Frenar completamente la lluvia y medir la deposición total de energía
  - desarrollo de la lluvia es un proceso estocástico de  $2^{X_{\max}}$  partículas
    - Lluvias muy parecidas entre si
  - **CMS: 75000 cristales de tungsteno ( $X_0=0.8\text{cm}$ )**



$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{3\% - 10\%}{\sqrt{E/\text{GeV}}}$$



# [3] ¿Calorímetros homogéneos o no?

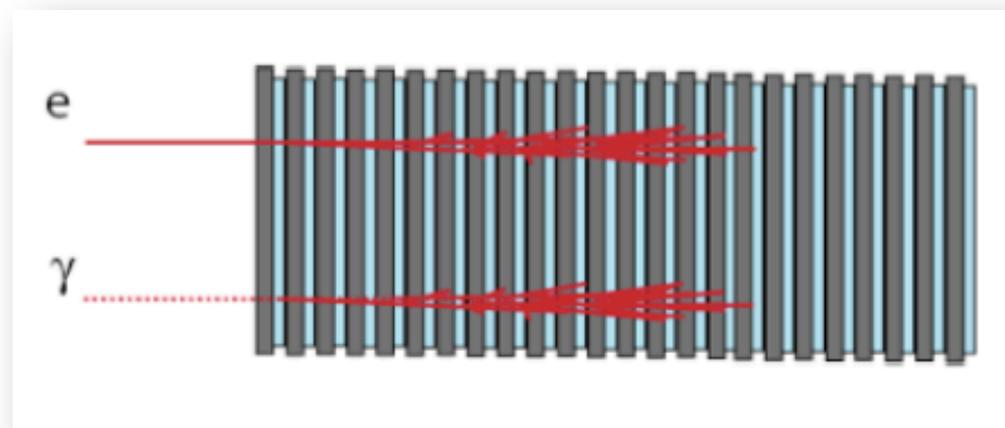
- **Homogéneos**

- El volumen total genera señal
- Cristales centelladores de alto Z
- $\sigma_E/E \sim 1\%$



- **De sampleo**

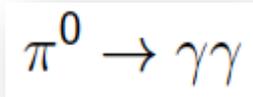
- **Medio activo** que genera señal
  - Centelladores, Argón líquido,...
- **Medio pasivo** para absorber y favorecer la lluvia
  - Hierro, cobre, uranio
- $\sigma_E/E \sim 10\%$



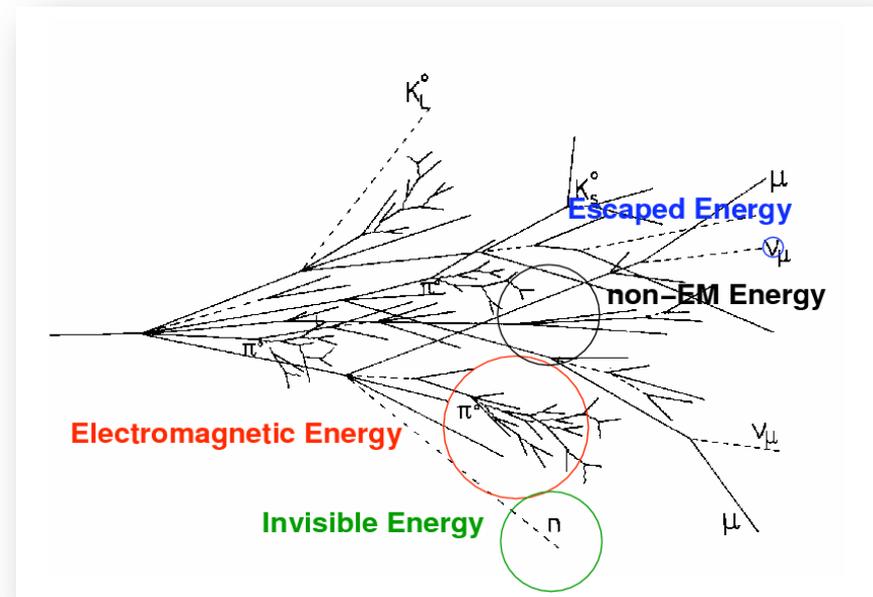
# [4] Interacción y detección de hadrones

- Hadrones cargados pierden energía por ionización
- Hadrones cargados y neutros interactúan vía la fuerza fuerte con los núcleos del material que atraviesan
  - Estos nuevos hadrones repiten este proceso generando una lluvia
- El desarrollo de una lluvia de hadrones se parametriza con algo similar a  $X_0$ 
  - $\lambda_f$  : distancia promedio entre interacciones nucleares
  - $\lambda_f \sim 10 X_0$
- Lluvias hadrónicas mucho más variables que las EM
  - Diferentes decaimientos posibles

- componente EM variable



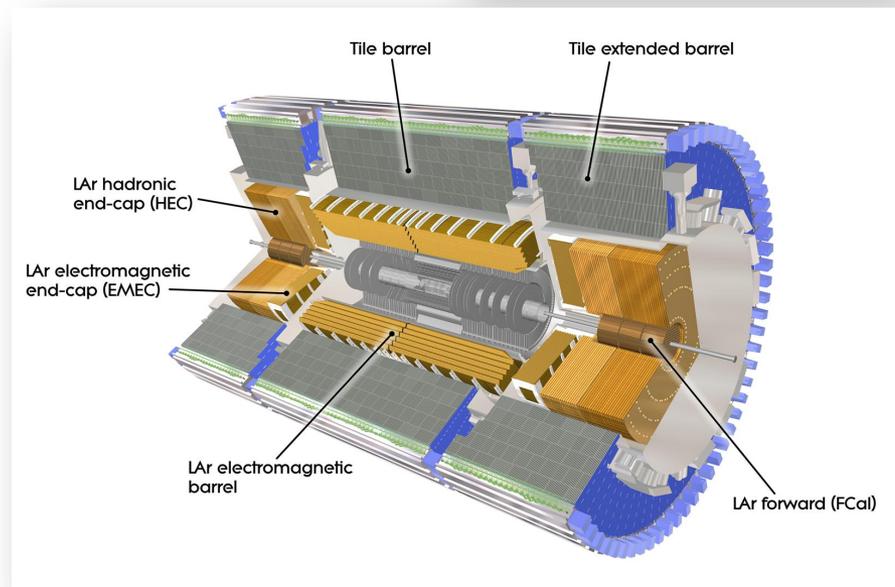
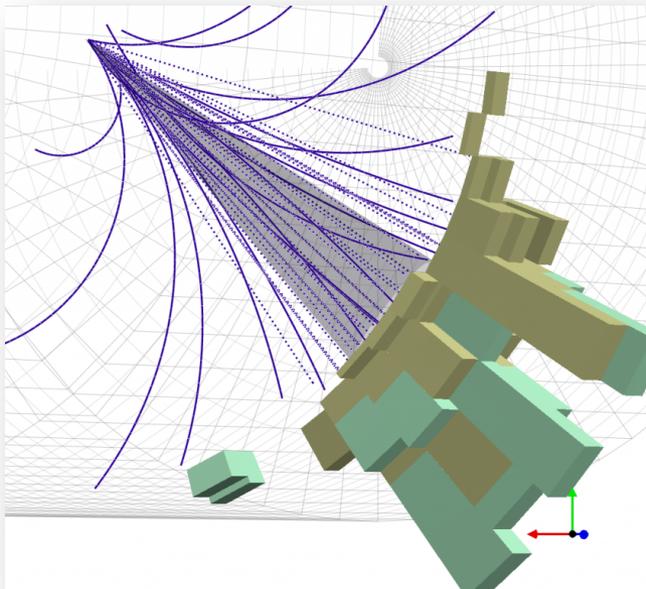
- 30% de energía se “pierde” en excitación y ruptura de núcleos



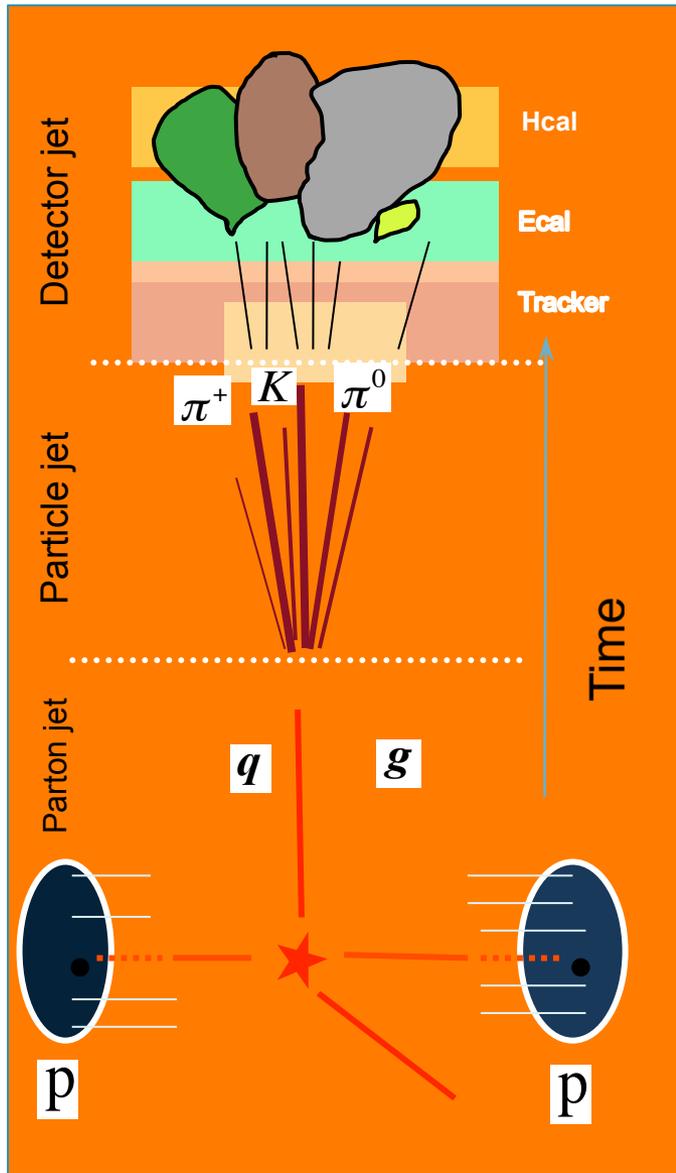
# [4] Calorímetro hadrónico

- El objetivo de estos calorímetros es análogo a los EMs pero para hadrones
  - Lluvias más extensas que las EMs ( $\lambda_f \sim 10 X_0$ ) -> Volúmenes mayores
- Típicamente de sampleo
- Peor resolución que los calorímetros EMs

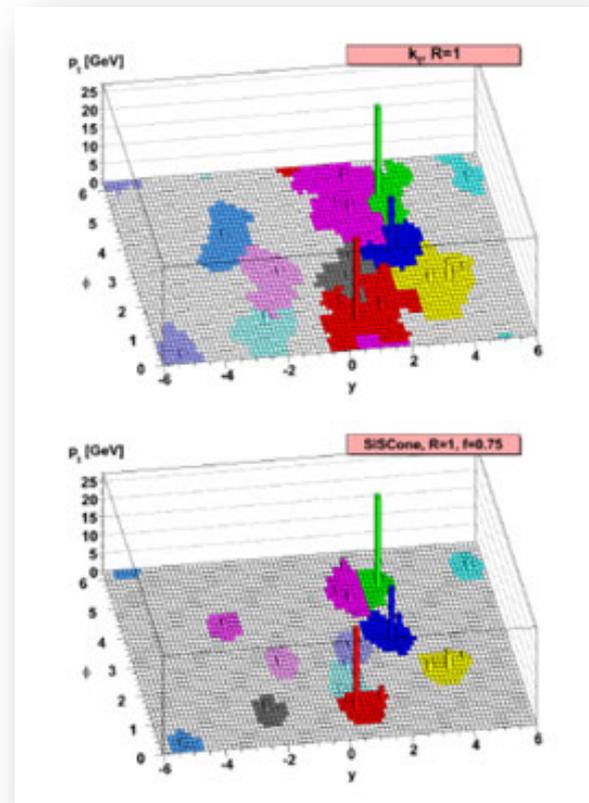
$$\frac{\sigma_E}{E} \geq \frac{50\%}{\sqrt{E/\text{GeV}}}$$



# Jets

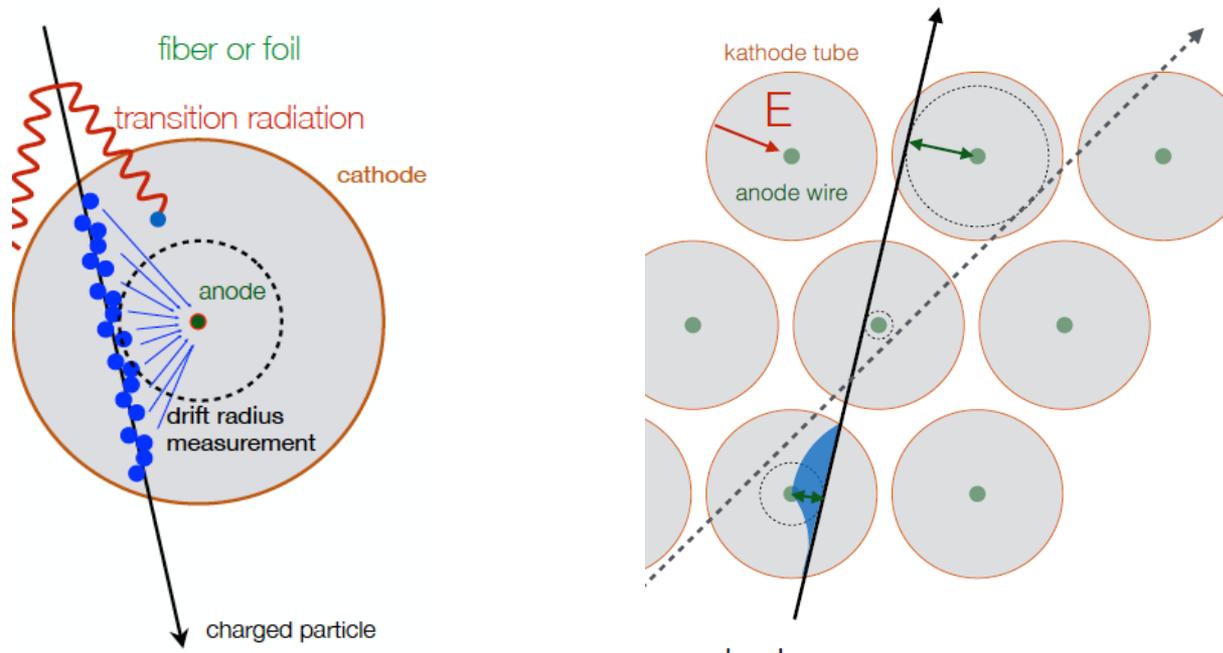


- Recuerden que QCD confina quarks
- Un quark se observa como un chorro (JET) de partículas en el calorímetro hadrónico
  - Diversos algoritmos disponibles



# Detectores de muones

- Recuerden que los muones son muy penetrantes
  - Los detectores de muones componen la última capa
- Detección basada en reconstrucción de trazas
  - Ionización de gas
  - En presencia de un campo E, los electrones derivan al ánodo
  - El tiempo de deriva permite determinar la posición del  $\mu$  incidente

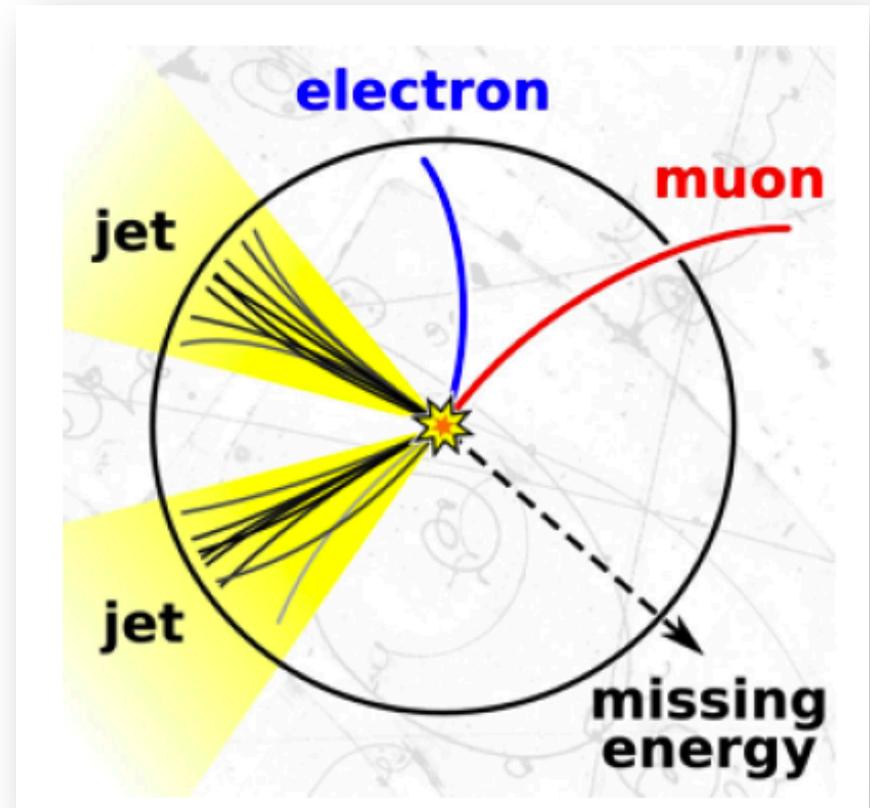


# ¿Y los neutrinos?

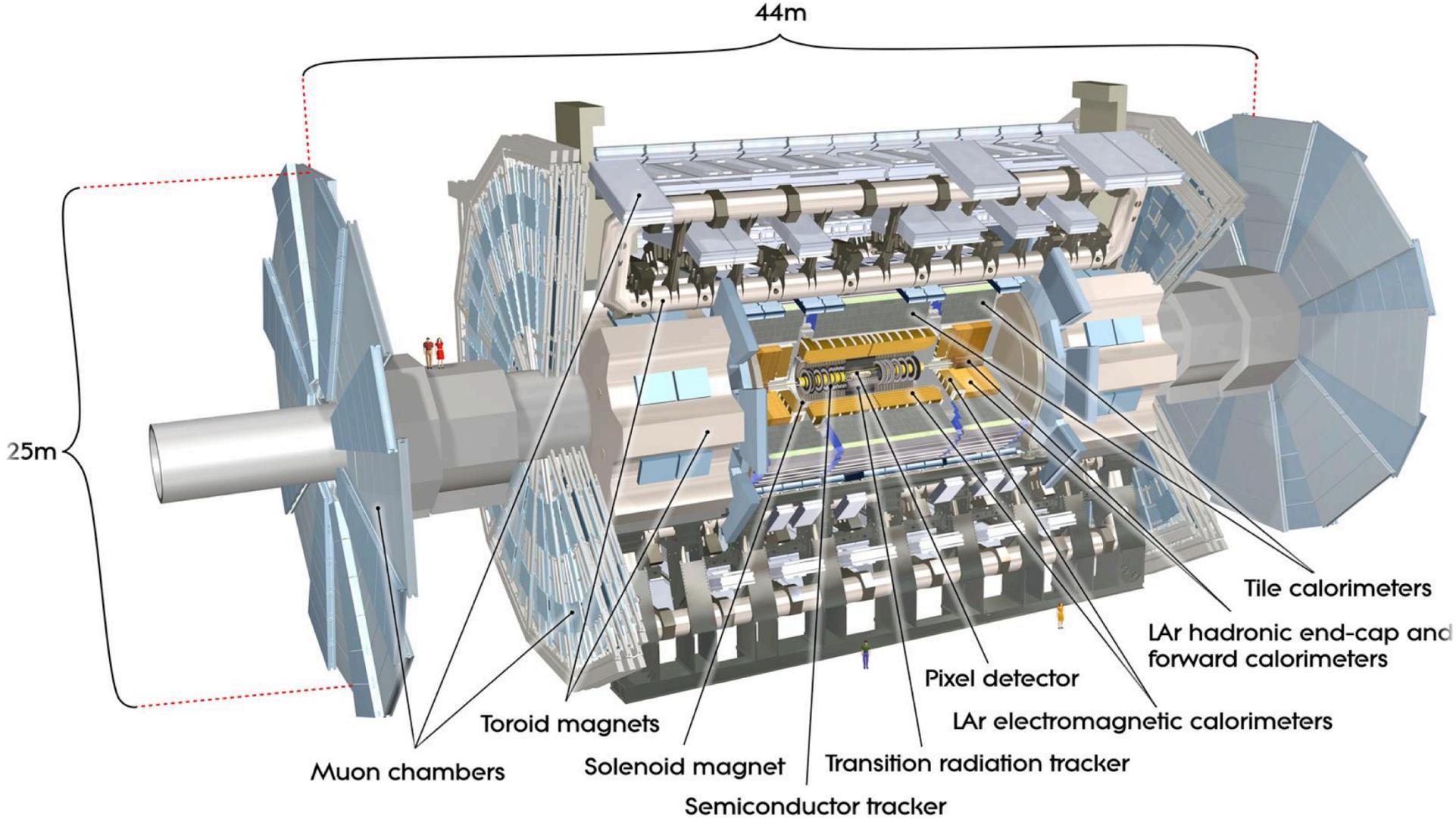
- Los  $\nu$ s atraviesan detectores sin interactuar
- La conservación de la energía en el plano trasverso permite inferir la de los  $\nu$ s

$$E_T^{miss} = - \sum_i E_T^i$$

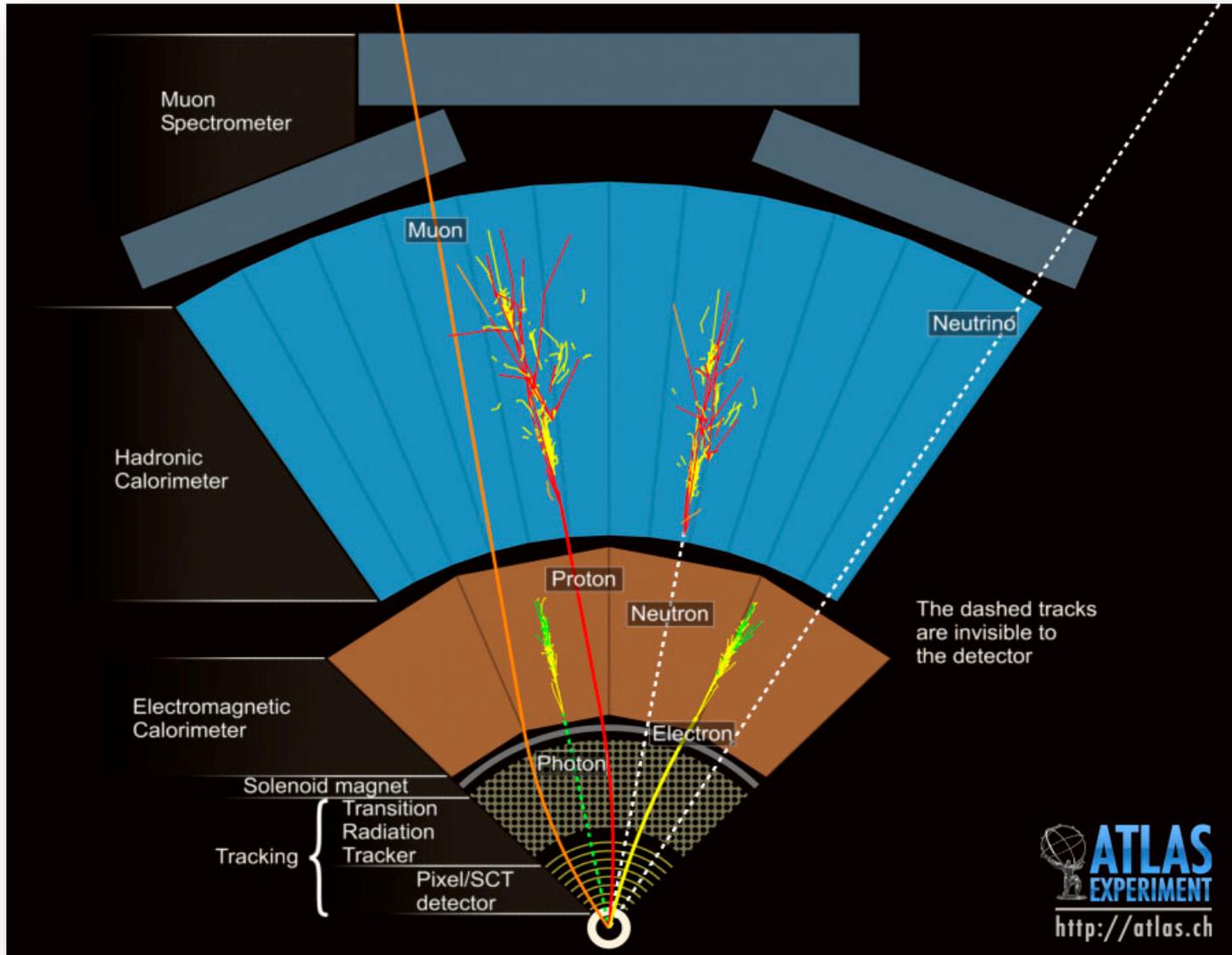
- No se puede determinar el momento en la dirección de colisión!
- Otras partículas (DM, SUSY, ?) contribuyen a  $E_T^{miss}$ !



# El detector ATLAS

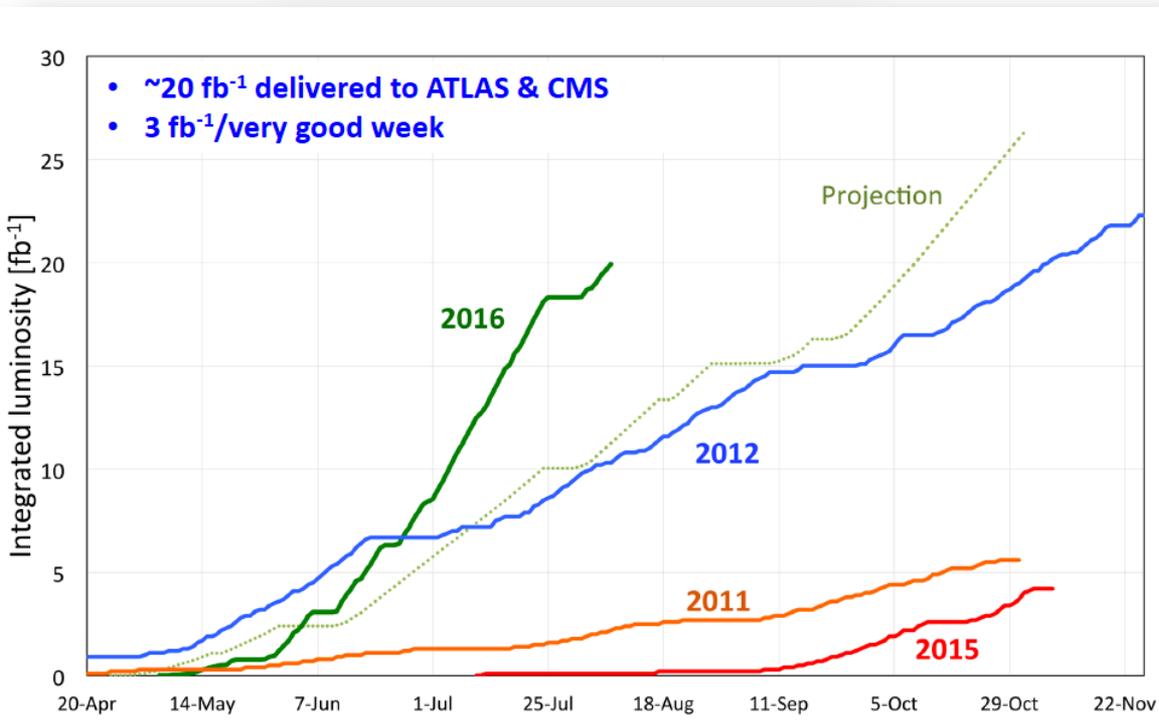


# ¿Qué detectamos entonces?



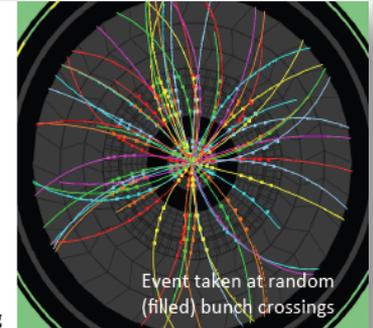
# Luminosidad (L) y sección eficaz ( $\sigma$ )

$$N = \sigma \int L(t) dt$$



2010  
O(2) Pile-up  
events

150 ns inter-bunch spacing



2011  
O(10) Pile-up  
events

50 ns inter-bunch spacing



Design value  
(expected to be  
reached at  $L=10^{34}$ !)

2012  
O(20) Pile-up  
events

50 ns inter-bunch spacing

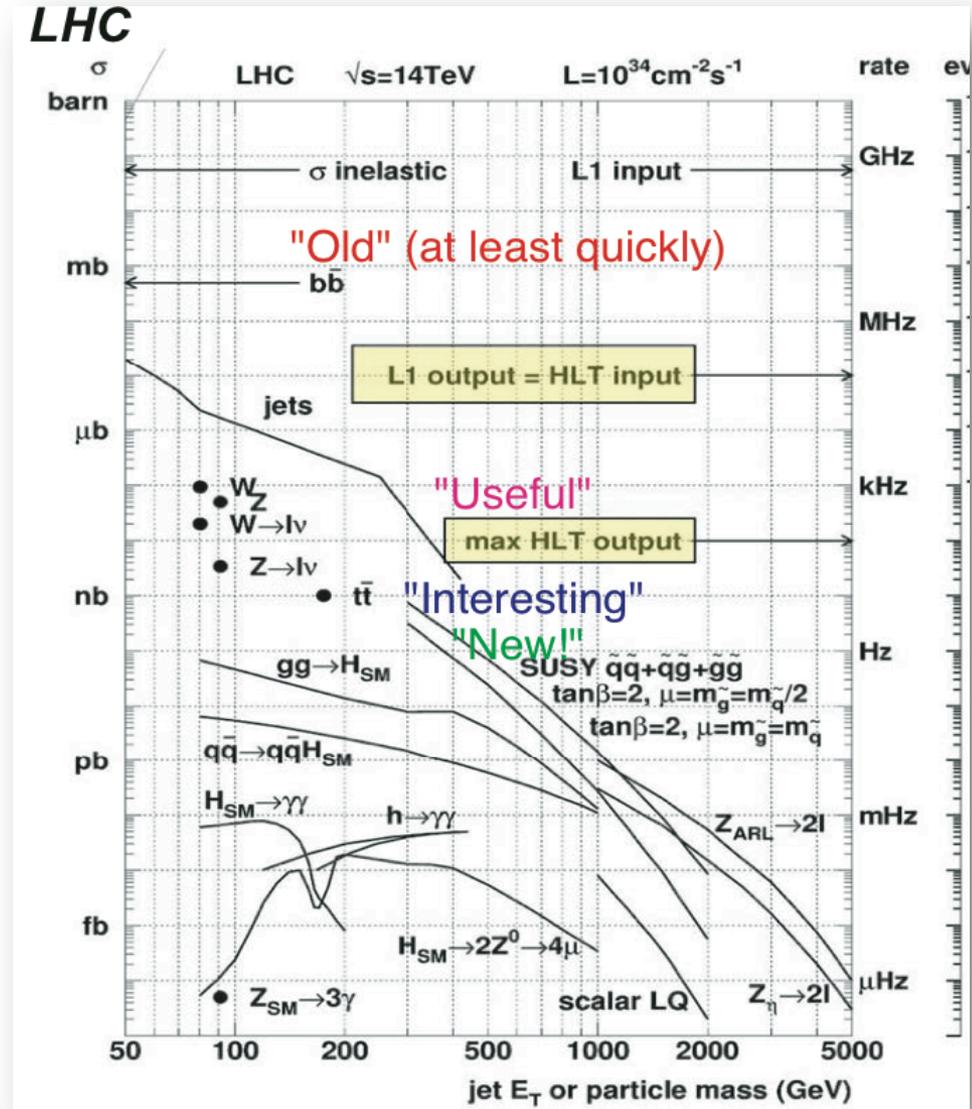


$N_{\text{Higgs}} = L \times \sigma = 20 \text{ fb}^{-1} \times 12 \text{ pb} = 240.000 (!)$   
El LHC es una “Fábrica de Higgses”

# Triggering

- Lo “interesante” tiene *rates* entre 1 y  $10^{-3}$ Hz
- Guardar los eventos interesantes, tirar el resto
- Solo podemos guardar ~1 KHz de los 40 MHz

Eventos no seleccionados por el trigger se pierden para siempre!



# Receta para medir una sección eficaz

Number of observed candidates  
(fitted or counted)

Number of background candidates  
(measured from data  
or calculated from theory)  
(minimize)

Cross section in  $\text{cm}^2$   
(or  $\mu\text{b}$ ,  $\text{nb}$ ,  $\text{pb}$ )

$$\sigma = \frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{backg}}}{\epsilon \cdot \int \mathcal{L} dt}$$

Efficiency/acceptance  
(maximize)

Integrated Luminosity in  $\text{cm}^{-1}$   
(or  $\mu\text{b}^{-1}$ ,  $\text{nb}^{-1}$ ,  $\text{pb}^{-1}$ )  
(maximize,  
unless systematically limited)

# ¿En resumen, qué medimos?

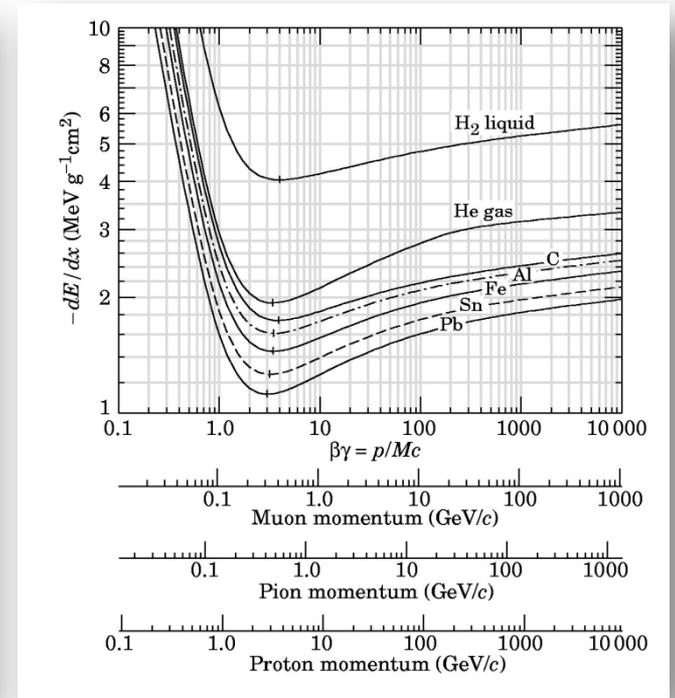
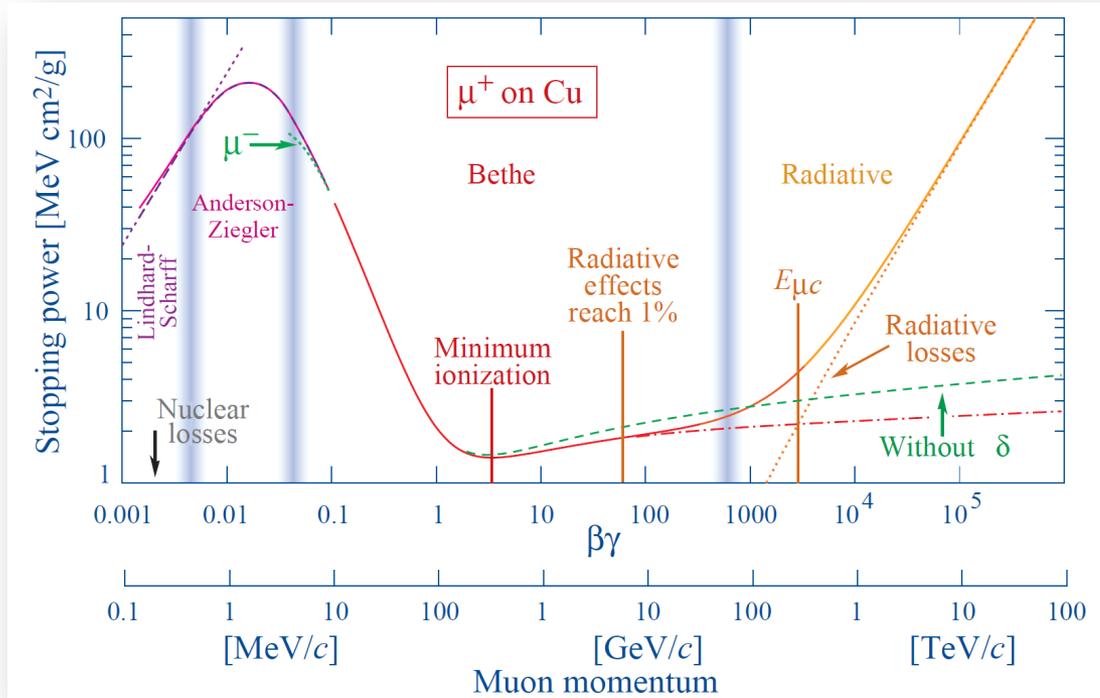


**La clase próxima vamos a ver que hacemos con esto...**

?

• ?

# Stopping power

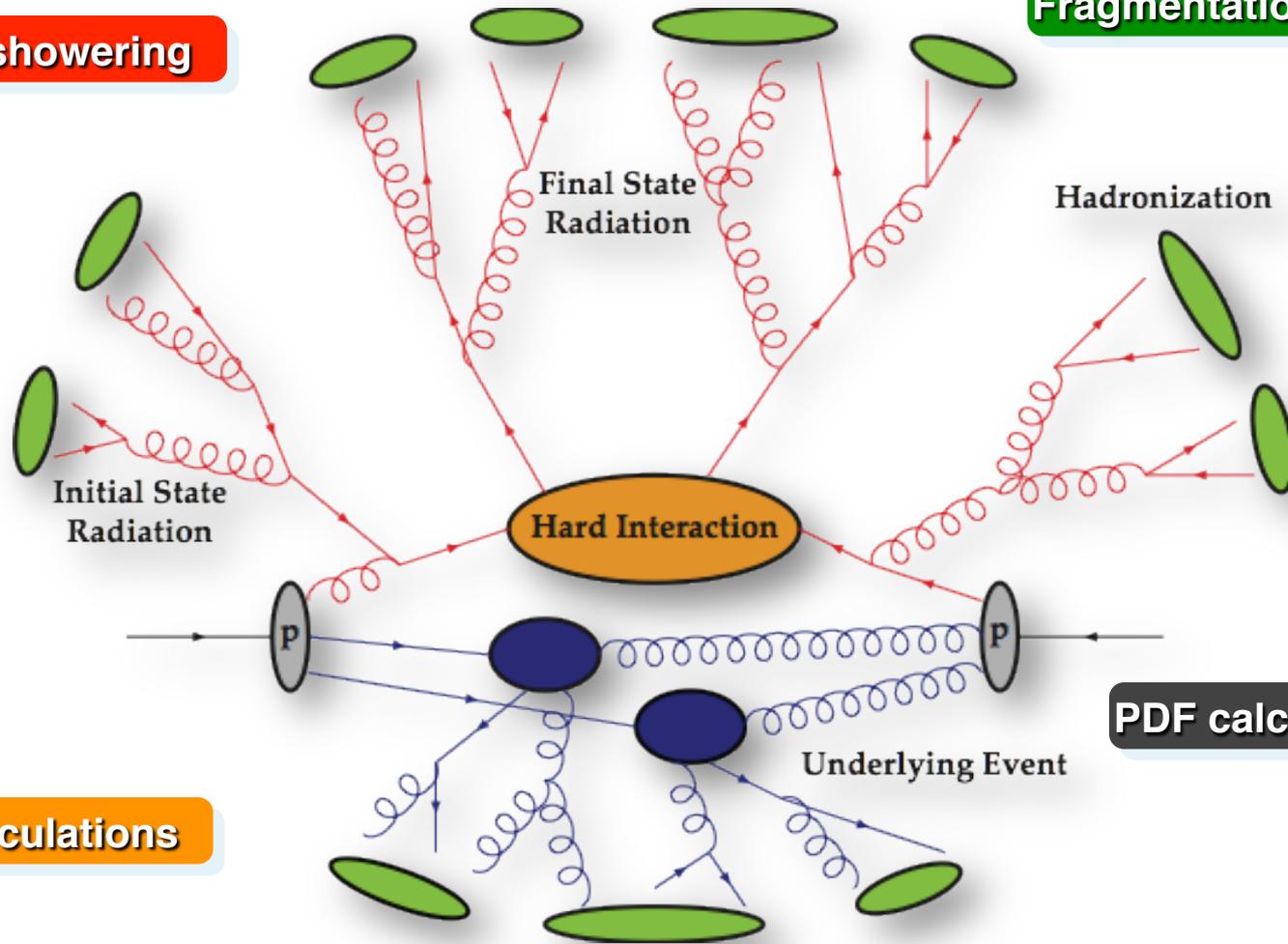


$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

# Simulación de Eventos

Parton showering

Fragmentation & Decay



ME calculations

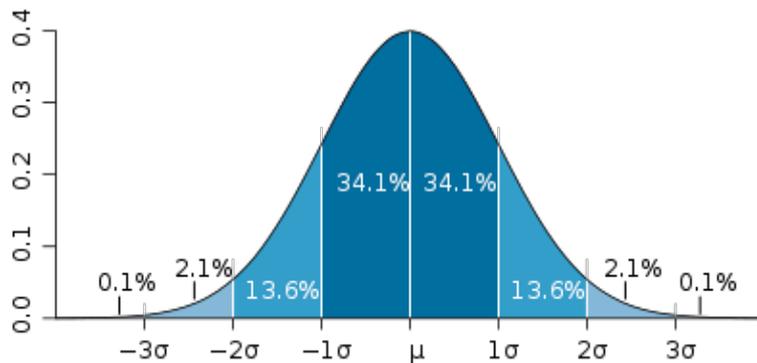
PDF calculations

MPI & Beam remnants

# Intervalos de Confianza(C.I.)

Un intervalo de confianza da un rango estimado de valores que incluyen el verdadero (y desconocido) valor  $\mu$  de un parametro poblacional  $X$

$\hat{\mu} = \langle X \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_i$  El estimador del verdadero parametro  $\hat{\mu}$  se calcula con la media muestral  $\langle X \rangle$



C.I. central para una muestra gaussiana

$1\sigma \rightarrow 68.27\%$

$2\sigma \rightarrow 95.45\%$

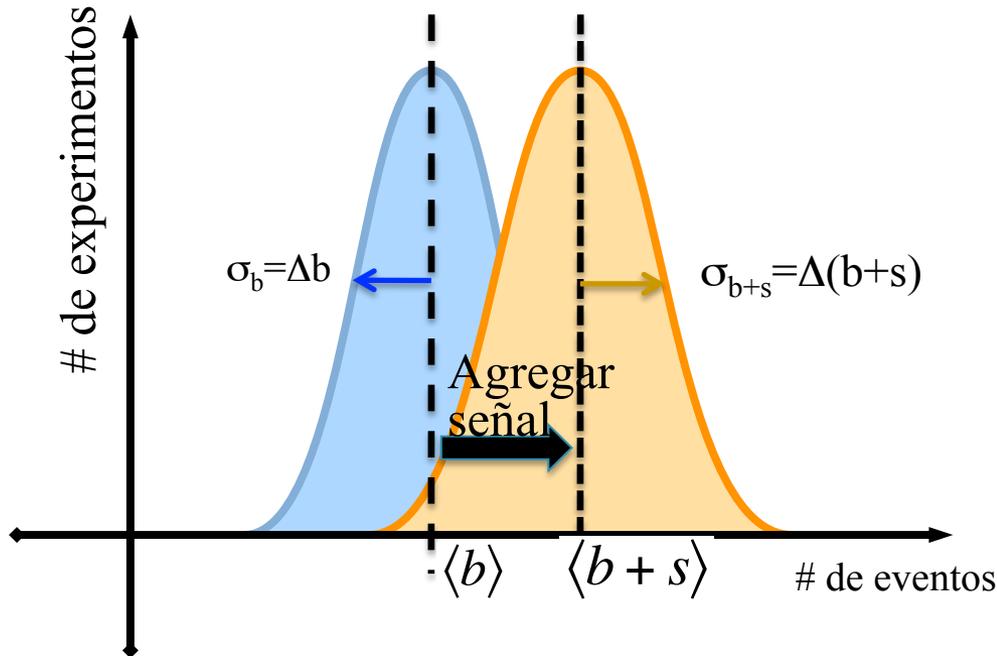
$3\sigma \rightarrow 99.75\%$

$5\sigma \rightarrow 99.99994\%$

Si repetimos el experimento  $N$  veces, el nivel de un intervalo de confianza (C.L. 90%, 95%, 99%, ...) se refiere al número de veces ( $n/N * 100$  experiments) que el intervalo contiene al valor verdadero

# Límite Esperado

- Generar un ensemble de N experimentos usando la distribución medida de  $\langle b \rangle + \Delta b$  ( $\langle b \rangle$  es la media poissoniana,  $\Delta b$  es gaussiana)
- “Límite Esperado”: máximo # de eventos de señal en la muestra tal que  $b+s$  C.I. contenga la predicción del background,  $\langle b \rangle$ , 95% de las veces.



## Límite Observado:

máximo # de eventos de señal en la muestra tal que  $b+s$  C.I. contenga  $N_{\text{obs}}$  95% de las veces

El límite se traduce en la medición de un observable usando modelos teóricos y acceptance/efficiency de señal

# Simulation tools

## Event Generators

- General purpose generators (HERWIG, PYTHIA, SHERPA)
  - 1 to 2, 2 to 2, 2 to 3 processes
  - Hadronization
  - Underlying Event
  - Tuned to Tevatron and LHC data
- Matrix Element Generators (ALPGEN, MADGRAPH, MC@NLO)
  - ME expressions for multi-particle final state (LO)
  - Interfaced with parton shower generators for hadronization

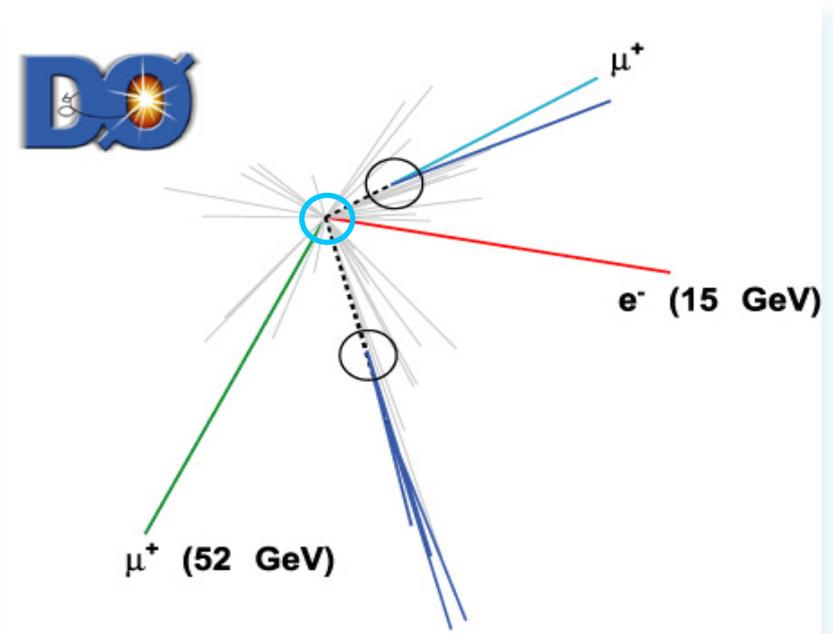
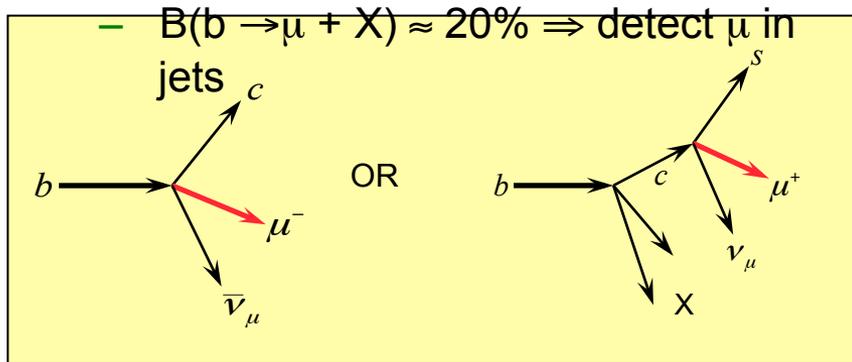
## Detector Simulation

- Fast Simulation
  - Detector response and resolution parameterized
- Full Simulation
  - Passage of particles through detector simulated with GEANT
- Trigger emulation

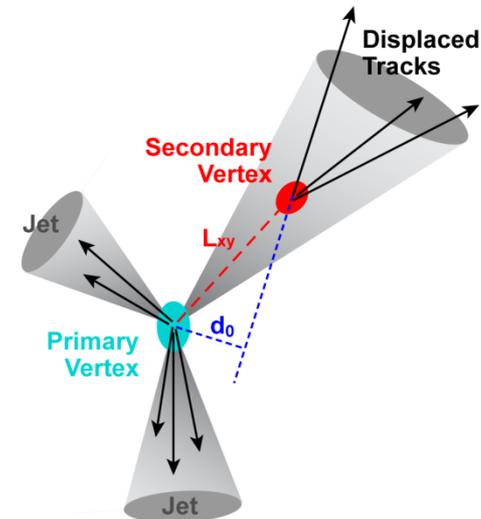
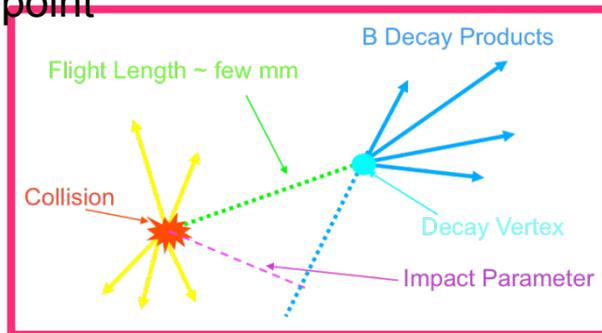
Simulated events are treated as collider events in data analysis.

# b-jet Identification

- Semileptonic decays of the b-quark



- life time  $\approx 1.5$  ps  $\Rightarrow c\tau \approx 0.5$  mm
  - Look for secondary vertices or tracks with large impact parameter w.r.t. interaction point

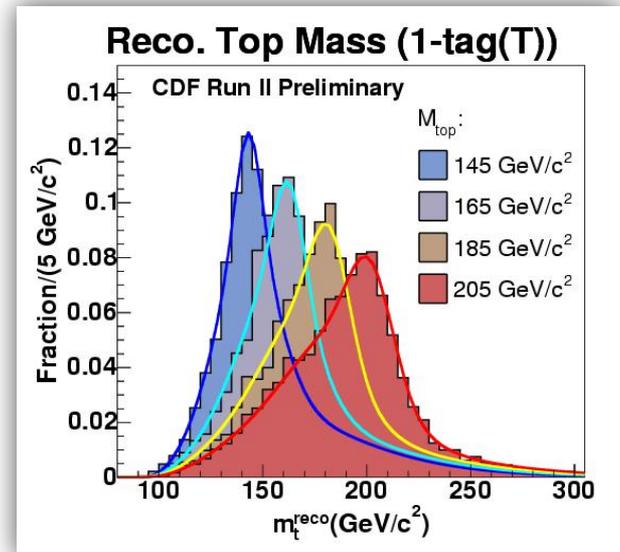


# How to Measure a Mass

**Precision measurement**  $\Rightarrow$  maximize statistical significance + minimize systematic uncertainties (jet energy scale, signal/background modeling).

## Main mass extraction techniques:

- Template methods: typically, one mass per event from kinematic fit, compare data to MC templates.
- Dynamical methods: event by event weights according to quality of agreement with signal and background differential cross-sections.

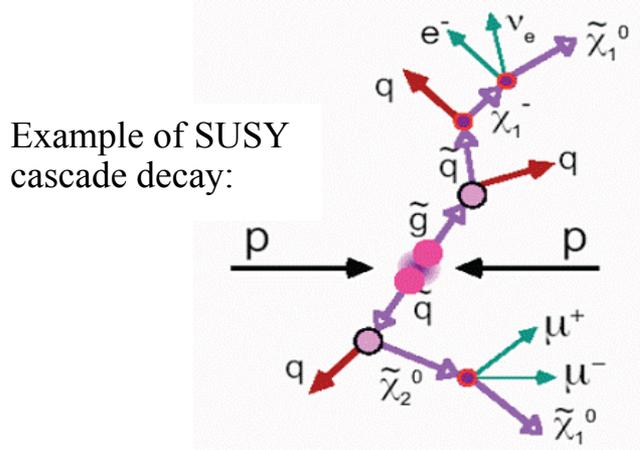
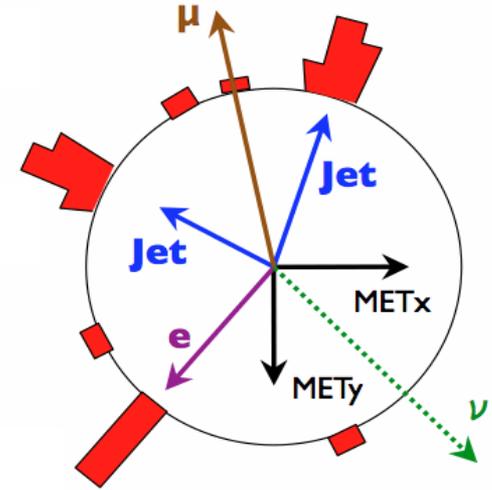


$$P(\mathbf{x}; \mathbf{m}_{\text{top}}) = \frac{1}{\sigma} \int d^n \sigma(\mathbf{y}; \mathbf{m}_{\text{top}}) dq_1 dq_2 f(q_1) f(q_2) W(\mathbf{x} | \mathbf{y})$$

differential cross-section (LO matrix element)    PDF's    Transfer function: mapping from parton level variables ( $\mathbf{y}$ ) to reconstructed level variables ( $\mathbf{x}$ )

# Missing Transverse Energy (MET)

- SM processes producing MET
  - Leptonic decays of top and W boson
- New Physics processes producing MET
  - Weakly interacting exotic particles in models with extra dimensions: monojets + MET
  - Production of Lightest SUSY Particles (LSP) in cascade decays, which would go undetected.
- Fake MET originates from non-reconstructed particles or from non-uniform detector response



We infer the presence of a neutrino from the imbalance in the transverse momentum

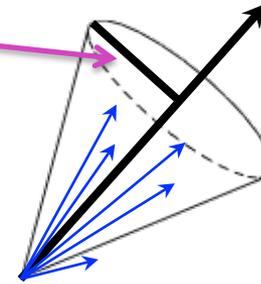
# Jet Clustering Algorithms

- **Fixed Cone**

- Variations in how to choose seed and cone size ( $R= 0.3\dots 1.0$ )

$$R^2 = \eta^2 + \phi^2$$

Fixed Cone

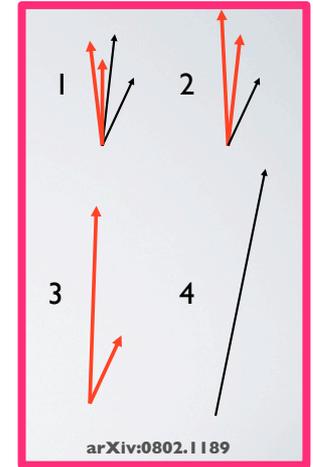


- **Sequential Clustering**

- Pairwise examination of input 4-vectors
- Merging determined by proximity in space and transverse momentum

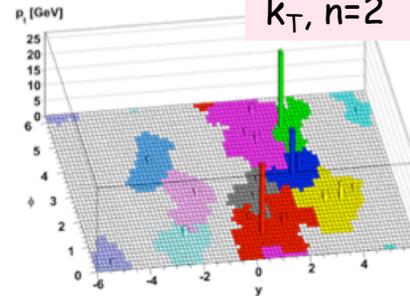
$$d_{ij} = \min\{k_{T_i}^n, k_{T_j}^n\} \frac{\Delta R}{R}$$

Sequential Clustering

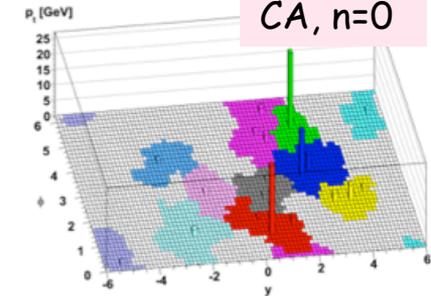


- $k_T$  ( $n = 2$ )
- Cambridge Aachen CA** ( $n = 0$ )
- Anti- $k_T$  ( $n = -2$ )

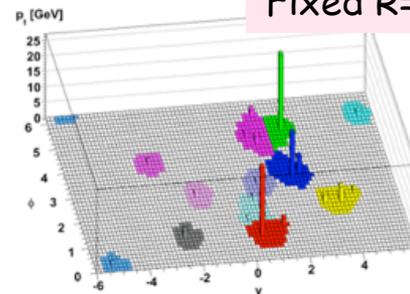
$k_T, n=2$



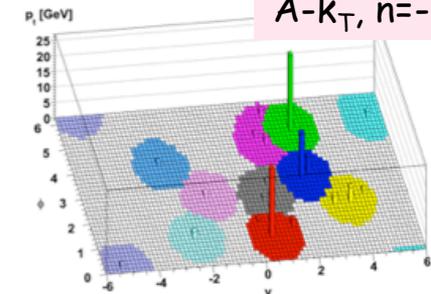
CA, n=0



Fixed R=1

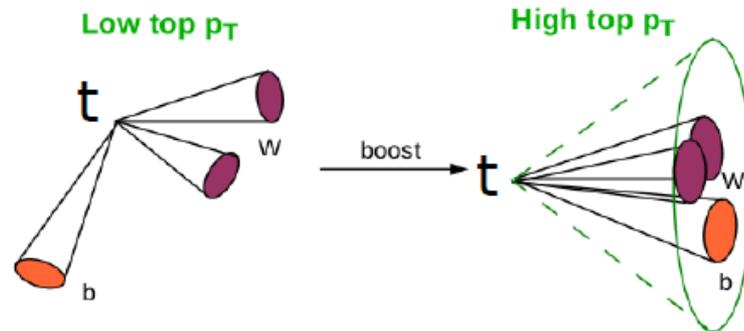


A- $k_T, n=-2$



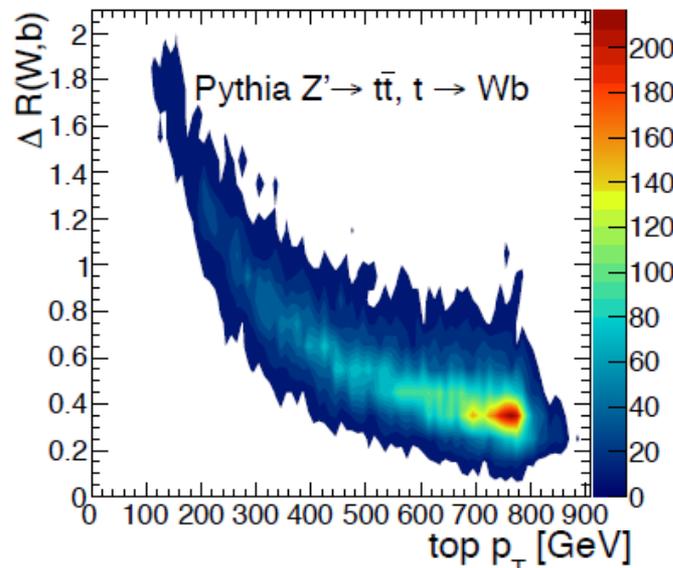
# Fat jets

- ▶ El régimen de energía alcanzado en el LHC permite producir partículas masivas con un considerable momento transverso.



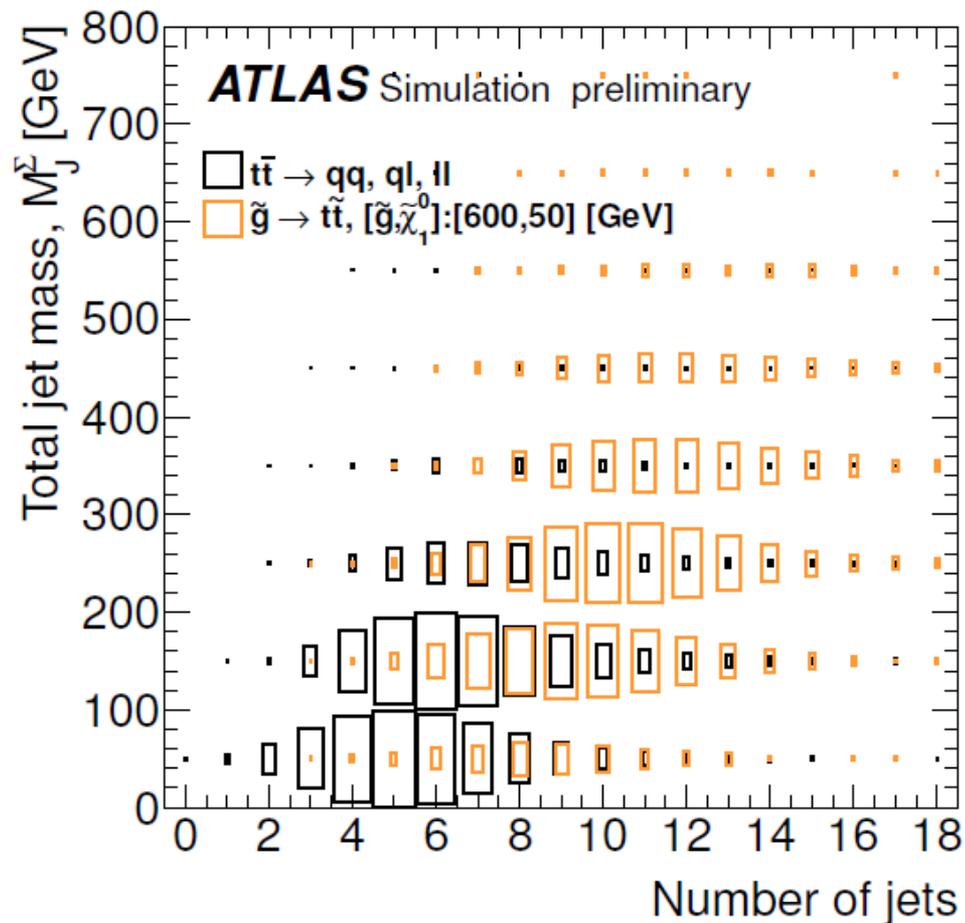
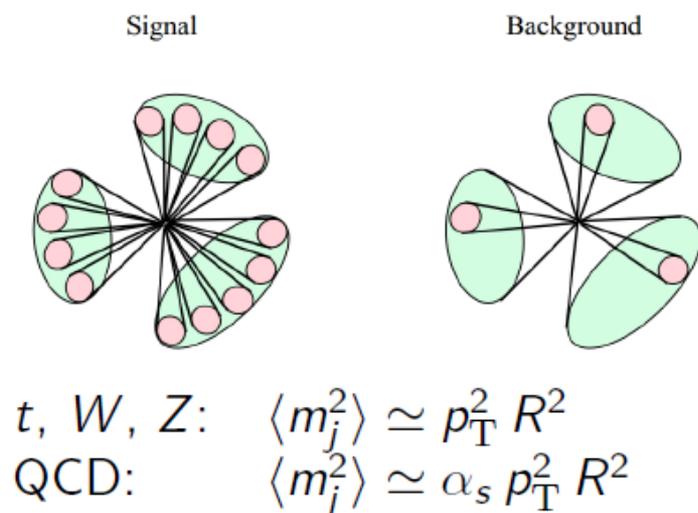
- ▶ La reconstrucción de una partícula masiva requiere jets de gran tamaño tal que se engloben los productos del decaimiento.

$$A \rightarrow B + C, \quad \Delta R(B, C) \simeq \frac{2m_A}{p_T^A}$$



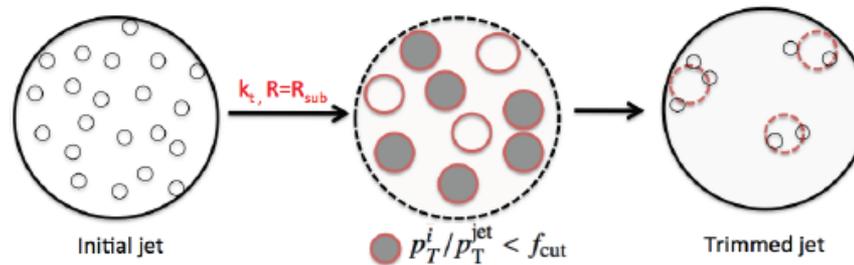
# Total Jet Mass

- ▶  $M_J^\Sigma$  incorpora la subestructura de 'fat-jets' para discriminar eventos de señal que se esperan con más jets de mayor masa que los del background.

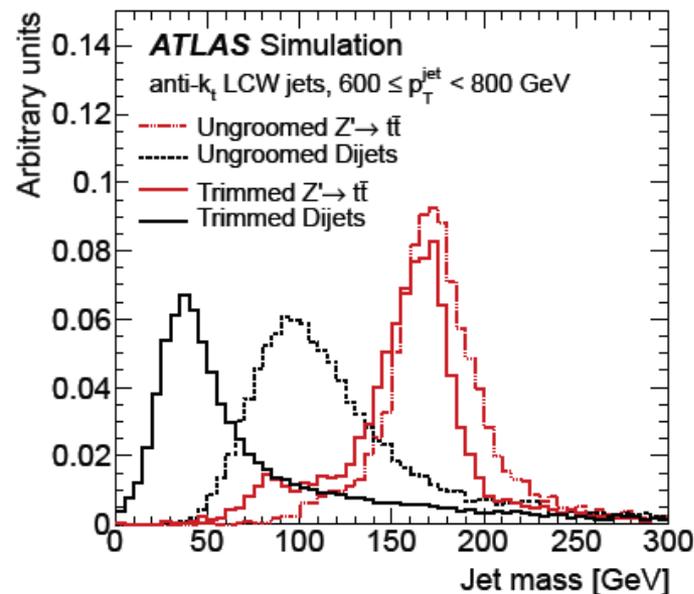


# Grooming

- ▶ Jets de gran tamaño son más susceptibles a ISR/FSR/pile-up/MPI  $\implies$  afecta la resolución de la masa.
- ▶ *Grooming* de jets, técnicas que eliminan componentes soft del jet.

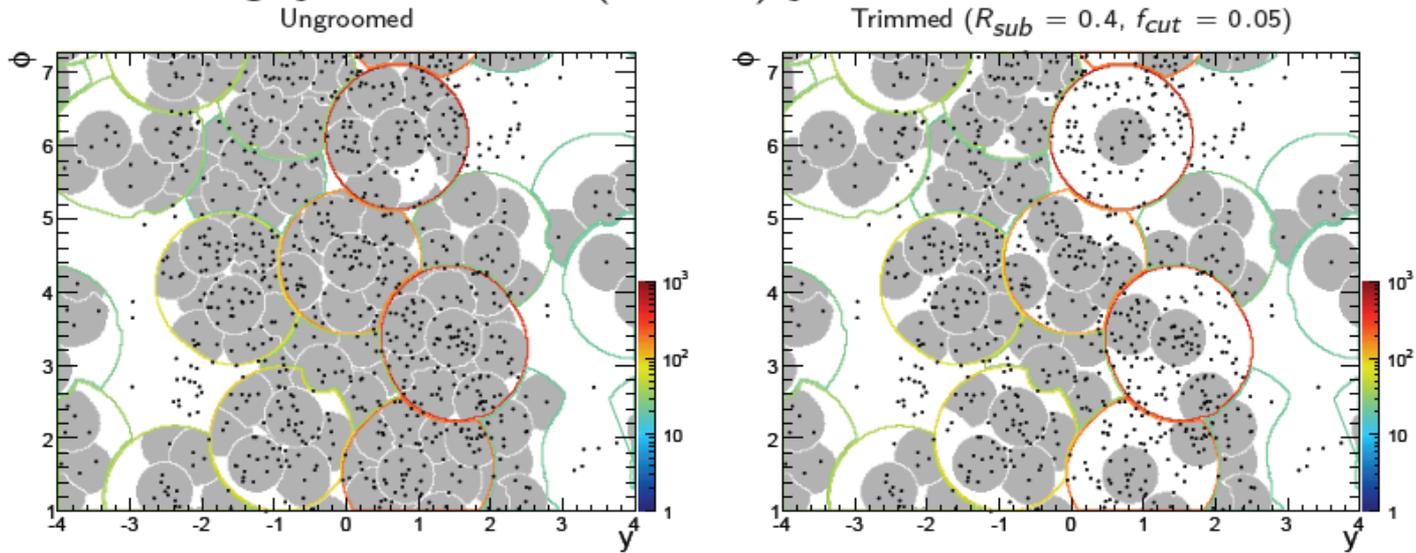


- ▶ Elimina la dependencia del jet con el pile-up, mejora la resolución de masa y aumenta la discriminación de señal.



# Jet Compuestos

1. 'Trimming' jets: anti- $k_T$  ( $R=1.0$ ) jets built from calorimeter clusters.



2. 'composite jets' built from the 'skinny'-jets (anti- $k_T$  with  $R=0.4$ )

