



# Calorimetría

---

## **Medidas de energía en Física de partículas.**

Santiago González de la Hoz, Master 2014-15

# Índice

- 1. **Mecanismos de detección**
  - Luz de centelleo
  - Radiación de Cerenkov
  - Ionización
  - (Radiación de transición)
- 2. Definición y razones de interés.
- 3. Clasificación y diferencias fundamentales.
- 4. **Mecanismos básicos** (cascada electromagnética)
  - 4.1 Interacción de los electrones
    - Pérdida de energía por ionización
    - Radiación de Bremsstrahlung
  - 4.2 Interacción de fotones
    - Producción de pares
    - Efecto fotoeléctrico
    - Efecto Compton.
- 5. **La cascada electromagnética**
  - 5.1 Procesos fundamentales ( $E > 10$  MeV)
  - 5.2 Características de la cascada em.
- 6. **Modelo de Rossi\_Heitler**
  - 6.1 Perfiles de la cascada electromagnética
  - 6.2 Parametrizaciones
- 7. **La cascada hadrónica**
  - 7.1 la componente e.m.
  - 7.2 Contribución de los  $n$  a la cascada hadrónica
  - 7.3 Perfiles de la cascada
- 8. **Relación señal/energía en calorímetros**
  - 8.1 La relación de respuestas e/h
  - 8.2 e/h en calorímetros de muestreo
  - 8.3 Determinación de e/mip para calorímetros
  - 8.4 respuesta a los hadrones
- 9. **La compensación**
  - 9.1 Mecanismos y métodos de compensación
  - Amplificación de la respuesta para los hadrones
- 10. **Resolución energética.** (Expresión general)
  - 10.1 Fluctuaciones intrínsecas en calorímetros homogéneos
  - 10.2 Fluctuaciones intrínsecas en calorímetros de muestreo
  - 10.3 Correlaciones
  - 10.4 Fluctuaciones de Landau y de longitud de camino
  - 10.5 Fluctuaciones de muestreo en cascadas hadrónicas
- 11. **Efectos instrumentales: ruido electrónico y fugas.**
  - 11.1 otros efectos instrumentales

## Índice (Cont)

---

### 12. Efectos de fugas de energía en las cascadas

12.1 Fugas longitudinales

12.2 Fugas transversales

### MATERIAL EXTRA

### (13. Fluctuaciones en energía visible

13.1 Fluctuaciones por energía de enlace.

13.2 Fluctuaciones inducidas por la componente electromagnética.

14. Fluctuaciones en un calorímetro compensado.

15. Aspectos instrumentales.

16. Calibración.

16.1 El calorímetro de Helios

16.2 Intercalibración con cascadas electromagnéticas

16.3 Intercalibración con cascadas hadrónicas

16.4 Intercalibración con las propias partículas  
16.5 Calibración forzando linealidad en la señal hadrónica

16.6 Compensación *off line*

16.7 Conclusiones)

### Libros:

- **R. Wigmans. Calorimetry. Energy Measurements in Particle Physics. Oxford University Press. ISBN=0 19 850296 6**
- **Thomas Farbel** (Editor). *Experimental techniques in high energy nuclear and particle physics*. World Scientific 1991.
  - **U. Amaldi**. *Fluctuations in calorimetry measurements*.
  - **C. Fabjan**. *Calorimetry in high energy physics*.
  - **R. Wigmans**. *High resolution hadron Calorimetry*.
- **Antonio Ereditato** (Editor). *Calorimetry in high energy physics*. World Scientific. 1991.
  - **T.S. Virdee**. *Performance and limitations of electromagnetic calorimeters*.
  - **R. Wigmans**. *Performance and limitations of hadron Calorimeters*
  - **M. Spiro**. *Calorimeters for astroparticle physics*.

### Artículos

- **U. Amaldi**. *Fluctuations in calorimetry measurements*.  
CERN-EP-/80-212
- **C. Fabjan**. *Detectors for elementary particle physics*.  
CERN-EP/94-61
- **ATLAS**. Development of a scintillator Tile Sampling etc.  
Internal Note TILECAL-009,1994

- **ATLAS.. J. Budagov** et al. Electron response and e/h ratio of ATLAS etc. Internal Note TILECAL-072,1995
- **ATLAS.** Calorimeter performance.. Technical design Report.  
CERN/LHCC/96-40
- **C. Fabjan.** Calorimetry in high energy physics.  
CERN-EP/85-54, Ann. Rev. Nucl. Part. Scien, (1982),**32**, 335-389.
- **R. Wigmans.** Advances in hadron calorimetry. CERN-PPE/91-39
- **P. M. Mockett.** A review of physics and technology of High-Energy calorimeter devices. Slac Summer courses.
- **M. Livan** et al. Scintillating fibre calorimetry. CERN-EP-95-02
- **L. Linssen.** RD1 scintillating fibre calorimetry.  
Nucl. Inst. Meth. In Phys Res. **A344** (1994) 73-84
- **C. Leroy et al.** An experimental study of the contribution of nuclear fission to the signal of uranium hadron detectors. CERN-EP/86-66.
- **R. Wigmans.** On the energy resolution of uranium and other hadron calorimeters. CERN-EP-86-141.
- **C. Joram.** Tranparencias del curso del CERN academic training.  
Particle detectors 1997-98.
- Gabriel et al. Nucl. Inst. and Meth. **A338**,336, 1994

# 1. Mecanismos de detección

---

**Definición:** **Calorímetros** son detectores que **miden la energía y posición** de las partículas por medio de su total absorción o aniquilación total en dichos detectores.

**El proceso de absorción** transcurre siempre por medio de la generación de partículas secundarias que a su vez interactúan con el detector en su seno, contribuyendo a la formación de la señal; eventualmente toda la energía, o parte de la misma, que transportaba la partícula incidente **se convierte en calor** en el detector; de aquí el origen del nombre de **CALORÍMETROS** para este tipo de detectores.

**Las magnitudes u observables** que se miden se hallan relacionadas con la interacción de partículas en el seno del detector, tales como la excitación atómica o la ionización originada por las partículas en el medio. No se mide el incremento de temperatura.

- **Observables típicos** en los calorímetros:
  - Luz de centelleo (Ej. **Calorímetro Hadrónico de ATLAS**)
  - Luz de Cerenkov (EJ: Calorímetro Electromagnético Forward de Delphi (FEMC).
  - Recolección de la carga producida por la ionización (Ej. **Calorímetro de Argón Líquido de ATLAS**, tanto hadrónico (forward) como electromagnético).
  - Desarrollo espacial y forma de la cascada etc.
  
- **Conceptualmente**: un **calorímetro** consiste de un bloque de materia que sirve para interceptar las partículas primarias, y dispone de espesor suficiente para que **toda la energía** de la radiación, originada por la partícula primaria y las creadas en la cascada subsiguiente, quede depositada en su interior.

## Mecanismos de detección: centelleo

- **Interacción culombiana:**
  - Las partículas cargadas pierden energía al atravesar un medio, **en forma de ionización o excitaciones atómicas** del medio.
    - El proceso de desexcitación, gobernado por las leyes de la mecánica cuántica-física atómica, se lleva a cabo por emisión de fotones: si en el visible, **fluorescencia o centelleo**.
    - Tiempos típico son del orden de  $10^{-12}$  a  $10^{-6}$  seg. En general las moléculas más complejas se liberan del exceso de energía con mayor rapidez → tiempos menores.
- **Elementos importantes** del desarrollo de estos calorímetros:
  - **El fotomultiplicador**, clásico o los nuevos desarrollos como el fotodiodo de avalancha.
  - **Wave length shifters**: cambian la longitud de onda y redirigen la luz de centelleo: se pierde luz y se alarga el proceso (precio a pagar)
  - **Fibras ópticas**: la fracción de luz atrapada es proporcional a su **apertura numérica** =

$$\sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2}$$

La mayor parte de luz viaja cerca del ángulo crítico (de la fibra)

$$\theta_{\text{cr}} = \arcsin \left( \frac{n_{\text{clad}}}{n_{\text{core}}} \right)$$

Fibras normalmente consisten en un *core* de poliestireno con índice de refracción  $n=1.59$ , rodeadas de una o varias capas de material envolvente con menor valor de  $n$



## Mecanismos de detección: **radiación de Cerenkov.**

---

### ○ **Radiación de Cerenkov**

- **Origen:** Cuando una partícula viaja a mayor velocidad que la luz en el medio:  $v \geq c/n \rightarrow \beta = v/c > 1/n$ .
- **Características:**
  - Ventajas
    - Ángulo característico de emisión
    - Cono de emisión con ángulo de semiapertura  $\theta_c = \arccos(1/n\beta)$
    - Espectro característico con dependencia  $1/\lambda^2$  → **La parte visible del espectro de R. C. es azul** (ej. La causante del color azul en las profundidades de los océanos cuando penetran rayos cósmicos)
  - Desventajas
    - Fuente menor de pérdida de energía (contribuye poco a la pérdida de energía de la partícula en el medio): Una partícula cargada (una m.i.p.) en agua pierde por cm tan solo 400 eV por R. de C., mientras 2 MeV por ionización/excitación.
    - Mecanismo **instantáneo** de emisión → conveniente para gran velocidad de adquisición

## Mecanismos de detección: **Ionización**

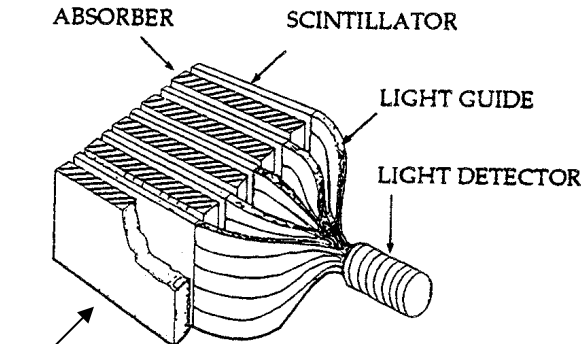
---

### ○ **Ionización:**

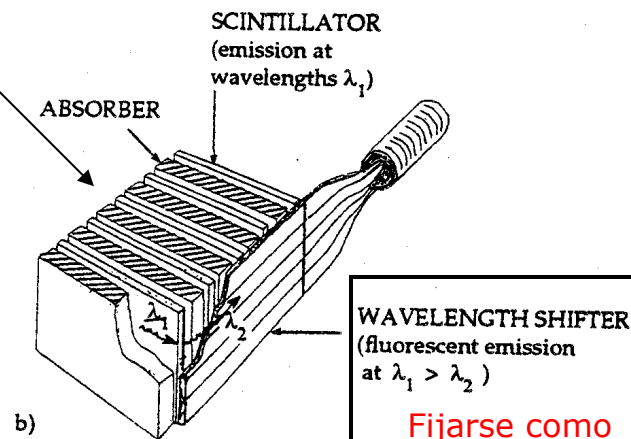
- **La recolección de la ionización** producida por las partículas cargadas en el medio, con o sin amplificación, **es la técnica básica de muchos calorímetros**.
- En las **cámaras de ionización líquidas**, (no amplificación), la carga directamente producida ha de ser recolectada en el ánodo y cátodo → el recorrido libre medio de absorción de  $e^-$  ha de ser grande → uso de “**líquidos**” **nobles** → criogenia + grado elevado de pureza.
  - Ejemplos: LAr (común + barato), LKr, LXe.
  - Gran resistencia a la radiación, al contrario que los cristales centelleadores.
- En **las cámaras de ionización gaseosas** tiene lugar el proceso de multiplicación proporcional (por **formación de la avalancha**), cerca del ánodo. Se usan pues cámaras de hilos, de diámetro  $\sim 30 \mu\text{m}$ .

**Tipos básicos de calorímetros:** a) centelleador acoplados a un PM, b) centelleador leído mediante un WLS a un PM, c) Ionización (carga) producida en un líquido noble (LiAr) d) La carga (ionización) en gas se amplifica proporcionalmente en las placas MWPCs

## Centelladores



a)

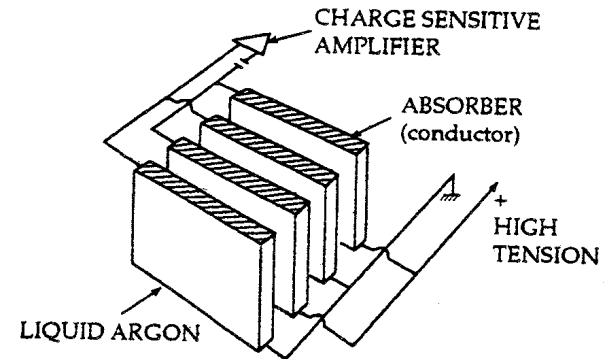


b)

WAVELENGTH SHIFTER  
(fluorescent emission  
at  $\lambda_1 > \lambda_2$ )

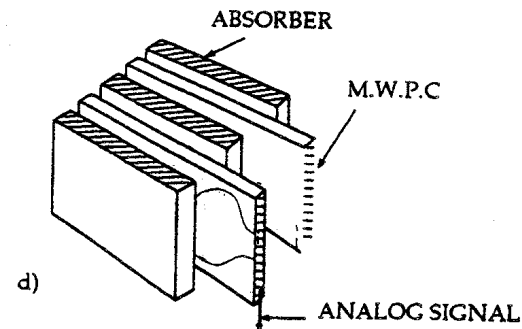
Fijarse como  
cambia la  
longitud de onda

## Cámara de ionización líquida



c)

## Cámara de ionización gaseosa



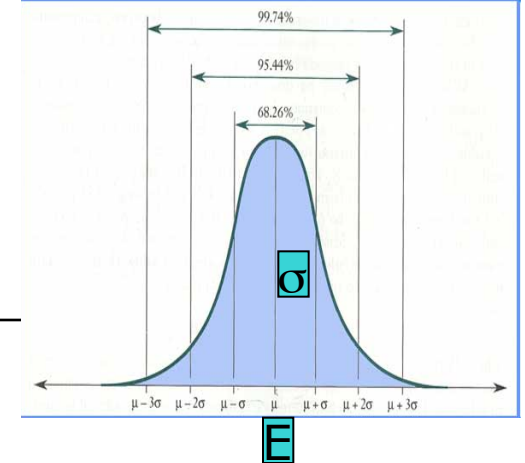
d)

## 2. Definición y razones de interés.

---

- **Definición:** Un calorímetro es un instrumento cuya respuesta al impacto de una partícula es una señal proporcional a la energía que tiene/deposita la partícula → **Absorción Total.**
- **Consiste** de un **bloque de materia** que sirve para interceptar las partículas primarias, y dispone de **espesor suficiente** para que toda la energía de la radiación, originada por la partícula primaria y las creadas en la cascada subsiguiente, quede depositada en su interior.
- Buena parte de **la energía** se disipa y convierte en calor, mientras que una pequeña parte de la energía depositada es detectable en forma de señal. La energía detectable como señal ha de ser proporcional a la energía depositada por la radiación (**linealidad**).

## Razones de Interés.



### Por razones inherentes a los calorímetros:

- Los calorímetros son sensibles a las **partículas neutras** (y cargadas):  $\gamma$ , N,  $K^0$ s etc. necesitan calorímetros para ser detectadas.
- La absorción de partículas es un **proceso estadístico**  $\Rightarrow$  **la precisión de la medida de la energía de la partícula mejora a medida que su energía aumenta.**
- De hecho  $\varepsilon(E) \approx (5-10\%) E^{-1/2}$  (50% para Cal. Had.) ya que el número de partículas secundarias producidas en la cascada es proporcional a la energía de la partícula incidente  $\Rightarrow \varepsilon(E) \approx \sigma/E \approx (N^{1/2}/N) \approx N^{-1/2}$  (**Factor intrínseco de resolución** en energía de los calorímetros).  $\rightarrow$ 
  - a medida que la energía de los haces primarios aumenta, la espectroscopia de absorción proporciona **medidas más precisas** de la energía de las partículas que los métodos tradicionales, basados en la medida de la curvatura magnética para partículas cargadas.
- La señal que se origina en estos detectores se forma en **tiempos característicos de 50-100 ns**  $\Rightarrow$  detectores idóneos para experimentos con elevada tasa de producción de sucesos (Interacciones hadrónicas en altas energías, p-p etc)

Dependiendo del mecanismo de generación de la señal

# Mas ventajas

- Son detectores **importantes en la definición del trigger** de los experimentos. Por su rapidez son elementos clave en la selección de sucesos *on line* (respuesta entre 50-100 ns).
- Su **longitud aumenta con  $\ln E$** , dado que la cascada tiene un desarrollo de tipo exponencial. Por comparación, para mantener una resolución  $\Delta p/p$  constante los espectrómetros magnéticos han de aumentar su tamaño según la ley  $P^{1/2}$ .
  - $t_{\max}$  (longitudes de radiación) =  $\ln(E_0/E_c)/\ln 2$  ( $E_c$ = Energía Crítica,  $E_0$ = energía inicial de la partícula)
- Los calorímetros **no necesitan de un campo magnético** (muchas veces intenso y superconductor), para determinar la energía de la partícula.  $\Rightarrow$  **ventajas en reconstrucción de neutras**)
- Con detectores segmentados y de fina granularidad se determina con buena **precisión el punto de incidencia y dirección de la partícula** que colisiona con el calorímetro.
- Los calorímetros presentan una respuesta diferente a  $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$  y hadrones, por lo que son una herramienta indispensable en la **identificación de estas partículas**.




---

Por razones **inherentes a la física** que se estudia.

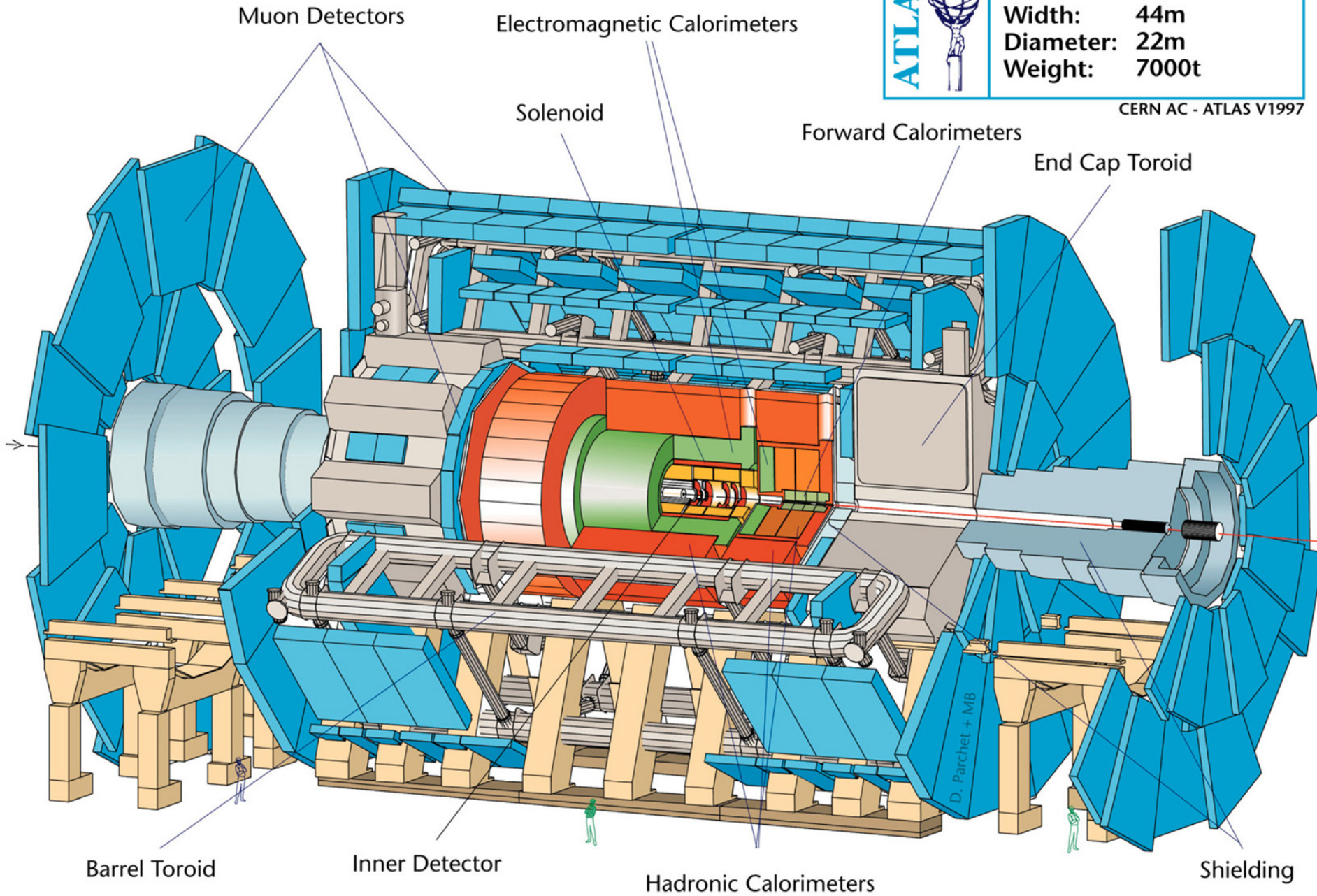
- La **espectroscopía clásica** se basaba en la reconstrucción individual de los cuádrimomentos de las partículas individuales (cargadas) producidas en el suceso. El **énfasis actual** se pone en el estudio de las **propiedades globales** del suceso que revela procesos interesantes a nivel de los constituyentes, tales como *transverse missing energy*, producción de jets etc. (Era del LHC).





Detector characteristics	
Width:	44m
Diameter:	22m
Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997





### 3. Clasificación de Calorímetros.

Atendiendo al tipo de partículas que detectan y al tipo de cascada que generan en:

- **Calorímetros electromagnéticos.** Los fotones y los electrones interactúan electromagnéticamente con el material absorbente a través de los procesos de:
  - **bremstrahlung (radiación de frenado)**
  - **producción de pares**
  - **difusión Compton**
  - **efecto fotoeléctrico.**

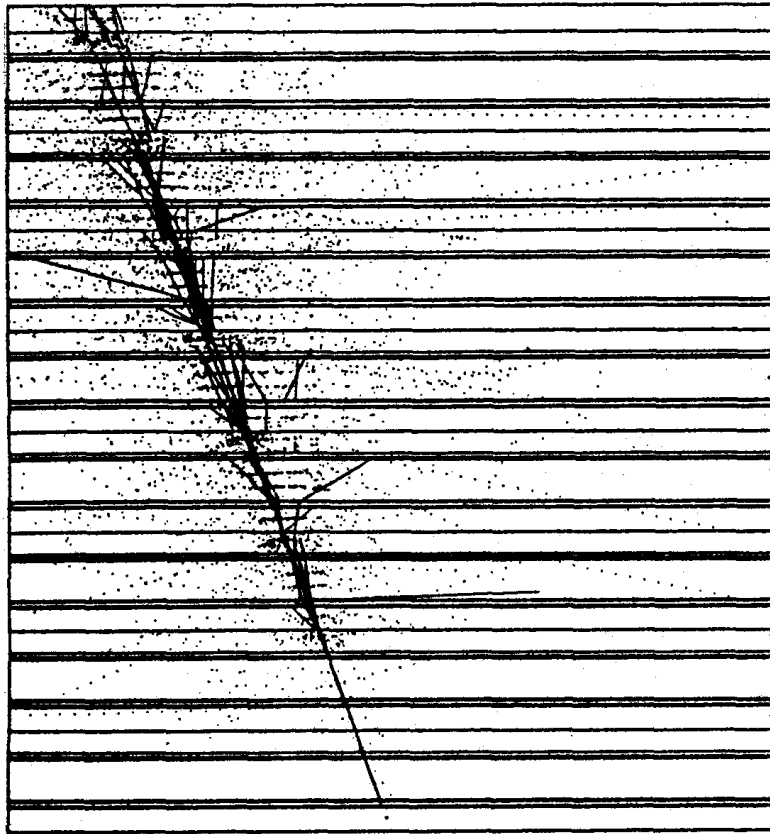
La sección eficaz de estos procesos y la multiplicidad de las partículas que se producen en la cascada, determinan las características de estos instrumentos. Así la **escala típica del tamaño de los calorímetros electromagnéticos es de 20/30 veces la longitud de radiación  $X_0$ .**
- **Calorímetros hadrónicos.** Los hadrones sufren la interacción fuerte con el material absorbente. El **recorrido libre medio  $\lambda$**  de los hadrones en material absorbente es la **escala apropiada para tener idea de su tamaño**. (En general  $\lambda \gg X_0$ ).
- **Calorímetros para la detección de  $\nu$  y  $\mu^\pm$ .** Interactúan débilmente o no produce cascada electromagnética hasta valores muy elevados de su energía ( $\mu^\pm$ ). Los secundarios de estas interacciones son fundamentalmente hadrones, por lo que sus características, aparte del **tamaño idóneo dado por la pequeña sección eficaz, son las de un calorímetro hadrónico.**

## Diferencias fundamentales

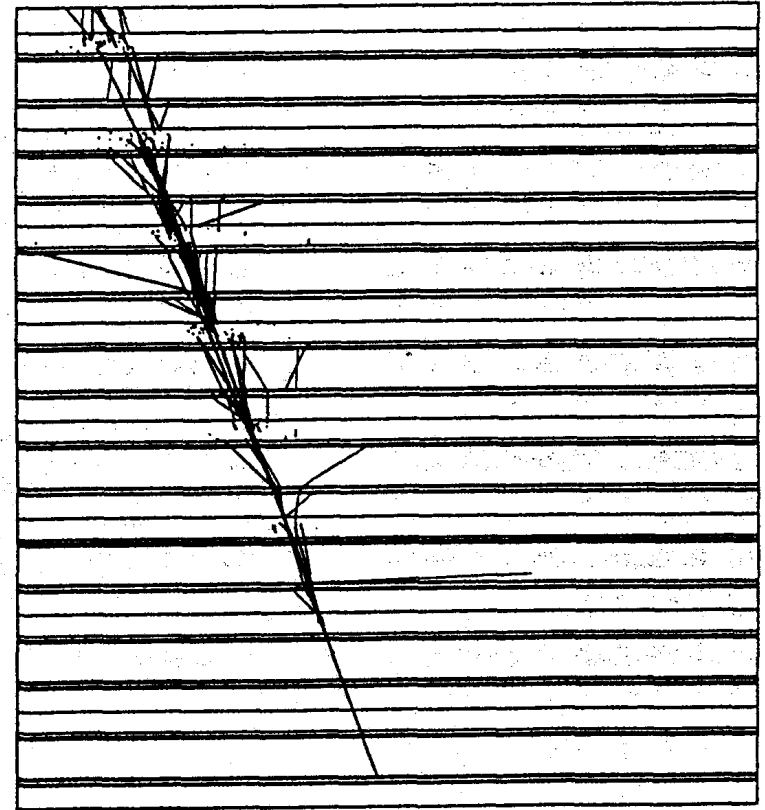
- Las constantes de acoplamiento ( $\alpha$ ,  $\alpha_s$ ) son muy diferentes + el alcance de ambas interacciones es muy distinto (infinito para la electromagnética y de 1 fm para la I.F.) → los parámetros característicos:
  - $X_0$  depende de  $Z^2$  (interacción electromagnética)
  - $\lambda$  depende de  $Z$  o  $A$  (interacción fuerte).
- promedio de secundarios producidos en cada interacción:
  - dependiente de la energía y superior (las interacciones fuertes)
  - dos partículas por interacción (cascada electromagnética).
- Proceso  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  (→cascadas electromagnéticas). Originan energía electromagnética en el seno de una cascada hadrónica→grandes fluctuaciones por diferente rendimiento.
- Fragmentos no relativistas del núcleo y neutrones: Transportan una componente importante de energía en las cascadas hadrónicas.

**Conclusión:** cascada electromagnética y hadrónica muy diferentes.  
ver figura:

Simulación de cascadas electromagnéticas y hadrónica: a) Fotón de 5 GeV a  $20^\circ$  y se detecta en un calorímetro de 8 módulos, cada uno con cámaras de hilos, plano centelleador, gaps de aire y conversor de aluminio. Se muestran todas las partículas (neutras con puntos). b) Lo mismo sin las neutras.



(a)



(b)

## Cascada Electromagnética

c) Dos cascadas de 100 GeV, sobre un contador de muestreo de plomo y centelleador. Los cuatro módulos (cada uno de 20 longitudes de radiación  $X_0$ ) están separados por gaps de aire. El shower de la izquierda es un electrón y el de la derecha es un pión.

**Obsérvese la multitud de cascadas locales para el pión.**

Cascada Hadrónica

