

## 8. Relación señal/energía en calorímetros (homogéneos)

- Se define como **respuesta de un calorímetro** la relación existente entre la señal obtenida (en sus unidades) con relación a la energía de la partícula incidente: por ejemplo **picoC/GeV** o número de **fotoelectrones/GeV** etc.
- **Linealidad:** cuando la respuesta de un calorímetro es la misma para todo el rango de energías se dice que es lineal. Significa que su **respuesta es una constante**. Se trata de una figura de mérito a conseguir (difícil de conseguir sobre todo a bajas E).
- Desde el punto de vista de generación de la señal, es importante distinguir entre:
  - **Calorímetros homogéneos**, en que la señal se origina en todo el medio absorbente de partículas
  - **Calorímetros heterogéneos**, en que la función pasiva (absorbente) y activa (generadora de la señal) se hallan desacopladas y pueden ser optimizadas separadamente.
  - Una mención especial merecen los **calorímetros** que usan la radiación de Cerenkov de los e en medios transparentes de elevado índice de refracción, puesto que sólo parte de la traza de los electrones se usa para generar la señal → **linealidad?** (**Difícil de conseguir la linealidad**)
- **Linealidad intrínseca.** En los **calorímetros e.m.** en que la señal detectada es la ionización o la luz de desexcitación atómicas, existe una **proporcionalidad directa** entre la señal que se produce en el medio y la energía depositada por la partícula, ya que una partícula de  $kE_0$  origina  $k$  veces más pares e/ion o fotones de centelleo, que una partícula de energía  $E_0$  (linealidad intrínseca). **Difícil de conseguir en los had.**
- **Las desviaciones** que se observan son achacables a defectos de construcción, tales como:
  - Efectos de **saturación en PMTs** (no linealidad de los PMTs para grandes señales)
  - Efectos de pérdida de señal por **fugas**
  - **Recombinación** de iones y e en el medio
  - **Atenuación y no uniformidades** en la recolección de la luz en centelladores.

## Respuesta a los muones (en calorímetros homogéneos)

- Los muones atraviesan los medios materiales homogéneos perdiendo energía por excitación/ionización del medio, exactamente igual a como lo hacen los (mip's) de un shower.
- La ionización (la pérdida de energía  $-dE/dx$ ) de un  $\mu^\pm$  es ligeramente mayor que para una mip. Ahora bien, el mecanismo de pérdida es el mismo (ionización/excitación), por lo que para una  $\Delta E$  determinada, ambas partículas originan en promedio el mismo número de pares ion/e o fotones →

Podemos considerar como mip el muón

$$\frac{e}{mip} = 1$$

- $e$  representa la respuesta del calorímetro a los showers em.
- mip es la respuesta a una partícula ionizante al mínimo, típicamente podemos pensar en un muón.

- La relación anterior significa que si calibramos un calorímetro homogéneo con electrones incidentes de E definida, la misma relación nos dará a partir de la señal generada por  $\mu^\pm$  la energía que han perdido en el calorímetro. Esto no es trivial, pues no ocurre para calorímetros heterogéneos con absorbentes de Z elevada.

## Respuesta a hadrones y jets.

- Debido al fenómeno de la **energía invisible**, (energía usada en la fisión de los núcleos etc.) espero:
- Los piones de energía E, originarán en el calorímetro una señal sensiblemente menor que electrones de la misma energía E.**
- Más aún, los calorímetros homogéneos son intrínsecamente no lineales para la detección de hadrones y jets debido a que la **componente e.m.** de la cascada que generan aumenta con E.

$\pi$  Respuesta generada por piones

$$\frac{\pi}{e} < 1, f(E) \text{ y además crece con } E$$

- 8.1 Relación de respuestas e/h.** La respuesta del calorímetro a la componente **puramente** hadrónica (h), (**extraída la componente e.m. dependiente de la energía**), no tiene por qué no ser lineal, aunque su respuesta sea menor que la respuesta e.m.

$$\frac{e}{h} \neq 1 (\text{generalmente} > 1) \Leftrightarrow \text{Definición de calorímetro no compensado}$$

h es la respuesta puramente hadrónica, sustraída la componente em

## ■ Características del parámetro e/h

- Todos los calorímetros homogéneos son por definición no compensados.
- El parámetro e/h caracteriza el grado de no compensación del detector, (no e/n, porque incluye energía e.m. y tiende a 1 a muy altas energías)
- La respuesta  $R_h$  a un hadrón vendrá dada por  $R_h = e E_e + h E_h$  donde  $E_e$  y  $E_h$  son las energías del hadrón incidente que transcurren por la cascada e.m y energía puramente hadrónica respectivamente
- El parámetro e/h no se puede medir experimentalmente (directamente), y se determina a partir de las medidas de relación de respuestas e/n. (**test beam, zona H8 del CERN**).
- La respuesta a los piones la escribimos:

$$E_e + E_h = E_{\text{hadrón}}$$

$$\pi = f_{\text{em}} \cdot e + (1 - f_{\text{em}}) \cdot h \rightarrow \frac{\pi}{e} = f_{\text{em}} + (1 - f_{\text{em}}) \cdot \frac{h}{e} \rightarrow$$

$$\frac{e}{\pi} = \frac{e/h}{1 - f_{\text{em}}[1 - e/h]}$$

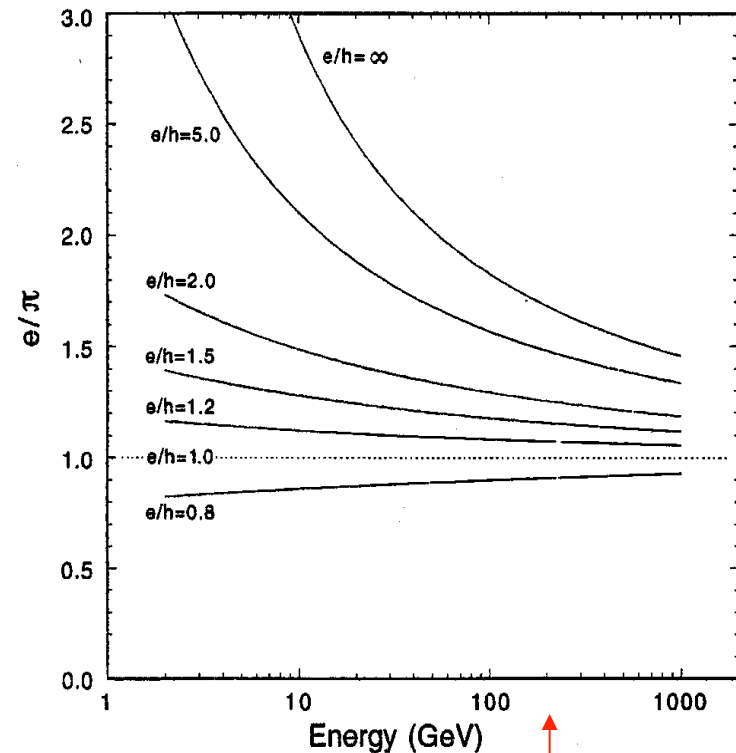
Como  $f_{\text{em}}$  depende de la energía, la relación e/n medida en el test beam será una función de  $E_{\text{inc}}$

La relación entre e/h y e/n en función de la energía se muestra en la figura lateral. Su obtención se basa en la relación de dependencia de la fracción de energía  $f_{\text{em}}(E)$  calculada según el modelo de Gabriel con  $E_0 = 1$  GeV,  $k=0.82$ .

**Obsérvese que para  $E_{\text{inc}} \rightarrow \infty$ , la relación**

**e/n  $\rightarrow 1$ , para todo valor de e/h**

**Los calorímetros homogéneos son por definición no compensados.**



Modelo de Gabriel

S. González (6)

$$f_{\text{em}} = 1 - \langle m \rangle^{n(k-1)}$$

$$\langle m \rangle = (E/E_0)^n \quad \text{Calorimetría}$$

Calorímetros homogéneos

## 8.2 e/h en Calorímetros de muestreo (no homogéneos)

- **Fracción de muestreo**: es la fracción de energía depositada en las franjas activas por las mip's con relación a la total que transportan.

**Ejemplo**: el calorímetro D0 de Fermilab opera con franjas de LAr (de 5 mm, **estas son las franjas activas**) y  $^{238}\text{U}$  empobrecido de 3 mm. La pérdida de energía de una mip es de 2.13 MeV/cm, en LAr y de 20.5 MeV/cm, en U  $\rightarrow$  1.06 MeV en LAr y 6.15 MeV en U  $\rightarrow$  fracción de muestreo  $= 1.06/(1.06+6.15)=0.147$  (14.7%)

Definición académica, pues no es medible directamente. Lo más parecido a una mip es un muón relativista, con correcciones por su energía y efecto del medio.

- **Efectos de transición**: respuesta a e/ $\gamma$ .

En los calorímetros homogéneos la respuesta de las partículas cargadas que pierden su energía a través de la interacción de Coulomb es idéntica (ya que  $e/mip=1$ , visto anteriormente).

En los c. de muestreo, en que la Z del absorbente es sensiblemente mayor que la del medio activo, la respuesta a la cascada em es menor que para las mip's  $\rightarrow$

$$\frac{e}{mip} < 1$$

- No se trata de un efecto mínimo: puede llegar a valores de un 60%.
- La supresión de señal de la cascada em con relación a la esperada por mip's, en c. de muestreo de Z sensiblemente diferente para absorbente/medio activo es lo que se conoce como **efectos de transición**.
- Explicación de Pinkau, basada en la  $\xi_c$  menor en Z elevada (absorbente)  $\rightarrow$  la ramificación de la cascada es mayor en el absorbente (sin señal) que en el medio activo  $\rightarrow$  la densidad de partículas mip en la cola de la cascada es mayor en el absorbente. (Wigmans pág: 110)  
Cualitativamente correcto, pero dado que las capas activas son muy delgadas ( $\sim 0.01 X_0$ ) su influencia en el desarrollo de la cascada es despreciable.
- Explicación de Flauger: reside en que en materiales de elevado Z hay un gran número de fotones de baja energía ( $E_\gamma < 1 \text{ MeV}$ ), dado que la cascada progresa más en subdivisiones. Estos fotones son absorbidos casi íntegramente en el absorbente por el efecto fotoeléctrico ( $\sigma \rightarrow Z^5$ ) y **no dejan señal en el medio activo** (poco alcance)

## Ejemplo:

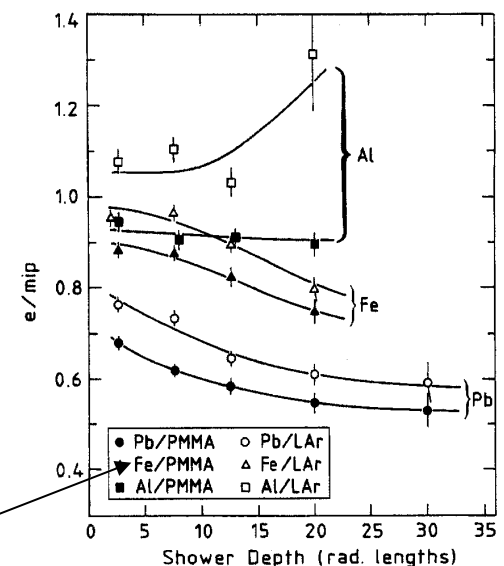
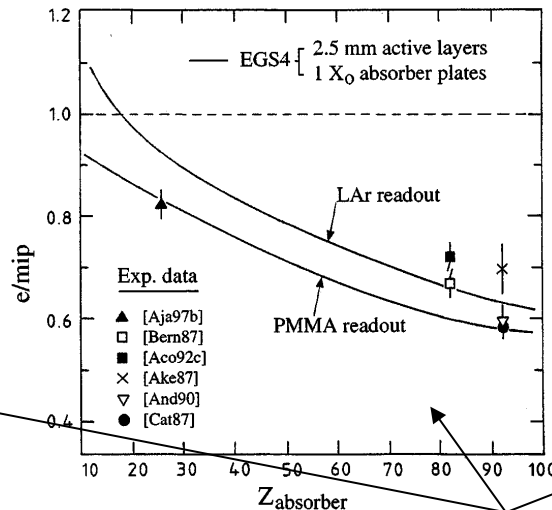
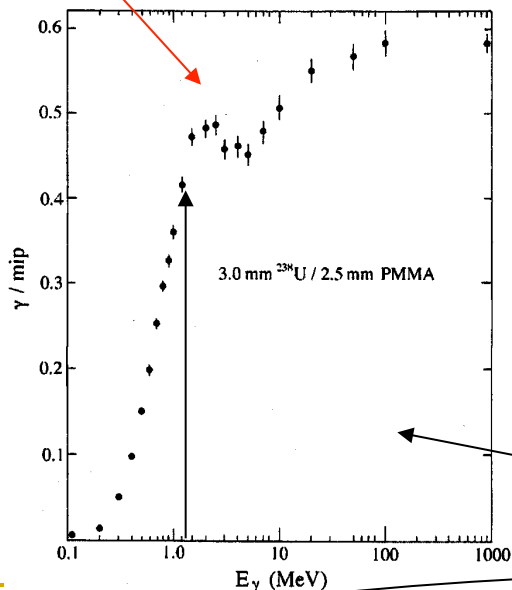
- El calorímetro de HELIOS tiene una fracción de muestreo de 8.5%, consistente con 3 mm de  $^{238}\text{U}$  y 2.5 mm de PMMA (plástico centelleo).
- Se genera (EGS4) un promedio de **60 fotones de energía de 511 KeV** (por GeV incidente) por la componente del positronio en la cascada → representa el 6% de la energía de la cascada.
- Las secciones eficaces de colisión de fotones de 511 KeV son de 76 b (46 b fotoeléctrico) sobre el U y de 1.7 b sobre C. (La densidad de difusores  $n_a = \rho_A/A_a$ )

La probabilidad de interacción relativa, plástico/ $^{238}\text{U}$ , vale:  $\frac{\sigma_a}{\sigma_p} \frac{A_p}{A_a} \frac{\rho_a}{\rho_p} \frac{d_a}{d_p} = \frac{1.7}{76} \frac{238}{12} \frac{1.18}{18.95} \frac{2.5}{3} = 0.023 \rightarrow \frac{1}{0.023} \sim 40$

- Lo que representa un **factor de supresión de 40**. (Figura)
- Si se **reemplaza el  $^{238}\text{U} \rightarrow \text{Fe}$** , la señal sólo se reduce un 17%. **El factor de supresión depende fundamentalmente del valor relativo de Z absorbente/activo.**

En la figura (izq.) se **representa la relación de señal  $\gamma$ /mip** para el calorímetro de HELIOS **en función de la energía** (baja) del  $\gamma$ . La relación e/mip (**centro**) en **función de la Z** del absorbente para centelleadores de plástico. Obsérvese que en un calorímetro de Al/plástico la relación puede ser mayor que la unidad. En la **drcha**: Dependencia de la relación e/mip en función de **la edad del shower** para Al, Fe y Pb. Calorímetros de  $1 X_0$  de absorbente con 2.5 mm de activo (LAr o plástico). Para **materia pesada (Pb)** la relación puede caer desde 0.8 a 0.6 al final de la cascada, donde a energía promedio menor de las partículas, los efectos de absorción son mayores. **Efecto contrario en Al.**

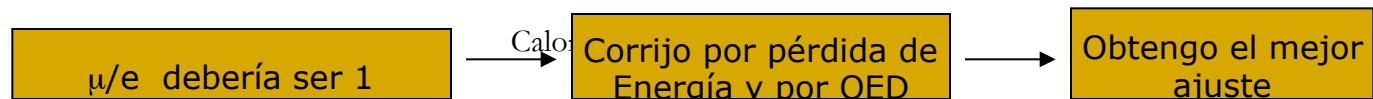
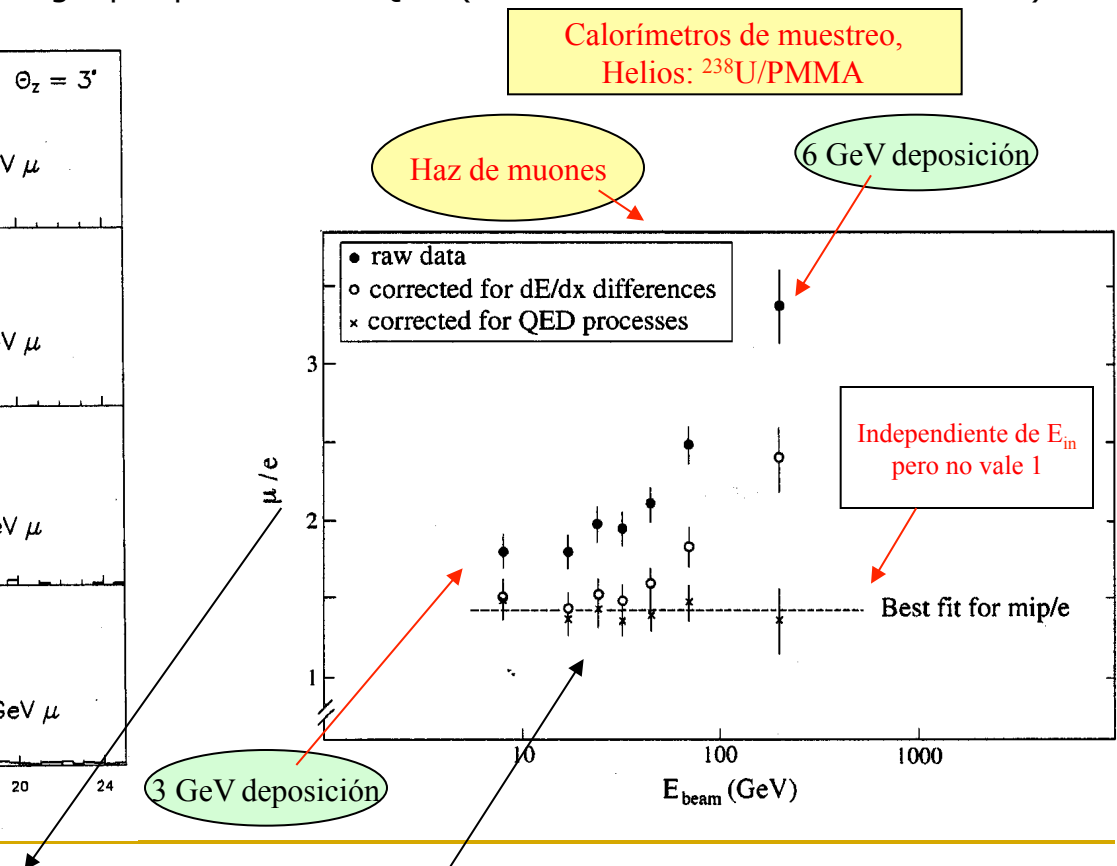
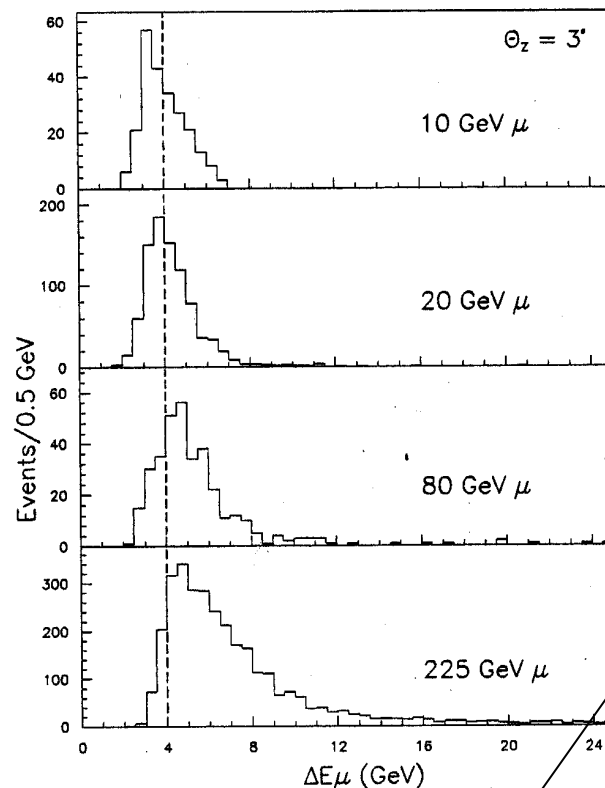
$$\gamma_{511}/\text{mip} = 0,27$$



**La fracción de muestreo depende de, la energía, de Z y de la granularidad en profundidad (edad del shower)**

## 8.3 Determinación de $e/mip$ para calorímetros (de muestreo).

- No es un problema trivial: se suelen usar muones relativistas (de relativa baja energía,  $\rightarrow$  menos problemas, ya que la cola de la derecha es mucho menor) (ver figura)
- El problema que presenta la pérdida de energía de muones se origina (figura) en las grandes fluctuaciones generadas por QED (brems). Básicamente las correcciones a efectuar son:
  - Subida relativista de la pérdida de energía
  - Incremento de pérdida de energía por procesos de QED (tales como brems  $\rightarrow$  cascadas em.)



## 8.4 La respuesta a los hadrones (calorímetros de muestreo).

- Todos los calorímetros (**homogéneos y de muestreo**) son intrínsecamente no compensados (**no lineales**) y reflejan la diferente composición en la energía (em o hadrónica) de la cascada, en función de la energía incidente.
  - Todos los calorímetros homogéneos tienen valores de  $e/h > 1$
  - Los calorímetros de muestreo pueden tener valores de  $e/h < (=) 1$  según su diseño. (**figura**)
  - Se denominan **calorímetros compensados** a aquellos **cuya relación  $e/h = 1$** , en un rango grande de energías.
- **Relación  $e/h$  y no linealidad**. La **no linealidad de la señal** viene directamente relacionada por
  - La relación  $e/h$  del calorímetro
  - La dependencia con la energía de la fracción  $f_{em}$ , de la componente em de  $\pi^0$ 's. ( *$0.11 \ln E$ , modelo de Gabriel*)

De la relación  $e/\pi(E)$  se deduce:

$$\frac{\pi(E_1)}{\pi(E_2)} = \frac{f_{em}(E_1) + [1 - f_{em}(E_1)](e/h)^{-1}}{f_{em}(E_2) + [1 - f_{em}(E_2)](e/h)^{-1}}$$

Relación que permite medir experimentalmente **la relación de  $e/h$**  a partir de las respuestas a dos energías, y conocer el valor de la  $f_{em}$  (por ejemplo con modelo de Gabriel).

- **La compensación** es una propiedad conveniente para los calorímetros y significa que la respuesta del detector a la componente puramente em y hadrónica de una cascada son iguales.

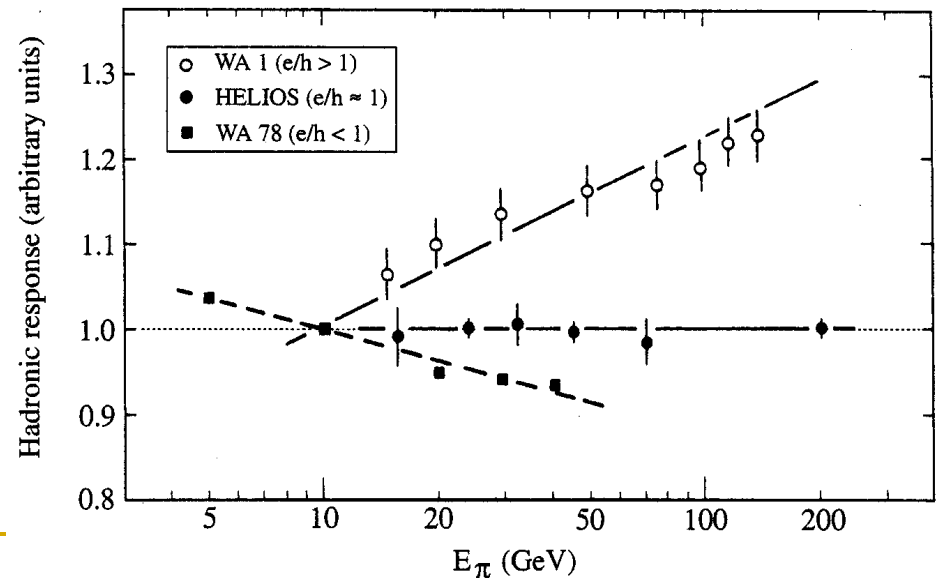
Podemos suponer que la componente puramente hadrónica se distribuye (visto en fichero 5):

- en una parte relativista (mips),
- los protones intermedios de la espalación nuclear,
- los n de evaporación y finalmente
- una parte invisible de rotura nuclear y recoils de los núcleos. Así:

$$h = f_{rel} \cdot rel + f_p \cdot p + f_n \cdot n + f_{inv} \cdot inv$$

donde rel, p, n e inv son las respuestas a este tipo de partículas

Normalizando a la respuesta a mip's y eliminando la energía invisible **obtenemos  $e/h$  para los calorímetros de muestro:**



$$\frac{e}{h} = \frac{e / mip}{f_{rel} \cdot (rel / mip) + f_p \cdot (p / mip) + f_n \cdot (n / mip)}$$

Para calorímetros no homogéneos

Los valores indicativos de la contribución de los diferentes procesos hadrónicos sobre blanco de Fe y Pb se presentan en la tabla, lo que

en principio nos permite calcular la relación e/h

Deposición de energía y composición de la energía no em en cascadas hadrónicas. ( Por GeV de energía hadrónica pura) (Table 2.5 Wigmans)		
Blanco pasivo	Pb	Fe
<b>Ionización:</b> por piones	19%	21%
por protones	37%	53%
<b>Ionización total</b>	<b>56%</b>	<b>74%</b>
<b>Energía Invisible:</b> Enlace nuclear	32%	16%
Retroceso nuclear	2%	5%
<b>Total Energía Invisible</b>	<b>34%</b>	<b>21%</b>
<b>Energía cinética de n de evaporación</b>	<b>10%</b>	<b>5%</b>
# piones cargados	0.77	1.4
# p	3.5	8
# n de cascada	5.4	5
# n de evaporación	<b>31.5</b>	5.
<b># total de n</b>	36.9	10.
Relación n/p	10.5/1	1.3/1

- Hay que resaltar (propiedades de la cas, had.):
  - La contribución de los **hadrones relativistas** es muy similar a la de las mips, por lo que **rel/mip~1**
  - Los **hadrones cargados no relativistas** tienen contribuciones complejas debido a que su ionización no es la de una mip y a que la difusión múltiple origina recorridos más largos en el medio pasivo (Z grande). Influye también fenómenos de saturación de la señal.
  - **Los n**, con energía típicas de 1 MeV son una componente importante de la cascada nuclear y originan:
    - **Reacciones nucleares** del tipo de transferencia (n,a), (n,p), (n,d), inhibidas por la barrera de Coulomb a E<5 MeV
    - **Difusión inelástica**, con excitación de los núcleos del medio, lo que depende de la estructura de niveles atómicos del medio
    - **Difusión elástica** (como termalización), proceso más probable, sobre todo en los medios con p y núcleos ligeros.
  - Los n son un brazo de palanca importante para **amplificar la señal** hadrónica del calorímetro, en los medios activos ricos en p.



## 9. Compensación

- En general, la energía hadrónica es menos eficiente en la generación de señal que la energía em ( $e/h > 1$ ) a causa de la energía invisible de la cascada hadrónica.
- La energía invisible aparece por la rotura de núcleos (energía de enlace), núcleos de retroceso, neutrinos que escapan etc.
- Las consecuencias más importantes de la no compensación son la **pérdida de linealidad energía/señal** y la **degradación de la resolución de la energía**.
- La idea original de la compensación (Fabjan y Willis) consiste en amplificar *selectivamente* a través de la fisión nuclear la energía depositada en el calorímetro, de modo que se compense la energía invisible de la interacción nuclear. (→ energía extra de 200 MeV por fisión).
  - La idea que funcionó bien en su calorímetro, de  $^{238}\text{U}$  (3 mm) con PMMA (2.5 mm de plástico) **no resultó funcionar correctamente en los subsiguientes calorímetros** desarrollados, muchos de ellos infracompensadores.
  - Otro calorímetro con placas de  $^{238}\text{U}$  (1 cm) y con placas de 5 mm de plástico centelleador resultó por el contrario supracompensador (mayor señal).
- Wigmans et al. han demostrado que **la compensación** se puede obtener a través de los diferentes mecanismos que intervienen en la cascada, con una amplificación correcta, sin ser mandatorio el uso de U (fisión).
  - **La idea** es amplificar una (o varias) de las componentes energéticas de la cascada hadrónica para obtener  $e/h \approx 1$ : por ejemplo a través de blancos ricos en p que amplifican la respuesta de los n de la cascada/evaporación. (lo dicho en la transparencia anterior, los n son importante para amplificar la señal en medio ricos en p, ya que “prolongan” la cascada)

Conclusión

## 9.1 Mecanismos de compensación

Hemos visto que la relación  $e/h$  se puede escribir como:

$$\frac{e}{h} = \frac{1 - f_{em}(E)}{\left[\frac{\pi}{e}\right](E) - f_{em}(E)}$$

homogéneos

Para determinar  $e/h$  se mide experimentalmente la relación  $e/\pi(E)$  y se hacen hipótesis sobre el valor de la fracción  $f_{em}$ . Como se ha visto (Gabriel), la  $f_{em}$  se calcula mediante:

$$f_{em} = 1 - \left(\frac{E}{E_0}\right)^{[k-1]}$$

Siendo  $k=0.82$  y  $E_0=0.7$  (para Fe y Cu) y 1.3 para Pb,U. Además, las contribuciones de  $e/h$  son:

No homogéneos

$$\frac{e}{h} = \frac{e/mip}{f_{rel} \cdot (rel/mip) + f_p \cdot (p/mip) + f_n \cdot (n/mip)}$$

La fracción invisible no contribuye en los c. homogéneos → infracompensados.

IDEA

- En **los c. de muestreo** se puede elegir alguno de los parámetros de la ecuación para obtener la compensación. Una vez elegido el material activo/pasivo, la fracción  $f_{rel}=rel/mip$  es definida → son brazos de palanca las relaciones  $e/mip$ ,  $p/mip$  y  $n/mip$

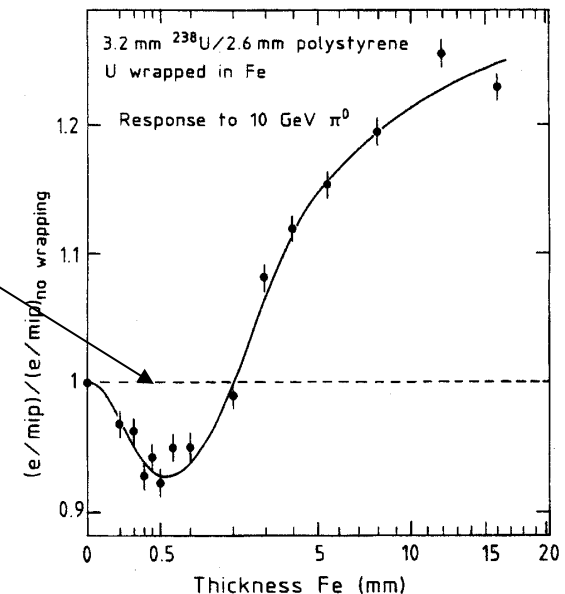
### Métodos de compensación:

#### Primer método: Reducción de la respuesta em.

1) Se puede reducir el parámetro  $e/mip$  mediante **absorbentes de elevado Z**. Si las fracciones activo/pasivo son idóneas, se puede **reducir un 30/40%  $e/mip$**  para compensar a la baja la pérdida de señal (energía invisible) de la cascada hadrónica.

2) La señal se reduce porque los  $\gamma$  ( $E < 1$  MeV) por efecto fotoeléctrico son absorbidos en el material pasivo (no señal)

Un mayor factor de atenuación se obtiene **recubriendo los absorbentes de Z elevado con material pasivo** (ej: Al) **de Z bajo** (no produce efecto fotoeléctrico, y absorbe los e- producidos en el pasivo de Z elevado). Ejemplo: calorímetro de U (3 mm) / plástico centelleo(2.5) con recubrimiento de láminas de Fe en función de su espesor (figura).



$e/mip$  en función de la Fracción activo/pasivo

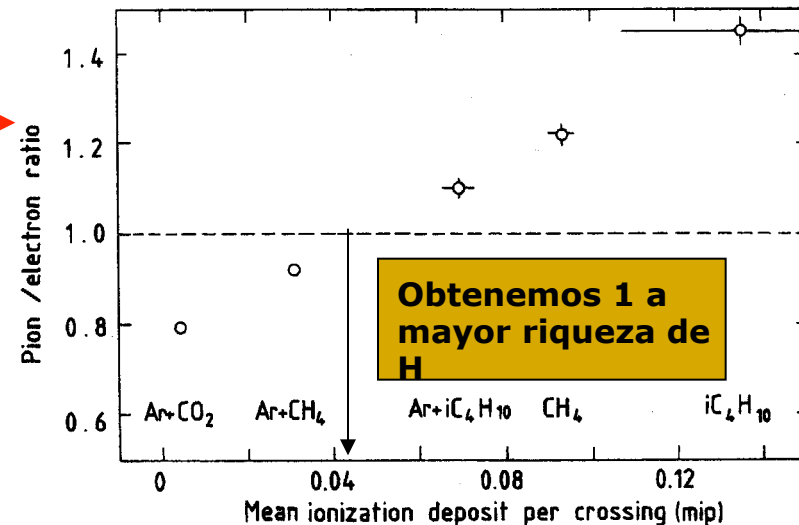
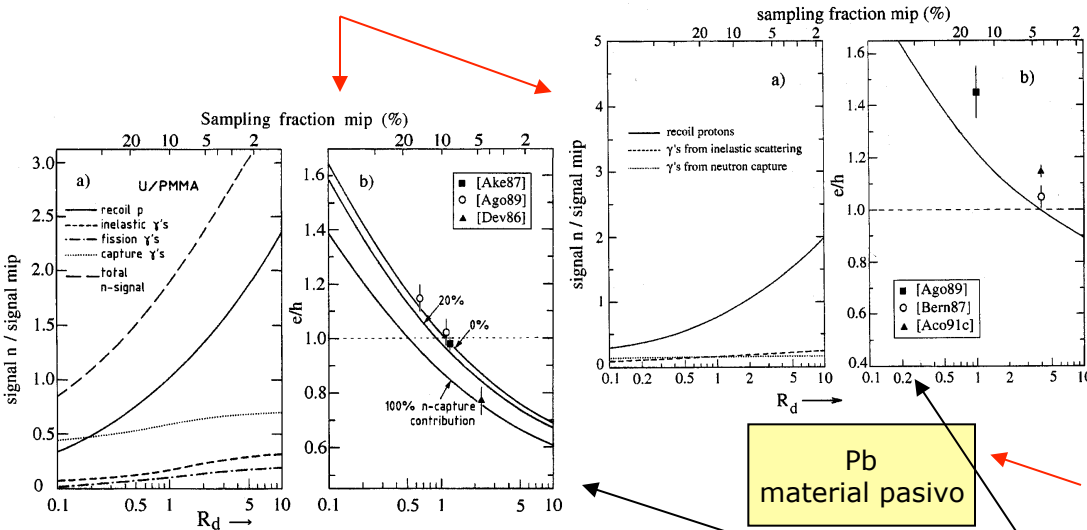
## 9.2. Segundo método: Y/o Amplificación de la respuesta puramente hadrónica.

El modo más poderoso de actuar sobre la relación  $e/h$  de un calorímetro es usar medios activos ricos en H, sobre los que los n se termalizan transfiriendo su energía a los p: hasta un 90% de su energía (Leo). En consecuencia,

- El **factor  $n/mip$**  puede ser modificado para alcanzar el factor  $e/h$  deseado, dependiendo de la fracción de capas activa/pasiva elegida, y de la proporción de H (moderador de n) en la capa activa (figura abajo)

En la figura se presenta la relación de la señal  $n/e$  medida para diferentes mezclas de gases de un calorímetro de U/gas de la colaboración L3. La abscisa representa la deposición de energía calculada en una cámara por los n lentos (no hay efecto de saturación de la señal) →

La situación es muy diferente en materiales densos en H (como los centelleadores plásticos) por la saturación de la señal debida a los p de retroceso difundidos por las colisiones elásticas con los n.



Obtenemos 1 a mayor riqueza de H

Mayor riqueza de H →

Las figuras muestran las diferentes contribuciones originadas por n sobre un calorímetro de <sup>238</sup>U/PMMA, en función de R<sub>d</sub>, (→**relación de espesores pasivo - activo**). La fig. de la derecha se basa en diferentes hipótesis de contribución de captura nuclear de los n

- **La compensación en calorímetros sin H**, como los de LAr se puede obtener incrementando el tiempo de integración de la señal
- La compensación en calorímetros ricos en H, se consigue por los n de espalación y su mecanismo de moderación (lo que ya hemos visto).

### ■ Tercer Método: La compensación off line

Existen procedimientos, sobre la base de **corrección suceso a suceso** (no topológica sobre celdas), basados en el diferente desarrollo de la cascada hadrónica y em, que permiten **corregir off-line**, la energía depositada en el calorímetro: **el método de bench mark y el de H1**, (a explicar en fichero 8).

### • Comentario sobre los calorímetros de $^{238}\text{U}$ .

• **No implican necesariamente que estos sean compensados (Y son muy costosos, Uranio caro).**

• Por cada fisión de U se libera una energía de unos 200 MeV, repartida como:

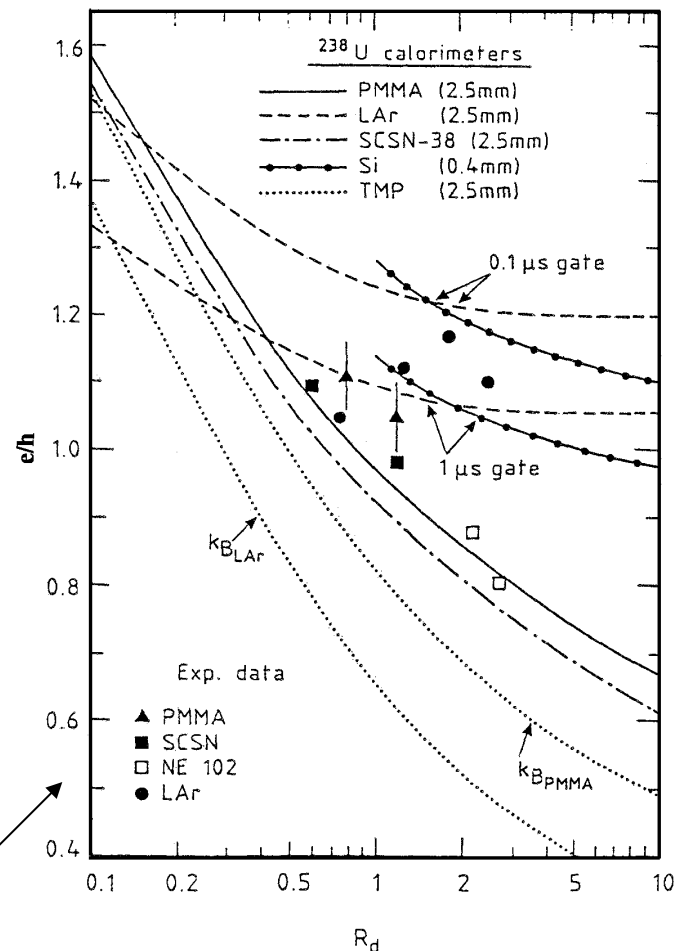
• 90% de la E se traduce en núcleos pesados de retroceso y fragmentos de fisión que no contribuyen (recorrido) a la señal

• Se producen  $\gamma$ 's de la desexcitación nuclear ( $\sim 7.5$  MeV)

• Como en promedio se producen 10 fisiones por GeV, una **contribución adicional de 135 MeV** se origina en estos calorímetros, lo que representa tan sólo 1/3 de la fracción de energía invisible.

• Se producen unos 3 n por fisión, con energías de 1.5 -2 MeV

SCSN y PMMA son plásticos centelleadores con diferente proporción de p  
TMP es tetrametilpentano, líquido rico en p  
NE 102 es un centelleador plástico estándar  
K representa el coeficiente de recombinación



**Factor e/h en función de la fracción de capas activa/pasiva**

- **Calorímetros de Cerenkov (3º tipo de calorímetro desde punto de vista de la señal).**
- Son un ej. de calorímetros ultradescompensados (no utilizados en c. hadrónicos).
- La luz de Cerenkov es emitida por partículas relativistas → sólo contribuye en la formación de la señal el término  $f_{rel}$ . →  $\frac{e}{h} = \frac{1}{f_{rel}} \cdot \frac{e}{mip}$  Para calorímetros de Cerenkov
- Si consideramos que el valor de  $f_{rel}$  es del orden de 0.2, obtenemos un detector muy descompensado con un factor  $e/h \sim 5$  (1/0.2 y suponemos  $e/mip = 1$ )).
- Los calorímetros de Cerenkov son muy lineales para la cascada em, si bien exhiben una fuerte dependencia angular cuando su construcción es en fibras (**utilizados en c. electromagnéticos**).

Respuesta a la deposición de energía em por un detector basado en centelleo (izq) y un detector basado en Cerenkov (dcha) en función del ángulo de incidencia sobre las fibras ópticas.

Ej. En un calorímetro de Cerenkov, como el FEMC (Forward ElectroMagenitc Calormimeter de Delphi), la traza detectable  $T_d$  es menor que la longitud de traza total  $T$  de los electrones, dado que existe un umbral de energía  $\eta$ , por debajo del cual no hay emisión. La fracción  $F$  de traza detectable, se puede parametrizar en función de la energía umbral  $\eta$ , definiendo la variable

$$\zeta = 2.29 \frac{\eta}{\xi_c} \rightarrow T_d = F(\zeta) \frac{E}{\xi_c} \text{ en unidades de } X_0$$

De modo que se puede representar la fracción de traza (figura) y parametrizar en la forma  $F(\zeta) = \left[ 1 + \zeta \ln \frac{\zeta}{1.53} \right] e^{-\zeta}$

■ Obsérvese que la longitud de traza detectable es **LINEAL** con la energía incidente de la partícula medida. El factor  $F(\zeta)$  es característico de cada detector ⇒ **la calorimetría es posible, por la linealidad.**

