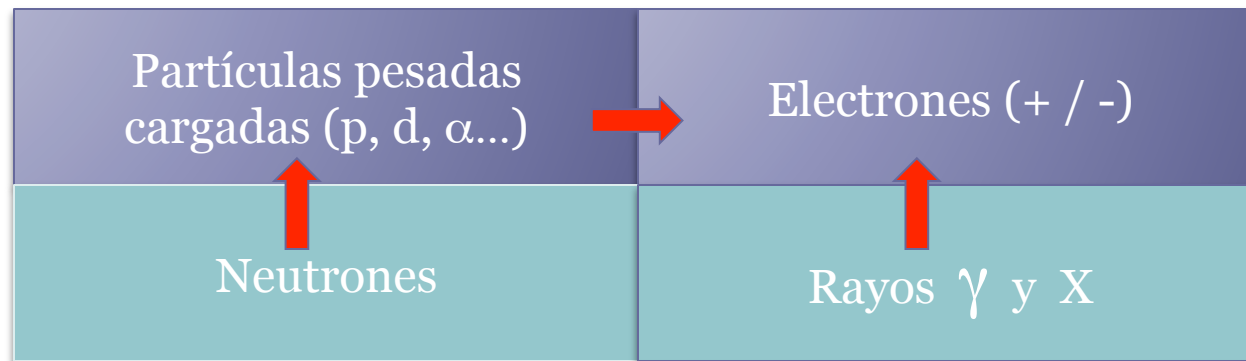


INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA.

Enrique Nácher



Tipos de radiación



- Los neutrones sólo interaccionan con los núcleos, el resto fundamentalmente con electrones del medio
- La fila de arriba: interacción continua, la de abajo: interacción de punto

Partículas pesadas cargadas

- Incluye todas las partículas cargadas más pesadas que el electrón: muones, protones, partículas α ... Todas interaccionan de forma continua.
- Interaccionan principalmente mediante 2 procesos:
 - 1) colisiones inelásticas (excit. atómicas e ionización)
 - 2) colisiones elásticas con núcleos atómicos
- Otros procesos menos probables: radiación Cherenkov, reacciones nucleares y bremsstrahlung

Partículas pesadas cargadas

- Incluye todas las partículas cargadas más pesadas que el electrón. Todas interactúan fuertemente con la materia. **Se producen electrones secundarios libres en la materia. Si tienen energía suficiente para ionizar otros átomos se denominan rayos δ**
- Interactúan a través de los siguientes procesos:
 - 1) colisiones inelásticas (excit. atómicas e ionización)
 - 2) colisiones elásticas con núcleos atómicos
- Otros procesos menos probables: radiación Cherenkov, reacciones nucleares y bremsstrahlung

Partículas pesadas cargadas

- Colisiones inelásticas: la fórmula de Bethe-Bloch.
Cálculo ‘cuántico’ de la pérdida de energía por unidad de longitud (*‘stopping power’*)

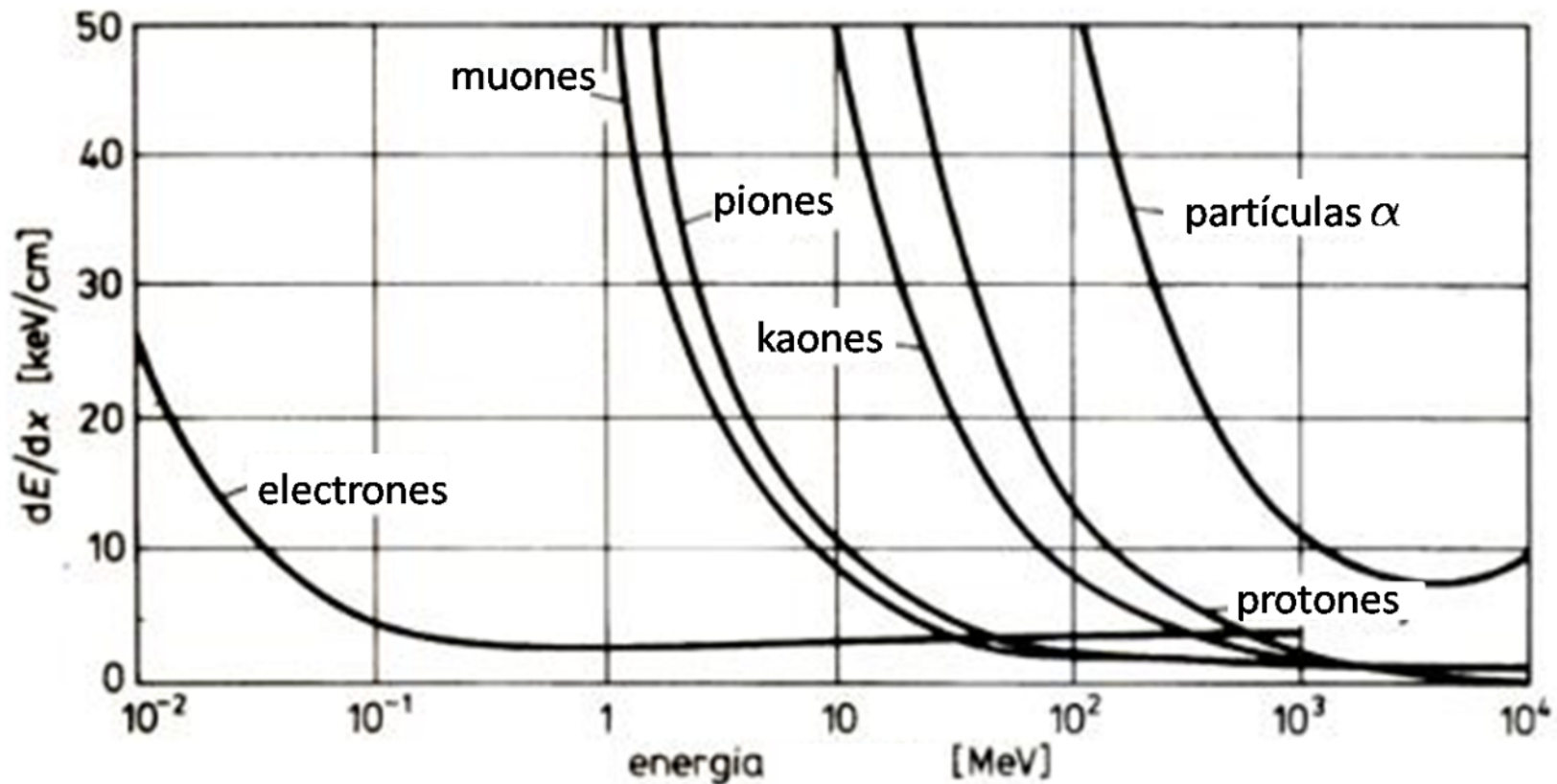
$$-\frac{dE}{dx} = 2C \frac{m_e c^2}{\beta^2} \frac{q^2 Z}{A} \rho \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2\gamma^2 \beta^2 m_e c^2 E_{\max}}{I_0^2} \right) - \beta^2 \left(-\frac{\varepsilon}{2} - \frac{\delta(\beta)}{2} \right) \right]$$

Domina a energías no relativistas, cae como $1/E$ ($\beta < 0.96c$)

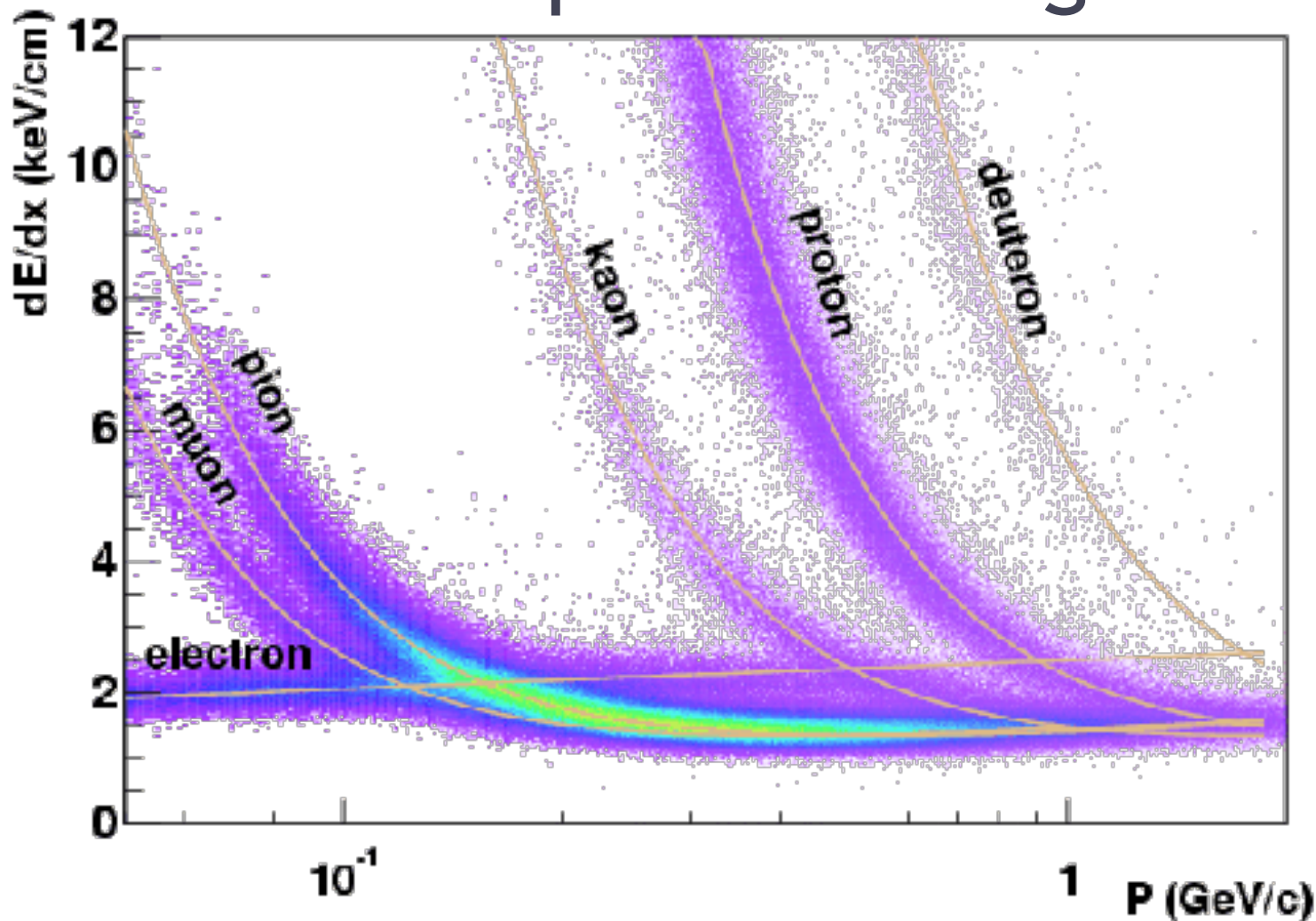
Domina a Altas energías pero lo compensa la corrección de ‘densidad’ ($\beta \geq 0.96c \rightarrow \text{MIP's}$)

Correcciones de ‘capa’ y ‘densidad’

Partículas pesadas cargadas



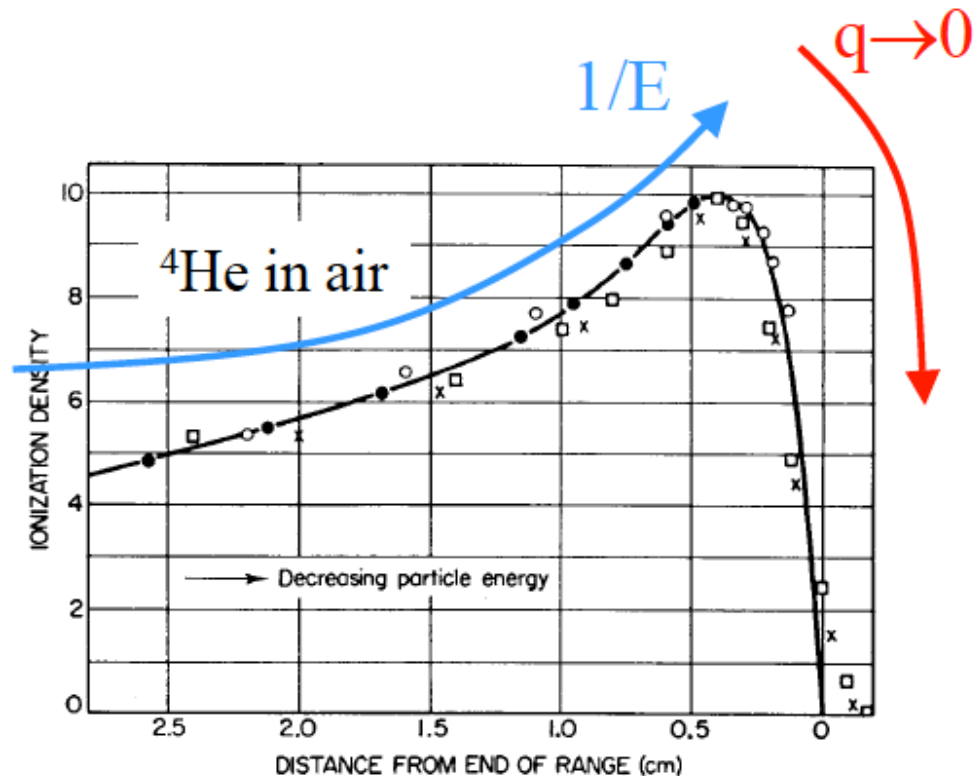
Partículas pesadas cargadas



Partículas pesadas cargadas

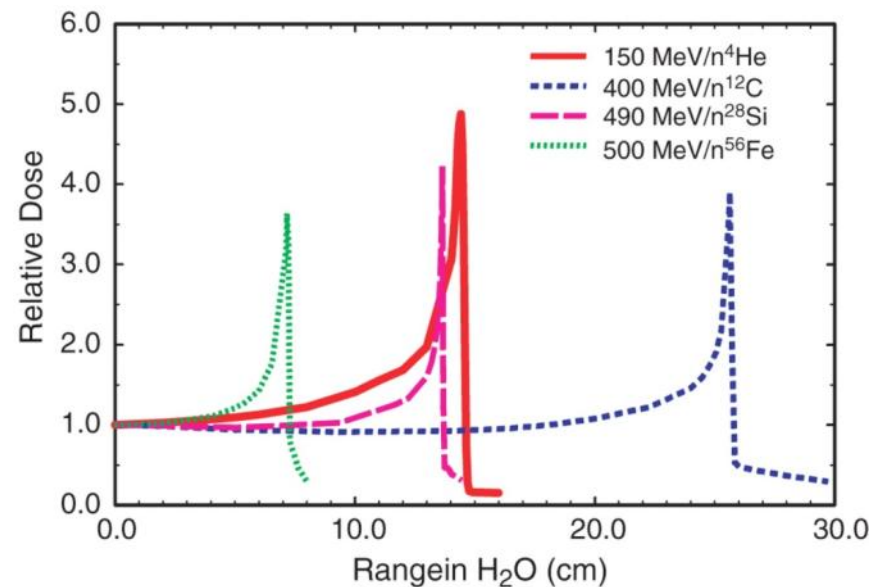
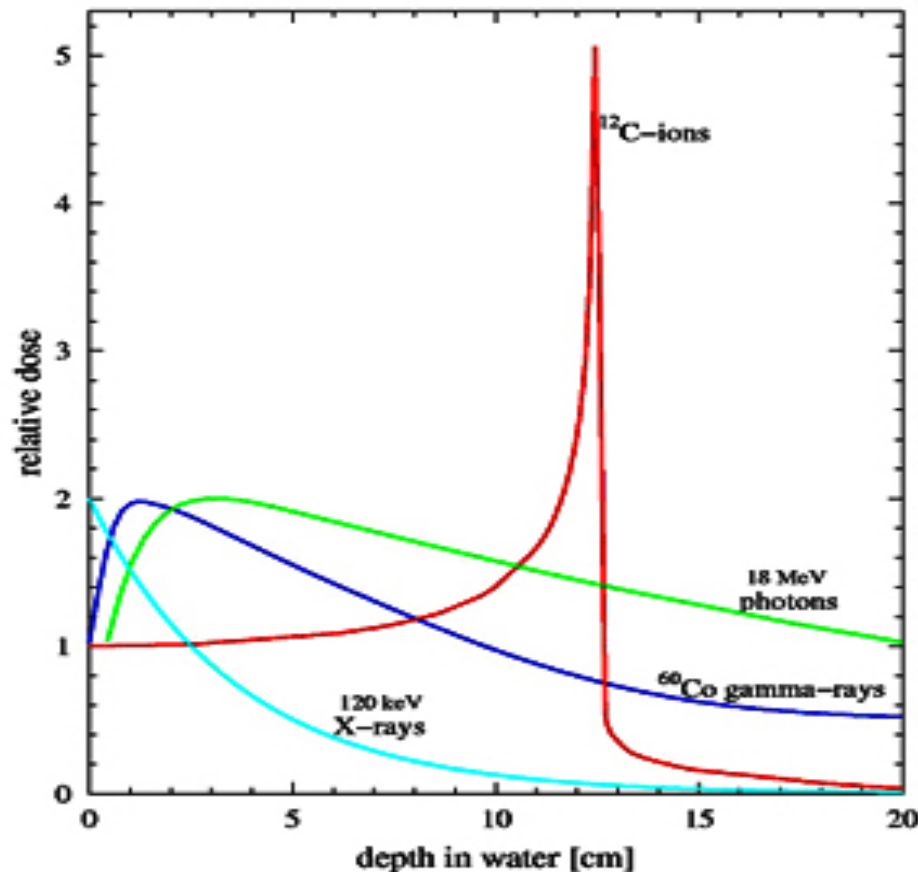
- Curva de Bragg: '*stopping power*' vs profundidad

$$\frac{-dE}{dx} \propto \frac{q^2}{E}$$



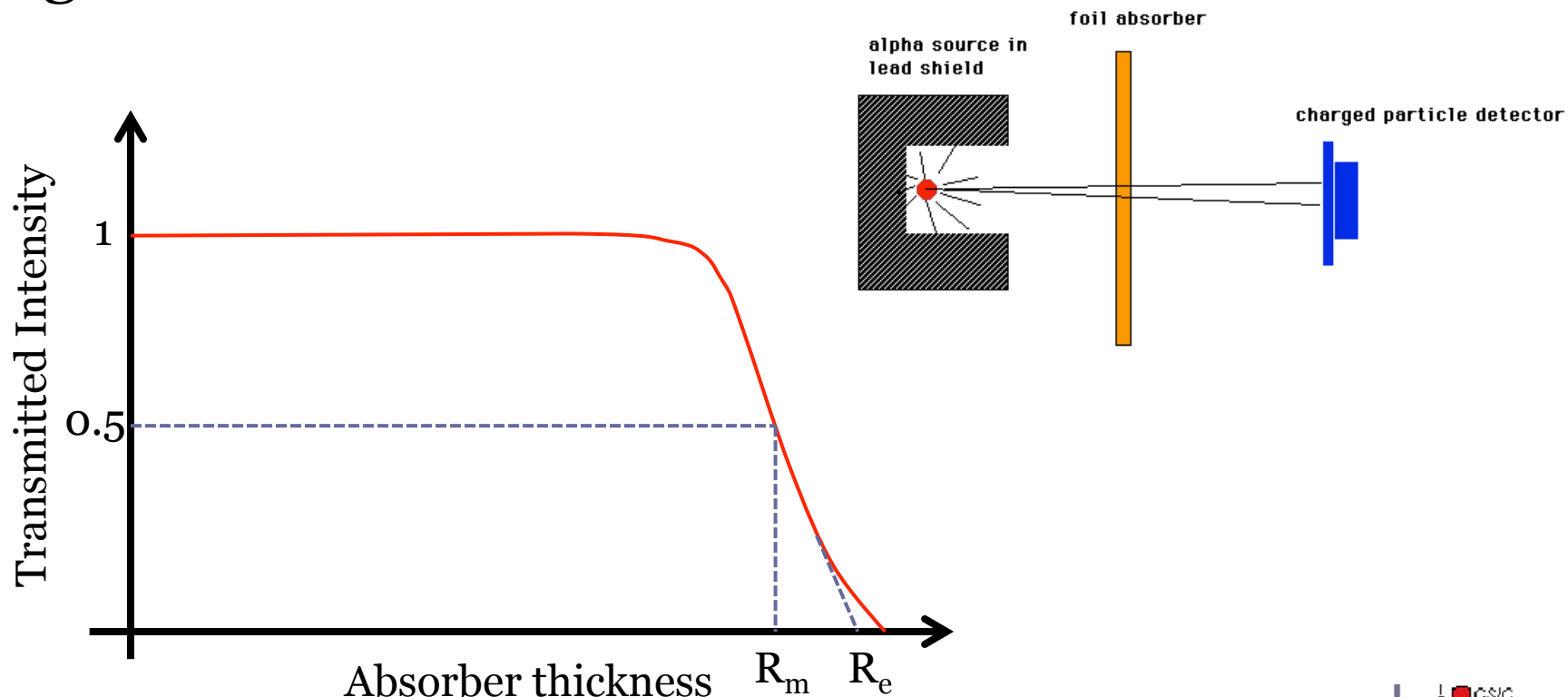
Partículas pesadas cargadas

- Curva de Bragg: ‘*stopping power*’ vs profundidad



Partículas pesadas cargadas

- Rango



Electrones y Positrones

- La radiación por Bremsstrahlung se vuelve muy importante a partir de unos pocos MeV.
- La pérdida total de energía se compone entonces de dos términos: colisión + radiación (iguales para $E=E_c$)

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{tot} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{coll} + \left(\frac{dE}{dx} \right)_{rad}$$

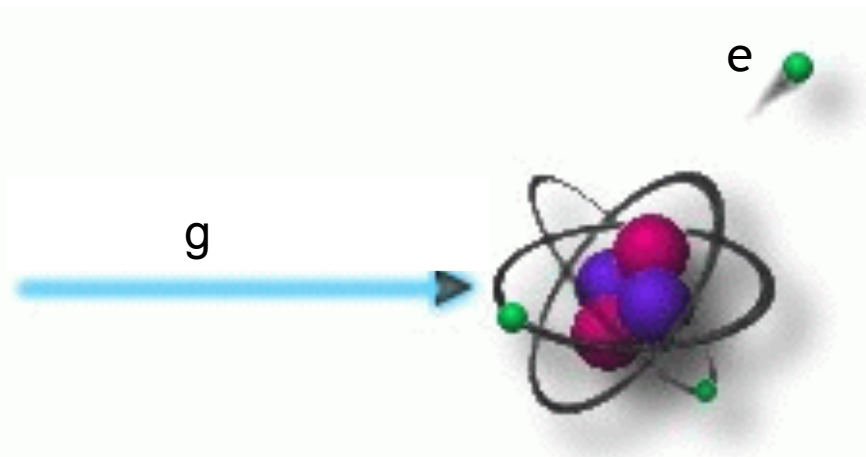
Bethe-Bloch modificada

Radiación gamma (γ)

- Procesos discretos y poco probables. Principalmente:
 - 1) Efecto fotoeléctrico
 - 2) Dispersión Compton
 - 3) Producción de pares
- Otros procesos menos probables:
fotodisociación (γ, n), dispersión Thomson y Rayleigh

Radiación gamma (γ)

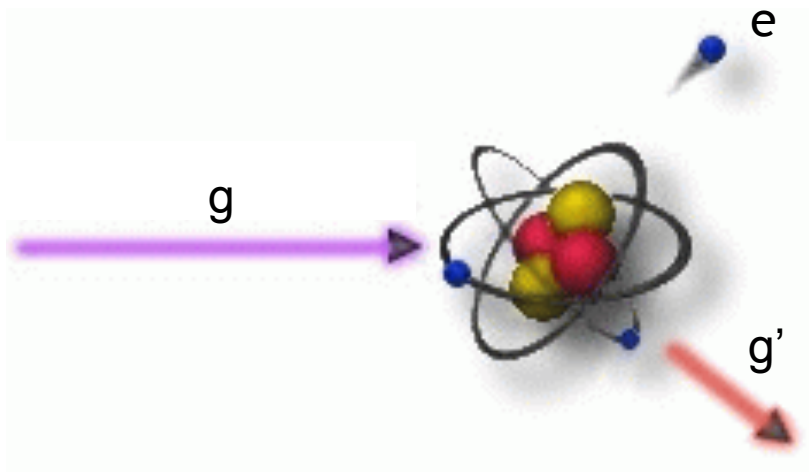
- Efecto Fotoeléctrico: Toda la energía del fotón incidente es absorbida por un electrón que queda libre. Si tiene energía suficiente para ionizar otros átomos se denomina... ¡¡ Rayos δ !!



- Sección eficaz: $\tau \propto Z^n$, $4 < n < 5$

Radiación gamma (γ)

- Efecto Compton: Parte de la energía del fotón incidente es absorbida por un electrón que queda libre. El fotón se dispersa con una nueva dirección.

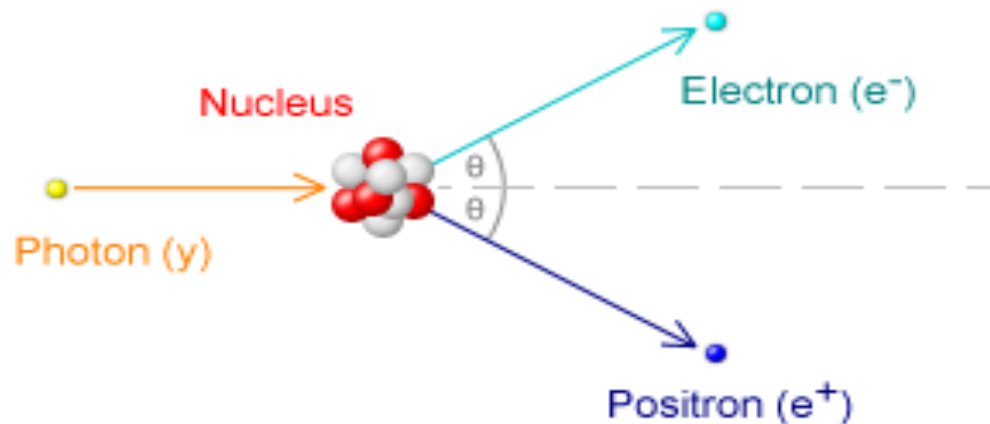


$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta).$$

- Sección eficaz: $\sigma \propto Z$

Radiación gamma (γ)

- Producción de pares: En presencia de materia, el fotón puede producir un par e^+e^- siempre y cuando tenga energía suficiente ($E \geq 1.022 \text{ MeV}$)



- Sección eficaz: $\kappa \propto \frac{1}{\sqrt[3]{Z}}$

Radiación gamma (γ)

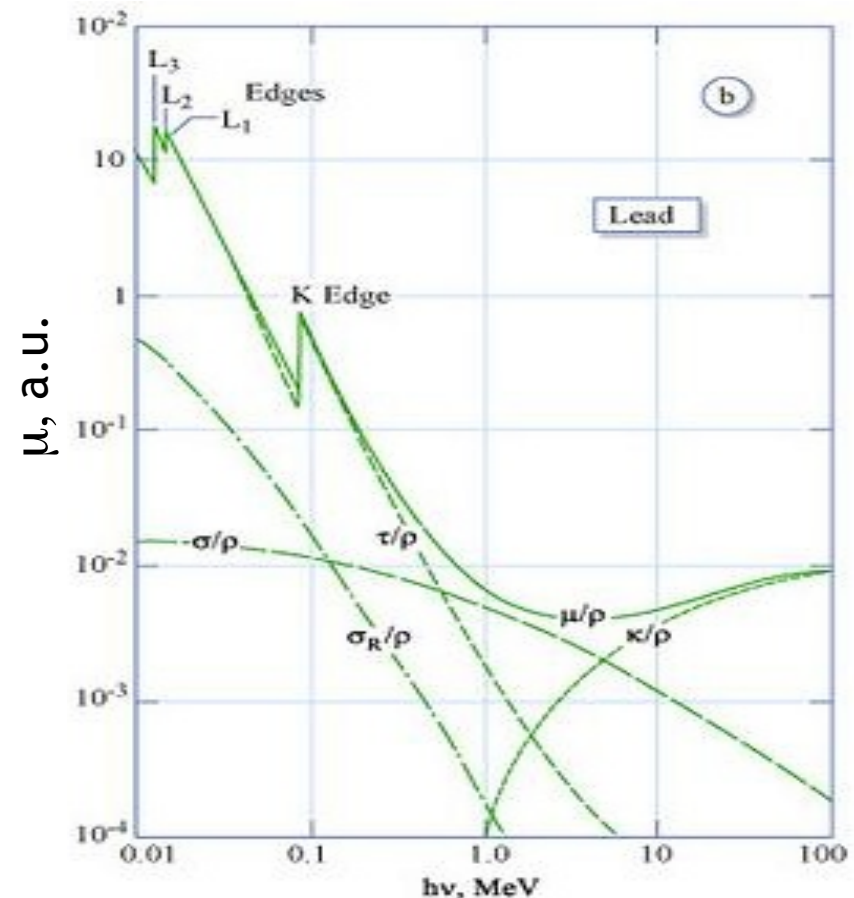
- Atenuación de los rayos γ en la materia:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

- Sección eficaz total:

$$\sigma_{tot} = \tau + \sigma + K$$

- Coeficiente de atenuación lineal: $\mu = N\sigma_{tot}$

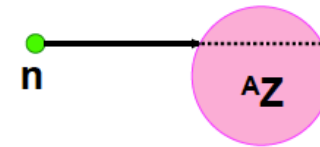


Neutrones

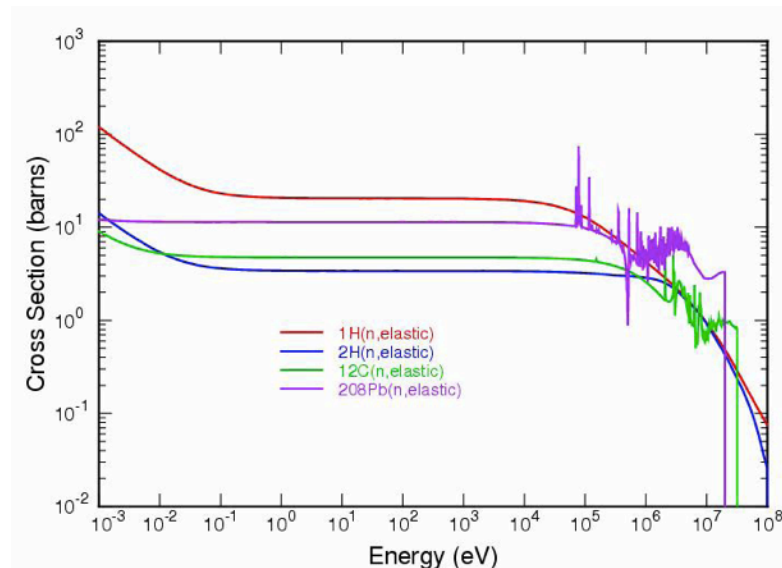
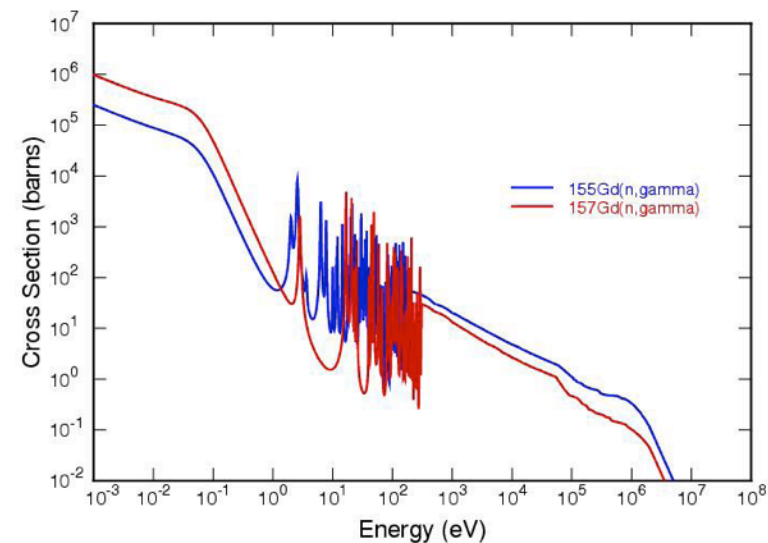
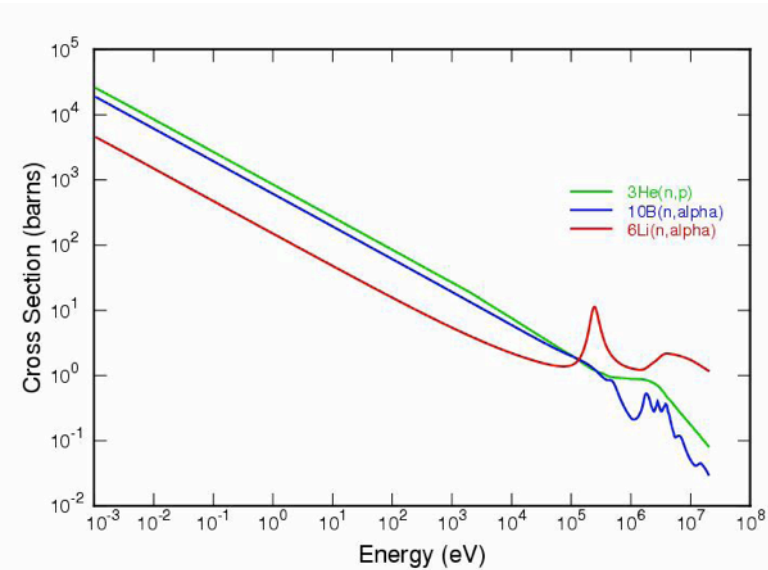
No tienen carga \Rightarrow Sólo interacción nuclear (y gravedad!): corto alcance de las interacciones nucleares ($\approx 1\text{fm}$) \Rightarrow Baja probabilidad de interacción

- Canales de reacción:
 - dispersión elástica: (n,n)
 - dispersión inelástica: $(n,n'\gamma)$
 - captura radiativa: (n,γ)
 - multiplicación: $(n,xn\gamma)$
 - producción de partículas cargadas: $(n,p\gamma)$, $(n,\alpha\gamma)$, ...
 - fisión: $(n,xnA_1Z_1A_2Z_2)$
 - ...
- Sin barrera de Coulomb
- Umbrales de reacción
- Fuerte dependencia energética

Neutrones



- Dispersión elástica: MODERACIÓN
- Producción de partículas cargadas:
 $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$; $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$; $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$
- Captura radiativa: $^{155,157}\text{Gd}(n,\gamma)$



Neutrones

- Dispersión elástica: MODERACIÓN
 - Energía del neutrón tras una colisión:
$$\left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 E_0 \leq E \leq E_0$$
 - Buen moderador: material ligero rico en H

Nucleus	$1-\alpha$	ξ	N (1MeV→ 25 meV)
^1H	1	1	18
^2H	0.889	0.725	24
^4He	0.640	0.425	41
^{12}C	0.284	0.158	111
^{56}Fe	0.069	0.035	500
^{208}Pb	0.019	0.010	1823



Algunas ideas claras

- Partículas cargadas: interaccionan de forma continua. En el caso de e^- y e^+ la radiación por bremsstrahlung es igual o más importante que la ionización (E_c)
- Radiación γ : interacción mediante procesos discretos. Los más relevantes: fotoeléctrico, Compton y producción de pares
- Para hacer espectroscopía γ interesan materiales con alto Z para que la sección eficaz de efecto fotoeléctrico sea mucho mayor que la de cualquier otro proceso.

Algunas ideas claras

- Neutrones: interacción mediante procesos discretos. Poca probabilidad de interacción con fuerte dependencia energética. Pierden energía rápidamente en materiales ricos en H por colisiones elásticas ('moderación'). Acaban produciendo partículas pesadas cargadas o radiación γ .

Algunas ideas claras

- Tanto radiación γ como partículas cargadas, acaban por producir electrones libres en el material sensible del detector. Estos pueden a su vez ionizar otros átomos (rayos δ), pero cuando les queda menos energía que la de ionización del material, ¿qué sucede?

→ depende del material sensible del detector

Detectores
de gas

Detectores de
semiconductor

Detectores
de centelleo

Parte 2

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS DETECTORES

Enrique Nácher



Función de Respuesta

- En condiciones ideales la respuesta de nuestro detector a un haz monoenergético debería ser un pico tipo 'delta de Dirac' a la energía correspondiente del haz



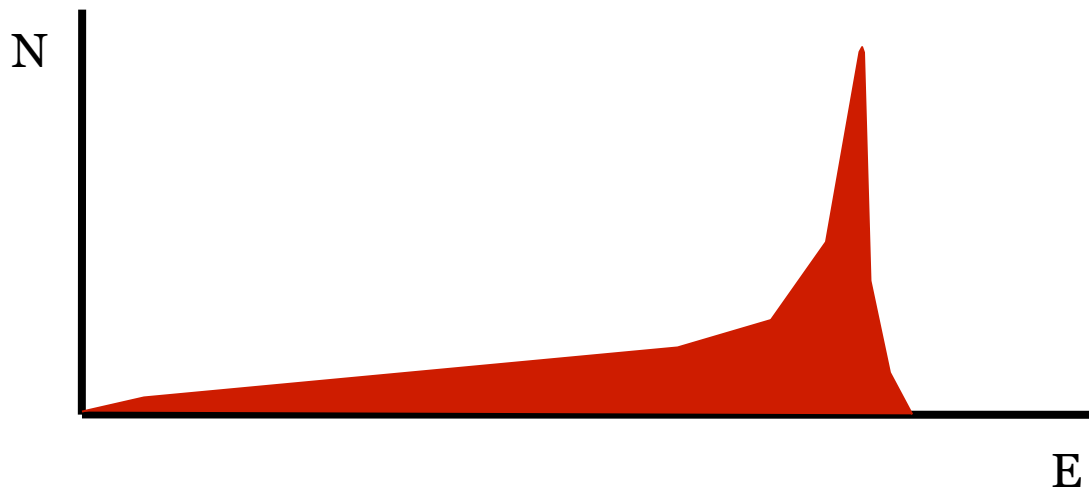
Función de Respuesta

- En condiciones reales el pico tendrá una cierta anchura (resolución finita del detector).



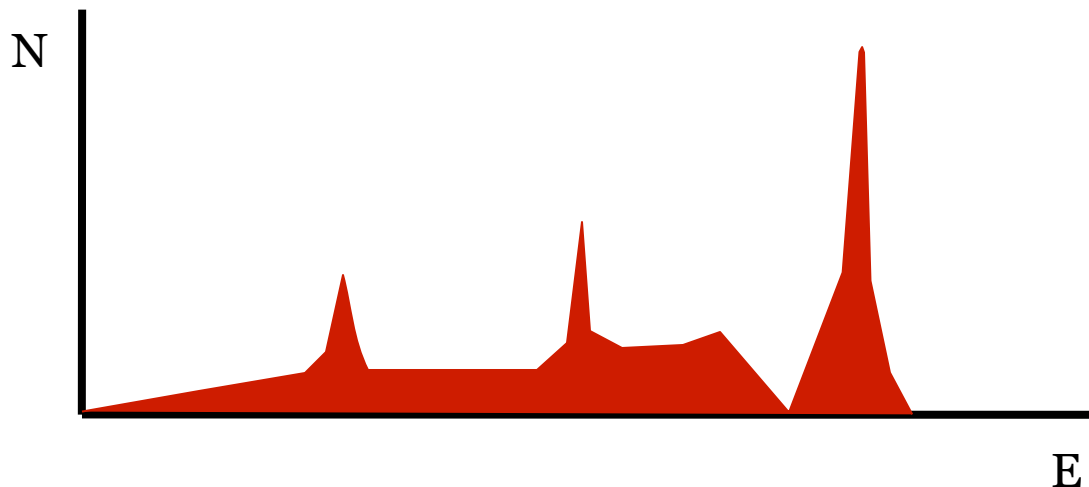
Función de Respuesta

- En condiciones reales el pico tendrá una cierta anchura (resolución finita del detector).
- Si detectamos p. ej. electrones, parte de la energía se perderá por bremsstrahlung \rightarrow cola a bajas energías



Función de Respuesta

- Si detectamos radiación γ , aparecerá un continuo Compton a bajas E y picos de escape si hay producción de pares.



Resolución Energética

- Capacidad del detector de distinguir dos energías muy próximas entre sí.

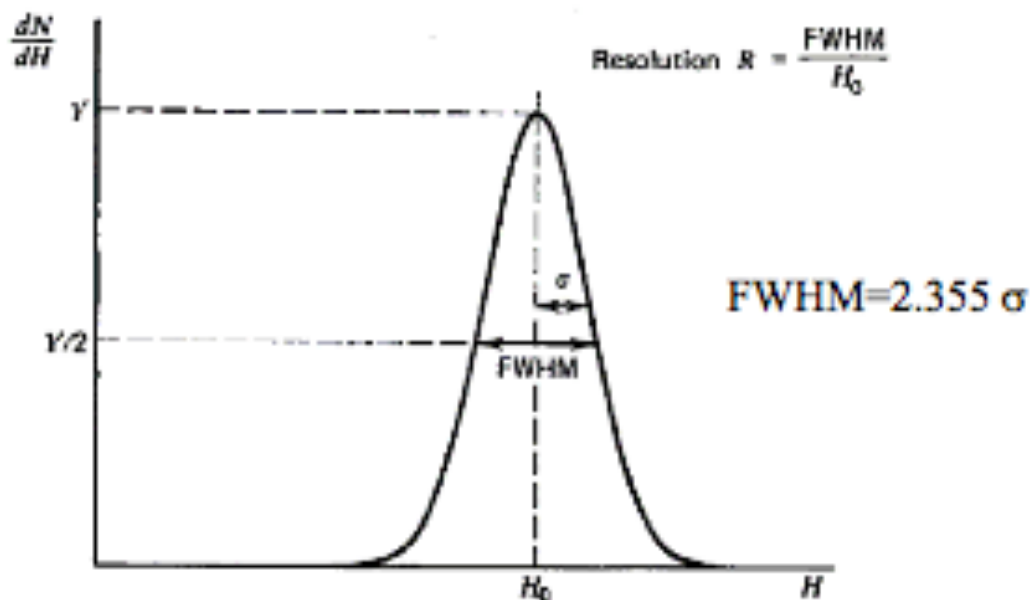


Fig. 4.5 Knoll, 3rd Ed.

el material sensible
ción y formación de la
dísticos.

$\Delta E = \text{FWHM a energía } E$

Resolución Energética

- Sea J el número de portadores de carga liberados en la detección de una partícula o fotón. Si w es el potencial de ionización del material, entonces: $J = \frac{E}{w}$
- Si asumimos que se libera carga siguiendo una estadística de Poisson, entonces $\sigma_J^2 = J$

Por tanto:
$$R = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta J}{J} = 2.35 \frac{\sigma_J}{J} = 2.35 \frac{\sqrt{J}}{J}$$

Resolución Energética

- En realidad, la carga liberada no sigue una estadística de Poisson, pero se puede aproximar $\sigma_J^2 = FJ$, donde F es el factor de Fano

Por tanto:
$$R = \frac{\Delta E}{E} = 2.35 \frac{\sqrt{FJ}}{J} = 2.35 \sqrt{\frac{F\omega}{E}}$$

- $F \approx 1$ para centelleadores, pero $F < 1$ para detectores de semiconductor \Rightarrow Mejor resolución energética!!

Eficiencia

- Se definen 2 tipos de eficiencia
 - 1) Eficiencia absoluta es la fracción de eventos detectados de todos los emitidos por una fuente
 - 2) Eficiencia intrínseca es la fracción de eventos detectados de todos los que llegan al detector
- La primera depende del material sensible del detector, así como del volumen de este y la geometría de la medida. La segunda no depende de la geometría de la medida

Eficiencia

- Matemáticamente:

$$\varepsilon_{\text{intr}} = \frac{\text{Part. Detectadas}}{\text{Part. que llegan}} \quad f_{\text{geom}} = \frac{\text{Angulo sólido cubierto}}{4\pi}$$

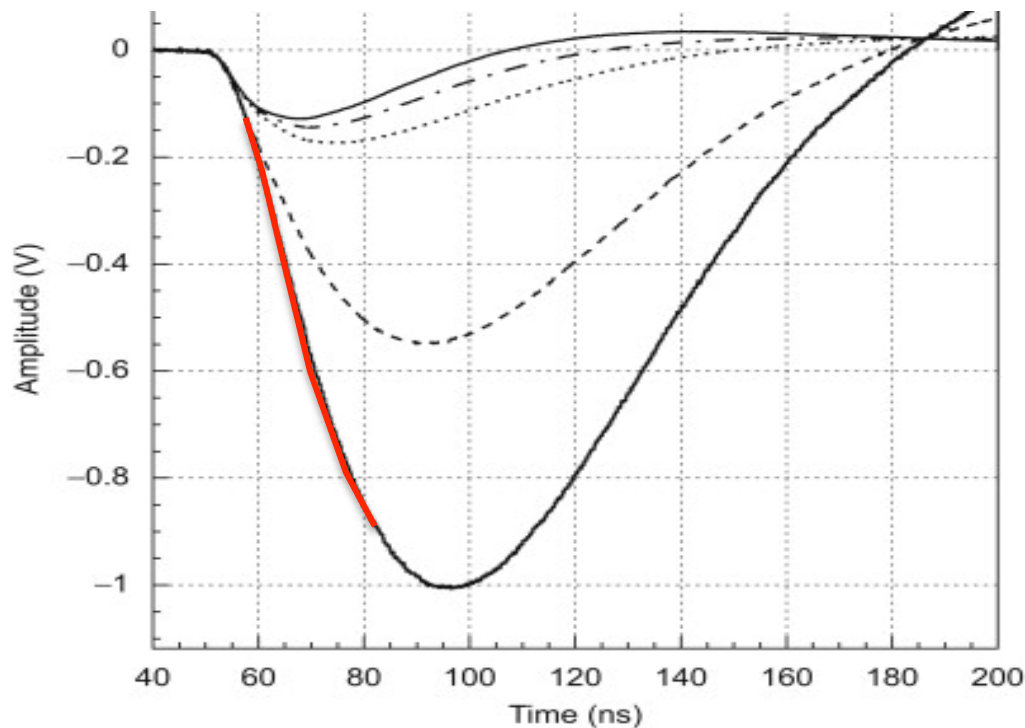
$$\varepsilon_{\text{abs}} = \frac{\text{Part. Detectadas}}{\text{Part. que salen de la fuente}} = \varepsilon_{\text{intr}} f_{\text{geom}}$$

- La eficiencia de los centelleadores es en general mucho mayor que la de los detectores de semiconductor y los detectores gaseosos.

Características Temporales

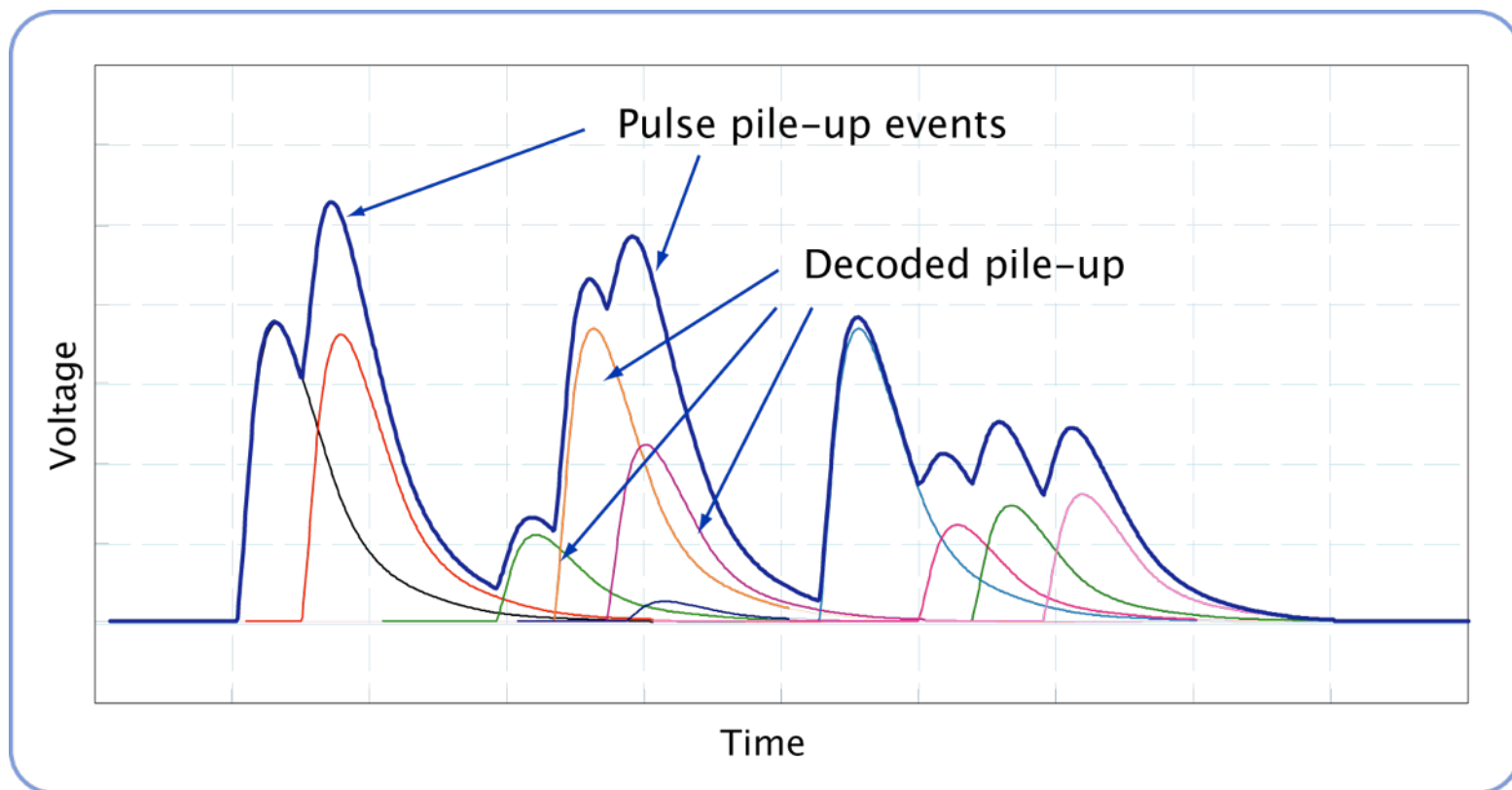
- *Tiempo de respuesta*: tiempo que le lleva al detector formar la señal eléctrica desde que le llega la radiación.
- Para un buen '*timing*' la señal debe formarse rápido, con un flanco de subida tan vertical como sea posible.
- *Pile-up*: una segunda señal se forma sobre la que se estaba formando previamente (se suman, pero no confundir con '*summing*'). Para evitarlo la duración de la señal debe ser lo más corta posible.

Características Temporales



Rise time: Tiempo que transcurre entre el 10% y el 90% del máximo de la señal

Características Temporales



Características Temporales

- *Tiempo muerto*: tiempo que le lleva al sistema de detección (detector+adquisición de datos) procesar por completo un evento y estar dispuesto a aceptar el siguiente. Suele expresarse en % (proporción de eventos perdidos respecto del total) y depende del ‘*counting rate*’.

