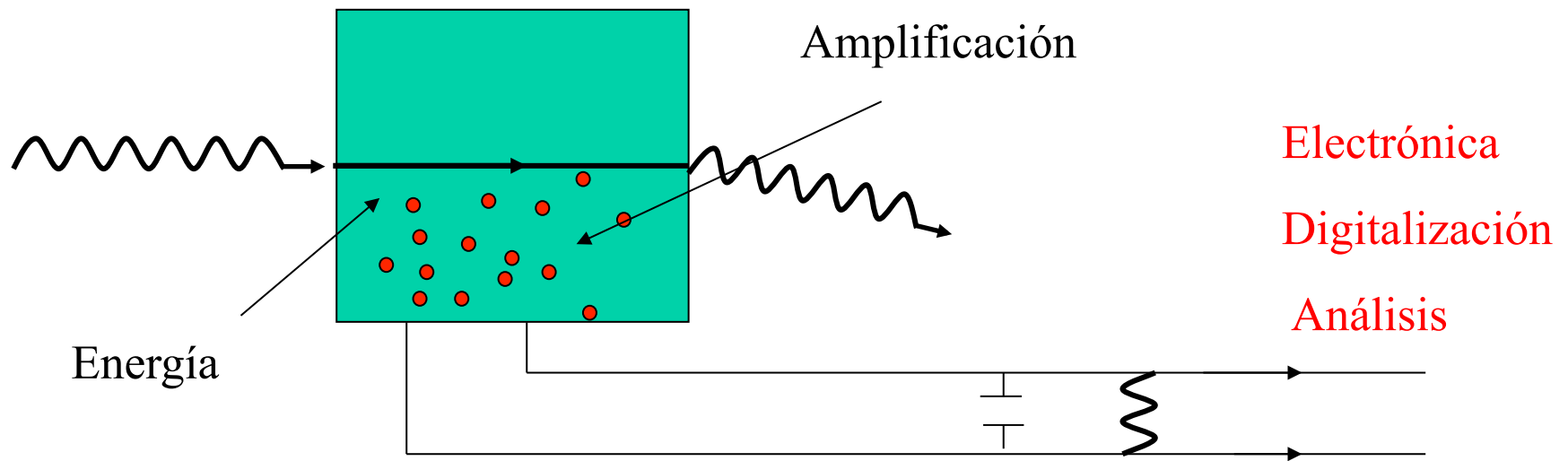
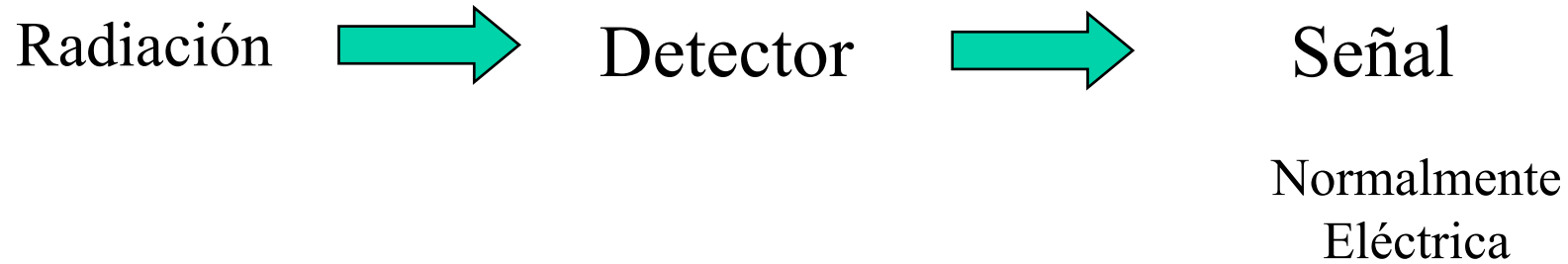


Detectores de Partículas

Física de Astropartículas
Master de Física Fundamental

Juan Abel Barrio, Curso 11/12
Universidad Complutense de Madrid

Detección de radiación



© Fernando Arqueros, Jose Luis Contreras, Juan Abel Barrio

Detectores de partículas

- Propiedades generales (1.5 h)
- Técnicas de Montecarlo (0.5 h)
- Detectores de radiaciones ionizantes (2 h)
 - Cámaras de ionización
 - Detectores de centelleo
 - Detectores de estado sólido
- Fotosensores (1 h)
 - Fotomultiplicadores
 - Detectores de estado sólido
- Técnicas de detección (1 h)
 - Espectroscopía con centelleadores
 - Detectores de trazas
 - Calorímetros
 - Detectores combinados (LHC)

Detectores de partículas

- **Propiedades generales (1.5 h)**
- Técnicas de Montecarlo (0.5 h)
- Detectores de radiaciones ionizantes (2 h)
 - Cámaras de ionización
 - Detectores de centelleo
 - Detectores de estado sólido
- Fodosensores (1 h)
 - Fotomultiplicadores
 - Detectores de estado sólido
- Técnicas de detección (1 h)
 - Espectroscopía con centelleadores
 - Detectores de trazas
 - Calorímetros
 - Detectores combinados (LHC)

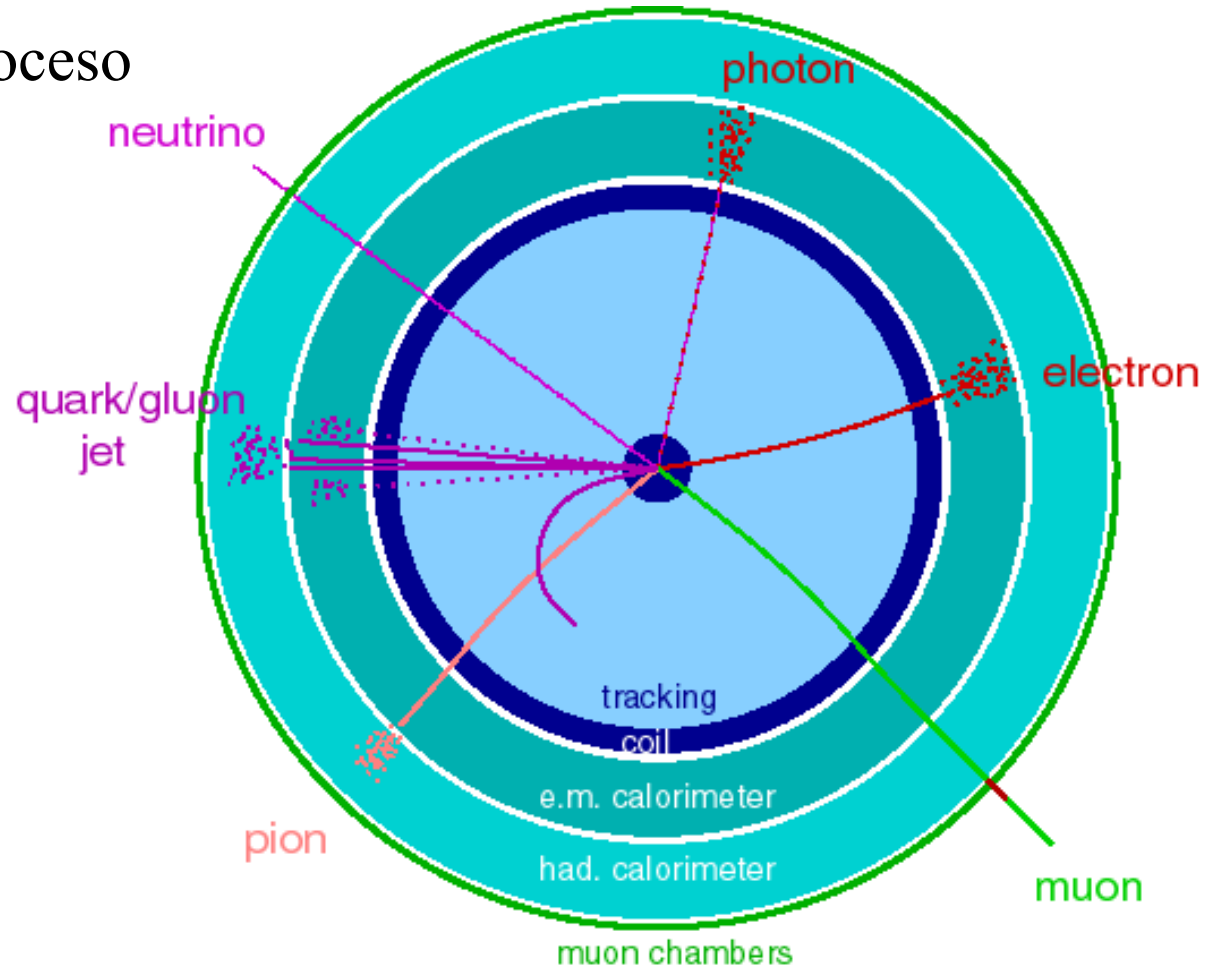
Índice



- Sensibilidad.
- Respuesta a partículas:
 - Modos de operación
 - Instrumentación
- Respuesta en energía: Resolución.
- Eficiencia
- Respuesta temporal: Tiempo muerto.

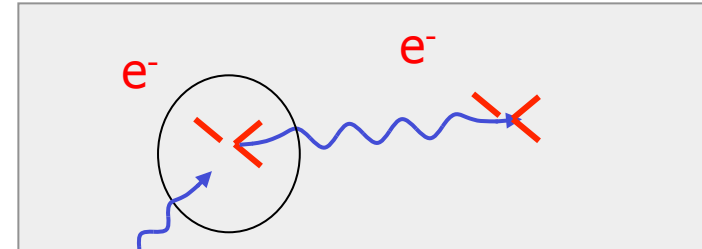
Sensibilidad

- Sección eficaz del proceso (s) de detección.
- Tamaño
- Tipo partícula
 - Cargadas
 - Neutras
 - Neutrinos
- Ruido



Respuesta a partículas

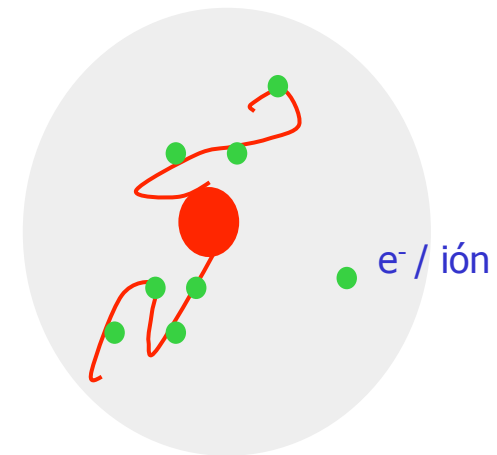
- Medio de interacción { sólido
líquido
gas



Q: Cada partícula individual (α , e^- , γ) libera pares de portadores de carga (e^- , ión, hueco, ...)

t_i : tiempo de interacción es muy breve
ns (gases), ps (líquidos y sólidos) →

t_c : tiempo de colección de carga breve (ns – μ s) →



→ **detección de partículas individuales**

- Medida de la carga liberada

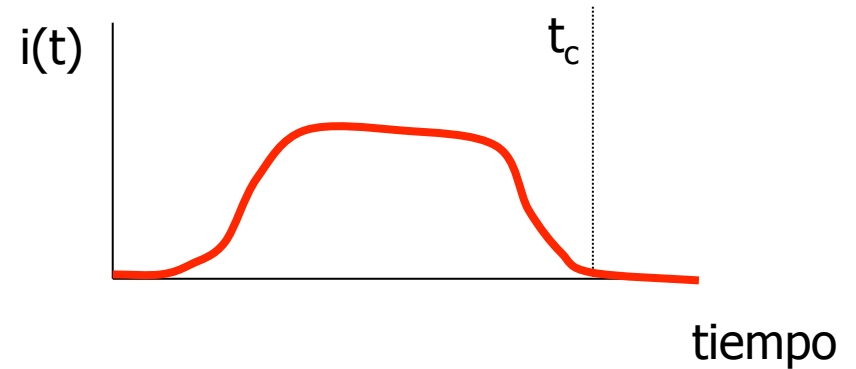
directa / amplificada

luz de centelleo → carga

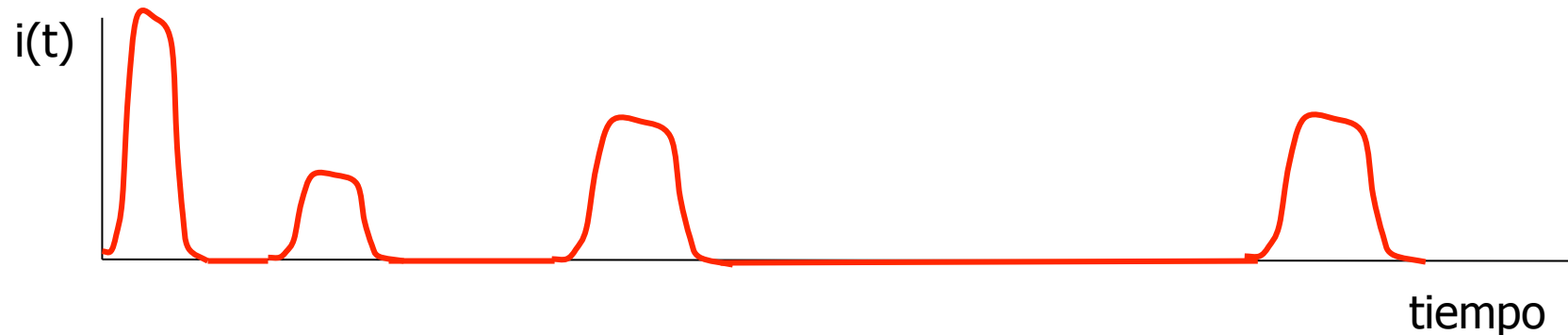
Respuesta a partículas

Respuesta a una partícula individual

$$Q = \int_0^{t_c} i(t) dt \propto E$$



Respuesta a una sucesión de partículas



Tren de impulsos eléctricos individuales
→ detección de partículas individuales

Índice



- Sensibilidad.
- Respuesta a partículas:
 - Modos de operación
 - Instrumentación
- Respuesta en energía: Resolución.
- Eficiencia
- Respuesta temporal: Tiempo muerto.

Modos de operación

Corriente (eléctrica): Medida del “flujo” de partículas

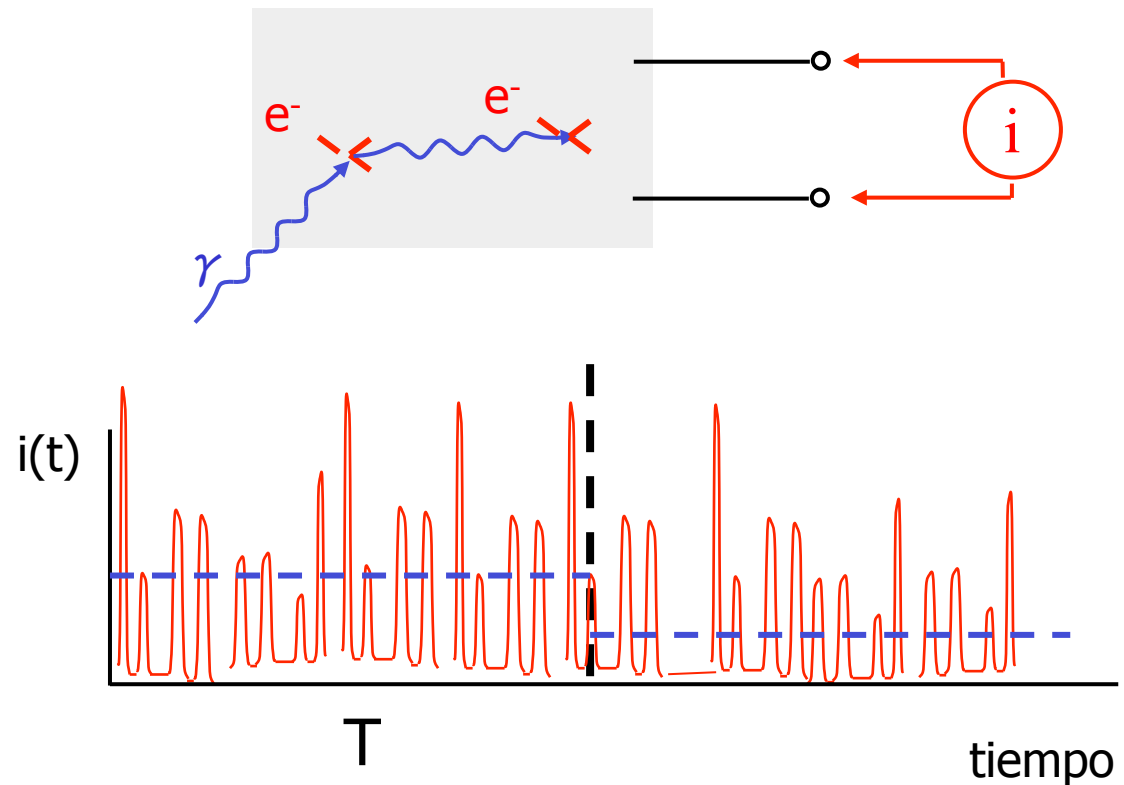
$$T \gg t_c$$



$$I(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i(t') dt'$$

Promedia las fluctuaciones
en un intervalo de tiempo
 T = tiempo de respuesta del
detector

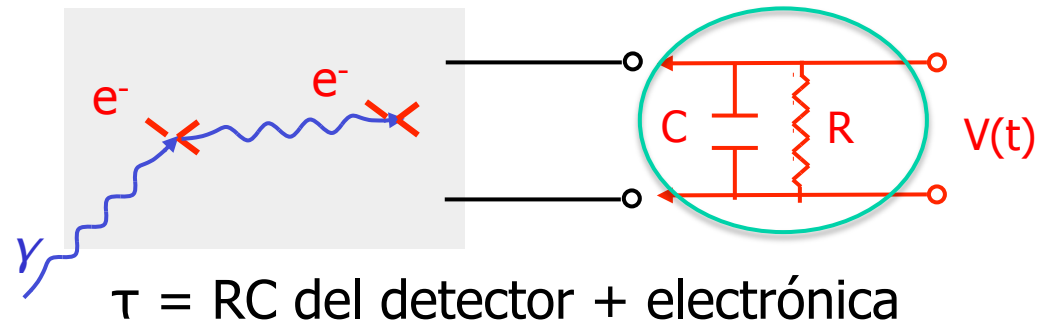
Aplicación: Dosimetría



Modos de operación

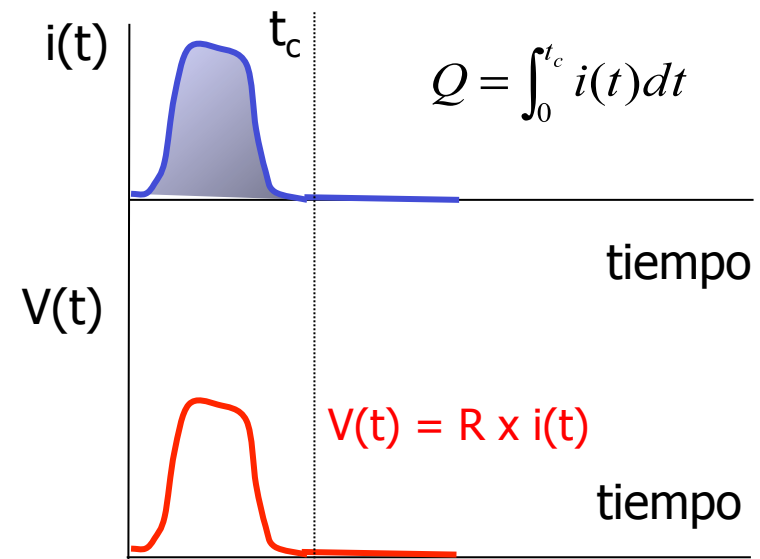
Impulso (Tensión): Detección de partículas individuales

Caso a): $RC \ll t_c$



Aplicación:

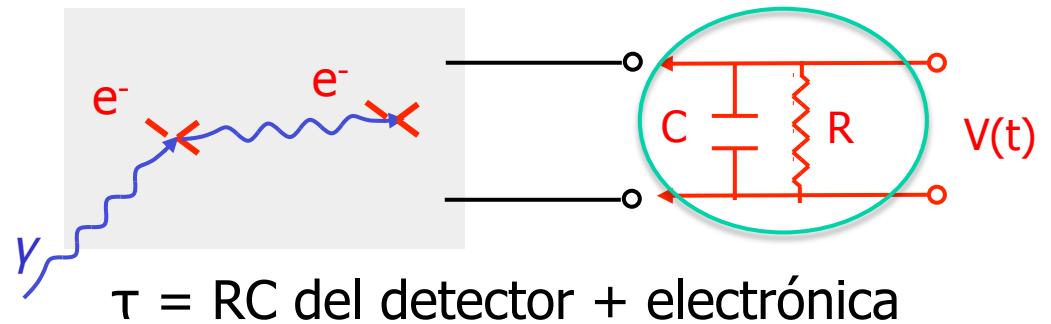
- Medida de tiempos
- Medida con fondo reducido



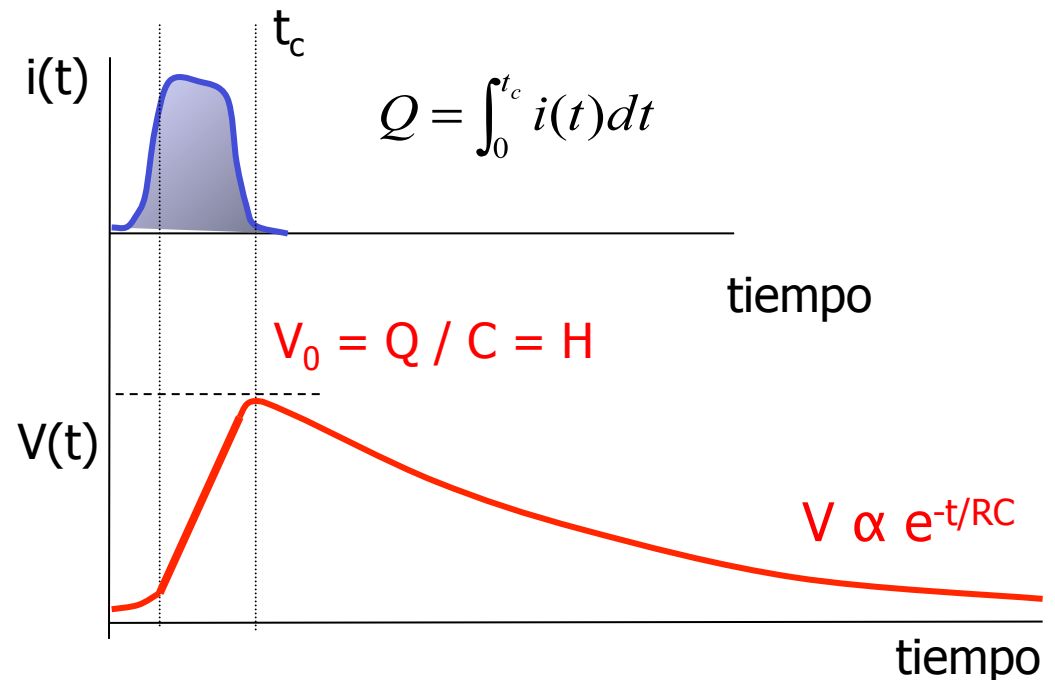
Modos de operación

Impulso (Tensión): Detección de partículas individuales

Caso b): $RC \gg t_c$



Aplicación:
-Espectros de energía



Modos de operación

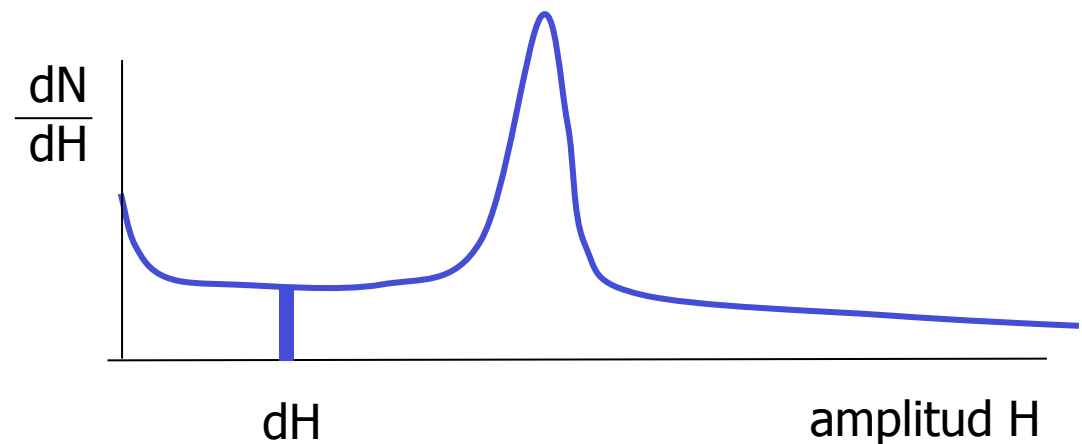
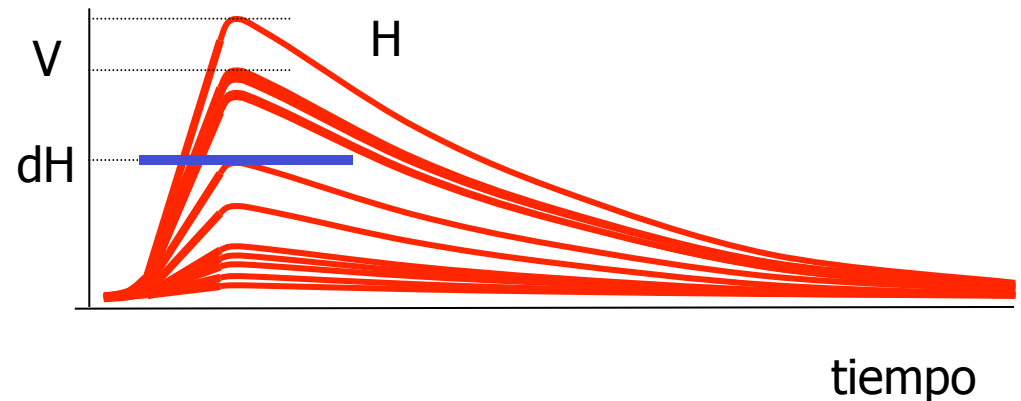
Impulso (Tensión): Detección de partículas individuales

Caso b): $RC \gg t_c$

espectro de amplitudes
= espectro de energía

N_0 = número total
de impulsos

$$N_0 = \int_0^{\infty} \frac{dN}{dH} dH$$

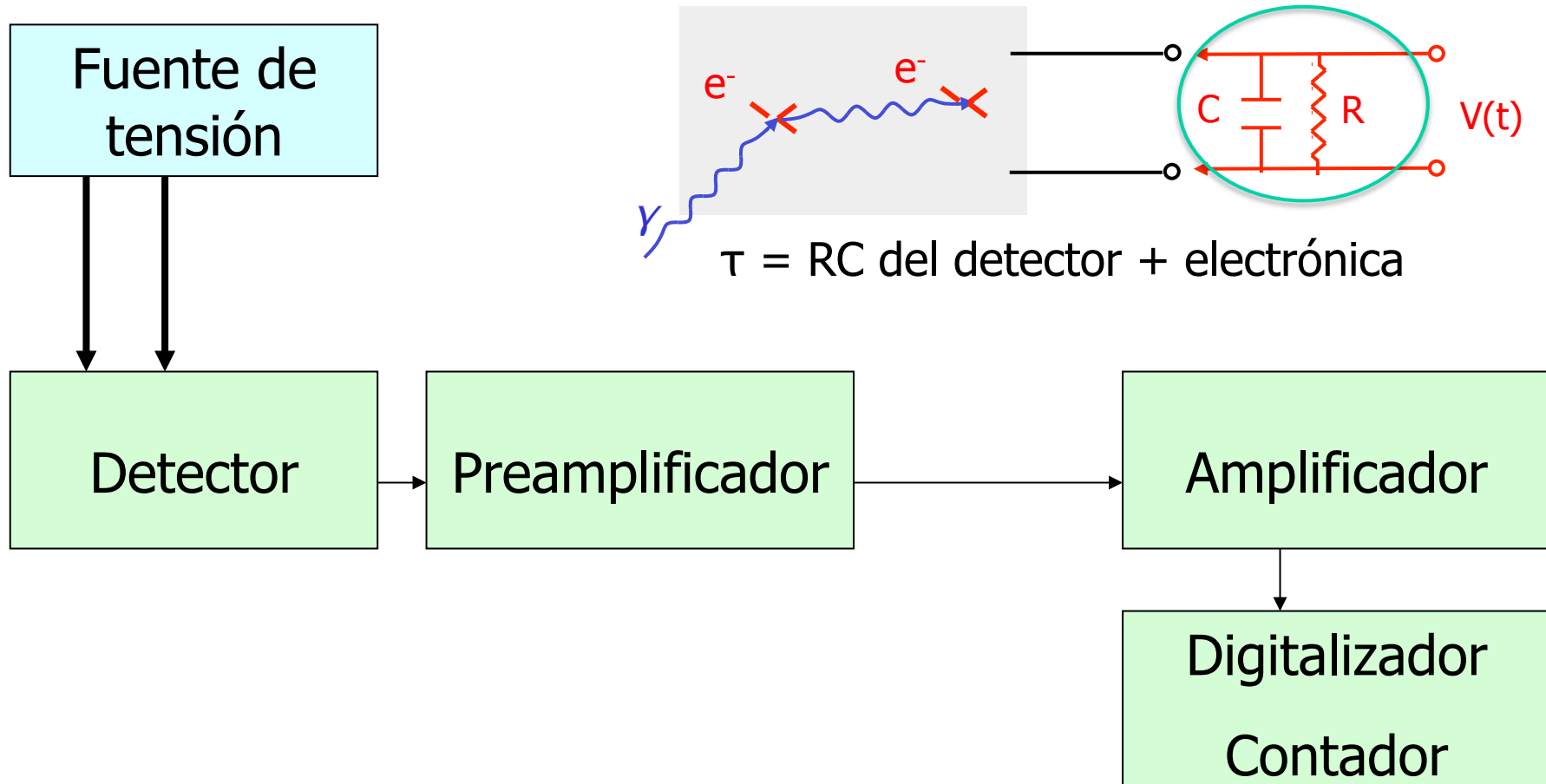


Índice



- Sensibilidad.
- Respuesta a partículas:
 - Modos de operación
 - Instrumentación
- Respuesta en energía: Resolución.
- Eficiencia
- Respuesta temporal: Tiempo muerto.

Instrumentación



Instrumentación

Detector	Señal (V)	Duración (μs)
NaI	$10^{-1} - 1$	0.25
Cent. Liq.	$10^{-2} - 10^{-1}$	10^{-2}
Cent. Plast	10^{-1}	10^{-2}
Semicond.	$10^{-4} - 10^{-3}$	$10^{-1} - 1$
Gas proporc.	$10^{-3} - 10^{-2}$	$10^{-1} - 1$
Geiger	1 - 10	50 - 300

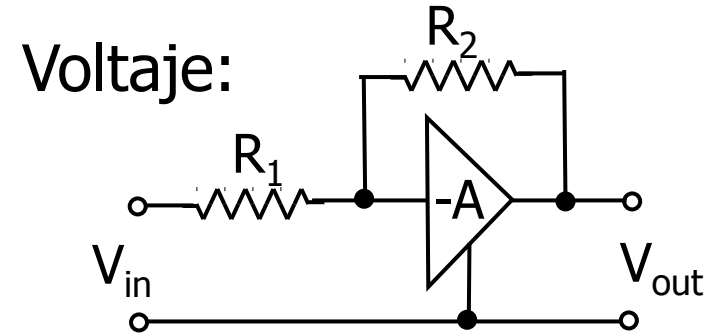
Instrumentación

Preamplificador

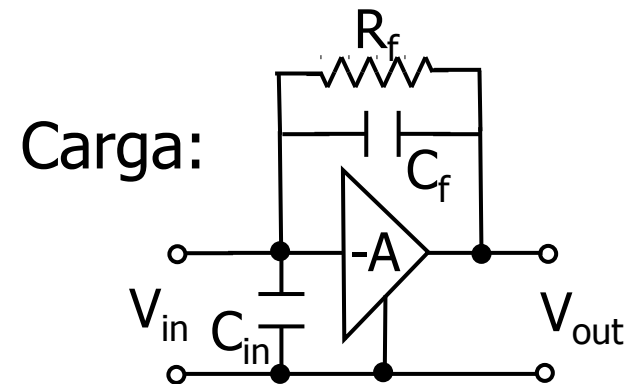
Funciones

- Amplificar la señal
- Acoplar impedancias
- Dar forma a la señal

Tipos



$$V_{out,0} \approx -\frac{R_2}{R_1} V_{in,0}$$



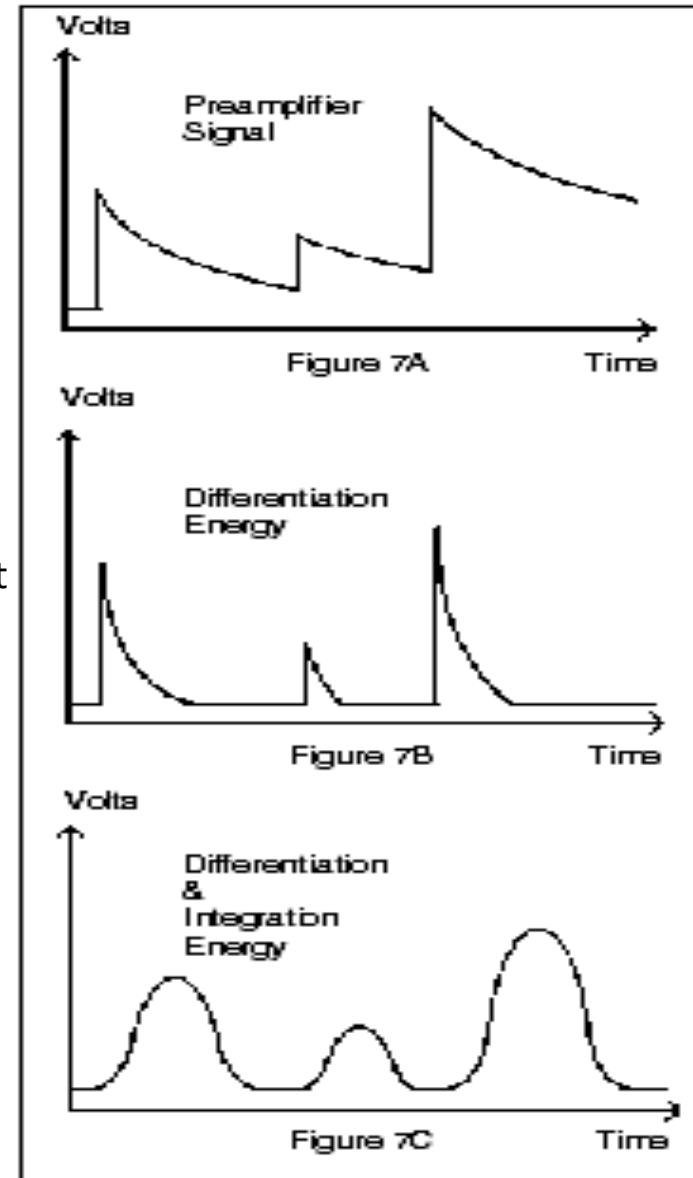
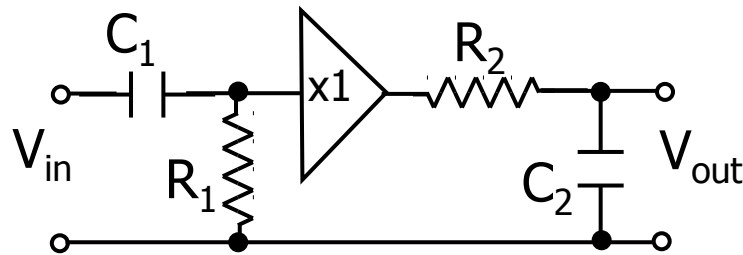
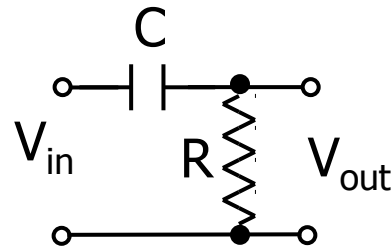
$$V_{out,0} \approx \frac{Q}{C_f}; \quad V_{out} \approx V_{out,0} e^{-t/R_f C_f}$$

Instrumentación

Amplificador

Funciones

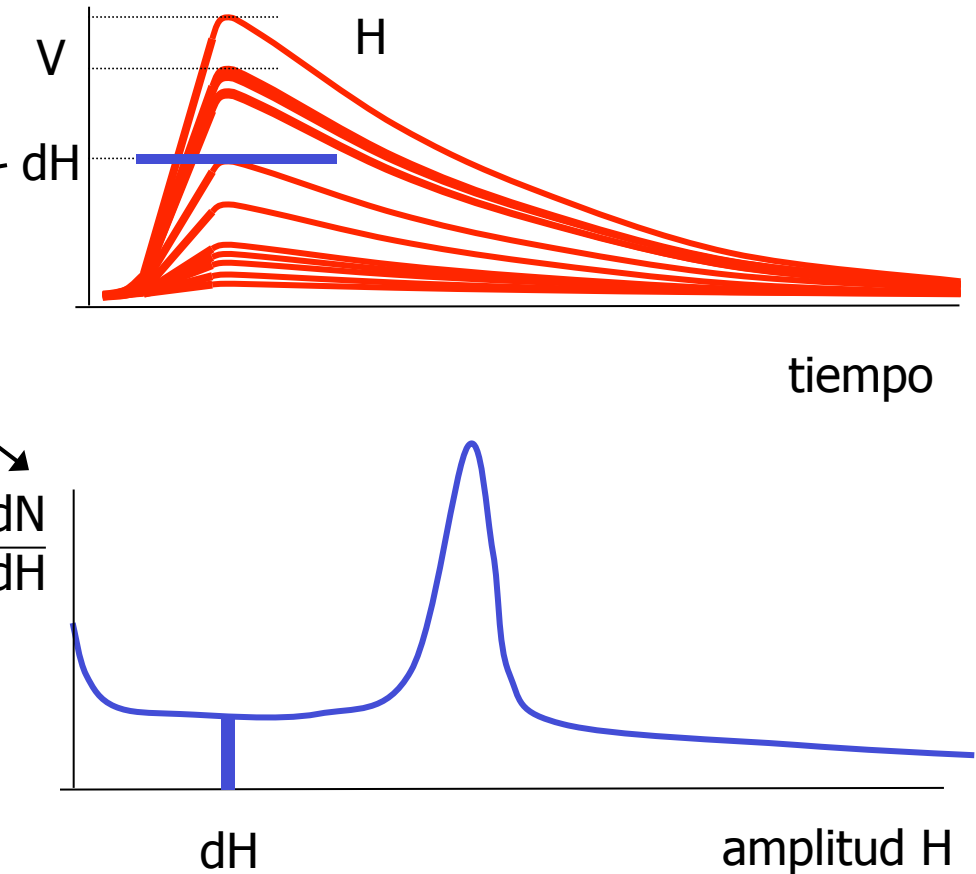
- Amplificar la señal
- *Mejorar* los pulsos



Instrumentación

Otros módulos

- Single Channel Analyzer
- Multi Channel Analyzer
- Time Amplitude Converter
- Unidad de Coincidencias



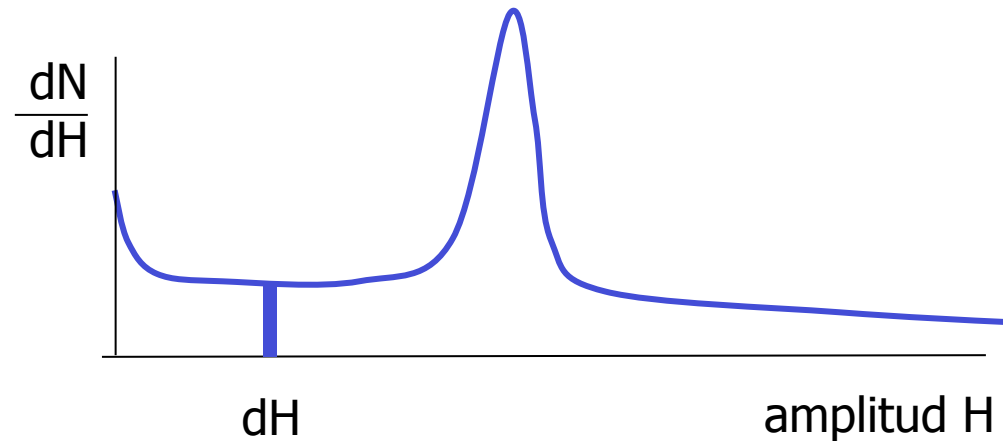
Índice



- Sensibilidad.
- Respuesta a partículas:
 - Modos de operación
 - Instrumentación
- Respuesta en energía: Resolución.
- Eficiencia
- Respuesta temporal: Tiempo muerto.

Respuesta en energía

- Importante para detectores que miden energía
- Relación entre la energía de la partícula y la señal de salida (tamaño del pulso).
- Linealidad



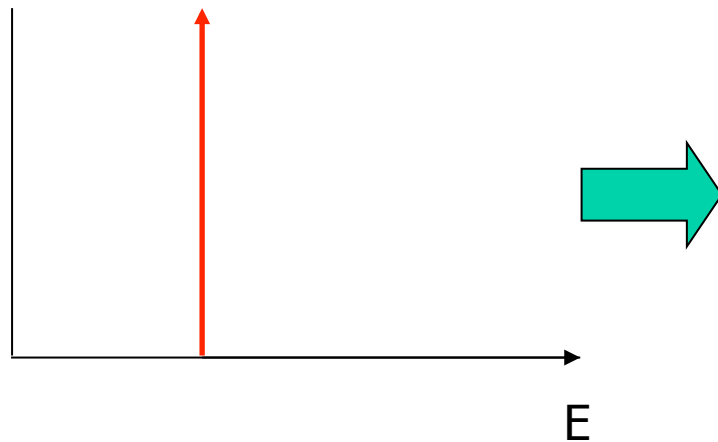
$$F(H) = \int S(E) R(H, E) dE$$

Distribución amplitudes \nearrow Señal \nearrow Respuesta del detector \nwarrow

Respuesta en energía

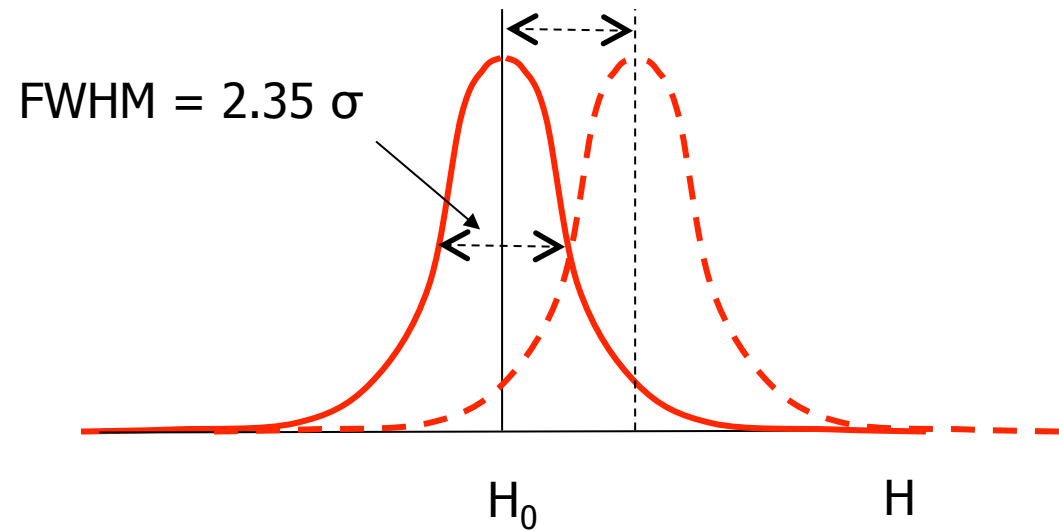
Resolución en energía

Si un haz mono-energético incide
Sobre un detector



Anchura a media altura

$$FWHM = \sqrt{\sum (\text{diver. contrib.})^2}$$



$$\text{Resolución: } R = \frac{FWHM}{H_0}$$

R se expresa habitualmente en %

Respuesta en energía

Resolución en energía

Normalmente la partícula cede su energía al detector en muchas interacciones semejantes (ionización...), de carácter Poissoniano

E = Energía total depositada

w = Energía suceso elemental

$$N = \frac{E}{w} \quad \text{Número de procesos elementales}$$

$$\text{Poisson: } \Delta N = \sqrt{N} \Rightarrow R \approx 2.35 \frac{\Delta N}{N} = 2.35 \sqrt{\frac{1}{N}} = 2.35 \sqrt{\frac{w}{E}}$$

$$\text{No - Poisson: } \Delta N = \sqrt{F N} \Rightarrow R \approx 2.35 \sqrt{\frac{F}{N}}; \quad F \leq 1$$

Factor de Fano

Índice



- Sensibilidad.
- Respuesta a partículas:
 - Modos de operación
 - Instrumentación
- Respuesta en energía: Resolución.
- **Eficiencia**
- Respuesta temporal: Tiempo muerto.

Eficiencia de detección

- No todas las partículas interactúan con el detector y son medidas.

$$\epsilon_{tot} = \frac{\text{Num. partículas observadas}}{\text{Num. partículas emitidas por la fuente}} = \frac{N_o}{N_e}$$

$$N_e = \frac{N_o}{\epsilon_{tot}}$$

- Se puede desglosar en varias componentes.

- Geométrica

- Intrínseca.

- En ventana de energía.

- En la fuente. (Absorción y dispersión).

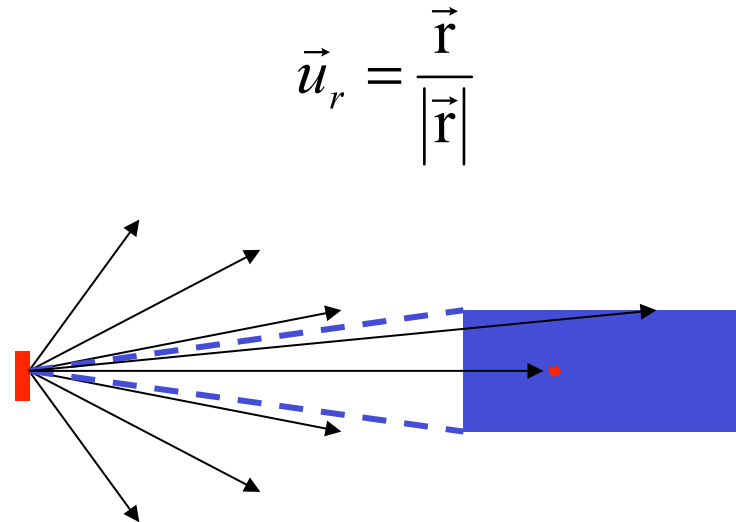
$$\epsilon_{tot} \approx \epsilon_{geo} \times \epsilon_{int} \times \epsilon_{ener} \times \dots$$

Eficiencia de detección

Eficiencia geométrica

$$\epsilon_{geo} = \frac{\text{Partículas que atraviesan el detector}}{\text{Partículas emitidas por la fuente}}$$

$$\epsilon_{geo} \approx \frac{A}{4\pi r^2}$$



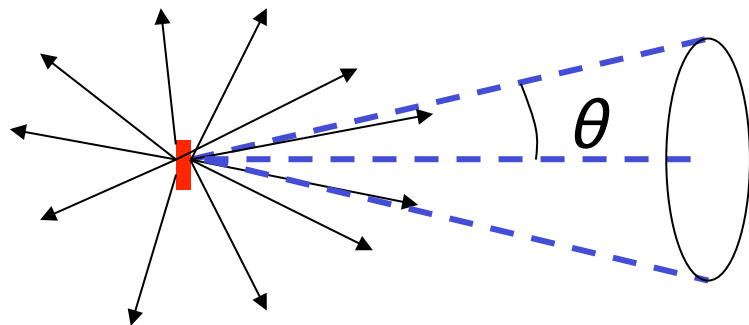
Eficiencia de detección

Eficiencia geométrica

– En general:

$$\varepsilon_{geo} \approx \frac{1}{4\pi} \Omega_{det} \quad \Omega_{det} = \int_{det} \frac{1}{r^2} \vec{u}_r \cdot d\vec{s} \quad \vec{u}_r = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

– Para un área circular, no muy lejos:



$$\varepsilon_{geo} \approx \frac{1}{2} (1 - \cos \theta)$$

Eficiencia de detección

Eficiencia intrínseca

$$\epsilon_{\text{int}} = \frac{\text{Partículas que interaccionan en el detector}}{\text{Partículas que atraviesan el detector}}$$

Para un detector de γ

$$\epsilon_{\text{int}} = 1 - e^{-\mu_l(E)x}$$

Probabilidad de interacción:

$$\mu_l(E)$$

Depende mucho de E

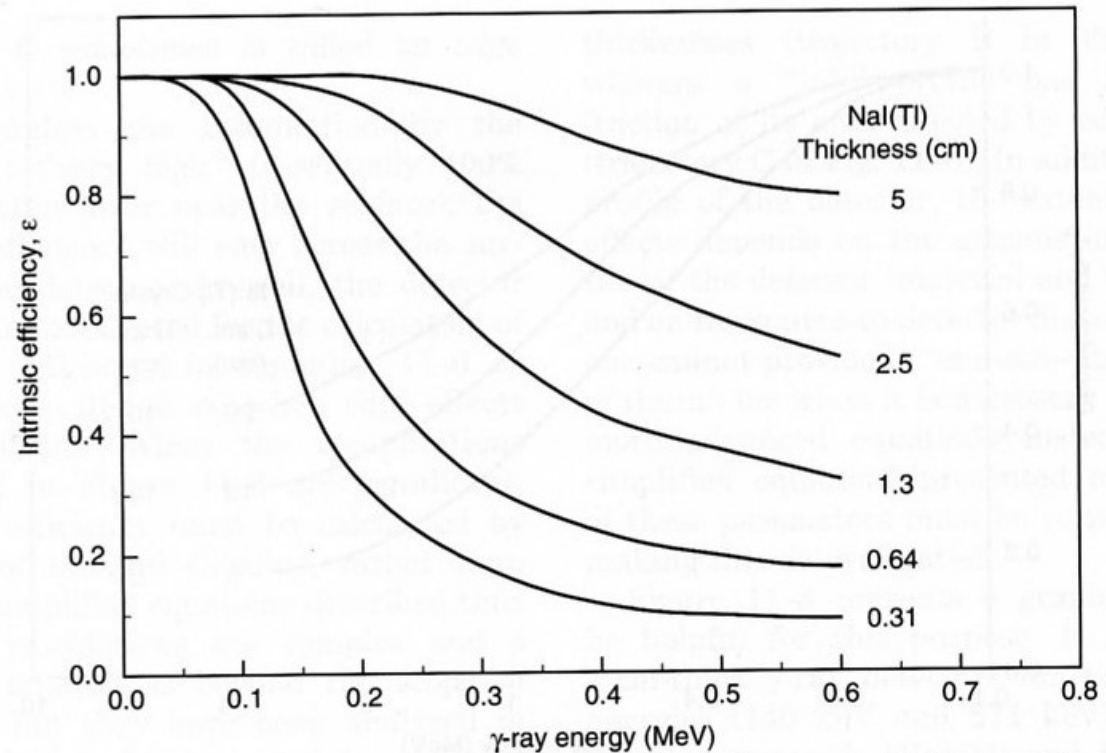


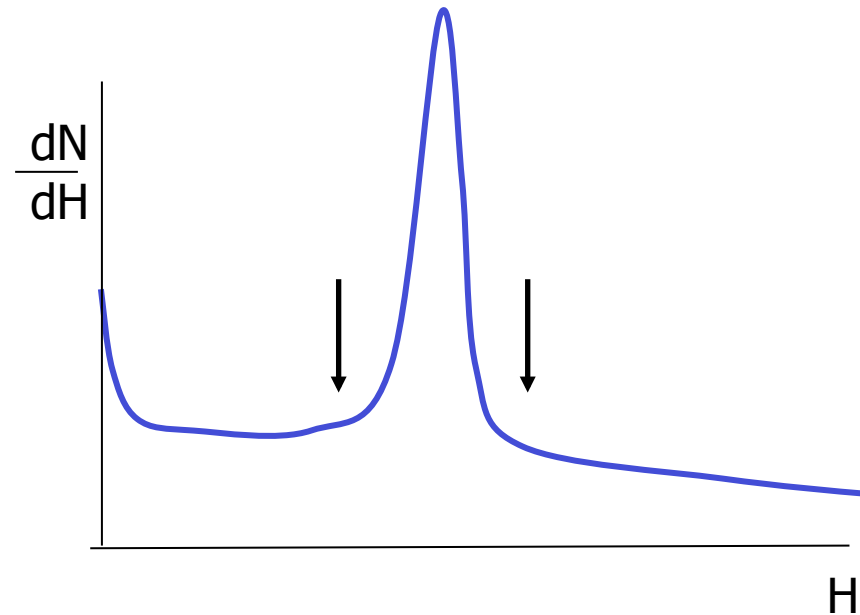
Figure 11-4. Intrinsic efficiency versus γ -ray energy for NaI(Tl) detectors of different thicknesses.

Eficiencia de detección

Eficiencia en ventana de energía (de pico)

$$\epsilon_{pico} = \frac{\text{N. part. en rango energías seleccionado}}{\text{N. part observadas}}$$

Habitual en medida de γ : ventana = pico = energía total $\rightarrow \epsilon_{pico}$



Eficiencia de detección

Complicaciones

- Detectores inhomogeneos:

$$\cancel{\varepsilon_{tot} \approx \varepsilon_{geo} \times \varepsilon_{int} \times \varepsilon_{ener} \times \dots}$$

- Radiaciones emitidas en coincidencia.
Aparecen picos extra, combinatorios.
Es necesario un análisis que lo corrija
- Atenuación y dispersión fuera del detector.
Análisis complejo. Calibración para corregir.
Ventanas de entrada finas

Eficiencia de detección

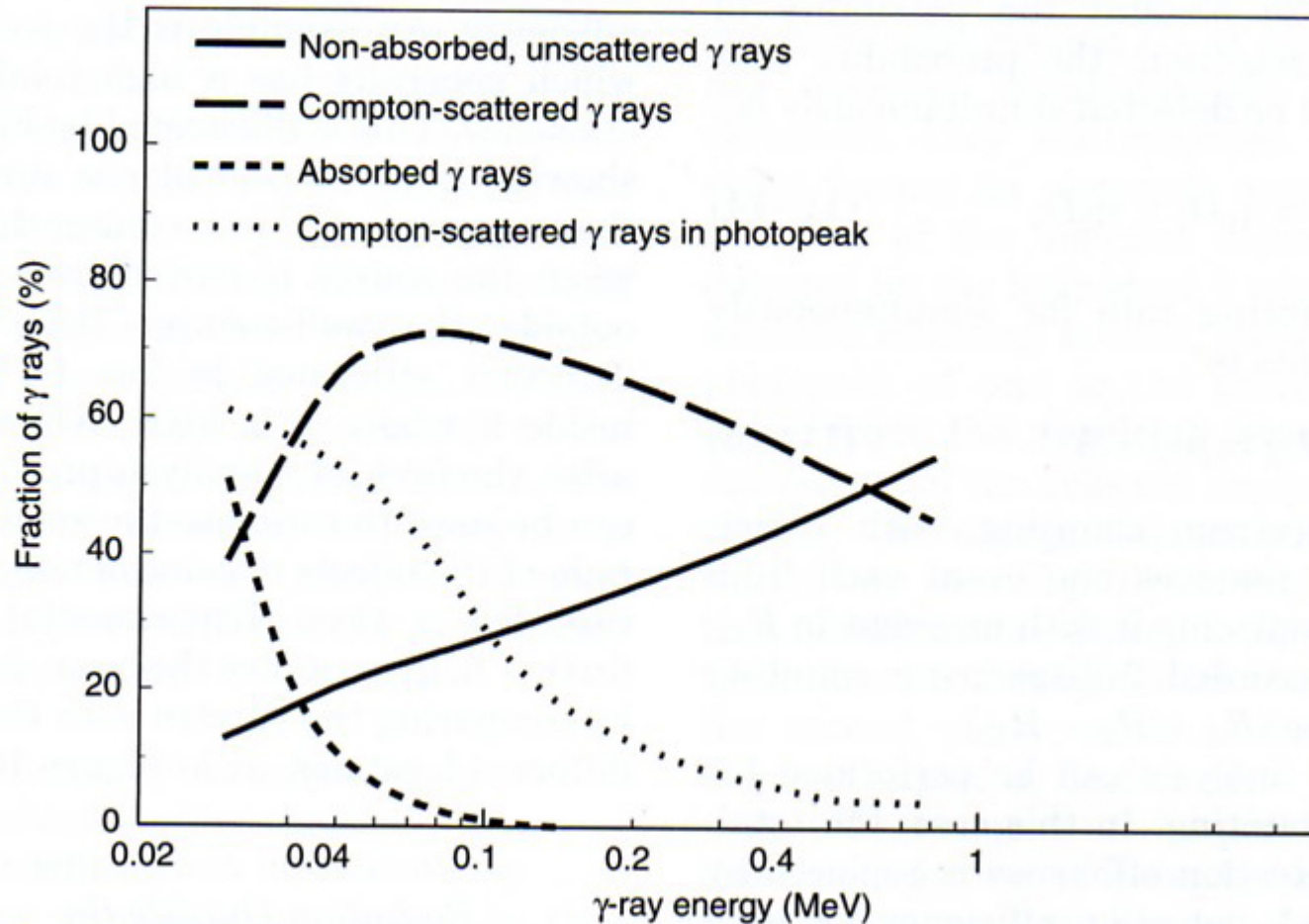


Figure 11-9. General effects of γ -ray energy on the fraction of γ rays scattered or absorbed from a point source 7.5 cm deep in tissue and on the fraction of unscattered γ rays and scattered γ rays having sufficient energy to be recorded with a photopeak window and NaI(Tl) detector. (From Anger HO: Radioisotope cameras. In Hine GJ [ed]: Instrumentation in Nuclear Medicine, Vol 1. New York, Academic Press, 1967, p 514.)

Eficiencia de detección

Fuentes de calibración

T A B L E 11-1

Properties of Some γ -Ray Sources Used as Calibration Standards

Radionuclide	Half-Life	γ -Ray or x-Ray Energy (keV)*	Emission Frequency (γ or x rays/dis)
^{22}Na	2.60 yr	511	1.798
		1274	0.999
^{54}Mn	312 d	834.8	1.000
^{57}Co	272 d	14.4	0.095
		122.1	0.856
		136.5	0.105
		1173	0.999
^{60}Co	5.27 yr	1333	1.000
		511	1.780
		514	0.980
^{68}Ge	271 d	22.0 (K_{α} x ray)	0.842
^{85}Sr	64.9 d	24.9 (K_{β} x ray)	0.178
^{109}Cd	463 d	88.0	0.037
		24.1 (K_{α} x ray)	0.794
		27.3 (K_{β} x ray)	0.172
		391.7	0.649
^{113}Sn	115 d	29.7 (K_{α} x ray)	0.571
		33.6 (K_{β} x ray)	0.132
		39.6	0.075
^{129}I	15.7×10^6 yr	32.0 (K_{α} x ray)	0.057
		36.4 (K_{β} x ray)	0.013
^{137}Cs	30 yr	661.7	0.851

*Only predominant photon emissions are listed.

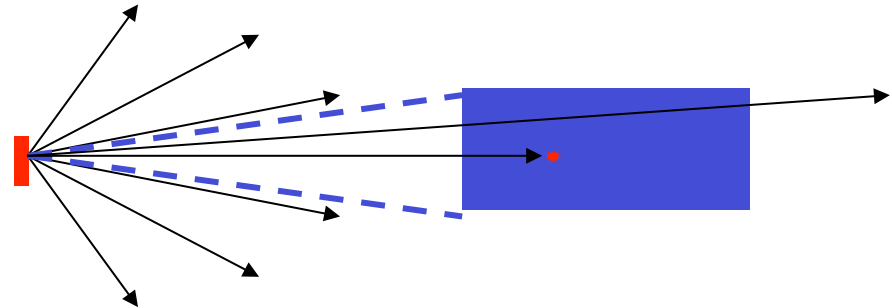
Data adapted from NCRP Report No. 58: A Handbook of Radioactivity Measurements Procedures, 2nd ed. Bethesda, MD, National Council on Radiation protection and Measurements, 1985.

Eficiencia de detección

Otros aspectos

En general podemos estimar las eficiencias usando simulaciones Monte Carlo

$$\varepsilon_{MC} = \frac{\text{Num. partículas aceptadas}}{\text{Num. partículas generadas}}$$



Incertidumbre en la eficiencia:
Distribución binomial

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)}}{\sqrt{N}}$$

Índice



- Sensibilidad.
- Respuesta a partículas:
 - Modos de operación
 - Instrumentación
- Respuesta en energía: Resolución.
- Eficiencia
- Respuesta temporal: Tiempo muerto.

Tiempo Muerto

Tiempo muerto τ = Tiempo mínimo entre dos sucesos consecutivos necesario para ser registrados como partículas diferentes.

$\tau \neq 0 \rightarrow$ Pérdidas por tiempo muerto

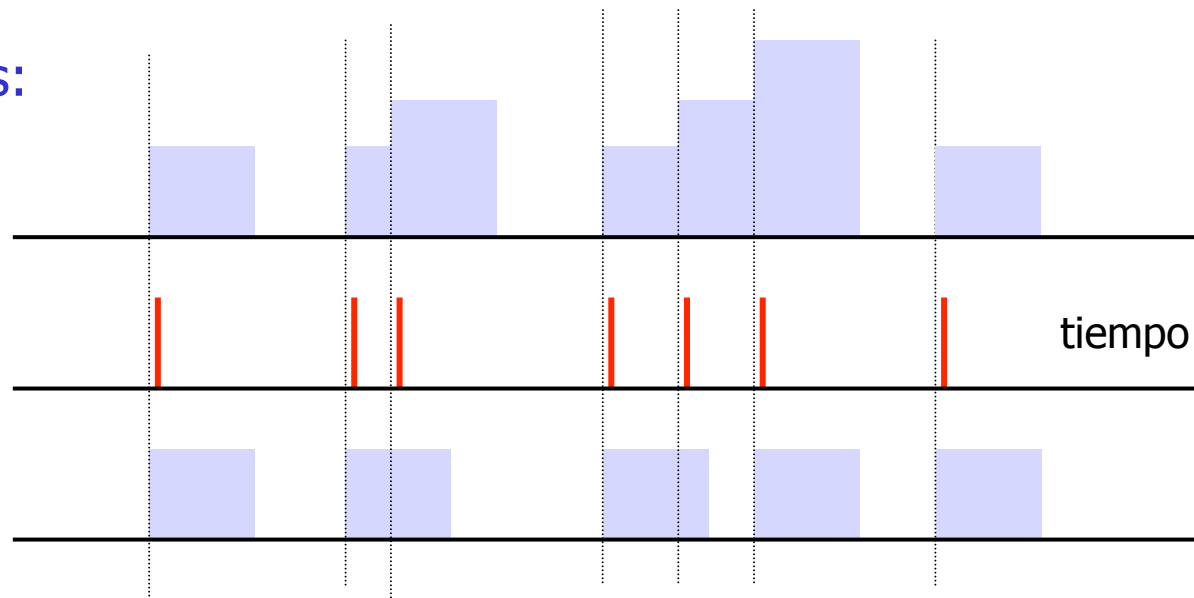
n = número verdadero de sucesos
 m = número registrado de sucesos

Dos casos:

$m = 4$

$n = 7$

$m = 5$



paralizable

no paralizable

Tiempo Muerto

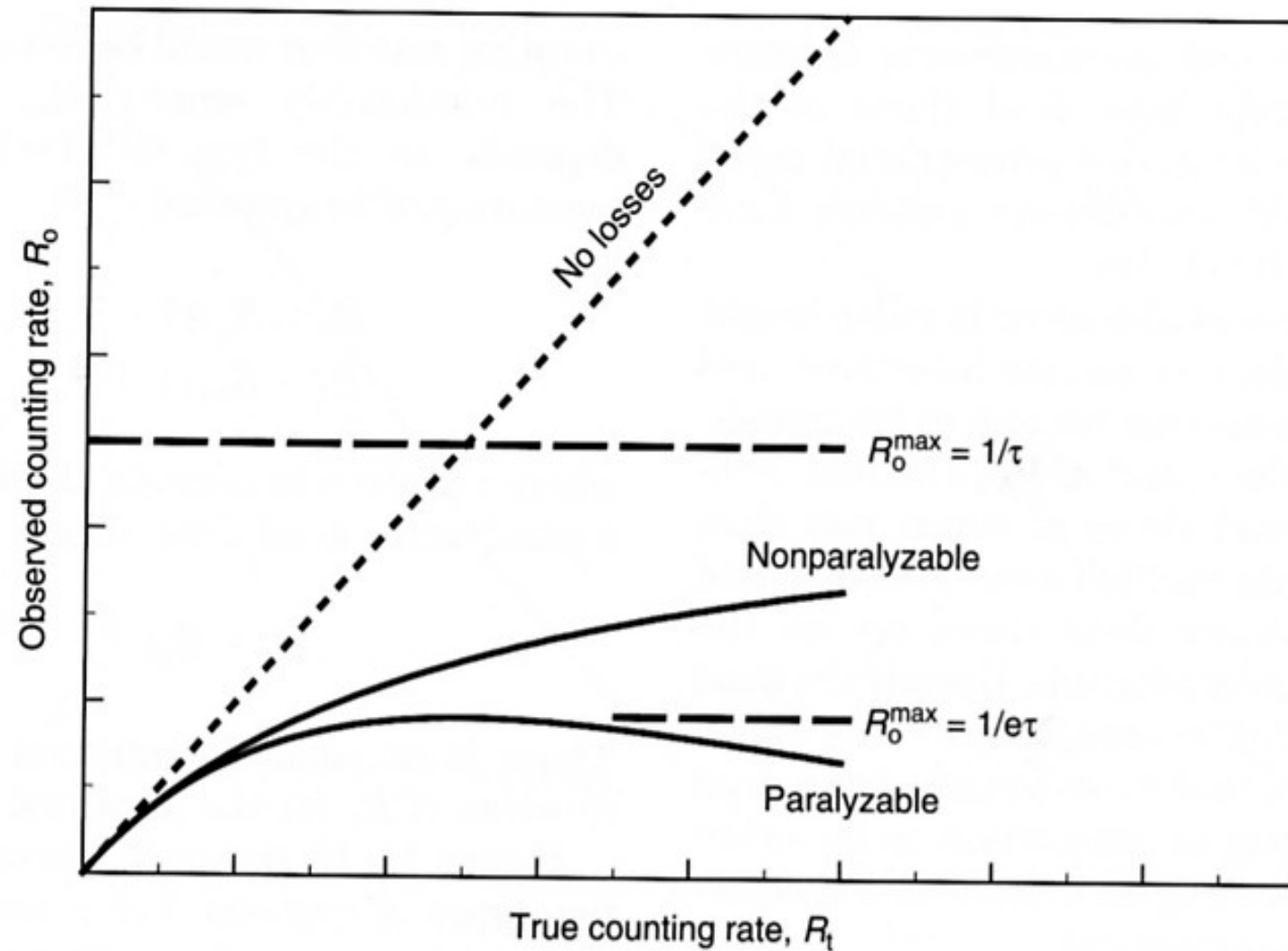


Figure 11-15. Observed (R_o) versus true (R_t) counting rate curves for paralyzable and nonparalyzable having the same dead time value, τ .

Tiempo Muerto

R_t = ritmo **verdadero** de sucesos

R_0 = ritmo **registrado** de sucesos

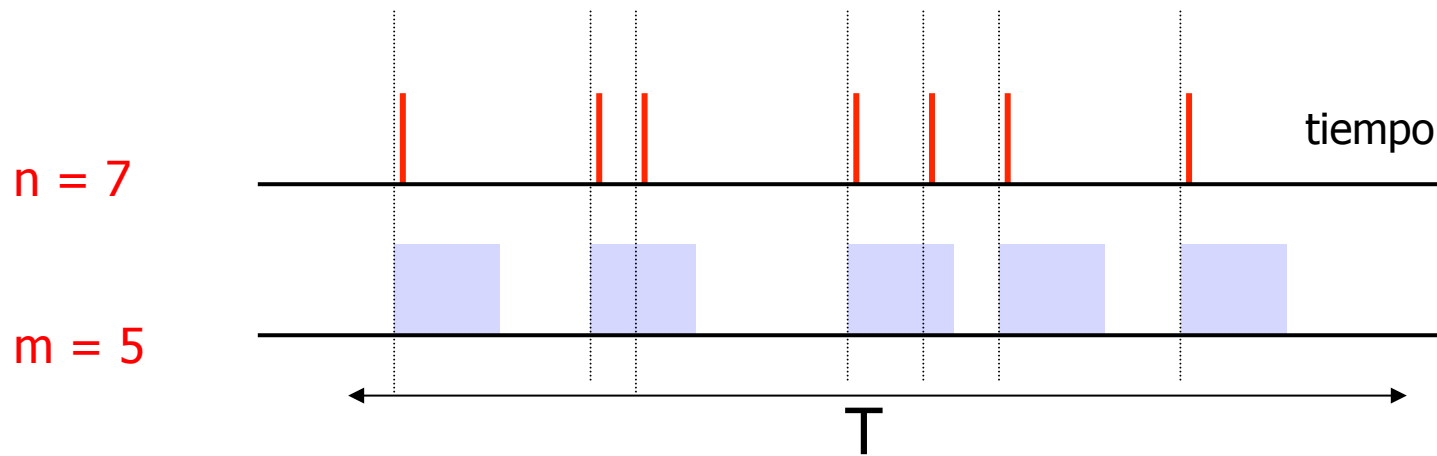
no paralizabile

$$R_t \cdot T = R_0 \cdot T + \underbrace{R_0 \cdot \tau \cdot T \cdot R_t}_{\text{Sucesos perdidos}} \quad \longrightarrow$$

Tiempo muerto total

Sucesos reales
Sucesos medidos
Sucesos perdidos

$$R_0 = \frac{R_t}{1 + R_t \tau}$$

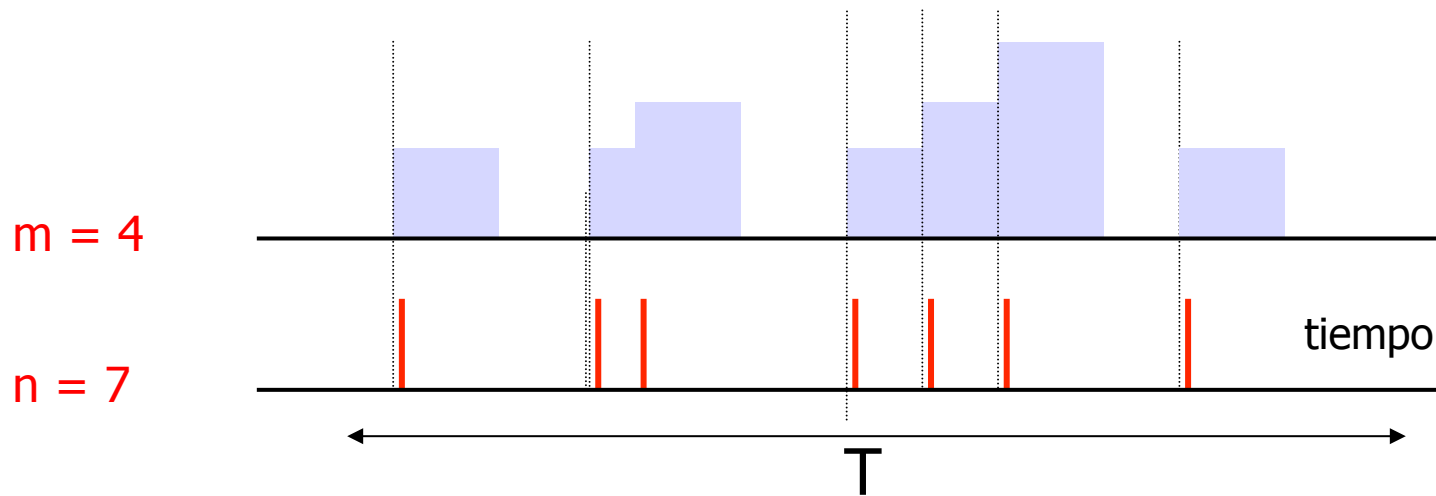


Tiempo Muerto

R_t = ritmo **verdadero** de sucesos

R_0 = ritmo **registrado** de sucesos

paralizable



$$P(t) = R_t e^{-R_t t} \quad \Rightarrow \quad P(t > \tau) = e^{-R_t \tau} \quad \Rightarrow \quad R_0 = R_t e^{-R_t \tau}$$

Derivo para hallar el máximo



Tiempo Muerto

- Aunque observemos en una ventana de energía, nos afecta el tiempo muerto total.

El tiempo muerto por suceso parece aumentar al disminuir la ventana

$$\tau_{vent} = \frac{\tau}{f_{vent}} \quad \text{con} \quad f_{vent} = \frac{\textit{Intervalo obs}}{\textit{Total}}$$

Tiempo Muerto

Medida de tiempo muerto

- Electrónico \rightarrow Con un generador de pulsos.
- Físico \rightarrow Usando dos fuentes midiendo por separado (R_1, R_2) y conjuntamente (R_{12}) :

$$\tau = f(R_1, R_2, R_{12})$$



Distinta paralizable o no paralizable

Tiempo Muerto

Medida de tiempo muerto

- Físico → Usando dos fuentes midiendo por separado (R_1 , R_2) y conjuntamente (R_{12}) :

$$\tau = f(R_1, R_2, R_{12})$$

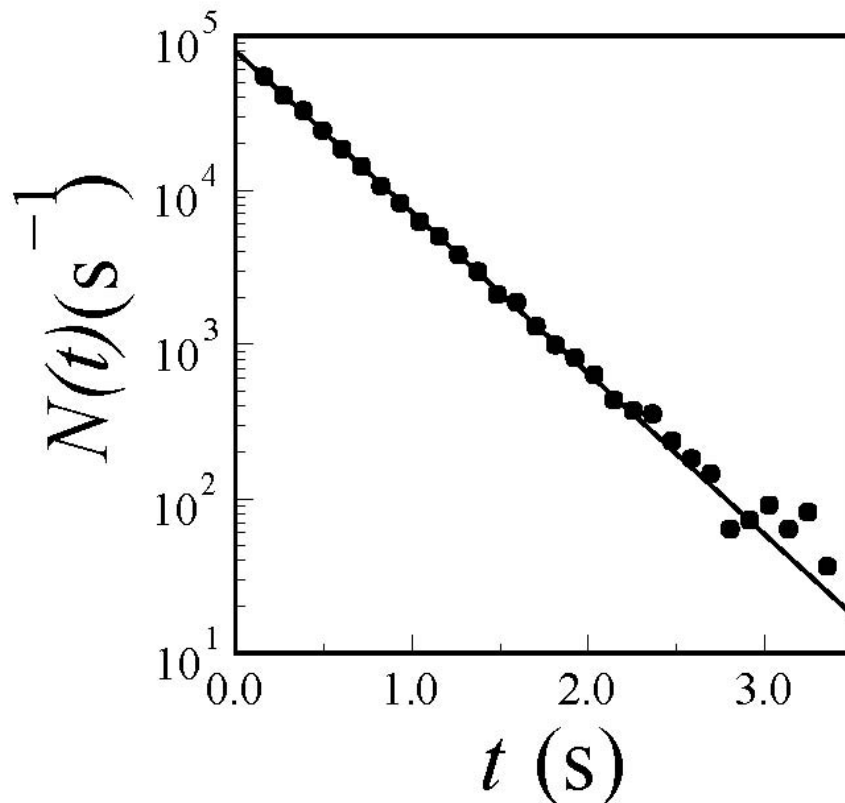


Distinta paralizable o no paralizable

Tiempo Muerto

Medida del R_t

Podemos medir R_t = ritmo **verdadero** de sucesos directamente de los datos



Representamos la separación temporal entre sucesos consecutivos

$$P(t > \tau) = e^{-R_t \tau}$$

Entonces R_t es la pendiente de la recta
En escala logarítmica.

Bibliografía

- *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*,
W.R. Leo.
- *Radiation Detection and Measurement* **G.F. Knoll.**
- *Review of Particle Physics* **<http://pdg.web.cern.ch/pdg/PDG>**
- *The Particle Detector BriefBook* **<http://rd11.web.cern.ch/RD11/rkb/titleD.htm>** **R. Bock**