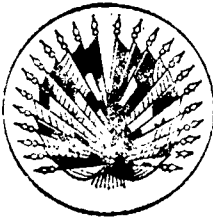
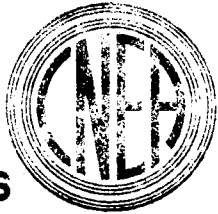


02.78.16



COMISION INTERAMERICANA DE ENERGIA NUCLEAR Y
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA DE LA REPUBLICA ARGENTINA



**CURSO LATINOAMERICANO DE INGENIERIA NUCLEAR
ORIENTADO A LA CAPACITACION BASICA PARA LA
IMPLEMENTACION DE PROGRAMAS NUCLEOELECTRICOS**

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 3	AÑO 1978

CNEA AC-56/78

RADIATIVIDAD E INTERACCION DE LA RADIACION
CON LA MATERIA

Prof.: Dr. NESTOR B. PIERONI

BUENOS AIRES - ARGENTINA

OCTUBRE - 1978

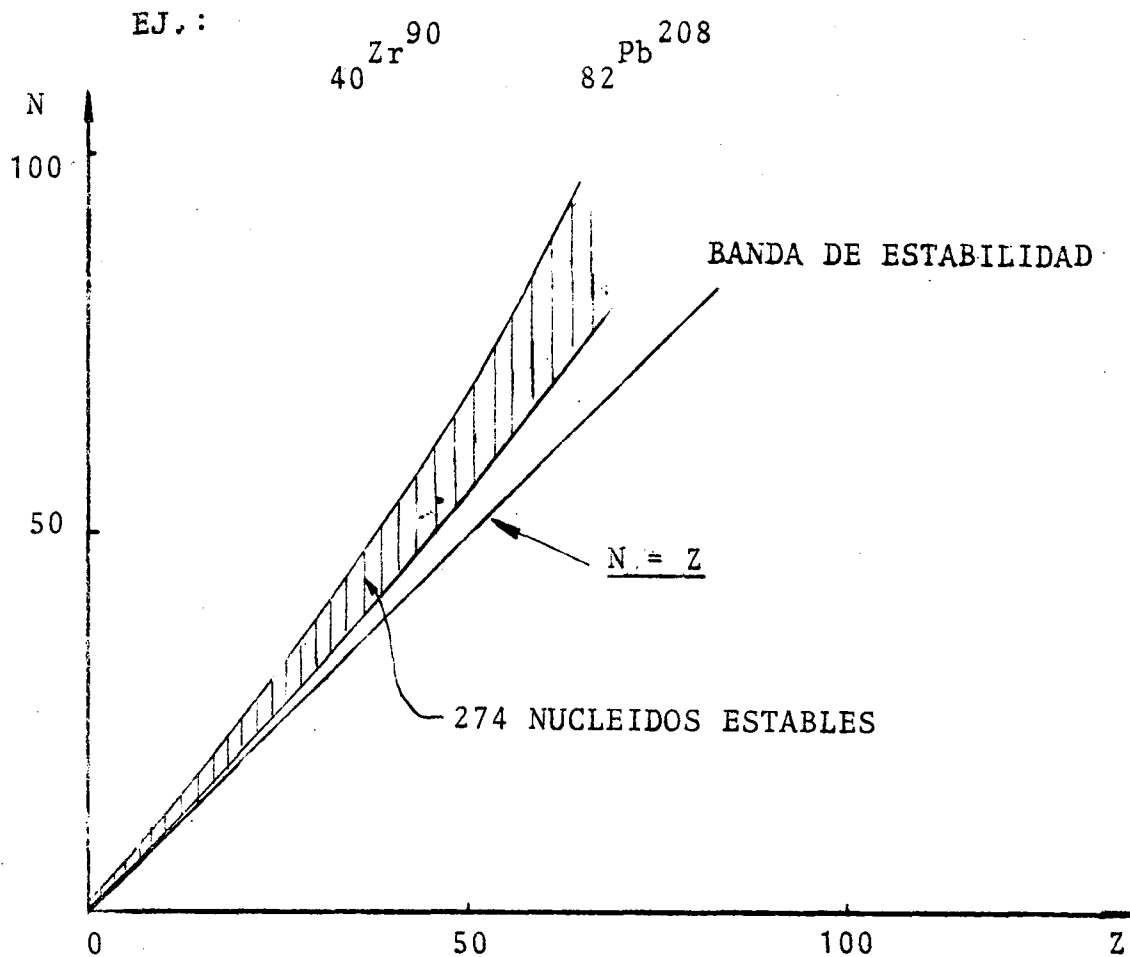
RADIOACTIVIDAD E INTERACCION DE LA

RADIACION CON LA MATERIA

SE PRESENTAN EN FORMA ESQUEMATICA LOS SIGUIENTES TEMAS DESARROLLADOS EN EL CURSO:

- 1.- RADIOACTIVIDAD
- 2.- LEYES DE DESINTEGRACION
- 3.- RADIACIONES IONIZANTES
- 4.- INTERACCION DE PARTICULAS ALFA Y BETA CON LA MATERIA
- 5.- RADIACION CERENKOV
- 6.- INTERACCION DE RAYOS GAMMA CON LA MATERIA
- 7.- EFECTO FOTOELECTRICO
- 8.- EFECTO COMPTON
- 9.- PRODUCCION DE PARES
- 10.- ATENUACION DE RAYOS GAMMA

NUCLEOS PESADOS ($A > 30$) \longrightarrow $\frac{N}{Z} > 1$

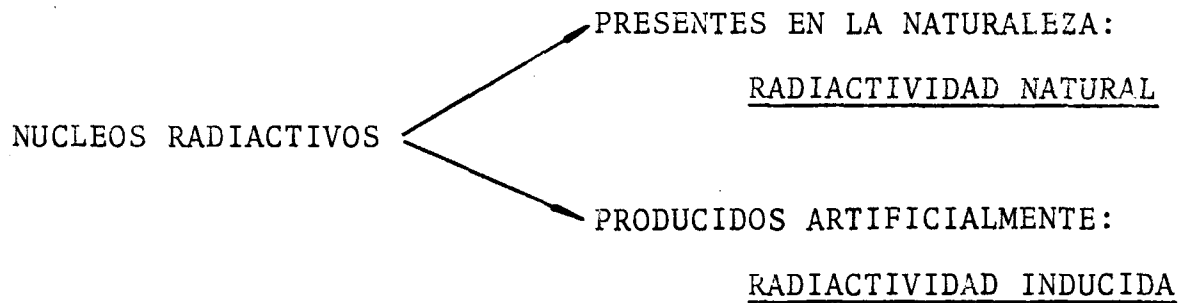


NUCLEO FUERA BANDA ESTABLE \longrightarrow NUCLEO
INESTABLE QUE TENDERA A REAJUSTARSE POR SI MISMO, MEDIANTE
DESINTEGRACION, PARA LLEGAR O APROXIMARSE A LA BANDA ESTABLE.
EVENTUALMENTE SE TRANSFORMARA EN EL NUCLEO DE OTRO
ELEMENTO.

FUERZAS NUCLEARES \longrightarrow TEORIA MESONICA:

INTERCAMBIO MESONES ENTRE p Y n

(SIMILAR CASO MOLECULA H_2)



RADIOISOTOPOS PRODUCIDOS ARTIFICIALMENTE EN REACTORES NUCLEARES PARA USO EN MEDICINA E INDUSTRIA, DE ACUERDO A:

- INTENSIDAD DE RADIACION
- VELOCIDAD DECAIMIENTO
- PROPIEDADES FISICAS (SOLUBILIDAD, ABSORCION PREFERENCIAL POR UN MATERIAL U ORGANO DEL CUERPO)

B) ¿COMO SE DESINTEGRA EL NUCLEO?

TIPOS DE DECAIMIENTO RADIATIVO

- PARTICULAS ALFA (α)
- PARTICULAS BETA (β) $\begin{cases} - \\ + \end{cases}$
- RAYOS GAMMA (γ)

1

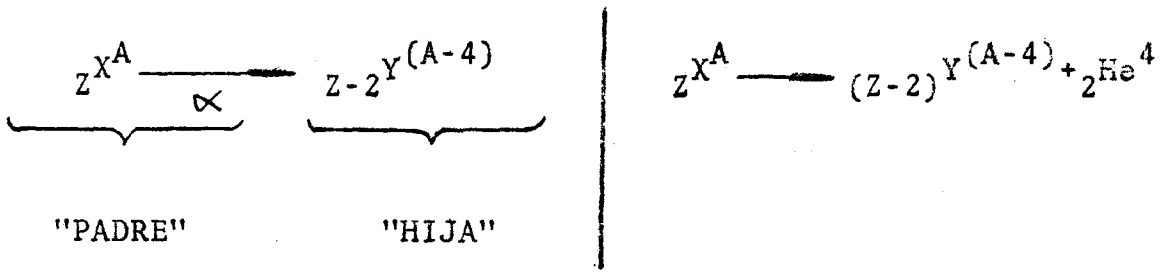
NUCLEOS DEMASIADO PESADOS (DEMASIADOS NUCLEONES)

EMISION α

$$\alpha \equiv {}_2\text{He}^4$$

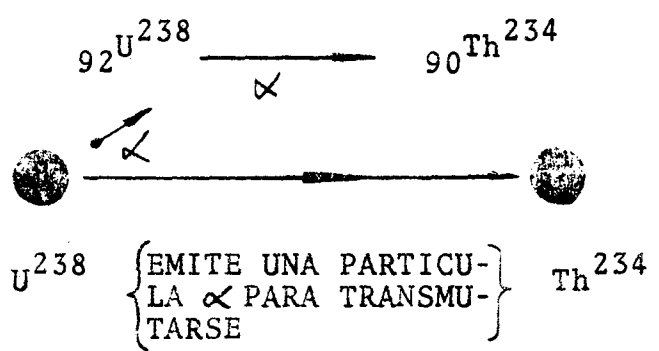
$$m_\alpha = 4 \text{ amu}$$

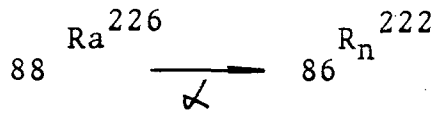
$$Q_\alpha = 2 Q_p$$



NUCLEOS RADIATIVOS PESADOS GENERALMENTE PRESENTAN EMISION α

EJEMPLO:





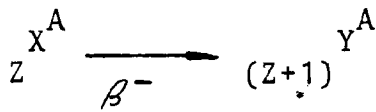
2

NUCLEOS CON DEMASIADOS NEUTRONES

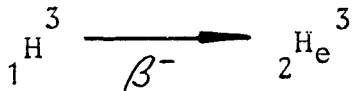
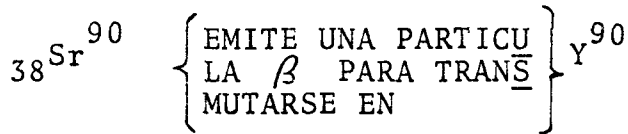
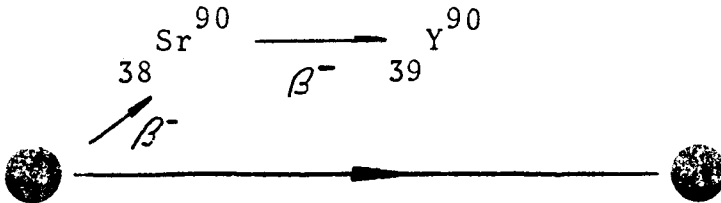
EMISION β^-



$$m\beta = m_e \ll m_A \implies A \simeq \text{cte.}$$



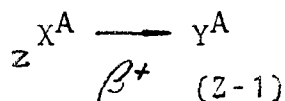
EJ.:



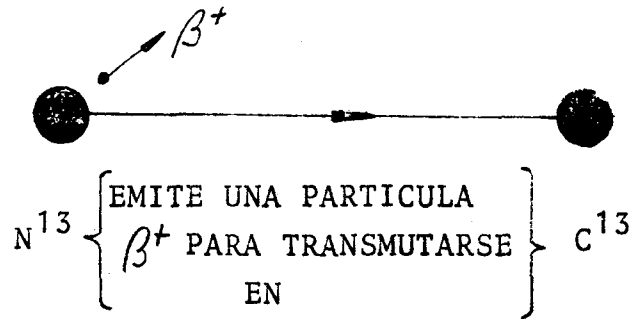
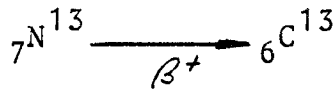
3

NUCLEOS CON DEMASIADOS PROTONES

EMISION β^+

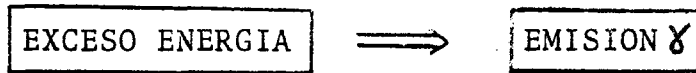


EJEMPLO:



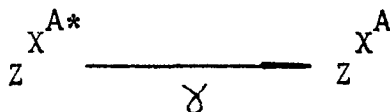
DESPUES DE UN DECAIMIENTO α , β^- o β^+ EL NUEVO NUCLEO RESULTA EN UN ESTADO EXCITADO:

(4)

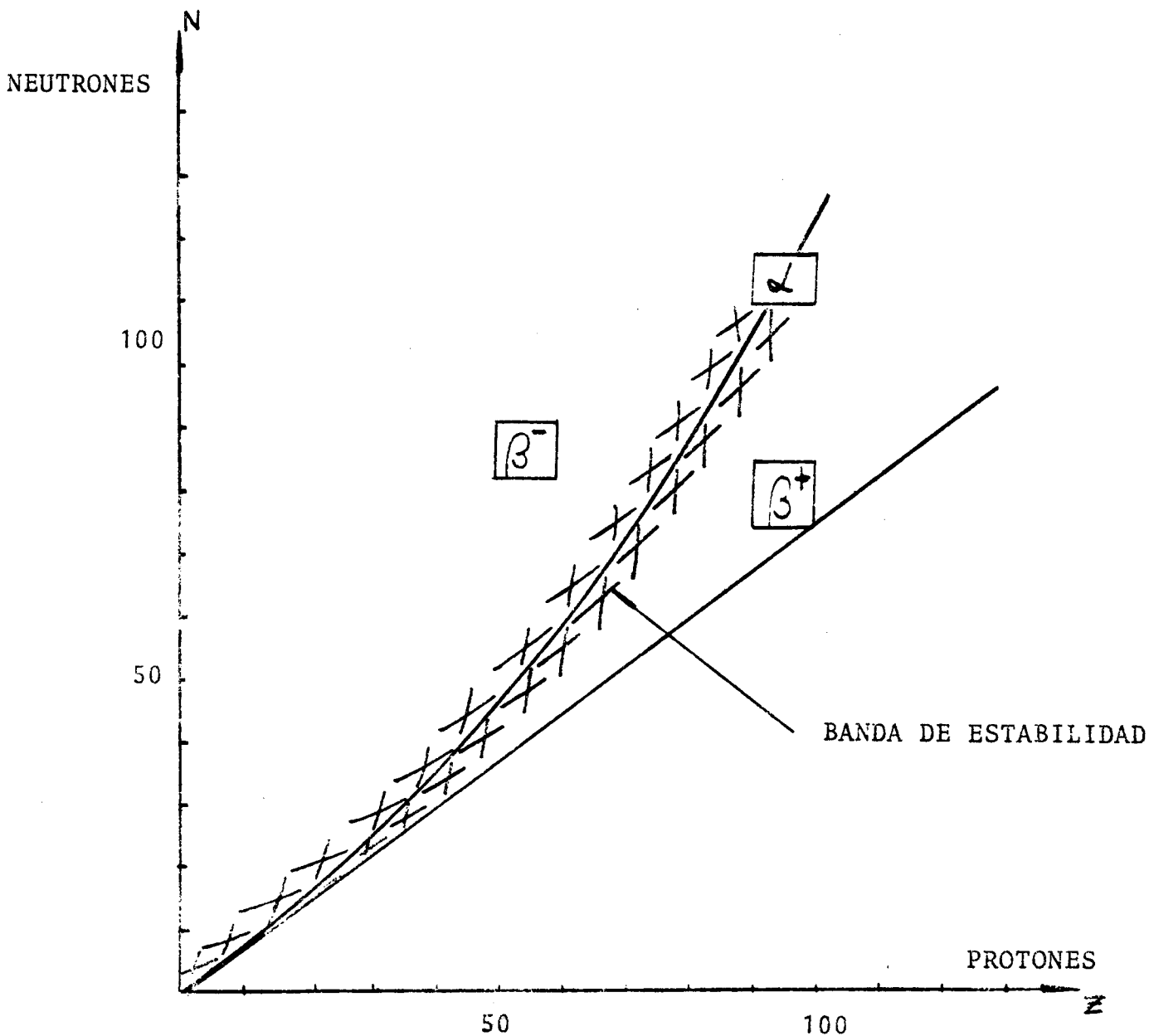
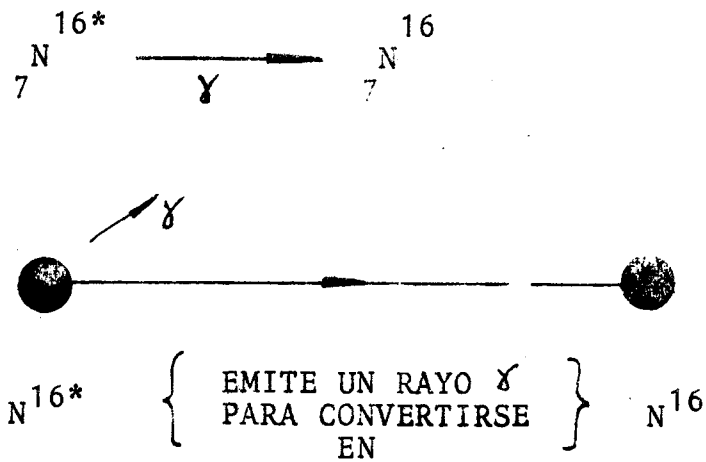


γ — ONDA ELECTROMAGNETICA (SIMILAR RAYOS X CASO ATOMOS)

$$\begin{cases} m_\gamma \sim 0 \\ Q_\gamma = 0 \end{cases}$$



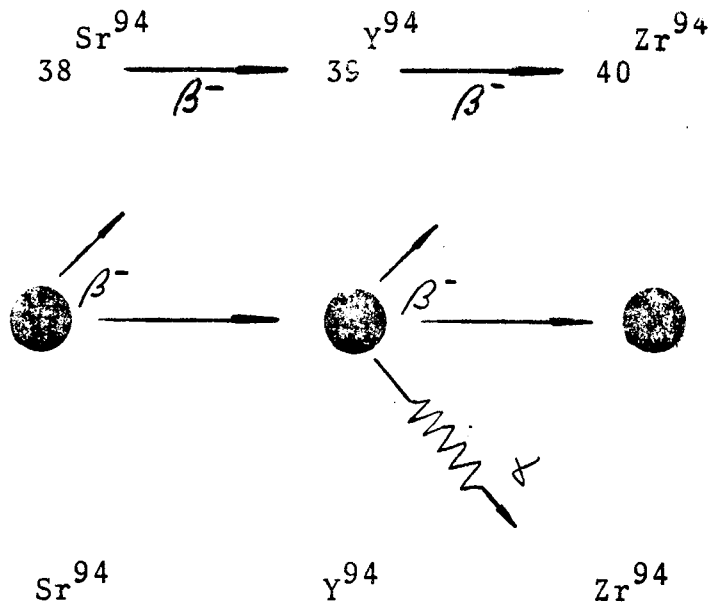
EJEMPLO:



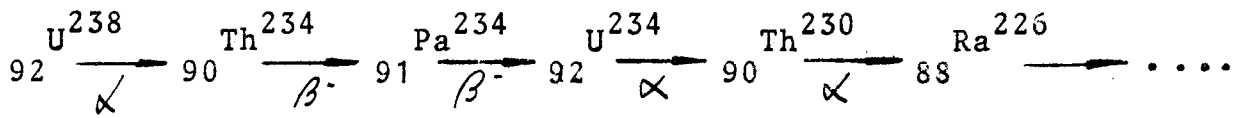
CADENA O SERIE DE DESINTEGRACIONES

EJEMPLO:

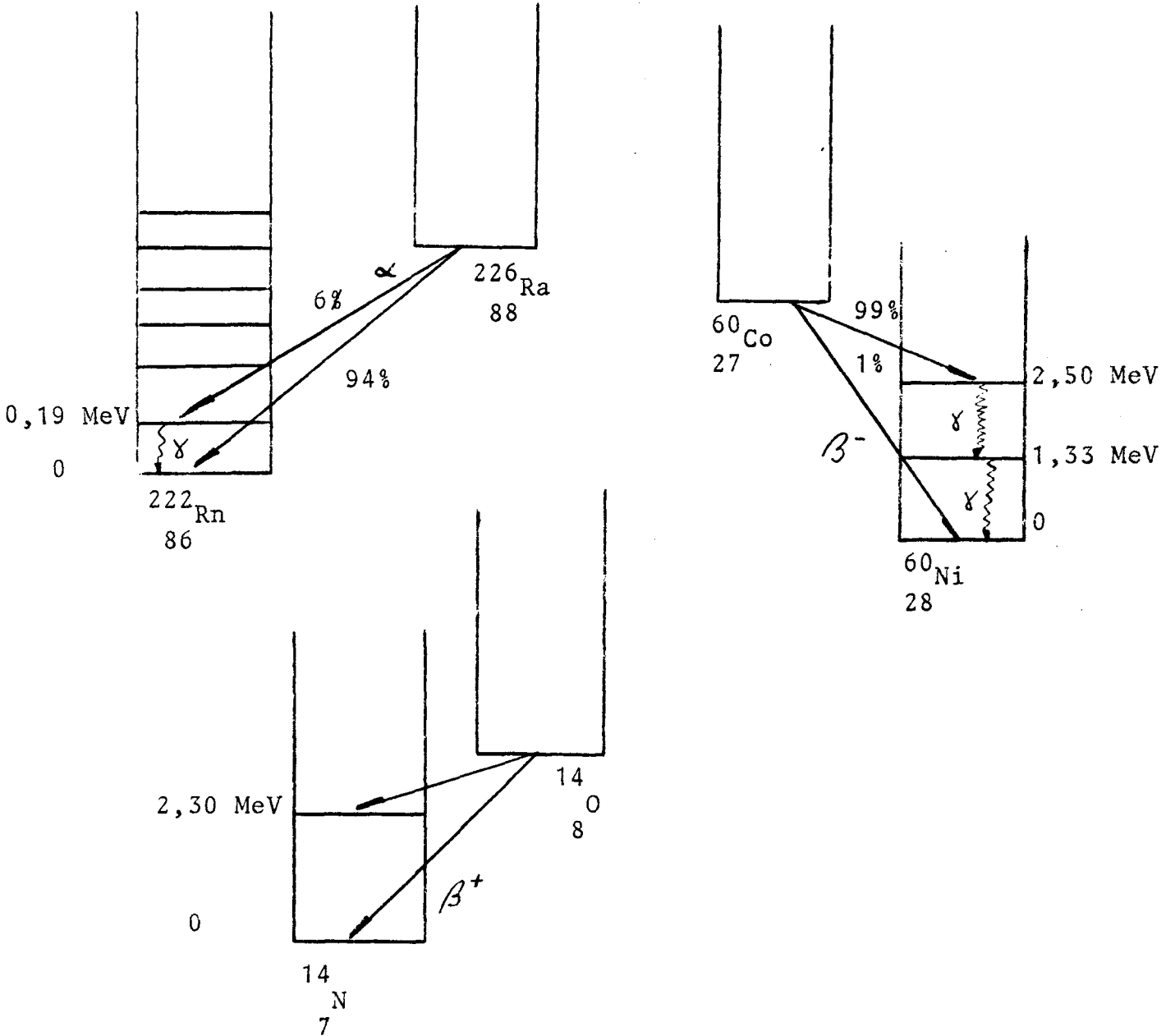
a) SERIE CORTA



b) SERIE LARGA



ESQUEMA DE DECAIMIENTOS



2.- LEYES DE DESINTEGRACION

a)

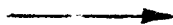
UN NUCLEO RADIOACTIVO



IMPOSIBLE PREDECIR EL MOMENTO EN QUE DECAERA

DECAIMIENTO ————— PROCESO ESTADISTICO

PROBABILIDAD DE DECAIMIENTO



CARACTERISTICA DE CADA NUCLEO

CONSTANTE

λ = CONSTANTE DECAIMIENTO

b)

NUMERO GRANDE DE NUCLEOS RADIOACTIVOS N



VELOCIDAD DE DESINTEGRACIONES PERFECTAMENTE CONOCIDA = ACTIVIDAD

$$A = \lambda N$$

$$1 \text{ CURIE (1 Ci)} = 3,7 \times 10^{10} \frac{\text{DESINTEGRACIONES}}{\text{SEG.}} \text{ (dps)}$$

$$1 \text{ m Ci} = 3,7 \times 10^7 \text{ dps}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Ci} = 3,7 \times 10^4 \text{ dps}$$

$$t = t_0 = 0 \longrightarrow N_0$$

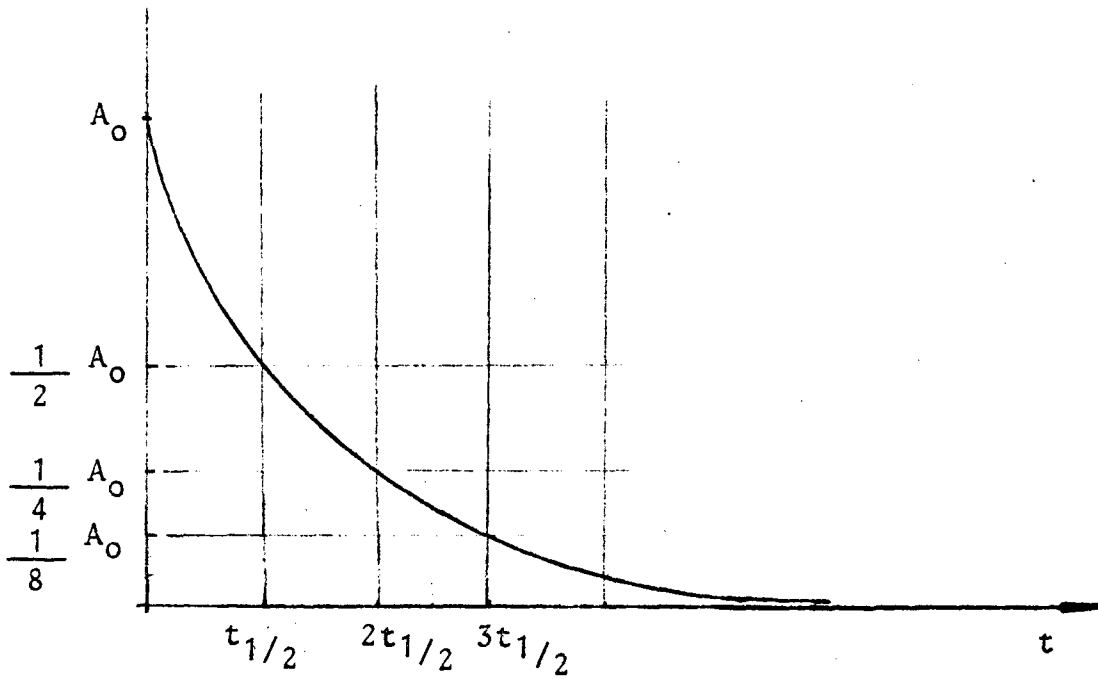
$$t = 0 + dt \longrightarrow dN = N_0 - N$$

$$dN = -\lambda N_0 dt$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

DECAIMIENTO EXPONENCIAL

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$



$$t = t_{1/2} \longrightarrow A = \frac{1}{2} A_0$$

$$t_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

SEMIPERiodo

$$t = \bar{t} \longrightarrow A = \frac{1}{e} A_0$$

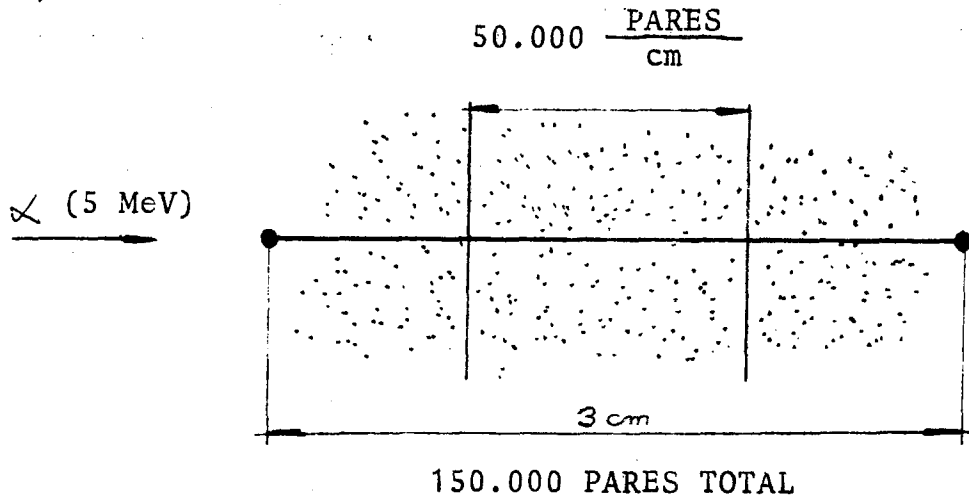
$$\bar{t} = \frac{1}{\lambda} = \frac{t_{1/2}}{0,693}$$

VIDA MEDIA

S I N T E S I S
=====

LA RADIOACTIVIDAD ES:

- 1.- UN PROCESO PURAMENTE NUCLEAR
- 2.- UN PROCESO ESPONTANEO
- 3.- UNA REACCION OPUESTA A LA INESTABILIDAD
- 4.- UNA REACCION EXOENERGETICA
- 5.- UN PROCESO PROBABILISTICO
- 6.- UN PROCESO DE EMISION DE PARTICULAS

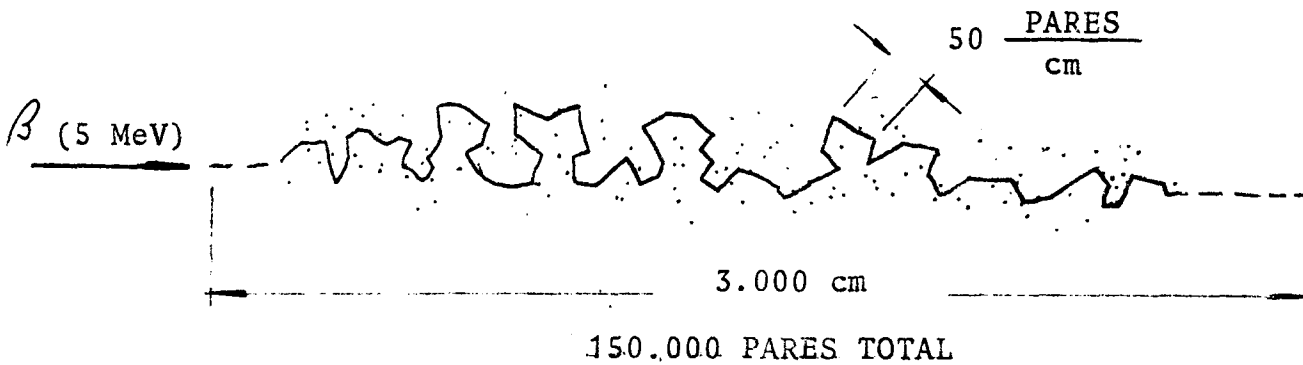


$$\text{si } E_{\beta} = 5 \text{ MeV} \quad \frac{5 \times 10^6}{32,5} = 150.000 \text{ PARES}$$

$m_{\beta} \approx m_e \implies \beta$ CAMBIA DE DIRECCION EN CADA INTERACCION

$$\beta \longrightarrow I_e \text{ (aire)} = 50 \frac{\text{PARES}}{\text{cm}}$$

$$\text{RANGO } \beta \text{ (5 MeV)} = \frac{150.000}{50} = 3.000 \text{ cm}$$



$$\text{RANGO } \beta \text{ (5 MeV)} = 1000 \times \text{RANGO } \gamma \text{ (5 MeV)}$$

RADIACION γ
 n

{ NO CAUSAN IONIZACION DIRECTA
PERO PUEDEN CAUSAR INDIRECTA

3.- RADIACIONES IONIZANTES

IONIZACION



DESPLAZAMIENTO DE ELECTRONES ORBITALES DE LOS ATOMOS

∴ POSIBLE POR RADIACION DE PARTICULAS

CARGADAS $\implies \begin{cases} \alpha \\ \beta \end{cases}$

ATOMO NEUTRAL \longrightarrow ION POSITIVO + ELECTRON
PAR IONICO

IONIZACION ESPECIFICA $I_e = N^\circ$ DE PARES IONICOS PRODUCIDOS
EN CADA cm DE RECORRIDO DE LA RADIACION IONIZANTE

PAR IONICO EN EL AIRE \longrightarrow 32,5 eV

Si:

$$E_\alpha = 5 \text{ MeV} \longrightarrow \frac{5 \times 10^6}{32,5} = 1,5 \times 10^5 \text{ PARES}$$

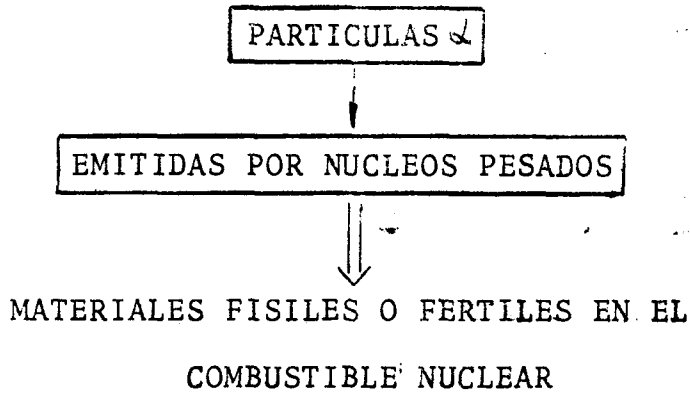
$m_\alpha \sim 10.000 m_e \implies \alpha$ NO CAMBIA DIRECCION CON INTERACCIONES

$$\alpha \longrightarrow I_e \text{ (aire)} = 50 \frac{\text{PARES}}{\text{cm}}$$

$$\therefore \text{RANGO } \alpha \text{ (5 MeV)} = \frac{150.000 \text{ PARES}}{50.000 \frac{\text{PARES}}{\text{cm}}} = 3 \text{ cm}$$

4.- INTERACCION DE PARTICULAS ALFA Y BETA CON LA MATERIA

a)



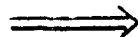
ISOTOPOS	VIDA MEDIA (AÑOS)	ENERGIA (MeV)	RANGO (cm) AIRE
Th ²³²	1,4 x 10 ¹⁰	4,0	2,5
U ²³⁸	4,5 x 10 ⁹	4,2	2,7
U ²³⁵	8,9 x 10 ⁸	4,4 y 4,6	2,9 y 3,1
U ²³³	1,6 x 10 ⁵	4,8	3,3
Pu ²³⁹	2,0 x 10 ⁴	5,1	3,6

Pu^{239}
{
 MAS ACTIVO ($t_{1/2}$ MENOR)
 MAS PENETRANTE (RANGO MAYOR)

VELOCIDAD : $v \sim 3 \times 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{seg}}$ ($\sim \frac{1}{10} c$)

- VELOCIDAD ELEVADA

- MASA Y CARGA GRANDE



RANGO PEQUEÑO

IONIZACION ESPECIFICA GRANDE

BLINDAJE α ?

PAPEL	}	RANGO 1.000 VECES MENOR QUE EN AIRE
PIEL		
AGUA		
ALUMINIO	}	RANGO 1.600 Y 5.000 VECES MENOR QUE EL AIRE
PLOMO		

α {
- NO CONSTITUYE UN RIESGO DE RADIACION EXTERNA
- INGERIDAS O INHALADAS PUEDEN PROVOCAR SERIOS DAÑOS ———
RIESGO DE DAÑO POR RADIACION INTERNA

EJEMPLO: Pu

b) PARTICULAS β ——— ELECTRONES EMITIDOS CON ALTA VELOCIDAD

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

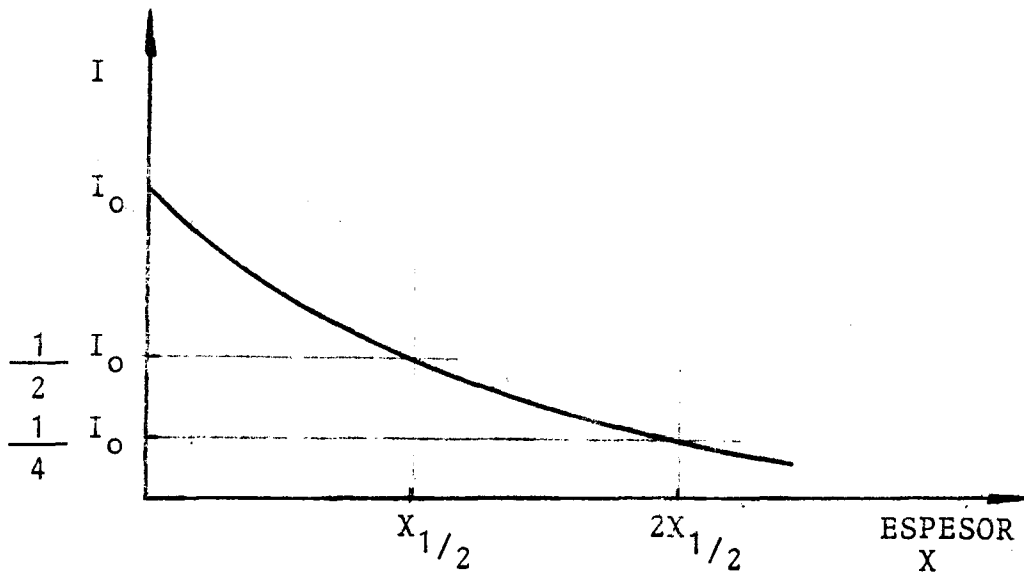
ATENUACION EXPONENCIAL

μ = COEFICIENTE DE ABSORCION LINEAL

I_0 = INTENSIDAD INICIAL

X = ESPESOR DEL MATERIAL

ATENUACION ——— LEY SIMILAR DECAIMIENTO RADIOACTIVO



$$X_{1/2} \longrightarrow I = \frac{1}{2} I_0$$

$$X_{1/2} = \frac{0,693}{\mu}$$

$$\text{RANGO } \beta \approx 7 X_{1/2}$$

$$\text{RANGO } \beta \approx 100 \text{ RANGO } \alpha$$

EJEMPLO:

$$E_{\beta} = 1 \text{ MeV} \longrightarrow \text{RANGO} \approx 0,14 \text{ cm EN ALUMINIO}$$

$\therefore \beta$ NO PRESENTA DIFICULTAD BLINDAJE PERO DURANTE
ATENUACION \longrightarrow RADIACION DE FRENAMIENTO

\implies RAYOS γ (X)

FRACCION ENERGIA PARTICULAS β CONVERTIDA EN
RADIACION DE FRENAMIENTO:

$$f = 0,0011 Z E$$

∴ MATERIAL DE BLINDAJE LIVIANO

(PEQUEÑO Z), POR EJ. ALUMINIO

- β {
- PRODUCEN DAÑOS EN PIEL Y OJOS \implies RIESGO DE RADIACION EXTERNA
 - MAYOR RIESGO DE RADIACION INTERNA SI SON INGERIDAS O INHALADAS

5.- RADIACION CERENKOV

- PARTICULAS CARGADAS CON ALTA ENERGIA EMITEN RADIACION ELECTROMAGNETICA VISIBLE EN EL PASAJE A TRAVÉS DE UN MEDIO TRANSPARENTE SI SU VELOCIDAD ES MAYOR QUE LA VELOCIDAD DE LA LUZ C EN ESE MEDIO.

- TIPICA EN REACTORES MODERADOS Y ENFRIADOS CON AGUA, DEBIDO A LOS ELECTRONES COMPTON (SE EXPLICARA A CONTINUACION) PRODUCIDAS POR LOS RAYOS γ DE LOS PRODUCTOS DE FISION.

6.- INTERACCION DE RAYOS GAMMA CON LA MATERIA

ENERGIA RAYOS GAMMA = DIFERENCIA ENTRE LOS NIVELES
ENERGETICOS INVOLUCRADOS EN LA TRANSICION

$$E_{\gamma} = h \nu$$

h = CTE. DE PLANK = $6,625 \times 10^{-27}$ erg . seg

ν = FRECUENCIA DE LA RADIACION

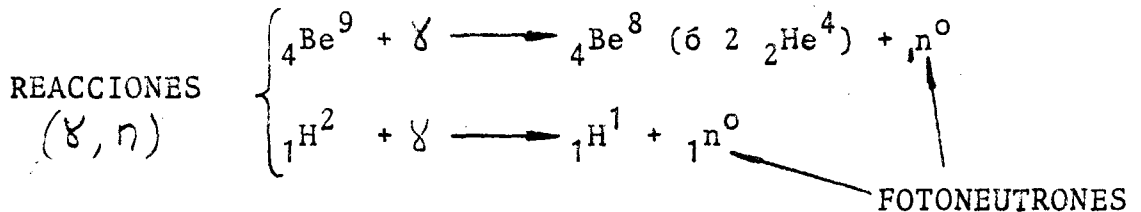
RAYOS γ — INTERACCION MAS FACIL CON ELECTRON QUE CON
NÚCLEOS

⇒ ATENUACION COMO CONSECUENCIA DE INTERACCIONES
CON ATOMOS

INTERACCIONES γ MAS IMPORTANTES:

- EFECTO FOTOELECTRICO
- EFECTO COMPTON
- PRODUCCION DE PARES

■ INTERACCIONES PARTICULARES SON LAS QUE RESULTAN CON
DEUTERIO Y BERILIO

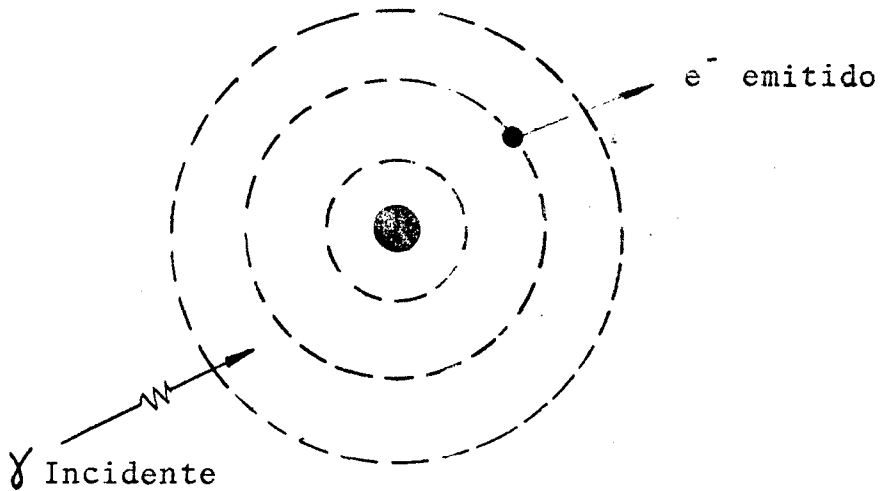


$$E_u ({}_4\text{Be}^9) = 1,6 \text{ MeV}$$

$$E_u ({}_1\text{H}^2) = 2,2 \text{ MeV}$$

7.- EFECTO FOTOELECTRICO

PROCESO DE ABSORCION γ MAS IMPORTANTE A BAJAS ENERGIAS
($E_\gamma < 1 \text{ MeV}$)

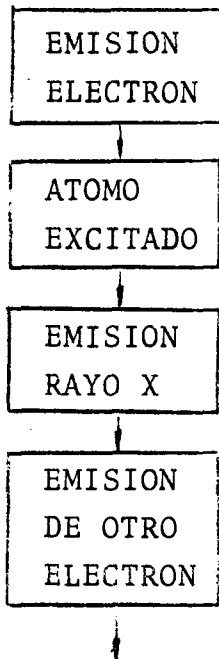


PROBABILIDAD DE INTERACCION FOTOELECTRICA:

$$\sqrt{\mu_{FE}} \sim \frac{Z^n}{E^3}$$

$n = 3 - 5$

MATERIALES PESADOS
PARA BLINDAJES



ELECTRON AUGER O ESCAPE DEL RAYO X DE BAJA ENERGIÁ, QUE ES FACILMENTE DETENIDO

∴ EFECTO FOTOELECTRICO \implies GENUINO PROCESO
DE ABSORCION PUES ELIMINA EL RAYO γ INCIDENTE

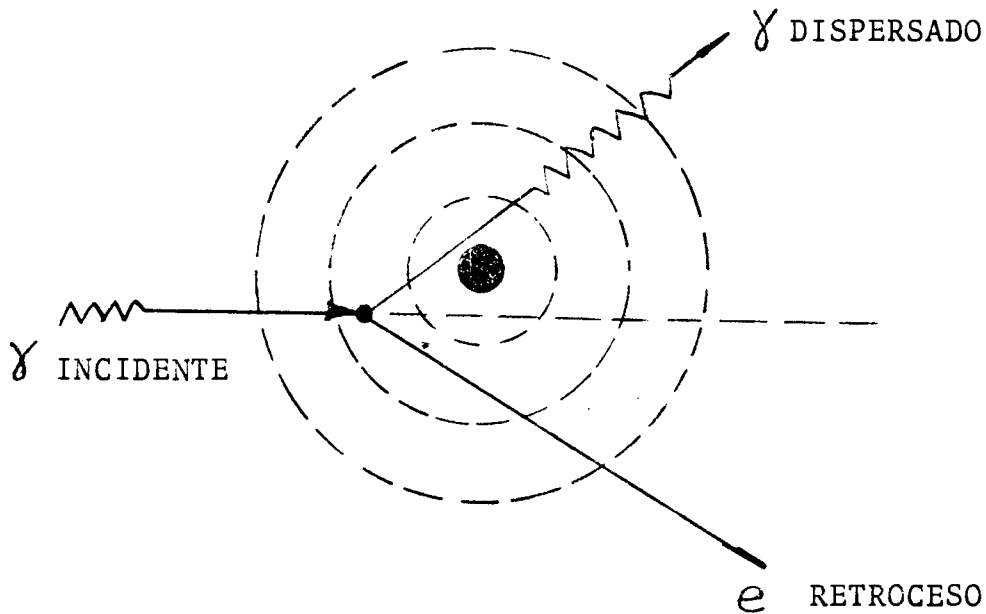
SI $E_\gamma > 1 \text{ MeV} \longrightarrow E \gg$ ENERGIA DE LIGADURA DE
ELECTRONES \implies NO SE PUEDE SATISFACER LA LEY DE CONSER-
VACION DE ENERGIA Y MOMENTOS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO
FOTOELECTRICO

8.- EFEECTO COMPTON

RAYOS γ \longrightarrow COMPORTAMIENTO SIMILAR

PARTICULAS \implies COLISIONES TIPO "BOLA DE BILLAR" CON

ELECTRONES



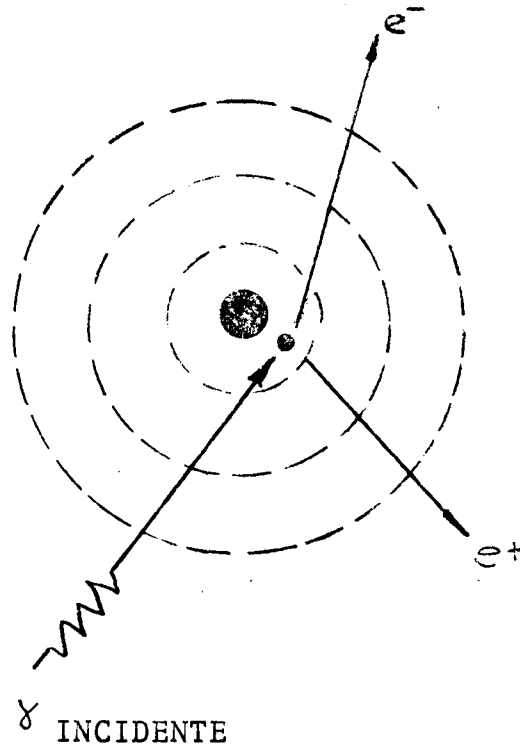
NO ES PROCESO DE ABSORCION, PUES γ -DISPERSADO PUEDE TENER APROXIMADAMENTE IGUAL ENERGIA INCIDENTE Y POCA DEFLEXION

\implies RADIACION DISPERSADA ES UNO DE LOS PROBLEMAS MAS SERIOS DE BLINDAJES.

PROBABILIDAD DE INTERACCION COMPTON:

$$\sigma_{\text{COMPTON}} \sim \frac{Z}{E}$$

9.- PRODUCCION DE PARES



$$m_e = 0,51 \text{ MeV} \implies E_\gamma > 1,02 \text{ MeV}$$

POSITRON \longrightarrow ANIQUILACION \implies 2 RAYOS γ

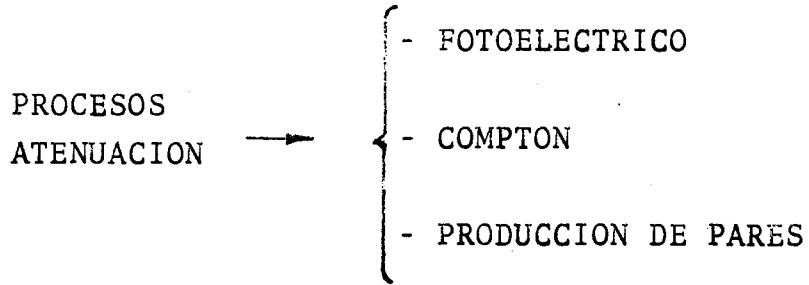
DE 0,51 MeV \longrightarrow ABSORCION FOTOELECTRICA

\therefore PROCESO DE ABSORCION

PROBABILIDAD DE PRODUCCION DE PARES:

$$\sigma_{PP} = Z^2 (E - 1,02)$$

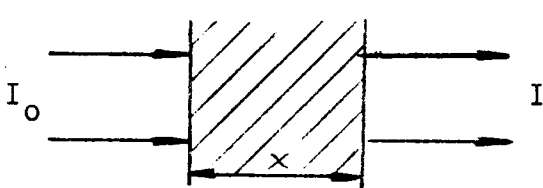
10.- ATENUACION DE RAYOS GAMMA



COEFICIENTE DE ATENUACION LINEAL μ :

$$\mu = N_e (\sigma_{FE} + \sigma_{COMPTON} + \sigma_{PP})$$

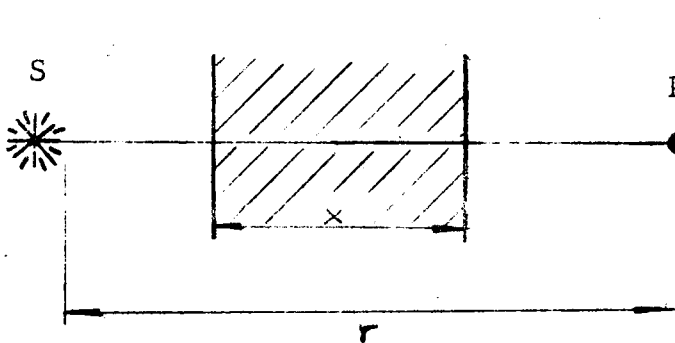
$$N_e = \frac{N^{\circ} \text{ ELECTRONES}}{\text{cm}^3}$$



$$[I] = \frac{\text{MeV}}{\text{cm}^2 \cdot \text{seg}}$$

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

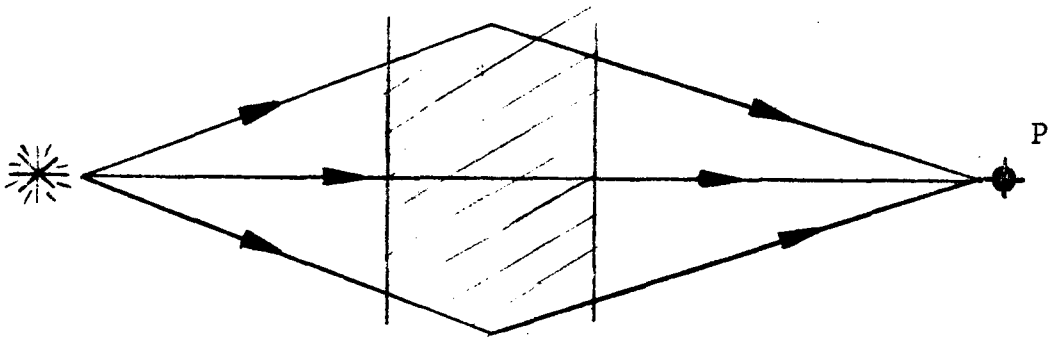
LEY EXPONENCIAL



$$[S] = \frac{\text{MeV}}{\text{seg}}$$

$$I(P) = \frac{S \cdot e^{-\mu x}}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

I(P) DETERMINADO CON FORMULA ANTERIOR RESULTA INFERIOR AL REAL:



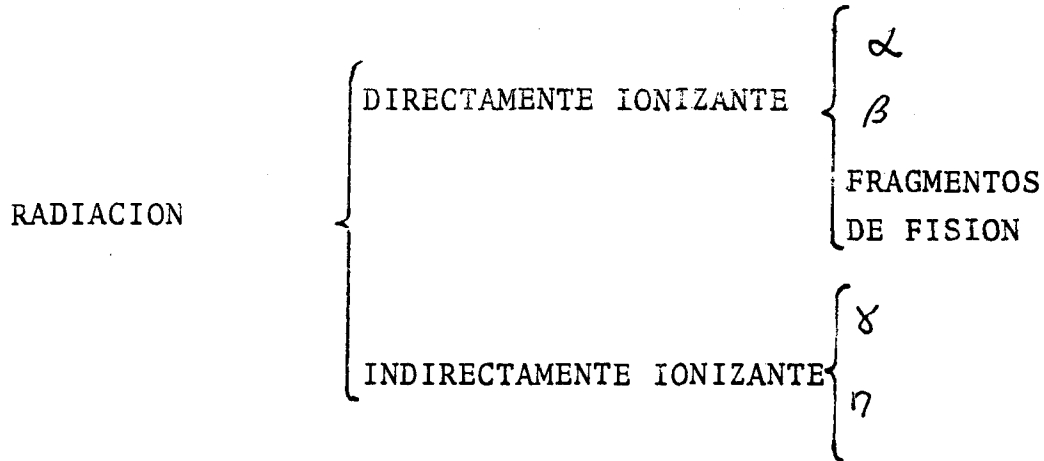
CONTRIBUCION DISPERSION COMPTON → FACTOR B

$$\therefore I(P) = \frac{B \cdot S \cdot e^{-\mu x}}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

ATENUACION γ	{	- FOTOELECTRICO	}	DECRECE CON E_γ
		- COMPTON		
		- PRODUCCION DE PARES		AUMENTA CON E_γ

S I N T E S I S
=====

INTERACCION DE LA RADIACION CON LA MATERIA



1

RAYOS α

- ENERGIA: 4 a 10 MeV
- RANGO : 2,5 a 10 cm EN AIRE
- PROCESO: IONIZACION

2

RAYOS β

- ENERGIA: 0,1 a 3 MeV
- RANGO : 0,1 a 13 m EN AIRE
- PROCESO: IONIZACION

3

RAYOS γ

- ENERGIA: 0,1 a 3 MeV
- ATENUACION: $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$
- PROCESO: EFECTO FOTOELECTRICO (E < 1 MeV)
EFECTO COMPTON
PRODUCCION PARES (E > 1,02 MeV)

COMPARACION PODER PENETRACION
=====

