

# **Capítulo 3**

## **Interacción de la Radiación con la Materia**

## Interacciones del Neutrón

Los neutrones pueden interactuar con el núcleo en una o más de las siguientes formas:

Choque elástico. En este proceso el neutrón golpea al núcleo, el cual casi siempre se encuentra en estado estable. El neutrón reaparece y el núcleo se queda en estado estable. En la notación de reacciones nucleares esta interacción es abreviada por el símbolo (n, n).

# *Dispersión Elástica del Neutrón*

Elastic Neutron  
Scattering

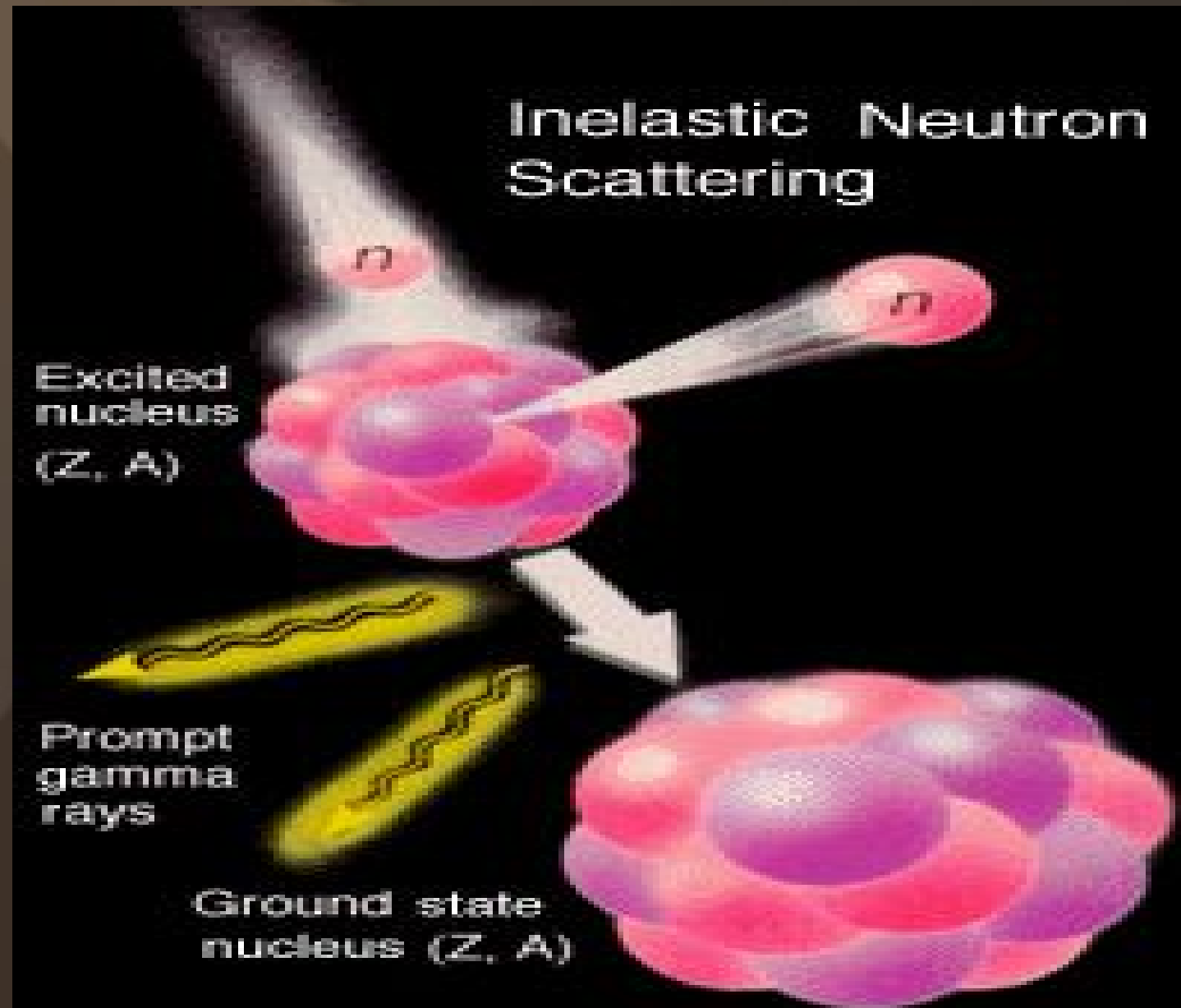


## Interacciones del Neutrón

**Choque inelástico.** Este proceso es similar al anterior excepto que el núcleo se queda en un estado de excitación. Normalmente este tipo de interacción es endotérmica.

El núcleo excitado decae por emisión de rayos gamma ( $\gamma$  inelásticos), su notación es  $(n, n')$ .

# *Dispersión Inelástica del Neutrón*



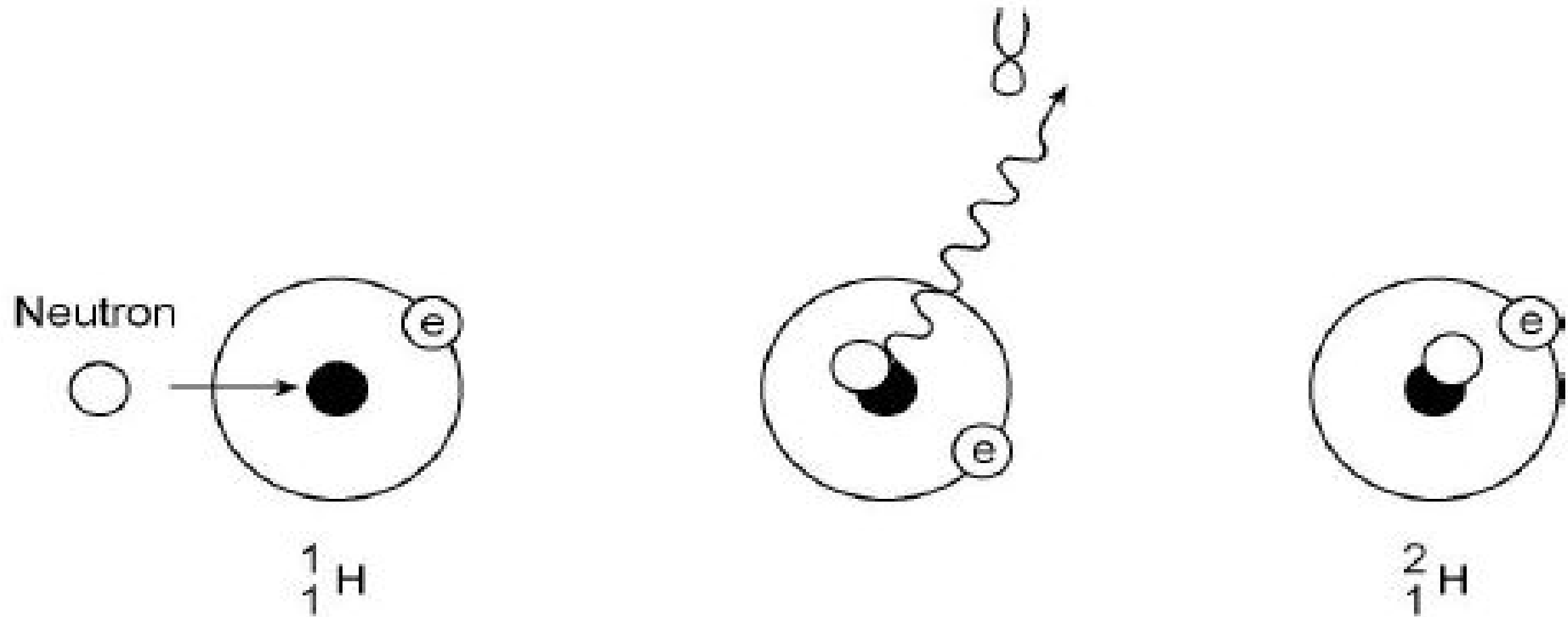
## Interacciones del Neutrón

**Captura Radiactiva.** En este proceso un neutrón es capturado por el núcleo y uno o más rayos  $\gamma$  son emitidos (llamados rayos  $\gamma$  por captura).

Esta es una interacción exotérmica con notación  $(n, \gamma)$ .

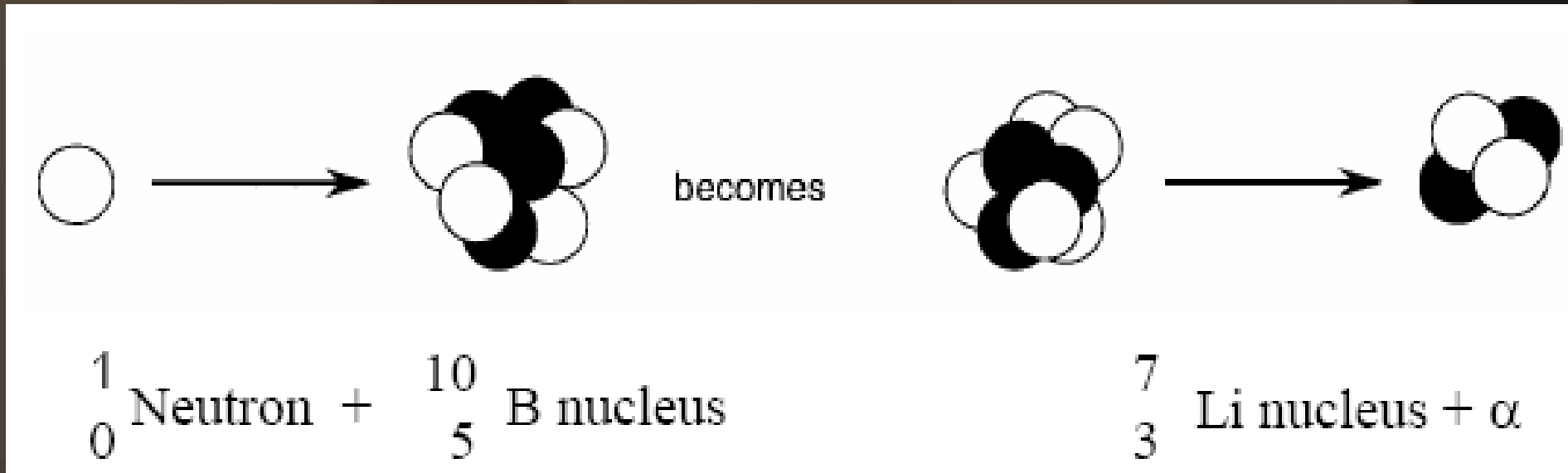
Como el neutrón es absorbido se conoce como un tipo de reacción de absorción.

# *Captura Radiactiva (n, $\gamma$ )*



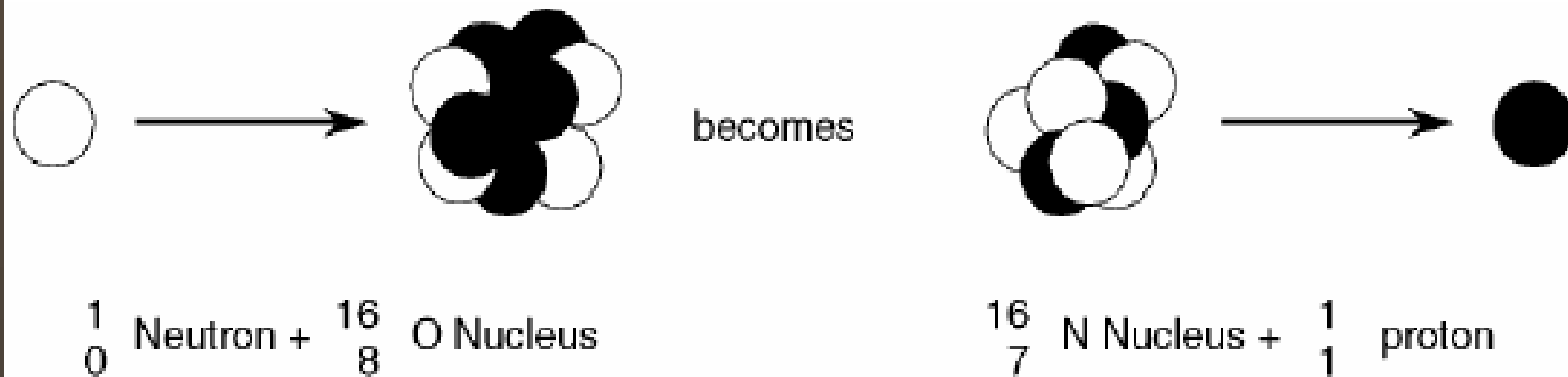
## Interacciones del Neutrón

Reacciones de Partículas cargadas. Los neutrones pueden desaparecer como resultado de reacciones de absorción del tipo (n,  $\alpha$ ) y (n, p). Estas pueden ser endotérmicas o exotérmicas.





## Reacción de Partícula cargada : Protón



## Interacciones del Neutrón

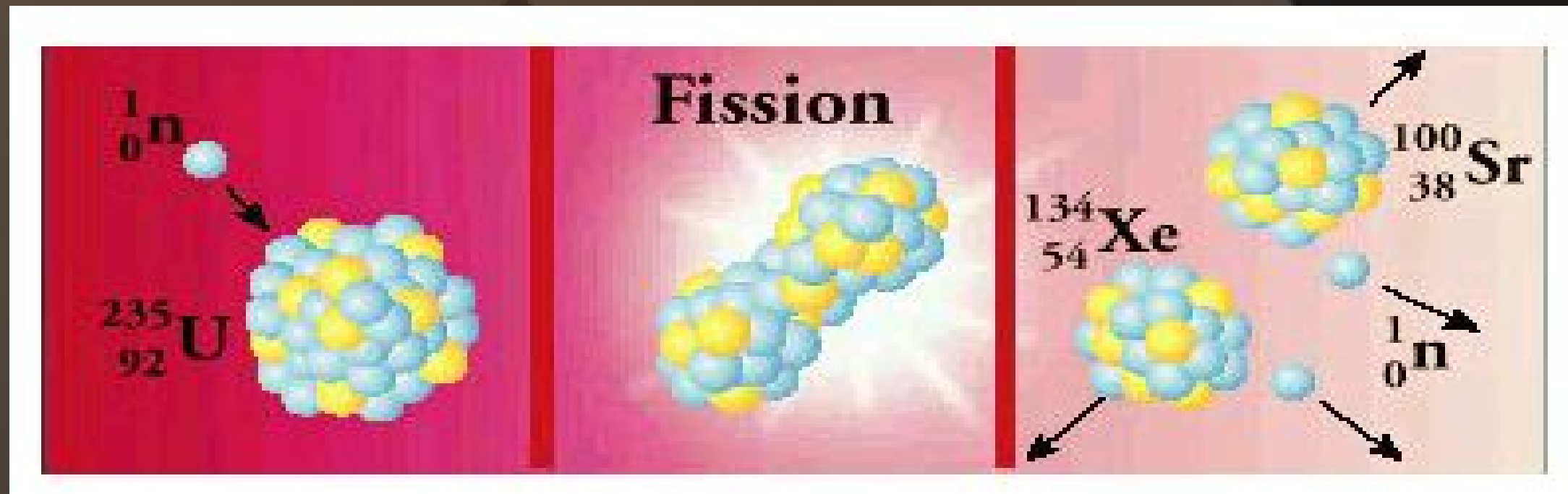
Reacciones de producción de neutrón. Las reacciones del tipo  $(n, 2n)$  y  $(n, 3n)$  ocurren con neutrones energéticos.

Esta reacción es endotérmica dado que en la reacción  $(n, 2n)$  un neutrón y en la reacción  $(n, 3n)$  dos neutrones son extraídos del núcleo golpeado.

La reacción  $(n, 2n)$  es especialmente importante para los reactores de agua pesada o de berilio.

## Interacciones del Neutrón

**Fisión.** Los neutrones que chocan con un núcleo pueden ser la causa de que el núcleo se separe. Esta es la principal fuente de la energía nuclear para aplicaciones prácticas.



## Sección eficaz

El área en la cual los neutrones interactúan con el núcleo en términos cuantitativos es conocida como sección eficaz.

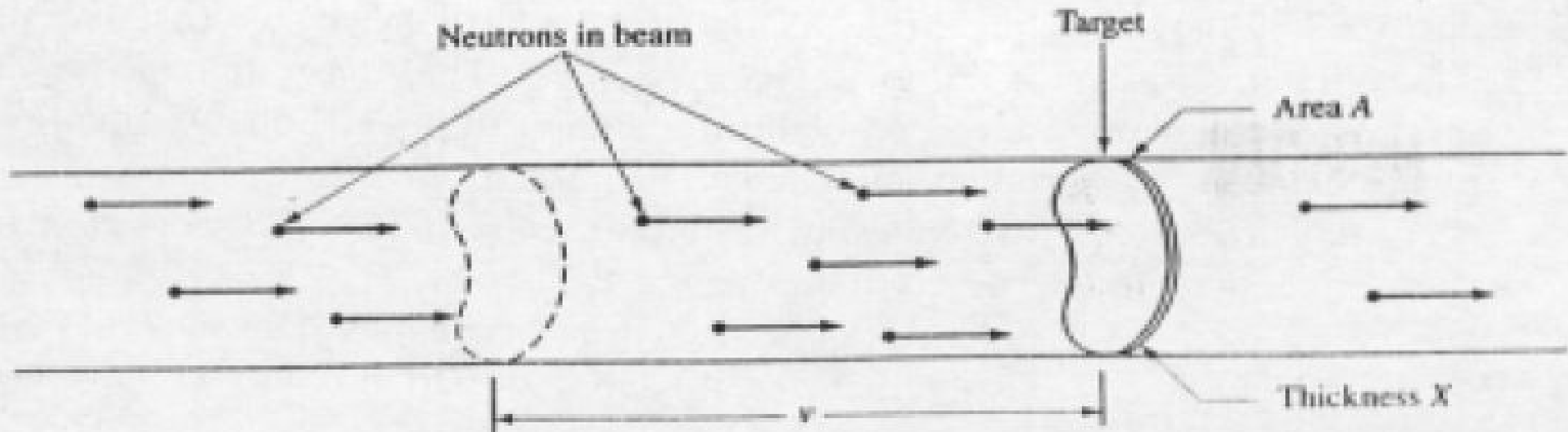


Figure 3.1 Neutron beam striking a target.

## Sección eficaz

La intensidad de un rayo monoenergético se define por:

$$I = n v$$

Donde  $n$  es el número de neutrones por  $\text{cm}^3$  en el rayo y  $v$  la velocidad de los neutrones en  $\text{cm/s}$

El número de colisiones en una placa completa está dado por:

$$\text{No. de colisiones/s} = \sigma I N A X$$

Donde  $\sigma$  es una constante de proporcionalidad llamada sección eficaz,  $N$  la densidad del átomo de la placa,  $A$  el área de la placa y  $X$  su espesor.

## Sección eficaz

$\sigma$  es igual al número de colisiones por segundo con un núcleo por unidad de intensidad del rayo.

La sección eficaz del neutrón se define en unidades de barns ( $b = 10^{-24} \text{ cm}^2$ ).

La sección eficaz total está dada por:

$$\sigma_t = \sigma_e + \sigma_i + \sigma_\gamma + \sigma_f + \dots$$

Donde:  $\sigma_e$  representa la sección eficaz por choque elástico,  $\sigma_i$  la sección eficaz por choque inelástico,  $\sigma_\gamma$  la sección eficaz por captura radiactiva,  $\sigma_f$  la sección eficaz por fisión.

## Sección eficaz

La sección eficaz total es la probabilidad de una interacción de cualquier tipo ocurra cuando neutrones golpean una placa.

La sección eficaz de absorción está dada por:

$$\sigma_a = \sigma_\gamma + \sigma_f + \sigma_p + \sigma_\alpha + \dots$$

Donde:  $\sigma_p$  representa la sección eficaz por reacción (n, p) y  $\sigma_\alpha$  la sección eficaz por reacción (n,  $\alpha$ ).

## Sección eficaz

Similarmente, la sección eficaz de dispersión está dada por:

$$\sigma_s = \sigma_e + \sigma_i$$

Por lo tanto:

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a$$



Ejemplo: Un rayo de neutrones de 1MeV con una intensidad de  $5 \times 10^8$  neutrones/cm<sup>2</sup> -s golpea una placa de <sup>12</sup>C.

La placa tiene un área de 0.5 cm<sup>2</sup> y un espesor de 0.05 cm. El rayo tiene una sección eficaz con un área de 0.1 cm<sup>2</sup>.

A 1MeV, la sección eficaz total de <sup>12</sup>C es 2.6 b.

a) Cuántas interacciones ocurren en la placa?

b)Cuál es la probabilidad de que un neutrón del rayo choque en la placa?

Ejemplo: Un rayo de neutrones de 1MeV con una intensidad de  $5 \times 10^8$  neutrones/cm<sup>2</sup> -s golpea una placa de <sup>12</sup>C. La placa tiene un área de 0.5 cm<sup>2</sup> y un espesor de 0.05 cm. El rayo tiene una sección eficaz con un área de 0.1 cm<sup>2</sup>. A 1MeV, la sección eficaz total de <sup>12</sup>C es 2.6 b. a) Cuántas interacciones ocurren en la placa? b)Cuál es la probabilidad de que un neutrón del rayo choque en la placa?

a) Si  $N = 0.080 \times 10^{23}$  (para el Carbono)

$$\sigma I N A X = 2.6 \times 10^{-24} \times 5 \times 10^8 \times 0.080 \times 10^{23} \times 0.1 \times 0.05$$
$$= 5.2 \times 10^5 \text{ interacciones/s}$$

b) Si en 1 s,  $I A = 5 \times 10^8 \times 0.1 = 5 \times 10^7$  neutrones que golpean la placa.

La probabilidad de que un neutrón interactúe con la placa es por lo tanto  $5.2 \times 10^5 / 5 \times 10^7 = 1.04 \times 10^{-2}$

Ejemplo: Existen dos reacciones de absorción (captura radiactiva y fisión) que pueden ocurrir cuando neutrones de 0.0253 eV interactúa con  $^{235}\text{U}$ .

La sección eficaz para estas reacciones es de 99 b y 582 b, respectivamente.

Cuando neutrones de 0.0253 eV son absorbidos por el  $^{235}\text{U}$ , cuál es la probabilidad relativa de que ocurra la fisión?

Ejemplo: Existen dos reacciones de absorción (captura radiactiva y fisión) que pueden ocurrir cuando neutrones de 0.0253 eV interactúa con  $^{235}\text{U}$ .

La sección eficaz para estas reacciones es de 99 b y 582 b, respectivamente.

Cuando neutrones de 0.0253 eV son absorbidos por el  $^{235}\text{U}$ , cuál es la probabilidad relativa de que ocurra la fisión?

$$P = \sigma_f / (\sigma_\gamma + \sigma_f) = \sigma_f / \sigma_a = 582 / 681 = 85.5 \%$$

## Sección eficaz macroscópica

El número de colisiones en una placa completa está dado por:

$$\text{No. de colisiones/s} = \sigma INAX$$

La densidad de colisiones (F) está dada por:

$$F = IN \sigma_t$$

Esta ecuación en términos macroscópicos se reduce en:

$$F = I\Sigma_t$$

Ejemplo: Con respecto al primer ejemplo de este capítulo, calcule:

a) la sección eficaz macroscópica del  $^{12}\text{C}$  en MeV.

b) la densidad de colisión en la placa.

Ejemplo: Con respecto al primer ejemplo de este capítulo, calcule:

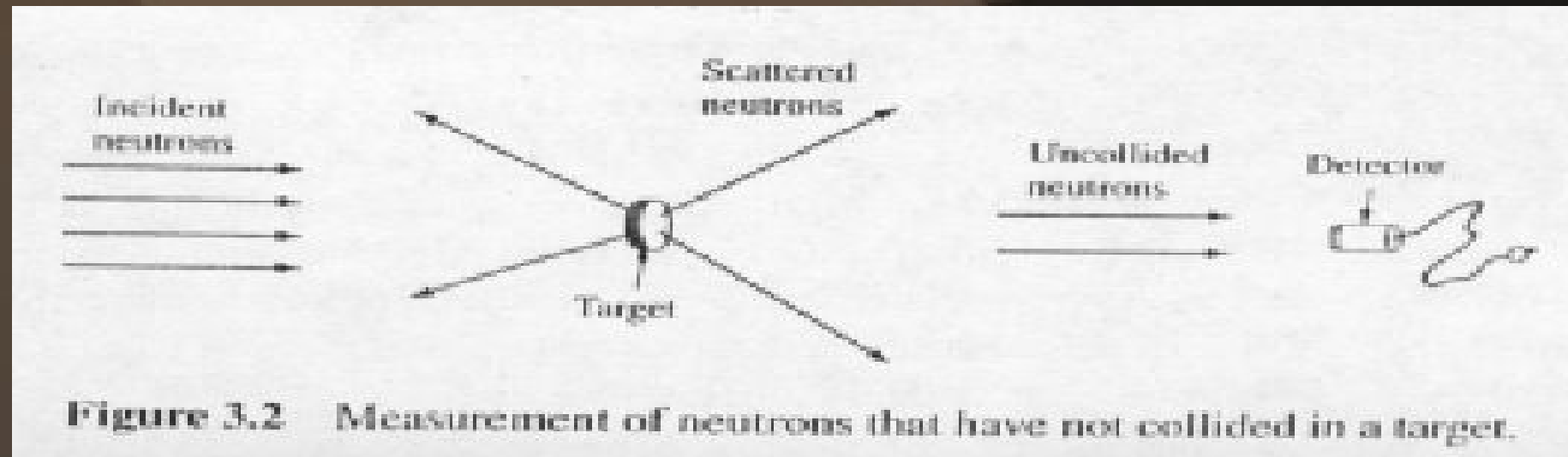
a) la sección eficaz macroscópica del  $^{12}\text{C}$  en MeV.

b) la densidad de colisión en la placa.

$$\text{a) } \Sigma_t = 2.6 \times 10^{-24} \times 0.080 \times 10^{23} = 0.021 \text{ cm}^{-1}$$

$$\text{b) } F = 5 \times 10^8 \times 0.021 = 1.05 \times 10^7 \text{ colisiones/ cm}^3\text{-s}$$

# Atenuación neutrónica

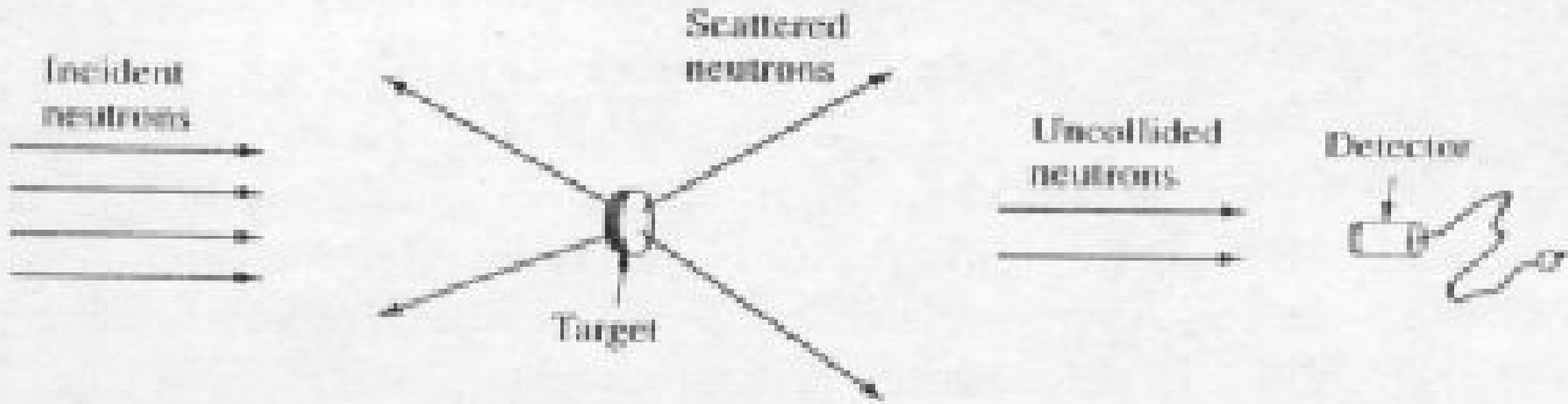


La intensidad de los neutrones que no sufrieron colisión (la cual es la que mide el detector) está dada por:

$$I(X) = I_0 e^{-\Sigma tX}$$



## Atenuación neutrónica



**Figure 3.2** Measurement of neutrons that have not collided in a target.

Podemos concluir que  $\Sigma_t$  es la probabilidad, por unidad de trayectoria y longitud, de que un neutrón tenga algún tipo de colisión en el medio que se mueve.

## Atenuación neutrónica

La probabilidad de que un neutrón pueda moverse a través de una distancia  $x$  sin sufrir una colisión está dada por:

$$p(x) = I(X) / I_0 = e^{-\Sigma t x}$$

La distancia promedio en la cual un neutrón se mueve entre colisiones es llamada trayectoria libre media ( $\lambda$ ) y está dada por:

$$\lambda = 1 / \Sigma t$$

Ejemplo: Calcule la trayectoria libre media de un neutrón con energía cinética de 100 KeV en sodio líquido. Para esta energía, la sección eficaz total del sodio es de 3.4 b.

Ejemplo: Calcule la trayectoria libre media de un neutrón con energía cinética de 100 KeV en sodio líquido. Para esta energía, la sección eficaz total del sodio es de 3.4 b.

De la tabla II-3, la densidad del átomo ( $N$ ) de sodio es de  $0.0254 \times 10^{24}$ .

En términos macroscópicos la sección eficaz es entonces  $\Sigma_t = N \sigma_t = 0.0254 \times 10^{-24} \times 3.4 \times 10^{-24} = 0.0864 \text{ cm}^{-1}$ . De aquí  $\lambda = 1/0.0864 = 11.6 \text{ cm}$

Ejercicio: Calcule la trayectoria libre media de un neutrón de 1 eV en el grafito. Para esta energía, la sección eficaz total del carbón es de 4.8 b.

Ejercicio: Calcule la trayectoria libre media de un neutrón de 1 eV en el grafito. Para esta energía, la sección eficaz total del carbón es de 4.8 b.

De la tabla II-3, la densidad del átomo ( $N$ ) de carbón es de  $0.08023 \times 10^{24}$ . En términos macroscópicos la sección eficaz es entonces  $\Sigma_t = N \sigma_t = 0.08023 \times 10^{24} \times 4.8 \times 10^{-24} = 0.3851 \text{ cm}^{-1}$ . De aquí  $\lambda = 1/0.3851 = 2.59 \text{ cm}$

## Atenuación neutrónica

Para una mezcla homogénea de dos especies nucleares, la probabilidad total por trayectoria de que un neutrón interactúe con cualquier núcleo está dada por:

$$\Sigma = \Sigma_x + \Sigma_y = N_x \sigma_x + N_y \sigma_y$$

Si existe N moléculas de  $X_m Y_n$  por  $\text{cm}^3$ , la sección eficaz para la molécula es:

$$\sigma = \frac{\Sigma}{N} = m\sigma_x + n\sigma_y$$

Ejemplo: La sección eficaz de absorción para  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  en 0.0253 eV son 680.8 b y 2.70 b respectivamente. Calcule  $\Sigma_a$  para el uranio natural con esta energía.



Ejemplo: La sección eficaz de absorción para  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  en 0.0253 eV son 680.8 b y 2.70 b respectivamente. Calcule  $\Sigma_a$  para el uranio natural con esta energía.

Por el uso de los métodos de la sección 2.14, la densidad del átomo (N) para el  $^{235}\text{U}$  y el  $^{238}\text{U}$  es de  $3.48 \times 10^{-4} \times 10^{24}$  y de  $0.0483 \times 10^{24}$ , respectivamente.

Por lo tanto, sección eficaz de absorción es entonces  $\Sigma_a = 3.48 \times 10^{-4} \times 680.8 + 0.0483 \times 2.70 = 0.367 \text{ cm}^{-1}$ .

Ejemplo: La sección eficaz de dispersión (en barns) para hidrógeno y el oxígeno en 1 MeV y en 0.0253 eV se muestra en la tabla. Calcule el valor de  $\sigma_s$  para la molécula de agua a esas energías.

	1 MeV	0.0253 eV
H	3	21
O	8	4

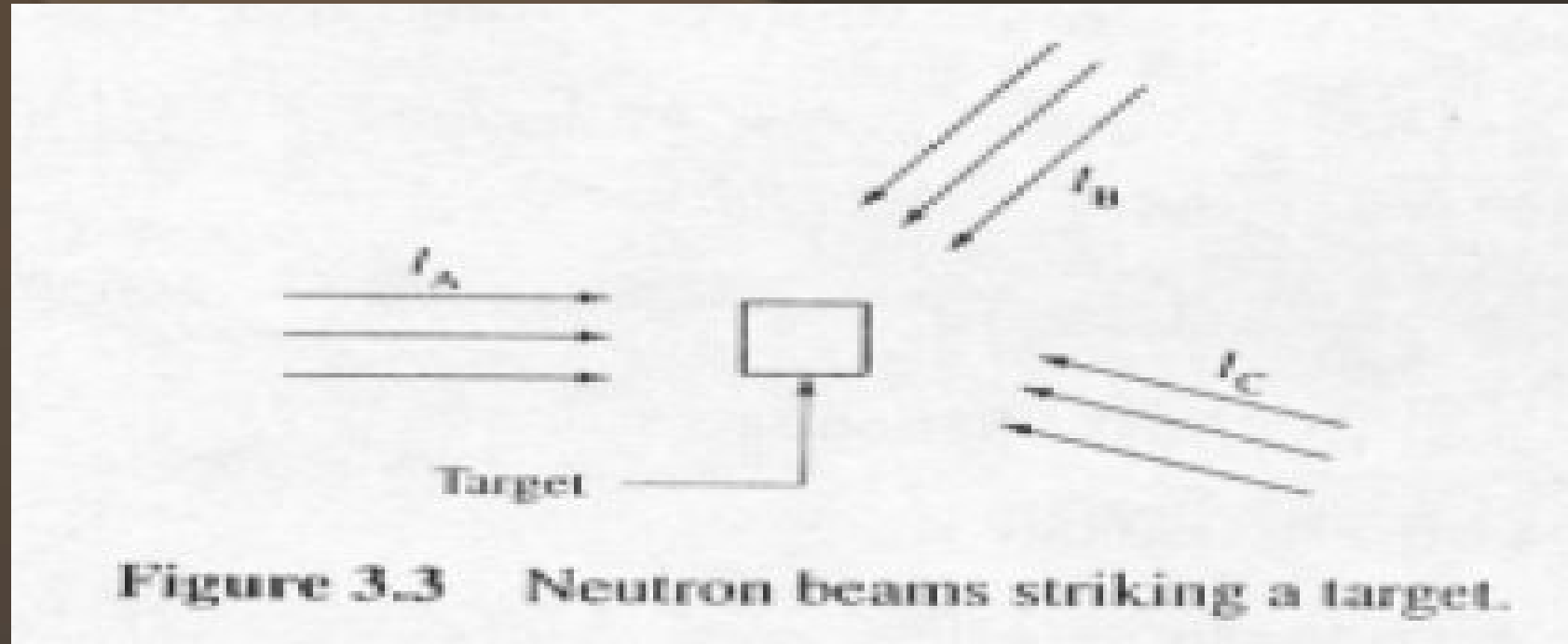
Ejemplo: La sección eficaz de dispersión (en barns) para hidrógeno y el oxígeno en 1 MeV y en 0.0253 eV se muestra en la tabla. Calcule el valor de  $\sigma_s$  para la molécula de agua a esas energías.

	1 MeV	0.0253 eV
H	3	21
O	8	4

Para la energía de 1 MeV la sección eficaz de choque es  $\sigma_s(\text{H}_2\text{O}) = 2\sigma_s(\text{H}) + \sigma_s(\text{O}) = 2 \times 3 + 8 = 14 \text{ b}$ .

Para la energía de 0.0253 eV la sección eficaz de choque no puede ser calculada a partir de la fórmula dado que se considera una baja energía. El valor experimental es de 103 b.

## Flujo neutrónico



La densidad de colisiones ( $F$ ) términos macroscópicos para diferentes rayos con la misma intensidad está dada por:

$$F = \sum_t (I_A + I_B + I_C + \dots)$$

## Flujo neutrónico

Asumiendo los neutrones como monoenergéticos, la densidad de colisiones puede definirse como:

$$F = \sum_t (n_A + n_B + n_C + \dots) v$$

Donde  $n_A$ ,  $n_B$  son las densidades de los neutrones en varios rayos y  $v$  es la velocidad del neutrón.

Si se sustituye el valor de la densidad total de los neutrones que golpean la placa ( $n$ ) en la ecuación anterior se obtiene:

$$F = \sum_t n v$$

# Flujo neutrónico

Si flujo neutrónico está dado por:

$$\Phi = n v$$

Por lo tanto:

$$F = \sum_t \Phi$$

Ejemplo: Un cierto reactor en investigación tiene un flujo de  $1 \times 10^{13}$  neutrones/cm<sup>2</sup>- s y un volumen de 64,000 cm<sup>3</sup>.

Si la sección eficaz de fisión  $\Sigma_f$  del reactor es de 0.1cm<sup>-1</sup>, cuál es la potencia del reactor?

La potencia puede obtenerse a partir de la velocidad de fisión utilizando la relación que existe entre la energía liberada por fisión (200 MeV) y la velocidad con la que ocurren las fisiones:

$$\text{Potencia} = \frac{1\text{MW}}{10^6 \text{ W}} \times \frac{1\text{W-s}}{\text{joules}} \times \frac{1.60 \times 10^{13} \text{ joule}}{\text{MeV}} \times \frac{200\text{MeV}}{\text{fisión}} \times \text{vel. de fisión}$$

$$= 3.2 \times 10^{-17} \text{ MW/fisión/s} \times \text{vel. de fisión}$$

La vel. de fisión se obtiene apartir de  $\Sigma_f \Phi = 0.1\text{cm}^{-1} \times 1 \times 10^{13}$  neutrones/cm<sup>2</sup>- s =  $1 \times 10^{12}$  neutrones/cm<sup>3</sup>- s

Sustituyendo la vel. de fisión se obtiene la potencia del reactor por cm<sup>3</sup>. Al multiplicar por el volumen del reactor se eliminan los cm<sup>3</sup>:

$$\begin{aligned} \text{Potencia} &= 3.2 \times 10^{-17} \text{ MW/fisión/s} \times 1 \times 10^{12} \text{ fisiones/cm}^3\text{- s} \times 64,000 \text{ cm}^3 \\ &= 2 \text{ MW.} \end{aligned}$$



# Datos sobre la sección eficaz neutrónica

## Como interactuan los neutrones con el núcleo?

La mayoría en 2 pasos, el neutrón choca con el núcleo y forma un núcleo compuesto, El núcleo compuesto decae en diferentes formas.

Para neutrones de 10 MeV.



En la formación del núcleo compuesto hay valores máximos de sección eficaz para ciertas energías de neutrones incidentes, estos máximos son llamados resonancia.

## Dispersión elástica

3 regiones diferentes: Baja energía es constante, no se forma núcleo compuesto y esta dada por:

$$\sigma_e \text{ (Disp potencial)} = 4\pi R^2$$

Mas allá de la energía de dispersión potencial esta la región de resonancia debido a la formación del núcleo compuesto. A energías mas altas se encuentra la tercera región llamada suave.

Ejemplo: Si a 4.8 b se da una dispersión potencial constante para el  $^{12}\text{C}$ , calcule el radio del núcleo de Carbono.

## Dispersión inelástica

Este proceso no ocurre a menos que el neutrón tenga suficiente energía para colocar el núcleo en el primer estado excitado.

Debido a lo anterior  $\sigma_i$  es cero hasta alcanzar una cierta energía. Generalmente la energía a la cual encuentra el primer estado excitado se decrementa conforme aumenta en número másico. Como consecuencia,  $\sigma_i$  no es cero en una región grande de energía para núcleos pesados mas que para núcleos ligeros.

## Captura radiactiva

La sección eficaz para la captura radiactiva se divide en 3 regiones:

En la región de baja energía:  $\sigma_\gamma$  tiende a  $1/(E)^{1/2}$ , como  $v$  es proporcional a  $(E)^{1/2}$ , por tanto,  $\sigma_\gamma$  tiende a  $1/v$ .

Arriba de la región  $1/v$ , está la región de resonancia y está dada por la formula de un nivel de Breit-Wigner.

Arriba de la región de resonancia, la cual termina en 1 eV en los núcleos pesados y se incrementa en grandes energías para núcleos ligeros,  $\sigma_\gamma$  cae rápidamente y suave a valore mas pequeños.

### **Reacciones de partículas cargadas**

Como regla, las reacciones (n, p) y (n,  $\alpha$ ) son endotérmicas y no ocurren abajo de ciertas energías Estas secciones eficaz tienden a ser pequeñas especialmente para núcleos pesados.

### **Sección eficaz total**

Dado que  $\sigma_t$  es la suma de todas las secciones eficaces, la variación de  $\sigma_t$  con la energía, refleja el comportamiento indiviual de cada sección eficaz, para bajas energías:

$$\sigma_t = 4\pi R^2 + C/(E)^{1/2}$$

Donde C es una constante.

$$\sigma_t = 4\pi R^2 + C/(E)^{1/2}$$

El primer término corresponde a la sección eficaz de dispersión elástica, el segundo término a la sección eficaz por captura radiactiva.

En la región de resonancia,  $\sigma_t$  es igual a las  $\sigma_v$  y  $\sigma_i$  ocurriendo en las mismas energías. Arriba de la región de resonancia,  $\sigma_t$  se comporta suave.

## **Hidrógeno y Deuterio**

Los núcleos de  $^1\text{H}$  y  $^2\text{H}$  interactúan con los neutrones en forma diferente a como lo hacen otros núcleos. La interacción con  $^1\text{H}$  y  $^2\text{H}$  no forman núcleos compuestos, por tanto no hay resonancia. La  $\sigma_s$  es constante hasta 10 KeV, y la  $\sigma_v$  es  $1/v$  para todas las energías, además, estos núcleos no tienen estados excitados y por tanto no ocurren dispersiones inelásticas.

Ejemplo: .

El valor de  $\sigma_v$  para el  $^1\text{H}$  a 0.0253 eV es 0.332 b. Cuál es el valor de  $\sigma_v$  para neutrones con una energía de 1 eV?.

Solución: Como  $\sigma_v$  es  $1/v$ , puede ser escrito como:

$$\sigma_v(E) = \sigma_v(E_0) \left( E_0/E \right)^{1/2}$$

Donde  $E_0$  es cualquier energía. En este problema,  $\sigma_v$  es conocida para neutrones de 0.0253 eV , entonces es razonable tomar a  $E_0$  como esta energía.

$$\begin{aligned}\sigma_v(1 \text{ eV}) &= 0.332 \left( 0.0253/1 \right)^{1/2} \\ \sigma_v(1 \text{ eV}) &= 0.0528 \text{ b}\end{aligned}$$

Ejemplo: .

El valor de  $\sigma_v$  para el  $^1\text{H}$  a 0.0253 eV es 0.332 b. Cuál es el valor de  $\sigma_v$  para neutrones con una energía de 1 eV?.

Solución 2: Como  $\sigma_v$  es  $1/v$ , y sabemos que la velocidad para neutrones menores a 20 MeV es (Ec. 2.12):

$$v = 1.383 \times 10^6 (E)^{1/2}$$

$$v = 1.383 \times 10^6 (1)^{1/2}$$

$$v = 1.383 \times 10^6 \text{ cm/s}$$

Como  $\sigma_v$  es  $1/v$ :

$$\sigma_v (1 \text{ eV}) = 1 / (1.383 \times 10^6)$$

$$\sigma_v (1 \text{ eV}) = 0.0528 \text{ b}$$

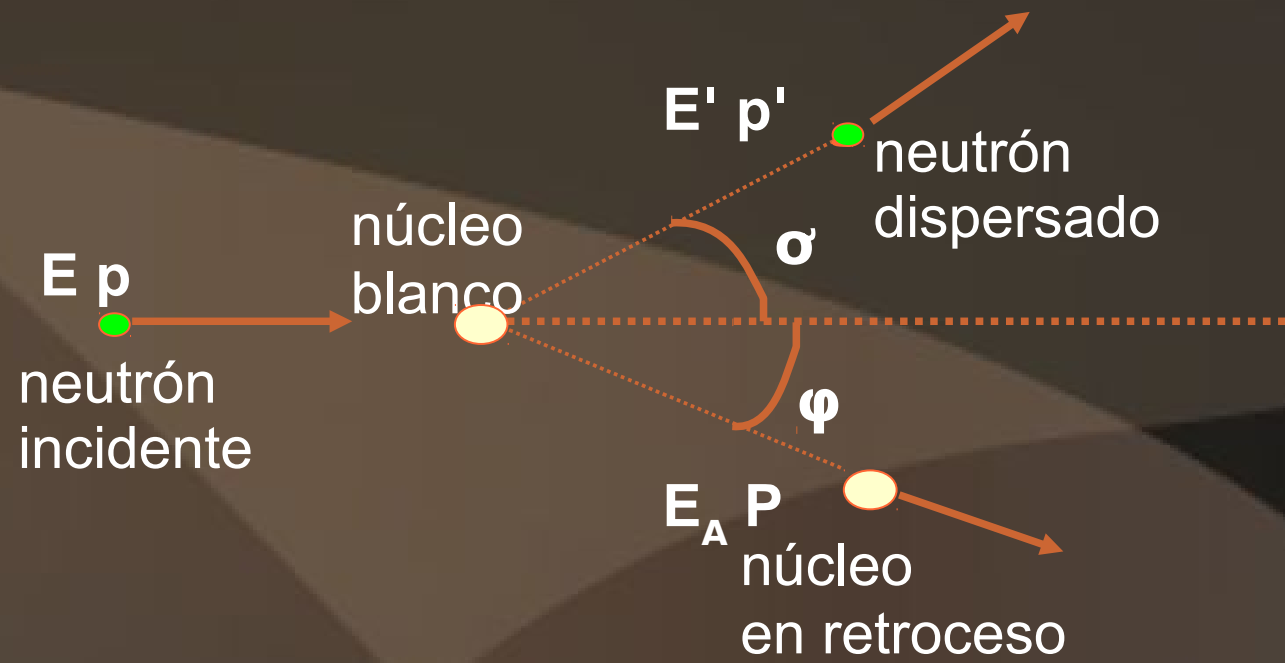
## **Pérdida de energía en una colisión por dispersión**

Cuando un neutrón es dispersado elásticamente al colisionar con un núcleo en reposo, el núcleo retrocede del lugar de colisión, entonces la energía cinética del neutrón disperso es menor que la del neutrón incidente por una cantidad igual a la energía requerida para que el núcleo retroceda.

De esta forma el neutrón pierde energía por dispersión elástica, siempre y cuando la energía interna del núcleo no cambie.

Utilizando las leyes de conservación de energía y momento podemos calcular la energía perdida por la dispersión elástica.





$$E = E' + E_A$$

$$p = p' + P$$

$$P^2 = p^2 + (p')^2 - 2 p p' \cos \sigma$$



Diagrama del vector para conservación de momentum

$$E' = \frac{E}{(A + 1)^2} [\cos \vartheta + \sqrt{A^2 - \sin^2 \vartheta}]^2.$$

Si  $\sigma$  es casi cero, entonces  $E' = E$

Si  $\sigma = \pi$ , entonces

$$(E')_{\min} = \left( \frac{A - 1}{A + 1} \right)^2 E = \alpha E,$$

Donde  $\alpha$  es llamado el parámetro de colisión.

$$\alpha = \left( \frac{A - 1}{A + 1} \right)^2$$

En muchos cálculos de ingeniería nuclear, es conveniente describir la colisión de neutrones en términos de una nueva variable llamada letargia.

$$u = \ln(E_M/E)$$

donde:  $E_M$  es arbitraria

El cambio promedio en la letargia en una colisión elástica esta dado por:

$$\xi = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \left( \frac{A+1}{A-1} \right),$$

### **Ejemplo:**

Un neutrón de 1 MeV es disperso en un ángulo de  $45^\circ$  en una colisión con un núcleo de  $^2\text{H}$ .

- a.) Cuál es la energía del neutrón dispersado?
- b.) Cuál es la energía del núcleo en retroceso?
- c.) Cuál es el cambio en la letargia del neutrón después de la colisión?

### Ejemplo:

Un neutrón de 1 MeV es disperso en un ángulo de  $45^\circ$  en una colisión con un núcleo de  $^2\text{H}$ .

a.) Cuál es la energía del neutrón dispersado?  $E' = 0.738 \text{ MeV}$

b.) Cuál es la energía del núcleo en retroceso?  $E_A = 0.262 \text{ MeV}$

c.) Cuál es el cambio en la letargia del neutrón después de la colisión?

Letargia en la colisión  $u = \ln(E_m/E)$  y después  $u' = \ln(E_m/E')$ , entonces el cambio en la letargia es  $du = u' - u = \ln(E/E') = (1/0.738) = 0.304$