

# Tema 6: Reacciones nucleares

---

César Fernández Ramírez  
Departamento de Física Interdisciplinar  
Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)



# Contextualización dentro de la asignatura

---

- Bloque I. Estructura nuclear
  - Tema 1: Principales características del núcleo atómico
  - Tema 2: La interacción nuclear. El deuterón y la interacción nucleón-nucleón
  - Tema 3: Modelos nucleares
- Bloque II. Radioactividad y desintegraciones nucleares
  - Tema 4: Desintegración nuclear
  - Tema 5: Procesos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$
- **Bloque III. Reacciones nucleares e interacción radiación-materia**
  - **Tema 6: Reacciones nucleares**
  - Tema 7: Interacción radiación-materia
- Bloque IV. Física subnuclear
  - Tema 8: El Modelo Estándar de partículas elementales
  - Tema 9: Quarks y hadrones

# Cronograma

	L	M	X	J	V	S	D
<b>Octubre</b>		1	2	3	4	5	6
	7	8	9	10	11	12	13
	14	15	16	17	18	19	20
	21	22	23	24	25	26	27
	28	29	30	31			
<b>Noviembre</b>					1	2	3
	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17
	18	19	20	21	22	23	24
	25	26	27	28	29	30	
<b>Diciembre</b>							1
	2	3	4	5	6	7	8
	9	10	11	12	13	14	15
	16	17	18	19	20	21	22
	23	24	25	26	27	28	29
	30	31					
<b>Enero</b>			1	2	3	4	5
	6	7	8	9	10	11	12
	13	14	15	16	17	18	19
	20	21	22	23	24	25	26
	27	28	29	30	31		

<b>Bloque I</b>
Tema 1
Tema 2
Tema 3
<b>Bloque II</b>
Tema 4
Tema 5
<b>Bloque III</b>
Tema 6
Tema 7
<b>Bloque IV</b>
Tema 8
Tema 9

PEC
Apertura TE
Exámenes
Periodo vacacional
Cierre TE

## Material disponible

---

- Material disponible en el repositorio Github de la asignatura
  - <https://github.com/cefera/FNyP>
- Esta presentación:
  - [./Presentaciones/Tema6.pdf](#)
- Código en Python asociado:
  - [./Notebooks/Tema6.ipynb](#)

# Esquema

---

- Características generales. Clasificación.
- Leyes de conservación en las reacciones nucleares.
- Balance energético.
- Cinemática de las reacciones.
- Sección eficaz. Fórmula de Breit-Wigner.
- Modelo del núcleo compuesto. Reacciones directas.
- Resonancia.
- Fisión.
- Fusión.

## Objetivos específicos

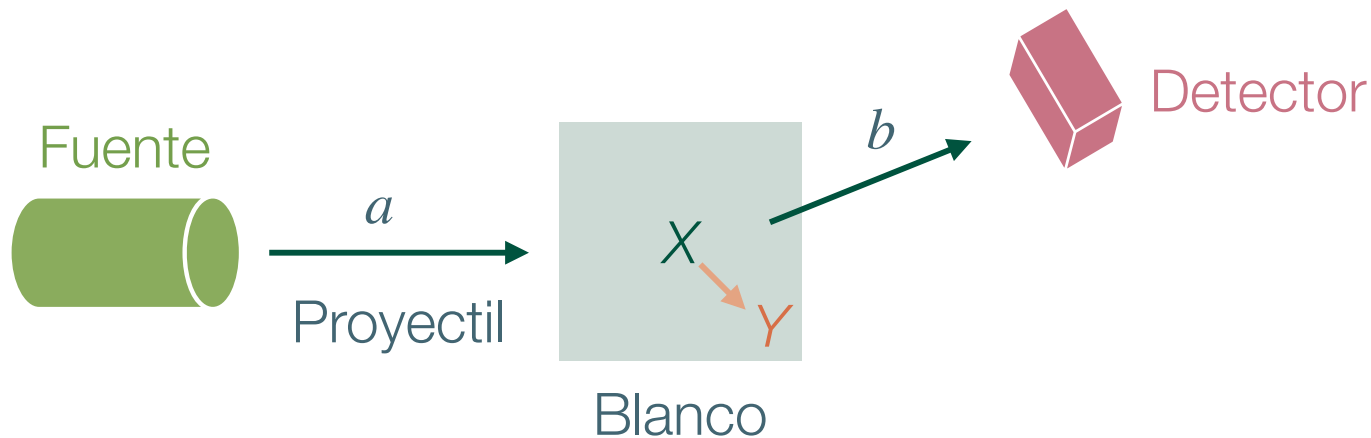
---

- Estudiar las principales características de una reacción nuclear.
- Estudiar la aplicabilidad de las leyes de conservación de las reacciones nucleares.
- Obtener la energía de las partículas participantes en las reacciones nucleares.
- Comprender el concepto de sección eficaz. Cálculo de secciones eficaces.
- Desarrollar el modelo del núcleo compuesto.
- Estudiar la resonancia nuclear. Ejemplos.
- Introducción a la Fisión y a la Fusión.

# Introducción

---

- Las reacciones nucleares son el principal mecanismo para estudiar las propiedades nucleares. Permiten estudiar:
  - La dinámica de las transmutaciones nucleares
  - La estructura nuclear
- La reacción nuclear se suele representar:  $a + X \rightarrow b + Y$  o  $X(a, b)Y$
- Se requieren: Fuentes de proyectiles, blancos y detectores apropiados



# Leyes de conservación

---

- Energía
- Momento lineal
- Carga eléctrica
- Número de nucleones (número bariónico, ver Tema 9).
- Momento angular total
- Paridad (interacción fuerte)
- Isospín



## Conservación de la energía-momento

---

- Sea la reacción:  $a + X \rightarrow b + Y$
- La conservación de la energía implica:  $m_a c^2 + T_a + m_X c^2 + T_X = m_b c^2 + T_b + m_Y c^2 + T_Y$   
y  $Q = (m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}})c^2$ , es decir:

$$Q = m_a c^2 + m_X c^2 - m_b c^2 - m_Y c^2 = T_b + T_Y - T_a - T_X$$

$Q > 0$ ; exoenergética

$Q = 0$ ; elástica

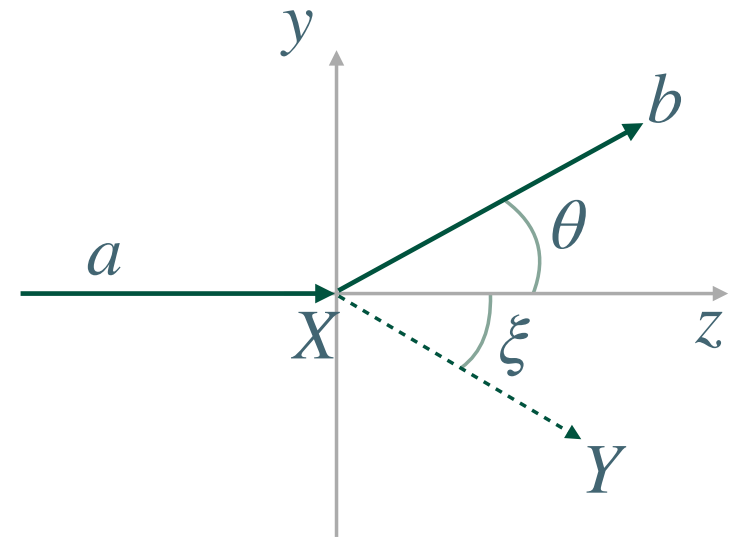
$Q < 0$ ; endoenergética

- La expresión es válida en cualquier sistema de referencia
- Los cálculos pueden ser no relativistas si las partículas que participan son muy pesadas

## Sistema de referencia del laboratorio (lab)

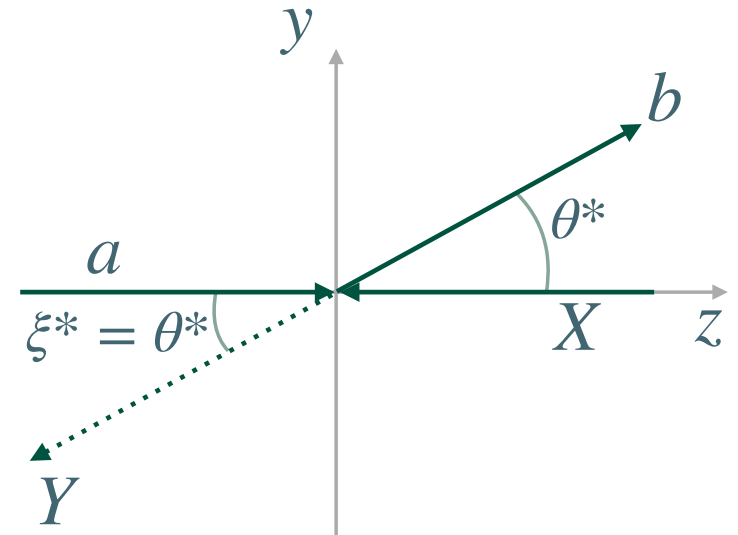
---

- Se cumple que el blanco está en reposo  
 $\Rightarrow T_X = 0$
- $\vec{p}_a + \vec{p}_X = \vec{p}_b + \vec{p}_Y$ , luego:  
$$p_a = p_b \cos \theta + p_Y \cos \xi$$
$$0 = p_b \sin \theta - p_Y \sin \xi$$
- Normalmente se conoce la información del proyectil y se detecta la energía y el ángulo de la partícula  $b$  saliente



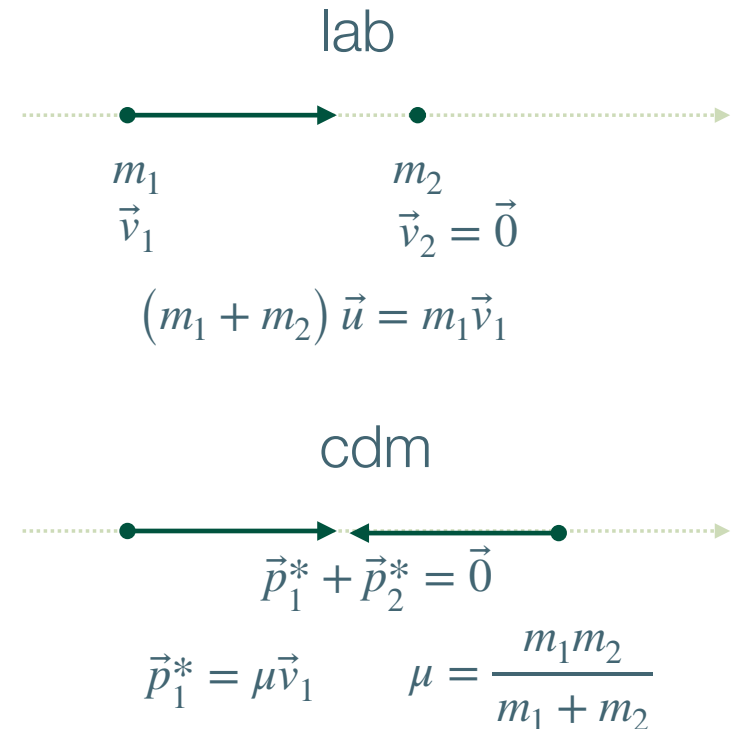
## Sistema centro de masas (cdm)

- Muchos cálculos son más sencillos de realizar en el sistema centro de masas
- Se cumple:  $\vec{p}_a^* + \vec{p}_X^* = \vec{0} = \vec{p}_b^* + \vec{p}_Y^*$   
y  $\xi^* = \theta^*$
- En el caso no relativista para una reacción endoenergética  $T^* \geq |Q|$  donde  $T^* = T_a^* + T_X^*$  se cumple  $p_a^* = -p_X^*$  y  $v_X^* = -v_a^* m_a / m_X$   
$$\Rightarrow T^* = T_a^* \left( 1 + \frac{m_a}{m_X} \right)$$



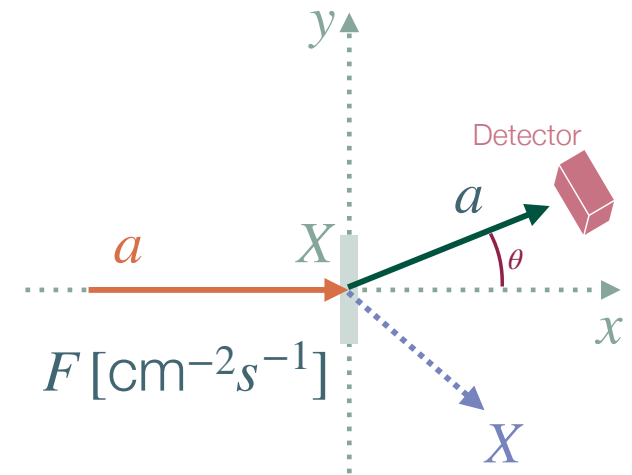
## Relación entre lab y cdm

- En el lab:  $T = T_a = \frac{1}{2}m_a v_a^2$
- Se cumple:  $v_a = v_a^* - v_X^* = v_a^* \left(1 + \frac{m_a}{m_X}\right)$  y  
 $T = T^* \left(1 + \frac{m_a}{m_X}\right)$  y la condición  $T^* \geq |Q|$   
 se puede escribir  $T \geq |Q| \left(1 + \frac{m_a}{m_X}\right)$  en  
 donde el  $=$  identifica el umbral energético



## Sección eficaz (I)

- Proporciona la probabilidad de interacción de una partícula con el blanco
- Supongamos el caso elástico:  $a + X \rightarrow a + X$ 
  - Projectiles con Flujo  $F$
  - Blanco de material  $X$  con densidad de blancos por unidad de volumen  $n$  [ $\text{cm}^{-3}$ ]
  - Se supone que el espesor del blanco es muy delgado
  - El detector subtende un ángulo sólido  $d\Omega$
  - El haz tiene una superficie finita  $S$
  - El número de total de partículas incidentes por unidad de tiempo es  $N_{inc} = FS$



## Sección eficaz (II)

---

- Al colisionar los proyectiles con el blanco se produce la dispersión del proyectil, saliendo con un ángulo  $\theta$  (ángulo de dispersión)
- Sea  $N_s(\theta)$  el número de partículas dispersadas detectadas por unidad de tiempo en el ángulo sólido  $d\Omega$  subtendido por el detector
- La sección eficaz diferencial es:  $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{F} \frac{dN_s}{d\Omega}$
- La sección eficaz total es:  $\sigma(E) = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega$
- Al integrar  $N_s(\theta)$  para todo el ángulo sólido se obtiene el total de partículas dispersada por unidad de tiempo  $N_{tot}$
- Entonces:  $N_{tot} = \sigma[F S]n\Delta x = N_{inc}n\sigma\Delta x \Rightarrow \frac{N_{inc}}{N_{tot}} = n\sigma\Delta x$  entonces  $\sigma$  es la probabilidad de interacción por proyectil y por blanco

## Sección eficaz (III)

---

- Sección eficaz elástica:  $a + A \rightarrow a + A$
- Sección eficaz inelástica:  $a + A \rightarrow b + B$
- La sección eficaz clásica es  $\sigma = \pi R^2$ 
  - Para  $R \sim 2 - 7 \text{ fm}$ ,  $\sigma \sim 12 - 150 \text{ fm}^2$
  - La unidad es el barn.  $1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$

## Probabilidad de supervivencia del proyectil

---

- Calcular la probabilidad de que no haya interacción a lo largo de un recorrido
- Importante para la interacción de partículas con la materia
$$P(x + dx) = P(x)(1 - n\sigma dx) \Rightarrow P(x) = e^{-n\sigma x}$$
- Dado un haz con  $N_0$  partículas que inciden en un material de espesor  $L$ , la ley de atenuación viene dada por:  $N = N_0 e^{-n\sigma L}$



## Recorrido libre medio

---

- $\lambda = \frac{\int xP(x)dx}{\int P(x)dx} = \frac{1}{n\sigma} \Rightarrow P(x) = e^{-x/\lambda} = e^{-\mu x}$  donde  $\mu$  es el coeficiente de absorción
- Si conocemos el hamiltoniano de interacción, podemos calcular la sección eficaz a partir de la regla de oro de Fermi
$$\sigma_{a \rightarrow b} = \frac{1}{\pi \hbar^4} \left| \langle H_{fi} \rangle \right|^2 \frac{p_b^2}{v_a v_b}$$
 donde  $p_b, v_a$ , y  $v_b$  vienen dadas en el centro de masas

## Tipos de reacciones según la energía

---

- Baja  
 $\leq 10$  MeV/nucleón. Se estudia la estructura y los niveles nucleares. Los cálculos suelen ser no relativistas
- Intermedia  
 $100 \leq E \leq 1000$  MeV. Es el dominio de la física de producción de mesones ligeros. Los cálculos han de ser relativistas
- Alta  
 $E \geq 1$  GeV. Física hadrónica y de partículas

# Tipos de reacciones según el mecanismo

---

- Directas
  - El proyectil atraviesa el blanco interactuando con un nucleon, con un grupo de nucleones o con todo el núcleo ( $\sim 10^{-22}$  s). Ejemplo: dispersión elástica.
- Formación de núcleo compuesto
  - El proyectil es capturado por el blanco y la energía es compartida en varios pasos por los nucleones. Se pueden arrancar partes del núcleo. El tiempo que tarda el proyectil en atravesar el núcleo es mayor que para las reacciones directas. Ejemplo: fisión en núcleos pesados
- Reacciones de pre-equilibrio.
  - Puede ocurrir que una partícula no sea emitida inmediatamente después de interactuar. El proyectil interactúa con los nucleones compartiendo la energía con varios de ellos y que sea emitida más tarde pero antes de que el núcleo alcance el equilibrio termodinámico. Estas reacciones son importantes para el estudio del mecanismo de termalización. Ejemplo: colisión de iones pesados.

## Dispersión de Rutherford (I)

---

- Dispersión de partículas cargadas por un potencial de Coulomb  $V_C(r) = \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0 r}$
- La partícula proyectil debe franquear una barrera energética  $B = V_C(R)$  donde  $R$  es el radio nuclear. Esta barrera es la misma que la del modelo de Gamow de la desintegración  $\alpha$  (ver Tema 5 y su relación con el efecto tunel).

Ejemplos:

$$e + {}^{12}\text{C} : V_C(R) = \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{6 \times 1,439976 \text{ MeV fm}}{1,25 \text{ fm} \times 12^{1/3}} = 3 \text{ MeV}$$

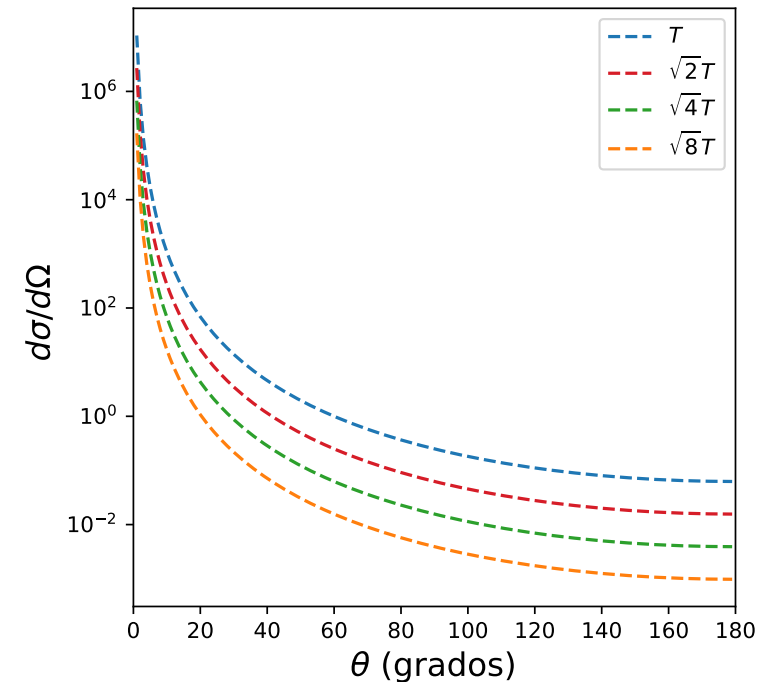
$$e + {}^{208}\text{Pb} : V_C(R) = \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{82 \times 1,439976 \text{ MeV fm}}{1,25 \text{ fm} \times 208^{1/3}} = 16 \text{ MeV}$$

## Dispersión de Rutherford (II)

- La sección eficaz de Rutherford es:

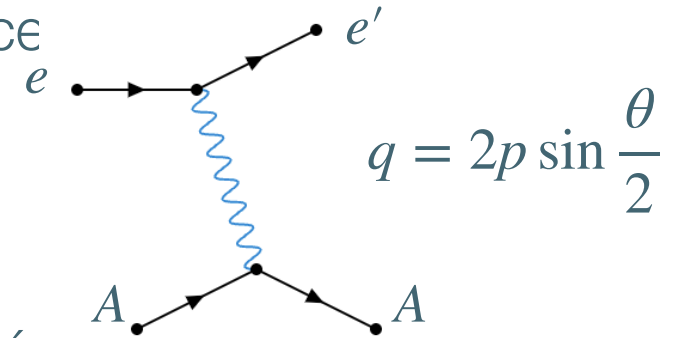
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left[ \frac{zZe^2}{16\pi\epsilon_0 T_a} \right]^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

- Sirvió para poner en evidencia la existencia del núcleo atómico



## Dispersión electrón-núcleo. Factor de forma

- Dispersión electrón-núcleo  $A(e, e')A$  suponiendo que el núcleo es una carga puntual de momento angular cero y no existe retroce

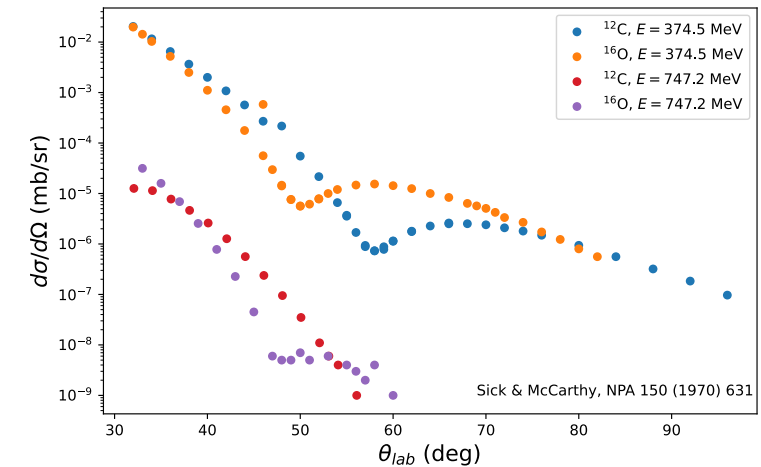


$$\sigma(\theta) \Big|_{\text{Mott}} = \left( \frac{Z\alpha}{2E_1\beta^2} \right) \left( 1 - \beta^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

donde  $E_1^2 = m_e^2(1 + \beta^2)$  y  $\beta$  es la velocidad del electrón

$$\sigma(\theta) = |F(q^2)|^2 \sigma(\theta) \Big|_{\text{Mott}}$$

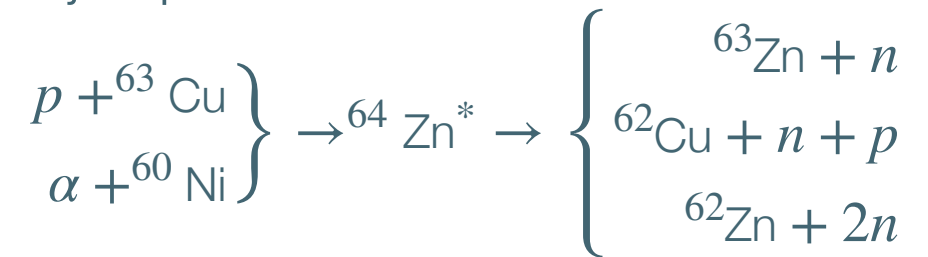
$$F(q^2) = \frac{4\pi}{q} \int \rho(r) \sin(qr) r dr$$



## Reacciones de núcleo compuesto

---

- Ejemplo:



- El núcleo compuesto decae «olvidándose» de cómo se había formado

## Fórmula de Breit-Wigner

---

- El proceso se representa en el caso más simple como  $a + X \rightarrow R \rightarrow b + Y$
- Queda determinado si se conocen  $a$  y  $b$
- El núcleo  $R$  es diferente de  $X$
- La sección eficaz es el producto:  $\sigma_{ab} = \sigma_a \frac{\Gamma_b}{\Gamma}$  donde  $b$  representa un determinado canal de desintegración de anchura  $\Gamma_b$  y es uno de los canales posibles, es la anchura total es  $\Gamma = \sum_i \Gamma_i$
- En el caso de que se formen resonancias, se suelen describir mediante la fórmula de Breit-Wigner:  $\sigma_{ab} = \pi \left( \frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 g \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E_r - E)^2 + \Gamma^2/4}$  donde  $g = \frac{2J + 1}{(2s_a + 1)(2s_X + 1)}$  es el factor estadístico que da la multiplicidad del espín,  $J$  es el momento angular total de la resonancia, y  $E_r$  es la energía a la que pica la sección eficaz. Recordatorio:  $\lambda/2\pi = \hbar/p$



## Reacciones directas

---

- Estas reacciones se suelen observar a partir de 5 MeV de energía cinética del proyectil
- En muchos casos se pueden interpretar como reacciones con nucleones individuales
- Ejemplos:
  - Reacción de transferencia:  $^{16}\text{O} + d \rightarrow ^{17}\text{O} + p$
  - *Pick up* en las que el proyectil le quita un nucleón al núcleo:  $X(p, d)Y$ 
    - La interacción es periférica
    - El momento angular orbital transferido:  $|\vec{r} \times \vec{q}| = \sqrt{\ell(\ell + 1)}\hbar$  luego si la reacción es periférica y el proyectil tiene radio  $r_a$  se cumple  $(r_a + R)q = \sqrt{\ell(\ell + 1)}\hbar$  lo que permite estimar qué orbitales del modelo de capas se ven involucradas en la reacción

## Modelo óptico (I)

---

- Toma el problema de la interacción de una partícula y un núcleo como la dispersión la partícula incidente con un potencial  $U(r)$  y se resuelve la ecuación de Schrödinger correspondiente
- El potencial  $U(r)$  es complejo para poder modelar absorción y la aparición de otros canales de reacción 
$$U(r) = \begin{cases} V_0 + iW_0 & r \leq R \\ 0 & r > R \end{cases}$$

## ¿Qué significa un potencial complejo?

---

- Supongamos que resolvemos la ecuación de Schrödinger con un potencial real  $H|\psi_n\rangle = E_n|\psi_n\rangle$ , entonces  $E_n$  es real y si calculamos la evolución temporal de un autoestado  
$$|\psi_n(t)\rangle = U(t)|\psi_n\rangle = e^{iE_nt}|\psi_n\rangle \Rightarrow \langle\psi_n(t)|\psi_n(t)\rangle = \langle\psi_n|U^\dagger(t)U(t)|\psi_n\rangle = \langle\psi_n|\psi_n\rangle = 1$$
- Si resolvemos la ecuación el caso en el que el potencial es complejo, entonces  $H|\psi_n\rangle = (E_n^r + iE_n^i)|\psi_n\rangle$  y si calculamos la evolución temporal de un autoestado  
$$|\psi_n(t)\rangle = U(t)|\psi_n\rangle = e^{iE_n^rt}e^{-E_n^it}|\psi_n\rangle$$
$$\Rightarrow \langle\psi_n(t)|\psi_n(t)\rangle = \langle\psi_n|U^\dagger(t)U(t)|\psi_n\rangle = e^{-2E_n^it}\langle\psi_n|\psi_n\rangle = e^{-2E_n^it}$$
- Por lo tanto tenemos una «fuga» de probabilidad
- Añadir una parte imaginaria al potencial ayuda a modelar efectos no elásticos como la absorción o la apertura de nuevos canales

## Modelo óptico (II)

---

- El número de onda  $k$  se puede escribir  $k = k_r + ik_i$ . Si  $W_0 \ll V_0$ :

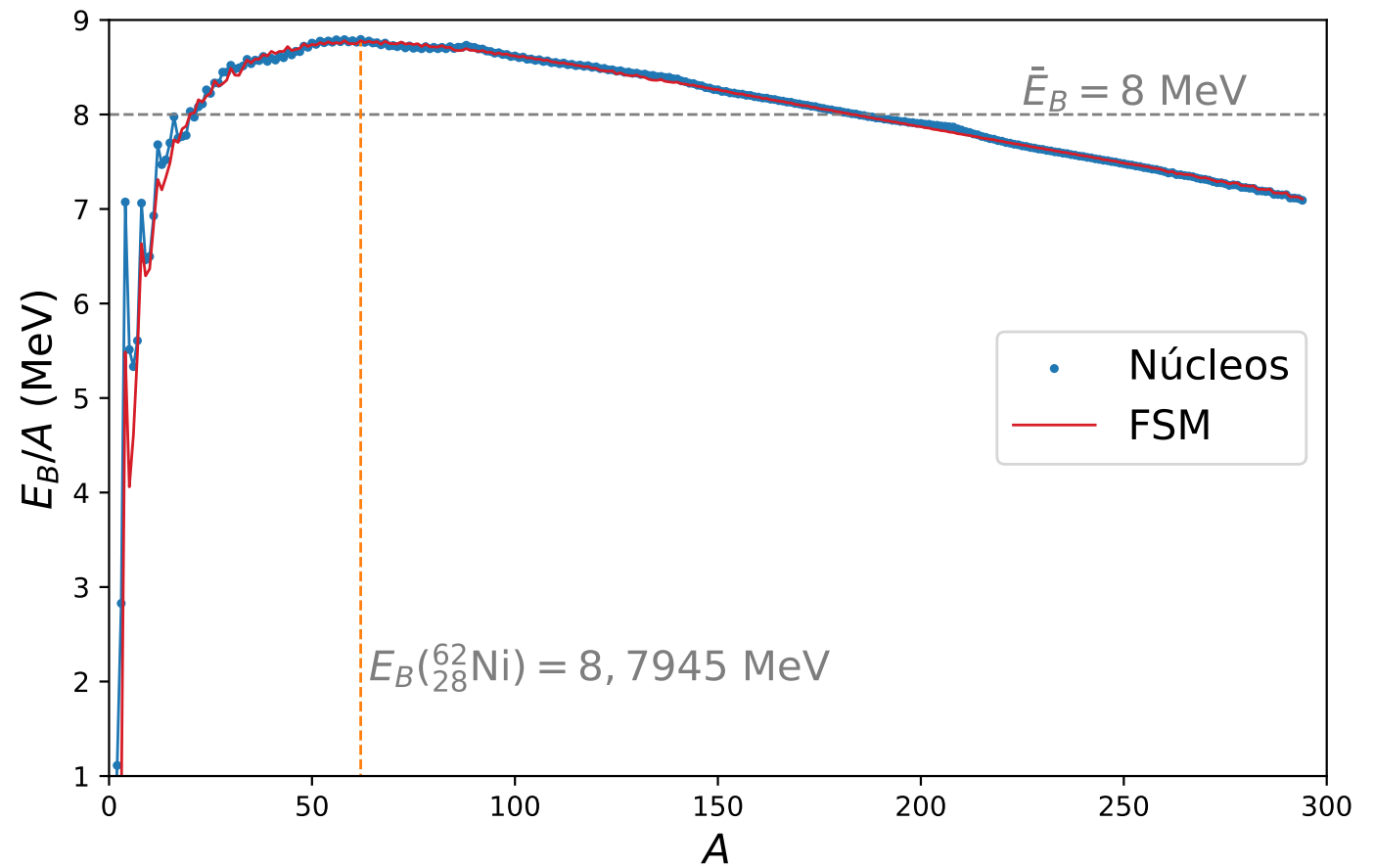
$$k = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (E + V_0 + iW_0)} \approx \frac{1}{\hbar} \sqrt{2m(E + V_0)} + i \frac{W_0}{2\hbar} \sqrt{\frac{2m}{E + V_0}}$$

y la función de onda

toma la forma de una onda esférica que se atenúa  $\psi \sim \frac{e^{ik_r r}}{r} e^{-k_i r}$

- El modelo óptico proporciona sus mejores resultados para energías  $\geq 10$  MeV y núcleos de masa media
- Se consigue reproducir bien el comportamiento medio de las secciones eficaces de dispersión y absorción

## Fisión y fusión. Recordatorio



# Fisión nuclear

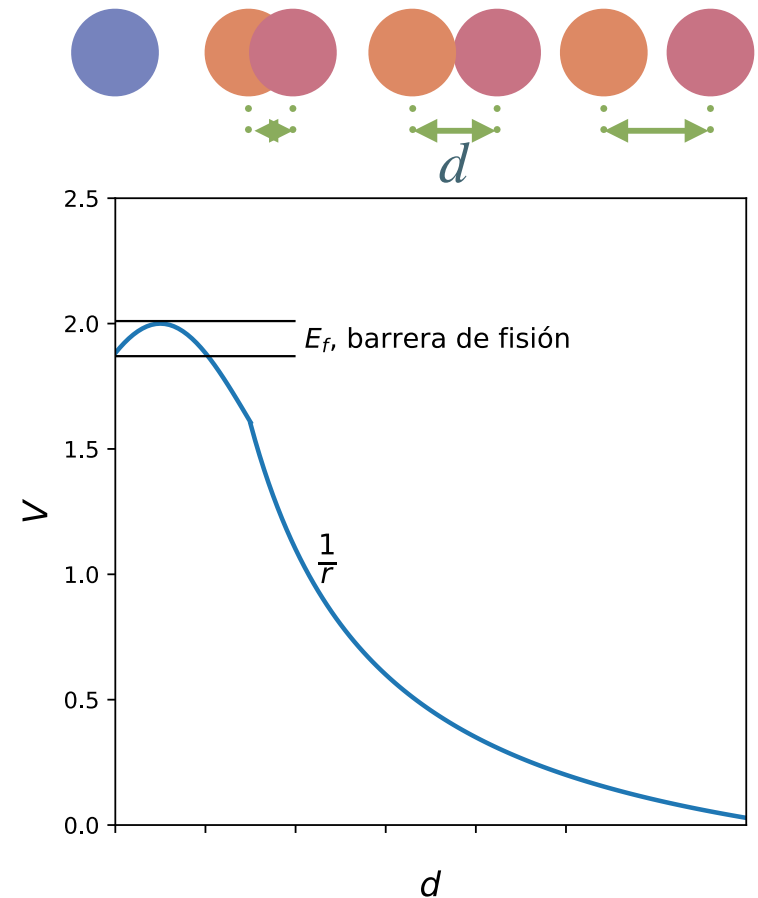
---

- Proceso por el que un núcleo de número másico  $A$  se rompe en dos núcleos con número másico  $\approx A/2$ . En el proceso se suelen emitir neutrones  
 $X \rightarrow Y + Z + n + n + \dots$
- Los núcleos resultantes son altamente inestables al estar lejos del valle de estabilidad, iniciando cadenas radiactivas
- La fisión es el resultado de la competición entre las fuerzas nucleares atractivas y las coulombianas repulsivas
- El proceso es exoenergético  $Q = m_{\text{ini}} - m_{\text{fin}} = E_B(\text{fin}) - E_B(\text{ini}) > 0$
- Ejemplo:  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{119}_{46}\text{Pd} + ^{119}_{46}\text{Pd}$ , con  $(B/A)_{\text{U}} \sim 7,6 \text{ MeV/nucleón}$  y  $(B/A)_{\text{Pd}} \sim 7,6 \text{ MeV/nucleón}$  implica  $Q \simeq 238(8,5 - 7,6) \sim 214 \text{ MeV}$  por fisión, es decir, más de 6 órdenes de magnitud que en una reacción química
- Para núcleos con  $A > 300$  la fisión espontánea es el proceso dominante



## Barrera de fisión

- El problema es similar al abordado en el modelo de desintegración  $\alpha$  de Gamow
- Hay que superar la barrera coulombiana, pero esta vez debida a los dos núcleos finales
- Se plantea un potencial debido a la deformación nuclear consecuencia de la enormes fuerzas centrífugas del núcleo padre
- Se deforma el núcleo esférico y se observa un máximo de energía potencial en función de la deformación. La energía de activación es la energía necesaria para franquear la barrera de fisión





## Modelo de la gota líquida para la fisión (I)

---

- Se considera el núcleo como una gota líquida elipsoidal con ejes:  $a = R(1 + \epsilon)$  y  $b = R/\sqrt{1 + \epsilon}$  con volumen  $V = \frac{4}{3}\pi ab^2$  es el mismo que si fuera esférico al considerar el núcleo como incompresible
- Al deformarse la superficie aumenta:  $S = 4\pi R^2 \left(1 + \frac{2}{5}\epsilon^2 + \dots\right)$  con lo que el aumento de la energía de la superficie es  $E'_S = \alpha_S A^{2/3} \left(1 + \frac{2}{5}\epsilon^2 + \dots\right)$  y la energía coulombiana disminuye  $E'_C = \alpha_C \left(1 - \frac{1}{5}\epsilon^2 + \dots\right)$  con lo que la diferencia entre la energía de ligadura entre el núcleo deformado y el esférico a orden  $\epsilon^2$  es
$$\Delta E = E_B(\epsilon) - E_B(0) \approx \epsilon^2 \left( \frac{1}{5}\alpha_C Z^2 A^{-1/3} - \frac{2}{5}\alpha_S A^{2/3} \right)$$

## Modelo de la gota líquida para la fisión (II)

---

- La fisión espontánea tendrá lugar si la configuración nuclear deformada es energéticamente más favorable que la esférica,  $\Delta E > 0$ , es decir,  
$$\frac{1}{5}\alpha_C Z^2 A^{-1/3} > \frac{2}{5}\alpha_S A^{2/3}$$
 que numéricamente se corresponde con  $Z^2/A > 49$ , lo que lleva a  $A > 300$
- La fisión es un fenómeno similar a la desintegración alfa
- La barrera de fisión puede ser franqueada de manera natural o inducida artificialmente distinguiéndose la fisión espontánea de la fisión inducida

## Características de la fisión inducida (I)

---

- Para el Uranio y algunos transuránidos la fisión espontánea es prácticamente despreciable
- El procedimiento para activar la fisión consiste en bombardear el núcleo fisible con neutrones térmicos (energía cercana a 0,025 eV). La reacción típica es:  
$$n + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{93}_{37}\text{Rb} + {}^{141}_{55}\text{Cs} + 2n$$
 (los núcleos finales pueden ser muy variados, como Zr + Te o Kr + Ba, etc.)

## Características de la fisión inducida (II)

---

- Las secciones eficaces de fisión siguen la ley para neutrones térmicos  $\sigma \sim 1/v$  con picos de resonancias entre 1 y 100 eV
- El número de neutrones producidos,  $\nu_n$ , no es siempre el mismo y depende del número másico del elemento fisible. Los neutrones se producen instantáneamente con la fisión
- Aparecen cadenas radiactivas artificiales
- También aparecen neutrones retardados, consecuencia de la aparición de núcleos altamente excitados en las desintegraciones
- En el caso del  $^{235}\text{U}$  los fragmentos se acumulan alrededor de  $A_X = 95$  y  $A_Y = 140$ .

# Fusión nuclear

---

- Tienen lugar entre núcleos ligeros que se fusionan dando lugar a núcleos más pesados
- Este es un proceso exoenergético
- Para que la reacción tenga lugar se tiene que vencer la barrera coulombiana
- Las reacciones de fusión son las que generan la energía en el Sol y las estrellas

## Procesos básicos de fusión nuclear

---

- Los núcleos han de tener la suficiente energía cinética como para vencer la barrera coulombiana o al menos para tener una elevada probabilidad de que se produzca el efecto túnel
- Los procesos más importantes son:
  - Reacciones deuterón-deuterón (D-D)
$${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + n \quad Q = 3,27 \text{ MeV}$$
$$\rightarrow {}^3\text{H} + p \quad Q = 4,03 \text{ MeV}$$
  - Reacción deuterón-tritio (D-T)
$${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n \quad Q = 17,6 \text{ MeV}$$
  - ${}^2\text{H} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p \quad Q = 14,7 \text{ MeV}$ , pero precisa Helio-3
  - En las estrellas el proceso es:  $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e \quad Q = 26,2 \text{ MeV}$

## Características de la fusión nuclear (I)

---

- Energética
  - La energía de los proyectiles suele ser muy pequeña  $T_a \approx 1 - 10 \text{ keV}$
  - Si se desprecia  $Q = T_b + T_Y = T_b(1 + m_b/m_Y)$ . En la reacción D-T, el neutrón emitido se lleva el 80% de la energía
- Barrera coulombiana
  - Ha de ser superada
  - Su valor es  $V_C = \alpha \hbar c \frac{Z_a Z_X}{R_a + R_X}$ . Para D-T  $V_C = 0,4 \text{ MeV}$

## Características de la fusión nuclear (II)

---

- Sección eficaz

- Fuera de la región de las resonancias se cumple:  $\sigma \propto \frac{1}{v^2} e^{-2G}$  donde  $G$  es el factor de Gamow (el mismo que para la desintegración alfa), que contiene el factor de penetración de la barrera coulombiana y recuerda que la reacción se ha de producir mediante efecto túnel. Para este caso particular y como  $Q \ll B$  se cumple

$G = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\pi Z_a Z_X}{\hbar v}$  y sólo hace falta conocer el elemento de matriz nuclear. Se obtiene:

$$\sigma_{aX}(E) \sim \left( \frac{a}{E} \right) \exp \left[ -\frac{2\sqrt{2m}}{\hbar\sqrt{E}} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \pi Z_a Z_X \right], \text{ parametrizándose: } \ln(E\sigma_{aX}) = A' - \frac{B'}{\sqrt{E}}$$

donde los parámetros  $A'$  y  $B'$  son determinados experimentalmente



## Resumen

---

- Las reacciones nucleares son el principal mecanismo para estudiar las propiedades nucleares.
- Leyes de conservación: Energía, momento lineal, carga eléctrica, número de nucleones, momento angular total, paridad (interacción fuerte) e isospín.
- Relación entre los sistemas centro de masas y laboratorio.
- Sección eficaz.
- Tipos de reacciones.
- Fisión y fusión.