

Tema 1. Principales características del núcleo atómico

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 α , β y γ
- 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
Octubre		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			
Noviembre					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	
Diciembre							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					
Enero			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		

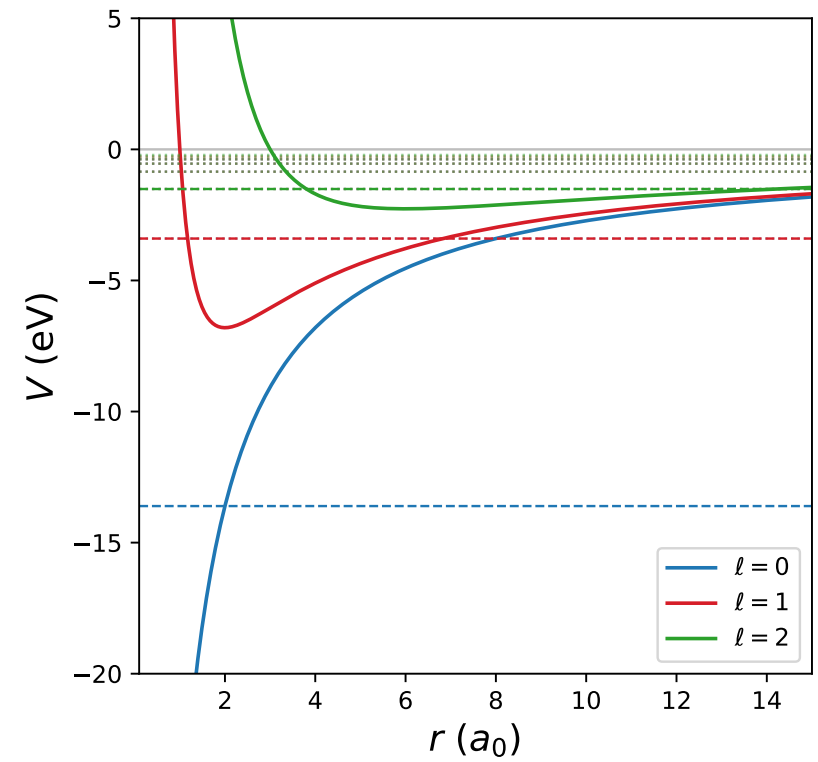
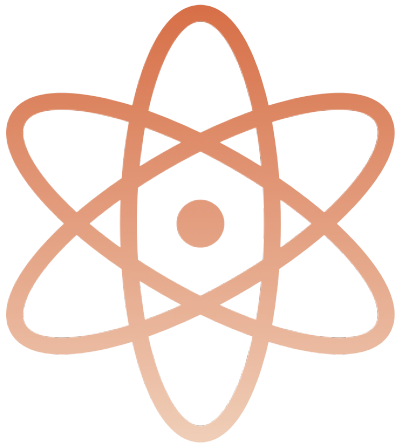
Bloque I
Tema 1
Tema 2
Tema 3
Bloque II
Tema 4
Tema 5
Bloque III
Tema 6
Tema 7
Bloque IV
Tema 8
Tema 9

Apertura foros
Apertura TE
PEC
Periodo vacacional
Cierre foros
Exámenes
Cierre TE

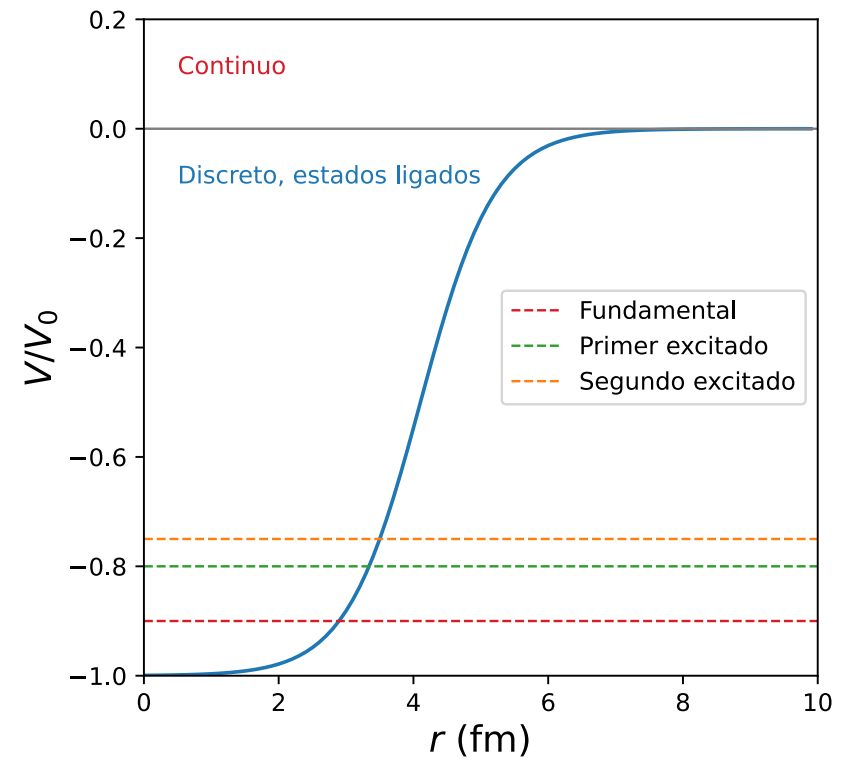
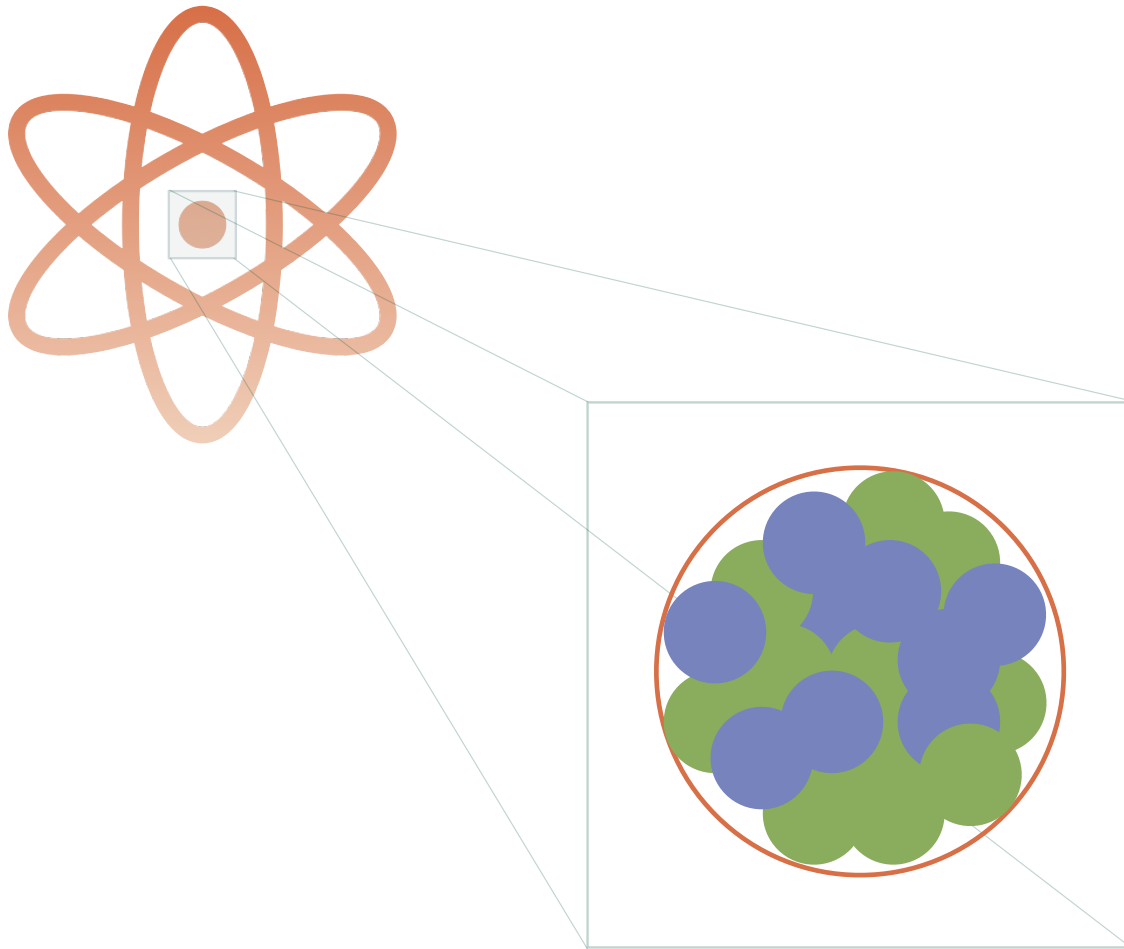
Esquema

- Introducción
- Tamaño y distribución de la carga nuclear. Medida del radio de los núcleos
- Masa y abundancia de los núcleos
- Estabilidad nuclear. Parábola de masas
- Espín, paridad y momentos magnéticos nucleares
- Estructura de los niveles energéticos nucleares

El núcleo



El núcleo



Introducción. Nomenclatura.

- Nucleones: protones y neutrones
- Núcleos = A nucleones, Z protones y $N=A-Z$ neutrones
- A = de 1 a ≈ 260
- Notación A_ZX . Ejemplos:

$$\left. \begin{array}{l} Z = 1 \\ N = 0 \end{array} \right\} {}^1_1H, \quad \left. \begin{array}{l} Z = 1 \\ N = 1 \end{array} \right\} {}^2_1H,$$

$$\left. \begin{array}{l} Z = 92 \\ N = 143 \end{array} \right\} {}^{235}_{143}U, \quad \left. \begin{array}{l} Z = 92 \\ N = 146 \end{array} \right\} {}^{238}_{143}U.$$

- ≈ 350 núcleos estables, ≈ 2000 núcleos inestables
- Núcleos pares e impares
- Isótopos (mismo Z), Isótonos (mismo N), isóbaros (mismo A)

Introducción. Propiedades de los nucleones

	Masa	Vida media	Carga	μ	Espín
Protón	$1,67262 \times 10^{-27} \text{ kg}$ $938,272 \text{ MeV}/c^2$	$\tau_p > 0,96 \times 10^{30} \text{ años}$	+e	$2,7928 \mu_N$	1/2
Neutrón	$1,67492 \times 10^{-27} \text{ kg}$ $939,566 \text{ MeV}/c^2$	$\tau_n = 878,4 \pm 0,5 \text{ s}$	0	$1,9130 \mu_N$	1/2

$$m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$$

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 3,152 \times 10^{-14} \text{ MeV/T}$$

Introducción. Interacción nuclear

- Existencia y estabilidad de los núcleos \Rightarrow Interacción fuerte atractiva
- Corto alcance ($\approx 1\text{ fm}$)
- Independencia de la carga
- Ha de compensar la repulsión Coulombiana entre protones
- La interacción no distingue entre protones y neutrones \Rightarrow simetría de isospín

Introducción. Isospín

- El protón y el neutrón pueden ser descritos simultáneamente mediante una partícula de isospín $T=1/2$: el nucleón

$$|p\rangle = |T = \frac{1}{2}, T_3 = +\frac{1}{2}\rangle$$

$$|n\rangle = |T = \frac{1}{2}, T_3 = -\frac{1}{2}\rangle$$

$$|0,0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|p\rangle \otimes |n\rangle - |n\rangle \otimes |p\rangle]$$

$$|1,1\rangle = |p\rangle \otimes |p\rangle$$

$$|1,0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|p\rangle \otimes |n\rangle + |n\rangle \otimes |p\rangle]$$

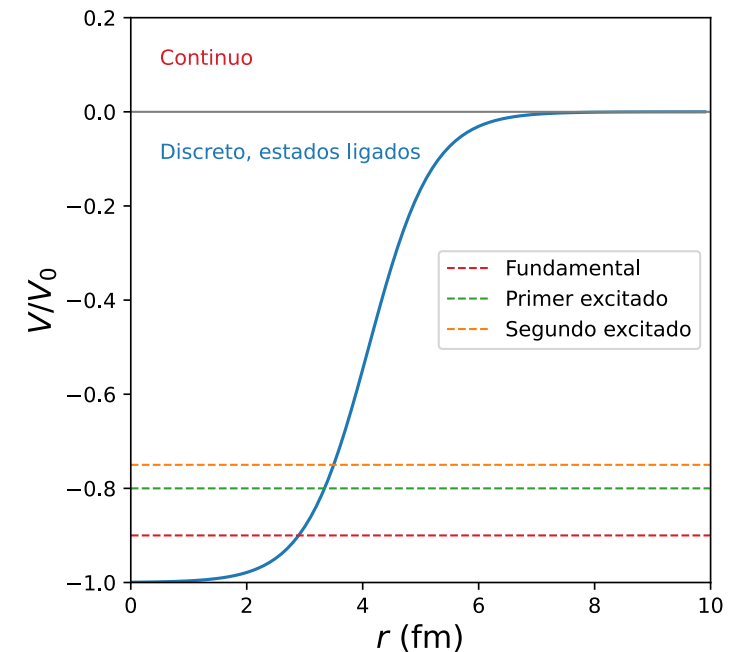
$$|1,-1\rangle = |n\rangle \otimes |n\rangle$$

Introducción. Propiedades estáticas

- Los núcleos se consideran sistemas cuánticos con propiedades estáticas bien definidas
 - Masa M
 - Radio R
 - Número atómico Z
 - Carga eléctrica $q=Ze$
 - Espín J
 - Paridad \mathcal{P}
 - Isospín T
 - Momentos multipolares electromagnéticos (E, M)
 - Momento cuadrupolar eléctrico Q
 - Momento dipolar magnético μ

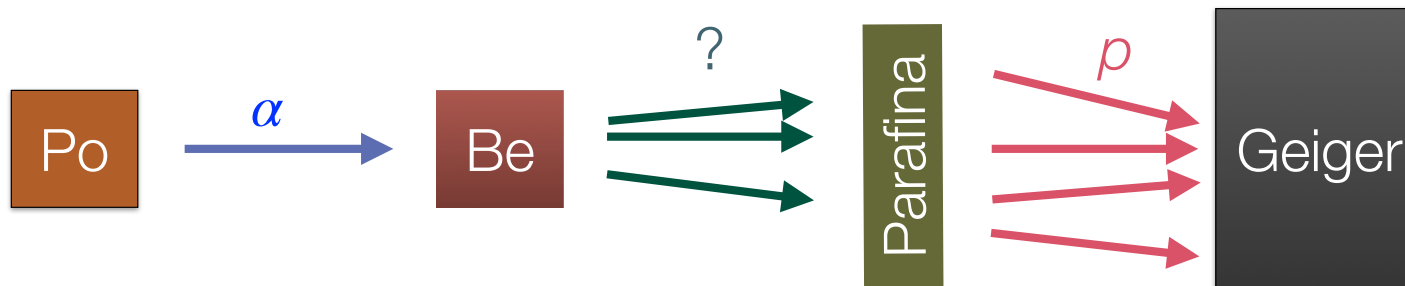
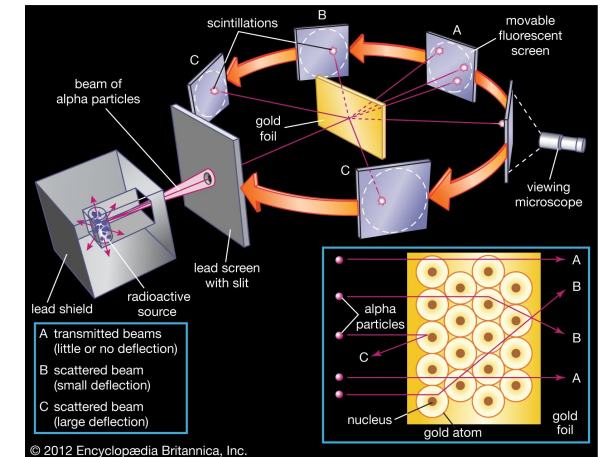
Introducción. Niveles excitados, sección eficaz y vida media

- Niveles excitados
 - Los núcleos son sistemas compuestos.
 - En condiciones normales el núcleo suele estar en el nivel fundamental
 - Los niveles excitados son accesibles mediante reacciones nucleares
- Sección eficaz
 - Caracteriza las reacciones nucleares (Tema 6. Reacciones Nucleares)
 - Representa la probabilidad de reacción
- Vida media y semivida
 - Caracterizan las desintegraciones nucleares (Tema 4. Desintegración nuclear)
 - Probabilidad de desintegración por unidad de tiempo (λ).
 - Vida media: $\tau = 1/\lambda$, semivida: $t_{1/2} = \ln 2/\lambda = \tau \ln 2$



Introducción. Experimentos históricos

- Exp. de Rutherford, Geiger y Marsden (1909-1911): $\alpha + {}^{197}_{79}\text{Au} \rightarrow {}^{197}_{79}\text{Au} + \alpha$
- ${}^4_2\text{He}$ (α) provienen de una fuente radiactiva de Radio
- El núcleo se puede considerar puntual con toda la carga Ze concentrada en un punto (núcleo)
- Exp. de Chadwick y Feather (1932): $\alpha + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + n$

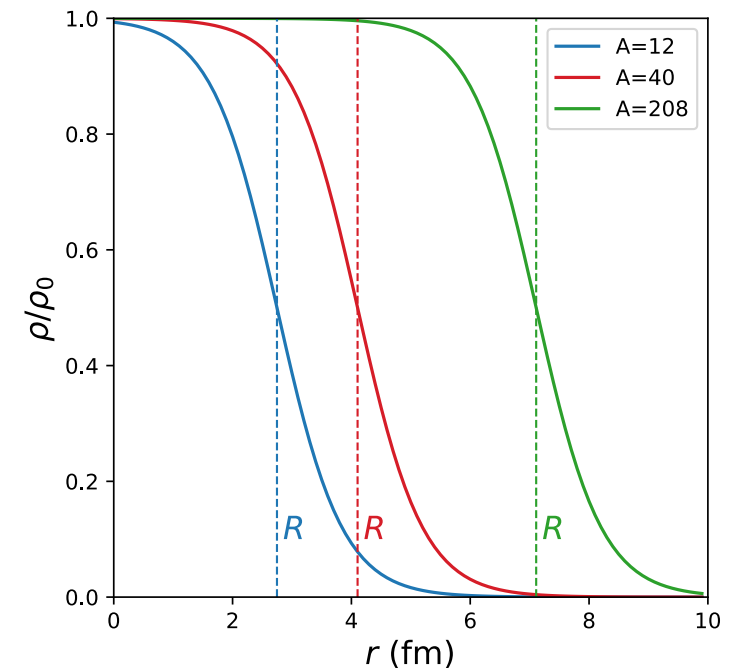


Tamaño y distribución de la carga nuclear

- En primera aproximación: esférico
- Distribución de carga o materia caracterizado por
 - Radio R
 - Espesor de la corteza a
- Distribución de Fermi o Woods-Saxon

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{(r-R)/a}}$$

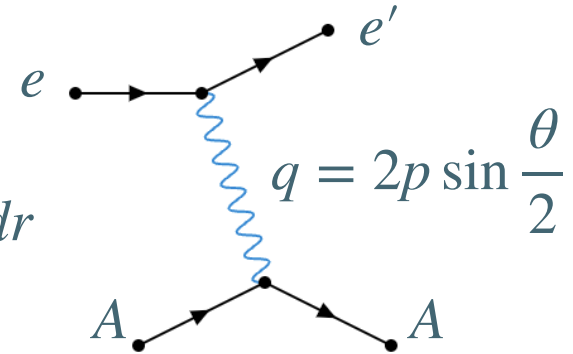
- $R = r_0 A^{1/3}$
- $r_0 \simeq 1.2 \text{ fm}, a \simeq 0.55 \text{ fm}$



Medida del radio de carga

- Dispersión electrón-núcleo $A(e, e')A$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |F(q^2)|^2 \left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{\text{Mott}} \quad F(q^2) = \frac{4\pi\hbar}{Ze q} \int \rho(r) \sin\left(\frac{qr}{\hbar}\right) r dr$$



- Rayos X de isótopos → átomos muónicos
 - Se mide la diferencia entre la energía de transición de dos núcleos isótopos
- Diferencia de energía entre núcleos espejo
 - $A = Z_1 + N_1 = Z_2 + N_2$, con $Z_1 = N_2$ y $Z_2 = N_1$
 - Ej. ${}^3\text{H}$ y ${}^3\text{He}$ o ${}^{14}\text{C}$ y ${}^{14}\text{O}$. Excepción (2020): ${}^{73}\text{Sr} - {}^{73}\text{Br}$
 - Se toman núcleos impares y se ve la diferencia de masas, debida a la interacción Coulombiana

Masa de los núcleos

- Difíciles de medir. Es habitual encontrar masas atómicas tabuladas
- Unidad de masa atómica (u.m.a.):

$$u \equiv \frac{\mathcal{M}(^{12}\text{C})}{12} = 1,6 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931,49 \text{ MeV}/c^2$$

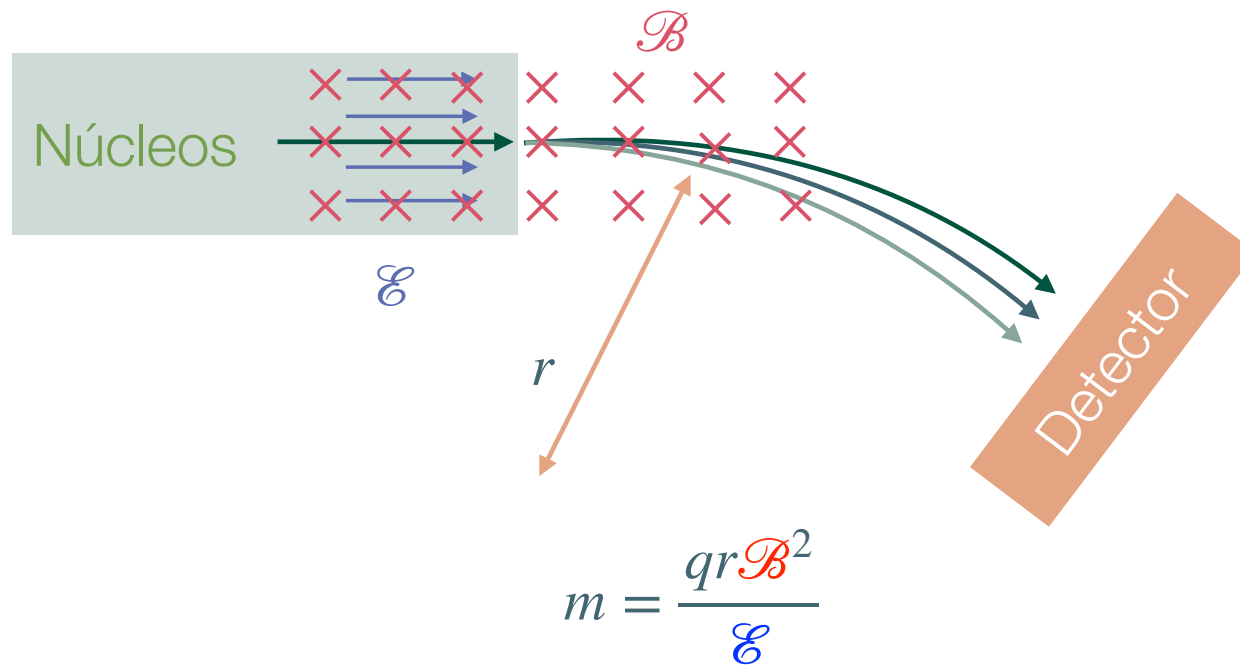
- Relación entre masa atómica \mathcal{M}_a y nuclear M_a

$$M_n(^A_Z X) = \mathcal{M}_a(^A_Z X) - Zm_e + \sum_{i=1}^Z B_i/c^2$$

- La energía de ligadura de los electrones es despreciable
- Defecto de masa:
 - $\Delta = \mathcal{M}_a(Z, N) - A u$ en u.m.a., $\Delta = (\mathcal{M}_a(Z, N) - A) c^2$ en MeV

Espectroscopía de masas

$$\left. \begin{array}{l} F_e = q\mathcal{E} \\ F_m = qv\mathcal{B} \end{array} \right\} \Rightarrow v = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{B}}$$



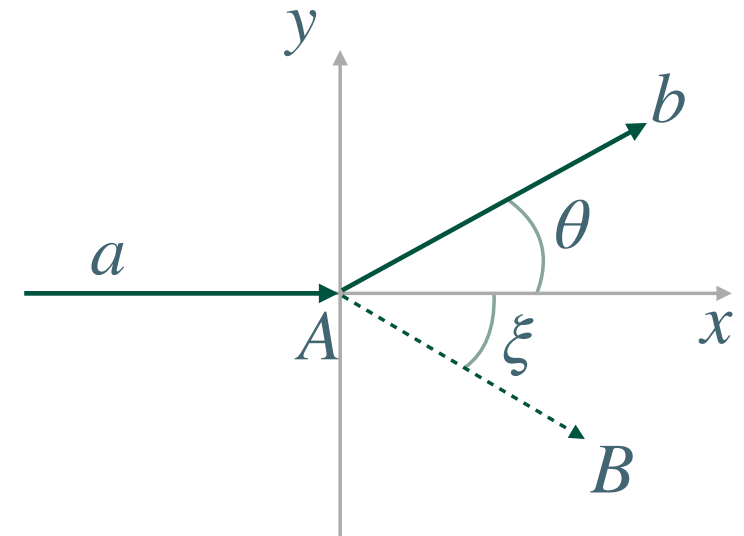
Medida a través de reacciones nucleares



$$Q = M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}}$$

$$Q = [M_a + M_A - M_b - M_B] c^2 = T_b + T_B - T_a - T_A$$

$$Q = T_b \left(1 + \frac{M_b}{M_B} \right) - T_a \left(1 - \frac{M_a}{M_B} \right) - \frac{2}{M_B} \sqrt{T_a T_b M_a M_b} \cos \theta$$



Abundancia de núcleos

- La abundancia de cada isótopo en la Tierra está directamente ligada a:
 - La nucleosíntesis, es decir, la frecuencia con la que cada núcleo fue originalmente producido
 - La estabilidad nuclear. Probabilidad de desintegración de cada núcleo
- Los elementos aparecen con abundancia isotópica variable
- Ejemplo. La determinación de los isótopos estables del Kriptón proporciona

A=	78	80	82	83	84	86
%	0,356	2,27	11,6	11,5	57,0	17,3

- La masa tabulada del Kriptón es $\mathcal{M}(\text{Kr}) = 83$ u.m.a que es la media ponderada de las masas de los isótopos estables

Energía de ligadura (o enlace) nuclear

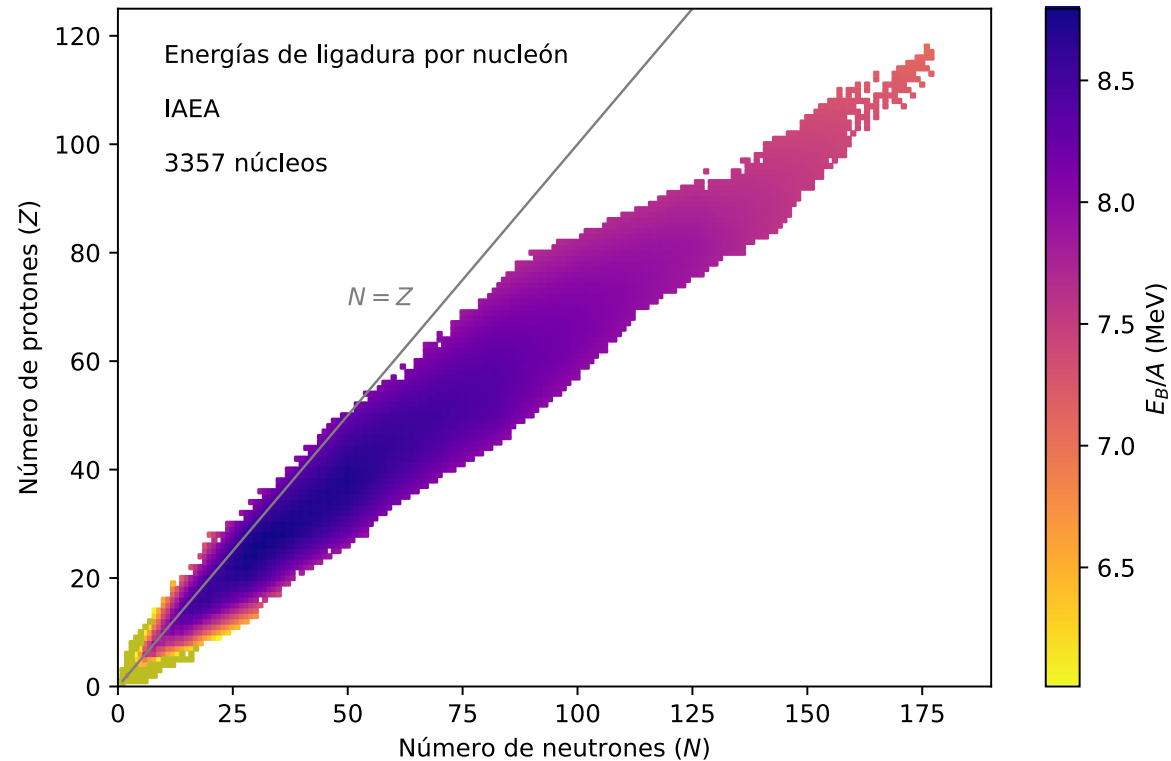
$$E_B(Z, N) = [Z\mathcal{M}(^1\text{H}) + Nm_n - \mathcal{M}(Z, N)] c^2$$

$$E_B(Z, N) = [Z\Delta_{\text{H}} + N\Delta_n - \Delta(Z, N)] c^2$$

$$\Delta_{\text{H}} = 7,2890 \text{ MeV}$$

$$\Delta_n = 8,0714 \text{ MeV}$$

Table of Nuclides, IAEA



Energía de ligadura (o enlace) nuclear

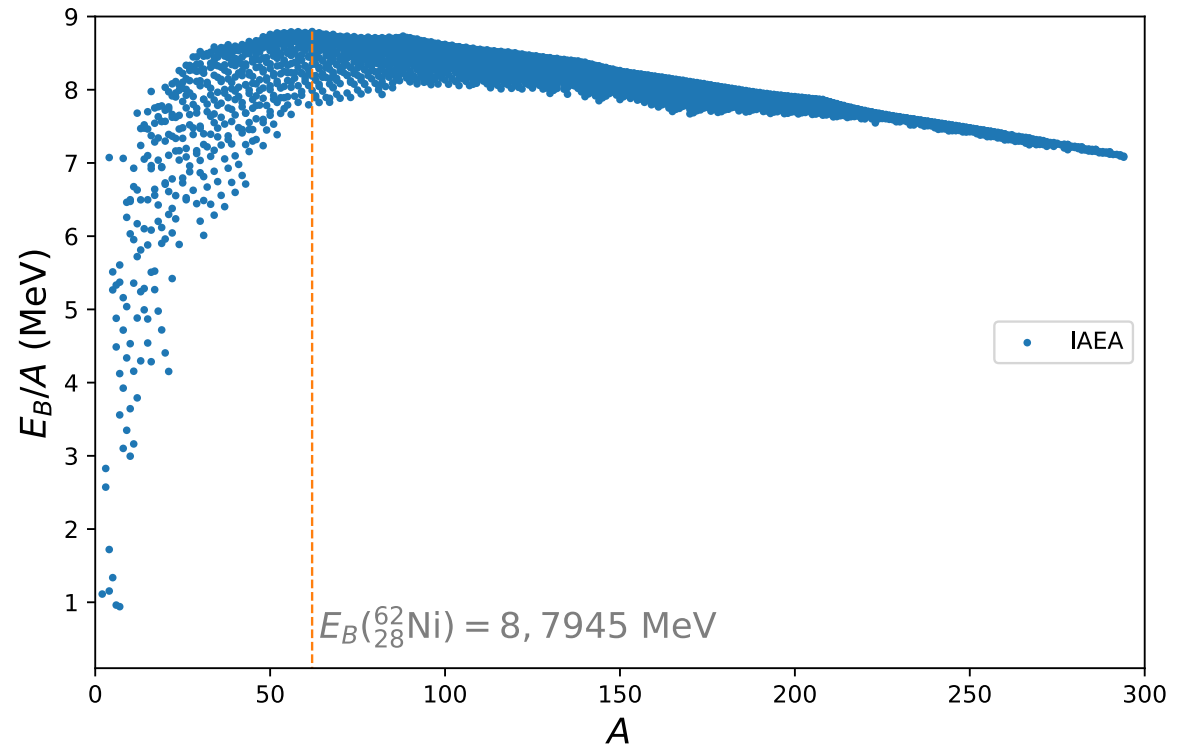
$$E_B(Z, N) = [Z\mathcal{M}({}^1\text{H}) + Nm_n - \mathcal{M}(Z, N)] c^2$$

Table of Nuclides, IAEA

$$E_B(Z, N) = [Z\Delta_{\text{H}} + N\Delta_n - \Delta(Z, N)] c^2$$

$$\Delta_{\text{H}} = 7,2890 \text{ MeV}$$

$$\Delta_n = 8,0714 \text{ MeV}$$

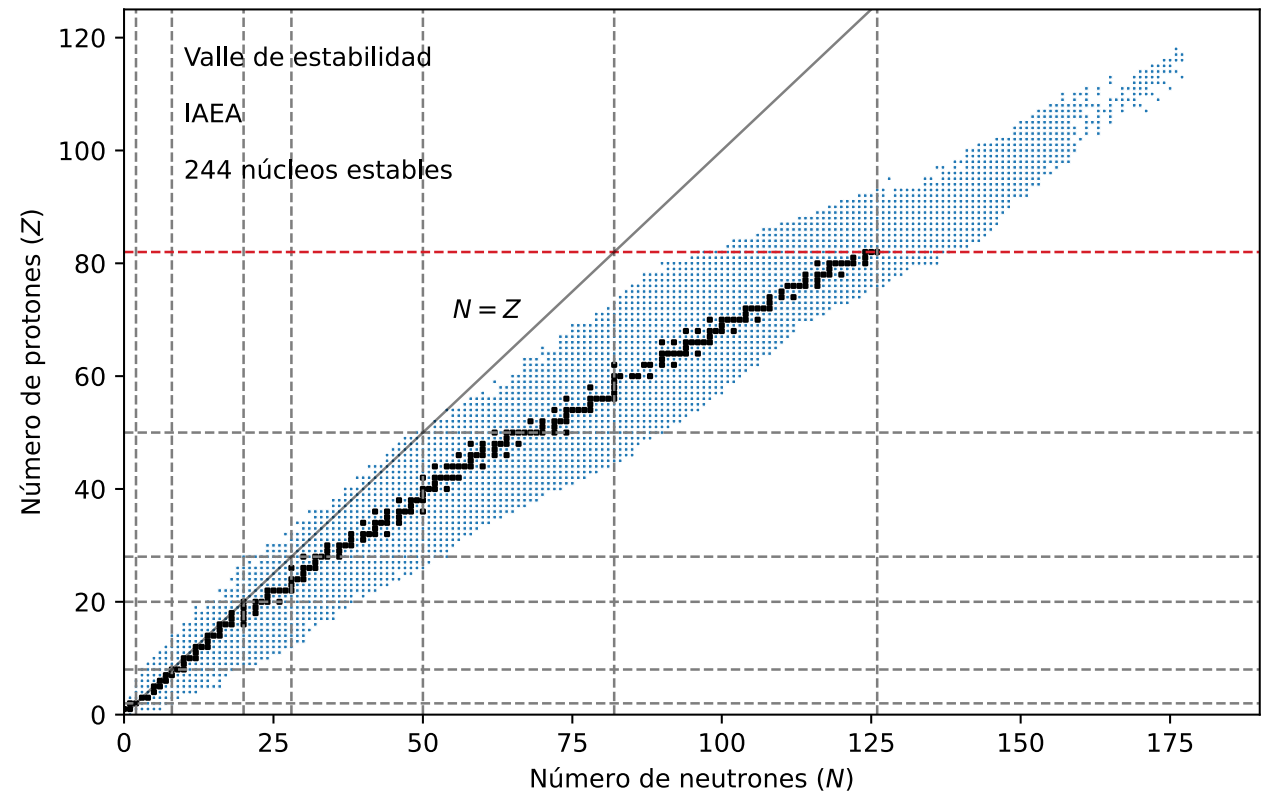


Energía de ligadura

- Hay saturación ya que la energía tiende a una constante
- El valor medio de la energía de ligadura por nucleón es 8 MeV
- El máximo de la curva clasifica los núcleos en dos regiones
 - $A < 60 \Rightarrow$ Fusión
 - $A > 60 \Rightarrow$ Fisión
- Existencia de deuterón y Helio \Rightarrow dependencia del espín
- La diferencia de energía entre núcleos espejo es prácticamente la Coulombiana \Rightarrow introducción del número cuántico de isospín

El valle de estabilidad

- $Z/N \approx 1$ para $A < 40$
 - Ppio. exclusión
- $Z/A \approx 1/2,5$ para $A > 40$
- Núcleos estables en Z o $N=2,8,20,28,50,82,126$ (números mágicos)
- Más allá del Pb ($Z=82$) la repulsión Coulombiana rompe la estabilidad nuclear (desintegración α , Tema 5)



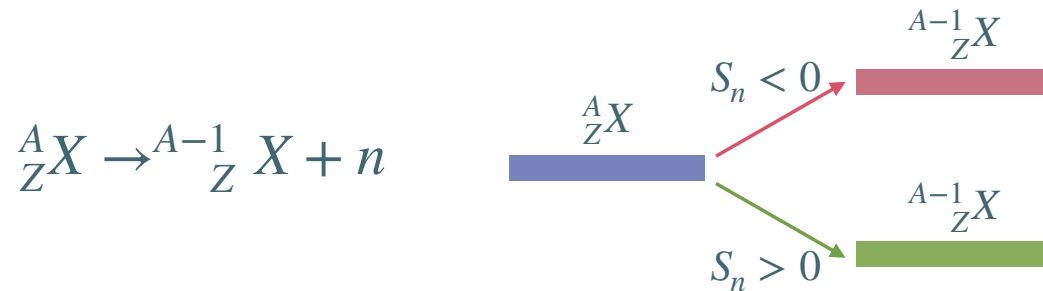
Valle de estabilidad

Par-Par	140
Par-Impar	50
Impar-Par	48
Impar-Impar	4

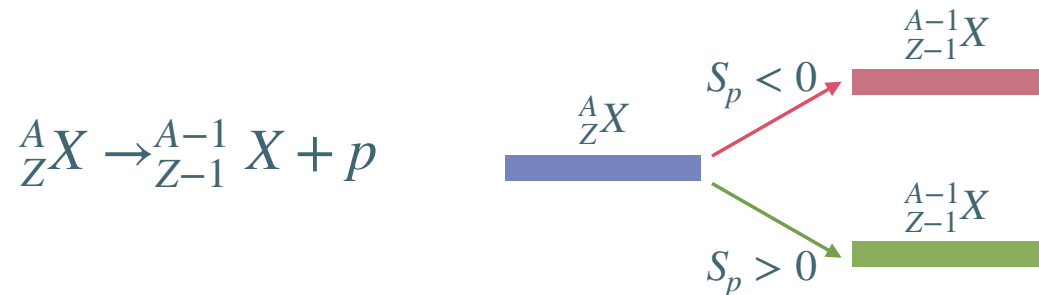
- Hay muchos más núcleos estables de tipo par-par
- Implica que debe haber fuerzas de apareamiento
- En particular, los núcleos con clusters de partículas α (${}^4\text{He}$, ${}^8\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$) tienen valores grandes de la energía de ligadura por nucleón
- Sólo 4 impar-impar son estables: ${}^2_1\text{H}$, ${}^6_3\text{Li}$, ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{14}_7\text{N}$

Energía de separación nucleónica

- Energía de separación neutrónica: Energía necesaria para arrancar un neutrón de un núcleo

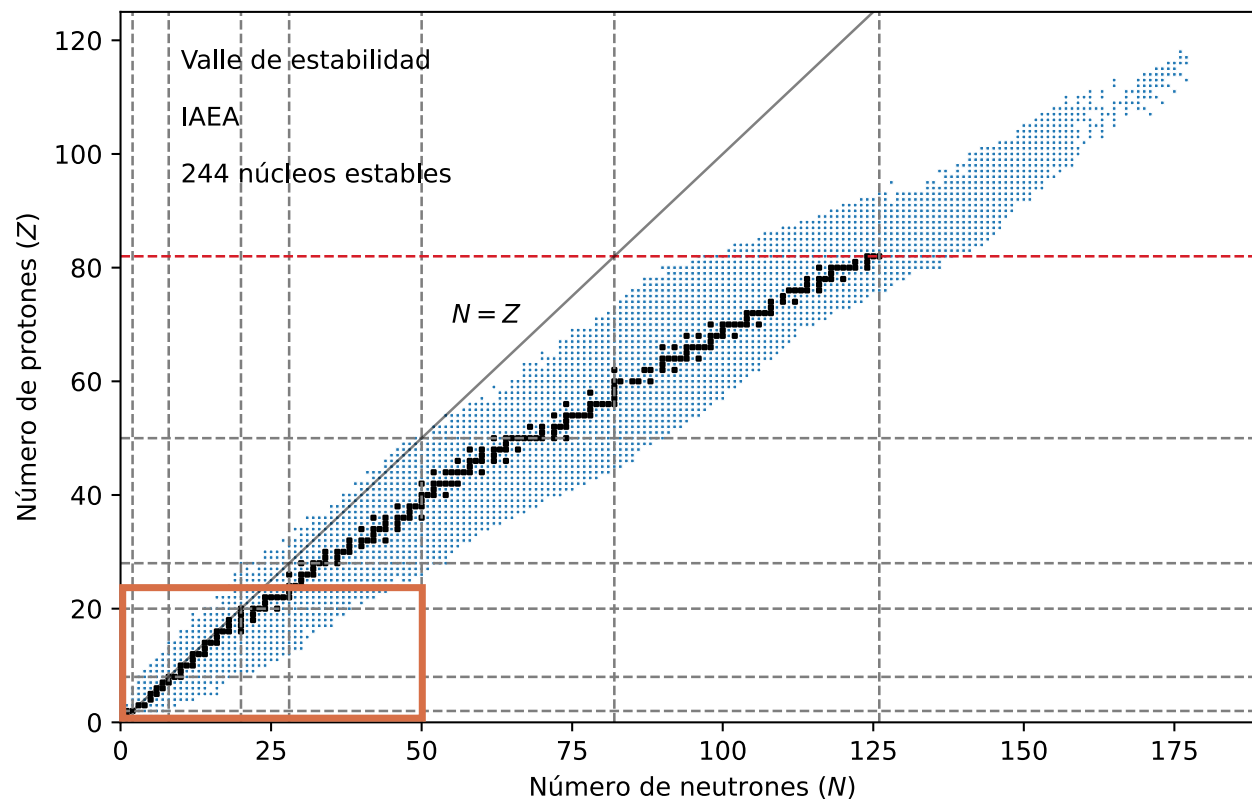


$$S_p(Z, N) = - [\mathcal{M}(Z, N) - \mathcal{M}(Z-1, N) - \mathcal{M}({}^1\text{H})] c^2 = E_B(Z, N) - E_B(Z-1, N)$$

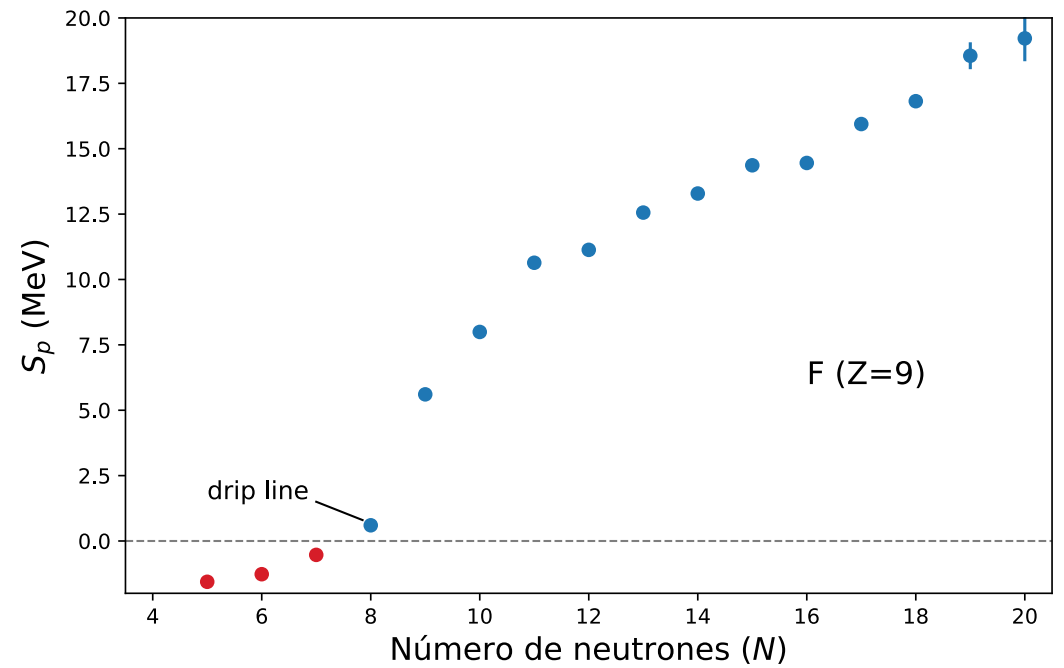
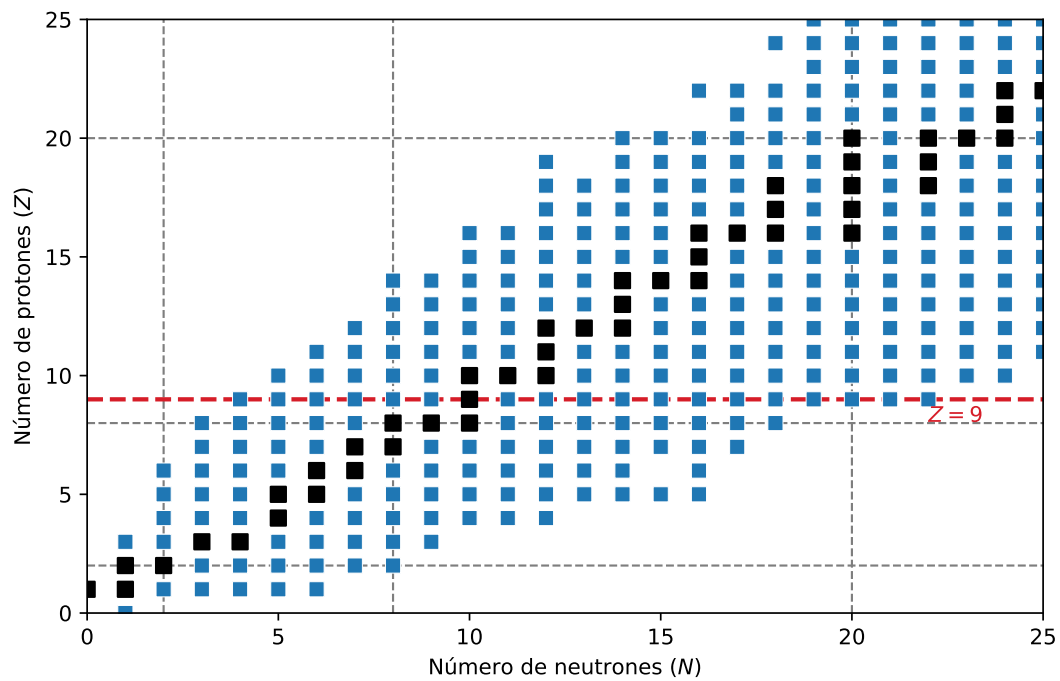


$$S_n(Z, N) = - [\mathcal{M}(Z, N) - \mathcal{M}(Z, N-1) - m_n] c^2 = E_B(Z, N) - E_B(Z, N-1)$$

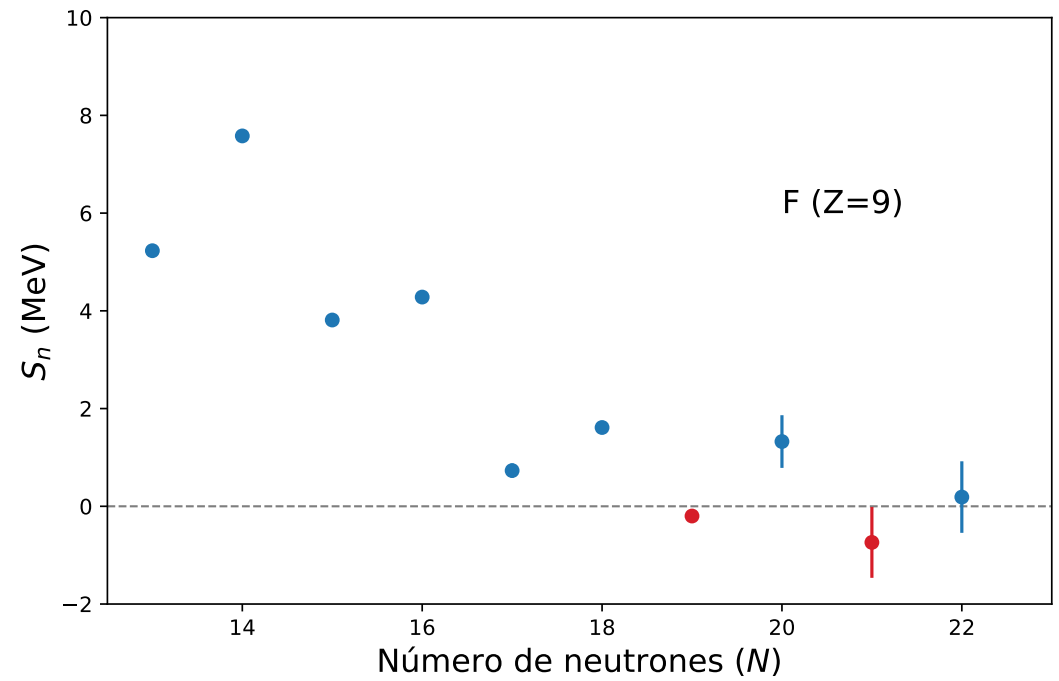
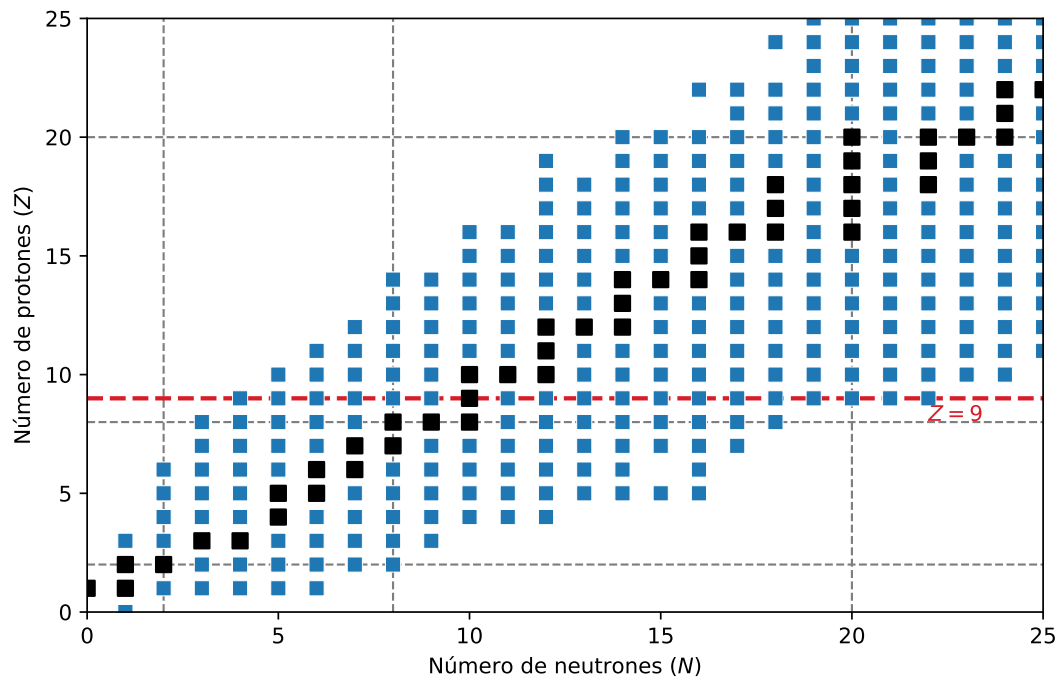
Energía de separación nucleónica



Energía de separación nucleónica (proton drip line)

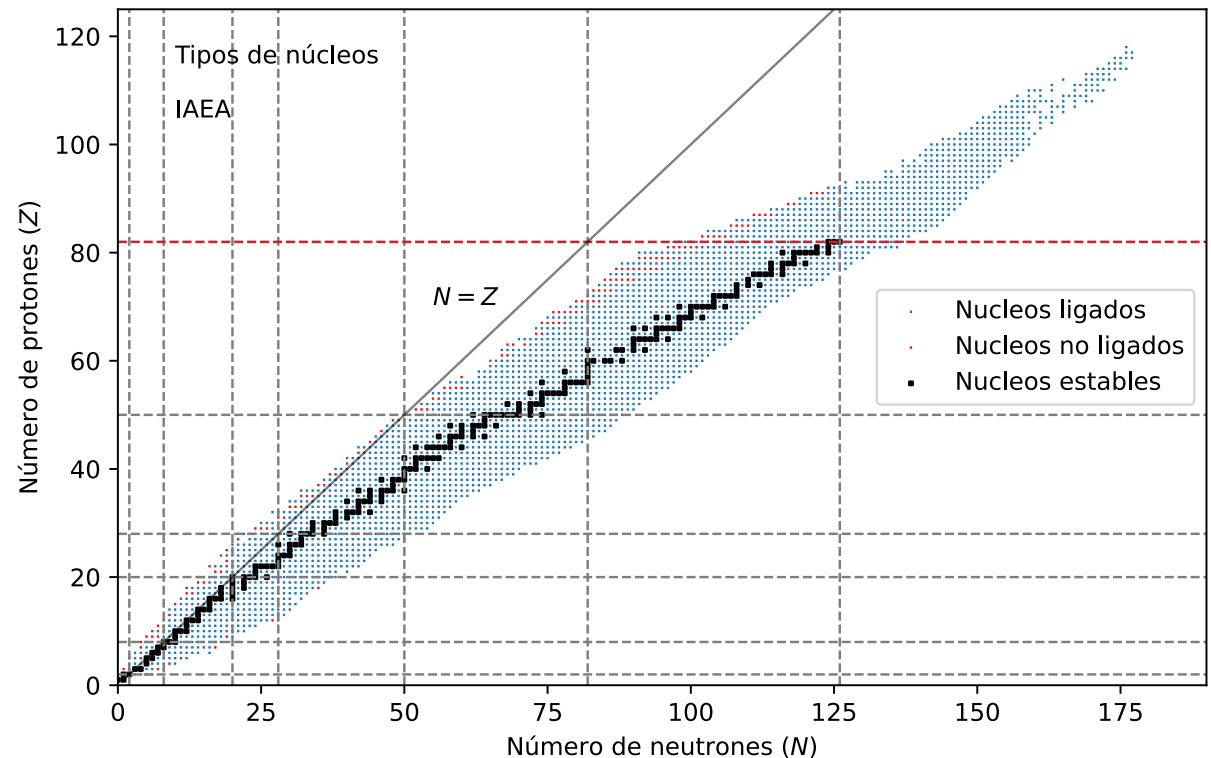


Energía de separación nucleónica (neutron drip line)



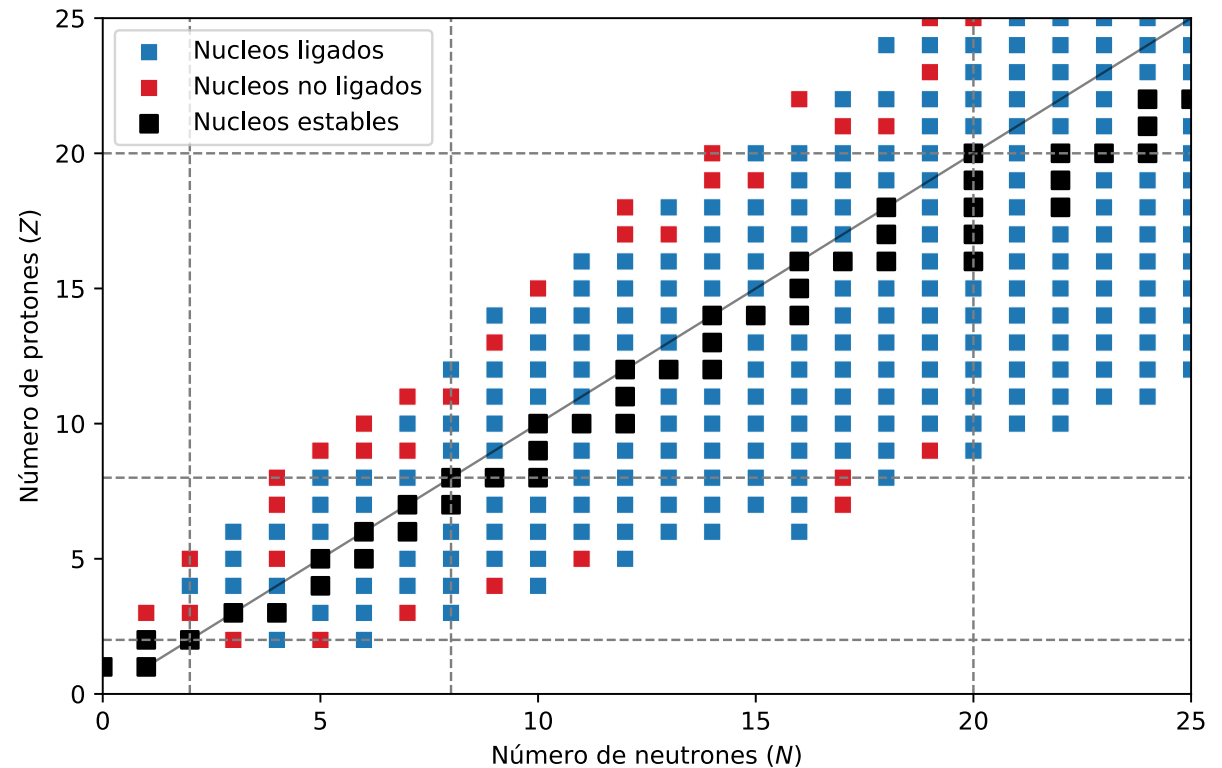
Tipos de núcleos

- Estables (no decaen)
- Ligados pero inestables (decaen mediante radiactividad, Temas 4 y 5)
- No ligados (energía de separación negativa). El núcleo decae por emisión de protón o neutrón. Determinan la posición de la drip line en la carta nuclear



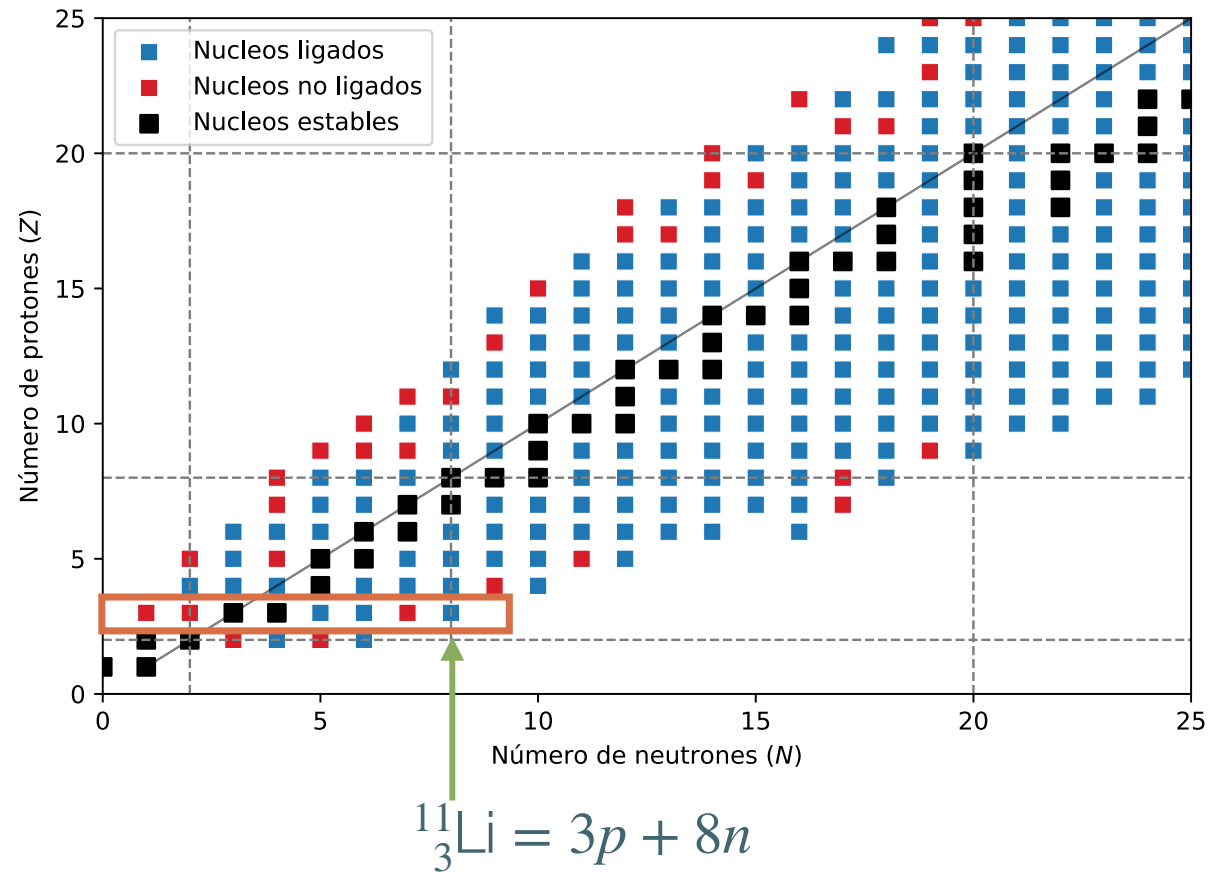
Tipos de núcleos

- Estables (no decaen)
- Ligados pero inestables (decaen mediante radiactividad, Temas 4 y 5)
- No ligados (energía de separación negativa). El núcleo decae por emisión de protón o neutrón. Determinan la posición de la drip line en la carta nuclear

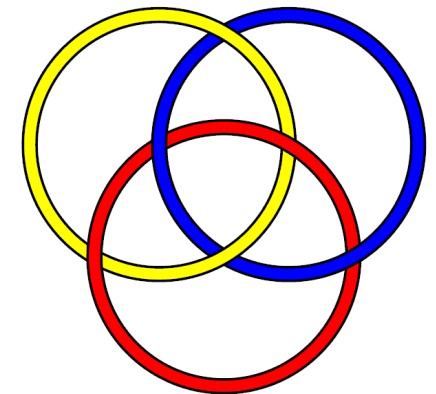
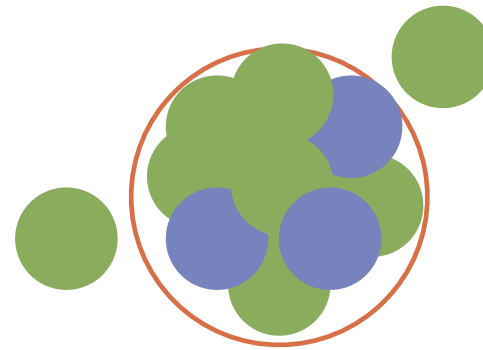


Tipos de núcleos

- Estables (no decaen)
- Ligados pero inestables (decaen mediante radiactividad, Temas 4 y 5)
- No ligados (energía de separación negativa). El núcleo decae por emisión de protón o neutrón. Determinan la posición de la drip line en la carta nuclear



Núcleos borromeos (núcleos con halo)



Borromean knot, Wikipedia

Estabilidad nuclear. Parábola de masas

Espín y paridad nucleares

Espín isotópico del núcleo

Momentos electromagnéticos nucleares

Momento dipolar magnético

Momento cuadrupolar eléctrico

Estructura de los niveles energéticos nucleares

Material disponible

- Material disponible en el repositorio Github de la asignatura
 - <https://github.com/cefera/FNyP>
- Esta presentación:
 - [./Presentaciones/Tema1.pdf](#)
- Código en Python para generar las figuras de esta presentación, acceder y tratar la base de datos de núcleos de la Agencia Internacional de la Energía Atómica:
 - [./Notebooks/Tema1.ipynb](#)