

# 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  $\alpha$ ,  $\beta$  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

<b>Apertura foros</b>
Apertura TE
PEC
Periodo vacacional
Cierre foros
Exámenes
Cierre TE

# Esquema

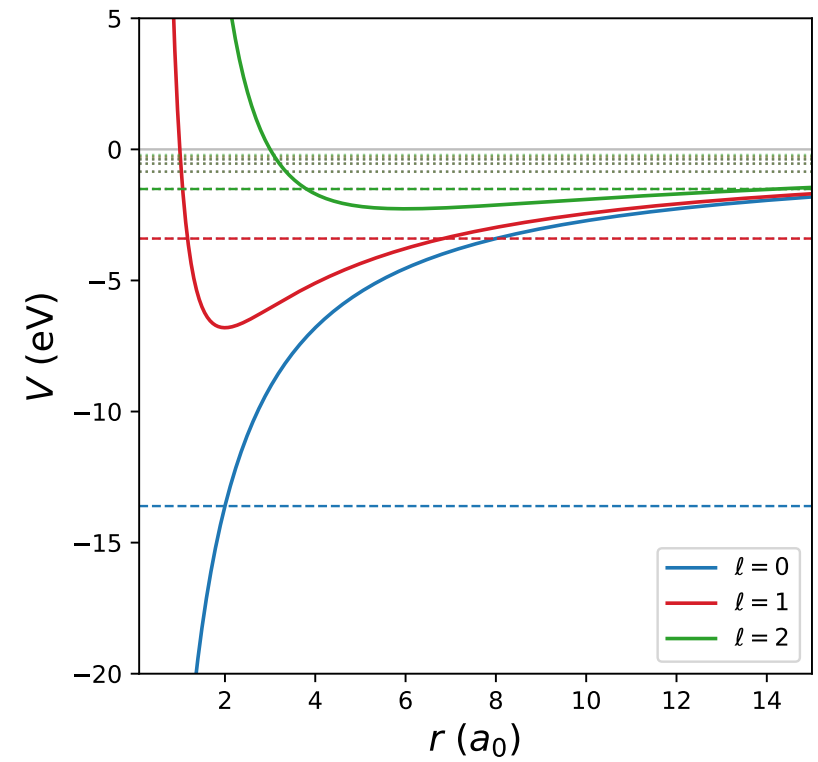
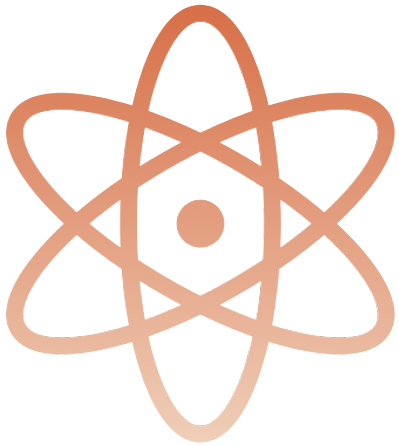
---

- Introducción
- El radio nuclear
  - Densidad de carga nuclear
  - Densidad de materia nuclear
- Masa y abundancia de los núclidos
- Energía de ligadura y estabilidad nuclear
  - Energía de ligadura
  - Estabilidad nuclear. Parábola de masas
- Otras propiedades nucleares
  - Espín, isospín y paridad
  - Momentos electromagnéticos nucleares

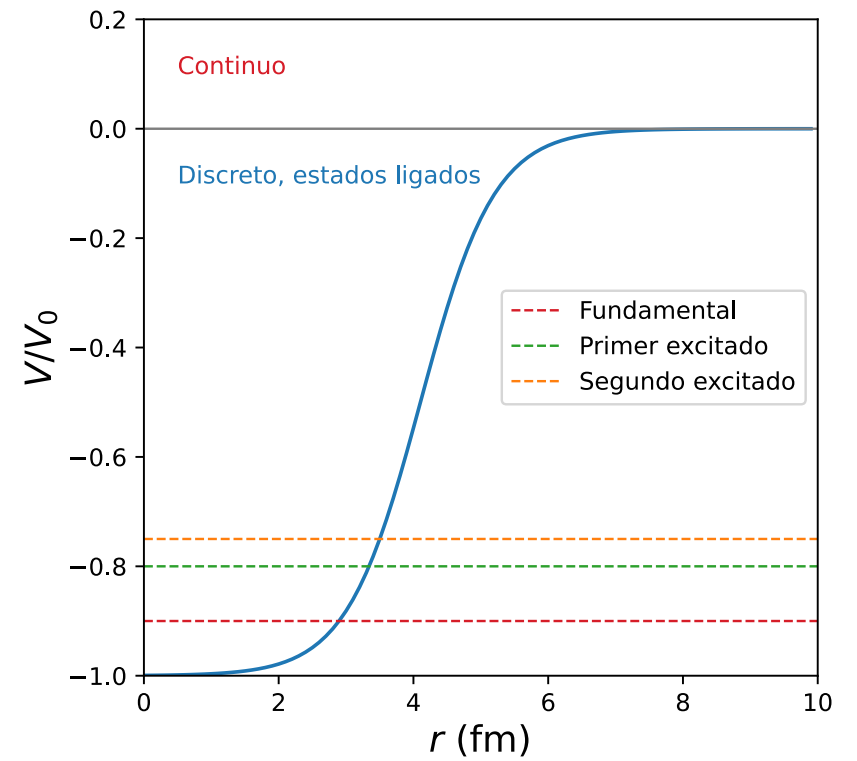
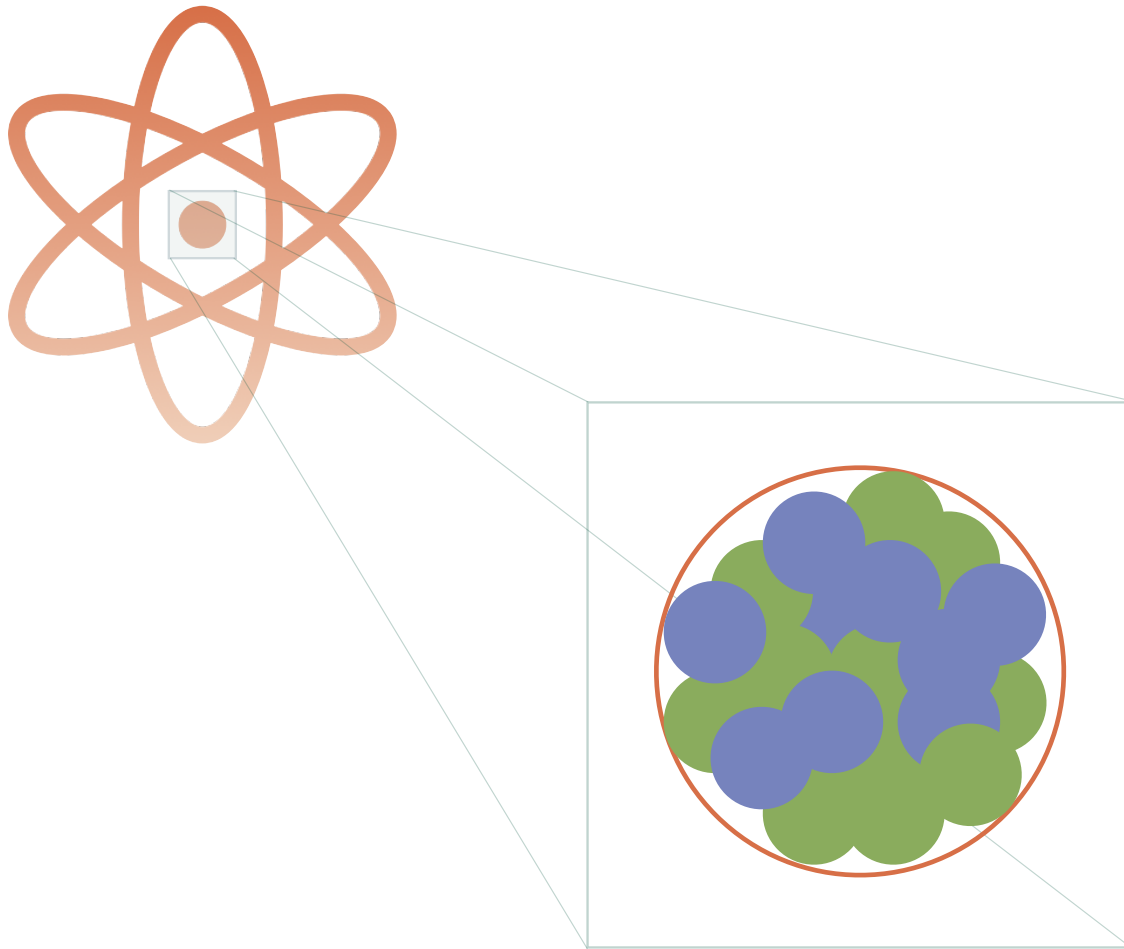
*Datos sobre núcleos procedentes de: Table of Nuclides, IAEA*

# Introducción

# El núcleo



# El núcleo



# Nomenclatura

---

- Nucleones: protones y neutrones
- Núcleos =  $A$  nucleones,  $Z$  protones y  $N=A-Z$  neutrones
- $A$  = de 1 a  $\approx 260$
- Notación  ${}^A_ZX$ . Ejemplos:

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

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

- $\approx 240$  núcleos estables,  $\approx 3000$  núcleos inestables
- Núcleos pares e impares
- Isótopos (mismo  $Z$ ), Isótonos (mismo  $N$ ), isóbaros (mismo  $A$ )



## Propiedades de los nucleones

	Masa	Vida media	Carga	$\mu$	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

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

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

# 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

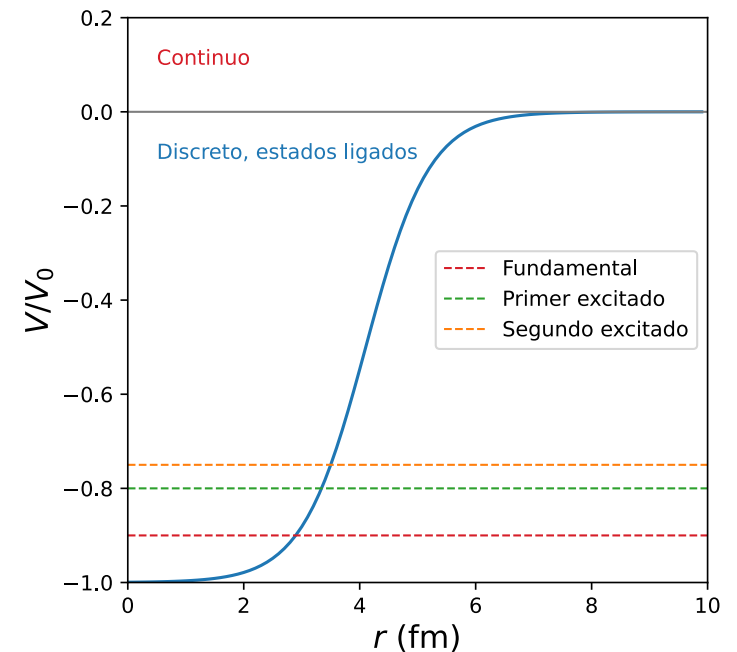
## Propiedades estáticas

---

- 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  $\mu$

# Niveles excitados, sección eficaz y vida media

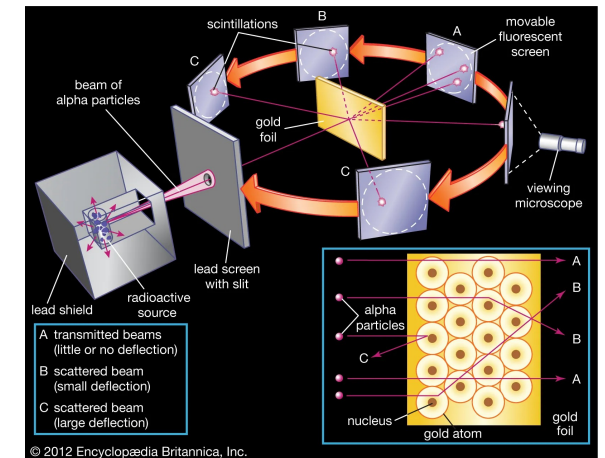
- Niveles excitados
  - Los núcleos son sistemas compuestos.
  - En condiciones normales el núcleo suele estar en el nivel fundamental
  - Los niveles excitados son accesibles mediante reacciones nucleares
- Sección eficaz
  - Caracteriza las reacciones nucleares (Tema 6. Reacciones Nucleares)
  - Representa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



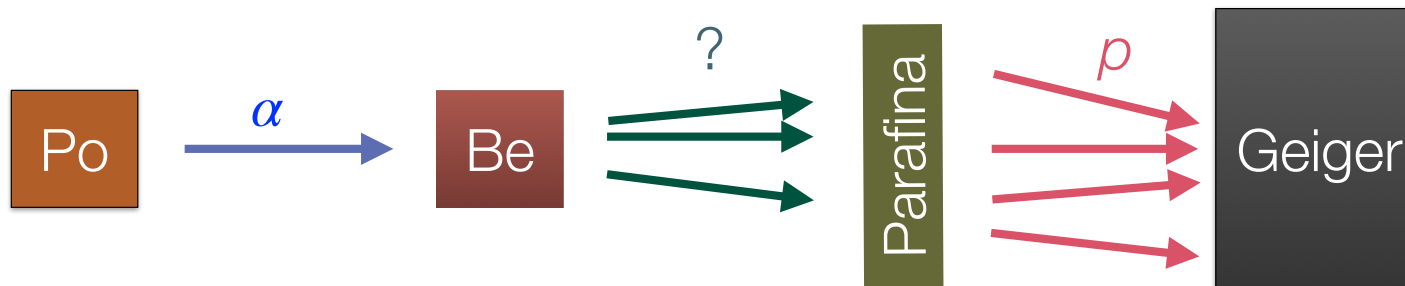
# Experimentos históricos

- Exp. de Rutherford, Geiger y Marsden (1909-1911):  $\alpha + {}^{197}_{79}\text{Au} \rightarrow {}^{197}_{79}\text{Au} + \alpha$

- ${}^4_2\text{He}$  ( $\alpha$ ) 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):  $\alpha + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + n$



El radio nuclear

## Tamaño y distribución de la carga nuclear

---

- El núcleo no es un objeto sólido con fronteras sólidas y rígidas
- Caracterizamos al núcleo por su densidad
- En primera aproximación: esférico
- Distribución de carga o materia caracterizado por
  - Radio medio  $R$ , la densidad se reduce a la mitad
  - Espesor de la corteza  $a$
- Densidad de carga vs. densidad de masa
  - Según el experimento mediremos una u otra
  - La densidad de carga esencialmente mide la distribución de protones
  - La densidad de masa mide la distribución de protones y neutrones

## Medida de la densidad de carga y masa

---

- Experimentos para medir la distribución
  - Dispersión electrón-núcleo  $A(e, e')A$
  - Transiciones atómicas. Desplazamiento isotópico de rayos X de la capa K
  - Diferencias en la energía Coulombiana de núcleos espejo
- Experimentos para la medida de la distribución de materia nuclear
  - Colisiones  $\alpha$ +núcleo (desviaciones de la dispersión de Rutherford)
  - Estudio de la desintegración  $\alpha$  de distintos emisores
  - Rayos X de átomos piónicos



# Dispersión electrón-núcleo

- Examinamos la radiación dispersada por un objeto. Patrón de difracción:

Núcleo de unos 10 fm  $\Rightarrow \lambda < 10 \text{ fm} \Rightarrow p > \hbar/\lambda \approx 100 \text{ MeV}/c$

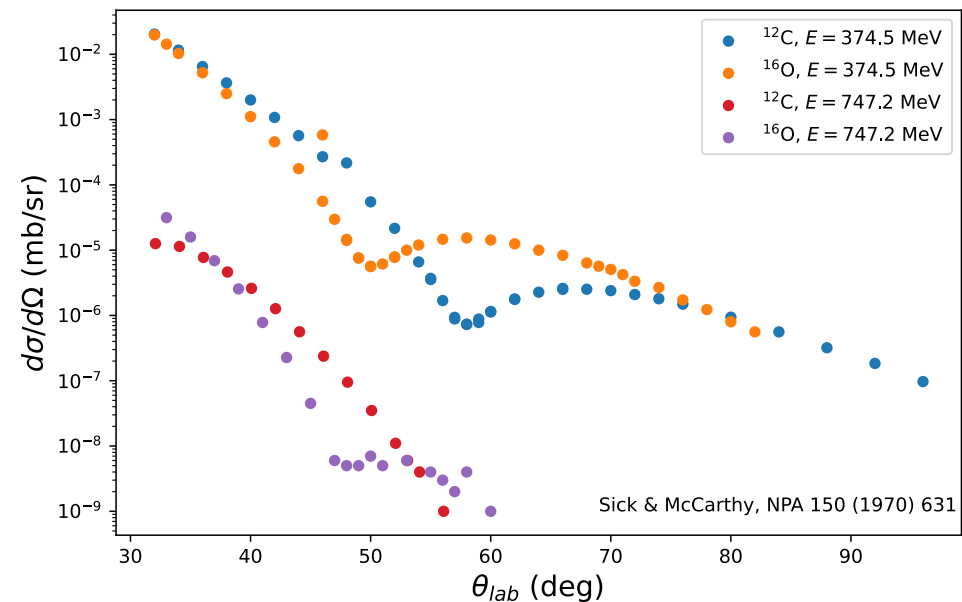
- Usamos haces de electrones con energías de ese orden
- Para un disco de radio  $R$  el primer mínimo de difracción verifica

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{2R}$$

- Luego:

$$R(^{16}\text{C}) \simeq 2.3 \text{ fm}$$

- $R(^{16}\text{O}) \simeq 2.6 \text{ fm}$



# 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 retroceso

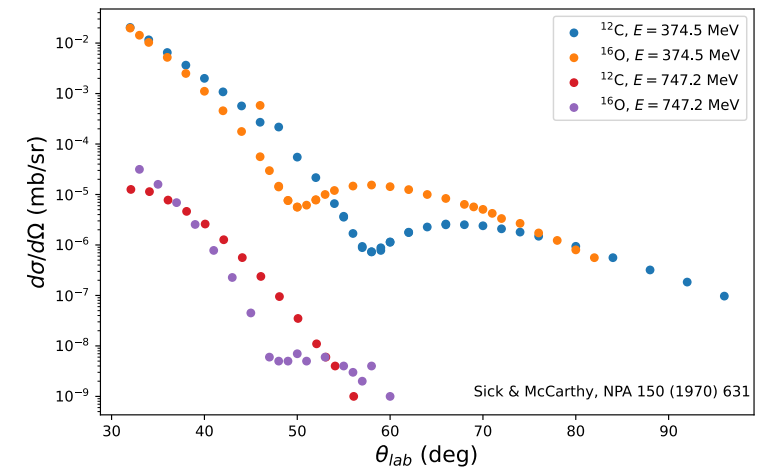
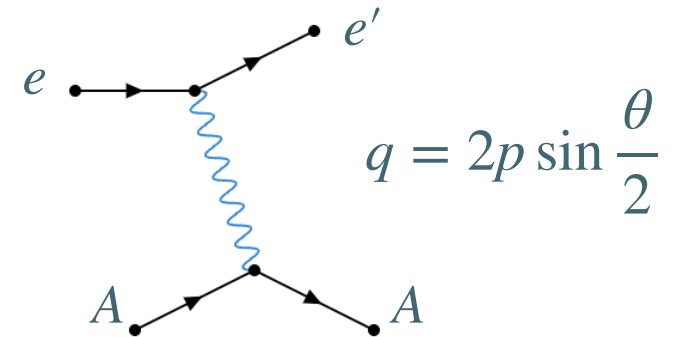
$$\sigma(\theta) \Big|_{\text{Mott}} = \left( \frac{Z\alpha}{2E_1\beta^2} \right) \left( 1 - \beta^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

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

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

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

- Si  $\lambda \gg R$  se puede demostrar que:  $F(q^2) = 1 - \frac{q^2}{6} \langle r^2 \rangle$



## Transiciones atómicas.

### Desplazamiento isotópico de rayos X de la capa K

---

- Se estudian las diferencias entre las líneas espectrales de isótopos del mismo elemento (mismo  $Z$ , ergo misma estructura atómica)
- Consideramos el núcleo como objeto extenso y esférico.
- Comparamos el caso puntual con el extenso

$$V_p(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}; \quad V_E(r) = \begin{cases} -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 R} \left[ \frac{3}{2} - \frac{r^2}{2R^2} \right], & r \leq R \\ -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}, & r > R \end{cases}$$

- Dados dos isótopos cercanos, para la transición  $K(2p \rightarrow 1s)$

$$E_K(A) - E_K(A') = \frac{2}{5} \frac{Z^4 e^2 r_0^2}{4\pi\epsilon_0 a_0^3} [A'^{2/3} - A^{2/3}]$$

- Si usamos átomos muónicos el efecto se acentúa al ser más pequeño su "radio de Bohr"

## Energía coulombiana de núcleos espejo

---

- Dos núcleos isóbaros X e Y son espejo si  $Z_X=N_Y$  y  $N_X=Z_Y$
- Si nos restringimos a núcleos impares, el protón impar en uno se corresponde al neutrón impar del otro
- Se puede calcular la diferencia entre las energía coulombianas suponiendo que los núcleos son esferas cargadas

$$E_c = \frac{3}{5} \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 R}$$

- Si Z el mayor de los dos Z, para ambos núcleos se cumple  $A=2Z-1$  y

$$\Delta E_c = \frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R} \left[ z^2 - (Z-1)^2 \right] = \frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R} A = \frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} A^{2/3}$$

- $\Delta E_c$  se mide a partir de la energía cinética máxima del  $e^+$  en la desintegración  $\beta^+$

# Distribución de la materia nuclear

---

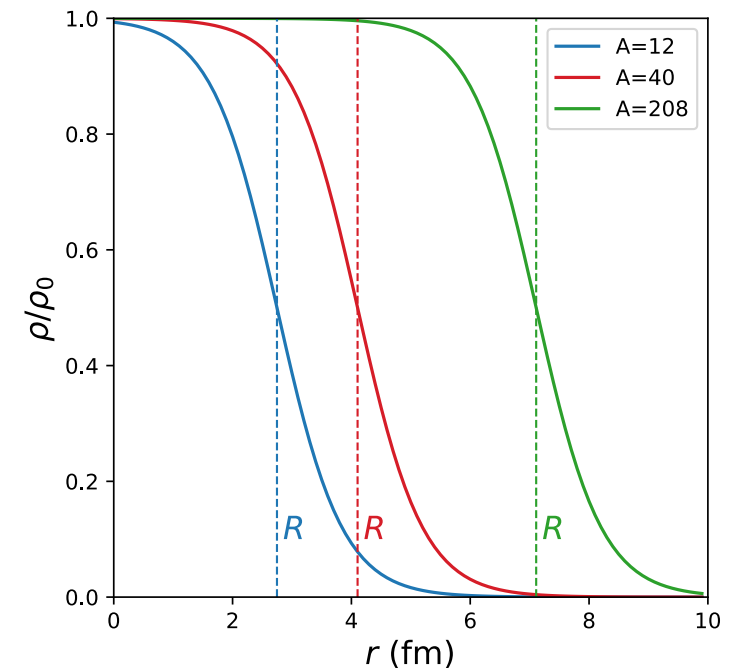
- Estudiar esta magnitud implica conocer el efecto de la interacción nuclear en lugar de la electromagnética, es decir, la distribución de los nucleones en lugar de, esencialmente, sólo la distribución de los protones
- Colisiones  $\alpha$ +núcleo
  - Desviación respecto a la fórmula de Rutherford
  - A baja energía cinética de la partícula  $\alpha$  la barrera coulombiana domina
  - Al aumentar la energía cinética de la partícula  $\alpha$  se supera la barrera coulombiana y domina la interacción fuerte observándose desviación de la fórmula de Rutherford
- Átomos piónicos
  - Pión más pesado que el electrón y el muón e interacciona fuertemente además de electromagnéticamente
  - Comparando rayos X emitidos por átomos piónicos comparados con los calculados sólo con interacción coulombiana podemos aislar la parte fuerte y obtener el efecto del tamaño del núcleo

# Tamaño y distribución de la masa nuclear

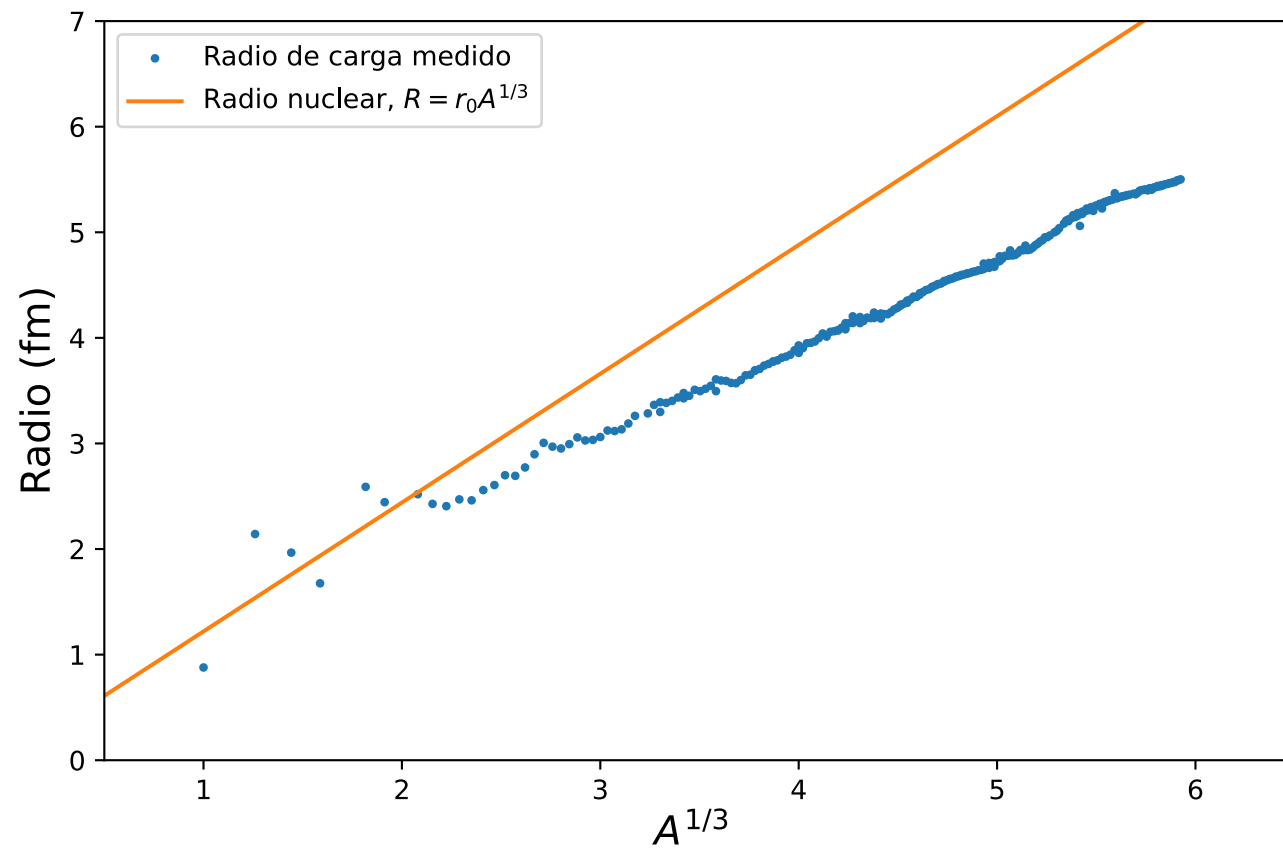
- Distribución de carga o materia caracterizado por
  - Radio medio  $R$ , la densidad se reduce a la mitad
  - Espesor de la corteza  $a$
- La distribución de masa: Fermi (Woods-Saxon)

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

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



## Radio de carga vs. radio nuclear



Abundancia y masa de los núcleos

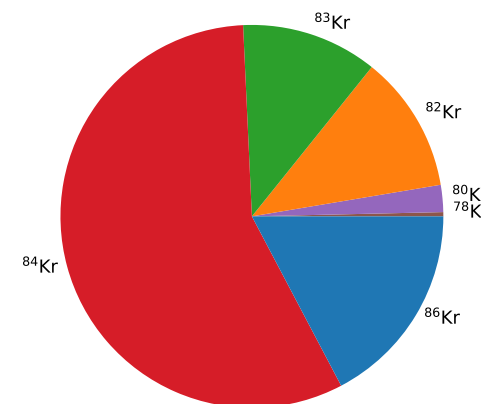


## Abundancia de núcleos

- 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
%	0,355	2,286	11,593	11,500	56,987	17,279

- La masa tabulada del Kriptón es  $\mathcal{M}(\text{Kr}) = 83,798$  u.m.a que es la media ponderada de las masas de los isótopos estables



## Masa de los núcleos

---

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

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

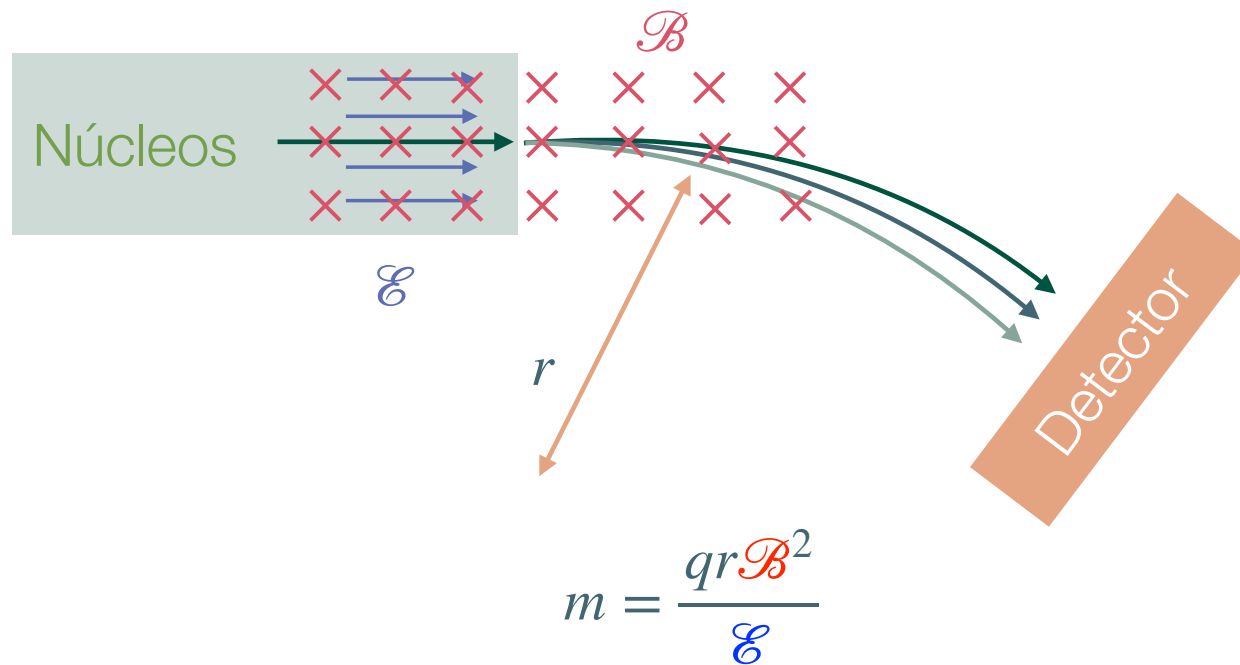
- Relación entre masa atómica  $\mathcal{M}_a$  y nuclear  $M_a$

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

- 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

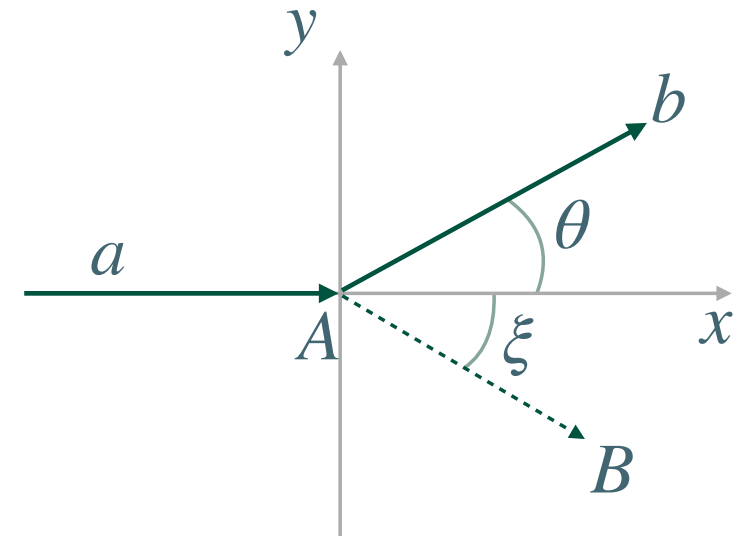
---



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

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

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



Energía de ligadura y estabilidad nuclear

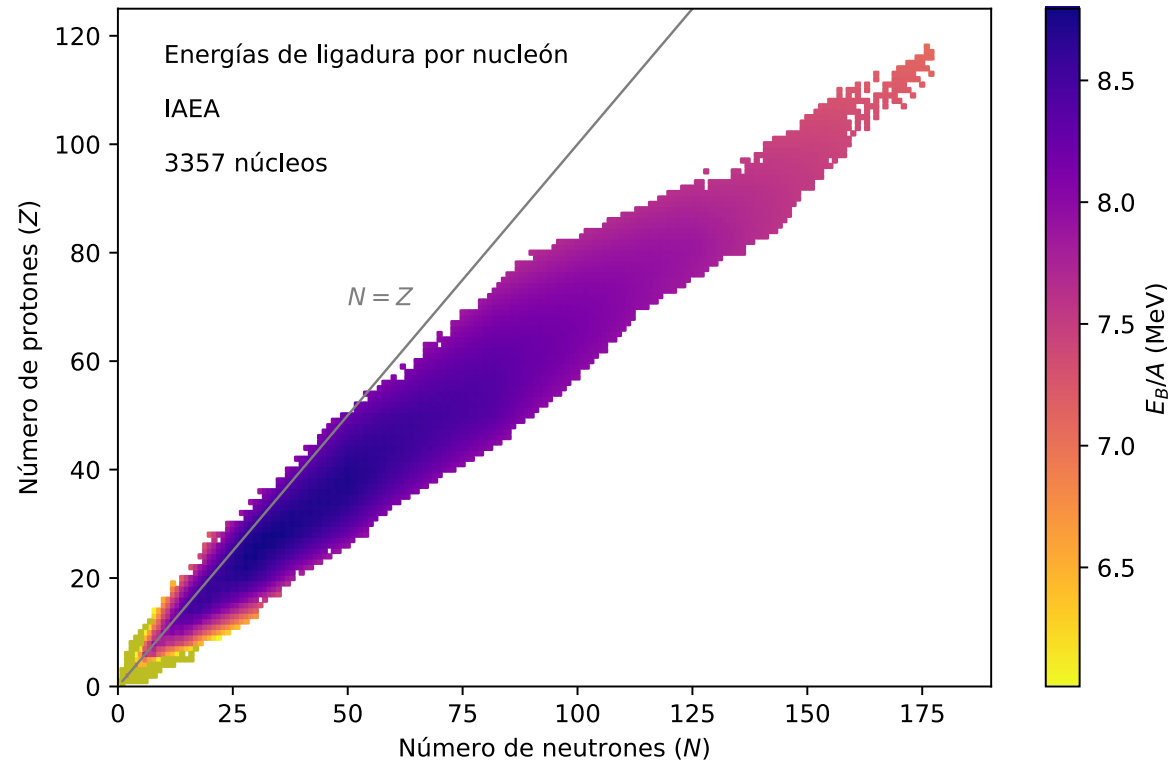
# Energía de ligadura (o enlace) nuclear

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

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

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

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



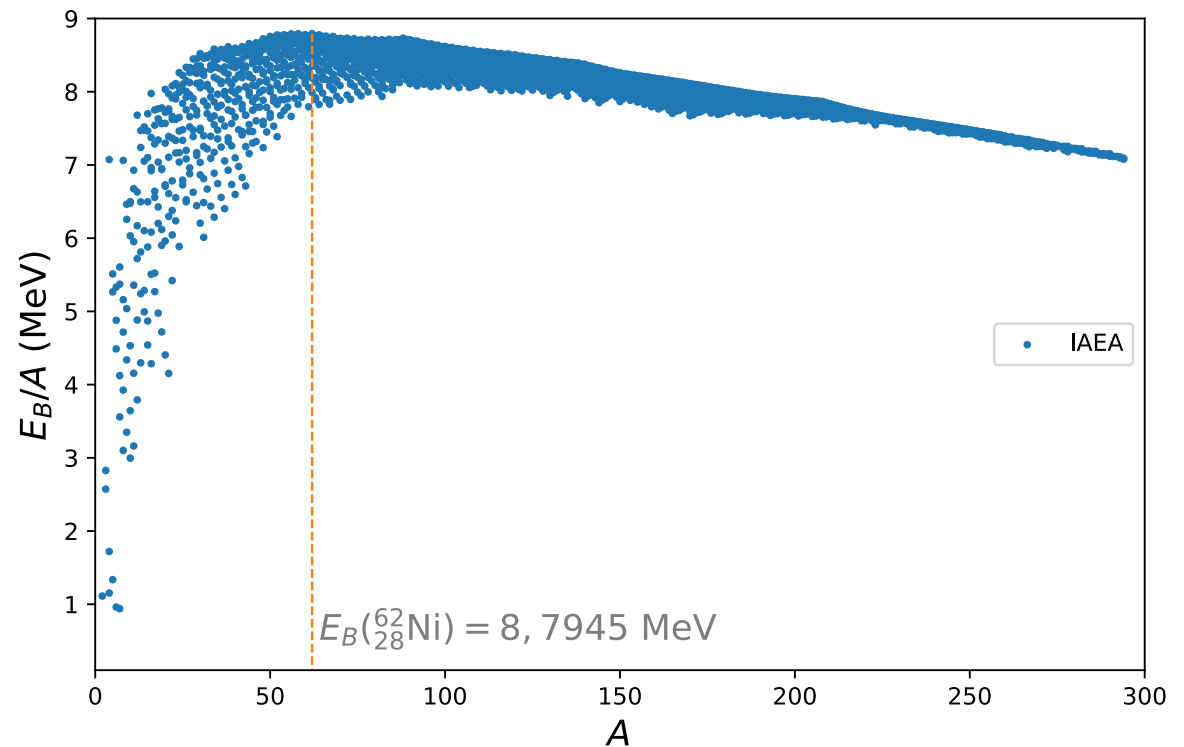
# Energía de ligadura (o enlace) nuclear

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

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

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

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



## Energía de ligadura

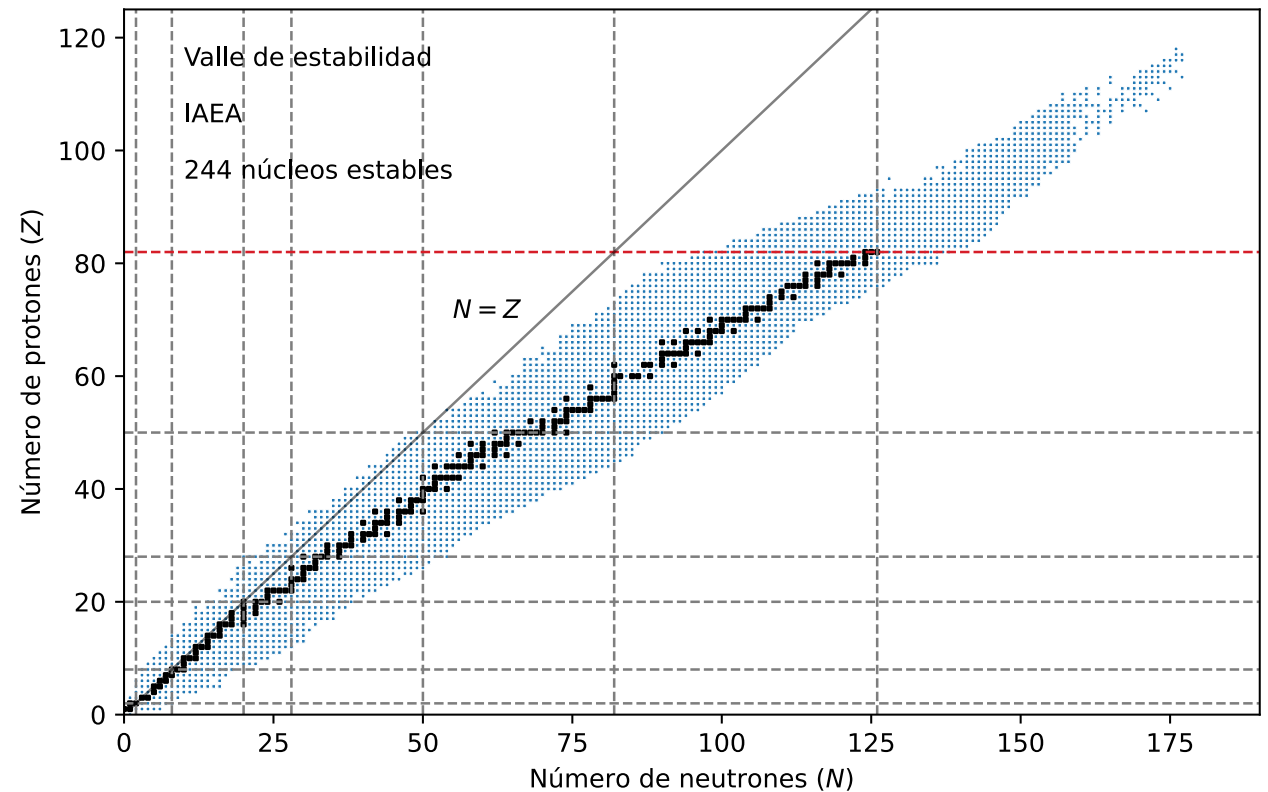
---

- 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  $\alpha$ , Tema 5)



## Valle de estabilidad

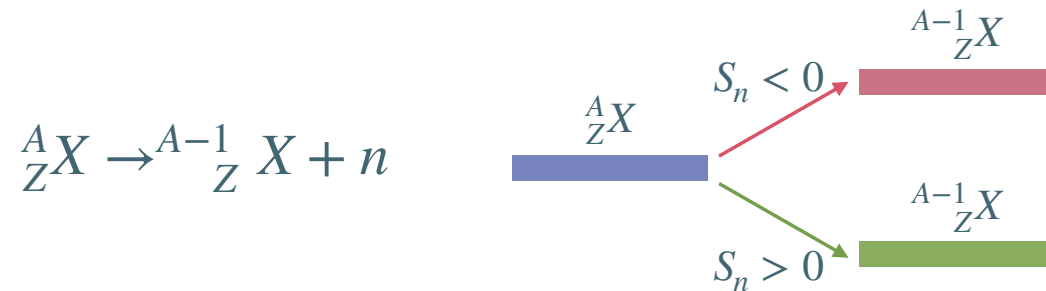
---

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

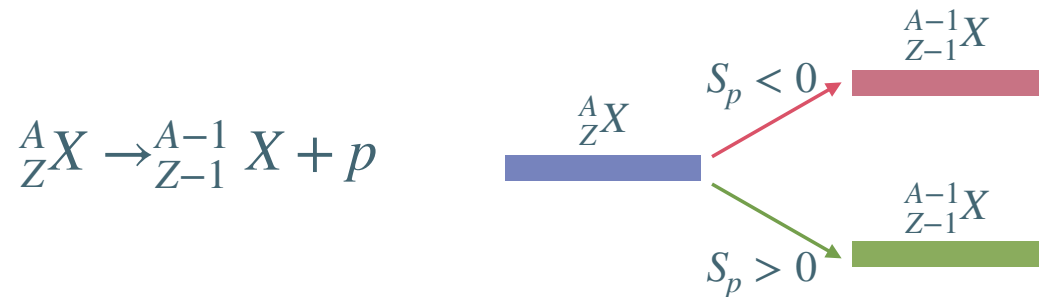
- Hay muchos más núcleos estables de tipo par-par
- Implica que debe haber fuerzas de apareamiento
- En particular, los núcleos con clusters de partículas  $\alpha$  ( $^4\text{He}$ ,  $^8\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ) tienen valores grandes de la energía de ligadura por nucleón
- 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

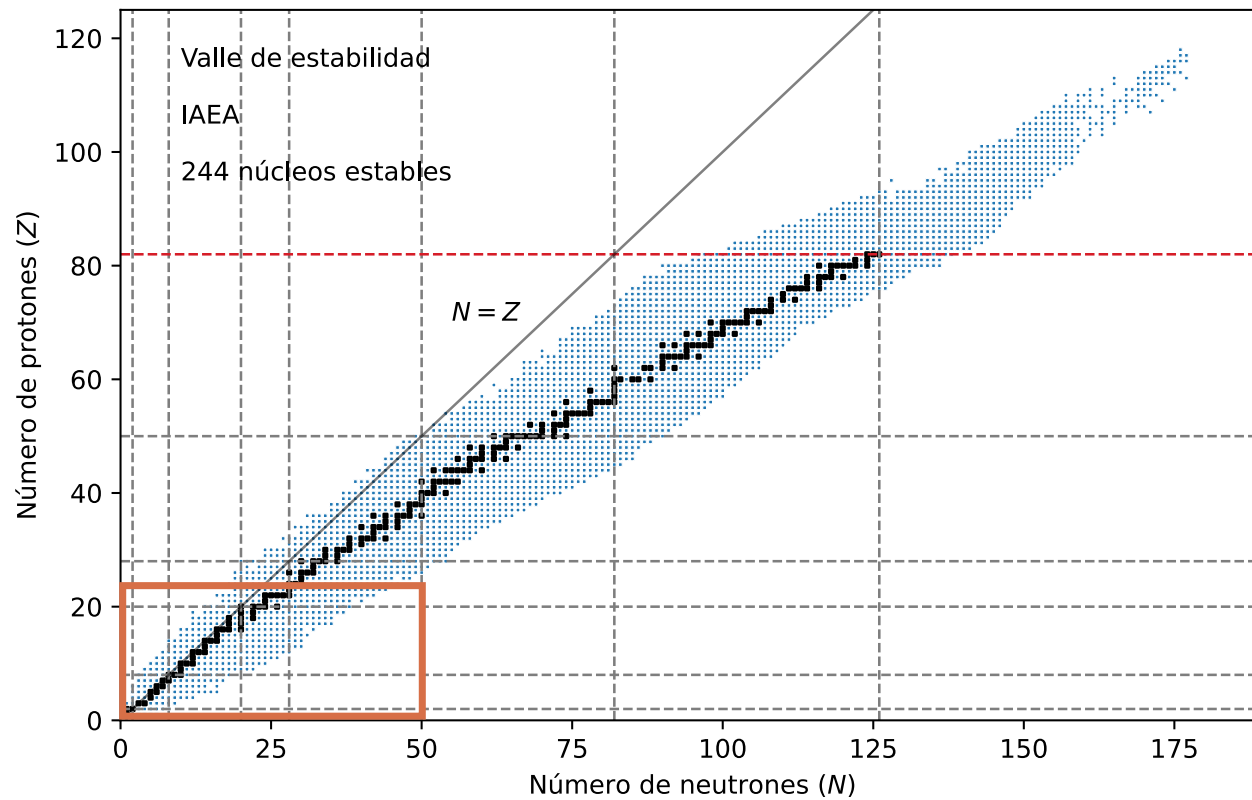


$$S_p(Z, N) = - [\mathcal{M}(Z, N) - \mathcal{M}(Z-1, N) - \mathcal{M}({}^1\text{H})] c^2 = E_B(Z, N) - E_B(Z-1, N)$$

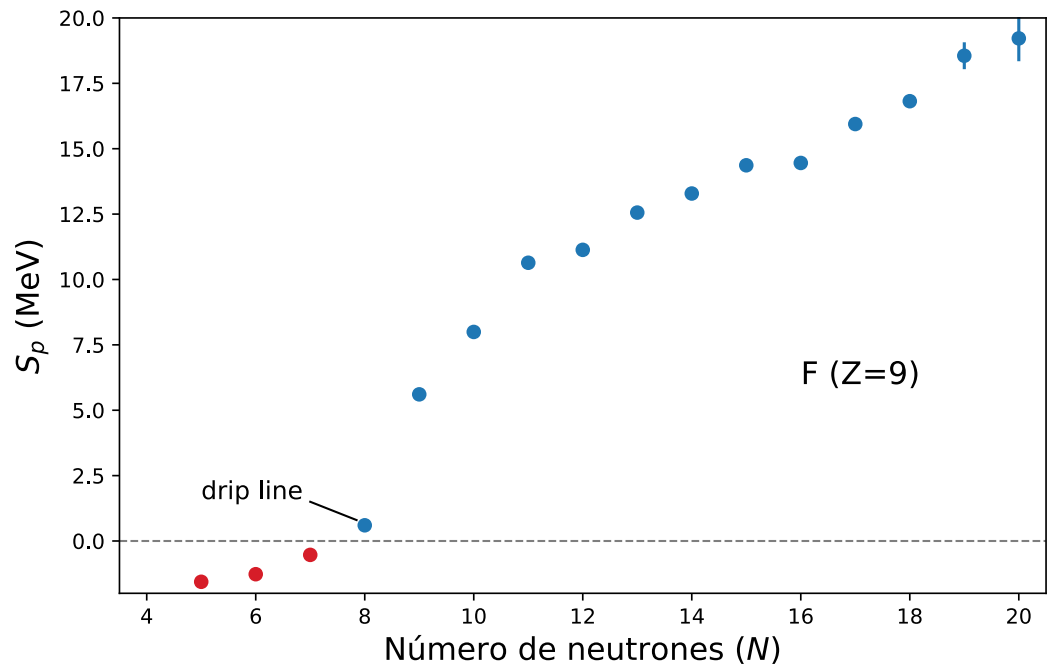
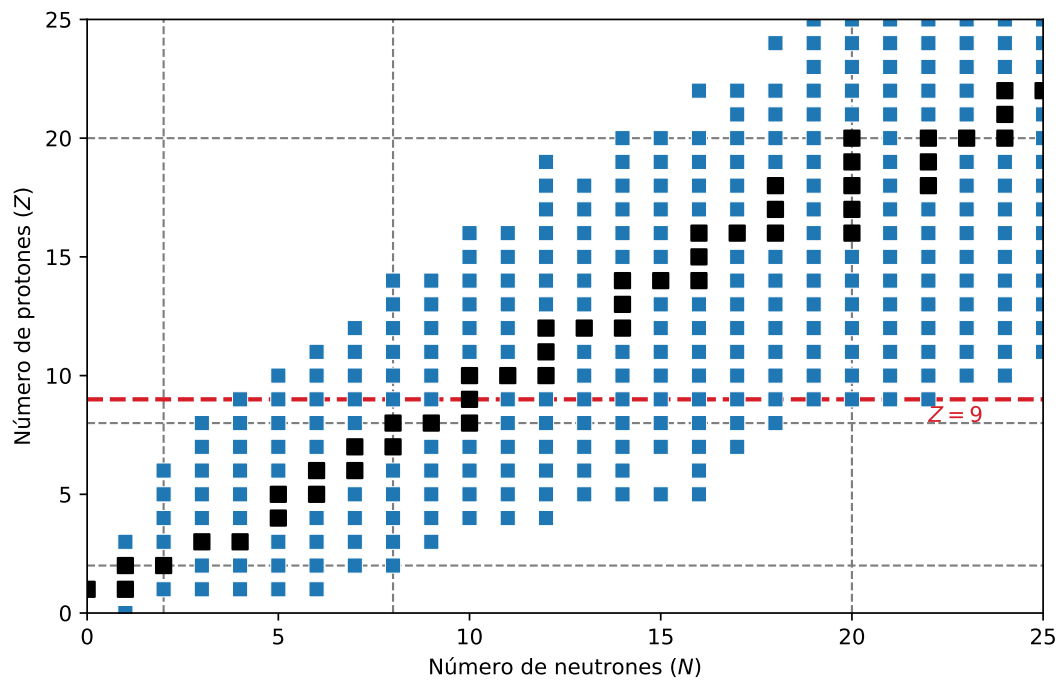


$$S_n(Z, N) = - [\mathcal{M}(Z, N) - \mathcal{M}(Z, N-1) - m_n] c^2 = E_B(Z, N) - E_B(Z, N-1)$$

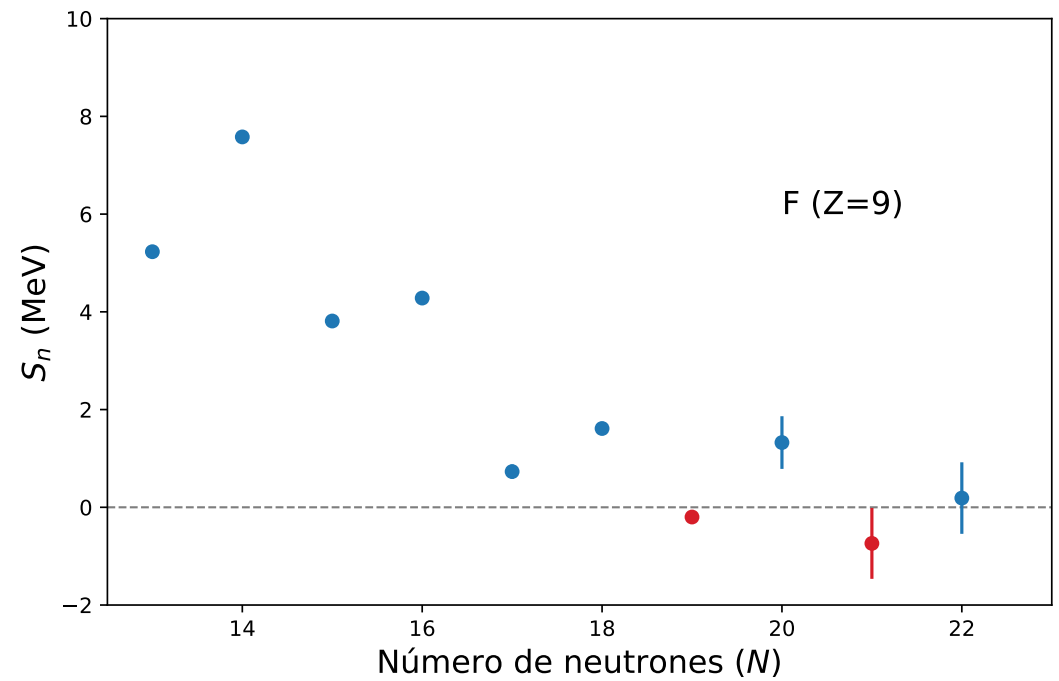
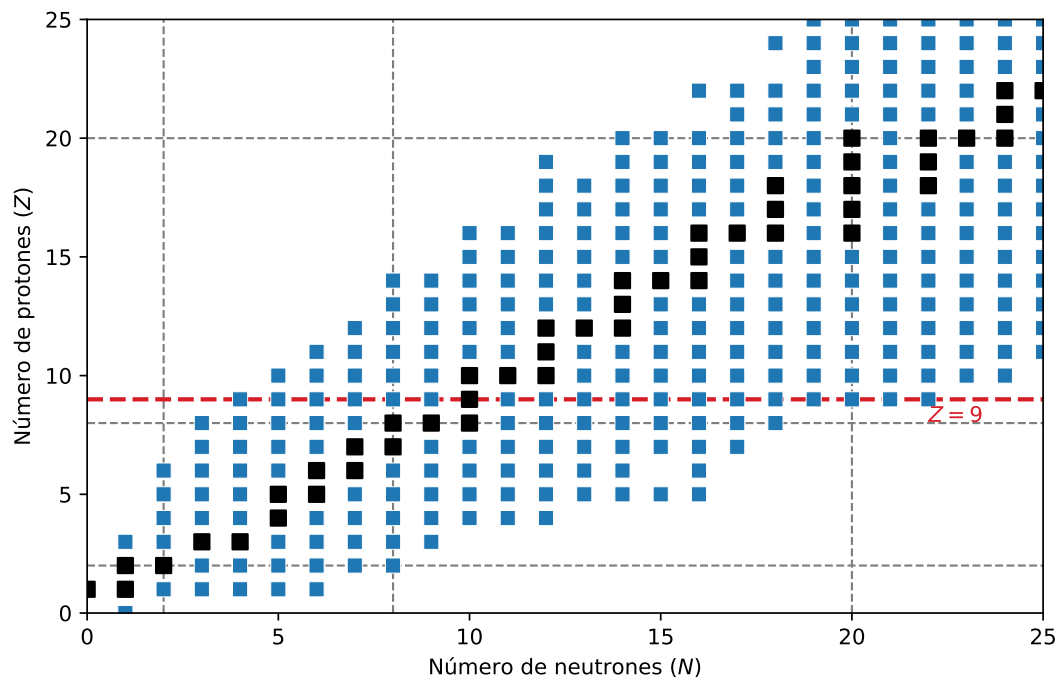
# Energía de separación nucleónica



# Energía de separación nucleónica (*proton drip line*)

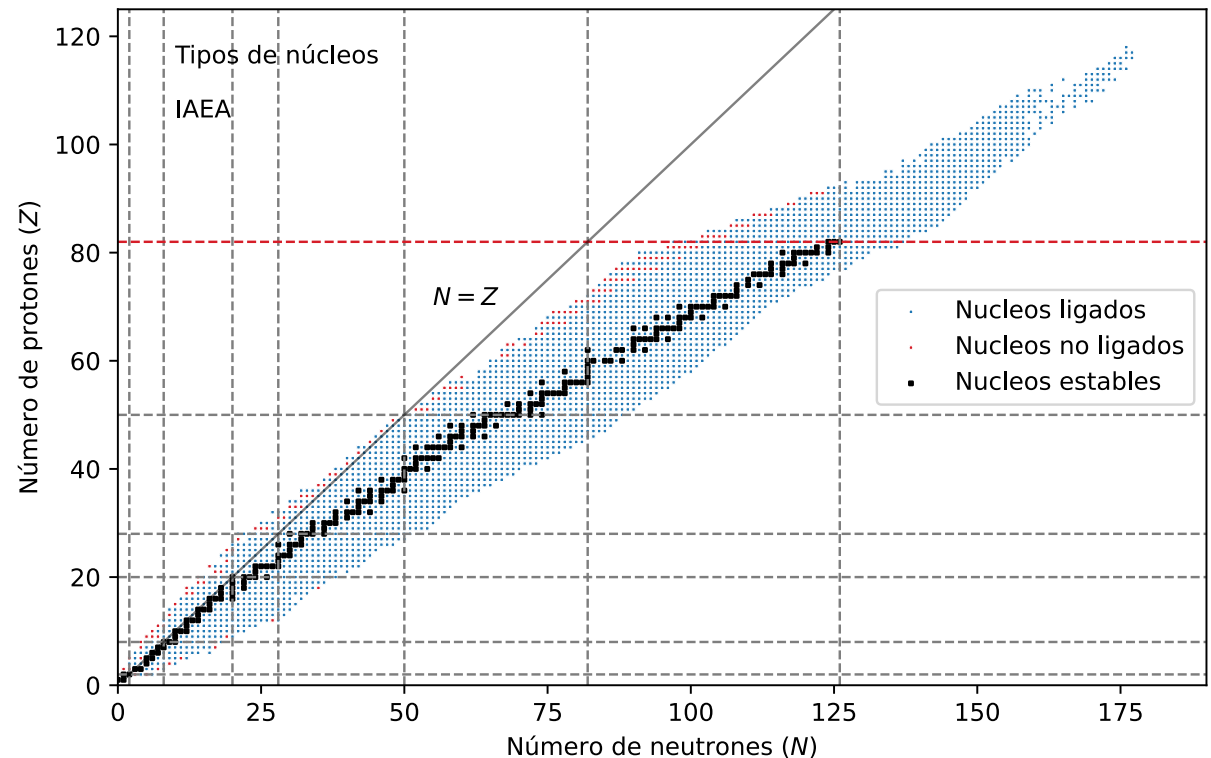


# Energía de separación nucleónica (*neutron drip line*)



# 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



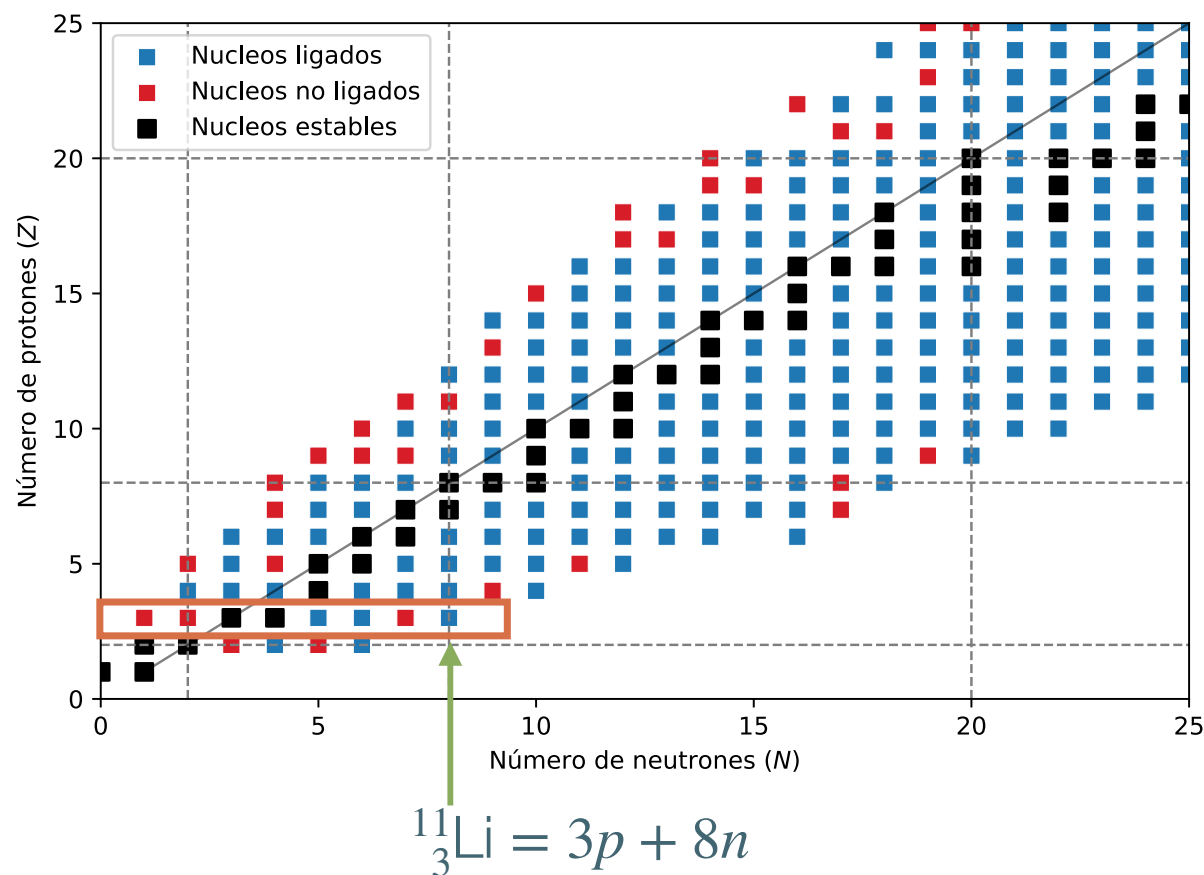
- Estables (no decaen)
- Ligados pero inestables (decaen mediante radiactividad, Temas 4 y 5)
- No ligados (energía de separación negativa). El núcleo decae por emisión de protón o neutrón. Determinan la posición de la *drip line* en la carta nuclear





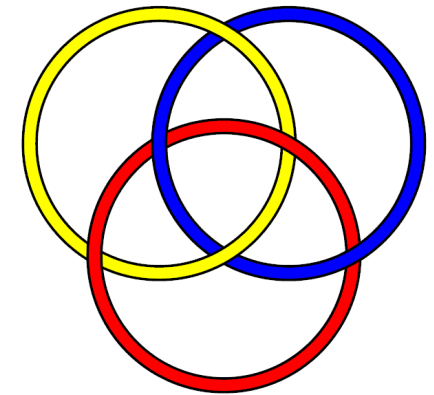
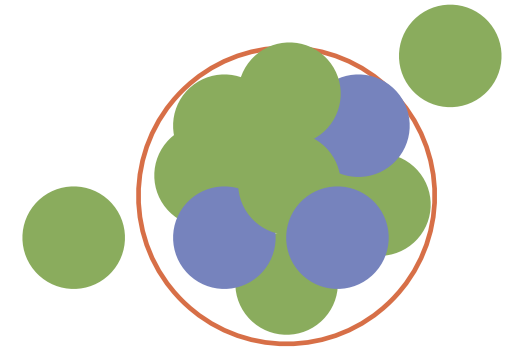
# Tipos de núcleos

- 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 con halo (núcleos borromeos)

- Núcleos con un radio mayor de lo esperado (halo)
- Tienen una mayor sección eficaz de la esperada
  - Ejemplos:  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$ ,  ${}^{11}\text{Be}$ ,  ${}^{14}\text{Be}$ ,  ${}^8\text{B}$ ,  ${}^{17}\text{B}$ ,  ${}^{19}\text{B}$ ,  ${}^{15}\text{C}$ ,  ${}^{19}\text{C}$ ,  ${}^{22}\text{C}$ ,  ${}^{17}\text{Ne}$ ,  ${}^{26}\text{P}$ ,  ${}^{16}\text{S}$
- Núcleos borromeos: Sistemas descriptible como un sistema de tres cuerpos cuyos subsistemas de dos cuerpos no son ligados
  - Ejemplos:
    - $(2n) : {}^6\text{He}, {}^{11}\text{Li}, {}^{22}\text{C}$
    - $(2p) : {}^{17}\text{Ne}$
    - $(2\alpha) : {}^5\text{He}, {}^8\text{Be}$



*Borromean knot, Wikipedia*

## Estabilidad nuclear

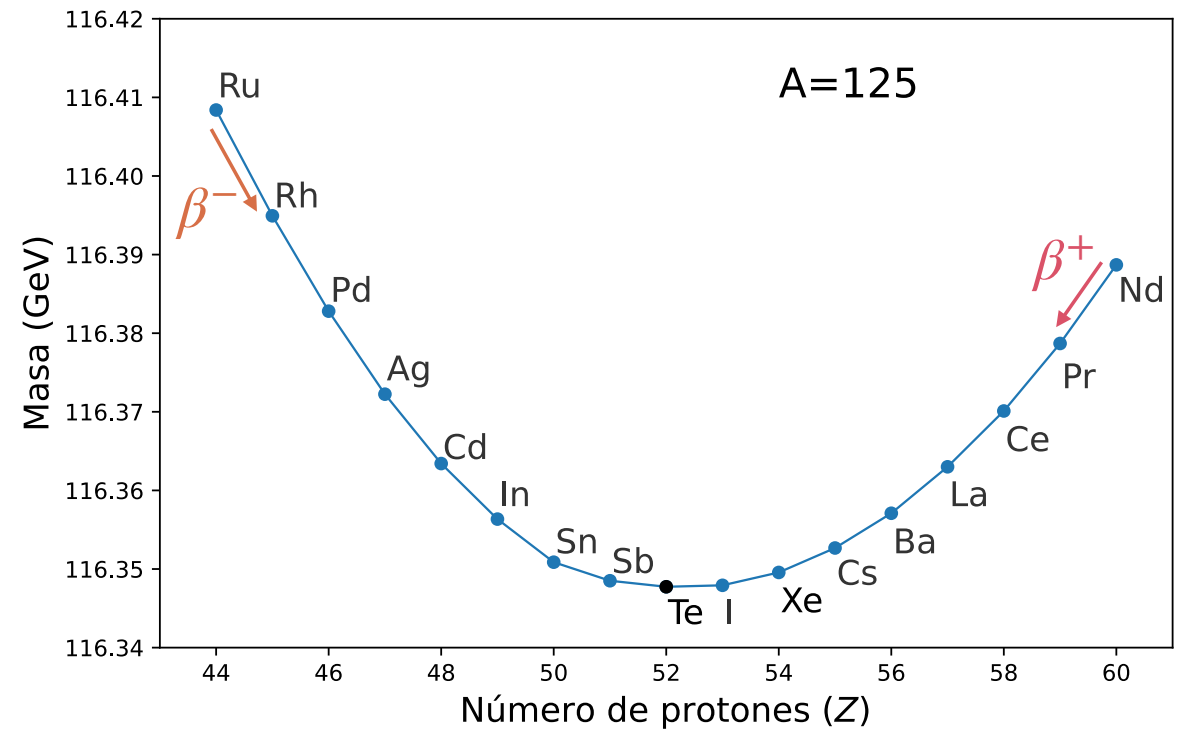
---

- Desintegración  $\alpha$ :  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$
- Desintegración  $\beta$ :
  - $\beta^-$ :  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}_e$
  - $\beta^+$ :  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu_e$
  - Captura electrónica (C.E.):  ${}^A_Z X + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu_e$
- Desintegración  $\gamma$ :  ${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$
- Emisión de nucleones:  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-1}_{Z-1} Y + p$  o  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-1}_Z X + n$

$$Z_{\min} = \frac{A}{1,98 + 0,015A^{2/3}}$$

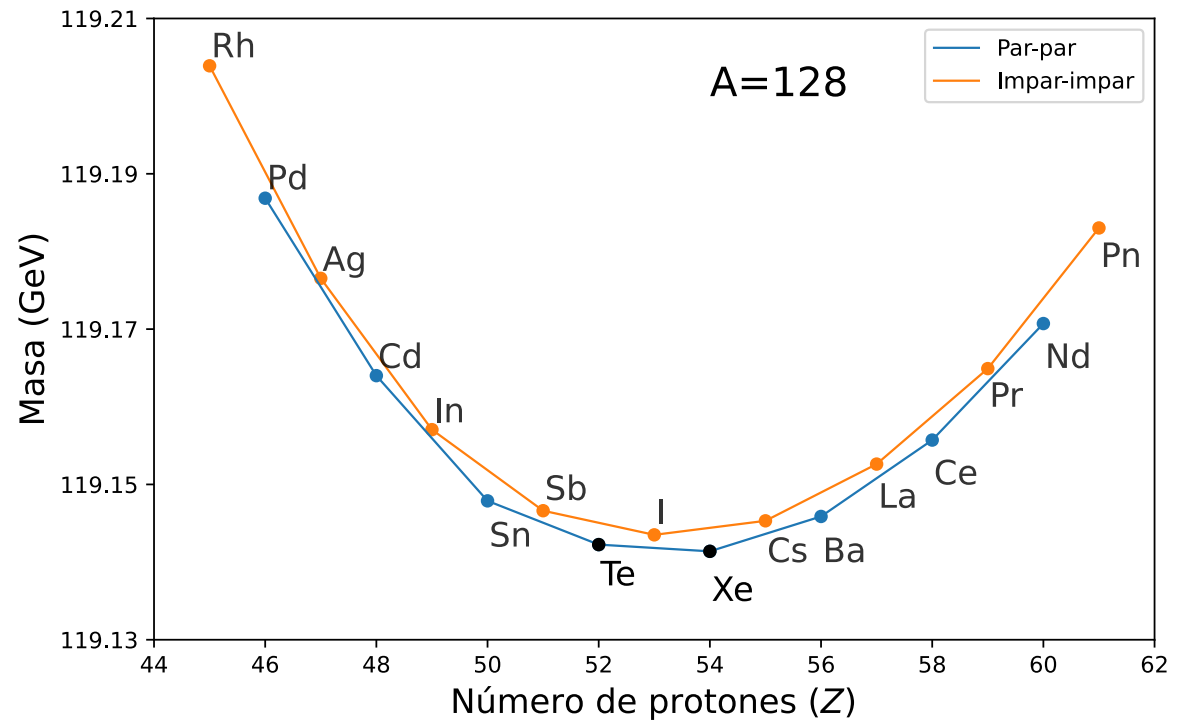
## Parábola de masas (caso A impar)

- Una sola parábola
- Se van produciendo decaimientos hasta alcanzar el estado de menos masa



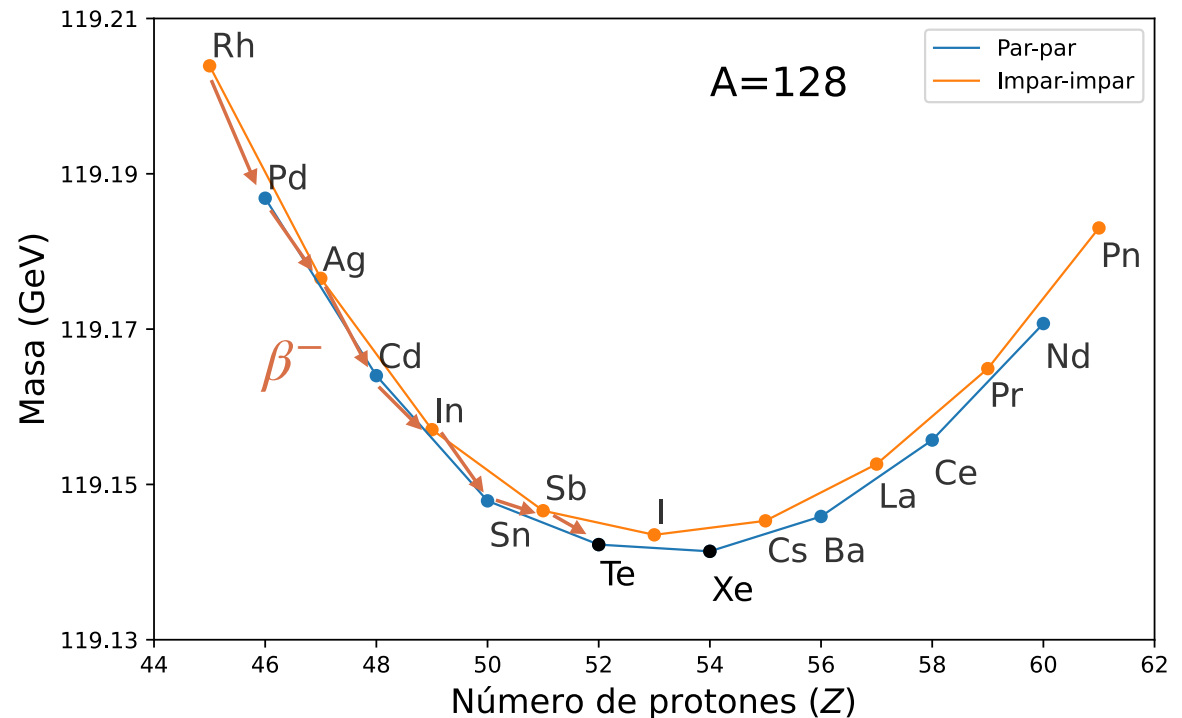
## Parábola de masas (caso A par)

- Existen dos parábolas:
  - Par-par
  - Impar-impar
- La diferencia de energía es el *pairing*
- Explica que los núcleos impar-impar sean menos estables
- La cadena de decaimientos salta entre parábolas
- El impar-impar de menor masa puede decaer  $\beta^+$  o  $\beta^-$
- Doble  $\beta$



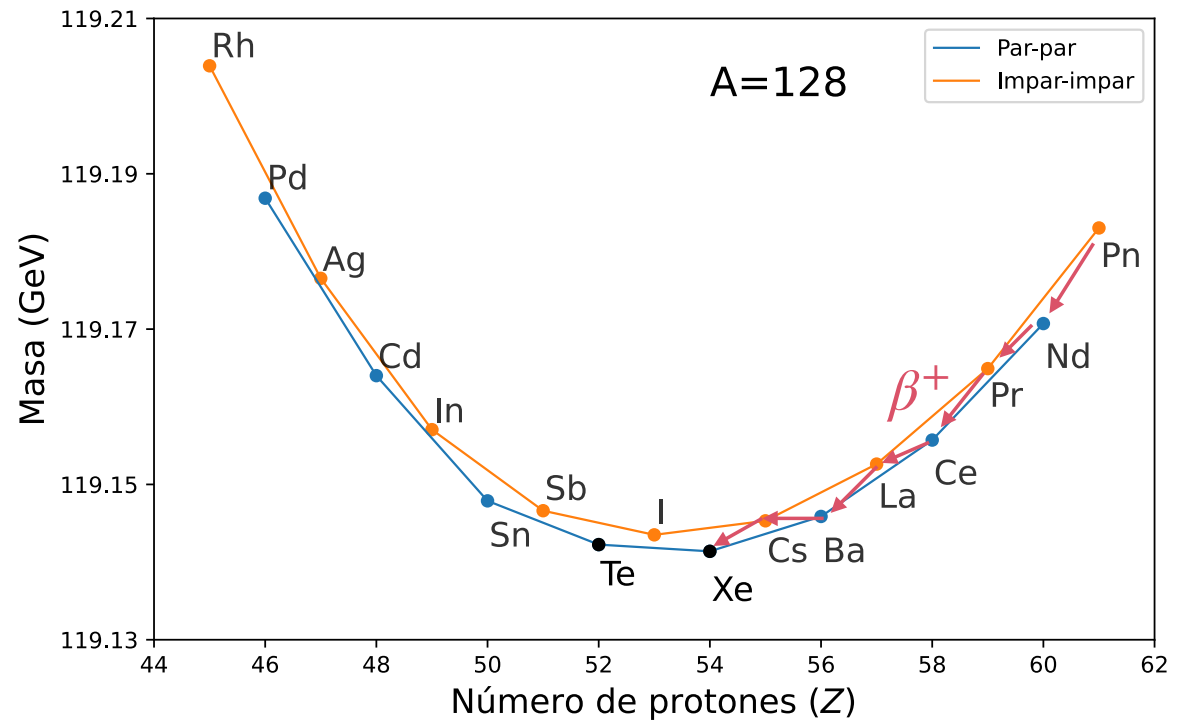
## Parábola de masas (caso A par)

- Existen dos parábolas:
  - Par-par
  - Impar-impar
- La diferencia de energía es el *pairing*
- Explica que los núcleos impar-impar sean menos estables
- La cadena de decaimientos salta entre parábolas
- El impar-impar de menor masa puede decaer  $\beta^+$  o  $\beta^-$
- Doble  $\beta$



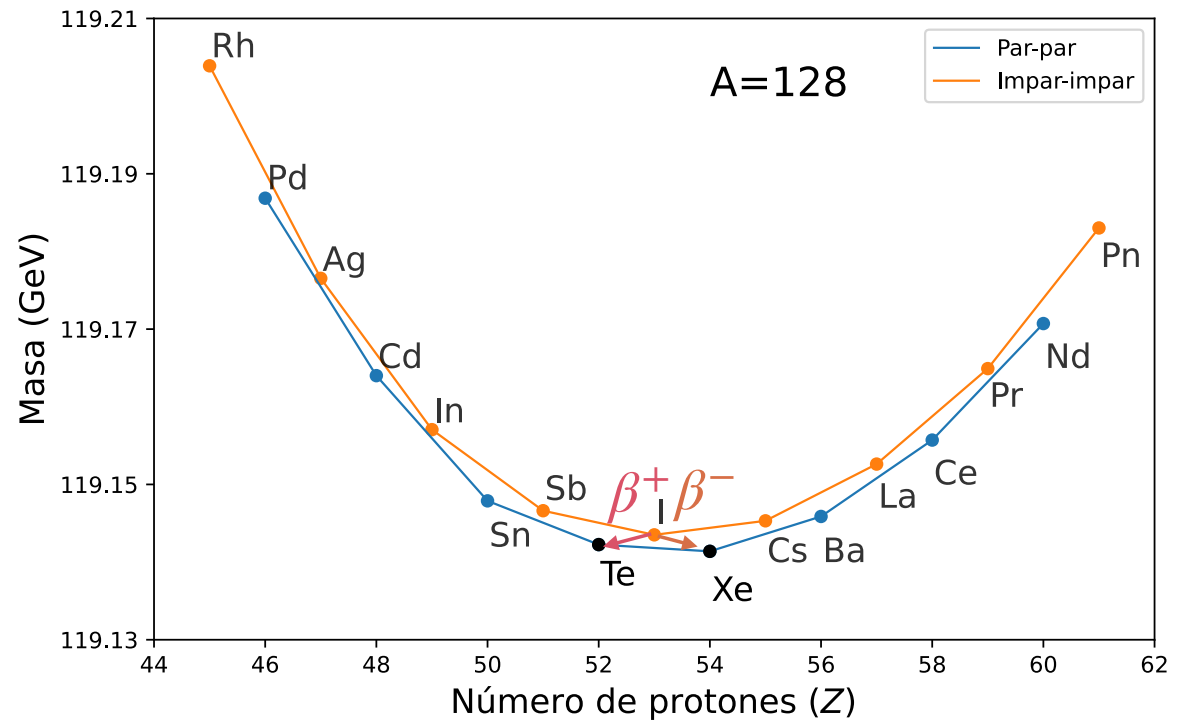
## Parábola de masas (caso A par)

- Existen dos parábolas:
  - Par-par
  - Impar-impar
- La diferencia de energía es el *pairing*
- Explica que los núcleos impar-impar sean menos estables
- La cadena de decaimientos salta entre parábolas
- El impar-impar de menor masa puede decaer  $\beta^+$  o  $\beta^-$
- Doble  $\beta$



## Parábola de masas (caso A par)

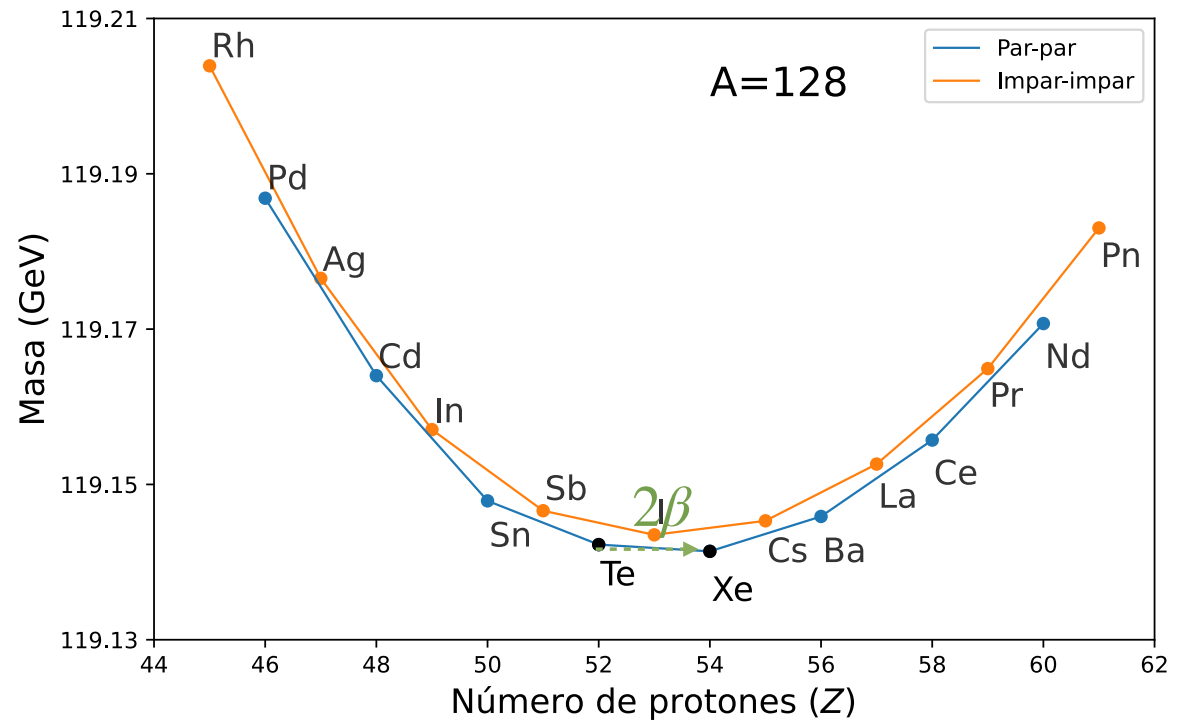
- Existen dos parábolas:
  - Par-par
  - Impar-impar
- La diferencia de energía es el *pairing*
- Explica que los núcleos impar-impar sean menos estables
- La cadena de decaimientos salta entre parábolas
- El impar-impar de menor masa puede decaer  $\beta^+$  o  $\beta^-$
- Doble  $\beta$





## Parábola de masas (caso A par)

- Existen dos parábolas:
  - Par-par
  - Impar-impar
- La diferencia de energía es el *pairing*
- Explica que los núcleos impar-impar sean menos estables
- La cadena de decaimientos salta entre parábolas
- El impar-impar de menor masa puede decaer  $\beta^+$  o  $\beta^-$
- Doble  $\beta$



## Espín nuclear

---

- Los núcleos tienen espín bien definido
- Dado un potencial central, los nucleones tienen un momento angular orbital  $\vec{\ell}_i$  y junto con su espín intrínseco  $\vec{s}_i$ ,  $\vec{j}_i = \vec{\ell}_i + \vec{s}_i$ . Y el espín nuclear será:

$$\vec{J} = \sum_{i=1}^A \vec{j}_i$$

- Si  $A$  es par,  $J$  es entero, si  $A$  es impar,  $J$  es semientero con  $|\vec{J}|^2 = J(J+1)\hbar^2$
- Y sus proyecciones  $m_J\hbar$  cumplen  $J \geq m_J \geq -J$

Otras propiedades nucleares

## Paridad nuclear

---

- Los núcleos tienen paridad bien definida
- La paridad transforma la función de ondas

$$\mathcal{P} \psi(r_1, r_2, \dots) = \psi(-r_1, -r_2, \dots) = p \psi(r_1, r_2, \dots)$$

- Se puede obtener a partir de mediciones experimentales
- La paridad del núcleo es consecuencia de la paridad espacial de los nucleones que lo componen
- Los núcleos par-par tienen  $J^{\mathcal{P}} = 0^+$ , consecuencia de las fuerzas de apareamiento entre nucleones idénticos

$$p = (-1)^{\ell}$$

## Isospín

---

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

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

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

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

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

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

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

## Espín isotópico (isospín) del núcleo

---

- Consecuencia del isospín del nucleón
- Reglas de composición del momento angular
- $\vec{T}$  y  $T_3$
- El hamiltoniano nuclear depende sólo del isospín total  $\vec{T}$
- El isospín nuclear se conserva en las interacciones fuertes
- $|\vec{T}| \geq |Z - N|/2$  y  $T_3 = (Z - N)/2$
- Fórmula de Gell-Mann-Nishijima  $Q = T_3 + A/2$
- Ejemplo:

$$A = 10 \left[ \begin{array}{l} T_3 (^{10}_4\text{Be}) = -1 \\ T_3 (^{10}_5\text{B}) = 0 \\ T_3 (^{10}_6\text{C}) = +1 \end{array} \right.$$

## Momentos electromagnéticos nucleares

---

- Proporcionan información sobre la distribución de carga y las propiedades magnéticas de los núcleos
- Determinan el comportamiento del núcleo en presencia de campos magnéticos y eléctricos

## Momentos eléctricos. Expansión multipolar

---

- El potencial eléctrico se puede escribir:

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{q(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{r}' = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \sum_{\lambda} \sqrt{\frac{4\pi}{2\lambda + 1}} \frac{Q_{\lambda 0}}{r^{\lambda}}$$

donde

$$Q_{\lambda\mu} = e \langle \psi(\vec{r}) | r^{\lambda} Y_{\lambda\mu}^*(\theta, \phi) | \psi(\vec{r}) \rangle$$

- Si  $\lambda = \text{impar} \Rightarrow Q_{\lambda\mu} = 0$
- $Q_{00}$  es la carga eléctrica y el primer término de interés es el momento cuadrupolar  $Q_{20}$
- Si  $J=0$  o  $J=1/2$  el momento cuadrupolar es cero



# Momento cuadrupolar eléctrico. Deformación nuclear

- Se define

$$Q_{20} = e \sqrt{\frac{16\pi}{5}} \langle \psi(\vec{r}) | r^2 Y_{20}^*(\theta, \phi) | \psi(\vec{r}) \rangle = e \langle J, M = J | 3z^2 - r^2 | J, M = J \rangle = e [3\langle z^2 \rangle - \langle r^2 \rangle]$$

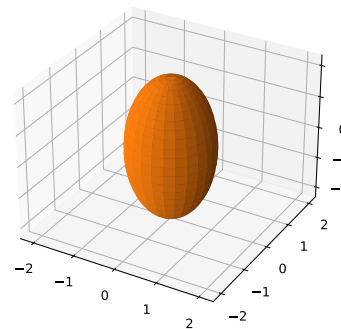
- Si

$$3\langle z^2 \rangle = \langle r^2 \rangle \Rightarrow Q_{20} = 0$$

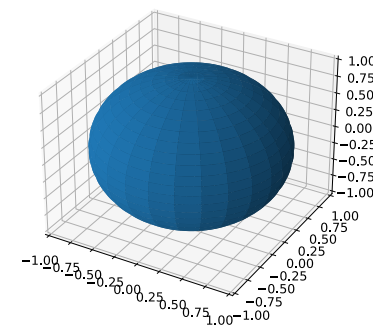
$$3\langle z^2 \rangle > \langle r^2 \rangle \Rightarrow Q_{20} > 0$$

$$3\langle z^2 \rangle < \langle r^2 \rangle \Rightarrow Q_{20} < 0$$

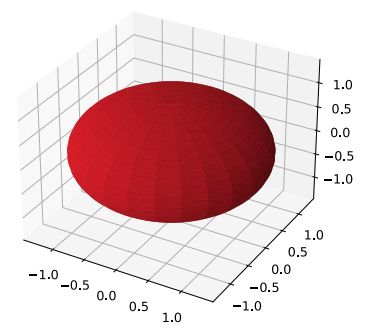
*prolato,  $Q_{20} > 0$*



*esférico,  $Q_{20} = 0$*

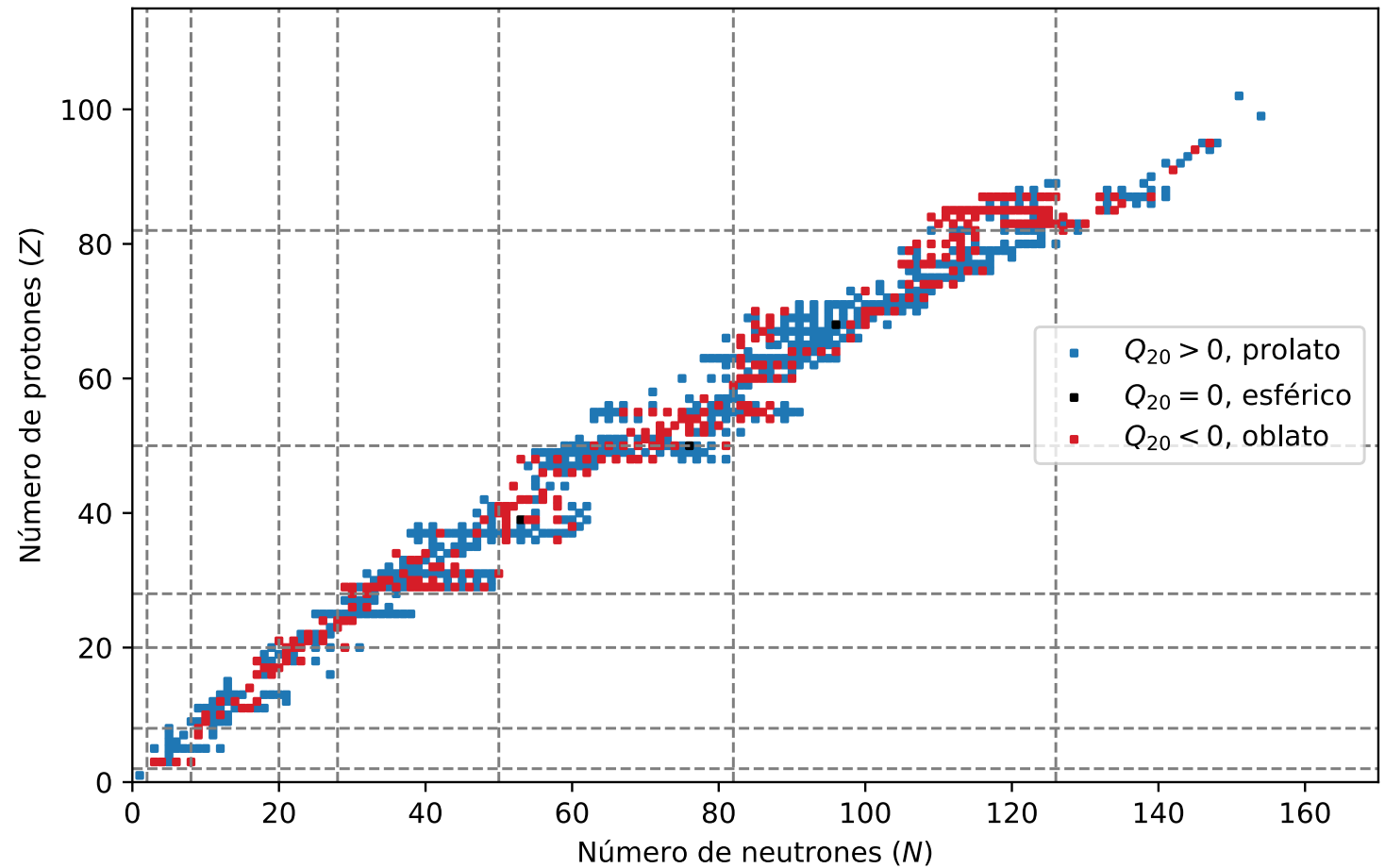


*oblato,  $Q_{20} < 0$*



# Deformación nuclear

- 421 núcleos prolatos
- 270 núcleos oblatos



## Momento dipolar magnético (I)

---

- Es el momento magnético más bajo no nulo
- Dos componentes

• Debida al momento angular orbital  $\vec{\mu}_l = g^{(l)} \frac{e\hbar}{2m_p} \frac{\vec{l}}{\hbar} = g^{(l)} \mu_N \frac{\vec{l}}{\hbar}$  donde

$$g_p^{(l)} = 1 \text{ y } g_n^{(l)} = 0$$

• Debida al espín  $\vec{\mu}_s = g^{(s)} \frac{e\hbar}{2m_p} \frac{\vec{s}}{\hbar} = g^{(s)} \mu_N \frac{\vec{s}}{\hbar}$  donde  $g_p^{(s)} = 5,58569$  y

$$g_n^{(s)} = -3,82608$$

•  $\mu_N = 3,1524513 \cdot 10^{-14}$  MeV/T es el magnetón nuclear

## Momento dipolar magnético (II)

---

- El momento magnético del sistema viene dado por

$$\vec{\mu} = \frac{\mu_N}{\hbar} \sum_{i=1}^A \left( g^{(s)} \vec{s} + g^{(l)} \vec{l} \right)$$

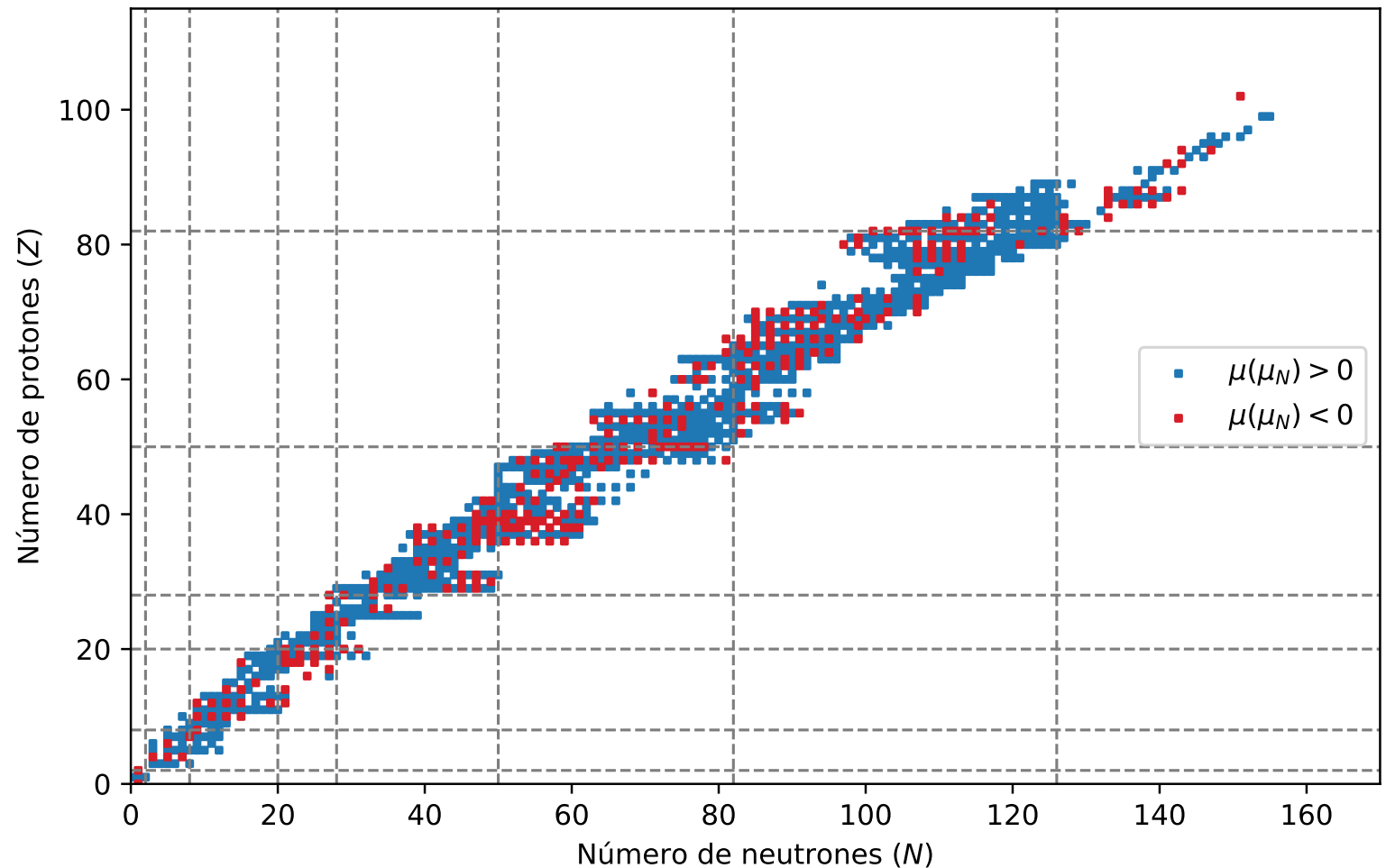
- En general no se puede obtener  $\mu$  a partir de sus constituyentes, por lo que se define

$$\vec{\mu} = g^{(J)} \frac{\mu_N}{\hbar} \vec{J}$$

- Experimentalmente se comprueba que las fuerzas de apareamiento hacen que los nucleones se acoplen a  $J=0$ . Por lo tanto sólo los nucleones desapareados contribuirán a  $\mu$ . Por tanto:  $-\mu_N < \mu < 6\mu_N$

## Momento dipolar magnético (III)

- 292 núcleos tienen dipolo magnético negativo
- 853 núcleos tienen dipolo magnético positivo



## Resumen

---

- El núcleo como sistema compuesto con tamaño finito
- Densidad nuclear vs. densidad de carga
- Energía de ligadura. Estabilidad nuclear. *Drip line*.
- Espín, isospín y paridad nucleares
- Momento cuadrupolar eléctrico. Deformación nuclear
- Momento dipolar magnético

## 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 a partir de la base de datos de núcleos de la Agencia Internacional de la Energía Atómica:
  - [./Notebooks/Tema1.ipynb](#)