

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. Desintegración 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

Material disponible

- Material disponible en el repositorio Github de la asignatura
 - <https://github.com/cefera/FNyP>
- Esta presentación:
 - [./Presentaciones/Tema1.pdf](#)
- Código en Python asociado:
 - [./Notebooks/Tema1.ipynb](#)

Esquema

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

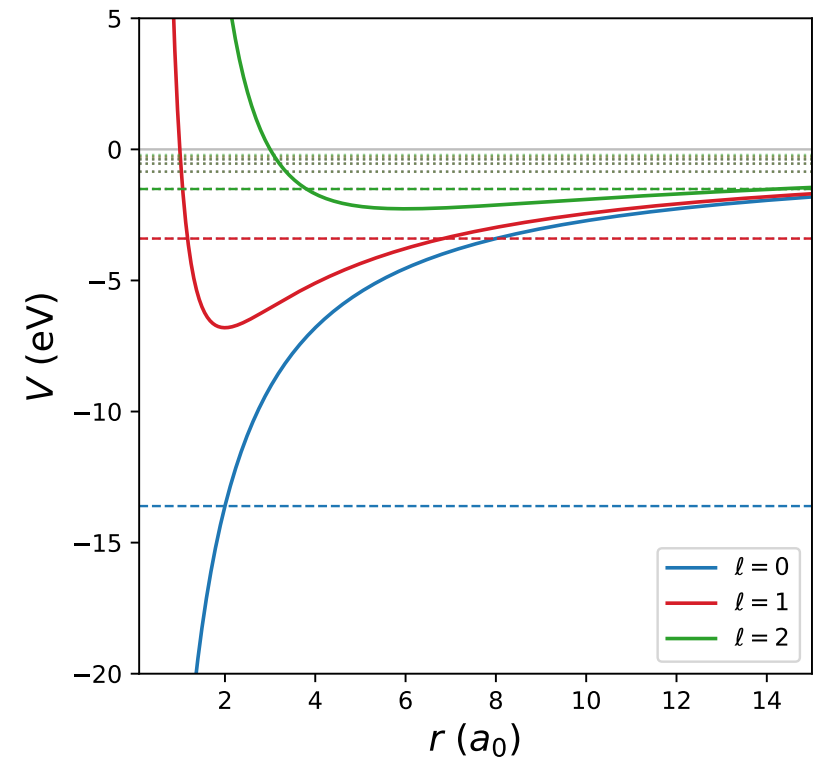
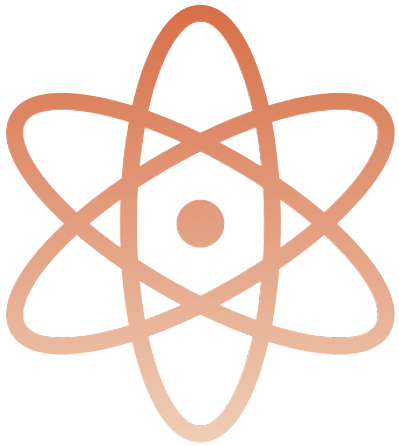
Datos sobre núcleos procedentes de: Table of Nuclides, IAEA

Objetivos específicos

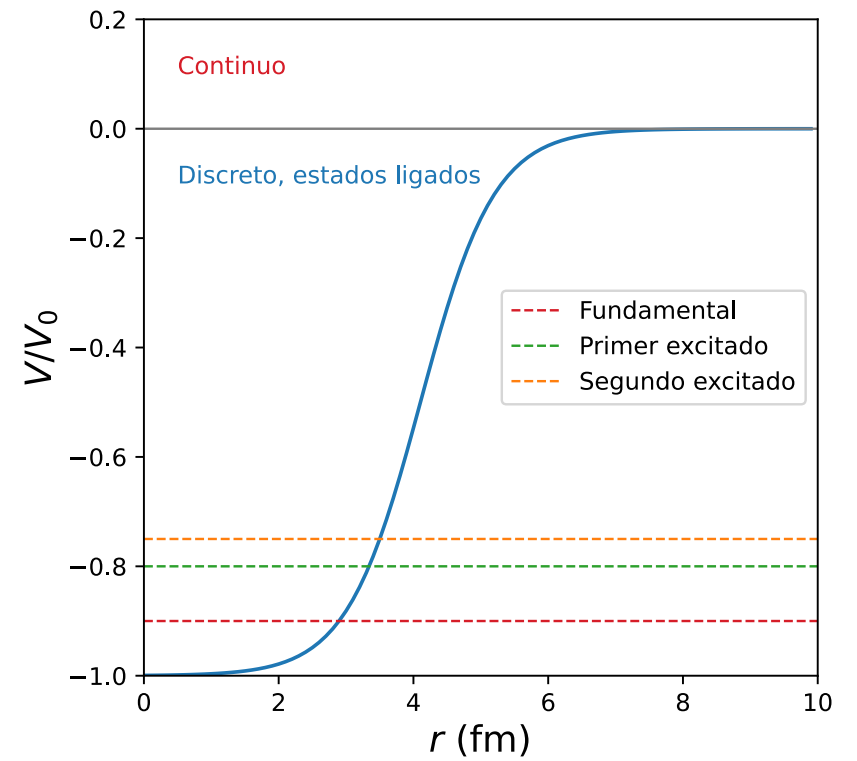
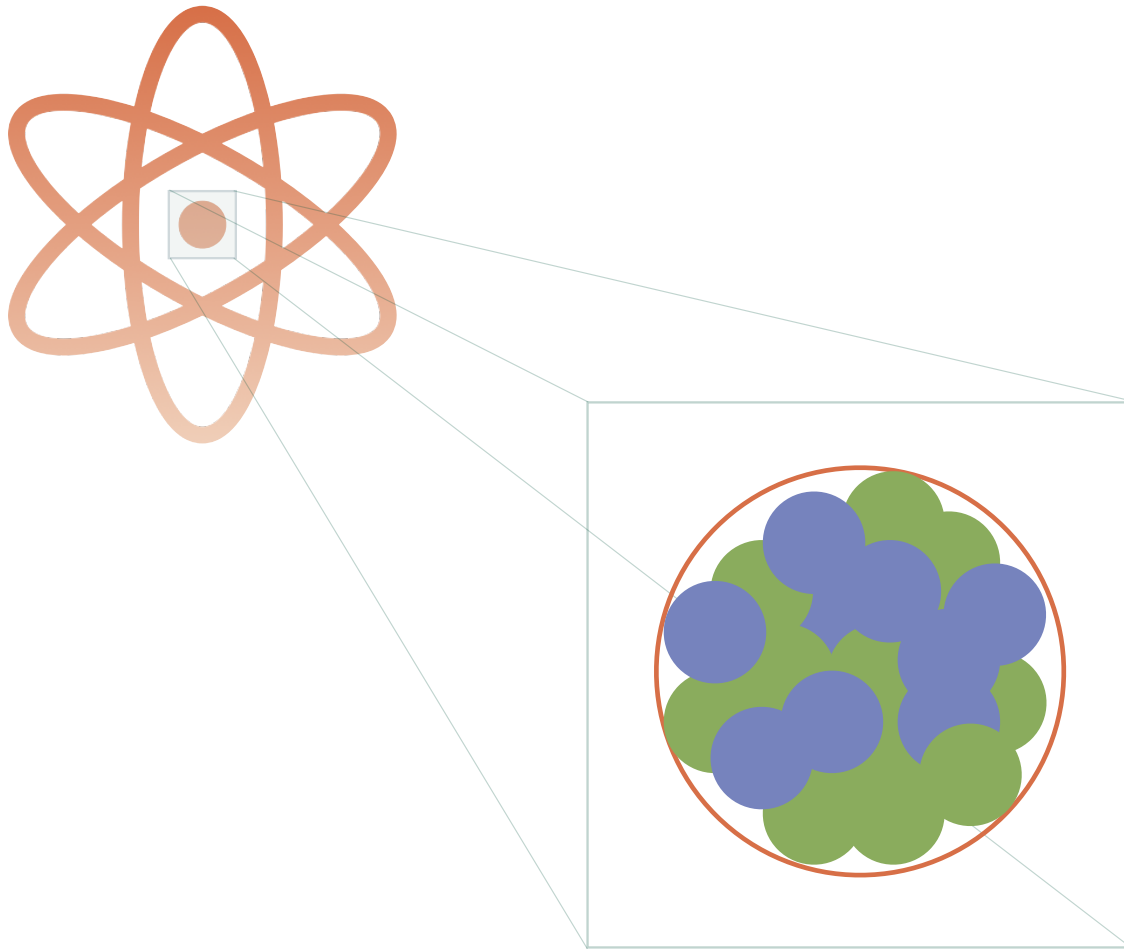
- Explicar los conceptos de masa, carga y radio nuclear y describir alguno de los métodos para medir estas magnitudes; analizar los resultados que aportan estos métodos.
- Definir y explicar los conceptos de exceso de masa, energía de ligadura de un núcleo y energía de ligadura media por nucleón en función del número másico.
- Utilizar la figura de Segré para analizar la estabilidad nuclear y deducir las consecuencias en relación a las características de los núcleos estables.
- Estudiar los momentos nucleares (espín, dipolar magnético, cuadrupolar eléctrico), el isospín y la paridad para caracterizar el estado nuclear.

Introducción

El núcleo



El núcleo



Nomenclatura

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

$$\left. \begin{array}{l} Z = 1 \\ N = 0 \end{array} \right\} {}^1_1\text{H}, \quad \left. \begin{array}{l} Z = 1 \\ N = 1 \end{array} \right\} {}^2_1\text{H},$$

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

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

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

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

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

Interacción nuclear

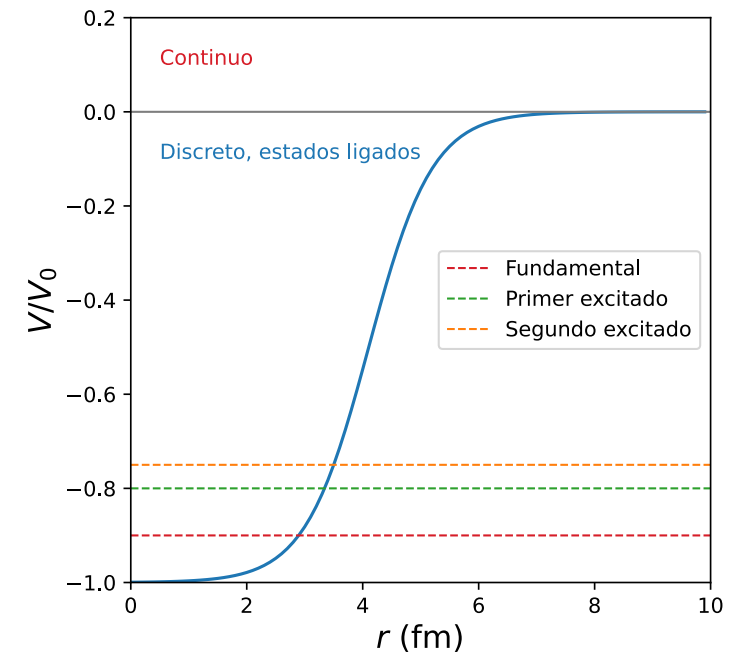
- Existencia y estabilidad de los núcleos \Rightarrow Interacción fuerte atractiva
- Corto alcance ($\approx 1\text{ fm}$)
- Independencia de la carga
- Ha de compensar la repulsión Coulombiana entre protones
- La interacción no distingue entre protones y neutrones \Rightarrow simetría de isospín

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 μ

Niveles excitados, sección eficaz y vida media

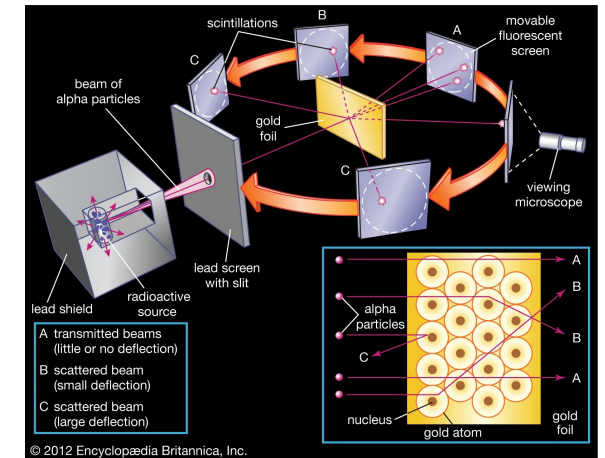
- Niveles excitados
 - Los núcleos son sistemas compuestos.
 - En condiciones normales el núcleo suele estar en el nivel fundamental
 - Los niveles excitados son accesibles mediante reacciones nucleares
- Sección eficaz
 - Caracteriza las reacciones nucleares (Tema 6. Reacciones Nucleares)
 - Representa 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: $t_{1/2} = \ln 2/\lambda = \tau \ln 2$



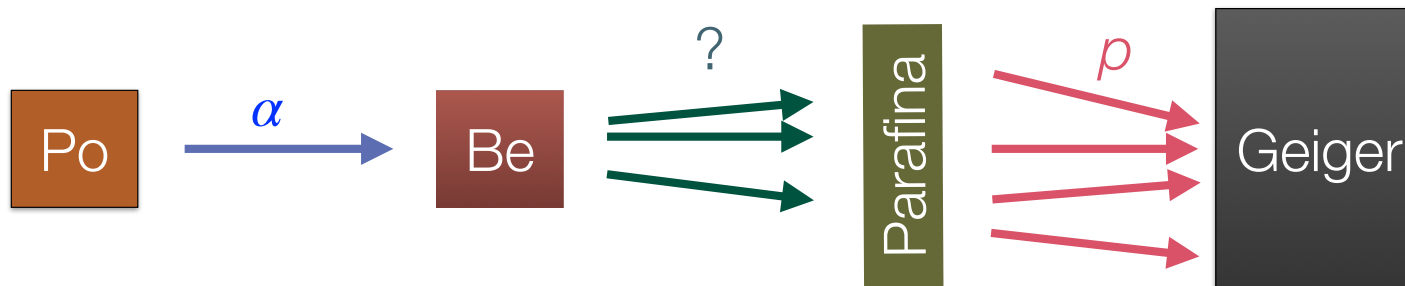
Experimentos históricos

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



El radio nuclear

Tamaño y distribución de la carga nuclear

- El núcleo no es un objeto sólido con fronteras estrictas 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 α +núcleo (desviaciones de la dispersión de Rutherford)
 - Estudio de la desintegración α 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 $\Rightarrow \lambda < 10 \text{ fm} \Rightarrow p > \hbar/\lambda \approx 100 \text{ MeV}/c$

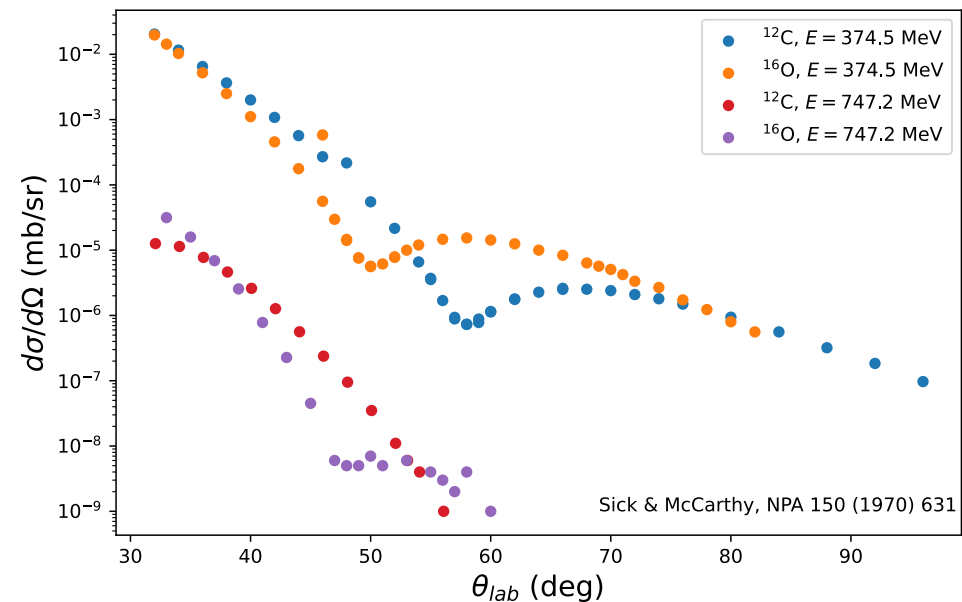
- Usamos haces de electrones con energías de ese orden
- Para un disco de radio R el primer mínimo de difracción verifica

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

- Luego:

$$R(^{12}\text{C}) \simeq 2.3 \text{ fm}$$

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



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

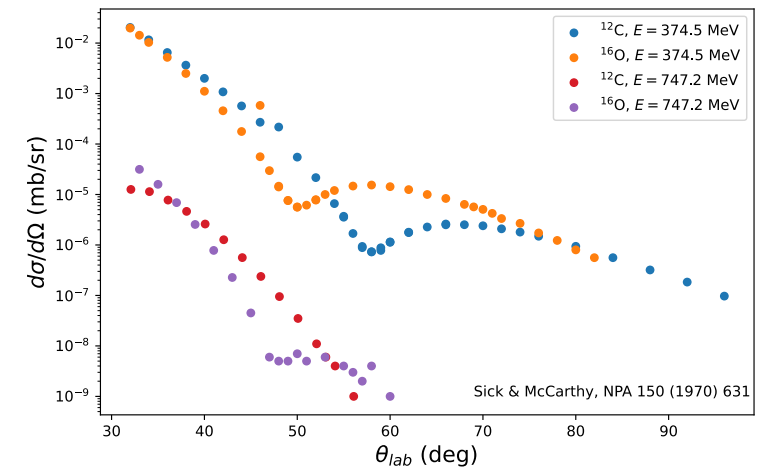
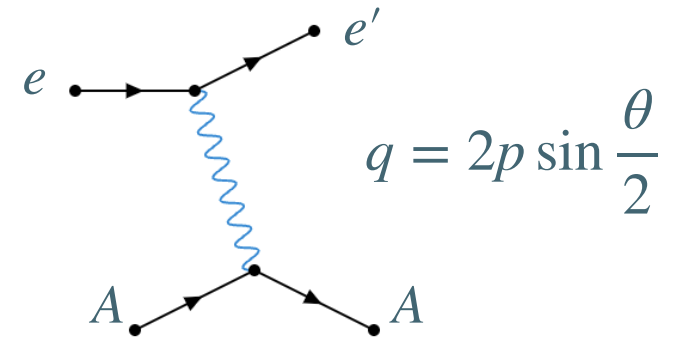
$$\sigma(\theta) \Big|_{\text{Mott}} = \left(\frac{Z\alpha}{2E_1\beta^2} \right) \left(1 - \beta^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

donde $E_1^2 = m_e^2(1 + \beta^2)$ y β 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→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

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

- ΔE_c se mide a partir de la energía cinética máxima del e^+ en la desintegración β^+

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 α +núcleo
 - Desviación respecto a la fórmula de Rutherford
 - A baja energía cinética de la partícula α la barrera coulombiana domina
 - Al aumentar la energía cinética de la partícula α 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

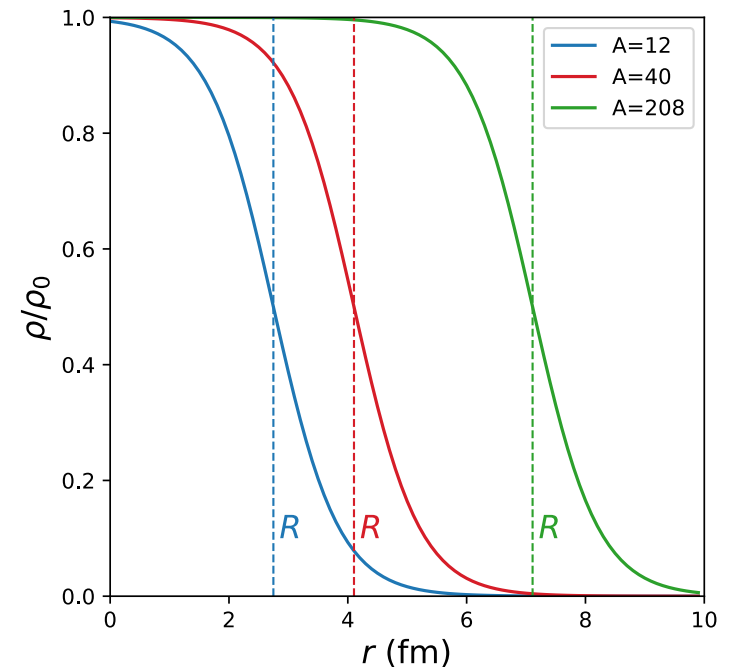
Tamaño y distribución de la masa nuclear

- 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)

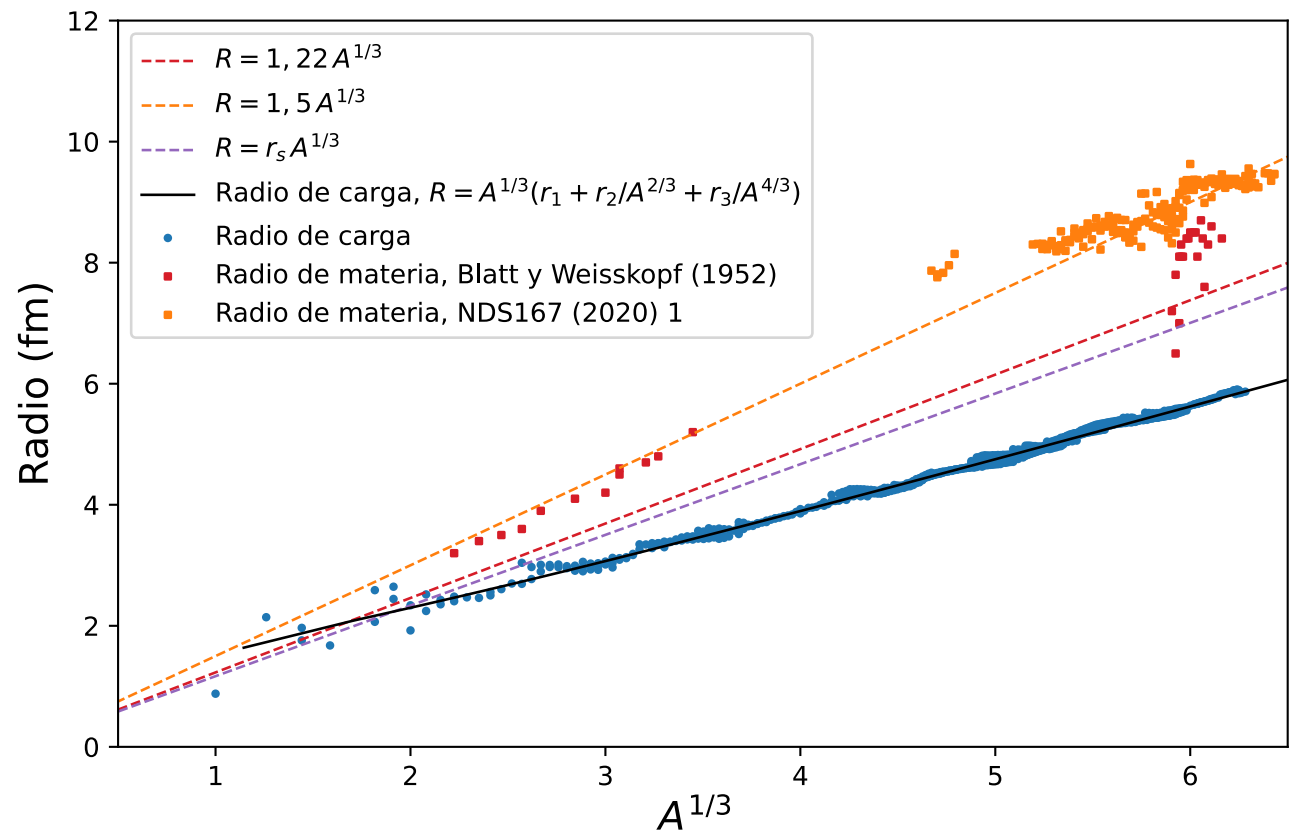
$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{(r-R)/a}}$$

- $R = r_0 A^{1/3}$; $r_0 \simeq 1,1 - 1,6$ fm, $a \simeq 0.55$ fm
- Densidad nuclear constante

$$\text{Saturación: } 0.15 \text{ fm}^{-3} = \frac{A}{V} = \frac{4A}{3\pi R^3} = \frac{4}{3\pi r_s^3} \Rightarrow r_s = 1,17 \text{ fm}$$



Radio de carga vs. radio nuclear



Blatt, Weisskopf (1952)

Singh, Kumar, Singh y Jain, Nucl. Data Sheets 167 (2020) 1

Angeli, Marinova, Atom. Data Nucl. Data Tables 99 (2013) 69

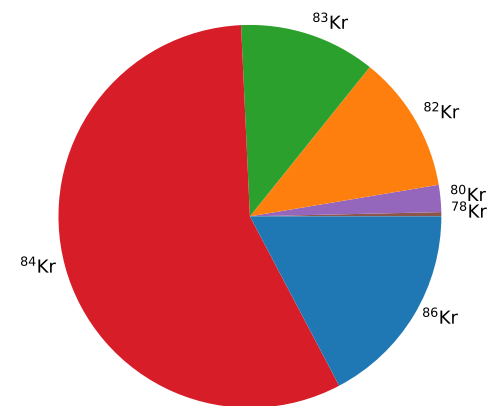
Abundancia y masa de los núcleos

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.):

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

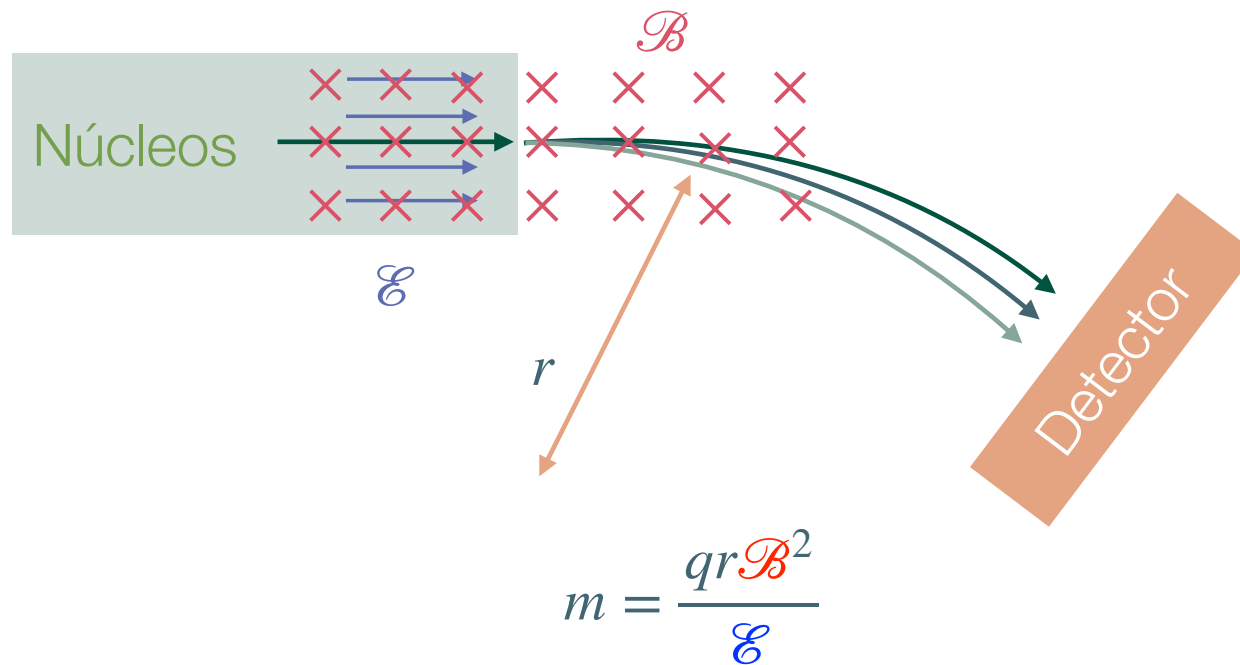
- Relación entre masa atómica \mathcal{M}_a y nuclear M_a

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

- 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

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



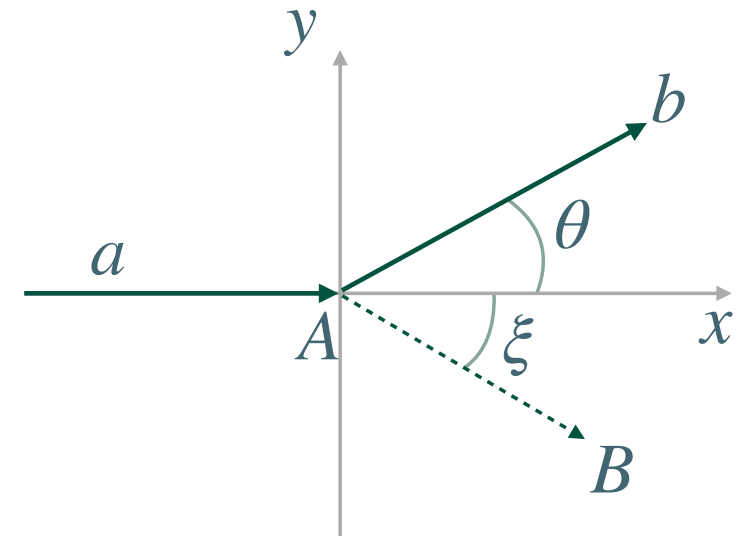
Medida a través de reacciones nucleares



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

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

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



Energía de ligadura y estabilidad nuclear

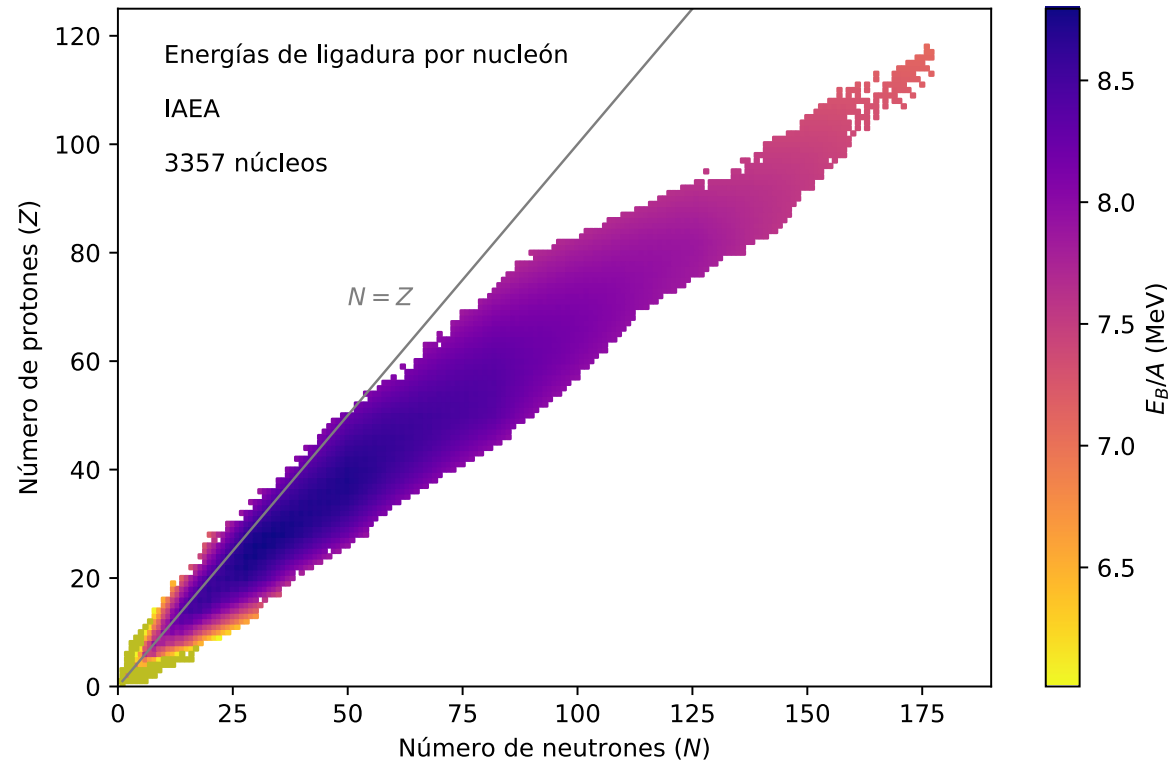
Energía de ligadura (o enlace) nuclear

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

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

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

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



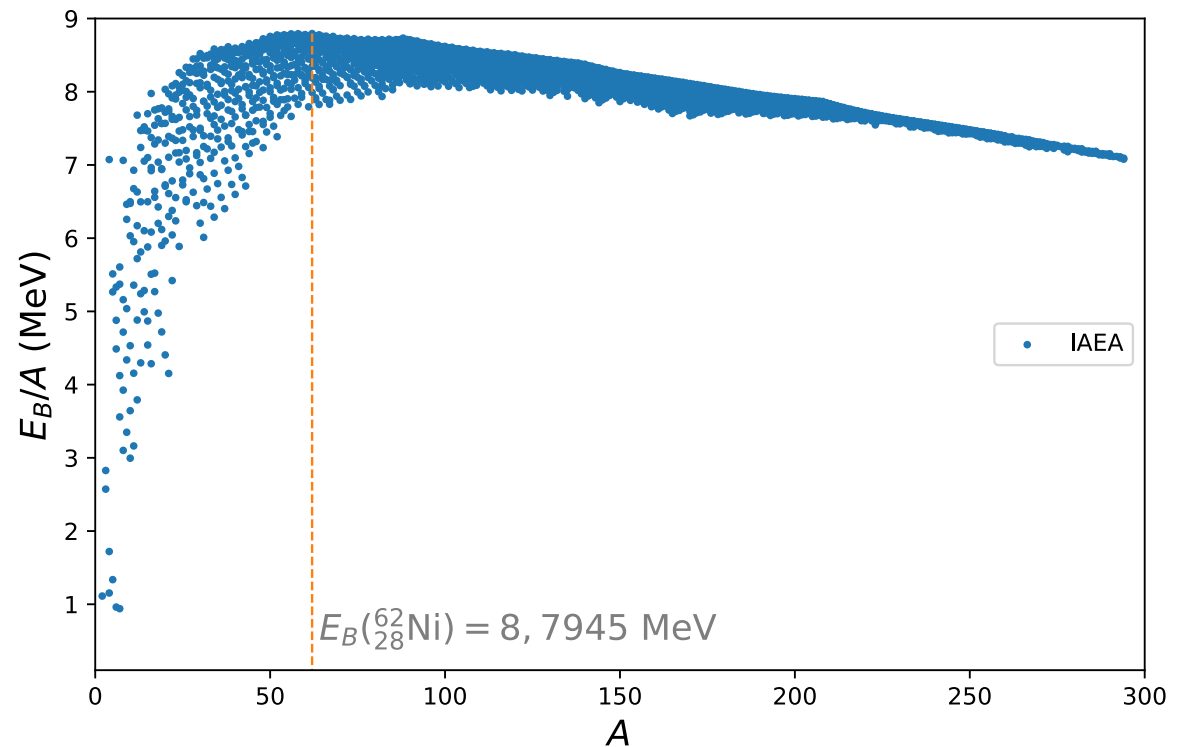
Energía de ligadura (o enlace) nuclear

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

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

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

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

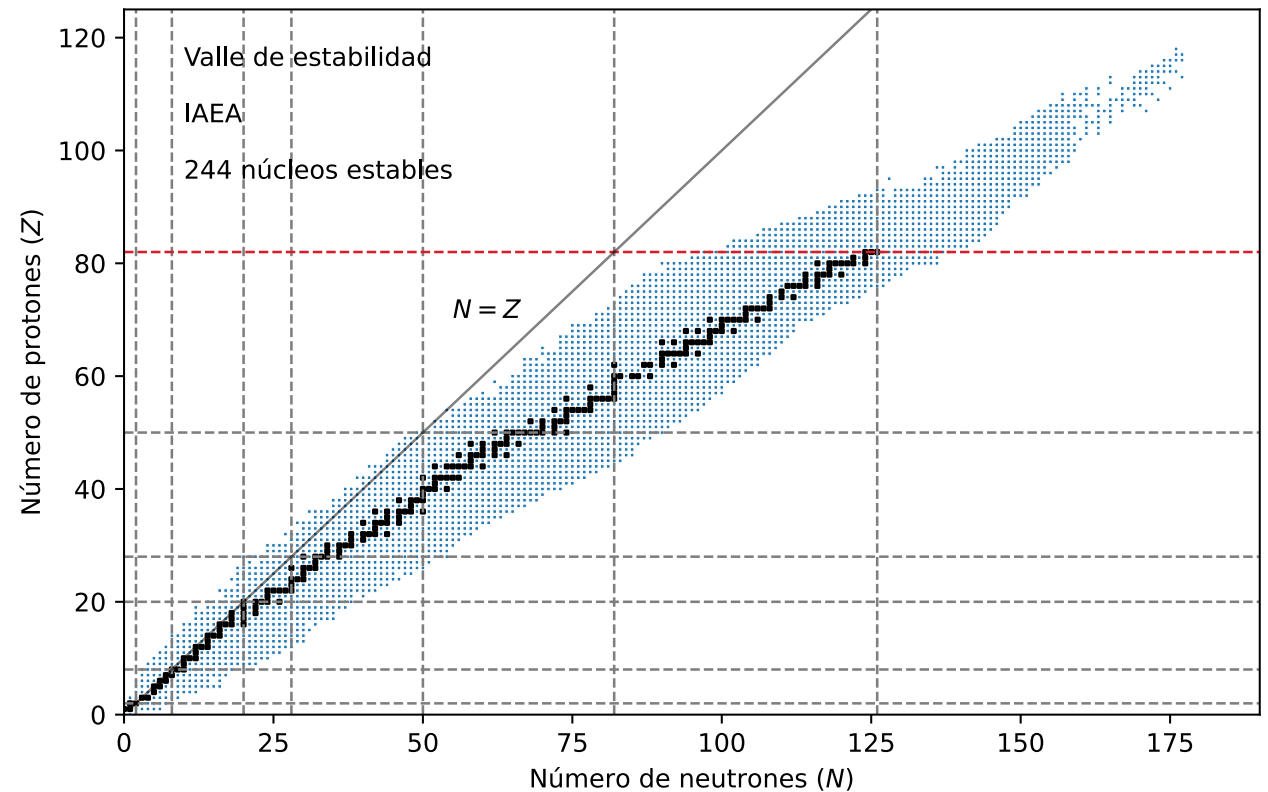


Energía de ligadura

- 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 α , Tema 5)



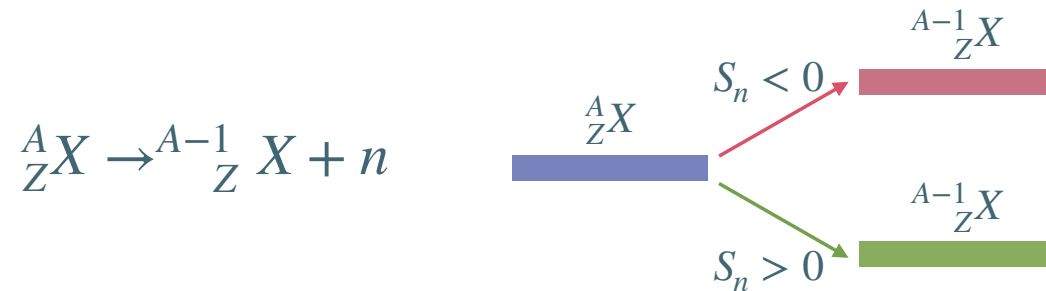
Valle de estabilidad

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

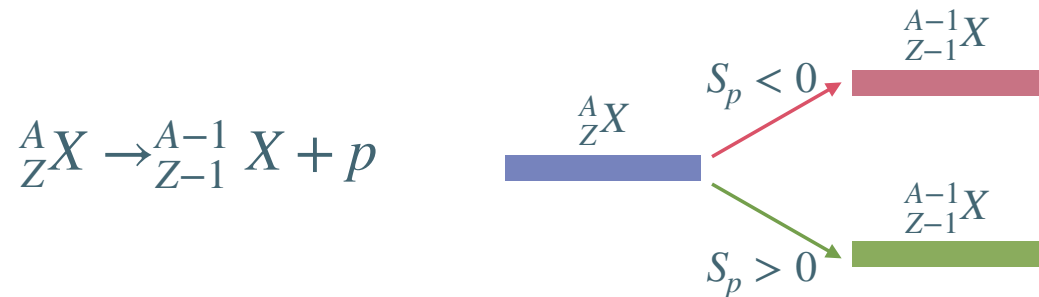
- Hay muchos más núcleos estables de tipo par-par
- Implica que debe haber fuerzas de apareamiento
- En particular, los núcleos con clusters de partículas α (^4He , ^8Be , ^{12}C , ^{16}O) tienen valores grandes de la energía de ligadura por nucleón
- Sólo 4 impar-impar son estables: ^2_1H , ^6_3Li , $^{10}_5\text{B}$, $^{14}_7\text{N}$

Energía de separación nucleónica

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

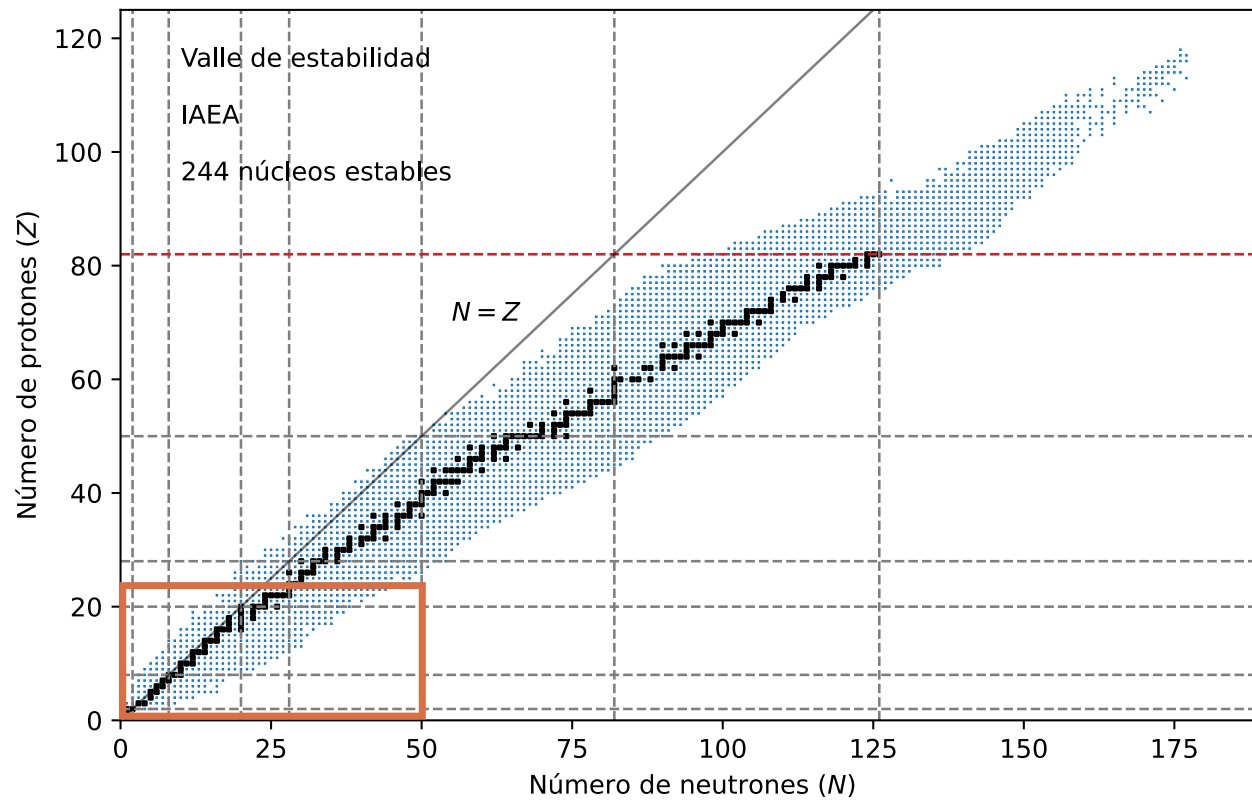


$$S_p(Z, N) = - [\mathcal{M}(Z, N) - \mathcal{M}(Z-1, N) - \mathcal{M}({}^1\text{H})] c^2 = E_B(Z, N) - E_B(Z-1, N)$$

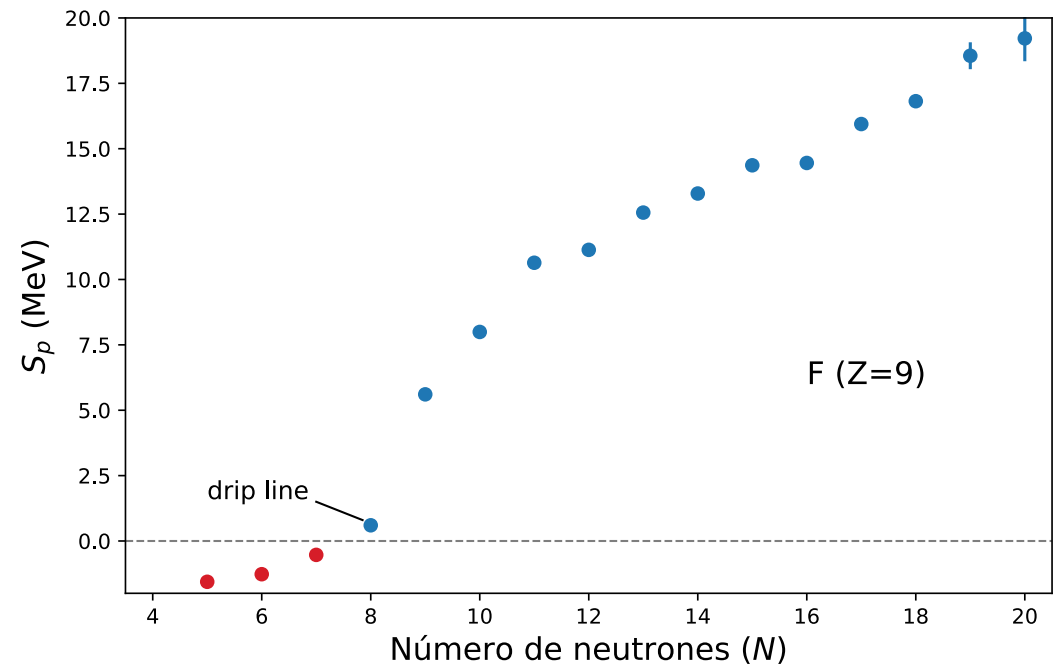
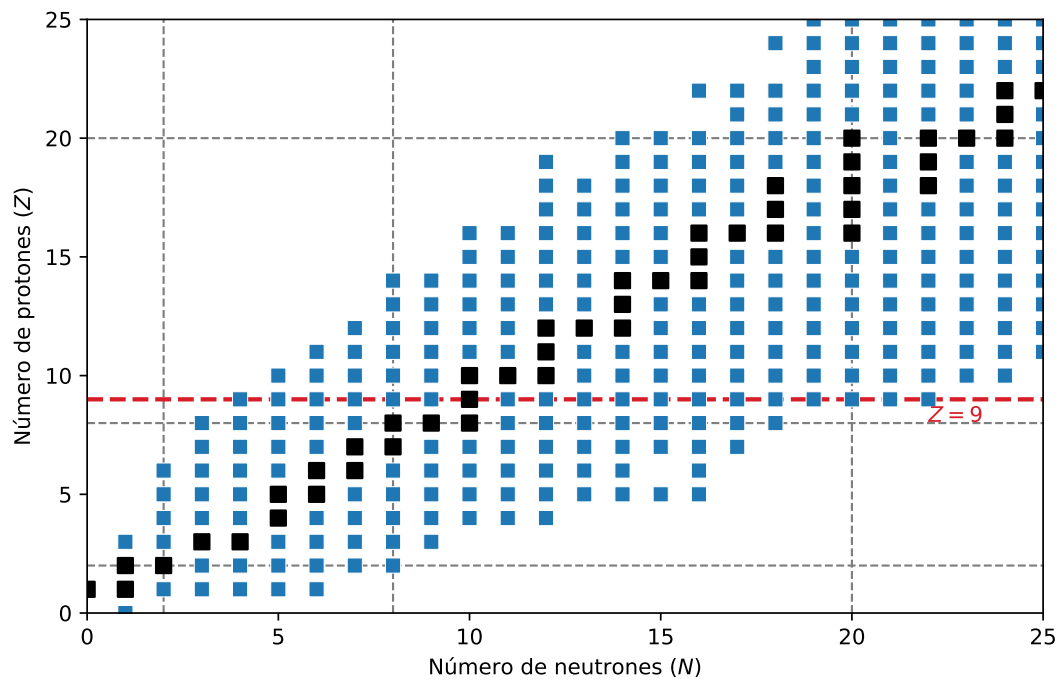


$$S_n(Z, N) = - [\mathcal{M}(Z, N) - \mathcal{M}(Z, N-1) - m_n] c^2 = E_B(Z, N) - E_B(Z, N-1)$$

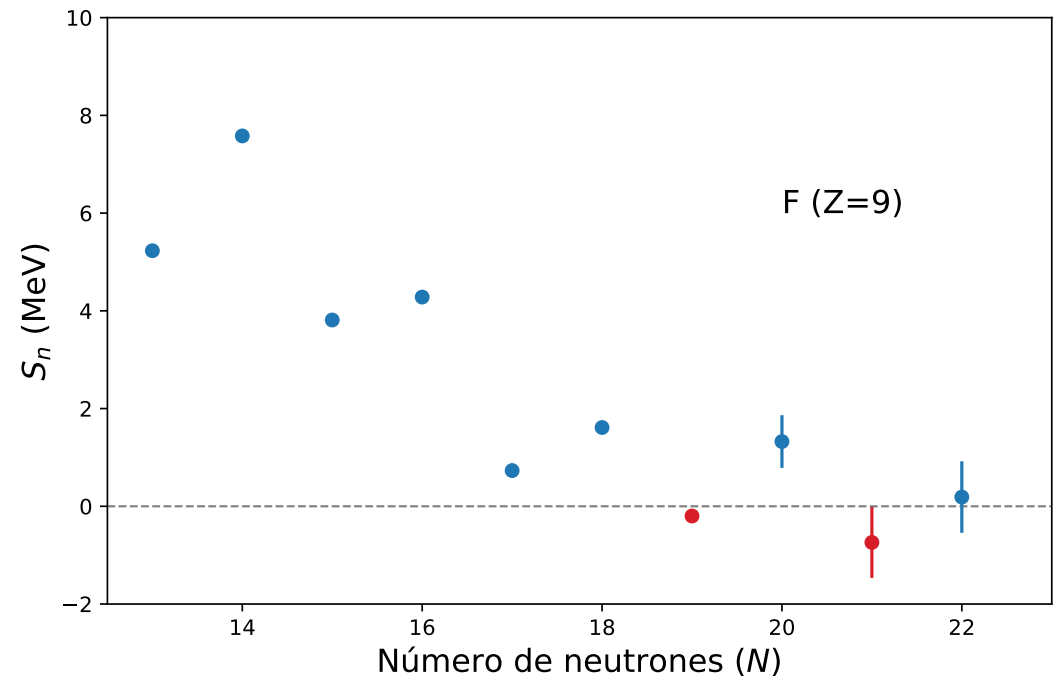
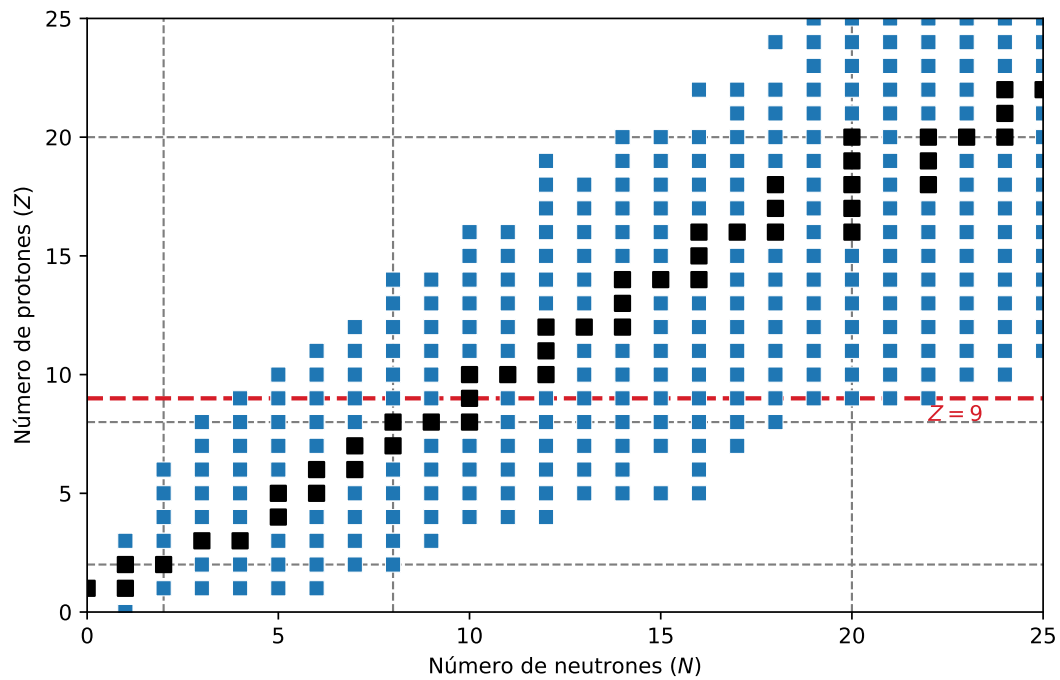
Energía de separación nucleónica



Energía de separación nucleónica: *drip line* del protón

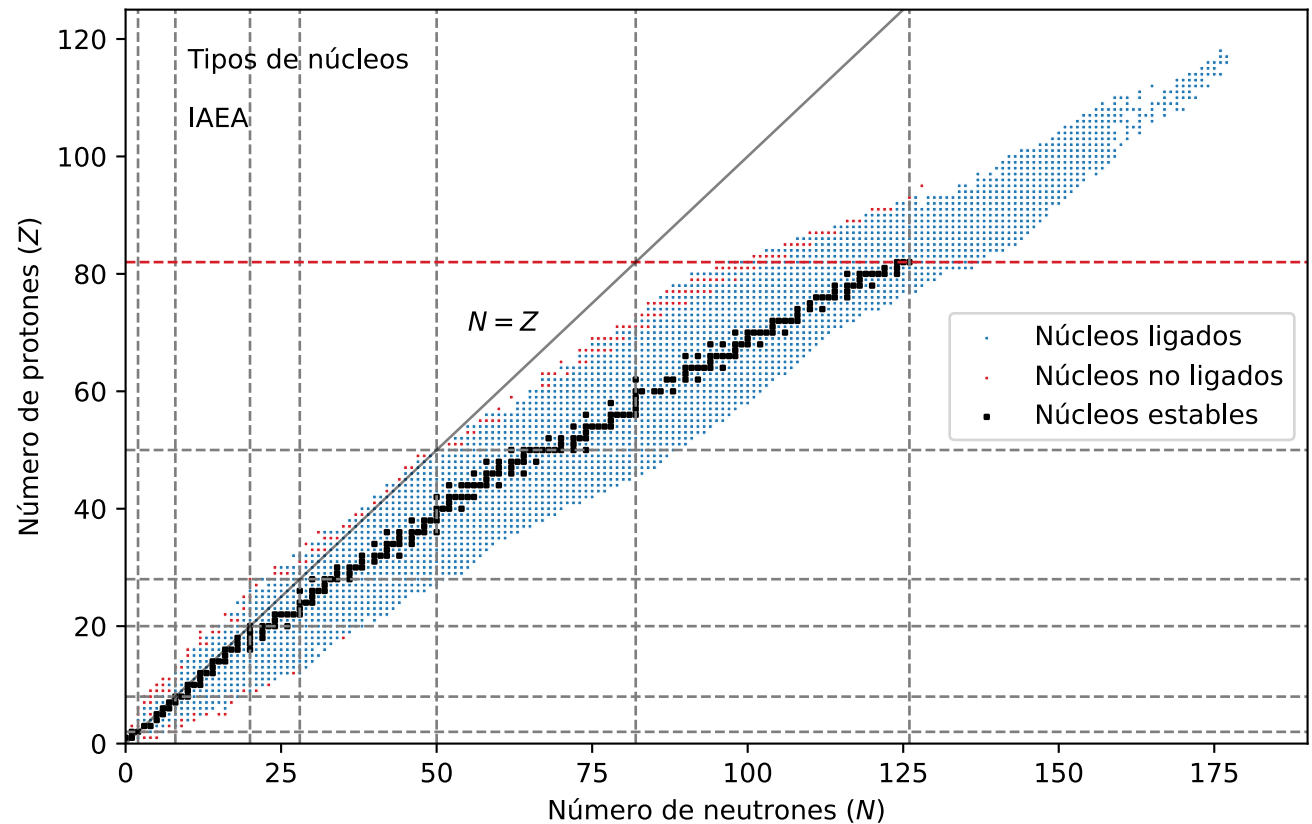


Energía de separación nucleónica: *drip line* del neutrón



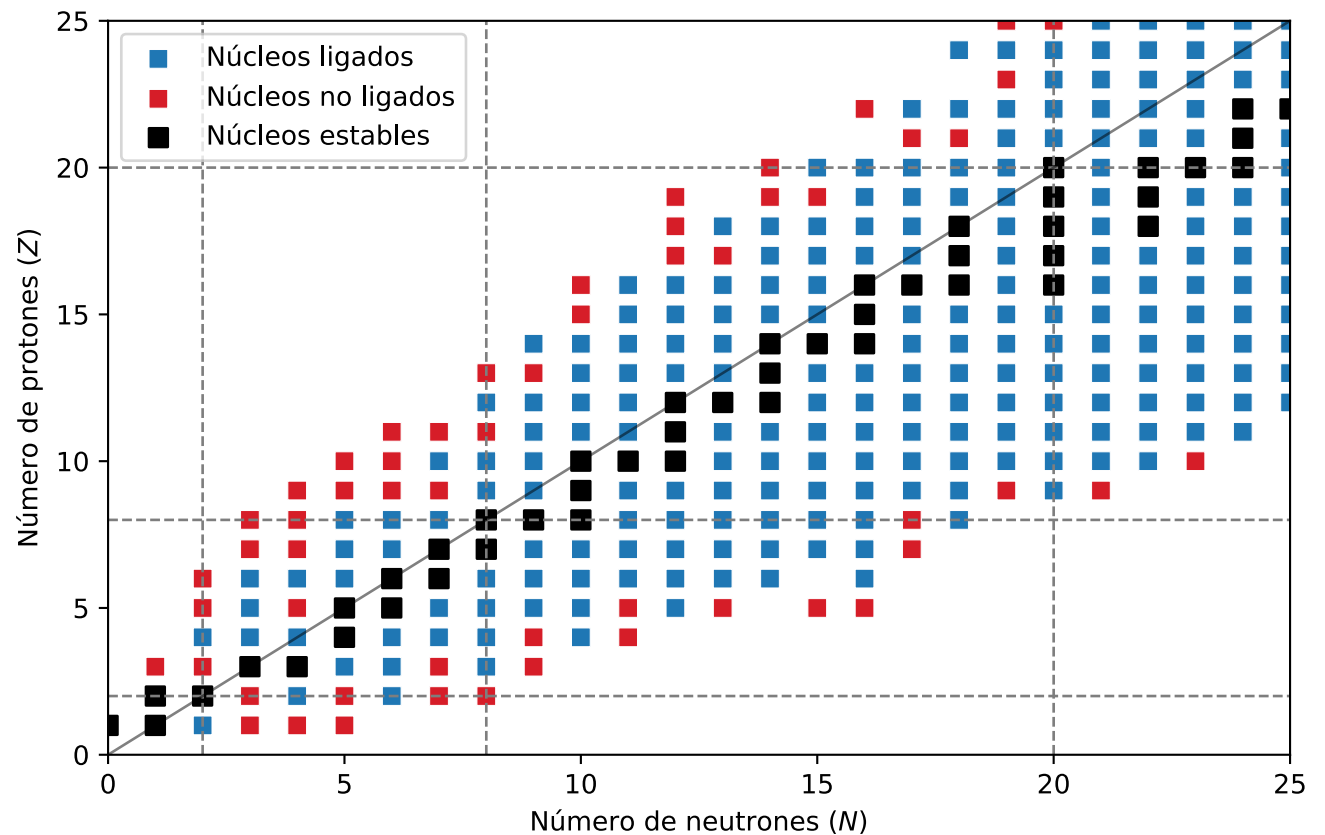
Tipos de núcleos

- 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



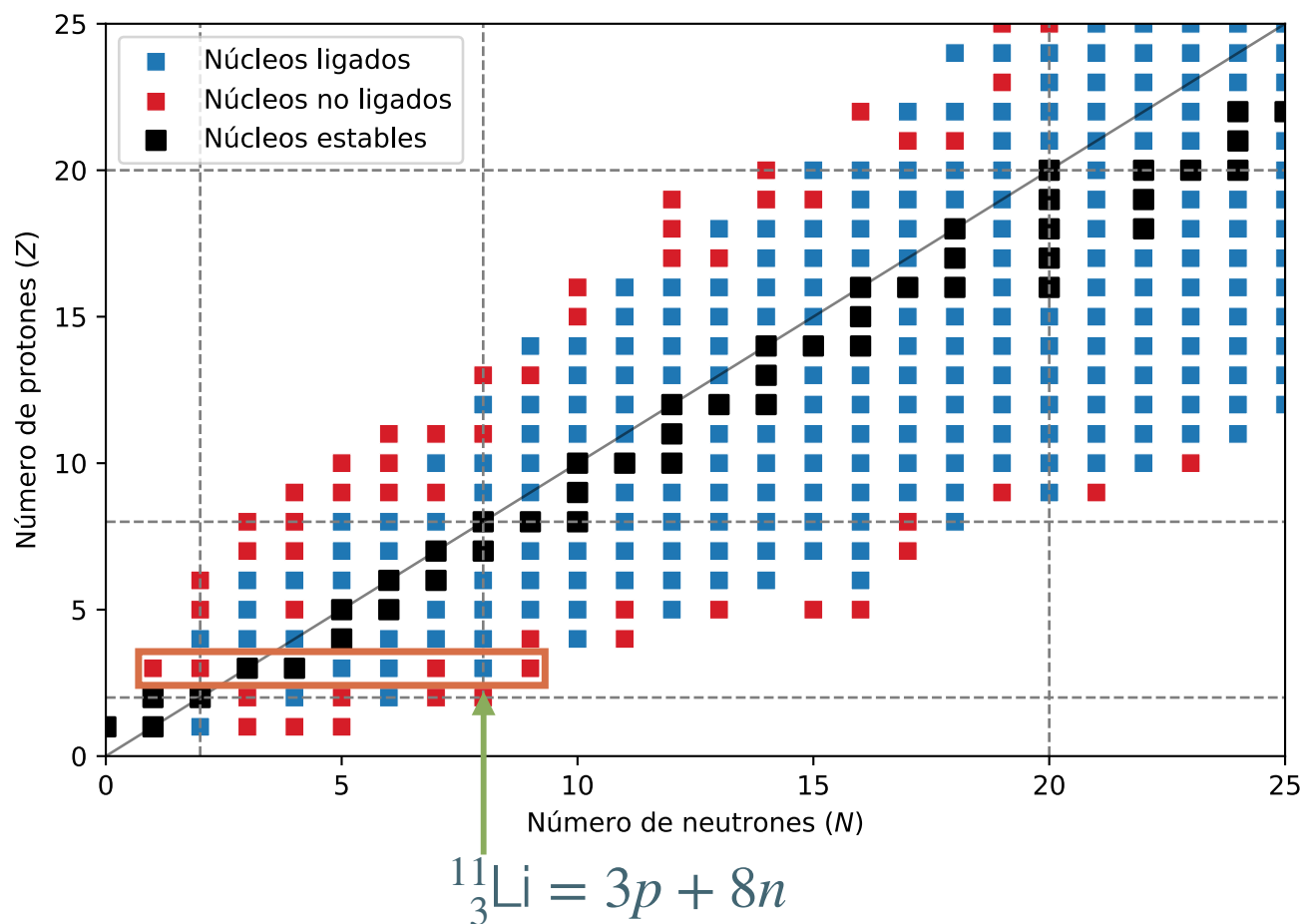
Tipos de núcleos

- 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



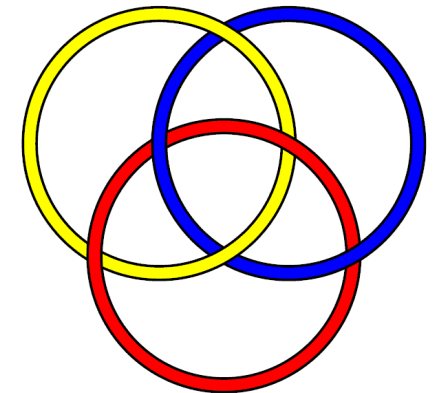
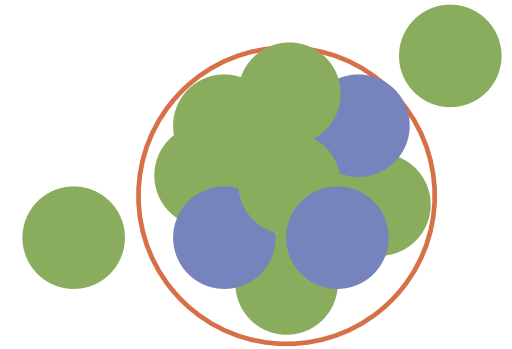
Tipos de núcleos

- 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 con halo (núcleos borromeos)

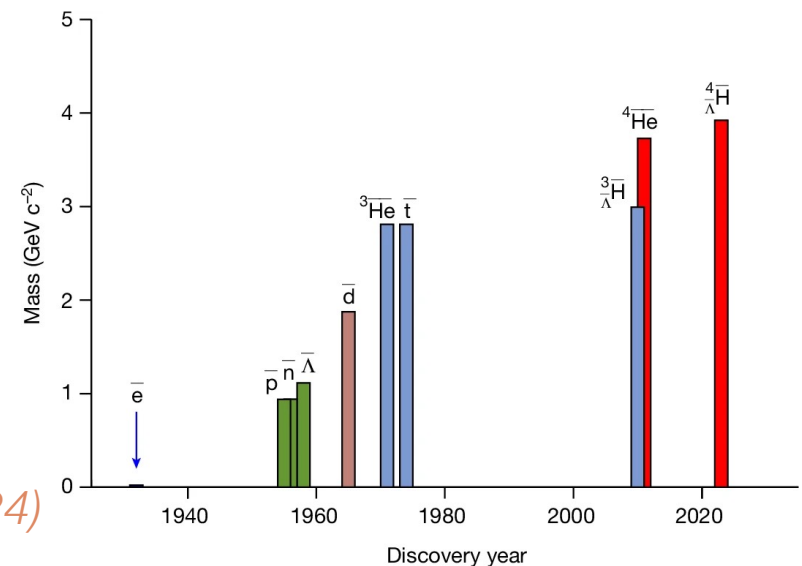
- Núcleos con un radio mayor de lo esperado (halo)
- Tienen una mayor sección eficaz de la esperada
 - Ejemplos: ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$, ${}^{14}\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, ${}^{17}\text{B}$, ${}^{19}\text{B}$, ${}^{15}\text{C}$, ${}^{19}\text{C}$, ${}^{22}\text{C}$,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



Antinúcleos, hipernúcleos y antihipernúcleos

- El protón y el neutrón son bariones (Tema 9. Quarks y hadrones).
- El protón y el neutrón tiene antipartículas: antiprotón y antineutrón
- Que pueden formar antinúcleos
- Existen bariones más pesados, v.g. Λ ($M_\Lambda=1115,183 \text{ MeV}/c^2$, $J^P=1/2^+$, $q=0$)
- En un núcleo dado podemos sustituir un neutrón por un Λ creando un «hipernúcleo»
- Ejemplos: ${}^3_\Lambda\text{H}$ (hipertritio), ${}^7_\Lambda\text{Li}$
- La Λ tiene su antipartícula $\bar{\Lambda}$
- ¡Y también existen antihipernúcleos!: ${}^3_{\bar{\Lambda}}\bar{\text{H}}$ y ${}^4_{\bar{\Lambda}}\bar{\text{H}}$

STAR coll, Nature 632, 1026–1031 (2024)

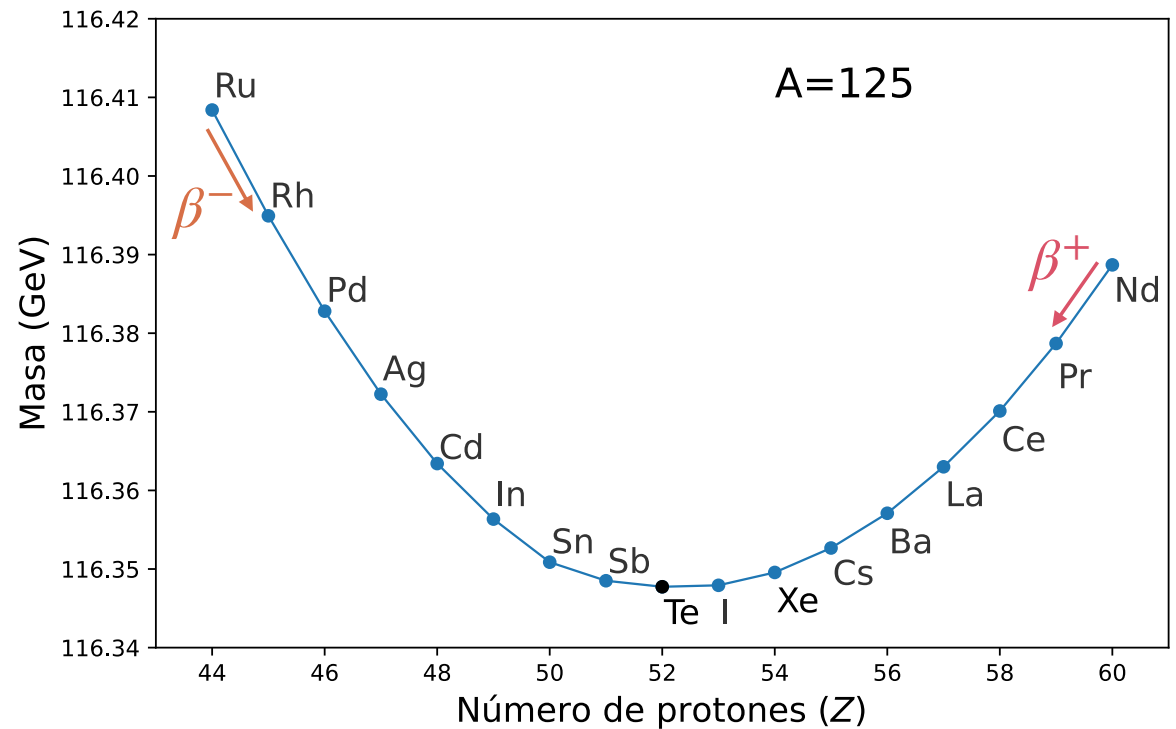


Estabilidad nuclear

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

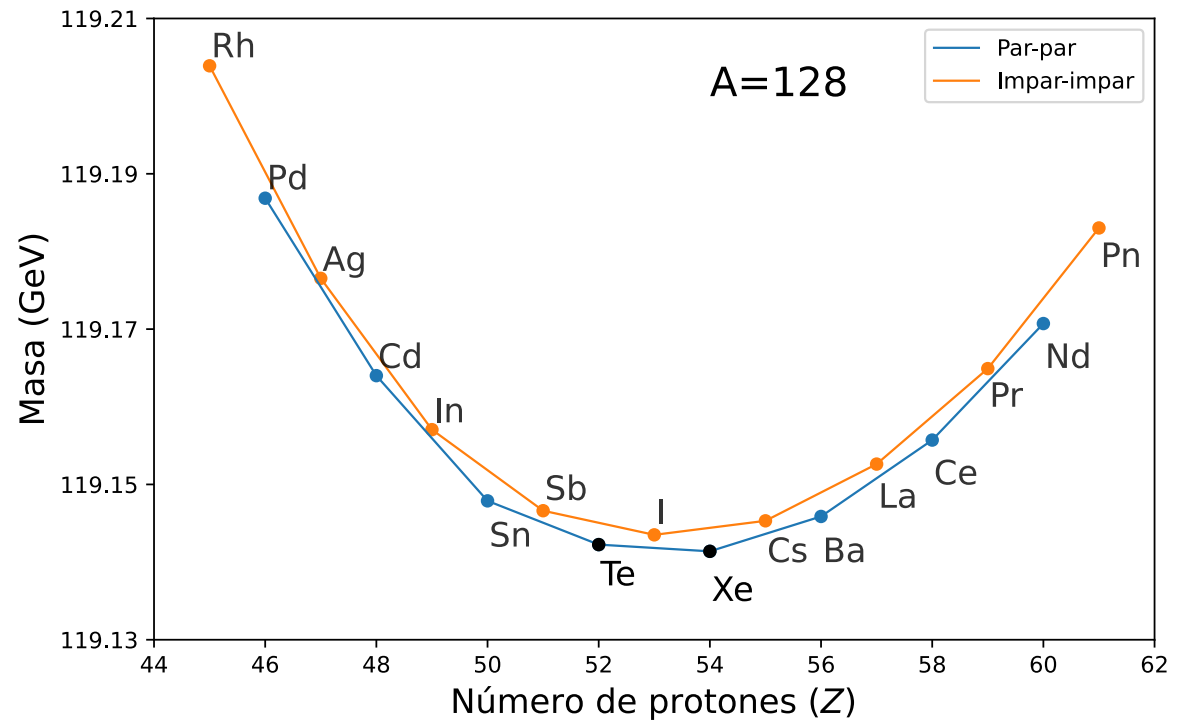
Parábola de masas (caso A impar)

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



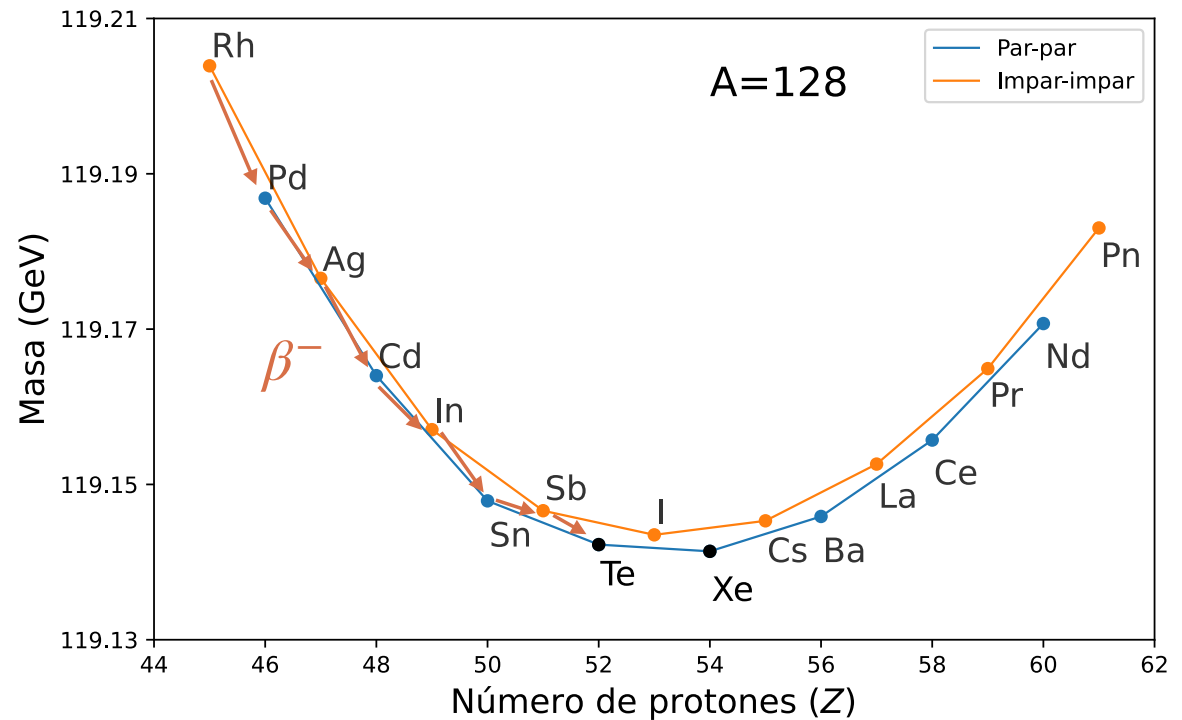
Parábola de masas (caso A par)

- 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 β^+ o β^-
- Doble β



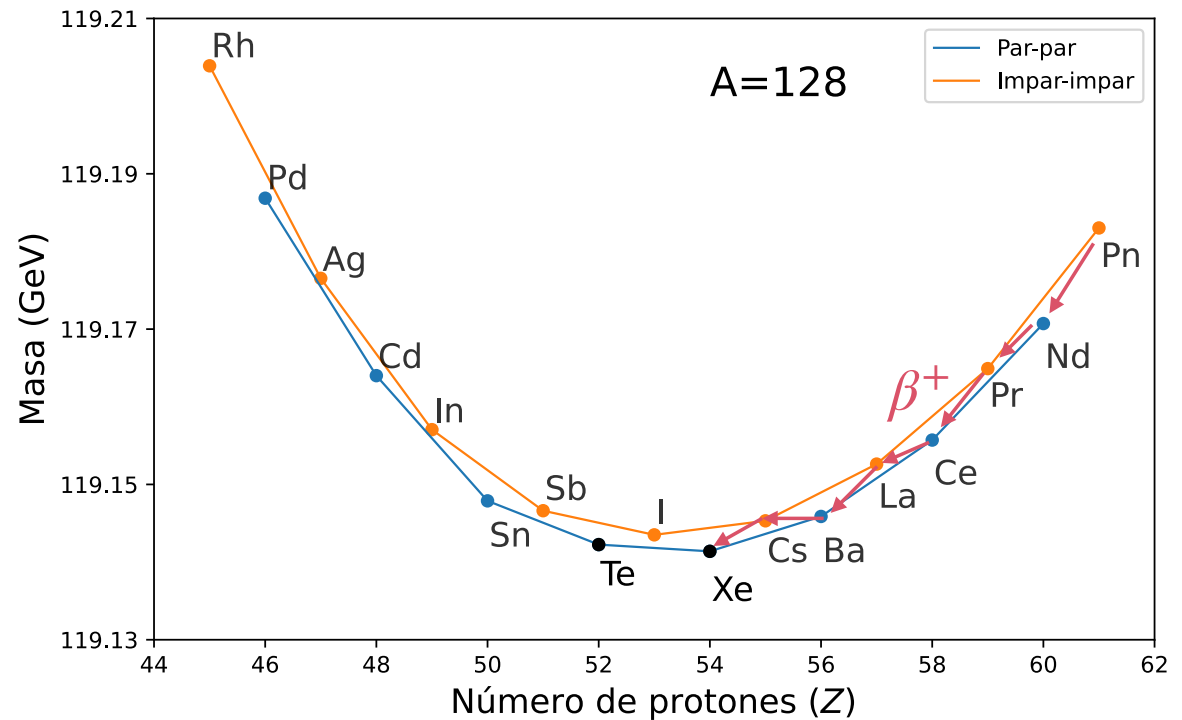
Parábola de masas (caso A par)

- 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 β^+ o β^-
- Doble β



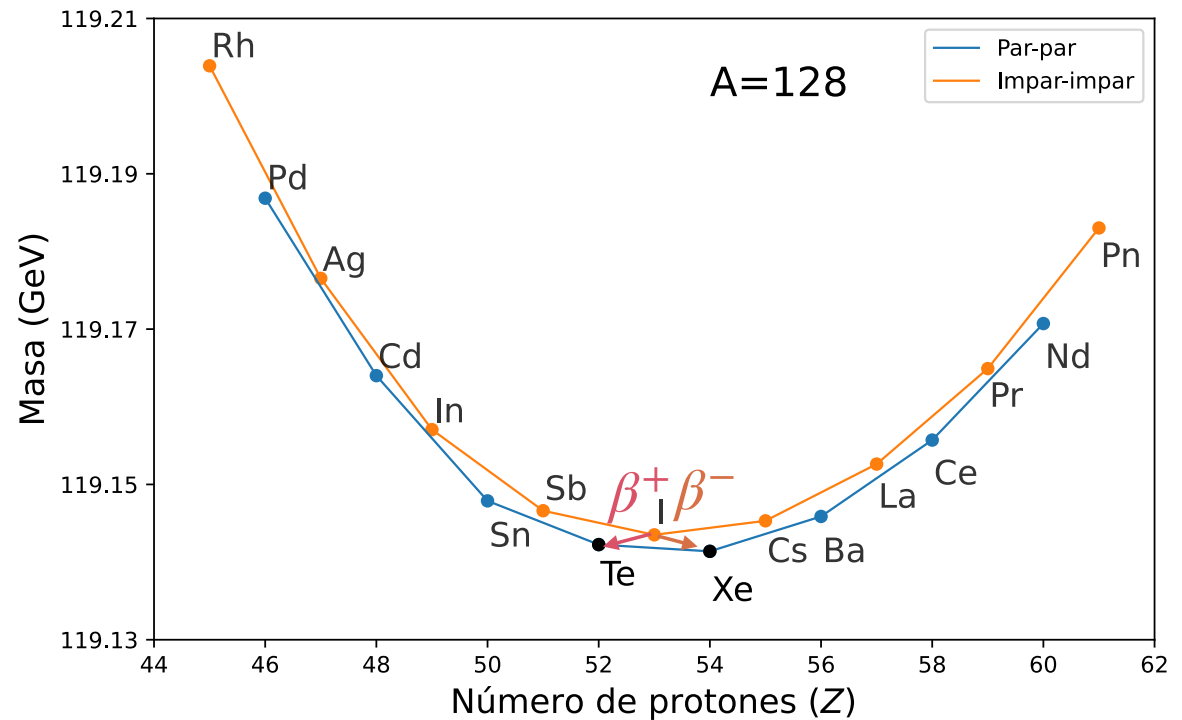
Parábola de masas (caso A par)

- 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 β^+ o β^-
- Doble β



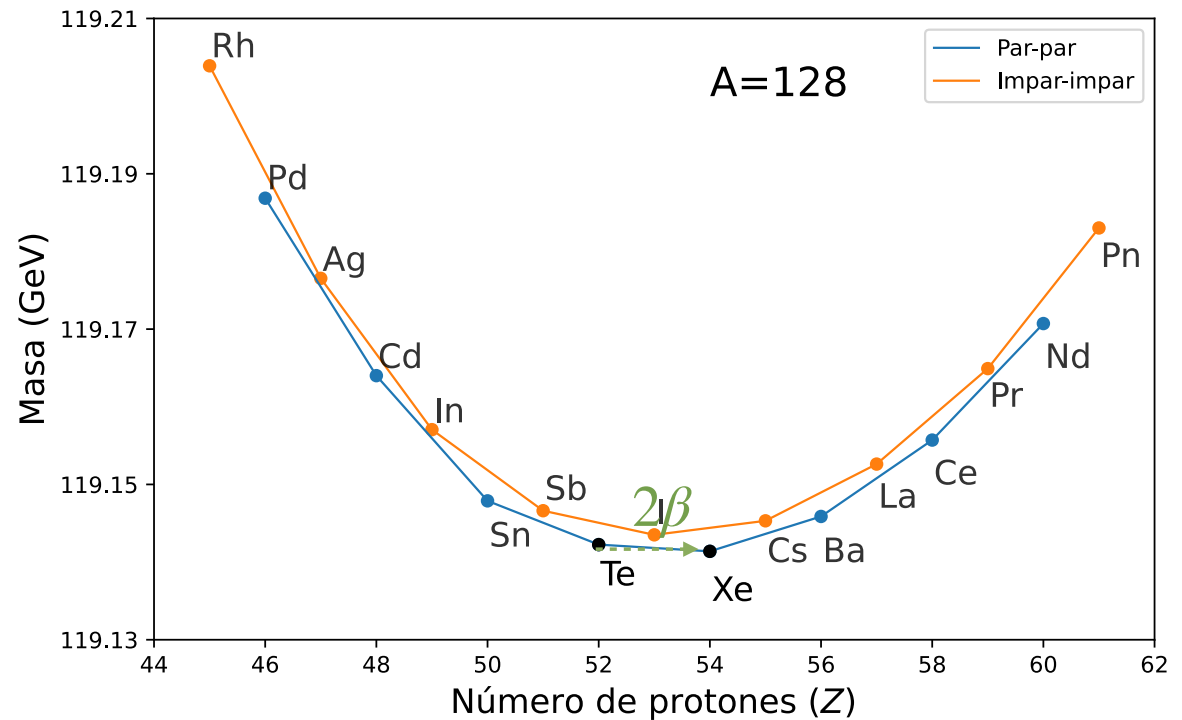
Parábola de masas (caso A par)

- 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 β^+ o β^-
- Doble β



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 β^+ o β^-
- Doble β



Momentos nucleares, isospín y paridad

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 $J \geq m_J \geq -J$

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:

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

donde

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

- Si $\lambda = \text{impar} \Rightarrow Q_{\lambda\mu} = 0$
- Q_{00} es la carga eléctrica en unidades de e
- El primer término de interés es el momento cuadrupolar Q_{20}
 - Si $J=0$ o $J=1/2$ el momento cuadrupolar es cero
 - Se mide en barns, $1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2$

Momento cuadrupolar eléctrico. Deformación nuclear

- Se define

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

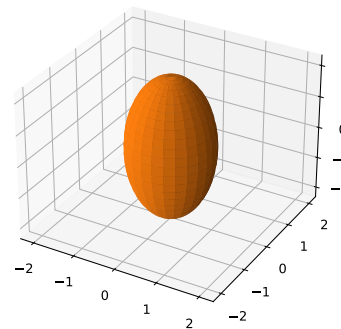
- Si

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

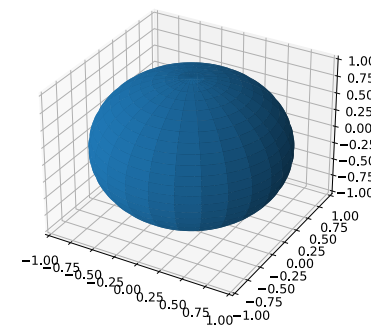
$$3\langle z^2 \rangle > \langle r^2 \rangle \Rightarrow Q_{20} > 0$$

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

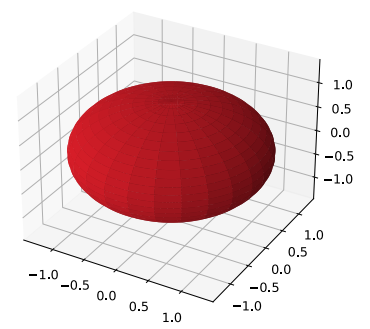
prolato, $Q_{20} > 0$



esférico, $Q_{20} = 0$

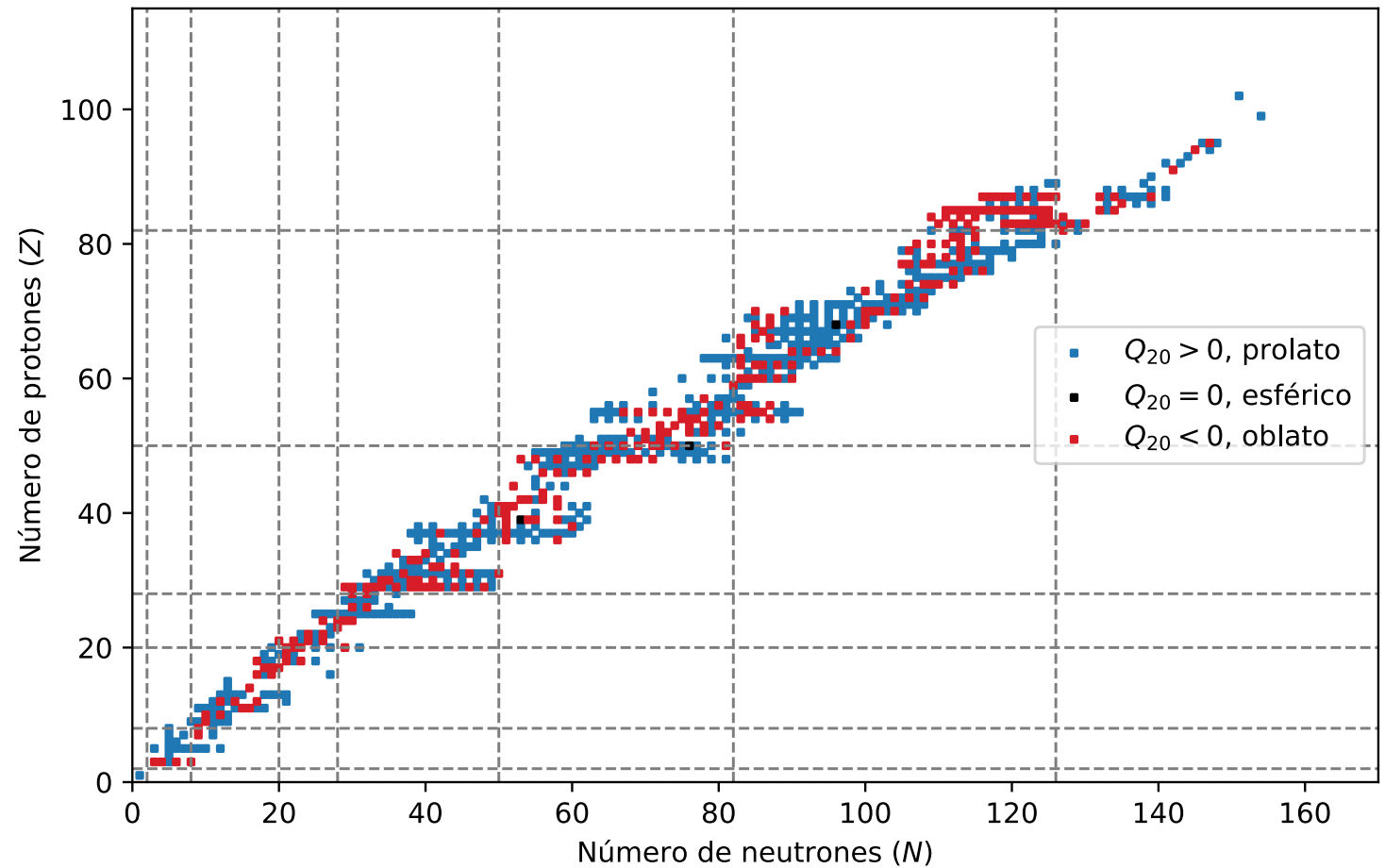


oblato, $Q_{20} < 0$



Deformación nuclear

- 421 núcleos prolato
- 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

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

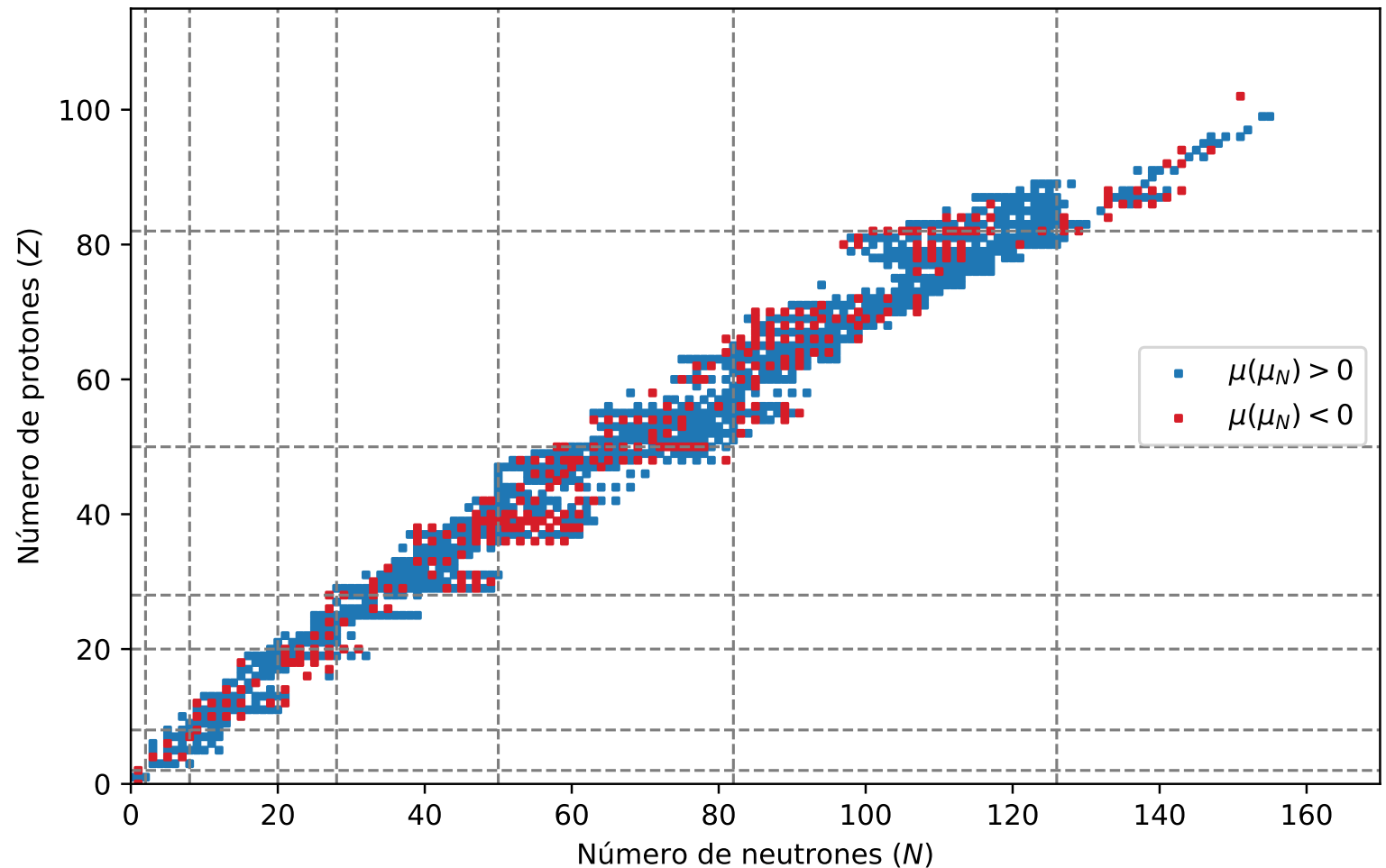
- En general no se puede obtener μ a partir de sus constituyentes, por lo que se define

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

- 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 μ . 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