

Propiedades del núcleo

ENR - 2024

Profesora: Laura Damonte

JTP: Javier Martínez

El núcleo

Dos problemas principales:

- Las fuerzas que mantienen unido al núcleo.
- La descripción de un sistema de muchas partículas.



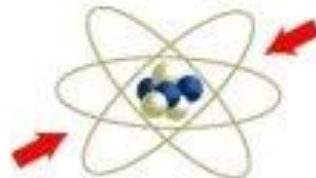
1. MODELOS

Las fuerzas fundamentales

FUERZA NUCLEAR FUERTE
Partícula de intercambio: gluón
Acción: mantiene unido el núcleo atómico



FUERZA ELECTROMAGNÉTICA
Partícula de intercambio: fotón
Acción: mantiene el átomo unido



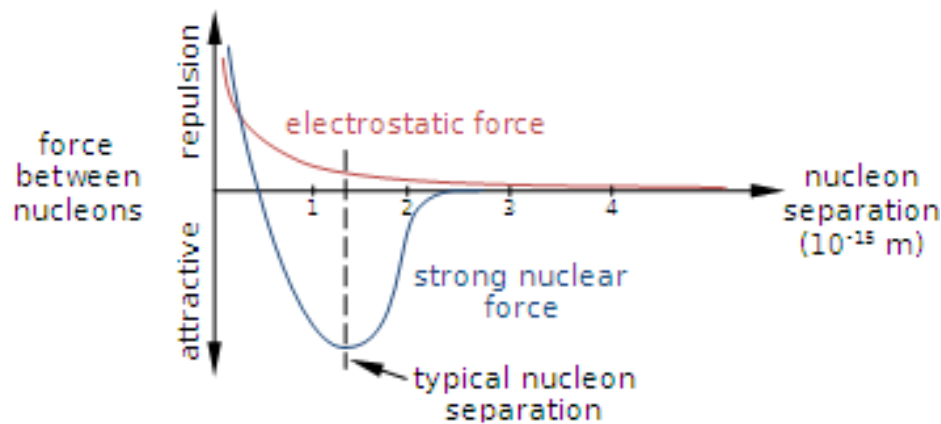
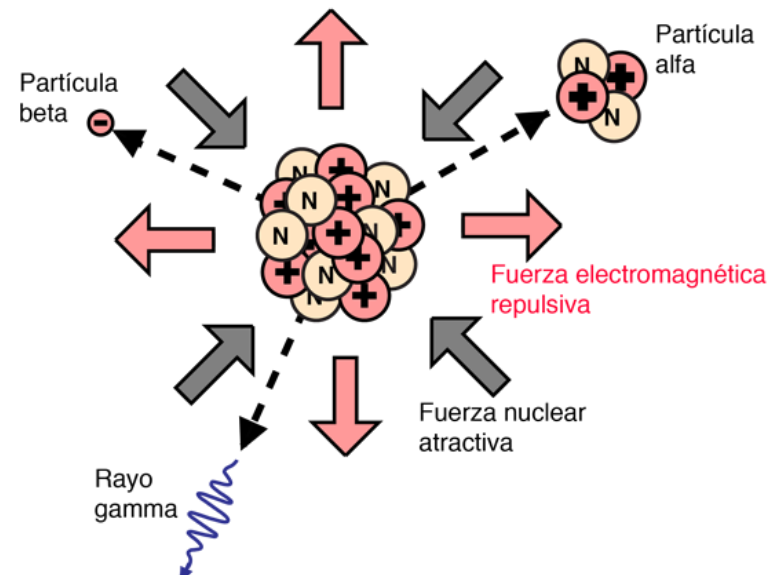
FUERZA GRAVITATORIA
Partícula de intercambio: gravitón
Acción: rige el movimiento de los planetas

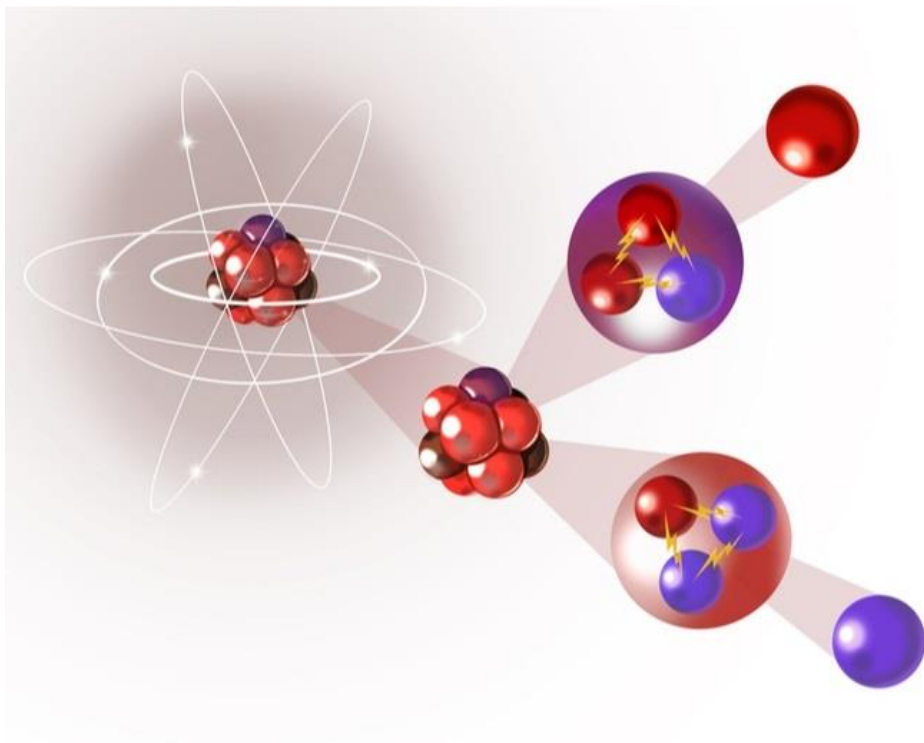
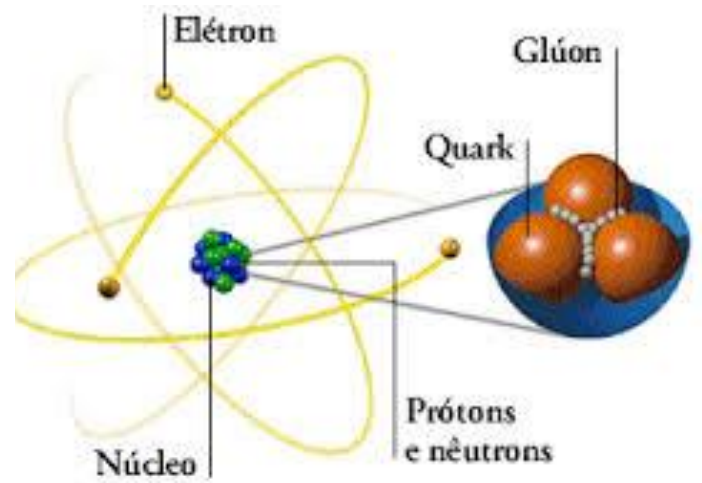
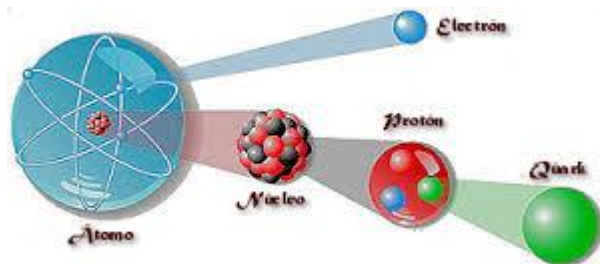


FUERZA NUCLEAR DÉBIL
Partícula de intercambio: partículas W^+ y Z^0
Acción: provoca desintegraciones radiactivas



Fuente: CERN, Ginebra





➤ Propiedades estáticas:

- masa
- tamaño (radio nuclear)
- carga
- momento angular intrínseco (spin nuclear)
- momento dipolar magnético
- momento cuadrupolar eléctrico
- abundancia
- paridad
- estadística

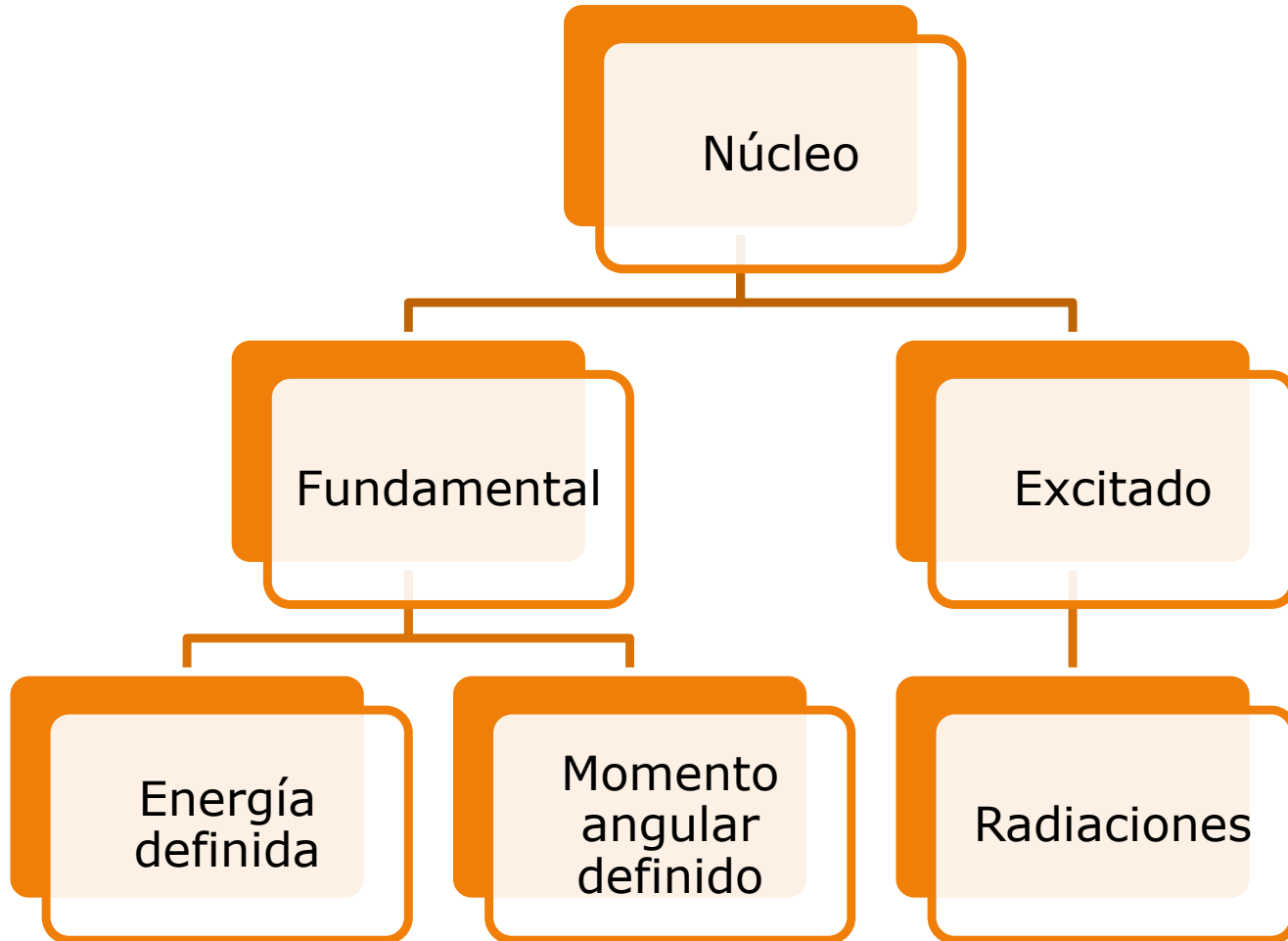
➤ Propiedades dinámicas:

- decaimiento alpha, beta y reacciones nucleares.

Propiedades estáticas

El núcleo

Es un estado ligado de protones y neutrones. Una gota esférica de líquido de densidad uniforme? Sistema mecánico cuántico:



Masa nuclear y energía de ligadura

Al ser un estado ligado de nucleones, es necesaria una energía $B(Z,N)$ para separar completamente los Z protones y N neutrones. La energía de ligadura $B(Z,N)$ está relacionada con la masa nuclear $M(Z,N)$

$$M \approx ZM_{\text{H}} + NM_{\text{n}} \quad \longrightarrow \quad B_{\text{tot}}(A,Z) = [ZM_{\text{H}} + NM_{\text{n}} - M(A,Z)]c^2$$

↓
Energía necesaria para disociar el núcleo en nucleones independientes

$$B_{\text{ave}}(A,Z) = \frac{B_{\text{tot}}(A,Z)}{A} \quad \text{Energía promedio por nucleón}$$

$B(Z,N) > 0$ para que se pueda formar un núcleo,
~1% de la energía en reposo Mc^2

Experimentalmente se miden masas de iones no de núcleos, luego la masa atómica:

$$M(Z,N) = Z(m_{\text{p}} + m_{\text{e}}) + Nm_{\text{n}} - B_{\text{e}}(Z)/c^2 - B(Z,N)/c^2]$$

$B_{\text{e}}(Z)/c^2$ es despreciable

Espectrómetros de masa

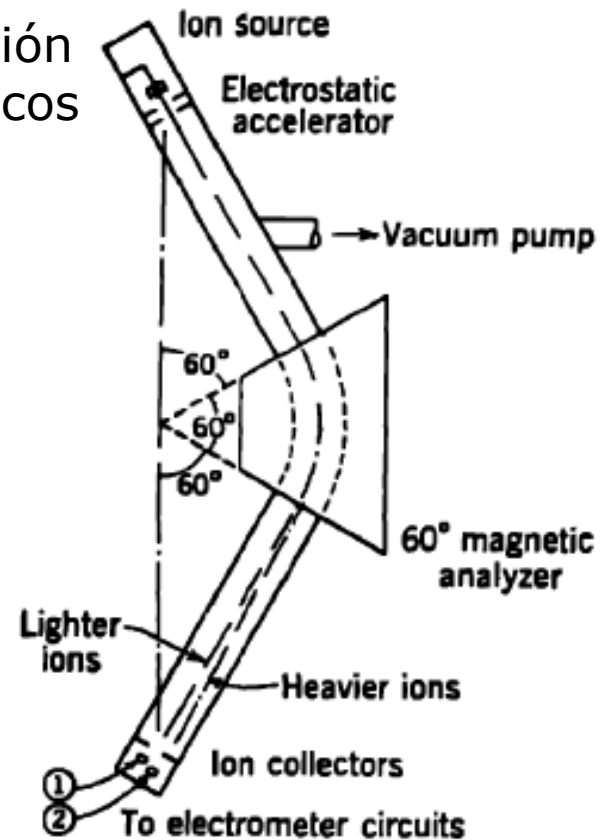
La medida de masas atómicas utiliza la deflexión de partículas cargadas debida a campos eléctricos y magnéticos. La precisión es de $1/10^7$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}$$

$$T = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - (V/c)^2}} - 1 \right]$$

$$= m c^2 - m_0 c^2 = (m - m_0) c^2 = \Delta m c^2$$

$$(m - m_0) = \frac{T}{c^2} \quad \frac{T}{c^2} = \Delta m_0$$



La unidad es la *uma*: $1/12$ la masa del átomo neutro ^{12}C .

$$1 \text{ Mev} = 10^6 \text{ volts} \left[\frac{1 \text{ statvolt}}{(c/10^8) \text{ volts}} \right] e \text{ esu}$$

$$= \frac{c}{c} 10^{14} \text{ ergs}$$

$$1 \text{ Mev} = (1.602 \, 07 \pm 0.000 \, 07) \times 10^{-6} \text{ erg}$$

$$1 \text{ amu} = 931.162 \pm 0.024 \text{ Mev}$$

Masa nuclear y energía de ligadura

Peso atómico del C es 12.00; F, 19.00; Na, 23.00, (nos. enteros) otros elementos Ne es 20.2, Cl es 35.46, y Mg 24.32. Nos. fraccionales incompatibles con las hipótesis de Dalton y Prout hasta el descubrimiento de los isótopos y del neutrón.

Si es M la masa atómica, la masa de un átomo neutro, la masa nuclear M' está dada por:

$$M' = M - [Zm_0 - B_e(Z)/c^2]$$

donde m_0 es la masa en reposo del electrón y $B_e(Z)$ es la energía de ligadura de todos los electrones en el átomo.

Modelo de Thomas-Fermi:

$$B_e(Z) = 15.73 Z^{7/3} \text{ ev}$$

1 Mev para núcleos livianos mientras que la energía de ligadura nuclear es de 8 Mev por nucleon.

Table 4.2. *Energies of some light nuclei*

Nucleus	Binding energy (MeV)	Binding energy of last nucleon (MeV)	Binding energy per nucleon (MeV)	Spin and parity
${}^2_1\text{H}$	2.22	2.2	1.1	1^+
${}^3_2\text{H}$	8.48	6.3	2.8	$\frac{1}{2}^+$
${}^4_2\text{He}$	28.30	19.8	7.1	0^+
${}^5_2\text{He}$	27.34	-1.0	5.5	$\frac{3}{2}^+$
${}^6_3\text{Li}$	31.99	4.7	5.3	1^+
${}^7_3\text{Li}$	39.25	7.3	5.6	$\frac{3}{2}^-$
${}^8_4\text{Be}$	56.50	17.3	7.1	0^+
${}^9_4\text{Be}$	58.16	1.7	6.5	$\frac{3}{2}^-$
${}^{10}_5\text{B}$	64.75	6.6	6.5	3^+
${}^{11}_5\text{B}$	76.21	11.5	6.9	$\frac{3}{2}^-$
${}^{12}_6\text{C}$	92.16	16.0	7.7	0^+
${}^{13}_6\text{C}$	97.11	5.0	7.5	$\frac{1}{2}^-$
${}^{14}_7\text{N}$	104.66	7.6	7.5	1^+
${}^{15}_7\text{N}$	115.49	10.8	7.7	$\frac{1}{2}^-$
${}^{16}_8\text{O}$	127.62	12.1	8.0	0^+
${}^{17}_8\text{O}$	131.76	4.1	7.8	$\frac{5}{2}^+$

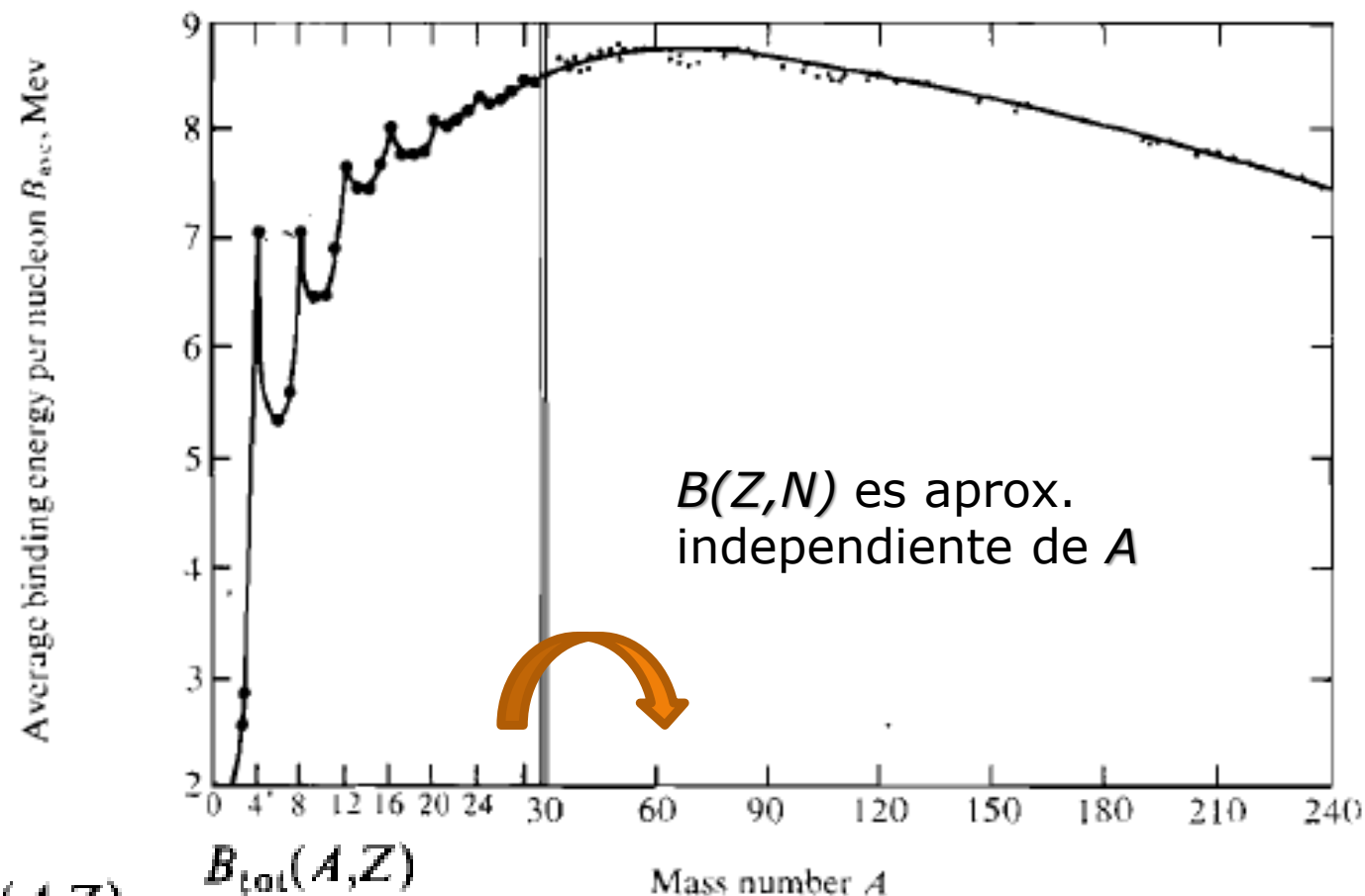


inestables



Energía de ligadura promedio por nucleón

FIGURE 2-8 Average binding energy per nucleon versus mass number for the naturally occurring nuclides (and Be^8). Note the scale change on the abscissa at $A = 30$. (By permission from Evans, 1955.)



$$B_{\text{ave}}(A, Z) = \frac{B_{\text{tot}}(A, Z)}{A}$$

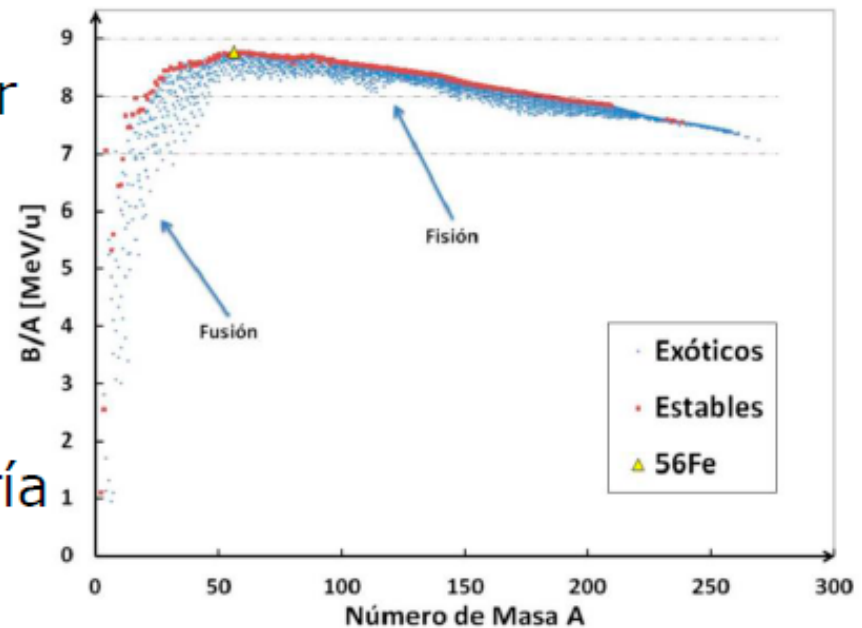


✓ La constancia de $B(Z,N)$ indica que cada nucleón no está igualmente ligado a otro nucleón, es decir, las fuerzas nucleares entre nucleones no se extienden más allá de unos pocos nucleones.

✓ Las fuerzas deben tener un muy corto alcance del orden del diámetro de un nucleón:
un tipo de *saturación*.

✓ Esta saturación parecería ser de 4 nucleones

✓ El ${}^4\text{He}$ parece jugar un rol importante en física nuclear, la *partícula α* .



Energía de separación

El trabajo necesario para separar un protón, un neutrón, un deuteron o una partícula alfa, se denomina energía de separación. Inversamente, esta energía es liberada cuando alguna de estas partículas es capturada por el núcleo.

Para un neutrón:

$$S_n = [M(A - 1, Z) + M_n - M(A, Z)]c^2$$

O en términos de la energía de ligadura total:

$$S_n = B_{\text{tot}}(A, Z) - B_{\text{tot}}(A - 1, Z)$$

$$S_\alpha = B_{\text{tot}}(A, Z) - B_{\text{tot}}(A - 4, Z - 2) - B_{\text{tot}}(4, 2)$$

$$Q = \text{energía de desintegración}; Q = (M_x + M_y - M_\alpha) c^2$$

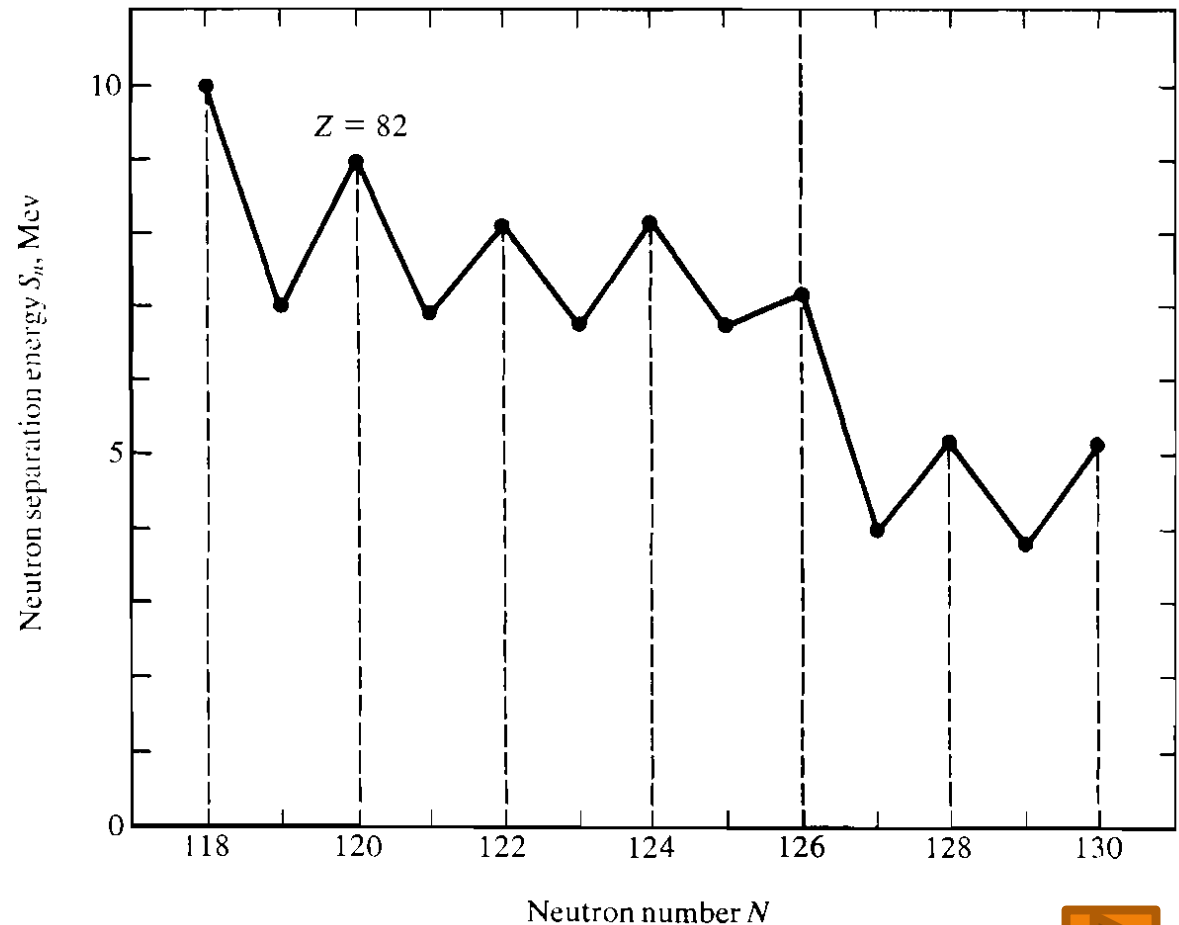
$$E_c^\alpha = Q(A-4)/A \rightarrow 5 \text{ a } 10 \text{ MeV},$$

$$v \sim 10^4 \text{ km/s}$$

Energía de separación

$$S_n = B_{\text{tot}}(A, Z) - B_{\text{tot}}(A - 1, Z)$$

Para un dado Z ,
 S_n es mayor para
 N par que para N
impar



Radio del núcleo

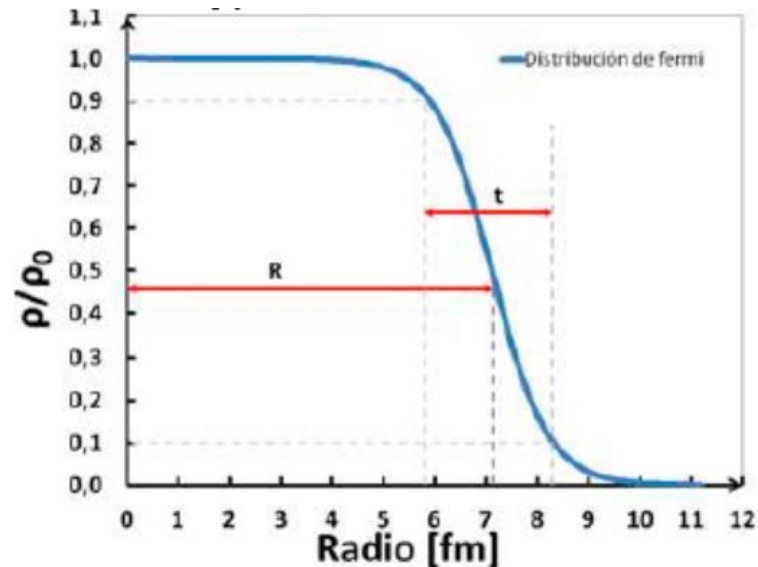
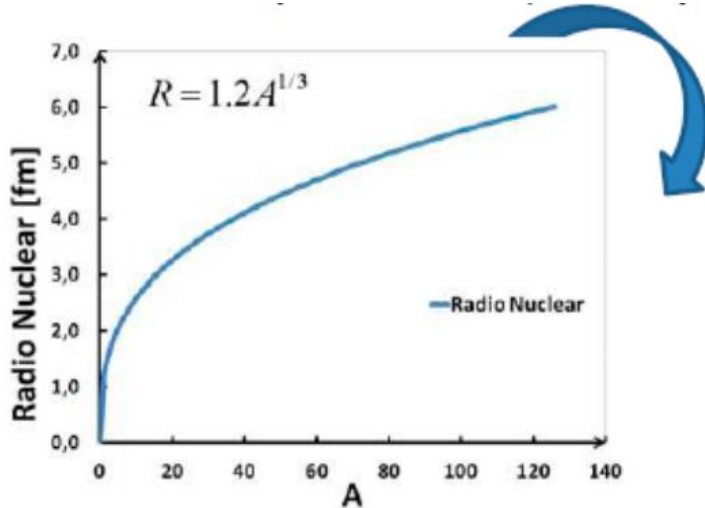
Experimentos de scattering (Rutherford):

$$R \approx R_0 A^{1/3} \quad R_0 \approx \begin{cases} 1.4 \text{ F} \\ 1.2 \text{ F} \end{cases}$$

for nuclear particle scattering on nuclei
for electron scattering on nuclei

Experimentos de dispersión de electrones (Hofstadter, 1953):

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



La saturación se debe a dos efectos:

- ✓ Fuerza entre nucleones fuertemente repulsiva (hard core) para $R < 0.5\text{F}$
- ✓ Principio de exclusión de Pauli.
- ✓ Ambos, la energía de ligadura nuclear y el volumen nuclear proveen importantes datos sobre la fuerza nuclear.

Densidad nuclear

Si consideramos al núcleo como una esfera de volumen V:

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 A$$

La densidad nuclear, resulta:

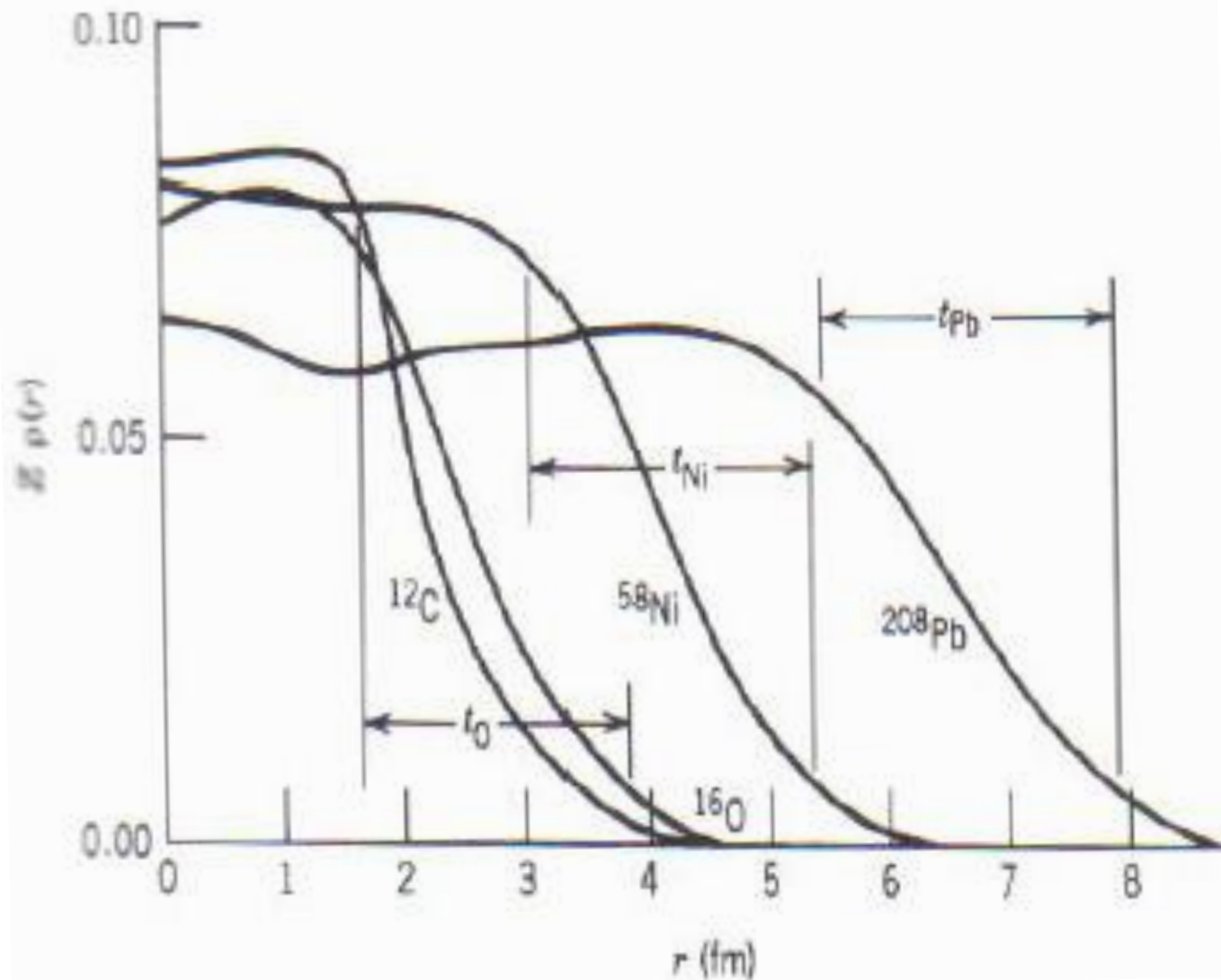
$$\rho = \frac{M}{V} \cong A / \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) = A / \left(\frac{4}{3} \pi R_0^3 A \right) = \frac{4}{3} \pi R_0^3$$

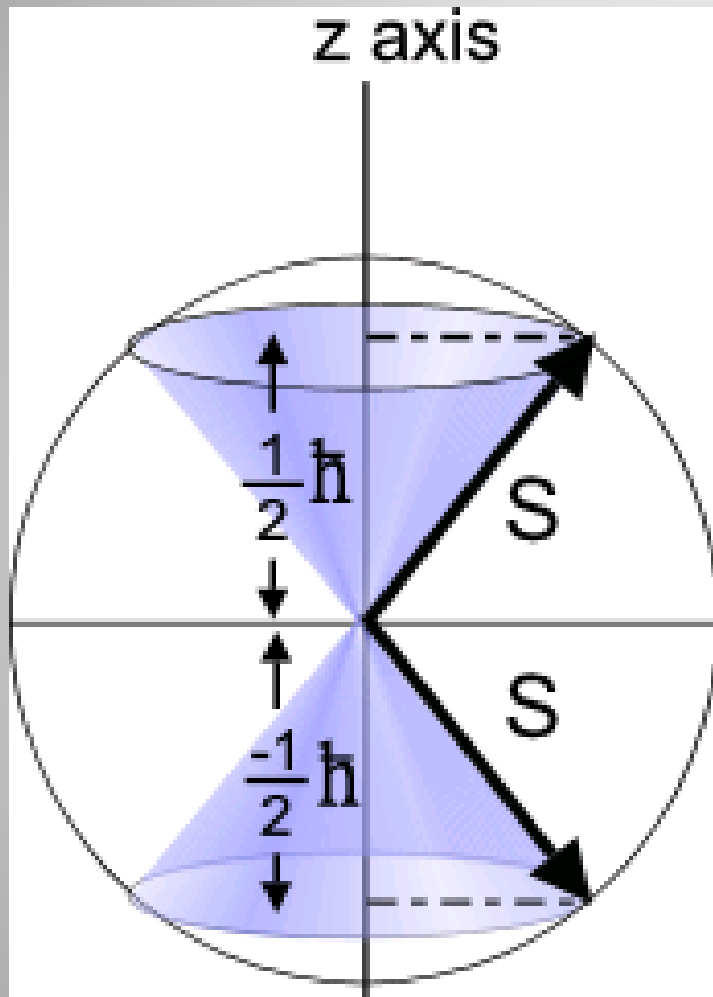
Todos los núcleos tienen, aproximadamente,
la ***misma densidad***

$$\rho \cong cte \approx 2 \times 10^{17} \text{ kg} / \text{m}^3$$

Observación: la densidad del hierro es de 7000 kg/m³

Distribución radial de la carga nuclear obtenida de experimentos de dispersión de electrones





Spines y momentos nucleares

Experimento de Stern y Gerlach,
Uhlenbeck y Goudsmit, 1922

Cada electrón "rota" alrededor de su eje (espín) y entonces contribuye tanto al momento angular como al momento dipolar magnético del átomo.

El concepto de espín del electrón fue necesario para describir la estructura fina de los espectros ópticos, la dispersión de partículas β por electrones, etc.

Momentos nucleares

✓ Núcleos: estado fundamental
estado excitado (mayor E)

✓ Momento magnético nuclear en 1924 por Pauli para explicar estructura hiperfina.

✓ Conocida la fuerza entre partículas individuales la solución de la ecuación de Schrodinger

$$-\frac{\hbar^2}{2m_0} \nabla^2 \Psi + V\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

da la energía de la partícula ligada (nucleon) en términos de cuatro numeros cuánticos principales: **n, l, m_l, m_s**

✓ Al agregar nucleones para formar un núcleo, el estado cuántico del sistema conforma un nivel nuclear.

✓ Este nivel estará caracterizado por un momento angular nuclear total **I** que depende del tipo de acoplamiento entre nucleones.

Momento angular intrínseco nuclear

- ✓ Afecta las propiedades dinámicas del núcleo
- ✓ Su valor absoluto es $\hbar [I(I+1)]^{1/2}$
- ✓ I es un vector, su proyección es $m_I \hbar$, $m_I = I, I-1, \dots, -I$
 - núcleos con A par, I entero
 - núcleos con A impar, I semi entero

Momento dipolar magnético nuclear

✓ Una partícula cargada en movimiento genera un campo magnético ➡ el protón genera un campo extranuclear que puede localizarse en el interior del núcleo y se ve como si fuera el producido por un dipolo.

$$\begin{aligned}\mu_M &\equiv \frac{eh}{4\pi M c} = \mu_\beta \left(\frac{m_0}{M} \right) = 5.050 \times 10^{-24} \text{ erg/gauss} \\ &= 3.152 \times 10^{-12} \text{ ev/gauss}\end{aligned}$$

Siendo $\mu_\beta \equiv \frac{eh}{4\pi m_0 c} = 9.273 \times 10^{-21} \text{ erg/gauss}$ el magnetón de Bohr

Momento cuadrupolar eléctrico nuclear

- ✓ Si la distribución de la carga eléctrica en el núcleo se desvía de la esférica, habrá momentos multipolares eléctricos.
- ✓ De irregularidades medibles en niveles nucleares se encuentra que esta interacción es debida al momento cuadrupolar eléctrico

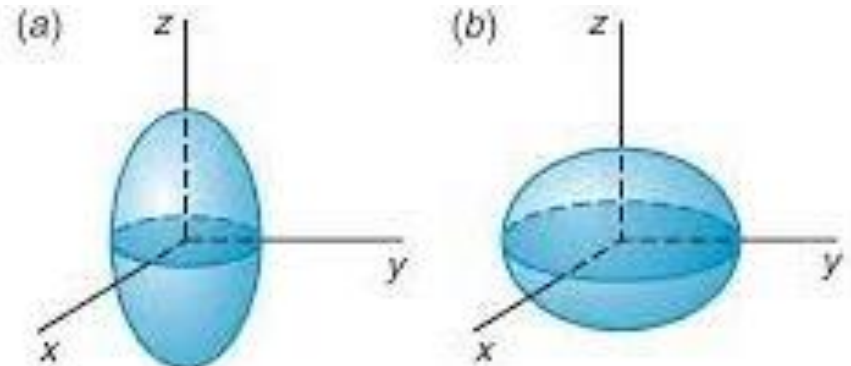
$$Q \equiv \frac{1}{e} \int \rho(3z^2 - r^2) d\tau = \frac{1}{e} \int \rho r^2(3 \cos^2 \vartheta - 1) d\tau$$

Formas nucleares

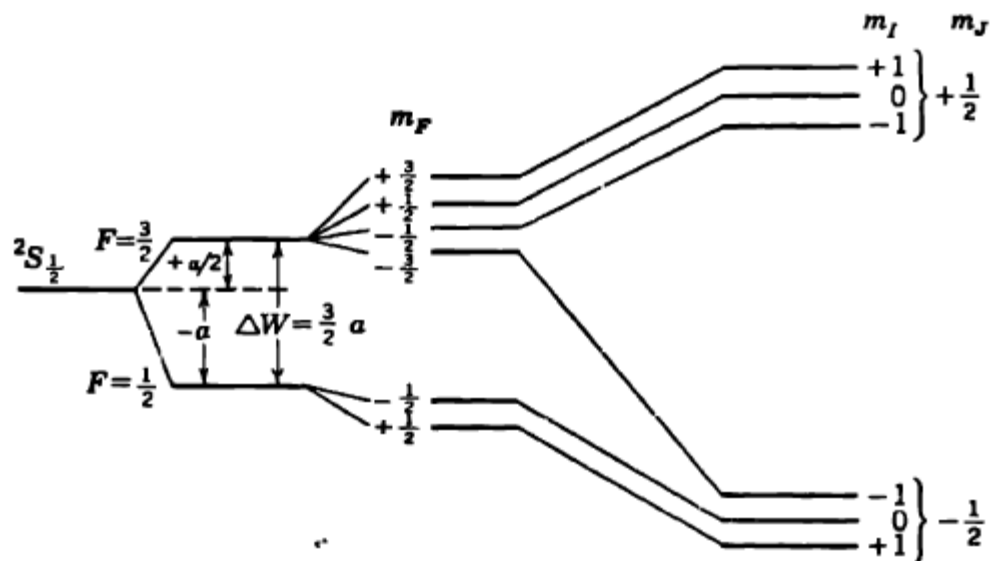
$Q > 0$: elipsoide prolado.

$Q = 0$: distribución esférica.

$Q < 0$: elipsoide oblado.



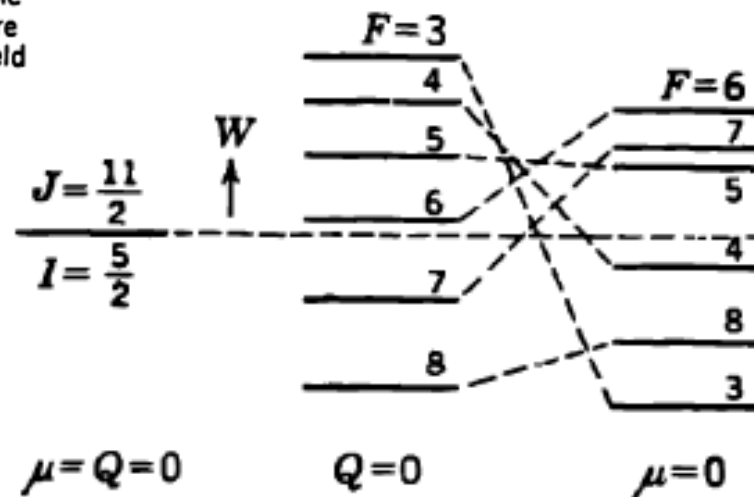
Estructura hiperfina



Hyperfine
ground state
multiplet
zero field

Zeeman
hyperfine
structure
very weak field

Paschen-Back
hyperfine
structure
weak field



Paridad

- ✓ Propiedad intrínseca relacionada con las propiedades de reflexión de la parte radial de la función de onda asociada a la partícula

$$\begin{aligned}\psi(-x, -y, -z, s) &= \psi(x, y, z, s) \\ \psi(-x, -y, -z, s) &= -\psi(x, y, z, s)\end{aligned}$$



Paridad par

Paridad impar

- ✓ En un sistema aislado la paridad se conserva.

Estadística de los nucleones

- ✓ Propiedad intrínseca relacionada con la simetría de la parte radial de la función de onda asociada a la partícula.
- ✓ La simetría de la función de onda no cambia con el tiempo  constante de movimiento.
- ✓ Asociada al comportamiento estadístico de partículas idénticas:
 - Fermi-Dirac, antisimétrica: núcleos con número atómico impar. Ppio. de exclusión de Pauli
 $s=1/2, 3/2, \text{ etc } \img alt="orange arrow" data-bbox="425 715 535 760"/> fermiones$
 - Bose-Einstein, simétrica: fotones y núcleos con número atómico par.
 $s=0, 1, 2, 3, \text{ etc } \img alt="orange arrow" data-bbox="440 875 550 920"/> bosones$

Estabilidad nuclear

✓ Regularidades en las energías de separación.

✓ Para un dado Z , S_n es mayor para N par que N impar.

✓ Para un dado N , S_n es mayor para Z par que Z impar.

✓ Núcleos par-par (Z par, N par) son más estables.

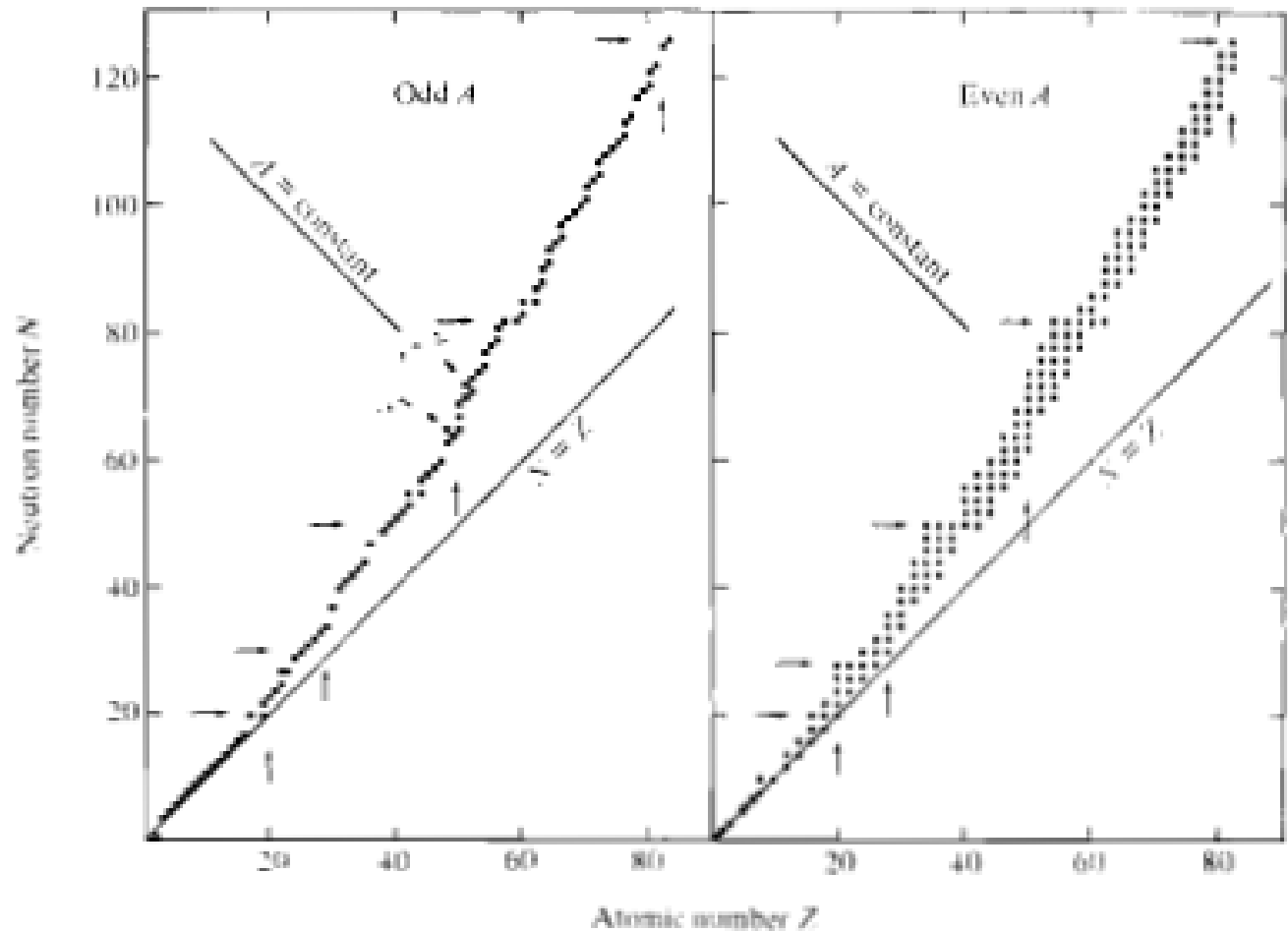
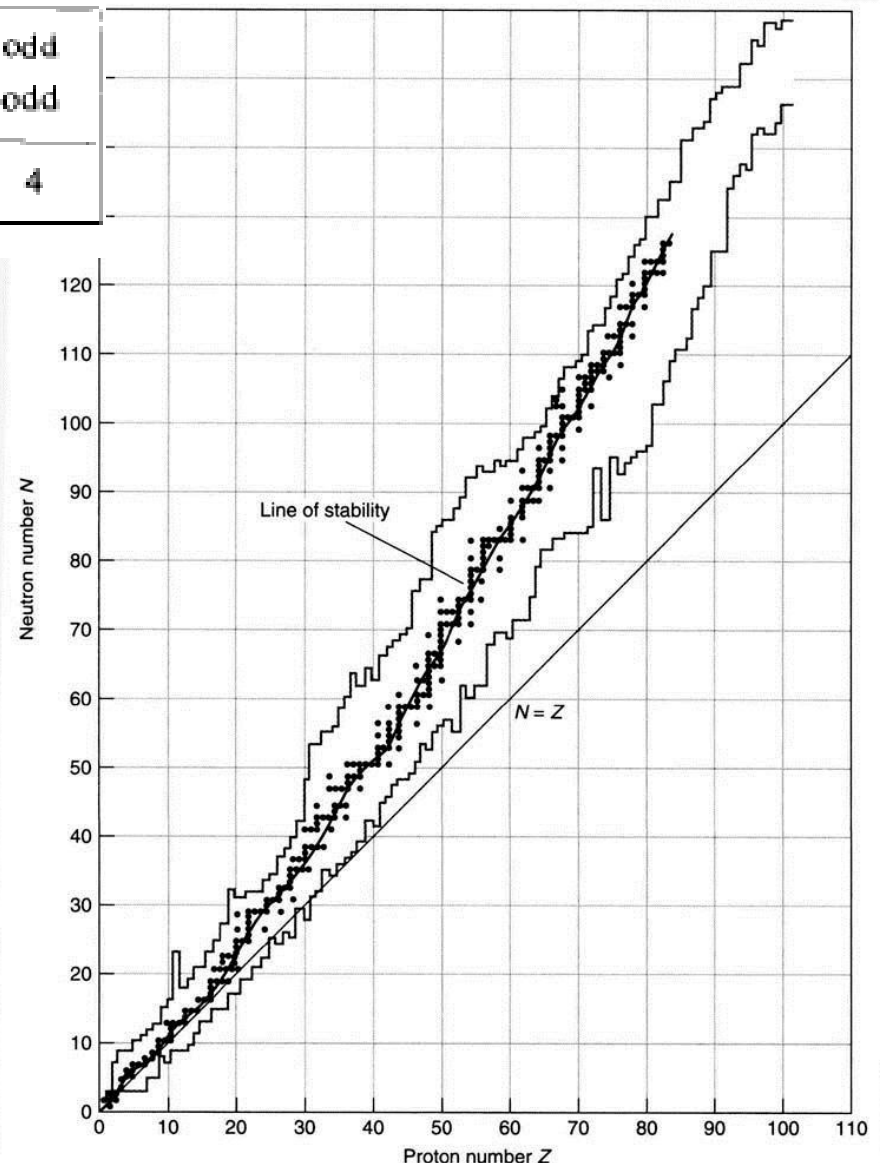


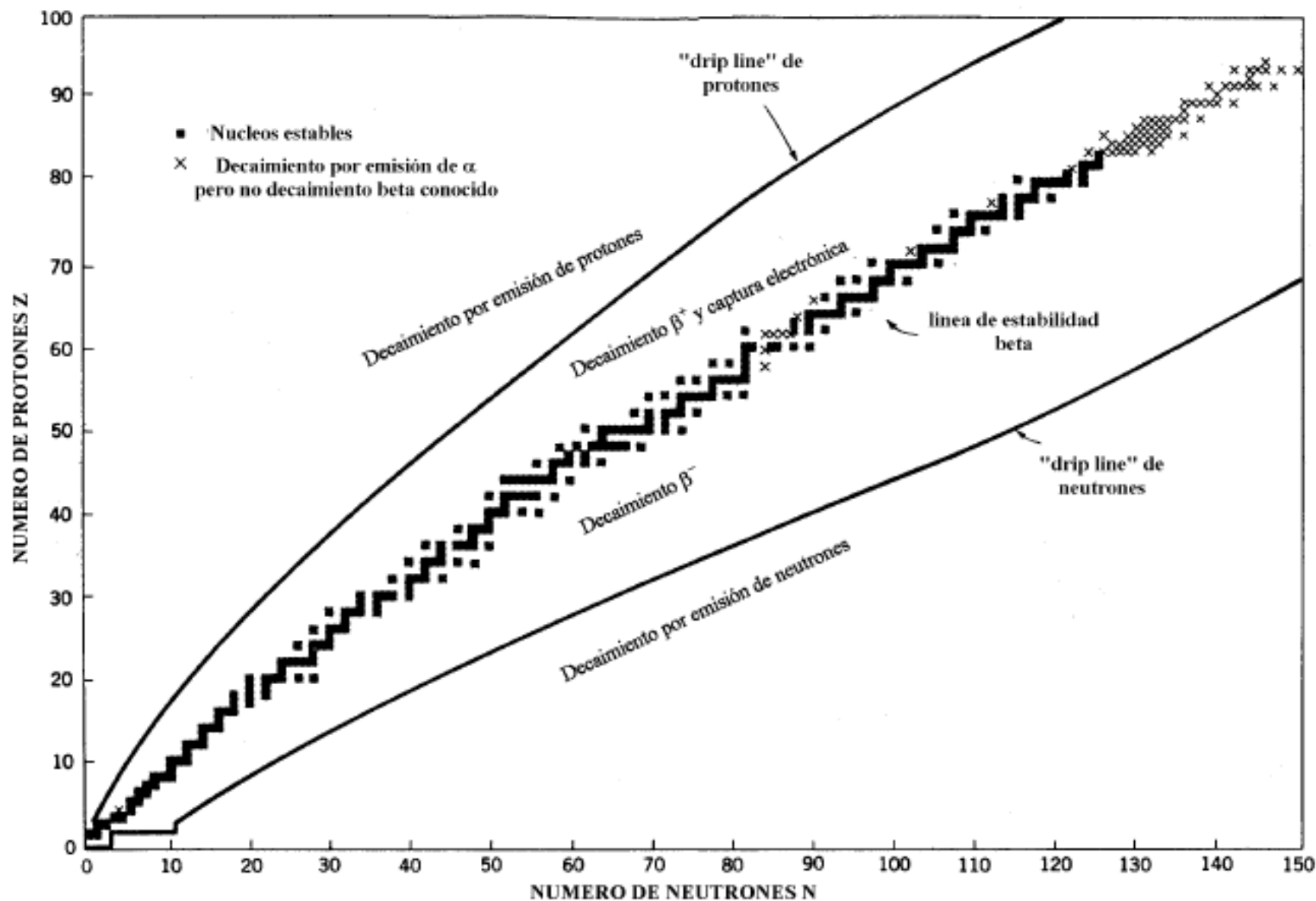
FIGURE 2-10 Neutron number versus proton number for stable nuclides. Odd isobars are plotted on the left side and even isobars on the right side. Arrows point along the "magic number" values of N and Z : 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. The odd-odd isobars with $A = 2, 6, 10$, and 14 are also shown.

TABLE 2-2 Frequency of occurrence of stable nuclides

N	even	odd	even	odd
Z	even	even	odd	odd
Number of nuclides	160	53	49	4

- ✓ 3000 nucleídos conocidos, sólo 266 estables!
- ✓ Elementos con $Z > 83$: todos inestables
- ✓ Tendencia inicial de $N \approx Z$, pero $N > Z$ para Z mayores Z (repulsión protónica)
- ✓ Estabilidad inusual para ciertos "números mágicos" $Z, N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ (capas electrónicas!!)





Leyes de conservación en una reacción nuclear

✓ Carga:

$$\sum Z = cte$$

✓ Número másico **A**: el número total de nucleones que entran y salen en la reacción debe ser constante.

$$\sum A = cte$$

✓ Estadística: mismo número de fermiones

✓ Momento angular

✓ Paridad

✓ Momento lineal

✓ Masa-energía: la energía cinética y la energía en reposo no se conservan por sí mismas. Si la energía total.

Relación masa-energía. Q de una reacción.

Si el N es bombardeado con deuterones de alta velocidad, se liberan protones energéticos a través de la reacción nuclear:

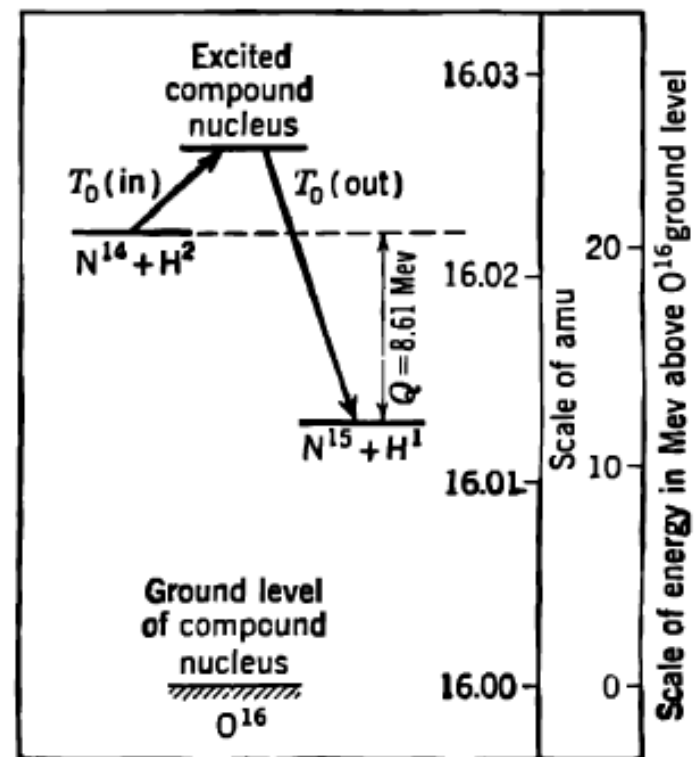


Donde Q es la energía cinética liberada en la reacción.

Simplemente, Q puede identificarse como :

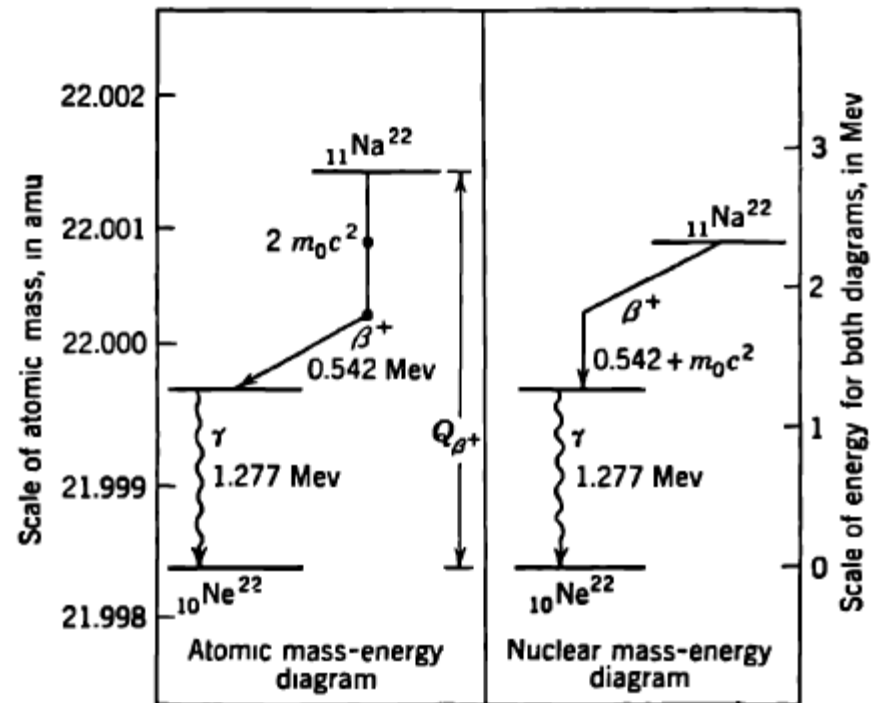
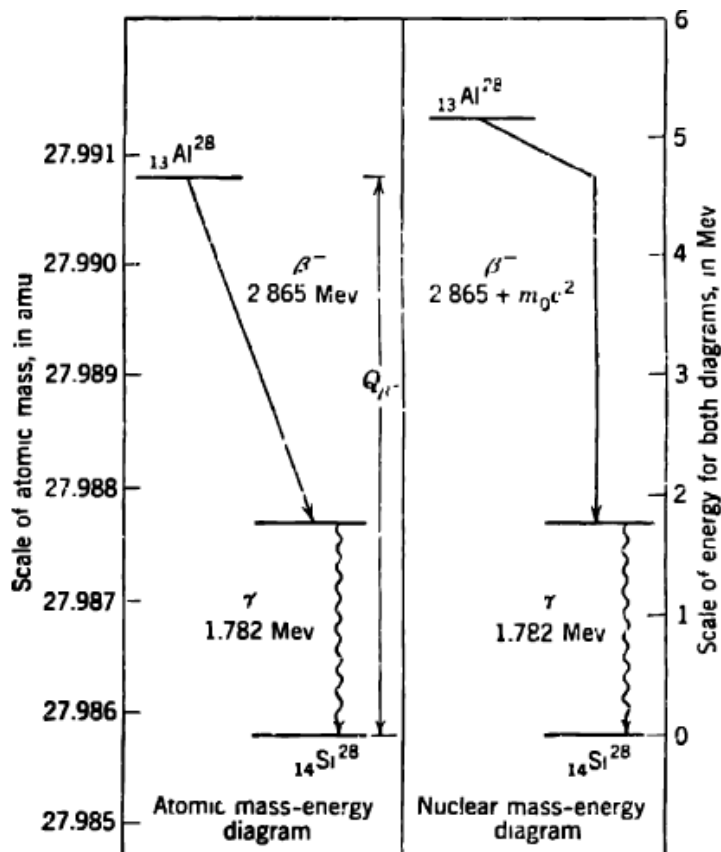
$$Q = T_0 (\text{out}) - T_0 (\text{in})$$

Cuando: $Q > 0$ $\longrightarrow$ exoérgica
 $Q < 0$ $\longrightarrow$ endoérgica





$${}_Z M' = {}_{Z+1} M' + m_0 + \bar{\nu} + T_{\beta^-} + T_{\bar{\nu}} + T_{M'} + T_{\gamma} \longrightarrow {}_Z M = {}_{Z+1} M + T_0$$



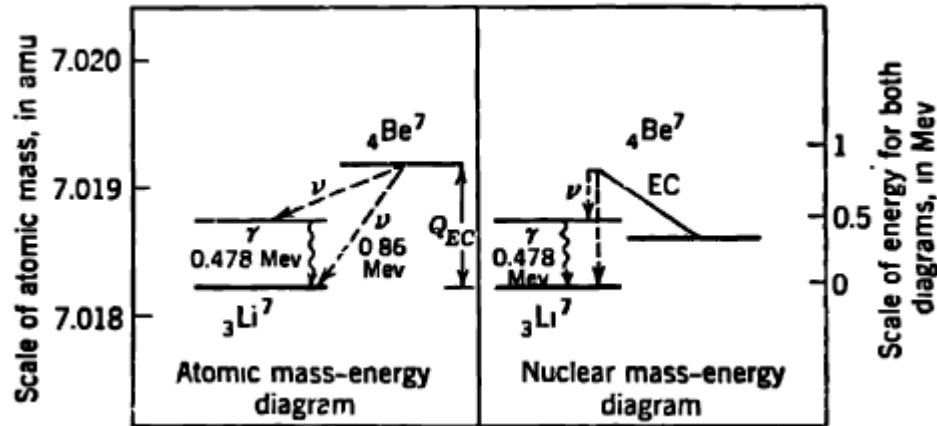
$${}_Z M' = {}_{Z-1} M' + m_0 + T_0 \longrightarrow {}_Z M = {}_{Z-1} M + 2m_0 + T_0$$

$${}_Z M = {}_{Z-1} M + T_0$$

$$Q_{EC} \equiv {}_Z M - {}_{Z-1} M = T_0 = T_\gamma + T_\nu$$

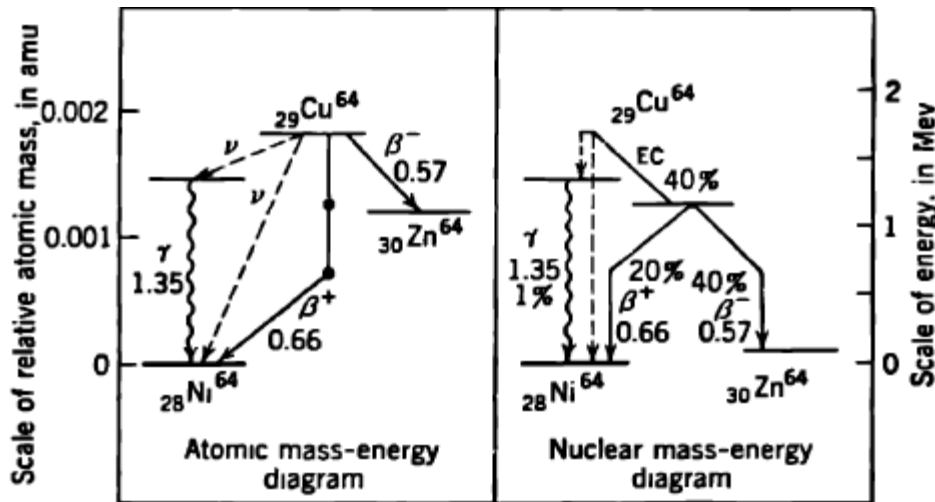
$${}_Z M' = {}_{Z-2} M' + \alpha + T_\alpha + T_{M'} + T_\gamma$$

$$Q_\alpha \equiv {}_Z M - {}_{Z-2} M - \text{He}^4 = T_\alpha \left(\frac{M_\alpha}{M_0} \right) + T_\gamma$$



$${}_{29}\text{Cu}^{64} = {}_{30}\text{Zn}^{64} + T_{\max}(\beta^-)$$

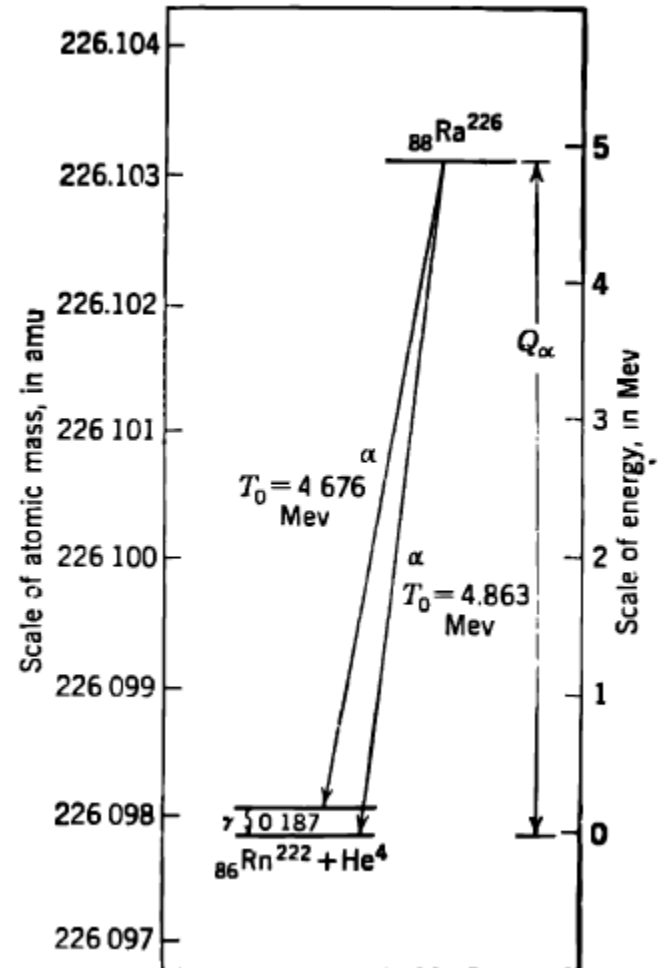
$${}_{29}\text{Cu}^{64} = {}_{28}\text{Ni}^{64} + 2m_0c^2 + T_{\max}(\beta^+)$$



$${}_{30}\text{Zn}^{64} - {}_{28}\text{Ni}^{64} = 2m_0c^2 + T_{\max}(\beta^+) - T_{\max}(\beta^-)$$

$$= 1.02 + 0.66 - 0.57 \text{ MeV}$$

$$= 1.11 \text{ MeV} = 0.00119 \text{ amu}$$



Modelos nucleares

Modelos nucleares

- ✓ Núcleos: sistema de muchos cuerpos ➡ complejidad matemática

Modelos estadísticos (gota líquida, un volumen de gas, etc) o sistema central de fuerzas (el sistema planetario, un átomo pesado, etc)

- ✓ En los últimos 50 años distintos modelos para la descripción de diferentes propiedades

modelos de partícula independiente: donde los nucleones interactúan débilmente

modelo de gas de Fermi

modelo de capas

modelos colectivos: nucleones fuertemente correlacionados

modelo de la gota líquida

modelo rotacional-vibracional.

modelo unificado

Modelo de la gota líquida

Nucleones fuertemente correlacionados propuesto por *N. Bohr en 1935.*

De acuerdo al modelo, los nucleones se comportan como las moléculas de una gota líquida pues éstos interaccionan fuertemente unos con los otros, tal como las moléculas en una gota líquida.



El modelo está basado en dos propiedades que son comunes a todos los núcleos, excepto para los muy pequeños.

- ✓ **La densidad de masa en el interior es aproximadamente la misma.**
- ✓ **La energía total de ligadura es proporcional a su masa.**

$$M(A, Z) = m_p Z + m_n (A - Z) - B(A, Z); \quad B/A \approx \text{cte}$$

Modelo de la gota líquida

El modelo de la gota predice la energía de ligadura de un núcleo en términos del número de protones y neutrones.



fórmula semiempírica de masas o fórmula de Weizsaeker



explica de manera sencilla algunas *propiedades del núcleo*, así como el mecanismo de reacciones nucleares a baja energía.

Permitió entender diversos procesos tales como fisión, fusión, numerosos decaimientos nucleares, etc.

Modelo de la gota líquida

Fórmula semiempírica de masas o fórmula de Weizsaeker

Tiene cinco términos que corresponden a:

- ✓ La cohesión de todos los nucleones debido a la fuerza nuclear
- ✓ La repulsión electrostática entre los protones
- ✓ Un término de energía superficial
- ✓ Otro término de asimetría, proporcional a la diferencia entre el número de neutrones y el de protones
- ✓ Un término de apareamiento entre pares de protones o de neutrones

Fórmula de Bethe-Weizsaeker

$$B(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{A} + \Delta(A)$$

$$\Delta(A) = \begin{cases} -a_p f(A) & \text{impar - impar} \\ 0 & \text{par - impar} \\ a_p f(A) & \text{par - par} \end{cases}$$

$$a_v = 15.56 \text{ MeV}$$

$$a_s = 17.23 \text{ MeV}$$

$$a_c = 0.7 \text{ MeV}$$

$$a_a = 23.29 \text{ MeV}$$

$$a_p = 12 \text{ MeV} \quad \text{para } f(A) = A^{-1/2}$$

Valle de estabilidad como consecuencia de la competencia entre el término coulombiano y el de asimetría.

Término de volumen
debido a la fuerza
nuclear entre nucleones

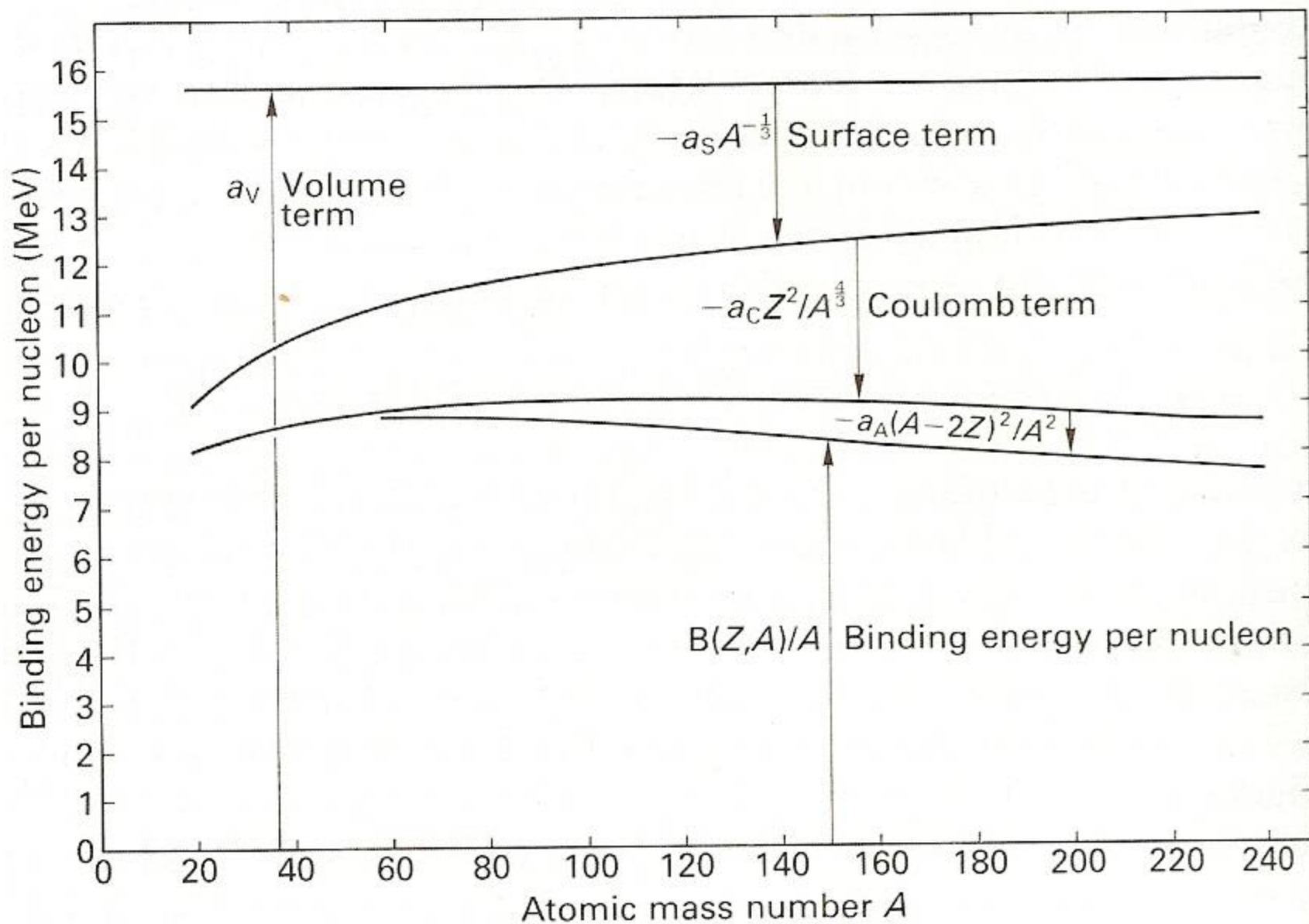
Término coulombiano

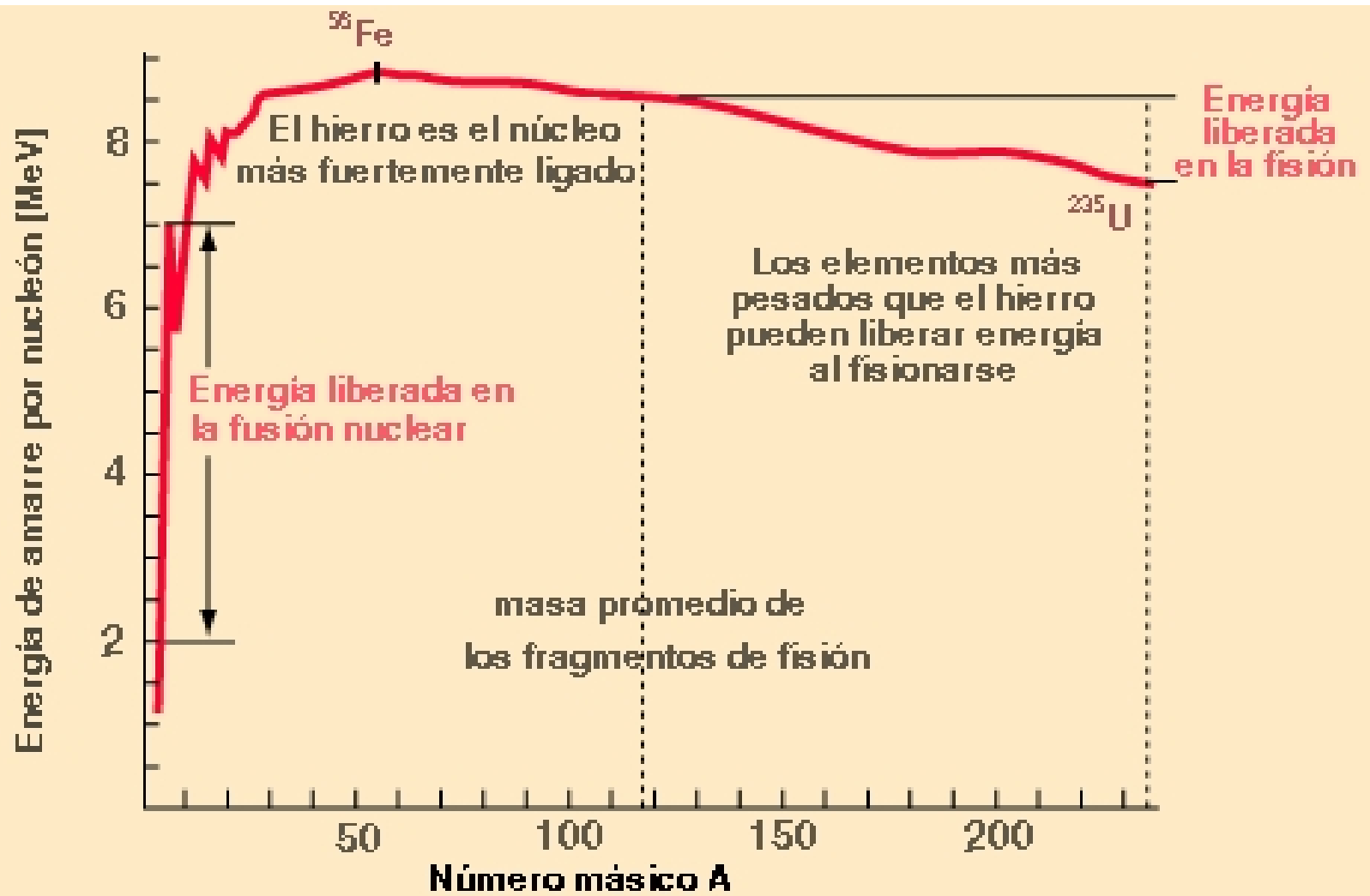
$$B(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{A} + \Delta(A)$$

Término de superficie

Término de asimetría

Término de
apareamiento





Isobaros con:

A impar un nucleido estable

A par, 2 o 3 miembros estables

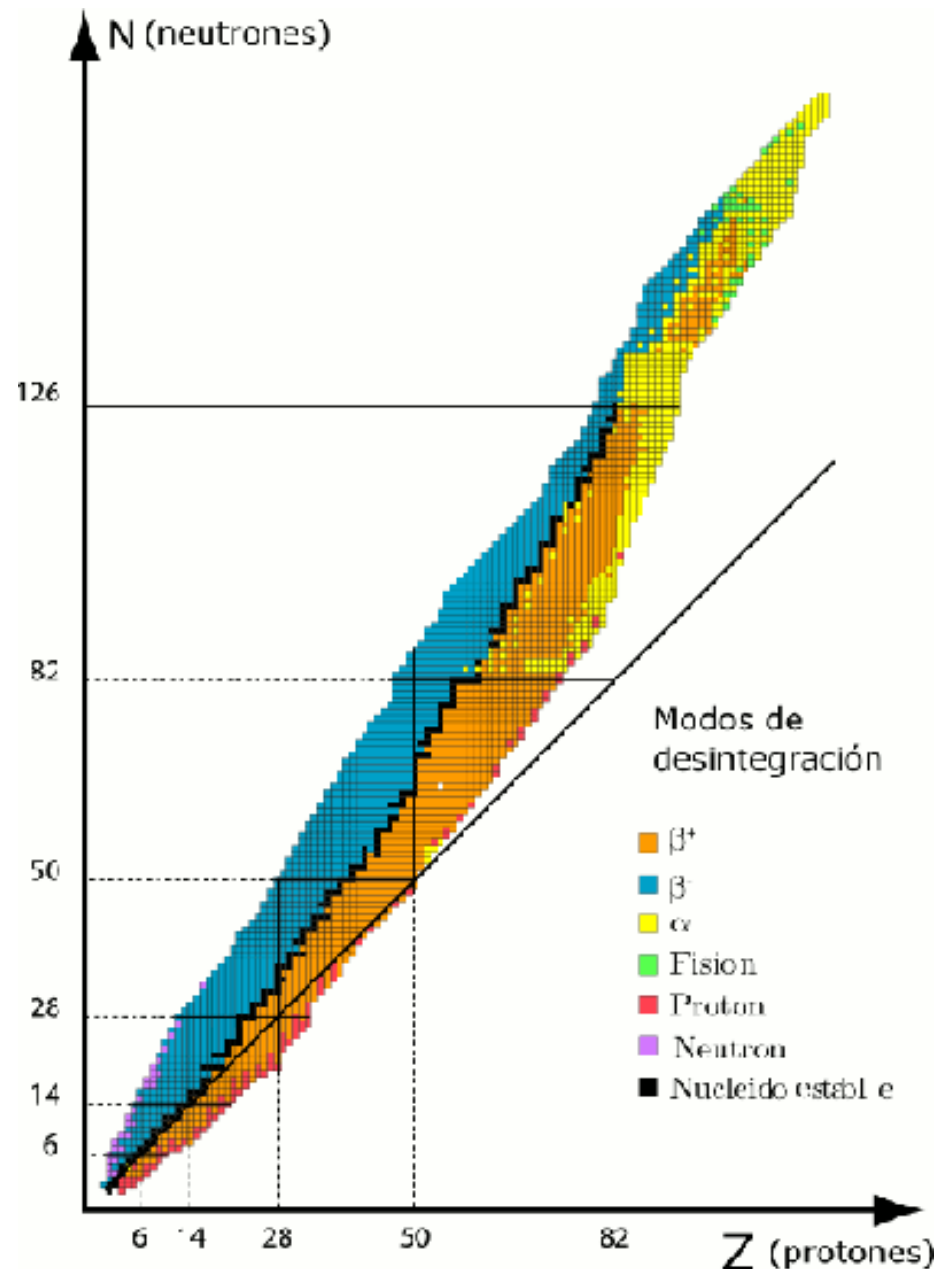
Los nucleídos inestables son mayoritariamente emisores β

Valle de la estabilidad:

$$Z_{\text{estable}} \Rightarrow \left. \frac{\partial M}{\partial Z} \right|_A = 0$$

$$Z_{\text{estable}} = -\frac{k_2}{2k_3}$$

$$M(Z, A) = k_1 A + k_2 Z + k_3 Z^2$$



Parábolas de masa

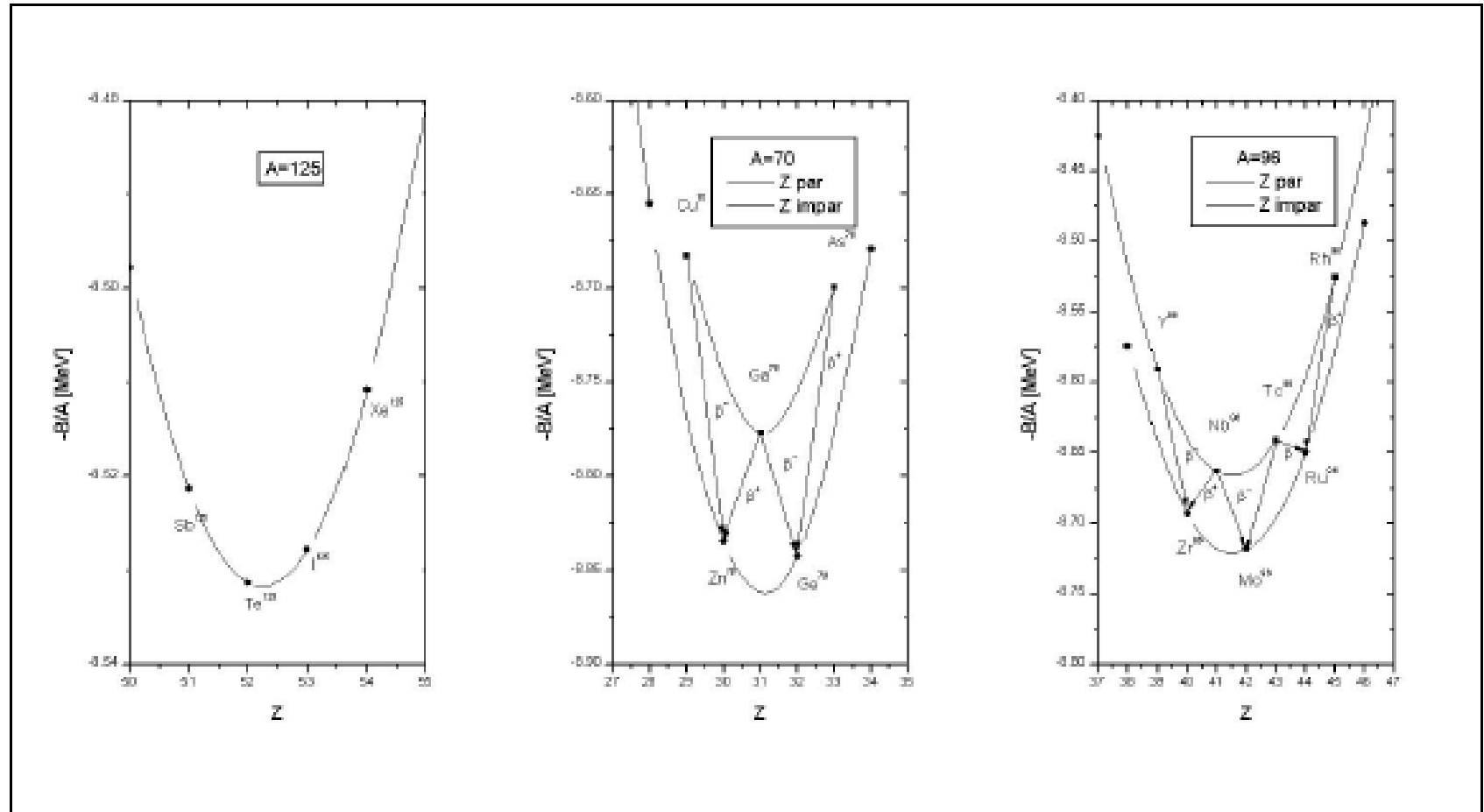
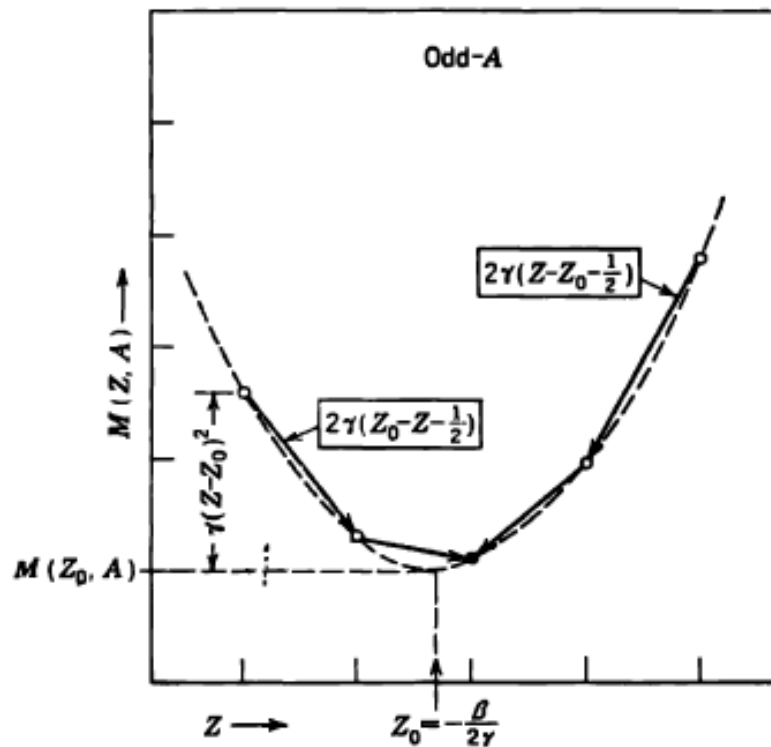


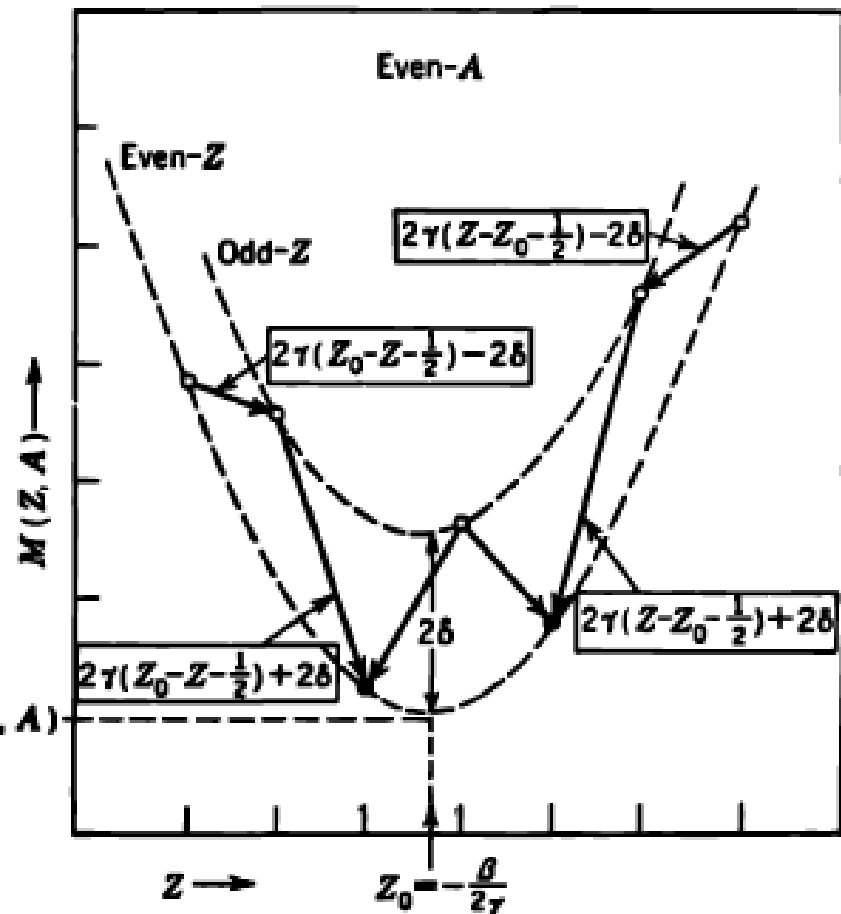
Fig. 5.1: Energías de ligadura en función de Z para valores fijos de A obtenidas utilizando la formula semi-empírica de masas.

Parábolas de masa

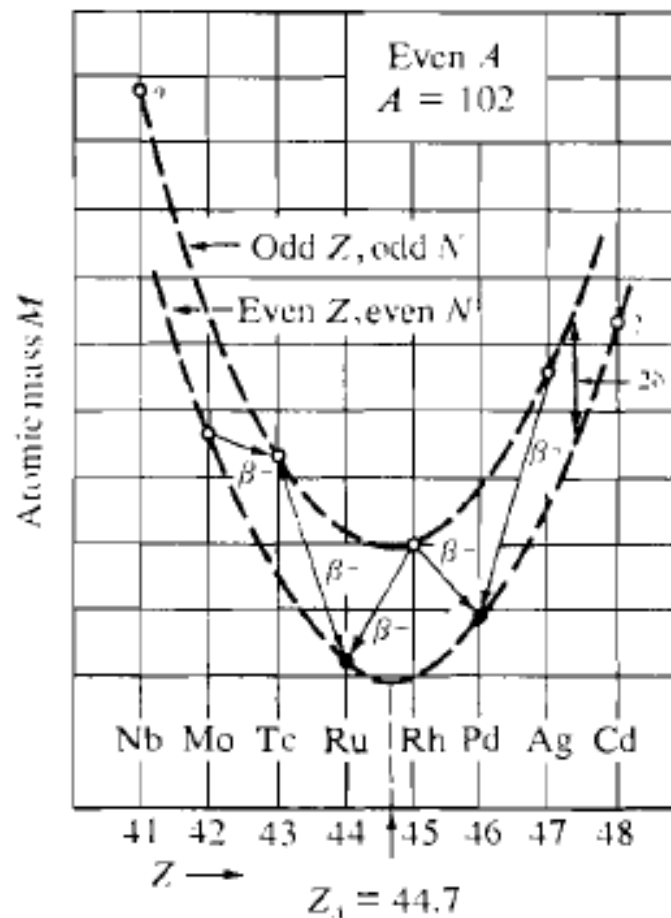
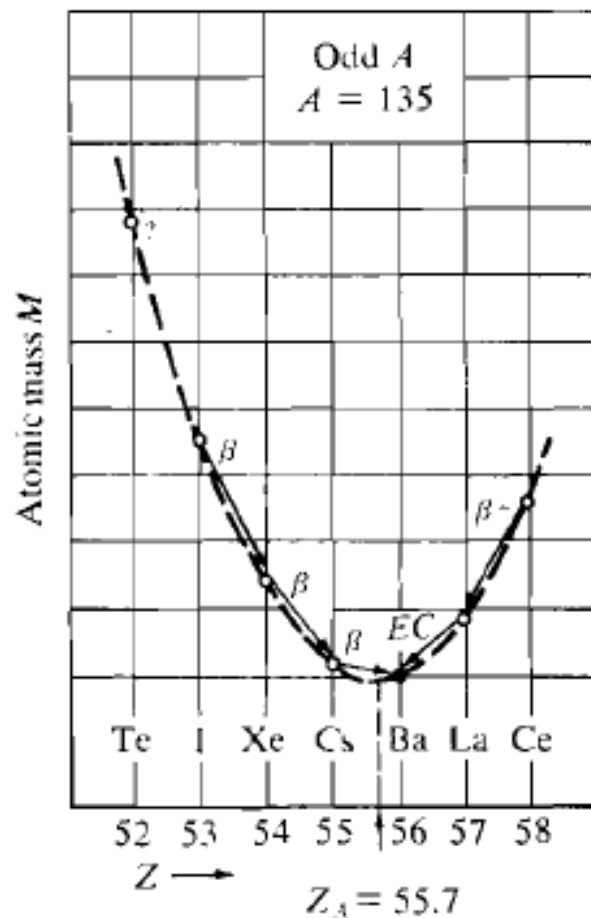


$$Z_{\text{estable}} = -\frac{k_2}{2k_3}$$

$$M(Z, A) = k_1 A + k_2 Z + k_3 Z^2$$



Parábolas de masa



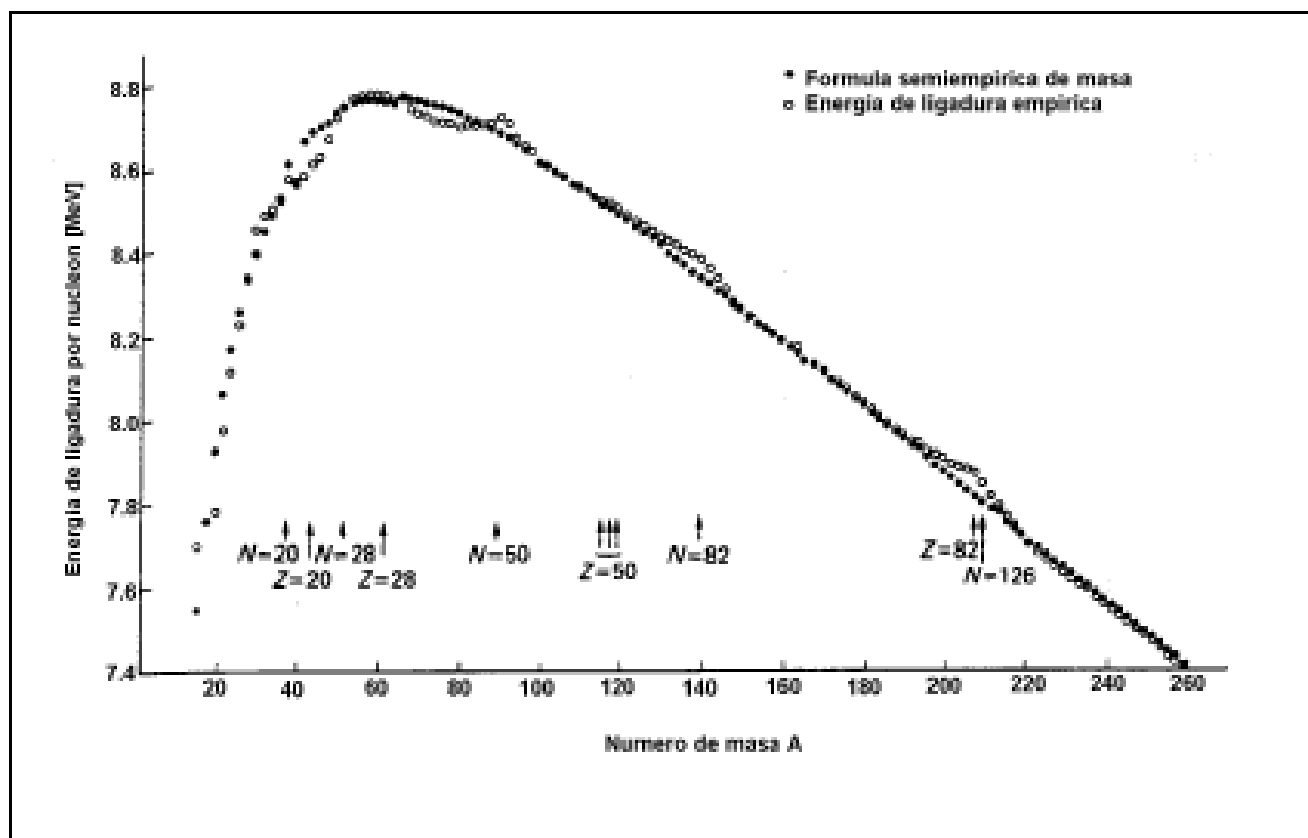


Fig. 5.2: Energías de ligadura por nucleón determinadas experimentalmente comparadas con las predichas por la fórmula semi-empírica de masas.

Modelo de gas de Fermi

Propuesto por *H. Bethe en 1935*: partículas que interactúan débilmente el núcleo puede tratarse como un *gas cuántico*.



Principio de exclusión de Pauli



Quedó relegado por el modelo de la gota líquida

Modelo de gas de Fermi

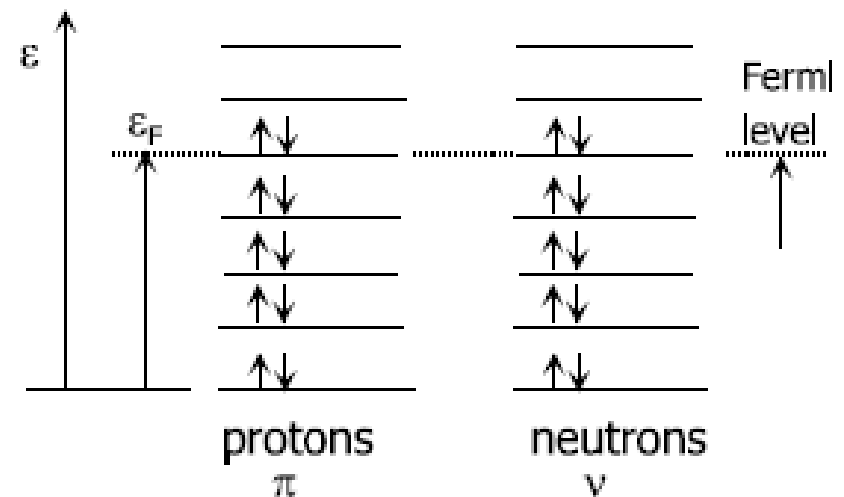
Cada nucleón se mueve en un potencial neto atractivo, que representa el promedio de los efectos de sus interacciones con otros nucleones del núcleo.

El potencial neto tiene una profundidad constante dentro del núcleo, dado que la distribución de los nucleones es constante en esta región; afuera del núcleo el potencial se va a cero en una distancia igual al rango de las fuerzas nucleares.

El potencial neto es aproximadamente como un pozo cuadrado finito de tres dimensiones de radio un poco más grande que el radio nuclear.

Son fermiones con espín intrínseco $s=1/2$, ocupan los niveles de energía del potencial neto, minimizan la energía total sin violar el principio de exclusión de Pauli.

Dado que los protones son distinguibles de los neutrones, el principio de exclusión opera independientemente para los dos tipos de nucleones:



Modelo de gas de Fermi...

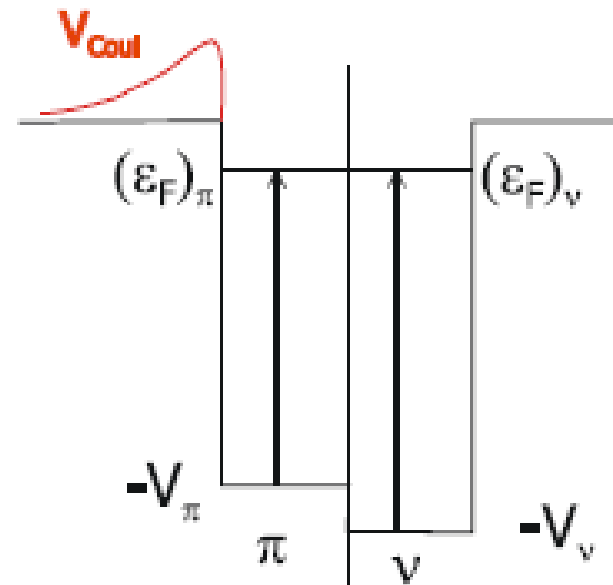
Para conocer la profundidad del pozo necesitamos conocer la energía típica de Fermi ε_F para un núcleo, que es la energía del nivel lleno mas alto del sistema, medida desde el fondo del pozo de potencial (pozo cuadrado en tres dimensiones).

Está relacionada con la masa M del nucleón y su densidad ρ , por:

$$\varepsilon_F = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2M} \left(\frac{3}{\pi} \rho \right)^{2/3}$$

Para un gas de Fermi la energía para los protones y neutrones:

$$E_F^{\text{prot}} = C \left(\frac{Z}{A} \right)^{2/3} \quad \text{y} \quad E_F^{\text{neut}} = C \left(\frac{N}{A} \right)^{2/3}$$



Modelo de capas

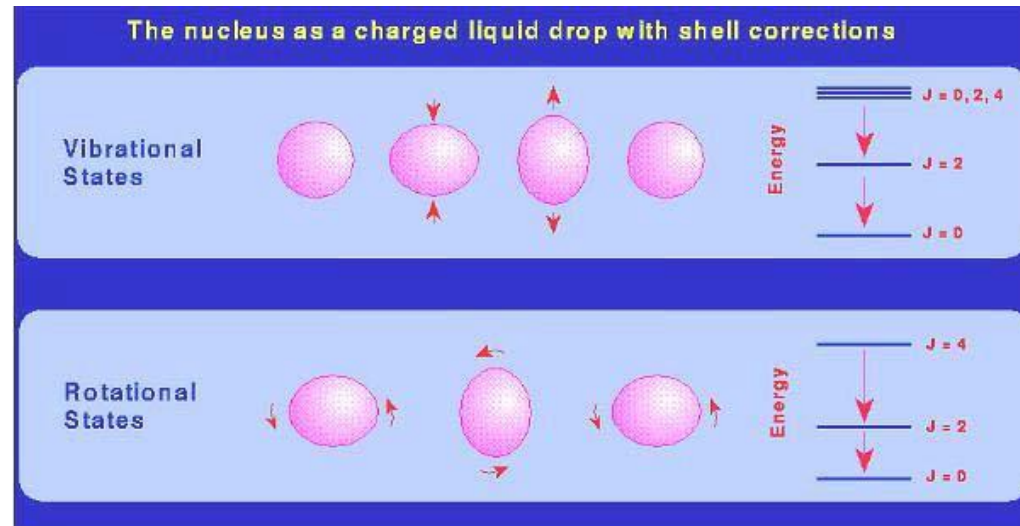


Maria Goeppert-Mayer (PN en 1963) propuso un potencial espín-órbita para obtener la separación correcta entre capas.

- Hacia fines de 1940 gran cantidad de datos experimentales (masas, momentos magnéticos, etc.) indicaban que diversas propiedades nucleares presentaban discontinuidades para ciertos valores de N o Z .
- El *modelo de capas* se basa en la idea de que los constituyentes del núcleo se mueven de manera independiente.
- Estabilidad inusual para ciertos "números mágicos" $Z, N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ (capas electrónicas!!)

Modelo colectivo

El **modelo colectivo del núcleo**, combina ciertas características del modelo de capas y del de la gota incluyendo el movimiento del núcleo completo considerando **rotaciones y vibraciones**.



Fue Aage **Bohr** junto con **Ben Mottelson** quien planteó el modelo como tal y desarrollo la mayoría de los resultados.

Bibliografía y links de interés

Elements of Nuclear Physics, Meyerhof, 1967

Technics for Nuclear and Particle Physics Experiments, W.R.Leo

The Atomic Nucleus, R.Evans, 1955

Introduction to Nuclear Physics, W.N.Cottingham and D.A.Greenwood, 1985.

*Tabla de nucleidos: <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>
<http://atom.kaeri.re.kr/>*

*Tabla periodica de los elementos:
<http://www.webelements.com/>*

Datos nucleares: <http://www.nndc.bnl.gov/>

Constantes, unidades: <http://physics.nist.gov/cuu/index.html>