

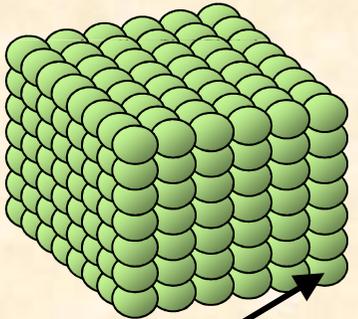
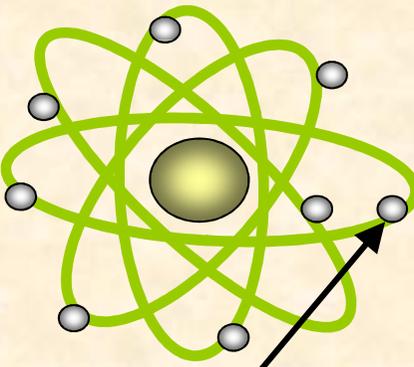
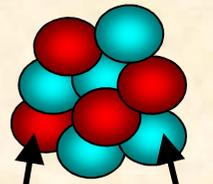
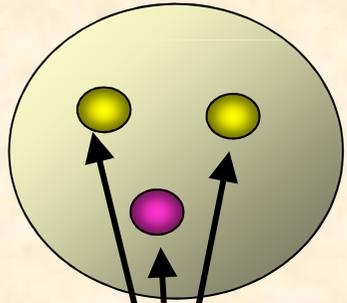


# **ESTRUCTURA DE LA MATERIA**

**Grupo D  
CURSO 20011 – 2012**

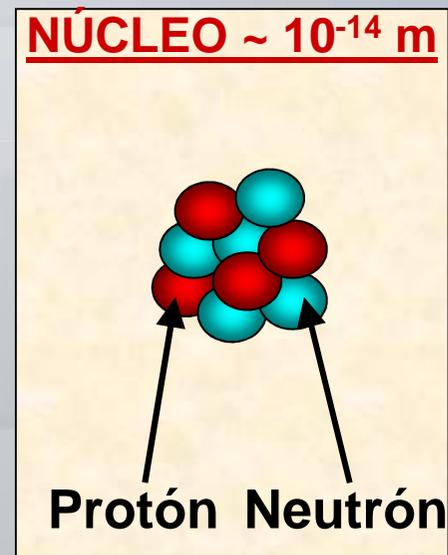
**EL NÚCLEO ATÓMICO**

# ¿DE QUÉ ESTÁN HECHAS LAS COSAS?

<u>MATERIA ~ 10<sup>-9</sup> m</u>	<u>ÁTOMO ~ 10<sup>-10</sup> m</u>	<u>NÚCLEO ~ 10<sup>-14</sup> m</u>	<u>NUCLEÓN &lt; 10<sup>-15</sup> m</u>
 <p>Átomo</p>	 <p>Electrón</p>	 <p>Protón Neutrón</p>	 <p>Quarks</p>
FÍSICA MATERIALES	FÍSICA ATÓMICA	FÍSICA NUCLEAR	FÍSICA PARTÍCULAS

# ¿DE QUÉ ESTÁN HECHAS LAS COSAS?

En la primera parte de la asignatura, nos centraremos en el núcleo atómico.



FÍSICA NUCLEAR

# PROPIEDADES BÁSICAS DEL NÚCLEO

- **COMPONENTES**  
[NÚCLEOS ISÓTOPOS, ISÓTONOS E ISÓBAROS]
- **DENSIDAD DE CARGA**
- **RADIO**
- **MASA Y DENSIDAD**
- **ENERGÍA DE LIGADURA [MODELO DE GOTA LÍQUIDA]**
- **ESTABILIDAD**
- **MOMENTO ANGULAR Y SPIN**
- **MOMENTO MAGNÉTICO**

# COMPONENTES DE LOS NÚCLEOS

- En un primer nivel de aproximación (con el que trabajaremos en esta parte de la asignatura), los núcleos están compuestos de nucleones (protones y neutrones).

# COMPONENTES DE LOS NÚCLEOS

- **Por tanto...** En este nivel de aproximación los núcleos están formados por protones y neutrones.
- **NOTACIÓN:** Un núcleo atómico viene descrito por:



# NÚCLEOS ISÓTOPOS, ISÓBAROS E ISÓTONOS

- Núcleos Isótopos – Mismo Z, Distinto N

Ej:  $^{12}\text{C}_6$ ,  $^{14}\text{C}_6$  ... [NOTA: La ABUNDANCIA indica el porcentaje que hay en la naturaleza de cada isótopo para un elemento]

Por ejemplo, los isótopos estables del kriptón y sus abundancias relativas son:

$^{78}\text{Kr}$	$^{80}\text{Kr}$	$^{82}\text{Kr}$	$^{83}\text{Kr}$	$^{84}\text{Kr}$	$^{86}\text{Kr}$
0,356%	2,27%	11,6%	11,5%	57,0%	17,3%

- Núcleos Isótonos – Mismo N, Distinto Z

Ej:  $^{12}\text{C}_6$ ,  $^{13}\text{N}_6$

- Núcleos Isóbaros – Mismo A, Distinto Z y Distinto N

Ej:  $^{12}\text{C}_6$ ,  $^{12}\text{N}_5$

# DENSIDAD DE CARGA NUCLEAR

- **CUESTIÓN [2]** - ¿Cómo se distribuye la carga eléctrica en el núcleo? ¿Tiene simetría esférica? ¿O tiene simetría axial? ¿Es uniforme? ¿Está concentrada en el centro? ¿O en la región más externa?

¿?

# DENSIDAD DE CARGA NUCLEAR

- **CUESTIÓN [3] - ¿Se os ocurre algún método experimental para determinar como está distribuida la carga en el núcleo?**

¿?

# DENSIDAD DE CARGA NUCLEAR

## • **SOLUCIÓN [3]** -----

- Como casi siempre en física... ¡A cañonazos! “Si un físico fundamental tuviese que estudiar cómo funcionan los relojes, haría impactar dos de ellos y analizaría las piezas que salen”
- **EXPERIMENTO:** Para estudiar la densidad de carga en un núcleo se coloca como blanco y se lanzan electrones contra él, estudiando su interacción. [Difracción de electrones por núcleos] A partir de la dispersión de los electrones, se obtiene la densidad.

**NOTA:** Dado que los electrones no sufren la interacción fuerte, se trata de un proceso electromagnético. Esto es importante, teniendo en cuenta que la interacción fuerte apenas se conocía.

# DENSIDAD DE CARGA NUCLEAR

- **CUESTIÓN [4]** - ¿Qué energía (en eV) deben tener los electrones que se utilizan para impactar contra los núcleos?

¿?

# DENSIDAD DE CARGA NUCLEAR

- **SOLUCIÓN [4]** -----
- Para estimar la energía de los electrones que impactan contra el núcleo blanco, recurrimos a un método bastante común en física cuántica para estimar órdenes de magnitud en muchos problemas de este tipo:
- El momento de los electrones debe ser aquel para el que su longitud de onda de De-Broglie sea del orden del tamaño nuclear.

Tamaño del núcleo a observar:  $x \rightarrow 10^{-15}$  m

Momento del electrón incidente:

↓ ¡RECORDAD!

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{\hbar c}{\lambda c} = \frac{197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{1 \text{ fm} \cdot c} \approx 200 \text{ MeV} / c$$

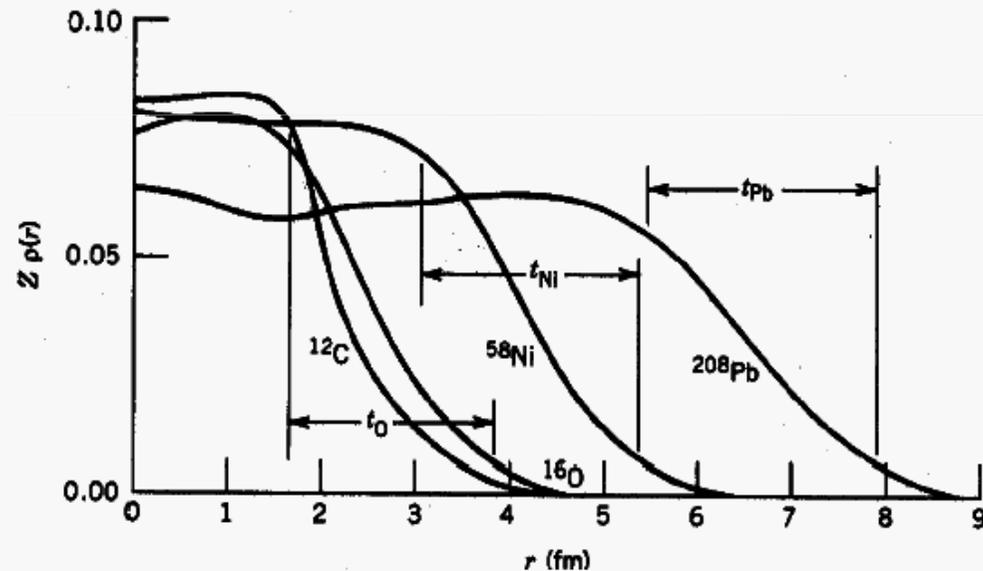
$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2} = \sqrt{(200 \text{ MeV})^2 + (0.5 \text{ MeV})^2} \approx 200 \text{ MeV}$$

↑  
LIMITE ULTRARRELATIVISTA

# DENSIDAD DE CARGA NUCLEAR

## SOLUCIÓN [2] -----

- El resultado de estos experimentos fue:



*Distribución radial de la carga de varios núcleos obtenida a partir de la difusión de electrones*

# RADIO NUCLEAR

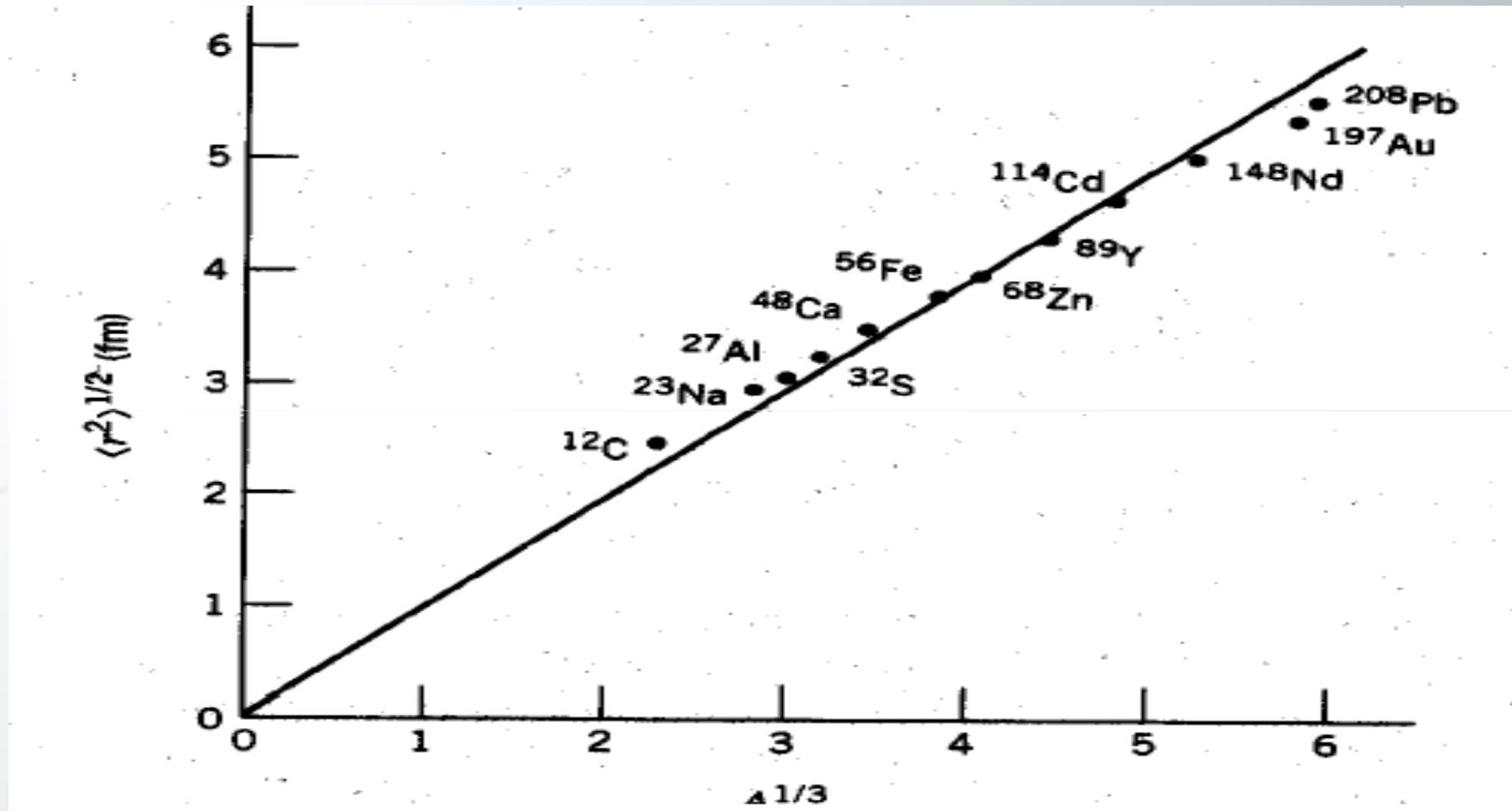
Resultados:

- El número de nucleones por unidad de volumen es constante

$$\frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3} \approx cte. \Rightarrow R = R_0 A^{1/3}, \quad R_0 \approx 1.2 \text{ fm}$$

- La densidad de carga nuclear es prácticamente la misma para todos los núcleos
- La corteza superficial es constante :  $t \approx 2.3 \text{ fm}$

# RADIO NUCLEAR



Radio cuadrático medio (rms) de diferentes núcleos obtenidos a partir de experimentos de dispersión de electrones. La pendiente de la recta  $R = R_0 A^{1/3}$  es  $R_0 = 1,23 \text{ fm}$ .

# RADIO NUCLEAR

- A partir de los resultados anteriores, se buscaron cantidades que determinasen el radio del núcleo:

Radio cuadrático medio:

$$\langle r^2 \rangle = \frac{\int \rho_c(r) \cdot r^2 \cdot d^3\vec{r}}{\int \rho_c(r) \cdot d^3\vec{r}} = \frac{\int \rho_c(r) \cdot r^2 \cdot d^3\vec{r}}{Z \cdot e}$$

Radio de densidad media: Radio en el que la densidad en el origen decae a la mitad.

Radio uniforme –  $R = (5/3 * \langle r^2 \rangle)^{1/2}$ ; Se cumple  $R = 1.2A^{1/3}$

[Se debe a que el radio cuadrático medio de una esfera uniforme de radio R es:

$$\langle r^2 \rangle (\text{esfera _ uniforme}) = \frac{\int \rho_c(r) \cdot r^2 \cdot d^3\vec{r}}{\int \rho_c(r) \cdot d^3\vec{r}} = \frac{\rho \cdot \int_0^R 4\pi r^4 \cdot dr}{\rho \cdot \int_0^R 4\pi r^2 \cdot dr} = \frac{R^5 / 5}{R^3 / 3} = \frac{3}{5} R^2$$

# RADIO NUCLEAR

- También se ha podido estudiar el radio nuclear con otros métodos. Por ejemplo:
- Átomos muónicos – Si un átomo incorpora algún muón (unas 217 veces más pesados que los electrones) el estudio de sus propiedades (más afectado por el tamaño del núcleo al tener una “órbita” más interior que los electrones) revela el radio nuclear.
- Colisiones de núcleos de  $^4\text{He}$  contra núcleos pesados. La interacción será coulombiana salvo en la región en la que intervenga la fuerza fuerte (es decir, en la región donde está el núcleo blanco)

# MASA Y DENSIDAD NUCLEAR

- Las masas de los distintos núcleos se encuentran tabuladas. En general se puede ver que la densidad de los núcleos es bastante similar en todos ellos.

# MASA Y DENSIDAD NUCLEAR

**CUESTIÓN [4] - ¿Qué orden de magnitud (en Unidades del S.I.) tiene la densidad nuclear? ¿cuántas veces el mayor que la densidad del agua? [d(agua) = 1kg/l = 1g/cm<sup>3</sup>]**

¿?

# MASA Y DENSIDAD NUCLEAR

## SOLUCIÓN [4] -----

Ejemplo: Un núcleo como el  $^{12}\text{C}$  tiene un radio de  $R=1.2*(A=12)^{1/3}$  fm y por tanto un volumen de  $V=4/3*\pi*R^3 = 7.24*(A=12) \text{ fm}^3 = 86.86 \text{ fm}^3 = 86.86 *10^{-45} \text{ m}^3$

Su masa del  $^{12}\text{C}$  es exactamente 12 u [El  $^{12}\text{C}$  se toma como referencia para definir la unidad de masa atómica u]

NOTA:  $1 \text{ u} = 931.494 \text{ MeV}$  (tomando  $c=1$ ) =  $1.66*10^{-27} \text{ kg}$

Por tanto, su densidad es de  $(19.92/86.86)*10^{18} \text{ kg/m}^3$

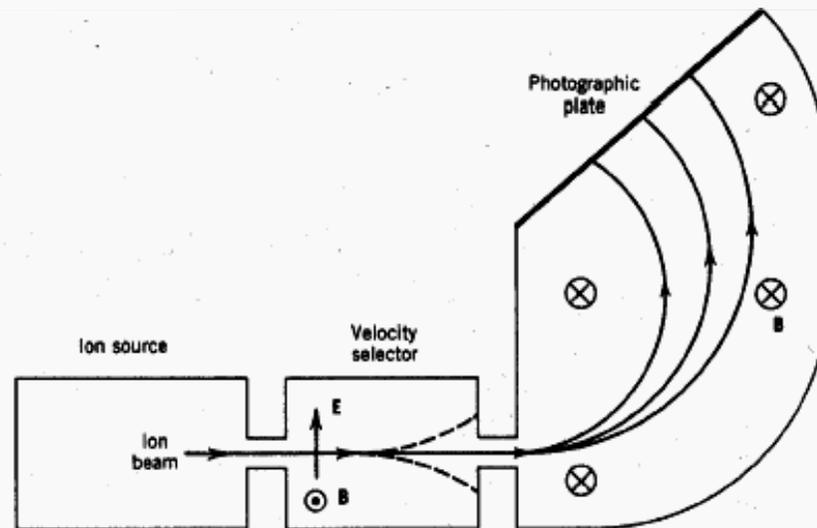
$d = 2*10^{16} \text{ g/cm}^3$  !! (En la zona interior del núcleo)

Estos valores son del orden de la densidad que se le asigna a las estrellas de neutrones.

# MASA Y DENSIDAD NUCLEAR

- **EXPERIMENTO:** Para estudiar las masas de los distintos núcleos:

## ESPECTRÓMETRO DE MASAS.



*Esquema de un espectrógrafo de masas*

# MASA Y DENSIDAD NUCLEAR

## ESPECTRÓMETRO DE MASAS

Fuente de iones: de la que se obtiene un haz de átomos o moléculas ionizadas, con diferentes velocidades.

Selector de velocidad: campo eléctrico  $E$  y magnético  $B$  perpendiculares, que deflecan en sentidos contrarios a los iones, de modo que los iones no deflectados cumplen

$$qE = qvB \Rightarrow v = \frac{E}{B}$$

Selector de momentos: campo magnético uniforme que defleca a los iones en una trayectoria circular de radio:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

# MASA Y DENSIDAD NUCLEAR

- Sin embargo, si sumamos las masas de sus componentes, vemos que es mayor que la masa de los núcleos estudiados:

**Ejemplo:**  ${}^4\text{He}$  - Está compuesto por 2 protones y 2 neutrones

Su masa en principio sería de:  $2 \cdot m(p) + 2 \cdot m(n) = 2 \cdot 939.56 + 2 \cdot 938.27 = 3755.66 \text{ MeV}$

Sin embargo, en las tablas aparece que  $m({}^4\text{He}) = 3727.38 \text{ MeV}$



# MASA Y DENSIDAD NUCLEAR

**CUESTIÓN [5] - ¿A que creéis que se debe esto? ¿Dónde están los 28 MeV de diferencia?**

$$2*m(p)+2*m(n) = 2*939.56 + 2*938.27 = 3755.66 \text{ MeV}$$

$$m(^4\text{He}) = 3727.38 \text{ MeV}$$

¿?

# ENERGÍA DE LIGADURA

## SOLUCIÓN [5] -----

¡La energía de ligadura de los nucleones es lo suficientemente grande como para tenerla en cuenta! Recordad que  $E = mc^2$   
→ Una energía de enlace en un sistema (negativa) genera un defecto de masa.  
[Masa del sistema ligado < Suma de las masas de sus constituyentes]

- **F** Energía de enlace de un núcleo:

$$B = \left\{ Zm_p + Nm_n - \left[ m(^A X) - Zm_e \right] \right\} = \left[ Zm(^1H) + Nm_n - m(^A X) \right]$$

# ENERGÍA DE LIGADURA

También vamos a definir:

Defecto de masa  $[\Delta] \cdot c^2 =$  Energía de ligadura

Energía de separación neutrónica:

$$S_n = B\left({}^A_Z X_N\right) - B\left({}^{A-1}_Z X_{N-1}\right) = \left[ m\left({}^{A-1}_Z X_{N-1}\right) - m\left({}^A_Z X_N\right) + m_n \right]$$

Energía de separación protónica:

$$S_p = B\left({}^A_Z X_N\right) - B\left({}^{A-1}_{Z-1} X_N\right) = \left[ m\left({}^{A-1}_{Z-1} X_N\right) - m\left({}^A_Z X_N\right) + m\left({}^1_1 H\right) \right]$$

# ENERGÍA DE LIGADURA

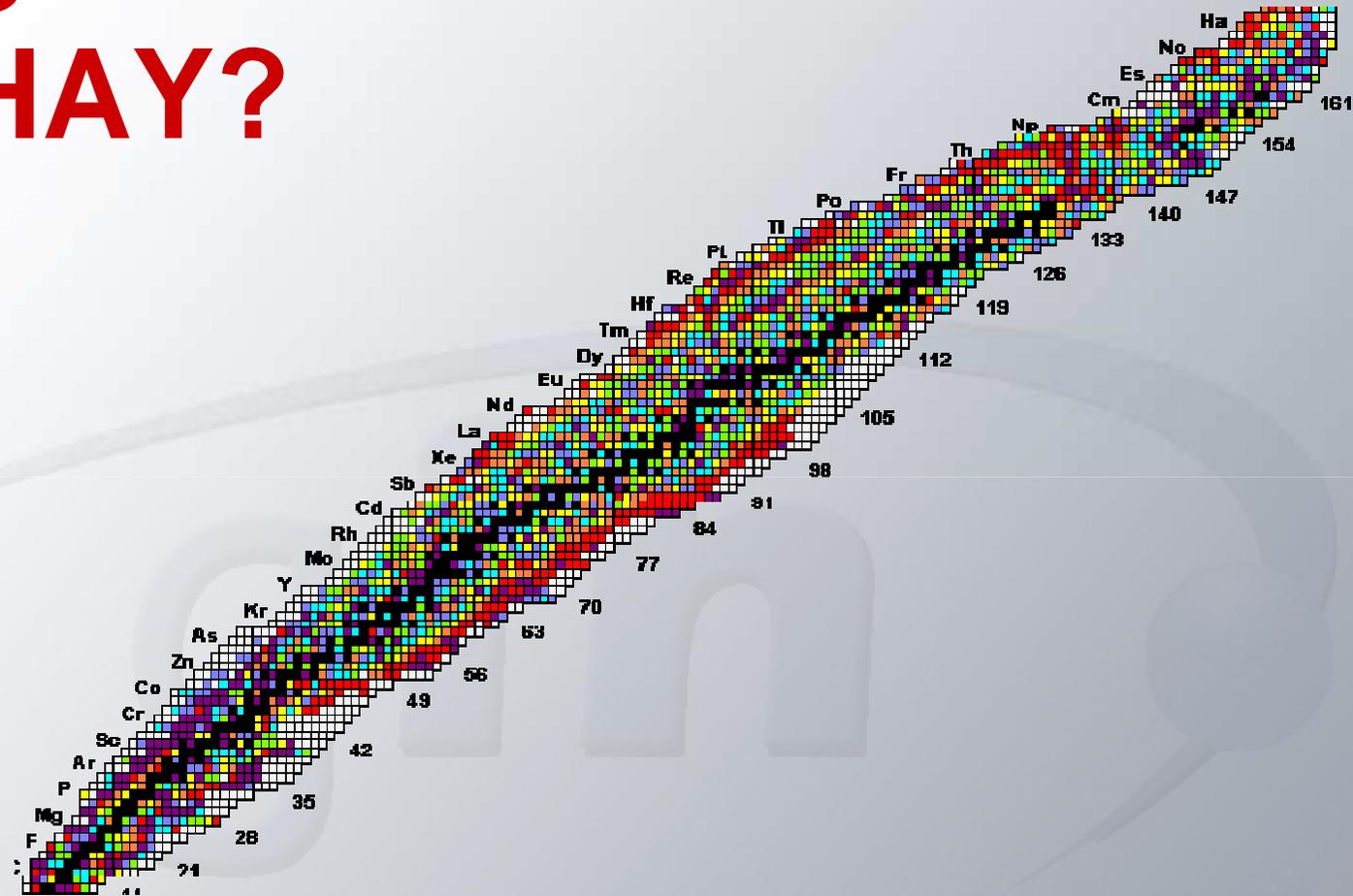
Núcleo	$\Delta(\text{MeV})$	$S_n(\text{MeV})$	$S_p(\text{MeV})$
$^{16}_8\text{O}_8$	-4,737	15,66	12,13
$^{17}_8\text{O}_9$	-0,810	4,14	13,78
$^{17}_9\text{F}_8$	+1,952	16,81	0,60
$^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$	-34,847	15,64	8,33
$^{41}_{20}\text{Ca}_{21}$	-35,138	8,36	8,89
$^{41}_{21}\text{Sc}_{20}$	-28,644	16,19	1,09

# ESTABILIDAD

- [6] ¿Cuántos núcleos se conocen?
- [7] ¿Existen varios isótopos estables para un determinado elemento, o uno sólo?

# ¿CUÁNTOS NÚCLEOS HAY?

Protones

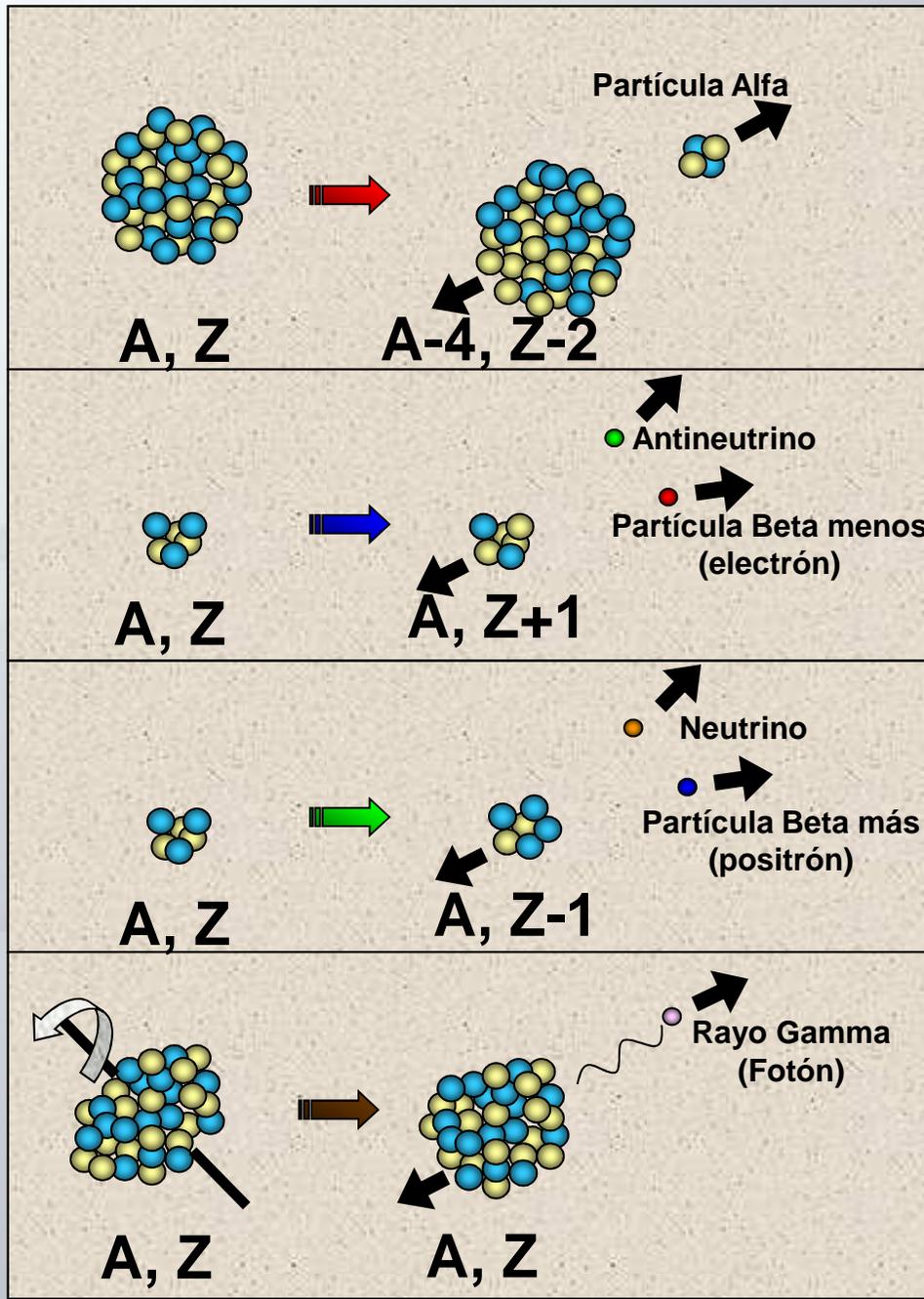


Neutrones

# ESTABILIDAD

## TIPOS DE DESINTEGRACIONES

DESINTEGRACIÓN GAMMA    DESINTEGRACIÓN BETA MÁS    DESINTEGRACIÓN BETA MENOS    DESINTEGRACIÓN ALFA



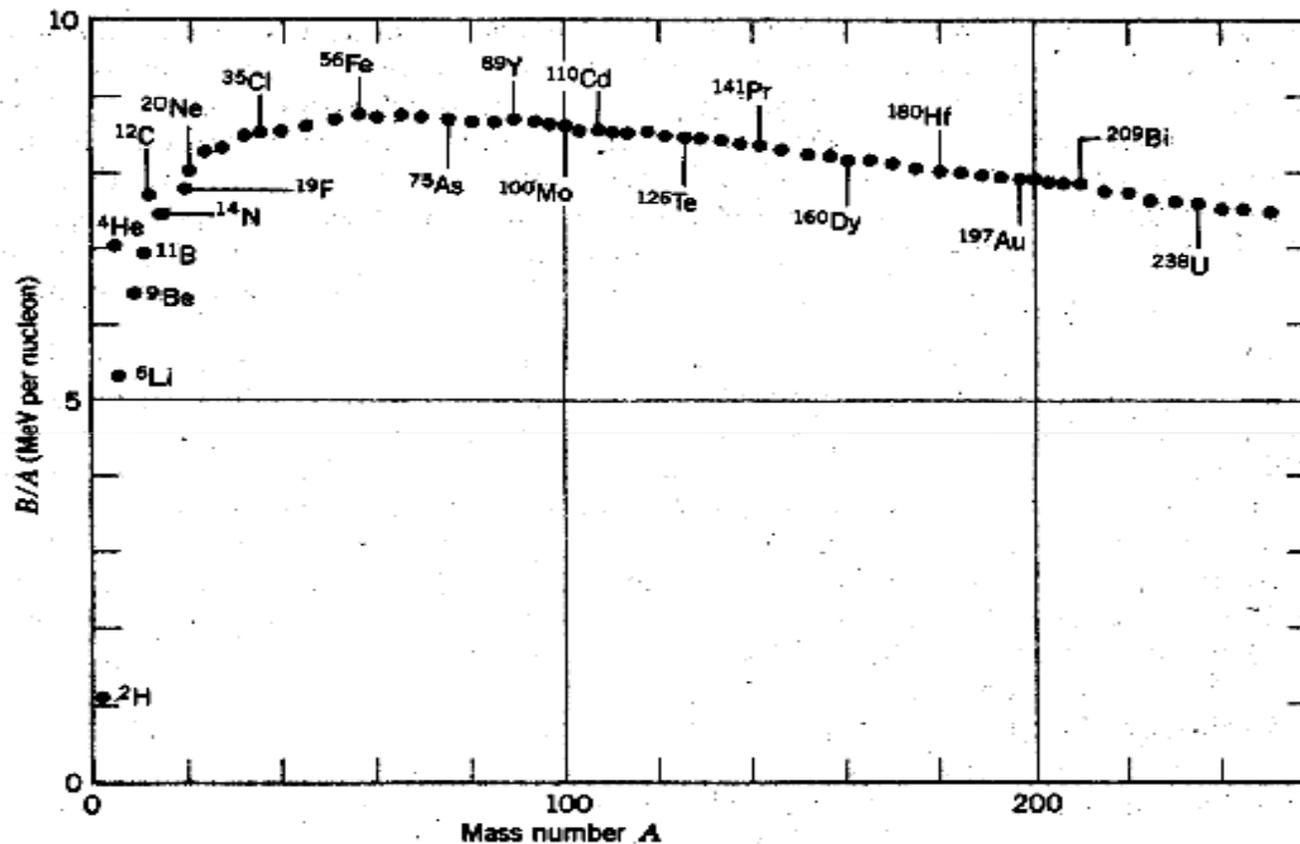
# Energía de ligadura

- **MODELO DE GOTA LÍQUIDA**

# MODELO DE GOTA LÍQUIDA

- Es el modelo más sencillo para núcleos. Es semiempírico.
- Pretende justificar la masa nuclear de un núcleo  $(Z,N)$  siguiendo un modelo simple. En este modelo aparecen una serie de coeficientes cuyos valores se obtienen a partir de los datos experimentales y con una cierta dependencia en el número de protones y neutrones que se basa en la semejanza de un núcleo con una esfera líquida.
- Además se incluyen otros términos adicionales que buscan justificar ciertas propiedades de los núcleos (como el que suelen ser más estables los núcleos con mismo número de protones que de neutrones).

# MODELO DE GOTA LÍQUIDA



*Energía de enlace por nucleón obtenida a partir de las masas de los núcleos*

- $B/A \approx 8 \text{ MeV} / \text{nucleon}$  salvo para núcleos ligeros
- Máximo alrededor de  $A=60$

# MODELO DE GOTA LÍQUIDA

- La Energía de ligadura de un núcleo con  $(Z,A)$  vendrá dada en este modelo por:

$$B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z(Z-1)A^{-1/3} - a_{sym} \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta$$

- $a_v A \rightarrow$  término de volumen  $\rightarrow$  saturación de la fuerza nuclear
- $-a_s A^{2/3} \rightarrow$  término de superficie
- $-a_c Z(Z-1)A^{-1/3} \rightarrow$  repulsión coulombiana entre protones
- $-a_{sym} \frac{(A-2Z)^2}{A} \rightarrow$  simetría entre el número de p y n
- $\delta \rightarrow$  término de apareamiento  $\begin{cases} -a_p A^{-3/4} \rightarrow \text{impar} - \text{impar} \\ +a_p A^{-3/4} \rightarrow \text{par} - \text{par} \end{cases}$

Ajuste de los parámetros con los datos experimentales de  $B/A$

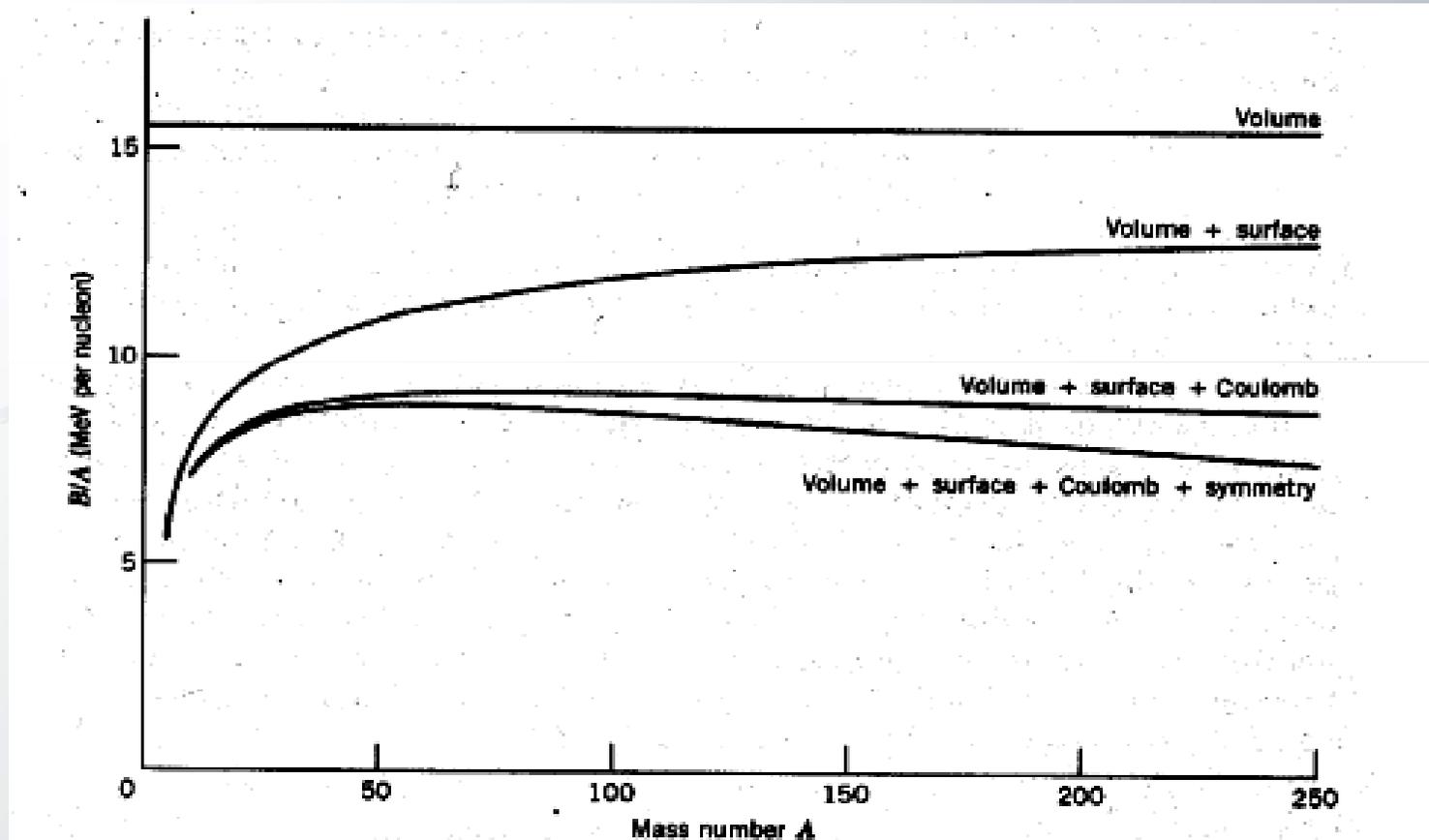
$a_v$	$a_s$	$a_c$	$a_{sym}$	$a_p$
15,5 MeV	16,8 MeV	0,72 MeV	23 MeV	34 MeV

# MODELO DE GOTA LÍQUIDA

- El término de apareamiento intenta justificar el que:

Nº NÚCLEOS ESTABLES	N PAR	N IMPAR
Z PAR	165	55
Z IMPAR	50	4

# MODELO DE GOTA LÍQUIDA



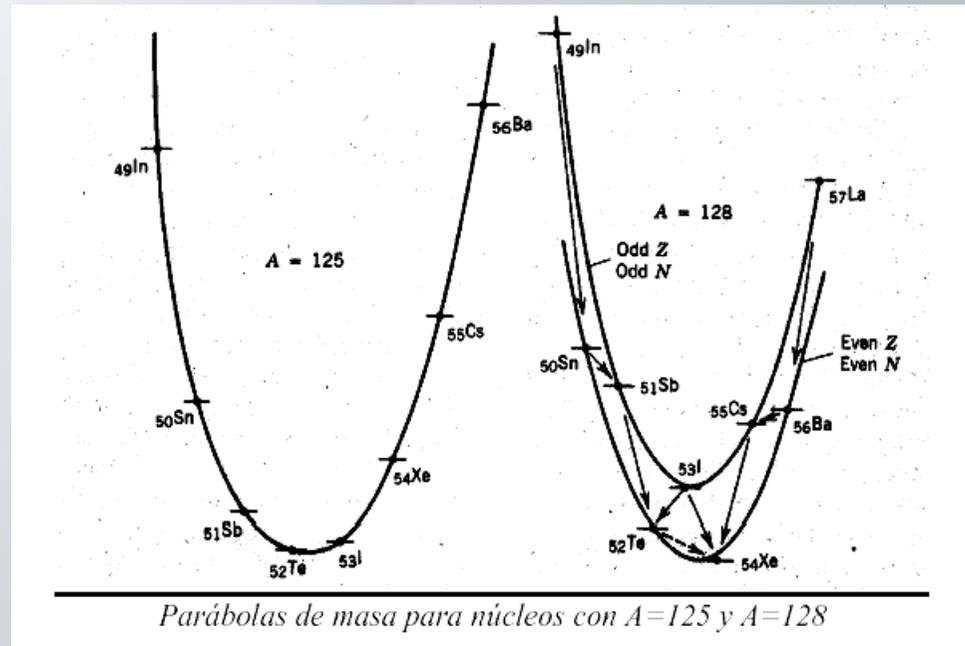
*Contribución de los diferentes términos en la fórmula semiempírica de la masa*

# MODELO DE GOTA LÍQUIDA

## Parábola de masas

$M(Z, A) = Zm(^1H) + Nm_n - B(Z, A) \rightarrow$  parábola M vs. Z a A cte.

$$B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z(Z-1)A^{-1/3} - a_{sym} \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta$$



# MODELO DE GOTA LÍQUIDA

$$Z_{\min} = \frac{\left[ m_n - m(^1H) \right] + a_c A^{-1/3} + 4a_{\text{sym}}}{2a_c A^{-1/3} + 8a_{\text{sym}} A^{-1}}$$

Despreciando los dos primeros términos:

$$Z_{\min} \approx \frac{A}{2 \left( 1 + \frac{1}{4} A^{2/3} \frac{a_c}{a_{\text{sym}}} \right)} \rightarrow \begin{cases} A \downarrow \Rightarrow Z_{\min} \approx A/2 \\ A \uparrow \Rightarrow Z_{\min} < A/2 \end{cases}$$



# **GRACIAS POR LA ASISTENCIA**

**No olvidéis visitar la web:  
<http://nuclear.fis.ucm.es/EM2011>**