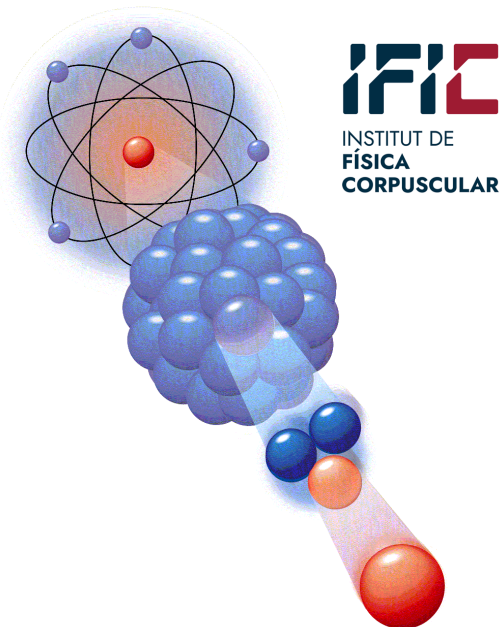


El modelo de la gota líquida

Alejandro Algora
IFIC (CSIC-Univ. Valencia)



IFIC
INSTITUT DE
FÍSICA
CORPUSCULAR

 EXCELENCIA
SEVERO
OCHOA

 **CSIC**
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

 VNIVERSITAT
D VALÈNCIA

Introducción histórica: hitos tempranos de la física (nuclear)

- 1896 Descubrimiento de la radioactividad (Becquerel*)
1898 Separación del Radio (M. Curie*, P. Curie*)
- 1905 Teoría especial de la relatividad (Einstein*)
1909 Se descubre que las partículas alfa son núcleos de He (Rutherford*)
- 1911 Modelo nuclear del átomo (Rutherford*)
1913 Modelo planetario del átomo (Bohr*)
1919 Transmutación artificial utilizando reacciones nucleares (Rutherford*)
- 1919 Desarrollo de un espectrómetro de masas (Aston*)
1926 Desarrollo de la mecánica cuántica (Schrödinger*)
1928 Teoría de la radioactividad alpha (Gamow, Gurney, Condon)
- 1930 Modelo de la gota líquida (Gamow)
1931 Primeros aceleradores (Van De Graaff, Sloan*, Lawrence*)
- 1932 Descubrimiento del neutron (Chadwick*)
- 1932 Modelo proton neutron del núcleo (Heisenberg*)
1932 Primera reacción nuclear utilizando un acelerador (Cockcroft*, Walton*)
....
- 1938 Descubrimiento de la fisión (Hahn* and Strassmann)
1939 Modelo de la gota líquida de la fisión (Bohr*, Wheeler)

Isótopos I: las masas de los elementos

Importante: las masas de los elementos no son números enteros

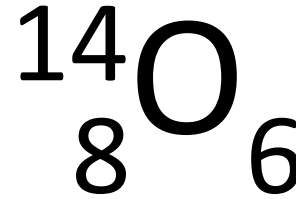
Periodic Table of the Elements																		18		
1																	2			
1A																	VIIIA			
11A																	8A			
1	2													2						
H	He																	He		
Hydrogen	Helium																	Helium		
1.0079	4.00260																	4.00260		
3	4											5	6	7	8	9	10			
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne			
Lithium	Beryllium											Boron	Carbon	Nitrogen	Oxygen	Fluorine	Neon			
6.941	9.01218											10.811	12.011	14.00674	15.9994	18.998403	20.1797			
11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VII	VIII	VIII	VIII	IB	IIB	Al	Si	P	S	Cl	Ar			
Sodium	Magnesium	3B	4B	5B	6B	7B	8	8	8	1B	2B	Aluminum	Silicon	Phosphorus	Sulfur	Chlorine	Argon			
22.989768	24.305											26.981539	28.0855	30.973762	32.066	35.4527	39.948			
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36			
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr			
Potassium	Calcium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chromium	Manganese	Iron	Cobalt	Nickel	Copper	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Selenium	Bromine	Krypton			
39.0983	40.078	44.95591	47.88	50.9415	51.9961	54.938	55.847	58.9332	58.6934	63.546	65.39	69.723	72.64	74.92159	78.96	79.904	83.80			
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54			
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe			
Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirconium	Niobium	Molybdenum	Technetium	Ruthenium	Rhodium	Palladium	Silver	Cadmium	Indium	Tin	Antimony	Tellurium	Iodine	Xenon			
85.4678	87.62	88.90585	91.224	92.90638	95.94	98.9072	101.07	102.9055	106.42	107.8682	112.411	114.818	118.71	121.760	127.6	126.90447	131.29			
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86			
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
Cesium	Barium		Hafnium	Tantalum	Tungsten	Rhenium	Osmium	Iridium	Platinum	Gold	Mercury	Thallium	Lead	Bismuth	Polonium	Astatine	Radon			
132.90543	137.327		178.49	180.9479	183.85	186.207	190.23	192.22	195.08	196.9665	200.59	204.3833	207.2	208.98037	[208.9824]	209.9871	222.0176			
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118			
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo			
Francium	Radium		Rutherfordium	Dubnium	Seaborgium	Bohrium	Hassium	Mendelevium	Darmstadtium	Roentgenium	Copernicium	Ununtrium	Ununquadium	Ununpentium	Ununhexium	Ununseptium	Ununoctium			
223.0197	226.0254		[261]	[262]	[266]	[264]	[269]	[268]	[269]	[272]	[277]	unknown	[289]	unknown	unknown	unknown	unknown			
Lanthanide Series		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71				
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
		Lanthanum	Cerium	Praseodymium	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium				
		138.9055	140.115	140.90765	144.24	144.9127	150.36	151.9655	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.04	174.967				
Actinide Series		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103				
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				
		Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lawrencium				
		227.0278	232.0381	231.03588	238.0289	237.0482	244.0642	243.0614	247.0703	247.0703	251.0796	[254]	257.0951	258.1	259.1009	[262]				
		Alkali Metal	Alkaline Earth	Transition Metal	Basic Metal	Semimetals	Nonmetals	Halogens	Noble Gas	Lanthanides	Actinides									

Isótopos II: la explicación, gracias a la FN

Número atómico A: 14
(relacionado con la masa)

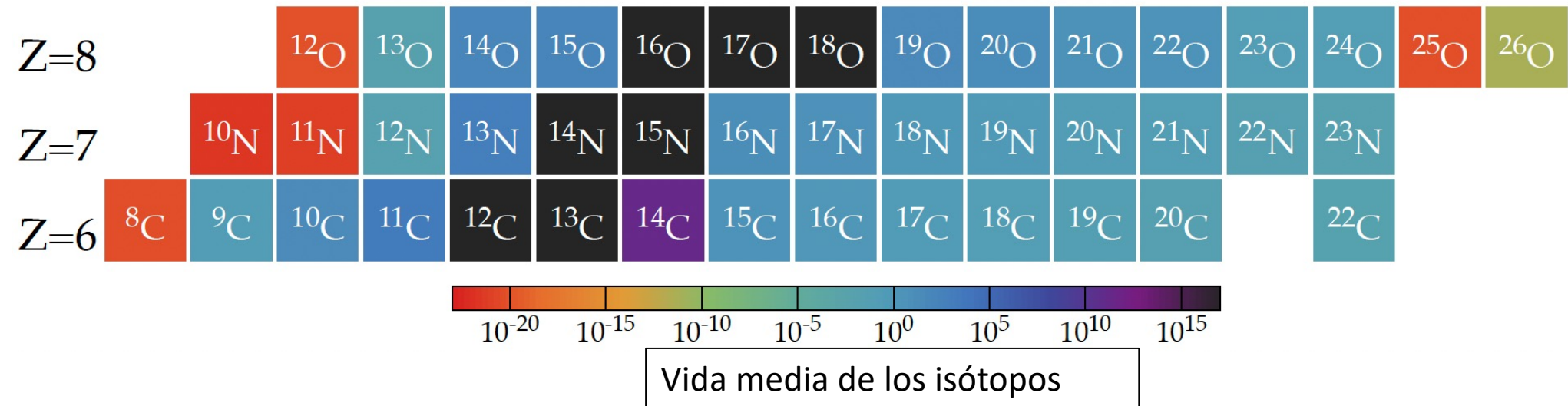
$$A=Z+N$$

Elemento: oxígeno, Z=8



Número de neutrones: N

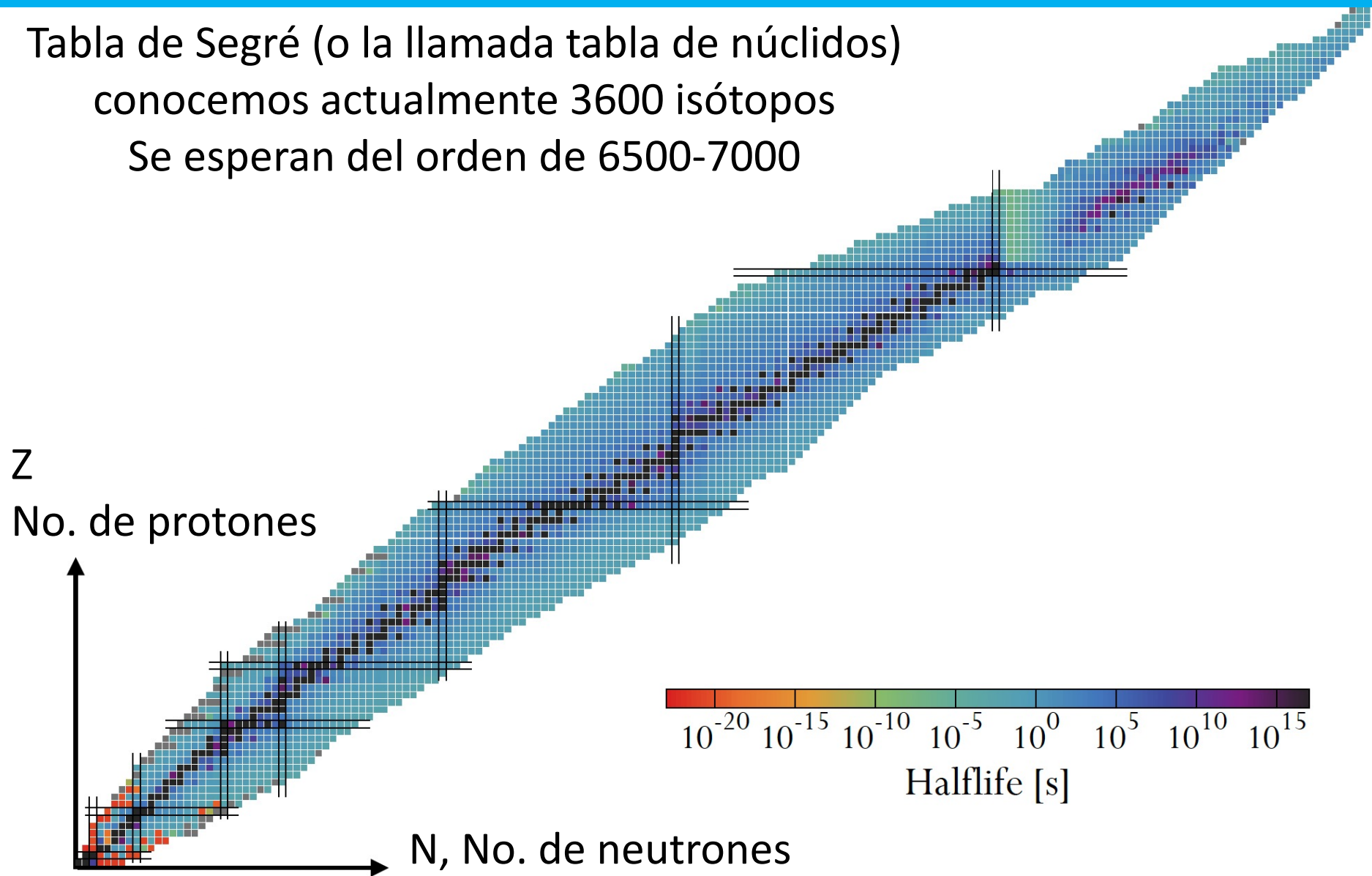
$$N = A - Z, \\ 14 - 8 = 6$$



Los isótopos son átomos del mismo elemento químico que poseen el mismo número de protones (igual número atómico, Z), pero distinto número de neutrones en su núcleo

Tabla de núclidos

Tabla de Segré (o la llamada tabla de núclidos)
conocemos actualmente 3600 isótopos
Se esperan del orden de 6500-7000



Algunas palabras sobre Gamow



George Gamow

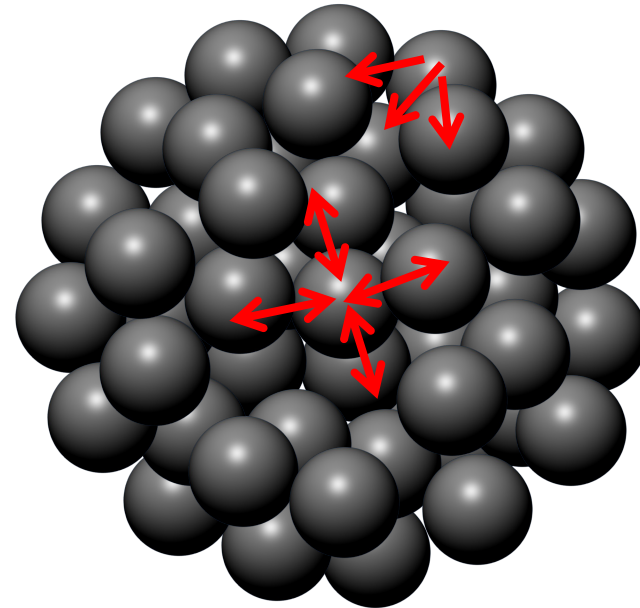
(1904-1968)

físico teórico soviético-norteamericano,
erudito

Interpretó por primera vez la
desintegración alpha, fue uno de los
primeros defensores de la teoría del big
bang.

Padre del modelo que discutiremos hoy

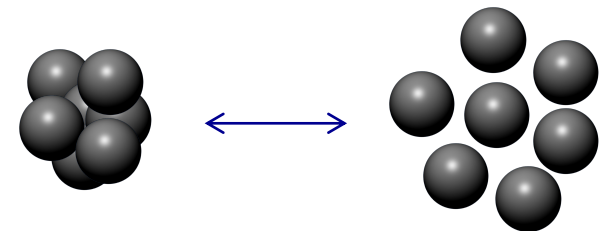
El modelo nuclear más simple: la gota líquida



$$E = mc^2$$

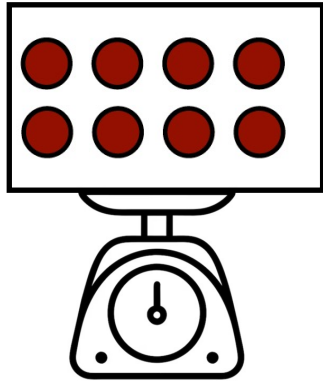
$$Mc^2 \leq Zm_p c^2 + Nm_n c^2$$

$$B = (Zm_p c^2 + Nm_n c^2) - Mc^2$$

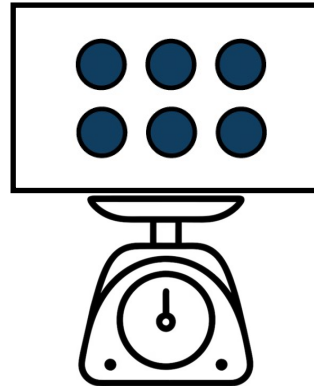


Cálculo de la energía de enlace: ^{14}O

$Z=8$



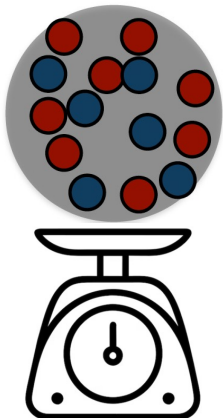
$N=14-8=6$



$^{14}_8\text{O}_6$ Oxígeno 14

$$Mc^2 = 8m_p c^2 + 6m_n c^2 = 13144 \text{ MeV}$$

^{14}O



$$M_{14}c^2 = 13046 \text{ MeV}$$

$$BE = 8m_p c^2 + 6m_n c^2 - M_{14}c^2 = 98 \text{ MeV}$$

Energía de enlace en 2D

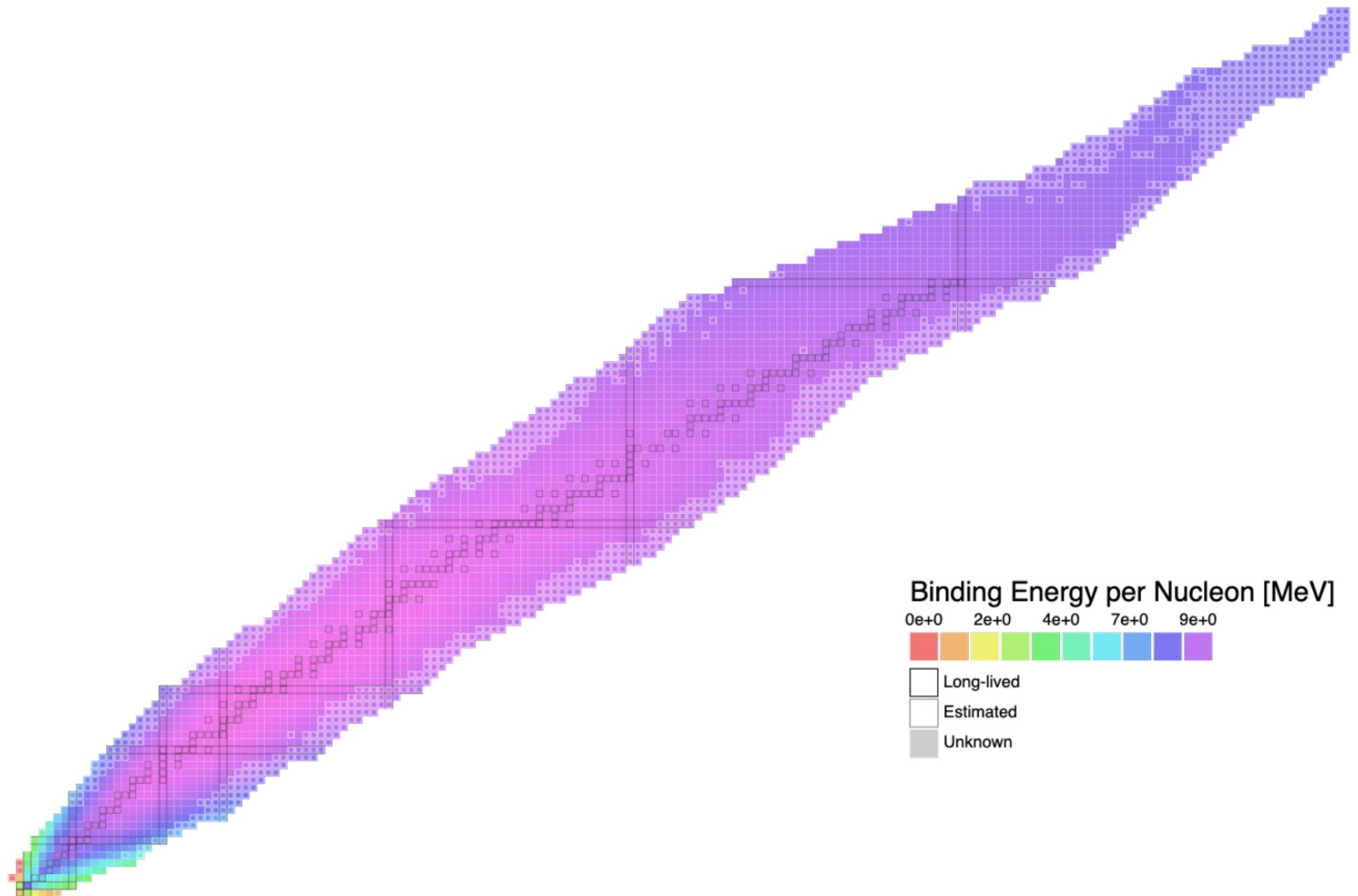
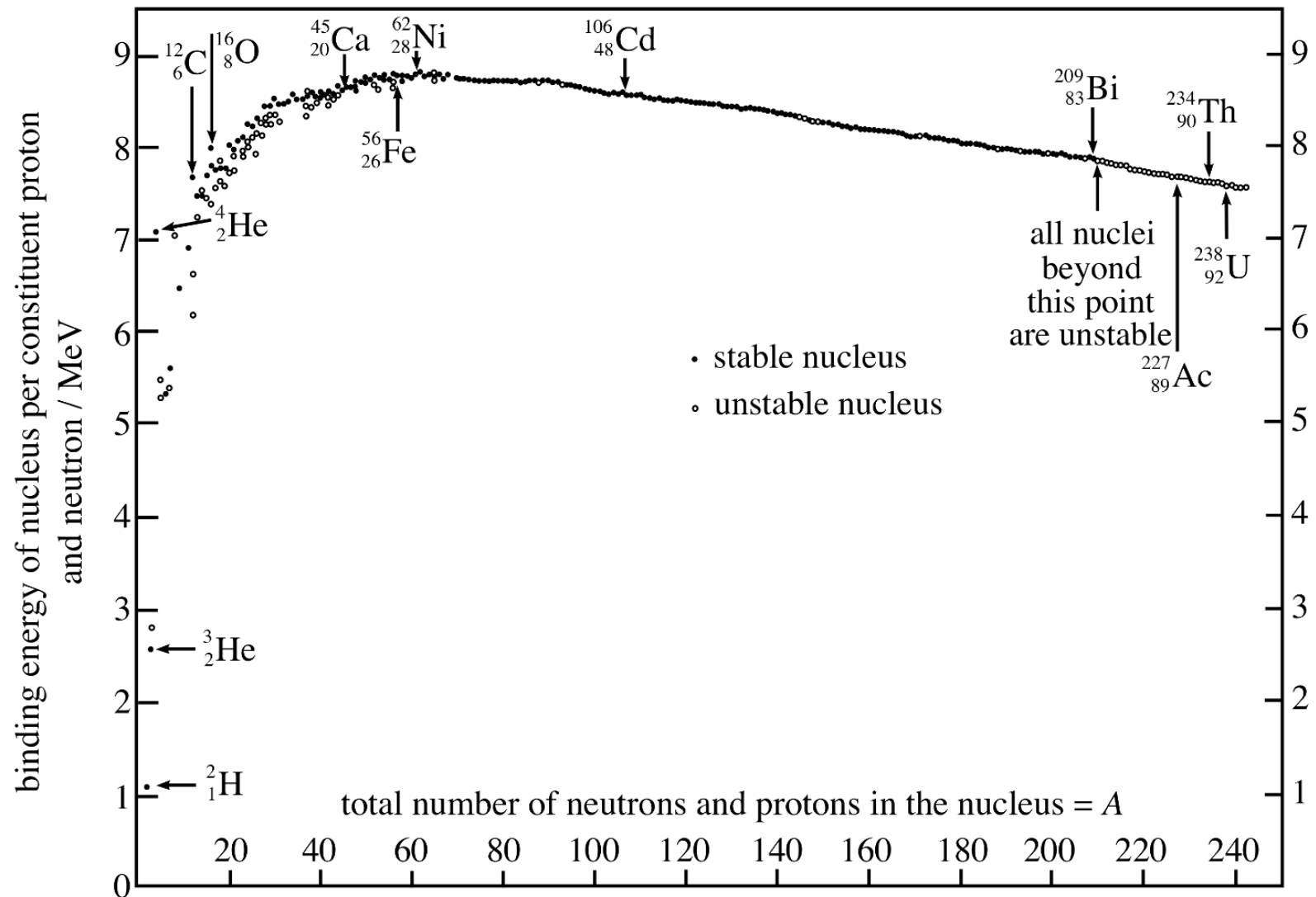


Gráfico de la energía de enlace: BE/A



Entender el núcleo: la formula de Bethe-Weizsäcker

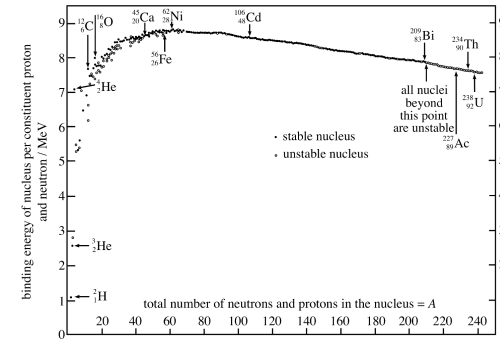
Hans Bethe

(1906-2005) Nobel 1967

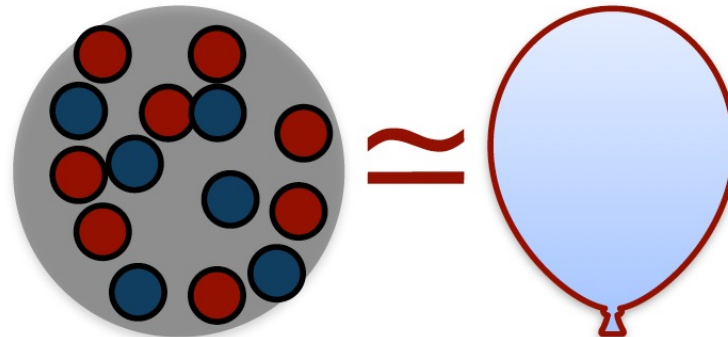


C. F. von Weizsäcker

(1912-2007)



$$BE = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_S \frac{(N - Z)^2}{A} + a_P \delta_{N,Z}$$



Entender el núcleo: la formula de Bethe-Weizsäcker

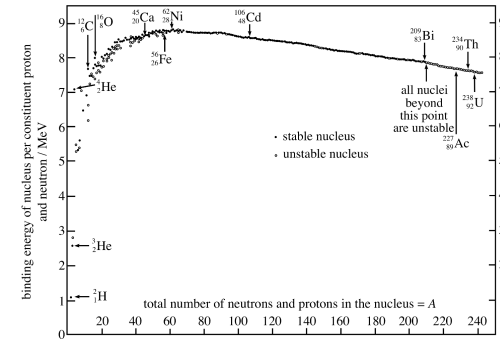
Hans Bethe

(1906-2005) Nobel 1967

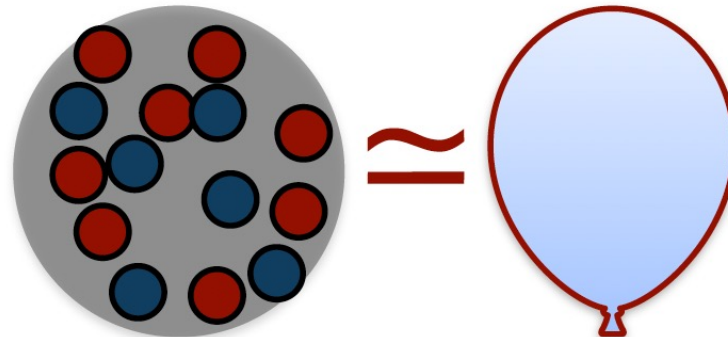


C. F. von Weizsäcker

(1912-2007)



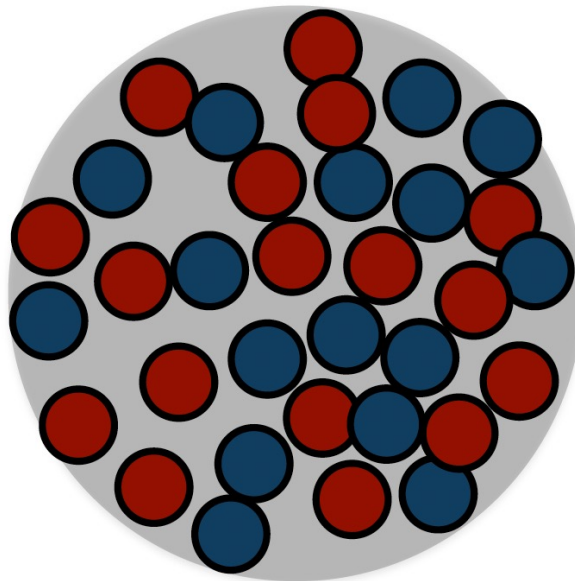
$$\frac{BE}{A} = a_V - \frac{a_S}{A^{1/3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A^2} + a_P \frac{\delta_{N,Z}}{A}$$



La gota líquida: término de volumen

$$BE = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A} + a_P \delta_{N,Z}$$

$$\frac{BE}{A} = a_V - \frac{a_S}{A^{1/3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A^2} + a_P \frac{\delta_{N,Z}}{A}$$



Término de volumen

La gota líquida: término de volumen

$$BE = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A} + a_P \delta_{N,Z}$$

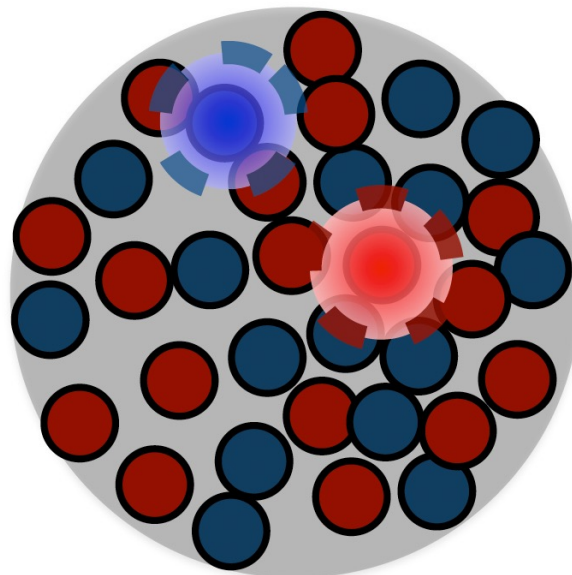
$$\frac{BE}{A} = a_V - \frac{a_S}{A^{1/3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A^2} + a_P \frac{\delta_{N,Z}}{A}$$

Recordemos como se calcula el volumen de una esfera

$$V = 4/3\pi R^3$$

De aqui se deduce que el radio de un nucleo es aproximamente

$$R = r_0 A^{1/3}$$

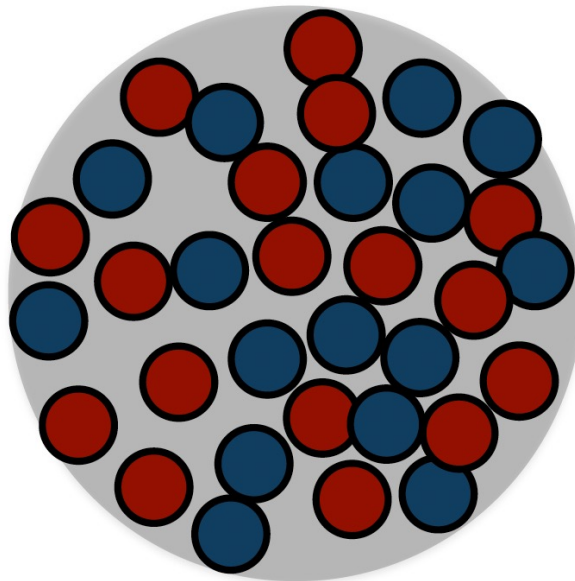


Término de volumen

La gota líquida: término de superficie

$$BE = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A} + a_P \delta_{N,Z}$$

$$\frac{BE}{A} = a_V - \frac{a_S}{A^{1/3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A^2} + a_P \frac{\delta_{N,Z}}{A}$$

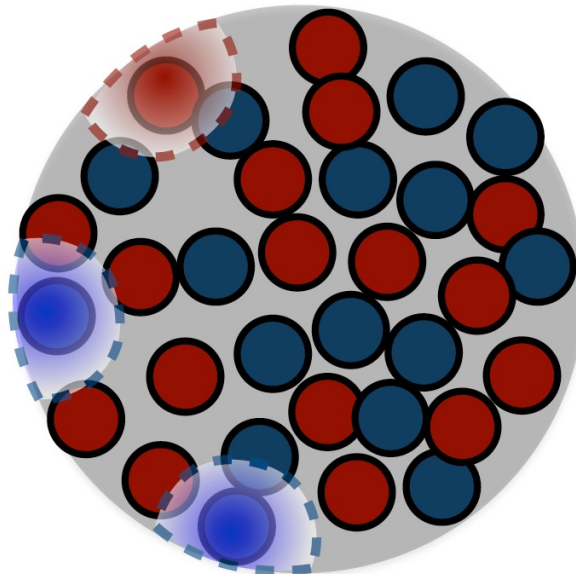


Término de superficie

La gota líquida: termino de superficie

$$BE = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A} + a_P \delta_{N,Z}$$

$$\frac{BE}{A} = a_V - \frac{a_S}{A^{1/3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A^2} + a_P \frac{\delta_{N,Z}}{A}$$

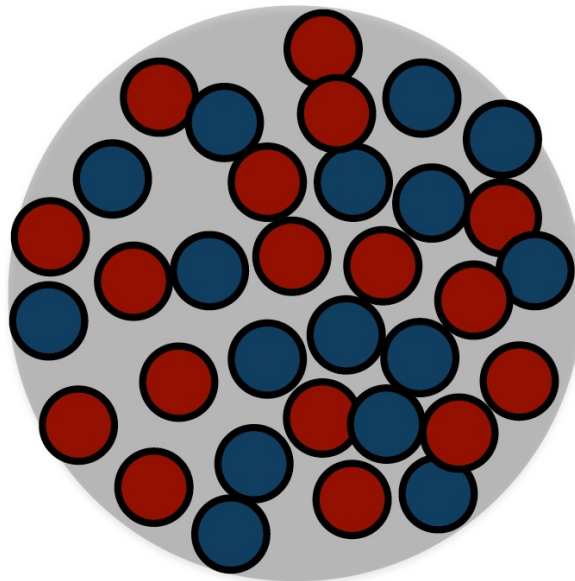
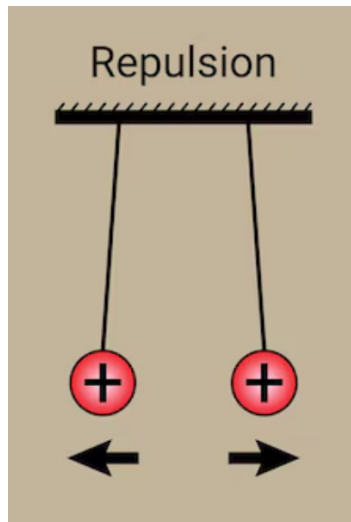


Término de superficie

La gota líquida: término de Coulomb

$$BE = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A} + a_P \delta_{N,Z}$$

$$\frac{BE}{A} = a_V - \frac{a_S}{A^{1/3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A^2} + a_P \frac{\delta_{N,Z}}{A}$$

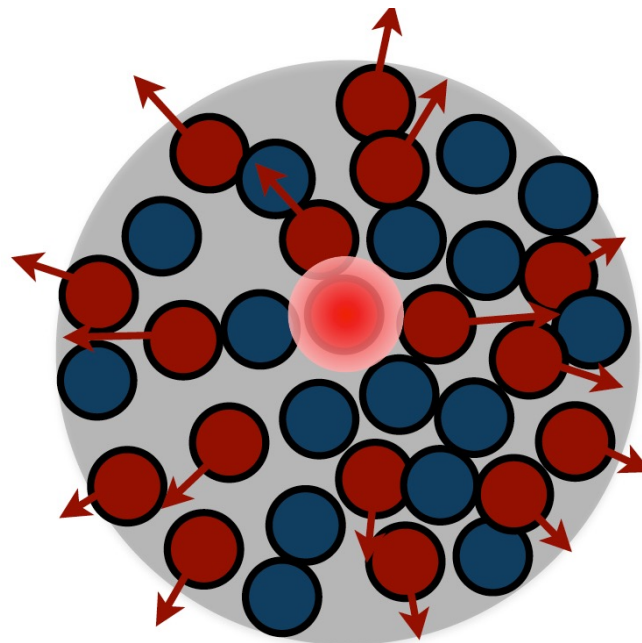
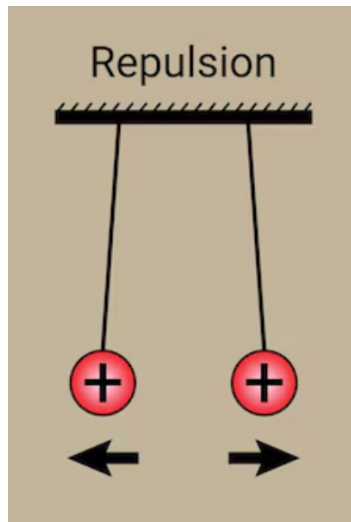


Término de Coulomb

La gota líquida: término de Coulomb

$$BE = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_S \frac{(N - Z)^2}{A} + a_P \delta_{N,Z}$$

$$\frac{BE}{A} = a_V - \frac{a_S}{A^{1/3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A^2} + a_P \frac{\delta_{N,Z}}{A}$$

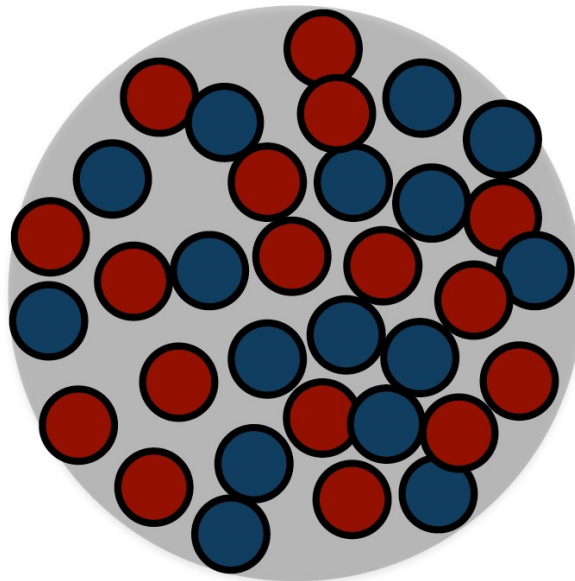


Término de Coulomb

La gota líquida: término de asimetría

$$BE = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A} + a_P \delta_{N,Z}$$

$$\frac{BE}{A} = a_V - \frac{a_S}{A^{1/3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A^2} + a_P \frac{\delta_{N,Z}}{A}$$

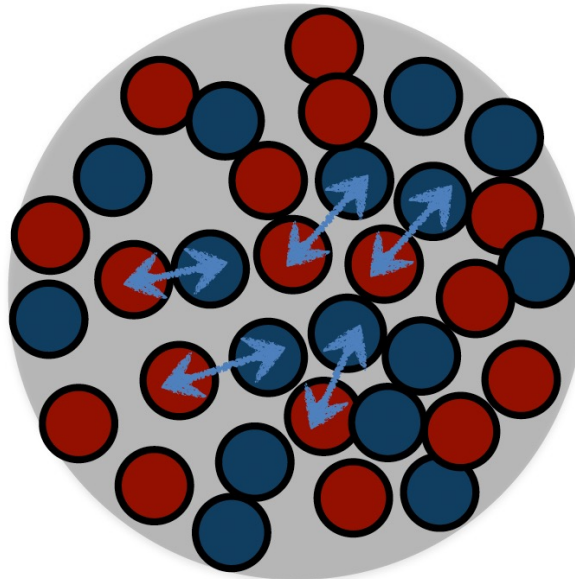


Término de asimetría

La gota líquida: termino de asimetría

$$BE = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A} + a_P \delta_{N,Z}$$

$$\frac{BE}{A} = a_V - \frac{a_S}{A^{1/3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A^2} + a_P \frac{\delta_{N,Z}}{A}$$

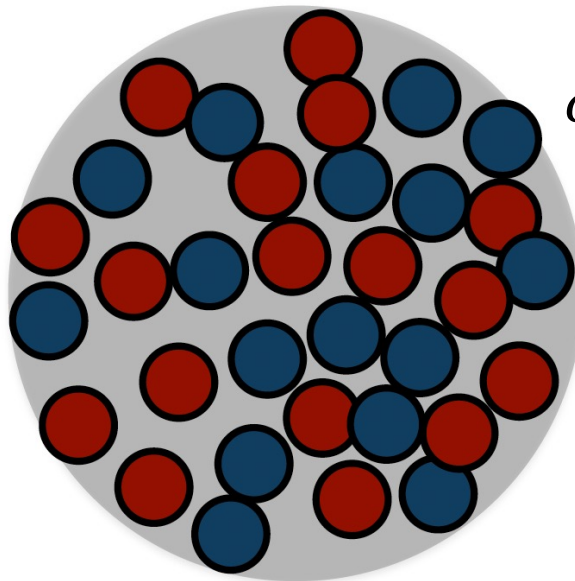


Termino de asimetría

La gota líquida: término de apareamiento

$$BE = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A} + a_P \delta_{N,Z}$$

$$\frac{BE}{A} = a_V - \frac{a_S}{A^{1/3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A^2} + a_P \frac{\delta_{N,Z}}{A}$$



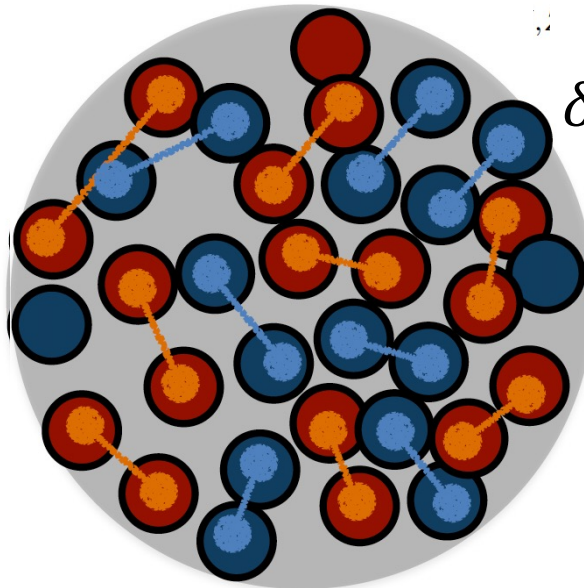
$$\delta_{N,Z} = \begin{cases} A^{-1/2}, N \text{ y } Z \text{ par} \\ -A^{-1/2}, N \text{ y } Z \text{ impar} \\ 0, \text{ otros casos} \end{cases}$$

Término de apareamiento

La gota líquida: término de apareamiento

$$BE = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A} + a_P \delta_{N,Z}$$

$$\frac{BE}{A} = a_V - \frac{a_S}{A^{1/3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A^2} + a_P \frac{\delta_{N,Z}}{A}$$



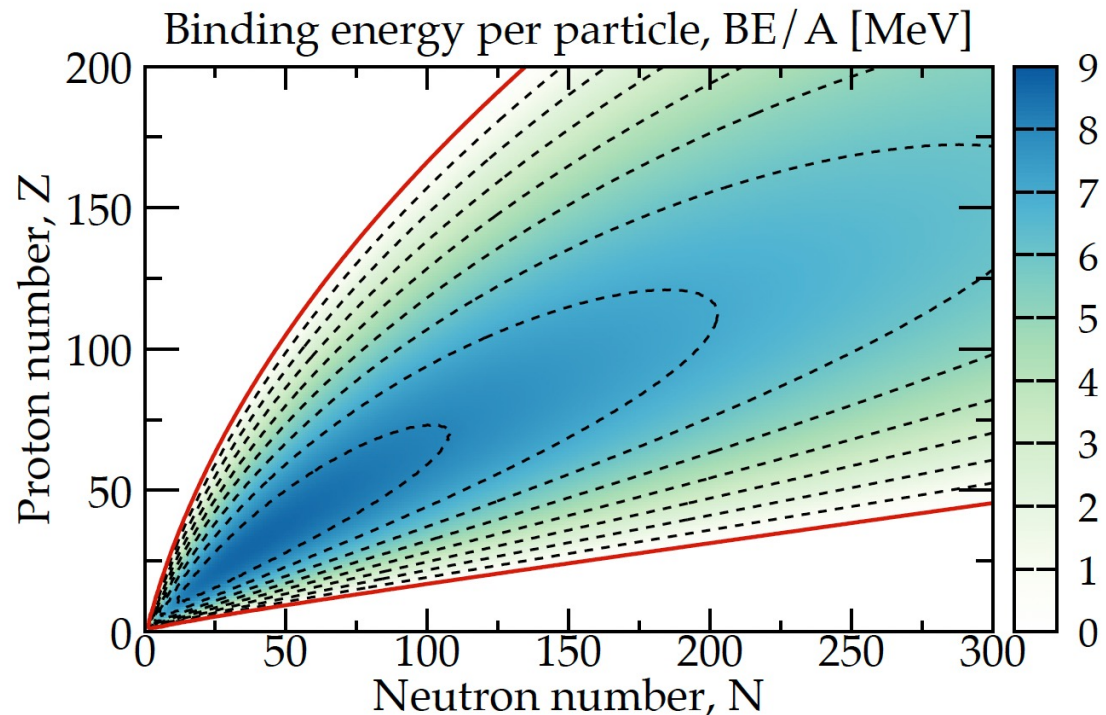
$$\delta_{N,Z} = \begin{cases} A^{-1/2}, N \text{ y } Z \text{ par} \\ -A^{-1/2}, N \text{ y } Z \text{ impar} \\ 0, \text{ otros casos} \end{cases}$$

Término de apareamiento

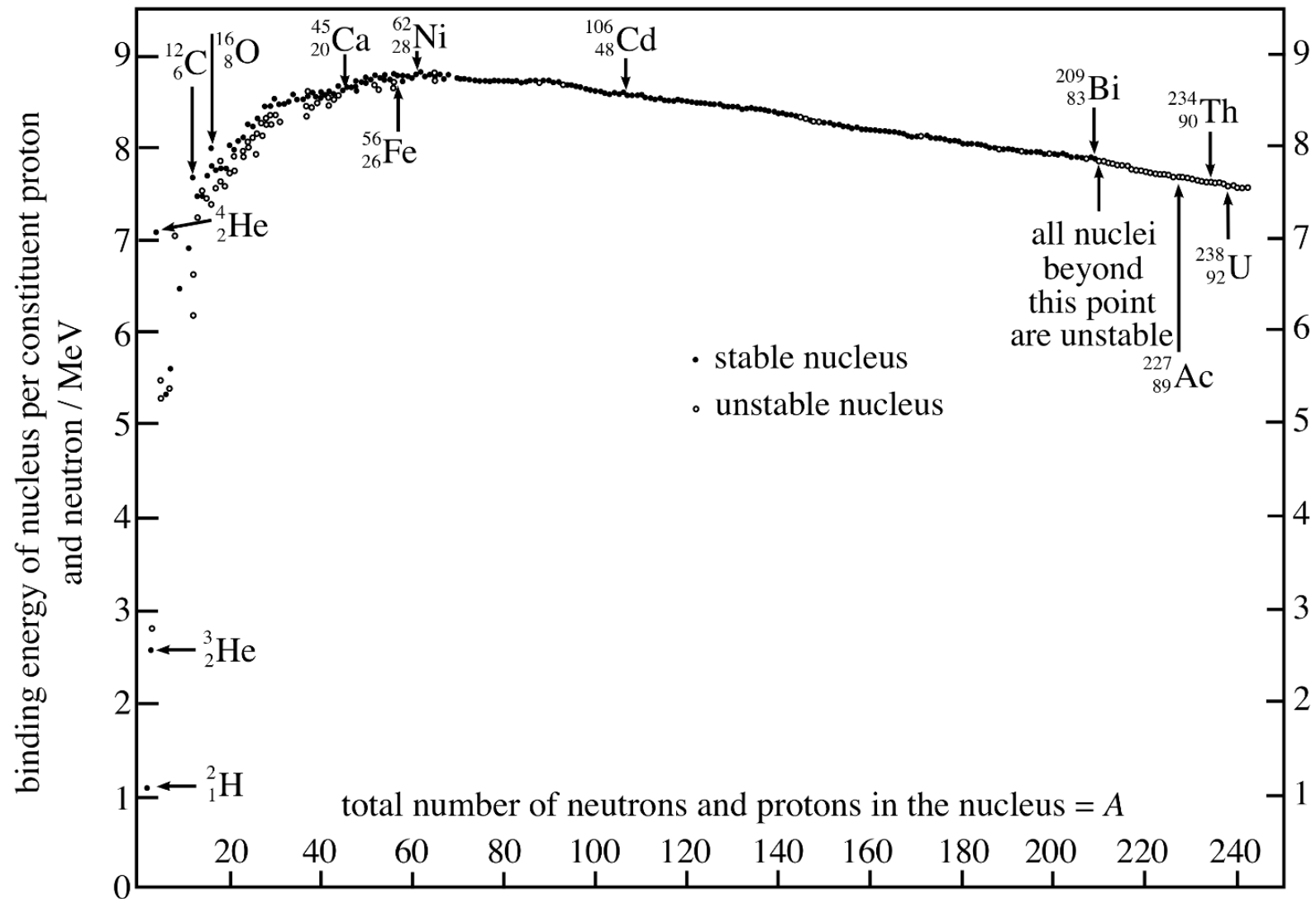
La gota líquida: algunos parámetros

$$\frac{BE}{A} = a_V - \frac{a_S}{A^{1/3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A^2} + a_P \frac{\delta_{N,Z}}{A}$$

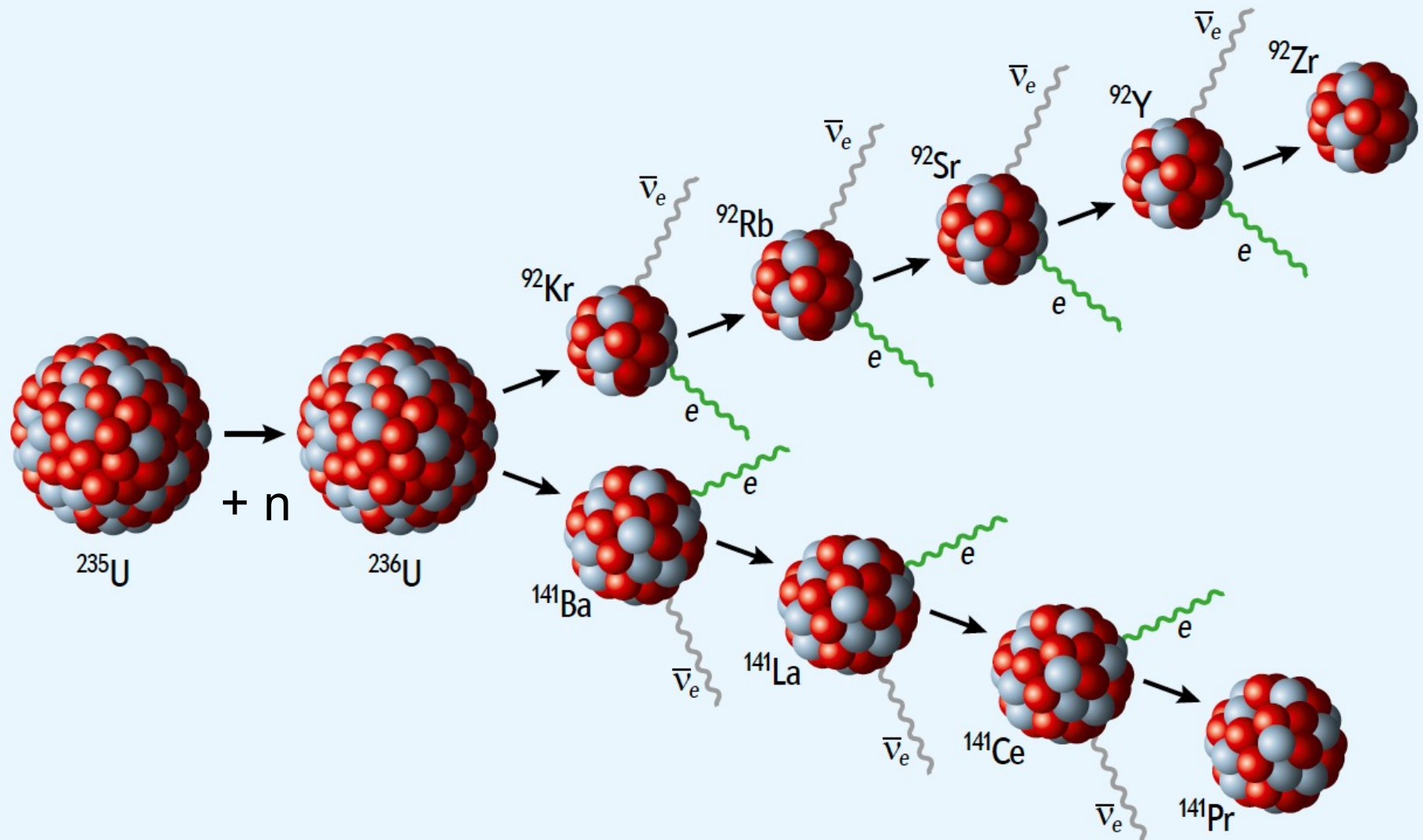
	[MeV]
a_V	15,8
a_S	18,3
a_C	0,714
a_A	23,2
a_P	12,0



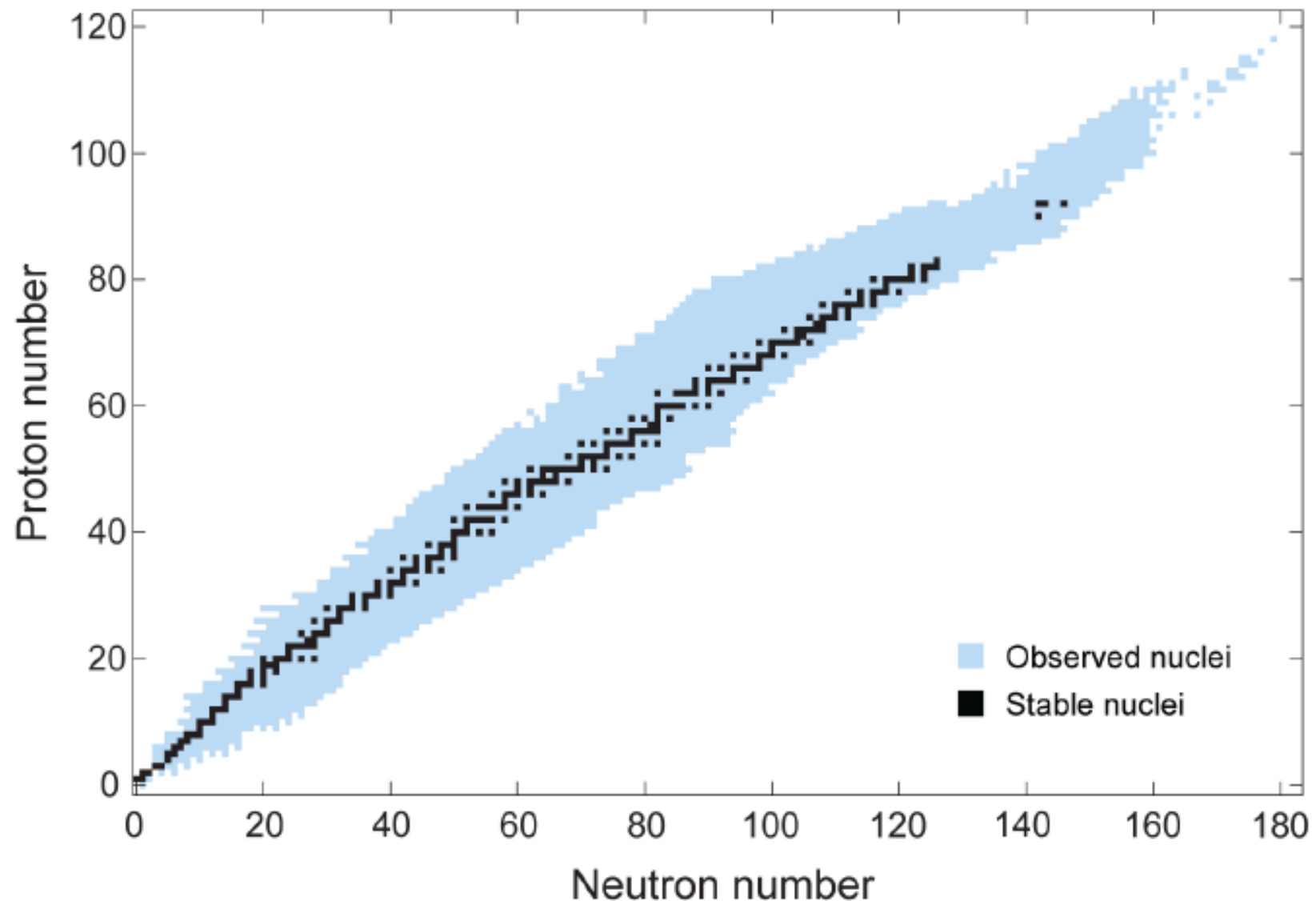
Que nos permite entender



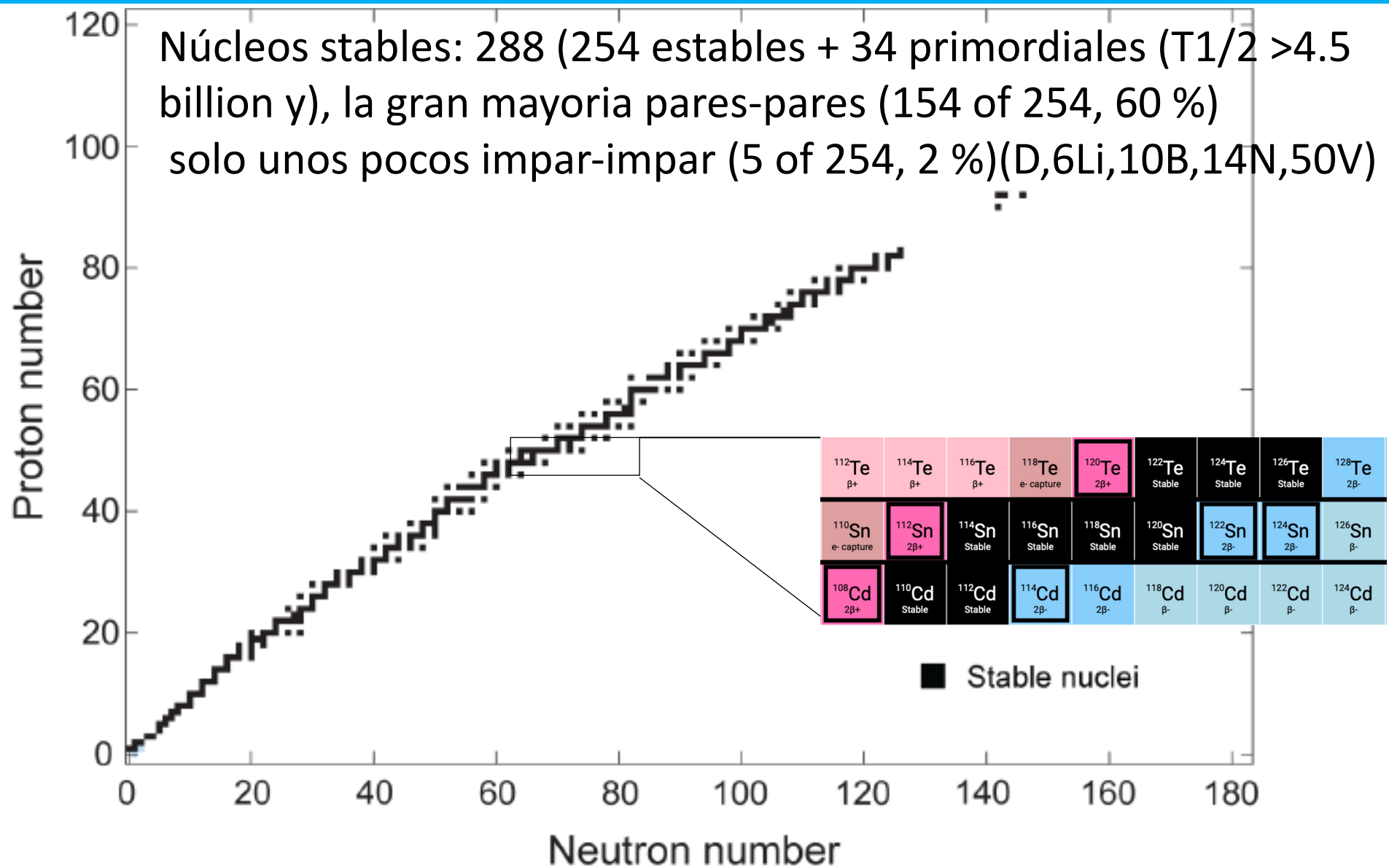
Que nos permite entender: energía liberada en la fisión



Algo más que nos permite entender:
por qué algunos núcleos son mas estables



Algo más que nos permite entender: por qué algunos núcleos son mas estables



Estrellas de neutrones

También permite entender un poco lo que imaginamos como debe ser una estrella de neutrones.

Objetos de unos 10 km de diámetro que quedan después de la explosión de una supernova.

Una estrella de neutrones tiene masas del orden de 1.4 masas solares (material extremadamente denso)



Nebulosa del Cangrejo. Se supone que en su centro hay una estrella de neutrones de 1.4-2.9 masas solares. Foto del telescopio Hubble

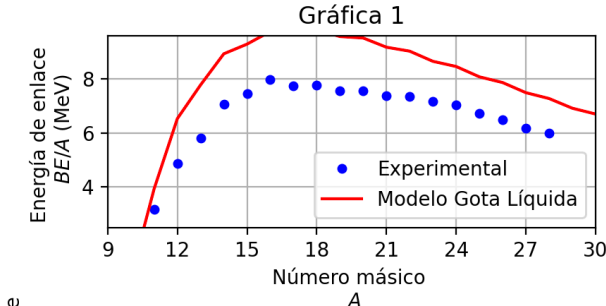
Tarea de hoy

Masterclass Nuclear

Actividad 1Actividad 2Logs

ElementoO - Oxígeno (Z=8)ES

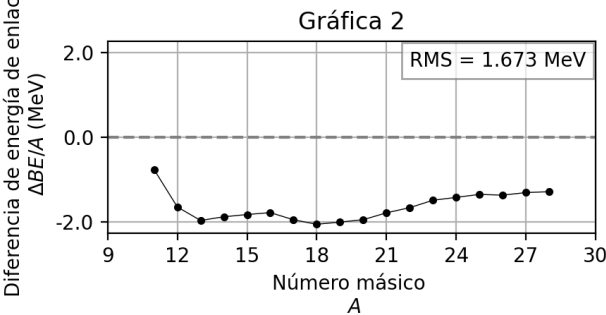
Gráfica 1



Experimental

Modelo Gota Líquida

Gráfica 2



RMS = 1.673 MeV

Parámetros del Modelo de la Gota Líquida (MeV)

$a_v = 16,14$

$a_s = 14,16$

$a_c = 0,67$

$a_a = 20,86$

$a_p = 10,80$

☒

☒

☒

☒

☒

Modelo de la Gota Líquida

Introducción

En esta actividad, determinaréis los valores de los **Parámetros del Modelo de Gota Líquida (MGL)** basándoos en los datos experimentales de isótopos conocidos (datos del [Atomic Mass Data Center](#)).

Podéis volver a ver el [vídeo](#) del Dr. Arnau Rios o pulsar el botón ⓘ para más información.

Inicialmente, todo el mundo trabajará con el Oxígeno. Después se os asignará un elemento aleatorio según el grupo.

Tendréis unos 10 minutos para completar cada apartado.

¡Pasad a la Actividad 1a para empezar!

Actividad 1a - Ajuste para el Oxígeno (Z = 8)

Actividad 1b - Isótopos simétricos

Actividad 1c - Parámetro de Volumen

Actividad 1d - Parámetro de Asimetría

Actividad 1e - Parámetro de Apareamiento

Reinicia

Guarda

Carga

Envía

ⓘ

Tarea de hoy

Masterclass Nuclear

Actividad 1Actividad 2Logs

ElementoO - Oxígeno (Z=8)ES

Gráfica 1

$A_{\min} = 140$ Fijar

$A_{\max} = 140$ Fijar

Parámetros del Modelo de la Gota Líquida (MeV)

$a_v = 16,14$

$a_s = 14,16$

$a_c = 0,67$

$a_a = 20,86$

$a_p = 10,80$

Introducción

En esta actividad, utilizaréis los **Parámetros del Modelo de Gota Líquida (MGL)** obtenidos en la **Actividad 1** para predecir las propiedades de los isótopos aún no descubiertos.

Para que un núcleo pueda existir y no decaiga espontáneamente en las partículas que lo forman, debe tener una energía de enlace positiva ($BE/A > 0$).

El número másico (A) del isótopo más pesado aparece en la **Gráfica 1** sobre la línea verde.

(P) ¿Cuál es el isótopo más pesado con energía positiva?
La predicción para el isótopo más pesado de Oxígeno (Z = 8) es:
 $A = 72$.

EXTRA: ¿Te animas a encontrar el isótopo más pesado de otro elemento?

Actividad 2a - Incertidumbre del Parámetro de Asimetría

Actividad 2b - Incertidumbre del Parámetro de Volumen

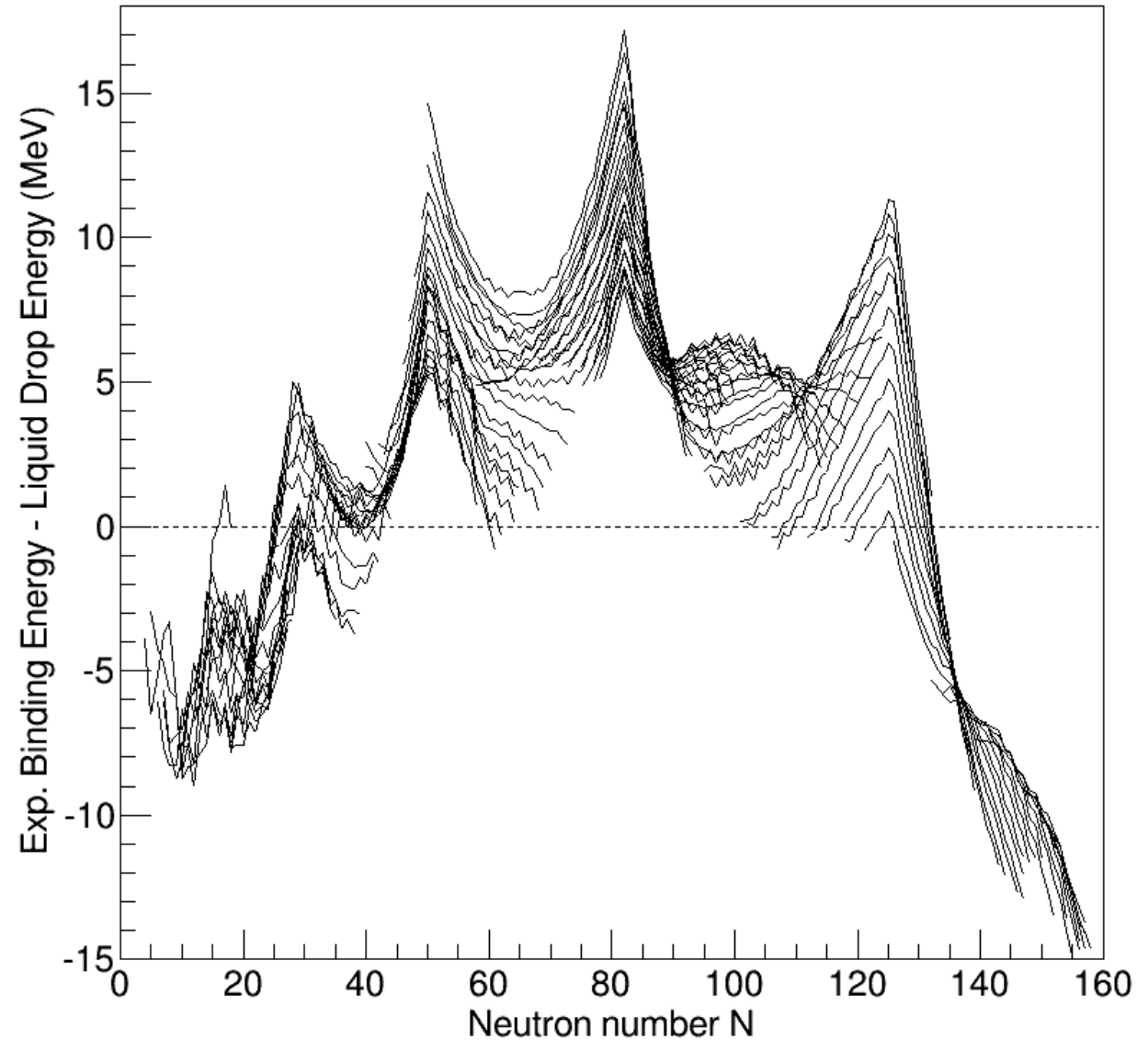
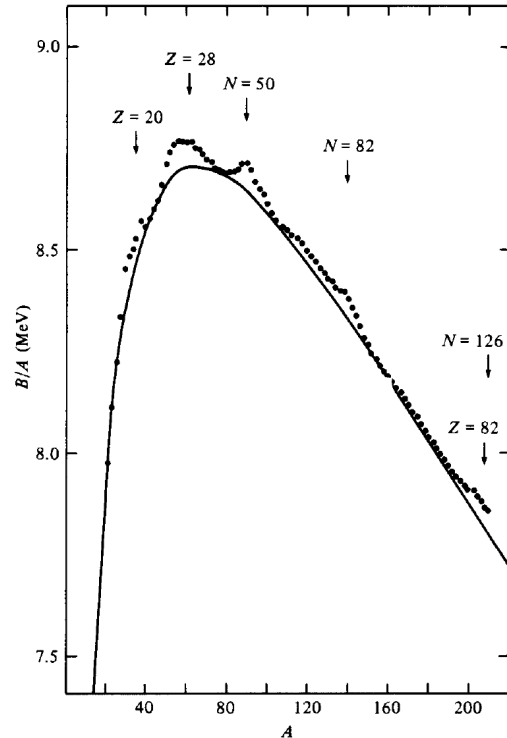
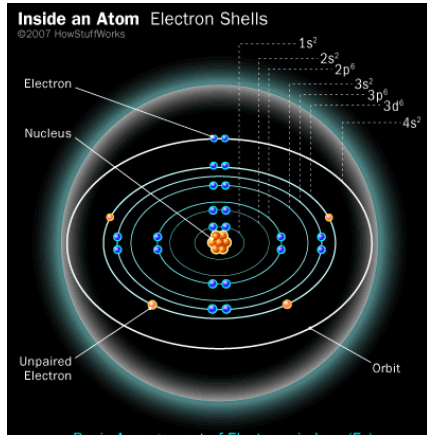
ReiniciaGuardaCargaEnvía

TAREAS en ORDENADOR

¿Qué pensáis qué ocurre?

Los modelos no son perfectos, y aunque este model nos permite entender algunos aspectos del núcleo, no existe un modelo único que pueda explicar toda la complejidad de este sistema cuántico.

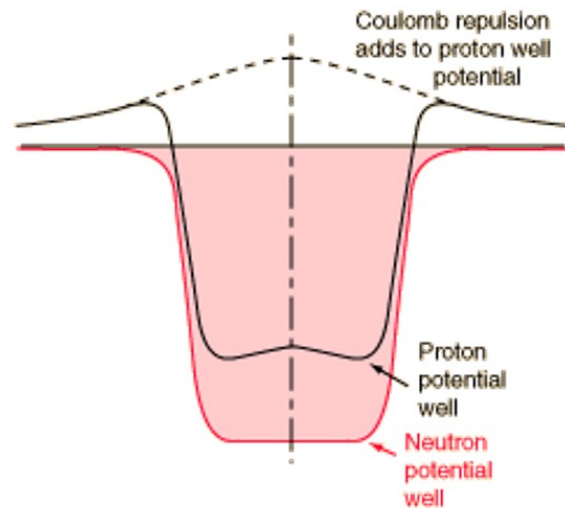
Nos permitió descubrir: que hay capas



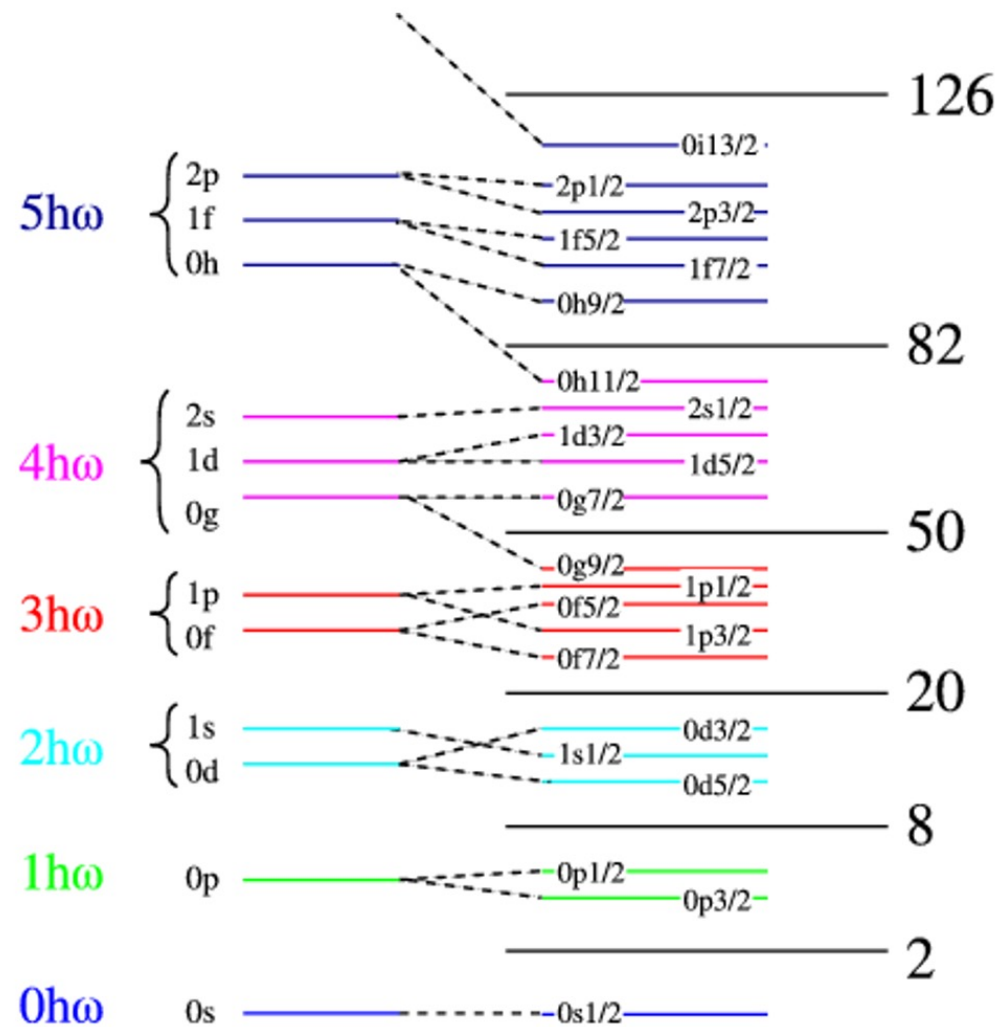
MUCHAS GRACIAS

Se agradece la ayuda del grupo de Física Hadrónica, Nuclear y Atómica del Institut de Ciències del Cosmos, Univ. Barcelona, en particular de Arnau Rios y Alejandro Romero

Nos permitió descubrir: que hay capas

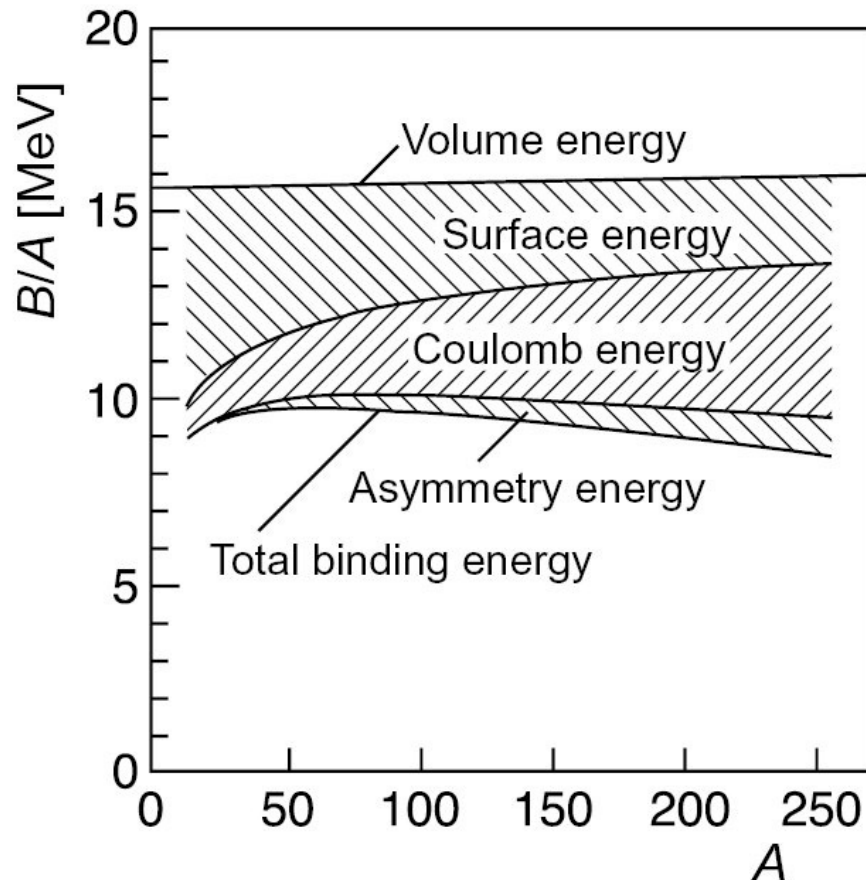


Goeppert-Meyer and Jensen
Nobel prize 1963
(shared with E. Wigner)



Entender el núcleo: la formula de Bethe-Weizsäcker

$$\frac{BE}{A} = a_V - \frac{a_S}{A^{1/3}} - a_C \frac{Z^2}{A^{4/3}} - a_A \frac{(N - Z)^2}{A^2} + a_P \frac{\delta_{N,Z}}{A}$$



$$a_v \approx 16 \text{ MeV}$$

$$a_s \approx 20 \text{ MeV}$$

$$a_c \approx 0.75 \text{ MeV}$$

$$a_{Sym} \approx 21 \text{ MeV}$$