



Escuela José Antonio Balseiro 2016

Nuevas Tendencias en Investigación en Física Médica

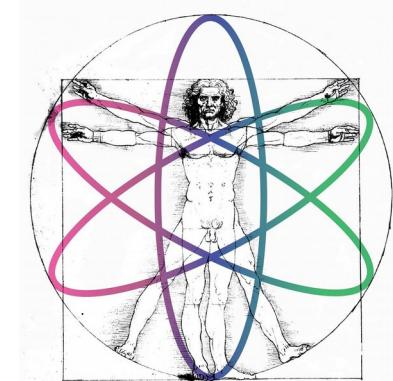
Introducción a muchas cosas

Miércoles, Física Nuclear

Hernán Asorey

asoreyh@cab.cnea.gov.ar

Laboratorio Detección Partículas y Radiación
Centro Atómico Bariloche



Clases en

<https://github.com/asoreyh/intro-nuclear-fisica-medica>

 asoreyh Clase 01 lista	Latest commit db0d282 2 days ago
 clases Clase 01 lista	2 days ago
 README.md Commit inicial	4 days ago

 README.md



Curso de Introducción a Física Nuclear y Detectores

Escuela José Antonio Balseiro - Nuevas Tendencias en Investigación en Física Médica

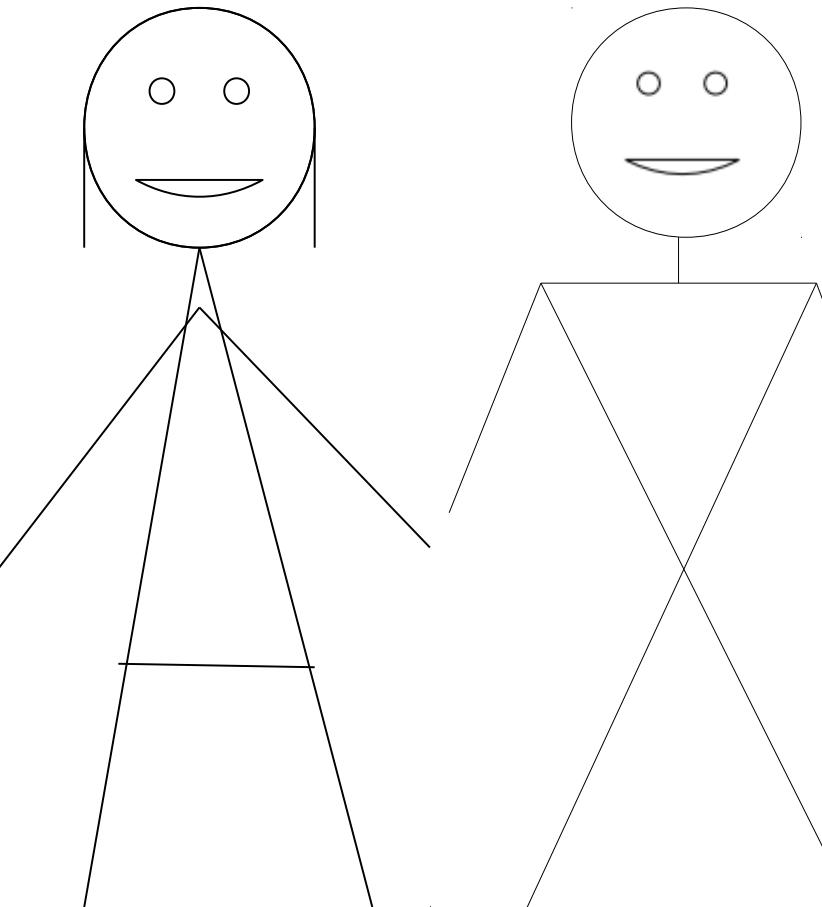
Octubre 2016 - Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro

(C) 2016 - Hernán Asorey (@asoreyh)



Este trabajo se distribuye en forma gratuita bajo la [Licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](#).

**Pero seguro estarán muy lejos de la realidad....
(¡por suerte!)**



La foto de la familia...

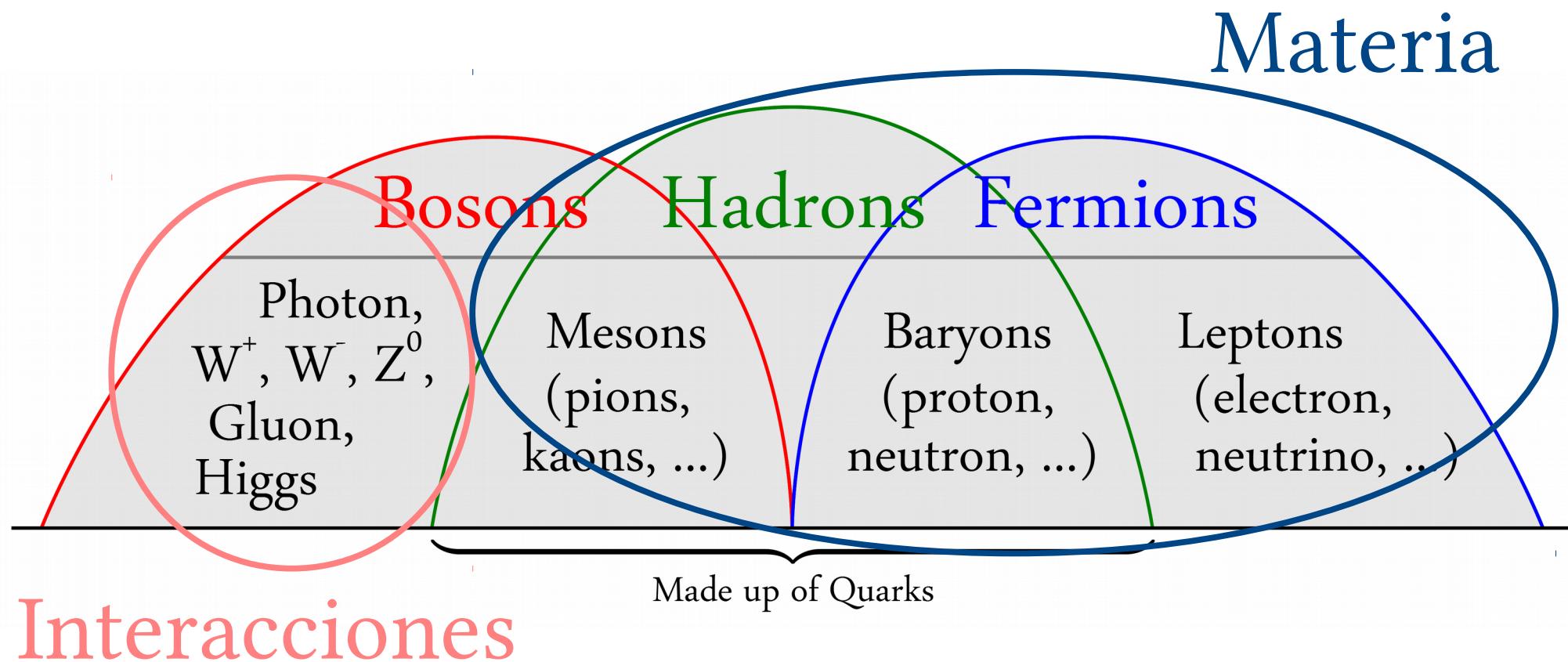


La foto de la familia...

	mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ charge → 2/3 spin → 1/2 up	mass → $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ charge → 2/3 spin → 1/2 charm	mass → $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ charge → 2/3 spin → 1/2 top	mass → 0 charge → 0 spin → 1 gluon	mass → $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ charge → 0 spin → 0 Higgs boson
QUARKS	u	c	t	g	H
	mass → $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1/3 spin → 1/2 down	mass → $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1/3 spin → 1/2 strange	mass → $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge → -1/3 spin → 1/2 bottom	mass → 0 charge → 0 spin → 1 photon	
	d	s	b	γ	
LEPTONS	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	Gauge Bosons
	mass → 0.511 MeV/c^2 charge → -1 spin → 1/2 electron	mass → 105.7 MeV/c^2 charge → -1 spin → 1/2 muon	mass → 1.777 GeV/c^2 charge → -1 spin → 1/2 tau	mass → 91.2 GeV/c^2 charge → 0 spin → 1 W boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

Clasificación de partículas

- Teorema de Espín-Estadística (Bosones-Fermiones)
- Carga de Fuerza Fuerte (hadrones o mesones)



Leptones, quarks y mediadores

three generations of matter (fermions)				
	I	II	III	
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name →	up	charm	top	
QUARKS				
mass →	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	
charge →	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name →	down	strange	bottom	
LEPTONS				
mass →	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	
charge →	0	0	0	
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name →	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	
mass →	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	
charge →	-1	-1	-1	
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name →	electron	muon	tau	
GAUGE BOSONS				
mass →			91.2 GeV/c ²	
charge →			0	
spin →			1	
name →			Z boson	
mass →			80.4 GeV/c ²	
charge →			± 1	
spin →			1	
name →			W boson	

- Materia
- Interacciones
- Masa
- Parece inocente:
 - (6·2) leptones = 12 l
 - ((6·3)·2) quarks = 36 q
 - (1+8+3+1)=13 bosones de calibre (gauge, interacciones)
- **61 partículas “fundamentales”**

Cuatro interacciones cuatro

Force	Strength	Theory	Mediator
Strong	10^0	Chromodynamics	Gluon
Electromagnetic	10^{-2}	Electrodynamics	Photon
Weak	10^{-13}	Flavordynamics	W and Z
Gravitational	10^{-42}	Geometrodynamics	Graviton

- Dos de largo alcance (infinito) → Gravedad y EM
- Dos de muy corto alcance (~fm) → Débil y fuerte

Teorema de Noether

- **Simetrías de las ecuaciones \leftrightarrow Cargas conservadas**
 - Invariancia rotaciones \leftrightarrow Cons. momento angular
 - Invariancia traslaciones espaciales \leftrightarrow Cons. momento lineal
 - Invariancia traslaciones temporales \leftrightarrow Cons. Energía
 - Ver por ejemplo, Landau & Lifshitz, Vol 1 (Mechanics, Cap II)
 - Para simetrías, caldo Knorr, Landay & Lifshitz, Vol 3 (Quantum Mechanics, Non-Relativistic Theory, Cap XII)
- ¡Cuidado! Dice “simetría de las ecuaciones”, no del problema → un cuerpo en rotación puede no tener un sólo eje de simetría pero conserva el impulso angular

Las ecuaciones de movimiento son simétricas $\leftrightarrow \leftrightarrow$ Hay cargas conservadas

Acción, simetrías y cargas

- ¿Qué fue primero, el huevo o la gallina?
 - ¿La conservación de la energía o la invariancia temporal?
- Aquí es simple: el huevo fue primero...
 - Los principios de conservación se basan en observaciones de los sistemas naturales → “prejuicios”
 - Las ecuaciones movimiento, y por ende la acción, debe tener las simetrías necesarias para verificar las conservaciones observadas
- “La carga [eléctrica] es una magnitud conservada”
- Significa que nunca en la historia (es decir, *nunca hasta hoy y esperamos que eso no cambie -prejuicio-*) se observó un proceso donde la cantidad de carga [eléctrica] inicial y final difieren
- Moraleja 1: Nuestra acción deberá incluir alguna simetría que, Noether mediante, contemple la conservación de la carga eléctrica
- Moraleja 2: La física es una ciencia natural, de carácter observational y/o experimental → no es una ciencia “exacta”

Nuevas cargas conservadas

- Conservación de la Energía (E)
- Conservación del impulso lineal (\mathbf{p})
- Conservación del impulso angular (\mathbf{J})
- Conservación de la carga eléctrica (Q)
- **Conservación del número leptónico (L)**

- *electrónico (L_e)*
- *muónico (L_μ)*
- *tauónico (L_τ)*

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$$

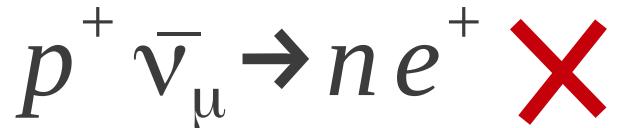
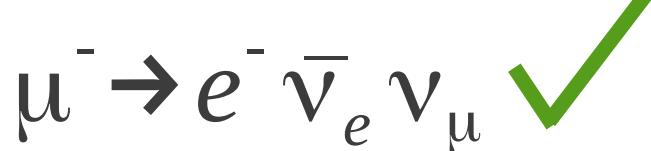
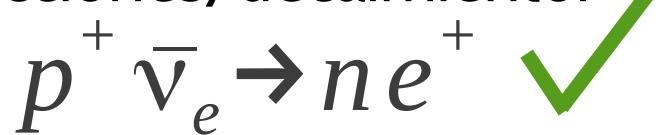
- **Conservación del número bariónico (B)**

$$p \ p \rightarrow p \ p \ p \bar{p}$$

- *Atención: una magnitud conservada hoy podría no haberse conservado en el pasado y viceversa \leftrightarrow Simetrías rotas*

Número leptónico

- Sean las siguientes reacciones/decaimiento:



- Algunas se producen, otras no
- La 2da viola la conservación de la carga eléctrica
- ¿Qué pasa con la 4ta?
- La cantidad de leptones (o antileptones) por familia (o sabor) debe conservarse!

Magnitudes conservadas

LEPTON CLASSIFICATION

l	Q	L_e	L_μ	L_τ
e	-1	1	0	0
	0	1	0	0
μ	-1	0	1	0
	0	0	1	0
τ	-1	0	0	1
	0	0	0	1



- Carga eléctrica
- Número leptónico por sabor (*flavor*)
- Las antipartículas tienen signos opuestos en todos los números
- Entonces, hay “12” leptones diferentes
- **Los números antes y después de la reacción deben conservarse**

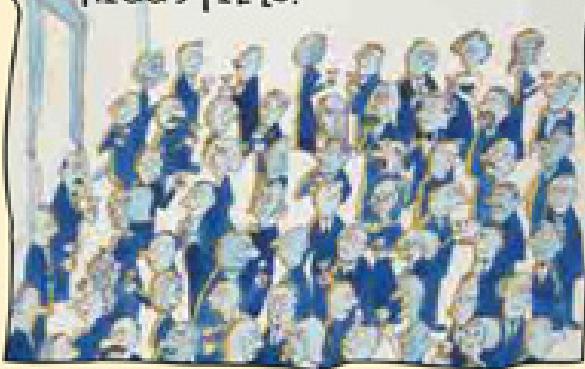
Para terminar, el Higgs

THE HIGGS MECHANISM

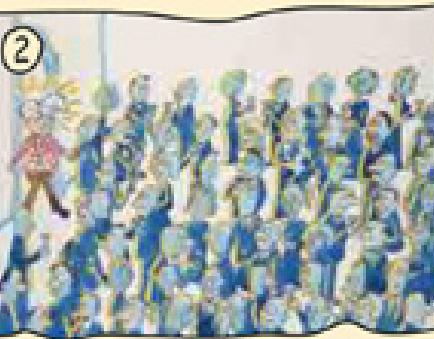
Illustration courtesy of CERN

①

TO UNDERSTAND THE HIGGS MECHANISM, IMAGINE THAT A ROOM FULL OF PHYSICISTS QUIETLY CHATTERING IS LIKE SPACE FILLED ONLY WITH THE HIGGS FIELD.



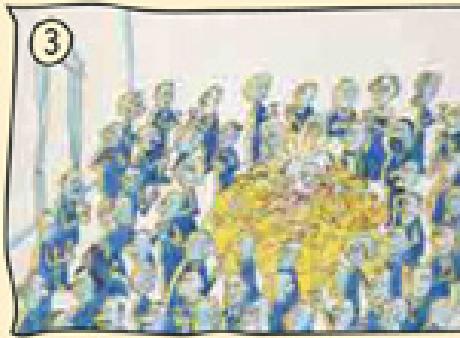
②



A WELL KNOWN SCIENTIST, ALFRED FINCHERIN, WALKS IN, CREATING A DISTURBANCE AS HE MOVES ACROSS THE ROOM, AND ATTRACTING A CLUSTER OF COMERS WITH EACH STEP.

THIS INCREASES HIS RESISTANCE TO MOVEMENT - IN OTHER WORDS, HE ACQUIRES MASS, JUST LIKE A PARTICLE MOVING THROUGH THE HIGGS FIELD.

③



IF A RUMOUR CROSSES THE ROOM ...

④



⑤



IT CREATES THE SAME KIND OF CLUSTERING, BUT THIS TIME AMONG THE SCIENTISTS THEMSELVES. IN THIS ANALOGY, THESE CLUSTERS ARE THE HIGGS PARTICLES.

Constituyentes del núcleo

- En un núcleo, ${}^A_N X_Z$, encontramos $A=Z+N$ nucleones:
 - **Z protones**, p^+ , $m_p = 938,27 \text{ MeV}/c^2$
 - **N=(A-Z) neutrones**, n^0 , $m_n = 939,565 \text{ MeV}/c^2$
 - Otras verduras (originadas por las interacciones EM y Fuerte) cuyo resultado es la:
 - **Energía de ligadura**

En el núcleo es más evidente

- Hay un “**faltante de masa**” originado en la energía de ligadura nuclear $B(A,Z)$:

$$m_{^{A_Z}X} = Z m_p + (A - Z) m_n - B(A, Z)$$

- **$B(A,Z)$ está definido explícitamente positivo. $B(A,Z) > 0$: el núcleo está ligado.** Por ej: $B(12,6) = 89.09 \text{ MeV}$
- Luego, la masa del núcleo carbono-12 será

$$m_{^{12}C_6} = 6 \times 938.27 \text{ MeV} + 6 \times 939.565 \text{ MeV} - 89.09 \text{ MeV}$$

$$m_{^{12}C_6} = 11.1772 \text{ GeV} \quad \frac{B(12,6)}{m_{^{12}C_6}} \simeq 0.8\% \quad \frac{B(12,6)}{A} = 7.424 \text{ MeV}$$

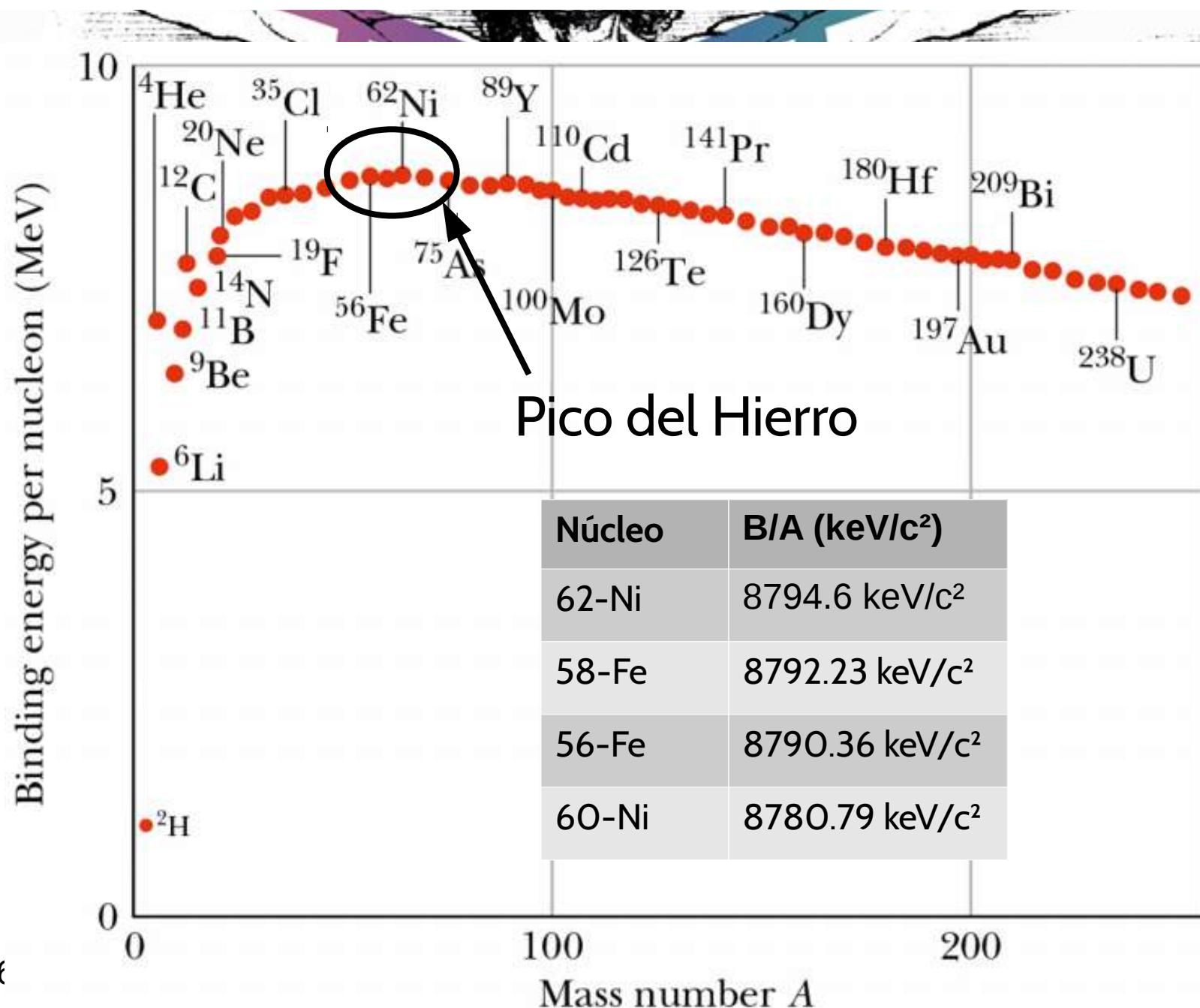
- El valor de $B(A,Z)$ puede calcularse, por ejemplo, con la **fórmula semiempírica de la masa**

¿Cuál es la masa de un sistema ligado?

- La masa total de un sistema ligado, ¿es mayor, menor o igual a la de sus constituyentes?
- Pensemos en el sistema Tierra – Luna...



Energía de ligadura por nucleón (def. positiva)



¿Y para el átomo?

- Faltan los electrones y sus energías de ligadura

$$M_{^A X_z} = Z m_p + (A - Z) m_n - \underbrace{B(A, Z) + Z m_e - B_e(A, Z)}_{\approx \frac{m}{2000} \text{ para el } ^1 H_1}$$

- Unidad de masa atómica unificada** (“u” ó “Da”, por dalton) a la 12-ava parte de la masa del átomo de Carbono-12

$$1 \text{ Da} = \frac{M_{^{12} X_6}}{12} = 931.4941 \text{ MeV}/c^2 = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Rightarrow M_{^{12} X_6} = 12 \text{ Da}$$

- La masa de 1 mol de Da es 1 g → **masa molar ${}^A X_z = A$ g/mol**

Constituyentes del núcleo (reload)

- En un núcleo, ${}^A_N X_Z$, encontramos $A=Z+N$ nucleones:
 - **Z protones**, p^+ , $m_p = 938,27 \text{ MeV}/c^2 = 1.007276 \text{ Da}$
 - **N=(A-Z) neutrones**, n^0 , $m_n = 939,565 \text{ MeV}/c^2 = 1.008665 \text{ Da}$
 - Otras verduras (originadas por las interacciones EM y Fuerte) cuyo resultado es la:
 - **Energía de ligadura**

Exceso de masa

- Se define como la diferencia entre la masa del núcleo y su número másico en daltons:

$$\Delta m_{^A X_z} = m_{^A X_z} - A \quad [\Delta m_{^A X_z}] = \text{MeV}/c^2$$

- Se relaciona con la energía de ligadura del núcleo, relativa a la energía de ligadura del 12-carbono:

$\Delta m_{^A X_z} < 0$: el núcleo está más ligado que el $^{12}C_6$

- Es una manera de tabular las masas de los núcleos.

$$m_{^A X_z} = A + \Delta m_{^A X_z}$$

Ya salió! si no tiene lugar, desinstale facebook y whatsapp e instale cosas útiles como la NWC

The image shows the Google Play Store listing for the "Isotope Browser" app. The app is developed by the IAEA Nuclear Data Section and has a rating of 4.36 stars from 436 reviews. It is categorized under "Todos". A note indicates that the app is compatible with all devices. A green "Instalada" button is visible. The main interface of the app is displayed, featuring a search bar at the top with "Chart" and "Element" options, and a dropdown menu showing "12C or C or 6". Below the search bar are several filters: "N", "A", "Jp", "Stable", "s < T% < Y", "Decay mode 0 < % < 100", and "Decay Rad. 0 < keV < 100". To the right of the search bar is a grid of element symbols and names, including Hydrogen (H), Lithium (Li), Beryllium (Be), Sodium (Na), Magnesium (Mg), Potassium (K), Calcium (Ca), Scandium (Sc), Titanium (Ti), Vanadium (V), Chromium (Cr), Rb, Sr, Yttrium (Y), Zirconium (Zr), Niobium (Nb), Molybdenum (Mo), Cs, Barium (Ba), Hafnium (Hf), Ta, tungsten (W), Francium (Fr), Radium (Ra), Rutherfordium (Rf), Dubnium (Db), Seaborgium (Sg), Lanthanum (La), Cerium (Ce), Praseodymium (Pr), Neodymium (Nd), Promethium (Pm), Actinium (Ac), Thorium (Th), Protactinium (Pa), Uranium (U), Neptunium (Np). On the right side of the interface is a detailed isotope chart showing various isotopes and their decay chains, with arrows indicating beta-minus (β⁻) and beta-plus (β⁺) decay paths.

GET IT ON
Google play

Versión pdf disponible en
<http://www.nndc.bnl.gov/wallet/>
Asorey - Balseiro 2016 Física Médica - 02/04

Available on the
App Store

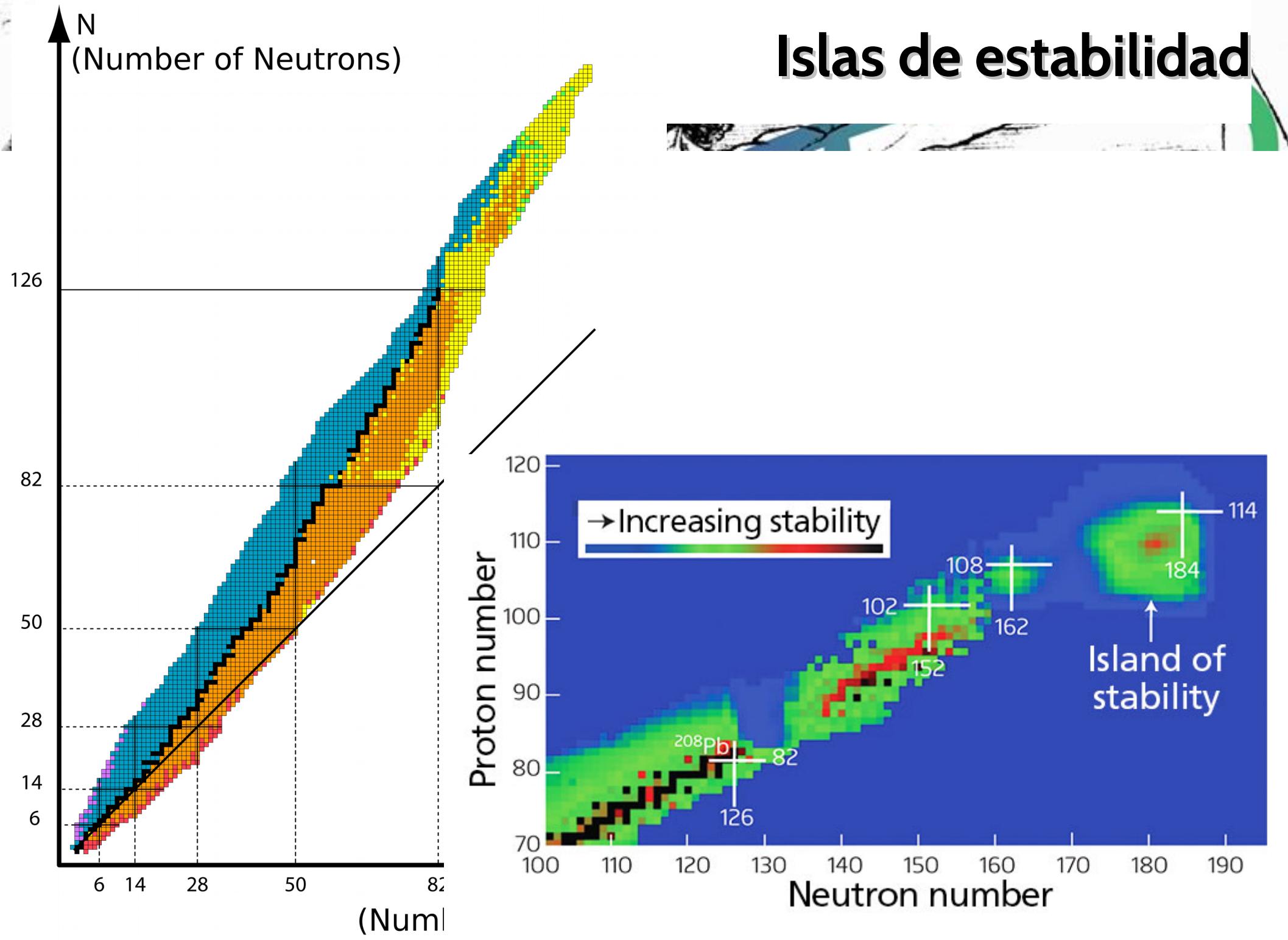
Por ejemplo, el pdf tiene estética *vintage*

Nuclear Wallet Cards

Nuclide Z E1 A	Jπ	Δ (MeV)	T½, Γ, or Abundance	Decay Mode
5 B 15		28.96	9.93 ms 7	β_- , β -n 93.6%, β -2n 0.4%
16	0-	37.12	<190 ps	n
17	3/2-)	43.8	5.08 ms 5	β_- , β -n 63%, β -2n 11%, β -3n 3.5%, β -4n 0.4%
18	(4-)	51.9s	<26 ns	n?
19	3/2-)	58.8s	2.92 ms 13	β_- , β -n 72%, β -2n 16%
20		67.1s		
21		75.7s		
6 C 8	0+	35.08	230 keV 50	p, α
9	3/2-)	28.909	126.5 ms 9	ε , εp 61.6%, $\varepsilon \alpha$ 38.4%
10	0+	15.698	19.308 s 4	ε
11	2/2	10.650	20.334 m 24	ε
12	0+	0.000	98.93% 8	
13	1/2-	3.125	1.07% 8	
14	0+	3.020	5700 y 30	β_-
15	1/2+	9.873	2.449 s 5	β_-
16	0+	13.694	0.747 s 8	β_- , β -n 99%
17	3/2+	21.03	193 ms 13	β_- , β -n 32%
18	0+	24.92	92 ms 2	β_- , β -n 31.5%
19	1/2+	32.41	49 ms 4	β_- , β -n 61%
20	0+	37.6	14 ms +6-5	β_- , β -n 72%
21	1/2+)	45.6s	<30 ns	n?
22	0+	52.1s	6.1 ms +14-12	β_- , β -n 61%, β -2n<37%
23		62.7s		

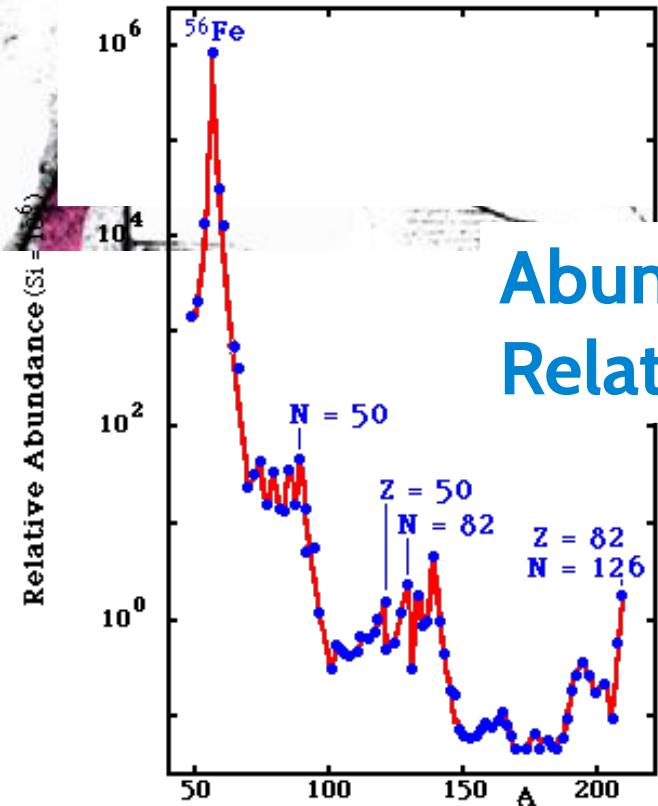
¡CUIDADO!
Son masas
atómicas!

Islas de estabilidad

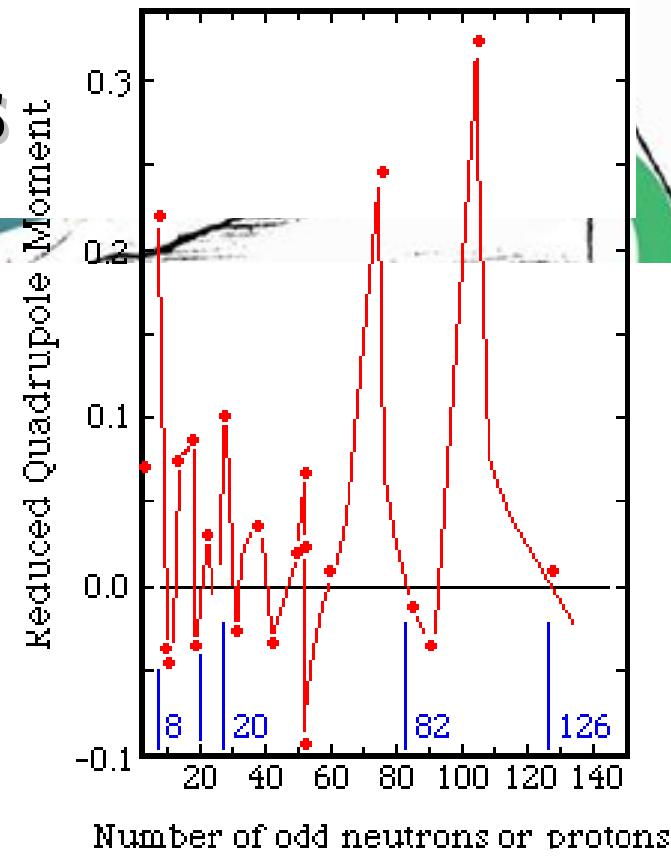


Números mágicos

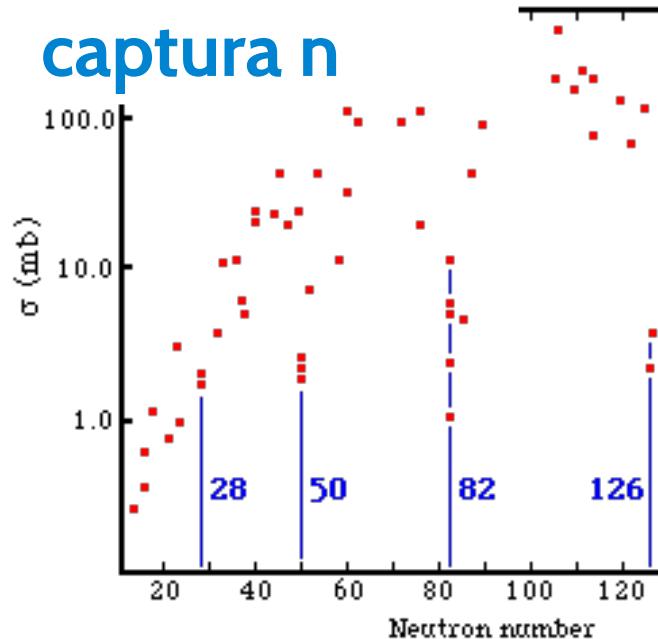
Abundancias Relativas



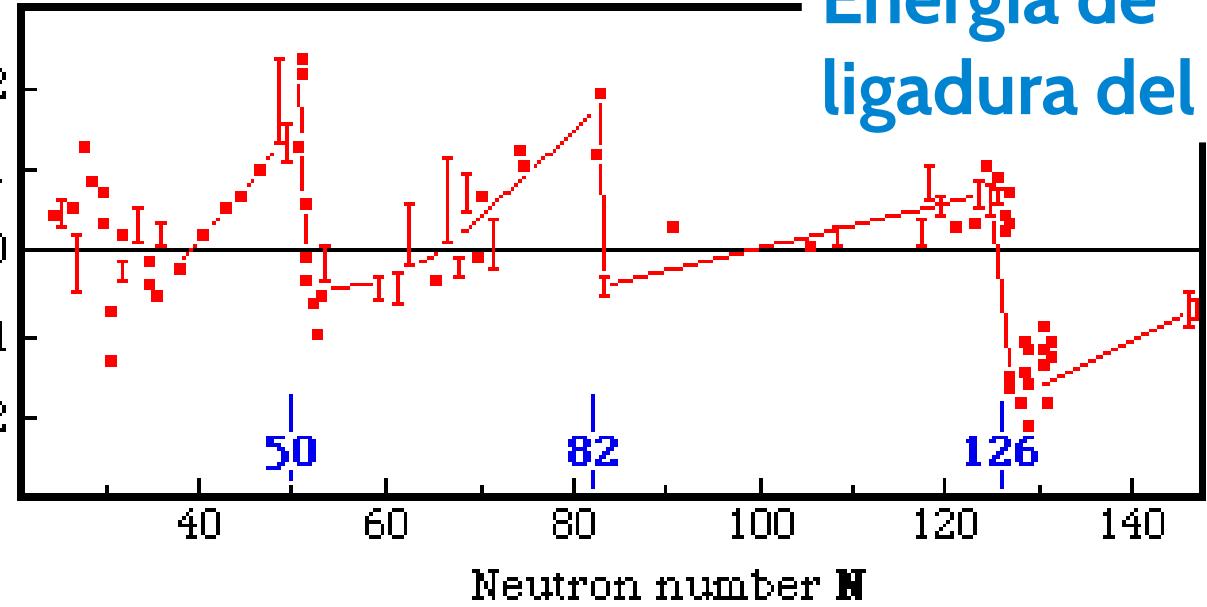
Momento cuadrupolar E



Sección eficaz
captura n



Binding Energy of last neutron (MeV)



Energía de ligadura del n

El modelo de capas

- Los datos experimentales indican
 - **máximos locales en la energía de ligadura nuclear**
 - **mínimos locales en el radio nuclear**
 - **mínimos locales en el momento cuadrupolar (anesfericidad)**
 - **y mínima sección eficaz de captura de nucleón adicional**
- cuando el Z y/o N son iguales a:

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

- A estos números se los conoce como **números mágicos**
- ¿podría sugerir una estructura de capas como en los átomos?

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

- Los niveles de energía dependen del potencial

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = \hat{H} \psi(\vec{r}, t)$$

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r})$$

- $L=0 \rightarrow s, L=1 \rightarrow p, L=2 \rightarrow d, L=3 \rightarrow f$

- Un nivel puede acomodar:
 $n = 2 \times (2L+1)$

nucleones

Oct, 2016

Falto poco

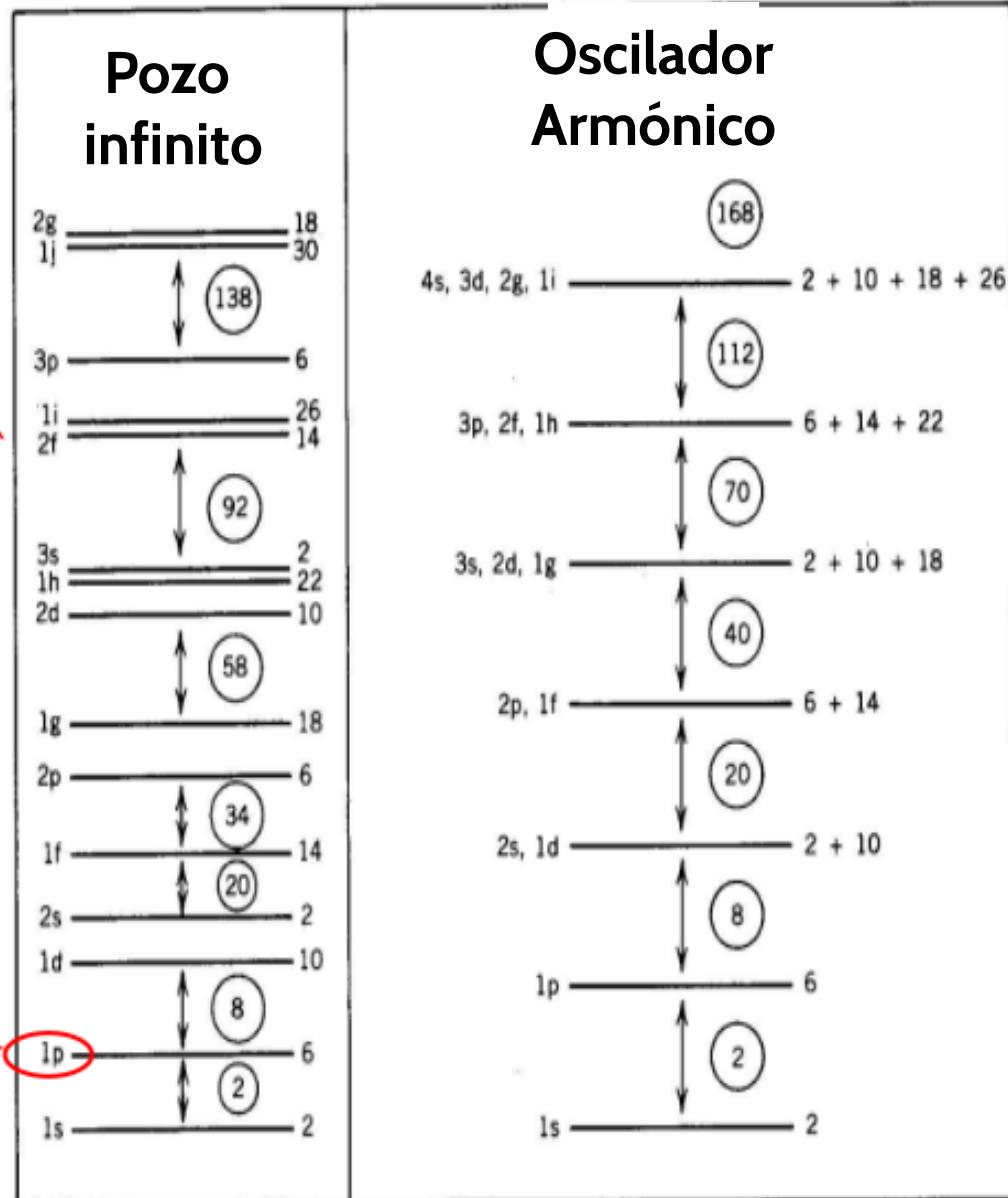


Figure 5.4 Shell structure obtained with infinite well and harmonic oscillator potentials. The capacity of each level is indicated to its right. Large gaps occur between the levels, which we associate with closed shells. The circled numbers indicate the total number of nucleons at each shell closure.

Potencial nuclear realista

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

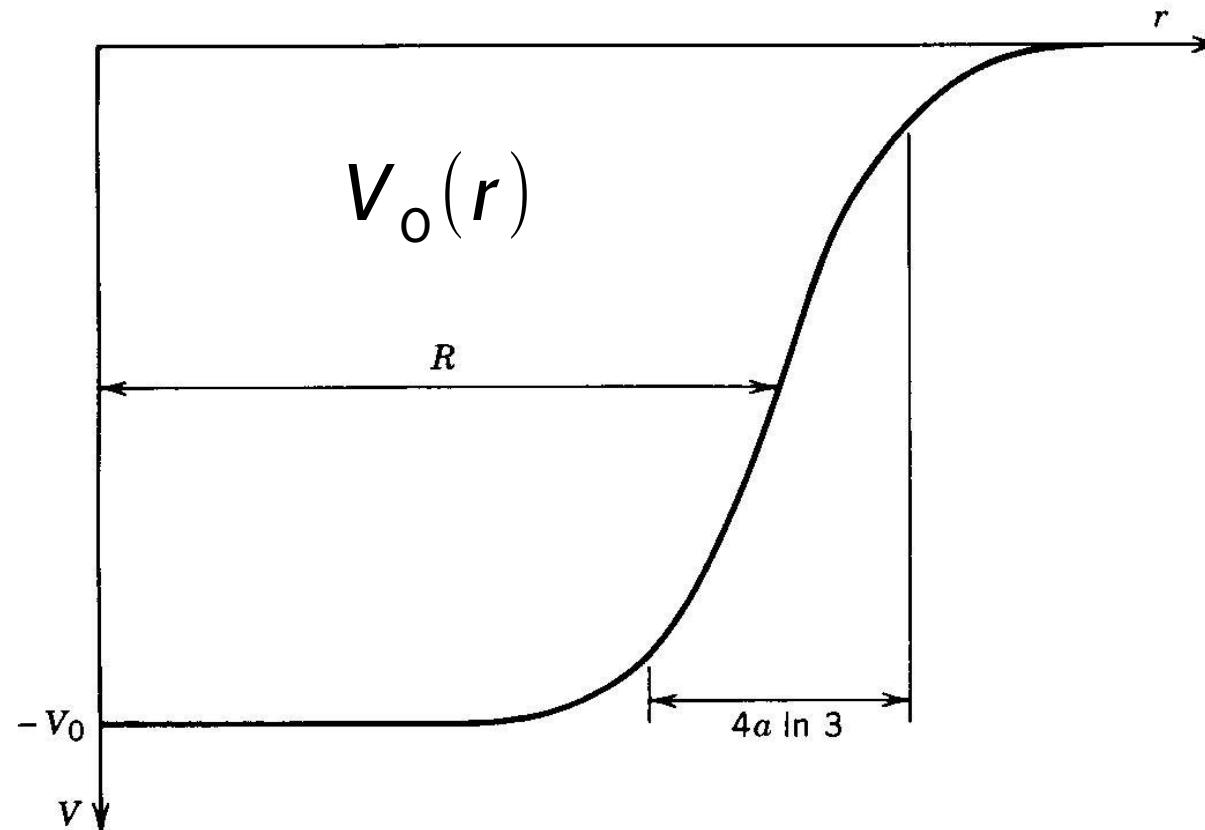
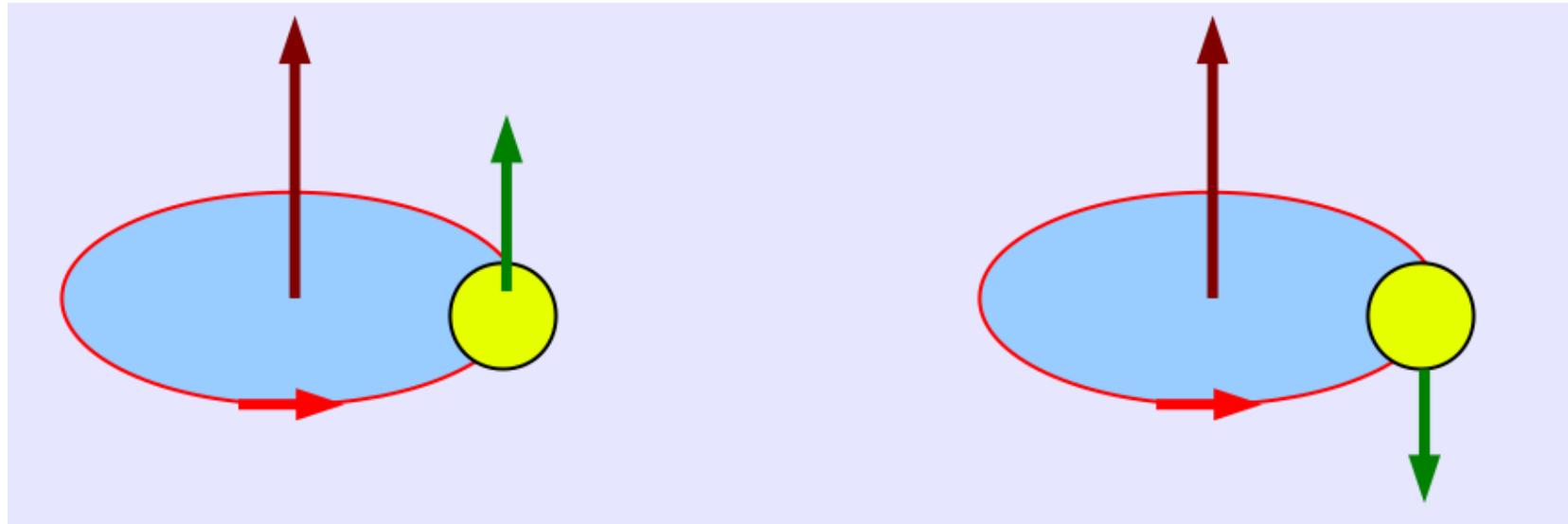


Figure 5.5 A realistic form for the shell-model potential. The “ski” $4a \ln 3$ is the distance over which the potential changes from $0.9V_0$ to

4s	2
3d	10
2g	18
1i	26
112	(shell closure)
3p	6
2f	14
92	(shell closure)
1h	22
3s	2
2d	10
58	(shell closure)
1g	18
40	(shell closure)
2p	6
1f	14
20	(shell closure)
2s	2
1d	10
8	(shell closure)
1p	6
2	(shell closure)
1s	2

Fermi: Acoplamiento spin-órbita



- Término de acoplamiento al potencial:

$$V(r) = V_0(r) + V_{LS} \vec{L} \cdot \vec{S}$$

- L y S paralelos, potencial más atractivo
- L y S antiparalelos, potencial menos atractivo

¡Splitting!

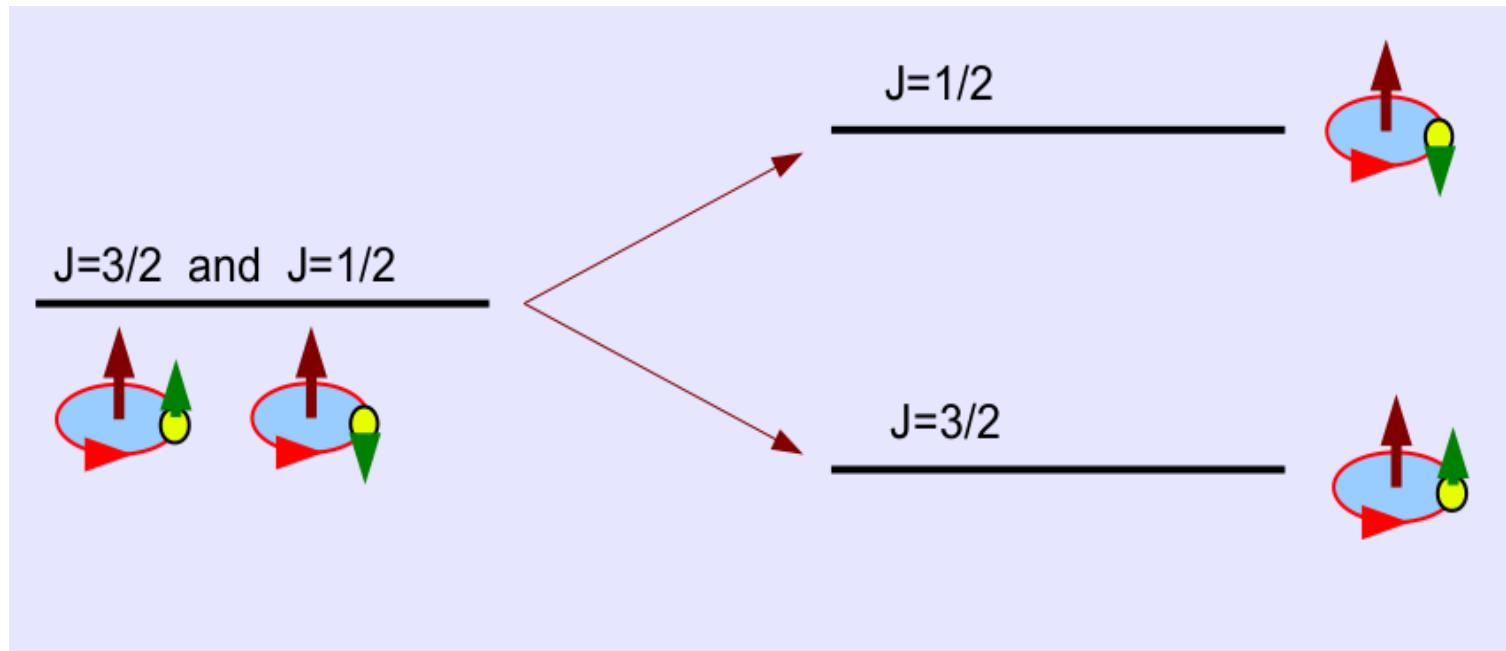
Suma de momentos angulares

- En cuántica, la suma de momentos angulares

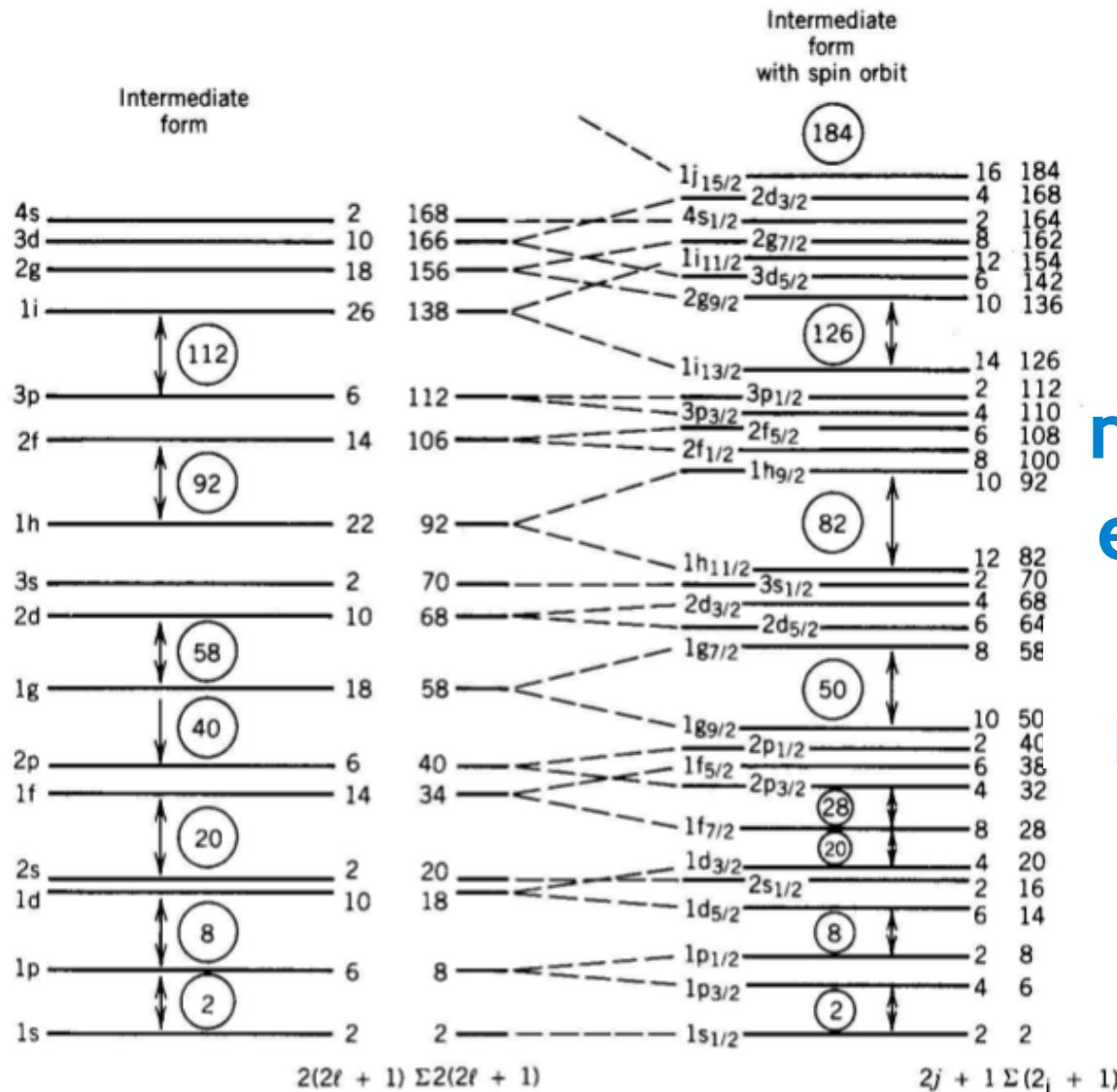
$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \rightarrow |l - s| \leq j \leq (l + s)$$

- Por ejemplo, $L=1$, $S=1/2$

- paralelos, $j=1/2$
- antiparalelos, $j=3/2$



Potencial nuclear incluyendo spin-órbita



Al incluir el potencial nuclear y el acoplamiento espín-órbita aparecen las “capas” nucleares y los números mágicos se son reproducidos:

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

Momento angular total y paridad

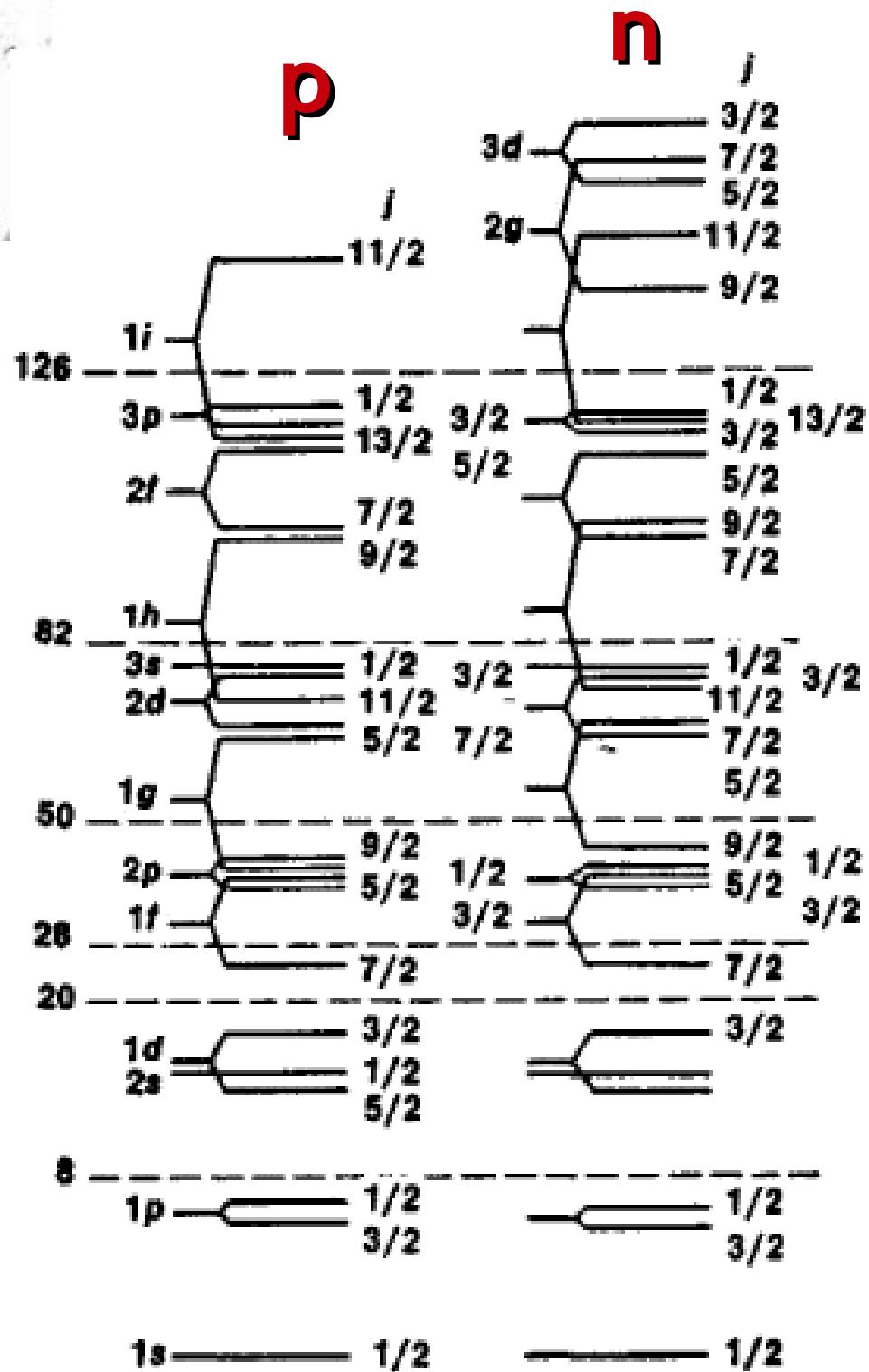
- Momento angular total J
- Paridad: Simetría de la función de onda frente a reflexiones espaciales, autovalores: +1 o -1
- La paridad de nivel es

$$\Pi = (-1)^l \Rightarrow l = 0, + ; l = 1, - ; l = 2, +$$

- El momento angular total y la paridad de un núcleo quedan dados por la configuración de nucleones en las capas:

$$J^{\Pi}$$

p y n, diferentes capas



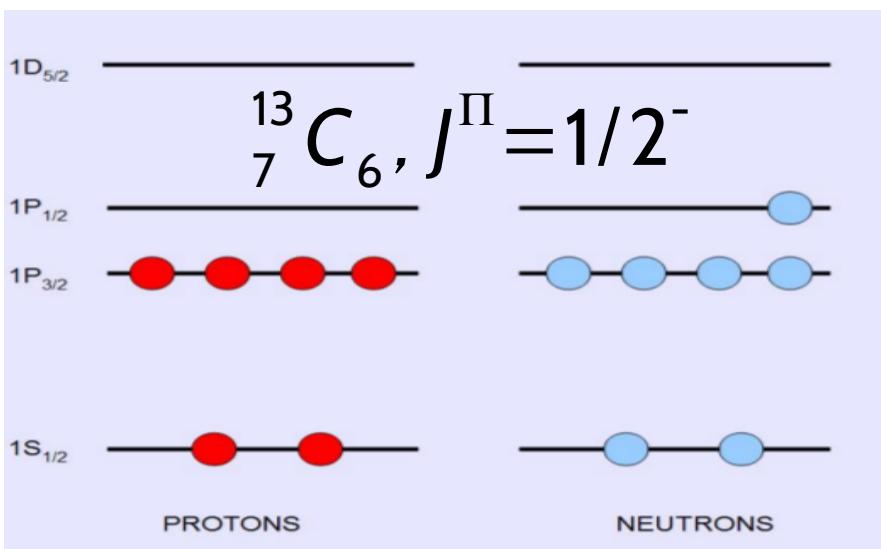
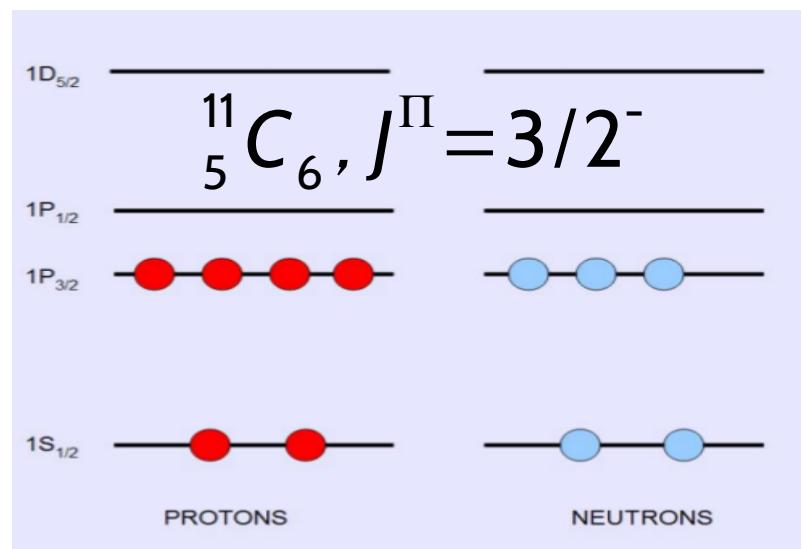
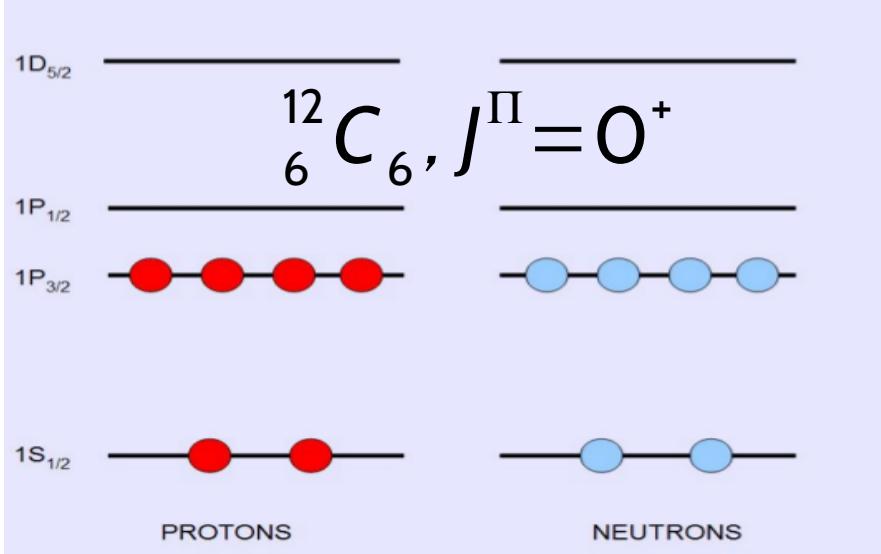
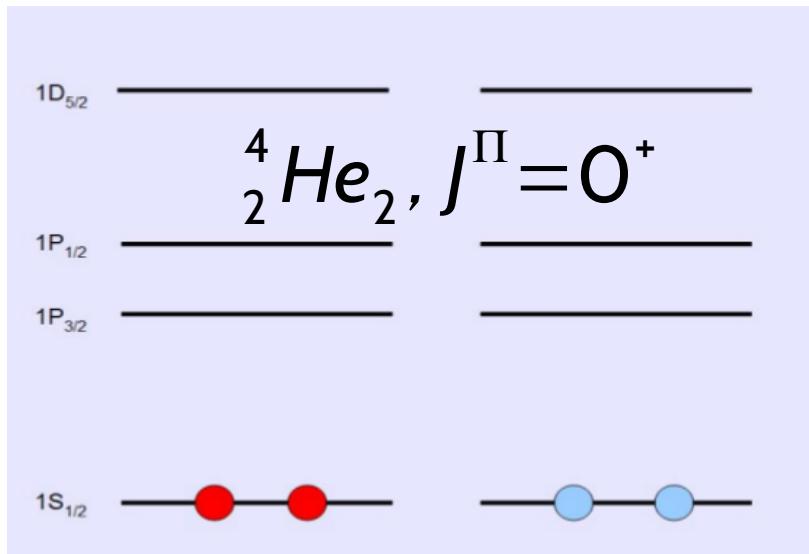
Momento angular total y paridad del núcleo

- Un nivel J puede acomodar $2J+1$ nucleones
- protones o neutrones apareados forman un estado 0^+
- Entonces, estado fundamental de un núcleo...
 - **Par-Par es 0^+**
 - **Par-Impar es el del orbital que ocupa el nucleón desapareado, y su paridad es $(-1)^l$.**
 - **Impar-impar es complicado, corresponde a la suma (cuántica) de los momentos angulares del protón, j_p , y del neutrón, j_n :**

$$|j_p - j_n| \leq J \leq |j_p + j_n| \quad \Pi = (-1)^{l_p + l_n}$$

P. ej: ${}^6Li_3 \rightarrow j_p = 3/2^-, j_n = 3/2^- \Rightarrow \Pi = (-1)^2 = +1$, pero $0 \leq J \leq 3$

Por ejemplo

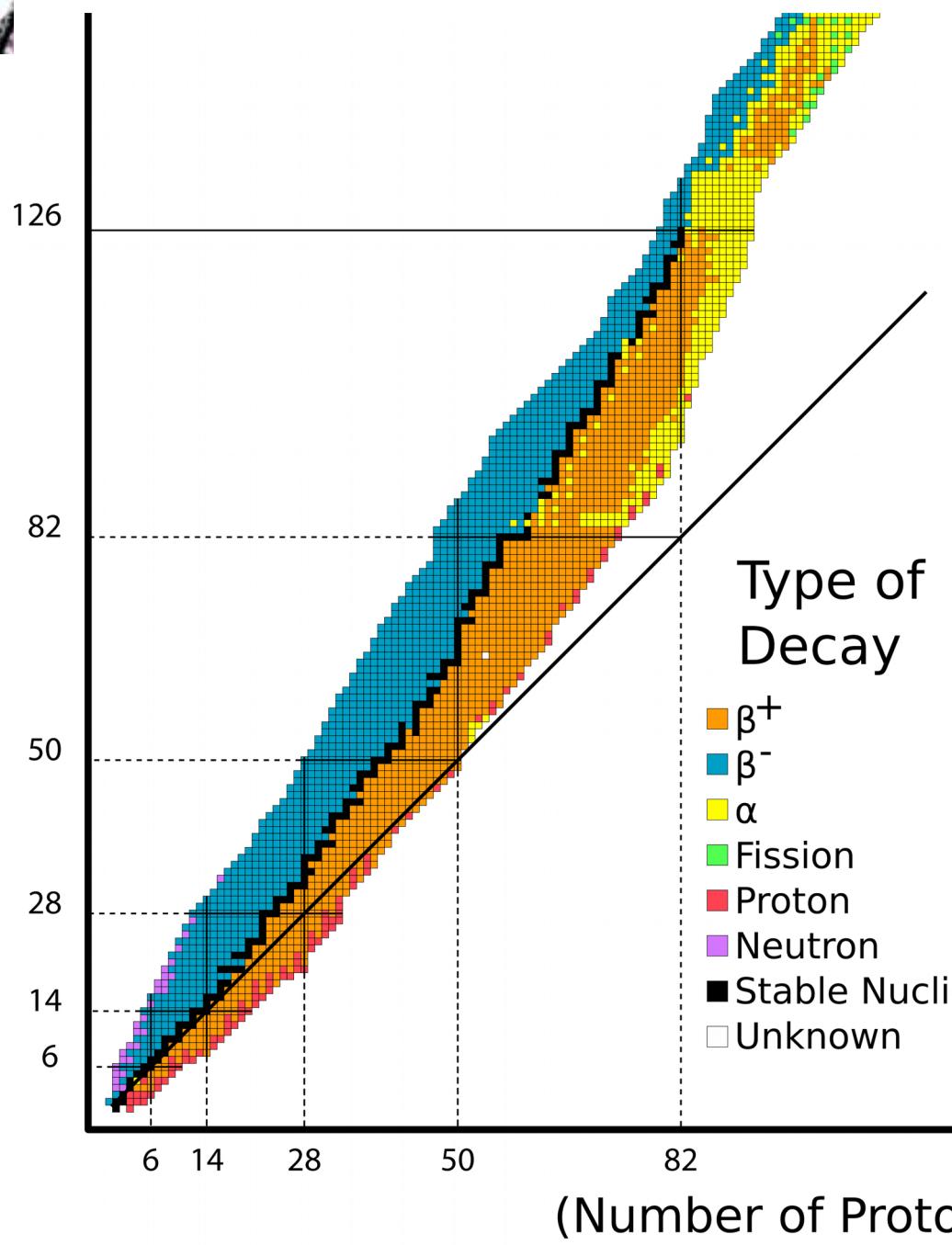


J y paridad de los núcleos

Nuclear Wallet Cards

Nuclide	Z	E1	A	Jπ	Δ (MeV)	T½, Γ, or Abundance	Decay Mode
5 B	5	B	15		28.96	9.93 ms 7	β_- , $\beta\text{-}n$ 93.6%, $\beta\text{-}2n$ 0.4%
	16			0-(3/2-)	37.12	<190 ps	n
	17				43.8	5.08 ms 5	β_- , $\beta\text{-}n$ 63%, $\beta\text{-}2n$ 11%, $\beta\text{-}3n$ 3.5%, $\beta\text{-}4n$ 0.4%
	18			(4-)	51.9s	<26 ns	n?
	19			(3/2-)	58.8s	2.92 ms 13	β_- , $\beta\text{-}n$ 72%, $\beta\text{-}2n$ 16%
	20				67.1s		
	21				75.7s		
	6 C	6	C	0+	35.08	230 keV 50	p, α
		8		(3/2-)	28.909	126.5 ms 9	ε , εp 61.6%, $\varepsilon\alpha$ 38.4%
	10			0+	15.608	10.308 s 4	ε
	11			3/2-	10.650	20.334 m 24	ε
	12			0+	0.000	98.93% 8	
	13			1/2-	3.125	1.07% 8	
	14			0+	3.020	5700 y 30	β_-
	15			1/2+	9.873	2.449 s 5	β_-
	16			0+	13.694	0.747 s 8	β_- , $\beta\text{-}n$ 99%
	17			3/2+	21.03	193 ms 13	β_- , $\beta\text{-}n$ 32%
	18			0+	24.92	92 ms 2	β_- , $\beta\text{-}n$ 31.5%
	19			1/2+	32.41	49 ms 4	β_- , $\beta\text{-}n$ 61%
	20			0+	37.6	14 ms +6-5	β_- , $\beta\text{-}n$ 72%
	21			(1/2+)	45.6s	<30 ns	n?
	22			0+	52.1s	6.1 ms +14-12	β_- , $\beta\text{-}n$ 61%, $\beta\text{-}2n$ <37%
	23				62.7s		

Tabla de nucléidos



Radiactividad





Radiactividad

- **Fenómeno físico por el cual algunos elementos inestables decaen en otros más estables emitiendo radiación ionizante (Energías típicas: keV – MeV).**

Tipos:

- **Alfa:** emisión de un núcleo de Helio (2 protones, 2 neutrones). Poca capacidad de penetración (las detiene un papel)
- **Beta:** emisión de un electrón o un positrón (media capacidad de penetración: láminas metálicas delgadas)
- **Gamma:** emisión de un fotón de alta energía (alta capacidad de penetración, hasta plomo)
- Otros: neutrones, protones, fisión espontánea, fragmentación



Tipos de decaimiento

- **Emisión de partículas cargadas** (alfa, beta, protón, fisión, fragmentación): implican cambios en el número atómico
- **Emisión de neutrones**: cambios en el número másico
- **Emisión de fotones**: desexcitación nuclear
- En todo decaimiento **se libera energía, Q** , usualmente en forma de energía cinética de los productos del decaimiento. **El decaimiento ocurre si y sólo si $Q>0$**
- En general, **Q es igual a la diferencia de masa entre reactivos y productos (cuidado, ¡son masas nucleares!).**

$$Q = (m_{\text{reactivos}} - m_{\text{productos}}) c^2$$



Ley de decaimiento radiactivo

- **Suceso cuántico y estadístico:** no podemos saber cuando un átomo particular decaerá.
- Se observa que para un elemento la **tasa de decaimiento es constante**, λ .

$$[\lambda] = \text{s}^{-1}$$

Ley de decaimiento radiactivo

→ El núcleo tiene una tasa de decaimientos λ , $[\lambda] = \text{s}^{-1}$

$$\Rightarrow N_0 \xrightarrow{t} N(t) \quad N(t) < N_0 \quad y \quad N(t) = N_0 + c \cdot t \Rightarrow dN < 0$$

Luego, en un tiempo dt :

$$\boxed{\frac{dN}{dt} = -\lambda N} \quad \left(\frac{dN}{dt} < 0 \right)$$

Aplicamos el procedimiento usual para esta ecuación diferencial:

$$\Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt \Rightarrow \ln N = -\lambda t + C$$

Señala C la constante de integración. Luego:

$$e^{\ln N} = e^{-\lambda t + C} \Rightarrow N(t) = e^{-\lambda t} e^C \quad y \quad \text{para } t=0, N(t)=N_0 \Rightarrow$$

$$N_0 = e^{-\lambda 0} e^C \Rightarrow e^C = N_0. \quad \text{Finalmente:}$$

$$\boxed{N(t) = N_0 e^{-\lambda t}}$$

Ley de Decaimiento Radiactivo.



Ley de decaimiento radiactivo

- **Suceso cuántico y estadístico:** no podemos saber cuando un átomo particular decaerá.
- Se observa que para un elemento la **tasa de decaimiento es constante, λ .** $[\lambda] = s^{-1}$
- Luego, en una muestra con N átomos radiactivos, la tasa de decaimiento dN/dt será proporcional a N :

$$\frac{-dN}{dt} = -\lambda N \rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \rightarrow \int \frac{dN}{N} = \int -\lambda dt$$

$$\rightarrow \ln N = -\lambda t + C \rightarrow N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$



Ley de Decaimiento exponencial

- Ocurre con una **tasa de decaimiento constante λ**

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad [\lambda] = s^{-1}$$

- A partir de λ , definimos la **vida media τ**

$$\tau \equiv \frac{1}{\lambda} \Rightarrow N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [\tau] = s$$

- Y además, el **período de semi-desintegración**, como el **tiempo que debe transcurrir para que la cantidad del elemento en una muestra se reduzca a la mitad**

$$T_{1/2} \text{ es tal que } N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\frac{T_{1/2}}{\tau}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\frac{T_{1/2}}{\tau}}$$
$$\Rightarrow T_{1/2} = \ln(2) \tau$$



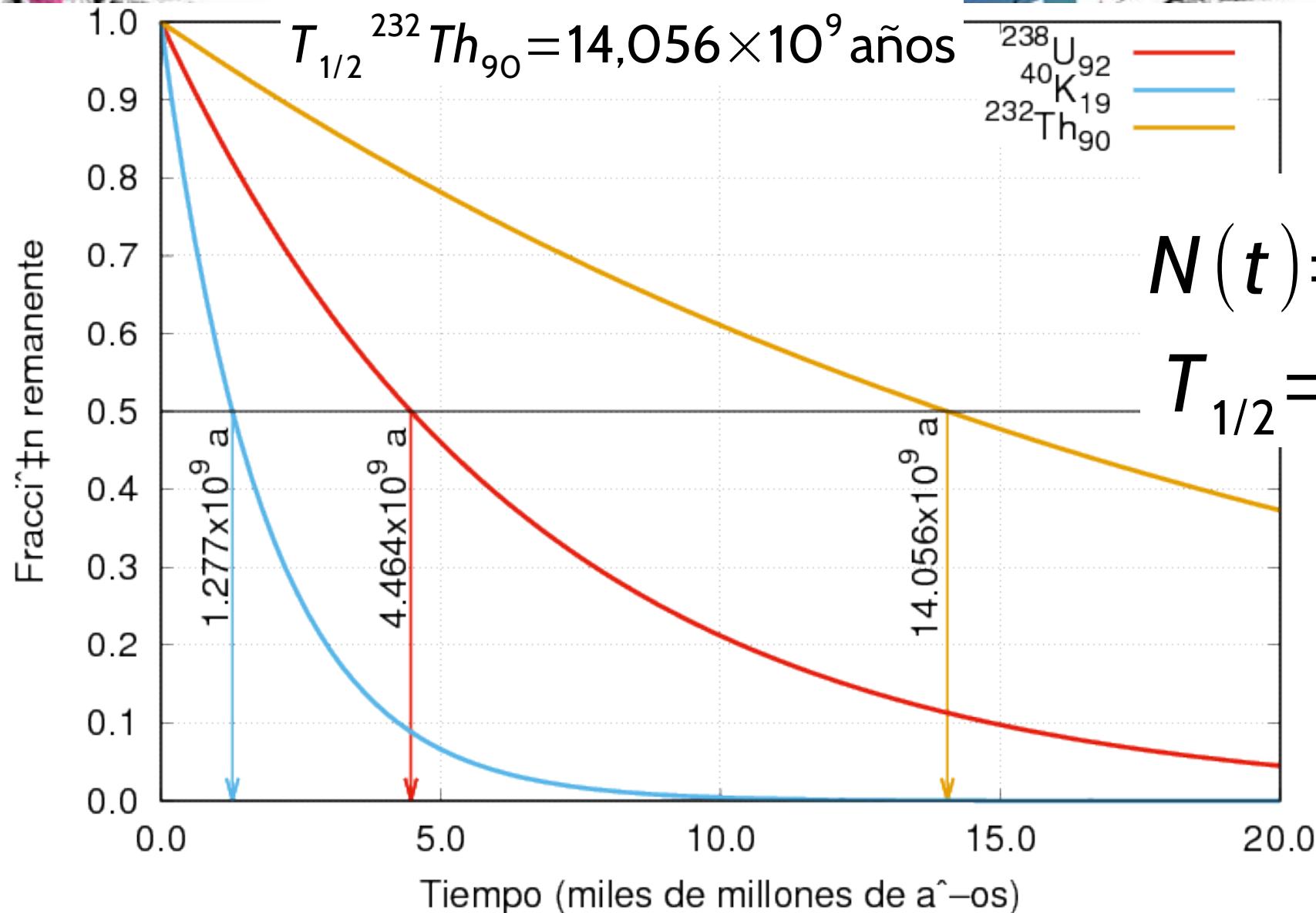
$$T_{1/2}^{40}K_{19} = 1,277 \times 10^9 \text{ años}$$

$$T_{1/2}^{238}U_{92} = 4,464 \times 10^9 \text{ años}$$

$$T_{1/2}^{232}Th_{90} = 14,056 \times 10^9 \text{ años}$$



$T_{1/2}$



$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$T_{1/2} = \ln(2)\tau$$

Abundancia relativa y períodos de semidesintegración, según corresponda

Nuclear Wallet Cards

Nuclide Z E1 A			Δ (MeV)	T $\frac{1}{2}$, Γ , or Abundance	Decay Mode
	J π				
5 B			28.96	9.93 ms 7	β_- , β -n 93.6%, β -2n 0.4%
	16	0-	37.12	<190 ps	n
	17	(3/2-)	43.8	5.08 ms 5	β_- , β -n 63%, β -2n 11%, β -3n 3.5%, β -4n 0.4%
	18	(4-)	51.9s	<26 ns	n?
	19	(3/2-)	58.8s	2.92 ms 13	β_- , β -n 72%, β -2n 16%
	20		67.1s		
	21		75.7s		
	6 C	8	0+	230 keV 50	p, α
		9	(3/2-)	126.5 ms 9	ε , ε p 61.6%, ε α 38.4%
	10	0+	15.608	10.308 s 4	ε
	11	3/2-	10.650	20.334 m 24	ε
	12	0+	0.000	98.93% 8	
	13	1/2-	3.125	1.07% 8	
	14	0+	3.020	5700 y 30	β_-
	15	1/2+	9.873	2.449 s 5	β_-
	16	0+	13.694	0.747 s 8	β_- , β -n 99%
	17	3/2+	21.03	193 ms 13	β_- , β -n 32%
	18	0+	24.92	92 ms 2	β_- , β -n 31.5%
	19	1/2+	32.41	49 ms 4	β_- , β -n 61%
	20	0+	37.6	14 ms +6-5	β_- , β -n 72%
	21	(1/2+)	45.6s	<30 ns	n?
	22	0+	52.1s	6.1 ms +14-12	β_- , β -n 61%, β -2n <37%
	23		62.7s		

En un mol de $^{232}_{\text{Th}}{}_{\text{90}}$, ¿Cuántos decaimientos se producen en un segundo?

+ Sea un mol de $^{232}_{\text{Th}}{}_{\text{90}}$ ($\Rightarrow N_0 = 6.02 \times 10^{23}$ átomos de Thorio)

+ La masa del mol es 232 g .

$$+ T_{1/2} = 14,056 \times 10^9 \text{ s} = 4,43 \times 10^{17} \text{ s}$$

$$+ T_{1/2} = \ln(2) \tau \Rightarrow \tau = T_{1/2} / \ln(2) \Rightarrow \tau = 6,39 \times 10^{17} \text{ s}$$

Con lo cual $\lambda = \frac{1}{\tau} = 1,56 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$

+ Luego cada segundo esperamos medir $\Delta N = N_0 \cdot \lambda$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -N_0 \cdot 1,56 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1} \quad \text{para el primer segundo}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta N}{\Delta t} = 6,02 \times 10^{23} \cdot 1,56 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

Aproximación válida si
 $\Delta t \ll \tau$

$$\Rightarrow \frac{\Delta N}{\Delta t} \approx -10^6 \text{ at/s} \quad \text{para el primer segundo.}$$

para tiempos largos $\Rightarrow N(t) = N_0 e^{-t/\tau} \Rightarrow \Delta N = N(t) - N_0$

$$\Rightarrow \Delta N = N_0 (e^{-t/\tau} - 1) \Rightarrow \Delta N \approx -10^{16} \text{ at para } t = 1 \text{ s.}$$

- Cuando tengo 1 núcleo, hablo de probabilidades
- Pero tengo muchos → Ley de los grandes números → valores medios.
- **La actividad de una muestra está dada por el número de decaimientos por unidad de tiempo:**

$$A(t) = \lambda N(t)$$

$$[A(t)] = \text{decaimientos } s^{-1} = \text{Bq (bequerel)}$$

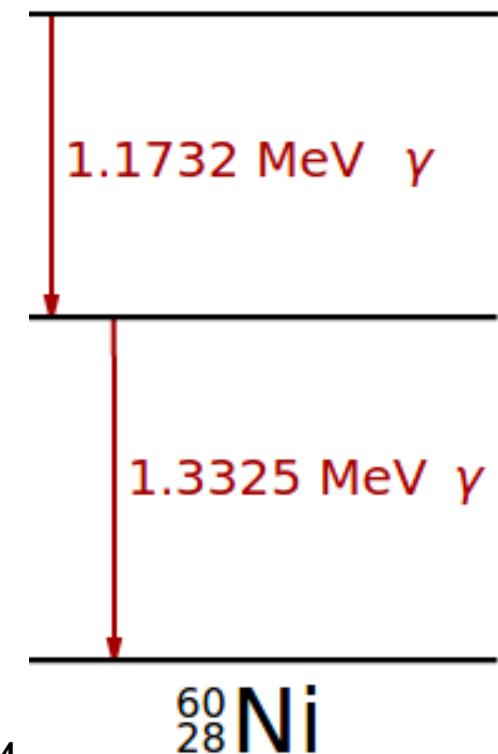
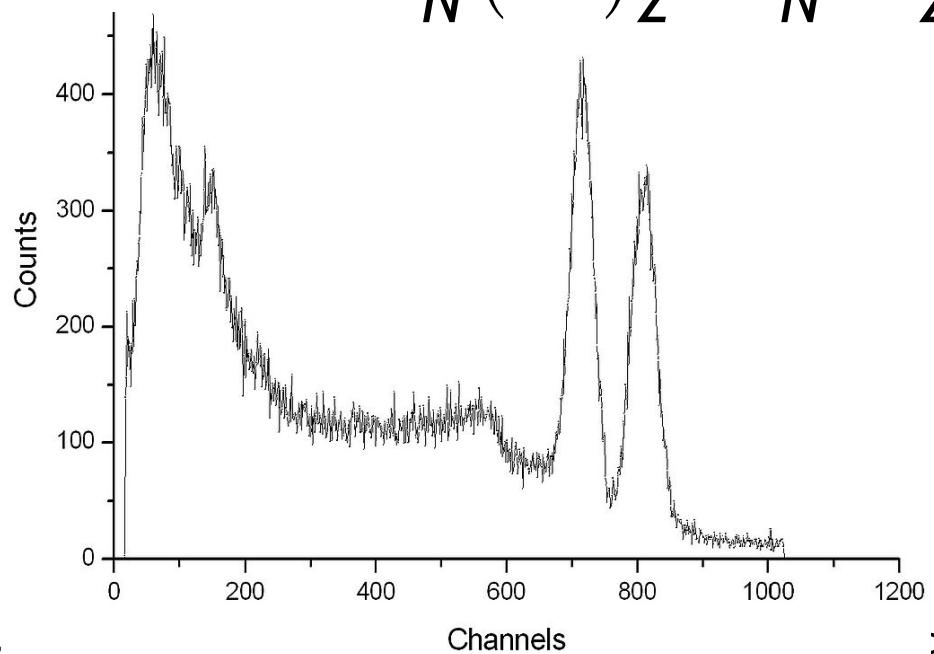
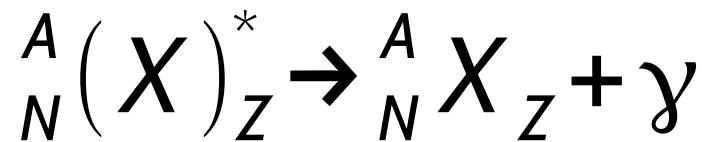
$$1 \text{ Bq} = 27 \text{ pCi} \quad 1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$$

- Se puede pensar en que masa se necesita para 1 Bq



Emisión Gamma

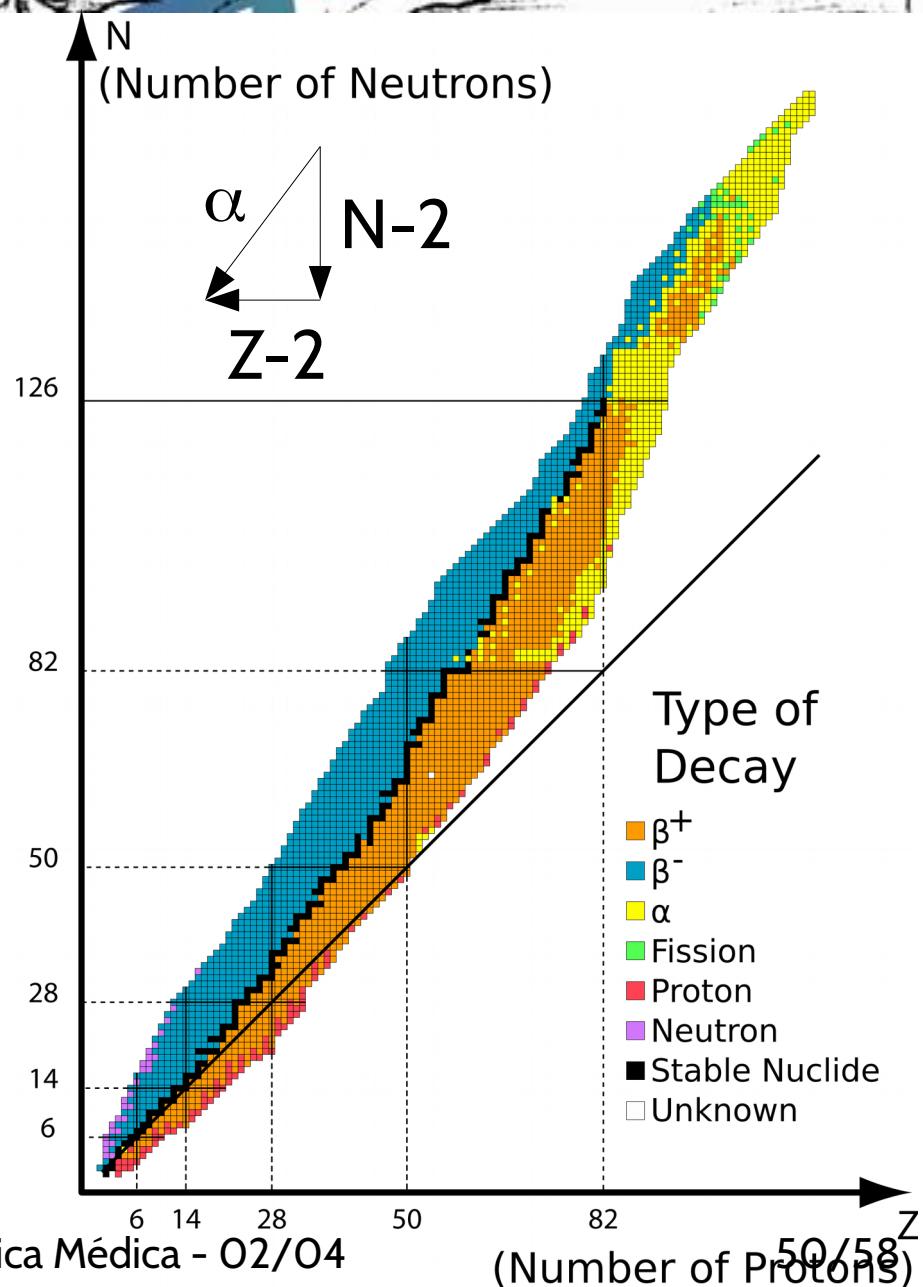
- El núcleo tiene niveles de energía
- El núcleo en un estado excitado se desexcita a través de la emisión de un fotón (gamma) con energía igual a la diferencia de energía entre los estados inicial y final





Decaimiento alfa

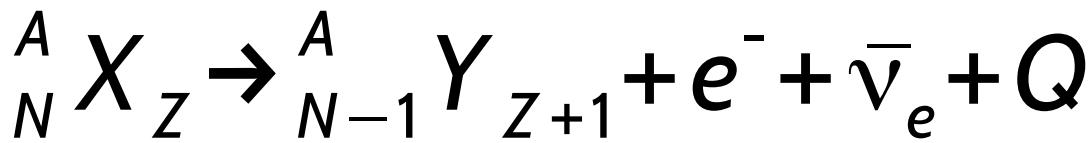
- Corresponde a la emisión espontánea de un núcleo de Helio ${}^4\text{He}_2$ (partícula alfa, 2 neutrones, 2 protones)
- El núcleo pierde dos protones \rightarrow ¡otro elemento!



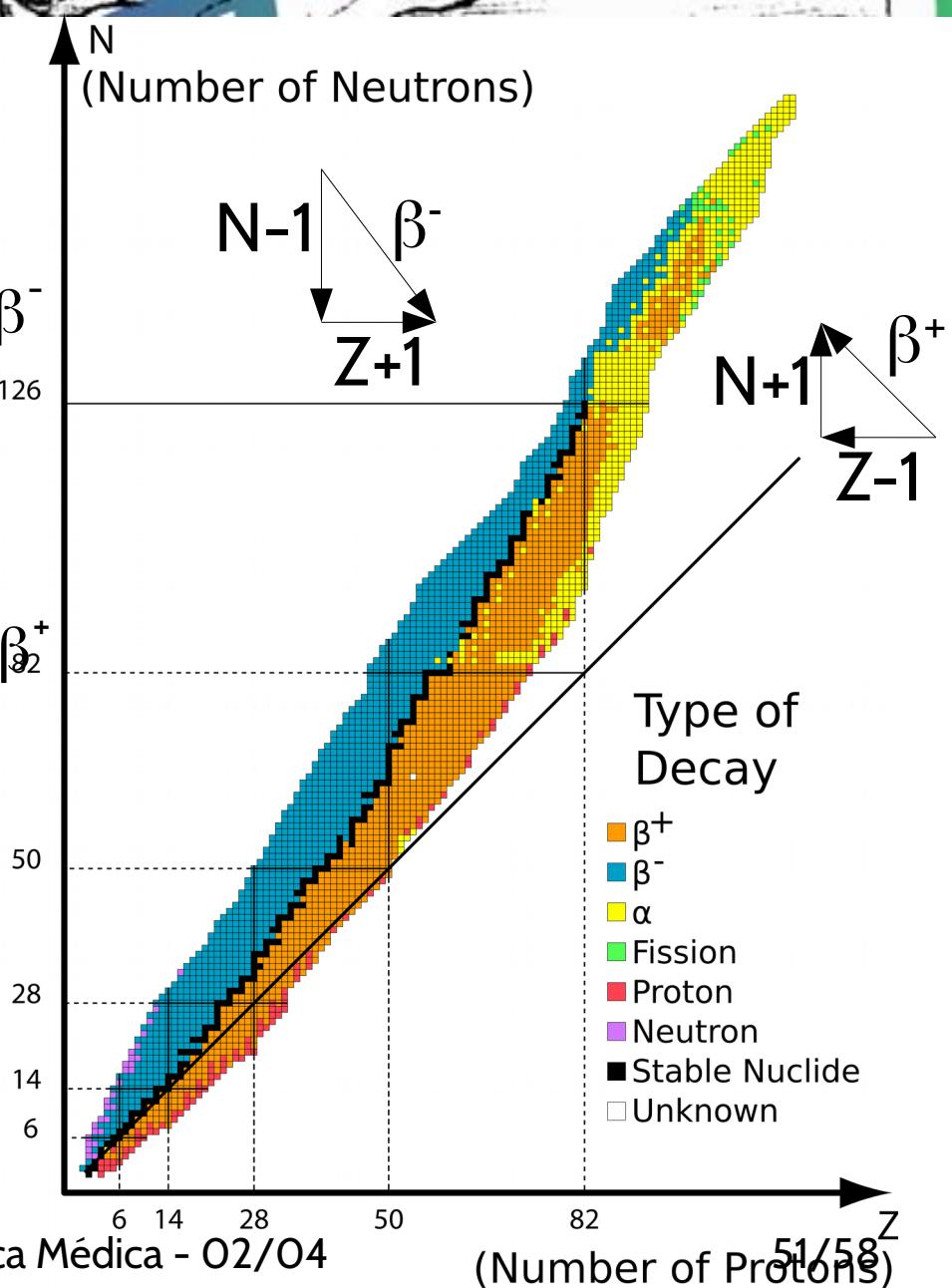
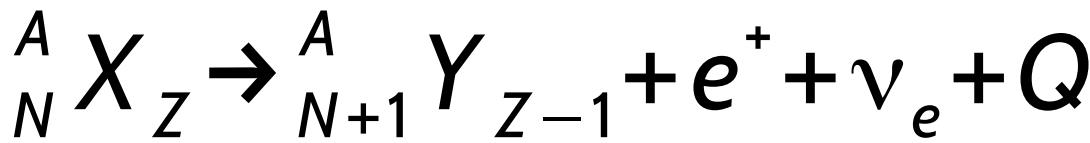


Decaimiento beta

- β^- : emisión de un **electrón**

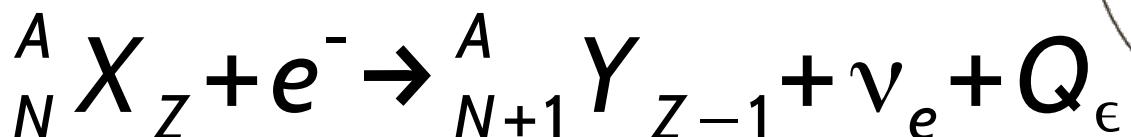


- β^+ : emisión de un positrón

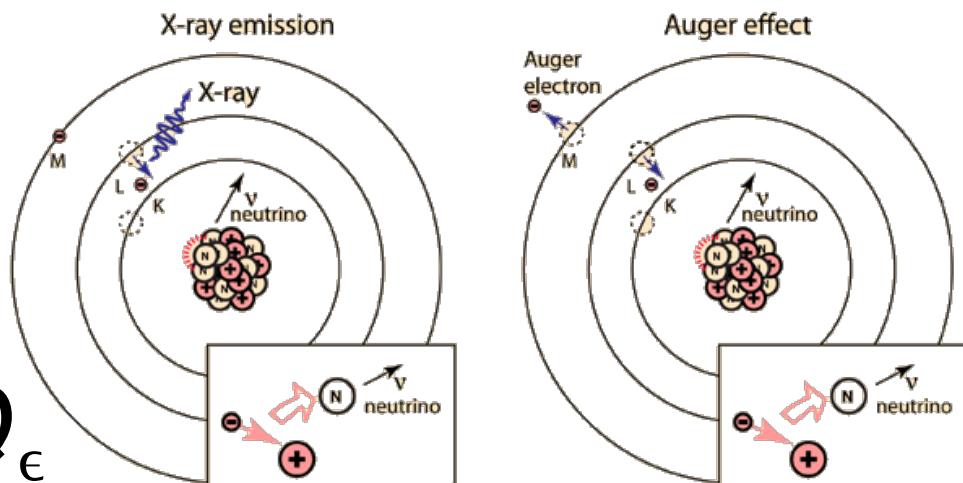


Captura electrónica

- En algunos núcleos inestables con exceso de protones, $DE < 2m_e$, el decaimiento beta no es posible (p. ej ^{11}C , ^7Be)
- Otros núcleos pueden decaer vía beta+ y/o captura
- Un electrón interno es capturado por el núcleo



- El hueco es completado por un electrón externo y RX
- ó **efecto Auger**: la energía liberada cuando el externo completa el interno es transferida a un electrón externo



Modos de decaimiento

Nuclear Wallet Cards

Nuclide Z E1 A			Δ (MeV)	T $\frac{1}{2}$, Γ , or Abundance	Decay Mode
Jπ					
5 B 15			28.96	9.93 ms 7	β^- , β^-n 93.6%, β^-2n 0.4%
	16	0-	37.12	<190 ps	n
	17	(3/2-)	43.8	5.08 ms 5	β^- , β^-n 63%, β^-2n 11%, β^-3n 3.5%, β^-4n 0.4%
	18	(4-)	51.9s	<26 ns	n?
	19	(3/2-)	58.8s	2.92 ms 13	β^- , β^-n 72%, β^-2n 16%
	20		67.1s		
	21		75.7s		
	6 C 8	0+	35.08	230 keV 50	p, α
		(3/2-)	28.909	126.5 ms 9	ε , εp 61.6%, $\varepsilon\alpha$ 38.4%
	10	0+	15.608	10.308 s 4	ε
	11	3/2-	10.650	20.334 m 24	ε
	12	0+	0.000	98.93% 8	
	13	1/2-	3.125	1.07% 8	
	14	0+	3.020	5700 y 30	β^-
	15	1/2+	9.878	2.449 s 5	β^-
	16	0+	13.694	0.747 s 8	β^- , β^-n 99%
	17	3/2+	21.03	193 ms 13	β^- , β^-n 32%
	18	0+	24.92	92 ms 2	β^- , β^-n 31.5%
	19	1/2+	32.41	49 ms 4	β^- , β^-n 61%
	20	0+	37.6	14 ms +6-5	β^- , β^-n 72%
	21	(1/2+)	45.6s	<30 ns	n?
	22	0+	52.1s	6.1 ms +14-12	β^- , β^-n 61%, β^-2n <37%
	23		62.7s		

Núcleos radiactivos

**Nuclear Wallet Cards
for Radioactive Nuclides**

March 2004

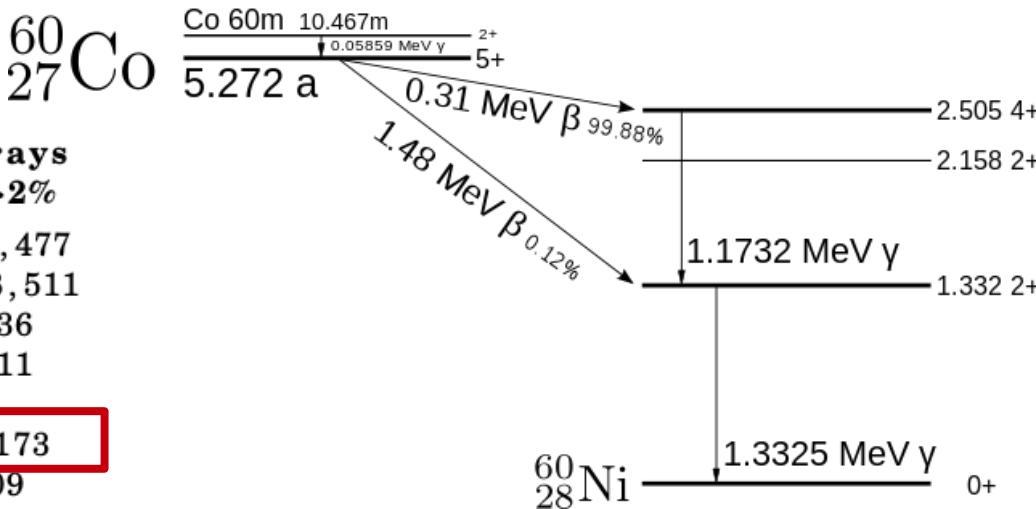
**Jagdish K. Tuli
National Nuclear Data Center
(www.nndc.bnl.gov)**

- Propiedades de núcleos radiactivos con
 - $T_{1/2} > 1\text{h}$
 - $Z < 100$
- Contiene:
 - Nucléido,
 - $T_{1/2}$,
 - principales modos
 - Principales líneas gamma

<http://www.nndc.bnl.gov/wallet/wchome.html>

Cobalto-60: ${}^{60}\text{Co}_{27}$

Nuclide	Half-life	Major Radiations	Major γ -rays (keV) I γ >2%
${}^{55}\text{Co}$	17.53 h	γ	511, 931, 477
${}^{56}\text{Co}$	77.23 d	γ	847, 1238, 511
${}^{57}\text{Co}$	271.7 d	γ	122, 136
${}^{58}\text{Co}$	70.86 d	γ	811, 511
${}^{58m}\text{Co}$	9.04 h	γ	
${}^{60}\text{Co}$	5.271 y	β^-, γ	1332, 1173
61	1.65 h	β^-, γ	67, 909

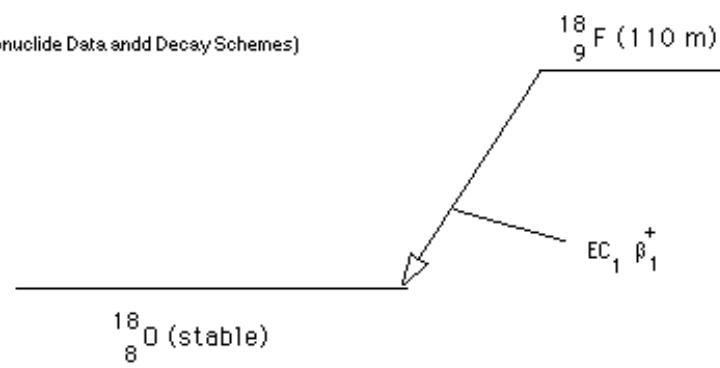


- Beta- a ${}^{60}\text{Ni}$. Emisión de dos líneas muy intensas
- Irradiación de n en ${}^{59}\text{Co}$ en CANDU (Argentina!)
- Gran importancia industrial y médica: esterilización de equipo médico, radiografía industrial, cobalto-terapia, pesticida

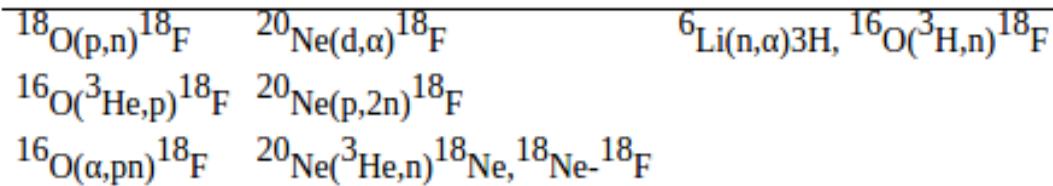
Fluor-18: $^{18}\text{F}_{9}$

FLUORINE-18
ELECTRON CAPTURE AND
POSITRON DECAY

(source: MIRD Radionuclide Data and Decay Schemes)

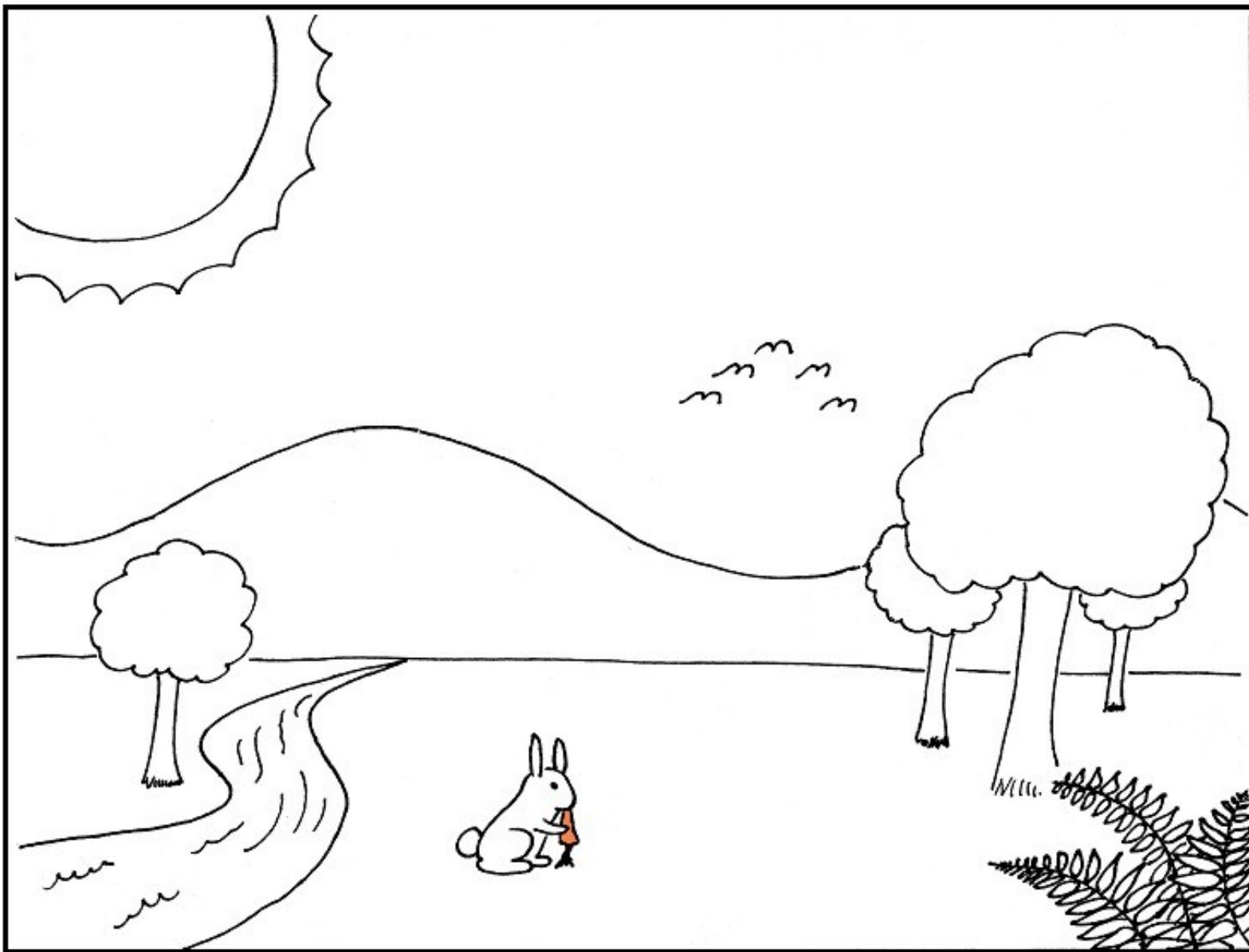


6	C	14	5700 y	β^-	
9	F	18	1.829 h	γ	511
11	Na	22	2.602 y	γ	511, 1275



- Se produce en ciclotrones (CAB!) irradiando protones sobre muestras de agua enriquecida con ^{18}O : $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$
- La destrucción de pares e^+/e^- produce 2 gammas de 511 keV
- Reemplaza un OH^- en azúcares, p ej, fludeoxiglucosa (2-[^{18}F]fluoro-2-deoxy-D-glucosa) para estudios PET

Tratamos de describir la naturaleza



Hacemos lo que podemos

