



# Escuela José Antonio Balseiro 2016

## Nuevas Tendencias en Investigación en Física Médica

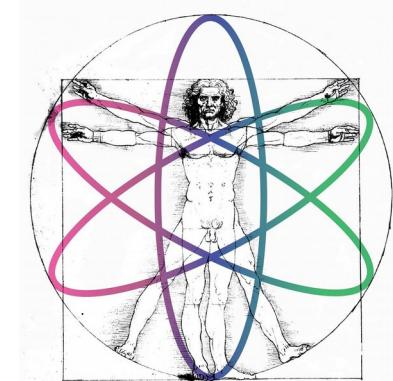
### Introducción a muchas cosas

### Miércoles, Física Nuclear 1ra parte

Hernán Asorey

[asoreyh@cab.cnea.gov.ar](mailto: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



## 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](https://twitter.com/asoreyh))

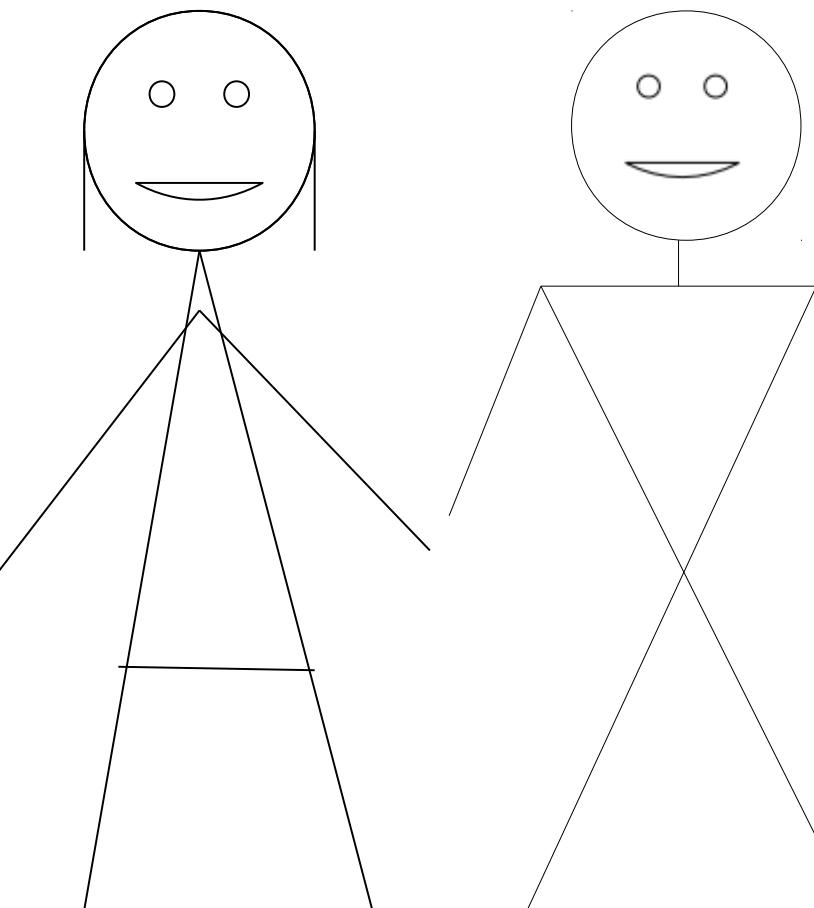
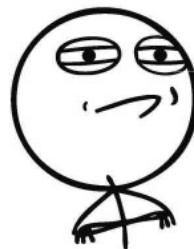


Este trabajo se distribuye en forma gratuita bajo la [Licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

# Pero seguro estarán muy lejos de la realidad....

(¡por suerte!)

CHALLENGE ACCEPTED



# La foto de la familia...

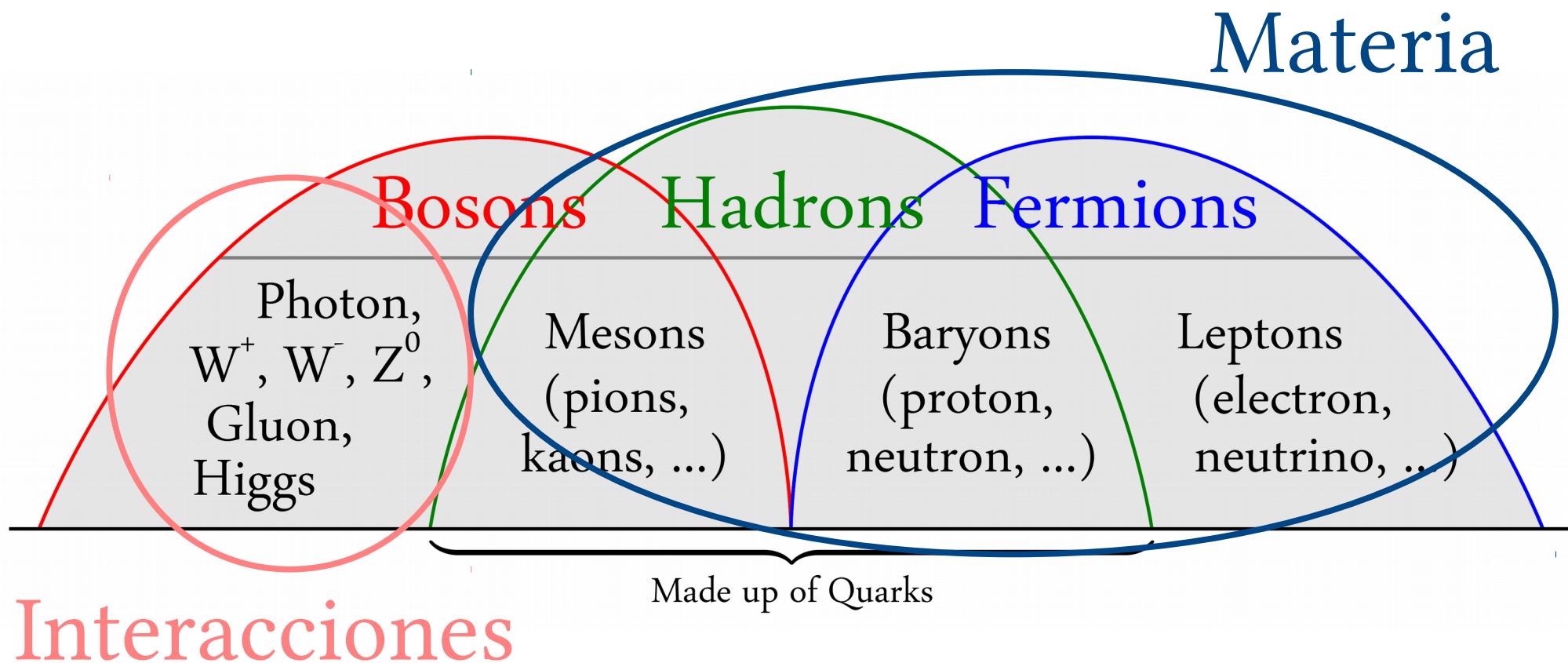


# La foto de la familia...

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

# Clasificación de partículas

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



Interacciones

# Leptones, quarks y mediadores

three generations of matter (fermions)				
	I	II	III	
mass →	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name →	up	charm	top	
<b>QUARKS</b>				
mass →	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	
charge →	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name →	down	strange	bottom	
<b>LEPTONS</b>				
mass →	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	
charge →	0	0	0	
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name →	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	
mass →	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	
charge →	-1	-1	-1	
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name →	electron	muon	tau	
<b>GAUGE BOSONS</b>				
mass →			91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
charge →			0	
spin →			1	
name →			Z boson	
mass →			80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
charge →			$\pm 1$	
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	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 (**p**)
- Conservación del impulso angular (J)
- Conservación de la carga eléctrica (Q)
- **Conservación del número leptónico (L)**

- *electrónico ( $L_e$ )*
- *muónico ( $L_\mu$ )*
- *tauónico ( $L_\tau$ )*

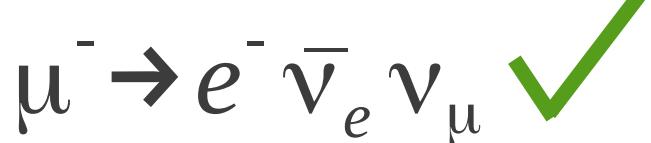
- **Conservación del número bariónico (B)**



- *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

$l$	$Q$	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$
$e$	-1	1	0	0
	0	1	0	0
$\mu$	-1	0	1	0
	0	0	1	0
$\tau$	-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.



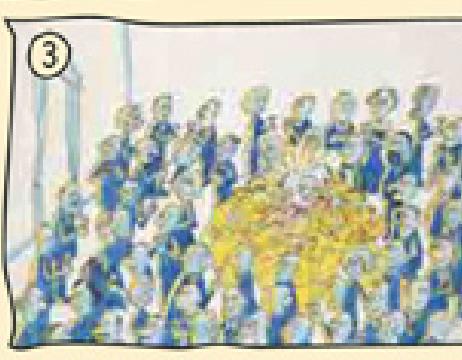
②



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

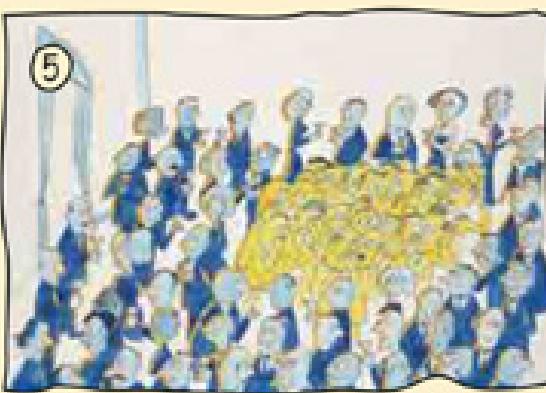


IF A RUMOUR CROSSES THE ROOM ...

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

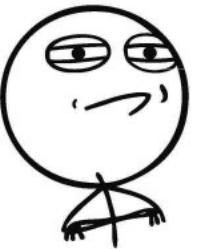
- En un núcleo,  ${}^A_N X_Z$ , encontramos  $A=Z+N$  nucleones:
  - **Z protones**,  $p^+$ ,  $m_p = 938,27 \text{ MeV}/c^2$
  - **N=(A-Z) neutrones**,  $n^0$ ,  $m_n = 939,565 \text{ MeV}/c^2$
  - Otras verduras (originadas por las interacciones EM y Fuerte) cuyo resultado es la:
  - **Energía de ligadura**

# ¿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...



CHALLENGE ACCEPTED





# En el núcleo es más evidente

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

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

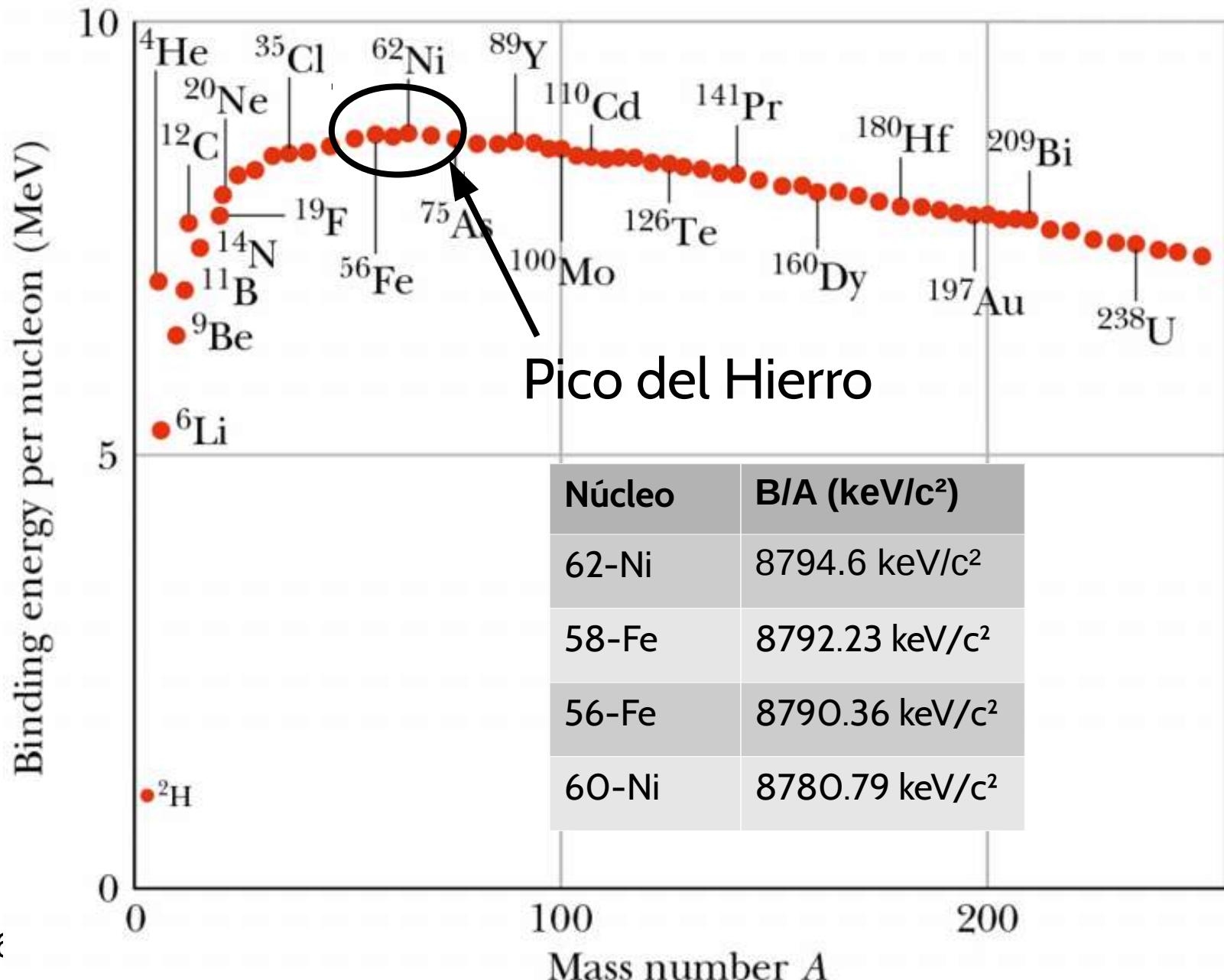
- **$B(A,Z)$  está definido explícitamente positivo.  $B(A,Z) > 0$ : el núcleo está ligado.** Por ej:  $B(12,6) = 89.09 \text{ MeV}$
- Luego, la masa del núcleo carbono-12 será

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

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

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

# 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

Isotope Browser

IAEA Nuclear Data Section Libros y referencias

★ ★ ★ ★ 436

E Todos

Instalada

Sort by name

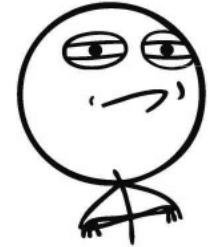
1 H	Alkaline Metals		
3 Li	Alkaline Earth Metals		
4 Be	Transition Metals		
11 Na	Post Transition Metals		
12 Mg	Metalloid		
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr
55 Cs	56 Ba	72 Hf	73 Ta
87 Fr	88 Ra	104 Rf	105 Db
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U
		92 U	93 Np

Decay mode Decay Rad.

Guide

Pick an Element (or enter Symbol, e.g. xe, or Atomic Number Z, e.g. 54, or Nuclide, e.g. 135xe), search starts automatically. Tap an item in the result list to get detailed information. The Database includes ground states and isomers having half-life > 0.1 s

CHALLENGE ACCEPTED



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

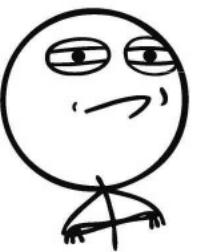
# Por ejemplo, el pdf tiene estética vintage

## Nuclear Wallet Cards

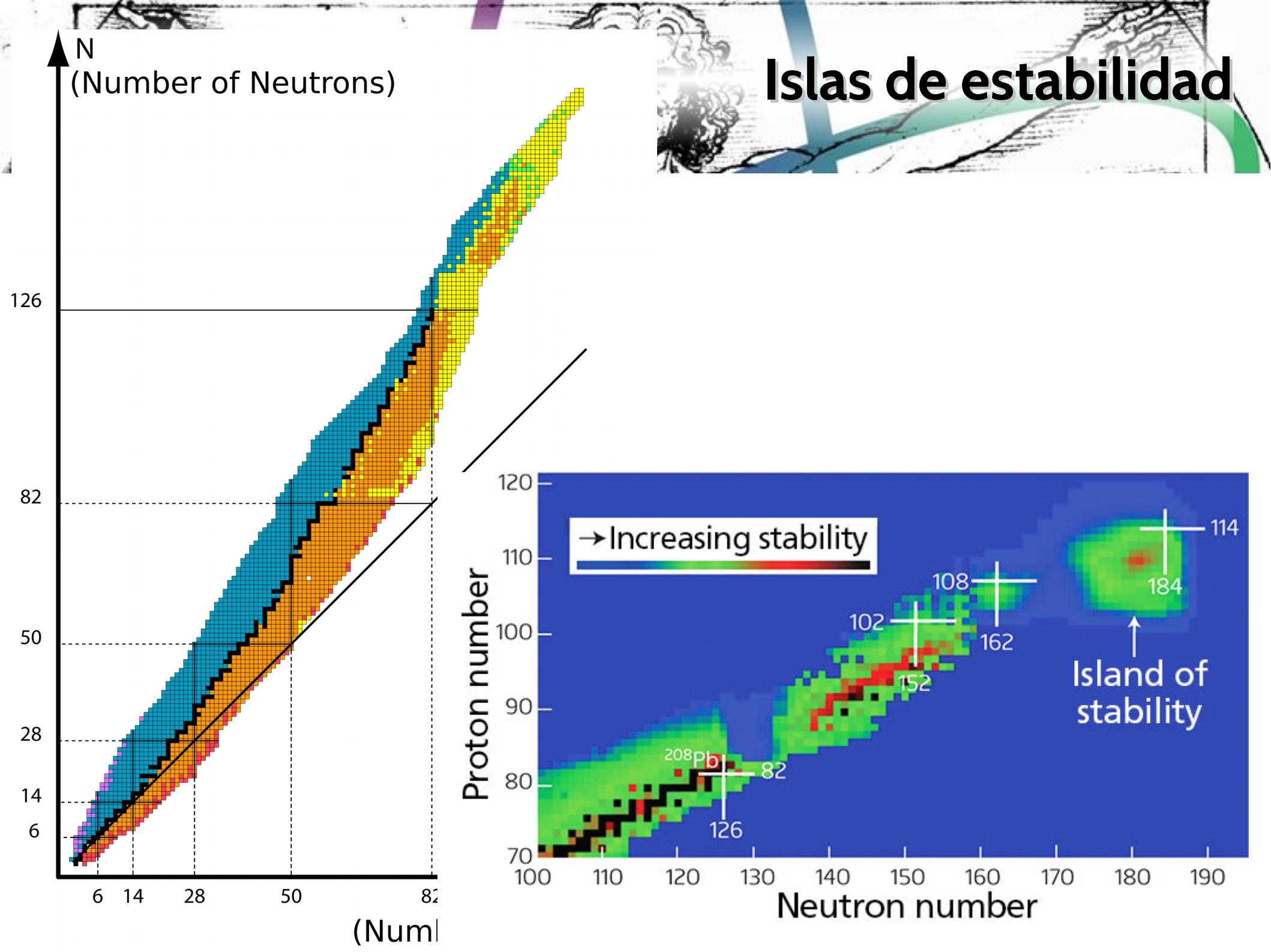
Nuclide Z E1 A	Jπ	Δ (MeV)	T½, Γ, or Abundance	Decay Mode
5 B 15		28.96	9.93 ms 7	$\beta_-$ , $\beta$ -n 93.6%, $\beta$ -2n 0.4%
	16 0-	37.12	<190 ps	n
	17 3/2-)	43.8	5.08 ms 5	$\beta_-$ , $\beta$ -n 63%, $\beta$ -2n 11%, $\beta$ -3n 3.5%, $\beta$ -4n 0.4%
	18 (4-)	51.9s	<26 ns	n?
	19 3/2-)	58.8s	2.92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

¡CUIDADO!  
Son masas  
atómicas!

CHALLENGE ACCEPTED

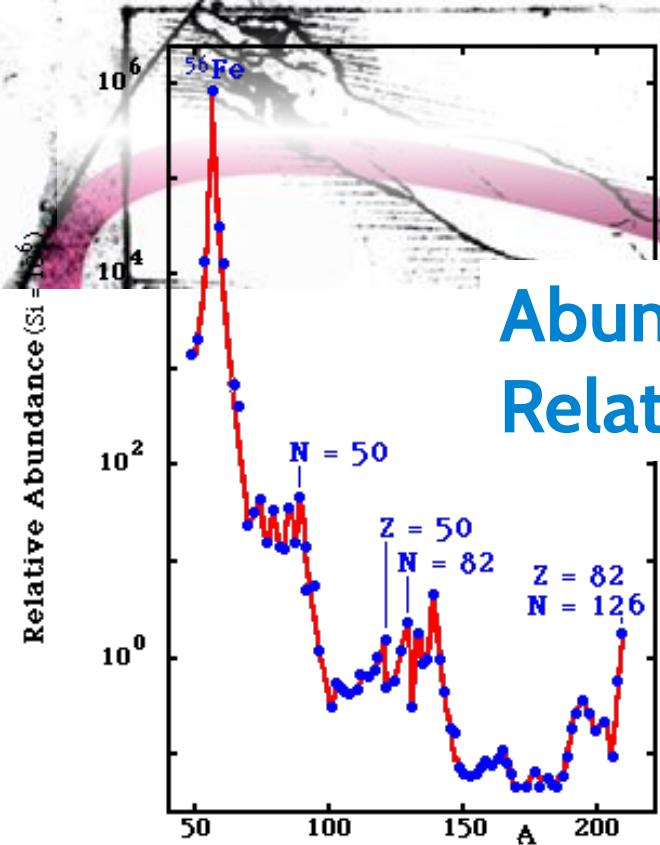


# Islas de estabilidad

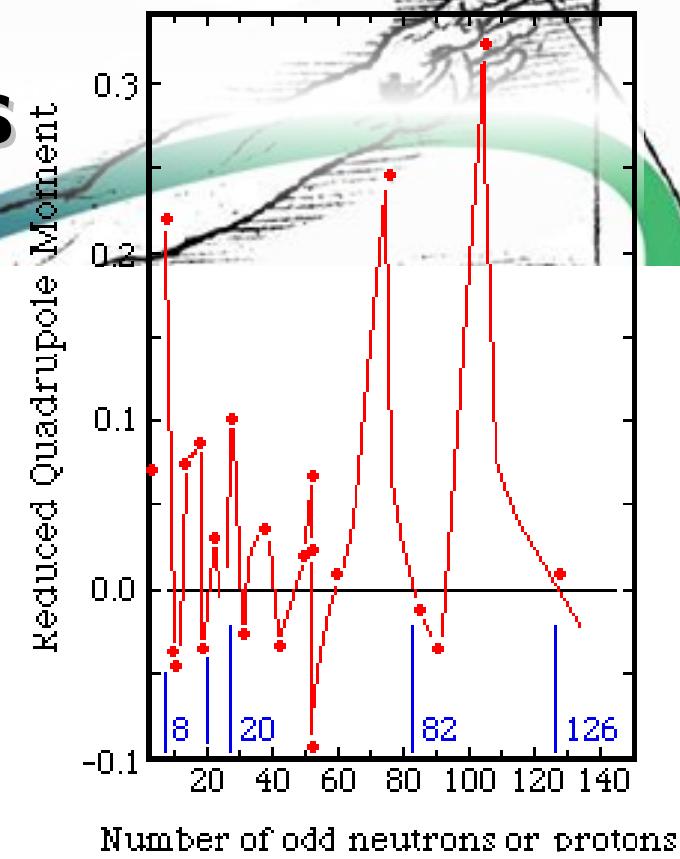


# Números mágicos

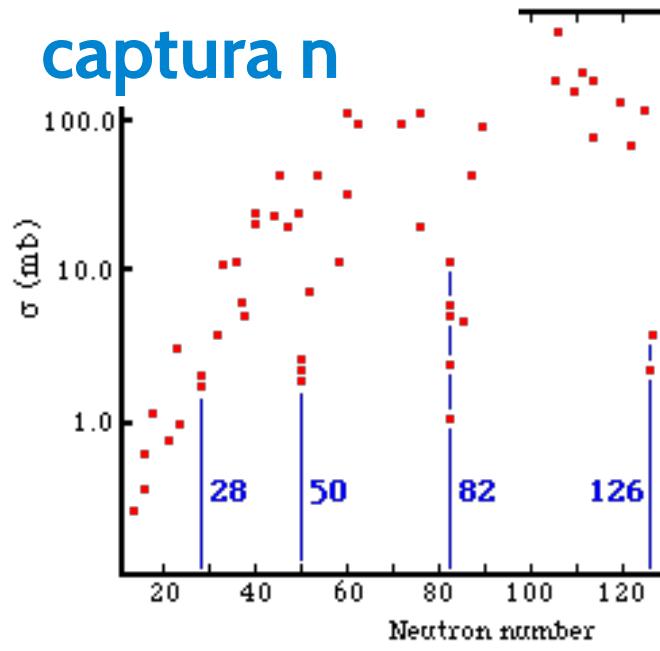
## Abundancias Relativas



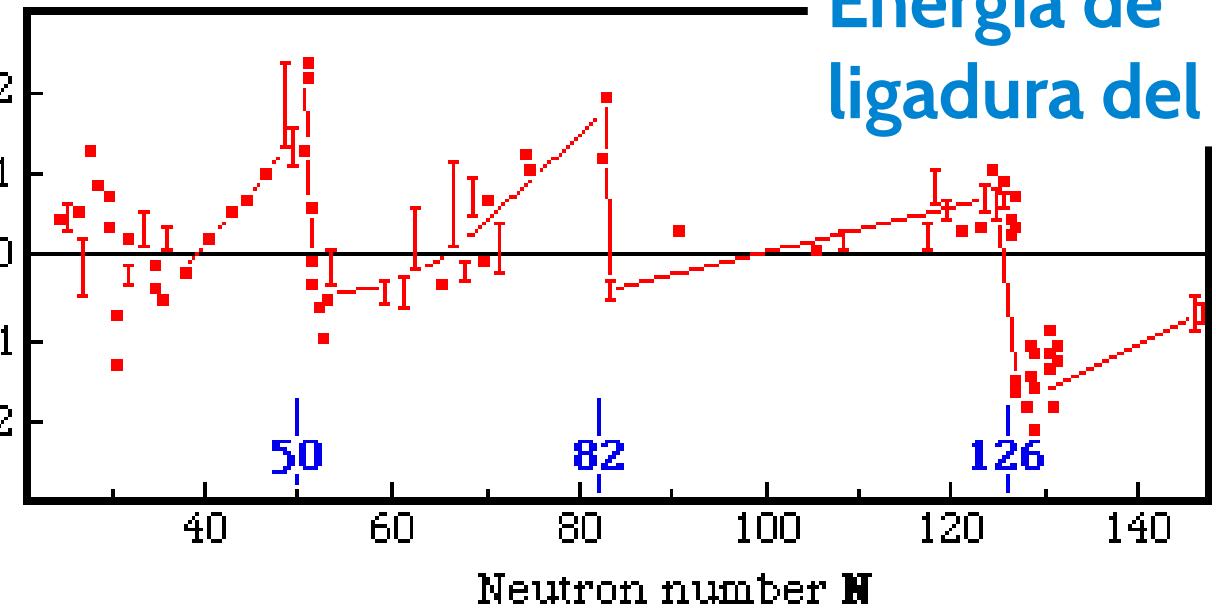
## Momento cuadrupolar $E$



## 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

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

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

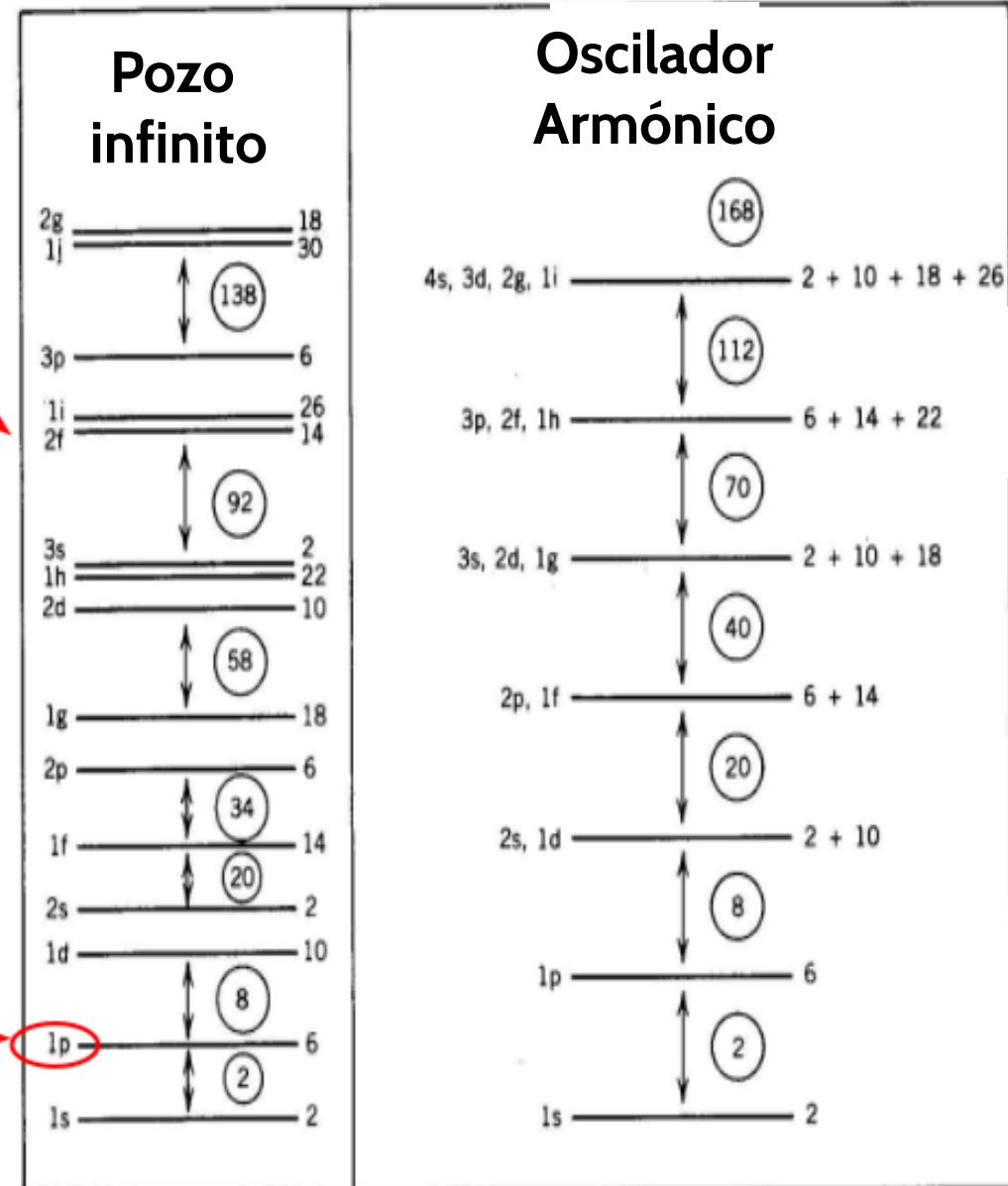
- $L=0 \rightarrow s, L=1 \rightarrow p, L=2 \rightarrow d, L=3 \rightarrow f$

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

nucleones

Oct, 2016

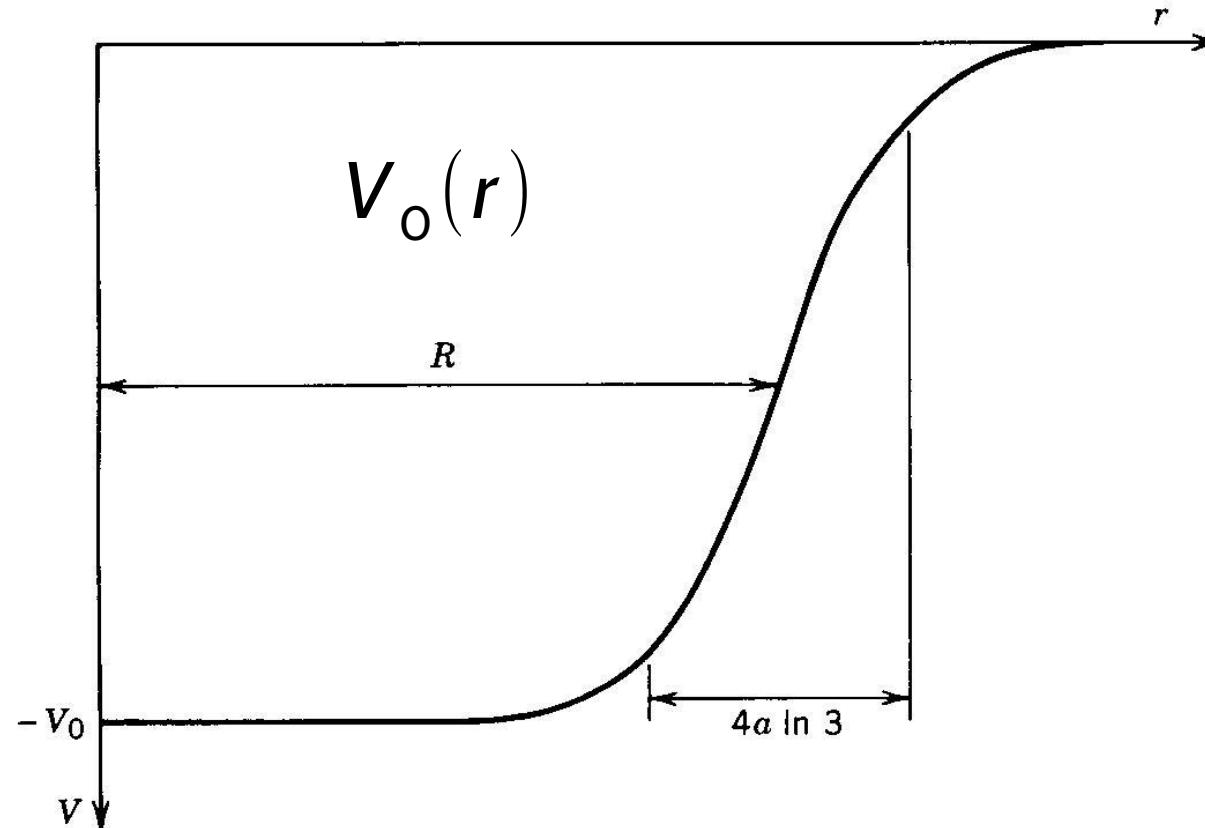
Falto poco



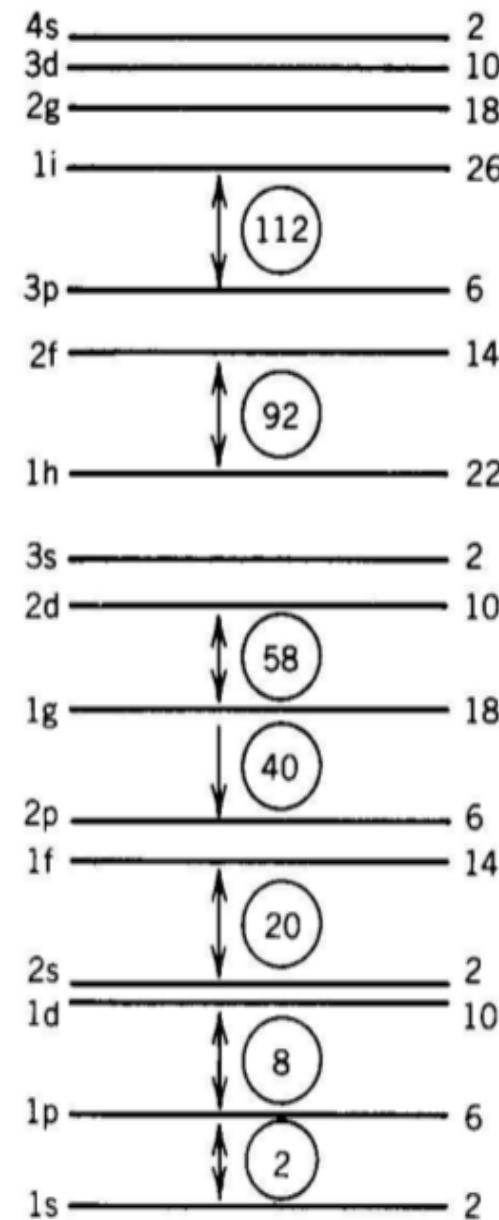
**Figure 5.4** Shell structure obtained with infinite well and harmonic oscillator potentials. The capacity of each level is indicated to its right. Large gaps occur between the levels, which we associate with closed shells. The circled numbers indicate the total number of nucleons at each shell closure.

# Potencial nuclear realista

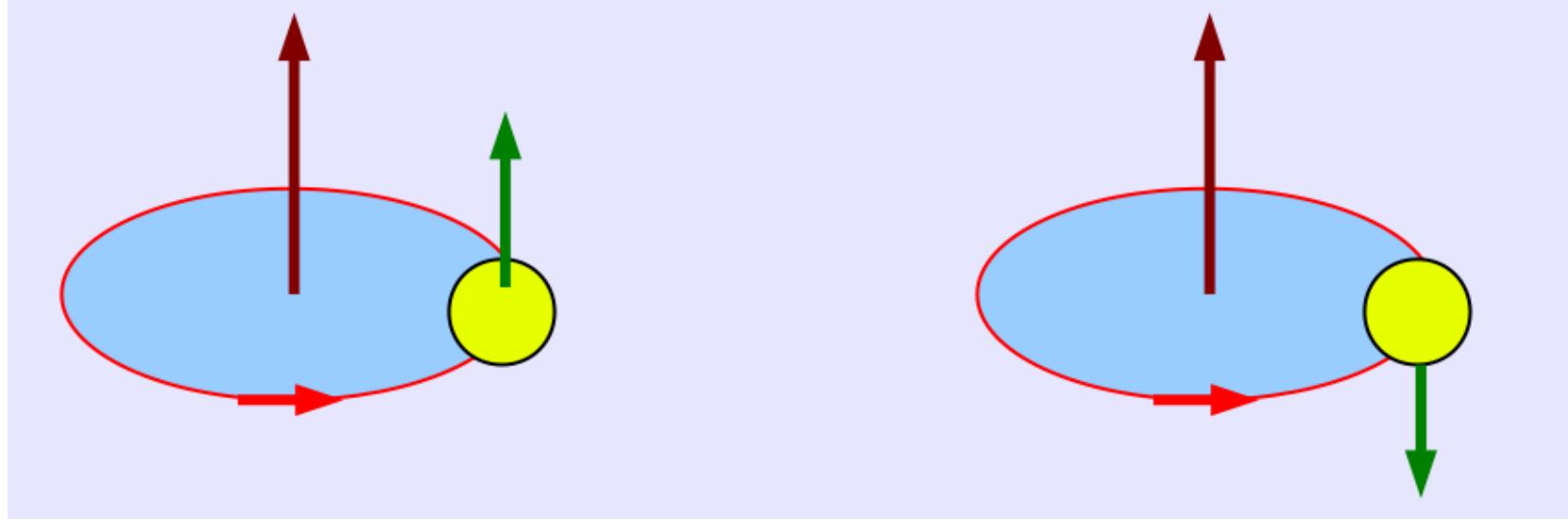
2, 8, 20, 28, 50, 82, 126



**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



# 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!**

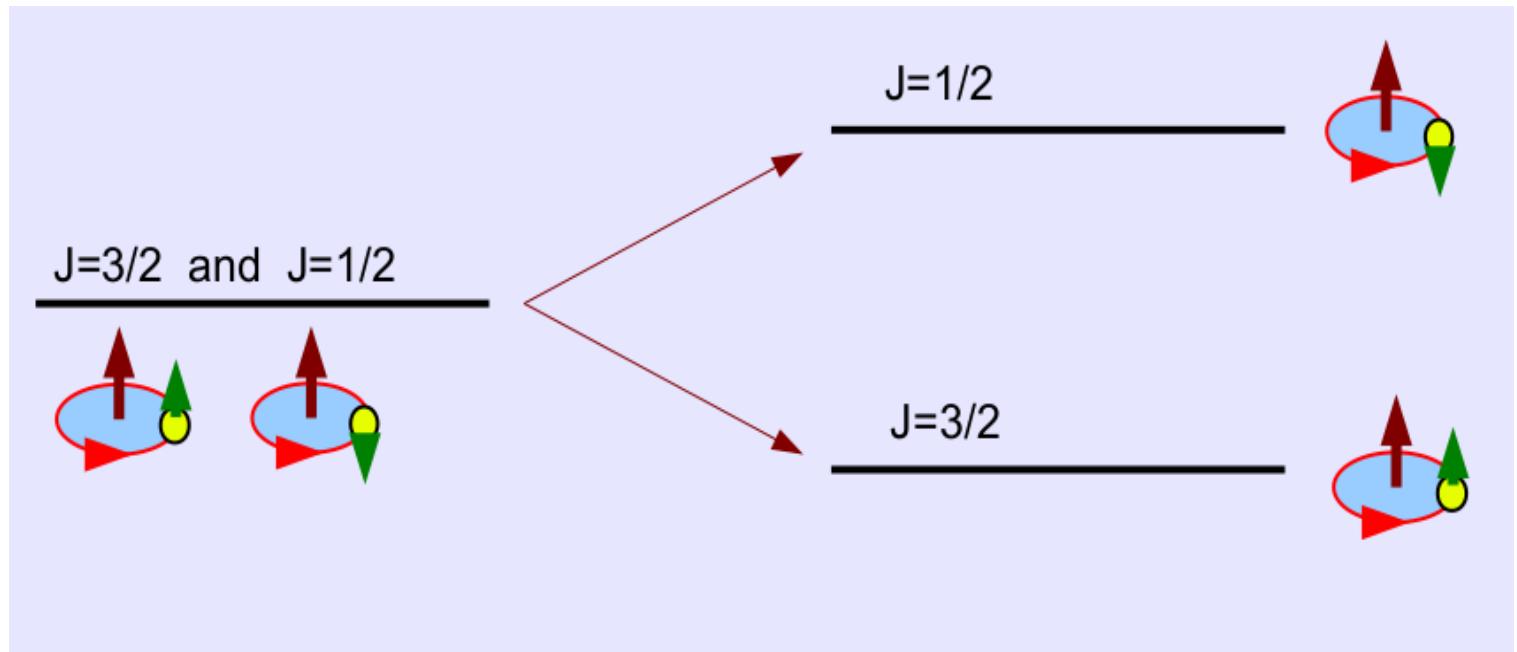
# Suma de momentos angulares

- En cuántica, la suma de momentos angulares

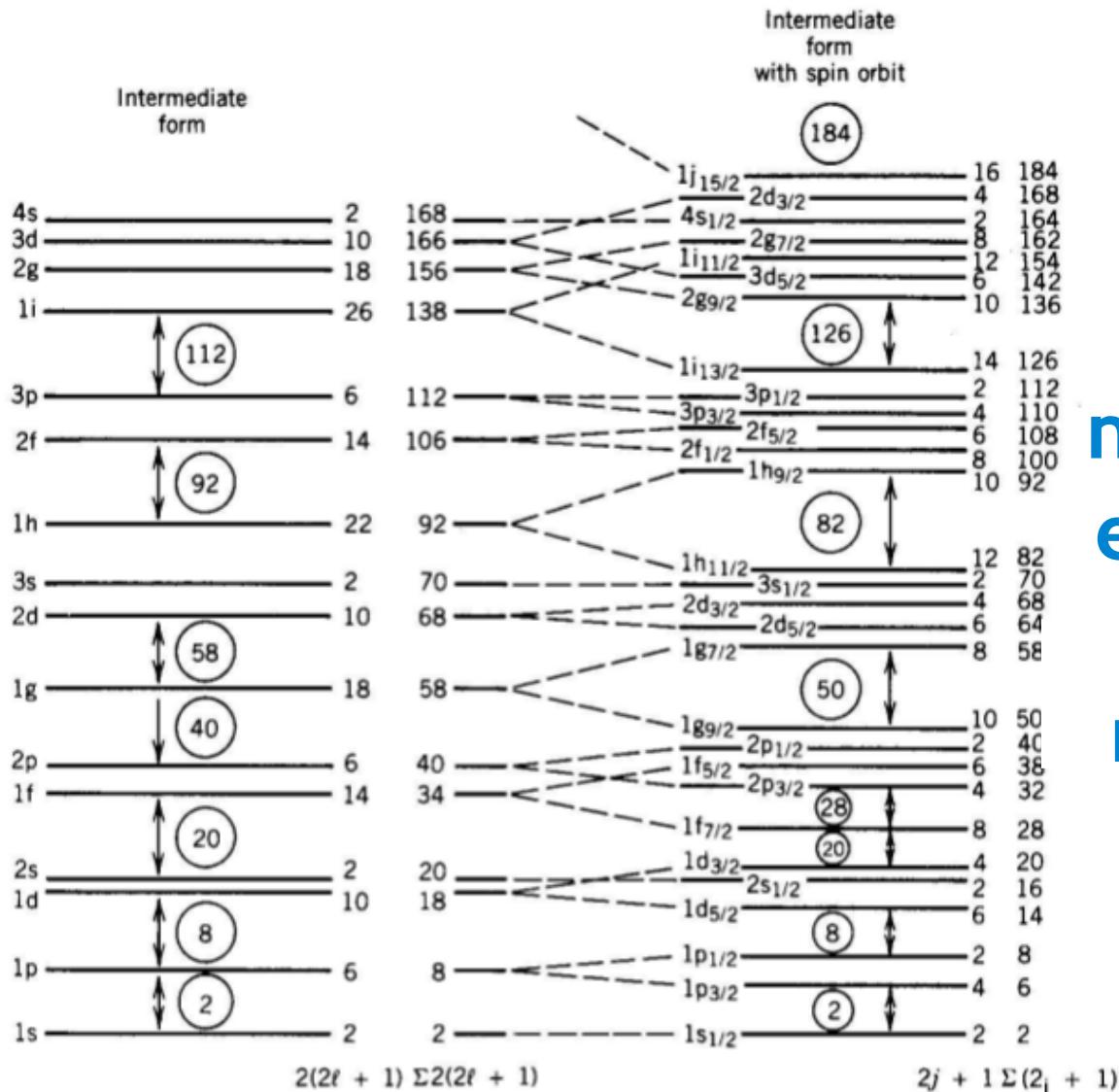
$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \rightarrow |l - s| \leq j \leq (l + s)$$

- 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

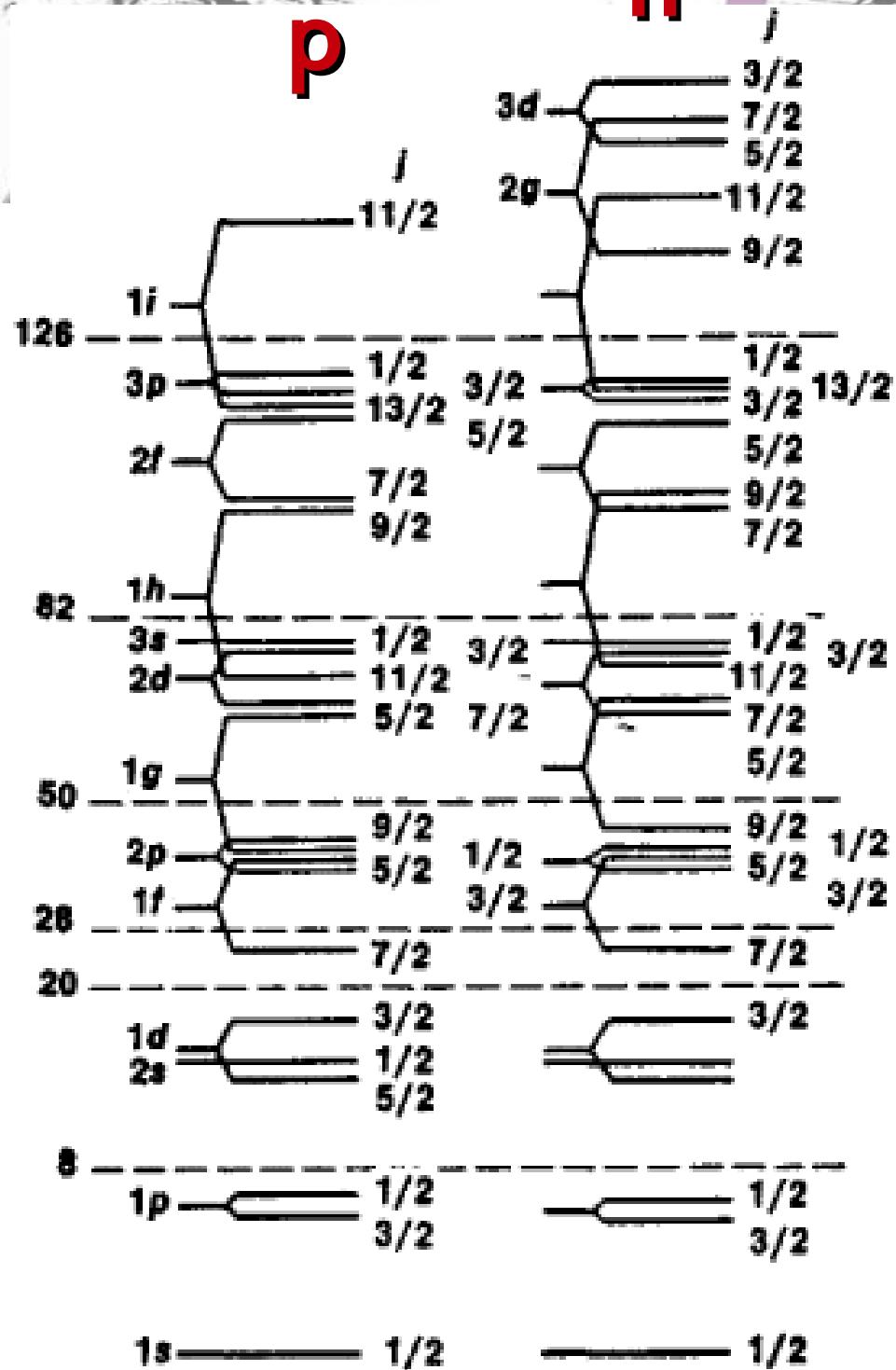
$$\Pi = (-1)^l \Rightarrow l = 0, + ; l = 1, - ; l = 2, +$$

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

$$J^\Pi$$

**p**

**n**



**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,  $j_n$ :**

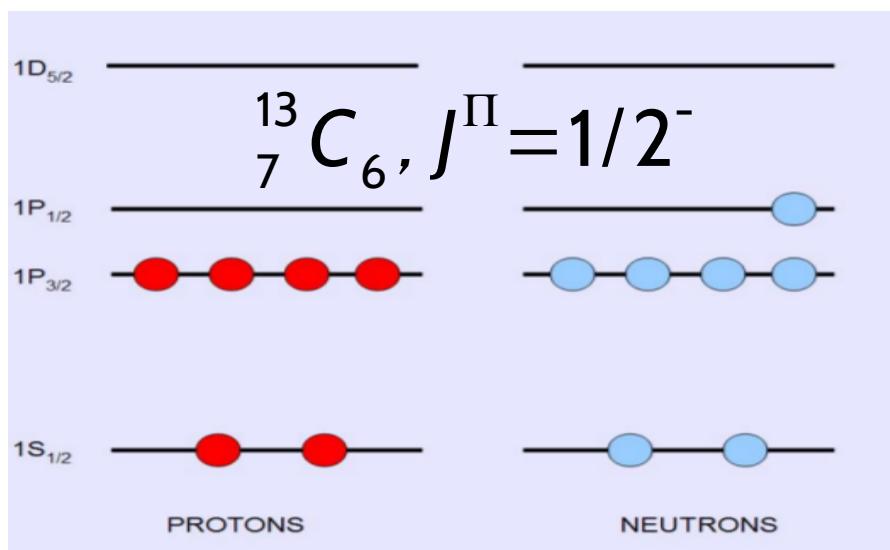
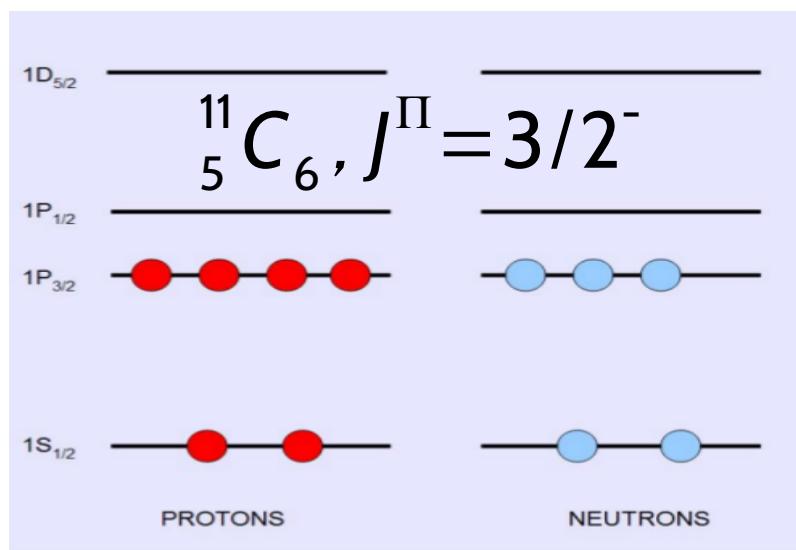
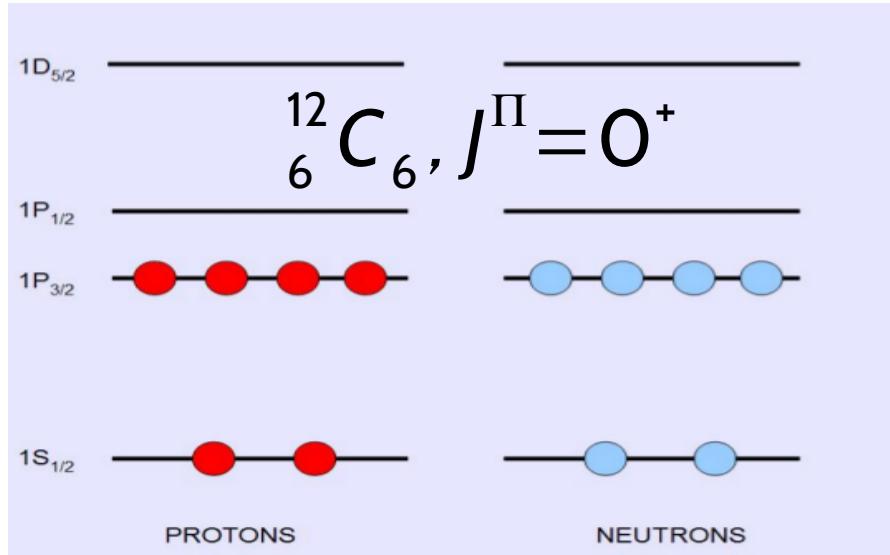
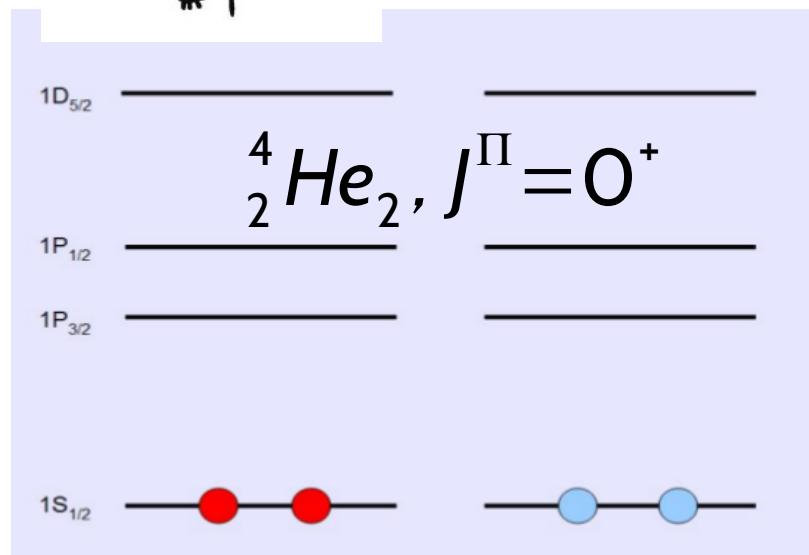
$$|j_p - j_n| \leq J \leq |j_p + j_n| \quad \Pi = (-1)^{l_p + l_n}$$

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

CHALLENGE ACCEPTED



Por ejemplo

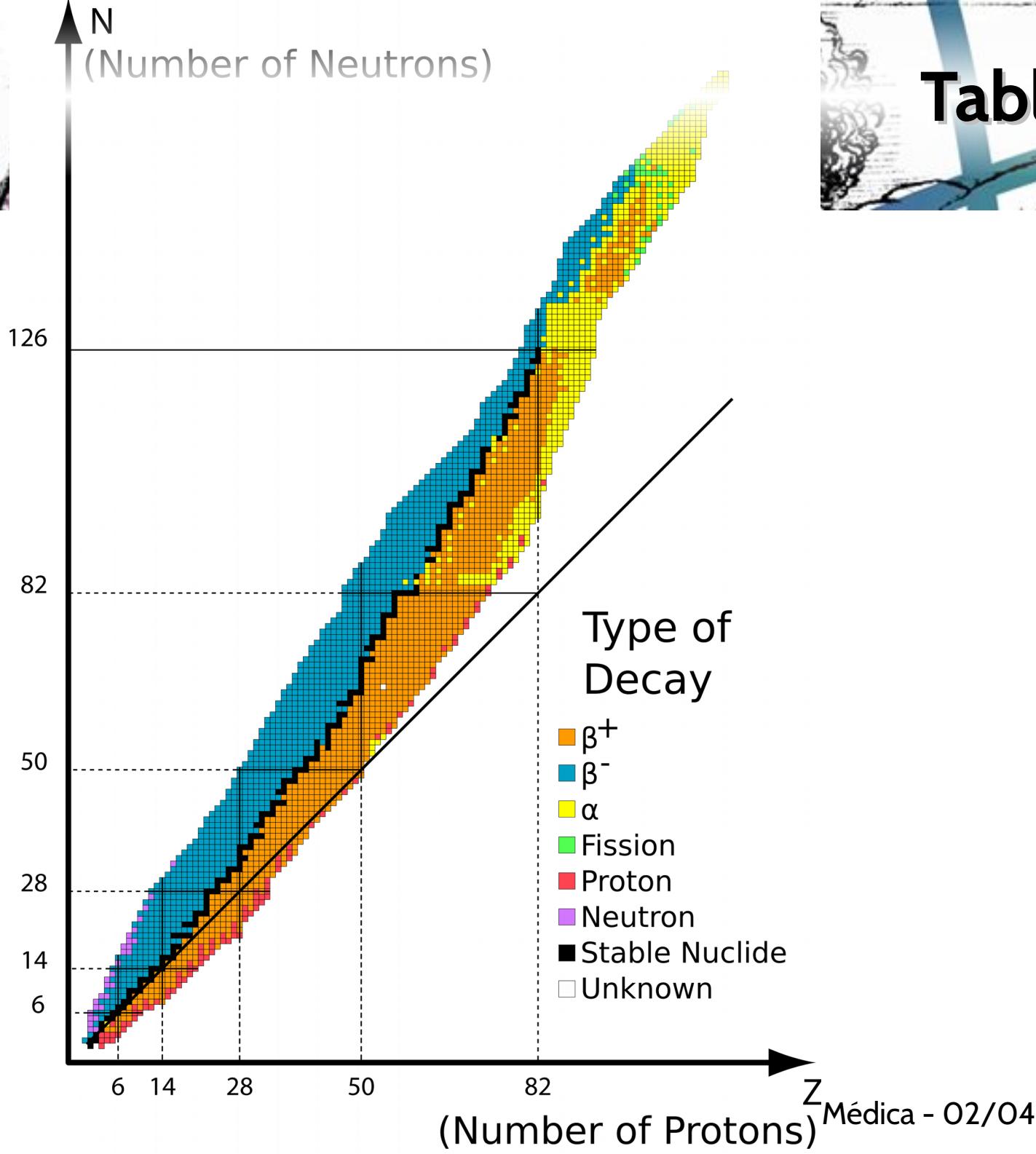


# J y paridad de los núcleos

## Nuclear Wallet Cards

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

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