

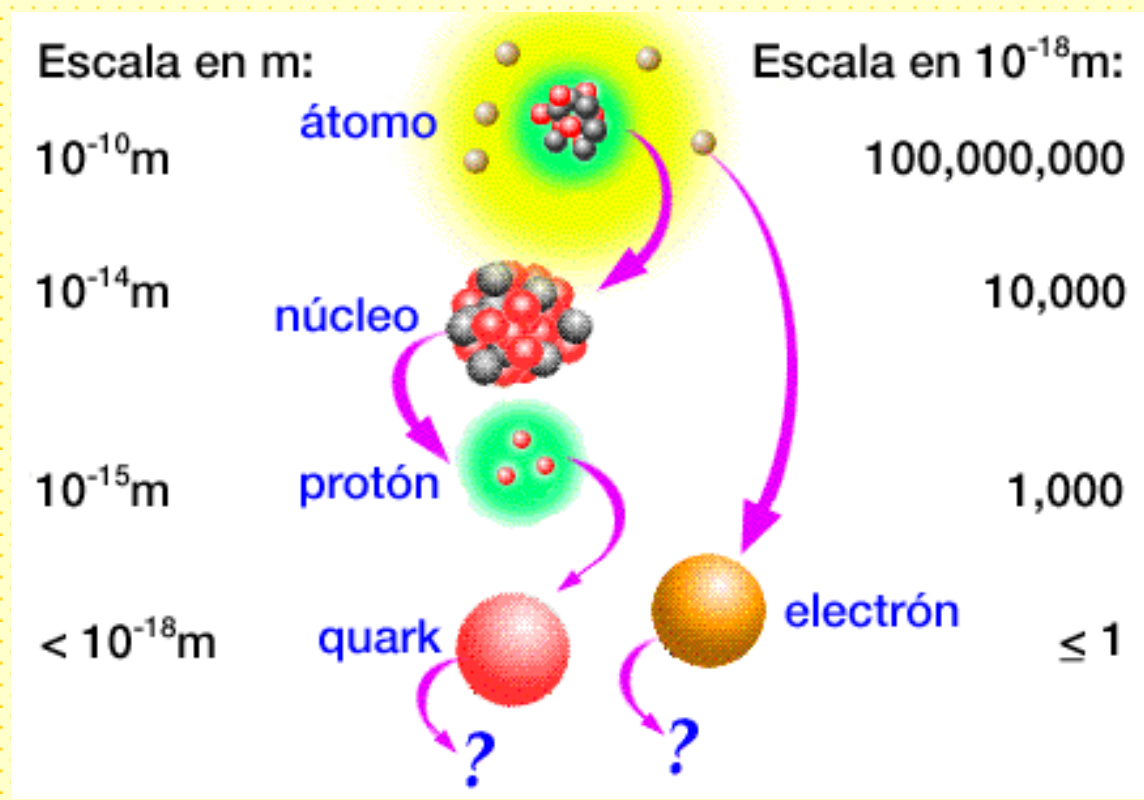
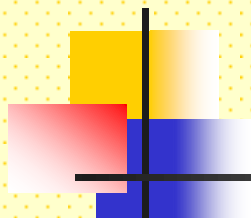


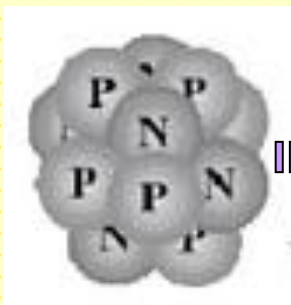
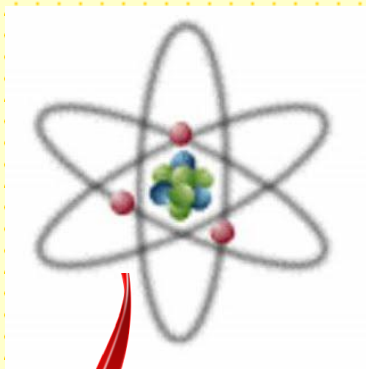
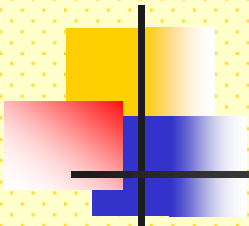
# El núcleo y sus radiaciones

clase 3

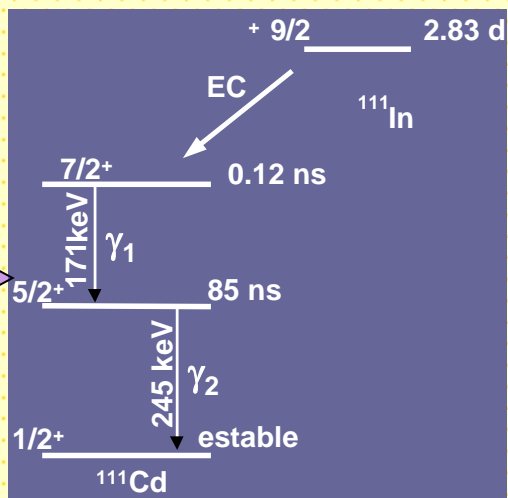
Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas - UNLP  
Instituto de Física La Plata - CONICET  
Calle 49 y 115 La Plata



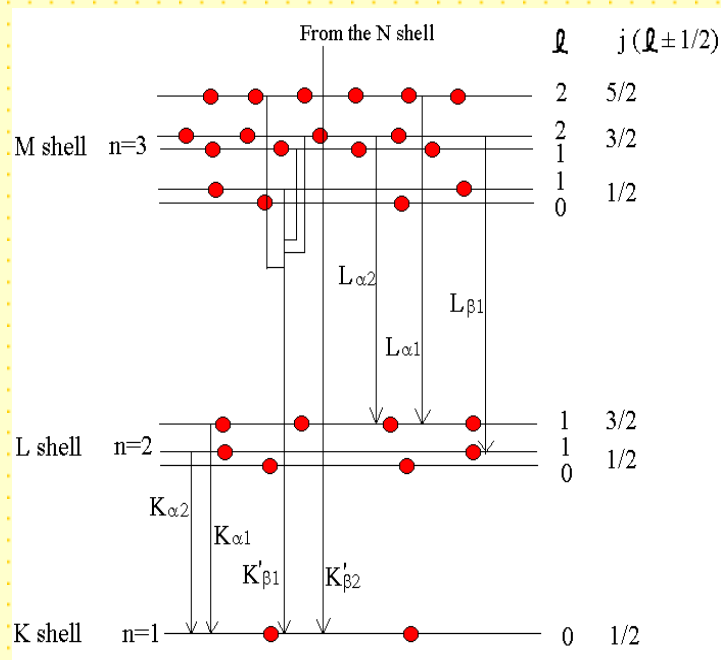




El núcleo



## Esquema de niveles de energía atómicos



## Esquema de niveles de energía nucleares



## El núcleo

---

Cada átomo contiene un *núcleo* extremadamente denso con carga positiva, que es mucho más pequeño que el tamaño general del átomo, pero que contiene la mayor parte de su masa.

Describiremos algunas propiedades generales importantes de los núcleos y de la fuerza nuclear que los mantiene unidos.

La estabilidad o inestabilidad de un núcleo en particular está determinada por la competencia entre la fuerza nuclear de atracción entre protones y neutrones, y las interacciones eléctricas de repulsión entre los protones.

Los núcleos inestables *decaen o se desintegran*, transformándose en forma espontánea en otras estructuras, a través de diversos procesos de decaimiento.

Las reacciones nucleares que alteran las estructuras pueden inducirse también mediante el impacto de una partícula o de algún núcleo sobre otro núcleo.



# El núcleo

---

❖ **materia:** átomos, unidos entre sí por enlaces químicos

❖ **átomo:** electrones + núcleo

❖ **núcleo:** neutrones + protones



❖ **N** = número de neutrones

**Z** = número de protones

**A** = **N** + **Z**

(número atómico)

(número másico)



# El núcleo

---

La unidad de masa atómica (uma) se define como:

**1/12 parte de la masa de un átomo de  $^{12}\text{C}$ .**

Un mol de  $^{12}\text{C}$  contiene un número de Avogadro de átomos ( $6,02 \times 10^{23}$  átomos) y tiene una masa exactamente igual a su peso atómico.

Entonces:

$$\text{masa de un átomo de } ^{12}\text{C} = 12 \text{ g} / 6,02 \times 10^{23} = 1,99 \times 10^{-23} \text{ g/átomo}$$

$$1 \text{ u} = 1,66053886 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$E=mc^2 \Rightarrow 1 \text{ uma} = 931,48 \text{ MeV}$$



## El núcleo

---

$$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0,000549 \text{ uma}$$

$$m_p = 1,672 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,007594 \text{ uma}$$

$$m_n = 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,008986 \text{ uma}$$

# PERIODIC TABLE

## Atomic Properties of the Elements

18  
VIIIA

Physics Laboratory  
physics.nist.gov

Standard Reference Data Group  
www.nist.gov/srd

**Frequently used fundamental physical constants**  
For the most accurate values of these and other constants, visit physics.nist.gov/constants

1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of  $^{133}\text{Cs}$

speed of light in vacuum  $c$  299 792 458 m s<sup>-1</sup> (exact)

Planck constant  $h$  6.626 070 15 × 10<sup>-34</sup> J s (exact)

elementary charge  $e$  1.602 176 634 × 10<sup>-19</sup> C

electron mass  $m_e$  9.109 383 56 × 10<sup>-31</sup> kg

$m_e c^2$  0.511 0 MeV

proton mass  $m_p$  1.672 621 92 × 10<sup>-27</sup> kg

fine-structure constant  $\alpha$  1/137.036

Rydberg constant  $R_\infty$  10 973 731.762 m<sup>-1</sup>

$R_H$  13.605 698 eV

$R_\infty h c$  13.605 698 eV

Boltzmann constant  $k$  1.380 658 × 10<sup>-23</sup> J K<sup>-1</sup>

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

Group 1 IA	2 IIA	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII	9 VIII	10 VIII	11 IB	12 IIB	13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA	
1 H																		2 He
2 Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3 Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4 K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5 Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6 Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7 Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub		Uuq		Uuh			

Lanthanides

Actinides

Atomic Number

Ground-state Level

Symbol

Name

Atomic Weight

Ground-state Configuration

Ionization Energy (eV)

**58**  $^{138}\text{Ce}$

**Ce**

Cerium

140.118

$(\text{Xe})4f^{14}6s^2$

5.5387

57 $^{139}\text{La}$	58 $^{140}\text{Ce}$	59 $^{141}\text{Pr}$	60 $^{142}\text{Nd}$	61 $^{143}\text{Pm}$	62 $^{144}\text{Sm}$	63 $^{145}\text{Eu}$	64 $^{147}\text{Gd}$	65 $^{148}\text{Tb}$	66 $^{149}\text{Dy}$	67 $^{150}\text{Ho}$	68 $^{151}\text{Er}$	69 $^{152}\text{Tm}$	70 $^{153}\text{Yb}$	71 $^{154}\text{Lu}$
57 $^{223}\text{Fr}$	58 $^{226}\text{Ra}$	59 $^{227}\text{Ac}$	60 $^{228}\text{Th}$	61 $^{229}\text{Pa}$	62 $^{230}\text{U}$	63 $^{231}\text{Np}$	64 $^{232}\text{Pu}$	65 $^{233}\text{Am}$	66 $^{235}\text{Cm}$	67 $^{237}\text{Bk}$	68 $^{239}\text{Cf}$	69 $^{241}\text{Es}$	70 $^{243}\text{Fm}$	71 $^{247}\text{Md}$
72 $^{178}\text{Hf}$	73 $^{180}\text{Ta}$	74 $^{182}\text{W}$	75 $^{186}\text{Re}$	76 $^{188}\text{Os}$	77 $^{190}\text{Ir}$	78 $^{192}\text{Pt}$	79 $^{195}\text{Au}$	80 $^{200}\text{Hg}$	81 $^{201}\text{Tl}$	82 $^{204}\text{Pb}$	83 $^{208}\text{Bi}$	84 $^{209}\text{Po}$	85 $^{210}\text{At}$	86 $^{210}\text{Rn}$
87 $^{223}\text{Fr}$	88 $^{226}\text{Ra}$	89 $^{227}\text{Ac}$	90 $^{228}\text{Th}$	91 $^{229}\text{Pa}$	92 $^{230}\text{U}$	93 $^{231}\text{Np}$	94 $^{232}\text{Pu}$	95 $^{233}\text{Am}$	96 $^{235}\text{Cm}$	97 $^{237}\text{Bk}$	98 $^{239}\text{Cf}$	99 $^{241}\text{Es}$	100 $^{243}\text{Fm}$	101 $^{247}\text{Md}$
104 $^{261}\text{Rf}$	105 $^{262}\text{Db}$	106 $^{263}\text{Sg}$	107 $^{264}\text{Bh}$	108 $^{265}\text{Hs}$	109 $^{266}\text{Mt}$	110 $^{267}\text{Uun}$	111 $^{268}\text{Uuu}$	112 $^{269}\text{Uub}$		114 $^{288}\text{Uuq}$		116 $^{289}\text{Uuh}$		

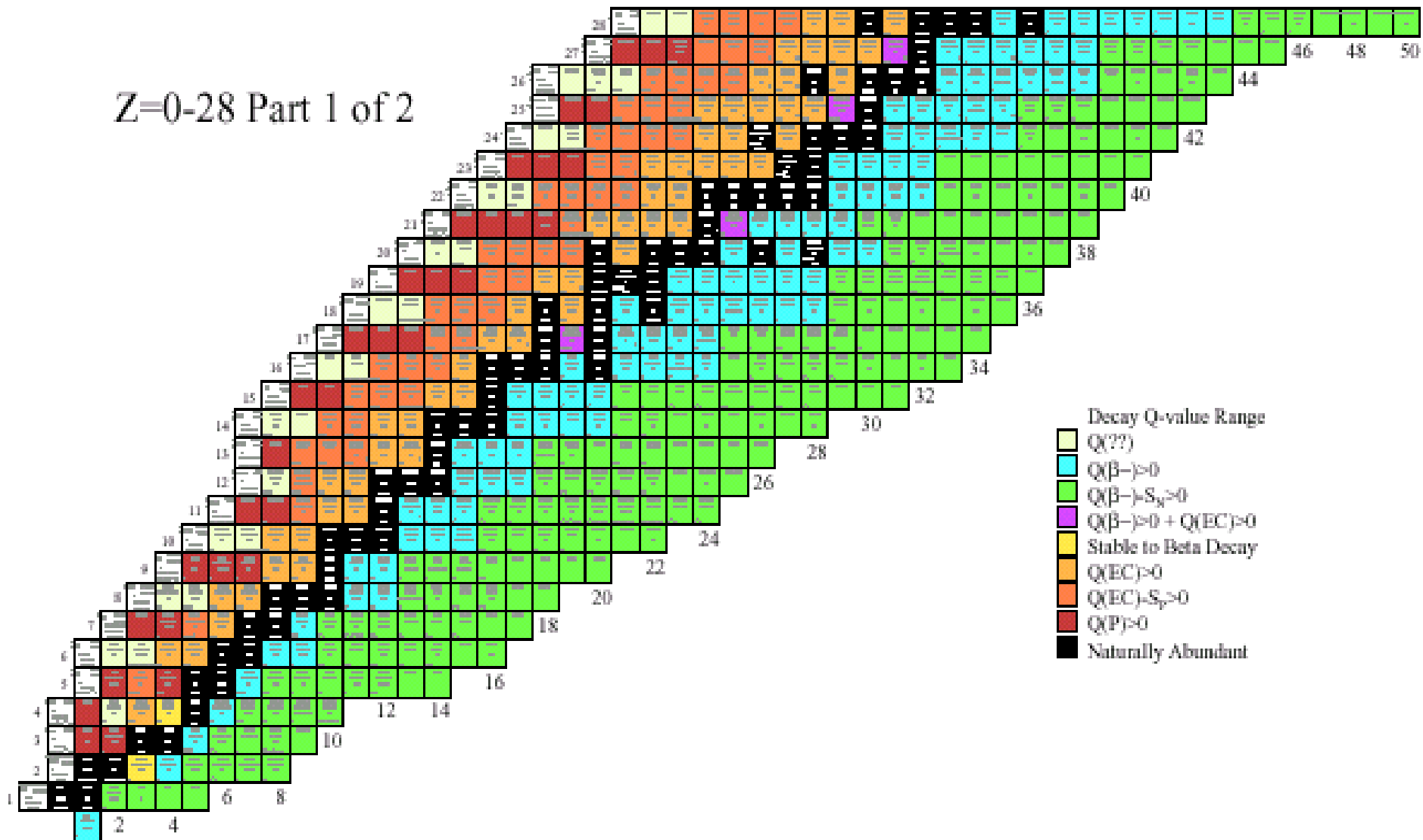
<sup>1</sup>Based upon  $^{12}\text{C}$ . 0 indicates the mass number of the most stable isotope.

For a description of the data, visit [physics.nist.gov/data](http://physics.nist.gov/data)



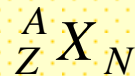
# Table of Isotopes (1998)

Z=0-28 Part 1 of 2



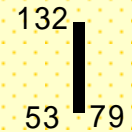
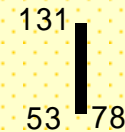


# El núcleo

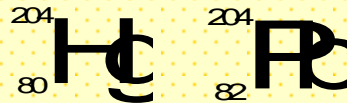


- ❖ **Isótopos:** átomos con igual Z y diferente A y N

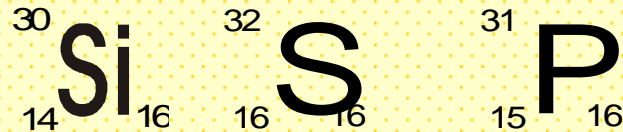
Elemento  $\longrightarrow$  mezcla natural de isótopos



- ❖ **Isóbaros:** igual A diferente Z



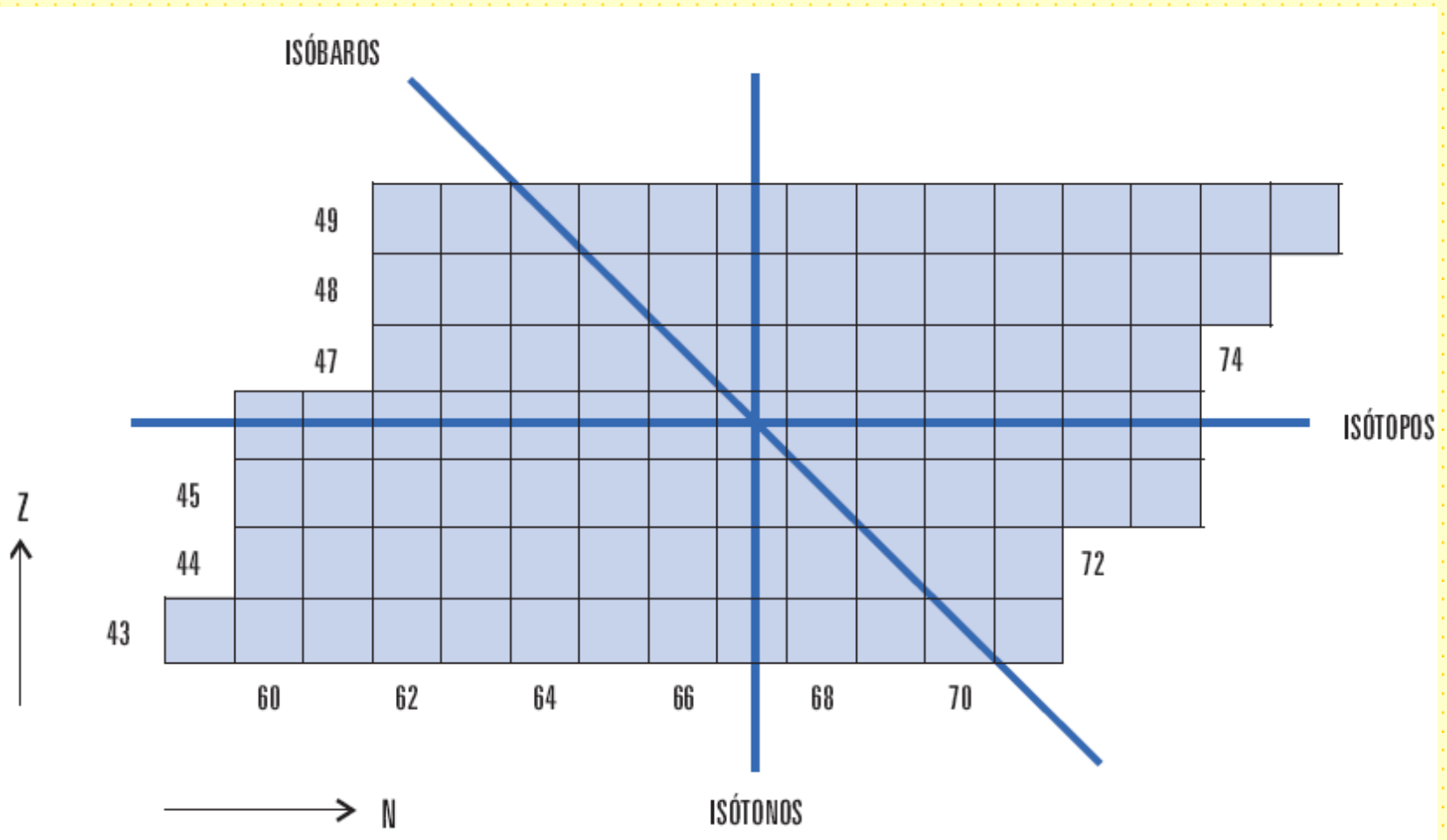
- ❖ **Isótonos:** igual N, diferente A y Z



- ❖ **Isómeros:** igual N, A y Z, diferentes estados energéticos ( $t_{1/2} > ms$ )



# El núcleo





# El núcleo

## Composición de algunos nucleídos

Núcleo	Número de masa (número total de nucleones), $A$	Número atómico (número de protones), $Z$	Número de neutrones, $N = A - Z$
${}^1_1\text{H}$	1	1	0
${}^2_1\text{D}$	2	1	1
${}^4_2\text{He}$	4	2	2
${}^6_3\text{Li}$	6	3	3
${}^7_3\text{Li}$	7	3	4
${}^9_4\text{Be}$	9	4	5
${}^{10}_5\text{B}$	10	5	5
${}^{11}_5\text{B}$	11	5	6
${}^{12}_6\text{C}$	12	6	6
${}^{13}_6\text{C}$	13	6	7
${}^{14}_7\text{N}$	14	7	7
${}^{16}_8\text{O}$	16	8	8
${}^{23}_{11}\text{Na}$	23	11	12
${}^{65}_{29}\text{Cu}$	65	29	36
${}^{200}_{80}\text{Hg}$	200	80	120
${}^{235}_{92}\text{U}$	235	92	143
${}^{238}_{92}\text{U}$	238	92	146



# El núcleo

Masas de átomos neutros, para algunos nucleídos ligeros.

Elemento e isótopo	Número atómico, $Z$	Número de neutrones, $N$	Masa atómica (u)	Número de masa, $A$
Hidrógeno ( ${}^1_1\text{H}$ )	1	0	1.007825	1
Deuterio ( ${}^2_1\text{H}$ )	1	1	2.014102	2
Tritio ( ${}^3_1\text{H}$ )	1	2	3.016049	3
Helio ( ${}^3_2\text{He}$ )	2	1	3.016029	3
Helio ( ${}^4_2\text{He}$ )	2	2	4.002603	4
Litio ( ${}^6_3\text{Li}$ )	3	3	6.015122	6
Litio ( ${}^7_3\text{Li}$ )	3	4	7.016004	7
Berilio ( ${}^9_4\text{Be}$ )	4	5	9.012182	9
Boro ( ${}^{10}_5\text{B}$ )	5	5	10.012937	10
Boro ( ${}^{11}_5\text{B}$ )	5	6	11.009305	11
Carbono ( ${}^{12}_6\text{C}$ )	6	6	12.000000	12
Carbono ( ${}^{13}_6\text{C}$ )	6	7	13.003355	13
Nitrógeno ( ${}^{14}_7\text{N}$ )	7	7	14.003074	14
Nitrógeno ( ${}^{15}_7\text{N}$ )	7	8	15.000109	15
Oxígeno ( ${}^{16}_8\text{O}$ )	8	8	15.994915	16
Oxígeno ( ${}^{17}_8\text{O}$ )	8	9	16.999132	17
Oxígeno ( ${}^{18}_8\text{O}$ )	8	10	17.999160	18

Fuente: A. H. Wapstra y G. Audi, *Nuclear Physics A595*, 4 (1995).



## El núcleo

---

La estructura electrónica de un átomo, que es la responsable de sus propiedades químicas, está determinada por la carga  $Z_e$  del núcleo.

Los diversos isótopos de un elemento suelen tener propiedades físicas ligeramente diferentes, como sus puntos de fusión y de ebullición, y sus velocidades de difusión.

Los dos isótopos comunes del uranio, con  $A = 235$  y  $238$ , se separan a escala industrial aprovechando las distintas velocidades de difusión del hexafluoruro de uranio ( $UF_6$ ), que es gaseoso, cuando contiene los dos isótopos del uranio.



# Tamaño, forma y otras propiedades

---

## Tamaño nuclear



*Experimento de dispersión de electrones*

$$R \sim (1,07 \pm 0,02) A^{1/3} \text{ fm}$$

$$t \sim (2,3 \pm 0,3) \text{ fm}$$

*R = radio (electromagnético)*

*t = espesor de la superficie*



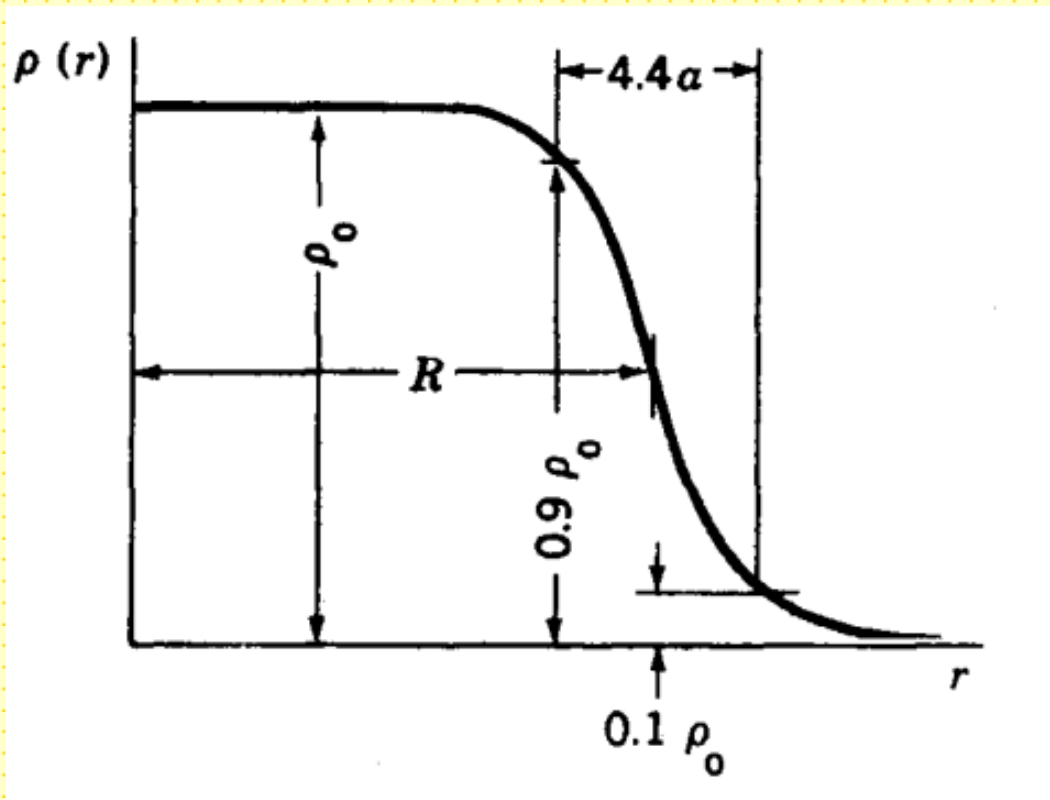
*Experimento de dispersión de neutrones*

$$R = 1,4 \text{ fm } A^{1/3}$$

*R = radio (fuerza nuclear)*

# Tamaño, forma y otras propiedades

## Densidad nuclear



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



# Tamaño, forma y otras propiedades

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 101, NUMBER 3

FEBRUARY 1, 1956

## High-Energy Electron Scattering and the Charge Distributions of Selected Nuclei\*†

BEAT HAHN,‡ D. G. RAVENHALL, AND ROBERT HOFSTADTER

Department of Physics and W. W. Hansen Laboratories of Physics, Stanford University, Stanford, California

(Received October 19, 1955)

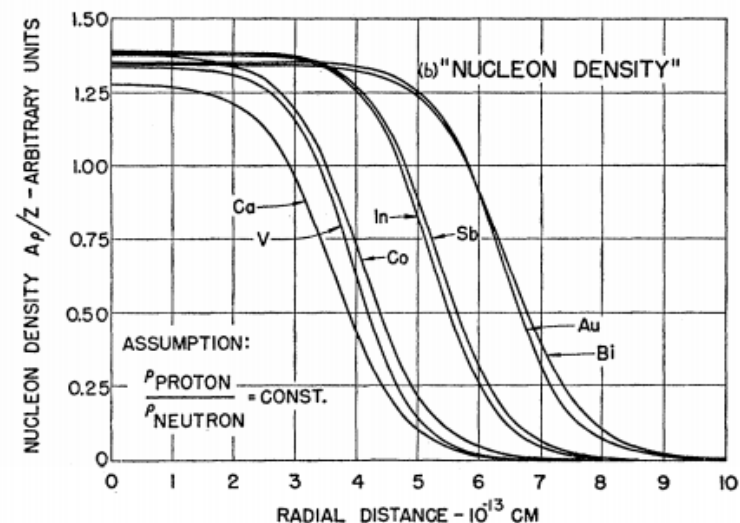
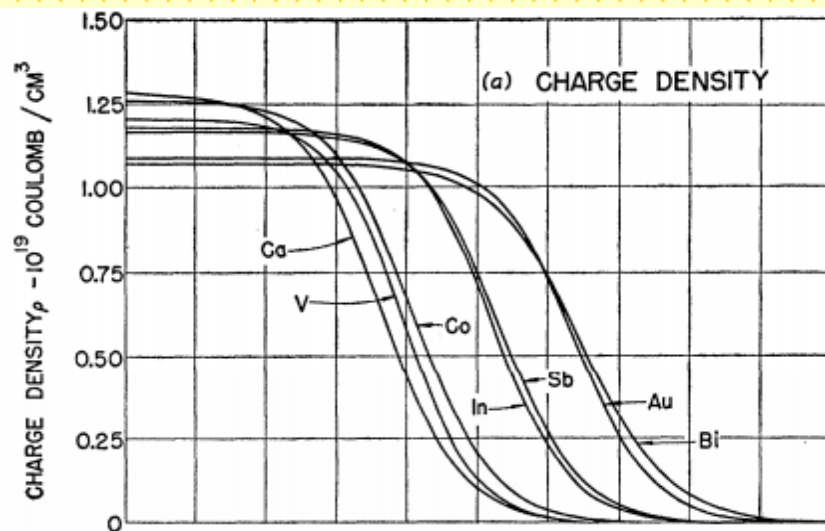


FIG. 14. (a) Charge distributions  $\rho(r)$  for Ca, V, Co, In, Sb, Au, and Bi. They are Fermi smoothed uniform shapes, with the parameters given in Table III, and yield the cross sections shown in Figs. 3 and 8-12. (b) A plot of  $(A/2Z)\rho(r)$  for the above nuclei. On the assumption that the distribution of matter in the nucleus is the same as the distribution of charge, this represents the "nucleon density."



# Tamaño, forma y otras propiedades

---

$$* R \propto A^{1/3}$$



*la densidad es la misma en todos los núcleos*

$$V = \frac{4\pi r_0^3 A}{3} = 1.12 \times 10^{-45} A m^3$$

$$\rho = 1.49^{18} \text{ kg/m}^3$$

$$^{12}\text{C} \quad R = 2,7 \text{ fm}$$

$$\rho = m / V = m / \left( \frac{4}{3} \pi \right) R^3 = 12 \text{ uma} \times 1,66 \times 10^{-27} \text{ (kg/uma)} / \left( \frac{4}{3} \pi \right) \times (2,7 \times 10^{-15} \text{ m})^3$$

$$\rho = 2 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$



## Tamaño, forma y otras propiedades

---

Pauli, 1924. Concepto de un momento magnético nuclear asociado con el momento angular nuclear para explicar la estructura hiperfina observada en espectros atómicos.

Como la existencia del neutrón aun no había sido establecida, era imposible postular como los momentos angulares de los constituyentes podrían combinarse para producir el momento angular total, o spin, exhibidos aparentemente como un todo.

1925, Uhlenbeck y Goudsmit. Extendieron el concepto a electrones atómicos. Supusieron que cada electrón "rota" alrededor de su eje y entonces contribuye tanto al momento angular como al momento dipolar magnético del átomo.



## Tamaño, forma y otras propiedades

---

El concepto de spin del electrón fue pronto necesario para describir la estructura fina de los espectros ópticos, la dispersión de partículas  $\beta$  por electrones, etc.

Análogamente, se encontró empíricamente que el momento angular nuclear jugaba un importante rol en una variedad de fenómenos moleculares, atómicos y nucleares.

Chadwick descubrió el neutrón en 1932, abriendo una nueva era en el estudio de la estructura nuclear.



## Tamaño, forma y otras propiedades

---

El protón y el neutrón tienen el mismo spin  $1/2$ , igual que el electrón, y obedecen el principio de exclusión de Pauli.

Cada neutrón y protón en el núcleo posee momento angular de espín:

$$S = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2} + 1\right)}\hbar = \sqrt{\frac{3}{4}}\hbar \quad S_z = \pm\frac{1}{2}\hbar$$

Además del espín, puede existir la cantidad de movimiento angular *orbital* asociada con sus movimientos dentro del núcleo.

Ambos se acoplan para dar lugar al momento angular nuclear total.

El momento angular total de un núcleo, respecto de su propio eje, es medible.

El movimiento complejo de los nucleones dentro del núcleo no es observable directamente.

Es conveniente describir los estados de las partículas nucleares en analogía con los estados de los electrones atómicos en el campo central del núcleo.



## Tamaño, forma y otras propiedades

---

La cantidad de movimiento angular total del núcleo es la suma vectorial de las cantidades de movimiento angulares espín y orbital individuales de todos los nucleones. Su magnitud es

$$J = \sqrt{j(j+1)}\hbar$$

$$J_z = m_j\hbar \quad (m_j = -j, -j+1, \dots, j-1, j)$$

Cuando el número total de nucleones  $A$  es par,  $j$  es un entero

Cuando es  $A$  es impar,  $j$  es semientero.

Todos los nucleidos para los cuales tanto  $Z$  como  $N$  son pares tienen  $J = 0$  (lo cual sugiere que un apareamiento de partículas con componentes de espín opuestos puede ser importante en la estructura nuclear).



# Tamaño, forma y otras propiedades

---

## Nomenclatura de los estados de los nucleones

De acuerdo al principio de exclusión de Pauli, dos protones no pueden tener en un núcleo el mismo conjunto de valores para sus números cuánticos orbitales y de spin:

$$n, l, m_l, m_s \quad \text{o, alternativamente} \quad \left\{ \begin{array}{l} n, l, j, m_j \\ \nu, l, j, m_j \end{array} \right.$$

Recordar que los nucleones cumplen el principio de exclusión (no puede haber dos protones o dos neutrones con el mismo conjunto de números cuánticos).

Sin embargo, un protón y un neutrón, pueden tener los cuatro números cuánticos iguales, ya que difieren en la carga.



# Tamaño, forma y otras propiedades

---

## Acoplamiento de estados nucleares

Cuando dos o más nucleones se agregan para formar un núcleo, el estado cuántico del sistema como un todo, se llama "nivel nuclear".

Este nivel nuclear puede ser el nivel fundamental o algún nivel excitado del núcleo.

Entre otras propiedades, cada nivel nuclear está caracterizado por un valor del momento angular total  $I$ .

La forma en la cual se acoplan los valores de  $l$  y  $s$  de los nucleones individuales para dar lugar a  $I$  no puede ser fácilmente descripta.





## Tamaño, forma y otras propiedades

---

Asociado con la cantidad de movimiento angular nuclear hay asociado un ***momento magnético nuclear***.

Cuando se describieron los momentos magnéticos *electrónicos* se introdujo el magnetón de Bohr como unidad del momento magnético:

$$\mu_B = e\hbar/2m_e$$

se puede definir una cantidad análoga, se define el **magnetón nuclear**

$$\mu_n = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5.05078 \times 10^{-27} \text{ J/T} = 3.15245 \times 10^{-8} \text{ eV/T}$$

Ya que la masa del protón es 1836 veces mayor que la masa del electrón, el magnetón nuclear es 1836 veces menor que el magnetón de Bohr.

$$|\mu_{sz}|_{\text{electrón}} \approx \mu_B$$

$$|\mu_{sz}|_{\text{protón}} = 2.7928\mu_n$$



## Tamaño, forma y otras propiedades

---

Pese a no tener carga, el neutrón presenta una magnitud correspondiente:

$$|\mu_{sz}|_{\text{neutrón}} = 1.9130\mu_n$$

El protón tiene una carga positiva y, como era de esperarse, su momento magnético de espín  $\mu$  es paralelo a  $\mathbf{S}$ .

Para un neutrón,  $\mu$  es paralelo a  $\mathbf{S}$ , como cabría esperar para una distribución de carga negativa.

Estos momentos magnéticos *anómalos* se deben a que en realidad el protón y el neutrón no son partículas fundamentales, sino que están hechos de partículas más simples llamadas *quarks*. En el siguiente capítulo describiremos a los quarks con detalle.

Cuando un núcleo se coloca en un campo magnético externo hay una energía de interacción

$$U = \mu \cdot \mathbf{B}$$

# Un ejemplo de aplicación. Resonancia magnética nuclear

Protones se colocan en un campo magnético con dirección  $z$  y 2.30 T de magnitud.

a) ¿Cuál es la diferencia de energías entre un estado con la componente  $z$  de un protón de cantidad de movimiento angular de espín paralela al campo, y uno con la componente antiparalela al campo?

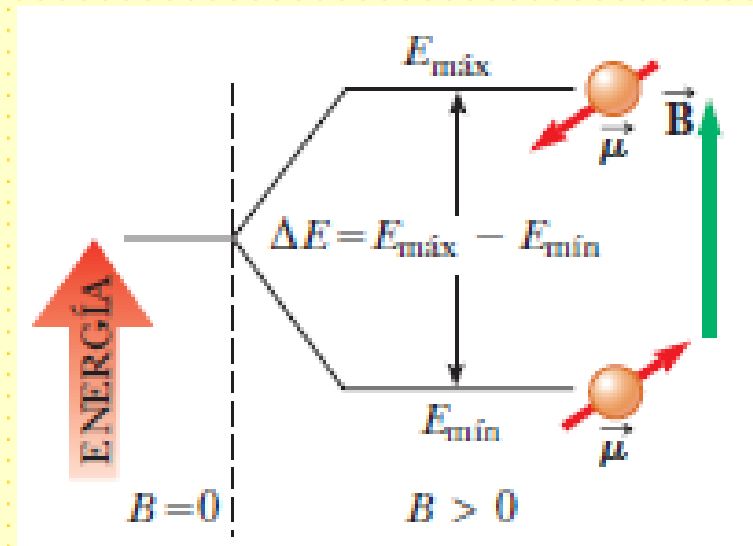
b) Un protón puede hacer una transición de uno a otro de esos estados emitiendo o absorbiendo un fotón de energía igual a la diferencia de energías entre los dos estados ¿Cuál es la frecuencia y la longitud de onda de ese fotón?

$$U = -|\mu_z|B = -(2.7928)(3.152 \times 10^{-8} \text{ eV/T})(2.30 \text{ T}) \\ = -2.025 \times 10^{-7} \text{ eV}$$

$$\Delta E = 2(2.025 \times 10^{-7} \text{ eV}) = 4.05 \times 10^{-7} \text{ eV}$$

$$f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{4.05 \times 10^{-7} \text{ eV}}{4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}} = 9.79 \times 10^7 \text{ Hz} = 97.9 \text{ MHz}$$

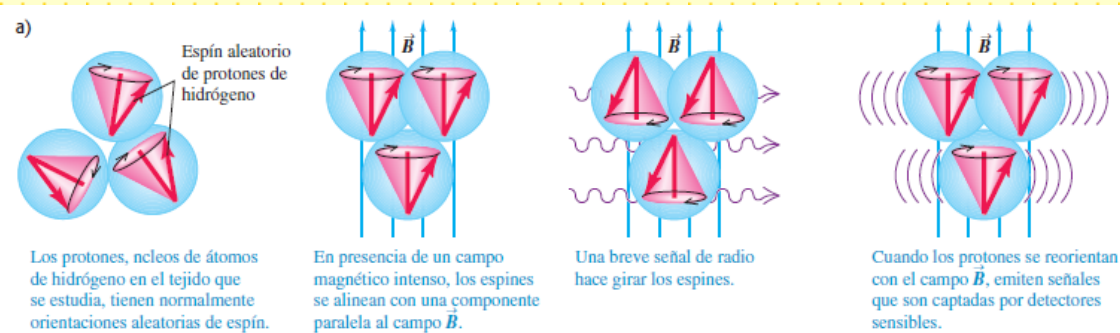
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{9.79 \times 10^7 \text{ s}^{-1}} = 3.06 \text{ m}$$



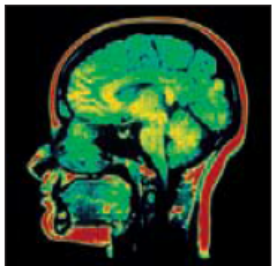
# Un ejemplo de aplicación. Resonancia magnética nuclear

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{9.79 \times 10^7 \text{ s}^{-1}} = 3.06 \text{ m}$$

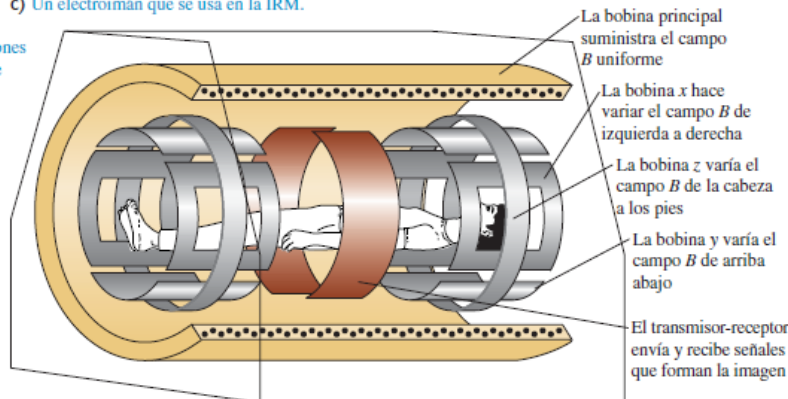
Esta frecuencia queda a la mitad de la banda FM de radio. Cuando H se coloca en un campo magnético de 2.30 T y se irradia con esta frecuencia, pueden detectarse *giros de espín* de los protones por la absorción de la energía de la radiación.



b) Como  $\vec{B}$  tiene un valor diferente en las diversas regiones del tejido, las ondas de radio provenientes de distintas ubicaciones tienen diferentes frecuencias. Esto permite reconstruir una imagen.



c) Un electroimán que se usa en la IRM.



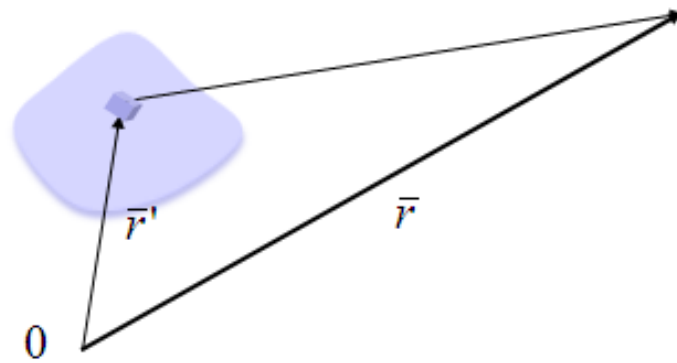
El campo magnético producido por el solenoide es suficiente para levantar un automóvil.

Si bien la RMN es segura si se utilizan normalmente, el campo magnético intenso requiere muchos cuidados para evitar la presencia de materiales ferromagnéticos cerca del aparato RMN.

Han ocurrido varios accidentes, como en el año 2000, cuando una pistola escapó de la mano de un guardia y se disparó al golpear contra la máquina.

## Tamaño, forma y otras propiedades

### Desarrollo multipolar de una distribución de carga



$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV'$$

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{r} \int \rho(\vec{r}') dV' + \sum_i \frac{x_i}{r^3} \int x_i' \rho(\vec{r}') dV' + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \int \frac{x_i' x_j'}{r^5} (3x_i x_j - r^2 \delta_{ij}) \rho(\vec{r}') dV' + \dots \right]$$



## Tamaño, forma y otras propiedades

---

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{q}{r} + \frac{\bar{p} \cdot \bar{r}}{r^3} + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{x_i x_j}{r^5} Q_{ij} + \dots \right]$$

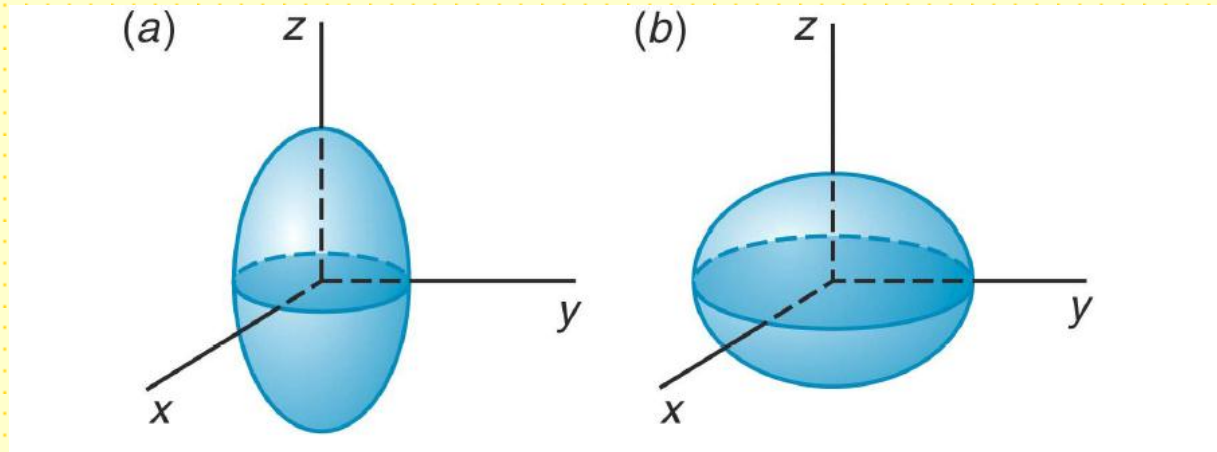
$$Q_{ij} = \int (3x_i x_j - \delta_{ij} r^2) \rho(\bar{r}) dV$$

Una distribución de carga sin simetría esférica posee momentos multipolares adicionales al momento monopolar.

(Una única carga, cuando no está localizada en el origen de coordenadas, también posee momentos multipolares).

# Tamaño, forma y otras propiedades

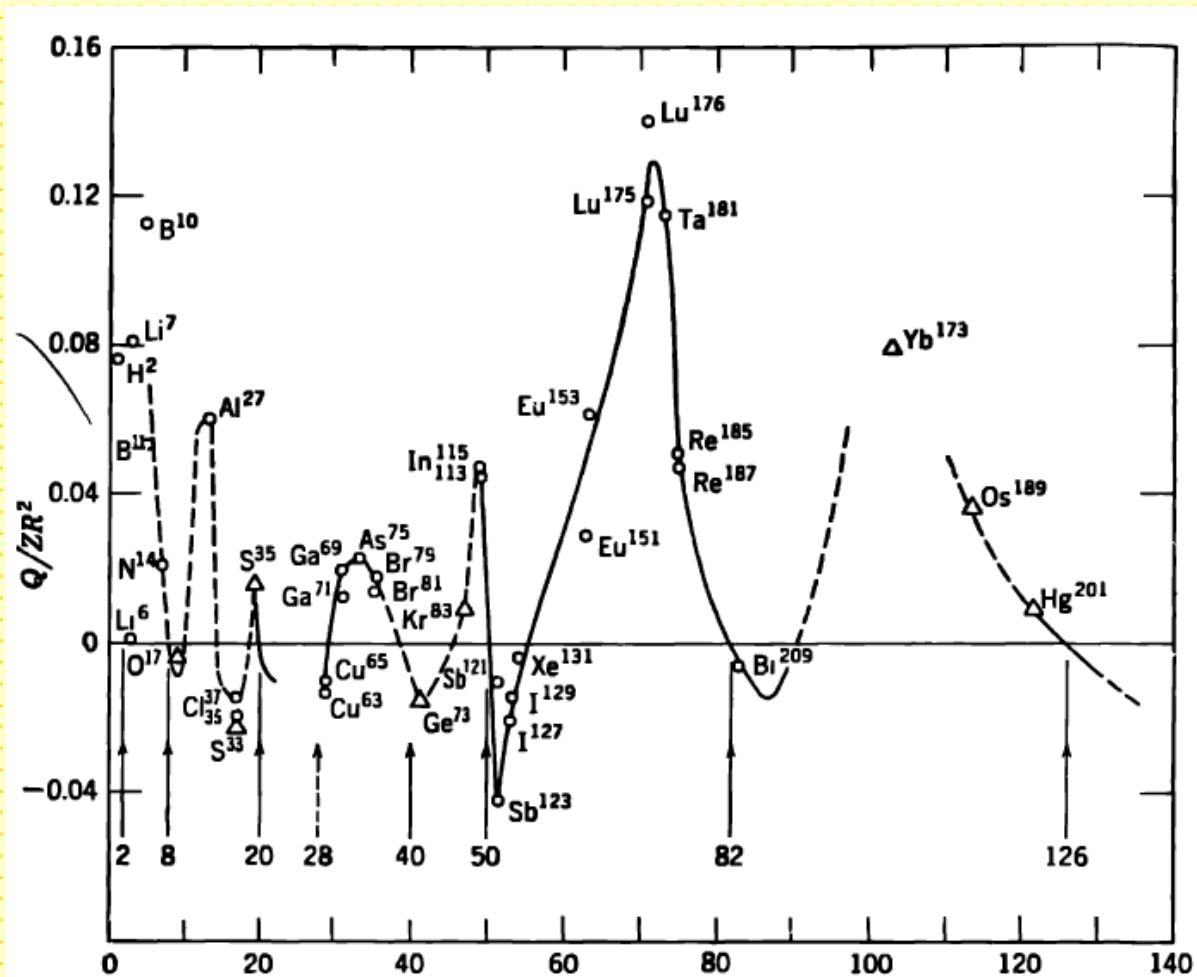
Formas nucleares  
 $Q > 0$  : elipsoide prolado.  
 $Q = 0$  : distribución esférica.  
 $Q < 0$  : elipsoide oblado.



Las unidades de  $Q$  son las de área. La unidad se denomina "barn":

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

# Tamaño, forma y otras propiedades







## Tamaño, forma y otras propiedades

---

Esta propiedad nuclear está asociada a la paridad de la función de onda nuclear.

Si la función de onda, que describe la probabilidad de hallar una partícula en una determinada posición  $(x,y,z)$  y con un determinado spin  $s$ , es

$$\psi(x, y, z, s)$$

La probabilidad es

$$|\psi|^2 = \psi\psi^*$$



## Tamaño, forma y otras propiedades

---

La probabilidad de encontrar la partícula en un punto no puede depender de la orientación de los ejes coordenados. Entonces

$$\psi(x, y, z, s) = \pm \psi(-x, -y, -z, s)$$

Se puede mostrar que la parte espacial de  $\psi$ , no cambia el signo si el número cuántico orbital  $l$  es par, pero lo cambia si  $l$  es impar. Entonces para una partícula con valor par de  $l$  el movimiento tiene paridad par. Si  $l$  es impar, el movimiento tiene paridad impar.



## Tamaño, forma y otras propiedades

---

Para un sistema de partículas

$$\psi = \psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \psi_3 \dots$$

La paridad del sistema depende de la paridad del movimiento de las partículas individuales.

Entonces:

$\sum l_i$  par

paridad +

$\sum l_i$  impar

paridad -



## Tamaño, forma y otras propiedades

---

La paridad intrínseca de electrón se define arbitrariamente como "par".

Experimentalmente se establece que la paridad del protón, neutrón y neutrino es "par".

La paridad de un sistema aislado es una constante de movimiento y no puede cambiarse por un proceso interno.

Solo si radiación o una partícula entra o deja el sistema, y entonces no está más aislado, la paridad puede cambiarse.



## Tamaño, forma y otras propiedades

---

La paridad aparece de consideraciones sobre las propiedades de la parte espacial de la función de onda ante inversión.

Otra propiedad nuclear importante, la "estadística", aparece al considerar las propiedades de simetría de las funciones de onda, ante el intercambio de partículas.

Las soluciones de la ecuación de Schrödinger para un sistema de partículas idénticas son "simétricas" o "antisimétricas".

La clase de simetría no cambia con el tiempo. Es una constante de movimiento.  
La clase de simetría es sinónimo de "estadística".



## Tamaño, forma y otras propiedades

---

La estadística tiene un profundo efecto sobre el comportamiento físico de sistemas de partículas idénticas.

Toda partícula en la naturaleza obedece uno de los dos tipos de estadística.

Fermi-Dirac (antisimétrica)	fermiones	$I = 1/2, 3/2, 5/2$
-----------------------------	-----------	---------------------

Bose-Einstein (simétrica)	bosones	$I = 0, 1, 2$
---------------------------	---------	---------------

Núcleos con	A impar	$I = 1/2, 3/2, \dots$	F.D.
	A par	$I = 0, 1, \dots$	B.E



## Sistemática de $Z$ y $N$

---

- ❖ No todas las combinaciones de *neutrones y protones* forman núcleos estables
- ❖ De unos 2500 nucleídos conocidos sólo 264 son estables

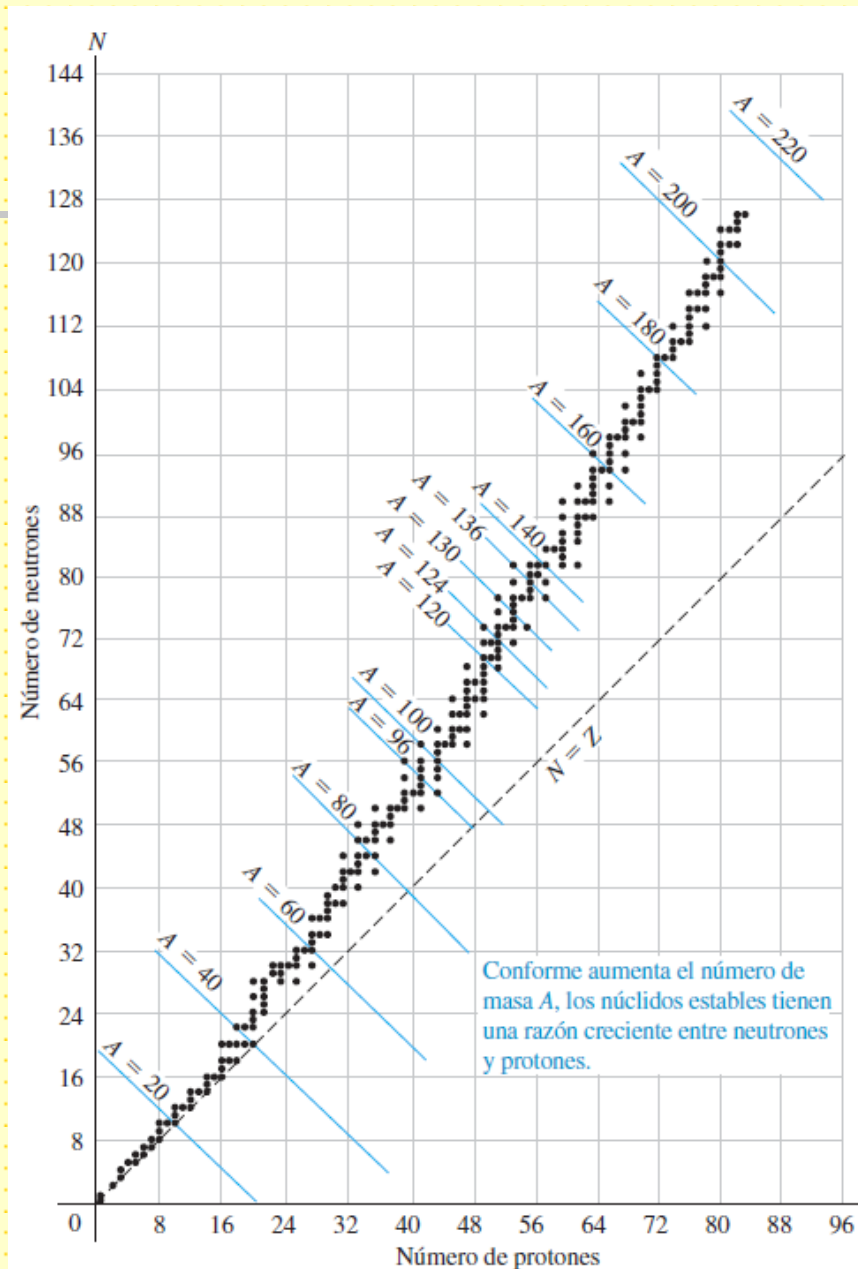
158	$Z$ par $N$ par
49	$Z$ impar $N$ par
53	$Z$ par $N$ impar
4	$Z$ impar $N$ impar

Los demás son estructuras inestables que se desintegran para formar otros nucleídos, emitiendo partículas y radiación electromagnética mediante un proceso llamado **radiactividad**. La escala de tiempos de esos procesos de decaimiento va desde una pequeña fracción de microsegundo hasta miles de millones de años

- ❖  $Z > 83$  y  $A > 209$  *desintegración espontánea*

# Sistemática de $Z$ y $N$

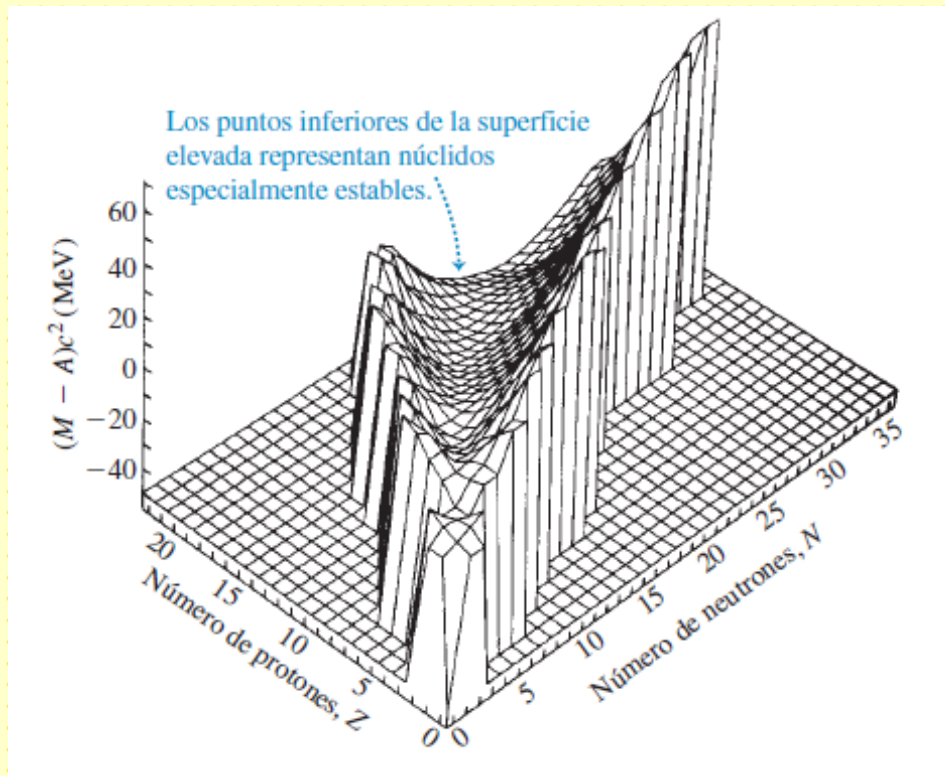
Gráfica de Segré que muestra el número de neutrones y el número de protones para nucleidos estables.





## Sistemática de $Z$ y $N$

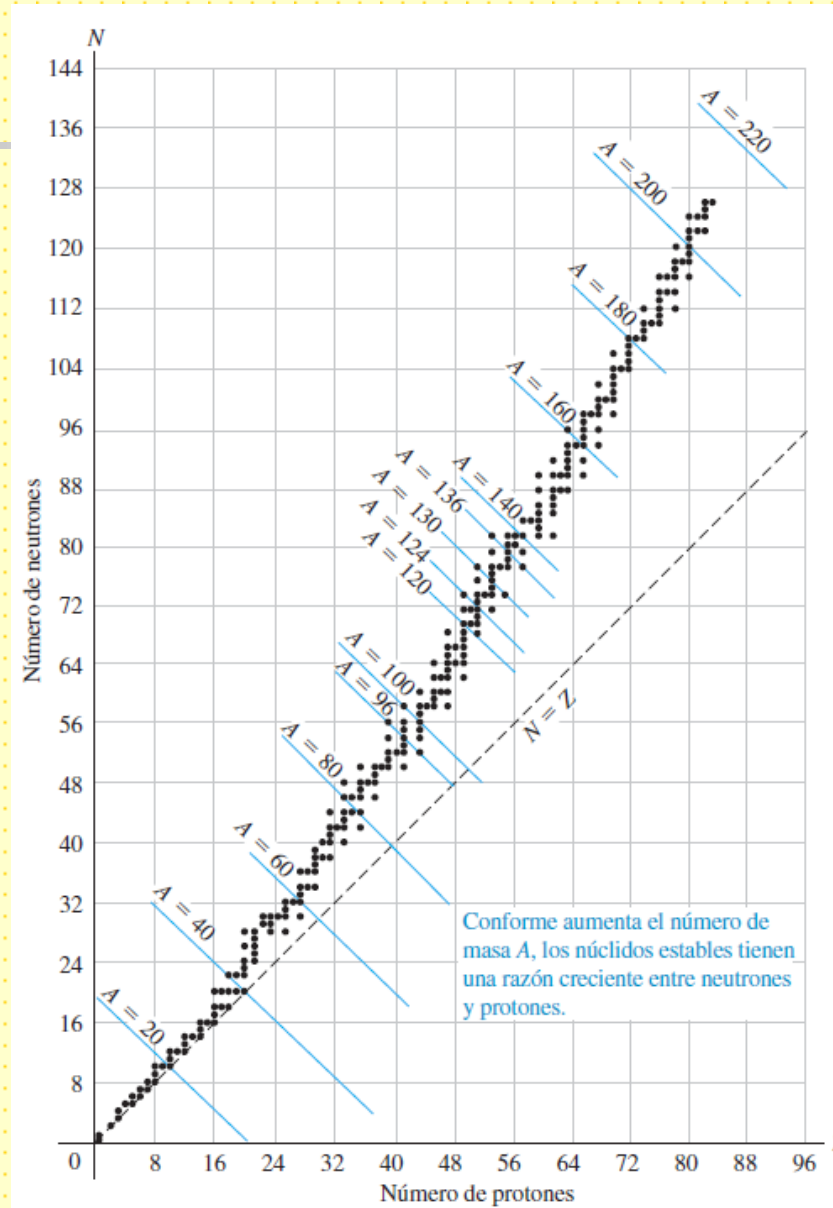
Gráfica tridimensional de Segré para nucleidos ligeros hasta  $Z=22$  (titanio). La cantidad graficada en el eje  $z$  es  $(M-A)c^2$ , donde  $M$  es la masa del nucleido expresada en  $u$ . Esta cantidad se relaciona con la energía de enlace para cada nucleido.



# Sistemática de $Z$ y $N$

Cada línea azul perpendicular a la línea  $N=Z$  representa un valor específico del número de masa  $A$ .

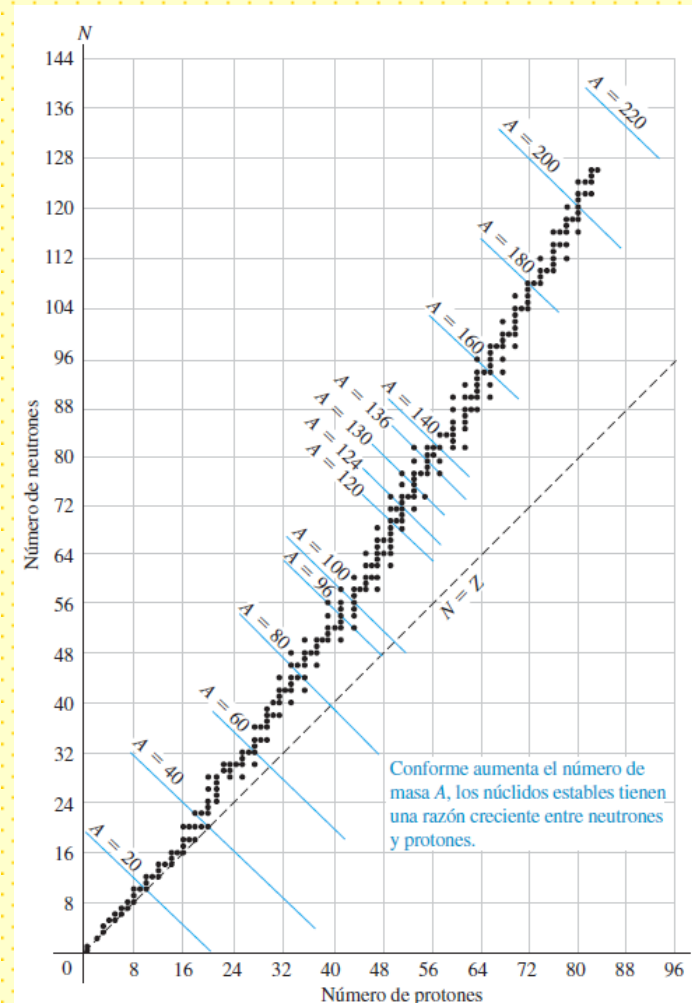
La mayor parte de las líneas de  $A$  constante sólo pasan por uno o dos nucleídos estables; esto es, en general hay un intervalo muy pequeño de estabilidad para determinado número de masa.



# Sistemática de $Z$ y $N$

Para bajas masas, las cantidades de protones y neutrones son aproximadamente iguales,  $N \sim Z$ .

La relación  $N/Z$  aumenta en forma gradual al aumentar  $A$ , hasta aproximadamente 1.6 para nucleídos de masa grande, debido a la influencia creciente de la repulsión eléctrica de los protones.



# Sistemática de $Z$ y $N$

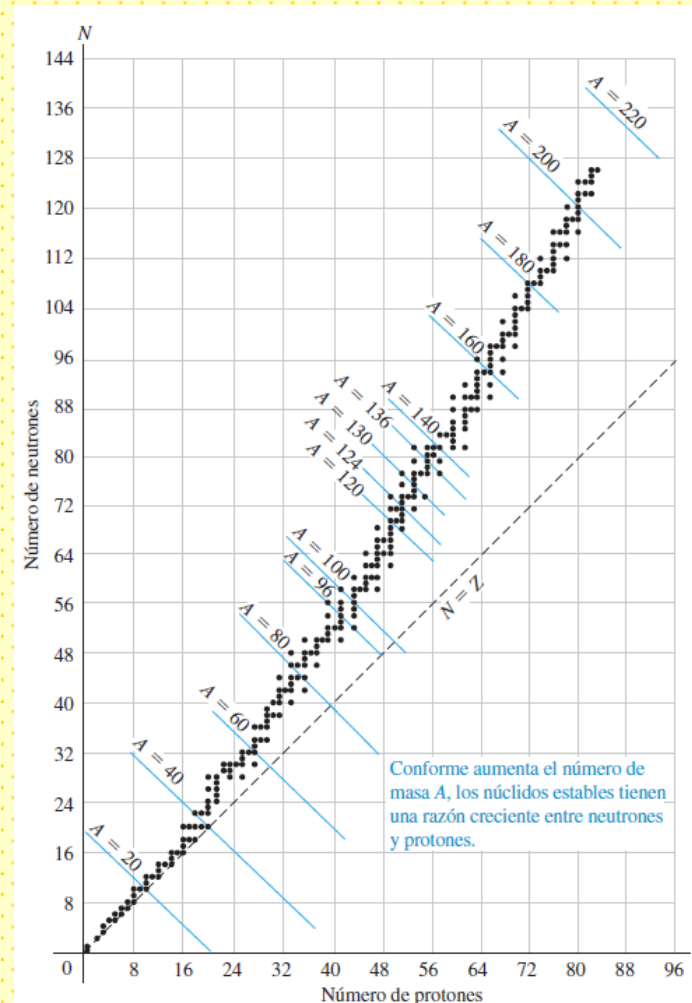
Los puntos a la derecha de la región de estabilidad representan nucleidos que tienen demasiados protones en relación con los neutrones, para ser estables. En esos casos gana la repulsión, y el núcleo se divide.

A la izquierda están los nucleidos con demasiados neutrones en relación con los protones.

La energía asociada con los neutrones está desbalanceada con la asociada a los protones, y los nucleidos decaen en un proceso que convierte los neutrones en protones.

No hay nucleídos con  $A > 209$  o  $Z > 83$  que sea estable: Un núcleo es inestable si es demasiado grande.

No hay nucleído estable con  $Z=43$  (tecnecio) o  $61$  (prometio).





## Masas y energía de enlace

---

❖ masa del átomo  $\neq$  masa del núcleo + masa  $e^-$   $\longrightarrow$   $B_{e^-}$

$$B_{\text{átomo}} = M_N c^2 + Z \cdot m_e c^2 - M_A c^2$$

$$B_N = Z m_p c^2 + N m_n \cdot c^2 - M_N c^2$$

$$B_{\text{átomo}} \sim \text{keV}; B_N \sim \text{MeV}$$

El núcleo más simple es el H.

Después viene el núcleo  ${}^2\text{H}$ , isótopo del H con número de masa 2 (deuterio).

Protón y un neutrón enlazados para formar una partícula llamada deuterón.

$$\begin{aligned} E_B &= (1.007825 \text{ u} + 1.008665 \text{ u} - 2.014102 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u}) \\ &= 2.224 \text{ MeV} \end{aligned}$$

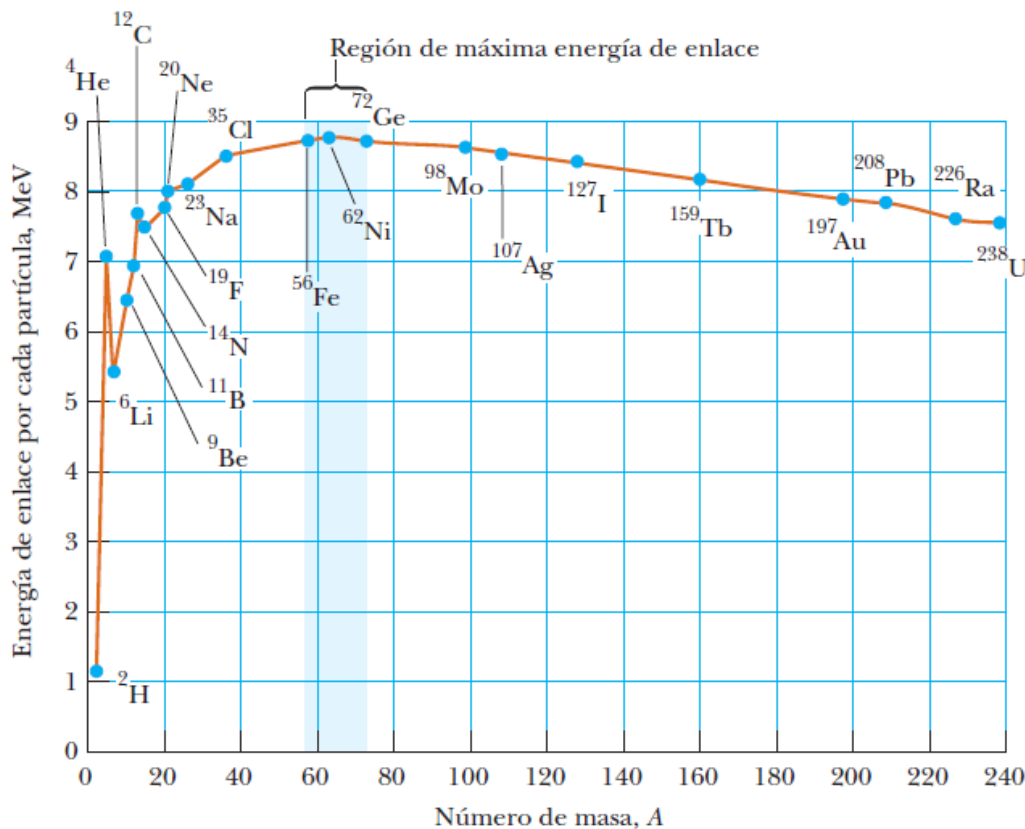
Una medida de lo fuertemente unido que está núcleo es la energía de enlace por nucleón,  $E_B/A$ .

${}^2\text{H}$ :  $(2.224 \text{ MeV})/2 = 1.112 \text{ MeV/nucleón}$

Menor energía de enlace por nucleón de todos los núcleidos.

## Masas y energía de enlace

Casi todos los nucleídos estables, desde los más ligeros hasta los más masivos, tienen energías de enlace del orden de 7 a 9 MeV por nucleón.



$$B_N \propto A$$

$$B_N/A = 8.3 \text{ MeV}$$

$$B_N/A = \text{cte}$$

**Saturación de las fuerzas nucleares**



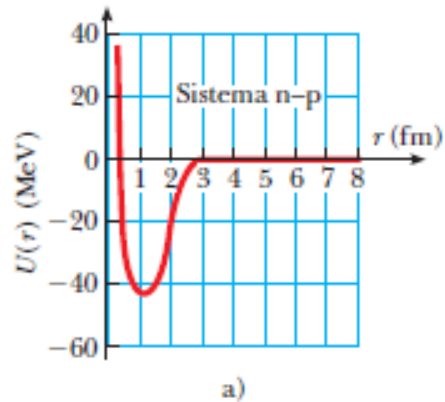
## La fuerza nuclear

---

La fuerza que une a los protones y neutrones en el núcleo, a pesar de la repulsión eléctrica de los protones, se denomina **fuerza nuclear fuerte**.

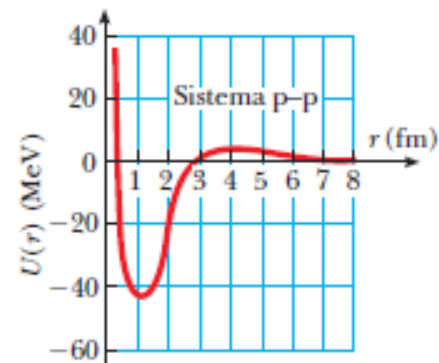
- Independiente de la carga; neutrones y protones se enlazan y el enlace es igual para los dos.
- Corto alcance, del orden de las dimensiones nucleares,  $10^{-15}$  m. No afecta a los electrones. Mucho más intensa que la eléctrica.
- La densidad casi constante de la materia nuclear y la energía de enlace por nucleón casi constante para grandes valores de  $A$  demuestran que determinado nucleón no puede interactuar en forma simultánea con todos los demás nucleones de un núcleo, sino sólo con los que tiene en su cercanía inmediata. Esto es distinto de las fuerzas eléctricas, en donde cada protón en el núcleo repele a todos los demás (**saturación**).
- La fuerza nuclear favorece el enlace de pares de protones o neutrones con espines opuestos, y de pares de pares, esto es, un par de protones y un par de neutrones, cada uno con espín opuesto. Por consiguiente, la partícula alfa, formada por dos protones y dos neutrones, es un núcleo de estabilidad excepcional para su número de masa.

## La fuerza nuclear



Fuerte componente de repulsión que impide que los nucleones se acerquen a distancias menores de 0.4 fm.

La diferencia principal entre las interacciones n-p y p-p es que la energía potencial p-p está constituida por la superposición de interacciones nucleares y de Coulomb.



A distancias menores a 2 fm, tanto la energía potencial p-p como la n-p son prácticamente idénticas, pero para distancias de 2 fm o mayores, el potencial p-p se encuentra con una barrera de energía positiva con un máximo en 4 fm.

La altura del pico de la curva p-p se ha multiplicado por un factor de 10, a fin de poder apreciar la diferencia entre curvas a esta escala.





## La fuerza nuclear

---

El estudio de la estructura nuclear es más complicado que el de átomos con muchos electrones. Intervienen dos clases distintas de interacción (eléctrica y nuclear) y todavía no se comprende por completo la fuerza nuclear.

Muchas interacciones, pero no las suficientes para un tratamiento estadístico.

Vamos a estudiar dos modelos sencillos para la estructura nuclear.



## La fuerza nuclear

---

### Modelo de gota líquida

Propuesto en 1928 por *George Gamow* y desarrollado después por *Niels Bohr*, es resultado de la observación de que todos los núcleos tienen casi la misma densidad.

Trata a los nucleones como si fueran moléculas en una gota de líquido.

Los nucleones interactúan con fuerza entre sí a corta distancia y sufren colisiones frecuentes conforme se mueven dentro del núcleo (similar al movimiento de agitación térmica de las moléculas en una gota de líquido).

Los nucleones individuales son análogos a las moléculas de un líquido, mantenidas juntas por interacciones de corto alcance y por efectos de tensión superficial.



## La fuerza nuclear

---

**Efecto de volumen.** La energía de enlace por cada nucleón es aproximadamente constante, esto indica que la fuerza nuclear de un nucleón dado se debe únicamente a unos cuantos de sus vecinos más cercanos y no a todos los otros nucleones que existen en el núcleo.

En promedio, la energía de enlace asociada con la fuerza nuclear para cada nucleón es la misma en todos los núcleos: asociada a la interacción con unos cuantos vecinos. Esta propiedad indica que la energía de enlace total del núcleo es proporcional a  $A$  y, por lo tanto, al volumen nuclear.

La contribución de la energía de enlace a todo el núcleo es igual a  $C_1 A$  ( $C_1$  es una constante ajustable que puede ser ajustada a partir de datos experimentales)



## La fuerza nuclear

---

**Efecto de superficie.** Los nucleones de la superficie de la gota tienen menos vecinos que los del interior, los nucleones superficiales tienen menor energía de enlace en una cantidad proporcional a su número.

El número de nucleones superficiales es proporcional al área de la superficie nuclear ( $4\pi r^2$ , modelado como una esfera).

$R$  es proporcional a  $A^{1/3}$ , entonces el término de superficie se puede expresar de la forma

$$-C_2 A^{2/3}$$

donde  $C_2$  es una segunda constante ajustable.



## La fuerza nuclear

---

**Repulsión coulombiana:** Cada uno de los  $Z$  protones repele a todos los demás  $(Z-1)$  protones.

La energía potencial total de repulsión eléctrica es proporcional a  $Z(Z-1)$ , e inversamente proporcional al radio  $R$  y, por consiguiente, a  $A^{1/3}$ .

Este término de energía es negativo, porque los nucleones están menos fuertemente enlazados de lo que estarían si no hubiera repulsión eléctrica.

Entonces este término se puede expresar en la forma

$$-C_3 Z(Z-1)/A^{1/3}$$

donde  $C_3$  es también una constante ajustable.



## La fuerza nuclear

---

**Efecto de simetría:** El núcleo debe tener un equilibrio entre las energías asociadas con los neutrones y los protones.

N cercano a Z para A pequeña y N es mayor que Z (pero no mucho mayor) cuando A es más grande.

Se necesita un término negativo de energía, que corresponda a la diferencia N-Z. La mejor correlación con las energías de enlace observadas se obtiene si este término es proporcional a  $(N-2Z)^2/A$ . Si usamos  $N \approx A/2 - Z$  para expresar esta energía en función de A y de Z, esta corrección es  $-C_4(A - 2Z)^2/A$ .

Entonces este término se puede expresar en la forma

$$-C_4(A - 2Z)^2/A$$



## La fuerza nuclear

---

la fuerza nuclear favorece el apareamiento de protones y neutrones.

Este término de energía es:

positivo (hay más enlace) si Z y N son pares.

negativo (menos enlace) si Z y N son impares.

cero en cualquier otro caso.

El mejor ajuste se logra si este término tiene la forma:

$$\pm C_5 A^{-4/3}$$



## La fuerza nuclear

---

$$E_B = C_1A - C_2A^{2/3} - C_3\frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - C_4\frac{(A-2Z)^2}{A} \pm C_5A^{-4/3}$$

$$C_1 = 15.75 \text{ MeV}$$

$$C_2 = 17.80 \text{ MeV}$$

$$C_3 = 0.7100 \text{ MeV}$$

$$C_4 = 23.69 \text{ MeV}$$

$$C_5 = 39 \text{ MeV}$$

Ejemplo:  $^{80}\text{Br}$ .

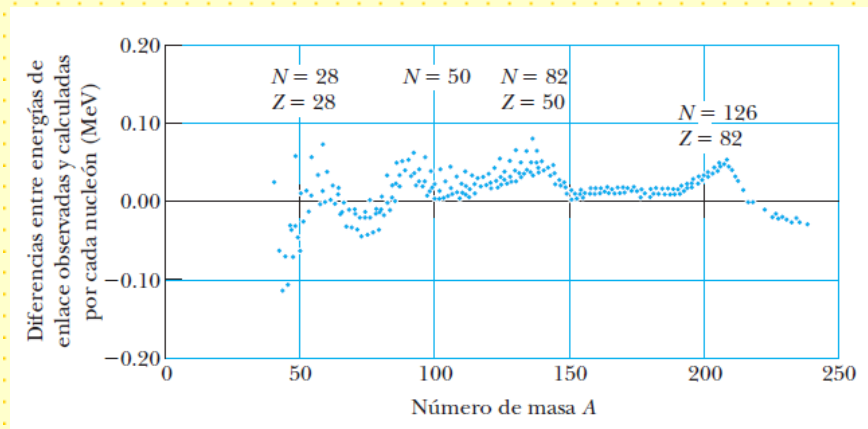
La energía de enlace calculada es 696.1 MeV y la medida es 694.2.



# La fuerza nuclear

## Modelo de capas.

El modelo de gota de líquido describe relativamente bien el comportamiento general de las energías de enlace nuclear. De cualquier modo, al estudiar las energías de enlace con mayor detalle, aparecen problemas.



Picos uniformemente espaciados no descritos por la fórmula semiempírica de la energía de enlace. Los picos se presentan en valores de  $N$  o de  $Z$ , que se conocen como **números mágicos**:  $Z$  o  $N=2, 8, 20, 28, 50, 82$



## La fuerza nuclear

---

La mayor parte de los núcleos estables tiene un valor par para  $A$ . Además, sólo ocho núcleos estables tienen valores impares tanto para  $Z$  como para  $N$ .

Estudios de alta precisión de los radios nucleares muestran desviaciones con la expresión simple para  $R$ .

Las gráficas de los datos experimentales muestran picos en la curva de  $R$  en función de  $N$  en valores de  $N$  que corresponden a los números mágicos.

Cuando se grafica el número de isótonos estables en función de  $N$ , se presentan picos en la gráfica, otra vez en los números mágicos.

Otras varias mediciones nucleares muestran un comportamiento anómalo en los números mágicos

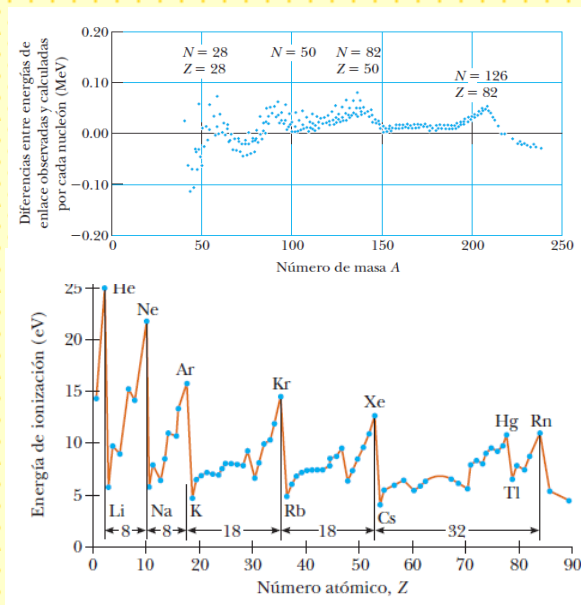
premio Nobel de física 1963 por su trabajo extraordinario para la comprensión de la estructura del núcleo



## La fuerza nuclear

Estos picos en las gráficas de datos experimentales recuerdan los picos relativos a la energía de ionización de los átomos, que se presentan debido a la estructura en capas del átomo.

El **modelo de capas** (también conocido como **modelo de partículas independientes**, fue desarrollado de forma independiente por María Goeppert-Mayer en 1949 y Hans Jensen en 1950.



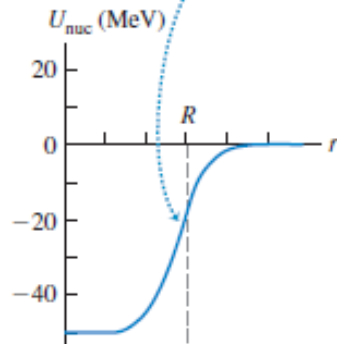
Cada nucleón existe en una capa similar a la capa atómica de un electrón. Los nucleones presentan estados de energía cuantizados, y existen pocas colisiones entre ellos.

Los estados cuantizados ocupados por los nucleones pueden describirse mediante un conjunto de números cuánticos.

Tanto el protón como el neutrón tienen espín  $\frac{1}{2}$  y cumplen el principio de exclusión.

# La fuerza nuclear

a) La energía potencial  $U_{nuc}$  se debe a la fuerza nuclear. Es igual para los protones y los neutrones; para los neutrones es la energía potencial total.



b) La energía potencial total  $U_{tot}$  para un protón es la suma de las energías potenciales nuclear ( $U_{nuc}$ ) y eléctrica ( $U_{el}$ ).

