



# QUÍMICA NUCLEAR

PROF. DIEGO J. RAPOSO

[DJRS@POLI.BR](mailto:DJRS@POLI.BR)

[DIEGORAPOSO@HOTMAIL.COM](mailto:DIEGORAPOSO@HOTMAIL.COM)

# TÓPICOS ABORDADOS

- Introdução (relevância, partículas subatômicas);
- Interação entre partículas subatômicas para formar átomos (energia de ligação, Eq. de Einstein);
- Descrição quântica do núcleo (estabilidade e n° de prótons/nêutrons);
- Processos nucleares importantes (reações nucleares: fusão/fissão/decaimentos);
- Tipos de decaimento ( $\alpha/\beta^+/\beta^-/\text{CE}/\gamma$ );
- Efeitos biológicos;
- Cinética de decaimento radioativo.

# INTRODUÇÃO

- **Química**: interações entre **elétrons**, quebra e formação de ligações, interações não covalentes;
- **Química/Física nuclear**: alterações e interações entre **núcleons (prótons e nêutrons)**;
- **Núcleos instáveis**: análise de compostos orgânicos e inorgânicos (geoquímica, arqueologia, biologia);
- **Núcleos estáveis**: ressonância magnética nuclear, marcação de átomos em moléculas;
- **Muitas outras!**





# PROPRIEDADES DOS NÚCLEONS

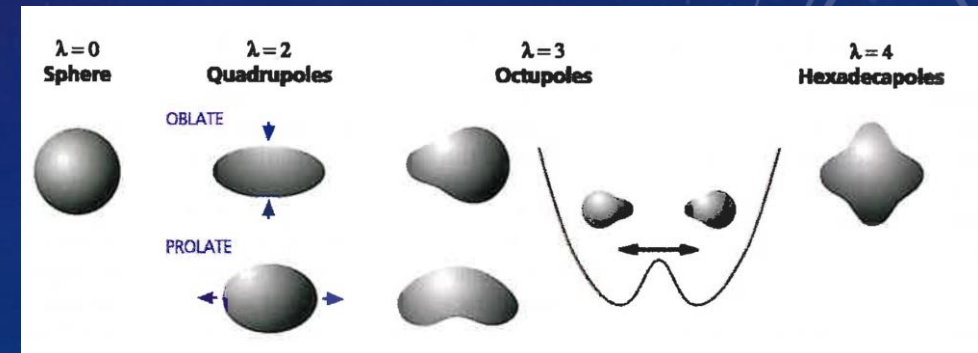
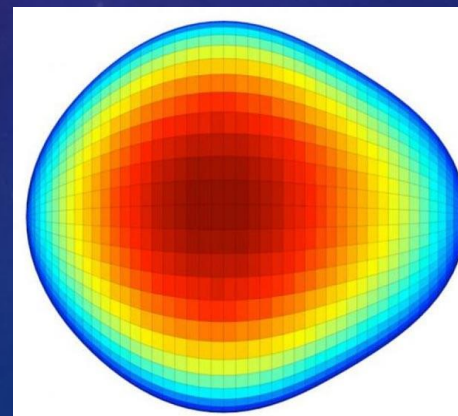
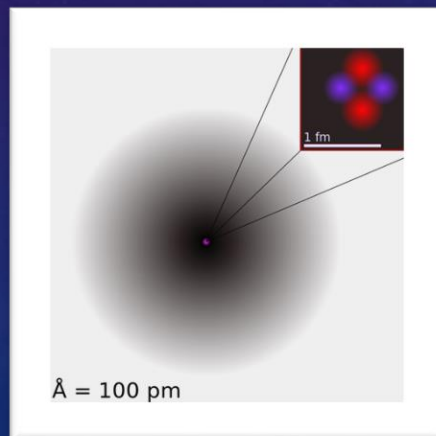
$$1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\frac{6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ J s}}{2\pi}$$

- Prótons;
- Nêutrons;
- Elétrons;
- Fótons;
- Átomos.

Partícula	Símbolo	Carga / $e$	Massa / $u$	Spin / $\hbar$
Elétron	$e^-$	-1	0,00055	1/2
Próton	p	+1	1,00728	1/2
Nêutron	n	0	1,00867	1/2

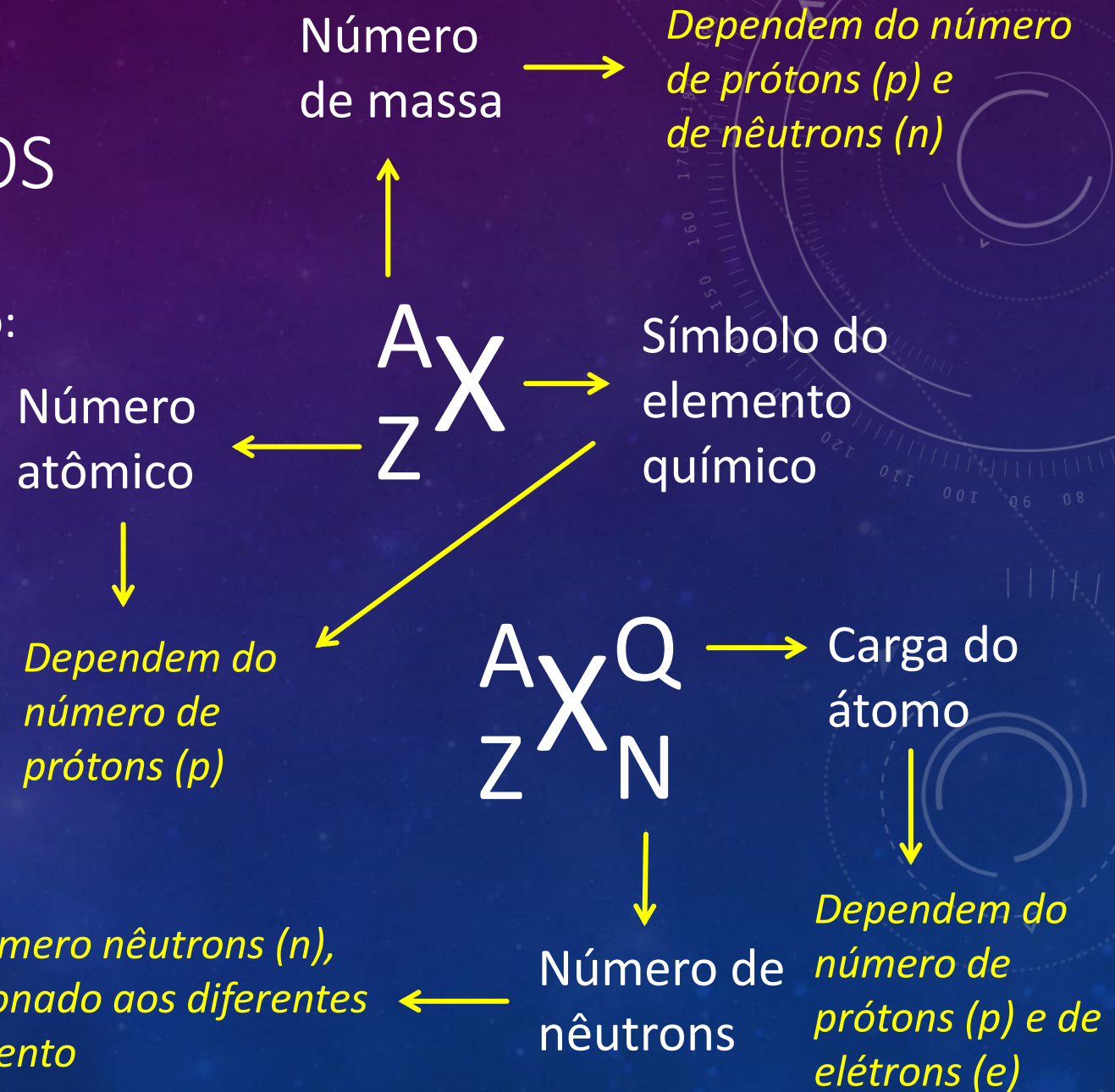


# PROPRIEDADES DOS ÁTOMOS

- Relembrando representação de um átomo:

- Z**: número de prótons;
- A**: número de prótons + número de nêutrons;
- N = A - Z**: número de nêutrons;
- N<sub>e</sub>**: número de elétrons;
- Q = Z - N<sub>e</sub>**: carga do átomo;
- Q > 0**: íon positivo;
- Q < 0**: íon negativo.

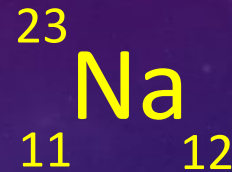
*Dependem do número nêutrons (n), A-Z, e está relacionado aos diferentes isótopos do elemento*



- Exemplos:

- Um átomo de sódio possui número de massa 23 e número atômico 11. Quantos nêutrons ele possui?

$$N = A - Z = 23 - 11 = 12$$



- Qual o elemento químico neutro que possui 27 elétrons?

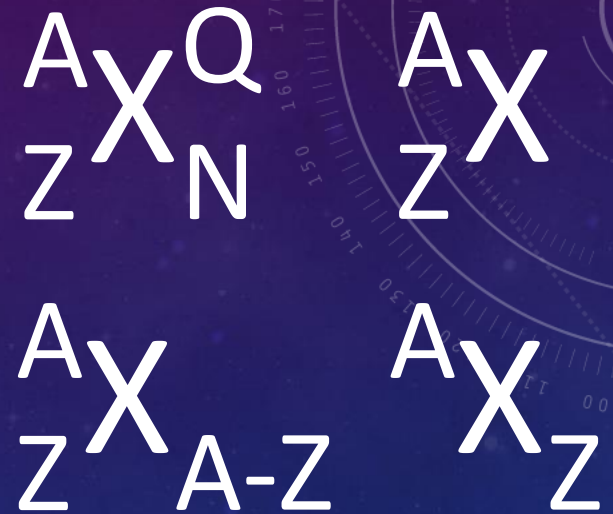
$$Q = Z - N_e = 0 \rightarrow Z = N_e = 27 \leftrightarrow \text{Co}$$



- Quantos elétrons um íon com carga +2 tem se seu número atômico é 12? Qual o elemento?

$$Q = Z - N_e = 2 \rightarrow N_e = 12 - 2 = 10$$

$$Z = 12 \leftrightarrow \text{Mg}$$



$$\begin{array}{l} Z \leftrightarrow X \\ A = Z + N \\ Q = Z - N_e \end{array}$$

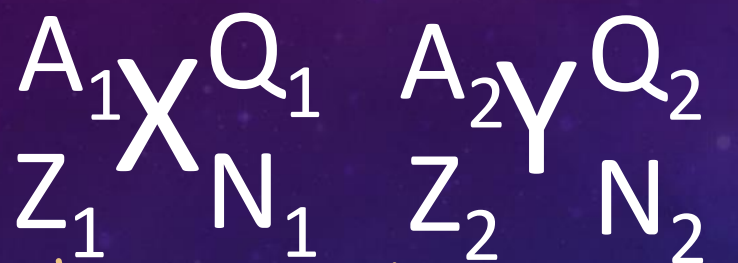


$A_1 = A_2 = A$ :  
isóbaros

$N_{e1} = N_{e2} = N_e$ :  
 $Z_1 - Q_1 = Z_2 - Q_2$   
isoeletrônicos

$$\begin{aligned} Z_1 &\leftrightarrow X \\ A_1 &= Z_1 + N_1 \\ Q_1 &= Z_1 - N_{e1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_2 &\leftrightarrow Y \\ A_2 &= Z_2 + N_2 \\ Q_2 &= Z_2 - N_{e2} \end{aligned}$$



$Z_1 = Z_2 = Z$ :  
isótopos

$N_1 = N_2 = N$ :  
isótonos

## • Exemplos:

Ir para Tabela Periódica

1º) De que forma os isótopos de um certo elemento são sempre distintos? Em que sentido eles são equivalentes?

2º) Determine número de prótons, nêutrons e elétrons nos isótopos usados em diagnóstico médico a seguir. Consulte a tabela periódica e indique também o elemento:

- Número atômico 9, número de massa 18, carga -1;
- Número atômico 43, número de massa 99, carga +7;
- Número atômico 53, número de massa 131, carga de -1;
- Número atômico 81, Número de massa 201, carga +1;

1º) **Distintos:** valores de A (ou N);

**Iguais:** valores de Z

2º) **a)** 9; 9; 10; F    **b)** 43; 56; 36; Tc

**c)** 53; 78; 54; I    **d)** 81; 120; 80; Tl

- **Exemplos:**

**3º) a)** Que características têm em comum os átomos de argônio-40, potássio-40 e cálcio-40? **b)** Em que eles são diferentes?

**4º) a)** Determine o número total de prótons, nêutrons e elétrons de uma molécula de tetrafluoreto de carbono,  $\text{CF}_4$ , supondo que todos os átomos são dos isótopos mais estáveis dos elementos. **b)** Qual é a massa total de prótons, nêutrons e elétrons de uma molécula de tetrafluoreto de carbono? Calcule as três massas.



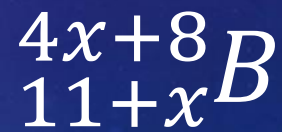
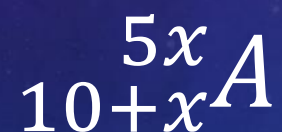
- Exemplos:

[Ir para Tabela Periódica](#)

5º) Complete a tabela a seguir:

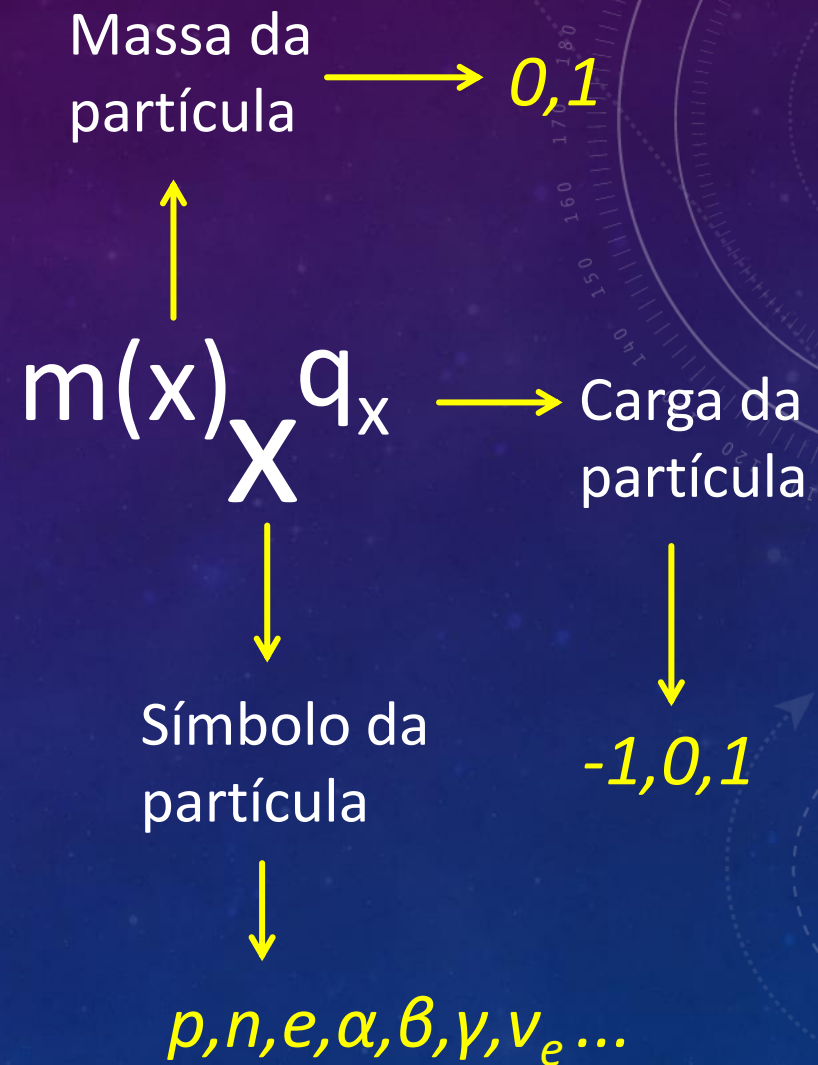
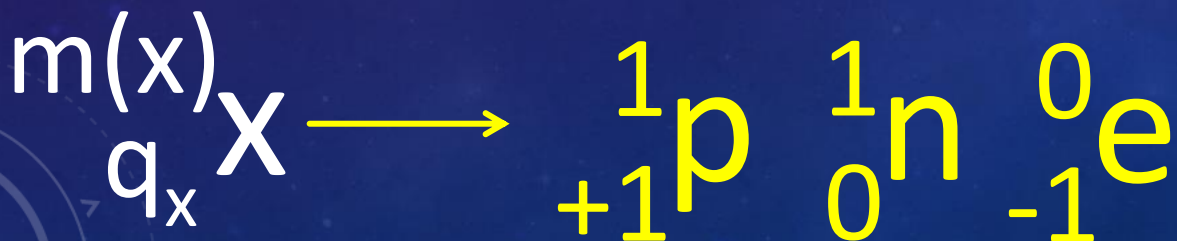
Elemento	Símbolo	Prótons	Nêutrons	Elétrons	Número de massa
	$^{36}\text{Cl}$				
		30			65
			20	20	
Lantânio			80		

6º) Determine o número atômico e o número de massa dos átomos A e B, que são isóbaros e apresentam a seguinte representação:



# PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS

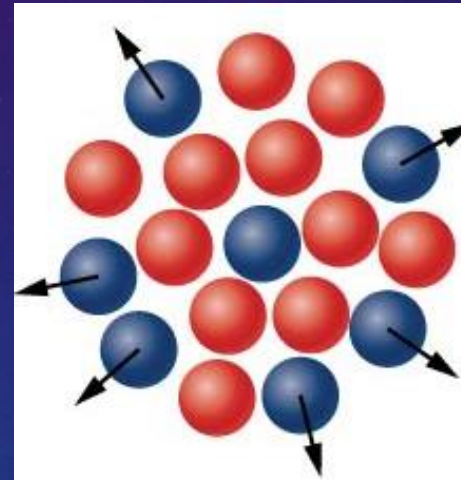
- Relembrando representação de uma partícula subatômica:
  - **x**: símbolo da partícula;
  - **m(x)** : massa da partícula;
  - **q<sub>x</sub>**: carga da partícula;
- Como a partícula não tem número atômico, é comum usar a representação:



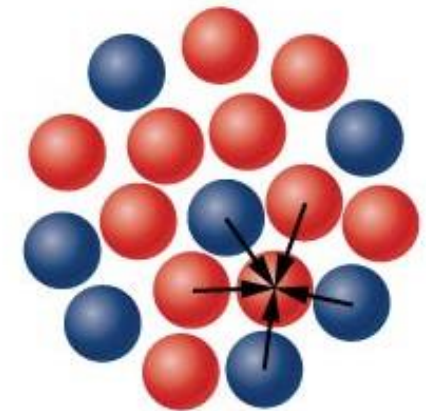
# FORMAÇÃO DO NÚCLEO ATÔMICO

- Interações atrativas (**força forte**) de curto alcance;
- Interações repulsivas (**força eletromagnética**) de longo alcance;
- A formação do núcleo é mais favorável, o que abaixa a energia do sistema de partículas isoladas;
- Isso resulta na liberação de energia, a **energia de ligação**:  $E_b$ .

Força repulsiva entre  
prótons distantes



Força atrativa entre  
núcleons próximos





# FORMAÇÃO DO NÚCLEO ATÔMICO

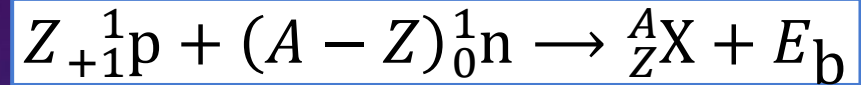
O (final – inicial) daria uma massa e uma energia negativas (o que é verdade). Mas a energia e a massa perdidas são positivas (o negativo das definições anteriores)

- Essa energia é proporcional a massa perdida quando os núcleons se unem, de acordo com a **equação de Einstein**:

$$E = mc^2$$

$$2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

- A formação de um núcleo com  $Z$  prótons e  $N = A - Z$  nêutrons é dada por:



$$m = Zm({}^1_1\text{p}) + (A - Z)m({}^1_0\text{n}) - m({}^A_Z\text{X})$$

$$E_b = [Zm({}^1_1\text{p}) + (A - Z)m({}^1_0\text{n}) - m({}^A_Z\text{X})]c^2$$

Massa / u	Massa / (MeV/c <sup>2</sup> )
$m({}^1_1\text{p})$	938,272
$m({}^1_0\text{n})$	939,565
$m({}^0_{-1}\text{e})$	0,510999
1	931,494

(energia dada em MeV)

# FORMAÇÃO DO NÚCLEO ATÔMICO

- Exemplos:

- Calcule a energia de ligação do núcleon  ${}^4\text{He}$ , a partícula  $\alpha$ .

$$E_b = [2m({}_{+1}^1\text{p}) + 2m({}_0^1\text{n}) - m({}_2^4\text{He})]c^2$$

$$4 \text{ u} \cdot \frac{931,494 \text{ MeV}/c^2}{1 \text{ u}} = 3725,976 \text{ MeV}/c^2$$

$$E_b = [2 \cdot (938,272 + 939,565) - 3725,976] \text{ MeV} = 29,698 \text{ MeV} \quad (\text{para 4 núcleons})$$

- Um núcleo de  ${}_{26}^{56}\text{Fe}$  possui uma massa de 55,93494 u. Calcule a energia de ligação por núcleon desse núcleo (faça em casa!).

Massa / u	Massa / (MeV/c <sup>2</sup> )
$m({}_{+1}^1\text{p})$	938,272
$m({}_0^1\text{n})$	939,565
$m({}_{-1}^0\text{e})$	0,510999
1	931,494

(faixa de energia de radiação gama!!)

# DESCRIÇÃO QUÂNTICA DO NÚCLEO

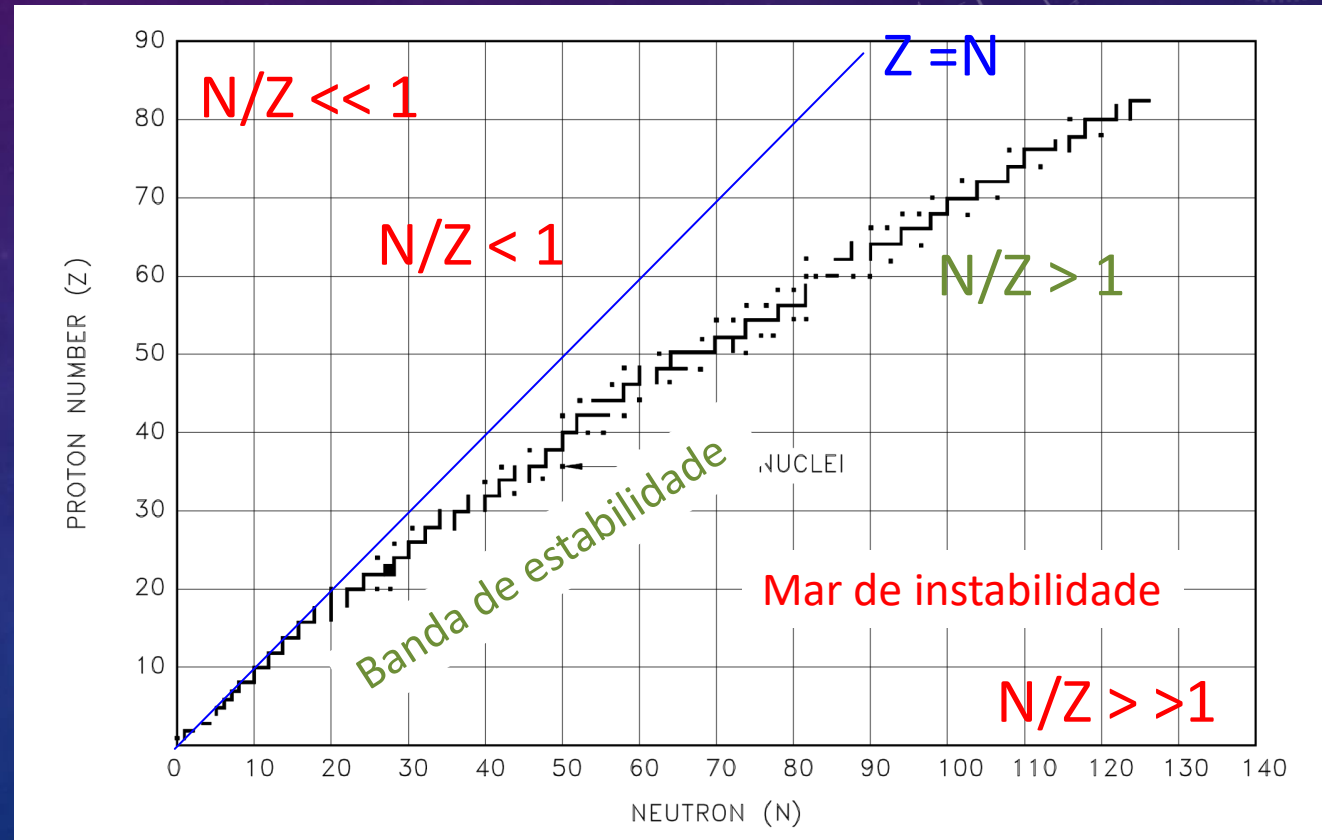
- Funções de onda dos núcleons interagindo se sobrepõem, e a resolução da Eq. de Schrödinger leva a **funções de onda do núcleo** com diferentes estados de energia;
- O resultado são diferentes camadas em ordem crescente de energia, como nas camadas K, L, M, ... para os elétrons;
- Configurações de camadas fechadas, com 2, 8, 18, ... elétrons são mais estáveis (gases nobres);
- Da mesma maneira, núcleos com  $A = 2, 8, 20, 28, 50$ , etc núcleons são mais estáveis. Os valores dessa sequência são chamados de **números mágicos**.
- Nota-se que a estabilidade do número de prótons e nêutrons segue a seguinte ordem:  
**próton: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 114**  
**nêutron: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 184**  
Quanto mais núcleons seguem esses números, maior a chance de serem estáveis (mas há exceções)





# MAPA DE NUCLÍDEOS E RAZÃO N/Z

- Até  $Z = 20$ , núcleos estáveis geralmente apresentam  $N/Z = 1$  (ou seja, números iguais de prótons e nêutrons, o que leva a um número par de núcleons);
- A partir desse ponto núcleos estáveis possuem  $N/Z > 1$ , com tanto  $N/Z \leq 1$  como  $N/Z \ll 1$  e  $N/Z \gg 1$  levando a núcleos instáveis.



# ESTABILIDADE DOS ISÓTOPOS DOS ELEMENTOS

1 H Hydrogen																	2 He Helium						
3 Li Lithium	4 Be Beryllium																	5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium																	13 Al Aluminum	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton						
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon						
55 Cs Cesium	56 Ba Barium	57 * La Lanthanum	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon						
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 ** Ac Actinium	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Uub Ununbium	113 Uut Ununtrium	114 Fl Flerovium	115 Uup Ununpentium	116 Lv Livermorium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium						
		* 58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium								
		** 90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium								

Todos os átomos com  $Z > 83$  não possuem isótopos estáveis. Ou seja, todos são radioativos.



# PREVENDO ESTABILIDADE NUCLEAR

- I. Calcule o número total de núcleons (prótons e nêutrons). Se o número de núcleons é par, a chance de ser estável é grande. Se  $Z > 83$  ele é instável, necessariamente;
- II. O número de prótons ou de nêutrons é mágico? Eles frequentemente levam a núcleos estáveis;
- III. Verifique a razão  $N/Z$  e, pelo número atômico, preveja a posição do núcleo no mapa.  $N/Z \gg 1$  e  $N/Z \ll 1$  são instáveis.  $N/Z = 1$  é estável abaixo de  $Z = 20$ , e instável para  $Z \geq 20$ .

# PREVENDO ESTABILIDADE NUCLEAR

- Exemplos:

7º) Indique se os isótopos a seguir são estáveis ou instáveis:

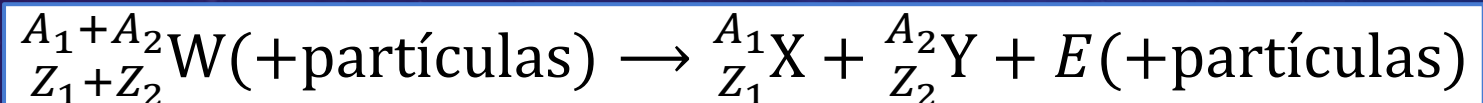
- $^{40}_{20}\text{Ca}$ ;  **$A = 40, Z = 20 \rightarrow N = A - Z = 20$ . I)  $A$  é mágico; II)  $Z$  e  $N$  são mágicos; III)  $N/Z = 1$ . Muito estável**
- $^{54}_{25}\text{Mn}$ ;  **$A = 54, Z = 25 \rightarrow N = A - Z = 29$ . I) Não; II) Não; III)  $N/Z > 1$ . Instável.**
- $^{210}_{84}\text{Po}$ .  **$Z > 83$ . Instável.**

8º) Indique se os isótopos a seguir são estáveis ou instáveis:

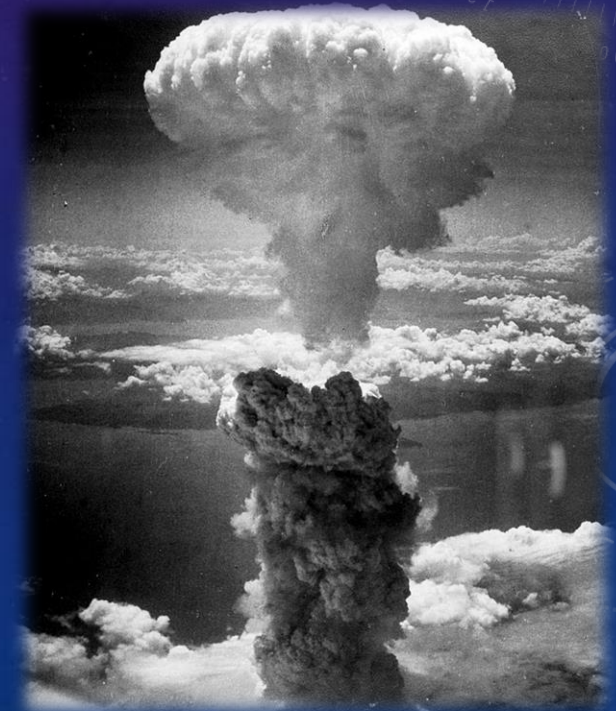
- $^{30}_{15}\text{P}$ ;
- $^{98}_{43}\text{Tc}$ ;
- $^{118}_{50}\text{Sn}$ ;
- $^{239}_{94}\text{Pu}$ .

# REAÇÕES NUCLEARES

- **Fissão nuclear:** ocorre uma separação, espontânea (natural) ou induzida (artificial) de um núcleo;
- Isso ocorre porque sua massa é grande demais para que os prótons e nêutrons se mantenham unidos;
- O resultado dessa divisão é a **formação de dois ou mais núcleos**, partículas e energia;

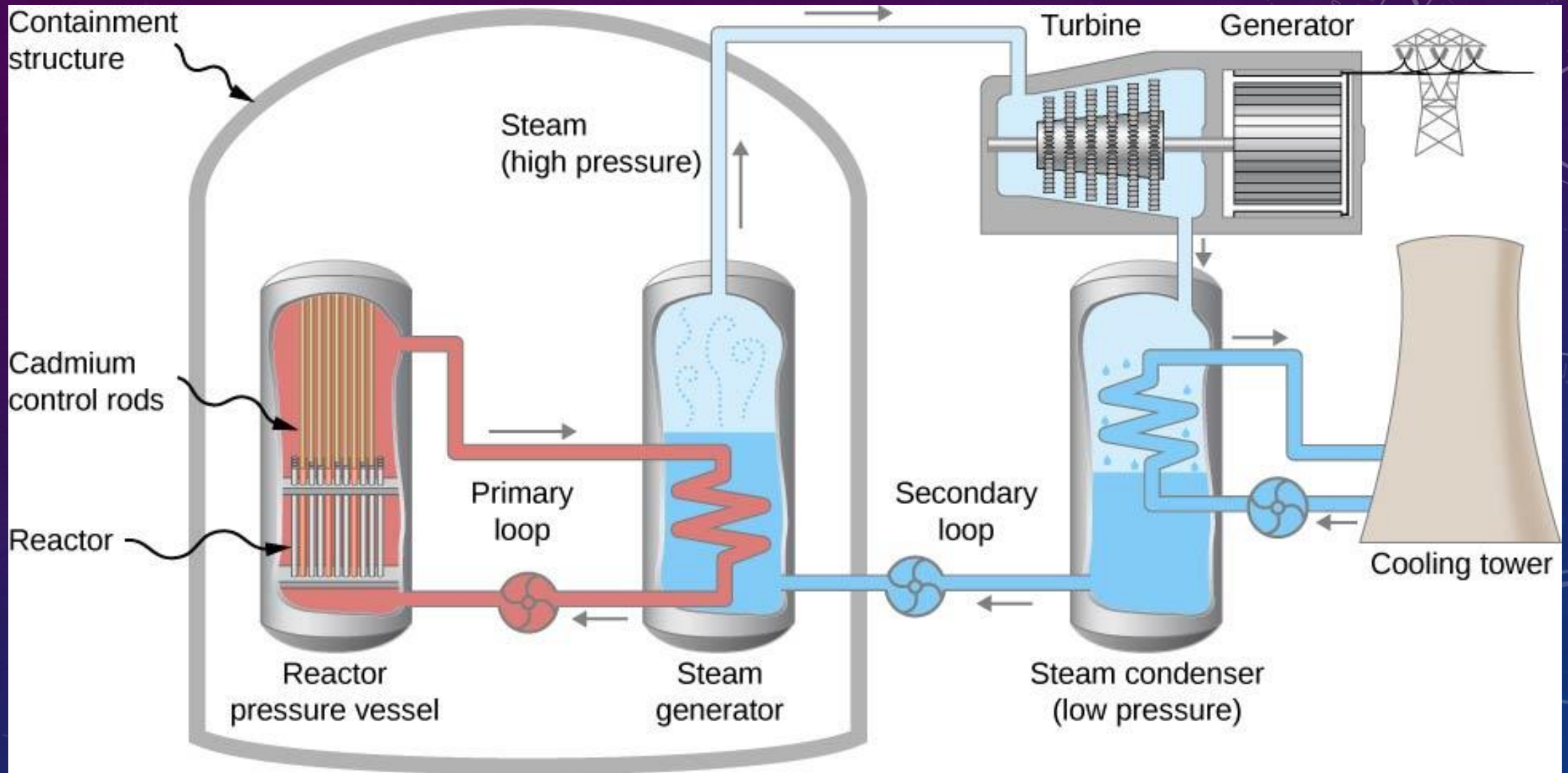


- Fonte não-renovável de **energia nuclear** e **termoelétrica**.



Bomba atômica





[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University\\_Physics/University\\_Physics\\_\(OpenStax\)/University\\_Physics\\_III\\_-\\_Optics\\_and\\_Modern\\_Physics\\_\(OpenStax\)/10%3A\\_\\_Nuclear\\_Physics/10.06%3A\\_Fission](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_(OpenStax)/University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_(OpenStax)/10%3A__Nuclear_Physics/10.06%3A_Fission)

- A fissão nuclear **espontânea** ocorre via oscilações naturais na forma do núcleo. **Ex.:**



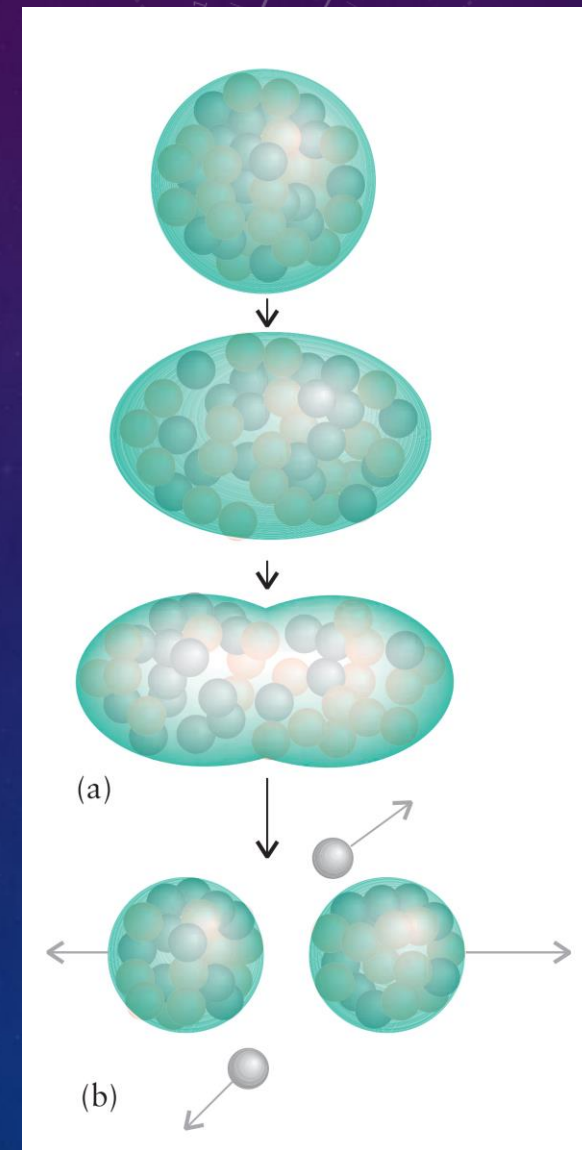
- Por quê esse isótopo do urânio é instável?
- Calcule a energia liberada. Considere:

- $m(^{238}\text{U}) = 238,050784\text{ u};$
- $m(^{95}\text{Sr}) = 94,919388\text{ u};$
- $m(^{140}\text{Xe}) = 139,921610\text{ u};$
- $m(^1\text{n}) = 1,008665\text{ u}.$

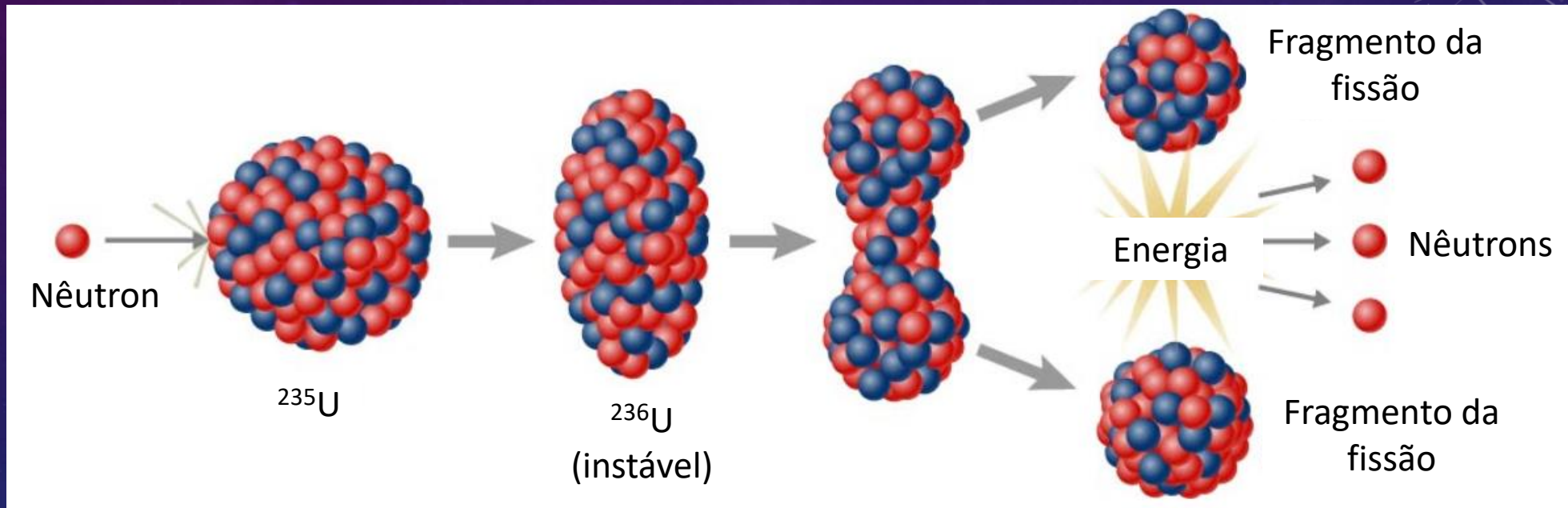
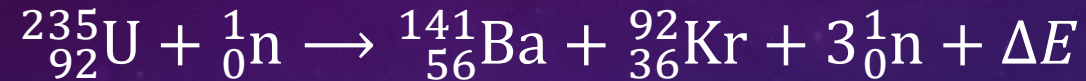
$$1\text{ u} = 931,5\text{ MeV}/c^2$$

$$E = [238,050784 - 94,919388 - 139,921610 - 3 \cdot 1,008665]\text{ u } c^2$$

$$E = [0,183791]\text{ u } c^2 = 0,183791 \cdot 931,5\text{ MeV} = 171,2\text{ MeV}$$

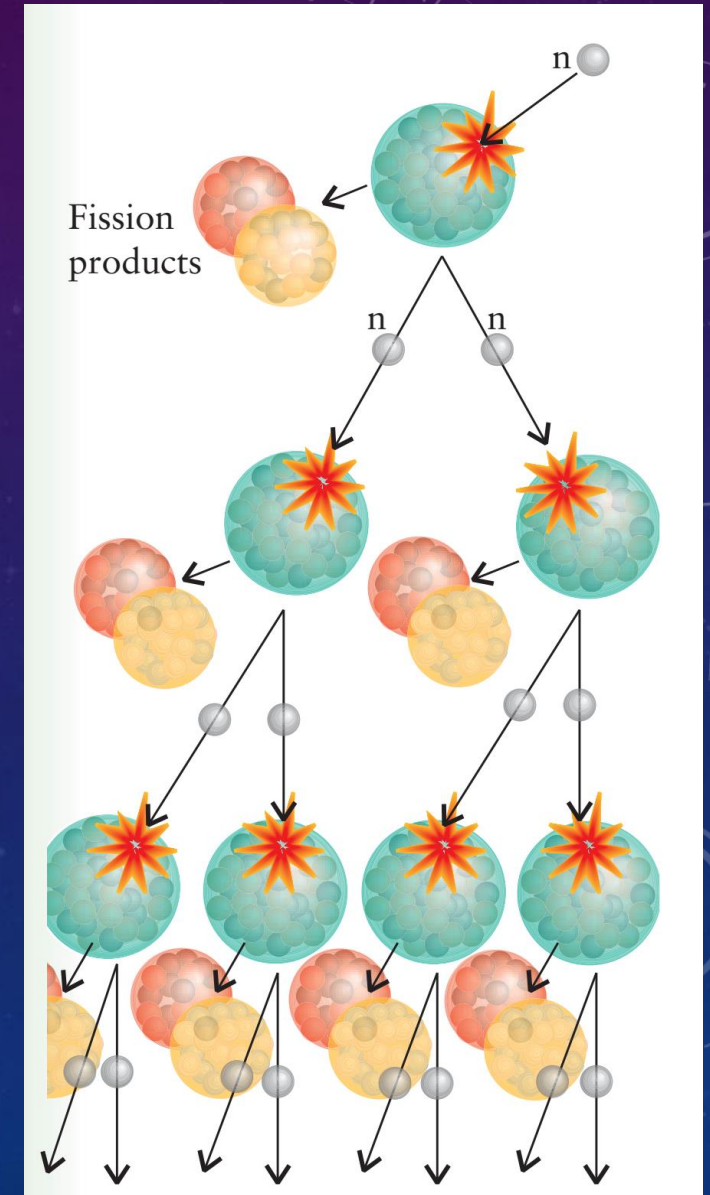


- A fissão nuclear **induzida** é causada pelo bombardeamento de nêutrons nos núcleos pesados (fissionáveis). **Ex.:**

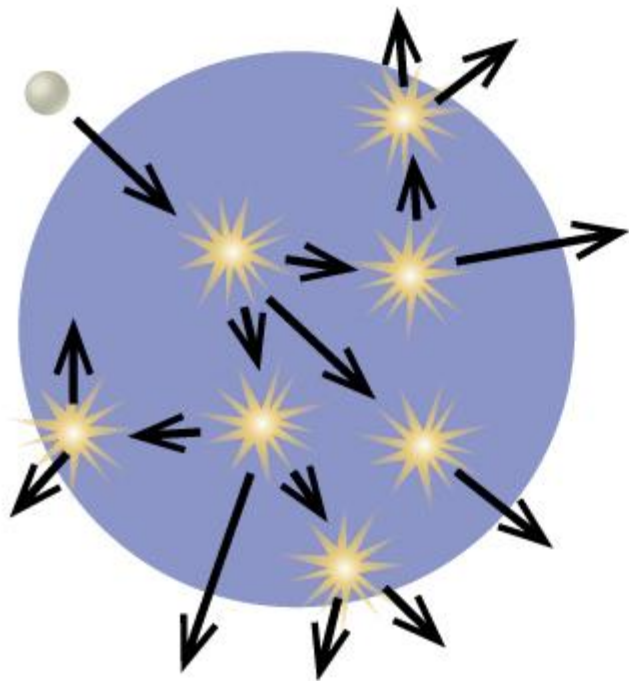




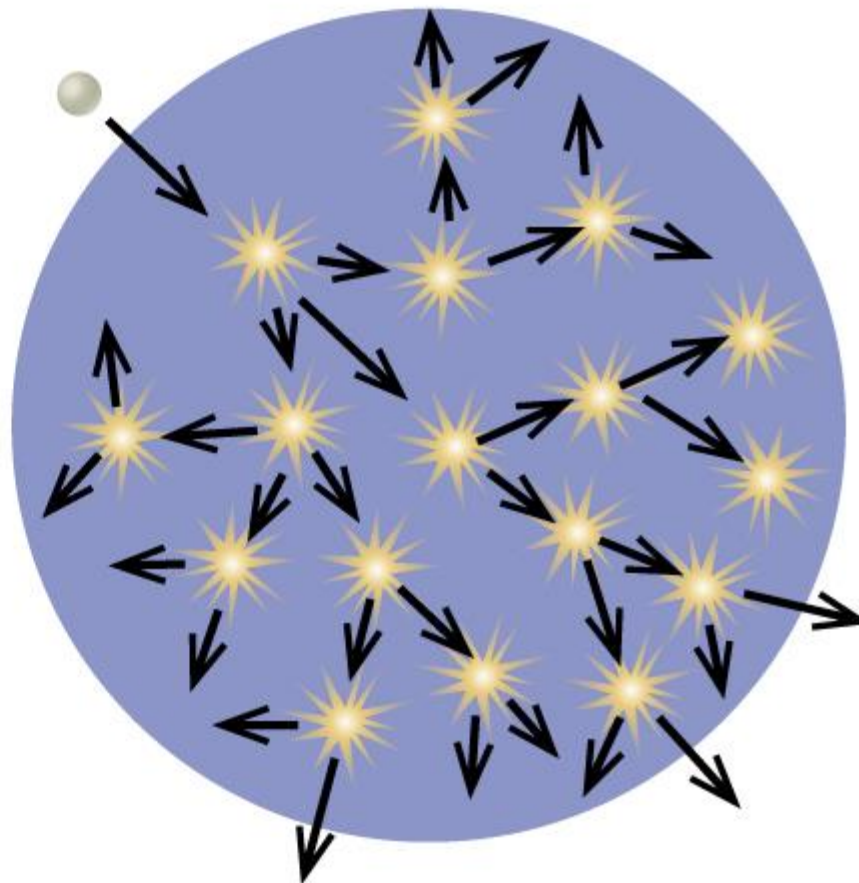
- Nêutrons são **propagadores** quando resultam em mais nêutrons como resultado da fissão nuclear.
- Devido a sua velocidade, a maioria escapa do sistema ao serem produzidos em pequenas quantidades do isótopo;
- Dizemos que a massa deste é **subcrítica**, e a quantidade de nêutrons que não escapa não é suficiente para sustentar a reação em cadeia;
- A massa do isótopo é **crítica** se a quantidade de nêutrons reaproveitados é suficiente para sustentar a reação;
- **Supercrítica** é a massa que leva não só a uma reação que se mantém, mas de maneira tão intensa que pode levar a explosão;
- Esse é o caso da reação usada nas bombas lançada em Hiroshima e Nagasaki (bomba atômica).



Massa subcrítica

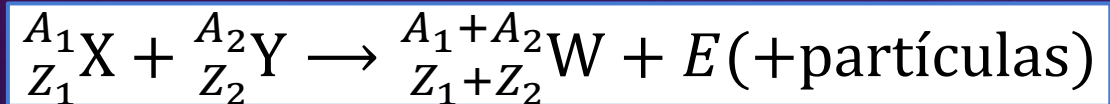


Massa crítica

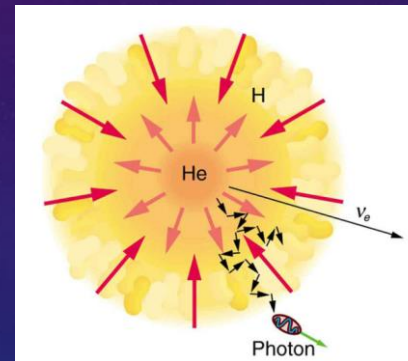
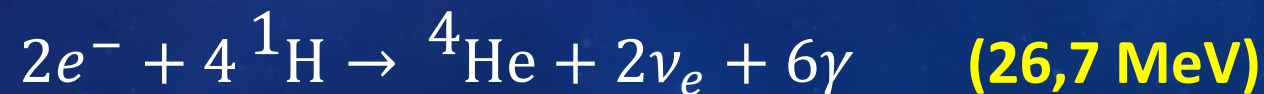
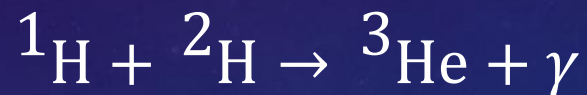
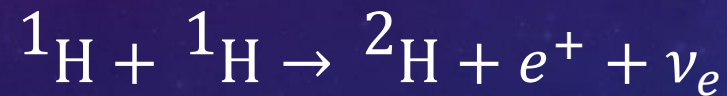


A massa crítica depende do tipo de material, sua pureza, da temperatura, do formato da amostra e de como a geração de nêutrons é controlada

- **Fusão nuclear:** colisão entre dois ou mais núcleos, resultando em um ou mais núcleos e possivelmente partículas subatômicas e energia;
- Normalmente dois átomos de baixa massa molar se unem para formar um átomo mais “pesado”.



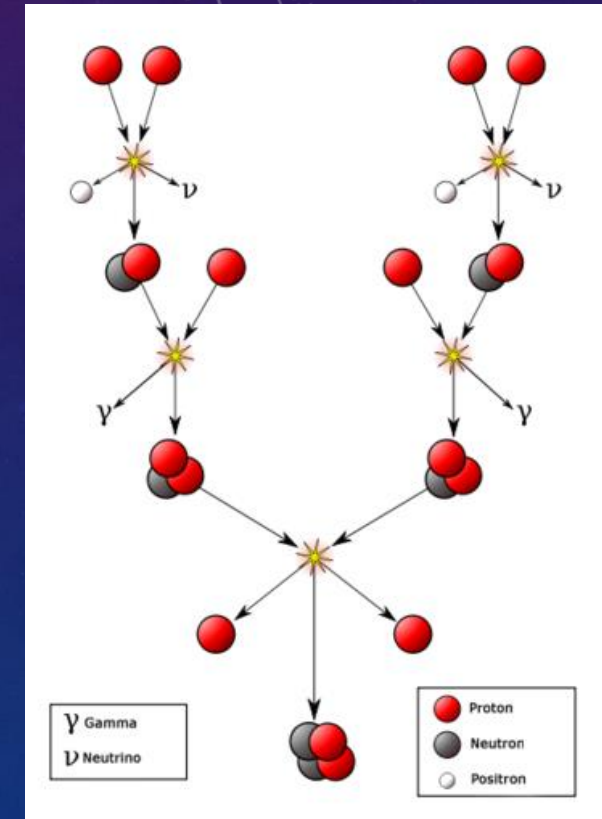
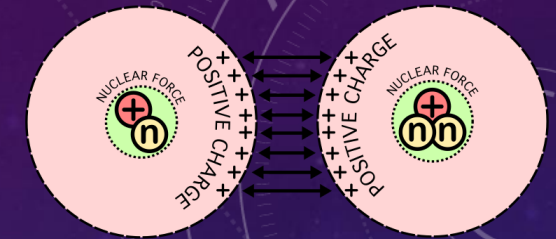
- Sol:



(0,42 MeV)

(5,59 meV)

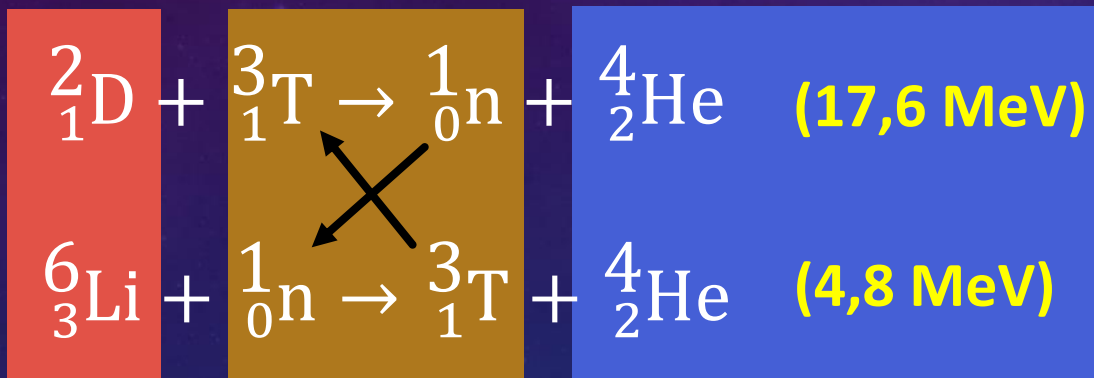
(12,86 MeV)





- Bomba-H (bomba de hidrogênio, arma termonuclear):

- Fusão termonuclear: altas temperaturas levam à fusão dos núcleos;



Reagentes      Intermediários      Produtos



0,020 quilotons  
10 megatons/tonelada

0,1 megatons  
60 megatons/tonelada

# COMPARANDO BOMBAS

- Formação do núcleo de hélio/reação de fusão do hidrogênio para produzir hélio no sol:

$$\frac{30 \text{ MeV}}{\text{átomo de } ^4\text{He}} \cdot \frac{6,0221 \cdot 10^{23} \text{ átomos de } ^4\text{He}}{1 \text{ mol de } ^4\text{He}} \cdot \frac{1 \text{ mol de } ^4\text{He}}{4,0026 \text{ g}} = 4,51 \cdot 10^{24} \frac{\text{MeV}}{\text{g}}$$

- Fissão de urânio:  $\frac{171,2 \text{ MeV}}{\text{átomo de } ^{238}\text{U}} \cdot \frac{6,0221 \cdot 10^{23} \text{ átomos de } ^{238}\text{U}}{1 \text{ mol de } ^{238}\text{U}} \cdot \frac{1 \text{ mol de } ^{238}\text{U}}{238,050784 \text{ g}} = 4,33 \cdot 10^{23} \frac{\text{MeV}}{\text{g}}$

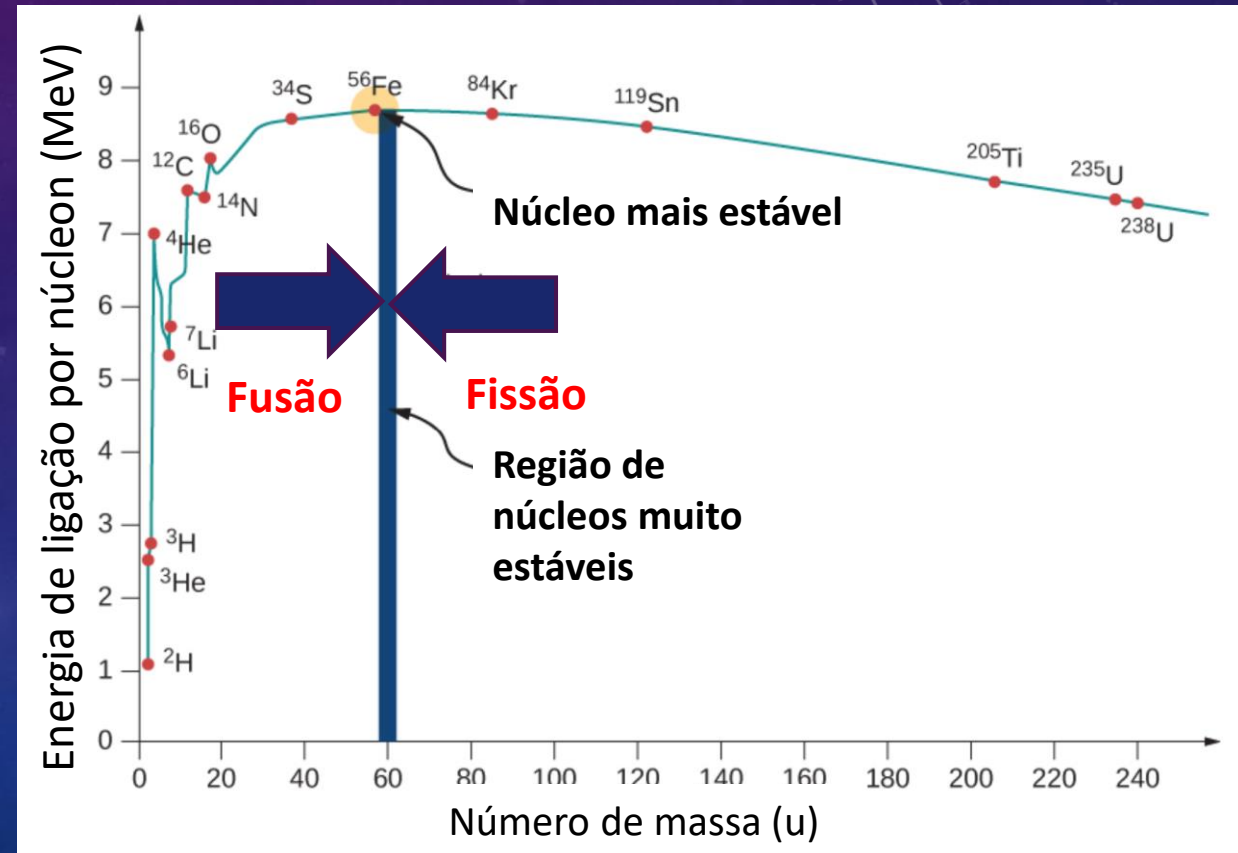
$$4,33 \cdot 10^{23} \frac{\text{MeV}}{\text{g}} \cdot \frac{10^6 \text{ eV}}{\text{g}} \cdot \frac{10^3 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \cdot \frac{0,160206 \cdot 10^{-18} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \cdot \frac{1 \text{ megaton}}{8 \cdot 10^{15} \text{ J}} = \frac{0,9 \text{ megatons}}{100 \text{ kg}}$$

- Bomba-H:  $\frac{22,4 \text{ MeV}}{\text{moléculas de LiD}} \cdot \frac{6,0221 \cdot 10^{23} \text{ moléculas de LiD}}{1 \text{ mol de LiD}} \cdot \frac{1 \text{ mol de LiD}}{6,016705 \text{ g}} = 2,23 \cdot 10^{24} \frac{\text{MeV}}{\text{g}}$

$$2,23 \cdot 10^{24} \frac{\text{MeV}}{\text{g}} \cdot \frac{10^6 \text{ eV}}{\text{g}} \cdot \frac{10^3 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \cdot \frac{0,160206 \cdot 10^{-18} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \cdot \frac{1 \text{ megaton}}{8 \cdot 10^{15} \text{ J}} = \frac{4,5 \text{ megatons}}{100 \text{ kg}}$$

# PREVENDO SE HAVERIA FISSÃO OU FUSÃO

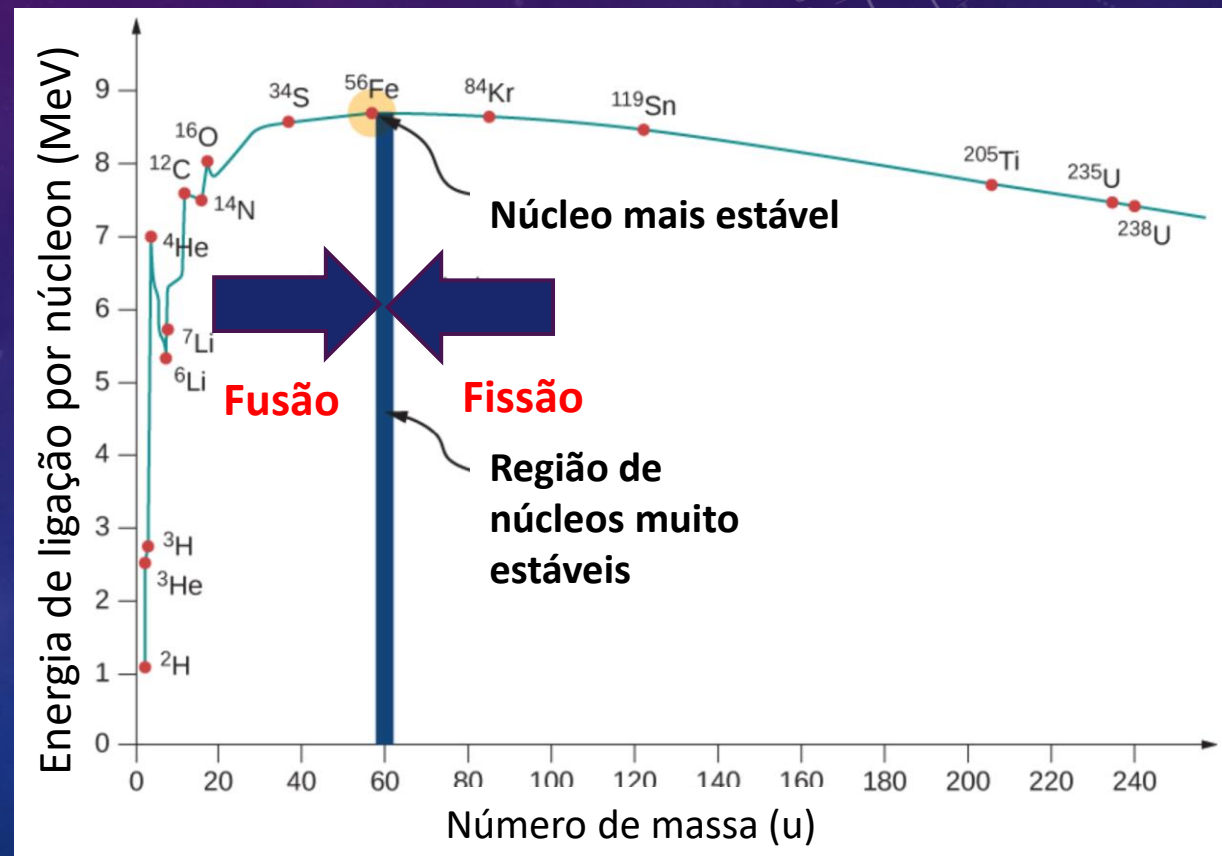
- A energia de ligação por núcleon,  $E_b/A$ , corresponde a energia necessária para retirar um núcleon (próton ou nêutron do núcleo);
- Tal quantidade é **análoga à energia de ionização** de elétrons em orbitais.
- Similarmente, quanto maior o valor dessa quantidade, mais estável é o núcleo;
- O **Ferro-56** é o isótopo mais estável do ponto de vista nuclear.

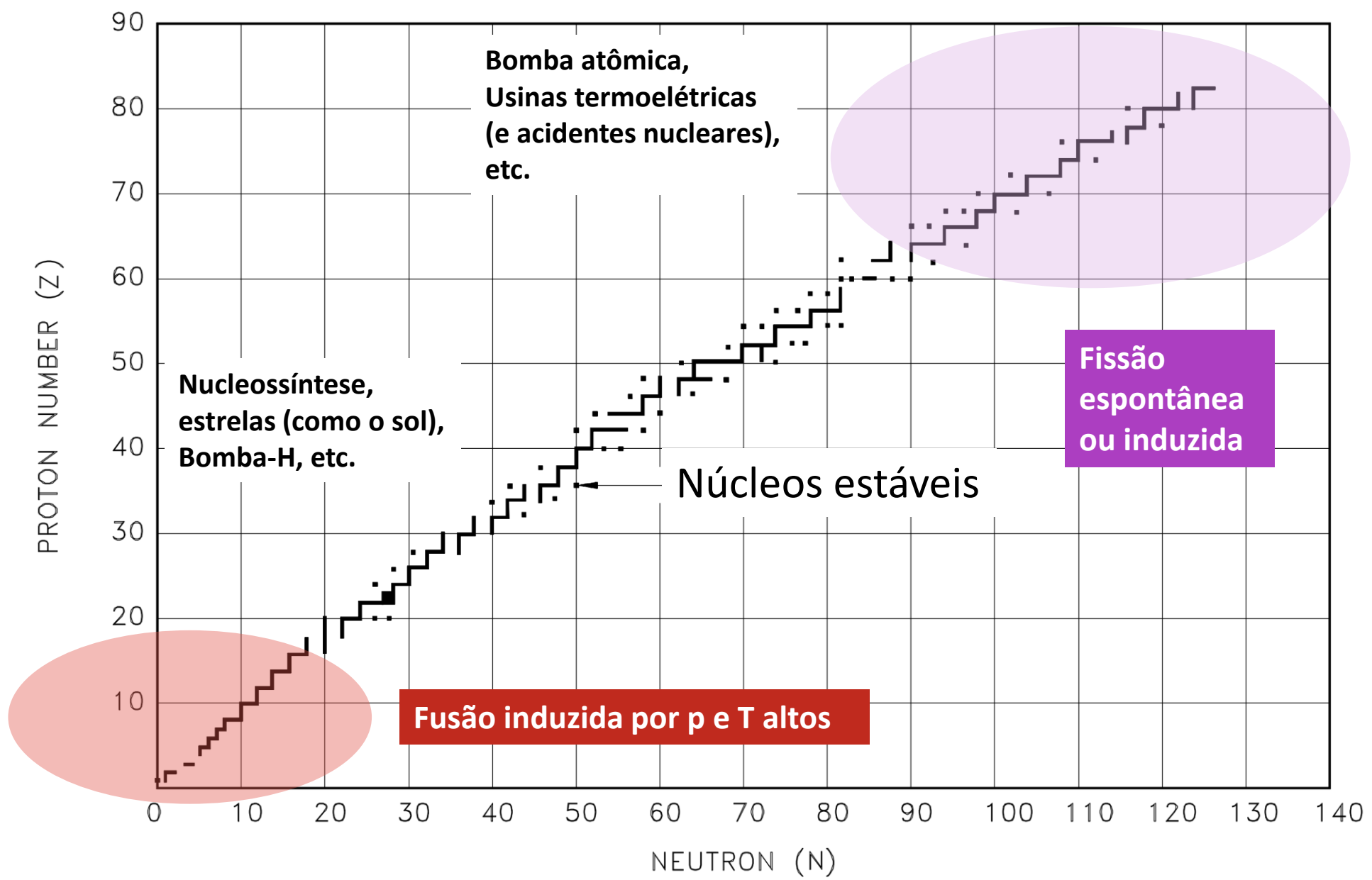




# PREVENDO SE HAVERIA FISSÃO OU FUSÃO

- Os átomos adquirem **configuração eletrônica** mais estável (a de um gás nobre) ao **perder ou ganhar elétrons**, dependendo do que é menos custoso energeticamente (“fácil”);
- Da mesma forma, como **configuração nuclear** do Fe é a mais estável, núcleos com maior  $E_b/A$  tendem a reduzi-la, e núcleos com menor  $E_b/A$  tendem a aumentá-la;
- Isso pode ser alcançado via **fusão ou fissão nuclear**, respectivamente;





- **Exemplos:**

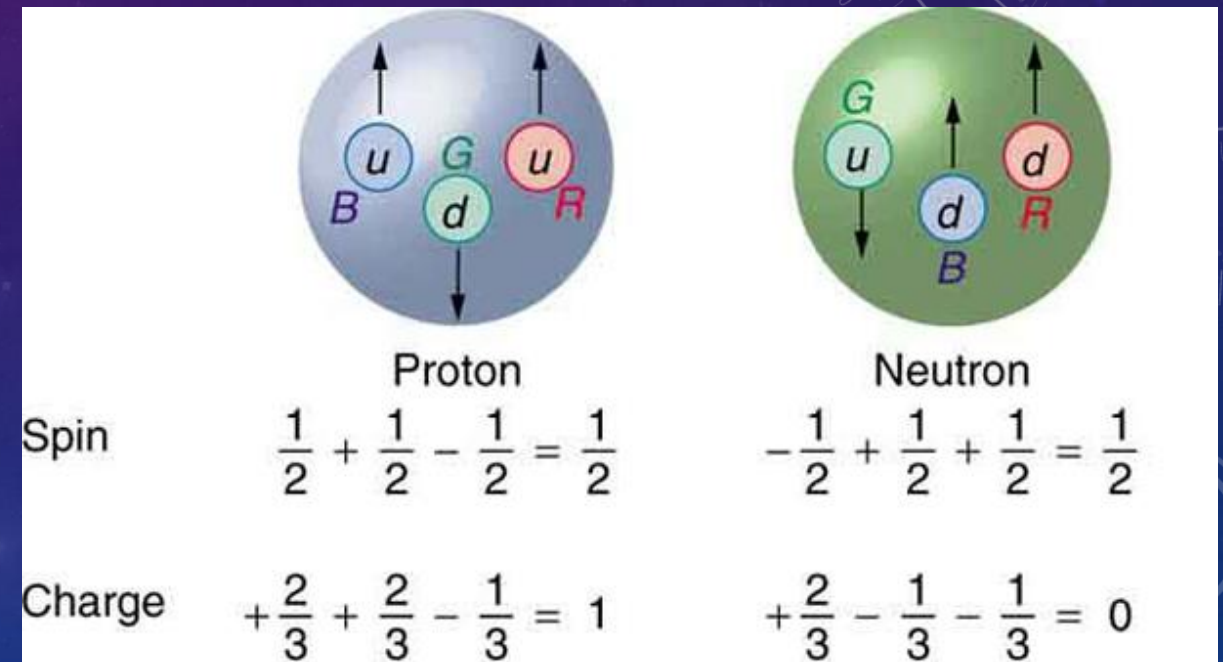
9º) Indique se os isótopos instáveis (analisados anteriormente) deverão sofrer fusão ou fissão nuclear, em condições adequadas:

- $^{54}_{25}\text{Mn}$ ;
- $^{210}_{84}\text{Po}$ ;
- $^{30}_{15}\text{P}$ ;
- $^{98}_{43}\text{Tc}$ ;
- $^{239}_{94}\text{Pu}$ .



# APÊNDICE A: PARTÍCULAS SUBATÔMICAS FUNDAMENTAIS

- Prótons e nêutrons são **hádrons** (combinações de quarks) específicos chamados de **bárions**. Prótons, nêutrons e elétrons são as partículas subatômicas que compõem o átomo;
- Como prótons e nêutrons são formados de **quarks** (*up* e *down*), o átomo é composto das partículas subatômicas fundamentais quarks, elétrons e das interações entre eles.



Grupo I	Grupo II	Grupo III		
$\cong 2,3$ $2/3$ <b>u</b> Up $1/2$	$\cong 1275$ $2/3$ <b>c</b> Charm $1/2$	$\cong 173070$ $2/3$ <b>t</b> Top $1/2$	$0$ <b>g</b> Glúon $1$	
$4,8$ $-1/3$ <b>d</b> Down $1/2$	$95$ $-1/3$ <b>s</b> Strange $1/2$	$4180$ $-1/3$ <b>b</b> Bottom $1/2$	$0$ <b><math>\gamma</math></b> Fóton $1$	
$0,511$ $-1$ <b>e</b> Elétron $1/2$	$105,7$ $-1$ <b><math>\mu</math></b> Múon $1/2$	$1777 \cdot 10^3$ $-1$ <b><math>\tau</math></b> Tau $1/2$	$80,4 \cdot 10^3 \pm 1$ <b>W</b> Bóson W $1$	$91,2 \cdot 10^3$ $0$ <b>Z</b> Bóson Z $1$
$< 0,002$ $0$ <b><math>\nu_e</math></b> Neutrino do elétron $1/2$	$< 0,17$ $0$ <b><math>\nu_\mu</math></b> Neutrino do múon $1/2$	$< 15,5$ $0$ <b><math>\nu_\tau</math></b> Neutrino do tau $1/2$	$126 \cdot 10^3$ $0$ <b>H</b> Bóson de Higgs $0$	
Férmions			Bósons	

Partícula	Previsão	Observação
Bottom	1973	1977
Elétron	1874	1897
Múon	—	1936
Tau	—	1975
Neutrino do elétron	1930	1956
Neutrino do múon	1940s	1962
Neutrino do tau	1970s	2000
Próton	1815	1917
Nêutron	1920	1932
Bóson de Higgs	1964	2012
Glúon	1962	1978
Fóton	—	1899
Bóson W	1968	1983
Bóson Z	1968	1983

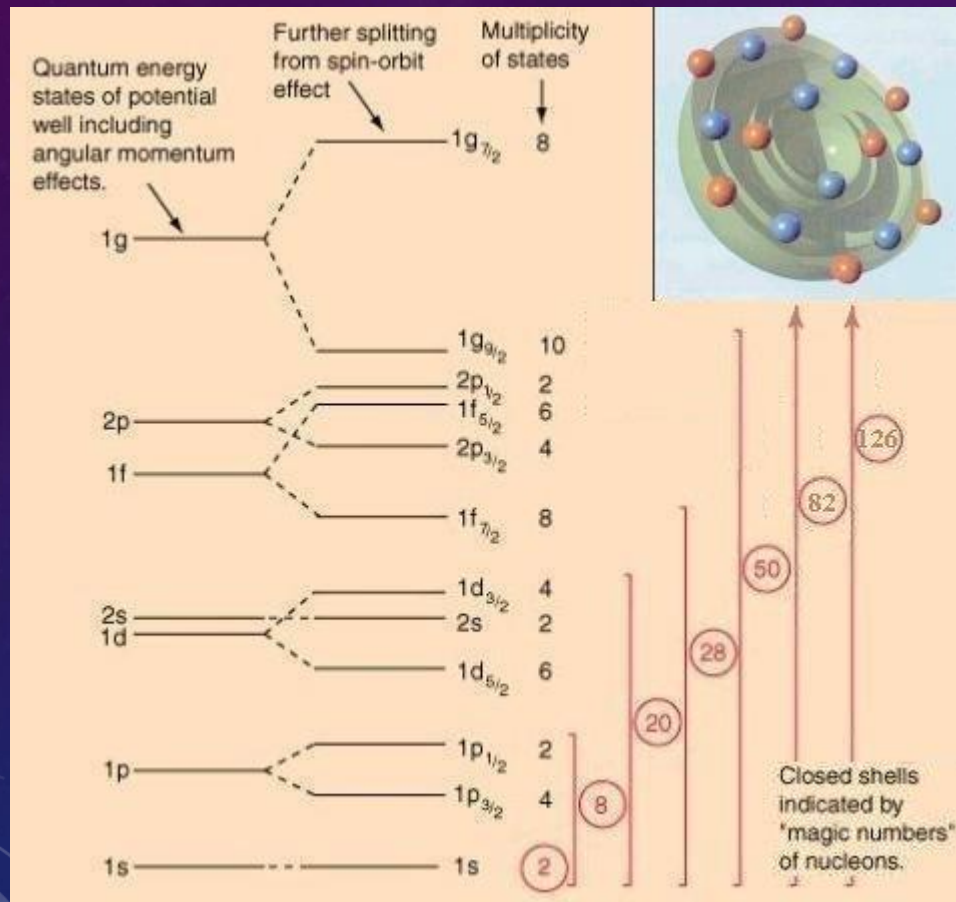
Partículas subatômicas fundamentais mais importantes na Química Nuclear (estabilidade do grupo I)

# APÊNDICE B: GLOSSÁRIO

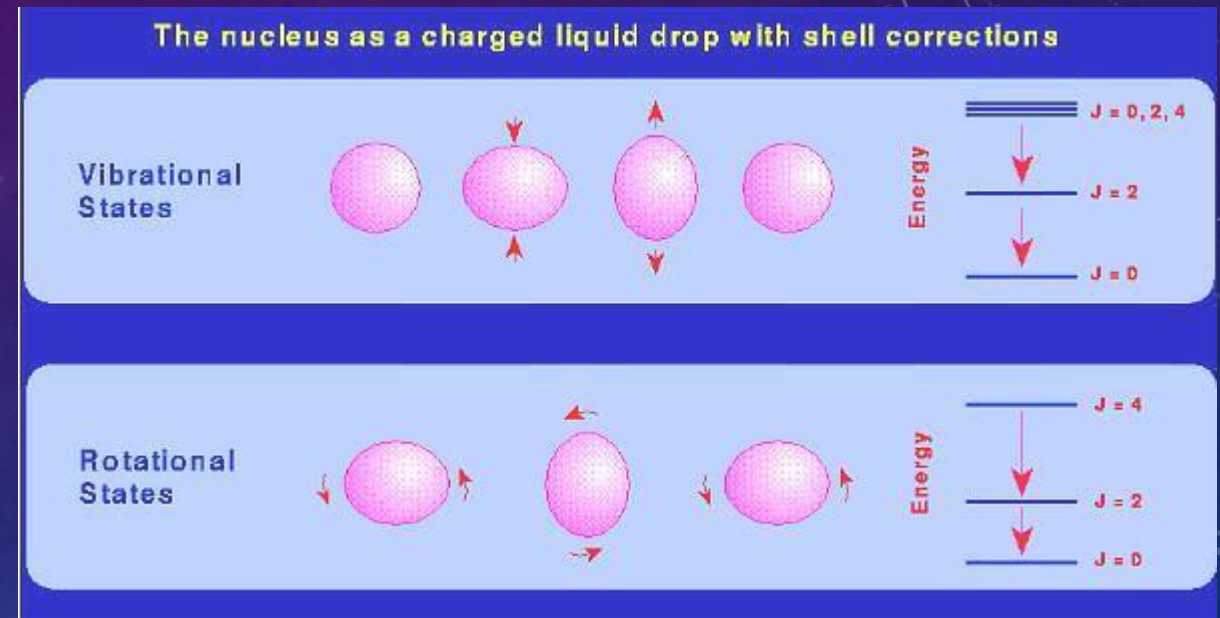
- **Átomo**: menor partícula capaz de caracterizar um elemento. É formado por um núcleo com carga positiva e número de prótons  $Z$ , que carrega quase toda a massa do átomo, e pelo mesmo número de elétrons, que delimitam seu tamanho;
- **Núcleo**: porção central, positivamente carregada, de um átomo, a parte dos elétrons em orbitais;
- **Núcleons**: partículas do núcleo (prótons e nêutrons)
- **Nuclídeo**: tipo de átomo com valores de  $A$ ,  $Z$  e estado energético definidos, com tempo de vida longo o suficiente para ser observável;
- **Isótopos**: nuclídeos com o mesmo  $Z$  mas valores de  $A$  distintos;
- **Radiação**: ondas eletromagnéticas (radiação eletromagnética) ou partículas em alta velocidade (radiação corpuscular);



# APÊNDICE C: MODELOS DO NÚCLEO



Modelo Nuclear de Camadas



Modelo da Gota Líquida

<https://universe-review.ca/F14-nucleus02.htm>  
[https://chem.libretexts.org/Courses/Portland Community College/CH105%3A Allied Health Chemistry II/07%3A Nuclear Chemistry/7.02%3A Stable and Unstable Isotopes](https://chem.libretexts.org/Courses/Portland_Community_College/CH105%3A_Allied_Health_Chemistry_II/07%3A_Nuclear_Chemistry/7.02%3A_Stable_and_Unstable_Isotopes)

## Exercício 8

Metal

Não metal

Intermediário

IA

1  
H  
1,0080

IIB

3  
Li  
6,941

4  
Be  
9,0122

VIIA

9  
F  
18,998

10  
Ne  
20,180

Legenda

29

Cu

63,55

Número atômico

Símbolo

Massa atômica

IIA

2  
He  
4,0026

III A

5  
B  
10,811

IVA

6  
C  
12,011

VA

7  
N  
14,007

VIA

8  
O  
15,999

VIIA

17  
Cl  
35,453

VIII

26 Fe 55,845

IB

29 Cu 63,55

IIB

30 Zn 65,41

V

23 V 50,942

Cr

24 Cr 51,996

Mn

25 Mn 54,938

Fe

26 Fe 55,845

Co

27 Co 58,933

Ni

28 Ni 58,69

Cu

29 Cu 63,55

Zn

30 Zn 65,41

Ga

31 Ga 69,72

Ge

32 Ge 72,64

As

33 As 74,922

Se

34 Se 78,96

Br

35 Br 79,904

Kr

36 Kr 83,80

Rb

37 Rb 85,47

Sr

38 Sr 87,62

Y

39 Y 88,91

Zr

40 Zr 91,22

Nb

41 Nb 92,91

Mo

42 Mo 95,94

Tc

43 Tc (98)

Ru

44 Ru 101,07

Rh

45 Rh 102,91

Pd

46 Pd 106,4

Ag

47 Ag 107,87

Cd

48 Cd 112,41

In

49 In 114,82

Sn

50 Sn 118,71

Sb

51 Sb 121,76

Te

52 Te 127,60

I

53 I 126,90

Xe

54 Xe 131,30

Cs

55 Cs 132,91

Ba

56 Ba 137,33

Série das terras-raras

Hf

72 Hf 178,49

Ta

73 Ta 180,95

W

74 W 183,84

Re

75 Re 186,2

Os

76 Os 190,23

Ir

77 Ir 192,2

Pt

78 Pt 195,08

Au

79 Au 196,97

Hg

80 Hg 200,59

Tl

81 Tl 204,38

Pb

82 Pb 207,19

Bi

83 Bi 208,98

Po

84 Po (209)

At

85 At (210)

Rn

86 Rn (222)

Fr

87 Fr (223)

Ra

88 Ra (226)

Série dos actínidos

Rf

104 Rf (261)

Db

105 Db (262)

Sg

106 Sg (266)

Bh

107 Bh (264)

Hs

108 Hs (277)

Mt

109 Mt (268)

Ds

110 Ds (281)

Série das terras-raras

57 La 138,91

58 Ce 140,12

59 Pr 140,91

60 Nd 144,24

61 Pm (145)

62 Sm 150,35

63 Eu 151,96

64 Gd 157,25

65 Tb 158,92

66 Dy 162,50

67 Ho 164,93

68 Er 167,26

69 Tm 168,93

70 Yb 173,04

71 Lu 174,97

Série dos actínidos

89 Ac (227)

90 Th 232.04

91 Pa 231.04

92 U 238.03

93 Np (237)

94 Pu (244)

95 Am (243)

96 Cm (247)

97 Bk (247)

98 Cf (251)

99 Es (252)

100 Fm (257)

101 Md (258)

102 No (259)

103 Lr (262)