

# INSTRUMENTAÇÃO NUCLEAR

## FONTES DE RADIAÇÃO

## Unidades e definições

- Atividade  $\rightarrow$  taxa de decaimento.

no. de núcleos radioativos

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad \Rightarrow \quad A = A_0 e^{-\lambda t}$$

atividade

cte de decaimento

tempo de meia-vida

- **Unidade histórica** : Curie (Ci)

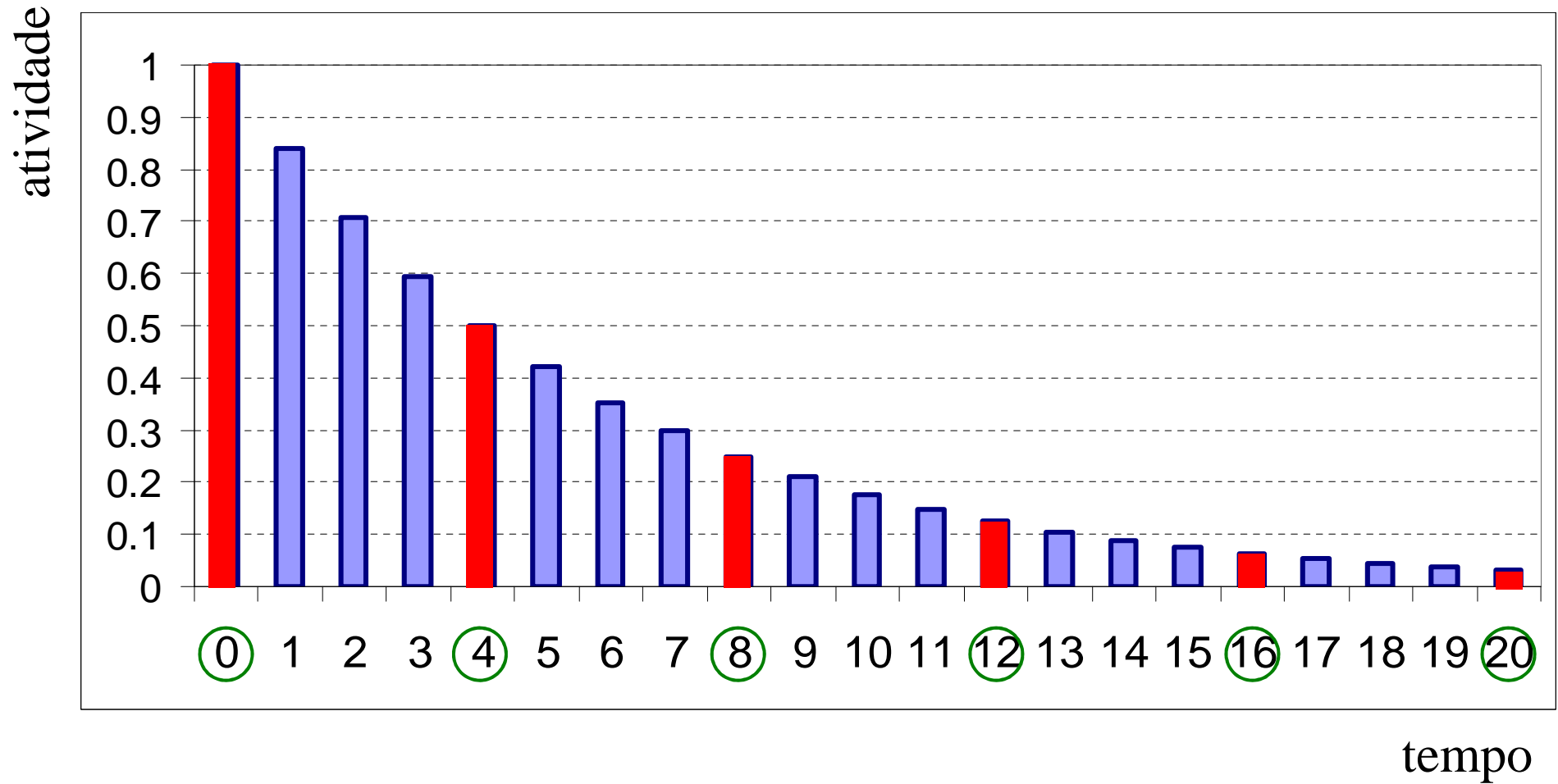
1Ci = 3.7E10 dps (atividade de 1g de Ra-226)

- **Unidade SI** : Becquerel (Bq)

1Bq = 1dps

$$1\text{Bq} = 1/3.7\text{E}10 = 2.703\text{E}-11\text{Ci}$$

# Curva de decaimento radioativo



# Múltiplos e submúltiplos

## Múltiplos

Kilo	k	1E3	kBq
Mega	M	1E6	MBq
Giga	G	1E9	GBq
Tera	T	1E12	TBq
Peta	P	1E15	PBq

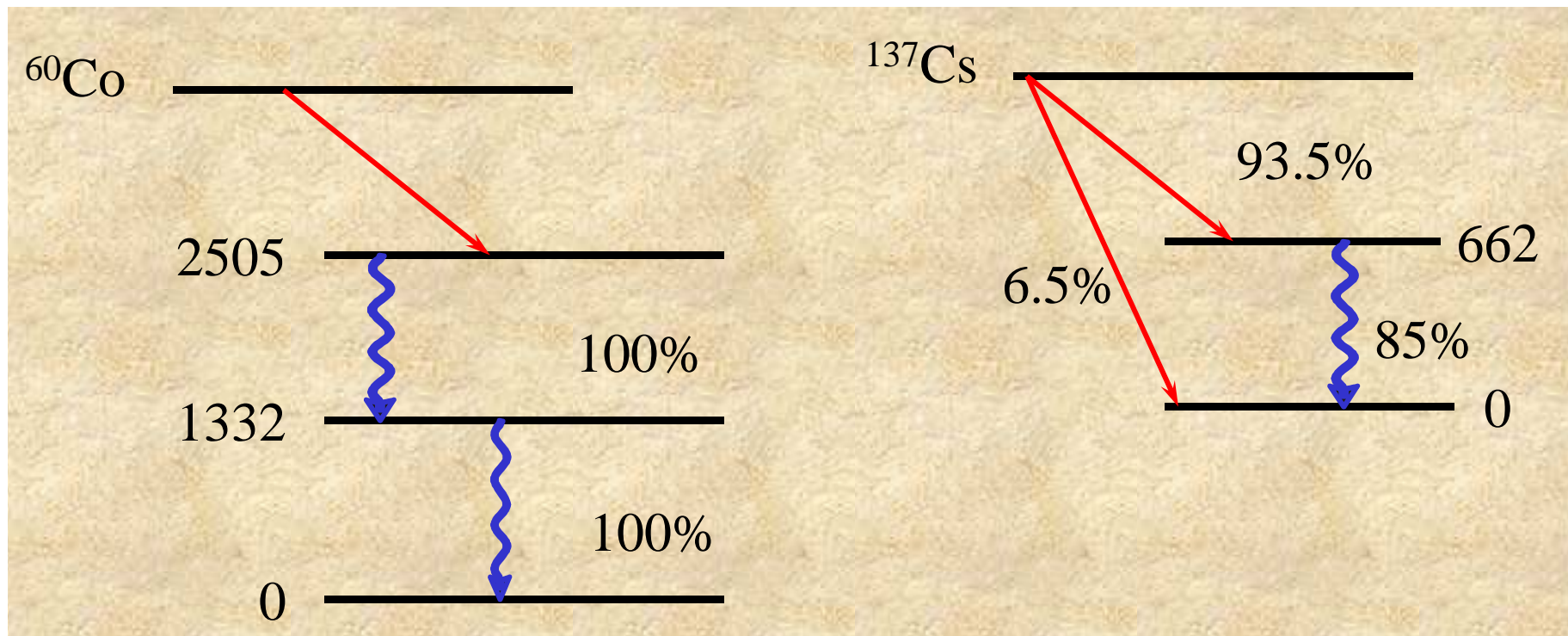
## Submúltiplos

Mili	m	1E-3	mCi
Micro	μ	1E-6	μCi
Nano	n	1E-9	nCi
Pico	p	1E-12	pCi
Femto	f	1E-15	fCi

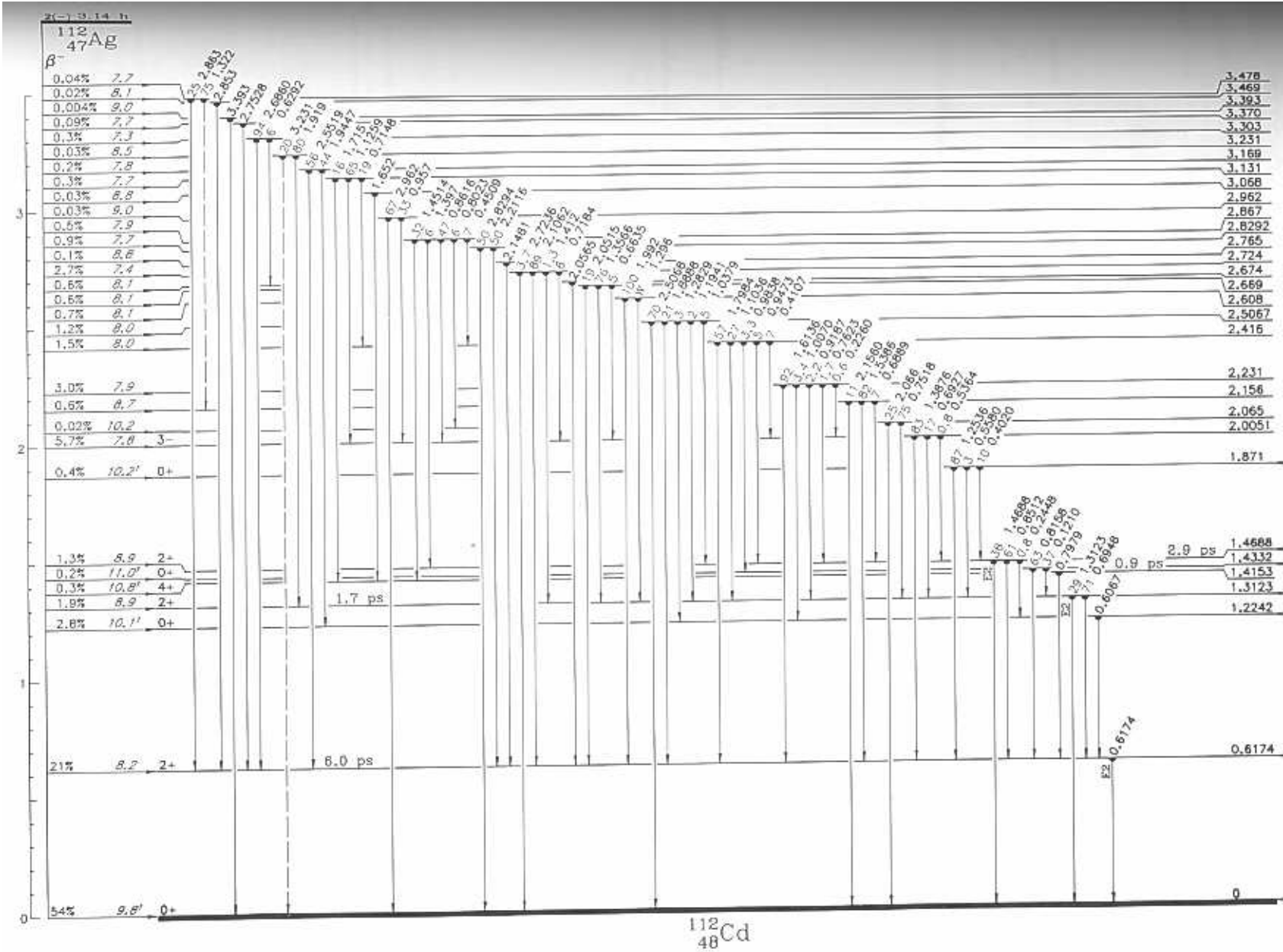
## Taxa de decaimento e taxa de emissão

**Taxa de decaimento** → número de átomos que sofrem decaimento por unidade de tempo.

**Taxa de emissão** → número de partículas emitidas por unidade de tempo.



# Exemplo de esquema complexo de decaimento radioativo



# Energia

**Unidade histórica** : eletron-Volt (eV)

1eV = energia adquirida por 1 elétron devido a sua aceleração por uma diferença de potencial de 1V.

**Unidade SI** : Joule (J) → 1 eV = 1.602E-19 J

Para partículas carregadas :  $ddp \cdot \text{carga da partícula}$

Para fótons:

$E = h\nu$                        $h \rightarrow$  constante de Plank (4.135E-15 eV.s)

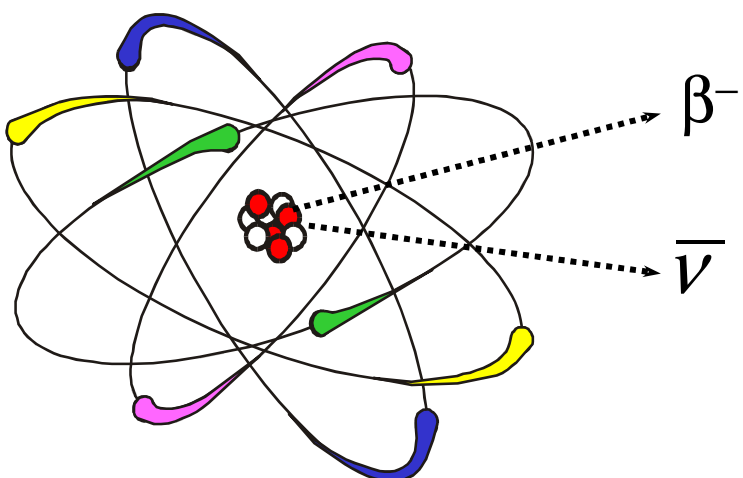
$\nu = v/\lambda$                        $\nu \rightarrow$  frequência (ciclos/s)

$\lambda = v h/E$                        $v \rightarrow$  velocidade da luz (3E8m/s)

$\lambda = 1.24E-6/E$                        $\lambda \rightarrow$  comprimento de onda (m)

# Fontes de elétrons

## a. Decaimento Beta

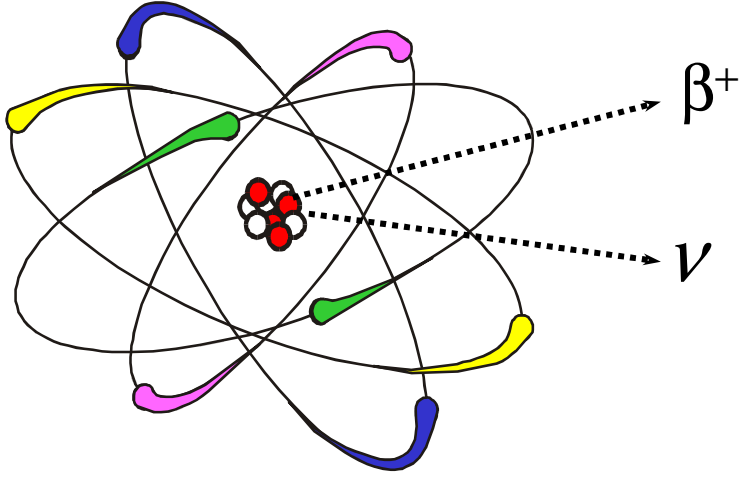


The diagram shows an atom with a nucleus of red and white spheres and several colored electron shells (blue, pink, yellow, green). A dashed arrow labeled  $\beta^-$  points from the nucleus to the right. Another dashed arrow labeled  $\bar{\nu}$  points from the nucleus to the right. To the right of the diagram is the equation  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + \beta^- + \bar{\nu}$ . A green arrow labeled "antineutrino" points from the text above to the  $\bar{\nu}$  term in the equation.

$\beta^-$

$\bar{\nu}$

antineutrino

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + \beta^- + \bar{\nu}$$


The diagram shows an atom with a nucleus of red and white spheres and several colored electron shells (blue, pink, yellow, green). A dashed arrow labeled  $\beta^+$  points from the nucleus to the right. Another dashed arrow labeled  $\nu$  points from the nucleus to the right. To the right of the diagram is the equation  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \beta^+ + \nu$ . A green arrow labeled "neutrino" points from the text above to the  $\nu$  term in the equation.

$\beta^+$

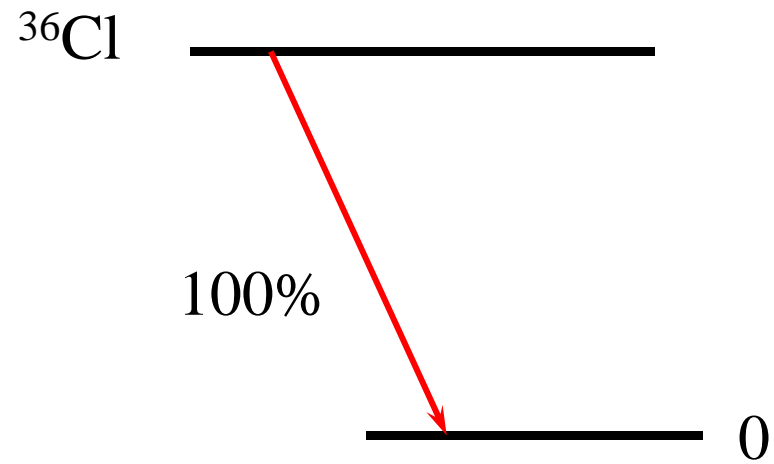
$\nu$

neutrino

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \beta^+ + \nu$$



# Fontes de elétrons - beta



# Fontes de elétrons

## b. Conversão interna

Núcleo excitado (devido a emissão beta) → gama;

Em alguns estados de excitação, a emissão de gama é inibida; a energia é transferida para um elétron orbital que é ejetado.

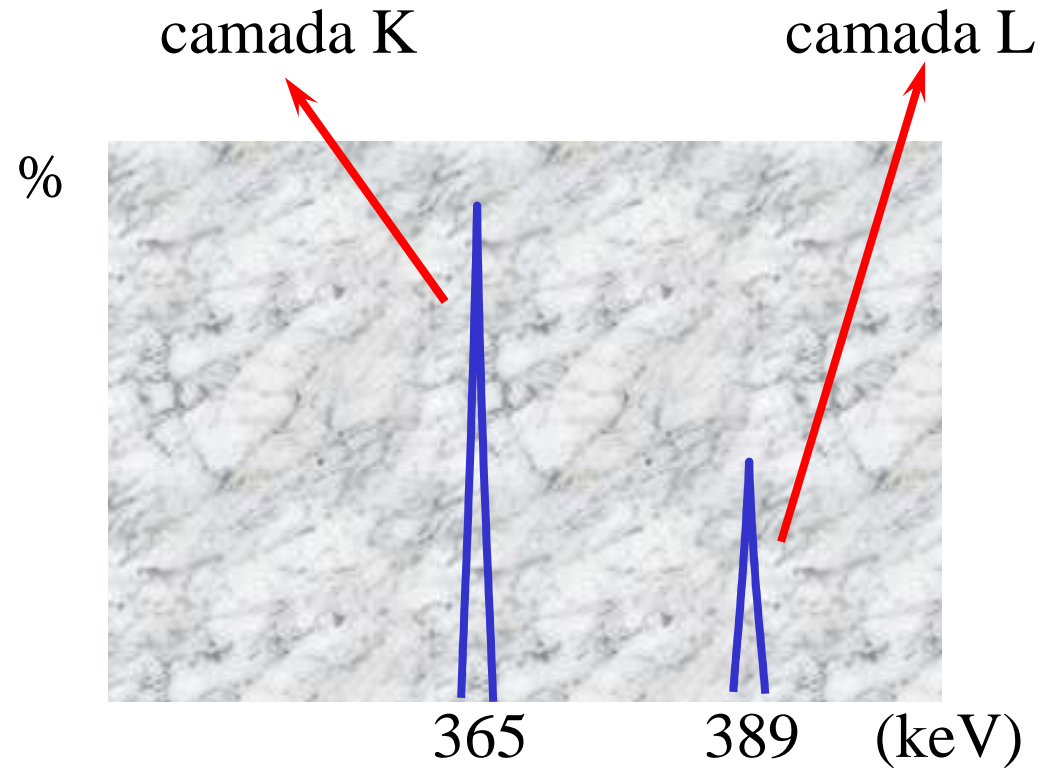
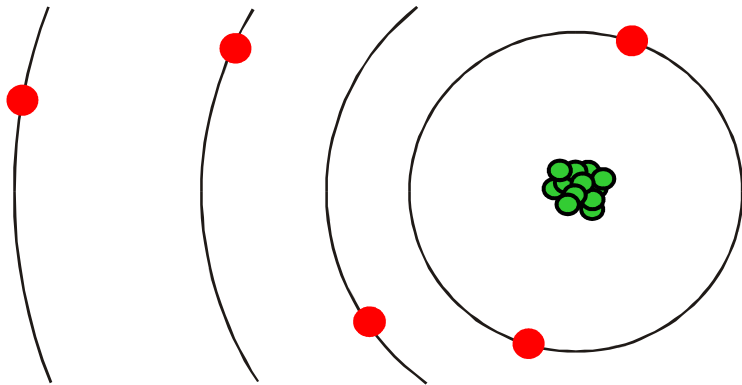
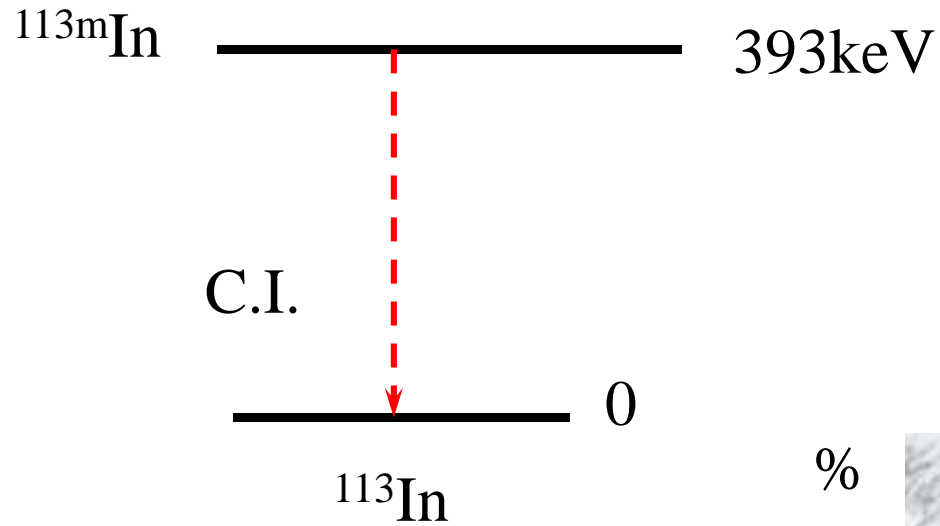
$$E_e = E_{ex} - E_b$$

energia do elétron      energia de excitação      energia de ligação

Ex:  $^{137}\text{Cs} (\beta) \rightarrow ^{137\text{m}}\text{Ba}$

EC : 624keV e 656keV

# Fontes de elétrons – C.I.



energia do elétron

## Fontes de elétrons

### c. Elétrons Auger

Átomo excitado (devido a captura eletrônica) → raio X;

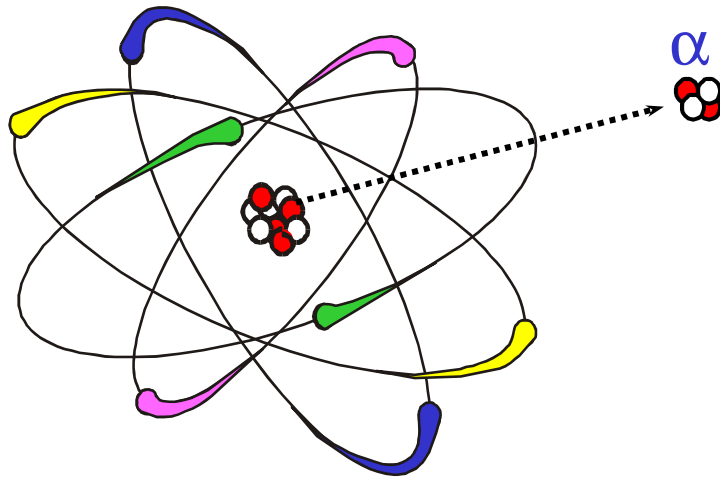
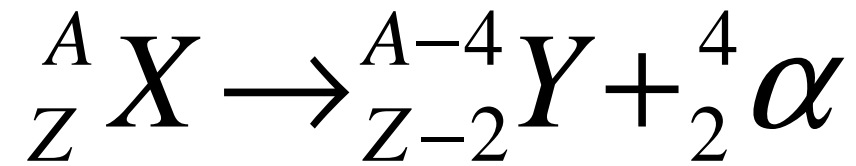
Em alguns estados de excitação, a emissão de raio X é inibida; a energia é transferida para um elétron orbital que é ejetado.

$$E_e = E_{ex} - E_b$$

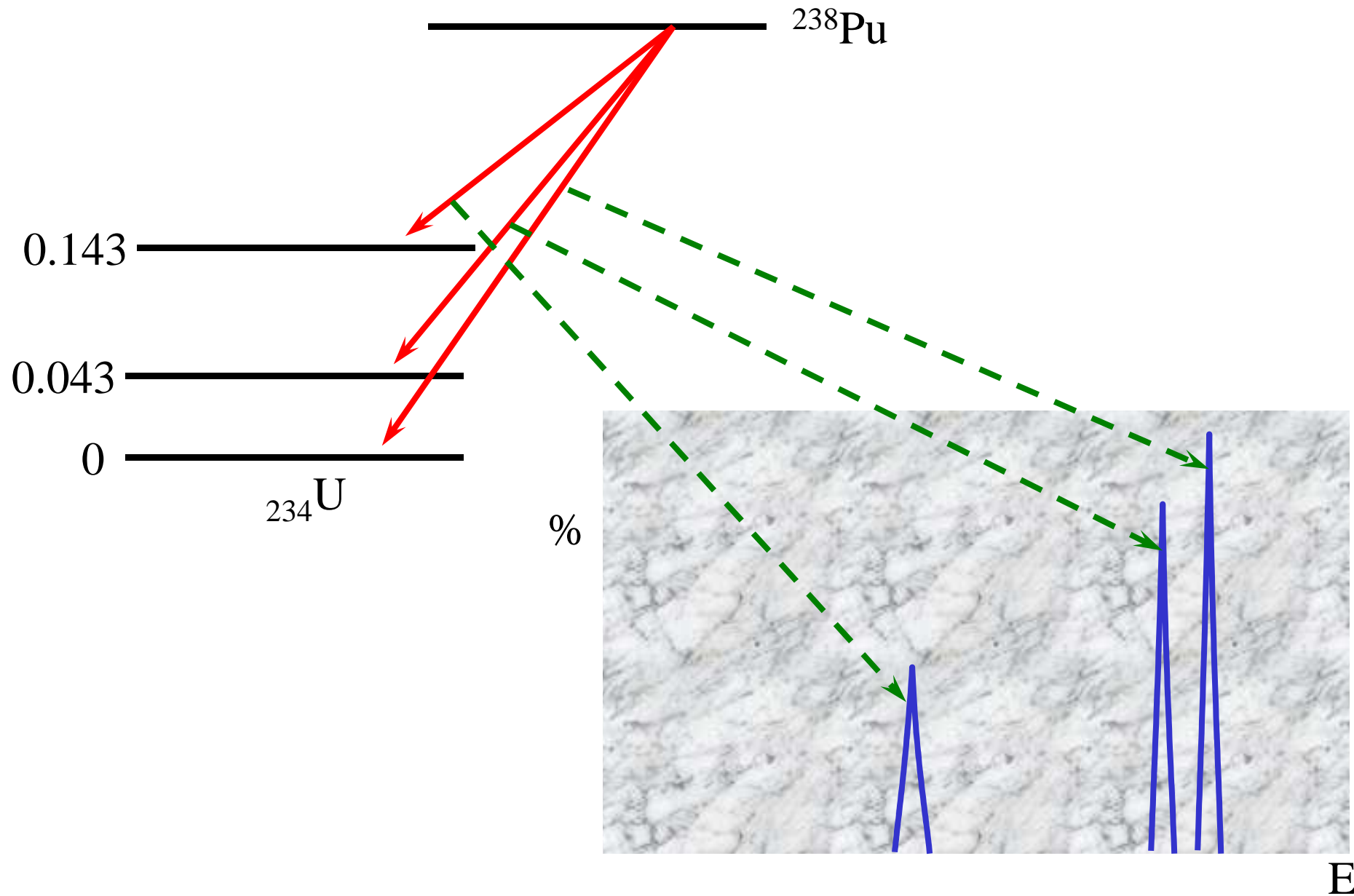
Apresentam baixa energia comparados com beta e EC, especialmente porque é favorecido em elementos de baixo Z, cuja energia de ligação é baixa.

# Fontes de partículas pesadas

## a. Decaimento alfa



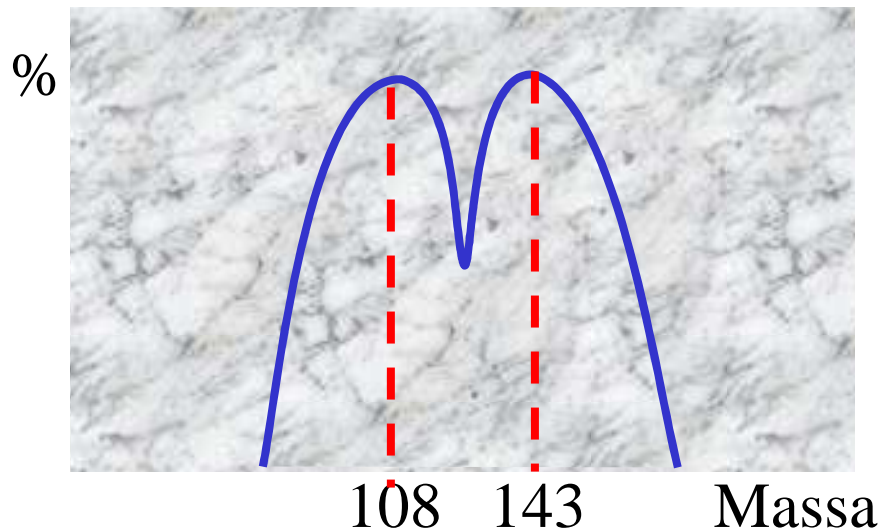
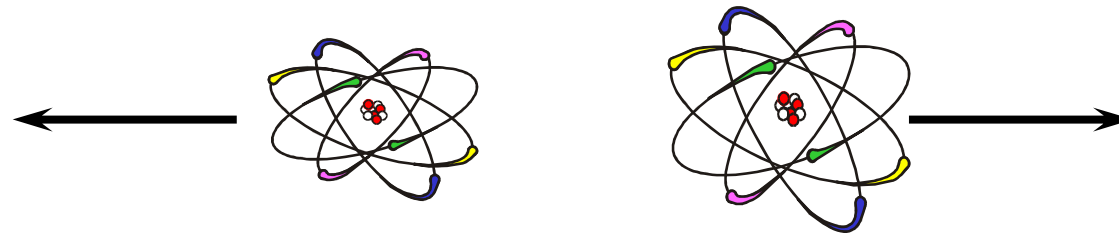
# Fontes de partículas pesadas - alfa



E

# Fontes de partículas pesadas

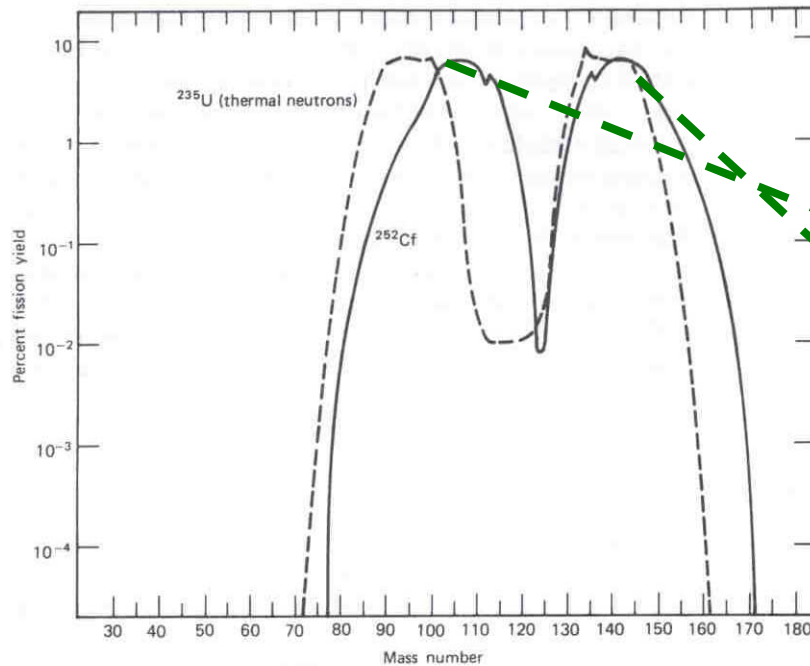
## b. Fissão espontânea



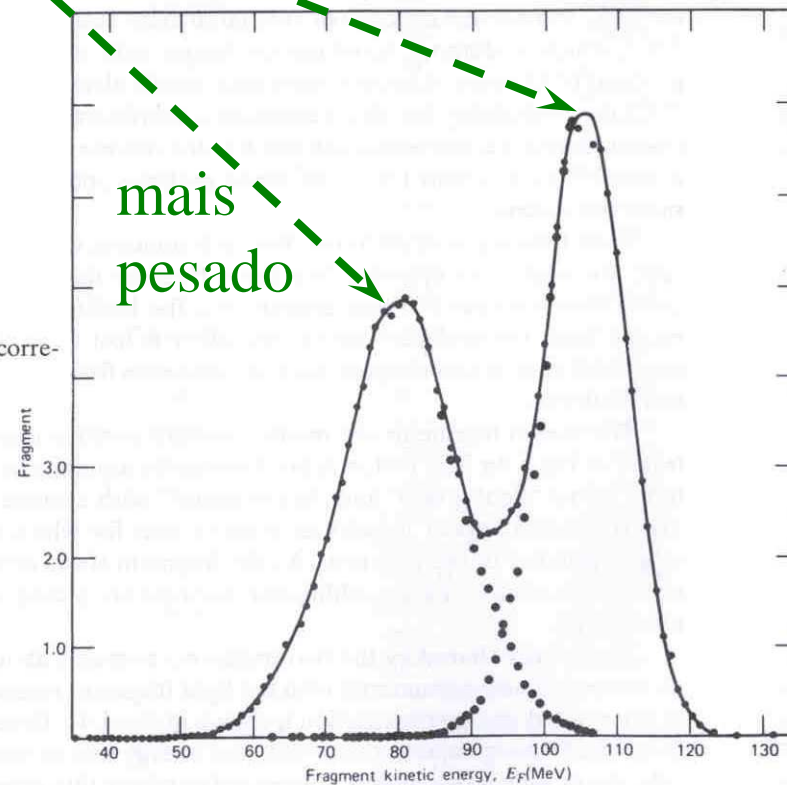
$^{252}\text{Cf} \rightarrow$   $t_{1/2}$  f.e. = 85 anos;  
 $t_{1/2}$  real = 2.65 anos

$1\mu\text{g}$  emite  $1.92\text{E}7$   $\alpha/\text{s}$  e  $6.15\text{E}5$  pf/s

# Fontes de partículas pesadas – f.e.



**Figure 1.4a** The mass distribution of  $^{252}\text{Cf}$  spontaneous fission fragments. Also shown is the corresponding distribution from fission of  $^{235}\text{U}$  induced by thermal neutrons. (From Nervik.<sup>4</sup>)



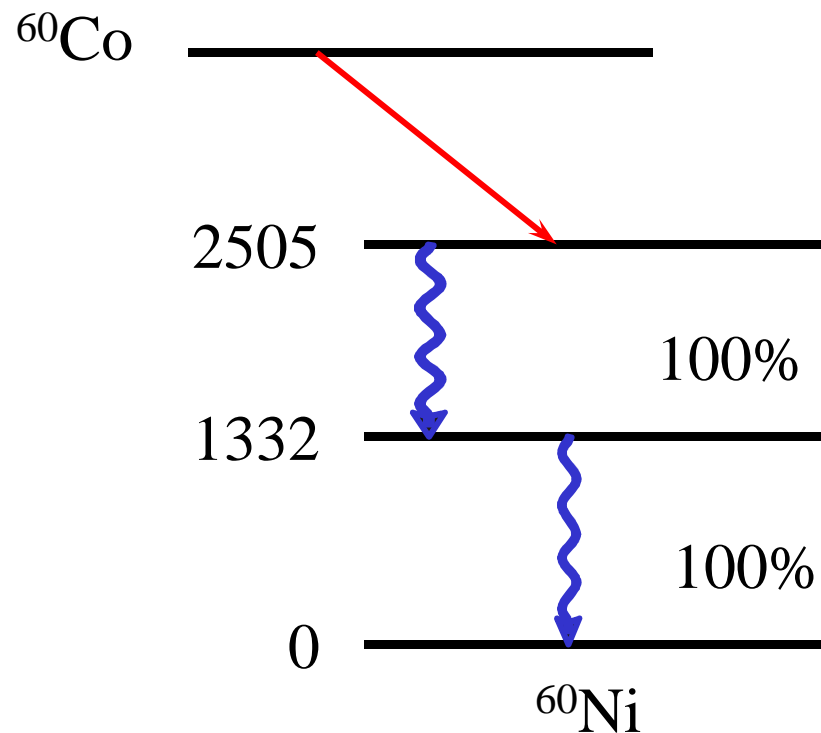
**Figure 1.4b** The distribution in kinetic energy of the  $^{252}\text{Cf}$  spontaneous fission fragments. The peak on the left corresponds to the heavy fragments, and that on the right to the light fragments. (From Whetstone.<sup>5</sup>)



# Fontes de radiação eletromagnética

## a. $\gamma$ após decaimento $\beta$

Após emissão  $\beta$ , o núcleo do produto permanece excitado, na transição à níveis mais baixos de energia, a radiação  $\gamma$  é liberada.

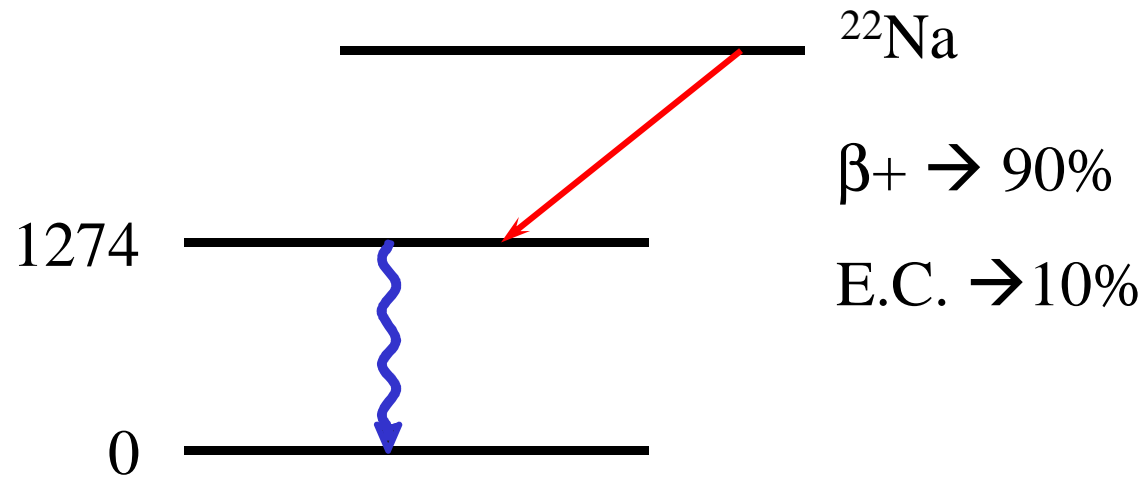
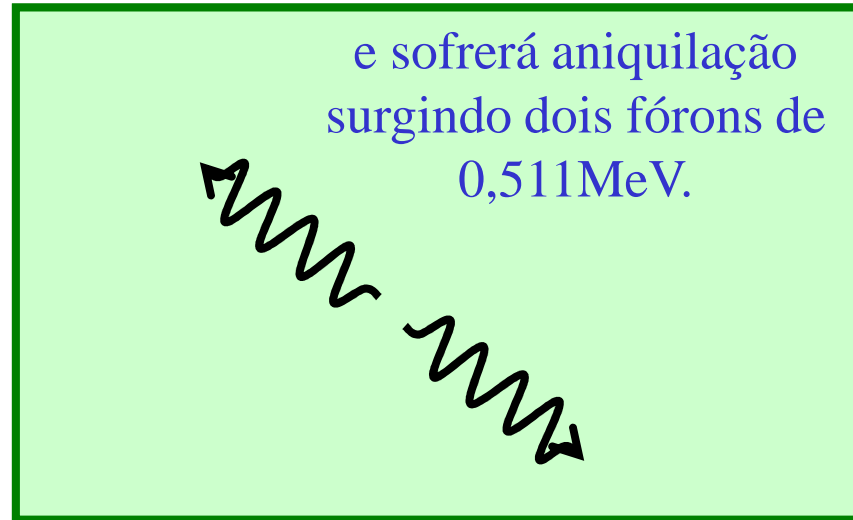


Tempo de decaimento:  
picosegundos.

O  $t_{1/2}$  considerado é do  
pai, apesar dos níveis de  
energia serem do filho.

# Fontes de radiação eletromagnética

## b. Aniquilação



$\gamma$  envolvidos : 1274 e 511 keV

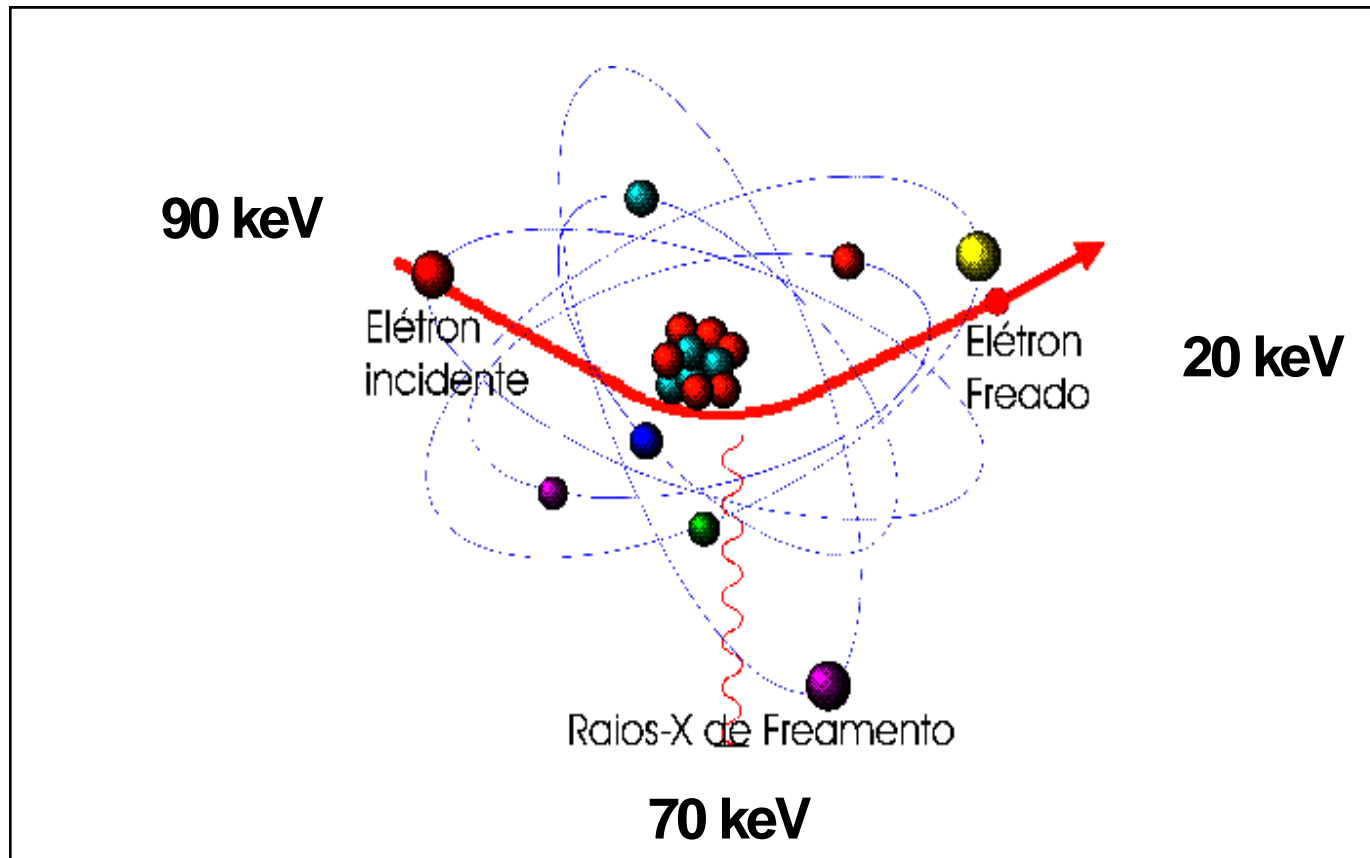
## Fontes de radiação eletromagnética

### c. Bremsstrahlung (raio-X de frenamento)

Na interação com a matéria, elétrons rápidos podem reduzir sua energia cinética, mudar de direção e emitir a diferença de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas que são denominadas de raios X de frenamento (*bremsstrahlung*).

A energia da radiação produzida, raios X de bremsstrahlung, depende da energia cinética inicial, da intensidade de interação da partícula incidente com o núcleo e de seu ângulo de saída. A energia destes raios X pode variar desde valores próximos a zero até um valor máximo, que é igual à energia cinética ( $E_C$ ) da partícula incidente

# Fontes de radiação eletromagnética - Bremsstrahlung



$E(e^-)$  ↑

Bremsstrahlung ↑

Z ↑

Bremsstrahlung ↑

# Fontes de radiação eletromagnética

## d. Raio-X característico

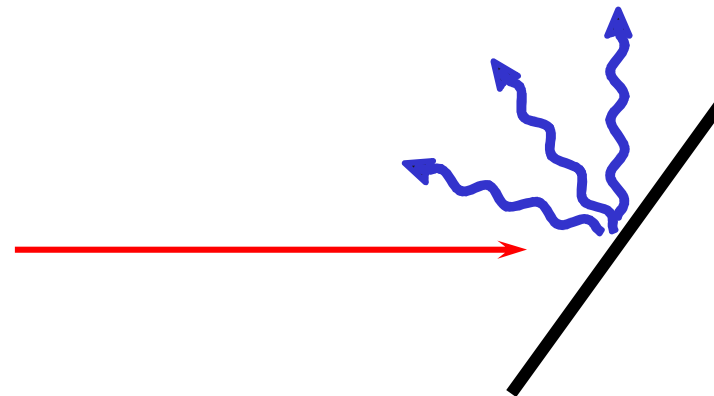
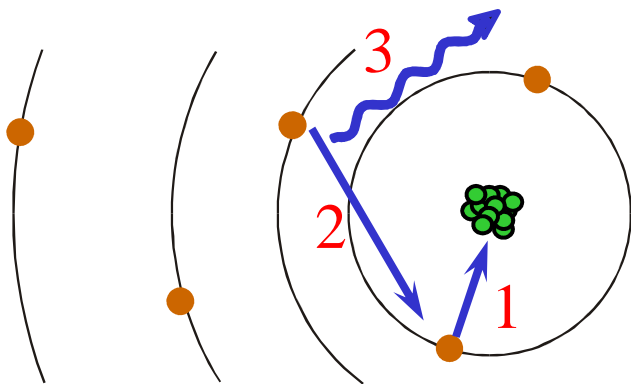
Se um ou mais elétrons orbitais forem deslocados por algum processo de excitação, os elétrons se rearranjarão, liberando energia na forma de raio-X.

Processos de excitação:

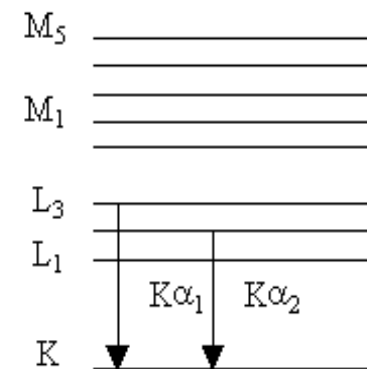
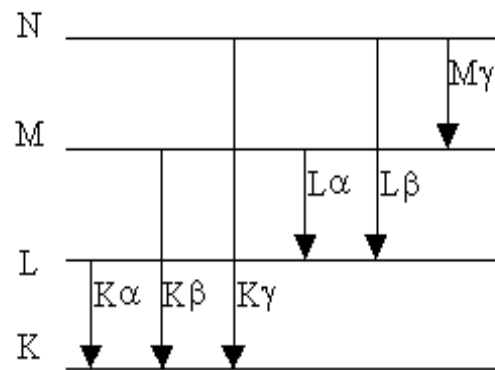
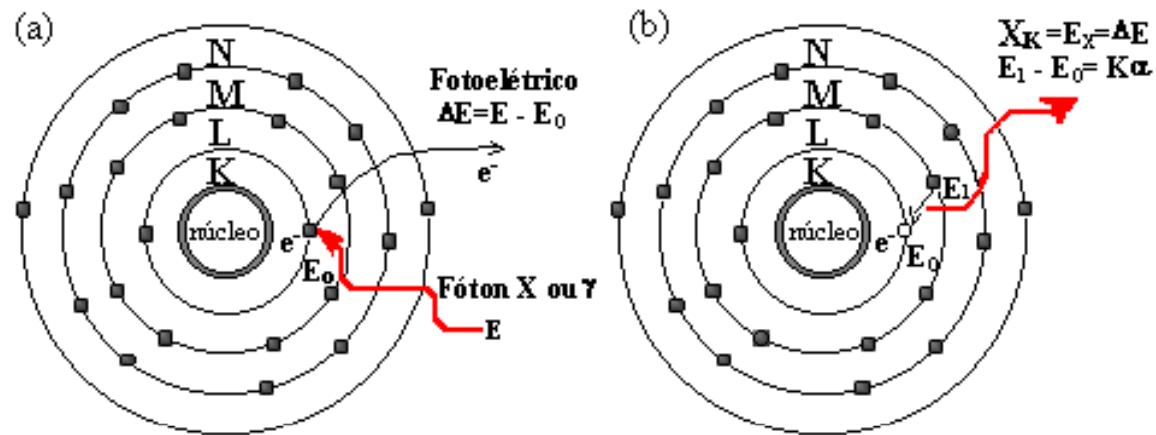
### 1) Decaimento radioativo

- Conversão interna
- Captura eletrônica

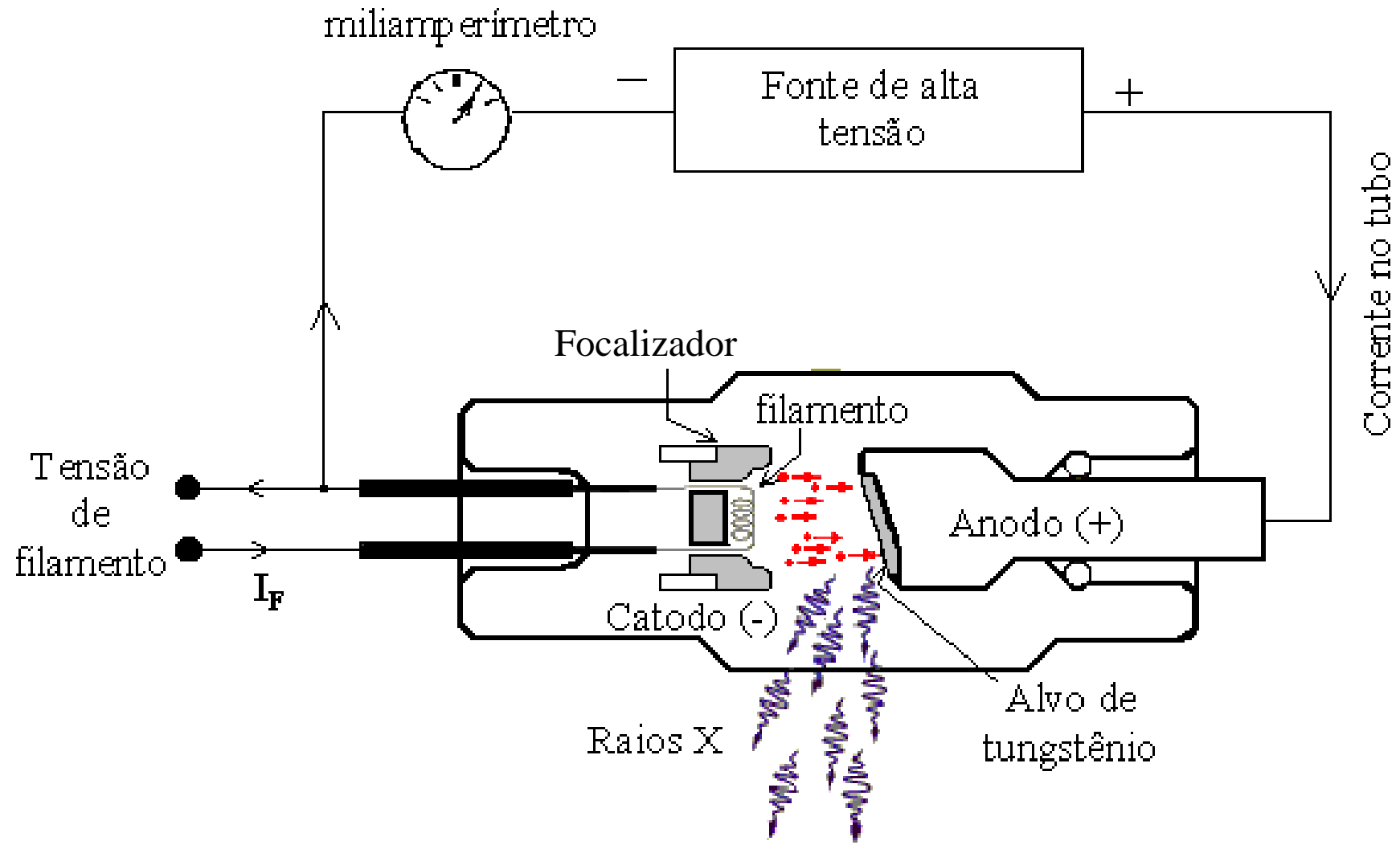
### 2) Radiação externa



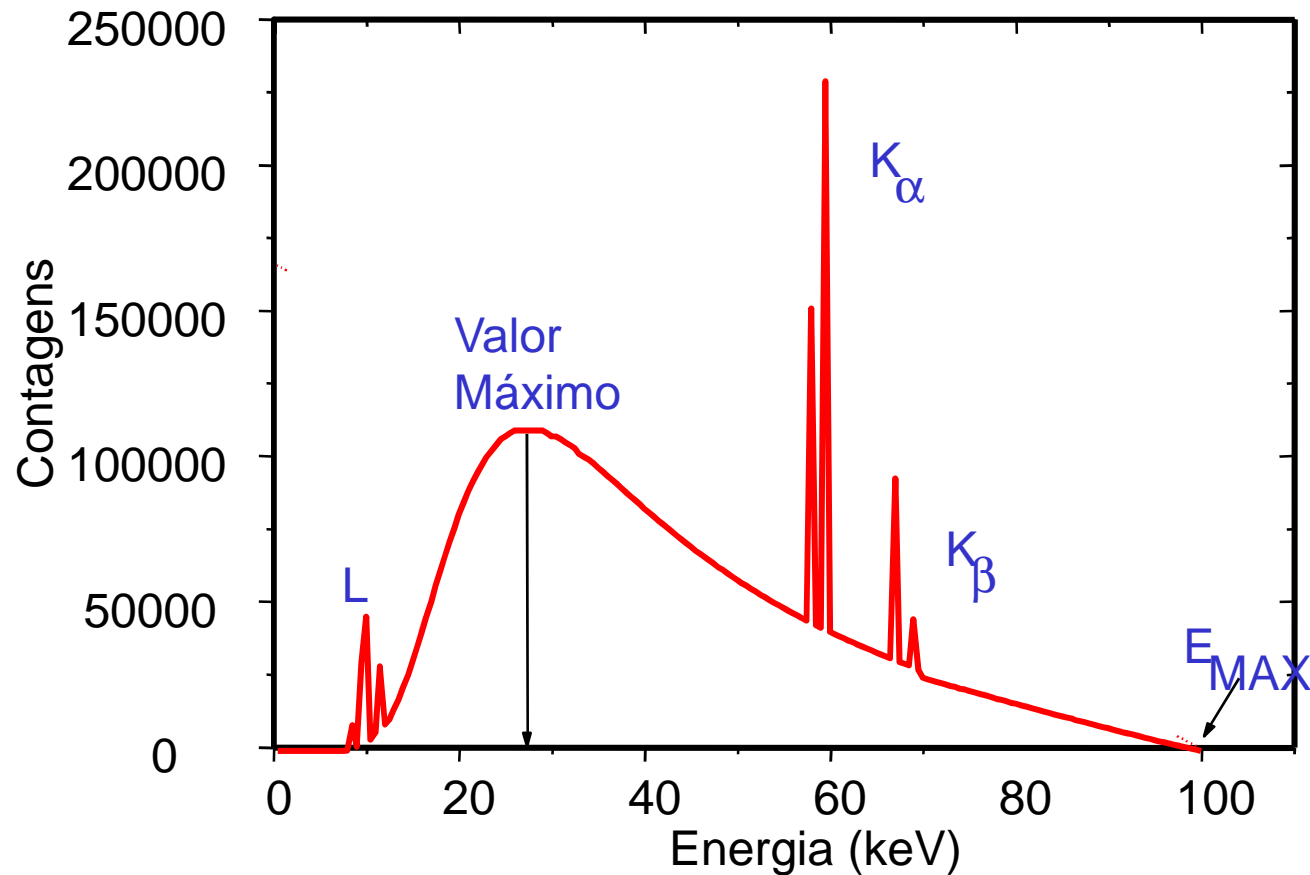
# Raio-X característico



# Tubo de Raio-X



# Espectro teórico para um tubo de raio-X

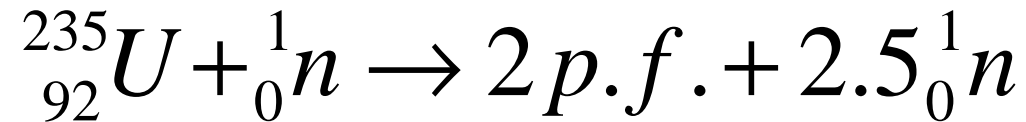
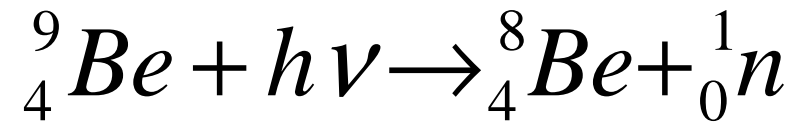
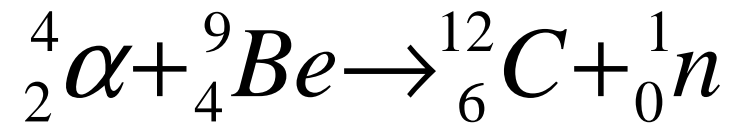


Alvo de tungstênio,  $20^{\circ}$ , tensão de 100 kVp, com filtração inerente de 1,0 mm de berílio e adicional de 0,5 mm de alumínio – os picos são RX característico e o contínuo é Bremsstrahlung



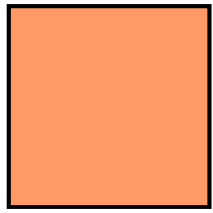
## Fontes de neutrons

- a. Fissão espontânea
- b. Reação nuclear

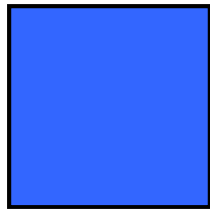


# Tabela de núclídeos

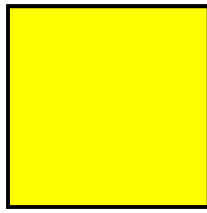
## Código de cores



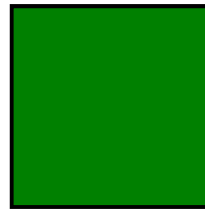
$\beta^+$   
CE



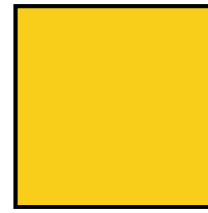
$\beta^-$



$\alpha$



fissão  
espontânea



p



estável

Np 231 3,8 m	Np 232 14,7 m	Np 233 36,2 m	Np 234 4,4 d	Np 235 396,1 d	Np 236 22,5 h	Np 237 2,144 · 10 <sup>6</sup> a	Np 238 2,117 d	Np 239 2,355 d	Np 240 7,22 m
α 348; e <sup>-</sup>	e <sup>-</sup> γ 327, 820; 867, 864; 282...	e <sup>-</sup> α 5,54 γ (312; 299; 547...)	e <sup>-</sup> ; β <sup>+</sup> ... γ 1559; 1528; 1602... σ <sub>f</sub> ~ 900	e <sup>-</sup> ; α 5,025; 5,007... γ (26; 84...); e <sup>-</sup> g; σ 160 + ?	e <sup>-</sup> ; β <sup>-</sup> 0,5... γ (642; 688...); e <sup>-</sup> g; σ <sub>f</sub> 2700	sf e <sup>-</sup> ; β <sup>-</sup> α γ 180 104...; e <sup>-</sup> g; σ <sub>f</sub> 2600	β <sup>-</sup> 1,2... γ 984; 1029; 1026; 924...; e <sup>-</sup> g; σ <sub>f</sub> 2100	β <sup>-</sup> 0,4; 0,7... γ 108; 278; 228...; e <sup>-</sup> ; g σ 32 + 19; σ <sub>f</sub> < 1	β <sup>-</sup> 2,2... γ 555; 597... e <sup>-</sup> h...; g
U 230 0,8 d	U 231 4,2 d	U 232 68,9 a	U 233 1,592 · 10 <sup>5</sup> a	U 234 0,0055	U 235 0,7200	U 236 120 ns	U 237 6,75 d	U 238 99,2745	U 239 23,45 d
α 8; 5,818... 154; ); e <sup>-</sup>	e <sup>-</sup> ; α 5,456; 5,471; 5,404 γ 26; 84; 102... e <sup>-</sup> ; σ <sub>f</sub> ~ 250	α 5,320; 5,262... Ne 24; γ (58; 129...); e <sup>-</sup> σ 73; σ <sub>f</sub> 74	α 4,824; 4,783... Ne 25; γ (42; 97...); e <sup>-</sup> σ 47; σ <sub>f</sub> 530	2,455 · 10 <sup>-5</sup> a α 4,775; 4,723...; sf Mg 28; Ne; γ (53; 121...) e <sup>-</sup> ; σ 96; σ <sub>f</sub> < 0,005	26 m 7,038 · 10 <sup>8</sup> a α 4,398...; sf Ne; γ 186... e <sup>-</sup> ; σ 95; σ <sub>f</sub> 536	ly 1783; 642... e <sup>-</sup>	β <sup>-</sup> 0,2... γ 60; 208... e <sup>-</sup> σ ~ 100; σ <sub>f</sub> < 0,35	270 ns 4,468 · 10 <sup>9</sup> a ly 251... 187... 287; γ (50...; σ 27; σ <sub>f</sub> 3 · 10 <sup>-6</sup>	β <sup>-</sup> 1,2... γ 75... σ 22...
Pa 229 50 d	Pa 230 17,4 d	Pa 231 3,276 · 10 <sup>4</sup> a	Pa 232 1,31 d	Pa 233 27,0 d	Pa 234 1,17 m	Pa 235 6,70 h	Pa 236 24,2 m	Pa 237 9,1 m	Pa 238 8,7 m
α 580; 5,615... 40; 146...)	e <sup>-</sup> ; β <sup>-</sup> 0,5... α 5,345; 5,326... γ 982; 919; 455; 899; 444...; σ <sub>f</sub> 1500	α 5,014; 4,952; 5,028...; Ne 24; F 237 γ 27; 300; 303...; e <sup>-</sup> σ 200; σ <sub>f</sub> < 0,020	β <sup>-</sup> 0,3; 1,3...; e <sup>-</sup> γ 969; 894; 150...; e <sup>-</sup> σ 460; σ <sub>f</sub> 700	β <sup>-</sup> 0,3; 0,6... γ 312; 300; 341...; e <sup>-</sup> σ 20 + 19; σ <sub>f</sub> < 0,1	β <sup>-</sup> 2,3... γ (1001; 767...) h (74...); e <sup>-</sup> σ <sub>f</sub> < 500	β <sup>-</sup> 0,5... 1,2... γ 131; 681 883...; e <sup>-</sup> σ <sub>f</sub> > 5000	β <sup>-</sup> 1,4... γ 128 - 659 m	β <sup>-</sup> 2,0; 3,1... γ 642; 687; 1763...; g βsf ?	β <sup>-</sup> 1,7... γ 101... 448; 6... g
Th 228 913 a	Th 229 7880 a	Th 230 7,54 · 10 <sup>4</sup> a	Th 231 25,5 h	Th 232 100	Th 233 22,3 m	Th 234 24,10 d	Th 235 7,1 m	Th 236 37,5 m	Th 237 5,01 m
α 23; 5,340... (216...); e <sup>-</sup> σ <sub>f</sub> < 0,3	α 4,845; 4,901; 4,815... γ 194; 211; 80; 31...; e <sup>-</sup> σ ~ 60; σ <sub>f</sub> 30	α 4,687; 4,621... γ (68; 144...); e <sup>-</sup> Ne 24; σ 23,4 σ <sub>f</sub> < 0,0005	β <sup>-</sup> 0,3; 0,4... γ 26; 84... e <sup>-</sup>	1,405 · 10 <sup>10</sup> a α 4,013; 3,950...; sf γ (64...); e <sup>-</sup> σ 7,37; σ <sub>f</sub> 0,000009	sf β <sup>-</sup> 1,2... γ 87; 29; 459...; e <sup>-</sup> σ 1500; σ <sub>f</sub> 15	β <sup>-</sup> 0,2... γ 63; 92; 93... e <sup>-</sup> ; m σ 1,8; σ <sub>f</sub> < 0,01	β <sup>-</sup> 1,4... γ 417; 727; 696...	β <sup>-</sup> 1,0... γ 111; (647; 196...)	β <sup>-</sup>
Ac 227 773 a	Ac 228 6,13 h	Ac 229 62,7 m	Ac 230 122 s	Ac 231 7,5 m	Ac 232 119 s	Ac 233 145 s	Ac 234 44 s	146	
α 34... 53; 4,941... ); 84...); e <sup>-</sup>	β <sup>-</sup> 1,2; 2,1... α 4,27 ? γ 911; 969;	β <sup>-</sup> 1,1 γ 165; 569;	β <sup>-</sup> 2,7... γ 455; 508; 1244...	β <sup>-</sup> γ 282; 307;	β <sup>-</sup> γ 665; 1899; 1959; 1948;	β <sup>-</sup> γ 529; 549;	β <sup>-</sup> γ 1847; 1912; 529; 1954;		

## Exercícios

Espectro em energia pode ser classificado em dois grupos principais: discreto ou contínuo. Para cada tipo de radiação abaixo, indique qual é discreto e qual é contínuo:

- a) Alfa
- b) Beta
- c) Gama
- d) Raio-X característico
- e) Elétron de conversão
- f) Elétron Auger
- g) Fragmento de fissão
- h) Bremsstrahlung
- i) Radiação de aniquilamento

## Exercícios

Qual o menor comprimento de onda encontrado em um tubo de raio-X operando a 195kV?

## Exercícios

Calcular a atividade específica the  $^3\text{H}$  com  $t_{1/2}=12.26$  anos.

## Exercícios

Considerando que na formação da Terra a  $\text{Ativ.}^{235}\text{U} = \text{Ativ.}^{238}\text{U}$  e que hoje a proporção (porcentagem de átomos) é de 0.7% de  $^{235}\text{U}$  e 99.3% de  $^{238}\text{U}$ . Qual a idade da Terra? ( $T_{1/2} = 7.1\text{E}8$  e  $4.5\text{E}9$ )

E considerando quantidade de átomos iguais?