

### Aula nº 13

#### MÉTODOS RADIOATIVOS

#### Radioatividade

June 04

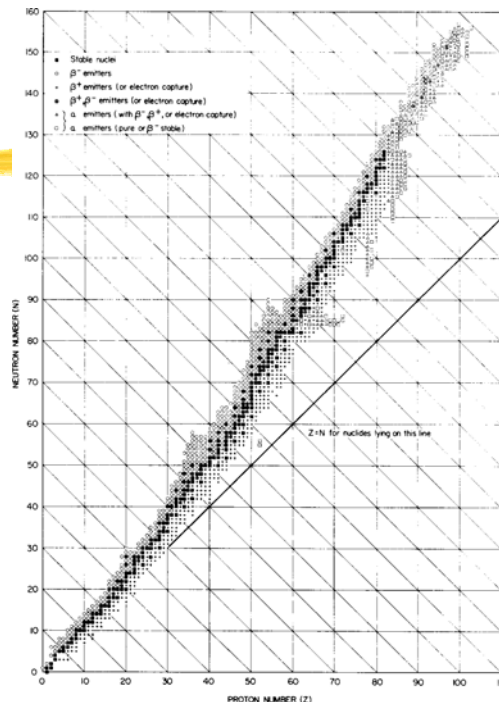
Hédison K. Sato

## Radioatividade

- ⌘ Em 1896, Henry Becquerel observou que os sais de urânio podiam naturalmente velar uma chapa fotográfica, assim como os raios-X, artificiais, descobertos alguns anos antes por Röntgen.
- ⌘ A descoberta da radioatividade introduziu ao conhecimento da época, mais uma fonte natural de energia, poderosa o suficiente para acomodar, entre outras, uma idade térmica da Terra, compatível com os tempos necessários para explicar os processos geológicos observados.

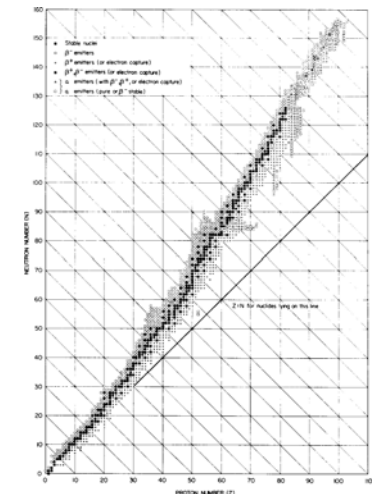
## Carta de isótopos

- ⌘ A razão entre o nº de nêutrons e o de prótons é aprox. 1 para núclídeos leves até nº atômico 20.
- ⌘ Esta razão cresce até 1,5 para os núclídeos estáveis de nº atômico em torno de 80.



## Carta de isótopos

- ⌘ Núclídeos com nºs pares de prótons e nêutrons são os mais abundantes e, geralmente, mais estáveis.
- ⌘ Núclídeos com nºs ímpares de prótons e nêutrons são os menos estáveis.
- ⌘ Núclídeos com nº ímpar de prótons e nº par de nêutrons são intermediários quanto a estabilidade.



## Razão nêutrons/prótons

- ⌘ Quando a razão é elevada, o decaimento se processa com a diminuição do número de nêutrons e aumento do número de prótons.
  - ☒ um nêutron transforma-se em um próton (retido no núcleo) e um elétron ( $\beta^-$ ) e um anti-neutrino (expulsos do núcleo).
- ⌘ Quando a razão é baixa, o decaimento se processa de forma que o número de prótons decresce pela:
  - ☒ emissão alfa (núcleo do átomo de hélio),
  - ☒ emissão de pósitron ( $\beta^+$ ), ou
  - ☒ captura de um elétron dos orbitais (captura K).

## Processos de decaimento

### EMIÇÃO ALFA

- ⌘ Expulsão de um núcleo de  $\text{He}^{2+}$  e, devido a alta energia envolvida, não é freqüente. Ocorre principalmente com núclídeos com nº de massa maior que 210.

### EMIÇÃO DE PÓSITRON ( $\beta^+$ )

- ⌘ Aparece quando um próton transforma-se em um nêutron, pósitron e neutrino, estes dois emitidos.

### CAPTURE DE ELÉTRON K (DO ORBITAL)

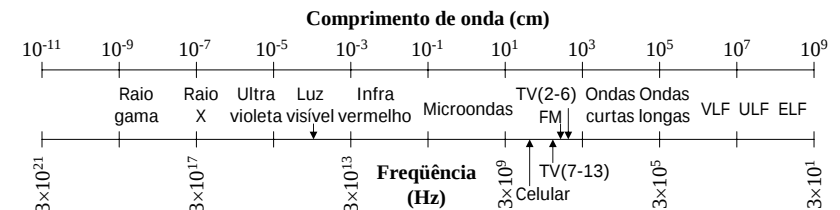
- ⌘ Consiste na captura de um elétron extra nuclear com a emissão de um neutrino. Normalmente o elétron pertence à camada K (mais interna).

## Decaimento fracionado

- ⌘ Muitos núclídeos decaem através de dois processos.
- ⌘ Captura do elétron K ou emissão de  $\beta^-$ :  $K_{40}$ .
- ⌘ Emissão  $\alpha$  ou  $\beta^-$ :  $\text{Bi}_{212}$  e  $\text{Bi}_{214}$ .
- ⌘ Esses radionuclídeos têm decaimento fracionado.
- ⌘ A probabilidade relativa de cada tipo de decaimento é usualmente denominada razão de fracionamento.

## Radiação eletromagnética

- ⌘ Frequentemente acompanha cada processo descrito.
- ⌘ Radiação gama e raio-X são ondas EM altamente penetrantes, com comprimento de onda  $10^{-7}$  a  $10^{-11}$  cm, ou freqüência  $10^{17}$  a  $10^{21}$  Hz.
- ⌘ Espectro das onda EM



## Energia da radiação

- ⌘ A energia da radiação gama (assim como o raio-X) é dada, geralmente, na forma

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

onde  $\nu$  é a frequência,  $\lambda$ , o comprimento de onda da radiação,  $c$ , a velocidade da luz, e  $h$ , a constante de Planck ( $6.62554 \times 10^{-27}$  erg.sec).

Geralmente, se usa o 1eV ( $=1.602 \times 10^{-12}$  erg) como unidade de energia.

É a energia adquirida por uma partícula carregada com uma unidade eletrônica (elétron) acelerada através de uma diferença de potencial de 1 V.

## Absorção das radiações $\alpha$ e $\beta^-$

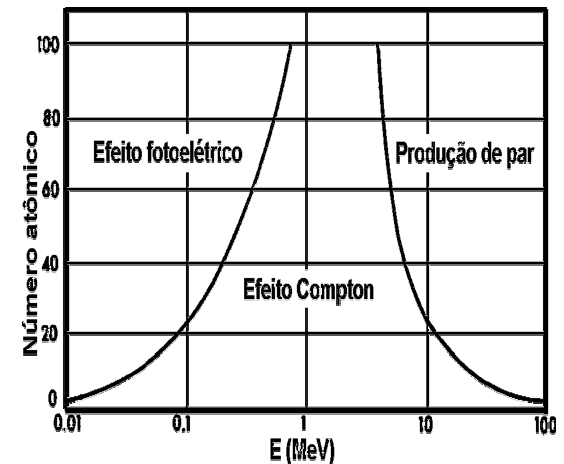
- ⌘ Ao atravessar um meio absorvente, a partícula alfa é gradualmente desacelerada
  - ☒ por interações eletrostáticas ou por colisões com íons, elétrons, núcleos e átomos.
  - ☒ Capturando dois elétrons, termina no estado de repouso.
- ⌘ A partícula beta, o elétron, também termina absorvido de forma similar à partícula alfa.

## Absorção da radiação $\gamma$

- ⌘ Ao atravessar um meio absorvente, cada fóton de um feixe monoenergético e paralelo desaparece transferindo toda sua energia em um único evento, ou é espalhado.
- ⌘ A intensidade do feixe decresce exponencialmente e a absorção se faz por três principais processos:
  - ☒ O fóton passa toda a sua energia para um elétron de ligação e desaparece (efeito fotoelétrico).
  - ☒ O fóton passa parte de sua energia a um elétron e é espalhado do feixe (Espalhamento Compton).
  - ☒ O fóton interage com o campo eletrostático do núcleo, formando um par de pósitron-elétron.

## Absorção da radiação $\gamma$

- ⌘ Distribuição das formas de absorção em função da energia.



## Absorção fotoelétrica

- Neste processo, o fóton transfere toda a sua energia para o elétron ligado, que é expelido do átomo com energia cinética

$$E = h\nu - E_b$$

onde  $E_b$  é a energia de ligação do elétron, e  $h\nu$ , a energia do fóton incidente.

80% ocorre na camada K e a maior parte do 20% restante na camada L.

Após a emissão do elétron, o átomo reorganiza-se com a emissão de raios X.

## Espalhamento Compton

- Ao interagir com um elétron livre ou fracamente ligado, o raio  $\gamma$  transfere parte de sua energia e é espalhado numa direção  $\theta$ , com sua frequência reduzida.
- Ocorre, principalmente, com os elétrons das camadas mais externas e, por isso, há muito pouca emissão de raios X.

$$(\hbar\nu)_\theta = \frac{(\hbar\nu)_0}{1 + \frac{(\hbar\nu)_0}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

## Produção de par

- Condições de conservação de energia e momento do sistema permitem que, no campo elétrico de um núcleo, um raio gama transfira toda a sua energia para a formação de um par de elétron e pósitron.
- A energia do raio  $\gamma$  deve ser maior que  $1.02 \text{ MeV}$  ( $2m_e c^2$ ).
- Após a formação, o pósitron é desacelerado até a energia de repouso, quando se aniquila combinando-se com um elétron, com a consequente emissão de dois raios gamas de  $0.511 \text{ MeV}$  em direções aproximadamente opostas.

## Alguns radioisótopos naturais

| Elemento | Isótopo           | Abundância (%) | Meia-vida (anos)      | Radiação                      | Energia (MeV)    |
|----------|-------------------|----------------|-----------------------|-------------------------------|------------------|
| Potássio | K <sup>40</sup>   | 0.012          | $1.3 \times 10^9$     | $\beta$ , cap.K               | 1.46             |
| Cálcio   | Ca <sup>48</sup>  | 0.18           | $> 2 \times 10^{16}$  | $\beta$                       | 0.12             |
| Vanádio  | Va <sup>50</sup>  | 0.24           | $6 \times 10^{15}$    | $\beta$ , cap.K, $\gamma$     | 0.71, 1.59       |
| Rubídio  | Rb <sup>87</sup>  | 27.8           | $6 \times 10^{15}$    | $\beta$                       | 0.27             |
| Índio    | In <sup>115</sup> | 95.72          | $6 \times 10^{14}$    | $\beta$                       | 0.60             |
| Platina  | Pt <sup>190</sup> | 0.013          | $6 \times 10^{11}$    | $\alpha$                      | 3.11             |
| Platina  | Pt <sup>192</sup> | 0.78           | $\sim 10^{15}$        | $\alpha$                      | 2.6              |
| Chumbo   | Pb <sup>204</sup> | 1.48           | $1.4 \times 10^{19}$  | $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ | 3.95, 4.01, 0.06 |
| Tório    | Th <sup>232</sup> | 100            | $1.39 \times 10^{10}$ | $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ | 0.03-2.62        |
| Urânio   | U <sup>235</sup>  | 0.72           | $7.1 \times 10^8$     | $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ | 0.02-0.9         |
| Urânio   | U <sup>238</sup>  | 99.3           | $4.5 \times 10^9$     | $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ | 0.4-2.5          |

## Decaimento radioativo

⌘ A taxa da radioatividade é proporcional à quantidade do material, não sendo afetada por nenhum outro processo físico ou químico vizinho.

Se  $N$  representa o número de átomos, a taxa

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N.$$

Considerando o valor inicial  $N_0$ , a solução é

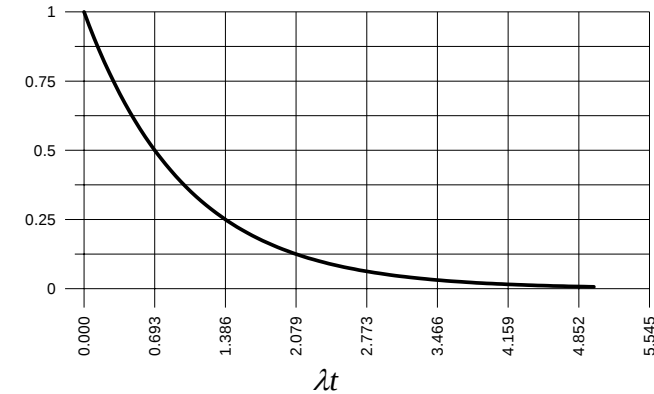
$$N = N_0 \exp(-\lambda t).$$

O tempo de meia vida ( $T_{1/2}$ ) é o tempo necessário para  $N$  reduzir a  $N_0/2$ . Assim,

$$\lambda = (\ln 2)/T_{1/2} = 0.693/T_{1/2}$$

## Decaimento radioativo

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) = N_0 \exp(-t \ln 2/T_{1/2})$$



## Série radioativa

⌘ Certos elementos radioativos decaem para elementos também radioativos e, assim por diante, até atingir um nuclídeo estável.

Se  $N_1$  representa o número de átomos do primeiro de uma série,  $N_2$ , o segundo, etc..., tem-se

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2.$$

Supondo que em  $t = 0$ ,  $N_2 = 0$ , a solução é

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}).$$

## Série radioativa

⌘ Este processo pode ser estendido para os membros sucessivos da série.

Assim, supondo que em  $t = 0$ ,  $N_n = 0$  ( $n = 2, \dots$ ), o número de átomos do  $n$ -ésimo produto é dado por

$$N_n = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t},$$

onde

$$C_1 = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1} N_0 / (\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)$$

$$C_2 = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1} N_0 / (\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)$$

$\vdots$

$$C_n = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1} N_0 / (\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \dots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)$$

## Série radioativa (equilíbrio)

⌘ A série estará em equilíbrio quando a taxa de criação iguala-se à de desintegração para cada membro da série, ou seja,

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \lambda_n N_n$$

Considerando apenas dois membros, das expressões de  $N_2$  e  $N_1$

$$N_2/N_1 = [\lambda_1/(\lambda_2 - \lambda_1)]\{1 - \exp[(\lambda_1 - \lambda_2)t]\}$$

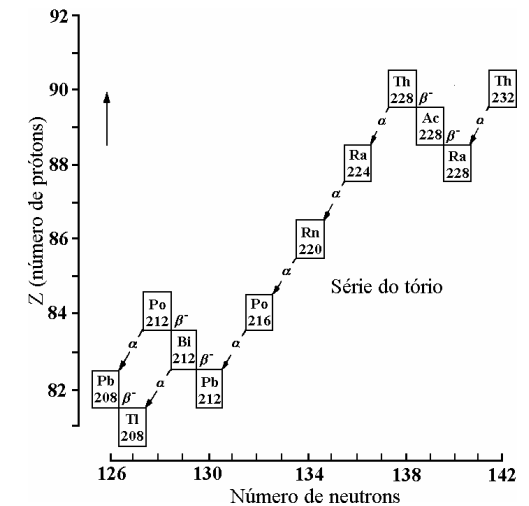
como no equilíbrio  $N_2/N_1 = \lambda_1/\lambda_2$ ,

$$\lambda_1/\lambda_2 = [\lambda_1/(\lambda_2 - \lambda_1)]\{1 - \exp[(\lambda_1 - \lambda_2)t_{eq.}]\}$$

$$\text{ou seja, } t_{eq.} = \frac{\log(\lambda_1/\lambda_2)}{\lambda_1 - \lambda_2}.$$

## Série do tório

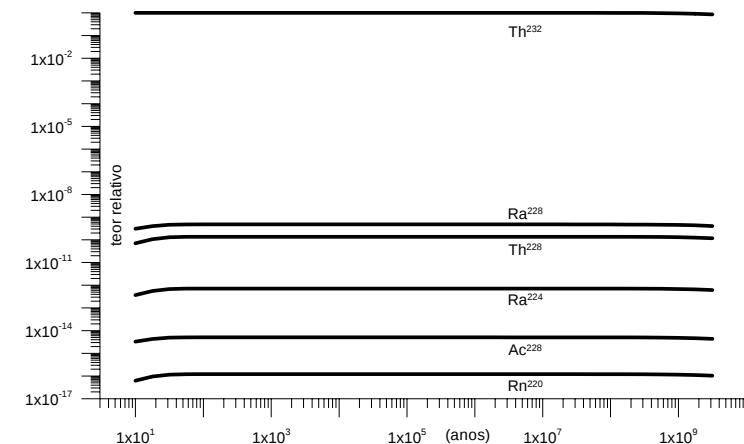
O equilíbrio é alcançado em cerca de 100 anos.



## Série do tório

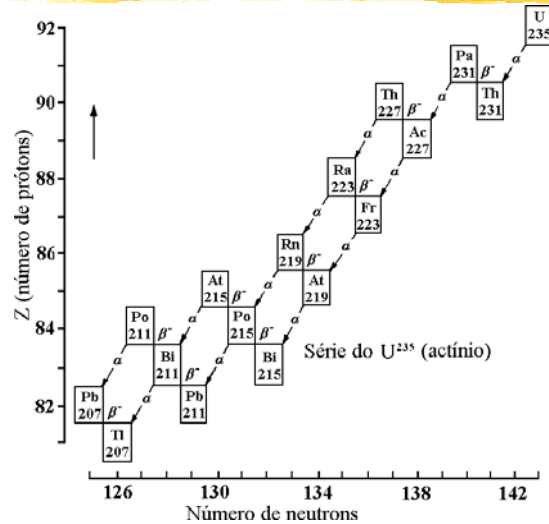
| Elemento |                   | Meia-vida              | Radiação | Energia (MeV) | Nº raios γ |
|----------|-------------------|------------------------|----------|---------------|------------|
| Tório    | Th <sup>232</sup> | 1.4×10 <sup>10</sup> a | α, SF, γ | 0.059         |            |
| Rádio    | Ra <sup>228</sup> | 5.7 a                  | β, γ     | 0.03          |            |
| Actínio  | Ac <sup>228</sup> | 6.1 h                  | β, γ     | 0.06-0.97     | >10        |
| Tório    | Th <sup>228</sup> | 1.91 a                 | α, γ     | 0.085-0.214   | 5          |
| Rádio    | Ra <sup>224</sup> | 3.64 dias              | α, γ     | 0.24, 0.29    |            |
| Radônio  | Rn <sup>220</sup> | 51 s                   | α, γ     | 0.54          |            |
| Polônio  | Po <sup>216</sup> | 0.16 s                 | α        |               |            |
| Chumbo   | Pb <sup>212</sup> | 10.6 h                 | β, γ     | 0.11-0.41     | 5          |
| Bismuto  | Bi <sup>212</sup> | 60.6 min               | β, α, γ  | 0.04-2.2      | >10        |
| Polônio  | Po <sup>212</sup> | 0.3×10 <sup>-6</sup> s | α        |               |            |
| Tálio    | Tl <sup>206</sup> | 3.1 min                | β, γ     | 0.28-2.62     | 5          |
| Chumbo   | Pb <sup>208</sup> | estável                |          |               |            |

## Série do tório 232



## Série do urânio 235

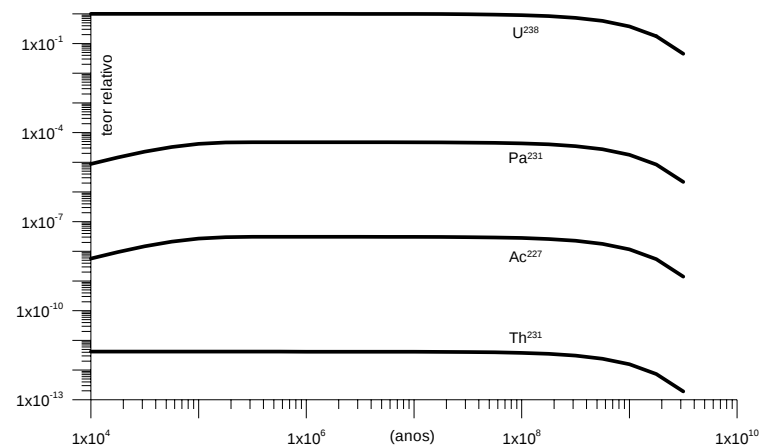
O equilíbrio é alcançado em cerca de  $10^6$  anos.



## Série do urânio 235

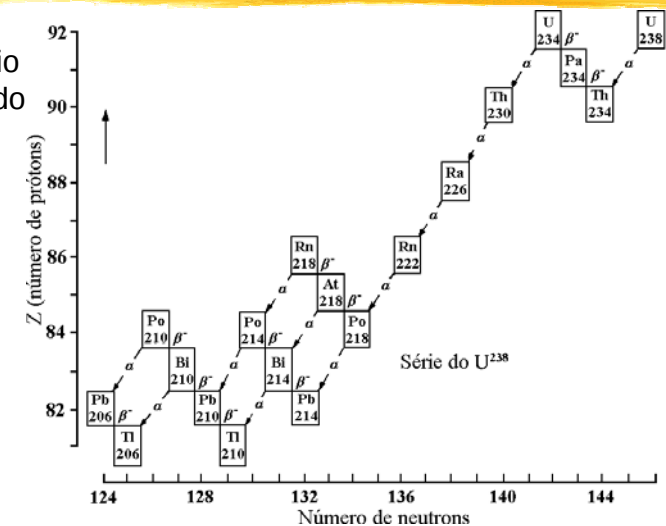
| Elemento               | Meia-vida              | Radiação                      | Energia (MeV) | Nº raios $\gamma$ |
|------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------|-------------------|
| Urânio $U^{235}$       | $7.1 \times 10^8$ a    | $\alpha$ , SF, $\gamma$       | 0.07-0.38     | 10                |
| Tório $Th^{231}$       | 25.6 h                 | $\beta$ , $\gamma$            | 0.08-0.31     | >10               |
| Protactínio $Pa^{231}$ | $3.4 \times 10^4$ a    | $\alpha$ , $\gamma$           | 0.29-0.36     | >10               |
| Actínio $Ac^{227}$     | 21.6 a                 | $\beta$ , $\alpha$ , $\gamma$ | 0.09-0.19     | 9                 |
| Tório $Th^{227}$       | 18.2 dias              | $\alpha$ , $\gamma$           | 0.05-0.33     | >10               |
| Frâncio $Fr^{223}$     | 22 min                 | $\beta$ , $\alpha$ , $\gamma$ | 0.05-0.31     | 4                 |
| Rádio $Ra^{223}$       | 11.7 dias              | $\alpha$ , $\gamma$           | 0.03, 0.45    | >10               |
| Radônio $Rn^{219}$     | 4 s                    | $\alpha$ , $\gamma$           | 0.27, 0.4     |                   |
| Astátio $At^{219}$     | 54 s                   | $\alpha$ , $\beta$            |               |                   |
| Polônio $Po^{215}$     | $1.8 \times 10^{-3}$ s | $\alpha$ , $\beta$            |               |                   |
| Astátio $At^{215}$     | $10^{-4}$ s            | $\alpha$                      |               |                   |
| Bismuto $Bi^{215}$     | 8 min                  | $\beta$                       |               |                   |
| Bismuto $Bi^{211}$     | 2.15 min               | $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ | 0.35          |                   |
| Polônio $Po^{211}$     | 0.52 s                 | $\alpha$ , $\gamma$           | 0.56, 0.88    |                   |
| Chumbo $Pb^{211}$      | 36 min                 | $\beta$ , $\gamma$            | 0.065-0.83    | 4                 |
| Tálio $Tl^{207}$       | 4.8 min                | $\beta$ , $\gamma$            | 0.89          |                   |
| Chumbo $Pb^{207}$      | estável                |                               |               |                   |

## Série do urânio 235



## Série do urânio 238

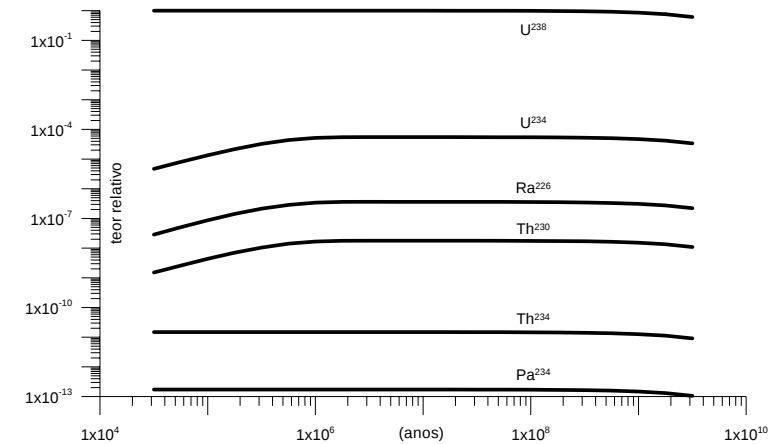
O equilíbrio é alcançado em cerca de  $10^6$  anos.



## Série do urânio 238

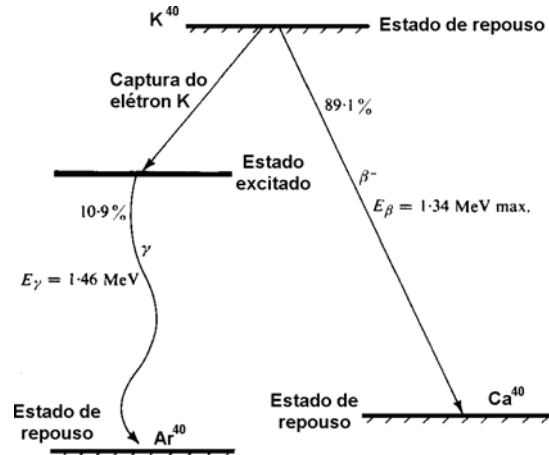
| Elemento   |            | Meia-vida               | Radiação                      | Energia (MeV)  | Nº raios $\gamma$ |
|------------|------------|-------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------|
| Urânio     | $U^{238}$  | $4.46 \times 10^9$ a    | $\alpha$ , SF, $\gamma$       | 0.048          |                   |
| Tório      | $Th^{234}$ | 24.1 h                  | $\beta$ , $\gamma$            | 0.03-0.09      | 3                 |
| Protactín. | $Pa^{234}$ | 6.7 h                   | $\beta$ , $\gamma$            | 0.044-1.85     | >10               |
| Urânio     | $U^{234}$  | $2.48 \times 10^5$ a    | $\alpha$ , SF, $\gamma$       | 0.053, 0.118   |                   |
| Tório      | $Th^{230}$ | $8 \times 10^4$ a       | $\alpha$ , $\gamma$           | 0.068-0.25     | 7                 |
| Rádio      | $Ra^{226}$ | 1622 a                  | $\alpha$ , $\gamma$           | 0.19, 0.64     | 4                 |
| Radônio    | $Rn^{222}$ | 3.82 dias               | $\alpha$ , $\gamma$           | 0.51           |                   |
| Polônio    | $Po^{218}$ | 3.05 min                | $\alpha$ , $\beta$            |                |                   |
| Astatínio  | $At^{218}$ | 1.35 s                  | $\alpha$                      |                |                   |
| Radônio    | $Rn^{218}$ | 0.03 s                  | $\alpha$                      | 0.61           |                   |
| Bismuto    | $Bi^{214}$ | 19.7 min                | $\beta$ , $\alpha$ , $\gamma$ | 0.45-2.43      | >10               |
| Polônio    | $Po^{214}$ | $1.64 \times 10^{-4}$ s | $\alpha$                      |                |                   |
| Chumbo     | $Pb^{214}$ | 26.8 min                | $\beta$ , $\gamma$            | 0.05-0.35      | >10               |
| Chumbo     | $Pb^{210}$ | 21 a                    | $\beta$ , $\gamma$            | 0.047          |                   |
| Bismuto    | $Bi^{210}$ | 5 dias                  | $\beta$                       |                |                   |
| Polônio    | $Po^{210}$ | 138.4 dias              | $\alpha$ , $\gamma$           | 0.79           |                   |
| Tálio      | $Tl^{210}$ | 1.3 min                 | $\beta$ , $\gamma$            | 0.3, 0.78, 1.1 |                   |
| Tálio      | $Tl^{206}$ | 4.2 min                 | $\beta$                       |                |                   |
| Chumbo     | $Pb^{206}$ | estável                 |                               |                |                   |

## Série do urânio 238



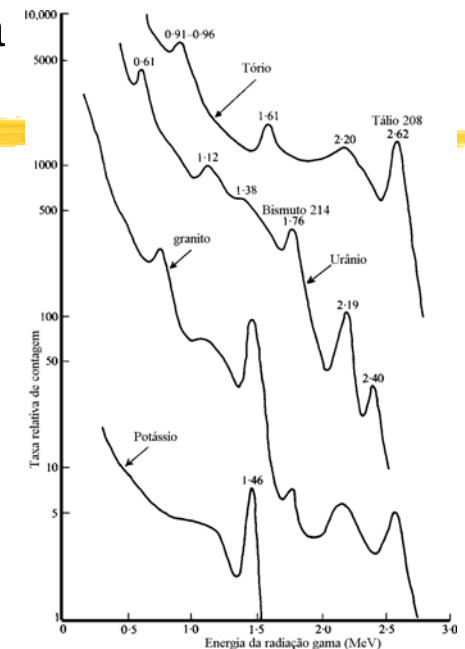
## Potássio 40

O  $K^{40}$  apresenta um decaimento fracionado para o  $Ar^{40}$  e  $Ca^{40}$ . O raio  $\gamma$  de 1.46 MeV é bastante característico do decaimento do  $K^{40}$ .



## Espectrometria gama

Espectros  $\gamma$  do  $K^{40}$ , das séries do U e Th, e de uma amostra de granito. A radiação marcante do espectro do Th é devido ao  $Tl^{208}$ . No espectro do U, é devido ao  $Bi^{214}$ . No espectro do K, é o pico de 1.46 MeV.



## Unidade de radioatividade

- ⌘ Para medição da radioatividade de uma amostra radioativa, usa-se o *curie*. É a atividade que resulta em  $3.7 \times 10^{10}$  desintegração/s, correspondendo ao número de partículas  $\alpha$  emitidas por um grama de rádio puro ( $\text{Ra}^{226}$ ) durante um segundo.
- ⌘ Devido a similaridade com o raio X, a intensidade da radiação  $\gamma$  é medida em *röntgen*. É a quantidade de radiação capaz de produzir uma unidade eletrostática de carga ( $2.08 \times 10^9$  pares de íons) por  $\text{cm}^3$  no ar a  $0^\circ\text{C}$  e 760 mm de Hg.
- ⌘ A dosagem máxima de exposição a radioatividade para humanos é cerca de 300 miliröntgen/semana.

## Minerais radioativos (potássio)

|            |       |                                                                             |
|------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Mineral    | (i)   | Ortoclásio e feldspato [ $\text{K Al Si}_3\text{O}_8$ ]                     |
|            | (ii)  | Muscovita [ $\text{H}_2\text{KAl}(\text{SiO}_4)_3$ ]                        |
|            | (iii) | Alunita [ $\text{K}_2\text{Al}_6(\text{OH})_{12}\text{SO}_4$ ]              |
|            | (iv)  | Silvita, canalita [ $\text{KCl}, \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ] |
| Ocorrência | (i)   | Constituintes principais das rochas ácidas e pegmatitos                     |
|            | (ii)  | O mesmo                                                                     |
|            | (iii) | Rochas vulcânicas alteradas                                                 |
|            | (iv)  | Depósitos salinos em sedimentos                                             |

## Minerais radioativos (Th e U)

| TÓRIO      |       |                                                                                                            |
|------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mineral    | (i)   | Monazita [ $\text{ThO}_2$ + fosfatos de terras raras]                                                      |
|            | (ii)  | Torianita [ $(\text{Th}, \text{U})\text{O}_2$ ]                                                            |
|            | (iii) | Torita, uranotorita [ $\text{ThSiO}_4 + \text{U}$ ]                                                        |
| Ocorrência | (i)   | Granitos, pegmatitos e gneisses                                                                            |
|            | (ii)  | e (iii) Granitos, pegmatitos e pláceres                                                                    |
| URÂNIO     |       |                                                                                                            |
| Mineral    | (i)   | Uraninita [Óxidos de U, Pb, Ra, Th, terras raras]                                                          |
|            | (ii)  | Carnotita [ $\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{UO}_3 \cdot \text{V}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ] |
|            | (iii) | Gumita [Uraninita alterada]                                                                                |
| Ocorrência | (i)   | Granitos, pegmatitos e em veios de Ag, Pb, Cu, etc.                                                        |
|            | (ii)  | Arenitos                                                                                                   |
|            | (iii) | Associados com a uraninita.                                                                                |

## Radioatividade das rochas

| Rocha         | curie/g<br>( $\times 10^{-12}$ ) | K<br>(ppm) | Th<br>(ppm) | U<br>(ppm) |
|---------------|----------------------------------|------------|-------------|------------|
| hornblenda    | 1.2                              |            |             |            |
| granito       | 0.7-4.8                          | 35000      | 15          | 4          |
| basalto       | 0.5                              | 9000       | 2           | 0.6        |
| olivina       | 0.33                             |            |             |            |
| ultramáficas  |                                  | 10         | 0.2         | 0.05       |
| mármore       | 1.9                              |            |             |            |
| quartzito     | 5.0                              |            |             |            |
| arenito       | 2-4                              |            |             |            |
| dolomitos     | 8                                |            |             |            |
| condritos     |                                  | 850        | 0.08        | 0.02       |
| meteoro ferro |                                  |            | 0.015       | 0.04       |

## Radioatividade de águas

| Água                  | curie/g ( $\times 10^{-12}$ ) |
|-----------------------|-------------------------------|
| Saratoga, N. Y.       | 0.01-0.1                      |
| Bath, Inglaterra      | 0.14                          |
| Carlsbad, Rep. Checa  | 0.04-0.1                      |
| Rio S. Lourenço       | 0.00025                       |
| Valdemorilo, Espanha  | 0.02                          |
| Aix-les-bains, França | 0.002                         |
| Manitou, Colorado     | 0.003                         |
| Hot Springs, Arkansas | 0.0009                        |
| Oceano Atlântico      | 0.014-0.034                   |
| Oceano Índico         | 0.007                         |

## Bibliografia

- ⌘ Adams, J. A. e Gasparini, P., 1970, Gamma-ray spectrometry of rocks. Elsevier, New York.
- ⌘ Sharma, P. V., 1986, Geophysical methods in geology. 2. ed., Elsevier, New York.
- ⌘ Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. e Keys, D. A., 1978, Applied geophysics. Cambridge University Press.