

# Física das Radiações

Prof. Luciano Santa Rita

[www.lucianosantarita.pro.br](http://www.lucianosantarita.pro.br)

[tecnólogo@lucianosantarita.pro.br](mailto:tecnólogo@lucianosantarita.pro.br)

# Conteúdo programático

- Ondas eletromagnéticas;
- Produção de raios X;
- Interação e atenuação da radiação X e gama com a matéria;
- Radiações naturais e radioatividade;
- Grandezas radiológicas e suas unidades;
- Objetivos, princípios básicos e conceitos fundamentais da radioproteção;
- Efeitos da radiação no ser humano;
- Inspeção visual de um serviço de radiodiagnóstico.

# Bibliografia

- Notas de aula – Prof Luciano Santa Rita ([http://www.lucianosantarita.pro.br/notas\\_aula.html](http://www.lucianosantarita.pro.br/notas_aula.html))
- Ciências Radiológicas para Tecnólogos (9ª edição) – Bushong;
- Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos – Luiz Tauhata et al ([www.ird.gov.br](http://www.ird.gov.br))
- Princípios básicos de Segurança e Proteção Radiológica (3ª edição) – Ana Maria Xavier et al (<http://www6.ufrgs.br/spr/SegurancaProtRad.pdf>)
- Física das radiações – Emiko Okuno e Elisabeth Yoshimura
- Site: <http://www.prorad.com.br/index.php?data=cursos.php>

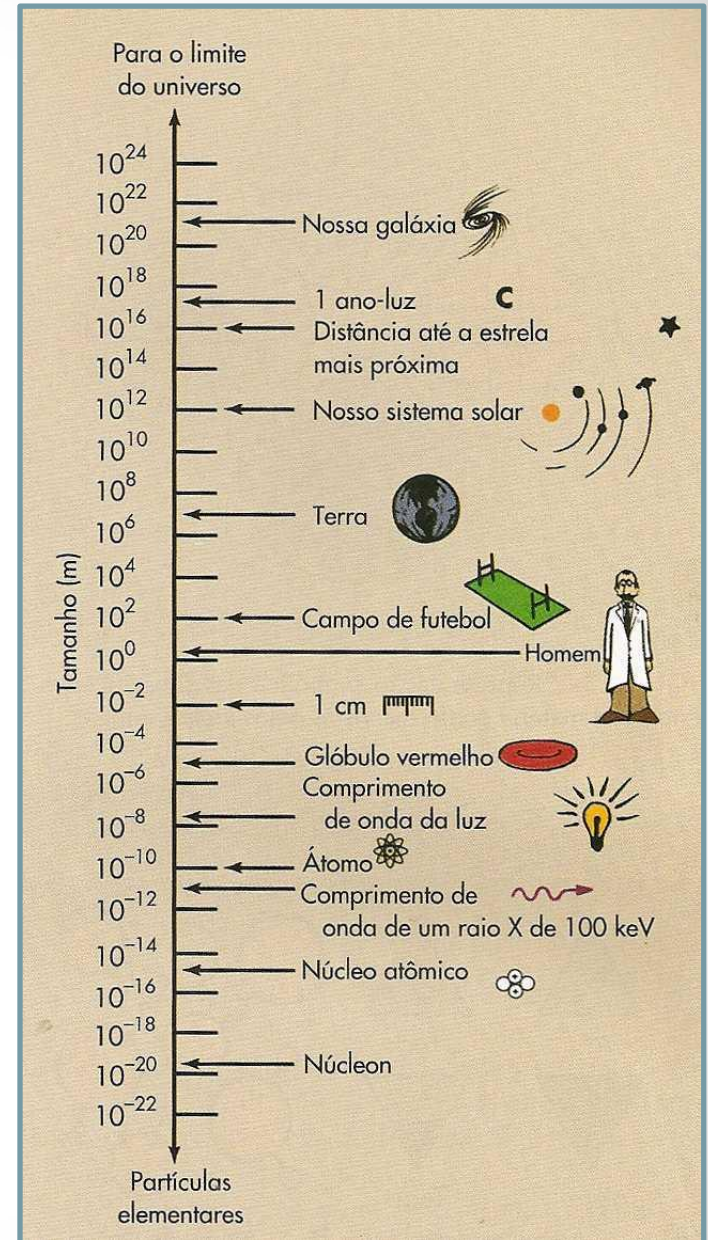
# Ondas eletromagnéticas

- Modelo atômico de Bohr e noções de níveis de energia das camadas eletrônicas;
- Estrutura nuclear.
- Conceitos básicos do movimento ondulatório;
- Definição de fótons;
- Dualidade Onda x Partícula;
- Relação entre as grandezas físicas energia, frequência e comprimento de onda.



# Modelo atômico de Bohr

- ***O que compõe a matéria?***
- ***Qual é a magnitude da matéria?***
- Embora um tecido tenha estrutura extremamente complexa, compõe-se de átomos e combinações de átomos.
- O átomo é o alicerce de todo tecnólogo em radiologia para a compreensão da interação entre radiação ionizante e matéria.



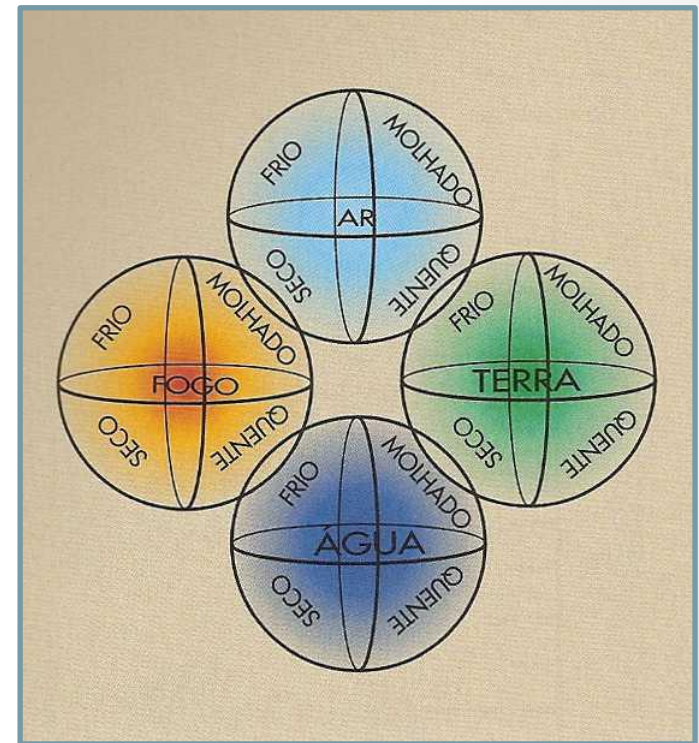
# Modelo atômico de Bohr

- Evolução

- **Átomo grego**

- referência mais antiga na busca pela estrutura da matéria;
    - Matéria composta por quatro substâncias: terra, água, ar e fogo;
    - Usaram o termo átomo (indivisível) para descrever a menor parte das quatro substâncias da matéria;
    - Cada tipo de átomo era representado por um símbolo.

- Hoje sabemos que o átomo é a menor partícula da matéria que tem as propriedades de um elemento.
  - Sabemos também que muitas partículas são menores que o átomo e são chamadas partículas subatômicas.



# Modelo atômico de Bohr

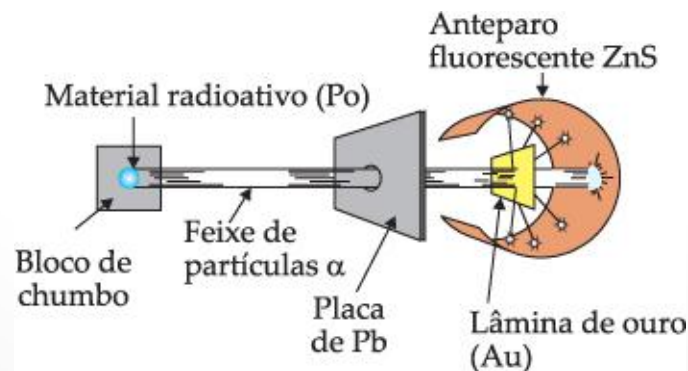
- Evolução
  - **Átomo de Dalton (1808)**
    - Um elemento era composto por átomos idênticos que reagiam quimicamente da mesma forma. Por exemplo todos os átomos de hidrogênio eram semelhantes, no entanto seriam muito diferentes dos átomos de qualquer outro elemento.
  - **Átomo de Thomson (1890)**
    - Concluiu que os elétrons eram parte integrante de todos os átomos. Ele descreveu o átomo como algo parecido como um “pudim de ameixa” : as ameixas representavam as cargas elétricas negativas (elétrons) e o pudim era uma massa disforme de eletrificação uniformemente positiva. O nº de elétrons foi considerado igual à quantidade de carga positiva.
    - Rutherford refutou o modelo de Thomson e introduziu o modelo nuclear contendo um núcleo positivo, denso e no centro do átomo rodeado por órbitas de elétrons.

# Modelo atômico de Bohr

- Evolução

- **Átomo de Rutherford (1911)**

- Estudando a trajetória de partículas emitidas pelo elemento radioativo polônio, ele observou que a maioria das partículas atravessavam a lâmina de ouro sem sofrer desvio em sua trajetória; que outras sofriam desvio em sua trajetória; outras, em número muito pequeno, batiam na lâmina e voltavam.
    - Desta forma concluiu que o átomo não era maciço e propôs que o mesmo possuía um núcleo positivo, denso e muito pequeno rodeado por uma região comparativamente grande onde estariam os elétrons em movimentos orbitais (eletrosfera).



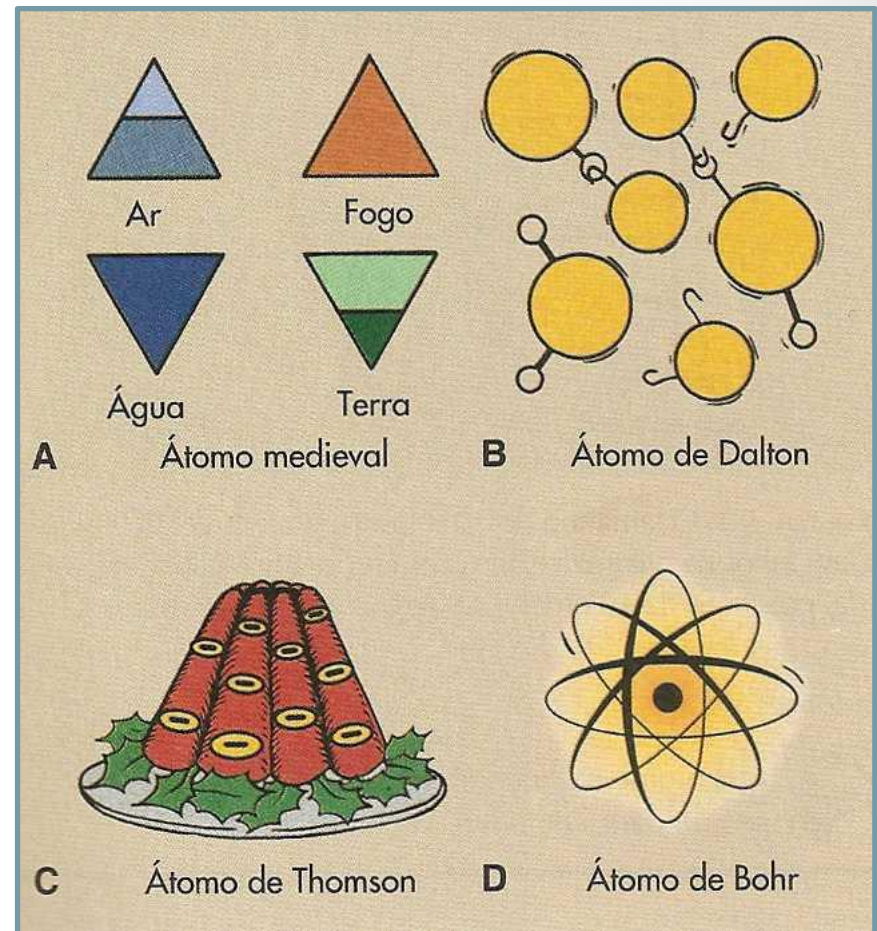


# Modelo atômico de Bohr

- Evolução

- **Átomo de Bohr (1913)**

- Niels Bohr aperfeiçoou a descrição de Rutherford, no modelo de Bohr o átomo era uma miniatura do sistema solar, onde os elétrons giravam em torno núcleo em órbitas específicas ou níveis de energia.
    - Estrutura do átomo – O átomo de Bohr contém um núcleo positivo pequeno e denso, cercado de elétrons negativos que giram em órbitas fixas, bem definidas sobre o núcleo.



# Modelo atômico de Bohr

- **Átomo de Bohr (1913)**

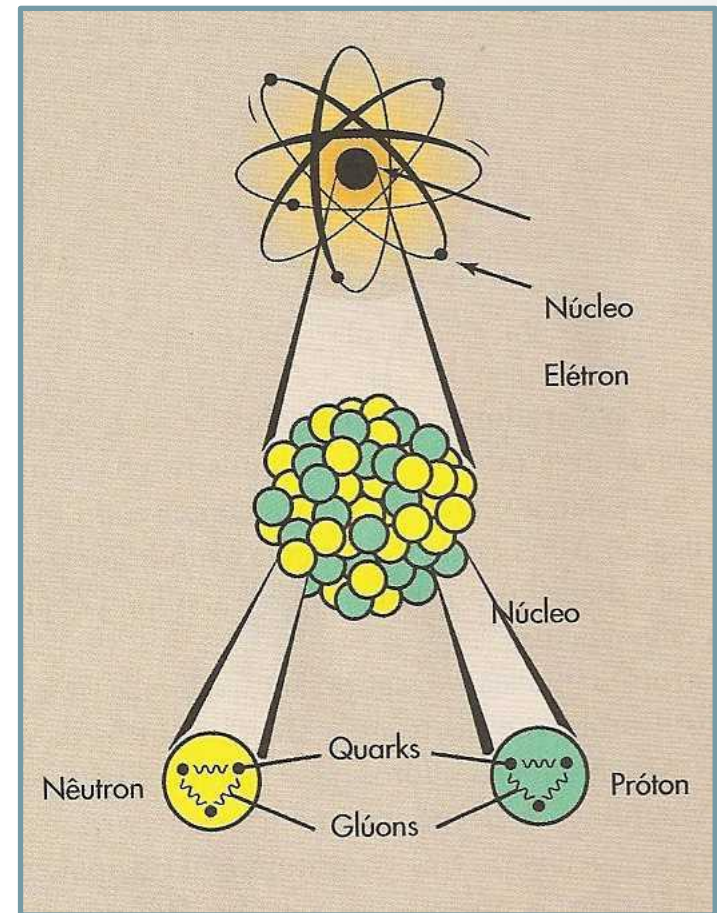
- Com o modelo de Bohr foram propostos os seguintes postulados:
  - Na eletrosfera, os elétrons descrevem sempre órbitas circulares ao redor do núcleo, chamadas de camadas ou níveis de energia.
  - Cada camada ocupada por um elétron possui um valor determinado de energia (estado estacionário).
  - Os elétrons só podem ocupar os níveis que tenham uma determinada quantidade de energia, não sendo possível ocupar estados intermediários.
  - Cada órbita é denominada de estado estacionário e pode ser designada por letras K, L, M, N, O, P, Q.

# Modelo atômico

- Partículas fundamentais
  - Nossa compreensão de átomo hoje baseia-se no que Bohr apresentou a quase um século. No modelo de Bohr o átomo pode ser visto como um sistema solar cujo o sol é o núcleo e cujos os planetas são os elétrons. O **elétron**, o **próton** e o **nêutron** representam as partículas fundamentais deste modelo.
  - Os elétrons são partículas muito pequenas com uma unidade de carga elétrica negativa. Sua massa é de apenas  $9,1 \times 10^{-31}$  kg.
  - As partículas atômicas tem sua massa normalmente expressa em **unidades de massa atômica (u)**. Uma unidade de massa atômica é igual a 1/12 da massa de um átomo de  $^{12}\text{C}$ . A massa do elétron é 0,000549 u.

# Modelo atômico

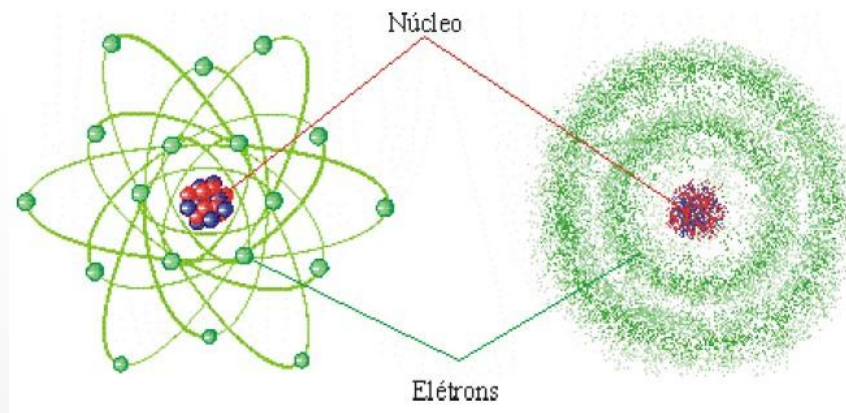
- Estrutura nuclear
  - O núcleo contém partículas chamadas **núcleons**, dos quais há dois tipos: prótons e nêutrons.
  - A massa de um próton é  $1,673 \times 10^{-27} \text{kg}$  e a do nêutron  $1,675 \times 10^{-27} \text{kg}$ .
  - O número de massa atômica de cada um deles é 1 u.
  - O próton tem carga elétrica positiva de uma unidade.
  - O nêutron não tem carga. Ele é eletricamente neutro.





# Estrutura eletrônica

- Os elétrons se distribuem em camadas ou orbitais de tal modo que dois elétrons não ocupem “o mesmo lugar” ao mesmo tempo;
- Quanto mais elétrons possuir o elemento químico, mais camadas ele deve ter ou mais complexa será a maneira como eles se acomodarão;
- Cada orbital pode ser representado por um elétron se movendo segundo uma trajetória circular (ou elíptica) ou por uma nuvem envolvendo o núcleo.



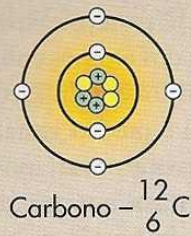
# Estrutura eletrônica

- O orbital é definido como uma região em torno do núcleo onde os elétrons tem grande probabilidade de estar localizados (*teoria quântica do átomo*);
- Cada camada acomoda um número definido de elétrons e quando preenchida denomina-se camada fechada;
- O  $n^{\circ}$  de elétrons nestas camadas é denominado de  $n^{\circ}$  *mágico* e, quando excedido, os novos elétrons devem ocupar novos orbitais. Os  $n^{\circ}$  mágicos são: 2, 8, 18, 32, 32, 18 até 8;
- Segundo a teoria quântica da matéria os elétrons se distribuem ao redor do núcleo em níveis e sub níveis de energia possuindo um conjunto de  $n^{\circ}$  que os identificam:  $n^{\circ}$  quântico principal ( $n$ ),  $n^{\circ}$  quântico orbital ( $l$ ),  $n^{\circ}$  quântico magnético ( $m_l$ ),  $n^{\circ}$  quântico de spin ( $m_s$ ).

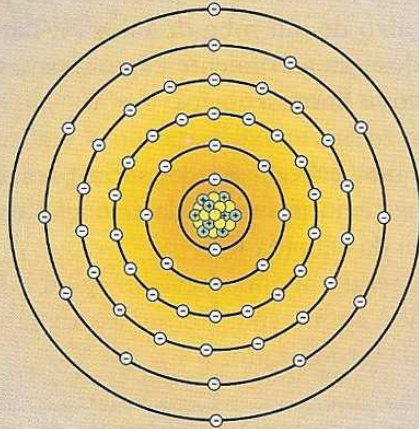
# Energia de ligação eletrônica

- A magnitude do vínculo de um elétron ao núcleo é chamada de **energia de ligação do elétron**.
- Quanto mais próximo do núcleo está o elétron, mais forte é esta ligação.
- Elétrons da camada K tem energia de ligação maiores que os elétrons da camada L, e estes possuem maior energia de ligação que os elétrons da camada M, e assim por diante.
- Quanto maior é o  $n^{\circ}$  total de elétrons em um átomo, mais firmemente cada um é ligado.
- Para elementos com  $n^{\circ}$  atômico elevados a energia de ligação do elétron próximo ao núcleo é bastante elevada podendo atingir a faixa de 100 KeV . O urânio (U) tem energia de ligação dos elétrons da camada K em 116 keV.

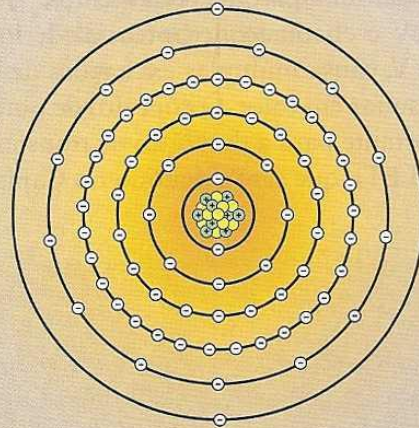
# Energia de ligação eletrônica



| Camada | Número de Elétrons | Energia de ligação aproximada |
|--------|--------------------|-------------------------------|
| K      | 2                  | 0,3                           |
| L      | 4                  | 0,01                          |



|   |    |      |
|---|----|------|
| K | 2  | 37   |
| L | 8  | 6    |
| M | 18 | 1,3  |
| N | 18 | 0,3  |
| O | 12 | 0,04 |
| P | 2  |      |



|   |    |      |
|---|----|------|
| K | 2  | 69   |
| L | 8  | 12   |
| M | 18 | 2,8  |
| N | 32 | 0,6  |
| O | 13 | 0,08 |
| P | 2  |      |

- ✓ O metal tungstênio (W) é utilizado como material do alvo em tubos de raios X;
- ✓ O bário (Ba) é utilizado como agente de contraste radiográfico e fluoroscópico.
- ✓ O carbono (C) é um componente importante da estrutura do tecido humano.



# Nomenclatura atômica

- As propriedades químicas de um elemento são determinadas pelo  $n^\circ$  e arranjo dos elétrons;
- No átomo neutro o  $n^\circ$  de elétrons é igual ao  $n^\circ$  de prótons. O  $n^\circ$  de prótons é chamado de  $n^\circ$  atômico e simbolizado por **Z**.
- O  $n^\circ$  de prótons adicionado ao  $n^\circ$  de nêutrons é chamado de  $n^\circ$  de massa atômica, simbolizado por **A**.
- O  $n^\circ$  de massa atômica de um átomo é um número inteiro, que equivale ao  $n^\circ$  de núcleons no átomo. A massa atômica de um átomo é determinada por medição e raramente é um número inteiro.

- Símbolo químico:  $\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} Y$

Exemplo - urânio:  ${}^{238}_{92}\text{U}$



# Nomenclatura atômica

- **Isótopos** – Átomos que possuem o mesmo  $n^\circ$  atômico, mas diferentes  $n^\circ$  massa atômica. Ou mesmo  $n^\circ$  de prótons e diferentes  $n^\circ$  de nêutrons. Ex.:  $^{134}\text{Ba}$ ,  $^{135}\text{Ba}$ ,  $^{136}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Ba}$  e  $^{138}\text{Ba}$ .
- **Isóbaros** – Átomos que possuem o mesmo  $n^\circ$  de massa atômica, mas diferentes  $n^\circ$  atômicos. Ex.:  $^{131}\text{I}$  e  $^{131}\text{Xe}$ .
- **Isótonos** – Átomos que possuem o mesmo  $n^\circ$  de nêutrons, mas diferentes  $n^\circ$  de prótons. Ex.:  $^{130}\text{I}$ ,  $^{131}\text{Xe}$  e  $^{132}\text{Cs}$ .
- **Isômero** – Átomos que possuem o mesmo  $n^\circ$  atômico e mesmo  $n^\circ$  de massa, diferem em relação ao estado de energia em função de diferenças no arranjo dos núcleons. Ex.:  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  decai para  $^{99}\text{Tc}$  com a emissão de raios gama de 140 keV.
- **Radioisótopo** – É um isótopo radioativo.

# Elementos com relevância para a ciência radiológica

| Elemento          | Símbolo Químico | Número Atômico (Z) | Número de Massa Atômica (A)* | Número de isótopos de ocorrência natural | Massa elementar (u)** | Energia de ligação eletrônica da camada K (keV) |
|-------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------|
| <i>Carbono</i>    | <i>C</i>        | <i>6</i>           | <i>12</i>                    | <i>3</i>                                 | <i>12,01</i>          | <i>0,28</i>                                     |
| <i>Alumínio</i>   | <i>Al</i>       | <i>13</i>          | <i>27</i>                    | <i>1</i>                                 | <i>26,98</i>          | <i>1,56</i>                                     |
| <i>Molibdênio</i> | <i>Mo</i>       | <i>42</i>          | <i>98</i>                    | <i>7</i>                                 | <i>95,94</i>          | <i>20</i>                                       |
| <i>Ródio</i>      | <i>Rh</i>       | <i>45</i>          | <i>103</i>                   | <i>5</i>                                 | <i>102,9</i>          | <i>23,2</i>                                     |
| <i>Tungstênio</i> | <i>W</i>        | <i>74</i>          | <i>184</i>                   | <i>5</i>                                 | <i>183,8</i>          | <i>69,5</i>                                     |
| <i>Chumbo</i>     | <i>Pb</i>       | <i>82</i>          | <i>208</i>                   | <i>4</i>                                 | <i>207,1</i>          | <i>88</i>                                       |
| <i>Urânio</i>     | <i>U</i>        | <i>92</i>          | <i>238</i>                   | <i>3</i>                                 | <i>238</i>            | <i>116</i>                                      |

\* *Isótopo mais abundante*

\*\* *Média de isótopos de ocorrência natural*

# Origem das radiações

- As radiações são produzidas por processos de ajuste que ocorrem no núcleo ou nas camadas eletrônicas, ou pela interação de outras radiações ou partículas com o núcleo ou com o átomo.
- Radiação nuclear é o nome dado as partículas ou **ondas eletromagnéticas** emitidas pelo núcleo durante o processo de reestruturação interna para atingir a estabilidade.
- Raios X é a denominação dada à radiação **eletromagnética** de alta energia que tem origem na eletrosfera ou na frenagem de partículas carregadas no campo eletromagnético do núcleo atômico ou dos elétrons.

# Ondas eletromagnéticas

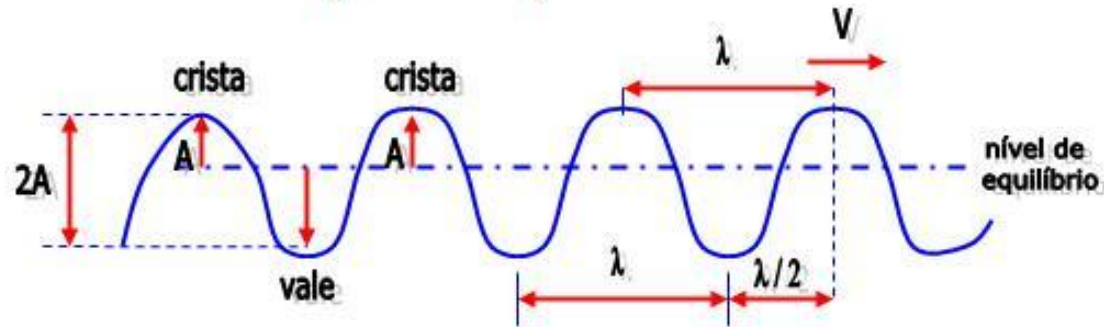
- **Conceitos básicos do movimento ondulatório:**
  - **Ondas** – É uma perturbação que se propaga através de um meio. Toda onda transmite energia sem transportar matéria.
  - **Quanto a natureza podem ser:**
    - Mecânicas – necessitam de um meio material para se propagar (ex. som);
    - Eletromagnéticas – não necessitam de um meio material para se propagar (ex. luz, raios X e raios gama)
  - **Elementos de uma onda**
    - Crista – ponto mais alto e Vale – ponto mais baixo;
    - Comprimento – distância de uma crista a outra;
    - Amplitude – altura da crista;
    - Frequência – número de ciclos por unidade de tempo;
    - Ciclo – movimento completo de qualquer ponto da onda;
    - Período – tempo necessário para que duas cristas consecutivas passem pelo mesmo ponto.

# Ondas eletromagnéticas

Matematicamente temos:  $f = \frac{n}{\Delta t}$

Caso  $n = 1$ ,  $\Delta t$  será = à  $T$ , logo:

$$f = \frac{1}{T} \text{ ou } T = \frac{1}{f}$$



Caso a unidade de tempo seja o segundo, teremos:

$$\text{unid (f)} = \frac{1}{s} = s^{-1} = \text{hertz (Hz)}$$

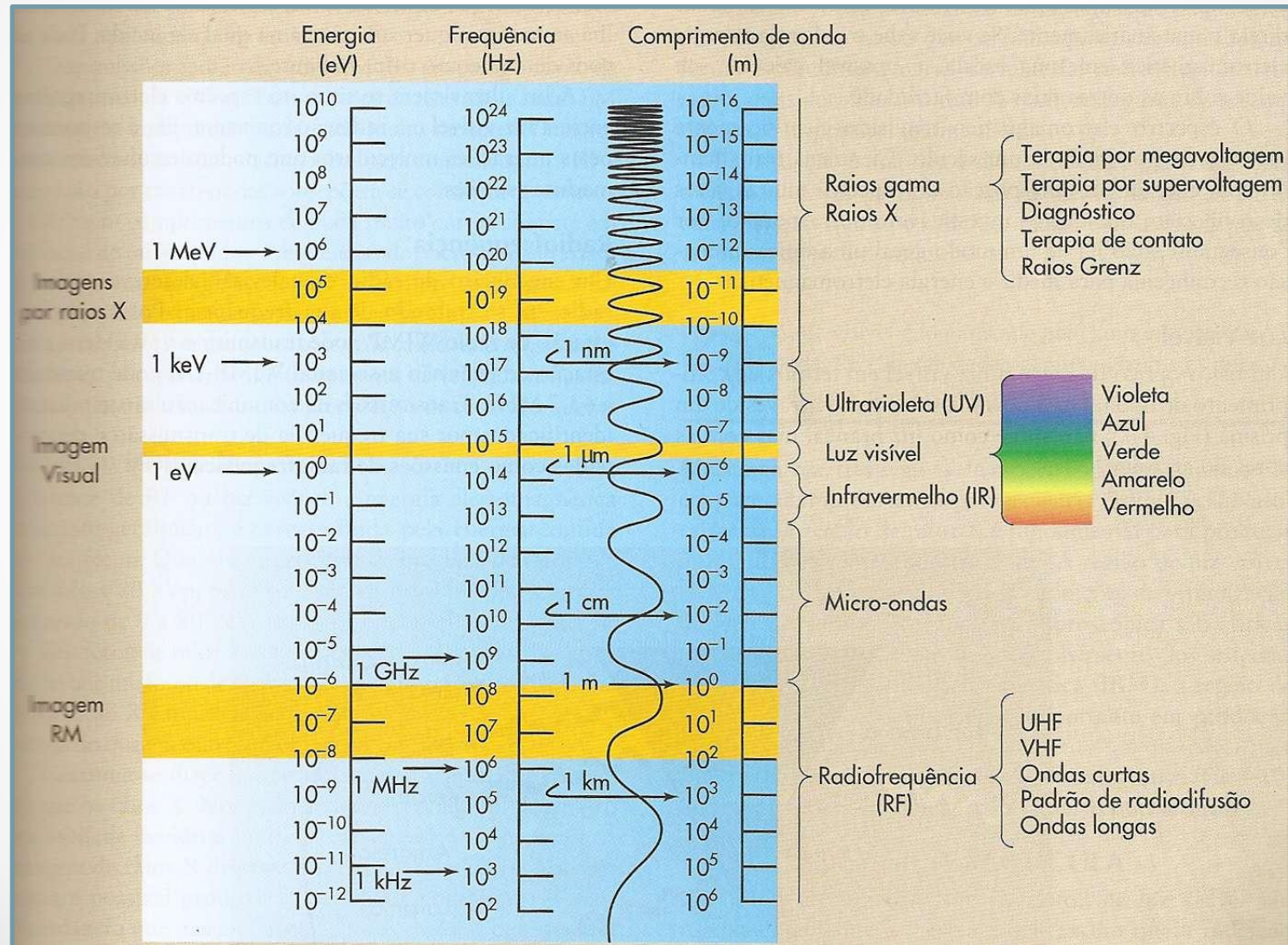


# Energia eletromagnética

- Sempre há ao nosso redor um campo ou estado de energia chamado energia eletromagnética. Ex.: Luz visível, raios X, radiação gama e radiofrequência.
- Um **fóton** é a menor quantidade de qualquer tipo de energia eletromagnética, assim como um átomo é a menor quantidade em um elemento.
- Um **fóton** pode ser retratado como um pacote de energia, *quantum*, que se move a velocidade da luz ( $c$ ).
- As propriedades de energia eletromagnética incluem frequência, comprimento de onda, amplitude e velocidade.
- Três parâmetros da onda – velocidade, frequência e comprimento – são necessários para descrever a energia eletromagnética.

$$v = f \cdot \lambda \text{ ou } c = f \cdot \lambda$$

# Espectro eletromagnético



# Espectro eletromagnético

- Três regiões do espectro eletromagnético são em particular importantes para a ciência radiológica.
- A região dos raios X e gama, pois propiciam a obtenção de imagens radiográficas ou fluoroscópicas com qualidade.
- A região de luz visível que influencia nas condições de visualização para diagnóstico de uma imagem radioscópica ou fluoroscópica.
- A região de radiofrequência em função do desenvolvimento de sistemas de imagens por ressonância magnética (IRM) tem sua relevância destacada na produção de imagens médicas.

# Dualidade onda-partícula

- Fótons de raios X e fótons de luz visível
  - Raios X: ↑ frequência; ↑ energia e ↓ comprimento de onda
- Estas diferenças influem como esses fótons interagem com a matéria:
  - **Radiofrequência**: comprimento de onda medidos em metros interagem com hastes metálicas ou antenas;
  - **Micro-ondas**: comprimento de onda medidos em centímetros interagem com objetos do tamanho de um alimento;
  - **Luz visível**: comprimento de onda em nanômetro (nm) interagem com células. Ex.: bastonetes e cones do olho.
  - **Luz ultravioleta**: interagem com moléculas;
  - **Raios X e gama**: interagem com elétrons e átomos.
- Os raios X e gama se comportam como se fossem partículas ao interagirem com a matéria.

# Lei do inverso do quadrado da distância

- A intensidade da energia eletromagnética (radiação) é inversamente proporcional ao quadrado da distância de uma fonte puntual.

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

- Onde  $I_1$  é a intensidade a uma distância  $d_1$  da fonte e  $I_2$  é a intensidade a uma distância  $d_2$  da fonte.



# Exemplo

- Para um determinado ajuste de técnica radiográfica, a intensidade dos raios X a 1 m é de 450 mR. Qual a intensidade do feixe de raios X na cabine a uma distância de 3 m, se o feixe útil for dirigido para a mesma?

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad \frac{450}{I_2} = \left(\frac{3}{1}\right)^2 \quad I_2 = \frac{450}{9}$$

$$I_2 = 50 \text{ mR}$$

# Equação quântica de Planck

- A teoria quântica de Planck afirma que os raios X se movem com a velocidade da luz ( $c = 3 \times 10^8$  m/s) e que a energia do fóton é diretamente proporcional a frequência do fóton.
- A constante de proporcionalidade, conhecida como **constante de Planck ( $h$ )**, tem um valor numérico de  $4,15 \times 10^{-15}$  eV.s ou  $6,65 \times 10^{-34}$  J.s.
- A energia de um feixe de raios X ou gama é normalmente apresentada com a unidade elétron-volt (eV). A relação entre elétron-volt (eV) e joule (J) é  **$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$** .

$$E = h \cdot f$$

ou

$$E = h \cdot \nu$$

# Equação quântica de Planck

$$E = h \cdot f$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

- As equações acima mostram que a energia do fóton é inversamente proporcional ao comprimento de onda do fóton.
- Quanto menor o comprimento de onda da energia eletromagnética, maior a energia do fóton.

# Matéria e energia

$$E = m \cdot c^2$$

- Segundo a física quântica e a física da relatividade, a matéria pode ser transformada em energia e vice-versa.
- A equação acima permite o cálculo do equivalente energético da massa e a massa equivalente da energia.
- A relação entre joule (J) e elétron-volt (eV) é :
  - **$1 \text{ J} = 6,24 \times 10^{18} \text{ eV}$**

# Exemplo

- Qual é a equivalência energética de um elétron (massa =  $9,109 \times 10^{-31}$  kg), medido em joules e em elétron-volt?

$$E = m \cdot c^2$$

$$E = (9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}) \cdot (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$E = 8,1972 \times 10^{-14} \text{ J}$$

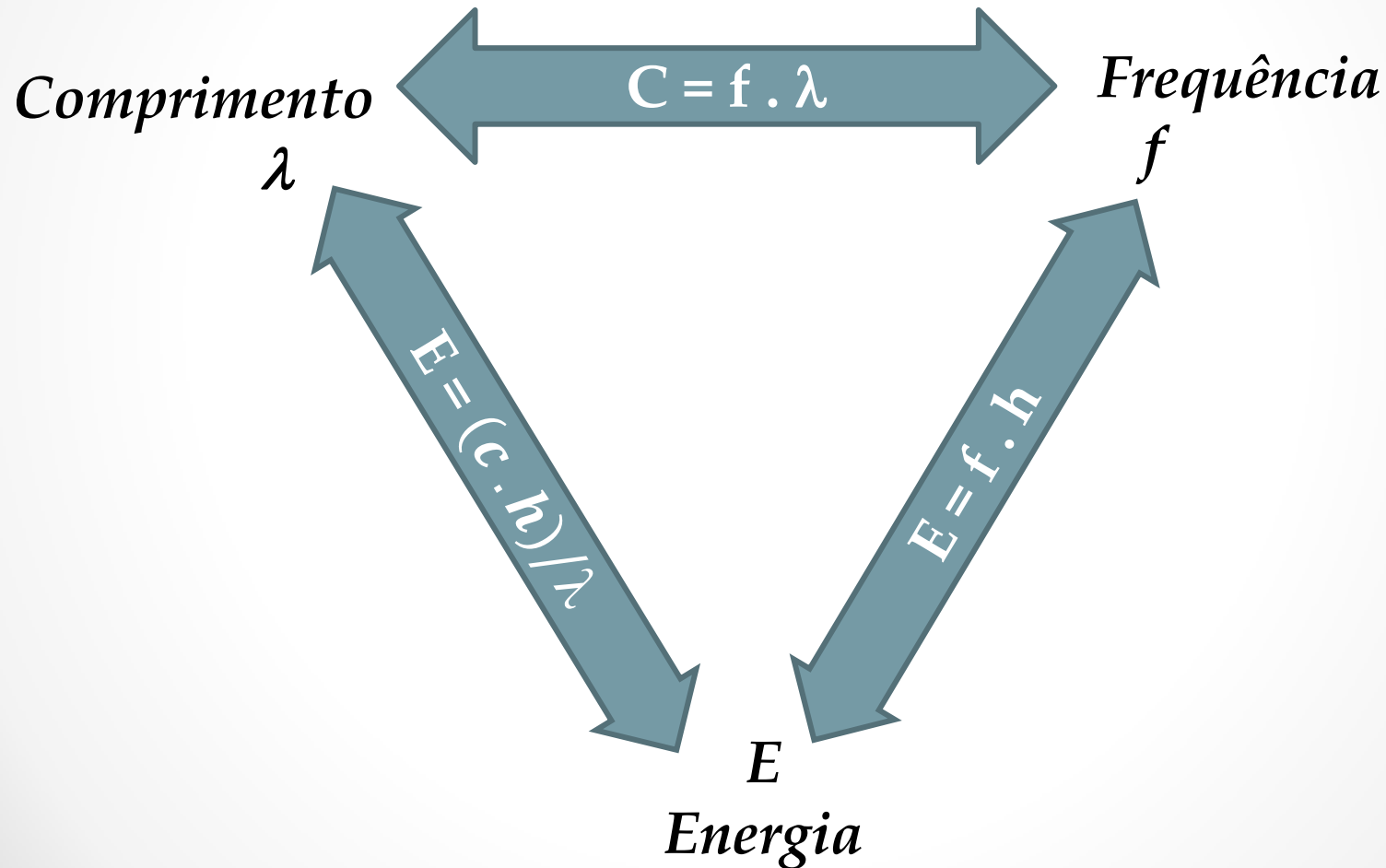
$$E = (8,1972 \times 10^{-14} \text{ J}) \cdot (6,24 \times 10^{18} \text{ eV/J})$$

$$E = 511,5 \times 10^3 \text{ keV}$$

$$E = 511,5 \text{ keV}$$



# Triângulo de relação eletromagnética

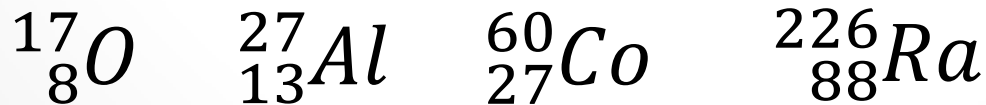


# Exercícios

1. Explique ou defina o que se segue:

- a) O átomo de Rutherford
- b) Núcleons
- c) Fótons
- d) Lei do inverso do quadrado da distância
- e) Espectro eletromagnético

2. Quantos prótons, nêutrons, elétrons e núcleons são encontrados nos elementos abaixo?



# Exercícios

3. Qual a frequência associada a um fóton de radiação de micro-ondas que tem um comprimento de  $10^{-4}$  m?
4. Na mamografia, raios X com energia de 28 keV são usados. Qual a frequência dessa radiação?
5. A intensidade de saída de um sistema de imagens radiográficas normal é de 5mR/mAs a 100 cm. Qual é a intensidade de saída de tal sistema a 200 cm?

# Exercícios

6. Qual a frequência de um fóton de raios X com energia de 85 keV?
7. A estação de rádio ZYZ4-FM transmite em uma frequência de 108 MHz. Qual o comprimento de onda desta radiação?
8. A intensidade da luz de uma lâmpada de leitura é 200 mililumens (mlm) a uma distância de 2 metros (m). Qual a intensidade da luz a 3m?

# Produção dos raios X

- Histórico
- Processos de geração dos raios X
- O espectro de raios X
- Fatores que afetam o espectro dos raios X
- O equipamento de raios X diagnóstico

# Histórico

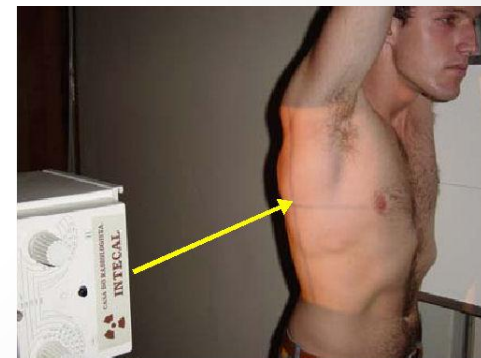
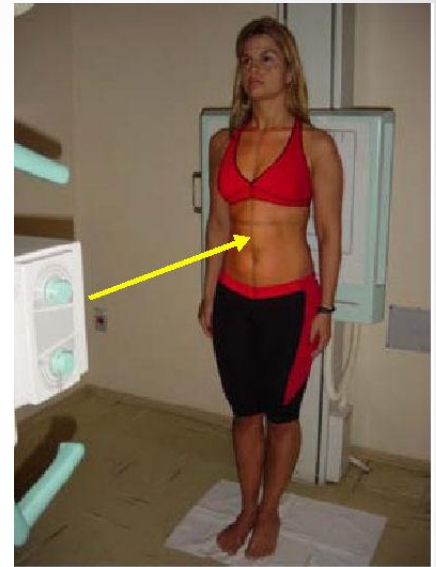
- A descoberta dos raios X por Wilhelm Konrad Roentgen em 08 de novembro de 1895 está entre os mais importantes eventos da história humana.
- Mesmo com os trabalhos desenvolvidos nas décadas de 1870 e 1880 sobre condução de raios catódicos através dos tubos de Crookes, esta foi uma descoberta acidental.
- Contemporâneos de Roentgen já haviam observado anteriormente a radiação X, mas nenhum deles havia reconhecido a sua importância, porém Roentgen, em pouco mais de um mês de investigação, já havia descrito a radiação X com quase todas as propriedades que conhecemos hoje.





# Histórico

- Ao mesmo tempo em que a utilização desta descoberta sinalizava com enormes ganhos, principalmente associados a área de saúde, danos começavam a ser associados a ela.
- A produção de raios X e seu uso seguro para auxílio no diagnóstico de patologias servem de base para a radiologia atual, o desenvolvimento nesta área e seu histórico levaram a uma ênfase na busca de um controle eficiente da emissão de radiação em radiodiagnóstico e nas doses decorrentes dos procedimentos da rotina diagnóstica para os IOEs e pessoas do público.

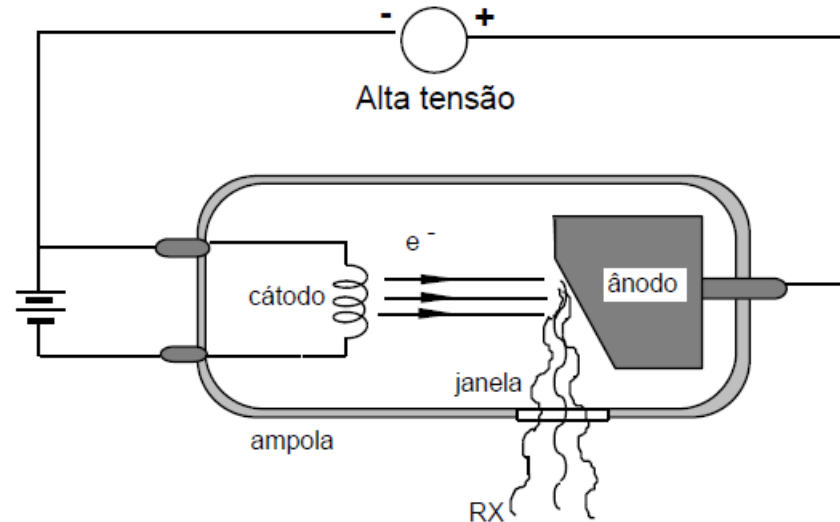


# Propriedades dos raios X

- Não sofrem desvios em sua trajetória por ação de campos elétricos nem magnéticos;
- Atravessam corpos opacos;
- Perdem energia na proporção direta ao n° atômico ( $Z$ ) do elemento com o qual interagem;
- Causam fluorescência em certas substâncias químicas;
- Diminuem de intensidade na razão inversa do quadrado da distância por eles percorrida ( $1/r^2$ );
- Produzem ionização.

# Produção dos raios X

- A radiação X é uma radiação produzida artificialmente através da aceleração de cargas elétricas (elétrons) contra um material metálico de alto número atômico, resultando desse choque a emissão de radiação eletromagnética, caracterizada por uma frequência muito alta, pequeno comprimento de onda e alto poder de penetração.
- Ao contrário que a maioria das pessoas leigas pensa, não há material radioativo em um equipamento emissor de raios X.



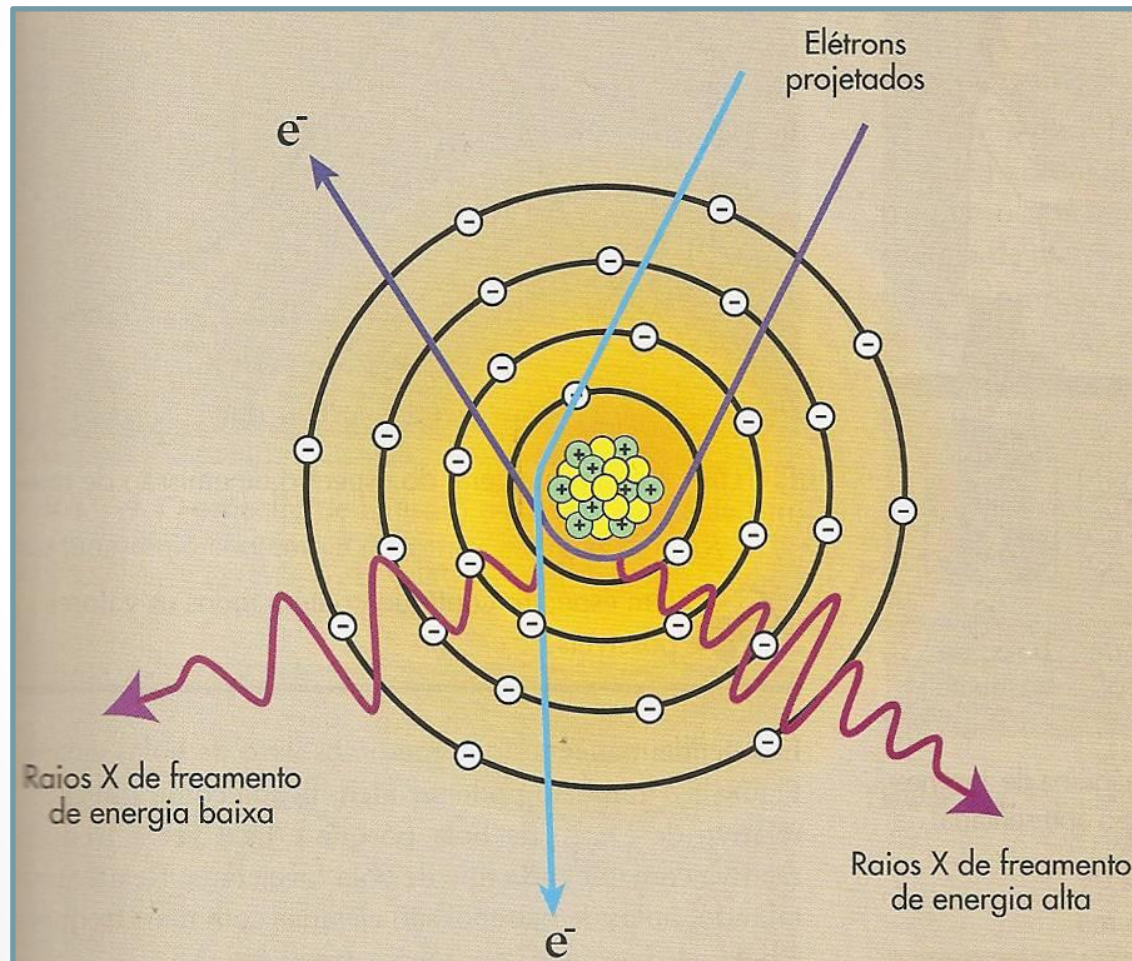
# Produção dos raios X

- Os elétrons projetados no material alvo do tubo de raios X interagem com a coroa eletrônica ou com o campo nuclear, resultando na conversão de energia cinética dos elétrons em energia térmica (calor) e em radiação eletromagnética ionizante ou raios X. O espectro de emissão dos raios X possui um componente contínuo (*bremsstrahlung*) e um componente discreto chamado de raios X característicos.

# Produção dos raios X

- A **radiação de frenagem ou bremsstrahlung** ocorre quando partículas carregadas, neste caso elétrons, interagem com o campo coulombiano de átomos com número atômico elevado, resultando em redução de sua energia cinética e emissão dessa diferença de energia na forma de raios X. A energia dos raios X gerados por frenagem varia desde valores muito baixos até um valor máximo, igual a energia cinética da partícula incidente.

# Produção dos raios X – frenagem ou bremsstrahlung (contínuo)

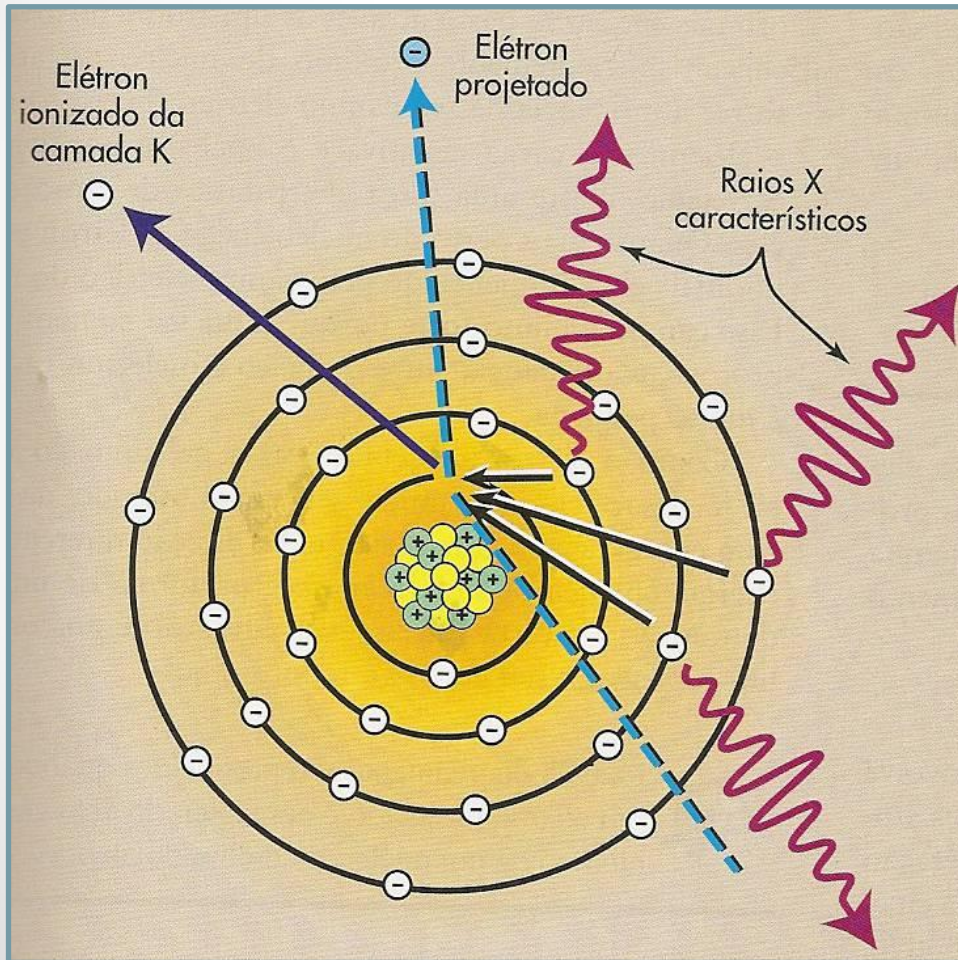




# Produção dos raios X

- Os **raios X característicos** são produzidos quando átomos do material alvo são ionizados por partículas incidentes e possuem energia necessária para retirar elétrons das camadas eletrônicas mais internas. Neste caso ocorre uma vaga temporária, que torna o átomo instável e faz com que elétrons das camadas mais externas desloquem-se para preencher a vaga.
- Ao se deslocar de um nível mais externo para um mais interno na estrutura eletrônica, o elétron libera o excesso de energia na forma de radiação eletromagnética ionizante, cuja intensidade é igual a diferença das energias de ligação das camadas eletrônicas correspondentes.

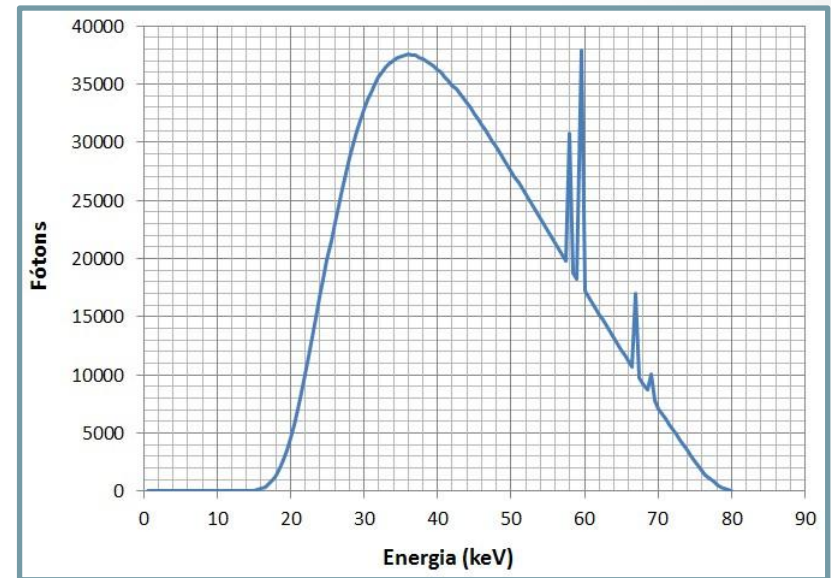
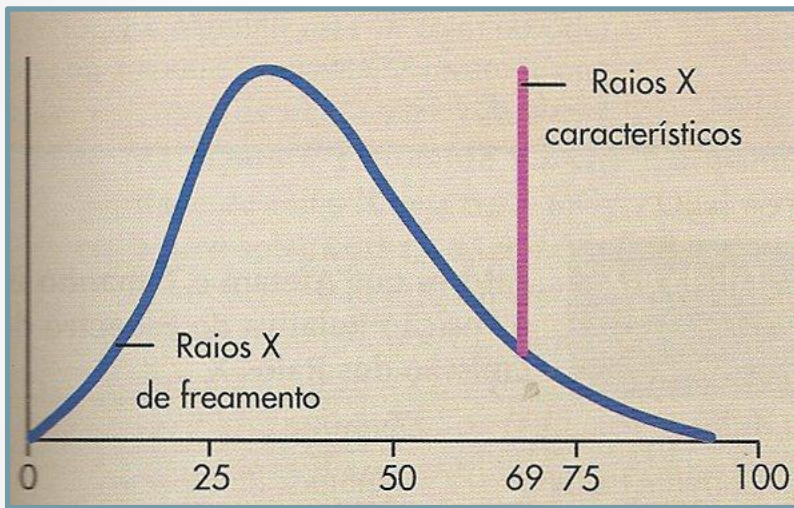
# Produção dos raios X – característico (discreto)



*Para o átomo de tungstênio (W) a energia efetiva dos raios X de transições eletrônicas para a camada K = 69 keV*

| Transição (camada) | Símbolo      | Energia (keV) |
|--------------------|--------------|---------------|
| L → K              | $K_{\alpha}$ | 57,4          |
| M → K              | $K_{\beta}$  | 66,7          |
| N → K              | $K_{\delta}$ | 68,9          |

# Espectro de raios X



*O espectro de emissão de raios X de frenagem se estende de zero até a energia máxima dos elétrons projetados, com a maioria dos raios X tendo aproximadamente um terço da energia máxima. O espectro de emissão de raios X característicos é representado na figura a esquerda por uma linha em 69 keV (energia efetiva).*

# Fatores que afetam o espectro de emissão de raios X

- A forma geral do espectro de raios X pode ser alterada em relação a **qualidade** e a **quantidade** de fótons presentes no feixe. Quando o ponto máximo da curva esta mais a direita, maior é a energia efetiva ou a qualidade do feixe. Quanto maior a área sob a curva, maior é a quantidade de fótons emitidos.
- Alguns fatores influenciadores da qualidade do feixe e da quantidade de fótons emitidos são apresentados a seguir:



# Fatores que afetam o espectro de emissão de raios X

## *Alterações no feixe de raios X produzidas por seus fatores influenciadores*

| <i>Aumento:</i>           | <i>Resulta em:</i>                                                         |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Corrente (mA)             | aumento na quantidade de fótons e nenhuma alteração na qualidade do feixe; |
| Tensão (kV <sub>p</sub> ) | aumento na quantidade de fótons e na qualidade do feixe;                   |
| Filtração adicional       | diminuição na quantidade de fótons e aumento na qualidade do feixe;        |
| Nº atômico (Z) do alvo    | aumento na quantidade de fótons e na qualidade do feixe;                   |
| <i>Ripple</i>             | diminuição na quantidade de fótons e na qualidade do feixe.                |

# O equipamento de raios X diagnóstico

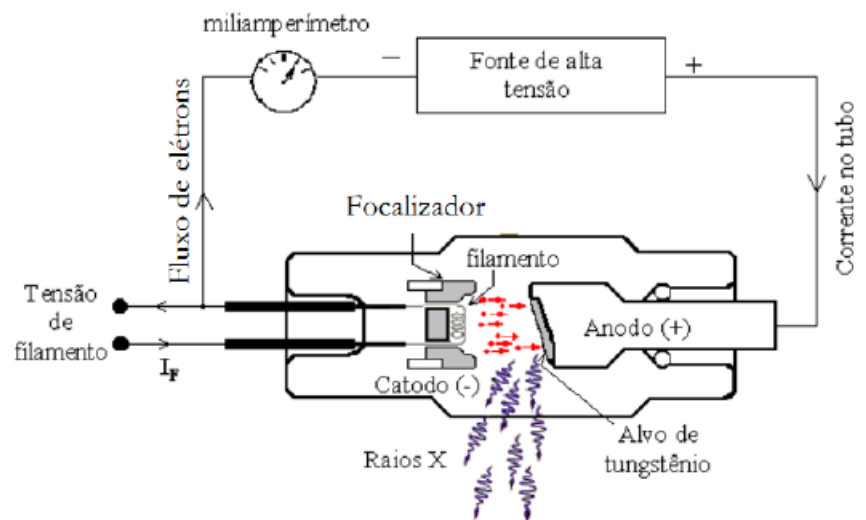
- O equipamento emissor de raios X para a área do radiodiagnóstico, utilizado em exames para obtenção de imagem radiográfica ou em fluoroscópica são constituídos pelo o painel de controle, o gerador de alta tensão e o tubo de raios X.





# O equipamento de raios X diagnóstico

- O tubo de raios X pode ser dividido em dois componentes principais, o catodo e o anodo. O catodo é o eletrodo negativo, de onde os elétrons partem por emissão termiônica em direção ao alvo e o anodo é o eletrodo positivo, que contém o material alvo, normalmente tungstênio (W), podendo ser fixo (radiologia odontológica) ou giratório (radiologia médica) em função da corrente e do tempo de exposição utilizadas.



# Exercícios

1. Explique ou defina o que se segue:
  - a) Energia de ligação
  - b) Raios X de frenagem ou *bremsstrahlung*
  - c) Raios X característicos
  - d) Quantidade de raios X
  - e) Qualidade do feixe de raios X
2. O que representa o espectro discreto de raios X?
3. Liste três fatores que afetam a forma do espectro de emissão dos raios X e descreva sucintamente cada um.

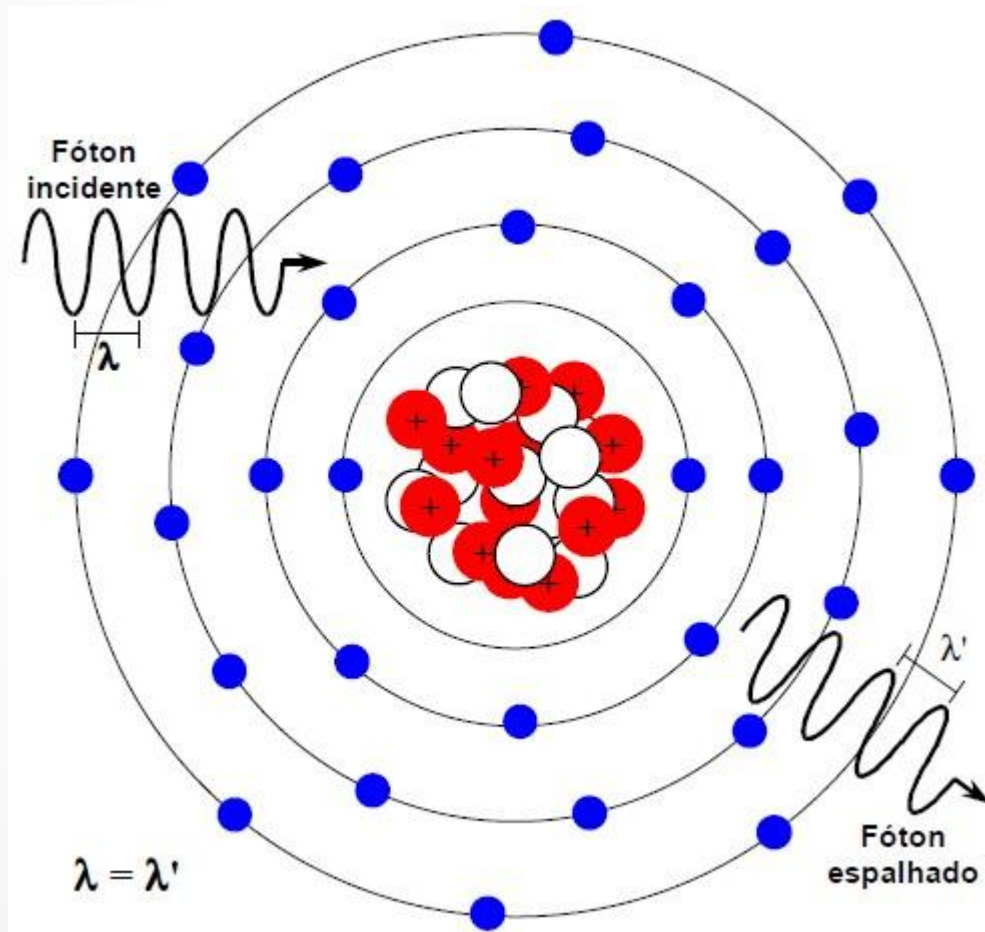
# Exercícios

4. Desenhe o espectro de emissão dos raios X de um equipamento operado em  $90\text{kV}_p$ , cujo o tubo tenha alvo de tungstênio.
5. Como é possível aumentar a energia cinética do fluxo de elétrons projetados através do tubo de raios X?
6. Qual o comprimento de onda mínimo associado aos raios X emitidos por um tubo operado a  $90\text{ kV}_p$ ?

# Interação da radiação X e gama com a matéria

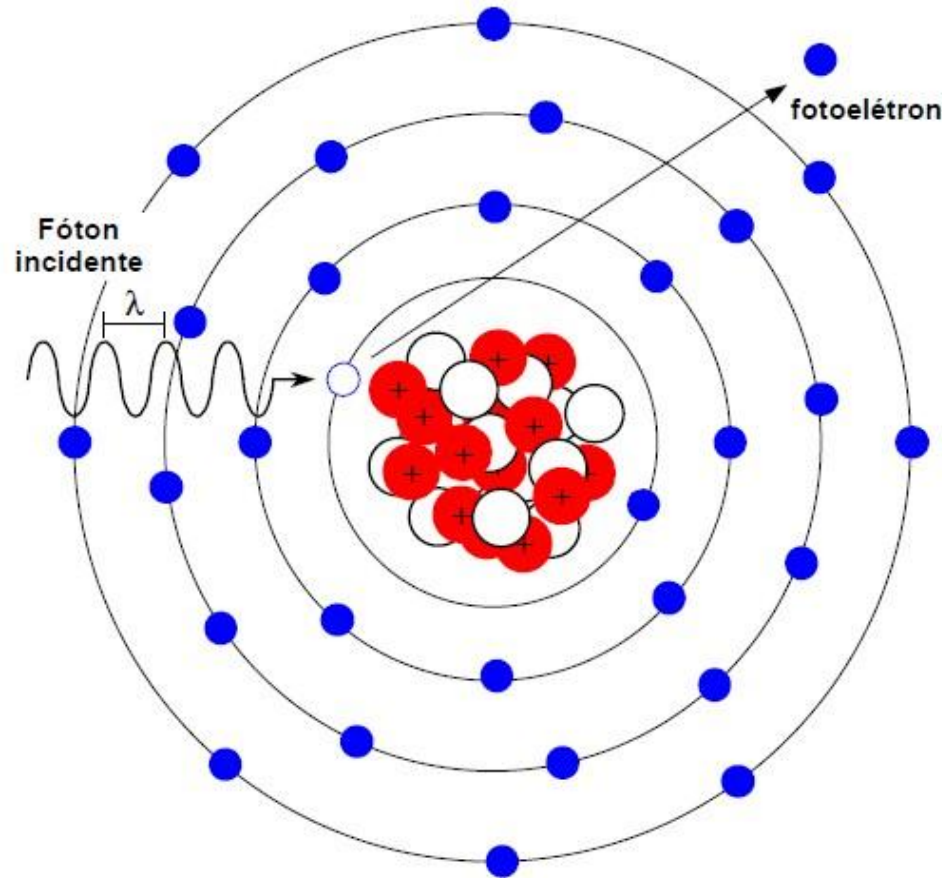
- A interação da radiação eletromagnética ionizante com a matéria pode ocorrer por espalhamento coerente (*rayleigh*), efeito fotoelétrico, espalhamento incoerente (*compton*), produção de par e por fotodesintegração.
- Os dois últimos tipos de interação não ocorrem na faixa de energia do raio X diagnostico, pois o efeito de produção de par somente ocorre com fótons de energia superior a 1,022 MeV e a fotodesintegração somente ocorre com energia acima de 10 MeV.
- E o espalhamento coerente (*rayleigh*) não produz ionização na matéria.

# Espalhamento clássico ou coerente (*rayleigh*)



*Energias < 20keV*

# Efeito fotoelétrico



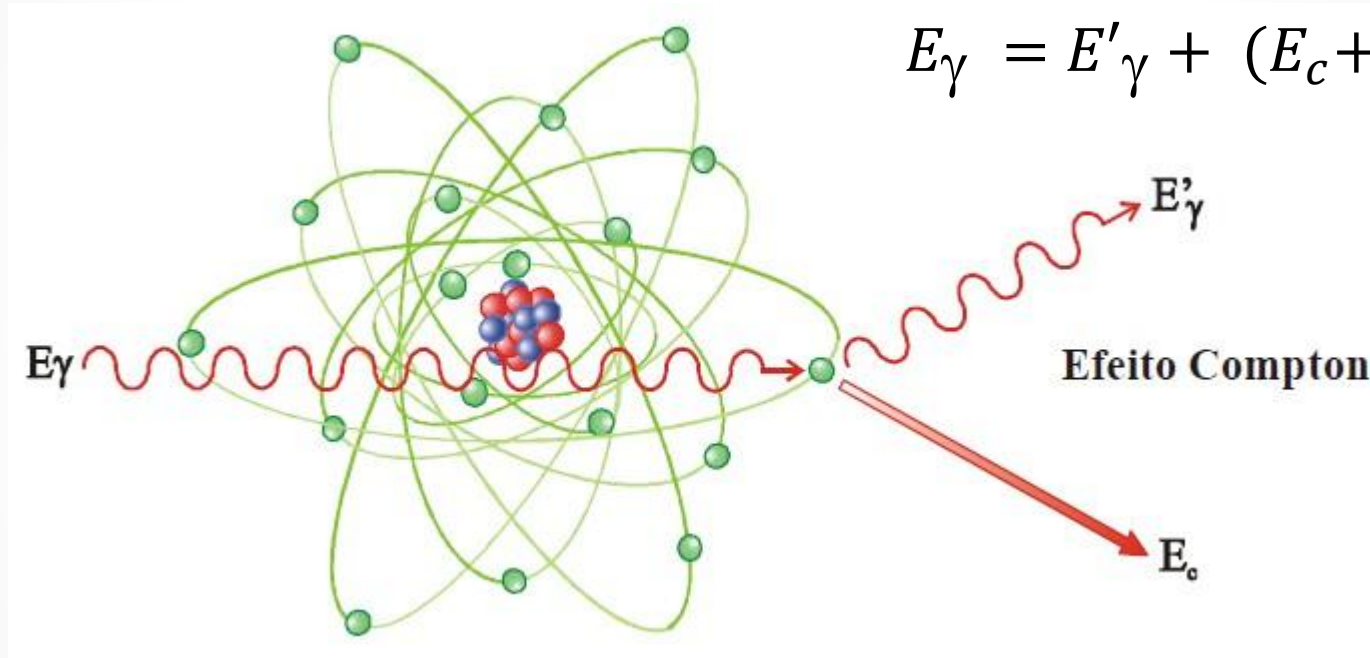
$$E_c = E_\gamma - E_l$$

Onde:

- $E_c$  = energia cinética do elétron orbital expelido ;
- $E_\gamma$  = energia do fóton incidente;
- $E_l$  = energia de ligação do elétron orbital.



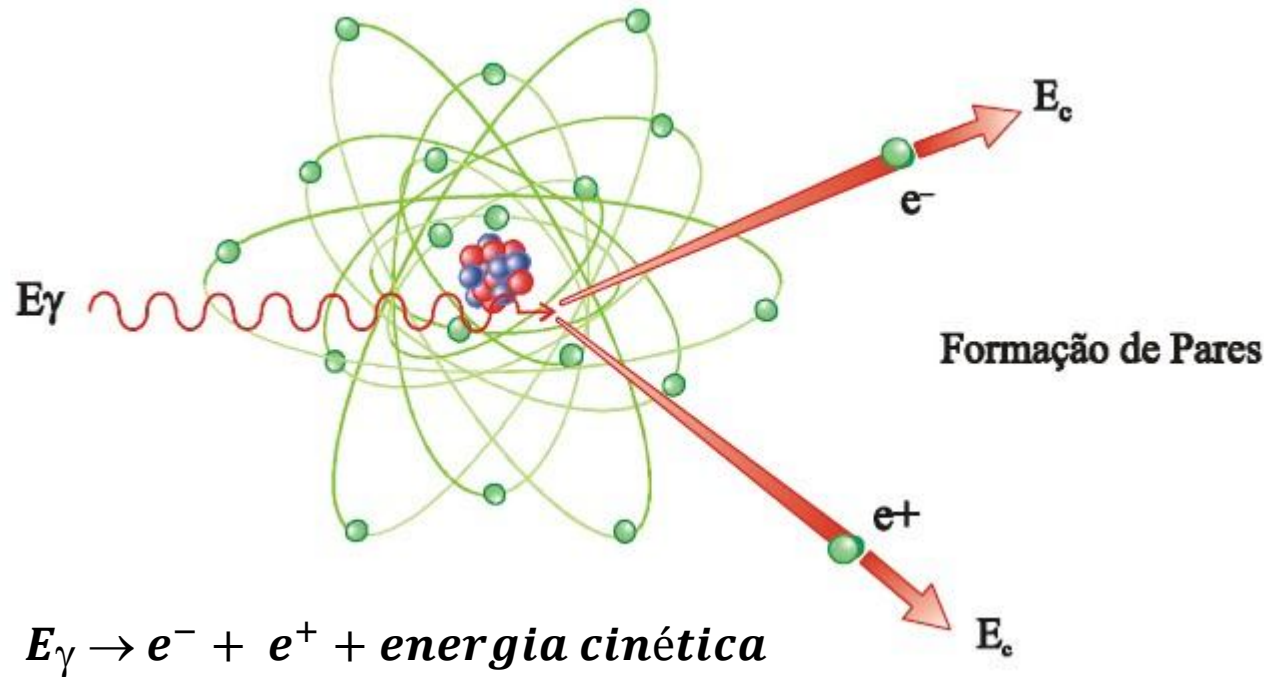
# Espalhamento incoerente (*compton*)



Onde:

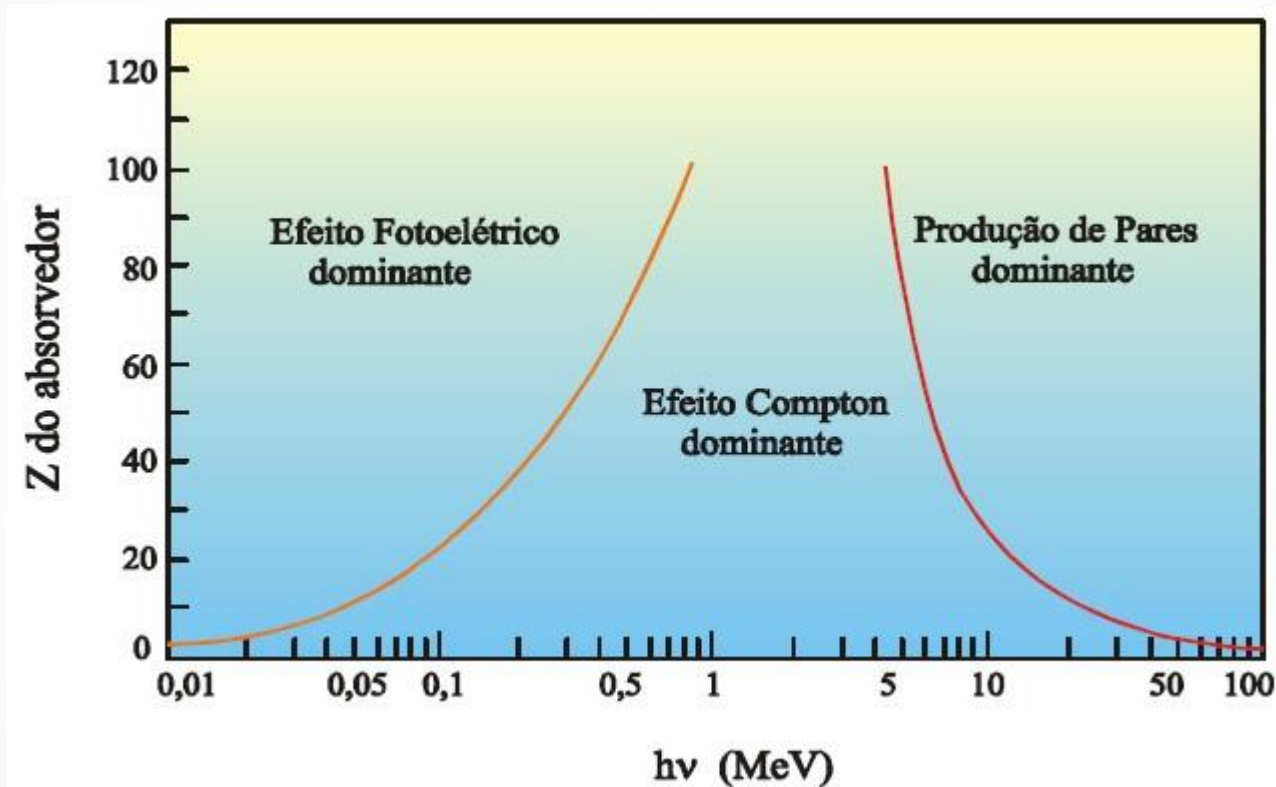
- $E_\gamma$  = energia do fóton incidente;
- $E'_\gamma$  = energia do fóton espalhado;
- $E_l$  = energia de ligação do elétron orbital;
- $E_c$  = energia cinética do elétron orbital expelido.

# Produção de par (*elétron-pósitron*)



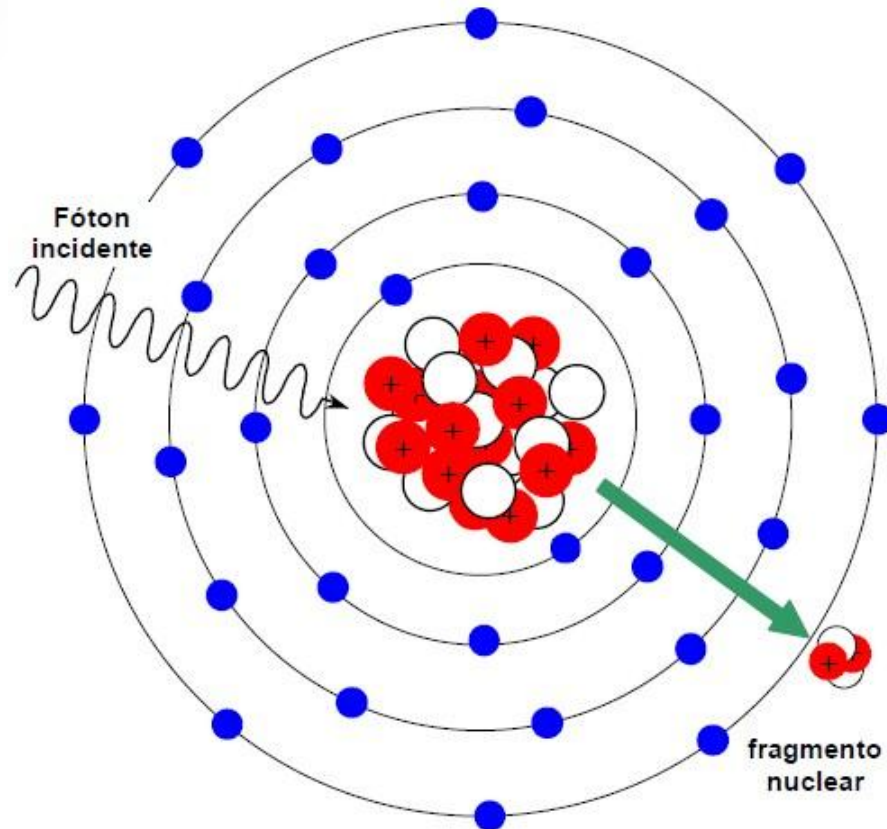
- $E_\gamma$  possui energia superior a 1022 KeV;
- As duas partículas transferem a sua energia cinética para o meio material, sendo que o pósitron volta a se combinar com um elétron do meio e dá origem a 2 fótons, cada um com energia de 511 keV.

# Importância relativa dos efeitos fotoelétrico, compton e produção de pares



*Importância relativa dos diversos processos de interação dos fótons com a matéria em função da energia do fóton e do número atômico do material.*

# Fotodesintegração



*Fótons com energia acima de 10 MeV são absorvidos pelo núcleo, sendo o núcleo elevado a um alto grau energético e emite um núcleon ou fragmento nuclear.*

# Energia de ligação de materiais relevantes para a radiologia

| Elemento   | Número atômico (Z) | Energia de ligação de elétrons da camada K (kV) |
|------------|--------------------|-------------------------------------------------|
| Hidrogênio | 1                  | 0,02                                            |
| Carbono    | 6                  | 0,3                                             |
| Alumínio   | 13                 | 1,6                                             |
| Cálcio     | 20                 | 4,1                                             |
| Molibdênio | 42                 | 19                                              |
| Ródio      | 45                 | 23                                              |
| Iodo       | 53                 | 33                                              |
| Bário      | 56                 | 37                                              |
| Tungstênio | 74                 | 69                                              |
| Chumbo     | 82                 | 88                                              |

# Exercício

- Uma radiação X de 70 KeV interage por efeito fotoelétrico com um átomo da camada K de carbono e um átomo de bário. Qual a energia cinética de cada fotoelétron?

$$E_c = E_\gamma - E_l$$

$$E_{c \text{ carbono}} = 70 - 0,3 = 69,7 \text{ keV}$$

$$E_{c \text{ bário}} = 70 - 37 = 33 \text{ keV}$$



# Exercício

- Uma radiação X de 60 KeV ioniza um átomo de bário ejetando um elétron da camada N com 12keV de energia cinética. Qual a energia da radiação X espalhada?

$$E_{\gamma} = E'_{\gamma} + (E_c + E_l)$$

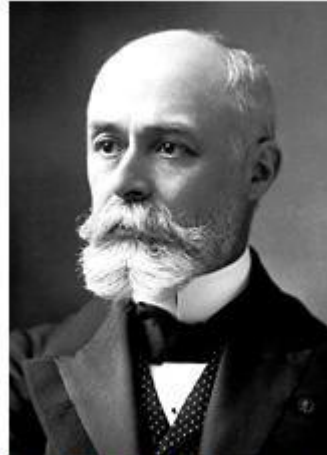
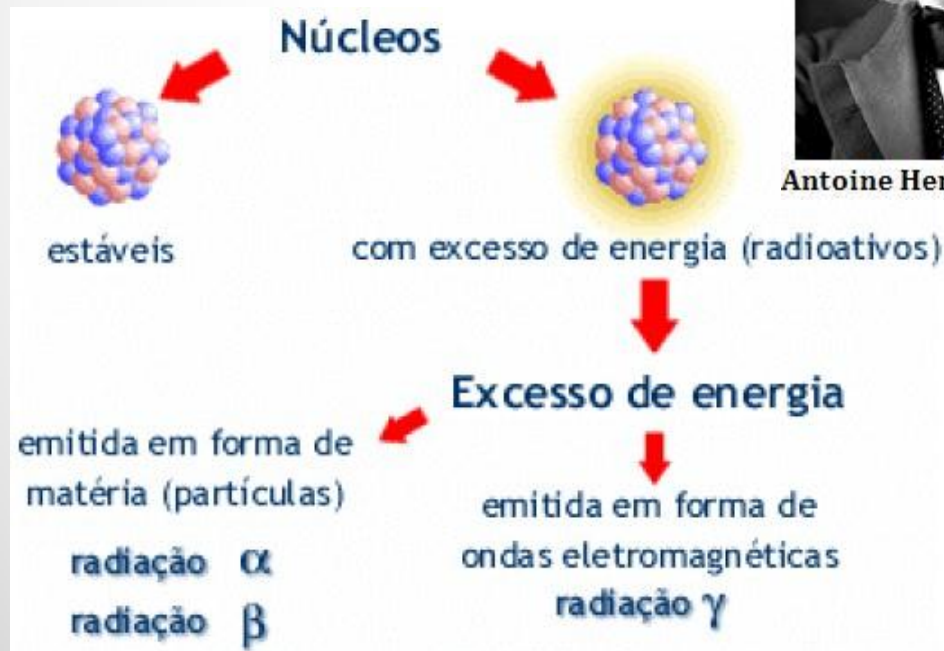
*No slide 16 podemos observar que a energia de ligação da camada N do bário é 0,3 keV*

$$60 = E'_{\gamma} + (12 + 0,3)$$

$$E'_{\gamma} = 60 - (12 + 0,3) = 47,7 \text{ keV}$$

# Radiações naturais e radioatividade

## *Histórico*



Antoine Henri Becquerel



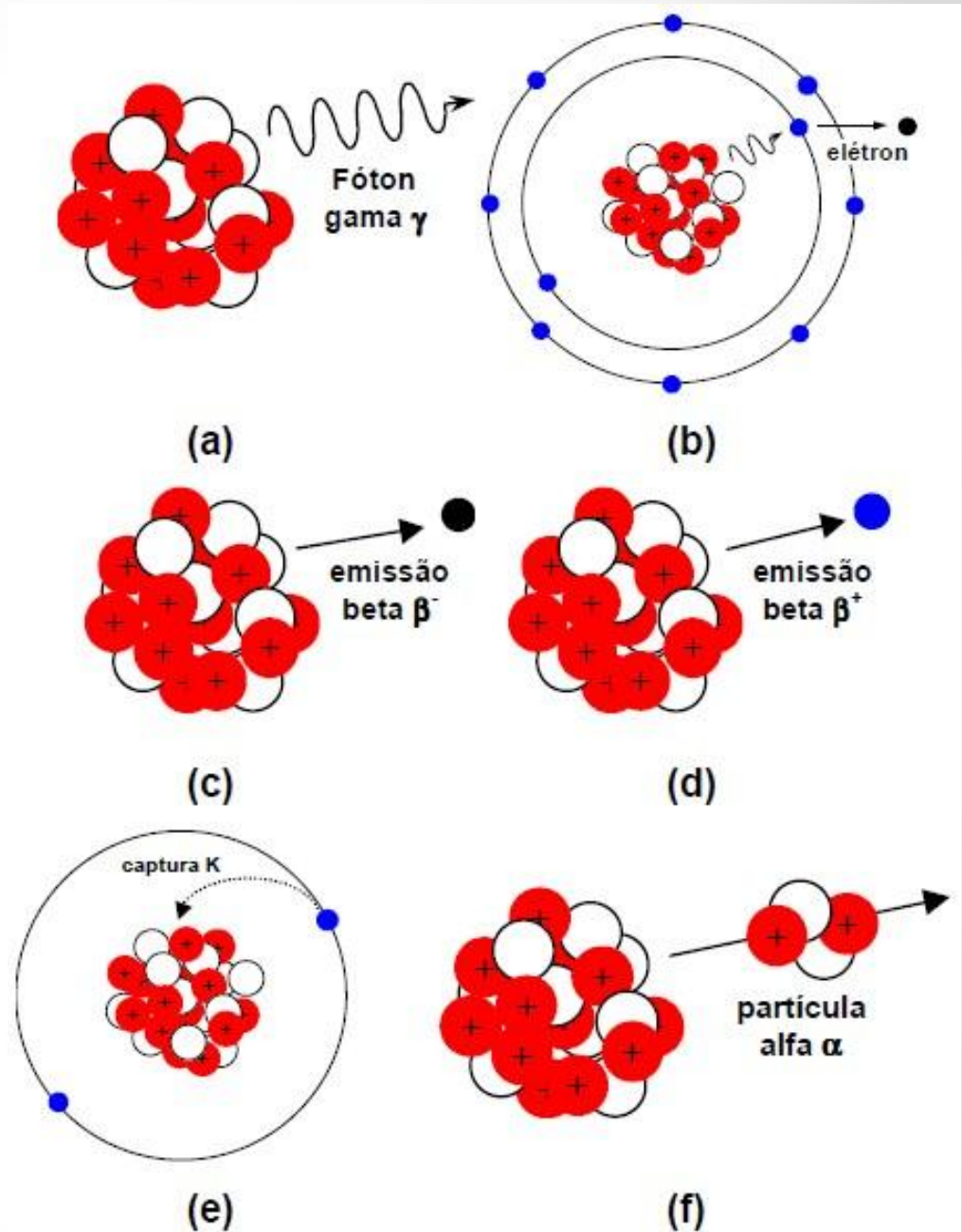
# Radiações naturais e radioatividade



# Decaimento radioativo

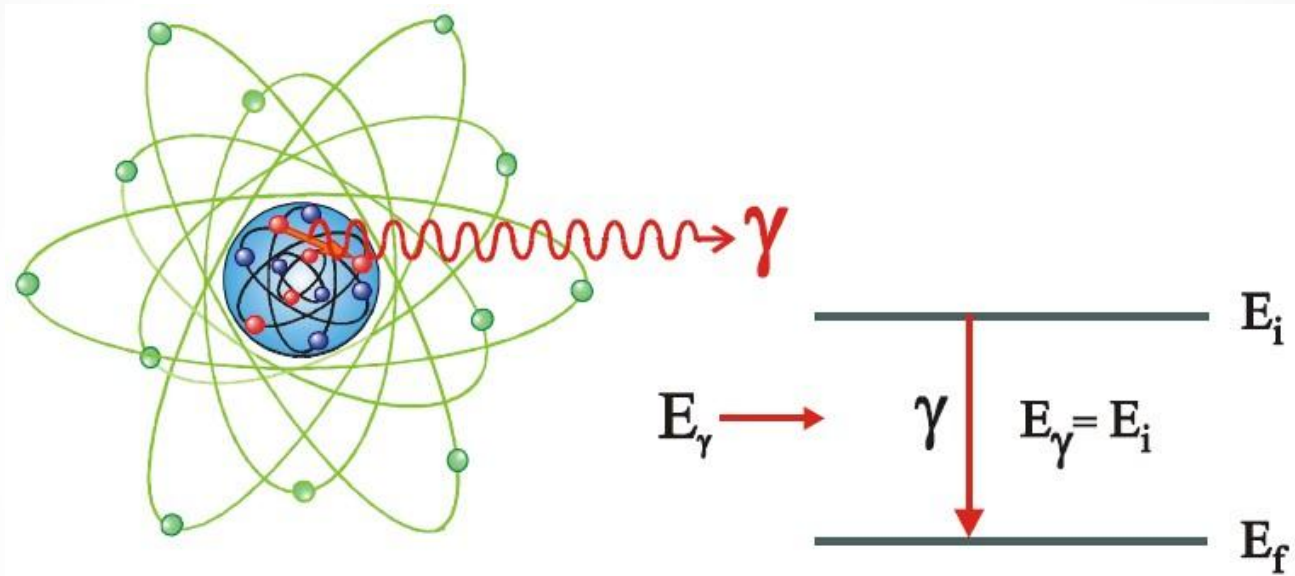
- Um núcleo de átomo excitado, que possui mais energia que a necessária ou possui mais nêutrons que o indispensável, irá expulsar esta energia. Esta emissão caracteriza a radioatividade do átomo.
- Existem seis tipos de processos de decaimento radioativo:
  - a. Transição isomérica ou radiação gama;**
  - b. Conversão interna;
  - c. Emissão de  $\beta^-$ ;**
  - d. Emissão de  $\beta^+$ ;**
  - e. Captura de elétron;
  - f. Emissão  $\alpha$ .**

# Decaimento radioativo

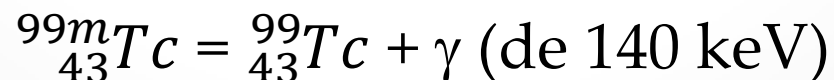




# Transição isomérica ou radiação gama

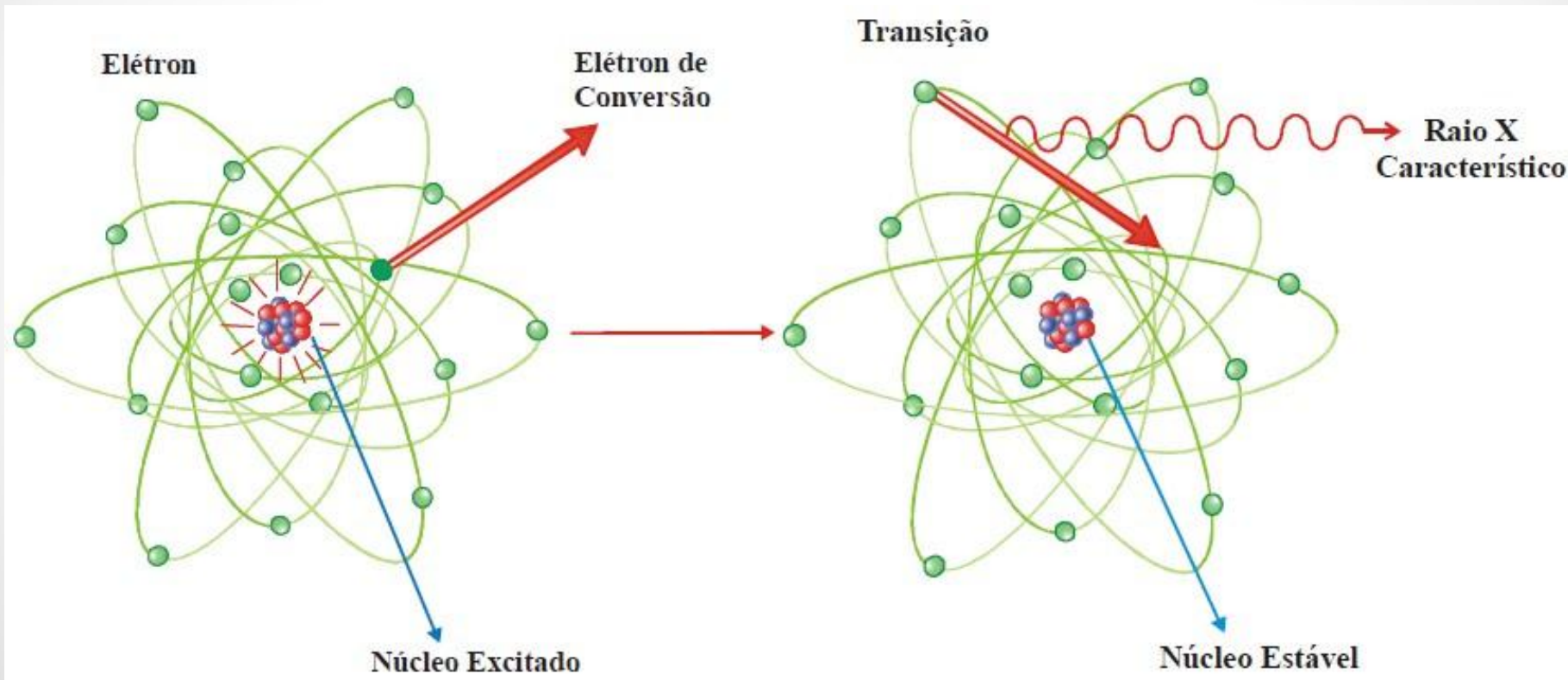


- Tem por objetivo trazer o núcleo para um estado de menor energia, sem a perda de massa nuclear (próton ou nêutron) como ocorrem com outros processos radioativos.



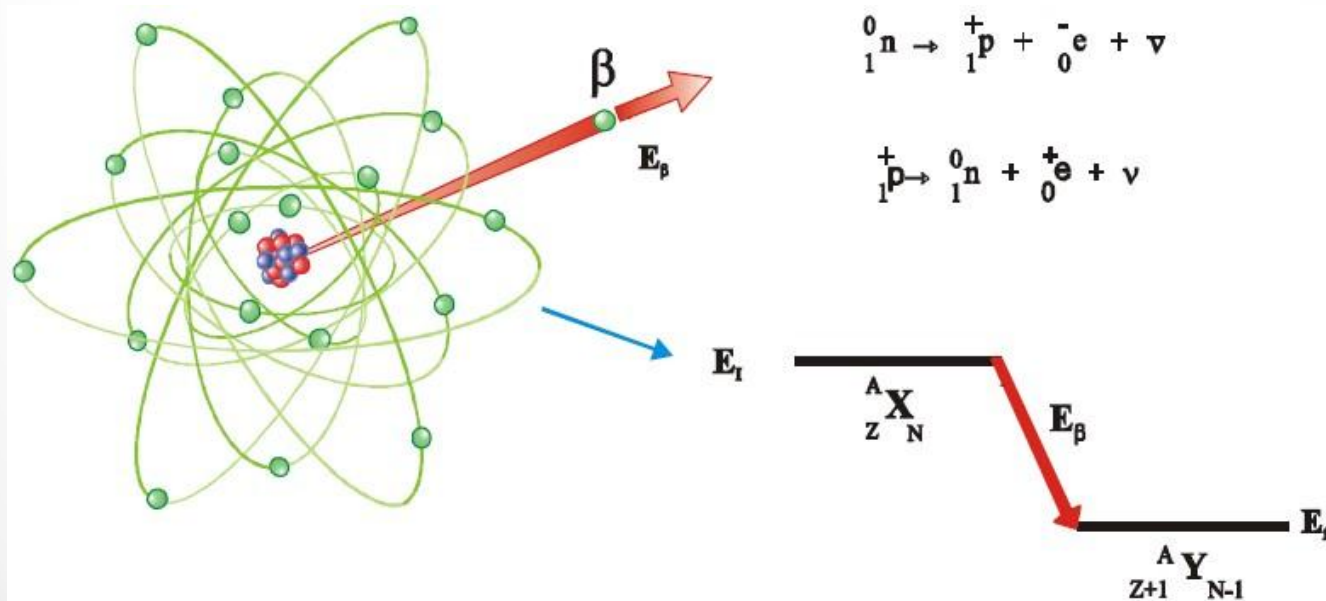


# Conversão interna

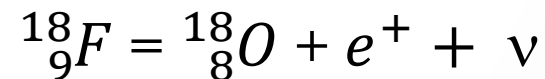
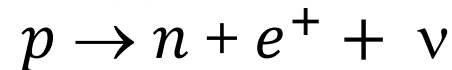
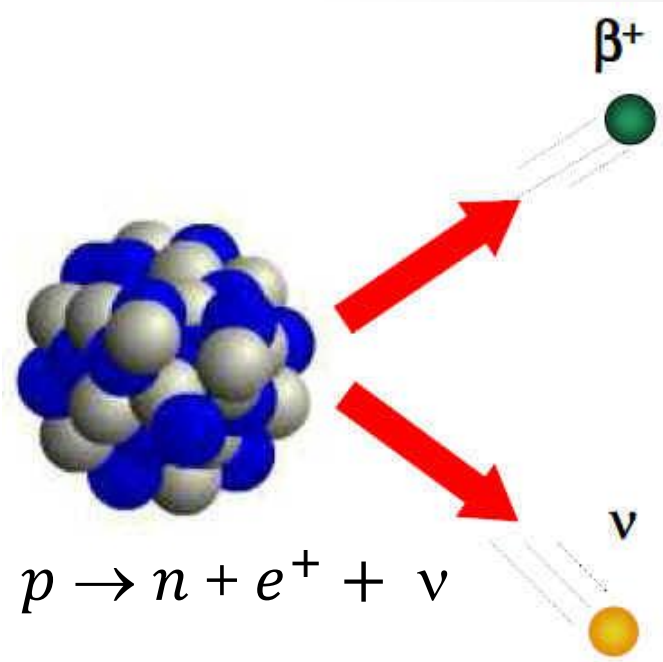
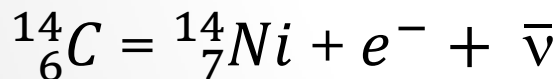
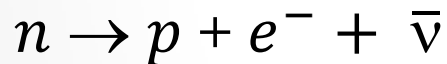
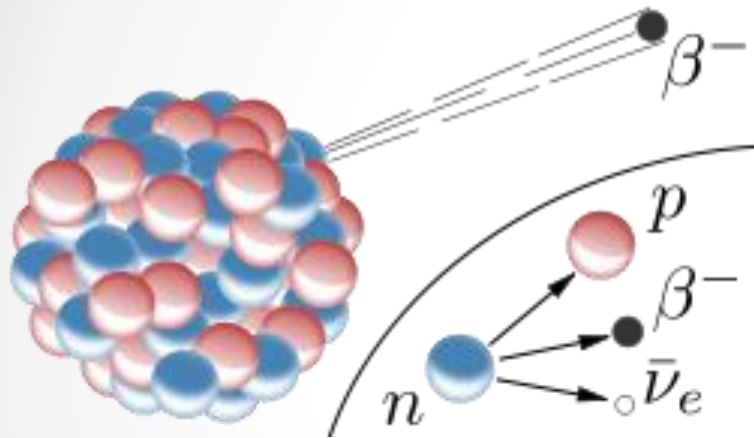


# Radiação $\beta$

- Radiação beta ( $\beta$ ) é o termo usado para descrever elétrons (pósitrons e negatrons) de origem nuclear, carregados positiva ( $\beta^+$ ) ou negativamente ( $\beta^-$ ). Sua emissão constitui um processo comum em núcleos de massa pequena ou intermediária, que possuem excesso de nêutrons ou de prótons em relação à estrutura estável correspondente.

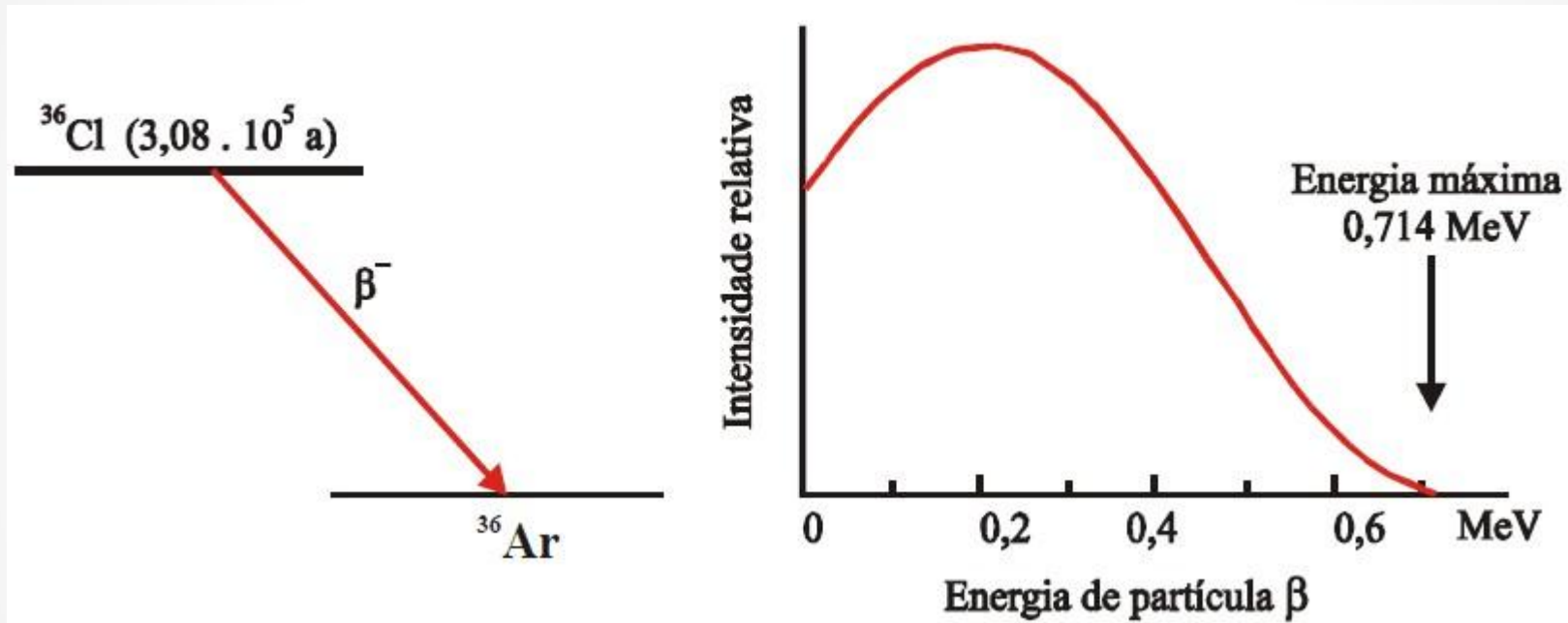


# Radiação $\beta^-$ e $\beta^+$



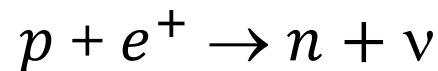
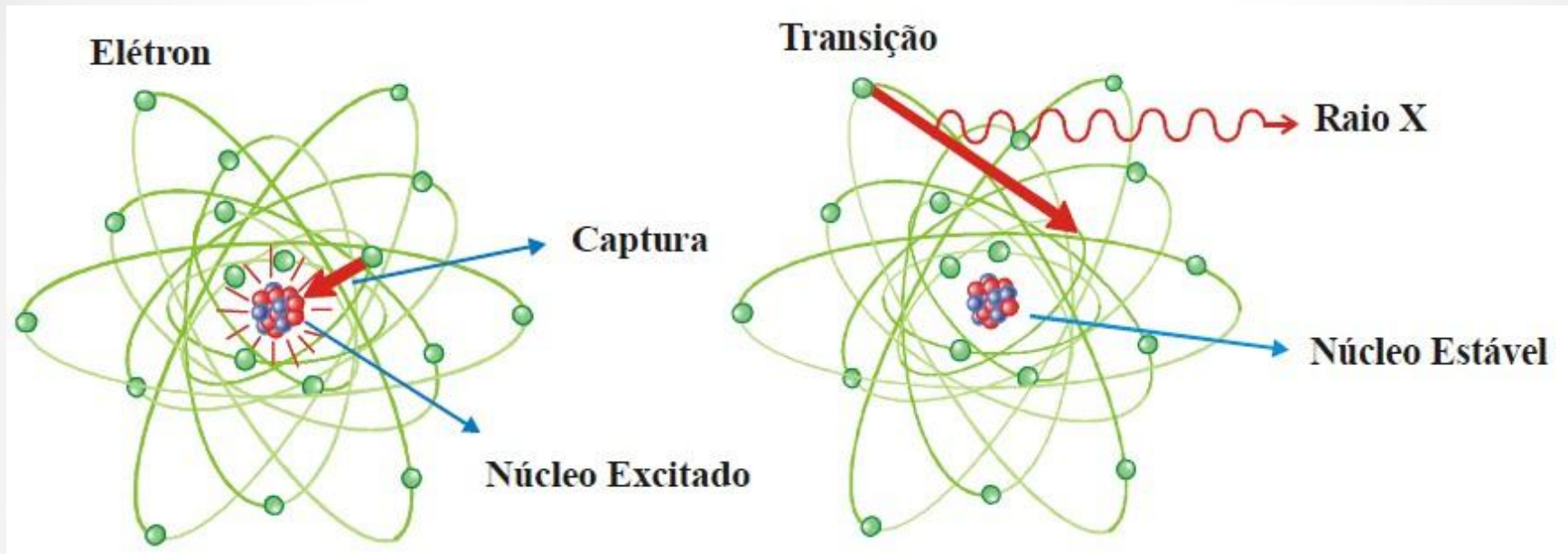
*A emissão beta (+) é sempre acompanhada por radiação de aniquilação. Os pósitrons sofrem interação com elétrons negativos (muito abundantes) produzindo: 2 fótons gama de 511 keV emitidos diametralmente opostos.*

# Radiação $\beta$



*Espectro da emissão de energia de um processo de emissão  $\beta$ .*

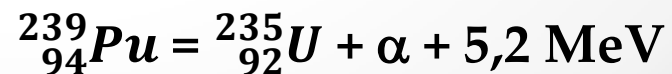
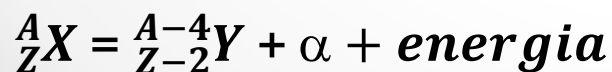
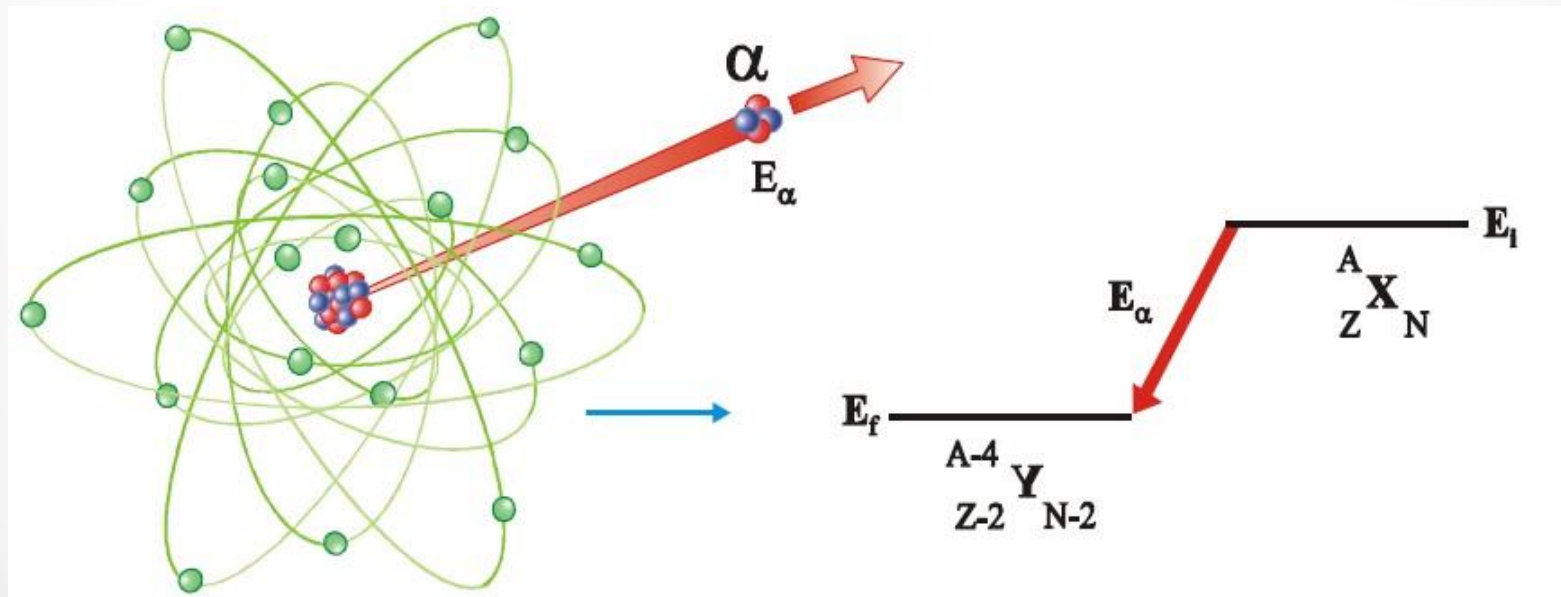
# Captura de elétrons



*Nesse caso não ocorre emissão da radiação nuclear, exceto a do neutrino. No entanto, a captura do elétron da camada interna da eletrosfera, cria uma vacância, que ao ser preenchida, provoca a emissão de raios X característicos.*

# Radiação $\alpha$

- Átomos pesados com número de prótons e nêutrons elevados podem emitir a partícula alfa (2 prótons e 2 nêutrons – 4 núcleons) e grande quantidade de energia a fim de alcançar uma posição de maior estabilidade nuclear.





# Constante de decaimento radioativo

- Alguns radionuclídeos permanecem instáveis por alguns segundos, minutos, horas, dias, meses, anos e séculos. Ou seja cada radionuclídeo possui seu próprio **tempo** para passar de um estágio instável para uma situação energética mais estável.
- Este tempo representa a **probabilidade** de que uma quantidade de radionuclídeos sofreram transformações ou irão decair, em busca de uma maior estabilidade energética, em um determinado instante.
- Esta probabilidade é denominada constante de decaimento do radionuclídeo.

# Lei do decaimento radioativo

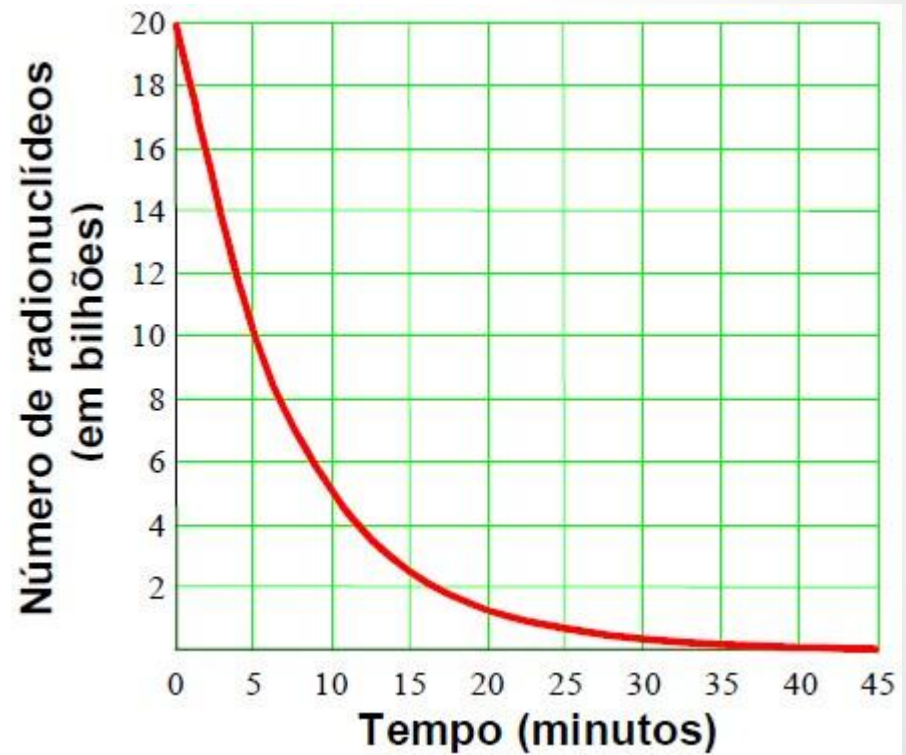
$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Onde,

$N(t)$  = número de átomos no instante  $t$ ;

$N_0$  = número inicial de átomos;

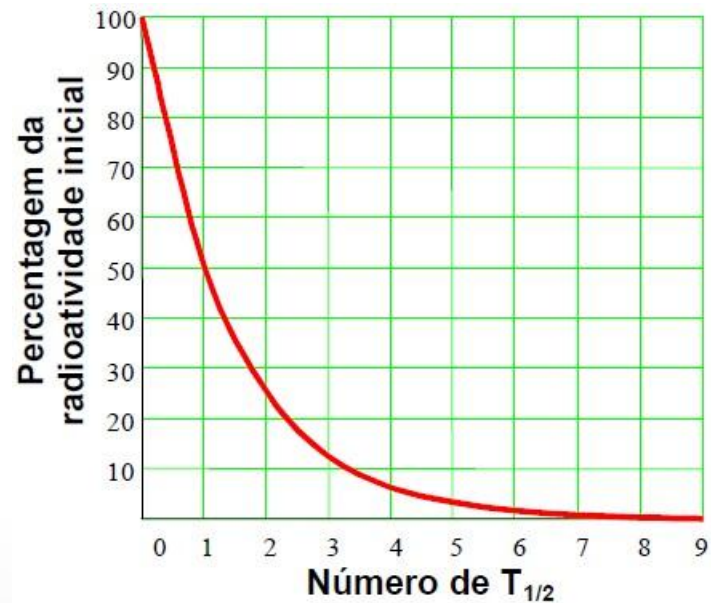
$\lambda$  = constante de decaimento.



# Meia Vida física

- A meia vida de um radioisótopo, abreviada  $T_{1/2}$ , é o tempo necessário, em que teremos no material radioativo exatamente a metade do número inicial de átomos excitados. Este tempo é característico de cada fonte radioativa.
- A relação entre a meia vida e a constante de decaimento  $\lambda$  é expressa por :

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$



# Atividade

- A *atividade* de um material radioativo é o **número de transformações nucleares por unidade de tempo**.

$$A = \frac{dN}{dt} \quad [s^{-1}] \qquad A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad [Bq]$$

- onde  $N$  é o número de núcleos radioativos contidos na amostra ou material. A unidade, Becquerel (Bq), corresponde a **uma transformação por segundo, ou  $s^{-1}$** .
- A unidade antiga, Curie (Ci) =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq, ou ainda 1 Ci = 37GBq.
- Meia vida ( $T_{1/2}$ ) é o tempo necessário para termos no material radioativo exatamente a metade do número inicial de átomos excitados.

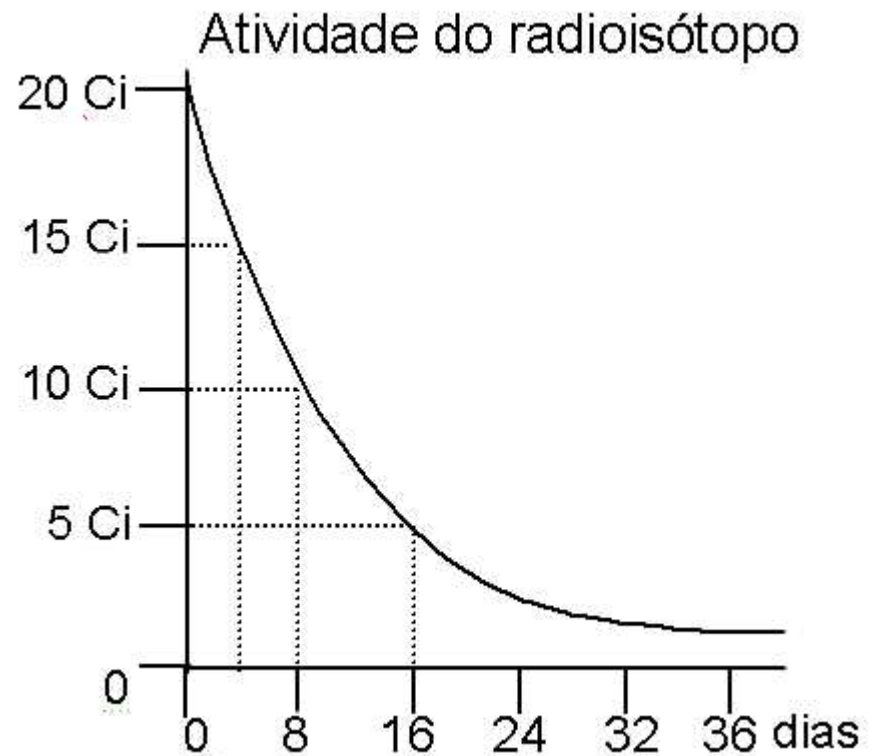
# Múltiplos e submúltiplos das unidades de atividade

| Múltiplos e símbolos |   |           |     |     |
|----------------------|---|-----------|-----|-----|
| Kilo                 | k | $10^3$    | kBq | kCi |
| Mega                 | M | $10^6$    | MBq | MCi |
| Giga                 | G | $10^9$    | GBq | GCi |
| Tera                 | T | $10^{12}$ | TBq | TCi |
| Peta                 | P | $10^{15}$ | PBq | PCi |

| Submúltiplos e símbolos |       |            |          |          |
|-------------------------|-------|------------|----------|----------|
| Mili                    | m     | $10^{-3}$  | mBq      | mCi      |
| Micro                   | $\mu$ | $10^{-6}$  | $\mu$ Bq | $\mu$ Ci |
| Nano                    | n     | $10^{-9}$  | nBq      | nCi      |
| Pico                    | p     | $10^{-12}$ | pBq      | pCi      |
| Femto                   | f     | $10^{-15}$ | fBq      | fCi      |

# Exemplo

- Você recebeu o gráfico ao lado que se refere ao decaimento de uma das três fontes radioativas da empresa em que você trabalha. No entanto, quem elaborou o gráfico se esqueceu de informar a que fonte se refere. Sabendo que as fontes radioativas e suas respectivas meias-vidas são  $^{198}\text{Au}$  ( $t_{1/2} = 60,2$  dias),  $^{131}\text{I}$  ( $t_{1/2} = 8,05$  dias) e  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  ( $t_{1/2} = 6$  horas), anote no gráfico o radioisótopo a que se refere. Explique ou demonstre como você chegou à conclusão.

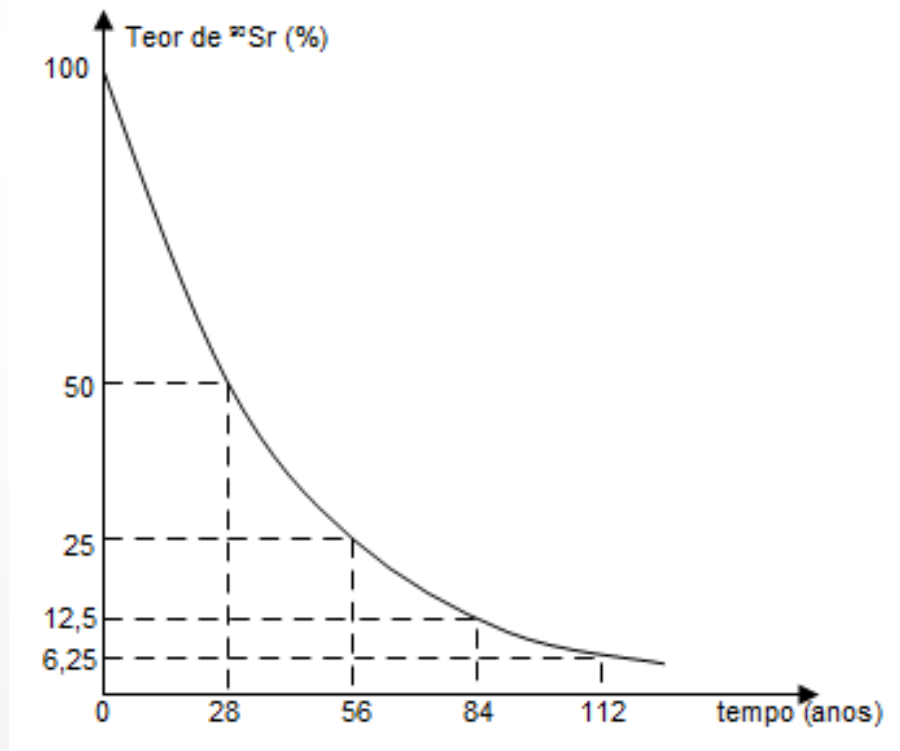


Resposta:  $^{131}\text{I}$



# Exemplo

- O gráfico abaixo ilustra a variação do teor de  $^{90}\text{Sr}$ , presente na amostra dessa substância. Pelo exame do gráfico, qual a meia-vida do  $^{90}\text{Sr}$  ?



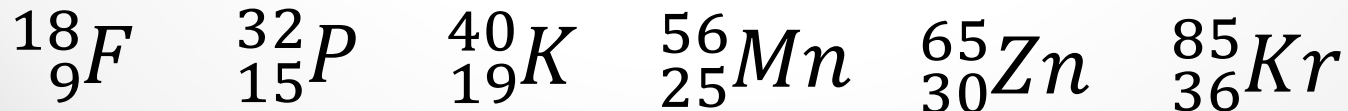
Resposta: **28 anos**

# Exercício

- Explique o processo de decaimento por emissão de radiação gama e a diferença dos raios X.
  - Ocorre quando núcleos ainda em estados excitados, emitem sua energia excedente sob a forma de radiação eletromagnética ionizante, denominada radiação gama ( $\gamma$ ). Ela se diferencia dos raios X quanto a sua origem, os raios gama são originários do núcleo do átomo e os raios X da eletrosfera dos átomos.
- Quando ocorre a emissão de uma partícula alfa ( $\alpha$ ) ou beta ( $\beta^-$  ou  $\beta^+$ ) o átomo original se transforma em outro elemento. Por que?
  - O número atômico ( $Z$ ) caracteriza o elemento químico quando ocorre a emissão de uma partícula alfa o elemento original perde 2 prótons e desta forma se transforma em outro elemento químico. Com a emissão das partículas  $\beta^-$  e  $\beta^+$  um nêutron se transforma em próton e um próton se transforma em nêutron alterando desta forma o ( $Z$ ) do átomo original, caracterizando sua transformação.

# Atividade campo AV1

1. Para um determinado ajuste de técnica radiográfica, a intensidade dos raios X a 2,3 m é de 350 mR. Qual a intensidade do feixe de raios X na blindagem a uma distância de 4,7 m, se o feixe útil for dirigido para a mesma?
2. Qual é a equivalência energética de um elétron (massa =  $1,673 \times 10^{-27}$  kg), medido em joules e em elétron-volt?
3. Quantos prótons, nêutrons, elétrons e núcleons são encontrados nos elementos abaixo?  $^{85}\text{Kr}_{36}$



# Atividade campo AV1

4. Qual a frequência associada a um fóton de radiação de micro-ondas que tem um comprimento de  $10^{-8}$  m?
5. Na mamografia, raios X com energia de 23 keV são usados. Qual a frequência dessa radiação?
6. A intensidade de saída de um sistema de imagens radiográficas normal é de 3,4mR/mAs a 150 cm. Qual é a intensidade de saída de tal sistema a 350 cm?
7. Qual a frequência de um fóton de raios X com energia de 77 keV?
8. A estação de rádio KYZ8-FM transmite em uma frequência de 97,65 MHz. Qual o comprimento de onda desta radiação?
9. Explique a formação dos raios X de frenagem (***bremsstrahlung***) e dos raios X característicos.

# Atividade campo AV1

10. Desenhe o espectro de emissão dos raios X de um equipamento operado em 65kVp, cujo o tubo tenha alvo de tungstênio.
11. Qual o comprimento de onda mínimo associado aos raios X emitidos por um tubo operado a 97 kVp?
12. Uma radiação X de 83 KeV interage por efeito fotoelétrico com um átomo da camada K de carbono e um átomo de bário. Qual a energia cinética de cada fotoelétron?
13. Uma radiação X de 77 KeV ioniza um átomo de bário ejetando um elétron da camada N com 12 keV de energia cinética. Qual a energia da radiação X espalhada?
  - a energia de ligação da camada N do bário é 0,3 keV

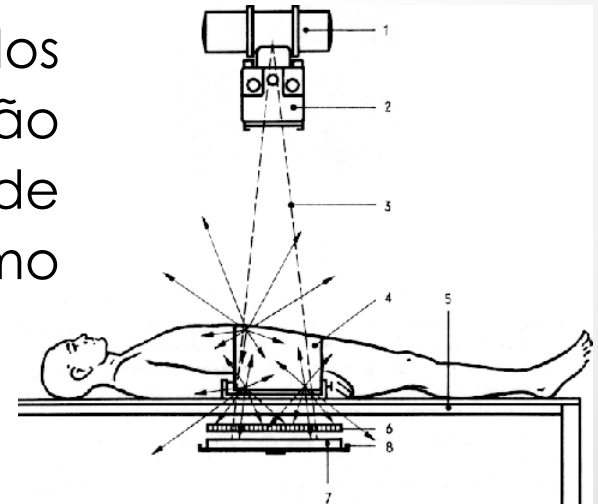
# Atividade campo AV1

14. Explique o processo de decaimento por emissão de radiação  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  e  $\alpha$ .
15. A meia-vida do tório-234 é de 24 dias. Uma amostra contém 8,0 g de tório-234. Após quantos dias a amostra irá conter apenas 2 g de tório-234? Justifique.
- a) 24 dias
  - b) 72 dias
  - c) 96 dias
  - d) 48 dias



# Grandezas radiológicas e unidades

- Desde que surgiram as primeiras preocupações com a possibilidade das radiações ionizantes induzirem detrimientos à saúde humana, apareceram os métodos de produção, caracterização e medição da radiação, bem como de definição de grandezas que expressassem com realismo a sua interação com o tecido humano.



# Grandeza: Exposição (X)

- Exposição (X):
  - É o quociente entre **dQ** por **dm**, onde **dQ** é o valor absoluto da carga total de íons de um dado sinal, produzidos no ar, quando todos os elétrons (negativos e positivos) liberados pelos fótons no ar, em uma massa **dm**, são completamente freados no ar.

$$X = \frac{dQ}{dm} [C.kg^{-1}]$$

- Esta grandeza só pode ser definida para o ar e para fótons X ou gama.
- A unidade especial da grandeza Exposição é Röentgen (R) que é relacionado com a unidade do SI por:  $1 R = 2,58 \times 10^{-4} [C.kg^{-1}]$

# Grandeza: Dose absorvida (D)

- Dose absorvida (D):
  - é a energia média ( $dE$ ) depositada pela radiação ionizante na matéria de massa  $dm$ , num ponto de interesse.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad [J/kg \text{ ou } Gy]$$

- Essa grandeza vale para qualquer meio, para qualquer tipo de radiação e qualquer geometria de irradiação.
- A unidade especial da grandeza dose absorvida é o rad (*radiation absorbed dose*) que é relacionado com a unidade do SI por:  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ J/kg}$

# Grandeza: Kerma (K)

- Kerma (K):

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad [J/kg \text{ ou } Gy]$$

- É o quociente  $dE_{tr}$  por  $dm$ , onde  $dE_{tr}$  é a soma de todas as energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas por partículas neutras ou fótons, incidentes em um material de massa  $dm$ .
- A grandeza kerma ocorre no ponto de interação do fóton e a dose absorvida ocorre ao longo da trajetória do elétron.

# Kerma (K) x Dose absorvida (D)

- A dose absorvida depende da energia média absorvida na região de interação (local) e o kerma, depende da energia total transferida ao material.
- Isto significa que, do valor de energia transferido na interação radiação com a matéria, uma parte é dissipada por radiação de frenagem, outra sob forma de luz ou raios X característicos.

# Relação entre a exposição (X) e a atividade (A) de uma fonte gama

- A Taxa de Exposição pode ser associada à atividade gama de uma fonte, pela expressão:

$$X = \Gamma \cdot \frac{A \cdot t}{d^2}$$

- $\Gamma$  = constante de exposição de uma fonte pontual (Gamão);
- A = atividade da fonte radioativa;
- t = tempo de exposição;
- d = distância até a fonte.



# Exemplo

- Uma fonte de Ir-192 com atividade de 24 Ci será utilizada na realização de END para a aferição de juntas soldadas a uma distância de 2 m . Qual a taxa de exposição em 1h? (Sabendo que para o Ir-192:  $\Gamma = 0,48 \text{ R.m}^2/\text{h.Ci}$ )

$$X = \Gamma \cdot \frac{A \cdot t}{d^2}$$

$$X = 0,48 \cdot \frac{24 \cdot (1)}{(2)^2}$$

$$X = 2,88 \text{ R/h}$$

# Exemplo

- Um tecnólogo entrou numa sala de irradiação e não percebeu que uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$  com atividade de 0,5 Ci estava exposta. Foi estimado que o tecnólogo permaneceu a 3 m da fonte durante 10 minutos. Qual o valor da exposição na entrada da pele do tecnólogo.

(Sabendo que para o Ir-192:  $\Gamma = 0,33 \text{ R.m}^2/\text{h.Ci}$ )

$$X = \Gamma \cdot \frac{A \cdot t}{d^2} \qquad X = 0,33 \cdot \frac{0,5 \cdot (10/60)}{(3)^2}$$

$$X = 3,06 \times 10^{-3} \text{ R/h} \qquad \text{ou} \qquad X = 3,06 \text{ mR/h}$$

# Exercício

1. Uma fonte de Ir-192 com atividade de 13 Ci será utilizada na realização de END para a aferição de juntas soldadas a uma distância de 1,6 m . Qual a taxa de exposição em 1 h?  
(Sabendo que para o Ir-192:  $\Gamma = 0,48 \text{ R.m}^2/\text{h.Ci}$ )
2. Um tecnólogo entrou numa sala de irradiação e não percebeu que uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$  com atividade de 0,7 Ci estava exposta. Foi estimado que o tecnólogo permaneceu a 3,4 m da fonte durante 10 minutos. Qual o valor da exposição na entrada da pele do tecnólogo.

(Sabendo que para o Ir-192:  $\Gamma = 0,33 \text{ R.m}^2/\text{h.Ci}$ )

# Exercício - resposta

1.

$$X = \Gamma \cdot \frac{A \cdot t}{d^2} \quad X = 0,48 \cdot \frac{13 \cdot (1)}{(1,6)^2} \quad X = 2,44 \text{ R/h}$$

2.

$$X = \Gamma \cdot \frac{A \cdot t}{d^2} \quad X = 0,33 \cdot \frac{0,7 \cdot (10/60)}{(3,4)^2}$$

$$X = 3,33 \times 10^{-3} \text{ R/h} \quad \text{ou} \quad X = 3,33 \text{ mR/h}$$

# Relação entre Exposição e Dose Absorvida no ar

- Sob condições de equilíbrio eletrônico (CPE), a Exposição  $X$ , medida no ar, se relaciona com a Dose Absorvida no ar, pela expressão:

$$D_{ar} = X \cdot (w/e)_{ar}$$

- Onde  $(w/e)_{ar}$  é a energia média para formação de um par de íons no ar dividida pela carga do elétron:
  - No SI = 33,97 J/C
  - Quando exposição dada em Röentgen (R) =  $0,876 \text{ rad/R}$ .

# Exemplo

- A medição de uma fonte radioativa apresenta uma taxa de exposição de 23 mR/h. Qual o valor da taxa de dose em rad e no sistema internacional de unidades (SI)?

$$D_{ar} = X \cdot (W/e)_{ar} \quad D_{ar} = 23 \times 10^{-3} \cdot 0,876 = 0,0201 \text{ rad}$$

$$D_{ar} = \frac{0,0201}{100} = 2,01 \times 10^{-4} \text{ Gy}$$

# Exemplo

- A medição de uma fonte radioativa apresenta uma taxa de exposição de  $2,58 \times 10^{-4} \text{ C.kg}^{-1}$ . Qual o valor da taxa de dose no sistema internacional de unidades (SI)?

$$D_{ar} = X \cdot (W/e)_{ar}$$

$$D_{ar} = 2,58 \times 10^{-4} \cdot 33,97 = 8,76 \times 10^{-3} \text{ Gy}$$



# Grandeza: Dose equivalente ( $H_T$ )

- Dose equivalente ( $H_T$ ):
  - É o valor médio da dose absorvida  $D_{T,R}$  num tecido ou órgão T, obtido sobre todo o tecido ou órgão T, devido à radiação R:
$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad [Sv \text{ ou } J \cdot kg^{-1}]$$
  - onde  $w_R$  é o fator de peso de cada radiação R que permite converter a dose absorvida  $D_{T,R}$  no tecido T, em dose equivalente no tecido T, devido à radiação do tipo R.
  - A unidade especial da grandeza dose equivalente é o rem (*röntgen equivament man*) que é relacionado com a unidade do SI por:  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} = 1 \text{ J/kg}$

# Fatores de ponderação da radiação:

## ICRP-60 (1990) e ICRP-103 (2007)

- A ICRP escolheu os valores de  $w_R$  para cada tipo de partícula e energia como representativos dos valores de efetividade biológica (RBE – *relative biological effectiveness*) da radiação em induzir efeitos estocásticos da radiação (indução de câncer e de efeitos hereditários).

| Tipos de radiação e intervalos de energia                                                         | $w_R$ (ICRP-60)          | $w_R$ (ICRP-103)                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Fótons de todas as energias                                                                       | 1                        | 1                                     |
| Elétrons e múons de todas as energias                                                             | 1                        | 1                                     |
| Nêutrons com energias:<br>< 10keV<br>10 – 100 keV<br>>100keV a 2 MeV<br>>2 MeV a 20 MeV<br>>20MeV | 5<br>10<br>20<br>10<br>5 | Função contínua da energia do nêutron |
| Prótons                                                                                           | 5                        | 2 (prótons e pions)                   |
| Partículas alfa, elementos de fissão, núcleos pesados                                             | 20                       | 20                                    |

# Exemplo

- Um grupo de IOE foi exposto a um campo de raios X resultando em uma dose absorvida de 2,5 mGy. O mesmo grupo de IOE também foi exposto a uma fonte emissora de partículas alfa resultando em uma dose absorvida de 2,5 mGy, responda (unidades do SI):
  - Quais os valores de dose equivalente em função do campo de raios X e da fonte emissora de partícula alfa?
  - Caso os valores do item anterior forem diferentes, explique por que.

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

Raios X:

$$H_T = 1 \cdot 2,5 \times 10^{-3} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ Gy} = 2,5 \text{ mGy}$$

Partículas alfa:

$$H_T = 20 \cdot 2,5 \times 10^{-3} = 0,05 \text{ Gy} = 50 \text{ mGy}$$

# Grandeza: Dose efetiva (E)

- Dose efetiva (E):

- É a soma ponderada das doses equivalentes em todos os tecidos ou órgãos do corpo. Onde  $w_T$  é o fator de peso para o tecido T e  $H_T$  é a dose equivalente a ele atribuída.

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad [Sv \text{ ou } J \cdot kg^{-1}]$$

- Os fatores de ponderação de tecido ou órgão  $w_T$  são relacionados com a sensibilidade de um dado tecido ou órgão à radiação, no que concerne à indução de câncer e a efeitos hereditários

# Fatores de ponderação de tecidos: ICRP-26 (77), ICRP-60 (90) e ICRP-103(07)

| Tecido ou órgão     | w <sub>T</sub> (1977) | w <sub>T</sub> (1990) | w <sub>T</sub> (2007) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Gônadas             | 0,25                  | 0,20                  | 0,08                  |
| Medula óssea        | 0,12                  | 0,12                  | 0,12                  |
| Cólon               | -                     | 0,12                  | 0,12                  |
| Pulmão              | 0,12                  | 0,12                  | 0,12                  |
| Estômago            | -                     | 0,12                  | 0,12                  |
| Mama                | 0,15                  | 0,05                  | 0,12                  |
| Bexiga              | -                     | 0,05                  | 0,04                  |
| Esôfago             | -                     | 0,05                  | 0,04                  |
| Fígado              | -                     | 0,05                  | 0,04                  |
| Tireoide            | 0,03                  | 0,05                  | 0,04                  |
| Superfície do osso  | 0,03                  | 0,01                  | 0,01                  |
| Cérebro             | -                     | -                     | 0,01                  |
| Glândulas salivares | -                     | -                     | 0,01                  |
| Pele                | -                     | 0,01                  | 0,01                  |
| Restante            | 0,30                  | 0,05                  | 0,12                  |
| <b>Soma total</b>   | <b>1,00</b>           | <b>1,00</b>           | <b>1,00</b>           |

# Exercício

- Suponha que uma pessoa seja exposta, a um campo homogêneo de raios X com uma exposição total de 1,3 R, responda (unidades do SI):

I. Qual o valor da dose absorvida?

II. Qual o valor da dose equivalente?

III. Qual o valor da dose efetiva? (irradiação do corpo inteiro  $w_T = 1$ )

$$D_{ar} = X \cdot (W/e)_{ar} \quad D_{ar} = 1,3 \cdot 0,876 = 1,14 \text{ rad} \quad D_{ar} = \frac{1,14}{100} = 0,0114 \text{ Gy}$$

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad H_T = 1 \cdot 0,0114 = 0,0114 \text{ Sv}$$

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad E = 1 \cdot 0,0114 = 0,0114 \text{ Sv}$$

# Radioproteção

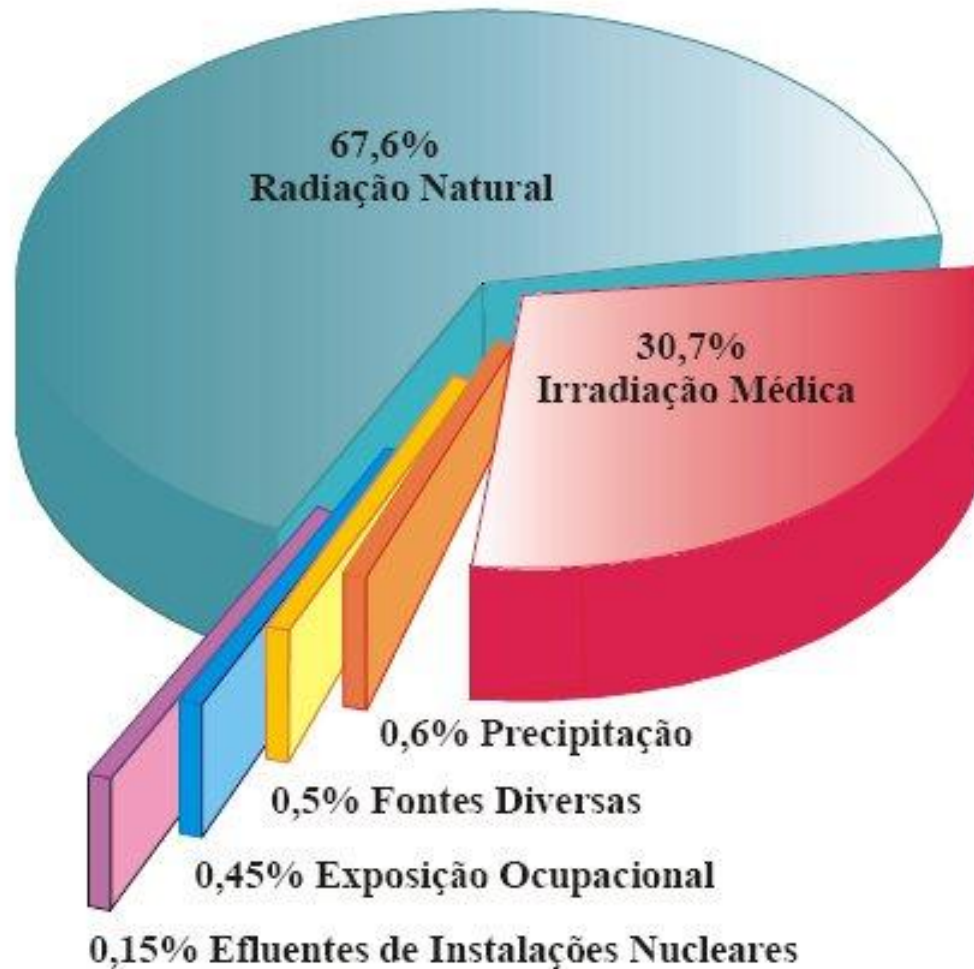
- Conjunto de medidas que visam proteger o homem, seus descendentes e seu meio ambiente contra possíveis efeitos indevidos causados por radiação ionizante proveniente de fontes produzidas pelo homem e fontes naturais modificadas tecnologicamente.
- Objetivos:
  - Minimizar os riscos de efeitos biológicos no ser humano
  - Limitar dose em atividades profissionais
  - Diminuir a probabilidade de efeitos de longo prazo (câncer, efeitos genéticos, etc.)



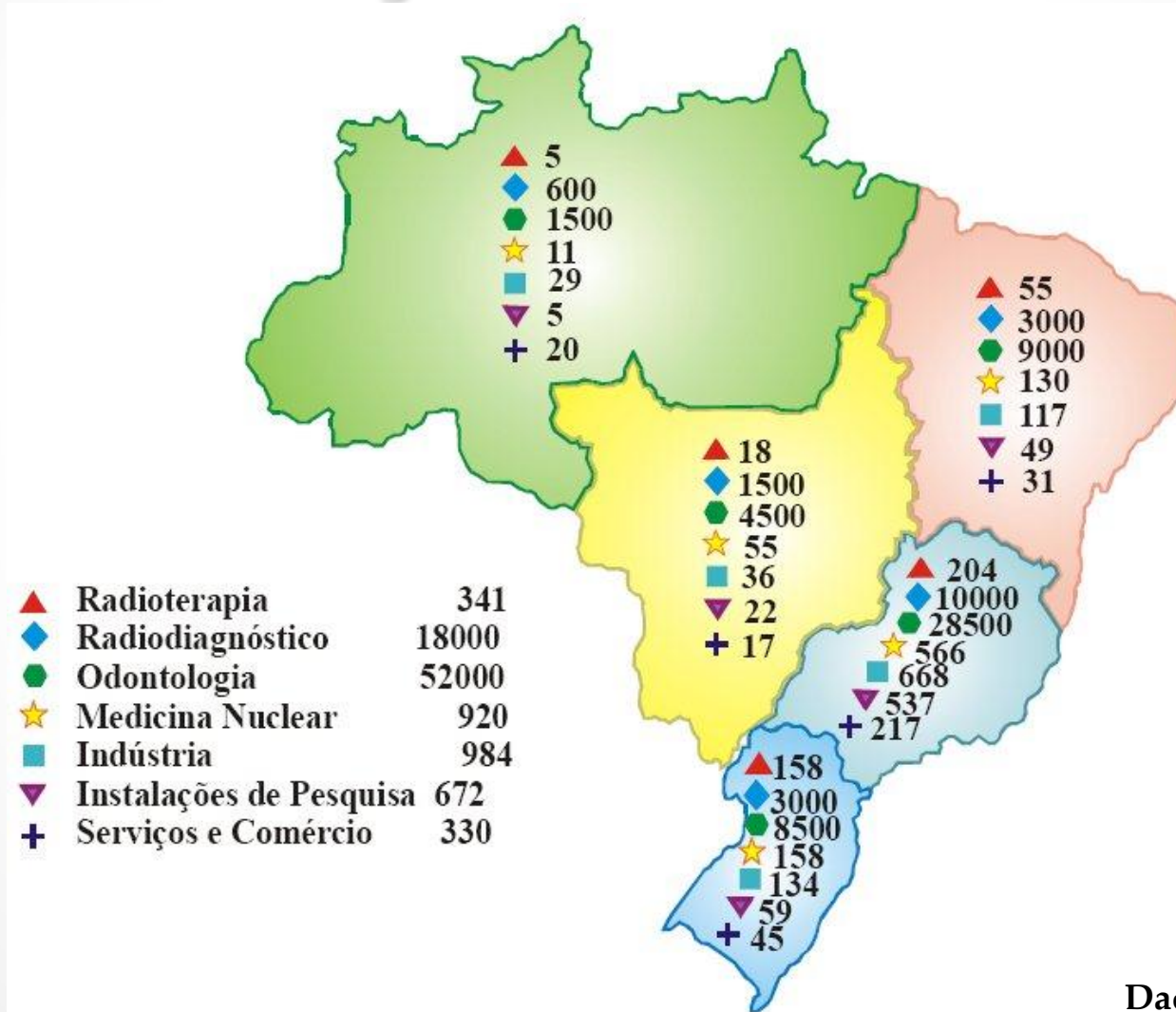
# Legislação sobre radioproteção

- Normas CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear):
  - NN-3.01: Diretrizes básicas de radioproteção
  - NE-3.02: Serviços de radioproteção
  - NN-3.03: Certificação da qualidade de supervisores de radioproteção
  - NN-3.05: Requisitos de radioproteção e segurança para serviços de medicina nuclear
  - NE-3.06: Requisitos de radioproteção e segurança para serviços de radioterapia
- Portaria 453/98 ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária)

# Exposição do homem a radiação ionizante



# Serviços com fonte de radiação ionizante



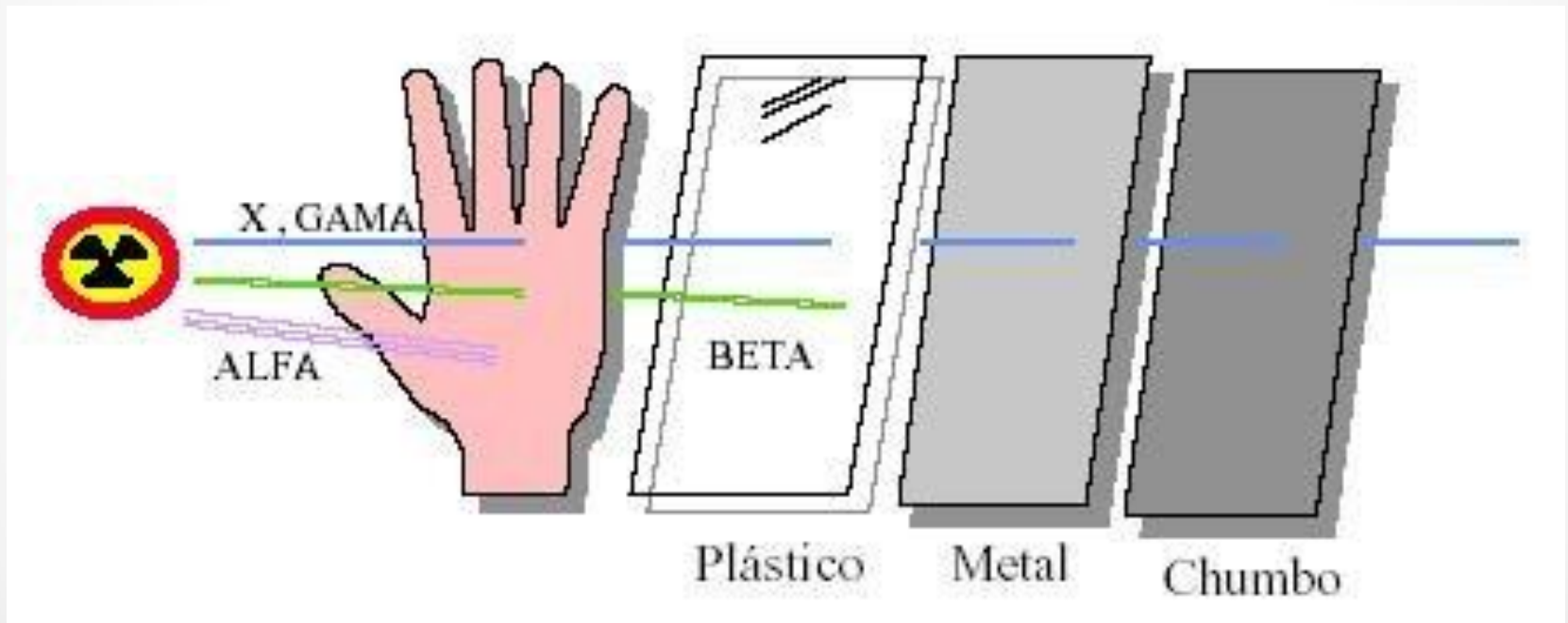
# Conceitos fundamentais de radioproteção

- **Radiação diretamente ionizante:** radiações que possuem carga elétrica (partículas alfa e beta), atuam principalmente por meio de seu campo elétrico e transferem sua energia para muitos átomos ao mesmo tempo.
- **Radiação indiretamente ionizante:** radiações que não tem carga elétrica (fótons de raios X e gama), interagem individualmente com elétrons transferindo sua energia e produzindo ionizações.

# Conceitos fundamentais de radioproteção

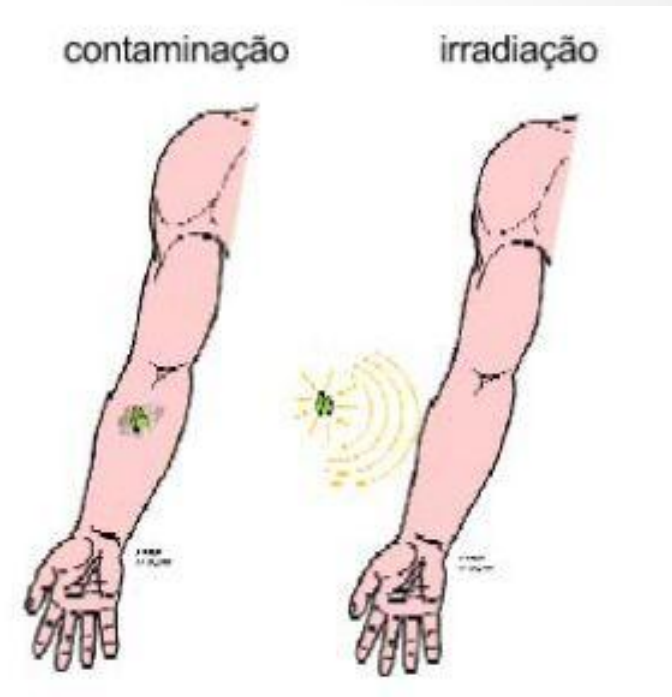
- Poder de ionização e penetração das radiações
  - **Partícula alfa ( $\alpha$ ):**
    - alto poder de ionização e baixo poder de penetração;
  - **Partícula beta ( $\beta$ ):**
    - alto poder de ionização (menor que  $\alpha$ ) e baixo poder de penetração (maior que  $\alpha$ );
  - **Fótons gama ( $\gamma$ ):**
    - baixo poder de ionização e alto poder de penetração;
  - Fótons de raios X:
    - baixo poder de ionização e alto poder de penetração.

# Conceitos fundamentais de radioproteção



# Conceitos fundamentais de radioproteção

- A contaminação se caracteriza pela presença de um material indesejável em determinado local.
- A irradiação é a exposição de um objeto ou de um corpo à radiação ionizante.
- Pode haver irradiação sem existir contaminação.
- ***Irradiação não contamina, mas contaminação irradia.***





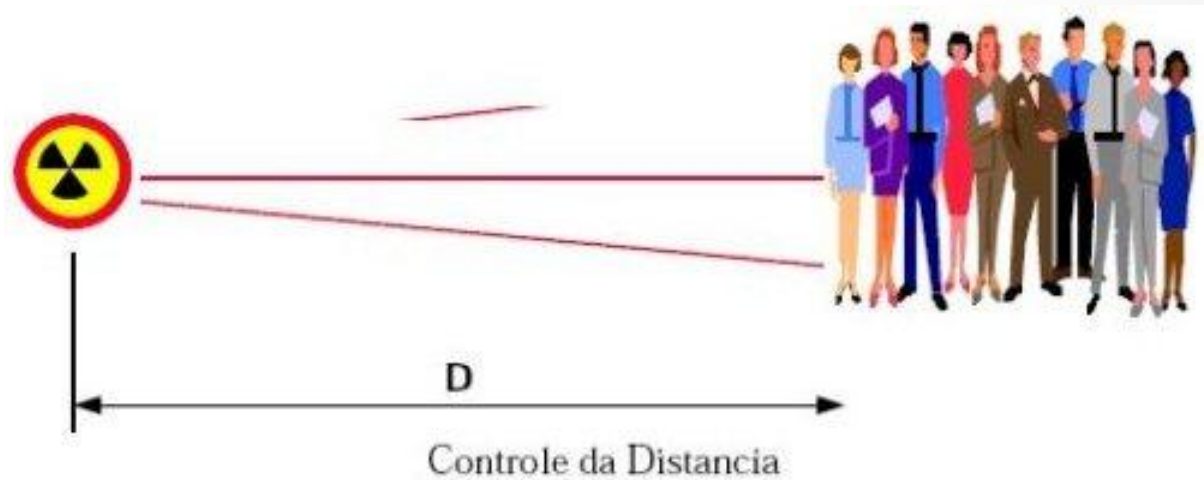
# Conceitos fundamentais de radioproteção

⌘ *Tempo*

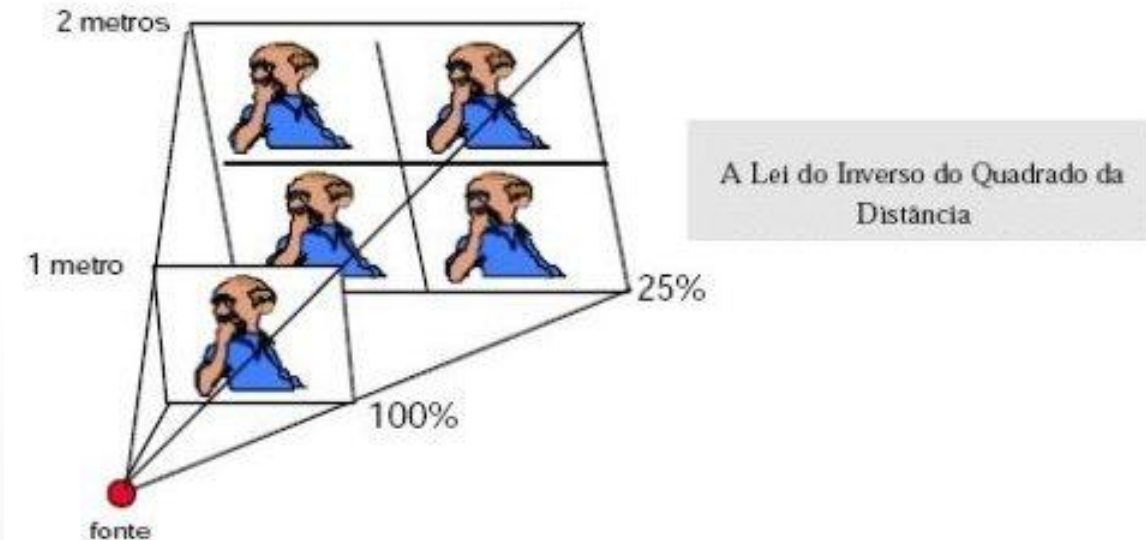


Controle do Tempo de Exposição

# Conceitos fundamentais de radioproteção

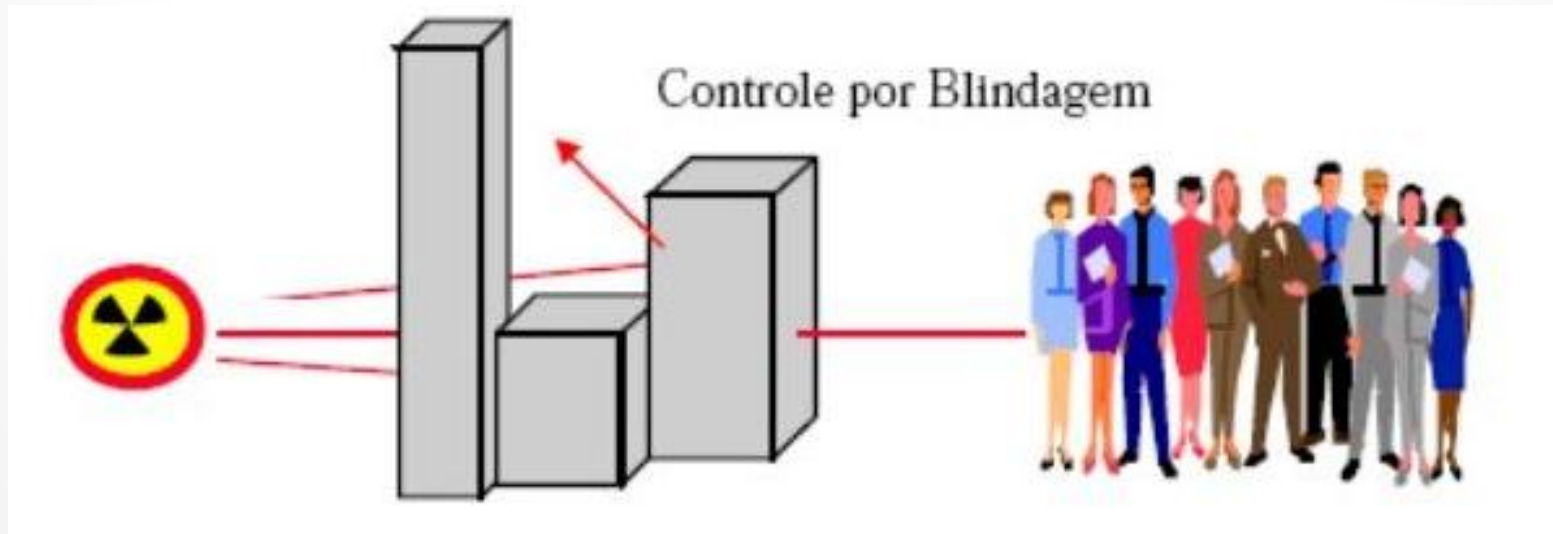


## ☼ **Distância**

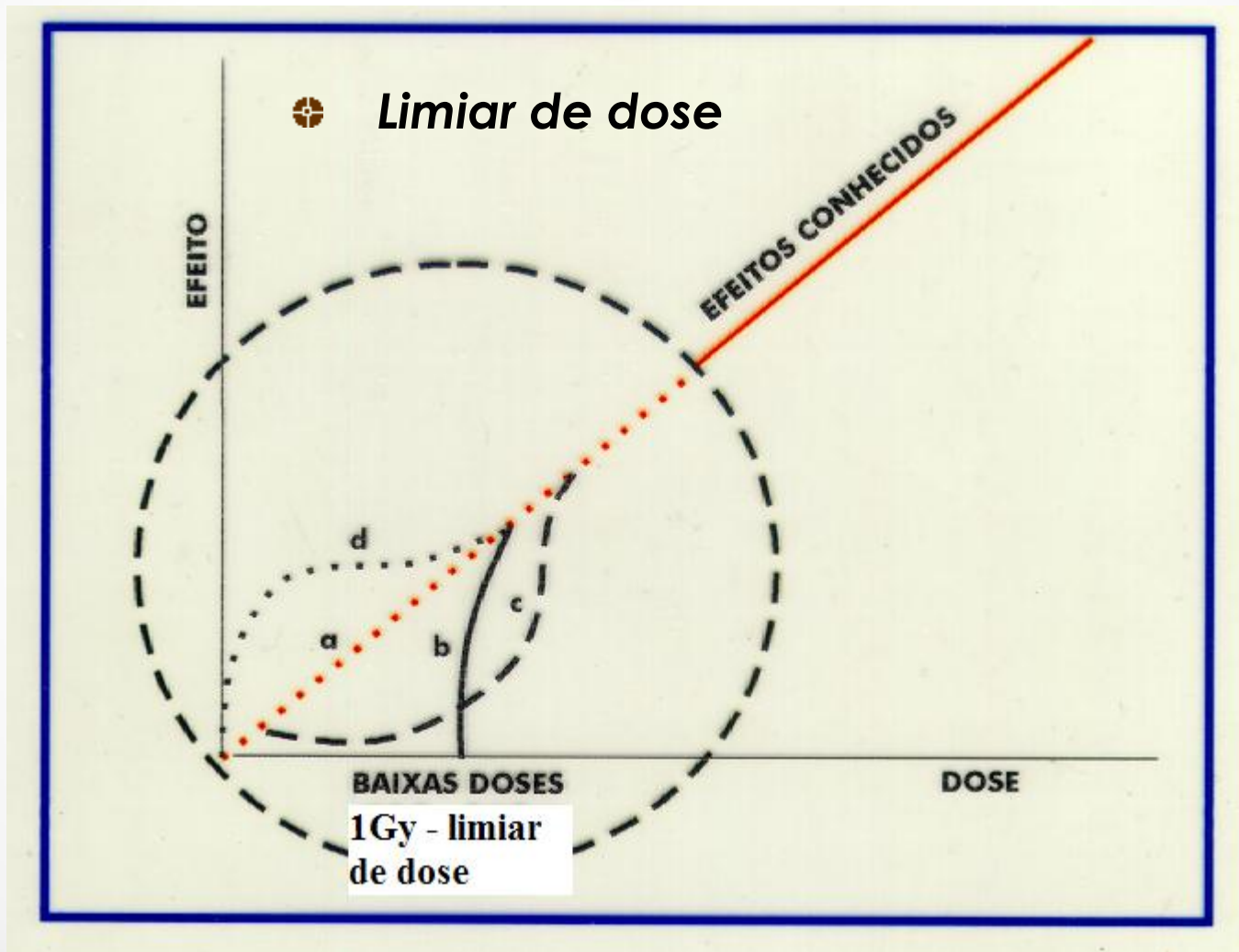


# Conceitos fundamentais de radioproteção

## ☼ *Blindagem*



# Conceitos fundamentais de radioproteção



# Conceitos fundamentais de radioproteção

- Relação dose x efeito:
  - Efeitos estocásticos:
    - São efeitos em que a **probabilidade de ocorrência** é proporcional à dose de radiação recebida, **sem** a existência de **limiar**. Isto significa, que doses pequenas, abaixo dos limites estabelecidos por normas e recomendações de radioproteção, podem induzir tais efeitos.
  - Efeitos determinístico:
    - São efeitos causados por irradiação total ou localizada de um tecido, causando um grau de morte celular não compensado pela reposição ou reparo, com prejuízos detectáveis no funcionamento do tecido ou órgão. **Existe** um **limiar** de dose. A probabilidade de **efeito determinístico** é **nula** para valores de dose **abaixo** do **limiar** e, e **100%, acima**.

| DOSE ABSORVIDA (Gy) | SINTOMATOLOGIA                                                                                                                                    |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| >4                  | Epilação temporária.                                                                                                                              |
| 16 a 20             | Epilação definitiva.                                                                                                                              |
| 6 a 12              | Radiodermite eritematosa que se manifesta oito dias após a exposição por dor e vermelhidão; freqüentemente substituída por pigmentação acentuada. |
| 16 a 20             | Radiodermite exudativa (bolhas, lesões) que regride em 5 ou 6 semanas.                                                                            |
| 25                  | Radiodermite e radionecrose que se manifesta por um eritema precoce, dor e exudação; o processo evolui para uma ulceração do tecido.              |
| 2                   | Catarata: quanto maior a dose, maior a velocidade do estabelecimento do processo; conjuntivite aguda de pouca gravidade.                          |
| 0,3                 | Esterilidade temporária do homem.                                                                                                                 |
| 5                   | Esterilidade definitiva do homem.                                                                                                                 |
| 3                   | Esterilidade temporária da mulher.                                                                                                                |
| 6-8                 | Esterilidade definitiva da mulher.                                                                                                                |

## Exemplo de efeitos determinísticos



# Princípios de radioproteção

- Justificação da prática  
(exposições médicas e industriais)
- Otimização da proteção radiológica
- Limitação da dose individual



# Princípios de radioproteção

- Justificação da prática  
(exposições médicas e industriais)
  - **Nenhuma** prática ou fonte adscrita a uma prática deve ser autorizada **a menos** que **produza** suficiente **benefício** para o indivíduo exposto ou para a sociedade, de modo a compensar o detrimento que possa ser causado.

# Princípios de radioproteção

- Otimização da proteção radiológica
  - Estabelece que as instalações e as práticas devem ser planejadas, implantadas e executadas de modo que a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de exposições acidentais sejam **tão baixos quanto razoavelmente exequíveis**, levando-se em conta fatores sociais e econômicos, além das **restrições de dose** aplicáveis.

# Princípios de radioproteção

- Limitação da dose individual
  - Os limites de doses individuais são valores de **dose efetiva** ou de **dose equivalente** nos órgãos ou tecidos de interesse, estabelecidos para **exposição ocupacional** e **exposição do público** decorrentes de **práticas autorizadas**, cujas magnitudes não devem ser excedidas.

# CNEN NN-3.01

## Limitação de dose individual

| Limites de Dose Anuais [a] |               |                                           |                             |
|----------------------------|---------------|-------------------------------------------|-----------------------------|
| Grandeza                   | Órgão         | <i>Indivíduo ocupacionalmente exposto</i> | <i>Indivíduo do público</i> |
| <i>Dose efetiva</i>        | Corpo inteiro | 20 mSv [b]                                | 1 mSv [c]                   |
| <i>Dose equivalente</i>    | Cristalino    | 150 mSv                                   | 15 mSv                      |
|                            | Pele [d]      | 500 mSv                                   | 50 mSv                      |
|                            | Mãos e pés    | 500 mSv                                   | ---                         |

[a] Para fins de *controle administrativo* efetuado pela CNEN, o termo *dose* anual deve ser considerado como *dose* no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano.

[b] Média ponderada em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

[c] Em circunstâncias especiais, a CNEN poderá autorizar um valor de *dose efetiva* de até 5 mSv em um ano, desde que a *dose efetiva* média em um período de 5 anos consecutivos, não exceda a 1 mSv por ano.

[d] Valor médio em 1 cm<sup>2</sup> de área, na região mais irradiada.

# Portaria 453/98 Limitação de Dose individual - ocupacional

| Intervalo de tempo anual | IOE (mSv) | Público (mSv) | Estudante (16 a 18 anos) (mSv) |
|--------------------------|-----------|---------------|--------------------------------|
| Limite *                 | 50        | 1             | 6                              |
| Média*                   | 20        | ---           | ---                            |
| Cristalino**             | 150       | ---           | 50                             |
| Extremidades**           | 500       | ---           | 15                             |

\* *Dose efetiva*

\*\* *Dose equivalente*

**Mulheres grávidas:** titular do serviço deve ser notificado imediatamente e dose no abdome não deve exceder a 2 mSv por toda a gestação.

**Menores de 18** anos não podem trabalhar com raios X diagnósticos, exceto em treinamentos.

# CNEN NN-3.01

## Limitação de dose individual

- Os valores de *dose efetiva* se aplicam à soma das *doses efetivas*, causadas por exposições externas, com as *doses efetivas comprometidas* (integradas em 50 anos para adultos e até a idade de 70 anos para crianças), causadas por incorporações ocorridas no mesmo ano.
- Para mulheres grávidas ocupacionalmente expostas, suas tarefas devem ser controladas de maneira que seja improvável que, a partir da notificação da gravidez, o feto receba *dose efetiva* superior a 1 mSv durante o resto do período de gestação.
- Indivíduos com idade inferior a 18 anos não podem estar sujeitos a *exposições ocupacionais*.
- Os limites de dose estabelecidos não se aplicam a *exposições médicas* de acompanhantes e voluntários que eventualmente assistem pacientes. As doses devem ser restritas de forma que seja improvável que algum desses acompanhantes ou voluntários receba mais de 5 mSv durante o período de exame diagnóstico ou tratamento do paciente. A dose para crianças em visita a pacientes em que foram administrados materiais radioativos deve ser restrita de forma que seja improvável exceder a 1 mSv.

# Informações para cálculo de níveis ação (limites derivados)

- **Níveis de ação** são valores de taxa de dose ou de concentração de atividade, estabelecidos com base em *modelo de exposição realista da situação*, acima dos quais devem ser adotadas ações protetoras ou remediadoras em situações de emergência ou de exposição crônica, de modo que sua adoção implique em certeza da observância dos níveis de intervenção correspondentes (Norma CNEN NN-301).
- As **doses** recebidas por um **IOE** são analisadas levando em conta uma jornada de trabalho de **50 semanas/ano** e uma semana de **40 horas/semanais**. Somente em situações definidas na legislação (Ex.: radiodiagnóstico) aplica-se a jornada de 24 horas/semanais.



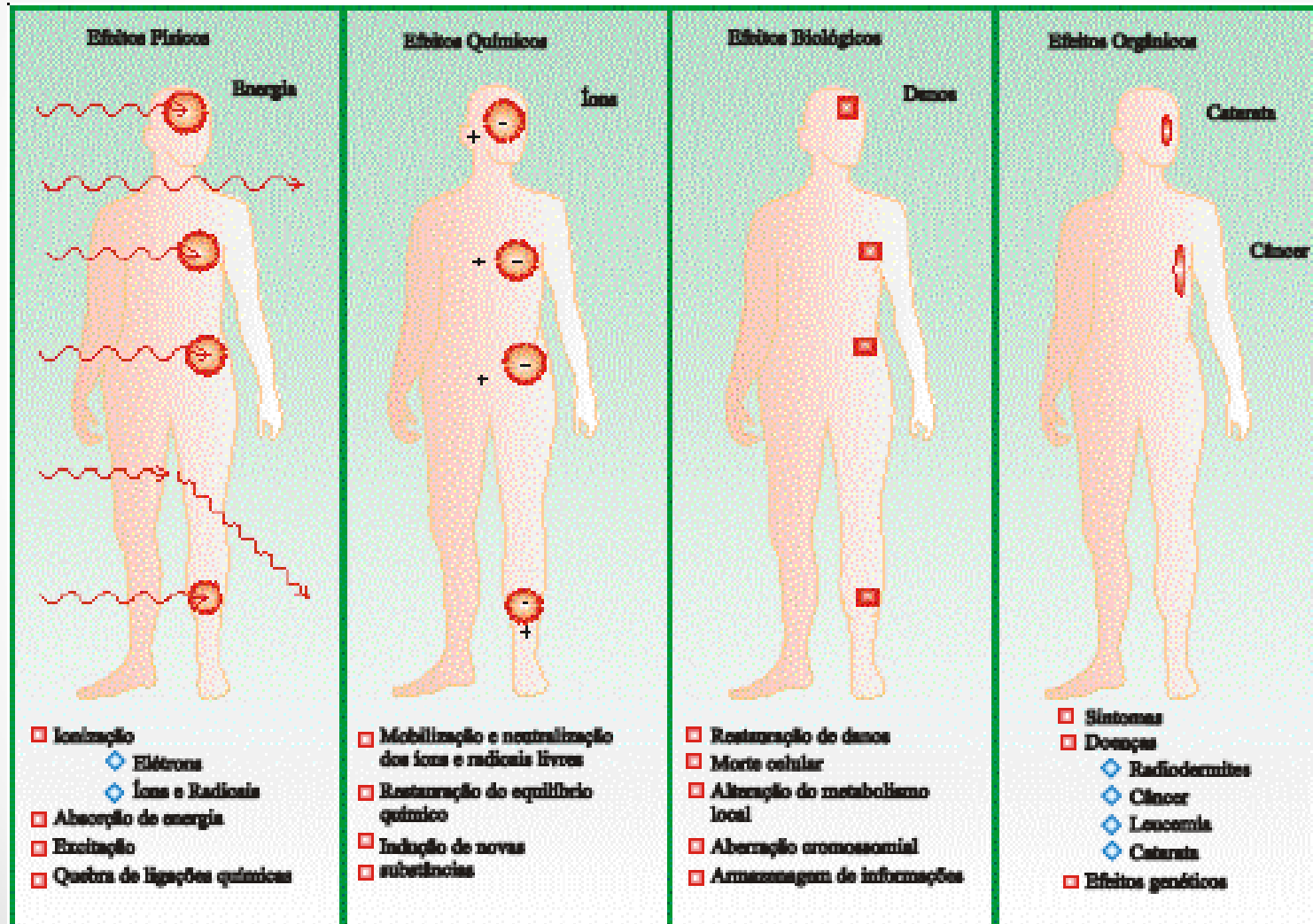
# Exercício

1. Com base nas informações para cálculo de níveis de ação (limites derivados) apresentados no slide 127, responda: **(consultar também slides 123 e 124)**
  - a) Qual o valor máximo de dose semanal para que em 1 ano um IOE não exceda seu limite de dose?
  - b) Quantas horas um IOE pode trabalhar por ano, respeitando a legislação?
  - c) Qual o valor máximo de dose por hora para que em 1 ano um IOE não exceda seu limite de dose?
  - d) Qual o valor de dose semanal para que em 1 ano um IOE não exceda o valor médio de dose anual recomendado?
  - e) Qual o valor de dose por hora para que em 1 ano um IOE não exceda o valor médio de dose anual recomendado?

# Exercício

2. Com a instalação do novo equipamento emissor de raios X, modelo Intecal CR125, foi realizado uma medição dos níveis de radiação na sala de exame e nas demais dependências do serviço. Verificou-se que na sala de exame a taxa de dose era de  $20\mu\text{Sv/h}$ . Pergunta-se:
- a) Qual a dose que o IOE estará sujeito em uma semana?
  - b) Qual a dose que o IOE estará sujeito em um ano?
  - c) O valor médio de dose anual recomendado será alcançado? Justifique.
  - d) Este IOE ainda poderá atuar com radiações ionizantes no ano corrente?

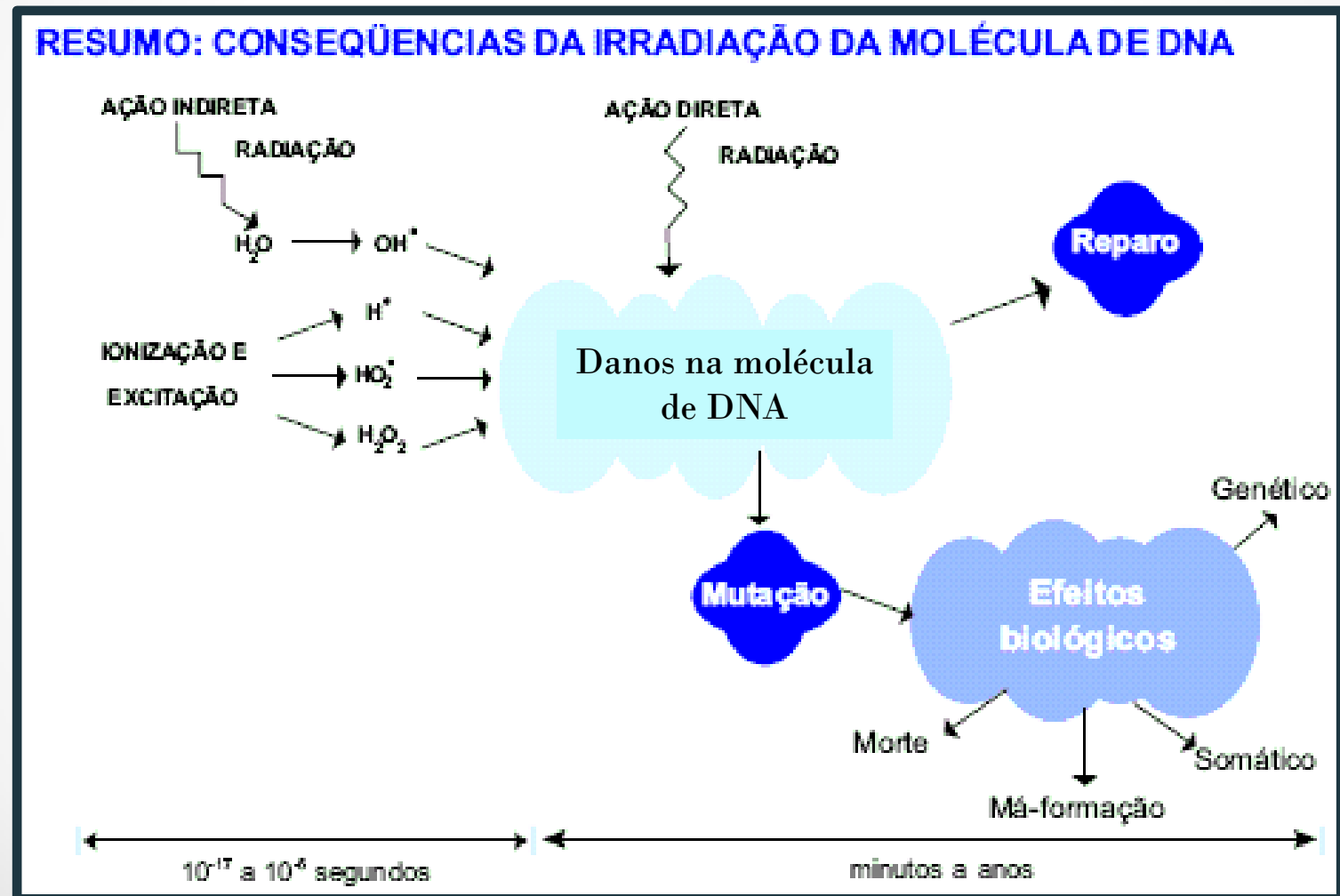
# Efeito da radiação ionizante no ser humano



# Mecanismo de dano biológico

- **Fase física:** ocorre a deposição de energia pela radiação na forma de ionização e/ou excitação de alguns átomos e moléculas do sistema biológico. Isto geralmente leva cerca de  $10^{-13}$  segundos.
- **Fase química:** esta fase dura cerca de  $10^{-10}$  segundos, e nela, os radicais livres, íons e os agentes oxidantes podem atacar moléculas importantes da célula, inclusive as substâncias que compõem o cromossomo.
- **Fase biológica:** esta fase varia de minutos a anos, dependendo dos sintomas. As alterações químicas produzidas podem afetar uma célula de várias maneiras: morte prematura, retardo na divisão celular ou modificação permanente. O surgimento de efeito biológico não significa uma doença e sim a resposta do organismo a um agente agressor.
- **Fase orgânica:** quando os efeitos biológicos desequilibram o organismo humano ou o funcionamento de um órgão, surgem sintomas clínicos da incapacidade de repara tais danos, as doenças.

# Efeito da radiação ionizante no ser humano



# Classificação dos efeitos radioinduzidos

- Os efeitos radioinduzidos podem receber denominações em função do valor da dose e forma de resposta (*estocástico e determinístico*), em termos de tempo de manifestação (*imediatos e tardios*) e em função do nível de dano (*somáticos e hereditários ou genéticos*).
  - **Efeitos estocásticos e determinísticos definidos no slide 118**

# Classificação dos efeitos radioinduzidos

- Tempo de manifestação
  - **Imediato** — primeiros efeitos biológicos causados pela radiação, que ocorrem num período de poucas horas até algumas semanas após a exposição. Ex. radiodermite;
  - **Tardio** — são efeitos que aparecem depois de anos ou mesmo décadas, como por exemplo o câncer.



# Classificação dos efeitos radioinduzidos

- Nível de dano
  - **Somáticos** — surgem do dano nas células do corpo e o efeito aparece na própria pessoa irradiada. Dependem da dose absorvida, da taxa de absorção da energia da radiação e da área do corpo irradiada;
  - **Hereditários ou genéticos** — são efeitos que surgem no descendente da pessoa irradiada, como resultado do dano produzido pela radiação em células dos órgãos reprodutores, as gônadas. Têm caráter cumulativo e independe da taxa de absorção da dose.

# Trabalho sobre proteção radiológica

- Fazer um resumo da portaria 453/98 obedecendo a estrutura e as orientações a seguir:
  - A. Introdução:** Qual o objetivo e a abrangência da portaria 453/98? Qual o assunto abordado em cada capítulo?
  - B. Capítulo 2 da portaria 453/98:** Definição para justificação, otimização e limitação de doses individuais e os artigos que contém estas definições; Quais os valores de doses anuais (limites) para trabalhadores, público e estagiários e os artigos que contém estas definições;
  - C. Capítulo 3 da portaria 453/98:** Localizar e transcrever o texto sobre memorial descritivo de proteção radiológica e as responsabilidades do supervisor de proteção radiológica, bem como dos técnicos e auxiliares
  - D. Localizar e transcrever:** os *Níveis de referência de radiodiagnóstico por radiografia para paciente adulto típico* e *Níveis de referência de radiodiagnóstico em CT para paciente adulto típico*

# Atividade campo AV2

1. A medição de uma fonte radioativa apresenta uma taxa de exposição de 3,7 mR/h. Qual o valor da taxa de dose em rad e no sistema internacional de unidades (SI)?
2. A medição de uma fonte radioativa apresenta uma taxa de exposição de  $1,8 \times 10^{-6} \text{ C.kg}^{-1}$ . Qual o valor da taxa de dose no sistema internacional de unidades (SI)?
3. Uma fonte de Ir-192 com atividade de 22 Ci será utilizada na realização de END para a aferição de juntas soldadas a uma distância de 3,7 m . Qual a taxa de exposição em 1 h?  
(Sabendo que para o Ir-192:  $\Gamma = 0,48 \text{ R.m}^2/\text{h.Ci}$ )

# Atividade campo AV2

4. Um tecnólogo entrou numa sala de irradiação e não percebeu que uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$  com atividade de  $5,3\text{Ci}$  estava exposta. Foi estimado que o tecnólogo permaneceu a 12 m da fonte durante 23 minutos. Qual o valor da exposição na entrada da pele do tecnólogo?

**(Sabendo que para o Ir-192:  $\Gamma = 0,33 \text{ R.m}^2/\text{h.Ci}$ )**

5. Um grupo de IOE foi exposto a um campo de raios X resultando em uma dose absorvida de 1 mGy. O mesmo grupo de IOE também foi exposto a uma fonte emissora de partículas alfa resultando em uma dose absorvida de 1 mGy, responda (unidades do SI):

- I. Quais os valores de dose equivalente em função do campo de raios X e da fonte emissora de partícula alfa?
- II. Caso os valores do item anterior forem diferentes, explique por que.

# Atividade campo de AV2

6. Suponha que uma pessoa seja exposta, a um campo homogêneo de raios X com uma exposição total de 1,3 R, responda (unidades do SI):
  - I. Qual o valor da dose absorvida?
  - II. Qual o valor da dose equivalente?
  - III. Qual o valor da dose efetiva? (irradiação do corpo inteiro  $w_T = 1$ )
7. Diferencie radiação diretamente ionizante de radiação indiretamente ionizante e cite exemplos.
8. Diferencie contaminação de irradiação.
9. É possível haver contaminação em uma sala de radiodiagnóstico? Justifique.

# Atividade campo de AV2

10. Os cuidados de radioproteção quando utilizados de forma adequada contribuem de forma significativa para a redução de dose nos IOEs quando estes trabalham com fontes de radiação ionizante. Assinale abaixo a opção mais adequada:

- (a) Menor distância, maior tempo e maior blindagem
- (b) Maior blindagem, menor tempo e maior distância
- (c) Maior blindagem, menor distância e menor tempo
- (d) Menor tempo, maior blindagem e menor distância
- (e) Maior tempo, maior distância e menor blindagem

# Atividade campo de AV2

11. Os efeitos radioinduzidos podem receber denominações em função do valor da dose e forma de resposta, em termos de tempo de manifestação e em função do nível de dano. Desta forma relacione os efeitos radioinduzidos com suas definições.

| <i>Efeitos radioinduzidos</i> |     | <i>Definições</i>                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (A) Estocástico               | ( ) | São efeitos que aparecem depois de anos ou mesmo décadas, como por exemplo o câncer.                                                                                                               |
| (B) Hereditários              | ( ) | São efeitos causados por irradiação total ou localizada de um tecido, causando um grau de morte celular e com prejuízos detectáveis no funcionamento do tecido ou órgão. Existe um limiar de dose. |
| (C) Imediatos                 | ( ) | São efeitos que surgem no descendente da pessoa irradiada, como resultado do dano produzido pela radiação em células dos órgãos reprodutores, as gônadas.                                          |
| (D) Somáticos                 | ( ) | São efeitos em que a probabilidade de ocorrência é proporcional à dose de radiação recebida, sem a existência de limiar.                                                                           |
| (E) Tardios                   | ( ) | Surgem do dano nas células do corpo e o efeito aparece na própria pessoa irradiada.                                                                                                                |
| (F) Determinísticos           | ( ) | São os primeiros efeitos biológicos causados pela radiação, que ocorrem num período de poucas horas até algumas semanas após a exposição.                                                          |



# Física das Radiações

Prof. Luciano Santa Rita

[www.lucianosantarita.pro.br](http://www.lucianosantarita.pro.br)

[tecnólogo@lucianosantarita.pro.br](mailto:tecnólogo@lucianosantarita.pro.br)