

# Física das Radiações

*Prof. Luciano Santa Rita Oliveira*



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

# Conteúdo programático

- Estrutura atômica
- Espectro eletromagnético
- Produção de raios X;
- Interação e atenuação de fótons (radiação X e gama) com a matéria;
- Radiações naturais e radioatividade;
- Grandezas radiológicas e suas unidades;
- Proteção Radiológica: Objetivos, princípios básicos e conceitos fundamentais;
- Efeitos da radiação no ser humano.

# Bibliografia

- Ciências Radiológicas para Tecnólogos (9ª edição) - Stewart Bushong;
- Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos - Luiz Tauhata et al
- Princípios básicos de Segurança e Proteção Radiológica (3ª edição) - Ana Maria Xavier et al
- Física das radiações - Emiko Okuno e Elisabeth Yoshimura
- Notas de aula

# Estrutura atômica

- Modelo atômico de Bohr;
- Estrutura eletrônica;
- Energia de ligação do elétron;
- Nomenclatura atômica.

# 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

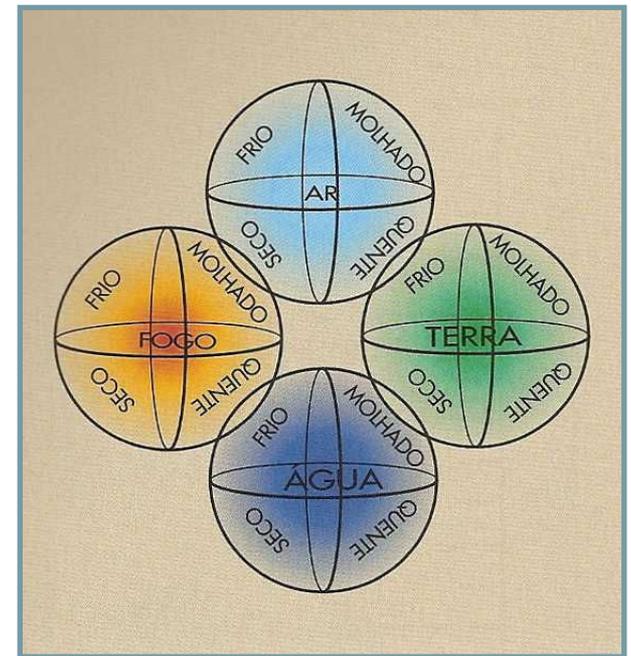
- Evolução

- o 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.

- o Hoje sabemos que o átomo é a menor partícula da matéria que tem as propriedades de um elemento.

- o Sabemos também que muitas partículas são menores que o átomo e são chamadas partículas subatômicas.



(Fonte: Bushong, 2010)

# Modelo atômico de Bohr

- Evolução

- **Átomo de Dalton (1808)**

- Um elemento era composto por átomos idênticos que reagem 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)**

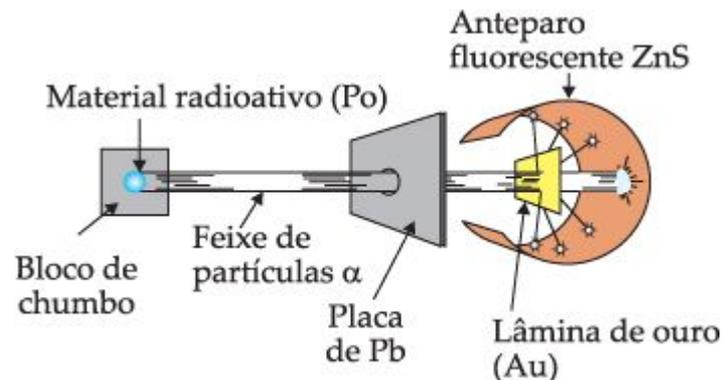
- Concluiu que os elétrons eram parte integrante de todos os átomos. Ele descreveu o átomo como algo parecido como um “pudim de ameixa” : as ameixas representavam as cargas elétricas negativas (elétrons) e o pudim era uma massa disforme de eletrificação uniformemente positiva. O n° de elétrons foi considerado 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

- o Átomo de Rutherford (1911)

- Estudando a trajetória de partículas emitidas pelo elemento radioativo polônio, ele observou que a maioria das partículas a 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).

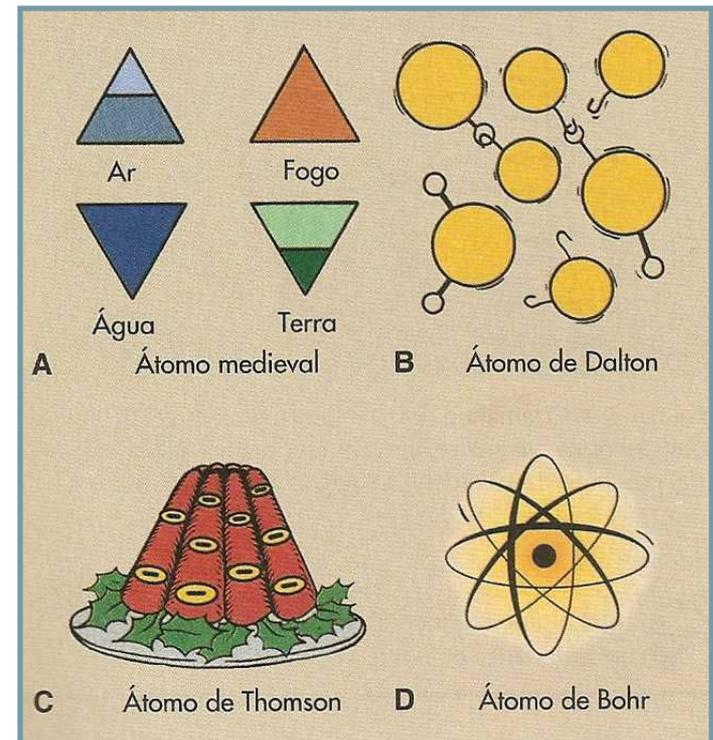


# Modelo atômico de Bohr

- Evolução

## O 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 do 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.



(Fonte: Bushong, 2010)

# Modelo atômico de Bohr

- Átomo de Bohr (1913)

O 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.

- 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

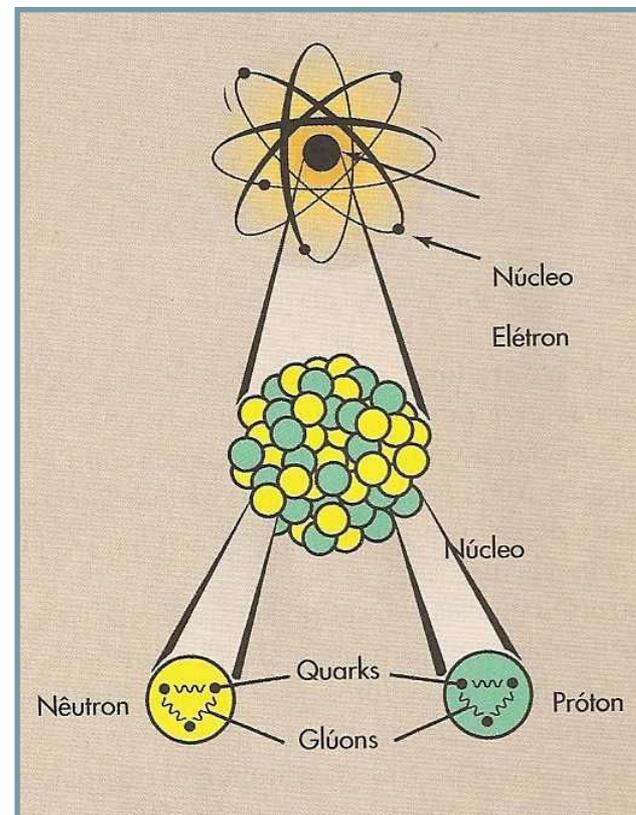
O núcleo contém partículas chamadas **núcleons**, dos quais há dois tipos: prótons e nêutrons.

A massa de um próton é  $1,673 \times 10^{-27}$  kg e a do nêutron  $1,675 \times 10^{-27}$  kg.

O número de massa atômica de cada um deles é 1 u.

O próton tem carga elétrica positiva de uma unidade.

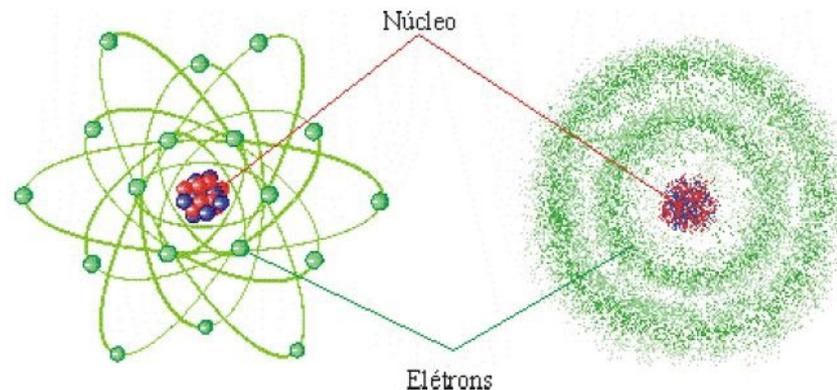
O nêutron não tem carga. Ele é eletricamente neutro.



(Fonte: Bushong, 2010)

# 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° de elétrons nestas camadas é denominado de *n° mágico* e, quando excedido, os novos elétrons devem ocupar novos orbitais. Os n° 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° que os identificam: n° quântico principal (n), n° quântico orbital (l), n° quântico magnético (ml), n° quântico de spin (ms).

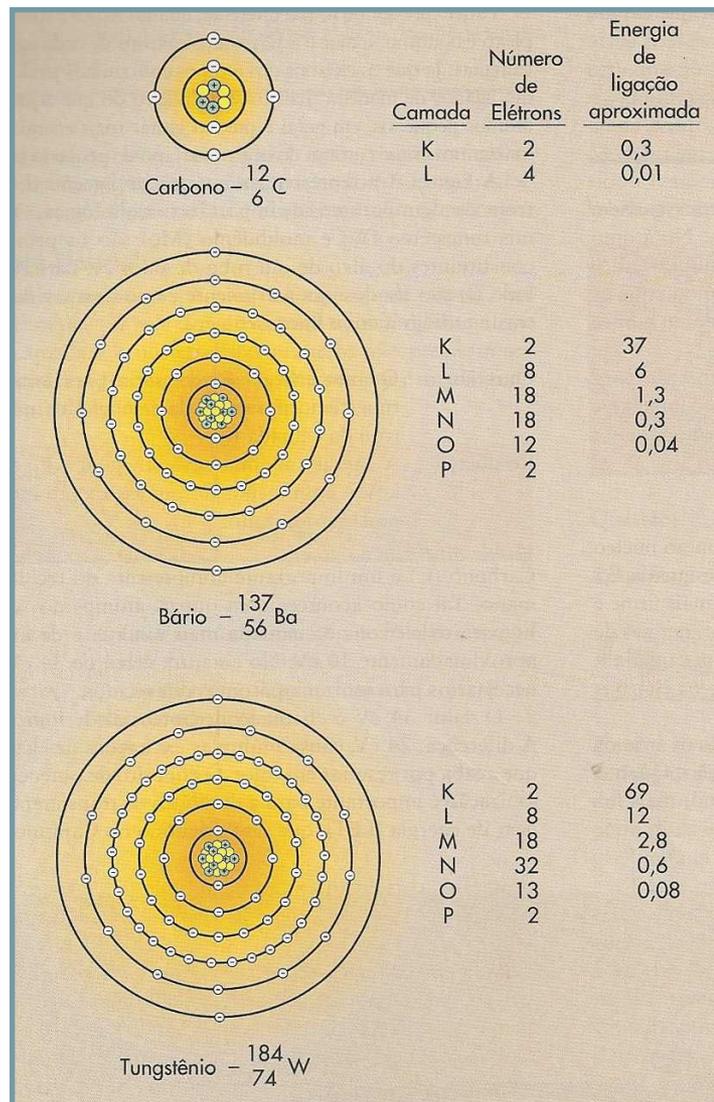
# Nomenclatura atômica

- As propriedades químicas de um elemento são determinadas pelo n° e arranjo dos elétrons;
- No átomo neutro o n° de elétrons é igual ao n° de prótons. O n° de prótons é chamado de n° atômico e simbolizado por **Z**.
- O n° de prótons adicionado ao n° de nêutrons é chamado de n° de massa atômica, simbolizado por **A**.
- O n° de massa atômica de um átomo é um número inteiro, que equivale ao n° de núcleons no átomo. A massa atômica de um átomo é determinada por medição e raramente é um número inteiro.
- Símbolo químico:  $\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} Y$        ${}^{238}_{92}U$

# Energia de ligação do elétron

- 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 do elétron



(Fonte: Bushong, 2010)

# Energia de ligação de materiais relevantes para a radiologia

Material	Símbolo	Nº atômico (Z)	Nº de massa atômica	Nº de isótopos de ocorrência natural	Energia de ligação eletrônica da camada K (keV)
Hidrogênio	H	1	1	2	0,02
Carbono	C	6	12	3	0,28
Alumínio	Al	13	27	1	1,56
Cálcio	Ca	20	40	6	4,1
Molibdênio	Mo	42	98	7	20
Ródio	Rh	45	103	5	23,2
Iodo	I	53	127	1	33
Bário	Ba	56	137	7	37
Tungstênio	W	74	184	5	69,5
Chumbo	Pb	82	208	4	88
Urânio	U	92	238	3	116

# Classificação dos átomos

- **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.

# Espectro eletromagnético

- Espectro eletromagnético;

Origem das radiações ionizantes

Conceitos básicos do movimento ondulatório;

Definição de fótons;

Dualidade Onda x Partícula;

Lei do inverso do quadrado da distância;

Equação quântica de planck;

Equação de equivalência massa energia.

# Origem das radiações ionizantes

- 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.

# Conceitos de movimentos ondulatórios

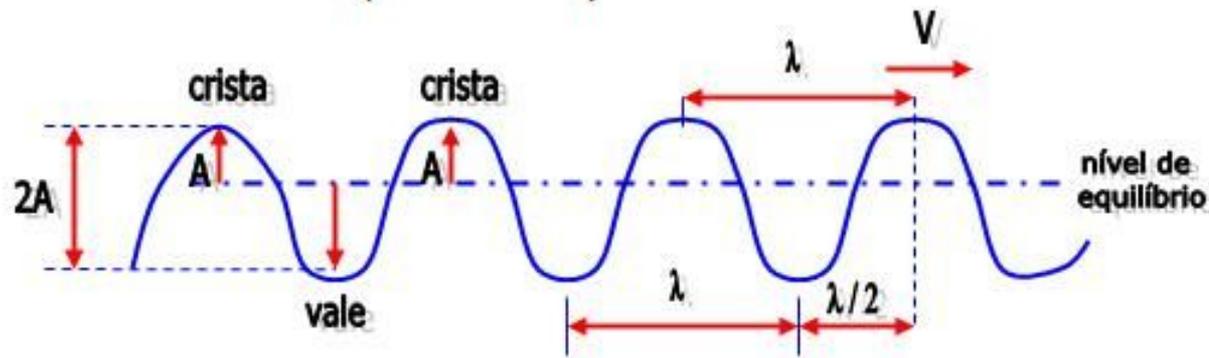
- Ondas - É uma perturbação que se propaga através de um meio. Toda onda transmite energia sem transportar matéria.
- Quanto a natureza podem ser:
  - Mecânicas - necessitam de um meio material para se propagar (ex. som);
  - Eletromagnéticas - não necessitam de um meio material para se propagar (ex. 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.

# Conceitos de movimentos ondulatórios

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:

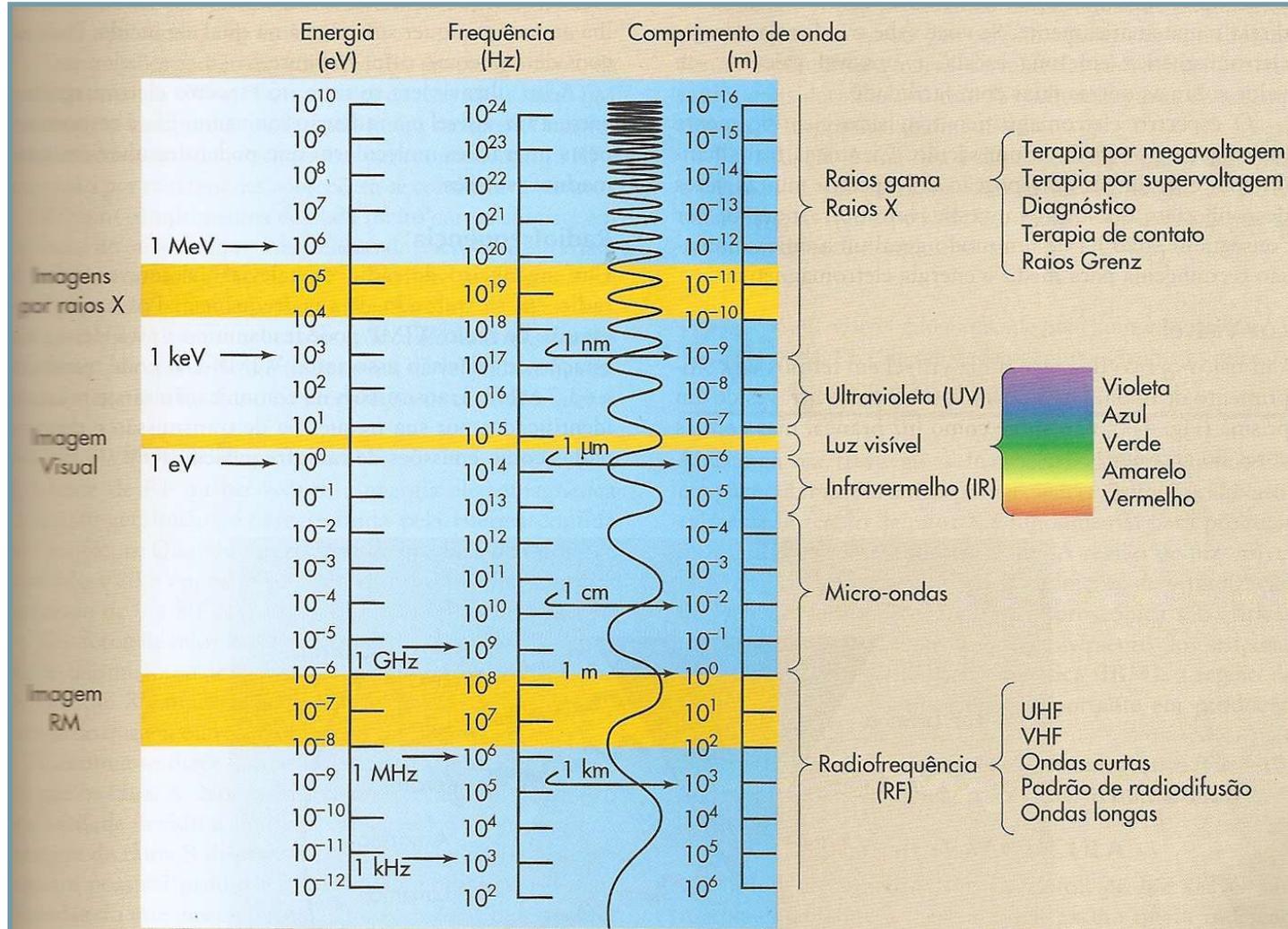
$$\text{unid (f)} = \frac{1}{s} = s^{-1} = \text{hertz (Hz)}$$

# Definição de fótons

- 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.

$$v = f \cdot \lambda \rightarrow c = f \cdot \lambda$$

# Espectro eletromagnético



(Fonte: Bushong, 2010)

# 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?

$$\frac{I_1}{I_2} = \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2 \quad \frac{450}{I_2} = \left( \frac{3}{1} \right)^2 \rightarrow I_2 = 50 \text{ mR}$$

# Equação de Planck

- A teoria quântica de Planck afirma que os raios X se movem com a velocidade da luz ( $c = 2,9979 \times 10^8$  m/s ou  $3 \times 10^8$  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  **$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$** .
- A relação entre joule (J) e elétron-volt (eV) é  **$1 \text{ J} = 6,24 \times 10^{18} \text{ eV}$** .

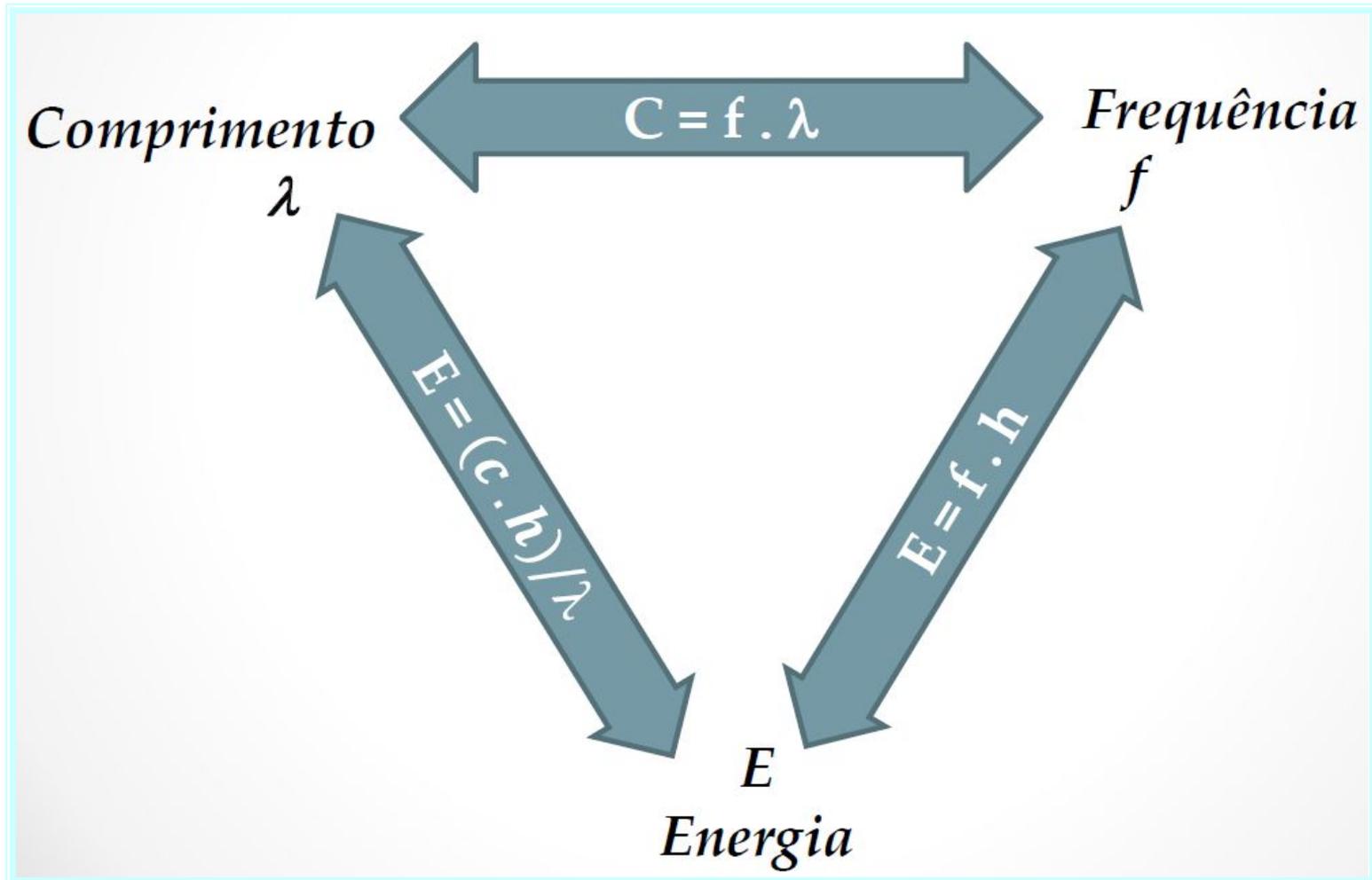
$$E = h.f \Leftrightarrow E = h.\nu$$

# Equação de Planck

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

- 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.

# Triângulo da relação eletromagnética



# Equação de equivalência massa 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.

# Exercícios

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

$$E = m \cdot c^2 \rightarrow E = 9,109 \cdot 10^{-31} \cdot (2,9979 \cdot 10^8)^2$$

$$E = 8,1866 \cdot 10^{-14} J$$

$$E = 8,1866 \cdot 10^{-14} J \cdot 6,24 \cdot 10^{18} eV/J$$

$$E = 5,11 \cdot 10^5 eV \rightarrow E = 511 \cdot keV$$

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?



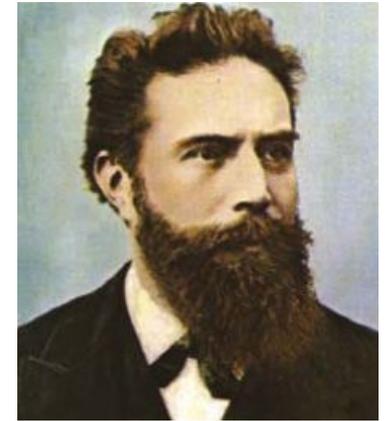
# Exercícios

3. Qual a frequência associada a um fóton de radiação de microondas 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?
6. Qual a frequência de um fóton de raios X com energia de 85 keV?
6. A estação de rádio ZYZ4-FM transmite em uma frequência de 108 MHz. Qual o comprimento de onda desta radiação?
7. 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

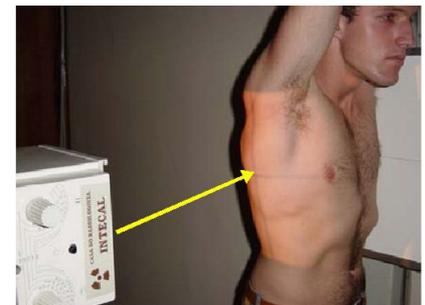
- Histórico
- Propriedade dos raios X
- Processos de geração dos raios X
- O espectro de raios X diagnósticos
- Fatores que afetam o espectro dos raios X
- O equipamento de raios X diagnóstico

- 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.

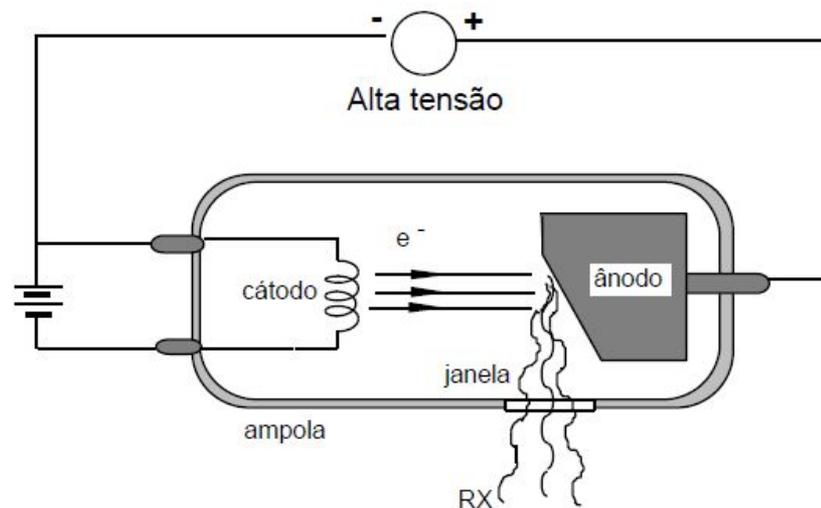


# Propriedade dos raios X

- 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.

# Processos de geração 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.



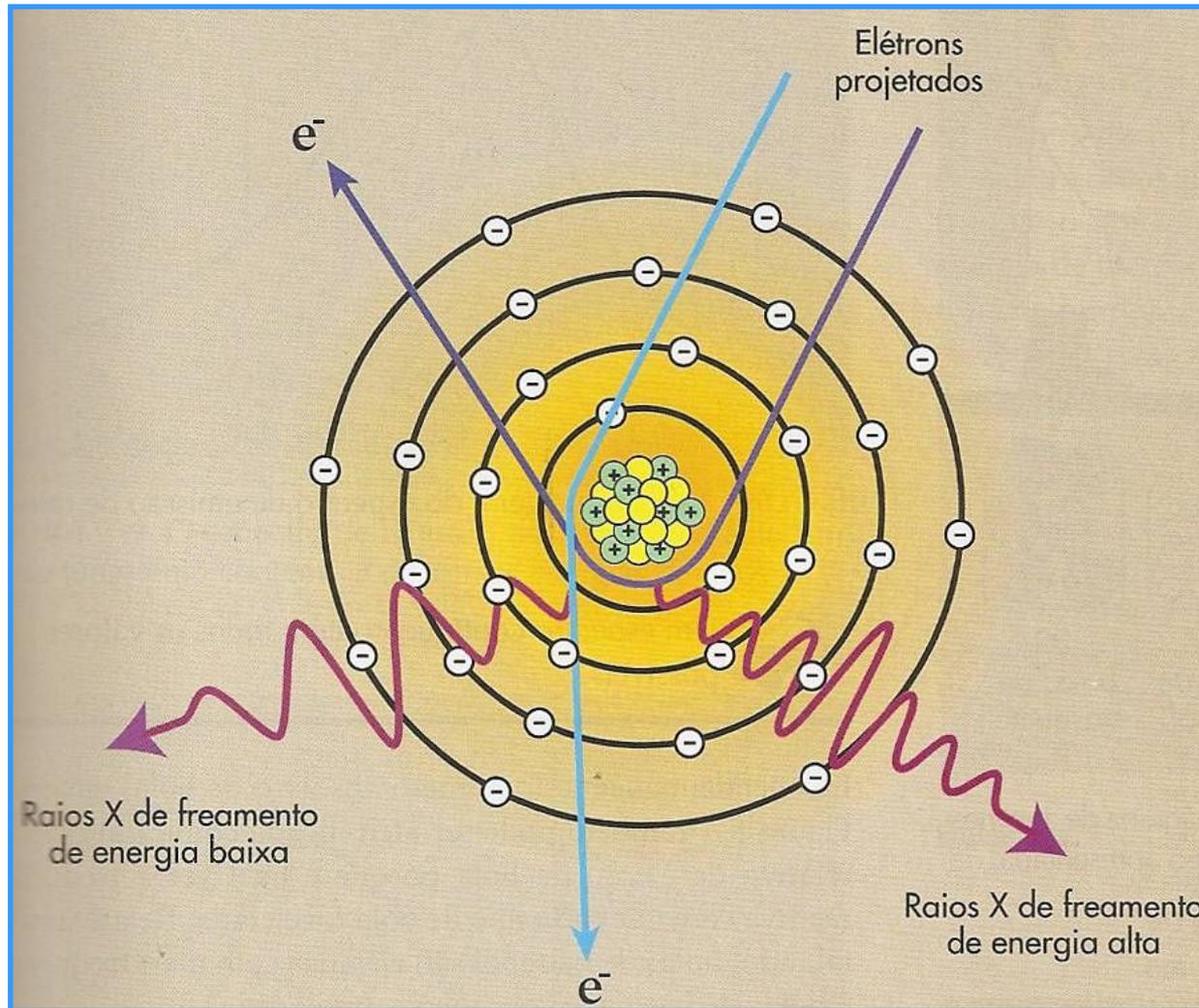
# Processos de geração dos raios X

- 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*.

# Processos de geração dos raios X

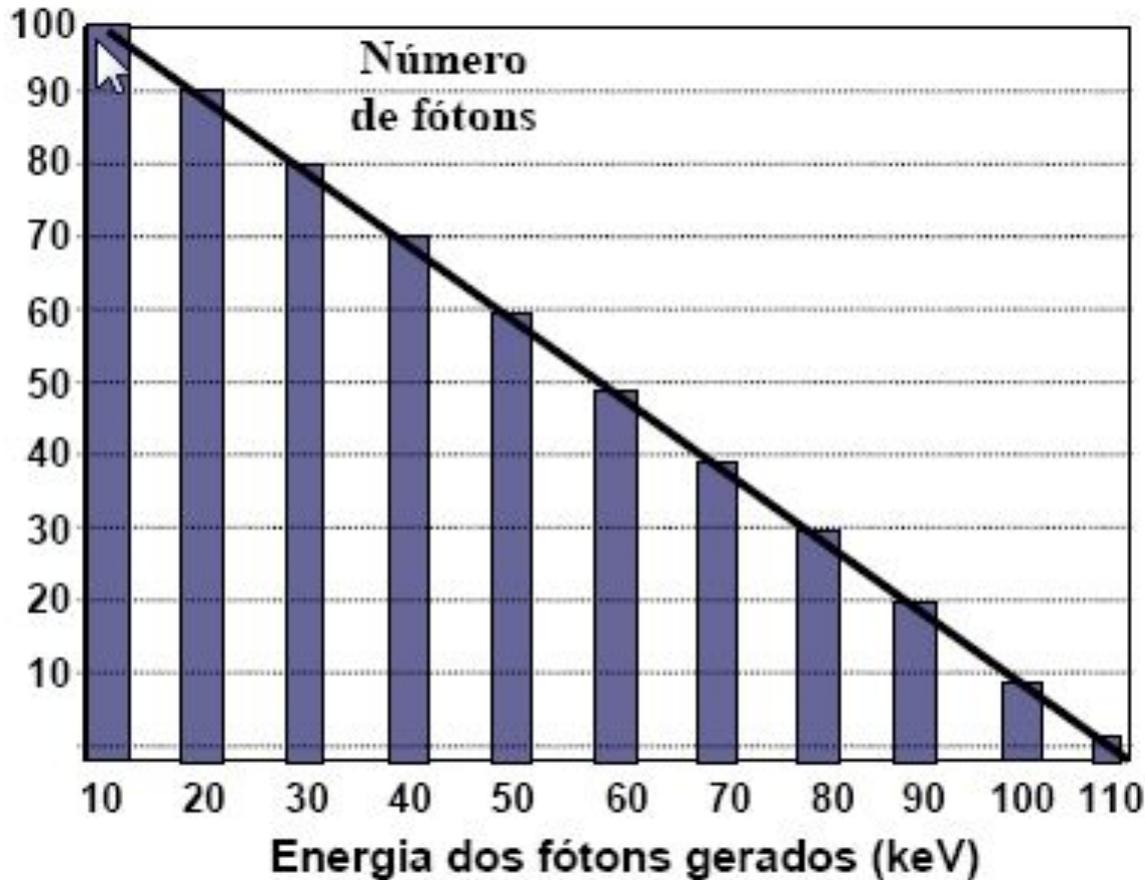
- A *radiação de frenagem ou bremsstrahlung* ocorre quando partículas carregadas, neste caso elétrons, interagem com o campo coulombiano de átomos com número atômico elevado, resultando em redução de sua energia cinética e emissão dessa diferença de energia na forma de raios X.
- A energia dos raios 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)



(Fonte: Bushong, 2010)

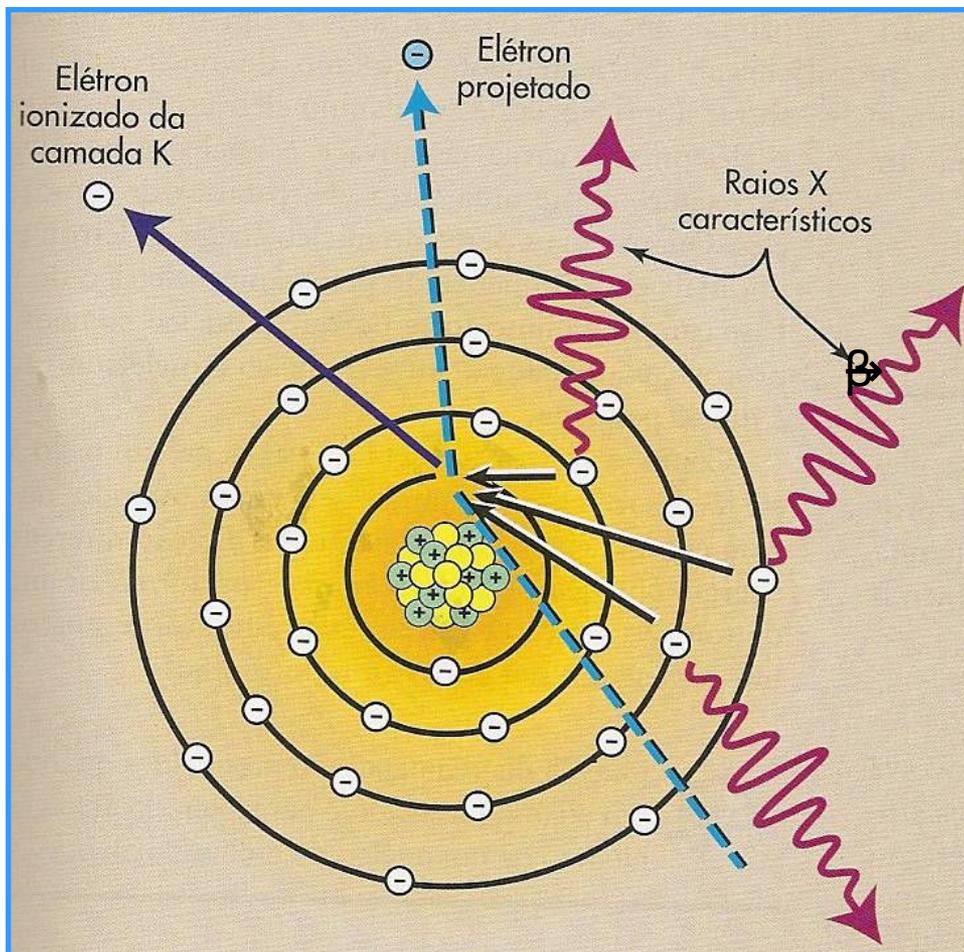
# Produção dos raios X - frenagem ou bremsstrahlung (contínuo)



# Processos de geração 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.

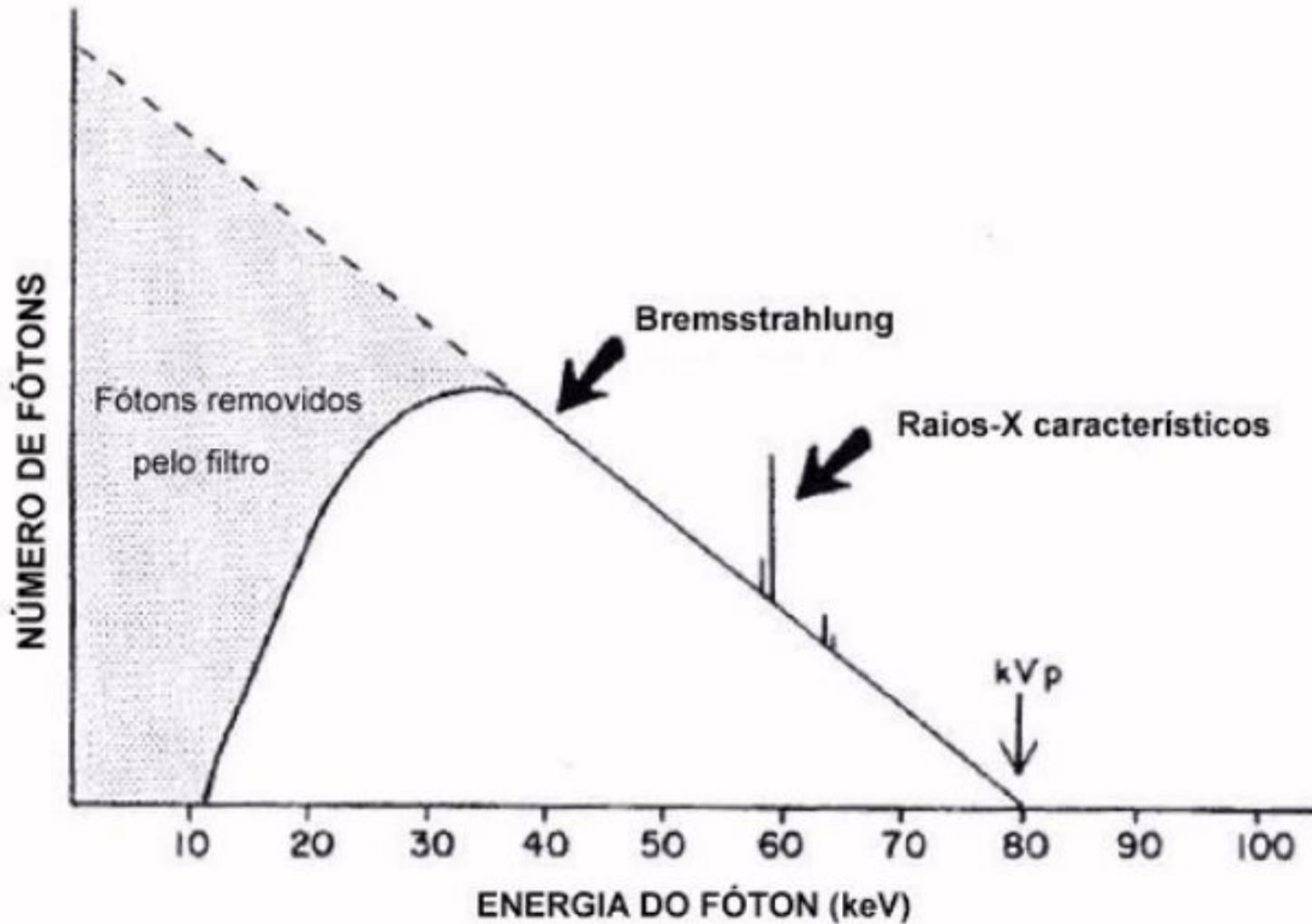
# Produção dos raios X - característico (discreto)



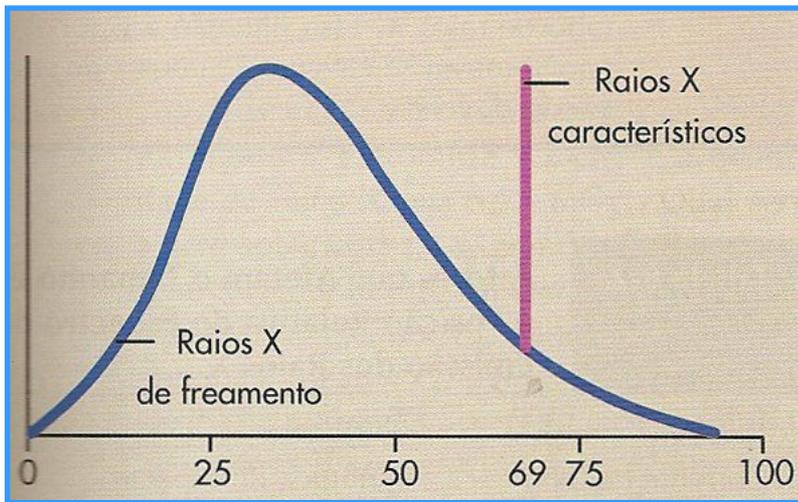
Para o átomo de tungstênio (W), considera-se a energia efetiva dos raios X das transições eletrônicas para a camada K com valor de 69 keV

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

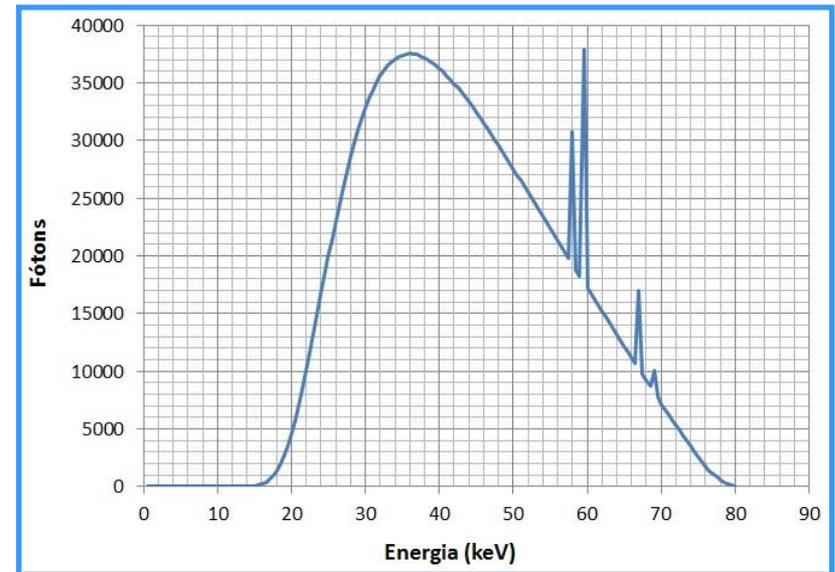
# Espectro dos raios X diagnósticos



# Espectro dos raios X diagnósticos

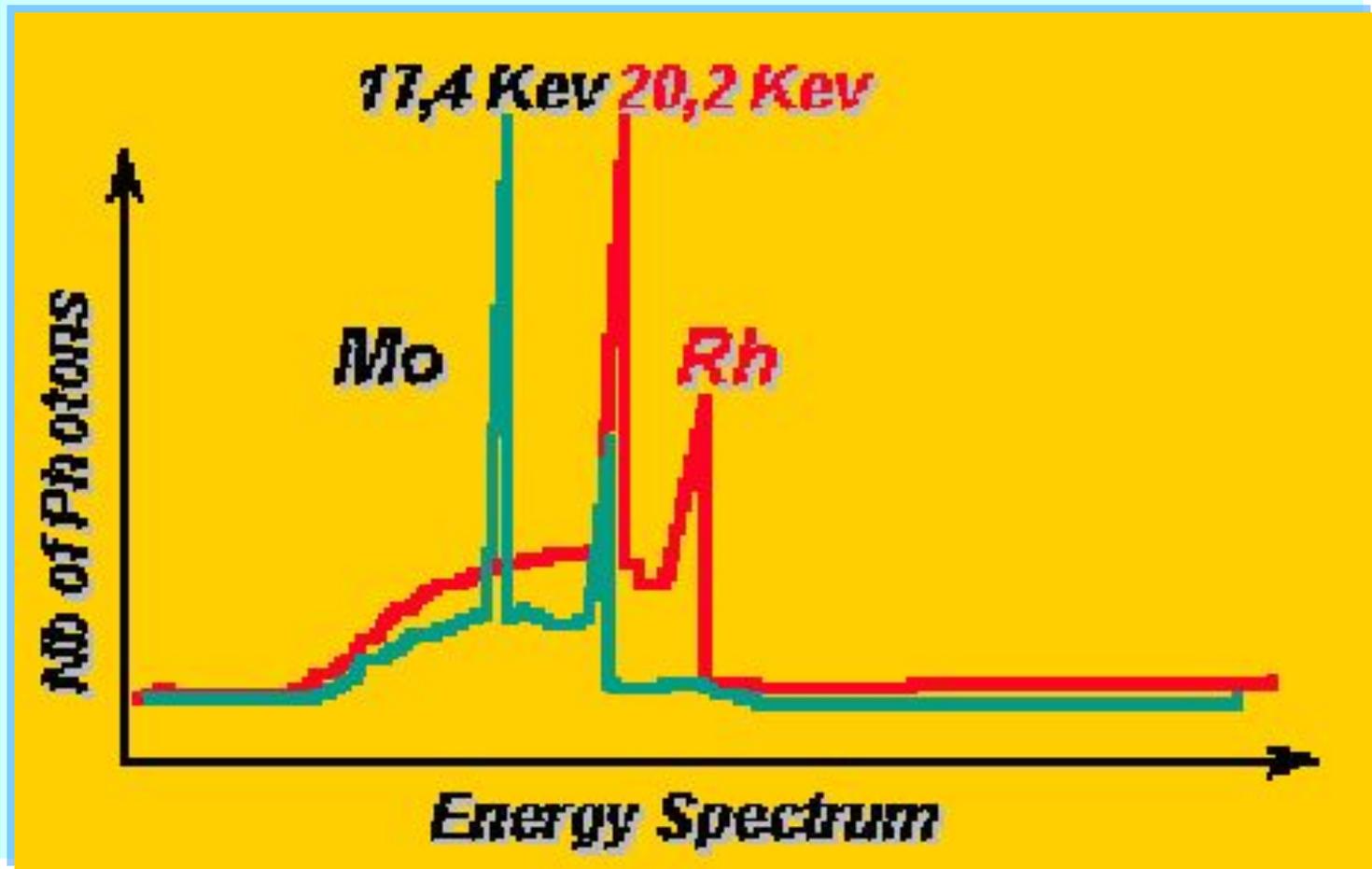


(Fonte: Bushong, 2010)



(Fonte: Oliveira, 2011)

# Espectro dos raios X diagnósticos



# 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 está mais à 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 espectro de raios X produzidas por seus fatores influenciadores

**Aumento:**

**Resulta em:**

**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**

diminuição na quantidade de fótons e aumento na qualidade do feixe;

**Ripple**

diminuição na quantidade de fótons e na qualidade do feixe.

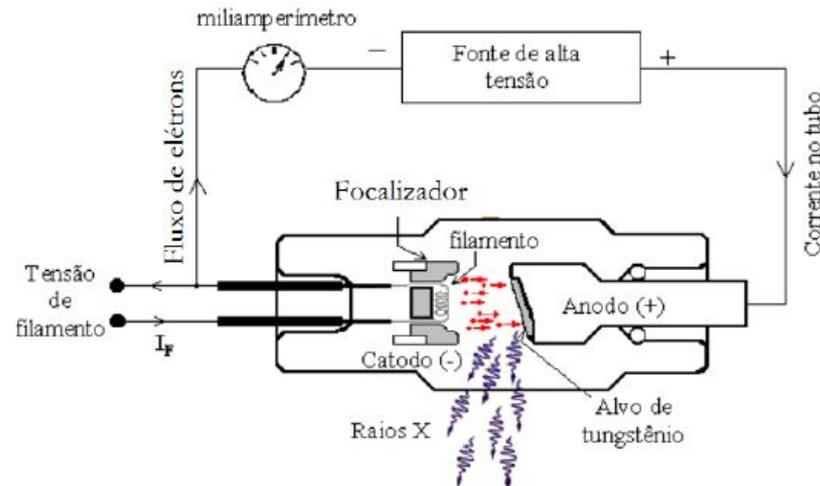
# O equipamento de raios X diagnóstico

- 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.



# 0 equipamento de raios X diagnóstico



*Anodo giratório*



*Anodo fixo*

1. Explique ou defina o que se segue:

- a) Energia de ligação
- b) Raios X de frenagem ou *bremstrahlung*
- 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.

4. Desenhe o espectro de emissão dos raios X de um equipamento operado em 90kVp, 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 kVp?

# Interação e atenuação de fótons (radiação X e gama) com a matéria

- Interação de fótons

  - Espalhamento clássico ou coerente

  - Efeito fotoelétrico

  - Espalhamento incoerente (compton)

  - Produção de par (elétron - pósitron)

  - Fotodesintegração

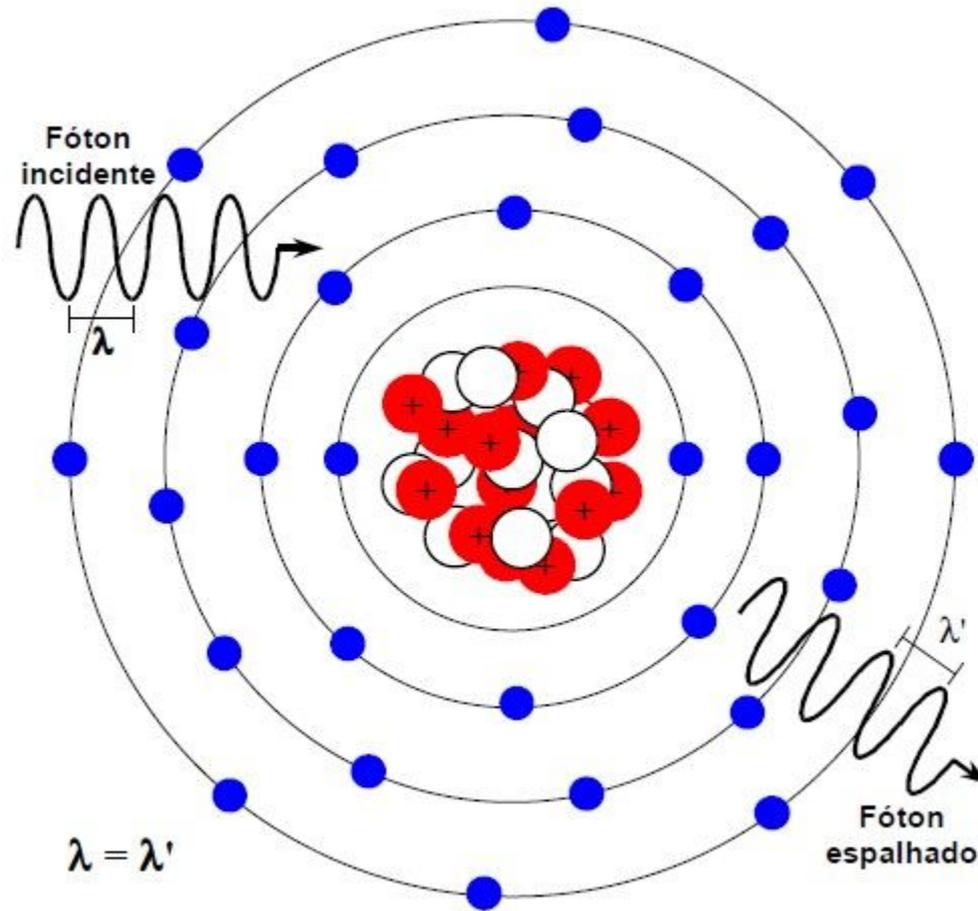
- Atenuação de fótons

  - Coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ )

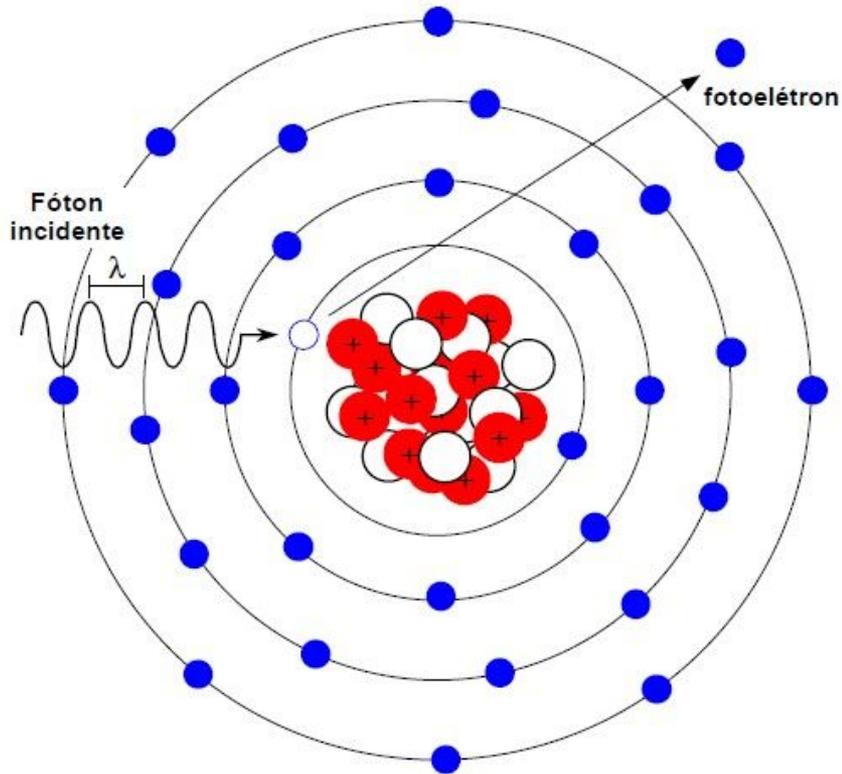
  - Coeficiente de atenuação linear em massa ( $\mu/\rho$ )

  - Camada semirredutora (CSR ou HVL)

# Espalhamento clássico ou coerente (*rayleigh*)



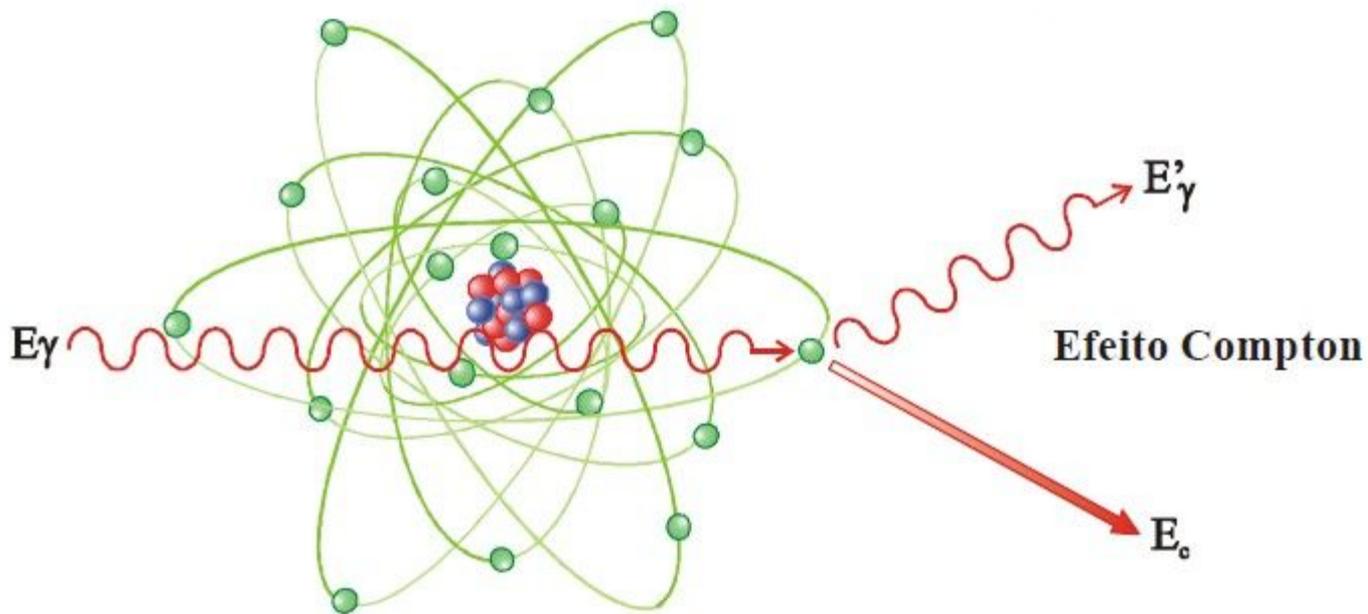
# Efeito fotoelétrico



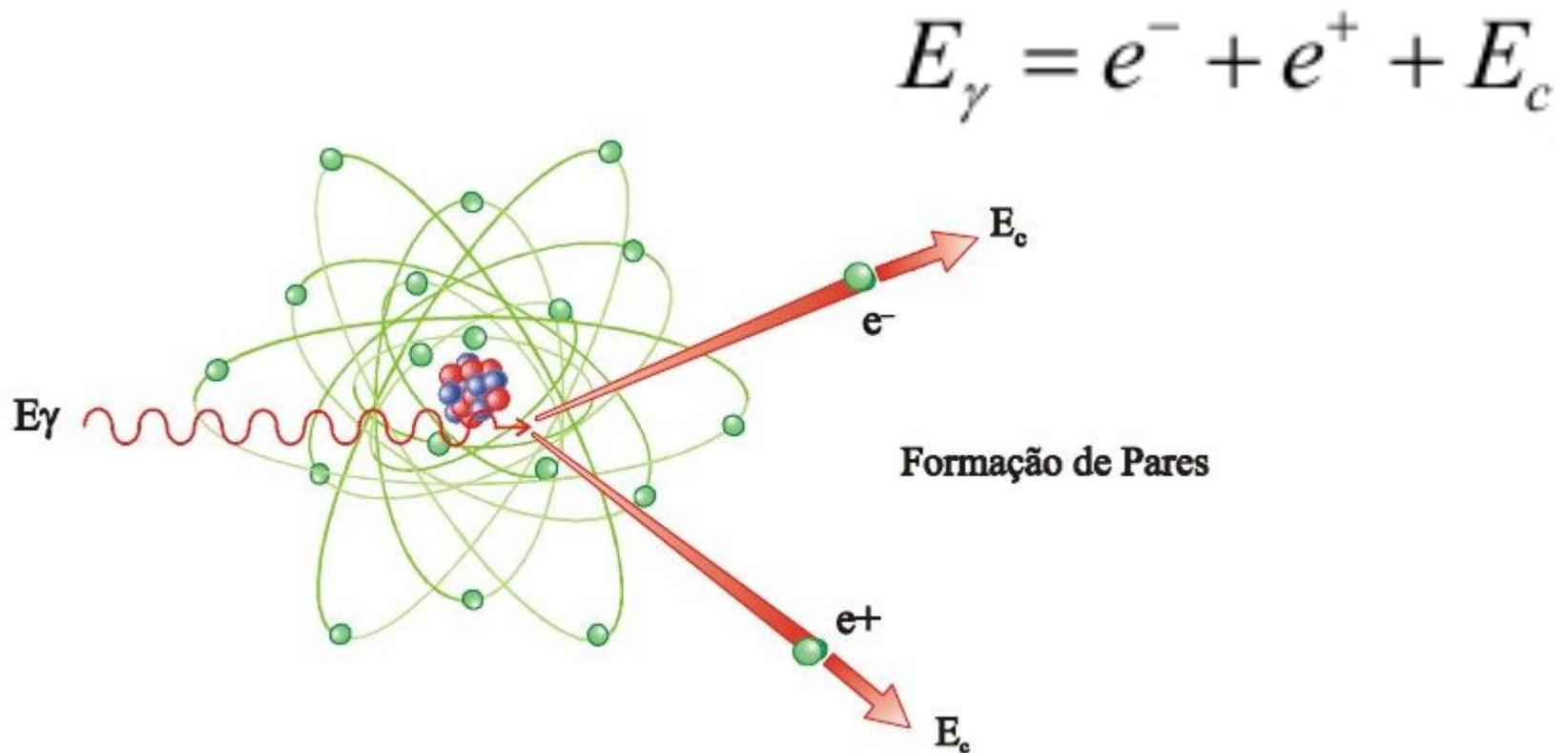
$$E_{\gamma} = E_l + E_c$$

# Espalhamento incoerente (*compton*)

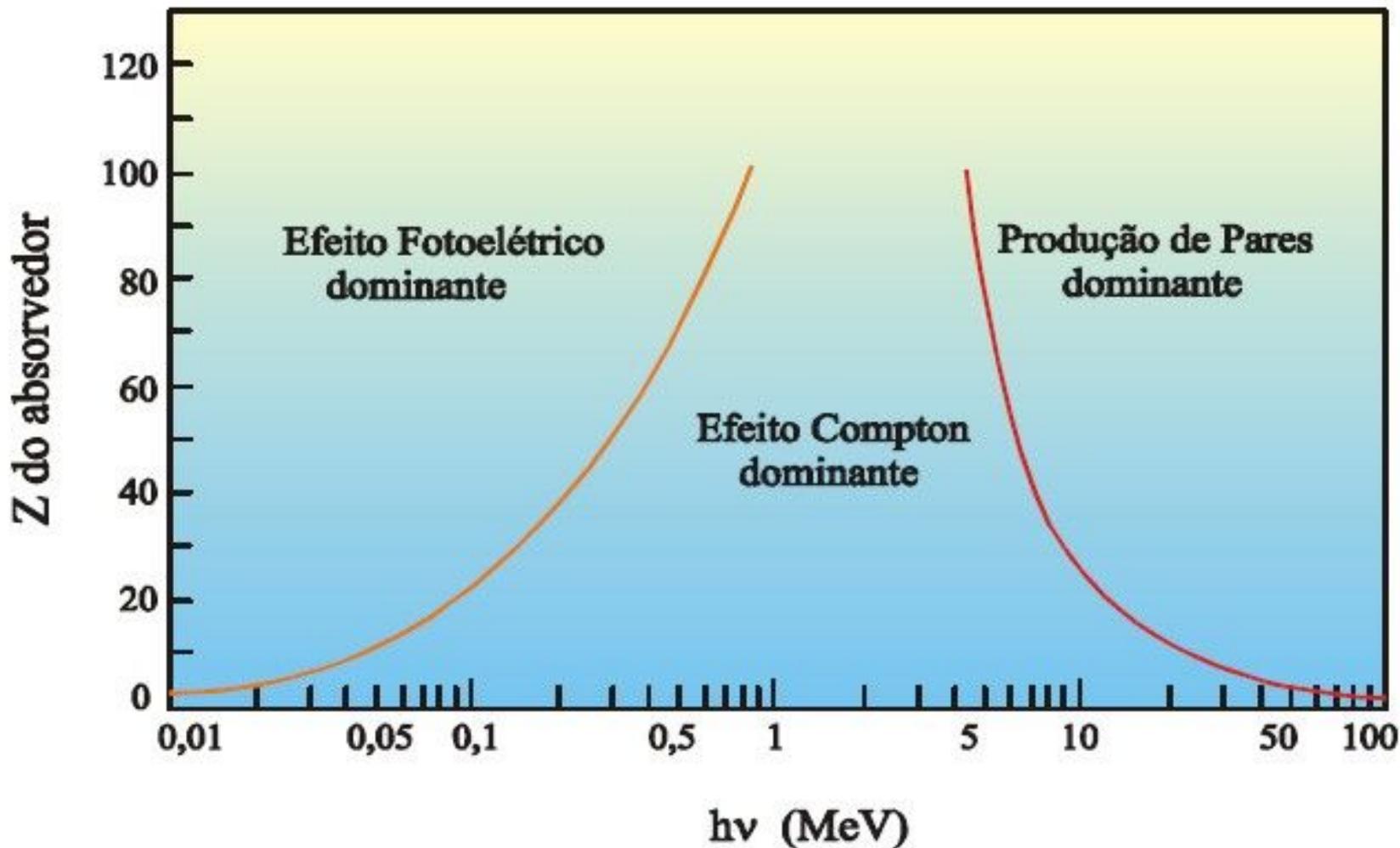
$$E_{\gamma} = E_l + E_c + E'_{\gamma}$$



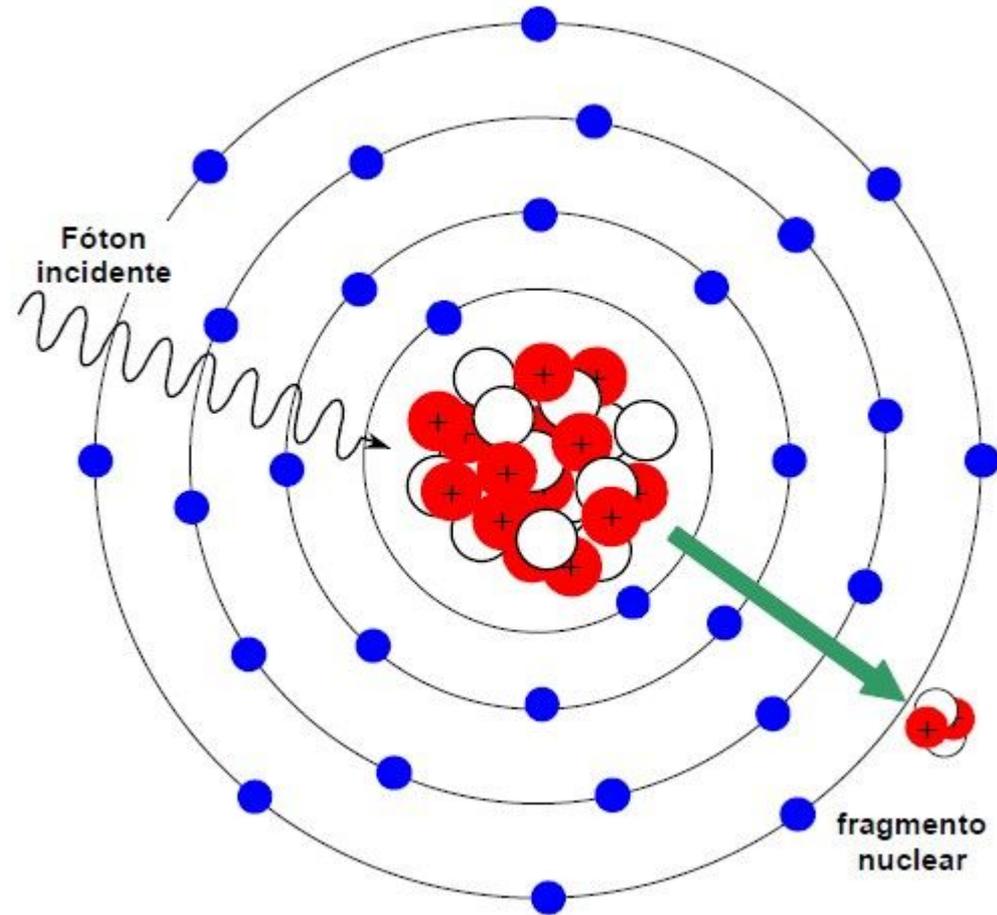
# Produção de par (elétron - pósitron)



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



# Fotodesintegração



# Exercício resolvido

- Uma radiação X de 70,0 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?

$$E_{\gamma} = E_l + E_c \rightarrow E_c = E_{\gamma} - E_l$$

Obs.: do slide 18 temos que a  $E_l$  do carbono para elétrons da camada K é 0,28keV e para o bário é 37keV.

p/ o átomo de carbono →  $E_c = 70,0 - 0,28 \rightarrow E_c = 69,7keV$

p/ o átomo de bário →  $E_c = 70,0 - 37 \rightarrow E_c = 33keV$

# Exercício resolvido

- Uma radiação X de 60,0keV ioniza um átomo de bário ejetando um elétron da camada N com 12,0keV de energia cinética. Qual a energia da radiação X espalhada?

$$E_{\gamma} = E_l + E_c + E'_{\gamma} \rightarrow E'_{\gamma} = E_{\gamma} - E_l - E_c$$

Obs.: do slide 17 temos que a  $E_l$  da camada N do bário é 0,3keV.

$$E'_{\gamma} = 60,0 - 0,3 - 12,0 \rightarrow E'_{\gamma} = 47,7keV$$

# Coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ )

- Quanto maior a espessura de um material, maior a quantidade de radiação que ela absorve, ou seja, menor a intensidade do feixe que atravessa o material;
- Como a absorção obedece a uma lei exponencial, a intensidade diminui, porém nunca se anula completamente;
- A capacidade de absorção varia de material para material. Isso se explica através de coeficiente de absorção “ $\mu$ ”, que é uma característica de cada material e representa a probabilidade, por unidade de comprimento, de que o fóton seja removido do feixe (por absorção ou espalhamento).

# Coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ )

Energia (MeV)	Alumínio ( $\text{cm}^{-1}$ )	Chumbo ( $\text{cm}^{-1}$ )	Concreto ( $\text{cm}^{-1}$ )	Aço ( $\text{cm}^{-1}$ )	Urânio ( $\text{cm}^{-1}$ )	Tijolo ( $\text{cm}^{-1}$ )
0,102	0,444	60,2	0,390	2,700	19,82	0,369
0,150	0,362	20,87	0,327	1,437	45,25	0,245
0,200	0,358	5,00	0,29	1,08	21,88	0,200
0,300	0,278	4,00	0,25	0,833	8,45	0,169
0,409	0,247	2,43	0,224	0,720	4,84	0,149
0,500	0,227	1,64	0,204	0,65	3,29	0,135
0,600	0,210	1,29	0,189	0,600	2,54	0,125
0,800	0,184	0,95	0,166	0,52	1,78	0,109
1,022	0,165	0,772	0,150	0,460	1,42	0,098
1,250	0,148	0,620	0,133	0,410	1,00	0,088
1,500	0,136	0,588	0,121	0,380	0,800	0,080
2,000	0,177	0,504	-	-	-	-

Nota: os valores desta tabela podem variar, em função da literatura consultada.

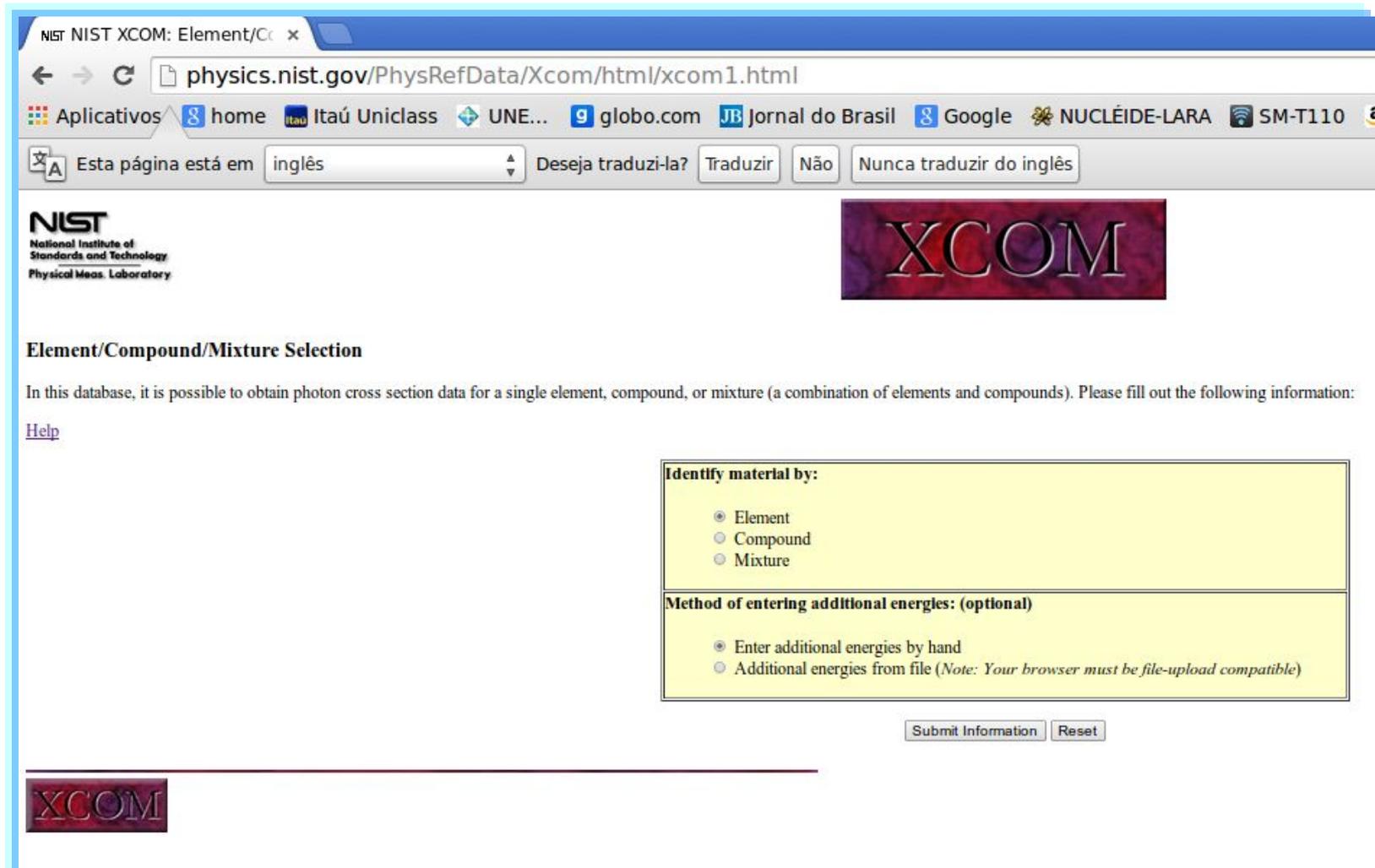
 Ir-192

 Co-60

# Coeficiente de atenuação linear em massa ( $\mu/\rho$ )

- O coeficiente de atenuação de um material também depende de seu estado físico. Assim, por exemplo, a água pode possuir valores diferentes de seus coeficientes de atenuação conforme esteja no estado de vapor, líquido ou sólido (gelo).
- Em função disto, costuma-se tabelar os valores dos coeficientes de atenuação divididos pela densidade do material.
- O coeficiente de atenuação tem então a denominação de Coeficiente Mássico de Atenuação ou Coeficiente de Atenuação em Massa ( $\mu/\rho$ ).
- O laboratório de medição física do NIST (National Institute of Standards and Technology) disponibiliza o programa XCOM que possibilita o calculo do coeficiente de Atenuação em Massa ( $\mu/\rho$ ), para os elementos químicos e materiais.
- O coeficiente de atenuação linear pode então ser obtido:  **$\mu = (\mu/\rho) \cdot \rho$**

# Coeficiente de atenuação linear em massa ( $\mu/\rho$ )



The screenshot shows a web browser window with the URL `physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html`. The page header includes the NIST logo (National Institute of Standards and Technology, Physical Meas. Laboratory) and a large 'XCOM' graphic. Below the header is the section 'Element/Compound/Mixture Selection' with the text: 'In this database, it is possible to obtain photon cross section data for a single element, compound, or mixture (a combination of elements and compounds). Please fill out the following information:'. A 'Help' link is provided. The main form is divided into two sections: 'Identify material by:' with radio buttons for 'Element', 'Compound', and 'Mixture'; and 'Method of entering additional energies: (optional)' with radio buttons for 'Enter additional energies by hand' and 'Additional energies from file (Note: Your browser must be file-upload compatible)'. At the bottom of the form are 'Submit Information' and 'Reset' buttons. A small 'XCOM' logo is also visible in the bottom left corner of the page content.

# Coeficiente de atenuação linear em massa ( $\mu/\rho$ )

Fill out the form to select the data to be displayed:

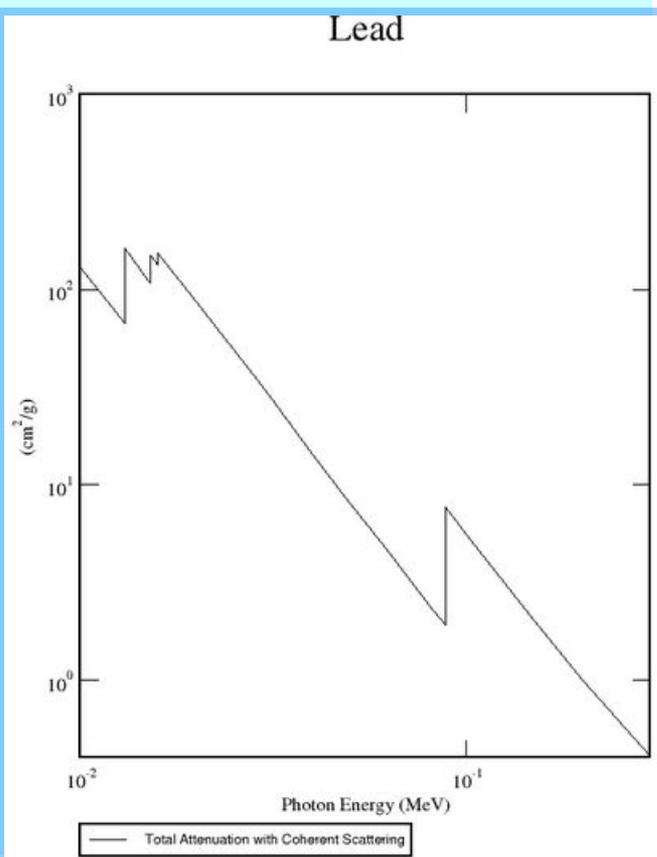
[Help](#)

<p><b>Select by:</b> (only elements 1 - 100)</p> <p>Atomic Number: <input type="text"/></p> <p><i>or</i></p> <p>Symbol: <input type="text"/></p>	<p><b>Options for output units:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li><input checked="" type="radio"/> All quantities in <math>cm^2/g</math></li><li><input type="radio"/> All quantities in <i>barns/atom</i></li><li><input type="radio"/> Partial interaction coefficients in <i>barns/atom</i> and total attenuation coefficients in <math>cm^2/g</math></li></ul>
<p><b>Graph options:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li><input checked="" type="checkbox"/> Total Attenuation with Coherent Scattering</li><li><input type="checkbox"/> Total Attenuation without Coherent Scattering</li><li><input type="checkbox"/> Coherent Scattering</li><li><input type="checkbox"/> Incoherent Scattering</li><li><input type="checkbox"/> Photoelectric Absorption</li><li><input type="checkbox"/> Pair Production in Nuclear Field</li><li><input type="checkbox"/> Pair Production in Electron Field</li><li><input type="checkbox"/> None</li></ul>	<p><b>Additional energies in MeV: (optional)</b> (up to 100 allowed)</p> <p>Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used). One energy per line. Blank lines will be ignored.</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><p>0.08 0.10 0.15</p></div> <p><input checked="" type="checkbox"/> <b>Include the standard grid</b></p> <p><b>Energy Range:</b></p> <p>Minimum: <input type="text"/> MeV</p> <p>Maximum: <input type="text"/> MeV</p>

Return to [previous](#) document.

(fonte: <http://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom2>)

# Coeficiente de atenuação linear em massa ( $\mu/\rho$ )



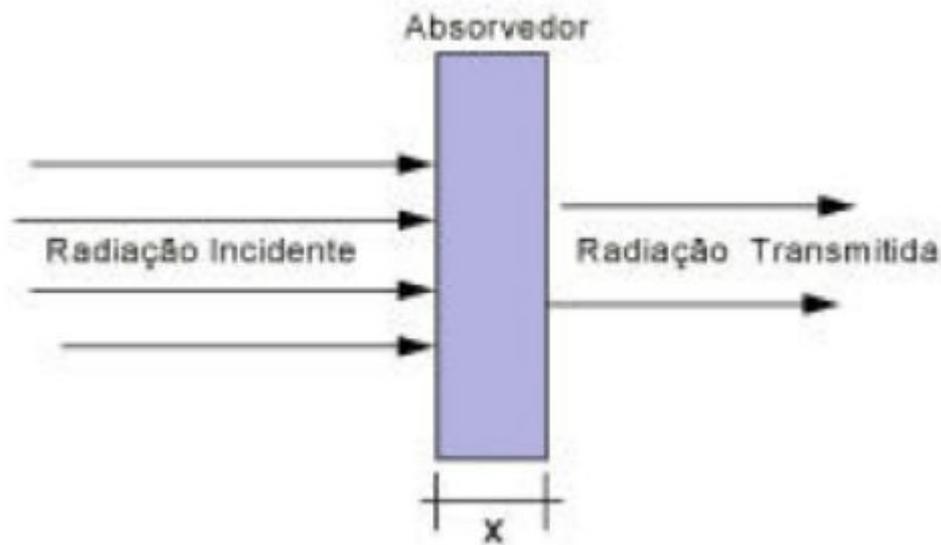
$$\rho_{Pb} = 11,348 \text{ g/cm}^3$$

$$\mu = (\mu/\rho) \cdot \rho$$

Edge	(required) Photon Energy MeV	Scattering		Photoelectric Absorption cm <sup>2</sup> /g	Pair Production		Total Attenuation	
		Coherent cm <sup>2</sup> /g	Incoherent cm <sup>2</sup> /g		In Nuclear Field cm <sup>2</sup> /g	In Electron Field cm <sup>2</sup> /g	With Coherent Scattering cm <sup>2</sup> /g	Without Coherent Scattering cm <sup>2</sup> /g
	1.000E-02	4.982E+00	4.540E-02	1.256E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.506E+02	1.257E+02
	1.304E-02	3.851E+00	5.435E-02	6.310E+01	0.000E+00	0.000E+00	6.700E+01	6.315E+01
82 L <sub>3</sub>	1.304E-02	3.851E+00	5.435E-02	1.582E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.621E+02	1.583E+02
	1.500E-02	3.308E+00	5.920E-02	1.082E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.116E+02	1.083E+02
	1.520E-02	3.258E+00	5.964E-02	1.045E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.078E+02	1.045E+02
82 L <sub>2</sub>	1.520E-02	3.258E+00	5.964E-02	1.452E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.485E+02	1.453E+02
	1.553E-02	3.180E+00	6.037E-02	1.380E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.412E+02	1.381E+02
	1.586E-02	3.104E+00	6.112E-02	1.312E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.344E+02	1.313E+02
82 L <sub>1</sub>	1.586E-02	3.104E+00	6.112E-02	1.517E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.548E+02	1.517E+02
	2.000E-02	2.338E+00	6.897E-02	8.397E+01	0.000E+00	0.000E+00	8.637E+01	8.404E+01
	3.000E-02	1.377E+00	8.228E-02	2.886E+01	0.000E+00	0.000E+00	3.032E+01	2.894E+01
	4.000E-02	9.202E-01	9.019E-02	1.335E+01	0.000E+00	0.000E+00	1.436E+01	1.344E+01
	5.000E-02	6.545E-01	9.478E-02	7.292E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.042E+00	7.387E+00
	6.000E-02	4.900E-01	9.734E-02	4.432E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.020E+00	4.530E+00
	8.000E-02	3.078E-01	9.923E-02	2.012E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.419E+00	2.112E+00
	8.800E-02	2.632E-01	9.928E-02	1.547E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.910E+00	1.647E+00
82 K	8.800E-02	2.632E-01	9.928E-02	7.321E+00	0.000E+00	0.000E+00	7.684E+00	7.421E+00
	1.000E-01	2.128E-01	9.894E-02	5.237E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.549E+00	5.336E+00
	1.500E-01	1.049E-01	9.484E-02	1.815E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.015E+00	1.910E+00
	2.000E-01	6.260E-02	8.966E-02	8.464E-01	0.000E+00	0.000E+00	9.986E-01	9.360E-01
	3.000E-01	2.988E-02	8.036E-02	2.930E-01	0.000E+00	0.000E+00	4.032E-01	3.733E-01

# Camada semirredutora (CSR)

É a espessura necessária para reduzir a intensidade do feixe de radiação à metade do valor inicial, CSR (Half Value Layer, HVL) pode ser expressa por:



$$I = I_0 e^{-\mu \cdot x}$$

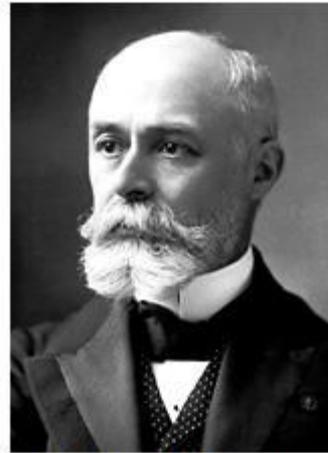
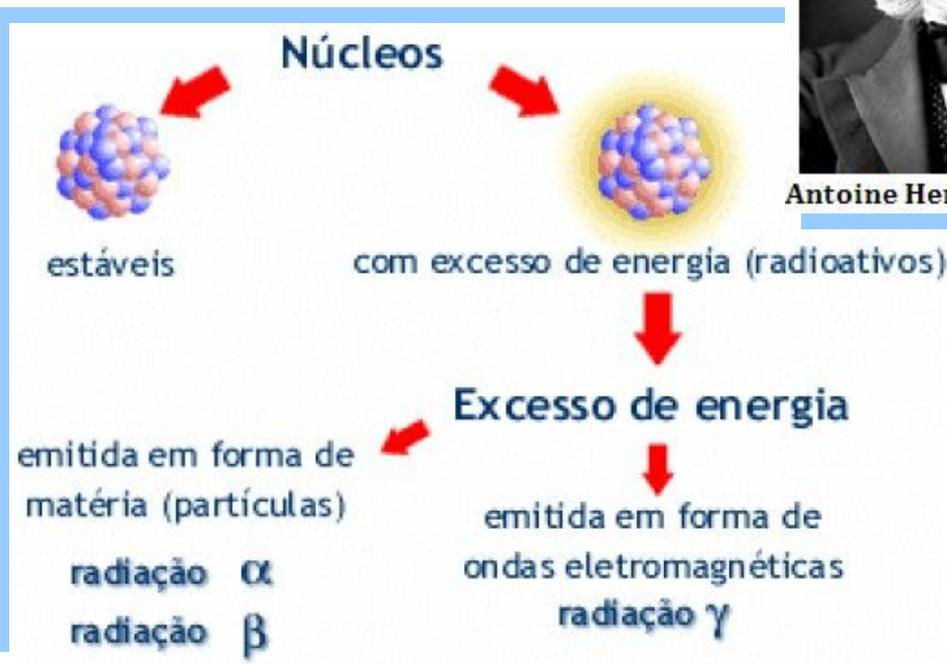
$$I_0/2 = I_0 \cdot e^{(-\mu x)} \longrightarrow 1/2 = e^{(-\mu x)} \longrightarrow \ln(1/2) = \ln[e^{(-\mu x)}]$$

$$-\ln(2) = -(\mu \cdot x) \longrightarrow x = \ln(2) / \mu \longrightarrow \text{CSR} = \ln(2) / \mu$$

# Radiações naturais e radioatividade

- Origem;
- Séries naturais:  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ ;
- Decaimento radioativo;
- Meia-vida física;
- Conceito de atividade

# Origem



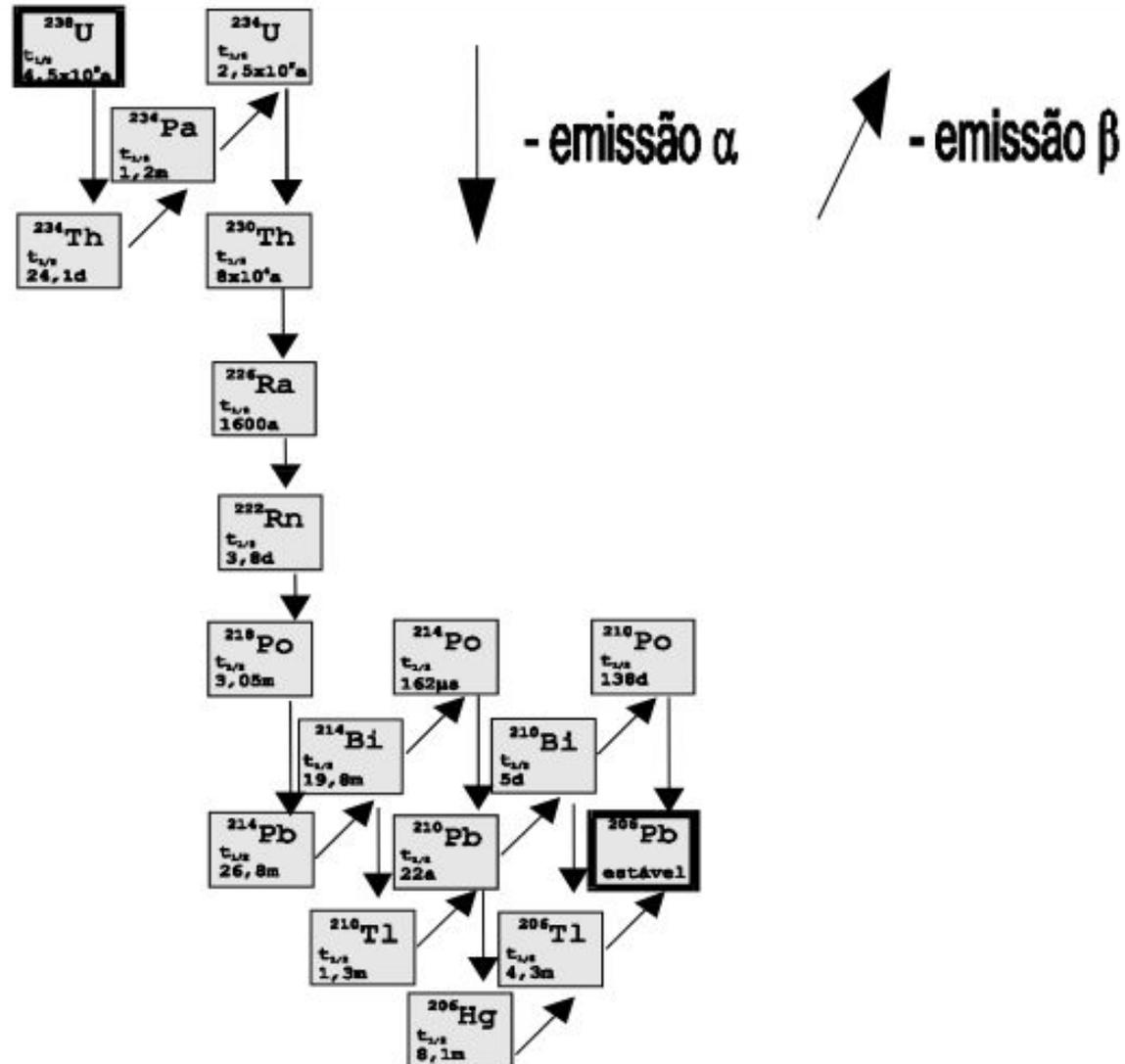
Antoine Henri Becquerel





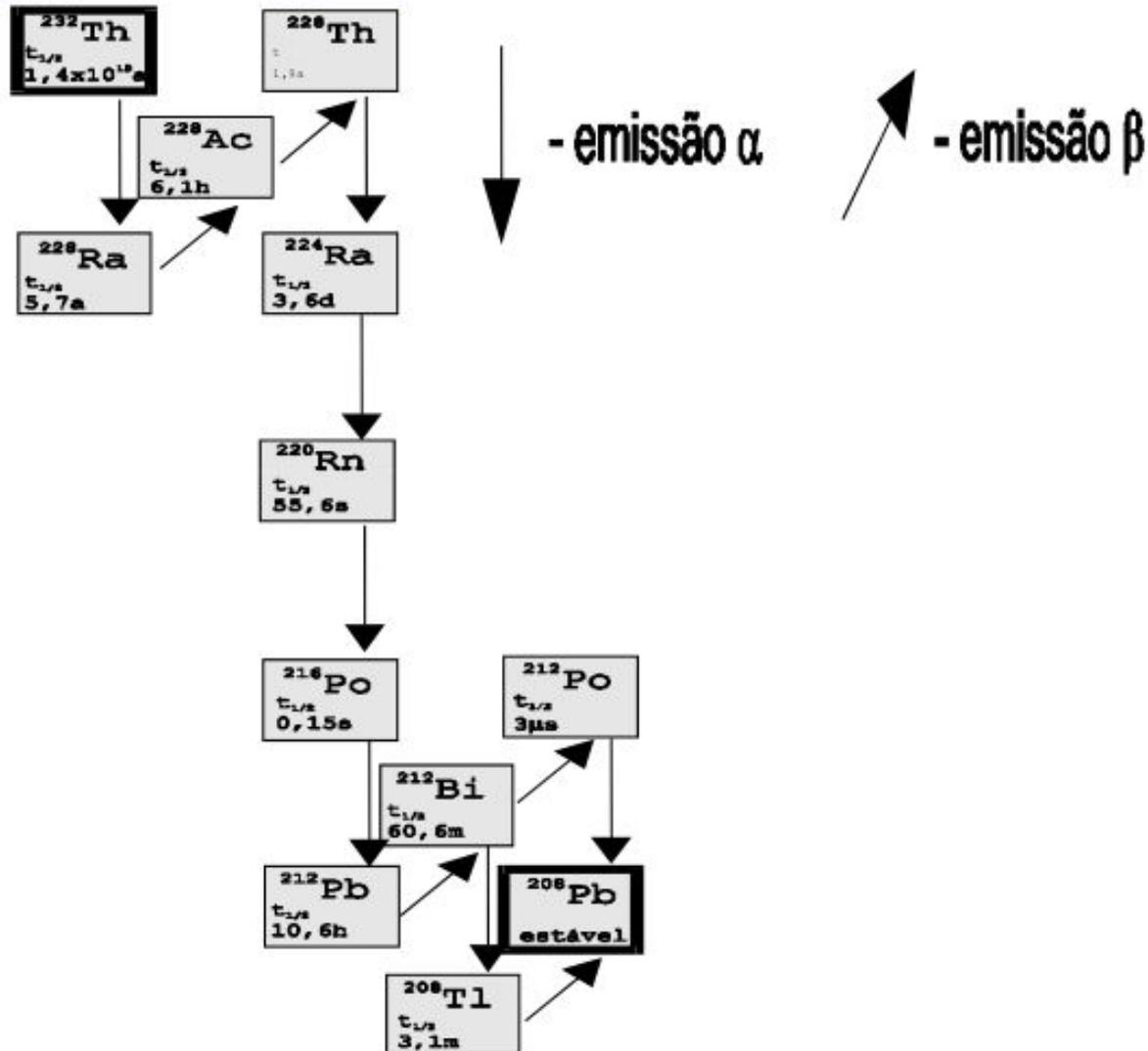
# Séries naturais $^{238}\text{U}$ e $^{232}\text{Th}$

## Série do Urânio-238



# Séries naturais $^{238}\text{U}$ e $^{232}\text{Th}$

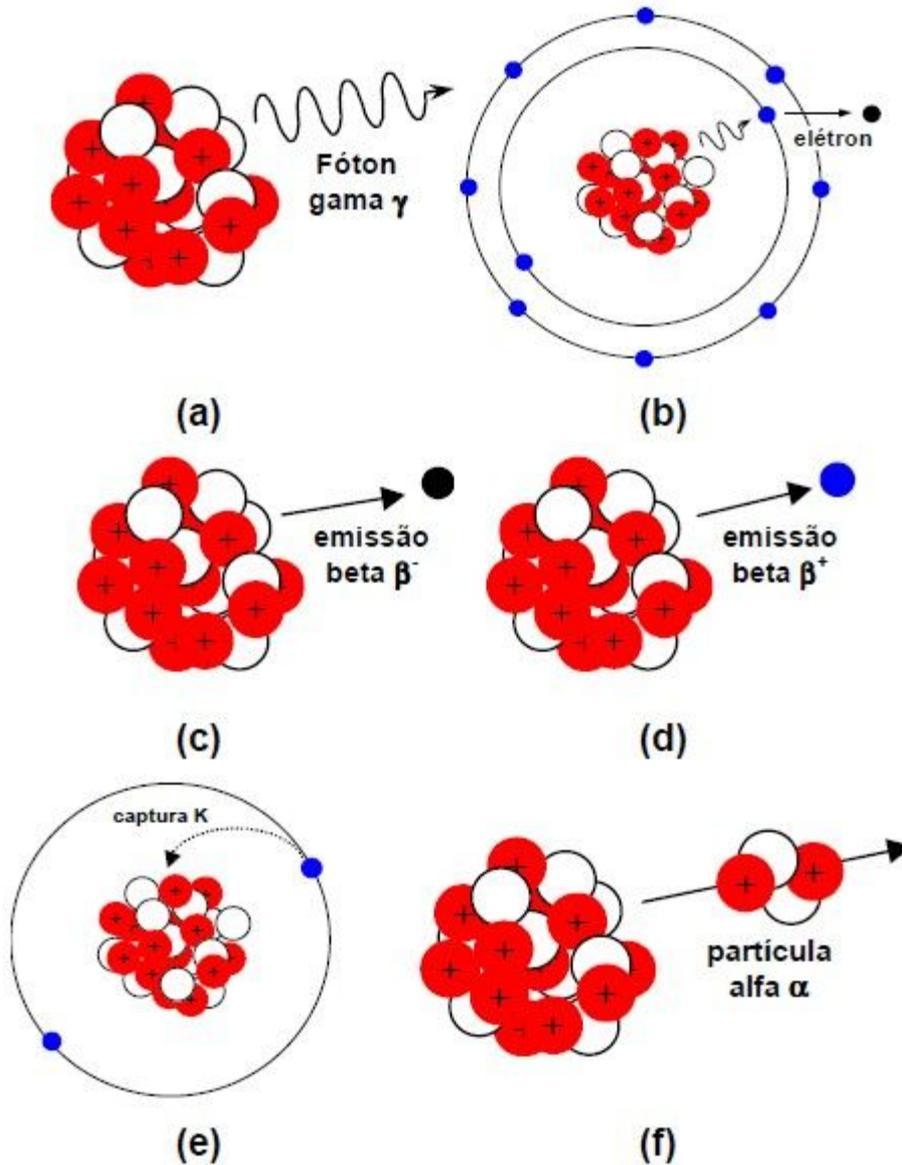
## Série do Tório-232



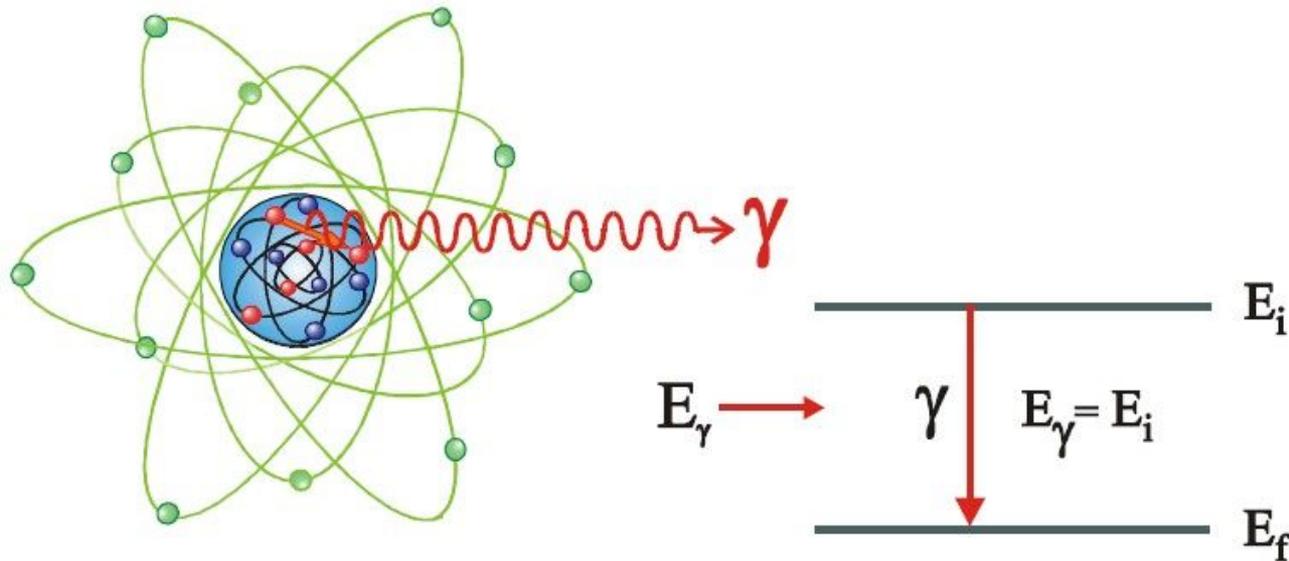
# Decaimento radioativo

- 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 eletrônica ou de elétron;
  - f. Emissão  $\alpha$ .

# Decaimento radioativo



# Transição isomérica ou radiação gama

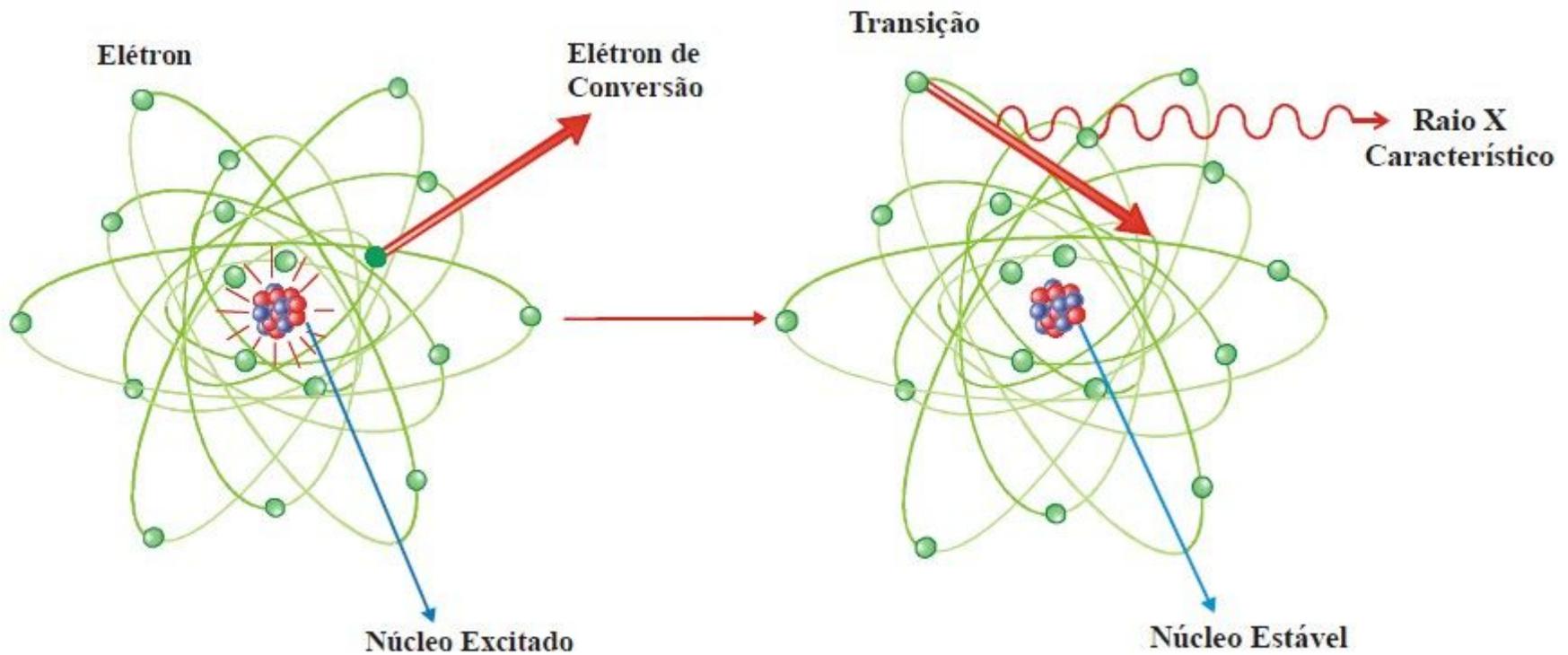


(Fonte: Tauhata, 2003)

- 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.



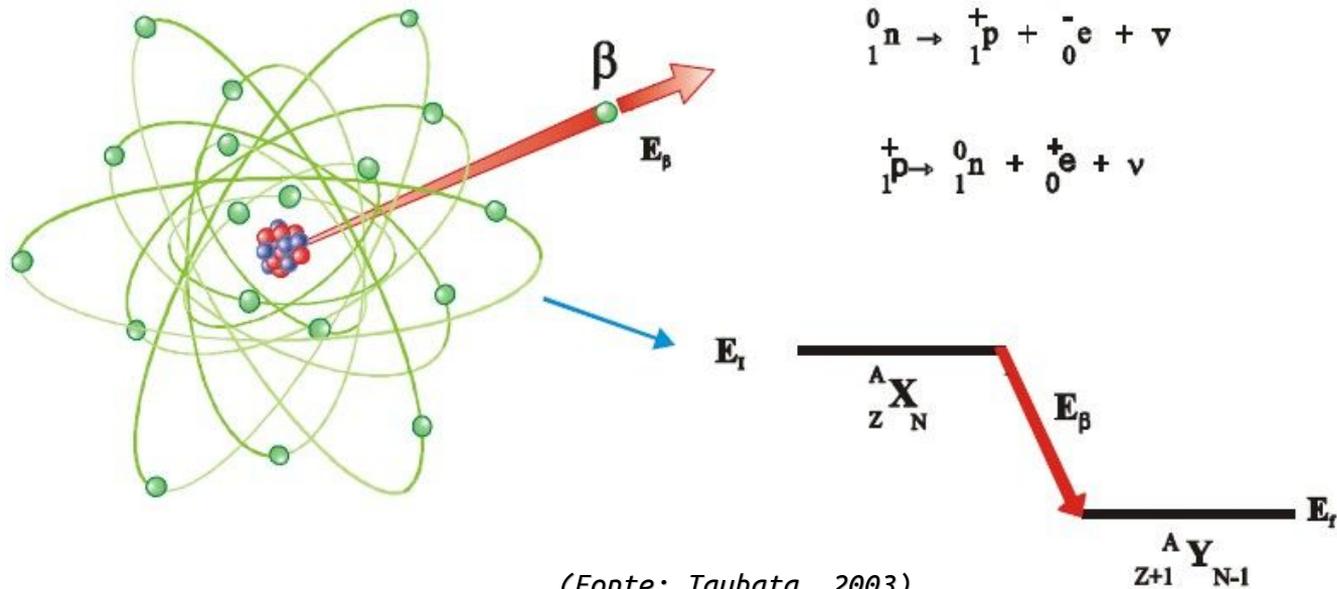
# Conversão interna



(Fonte: Tauhata, 2003)

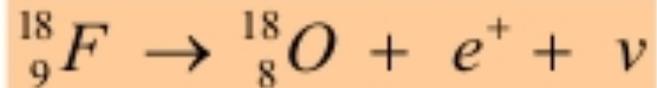
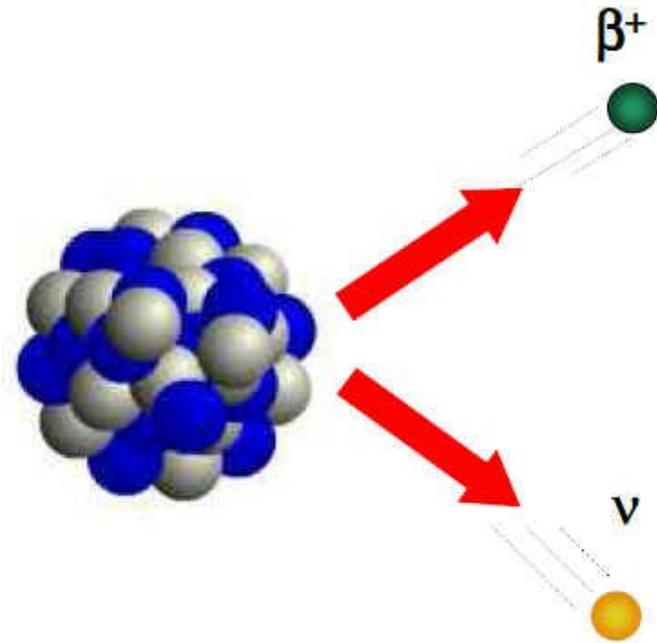
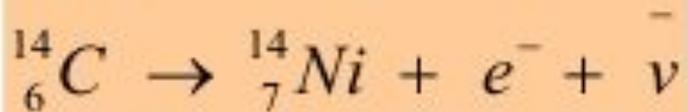
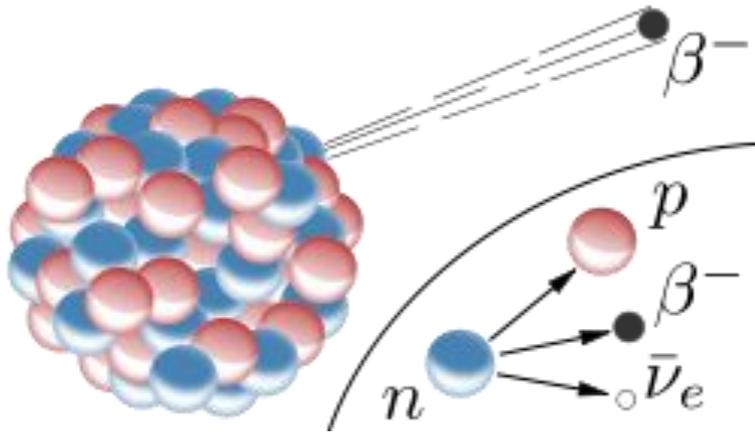
# Radiação $\beta$

- 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.

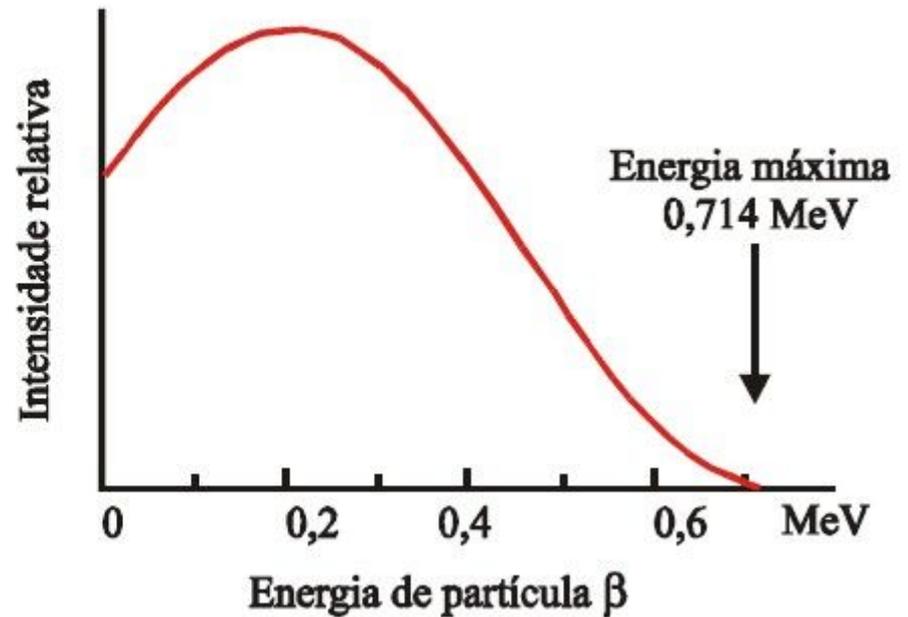
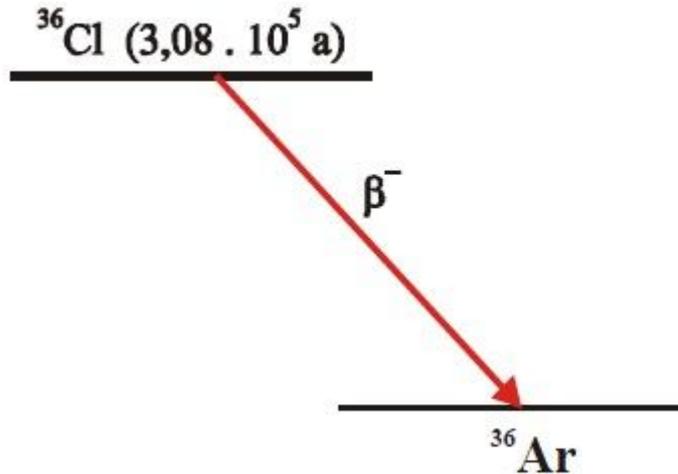


(Fonte: Tauhata, 2003)

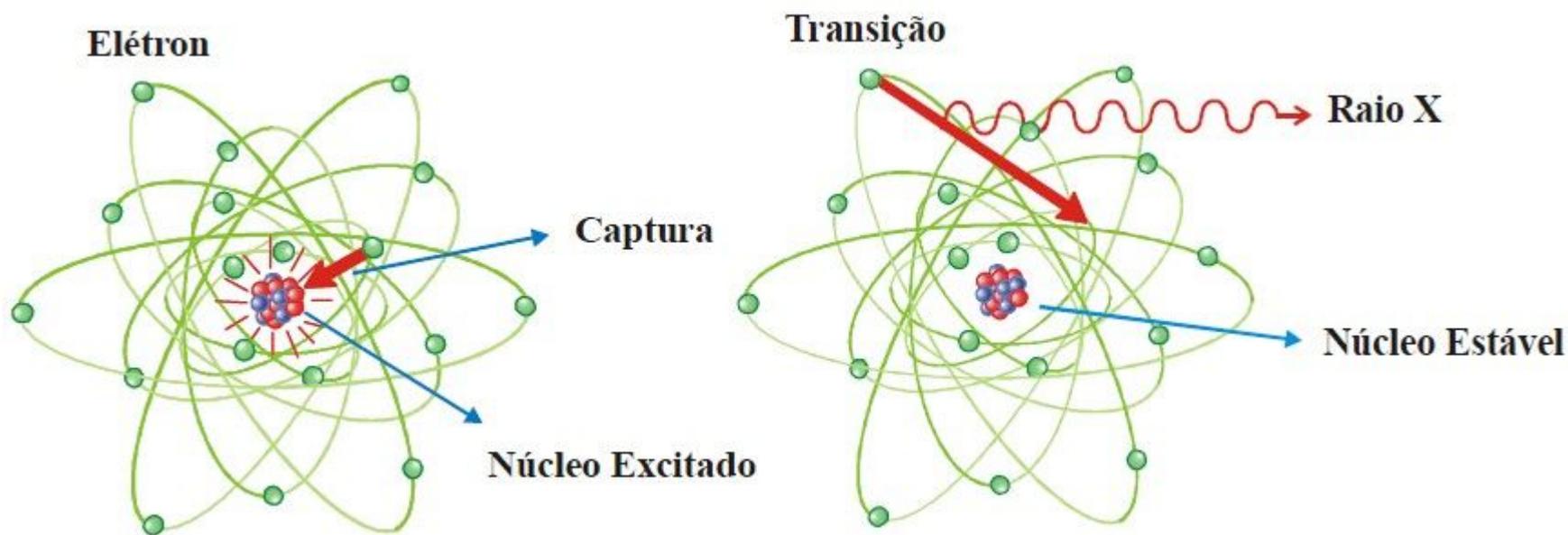
# Radiação $\beta^-$ e $\beta^+$



# Radiação $\beta^-$ e $\beta^+$



# Captura eletrônica ou de elétrons

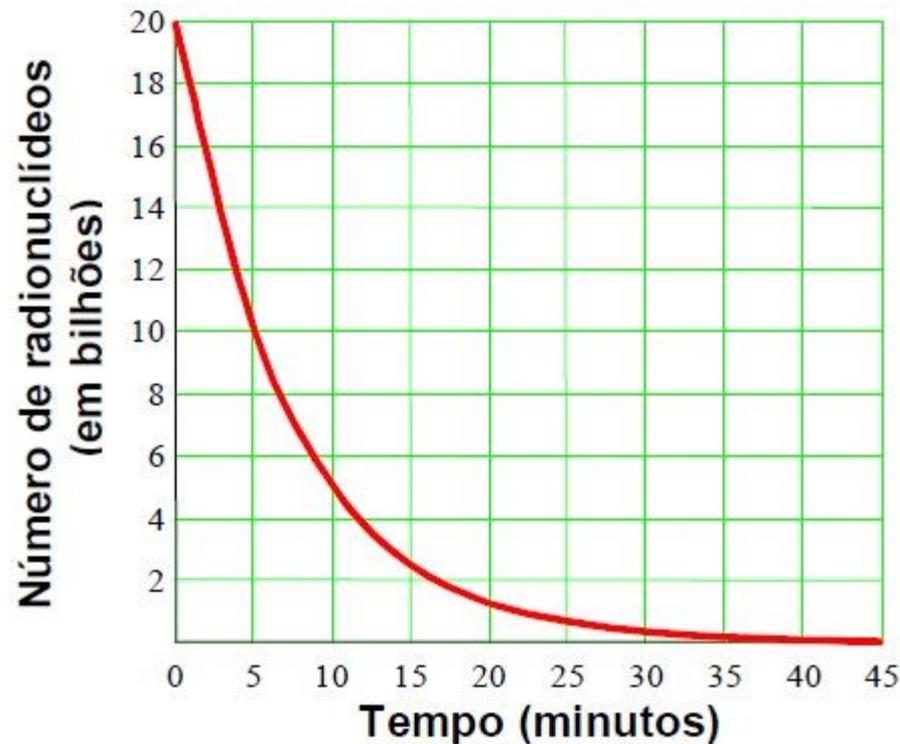


# Constante de decaimento radioativo ( $\lambda$ )

- 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 ( $\lambda$ ).

# Lei do decaimento radioativo

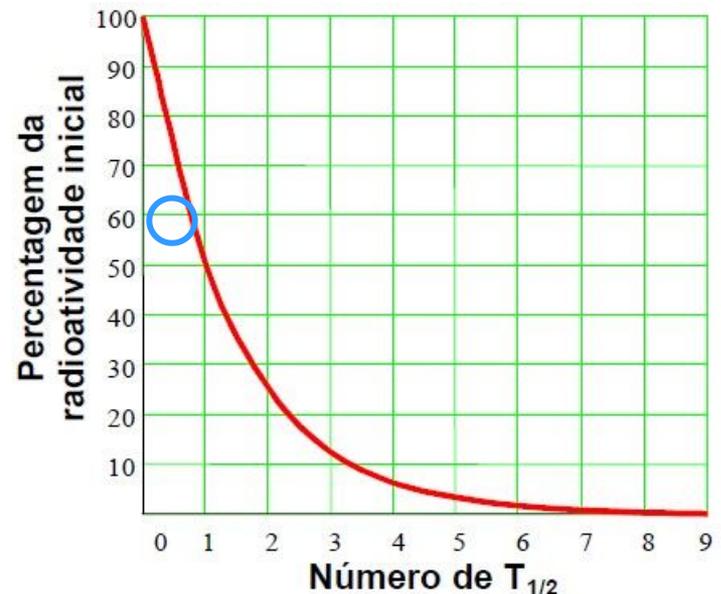
$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$



# Meia Vida física

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

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



# Conceito de atividade (A)

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

$$A = \frac{dN}{dt} \quad [s^{-1}]$$

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad [Bq]$$

- 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) =  $3,7 \times 10^{10}$  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

## Múltiplos e símbolos

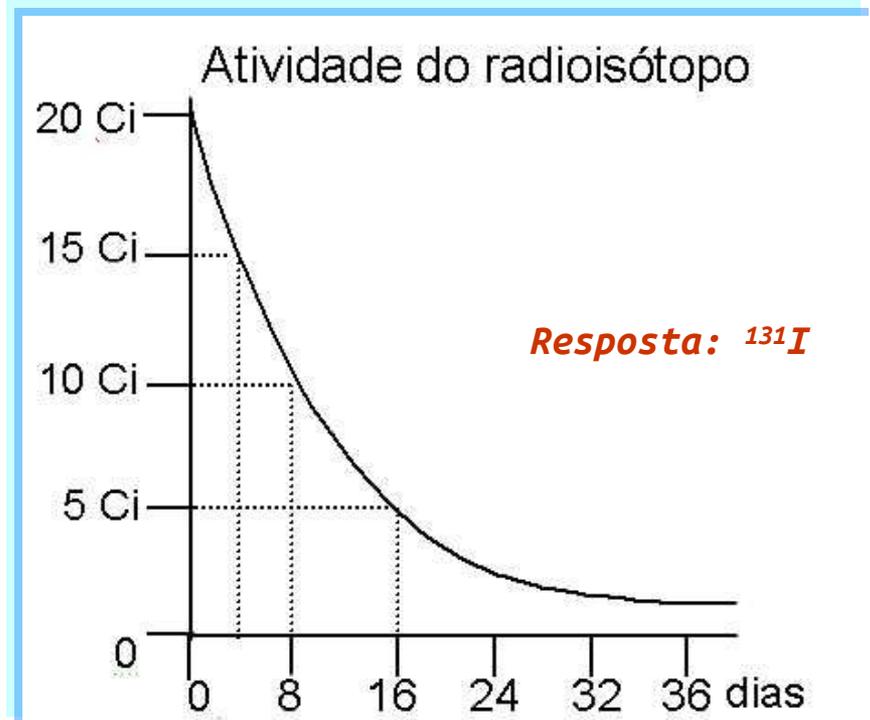
Kilo	k	$10^3$	kBq	kCi
Mega	M	$10^6$	MBq	MCi
Giga	G	$10^9$	GBq	GCi
Tera	T	$10^{12}$	TBq	TCi
Peta	P	$10^{15}$	PBq	PCi

## Submúltiplos e símbolos

Mili	m	$10^{-3}$	mR	mSv
Micro	$\mu$	$10^{-6}$	$\mu$ R	$\mu$ Sv
Nano	n	$10^{-9}$	nR	nSv
Pico	p	$10^{-12}$	pR	pSv
Femto	f	$10^{-15}$	fR	fSv

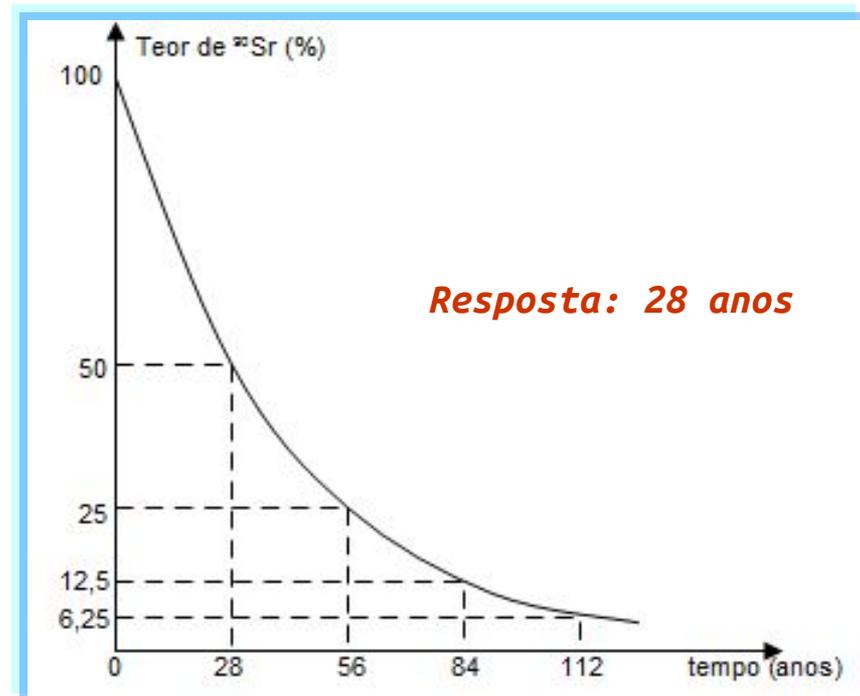
# Exercício com resposta

1. 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.



# Exercício com resposta

2. 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  $^{90}\text{Sr}$  ?



# Exercício com resposta

3. Explique o processo de decaimento por emissão de radiação gama e a diferença dos raios X.

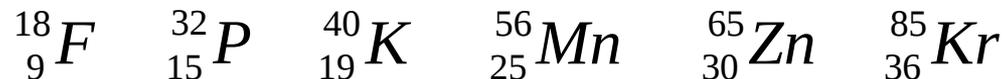
Ocorre quando núcleos ainda em estados excitados, emitem sua energia excedente sob a forma de radiação eletromagnética ionizante, denominada radiação gama ( $\gamma$ ). Ela se diferencia dos raios X quanto a sua origem, os raios gama são originários do núcleo do átomo e os raios X da eletrosfera dos átomos.

4. 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.

# Exercícios

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?



# Exercícios

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.

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 83,0 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 77,0 KeV ioniza um átomo de bário ejetando um elétron da camada N com 12,0 keV de energia cinética. Qual a energia da radiação X espalhada?
  - o *a energia de ligação da camada N do bário é 0,3 keV*

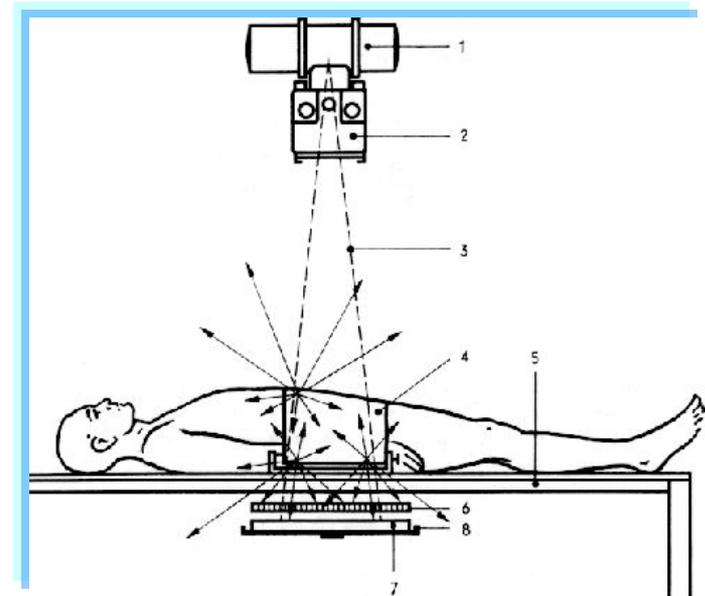
14. Explique o processo de decaimento por emissão de radiação  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  e  $\alpha$ .
15. A meia-vida do  $^{234}\text{tório}$  é de 24 dias. Uma amostra contém 8,0 g de  $^{234}\text{tório}$ . Após quantos dias a amostra irá conter apenas 2g de  $^{234}\text{tório}$ ? Justifique.
- a)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

# Grandezas radiológicas e unidades

- Exposição (X);
- Dose absorvida (D);
- Flênciã ( $\phi$ ) e Fluênciã de energia ( $\psi$ )
- Kerma (K);
- Dose equivalente ( $H_T$ );
- Dose Efetiva (E);
- Operacionais:
  - Equivalente de dose ambiente -  $H^*(d)$ ;
  - Equivalente de dose pessoal -  $H_p(d)$ ;
  - Dose individual (*Photon Dose Equivalent*) -  $H_x$ .

# 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.



# 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.

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

- 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:  $1 R = 2,58 \times 10^{-4} [C \cdot kg^{-1}]$

# 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:

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

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

# Fatores de exposição (Gamão) de algumas fontes radioativas

Radionuclídeo	$\Gamma$ (R.m <sup>2</sup> /h.Ci)	Radionuclídeo	$\Gamma$ (R.m <sup>2</sup> /h.Ci)
<sup>131</sup> I	0,22	<sup>75</sup> Se	0,15
<sup>125</sup> I	0,07	<sup>60</sup> Co	1,32
<sup>99m</sup> Tc	0,12	<sup>24</sup> Na	1,84
<sup>192</sup> Ir	0,48	<sup>198</sup> Au	0,23
<sup>226</sup> Ra	0,83	<sup>124</sup> Sb	0,98
<sup>137</sup> Cs	0,33	<sup>54</sup> Mn	0,47

# Dose absorvida (D)

- É a energia média ( $dE$ ) depositada pela radiação ionizante na matéria de massa  $dm$ , num ponto de interesse.

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

- 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:  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$

# 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:

$$D_{ar} = X \cdot \left( \frac{W}{e} \right)_{ar}$$

- 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 rad/R

# Relação entre dose absorvida

- Determinada a Dose no Ar,  $D_{ar}$ , pode-se obter a dose em um meio material qualquer, para a mesma exposição, por meio de um fator de conversão. Para a mesma condição de irradiação, a relação entre os valores da dose absorvida no material  $m$  e no ar, pode ser expressa por:

$$f = \frac{D_m}{D_{ar}} = \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_{ar}}$$

- Onde
  - $(\mu_{en}/\rho)_{ar}$  é o coeficiente de absorção de energia em massa do **ar**, e
  - $(\mu_{en}/\rho)_m$  é o coeficiente de absorção de energia em massa do material  **$m$**

# Relação entre dose absorvida

- A tabela abaixo lista valores de  $f$  para água e meios que são tecidos do corpo humano. Verifica-se que, para fótons com energia na faixa utilizada para radiografias, o osso chega a absorver até seis vezes mais energia por unidade de massa do que o tecido mole, e a gordura absorve um pouco menos que o tecido mole.

Energia (keV)	$f$ (água/ar)	$f$ (músculo/ar)	$f$ (gordura/ar)	$f$ (osso/ar)
10	1,04	1,05	0,62	5,65
30	1,01	1,05	0,62	6,96
50	1,03	1,06	0,75	5,70
100	1,10	1,09	1,05	1,97
200	1,11	1,10	1,11	1,12
600	1,11	1,10	1,11	1,03
1250	1,11	1,10	1,11	1,03

# Fluência ( $\phi$ ) e Fluência de energia ( $\psi$ )

- Fluência ( $\phi$ )

Grandeza radiométrica definida pelo quociente de  $dN$  por  $da$ , onde  $dN$  é o número de partículas ou fótons incidentes em uma esfera infinitesimal com área de seção reta perpendicular ao feixe  $da$ . A unidade de fluência é  $m^{-2}$ .

$$\phi = dN / da$$

- Fluência de energia ( $\psi$ )

- Onde  $dR$  é a energia radiante incidente em uma esfera infinitesimal de seção reta  $da$ . Para um campo monoenergético:

$$\psi_E = E \cdot \phi$$

- As grandezas escalares fluência e fluência de energia são relevantes na determinação da grandeza *kerma*.

$$\psi = dR / da$$

# Kerma (K)

- 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  $dm$ .

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

- A grandeza kerma ocorre no ponto de interação do fóton e a dose absorvida ocorre ao longo da trajetória do elétron.
- A grandeza kerma está relacionada a fluência de energia por meio do coeficiente transferência de energia em massa ( $\mu_{tr}/\rho$ ).

$$K_m = \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_m \cdot \Psi$$

# Coefficiente de transferência de energia em massa ( $\mu_{tr}/\rho$ )

Energia (MeV)	( $\mu_{tr}/\rho$ )
0,010	4,6100
0,015	1,2700
0,020	0,5110
0,030	0,1480
0,040	0,0668
0,050	0,0406
0,060	0,0305
0,080	0,0243
0,100	0,0234
0,150	0,0250
0,200	0,0268
0,300	0,0287

Unidade:  $\text{cm}^2/\text{g}$

# Kerma (K) x Dose absorvida (D)

- A diferença entre kerma e dose absorvida, é que a dose absorvida depende da energia média absorvida na região de interação (local) da radiação ionizante e o kerma depende da energia total transferida ao material.
- Isto significa que, do valor transferido, uma parte pode ser dissipada longe do local de interação radiação ionizante, caracterizando uma perda radioativa.

# 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:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \left[ Sv \text{ ou } J \cdot kg^{-1} \right]$$

- 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 equivalent man*) que é relacionado com a unidade do SI por:  $1 Sv = 100 rem$

# 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: < 10keV 10 - 100 keV >100keV a 2 MeV >2 MeV a 20 MeV >20MeV	5 10 20 10 5	Função contínua da energia do neutron
Prótons	5	2 (prótons e pions)
Partículas alfa, elementos de fissão, núcleos pesados	20	20

Os valores da norma CNEN NN-3.01 correspondem aos do ICRP-60.

(Fonte: Okuno e Yoshimura, 2010) 113

# 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.

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

- 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>

Os valores da norma CNEN NN-3.01 correspondem aos do ICRP-60.

(Fonte: Okuno e Yoshimura, 2010)

# Grandezas Operacionais

- As grandezas de proteção utilizadas para limitar dose, não são mensuráveis. Como é possível, então, saber se um IOE está com suas doses dentro dos limites estabelecidos?
- Para correlacionar essas grandezas não mensuráveis com o campo de radiação, a ICRU e a ICRP introduziram as grandezas operacionais para medidas de exposição à radiação externa.
- As duas principais grandezas introduzidas são o ***equivalente de dose pessoal***,  $H_p(d)$ , e o ***equivalente de dose ambiente***,  $H^*(d)$ , à profundidade  $d$ , para os casos de irradiação com fontes externas ao corpo.

# Grandezas Operacionais

- O *equivalente de dose ambiente*  $H^*(d)$  é usado, para avaliar a exposição ocupacional quando as pessoas que estão num dado ambiente podem não utilizar monitores individuais.
- A grandeza  $H^*(d)$  é utilizada pela portaria 453/98, no controle de área de serviços, para verificar a conformidade com os níveis de restrição de dose em monitoração de área.
- A grandeza  $H^*(d)$  pode ser obtida pelo produto da dose absorvida em um ponto pelo fator de qualidade  $Q$  da radiação, correspondendo ao que seria produzido em uma esfera de tecido equivalente de 30 cm de diâmetro, na profundidade  $d$ .

$$H^*(d) = Q \cdot D$$

\* Para feixes aos quais estamos potencialmente expostos (raios X, gama e elétrons), como o fator de qualidade da radiação  $Q$  é 1.

# Grandezas Operacionais

- O *equivalente de dose pessoal*  $H_p(d)$  é uma grandeza para monitoração individual externa.
- A grandeza  $H_p(d)$  é obtida pelo produto da dose absorvida em um ponto, na profundidade  $d$  do corpo humano, pelo fator de qualidade  $Q$  da radiação neste ponto. Deve-se medir  $H_p(10 \text{ mm})$  dose equivalente no cristalino e  $H_p(7 \text{ mm})$  na pele e nas extremidades.
- O valor de  $H_p(d)$  é obtido por meio do monitor individual que o IOE utiliza no local do corpo representativo da exposição, geralmente no tórax.
- O valor obtido deve fornecer uma estimativa conservadora da dose efetiva. A unidade de  $H_p(d)$  é o sievert (Sv).

$$H_p(d) = Q \cdot D$$

# Grandezas Operacionais

- **Dose individual ( $H_x$ )** – Photon Dose Equivalent

As calibrações de monitores individuais em  $H_p(d)$  precisam ser feitas em simuladores (cilindro da ICRU). Coeficientes de conversão tabelados são usados para converter, em condições padronizadas, o valor do kerma no ar (fótons).

A grandeza  $H_x$  é atualmente usada no Brasil para monitoração individual externa de corpo inteiro, pois não necessita de simuladores para a calibração dos dosímetros (monitores) individuais, que são calibrados livres no ar.

O fator de conversão ( $f = 1,14 \text{ Sv/Gy}$  para kerma no ar) independe da energia. É uma boa estimativa da dose efetiva.

$$H_x = K_{ar} \cdot f$$

# Exercício resolvido

1. Uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$  com atividade de 24 Ci será utilizada na realização de END para a aferição de juntas soldadas a uma distância de 2,0 m. Qual a taxa de exposição em 1h?

(Sabendo que para o  $^{192}\text{Ir}$ :  $\tau = 0,48 \text{ R.m}^2/\text{h.Ci}$ )

$$X = \tau \cdot \frac{A \cdot t}{d^2} \quad \rightarrow \quad X = 0,48 \cdot \frac{24 \cdot (1)}{(2,0)^2} \quad \rightarrow \quad X = 2,9 \text{ R/h}$$

# Exercício resolvido

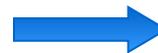
2. Um tecnólogo entrou numa sala de irradiação e não percebeu que uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$  com atividade de 0,43 Ci estava exposta. Foi estimado que o tecnólogo permaneceu a 1,5 m da fonte durante 5,0 minutos. Qual o valor da exposição na entrada da pele do tecnólogo.

(Sabendo que para o  $^{137}\text{Cs}$ :  $\tau = 0,33 \text{ R}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{Ci}$ )

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

$$X = 0,33 \cdot \frac{0,43 \cdot (5/60)}{(1,5)^2}$$

$$X = 0,005255556 \text{ R}$$



$$X = 5,3 \text{ mR}$$

# Exercício resolvido

- Considere duas fontes puntiformes de 1,0 Ci no ar, sendo uma de  $^{137}\text{Cs}$  e outra de  $^{60}\text{Co}$ , afastadas entre si pela distância de 2,0 m. Desprezando atenuação e espalhamento, calcule no ponto médio entre elas:
  - a) a taxa de exposição (em R/h) ;
  - b) a taxa de taxa de dose absorvida no ar (por hora) no SI.

$$X = \Gamma \cdot \frac{A \cdot t}{d^2} \quad X = 0,33 \cdot \frac{1 \cdot (60/60)}{1^2} + 1,32 \cdot \frac{1 \cdot (60/60)}{1^2} \rightarrow X = 1,65 \text{ R/h}$$

$$\text{a) } X = 1,6 \text{ R/h}$$

$$D_{ar} = X \cdot \frac{W}{e_{ar}} \rightarrow D_{ar} = 1,6 \cdot 0,876 / 100 \rightarrow D_{ar} = 0,014 \text{ Gy}$$

$$\text{b) } D_{ar} = 0,014 \text{ Gy}$$

# Exercício resolvido

- 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):
  - 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.

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \left[ Sv \text{ ou } J \cdot kg^{-1} \right]$$

para raios X,  $H_T = 1 \cdot 2,5 \times 10^{-3}$  →  $H_T = 2,5 \times 10^{-3} \text{ Sv ou } 2,5 \text{ mSv}$

para partículas alfa,  $H_T = 20 \cdot 2,5 \times 10^{-3}$  →  $H_T = 50 \times 10^{-3} \text{ Sv ou } 50 \text{ mSv}$

# Exercício resolvido

- 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  $w_T = 1$ )

$$\text{I. } D = 1,3 \cdot 0,876 / 100 \rightarrow D = 0,011 \text{ Gy}$$

$$\text{II. } H_T = 1 \cdot 0,011 \rightarrow H_T = 0,011 \text{ Sv}$$

$$\text{III. } E = 1 \cdot 0,011 \rightarrow E = 0,011 \text{ Sv}$$

# Exercício resolvido

- A radiação emitida por uma fonte de  $^{60}\text{Co}$  com atividade de 5,0 kCi é usada para irradiar um tumor na superfície do paciente durante 2,0 minutos, posicionado a 1,0 m da fonte. A energia média do raio gama emitido pelo  $^{60}\text{Co}$  é de 1250 keV. Considere o tumor com tendo a mesma densidade do músculo. Qual a dose absorvida no tumor?

$$X = \Gamma \cdot \frac{A \cdot t}{d^2} \quad X = 1,32 \cdot \frac{5000 \cdot (2/60)}{(1,0)^2} \quad X = 220 \text{ R}$$

$$D_{ar} = X \cdot (W/e)_{ar} \quad D_{ar} = 220 \cdot 0,876 = 192,72 \text{ rad}$$

$$D_m = f \cdot D_{ar} \quad D_m = 1,10 \cdot 192,72 = 211,99 \text{ rad}$$

$$D_m = \frac{211,99}{100} = 2,1299 \rightarrow D_m = 2,1 \text{ Gy}$$

# Exercícios

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 22,0 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 1,0 h?

(Sabendo que para o Ir-192:  $\Gamma = 0,48 \text{ R.m}^2/\text{h.Ci}$ )

# Exercícios

4. Um tecnólogo entrou numa sala de irradiação e não percebeu que uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$  com atividade de 5,3 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:  $\Gamma = 0,33 \text{ R}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{Ci}$ )

5. Um grupo de IOE foi exposto a um campo de raios X resultando em uma dose absorvida de 1,0 mGy. O mesmo grupo de IOE também foi exposto a uma fonte emissora de partículas alfa resultando em uma dose absorvida de 1,0 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.

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.

# Física das Radiações

*Prof. Luciano Santa Rita Oliveira*



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