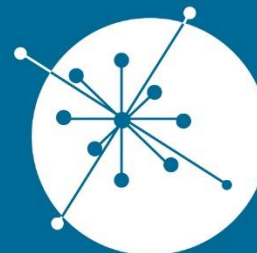
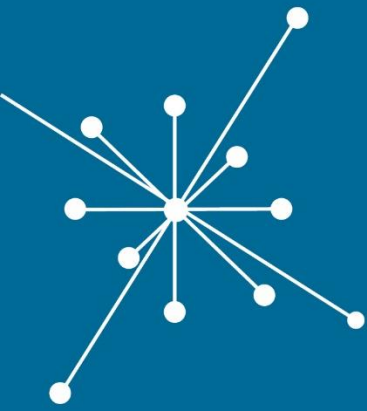
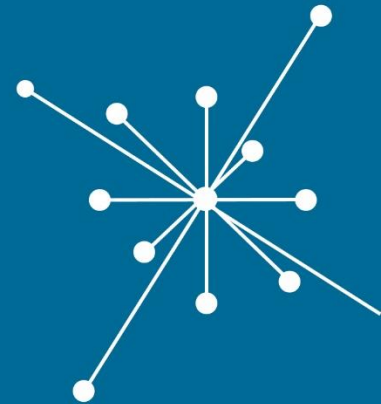


Decaimentos radioativos

FÍSICA DAS RADIAÇÕES I

Paulo R. Costa



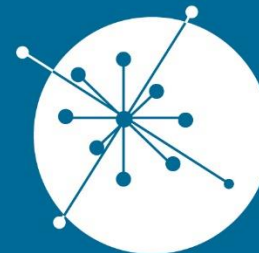
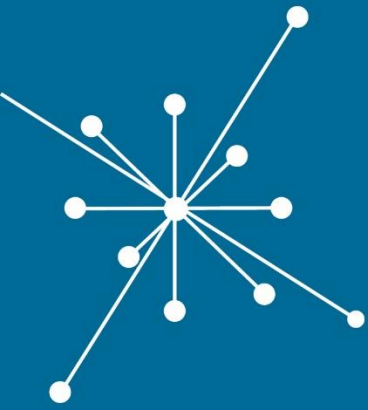
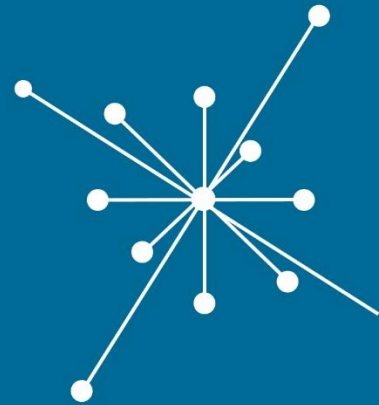
GRUPO DE
**DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES**
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

Sumário

- Atividade de uma amostra radioativa
- Crescimento radioativo
- Decaimentos sucessivos
- Tipos de decaimento
- Radioisótopos na Medicina
- Radioproteção no uso de radioisótopos

Atividade de uma amostra radioativa



GRUPO DE
**DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES**
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

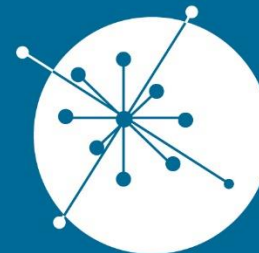
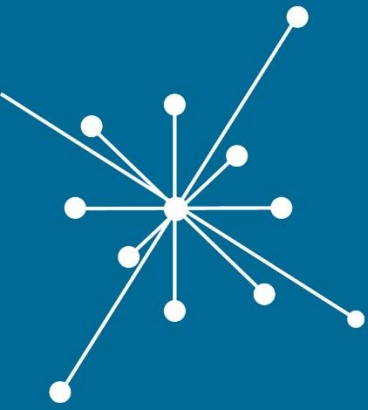
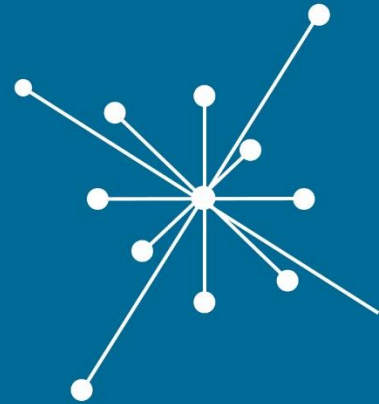
Atividade de uma amostra radioativa

- Atividade
 - Número de decaimentos por unidade de tempo

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad \Rightarrow \quad A = \lambda N = N_0 \lambda e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{\tau} t} = A_0 2^{-\frac{t}{\tau}}$$

- Unidade no SI: Becquerel (Bq) = desintegrações/s
 - Unidade antiga: Curie (Ci)
 - $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
- 2 EXEMPLOS DO LIVRO (4.2 E 4.3)

Crescimento radioativo



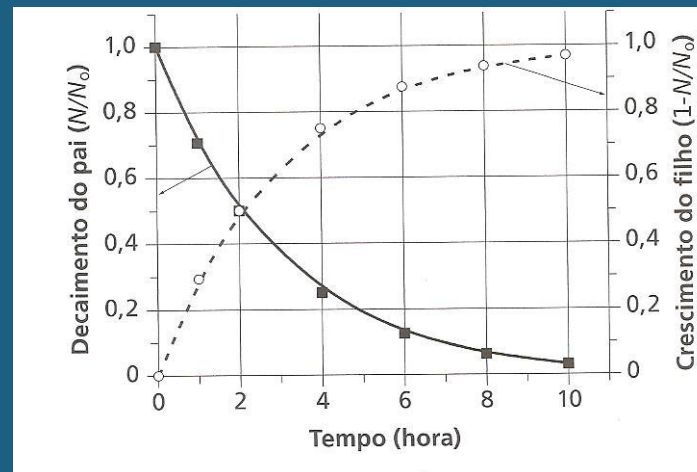
GRUPO DE
**DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES**
e FÍSICA MÉDICA

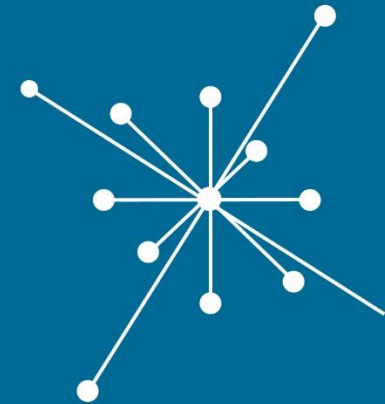
IFUSP - Instituto de Física da USP

Crescimento radioativo

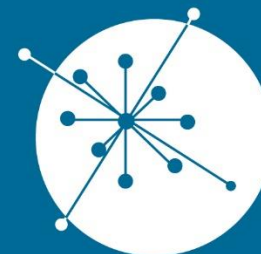
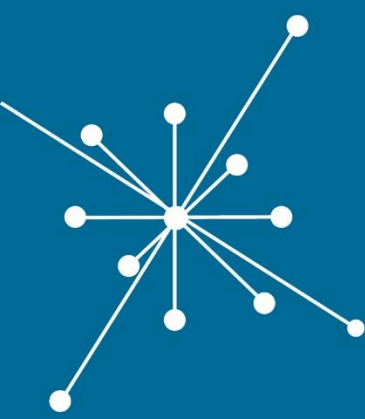
- Decaimento → outro nuclídeo
 - Estável
 - Instável
- Exemplo de filho estável

$$N_f(t) = N_{0\text{ pai}} - N_{\text{pai}}(t) = N_{0\text{ pai}} - N_{0\text{ pai}}e^{-\lambda t} = N_{0\text{ pai}}[1 - e^{-\lambda t}]$$





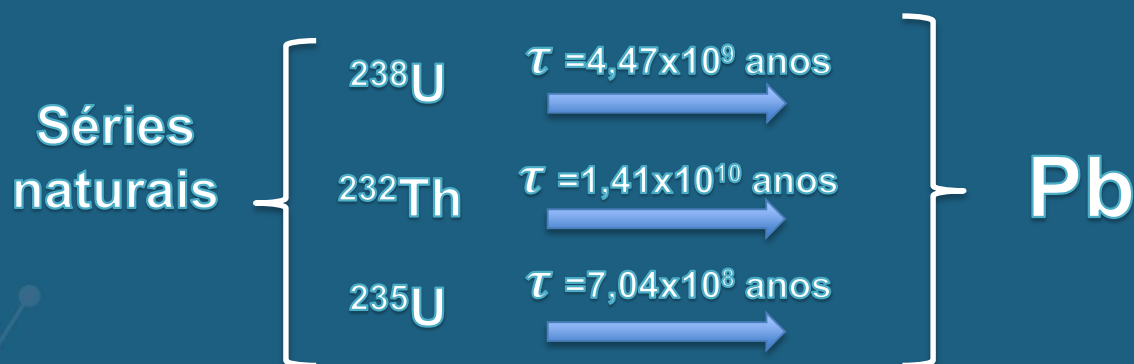
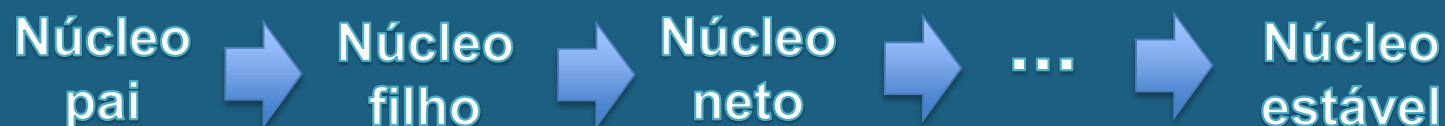
Decaimentos sucessivos



GRUPO DE
**DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES**
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

Decaimentos sucessivos



Decaimentos sucessivos



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \\ \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \\ \vdots \\ \frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n \end{array} \right.$$

$$N_n(t) = \prod_{j=1}^{n-1} \lambda_{j,j+1} \sum_{j=1}^{j=n} \frac{N_i(0) e^{-\lambda_j t}}{\prod_{\substack{p=i \\ p \neq j}}^n (\lambda_p - \lambda_j)}$$

**Primeira
geração**

$$N_{filho} = \lambda_{pai} N_{pai}(0) \frac{(e^{-\lambda_{pai} t} - e^{-\lambda_{filho} t})}{(\lambda_{filho} - \lambda_{pai})}$$

$$A_{filho}(t) = \frac{\lambda_{filho} A_{pai}(0)}{(\lambda_{filho} - \lambda_{pai})} (e^{-\lambda_{pai} t} - e^{-\lambda_{filho} t}) = \frac{\lambda_{filho} A_{pai}(t)}{(\lambda_{filho} - \lambda_{pai})} (1 - e^{-(\lambda_{filho} - \lambda_{pai}) t})$$

Decaimentos sucessivos

– Equilíbrio Transiente

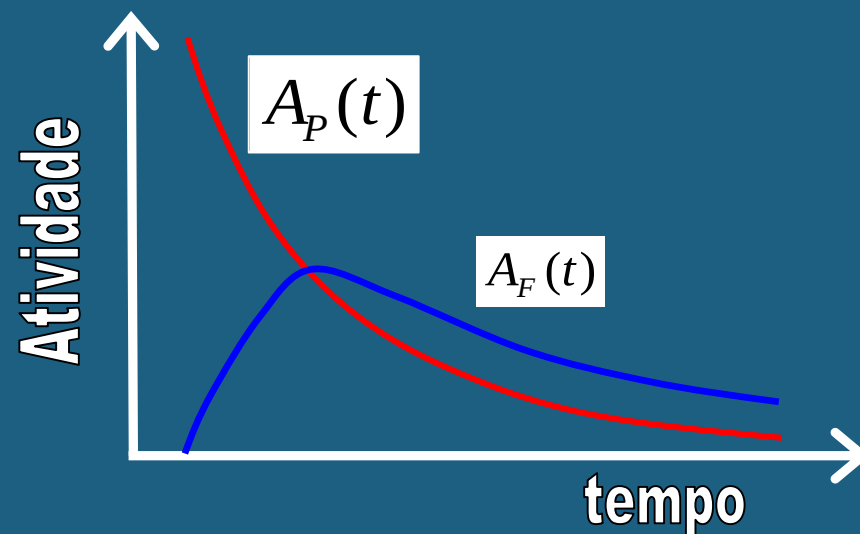
$$\tau_{pai} > \tau_{filho} \Rightarrow \lambda_{pai} < \lambda_{filho}$$

- $A_f(t)$ cai rapidamente com o tempo

$$A_f(t) = \frac{\lambda_f}{\lambda_f - \lambda_p} \times A_p(0) \times e^{-\lambda_p t} = \frac{\lambda_f}{\lambda_f - \lambda_p} \times A_p(t)$$

– como $\frac{\lambda_f}{\lambda_f - \lambda_p} > 1 \Rightarrow A_f(t) > A_p(t)$

durante o equilíbrio transiente
se 100% do nuclídeo pai
decai no nuclídeo filho



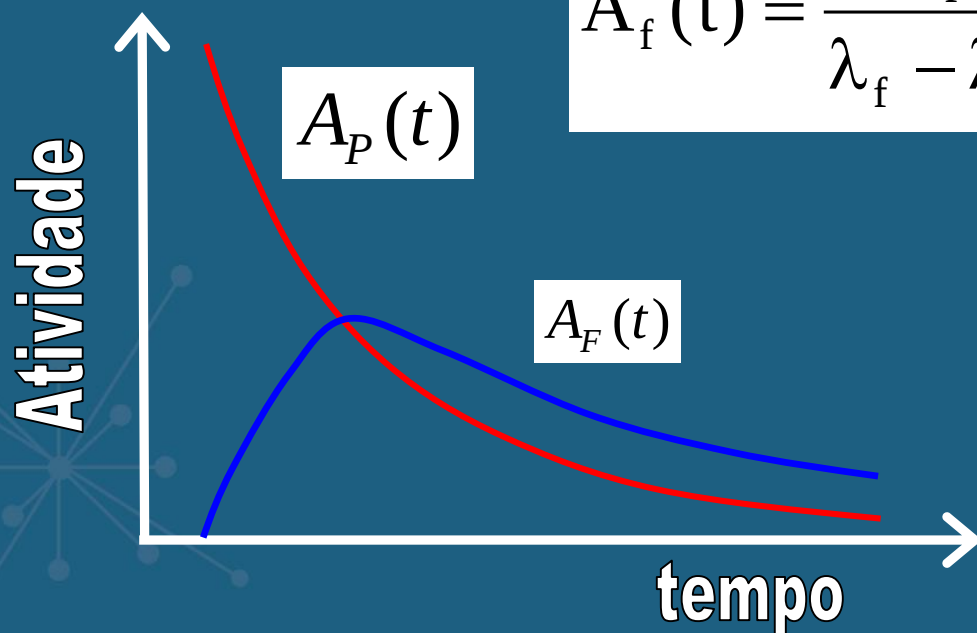
Decaimentos sucessivos

- Exemplo → gerador de tecnécio



Extração química
para uso clínico

Nêutrons
em um reator



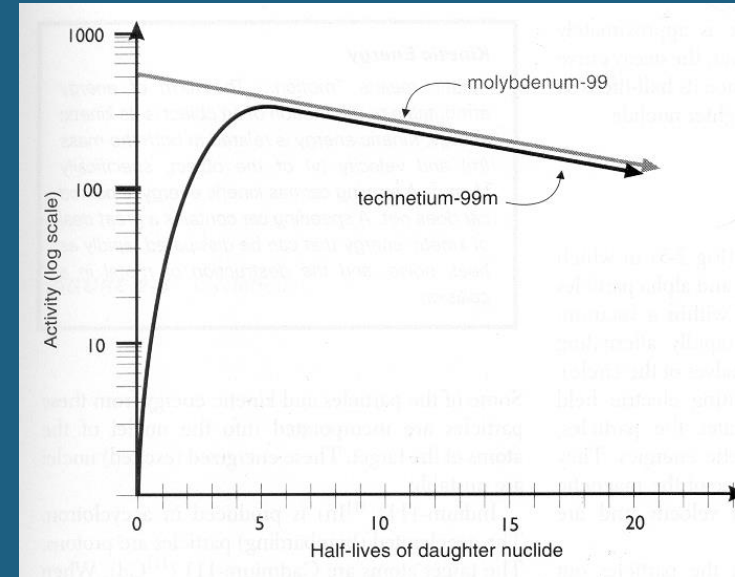
$$A_f(t) = \frac{\lambda_f}{\lambda_f - \lambda_p} \times A_p(0) \times (e^{-\lambda_p t} - e^{-\lambda_f t})$$

Decaimentos sucessivos

– Para o decaimento



- 86% do ^{99}Mo decai para o $^{99\text{m}}\text{Tc}$
 - $T_{1/2}\text{Mo} = 67\text{h}$
 - $T_{1/2}\text{Tc} = 6\text{h}$



$$\begin{aligned} A_{^{99\text{m}}\text{Tc}}(t) &= 0,86 \frac{\lambda_{^{99\text{m}}\text{Tc}}}{\lambda_{^{99\text{m}}\text{Tc}} - \lambda_{^{99}\text{Mo}}} \times A_{^{99}\text{Mo}}(t) = \\ &= 0,86 \frac{0,116}{0,116 - 0,010} \times A_{^{99}\text{Mo}}(t) = 0,94 \times A_{^{99}\text{Mo}}(t) \end{aligned}$$

Decaimentos sucessivos

– Geradores de Tecnécio

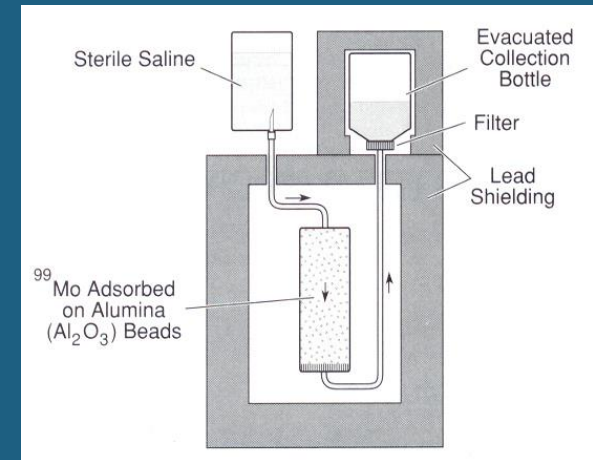
- Isótopo pai

- ^{99}Mo em alumina (Al_2O_3) ou resina
- Meia-vida: 67h



- Produto final

- Eluição (lavagem) com solução fisiológica salina
 - » Tc menos ligado na coluna que o Mo
- Produto: pertecnetato de sódio
 - » Combinação com o agente em um kit



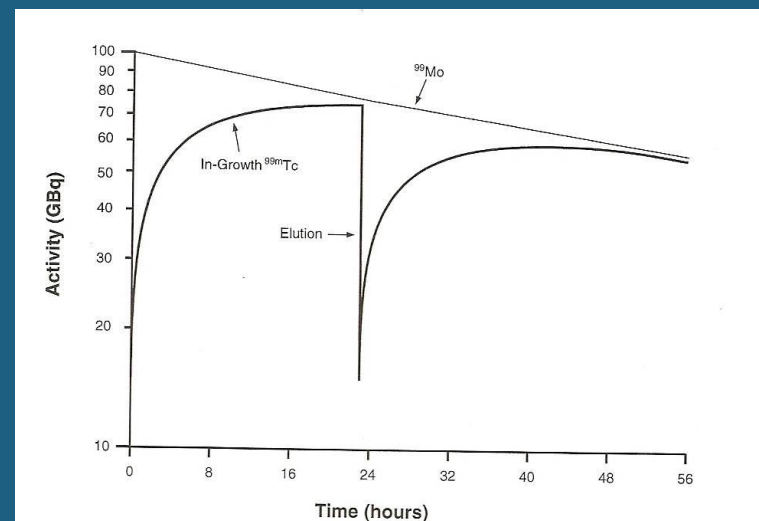
Decaimentos sucessivos

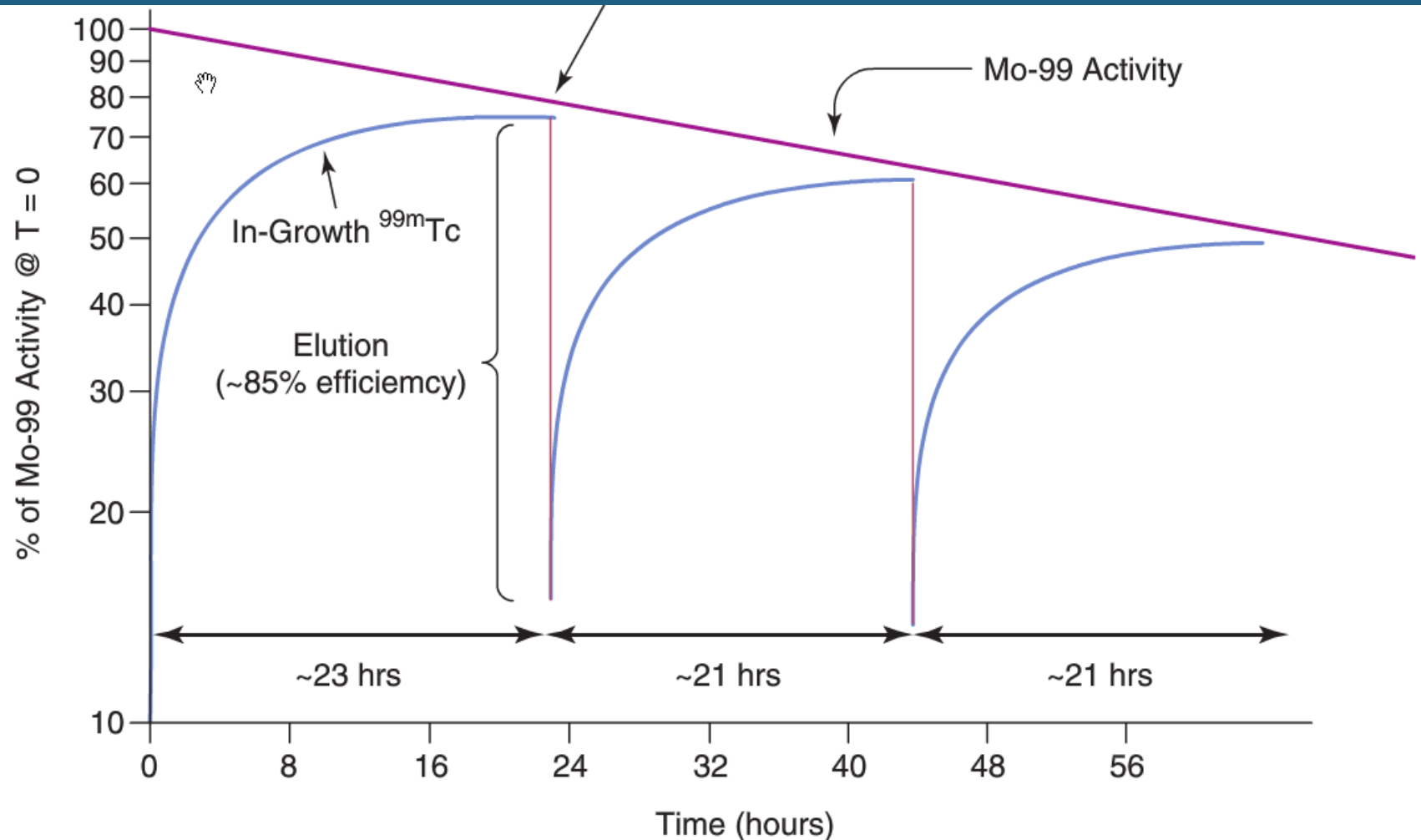
– Tempos no gerador

- Re-estabelecimento do Tc
 - Meia-vida (6h)
- Após eluição
 - Equilíbrio transiente entre Mo e Tc após 4-5 meias-vidas (24h)
 - Retirada do Tc – uma vez por dia
 - Durante o equilíbrio

$$A_f(t) = \frac{\lambda_f}{\lambda_f - \lambda_p} \times A_p(0) \times (e^{-\lambda_p t} - e^{-\lambda_f t})$$

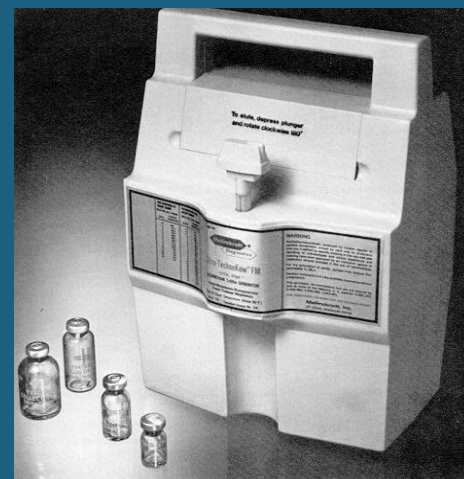
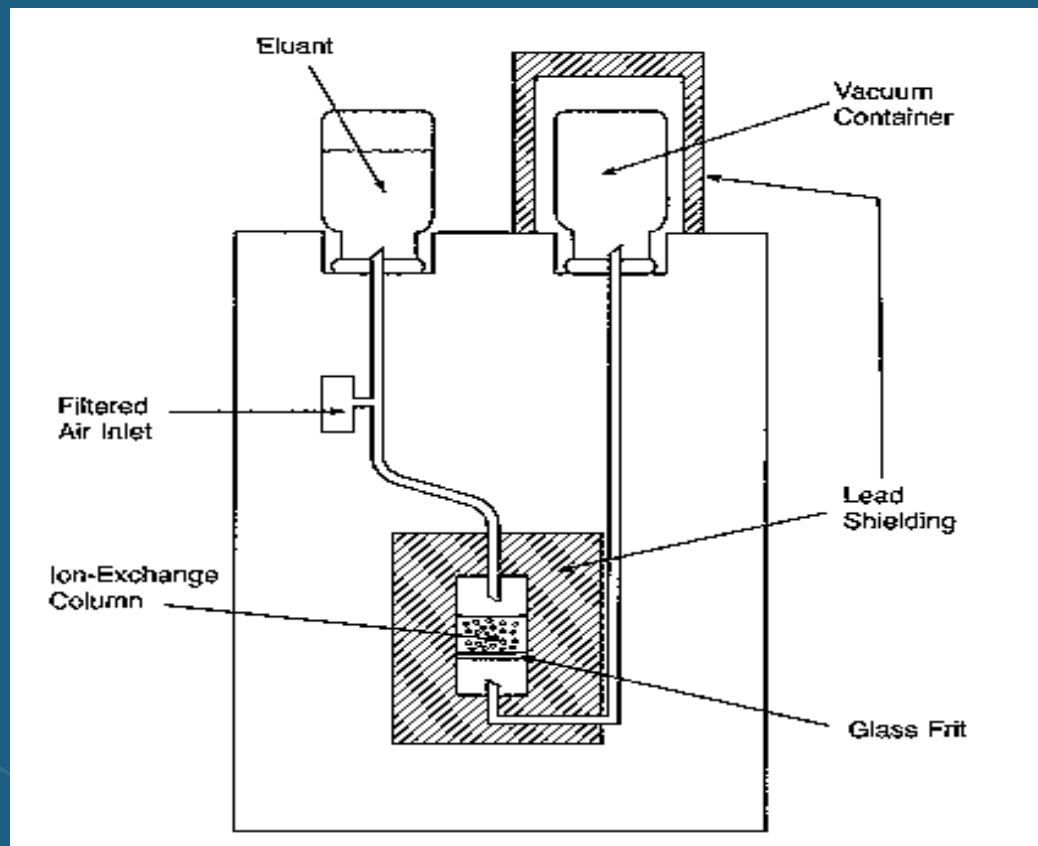
- Atividade específica cai com o tempo
 - » Utilidade dos geradores: ~ 1 semana





■ **FIGURE 16-9** Time-activity curve of a molybdenum 99/technetium 99m radionuclide generator system demonstrating the ingrowth of Tc-99m and subsequent elution. The time to maximum Tc-99m activity, approximately 23 h, assumes there is no residual Tc-99m from a previous elution of the column. Typical elution efficiency is approximately 85% (~15% residual Tc-99m), thus time to maximum Tc-99m activity following the first elution is approximately 21 h. Approximately 50% of the maximum Tc-99m activity is obtained in 6 h. The maximum Tc-99m activity in the eluate is typically 80% to 90% of Mo-99 activity.

Decaimentos sucessivos



Decaimentos sucessivos



Decaimentos sucessivos



Decaimentos sucessivos

– Outros tipos de geradores

TABLE 16-2 CLINICALLY USED RADIONUCLIDE GENERATOR SYSTEMS IN NUCLEAR MEDICINE

PARENT	DECAY MODE AND (HALF-LIFE)	DAUGHTER	TIME OF MAXIMAL INGROWTH (EQUILIBRIUM)	DECAY MODE AND (HALF-LIFE)	DECAY PRODUCT
^{68}Ge	EC (271 d)	^{68}Ga	~6.5 h (S)	β^+ EC (68 min)	^{68}Zn (stable)
^{90}Sr	β^- (28.8 y)	^{90}Y	~1 mo (S)	β^- (2.67 d)	^{90}Zr (stable)
^{81}Rb	β^+ EC (4.6 h)	$^{81\text{m}}\text{Kr}$	~80 s (S)	IT (13.5 s)	$^{81}\text{Kr}^a$
^{82}Sr	EC (25.5 d)	^{82}Rb	~7.5 min (S)	β^+ (75 s)	^{82}Kr (stable)
^{99}Mo	β^- (67 h)	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	~24 h (T)	IT (6 h)	$^{99}\text{Tc}^a$

Note: Decay modes: EC, electron capture; β^+ , positron emission; β^- , beta-minus; IT, isometric transition (i.e., gamma ray emission). Radionuclide equilibrium; T, transient; S, secular.

^aThese nuclides have half-lives greater than 10^5 y and for medical applications can be considered to be essentially stable.

Decaimentos sucessivos

– Outros tipos de geradores

Generator (Parent–Daughter)	Clinical Uses of Daughter Nuclide	Half-Life of Parent ($T_{1/2p}$)	Half-Life of Daughter ($T_{1/2d}$)	$T_{1/2p}/T_{1/2d}$
^{99}Mo – ^{99m}Tc (Molybdenum-99–Technetium-99m)	Used in most radiopharmaceuticals for nuclear medicine studies	67 h	6 h	11.2
^{82}Sr – ^{82}Rb (Strontium-82–Rubidium-82)	Cardiac perfusion imaging	600 h	0.021 h (75 s)	28,571
^{81}Rb – ^{81m}Kr (Rubidium-81–Krypton-81m)	Lung ventilation scans	4.7 h	0.004 h (13 s)	1175

Decaimentos sucessivos

- Equilíbrio secular

$$\tau_{pai} \gg \tau_{filho} \Rightarrow \lambda_{pai} \ll \lambda_{filho}$$

$$\begin{aligned} N_{filho} &= \lambda_{pai} N_{pai}(0) \frac{(e^{-\lambda_{pai}t} - e^{-\lambda_{filho}t})}{(\lambda_{filho} - \lambda_{pai})} = \\ &= N_{pai}(0) \frac{\lambda_{pai}}{\lambda_{filho}} (1 - e^{-\lambda_{filho}t}) \end{aligned}$$


$$t \gg \tau_{filho} \Rightarrow A_{filho}(t) = A_{pai}(t)$$

Decaimentos sucessivos

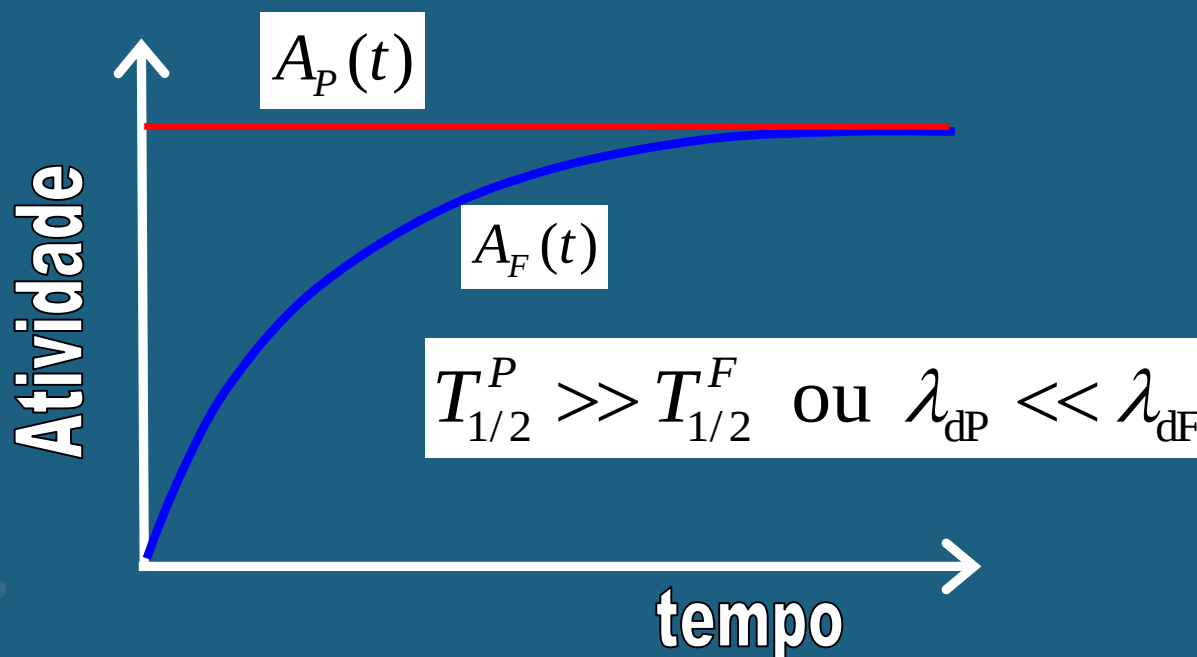
— Equilíbrio Secular

- $T_{1/2}^{\text{pai}} > 100 T_{1/2}^{\text{filho}}$

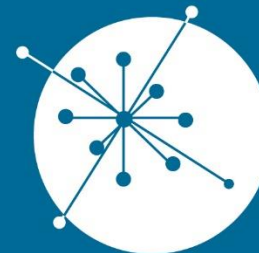
- $\lambda_f \gg \lambda_p$

- $A_f(t)$ aproximadamente constante

$$A_f(t) = A_p(t)$$



Tipos de decaimento

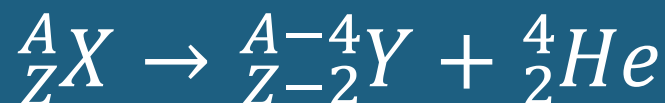


GRUPO DE
**DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES**
e FÍSICA MÉDICA

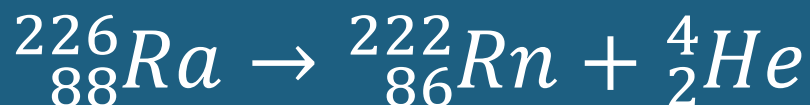
IFUSP - Instituto de Física da USP

Tipos de decaimento

- Decaimento α

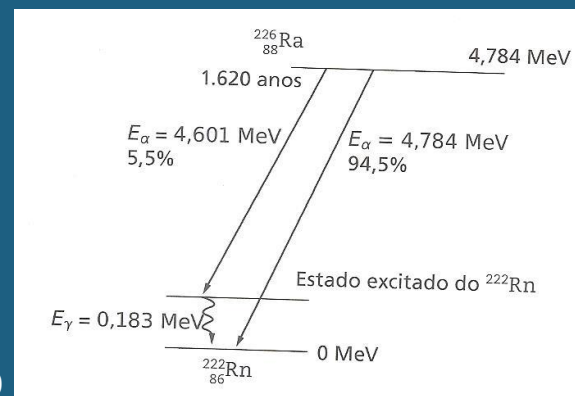


$$Q = (m_X - m_Y - m_\alpha)c^2 = (m_X - m_Y - m_\alpha)931,5 \text{ MeV/uma}$$



$$Q = [226,025406 - 88m_e - (222,017574 + 86m_e) - (4,002603 - 2m_e)] \times 931,50$$

$$Q = 4,871 \text{ MeV}$$



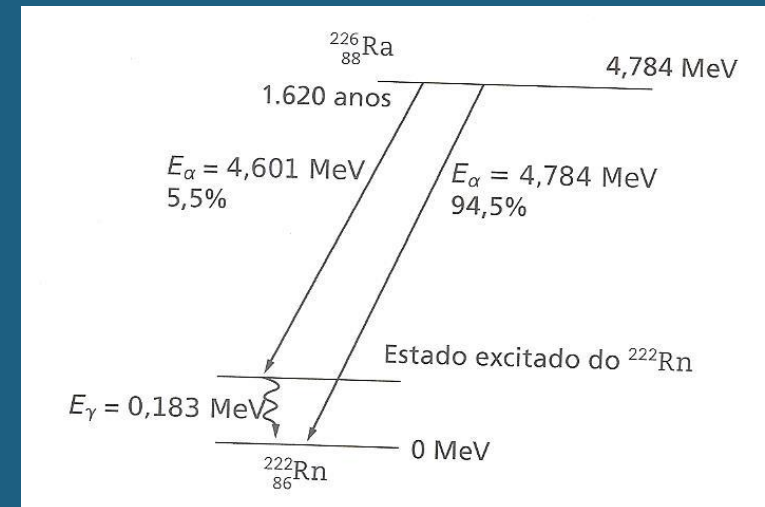
Tipos de decaimento

- Decaimentos parciais

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \cdots \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

$\lambda_i = n_i \lambda \rightarrow n_i$: probabilidades de decaimentos parciais

$$A = \sum_{i=1}^n A_i = N \sum_{i=1}^n \lambda_i = N \lambda = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

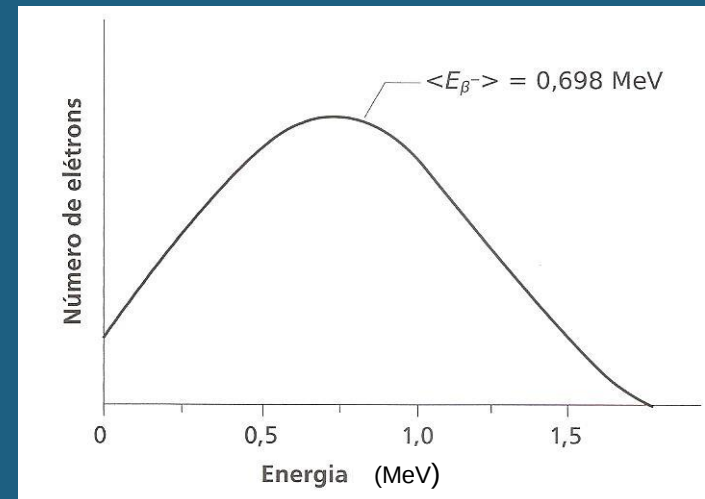
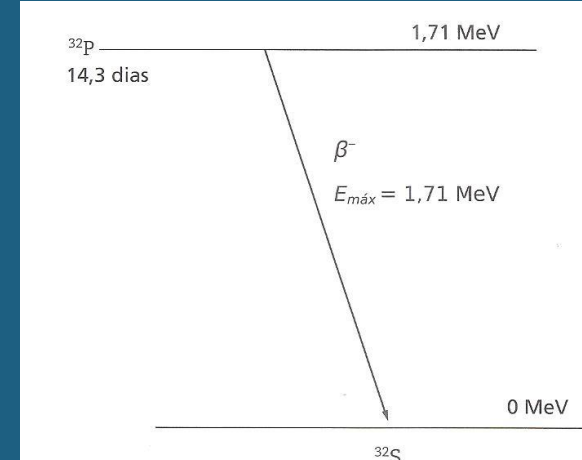


Tipos de decaimento

- Decaimento β^- $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
– Núcleos com excesso de nêutrons



$$Q = 1,71\text{MeV}$$



Tipos de decaimento

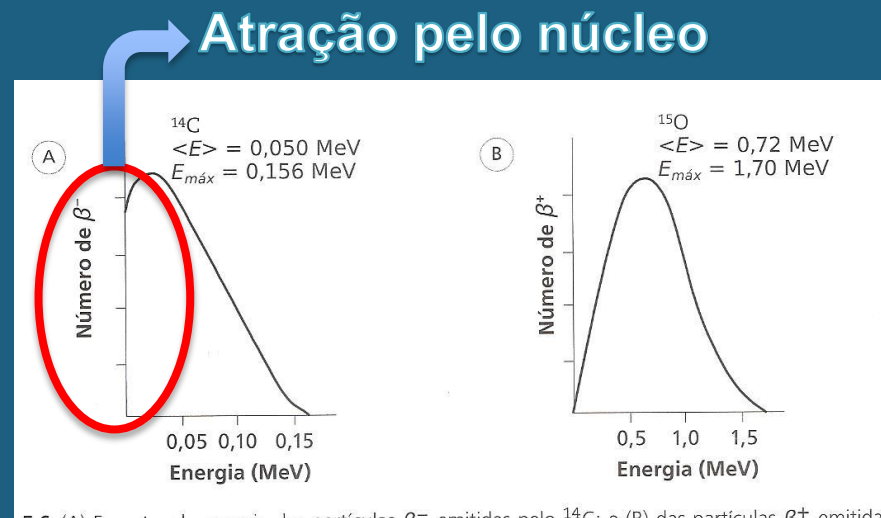
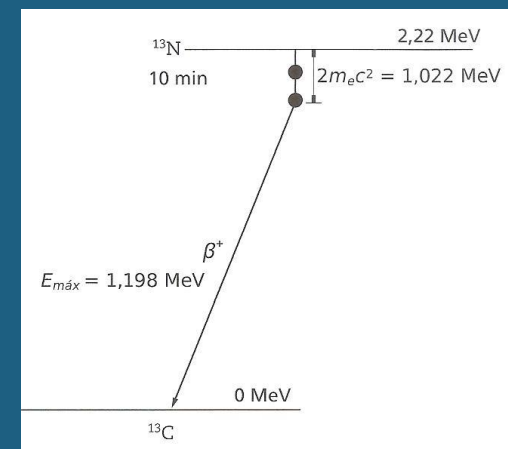
- Decaimento β^+ $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
– Núcleos com excesso de prótons



$$Q = (M_{pai}(A, Z) - M_{filho}(A, Z - 1) - 2m_e)c^2$$



$$Q = 1,198 \text{ MeV}$$



Aplicações em arqueologia

- Datação por C-14
 - Carbono – elemento mais abundante nos seres vivos após o H e o O
 - ^{12}C e ^{13}C – 98,892% e 1,108%
 - ^{14}C instável
 - Interação de nêutrons da radiação cósmica com ^{14}N
 - $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + ^1_1\text{H}$
 - Razão entre as abundâncias isotópicas constante
 - $1,3 \times 10^{-12}$ todos os organismos VIVOS com a mesma proporção
 - Após o organismo morrer, a proporção diminui
 - Meia vida do ^{14}C = 5730 anos

Exemplo

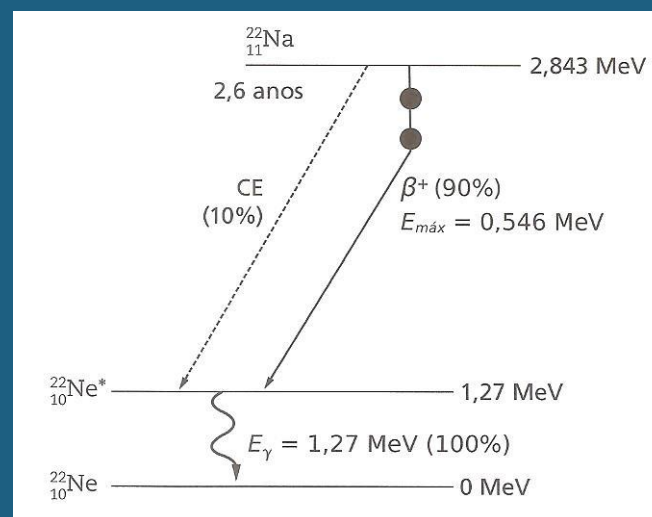
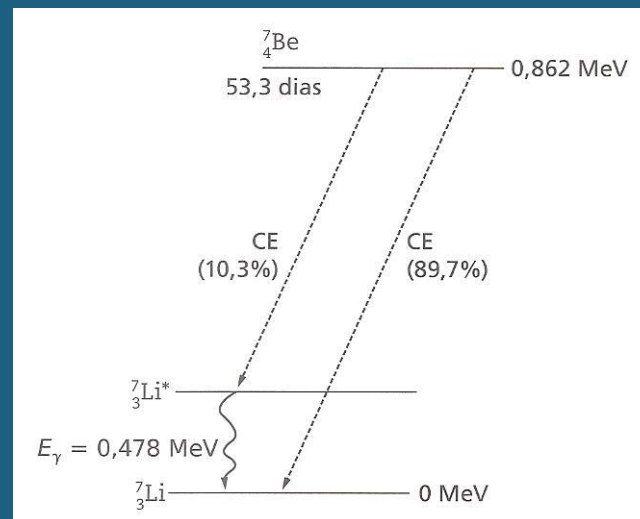
- Pedaco de carvão vegetal com 25g
 - Atividade do ^{14}C = 4,2 Bq
 - (a) equação do decaimento
 - (b) sabendo
 - $M(^{14}\text{C}) = 14,003242\text{u}$ e $M(^{14}\text{N}) = 14,003074\text{u}$
 - Energia máxima da partícula beta emitida
 - (c) em que ano a árvore foi cortada?

Exemplo

- (a) ${}^{14}_7\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\beta + {}^0_0\bar{\nu}$
- (b) $M({}^{14}\text{C}) - M({}^{14}\text{N}) =$
- $= 14,003242\text{u} - 14,003074\text{u} = 0,000168\text{u} \times 931,5 \text{ MeV/u}$
- $= 156 \text{ keV}$
- (c) supondo que toda a amostra seja de ${}^{12}\text{C} \rightarrow 12\text{g} = 6 \times 10^{23}$ átomos
- Em $25\text{g} \rightarrow 12,5 \times 10^{23}$ átomos $\rightarrow 1,625 \times 10^{12}$ átomos de ${}^{14}\text{C}$
- $A = 0,693 \times N / 5730 = 6,24 \text{ Bq}$ (qdo a árvore foi cortada)
- Logo: $\ln(4,2/6,24) = (-0,693 \times t / 5730) \rightarrow t = 3273 \text{ anos}$

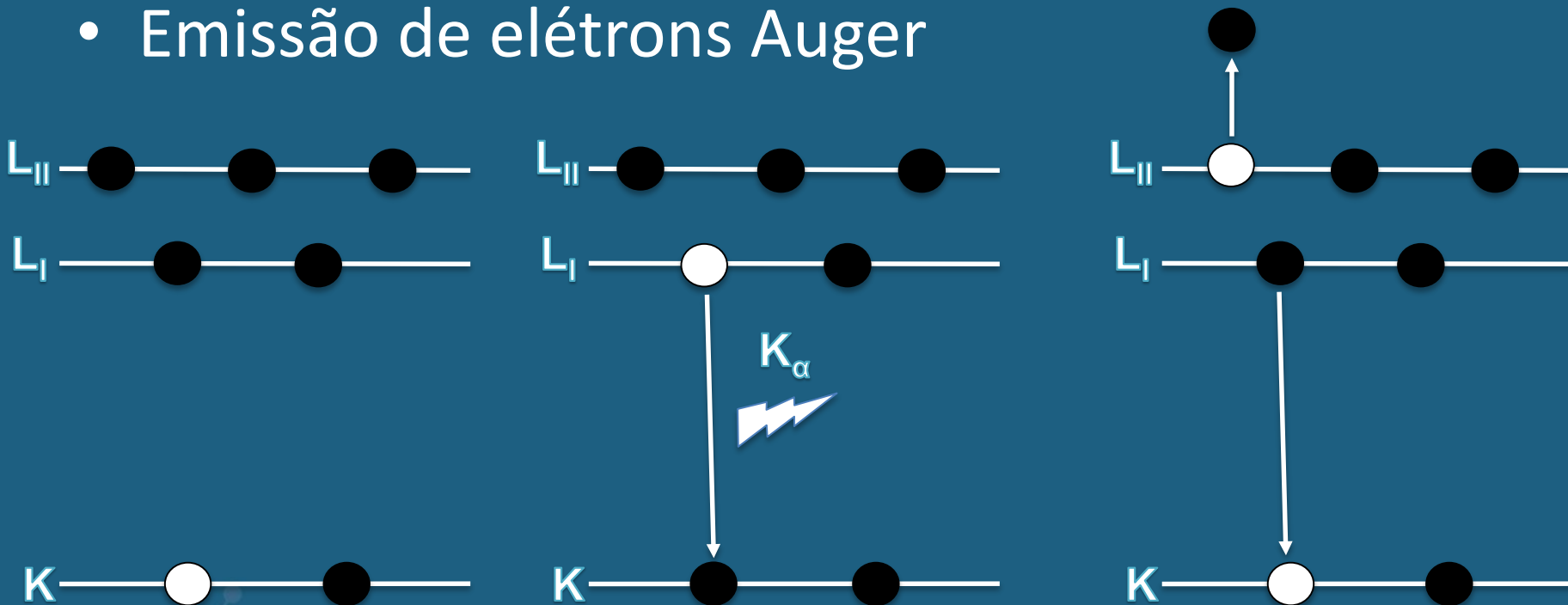
Tipos de decaimento

- Captura eletrônica (CE)
 - Núcleos com excesso de prótons
 - Com excesso de energia menor que $2m_e c^2$



Tipos de decaimento

- Emissão de elétrons Auger



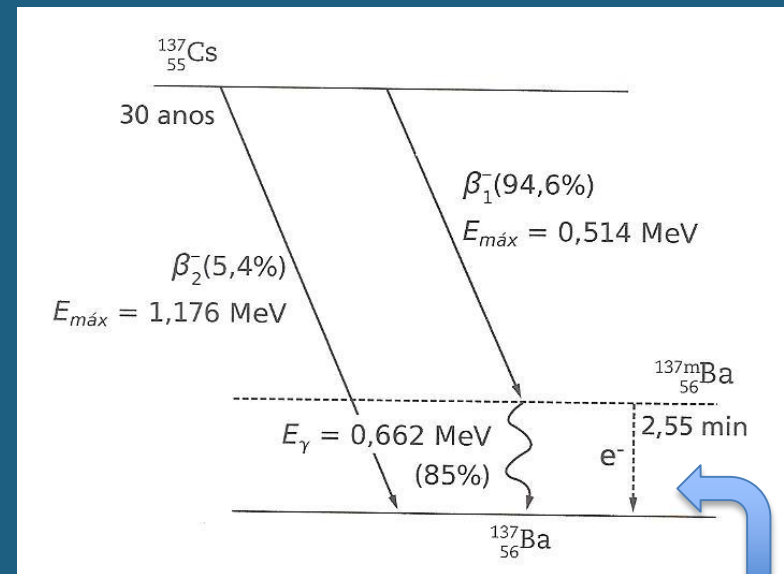
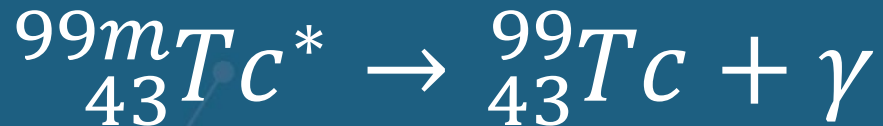
Tipos de decaimento

- Decaimento γ e conversão interna



Transições isoméricas

- segundos, horas ou dias
- estado metaestável



Conversão
interna

Tipos de decaimento

- Instabilidade dos isótopos

Tab. 5.1 ISÓTOPOS DO IODO COM DECAIMENTO MAIS PROVÁVEL E MEIA-VIDA

Número de massa A	Número de nêutrons	Decaimento mais provável	Meia-vida
117	64	β^+	2,3 min
118	65	β^+	13,7 min
119	66	β^+	19,1 min
120	67	β^+	81 min
121	68	CE	2,12 h
122	69	β^+	3,6 min
123	70	CE	13,2 h
124	71	CE	4,2 d
125	72	CE	60 d
126	73	CE	13,2 d
127	74		estável
128	75	β^-	25 min
129	76	β^-	$1,72 \times 10^7$ ano
130	77	β^-	12,5 h
131	78	β^-	8,05 h
132	79	β^-	2,3 h
133	80	β^-	21 h
134	81	β^-	53 min
135	82	β^-	6,61 h
136	83	β^-	83 s

Radioisótopos na Medicina

EMISSORES β -

- mais utilizados em terapia
- permitem uma dose de radiação uniforme

Terapia com radionuclídeos

Radionuclídeos emissores de partículas diretamente ionizantes (partículas α , β , ou *elétrons Auger*) são indicados para tratamento de tumores

EMISSORES α

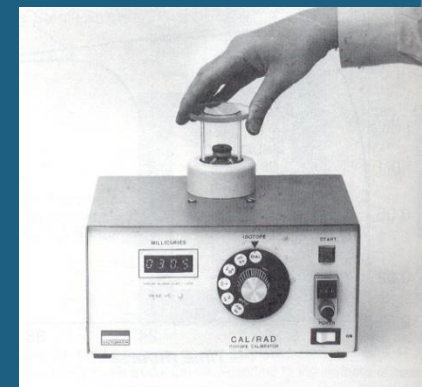
- pequeno alcance
- 100 radionuclídeos
- a maioria com meia-vida longa
- difícil produção
- apenas três com aplicação terapêutica em estudo.

EMISSORES DE ELÉTRONS AUGER

- capacidade ionizante baixa no citoplasma das células, mas elevada, quando incorporados em compostos que interagem diretamente com o DNA
- não existem radiofármacos comercializados
- área ativa de investigação.

Produção de radioisótopos

- Garantia da qualidade dos radiofármacos
 - Radionuclídeo
 - Deve ser puro
 - Contaminação por alumínio da coluna de troca
 - Para o ^{99m}Tc
 - 0,1% de Mo no máximo
 - Para 1mCi (37MBq) ^{99m}Tc somente 1 μ Ci (37kBq) de ^{99}Mo
 - 1 – 10% pode ser aceitável
 - Atividade
 - Contador de poço
 - » Calibrado com fontes de ^{57}Co , ^{60}Co e ^{137}Cs



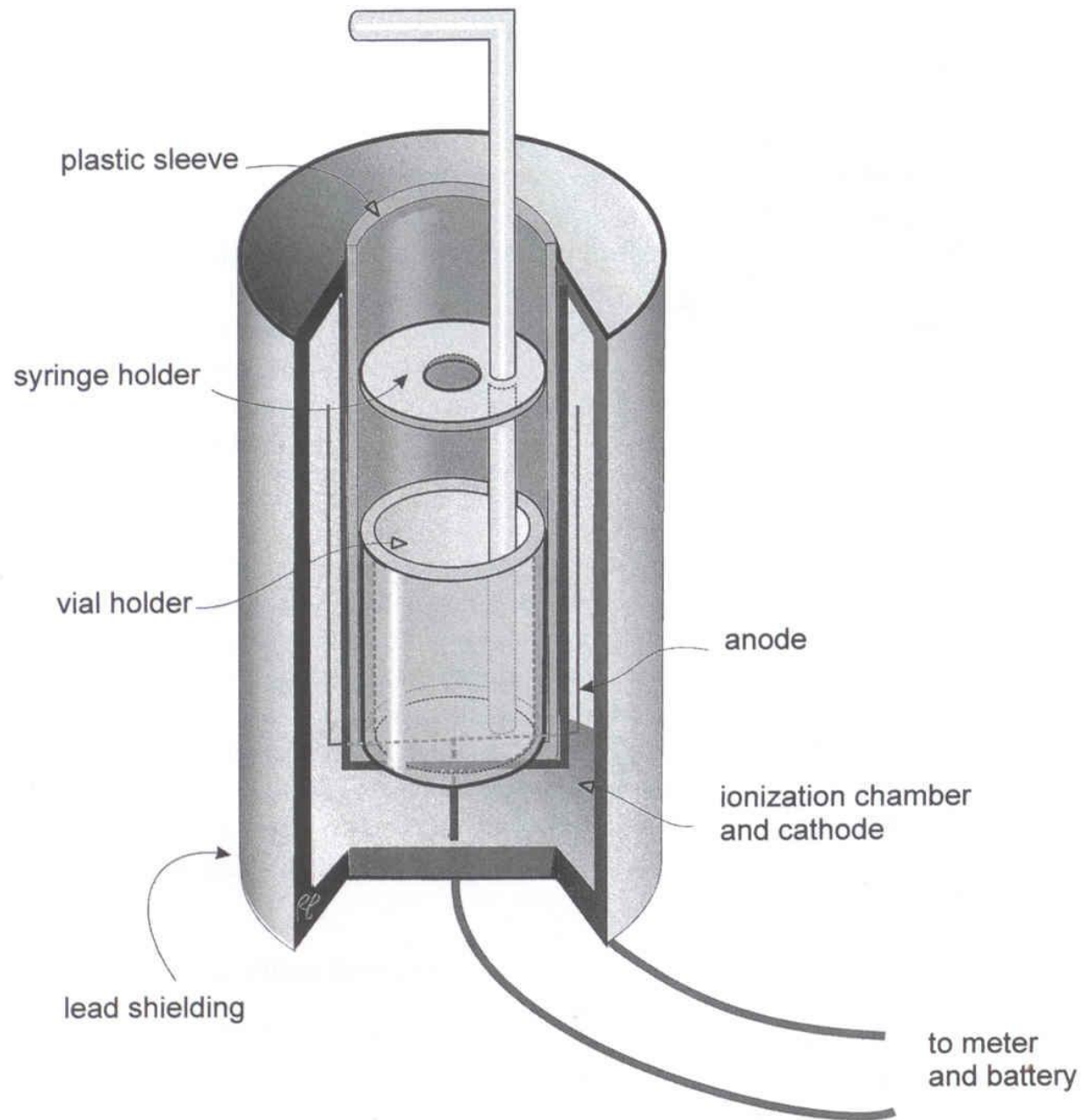


FIGURE 4-9 *Dose calibrator.*

Radioproteção no uso de radioisótopos

- Programa de segurança radiológica
 - Seguir princípio ALARA
 - Tempo de exposição deve ser o mínimo possível
 - Manter a maior distância possível das fontes
 - Blindagem deve ser utilizada quando necessária
 - Seringas e frascos com elutantes
 - Castelos de Pb para preparação dos fármacos



Radioproteção no uso de radioisótopos

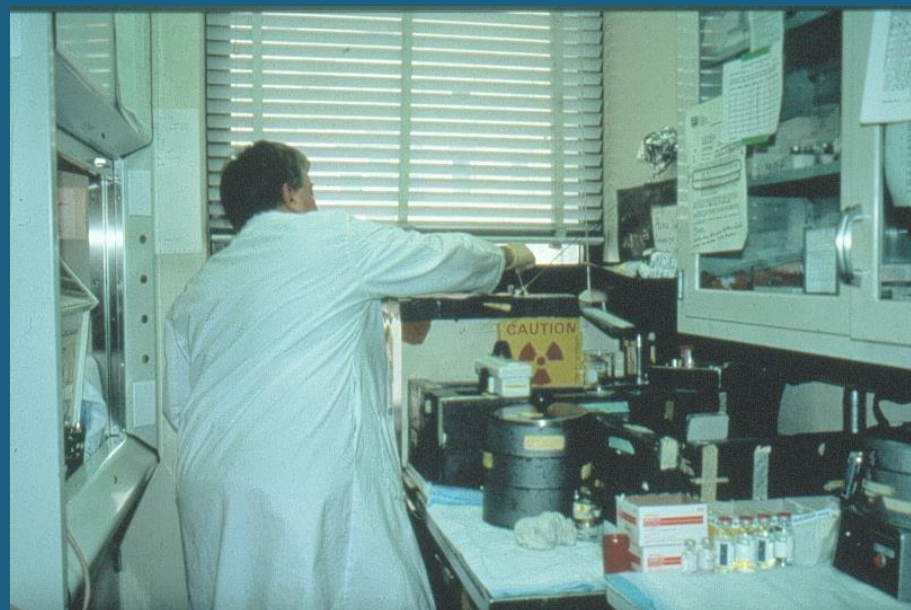
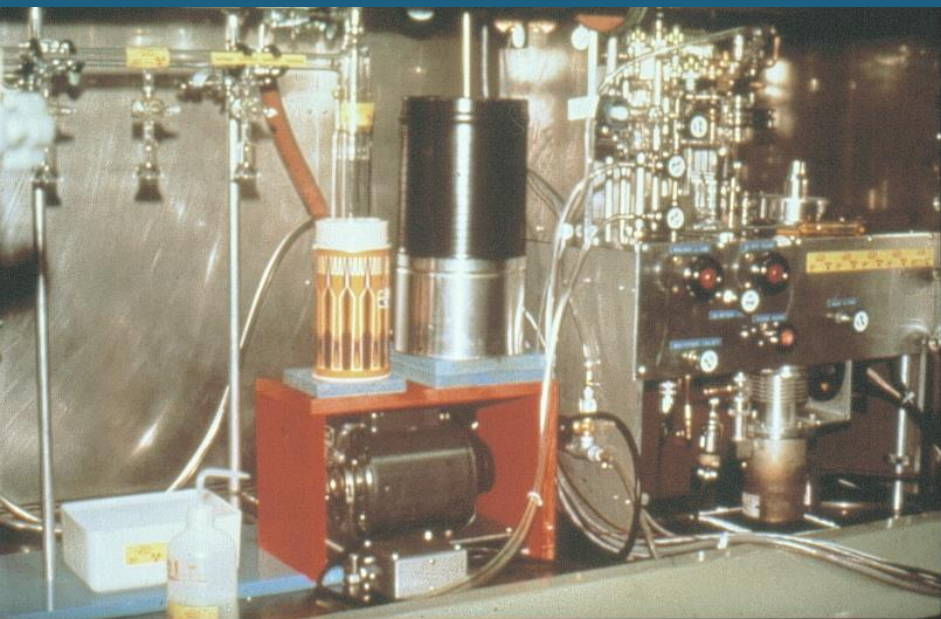
- Contaminação
 - Comidas, bebidas e cigarros – proibidos
 - Nunca usar pipetas com a boca
 - Uso de aventais e luvas
 - Materiais voláteis – capelas especiais
 - Monitoração
 - Individual dos trabalhadores
 - Das áreas de trabalho (Geiger-Müller ou outros)
 - Procedimentos
 - Armazenamento de materiais antes e após o uso
 - Rotulagem
 - » Áreas de trabalho
 - » Rejeitos
 - Educação continuada
 - Registros detalhados



Radioproteção no uso de radioisótopos



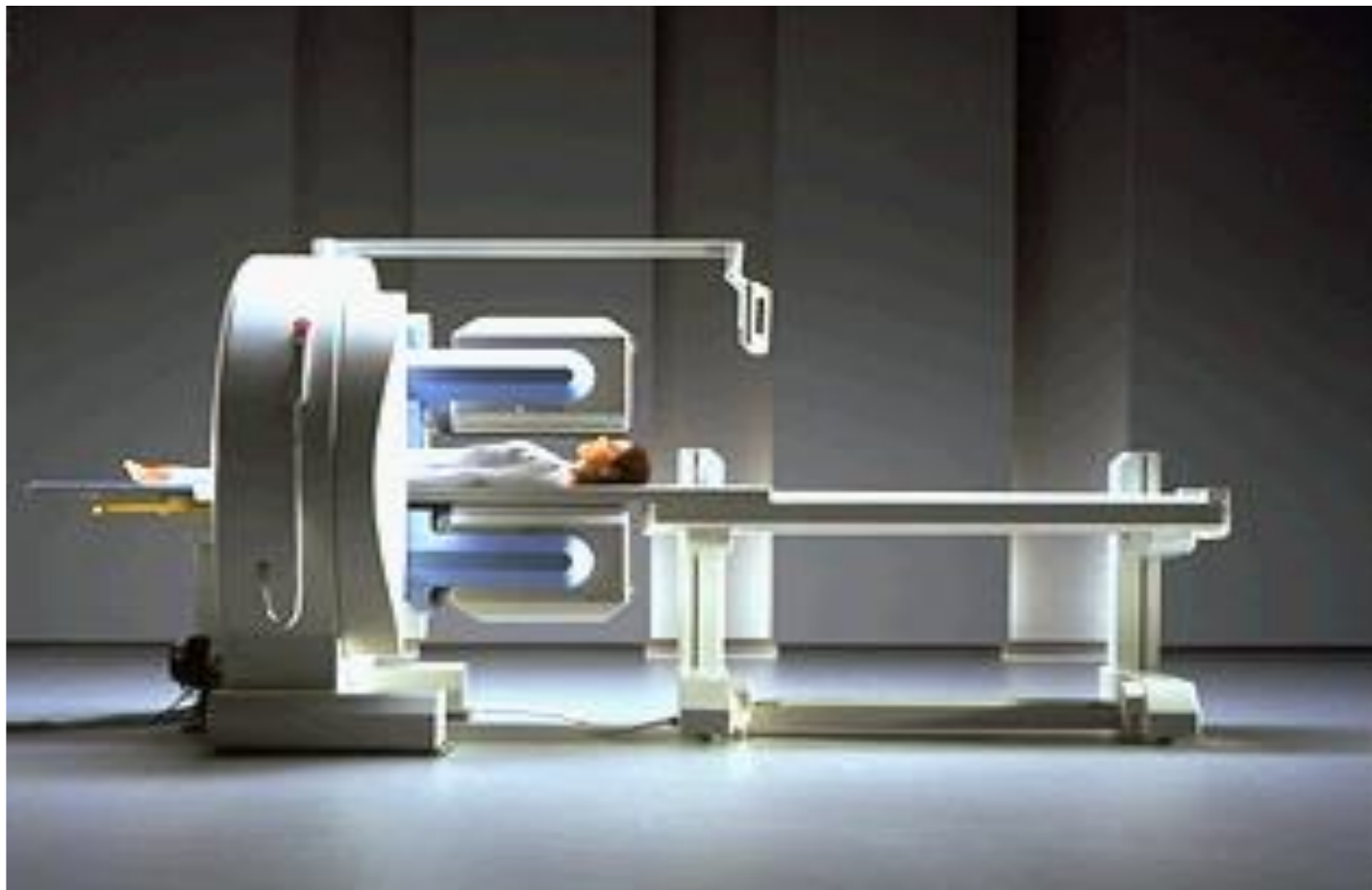
Radioproteção no uso de radioisótopos



Radioproteção no uso de radioisótopos



Radioproteção no uso de radioisótopos



Radioproteção no uso de radioisótopos



Radioproteção no uso de radioisótopos



Sumário

- Atividade de uma amostra radioativa
- Crescimento radioativo
- Decaimentos sucessivos
- Tipos de decaimento
- Radioisótopos na Medicina
- Radioproteção no uso de radioisótopos