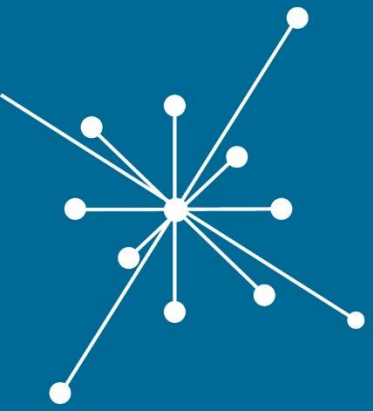
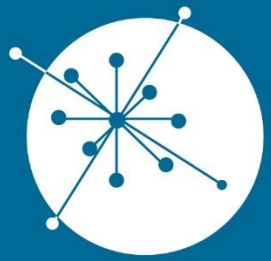
Radioisótopos

FÍSICA DAS RADIAÇÕES I

Paulo R. Costa





GRUPO DE
DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

Sumário

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Introdução
- Isótopos e radioisótopos
- Um pouco de história
- Produção artificial de radioisótopos
- Meia-vida física, biológica e efetiva
- Contaminação ambiental

Introdução

GRUPO DE
DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

Aplicações dos Radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

MEDICINA

-IMAGENS
-RADIOTERAPIA
-BRAQUITERAPIA
-IMUNOTERAPIA
-TERAPIA COM FEIXES IÔNICOS

INDÚSTRIA

- INSPEÇÃO DE NÍVEIS
- GAMAGRAFIA
- IRRADIAÇÃO DE ALIMENTOS

OUTRAS APLICAÇÕES

- DATAÇÃO
- CIÊNCIA FORENSE
- OBRAS DE ARTE

Isótopos e radioisótopos

GRUPO DE
DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES
e FÍSICA MÉDICA

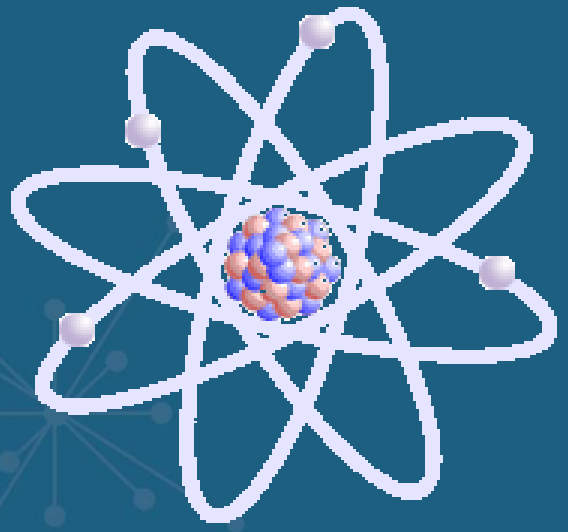
IFUSP - Instituto de Física da USP

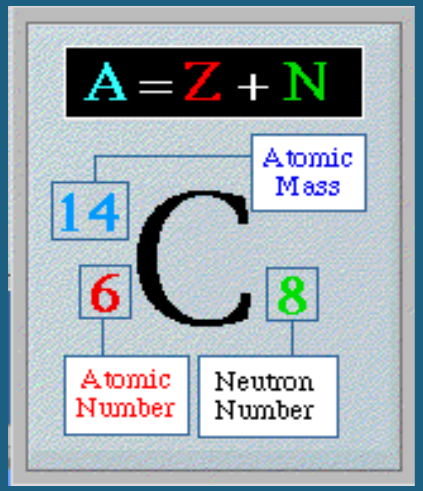
Isótopos e radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Classificação dos elementos

A = número de massa (prótons + nêutrons)
Z = número de prótons ou número atômico
N = número de nêutrons

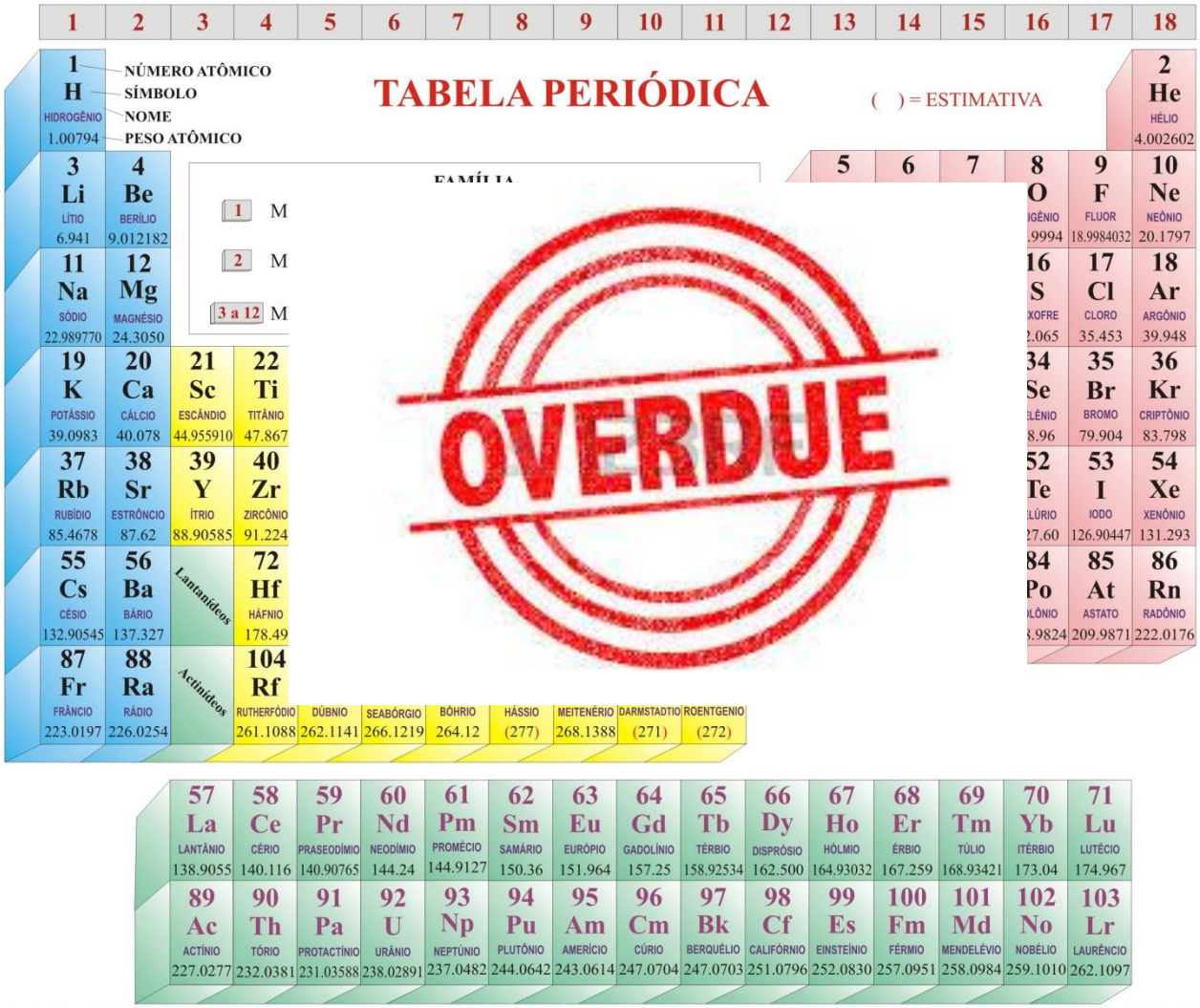




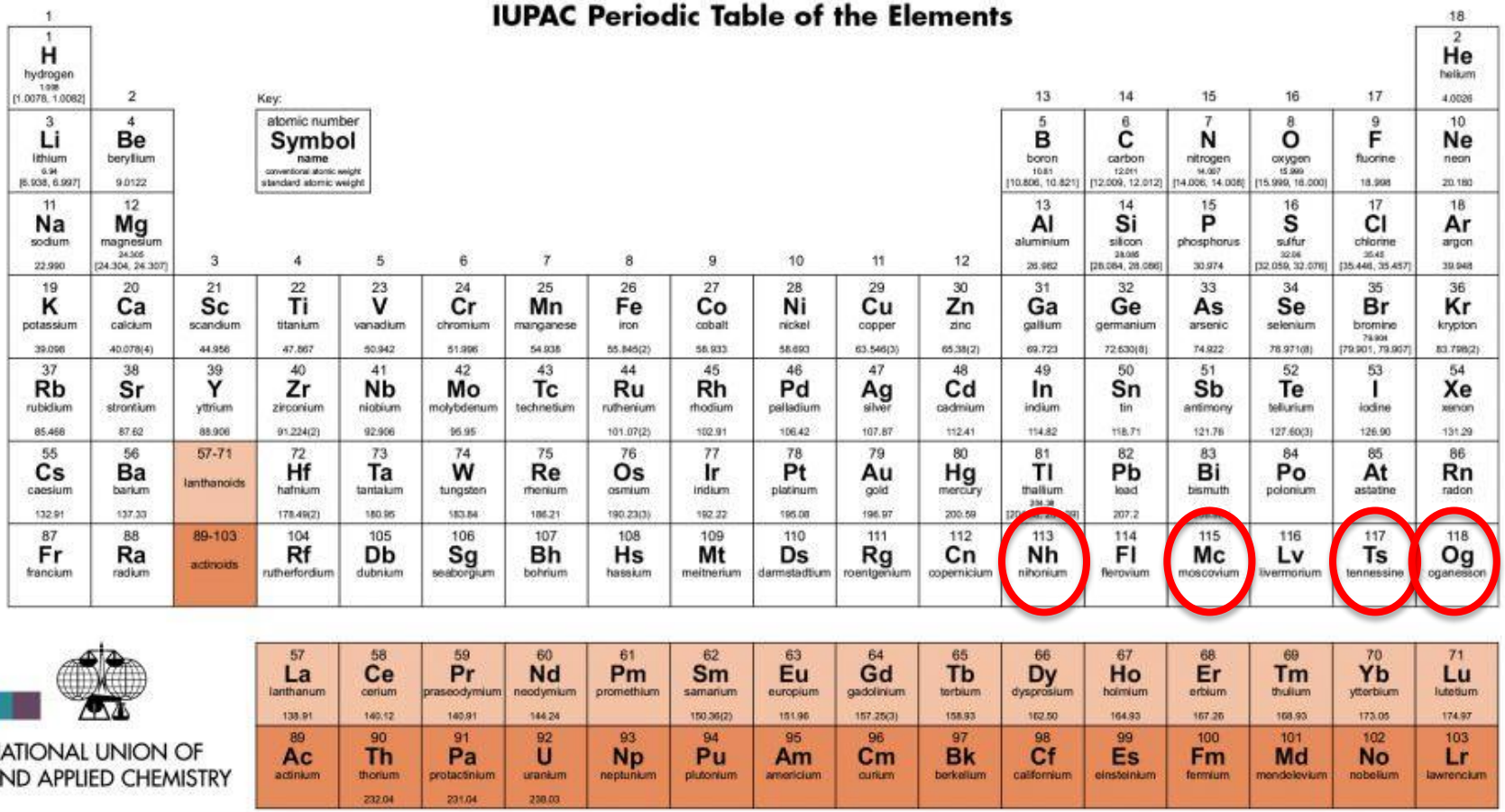
118 elementos Químicos
(4 descobertos recentemente)

O que diferencia um átomo de outro?

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP



IUPAC Periodic Table of the Elements



INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY

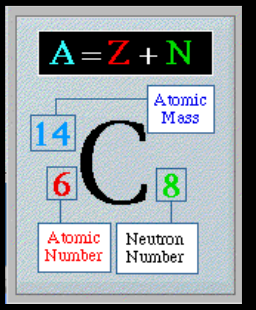
For notes and updates to this table, see www.iupac.org. This version is dated 28 November 2016.

Copyright © 2016 IUPAC, the International Union of Pure and Applied Chemistry.

https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/ **DEZEMBRO DE 2016**

ISÓTOPOS: **m**esmo número de prótons (define o elemento)

$_{92}{}^{234}U$ $_{92}{}^{235}U$ $_{92}{}^{238}U$



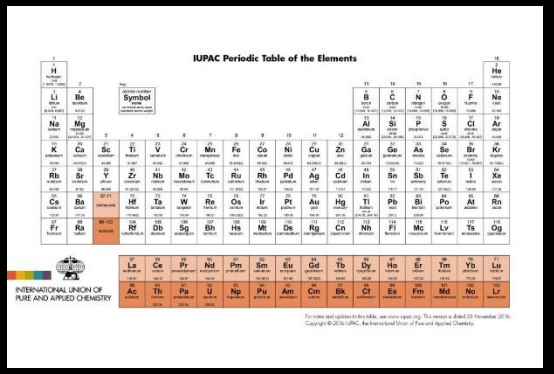
ISÓTONOS : possuem mesmo número de nêutrons

$_{14}{}^{30}Si$ $_{15}{}^{31}P$ $_{16}{}^{32}S$

ISÓBAROS: possuem mesmo número de massa (prótons + nêutrons)

$_{52}{}^{130}I$ $_{53}{}^{130}Te$ $_{54}{}^{130}Xe$

10% estáveis ← + de 3000 nuclídeos ←



○ Isótopos ? □ Isóbaros ? △ Isótonos ?

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

$_{15}^{31}P$

$_{92}^{238}U$

$_{82}^{206}Pb$

$_{56}^{137}Cs$

$_{14}^{30}Si$

$_{16}^{34}S$

$_{92}^{234}U$

$_{52}^{130}I$

$_{53}^{130}Te$

$_{54}^{130}Xe$

$_{3}^{7}Li$

$_{92}^{235}U$

$_{52}^{131}I$

Isótopos e radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- O núcleo atômico

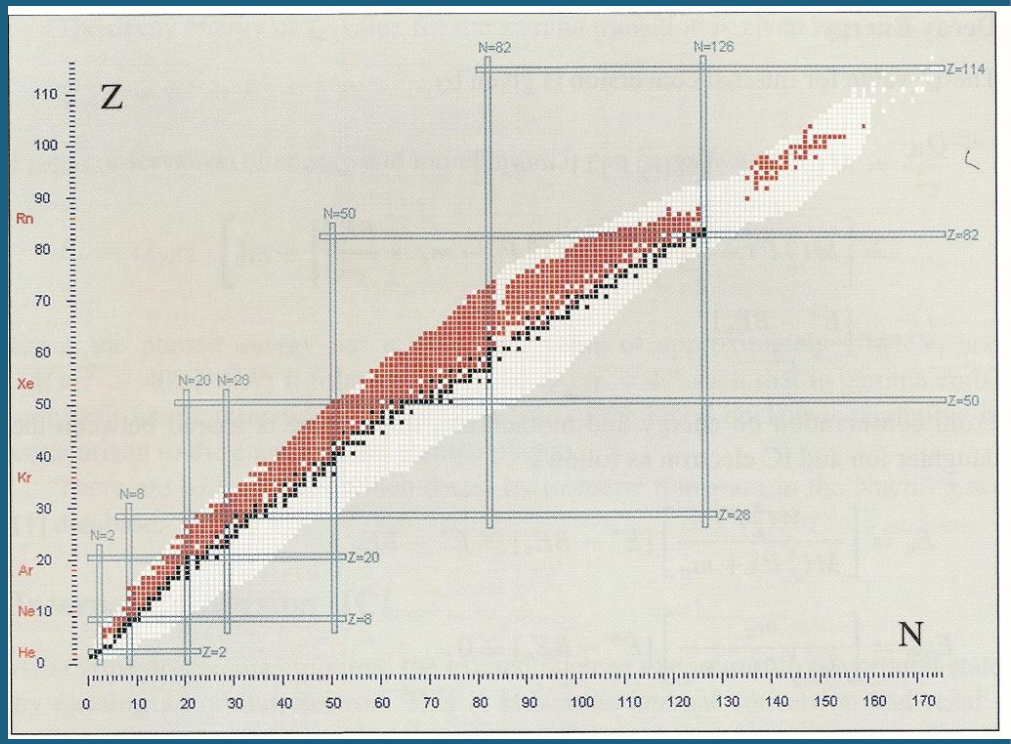
$$ {}^{A}_{Z}X_{N} $$

$Z \Rightarrow$ número de prótons

$N \Rightarrow$ número de nêutrons

$A \Rightarrow$ número de massa $(Z + N)$

- Nuclídeos
  - Identificado por A
- Isótopos
  - Estáveis
  - Instáveis



Fonte: Magill, J; Galy,J Radioactivity Radionuclides Radiation, 2005

Isótopos e radioisótopos

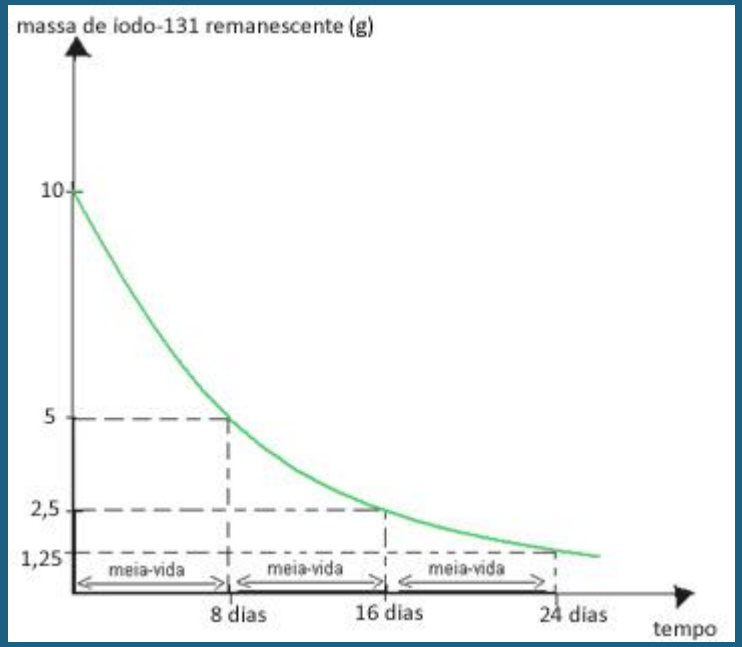
GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Elementos químicos
  - Isótonos
  - Isóbaros
  - Isótopos
    - Radioisótopos

    (ou Radionuclídeos)
- Decaimento nuclear

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N \Rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$$

  - Becquerel – desintegrações/s (dps)
  - Curie – 3,7 x 10^{10} dps



Fonte: Mundo Educação

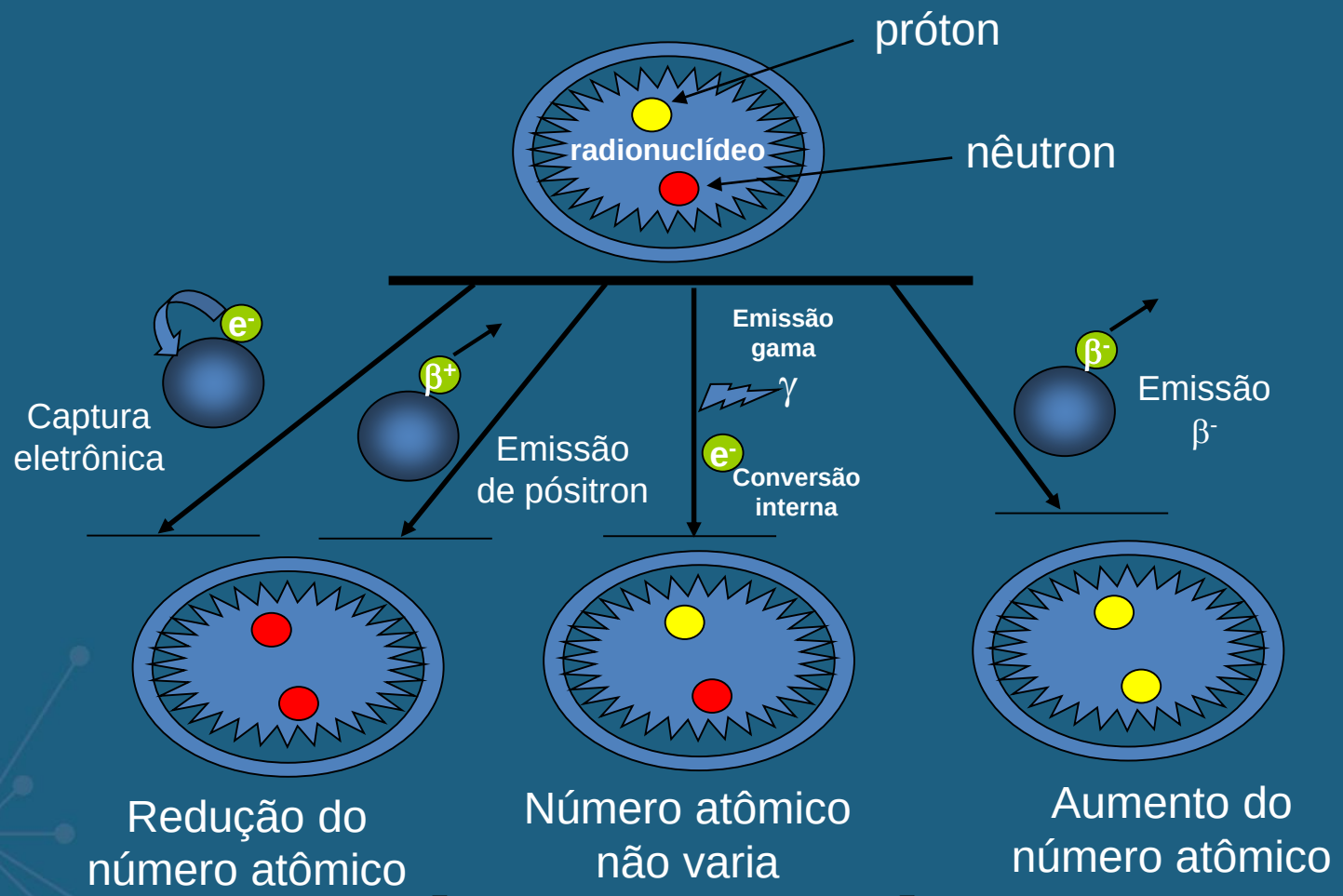
Isótopos e radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Modelo semiclássico do átomo
  - núcleo é constituído de prótons e nêutrons
  - mantidos juntos pela *força nuclear*
    - uma força atrativa intensa de curto alcance
    - configuração desses nucleons determina o estado energético do núcleo
- Radioisótopo
  - configuração dos nucleons → núcleo em *estado instável*
  - essa energia em excesso deve ser emitida
    - *decaimento nuclear* ou *desintegração radioativa*.
- Emissão de energia
  - regras de seleção → vão determinar o seu *modo* de decaimento
  - núcleo radioativo inicial → *nuclídeo pai*
  - núcleo para o qual ele decai → *nuclídeo filho*
- Radionuclídeos naturais
  - majoritariamente na extremidade dos elementos mais pesados
  - todos os núcleos com número atômico Z superior a 82 (chumbo)
    - são radioativos
    - se desintegram até chegarem a um núcleo estável do chumbo

Isótopos e radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP



isótopos estáveis

Tabelas de isótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- TABELA
  - Exemplos:
    - http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/
    - http://atom.kaeri.re.kr/
    - http://www-nds.iaea.org/relnsd/vchart/
    - http://xdb.lbl.gov/Section1/Periodic_Table/X-ray_Elements.html

Um pouco de história

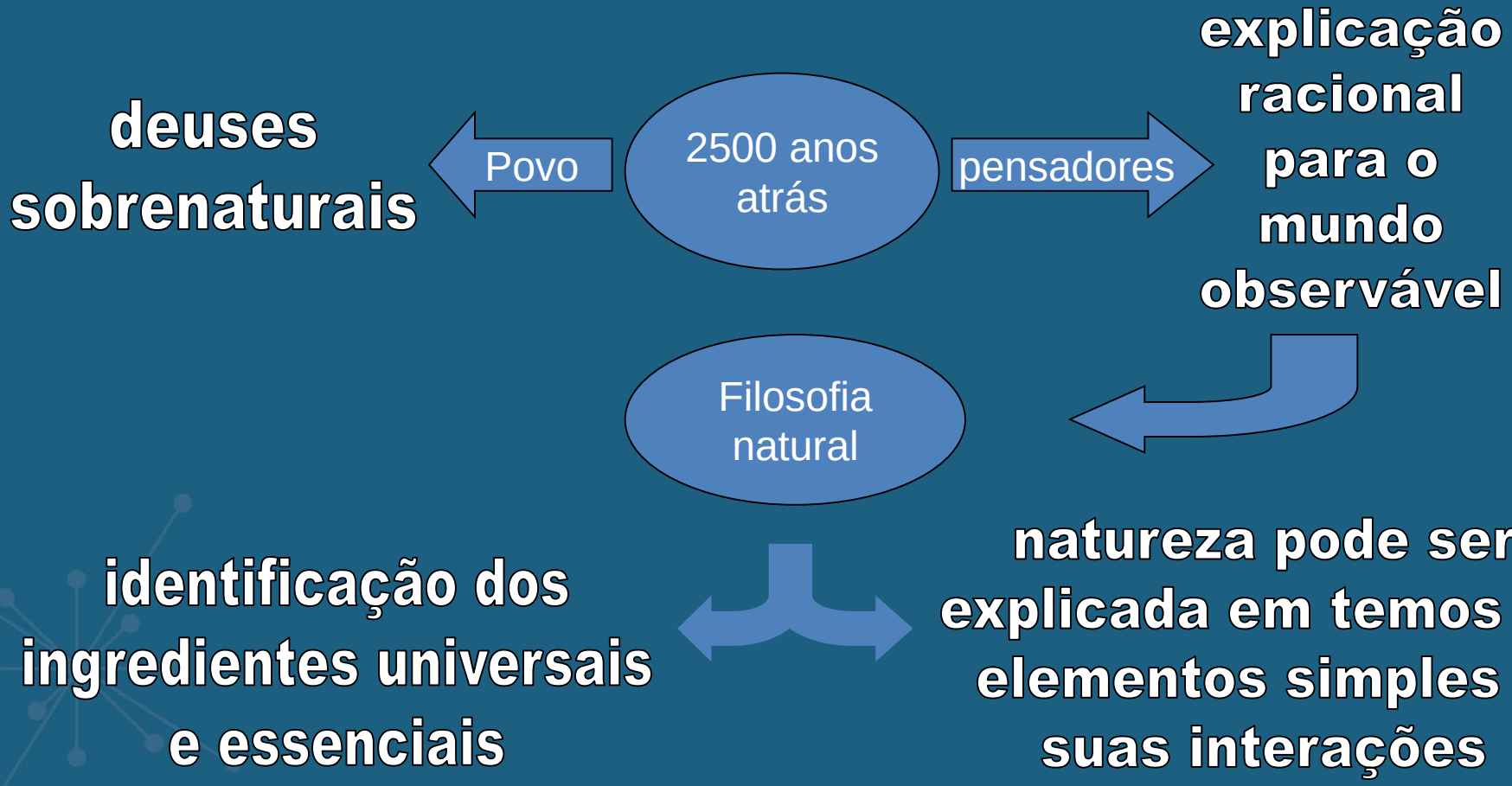
GRUPO DE
DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

Origens e descoberta

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Os elementos gregos e o átomo indivisível



Origens e descoberta

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

Atomismo Moderno (séc. XVIII)

idéia dos quatro elementos estava errada

Lavoisier
Cavendish
Priestly

água e ar são compostos

Dalton

lei das proporções múltiplas

base para as leis quantitativas modernas da matéria

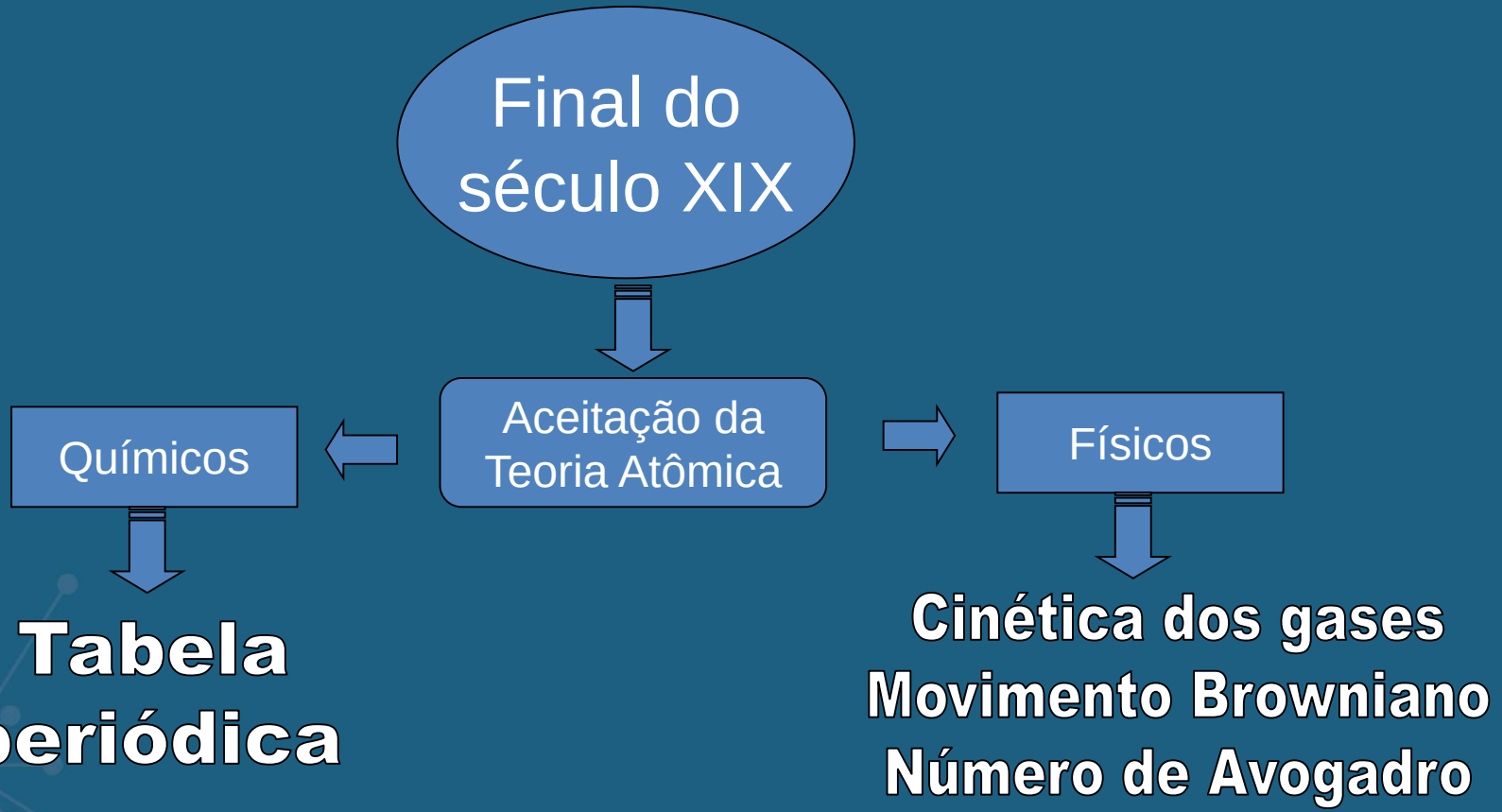
átomos indivisíveis e indestrutíveis

- *átomos dos elelentos são similares e têm o mesmo peso*
- *átomos de elementos diferentes têm pesos diferentes*
- *os elementos contrutivos básicos (moléculas) são formados por diferentes átomos em proporções definidas*
- *nas reações químicas não ocorre criação ou destruição de matéria*

Origens e descoberta

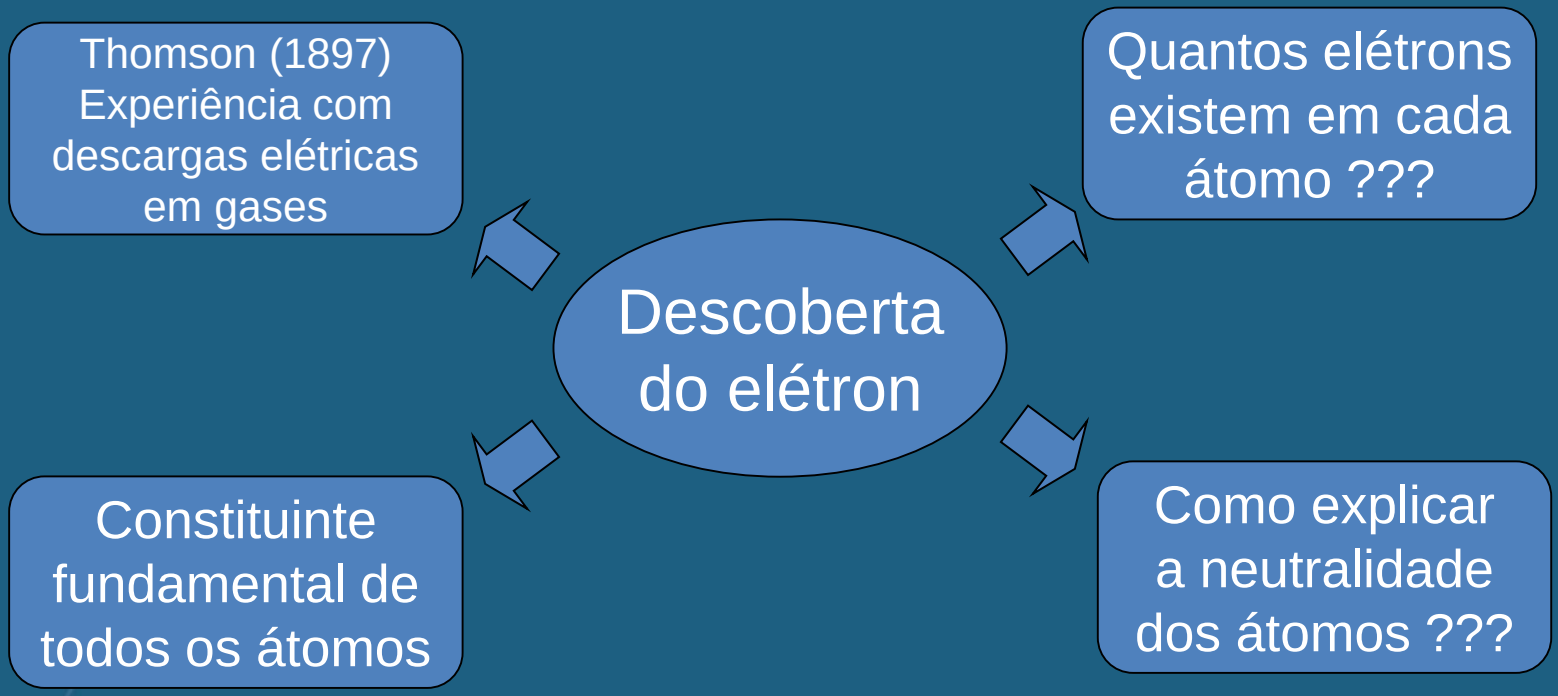
GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Ciência do século XX e o átomo multicorpuscular



Origens e descoberta

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP



Origens e descoberta

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Descoberta da Radioatividade

Röntgen
Nov.1895

descoberta dos raios X

Becquerel
1896

Amostras de sais de Urânio embaladas em papel preto e expostas á luz solar

registro em uma placa fotográfica

Uma amostra embalada e não exposta à luz solar apresentava o mesmo efeito

reprodução do controno de objetos (moedas)

Pierre e
Marie Curie

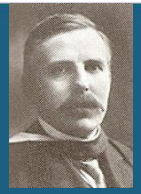
Tório apresentava o mesmo efeito do Urânio

Descoberta do Polônio e do Rádio

Rutherford:
Partículas α e β

Origens e descoberta

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP



Modelo atômico de Rutherford

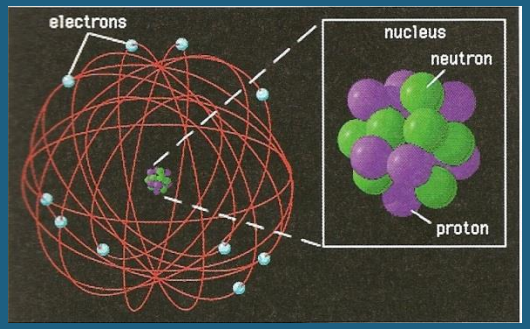
carga positiva do átomo concentrada em um núcleo central

movimento "planetário" dos elétrons negativos em torno do núcleo positivo

maior parte da massa do átomo concentrada no núcleo

mesmo número de cargas negativas e positivas (prótons)

Comprovação experimental por Geiger e Marsden (1913):
Folhas de ouro bombardeadas por partículas α
-Núcleo de ~5×10^{-15}m
-Distância entre os núcleos ~10^{-10}m



Como os prótons se mantêm agrupados ?

Por que os elétrons em movimento não iradiam e perdem energia cinética ?

como explicar a emissão de linhas espectrais ?

Origens e descoberta

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Modelo atômico de Bohr-Sommerfeld

radiação de corpo negro

Teoria de Planck (1900)

emissão discreta de energia

emissão de elétrons por metais atingidos por luz UV

Efeito fotoelétrico (1905)

energia dos elétrons emitidos dependia da frequência da luz incidente

emissão de enegria pelos átomos associada à transição de estados

Modelo do Átomo de Bohr (1913)

diferentemente da teoria clássica: os elétrons não emitem radiação continuamente

Origens e descoberta

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- O nêutron

Como explicar como os prótons se mantém no núcleo apesar da força repulsiva ??

Outro problema: o número de massa de átomos mais pesados que o hidrogênio era aproximadamente o dobro do número atômico !!

Descoberta do Nêutron por Chadwick (1932)

força nuclear coesiva de curto alcançe

explica também a existência de isótopos (Soddy 1913)

Produção artificial de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Transmutação articicial → Irène Curie (1934)
  - P-30 e N-13

$$^{27}_{13}Al + ^{2}_{4}He \rightarrow \left(^{31}_{15}P\right) \rightarrow ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n$$

$$^{10}_{5}B + ^{2}_{4}He \rightarrow (^{14}_{7}N) \rightarrow ^{13}_{7}N + ^{1}_{0}n$$

- Quatro elementos que faltavam na tabela periódica de Mendeléev
  - Segré e Perrier (Itália, 1937) →Tc-99 (Tecnécio)
  - Margarite Perey (França, 1939)→ Fr-232 (Frâncio)
  - Grupo de Segré (1940)→As-210 (Astato)
  - Marinsky/Glendenin/Coryell (1945)→Pm-145 (Promécio)

Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

Métodos

Reatores **Cíclotrons** **Geradores**

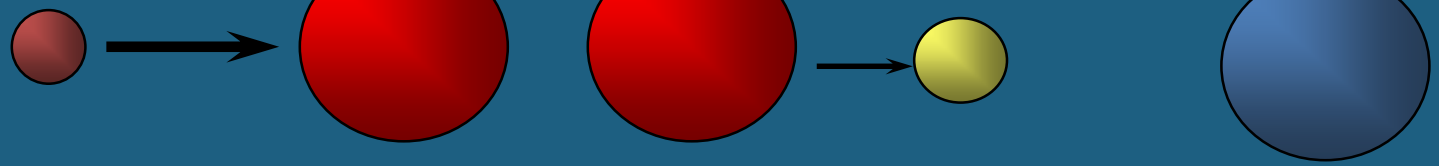
Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

Alvo	Reação	Radionuclídeo
Cr-50	(n,γ)	Cr-51
Mo-98	(n,γ)	Mo-99
Xe-124	(n,γ)	Xe-125 => I-125
Te-130	(n,γ)	Te-131 => I-131
Zn-68	(p,2n)	Ga-67
Cd-111	(p,n)	In-111
Tl-203	(p,3n)	Pb-201 => Tl-201
Te-124	(p,2n)	I-123
I-127	(p,5n)	Xe-123 => I-123
U-235	(n,f)	Zr-99 => Nb-99 => Mo-99

Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP



ALVO
^{18}O

NEUTRON

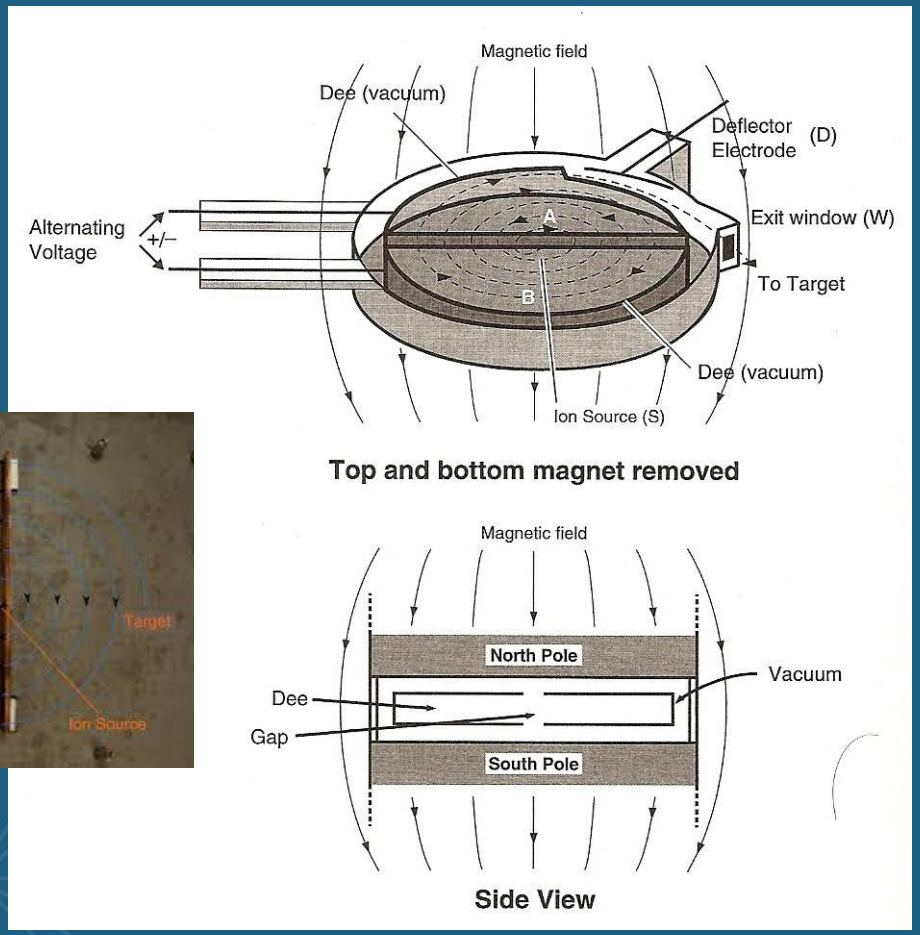
PRÓTON

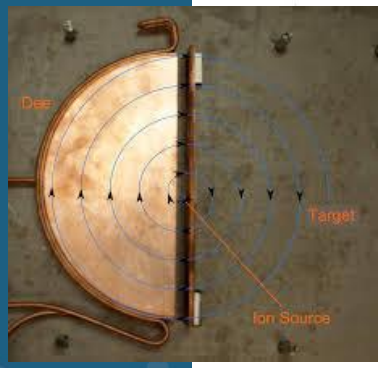
NÚCLEO COMPOSTO
^{19}F

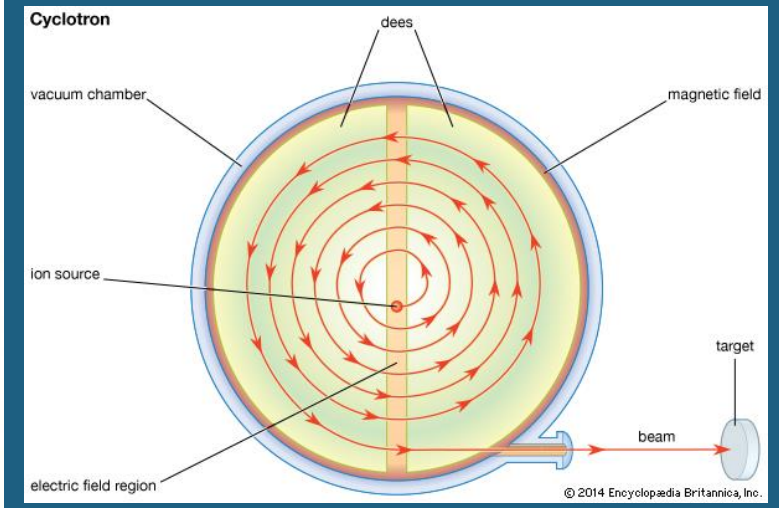
RADIONUCLÍDEO
^{18}F

Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP





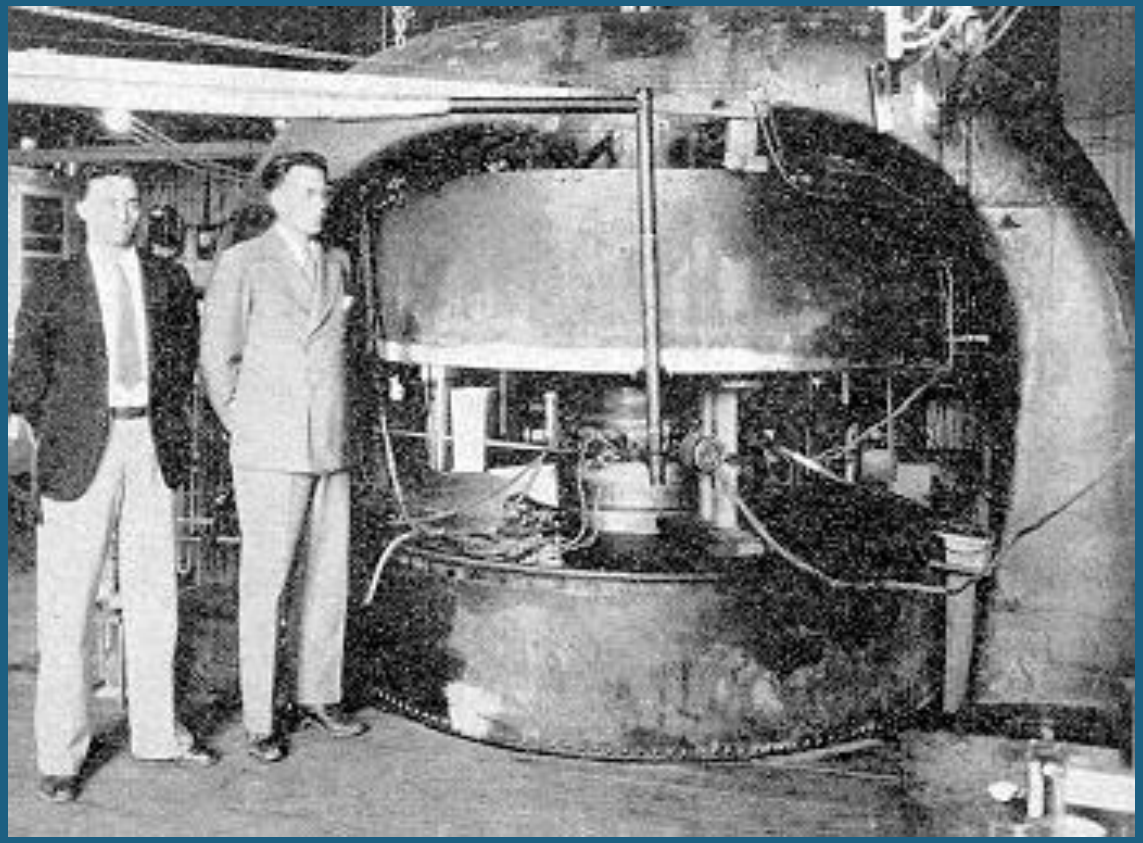


Fonte: Bushberg, J.T. et al. – The Essencial Physics of Medical Imaging, 2002

Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

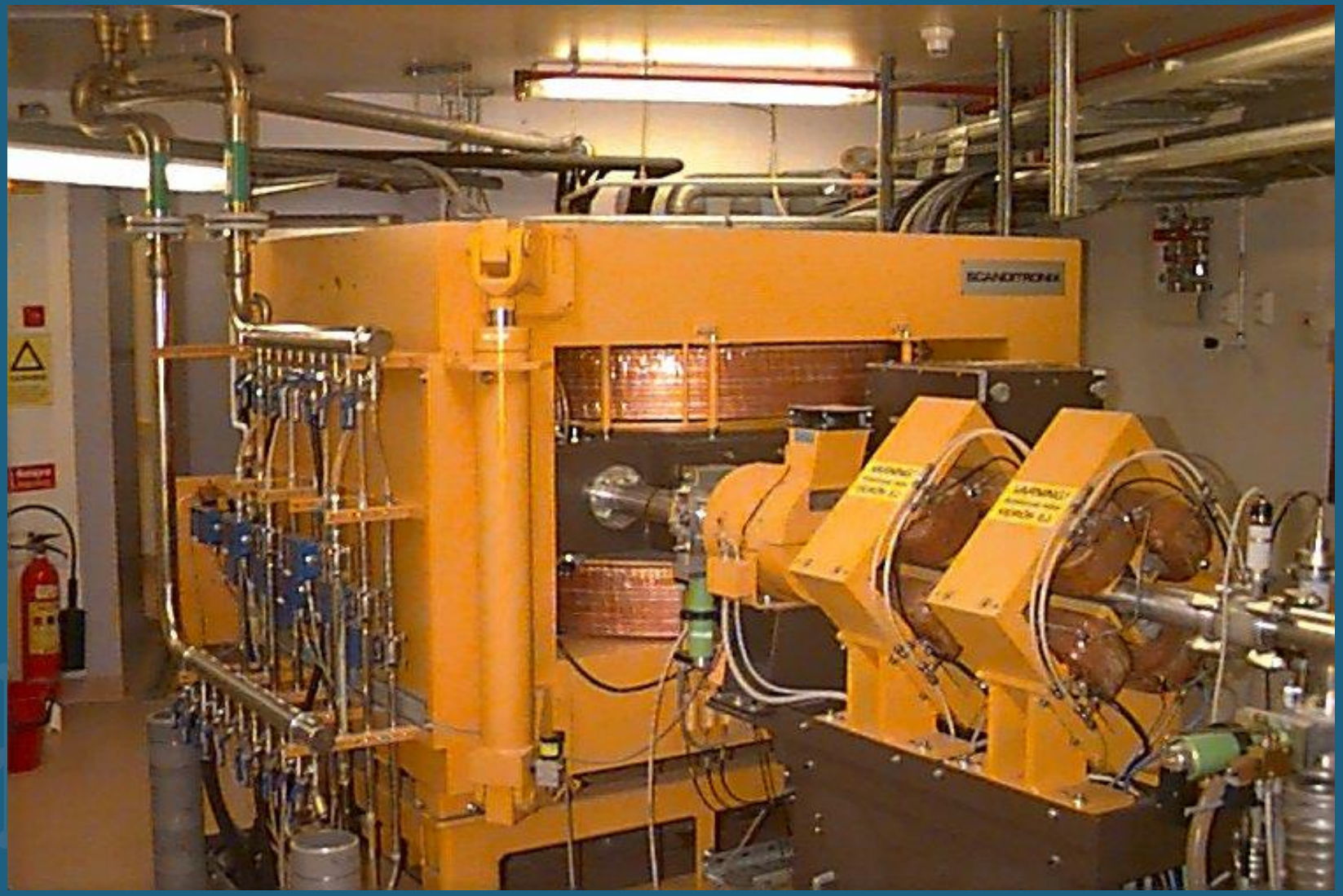
CICLOTRON



Stanley Livingstone and Ernest Lawrence com seu cíclotron de 8 MeV (1935)

Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

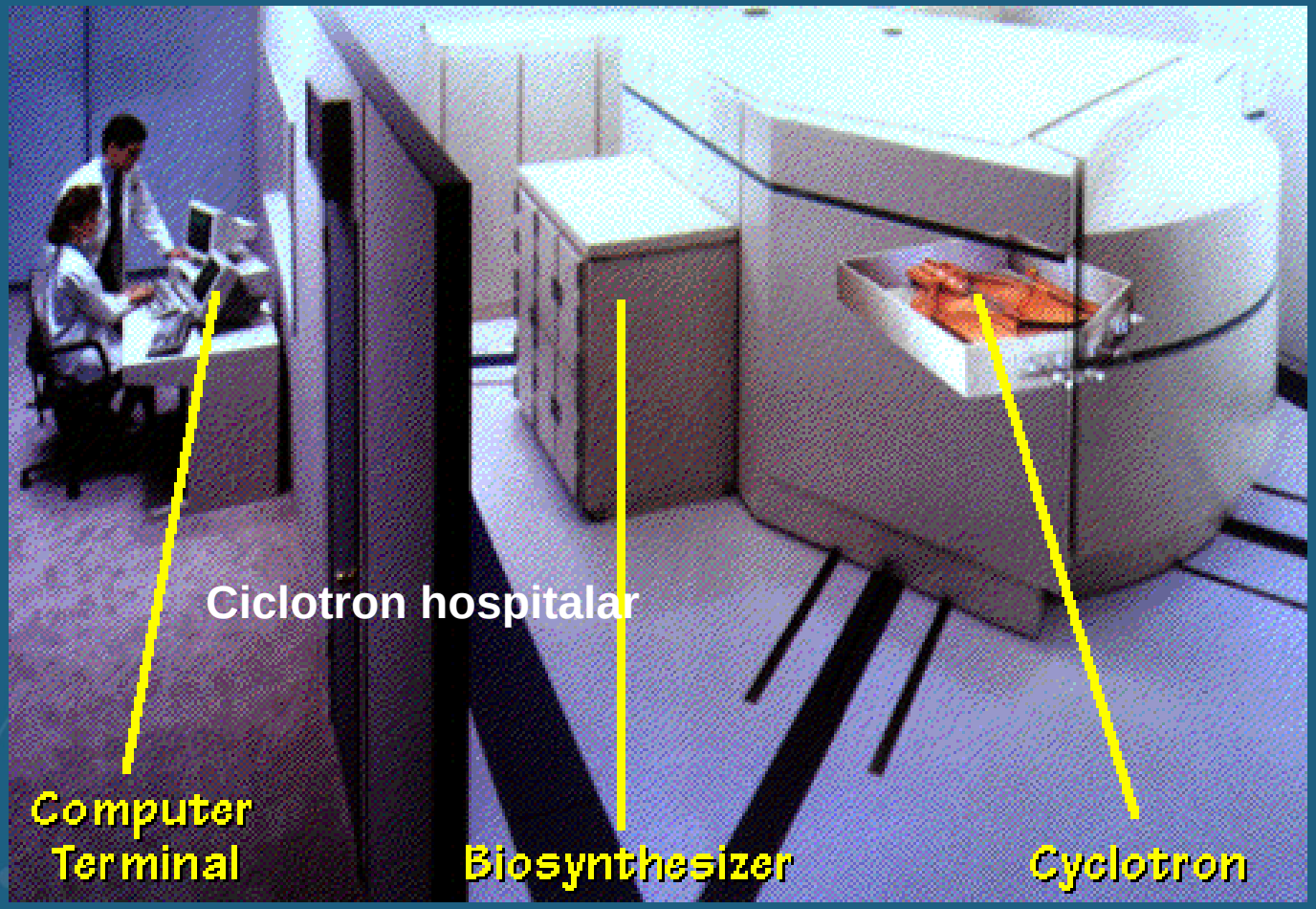


Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP



Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Próton → Neutron
  - Z decresce 1, N cresce 1, A permanece constante
  - Ocorre em nuclídeos ricos em prótons
- Limiar de energia
  - Massa atômica do pai > Massa atômica do filho + 1.02 MeV
- Pósitron & Neutrino
  - Pósitron é a anti-partícula no elétron
  - Espectro de energias vai de 0 até a energia máxima do β+
  - Neutrino faz parte do balanço energético
- Alcance do pósitron
  - Aproximadamente 5 mm/MeV na água

Produção de radioisótopos

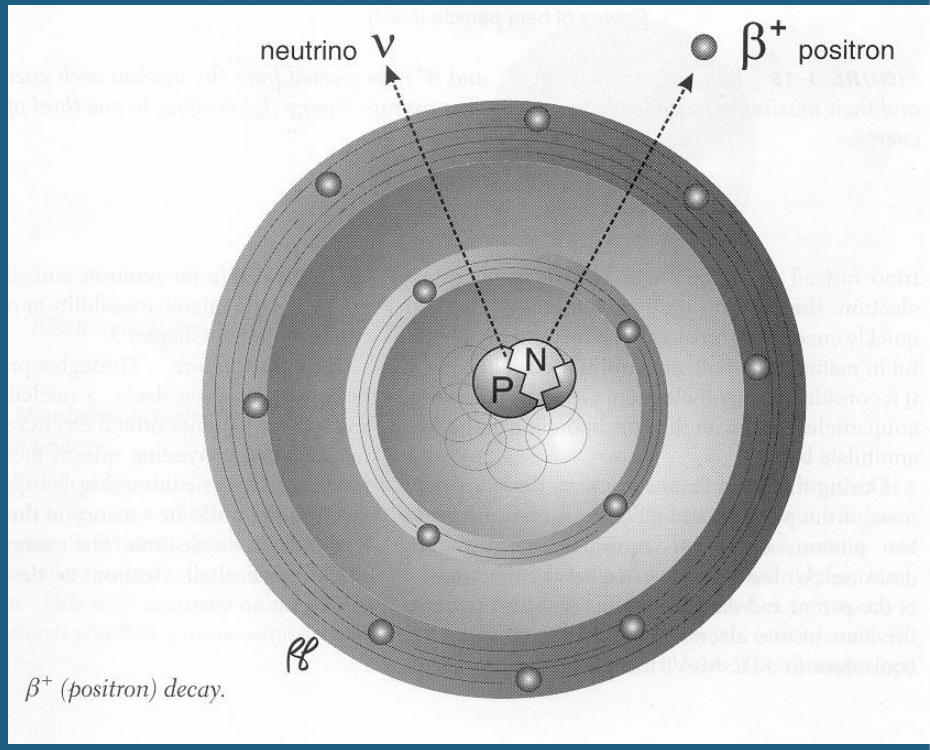
GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Decaimento β^+

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + \beta^+ + \nu $$

$$ \beta^+ + \beta^- \rightarrow 2\gamma\,(511\text{keV cada}) $$

$$ p \rightarrow n + e^+ \,(\text{decaimento } \beta^+) $$



β+ (positron) decay.

Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Em Medicina Nuclear
  - átomos naturalmente presentes em tecidos ^{11}C, ^{13}N, ^{15}O, ^{18}F, ^{82}Rb
  - moléculas marcadas biologicamente ativas
    - Glicose
    - Água
    - Proteínas
    - Peptídeos
    - neuro-transmissores, etc.

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

	^{11}C	^{13}N	^{15}O	^{18}F	^{68}Ga	^{82}Rb
Meia-vida $T_{1/2}$ (min)	20,4	9,96	2,07	109,8	68	1,3
Energia Máx (MeV)	0,959	1,197	1,738	0,650	1,899	3,148
Energia Mais Provável (MeV)	0,326	0,432	0,696	0,202	0,843	1,385
Alcance Médio em água (mm)	1,7	2,0	2,7	1,4	1,7	-
Viabilidade	**Cíclotron local**	**Cíclotron local**	**Cíclotron local**	**Cíclotron local**	Gerador ^{68}Ge-^{68}Ga	Gerador ^{82}Sr-^{82}Rb

Métodos de produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

TABLE 16-1 COMPARISON OF RADIONUCLIDE PRODUCTION METHODS

	PRODUCTION METHOD			
CHARACTERISTIC	LINEAR ACCELERATOR/ CYCLOTRON	NUCLEAR REACTOR (FISSION)	NUCLEAR REACTOR (NEUTRON ACTIVATION)	RADIONUCLIDE GENERATOR
Bombarding particle	Proton, alpha	Neutron	Neutron	Production by decay of parent
Product	Neutron poor	Neutron excess	Neutron excess	Neutron poor or excess
Typical decay pathway	Positron emission, electron capture	Beta-minus	Beta-minus	Several modes
Typically carrier free	Yes	Yes	No	Yes
High specific activity	Yes	Yes	No	Yes
Relative cost	High	Low	Low	Low (^{99m}Tc)
				High (^{82}Rb)
Radionuclides for nuclear medicine applications	^{11}C, ^{13}N, ^{15}O, ^{18}F, ^{57}Co, ^{67}Ga, ^{68}Ge, ^{111}In, ^{123}I, ^{201}Tl	^{99}Mo, ^{131}I, ^{133}Xe	^{32}P, ^{51}Cr, ^{89}Sr, ^{125}I, ^{153}Sm	^{68}Ga, ^{81m}Kr, ^{82}Rb, ^{90}Y, ^{99m}Tc

Fonte: Bushberg, J.T. et al. – The Essencial Physics of Medical Imaging, 2012

Geradores de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Radioisótopo mais usado
  - Tecnécio metaestável – ^{99m}Tc
    - Meia-vida: 6h
    - Combinação fácil com vários agentes
    - Energia principal: 140keV

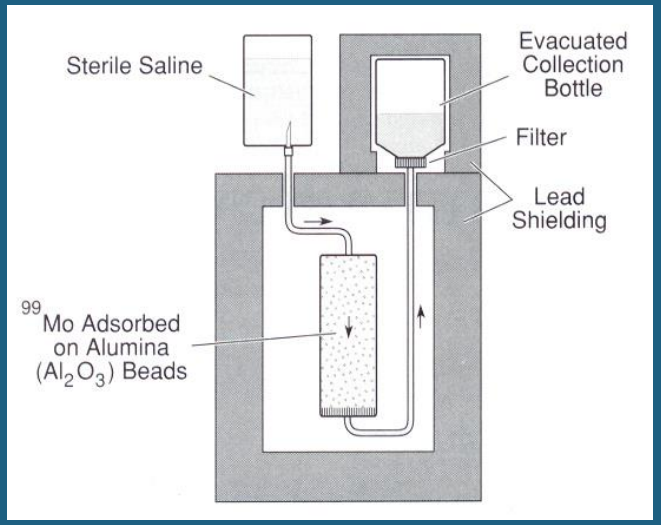
$$^{99m}Tc \longrightarrow {}^{99}Tc + \text{gama de } 140keV$$

Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Geradores de Tecnécio
  - Isótopo pai
    - ^{99}Mo em alumina (Al_2O_3) ou resina
    - Meia-vida: 67h

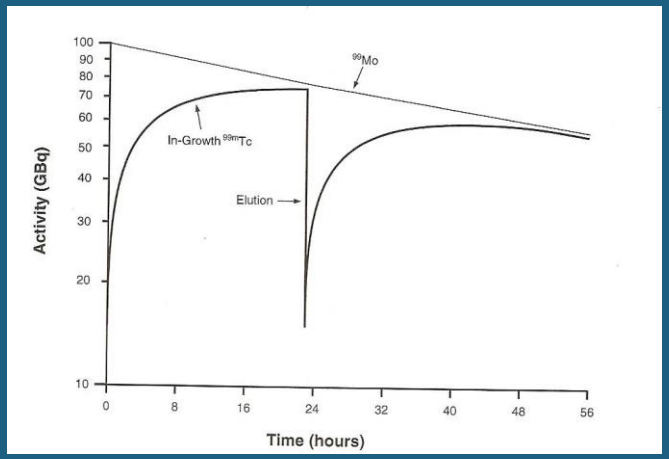
$$^{99}Mo \longrightarrow {}^{99m}Tc$$



  - 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

Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP



- Tempos no gerador
  - Reestabelecimento 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

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

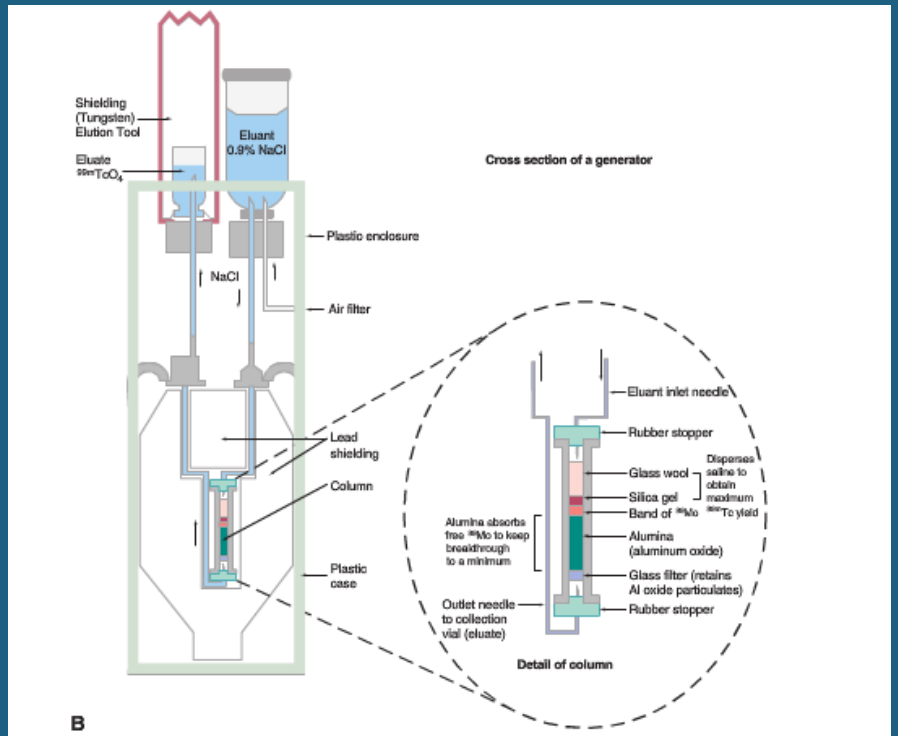
    - Atividade específica cai com o tempo
      - » Utilidade dos geradores: ~ 1 semana

Produção de radioisótopos

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

Produção de radioisótopos

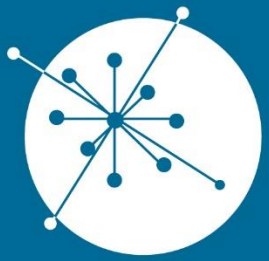
GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP



■ **FIGURE 16-7** (**A**) Picture of a "wet" molybdenum 99/technetium 99m generator in the process of being eluted (**left**). A spent generator which is no longer radioactive was used in order to minimize dose. For picture clarity, the shielding normally surrounding the generator (illustrated in the accompanying diagram (**right**) is not shown. However correct radiation safety principles (discussed further in chapter 21) are shown including the use of disposable gloves, finger ring and body dosimeters and disposable plastic backed absorbent paper on the bench top to minimize the spread of any contamination. An explosion diagram depicting the generator components, and auxiliary radiation shielding is shown on the right. (**B**) A cross-sectional diagram of the generator interior and column detail. Consult the text for additional information on the elution process. (Adapted from photo and diagrams provided courtesy of Covidien Radiopharmaceuticals St. Louis, MO.)

Fonte: Bushberg, J.T. et al. – The Essencial Physics of Medical Imaging, 2012

Meia-vida física, biológica e efetiva



GRUPO DE
DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

Meia-vida física, biológica e efetiva

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- Meia-vida

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow A = \frac{A_0}{2} \Rightarrow t = T_{1/2}$$

$$\therefore \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

- Vida-média
  - Tempo de vida médio do átomo em uma amostra

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = 1{,}44 T_{1/2}$$

- Meia-vida biológica e meia-vida efetiva

$$\frac{1}{T_{1/2}^{efetiva}} = \frac{1}{T_{1/2}^{física}} + \frac{1}{T_{1/2}^{biológica}}$$

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

Tab. 3.2 MEIAS-VIDAS FÍSICA, BIOLÓGICA E EFETIVA DE VÁRIOS RADIOISÓTOPOS DE INTERESSE NA MEDICINA OU EM PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Radioisótopo	Meia-vida em dias		
	$T_{1/2fis}$	$T_{1/2bio}$	$T_{1/2efetiva}$
^{3}H	$4,5 \times 10^{3}$	12	12
^{14}C	$2,1 \times 10^{6}$	40	40
^{22}Na	850	11	11
^{32}P	14,3	1155	14,1
^{35}S	87,4	90	44,3
^{36}Cl	$1,1 \times 10^{8}$	29	29
^{45}Ca	165	$1,8 \times 10^{4}$	164
^{59}Fe	45	600	42
^{60}Co	$1,93 \times 10^{3}$	10	10
^{65}Zn	244	933	193
^{86}Rb	18,8	45	13
^{90}Sr	$1,1 \times 10^{4}$	$1,8 \times 10^{4}$	$6,8 \times 10^{3}$
^{99m}Tc	0,25	1,0	0,20
^{123}I	0,54	138	0,54
^{131}I	8	138	7,6
^{137}Cs	$1,1 \times 10^{4}$	70	70
^{140}Ba	12,8	65	10,7
^{198}Au	2,7	280	2,7
^{210}Po	138	60	42
^{226}Ra	$5,8 \times 10^{5}$	$1,6 \times 10^{4}$	$1,5 \times 10^{4}$
^{235}U	$2,6 \times 10^{11}$	15	15
^{239}Pu	$8,8 \times 10^{6}$	$7,3 \times 10^{4}$	$7,2 \times 10^{4}$

Fonte: <http://hyperphysics.phy-ast.gsu/hbase/nuclear/bchalf.html>.

Acesso em: abr. 2009

Aplicações em arqueologia

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- 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
      - $^{14}N + n \rightarrow {}^{14}C + {}^{1}_{1}H$
    - 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

Radioisótopos na Medicina

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

DIAGNÓSTICO

IMAGENS

- *Imagens planares*
- *SPECT*
- *PET*

RADIOIMUNOENSAIO

TERAPIA

BRAQUITERAPIA

- *LDR*
- *HDR*
- *IODOTERAPIA*

TELETERAPIA

- *FONTES*
- *ACELERADORES*

Radioisótopos na Medicina

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

Meia-vida biológica

redução de bioquímicos ou drogas em sistemas biológicos

muitas vezes exponencial

metabolismo
excreção
difusão
doença

$$M(t) = M_0 e^{-\lambda_{bio} t}$$

$$T_{1/2}^{bio} = \frac{\ln 2}{\lambda_{bio}}$$

sistemas reais

$$M(t) = M_0 \left(A_1 e^{-\lambda_{bio}^1 t} + A_2 e^{-\lambda_{bio}^2 t} + A_3 e^{-\lambda_{bio}^3 t} \ldots \right)$$

$A_1, A_2, A_3 \ldots$ e $\lambda_{bio}^1, \lambda_{bio}^2, \lambda_{bio}^3 \ldots$ obtidos experiment almente

Radioisótopos na Medicina

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

Meia-vida efetiva

em sistemas simples: combinação dos fenômenos físico e biológico

$$\lambda_{ef} = \lambda_{bio} + \lambda$$

$$\frac{1}{T_{1/2}^{efetiva}} = \frac{1}{T_{1/2}^{física}} + \frac{1}{T_{1/2}^{biológica}}$$

EXEMPLOS:

1. A meia-vida biológica do iodo na tireóide humana é de 64 dias e a meia-vida física do ^{131}I é de 8 dias Qual a meia-vida efetiva do ^{131}I na tireóide?

$$\frac{1}{T_{1/2}^{efetiva}} = \frac{1}{T_{1/2}^{física}} + \frac{1}{T_{1/2}^{biológica}} = \frac{1}{8} + \frac{1}{64} = \frac{9}{64} \Rightarrow T_{1/2}^{efetiva} = 7{,}1\,\text{dias}$$

$$\approx T_{1/2}^{física}$$

2. O Xenônio-133 é um gás radioativo inerte usado para estudos da função pulmonar. Sua meia-vida física é de 5,3 dias e sua meia-vida biológica nos pulmões é de cerca de 0,35 minutos. Qual sua meia-vida biológica?

$$\frac{1}{T_{1/2}^{efetiva}} = \frac{1}{5{,}3 \times 24 \times 60} + \frac{1}{0{,}35} \Rightarrow T_{1/2}^{efetiva} \approx 0{,}35\,\text{minutos}$$

$$\approx T_{1/2}^{biológica}$$

Radioisótopos na Medicina

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

Radiofármacos

Projeto de um radiofármaco

SELEÇÃO DO RADIONUCLÍDEO:

1. Minimização da dose
   a. $T_{1/2}$ curta (compatível)
   b. Não emissor α e β
2. Características de detecção da instrumentação
3. Preferencialmente monocromático (100<E<300keV)
4. Economicamente viável

SELEÇÃO DO QUÍMICO:

1. Não-tóxico
2. Incorporação diferencial em situações normais e patológicas
3. Baixa adesão a proteínas plasmáticas

Desenvolvimento de um radiofármaco

Estudos químicos:

1. Melhores métodos de rotulagem

Estudos em animais:

- Biodistribuição
- Estudo de toxidade

Estudos clínicos em humanos

- Três fases
- Registro no MS

Controle de qualidade de um radiofármaco

Pureza do radionuclídeo:

1. Contaminantes podem deteriorar a qualidade das imagens

Pureza do radioquímico

1. Estabilidade em longo prazo mesmo com ações químicas e da radiação

Pureza química final

Esterilidade

Apirogenicidade

Radioisótopos na Medicina

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

Teoria dos Compartimentos → determinação da taxa de incorporação de radiofármacos → *órgãos = compartimentos*

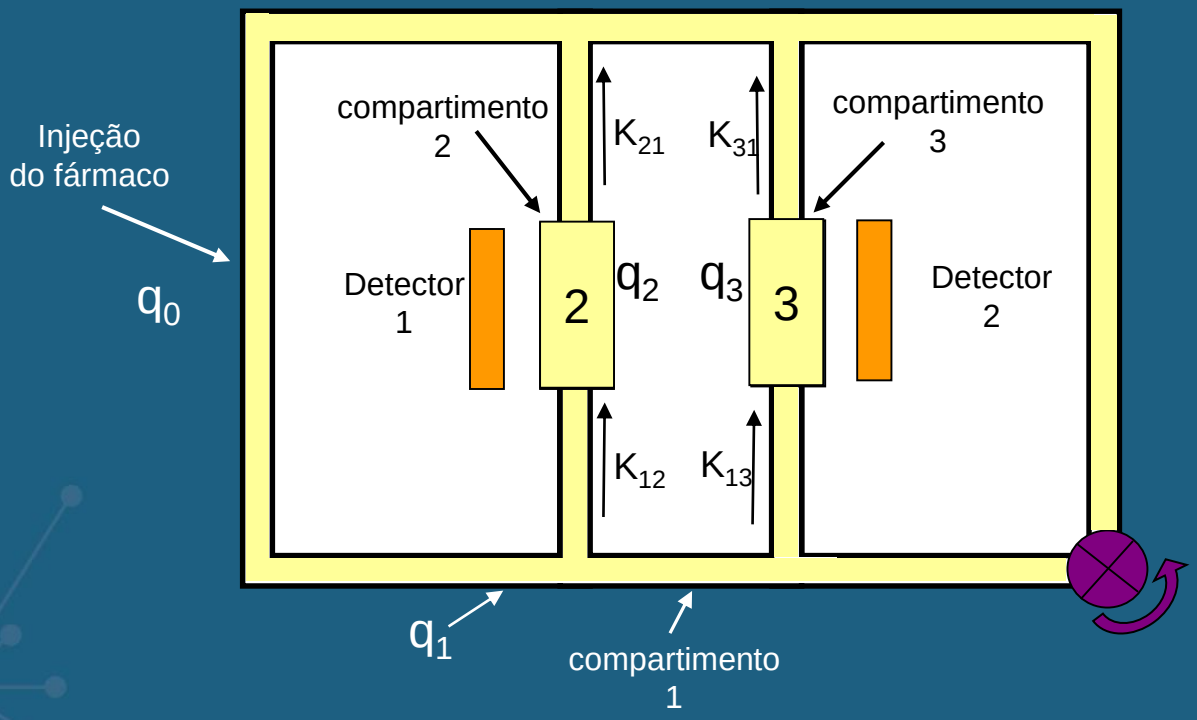
complexidade aumenta com
- *número de compartimentos*
- *sistema aberto ou fechado*

medições clínicas
- *fluxo entre órgãos*
- *tempo de trânsito do fluxo sanguíneo através dos órgãos*
- *taxa total de fluxo sanguineo através de um órgão*

Radioisótopos na Medicina

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

Modelo fechado de 3 compartimentos



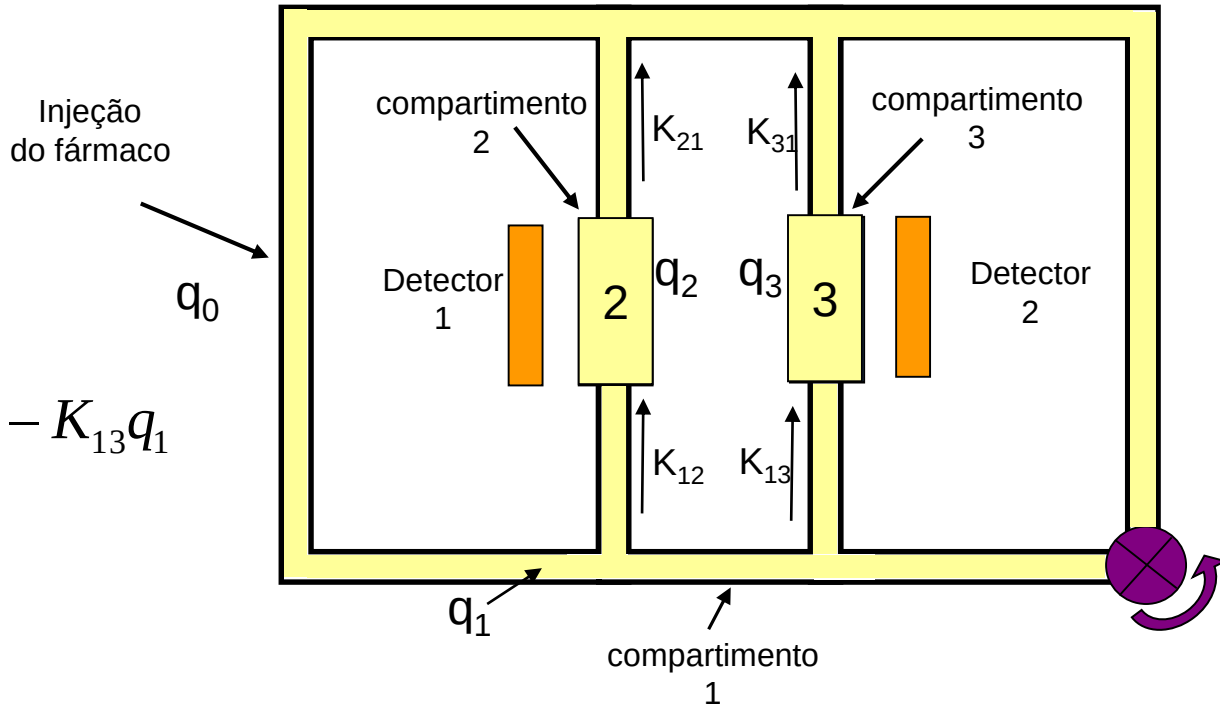
Radioisótopos na Medicina

Modelo fechado de 3 compartimentos

Condições iniciais (t=0):

$q_1=q_0$ e $q_2 = q_3 = 0$

$q_0(t)=q_0\exp(-\lambda t)$



$$\frac{dq_1}{dt} = K_{21}q_2 + K_{31}q_3 - K_{12}q_1 - K_{13}q_1$$

$$\frac{dq_2}{dt} = K_{12}q_1 - K_{21}q_2$$

$$\frac{dq_3}{dt} = K_{13}q_1 - K_{31}q_3$$

se não há transferência reversível de atividade de 2 e 3 de volta para 1

$K_{21} = K_{31} = 0$

$$\begin{cases} q_2 = \dfrac{-K_{12}}{K_{12}+K_{13}} q_0 e^{-(K_{12}+K_{13})t} + C_2 \\ q_3 = \dfrac{-K_{13}}{K_{12}+K_{13}} q_0 e^{-(K_{12}+K_{13})t} + C_3 \end{cases}$$

Radioisótopos na Medicina

C_2 e C_3 ⇒ Atividade nos compartimentos quando $t \to \infty$

$t \to 0$ ⇐ *para minimizar a dose, deve-se escolher isótopos com meia-vida dimensionada para permitir a investigação clínica*

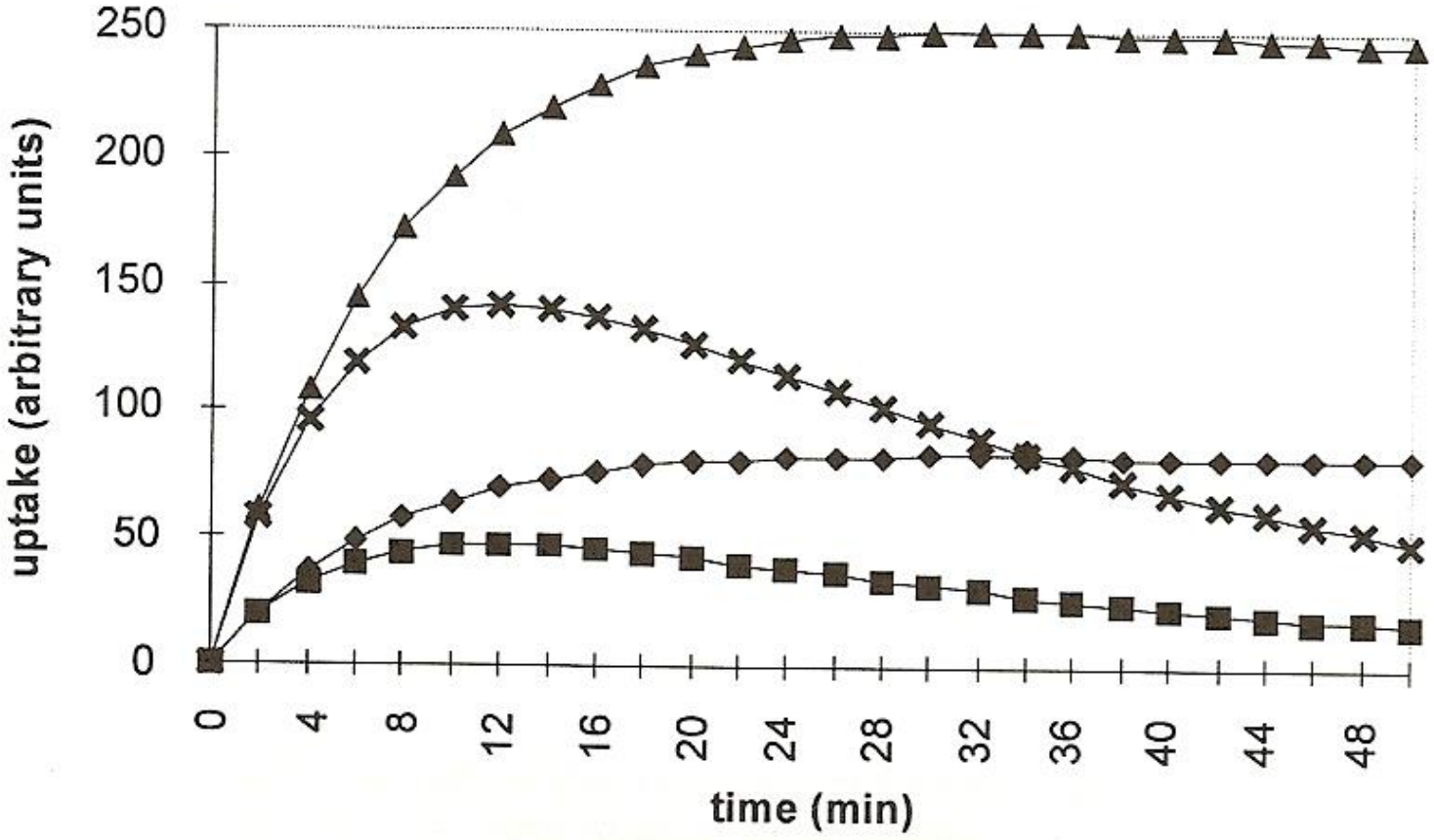
$$C_2 = \frac{K_{12}}{K_{12} + K_{13}} q_0$$

$$C_3 = \frac{K_{13}}{K_{12} + K_{13}} q_0$$

$$q_2 = \frac{K_{12}}{K_{12} + K_{13}} q_0 e^{-\lambda t} \left[1 - e^{-[K_{12}+K_{13}]t}\right]$$

$$q_3 = \frac{K_{13}}{K_{12} + K_{13}} q_0 e^{-\lambda t} \left[1 - e^{-[K_{12}+K_{13}]t}\right]$$

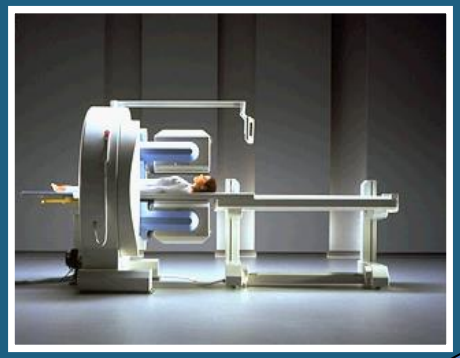
Radioisótopos na Medicina



Smith, FA – A Primer in Applied Radiation Physics, 2000.

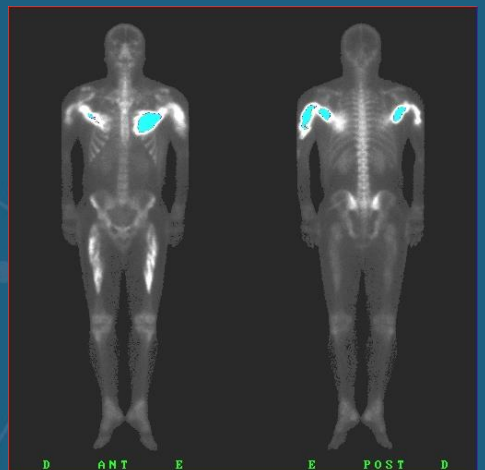
Radioisótopos na Medicina

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

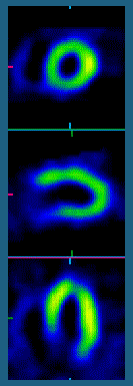


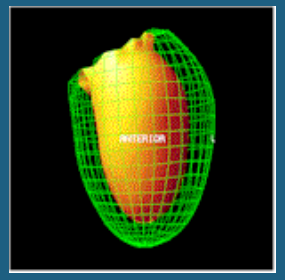
Imagens em Medicina Nuclear

Planares



SPECT





PET

Radioisótopos na Medicina

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

Terapia com radionuclídeos

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

EMISSORES β-

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

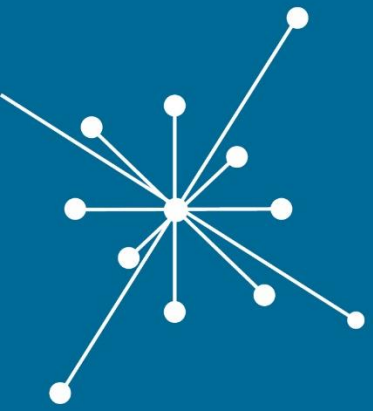
EMISSORES α

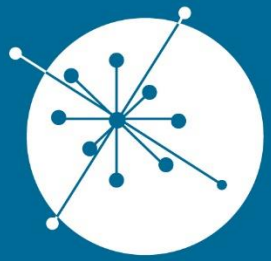
- pequeno alcance
- 100 radionuclídeos
- a maioria com meia-vida longa
- difícil produção
- apenas três com aplicação terapêutica em estudo.

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.

Contaminação ambiental



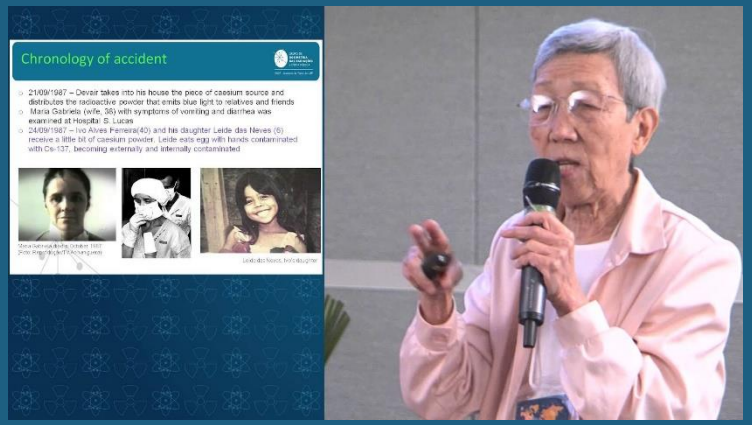


GRUPO DE
DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

O acidente de Goiânia

GRUPO DE DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES e FÍSICA MÉDICA
IFUSP - Instituto de Física da USP

- **Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia**
- **Emico Okuno**

- **Estud. av. vol.27 no.77 São Paulo 2013**
- http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142013000100014