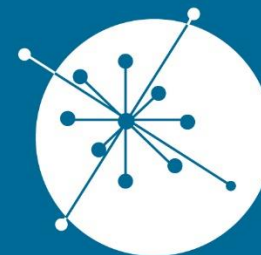
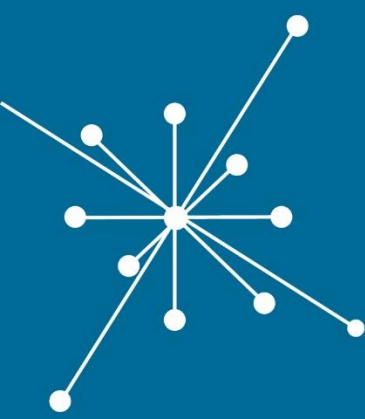


Desintegração Nuclear

Paulo R. Costa



GRUPO DE
DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

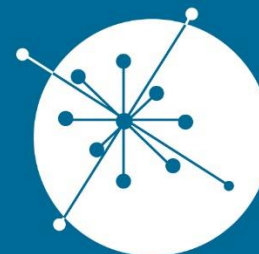
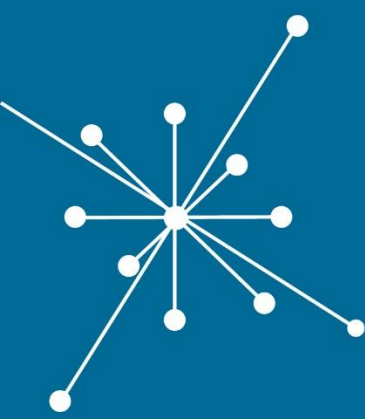
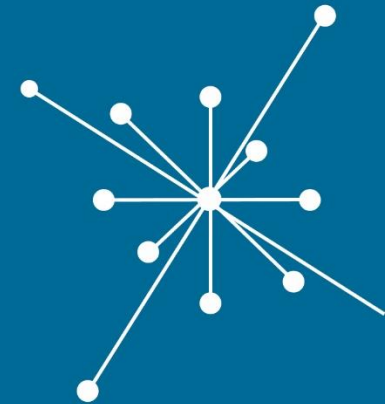
Sumário



- Introdução
- Massas atômicas e nucleares
- Razões para a desintegração nuclear
- Decaimento nuclear



Introdução

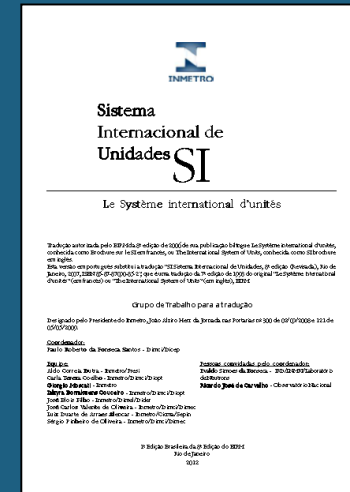


GRUPO DE
DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

Introdução

- Unidades e SI
 - Comprimento → metro
 - Tempo → segundo
 - Temperatura → kelvin
 - Massa → kilograma
 - Corrente elétrica → ampère
 - Intensidade luminosa → candela
 - Quantidade de substância → mol



Vocabulário metrológico



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

IFUSP - Instituto de Física da USP

Vocabulário Internacional de Termos de Metrologia Legal



Rio de Janeiro
2007

VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA **VIM** 2012 CONCEITOS FUNDAMENTAIS E GERAIS E TERMOS ASSOCIADOS

1ª edição Luso - Brasileira | 2012

propriedade qualitativa
amplitude de medição
dimensão de uma grandeza
função de medição
rastreadabilidade metrológica
compatibilidade metrológica
calibração sistema de medição
padrão primário verificação
grandeza derivada
exatidão de medição
material de referência
unidade de medida



Sistema Internacional de Unidades **SI**

Le Système international d'unités

Tradução autorizada pelo BIPM de sua publicação bilingue Le Système international d'unités, conhecida como Brochure sur le SI em francês, ou The International System of Units, conhecida como SI Brochure em inglês.
Esta versão em português substitui a tradução "Sistema Internacional de Unidades, 8ª edição (Quênia), Rio de Janeiro, 2007, ISBN 95-8-070045-5" que é uma tradução da 7ª edição de 1993 do original "Le Système international d'unités" (em francês) ou "The International System of Units" (em inglês), BIPM.

Grupo de Trabalho para a tradução

Designado pelo Presidente do Inmetro, João Alvaro Mota da Fonseca, nas Portarias nº 300 de 07/02/2008 e 111 de 05/05/2009.

Coordenador:
Paulo Roberto da Fonseca Santos - D em V/D/ep

Equipa:
Júlio Correia Brito - Inmetro/Insi
Carla Teresa Coelho - Inmetro/D em V/D opt
Orçamento: Inmetro
Sílvia Brito de Sousa - Inmetro/D em V/D opt
José Manoel Filho - Inmetro/D em V/D idr
José Carlos Valente de Oliveira - Inmetro/D em V/D emec
Luís Duarte de Jesus Alencar - Inmetro/Coordenador
Sérgio Filipe de Oliveira - Inmetro/D em V/D emec

Respostas técnicas: pelo coordenador
Paulo Roberto da Fonseca - IPQ/INMETRO/Laboratório
de Referências

Nardo José de Carvalho - Observatório Nacional

1ª Edição Brasileira da 8ª Edição do BIPM
Rio de Janeiro
2012

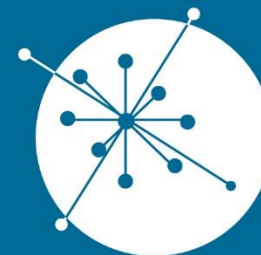
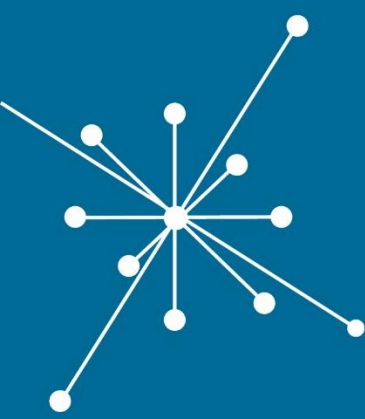
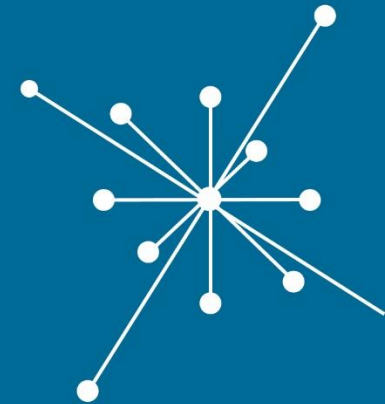
Disponíveis em:

<http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes.asp>

Introdução

- Em física nuclear
 - Massa
 - Dos núcleos $\approx 10^{-21}$ g
 - Unidade de massa atômica (uma ou u)
 - Massa do $^{12}\text{C} = 12$ uma
 - 1 u.m.a. = $1,6605387 \times 10^{-27}$ kg
 - Energia
 - Energias liberadas em reações químicas $\approx 10^{-19}$ J
 - Elétron-volt
 - Energia cinética ganha por um elétron ao ser acelerado por uma ΔV de 1V
 - $\Delta V \cdot e = (1,60217646 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (1\text{V}) = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - Equivalente energético de 1 uma
 - $E = mc^2 = 1,494 \times 10^{-10} \text{ J} = 931,49 \text{ MeV}$

Massas atômicas e nucleares



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

IFUSP - Instituto de Física da USP

Massas atômicas e nucleares

- Tabelas → massas ATÔMICAS e não NUCLEARES
 - Incluem os elétrons extra-nucleares
 - São medidas experimentalmente

- Notação

$M\left(\frac{A}{Z}X\right) \Rightarrow$ *massa atômica*

$m\left(\frac{A}{Z}X\right) \Rightarrow$ *massa nuclear*

$m\left(-\frac{0}{1}e\right) \Rightarrow m_e$

$m\left(\frac{1}{0}n\right) \Rightarrow m_n$

$m\left(\frac{1}{1}H\right) \Rightarrow m_p$



Massas atômicas e nucleares

- Para um átomo neutro

$$M\left(\frac{A}{Z}X\right) = m\left(\frac{A}{Z}X\right) + Zm_e - \frac{BE_{Ze}}{c^2}$$

$BE_{Ze} \rightarrow$ energia de ligação dos elétrons no núcleo

$\frac{BE_{Ze}}{c^2} \approx 10^{-8} \text{ uma} \rightarrow$ desprezível comparada com a
massa do núcleo

$$M\left(\frac{A}{Z}X\right) \approx m\left(\frac{A}{Z}X\right) + Zm_e$$

Massas atômicas e nucleares

- Pesos atômico e molecular

Peso atômico	$\mathcal{A} = \frac{\text{massa do átomo}}{\frac{1}{12} \text{ massa do } ^{12}\text{C}}$	} adimensionais
Peso molecular	$\mathcal{M} = \frac{\text{massa da molécula}}{\frac{1}{12} \text{ massa do } ^{12}\text{C}}$	

- Massa atômica medida em uma \rightarrow numericamente igual a \mathcal{A}
- Massa atômica \approx número de massa $A = Z + N$

$$\mathcal{A} \approx A$$

Massas atômicas e nucleares

- Abundância isotópica, a_i
 - Número relativo de átomos de um dado isótopo em uma mistura de um elemento químico

$$\mathcal{A} = \sum_i \frac{a_i}{100} \mathcal{A}_i$$

– Exemplo

$$\left\{ \begin{array}{l} {}^{24}\text{Mg} - a_1 = 78,99\% \\ {}^{25}\text{Mg} - a_2 = 10,00\% \\ {}^{26}\text{Mg} - a_3 = 11,01\% \end{array} \right. \quad \mathcal{A}_i = \left\{ \begin{array}{l} i = 1 \Rightarrow 23,9850 \\ i = 2 \Rightarrow 24,9858 \\ i = 3 \Rightarrow 25,9826 \end{array} \right.$$

$$\mathcal{A} = \frac{a_1 \mathcal{A}_1 + a_2 \mathcal{A}_2 + a_3 \mathcal{A}_4}{100} = 24,3050$$

Massas atômicas e nucleares

- Número de Avogadro
 - 1 mol de uma substância
 - Quantidade de átomos presentes em uma amostra de 12g de $^{12}\text{C} = 6,0221415 \times 10^{23} = N_a$
 - Substância com massa \mathcal{M} gramas

$$\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{A}} \text{ moles} \qquad \frac{\mathcal{M}}{\mathcal{A}} N_a \text{ átomos}$$

- Utilizado em problemas de decaimento

– Atividade $A = \lambda N$ sendo $\lambda = \frac{\ln 2}{\tau(s)}$

$$N = \frac{A}{\lambda} = A \frac{\tau(s)}{\ln 2} = \frac{\mathcal{M}}{\mathcal{A}} N_a \quad \longrightarrow \quad \mathcal{M} = A \frac{\mathcal{A} \tau(s)}{N_a \ln 2}$$

Massas atômicas e nucleares

- Massa de um átomo e densidade atômica
 - 1 mol de uma substância $\rightarrow \mathcal{A}$ gramas $\rightarrow N_a$ átomos
 - Massa de 1 átomo $\rightarrow M = \frac{\mathcal{A}}{N_a} \approx \frac{A}{N_a}$
 - A aproximação é boa?
 - Exemplo: ^{208}Pb
 - $M(^{208}\text{Pb}) = \frac{\mathcal{A}}{N_a} = \frac{207,976652g}{N_a} = 3,4535 \times 10^{-22}g$
 - $M(^{208}\text{Pb}) \approx \frac{A}{N_a} = \frac{208g}{N_a} = 3,4539 \times 10^{-22}g$
 - Diferença $< 0,01\%$
 - Densidade de átomos
 - $N\left(\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}\right) = \frac{\rho}{\mathcal{A}} N_a$

Massas atômicas e nucleares

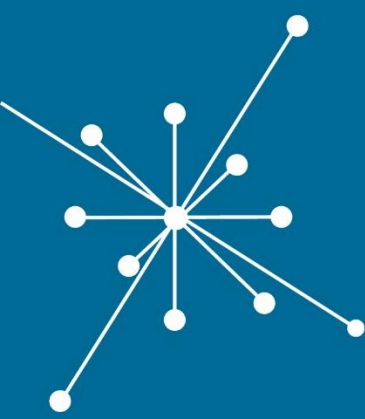
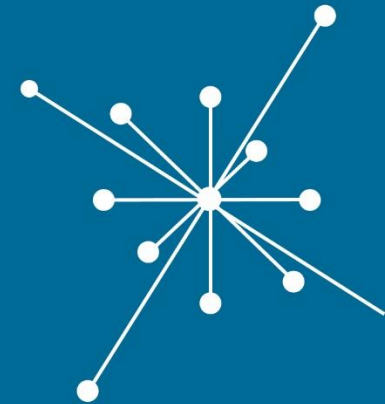
- Equivalência massa-energia
 - Da mecânica relativística

$$mc^2 = m_0c^2 + \Delta KE$$

– Exemplos

- Energia equivalente à massa das partículas:
- Elétron $\rightarrow E = m_e c^2 = 5,486 \times 10^{-4} \text{uma} \times 931,49 \frac{\text{MeV}}{\text{uma}} = 0,511 \text{ MeV}$
- 1 uma $\rightarrow E = m_{\text{uma}} c^2 = 1 \text{ uma} \times 931,49 \frac{\text{MeV}}{\text{uma}} = 931,49 \text{ MeV}$
- próton $\rightarrow E = m_p c^2 = 1,007276 \text{uma} \times 931,49 \frac{\text{MeV}}{\text{uma}} \approx 1 \text{ GeV}$

Razões para a desintegração nuclear

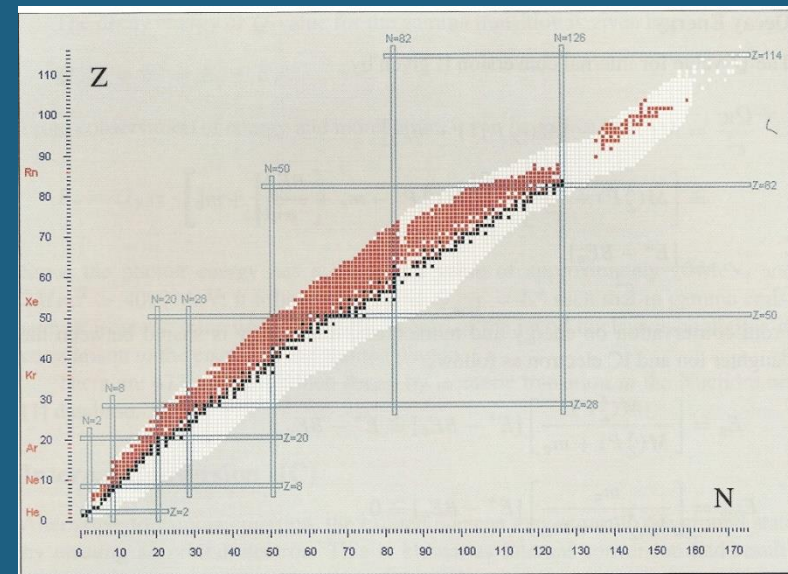


GRUPO DE
DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES
e FÍSICA MÉDICA

IFUSP - Instituto de Física da USP

Razões para a desintegração nuclear

- Desintegração nuclear ou decaimento radioativo
 - Emissão espontânea de energia ou partícula do interior do núcleo atômico
 - Núcleos
 - Estáveis
 - Instáveis
 - Estabilidade
 - Equilíbrio entre forças
 - Nucleares \rightarrow p-p, p-n e n-n
 - Repulsão coulombiana p-p



Razões para a desintegração nuclear

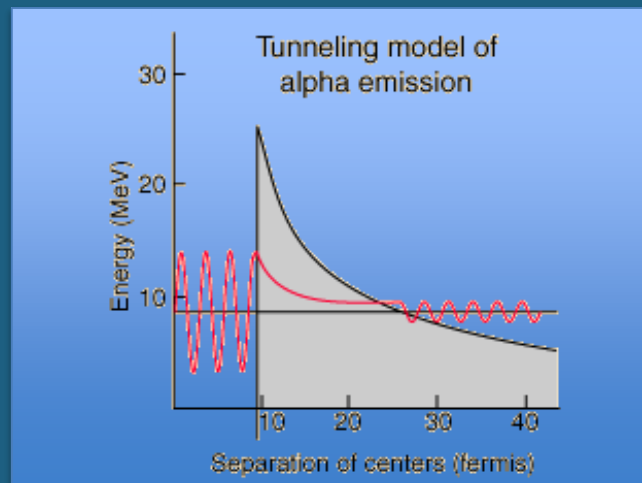
- Força nuclear
 - Atrativas para distâncias até 2 fm (10^{-15} m)
 - Repulsivas para distâncias mais curtas
- Núcleos
 - Leves $\rightarrow N=Z$
 - Z crescendo $\rightarrow N > Z$
 - devido ao aumento da repulsão coulombiana
 - Mais nêutrons para aumentar a força nuclear de atrativa

Razões para a desintegração nuclear

- Princípio da conservação de energia
 - Emissão de α^+ pelo plutônio-242
 - ${}_{94}^{242}\text{Pu} \rightarrow {}_{92}^{238}\text{U} + {}_2^4\text{He}$
 - Pra ocorrer
 - $M_{nucl}({}^{242}\text{Pu}) > M_{nucl}({}^{238}\text{U}) + M_{nucl}({}^4\text{He})$
 - Excesso de energia
 - » energia cinética da partícula alfa
 - » Excitação no núcleo filho
 - Todos os núcleos com $A > 140$ satisfazem a equação
 - » Condição necessária mas não suficiente para ocorrer decaimento
 - » Há núcleos estáveis com $A > 140$

Razões para a desintegração nuclear

- Condições para ocorrência de decaimento alfa
 - 2 N e 2 P juntos dentro do núcleo
 - A partícula deve escapar do poço de potencial no núcleo
 - Armadilhamento
 - George Gamow – 1928 – tunelamento da partícula alfa



Razões para a desintegração nuclear

- Energia de ligação dos núcleos – BE
 - Energia necessária para separar o núcleo em seus nucleons constituintes
 - Soma das massas dos constituintes

$$m_c = Zm_p + (A - Z)m_n$$

- Defeito de massa
 - Energia de ligação do núcleo/ c^2
 - Energia necessária para separar os componentes/ c^2

$$\text{Defeito de massa} = m_c - m\left({}_Z^AX\right) = Zm_p + (A - Z)m_n - m\left({}_Z^AX\right) = \frac{BE}{c^2}$$

Razões para a desintegração nuclear

- Normalmente não se conhece $m\left(\frac{A}{Z}X\right)$
 - Usando-se as massas atômicas

$$\begin{aligned} \text{Defeito de massa} &= \frac{BE}{c^2} = Z \left[M\left(\frac{1}{1}H\right) - m_e + \frac{BE_{1e}}{c^2} \right] + m_c - (A - Z)m_n - \\ &\quad - \left[M\left(\frac{A}{Z}X\right) - Zm_e + \frac{BE_{Ze}}{c^2} \right] = \\ &= ZM\left(\frac{1}{1}H\right) + (A - Z)m_n - M\left(\frac{A}{Z}X\right) + \frac{1}{c^2} [ZBE_{1e} - BE_{Ze}] \end{aligned}$$

$$[ZBE_{1e} - BE_{Ze}]$$

Diferença entre a energia de ligação de Z elétrons de Átomos de H e dos Z elétrons do átomo $\frac{A}{Z}X$

Valor pequeno – ordens de grandeza inferior ao restante

$$BE \approx \left[ZM\left(\frac{1}{1}H\right) + (A - Z)m_n - M\left(\frac{A}{Z}X\right) \right] c^2$$

Razões para a desintegração nuclear

- Exemplos
 - Defeito de massa e energia de ligação do ${}^{17}_8\text{O}$
- Excesso de massa
 - $ME\left({}^A_ZX\right) = M\left({}^A_ZX\right) - A$ (*em uma*)
 - Conhecendo o excesso de massa pode-se deduzir a massa do nuclídeo
 - Exemplo
 - Excesso de massa do ${}^{238}\text{U}$

Razões para a desintegração nuclear

- Valor Q de uma reação
 - Conservação da energia total

$$\left\{ \sum_i [E_i + m_i c^2] \right\}_{antes} = \left\{ \sum_i [E_i + m_i c^2] \right\}_{depois}$$

variações nas energia cinéticas \equiv variações nas m_i 's

$$Q = \left(\begin{array}{c} \text{energia} \\ \text{cinética} \end{array} \right)_{depois} - \left(\begin{array}{c} \text{energia} \\ \text{cinética} \end{array} \right)_{antes}$$

$$Q = \left(\begin{array}{c} \text{massa de} \\ \text{repouso} \end{array} \right)_{antes} \cdot c^2 - \left(\begin{array}{c} \text{massa de} \\ \text{repouso} \end{array} \right)_{depois} \cdot c^2$$

Razões para a desintegração nuclear

– Se

$$\left(\begin{array}{l} \text{energia cinética} \\ \text{dos produtos} \end{array} \right) > \left(\begin{array}{l} \text{Energia cinética} \\ \text{dos reagentes} \end{array} \right) \Rightarrow \text{exotérmica} \Rightarrow Q > 0$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{Preciso de energia} \\ \text{para induzir a reação} \end{array} \right) \Rightarrow \text{endotérmica} \Rightarrow Q < 0$$

– Para a reação $a + X \rightarrow Y + b$

$$Q = (E_Y) - (E_a + E_X) = [(m_a + m_X) - (m_Y + m_b)]c^2$$

– Em termos das massas atômicas

$$Q = [(M_a + M_X) - (M_Y + M_b)]c^2$$

Razões para a desintegração nuclear

- Num decaimento radioativo

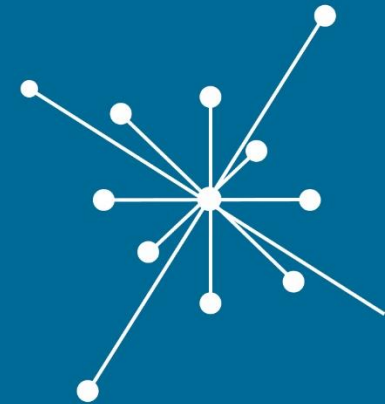


$$Q = \underbrace{(E_D + E_d)}_{P \text{ em repouso}} = [m_P - m_D - m_d]c^2 > 0$$

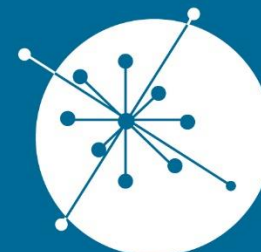
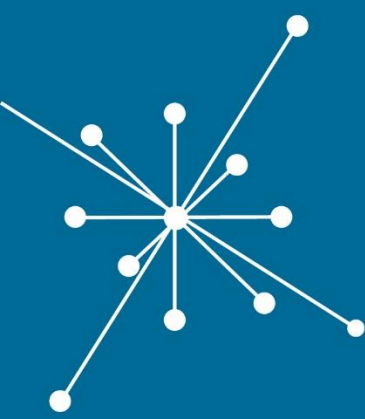
– Se for considerada a conservação de momento

- Energia necessária para induzir a reação em pouco maior que Q
- Energia limiar

$$E_{th} = -\frac{Q(m_a + M_X)}{m_a}$$



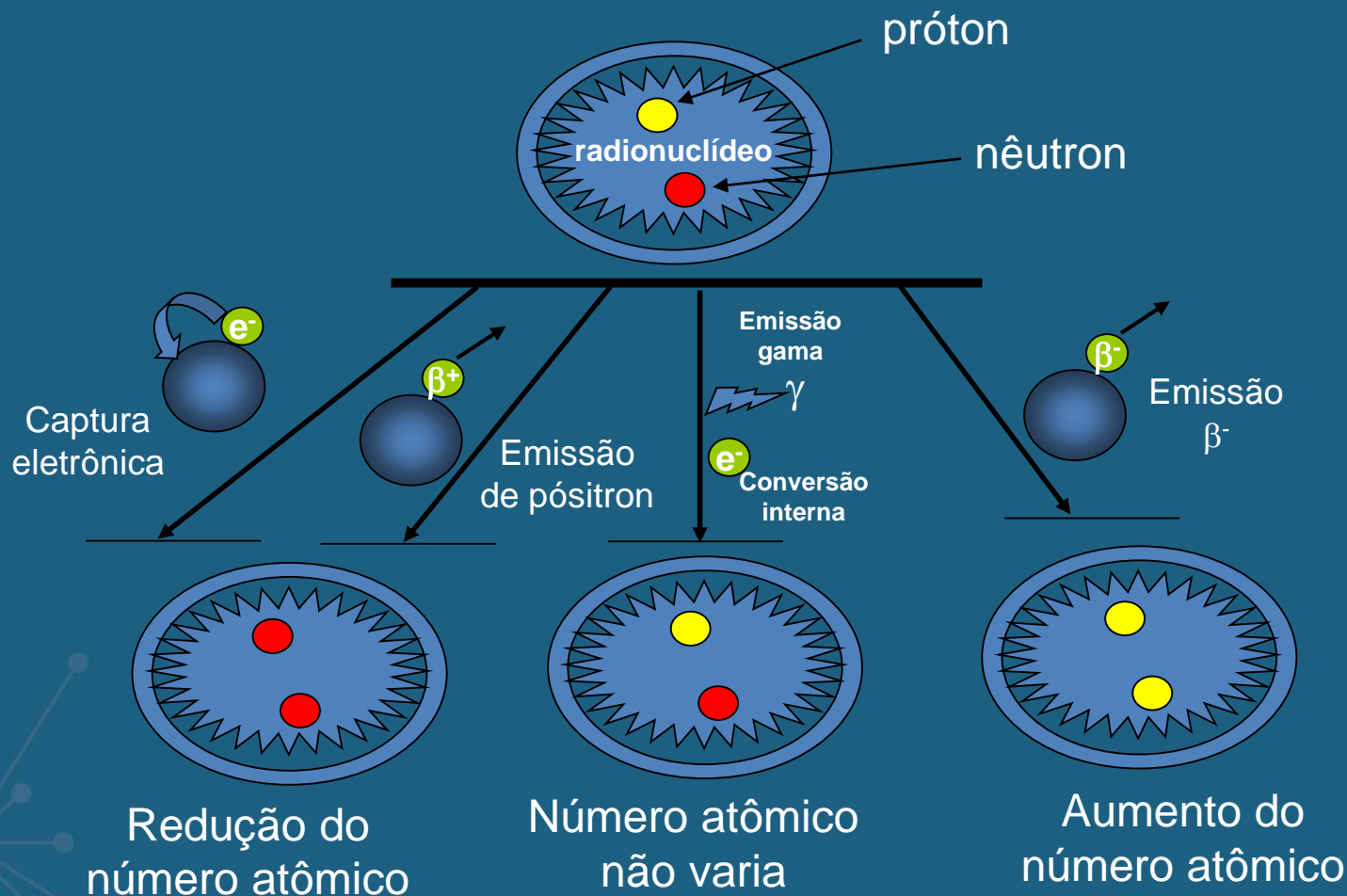
Decaimento nuclear



GRUPO DE
DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES
e FÍSICA MÉDICA

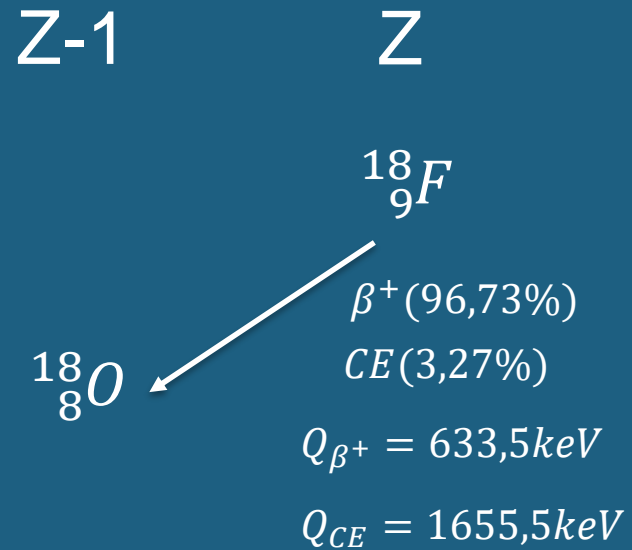
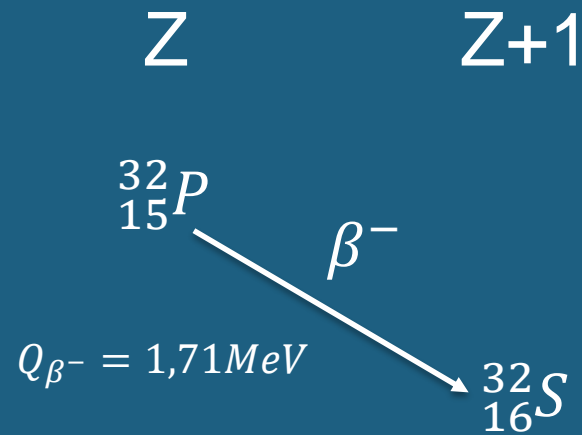
IFUSP - Instituto de Física da USP

Decaimento nuclear



isótopos estáveis

Decaimento nuclear



Decaimento nuclear

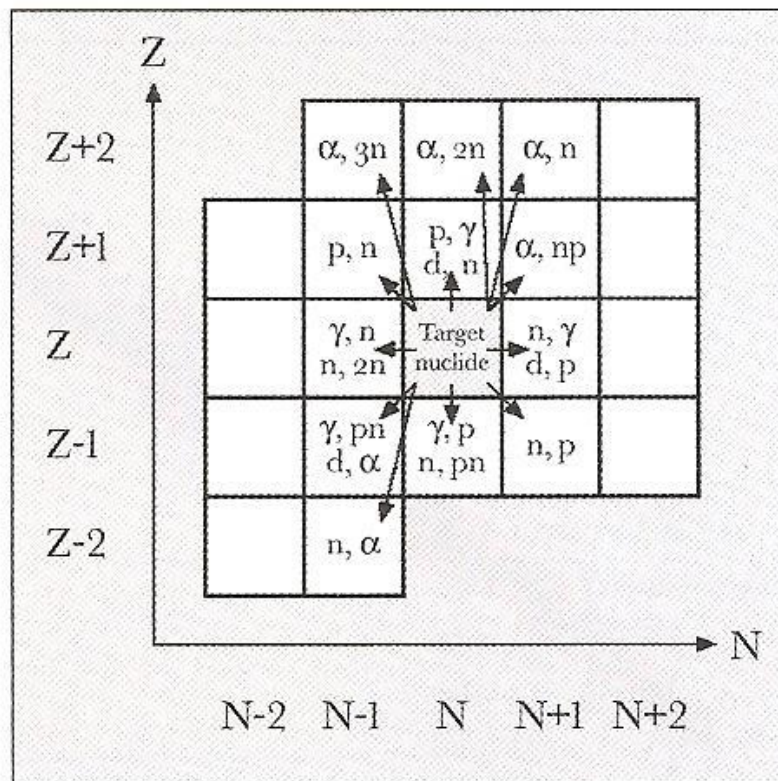
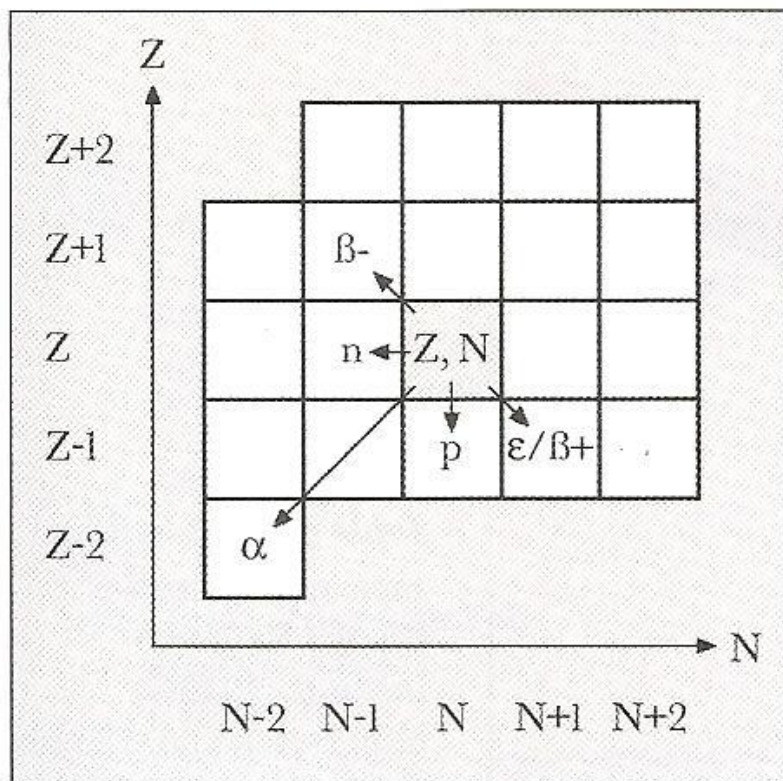


Fig. 2.7 (left). Nuclear decay processes on the nuclide chart. A nuclide with “co-ordinates” Z, N transforms to the nuclide Z', N' through the decay processes shown

Fig. 2.8 (right). Activation processes and nuclear reactions on the nuclide chart. A target nuclide with co-ordinates Z, N transforms to the nuclide Z', N' through the processes shown

Table 4.3. Summary of different types of radioactive decay. The parent nuclide is denoted by *P* and the daughter nuclide by *D*.

Decay type	Reaction	Description
Alpha (α)	${}^A_Z P \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} D + \alpha$	In proton rich nuclides, an alpha particle (${}^4_2\text{He}$) can be emitted – the daughter nucleus contains two protons and two neutrons less than the parent.
Beta-minus (β^-)	${}^A_Z P \rightarrow {}^A_{Z+1} D + \beta^- + \bar{\nu}$	In neutron rich nuclides, a neutron in the nucleus can decay to a proton – thereby an electron (β^-) is emitted together with an anti-neutrino ($\bar{\nu}$).
Beta-plus (β^+)	${}^A_Z P \rightarrow {}^A_{Z-1} D + \beta^+ + \nu$	In proton rich nuclides, a proton in the nucleus changes to a neutron – thereby a positron (β^+) is emitted together with a neutrino (ν).
Electron capture (ϵ or ec)	${}^A_Z P + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} D^* + \nu$	An orbital electron is “captured” by the nucleus and results in a proton being converted to a neutron and a neutrino (ν). The daughter nucleus is usually left in an excited state.
Gamma (γ)	${}^A_Z P^* \rightarrow {}^A_Z P + \gamma$	An atom in an excited state decays through the emission of a photon.
Isomeric transition (IT)	${}^A_m P \rightarrow {}^A_Z P + \gamma$	Isomeric transition occurs in long-lived metastable states (isomers) of parent nuclei.
Internal conversion (IC)	${}^A_Z P^* \rightarrow [{}^A_Z P]^+ + e^-$	A nucleus in an excited state ejects an orbital (usually a <i>K</i> -shell) electron.
Proton (p)	${}^A_Z P \rightarrow {}^{A-1}_{Z-1} D + p$	A proton is ejected from the nucleus.
Neutron (n)	${}^A_Z P \rightarrow {}^{A-1}_Z D + n$	A neutron is ejected from the nucleus.
Spontaneous fission (SF)	${}^A_Z P \rightarrow D_H + D_L + \nu_n$	In this process, the parent nucleus splits into heavy and light fragment daughter nuclei (D_H , D_L) with mass and charge roughly half that of the parent, and several neutrons ν_n .
Special beta-decay processes β^-n , $\beta^+\alpha$, β^+p	${}^A_Z P \rightarrow {}^A_{Z+1} D^* + \beta^- + \bar{\nu}$ ${}^A_{Z+1} D^* \rightarrow {}^{A-1}_{Z+1} D + n$	Particle (neutron, alpha, proton) emission immediately follows beta decay.
Heavy-ion radioactivity	${}^A_Z P \rightarrow D_H + D_L$	A heavy parent decays by the emission of a light ion.

Decaimento nuclear

$$\alpha \quad {}^A_Z P \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} D + {}^4_2 He \quad Q = \{M({}^A_Z P) - [M({}^{A-4}_{Z-2} D) + M({}^4_2 He)]\} \times 931,5 MeV$$

$$\begin{aligned} \beta^- \quad {}^A_Z P &\rightarrow [{}^A_{Z+1} D]^+ + \beta^- + \bar{\nu} & Q &= \{M({}^A_Z P) - [M([{}^A_{Z+1} D]^+) + m_{\beta^-} + m_{\bar{\nu}}]\} \times 931,5 MeV \\ & & &= \{M({}^A_Z P) - [M([{}^A_{Z+1} D] - m_e) + m_{\beta^-} + m_{\bar{\nu}}]\} \times 931,5 MeV \\ & & &\approx \{M({}^A_Z P) - M([{}^A_{Z+1} D])\} \times 931,5 MeV \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta^+ \quad {}^A_Z P &\rightarrow [{}^A_{Z-1} D]^- + \beta^+ + \nu & Q &= \{M({}^A_Z P) - [M([{}^A_{Z-1} D]^-) + m_{\beta^+} + m_{\nu}]\} \times 931,5 MeV \\ & & &= \{M({}^A_Z P) - [M([{}^A_{Z-1} D] + m_e) + m_{\beta^+} + m_{\nu}]\} \times 931,5 MeV \\ & & &\approx \{M({}^A_Z P) - M([{}^A_{Z-1} D]) - 2m_e\} \times 931,5 MeV \end{aligned}$$

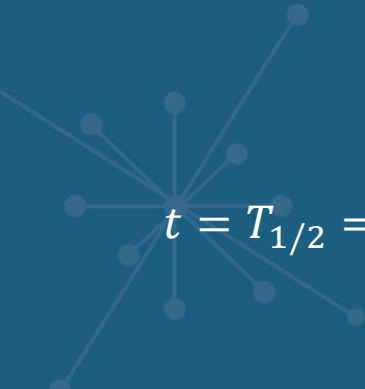
Condição de emissão beta+

Decaimento nuclear

- Lei fundamental do decaimento radioativo
 - Cada partícula tem a mesma constante de probabilidade de decair por unidade de tempo
 - Número de decaimentos, dN , em dt

$$dN = -\lambda N(t)dt \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt$$

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t \Rightarrow N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$


$$t = T_{1/2} \Rightarrow N = \frac{N_0}{2}$$

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

$$N = \frac{N_0}{e^{\lambda t}} = \frac{N_0}{e^{0,693t/T_{1/2}}} = \frac{N_0}{2^{\frac{t}{T_{1/2}}}}$$

Sumário

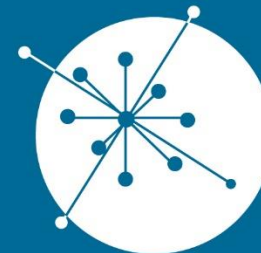
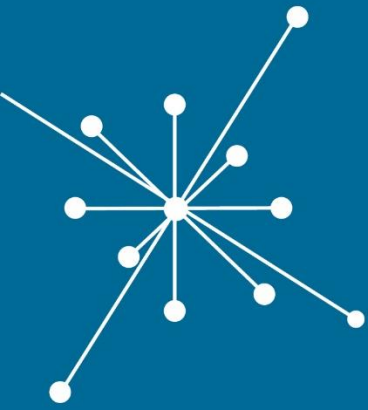
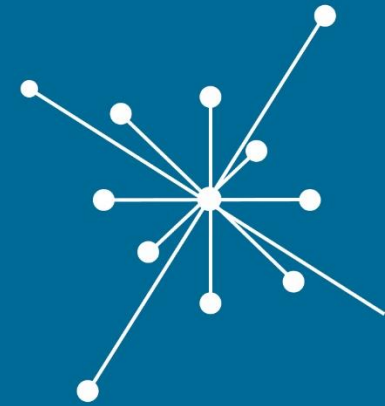


IFUSP - Instituto de Física da USP

- Introdução
- Massas atômicas e nucleares
- Razões para a desintegração nuclear
- Decaimento nuclear



Lista de classe



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

IFUSP - Instituto de Física da USP