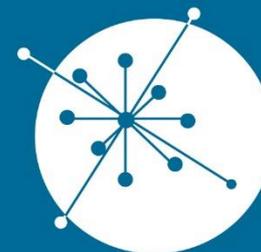
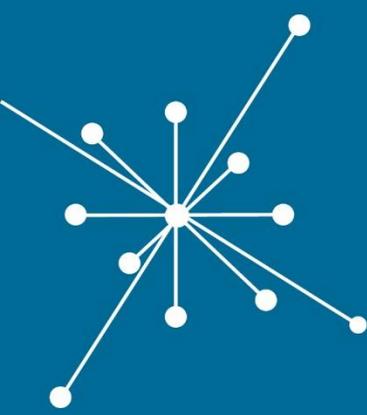


Desintegração Nuclear

Paulo R. Costa



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

IFUSP - Instituto de Física da USP

Sumário

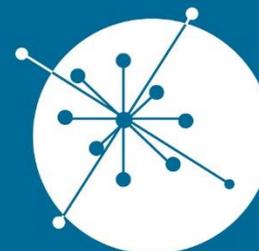
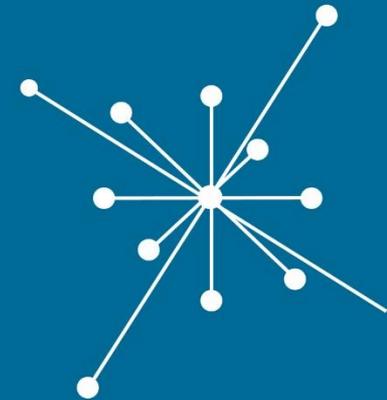


IFUSP - Instituto de Física da USP

- 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

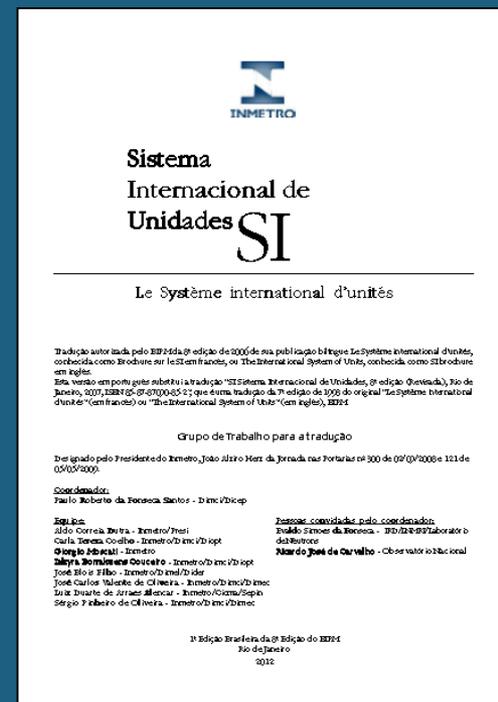
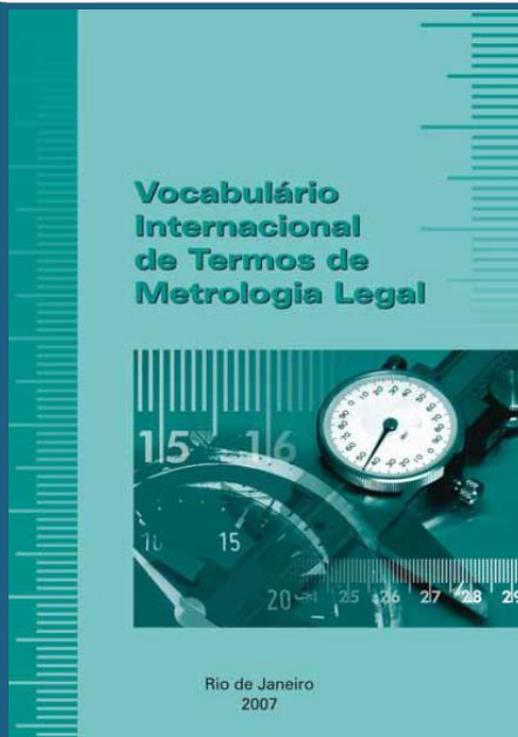
- Unidades e SI
 - Comprimento → metro
 - Tempo → segundo
 - Temperatura → kelvin
 - Massa → quilograma
 - Corrente elétrica → ampère
 - Intensidade luminosa → candela
 - Quantidade de substância → mol



Vocabulário metrológico



IFUSP - Instituto de Física da USP

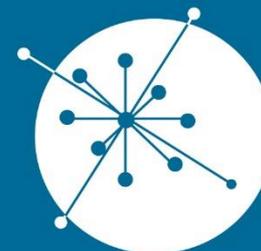
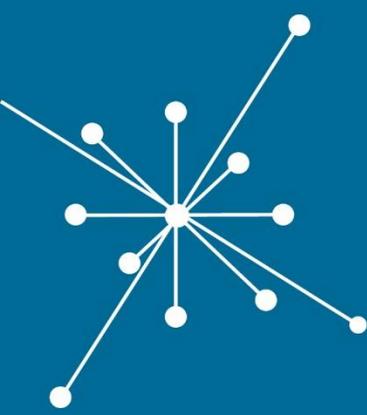
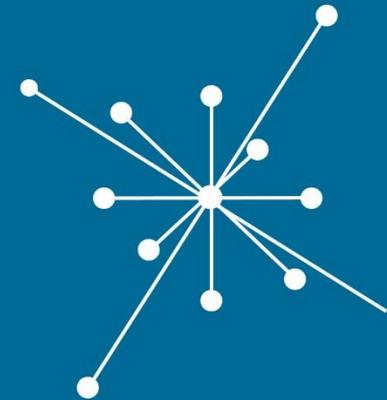


Disponíveis em:
<http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes.asp>

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

$M\left({}_Z^AX\right) \Rightarrow$ *massa atômica*

$m\left({}_Z^AX\right) \Rightarrow$ *massa nuclear*

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

$m\left({}_0^1n\right) \Rightarrow m_n$

$m\left({}_1^1H\right) \Rightarrow m_p$

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

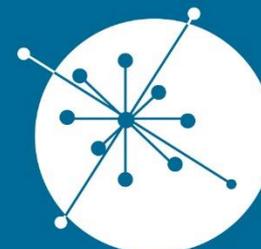
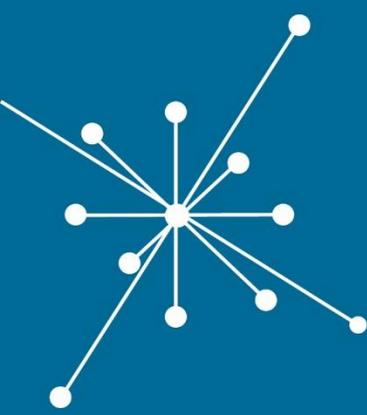
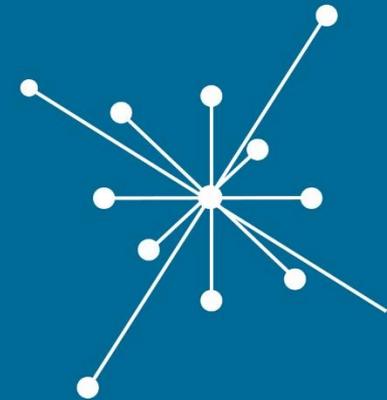
- Equivalência massa-energia
 - Da mecânica relativística

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

– 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

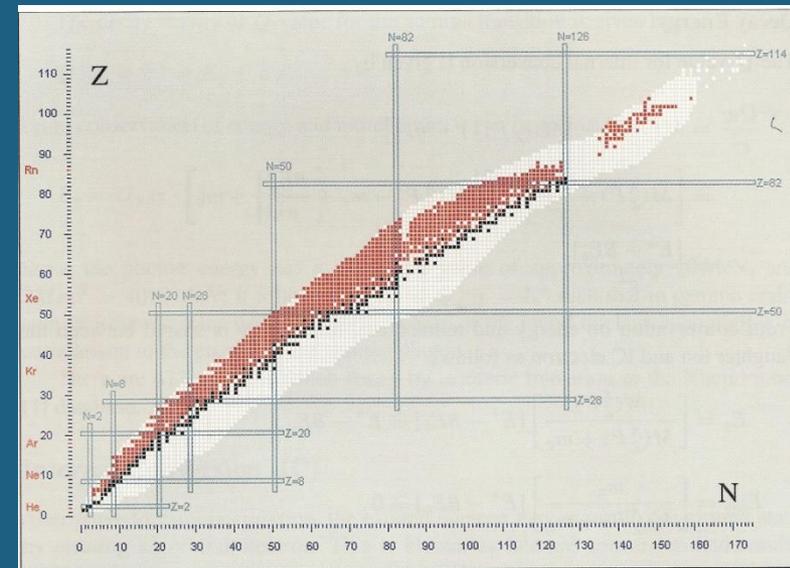


GRUPO DE
**DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES**
e FÍSICA MÉDICA

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

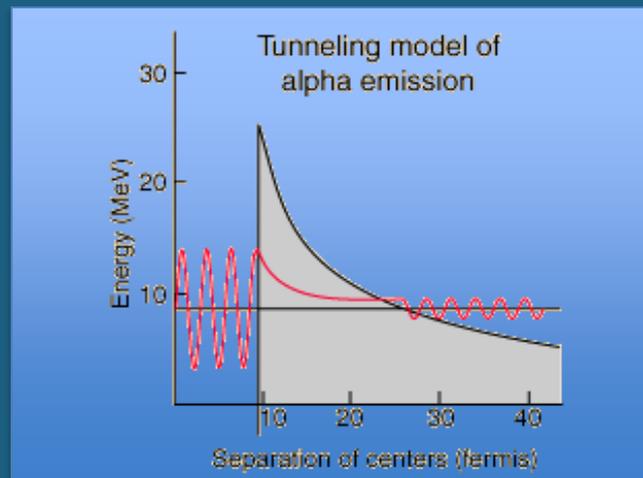
- Força nuclear
 - Atrativas para distâncias até 2 fm (10^{-15} m)
 - Repulsivas para distâncias mais curtas
- Núcleos
 - Leves $\rightarrow N=Z$
 - Z crescendo $\rightarrow N > Z$
 - devido ao aumento da repulsão coulombiana
 - Mais nêutrons para aumentar a força nuclear de atrativa

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

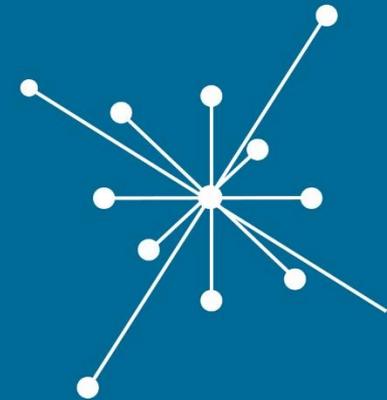


$$Q = \underbrace{(E_D + E_d)}_{P \text{ em repouso}} = [m_P - m_D - m_d]c^2 > 0$$

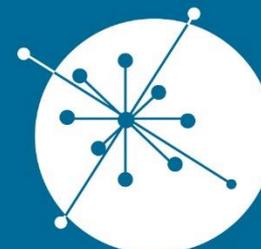
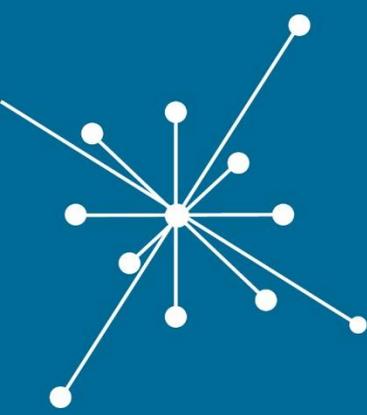
– Se for considerada a conservação de momento

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

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



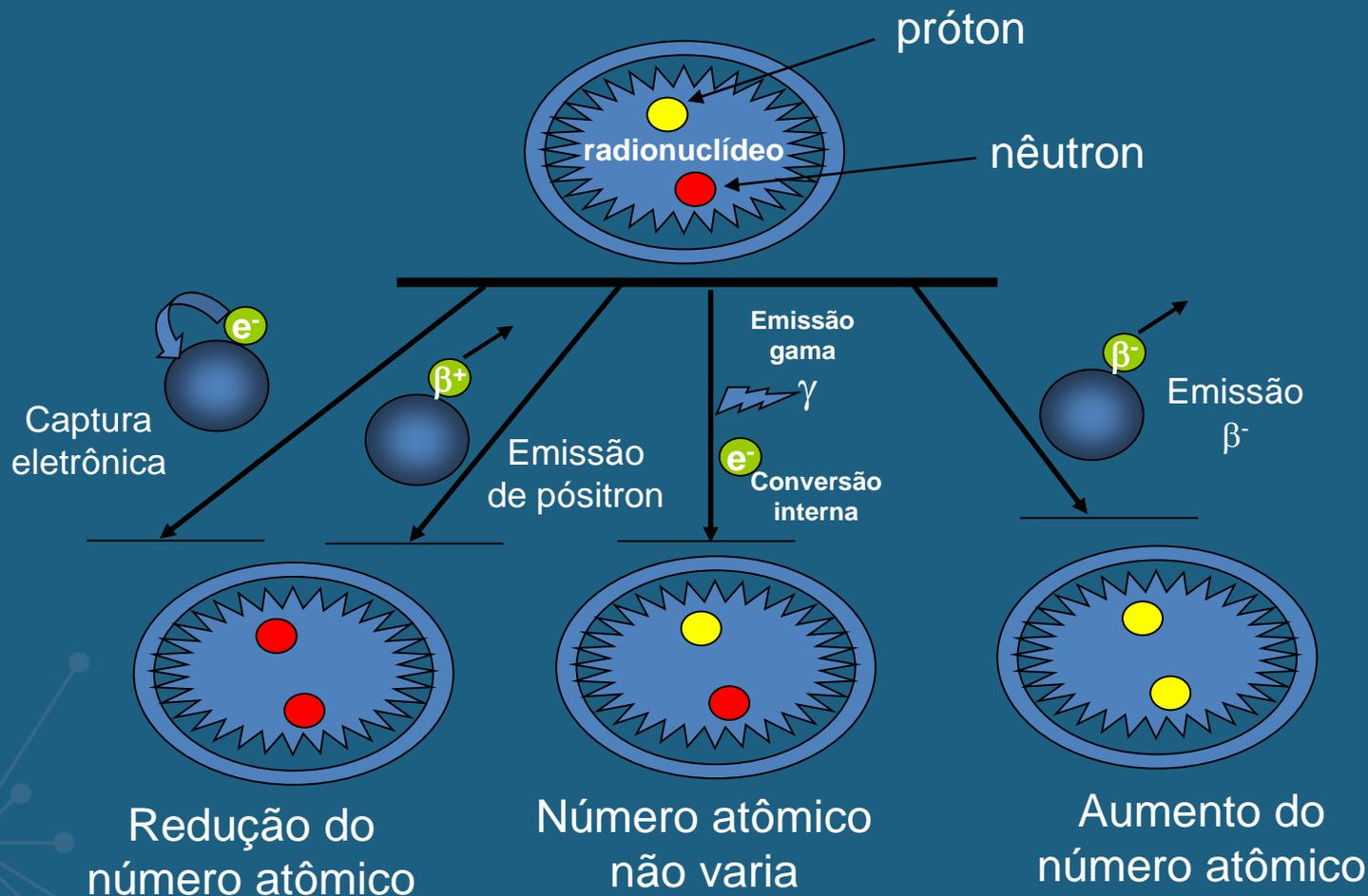
Decaimento nuclear



GRUPO DE
DOSIMETRIA
DAS RADIAÇÕES
e FÍSICA MÉDICA

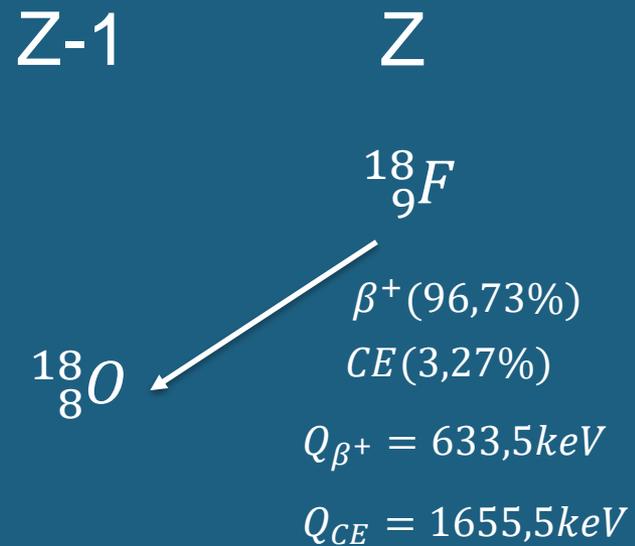
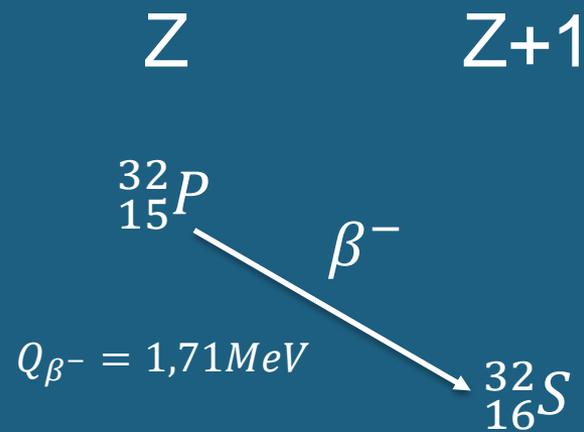
IFUSP - Instituto de Física da USP

Decaimento nuclear



isótopos estáveis

Decaimento nuclear



Decaimento nuclear

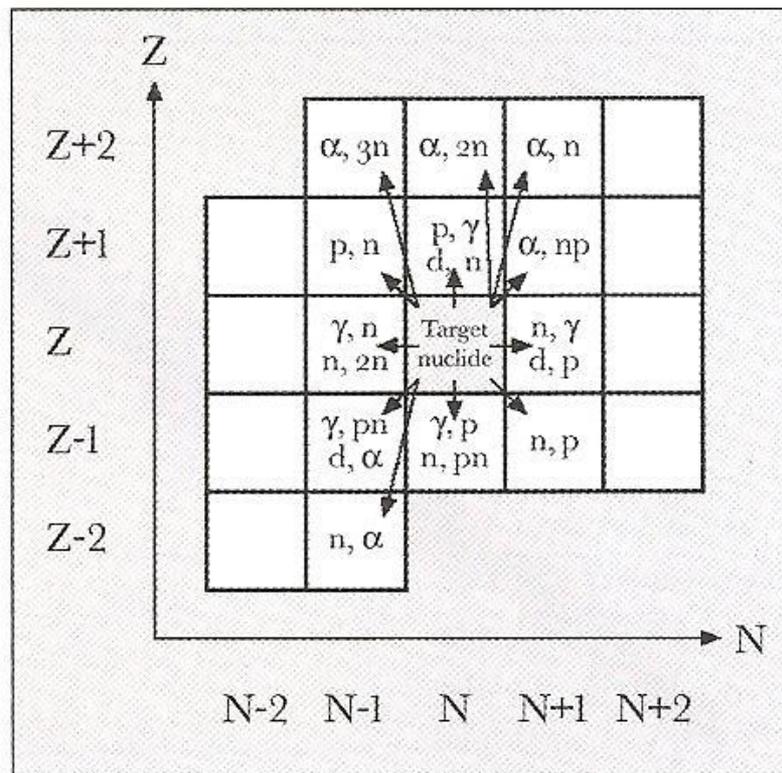
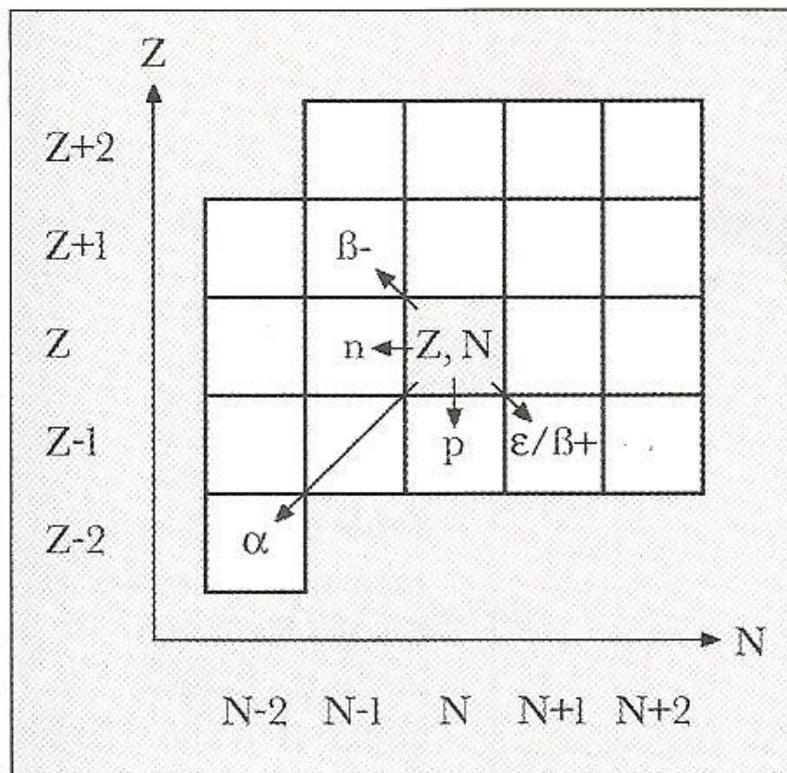


Fig. 2.7 (left). Nuclear decay processes on the nuclide chart. A nuclide with “co-ordinates” Z, N transforms to the nuclide Z', N' through the decay processes shown

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

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

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

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

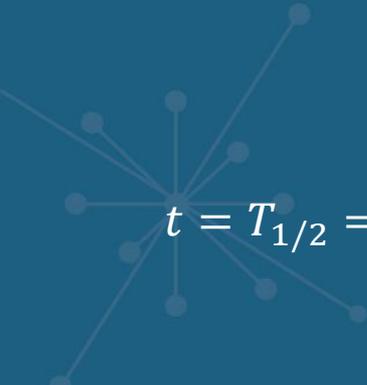
Condição de emissão beta+

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

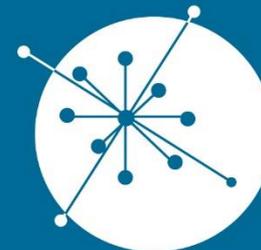
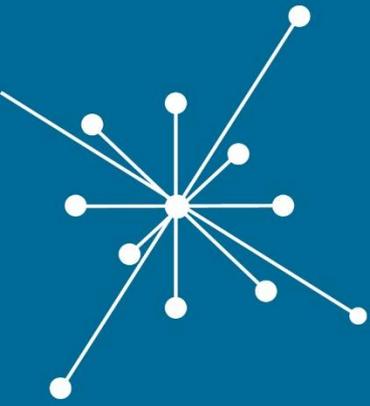
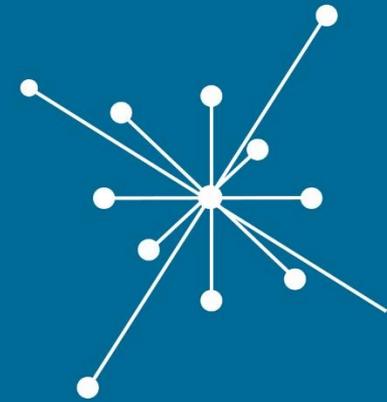


IFUSP - Instituto de Física da USP

- 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