
Capítulo 6: O Universo, Partículas e Radioactividade

Partículas fundamentais

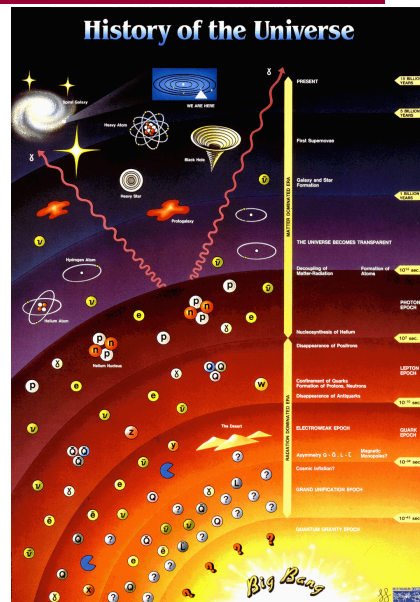
O universo é constituído por partículas (?), que interagem:

- *quarks* (componentes das partículas do núcleo atómico, os prótons e neutrões)
- *electrões*
- *neutrinos*

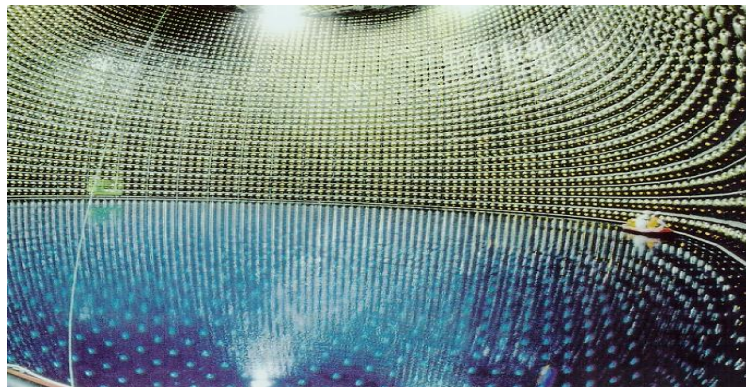
As interacções são realizadas por intermédio de outras partículas (*gluões, fótons, etc*)

O Universo

Estas partículas
(e outras) surgiram
há cerca de
15 mil milhões de
anos, na
Grande Explosão
Inicial
(**Big Bang**)



Detector de Neutrinos: Kamioka Observatory



On February 23, 1987, a supernova explosion occurred in the Large Magellanic Cloud. The first neutrinos detection was made by Kamiokande with 11 neutrino events detected.

Constituição do núcleo

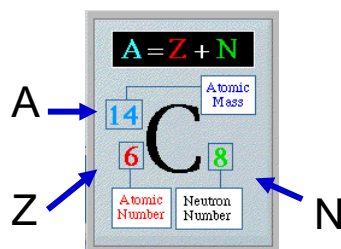


Núcleo = Protões + Neutrões
nucleões

Z=número de protões (nº atómico)

N=número de neutrões

A = número de nucleões (nº massa)



Isótopos

⇒ átomos do mesmo elemento
(mesmo Z) e diferente A

Site: [isótopos:
http://ie.lbl.gov/education/
isotopes.htm](http://ie.lbl.gov/education/isotopes.htm)

Hidrogénio = 1.0079 u.m.a.

(valor médio, devido à abundância diferente dos isótopos)

Prótio	1 protão 1 electrão
	1.0070 u.m.a. 99.985 %
Deutério	1 protão 1 electrão 1 neutrão
	2.0141 u.m.a. 0.014 %
Trítio	1 protão 1 electrão 2 neutrões
	3.0220 u.m.a. 0.001 %

Núcleo

- Carga = Z (e)
- Dimensões da ordem de fm (10^{-15} m)
- Massa Aprox. $\approx A$ (u.m.a.)

– u.m.a. = unidade de massa atómica
= 1.66×10^{-27} kg
= $931.5 \text{ MeV}/c^2$

Calculado a partir da
energia em repouso

$$E_0 = mc^2$$

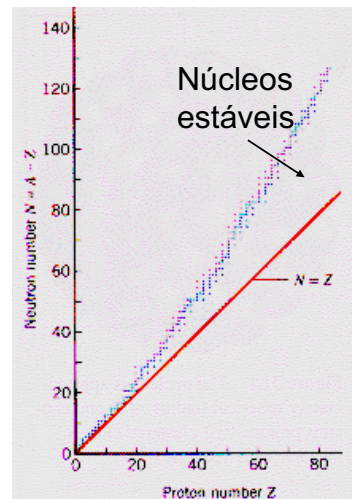
Massa de repouso do prótão, neutrão e electrão

Partícula	Kg	u.m.a.	MeV/c ²
prótão	$1,6726 \times 10^{-27}$	1,007276	938,28
neutrão	$1,6750 \times 10^{-27}$	1,008665	939,57
electrão	$9,109 \times 10^{-31}$	$5,486 \times 10^{-4}$	0,511

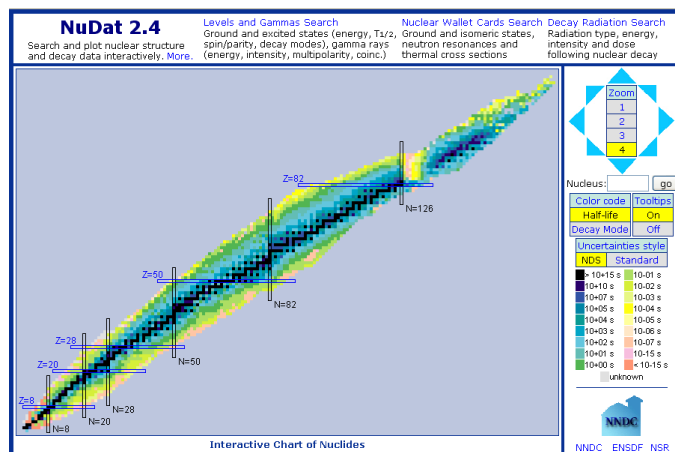
Estabilidade do núcleo

- para A pequenos,
 $N = Z$
- para A elevados,
 $N > Z$

Não há núcleos
estáveis para
 $Z > 83$ (Bi)

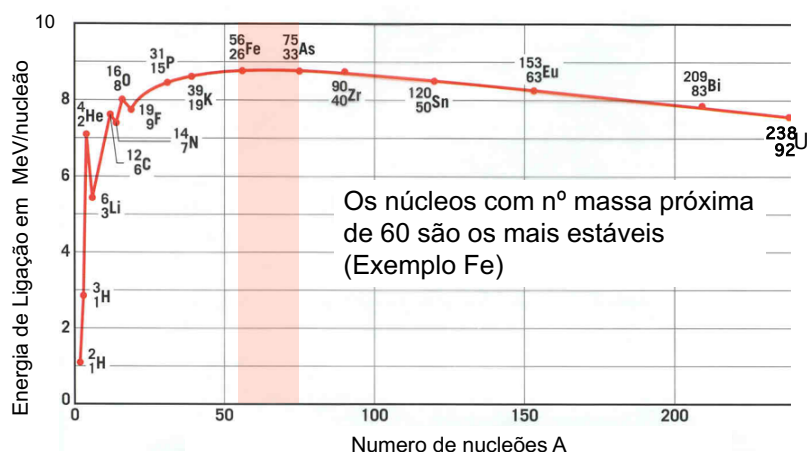


A Tabela Nuclear de Isótopos (Zoo)



<http://www.nndc.bnl.gov/chart/>

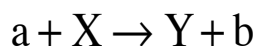
Energia de Ligação



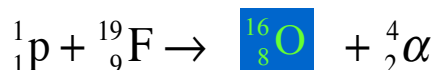
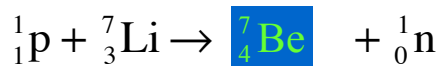
Elementos de Física 2017/2018  universidade de aveiro
theoria poiesis praxis

Reações Nucleares

- Um núcleo X é bombardeado por uma partícula a produzindo Y and b

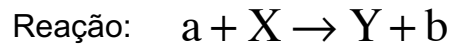


A reacção deve obedecer às regras de conservação (carga, número de nucleões, energia e momento)



Elementos de Física 2017/2018  universidade de aveiro
theoria poiesis praxis

Energia da Reação



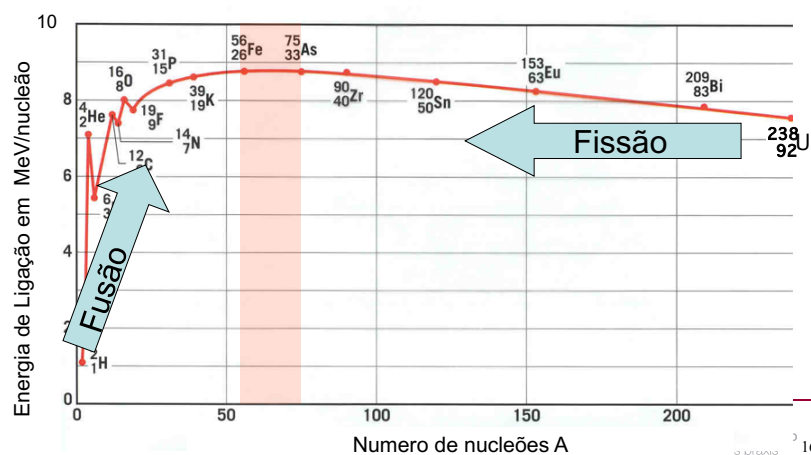
$$\text{Energia de Reagentes} = \text{Energia de Produtos} + Q$$

- Se $Q > 0$: reação exotérmica
 - Energia cinética dos produtos é maior
- Se $Q < 0$: reação endotérmica

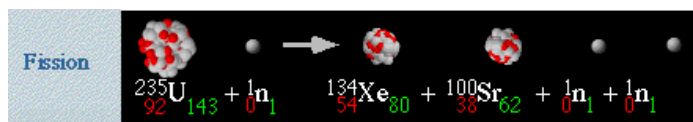
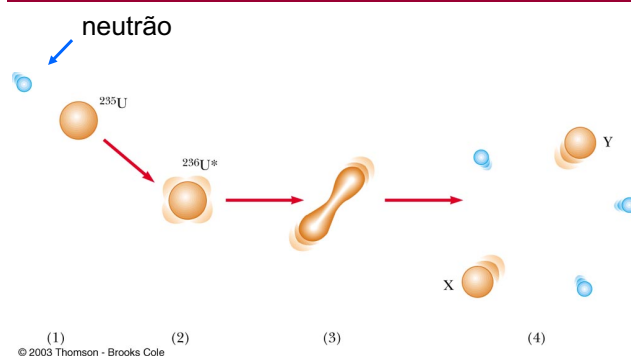
Reacções Nucleares: Energia

Fissão: Desagregar núcleos grandes

Fusão: Agregar núcleos pequenos

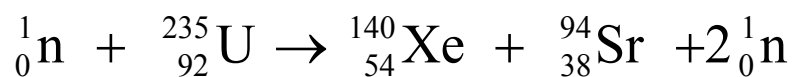


Fissão Nuclear



Elementos de Física 2017/2018  universidade de aveiro
theoria poiesis praxis

Fissão Nuclear



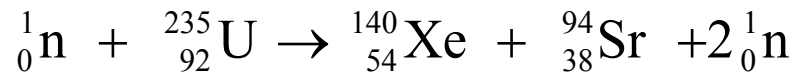
- Divide-se em dois núcleos com

$$Z_1 = 46 + z \quad \text{e} \quad Z_2 = 46 - z$$

- Liberta 2.5 neutrões, em média
- Productos tipicamente radioactivos
 - Decaimento via β^-

Elementos de Física 2017/2018  universidade de aveiro
theoria poiesis praxis

Fissão Nuclear

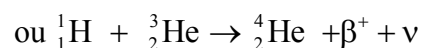
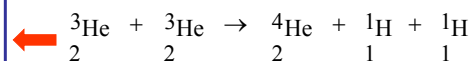
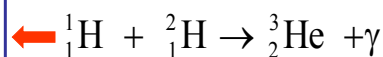
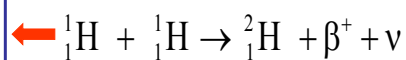
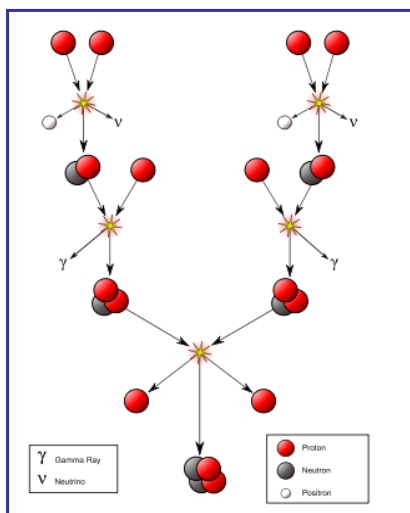


- Xe-140 e Sr-94 são radioactivos
 - Decaimento beta
 - Xe (16 s) \rightarrow Cs (66 s) \rightarrow Ba (12.8 d) \rightarrow La (40.2 h) \rightarrow Ce-140
 - Sr (1.2 m) \rightarrow Y (20 m) \rightarrow Zr-94
 - 6 electrões e 6 antineutrinos

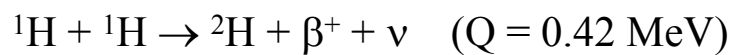
Fusão Nuclear

Ciclo protão-protão $\rightarrow 4\text{p} \rightarrow \alpha + 2\text{e}^+ + 25\text{ MeV}$

Energia gerada nas estrelas!

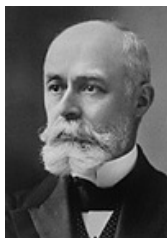


Fusão Nuclear



Radioactividade

Processo de emissão espontânea de radiação/partículas por núcleos instáveis



**Antoine-Henri
Becquerel**



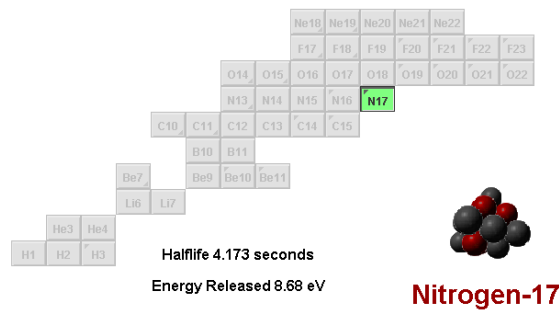
Pierre Curie



Marie Curie

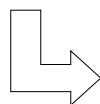
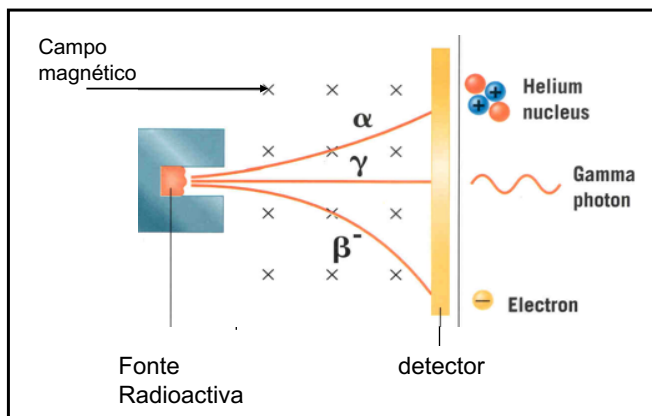
Radioactividade

⇒ processo estatístico que ocorre em núcleos instáveis



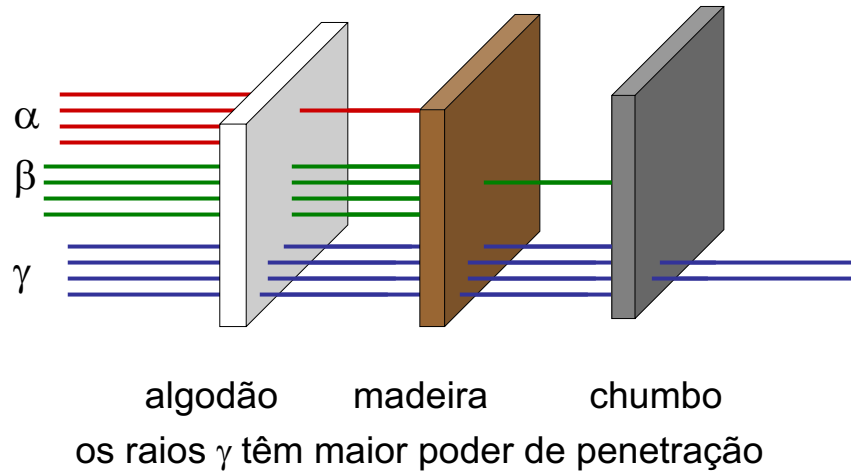
<http://www.colorado.edu/physics/2000/applets/iso.html>

3 Tipos de Radioactividade



partículas α : núcleos de hélio 4
partículas β : electrões β^- ou positrões β^+
 γ : fótons (mais energéticos que os raios X)

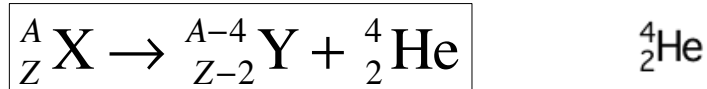
Poder de penetração



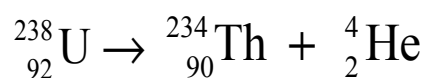
Regras de conservação

- 1) Número de nucleões ($p+n$) é conservado.
- 2) Carga é conservada.
- 3) Energia e momento são conservados.

Decaimento Alfa

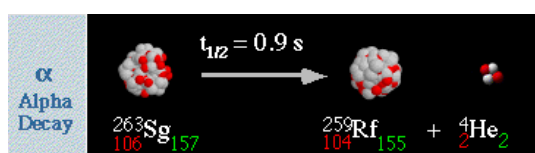


Nota: Só ocorre se $M_X > M_Y + M_\alpha$

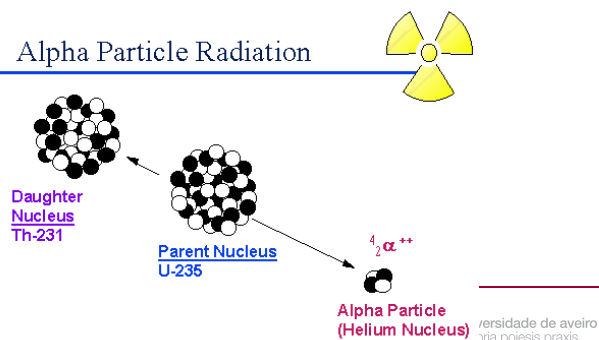


- 1) $238 = 234 + 4$ conservação do nº nucleões
- 2) $92 = 90 + 2$ conservação da carga

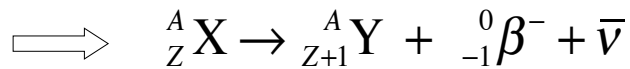
Decaimento Alfa



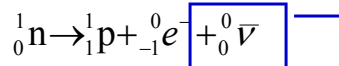
Alpha Particle Radiation



Decaimento Beta



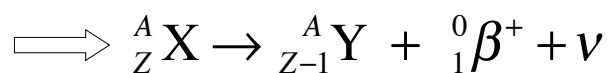
Exemplo:



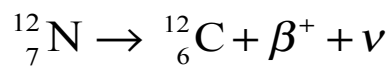
Necessário para
conservar o momento.

- Electrão (β^-) é relativístico
- Antineutrino ($\bar{\nu}$) tem
velocidade próxima da da
luz

Decaimento Beta



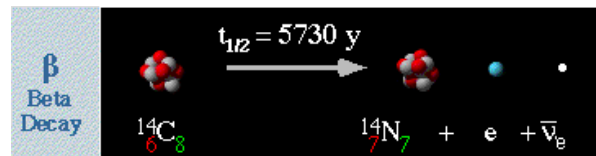
Exemplo:



Positrão = β^+
= antielectrão

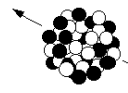
- neutrino = ν
- massa » 0 carga = 0 spin = $\frac{1}{2}$
 - * Interação fraca 1 em 10^{12}
 - * Observado em 1956

Decaimento Beta



Beta Particle Radiation

Daughter Nucleus
Calcium-40



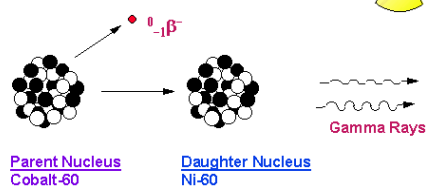
$^0_0\bar{\nu}$
Antineutrino

$^0_{-1}\beta^-$
Beta Particle

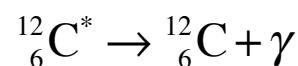
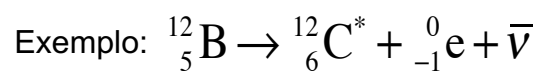
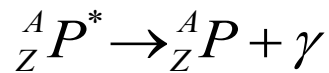
Elementos de Física 2017/2018  universidade de aveiro
theoria poiesis praxis

Decaimento Gama

Gamma-Ray Radiation



- O núcleo pai decai para um estado excitado
- O núcleo filho emite um fóton γ



Elementos de Física 2017/2018  universidade de aveiro
theoria poiesis praxis

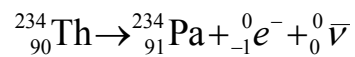
Decaimento

O núcleo ${}^{234}_{90}\text{Th}$ sofre um decaimento β^-

O que é verdade?

1. O nº de prótons no núcleo filho aumenta de um.
2. O nº de neutrões no núcleo filho aumenta de um.

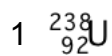
O decaimento β^- é acompanhado pela emissão de um electrão: criação de uma carga $-e$.



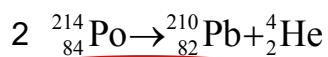
De facto, o electrão e o neutrino saem do núcleo

Decaimento

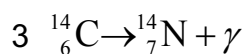
Qual dos seguintes decaimentos não é permitido?



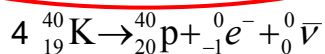
$$\begin{aligned} 238 &= 234 + 4 \\ 92 &= 90 + 2 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} 214 &= 210 + 4 \\ 84 &= 82 + 2 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} 14 &= 14 + 0 \\ 6 &= 7 + 0 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} 40 &= 40 + 0 + 0 \\ 19 &= 20 - 1 + 0 \end{aligned}$$

Lei cinética do decaimento

A taxa de decaimento é proporcional ao número núcleos radioactivos presentes

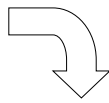
Decaimentos por segundo, ou "actividade" $\rightarrow \frac{dN}{dt} = -\lambda N \leftarrow$ No. de núcleos presentes

λ = constante de decaimento ou de desintegração

- Probabilidade de decaimento por núcleo por segundo

Lei cinética do decaimento

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$



$$N = N_o e^{-\lambda t}$$

Nº núcleos radioactivos no instante t

Nº núcleos radioactivos em t=0

Lei cinética do decaimento

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \Leftrightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

$$\Leftrightarrow \int_{N_0}^{N_f} \frac{dN}{N} = -\int_0^{t_f} \lambda dt$$

$$\Leftrightarrow \ln\left(\frac{N_f}{N_0}\right) = -\lambda t_f$$

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

Lei cinética do decaimento

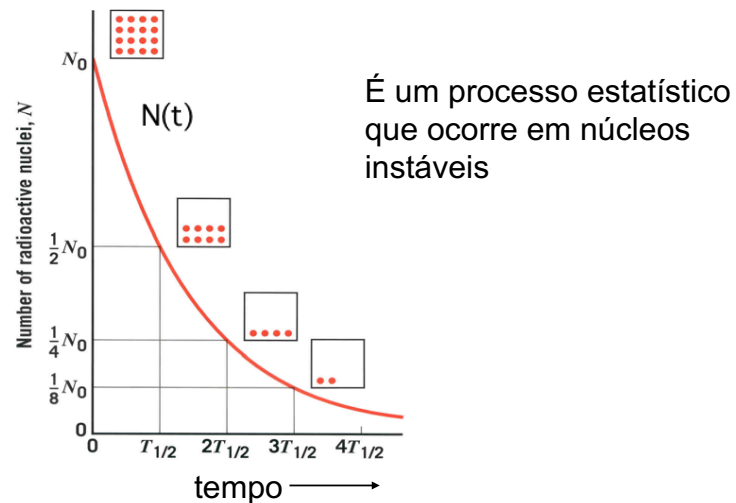
$T_{1/2}$ meia-vida: tempo necessário para que metade do nº inicial de núcleos radioactivos decaia

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow 2 = e^{\lambda T_{1/2}}$$

$$\Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}$$

Lei cinética do decaimento



Elementos de Física 2017/2018  universidade de aveiro
theoria poiesis praxis

Taxa de decaimento ou actividade

número de decaimentos por segundo

$$a = \left| \frac{dN}{dt} \right| \Rightarrow a = a_0 e^{-\lambda t}$$

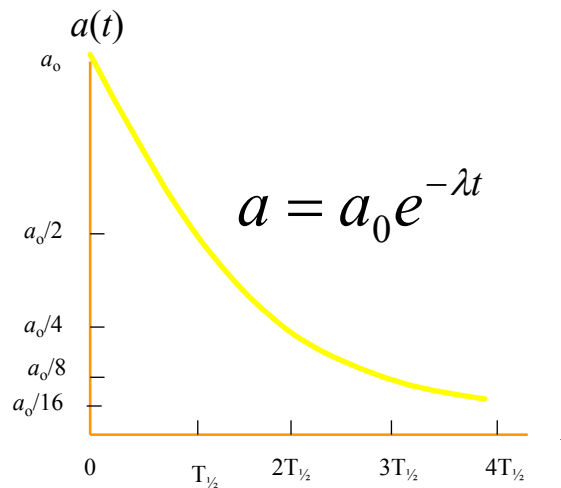
$$a_0 = N_0 \lambda \quad a = N \lambda$$

1 curie (Ci) = 3.7×10^{10} decaimentos/segundo

1 becquerel (Bq) = 1 decaimento/segundo

Elementos de Física 2017/2018  universidade de aveiro
theoria poiesis praxis

Taxa de decaimento ou actividade: Variação temporal também exponencial



Radioactividade

Se começarmos com 16 átomos de ^{14}C . Após cerca de 6000 anos, só existem 8 átomos.

Quantos existirão após mais 6000 anos?

- 1) 0 2) 4 3) 8

Cada 6000 anos $\frac{1}{2}$ dos átomos decaem.

Se o número de núcleos radioactivos passar para metade, como se altera a actividade?

1 permanece na mesma

2 passa para metade

3 passa para o dobro

Somos radioactivos!

Um em cada 8.3×10^{11} átomos de carbono é ^{14}C que decai com um tempo de meia vida de 5730 anos. Determine a taxa de decaimento do Carbono.

$$N_{14} = \left(\frac{1.0 \text{ mole}}{12 \text{ g}} \right) (6.02 \times 10^{23}) \left(\frac{1}{8.3 \times 10^{11}} \right) = 6 \times 10^{10} \frac{\text{atoms}}{\text{g}}$$

$$\lambda = \frac{.693}{T_{1/2}} = \frac{.693}{5730 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60} = 3.83 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1} = 1.21 \times 10^{-4} \text{ ano}^{-1}$$

$$a = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N = 0.23 \text{ decaimentos / s por grama}$$

Exemplo: Datação por Carbono

- Na atmosfera a razão de $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ é igual a 1.2×10^{-12}
 - ^{14}C é produzido na alta atmosfera pela colisão dos raios cósmicos com o azoto
 - organismos vivos têm a mesma proporção $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$
- Quando morrem, a razão decresce exponencialmente
- Portanto, a razão $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ pode ser usada como um relógio.

Datação por Carbono

Acabámos de determinar que os organismos vivos devem ter uma taxa de decaimento de 0.23 decaimentos/ segundo/grama de carbono.

O corpo do “homem do gelo” (Itália) apresenta uma taxa de decaimento de 0.115 Bq(0.23/ 2) /grama. Podemos estimar que tenha morrido há cerca de 6000 anos.



Actividade Inicial

Quantos átomos de ^{14}C existem num grama de carbono no instante da morte?

$$N_o = \frac{1 \text{ g}}{12.011 \text{ g/mole}} (1.2 \times 10^{-12}) (6.0 \times 10^{23} \text{ atom/mole})$$
$$= 6.0 \times 10^{10} \text{ atoms}$$

Qual é a actividade?

$$0.23 \text{ Bq} = 14 \text{ dec/min}$$

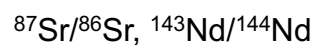
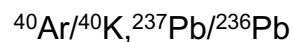
Actividade

Qual é a actividade por grama após 1950 anos?

$$\begin{aligned}a &= a_0 e^{-\lambda t} \\&= 14 \text{ dec / min} \times e^{-(1950 \text{ a})(1.21 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1})} = \\&= 11 \text{ dec / min}\end{aligned}$$

Outras aplicações:

Datação de rochas
(geocronologia):



(Univ. Aveiro)

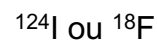
Variação da temperatura da
Terra: $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$
(paleoclimatologia)

Análises isotópicas em
artefactos (Louvre)

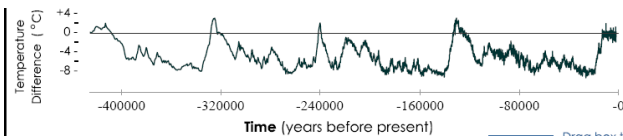
Isótopos Radioactivos
em Medicina

Radioterapia

Imagiologia PET:



Outras aplicações:



Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica

J. R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaguerre, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Ritz, E. Salzman & M. Stievenard

Petit, J. R., et al., Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature*, 399, 429–436, 1999.

