

Unidade 3

Radioatividade

- Decaimento Radioativo
- Decaimentos Alfa, Beta, e Gama
- Nuclídeos Radioativos
- Datação Radioativa ¹⁴C
- Medidas de Dose de Radiação
- Modelos Nucleares



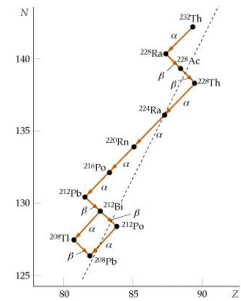
Marie e Pierre Curie

Marie Curie (1867 – 1934) e seu marido Pierre (1859 – 1906) descobriram o Polônio e o Rádio em 1898. Ambos ganharam o Prêmio Nobel de Física em 1903, junto com Henri Becquerel e em 1911, Marie Curie ganhou o Prêmio Nobel em Química.

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Decaimento Radioativo

- O decaimento mais simples é a emissão de raios gama, que representam uma transição nuclear de um estado excitado para um estado de mais baixa energia.
- Outros modos de decaimento: emissão de partículas alfa, beta, prótons e nêutrons.
- Quando um núcleo radioativo emite espontaneamente uma partícula transforma-se em um nuclídeo diferente.



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

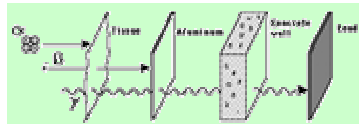
Decaimento Radioativo

Radiação pode ser separada por campos magnéticos e elétricos:



Interação com a matéria:

- α e β interagem fortemente com a matéria, curto alcance
- γ radiação muito penetrante

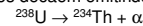


Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Decaimento Radioativo

- Decaimento é estatístico! Por exemplo: ²³⁸U - quantos e quais núcleos decaem por unidade de tempo?

1 mg de ²³⁸U tem 2,5 x 10⁸ átomos de radionuclídeos de vida longa
1 segundo ~ 12 núcleos decaem emitindo partículas α (⁴He)



Quais núcleos decaíram neste tempo? Todos tem a mesma chance!

PROCESSO ESTATÍSTICO

<http://www.lon-capa.org/~mmp/applist/decay/decay.htm>

1 segundo: $\frac{12 \text{ núcleos decaem}}{2,5 \times 10^8 \text{ radionuclídeos}}$ ou 1 chance de decaimento em 2×10^7
ou $\frac{1}{2 \times 10^7}$ por segundo

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Decaimento Radioativo

N núcleos radioativos: como fica a taxa de decaimento?

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

Número de núcleos que decaem por unidade de tempo é proporcional ao número total (N) de núcleos radioativos!

$\lambda =$ constante de desintegração

Sinal negativo: número total de núcleos diminui com o tempo

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Decaimento radioativo

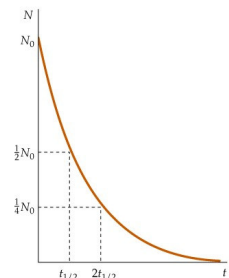
- Número de núcleos radioativos como função do tempo

Integrando a equação: $-\frac{dN}{dt} = \lambda N$

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

N = número de núcleos radioativos remanescentes após um tempo t

N₀ = número de núcleos radioativos na amostra num tempo t = 0



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Taxa de Decaimento (Atividade)

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

$$R = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t}$$

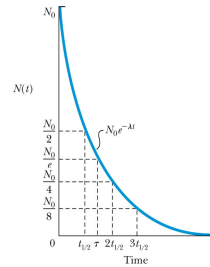
$$R_0 = \lambda N_0$$

Unidades: 1 becquerel = 1 Bq = 1 decaimento/segundo

1 curie = 1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Meia – Vida / Vida Média



Meia – Vida ($t_{1/2}$): tempo necessário para que N e R caiam a metade de seus valores iniciais

$$N = \frac{N_0}{2} \quad R = \frac{R_0}{2}$$

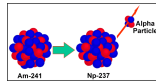
$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \quad t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Vida Média (τ): tempo necessário para que N e R caiam a $1/e$ de seus valores iniciais

$$\frac{N_0}{e} = N_0 e^{-\lambda \tau} \quad \frac{1}{e} = e^{-\lambda \tau} \quad \tau = \frac{1}{\lambda}$$

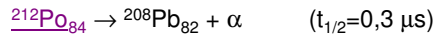
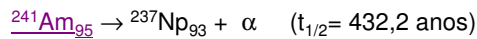
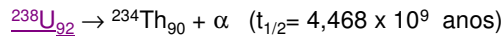
Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Decaimento alfa (α)



($\alpha = {}^4\text{He}_2$)

- partícula α = núcleo de He (2 prótons + 2 nêutrons)
- decaimento ocorre normalmente para núcleos pesados espontaneamente.
- alguns exemplos:



(Carta de Nuclídeos: <http://atom.kaeri.re.kr/ton/nuc8.html>)

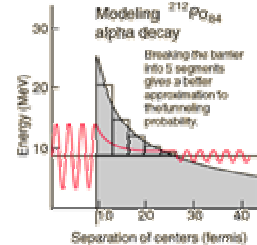
(Elementos: <http://atom.kaeri.re.kr/ton/main.shtml>)

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Decaimento alfa (α)

Porque a meia-vida varia tanto de uma reação para a outra??

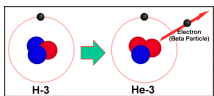
Partícula α escapa do núcleo por efeito túnel: **cálculos** levando em consideração a altura e largura da barreira de energia (calculada a partir da separação entre os núcleos, do potencial nuclear atrativo e potencial de Coulomb repulsivo) permite determinar a meia-vida do nuclídeo nestas reações nucleares (quanto maior a largura da barreira, maior a meia-vida)



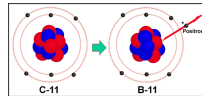
(Cálculos: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/alphdet.html - c1>)

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Decaimento beta (β)



Núcleo decai espontaneamente por emissão de um elétron + antineutrino ou pósitron + neutrino



Para entender este decaimento precisamos definir as seguintes transformações:

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ n = nêutron; p = próton; e^- = elétron;

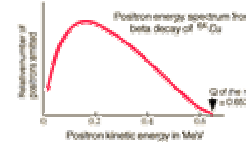
$p \rightarrow n + e^+ + \nu$ $\bar{\nu}$ = antineutrino; e^+ = pósitron; ν = neutrino.

Neutrino/antineutrino: partícula sem carga e quase sem massa, de tal modo que sua interação com a matéria é muito pequena, tendo um alto grau de penetração, por isto sua detecção é muito difícil.

IMPORTANTE: e^- ou e^+ emitidos no decaimento β não existem no interior do núcleo, mas são criados no processo de desintegração, assim como os fótons são criados no processo de emissão!

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Decaimento beta (β) – espectro de energia



- Pauli em 1930 propôs a existência de uma partícula neutra, não-observada e sem massa, para explicar o espectro contínuo no decaimento beta para que não houvesse violação das leis de conservação de momento e energia.
- Fermi introduziu esta partícula em sua teoria de decaimento radioativo, chamando-a de neutrino, o que levou a curva de energia para o decaimento beta.
- O neutrino foi detectado pela primeira vez em laboratório em 1953.

• Como a energia deve ser distribuída entre elétrons e antineutrinos ou pósitrons e neutrinos, existe um espectro contínuo de energias para estas partículas que depende da fração da energia de desintegração Q ($= \Delta Mc^2$) carregada por elas.

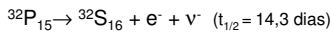
Wolfgang Pauli (1900 – 1958): físico austríaco, Prêmio Nobel em Física (1945)

Enrico Fermi (1901 – 1954): físico italiano, Prêmio Nobel em Física (1938)

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

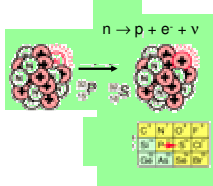
Decaimento β^-

(Emissão de elétron + antineutrino)



- Conservação de cargas:
 $15e \rightarrow 16e - e$
- Conservação de núcleons:
 $32 \rightarrow 32$
- Variação de massa nuclear:

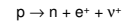
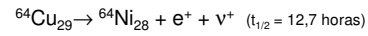
$$\left. \begin{aligned} M_i &= M_P \\ M_i &= M_S + m_e \end{aligned} \right\} \Delta M = M_i - M_f = M_P - (M_S + m_e) \\ = (M_P + 15m_e) - (M_S + 15m_e + m_e) \\ \Delta M = M_{\text{átomo de P}} - M_{\text{átomo de S}}$$



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Decaimento β^+

(Emissão de pósitron + neutrino)



- Conservação de cargas:
 $29e \rightarrow 28e + e$
- Conservação de núcleons:
 $64 \rightarrow 64$
- Variação de massa nuclear:

$$\left. \begin{aligned} M_i &= M_{\text{Cu}} \\ M_i &= M_{\text{Ni}} + m_e \end{aligned} \right\} \Delta M = M_i - M_f = M_{\text{Cu}} - (M_{\text{Ni}} + m_e) \\ = (M_{\text{Cu}} + 29m_e) - (M_{\text{Ni}} + 29m_e + m_e) \\ = (M_{\text{Cu}} + 29m_e) - (M_{\text{Ni}} + 28m_e + 2m_e) \\ \Delta M = M_{\text{átomo de Cu}} - (M_{\text{átomo de Ni}} + 2m_e)$$

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

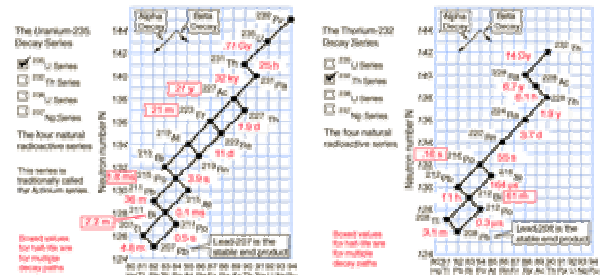
Decaimento gama (γ)



- raios gama: comprimentos de onda da ordem de 10^{-15} m .
- são originados quando um núcleo num estado excitado, decai para um estado com menor energia, emitindo fótons de raios γ .
- sua energia é maior que a dos raios X e diferem basicamente destes por se originarem de transições nucleares.
- são extremamente penetrantes
- é a radiação mais útil para aplicações em medicina, porém é a mais perigosa também, pelo fato de ser muito penetrante.

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Séries de Decaimentos – Urânio (235) e Tório

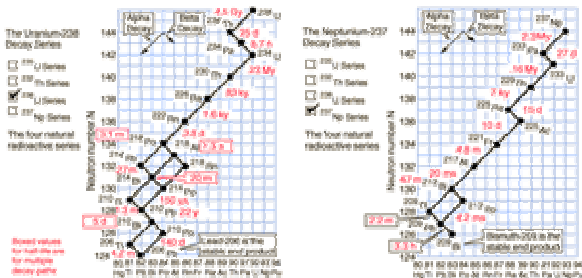


$$1\mu\text{s} = 10^{-6}\text{s}, 1\text{ms} = 10^{-3}\text{s}, 1\text{My} = 10^6\text{y}, 1\text{Gy} = 10^9\text{y}$$

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/radser.html - c1>

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Séries de Decaimentos – Urânio (238) e Netuno



$$1\mu\text{s} = 10^{-6}\text{s}, 1\text{ms} = 10^{-3}\text{s}, 1\text{My} = 10^6\text{y}, 1\text{Gy} = 10^9\text{y}$$

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/radser.html - c1>

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

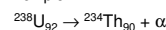
Energia Liberada num Processo de Decaimento

$$Q = \Delta Mc^2 \quad \text{onde} \quad \Delta M = M_i \text{ (massa inicial)} - M_f \text{ (massa final)}$$

$M_i > M_f \rightarrow$ núcleo estável em relação à emissão de partículas (núcleo não radioativo)

$M_i < M_f \rightarrow$ núcleo emite espontaneamente partículas (núcleo radioativo)

Exemplo:



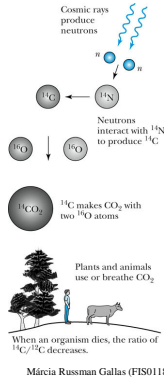
$$M_i = M_U = 238,0507826 \text{ u}$$

$$M_f = M_{\text{Th}} + M_{\alpha} = 234,0435955 \text{ u} + 4,002602 \text{ u} = 238,0461975 \text{ u}$$

$$\Delta M = 0,0045851 \text{ u} \rightarrow Q = 0,0045851 \text{ u} \times 931,5 \text{ MeV/u} = 4,271 \text{ MeV}$$

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Datação Radioativa com Carbono 14



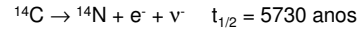
- Sabendo-se a meia-vida de um dado radionuclídeo, usa-se o decaimento como um relógio para medir um intervalo de tempo
- ^{14}C radioativo é produzido na atmosfera da terra pelo bombardeamento de ^{14}N por nêutrons produzidos pelos raios cósmicos.

$$n + ^{14}\text{N} \rightarrow ^{14}\text{C} + p$$
- Quando organismos morrem, a absorção de ^{14}C , na forma de CO_2 , por plantas e animais, cessa, e a razão $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($= R$) diminui com o decaimento do ^{14}C .
- A taxa de $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ para organismos vivos é da ordem de 10^{12} , a mesma proporção encontrada na atmosfera.
- A meia-vida do ^{14}C é de 5730 anos.
- Como taxa de $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ diminui depois que o organismo morre, compara-se esta taxa com a do organismo vivo e sabendo-se a meia-vida, pode-se determinar a idade do material.

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Datação Radioativa com Carbono 14

^{14}C – decaimento β^-



Exemplo:

Restos de carvão foram encontrados num sítio arqueológico e mediu-se a radioatividade deste "material morto": para 1 kg deste material, a taxa de decaimento do ^{14}C foi de $9,4 \times 10^2$ decaimentos/segundo. Sabe-se que para um "material vivo" esta taxa é de $1,5 \times 10^4$ decaimentos/segundo. Com estes dados determinar a idade do material encontrado.

$$\begin{aligned} \text{"material morto": } R &= 9,4 \times 10^2 \text{ decaimentos/segundo} \\ \text{"material vivo": } R_0 &= 1,5 \times 10^4 \text{ decaimentos/segundo} \end{aligned} \quad \left\{ \begin{aligned} R &= R_0 e^{-\lambda t} \quad \ln \frac{R}{R_0} = -\lambda t \\ t &= -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{R}{R_0} \end{aligned} \right.$$

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{R}{R_0} = -\frac{t_{1/2}}{\ln 2} \ln \frac{R}{R_0}$$

Resposta: $t = 2,3 \times 10^4$ anos

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Medidas da Dose de Radiação

Radiação: raios γ , partículas α , raios cósmicos, elementos radioativos, raios X \rightarrow 4 unidades em que as propriedades e efeitos são expressas:



- Atividade: becquerels (ou curies) \rightarrow esta medida não dá informações sobre a natureza do decaimento
 $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ $1 \text{ Bq} = 1 \text{ decaimento/seg}$
- Exposição: roentgens \rightarrow medida da intensidade de energia cedida ao material
 $1 \text{ R} = 8,78 \text{ mJ de energia cedida a 1 kg de ar seco em CNTP}$
- Dose Absorvida: rads (ou grays) \rightarrow energia cedida ao corpo por unidade de massa
 $1 \text{ rad} = 10 \text{ mJ/kg}$ $1 \text{ gray (Gy)} = 100 \text{ rads}$

4) Dose equivalente (roentgen equivalente no homem): rems (ou sieverts) \rightarrow leva em conta o tipo de radiação e os efeitos produzidos no homem \rightarrow 1 sievert (Sv) = 100 rems

Unidades de radiação: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/radrisk.html - c1>
Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Dose de Radiação: REMS

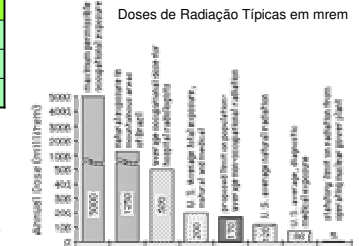
REMS = dose absorvida (rads) X fator de efetividade biológica (RBE)

Tabelado para as diferentes radiações

Radiação	RBE
Raios X, γ e elétrons	1
Nêutrons	5
Partículas α	10

Dose máxima por ano recomendada: 0,5 rem

Incluindo todos os tipos de radiação, usando-se o RBE apropriado (radiação é cumulativa!), para um indivíduo exposto não-profissionalmente



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/radexp.html - c2>

Modelos Nucleares

- Explicar propriedades dos núcleos e prever reações nucleares.
- Não existe uma Teoria Nuclear, núcleos são bem mais complexos que átomos, pois as forças que mantêm os núcleons juntos tem uma forma bastante complicada.
- 2 modelos, onde cada um explica um conjunto de propriedades, serão brevemente descritos:

Modelo Coletivo

Modelo das Partículas Independentes

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

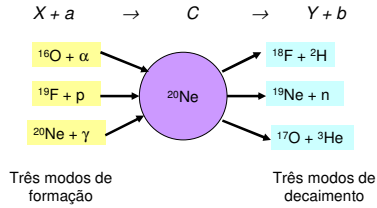
Modelo Coletivo (Liquid Drop Model)

- formulado por Niels Bohr;
- experimentos de espalhamento sugerem que o núcleo tem densidade aproximadamente constante, de tal modo que o raio nuclear pode ser calculado usando a relação de densidade como se o núcleo fosse uma gota de um líquido uniforme.
- núcleons movem-se aleatoriamente no interior do núcleo e interagem fortemente entre si como as moléculas numa gota líquida, onde há colisões freqüentes;
- correlaciona massas e energias de ligação dos núcleos;
- explica fissão nuclear e outras reações nucleares;

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Modelo Coletivo (Liquid Drop Model)

- numa reação do tipo:
 $X + a \rightarrow C \rightarrow Y + b$ a penetra em X e forma um núcleo composto C que decai em Y e b
- Neste modelo C não sabe mais como foi formado, não tem memória!
- Decaimento em Y e b é totalmente independente de como C foi formado



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Modelo das Partículas Independentes (Shell Model)

- cada núcleon permanece num estado quântico bem definido;
- praticamente os núcleons não colidem entre si;
- eles se movem num poço de potencial determinado pelo movimento médio de todos os outros núcleos;
- os núcleons obedecem ao princípio de Pauli (1 próton e 1 nêutron podem ter os mesmos números quânticos pois são partículas diferentes);

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

Modelo das Partículas Independentes (Shell Model)

- estabilidade dos estados:

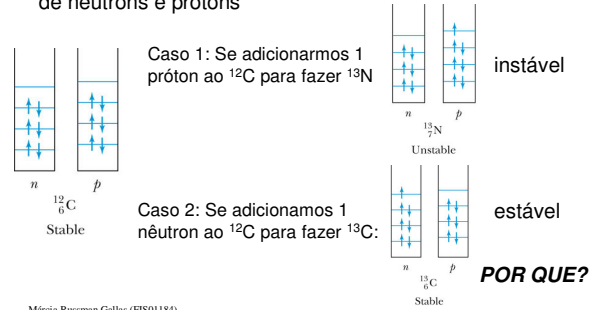
Para ocorrer colisões é preciso que a energia de cada um dos núcleons após a colisão corresponda a energia de um estado desocupado, se isto não ocorrer, o núcleo ficará num mesmo estado de movimento por um tempo longo, de tal modo que pode-se afirmar que está num estado quântico definido.

Assim como as propriedades físicas e químicas dos átomos estão associadas ao preenchimento dos níveis eletrônicos, para os núcleos ocorre o mesmo.

Márcia Russman Gallas (FIS01184)

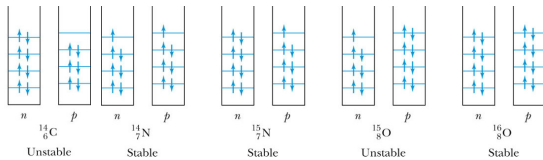
Modelo das Partículas Independentes

- Diagrama de níveis de energia para o ^{12}C : número par de nêutrons e prótons



Márcia Russman Gallas (FIS01184)

- Se adicionarmos mais um nêutron ao ^{13}C para produzir ^{14}C , também teremos um núcleo instável.

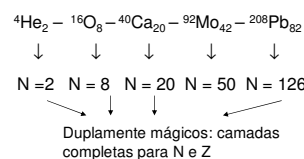


- Níveis de energia para nêutrons são mais baixos (menor energia) do que para os prótons, o que indica porque um núcleo com mais prótons é instável e um núcleo com mais nêutrons é estável, embora este número não seja igual!

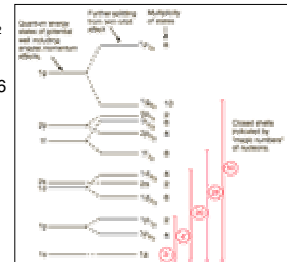
Márcia Russman Gallas (FIS01184)

- Núcleos com certos números de prótons e nêutrons apresentam propriedades semelhantes e uma estabilidade especial

Números mágicos nucleares (N ou Z)
2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, ...



- energia de ligação grande \rightarrow difícil remover um núcleon
- núcleos com uma partícula excedente \rightarrow facilmente removida



Márcia Russman Gallas (FIS01184)