

Radiação Nuclear

Introdução

Neste capítulo vamos discutir de maneira superficial algumas formas de radiação nuclear, sua aplicação biológica e seus impactos.

Esta forma de radiação desempenha um enorme papel no desenvolvimento de fármacos e estudos biológicos. Por exemplo, fármacos com isótopos radioativos podem aumentar a atuação em células cancerígenas, aumentando sua eficácia e diminuindo os efeitos colaterais. Para se ter uma noção, a dose necessária para matar um tumor pode variar entre 50 a 100 Gy, o que mata tecidos vizinhos. A dose letal é de 2 – 3 Gy.

O que é radiação?

Antes de tudo precisamos ter clareza do que é radiação. Genericamente, radiação é uma forma de transmissão de energia, seja como onda ou partícula. A isso se encaixam a radiação eletromagnética, acústica, gravitacional ou nuclear e de partículas.

No caso da radiação nuclear essa transmissão se dá pela emissão de *partículas*, tais como α (${}^4\text{He}$), β (elétron ou pósitron), nêutrons ou de *fótons*, como γ e raios-X.

Tamanho nuclear: ordens de grandeza

Deve-se sempre ter em mente algumas ordens de grandeza das principais grandezas físicas. Vejamos algumas delas:

$$\begin{aligned}\text{átomo: } &\sim 10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA} \\ \text{núcleo: } &\sim 10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}\end{aligned}$$

Vamos considerar o raio do núcleo de hidrogênio como $R_0 = 1,2 \text{ fm}$. Qual o raio dos outros núcleos?

A densidade do núcleo é proporcional ao número de massa, A , ($A = Z + N$), algo que não iremos discutir aqui. Assumindo a esfe-

ricidade dos átomos, então o volume do núcleo é proporcional a A . Assim,

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (1)$$

Energia de ligação: estabilidade nuclear

Antes de descrevermos as variadas formas de manifestação de energia, precisamos primeiro pensar sobre *o que é energia*. Observando a Natureza notamos que há uma lei que se manifesta em *todos* os fenômenos: a *conservação de energia*.

Se *pesarmos* a massa do núcleo e a massa de todos seus constituintes separados (a soma das massas dos prótons e dos nêutrons), notamos que há uma diferença entre eles. Essa diferença é justamente a energia que deve ser fornecida para colocar estes prótons e nêutrons juntos no átomo em questão. Matematicamente, definimos então como

$$Q = (m - \sum m_i) c^2 \quad (2)$$

onde Q é a energia de ligação do núcleo atômico, m , a massa do núcleo, e $\sum m_i$, as somas das massas dos prótons e dos nêutrons deste núcleo.

Em verdade, estamos fazendo a diferença da *energia potencial* do núcleo e de seus constituintes. Para este caso, a expressão relativista é a tão famosa $E = mc^2$.

Meia-vida

O decaimento de um núcleo se dá por um processo aleatório e *não-determinista*. Por conta disso, podemos apenas fazer inferências sobre suas probabilidades de decaimento. Uma delas é: dado um número N de um mesmo tipo de núcleo, qual o *número médio* $A(dN)$ de decaimentos após um intervalo de tempo dt ? Se observarmos a curva experimental destas medidas, notamos que há uma relação linear entre estas duas grandezas

$$dN = -\lambda N dt, \quad (3)$$

onde λ é uma constante de proporcionalidade, conhecida por *constante de decaimento* e possui dimensão de $[tempo]^{-1}$, ou o inverso da *meia-vida*, $t_{1/2} = \lambda^{-1}$.

Resolvendo esta equação (tecnicamente é uma equação diferencial), temos que

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (4)$$

onde N_0 é o número de núcleos não decaídos no tempo $t = 0$.

Datação

Uma aplicação direta do decaimento exponencial é a datação de materiais arqueológicos. Existem apenas dois isótopos estáveis do carbono, ^{12}C , cuja proporção relativa é de $\approx 99\%$ e ^{13}C , cuja proporção relativa é de $\approx 1\%$.

A atmosfera é rica em nitrogênio, como ^{14}N . Na alta atmosfera ocorre inúmeras reações dos elementos presentes no ar com os raios cósmicos, entre eles *nêutrons térmicos*. Estes nêutrons quando capturados pelo nitrogênio produz a seguinte reação



Este carbono é então absorvido por plantas no processo de fotossíntese e entra como constituinte de toda a matéria orgânica.

Inúmeros experimentos demonstraram que há uma certa constante entre a proporção isotópica de ^{12}C e ^{14}C , absorvidos pela matéria orgânica. Quando um ser vivo morre, ele para de renovar esta matéria, mas como o ^{14}C é radioativo, esta proporção varia. Daí temos a equação do decaimento exponencial cuja única incógnita é o tempo transcorrido!

A grande genialidade desta descoberta foi a percepção de que a taxa de absorção $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ pelos organismos é aproximadamente constante.

A meia-vida do ^{14}C é de $t_{1/2} = 5730 a$, de forma que fósseis com mais de 10 meias-vidas a quantidade de ^{14}C é pequena o suficiente para não permitir uma datação precisa. Nestes casos, outros isótopos de meias-vidas maiores devem ser usados.

Efeitos Biológicos da Radiação: Dosimetria

A interação da radiação com a matéria provoca ionização de átomos, a chamada *radiação ionizante*. Dependendo da energia da radiação, ela pode provocar milhares de ionização até que toda sua energia seja depositada. Em organismos vivos, esta exposição pode ser letal, devido a destruição do DNA, que pode tanto causar sua morte, como sua mutação. Claro, que este mesmo efeito pode ser usado em células cancerígenas, levando a sua morte.

Para isso, vamos definir algumas unidades de medidas de dosimetria que são muito utilizadas como *estimativa* para se calcular a dose máxima tolerada pelo organismo sem que haja risco suficiente.

A primeira unidade de *exposição* à radiação é o *roentgen*, R , que é definida como número de pares produzidos num volume de 1 cm^3 de ar sob condições padrão (0°C e 1 atm). Em unidades SI, temos a seguinte conversão, $1 R = 2,58 \times 10^4\text{ C/kg}$.

Outra medida é a da *dose absorvida* de radiação, que é medida como a energia absorvida por unidade massa e é definida como *gray* (Gy), onde $1 Gy = 1\text{ J/kg} = 100\text{ rad}$. O *rad* é uma unidade antiga que ainda é utilizada.

A última unidade que vamos definir é o *sieverts*, Sv , que é uma medida de *dose equivalente*. Esta unidade tem significado biológico, servindo como uma estimativa dos efeitos à saúde causados pela radiação ionizante no corpo humano. Obviamente, ela se relaciona com a energia depositada, mas se considerarmos que uma partícula α provoca muito mais ionização que uma β , devido a possuir uma carga maior, este fator deve ser multiplicado por algum outro dependente da partícula ionizante e de sua energia. Assim, ela é definida como

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R}, \quad (6)$$

onde

H_T é a medida da dose equivalente, em Sv ;

W_R é um fator adimensional, dependente da radiação e de sua energia;

$D_{T,R}$ é a dose absorvida, em Gy pelo tecido T e para determinada radiação, R .

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (*ICRP*, na sigla em inglês), define os valores padrão dos fatores W_R , que podem ser conferidos na tabela abaixo: ¹

Radiação	W_R
raios-X, γ , β , μ	1
nêutrons ($< 1\text{ MeV}$)	$2,5 + 18,2 \cdot e^{-[\ln(E)]^2/6}$
nêutrons ($1 - 50\text{ MeV}$)	$5,0 + 17,0 \cdot e^{-[\ln(2 \cdot E)]^2/6}$
nêutrons ($> 50\text{ MeV}$)	$2,5 + 3,25 \cdot e^{-[\ln(0,04 \cdot E)]^2/6}$
prótons, π^\pm	2
α , núcleos pesados, produtos de fissão	20

¹ A D Wrixon. New icrp recommendations. *Journal of Radiological Protection*, 28(2):161, 2008

Se quisermos calcular para todo o corpo humano, devemos somar a dose equivalente de cada tecido, também ponderada:

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T, \quad (7)$$

onde

E é a dose equivalente para todo o organismo, em Sv;

W_T é um fator adimensional, para cada tecido;

Por curiosidade, mostraremos quais são os fatores W_T para cada tecido humano. Isso é importante no caso de materiais radiativos ingeridos, como contrastes e outros radioquímicos:²

Radiação	W_R
Gônadas	0.08
Medula óssea vermelha	0.12
Cólon	0.12
Pulmões	0.12
Estômago	0.12
Seios	0.12
Bexiga	0.04
Rins	0.04
Esôfago	0.04
Tireoide	0.04
Pele	0.01
Superfície óssea	0.01
Glândulas salivares	0.01
Cérebro	0.01
Resto do corpo	0.12

² United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United nations. sources and effects of ionizing radiation, anexo a

Medicina Nuclear

Isótopos radioativos são amplamente usados em ciências biológicas, seja como marcadores, seja para destruir células cancerígenas. A diferença entre um e outro reside na dose aplicada.

Deve-se ter em mente que isótopos compartilham as mesmas propriedades químicas, uma vez que estas devem-se aos elétrons na camada de valência. Isótopos possuem *apenas* propriedades nucleares diferentes.

Quando radiofármacos são administrados em pacientes, deve-se calcular a dose radioativa a que eles estarão submetidos, de forma a maximizar os efeitos, minimizando os efeitos colaterais. Obviamente, esta dose depende da meia-vida do isótopo radioativo. Ao mesmo tempo, os elementos químicos a que eles estão ligados são processados e eliminados pelo corpo humano, deixando de atuar no paciente.

Temos então uma meia-vida efetiva, τ_e , dependente da meia-vida do isótopo radioativo, $\tau_{1/2}$ e da meia-vida biológica, τ_b . Ela é dado pela média entre elas:

$$\frac{1}{\tau_e} = \frac{1}{\tau_{1/2}} + \frac{1}{\tau_b} \quad (8)$$

Atente para o fato que $\tau_e \leq \tau_{1/2}$, como esperado.

Problemas

1. O período típico de meiose de uma célula ou microrganismo é de $\sim 1 h$. A partir de uma célula, qual o período transcorrido para se obter o equivalente ao número de Avogadro ($N_A = 6 \times 10^{23}$)?
2. A sonda marciana Curiosity utiliza ${}^{238}_{94}\text{Pu}$ como combustível em sua propulsão. O plutônio decai emitindo alfas de $5,5 \text{ MeV}$. Quantas partículas são necessárias para se atingir a potência de 1 kW , necessária para locomover a sonda?
3. Reatores nucleares utilizam ${}^{235}_{92}\text{U}$ para produção de energia. Reatores típicos têm potência de $1,2 \text{ GW}$. Considerando que a energia liberada no decaimento do urânio é de 1 GeV/nucleon , pergunta-se qual o consumo de ${}^{235}\text{U}$ por ano?
4. Traçadores radioativos permitem acompanhar a dinâmica de elementos químicos no organismo. Foi utilizado $1 \mu\text{Ci}$ de ${}^{131}_{53}\text{I}$, usado para se medir os hormônios produzidos pela tireoide. Qual o número de contagens um detector mediria a 1 m de distância por dm^2 ($1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ desintegrações/segundo}$)?
5. Para uma célula de 1 ng , $1 \text{ J/kg} = 1 \text{ Gy}$ corresponde a quantos eV ?
6. Iodo é seletivamente acumulado na tireoide, onde pode atingir quantidades letais. Quando materiais radioativos são liberados na atmosfera devido a acidentes nucleares, cujo maior foi o de Chernobyl, ou devido a testes nucleares, estes materiais tendem a se concentrar (devido a cadeia alimentar) e aparecer em produtos alimentícios, tais como leite, que é consumido majoritariamente por crianças. Então, mesmo que a meia-vida do ${}^{131}\text{I}$ seja relativamente curta, este isótopo provocou câncer de tireoides em inúmeras crianças das áreas afetadas.
Algumas crianças foram submetidas a doses de até 1000 rem devido ao ${}^{131}_{53}\text{I}$ em Chernobyl. Por qual fator acima da máxima dose recomendada a exposição radioativa estas crianças foram submetidas? Quanto tempo demorará para que o nível de radiação diminua o suficiente para que, com o mesmo consumo de leite, a exposição seja de $0,1$ vezes a dose máxima recomendada?

7. Para destruir uma célula cancerígena, uma dose de radiação gama totalizando $2,12\text{ J}$ é liberada em 30 dias pelo implante de cápsulas contendo $^{103}_{46}\text{Pd}$. Considere que este isótopo possui uma meia-vida de 17,0 dias e que a energia da radiação gama emitida é de $21,0\text{ keV}$ por decaimento, sendo totalmente absorvida pelo corpo humano. Qual a atividade radioativa inicial destas cápsulas? Qual a massa total de $^{103}_{46}\text{Pd}$ presente nelas?
8. Em um radioimunensaio, 10 nM de antígeno marcado com $^{125}_{53}\text{I}$ e 1 nM de anticorpos são misturados formando um complexo anticorpo-antígeno. Em seguida, este complexo é misturado a uma amostra contendo antígenos sem marcadores. A solução é centrifugada e a razão entre as atividades da solução supersaturada e do precipitado é $5,4 : 1$. Quanto antígeno está originalmente presente na solução? (Este método permite a mensuração de drogas e proteínas com uma grande precisão e com amostras pequenas. Basicamente, o anticorpo é ligado ao antígeno, formando um complexo. Quando este complexo é colocado em solução com antígenos não marcados, há uma competição entre os dois tipos de antígenos, fazendo com que alguns antígenos marcados sejam separados do anticorpo. Calibrando esta razão é possível quantificar a quantidade de antígeno inicialmente presente na amostra.)
9. Dois métodos de imagem baseados em radioisótopos são o PET (*positron emission tomography*) e o SPECT (*single photon emission tomography*). Estes métodos são importantes para «fotografar» os isótopos no corpo humano. Descreva-os, com especial atenção para os procedimentos físicos.