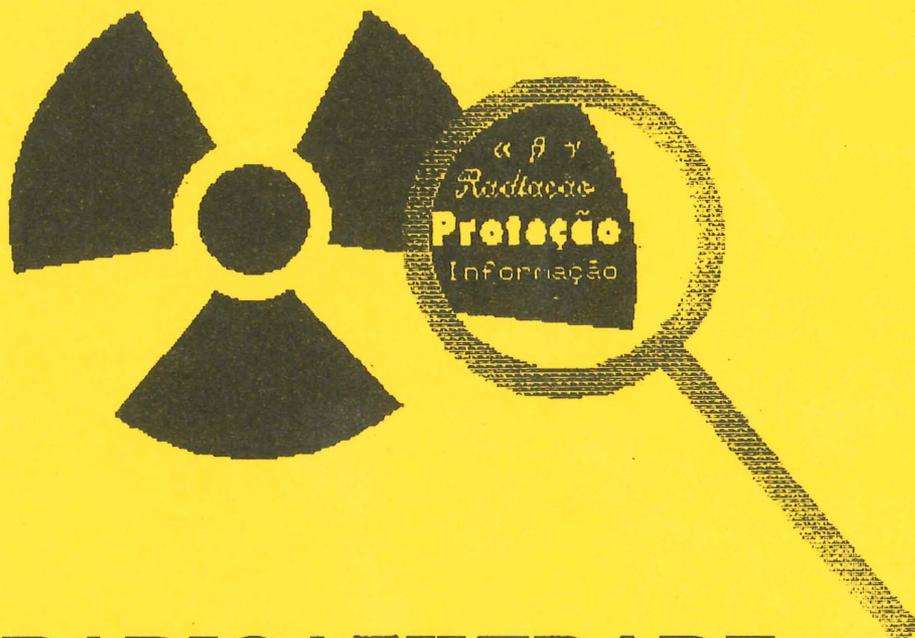
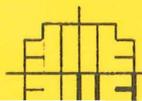


TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA  
Nº 2, 1991



# RADIOATIVIDADE

M. E. BRÜCKMANN & S. G. FRIES



INSTITUTO DE FÍSICA - UFRGS



TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA  
Nº 2, 1991



# RADIOATIVIDADE

M. E. BRÜCKMANN & S. G. FRIES

GRUPO DE ENSINO  
INSTITUTO DE FÍSICA - UFRGS

Série: Textos de Apoio ao Professor de Física, Nº 2, 1991.  
PAS - Programa de Atualização em Serviço  
para Professores de Física.

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do IF - UFRGS  
por: Carmen Silvia Taday - CRB 10/459  
Veleida A. Blank - CRB 10/571

B888r Brückmann, Magale Elisa  
Radioatividade / Magale Elisa Brückmann / e /  
Suzana Gomes Fries. - Porto Alegre : Instituto de Física  
- UFRGS, 1991.

39p. : il. (Textos de Apoio ao Professor de Física;  
n. 2)

1. Radioatividade : Ensino. 2. Radioatividade : Ensino  
de 2º grau. I. Fries, Suzana Gomes. II. Título. III. Série.

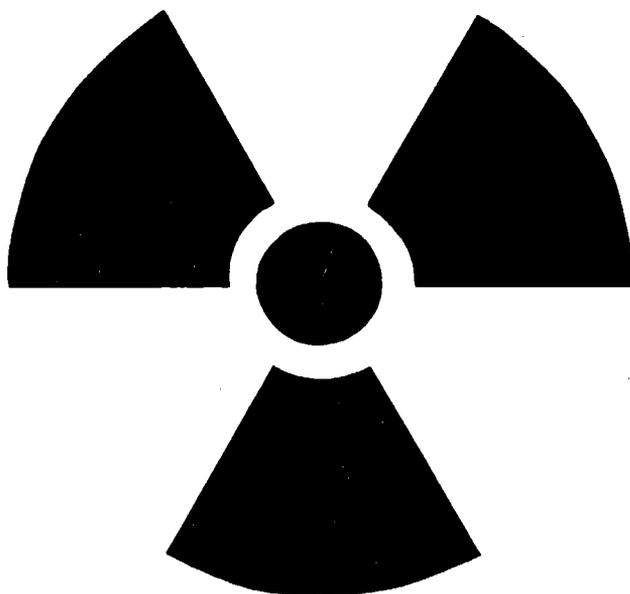
CDU: 539.16 : 37  
539.16 : 373.5

Capa: Alegoria indicando a necessidade de maior informação sobre o tema  
Radioatividade - S. G. Fries

O símbolo padrão utilizado (definido pela ICRP-International Commission on Radiological Protection) é apresentado em suas corretas proporções dimensionais na página ao lado e deve ser usado sempre para designar a presença de qualquer tipo de radiação. As cores padrões são um fundo amarelo com o símbolo em vermelho ou preto, guardando as seguintes proporções entre os raios dos círculos concêntricos: R, 1.5 R e 5 R.

Digitação: M. E. Brückmann

Apoio de Software: R. L. Schreiner



# **RADIOATIVIDADE**

**MAGALE ELISA BRÜCKMANN**  
Licenciada em Física  
Bacharelanda em Física

**SUZANA GOMES FRIES**  
Doutor em Ciências  
Professor Adjunto do I.F - UFRGS

**INSTITUTO DE FÍSICA**  
UFRGS  
CAMPUS DO VALE  
91500 PORTO ALEGRE RS



## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO		1
O QUE É RADIOATIVIDADE		2
MEIA-VIDA		5
UNIDADES	- Quadro 1: ATIVIDADE	6
	- Quadro 2: UNIDADES	8
	- Quadro 3: CONTADOR GEIGER	9
10		10
O QUE EXISTE NA NATUREZA		11
NA CROSTA TERRESTRE		11
	- Quadro 4: EM DIVERSOS TIPOS DE ROCHAS	12
12		12
NA ATMOSFERA		13
NA HIDROSFERA		14
EM CAVIDADES SUBTERRÂNEAS		14
EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO		14
NO CORPO HUMANO		16
NOS ALIMENTOS		16
NA ÁGUA POTÁVEL E OUTRAS BEBIDAS		16
EFEITOS DA RADIAÇÃO		18
EM MATERIAIS		18
	- Quadro 5: ABSORÇÃO	19
19		19
NOS SERES VIVOS		19
QUAL O CONTROLE QUE SE TEM		22
NORMAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA		22
RADIAÇÃO DE BAIXO NÍVEL		22
APLICAÇÕES		25
NA PESQUISA		25
NA TECNOLOGIA		25
	- Quadro 6: DATAÇÃO	27
27		27
AMPLIANDO HORIZONTES		28
GLOSSÁRIO		29
BIBLIOGRAFIA		35



## INTRODUÇÃO

Existem certos assuntos controvertidos, periodicamente divulgados pelos meios de comunicação, e que dizem respeito à toda população. Esta divulgação é, geralmente, motivada por algum acontecimento que traz o assunto à tona, exigindo da comunidade uma postura crítica para avaliação de suas consequências. Radioatividade é um destes assuntos.

As opiniões a respeito são, geralmente, apresentadas sem o devido embasamento técnico-científico o que facilmente pode levar a erros na avaliação. Por outro lado, quando são expostos argumentos fundamentados, há uma certa resistência dos leitores devido à dificuldade na compreensão de certos conceitos considerados complicados e/ou pouco conhecidos.

Esta desinformação tem raízes na formação escolar do leitor. Na verdade, como regra geral, conceitos como radioatividade, não são apresentados no primeiro grau e aparecem, às vezes, na disciplina de química do segundo grau. No terceiro grau, só são discutidos em cursos da área de ciências exatas sob seus aspectos físicos / químicos / energéticos, ficando sua interação com seres vivos para a área das ciências bio-médicas.

Isto significa que um cidadão com o terceiro grau completo, que não tenha escolhido qualquer uma das áreas acima mencionadas, terá, na melhor das hipóteses, visto o assunto radioatividade sob seu aspecto químico em algumas aulas no segundo grau! E o cidadão com o primeiro grau completo, nunca ouviu falar do assunto na escola!

E a radioterapia, lixo radioativo, danos de radiação, proteção radiológica e tantos outros temas que dizem respeito ao dia-a-dia do indivíduo?

Somos de opinião que assuntos com esta repercussão social devem ser abordados já no primeiro grau, pois dizem respeito a cada indivíduo, que deve ser capaz de opinar, agir e decidir de acordo com uma postura ética adquirida também através de uma formação bem fundamentada.

Suponhamos que algum professor de Ciências do primeiro grau, queira romper este ciclo. Onde poderá ele suprir as deficiências na sua própria formação de maneira a ter uma visão ampla do assunto para poder apresentá-la a seus alunos? A literatura a respeito é pouco acessível, geralmente especializada, e/ou em línguas estrangeiras.

Pensando neste professor, no aluno de segundo grau, no universitário das áreas humanas e sociais e nas pessoas interessadas no assunto, escrevemos um texto de iniciação, bastante acessível e abrangente no sentido de referir-se a vários aspectos do tema. Certos assuntos são apresentados com mais detalhes nos quadros impressos com letras menores, sua leitura, no entanto, não se faz necessária para a compreensão geral do texto.

A bibliografia indicada foi cuidadosamente escolhida para permitir um aprofundamento dos diversos itens que no texto são abordados superficialmente.



De que são feitas as coisas, a terra, as plantas, a gente? A pergunta é a mesma desde há muito tempo! A resposta é que vem mudando à medida que mais conhecimento se acumula sobre o assunto permitindo novas interpretações de fenômenos que eram supostamente conhecidos.

No tempo de Aristóteles dizia-se que eram quatro os elementos que compunham todo o tipo de matéria: terra, ar, fogo e água. Mas mesmo neste tempo já se sabia da existência de outras substâncias como cobre, prata, ouro e enxofre, que não podiam ser decompostas em nenhum dos quatro elementos propostos como fundamentais. Estas substâncias, cobre, ouro, prata, ferro, chumbo e mercúrio, conhecidas desde há muitos milhares de anos, são hoje reconhecidas como sendo elementos. Embora o número de elementos seja relativamente pequeno, o número de combinações que se pode fazer com eles é muito grande e é isto que origina o número tão grande de substâncias diferentes.

Mas se um elemento não pode ser separado em constituintes mais simples, o que ocorre se dividirmos um pedaço de um dado elemento, ouro por exemplo, em pedaços cada vez menores? O último pedacinho que ainda é ouro é chamado de um átomo de ouro, e portanto átomo é o menor pedaço que ainda guarda as propriedades do elemento.

Mas de que são constituídos os átomos? A resposta mais atual e acessível diz que um átomo é constituído por um núcleo cercado por um envoltório de elétrons. E este núcleo é composto por prótons e neutrons. Estes constituintes dos átomos são chamados por nomes diferentes porque possuem propriedades diferentes.

A pergunta pode continuar, mas muitas respostas ainda não foram encontradas. Existe um ramo da física chamado Física de Partículas, que é especializado neste tipo de perguntas e trabalha febrilmente na obtenção das respostas.

Resumindo: de acordo com as teorias modernas dizemos que a matéria é formada por elétrons, prótons e neutrons. A diferença entre um elemento químico e outro é determinada pelo número de prótons que seu núcleo possui. Se dois átomos tiverem o mesmo número de prótons mas diferente número de neutrons, eles são do mesmo elemento, mas não são a mesma coisa. Quando isto ocorre dizemos que são isótopos. As vezes é interessante se referir aos diferentes tipos de núcleos chamando-os de nuclídeos.

Vamos agora, finalmente, falar sobre radioatividade e veremos que com ela iremos responder também à pergunta: de que são feitos os neutrons?

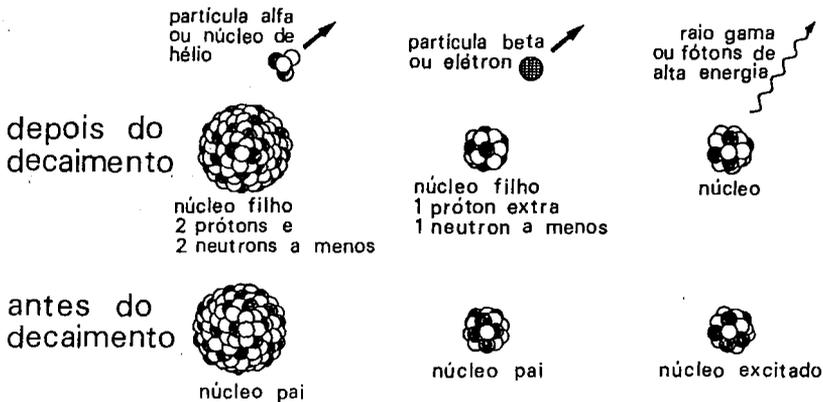
RADIOATIVIDADE é um processo no qual um núcleo com  $Z$  prótons e  $N$  neutrons pode se transformar em outro núcleo com  $Z$  e  $N$  diferentes. Esta transformação é chamada desintegração nuclear, sendo acompanhada por emissão de radiação. Por este motivo, estes núcleos instáveis são chamados radioativos.

As duas principais maneiras de um núcleo se desintegrar são através da emissão de uma partícula alfa ( $\alpha$ ) ou de uma partícula beta ( $\beta$ ). Esta última é um elétron que sai do núcleo com uma grande velocidade. Este elétron origina-se no núcleo quando um neutrão (carga 0) se desintegra transformando-se em um próton (carga +), em um elétron (carga -) e num neutrino (que é uma partícula sem massa e sem carga muito difícil de ser detectada), (eis a resposta para a pergunta: De que são feitos os neutrões?). O próton permanece no núcleo e o elétron é ejetado.

O número de massa A é definido como a soma do número de prótons e neutrons; portanto a emissão de uma partícula beta não muda o número de massa do nuclideio que desintegrou.

No entanto o número de prótons do núcleo (número atômico Z) aumentou e como é o número de prótons que caracteriza um dado elemento, quando um nuclideio emite um beta ele se transforma em um nuclideio de outro elemento.

FIGURA 1: TIPOS DE RADIAÇÕES [Hey & Walters-87]



Exemplificando: O Cs-137 tem  $A = Z + N = 137$ , isto é, tem 55 prótons e 82 neutrons. Quando ele emite um elétron (partícula beta) passa a ter  $Z = 56$  e  $N = 81$  continuando com o mesmo número de massa. Quem tem  $Z = 56$  é o elemento Ba-137. Diz-se então que o Cs-137 ao emitir uma partícula beta decai para Ba-137.

Vejamos agora a partícula alfa: ela é composta por 2 prótons e 2 neutrons tendo, portanto, a mesma constituição do "núcleo de hélio". Quando um elemento emite uma partícula alfa, tanto o número de massa quanto o número atômico diminuirão (o primeiro de 4 unidades e o segundo de 2 unidades).

Exemplificando: O U-238 tem 92 prótons e 146 neutrons, isto é, tem  $Z=92$  e  $A=238$ . Quando emitir uma partícula alfa ele passará a ter  $Z=90$  (pois perdeu dois prótons) e  $A=234$  (pois perdeu dois prótons e dois neutrons). O elemento que possui  $Z=90$  é o Th-234. Diz-se então que o U-238 ao emitir uma partícula alfa decai para Th-234.

Em muitos núcleos o decaimento através de partículas alfa e beta é seguido da emissão de energia em forma de uma onda eletromagnética. Esta onda é chamada radiação gama ( $\gamma$ ) e se origina de uma instabilidade energética surgida no núcleo após a emissão das partículas alfa ou beta.

Quanto à natureza esta radiação é do mesmo tipo da radiação X (raios X) ou da radiação luminosa, por exemplo. Comparando sua energia, no entanto, verifica-se que é muito maior do que a da luz visível e em muitos casos maior do que a dos raios X. Não é, no entanto, sua energia que a caracteriza e sim sua origem. Isto significa que se observarmos uma radiação X e uma radiação gama de mesma energia não a diferenciaremos fisicamente; sua caracterização é feita somente se soubermos se ela se originou no núcleo ou no envoltório eletrônico. A figura 1 mostra os três tipos de radiações acima descritos.

Porque alguns núcleos são estáveis e outros radioativos?

No interior do núcleo, os prótons e os neutrons interagem muito intensamente, disso resultando uma força chamada nuclear. Para esta interação não existe diferença entre prótons e neutrons, estas partículas interagem de maneira indistinta e as vezes as chamamos simplesmente de núcleons. Devido ao curto alcance destas forças somente núcleons muito próximos interagem entre si.

Existe, também no núcleo, uma interação entre as partículas com carga (prótons) dando origem às forças elétricas que são muito fracas se comparadas às forças nucleares; no entanto, sua atuação é de um alcance muito maior. Quando prótons e neutrons estão no núcleo existe uma competição entre estas forças: as forças nucleares de curto alcance querem manter os núcleons juntos e a força elétrica quer separar os prótons (partículas com carga) e portanto tenta desmanchar o núcleo. Para muitos núcleos a força nuclear sai vencedora, mas para núcleos pesados há um delicado balanço entre as duas forças opostas. Para núcleos com muitos prótons e muitos neutrons, a força elétrica continua atuando sobre os prótons mas a força nuclear, por ser de curto alcance, não atinge todos os núcleons atuando apenas sobre alguns núcleons muito próximos. Estes núcleos com  $A$  grande e instáveis podem se transformar em núcleos com núcleons mais fortemente ligados através de um decaimento alfa ou beta.

MEIA-VIDA

Suponha que você tem um certo nuclídeo e que ele é radioativo. É certo que ele irá se desintegrar. Mas quando isto ocorrerá? Não dá para dizer! Não se pode ter certeza de que vai ser já ou daqui a cinquenta anos. Se não se pode falar de certezas, pode-se falar de probabilidades: se um nuclídeo é muito instável existe uma chance maior de que ele se desintegre antes do que o faça um nuclídeo que seja mais estável. Observando somente um nuclídeo radioativo não se pode falar em probabilidades, no entanto, se observarmos um grande número de átomos com um dado nuclídeo poderemos contar quantos se desintegraram no primeiro segundo, quantos no segundo seguinte e assim por diante. O que se constata, fazendo esta experiência, é que para um dado nuclídeo, uma dada fração dos átomos radioativos sempre decairá em um dado tempo. Por exemplo para cada intervalo de tempo de trinta anos o número de átomos radioativos do elemento Cs 137 será a metade. Suponha que em um tempo inicial se tenha  $N_0$  átomos radioativos de Cs 137, passados 30 anos teremos  $N_0/2$  átomos radioativos, passados mais trinta anos teremos a metade de  $N_0/2$  que é  $N_0/4$ , passados mais trinta anos teremos a metade de  $N_0/4$  que é  $N_0/8$  átomos radioativos e assim por diante. Este tempo necessário para que a metade dos átomos tenham se desintegrado é chamado meia-vida do nuclídeo em questão. Para o caso do Cs-137 sua meia-vida é de trinta anos. A tabela 1 mostra a meia-vida de alguns elementos.

TABELA 1:

MEIA-VIDA DE ALGUNS ELEMENTOS [ Ruiperez-78 ]

NUCLÍDEO	MEIA-VIDA ( $T_{1/2}$ )
Cs 137	30 anos
U 238	$4,5 \times 10^9$ anos
U 235	$7,1 \times 10^8$ anos
Co 60	5,26 anos
Th 232	$1,39 \times 10^{10}$ anos
Th 234	24 dias
K 40	$1,26 \times 10^9$ anos
I 131	8 dias
Hg 197	65 horas

## Quadro 1- ATIVIDADE

É impossível prever qual núcleo de um isótopo radioativo irá decair a um dado instante. O decaimento de qualquer um dos núcleos tem igual probabilidade de ocorrer. O decaimento de um único átomo radioativo é um fenômeno aleatório. Há núcleos que terão um longo tempo de vida e outros que terão vida muito curta.

Verifica-se que o número de núcleos que decaem aumenta com o número total de núcleos radioativos e com o tempo no qual o decaimento ocorre.

O número  $\Delta N$  de núcleos pais decaindo durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  é proporcional ao número  $N_0$  de núcleos existentes no início do decaimento e ao intervalo  $\Delta t$ .

$$\Delta N = - \lambda N_0 \Delta t$$

O sinal menos indica que o número de núcleos radioativos diminui como um resultado do decaimento radioativo. A constante  $\lambda$  é chamada constante de decaimento e é característica de cada núcleo.

Esta lei é chamada lei fundamental do decaimento radioativo e pode ser reescrita da seguinte forma:

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

Obtemos, assim, o número  $N$  de partículas que permanecem radioativas depois de um tempo  $t$ .

Podemos, então, calcular o tempo  $t$  no qual o número  $N$  de núcleos radioativos é igual à metade do número inicial de núcleos radioativos  $N_0$ :

logo,  $N=N_0/2$  donde

$$\begin{aligned} N_0/2 &= N_0 e^{-\lambda t} \\ \ln(1/2) &= - \lambda t \\ \ln(2) &= \lambda t \\ t &= 0,693 / \lambda \text{ segundos} \end{aligned}$$

Este tempo  $t$  é chamado meia-vida ( $T_{1/2}$ ) e nos diz qual o tempo que deve transcorrer para que a intensidade da fonte radioativa se torne a metade da existente no tempo inicial.

A constante  $\lambda$  tem dimensão de  $1/s$  e caracteriza a fração de núcleos que decaem na unidade de tempo, isto é, determina a taxa de decaimento radioativo.

A quantidade  $\tau = 1/\lambda$  é chamada vida média de um isótopo radioativo, pois expressa o seu tempo médio de vida, isto é:

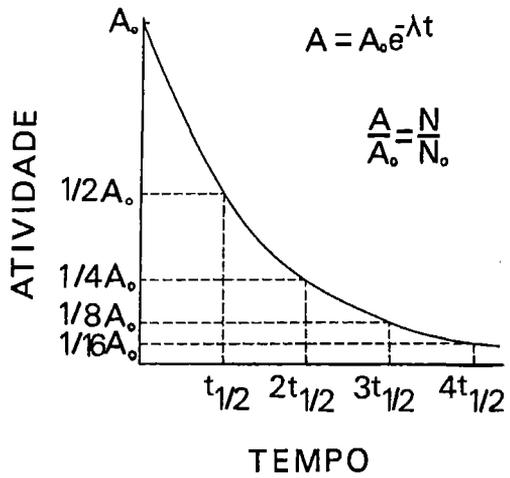
$$\tau = \text{tempo total} / N_0$$

O número de desintegrações que ocorrem em uma dada amostra radioativa durante um segundo, chamado de ATIVIDADE da amostra, é medido em Bequerel (Bq).

O decaimento radioativo pode ser representado através do seguinte gráfico, onde o número de núcleos radioativos da amostra está relacionado à sua atividade:

Observando o gráfico:

- Qual o tempo  $t$  transcorrido para que a atividade da fonte seja  $A_0/2$ ?
- Qual o tempo  $t$  transcorrido para que a atividade da fonte seja  $A_0/4$ ?
- Qual o tempo necessário para que a atividade seja nula?



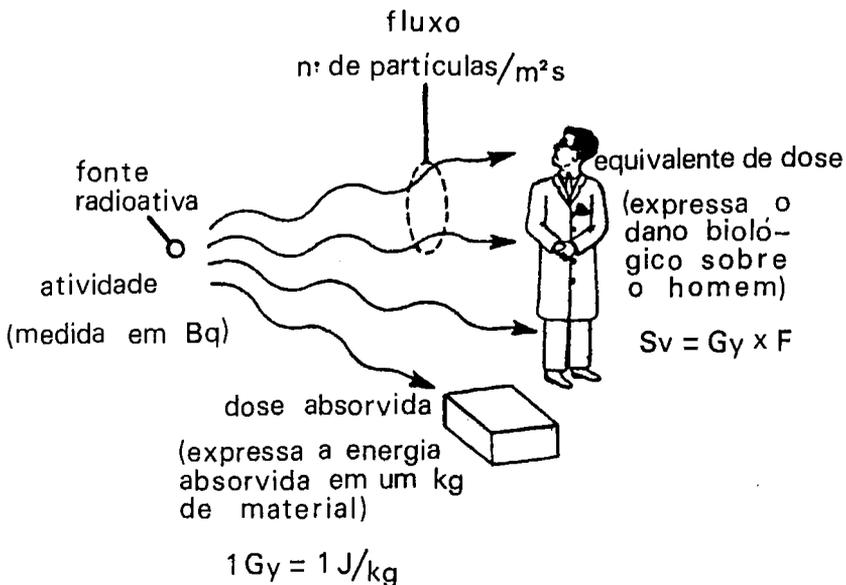
## UNIDADES

Quando um material radioativo apresenta uma desintegração por segundo, dizemos que sua atividade é um bequerel (Bq).

Uma outra unidade importante é a da energia absorvida por um organismo quando a radiação ionizante o atinge. Quando a energia de 1 Joule (J) é absorvida por 1 Kilograma de material dizemos que a dose absorvida é 1 Gray (Gy). A energia, porém, não é suficiente para caracterizar os danos provocados pela radiação em organismos vivos. A distribuição destes danos depende da energia, da massa e da carga da radiação.

Para expressar estes danos existe uma outra unidade chamada Sievert (Sv). Por exemplo: uma dose de 1 Gy para radiação gama faz menos danos do que a mesma dose absorvida de radiação beta. Este fator que quantifica o efeito de cada tipo de radiação é chamado fator de qualidade e deve ser multiplicado pela dose absorvida (Gy) para se obter a dose equivalente em Sv. No caso da radiação gama, X e beta, este fator é igual a 1 e no caso da radiação alfa este fator é igual a 20. Vemos assim que a dose equivalente nos dá informação sobre o dano já levando em conta a natureza da radiação ionizante. A figura 2 mostra as diversas unidades radiológicas.

FIGURA 2: RELAÇÕES ENTRE AS UNIDADES RADIOLÓGICAS [ Martin & Harbison-72 ]



## Quadro 2- UNIDADES

**UNIDADES RADIOLÓGICAS:** As unidades radiológicas podem ser divididas em dois grupos:

**GRUPO 1:** Tratam da caracterização da fonte radioativa, quantificando sua taxa de radiação. Encontram-se neste grupo as unidades de:

**ATIVIDADE(A)** que estabelece a razão da variação do número de eventos ionizantes na unidade de tempo e que é dada em:

Curie(Ci) - unidade antiga

Bequerel(Bq) - unidade SI

onde: 1Ci =  $3,7 \times 10^{10}$  desintegrações/segundo  
1Bq = 1 desintegração/segundo

**GRUPO 2:** Tratam dos efeitos produzidos pela radiação (ionização e/ou danos) no meio onde ela incide. Encontram-se neste grupo as unidades de:

a)**ENERGIA(ev)** onde ev(elétron-volt) é a energia de radiação equivalente à adquirida por um elétron quando acelerado por uma diferença de potencial de 1 volt.

1 ev =  $1,6 \times 10^{-19}$  J (J=Joule)

b)**EXPOSIÇÃO(R)** que expressa a quantidade de ionização produzida no ar(CNTP) por raios-X ou radiação gama e que é dada em:

Roentgen (R) ou (r)

onde: 1r =  $1,6 \times 10^{15}$  pares de íons/Kg =  $2,8 \times 10^{-4}$  C/Kg (C=Coulomb)

c)**DOSE ABSORVIDA(rad)** - do inglês rad=roentgen absorbed dose - que é a grandeza medida pelo quociente da energia transferida pela radiação ionizante(fótons e/ou partículas) em um elemento de volume pela matéria contida neste volume e que é dada em:

rad(rad) - unidade antiga

Gray(Gy) - unidade SI

onde: 1 rad =  $1 \times 10^{-2}$  J/Kg  
1 Gy = 1 J/Kg (1 Gy = 100 rad)

d)**EQUIVALENTE DE DOSE (rem)** - do inglês rem=roentgen equivalent man - que é a quantidade de qualquer radiação que, absorvida pelo homem, produz o mesmo efeito que a absorção de 1r de raios-X ou radiação gama e que é dada em:

rem(rem) - unidade antiga

Sievert(Sv) - unidade SI

onde: 1 rem =  $1 \times 10^{-2}$  J/Kg  
1 Sv = 1 J/Kg (1 Sv = 100 rem)

NOTA: (Dose em) rem = (Dose em) rad x F

onde F é um fator de qualidade (ou eficiência biológica relativa) que depende da eficácia do tipo de radiação na produção de danos biológicos. Veja alguns exemplos:

Raios X, gama e partículas beta - F = 1

Partículas alfa e neutrons - F = 20

### Quadro 3- CONTADOR GEIGER

O contador Geiger é um aparelho que serve para medir a radiação emitida por uma fonte radioativa, utilizando a propriedade da ionização (retirada de elétrons) que a radiação possui.

O aparelho é constituído basicamente de um tubo cilíndrico sensível à radiação, contendo um gás em seu interior, conectado a uma bateria. Quando a radiação penetra no cilindro arranca elétrons das moléculas do gás. Estes elétrons entram em movimento devido à ação de um forte campo elétrico e colidem com outras moléculas, dando origem a uma "cadeia de ionização", antes de serem atraídos para um filamento carregado positivamente disposto ao longo do cilindro. Quando eles o atingem geram um rápido pulso (variação) de tensão. Este sinal provocará o deslocamento de um ponteiro na escala do aparelho e/ou um sinal audível o que indicará a quantidade e/ou presença de radiação. A figura 3 mostra um esquema de um contador Geiger.

FIGURA 3: CONTADOR GEIGER-MÜLLER

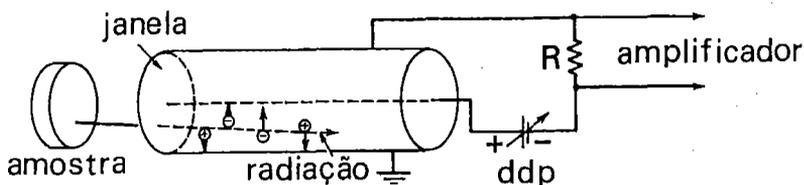




TABELA 2:

**ÁREAS DE RADIAÇÃO EXTERNA ELEVADA [Ruiperez-78]**

ÁREAS	DOSE EXTERNA (mSv/ano)
NORMAL	1
BRASIL (*)	5 - 10
KERALA (ÍNDIA)	2 - 26
ILHA DE NIUE (PACÍFICO)	10
ÁREAS FRANCESAS DE GRANITOS PRIMITIVOS	1,8 - 3,5

(\*) Não se refere a todo o Brasil mas sim a Guarapari e Poços de Caldas, onde há altas concentrações de tório e urânio.

**Quadro 4- RADIOATIVIDADE EM DIVERSOS TIPOS DE ROCHAS**

As rochas classificam-se em ígneas e sedimentares que diferenciam-se pela sua formação, tendo em comum a presença dos elementos radioativos U e Th em diferentes concentrações (medidas em ppm = partes por milhão) em cada tipo de rocha.

As ígneas dividem-se em:

- granitos (com concentração de U=3 ppm e de Th=9 a 12 ppm);
- rochas vulcânicas - riolitas (com concentração de U=1 ppm) e basaltos (com concentração de U=4 a 8 ppm);
- rochas básicas (com concentração de U=1 a 2 ppm e de Th=3 a 4 ppm).

As sedimentares dividem-se em:

- rochas calcáreas (concentração de U=3 ppm);
- rochas carbonadas (concentração de U varia de milésimos a centenas de ppm de acordo com a idade da rocha); e,
- rochas fosfatadas (contém algumas centenas de ppm de U em estado difuso, no entanto, o Th quase não existe).

Podemos concluir, então, que existem áreas com concentrações radioativas maiores, devido a causas geológicas e geoquímicas, como é o caso, por exemplo, de GUARAPARI conhecida pela sua concentração de areias monazíticas ricas em Th.

Os elementos radioativos naturais originam, em suas séries de desintegração, os gases radioativos radônio, torônio e actinônio que são isótopos do gás nobre radônio. Suas meias vidas são:

- 330000 segundos (radônio)
- 55 segundos (torônio)
- 4 segundos (actinônio)

e suas concentrações são variáveis e proporcionais a seus períodos.

Do ponto de vista da radioatividade, tanto da crosta terrestre quanto da atmosfera, são importantes o radônio e o torônio. Esses gases provêm (emanam) das porosidades, fissuras e grutas existentes na crosta terrestre, devido aos materiais que compõem os diversos tipos de rochas, atingindo e misturando-se ao ar e a água. A emissão desses gases dependerá do tipo de mineral, da natureza do grão mineral e do tamanho do grão, havendo a "fuga dos átomos radioativos" para a atmosfera pela difusão. A tabela 3 apresenta doses de radiação típicas encontradas em diversas rochas.

TABELA 3:

RADIOATIVIDADE EM ROCHAS (em mSv/ano) [Ruiperez-78]					
TIPO DE ROCHA	Ra 226	U 238	Th 232	K 40	TOTAL
<b>ÍGNEAS</b>	0,24	0,26	0,37	0,35	0,98
<b>SEDIMENTARES</b>					
- ARENOSAS	0,13	0,077	0,18	0,15	0,46
- ARGILAS	0,20	0,077	0,31	0,36	0,87
- CALCÁREAS	0,077	0,084	0,04	0,04	0,16

## NA ATMOSFERA:

A radioatividade na atmosfera procede:

- dos raios cósmicos
- de sedimentos radioativos procedentes de provas nucleares
- das séries radioativas (radônio e torônio, principalmente)

A radiação cósmica tem origem no espaço exterior e consta de:

- 79% de prótons
- 20% de partículas alfa
- 0,7% de núcleos de carbono, nitrogênio e oxigênio
- 0,22% de núcleos de  $Z > 10$ .

Sua energia é elevada (até  $1 \times 10^{13}$  Mev =  $1 \times 10^{19}$  ev = 1,6 J), e varia com a latitude e altitude.

Da interação dos raios cósmicos com os componentes da atmosfera originam-se vários elementos radioativos dentre os quais destacam-se: H-3 (trítio), C-14 e Be-7.

O trítio se encontra principalmente combinado ao O (oxigênio) formando moléculas de água que, arrastadas pela chuva, aumentam sua concentração.

A concentração de trítio na água dos rios é de um átomo de trítio por  $0,2 \times 10^8$  átomos de H. A concentração de trítio no corpo humano é próxima a esta, o que contribui para a radioatividade do corpo.

O C-14 existe na atmosfera sob a forma de  $CO_2$  e interage com os organismos vivos incorporando-se às moléculas que formam a matéria viva, existindo um equilíbrio entre o C-14 da atmosfera e o existente na matéria viva o que dá a cifra de 0,287 Bq/g de C na matéria viva. O C-14 é um emissor beta puro com energia 1000 vezes maior que o trítio.

Quando aos gases radônio e torônio, suas concentrações dependem de vários fatores, como por exemplo:

- do valor da emanção
- do vento e chuvas
- das condições de estabilidade atmosférica

O radônio e o torônio são produzidos por um processo natural e constante a partir do Ra-226 e do Ra-224, respectivamente, e também por fontes artificiais como as centrais térmicas alimentadas por carbono.

#### NA HIDROSFERA:

A hidrosfera compreende as águas dos oceanos, rios e lagos que estão em constante ciclo de evaporação, difusão na atmosfera e precipitação (em forma de chuva e/ou neve), e as águas subterrâneas que surgem a partir da filtração, pelo solo, das correntes de águas superficiais.

A concentração de elementos radioativos presentes nos diversos tipos de água dependerá dos processos que as originam e dos locais de onde provém. (A água carregará materiais radioativos que estão no solo e também no ar). Por exemplo: nos oceanos de concentração salina de 3,3 g/l há  $3,3 \times 10^{-13}$  ppm de U o que resulta em uma atividade de 0,08 Bq/l.

#### EM CAVIDADES SUBTERRÂNEAS:

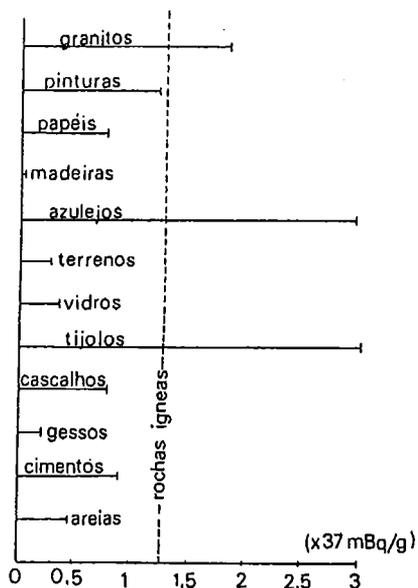
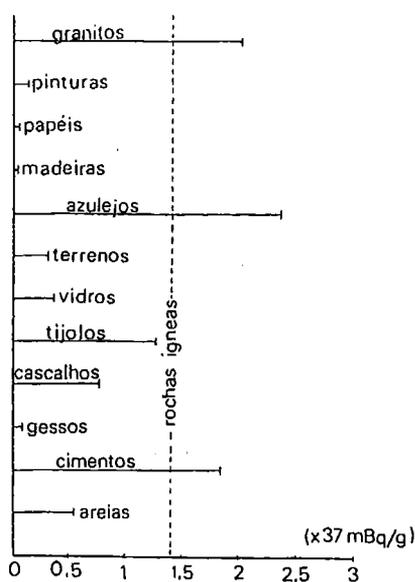
Cavidade subterrânea é qualquer recinto natural ou artificial existente na crosta terrestre (grutas, covas, cavernas, túneis, etc) que pode ou não estar em comunicação direta com a atmosfera.

A atmosfera no interior destas cavidades apresenta uma concentração extraordinariamente elevada de gases radioativos podendo ser, em cavidades fechadas, até mil vezes superior à medida na atmosfera normal. Uma variação nesta concentração pode ocorrer através da ventilação da cavidade.

#### EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO:

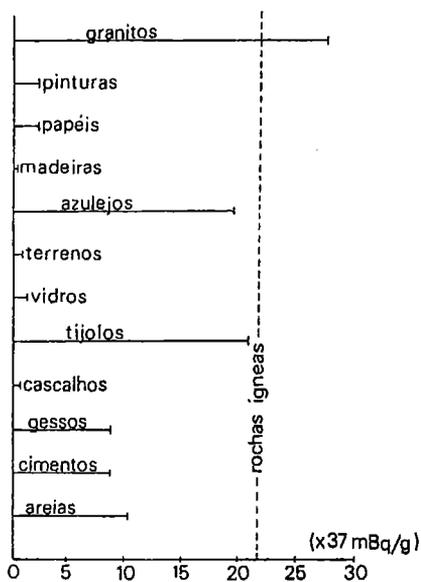
Como a maioria dos materiais que o homem utiliza em construções provém de materiais existentes na crosta terrestre, eles serão radioativos em maior ou menor grau dependendo da sua natureza e procedência. A figura 4 apresenta doses típicas de radiação encontradas em diversos materiais.

**FIGURA 4: A RADIOATIVIDADE EM DIVERSOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**  
[ Ruíperéz-78 ]



CONTEÚDO DE Ra-226 PARA DIVERSOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

CONTEÚDO DE Th-232 PARA DIVERSOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



CONTEÚDO DE K-40 PARA DIVERSOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

#### NO CORPO HUMANO:

Os elementos radioativos existentes no nosso ambiente e que acabam fazendo parte de nosso corpo são isótopos radioativos dos elementos potássio, carbono e hidrogênio, ou são elementos pesados que compõem as séries do U e do Th.

Como sabemos K, C e H são componentes indispensáveis da matéria viva, o que a torna naturalmente radioativa.

Os elementos radioativos pesados, tais como Pb, W, Ra, Po e Hg, não desempenham nenhum papel na constituição do organismo, apenas nele se alojam prejudicando seu funcionamento. Sua fixação dependerá de seu "parentesco" (semelhança química) com os elementos normais. Por exemplo o Ra, por seu parentesco com o Ca, se fixará preferencialmente nos ossos; o Po se fixará nos pulmões; o Pb deposita-se sobre vegetais entrando no corpo humano pela ingestão alimentar. Já o K-40 se localiza preferencialmente nos músculos numa proporção de 0,2 - 0,3%; o C-14 se encontra em lipídios, glicídios e protídios; o H-3 forma parte de todas substâncias que contém H (inclusive a água), sendo que sua radioatividade é conseqüente dos elementos pesados dos quais procede. Sendo assim, a radioatividade no corpo humano estará relacionada com a região e a dieta alimentícia.

Outra via de entrada de material radioativo é a respiração. O ar contém gases e pó radioativo. Por exemplo, o radônio pode fundir-se ao sangue através dos alvéolos pulmonares: o pó radioativo se deposita ao longo do aparelho respiratório sendo carregado por mucosas até o aparelho digestivo donde é levado até a circulação. O radônio e o torônio se desintegram rapidamente formando o Pb-210 (meia vida aproximada de 22 anos) que se fixa nos pulmões ou na estrutura óssea. A tabela 4 mostra doses típicas de radiação encontradas no interior do organismo humano.

#### NOS ALIMENTOS:

A radioatividade dos alimentos (sólidos e líquidos) varia devido ao local de procedência e ao processo de elaboração, pois tanto o solo, a água e aditivos utilizados, contém elementos radioativos que são passados para os alimentos de acordo com suas concentrações. Existem normas de proteção radiológica que estabelecem qual a dose de radiação que cada alimento pode ter e ainda ser considerado consumível.

#### NA ÁGUA POTÁVEL E OUTRAS BEBIDAS:

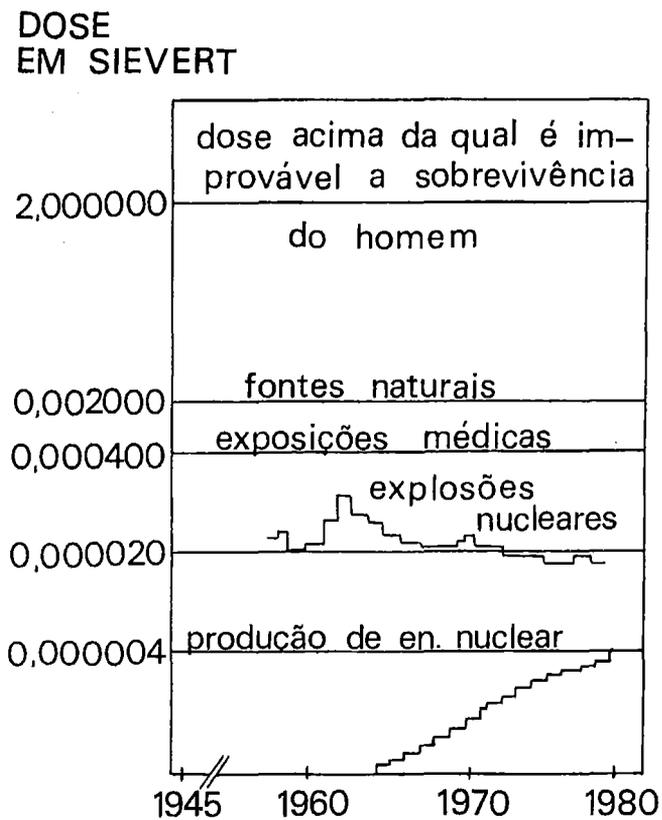
A água é a substância que se encontra em maior proporção na constituição dos seres vivos. As águas que procedem de terrenos graníticos possuem, em geral, maior radioatividade do que as que procedem de terrenos calcáreos sendo que os elementos que mais contribuem para a radioatividade da água potável são o radônio e o Ra-226. Também convém lembrar que as águas correntes de superfície possuem uma concentração de radônio inferior à das águas subterrâneas.

A figura 5 compara as doses de radiação emitidas pelas diversas fontes de radiação existentes no planeta e mostra a dose em que a sobrevivência do homem se torna improvável.

TABELA 4: RADIOATIVIDADE NO INTERIOR DO ORGANISMO [Ruiperez-78]

ELEMENTO RADIOATIVO	DOSE(em mSv/ano)
K 40	0,20
Ra 226	0,005
Pb 210	0,003
C 14	0,007

FIGURA 5: RELAÇÃO ENTRE AS DOSES DE DIVERSAS FONTES DE RADIAÇÕES [Errera-85]



## EFEITOS DA RADIAÇÃO

Como acabamos de ver, a natureza está cheia de átomos radioativos e conseqüentemente os seres vivos se formaram e se desenvolveram em convívio com este ambiente. No entanto, somente no ano de 1896 devido à pesquisa de H. Bequerel, a humanidade tomou conhecimento deste fenômeno, (na verdade nesta data já se tinha conhecimento da existência de raios-X descobertos por W. Roentgen em 1895). Nada se sabia, então, a respeito do efeito da radiação sobre um tecido vivo e os cientistas envolvidos nas pesquisas iniciais estavam preocupados em entender a natureza das radiações emitidas, seus efeitos em materiais diversos e seu comportamento com o decorrer do tempo.

Os efeitos da radiação sobre o ser humano se evidenciaram em seguida e o próprio Bequerel constatou que os raios produziam queimaduras em sua pele (radiodermites). Somente mais tarde, no início do século, se percebeu que estas queimaduras podiam degenerar em câncer. O primeiro quilo de radium obtido por Marie Curie, logo após sua descoberta, deve ter feito várias vítimas.

Nas décadas seguintes, antes de se adotarem medidas de proteção, tumores ocasionados por exposição à radiação afetaram uma série de pesquisadores que pioneiramente se dedicaram à investigação nesta área. Desta maneira, bem antes de se conhecer os mecanismos biológicos que são ativados pela radiação, já se sabia de seus efeitos nocivos. É preciso lembrar, no entanto, que estas pessoas afetadas estavam sujeitas a doses muito altas de radiação o que de certa forma motivou o conceito de que a radiação só é nociva acima de certas doses. A possibilidade de que doses pequenas possam causar tumores só foi estudada seriamente muito tempo depois (1950).

Veremos, agora, mais especificamente, os efeitos da radiação nos materiais e em seres vivos.

### EM MATERIAIS

O que ocorre quando a radiação atinge e interage com a matéria? Quando uma partícula alfa, beta ou um raio gama entra em um pedaço de matéria há transferência de energia da radiação para o material através das colisões com os átomos que constituem o material. Estas colisões arrancam os elétrons dos átomos do material criando-se assim átomos carregados (íons). Se o material for muito fino ou se a radiação tiver energia muito alta, a partícula ou raio pode passar através do material, perdendo muito pouco de sua energia (poucas colisões). Em outros casos, a partícula ou radiação pode ser completamente absorvida pelo material, significando que perdeu toda sua energia através da ionização (muitas colisões).

Enquanto a radiação alfa é completamente absorvida por uma fração de milímetro de alumínio e a radiação beta é absorvida por poucos milímetros do mesmo material, raios gama podem atravessar uma espessura de vários centímetros.

Verifica-se que a radiação absorvida por diferentes materiais varia quase que diretamente com a densidade desses materiais.

## Quadro 5 - ABSORÇÃO

Se uma radiação de intensidade  $I_0$  incide sobre uma camada absorvedora de espessura  $\Delta x$ , a quantidade de radiação absorvida  $\Delta I$  é proporcional a  $\Delta x$  e a  $I_0$ , o que pode ser expresso através da seguinte equação:

$$\Delta I = -\mu I_0 \Delta x$$

onde, a constante de proporcionalidade  $\mu$  é característica do meio absorvente e o sinal negativo significa que a intensidade diminui quando a espessura aumenta.

Esta equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Por exemplo, para reduzir a intensidade  $I_0$  a metade do seu valor inicial, isto é, para se ter  $I=I_0/2$ , a espessura correspondente ( $x_{1/2}$ ) deve ser:

$$\begin{aligned} I_0/2 &= I_0 e^{-\mu x} \\ \ln(1/2) &= -\mu x \\ \ln 2 &= \mu x \\ x_{1/2} &= 0,693/\mu \end{aligned}$$

### NOS SERES VIVOS

A medida que a radiação penetra nos tecidos, como nos materiais, vai perdendo energia através de uma série de colisões e interações ao acaso com os átomos e moléculas que lhe atravessam o caminho. No caso dos materiais não estávamos interessados nos efeitos da radiação no absorvedor. No caso dos tecidos vivos, estas alterações devem ser consideradas, porque influenciam o funcionamento das células.

Estas colisões originam íons (elétrons arrancados) e radicais químicos reativos que rompem ligações, causando alterações em moléculas vizinhas.

A distribuição das ionizações ao longo do trajeto depende da energia, da massa e da carga da radiação. Cada tipo de radiação, então, perde energia de maneira peculiar.

Por exemplo, geralmente, os raios X e gama (que são eletricamente neutros) se caracterizam por um baixo gradiente de transferência linear de energia, ou seja, geram poucos íons ao longo do seu trajeto e penetram profundamente nos tecidos. Já as partículas dotadas de carga se caracterizam por uma transferência linear mais elevada e menor penetração.

Essa densidade de liberação de energia está relacionada à capacidade de provocar lesões (danos). Desta forma as radiações com alta transferência linear (por exemplo, prótons e partículas alfa) produzem, em geral, um dano maior que as radiações de baixa transferência linear de energia (raios X e raios gama, por

exemplo). A figura 6 mostra o efeito das radiações, com alta e baixa taxa de transferência de energia, nos organismos vivos.

Os efeitos biológicos das radiações ionizantes podem ser do tipo somático e isto significa que seus efeitos aparecem na própria pessoa que recebeu a radiação, ou hereditários o que significa que aparecerão em seus filhos sendo o resultado do dano ocasionado nas células reprodutoras da pessoa que recebeu a radiação.

Os efeitos somáticos podem ser imediatos, se a dose absorvida for muito alta, em torno de 1 gray, e recebida toda de uma só vez. Os sintomas são náusea e vômito. Isto é conhecido como síndrome da radiação. Doses absorvidas acima de dois grays podem levar à morte. A medida que a dose aumenta, as chances de sobrevivência diminuem.

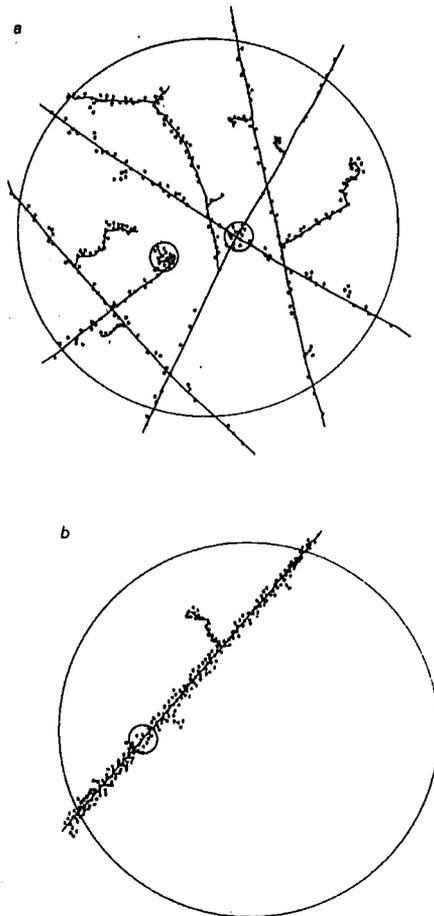
Já os efeitos somáticos tardios são resultado de pequenas doses, mas continuadas num longo intervalo de tempo. São casos que ocorrem em pessoas ocupacionalmente expostas, como os radiologistas e mineiros de urânio, por exemplo. Estes efeitos são: maior incidência de câncer, possibilidade de formação de catarata e há certas evidências de que a expectativa de vida seja levemente reduzida.

A investigação de efeitos somáticos, como por exemplo o câncer e a leucemia, nos leva a questionar a existência de um limiar de radiação que seja responsável pelo desencadeamento desses efeitos.

A tendência atual, gerada pelos resultados de experimentações com doses consideradas baixas, é de não aceitar a existência de um limiar de segurança absoluta. Pelo contrário, postula-se que haja uma relação contínua entre exposição e risco.

FIGURA 6: A ENERGIA DA RADIAÇÃO que incide sobre uma célula viva dissipa-se de maneira distinta segundo a natureza da radiação incidente. Os raios-X e os raios  $\gamma$  têm, em geral, uma baixa transferência linear de energia, logo, penetram profundamente gerando poucos íons ao longo de seu trajeto. Quando a radiação é  $\alpha$  tem-se uma alta transferência linear de energia e geram-se muitos íons.

Na ilustração aparecem os dois tipos, para doses iguais de radiação gama (a) e radiação de partículas alfa (b). Os pontos representam as ionizações causadas pela perda energética ao longo da trajetória seguida pela radiação (linhas retas). Produzem-se altas concentrações de dissipação de energia em pequenos volumes em ambos os casos (circunferências), porém, por unidade de dose são menos freqüentes em (a) do que em (b) [ Santos & Villanueva-85 ]



## QUAL O CONTROLE QUE SE TEM

### NORMAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Existem certas normas básicas de proteção radiológica estabelecidas por órgãos autorizados que prescrevem os limites de doses equivalentes máximas permitidas, as quais destinam-se à prevenção ou redução ao mínimo de danos somáticos e degenerescências da constituição genética da população.

O órgão legalmente responsável, no Brasil, é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

As normas estabelecidas pela CNEN aplicam-se à produção, processamento, manuseio, uso, armazenamento, transporte e eliminação de material radioativo natural ou artificial e ao uso e operação de outras fontes de radiação e classificam os indivíduos em três categorias:

- a) Trabalhadores (compreende qualquer indivíduo adulto que poderá ser irradiado, de maneira regular ou ocasional, durante e em consequência do seu trabalho)
- b) Indivíduos do público (são os indivíduos que vivem nas imediações de instalações nucleares)
- c) População como um todo (compreende, além das categorias anteriores, a população em geral).

São os seguintes os limites de dose equivalente máximos prescritos em cada categoria, para o corpo inteiro:

- a) Para trabalhadores: 50 mSv/ano
- b) Para indivíduos do público: 5 mSv/ano
- c) Para a população como um todo: não pode exceder ao limite de 50 mSv em um período de 30 anos.

### RADIAÇÃO DE BAIXO NÍVEL

De acordo com o postulado de que toda a quantidade de radiação produz algum efeito no ser humano, deve-se considerar a existência de um risco associado a qualquer procedimento que envolva radiação de baixo nível, não importando quão baixa seja a dose. Estes riscos são na verdade insignificantes se comparados a outros perigos da vida cotidiana. Entretanto, nenhum risco é aceitável se se pode evitá-lo ou se não vem acompanhado de um benefício. A estimativa das agressões à saúde pela radiação de baixo nível constitui um problema científico em constante revisão, pois novos dados experimentais estão sempre aparecendo. O problema da radiação de baixo nível é semelhante ao da ingestão de pequenas quantidades de substâncias químicas tóxicas cujos efeitos também não são bem determinados. A tabela 5 compara o risco de morte com probabilidade de um em um milhão por exposição a radiação com o risco de morte com a mesma probabilidade mas relativo a outras atividades humanas. A figura 7 ilustra o risco do surgimento de câncer em diversos órgãos do organismo.

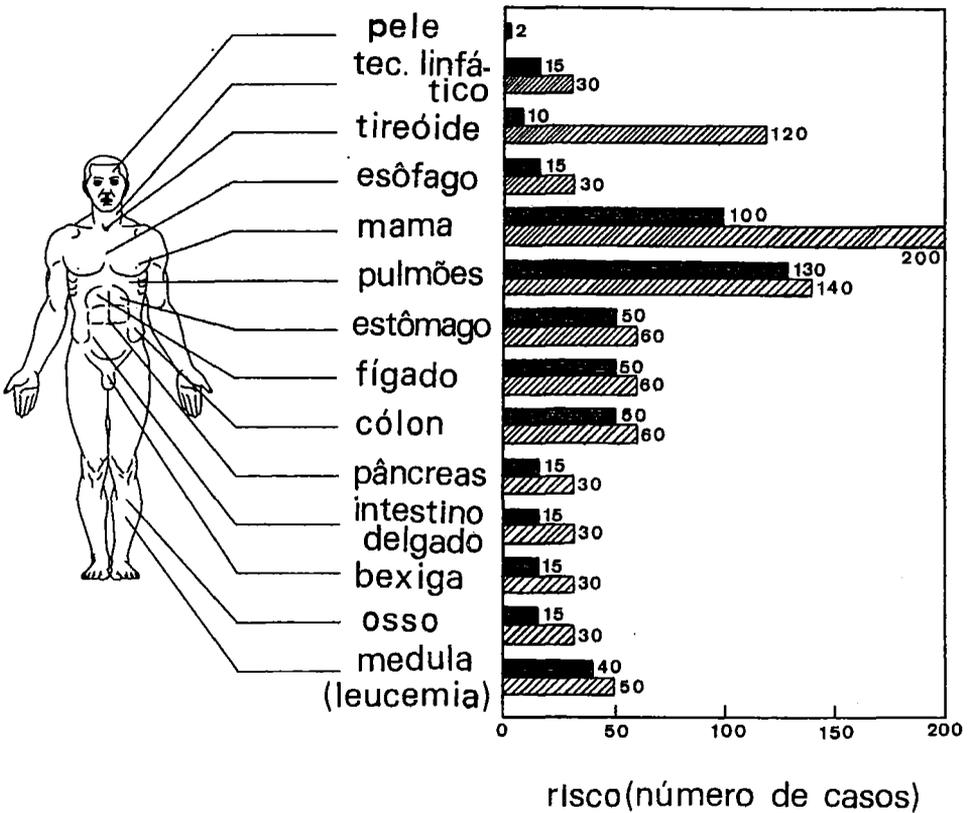
TABELA 5:

RISCO DE EXPOSIÇÃO à radiação comparado com os riscos referentes a outras situações ou atividades. Em cada caso, o risco de morte devido à exposição tem probabilidade de um por milhão. [Santos & Villanueva-85]

SITUAÇÃO	CAUSA DA MORTE
VIAJAR 1100 Km POR VIA AÉREA	ACIDENTE
CRUZAR O OCEANO PELO AR	CÂNCER POR RADIAÇÃO CÓSMICA
VIAJAR 95 Km DE AUTOMÓVEL	ACIDENTE
VIVER DOIS MESES NUM EDIFÍCIO DE PEDRA	CÂNCER POR RADIOATIVIDADE
TRABALHAR UMA SEMANA E MEIA NUMA FÁBRICA NORMAL	ACIDENTE
TRABALHAR TRÊS HORAS NUMA MINA DE CARVÃO	ACIDENTE
FUMAR DE UM A TRES CIGARROS	CÂNCER; ENFERM. CARDIO-PULMONAR
FAZER MONTANHISMO DURANTE 1,5 MINUTOS	ACIDENTE
VIVER 20 MINUTOS NA IDADE DE 60 ANOS	MORTE POR QUALQUER CAUSA

FIGURA 7: RISCO DE SURGIMENTO, ao longo da vida, de vários tipos de câncer por exposição à radiação de baixo nível.

Os dados apoiam-se em estimativas de numerosos investigadores. O risco corresponde a uma exposição de 10000 sievert-pessoa, isto é, a um sievert de radiação a cada uma das 10000 pessoas ao longo de suas vidas. Os números dados são estimativas máximas de tumores com final fatal (escuro) e o número de casos de câncer (cinza). [ Santos & Villanueva-85 ]



## APLICAÇÕES

Os isótopos radioativos são usados, basicamente, de duas maneiras: como marcadores ou como fontes de energia. Isto é, pode-se colocar isótopos radioativos no lugar de outros elementos não-radioativos, sem alterar as propriedades químicas do material de modo que torne-se possível obter informações sobre o material onde o isótopo se localiza, bem como se pode fazer uso das propriedades de ionização da radiação para matar células, destruir tecidos de crescimento anormal, alterar o código genético dos seres vivos ou para fazer mapeamento do interior de materiais (detecção de falhas).

A importância do emprego dos radioisótopos tem sido notada em diversos campos da atividade humana, tanto em pesquisas básicas nas áreas de biologia, física e química, como também em aplicações tecnológicas na indústria, agricultura, pecuária etc. Seguem-se exemplos da utilização da radiação e/ou isótopos radioativos empregados em pesquisa básica e tecnologicamente.

### NA PESQUISA BÁSICA

#### a) Em Biologia, nas áreas de:

- Genética: estudo de mutações genéticas em insetos induzidas por radiação.
- Botânica: transporte e localização de moléculas nas plantas.
- Fisiologia: determinação do volume de sangue no corpo, auto-radiografia alfa de tecidos dos pulmões.

#### b) Em Física e Química: na investigação de propriedades dos materiais, acompanhamento de processos de difusão, no estudo da cinética das reações químicas, na investigação de novas partículas, etc.

### NA TECNOLOGIA

#### a) Gamagrafias e radiografias de materiais: Através da penetração da radiação na matéria, sem sua destruição, pode-se examinar interiores e detectar discontinuidades e heterogeneidades (detectar falhas) de materiais. A escolha do tipo de radiação a ser utilizado depende de fatores como a densidade e espessura do material, forma geométrica do objeto e acesso ao espécime.

#### b) Traçadores radioativos na medicina (isótopo diagnose): o radioisótopo é empregado como indicador de um fenômeno biológico em estudo, sendo que a radioatividade serve para acompanhar o trajeto da substância administrada. (Os níveis da radioatividade utilizada são da ordem de alguns MBq a 1000 MBq).

- c) Radioterapia: Como vimos a radiação pode destruir células. Esta potencialidade pode ser utilizada para eliminação de células cancerígenas em organismos vivos. Para que a radiação não atinja as células saudáveis, o feixe de raios gama ou X é focado diretamente sobre o tumor e os tempos de exposição à radiação devem ser cuidadosamente calculados para que a dose recebida seja a mínima possível. Mesmo assim, indivíduos que submetem-se a estes tratamentos podem ser atingidos por doses que acarretem efeitos em células sadias. Desta maneira fica sob a responsabilidade do médico radioterapeuta a avaliação da relação entre o dano e o benefício trazidos ao paciente.
- d) Radiologia diagnóstica: utilização de feixes de raios X para a produção de imagens numa chapa fotográfica ou tela fluoroscópica, como por exemplo na tomografia computadorizada e na medicina nuclear (emprego da Física Nuclear para estudo, tratamento e diagnóstico de doenças).
- e) Conservação de alimentos: a radiação aplicada ioniza alguns átomos e moléculas vitais de bactérias e microorganismos, inibindo-os ou destruindo-os de modo que os alimentos são preservados sem serem afetados nocivamente. Podem, porém, ocorrer mudanças na cor, sabor, textura ou teor vitamínico, dependendo do tipo de alimento. Uma vez que o material radioativo não entra em contato direto com os alimentos, estes não ficam radioativos.
- f) Esterilização de material cirúrgico: ao invés de aquecer, correndo o risco de deteriorar certos produtos, utilizam-se radiações suficientemente energéticas (mesmo em materiais embalados) para destruir fungos e bactérias.
- g) Coloração de cristais: através da radiação provocam-se danos nos cristais, o que altera sua coloração e seu valor comercial.

## Quadro 6 - DATAÇÃO

As estimativas da idade da Terra eram, até a descoberta da radioatividade em 1896, apenas qualitativas pois não se conhecia nenhum método para fazer medidas que fornecesse dados sobre a idade das rochas. A idéia de usar o decaimento radioativo como um relógio que conta eras, possibilitou aos geólogos a ampliação da escala de tempo na qual podiam basear suas pesquisas. As séries radioativas já haviam sido descobertas e sabiam-se quais os produtos finais do decaimento dos elementos como tório e urânio que são encontrados em vários minerais. Sabendo a relação entre a quantidade destes minerais nas rochas e a de seus produtos radioativos, pode-se fazer uma estimativa da idade da rocha.

O tempo que uma amostra de U-238 leva para ter metade de seus núcleos radioativos iniciais é  $4,5 \times 10^9$  anos. Quando este tempo passar teremos núcleos que decaíram transformados em Pb-206.

Exemplificando: Suponha que em um dado instante se tenha 1000 átomos radioativos de U-238 em uma amostra. Vamos calcular quanto tempo deve passar para que se tenha 80 átomos de Pb-206. Se existem no final 80 átomos de Pb-206 restaram 1000 átomos de urânio; então o número inicial de átomos de U-238 é  $N_0 = 1000$  e o número final de átomos de U-238 é 1000. Vamos calcular quanto tempo leva para isto ocorrer, sabendo que:

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

$$\text{Teremos: } \lambda = 0,693/4,5 \times 10^9 = 0,15 \times 10^{-9}$$

onde t será dado por:  $N/N_0 = e^{-\lambda t}$

$$\begin{aligned} 1000/1000 &= e^{-0,15 \times 10^{-9} t} \\ \ln(1000/1000) &= -0,15 \times 10^{-9} t \\ t &= 0,51 \times 10^9 \text{ anos} \end{aligned}$$

Isto significa que se olharmos uma amostra de rocha e encontrarmos para cada 1000 átomos de U-238, 80 de Pb-206 passaram-se 510 000 000 de anos e portanto a rocha tem pelo menos esta idade.

Devemos lembrar que este processo está sujeito a erros tanto na contagem da percentagem como no desconhecimento da história da rocha, que pode ter perdido fragmentos que mascarem a proporção encontrada.

Para evitar estes problemas fazem-se vários testes com outros átomos radioativos e seus produtos e comparam-se os tempos encontrados.

Os testes alternativos, entre outros, são:

- 1- razão do Pb-206 para o U-238
- 2- razão do Pb-207 para o U-235
- 3- razão do Pb-206 para o Pb-207
- 4- razão do He para o urânio

O terceiro método é o mais simples e o mais satisfatório; o primeiro e segundo métodos, baseados na comparação U-Pb, são mais incertos pois dependem, basicamente, de três medidas: a concentração do U e do Pb e a razão dos isótopos de Pb.

Rochas comuns como as graníticas, que contenham de 1 a 10 ppm de U, são datadas com sucesso embora, agora, já se consiga datar rochas que contenham menos de 1 ppm de U.

O que se procura através destes estudos é indicar um limite superior para a idade da Terra examinando depósitos de chumbo encontrados em várias partes do mundo.

Quando se quer determinar idades de materiais orgânicos de centenas até dezenas de milhares de anos, e não bilhões de anos como a idade das rochas, usa-se o método da datação pelo C-14. Esse método pode ser entendido da seguinte forma: os seres vivos absorvem contínua e diretamente do ar uma certa quantidade de carbono na qual se encontra, também, o C-14 (radioativo) que é produzido em colisões entre raios cósmicos e o nitrogênio do ar, que ocorrem nas camadas mais externas da atmosfera. Quando o indivíduo morre, seu organismo pára de absorver o carbono do ar. Logo, a quantidade de C-12 (não radioativo) permanecerá constante enquanto que o C-14 (radioativo) irá decair diminuindo sua fração no carbono total. Dessa forma pode-se determinar a fração do C-12 para C-14, medindo a radioatividade existente no material o que, comparado com o que havia antes da morte do organismo, serve para deduzir a idade do material.

#### AMPLIANDO HORIZONTES

Esperamos ter auxiliado o leitor a ampliar sua informação sobre o tema radioatividade. Gostaríamos, também, de ter aumentado seu interesse pelo assunto. Existe uma infinidade de tópicos que não foram abordados e que são também interessantes. Se o leitor for, por exemplo, um professor de ciências, certamente se confrontará com complicadas perguntas, de seus curiosos alunos, para as quais não encontrará respostas neste texto. Para auxiliar o leitor interessado apresentamos a literatura classificada de acordo com o assunto e também de acordo com os níveis de 1<sup>o</sup>, 2<sup>o</sup> e 3<sup>o</sup> graus. Todo o material indicado pode ser encontrado na biblioteca do Instituto de Física da UFRGS, ou com as autoras, que terão satisfação em colaborar no esclarecimento de dúvidas. Os pedidos de informações podem ser encaminhados para:

M. E. BRÜCKMANN  
TEMA RADIOATIVIDADE  
Instituto de Física - UFRGS  
Campus do Vale - C.P. 15051  
91500 Porto Alegre - RS - Brasil



## **GLOSSÁRIO:**

**ATIVIDADE** - É o número de desintegrações nucleares que ocorrem por unidade de tempo em uma quantidade de substância radioativa. Atividade é medida em curies ou bequeréis.

**ÁTOMO** - Um átomo é a menor partícula de um elemento que ainda guarda as propriedades químicas deste elemento. Um átomo consiste de um núcleo central massivo constituído de prótons e neutrons carregado com uma carga elétrica positiva, em torno do qual elétrons se movem em órbitas relativamente grandes e distantes.

**BEQUEREL, Bq** - É a unidade de atividade no sistema internacional de medidas (SI). É equivalente a uma desintegração/segundo ou aproximadamente  $2.7 \times 10^{-11}$  Curie.

**CONTADOR GEIGER-MÜLLER** - É um equipamento que permite detectar radiação através da produção de pulsos elétricos numa taxa relacionada com intensidade da radiação. Geralmente é chamado somente de contador geiger.

**CONTAMINAÇÃO RADIOATIVA** - É a presença de material radioativo em lugares onde ele não deveria estar, por exemplo, roupas, mãos e instrumentos de trabalho.

**CURIE, Ci** - É a unidade de radioatividade na qual, para uma quantidade de material radioativo,  $3.7 \times 10^{10}$  núcleos desintegram em cada segundo. Originalmente ela era a atividade de 1 grama de radio-226. Esta unidade foi substituída pelo bequerel (Bq) que é igual a 1 desintegração por segundo.

**DATAÇÃO** - Determinação da idade de um espécime arqueológico ou geológico através da medida do conteúdo de um isótopo radioativo em relação ao seu precursor ou produto filho ou seu isótopo estável.

**DECAIMENTO RADIOATIVO** - É a desintegração de um núcleo através da emissão de energia em forma de partículas ou radiação.

**DESINTEGRAÇÃO** - Qualquer transformação de um núcleo, espontânea ou por interação com radiação, na qual partículas ou radiação são emitidas. Usado em particular para referir decaimento radioativo.

**DOENÇAS DE RADIAÇÃO** - São os efeitos agudos não-aleatórios causados por uma grande dose de radiação sobre o corpo inteiro, tal como a que pode ser recebida em um acidente com reator ou a partir de uma explosão nuclear e seus

produtos. Os sintomas e seus efeitos variam com a intensidade da dose, abrangendo desde náuseas temporárias até morte. VEJA efeitos aleatórios.

**DOSE** - Genericamente, é a quantidade de energia da radiação que é absorvida por um corpo. Existem várias definições especiais para especificar diferentes aplicações. VEJA rad, rem, roentgen, sievert e gray.

**DOSE LIMITE** - Em proteção radiológica, é a dose máxima de exposição à radiação permitida para uma pessoa num certo período de tempo. Os limites atuais recomendados pelo ICRP - International Commission on Radiological Protection (Comissão Internacional de Proteção Radiológica) - e prescritos pela CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), são:

(1) para pessoas que trabalham diretamente com radiação, 50 milisieverts (5 rem) por ano.

(2) para pessoas do público, 5 milisieverts (0.5 rem) por ano.

Estes limites procuram minimizar a ocorrência de efeitos aleatórios e prevenir a ocorrência de efeitos não-aleatórios. A dose limite não deve ser tomada como um "limite seguro".

**DOSÍMETRO** - É um instrumento que serve para medir doses de radiação ou razões entre doses e é usado por pessoas que trabalham com radiação.

**EFEITOS ALEATÓRIOS (OU EFEITOS ESTOCÁSTICOS)** - São aqueles que têm a probabilidade de ocorrência proporcional a dose; eles abrangem indução de câncer e efeitos genéticos. Efeitos não-aleatórios são aqueles que aparecem somente depois que uma dose suficientemente grande é ultrapassada. VEJA dose limite.

**EFEITOS GENÉTICOS (OU EFEITOS HEREDITÁRIOS)** - São os efeitos produzidos nos descendentes da pessoa ou organismo exposto. VEJA efeitos somáticos.

**EFEITOS SOMÁTICOS** - São os efeitos da radiação no corpo da pessoa ou animal exposto.

**ELÉTRON** - Uma das partículas elementares das quais toda matéria é constituída. Ele carrega uma unidade simples de carga negativa igual a  $1.6 \times 10^{-19}$  coulomb e tem a massa de  $9 \times 10^{-31}$  quilogramas.

**ELÉTRON VOLT** - É uma unidade utilizada para expressar energia no estudo de partículas nucleares e suas interações. Ela é igual a variação de energia de um elétron que atravessa uma diferença de potencial de 1 volt.

Abreviação: eV

Múltiplos: keV (mil eV) e MeV (um milhão de eV).

**FATOR DE QUALIDADE (da radiação)** - É um fator usado para expressar o efeito biológico prejudicial dos diferentes tipos de radiações: partículas alfa de materiais radioativos ingeridos têm um fator de qualidade de 20, neutrons de 10 e raios-X, raios gama e elétrons de 1.

**FISSÃO NUCLEAR** - É a quebra de núcleos pesados usualmente em dois fragmentos que se movem rapidamente e que são aproximadamente iguais, acompanhada por neutrons rápidos e raios gama. A fissão pode ser espontânea ou induzida pela absorção de uma partícula ou um fóton de alta energia.

**FUSÃO NUCLEAR** - É uma reação entre dois núcleos leves resultando na produção de núcleos mais pesados acompanhada de liberação de energia.

**GRAY, Gy** - É a unidade de dose absorvida no SI (Sistema Internacional) e equivale a 1 Joule por quilograma.  $1\text{Gy} = 100\text{ rads}$ .

**ÍON** - É um átomo que perdeu ou ganhou um ou mais elétrons orbitais ficando, desta forma, eletricamente carregado.

**IONIZAÇÃO** - É o processo de formação de íons por retirada ou acréscimo de elétrons.

**ISÓTOPOS** - São átomos do mesmo elemento que tem pesos atômicos diferentes devido a diferenças no número de neutrons de cada núcleo. Isótopos tem o mesmo número atômico ( $Z$ ) mas diferente número de massa ( $A$ ).

**MEIA-VIDA** - É o tempo característico para que a atividade de uma substância radioativa decaia à metade do seu valor inicial, isto é, para que a metade dos átomos presentes se desintegre. Meias-vidas variam desde décimos a milhões de segundos até centenas ou milhões de anos, dependendo da estabilidade do núcleo em questão.

**NEUTRINO** - Partícula sem massa e sem carga que é emitida num decaimento beta juntamente com um elétron. (É muito difícil de ser detectado).

**NEUTRON** - É uma partícula elementar com massa de 1 uma (uma unidade de massa atômica), aproximadamente  $1.67 \times 10^{-27}\text{ Kg}$ , que é aproximadamente a mesma massa do próton. Neutrons e prótons formam os núcleos.

**NÚCLEO** - É a parte central de um átomo na qual a carga positiva e aproximadamente toda a massa estão concentradas e em torno da qual estão os elétrons.

**NÚCLEONS** - São prótons ou neutrons, isto é, são as partículas que compõem os núcleos.

**NÚCLEO PAI** - É o precursor imediato de um produto filho. VEJA produto filho.

**NUCLÍDEO** - É cada diferente tipo de átomo caracterizado por seu número de massa, número atômico e estado de energia do seu núcleo.

**NÚMERO ATÔMICO (Z)** - de um elemento, é o número de prótons no núcleo de seus átomos.

**NÚMERO DE MASSA** - É o número de prótons e neutrons do núcleo de um átomo.

**PARTÍCULA ALFA** - É uma partícula carregada de carga 2 e massa de 4 uma. É emitida no decaimento de vários núcleos pesados e é idêntica ao núcleo do átomo de hélio, isto é, é constituída de dois prótons e dois neutrons.

**PARTÍCULA BETA** - É um elétron ou pósitron emitido de um núcleo em certos tipos de desintegrações radioativas (decaimentos beta).

**PESO ATÔMICO** - É a massa média dos átomos de um elemento em seu estado isotópico natural em relação aos outros átomos tomando o carbono 12 como base.

**PÓSITRON** - É um elétron com carga positiva.

**PRODUTO DO DECAIMENTO (OU PRODUTO FILHO)** - É o nuclídeo imediatamente resultante do decaimento radioativo de um núcleo pai ou nuclídeo precursor. Se for radioativo, tornar-se-á, com o passar do tempo, um núcleo pai.

**PRÓTON** - É uma partícula elementar estável com uma carga de  $1.6 \times 10^{-19}$  Coulomb e uma massa de  $1.67 \times 10^{-27}$  Kg (1 uma) que se encontra em todos nuclídeos. O número de prótons em um núcleo de qualquer elemento é o número atômico Z do elemento.

**RAD** - É uma unidade de dose absorvida de radiação equivalente a 0.01 joules por Kg. Atualmente usa-se o gray (Gy) - SI - que é igual a 100 rads. VEJA roentgen, rem e Gray.

**RADIAÇÃO** - São ondas eletromagnéticas, especialmente (no contexto da energia nuclear) raios-X ou raios gama, ou partículas rápidas (elétrons, partículas alfa, neutrons, prótons), isto é, são todos os modos pelos quais um átomo libera energia.

**RADIAÇÃO DE FUNDO** - É a soma das intensidades das radiações provenientes das diversas fontes naturais e artificiais.

**RADIOATIVIDADE** - É a propriedade de vários núcleos atômicos que se desintegram espontaneamente com perda de energia através da emissão de uma partícula carregada e/ou radiação gama.

**RADIOISÓTOPO** - É o elemento radioativo natural.

**RADIOLOGIA** - É o ramo da medicina especializado nos usos das radiações ionizantes para diagnósticos médicos e no estudo de seus efeitos.

**RADIONUCLÍDEO** - É o nuclídeo radioativo.

**RADIOTERAPIA** - Tratamento de doenças pelo uso de radiação ionizante.

**RADIOTOXIDADEZ** - É uma medida do dano provocado por uma substância radioativa num corpo ou órgão específico.

**RADÔNIO** - É um gás inerte radioativo de origem natural.

**RAIOS GAMA** - São radiações eletromagnéticas de ondas muito curtas, de origem nuclear, emitidas tanto durante transições como na fissão e na desintegração radioativa.

**RAIOS-X** - São radiações eletromagnéticas que possuem comprimento de onda muito menor (isto é, energia muito maior) que a luz visível. Raios-X são produzidos por transições de elétrons nas órbitas atômicas, são semelhantes aos raios gama mas possuem, em geral, menor energia.

**REAÇÃO EM CADEIA** - É um processo que, quando iniciado, proporciona condições para sua continuidade. Na reação em cadeia da fissão nuclear, neutrons causam a fissão nuclear em átomos de urânio ou plutônio produzindo mais neutrons, os quais causam futuras fissões, e assim sucessivamente.

**REATOR NUCLEAR** - É uma estrutura ou parte de uma usina na qual um neutron induz uma reação em cadeia de fissão nuclear que pode ser mantida, controlada e usada. Frequentemente é chamado somente de reator.

**REM** - Roentgen Equivalent Man: é a unidade de dose absorvida efetiva de radiação por tecido (tecido biológico), sendo o produto entre a dose em rads e o fator de qualidade. Em unidades do SI usa-se o sievert (Sv) que é igual a 100 rem.

**ROENTGEN** - É uma unidade de exposição à radiação baseada na capacidade de causar ionização. Ela é igual a  $2.58 \times 10^{-4}$  Coulomb por Kg no ar. Geralmente uma exposição de 1 roentgen resulta numa dose absorvida no tecido biológico de cerca de 1 rad.

**SI (Sistema Internacional de Unidades)** - É um sistema prático, de unidades de medida desenvolvido para unificar e facilitar o uso internacional destas unidades.

**SIEVERT (Sv)** - É a unidade de dose equivalente de radiação no sistema internacional; é produto entre a dose absorvida em grays e o fator de qualidade.  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ .

**TAXA DE DOSAGEM** - É a dose absorvida em unidade de tempo, em geral, rems por ano. Também usada como o nível da intensidade da radiação em um dado ponto, em geral, milirads por hora.

**TRANSFERÊNCIA LINEAR DE ENERGIA** - É taxa com que uma partícula carregada ou onda eletromagnética perde energia quando passa através da matéria. Ela é alta para partículas alfa e baixa para raios gama.

**UNIDADE DE MASSA ATÔMICA (UMA)** - É  $1/12$  da massa do átomo de carbono. Aproximadamente a massa de um próton ou neutron.

## BIBLIOGRAFIA

### Lista classificada

#### - Acidente de Goiânia

ANDERSON, Ian. "Isotopes From Machine Imperil Brazilians". *New Scientist* 15: 19-20. Outubro, 1987.

CRUZ, F. F. de Souza. "Radioatividade e o Acidente de Goiânia". Florianópolis. *Cad. Cat. Ens. Fis.* 4 (3): 164-169. Dezembro, 1987.

\_\_\_\_\_ "Atencion: Tres Pétalos. Ensenanzas de una Tragédia en Brasil". *Tiempos Nuevos* 9 (88): 26-27. 1988.

\_\_\_\_\_ "Autos de Goiânia". *Suplemento da Ciência Hoje* 7 (40). Março, 1988.

#### - Hiroxima e Nagasaki

ROTLAT, Joseph. "A Tale Of Two Cities". *New Scientist* 7: 46-50. Janeiro, 1988.

#### - Proteção radiológica

ERRERA, Maurice. "Les Effets Des Radiations Nucléaires à Faibles Doses". *La Recherche* 168 (16): 958-968. Juillet-aout, 1985.

FREIRE-MAIA, Newton. "Radiogenética Humana". São Paulo. Edgard Blucher/Editora da USP, 1972.

MARTIN, A. e HARBISON, S. "An Introduction to Radiation Protection". Londres. Chapman and Hall. 2ª edição, 1972.

OKUNO, Emiko. "Radiação: Efeitos, riscos e benefícios". São Paulo. Harbra, 1988.

PINTO, Ábio. "Proteção Radiológica: Alguns Aspectos Técnicos e Legais". Florianópolis. *Cad. Cat. Ens. Fis.*, 4 (1): 37-43, abr. 1987.

\_\_\_\_\_ "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection/Annals of the ICRP". Volume 1. Número 3. 1977.

- Textos para 1º grau

BISHOP, Keith. "Science For Life". Londres. Collins Educational, 1984.

BOROVOL, A. "Como se registram las partículas". Moscou. Editora Mir, 1981.

FLIOROV, G.N e ILHINOV, A.S. "À procura dos elementos". Moscou. Editora Mir, 1985.

HAWKES, Nigel. "Energia Nuclear". Lisboa/São Paulo. Aladdin Books Ltd. e Verbo, 1981.

- Textos para 2º grau

HEY, T. e WALTERS, P. "The Quantum Universe". Austrália. Scotprint Ltd., 1987.

OKUNO, Emiko. "Radiação: Efeitos, riscos e benefícios". São Paulo. Harbra, 1988.

PLANT, Robert. "A School Investigation Into Chernobyl Fallout". Physics Education 23. 1988.

ROSER, F. X. e CULLEN, T. L. "On The Intensity Levels Of Natural Radioactivity in Certain Selected Areas In Brazil". Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Bibliografia e Documentação, 1958.

RUIPEREZ, L. G. "Radiactividad Y Medio Ambiente". Oviedo. Universidad de Oviedo - Servicio de Publicaciones, 1978.

SANTOS, E. e VILLANUEVA, J. R. "El Cancer (Libros de Investigacion e Ciencia)". Espanha. Prensa Científica, S. A., 1985.

- Textos para 3º grau

CORK, James M. "Radioactivity and Nuclear Physics". Nova York. D. Van Nostrand Company, 1950.

MacDOUGALL, J. D. "Fission-Track Dating". Scientific American 6 (235): 14-122. Dez/76.

OKUNO E OUTROS. "Física para Ciências Biológicas e Biomédicas". São Paulo. Harbra, 1982.

- Assuntos diversos

BROWN, Harrison. "The Age Of The Solar System". Scientific American 4 (196): 81-94. Abril, 1957.

DEFFEYES e MacGREGOR. "World Uranium Resources". Scientific American 1 (242): 50-60. Jan/80.

MacGEACHY, Frank. "Radioactive Decay - An Analog". The Physics Teacher: 28-29. Janeiro, 1988.

SEABORG e BLOOM. "The Synthetic Elements: IV". Scientific American 4 (220): 57-67. abril, 1969.

SHIROKOV, Y. M. e YUDIN, N. P. "Nuclear Physics - Volume 2". Moscou. Mir Publishers, 1982.

\_\_\_\_\_ "Safe Handling of Radionuclides". Viena. International Atomic Energy Agency, 1973

## Lista geral

- ANDERSON, Ian. "Isotopes From Machine Imperil Brazilians". *New Scientist* 15: 19-20. Outubro, 1987.
- BISHOP, Keith. "Science For Life". Londres. Collins Educational, 1984.
- BOROVOL, A. "Como se registram las particulas". Moscou. Editora Mir, 1981.
- BROWN, Harrison. "The Age Of The Solar System". *Scientific American* 4 (196): 81-94. Abril, 1957.
- CORK, James M. "Radioactivity and Nuclear Physics". Nova York. D. Van Nostrand Company, 1950.
- CRUZ, F. F. de Souza. "Radioatividade e o Acidente de Goiânia". Florianópolis. *Cad. Cat. Ens. Fis.* 4 (3): 164-169, dez. 1987.
- DEFEYES e MacGREGOR. "World Uranium Resources". *Scientific American* 1 (242): 50-60. Jan/80.
- ERRERA, Maurice. "Les Effets Des Radiations Nucléaires à Faibles Doses". *La Recherche* 168 (16): 958-968. Juillet-aout, 1985.
- FLIOROV, G.N e ILHINOV, A.S. "À procura dos elementos". Moscou. Editora Mir, 1985.
- FREIRE-MAIA, Newton. "Radiogenética Humana". São Paulo. Edgard Blucher/Editora da USP, 1972.
- HAWKES, Nigel. "Energia Nuclear". Lisboa/São Paulo. Aladdin Books Ltd. e Verbo, 1981.
- HEY, T. e WALTERS, P. "The Quantum Universe". Austrália. Scotprint Ltd., 1987.
- MacDOUGALL, J. D. "Fission-Track Dating". *Scientific American* 6 (235): 14-122. Dez/76.
- MacGEACHY, Frank. "Radioactive Decay - An Analog". *The Physics Teacher*: 28-29. Janeiro, 1988.
- MARTIN, A. e HARBISON, S. "An Introduction to Radiation Protection". Londres. Chapman and Hall. 2ª edição, 1972.

- OKUNO, Emiko. "Radiação: Efeitos, riscos e benefícios". São Paulo. Harbra, 1988.
- OKUNO E OUTROS. "Física para Ciências Biológicas e Biomédicas". São Paulo. Harbra, 1982.
- PINTO, Ábio. "Proteção Radiológica: Alguns Aspectos Técnicos e Legais". Florianópolis. Cad. Cat. Ens. Fis., 4 (1): 37-43, abr. 1987.
- PLANT, Robert. "A School Investigation Into Chernobyl Fallout". Physics Education 23. 1988.
- ROSER, F. X. e CULLEN, T. L. "On The Intensity Levels Of Natural Radioactivity in Certain Selected Areas In Brazil". Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Bibliografia e Documentação, 1958.
- ROTBLAT, Joseph. "A Tale Of Two Cities". New Scientist 7: 46-50. Janeiro, 1988.
- RUIPEREZ, L. G. "Radiactividad Y Medio Ambiente". Oviedo. Universidad de Oviedo - Servicio de Publicaciones, 1978.
- SANTOS, E. e VILLANUEVA, J. R. "El Cancer (Libros de Investigacion e Ciencia)". Espanha. Prensa Científica, S. A., 1985.
- SEABORG e BLOOM. "The Synthetic Elements: IV". Scientific American 4 (220): 57-67. abril, 1969.
- SHIROKOV, Y. M. e YUDIN, N. P. "Nuclear Physics - Volume 2". Moscou. Mir Publishers, 1982.
- \_\_\_\_\_ "Atencion: Tres Pétalos. Ensenanzas de una Tragédia en Brasil". Tiempos Nuevos 9 (88): 26-27. 1988.
- \_\_\_\_\_ "Autos de Goiânia". Suplemento da Ciência Hoje 7 (40). Março, 1988.
- \_\_\_\_\_ "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection/Annals of the ICRP". Volume 1. Número 3. 1977.
- \_\_\_\_\_ "Safe Handling of Radionuclides". Viena. International Atomic Energy Agency, 1973

GEF - Grupo de Ensino do IFUFRGS  
PAS - Programa de Atualização em Serviço  
para Professores de Física.

Série : Textos de Apoio ao Professor de Física

- n<sup>o</sup> 1: Um Programa de Atividades sobre Tópicos de Física  
para a 8<sup>a</sup> Série do 1<sup>o</sup> Grau.  
Axt, R., Steffani, M. H. e Guimarães, V. H., 1990.
- n<sup>o</sup> 2: Radioatividade.  
Brückmann, M. E. e Fries, S. G., 1991.
- n<sup>o</sup> 3: Mapas Conceituais no Ensino da Física.  
Moreira, M. A. (no prelo).