

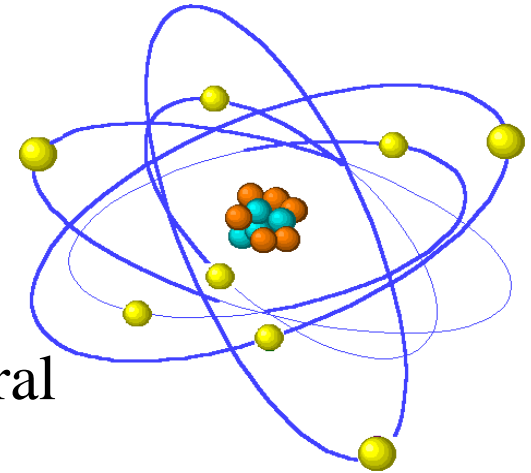
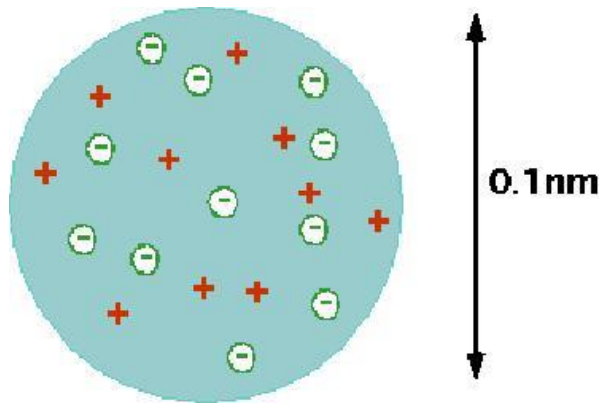
# F-106 Fundamentos de Física para Biologia

## O Átomo

# A teoria atômica da matéria

Até a descoberta dos elétrons (Thomson, 1897): átomo indivisível

1898 a 1911 (Rutherford): modelo do “pudim com ameixas”  
(Thomson, 1898):



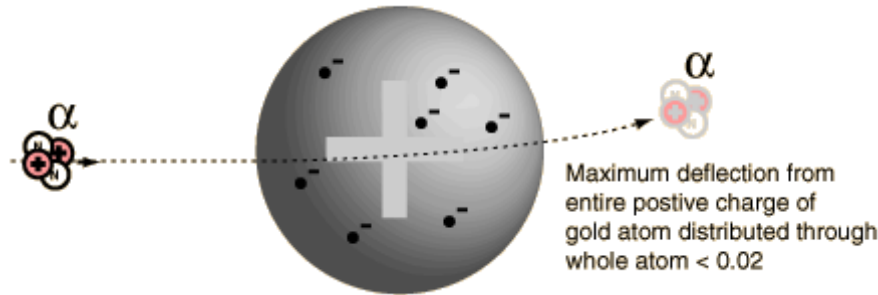
1911: Experiência de Rutherford: núcleo central

1913: o Átomo de Bohr

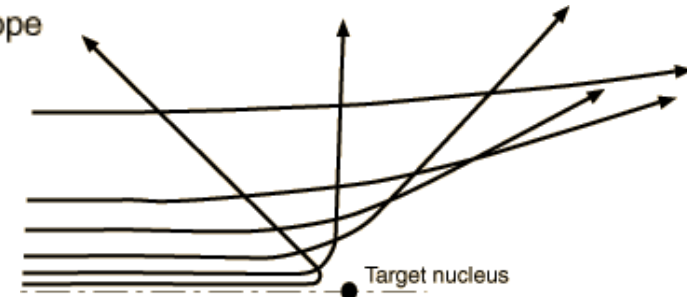
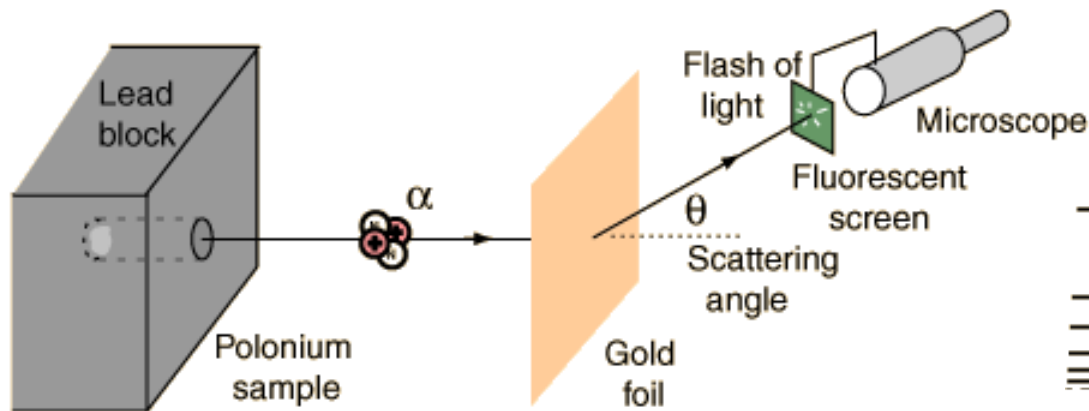
# A descoberta do núcleo atômico

## Modelo de Thomson (1910)

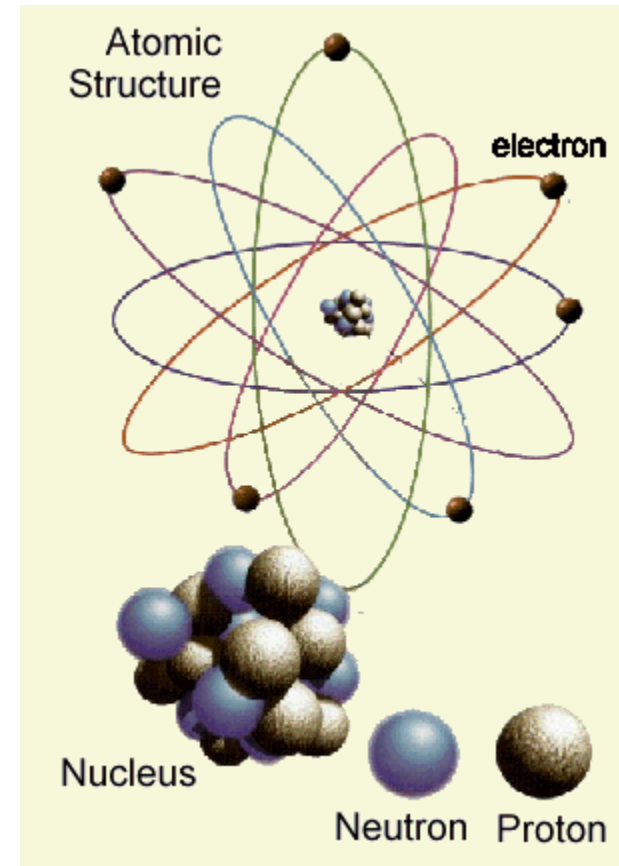
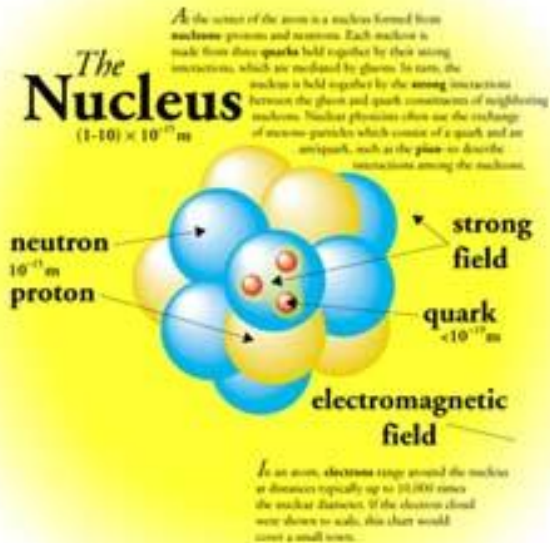
Modelo de Thomson: previa deflexão pequena das partículas  $\alpha$



Ernest Rutherford  
(1871 – 1937)  
Nobel em 1908



# A descoberta do núcleo atômico



Rutherford então propôs um modelo no qual toda a carga positiva desses átomos, que comportaria praticamente toda a sua massa, estaria concentrada numa pequena região do seu centro, chamada **núcleo**.

# Algumas propriedades dos núcleos

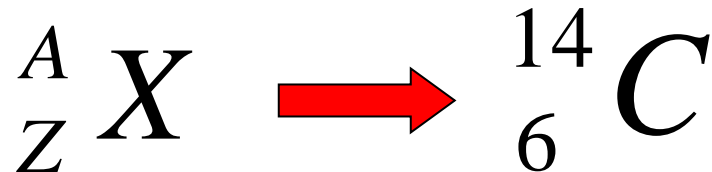
**Número Atômico (Z)** – número de prótons do núcleo.

**Número de Nêutrons (N)** – número de nêutrons do núcleo.

**Número de Massa (A)** – soma do número do número de prótons e nêutrons:

$$A = Z + N$$

**Símbolo:**



**Cargas e massas:**

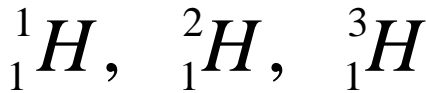
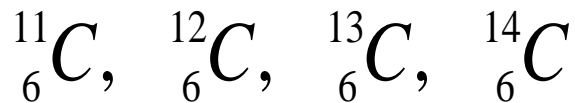
Prótons – carga positiva	$M_p = 1,6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Nêutron – sem carga	$M_n = 1,6749 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Elétron – carga negativa	$M_e = 9,1093 \times 10^{-31} \text{ kg}$

# Algumas propriedades dos núcleos

## Nomenclatura:

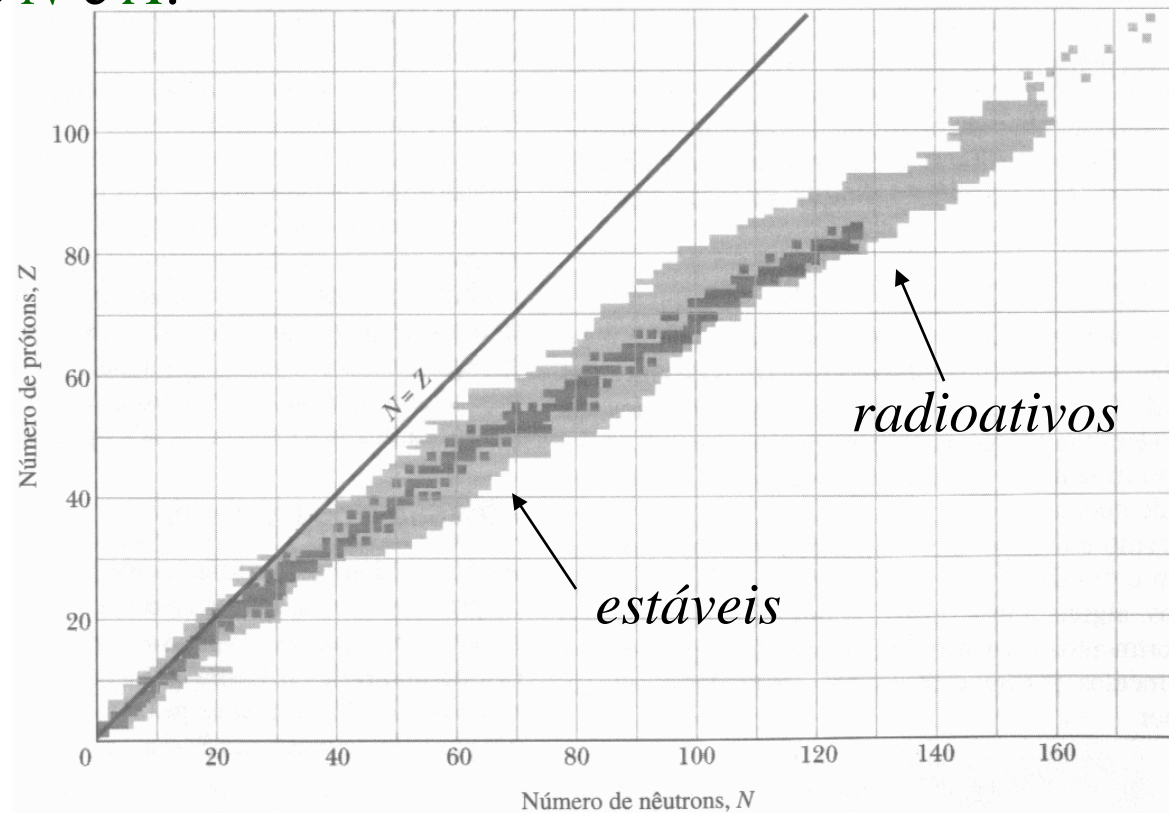
**Isótopos** – Os isótopos de um elemento tem o mesmo valor  $Z$ , mas diferentes números de  $N$  e  $A$ .

Exemplos:



*deutério*

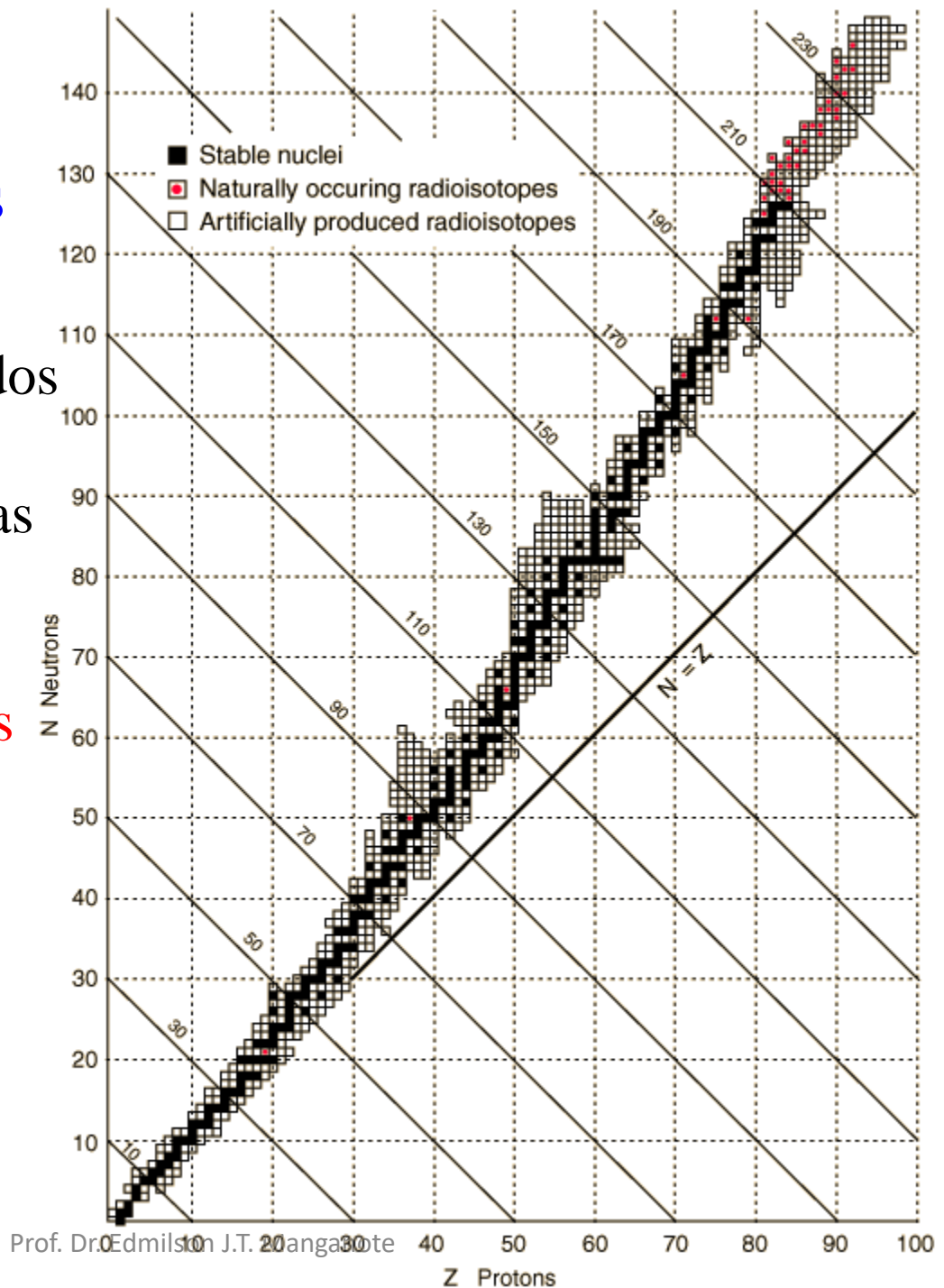
*trítio*



Carta de Nuclídeos

## Carta de Nuclídeos

Átomos neutros de todos os **isótopos** do mesmo elemento apresentam as **mesmas propriedades químicas**, porém **propriedades nucleares bastante diferentes**. Assim, é conveniente definir os **nuclídeos**.

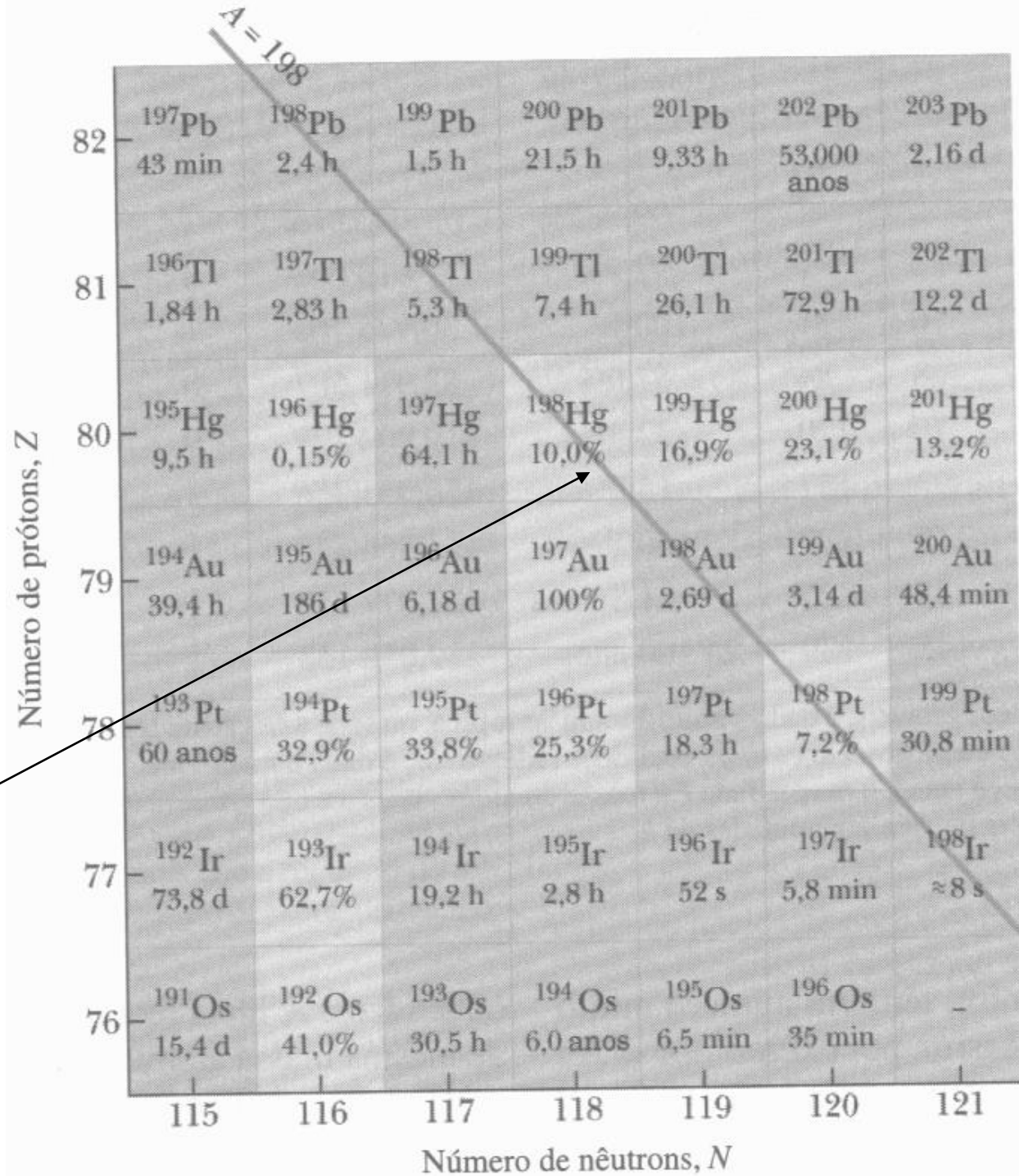




Vista ampliada da  
carta de **nuclídeos**:

$$A = N + Z = \text{const.}$$

*Isóbaros*





# Raio do núcleo

A unidade útil é o *fermi*

$$1 \text{ fermi (F)} = 1 \text{ fentômetro (fm)} = 10^{-15} \text{ m}$$

O raio do núcleo pode ser estimado por

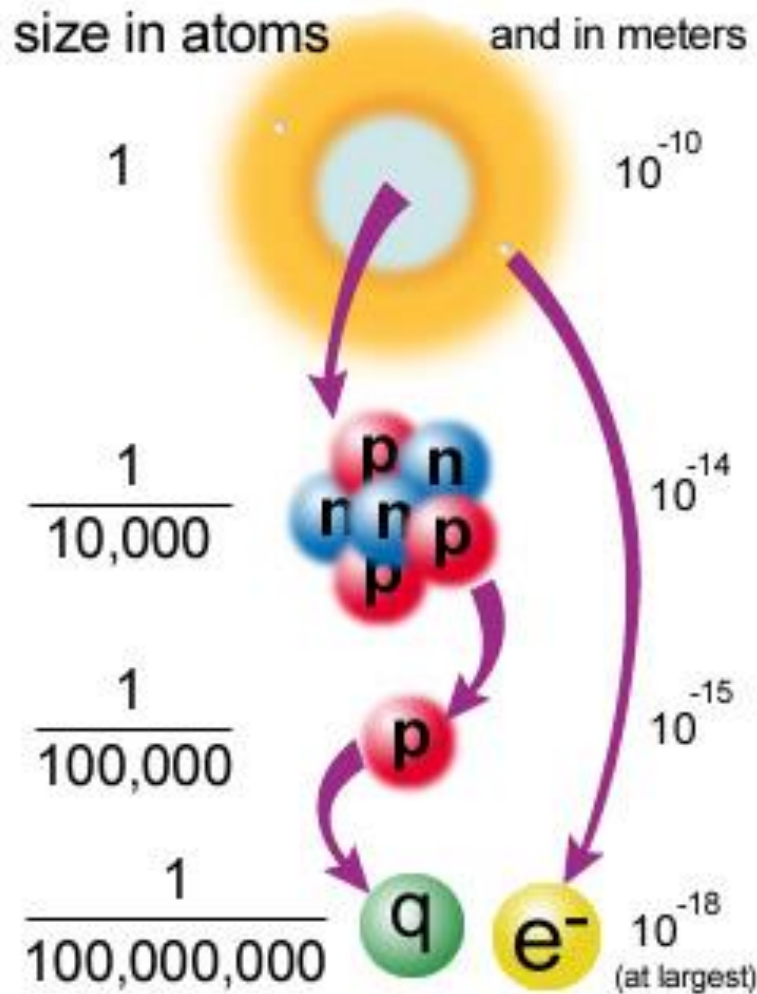
$$r = r_0 A^{1/3}$$

Onde  $A$  é o número de massa e  $r_0 \approx 1,2 \text{ fm}$

Compare:

$$1 \text{ angstrom (Å)} = 10^{-10} \text{ m ou } 1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$$

# As escalas dos átomos e núcleos



# A massa dos núcleos e núcleons

A unidade de massa atômica,  $u$ , é definida de modo que a massa atômica do isótopo  $^{12}\text{C}$  seja exatamente  $12u$ . Assim,

tem-se: 
$$1u = 1,661 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Utilizando a relação  $E = mc^2$  verifica-se que  $1u$  em repouso corresponde a uma energia de  $931,5 \text{ MeV}$ .

A massa de prótons, nêutrons e elétrons isolados também podem ser expressas em termos de  $u$ :

TABELA 30.1			
Massas do Próton, do Nêutron e do Elétron em Várias Unidades			
Partícula	Massa		
	kg	u	MeV/c <sup>2</sup>
Próton	$1,6726 \times 10^{-27}$	1,007 276	938,28
Nêutron	$1,6750 \times 10^{-27}$	1,008 665	939,57
Elétron	$9,109 \times 10^{-31}$	$5,486 \times 10^{-4}$	0,511

# Estabilidade nuclear

Os núcleos são estáveis devido à existência da *força nuclear*. Trata-se de uma *força atrativa intensa* (superior à *força Coulombiana*) *de curto alcance* (da ordem de *2 fm*), que age sobre todas as partículas nucleares.

Atualmente acredita-se que a força nuclear seja uma manifestação da *interação forte*, que mantém os *quarks* unidos para formarem os *prótons* e os *nêutrons*.

# Matéria Nuclear

Nuclídeos são formados por prótons e nêutrons.  
Qual a densidade da matéria nuclear?

$$\rho = \frac{Am}{\left(\frac{4}{3}\right)\pi r^3}$$

Substituindo  $r$  pelo o raio nuclear  $r_0$   
( $A = 1$ , átomo de hidrogênio)

$$\rho = \frac{1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}}{\left(\frac{4}{3}\right)\pi (1,2 \times 10^{-15} \text{ m})^3} \approx 2 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

O resultado vale para qualquer núcleo.

Isto é  $2 \times 10^{14}$  maior que a densidade da água!!!!

# Energia de ligação dos núcleos

A massa  $M$  de um núcleo é menor que a soma das massas isoladas,  $m_i$ , das partículas que o compõem.

A energia de ligação de um núcleo é dada por:

$$\Delta E_{el} = \sum_i (m_i c^2) - M c^2$$

Quantidade de energia que deve ser fornecida ao sistema (núcleo) para separá-lo em todas as suas partículas constituintes, que apresentem massas de repouso isoladas de valor  $m_i$ .

*Assim, ela é uma medida da **estabilidade do núcleo**.*

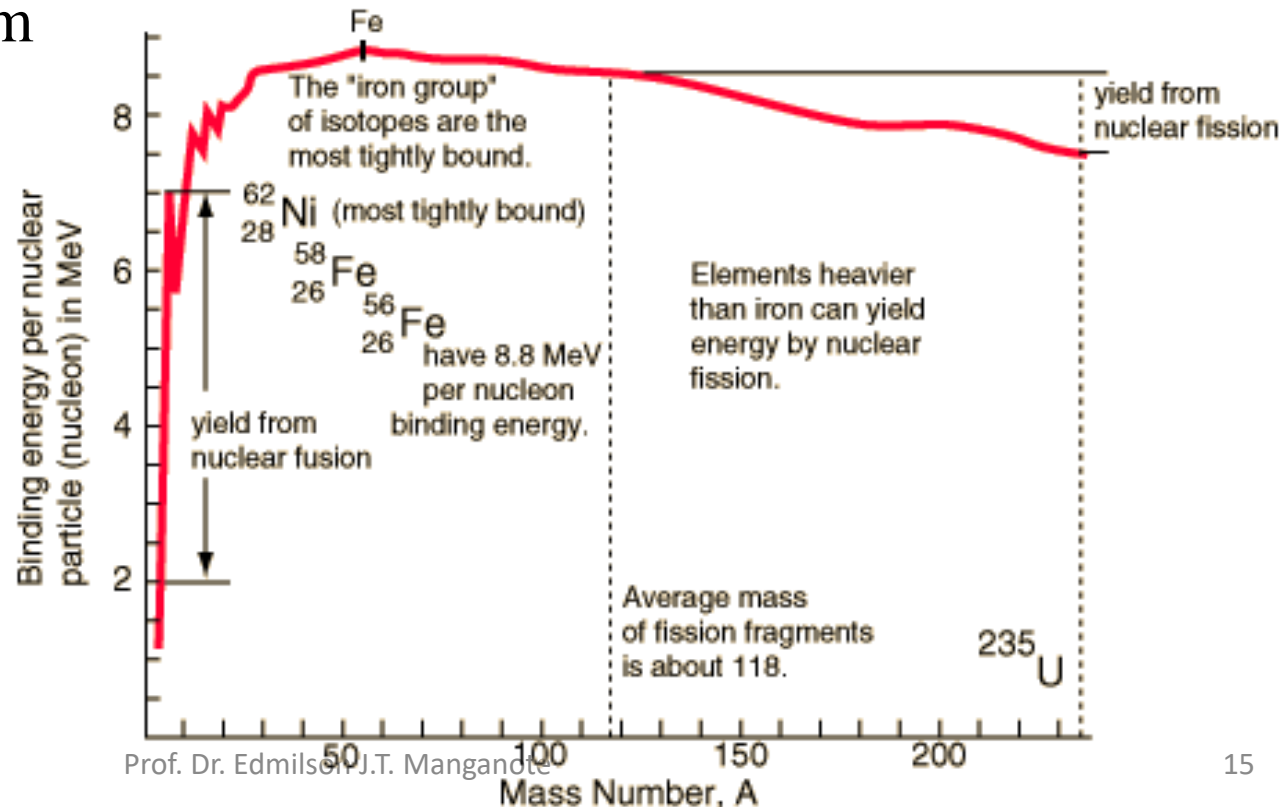


# Energia de ligação dos núcleos

Uma medida ainda melhor é a energia de ligação por nucleon (próton ou nêutron):

$$\Delta E_{eln} = \frac{\Delta E_{el}}{A}$$

Esta é a energia média necessária para arrancar um nucleon do núcleo.



# Exemplo

Energia de ligação do  $^{120}\text{Sn}$  (119,902 u):

O  $^{120}\text{Sn}$  tem  $Z = 50$  e  $N = 70$

(núcleo de  $^{120}\text{Sn}$ )  $\rightarrow$  50 prótons + 70 nêutrons

ou

(átomo de  $^{120}\text{Sn}$ )  $\rightarrow$  50 átomos de H + 70 nêutrons

$$\Delta E_{el} = \sum_i (m_i c^2) - M c^2$$

$$\Delta E_{el} = 50 m_H c^2 + 70 m_n c^2 - M_{\text{Sn}} c^2$$

$$\Delta E_{el} = [50 (1,0078252) + 70 (1,008644) - 119,902] c^2$$

$$\Delta E_{el} = 1,095553 c^2 = 1020,5 \text{ MeV} \quad \Delta E_{eln} = 8,50 \text{ MeV/núcleon}$$

# O $Q$ de uma reação nuclear

A energia  $Q$  (ou de decaimento) de uma reação envolvendo produtos nucleares iniciais e finais é o **negativo da energia de ligação**

$$\Delta E_{el} = -Q$$

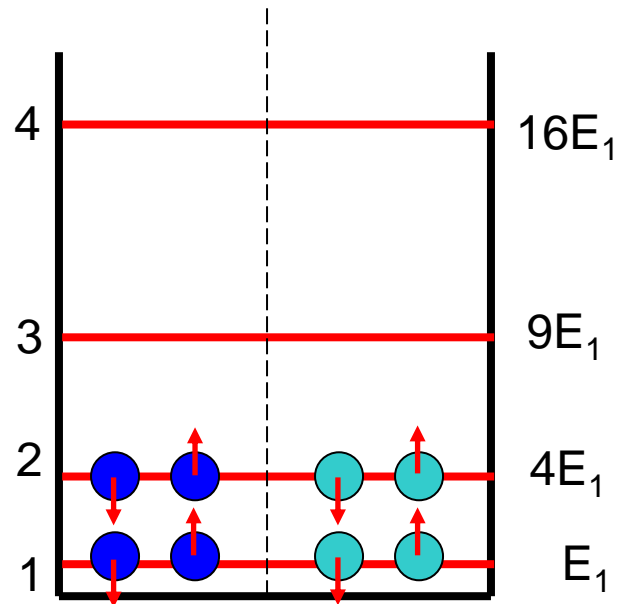
ou

$$Q = -\Delta m c^2 = (m_i - m_f) c^2$$

Que pode ser **endotérmica** ( $Q < 0$ ) ou **exotérmica** ( $Q > 0$ )

# Níveis de energia dos núcleos

A energia dos núcleos, como a dos átomos, é quantizada. Quando um núcleo sofre uma transição para um estado de menor energia geralmente emite um fóton na *região gama* do espectro eletromagnético.



Quatro nêutrons e quatro prótons numa caixa unidimensional

# Decaimento radioativo

A maioria dos núcleos conhecidos possui isótopos instáveis e portanto *radioativos*. Estes núcleos emitem espontaneamente uma ou mais partículas, transformando-se em um outro *nuclídeo*.

A taxa na qual ocorre um processo de decaimento em uma amostra radioativa é proporcional ao número de nuclídeos radioativos presentes na amostra

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

# Dcaimento radioativo

Integrando de  $t = 0$  (quando tem-se  $N_0$  núcleos radioativos não desintegrados) a  $t$  (quando restam  $N$  núcleos):

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad \Rightarrow \quad \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t$$

Logo,

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



# Dcaimento radioativo

Pode-se também determinar diretamente a evolução da taxa de decaimento  $R = - dN/dt$ . Derivando a equação anterior em relação ao tempo:

$$R = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

Logo, pode-se definir:

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

$$R_0 = \lambda N_0$$

# Decaimento radioativo

Frequentemente chama-se de *atividade* a taxa de decaimento total de uma amostra. A unidade para a atividade no SI é o *becquerel*:

$$1 \text{ becquerel} = 1 \text{ Bq} = 1 \text{ decaimento por segundo}$$

Eventualmente utiliza-se também o *curie (Ci)*, definido por:

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

# Dcaimento radioativo

## Meia-Vida

Tempo necessário para que  $N$  e  $R$  caiam a metade do valor inicial:

$$\frac{1}{2} R_0 = R_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

Tomando o *logaritmo natural* tem-se:

$$T_{1/2} = \ln(2) / \lambda$$

# Dcaimento radioativo

## Vida média

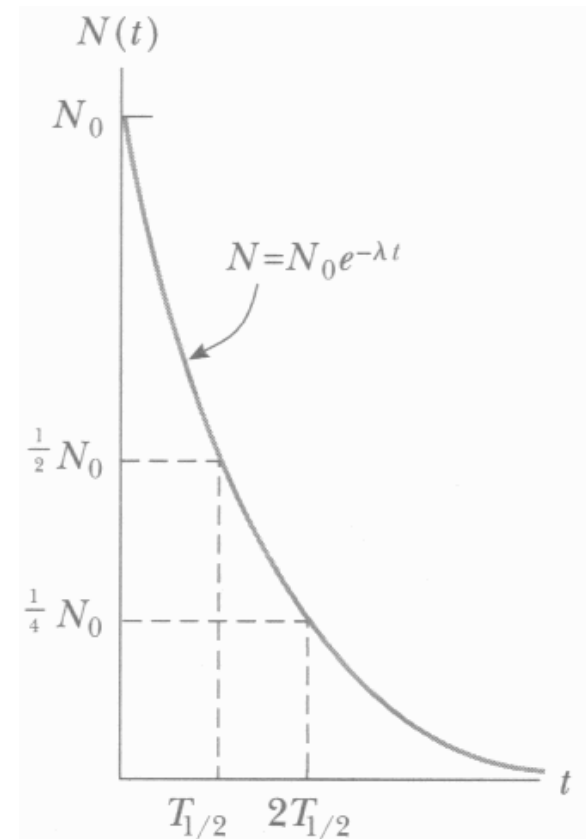
Tempo necessário para que  $N$  e  $R$  caiam a  $1/e$  do valor inicial:

$$\tau = 1/\lambda$$

Portanto tem-se também a relação:

$$T_{1/2} = \ln(2)\tau \approx 0,693\tau$$

Não há nenhuma maneira de se determinar qual nuclídeo decairá num dado instante. Pode-se apenas determinar a probabilidade deste decaimento ocorrer e, conseqüentemente, as taxas de decaimento acima.

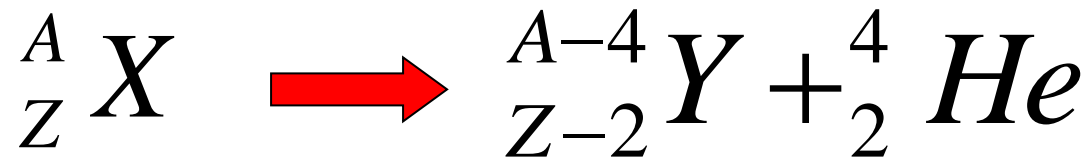


# Processos de decaimento radioativo

Os núcleos radioativos desintegram-se espontaneamente pelos decaimentos *alfa* e *beta*.

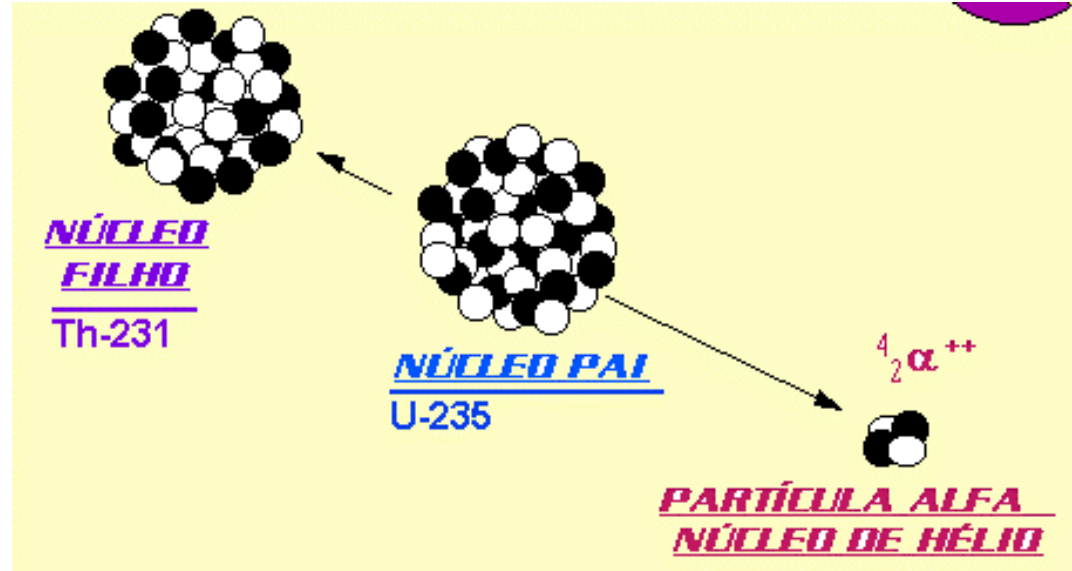
## a) O decaimento alfa

No decaimento alfa o núcleo  $X$ , emite uma partícula alfa (núcleo de  ${}^4\text{He}$ , dois prótons e dois nêutrons) transformando-se no núcleo:



# Processos de decaimento radioativo

Dentre as radiações ionizantes, as partículas alfa são as mais pesadas e de maior carga e por isso elas são menos penetrantes

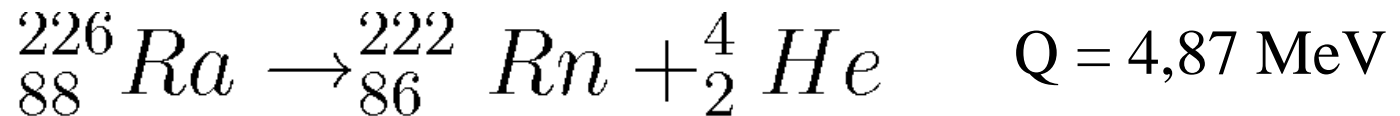
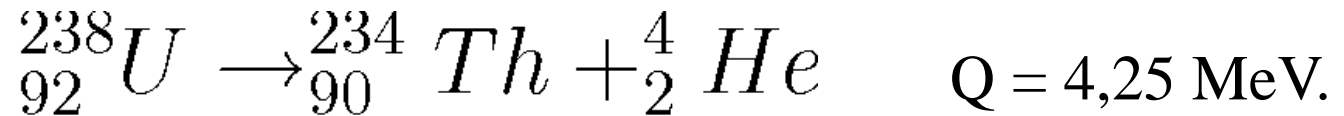
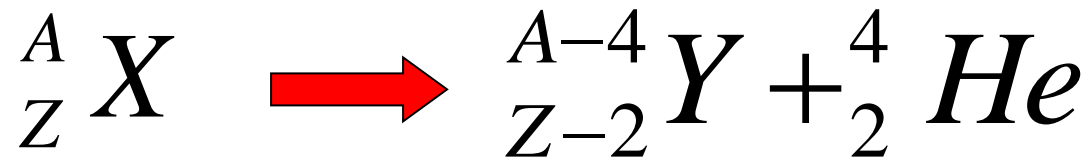


A partícula alfa originada fora do corpo do indivíduo não oferece perigo à saúde humana. Porém, quando emitida internamente ao corpo do indivíduo depositará sua energia em uma pequena área, produzindo grandes danos nesta área.



# Processos de decaimento radioativo

Exemplos:



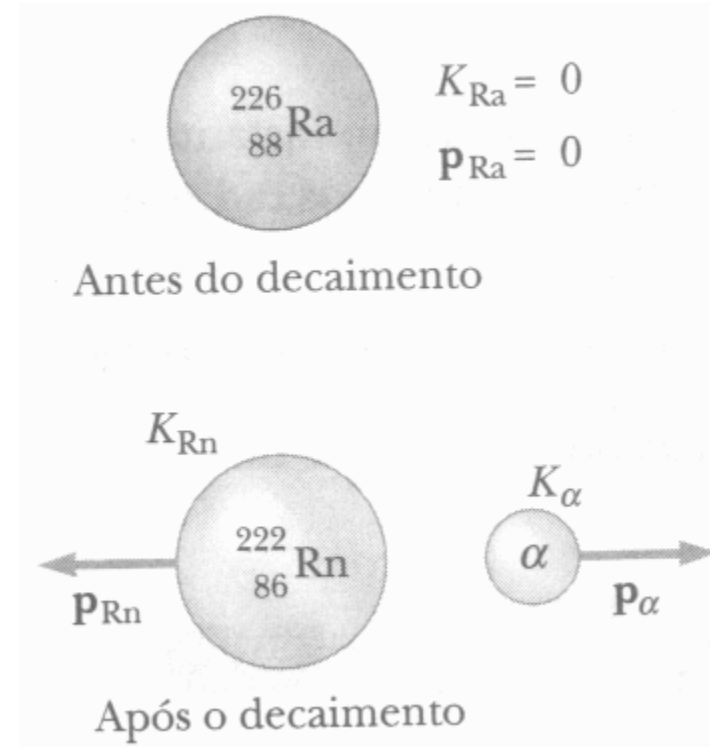
# Processos de decaimento radioativo

O **decaimento alfa** pode ocorrer espontaneamente porque o núcleo pai, X, apresenta uma energia de repouso (massa) maior que a soma das energias de repouso (massas) do núcleo filho, Y, e da partícula  $\alpha$ . A energia de desintegração é dada por:

$$Q = (M_X - M_Y - M_\alpha)c^2$$

Esta energia Q corresponde a **diminuição da energia de ligação** do sistema e aparece como **energia cinética** do núcleo filho e da partícula  $\alpha$ .

A **partícula  $\alpha$** , por ser mais leve, carregará quase toda a energia cinética.



# Processos de decaimento radioativo

## O mecanismo do decaimento alfa

A meia vida do  $^{238}\text{U}$  é de  $4,5 \times 10^9$  anos. Se o processo de decaimento é “energeticamente favorável” porque os núcleos não decaem todos rapidamente?

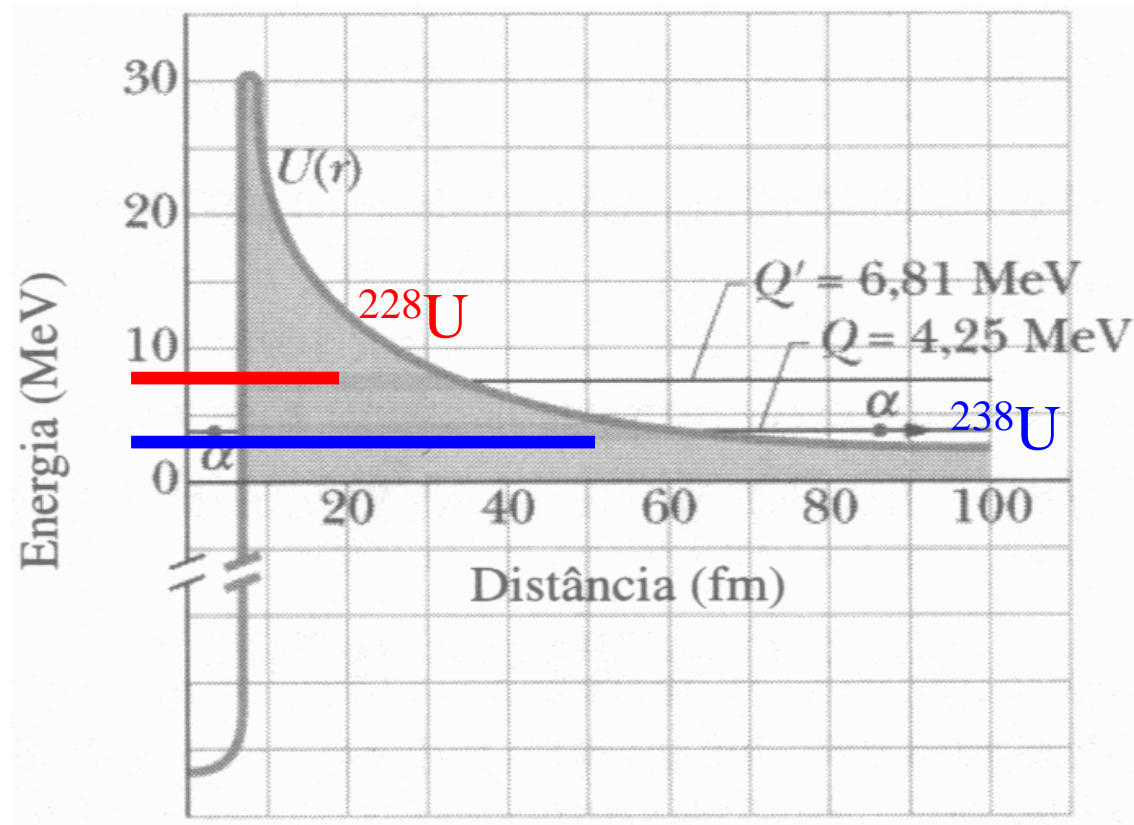
O processo de decaimento  $\alpha$  foi explicado em 1928 por Gamow, Gurney e Condon.

No modelo considera-se a partícula  $\alpha$  previamente existindo no interior do núcleo.

A partícula  $\alpha$  só é capaz de atravessar a barreira de potencial gerada pelo núcleo através de um processo quântico de tunelamento, que para diferenças apreciáveis de energia é bastante improvável.

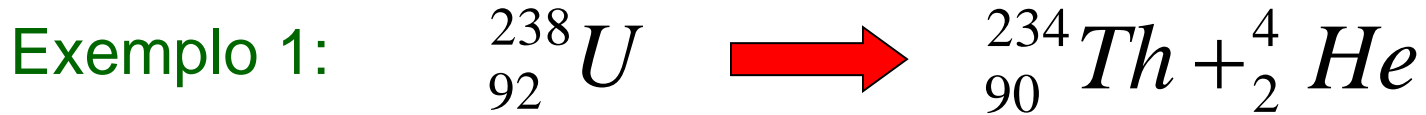
## O mecanismo do decaimento alfa

O isótopo  $^{228}\text{U}$ , que apresenta uma  $Q = 6,81$  MeV, apresenta uma meia vida de apenas 9,1 minutos.



Barreiras de potencial semelhantes são encontradas também em reações químicas. Neste caso elas são geradas pela repulsão eletrônica, ao invés da atração entre os nucleons. Mas da mesma forma representam a existência de “estados intermediários” energeticamente proibitivos. Normalmente elas são superadas pela elevação da temperatura no sistema, não sendo necessário “esperar” pelos processos de tunelamento.

# Processos de decaimento radioativo



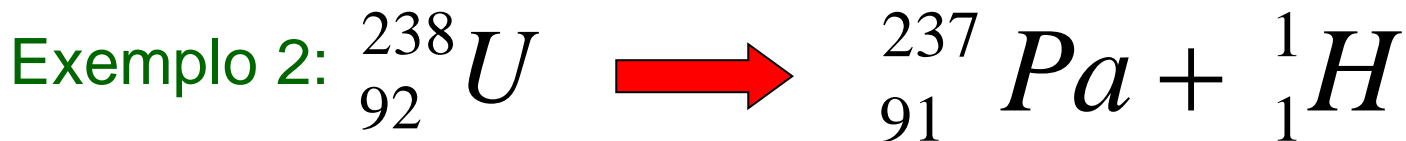
A carga e o número de núcleons se conserva.

A energia liberada na desintegração é

$$Q = M_i c^2 - M_f c^2$$

$$Q = [238,050 - (234,043 + 4,002)] c^2$$

$$Q = 4,25 \text{ MeV}$$



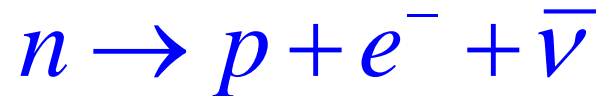
$$Q = -7,68 \text{ MeV} \quad \text{proibida}$$

# Processos de decaimento radioativo

## b) O decaimento beta

O decaimento beta ocorre em núcleos que têm excesso, ou falta, de nêutrons para adquirir estabilidade.

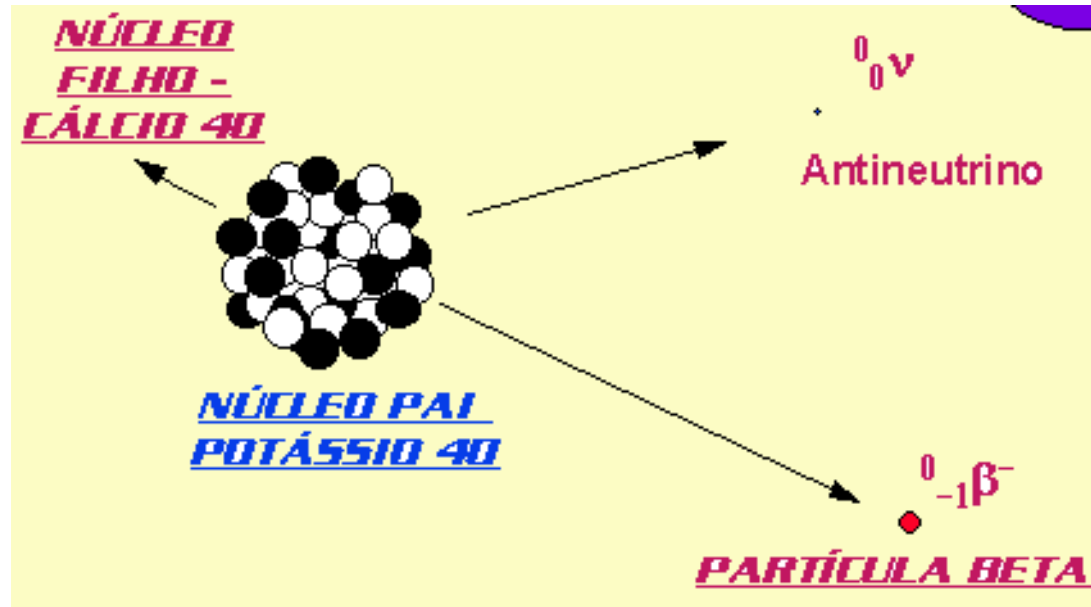
No decaimento *beta menos* um dos *nêutrons* no interior do núcleo emite um *elétron* e um *anti-neutrino*, transformando-se em um *próton*:





# Processos de decaimento radioativo

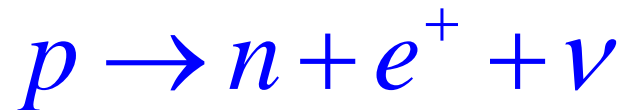
As partículas beta podem penetrar vários milímetros na pele, mas não penetram uma distância suficiente para alcançar os órgãos mais internos do corpo humano.



As partículas beta apresentam um risco maior quando emitidas por materiais radioativos depositados internamente ao corpo ou quando irradiam diretamente a pele e o cristalino dos olhos.

# Processos de decaimento radioativo

No decaimento *beta mais* um dos prótons no interior do núcleo emite um pósitron (anti-elétron) e um neutrino, transformando-se em um nêutron:



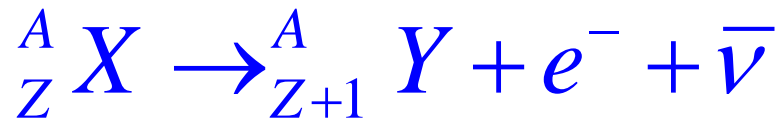
O neutrino (*pequeno nêutron*) foi introduzido para dar conta conservação de *momento angular* e *linear* nas reações acima.

O neutrino,  $\nu$ , apresenta carga nula e massa, possivelmente, também nula (menor que  $7\text{eV}/c^2$ ).

Além disso apresentam uma interação muito fraca com a matéria (um *livre caminho médio* que pode atingir *milhares de anos luz*). Foram detectados pela primeira vez em 1953, por Reines e Cowan.

# Processos de decaimento radioativo

Em termos dos núclídeos as fórmulas para os **decaimentos beta** são:



Como exemplos de decaimentos beta tem-se o decaimento do carbono 14 e do nitrogênio 12:

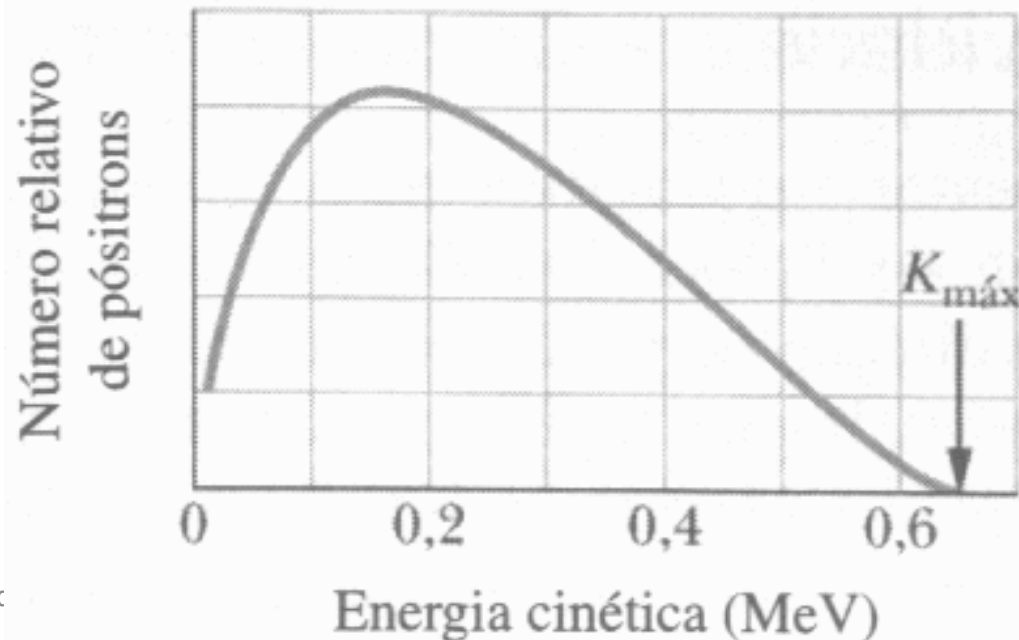


# Processos de decaimento radioativo

Enquanto no decaimento  $\alpha$  praticamente toda a energia liberada,  $Q$ , ia para a partícula  $\alpha$ , no decaimento  $\beta$  esta energia pode se distribuir de diferentes formas entre a energia do elétron (pósitron) e do anti-neutrino (neutrino).

Porém, os elétrons apresentam uma energia cinética máxima igual a  $Q$ , no caso em que os anti-neutrinos saem com energia nula:

$$K_{max}^{ele} = Q$$



## Alcance das partículas alfa e beta no ar, no tecido humano e no Alumínio (OKUNO, E. 1982)

Energia (MeV)		Alcance (cm)	
Partículas alfa	Ar	Tecido Humano	Alumínio
1,0	0,55	$0,33 \times 10^{-2}$	$0,32 \times 10^{-3}$
2,0	1,04	$0,63 \times 10^{-2}$	$0,61 \times 10^{-3}$
3,0	1,67	$1,00 \times 10^{-2}$	$0,98 \times 10^{-3}$
4,0	2,58	$1,55 \times 10^{-2}$	$0,50 \times 10^{-3}$
5,0	3,50	$2,10 \times 10^{-2}$	$2,06 \times 10^{-3}$
Partículas beta	Ar	Tecido Humano	Alumínio
0,01	0,23	$0,27 \times 10^{-3}$	
0,1	12,0	$1,51 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-3}$
0,5	150,0	0,18	$5,9 \times 10^{-2}$
1,0	420,0	0,50	0,15
2,0	840,0	1,00	0,34
3,0	1260,0	1,50	0,56

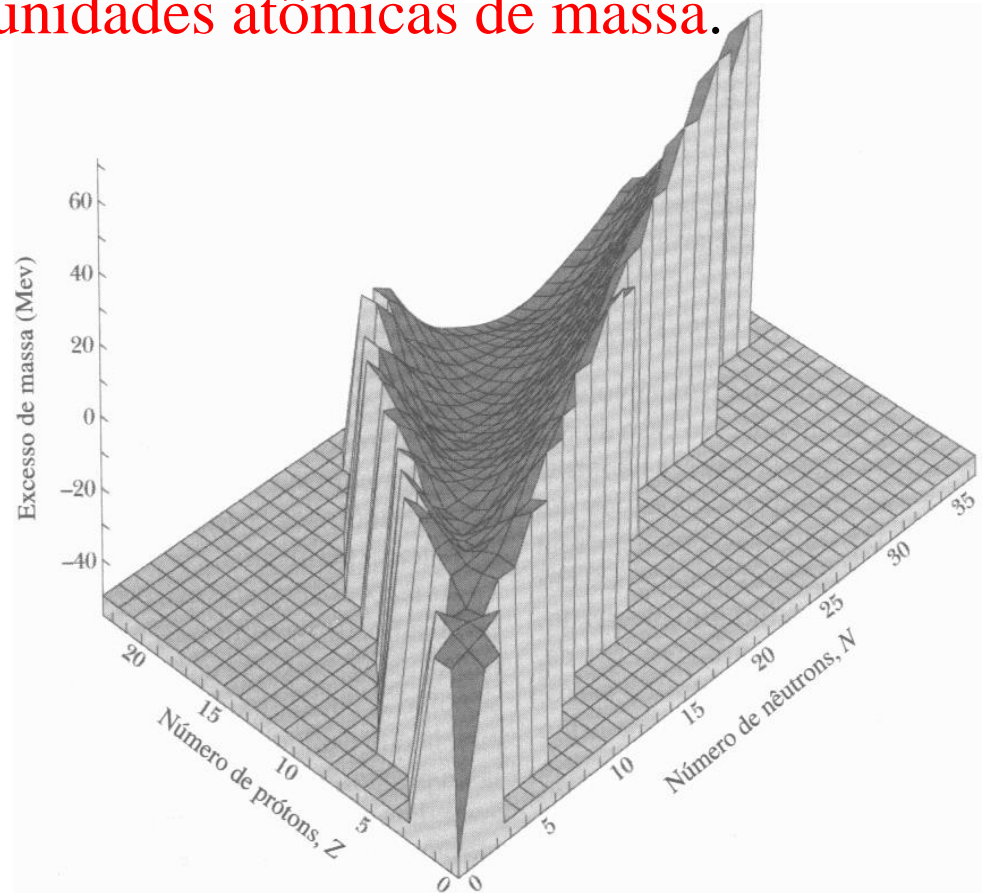
# Excesso de massa

O excesso de massa  $\Delta$  é definido por:

$$\Delta = M - A$$

onde  $M$  é a massa do átomo em unidades atômicas de massa.

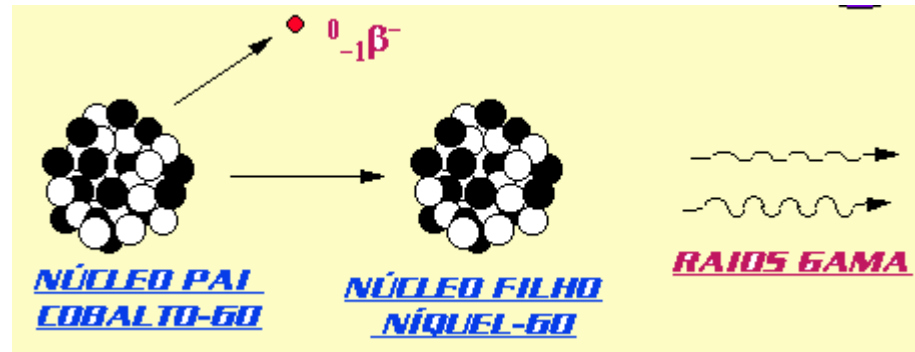
Os nuclídeos atingem as configurações mais estáveis através do decaimento beta.



# Processos de decaimento radioativo

## c) A radiação gama

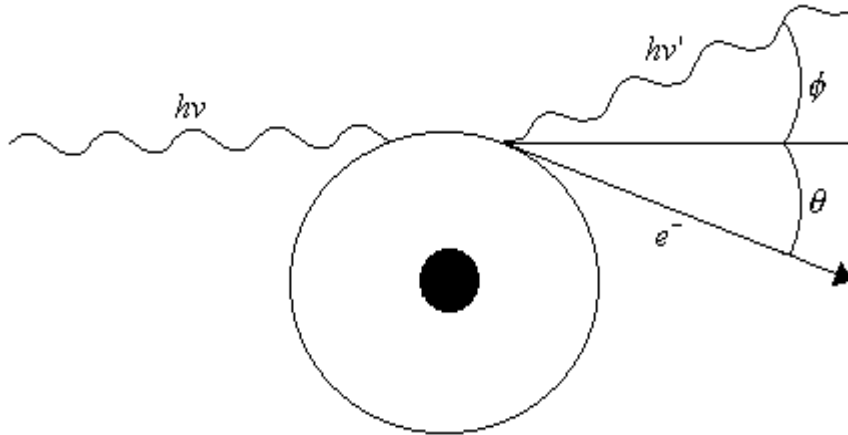
Os raios gama não possuem nem massa nem carga e por isso têm um enorme poder de penetração, podendo atingir grandes distâncias no ar e atravessar vários tipos de materiais.



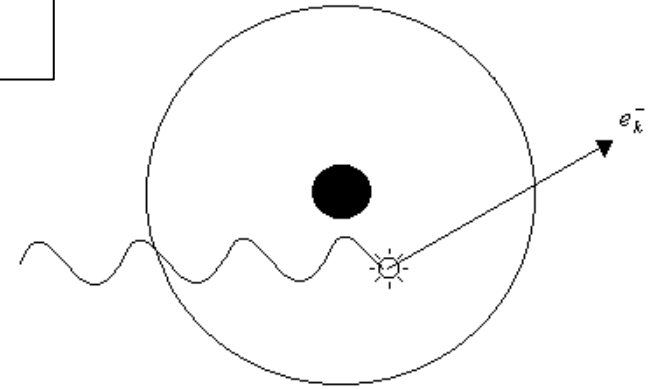
São ondas eletromagnéticas extremamente penetrantes, produzidas por elementos radioativos ou em processos subatômicos como a produção de pares. Por causa de sua alta energia são muito mais penetrantes do que as partículas Alfa ou Beta.

A radiação gama interage com a matéria pelo efeito fotoelétrico, pelo efeito Compton ou pela produção de pares.

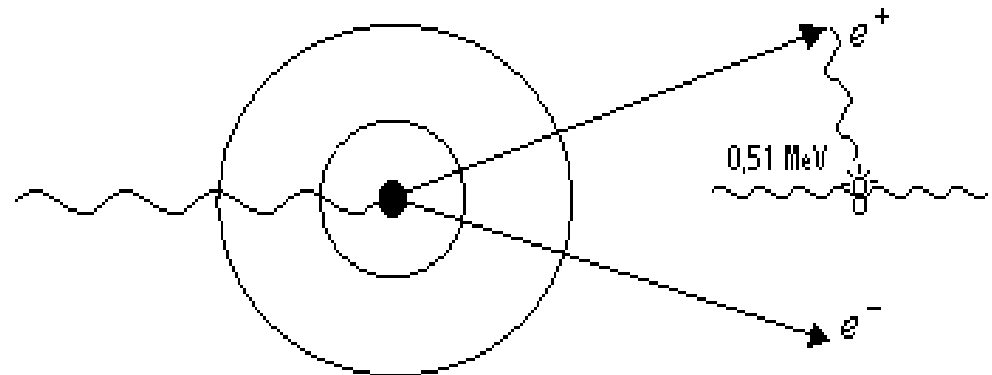
### Efeito Fotoelétrico



### Espalhamento Compton



### Produção e Aniquilação de Pares



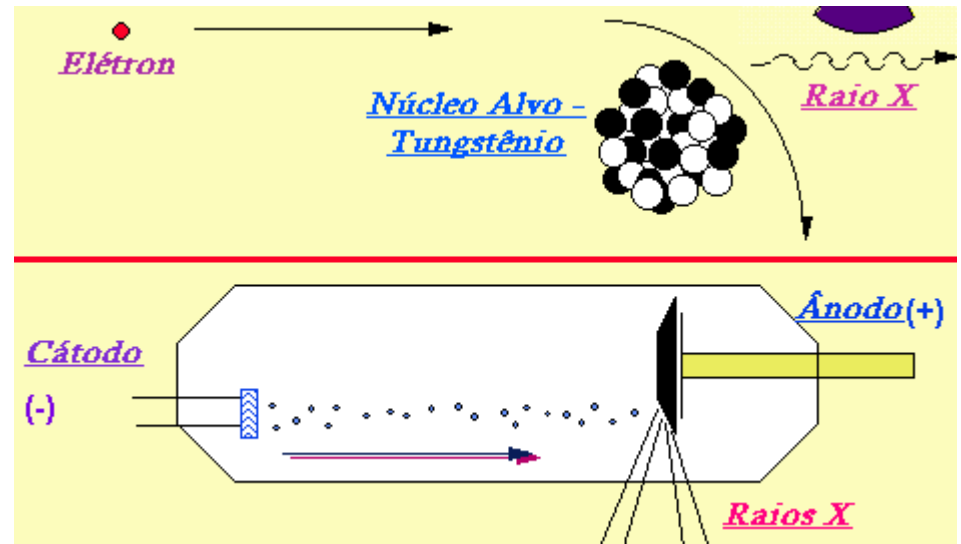


# Processos de decaimento radioativo

## d) A radiação X

Os raios X são semelhantes aos raios gama quanto as suas propriedades, ou seja, são ondas eletromagnéticas de alta frequência e pequeno comprimento de onda. A principal diferença entre eles é que os raios gama são produzidos no núcleo do átomo enquanto os raios X podem ter origem na eletrosfera (raio X característico) ou por meio do freamento de elétrons (raio X artificial).

Os raios X artificiais são gerados a partir da colisão de um feixe de elétrons contra um alvo metálico. Quando esses elétrons se chocam contra o alvo, sofrem um processo de desaceleração e liberam sua energia na forma de calor e raio X.



**Camadas semi-redutoras no tecido humano e no chumbo para os raios X e gama (OKUNO, E. 1982).**

Energia (MeV)	Camada Semi-redutora (cm)	
Raios X ou gama	Tecido humano	Chumbo
0,01	0,13	$4,5 \times 10^{-4}$
0,05	3,24	$0,8 \times 10^{-2}$
0,1	4,15	$1,1 \times 10^{-2}$
0,5	7,23	0,38
1,0	9,91	0,86
5,0	23,1	1,44

# Datação radioativa

O decaimento do  $^{14}\text{C}$  é utilizado para datar amostras orgânicas. A razão entre o  $^{14}\text{C}$  e o  $^{12}\text{C}$  na nossa atmosfera é de  $1,3 \times 10^{-12}$ . O  $^{14}\text{C}$  é produzido pelo choque de raios cósmicos com o nitrogênio do ar na alta atmosfera.

Todos os organismos vivos apresentam esta mesma razão em sua constituição, graças à respiração ou fotossíntese.

Porém, quando morrem esta troca com o ambiente cessa. O  $^{14}\text{C}$  do organismo sofre o decaimento beta, com uma meia-vida de 5.730 anos.

Assim, pode-se determinar a idade do material orgânico medindo a razão entre os carbonos.

# Fontes naturais e artificiais de radiação

## Radionuclídeos provenientes do cosmo

Nuclídeo	Símbolo	Meia-vida	Fonte	Atividade natural
Carbono-14	$^{14}\text{C}$	5730 anos	Interações entre raios cósmicos, $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$	0,22 Bq / g
Tritio	$^3\text{H}$	12,3 anos	Interações dos raios cósmicos com N e O; fragmentação dos raios cósmicos, $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$	$1,2 \times 10^{-3}$ Bq / kg
Berílio-7	$^7\text{Be}$	53,28 dias	Interações dos raios cósmicos com N e O	0,01 Bq / kg

# Fontes naturais e artificiais de radiação

## Radionuclídeos naturais de origem terrestre

Nuclídeo	Símbolo	Meia-vida	Atividade natural
Urânio-235	$^{235}\text{U}$	$7,04 \times 10^8$ anos	48.000 Bq / tonelada de rocha
Urânio-238	$^{238}\text{U}$	$4,47 \times 10^9$ anos	2.300 Bq / tonelada de rocha
Tório-232	$^{232}\text{Th}$	$1,41 \times 10^{10}$ anos	6.500 a 80.000 Bq / tonelada de rocha
Rádio-226	$^{226}\text{Ra}$	$1,60 \times 10^3$ anos	16 Bq / kg em pedras calcárias e 48 Bq / kg em rochas ígneas ou magmáticas.
Radônio-222	$^{222}\text{Rn}$	3,82 dias	Gás nobre cuja concentração média anual no ar varia, dependendo do local, de $0,6 \text{ Bq/m}^3$ a $28 \text{ Bq/m}^3$
Potássio-40	$^{40}\text{K}$	$1,28 \times 10^9$ anos	0,037 a 1,1 Bq / g de solo

# Fontes naturais e artificiais de radiação

Materiais radioativos produzidos artificialmente

Nuclídeo	Símbolo	Meia-vida
Iodo-131	$^{131}\text{I}$	8,04 dias
Cobalto-60	$^{60}\text{Co}$	5,27 anos
Césio-137	$^{137}\text{Cs}$	30,17 anos
Estrôncio-90	$^{90}\text{Sr}$	28,78 anos
Tecnécio-99	$^{99}\text{Tc}$	$2,11 \times 10^5$ anos
Plutônio-239	$^{239}\text{Pu}$	$2,41 \times 10^4$ anos

# Unidades de radiação

## Exposição (X)

- Os raios X ou gama, ao interagir com os átomos de um meio, produzem elétron ou pares  $e^-e^+$ . A exposição X é uma grandeza física definida para esses raios, tendo o ar como meio de interação.

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

Soma das cargas elétricas de todos os íons de um mesmo, produzidos no ar.

Quando todos os  $e^-e^+$ , num elemento de volume de ar cuja massa é  $\Delta m$ , são completamente freados.

Unidade de Exposição (Roentgen):

$$1R = 2,58 \times 10^{-4} \frac{C}{kg}$$

# Unidades de radiação

## Dose Absorvida (D)

- As mudanças químicas e biológicas que ocorrem, por exemplo, no tecido exposto à radiação X, dependem da energia absorvida pelo mesmo. A Dose Absorvida será:

$$D = \frac{E}{m}$$

Energia absorvida da radiação

Pela massa  $m$  do absorvedor

Unidades:

ICRU – 1950 a 1975  
Radiation Absorbed Dose

$$1rad = 100 \frac{erg}{g} = 10^{-2} \frac{J}{kg}$$

ICRU – após 1975 - Gray

$$1Gy = 1 \frac{J}{kg} = 100rad$$



# Unidades de radiação

## Dose Equivalente (H)

- Os efeitos químicos e biológicos que ocorrem num meio exposto à radiação dependem não só da energia absorvida pelo meio, mas também do tipo de radiação incidente e da distribuição da energia absorvida.

$$H = D \cdot Q \cdot N$$

**Fator de Qualidade (Q)** leva em conta que a radiação que produz maior número de ionização no tecido, por unidade de comprimento, causa maior dano biológico.

**Fator de Modificação (N)** é o produto de todos os outros fatores de modificação especificados pela ICRP relacionados com a ionização no meio em análise

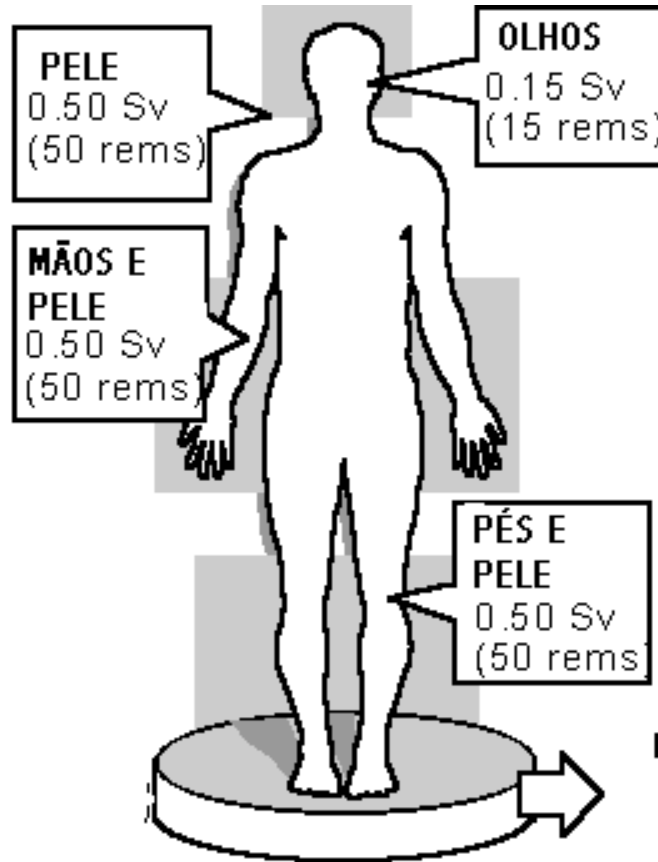
Até 1975, roentgen equivalent men (rem)  $\longrightarrow 1rem = 1rad \times Q \times N$

A partir de 1975  $\longrightarrow 1sievert = 1gray \times Q \times N$

Para fótons  $Q=N=1$

$$1Sv = 1Gy = 100rem$$

# Unidades de radiação



**LIMITE ANUAL MÁXIMO ADMISSÍVEL  
PARA TRABALHADORES  
COM RADIAÇÃO**

**DOSE EQUIVALENTE EFETIVA TOTAL - DEET  
CORPO INTEIRO - 0,05 Sv ou 5 rems**

# Unidades de radiação

## Limites primários anuais de dose equivalente

DOSE EQUIVALENTE	TRABALHADOR	PÚBLICO
EFETIVA (LAMA)* - $H_E$	50 mSv	1 mSv
ÓRGÃOS OU TECIDOS - $H_T$	500 mSv	1 mSv / $W_T^*$
PELE	500 mSv	50 mSv
EXTREMIDADES	500 mSv	50 mSv
CRISTALINO DOS OLHOS	150 mSv	50 mSv

# Unidades de radiação

Tipo de Radiação	Valor de Q
Raios X, $\gamma$ , $\beta$ e elétrons	1
Nêutrons rápidos e prótons	10
Partícula $\alpha$ e íons pesados	20

**Dose equivalente efetiva**

$$H_E = \sum W_T \cdot H_T$$

Órgão	Fator de ponderação ( $W_T$ )
Gonadas	0,25
Mamas	0,15
Medula óssea	0,12
Pulmão	0,12
Tireóide	0,03
Osso	0,03
Restante do corpo	0,06

# Unidades de radiação

## Faixa de energia dos fótons para o processo de atenuação dominante

Faixa de energia dos fótons	Processo de atenuação dominante (em tecido humano)
até 50 KeV	Fotoelétrico
60 - 90 KeV	Fotoelétrico + Compton
200 KeV a 2 MeV	Compton
5 MeV a 10 MeV	Compton + Produção de Pares
acima de 50 MeV	Produção de Pares

## Deposição de energia por unidade de massa, em diversos meios

	Ar (mGy)	Água (mGy)	Músculo (mGy)	Gordura (mGy)	Osso (mGy)
10 KeV	8,76	9,13	9,21	5,42	49,51
30 KeV	8,76	8,88	9,21	6,12	60,98
50 KeV	8,76	9,03	9,32	6,59	49,93
100 KeV	8,76	9,59	9, 58	9,17	17,28
200 KeV	8,76	9,73	9,65	9,70	9,85
1 MeV	8,76	9,75	9,66	9,76	9,03
1,25 MeV	8,76	9,74	9,65	9,76	9,02
10 MeV	8,76	9,46	9,35	9,12	9, 93

# Efeitos Biológicos

Há muitos anos verificou-se que as radiações ionizantes produziam danos biológicos nos seres vivos. Os primeiros casos de dano ao homem (dermatites, perda de cabelo, anemia) foram relatados na literatura logo após a descoberta dos raios X.

Os efeitos biológicos produzidos pela ação das radiações ionizantes no organismo humano são resultantes da interação dessas radiações com os átomos e as moléculas do corpo. Nessa interação, o primeiro fenômeno que ocorre é físico e consiste na ionização e na excitação dos átomos, resultante da troca de energia entre a radiação e a matéria.

A seguir aparecem os fenômenos bioquímicos e fisiológicos. Após um intervalo de tempo variável aparecem as lesões observáveis, que podem ser no nível celular ou no nível do organismo como um todo.

Um dos processos mais importantes de interação da radiação no organismo humano é com as moléculas de água. Quando a radiação interage com as moléculas de água do organismo humano, essas moléculas se quebram formando uma série de produtos danosos ao organismo, como os radicais livres e a água oxigenada.

# Efeitos Biológicos

## Características Gerais dos Efeitos Biológicos

### Especificidade

Os efeitos biológicos das radiações ionizantes podem ser provocados por outras causas que não as radiações, isto é, não são característicos ou específicos das radiações ionizante. Outros agentes físicos, químicos ou biológicos podem causar os mesmos efeitos. Exemplo: O câncer é um tipo de efeito que pode ser causado tanto pelas radiações ionizantes como por outros agentes.

### Tempo de latência

É o tempo que decorre entre o momento da irradiação e o aparecimento de um dano biológico visível. No caso da dose de radiação ser alta, esse tempo é muito curto. Os danos decorrentes da exposição crônica, doses baixas com tempo de exposição longo, podem apresentar tempos de latência da ordem de dezenas de anos. O tempo de latência é inversamente proporcional à dose.

# Efeitos Biológicos

## Características Gerais dos Efeitos Biológicos

### Reversibilidade

Os efeitos biológicos causados pelas radiações ionizantes podem ser reversíveis. A reversibilidade de um efeito dependerá do tipo de célula afetada e da possibilidade de restauração desta célula. Existem, porém, os danos irreversíveis como o câncer e as necroses.

### Transmissibilidade

A maior parte das alterações causadas pelas radiações ionizantes que afetam uma célula ou um organismo não são transmitidos a outras células ou outros organismos. Devemos, porém, citar os danos causados ao material genético das células dos ovários e dos testículos. Esses danos podem ser transmitidos hereditariamente por meio da reprodução.



# Efeitos Biológicos

## Características Gerais dos Efeitos Biológicos

### **Dose Limiar**

Certos efeitos biológicos necessitam, para se manifestar, que a dose de radiação seja superior a um valor mínimo, chamada de dose limiar. Temos também os efeitos que não necessitam de uma dose mínima para se manifestar. Como exemplo podemos citar a anemia cuja dose limiar é de 1 Sv e todas as formas de câncer que teoricamente não necessitam de uma dose limiar.

### **Radiosensibilidade**

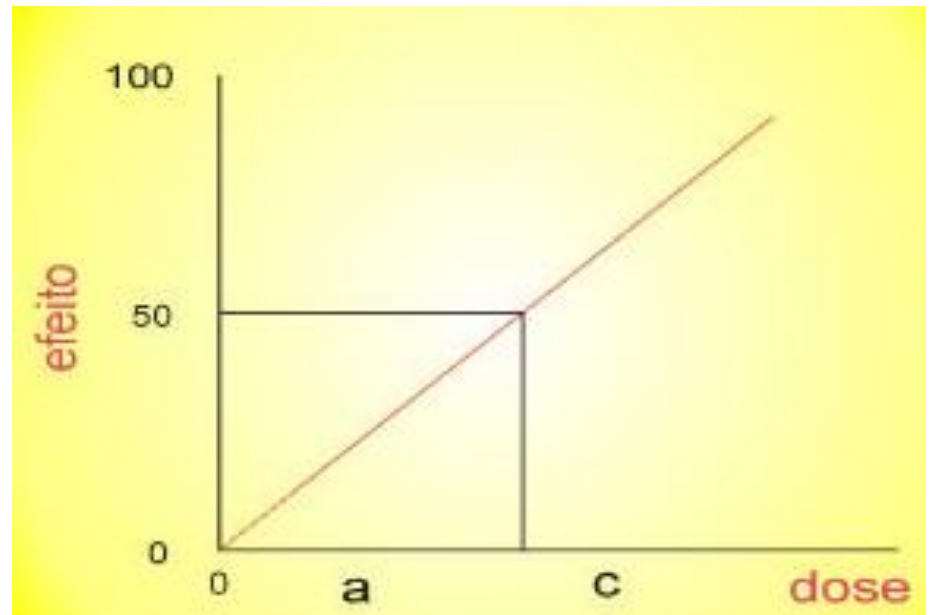
Nem todas as células, os tecidos, os órgãos e os organismos respondem igualmente à mesma dose de radiação. As diferenças de sensibilidade observadas seguem a “Lei de Bergonie e Tribondeau” a qual diz: “a radiosensibilidade das células é diretamente proporcional a sua capacidade de reprodução e inversamente proporcional ao seu grau de especialização”. Por exemplo a pele e as células produtoras de sangue.

# Efeitos Biológicos

## Classificação dos Efeitos Biológicos

### Efeitos Estocásticos

Os **efeitos estocásticos** são aqueles para os quais a probabilidade de ocorrência é função da dose, não apresentando dose limiar. Como exemplo podemos citar o câncer e os efeitos hereditários. A curva característica deste tipo de efeito é mostrada na figura ao lado.

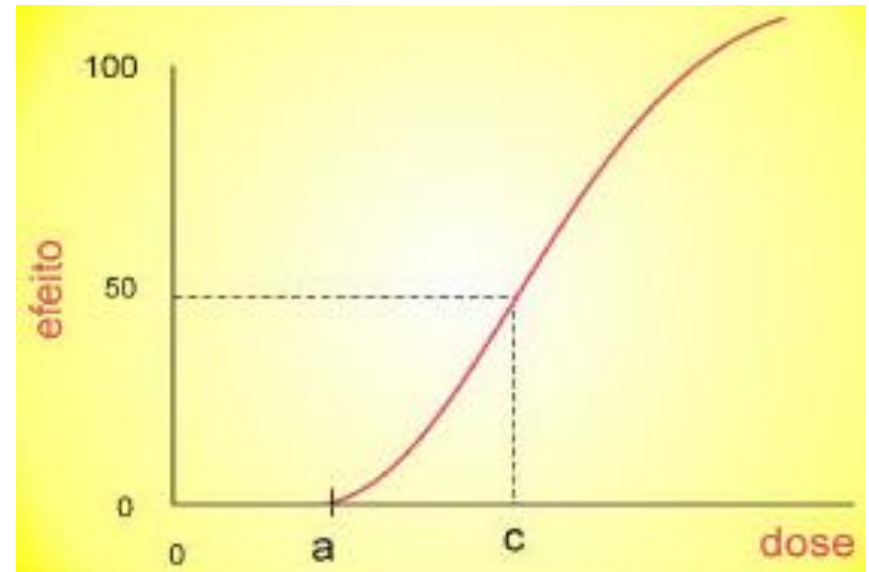


# Efeitos Biológicos

## Classificação dos Efeitos Biológicos

### Efeitos Determinísticos

Os **efeitos determinísticos** são aqueles cuja gravidade aumenta com o aumento da dose e para os quais existe um limiar de dose, como exemplo podemos citar a anemia, a catarata, as radiodermites etc. A curva característica deste tipo de efeito é mostrada na figura ao lado.



# Efeitos Biológicos

## Efeitos somáticos

Surgem do dano nas células do corpo e o efeito aparece na própria pessoa irradiada. Dependem da dose absorvida, da taxa de absorção da energia da radiação, da região e da área do corpo irradiada.

## Efeitos genéticos ou hereditários

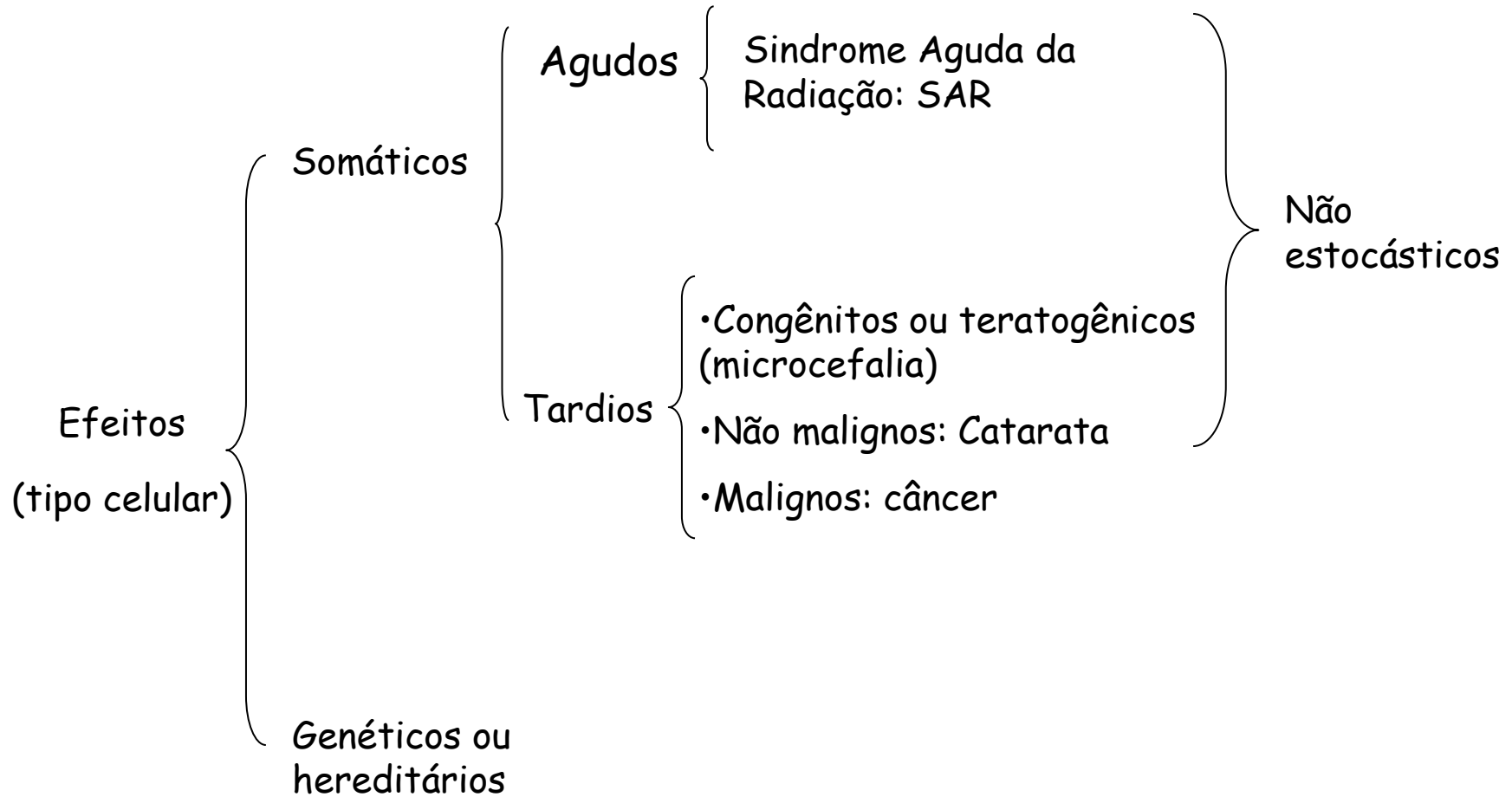
São efeitos que surgem no descendente da pessoa irradiada, como resultado do dano produzido pela radiação em células dos órgãos reprodutores, as gônadas. Têm caráter cumulativo e independe da taxa de absorção da dose.

## Efeitos imediatos e tardios

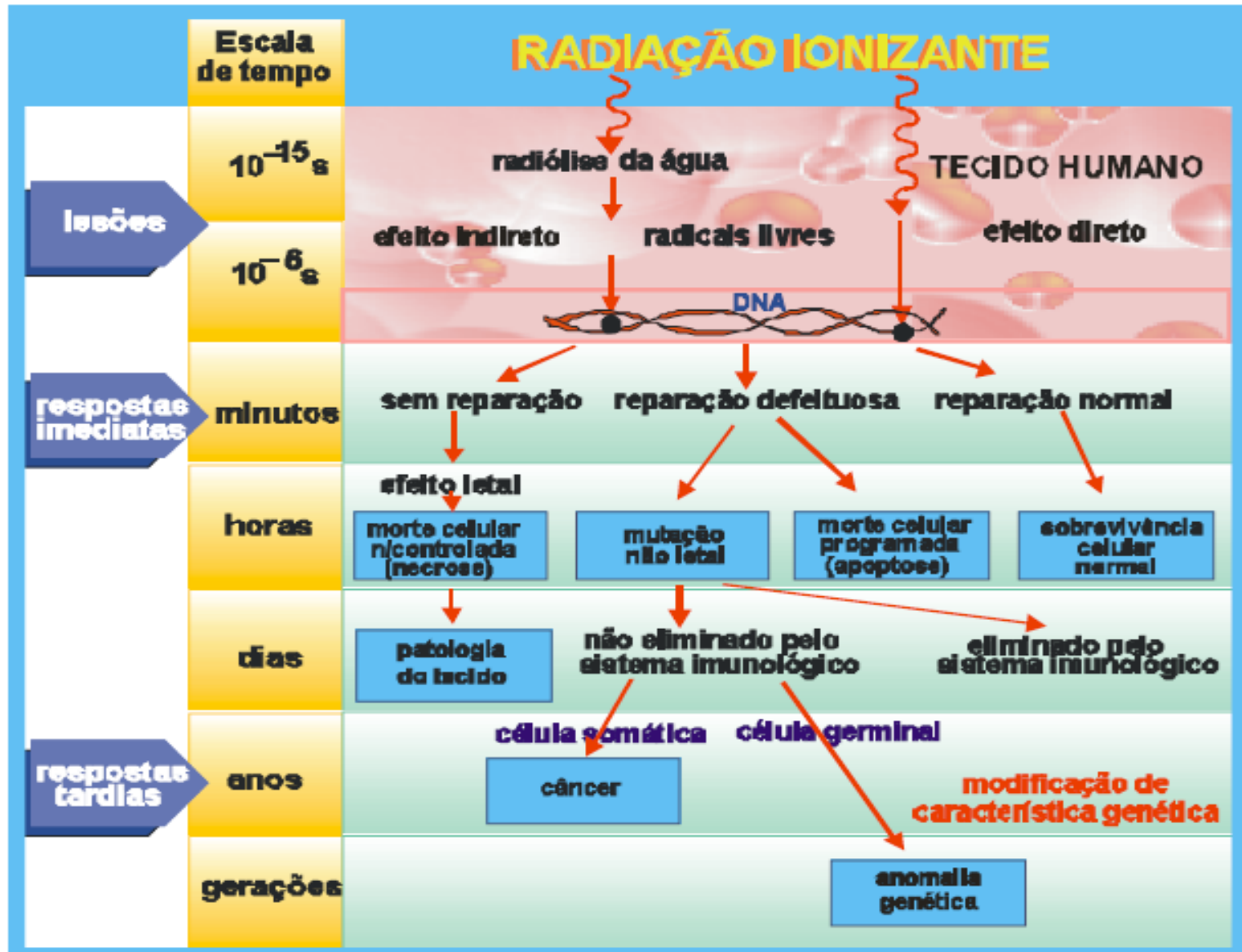
Os primeiros efeitos biológicos causados pela radiação, que ocorrem num período de poucas horas até algumas semanas após a exposição, são denominados de efeitos imediatos, como por exemplo, a radiodermite. Os que aparecem depois de anos ou mesmo décadas, são chamados de efeitos retardados ou tardios, como por exemplo, o câncer.

# Efeitos Biológicos

## Efeitos da radiação Ionizante



# Efeitos Biológicos



## O mecanismo de dano

Mecanismo Indireto



E

→ excitação

→ ionização

 $10^{14}$  células

Mecanismo Direto

DNA

alvo

 $10^5$  genesDNA  
lesado $10^{-6}$  mutações / gene / divisão celular

reparo correto

DNA  
restauradocélula  
normal

não reparo

reparo errôneo

DNA  
mutadocélula  
mutada  
viávelmorte  
celular

apoptose

célula  
somáticacélula  
germinativa

Catarata  
Malformações  
Síndromes da  
radiação

Diminuição da longevidade  
Envelhecimento precoce  
Indução do câncer

Doenças hereditárias  
(transmissíveis)

efeitos determinísticos

efeitos estocásticos

# Efeitos Biológicos

## Comentários Gerais

O tempo para aparição de um dano biológico depende fundamentalmente da Taxa de exposição e da Dose acumulada.

Os efeitos biológicos das radiações ionizantes são uma sequência de eventos que ocorrem em nível celular.

Em organismos mais complexos, multicelulares, dependendo do tipo de célula lesada os efeitos poderão ser transmitidos para maiores níveis de organização.

A criança e o idoso são muito mais sensíveis que o jovem adulto.

A mulher em geral parece ter maior tolerância a radiação que o homem.

A resposta a uma mesma dose de radiação pode ter um período de latência diferente entre dois indivíduos da mesma espécie.