

## Chapter 7

# Energia Nuclear

Pense nas crianças mudas

Telepáticas

Pense nas meninas cegas

Inexatas

Pense nas feridas como rosas

Cálidas

Mas! não se esqueça da rosa, da rosa

Radioativa

Estúpida

Inválida

Sem cor

Sem perfume

Sem nada

(**Rosa de Hiroshima** - Vinícius de Moraes)

No dia 6 de agosto de 1945 o mundo assistiu com horror à mais funesta aplicação prática da física de toda a sua história: a explosão

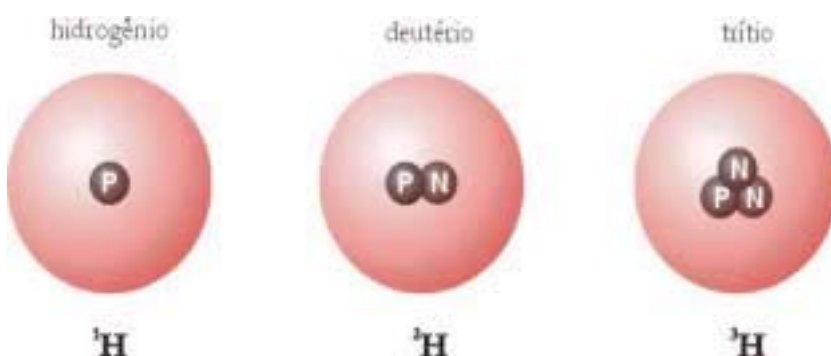
de uma bomba atômica, pelos Estados Unidos, sobre a cidade de Hiroshima no Japão, matando mais de 80 mil pessoas, e ferindo outras 75 mil. Apenas 3 dias depois desta tragédia, os Americanos largaram uma segunda bomba sobre a cidade de Nagasaki, matando outras 40 mil pessoas. Foi a inauguração trágica da era nuclear. Esta, e outras utilizações da energia nuclear, tornou-se possível graças à compreensão de certos processos físicos que ocorrem em núcleos instáveis.

## 7.1 Instabilidade Nuclear

No que diz respeito à estabilidade, existem dois tipos de núcleos atômicos na Natureza: os *estáveis* e os *instáveis*. Núcleos estáveis são aqueles que não sofrem nenhum tipo de transmutação com o tempo, ou seja, não decaem emitindo partículas subatômicas. Ao contrário, os núcleos instáveis emitem diversos tipos de partículas.

Quando olhamos para uma tabela periódica, as informações que nela lemos dizem respeito a isótopos estáveis dos elementos. É comum que cada elemento tenha mais de um isótopo estável, e vários isótopos instáveis. Por exemplo, o hidrogênio, o elemento mais simples do Universo, possui  $Z = 1$ , ou seja, seu núcleo só possui 1 único próton. Além deste isótopo, existem mais 2 isótopos do hidrogênio: o deutério ( ${}^2\text{H}$ ) e o trítio ( ${}^3\text{H}$ ). O núcleo do  ${}^1\text{H}$  possui 1 único próton, e nenhum nêutron; o do  ${}^2\text{H}$  possui 1 próton e 1 nêutron, e do  ${}^3\text{H}$  1 próton e 2 nêutrons. O hidrogênio e o deutério são estáveis, enquanto que o trítio é instável. A abundância isotópica (a proporção de um dado isótopo em relação à totalidade de isótopos do elemento) do  ${}^1\text{H}$  é de 99,985 %, e a do  ${}^2\text{H}$  é

de apenas 0,015 %. O trítio dura em média 12,3 anos.



Os três isótopos do hidrogênio. O hidrogênio e deutério são estáveis, enquanto o trítio é instável.

Considere um outro exemplo: o cobre (Cu). O seu número atômico é  $Z = 29$ . Existem dois isótopos estáveis do Cu: o  ${}^{63}\text{Cu}$ , com abundância de 69,2%, e o  ${}^{65}\text{Cu}$ , com abundância de 30,8%. Além desses, existem os isótopos  ${}^{59}\text{Cu}$ ,  ${}^{60}\text{Cu}$ ,  ${}^{61}\text{Cu}$ ,  ${}^{62}\text{Cu}$ ,  ${}^{64}\text{Cu}$ ,  ${}^{66}\text{Cu}$ ,  ${}^{67}\text{Cu}$  e  ${}^{68}\text{Cu}$ , todos instáveis. O  ${}^{67}\text{Cu}$ , por exemplo, dura em média 61,9 horas, e o  ${}^{68}\text{Cu}$  apenas 31 segundos.

Note que do ponto de vista químico, o que conta é o número de elétrons do átomo, e como eles se distribuem nos orbitais. Sendo assim, qualquer um desses isótopos, estável ou instável, pode participar de uma ligação química em uma substância qualquer. Do ponto de vista nuclear, contudo, as diferenças de massa são fundamentais, porque alteram as propriedades importantes dos núcleos. Por exemplo, o  ${}^{61}\text{Cu}$

possui spin  $I = 3/2$ , enquanto que o  $^{66}\text{Cu}$  possui spin  $I = 1$ . Se colocássemos o primeiro em um campo magnético, teríamos 4 níveis de energia, enquanto que com o segundo teríamos apenas 3, o que acarretaria diferenças nas suas propriedades magnéticas.

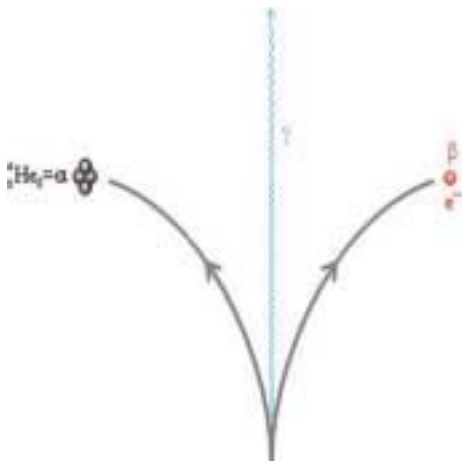
Na próxima seção vamos discutir os principais tipos de decaimento dos núcleos instáveis.

## 7.2 Alfa, Beta e Gama

Núcleos que espontaneamente emitem partículas são chamados *radioativos*. A radioatividade é um fenômeno natural, mas pode também ser produzida em laboratório. O fenômeno foi descoberto em 1896 pelo francês Henri Becquerel e, em 1934, foi produzido pela primeira vez em laboratório por Irene Curie e Pierre Joliot, que bombardearam alumínio com partículas alfa emitidas por polônio, e produziram o isótopo de fósforo  $^{30}\text{P}$ . Irene e Pierre levaram o Nobel de Química de 1935 pelo seu trabalho. Os pais de Irene, Pierre e Marie Curie, já haviam embolsado o Nobel de Física de 1903 (com Becquerel), pelo seu trabalho com radioatividade natural, e, como se não bastasse, Marie emplacou o Estocolmo novamente em 1911, desta vez o de Química!

A radioatividade é a liberação de energia por um núcleo excitado. Esse processo é chamado de *decaimento radioativo*, e pode ocorrer basicamente de três modos distintos: por emissão *alfa*, por emissão *beta* ou por emissão *gama*. Alfa, beta e gama são nomes dados a tipos de radiação cuja natureza era desconhecida na época em que foram descobertas. Radiação gama, já sabemos, são ondas eletromagnéticas, ou

fótons. Partículas alfa, são núcleos do átomo de hélio, composto por dois prótons e dois nêutrons, e partículas beta podem ser de dois tipos: elétrons ou pósitrons. O pósitron é uma partícula idêntica ao elétron, com exceção da sua carga que é positiva (igual à do próton).



Partículas alfa, beta e gama podem ser identificadas através da trajetória de cada uma delas em um campo magnético.

“Epa! Espera aí! Núcleos não são formados de prótons e nêutrons? Como é que agora tá saindo elétron e esse tal de pósitron lá de dentro?” E quem disse que prótons e nêutrons são os constituintes mais simples da matéria? Eles são feitos de objetos ainda menores!

Três anos após a descoberta da radioatividade foi verificado que a taxa de decaimento, ou seja, o número de decaimentos por unidade de tempo de uma certa quantidade de material radioativo, seguia uma lei exponencial. Isso quer dizer o seguinte: se em um dado instante existirem  $N_0$  núcleos radiativos de determinada substância, o número

de núcleos que existirão em um instante posterior  $t$ , denotado por  $N(t)$ , será igual a:

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

onde  $\tau$  é chamado de *meia-vida*, um parâmetro característico do tipo de decaimento e da espécie nuclear. Por exemplo, se em um dado instante tivermos 20 gramas de uma dada substância radiativa hipotética cuja meia-vida seja  $\tau = 1$  segundo, após 5 segundos teremos apenas

$$20 \times e^{-5/1} = 0,0067 \text{ gramas}$$

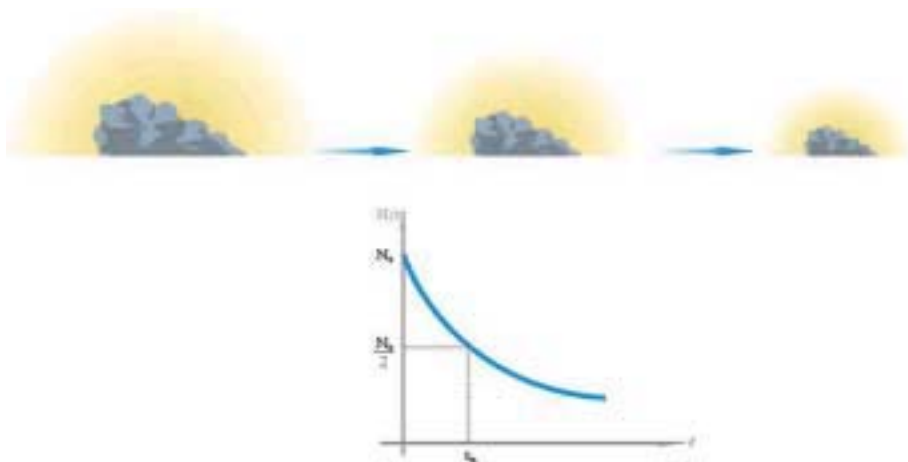
Um outro tempo característico importante é a chamada *vida-média* ( $t_{1/2}$ ), definido como o tempo para que o número de núcleos inicial seja reduzido à metade, ou seja,  $N(t_{1/2}) = N_0/2$ . É fácil encontrar a relação entre  $t_{1/2}$  e  $\tau$  a partir da lei de decaimento acima :

$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-t_{1/2}/\tau} \implies e^{-t_{1/2}/\tau} = \frac{1}{2}$$

Tomando o logaritmo dos dois lados da equação obtemos:

$$-\frac{t_{1/2}}{\tau} = \ln \frac{1}{2} \implies t_{1/2} = \tau \ln 2 = 0,693\tau$$

Como exemplos numéricos mencionaremos a meia-vida do  $^{38}\text{Ca}$  (cálcio), de 0,44 segundos, a do  $^{42}\text{K}$  (potássio), 12,4 horas, e a do  $^{93}\text{Mo}$  (molibdênio), de 3500 anos.



A quantidade de um determinado material radioativo diminui segundo uma lei exponencial. A chamada meia-vida é uma característica que distingue um isótopo radioativo do outro.

Decaimentos nucleares são eventos quânticos: é impossível dizer quando um dado núcleo irá decair. Os tempos acima expressam uma média, e portanto dizem respeito a um número muito grande de eventos ocorrendo nos núcleos em uma dada quantidade de material radioativo.

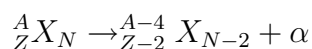
O decaimento gama é o mais simples de ser compreendido. Ele pode ser comparado ao caso das transições eletrônicas em um átomo. O núcleo faz uma transição de um nível de energia mais alto  $E_i$  para um de energia mais baixo  $E_f$ , emitindo um fóton com energia  $\Delta E = E_i - E_f$ , que pode variar de uns poucos keV ( $1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV} = \text{kilo elétronvolt}$ ) até a faixa de MeV (milhões de elétronvolts). Valores para meias-vidas no decaimento gama em geral são menores do que  $10^{-9}$  segundos. O decaimento gama ocorre, em geral, após um decaimento alfa ou beta,

e como a massa de repouso e a carga do fóton são zero, o decaimento gama não altera a massa do núcleo, e nem o seu número atômico. Um exemplo de núcleo que decai emitindo partículas gama é o isótopo da prata  $^{110}\text{Ag}$ .

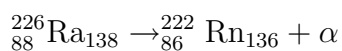
Partículas alfa, como já mencionamos anteriormente, são núcleos de átomos de hélio, e portanto possuem número de massa  $A = 4$  e número atômico  $Z = 2$  (dois prótons e dois nêutrons). Conseqüentemente, um núcleo que decai via emissão de uma partícula alfa, tem sua massa reduzida de 4 unidades, e sua carga reduzida de duas unidades. Se representarmos um núcleo  $X$  com número de massa  $A$ , número atômico  $Z$  e número de nêutrons  $N$  por

$${}^A_Z X_N$$

podemos representar o decaimento alfa de tal núcleo genérico da seguinte maneira esquemática:



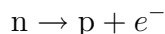
onde designamos por “ $\alpha$ ” a partícula alfa emitida, ou seja, o  ${}^4_2\text{He}_2$ . Um exemplo de emissor alfa é o  $^{226}\text{Ra}$ , cujo decaimento é mostrado abaixo:



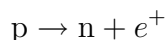
Neste caso, o rádio 226 decai no radônio 222 emitindo uma partícula alfa. A meia-vida deste processo é de 1600 anos.

O decaimento beta é o mais complexo dos três tipos de decaimento. Ele pode envolver a emissão de elétrons, como no caso em que um

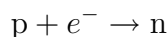
nêutron se transforma em um próton, aumentando assim o número atômico do núcleo de 1 unidade:



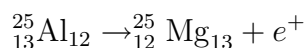
onde representamos por  $e^{-}$  o elétron, para distinguir do pósitron  $e^{+}$ . Pode envolver a emissão de um pósitron, como na transformação de um próton em um nêutron (neste caso o número atômico diminui de 1 unidade):



ou pode ainda acontecer de um próton *capturar* um elétron. Neste caso o processo é chamado de *captura eletrônica*, e representado por:



Além disso, a Natureza parece que resolveu mesmo complicar no decaimento beta. Ao contrário das partículas  $\alpha$  e  $\gamma$  que são sempre emitidas com valores de energia bem definidos, o espectro de emissão  $\beta$  varia *continuamente* de um valor inicial a um valor máximo. Esse fato levou Pauli a postular, em 1931, que no decaimento  $\beta$  havia uma outra partícula emitida com o elétron. Para explicar o processo, foi necessário adotar a idéia que tal partícula era eletricamente neutra (ou seja, sem carga elétrica, como o nêutron), e com massa de repouso virtualmente igual a zero (como o fóton). A estranha partícula foi batizada com o nome de *neutrino*, representada pela letra grega  $\nu$  (lê-se 'ni'). Um exemplo de decaimento por emissão beta (omitindo-se o neutrino) é mostrado abaixo:

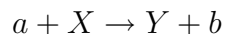


A meia-vida deste decaimento é de apenas 7,2 s. Note que o decaimento beta só muda o número atômico do núcleo, enquanto que o alfa muda tanto  $Z$  quanto  $N$ ; o gama não muda nada. É importante ressaltar que no caso do decaimento alfa, considera-se que a partícula emitida existia *previamente* dentro do núcleo (são dois prótons e dois nêutrons), mas no caso do decaimento beta, o elétron - ou o pósitron - emitido (com o neutrino) não “estava lá” antes do decaimento. Essas partículas são produzidas no momento da emissão.

A Física Nuclear é o ramo da física que estuda as propriedades dos núcleos atômicos. Isto não inclui somente o decaimento radiativo, mas uma série de outras coisas, como momentos nucleares, reações nucleares, fissão nuclear, fusão nuclear, astrofísica nuclear, aplicações medicinais (Medicina Nuclear), reatores nucleares, etc.

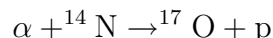
### 7.3 Fissão Nuclear: Xô Satanás!

De maneira análoga aos átomos, que podem reagir quimicamente, núcleos também podem reagir entre si. Reações nucleares podem ser provocadas bombardeando-se partículas sobre os núcleos de um alvo. De forma geral, tais reações são representadas da seguinte maneira:

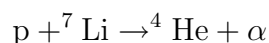


No esquema acima, uma partícula  $a$  incide sobre um núcleo  $X$  (de um alvo), resultando em um novo núcleo  $Y$  e uma partícula  $b$ . Cada tipo de

reação possui uma probabilidade de ocorrência. Exemplos de reações nucleares são:



Nesta reação uma partícula alfa incide sobre um núcleo de  ${}^{14}\text{N}$  resultando em  ${}^{17}\text{O}$  e um próton. Outro exemplo:

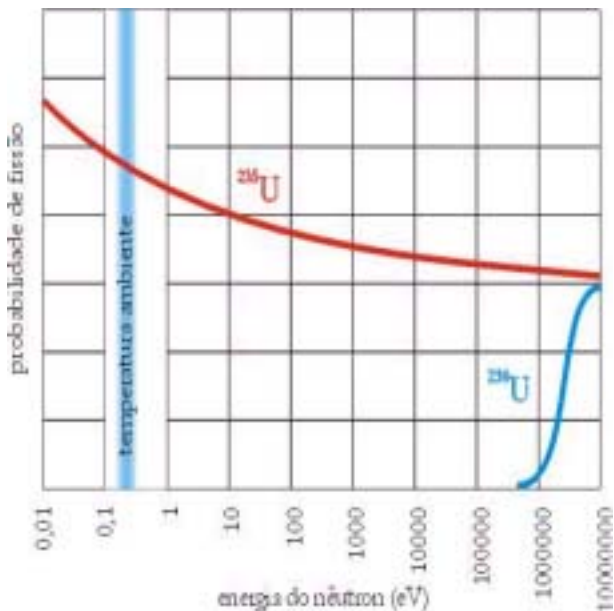


Neste caso um próton reage com o isótopo  ${}^7\text{Li}$ , resultando no  ${}^4\text{He}$  e uma partícula alfa.

Um tipo particularmente importante de reação nuclear é a de *captura de nêutrons*. Enrico Fermi, um importante físico italiano (Prêmio Nobel de 1938), mostrou que muitos núcleos quando expostos a nêutrons, tornam-se radioativos e decaem emitindo elétrons (decaimento beta). Como o urânio é o elemento natural mais pesado na tabela periódica ( $A = 238$ ), uma questão que logo colocou-se após a descoberta de Fermi foi acerca da possibilidade de se produzir elementos “artificiais” *transurânicos*, ou seja, mais pesados que o urânio, expondo-se uma amostra de urânio a um fluxo de nêutrons. Os resultados dessas pesquisas mostraram que seguindo a captura de nêutrons, núcleos de urânio decaem emitindo não apenas partículas subatômicas, como partículas alfa, beta, mas também *outros núcleos* mais leves, e uma quantidade de energia muito maior do que a observada nos outros tipos de reação nuclear! Foi então proposto (em 1939) que de fato o que estava ocorrendo nessas reações não era um mero decaimento do urânio seguindo a captura de um nêutron, mas sim que o núcleo do urânio em

si estava se *dividindo*, ou sofrendo uma *fissão*! Após capturar nêutrons, núcleos de urânio se tornam altamente instáveis e simplesmente “explodem” em núcleos menores, emitindo grande quantidade de partículas e energia.

Em princípio, qualquer núcleo pode sofrer fissão, mas o processo é mais facilmente realizável nos núcleos pesados, como o tório (Th,  $A = 232$ ), o urânio, o netúnio (Np,  $A = 237$ ), o plutônio (Pu,  $A = 244$ ), etc. A característica “diabólica” deste tipo de reação nuclear é o fato de que para cada núcleo que é fissionado, além dos núcleos mais leves e da energia emitidos, outros *dois nêutrons* são liberados! Então imagine: você tem uma certa quantidade de urânio. Suponha que um único nêutron seja capturado por um dos núcleos; este se divide, libera energia e mais dois nêutrons. Estes dois nêutrons adicionais são por sua vez capturados por outros dois núcleos de urânio que se dividem emitindo mais energia e outros quatro nêutrons, que são capturados, ...etc. É uma reação *em cadeia* que se auto-sustenta! Obviamente este processo é uma fonte de energia em potencial: uma espécie de *pilha nuclear*. Mas, se a reação não for controlada...bum!

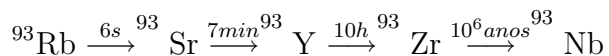


A probabilidade de que o isótopo do urânio  $^{235}\text{U}$  sofra fissão seguindo a captura de nêutrons de baixa energia é muito maior do que a do isótopo  $^{238}\text{U}$ . Isto torna o primeiro mais apropriado para aplicações em reatores e armamentos nucleares.

Um exemplo de reação por captura de nêutrons é mostrado abaixo:



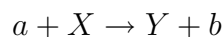
Nesta reação um núcleo de urânio 235 captura um nêutron e se divide em um núcleo de rubídio 93, um de célio 141 e mais dois nêutrons. Os *produtos de fissão*, como são chamados o  $^{93}\text{Rb}$  e o  $^{141}\text{Cs}$ , não são únicos; em geral haverá uma distribuição de massas, dando origem a vários radioisótopos. Os produtos de fissão são altamente radiativos, e sofrem uma série de decaimentos gama e beta logo após terem sido criados. Da reação acima, por exemplo, segue-se para o isótopo de rubídio:



A probabilidade de que um núcleo bombardeado por nêutrons sofra uma fissão é expressa por uma quantidade chamada *seção transversal para fissão induzida por nêutrons*. Cada tipo de reação nuclear possui a sua seção transversal. A seção transversal para a ocorrência da reação depende primariamente da energia do nêutron incidente. Comparando os isótopos  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ , encontra-se que para nêutrons de baixa energia (correspondendo à energia térmica ambiente) o  $^{235}\text{U}$  é muito mais fissionável do que o isótopo mais pesado. Por esta razão o  $^{235}\text{U}$  é preferível para ser utilizado em reatores e armas nucleares. O grande problema (ou talvez a grande salvação!) é que sua abundância é de apenas 0,720%, comparada a 99,275% para o  $^{238}\text{U}$ . Como *quimicamente* os dois isótopos são idênticos, sua separação é um problema complicado.

## 7.4 Energia de Fissão: Quantos Núcleos Fervem uma Piscina?

Vamos agora calcular, a título de curiosidade, a energia liberada na fissão de um núcleo de urânio 235. Para isso será útil considerar a nossa reação genérica:



onde uma partícula  $a$  incide sobre um núcleo  $X$ , resultando em  $Y$  e  $b$ . Vamos chamar de  $T_X$  e  $T_a$  as respectivas energias cinéticas da partícula incidente e do núcleo  $X$ , e  $T_Y$  e  $T_b$  o análogo para os produtos da reação. Além da energia cinética, sabemos da teoria de relatividade que as partículas envolvidas no processo possuem *energias de repouso*,

que devem ser levadas em consideração no balanço energético (veja capítulo dois). Estas serão respectivamente representadas por  $m_a c^2$ ,  $m_X c^2$ ,  $m_Y c^2$  e  $m_b c^2$ , onde  $m_a$ , etc., são as massas de repouso das partículas envolvidas na reação. Como a energia total no processo se conserva, a energia total *antes* da reação tem que ser igual à energia total *depois* da reação. Ou seja:

$$m_X c^2 + T_X + m_a c^2 + T_a = m_Y c^2 + T_Y + m_b c^2 + T_b$$

Podemos reorganizar os termos desta equação para obter:

$$(m_X + m_a - m_Y - m_b)c^2 = T_Y + T_b - T_X - T_a$$

Define-se então uma quantidade importante que caracteriza a reação do ponto de vista energético: o seu *valor*  $Q$ :

$$Q = T_f - T_i = (m_{inicial} - m_{final})c^2 = (m_X + m_a - m_Y - m_b)c^2$$

onde  $T_f$  é a energia cinética final, e  $T_i$  a inicial. Se  $Q > 0$  a reação *libera* energia, e é chamada de *exotérmica*, e se  $Q < 0$  ela é dita ser uma reação *endotérmica*, e neste caso consome energia. Note que a energia liberada ou consumida, dependendo do sinal de  $Q$ , aparece sob a forma de energia cinética das partículas envolvidas no processo.

Vamos então calcular como exemplo de aplicação da fórmula acima, o valor de  $Q$  para a seguinte reação de fissão do urânio 235:



As massas de repouso das partículas envolvidas são expressas em *unidades de massa atômica*  $u$ , que vale  $1,66 \times 10^{-27}$  kg. Assim:

$$m_U = 235,0439u$$

$$m_n = 1,0087u$$

$$m_{Rb} = 92,9217u$$

$$m_{Cs} = 140,9195u$$

Logo, para a reação de fissão acima, teremos:

$$Q = (m_U + m_n - m_{Rb} - m_{Cs} - m_{2n})c^2$$

$$Q = +0,1940uc^2$$

Então, a reação de fissão do  $^{235}\text{U}$  é exotérmica. A vantagem de ter o resultado expresso em termos da unidade de massa atômica,  $u$ , está no fato de que o produto  $uc^2$  é constante, e vale:

$$uc^2 = 931,502 \text{ MeV}$$

onde MeV significa “milhões de elétron-volts”, a unidade de energia que se usa em física nuclear. 1 MeV corresponde a  $1,60 \times 10^{-13}$  Joules. Conseqüentemente, o valor  $Q$  da reação de fissão do  $^{235}\text{U}$ , em MeV será:

$$Q = +180,71 \text{ MeV}$$

e em joules será:

$$Q = +2,89 \times 10^{-11} \text{ J}$$

Só para efeitos ilustrativos, vamos avaliar quantos núcleos de urânio 235 seriam necessários para produzir energia suficiente para fazer ferver

a água de uma piscina que inicialmente se encontra a zero graus Celsius. Vamos supor que a nossa piscina tenha 50 metros de comprimento, 10 metros de largura e 2 metros de profundidade. O volume será portanto igual a  $50 \times 10 \times 2 = 1000 \text{ m}^3$  ou  $10^6$  litros (1 milhão de litros de água). Agora, usaremos uma conhecida expressão para calcularmos a energia necessária para aquecer um objeto com massa  $m$  de uma temperatura inicial  $T_i$  para uma temperatura final  $T_f$ :

$$Q = mc(T_f - T_i)$$

(não confunda este ‘ $Q$ ’ com o outro ‘ $Q$ ’ da reação nuclear. É a crise de escassez de letras atacando de novo!). Nesta fórmula,  $c$  é o *calor específico* do objeto (não confunda com velocidade da luz!), que para a água é de  $4190 \text{ J/kg K}$ . A temperatura inicial é  $T_i = 0 \text{ C}$  ou  $273 \text{ K}$ , e a temperatura final  $T_f = 100 \text{ C}$ , ou  $373 \text{ K}$ . Para utilizarmos esta fórmula, ainda precisamos saber qual é a massa de água correspondente a 1 milhão de litros. Tomemos a densidade da água como  $1 \text{ g/cm}^3 = 10^{-3}/10^{-3} \text{ kg/dm}^3 = 1 \text{ kg/dm}^3 = 1 \text{ kg/l}$ . Logo, em 1 milhão de litros de água teremos  $m = 10^6 \text{ kg}$  (mil toneladas). Substituindo esses números na fórmula acima, obtemos:

$$Q = 10^6 \times 4190 \times 100 = 4,19 \times 10^{11} \text{ joules}$$

Como cada núcleo fissionado fornece cerca de  $2,89 \times 10^{-11} \text{ joules}$ , o número de fissões necessárias para ferver a piscina seria de  $(4,19/2,89) \times 10^{22} \approx 1,44 \times 10^{22}$  fissões. Se pudéssemos agrupar um igual número de núcleos de  $^{235}\text{U}$ , cada um realizando 1 fissão apenas, isto equivaleria a  $1,44 \times 235 \times 10^{22} / (6,02 \times 10^{23}) \approx 6$  gramas de  $^{235}\text{U}$  para obtermos a energia necessária para ferver 1 milhão de litros de água!

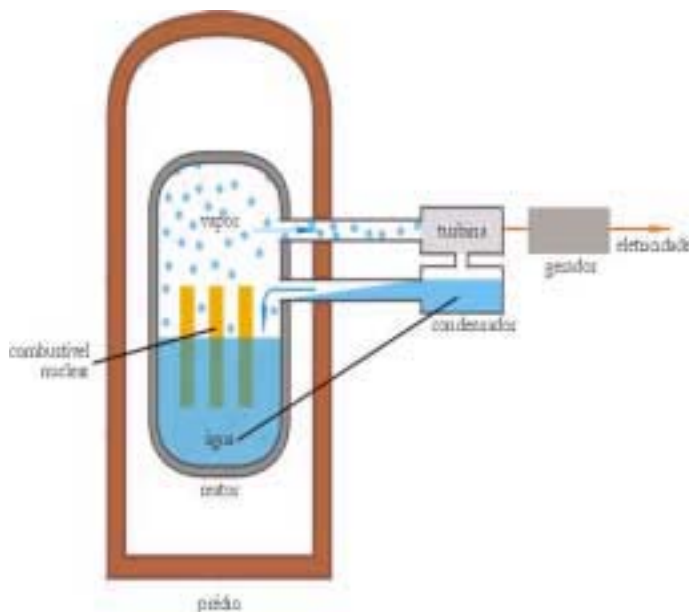
## 7.5 Reatores-N & Bombas-A

A liberação de energia em reações de fissão do urânio obviamente sugere que o processo possa ser utilizado como fonte para obtenção de energia em larga escala. As duas aplicações principais do fenômeno são os chamados *reatores de fissão*, que convertem essa energia em eletricidade, e as chamadas *bombas atômicas*, que convertem cidades inteiras em pó. O princípio de funcionamento de ambos é o mesmo, e pode-se de certa forma afirmar que um reator é uma bomba atômica “explodindo de maneira controlada”.

Em tese, qualquer material fissionável serve como combustível para um reator. Os isótopos mais comuns utilizados são o  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$  e o  $^{239}\text{Pu}$ . Destes, somente o primeiro é “natural”, sendo os outros produzidos artificialmente. O minério de urânio, ou seja, o urânio extraído da Natureza consiste basicamente de  $^{238}\text{U}$ , que não é prático para fins de fissão. Torna-se então necessário separar o  $^{235}\text{U}$  do material natural. O processo de separação é extremamente difícil e caro. O material separado é em geral chamado de *urânio enriquecido*: é a matéria prima utilizada nos reatores e nas bombas.

Para que seja mantida uma reação auto-sustentável em um reator, é necessário controlar a perda de nêutrons que ocorre no processo. Iniciada a reação, os nêutrons produzidos precisam ser absorvidos por outros núcleos de urânio. Mas, inevitavelmente haverá perdas, pois alguns nêutrons escaparão pela superfície do material. Quanto maior a superfície, maior a perda. Isso pode ser resolvido simplesmente aumentando-se a quantidade de material, pois quanto maior o volume

de material fissionável, menor será a *perda relativa* porque a produção de nêutrons é proporcional ao volume, enquanto que a perda é proporcional à área superficial. A partir de uma certa quantidade de material, a perda de nêutrons pela superfície deixa de ser importante. Quando a quantidade de substância é tal que a produção de nêutrons é exatamente balanceada pela perda, diz-se que o material atingiu a sua *massa crítica*.



Esquema de um reator nuclear. A água evaporada pela fissão do material radioativo move uma turbina e depois de condensada retorna para o tanque do reator.

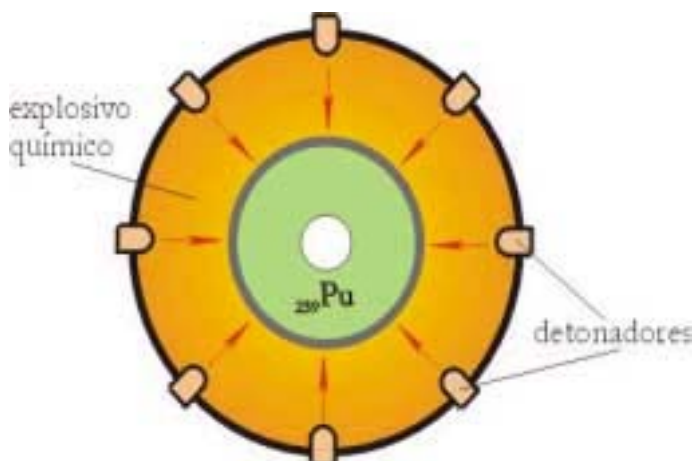
Em um reator utilizado para gerar eletricidade, a energia liberada pela fissão do urânio é convertida em calor. Este aquece uma certa quantidade de água gerando vapor a alta pressão que faz funcionar uma turbina. É interessante notar que a parte do custo de um reator devida

ao seu núcleo, onde a fissão do urânio de fato ocorre, é menor do que aquela do equipamento que vai gerar eletricidade, com a blindagem, etc. Conseqüentemente, um reator de alta potência tende a ser economicamente mais vantajoso do que vários de baixa potência. Em um esquema simples, a água circula pelo núcleo do reator, e absorve calor. Ela serve ao mesmo tempo para mover a turbina que vai gerar eletricidade, e como refrigerante para o núcleo.

Reatores operam com uma quantidade de urânio abaixo da massa crítica, para evitar que um acidente leve a uma explosão nuclear. A operação e manutenção de reatores nucleares é algo altamente complexo e perigoso. Eles operam a altas potências e precisam de refrigeração. Materiais utilizados como refrigerantes devem ter propriedades térmicas especiais, não serem corrosivos, não reativos, e não podem capturar nêutrons (ou, tecnicamente falando, devem ter uma pequena seção transversal para captura de nêutrons). A má operação e manutenção de um reator pode ser fatal e catastrófica, como ocorreu no dia 26 de abril de 1986 com o reator de Chernobyl na antiga União Soviética. A temperatura do reator subiu fora de controle, uma explosão ocorreu, destruindo parte do reator e do prédio, e lançando grande quantidade de material radiativo no ambiente. 30 pessoas, entre trabalhadores do reator e bombeiros, morreram no acidente. Mais de 130 mil quilômetros quadrados de área tiveram que ser isoladas em torno do prédio do reator. Uma população de quase 5 milhões de habitantes teve que ser deslocada. O acidente com o reator de Chernobyl chamou a atenção do mundo (em particular da opinião pública) sobre a segurança deste tipo de produção de energia.

Bombas atômicas, como já foi dito, funcionam essencialmente como reatores fora de controle. Para fazer um explosivo nuclear, quantidades de material abaixo do valor crítico (ou seja, com uma massa tal que a perda de nêutrons seja maior do que a produção por fissão), devem ser reunidas *rapidamente* de modo a atingir um valor supercrítico (ou seja, com massa acima da massa crítica). A bomba que foi jogada sobre Hiroshima em 1945 utilizava  $^{235}\text{U}$ . O material fissionável tinha um buraco no meio, de modo a manter a massa abaixo do valor crítico. A parte central, na forma de um cilindro do mesmo material era “explodida” para dentro do buraco, levando o sistema para o regime supercrítico, e a conseqüente explosão nuclear.

A segunda bomba, jogada sobre Nagasaki, utilizava um outro “design”. O material fissionável nesse caso era o  $^{239}\text{Pu}$ . O mecanismo utilizava um explosivo químico para comprimir o seu núcleo esférico acima do valor supercrítico.



Esquema de uma bomba atômica. O explosivo químico comprime o material fissionável elevando sua massa a um valor supercrítico, desencadeando a reação de fissão.

PAINEL XIII  
O PROJETO MANHATTAN

O projeto secreto para a construção da primeira bomba atômica nos Estados Unidos durante a Segunda Grande Guerra era chamado *Projeto Manhattan*. O projeto envolveu vários cientistas europeus e americanos, alguns dos quais haviam ido para a América fugindo da guerra na Europa. O projeto nasceu do receio de que os alemães estivessem desenvolvendo uma bomba atômica após a descoberta da fissão em 1938, mas só foi organizado a partir de 1942, sob o comando do General Leslie Groves. O General apontou o físico Julius Robert Oppenheimer como o diretor do projeto.

Embora não tenha participado diretamente do projeto, Albert Einstein teve um importante papel na decisão de construir a bomba. A partir de 1939, 1 ano após a descoberta da fissão do urânio, Einstein escreveu uma série de cartas ao então presidente americano Franklin Delano Roosevelt, alertando-o sobre a possibilidade da construção de “um novo tipo de bombas extremamente poderosas”. Abaixo, transcrevo uma tradução (de minha autoria) da primeira dessas cartas:

Albert Einstein

Old Grove Rd.  
Nassau Point  
Peconic, Long Island

2 de agosto de 1939

F.D. Roosevelt  
Presidente dos Estados Unidos  
Casa Branca  
Washington, D.C.

Senhor,

Trabalhos recentes por E. Fermi e L. Szilard, comunicados a mim sob a forma de manuscritos, convenceram-me de que o elemento urânio pode se

tornar uma nova e importante fonte de energia no futuro imediato. Alguns aspectos da situação presente merecem atenção e, se necessário, rápidas decisões por parte da Administração devem ser tomadas. Acredito, portanto, que é meu dever chamar Vossa atenção para os seguintes fatos e recomendações:

Durante os últimos quatro meses tornou-se claro - através do trabalho de Joliot na França, bem como o de Fermi e Szilard na América - que uma reação nuclear em cadeia seja possível de ser estabelecida em uma grande massa de urânio, através da qual uma enorme quantidade de energia e de novos elementos semelhantes ao rádio seriam produzidos. No momento nos parece quase certo que isto poderia ser alcançado no futuro imediato.

O novo fenômeno levaria também à construção de bombas, e é concebível - embora menos certamente - que bombas extremamente poderosas de um novo tipo pudessem ser construídas. Uma única bomba deste tipo, transportada em um barco e detonada em um porto, poderia muito bem destruir todo o porto, com parte da sua vizinhança. No entanto, pode ser que tais bombas se revelem muito pesadas para serem transportadas por meios aéreos.

Os Estados Unidos são muito pobres em minério de urânio. Existem boas reservas no Canadá e na antiga Tchecoslováquia, mas as reservas mais importantes se encontram no Congo belga.

Diante da presente situação talvez fosse conveniente estabelecer um contato permanente entre a Administração e o grupo de físicos que no momento trabalham no fenômeno de reações em cadeia na América. Isto poderia ser feito através da nomeação de uma pessoa de sua confiança para a tarefa. Suas atribuições seriam as seguintes:

a) manter os Departamentos Governamentais informados dos progressos realizados, e transmitir recomendações para as ações do Governo, com atenção especial ao problema de garantir um suprimento de minério de urânio para os Estados Unidos;

b) acelerar os trabalhos experimentais, que no momento estão sendo realizados dentro dos limites dos orçamentos universitários, fornecendo fundos, se necessário, através de contatos com pessoas interessadas em

contribuir com esta causa, e talvez também através da cooperação com laboratórios industriais que possuam o equipamento necessário.

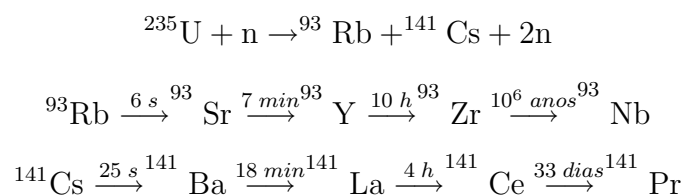
A Alemanha interrompeu a venda de urânio das minas da Tchecoslováquia, que agora ela domina. Tal decisão talvez possa ser compreendida com base no fato de que o filho do sub-Secretário de Estado Alemão, von Weizsäcker, é vinculado ao Instituto Kaiser-Wilhelm em Berlim, onde pesquisas com urânio realizadas na América estão sendo no presente momento repetidas.

Albert Einstein

Além de Oppenheimer, trabalharam no projeto da construção da bomba-A nos Estados Unidos, os físicos Niels Bohr, Enrico Fermi e Richard Feynman. Após muitas dificuldades para realizar a separação do urânio 235 do minério, material suficiente para fazer explodir uma bomba foi finalmente conseguido em 1945. No dia 16 de julho daquele ano, em Alamogordo, no Novo México, a primeira explosão nuclear foi observada em um teste. No dia 6 de agosto seria a vez de Hiroshima.

## 7.6 Lixo Atômico: um Sub-Produto Indesejável

Considere novamente o processo de fissão do  $^{235}\text{U}$ , seguido do decaimento dos produtos de fissão:



Vemos que para cada fissão do  $^{235}\text{U}$ , nada menos que oito novos radioisótopos são criados (o  $^{93}\text{Nb}$  e o  $^{141}\text{Pr}$  são estáveis). E mais, os subprodutos de fissão acima são apenas alguns dos muitos que podem ocorrer. A cada evento de fissão uma enormidade de radioisótopos que não existiam antes aparecem. Alguns destes radioisótopos simplesmente existirão “para sempre”, como é o caso do  $^{93}\text{Zr}$ , que leva em média 1 milhão de anos para decair em  $^{93}\text{Nb}$ . O que fazer com este *lixo atômico*?

O preço a ser pago para a obtenção de eletricidade via reatores nucleares é algo que tem sido altamente questionado. Durante algum tempo argumentou-se que esta seria uma forma barata e segura de se obter energia, mas os argumentos têm sido colocados em dúvida por vários especialistas, em particular aqueles ligados a entidades de proteção ao meio-ambiente. Os problemas com esta forma de geração de energia são muitos. Para início de conversa, devido às dificuldades de mineração do urânio e estocagem do lixo atômico, o processo se torna tão caro quanto outras formas de obtenção de eletricidade. Por

exemplo, um reator com capacidade para gerar 1 Gigawatt de energia elétrica consome 33 toneladas de urânio por ano, sendo que para isso nada menos do que 440 000 toneladas de minério devem ser escavadas. Estima-se que cerca de 40 mil pessoas morram todos os anos no mundo como decorrência da atividade de mineração do urânio. Dentro do reator a fissão ocorre em tubos feitos a partir de ligas de zircônio e magnésio, que aprisionam a maior parte dos produtos de fissão, mas deixam escapar os nêutrons, que podem ativar outros núcleos. Das 33 toneladas iniciais restarão, além de urânio, cerca de 300 kg de plutônio, e mais os produtos de fissão *altamente radioativos*. Este material que “sobra” do processo de fissão é o lixo atômico. A sua radioatividade é centenas de milhões de vezes maior do que a radioatividade natural das minas. O contato direto com esse material significa morte certa. A contaminação do ambiente é tão séria, que o próprio reator após algumas décadas de uso tem que ser fechado e desmontado. Ou seja, o próprio reator se torna lixo atômico!

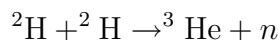
O lixo atômico, em geral, tem o seguinte destino: os cilindros são dissolvidos em ácido, e o plutônio é separado para uso em armas nucleares. O restante do material é estocado em caixas de carbono ou aço inoxidável que são enterradas. A radioatividade dentro dessas caixas continuará existindo por milhões e milhões de anos. Como garantir que não haverá vazamento deste material para o meio ambiente?! As gerações futuras herdarão este problema da atualidade. Provavelmente o material terá que ser re-empacotado por cada nova geração para garantir que não haverá vazamento!

Balanco: reatores nucleares possuem vida útil de apenas algumas

dezenas de anos, produzem eletricidade a um preço comparável a outras formas de obtenção de energia, podem vaziar ou explodir como aconteceu como o de Chernobyl (apesar de ser afirmado pelas autoridades que eles são absolutamente seguros). Como se não bastasse, geram o indesejável lixo atômico que permanecerá ativo por milhões de anos. Não parece ser muito vantajoso, principalmente para países como o nosso, com vastos recursos hidroelétricos.

## 7.7 Fusão Nuclear

Existe uma forma alternativa de se obter energia nuclear que não polui o ambiente: a  *fusão nuclear*. Neste processo dois núcleos leves são combinados para formar um núcleo mais pesado. Um exemplo é a reação abaixo:



Nesta reação, dois núcleos de deutério (ou *dêuterons*) se fundem para formar um núcleo de hélio. A reação libera um nêutron e 3,3 MeV de energia. Existem duas vantagens principais em reações de fusão, quando comparadas com as de fissão: primeiro, os produtos da reação (no caso acima o hélio) são núcleos estáveis, e não radioisótopos como ocorre no caso da fissão. A segunda vantagem é que os núcleos envolvidos na fusão (no caso acima o deutério) são abundantes, e não precisam ser escavados em minas como o urânio.

Mas, nem tudo são flores com a fusão. Se fosse fácil fazer fusão, a fissão já teria sido aposentada há muito tempo! A fim de que dois

núcleos sejam fundidos é preciso, obviamente, colocá-los perto um do outro. Perto o suficiente para que a força nuclear, que age a uma distância de apenas  $10^{-15}$  m (veja capítulo quatro), possa fazer o trabalho de fusão. Para isso é preciso superar a forte “barreira” repulsiva coulombiana (pois núcleos possuem cargas iguais e se repelem a distâncias maiores do que  $10^{-15}$  m).

A fusão pode ser alcançada simplesmente acelerando um núcleo até que ele tenha uma energia cinética suficientemente alta, e lançá-lo sobre outro núcleo. No entanto, para fins práticos este processo não produz energia suficiente que possa ser utilizada. Uma outra possibilidade é aquecer um gás formado pelos constituintes a serem fundidos a temperaturas tão altas que a agitação térmica faria com que os núcleos se aproximassem o suficiente para realizar a fusão. Este processo é de fato realizado no interior das estrelas, e é chamado de *fusão termonuclear*. Tem um pequeno probleminha: a temperatura para que o processo possa ocorrer deve ser de bilhões de graus!

Apesar dessas dificuldades, devido às suas possíveis importantes conseqüências, a fusão nuclear é um campo de pesquisas muito frutífero e promissor na física. Uma das dificuldades técnicas básicas é simplesmente arranjar um local onde a reação termonuclear possa ser realizada! A temperaturas de bilhões de graus, não há material na Terra que resista. A saída encontrada foi confinar o gás onde a fusão vai ocorrer sob a ação de campos magnéticos. Isso é possível porque a temperaturas tão altas, as partículas do gás estão totalmente ionizadas. Ou seja, o gás é composto por elétrons e núcleos “carecas”. Este tipo de gás é chamado de *plasma*. Como as partículas de um plasma são carregadas

(positivas e negativas em igual número), elas podem ser aprisionadas em campos magnéticos, via ação da força de Lorentz (veja capítulo um). Reatores de fusão termonuclear, como os chamados *tokamaks*, utilizam este princípio de confinamento magnético.

XIV  
ESPELHOS MAGNÉTICOS E TOKAMAKS

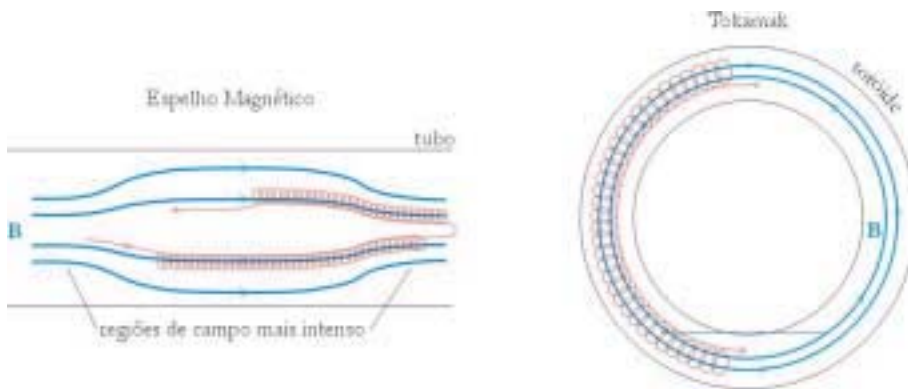
As “paredes” do recipiente que contém o plasma onde reações de fusão são realizadas são “feitas” de campo magnético. Como vimos no capítulo um, partículas carregadas em campos magnéticos ficam sujeitas à força de Lorentz,

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

que faz com que elas espiralem em torno da direção do campo.

Campos magnéticos podem ser produzidos com geometrias especiais de modo a manterem o plasma confinado em uma certa região do espaço. Existem dois desenhos básicos, que utilizam campos *axiais* ou *toroidais*. No caso axial, um campo é gerado de modo que seja uniforme na sua região central, e inhomogêneo nas extremidades. A inhomogeneidade faz com que uma partícula que se aproxime dessa região experimente uma força contrária ao seu movimento, que a reflete de volta para a região homogênea do campo. O fenômeno é às vezes chamado de *espelhamento magnético*, porque a partícula carregada é refletida pelo campo como a luz em um espelho.

Nos chamados *tokamaks* a geometria é diferente. O campo magnético é gerado por bobinas enroladas sob a forma de um toróide (veja figura). Com esta geometria, as linhas de campo serão paralelas ao eixo do toróide. As partículas do plasma espiralam em torno dessas linhas e são deste modo mantidas em confinamento.



Reações de fusão são realizadas confinando-se um plasma em campos magnéticos com duas configurações básicas: os espelhos magnéticos e os tokamaks.

Como não poderia deixar de ser, a liberação de energia no processo de fusão, sugeriu não só a construção de reatores de fusão para pesquisa científica e produção de energia, mas também as chamadas *bombas termonucleares*. Essas “belezocas” possuem um poder de destruição inimaginavelmente maior do que as obsoletas bombas de fissão que foram largadas sobre as cabeças dos moradores de Hiroshima e Nagasaki. De fato, uma bomba termonuclear possui em seu interior uma outra de fissão só para produzir a temperatura necessária para iniciar o processo de fusão. Pense nisso: uma bomba nuclear usada como uma mera espoleta! Milhares dessas bombas foram construídas pelos Estados Unidos e pela ex-União Soviética durante a chamada Guerra Fria. Um conflito termonuclear entre esses dois países não deixaria rastro de vida sobre a Terra.

## 7.8 Como Funciona o Sol?

O Sol é um gigantesco reator de fusão termonuclear que transforma hidrogênio em hélio. Estrelas são como seres vivos: nascem, vivem por um tempo e depois morrem. Estima-se em cerca de 5 bilhões de anos a idade do Sol, e que ele viverá outros 5 bilhões. A conversão do hidrogênio em hélio passa por várias etapas, mas a reação geral é representada por



ou seja, quatro prótons são fundidos em uma partícula alfa liberando dois pósitrons e dois neutrinos. Esta reação libera 26,7 MeV de energia, que chega até nós sob a forma de luz e calor. O “reator-Sol” é altamente estável: por mais de 1 bilhão de anos esta energia tem se mantido constante.

A vida de uma estrela como o Sol é uma eterna batalha entre a força de gravidade que tende a colapsar a sua massa, e as reações termonucleares que a expande. A aceleração da gravidade na superfície do Sol é de  $274 \text{ m/s}^2$ . Sua densidade de  $1410 \text{ kg/m}^3$  e seu raio de  $6,96 \times 10^8 \text{ m}$  são o resultado da competição entre essas duas forças com tendências opostas. Em 5 bilhões de anos o hidrogênio do Sol acabará, e a força da gravidade vencerá a expansão causada pela fusão, fazendo com que sua massa se contraia, aumentando a temperatura no seu centro, e iniciando um novo ciclo de fusão, desta vez usando o hélio como combustível nuclear.

O destino final de uma estrela depende em última análise da sua massa, mas o processo de queima de combustível nuclear partindo do

hidrogênio e fundindo elementos cada vez mais pesados, é o mesmo para todas elas. O produto final desta queima é o ferro. A partir daí não é mais possível produzir energia por fusão. Neste ponto, se a estrela for muito grande, ela explodirá em uma *supernova*. Com o nosso Sol acontecerá algo diferente: ao final de sua vida sua superfície se expandirá e ele se transformará em uma *gigante vermelha*. Neste ponto os planetas mais próximos do Sol - incluindo a Terra - serão engolidos por ele, e seu diâmetro será tão grande que visto da Terra parecerá preencher metade do céu. A vida na Terra será então extinta (por sorte ainda é cedo para nos preocuparmos com isso!). O próximo estágio será novamente de contração, mas desta vez a gravidade não será suficiente para reiniciar uma reação de fusão termonuclear. O “ex-Sol” então se transformará em uma estrela chamada *anã branca*.

## 7.9 Efeitos Biológicos da Radiação

No dia 13 de setembro de 1987 duas pessoas abriram um recipiente abandonado em um local onde havia existido uma clínica médica na cidade de Goiânia. O conteúdo do recipiente eram 18 gramas de césio 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ), um radioisótopo com meia-vida de 30,2 anos utilizado para fins médicos. A irresponsabilidade dos donos da clínica e a completa falta de informação daquelas pessoas, aliada à total negligência das autoridades do governo local na época, levaram o césio a se espalhar e causar a morte de vários moradores locais, e a contaminar centenas de outras pessoas. Depois de Chernobyl, o acidente de Goiânia é considerado o mais grave acidente com radiação.

Radiação pode ser extremamente danosa para organismos vivos. Explosões de bombas atômicas em testes nucleares, e a mineração de urânio para reatores de fissão liberam radioisótopos na atmosfera que podem se combinar com o ar, com a água, com plantas e animais, e ter como destino o corpo de alguém. Por exemplo, o processo de mineração de urânio libera o radônio sob a forma de gás, que decai em chumbo radiativo, que por sua vez causa danos ao cérebro. Já o plutônio prefere se agarrar à superfície dos nossos ossos e despejar partículas alfa, que possuem alto *poder de ionização*.

É no poder de ionização que reside o perigo da radiação. Como vimos, moléculas são formadas por átomos que se ligam quimicamente entre si. As propriedades das moléculas são reflexos da estrutura eletrônica dos átomos que as compõem. Radiação de qualquer tipo tem o poder de alterar esta estrutura química e conseqüentemente alterar o funcionamento de moléculas, como por exemplo o ADN. O tipo e a extensão do dano biológico é função das características da radiação. Partículas alfa, por exemplo, causam maior dano do que a mesma dose de prótons, partículas beta ou gamas. Isto porque partículas alfa são facilmente freadas, e conseqüentemente depositam sua energia mais localizada-mente no organismo.

Os possíveis danos variam também em grau, dependendo do tipo de radiação e sobretudo da dose. O efeito é acumulativo e piora se a dose for tomada em um curto intervalo de tempo. De um modo geral, a exposição à radiação pode levar à morte em pouco tempo, ou levar a alterações do funcionamento de células, causando doenças como, por exemplo, o câncer. Pode ainda alterar a estrutura do material

genético das células, causando defeitos que serão transmitidos às futuras gerações.

Existem duas unidades que quantificam a dose absorvida de radiação por um organismo: o *rad*, que equivale a uma energia de 100 erg/g, e o *Gray* (Gy), que equivale a 1 J/kg. Portanto,  $1\text{Gy} = 100\text{ rad}$ . Exposições de 0,5 a 1 Gy começam a gerar problemas de saúde em adultos. Doses entre 6 a 10 Gy causam problemas gastrointestinais (diarréias, desidratação, etc.). Problemas no sistema nervoso central aparecem com doses acima de 10 Gy (distúrbios de equilíbrio, agitação, convulsões, e ocasionalmente, morte do indivíduo). Em mulheres entre 15 e 40 anos de idade doses entre 2,5 e 5,0 Gy podem causar a supressão de ovulação. Acima de 40 anos, a supressão ocorre em 100% dos casos. Nos homens a mesma dose causa supressão na produção de esperma (aspermia). Dependendo da fase de desenvolvimento em que o organismo atingido pela radiação se encontra, esta pode produzir alterações diferentes no sistema nervoso; estruturas cerebrais podem nem chegar a se formar ou se apresentar anormalmente.

Começamos este capítulo com o belo poema *Rosa de Hiroshima* de Vinícius de Moraes. É notável como a miséria e a destruição nuclear inspiram os poetas. Terminaremos esta seção transcrevendo um outro poema, intitulado *Radiophobia* (Radiofobia), que expressa a dor e o desespero dos habitantes de Chernobyl. O poema foi traduzido do Russo para o inglês por Leonid Levin e Elisavietta Ritchie. Não me atrevi a tentar uma segunda tradução para o português, e portanto mantive a sua forma em inglês.

## RADIOPHOBIA

Is this only—a fear of radiation?  
Perhaps rather—a fear of wars?  
Perhaps—the dread of betrayal,  
cowardice, stupidity, lawlessness?  
The time has come to sort out  
what is—radiophobia.  
It is—  
when those who've gone through the Chernobyl drama  
refuse to submit  
to the truth meted out by government ministers  
("Here, you swallow exactly this much today!")  
We will not be resigned  
to falsified ciphers,  
base thoughts,  
however you brand us!  
We don't wish—and don't you suggest it!—  
to view the world through bureaucratic glasses!  
We're too suspicious!  
And, understand, we remember  
each victim just like a brother! . . .  
Now we look out at a fragile Earth  
through the panes of abandoned buildings.  
These glasses no longer deceive us!—  
These glasses show us more clearly—

believe me—  
the shrinking rivers,  
poisoned forests,  
children born not to survive . . .  
Mighty uncles, what have you dished out  
beyond bravado on television?  
How marvelously the children have absorbed  
radiation, once believed so hazardous! . . .  
(It's adults who suffer radiophobia—  
for kids is it still adaptation?)  
What has become of the world  
if the most humane of professions  
has also turned bureaucratic?  
Radiophobia  
may you be omnipresent!  
Not waiting until additional jolts,  
new tragedies,  
have transformed more thousands  
who survived the inferno  
into seers—  
Radiophobia might cure  
the world  
of carelessness, satiety, greed,  
bureaucratism and lack of spirituality,  
so that we don't, through someone's good will  
mutate into non-humankind.

## 7.10 Medicina Nuclear

Graças aos Céus, nem tudo na história das aplicações da física nuclear é destruição. A compreensão dos fenômenos envolvendo núcleos atômicos possibilitou o desenvolvimento de várias técnicas de diagnóstico e tratamento que têm ajudado a salvar muitas vidas. A ressonância magnética nuclear, discutida no capítulo anterior, é um belo exemplo de aplicação que não existiria se as propriedades magnéticas dos núcleos não tivessem sido estudadas<sup>1</sup>. Nesta seção comentaremos brevemente algumas outras aplicações médicas que envolvem o uso da radiatividade. Esta parceria entre física nuclear e medicina é uma área de especialização chamada *Medicina Nuclear*.

Os médicos estão sempre interessados em olhar o que se passa dentro do corpo das pessoas, sem que para isso seja necessário - na medida do possível - nelas abrir um buraco. A idéia de utilizar radiação para produzir imagens do interior do corpo não é nova. Seguindo a descoberta dos raios X (ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda entre  $10^{-9}$  e  $10^{-15}$  metros), em 1895 pelo cientista alemão Wilhelm Röntgen, logo verificou-se o poder de penetração deste tipo de radiação em tecidos macios, propriedade esta que contrasta com sua forte atenuação por tecidos ósseos. Esta observação prontificou a utilização dos raios X para produzir imagens do esqueleto humano (e de outros bichos!), tornando-o um poderoso auxiliar no diagnóstico de ossos quebrados.

---

<sup>1</sup>Como curiosidade, note a diferença nas escalas de energia dos dois problemas: na RMN lidamos com frações ínfimas de elétronvolts, enquanto que na desintegração nuclear lidamos com milhares a milhões de elétronvolts. São 10 a 15 ordens de magnitude de energia acima!

Existem várias técnicas de exames médicos que se utilizam de gamas emitidos por radioisótopos. Muitas delas se utilizam do fato de que determinadas substâncias tendem a se acumular em determinados tecidos ou órgãos dentro do corpo. Por exemplo, a glândula tiróide, que se situa diante da traquéia, e que possui importante papel no nosso metabolismo, possui a propriedade de acumular iodo (I). A atividade da tiróide pode então ser estudada através da introdução de iodo no corpo, contendo isótopos radiativos desse elemento, como o  $^{131}\text{I}$  e o  $^{132}\text{I}$ . A utilização do primeiro é menos desejável, por possuir meia-vida de oito dias, o que prolonga demasiadamente a permanência do material radioativo dentro do corpo do paciente. O segundo possui meia-vida de 2,3 horas, e é mais utilizado. Mais recentemente, motivado pelo desenvolvimento nas técnicas de produção de radioisótopos, tem-se utilizado o  $^{123}\text{I}$ , que possui meia-vida de 13 horas, e decai via captura eletrônica (ou seja, absorve um elétron e depois emite o gama que é utilizado no exame), e não por emissão de elétrons, o que diminui a quantidade de radiação.

De uma maneira geral, substâncias radiativas são introduzidas no corpo dos pacientes, e se acumulam em determinados órgãos ou tecidos, com os quais possuem afinidade química. Uma vez acumuladas essas substâncias, o estudo do padrão espacial da radiação emitida permite a reconstrução da imagem interna do órgão. Um exemplo corriqueiro são as imagens de tumores no cérebro produzidas a partir dos gamas emitidos pelo  $^{99}\text{Tc}$ . O cérebro possui uma tendência natural de não acumular impurezas que viajam no sangue, exceto quando existe um tumor. O  $^{99}\text{Tc}$  é acumulado então na região do tumor, o que permite

a visualização da área afetada e do tamanho do tumor.

Uma outra importante técnica que tem se desenvolvido nos últimos anos é a técnica de PET (do inglês *Positron Emission Tomography*, ou Tomografia por Emissão de Pósitrons). Pósitrons são partículas idênticas ao elétron, com exceção da sua carga, que é positiva; podemos dizer que são uma espécie de elétrons positivos. Trata-se da partícula de antimatéria associada ao elétron (mais sobre isto no capítulo nove). Vários núcleos radiativos decaem emitindo pósitrons. A utilização dessas partículas em exames médicos se baseia na seguinte propriedade física: quando um pósitron encontra um elétron, os dois se aniquilam mutuamente, dando lugar a um par de fótons. São estes fótons produzidos pela aniquilação do par elétron-pósitron dentro do organismo de uma pessoa, que trazem informações sobre a região onde o fenômeno ocorreu. Exemplos de radioisótopos emissores de pósitrons, utilizados em exames PET são o  $^{15}\text{O}$  ( $t_{1/2} = 2$  min), o  $^{13}\text{N}$  ( $t_{1/2} = 10$  min), o  $^{13}\text{C}$  ( $t_{1/2} = 20$  min), e o  $^{18}\text{F}$  ( $t_{1/2} = 110$  min).

A diferença essencial entre as imagens produzidas por PET e aquelas produzidas por outras técnicas, como por exemplo a RMN, está no fato de que enquanto as outras técnicas produzem imagens anatômicas do organismo (ou seja, imagens estáticas), PET é capaz de gerar imagens *funcionais*, exibindo a *atividade metabólica* no organismo<sup>2</sup>. A prática envolve a ingestão dos radioisótopos, como nos casos anteriores. Substâncias químicas utilizadas pelo corpo, como por exemplo a glicose, contendo radioisótopos emissores de pósitrons, são introduzidas no pa-

---

<sup>2</sup>Existe, no entanto, a chamada *RMN funcional*, que também fornece informações sobre as atividades metabólicas do organismo.

ciente. À medida em que os pósitrons emitidos pelos radioisótopos vão encontrando elétrons no organismo e sendo aniquilados, os fótons resultantes são detectados, e as atividades metabólicas envolvendo glicose (por exemplo, nos músculos, no coração, no cérebro, em um tumor, etc) vão sendo monitoradas. Com isso, as imagens de PET fornecem uma medida direta das atividades bioquímicas e funcionais do organismo. Na cardiologia a técnica PET tem sido utilizada para o diagnóstico de problemas nas coronárias (artérias que irrigam o coração), redução de fluxo sanguíneo, necessidade de pontes e transplantes, etc. Na neurologia a PET tem auxiliado na detecção de doenças neurológicas como o Mal de Alzheimer, Doença de Parkinson, Síndrome de Down, etc. O exame é ainda capaz de localizar focos epiléticos, e qualificar a região para intervenção cirúrgica.

Tratamentos utilizando radioterapia incluem técnicas para destruição de tumores ou tecidos que apresentem problemas. Tais tratamentos baseiam-se na capacidade da radiação de ionizar moléculas. A ionização faz com que as moléculas afetadas pela radiação se recombinem quimicamente com radicais livres no organismo, e sejam incorporadas em estruturas biológicas mais complexas, alterando assim suas funções químicas.

**Onde saber mais: deu na Ciência Hoje.**

1. *A Segurança de Angra I*, Luiz Pinguelli Rosa, vol. 9, no. 53, p 24.
2. *Como Funciona o Reator de Angra*, David Simon, in **Angra Entra em Operação**, vol. 2, no. 8, p 54.
3. *Angra Entra em Operação*, vol. 2, no. 8, p 50.
4. *Abalos em Angra: Nenhum Perigo à Vista*, Vera Rita da Costa e Luís

Martins, vol. 9, no. 50, p 77.

5. *A Tragédia Atômica não Acabou*, Ademar Freire-Maia, vol. 4, no. 20, p 86.
6. *Do Lixo Atômico ao Lixo Industrial*, Mário Epstein, vol. 12, no. 70, p 22.
7. *Lixo Atômico o que Fazer?* Joaquim Francisco de Carvalho, vol. 2, no. 12, p 18.
8. *Cinqüenta Anos da Fissão Nuclear: Há Razões para se Comemorar?*, Daniel R. Bes, vol. 9, no. 50, p. 76.
9. *Materiais Radiativos e Contaminação*, Roberto Alcântara Gomes, vol. 8, no. 45, p. 22.
10. *Forças Nucleares*, Hélio Teixeira Coelho e Manoel Roberto Robilotta, vol. 11, no. 63, p. 22.
11. *Fusão Termonuclear Controlada*, Nelson Fiedler-Ferrari e Ivan Cunha Nascimento, vol. 7, no. 41, p. 44.
12. *Separação de Isótopos de Urânio por Laser*, Luiz Davidovich, vol. 2, no. 10, p. 82.
13. *Novas Esperanças para a Fusão Nuclear*, Alicia Ivanissevich, vol. 9, no. 49, p. 10.
14. *Um Reator Nuclear Pode Explodir?*, Arthur Moses Thompson Motta e Luiz Fernando Seixas de Oliveira, em **Angra Entra em Operação**, vol. 2, no. 8, p. 58.
15. *Núcleos Exóticos*, Carlos A. Bertulani, vol. 11, no. 65, p. 60.
16. *Radioisótopos para Medicina*, Arthur Gerbasi da Silva, vol. 3, no. 16, p. 12.
17. *Radioterapia com Menos Riscos*, Regina Scharf, vol. 8, no. 45, p. 10.
18. *O Casal Curie e os Novos Caminhos da Física*, Lucía Tosi, vol. 24, no. 144, p. 65.

## Resumo - Capítulo Sete

Núcleos instáveis livram-se do excesso de energia emitindo partículas subatômicas. O fenômeno é chamado de radioatividade. Os três tipos de decaimento mais comuns são o decaimento por emissão alfa, por emissão beta, e por emissão gama. Partículas alfa são núcleos do átomo de hélio, formados por dois prótons e dois nêutrons. Partículas beta são elétrons ou pósitrons, e partículas gama são fótons. Analogamente às reações químicas, núcleos podem sofrer reações nucleares, dando origem a outros núcleos. Um tipo de reação nuclear muito importante é a captura de nêutrons. Quando elementos pesados, como o  $^{235}\text{U}$ , capturam nêutrons, o núcleo é fissionado, emitindo grande quantidade de energia e outros nêutrons. Esse fenômeno permite que reações nucleares de fissão sejam utilizadas para gerar energia em grande escala. Bombas atômicas e reatores nucleares utilizam este princípio. A radioatividade em excesso é altamente perniciosa para a nossa saúde, e vários acidentes já ocorreram, sendo os mais graves a explosão da usina de Chernobyl em 1986, e o acidente de Goiânia com  $^{137}\text{Cs}$  em 1987. Na fusão nuclear dois elementos leves são fundidos em um mais pesado. Este é o processo de funcionamento do Sol e de outras estrelas. Para a fusão ocorrer, altas temperaturas são necessárias. Em laboratórios, a chamada fusão termonuclear é realizada utilizando-se o princípio de confinamento magnético de um plasma em campos magnéticos. Milhares de bombas termonucleares foram construídas nos Estados Unidos e na antiga União Soviética durante a Guerra Fria. As chamadas bombas-H possuem um poder de devastação incomparavelmente maior do que as primeiras bombas atômicas lançadas sobre Hiroshima e Nagasaki. Além de armas de destruição em massa, as aplicações da energia nuclear têm produzido toneladas de lixo atômico o qual permanecerá ativo por milhões e milhões de anos. A radioatividade é também um poderoso auxiliar para tratamentos médicos e diagnósticos de doenças. Existem várias técnicas que se utilizam de isótopos radioativos para produzir imagens do interior do corpo humano, ou para combater a evolução de tumores no organismo.