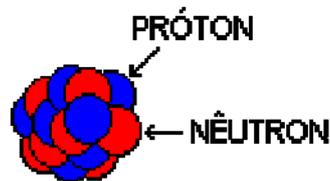


## A Interação Nuclear e a Estabilidade do Núcleo

Os prótons e nêutrons do núcleo estão aglomerados em uma região aproximadamente esférica. Os experimentos revelam que o raio  $r$  do núcleo depende do número de massa  $A$  e pode ser determinado aproximadamente, através da seguinte expressão:  $r = (1,2 \cdot 10^{-15}) \cdot \sqrt[3]{A}$ , com  $r$  dado em metros (m).



Núcleo Atômico e os núcleons

A partir dela podemos então, calcular o raio do alumínio ( $A = 27$ ), por exemplo:

$$r = (1,2 \cdot 10^{-15}) \cdot \sqrt[3]{27} \Rightarrow r = (1,2 \cdot 10^{-15}) \cdot 3 \Rightarrow r = 3,6 \cdot 10^{-15} \text{ m.}$$

Este valor de raio encontrado, mais uma vez confirma o tamanho diminuto do núcleo atômico e a enorme proximidade entre os prótons e nêutrons. Diante disso, nos deparamos com um problema interessante no núcleo. Nele encontramos apenas partículas neutras (os nêutrons) e partículas positivas (os prótons). Sabemos que cargas elétricas de mesmo sinal se repelem, ou seja, sofrem uma força de natureza elétrica e repulsiva. Por que então a repulsão elétrica entre os prótons, que são positivos, não faz os núcleos se desintegrarem? Isso faz muito sentido, pois pensando em um átomo de oxigênio que possui  $Z = 8$ , temos em seu núcleo 8 prótons confinados em um espaço muito pequeno, logo esses 8 prótons estariam exercendo entre si uma força de repulsão elétrica. Portanto, voltamos à questão: Por que os núcleos dos átomos não se desintegram?

Para que o núcleo seja estável, é preciso então que exista uma interação atrativa capaz de superar a repulsão elétrica dos prótons. Por esta razão, os físicos a chamaram de interação nuclear, uma manifestação da interação forte, uma das três interações fundamentais conhecidas, no sentido de que podem explicar todas as forças observadas na natureza. A interação nuclear deve agir apenas a pequenas distâncias, distâncias estas da mesma ordem que o tamanho do núcleo atômico, ou seja, distâncias da ordem de  $10^{-15}$  metros ou 1 Fermi. Neste aspecto, a interação nuclear é muito diferente das interações já conhecidas como a gravitacional<sup>1</sup> e eletromagnética<sup>2</sup>, que agem a grandes distâncias. A interação nuclear se manifesta de forma igual entre prótons e nêutrons, não dependendo da carga elétrica.

O alcance limitado da interação nuclear desempenha um papel importante na estabilidade do núcleo. Para que um núcleo seja estável, é preciso que a repulsão elétrica entre os prótons seja compensada pela atração entre os núcleons devido à interação nuclear. Entretanto, um próton repele todos os outros prótons do núcleo, já que a interação eletromagnética é uma interação de longo alcance. Um próton ou um nêutron, por outro lado, atrai apenas os vizinhos mais próximos através da interação nuclear. Nessas condições,

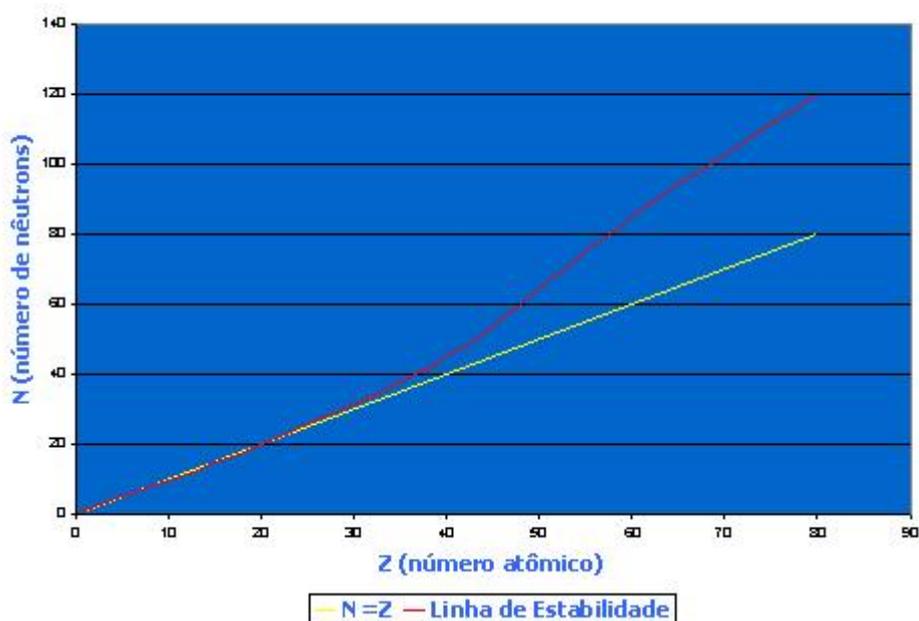
<sup>1</sup> Interação gravitacional: ocorre entre massas.

<sup>2</sup> Interação eletromagnética: ocorre entre partículas carregadas eletricamente.

quando o número Z de prótons do núcleo aumenta, o número N de nêutrons tem que aumentar ainda mais para que a estabilidade seja mantida.

Podemos considerar que existam cerca de 260 núcleos estáveis e centenas de outros núcleos instáveis. Uma representação gráfica útil na Física é um gráfico que apresenta N em função de Z para os elementos estáveis encontrados na natureza. No gráfico abaixo, a linha reta (em amarelo) representa a condição onde  $N = Z$ , indicando que estes elementos por possuírem número de prótons e nêutrons iguais, são estáveis. Isso ocorre com núcleos leves. Com o aumento do número atômico Z, os pontos que apresentam núcleos estáveis se afastam cada vez mais dessa reta, refletindo o fato de que é preciso um número relativo de nêutrons cada vez maior para compensar a repulsão elétrica dos prótons.

### Linha de Estabilidade Nuclear



Com o aumento do número de prótons do núcleo, chega um ponto em que o aumento do número de nêutrons não é suficiente para compensar a repulsão elétrica. O núcleo estável com maior número de prótons ( $Z = 83$ ) é o bismuto,  ${}_{83}^{209}Bi$ , que contém 126 nêutrons. Todos os núcleos com mais de 83 prótons, como por exemplo, o urânio ( $Z = 92$ ) são instáveis e com o tempo se desintegram<sup>3</sup> espontaneamente, até tornarem-se estáveis. Essa desintegração espontânea foi denominada de **radioatividade** e será estudada em breve.

É interessante mencionar que a maioria dos núcleos estáveis têm valores pares de número de massa (A). De fato, certos valores de Z e de N correspondem a núcleos que têm estabilidade excepcionalmente elevada. Esses valores de N e de Z, chamados de **números mágicos**, são: **Z ou N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126**. Por exemplo, o núcleo de hélio (dois prótons e dois nêutrons), que tem  $Z = 2$  e  $N = 2$ , é muito estável. Isso acaba lembrando a estabilidade química dos gases nobres que recebem essa nomenclatura por possuírem em sua eletrosfera número de elétrons como 2, 8, 18, 32.

<sup>3</sup> Desintegração: emissão de partículas.

## Unidades de medida

Para medidas da massa do átomo e de sua energia, trabalhamos com unidades de medida não tão usuais quanto aquelas que estamos habituados a usar em nosso cotidiano. Quanto à massa do átomo ela pode ser expressa em termos da chamada **unidade de massa atômica**<sup>4</sup> (**u**), que corresponde a um padrão em relação ao átomo de carbono-12. Já para as medidas de energia, usamos o **elétron-volt**<sup>5</sup> (**eV**) e os seus múltiplos: o **quiloelétron-volt**<sup>6</sup> (**keV**) e o **megaelétron-volt**<sup>7</sup> (**MeV**). Um elétron-volt corresponde a quantidade de energia igual àquela que 1 elétron adquire ao acelerar numa diferença de potencial de 1 volt.

Usando a relação de equivalência entre massa-energia de Einstein, isto é, a famosa expressão  $E = m.c^2$ , podemos estabelecer as relações entre a massa atômica e o elétron-volt. Considerando o valor da velocidade da luz como sendo  $c = 3.10^8$  m/s para o vácuo, temos então que:

**1 u = 931,5 MeV** (representa a energia da unidade de massa atômica)

**$m_e = 511,0$  keV = 0,511 MeV** (representa a energia de repouso<sup>8</sup> do elétron)

**$m_p = 938,7$  MeV** (representa a energia de repouso do próton)

**$m_N = 939,6$  MeV** (representa a energia de repouso do nêutron)

## Energia de Ligação Nuclear

Quando pensamos em uma dúzia de laranjas e uma dúzia de maçãs, a massa total é simplesmente a soma das massas de todas as frutas. No caso dos núcleons (prótons e nêutrons) que formam o núcleo atômico, porém, a situação é diferente: a massa do núcleo é sempre ligeiramente menor que a soma das massas dos prótons e nêutrons. Quando os prótons e nêutrons se unem para formar um núcleo, parte de sua massa é transformada em energia e sabemos disso porque é preciso fornecer uma certa quantidade de energia ao núcleo para desintegrá-lo. Esta energia é denominada de **energia de ligação nuclear (E)** e é diferente para diferentes núcleos. Quanto mais estável for o núcleo, maior será a energia necessária para desintegrá-lo.

Para calcular a energia de ligação nuclear precisamos conhecer o chamado **déficit de massa ( $\Delta m$ )** do núcleo que nada mais é do que a diferença entre a soma das massas dos prótons e nêutrons e a massa do núcleo, e que pode ser escrita da seguinte forma:  $E = \Delta m \cdot c^2$ .

Como exemplo, vamos fazer o cálculo da energia de ligação nuclear do átomo de hélio-4. Para determinar essa energia, calculamos primeiramente o déficit de massa  $\Delta m$ . O hélio-4 é assim indicado, pois tem  $Z = 2$  prótons e  $N = 4 - 2 = 2$  nêutrons. Para obter o déficit de massa, calculamos a soma das massas dos prótons e nêutrons que compõem o núcleo e subtraímos

<sup>4</sup>  $1 u = 1,661.10^{-27}$  kg.

<sup>5</sup>  $1 eV = 1,6.10^{-19}$  J.

<sup>6</sup>  $1 keV = 1000 eV = 10^3 eV$ .

<sup>7</sup>  $1 MeV = 1.000.000 eV = 10^6 eV$ .

<sup>8</sup> Energia de repouso: energia associada a um corpo, dada pela expressão  $E = m.c^2$ .

dessa soma a massa do núcleo de hélio-4 que é de  $6,6447 \cdot 10^{-27}$  kg, valor este retirado de uma tabela de massa de átomos, encontrada em livros de física nuclear. Logo, temos:

$$\left. \begin{array}{l} m_{\text{próton}} = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ m_{\text{nêutron}} = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\ m_{\text{núcleo}} = 6,6447 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Como temos 2 prótons e 2 nêutrons:} \\ 2 \cdot (1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}) \\ 2 \cdot (1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}) \quad + \\ \hline 6,6950 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \end{array}$$

**(Valor da soma das massas dos prótons e nêutrons)**

**Déficit de massa:**

$$\Delta m = (\text{soma das massas dos prótons e nêutrons}) - (\text{massa do núcleo})$$

$$\Delta m = 6,6950 \cdot 10^{-27} \text{ kg} - 6,6447 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta m = 0,0503 \text{ kg}$$

**Energia de ligação nuclear:**

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

$$E = 0,0503 \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$E = 4,53 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

Como  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , temos que:

$$E = 2,83 \cdot 10^7 \text{ eV} = 28,3 \text{ MeV}$$

**(energia de ligação nuclear do hélio-4)**

### Questões

1-) Existe a interação nuclear entre nêutron e próton ou ela ocorre somente entre os prótons que estão sujeitos a repulsão elétrica? Justifique.

2-) É mais fácil remover do átomo um próton ou um elétron? Justifique.

3-) Qual a principal diferença entre a interação nuclear e as interações eletromagnética e gravitacional?

4-) O que significa dizer que um átomo é estável? E que um átomo é instável?

5-) Para que serve a energia de ligação nuclear?

6-) O átomo de menor número de massa e maior número de massa e estáveis, tem respectivamente,  $A = 1$  (Hidrogênio) e  $A = 209$  (Bismuto). Qual o valor do raio atômico em cada caso?

7-) Sabendo que a massa atômica do  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$  é 205,974440 u, determine:

a) o seu déficit de massa, em unidades de massa atômica (u);

b) a energia de ligação nuclear, em MeV.