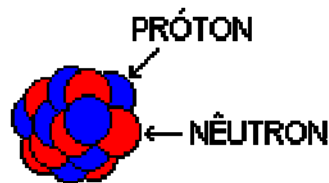


A Interação Nuclear e a Estabilidade do Núcleo

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 gravitacional¹ e eletromagnética², 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,

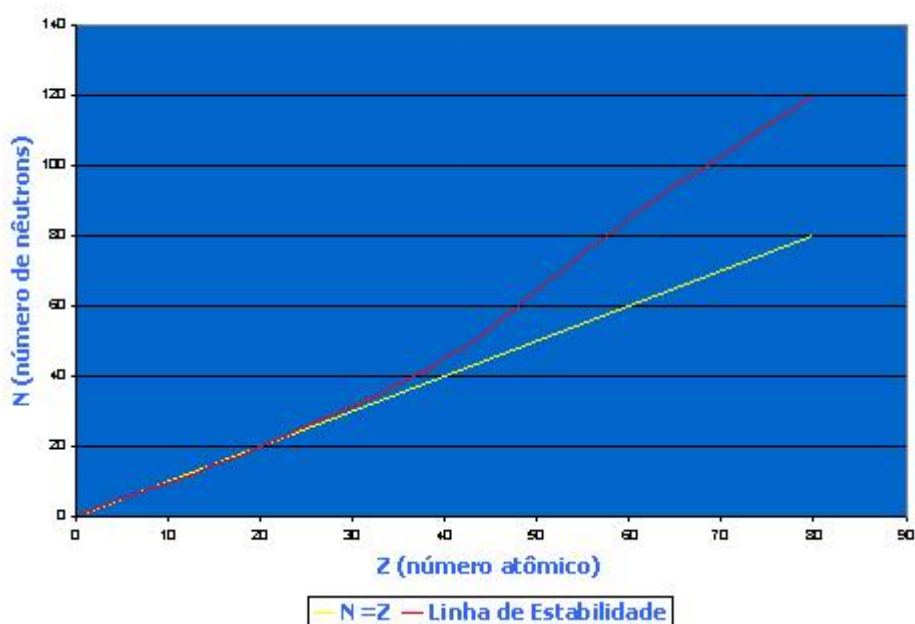
¹ Interação gravitacional: ocorre entre massas.

² 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, ${}_{83}^{209}\text{Bi}$, 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 desintegram³ 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.

³ 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**⁴ (**u**), que corresponde a um padrão em relação ao átomo de carbono-12. Já para as medidas de energia, usamos o **elétron-volt**⁵ (**eV**) e os seus múltiplos: o **quiloelétron-volt**⁶ (**keV**) e o **megaelétron-volt**⁷ (**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 repouso⁸ 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 (Δm)** 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 Δm . 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

⁴ $1 \text{ u} = 1,661.10^{-27} \text{ kg}$.

⁵ $1 \text{ eV} = 1,6.10^{-19} \text{ J}$.

⁶ $1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV} = 10^3 \text{ eV}$.

⁷ $1 \text{ MeV} = 1.000.000 \text{ eV} = 10^6 \text{ eV}$.

⁸ 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.