

**As Forças da Natureza.** Há quatro forças fundamentais atuando no interior dos átomos, forças estas que determinam as interações entre as partículas individuais e o comportamento, em larga escala, de toda a matéria no universo. Estas são a força nuclear forte e a força nuclear fraca, a força eletromagnética e a força de gravidade. A Gravidade é uma força de atração que atua entre todas as partículas no universo, sendo de natureza sempre atrativa, nunca repulsiva. Esta força, que agrega a matéria, é responsável pelo peso dos corpos, por manter a Lua em sua órbita em volta da Terra, pelo confinamento dos planetas em suas órbitas ao redor do Sol, e por agregar as galáxias, entre muitos outros fenômenos da natureza. A força eletromagnética determina como ocorrem as interações entre partículas eletricamente carregadas e com campos magnéticos. Esta força pode ser atrativa ou repulsiva. Cargas elétricas com o mesmo sinal repelem-se; com sinais diferentes, atraem-se. A força eletromagnética é responsável por manter os elétrons em orbitais atômicas, sendo portanto a força responsável pela existência dos átomos. A força eletromagnética também controla o comportamento de plasmas (um plasma é, por exemplo, uma mistura de quantidades iguais de íons positivos e elétrons) como em proeminências solares, laços coronais, e outros tipos de atividade solar. A força eletromagnética também governa a emissão e a absorção de luz e outras formas de radiação eletromagnética. Luz é emitida quando uma partícula com carga elétrica é acelerada (por exemplo, quando um elétron passa na proximidade de um íon ou interage com um campo magnético) ou quando um elétron atômico sofre transição de um nível mais alto de energia para outro de menor energia. Já a interação forte, também chamada de força forte, corresponde a dois níveis de interação. No primeiro nível, a força forte corresponde à interação entre os núcleons por meio da troca de mésons, confinando prótons e nêutrons em núcleos atômicos. No segundo nível, a força forte corresponde à interação entre quarks, --- partículas massivas com valores semi-inteiros de spin e de carga elétrica ---, por meio da troca de glúons, partículas não-massivas, sem carga elétrica mas que carregam a chamada carga de cor. A interação forte entre os quarks é descrita pela cromodinâmica quântica. A interação forte é a fonte básica das vastas quantidades de energia que são libertadas pelas reações nucleares que alimentam as estrelas. A força nuclear fraca causa o decaimento radioativo de certos núcleos atômicos. Em particular, esta força governa o processo de emissão (decaimento) beta no qual um nêutron divide-se espontaneamente em um próton, um elétron e um anti-nêutrino. Se um nêutron no interior de um núcleo atômico decair deste modo, o núcleo emite um elétron (partícula beta) e o nêutron transforma-se em um próton. Isto aumenta em uma unidade o número de prótons desse núcleo, mudando assim o seu número atômico e transformando-o no núcleo de um elemento químico diferente. A força nuclear fraca é responsável por sintetizar elementos químicos no interior de estrelas e em explosões de supernovas, através de processos que envolvem a captura e o decaimento de nêutrons. Um nêutron é estável (não é radioativo), e tem vida longa, quando confinado dentro do núcleo atômico. Uma vez removido do núcleo atômico, um nêutron livre sofrerá decaimento beta, tipicamente em cerca de  $886,7 \pm 1,9$  s. O processo de decaimento beta inverso ocorre nos interiores de estrelas em colapso de supernova, quando prótons e elétrons se fundem para criarem as vastas quantidades de nêutrons que abundam, como produto final do colapso de supernova, uma estrela de nêutrons. As interações nucleares fraca e forte, somente são efetivas para distâncias extremamente curtas. O alcance da força forte é de cerca de  $10^{-15}$  metros e o da força fraca é de  $10^{-17}$  metros. Em contraste, as interações eletromagnética e gravitacional são forças de longo alcance, sendo a sua intensidade inversamente proporcional ao quadrado da distância. Em princípio, a força gravitacional entre duas massas, ou a força eletromagnética entre duas partículas carregadas eletricamente, não se reduz completamente a zero até que a separação entre as massas ou as partículas se torne infinita. A gravitação é a mais fraca das forças em termos de intensidade. As intensidades relativas dessas interações são dadas por: Nuclear Forte  $\sim 1$ ; Eletromagnética  $\sim 10^{-2}$ ; Nuclear Fraca  $\sim 10^{-14}$ ; Gravitacional  $\sim 10^{-37}$ . No entanto, devido ao curto alcance da força nuclear e à tendência da matéria, em escalas macroscópicas, ser eletricamente neutra, é a gravitação a força que governa o movimento de corpos celestes como planetas, estrelas e galáxias. Maiores detalhes das principais características das partículas elementares e das quatro interações da natureza serão examinadas mais adiante neste curso.

**Modelos Atômicos na Antiguidade. Modelos Atômicos de John Dalton, Joseph John Thomson, Phillip Eduard Anton Lenard e Ernest Rutherford.** Acreditava-se, na antiguidade, que dividindo a matéria em porções cada vez menores, chegar-se-ia em um ponto onde as porções seriam invisíveis ao olho humano e até mesmo indivisíveis. A palavra átomo caracteriza em grego exatamente esta última propriedade: etimologicamente, a palavra *átomo* significa indivisível. Demócrito de Abdera (460 a.C. - 370 a.C.), discípulo e sucessor de Leucipo de Mileto, foi o mais importante pensador grego da antiguidade no que concerne o chamado *atomismo grego*. De acordo com essa concepção, tudo o que existe é composto por elementos indivisíveis chamados átomos. Demócrito concebeu também o conceito de universo infinito e, baseado na intuição e no pensamento lógico, concebeu a constituição da matéria como sendo

## UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Instituto de Física

Departamento de Física

Disciplina: Física do Século XX B

Prof. César Augusto Zen Vasconcelos

**LISTA TEMÁTICA E DE PROBLEMAS No.9 Propriedades dos Núcleos.** Designação dos Núcleos. Número Relativo de Prótons e Nêutrons em Núcleos. O Núcleo como uma Esfera. Energia de Ligação Nuclear.

descontínua, imersa no vácuo (*o nada absoluto*), e que todas as variedades de matéria resultariam da combinação de átomos de quatro elementos: terra, ar, fogo e água. Sua concepção de que a constituição da matéria seria descontínua foi porém contestada por Aristóteles (384 a.C. - 322 a.C.), que afirmava que, ao contrário, sua composição seria contínua. Os argumentos apresentados por Aristóteles superaram, na aceitação dos pensadores da época, as proposições de Demócrito e permaneceram até a Renascença. Em 1808, John Dalton (1766-1844) propôs um modelo atômico, denominado de bola de bilhar, em que o átomo é representado por uma minúscula esfera maciça, impenetrável, indestrutível, indivisível e sem carga. Todos os átomos de um mesmo elemento químico são idênticos em seu modelo. O modelo proposto por Joseph John Thomson (1856-1940) em 1897 tinha como suposição básica que o átomo não seria maciço, como afirmava John Dalton, mas sim um fluido com carga positiva. A distribuição de carga positiva, no interior do átomo de Thomson seria homogênea; e o átomo seria por sua vez, neste modelo, quase esférico, encontrando-se dispersos em seu interior, com distribuição também homogênea, os elétrons. Os historiadores da física moderna comumente referem-se a este modelo como modelo de *pudim recheado de uvas passas*, ou *panetone*, em que a *massa do panetone corresponderia à carga atômica positiva e as passas constituiriam as partículas negativas*. Philipp Eduard Anton Lenard<sup>1</sup> (1862-1947) aperfeiçoou o modelo de J.J. Thomson. Uma vez que a matéria é em geral eletricamente neutra, Lenard ponderou que as cargas negativas e positivas que compõem os átomos devem anular-se mutuamente. Desta forma, propôs que o átomo seria constituído por pares de cargas negativas e positivas (dinâmidos). Em 1911, Ernest Rutherford (1871-1937) propôs um modelo no qual o átomo seria constituído por um núcleo central e elétrons orbitais, modelo este que encontra similaridade em movimentos planetários. O modelo atômico de Rutherford ficou conhecido, por esta razão, como modelo planetário, pela sua semelhança com a constituição do Sistema Solar. Este modelo foi estudado e aperfeiçoado por Niels Bohr.

**Características Gerais do Núcleo.** O núcleo atômico é composto de partículas chamadas núcleons: os prótons, com carga elétrica positiva, e os nêutrons, sem carga elétrica. Prótons e nêutrons têm spin  $\frac{1}{2} \hbar$  e obedecem ao Princípio de Exclusão de Pauli. Um núcleo tem número atômico  $Z$ , sendo portanto constituído por  $Z$  prótons e  $N$  nêutrons. No átomo neutro coexistem, ao redor desse núcleo,  $Z$  elétrons. O símbolo  $A$ , tal que  $A = N + Z$ , corresponde ao número de núcleons em um núcleo, sendo  $A$  denominado de número de massa de um núcleo.

**Massas Nucleares em Unidade de Massa Atômica.** As massas nucleares são expressas em unidades de massa atômica (uma). Uma unidade de massa atômica é definida, como vimos, como: 1 uma = (1/12) da massa de um átomo de carbono 12. A massa de um átomo de carbono 12 corresponde portanto a exatamente 12 uma, tal que 1 uma =  $1,6605 \times 10^{-27}$  kg. Em termos da unidade de massa atômica, as massas do próton e do nêutron são, respectivamente:  $m_p = 1,007276$  uma;  $m_n = 1,008664$  uma. Ademais,  $1 \text{ uma } c^2 = 931,4815 \text{ MeV}$  e portanto,  $m_e c^2 = 0,5110 \text{ MeV}$ ;  $m_p c^2 = 938,3 \text{ MeV}$ ;  $m_n c^2 = 939,6 \text{ MeV}$ .

<sup>1</sup> Prêmio Nobel de Física. Ano, Nomes e Tópicos. Década de 1900 a 1910: 1901 - Wilhelm Conrad Röntgen. Descoberta dos Raios X. 1902 - Hendrik Antoon Lorentz e Pieter Zeeman. Descoberta e pesquisas da influência do magnetismo sobre as radiações. 1903 - Antoine Henri Becquerel. Descoberta da radioatividade espontânea. Pierre Curie e Marie Curie. Pesquisas sobre o fenômeno da radioatividade espontânea. 1904 - John William Strutt (Lord Rayleigh). Investigações sobre a densidade dos gases e descoberta do Argônio. 1905 - Philipp Eduard Anton von Lenard. Pesquisas sobre os raios catódicos. 1906 - Joseph John Thomson. Investigações da condução elétrica dos gases. 1907 - Albert Abraham Michelson. Instrumentação ótica de precisão e pesquisas espectroscópicas e metrológicas. 1908 - Gabriel Lippmann. Método de reprodução fotográfica de cores com base em fenômenos de interferência. 1909 - Guglielmo Marconi e Carl Ferdinand Braun. Reconhecimento às contribuições para o desenvolvimento do telégrafo sem fio. Década de 1910 a 1920: 1910 - Johannes Diderik van der Waals. Equações de estado para gases e líquidos. 1911 - Wilhelm Wien. Descobertas das leis de irradiação do calor (Lei de Wien). 1912 - Nils Gustaf Dalén. Invenção de reguladores automáticos para reservatórios de gás de iluminação. 1913 - Heike Kamerlingh-Onnes. Propriedades da matéria a baixas temperaturas e produção do hélio líquido. 1914 - Max von Laue. Descoberta da difração dos raios-X pela matéria cristalina. 1915 - William Henry Bragg e William Lawrence Bragg. Análise da estrutura cristalina através da difração de raios-X. 1916 - não houve premiação. 1917 - Charles Glover Barkla. Descoberta de emissões características de Raios Röntgen pelos elementos. 1918 - Max Planck. Desenvolvimento da física quântica e descoberta dos quanta de energia. 1919 - Johannes Stark. Descoberta do Efeito Doppler em Raios Canais e da difusão das linhas espectrais em campos elétricos. Década de 1920 a 1930: 1920 - Charles Edouard Guillaume. Precisão de medições na Física e descoberta de anomalias em ligas de aço-níquel. 1921 - Albert Einstein. Efeito fotoelétrico. 1922 - Niels Henrik David Bohr. Investigações sobre a estrutura de átomos e suas radiações. 1923 - Robert Andrews Millikan. Trabalhos sobre cargas elétricas elementares e o efeito fotoelétrico. 1924 - Karl Manne Geogr. Siegbahn. Espectroscopia de Raios-X. 1925 - Jates Franca e Gustavo Ludwig Hertz. Leis que descrevem o impacto de elétrons sobre os átomos. 1926 - Jean Baptiste Perrin. Estudos sobre a estrutura descontínua da matéria. 1927 - Arthur Holly Compton. Descoberta do Efeito Compton. Charles Thomson Rees Wilson. Câmara de Wilson. 1928 - Owen Willans Richardson. Estudos sobre os fenômenos termoiônicos e descoberta da Lei de Richardson. 1929 - Louis de Broglie. Descoberta da natureza ondulatória dos elétrons.

**Isótopos, Isótonos e Isóbaros.** Isótopos são átomos de um elemento químico cujos núcleos têm o mesmo número atômico designado por  $Z$ , mas que contêm diferentes números de massas atômicas, designados por  $A$ . Exemplos de Isótopos do hidrogênio:  $1\text{H}$  (prótio),  $2\text{H}$  (deutério) e  $3\text{H}$  (trítio). Isótopos do oxigênio:  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  e  $^{18}\text{O}$ . Assim, os isótopos de um certo elemento contêm idêntico número de prótons. A diferença nos pesos atômicos resulta portanto das diferenças no número de nêutrons nos núcleos atômicos. Isótonos são átomos que diferem no número atômico,  $Z$ , e no número de massa,  $A$ , porém apresentam o mesmo número de nêutrons,  $N$ . Exemplo: o Boro e o Carbono apresentam, cada um, 6 nêutrons: Boro:  $Z=5$  e  $A=11$ , contém 5 prótons e 6 nêutrons; Carbono:  $Z=6$  e  $A=12$ , contém 6 prótons e 6 nêutrons. A propriedade entre átomos de elementos químicos diferentes que apresentam o mesmo número de nêutrons é denominada de *isotonia*. Isóbaros são átomos de diferentes elementos químicos e, portanto, de diferentes números atômicos,  $Z$ , mas que apresentam o mesmo número de massa,  $A$ . Ex. -  ${}^6\text{C}^{14}$  ( $A=14$  e  $Z=6$ ) e  ${}^7\text{N}^{14}$  ( $A=14$  e  $Z=7$ );  ${}^{18}\text{Ar}^{40}$  ( $A=40$  e  $Z=18$ ) e  ${}^{20}\text{Ca}^{40}$  ( $A=40$  e  $Z=20$ ). A propriedade de dois ou mais elementos apresentarem o mesmo número de massa é denominada *isobaria*. Observa-se que mesmo os isóbaros apresentando o mesmo número de massa, isso não significa que apresentem exatamente a mesma massa atômica.

**Tamanho do Núcleo. Densidade Nuclear. O Núcleo como uma Esfera.** A densidade nuclear para núcleos pesados é aproximadamente constante. Supondo que possa ser adotada a aproximação da esfera rígida, o raio de um núcleo pode ser expresso na forma

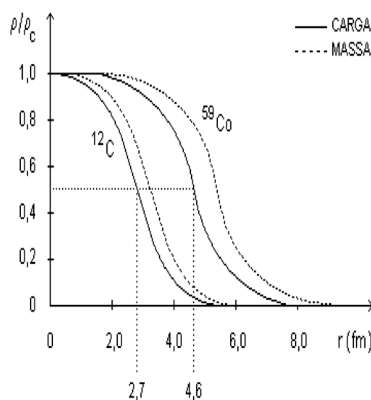
$$R = r_0 A^{1/3} \quad (1)$$

onde  $r_0$  é um coeficiente empírico ( $r_0 = 1,4$  fm para a distribuição de massa nuclear e  $r_0 = 1,2$  fm para a distribuição de carga elétrica nuclear). Representando o núcleo como uma esfera, tendo em vista que o volume de uma esfera é dado por  $V = 4\pi R^3/3$ , o volume do núcleo pode ser escrito na forma:

$$V = 4\pi R^3/3 = V = 4\pi A r_0^3/3 = 11,488 A \text{fm}^3 \quad (2)$$

A densidade da matéria nuclear fica:

$$\rho = A/V = 0,087 \text{ fm}^{-3} \quad (3)$$



Diferentes experimentos são realizados com o intuito de determinar o parâmetro  $r_0$ . Métodos experimentais com este objetivo envolvendo processos de colisão entre uma partícula incidente e o núcleo são categorizados como métodos nucleares e elétricos, dependendo do tipo de partícula incidente no sistema nuclear. Os métodos nucleares determinam a distribuição de matéria nuclear enquanto que os métodos elétricos medem a distribuição de carga em um núcleo. Representando o núcleo ainda como uma esfera, com carga  $Z$  uniformemente distribuída em seu interior, o núcleo terá uma energia eletrostática dada por

$$E_c = (3/5R) k Z(Z-1)e^2 \quad (4)$$

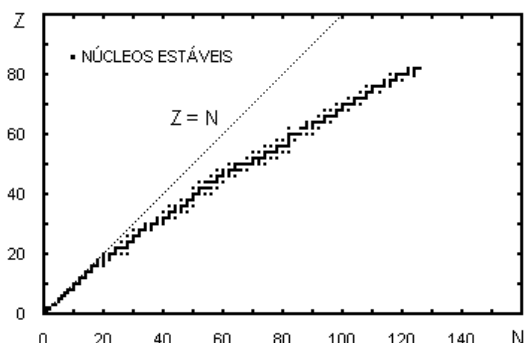
Esta relação possibilita, por meio do espalhamento de uma partícula eletricamente carregada por um núcleo, a determinação das dimensões nucleares.

#### Densidade de matéria nuclear:

$$\rho_M = AM/V = 1,67 \times 10^{-27} \text{kg} \times 0,087 \text{fm}^{-3} = 0,1453 \times 10^{-27} \times 10^{45} \text{kg m}^{-3} = 1,453 \times 10^{17} \text{kg m}^{-3} \quad (5)$$

onde  $M = 1,67 \times 10^{-27} \text{kg}$  representa a massa de um núcleon. Quanto à forma, alguns núcleos, cujos momentos de quadrupolo elétrico são diferentes de zero, afastam-se significativamente da forma esférica e podem ser considerados, em alguns casos, elipsoidais.

**Número Relativo de Prótons e Nêutrons.** Nos núcleos leves, o número de prótons e nêutrons é aproximadamente igual. Nos núcleos mais pesados, o número de nêutrons excede o de prótons em núcleos estáveis. Os efeitos atrativos da força nuclear, associados ao número maior de nêutrons, contrabalança os efeitos repulsivos da força Coulombiana repulsiva entre os prótons nucleares.



**Energia de Ligação Nuclear. Massa Nuclear.** Dado um núcleo, a energia liberada quando da sua formação, corresponde à energia de ligação nuclear. A energia de ligação de um núcleo com  $Z$  prótons e  $(A - Z)$  nêutrons, de massa  $M(Z,A)$ , pode ser expressa na forma

$$E_L(Z,N) = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - M(Z,N) c^2 \quad (6)$$

A massa nuclear, por sua vez, pode ser escrita na forma

$$M(Z,N) = Zm_p + Nm_n - E_L(Z,N)/c^2 \quad (7)$$

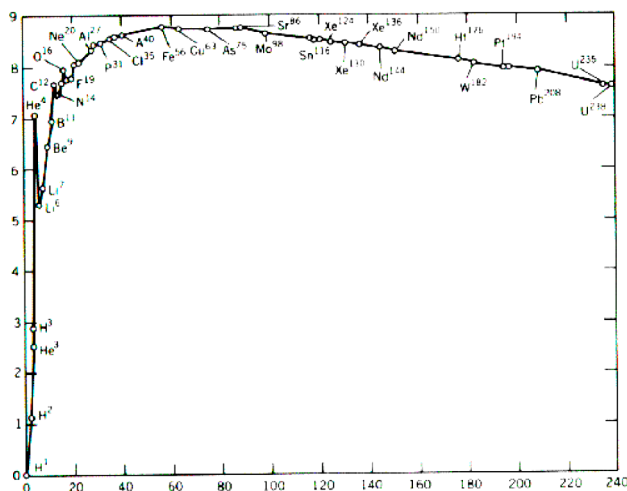
Experimentalmente, são as massas de íons atômicos ao invés das massas dos núcleos que são medidas tal que, representando por  $M_{\text{neutro}}(Z,N)$  a massa neutra nuclear, então

$$M(Z,N) = Zm_p + Nm_n - E_L(Z,N)/c^2 - E_L^{\text{elétrons}}/c^2 \quad (8)$$

onde  $E_L^{\text{elétrons}}/c^2$  representa a energia de ligação dos elétrons atômicos. Segundo o modelo estatístico de Thomas-Fermi (L.H. Thomas (1903-1992), Enrico Fermi (1901-1954)), desenvolvido em 1927

$$E_L^{\text{elétrons}}/c^2 \approx 20,8Z^{7/3} \text{eV} \quad (9)$$

**Energia de Ligação por Núcleon.** Uma indicação da estabilidade nuclear resultante das interações Coulombiana e nuclear forte é dada pelo gráfico da energia de ligação por núcleon,  $E_L(Z,N)/A$  (eixo das ordenadas), em função do número de núcleons,  $A$  (eixo das abscissas). O gráfico de  $E_L(Z,N)/A$  contra  $A$  inclui núcleos estáveis e núcleos radioativos.



O núcleo com a menor energia de ligação por núcleon é o átomo de hidrogênio 2 (deutério) e o núcleo com a maior energia de ligação por núcleon é o do ferro 56. Assim, esse gráfico apresenta um ponto de máxima em  $A = 56$ . Os núcleons são mantidos coesos pela interação nuclear, de caráter atrativo, apesar do efeito contrário da interação Coulombiana, de caráter repulsivo, entre os prótons.

**Propriedades da Força Nuclear. Saturação.** O gráfico de  $E/A$  contra  $A$  mostra que a energia de ligação por partícula é aproximadamente constante para todos os núcleos, exceto os mais leves. Assim, a energia de ligação de um núcleo é aproximadamente proporcional ao número de partículas desse núcleo. Se cada partícula do núcleo interagisse com todas as outras partículas, a energia de ligação deveria ser proporcional ao número de pares de partículas, isto é, proporcional a  $\frac{1}{2} A(A-1)$ , e como, para  $A$  grande, pode-se desprezar  $A$  em comparação a  $A^2$ , a energia de ligação deveria ser, sim, proporcional a  $A^2$ . Esse resultado está em contradição com o resultado experimental expresso no gráfico  $E / A$  contra  $A$ . A contradição desaparece se supomos que cada partícula do núcleo interage apenas com um número limitado de outras partículas. Assim, à força nuclear se atribui a propriedade de saturação. **Curto Alcance e Carço Repulsivo.** Se cada partícula do núcleo não interage com todas as outras partículas, mas apenas com algumas partículas vizinhas, a força nuclear deve ser de curto alcance. Esse alcance é da ordem de 1 fm ( $10^{-15}$  m). Para distâncias muito menores do que o alcance de 1 fm, a interação nuclear é repulsiva. A existência desse carço repulsivo explica, por exemplo, o fato de que a distância média entre núcleons é independente de  $A$  e o fato de que o volume nuclear é proporcional a  $A$ . **Independência de Carga Elétrica.** A interação nuclear é independente da carga elétrica, isto é, atua igualmente entre dois prótons (interação p-p), entre dois nêutrons (interação n-n) e entre um próton e um nêutron (interação p-n). A estabilidade do deutério permite concluir que existe interação nuclear entre nêutrons e prótons. O número de nêutrons cresce mais rapidamente que o número de prótons para núcleos estáveis não muito pequenos. Isto permite concluir que existe interação nuclear entre nêutrons. Com o crescimento do número de prótons, cresce o efeito anti-estabilizante da repulsão Coulombiana. Esse crescimento só pode ser contrabalançado pelo crescimento do efeito estabilizante da interação nuclear. Como cada núcleon interage apenas com um número limitado de outros núcleons, o excesso de nêutrons só pode contribuir para o crescimento do efeito estabilizante, se existe interação nuclear entre nêutrons. Para núcleos estáveis leves, o número de nêutrons cresce junto com o número de prótons. Este fato, mais a existência de interação nuclear entre nêutrons, permite concluir que existe interação nuclear também entre prótons e com a mesma intensidade. Se não existisse interação nuclear entre prótons ou se a interação nuclear entre nêutrons fosse mais intensa do que a interação nuclear entre prótons, os núcleos estáveis leves deveriam conter um número maior de nêutrons do que de prótons e não um número aproximadamente igual de nêutrons e prótons como, realmente,

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Instituto de Física**

**Departamento de Física**

**Disciplina: Física do Século XX B**

**Prof. César Augusto Zen Vasconcelos**

**LISTA TEMÁTICA E DE PROBLEMAS No.9 Propriedades dos Núcleos.** Designação dos Núcleos. Número Relativo de Prótons e Nêutrons em Núcleos. O Núcleo como uma Esfera. Energia de Ligação Nuclear.

---

acontece. A independência da carga nas interações nucleares é, também, corroborada pelo fato de que os resultados dos experimentos de espalhamento de prótons pelo núcleo são idênticos aos resultados dos experimentos de espalhamento de nêutrons. **Caráter Não Central.** .

**Problemas.**

1. Determine os raios dos núcleos  $^{16}\text{O}$  e  $^{208}\text{Pb}$ .
2. Determine a densidade aproximada de um núcleo.
3. Determine que núcleo estável tem raio equivalente a 1/3 do raio do  $^{189}\text{Os}$ .
4. Um núcleo com  $A = 235$  se desintegra em dois outros núcleos cujos números de massa estão na razão 2 : 1. Encontre os raios destes dois novos núcleos.
5. Calcule a energia de ligação do núcleo  $^{126}_{52}\text{Te}$ .
6. Qual é a energia necessária para remover o nêutron menos ligado do  $^{40}_{20}\text{Ca}$ ?
7. Determine a energia potencial eletrostática dos prótons em um núcleo supondo que a carga elétrica é uniformemente distribuída no volume nuclear.
8. Calcule a energia Coulombiana do  $^{73}_{32}\text{Ge}$ .
9. A fórmula semi-empírica de massa estabelece que a massa de um núcleo pode ser determinada pela expressão  
 $E_l(Z,N) = aA - bA^{2/3} - sA^{-1}(N-Z)^2 - dA^{-1/3}Z^2 - \delta A^{1/2}$  onde  $A = N+Z$ ,  $a = 15,835$  MeV,  $b = 18,33$  MeV,  $s = 23,20$  MeV,  $d = 0,714$  MeV e  $\delta = 11,2$  MeV, para núcleons com  $Z$  e  $N$  ímpares,  $\delta = -11,2$  MeV,  $Z$  e  $N$  pares e  $\delta = 0$ , para os demais. Determine os valores das massas dos seguintes núcleos:  $^2_1\text{H}$ ,  $^4_2\text{He}$ ,  $^6_3\text{Li}$ ,  $^{12}_6\text{C}$ .
10. Determine os valores das energias de ligação dos seguintes núcleos:  $^2_1\text{H}$ ,  $^4_2\text{He}$ ,  $^6_3\text{Li}$ ,  $^{12}_6\text{C}$ .
11. O raio do Ge é igual a duas vezes o raio do  $^9_4\text{Be}$ . Quantos elétrons existem no átomo neutro de Ge?
12. Qual é a energia necessária para remover o próton menos ligado do  $^{40}_{20}\text{Ca}$ ? Compare este resultado com aquele obtido no problema 6 desta lista.
13. Calcule a razão entre o raio nuclear e o raio do elétron mais interno do  $^{208}_{82}\text{Pb}$ , usando neste último caso, o modelo de Bohr.
14. Determine a energia Coulombiana do  $^{16}_8\text{O}$  e do  $^{175}_{71}\text{Lu}$ .
15. Calcule a energia de ligação do  $^{39}_{19}\text{K}$ .