

Aula 04 - O Núcleo Atômico

Introdução

Neste texto, faremos uma introdução ao núcleo atômico, iniciando a discussão a partir de sua descoberta, atribuída ao trabalho de Ernest Rutherford e colaboradores. Em seguida, discutiremos algumas propriedades bastante básicas do núcleo, como sua composição, tamanho e massa.

A descoberta do núcleo atômico

No final do século XIX, diversos trabalhos investigavam a natureza de novos fenômenos que envolviam a emissão de radiações desconhecidas tanto por alguns tipos de materiais como pelos chamados tubos de raios catódicos. Utilizando esse equipamento, Joseph John Thomson estabelece a existência dos elétrons em 1897, medindo a razão entre sua carga e massa ao estudar a interação dessas partículas com campos elétricos e magnéticos. Em seguida, o próprio Thomson propõe um modelo para a estrutura básica da matéria, o átomo, que era um conceito muito discutido e ainda não aceito por uma parte da comunidade científica. Ele propõe que os átomos seriam formados por elétrons, que são partículas carregadas negativamente, incrustados em uma distribuição de carga positiva, modelo que ficou conhecido na literatura por “pudim de passas” (figura 1).

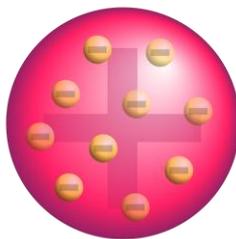


Figura 1: Modelo atômico proposto por Thomson (Fonte: Wikimedia Commons).

Uma pergunta que imediatamente emerge é como testar esse modelo proposto por Thomson. A resposta foi dada por Ernest Rutherford, físico neozelandês que trabalhava na Universidade de Manchester na Inglaterra, que propõe o “bombardeamento” dos átomos por uma partícula cujas propriedades sejam conhecidas antes da interação com os átomos, de forma que possam ser comparadas com o estado das partículas após a interação. Dessa comparação é possível se extrair informações sobre o sistema físico que provocou as mudanças no estado da partícula. A melhor candidata eram as chamadas partículas- α , que são emitidas por alguns materiais radiativos conhecidos na época e que haviam sido identificadas pelo próprio Rutherford em 1907. A proposta do experimento consistia em expor uma fina folha composta de um determinado material, como ouro ou alumínio, a um feixe colimado de partículas- α emitidas de uma fonte radioativa. A medida consistia em se contar quantas partículas- α eram espalhadas em função do ângulo relativo à sua trajetória inicial após atravessarem essa folha. Como as partículas- α possuem carga positiva e são, aproximadamente, 7000 vezes

Estrutura da Matéria – O Núcleo Atômico
Autor: Prof. Marcelo Gameiro Munhoz

mais pesadas que os elétrons, esperava-se, caso o modelo de Thomson estivesse correto, que todas as partículas- α sofressem pequenos desvios em suas trajetórias, sendo, portanto, medidas somente para pequenos ângulos de espalhamento. A figura 2 mostra um esquema dos experimentos realizados por Johannes Hans Geiger e Ernest Marsden, colaboradores de Rutherford.

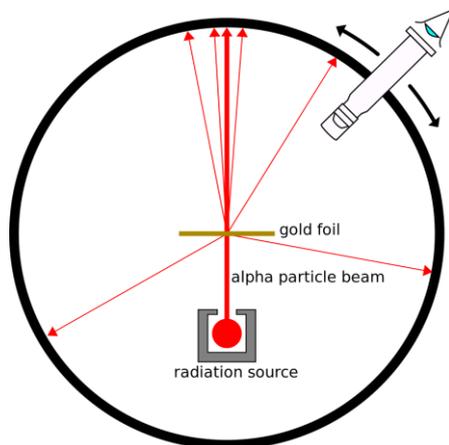


Figura 2: Esquema do experimentos realizados por Johannes Hans Geiger e Ernest Marsden (Fonte: Wikimedia Commons)

Contrariando as expectativas, algumas partículas- α foram espalhadas em ângulos bem traseiros, desafiando o modelo proposto por Thomson. Em 1911, Rutherford publica um trabalho onde ele demonstra quantitativamente que os resultados de Geiger e Marsden seriam obtidos a partir de novas hipóteses para o modelo atômico. Essencialmente, ele propõe uma nova configuração para o átomo, onde a maior parte da matéria do átomo e toda sua carga positiva estão concentrados no centro do átomo, isto é, no núcleo, com os elétrons orbitando em sua volta, como esquematizado na figura 3.

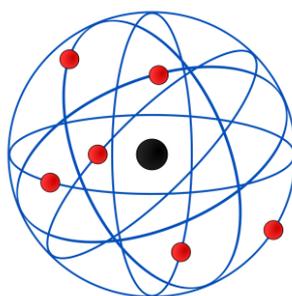


Figura 3: Visão esquemática da configuração do átomo proposto por Rutherford. O círculo no centro, em preto, representa o núcleo do átomo, enquanto os círculos em vermelho representam os elétrons (Fonte: Wikimedia Commons).

As hipóteses para o modelo atômico usadas por Rutherford em seus cálculos são:

- A mecânica clássica é válida (a física quântica estava apenas surgindo nessa época);
- O átomo contém um núcleo de carga $+Ze$ e Z elétrons orbitando a sua volta;

- Somente a força Coulombiana intermedia a interação entre as partículas- α e o núcleo dos átomos presentes na folha;
- O núcleo e a partícula incidente são pontuais;
- O núcleo alvo não sofre recuo, ou seja, tem uma massa infinitamente maior que as partículas- α ;
- Nenhuma mudança ocorre no estado do alvo ou da partícula incidente.

A partir dessas hipóteses, podemos agora calcular o número de partículas- α espalhadas em função do ângulo relativo à sua trajetória inicial (ângulo θ na figura 4) a fim de comparar com medidas e, assim, colocar a prova essas hipóteses. O primeiro passo nesse cálculo consiste em se obter o ângulo de espalhamento da partícula incidente (θ) em função da proximidade ou parâmetro de impacto da colisão (representado pela letra b na figura 4). Há diversas maneiras de se deduzir essa relação, cujo resultado é:

$$b = \frac{Ze^2}{4pe_0 \left(\frac{mv^2}{2} \right)} \cotg\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

onde Ze é a carga do núcleo que espalha as partículas- α , m e v são a massa e a velocidade das partículas- α , respectivamente.

Em seguida, precisamos calcular a probabilidade de uma partícula- α interagir com o núcleo e ser espalhada em um determinado ângulo θ . Esse espalhamento ocorrerá toda vez que uma partícula- α se aproximar do núcleo a uma distância b correspondente a esse ângulo θ , conforme a expressão (1). A figura 5 ilustra essa forma de abordar o questão, mostrando que as partículas- α serão espalhadas em um ângulo θ se atravessarem a folha alvo em anéis de raio b em torno dos núcleos.

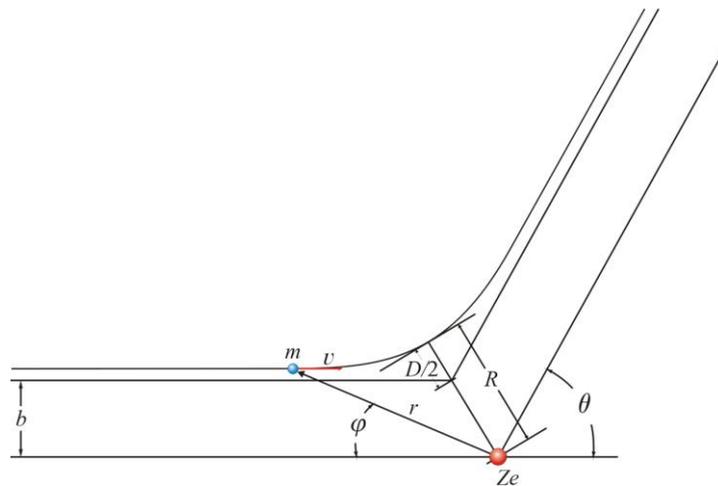


Figura 4: Diagrama representando o espalhamento de partículas- α em um núcleo atômico. As partículas- α têm carga $+2e$, enquanto o núcleo apresenta carga $+Ze$. O parâmetro de impacto da colisão está representado por b na figura e o ângulo de espalhamento das partículas- α por θ (Fonte: Wikimedia Commons).

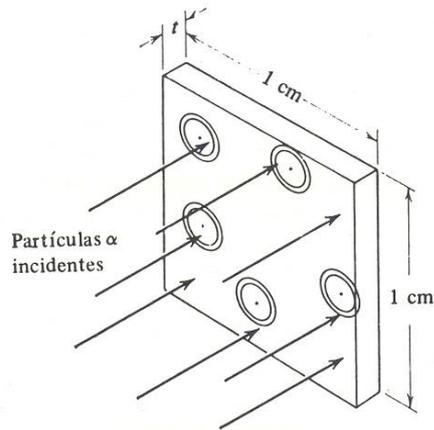


Figura 5: Ilustração da região (anéis de raio b) onde as partículas- α precisam atingir a folha alvo para serem espalhadas em um ângulo θ . (Fonte: *Física Quântica*, R. Eisberg e R. Resnick, Elsevier Editora Ltda)

Portanto, a probabilidade de uma partícula- α ser espalhada em um intervalo angular entre θ e $\theta+d\theta$, $P(\theta)d\theta$, será dada pela probabilidade de uma partícula- α atravessar um anel de raio interno b e raio externo $b+db$ em torno dos núcleos presentes na folha alvo. Essa probabilidade, por sua vez, será dada pela razão entre a área ocupada por esses anéis e a área total da folha (A), supondo que o feixe de partículas- α está uniformemente distribuído nessa área. Para calcular a área ocupada por esses anéis, precisamos multiplicar a área de um anel pelo número de núcleos presentes na folha (n). Se a folha alvo possui uma espessura t , área A e densidade ρ , o número (n) de núcleos presentes na folha será dado por:

$$r = \frac{n}{A \cdot t} \quad \Rightarrow \quad n = r \cdot A \cdot t \tag{2}$$

Finalmente, teremos:

$$P(q) dq = \frac{n \cdot 2 \rho b db}{A} = r \cdot t \cdot 2 \rho b db \tag{3}$$

Da expressão (1), podemos deduzir que:

$$db = - \frac{Ze^2}{4 \rho e_0 m v^2} \frac{d\left(\frac{q}{2}\right)}{\text{sen}^2\left(\frac{q}{2}\right)} \tag{4}$$

e, conseqüentemente,

$$P(q) dq = r \cdot t \left(\frac{Ze^2}{4 \rho e_0 m v^2} \right)^2 \frac{2 \rho \text{sen}(q) dq}{\text{sen}^4\left(\frac{q}{2}\right)} \tag{5}$$

Chamando de I o número de partículas- α incidentes sobre a folha alvo por unidade de tempo, teremos que o número de partículas- α espalhadas em um ângulo θ ($N(\theta)d\theta$) por unidade de tempo será dado por:

$$N(q)dq = I \cdot P(q)dq = I \cdot r \cdot t \left(\frac{Ze^2}{4pe_0mv^2} \right)^2 \frac{2p \operatorname{sen}(q) dq}{\operatorname{sen}^4\left(\frac{q}{2}\right)} \quad (6)$$

O último passo consiste em se obter uma grandeza que não dependa de especificidades do experimento realizado, ou seja, que não dependa de I , ρ e t . Esse processo, chamado de normalização, resulta em uma grandeza muito comum na física nuclear, chamada de seção de choque.

Ao incidir um feixe de partículas sobre um alvo, o número de núcleos por unidade de tempo que irão interagir com o alvo (N) é proporcional ao número de partículas por unidade de tempo no feixe (I) e o número de átomos no alvo por unidade de área (n_A):

$$N \propto I \times n_A \quad \text{ou} \quad N = S \times I \times n_A \quad (7)$$

A constante de proporcionalidade (σ) que aparece nessa relação depende dos processos físicos envolvidos na interação e é chamada de seção de choque. É interessante notar que a seção de choque tem unidade de área e corresponde a uma área efetiva que o projétil deve atingir para interagir com o alvo. Uma interpretação melhor para a seção de choque é simplesmente a probabilidade de interação entre o projétil e o alvo.

A seção de choque diferencial ($d\sigma/d\Omega$), por sua vez, fornece o número de partículas espalhadas em um dado elemento de ângulo sólido $d\Omega$, ou seja:

$$dN = \frac{dS}{dW} \cdot I \cdot n_A \cdot dW \quad (8)$$

onde,

$$dW = 2p \operatorname{sen}(q) dq \quad (9)$$

Consequentemente, a expressão final para o espalhamento das partículas- α em função do ângulo θ considerando-se a seção de choque, ou seja, a expressão normalizada, é dada por:

$$\frac{dS}{dW} = \frac{dN}{I \cdot n_A \cdot dW} = \frac{N(q) dq}{I \cdot n_A \cdot dW} = \left(\frac{Ze^2}{4pe_0mv^2} \right)^2 \frac{1}{\operatorname{sen}^4\left(\frac{q}{2}\right)} \quad (10)$$

a partir da combinação das expressões 2, 6, 8 e 9.

Podemos agora comparar essa expressão deduzida por Rutherford em seu trabalho de 1911, com os resultados experimentais obtidos por Geiger e

Marsden em uma série de novas medidas mais precisas (1913), onde eles observaram que:

- A distribuição angular variava com $1/\sin^4(\theta/2)$, para $5^\circ < \theta < 150^\circ$;
- A intensidade de partículas espalhadas era proporcional à espessura da folha;
- A intensidade de partículas espalhadas era proporcional ao quadrado do peso atômico (medido para Al, Cu, Ag, Sn e Au).

Todas essas observações são reproduzidas pela expressão de Rutherford, o que deu um grande impulso à sua proposta, tornando a existência do núcleo atômico muito bem aceita pela comunidade científica. Havia apenas algumas discrepâncias para alvos de alumínio, o material com menor valor de Z utilizado, e quando a energia das partículas- α era maior. Essas discrepâncias são, na realidade, muito interessantes, pois revelam que o núcleo atômico é muito mais complexo do que as hipóteses usadas por Rutherford. O núcleo é realmente algo pontual, sem uma estrutura interna? Ele tem massa infinitamente maior do que das partículas- α ? Apenas a força elétrica atua no núcleo atômico? Discutiremos essas e outras questões nas próximas seções.

A composição do núcleo

As hipóteses de Rutherford sobre o núcleo atômico em seu trabalho de 1911, apesar de representarem um grande avanço no entendimento da estrutura elementar da matéria, eram bastante rudimentares. Desde o início, notou-se que o núcleo não era simplesmente algo pontual sem estrutura interna. Por exemplo, em 1913, Frederick Soddy descobre que a relação entre a carga e a massa dos núcleos não é linear e relata a existência de um mesmo elemento com massas diferentes, indicando que o núcleo atômico não podia ser algo tão simples, composto apenas de “entidades” com carga positiva. Esses núcleos com mesma carga e diferentes massas são chamados de isótopos. Inicialmente, especulou-se que existiam elétrons no núcleo, mas essa hipótese logo foi descartada por conta de uma incompatibilidade entre o Princípio da Incerteza e medidas feitas com elementos radioativos. Em 1919, o próprio Rutherford identifica a existência dos prótons a partir de reações nucleares entre partículas- α e núcleos de Nitrogênio. Logo se percebe que essa é uma partícula com carga elétrica de igual magnitude à carga do elétron, mas de polaridade oposta, sendo bastante básica e presente em todos os núcleos. Somente em 1932, com a descoberta de uma partícula neutra proveniente do núcleo, o nêutron, por James Chadwick, é que Werner Heisenberg, no mesmo ano, estabelece a estrutura do núcleo como a conhecemos hoje, composto por prótons e nêutrons, sendo o primeiro de carga positiva e o segundo de carga nula. Portanto, a carga do núcleo é dada pelo número de prótons presentes, também chamado de número atômico e representado normalmente pela letra Z maiúscula, e a sua massa é dada tanto pelo número de prótons e como pelo número de nêutrons presentes, chamada de número de massa e representada normalmente pela letra A maiúscula. O número de nêutrons em um núcleo é normalmente representado pela letra N maiúscula. Prótons e nêutrons são chamados de forma genérica de núcleons. A figura 6 mostra a variedade de núcleos que

Estrutura da Matéria – O Núcleo Atômico
Autor: Prof. Marcelo Gameiro Munhoz

conhecemos atualmente em termos do número de prótons (abscissa do gráfico) e número de nêutrons (ordenada do gráfico). Os pontos em preto representam as combinações de prótons e nêutrons que resultam em núcleos estáveis, isto é, aqueles que não sofrem decaimentos radioativos. Os pontos coloridos representam justamente as combinações de prótons e nêutrons que resultam em núcleos que sofrem decaimentos radioativos, com as cores representando o tempo de meia-vida dos núcleos, conforme escala à direita. O fenômeno da radioatividade será discutido na aula seguinte.

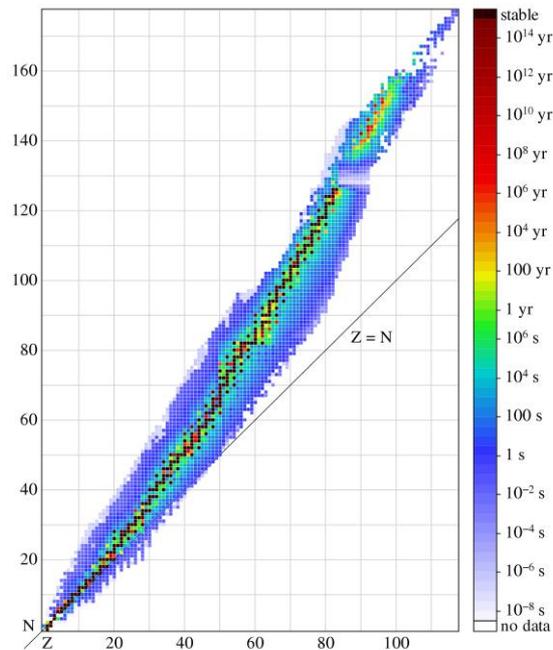


Figura 6: Possíveis combinações de prótons e nêutrons para formar os núcleos que conhecemos atualmente. Os pontos pretos representam núcleos estáveis, enquanto as cores representam justamente o tempo de meia-vida dos núcleos que não são estáveis, conforme escala à direita (yr = ano) (Fonte: Wikimedia Commons).

O tamanho do núcleo

E com relação ao tamanho do núcleo, como podemos determiná-lo? O estudo do tamanho do núcleo é feito utilizando-se a mesma abordagem proposta por Rutherford, ou seja, induzindo pontas de prova com propriedades conhecidas a interagir com núcleos atômicos e comparamos suas propriedades antes e depois da interação. Pode-se obter o tamanho do núcleo a partir de interações eletromagnéticas e nucleares, usando, por exemplo, partículas- α ; somente interações eletromagnéticas, a partir do espalhamento de elétrons; ou somente interações nucleares, estudando o espalhamento de nêutrons.

Rutherford e colaboradores já haviam notado que o núcleo deveria ter uma dimensão muito pequena, da ordem de 10^{-15} m, unidade também conhecida como fêrmion (fm). Essa ordem de grandeza é obtida simplesmente calculando-se a distância de máxima aproximação das partículas- α aos núcleos naqueles experimentos iniciais da física nuclear. Sabendo que essa

distância (D) é obtida quando toda a energia cinética das partículas- α é convertida em energia potencial elétrica, tem-se que:

$$D = \frac{Zze^2}{4\rho e_0 \left(\frac{mv^2}{2} \right)} \quad (11)$$

onde z é a carga da partícula- α ($z=2$), m a sua massa e v a sua velocidade. Portanto, sabendo o valor da energia cinética das partículas- α emitidas pelas fontes radioativas dos experimentos e o valor de Z do núcleo presente na folha alvo, pode-se calcular D .

Essa abordagem é bastante imprecisa e nos fornece apenas uma ordem de grandeza. O espalhamento de elétrons pelo núcleo atômico nos permite obter informações muito mais precisas, inclusive a distribuição de carga no núcleo. Assumindo que a distribuição de prótons, que determinam a carga do núcleo, é semelhante à distribuição de nêutrons (e de fato é o caso, com exceção dos núcleos que possuem uma configuração de prótons e nêutrons muito diferente dos núcleos estáveis), podemos inferir como é a distribuição de matéria dentro de um núcleo.

Como mencionado anteriormente, o estudo de espalhamento de partículas é feito a partir do conceito de seção de choque. Quando consideramos apenas a força elétrica de Coulomb e que a partícula alvo, aquela que provoca o espalhamento, é pontual, chegamos à expressão (10), que chamaremos de $dS/dW|_{Ruth}$. Porém, quando queremos incluir efeitos relativísticos, necessário quando se estuda o espalhamento de elétrons de alta velocidade, e o tamanho finito do núcleo, precisamos usar a expressão:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma}{d\Omega}|_{Mott} |F(\vec{q})|^2 \quad (12)$$

onde,

$$\frac{dS}{dW}|_{Mott} = \frac{dS}{dW}|_{Ruth} \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (13)$$

e

$$F(\vec{q}) = \int \rho_c(\vec{r}) e^{i\vec{q}\cdot\vec{r}} d\vec{r} \quad (14)$$

O fator de $\cos^2(\theta/2)$ que multiplica $dS/dW|_{Ruth}$ é a correção relativística proposta por Nevill Francis Mott e $F(\vec{q})$ é o chamado fator de forma, que trás

a informação sobre a distribuição finita de carga no alvo, sendo q o momento linear transferido do elétron para o núcleo e ρ_C a distribuição ou densidade de carga no núcleo, cuja integral deve corresponder à carga total do núcleo:

$$Ze = \int \rho_C(\vec{r}) d\vec{r} \quad (15)$$

Portanto, a distribuição de carga de um núcleo pode ser determinada medindo a seção de choque de espalhamento de elétrons no núcleo e ajustando a expressão (12) aos dados a partir da suposição de diferentes modelos para ρ_C na expressão (14). Um modelo muito bem sucedido que tem sido usado extensivamente, corresponde a:

$$\rho_C(r) = \frac{r_0}{1 + e^{\left[\frac{(r-a)}{d} \right]}} \quad (16)$$

que é chamado de distribuição de Fermi ou Woods-Saxon, onde a é a distância entre o centro do núcleo e a posição onde sua densidade é a metade do valor central e d é a difusividade do núcleo, que fornece uma estimativa da taxa com que a matéria nuclear diminui na superfície do núcleo. A figura 7 mostra a distribuição de carga obtida para diferentes núcleos.

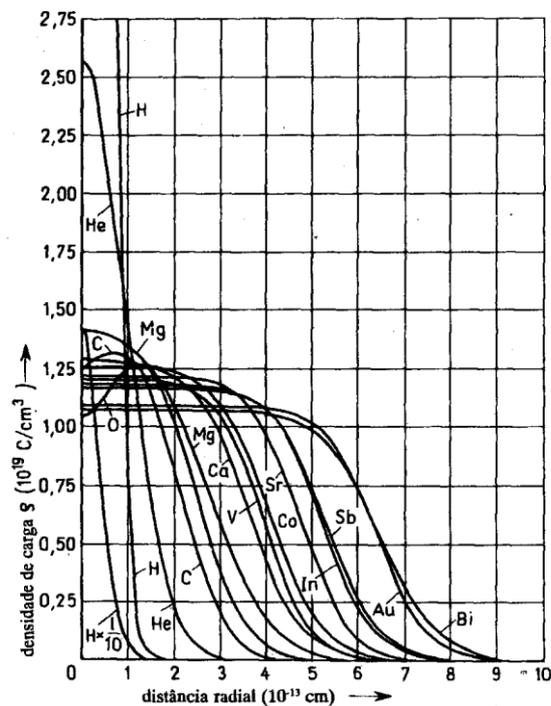


Figura 7: Distribuição de carga de diferentes núcleos.

O resultados ilustrados na figura 7 mostram que a densidade nuclear é a mesma para diferentes núcleos (com algumas exceções como o H e o He),

mudando apenas o valor do parâmetro a e, em menor escala, da difusividade (d).

Ao se estudar o comportamento do valor médio do raio nuclear em função do número de massa dos núcleos ($A=Z+N$), nota-se um comportamento muito interessante ilustrado na figura 8. O raio médio dos núcleos apresenta uma dependência com $A^{1/3}$ que, por sua vez, indica que o volume do núcleo é proporcional a A . Portanto, o volume nuclear é aditivo, isto é, ao se acrescentar um próton ou nêutron ao núcleo, seu volume cresce proporcionalmente. Isso indica que a força que mantém o núcleo coeso é de curto alcance, pois caso contrário a densidade nuclear deveria aumentar conforme se aumenta o número de prótons ou nêutrons, como acontece com o átomo ao se acrescentar elétrons em sua órbita. Essa força, como visto nas duas primeiras aulas desta disciplina, chama-se força forte.

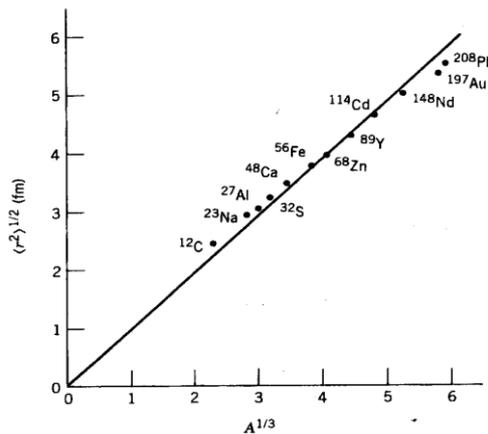


Figura 8: valor médio do raio nuclear em função do número de massa dos núcleos ($A=Z+N$) elevada a $1/3$.

A massa do núcleo

A massa dos átomos tem sido medida desde os primórdios da teoria atômica, no início do século XIX. Com as medidas da massa do elétron no final do século XIX, logo se concluiu que a massa atômica estava concentrada na parte positiva do átomo, ou seja, no núcleo atômico. A massa dos núcleos pode ser expressa em unidades de MeV/c^2 ou também podemos expressá-la em unidades de massa atômica (u.m.a.), onde $1 \text{ u.m.a.} = 1/12$ da massa do átomo neutro de ^{12}C .

Existem diversos métodos para se medir a massa atômica, como equipamentos chamados de espectrômetros de massa, que essencialmente utilizam a interação do núcleo com campos elétricos e magnéticos, como J. J. Thomson mediu a razão carga/massa do elétron, ou através de reações nucleares, como veremos na aula 6.

Um conceito muito importante relacionado à massa do núcleo é a sua energia de ligação. Podemos calcular a massa (m) de um núcleo com Z prótons e N nêutrons a partir da expressão:

$$m(Z, N)c^2 = Z \times m_p c^2 + N \times m_n c^2 - B$$

(17)

onde B é a energia de ligação do núcleo, isto é, a energia necessária para manter o núcleo como um sistema ligado. Se a massa dos núcleos fosse apenas a soma das massas de seus constituintes, deveríamos ter $B=0$. Porém, como ilustrado na figura 9, não é isso que observamos na natureza.

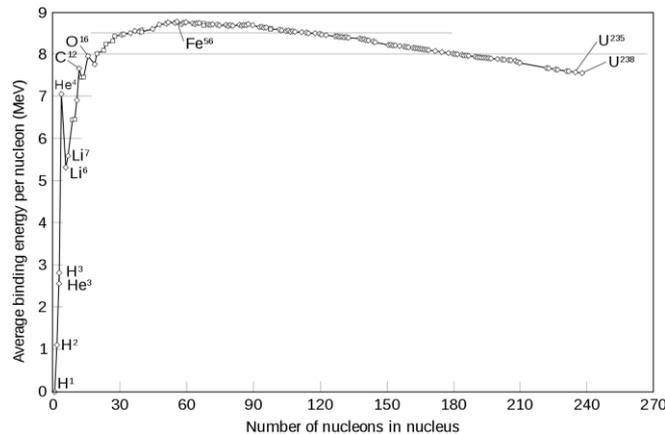


Figura 9: Energia de ligação dos núcleos dividida pelo número de massa ($A=Z+N$) em função do número de massa (Fonte: Wikimedia Commons).

Este resultado mostra que, de fato, a massa de um núcleo não é apenas a soma da massa dos seus constituintes, ou seja, o núcleo é uma estrutura mais complexa do que isso. Em 1935, C. F. von Weizsäcker e H. Beth desenvolveram uma fórmula semi-empírica da massa nuclear considerando o núcleo como um líquido incompressível, visto que a energia de ligação por A é quase constante para um grande número de núcleos. Essa abordagem foi conhecida como Modelo da Gota-Líquida. A equação proposta, chamada de fórmula semi-empírica de massa, se baseia em diversas propriedades observadas dos núcleos atômicos, que levam a diferentes termos com coeficientes numéricos que são obtidos a partir de um ajuste aos dados mostrados na figura 9.

O primeiro termo dessa fórmula corresponde justamente a um valor de B/A constante, que expressa justamente o fato da força que mantém prótons e nêutrons ligados no núcleo ser de curto alcance, pois, caso contrário, B deveria ser proporcional a $A(A-1)$.

No segundo termo, considera-se que os prótons e nêutrons na superfície do núcleo devem contribuir menos com a energia de ligação, pois possuem menos “vizinhos”. Como a superfície de uma esfera é proporcional a R^2 , devemos acrescentar um termo com essa dependência no nosso modelo, ou seja, como o raio do núcleo é proporcional a $A^{1/3}$, devemos ter B proporcional a $A^{2/3}$.

No terceiro termo, considera-se a repulsão Coulombiana entre prótons. Ela será proporcional a $Z(Z-1)$ e inversamente proporcional ao raio ($A^{1/3}$). A partir da observação de que núcleos estáveis tendem a apresentar $Z \sim A/2$, que deve ser uma condição de estabilidade e aumentar o valor de B , inclui-se um

Estrutura da Matéria – O Núcleo Atômico
Autor: Prof. Marcelo Gameiro Munhoz

quarto termo proporcional a $(A-2Z)^2/A$, pois esse efeito deve diminuir com o aumento de A .

Portanto, a fórmula semi-empírica de massa é dada por:

$$B = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_{sim} \frac{(A-2Z)^2}{A}$$

(18)

onde,

$$a_V = 15,56 \text{ MeV}$$

$$a_S = 17,23 \text{ MeV}$$

$$a_C = 0,697 \text{ MeV}$$

$$a_{sim} = 23,285 \text{ MeV}$$

Esse modelo funciona bem para explicar características mais globais dos núcleos, como a energia de ligação, mas para uma descrição microscópica do núcleo, isto é, em termos dos seus constituintes, é preciso outras abordagens.