

A1- NOÇÕES DE FÍSICA NUCLEAR

- 1.1 Histórico

Em **1896**, Henry Becquerel verificou que sais de urânio emitiam radiação continuamente mesmo sem a presença de luz, impressionando uma chapa radiográfica. Estava descoberta a radioatividade.

Radioatividade é o termo dado em **1898** às radiações emitidas pelo rádio (Ra), e polônio (Pó), devido à desintegração espontânea de seus núcleos. Esses novos elementos descobertos pelo casal Curie renderam a ambos os cientistas o prêmio Nobel de Física, juntamente com Becquerel.

O neozelandês Rutherford estudando a radioatividade no laboratório de Cavendish na Inglaterra observou que ela tinha a propriedade de penetrar na matéria. Além disso, observou que esses elementos apresentavam 3 feixes distintos de radiação, dois (02) dos quais se desviavam em sentidos opostos, sob a ação de campos magnéticos.

Rutherford do laboratório de Cavendish denominou de α , β e γ os três tipos de radiação emitidos pelos corpos radioativos.

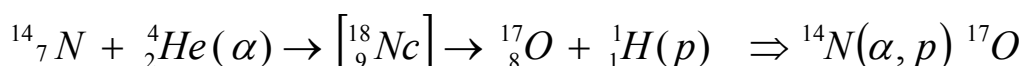
$\alpha \Rightarrow$ partícula massiva de carga + (núcleo do ${}^4_2\text{He}$ - $m = 4,0026$ uma);

$\beta \Rightarrow$ elétron de origem nuclear com carga - ($q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb);

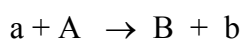
$\gamma \Rightarrow$ radiação de origem eletromagnética (decorre da excitação do núcleo após a emissão da partícula α ou β).

1.2 Desintegrações Artificiais

Realizando experiências em Cavendish, Rutherford obteve a primeira transmutação nuclear (reação nuclear) produzida pelo homem, bombardeando o N-14 com partículas alfa de alta energia do Po-214.



Posteriormente o próprio Rutherford e James Chadwick demonstraram que a desintegração artificial acontecia para todos os núcleos leves bombardeados com partículas alfa, desde o boro até o potássio, exceção ao oxigênio e Carbono. Assim, estabeleceram que ao bombardear um núcleo A com partículas α (α), obtinham um núcleo B mais uma partícula b. Assim,



Para calcularmos o balanço energético da reação Q, consideraremos o núcleo A estacionário. Assim,

$$\begin{aligned} E_a + M_a c^2 + M_A c^2 &= E_B + M_B c^2 + E_b + m_b c^2 \\ M_a c^2 + M_A c^2 - (M_B c^2 + m_b c^2) &= E_B + E_b - E_a = Q \end{aligned}$$

O balanço energético é também conhecido como o “valor Q da reação”.

Assim, quando $Q > 0$, dizemos que a **reação nuclear** é exotérmica, ou seja, libera energia. Quando $Q < 0$, dizemos que ela é endotérmica, ou seja, é necessário fornecermos energia ao sistema para que a reação venha a ocorrer.

1.3 Considerações sobre Reações Nucleares

Em toda reação nuclear teremos a conservação das seguintes propriedades físicas:

- Conservação de Massa (nucleons) (A);
- Conservação de Cargas (Z);
- Conservação de Energia;
- Conservação da quantidade de movimento.

1.4 Conceito de Massa Atômica

Uma das preocupações dos cientistas no estudo dos átomos foi estabelecer não apenas a sua massa, mas também a de seus constituintes e como consequência surgiu a necessidade de fixação de um padrão.

Definiu-se: 1 u.m.a. = 1/12 massa do C

logo, $m(^{12}\text{C}) = 12 \text{ u.m.a.}$

assim, 12 g de $^{12}\text{C} = 12 \text{ u.m.a.} \rightarrow 6,023 \cdot 10^{23}$ átomos

$$1 \text{ u.m.a} = \frac{12}{6,023 \cdot 10^{23}} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

1.5 Unidades de Energia

No mundo atômico utilizamos unidades de energia específicas, pelo fato de que aquelas convencionadas para o mundo macroscópico serem inadequadas às partículas elementares.

1 elétron volt (1 eV):

“Chamamos de 1 eV à variação de energia cinética sofrida por um elétron quando submetido a uma diferença de potencial de 1 volt”.

$$\begin{aligned} 1 \text{ eV} &= \Delta Ec \text{ (elétron)} = (\text{carga do elétron}) \cdot (\text{dap}) \\ 1 \text{ eV} &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \\ 1 \text{ eV} &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ erg} \end{aligned} \quad \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ KeV} = 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ J} \\ 1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} \end{array} \right.$$

Obs: 1 joule = 10^7 erg

1.6 Equivalência entre Matéria e Energia

De Einstein ($E=mc^2$) podemos calcular a energia concentrada em qualquer quantidade de matéria e concluir que matéria e energia são estados diferentes da propriedade universal que se manifesta em tudo que existe: a massa. Assim, podemos determinar a energia equivalente à massa do elétron em repouso.

$$m_0(e) = 0,91 \cdot 10^{-27} \text{ g}$$

$$m_0 c^2 = 0,91 \cdot 10^{-27} \text{ g} \cdot (3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s})^2 = 8,19 \cdot 10^{-7} \text{ erg}$$

$$1 \text{ erg} = \frac{10^6}{1,6} \text{ MeV} \therefore m_0 c^2 = 8,19 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{10^6}{1,6} \cong \boxed{0,51 \text{ MeV}}$$

Com correção relativística (partículas com alta energia cinética),

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = m_0 \cdot (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

logo, $E = 0,51 (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \text{ MeV}$

Energia Equivalente a 1 u.m.a. (unidade de massa atômica)

$$\begin{aligned} E (1 \text{ u.m.a.}) &= m (1 \text{ u.m.a.}) \cdot c^2 = 1,66 \cdot 10^{-24} \cdot 9 \cdot 10^{20} \text{ erg} \\ &= 1,66 \cdot 10^{-24} \cdot 9 \cdot 10^{20} \cdot 10^6 / 1,6 \end{aligned}$$

$$E (1 \text{ u.m.a.}) \cong 931 \text{ MeV}$$

$$Massa_{proton} = 1,007277 \text{ u.m.a.}$$

$$Massa_{neutron} = 1,008665 \text{ u.m.a.}$$

$$Massa_{eletron} = 5,4857 \cdot 10^{-4} \text{ u.m.a.}$$

1.7 Equação de Planck

Estudando o espectro de emissão emitida por uma cavidade aquecida, Planck em 1905 propôs que a propagação de energia emitida por um buraco em sua superfície (Corpo negro) se dava de uma forma descontínua em pequenos pacotes de energia a qual chamou de quantum .

A energia E contida em cada quantum de energia emitida pelos fótons pode ser dada a seguir.

$$E = h \nu \begin{cases} E - \text{energia} \\ h - \text{constante de Planck} = 6,625 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \\ \nu - \text{frequência de emissão} \end{cases}, \text{ ou}$$

O francês Louis de Broglie em 1924, apresentou a teoria que sob certas condições específicas as partículas apresentavam um comportamento ondulatório com comprimento de onda λ associada a mesma a partir do conhecimento de sua quantidade de movimento $p=m \cdot v$. Assim,

$$p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p}, \text{ ou}$$

$$\lambda = \frac{\lambda}{2\pi} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$$

para nêutrons: $\lambda = \frac{4,55 \cdot 10^{-10}}{\sqrt{E}} \cdot (cm)$ com E em eV .

1.8 O Raio Nuclear

O raio R de um núcleo é função do seu número de massa A . Assim,

$$R = 1,25 \cdot 10^{-13} A^{1/3} \quad \text{unidade: } 1F = 10^{-13} \text{ cm}$$

onde A = número de massa (núcleons = $p + n$)

1.9 Defeito de Massa do Núcleo

$$\text{Representação do Elemento: } {}^A_Z X \left\{ \begin{array}{l} A - \text{núcleons (p ou n)} \\ Z - \text{prótons} \\ (A-Z) - \text{nêutrons} \\ X - \text{elemento considerado} \end{array} \right.$$

$Z \cdot \text{massa}_{\text{proton}} + (A-Z) \text{massa}_{\text{neutron}} \Rightarrow$ deveria ser a massa total do núcleo, porém verificamos que a $\text{massa}_{\text{núcleo}} < Z \cdot m_p + (A-Z)m_n$.

A diferença entre a massa dos constituintes do núcleo e a real massa do núcleo m_n é chamada de “**DEFEITO DE MASSA**” Δm , tal que:

$$\Delta m = [Z \cdot m_p + (A-Z)m_n] - m_n$$

Δm pode ser interpretado como a quantidade de massa que teria que se transformar em energia para formar um átomo partindo de Z prótons e $(A-Z)$ nêutrons.

1.10 Energia de Ligação Nuclear

Assim, a energia necessária para manter o átomo coeso e unido, proveniente da diferença de massa Δm , suficiente para vencer a força de repulsão colombiana dos prótons existentes no núcleo, é dada a seguir.

$$E_L = \Delta m \cdot c^2 = \{ [Z \cdot m_p + (A-Z)m_n] - m_n \} c^2$$

mas $m_n = \text{Massa}_{\text{átomo}} - Z \cdot m_{\text{eletron}}$

$$E_L = \{ [Z \cdot (m_p + m_e) + (A-Z)m_n] - M_a \} c^2$$

sendo $m_p + m_e = M_H$ (massa do hidrogênio)

$$E_L = [Z \cdot M_H + (A-Z)m_n - M_a] c^2$$

Se Δm for dado diretamente em u.m.a., teremos:

$$E_L (MeV) = 931 [Z \cdot M_H + (A - Z)m_n - M_a]$$

sendo $M_H = 1,008142$ e $m_n = 1,008982$ u.m.a.,

teremos $E_L (MeV) = 931 [1,008142 \cdot Z + 1,008982 (A - Z) - M_a]$

Energia de Ligação por Nucleon (E_L / A):

Em elementos estáveis: $7 \leq E_L / A \leq 9$

$$\text{Ex.: } E_L ({}^4_2\text{He}) / A = \frac{28,2}{4} = 7,07 \text{ MeV / núcleon}$$

1.11 Princípio da Incerteza (Heisenberg – 1927)

Dada uma partícula representada por um comprimento de onda de de Broglie λ , absolutamente exato, a possibilidade de localizar a partícula entre $-\infty$ e $+\infty$ é absolutamente igual em qualquer intervalo. Assim,

$$\Delta p_x \cdot \Delta x = h \quad (\text{Princípio de Heisenberg aplicável a partículas não em estado quântico})$$

No campo dos valores quânticos:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{h}{2\pi} \Rightarrow \boxed{\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar}$$

Ex.: Determine a incerteza mínima da localização de uma partícula suposta no campo dos valores quânticos.

$$\text{Se } \Delta x = (\Delta x)_{\min} \Rightarrow \Delta p_x = (\Delta p_x)_{\max} = p$$

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}$$

$$p \cdot (\Delta x)_{\min} \geq \frac{h}{2\pi} \Rightarrow (\Delta x)_{\min} \geq \frac{h}{2\pi p}, \text{ mas } p = \frac{h}{\lambda}$$

$$\text{logo } (\Delta x)_{\min} \geq \frac{\lambda}{2\pi} \Rightarrow \boxed{(\Delta x)_{\min} \geq \tilde{\lambda}}$$

É absolutamente impossível localizar uma partícula em um segmento cujo comprimento de onda é menor ou igual a $\lambda/2\pi$, sendo λ o comprimento de onda da onda associada ao movimento da partícula.

1.12 Lei da desintegração radioativa

Schweidler propôs em 1905:

1. A desintegração atômica é um processo probabilístico;
2. A probabilidade de um átomo desintegrar é igual para todos os átomos da mesma espécie;
3. A desintegração ou não de um átomo radioativo independe de sua vida anterior;
4. A probabilidade de um átomo radioativo se desintegrar num intervalo de tempo Δt muito pequeno é proporcional à ele, portanto:

$$p = \lambda \cdot \Delta t$$

A interpretação da constante λ pode ser feita supondo um intervalo de tempo unitário. Neste caso, $p = \lambda$, ou seja, λ é a **probabilidade de um átomo se desintegrar por unidade de tempo** e é constante para cada espécie nuclear, sendo denominada de Constante de Desintegração ou Constante de Decaimento. Assim a probabilidade de um átomo não se desintegrar em Δt será: $q = 1 - \lambda \cdot \Delta t$

Raciocinando para n intervalos Δt compreendidos entre 0 e t , teremos:

$$q_1 = 1 - \lambda \cdot \Delta t$$

$$q_2 = q_1 \cdot q_1 = (1 - \lambda \cdot \Delta t)^2$$

.

.

$$q_n = (1 - \lambda \cdot \Delta t)^n = \left[\left(1 - \frac{\lambda t}{n} \right)^{-n/\lambda t} \right]^{-\lambda t}$$

$$q = \left[\lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ n \rightarrow \infty}} \left(1 - \frac{\lambda t}{n} \right)^{-n/\lambda t} \right]^{-\lambda t}$$

$$q = e^{-\lambda t} \text{ (probabilidade do átomo não se desintegrar até o instante } t\text{)}$$

como , vem $q = \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$

ou $N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

sendo N o número de átomos da amostra no instante t , e
 N_0 o número de átomos iniciais em $t = 0$.

Usando o raciocínio matemático:

$$-\frac{dN}{N} = \lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln N \Big|_{N_0}^N = -\lambda t \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \Rightarrow \boxed{N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}}$$

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N = A \Rightarrow \text{Atividade da amostra ou velocidade de desintegração.}$$

$$\text{Analogamente, } A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Sendo A_0 a atividade no instante inicial e A no instante t .

Unidades de Atividade

No S. I.: 1 Bq = 1 desintegração = s⁻¹ (becquerel)

Antiga e muito usada: 1 Ci (Curie) = $3,7 \cdot 10^{10}$ desintegrações.

Gráficos lineares e logarítmicos:

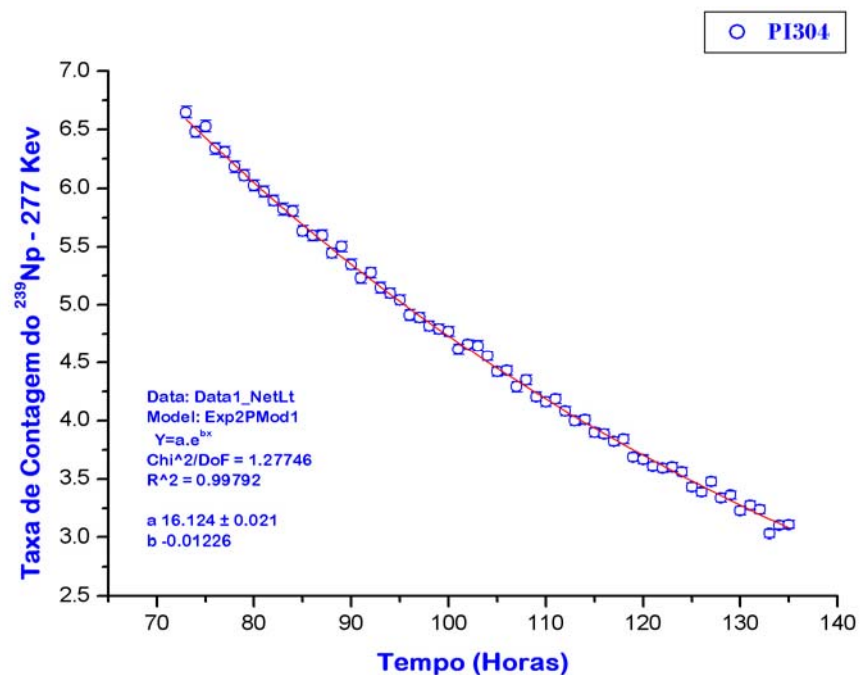


Figura 1- Curva de decaimento radioativo – Gráfico linear.

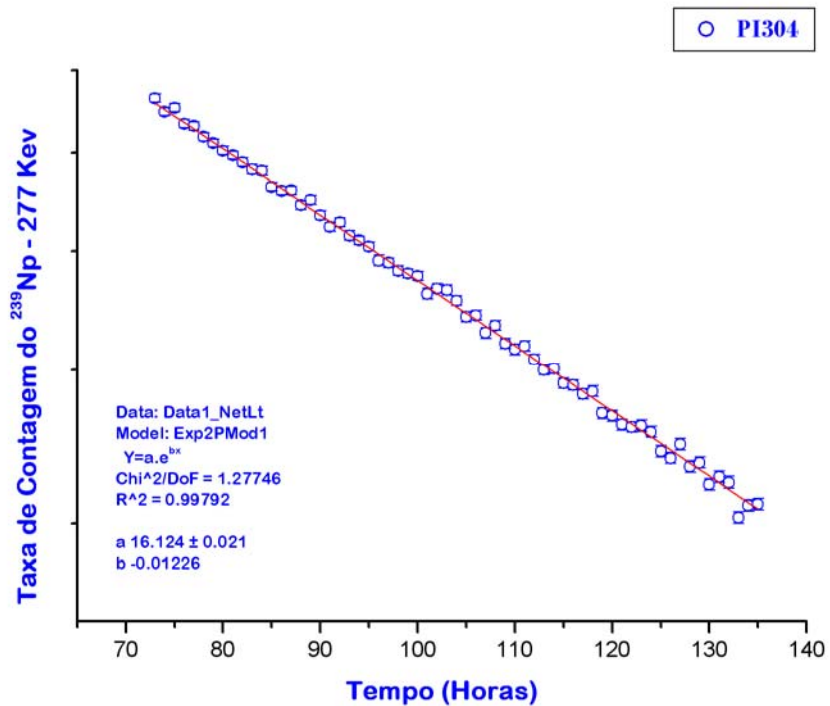


Gráfico 1.2 – Curva de decaimento Radioativo - Gráfico Logarítmico.

O coeficiente angular da reta no gráfico logarítmico nos dá a constante de decaimento (λ) da espécie radioativa medida. Conhecido λ se conhece a espécie, pois não há na natureza dois elementos com o mesmo λ .

1.13 Meia Vida ($T_{1/2}$) de uma Espécie radiotiva

A meia-vida de uma espécie radioativa é o Intervalo de tempo cuja atividade se reduz à metade (ou número de átomos). Assim,

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\ln 2 = \lambda \cdot T_{1/2} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

1.14 Vida Média de uma Espécie Radioativa

A vida média de uma espécie radioativa é o tempo de vida médio de um núcleo radioativo. Assim, obtemos a expressão a seguir.

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot p(t) dt = \frac{1}{\lambda}$$

$$\bar{t} = 1,44 \cdot T_{1/2}$$

1.15 Núcleon

Conforme comentado anteriormente, um núcleon é uma partícula de um núcleo atômico, podendo ser tanto um próton quanto um nêutron.

Por exemplo, referindo-se novamente ao $^{16}_8\text{O}$ e ao $^{235}_{92}\text{U}$, podemos dizer que o $^{16}_8\text{O}$ contém 16 núcleons e o $^{235}_{92}\text{U}$ 235 núcleons.

1.16 Isótopo

Um isótopo é um de dois ou mais nuclídeos com o mesmo número atômico, Z , mas com diferentes massas atômicas. Eles são elementos químicos iguais entre si. Ex.: Os oxigênios:

$^{16}_8\text{O}$; $^{17}_8\text{O}$; $^{18}_8\text{O}$ são isótopos do elemento Oxigênio.

Estes oxigênios embora possuam os mesmos números de prótons ($Z = 8$) possuem números de nêutrons diferentes (8, 9, 10 respectivamente) e, portanto, números de massa diferentes (16, 17, 18 respectivamente).

1.17 Isóbaro

Um isóbaro é um de dois ou mais nuclídeos, tendo o mesmo número de massa, A , mas diferentes propriedades químicas, devido aos diferentes valores de Z . Por exemplo:

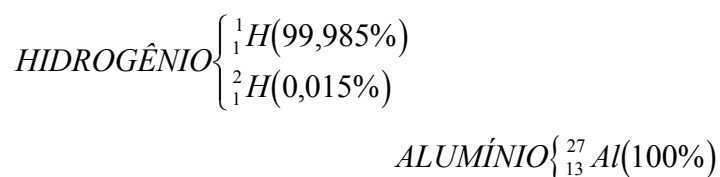
O $^{16}_8\text{O}$ e o $^{16}_7\text{N}$ são isóbaros, porque ambos possuem os mesmos números de núcleons.

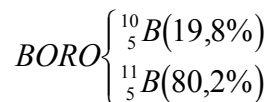
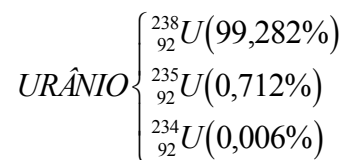
1.18 Isótonos

São nuclídeos que possuem o mesmo número de nêutrons (N) porém com diferentes números atômicos (Z).

1.19 Abundância Isotópica

No estado natural, um único elemento, pode conter vários isótopos em diferentes porcentagens ou abundância. Exemplo:





1.20 ESTABILIDADE DO NÚCLEO

Para se entender os fundamentos do núcleo atômico é necessário um estudo da natureza básica das forças que mantêm os núcleons juntos. Em virtude da enorme complexidade destas forças, o progresso nesta área tem sido muito lento, embora muitos dos trabalhos experimentais tem sido (ou estão sendo) feitos. O conceito essencial, que é agora comumente aceito, foi inicialmente enunciado na metade da década de trinta, mas embora se tenha passado cerca de sessenta anos, não se vislumbra ainda uma completa solução para o problema. Todavia, tem se estabelecido um número de características das forças e da estrutura nuclear.

1.21 Força

Existem 3 espécies de forças que agem sobre estas partículas: GRAVITACIONAL, ELÉTRICA e NUCLEAR.

1.22 Força Gravitacional

Atuam entre duas massas. Esta é a força que mantém os planetas em suas órbitas ao redor do Sol, satélites ao redor dos planetas e objetos e seres apoiados ao solo, etc. Tais forças são importantes em considerações que envolvam GRANDES massas. Em fenômenos atômicos elas não desempenham papéis importantes.

1.23 Forças Elétricas

Entre duas cargas elétricas ocorrem forças de atração ou repulsão, dependendo dos sinais destas cargas, isto é, se as duas cargas tiverem mesmos sinais elas se repelirão e se tiverem sinais contrários se atrairão. Esta força elétrica também é conhecida como força COULOMBIANA, e é proporcional ao inverso do quadrado da distância que separam as cargas.

Existe um outro tipo de força, conhecida como força magnética. Esta força surge quando cargas elétricas em movimento estão sob a influência de um campo magnético criado por outras cargas elétricas em movimento.

As forças magnéticas são, no entanto, bem menores que as forças coulombianas e é por esta razão que elas são consideradas desprezíveis no estudo das forças entre os núcleons.

1.24 Forças Nucleares

Se apenas as forças anteriormente mencionadas atuassem no núcleo, este fatalmente não existiria, isto porque haveria forte repulsão elétrica entre os prótons. As forças gravitacionais de atração são, no entanto, pequenas para se equilibrar com a força elétrica e com isso não seria possível a existência do núcleo. Portanto, a existência real do núcleo só pode ser explicada por uma outra força, diferente da gravitacional e da elétrica, chamada de força "NUCLEAR".

As forças nucleares são muito mais intensas do que as forças eletrostáticas de repulsão entre os prótons. A seguir serão fornecidas algumas das peculiaridades da força nuclear.

- a. As forças nucleares são de CURTO ALCANCE, da ordem de $2 \cdot 10^{-13} \text{cm}$. Além desta distância, a sua atuação decai muito rapidamente.
- b. As forças nucleares são FORTES, isto é, elas são capazes de manter o núcleo firmemente unido. Para separar um nêutron ou próton ligado a um núcleo é necessário energia da ordem de MeV, enquanto para separar um elétron necessita-se energia da ordem de eV. Estas energias comparadas entre si mostram o grau da magnitude destas forças nucleares.
- c. As forças nucleares são independentes da carga, isto é, elas agem igualmente entre grupos de prótons e grupos de nêutrons ou grupos prótons-nêutrons.
- d. As forças nucleares são atrativas, porém saturáveis. Isto significa que a energia de ligação entre um núcleon e o resto do núcleo alcança um

limite, uma vez que um certo número total de núcleons tenha se agrupado.

- e. As forças nucleares são dependentes do "SPIN", mostrando uma firmeza maior na ligação entre dois núcleons cujos "SPINS" são anti-paralelos do que dois núcleons com "SPINS" paralelos.

1.25 Estados Fundamentais e Excitados do Núcleo

Os núcleons no núcleo seguem, como os elétrons do átomo, leis da Mecânica Quântica. Eles normalmente se arranjam entre si em uma configuração tal que a energia interna do núcleo é mínima. Este é o estado fundamental do núcleo. Com outras configurações a energia interna é maior e o núcleo está em um estado excitado.

O excesso de energia acima do estado fundamental é chamado de "ENERGIA DE EXCITAÇÃO" de um estado excitado particular. A maioria dos estados excitados não conseguem permanecer por muito tempo neste estado. Face a esta instabilidade, há decaimento para estados excitados de menor energia com a conseqüente emissão de um ou mais fótons (radiação gama). Há entretanto, núcleos que podem permanecer em certos estados excitados por um tempo considerável. Se a energia de excitação é maior do que a energia de ligação de um núcleon ou um grupo de núcleons, o núcleo pode também emitir um núcleon ou um grupo de núcleons (tais como uma partícula alfa) e transmutar-se em outro núcleo menor.

1.26 Distribuição dos Nuclídeos

Dos 1500 nuclídeos conhecidos, somente cerca de 325 existem na natureza. Destes últimos, apenas 284 são estáveis, (isto é, o núcleo do átomo destes nuclídeos não se transformam por si próprios). Em um diagrama (N, Z) ou (Z, N) conforme a Figura 1.3, os pontos representando os nuclídeos estáveis são encontrados em uma faixa estreita, freqüentemente referida como a linha de estabilidade. Por intermédio disto, podemos ver que núcleos estáveis não podem ser obtidos por combinação de números arbitrários de prótons e nêutrons. Para núcleos leves, a relação nêutron para próton é muito próximo de 1. À medida que o número de núcleons

aumenta, esta razão se aproxima de 1,52. Nenhum núcleo com um número de massa maior que 209 é estável. Os nuclídeos instáveis conhecidos estão próximos aos nuclídeos estáveis localizados sobre a curva de estabilidade do diagrama (Z, N). A estabilidade dos nuclídeos depende também da paridade dos núcleons. Dos 284 nuclídeos estáveis, 166 são do tipo par - par (Z par, N par), 57 são par - ímpar (Z par, N ímpar), 53 são ímpar - par (Z ímpar, N par) e apenas 8 são ímpar - ímpar (Z ímpar, N ímpar).

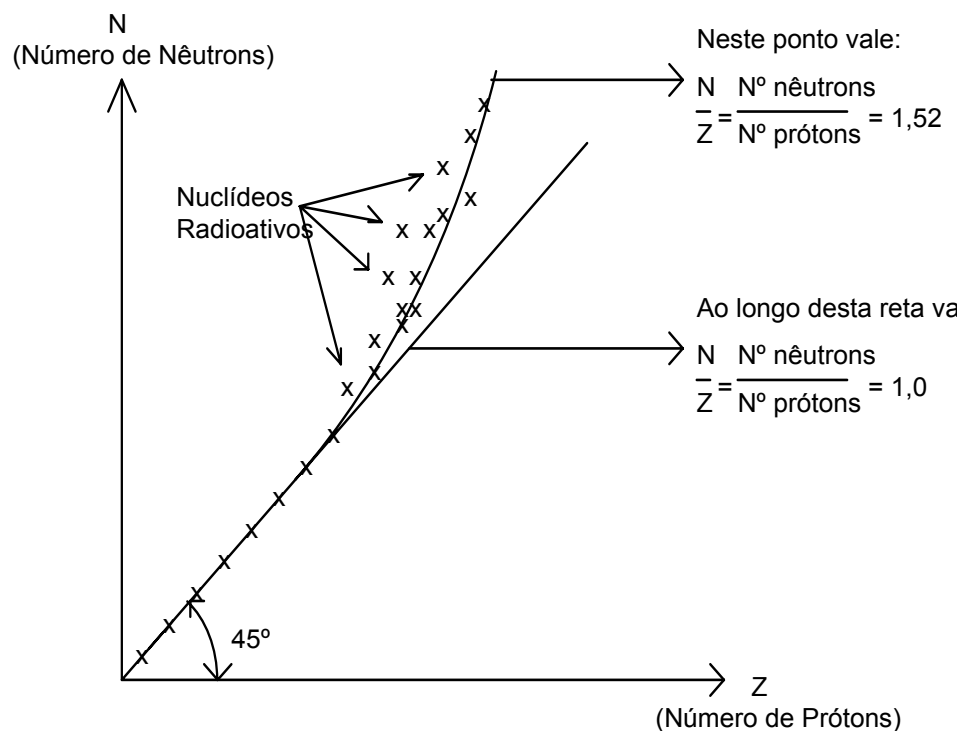


Figura 1.3 - Curva de Estabilidade dos Nuclídeos.

Os efeitos a serem considerados com respeito à estabilidade que dependem das forças atuando dentro do núcleo são:

1. Curto alcance das forças nucleares: elas agem entre núcleos adjacentes (nêutrons e prótons) no núcleo e são atrativas.
2. Forças de Coulomb: estas agem somente entre prótons, mas agem sobre todos os prótons no núcleo não obstante de sua localização e são repulsivas.

A maioria dos elementos leves são estáveis com igual número de nêutrons e prótons no núcleo. Se os elementos mais pesados (tendo um maior volume nuclear) tivessem que ter igual número de nêutrons e prótons, o núcleo seria instável porque as forças coulombianas devido aos prótons carregados tenderia a predominar

desde que as forças coulombianas agem sobre TODAS as partículas carregadas, enquanto as forças de curto alcance tendem a agir somente sobre as partículas adjacentes. Para ser estável, um núcleo pesado deve ter uma grande proporção de nêutrons para que as forças nucleares sejam competitivas com as forças coulombianas.

Isto explica a curva de estabilidade e a razão porque a relação N/Z é igual a unidade para nuclídeos leves estáveis e maior que para nuclídeos pesados. Para átomos muito pesados, como pode ser visto, a relação N/Z é igual a 1,52.

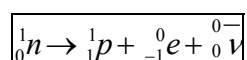
Um nuclídeo contendo muitos nêutrons para um número menor de prótons no núcleo ou muitos prótons para um número menor de nêutrons é dito estar à esquerda ou à direita da curva de estabilidade e, portanto, é INSTÁVEL.

Estes núcleos instáveis são ditos serem radioativos e devem retornar à curva de estabilidade por intermédio da emissão de partículas alfas, betas ou ainda, em poucos casos, por nêutrons. As partículas alfa são na realidade núcleos de Hélio 4. As partículas beta são elétrons ou pósitrons. Um nuclídeo com muitos nêutrons comparado com seu número de prótons pode alterar um desses nêutrons em um próton, emitindo com isso, um elétron ou uma partícula beta negativa (β^-). Se por outro lado o nuclídeo tiver menos nêutrons do que prótons, ele poderá converter um desses prótons em nêutrons emitindo um pósitron ou um elétron positivo (β^+).

Nuclídeos altamente excitados com muitos nêutrons podem decair fornecendo nêutrons. Tais nuclídeos são formados pelo decaimento de certos fragmentos de fissão e os nêutrons que eles emitem são conhecidos como NÊUTRONS ATRASADOS que serão considerados posteriormente em Cinética de Nêutrons.

Todos os nuclídeos além do bismuto ($Z = 83$) são instáveis e desintegram espontaneamente com a emissão de radiação gama ou partículas energéticas.

O nêutron em seu estado livre, isto é, quando não estiver ligado ao núcleo é por si próprio uma partícula instável que decai espontaneamente em um próton e um elétron e um anti-neutrino. (O anti-neutrino é um tipo particular de neutrino).



$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$$

O tempo de vida médio para esta ocorrência é de 17 minutos, e a meia-vida é de aproximadamente 12 minutos.

Quando alojado dentro de um núcleo, entretanto, o nêutron comporta-se como uma partícula fundamental indivisível e não pode ser encarada como uma partícula tendo uma estrutura composta de próton, elétron e anti-neutrino.

1.27 FISSÃO NUCLEAR : INTRODUÇÃO

Logo após a descoberta do nêutron, Enrico Fermi, na Itália, bombardeou o urânio com nêutrons num esforço de produzir elementos com números atômicos maiores que 92 (elementos transurânicos). Sua teoria predizia que o bombardeamento com nêutrons produziria reações (n, γ) no urânio. Este urânio mais pesado decairia com emissão de uma partícula β , para elementos mais altos. Esta tentativa eventualmente ocorreu, mas foi difícil a interpretação dos seus primeiros experimentos em virtude de um inesperado resultado. Fermi descobriu que o urânio irradiado com nêutrons ficava radioativo e que as meias-vidas dos nuclídeos radioativos presentes não correspondiam a qualquer meia-vida dos elementos pesados até então conhecidos. Por esta razão, Fermi acreditou que elementos transurânicos teriam sido produzidos por este processo. Entretanto, em 1939, os cientistas alemães Hahn e Strassman separaram quimicamente do Urânio radionuclídeos e provaram que eles eram na realidade isótopos do Bário ($^{139}_{56}Ba$) e Lantânio ($^{140}_{57}La$) ao invés de elementos transurânicos como previsto inicialmente. Os resultados poderiam somente ser explicados admitindo que o núcleo do urânio se quebrasse em duas partes durante a reação com nêutron.

Este processo de quebra de núcleos pesados em duas partes foi chamado de "FISSÃO".

O anúncio da fissão do urânio levou os cientistas de todo mundo a uma intensa pesquisa no assunto. Mostrou-se também na ocasião, que o processo de fissão era acompanhado de liberação intensa de quantidade de energia e deste fato levou ao

desenvolvimento da bomba atômica. Desde esta época, o processo de fissão tem sido aplicado em geração comercial de energia elétrica.

1.28 Mecanismo do Processo de Fissão

Por intermédio da curva de energia de ligação por nucleon, esperaria-se que os fragmentos de fissão formados seriam mais estáveis do que o estado fundamental do núcleo U^{236} e assim não existiriam elementos pesados na natureza, pois todos espontaneamente já teriam se transformado em núcleos leves. No entanto, a fissão espontânea só ocorre raramente. Para que ocorra fissão com uma razoável probabilidade é necessário que se forneça energia ao núcleo de uma forma ou de outra.

O mecanismo de fissão pode ser explicado em termos do "MODELO DA GOTA LÍQUIDA"

Este modelo diz que ao se aplicar a uma gota líquida uma tensão superficial, ela se deforma e tenta em seguida restaurar sua forma original. A estabilidade do núcleo é semelhante a esta situação, onde a tensão superficial é representada neste caso, pelas forças nucleares.

A Figura 1.4 é um diagrama do comportamento de uma gota submetida a uma tensão superficial.

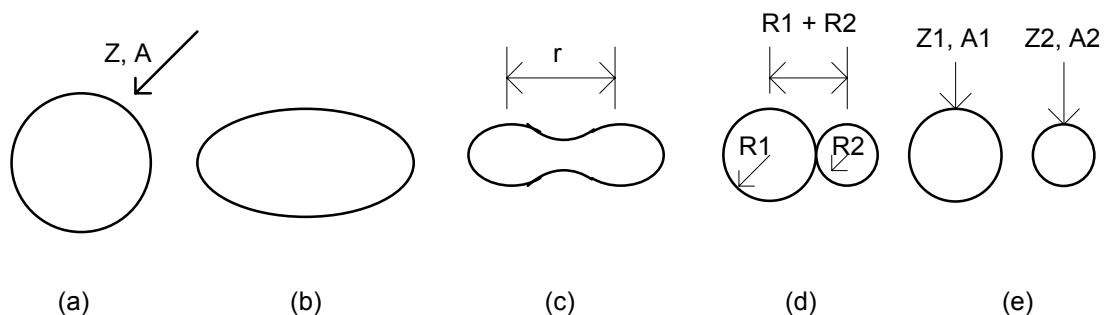


Figura 1.4: Processo de Fissão "Modelo da Gota Líquida".

Inicialmente, a gota esférica (a) sofre a ação de forças radiais e diametralmente opostas que a deformam dando origem a uma forma de um elipsóide de revolução (b). Se a distorção for suficientemente intensa, a gota assume em seguida uma forma de um haltere (c) que oscila até o "pescoço" se tornar tão estreito (d) que se rompe (e) em 2 fragmentos. Suponhamos que um núcleo é representado desta mesma

forma. Se este núcleo se encontra no seu estado fundamental, a carga positiva existente nele, pode ser considerada como localizada no seu centro conforme indicado em (a).

Se, no entanto, ele tiver sido formado em um estado excitado, esta energia excedente pode causar sua oscilação. Quando ele assume uma configuração conforme a indicada em (c), isto é, com dois pontos de cargas deslocados entre si, estes pontos tendem a causar ruptura do núcleo. Se a excitação for suficientemente grande, atinge-se a situação (d) e estando longe os dois pontos de cargas, as forças coulombianas acabam se predominando sobre forças nucleares de curto alcance, ocasionando assim a fissão do núcleo (e).

A energia potencial dos fragmentos de fissão está indicada na Figura 1.5

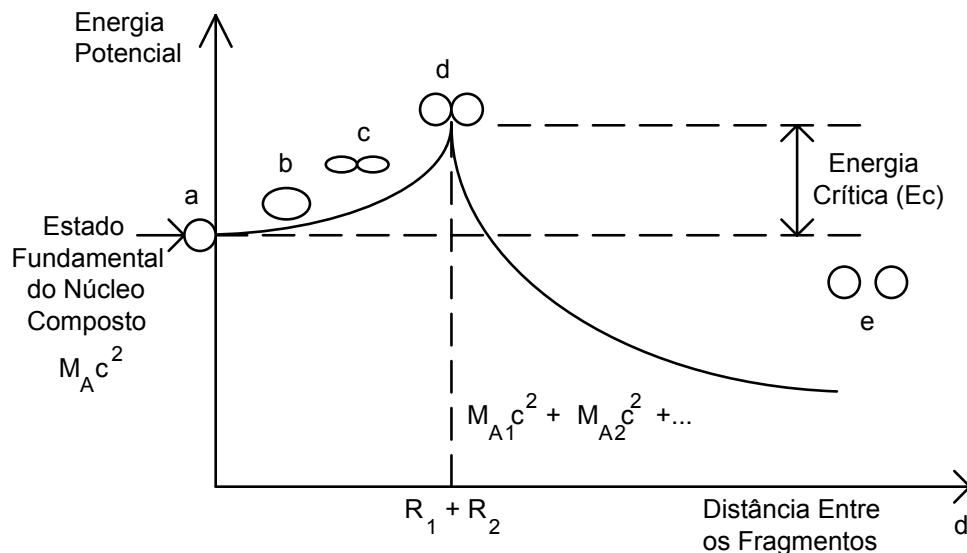


Figura 1.5: Energia Potencial dos Fragmentos de Fissão.

No estado fundamental, o núcleo composto, (Z, A) como representado em (a), possui uma certa energia potencial. Se a esta energia potencial for adicionada à energia cinética e de ligação do núcleo, então, esta energia aumenta. Se esta energia for aumentada de um determinado valor, ocorre então, uma situação análoga ao da gota líquida onde as distâncias entre os centros de cargas são aproximadamente iguais ao raio dos fragmentos de fissão $(R_1 + R_2)$. Nesta situação, a força coulombiana começa a predominar levando o núcleo a se separar e se distanciar rapidamente, conforme indicado na curva entre as situações (d) e (e). A diferença em energia potencial entre o

estado fundamental e o ponto onde a fissão é possível conforme indicado no diagrama é chamado de ENERGIA CRÍTICA, e é denotado por E_c .

Portanto, a energia crítica E_c é uma energia necessária para romper um núcleo a partir do seu estado fundamental (tabela 1.1)

Núcleo Fissionável	E_c (MeV)	E_l (MeV) *	E_{limiar} (MeV) Fotofissão
Th-232	5,9	*	5,4
Th-233	6,5	5,1	*
U-233	5,5	*	5,18
U-234	4,6	6,6	*
U-235	5,75	*	5,31
U-236	5,3	6,4	*
U-238	5,85	*	5,08
U-239	5,5	4,9	*
Pu-239	5,5	*	5,31
Pu-240	4,0	6,4	*

(*) E_l - Energia de Ligação provocada pelo nêutron incidente (nêutron térmico).

Tabela 1.1 - Valores de Energia Crítica E_c .

As curvas da Figura 1.6 mostram como a energia potencial do estado fundamental variam para diferentes núcleos. Aqueles núcleos que possuem grandes energias de ligação tem baixas energias nos seus estados fundamentais, portanto, enormes quantidades de energia teriam que ser fornecidas aos núcleos para causarem suas fissões. Estes núcleos possuem curvas semelhantes à Curva 1, como indicada na Figura 1.5 .

Núcleos com energia de ligação menores, possuem maior energia potencial. Eles são indicados por intermédio da curva 2, e uma quantidade muito menor de energia crítica é necessária para fissioná-los como mostrado em E_{c2} . Se um núcleo

tem uma curva análoga à curva 3, nenhuma energia seria necessária e com isso, a fissão espontânea ocorreria.

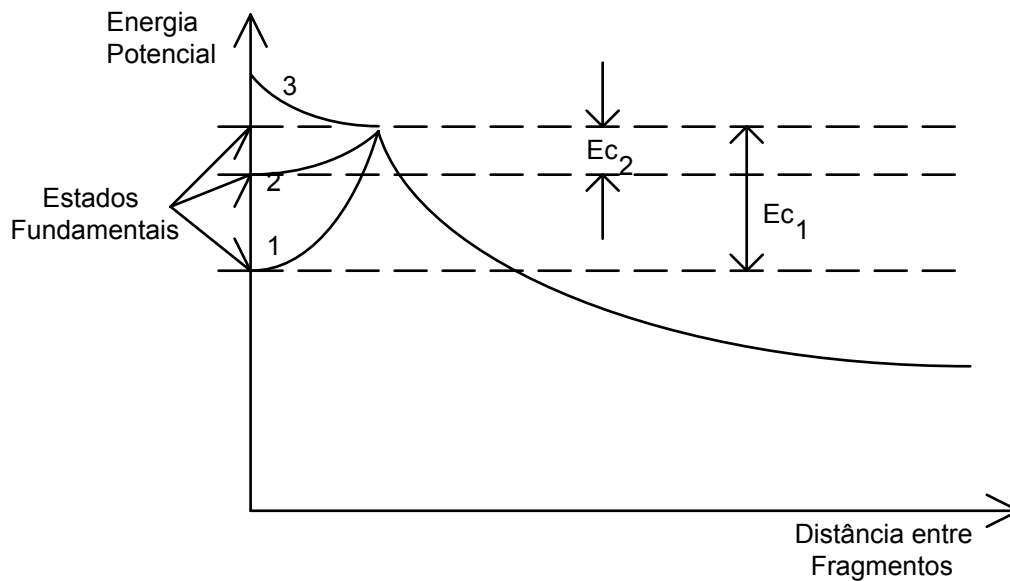
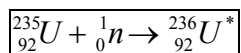


Figura 1.6: Energia Potencial dos Fragmentos de Fissão.

A fonte de energia que excita o núcleo até a sua energia crítica é a energia de ligação e a energia cinética de um nêutron entrando no núcleo. A soma da energia de ligação e energia cinética é chamada de energia de excitação, E_c . Se a energia de excitação for maior do que a energia crítica, então as fissões terão probabilidades de ocorrência elevadas.

O U-238 não se fissiona ao absorver um nêutron térmico, ao passo que o U-235 se fissionaria facilmente com a absorção deste mesmo nêutron.

A determinação da energia de excitação do U-235 ao absorver um nêutron é a seguinte:



massa do ${}_{92}^{235}\text{U} = 235,0439$ u.m.a.

massa do ${}_0^1\text{n} = 1,008665$ u.m.a.

massa teórica do ${}_{92}^{236}\text{U} = 236,052565$ u.m.a.

massa real do ${}_{92}^{236}\text{U} = 236,0456$ u.m.a.

variação de massa = $\Delta m = 236,052565 - 236,0456 = 0,006965$ u.m.a.

Esta variação de massa é convertida em energia da seguintes forma:

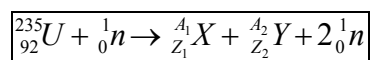
$$\Delta E = 0,006965 \text{ u.m.a.} \times 931 \text{ MeV/u.m.a.} = 6,4 \text{ MeV} = \text{Energia de Ligação.}$$

A energia de excitação é então igual a 6,4 MeV mais a energia cinética do nêutron. A energia crítica do ${}^{236}_{92}\text{U}$ é 5,3 MeV. Como E_e é maior que E_c , fica evidente que a fissão ocorrerá seguramente.

Fazendo-se uma análise semelhante para o U-238, encontra-se que a energia de ligação do nêutron do U^{239} é de 4,9 MeV e a energia crítica do U^{239} é de 5,5 MeV. Considerando apenas a energia de ligação do nêutron, verifica-se que é preciso fornecer uma energia adicional para causar fissão do U-238. Esta energia pode ser suprida por intermédio da energia cinética do nêutron, que será absorvido pelo U-238.

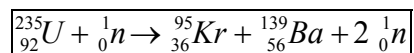
1.29 Reação de Fissão e Energia Liberada

A reação de fissão é escrita e balanceada da mesma forma como as outras reações nucleares. Por exemplo, considere a reação mais comum de fissão, isto é, a fissão do U-235 por nêutron térmico:



O maior significado desta reação envolve as implicações do trítio (emissor β) com relação aos resíduos radioativos e proteção radiológica.

Embora seja impossível prever os exatos produtos de fissão de uma particular reação de fissão, é de interesse tomar um exemplo típico e calcular a energia liberada que acompanha esta reação.



As massas envolvidas são:

U-235 = 235 u.m.a.

nêutron = 1,009 u.m.a.

Kr-95 = 94,945 u.m.a.

Ba-139 = 138,955 u.m.a.

Calculando as massas totais antes e depois da reação, tem-se:

MASSA ANTES DA FISSÃO

MASSA DEPOIS DA FISSÃO

$$\begin{aligned} \text{U-235} &= 235,124 \text{ u.m.a.} \\ n &= \underline{1,009} \text{ u.m.a.} \\ \text{TOTAL} &= 236,133 \text{ u.m.a.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kr-95} &= 94,945 \text{ u.m.a.} \\ \text{Ba-139} &= 138,955 \text{ u.m.a.} \\ 2n &= \underline{2,018} \text{ u.m.a.} \\ \text{TOTAL} &= 235,918 \text{ u.m.a.} \end{aligned}$$

A massa convertida em energia é:

$$\begin{aligned} \Delta m &= 236,133 - 235,918 = 0,215 \text{ u.m.a.} \\ \Delta E &= 0,215 \times 931 = 198 \text{ MeV } (\sim 200 \text{ MeV}). \end{aligned}$$

Embora estes cálculos tenham sido feitos para um modo particular de fissão, ele pode ser considerado como um resultado típico.

A maior quantidade (acima de 80 %) da energia de fissão, aparece como energia cinética dos fragmentos de fissão, que imediatamente se manifesta por si própria na forma de calor devido à moderação brusca destas partículas no meio. O restante desta energia (cerca de 20 %) é liberada na forma de radiação gama instantânea, ou de energia cinética dos nêutrons de fissão. O restante desta energia é liberado gradualmente na forma de radiação β e γ emitidas dos produtos de fissão radioativos.

1.29 Distribuição da Energia de Fissão

Instantânea	Energia cinética dos fragmentos de fissão	$165 \pm 5,0 \text{ MeV}$
	Energia das radiações gama instantâneas	$7 \pm 1,0 \text{ MeV}$
	Energia cinética dos nêutrons de fissão	$5 \pm 0,5 \text{ MeV}$
Atra- sada	Partículas betas provenientes dos produtos de fissão	$7 \pm 1,5 \text{ MeV}$
	Radiação gama proveniente dos produtos de fissão	$6 \pm 1,0 \text{ MeV}$
Perdida	Neutrinos	$10 \pm 5,0 \text{ MeV}$
Energia total de fissão		200 MeV

A energia de 10 MeV nos neutrinos, que acompanha a radiação beta não fica disponível para a geração de potência desde que estas partículas não interagem com a matéria. Portanto, a energia da fissão primária é cerca de 191 MeV por fissão. Entretanto, há uma fonte secundária de energia que surge quando as fissões ocorrem num reator nuclear. Alguns dos nêutrons de fissão em excesso são capturados pelo núcleo de vários materiais tais como U-238, materiais estruturais e moderadores

presentes no reator, propiciando assim as reações de captura (n, γ). Assim, nêutrons são absorvidos e energia é liberada na forma de radiação gama. Desde que a captura de nêutrons e a emissão de gama ocorrem dentro de um intervalo de tempo muito curto, esta energia pode ser considerada como sendo liberada instantaneamente, isto é, no instante da fissão. A energia da radiação gama de captura dependerá dos materiais presentes no reator, mas varia de 3 a 7 MeV por fissão. Desde que os produtos das reações (n, γ) são frequentemente radioativos, cerca de 1 ou 2 MeV de energia é liberada em média na forma de radiação beta e gama durante um certo intervalo de tempo após a ocorrência da fissão. Esta energia é assim aproximadamente igual a energia perdida pelos neutrinos e, portanto, a energia total de fissão disponível é ainda cerca de 200 MeV por fissão.

1.30 Liberação de Calor Devido à Fissão

a. Instantânea

Energia dos fragmentos de fissão	165 MeV
Energia dos nêutrons de fissão	~ 6 MeV
Raios gama instantâneos	7 MeV
Radiação gama proveniente de reações (n, γ)	<u>7 MeV</u>
	~ 185 MeV

b. Atrasada

Partículas beta dos produtos de fissão	7 MeV
Radiação gama dos produtos de fissão	6 MeV
Radiação das reações (n, γ)	<u>2 MeV</u>
	15 MeV

Existem várias conclusões que podem ser tiradas destes dados.

Primeiramente, quando se inicia a partida do reator, cerca de 185 MeV de calor é liberado por fissão. ao passar do tempo, os produtos de fissão e captura vão se acumulando e decaindo, com isso, o calor vai aumentando gradualmente até 200 MeV, onde então o sistema atinge o equilíbrio. Quando o reator é desligado e o processo de fissão é interrompido, o calor atrasado continua sendo ainda gerado por algum tempo enquanto os produtos radioativos decaem. Por isso, após o desligamento do reator é necessário manter ainda a refrigeração do reator para remover este calor "retardado",

que normalmente é chamado de "calor de decaimento". A Figura 1.7 mostra a geração do calor de decaimento em um reator em função do tempo após o seu desligamento para a situação onde o reator operou em plena potência por um tempo infinito de dias antes do desligamento. Esta última condição é equivalente a dizer que um estado de equilíbrio existe para o inventário dos produtos de fissão no reator antes do desligamento.

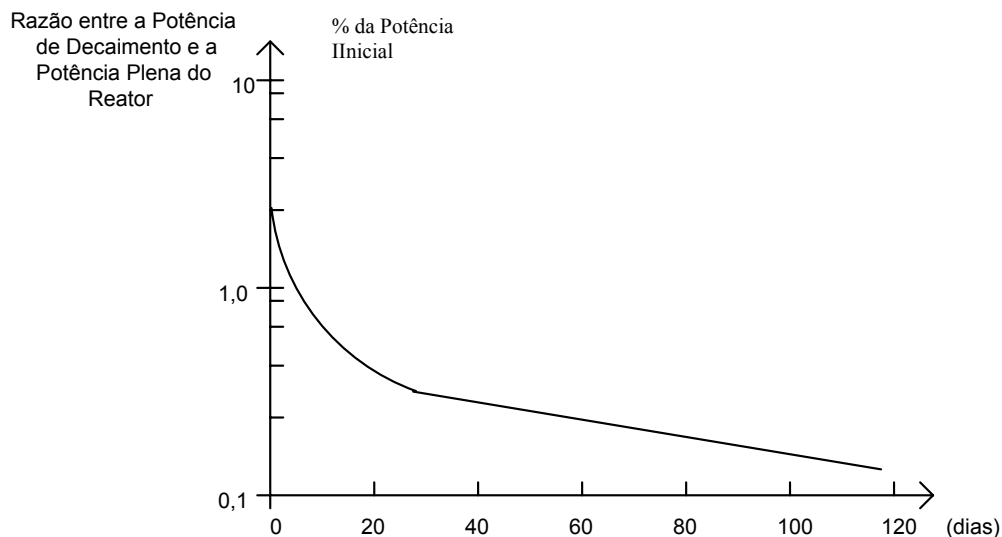


Figura 1.7: Decaimento da Potência em Função do Tempo após o Desligamento

No item a seguir são dados valores mais precisos para o calor de decaimento para vários tempos durante as poucas primeiras horas após o desligamento do reator.

1.31 Taxa de Produção de Calor de Decaimento após o Desligamento do Reator

Um outro ponto a observar considerando a energia de fissão, é que em virtude dos nêutrons e gamas caminharem distâncias consideráveis na matéria, uma grande quantidade de energia que eles possuem é liberada como calor a alguma distância do ponto onde ocorreu a fissão. Uma quantidade considerável de calor é liberada no moderador e materiais estruturais do reator. Isto causa importante papel no ponto de vista para o projeto de remoção do calor. Usando-se um valor de 200 MeV liberado por fissão e aplicando os fatores de conversão adequados, pode-se mostrar que são necessárias $3,1 \times 10^{10}$ fissões por segundo para produzir 1 watt de potência.

Tempo após o Desligamento	% da Potência Máxima
1 segundo	6,0 %
1 minuto	4,5 %
30 minutos	2,0 %
1 hora	1,6 %
8 horas	1,0 %
24 horas	0,7 %
48 horas	0,6 %

1.32 Produtos de Fissão

Um estudo detalhado da fissão por nêutrons térmicos do U-235, mostrou que o núcleo composto (U-236) divide-se em mais de 40 maneiras diferentes, produzindo mais de 80 produtos primários de fissão. A faixa dos números de massa é de 72, provavelmente um isótopo do zinco ($Z = 30$), a 160, possivelmente um isótopo do Gadolínio ($Z = 64$). Na Figura 1.7, os números de massa dos produtos de fissão do U-235 estão dispostos graficamente em função das produções de fissão. Esta produção é definida como sendo a porcentagem do número total de fissões nucleares que formam produtos de um dado número de massa. Analisando a Figura 1.8, nota-se que as massas de quase todos os produtos de fissão caem em dois grandes grupos, um grupo "leve", com números de massas desde 80 até 110 e um grupo pesado, com números de massas desde 125 até 155. O tipo de fissão mais provável, compreendendo aproximadamente 6,4 % do total, refere-se a produtos com número de massas 95 e 139. Todavia, é aparente que na grande maioria dos casos, a fissão do U-235 não é simétrica. Pu-239 e U-233 possuem curvas de fração de produção de produtos de fissão semelhantes.

No instante da fissão, os núcleos dos produtos de fissão são arremessados com uma velocidade tão alta que eles tendem até em deixar para trás seus elétrons orbitais. Todavia, os produtos de fissão agem como partículas altamente carregadas passando através da matéria.

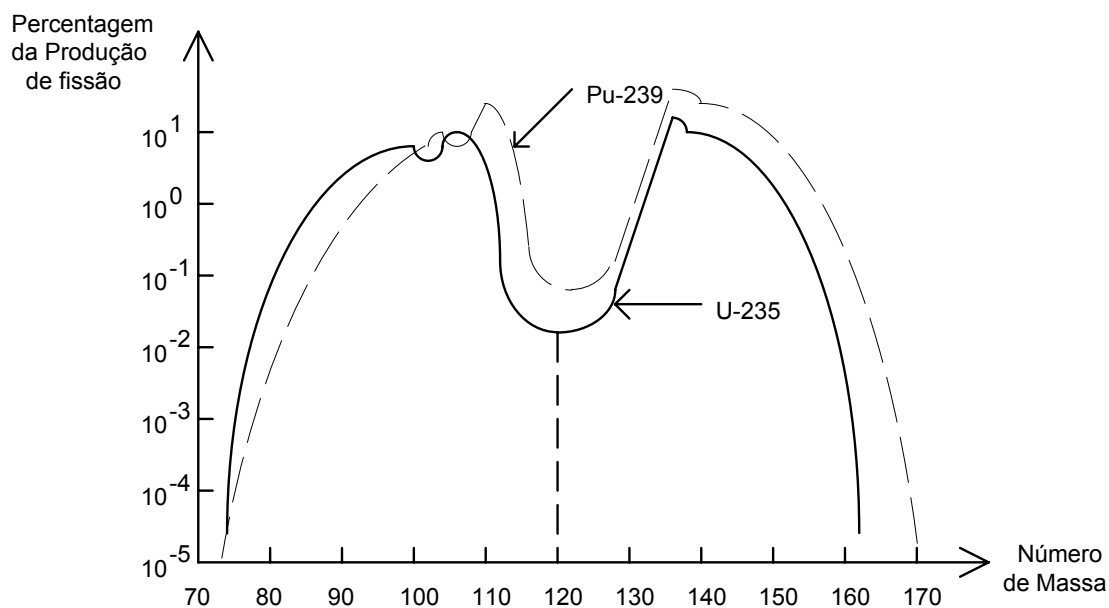


Figura 1.8: Fração de Produção de Fissão Térmica versus Número de Massa.

Os fragmentos mais leves, carregam consigo, em média, cerca de 20 unidades de carga positiva, enquanto os fragmentos mais pesados carregam, em média, cerca de 22 unidades.

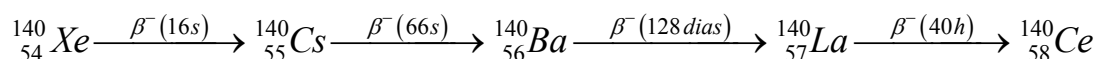
Os fragmentos de fissão produzem em seus caminhos, fortes ionizações e seus alcances são relativamente curtos para estes fragmentos tão energéticos. Os alcances no ar de grupos de fragmentos leves e pesados são, aproximadamente, de 2,5 cm e 1,9 cm, respectivamente. Isto é ligeiramente menor do que o alcance de uma partícula alfa de uma fonte radioativa típica.

1.32 Radioatividade dos Produtos de Fissão

Quase todos os produtos de fissão são radioativos e emitem partículas betas radioativas. A razão para isto é evidente sob as considerações das relações dos nêutrons para os prótons envolvidos, lembrando que isótopos pesados requerem cerca de 1,6 nêutrons para cada próton a fim de compensar a tremenda força eletrostática (coulombiana) de repulsão.

Os produtos de fissão, desde que eles sejam formados de urânio, também terão uma relação de nêutrons para prótons de cerca de 1,6. Isótopos de tamanhos intermediários, no entanto, necessitam uma relação de nêutron para próton de 1,3 para a

sua estabilidade. É evidente, então, que os produtos de fissão possuirão excesso de nêutrons. Isótopos fortemente neutrônicos, normalmente decaem por emissão β^- . Os produtos de fissão são tão ricos em nêutrons que em média eles necessitam cerca de três emissões beta para atingir a estabilidade. Isto dá origem a cadeias de decaimento. Um exemplo típico é o decaimento do Isótopo Xe-140 para um isótopo estável de Cério:



Desde que hajam cerca de 80 diferentes radioisótopos produzidos em fissão e cada um produz através de sua cadeia de decaimento em média, 2 radioisótopos adicionais, há então, mais de 200 espécies radioativas presentes em um curto intervalo de tempo após as fissões.

QUESTÕES DO CAPÍTULO A1

- 2.1 Determine o número de prótons, de elétrons e de nêutrons do potássio $\left({}_{19}^{39}\text{K}\right)$ eletricamente neutro.
- 2.2 Conhecem-se os seguintes dados referentes aos átomos A, B e C:
 - a. A tem número atômico 14 e é isóbaro de B.
 - b. B tem número atômico 15 e número de massa 30, sendo isótopo de C.
 - c. A e C são isótonos entre si.

Qual o número de massa de C?
- 2.3 O que é um núcleon?
- 2.4 Defina e de exemplos:
 - a. isótopo.
 - b. isóbaro.
 - c. isótono.
 - d. abundância isotópica.
- 2.5 Quais são as forças que interagem no núcleo? Explique cada uma delas.
- 2.6 Qual a origem da força magnética no núcleo?
- 2.7 Coloque em ordem crescente de intensidade as forças que agem no núcleo do átomo: elétrica, gravitacional, magnética e nuclear.

- 2.8. Como foi constatada a existência de forças nucleares no núcleo?
- 2.9. Das 4 forças que agem no núcleo, selecione as duas mais importantes, consideradas para efeito de explicações de equilíbrio nuclear.
- 2.10. O núcleo de um átomo a exemplo da eletrosfera de um átomo pode ter estados excitados? Explique.
- 2.11. Qual a diferença entre um Raio-x e uma radiação gama quanto a sua origem?
- 2.12. Explique porque a curva de estabilidade não é exatamente uma reta, isto é, $N = Z$, e sim desviada no sentido de ter mais nêutrons que prótons.
- 2.13. Um nuclídeo cuja proporção entre seus prótons e nêutrons é tal que ele está fora da curva de estabilidade é dito ser instável. Se ele é instável, então porque existe?
- 2.14. O modelo de Bohr, baseado no modelo de seu professor (Rutherford) apontava uma falha no modelo de seu mestre, ou seja, segundo a teoria eletromagnética clássica, qualquer partícula carregada emite radiação eletromagnética quando acelerada. Em particular, como a trajetória do elétron é circular, portanto acelerado, ao redor do núcleo haveria emissão de radiação eletromagnética. Consequentemente o movimento orbital de um elétron seria instável porque iria espiralando em direção ao centro, à medida que fosse perdendo energia até "cair" no núcleo. Isso porém não ocorre na realidade. Explique.
- 2.15. O que significa "as forças nucleares são saturáveis"?
- 2.16. O que é energia de excitação do núcleo?
- 2.17. Qual a diferença entre energia de excitação do elétron e do núcleo? O que os difere sob o ponto de vista quantitativo?
- 2.18. Porque à medida que Z aumenta a proporção de nêutrons para prótons aumenta no núcleo?
- 2.19. Explique os decaimentos:
- beta menos.
 - beta mais.
 - alfa.

d. captura de elétron.

- 2.20 Qual a distinção entre um decaimento radioativo e uma reação nuclear?
- 2.21. Numa mistura de núclídeos que estão emitindo radiações α , β e γ , como você identifica, de uma maneira simples, a existência destas 3 radiações?
- 2.22. O decaimento radioativo é um evento independente?
- 2.23. Qual o significado da constante de decaimento λ ?
- 2.24. Qual a razão de se falar em probabilidade de decaimento de um núclídeo?
- 2.25. O que são meia-vida e vida-média? Qual a relação matemática entre elas?
- 2.26. O que se entende por "pai" e "filho(s)" num decaimento radioativo?
- 2.27. O que é defeito de massa? Lavoisier, quando fez sua teoria sobre balanço de massa, considerou tal fato?
- 2.28. Como Rutherford, em 1919, descobriu que átomos de nitrogênio emitiam prótons quando bombardeados por radiações alfa?
- 2.29. Quando um núclídeo é bombardeado por uma partícula, o que se espera que aconteça?
- 2.30. Qual a importância da reação nuclear com relação às descobertas acerca do núcleo?
- 2.31. Qual a diferença entre espalhamento elástico e inelástico de uma partícula interagindo com um núcleo?
- 2.32. O que é energia de ligação de um núcleo?
- 2.33. Como você calcularia a diferença de massa de um isótopo A_ZX ?
- 2.34. Qual a relação entre diferença de massa e energia e como ela é conhecida?
- 2.35. O que se entende por energia de ligação por núcleon?
- 2.36. Esboce um gráfico da energia de ligação por núcleon em função do número de massa A.
- 2.37. Como foi descoberta a fissão?
- 2.38. Explique o mecanismo do processo de fissão.
- 2.39. O que é energia crítica num processo de fissão?

- 2.40. O gráfico da energia potencial em função da distância entre os fragmentos de fissão (desde o início do processo de fissão) é semelhante para todos os núclídeos fissionáveis? Explique.
- 2.41. O valor 931 MeV aparece frequentemente nos cálculos de física nuclear. Explique este valor.
- 2.42. Explique as origens e o valor da energia liberada na fissão.
- 2.43. Qual é a origem de uma parte da energia liberada numa fissão que não é aproveitada pelo sistema? Porque isso ocorre?
- 2.44. O calor gerado numa fissão é proveniente principalmente de qual produto da fissão?
- 2.45. Explique porque na partida do reator 185 MeV de calor são liberados por fissão e ao passar do tempo essa energia vai aumentando até 200 MeV.
- 2.46. O que se entende por "calor de decaimento"?
- 2.47. Esboce um gráfico do decaimento da potência em função do tempo após o desligamento do reator.
- 2.48. Os produtos de uma fissão nuclear específica são os mesmos para outras fissões? Comente sua resposta.
- 2.49. Esboce um gráfico da produção de fissão (em valores percentuais), em função do número de massa dos fragmentos de fissão produzidos.
- 2.50. Quais são as características dos fragmentos de fissão e qual sua importância num reator de potência?
- 2.51. Explique porque a maioria dos fragmentos de fissão são beta emissores.
- 2.52. Ache os valores da constante de desintegração e meia-vida de uma substância para a qual as seguintes contagens foram obtidas em tempos diferentes.

t (h)	Contagem/min	t (h)	Contagem/min	t (h)	Contagem/min
0,0	-----	3,0	4465	8,0	980
0,5	9535	4,0	3295	9,0	720

1,0	8190	5,0	2430	10,0	530
1,5	7040	6,0	1800	11,0	395
2,0	6050	7,0	1330	12,0	290

2.53 A meia-vida do Radônio²²² é 3,82 dias. Qual a fração de uma amostra deste nuclídeo recém separado que vai se desintegrar num dia? Em 2, 3, 4, 5, e 10 dias? Se a amostra contém inicialmente um micrograma de radônio, quantos átomos vão se desintegrar no primeiro dia? Durante o quinto dia?