

Parte I – Modelos Nucleares.

Modelo da Gota Líquida. C. von Weizsäcker reconheceu, em 1935, que as propriedades nucleares associadas com o tamanho, a massa e a energia de ligação de um núcleo são similares àquelas encontradas em uma gota líquida. Em uma gota de um líquido, a densidade da gota é aproximadamente constante; além disso, suas dimensões são proporcionais ao número de partículas do sistema (na realidade, as moléculas que compõem a gota) e o calor de vaporização (ou energia de ligação) da gota é proporcional à massa ou ao número de partículas que a compõem. O modelo da gota líquida levou então à fórmula semi-empírica de massa que expressa a dependência da massa nuclear com A e Z:

$$M = Zm_p + (A-Z)m_n - b_1A + b_2A^{2/3} + b_3Z^2A^{-1/3} + b_4(A-2Z)^2 A^{-1} + b_5A^{-3/4}$$

As constantes acima são determinadas experimentalmente:

$b_1 = 14 \text{ MeV}$	$b_3 = 0,58 \text{ MeV}$
$b_2 = 13 \text{ MeV}$	$b_4 = 19,3 \text{ MeV}$

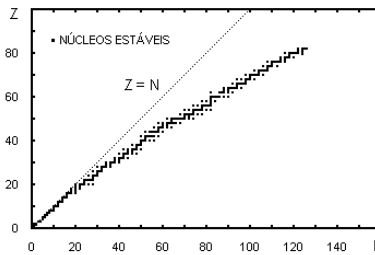
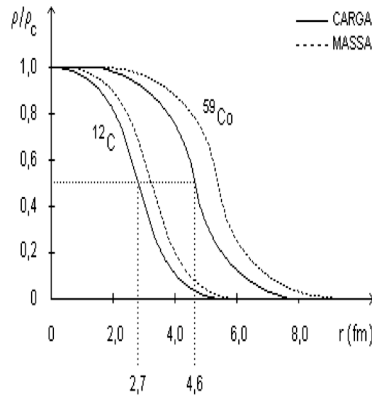
A	Z	b_5
par	par	-33,5MeV
ímpar		0
par	ímpar	33,5MeV

A obtenção teórica dos termos da fórmula semi-empírica de massa pode ser compreendida da seguinte forma:

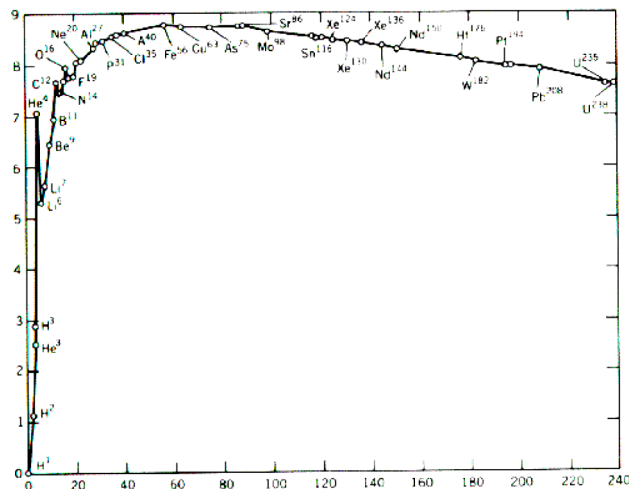
- Desprezando-se a energia de ligação nuclear, a massa do núcleo seria dada, em uma estimativa preliminar, pela soma das massas dos prótons e dos nêutrons: $Zm_p + (A-Z)m_n$. Isto explica a presença do primeiro termo da fórmula.
- O próximo termo corresponde à correção de primeira ordem da massa do núcleo, correção esta associada à energia de ligação nuclear. Este termo é dado por $-b_1A$ (termo de volume). Para compreendê-lo, partimos do pressuposto que a interação nuclear é predominantemente atrativa. Em sendo atrativa, a energia de ligação faz com que a massa de um núcleo ligado seja menor do que a soma das massas das partículas nucleares, na medida em que trabalho deve ser realizado (energia deve ser adicionada ao) no sistema para separar essas partículas nucleares. Similarmente ao que ocorre no caso de uma gota líquida, esta primeira correção será proporcional ao número de partículas (ou equivalentemente ao número de ligações) do núcleo.
- Há uma suposição adicional correspondente à correção de primeira ordem e que leva à correção de segunda ordem da fórmula semi-empírica: a de que cada partícula do sistema é rodeada pelo mesmo número de partículas nucleares. Isto não é certamente verdadeiro, na medida em que as partículas próximas à superfície nuclear contêm menos 'vizinhos' e são portanto mais fracamente ligadas. Isto significa dizer que a primeira correção corresponde à subtração de um termo, de volume, cujo valor é superior ao caso mais realístico que leve em conta este efeito. Portanto, a correção de segunda ordem à massa de um núcleo,

dada pelo termo $+b_2A^{2/3}$ (termo de superfície) visa corrigir a estimativa anterior, e corresponde portanto a uma 'correção de superfície' à massa nuclear.

- A correção de terceira ordem dada pelo termo $b_3Z^2A^{-1/3}$ (termo de Coulomb) é associada à repulsão de Coulomb entre os prótons nucleares.
- A correção de quarta ordem, $b_4(A-2Z)^2 A^{-1}$ (termo de simetria), não é introduzida com base em uma analogia com uma gota líquida. Este termo é de natureza quantum mecânica, e é introduzido devido à presença do Princípio de Exclusão de Pauli que estabelece que duas partículas idênticas não podem ocupar, simultaneamente, o mesmo estado físico. Assim, se houver mais prótons do que nêutrons no sistema (ou mais nêutrons do que prótons) a massa do núcleo sofre um acréscimo, significando que a energia de ligação nuclear, devido a este termo, concomitantemente, decresce. O princípio de Exclusão de Pauli é um princípio da mecânica quântica formulado por Wolfgang Pauli em 1925. Ele afirma que dois férmions idênticos não podem ocupar o mesmo estado quântico simultaneamente. Uma forma mais rigorosa de enunciar este princípio é dizer que a função de onda total de um sistema composto por dois fermions idênticos deve ser anti-simétrica. Para elétrons de um mesmo átomo, ele implica em que dois elétrons não podem ter os mesmos números quânticos pois de outro modo, em sendo antisimétrica, a função de onda do sistema se anula. Por exemplo, se os números quânticos n , l , e m_l são iguais para os dois elétrons, estes deverão necessariamente ter os números quânticos m_s diferentes, e portanto os dois elétrons têm orientações de spin opostas. O mesmo ocorre com os prótons e os nêutrons em um núcleo. E, na medida em que a força nuclear é independente de carga elétrica, prótons e nêutrons podem ser tratados, no que diz respeito à força forte, como dois estados distintos de uma partícula nuclear chamada de nucleon. Do ponto de vista da interação forte nuclear, prótons e nêutrons correspondem então a dois estados distintos de carga denominados de estados de isospin. Estes estados, similarmente ao caso do spin, correspondem a projeções up e down, em um espaço vetorial abstrato, considerando-se um eixo também abstrato de quantização. É definido então um operador de isospin que atua nos estados dos nucleons, e cujos auto-valores correspondem às projeções up e down de isospin. Assim, estados com projeções opostas de isospin (simétricos em isospin) são mais estáveis do que estados com idênticas projeções de isospin. O grau de simetria de isospin é dado então pelo termo $b_4(A-2Z)^2A^{-1}$. A situação de assimetria faz com que a massa do núcleo cresça pois representa uma contribuição efetivamente repulsiva devido ao Princípio de Pauli.
- A quinta correção à fórmula semi-empírica, dada por $b_5A^{-3/4}$ (termo de pareamento), tem duas razões de existir: a primeira associada também ao Princípio de Exclusão de Pauli, mas correlacionada aos spins dos nucleons e a segunda associada ao acoplamento entre os spins dos nucleons.



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 (eixo das ordenadas), em função do número de núcleons, A (eixo das abscissas). O gráfico inclui núcleos estáveis e núcleos radioativos. Usando a fórmula semi-empírica de massa a energia de ligação por núcleon pode ser escrita na forma



$$E_l/A = [Zm_p + (A-Z)m_n - M]A^{-1}c^2 = b_1 - b_2A^{-1/3} - b_3Z^2A^{-4/3} - b_4(A-2Z)^2 A^{-2} - b_5A^{-7/4}$$

Modelo de Camadas. No modelo de gota líquida, os núcleons não são tratados de maneira individual, mas seus efeitos são considerados por meio de valores médios associados a suas propriedades. O modelo é bem sucedido no que diz respeito à determinação de algumas propriedades nucleares como, por exemplo, a energia de ligação por núcleon. Entretanto, outras propriedades nucleares, como por exemplo, as energias dos estados excitados nucleares ou os momentos magnéticos nucleares, necessitam, para a sua compreensão, uma descrição que leve em conta propriedades individuais que não são levadas em consideração em um modelo de natureza mais coletiva como é o modelo de gota líquida. Neste sentido, dados nucleares revelam que núcleos cujos números de núcleons, N ou Z , correspondem aos chamados 'números mágicos', 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, apresentam estabilidade pronunciada, com valores mais expressivos para sua energia de ligação quando comparados a núcleos não mágicos. É importante salientar que um comportamento similar ocorre no caso atômico, que deu por sua vez origem ao modelo atômico de camadas. No caso dos núcleos, estes fatos deram origem assim ao modelo nuclear de camadas.

A estrutura do modelo atômico de camadas é determinada por meio de uma série de aproximações sucessivas. A primeira delas parte do pressuposto que os níveis de energia dos elétrons atômicos, considerando-se um núcleo com carga Ze , são preenchidos de maneira sucessiva, a partir dos níveis de energia com valores mais baixos aos níveis de energia com valores mais altos, contendo o átomo neutro Z elétrons que ocupam então os sucessivos níveis de energia atômicos. E este processo de ocupação ocorre como se estes elétrons não interagissem entre si, sendo os efeitos de interação entre os elétrons considerados por meio de correções. Estas correções são em geral relativamente pequenas. O seu efeito principal é o de alterar, de maneira suave, a estrutura de níveis do modelo de camadas atômico. O modelo de camadas atômico parte assim do pressuposto que, em uma primeira aproximação, os elétrons se movem independentemente no átomo sob a ação do campo Coulombiano nuclear.

Uma formulação similar é adotada no caso nuclear. No modelo de camadas nuclear, partimos do pressuposto, em uma primeira aproximação, que cada núcleon se move sob a ação de um potencial nuclear médio produzido pelos demais núcleons do núcleo. Por exemplo, um potencial do tipo oscilador harmônico

$$V = \frac{1}{2} k R^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 R^2$$

Os níveis de energia então obtidos para os núcleons são dados por

$$E = (N + 3/2)\hbar\omega$$

onde $N = 2(n-1) + \ell$. A quantidade ℓ é o número quântico momentum angular orbital tal que $\ell = 0, 1, 2, 3, \dots$ e sendo ainda que $|\mathbf{L}| = (\ell(\ell+1))^{1/2}\hbar$. Por sua vez, n é um inteiro, tal que $n = 1, 2, 3, 4, \dots$. Em contraste ao caso do átomo de hidrogênio, os valores de ℓ não são limitados pelos valores de n .

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.10 Modelos Nucleares e Decaimento de Núcleos Instáveis. Modelo da Gota Líquida. Modelo de Camadas. Lei Estatística do Decaimento Radioativo. Decaimento Gama. Decaimento Beta. Decaimento Beta e o Neutrino.

Para explicar os números mágicos, M. Mayer e J. Jensen, em 1949, de maneira independente, postularam um termo adicional no potencial nuclear, do tipo

$$\ell.s = \frac{1}{2} [(j+1) - \ell(\ell+1) - s(s+1)] \hbar^2$$

tal que

$$\ell.s = \frac{1}{2} \ell \hbar^2 \text{ para } j = \ell + \frac{1}{2}$$

e

$$\ell.s = -\frac{1}{2} (\ell+1) \hbar^2 \text{ para } j = \ell - \frac{1}{2}$$

Você saberia explicar de que forma a presença de um acoplamento do tipo spin-órbita, dado por $\ell.s$, possibilita a explicação dos números mágicos em um núcleo?

Problemas.

1. Determine a repulsão Coulombiana entre dois prótons no núcleo ${}^3_2\text{He}$, supondo que os dois prótons estão separados por uma distância igual ao raio nuclear. Solução: 0,71MeV.
2. Qual é a diferença entre as energias de ligação do ${}^3_2\text{He}$ e do ${}^3_1\text{H}$? Solução: 0,76MeV.
3. Calcule a energia de ligação por núcleon do ${}^{98}_{42}\text{Mo}$. Solução: 8,64MeV.
4. Compare as energias mínimas necessárias para remover um nêutron dos núcleos ${}^{41}_{20}\text{Ca}$, ${}^{42}_{20}\text{Ca}$, ${}^{43}_{20}\text{Ca}$. Solução: 8,36MeV, 11,47MeV, 7,93MeV.
5. Núcleos espelho são núcleos que contem o mesmo número de núcleons (portanto idêntico valor de A), mas cujos valores de Z e N são trocados. Determine a diferença de massa de dois núcleos espelho cujos valores de Z e N diferem por uma unidade.
6. As massas dos núcleos ${}^{23}_{11}\text{Na}$ e ${}^{23}_{12}\text{Mg}$ são iguais a 22,989771uma e 22,994125 uma, respectivamente. Usando estes dados, determine o valor da constante b_3 da fórmula semi-empírica de massa. Solução: 0,598MeV.
7. Usando a expressão da energia potencial eletrostática dos prótons em um núcleo, supondo que a carga elétrica é uniformemente distribuída no volume nuclear, para determinar o valor da constante b_3 . Solução: 0,58MeV.
8. Usando o modelo da gota líquida, encontre o mais estável isóbaro para um dado valor ímpar de A.
9. Para os valores $A = 25, 43, 77$, encontre os núcleos correspondentes mais estáveis.
10. Mostre que para uma dada órbita nuclear caracterizada por um dado valor de j, existem no máximo $2j + 1$ núcleons. Este resultado é consistente com o Princípio de Pauli?

Parte II –

Decaimento Radioativo. Decaimento radioativo ou desintegração radioativa é a desintegração de um núcleo por meio da emissão de energia em forma de radiação. A radiação emitida pode se propagar na forma de partículas corpusculares ou por meio de ondas eletromagnéticas. Se um núcleo for instável, tende a transformar-se, de acordo com o Princípio de Hamilton, em outro mais estável. A este processo de transformação nuclear dá-se o nome de decaimento radioativo. Devido às desintegrações que vão acontecendo ao longo do tempo, o número de núcleos instáveis contidos em uma fonte radioativa vai diminuindo. Os processos de desintegração radioativa mais comuns são os de desintegração α (alfa), β (beta) e γ (gama).

Lei Estatística do Decaimento Radioativo. Núcleos ocupam estados excitados. E estes estados decaem com a emissão, como vimos, de partículas gama (γ) (fótons de altas energias), partículas alfa (α) (núcleos de átomos de hélio) e partículas beta (β) (elétrons ou pósitrons). A Lei estatística do decaimento radioativo é definida na forma

$$\left(-\frac{dN}{N}\right) = \lambda \cdot dt.$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-t/\tau}.$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2.$$

Nestas expressões, N_0 e N representam respectivamente as quantidades de núcleos instáveis, nos estágios inicial e final do processo de decaimento. Nestas expressões, λ representa a constante de decaimento ou constante de desintegração, que depende do particular processo de desintegração, $t_{1/2}$ é a meia vida e τ a vida média dos núcleos instáveis considerados. A lei $N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-t/\tau}$ não é determinística e sim estatística (probabilística). Portanto, N corresponde ao valor esperado no processo de decaimento. A meia vida associada ao decaimento caracteriza uma medida da 'rapidez' do decaimento radioativo de um particular elemento, e é definida como o intervalo de tempo para o qual o número de núcleos instáveis inicialmente existentes é reduzido à metade. Os núcleos que decaem se transforma em outros núcleos. Os primeiros são denominados de 'núcleos progenitores', e os demais de 'núcleos filhos'. O número de núcleos filho, supondo-os estáveis, é $N_D = N_0 - N$. A atividade da amostra é definida como o valor da razão de desintegração, na forma

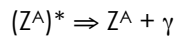
$$\text{Atividade} = |dN/dt| = \lambda N.$$

A unidade de atividade é o curie. $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo.

Decaimento Gama. No decaimento gama, um núcleo excitado sofre uma transição para um estado de menor energia emitindo um fóton chamado de raio gama (γ). Os raios gama emergem com energias discretas, mostrando assim que os núcleos possuem estados discretos de energia. A energia do raio gama é dada por

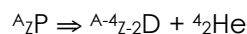
$$h\nu = E_i - E_f$$

Em contraste aos fótons emitidos em transições eletromagnéticas, cujas energias são da ordem de alguns eV, os raios gama tem energias que variam entre keV e MeV. Os fótons γ têm portanto uma energia muito superior à da luz visível e, regra geral, também à energia dos raios-X, sendo portanto mais penetrantes do que aqueles. O decaimento gama poderá estar associado a outros decaimentos, como α ou β , se os núclídeos descendentes estiverem em um estado energeticamente excitado. E, uma vez que os raios gama não carregam nem massa nem carga elétrica, a carga elétrica e o número atômico do núcleo não se modificam durante o processo de decaimento. Se o estado nuclear excitado for designado pelo símbolo $(Z^A)^*$, um processo de decaimento gama pode ser escrito, simbolicamente, na forma

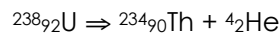


A maior parte dos núcleos instáveis para o decaimento gama tem meias vidas da ordem de 10^{-14} s, ou seja, meias vidas mais curtas do que a meia vida de estados excitados eletrônicos, meias vidas estas que não podem ser medidas. Os estados excitados de alguns núcleos, porém, são muito longas. Estes núcleos excitados são chamados de isômeros e seus estados excitados são chamados de estados isoméricos.

Decaimento Alfa. Quando da descoberta de emissões de energia do rádio 226 (no ano de 1898), por Marie Curie e Pierre Curie, o fenômeno de emissividade do rádio foi denominado de radioatividade α ou emissão α . Às partículas correspondentes emitidas deu-se o nome de partículas α apenas por ser a primeira letra do alfabeto grego. Posteriormente, verificou-se que essas partículas eram na realidade um núcleo de hélio, formado por 2 prótons e 2 nêutrons. As partículas α emitidas apresentam energias bem definidas e podem ser utilizadas para caracterizar o núcleo de onde provêm. Assim, no decaimento alfa, o núcleo instável perde dois prótons e dois nêutrons. Desta forma, seu número atômico Z decresce de duas unidades, e seu número de massa A decresce por quatro unidades. Desta forma, os núcleos progenitor, P , e filho (ou filha), D , correspondem a diferentes elementos químicos. Aplicando as leis de conservação de carga e de número de partículas, podemos representar o decaimento alfa, simbolicamente, na forma,



Por exemplo:



Em um sistema no qual o núcleo progenitor está em repouso, a seguinte lei de conservação de energia é válida

$$M_P c^2 = M_D c^2 + M_\alpha c^2 + K_D + K_\alpha$$

onde K_D e K_α representam respectivamente as energias cinéticas do núcleo filha e da partícula alfa e M_{PC}^2 , M_{DC}^2 , $M_\alpha c^2$ denotam respectivamente as energias de repouso dos núcleos progenitor e filha e da partícula alfa. E uma vez que as energias cinéticas das partículas são quantidades positivas, então o decaimento alfa somente pode ocorrer se

$$M_{PC}^2 \geq M_{DC}^2 + M_\alpha c^2$$

Adicionalmente à conservação de energia no processo, momentum linear também deve ser conservado. E uma vez que somente dois núcleos são produzidas no processo de decaimento alfa, as leis de conservação fixam, de maneira única, as energias cinéticas e os momenta lineares do núcleo filho e da partícula alfa. Se um núcleo progenitor, de número de massa A , decai por meio da emissão de uma partícula alfa, a energia cinética da partícula alfa é (ver lista de problemas)

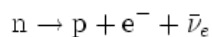
$$K_\alpha = ((A-4)/A) Q$$

$$\text{onde } Q = M_{PC}^2 - M_{DC}^2 - M_\alpha c^2 = K_\alpha + K_D$$

representa a energia de desintegração, ou seja, a energia total que é emitida no processo.

Decaimento Beta e o Neutrino. Um núcleo, que é instável por ter um excesso de prótons, de acordo com o Princípio de Hamilton, faz com um próton se converta em um nêutron, que permanece no interior do núcleo, sendo emitidos então um pósitron e um neutrino. Chama-se partícula β^+ a esse 'elétron' positivo emitido pelo núcleo. Assim, neste processo, a carga elétrica do núcleo, Z , é alterada mas o número de núcleons, A , permanece inalterado. Há outro tipo de decaimento beta, que ocorre quando uma partícula β^- , ou seja, um elétron, é emitido pelo núcleo. Neste caso, o núcleo instável tem um nêutron em excesso e este nêutron se transforma em um próton, que permanece no interior do núcleo, sendo emitidos um elétron e um anti-neutrino. Há outros processos beta que são originados pela captura de elétrons atômicos. É importante ressaltar o papel do neutrino nestes processos.

O Neutrino. Neutrino é uma partícula sub-atômica de difícil detecção porque sua interação com a matéria é muito fraca, sua carga é neutra e sua massa é nula (ou extremamente pequena). Outras propriedades do neutrino: spin intrínscio = $\frac{1}{2}\hbar$; velocidade = c . A formação de neutrinos ocorre em processos de desintegração em que um sistema nuclear sofre transição para um estado de energia mais baixa, como por exemplo na conversão de hidrogênio em hélio no interior do Sol. A maior parte dos neutrinos que atravessam a Terra são provenientes do Sol. A existência do neutrino foi postulada por Wolfgang Pauli em 1930 de modo a preservar as leis de conservação de energia e momentum linear no processo de decaimento beta. Por exemplo, no decaimento β^- , um nêutron livre é convertido em um próton, com emissão de um elétron e de um anti-neutrino (a anti-partícula do neutrino):



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Instituto de Física

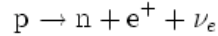
Departamento de Física

Disciplina: Física do Século XX B

Prof. César Augusto Zen Vasconcelos

LISTA TEMÁTICA E DE PROBLEMAS No.10 Modelos Nucleares e Decaimento de Núcleos Instáveis. Modelo da Gota Líquida. Modelo de Camadas. Lei Estatística do Decaimento Radioativo. Decaimento Gama. Decaimento Beta. Decaimento Beta e o Neutrino.

No decaimento β^- , um próton livre é convertido em um nêutron, com a emissão de um pósitron e de um neutrino:



De maneira geral, devido à presença do neutrino, o átomo e a partícula beta normalmente não retrocedem em direções opostas. Essa observação é na verdade o que levou Wolfgang Pauli a postular a existência de neutrinos a fim de impedir, como dissemos, a violação das leis de conservação de energia e momentum linear. O decaimento beta é mediado pela força nuclear fraca. Partículas beta em geral têm um alcance aproximadamente 10 vezes maior do que o alcance das partículas alfa e uma força de ionização cerca de um décimo da força de ionização das partículas alfa. As partículas beta são assim completamente paradas por uns poucos milímetros de alumínio. A fonte de elétrons no tubo de televisão pode também ser considerada uma fonte de radiação beta, que é absorvida pelo fósforo recobrimo a parte interior do tubo originando radiação eletromagnética. Os neutrinos sofrem interação fraca e gravitacional. Experiências executadas em laboratórios de partículas indicam que os neutrinos se transformam de um tipo em outro durante seu deslocamento. A isto se chama oscilação de neutrinos. Os distintos tipos de neutrinos: neutrino do elétron ou neutrino eletrônico associado ao elétron, de número eletrônico +1, seu símbolo é ν_e ; neutrino do múon ou neutrino muônico associado ao múon-menos, de número muônico +1, seu símbolo é ν_μ ; neutrino do tau, ou neutrino tauônico, associado ao tau, e de número tauônico +1, seu símbolo é ν_τ . Em geral o decaimento β^- pode ser simbolizado na forma



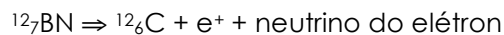
Exemplo:



No decaimento β^+ , um pósitron é emitido



Exemplo:



Lei de conservação de energia:

$$M_P C^2 = M_D C^2 + m_e C^2 + K_D + K_{Total}$$

$$Q = K_D + K_{Total}$$

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Instituto de Física

Departamento de Física

Disciplina: Física do Século XX B

Prof. César Augusto Zen Vasconcellos

LISTA TEMÁTICA E DE PROBLEMAS No.10 Modelos Nucleares e Decaimento de Núcleos Instáveis. Modelo da Gota Líquida. Modelo de Camadas. Lei Estatística do Decaimento Radioativo. Decaimento Gama. Decaimento Beta. Decaimento Beta e o Neutrino.

Problemas

1. Derive a Lei de decaimento radioativo. Determine a atividade de uma grama de $^{226}_{88}\text{Ra}$, sabendo que sua meia vida é 1622 anos.
2. Determine a distância para a qual a intensidade de um feixe de nêutrons de energia igual a 5eV será reduzida por um fator de $\frac{1}{2}$. (meia vida do nêutron livre = 12,8minutos)
3. Quanto tempo é necessário para que 5 mg de ^{22}Na , cuja meia vida é 2,6 anos, se reduza a 1mg?
4. Se 3×10^{-9} kg de $^{200}_{79}\text{Au}$ tem uma atividade de 58,9Ci, qual é sua meia-vida?
5. A atividade de uma amostra de $^{55}_{24}\text{Cr}$ ao fim de um intervalos de 5 min. é 19,2; 7,13; 2,65; 0,99; 0,35 miliCi. Qual é a meia vida do elemento?
6. Qual é a energia máxima dos elétrons emitidos no decaimento beta do ^3_1H ?
7. Em termos das massas em repouso dos núcleos progenitor e filho, determine os valores de Q para decaimentos beta, beta inverso e captura eletrônica.
8. Determine a energia mínima de um anti-neutrino para produzir, por meio de sua captura por um próton, um nêutron e um pósitron.
9. Para $A = 104$, mostre que o gráfico da massa versus numero atômico prediz que os correspondentes isóbaros estáveis são $^{104}_{44}\text{Ru}$ e $^{104}_{46}\text{Pd}$.
10. Determine as energias cinéticas das partículas alfa emitidas no decaimento alfa em termos do valor de Q da reação.