

Decaimento radioativo 2

6

META:

Discutir decaimento beta.

Discutir decaimento gama.

Discutir fissão espontânea de núcleos.

OBJETIVOS:

Ao fim da aula os alunos deverão ser capazes de:

Determinar quantidades características de processo de decaimento beta.

Determinar quantidades características de processo de decaimento gama.

Determinar quantidades características de processo de fissão espontânea.

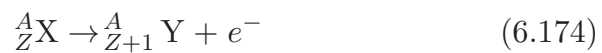
PRÉ-REQUISITOS

Os conhecimentos de determinação de massa de núcleos da Aula

1.

6.1 Decaimento Beta

Existe três processos chamados decaimento β . Eles são decaimento β^- , decaimento β^+ e captura de elétron. Núcleos que sofrem decaimento β são chamados β -ativos. Decaimento β^- é emissão espontânea de elétron e^- por núcleo. Esquema de decaimento β^- é



Condição de possibilidade da reação é

$$M({}^A_Z\text{X}) > M({}^A_{Z+1}\text{Y}) + M_e \quad (6.175)$$

Escrevemos a condição (6.175) em termos de massas de núclídeos. Adicionamos ZM_e ao lado equarado e ao lado direito na expressão (6.175)

$$M({}^A_Z\text{X}) + ZM_e > M({}^A_{Z+1}\text{Y}) + ZM_e + M_e$$

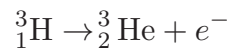
ou

$$M({}^A_Z\text{X}) + ZM_e > M({}^A_{Z+1}\text{Y}) + (Z + 1)M_e$$

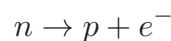
portanto

$$M_{at}({}^A_Z\text{X}) > M_{at}({}^A_{Z+1}\text{Y}) \quad (6.176)$$

Exemplo de decaimento β^- é transformação de núcleo de ${}^3_1\text{H}$ em núcleo de ${}^3_2\text{He}$



com meia vida $T_{1/2} = 12$ anos. Observamos que para nêutron livre existe possibilidade de decaimento β^-



Vemos que $M_p + M_e = 938,27 + 0,511 = 938,78$ MeV, $M_n = 939,56$ MeV. Tal que

$$M_n > M_p + M_e$$

Meia vida de nêutron livre é $T_{1/2} = 10,6$ min.

Decaimento β^+ é emissão espontânea de pósitron e^+ por núcleo. Pósitron e^+ é anti-partícula de elétron¹². Pósitron possui mesma massa de elétron M_e e carga elementar positiva $+e$. Esquema de decaimento β^+ é



Condição de possibilidade de decaimento β^+ é

$$M({}^A_Z\text{X}) > M({}^A_{Z-1}\text{Y}) + M_e \quad (6.178)$$

Escrevemos a condição (6.178) em termos de massas de núcleos. Adicionamos ZM_e ao lado esquerdo e ao lado direito na expressão (6.178)

$$M({}^A_Z\text{X}) + ZM_e > M({}^A_{Z-1}\text{Y}) + ZM_e + M_e$$

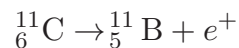
ou

$$M({}^A_Z\text{X}) + ZM_e > M({}^A_{Z-1}\text{Y}) + (Z-1)M_e + 2M_e$$

portanto

$$M_{at}({}^A_Z\text{X}) > M_{at}({}^A_{Z-1}\text{Y}) + 2M_e \quad (6.179)$$

Exemplo de decaimento β^+ é transformação de núcleo de ${}^{11}_6\text{C}$ em núcleo de ${}^{11}_5\text{B}$



¹²Existência de pósitrons foi prevista teoricamente por P. Dirac em 1928. Pósitrons foram descobertos em 1932 por C. D. Anderson em estudos de raios cósmicos.

com meia vida $T_{1/2} = 20,4$ min.

Captura de elétron e^- é efeito de absorção espontânea de elétron da camada eletrônica de átomo por núcleo. Esquema de captura de elétron e^- núcleo é



Condição de possibilidade de captura de elétron é

$$M({}^A_Z\text{X}) + M_e > M({}^A_{Z-1}\text{Y}) \quad (6.181)$$

Escrevemos a condição (6.181) em termos de massas de núclídeos. Adicionamos $(Z - 1)M_e$ ao lado esquerdo e ao lado direito na expressão ((6.181)

$$M({}^A_Z\text{X}) + (Z - 1)M_e + M_e > M({}^A_{Z-1}\text{Y}) + (Z - 1)M_e$$

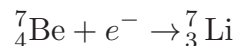
ou

$$M({}^A_Z\text{X}) + ZM_e > M({}^A_{Z-1}\text{Y}) + (Z - 1)M_e$$

portanto

$$M_{at}({}^A_Z\text{X}) > M_{at}({}^A_{Z-1}\text{Y}) \quad (6.182)$$

Exemplo de captura de e^- é transformação de núcleo de ${}^7_4\text{Be}$ em núcleo de ${}^7_3\text{Li}$



com meia vida $T_{1/2} = 53,6$ dias.

Em átomo captura de elétron por núcleo ocorre para elétrons de níveis mais baixos. Principalmente de camada eletrônica K . Se um elétron é capturado por núcleo, estado dele é desocupado. Elétron de estado com energia mais alta instantaneamente ocupa esse estado desocupado. Na transição de elétron de estado com energia mais alta para estado com energia mais baixa ocorre emissão

de fóton. Por causa disso captura de elétron e^- é acompanhada por emissão de raios X por átomo.

Observamos que se a condição (6.179) é satisfeita, a e condição (6.182) é satisfeita também. Tal que se pode ocorrer decaimento β^+ , captura de e^- pode ocorrer também. Além disso, processo de captura é mais preferível. Quando é satisfeita condição

$$M_{at}({}^A_{Z-1}Y) < M_{at}({}^A_ZX) < M_{at}({}^A_{Z-1}Y) + 2M_e \quad (6.183)$$

ou

$$0 < M_{at}({}^A_ZX) - M_{at}({}^A_{Z-1}Y) < 2M_e \quad (6.184)$$

captura de e^- ocorre mas decaimento β^+ não.

Como exemplo apresentamos transformação de núcleo de ${}^7_4\text{Be}$ em núcleo de ${}^7_3\text{Li}$ por decaimento β . Da Tabela 1.1 temos $M_{at}({}^7_4\text{Be}) = 0,01693$ uma, $M_{at}({}^7_3\text{Li}) = 0,01601$ uma e $2M_e = 2 \cdot 0,511 = 1,022$ MeV. Tal que $M_{at}({}^7_4\text{Be}) - M_{at}({}^7_3\text{Li}) = 0,00092$ uma, ou $M_{at}({}^7_4\text{Be}) - M_{at}({}^7_3\text{Li}) = 0,00092 \cdot 931,5 = 0,85698$ MeV. Vemos que

$$0 < 0,85698 < 1,022$$

Tal que

$$0 < M_{at}({}^7_4\text{Be}) - M_{at}({}^7_3\text{Li}) < 2M_e$$

e a condição (6.184) é satisfeita. Portanto transformação de núcleo de ${}^7_4\text{Be}$ em núcleo de ${}^7_3\text{Li}$ ocorre somente por meio de captura de e^- .

Para alguns núcleos são satisfeitas as duas condições (6.176) e (6.179). Mas junto com a condição (6.179) é satisfeita a condição (6.182). Tal que neste caso núcleo sofre todos três tipos de decaimento β . Cada tipo de decaimento β ocorre com sua probabilidade. Exemplo de tal núcleo é núcleo de ${}^{64}_{29}\text{Cu}$. Probabilidade

de decaimento β^- é 0,4, probabilidade de decaimento β^+ é 0,2, probabilidade de captura de e^- é 0,4.

Observamos que em processo de decaimento β número de massa A não muda. Muda somente número atômico Z .

Ao contrario de decaimento α que ocorre para núcleos suficiente pesados, decaimento β ocorre com núcleos de qualquer massa. Para cada número atômico Z existem isótopos β -ativos. Meia vida de núcleos β -ativos varia de $T_{1/2} = 10^2$ s para ${}^4_{12}\text{Be}$ a $T_{1/2} = 4 \cdot 10^{12}$ anos para ${}^{183}_{75}\text{Re}$. Energia liberada em processo de decaimento β varia de 0,0186 MeV (${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{H}$) a 16,6 MeV (${}^{12}_7\text{N} \rightarrow {}^{12}_6\text{C}$).

Discutiremos propriedades de partículas β (elétrons ou pósitrons) emitidos em decaimento β . Experimentos mostram que energia cinética de elétrons (pósitrons) emitidos em resultado de decaimento β tem espectro contínuo. Energia é variada em intervalo de zero a um valor limite superior E_{lim} . Gráfico de espectro típico de energia cinética de elétrons é mostrado na Fig. 6.1. Para cada núcleo E_{lim} tem valor determinado e pode ser considerado como característica de decaimento β do núcleo. Tal comportamento de elétrons leva a suposição que em processo de decaimento β não são satisfeitas as leis de conservação de energia, de momento, de momento angular total. Mas leis de conservação refletem princípios fundamentais de matéria e não podem ser violadas. Para explicar o efeito observado e defender as leis de conservação W. Pauli em 1930 propôs hipótese que em processo de decaimento β junto com elétron (pósitron) é emitida mais uma partícula que não é observada em experimentos. Tal suposição restaura as leis de conservação e permite receber propriedades da partícula hipotética. Primeiramente pode ser concluído que a partícula é neutra, porque

a carga elétrica é conservada em decaimento β . Ela possui spin semi-inteiro, pois em núcleo transformado número de núcleons não muda e elétron tem spin $1/2$. O fato que essa partícula não foi detectada em experimentos reflete o fato que ela não interage com partículas de matéria ou interage bem fraco. Isso leva a conclusão que massa da partícula deve ser nula ou muito pequena.

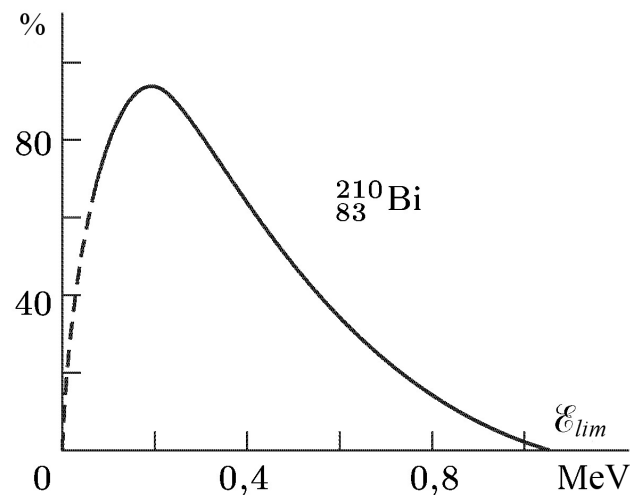
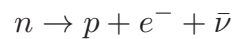


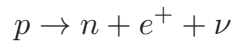
Figura 6.1: Distribuição típica de energia de elétron emitido em decaimento beta.

Baseando-se na hipótese de Pauli e usando dados experimentais, E. Fermi em 1933 elaborou teoria que deu explicação de decaimento β . Ele introduziu existência de forças de curta alcance de novo tipo – *forças fracas*. Então a teoria recebeu nome de *teoria de interação fraca*. Na teoria também foi postulada existência de nova partícula que foi chamada *neutrino*. Para neutrino é usada designação ν . Existe também anti-partícula de neutrino – *anti-neutrino*. É designada por $\bar{\nu}$. Mais detalhadamente interação fraca será discutida no Cap. 9. Cálculos da teoria e resultados

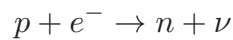
de experimentos permitiram estabelecer que spin de neutrino é $1/2$. Segundo a teoria de interação fraca de Fermi decaimento β é resultado de transformação de núcleons dentro de núcleo. No caso de decaimento β^- ocorre transformação de um dos nêutrons de núcleo em próton ($n \rightarrow p$). Em resultado de tal transformação são produzidos elétron e *anti-neutrino*. Tal que a forma completa da reação é



No caso de decaimento β^+ ocorre transformação de um dos prótons de núcleo em nêutron com emissão de pósitron e neutrino



No caso de captura de eletron, um dos prótons de núcleo reage com elétron que resulta em produção de nêutron e neutrino



Então, em resultado de decaimento β , que é causado pela interação fraca, ocorre transformação de materia em nível mais fundamental de que no caso de decaimento α .

6.2 Decaimento Gama

Decaimento gama é tipo de decaimento radioativo quando ocorre emissão de raios gama, fótons de alta energia, em resultado de transição de núcleo de um estado excitado a um estado de energia mais baixa. Núcleos que sofrem decaimento γ chamam-se γ -ativos. Energia de fótons de raios γ é maior de energia de fótons de raios X. Energia de fótons de raios γ varia de 10 keV a 5 MeV, que corresponde ao comprimento de onda de 10^{-8} a $2 \cdot 10^{-11}$ cm. Núcleos

um estado excitado são produzidos geralmente em resultado de decaimento β . Núcleo em estado excitado pode voltar ao seu estado fundamental emitindo só um fóton (Fig. 6.2). Ou núcleo pode voltar ao seu estado fundamental passando vários estados excitados. Nesse caso ocorre emissão de fótons em cascata (Fig. 6.3).

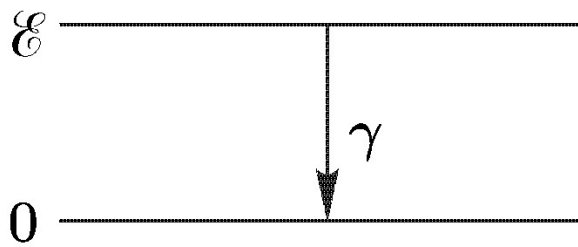


Figura 6.2: Decaimento gama com emissão de único fóton.

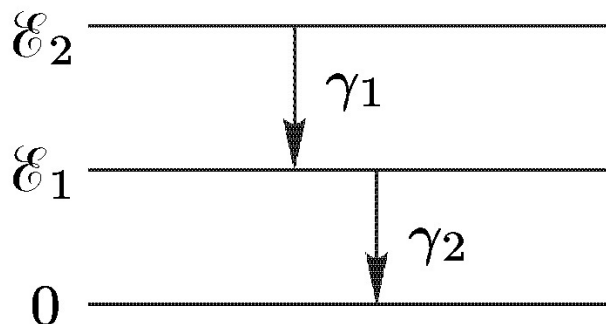
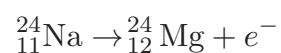


Figura 6.3: Decaimento gama com emissão de dois fótons em cascata.

Consideraremos um exemplo. Núcleo de ${}^{24}_{11}\text{Na}$ em resultado de decaimento β transforma-se em núcleo de ${}^{24}_{12}\text{Mg}$



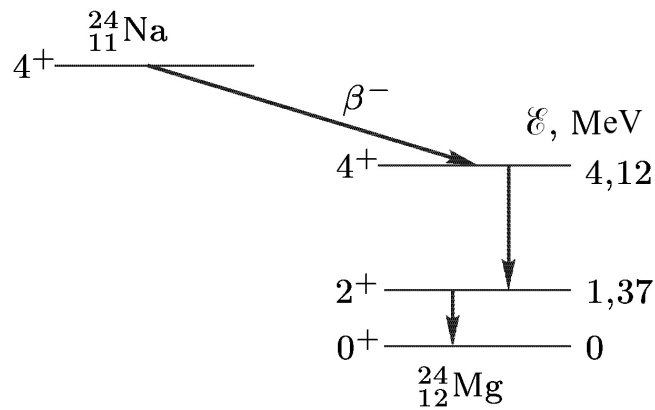


Figura 6.4: Esquema decaimentos gama de $^{24}_{12}\text{Mg}$. Ao lado esquerdo de linhas de níveis de energia são indicados spin e paridade do estado.

Núcleo de $^{24}_{12}\text{Mg}$ é produzido em segundo estado excitado com energia $E_2 = 4,12$ MeV. Primeiramente ocorre transição ao primeiro estado excitado com energia $E_1 = 1,37$ MeV. Energia de fóton emitido em resultado dessa transição é $E_\gamma = E_2 - E_1 = 4,12 - 1,37 = 2,75$ MeV. Depois ocorre transição do primeiro estado excitado ao estado fundamental. Energia de fóton emitido em resultado dessa transição é $E_\gamma = E_1 - E_0 = 1,37 - 0 = 1,37$ MeV. Esquema de processo de decaimentos é mostrada na Fig. 6.4.

Tempo característico de vida de núcleos γ -ativos é de 10^{-11} a 10^{-7} s. Entretanto, para alguns núcleos tempo característico de vida de estado excitado é suficiente longa, até horas. Tal estado excitado com tempo de existência longo é chamado estado *meta-estável*. Tais núcleos excitados meta-estáveis são chamados *isómeros*. Ou falam-se que núcleo está em *estado isométrico*. Por exemplo, em resultado de decaimento β de núcleo de $^{234}_{90}\text{Th}$ são produzidos dois

núcleos designados por UZ_1 , UX_2



ou



Por composição de núcleons UZ_1 , UX_2 são núcleos de ${}_{91}^{934}\text{Pa}$, mas eles demonstram propriedades diferentes. Meia vida de UZ_1 é $T_{1/2} = 6,7$ h, e meia vida de UX_2 é $T_{1/2} = 1,22$ min. De fato UZ_1 , UX_2 são isómeros de núcleo de ${}_{91}^{934}\text{Pa}$.

Outro exemplo é núcleo de ${}_{51}^{124}\text{Sb}$. Ele também tem dois estados isoméricos. Um com meia vida $T_{1/2} = 21$ min e outro com meia vida $T_{1/2} = 1,3$ min. Em estado fundamental núcleo de ${}_{51}^{124}\text{Sb}$ é β -ativo com meia vida $T_{1/2} = 60$ dias. Existência de isómeros, ou *isomeria nuclear*, não é fenômeno raro. São conhecidos em cerca de 100 núcleos meta-estáveis. Maioria de isómeros existem para núcleos com valores N ou Z aproximando de baixo aos números mágicos 50, 82, 126 e com número de massa A ímpar. Estados isoméricos encontram-se suficiente frequente para núcleos ímpar-ímpar e bastante raro para núcleos par-par.

6.3 Fissão Espontânea

Fissão espontânea é tipo de decaimento radioativo quando ocorre desintegração espontânea de núcleo por partes. Geralmente ocorre desintegração por duas partes com emissão de algum número de núcleons separados (principalmente nêutrons). Desintegração por mais de duas partes ocorre mais raro. Esquema de desintegração

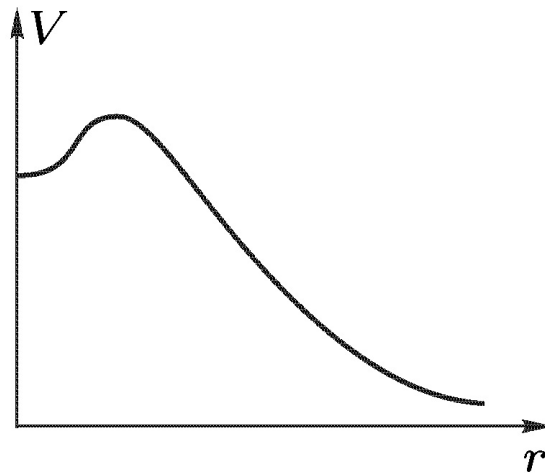


Figura 6.6: Energia potencial de interação de partes em núcleo inicial.

Tal que fissão ocorre espontaneamente, sem aplicação de nenhuma ação externa, energia de separação deste processo é negativa

$$E_s \left(\begin{smallmatrix} A \\ Z \end{smallmatrix} X \right) \left[\begin{smallmatrix} A_1 \\ Z_1 \end{smallmatrix} X_1 + \begin{smallmatrix} A_2 \\ Z_2 \end{smallmatrix} X_2 \right] = M \left(\begin{smallmatrix} A_1 \\ Z_1 \end{smallmatrix} X_1 \right) + M \left(\begin{smallmatrix} A_2 \\ Z_2 \end{smallmatrix} X_2 \right) - M \left(\begin{smallmatrix} A \\ Z \end{smallmatrix} X \right) < 0$$

Então recebemos condição de possibilidade de fissão espontânea

$$M \left(\begin{smallmatrix} A \\ Z \end{smallmatrix} X \right) > M \left(\begin{smallmatrix} A_1 \\ Z_1 \end{smallmatrix} X_1 \right) + M \left(\begin{smallmatrix} A_2 \\ Z_2 \end{smallmatrix} X_2 \right)$$

Energia liberada nesse processo é determinada como

$$Q = -E_s = M \left(\begin{smallmatrix} A \\ Z \end{smallmatrix} X \right) - M \left(\begin{smallmatrix} A_1 \\ Z_1 \end{smallmatrix} X_1 \right) - M \left(\begin{smallmatrix} A_2 \\ Z_2 \end{smallmatrix} X_2 \right)$$

e levada por partes produzidas na forma de energia cinética. Fissão espontânea é observada para núcleos suficiente pesados com $A > 92$. Como um critério de possibilidade de fissão espontânea serve parâmetro Z^2/A . Se $Z^2/A > 45$, fissão espontânea ocorre com probabilidade próxima a 1. Na Fig. 6.5 é apresentado gráfico de meia vida $T_{1/2}$ de alguns núcleos pesados relativa a fissão espontânea

versus parâmetro Z^2/A . Meia vida de alguns núcleos relativa a fissão espontânea é apresentada também na Tabela 6.1.

núcleo	$T_{1/2}$, anos
${}_{92}^{235}\text{U}$	$7,04 \cdot 10^8$
${}_{92}^{238}\text{U}$	$4,47 \cdot 10^9$
${}_{94}^{239}\text{Pu}$	$2,41 \cdot 10^4$
${}_{94}^{240}\text{Pu}$	6569
${}_{96}^{250}\text{Cm}$	8300
${}_{98}^{252}\text{Cf}$	2,638

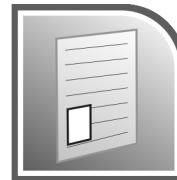
Tabela 6.1: Meia vida de núcleos relativa a fissão espontânea.

Teoricamente fissão espontânea é explicada por efeito túnel, analogamente a teoria de decaimento α . É suposto que núcleo que sofre fissão espontânea é composto por duas partes. Energia potencial de interação das partes devido a força nuclear e a força de repulsão Coulombiana é apresentada esquematicamente na Fig. ??, onde r é distância entre centros das partes. No gráfico vemos que energia potencial forma barreira potencial. Em termos de mecânica quântica existe probabilidade de penetração da barreira potencial por efeito de túnel. Quando ocorre penetração da barreira, núcleo sofre fissão espontânea.

6.4 Conclusão

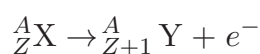
Nesta aula discutimos decaimento beta, decaimento gama, fissão espontânea de núcleos.

RESUMO



No resumo dessa Aula constam os seguintes tópicos:

Foi discutido processo de decaimento beta. Existe três processos chamados decaimento β : decaimento β^- , decaimento β^+ e captura de elétron. Núcleos que sofrem decaimento β chamam-se β -ativos. Decaimento β^- é processo de emissão espontânea de elétron por núcleo atômico. Esquema de decaimento β^- é



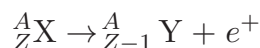
A condição de possibilidade de decaimento β^- é

$$M({}^A_Z\text{X}) > M({}^A_{Z+1}\text{Y}) + M_e$$

Em termos de massas de núclídeos a condição tem forma

$$M_{at}({}^A_Z\text{X}) > M_{at}({}^A_{Z+1}\text{Y})$$

Decaimento β^+ é processo de emissão espontânea de elétron por núcleo atômico. Esquema de decaimento β^+ é



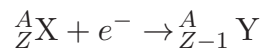
A condição de possibilidade de decaimento β^+ é

$$M({}^A_Z\text{X}) > M({}^A_{Z-1}\text{Y}) + M_e$$

Em termos de massas de núclídeos a condição tem forma

$$M_{at} \left({}^A_Z X \right) > M_{at} \left({}^A_{Z-1} Y \right) + 2M_e$$

Captura de elétron e^- é efeito de absorção espontânea de elétron de camada eletrônica de átomo por núcleo. Esquema de captura de elétron e^- núcleo é



Condição de possibilidade de captura de elétron é

$$M \left({}^A_Z X \right) + M_e > M \left({}^A_{Z-1} Y \right)$$

e em termos de massas de núclídeos

$$M_{at} \left({}^A_Z X \right) > M_{at} \left({}^A_{Z-1} Y \right)$$

Foi descrita resumidamente a teoria de Fermi de decaimento beta. Fermi introduziu existência de forças de curta alcance de novo tipo – forças fracas. Na teoria também foi postulada existência de nova partícula que foi chamada neutrino.

Foi discutido decaimento gama, que é tipo de decaimento radioativo quando ocorre emissão de raios gama, fótons de alta energia, em resultado de transição de núcleo de um estado excitado a um estado de energia mais baixa. Núcleos que sofrem decaimento γ chamam-se γ -ativos. São discutidos também estados isoméricos de núcleos.

Foi discutido outro tipo de decaimento radioativo – fissão espontânea de núcleos. A condição de possibilidade de fissão espontânea é

$$M \left({}^A_Z X \right) > M \left({}^{A_1}_{Z_1} X_1 \right) + M \left({}^{A_2}_{Z_2} X_2 \right)$$

Fissão espontânea é observada para núcleos suficiente pesados com $A > 92$. Como um critério de possibilidade de fissão espontânea serve parâmetro Z^2/A . Se $Z^2/A > 45$, fissão espontânea ocorre com probabilidade próxima a 1.

PRÓXIMA AULA

Em nossa próxima aula discutiremos reações nucleares em geral, reação de fissão nuclear em cadeia, reação de fusão nuclear.

ATIVIDADES

ATIV. 6.1. Em qual núcleo transfirma-se o núcleo α -ativo de ^{226}Ra em resultado de 5 decaimentos α e 4 decaimentos β^- ?

ATIV. 6.2. Quanto decaimentos α e decaimentos β^- sofre o núcleo de $^{238}_{92}\text{U}$ para transformar-se em núcleo estável de $^{206}_{82}\text{Pb}$?

ATIV. 6.3. Um próton com energia cinética $K = 1,5 \text{ MeV}$ foi absorvido por núcleo de ^2_1H em repouso. Determinar a energia de excitação do núcleo produzido.

ATIV. 6.4. Considerar decaimento β^- de núcleo de $^{210}_{83}\text{Bi}$. Determinar energia máxima de elétron emitido.

ATIV. 6.5. Quais tipos de decaimento β pode sofrer núcleo de $^{196}_{79}\text{Au}$?



ATIV. 6.6. Núcleo de ${}_{34}^{72}\text{Se}$ faz transição do primeiro estado excitado para estado fundamental emitindo fóton de energia 0,862 MeV. Determinar energia de récuo do núcleo.



LEITURA COMPLEMENTAR

ALONSO, M., FINN, E. J. - Física. Vol. III. Fundo Educativo Interamericano, 1971.

EISBERG, R., RESNICK, R. - Física Quântica. São Paulo, editora Campus, 1983.

PESSOA, E. F., COUTINHO, F. A., SALA, O. - Introdução à Física Nuclear. São Paulo, EDUSP, 1978.

CHUNG, K. C. - Introdução à Física Nuclear. Rio de Janeiro, EdUERJ, 2001.