

Tema 8 FÍSICA NUCLEAR

P1. La unió dels protons és deguda a l'acció d'una força molt intensa, força nuclear forta, que actua en l'interior de nucli. Les característiques d'aquesta força estan indicades en el text.

P2. L'energia associada als processos radioactius és del orde de MeV, molt superior a les implicades en els processos químics, de l'orde de desenes d'eV. Aquesta gran diferència d'energies és una prova que les emissions radioactives no són originades per transicions electròniques i planteja el problema de justificar el seu origen. Per això, es va establir que els processos radioactius estan associats a transformacions de l'interior del nucli, que generen una gran quantitat d'energia.

P3. La massa d'un nucli és sempre menor a la suma de la massa dels seus nucleons. Esta diferència es justifica per la energia d'enllaç alliberat en la formació del nucli.

P4. Apartat a

- Determinació de nucleons: protons = $Z = 17$; neutrons = $A - Z = 36 - 17 = 19$
- Massa de les partícules: $m(n + H^+) = 17 \cdot 1,007825 \text{ u} + 19 \cdot 1,008665 \text{ u} = 36,29766 \text{ u}$
- Càlcul del defecte de massa: $\Delta m = 36,29766 - 35,968307 = 0,329353 \text{ u}$
- Càlcul de l'energia de lligadura: $E_b = 0,329353 \text{ u} \cdot 931,47 \text{ MeV/u} = 306,78 \text{ MeV}$
- Energia de lligadura per nucleó: $E_b / A = 306,78 \text{ MeV} / 36 = 8,52 \text{ MeV} / \text{nucleó}$

Apartat b

- Determinació del defecte de massa: $\Delta m = E_b / 931,47 \text{ MeV/u} = 0,3619 \text{ u}$
- Càlcul de la massa de les partícules:

$$m(n + H^+) = m_{\text{atòmica}} + \Delta m = 39,970440 + 0,3619 = 40,33234 \text{ u}$$

- Determinació del nombre de neutrons. Al ser un àtom de clor, $Z = 17$; per tant:

$$m(n + H^+) = 17 \cdot 1,007825 + N \cdot 1,008665 = 40,33234 \text{ Aïllant } N, \text{ obtenim: } N = 23$$

$$\text{Per tant, } A = Z + N = 17 + 23 = 40$$

- Energia de lligadura per nucleó: $E_b / A = 337,100 \text{ MeV} / 40 = 8,43 \text{ MeV} / \text{nucleó}$

Apartat c

- Massa de les partícules: $m(H^+ + n) = 20 \cdot 1,007825 \text{ u} + 20 \cdot 1,008665 \text{ u} = 40,3298 \text{ u}$
- Massa atòmica: $\text{massa atòmica} = 40,3298 - 0,367208 = 39,962592 \text{ u}$
- Càlcul de l'energia de lligadura: $E_b = 0,367208 \text{ u} \cdot 931,47 \text{ MeV/u} = 342,04 \text{ MeV}$
- Energia de lligadura per nucleó: $E_b / A = 342,0432 \text{ MeV} / 40 = 8,55 \text{ MeV} / \text{nucleó}$

Apartat d

- Massa de les partícules: $m(H^+ + n) = 20 \cdot 1,007825 \text{ u} + 26 \cdot 1,008665 \text{ u} = 46,38179 \text{ u}$
- Càlcul del defecte de massa: $\Delta m = 46,38179 - 45,953689 = 0,428101 \text{ u}$
- Càlcul de l'energia de lligadura: $E_b = 0,428101 \text{ u} \cdot 931,47 \text{ MeV/u} = 398,76 \text{ MeV}$
- Energia de lligadura per nucleó: $E_b / A = 398,76 \text{ MeV} / 46 = 8,67 \text{ MeV} / \text{nucleó}$

L'isòtop més estable és el de major energia de lligadura per nucleó, en aquest cas correspon a l'isòtop 46 - Ca.

P5.

$m_{\text{nucleons}}(H + n) =$ $=Z \cdot 1,007825 \text{ u} + (A - Z) \cdot 1,008665 \text{ u}$	$\Delta m = m_{\text{nucleons}}(n + H) - A_R$	$E_b = \Delta m \cdot 931,47$ MeV/u	E_b / A
$6 \cdot 1,007825 \text{ u} + 6 \cdot 1,008665 \text{ u} =$ 12,09894 u	0,09894 u	92,16 MeV	7,68 MeV/nucleó
$6 \cdot 1,007825 \text{ u} + 7 \cdot 1,008665 \text{ u} =$ 13,107605 u	0,104250 u	97,11 MeV	7,47 MeV/nucleó
$6 \cdot 1,007825 \text{ u} + 8 \cdot 1,008665 \text{ u} =$ 14,11627 u	0,113028 u	105,31 MeV	7,52 MeV/nucleó

P6. ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ més estable que el ${}^{222}_{86}\text{Rn}$

P7.

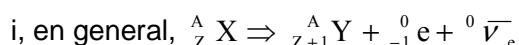
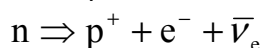
TABLA COMPARATIVA ENTRE LES INTERACCIONS				
Interacció	Origen i acció	Abast	Intensitat relativa	Caràcter
Nuclear (forta)	Entre partícules nuclears	Molt curt, només en el interior del nucli	Molt elevada	Saturat, només s'exerceix entre nucleons veïns
Elèctrica	Entre cossos amb una càrrega resultant	Infinit	Molt inferior a la nuclear, però més intensa que la gravitatòria	Actua en la línia que uneix els cossos i és inversament
Gravitatòria	Actua sobre tots els cossos	Infinit	Poc intensa; perquè siga apreciable la massa d'un dels cossos ha de ser molt elevada	proporcional al quadrat de la distància entre els cossos

P8. Igual a l'activitat 2 del tema

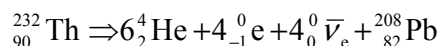
P9. A l'emetre 4 part α (${}^4_2\text{He}$) i 3 β (${}^0_{-1}\text{e}$) el ${}^{218}_{84}\text{Au}$ nou nucleid es transforma en un amb nombre màssic 16 vegades menor i un nombre atòmic $8-3 = 5$ vegades inferior per tant el nou nucleid serà



P10. a) L'explicació es basa en la teoria segons la qual l'electró alliberat pel nucli és conseqüència de la **transformació d'un neutró nuclear en un protó, un electró i un antineutrí**. Aquest procés proporciona la suficient energia cinètica a l'electró, i a l'antineutrí, per a escapar del nucli, a pesar de l'atracció electrostàtica tan intensa a la que estaria sotmès l'electró. Així, l'emissió ss pot escriure's com



b) El procés pot representar-se per mitjà de l'equació:



P11. La radioactivitat no és un fenomen periòdic, ja que en ella no es repeteix cap propietat cíclicament. No obstant, pel seu caràcter estadístic, podem introduir la magnitud **període de semidesintegració**, representada per **T1/2** o simplement **T**, com el *temps necessari perquè es transmuten la meitat dels àtoms de la mostra inicial*.

El període de semidesintegració (T) està relacionat amb el valor de la constant radioactiva (λ), de manera que quant major siga el valor de λ menor serà el valor del període de semidesintegració.

Per a establir aquesta relació farem ús de la definició del període i de la llei desintegració radioactiva. Si partim d'una mostra inicial formada per N_0 nuclis al cap d'un temps $\Delta t = T$ el nombre de nuclis sense transmutar-se serà $N = N_0 / 2$, per la pròpia definició del període de semidesintegració. Si apliquem la llei de desintegració establím la relació:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}; \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T} \text{ per tant } T = \frac{\text{Ln}2}{\lambda}$$

Aquesta expressió indica que T és inversament proporcional a la constant radioactiva (λ). Cada isòtop radioactiu té un període de semidesintegració distint, que depèn de la constant radioactiva segons la relació: **$T = \text{Ln} 2/\lambda$** .

Podem analitzar el significat aplicant la definició del període a la variació de la massa de l'isòtop ^{24}Na , el que permet establir la taula:

Temps (hores)	Massa (grams)
0	200
15	100
30	50
45	25
60	12,5
75	6,25

P12. Segons l'enunciat l'activitat disminueix en una dotzavada part al cap d'un dia

$$A = A_0 - 1/12 A_0 = 11/12 A_0$$

De l'equació general de la llei de desintegració (en funció de l'activitat), calclem la constant radioactiva

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}; \frac{11}{12} A_0 = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot \text{dia}}; \lambda = 0,087 \text{d}^{-1}$$

$$\text{I com } T = \frac{\text{Ln}2}{\lambda} = 7,96 \text{ dies}$$

P13. a) Per a calcular la constant de desintegració apliquem la definició operativa de l'activitat radioactiva: $A = \lambda \cdot N$. Aïllant la constant, establím: $\lambda = \frac{A}{N}$

Com $A = 3,7 \cdot 10^{10}$ Bq, i el nombre de nuclis en 1 g de ^{226}Ra és:

$$1\text{g} \cdot \frac{6,022 \cdot 10^{23} \text{ nucleïds/mol}}{226\text{g/mol}} = 2,665 \cdot 10^{21} \text{ nucleïds}$$

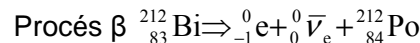
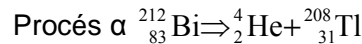
$$\lambda = \frac{A}{N} = \frac{3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}}{2,665 \cdot 10^{21} \text{ nucleïds}} = 1,39 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

b) El període de semidesintegració és: $T = \frac{\text{Ln}2}{\lambda} = 5 \cdot 10^{10} \text{ s} = 1585,5 \text{ anys}$

c) La vida mitjana és: $\zeta = 1 / \lambda = 7,14 \cdot 10^{10} \text{ s} = 2264,1 \text{ anys}$

P14. ${}_{15}^{32}\text{P} \Rightarrow {}_{16}^{32}\text{S} + {}_{-1}^0\text{e} + {}_0^0\bar{\nu}_e$; $\lambda = 0,0485 \text{ dies}^{-1}$; $T = 14,3 \text{ dies}$

P15. a) La interpretació d'aquest fet es basa en el caràcter estadístic dels processos de desintegració, un percentatge de nuclis radioactius es desintegra per emissió β i la resta per emissió α . Els dos processos es representen per mitjà de les equacions:



b) En primer lloc calculem el valor de la constant de desintegració a partir del període de semidesintegració:

$$\lambda = \frac{\text{Ln}2}{T} = \frac{\text{Ln}2}{60,5 \text{ min}}$$

Al cap d'una hora (60 min) quedaran sense desintegrar:

$$n = n_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}; 3 \cdot e^{-\frac{\text{Ln}2}{60,5 \text{ min}} \cdot 60} = 1,51 \text{ mol de } {}_{83}\text{Bi}$$

S'han desintegrat:

$$\text{Nuclis desintegrats} = 3 \text{ mol} - 1,51 \text{ mol} = 1,49 \text{ mol}$$

El 36% d'aquestes desintegracions ho fan per emissió β ;

$n_\beta = 0,36 \cdot 1,49 \text{ mol} = 0,5364 \text{ mol}$ de partícules β , que corresponen a:

$$0,5364 \text{ mol} \cdot \frac{6,022 \cdot 10^{23} \text{ partícules } \beta}{\text{mol}} = 3,23 \cdot 10^{23} \text{ partícules } \beta$$

La resta (64 %) per emissió α $n_\alpha = 0,9536 \text{ mol}$ de partícules $\alpha = 5,743 \cdot 10^{23}$ partícules α

P16. $\lambda = 0,0408 \text{ h}^{-1}$ $\zeta = 24,5 \text{ h}$

P17. a) Per a calcular la massa injectada a partir de l'activitat inicial calculem el nombre de nucleïds: $A = \lambda \cdot N$; per tant $A_0 = \lambda \cdot N_0$; $N_0 = A_0 / \lambda_0 =$

$$N_0 = \frac{A_0}{\text{Ln}2/T} = \frac{A_0 \cdot T}{\text{Ln}2} = \frac{6 \cdot 10^{-3} \text{ Ci} \cdot 3,7 \cdot 10^{10} (\text{Bq/Ci}) \cdot 77,8 \text{ h} \cdot 3660 (\text{s/h})}{\text{Ln}2} = 8,97 \cdot 10^{13} \text{ nucleïds de } {}^{67}\text{Ga}$$

Si considerem que la massa molar del Ga-67 és 67 g/mol, establim:

$$8,97 \cdot 10^{13} \text{ nucleïds de } {}^{67}\text{Ga} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ nucleïds}} \cdot \frac{67 \text{ g}}{1 \text{ mol}} = 9,98 \cdot 10^{-9} \text{ g de } {}^{67}\text{Ga}$$

b) Aplicant la llei de desintegració:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = 6 \text{ mCi} \cdot e^{-8,9 \cdot 10^{-3} \text{ dies}^{-1} \cdot t}$$

$$\text{Si } \Delta t = 1 \text{ h} \rightarrow A = 5,95 \text{ mCi.}$$

$$\text{Si } \Delta t = 24 \text{ h} \rightarrow A = 4,84 \text{ mCi.}$$

c) Aplicant la llei de desintegració expressada en funció de la massa:

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}; 9,98 \cdot \text{ng} \cdot e^{-8,9 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1} \cdot 7 \cdot 24 \text{ h}} = 2,23 \text{ ng}$$

P18. Equació ${}^{60}_{27}\text{Co} \Rightarrow {}^0_{-1}\text{e} + {}^0_0\bar{\nu} + {}^{60}_{28}\text{Ni}^* \Rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + \gamma$; Sol : $\Delta t = 2,73$ anys;

$$A = 4,169 \cdot 10^{13} \text{ partícules } \beta / \text{s}$$

P19. La proporció entre els isòtops de C-14 i C-12 deu seguir la llei de desintegració radioactiva, que en aquest cas expressem com:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}; \left(\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}} \right) = \left(\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}} \right)_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}; 0,578 \left(\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}} \right)_0 = \left(\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}} \right)_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$\lambda = \frac{\text{Ln}2}{T} = \frac{\text{Ln}2}{5730 \text{ anys}}$$

$$\text{Aplicant logaritmes } \Delta t = \frac{-\text{Ln}0,578}{\text{Ln}2/570} = 4531,62 \text{ anys}$$

P20. En primer lloc hem de determinar l'activitat d'1 g de carboni de la mostra, per a això a l'activitat de 8 g li restem la de fons:

176,0 des/min - 92,5 des/min = 83,5 des/min i la dividim per huit. Per tant, l'activitat d'1 g de carboni de la mostra és: $A = 10,4$ des/min.

La constant radioactiva és: $\lambda = \frac{\text{Ln}2}{T} = \frac{\text{Ln}2}{5730 \text{ anys}}$ i aplicant les condicions del problema

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}; 10,4 = 16,1 \cdot e^{-\frac{\text{Ln}2}{5730} \cdot t}; t = 3612,2 \text{ anys}$$

P21. Sol pag 352 llibre

P22. Sol pag 352 llibre.

Hi ha isòtops fissionables que no existeixen en la naturalesa però que poden obtindre's artificialment. Els principals són:

- **L'urani-233**, que s'obté per captura d'un neutró per un nucli de tori-232. El nucli intermedi format presenta dos desintegracions beta, donant lloc al mencionat U-233.

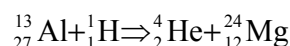
- **El plutoni-239**: Encara que han pogut detectar-se traces d'ell, es considera que no és un isòtop natural. Es forma en la captura d'un neutró per un nucli d'urani-238, seguida de dos emissions beta.

- **El plutoni-241**: Té menor importància que els anteriors. Es forma per la captura d'un neutró pel Pu-240, el qual procedeix al seu torn de la captura d'un neutró per un nucli de Pu-239.

L'obtenció dels dos primers isòtops, el U-233 i el Pu-239, es pot realitzar en els reactors nuclears, si introduïm en els mateixos nuclis de tori-232 i urani-238, que són els àtoms que per captura d'un neutró donen lloc als isòtops fissionables. Aquest material s'anomena

material fèrtil.

P23. Per a identificar el nucleid X, plantegem el següent procés:



Per a calcular la massa isotòpica de X determinem:

- El defecte de massa:

$$Q = \Delta m \cdot c^2 \text{ si expressem el defecte de massa en u.m.a. } Q = -\Delta m(\text{u.m.a.}) \cdot \frac{931,5 \text{ MeV}}{1 \text{ u.m.a.}}$$

$$-\Delta m = \frac{Q(\text{MeV})}{931,5\text{MeV/uma}} = \frac{1,09\text{MeV}}{931,5\text{MeV/uma}} = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ u.m.a.}$$

• La massa final del sistema:

$$-\Delta m = m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}; m_{\text{final}} = m_{\text{inicial}} + \Delta m$$

Ja que:

$$m_{\text{inicial}} = 26,981541 \text{ u} + (1,007276 \text{ u}) = 27,988817 \text{ u}$$

Per tant:

$$m_{\text{final}} = m_{\text{inicial}} + \Delta m = 27,988817 \text{ u} + (-1,17 \cdot 10^{-3} \text{ u}) = 27,987647 \text{ u}$$

• La massa isotòpica de X (${}^{24}_{12}\text{Mg}$):

Com la massa final del sistema és:

$$m_{\text{final}} = m_{\text{He}} + m_{\text{X}}; m_{\text{X}} = m_{\text{final}} - m_{\text{He}} = m_{\text{X}} = 27,987647 \text{ u} - 4,002603 \text{ u} = 23,985044 \text{ u}$$

P24. Per a calcular el factor Q de la reacció determinem el defecte de massa:

$$-\Delta m = m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}} = (9,012183 + 4,002603) \text{ u} - (12,000000 + 1,008665) \text{ u} = 0,006121 \text{ u}$$

El factor Q es calcula per l'expressió:

$$Q = -\Delta m \cdot \frac{931,5\text{MeV}}{1\text{u.m.a.}} = 0,006121\text{u.m.a.} \cdot \frac{931,5\text{MeV}}{1\text{u.m.a.}} = 50,7 \text{ MeV}$$

P25. L'explicació de fenomen de fissió s'ha d'estructurar en els apartats següents:

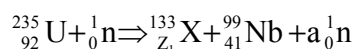
A) **Origen.** Les reaccions de fissió es produeixen quan alguns àtoms pesats, com l'**urani-235** o el **plutoni-239**, són bombardejats per neutrons. Llavors té lloc la partició del nucli d'urani o de plutoni.

B) **Productes originats.** Per la fissió del U-235 es poden generar fins a un centenar de nuclis distints, tots ells radioactius, que es criden productes de fissió. A més, es desprenen rajos gamma i neutrons en cada fissió. En una reacció de fissió té lloc un gran despreniment d'energia, de l'ordre de 200 MeV per nucli fissionat.

C) **Aplicacions.** Els neutrons alliberats poden al seu torn xocar amb altres àtoms d'urani-235 i produir noves fissions amb el seu corresponent despreniment de energia i alliberament de nous neutrons. Té així lloc una **reacció en cadena**. Si esta reacció es controla degudament tenim el fonament dels **reactors nuclears**. En cas contrari, la **bomba atòmica**.

1. Dos de les possibles reaccions de fusió del 235U són:

Procés A:



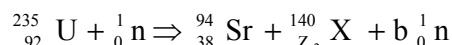
D'aquesta equació obtenim **Z₁** i El nombre de neutrons **a**.

$$\text{CONSERVACIÓ DEL NOMBRE ATÒMIC (càrrega)} \quad 92 + 0 = Z_1 + 41; \quad Z_1 = 51$$

$$\text{CONSERVACIÓ DEL NOMBRE MÀSSIC (nucleons)} \quad 235 + 1 = 133 + 99 + a \cdot 1; \quad a = 4$$

$$\text{Per tant l'equació quedaria } {}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \Rightarrow {}^{133}_{51}\text{Sb} + {}^{99}_{41}\text{Nb} + 4 {}^1_0\text{n}$$

Procés B:



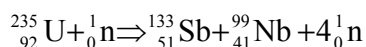
D'aquesta equació obtenim **Z₂** i El nombre de neutrons **b**.

$$\text{CONSERVACIÓ DEL NOMBRE ATÒMIC (càrrega)} \quad 92 + 0 = 38 + Z_2; \quad Z_2 = 54$$

$$\text{CONSERVACIÓ DEL NOMBRE MÀSSIC (nucleons)} \quad 235 + 1 = 94 + 140 + b \cdot 1; \quad b = 2$$

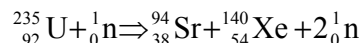
$$\text{Per tant l'equació quedaria } {}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \Rightarrow {}^{94}_{38}\text{Sr} + {}^{140}_{54}\text{Xe} + 2 {}^1_0\text{n}$$

2. Per a avaluar l'energia alliberada per nucli fissionat en cada procés calculem el factor Q de cada reacció.



$$-\Delta m = (235,043944 + 1,008665) - (132,915190 + 98,910350 + 4 \cdot 1,008665) = 0,192409 \text{ u}$$

$$Q = -\Delta m \cdot 931,5 \text{ MeV/uma} = 179,22 \text{ MeV / fissió}$$



$$-\Delta m = (235,043944 + 1,008665) - (93,915400 + 139,921370 + 2 \cdot 1,008665) = 0,198509 \text{ u}$$

$$Q = -\Delta m \cdot 931,5 \text{ MeV/uma} = 184,91 \text{ MeV / fissió}$$

Per tant aquest segon procés és més rentable energèticament

3. En primer lloc calcularem l'energia útil generada per la central en un dia:

$$\Delta E_{\text{útil}} = P \cdot \Delta t = 1092 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot 86400 \text{ s} = 9,43 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Ja que el rendiment supòsit és del 20%, per a generar esta energia la central ha de consumir:

$$\% \eta = \frac{\Delta E_{\text{útil}}}{\Delta E_{\text{cosumida}}} \cdot 100; \quad \Delta E_{\text{cosumida}} = \frac{\Delta E_{\text{útil}}}{\% \eta} \cdot 100 = \frac{9,43 \cdot 10^{13}}{20} \cdot 100 = 4,72 \cdot 10^{14} \text{ J}$$

L'energia proporcionada en cada fissió efectiva és: 179,22 MeV / fissió

$$179,22 \cdot 10^6 \text{ eV / fissió} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 2,87 \cdot 10^{-11} \text{ J / fissió}$$

En conseqüència el nombre de nuclis fissionats que "crema" la central al cap d'un dia és:

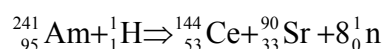
$$N = \frac{4,72 \cdot 10^{14} \text{ J}}{2,87 \cdot 10^{-11} \text{ J / fissió}} = 1,65 \cdot 10^{25} \text{ fissions (núclids)}$$

$$\text{Que correspon a una massa } m = 1,65 \cdot 10^{25} \text{ núclids} \frac{235 \text{ g / mol}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ àtoms / mol}} = 6439 \text{ g}$$

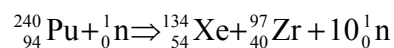
P26. $2{}_1^3\text{H} \Rightarrow {}_2^4\text{He} + 2{}_0^1\text{n}$ $\Delta E = Q = 1,133 \cdot 10^5 \text{ eV}$

P27. a) Ajust de les reaccions i identificació dels nucleïds residuals

Reacció A:



Reacció B:



b) Càlcul de l'energia associada als processos.

Reacció A: $Q = 161,5 \text{ MeV/nucleïd}$; **Reacció B:** $Q = 140,4 \text{ MeV/nucleïd}$

c) La valoració de la transmutació dels residus nuclears d'alta activitat pot estructurar-se en els següents apartats:

Plantejament del problema

La major part dels riscos radioactius a llarg termini del combustible nuclear irradiat procedeix d'uns pocs elements (plutoni, neptuni, americi, curi i alguns productes de fissió de vida llarga, com a iode i tecneci), que estan presents en baixes concentracions, però requereixen el seu aïllament per a impedir el seu fuga a l'ambient.

Solució

La separació d'aquests elements, a vegades anomenada partició, i la seua posterior transmutació (per mitjà de neutrons que produeixen la seua fissió o protons procedents de acceleradors) permet transformar els isòtops d'elevat nivell d'activitat en altres de menys activitat.

Aspectes positius

- a) Reducció de la radiotoxicidad al transmutar els isòtops d'alta activitat i elevat període en altres de baixa activitat i de període molt curt, i inclús estables.
- b) Generació d'energia; al ser el factor $Q > 0$, s'allibera energia que pot transformar-se en energia útil.

Aspectes negatius

- a) S'incrementa el temps de manipulació donant lloc a un major risc de fugues o accidents.
- b) Fa falta d'una tecnologia d'elevat nivell i cara

P28. Solució llibre pag 353