TD2 : Dualité onde-particule et radioactivité

1. a) La quantité de mouvement de chaque électron est donnée par la relation :

$$p_e = m_e v$$

Avec $v = 0,2\,c_0$, $c_0 = 3,0.10^8\,m.s^{-1}$ et $m_e = 9,1.10^{-31}\,kg$ on a donc $p_e = 5,5.10^{23}\,kg.m.s^{-1}$.

b) La longueur d'onde λ de cette onde de matière est liée à la quantité dqe mouvement des électrons par la relation de De Broglie : $p_e = h\,/\,\lambda$, ssi

$$\lambda = h\,/\,p_e$$

où $h = 6,62.10^{-34}J.s$ est la constante de Planck. On a alors $\lambda = 1,2.10^{-11}\,m$. (c'est plus petit que la dimension du noyau atomique)

2. a) Pour ioniser un atome de lithium, l'énergie portée par un photon incident doit être au moins égale à l'énergie d'ionisation $E_{\text{ion}}(Li)$. Donc la fréquence minimale d'une lumière monochromatique capable d'ioniser le lithium est donnée par la relation de De Broglie et l'énergie d'ionisation du lithium :

$$\nu_0 = E_{\text{ion}}(Li)/h$$

On a alors $\nu_0 = 5,6.10^{14}Hz$ (penser à convertir l'énergie d'ionisation en Joules, avec $1\,eV = 1,6.10^{-19}\,J$)

b) La logueur d'onde dans le vide de cette radiation est donnée par la relation :

$$\lambda_0 = c_0/\nu_0$$

Application numérique : $\lambda_0 = 5,4.10^{-7}\,m$. Cette lumière monochromatique appartient au spectre visible, elle est de couleur verte.

3. a) Les espèces ^{77}Br et ^{77}Se ne sont pas des isotopes. Ce sont des espèces différentes. On peut remarquer qu'elles ont le même nombre de nucléons, ou même masse atomique, ce sont donc des isobares.

b) Le produit de désintégration (sélénium 77) a autant de nucléons que le noyau père (brome 77) mais avec un proton de moins. Il s'agit donc d'une réaction de désintégration β^+ qui transforme un proton du noyau père en neutron :

$$^{77}_{35}Br \rightarrow {}^{77}_{35}Se + {}^{0}_{1}e^+ + {}^{0}_{0}\nu_e$$

L'interaction fondamentale qui se manifeste ici est l'interaction faible.

4. Une méthode simple pour équilibrer ce type d'équations consiste à :
– équilibrer le nombre de nucléons ;
– équilibrer les charges électriques (au besoin en ajoutant des électrons ou positrons) ;
– équilibrer le nombre de leptons (ajouter un neutrino ou anti-neutrino pour chaque positron ou électron ajouté à l'étape précédente).

Au cours de ce processus il vous apparaîtra clairement, dans le cas d'une désintégration (une seule espèce dans le membre de gauche), de quel type il s'agit : α (émission d'un noyau d'hélium, pas d'autres particules émises), β (transformation d'un proton en neutron ou inversement, avec émission d'un e^+ ou e^- et d'un ν_e ou $\bar{\nu_e}$), ou γ (émission d'un photon). Aucune de ces désintégrations n'émet de protons ou neutrons.

S'il y a deux espèces dans le membre de gauche il peut s'agir d'une nucléosynthèse (le noyau produit est plus lourd que les réactifs) ou d'une fission (un noyau père, évetuellement aidé d'un neutron incident, produit des noyaux-fils plus légers). Une réaction de l'un ou l'autre type peut s'accompagner de l'émission de neutrons. Une autre possibilité encore est la capture électronique : ${}^{A}_{Z}X + e^- \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y^* + \nu_e$ où un électron du cortège électronique est capturé par le noyau. Un ou plusieurs photons X sont émis lors du réarrangement du cortège électronique de l'espèce Y formée.

a)

$${}^{210}_{84}Po \rightarrow {}^{206}_{82}Pb + {}^{4}_{2}He$$

Il s'agit d'une désintégration α, qui fait intervenir l'interaction forte (en fait l'interaction nucléaire aussi appelée interaction forte résiduelle).

b)

$${}^{60}_{26}Fe \rightarrow {}^{60}_{27}Co + e^- + \bar{\nu}_e$$

$${}^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + e^- + \bar{\nu}_e$$

Il s'agit de deux désintégrations β^-, faisant intervenir l'interaction faible.

c)

$${}^{2}_{1}H +{}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{0}_{1}n$$

Il s'agit d'une réaction de fusion nucléaire (ou nucléosynthèse), faisant intervenir l'interaction forte.

d)

$${}^{18}_{9}F \rightarrow {}^{18}_{8}O + e^+ + \nu_e$$

Il s'agit d'une désintégration β^+, faisant intervenir l'interaction faible.

e)

$${}^{15}_{8}O \rightarrow {}^{15}_{7}N + e^+ + \nu_e$$

Il s'agit d'une désintégration β^+, faisant intervenir l'interaction faible.

5. a) L'équation complétée s'écrit :

$$4\,{}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + 2{}^{0}_{1}e^+ + 2{}^{0}_{0}\nu_e$$

b) La source d'énergie de l'émission lumineuse solaire est l'énergie de masse de celui-ci : $E_{0,\text{tot}} = M_\odot c^2$. La masse perdue Δm, en une seconde ($\Delta t = 1\,s$), est donc proportionnelle à la puissance lumineuse émise :

$$P_{\text{lum}} = \frac{\Delta E_0}{\Delta t} = \frac{\Delta m\, c^2}{\Delta t}$$

$$\text{ssi } \Delta m = \frac{P_{\text{lum}}\,\Delta t}{c^2}$$

Application numérique : $\Delta m = 4,3.10^9\,kg$.

c) On suppose ici que la perte de masse est constante, donc la masse perdue est proportionnelle à la durée correspondante. La masse perdue M_{perdue} depuis la naissance du Soleil ($T = 4,6.10^9\,ans$) s'écrit :

$$M_{\text{perdue}} = \frac{T}{\Delta t}\Delta m = \frac{P_{\text{lum}} T}{c^2}$$

Application numérique : $M_{\text{perdue}} = 6,3.10^{26}\,kg$, soit environ $3.10^{-4} \times M_{\odot}$.

6. a) La puissance lumineuse émise par le laser est liée à l'énergie individuelle et au nombre des photons émis par seconde ($\Delta t = 1\,s$) :

$$P = \frac{N_{\text{ph}} E_{\text{ph}}}{\Delta t} = \frac{N_{\text{ph}} hc}{\lambda\,\Delta t}$$

$$\text{ssi } N_{\text{ph}} = \frac{P\lambda\,\Delta t}{hc}$$

Application numérique : $N_{\text{ph}} = 3,2.10^{15}\,ph$ émis par seconde.

b) Le nombre de moles de photons émis par seconde par ce laser s'écrit :

$$n = N_{\text{ph}} \,/\, N_A$$

Application numérique : $n = 5,3.10^{-9}\,mol$.

c) Le nombre de photons émis par le laser ELI pendant chaque implusion (durée $\Delta t' = 10^{-12}\,s$), et le nombre de moles correspondant, s'écrivent :

$$N'_{\text{ph}} = \frac{P'\lambda\,\Delta t'}{hc}$$

$$n' = N'_{\text{ph}}/N_A$$

Application numérique : $N'_{\text{ph}} = 1,0.10^{24}\,ph$, soit $n = 1,7\,mol$ par impulsion.

d) Si le laser ELI émettait en continu, le nombre de photons émis par seconde ($\Delta t = 1\,s$), et le nombre de moles correspondant, s'écriraient :

$$N''_{\text{ph}} = \frac{P'\lambda\,\Delta t}{hc}$$

$$n'' = N''_{\text{ph}}/N_A$$

Application numérique : $N''_{\text{ph}} = 1,0.10^{36}\,ph$, soit $n = 1,7.10^{12}\,mol$ par seconde.

e) La surface équivalente du laser de lycée est proportionnelle au nombre de moles de photons émises par seconde :

$$S_{\text{eq}} = n \times S_{\text{eq},1}$$

où $S_{\text{eq},1} = 300\,m^2$ est la surface équivalente à la réception d'une mole de photons par seconde. Application numérique : $S_{\text{eq}} = 1,6.10^{-6}\,m^2$, soit $S_{\text{eq}} = 1,6\,mm^2$. Le faisceau du laser étant, en fait, concentré sur une surface environ égale à celle-ci, l'éclairement du laser est équivalent à celui du Soleil.

f) De même, la surface équivalente du laser ELI, s'il émettait en continu, s'écrit :

$$S''_{\text{eq}} = n'' \times S_{\text{eq},1}$$

Application numérique : $S''_{\text{eq}} = 5,1.10^{14}\,m^2$, ce qui est approximativement la surface de la Terre ($4\pi R_T^2 = 5,1.10^{14}\,m^2$, avec $R_T \simeq 6,4.10^6\,m$). Une autre manière de dire que l'éclairement du laser ELI est beaucoup, beaucoup, plus important que celui du Soleil.

7. a) L'activité de l'échantillon est égale au nombre de désintégrations décomptées, par seconde, dans cet échantillon. D'après la mesure effectuée, on peut écrire l'activité :

$$A = n_d \,/\, \Delta t$$

Application numérique : $A = 0,146\,Bq$.

b) On déduit la concentration en radon 222 dansla pièce où l'échantillon a été prélevé de l'activité et du volume de l'échantillon :

$$c = A/V$$

Application numérique : $c = 1,2.10^3\,Bq.m^{-3}$. Cette concentration est au-dessus du seuil d'alerte, le niveau de radioactivité dans cette pièce est dangereux.

8. a) L'équation de fission complétée s'écrit :

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{99}_{40}Zr + ^{134}_{52}Te + 3\,^{1}_{0}n$$

c'est-à-dire : $A = 134$ et $Z = 40$. Cette réaction peut donner lieu à une réaction en chaîne car des neutrons sont émis, qui peuvent provoquer chacun une réaction de fission identique.

b) La variation de masse occasionnée par cette réaction s'écrit :

$$\Delta m = m_{\text{produits}} - m_{\text{reactifs}}$$

$$\text{ssi } \Delta m = m\left(^{99}Zr\right) + m\left(^{134}Te\right) + 2m(n) - m\left(^{235}U\right)$$

Application numérique : $\Delta m = -3,3004.10^{-26}\,kg$. (Le signe "-" signifie que le système a pedu de la masse, donc émis de l'énergie, cf. question d.)

c) Le nombre d'atomes d'uranium contenus dans $1\,g$ d'uranium 235 peut être déduit du nombre de masse :

$$N_{\text{at},1} = \frac{N_A}{A_U}$$

Application numérique : $N_{\text{at},1} = 2,6.10^{21}\,g^{-1}$.

d) L'énergie libérée par $1\,g$ d'uranium 235 est liée à la perte de masse calculée plus haut :

$$E_{\text{lib,1,U}} = N_{\text{at},1}\,|\Delta E_0| = N_{\text{at},1}\,|\Delta m|\,c^2$$

Application numérique : $E_{\text{lib},1} = 7,72.10^{12}\,J.g^{-1}$.

e) Le pouvoir calorifique du charbon est l'énergie libérée par $1\,g$ de charbon (lors de la combustion. L'énergie libérée par une masse m de charbon s'écrit :

$$E_{\text{lib}} = mE_{\text{lib,1,C}}$$

Cette masse m de charbon libère autant d'énergie qu'1 g d'uranium si et seulement si :

$$E_{\text{lib}} = mE_{\text{lib,1,C}} = m'E_{\text{lib,1,U}}$$

$$\text{ssi } m = \frac{m'E_{\text{lib,1,U}}}{E_{\text{lib,1,C}}}$$

(avec $m' = 1\,g$). Application numérique : $m = 3,68.10^2\,t$.

f) L'équation de désintégration β^- du zirconium s'écrit :

$$^{99}_{40}Zi \rightarrow ^{99}_{41}Nb + ^{0}_{-1}e^- + ^{0}_{0}\bar{\nu}_e$$

Références : la plupart de ces exercices sont issus des ouvrages suivants : *DéfiBAC, Physique-Chimie, Tle S* (Ed. Bordas), *DéfiBAC, Physique-Chimie, 1ère S* (Ed. Bordas), *ABC du BAC, Physique-Chimie spécifique et spécialité* (Ed. Nathan).