

UE 6, PASS
CM Application

RAYONNEMENTS IONISANTS / RADIOACTIVITÉ

14 mars 2022

Anthime FLAUS
Remerciements à Sophie LANCELOT

PLAN

1. Rayonnements X et γ

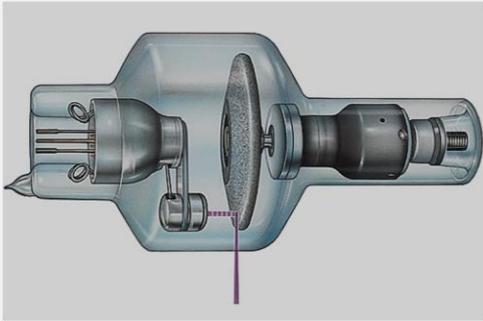
2. Radioactivité

1. Rayonnements X et γ

Production RX

Interaction avec la matière

Atténuation RX



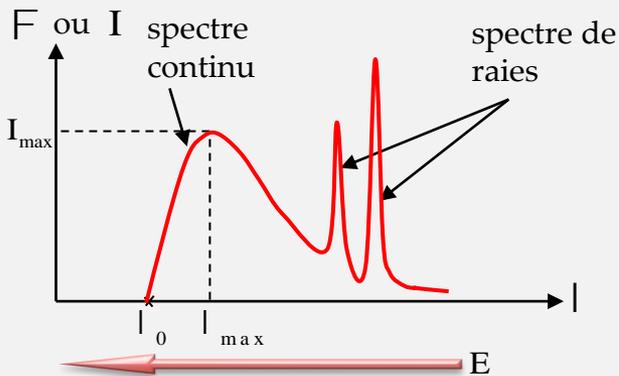
f_0



f

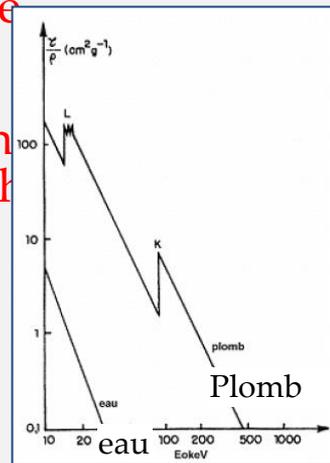


Spectre d'émission

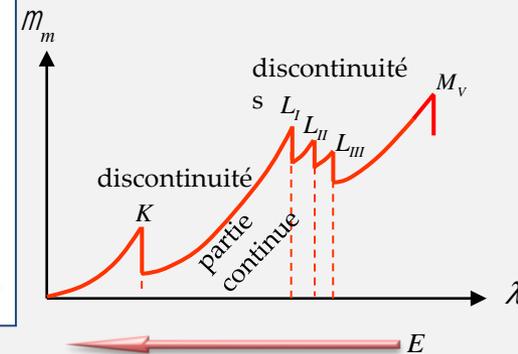


Absorption
Effet photoélectrique

Diffusion
Diffusion Compton
(Diffusion Rayleigh)



Spectre d'atténuation/d'absorption



APPLICATIONS MÉDICALES

Le rayonnement X

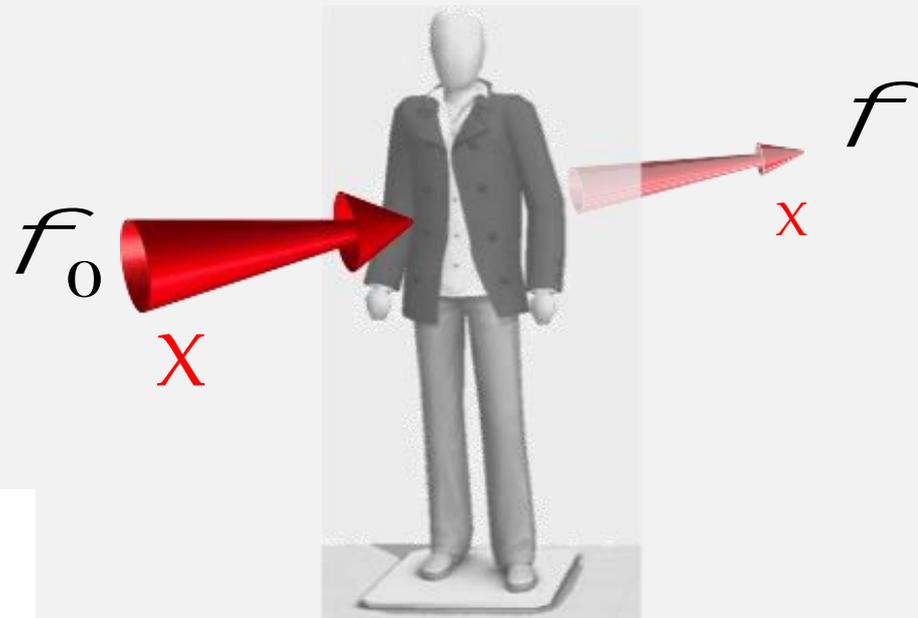
Production

RX

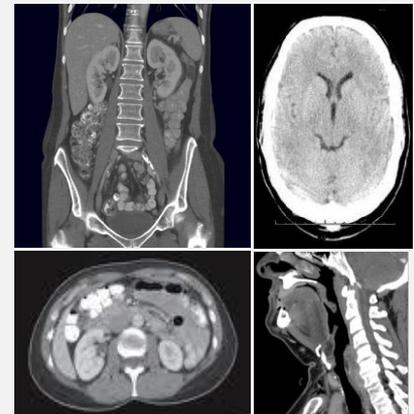


Radiodiagnostic

Interaction avec la matière



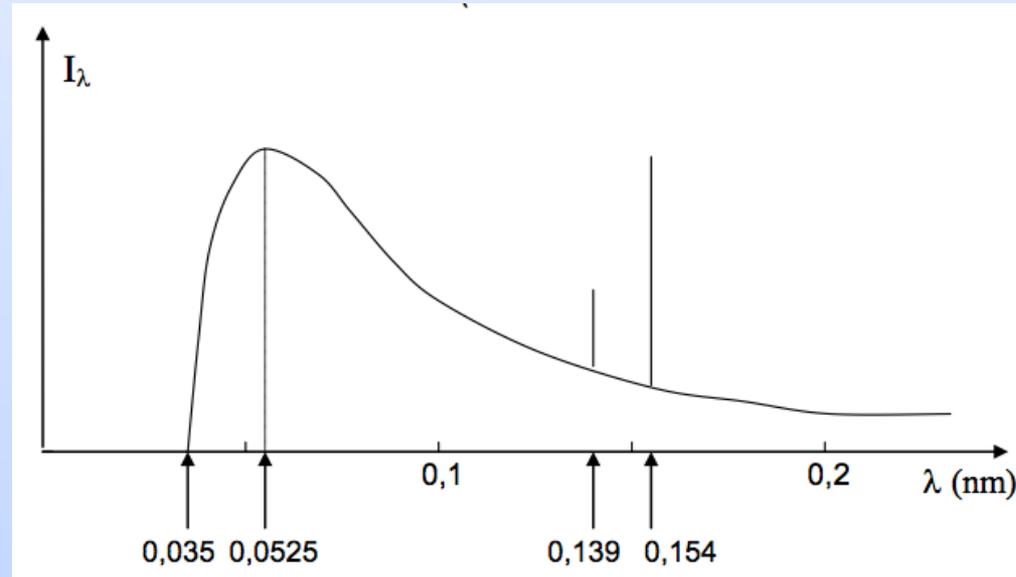
Atténuation RX



Scanner X (TDM, CT)

Exercice 1 Emission des X

Le spectre d'émission de rayons X produit par un tube à anticathode de cuivre est représenté sur le schéma ci-dessous :



1. Calculer, en keV, l'énergie maximale des photons X émis par le tube.
2. Donner, en kV, la tension de fonctionnement de ce tube.
3. Donner, en nm, la longueur d'onde la plus probable des photons X de freinage.
4. Calculer, en keV, la perte d'énergie cinétique la plus probable pour les électrons qui pénètrent dans l'anticathode.
5. Calculer l'énergie, en keV, des photons X de la raie K_α et de la raie K_β sachant que les deux raies d'émission présentées sur le schéma sont les raies K_α et K_β .
6. Calculer, en keV, l'énergie d'ionisation moyenne des niveaux L_{II} et L_{III} du cuivre sachant que l'énergie d'ionisation du niveau K est égale à 8,980 keV.

Exercice 1

1. Calculer, en keV, l'énergie maximale des photons X émis par le tube.

Interaction e⁻/N de cuivre

Energie du photon X maximale
= longueur d'onde minimale λ_0

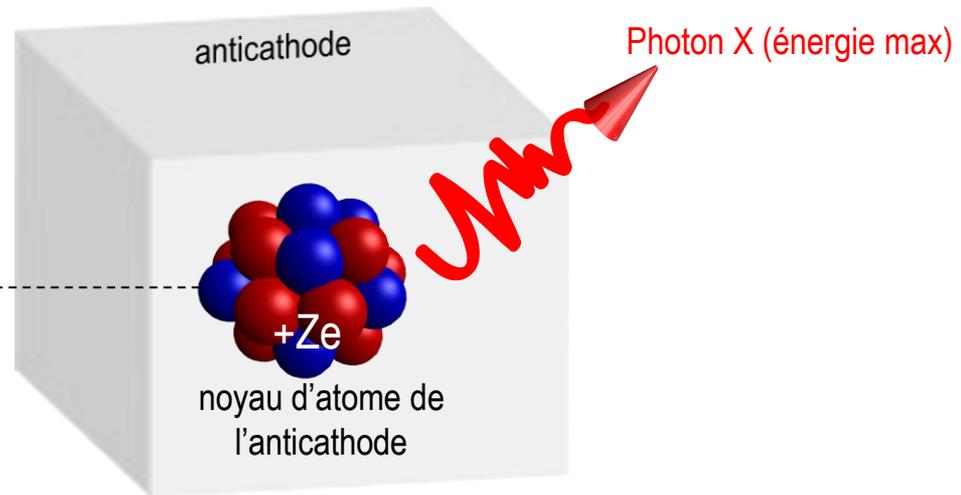


Cas particulier (très faible probabilité)

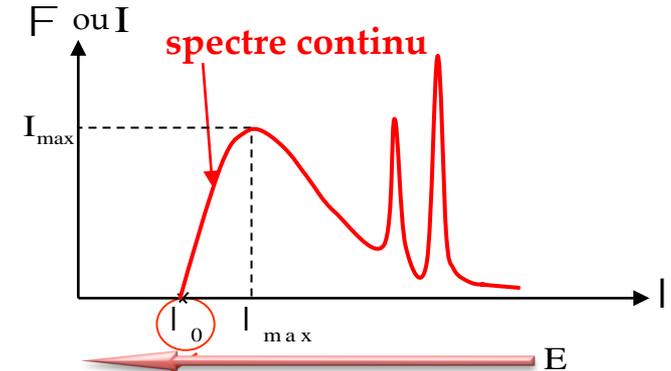
e⁻ incident perd toute son énergie cinétique qui est transformée en énergie électromagnétique (photon X)

$$e^- (E_c = eU)$$

l'électron est accéléré sous l'effet d'une ddp entre la cathode et l'anticathode



Spectre d'émission



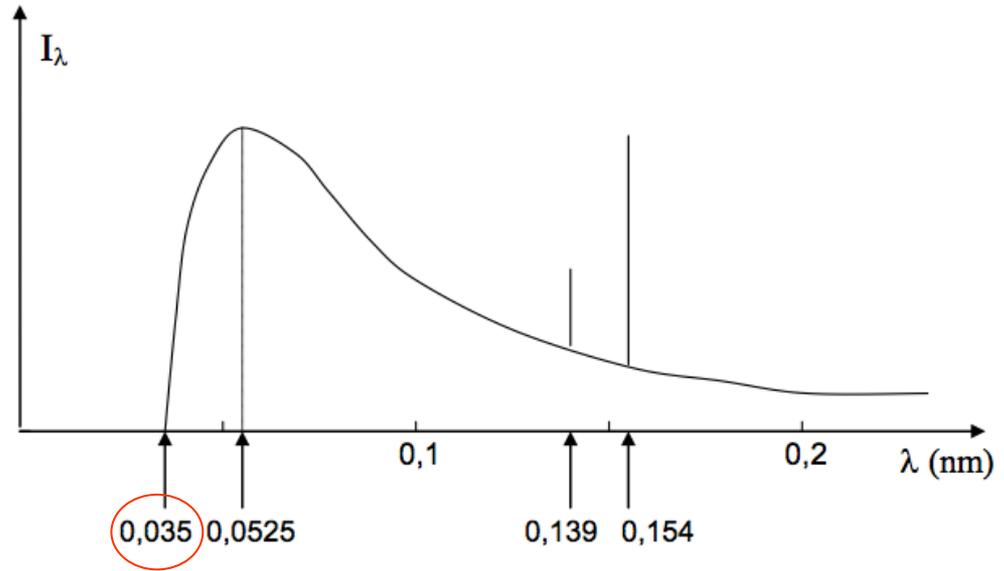
$$E_{\max} = \frac{hc}{\lambda_0}$$

Exercice 1

1. Calculer, en keV, l'énergie maximale des photons X émis par le tube.

Conservation de l'énergie :

$$\underbrace{Ec}_{\text{État initial}}(e^-) = \underbrace{E_{\text{max}}}_{\text{État final}}(\text{photon } X)$$



$$E_{\text{max}} = \frac{hc}{\lambda_0}$$

soit
$$E_{\text{max}}(eV) = \frac{hc}{\lambda_0 e}$$

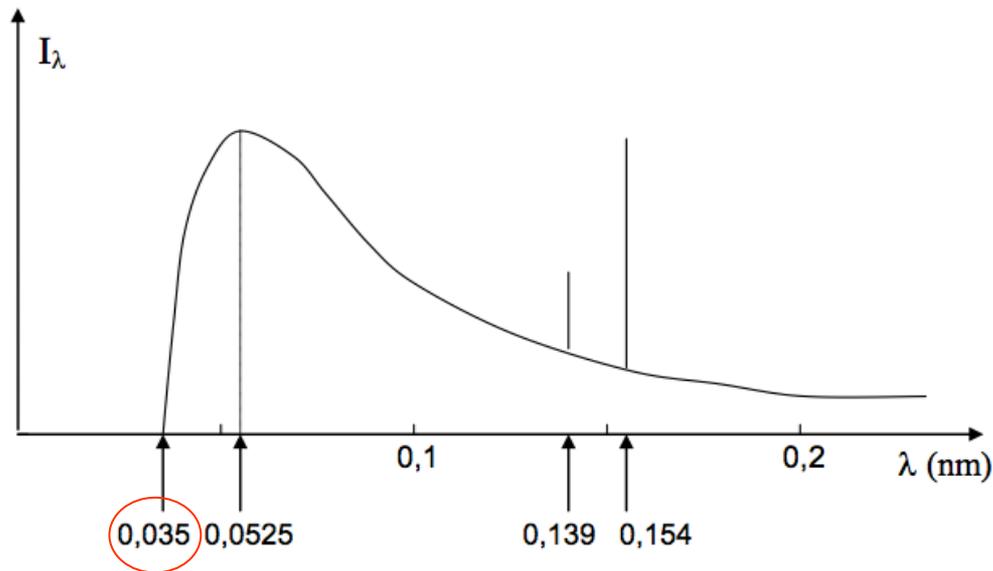
AN :
$$E_{\text{max}} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{0,035 \times 10^{-9} \cdot 1,60218 \times 10^{-19}} = 35500 \text{ eV} = 35,5 \text{ keV}$$

5.66E-15 J

Exercice 1

2. Donner, en kV, la tension de fonctionnement de ce tube.

Conservation de l'énergie (cas particulier) $\underbrace{Ec}_{\text{État initial}}(e^-) = \underbrace{E_{\max}}_{\text{État final}}(\text{photon } X)$



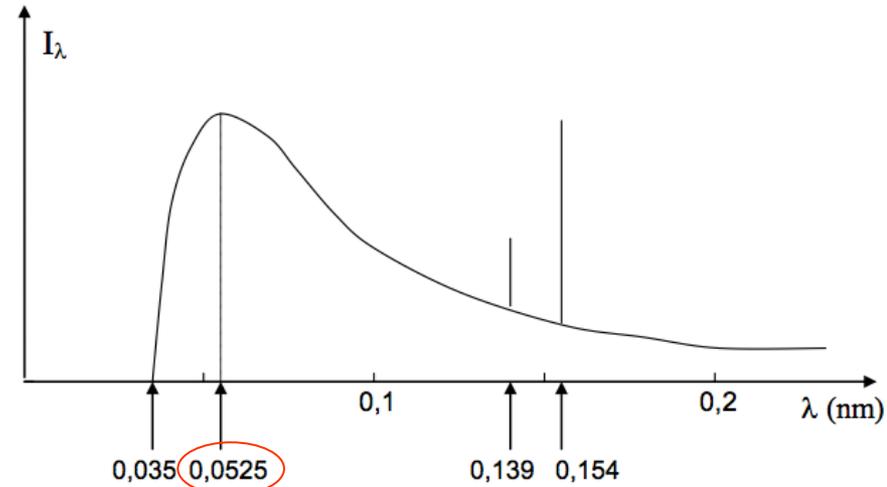
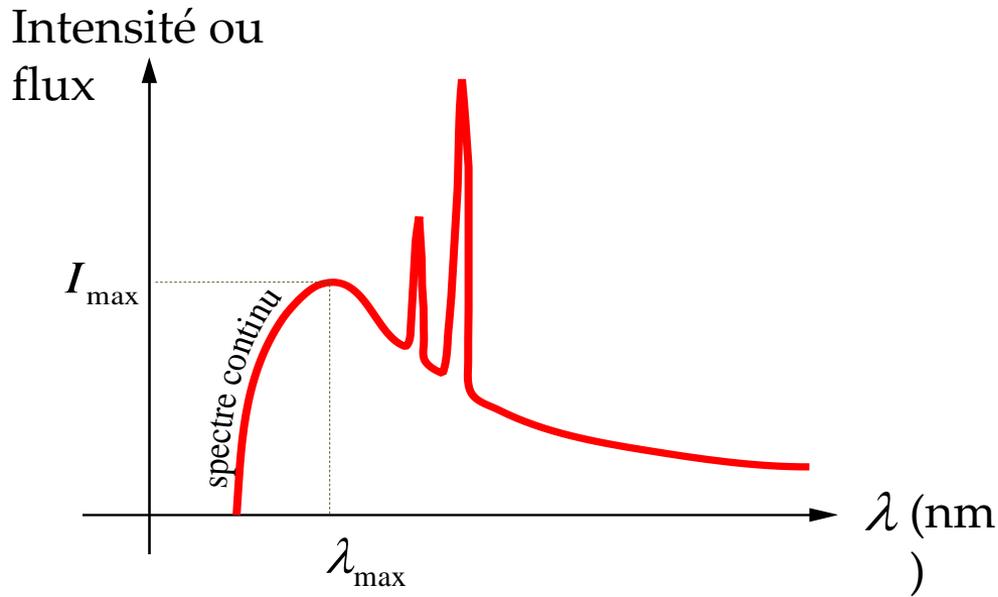
$$Ec = eU = \frac{hc}{\lambda_0}$$

$$U = \frac{hc}{\lambda_0 e}$$

AN:
$$U = \frac{6,62 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{0,035 \times 10^{-9} \cdot 1,60218 \times 10^{-19}} = 35500 \text{ V} = 35,5 \text{ kV}$$

Exercice 1

3. Donner, en nm, la longueur d'onde la plus probable des photons X de freinage.



Longueur d'onde correspondant à l'émission maximum de photons $\rightarrow I_{\max}$
C'est pour λ_{\max} que le nombre de photons X émis par l'anode est maximum

Emission des photons X de freinage maximale pour :

$$I_{\max} = 0,0525 \text{ nm} = \frac{3}{2} l_0$$

Exercice 1

4. Calculer, en keV, la perte d'énergie cinétique la plus probable pour les électrons qui pénètrent dans l'anticathode.

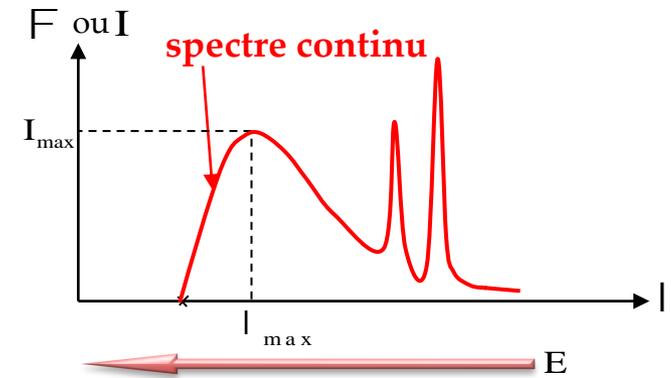
Interaction e⁻/N de cuivre

Longueur d'onde maximale λ_{\max}
= émission maximale de photon X



Une partie de l' E_c de l'e⁻ transformée en énergie électromagnétique (photon X)

Specre d'émission



Exercice 1

4. Calculer, en keV, la perte d'énergie cinétique la plus probable pour les électrons qui pénètrent dans l'anticathode.

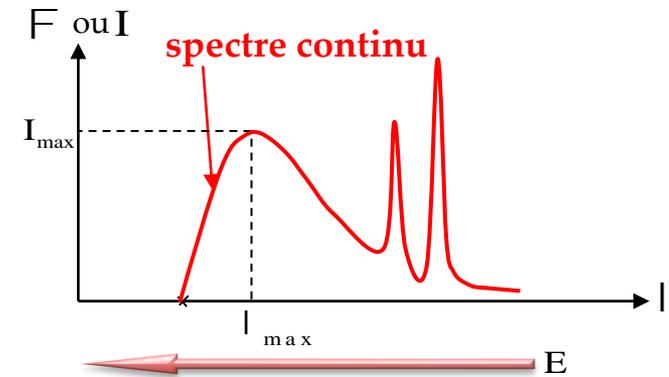
Interaction e⁻/N de cuivre

Longueur d'onde maximale λ_{\max}
= émission maximale de photons X



Une partie de l' E_c de l' e^- transformée en énergie électromagnétique (photon X)

Spectre d'émission



Conservation de l'énergie :

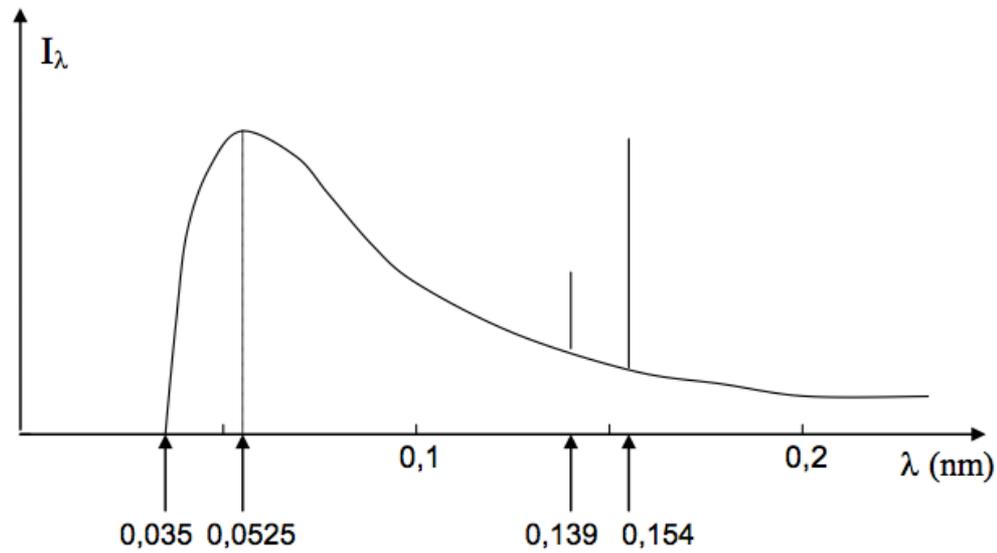
$$\underbrace{Ec}_{\text{État initial}}(e^-) = \underbrace{E_{\lambda_{\max}}}_{\text{État final}}(\text{photon X}) + \underbrace{Ec'}_{\text{État final}}(e^-)$$

$$\Delta Ec = Ec_{(e^-)} - Ec'_{(e^-)} = E_{\lambda_{\max}} = \frac{hc}{\lambda_{\max}}$$

AN: $\Delta E_c = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{0,0525 \cdot 10^{-9} \times 1,60218 \cdot 10^{-19}} = 23630 \text{ eV} = 23,63 \text{ keV}$

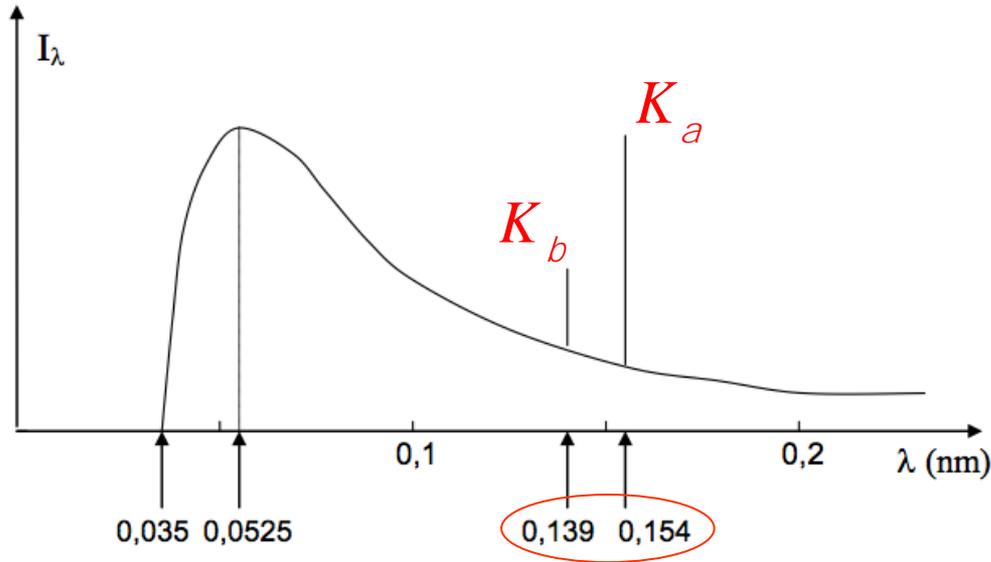
Exercice 1

5. Calculer l'énergie, en keV, des photons X de la raie K_α et de la raie K_β sachant que les deux raies d'émission présentées sur le schéma sont les raies K_α et K_β .



Exercice 1

5. Calculer l'énergie, en keV, des photons X de la raie K_α et de la raie K_β sachant que les deux raies d'émission présentées sur le schéma sont les raies K_α et K_β .



$$E_{k_a} = \frac{hc}{\lambda_{k_a}}$$

$$E_{k_b} = \frac{hc}{\lambda_{k_b}}$$

AN: $E_{k_a} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{0,154 \times 10^{-9} \cdot 1,60218 \times 10^{-19}} = 8060 \text{ eV} = 8,06 \text{ keV}$

$E_{k_b} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{0,139 \times 10^{-9} \cdot 1,60218 \times 10^{-19}} = 8930 \text{ eV} = 8,93 \text{ keV}$

Photons X de la raie K_β plus énergétiques que photons X de la raie K_α

Exercice 2 Emission et absorption des X

Un faisceau de rayons X est produit par un tube à anticathode de chrome fonctionnant sous une tension de 40 kV.

1. Quelle est la longueur d'onde minimale λ_0 du rayonnement émis ?
2. La principale raie d'émission est la raie K_α du chrome de longueur d'onde $\lambda_{K\alpha} = 0,229$ nm. Sachant que la discontinuité d'absorption K du chrome est située à la longueur d'onde $\lambda_K = 0,207$ nm, en déduire l'énergie d'ionisation moyenne des niveaux L_{II} et L_{III} du chrome (exprimer le résultat en eV).
3. On place devant la fenêtre du tube une feuille mince de fer de $5 \cdot 10^{-2}$ mm d'épaisseur. Quel est le pourcentage de transmission du rayonnement X à la longueur d'onde $\lambda = 0,229$ nm sachant que le coefficient d'atténuation massique μ_m du fer est égal à $115 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ et sa masse volumique à $7,87 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.
4. Calculer le coefficient d'atténuation linéaire μ_l du fer à la même longueur d'onde.
5. Quelle est l'épaisseur de demi-atténuation du fer à la même longueur d'onde ?
6. Pour un élément de numéro atomique donné, entre deux discontinuités, le coefficient d'atténuation massique varie selon la relation $\mu_m = K\lambda^3$ où K est une constante. Calculer l'épaisseur de demi-atténuation du fer à la longueur d'onde $\lambda = 0,3$ nm.
(On donne les longueurs d'onde des discontinuités d'absorption K et L_I du fer $\lambda_K = 0,1744$ nm et $\lambda_{L_I} = 1,460$ nm)

Exercice 2

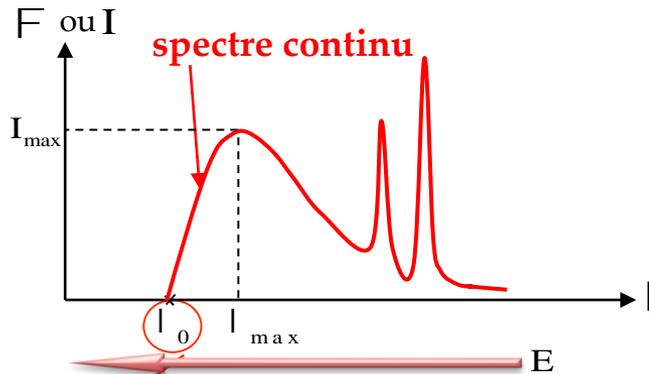
Un faisceau de rayons X est produit par un tube à anticathode de chrome fonctionnant sous une tension de 40 kV.

1. Quelle est la longueur d'onde minimale λ_0 du rayonnement émis ?

Interaction e⁻/N de chrome

Conservation de l'énergie $\underbrace{E_C}_{\text{État initial}}(e^-) = \underbrace{E_{\text{max}}}_{\text{État final}}(\text{photon X})$

Spectre d'émission



$$E_C = eU = h\nu_{\text{max}}$$

$$E_C = eU = \frac{hc}{\lambda_0}$$

soit $\lambda_0 = \frac{hc}{eU}$

$$E_{\text{max}} = \frac{hc}{\lambda_0}$$

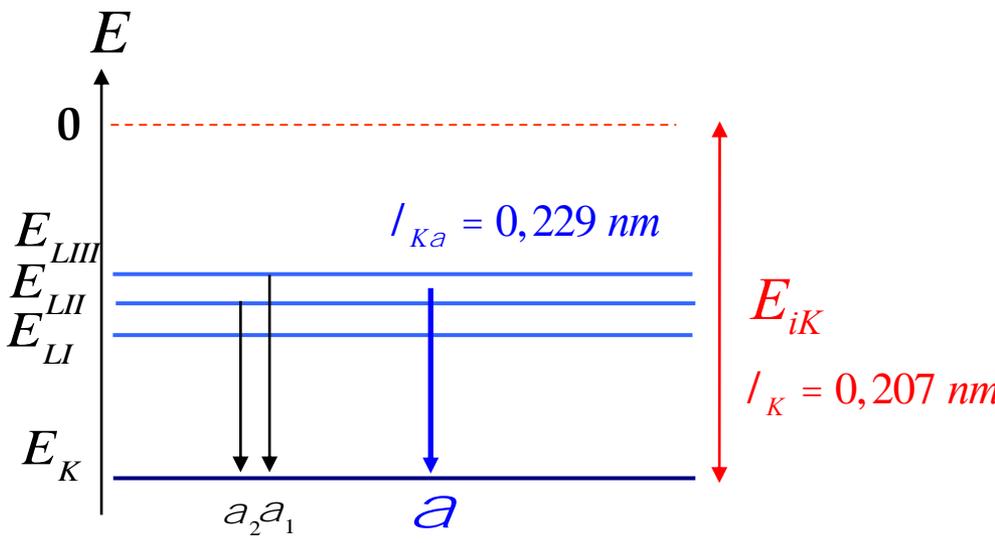
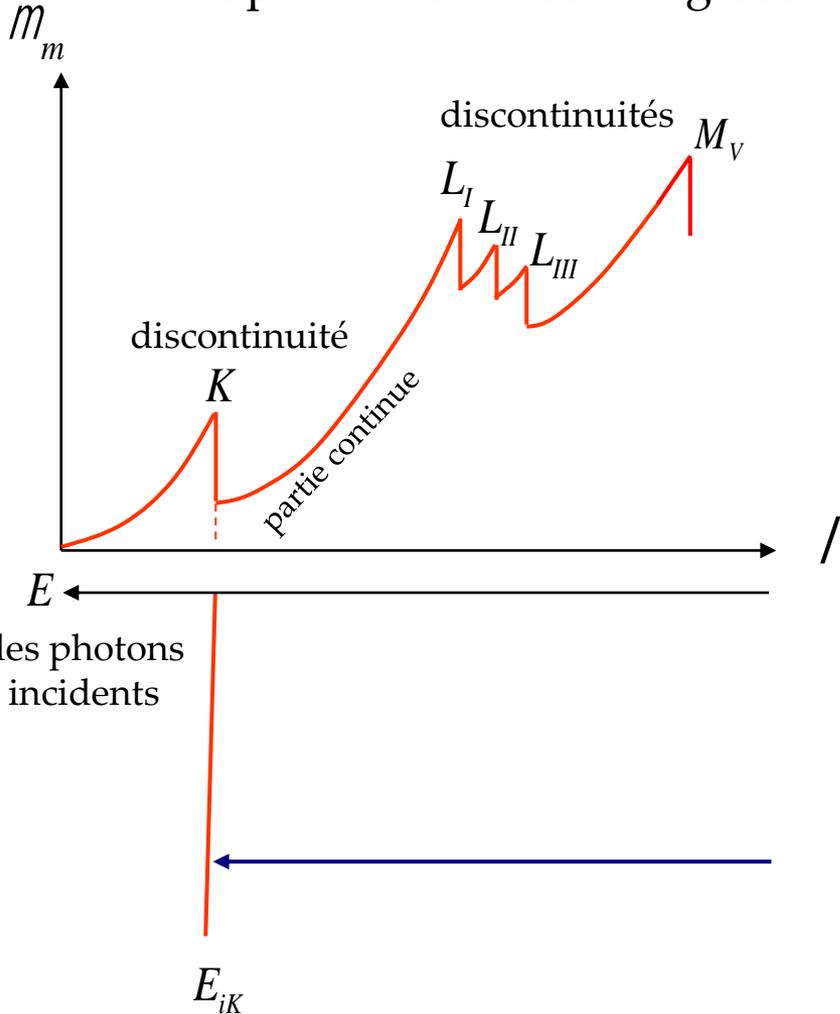
3.09E-11

AN: $\lambda_0 = \frac{6,62 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{1,6 \times 10^{-19} \cdot 40 \times 10^3} = 0,310 \times 10^{-10} \text{ m}$

Exercice 2

2. La principale raie d'émission est la raie K_α du chrome de longueur d'onde $\lambda_{K\alpha} = 0,229$ nm. Sachant que la discontinuité d'absorption K du chrome est située à la longueur d'onde $\lambda_K = 0,207$ nm, en déduire l'énergie d'ionisation moyenne des niveaux L_{II} et L_{III} du chrome (exprimer le résultat en eV).

Spectre d'atténuation global



λ discontinuité $K \rightarrow E_i$ des $e^- K$

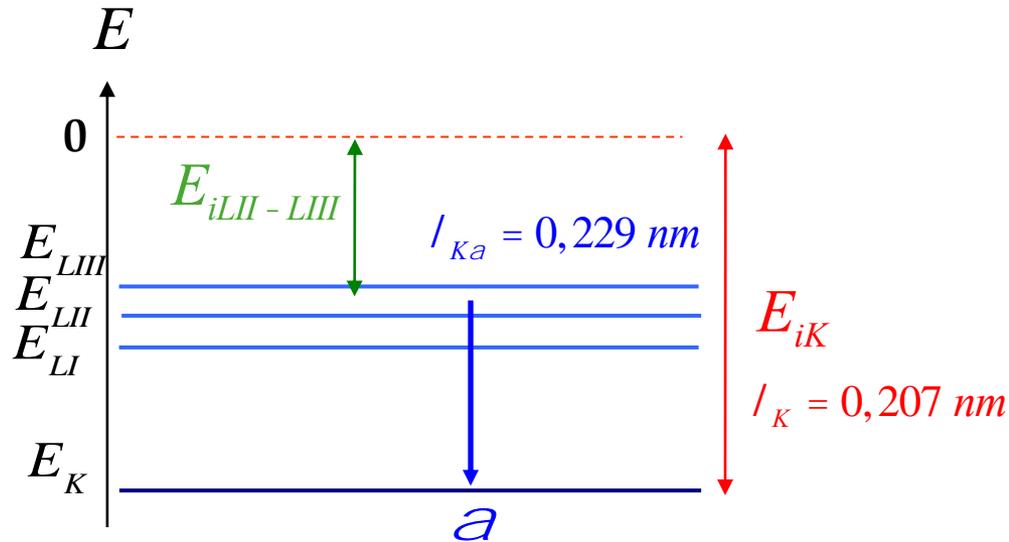
Valeur de la raie $K\alpha \rightarrow \neq$ d'énergie entre les niveaux L et K

Exercice 2

2. La principale raie d'émission est la raie K_α du chrome de longueur d'onde $\lambda_{K\alpha} = 0,229$ nm. Sachant que la discontinuité d'absorption K du chrome est située à la longueur d'onde $\lambda_K = 0,207$ nm, en déduire l'énergie d'ionisation moyenne des niveaux L_{II} et L_{III} du chrome (exprimer le résultat en eV).

$$\|E_{iK}\| = \|E_{iL_{II} - L_{III}}\| + E_{Ka}$$

$$\|E_{iK}\| = \|E_{i\bar{L}}\| + \frac{hc}{\lambda_{Ka}}$$

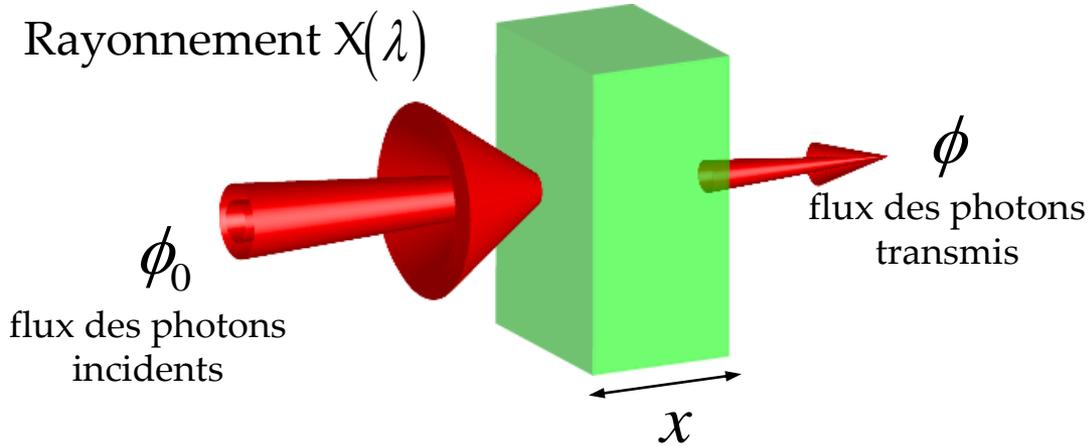


$$\|E_{i\bar{L}}\| = \|E_{iK}\| - \frac{hc}{\lambda_{Ka}} = \frac{hc}{e} \times \left(\frac{1}{\lambda_K} - \frac{1}{\lambda_{Ka}} \right)$$

AN: $\|E_{i\bar{L}}\| = \frac{6,62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1,6 \times 10^{-19}} \times \left(\frac{1}{0,207 \times 10^{-9}} - \frac{1}{0,229 \times 10^{-9}} \right) = 576 \text{ eV}$

Exercice 2

3. On place devant la fenêtre du tube une feuille mince de fer de $5 \cdot 10^{-2}$ mm d'épaisseur. Quel est le pourcentage de transmission du rayonnement X à la longueur d'onde $\lambda = 0,229$ nm sachant que le coefficient d'atténuation massique μ_m du fer est égal à $115 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ et sa masse volumique à $7,87 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.



Loi d'atténuation générale

$$I = I_0 e^{-\mu_m x} = I_0 e^{-\mu_m r x}$$

μ_m = coefficient d'atténuation massique
unité usuelle : $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$

(Pour rayonnement monochromatique)

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu_m \times r \times x}$$

AN: $\frac{I}{I_0} = e^{-115 \cdot 7,87 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 1,08 \times 10^{-2}$

$$\%T = 1,08 \%$$

Exercice 2

4. Calculer le coefficient d'atténuation linéaire μ_l du fer à la même longueur d'onde.

Coefficient d'atténuation linéaire $m_l = r \times m_m$

AN: $m_l = 7,87 \times 115 = 905 \text{ cm}^{-1}$

Exercice 2

5. Quelle est l'épaisseur de demi-atténuation du fer à la même longueur d'onde ?

$$\frac{f}{f_0} = \frac{1}{2} = e^{-m_l \times x_{1/2}}$$

P

$$\ln \frac{1}{2} = -m_l \times x_{1/2}$$

P

$$\ln 2 = m_l \times x_{1/2}$$

P

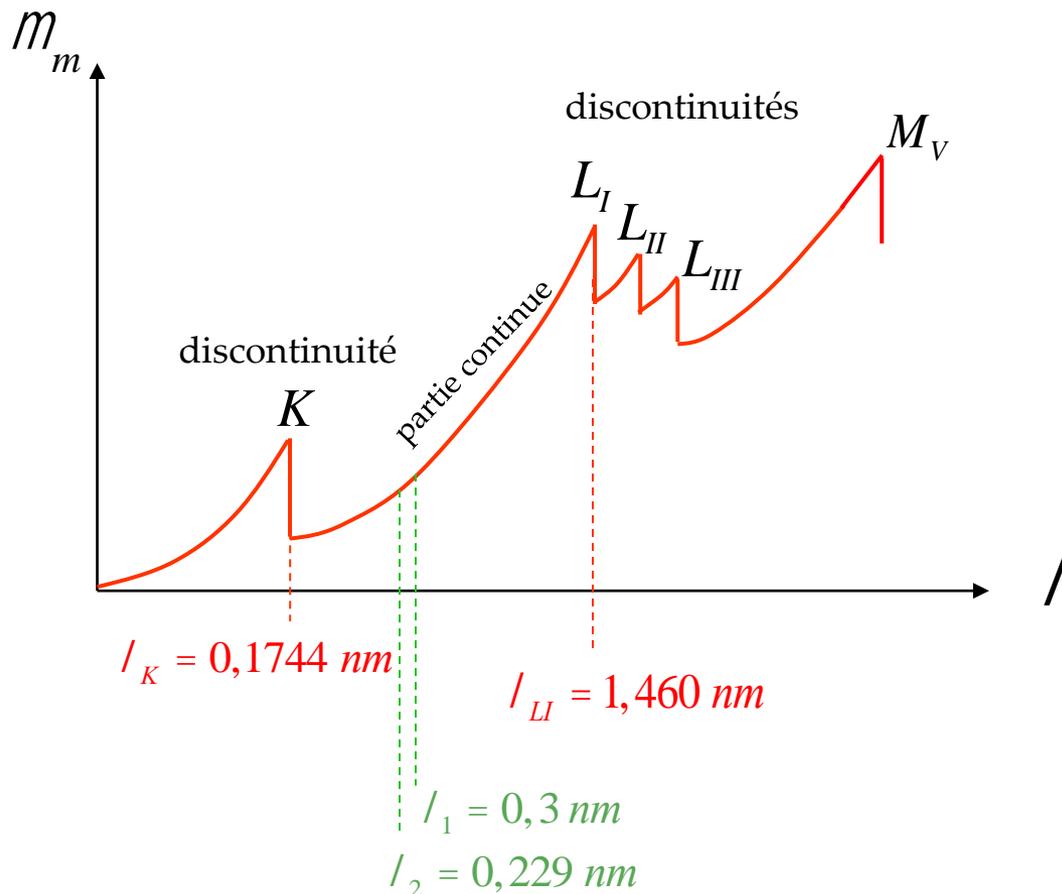
$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{m_l}$$

AN: $x_{1/2} = \frac{0,693}{905} = 7,66 \times 10^{-4} \text{ cm} = 7,66 \text{ mm}$

Exercice 2

6. Pour un élément de numéro atomique donné, entre deux discontinuités, le coefficient d'atténuation massique varie selon la relation $\mu_m = K\lambda^3$ où K est une constante. Calculer l'épaisseur de demi-atténuation du fer à la longueur d'onde $\lambda = 0,3 \text{ nm}$. (On donne les longueurs d'onde des discontinuités d'absorption K et L_I du fer $\lambda_K = 0,1744 \text{ nm}$ et $\lambda_{L_I} = 1,460 \text{ nm}$).

Spectre d'atténuation/d'absorption



$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{m_l} = \frac{\ln 2}{m_m r}$$

$$\lambda_1 = 0,3 \text{ nm} \rightarrow m_{m1} = K / \lambda_1^3$$

$$\lambda_2 = 0,229 \text{ nm} \rightarrow m_{m2} = K / \lambda_2^3$$

Exercice 2

6. Pour un élément de numéro atomique donné, entre deux discontinuités, le coefficient d'atténuation massique varie selon la relation $\mu_m = K\lambda^3$ où K est une constante. Calculer l'épaisseur de demi-atténuation du fer à la longueur d'onde $\lambda = 0,3$ nm.

(On donne les longueurs d'onde des discontinuités d'absorption K et L_I du fer $\lambda_K = 0,1744$ nm et $\lambda_{L_I} = 1,460$ nm).

$$\left. \begin{array}{l} m_{m1} = K / \lambda_1^3 \\ m_{m2} = K / \lambda_2^3 \end{array} \right\} \quad \text{P} \quad \frac{m_{m1}}{m_{m2}} = \frac{K / \lambda_1^3}{K / \lambda_2^3} = \frac{\lambda_2^3}{\lambda_1^3}$$

$x_{1/2(1)}$
↑
○

$$\text{P} \quad m_{m1} = m_{m2} \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^3 = 115 \cdot \left(\frac{0,3}{0,229} \right)^3 = 258,6 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$$

$$\text{P} \quad x_{1/2(1)} = \frac{\ln 2}{m_{m1} \times \rho}$$

$$\underline{\text{AN:}} \quad \boxed{x_{1/2(1)}} = \frac{0,693}{258,6 \cdot 7,87} = 3,41 \times 10^{-4} \text{ cm} = \boxed{3,41 \text{ mm}}$$

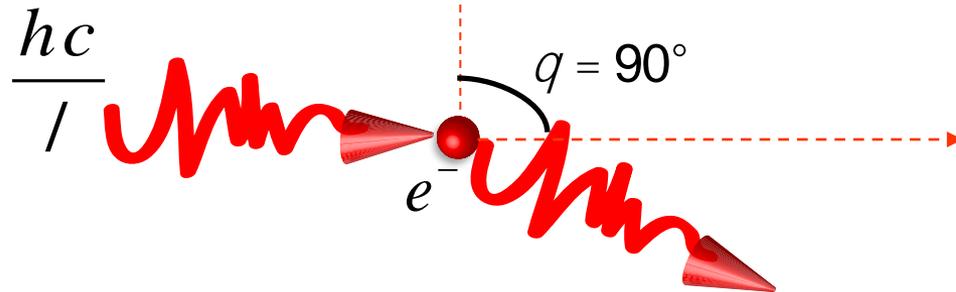
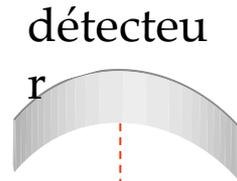
Un faisceau parallèle et monochromatique de rayons X rencontre un objet diffusant. Le spectre du rayonnement diffusé est enregistré selon un angle $\theta = 90^\circ$ par rapport à la direction d'incidence. Il comporte deux composantes de longueur d'onde $\lambda = 0,1542$ nm et $\lambda' = 0,15666$ nm.

1. A quels types de diffusion correspondent ces deux longueurs d'onde?
2. Quelle est l'énergie (en keV) des photons avant diffusion?
3. Quelle est la norme de la quantité de mouvement des photons avant diffusion?
4. Dans le mécanisme de diffusion à 90° avec perte d'énergie :
 - a) Quelle est l'énergie (en keV) communiquée à chaque électron percuté?
 - b) Quelle est la norme de la quantité de mouvement acquise par chaque électron percuté, en considérant ce dernier comme immobile avant le choc?

Exercice 3

Un faisceau parallèle et monochromatique de rayons X rencontre un objet diffusant. Le spectre du rayonnement diffusé est enregistré selon un angle $\theta = 90^\circ$ par rapport à la direction d'incidence. Il comporte deux composantes de longueur d'onde $\lambda = 0,1542 \text{ nm}$ et $\lambda' = 0,15666 \text{ nm}$.

1. A quels types de diffusion correspondent ces deux longueurs d'onde?



$\lambda = 0,1542 \text{ nm} \Rightarrow$ **diffusion Thomson-Rayleigh**
Sans perte d'énergie, sans changement de λ

$\lambda' = 0,15666 \text{ nm} \Rightarrow$ **diffusion Compton**
Avec perte d'énergie, avec changement de λ

Exercice 3

2. Quelle est l'énergie (en keV) des photons avant diffusion?

Avant diffusion, les photons X ont la même longueur d'onde que les photons diffusés par diffusion Rayleigh

$$l = l_0 = 0,1542 \text{ nm}$$

$$E_0 = \frac{hc}{l_0}$$

AN: $E_0 = \frac{6,62 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{0,1542 \times 10^{-9}} = 8,04 \text{ keV}$

Exercice 3

3. Quelle est la norme de la quantité de mouvement des photons avant diffusion?

Pour un photon

$$E_0 = pc$$

$$\|\vec{p}\| = \frac{E_0}{c} = \frac{h\nu_0}{c} = \frac{h}{\lambda_0}$$

AN: $\|\vec{p}\| = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{0,1542 \cdot 10^{-9}} = 4,30 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Exercice 3

4. Dans le mécanisme de diffusion à 90° avec perte d'énergie :

a) Quelle est l'énergie (en keV) communiquée à chaque électron percuté ?

Conservation de l'énergie TOTALE dans la diffusion Compton :

$$E_{\text{photon } X \text{ incident}} + E_{i(e^-)} = E_{\text{photon diffusé}} + E_{f(e^-)}$$

Avec $E_{i(e^-)}$ = énergie de l' e^- au repos

$E_{f(e^-)}$ = énergie de l' e^- au repos + énergie communiquée à l'électron

$$h\nu_0 + mc^2 = h\nu + mc^2 + E_{\text{communiquée}}$$

(on néglige l'énergie de liaison de l

$$E_{\text{communiquée}} = h\nu_0 - h\nu = h(\nu_0 - \nu) = hc \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda} \right)$$

AN :

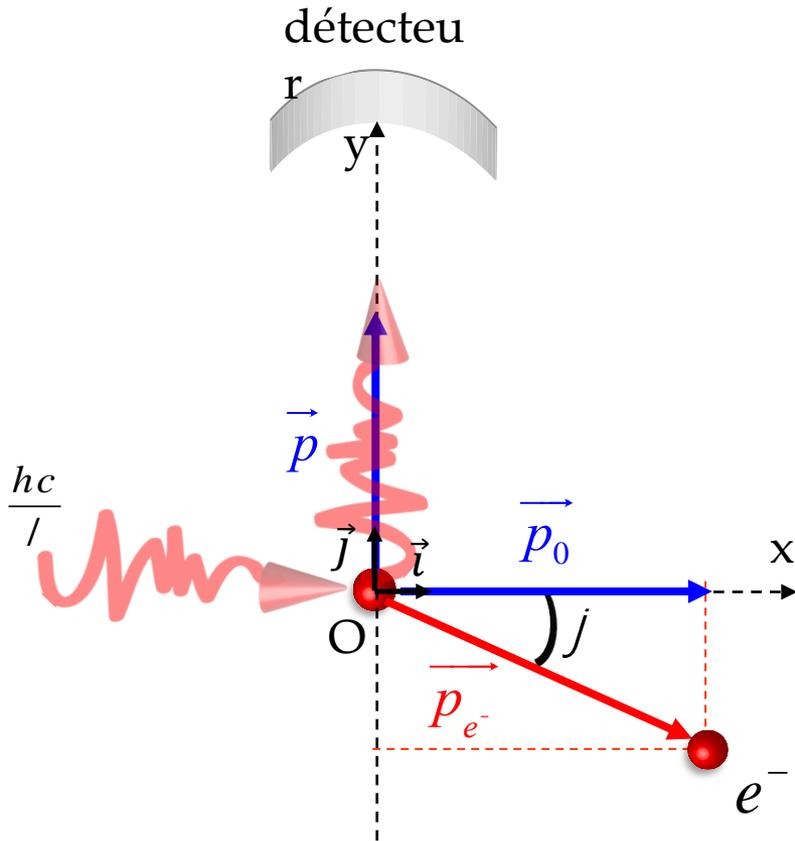
$$E_{\text{communiquée}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{1,60218 \cdot 10^{-19}} \cdot \left(\frac{1}{0,1542} - \frac{1}{0,1566} \right) \cdot 10^9 = 0,123 \text{ keV}$$

Exercice 3

4. Dans le mécanisme de diffusion à 90° avec perte d'énergie :

b) Quelle est la norme de la quantité de mouvement acquise par chaque électron percuté, en considérant ce dernier comme immobile avant le choc?

Conservation de la quantité de mouvement : $\vec{p}_0 = \vec{p} + \vec{p}_{e^-}$



En projetant sur (Ox) :

$$p_0 = 0 + p_e \cos j \quad \text{D} \quad p_0^2 = p_e^2 \cos^2 j \quad (1)$$

En projetant sur (Oy) :

$$0 = p - p_e \sin j \quad \text{D} \quad p^2 = p_e^2 \sin^2 j \quad (2)$$

$$(1) + (2) \quad \text{D} \quad p_0^2 + p^2 = p_e^2$$

$$\text{D} \quad p_e = \sqrt{p_0^2 + p^2} = \sqrt{\frac{h^2}{l_0^2} + \frac{h^2}{l^2}} = h \sqrt{\frac{1}{l_0^2} + \frac{1}{l^2}}$$

AN: $p_e = 6,62 \cdot 10^{-34} \sqrt{\left(\frac{1}{(0,1542)^2} + \frac{1}{(0,1566)^2}\right)} 10^{18} = 6,03 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

CONCOURS 2018

Rayonnement X (*)

A La diffusion Compton est un phénomène observé lors de l'interaction d'un rayonnement X avec les électrons peu liés de la matière

B La dimension d'un flux énergétique de photons X est : ML^2T^{-3}

C Dans un tube à rayons X, la probabilité d'émission X est maximale pour les photons X de longueur d'onde minimale λ_0

D Dans la partie discrète du spectre d'émission, la longueur d'onde des photons X la plus faible correspond à l'émission de photons X de la raie $K\alpha$

E La loi d'atténuation d'un faisceau parallèle de rayons X monoénergétiques à travers une épaisseur x de matière homogène de masse volumique ρ , s'écrit :

$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\mu\rho x}$ (avec μ le coefficient d'atténuation linéaire)

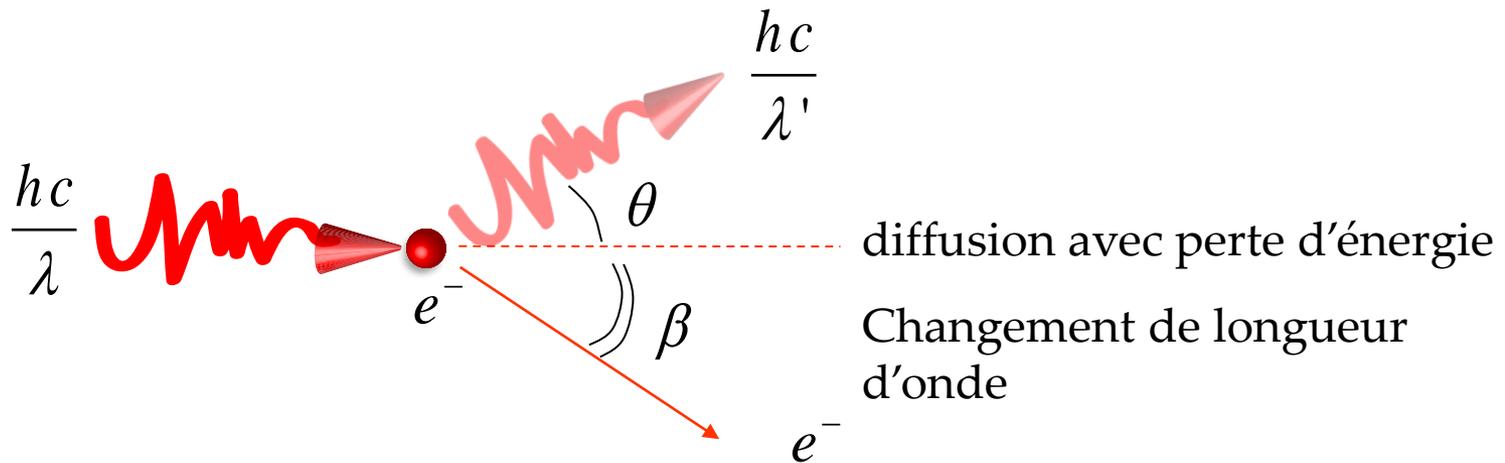
Cochez la(les) proposition(s) exacte(s)

A La diffusion Compton est un phénomène observé lors de l'interaction d'un rayonnement X avec les électrons peu liés de la matière

DIFFUSION COMPTON

Interaction des photons X avec les **électrons peu liés** des atomes de la substance traversée (choc inélastique)

Diffusion **avec perte d'énergie**.



A : vraie

B La dimension d'un flux énergétique de photons X est : ML^2T^{-3}

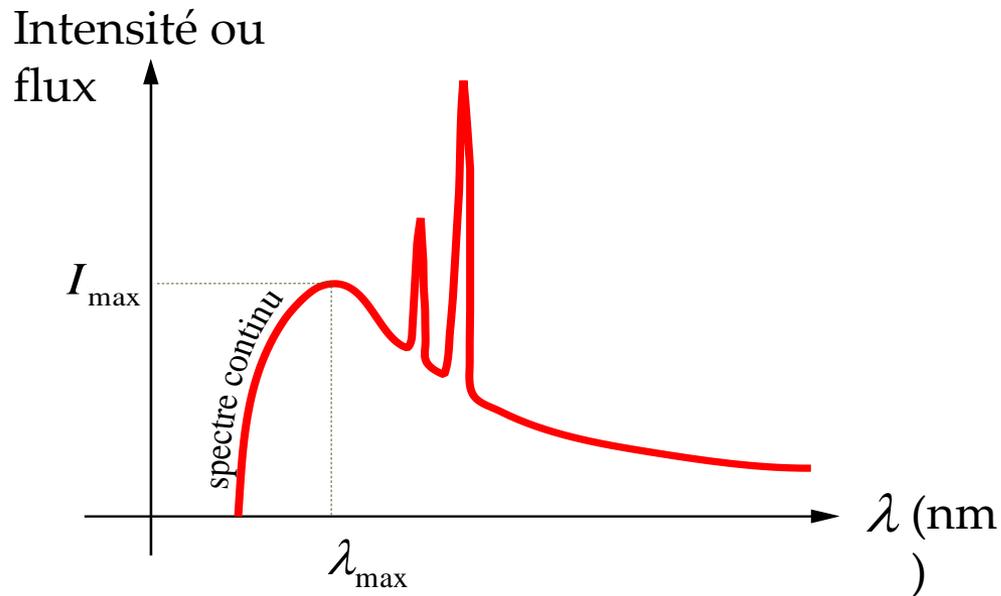
ϕ flux énergétique en watt (W)

Puissance peut être exprimée en termes d'énergie par unité de temps ($J.s^{-1}$)

Dimension : ML^2T^{-3}

B : vraie

C Dans un tube à rayons X, la probabilité d'émission X est maximale pour les photons X de longueur d'onde minimale λ_0



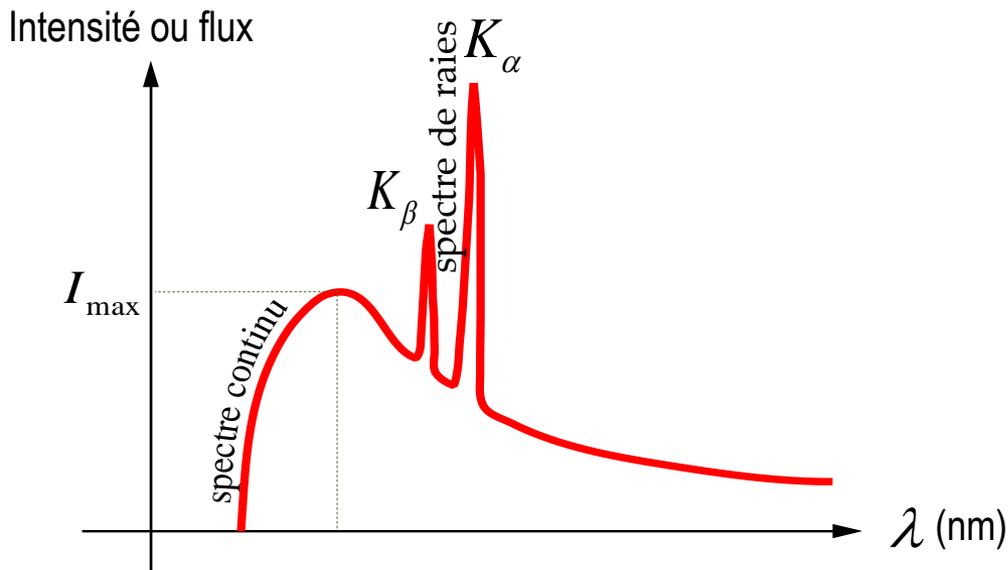
↓
Longueur d'onde correspondant à l'émission maximum de photons → I_{\max}
C'est pour λ_{\max} que le nombre de photons X émis par l'anode est maximum

C : fausse

D Dans la partie discrète du spectre d'émission, la longueur d'onde des photons X la plus faible correspond à l'émission de photons X de la raie $K\alpha$

DESCRIPTION DU SPECTRE DE RAIES

Considérons un tube fonctionnant à courant constant et à tension constante



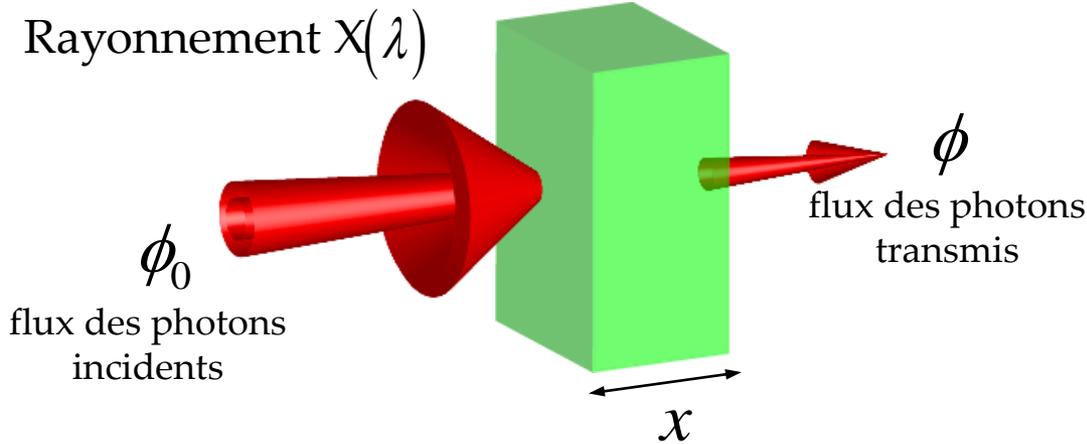
⇒ caractéristiques des raies spectrales :

- Photons X de la raie K_{β} **plus énergétiques** que photons X de ~~K_{α}~~ raie

D : fausse

E La loi d'atténuation d'un faisceau parallèle de rayons X monoénergétiques à travers une épaisseur x de matière homogène de masse volumique ρ , s'écrit :

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\mu \rho x} \text{ (avec } \mu \text{ le coefficient d'atténuation linéaire)}$$



Loi d'atténuation

$$\text{D } f = f_0 e^{-m_l x} = f_0 e^{-m_m \rho x}$$

m_m = coefficient d'atténuation massique $\left(m_m = f \left(/ \right) \right)$

$$[\mu_m] = \text{L}^2 \text{M}^{-1}$$

E : fausse

CONCOURS 2018

Absorption des rayons γ (**)

On considère un flux monoénergétique de photons γ (de faible énergie).
75 % de ce flux est atténué par un écran en plomb de 6 mm d'épaisseur.

- A Un écran en plomb de 3 cm ne laissera passer que $1/1024^{\text{ème}}$ de ce flux de photons γ incidents
- B Un écran en plomb de 1,2 cm atténuera environ 87,5 % de ce flux de photons γ incidents
- C Un écran en plomb de 1,5 cm atténuera environ 97 % de ce flux de photons γ incidents
- D Un écran de matériau différent, d'épaisseur 6 mm et dont la couche de demi-atténuation (CDA) est égale à 4 mm atténuera moins bien ce flux de photons γ incidents qu'un écran en plomb de même épaisseur
- E Ce flux de photons γ est essentiellement atténué par la matière par phénomènes de diffusion

Cochez la(les) proposition(s) exacte(s)

Réponses : A, C, D

A Un écran en plomb de 3 cm ne laissera passer que $1/1024^{\text{ème}}$ de ce flux de photons γ incidents

75 % de ce flux est atténué par un écran en plomb de 6 mm d'épaisseur.

→ une épaisseur de 6 mm de plomb correspond à 2 CDA.

→ CDA = 3 mm

→ 10 CDA = 3 cm laisse passer $1/1024^{\text{ème}}$

A : vraie

B Un écran en plomb de 1,2 cm atténuera environ 87,5 % de ce flux de photons γ incidents

CDA = 3 mm

Une épaisseur de 1,2 cm de plomb correspond à 4 CDA qui laisse passer $1/2^4$ soit 1/16ème du flux incident soit 6-7% environ

B : fausse

C Un écran en plomb de 1,5 cm atténuera environ 97 % de ce flux de photons γ incidents

CDA = 3 mm

Une épaisseur de 1,5 cm de plomb correspond à 5 CDA et laisse passer $1/2^5$ soit 1/32ème du flux incident soit 3 % environ

C : vraie

D Un écran de matériau différent, d'épaisseur 6 mm et dont la couche de demi-atténuation (CDA) est égale à 4 mm atténuera moins bien ce flux de photons γ incidents qu'un écran en plomb de même épaisseur

$$\text{CDA} = 4 \text{ mm} > \text{CDA}_{\text{plomb}} = 3 \text{ mm}$$

D : vraie

E Ce flux de photons γ est essentiellement atténué par la matière par phénomènes de diffusion

Photons γ de faible énergie : effet photo-électrique prépondérant

E : fausse

24 Discontinuités d'absorption (***)

Un faisceau de rayons X traverse une lame de fer. Les longueurs d'onde des discontinuités d'absorption K, L_{II} et L_{III} du fer sont respectivement λ_K , λ_{LII} et λ_{LIII} .

Etablir les expressions des longueurs d'onde ($\lambda_{K\alpha1}$ et $\lambda_{K\alpha2}$) des deux raies d'émission de fluorescence du fer consécutives à l'absorption des photons incidents.

On donne : $\lambda_{K\alpha1} < \lambda_{K\alpha2}$.

On rappelle l'expression de l'énergie d'ionisation d'un niveau en fonction de la longueur d'onde de la discontinuité d'absorption correspondante : $E_{iK} = hc/\lambda_K$ pour le niveau K

A $\lambda_{K\alpha1} = \lambda_{K_{LIII}} - \lambda_K$ et $\lambda_{K\alpha2} = \lambda_{K_{LII}} - \lambda_K$

B $\lambda_{K\alpha1} = \left[\lambda_{K_{LIII}} - \lambda_K \right]^{-1}$ et $\lambda_{K\alpha2} = \left[\lambda_{K_{LII}} - \lambda_K \right]^{-1}$

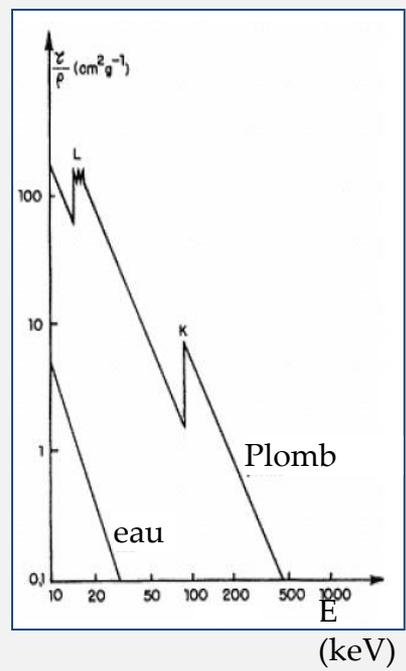
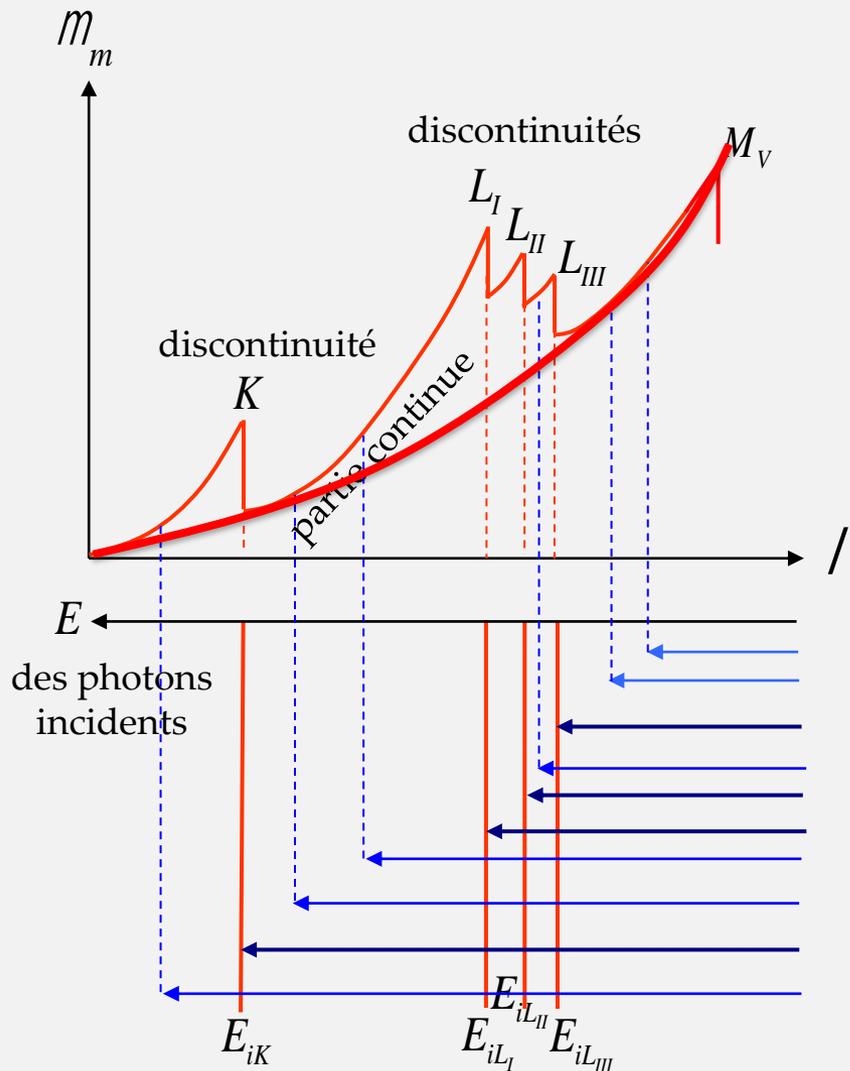
C $\lambda_{K\alpha1} = (\lambda_K)^{-1} - (\lambda_{L_{III}})^{-1}$ et $\lambda_{K\alpha2} = (\lambda_K)^{-1} - (\lambda_{L_{II}})^{-1}$

D $\lambda_{K\alpha1} = \left[(\lambda_{L_{III}})^{-1} - (\lambda_K)^{-1} \right]^{-1}$ et $\lambda_{K\alpha2} = \left[(\lambda_{L_{II}})^{-1} - (\lambda_K)^{-1} \right]^{-1}$

E $\lambda_{K\alpha1} = \left[(\lambda_K)^{-1} - (\lambda_{L_{III}})^{-1} \right]^{-1}$ et $\lambda_{K\alpha2} = \left[(\lambda_K)^{-1} - (\lambda_{L_{II}})^{-1} \right]^{-1}$

Exercice 2 Rappels de cours

Spectre d'atténuation GLOBAL des RX



Spectre d'atténuation des RX par effet photoélectrique

24 Discontinuités d'absorption (***)

Un faisceau de rayons X traverse une lame de fer. Les longueurs d'onde des discontinuités d'absorption K, L_{II} et L_{III} du fer sont respectivement λ_K , $\lambda_{L_{II}}$ et $\lambda_{L_{III}}$.

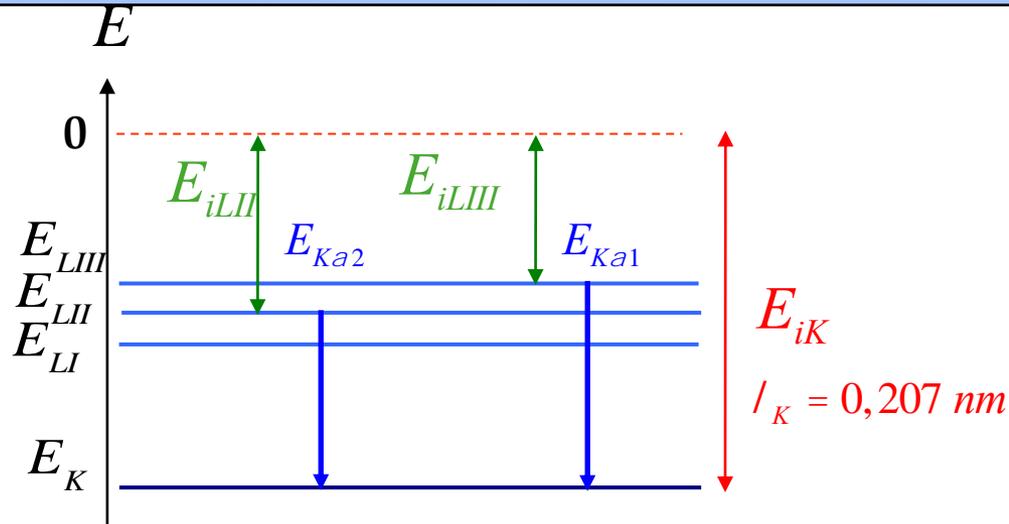
Etablir les expressions des longueurs d'onde ($\lambda_{K\alpha 1}$ et $\lambda_{K\alpha 2}$) des deux raies d'émission de fluorescence du fer consécutives à l'absorption des photons incidents.

On donne : $\lambda_{K\alpha 1} < \lambda_{K\alpha 2}$.

On rappelle l'expression de l'énergie d'ionisation d'un niveau en fonction de la longueur d'onde de la discontinuité d'absorption correspondante : $E_{iK} = hc/\lambda_K$ pour le niveau K

$$1) \text{ Raie } K_{\alpha 1}: \left| E_{iK} \right| = \left| E_{iL_{III}} \right| + E_{K\alpha 1}$$

$$2) \text{ Raie } K_{\alpha 2}: \left| E_{iK} \right| = \left| E_{iL_{II}} \right| + E_{K\alpha 2}$$



$$1) \frac{hc}{\lambda_{K\alpha 1}} = E_{iK} - E_{iL_{III}} = \frac{hc}{\lambda_K} - \frac{hc}{\lambda_{L_{III}}}$$

$$\Leftrightarrow hc \left(\frac{1}{\lambda_{K\alpha 1}} \right) = hc \left(\frac{1}{\lambda_K} - \frac{1}{\lambda_{L_{III}}} \right)$$

$$2) \frac{hc}{\lambda_{K\alpha 2}} = E_{iK} - E_{iL_{II}} = \frac{hc}{\lambda_K} - \frac{hc}{\lambda_{L_{II}}}$$

$$\Leftrightarrow hc \left(\frac{1}{\lambda_{K\alpha 2}} \right) = hc \left(\frac{1}{\lambda_K} - \frac{1}{\lambda_{L_{II}}} \right)$$

24 Discontinuités d'absorption (***)

Un faisceau de rayons X traverse une lame de fer. Les longueurs d'onde des discontinuités d'absorption K , L_{II} et L_{III} du fer sont respectivement λ_K , $\lambda_{L_{II}}$ et $\lambda_{L_{III}}$.

Etablir les expressions des longueurs d'onde ($\lambda_{K\alpha 1}$ et $\lambda_{K\alpha 2}$) des deux raies d'émission de fluorescence du fer consécutives à l'absorption des photons incidents.

On donne : $\lambda_{K\alpha 1} < \lambda_{K\alpha 2}$.

On rappelle l'expression de l'énergie d'ionisation d'un niveau en fonction de la longueur d'onde de la discontinuité d'absorption correspondante : $E_{iK} = hc/\lambda_K$ pour le niveau K

$$1) \quad \cancel{hc} \left(\frac{1}{\lambda_{K\alpha 1}} \right) = \cancel{hc} \left(\frac{1}{\lambda_K} - \frac{1}{\lambda_{L_{III}}} \right) \quad \text{D} \quad 1 = \left(\frac{1}{\lambda_K} - \frac{1}{\lambda_{L_{III}}} \right) \lambda_{K\alpha 1}$$

$$2) \quad \cancel{hc} \left(\frac{1}{\lambda_{K\alpha 2}} \right) = \cancel{hc} \left(\frac{1}{\lambda_K} - \frac{1}{\lambda_{L_{II}}} \right) \quad \text{D} \quad 1 = \left(\frac{1}{\lambda_K} - \frac{1}{\lambda_{L_{II}}} \right) \lambda_{K\alpha 2}$$

$$1) \quad \text{D} \quad \lambda_{K\alpha 1} = \left[\left(\lambda_K \right)^{-1} - \left(\lambda_{L_{III}} \right)^{-1} \right]^{-1}$$

$$2) \quad \text{D} \quad \lambda_{K\alpha 2} = \left[\left(\lambda_K \right)^{-1} - \left(\lambda_{L_{II}} \right)^{-1} \right]^{-1}$$

Réponse E vraie

2. Radioactivité

Exercice 1

Emission des X

Le sodium 22 (^{22}Na) se désintègre soit par capture électronique (9,74 %) soit par émission β^+ . Dans ce dernier cas, il se forme du néon 22 (^{22}Ne) dans un état excité (émission β_1^+ , 90,2 %) et du néon 22 à l'état fondamental (émission β_2^+ , 0,06 %).

On donne : numéro atomique du sodium $Z = 11$

masse de l'atome de $^{22}\text{Na} = 21,994434 \text{ u}$

masse de l'atome de $^{22}\text{Ne} = 21,991383 \text{ u}$

1. Ecrire les réactions de transformation par capture électronique et par émission β^+ .
2. Représenter le schéma de désintégration par émission β^+ .
3. Calculer l'énergie totale (en MeV) libérée sous forme de masse et d'énergie cinétique par la transformation d'un atome de ^{22}Na en un atome de ^{22}Ne à l'état fondamental.
4. Quelle est, en MeV, la valeur de l'énergie cinétique maximale des particules β_2^+ ($E_{\beta_{2\max}}$) ?
5. Les photons γ provenant de la désexcitation du ^{22}Ne ont une énergie égale à 1,275 MeV. En déduire la valeur de $E_{\beta_{1\max}}$ en MeV.

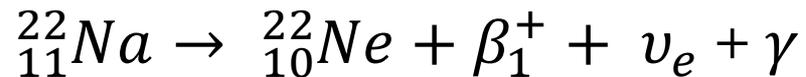
Exercice 1

1. Ecrire les réactions de transformation par capture électronique et par émission β^+ .

Capture électronique (9,74 %)



Emission β_1^+ (90,2 %) forme du néon 22 dans un état excité

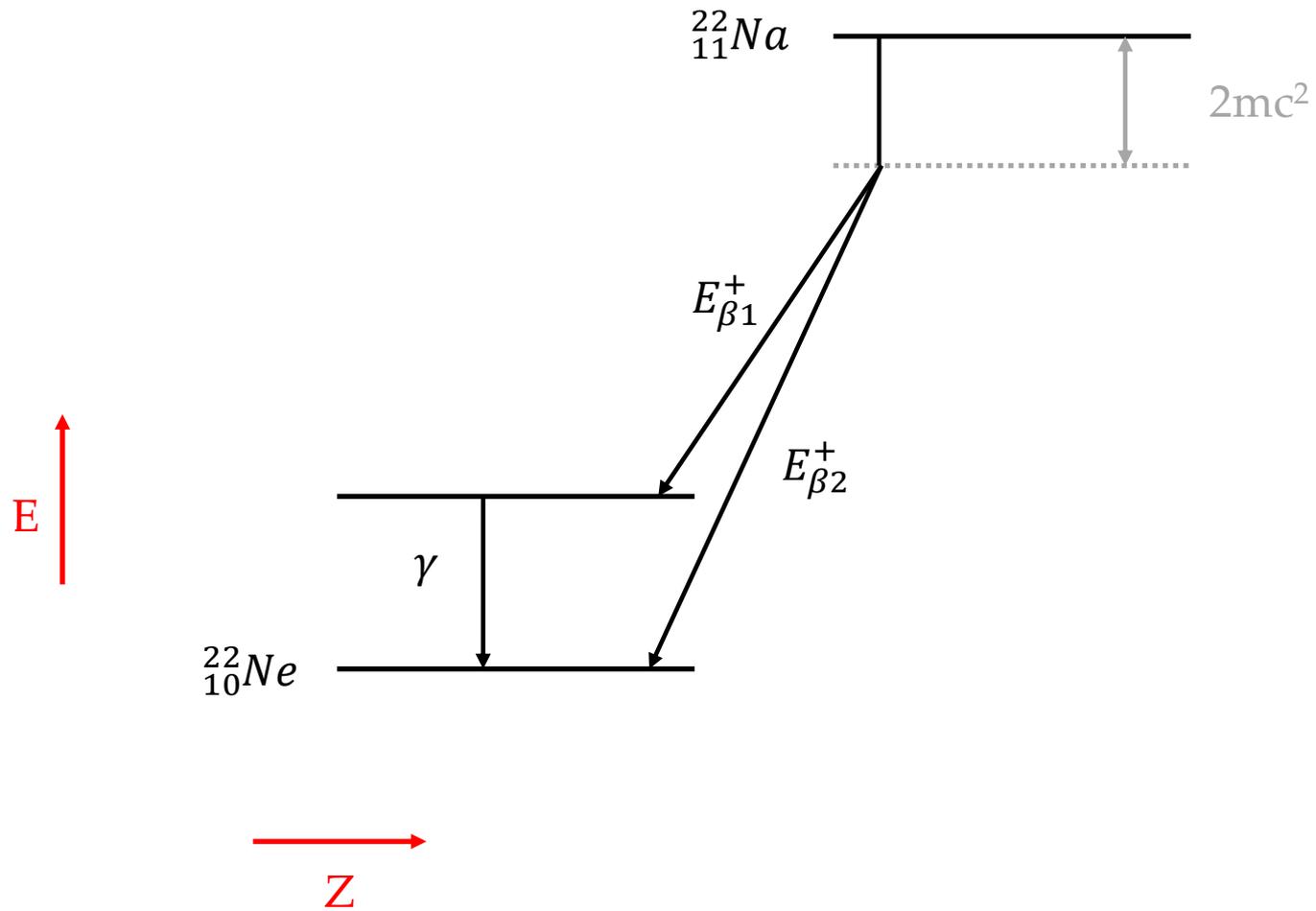


Emission β_2^+ (0,06 %) forme du néon 22 à l'état fondamental



Exercice 1

2. Représenter le schéma de désintégration par émission β^+ .



Exercice 1

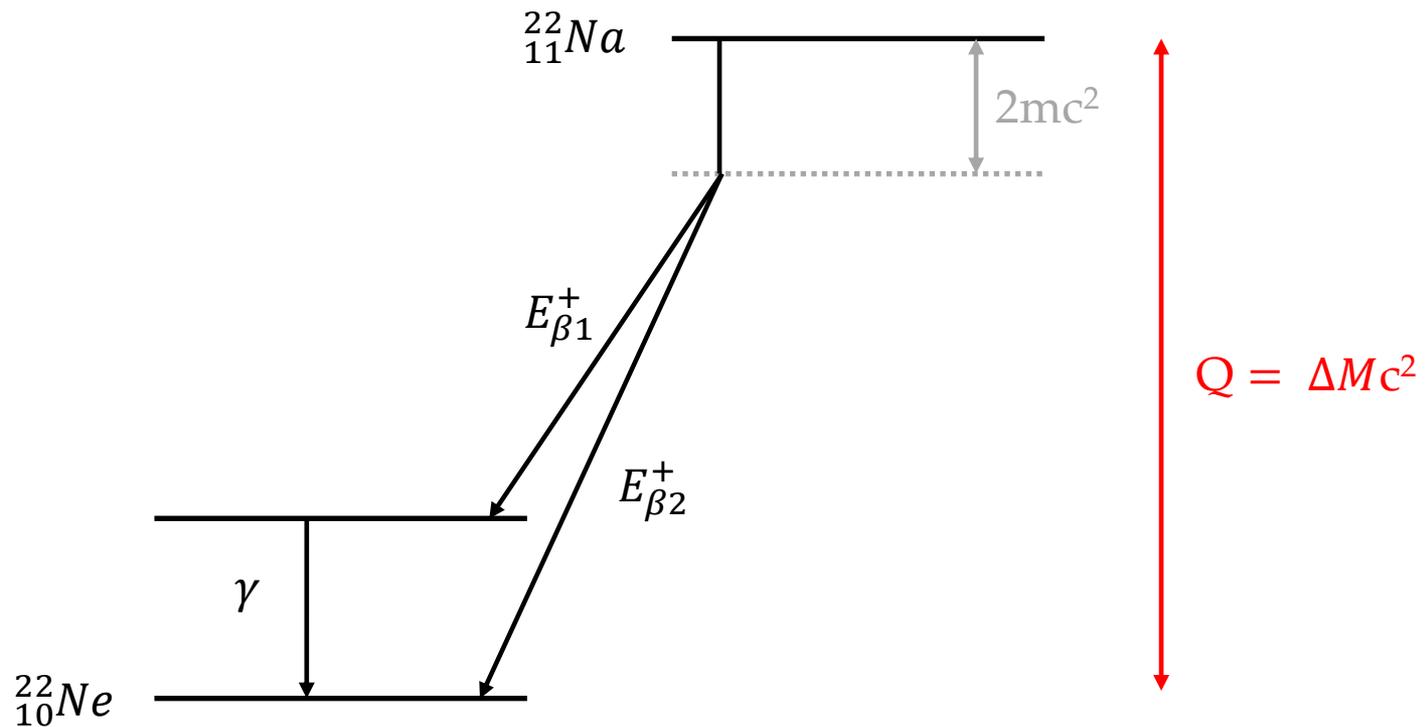
3. Calculer l'énergie totale (en MeV) libérée sous forme de masse et d'énergie cinétique par la transformation d'un atome de ^{22}Na en un atome de ^{22}Ne à l'état fondamental.

$$E \text{ totale libérée} = Q = \Delta M c^2$$

3-3-2 Équivalent énergétique de u

ne $m_u \cdot c^2 = 931,5 \text{ MeV}$

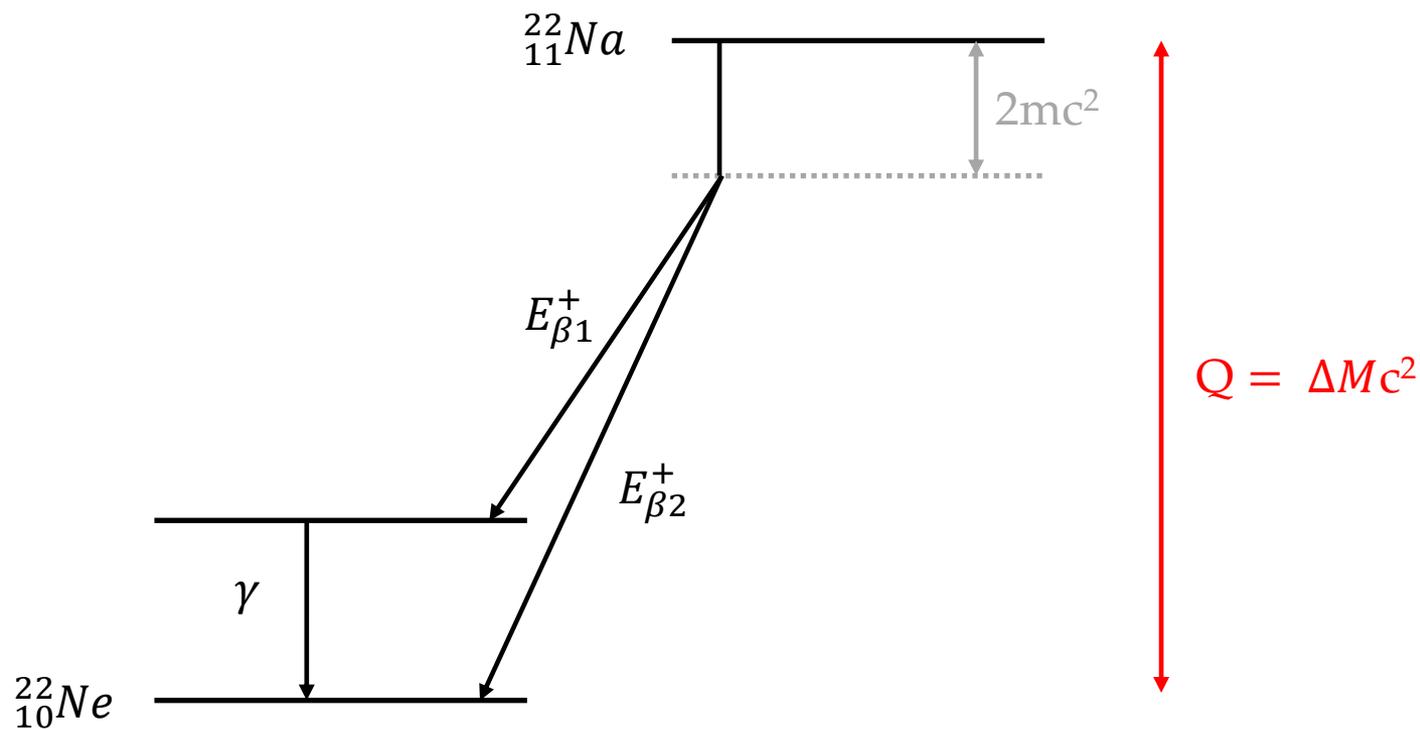
$$\text{Soit } [M_{11}^{22}\text{Na} - M_{10}^{22}\text{Ne}] c^2 = (21,994434 - 21,991383) \cdot 931,5 = 2,842 \text{ MeV}$$



Exercice 1

4. Quelle est, en MeV, la valeur de l'énergie cinétique maximale des particules β_2^+ ($E_{\beta_{2\max}}$) ?

$$E_{\beta_{2\max}} = Q - 2mc^2 = \Delta Mc^2 - 2mc^2 = 2,842 - 1,022 = 1,820 \text{ MeV}$$

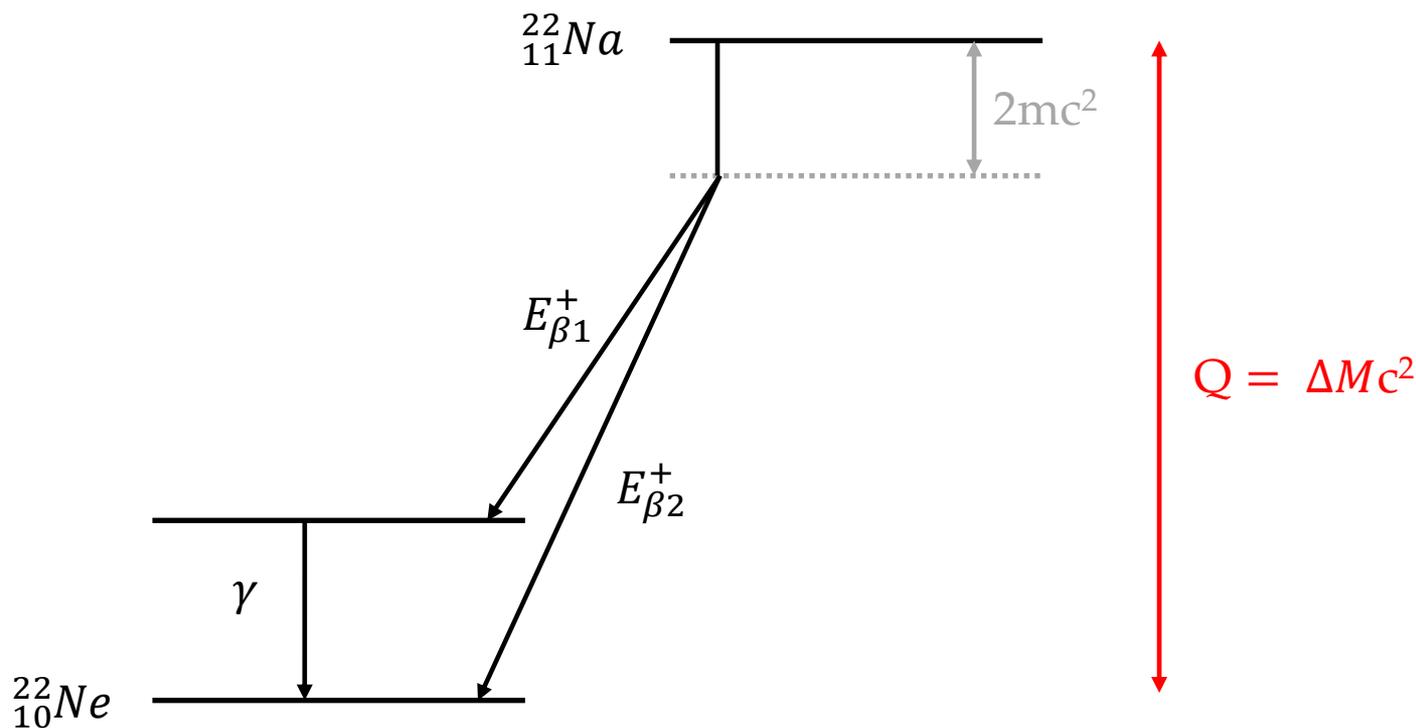


Exercice 1

5. Les photons γ provenant de la désexcitation du ^{22}Ne ont une énergie égale à 1,275 MeV. En déduire la valeur de $E_{\beta 1\text{max}}$ en MeV.

$$Q = 2 mc^2 + E_{\beta 1\text{max}} + E_{\gamma}$$

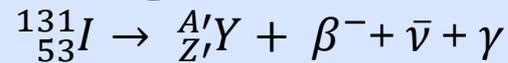
$$E_{\beta 1\text{max}} = Q - 2 mc^2 - E_{\gamma} = 2,842 - 1,022 - 1,275 = 0,545 \text{ MeV}$$



Exercice 2

Une solution contient un mélange de deux radioisotopes de l'iode, ^{125}I et ^{131}I , d'activités respectives 7 MBq et 25 MBq au temps t_0 .

1. ^{125}I se désintègre par capture électronique et ^{131}I par émission β^- :



On donne :

Elément	Z
Sb	51
Te	52
I	53
Xe	54
Cs	55

Déterminer les valeurs de A, A', Z et Z' ainsi que les noms des nucléides X et Y.

2. La désintégration de ^{125}I s'accompagne d'une émission secondaire de photons X. De quel élément ces photons sont-ils caractéristiques ?

3. La période de ^{125}I est de 60 jours, celle de ^{131}I est de 8 jours. Calculer la constante radioactive de ces deux radionucléides en s^{-1} .

4. Calculer le nombre d'atomes de ces deux radionucléides à t_0 .

5. a) Au bout de combien de temps (en jours) l'activité de ^{125}I sera-t-elle égale à l'activité de ^{131}I ?

b) Quelle sera la valeur de cette activité en MBq ?

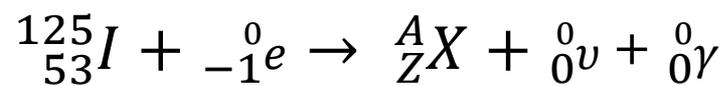
6. La désintégration nucléaire de ^{125}I aboutit uniquement à un niveau d'énergie excité du nucléide X qui se désexcite, soit par conversion interne (93,3 % des cas), soit par émission de photons γ de 35,5 keV (6,7 % des cas). Déterminer le flux énergétique de ces photons émis par la solution radioactive à t_0 .

Exercice 2

1. ^{125}I se désintègre par capture électronique et ^{131}I par émission β^- :



Déterminer les valeurs de A, A', Z et Z' ainsi que les noms des nucléides X et Y.



$$125 + 0 = A + 0 + 0$$

$$A = 125$$

$$53 - 1 = Z + 0 + 0$$

$$Z = 52$$

Élément	Z
Sb	51
Te	52
I	53
Xe	54
Cs	55

$$X = \text{Te}$$

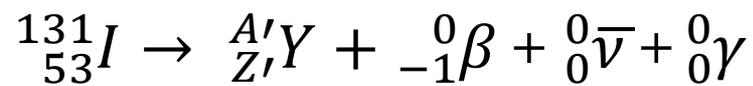
Tellure

Exercice 2

1. ^{125}I se désintègre par capture électronique et ^{131}I par émission β^- :



Déterminer les valeurs de A, A', Z et Z' ainsi que les noms des nucléides X et Y.



$$131 = A' + 0 + 0 + 0$$

$$A' = 131$$

$$53 = Z' - 1 + 0$$

$$Z = 54$$

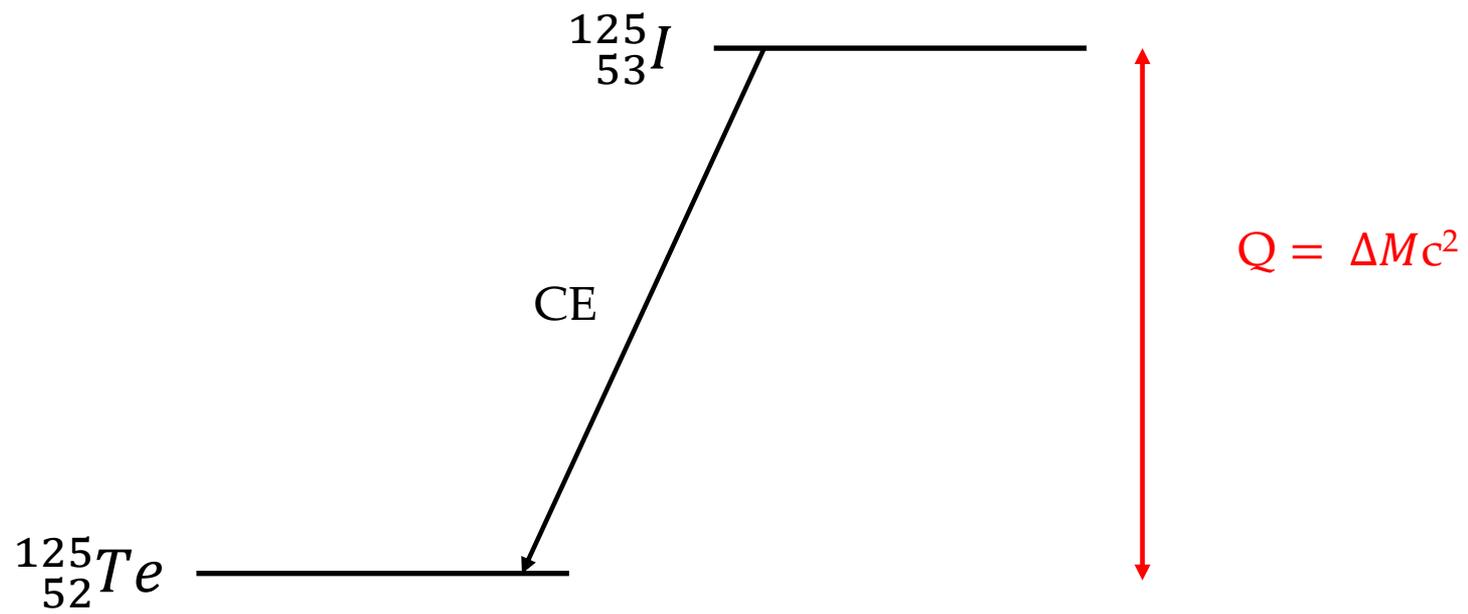
Élément	Z
Sb	51
Te	52
I	53
Xe	54
Cs	55

$$Y = \text{Xe}$$

Exercice 2

2. La désintégration de ^{125}I s'accompagne d'une émission secondaire de photons X. De quel élément ces photons sont-ils caractéristiques ?

Ces photons sont caractéristiques de l'élément Te.



Exercice 2

3. La période de ^{125}I est de 60 jours, celle de ^{131}I est de 8 jours. Calculer la constante radioactive de ces deux radionucléides en s^{-1} .

Pour ^{125}I :

$$\lambda_{125} = \frac{\text{Ln } 2}{T_{125}} = \frac{\text{Ln } 2}{60 \times 24 \times 3600} = 1,34 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$$

Pour ^{131}I :

$$\lambda_{131} = \frac{\text{Ln } 2}{T_{131}} = \frac{\text{Ln } 2}{8 \times 24 \times 3600} = 1,00 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

Exercice 2

4. Calculer le nombre d'atomes de ces deux radionucléides à t_0 .

Pour ^{125}I , à t_0 :

$$A_{0\ 125} = \lambda_{125} \cdot N_{0\ 125}$$

$$N_{0\ 125} = \frac{A_{0\ 125}}{\lambda_{125}} = \frac{7 \cdot 10^6}{1,34 \cdot 10^{-7}} = 5,22 \cdot 10^{13}$$

Pour ^{131}I , à t_0 :

$$A_{0\ 131} = \lambda_{131} \cdot N_{0\ 131}$$

$$N_{0\ 131} = \frac{A_{0\ 131}}{\lambda_{131}} = \frac{25 \cdot 10^6}{10^{-6}} = 2,49 \cdot 10^{13}$$

Exercice 2

5. a) Au bout de combien de temps (en jours) l'activité de ^{125}I sera-t-elle égale à l'activité de ^{131}I ?
b) Quelle sera la valeur de cette activité en MBq ?

Pour ^{125}I , à t_0 :

$$A_{0\ 125} \cdot e^{-\lambda_{125} t} = A_{0\ 131} \cdot e^{-\lambda_{131} t}$$

$$\frac{A_{0\ 125}}{A_{0\ 131}} = e^{(-\lambda_{131} + \lambda_{125}) t}$$

$$\text{Ln} \frac{A_{0\ 125}}{A_{0\ 131}} = (-\lambda_{131} + \lambda_{125}) t$$

$$t = \frac{1}{-\lambda_{131} + \lambda_{125}} \times \text{Ln} \frac{A_{0\ 125}}{A_{0\ 131}} = \frac{1}{1,34 \cdot 10^{-7} - 10^{-6}} \times \text{Ln} \frac{7}{25} = 1,469 \cdot 10^6 \text{ s} = 17 \text{ j}$$

Exercice 2

5. a) Au bout de combien de temps (en jours) l'activité de ^{125}I sera-t-elle égale à l'activité de ^{131}I ?
b) Quelle sera la valeur de cette activité en MBq ?

$$A_{131} = A_{0\ 131} \cdot e^{-\lambda_{131} t} = 25 \cdot 10^6 \cdot e^{-(10^{-6} \cdot 1,469 \cdot 10^6)} = 5,75 \text{ MBq}$$

Exercice 2

6. La désintégration nucléaire de ^{125}I aboutit uniquement à un niveau d'énergie excité du nucléide X qui se désexcite, soit par conversion interne (93,3 % des cas), soit par émission de photons γ de 35,5 keV (6,7 % des cas). Déterminer le flux énergétique de ces photons émis par la solution radioactive à t_0 .

Désintégration nucléaire de ^{125}I : 6,7 % γ ($E_\gamma = 35,5 \text{ keV}$)

Flux énergétique = puissance émise sous forme de rayonnement

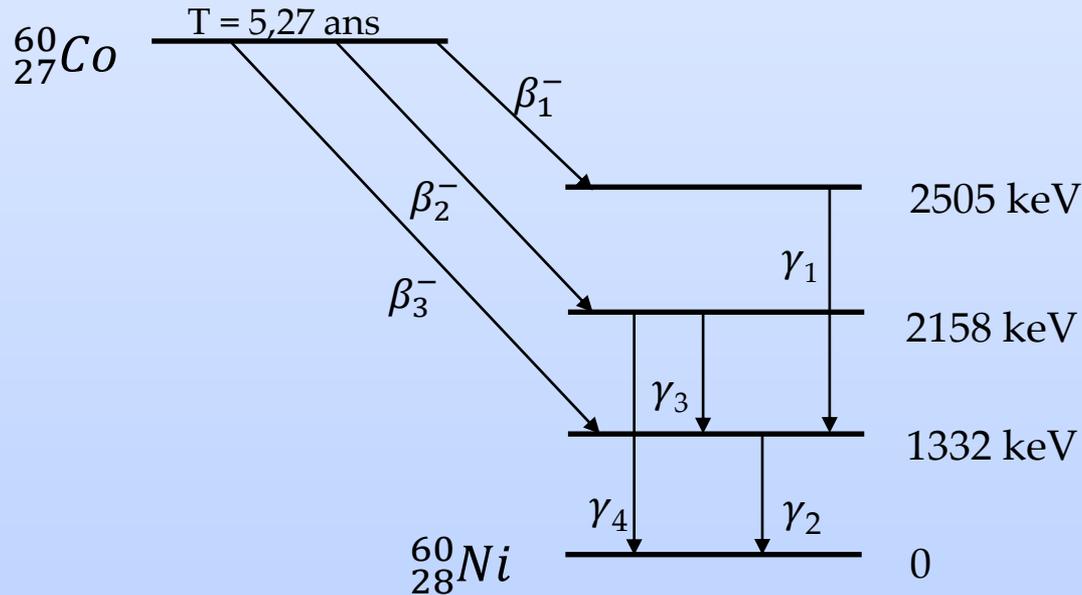
$$\Phi = A_0 \cdot 0,067 \cdot E_\gamma = 7 \cdot 10^6 \cdot 0,067 \cdot 35,5 \cdot 10^3 \cdot 1,60218 \cdot 10^{-19} = 2,67 \cdot 10^{-9} \text{ W}$$

*Pour mémoire : [eV] = [W*s]*

Exercice 3

Concours PACES 2012-13

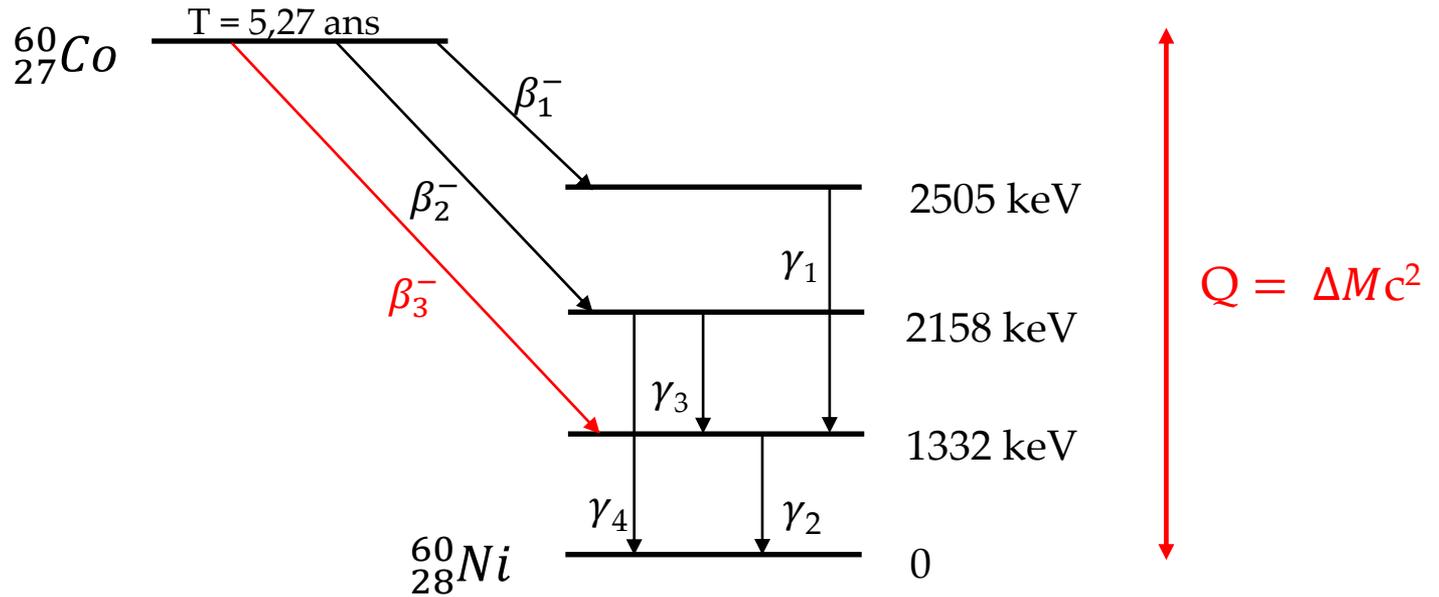
La figure ci-dessous donne le schéma de désintégration du cobalt 60. La différence entre les masses des atomes père et fils est de 0,003 u (1 u = 931,5 MeV/c²)



- A L'énergie maximale $E_{\beta_3^- \text{max}}$ de l'émission β_3^- est égale à 2,79 MeV
- B Au cours de la désintégration β^- , un proton se transforme en neutron
- C Le noyau de $^{60}_{28}\text{Ni}$ contient 32 neutrons
- D L'énergie du photon γ_1 est égale à 2505 keV
- E L'équation correspondant à la désintégration β_3^- s'écrit $^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow ^{60}_{28}\text{Ni} + {}_{-1}^0e + {}_0^0\bar{\nu}$

Exercice 3

A L'énergie maximale $E_{\beta_3^-}$ de l'émission β_3^- est égale à 2,79 MeV



$$E_{\beta_3^- \text{ max}} = \Delta mc^2 = \Delta Mc^2 - E_{\gamma_2} = 0,003 \times 931,5 - 1,332 = 1,463 \text{ MeV}$$

A : fausse

Exercice 3

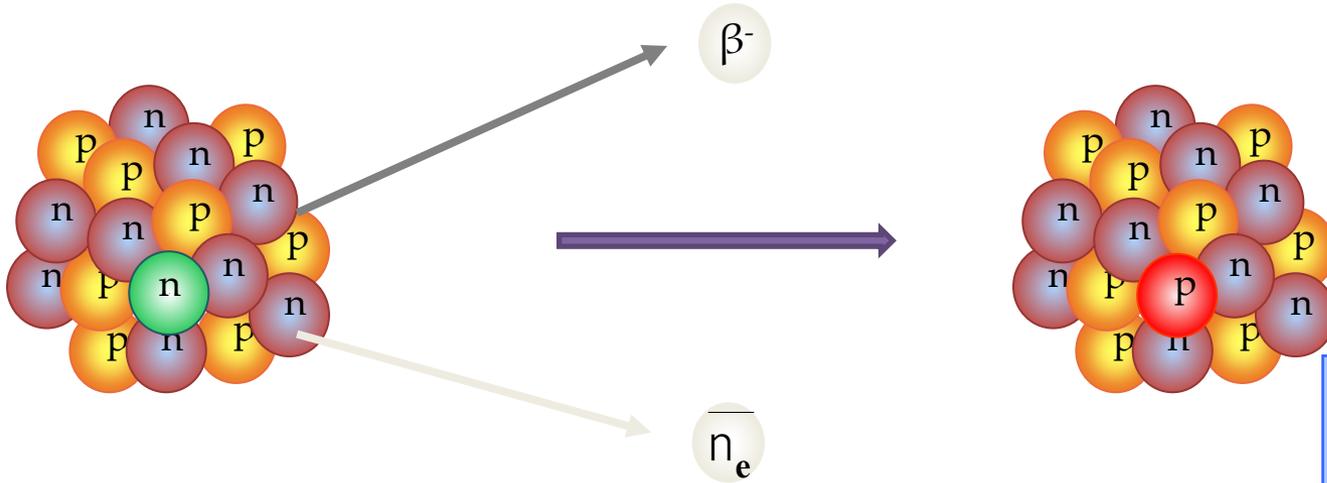
B Au cours de la désintégration β^- , un proton se transforme en neutron

Emission β^- : le nombre de **neutrons** est trop **important** par rapport à celui des protons, d'où l'instabilité nucléaire.

⇒ Mécanisme

Par interaction faible, un **neutron** se transforme en un **proton** avec émission d'une particule β^- et d'un **antineutrino** électronique

La particule β^- est un électron.



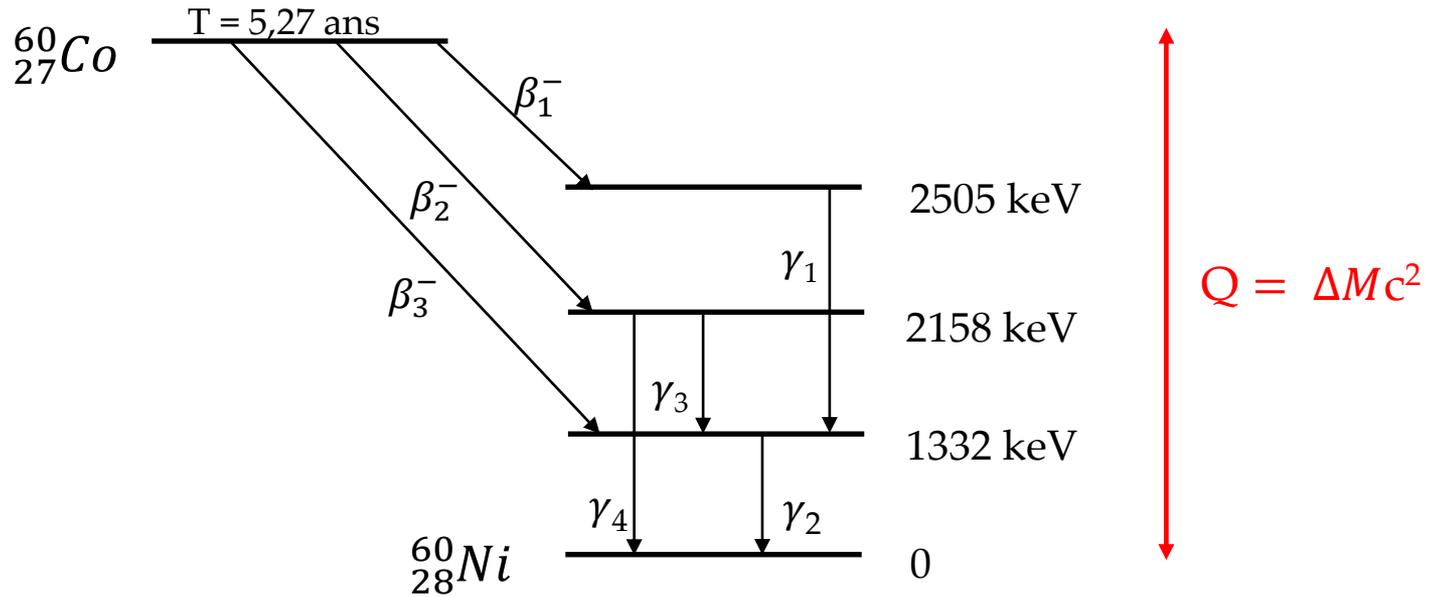
Désintégration β^-
Interaction faible



B : fausse

Exercice 3

C Le noyau de ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ contient 32 neutrons

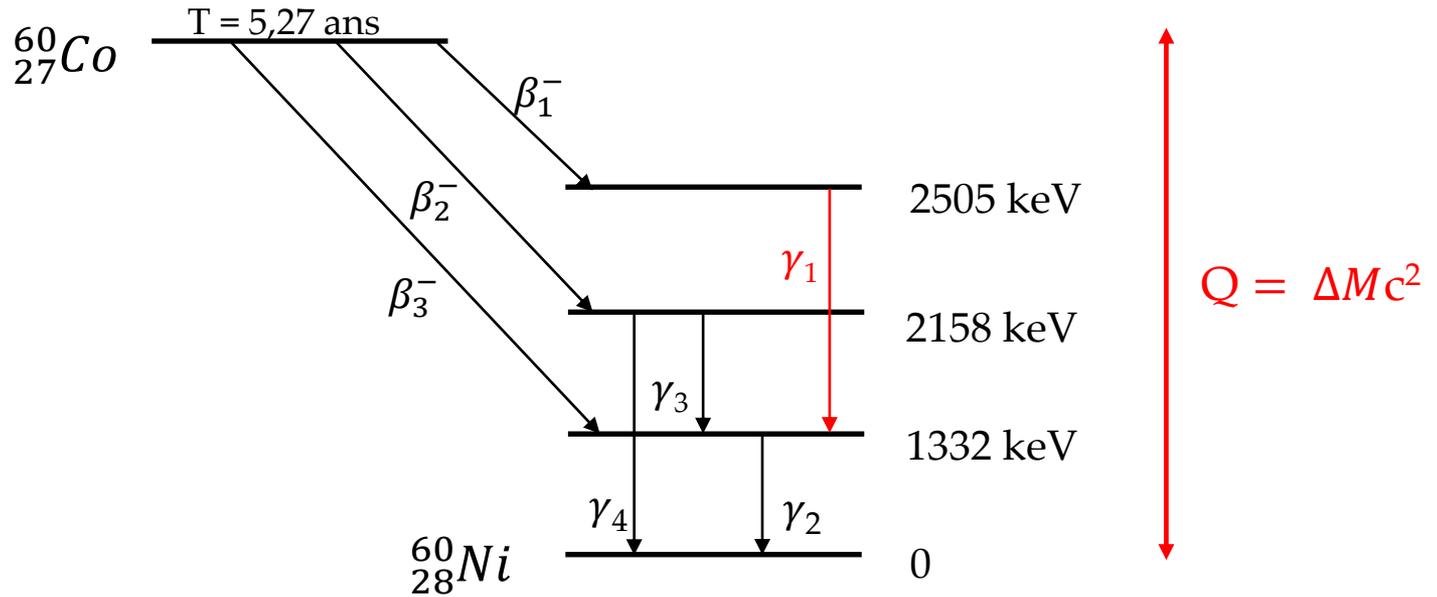


$$N = A - Z = 60 - 28 = 32$$

C : vraie

Exercice 3

D L'énergie du photon γ_1 est égale à 2505 keV

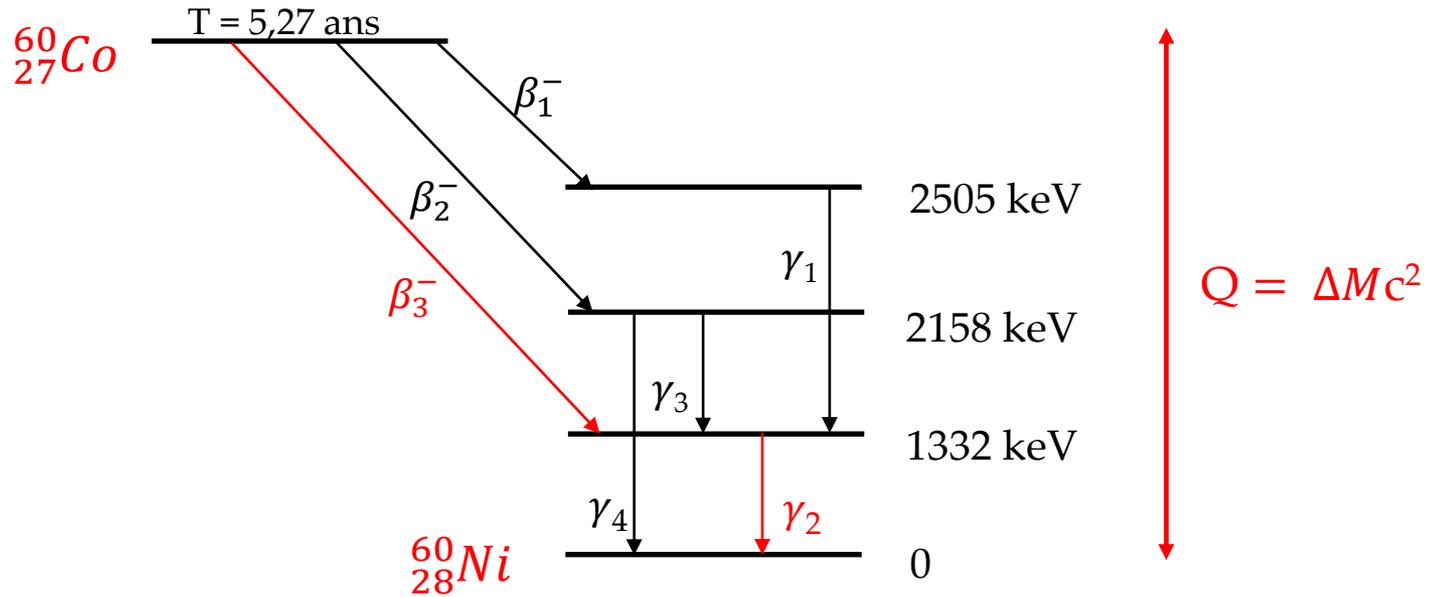


$$E_{\gamma_1} = 2505 - 1332 = 1773 \text{ keV}$$

D : fausse

Exercice 3

E L'équation correspondant à la désintégration β_3^- s'écrit ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + {}^0_{-1}\text{e} + {}^0_0\bar{\nu}$



E : fausse