



UE3a – Biophysique

Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

Un peu d'histoire :

- Röntgen : rayons X en 1895.
- Henri Becquerel, Marie et Pierre Curie : radioactivité NATURELLE, prix nobel en 1903
- Marie Curie : prix Nobel de chimie en 1911 pour avoir isolé le polonium et le radium
- Irène Joliot-Curie : radioactivité ARTIFICIELLE en 1934



ATTENTION :

- Les rayons X viennent du cortège électronique alors que la radioactivité vient du noyau.

Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

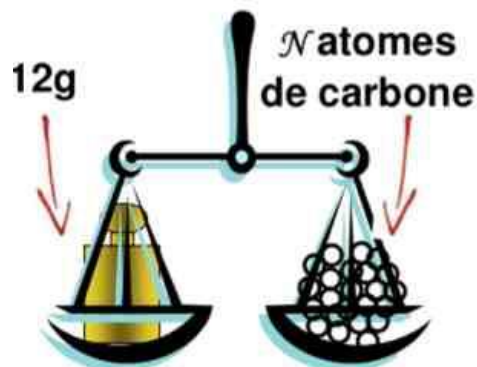
L'atome :



- Sa masse :

La masse molaire atomique (en g) : la référence est le carbone 12 donc 1 mole (N atomes, N étant la constante d'Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23}$) pèse 12g.

N x masse d'un atome en gramme = masse molaire atomique



L'atome :

- Sa masse :

L'unité de masse atomique (u) : définie comme $1/12^{\text{ème}}$ de la masse d'un atome de carbone 12, c'est donc l'inverse de la constante d'Avogadro.

$$1u = 1/N$$

| Masse | Hydrogène | Carbone | Oxygène |
|------------------------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| d'un atome en g | $0,17 \cdot 10^{-23}$ | $2 \cdot 10^{-23}$ | $2,65 \cdot 10^{-23}$ |
| d'une mole d'atomes en g <i>masse atomique</i> | 1,007 | 12 | 15,994 |
| d'un atome en unité de masse atomique | 1,007 | 12 | 15,994 |
| A nombre de masse (nombre de nucléons) | 1 | 12 | 16 |

L'atome

- Conclusion :

Le nombre de masse A est l'entier le plus proche de la masse atomique exprimée en gramme mais aussi de l'unité de masse atomique de l'atome.

Exercice !

QCM 1 : Un atome d' $^{12}_6\text{C}$...

- A) a une masse atomique d'environ 6 u
- B) a une masse molaire atomique de 12 g
- C) est composé de 12 neutrons
- D) est composé de 6 photons et 6 électrons
- E) A,B,C,D sont faux

Correction

QCM 1 : Un atome d' $^{12}_6\text{C}$

A) FAUX : $6u = 6 * 1,67.10^{-24} \text{ g} \neq 12 \text{ g}$

B) VRAI

C) FAUX : C(12 ;6) a 6 protons , 6 neutrons, 6 électrons et 12 nucléons

D) FAUX

E) FAUX

Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. **Masse et énergie**
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

Masse relativiste

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

m_0 = masse au repos;

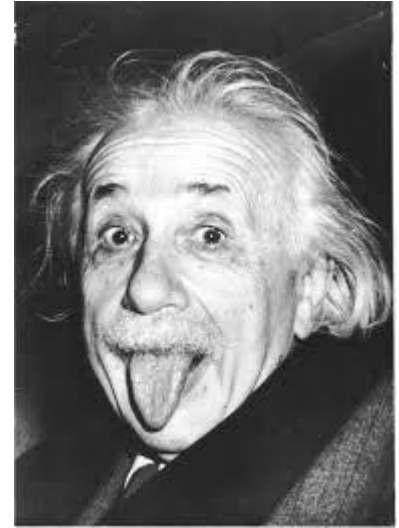
v = vitesse

c = vitesse de la lumière dans le vide ($3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

Quand $v \ll c$, $m \rightarrow m_0$

Tout objet en mouvement a une masse supérieure au repos du à son énergie cinétique.

Masse et énergie



- Energie de masse (Einstein) :

$$E_0 = m_0 c^2$$

En mouvement, l'objet en plus de son énergie de masse (E), l'objet acquiert aussi de l'énergie cinétique (E_C), on a donc une énergie totale (E_T) :

$$E_T = E_0 + E_C \quad \text{ou} \quad E_T = mc^2 \quad \text{avec } m \text{ la masse relativiste}$$

$$\text{Donc : } E_C = \Delta mc^2$$

Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. **Particules matérielles**
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

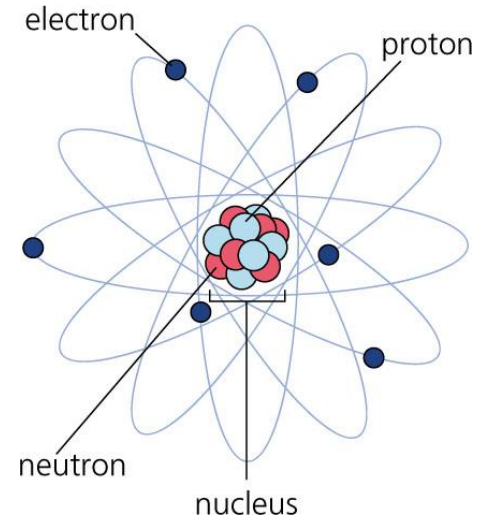
1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

L'électron (e^-)

- Electron, électron négatif $\neq \beta^-$



| Masse au repos | Masse relativiste | Charge |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| m_e $= 9,109 \cdot 10^{-28} \text{ g}$ $= \frac{1}{2000} \mathbf{u}$ | Pour $v = 0,5 c$ $m_e = 1,15 m_0$ | $- e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ |

L'électron (e^-)

- Masse-énergie : l'électronvolt

L'eV c'est donc l'énergie cinétique acquise par un électron sans vitesse initiale sous une différence de potentiel de 1 V .

$$\begin{aligned} 10^3 &= 1 \text{ keV} \\ 10^6 &= 1 \text{ MeV} \\ 10^9 &= 1 \text{ GeV} \end{aligned}$$

Équivalence masse -énergie:

$$1 \text{ u} = \frac{0,166 \cdot 10^{-26} \times (2,9979 \cdot 10^8)^2}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 931 \text{ MeV} / c^2$$

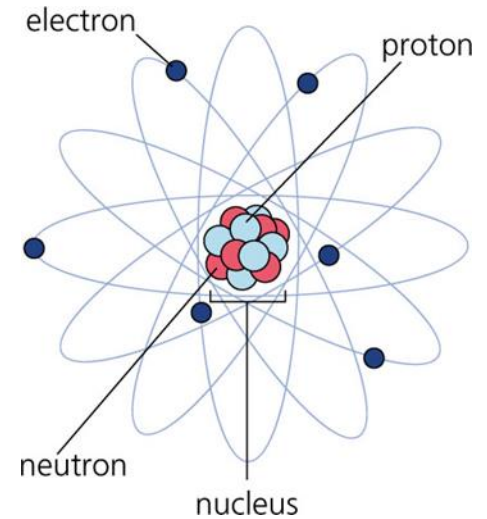
m en kg

1 eV en J

1 eV = 1.60 × 10⁻¹⁹ joules

Le proton (p^+)

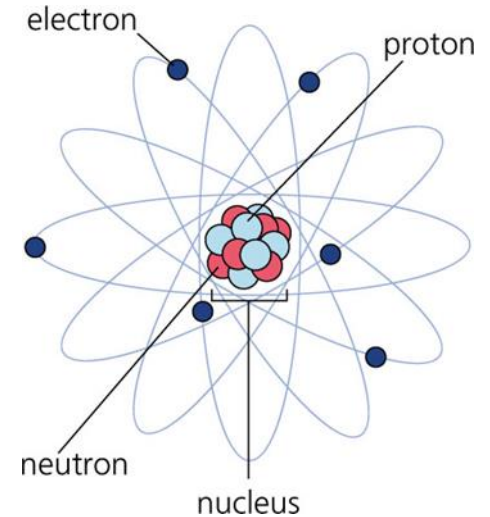
- Proton \neq positon ou β^+
 - Stable



| Masse au repos | Masse relativiste | Charge |
|-------------------------|-------------------|----------------------------------------|
| $m_p = 1,007 \text{ u}$ | Non relativiste | $+ e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ |

Le neutron (n^0)

- Stable DANS le noyau
- Instable HORS du noyau



| Masse au repos | Masse relativiste | Charge |
|-------------------------|-------------------|---------------|
| $m_n = 1,009 \text{ u}$ | Non relativiste | Pas de charge |

La particule alpha (α)

- La particule α est en fait le ${}^4_2\text{He}$ qui a perdu ses deux électrons, on l'écrit donc : He^{2+}
- NOYAU et non atome ou nucléon.

| Masse au repos | Charge |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| $m_\alpha = 4,0015 \text{ u}$ | $3,204 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (2 fois celle du proton !) |

Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

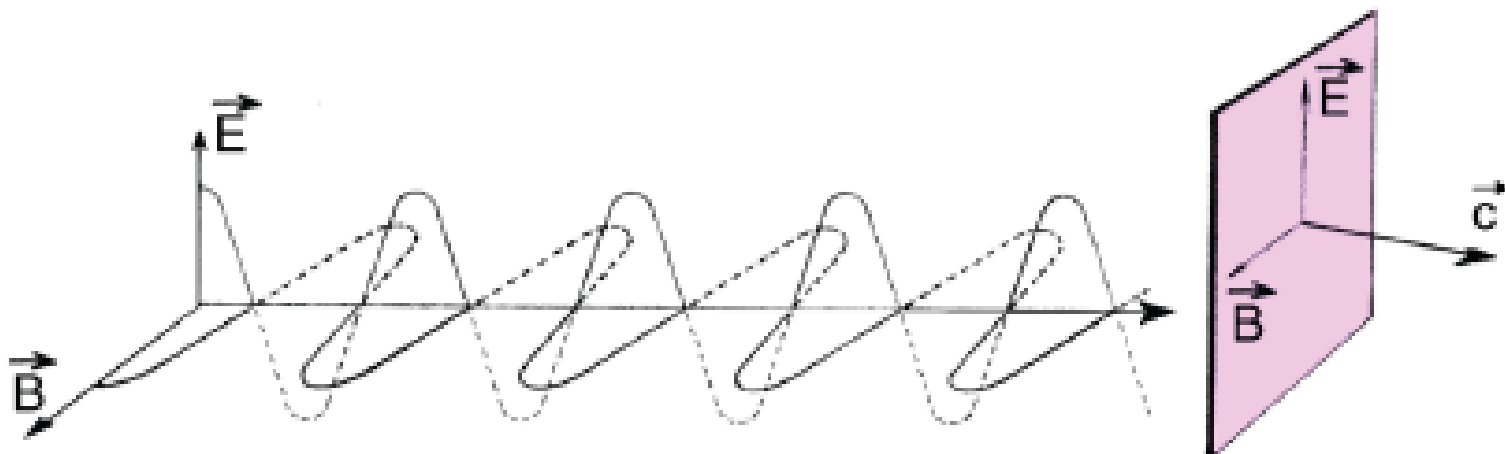
C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

Définition

- Perturbations du champ électromagnétique qui se propage dans le vide à la vitesse de la lumière.

Elles résultent de la propagation d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui vibrent en phase, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre et par rapport à la direction de propagation.

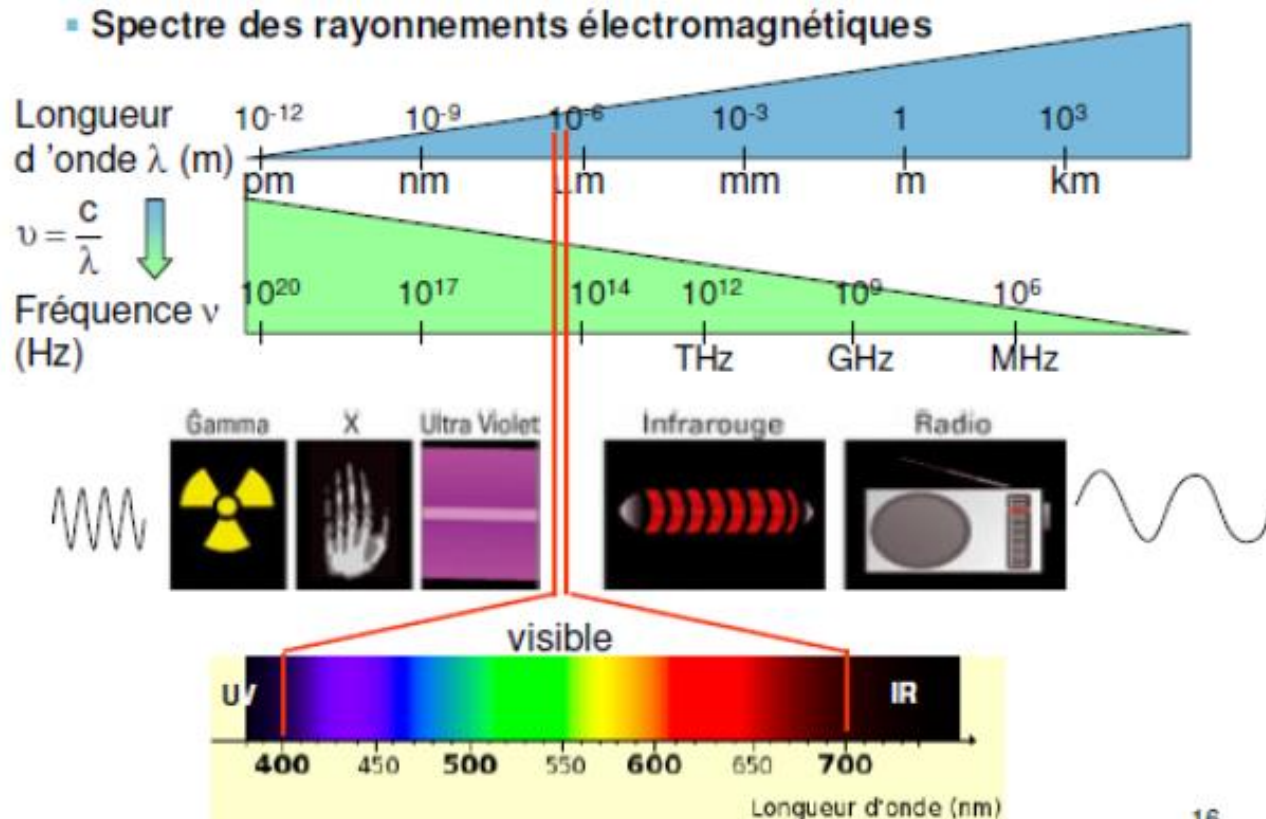


Longueur d'onde et fréquence

- Définition :
 - Longueur d'onde (λ) en m: la plus petite distance qui sépare 2 points d'un même état vibratoire
 - Fréquence (ν) en Hz ou s^{-1} : mesure du nombre de fois qu'un phénomène périodique se reproduit par unité de temps

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Spectre des rayonnements électromagnétiques



Le seul moyen de distinguer un photon X d'un gamma ce n'est pas son énergie mais bien son origine : du cortège pour le X, du noyau pour le gamma !

ATTENTION :

- Les rayons X viennent du cortège électronique alors que la radioactivité vient du noyau.
- Les rayons X viennent du cortège, les photons gamma viennent du noyau.

Représentation quantique

- Le quantum de Planck (1901)

Ces rayonnement particulaire transporte de l'énergie selon des quantités discontinues et multiple entiers d'un nombre élémentaire : la constante de Planck

$$E = h\nu$$

avec $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} (= 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s})$

E en Joules

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

- Duane et Hunt

$$E \text{ (eV)} = \frac{1240}{\lambda \text{ (nm)}}$$

Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

Einstein et Louis de Broglie

- Les ondes électromagnétiques peuvent être considérées comme de nature corpusculaire: les photons (Einstein 1905)

$$E = mc^2 = \frac{hc}{\lambda} \text{ donc } m = \frac{h}{\lambda c}$$

- A chaque particule peut être associée une représentation ondulatoire (Louis de Broglie 1924)
-

Donc : $\lambda = \frac{h}{mv}$ avec v la vitesse de la particule en $m \cdot s^{-1}$

Exercice !

QCM 2 : Quelle est l'énergie d'un photon de longueur d'onde $8 \cdot 10^{-7} \text{m}$?

- A) 1,55 eV
- B) $2,48 \cdot 10^{-19}$ eV
- C) $15,5 \cdot 10^9$ J
- D) $2,48 \cdot 10^{-19}$ J
- E) 0 eV

Pour répondre :

$$E \text{ (eV)} = \frac{1240}{\lambda \text{ (nm)}}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} (= 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s})$$

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ joules}$$

Correction

- $E = 1240/8 \cdot 10^2 = 155 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$
- Réponse A VRAI
- $1,55 \times 1,6 \times 10^{-19} = 2,48 \cdot 10^{-19} \text{ Joules}$
- Réponse D VRAI

- A) VRAI
- B) FAUX
- C) FAUX
- D) VRAI
- E) FAUX

Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

Modèle de Rutherford (1911)

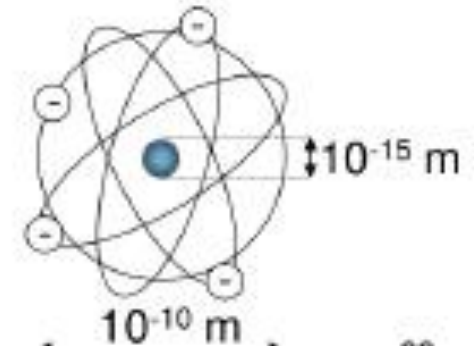
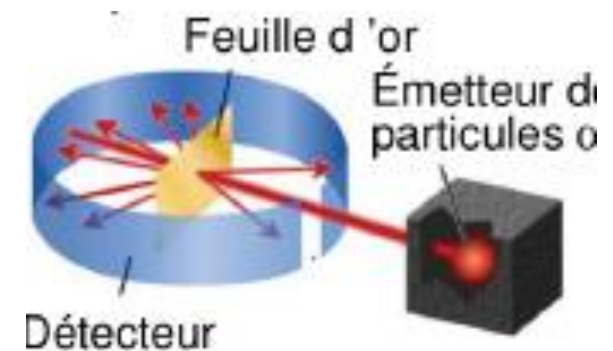
- **Expérience :**

un émetteur envoie des particules alpha sur une feuille d'or et la quasi-totalité des particules la traverse et finissent sur le détecteur. Donc la matière est pleine de vide.

- **Modèle :**

Noyau : 10^{-15} m chargé positivement

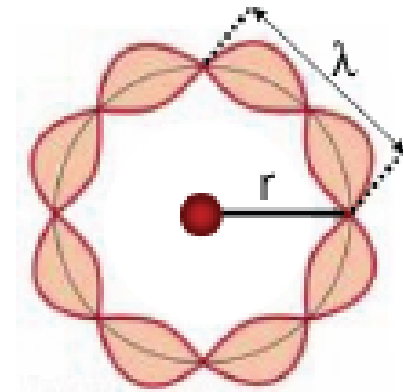
Atome : 10^{-10} m



Modèle de Bohr

- **Modèle :**

il associe l'électron à une particule qui circule sur une orbite (espace fermé circulaire). Etant ondulatoire, il faut donc qu'un nombre entier de longueur d'onde « rentre » sur une circonférence de l'orbite (périmètre du cercle).



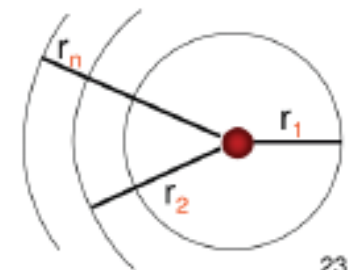
- **Conséquences :**

Il doit être un multiple entier de sa longueur d'onde λ :

$$l = 2\pi r = n\lambda$$

Les électrons sont positionnés sur des orbites discrètes.

L'intensité de la liaison au noyau dépend de l'orbite.

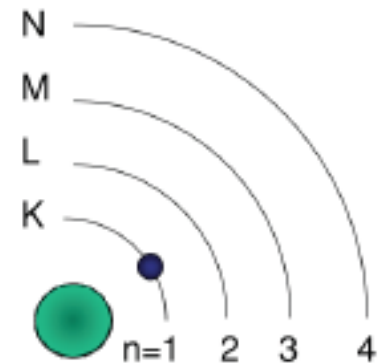


23

Energie de l'électron

- A l'état fondamental les électrons occupe toujours les couches les plus basses avant les autres. Pour passer d'une couche a l'autre l'électron a besoin d'un quantum d'énergie.
- L'énergie de l'électron est négative, il est dans un puits d'énergie.
- Son énergie de liaison est positive : c'est l'énergie qu'il faut apporter pour l'arracher de son puits.

$$W_n = -13,6 \frac{1}{n^2} \text{ eV}$$



Exemple

| | | | | | |
|------------------------------|----------|------------------------|------------------------|-------------------------|--|
| n | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| r (10⁻¹⁰m) | 0,5 | 2 | 4,5 | 8 | |
| Orbite | K | L | M | N | |
| W_n (eV) | -13,6 | -3,4 | -1,5 | -0,8 | |
| | | W_K/4 | W_K/9 | W_K/16 | |

$$W_L - W_K = -3,4 + 13,6 = 10,2 \text{ eV.}$$

Donc si on « donne » 10,2 eV a l'atome on pourra voir le passage de l'électron de la couche K vers la couche L.

ATTENTION :

- Les rayons X viennent du cortège électronique alors que la radioactivité vient du noyau.
- Les rayons X viennent du cortège électronique, les photons gamma viennent du noyau.
- L'énergie de l'électron est négative alors que l'énergie de liaison de l'électron est positive.

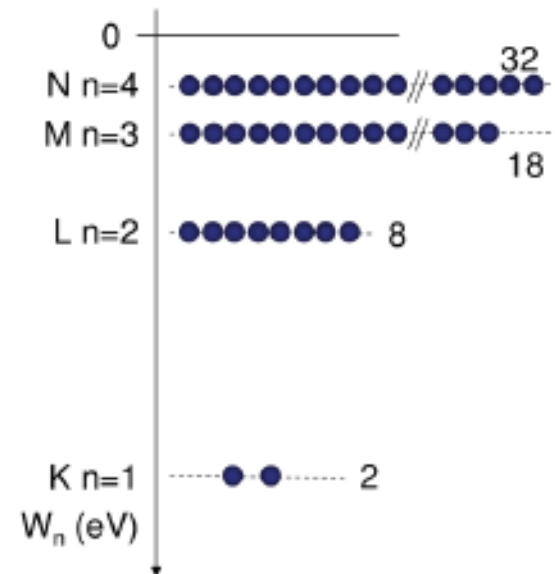
Effet écran

En réalité, le cortège électronique modifie l'interaction noyau/électron par un « effet écran », pour en tenir compte:

$$W_n = -13,6 \frac{(Z - \sigma)^2}{n^2} \text{ eV} \quad (2)$$

avec la « constante d'écran » σ

Le remplissage des couches se fait par $2n^2$ électrons au maximum !



Conclusions

- Les électrons K sont plus fortement liés, mais leur énergie varie beaucoup selon les atomes (selon Z^2 , à σ^2 près)
- Les électrons externes sont moins fortement liés mais leur énergie varie peu selon les atomes
- Lorsque les couches les plus basses sont complètes l'atome est dans son état fondamental

Exercice

**QCM 3 : Le $^{40}_{20}\text{Ca}$ a une constante d'écran de 16 .
Le puits d'énergie sur la couche L est :**

- A) 108.8 eV
- B) 54,4 eV
- C) -13,6 eV
- D) - 54,4 eV
- E) 0 eV

Pour répondre:

$$W_n = -13,6 \frac{(Z - \sigma)^2}{n^2} \text{ eV}$$

Correction

- $W_n = -13,6 \frac{(20-16)^2}{2^2} = -54,4 \text{ eV}$

– Réponse D VRAI

A) FAUX

B) FAUX

C) FAUX

D) VRAI

E) FAUX

Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

Atome et rayonnement

Rayonnement →

collision avec un atome (ses électrons+++) →

absorption d'énergie →

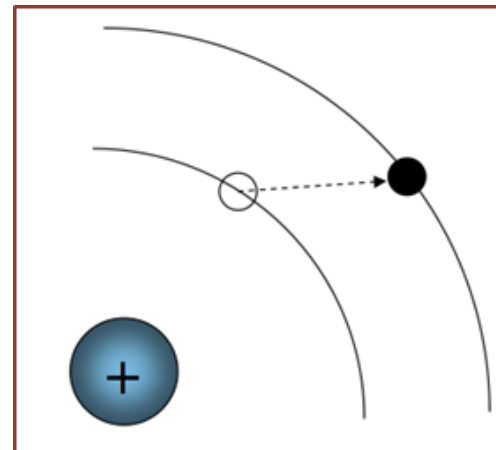
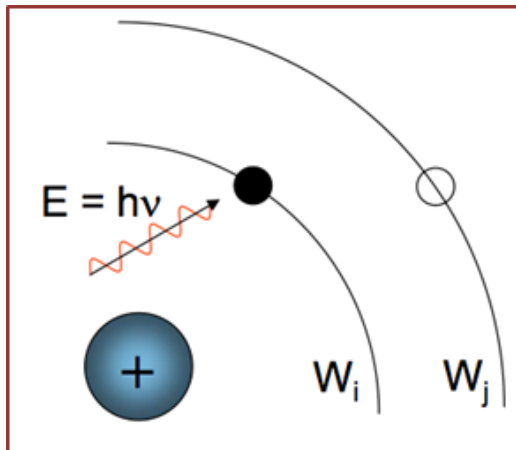
ionisation ou excitation →

restitution d'énergie →

Retour a l'état fondamental

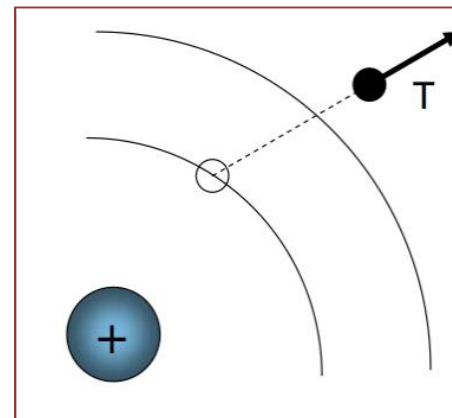
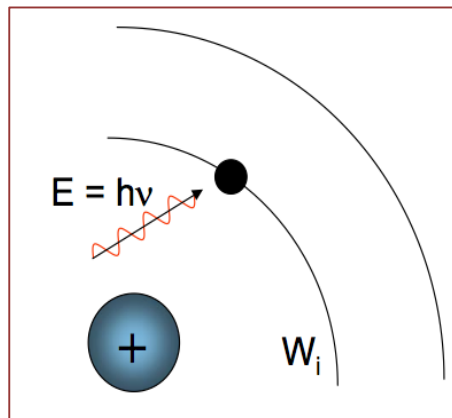
Absorption d'énergie : Excitation

- Si $E = h\nu < |W_i| = |W_i| - |W_j|$
- Alors l'électron change d'orbitale atomique
- L'atome quitte son état fondamental (état excité)
- L'énergie absorbée est quantifiée !



Absorption d'énergie : Ionisation

- Si $E = h\nu \geq |W_i|$
- Alors l'électron est expulsé de l'atome
- L'atome quitte son état fondamental : ionisation
- L'électron a une énergie cinétique $T = E - |W_i|$
- L'énergie absorbée n'est pas quantifiée



Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

Atome instable : son retour au fondamental

Atome ionisé ou excité →

Emission d'énergie par fluorescence ou électron

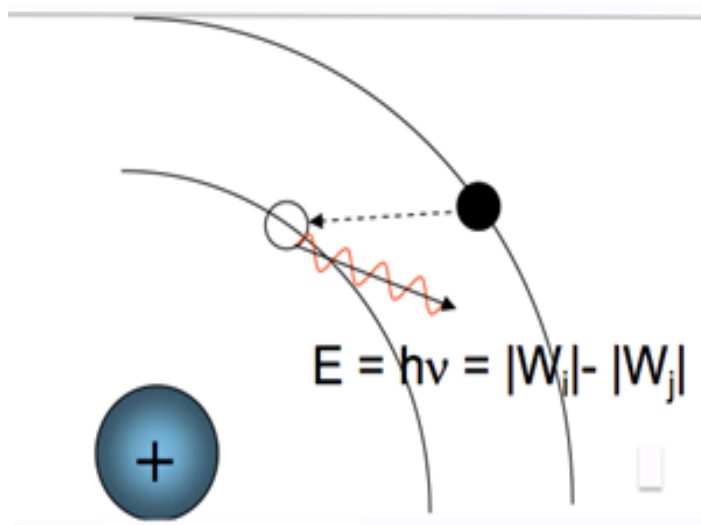
Auger →

Retour au fondamental (plus stable)

- Architecture initiale
- Restitue l'excès d'énergie

Emission d'énergie : photons de fluorescence

- Après excitation :
 - un électron d'une orbitale lointaine vient comblé la case quantique vacante
 - l'énergie du photon émis vaut



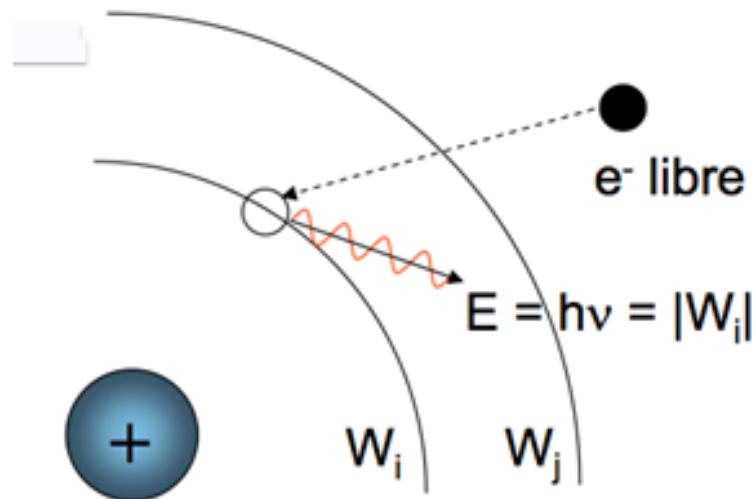
$$E = hv = |W_i| - |W_j|$$

Emission d'énergie : photons de fluorescence

- **Après ionisation :**

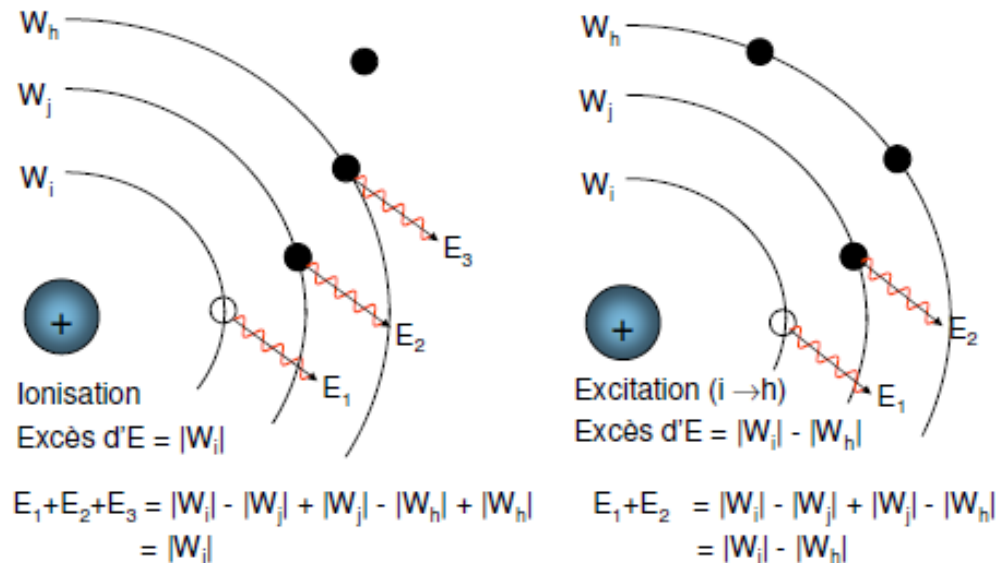
- un électron libre vient comblé la case quantique vacante.

- l'énergie du photon émis vaut **$E = h\nu = |W_i|$**



Emission d'énergie : photons de fluorescence

- Le retour au fondamental peut se faire par plusieurs réarrangements successifs (en cascade) !
- Énergies quantifiées = spectre de raies.



Le tutorat est gratuit. Toute copie ou vente est interdite.

Exemple :

Les énergies de liaison des électrons de l'atome du potassium 19K (dans le model de Bohr) sont :

$$W_K = - 3,6 \text{ keV}, W_L = - 0,2 \text{ keV} \text{ et } W_M = - 0,03 \text{ keV}.$$

Après une ionisation de l'atome sur sa couche K :

L'électron de la couche M peut remplir la case, émettant un photon : $E = |W_K| - |W_M| = 3,57 \text{ keV}$

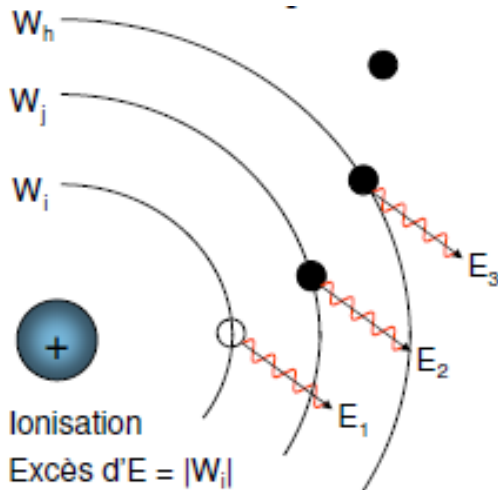
Puis : l'électron libre peut remplir la l'orbitale M vacante, émettant un photon : $E = |W_M| = 0,03 \text{ keV}$

L'électron de la couche L remplit la case K vacante : $E = |W_K| - |W_L| = 3,4 \text{ keV}$

Puis : l'électron de la couche M remplit la case L vacante : $E = |W_L| - |W_M| = 0,17 \text{ keV}$

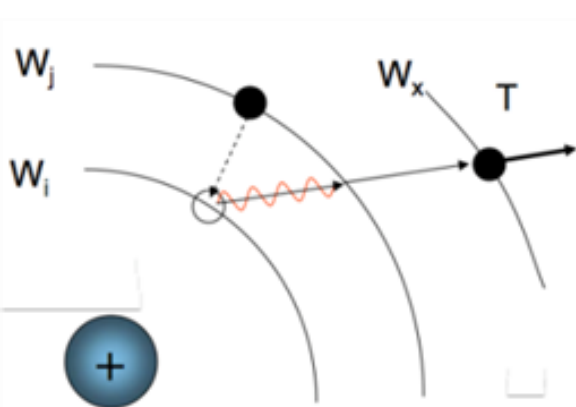
Puis : l'électron libre remplit la case M vacante : $E = |W_M| = 0,03 \text{ keV}$

L'électron libre remplit la case K vacante : $E = |W_K| = 3,6 \text{ keV}$



Emission d'énergie : électron Auger

- Un photon de fluorescence peut lui-même expulser un électron : ce sera l'électron Auger.
- Puis réorganisation pour retrouver l'état fondamental.
- **Après excitation :**



- photon de fluorescence d'énergie $E = h\nu = |W_i| - |W_j|$
- expulse un électron de la couche x
- Energie de l'électron Auger :

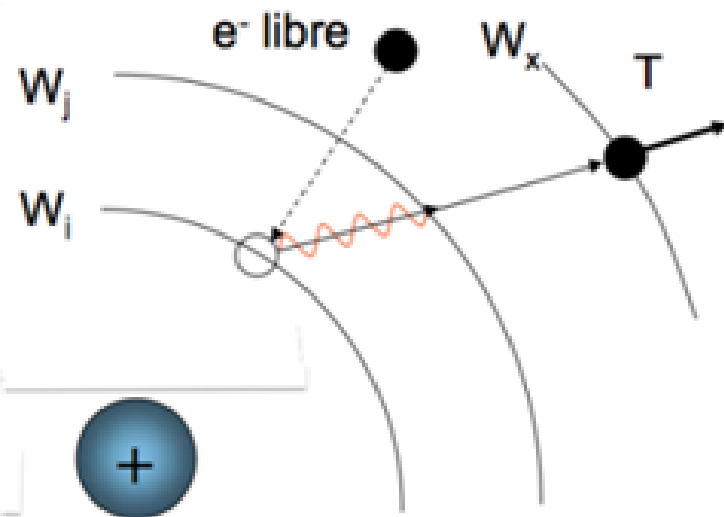
$$T = E - |W_x| = h\nu - |W_x| = |W_i| - |W_j| - |W_x|$$

Emission d'énergie : électron Auger

- Après ionisation :

- électron libre vient combler la case quantique, photon de fluorescence d'énergie $E = h\nu = |W_i|$
- expulse un électron d'une orbitale périphérique
- Cet électron possède alors une énergie cinétique :

$$T = E - |W_x| = h\nu - |W_x| = |W_i| - |W_x|$$



Exercice

QCM 4 : On considère l'atome de carbone $^{12}_6\text{C}$

Après excitation, un électron fait une transition de la couche L à la couche K. Ce faisant, il entraîne l'émission d'un photon qui entrera lui même en collision avec un électron d'une couche plus externe de la structure, produisant donc un électron Auger.

On rappelle : $W_K = - 422,3\text{eV}$ $W_L = - 109,6\text{eV}$

Quelle peut être l'énergie de cet électron Auger ?

- A) 312,7 eV
- B) 203,1 eV
- C) 61,4 eV
- D) 374,1 eV
- E) A,B,C,D sont faux

Correction

Energie du photon: $E = |W_K| - |W_L| = 312,7 \text{ eV}$

Si l'électron Auger vient de la couche L :

$$T = E - |W_L| = |W_K| - |W_L| - |W_L| = 203,1 \text{ eV}$$

- réponse B VRAI

- A) FAUX
- B) VRAI
- C) FAUX
- D) FAUX
- E) FAUX

Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

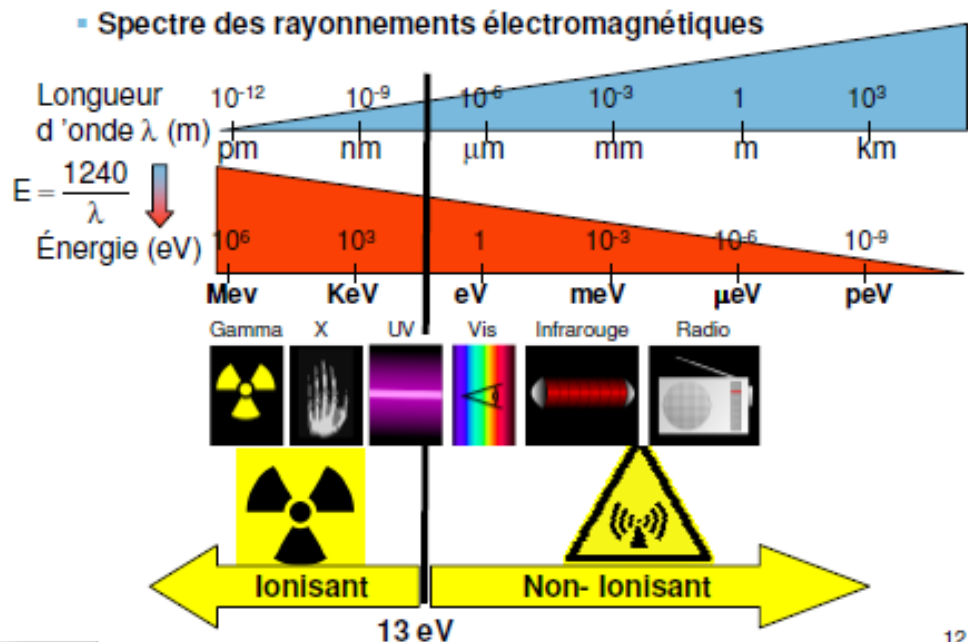
1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

Définition

- Rayonnement électromagnétique ou corpusculaire capable de produire directement ou indirectement des ions, lors de leur passage à travers les atomes et les molécules.
- Son énergie doit être supérieure à 13,5 eV environ (donc les Gamma, X et UV)
- Intérêt biologique !



Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

Expression de la loi

Définition : donne la quantité de photons qui « sortent » de l'échantillon d'épaisseur x sans avoir été atténués (de façon probabiliste)

$$N(x) = N(0) e^{-\mu x}$$

- $N(x)$ nombre de photons transmis
- $N(0)$ nombre de photons initial
- μ coefficient linéique d'atténuation (en m^{-1}). Il représente une probabilité d'interaction et dépend de l'état du milieu.

Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

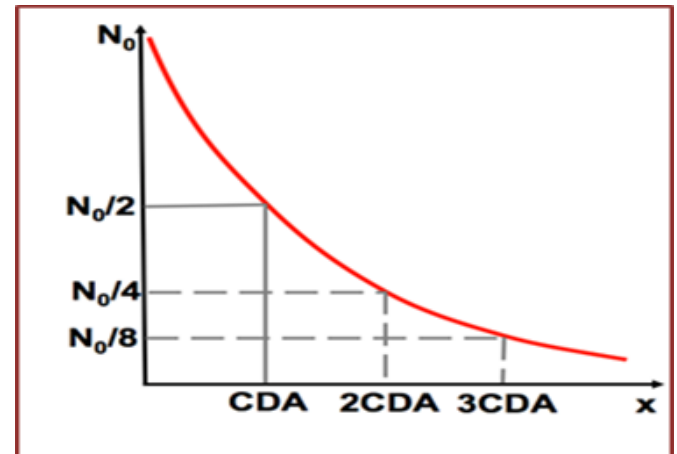
C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

CDA

- Définition : épaisseur de matière qui « arrête » la moitié des photons du faisceau.
→ A chaque fois que l'on rajoute une CDA de matière, on divise par 2 le nombre de photons du faisceau.

$$N(k. CDA) = \frac{N(0)}{2^k}$$



Au bout de 10 CDA on considère que la totalité du faisceau est atténué !

Donc : Après 1 CDA il reste 50% ; Après 2 CDA il reste 25% ; Après 3 CDA il reste 12,5%

Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

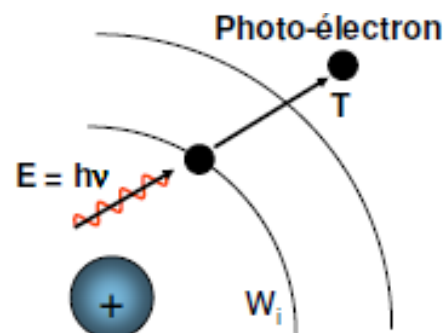
C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

Effet photo-électrique

- La TOTALITE de l'énergie du rayon de photon incident est transmise à un électron qui est expulsé. C'est un photo-électron.

- ionisation de la matière
- réarrangements électroniques



- Le photo-électron part avec une énergie cinétique

$$T = h\nu - |W_i|$$

qui va se dissiper au contact des autres atomes en les ionisant.

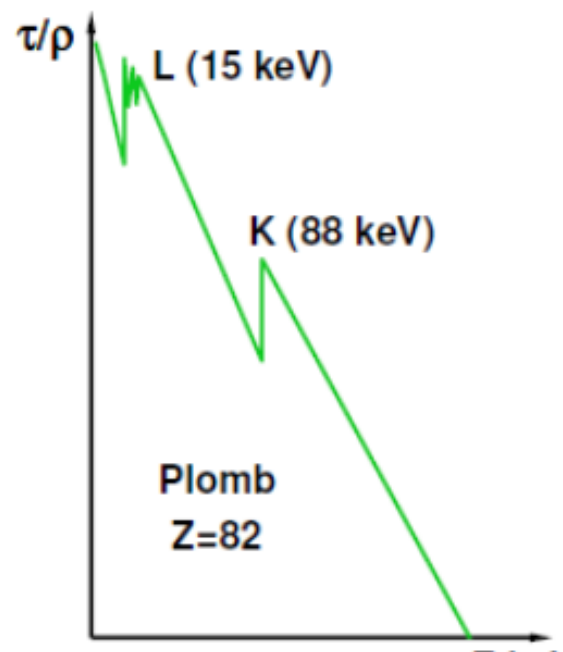


Effet photo-électrique

- Probabilité :

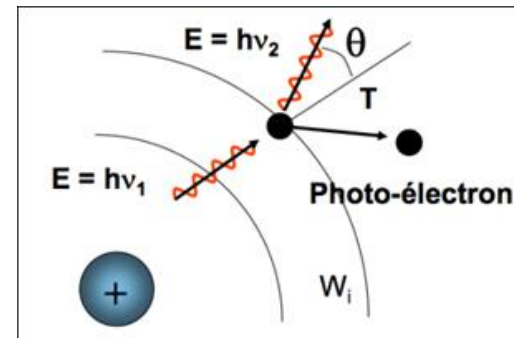
- Augmente quand E diminue
- Augmente quand Z augmente
- Pic = énergies de liaisons

$$\frac{\tau}{\rho} = k \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$$



Effet Compton

- Une PARTIE de l'énergie du faisceau incident est transmise à un électron qui est expulsé, c'est un photo-e- avec une énergie cinétique $T = h\nu_1 - |W_i| - h\nu_2$.
 - ionisation de la matière
 - réarrangements électroniques
- Une autre partie de cette énergie est diffusée via un photon ($E = h\nu_2$)

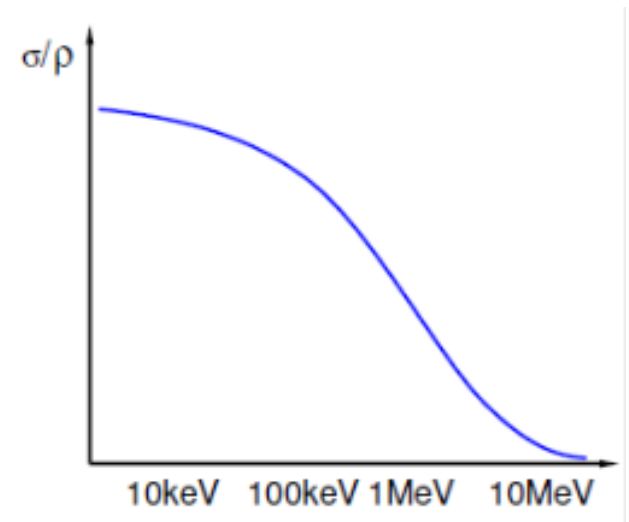


- Le photo-e- perd peu à peu de son énergie cinétique par ionisations successives.

Effet Compton

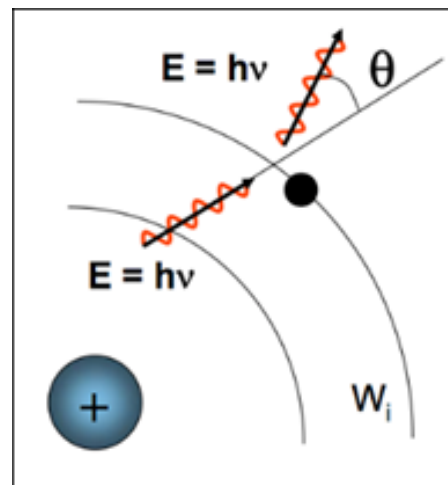
- Lois de Compton :
 - T est maximum si le choc est frontal
 - T est faible si le choc est tangentiel
- Probabilité :
 - Augmente quand E diminue
 - Indépendante de la matière

$$\frac{\sigma}{\rho} = k \frac{1}{h\nu}$$



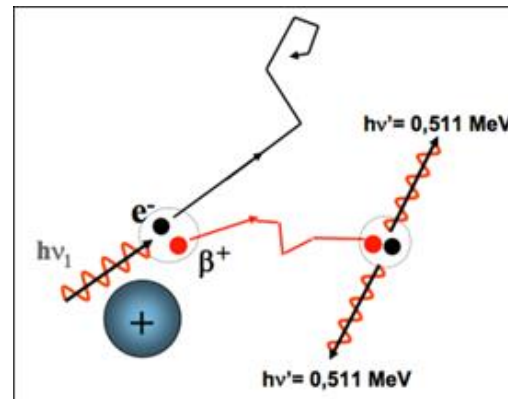
Diffusion de Thomson-Rayleigh

- Simple changement de direction sans changement d'énergie ni de longueur d'onde.
 - Important pour les photons peu énergétiques
 - Négligeable pour les photons très énergétiques



Création de paires

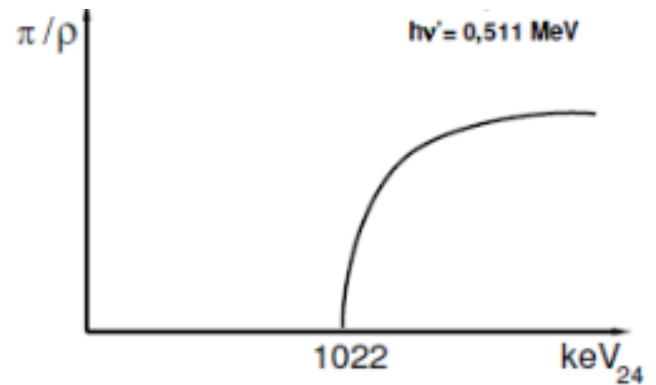
- Lorsqu'un faisceau de photon d'énergie **supérieure à 1022keV** passe à proximité d'un noyau, il voit son énergie transformée en 2 particules :
particule e^- et antiparticule β^+ =positon.



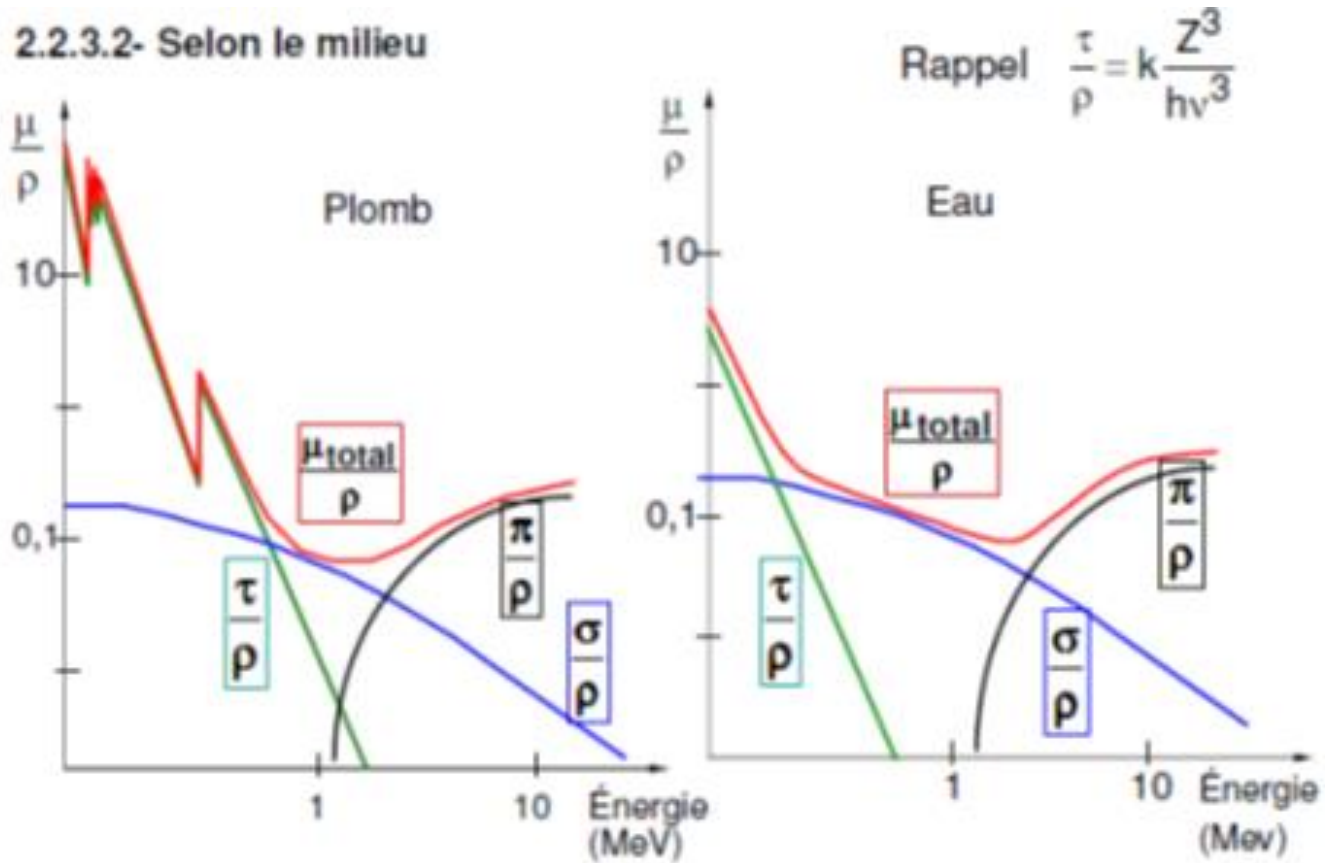
- Ces 2 particules se désintègrent rapidement en 2 photons chacun d'énergie égale à **511keV**.

Création de paires

- Probabilité :
 - π/ρ existante seulement à partir d'une énergie **$E > 1022 \text{ keV}$**



Probabilité et matière traversée



Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

Interaction des neutrons

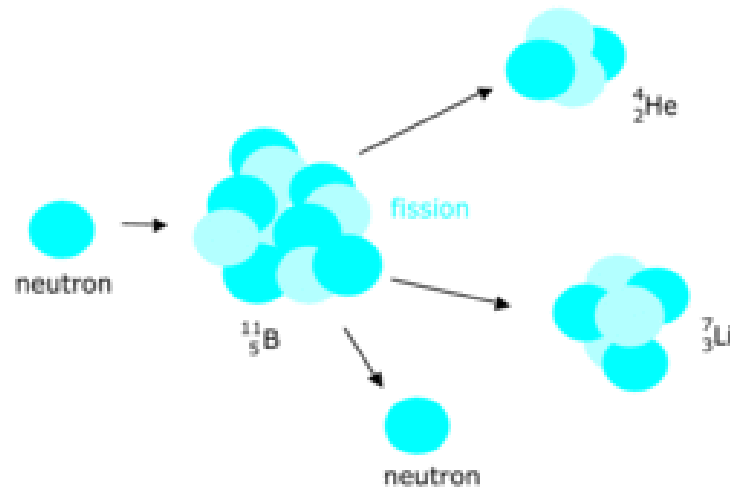
- Interactions avec les noyaux
- Faible probabilité
- Très pénétrants

Neutrons rapides :

- dans un milieu riche en H, par collision avec son noyau l'atome par expulsion du proton pourra a son tour être a l'origine d'ionisation.
- Dans un milieu de noyau lourd, le neutron rebondira, il n'y aura pas d'ionisations.

Interaction des neutrons

- **Neutrons lents** : s'incorpore ou est absorbé par un noyau, cela peut induire des transformations radioactives (capture radiative).



Particules, ondes, atomes et rayonnements ionisants.

I) Particules, ondes et atomes

1. Historique
2. Généralités et unités
3. Masse et énergie
4. Particules matérielles
5. Rayonnements électromagnétiques
6. Dualité onde-particule
7. Structure électronique de l'atome

II) Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interactions élémentaires

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Emission d'énergie par l'atome
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

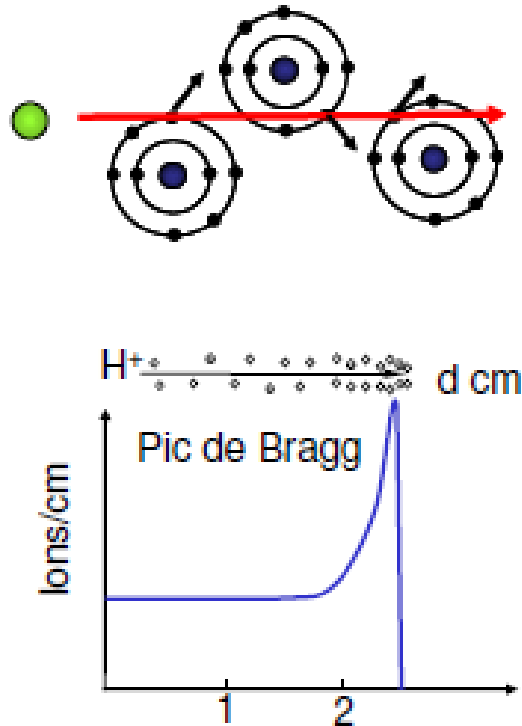
1. Loi d'atténuation
2. Couche de demi-atténuation (CDA)
3. Mécanisme d'atténuation

C. Interactions des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

Interactions des particules chargées

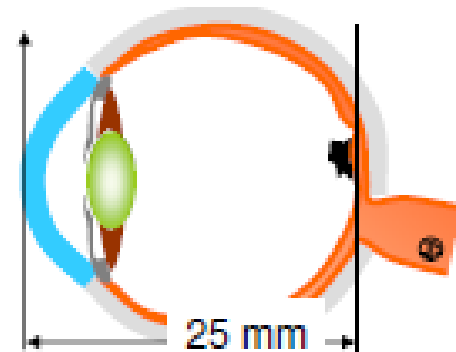
- Directement ionisante
- Parcours rectiligne
- Maximum d'ionisation en fin de parcours = pic de Bragg



Application : la radiothérapie

- Chaque rayonnement a un pic de Bragg a une distance particulière

Exemple d'application: la protonthérapie des mélanomes de l'œil



- Donc : un maximum d'ionisations au cœur d'une tumeur par exemple tout en préservant les tissus environnants.

Interactions des particules chargées

- **Les électrons :**

- Interaction électron-électron : « arrêt par collision ».
 - dépend de l'énergie cinétique de l'électron incident qui arrive sur l'électron installé sur son orbitale atomique avec son énergie de liaison W_i .
- **si $E_c < |W_i| - |W_j|$:** l'énergie cinétique est insuffisante pour le déloger. Il reste alors sur son orbitale atomique. On observe tout de même une vibration et l'émission de chaleur.
- **si $E_c > W_i$:** l'électron de l'orbitale atomique est expulsé : ionisation
- **si $E_c = |W_i| - |W_j|$:** l'énergie est suffisante pour faire passer l'électron de l'orbitale sur une autre orbitale : excitation
- Lors du retour à l'état fondamental, un photon de fluorescence est produit selon **un spectre de raie** . C'est ce que l'on appelle **un rayon X** dont **l'énergie est quantifiée et dépend de la cible** (des énergies de liaison des électrons du cortège électronique des atomes de la cible)

Interactions des particules chargées

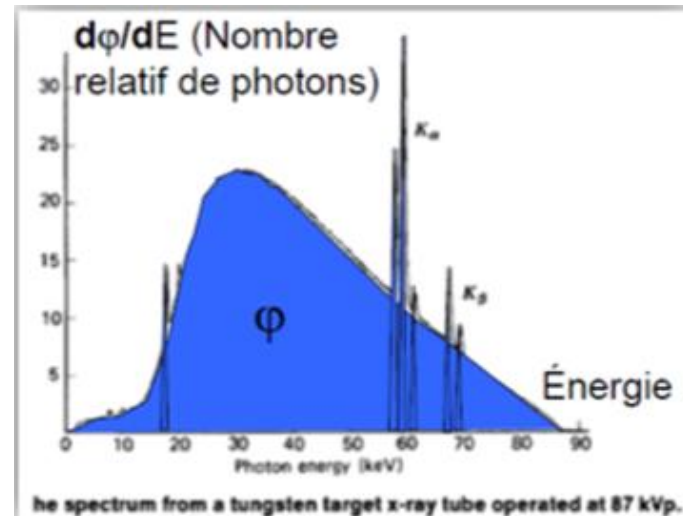
- Les électrons :
 - Interaction électron-noyau : « arrêt par freinage ».

L'électron va alors être dévié par ce noyau et va subir une accélération centripète.

Produit un rayonnement $h\nu$ (un photon) à partir de l'énergie cinétique de l'électron incident, avec une énergie **comprise entre 0 et E_c** mais qui n'est pas quantifiée. Le spectre d'émission est **donc continu** (plusieurs valeurs possibles qui créent une courbe continue)

Création des rayons X

- Des électrons sont envoyés sur une cible dont on choisit le matériau
- Ils rencontrent des noyaux et des électrons et subissent des interactions : électron-électron (arrêt par collision) et électron-noyau (arrêt par freinage).



- Le spectre des rayons X possède donc 2 composantes : une composante continue et des raies (spécifiques des éléments de la cible) .

ATTENTION :

- Les rayons X viennent du cortège électronique alors que la radioactivité vient du noyau.
- Les rayons X viennent du cortège, les photons gamma viennent du noyau.
- L'énergie de l'électron est négative alors que l'énergie de liaison de l'électron est positive.
- Les rayons X sont des photons de fluorescence créés par l'interaction d'électrons avec la matière.

Exercice

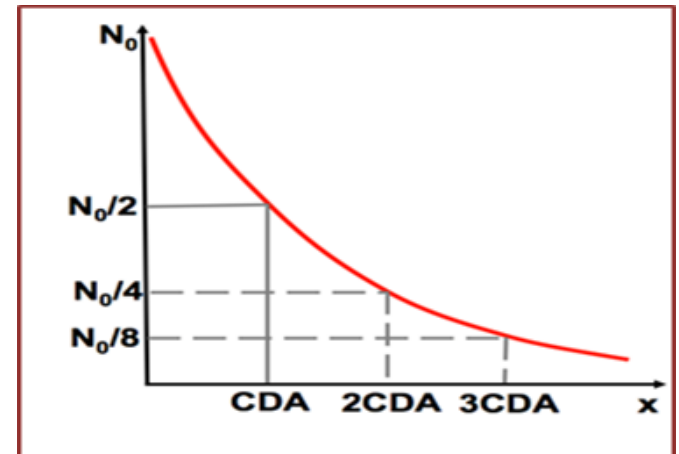
QCM 5 : Une épaisseur de 2mm de matière atténue 50% d'un faisceau de photon mono-énergétique.

- A) La valeur de la CDA de ce matériau est de 4 mm
- B) Après 6mm de matière, 87,5% du faisceau est atténué
- C) 19 cm de cette matière atténuent la totalité du faisceau
- D) L'atténuation par effet photo électrique est plus probable lorsque le faisceau traverse l'os que lorsqu'il traverse le sang
- E) A,B,C,D sont faux

CDA

- Définition : épaisseur de matière qui « arrête » la moitié des photons du faisceau.
→ A chaque fois que l'on rajoute une CDA de matière, on divise par 2 le nombre de photons du faisceau.

$$N(k. CDA) = \frac{N(0)}{2^k}$$



Au bout de 10 CDA on considère que la totalité du faisceau est atténué !

Donc : Après 1 CDA il reste 50% ; Après 2 CDA il reste 25% ; Après 3 CDA il reste 12,5%

Correction

QCM 5 : Une épaisseur de 2mm de matière atténue 50% d'un faisceau de photon mono-énergétique.

- A) La valeur de la CDA de ce matériau est de 4 mm
- B) Après 6mm de matière, 87,5% du faisceau est atténué
- C) 19 cm de cette matière atténuent la totalité du faisceau
- D) L'atténuation par effet photo électrique est plus probable lorsque le faisceau traverse l'os que lorsqu'il traverse le sang
- E) A,B,C,D sont faux

Exercice

QCM 6 : L'atome $^{16}_8\text{O}$ est ionisé sur sa couche K . Lors du réarrangement électronique, on peut observer :

- A) Un photon de fluorescence lors du passage de l'électron de la couche L vers la couche K
- B) Un photon de fluorescence lors du passage de l'électron de la couche M vers la couche K
- C) Un électron Auger issu de la couche L
- D) Un électron Auger issu de la couche M
- E) A,B,C,D sont faux

Correction

- Couche K : 2 électrons
- Couche L : 6 électrons
 - Réponse B FAUX
 - Réponse A VRAI



8 électrons !

Donc pas de couche M !

Un électron Auger vient d'une couche intérieur vers une couche extérieure !

- Réponse C VRAI
- Réponse D FAUX

- A) VRAI
- B) FAUX
- C) VRAI
- D) FAUX
- E) FAUX

Exercice

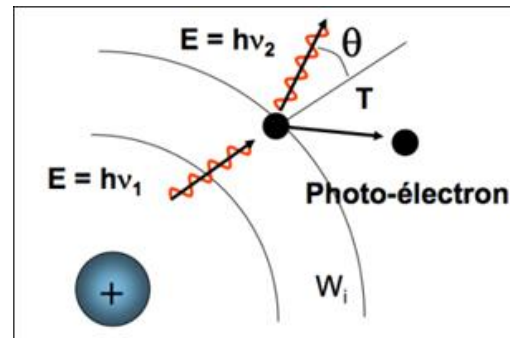
QCM 7 : un rayonnement d'énergie $E = 100\text{eV}$ est envoyé sur un atome de ${}_1\text{H}$. Celui-ci est atténué par effet Compton, on observera :

Données : $W_K = -13,6\text{ eV}$

- A) Une ionisation de l'hydrogène
- B) Un photo électron d'énergie cinétique = $86,4\text{ eV}$
- C) Un photon de fluorescence
- D) Un retour au fondamental de l'hydrogène émettant un photon de fluorescence d'énergie = $13,6\text{ eV}$
- E) A,B,C et D sont faux.

Effet Compton

- Une PARTIE de l'énergie du faisceau incident est transmise à un électron qui est expulsé, c'est un photo-e- avec une énergie cinétique $T = h\nu_1 - |W_i| - h\nu_2$.
 - ionisation de la matière
 - réarrangements électroniques
- Une autre partie de cette énergie est diffusée via un photon de fluorescence ($E = h\nu_2$)



- Le photo-e- perd peu à peu de son énergie cinétique par ionisations successives.

Correction

- Energie du photo-électron :

$$T = 100 - | -13,6 | - hv_2 \text{ eV} \neq 86,4 \text{ eV}$$

- Réponse B FAUX

A) VRAI

B) FAUX

C) VRAI

D) VRAI

E) FAUX

THE END.