

Chapitre 3

Etude des processus issus des interactions des rayonnements avec la matière

- Ces processus sont des phénomènes physiques qui résultent d'un transfert d'énergie des rayonnements à la matière: ce sont donc des phénomènes d'absorption d'énergie

* Nature des rayonnements considérés dans cette étude:

1) Les particules chargées:

- lourdes ($p = H^+$, $\alpha = {}^4_2He = {}^4He^{++}$, ${}^4He^+$, ions +, ions -)
- légères (e^- , β^- , β^+ , ...)

2) Les rayonnements électromagnétiques de petites longueurs d'onde:

(IR, radiations visibles, UV, RX, R γ)

* Constituants de la matière mis en jeu dans les interactions:

molécules, atomes, électrons du cortège, noyau, nucléons.

Dans l'étude d'un phénomène physique d'énergie transférée par le projectile à la cible et la condition pour que ce phénomène soit énergétiquement possible sont déduites de la loi de conservation de l'énergie:

$$[E(m_0c^2 + E)]_i = [E(m_0c^2 + E)]_f$$

± Phénomènes physiques issus des interactions des particules chargées avec les constituants chargés de la matière

Notation

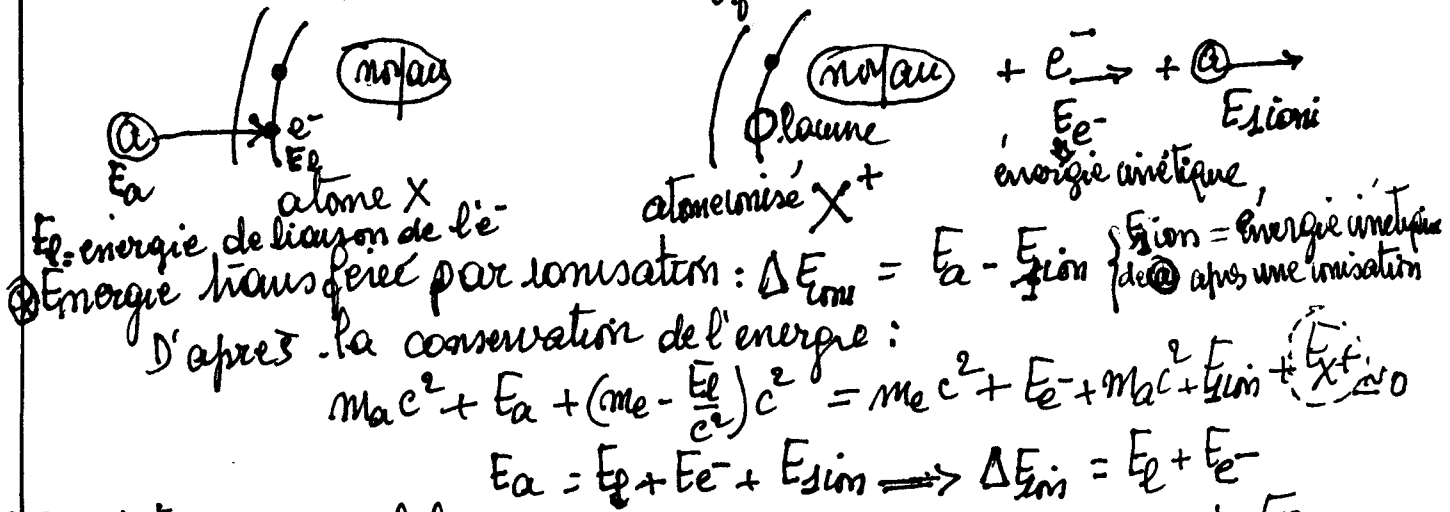
Particule chargée	masse au repos	Energie cinétique	Energie totale	Energie résiduelle	Energie transférée
@	m_0	$E_a \begin{cases} \text{classique} \\ \text{relativiste} \end{cases}$	$E = m_0c^2 + E_a$	$E_{\text{phén}}$	$\Delta E_{\text{ph}} = E_a - E_{\text{ph}}$

Types d'interaction

Les types d'interaction entre les corpuscules projectiles et cibles chargés sont principalement:

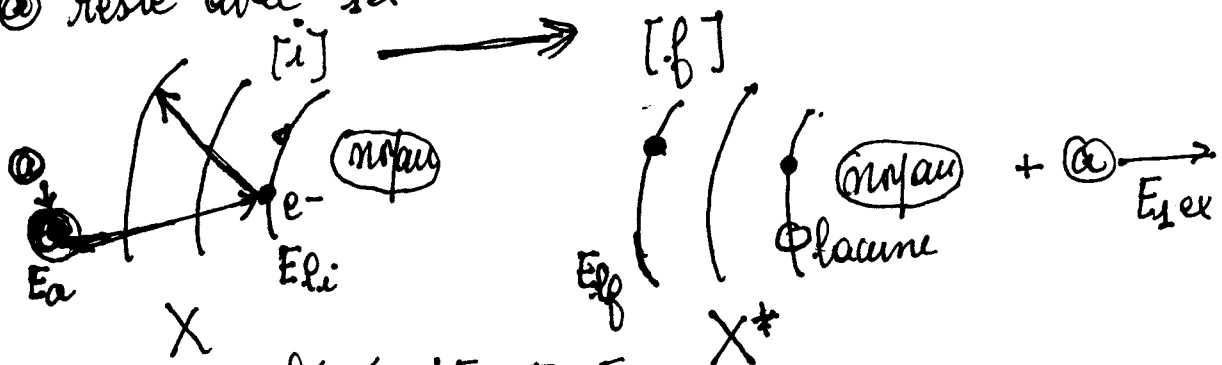
- l'interaction coulombienne à distance du fait de l'existence de forces électrostatiques entre corpuscules chargés
- l'interaction de contact (ou choc) entre projectile et cible: les corpuscules entrent effectivement en contact.
- Les phénomènes qui résultent de ces interactions sont alors:
 - 1/ l'ionisation: issue de l'interaction de @ avec un e⁻ lié d'un atome X
 - l'e⁻ est éjecté hors de l'atome et @ reste avec l'énergie résiduelle E_{ion}

[i] $\longrightarrow$ [f]



- Condition pour libérer un e⁻ par ionisation: $\Delta E_{\text{ion}} > E_Li$
- Conséquence de l'ionisation: réorganisation du cortège électronique suite à l'existence d'une lacune.

2/ L'excitation: issue de l'interaction de @ avec un e⁻ lié d'un atome X - l'e⁻ est déplacé de son niveau d'énergie E_{Li} vers un niveau externe d'énergie E_{Lf} et @ reste avec E_{ex}



- Énergie transférée: $\Delta E_{\text{ex}} = E_a - E_{\text{ex}}$
- E_{ex} = énergie cinétique de @ après une excitation.

Conservation de l'énergie : $m_a c^2 + E_a + (m_b - \frac{E_i}{c^2}) c^2 = (m_b - \frac{E_f}{c^2}) c^2 + m_a c^2 + E_{ex}$
 $E_a - E_{ex} = E_i - E_f \Rightarrow \Delta E_{ex} = E_i - E_f$

- * Condition pour déplacer une élé vers un niveau externe : l'énergie transférée doit être égale à l'intervalle d'énergie $|E_i - E_f|$
- * Conséquence : réorganisation du cortège suite à l'existence d'une lacune.

Définition de l'énergie moyenne d'ionisation $\bar{w}$.

Les particules chargées lourdes ou légères perdent leur énergie à la fois par ionisation et excitation.
 L'énergie moyenne d'ionisation est définie par :

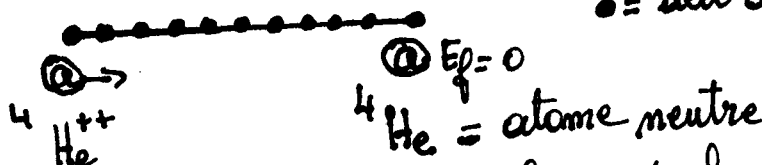
$$\bar{w} = \Delta E_{ion} + \Delta E_{ex}.$$

Dans un gaz $\bar{w} \approx 33 \text{ eV}$ à 35 eV

L'ionisation et l'excitation sont les principaux phénomènes de perte d'énergie des particules chargées lourdes et légères.

- A) Comportement spécifique des particules chargées lourdes.
- Les particules sont très ionisantes : une particule α de 1 MeV libère dans l'air 35 000 électrons alors qu'une particule β^- de même énergie ne libère qu'une cinquantaine d'électrons.
 - Leur pouvoir de pénétration dans la matière est faible : il faut une simple feuille pour absorber leur énergie.
 - Leur parcours est rectiligne du fait qu'elles soient lourdes : donc sont peu déviées dans la matière.
 - En fin de parcours leur énergie cinétique finale $E_f = 0$; elles attirent alors des e^- pour devenir des particules neutres.

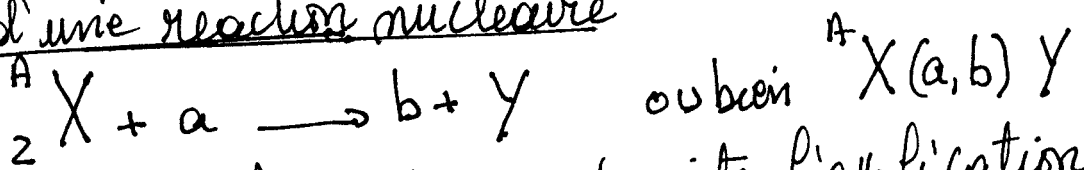
• = lieu de l'interaction



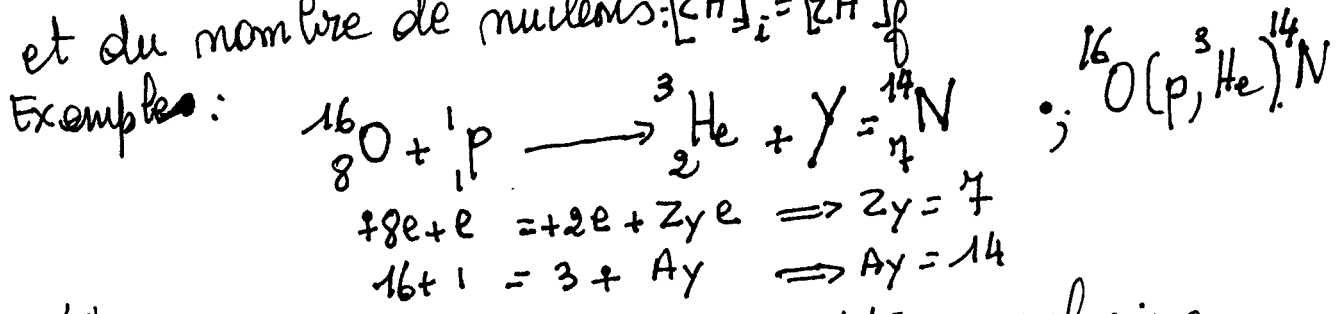
B) Réaction nucléaire par particule chargée lourde.

Une réaction nucléaire est issue d'une interaction entre un projectile a et un noyau cible ${}^A_Z X$ - il y a émission d'un rayonnement b et existence d'un noyau résiduel Y dans l'état final.

Ecriture d'une réaction nucléaire



L'identification de ${}^A_Z X$, a , b , Y nécessite l'application des lois de conservation de la charge $[Z]_i = [Z]_f$ et du nombre de nucléons $[A]_i = [A]_f$.



Définition de la chaleur Q d'une réaction nucléaire

$$Q = [(m_a + M_X) - (m_b + M_Y)] c^2$$

Q = différence des masses de l'état $[i]$ et de l'état $[f]$ en unité d'énergie - D'après la loi de conservation de l'énergie:

$$(m_a + M_X) c^2 + E_a = (m_b + M_Y) c^2 + E_b + E_Y$$

[avec ${}^A_Z X$ au repos]

$$Q = E_b + E_Y - E_a$$

Si $Q > 0$: la réaction nucléaire est exoénergétique et a lieu même si E_a est faible car $(m_a + M_X) > (M_Y + m_b)$.

Si $Q < 0$: la réaction est endoénergétique: il y a création de la quantité de matière $\Delta m = (m_b + M_Y) - (m_a + M_X)$ dans l'état final à partir de l'énergie cinétique E_a du projectile:

$$E_a = \Delta m c^2 + E_b + E_Y$$

Cette réaction nucléaire a lieu si $E_a > \Delta m c^2 = |Q|$.

Energie seuil d'une réaction nucléaire endoénergétique: $E_s = E_a = |Q|$.

Remarque

L'écriture ${}^A_Z X + a \rightarrow {}^A_Z X + a$ ou ${}^A_Z X(a, a) {}^A_Z X$ est une diffusion élastique où la nature des corpuscules ne change pas. Dans une diffusion élastique il y a transfert d'énergie cinétique de a à ${}^A_Z X$.

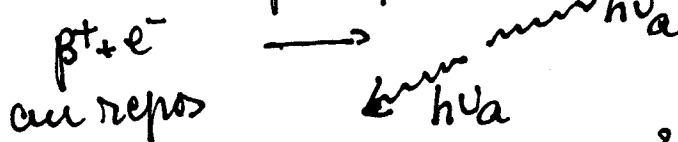
- L'écriture ${}^A_Z X + a \rightarrow {}^{A'}_Z X + a$ ou ${}^A_Z X(a, a') {}^{A'}_Z X$ est une diffusion inélastique où la nature des corpuscules ne change pas mais la particule a transfère de l'énergie cinétique et de l'énergie d'excitation au noyau ${}^A_Z X$.

B) Comportement spécifique des particules chargées légères (e^- , β^- , β^+ ...)

- * Ces particules sont peu ionisantes
- * Leur pouvoir de pénétration dans la matière est très supérieur à celui des α lourdes : il faut quelques mm d'Al pour absorber leur énergie.
- * Leur parcours est en lignes brisées du fait qu'elles soient légères et donc subissent des diffusions au niveau des atomes et des molécules (analogie avec une plume qui tombe en zigzag dans l'air)
- * En fin de parcours leur énergie cinétique $E_k = 0$: il n'y a alors plus aucune différence entre β^- , e^- et les électrons de la matière traversée.

Particularité des particules β^+ au repos

Les particules β^+ sont instables au repos : lorsque β^+ perd son énergie cinétique ($E_k = 0$), en fin de parcours, elle s'annihile alors avec un e^- au repos pour donner deux photons d'annihilation.



$$m_{\beta^+} c^2 + m_{e^-} c^2 = 2h\nu_a \Rightarrow 2mc^2 = 1,022 \text{ MeV} = 2h\nu_a$$

$$h\nu_a = 0,511 \text{ MeV}$$

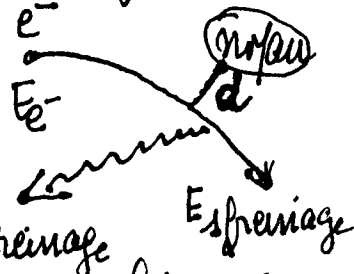
Devenir du β^+ en fin de parcours :

• Lieu de l'interaction



4/ Phénomène de freinage des e^- relativistes (énergie E_{e^-} relativiste)
 Au voisinage du noyau, l' e^- relativiste est freiné dans le champ électrique du noyau. L'énergie cinétique de l' e^- diminue et la perte d'énergie $\Delta E_{\text{freinage}} = E_{e^-} - E_{\text{freinage}}$ apparaît sous forme d'un photon de freinage

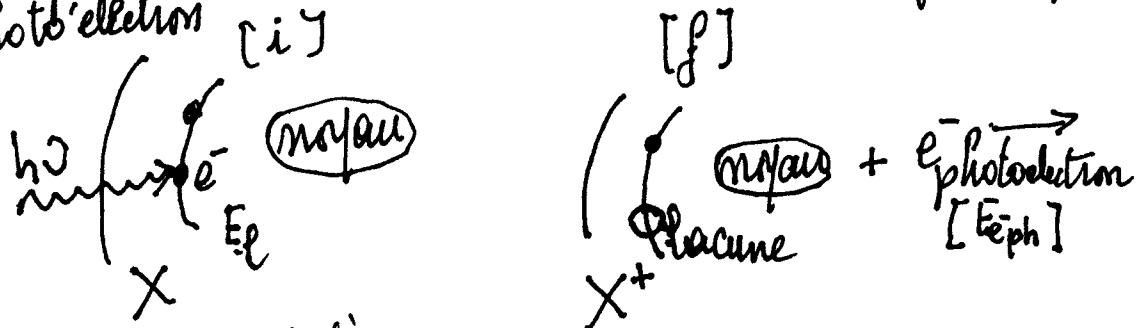
La perte d'énergie par rayonnement de freinage dépend de la distance d'approche d entre l' e^- relativiste et le noyau - L'expérience montre que pour un faisceau de particules relativistes monoénergétiques les photons de freinage présente un spectre continu
 $0 < h\nu_{\text{freinage}} < E_a$



Remarque
 En radiologie les photons de freinage sont communément appelés rayons X (RX) ce qui est une erreur puisque les RX sont des photons issus de transitions électroniques et présentent un spectre de raies.
 [voir réorganisation du cortège électronique des atomes excités paragraphe II]

Phénomènes issus des interactions des photons avec la matière

1) Effet photoélectrique: issu de l'interaction de $h\nu$ avec un e^- lié d'un atome X . L' e^- est éjecté hors de l'atome et le photon est éliminé dans l'état final, l' e^- émis est un photoélectron.



2) Conservation de l'énergie:

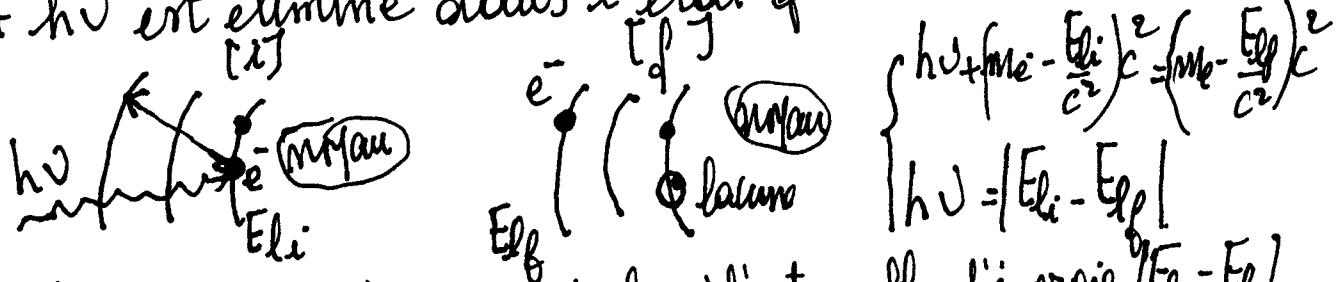
$$h\nu + (m_e - \frac{E_l}{c^2})c^2 = m_e c^2 + E_{photo} + E_{X^+} \approx 0$$

$$h\nu = E_l + E_{photo}$$

3) Condition pour avoir l'effet photoélectrique: $h\nu > E_l$.
On appelle énergie seuil $E_s = h\nu_s$: l'énergie photonique qui déclenche l'effet photoélectrique et tel que $E_s = h\nu_s = E_l$.
La condition $h\nu > E_l$ devient: $h\nu > h\nu_s$
ou bien: $\lambda < \lambda_s$

4) Conséquence de l'effet photoélectrique = reorganisation du cortège suite à l'existence d'une lacune.

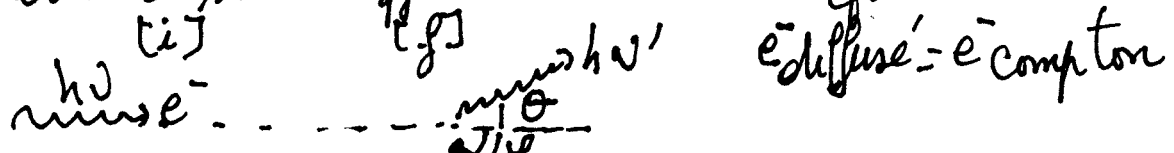
2) d'excitation: interaction de $h\nu$ avec e^- lié. L' e^- est déplacé de son niveau d'énergie E_i vers un niveau externe d'énergie E_f et $h\nu$ est éliminé dans l'état final.



5) Condition: $h\nu$ doit être juste égale à l'intervalle d'énergie $|E_i - E_f|$.

6) Conséquence: reorganisation du cortège suite à l'existence d'une lacune dans ce cortège.

3) Effet Compton ou diffusion Compton : interaction de $h\nu$ avec un e^- libre et au repos (ou faiblement lié : $E_e \approx 0$) - un photon $h\nu'$ et l' e^- sont diffusés dans l'état final.

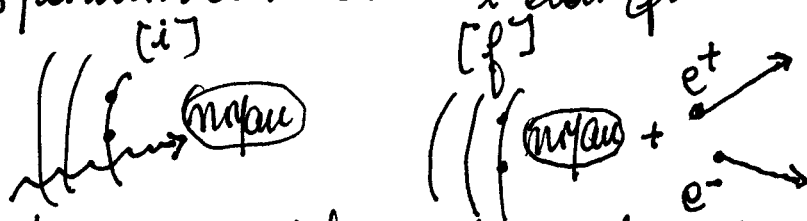


Conservation de l'énergie: $h\nu + m_e c^2 = h\nu' + m_e c^2 + E_{e_{\text{Compt}}}$

Le photon initial $h\nu$, éliminé dans [f], est remplacé par $h\nu'$.
Energie photonique transférée et convertie en énergie cinétique:

$$\Delta E_{\text{Compt}} = h\nu - h\nu' = E_{e_{\text{Compt}}}$$

4) Création de paire : l'interaction de $h\nu$ avec le champ électrique du noyau engendre la création d'une paire de particules : un positron e^+ ($+e, m_e = m_{e^-}$) et un négatron ($-e, m_e$) et disjonction de $h\nu$ dans l'état final.



$$h\nu = (m_{e^+} + m_{e^-})c^2 + E_{e^+} + E_{e^-}$$

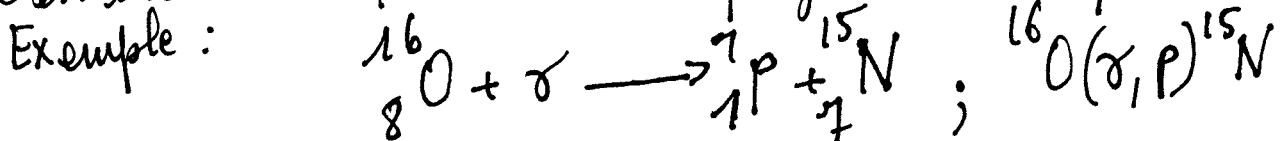
$$h\nu = 2m_e c^2 + E_{e^+} + E_{e^-}$$

Condition pour avoir la création de paire : $h\nu > 2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$
Conséquence : annihilation du positron e^+ au repos : e^+ étant physiquement identique à p^+ , e^+ s'annihile avec e^- au repos pour donner deux photons d'annihilation : $e^+ + e^- \rightarrow$

$$h\nu_a = 0,511 \text{ MeV}$$

5) Reaction photonucléaire.

C'est une réaction nucléaire où le projectile est un photon γ : $X(\gamma, b)Y$



Loi d'atténuation des photons dans la matière

Lorsqu'un faisceau de photons traverse la matière, chaque photon $h\nu$ peut être absorbé et engendrer un des processus ci-dessus; il est alors éliminé du faisceau des photons incidents. De ce fait les divers processus ci-dessus conduisant donc à l'atténuation du nombre de photons incidents.

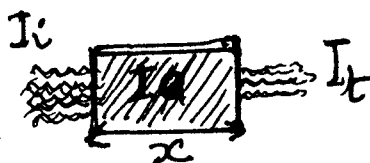
Détermination de la loi d'atténuation des photons

Données: les photons sont monoénergétiques et leur nombre par seconde est exprimé en terme d'intensité I .

Soit: I_i l'intensité des photons incidents tombant perpendiculairement sur la surface d'un matériau d'épaisseur x et constitué d'atomes identiques.

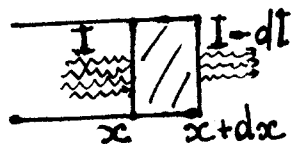
I_a = intensité des photons absorbés dans x

I_t = intensité des photons transmis par x



Raisonnement: soit I l'intensité des photons au niveau de l'épaisseur x .

Entre x et $x+dx$ le nombre de photons absorbés dans l'épaisseur élémentaire dx est dI .



L'expérience montre que le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur est proportionnel au nombre de photons incidents I au niveau de x ; en notant par μ le coefficient de proportionnalité il vient:

μ = coefficient d'atténuation linéaire (linéaire)
de signe moins car dI est une diminution de I

$$\frac{dI}{dx} = -\mu I \quad \xrightarrow{\text{par intégration}} \int_{I_i}^{I_t} \frac{dI}{I} = \int_{x=0}^x -\mu dx$$

$$\ln \frac{I_t}{I_i} = -\mu x \quad \rightarrow \quad I_t = I_i e^{-\mu x}$$

$$I_a = I_i - I_t = I_i (1 - e^{-\mu x})$$

Intensité I_a des photons absorbés dans x :

Définition de la couche de demi atténuation (x_{cda}):

La cda est l'épaisseur du matériau qui atténue de moitié l'intensité I_i .

$$\text{Pour } x = x_{cda} \rightarrow I_t = \frac{I_i}{2} = I_a \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_{i/2} = I_i e^{-\mu x_{cda}} \end{array} \right.$$

$$x_{cda} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Remarque: $\mu = \frac{dI}{I} \times \frac{1}{dx}$ = probabilité d'absorption d'un photon par unité d'épaisseur; $x_{cda} \rightarrow \mu_{cda}^{-1}$

Loi d'atténuation des photons lumineux dans une solution (loi de Beer Lambert)

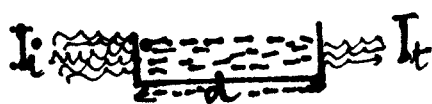
la solution contient une substance de concentration c .

d : longueur de la cuve contenant la solution

la loi de Beer-Lambert a pour expression : $I_t = I_i 10^{-\epsilon c d}$ ②

ϵ = coefficient d'extinction de la solution

Definition de la densité optique : $DO = \log \frac{I_i}{I_t}$



$$\textcircled{2} \rightarrow \frac{I_i}{I_t} = 10^{\epsilon c d} \rightarrow \log \frac{I_i}{I_t} = \epsilon c d \rightarrow c = \frac{DO}{\epsilon d}$$

la détermination de la concentration c d'une substance en solution peut être effectuée en mesurant la DO expérimentale.

Unités

	d	ϵ
Concentration pondérale : $g.l^{-1}$	cm	$l.g^{-1}cm^{-1}$ = coefficient d'extinction spécifique
Concentration molaire : $mol.l^{-1}$	cm	$l.mol^{-1}cm^{-1}$ = coefficient d'extinction molaire.

III Rayonnement de fluorescence et Rayonnement Auger émis par les atomes excités

1) Phénomènes d'excitation atomique

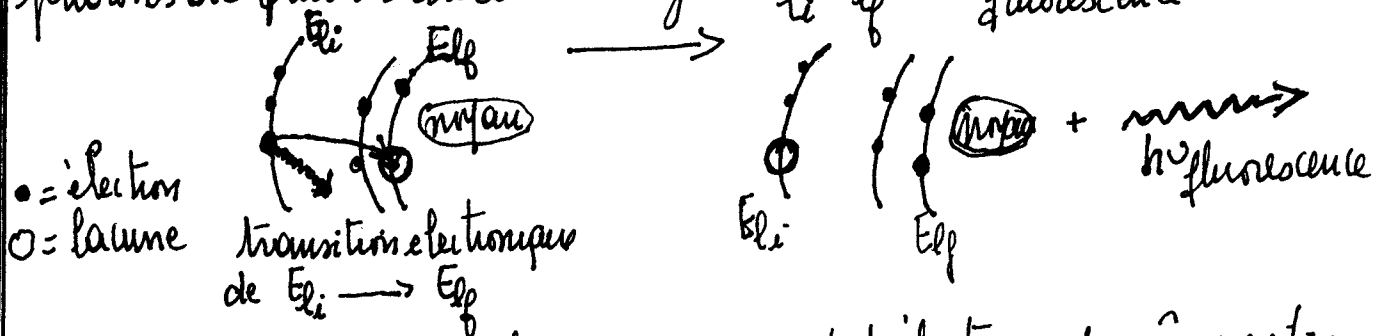
Des phénomènes de transfert d'énergie tels l'ionisation, l'excitation, l'effet photoélectrique et les phénomènes d'instabilité nucléaire telle la capture électronique engendrent une lacune dans le cortège électronique et laissent donc l'atome dans un état excité avec un excès d'énergie.

- L'atome revient à son état fondamental d'énergie minimum lorsque cette énergie en excès est évacuée hors de l'atome, ce qui nécessite la réorganisation du cortège pour remplir la lacune.

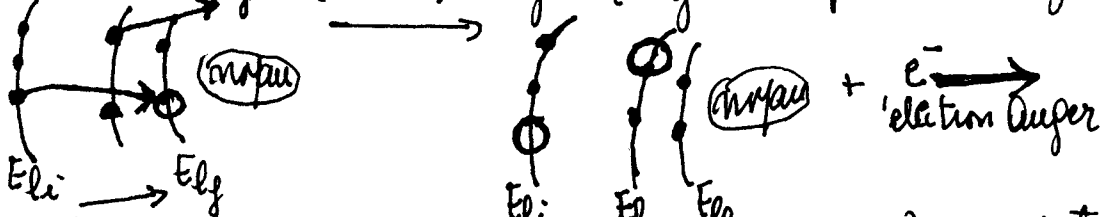
2) Mécanisme de la réorganisation du cortège électronique

La 1^{ère} lacune engendrée par un phénomène d'excitation atomique est comblée par un électron d'un niveau externe - la transition de cet e⁻ d'un niveau d'énergie de liaison E_L vers le niveau d'énergie E_F où se trouve la lacune s'effectue avec émission d'énergie $E_L - E_F$ véhiculée, hors de l'atome, par des rayonnements de 2 natures différentes.

2-1/ rayonnement de fluorescence composé de photons appelés photons de fluorescence d'énergie : $E_L - E_F = h\nu_{\text{fluorescence}}$



2-2/ rayonnement Auger composé d'électrons du même cortège d'énergie tel que : $E_L - E_F = (E_L + E_F) e_{\text{Auger}}$



La réorganisation du cortège se poursuit jusqu'à au remplissage de toutes les lacunes.

3) Nomenclature des photons de fluorescence

Les photons de fluorescence sont appelés des rayons X = RX lorsque les lacunes sont dans les niveaux K ou L ; les transitions électroniques entre niveaux externes et niveaux K ou L engendrent des RX de 0,1 à plus de 100 KeV.

Les photons de fluorescences sont des photons ultraviolets (des UV) d'énergie $>$ à quelques eV (3 à 100 eV) et des photons lumineux du rouge au violet (de 1,8 eV à 3 eV) lorsque les lacunes sont dans les couches M, N et les couches externes.

4) Règles de sélection des transitions électroniques par photons de fluorescences (RX, UV, lumière)

Le mouvement orbital et le mouvement de spin de chaque e^- dans un espace $n=1$ (couche K) $n=2$ (couche L) etc.. étant respectivement quantifié à l'aide du nombre quantique secondaire l ($0 \leq l \leq n-1$) et du nombre quantique de spin s ($s = \pm \frac{1}{2}$), le mouvement résultant de ces deux mouvements est quantifié à l'aide d'un nombre quantique total $j = l \pm s$ ($j = l \pm \frac{1}{2}$).

[d'espace extranucléaire étant quantifié, chaque électron du cortège occupe un espace n, l, j qui lui est propre où son énergie de liaison E_{nlj} . d'expérience montre que lorsqu'un atome excité revient à son état fondamental, seules les transitions électroniques qui vérifient simultanément les variations $\Delta l = l_i - l_f = \pm 1$ ($\Delta l = \pm 1$) et

$\Delta j = j_i - j_f = 0, \pm 1$ ($\Delta j = 0, \pm 1$)

s'effectuent avec émission de photons de fluorescence. Si les règles de sélection ① et ② ne sont pas vérifiées simultanément les transitions se font par émission d'électrons Auger.

5) Compétition entre rayonnement de fluorescence et rayonnement Auger.

Dans une population d'atomes identiques dans des états excités identiques les transitions électroniques s'effectuent par émission de $h\nu$ de fluorescence et d' e^- Auger mais avec des probabilités différentes. Cependant l'expérience montre que la désexcitation par fluorescence est prépondérante pour les atomes lourds tandis que la désexcitation par e^- Auger est prédominante pour les atomes légers. L'effet Auger est donc le principal phénomène de désexcitation des milieux biologiques constitués d'éléments légers : carbone, azote, oxygène, Calcium..

Remarque: Auger est le savant qui a découvert la désexcitation des atomes par émission d'électrons en compétition avec l'émission de photons de fluorescence.