

Chapitre 4

Exploitation de la physique de l'atome dans les sciences de la vie et de la terre

I) Exploitation des rayonnements et de l'énergie nucléaire

① Domaines d'utilisation des rayonnements

Ces rayonnements sont issus de radioisotopes émetteurs β^- , β^+ et α ou bien ce sont des corpuscules de charge q accélérés entre une différence de potentiel ΔV de manière que leur énergie cinétique soit $E_{\text{cin}} = q\Delta V$. Ces corpuscules sont alors produits avec des énergies calibrées dans les accélérateurs de particules.

1.1 Les datations

① Datation d'un objet en bois à l'aide du ^{14}C [émetteur β^- , $T_{1/2} = 5700$ ans, formé dans l'atmosphère par $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$, assimilé par les plantes sous forme de $^{14}\text{CO}_2$]

Un tel objet (comme un sarcophage, un lit etc...) est fabriqué avec du bois d'arbre d'une espèce végétale connue.

- Quand l'arbre est vivant, il assimile, lors de la photosynthèse, du $^{12}\text{CO}_2$ et du $^{14}\text{CO}_2$ et contient par unité de matière un nombre de radionucléides N_{014} constant déterminé par comptage de β^- . Si Δt_c est la durée du comptage : $N_{\beta^-} = N_{014} (1 - e^{-\lambda \Delta t_c}) \Rightarrow N_{014} = \frac{N_{\beta^-}}{1 - e^{-\lambda \Delta t_c}}$

- Quand l'arbre est coupé, pour fabriquer l'objet, à l'instant t_0 , les N_{014} commencent à décroître.

- A l'instant t de la datation une quantité de matière prélevée sur l'objet, contient par unité de matière $N_{14} = N_{014} e^{-\lambda(t-t_0)}$

L'âge de l'objet est donc : $(t - t_0) = \frac{5700}{0,693} \ln \frac{N_{014}}{N_{14}}$

N_{14} est déterminé par comptage de β^- pendant $\Delta t_c \Rightarrow N_{14} = \frac{N_{\beta^-}}{1 - e^{-\lambda \Delta t_c}}$

② Datation de l'eau stagnante d'une nappe phréatique à l'aide de ^3H [émetteur β^- , $T_{1/2} = 12$ ans, formé dans l'atmosphère à partir de $^{14}\text{N}(n, ^3\text{H})^{12}\text{C}$, se trouve dans l'eau de pluie sous forme $^3\text{H}_2\text{O}$]

- Quand la nappe phréatique est régulièrement alimentée par les eaux de pluie, le nombre de radionucléides par unité de matière est $N_{03} = \text{constante}$ déterminée par comptage de β^- .

- Quand la nappe n'est plus alimentée (par suite d'un phénomène géologique) à l'instant t_0 , l'eau commence à stagner et les N_{03} à décroître.

A l'instant de la datation, l'unité de matière stagnante, ne contient plus que $N_3 = N_{03} e^{-\lambda(t-t_0)}$ - l'âge de l'eau stagnante est donc

$$(t-t_0) = \frac{12}{0,693} \ln \frac{N_{03}}{N_3} \quad \left\{ \begin{array}{l} N_{03}, N_3 \text{ sont déterminés par} \\ \text{comptage de } \beta^- \text{ comme pour le } {}^{14}_6\text{C} \end{array} \right.$$

Remarque

Si l'âge dépasse $10T$ le comptage des β^- issus du ${}^{14}_6\text{C}$ ou du ${}^3_1\text{H}$ est réduit au bruit de fond : dans ce cas ${}^{14}_6\text{C}$ et ${}^3_1\text{H}$ ne sont plus utilisables pour les datations.

② datation d'une formation géologique à l'aide de ${}^{238}_{92}\text{U}$ ($T = 4,510^9$ ans) et de son descendant stable ${}^{206}_{82}\text{Pb}$

Cette formation géologique peut être une montagne qui, à l'instant t_0 de son existence contenait de l'uranium ${}^{238}_{92}\text{U}$ pur sans ses descendants.

Soit N_{0238} le nombre de ${}^{238}_{92}\text{U}$ par unité de matière à l'instant t_0 .
A l'instant de la datation l'analyse d'une quantité de matière de la formation montre un nombre N_{238} encore présents et un nombre d'atomes de ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ formés par désintégration de N_{0238} entre t_0 et t [on néglige les descendants radioactifs]

$$N_{238} = N_{0238} e^{-\lambda(t-t_0)} \quad (1)$$

$$N_{206} \approx N_{0238} - N_{238} = N_{0238} (1 - e^{-\lambda(t-t_0)}) \quad (2)$$

En faisant le rapport $\frac{(2)}{(1)}$, l'âge de la formation est donc :

$$(t-t_0) = \frac{4,510^9}{0,693} \ln \left[1 + \frac{N_{206}}{N_{238}} \right]$$

des atomes relatifs à N_{206} et N_{238} sont déterminés par spectrométrie de masse : un spectromètre de masse est un dispositif qui permet de séparer et de compter les ions atomiques de masses différentes.

1.2 Radio diagnostic et radiothérapie des maladies

- Les maladies cardiovasculaires sont diagnostiquées à l'aide du ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ ($T = 6\text{h}$) issu de la filiation ${}^{99}_{42}\text{Mo} \xrightarrow{\beta^-} {}^{99}_{43}\text{Tc} \xrightarrow{\gamma} {}^{99}_{43}\text{Tc}$

- Les maladies de la thyroïde sont détectées à l'aide de l'isotope ${}^{131}_{53}\text{I}$ ($T = 8\text{j}$)

Sachant que la thyroïde fixe l'iode on fait ingérer au patient un comprimé contenant de l'isotope ${}^{131}_{53}\text{I}$ - le comptage des γ notamment au niveau de la thyroïde donne un nombre N_γ qu'il faut comparer à $N_{\gamma s}$ relative à une thyroïde saine. Dans les cas où $N_\gamma < N_{\gamma s}$, $N_\gamma > N_{\gamma s}$, $N_\gamma = 0$ le traitement doit être adapté à chacun de ces cas.

- La radiothérapie des tumeurs malignes utilise les rayonnements ionisants issus de radioisotopes ou bien d'accélérateurs de particules (faisceau d'e ou de p accélérés). Ces rayonnements détruisent les cellules cancéreuses en cassant les liaisons des macromolécules et celle entre les acides aminés - la multiplication de ces cellules cessent à partir d'une dose totale de rayonnement variant avec la nature et l'emplacement de la tumeur -

1.3 Utilisation des radio traceurs dans les expériences in vivo

Pour suivre la trace d'une substance inactive dans un organisme afin d'étudier son métabolisme ou sa fixation dans un organe, on marque cette substance avec des radionucléides émetteurs γ ou β^+ dont l'annihilation donne des γ d'annihilation de 0,511 MeV. Un radio traceur est donc le radionucléide qui marque une substance inactive dont on peut suivre la trace grâce au rayonnement détectable.

Exemple : étude de la vitesse d'élimination de l'eau chez les rongeurs du Sahara

- On fait boire au rongeur une quantité d'eau ordinaire H_2O puis une quantité d'eau tritiée $^3H-O-H$ où 1H stable est remplacé par 3H émetteur β^- . On détermine en fonction du temps, la quantité de 3H éliminée dans les urines et la transpiration par comptage de β^- .

Definition de la période effective T_e d'une substance marquée

Dans les expériences in vivo la substance marquée avec un radio traceur est éliminée par décroissance radioactive avec la période physique T_p et diminue par élimination biologique avec une période T_b . La trace de cette substance est perdue avec une période effective T_e tel que :

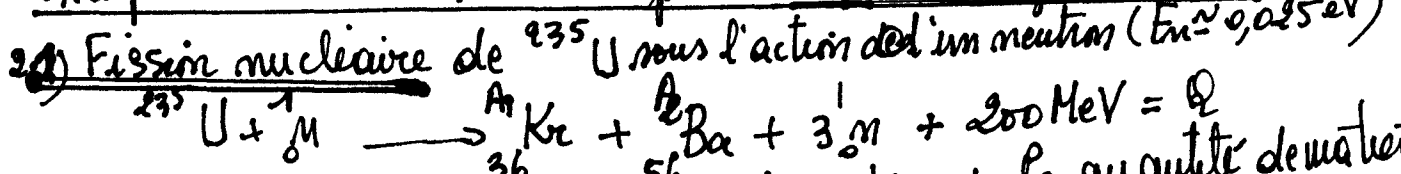
$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b} \Rightarrow T_e = \frac{T_p T_b}{T_b + T_p}$$

La période effective est le temps mesuré pour que la substance marquée soit réduite de moitié par suite à la fois de la décroissance radioactive et de l'élimination biologique -

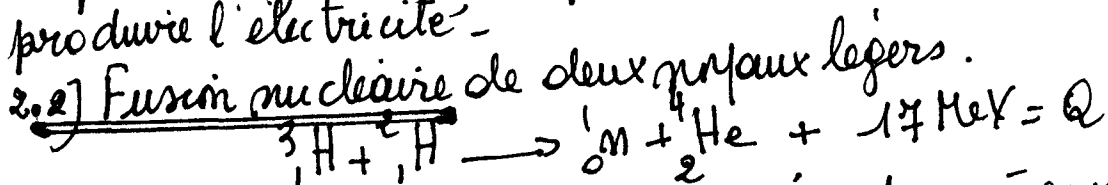
② Utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité

Dans une réaction nucléaire exoénergétique : $X(a,b)Y$, on appelle énergie nucléaire la quantité de matière nucléaire $\Delta m = (m_a + m_X) - (m_b + m_Y)$ transformée en énergie cinétique des corpuscules b et Y : $\Delta m c^2 = E_b + E_Y - E_a$ (d'après la loi de conservation de l'énergie). Cette énergie cinétique est elle même convertie en énergie calorifique dans

un matériau traversé par les rayonnements β et les rayons γ
Exemples de réactions nucléaires produisant de l'énergie nucléaire.



Chaque fission se produit avec une diminution de la quantité de matière
 $\Delta m = (m_{^{235}\text{U}} + m_{\text{n}}) - (m_{^{91}\text{Kr}} + m_{^{141}\text{Ba}} + 3m_{\text{n}})$ équivalente à $\Delta mc^2 = 200 \text{ MeV}$
 libérée sous forme cinétique des fragments de fission ^{91}Kr , ^{141}Ba et de 3 n.
 Les fragments de fission de longue période constituent les déchets
 radioactifs inutilisables jusqu'à présent et dont le stockage est coûteux.
 La fission de l' ^{235}U est exploitée dans les réacteurs nucléaires pour
 produire l'électricité.



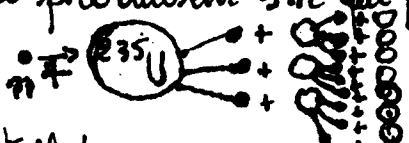
Les ^1_0n libres sont instables et se désintègrent par β^- avec une période $T = 12 \text{ min}$
 La fusion nucléaire produit de l'énergie sans déchets radioactifs.
 La comparaison de l'énergie produite par nucléon engagé dans l'état
 initial $\rightarrow \frac{Q}{A}$ montre pour ces deux types de réactions nucléaires:

$$\frac{Q}{A} \begin{cases} \text{fission} : \frac{200}{235+1} = 0,9 \text{ MeV/nucleon} \\ \text{fusion} : \frac{17}{3+2} = 3,4 \text{ MeV/nucleon} \end{cases}$$

La fusion nucléaire est un mode de production d'énergie nucléaire plus séduisant
 que la fission. Mais cette réaction n'est pas encore domestiquée comme
 la fission nucléaire utilisée depuis plus de 60 ans pour produire l'électricité.

Un projet international engageant les puissances technologiquement
 avancées verser le jour, en France, pour développer l'énergie
 propre du futur à savoir la fusion nucléaire.

Remarque: Fissions en chaîne: la fission de ^{235}U produit, en moyenne, 3 n qui provoquent 3 autres
 fissions qui produisent 9 n qui produisent 9 fissions etc... on obtient des fissions
 en chaîne:



Si les fissions en chaîne ne sont pas contrôlées elles
 conduisent à l'explosion: la fission explosive est exploitée
 dans les bombes nucléaires destructrices du règne
 animal et végétal.

La fission contrôlée est exploitée dans
 les réacteurs nucléaires pour produire l'électricité et quelques radioisotopes utilisés en
 médecine. Ce contrôle a lieu par absorption de l'excès des neutrons par des noyaux "neutrophages"
 tel le cadmium qui, par réaction $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)^{114}\text{Cd}$, permet de contrôler le nombre de fissions
 par seconde dans le réacteur, donc permet le contrôle de la puissance du réacteur nucléaire.

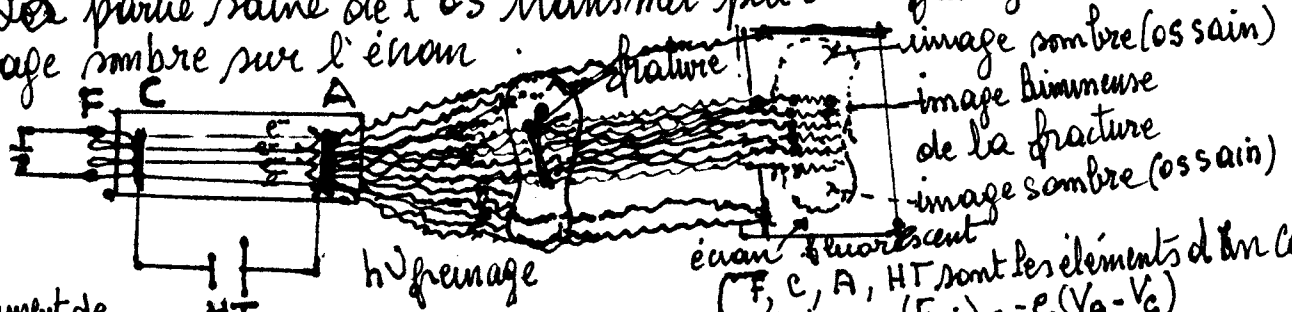
II Exploitation des photons de freinage en radiologie

Rappelons qu'un photon de freinage est issu de la perte d'énergie d'un électron relativiste freiné au niveau du champ électrique d'un noyau atomique (voir chapitre 3). Les électrons relativistes, produits dans un canon à e^- , en générant des $h\nu_{\text{freinage}}$ au niveau de l'anode de A sont utilisés en radiologie pour explorer le corps humain. Leur atténuation varie avec la densité du tissu traversé. Les photons transmis par un tissu sont détectés en radioscopie par un écran fluorescent, en radiographie par un film photographique et dans un scanner par des détecteurs électroniques auxquels est associé un système informatisé pour l'analyse et l'observation, sur écran de télévision, des différents tissus -

Exemple : observation d'une fracture de l'os à l'aide des photons de freinage

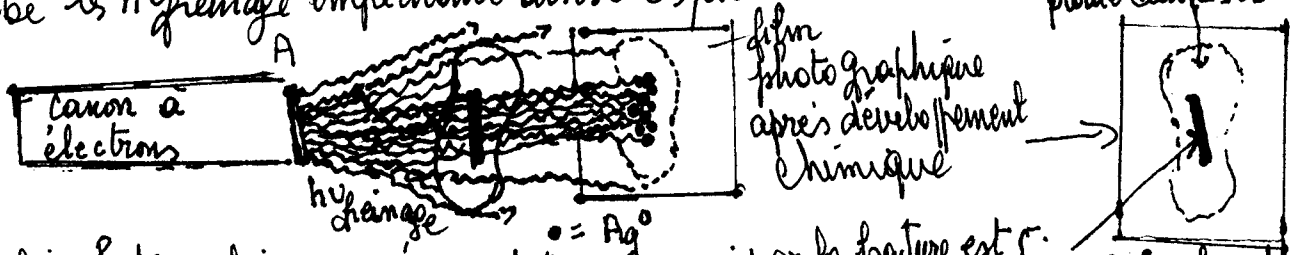
a) en radioscopie : les $h\nu_{\text{freinage}}$ transmis par la fracture excitent les atomes de l'écran : ces atomes se désolent par émission de photons de fluorescence lumineux $\Rightarrow h\nu_{\text{fluorescence}}$ = lumière verte par exemple.

La partie saine de l'os transmet peu de $h\nu_{\text{freinage}}$ et donne une image sombre sur l'écran.



F: filament de chauffage
C: cathode - A: anode - HT: haute tension

b) en radiographie : les $h\nu_{\text{freinage}}$ interagissent avec les ions Ag^+ du $Bn Ag$ contenus dans l'émulsion déposée sur une plaque en plastique. Les ions Ag^+ transformés en Ag^0 neutres apparaissent noirs après un développement chimique. Ainsi le film photographique montre une image sombre de la fracture car celle-ci transmet les $h\nu_{\text{freinage}}$ et une image claire de l'os sain qui réfléchit les $h\nu_{\text{freinage}}$ empêchant ainsi ces photons d'atteindre le film photographique.



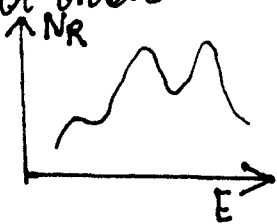
L'émulsion photographique exposée aux photons transmis par la fracture est noire après le développement chimique et l'émulsion non exposée se détache de son support lors du développement et sa place reste claire - [voir une radiographie des dents ou des poumons]

III Analyse spectrale

L'analyse spectrale est relative à l'étude des spectres des rayonnements émis ou bien absorbés par les substances - l'analyse spectrale permet l'identification d'une substance et la détermination de sa concentration dans un mélange de substances -

1) Définition d'un spectre de rayonnements

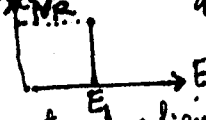
Un spectre est une courbe qui représente la distribution du nombre de rayonnement en fonction de l'énergie du rayonnement ou bien en fonction d'un autre paramètre comme la vitesse ou la longueur d'onde -



- Si le rayonnement est corpusculaire: $E = \text{énergie cinétique classique ou relativiste}$
- Si le rayonnement est électromagnétique $E = \text{énergie photonique}$:
 $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ $\left[\lambda = \frac{hc}{E} \Rightarrow \lambda \text{ et } E \text{ varient en sens inverse} \right]$

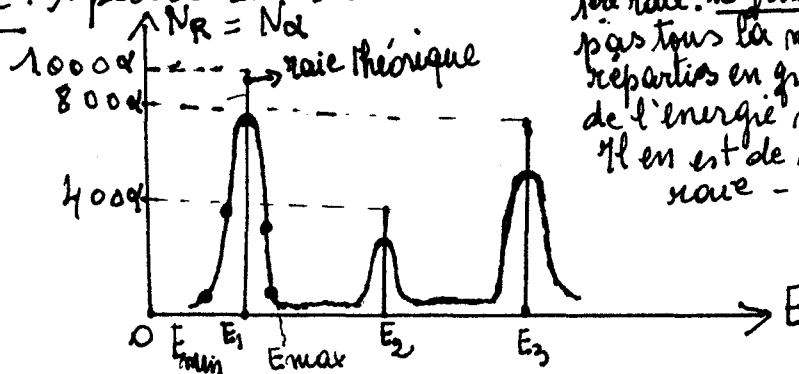
2) Formes des spectres des rayonnements

a) Spectre de raies: une raie représente un groupe de rayonnement monoénergétique - Les raies sont donc relatives à des groupes de rayonnement d'énergies différentes et bien séparées -



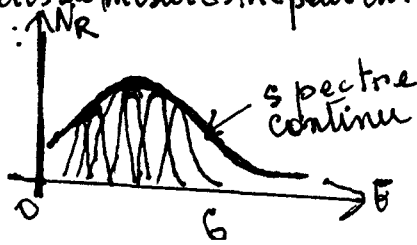
En théorie chaque raie est un trait vertical. En pratique la raie expérimentale est élargie et montre que l'énergie d'un même groupe de rayonnement fluctue entre E_{minimum} et E_{maximum} - En effet, les mesures répétées, dans les mêmes conditions, de l'énergie d'un groupe monoénergétique montrent des fluctuations statistiques et prouvent le caractère aléatoire du phénomène physique qui engendre ce groupe de rayonnement et du dispositif de mesure de cette énergie qui contribue à ces fluctuations.

Exemple: spectre de 3 raies.



une raie: le groupe de 10000 $\Rightarrow$ les 10000 n'ont pas tous la même énergie E_1 mais sont répartis en groupes d'énergies voisines autour de l'énergie moyenne E_1 . Il en est de même de la 2^{ème} et 3^{ème} raie -

b) Spectre continu: lors que les groupes de rayonnement ont des énergies très rapprochées que les appareils de mesures ne peuvent pas séparer, les raies se chevauchent et le spectre est continu:



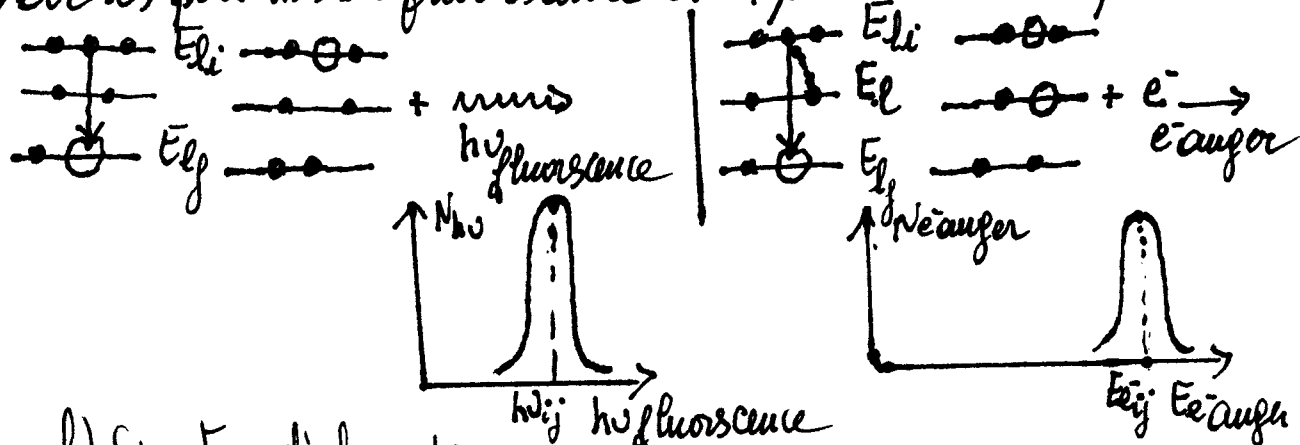
3) Exemples de spectres de rayonnements

a) Spectres d'émission des atomes excités

Ce sont des spectres des rayonnements de fluorescence et des rayonnements Auger émis lors des transitions électroniques pour remplir les lacunes engendrées dans le cortège des atomes suite à des phénomènes physiques comme l'ionisation, l'excitation, l'effet photoélectrique ou la capture électronique [voir chapitre 3 paradiagramme III],

le cortège électronique étant quantifié en niveaux occupés par des e^- en mouvement et ayant des énergies de liaison qui varient par valeurs discontinues, les mêmes transitions électroniques entre les mêmes niveaux $[E_{Li} \rightarrow E_{Lj}]$ sont suivies d'émission de photons de fluorescence de même énergie: $h\nu_{\text{fluorescence}} = E_{Li} - E_{Lj}$ ou bien d' e^- Auger de même énergie cinétique: $E_{e^- \text{ Auger}} = (E_{Li} - E_{Lj}) - E_{Lj}$. On obtient alors 1 raie pour les photons et 1 raie pour les e^- Auger issus des transitions de $E_{Li} \rightarrow E_{Lj}$.

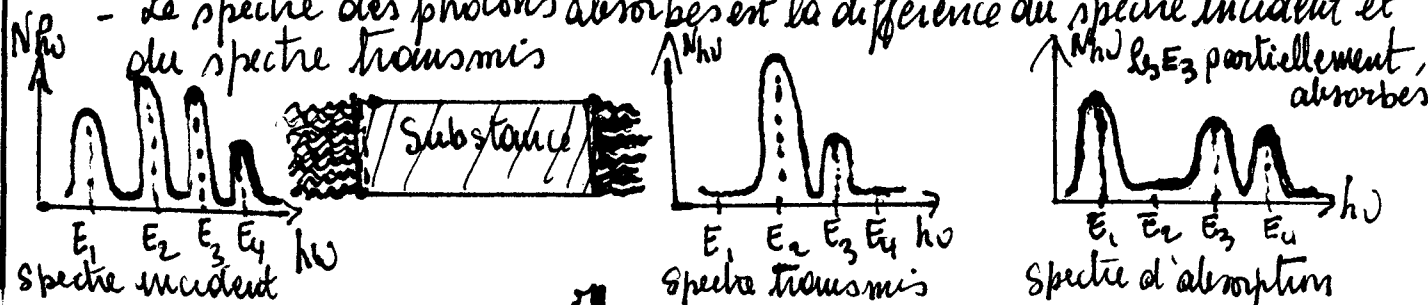
Plusieurs transitions différentes donnent donc un spectre de raies pour les photons de fluorescence et 1 spectre de raies pour les e^- Auger.



b) Spectre d'absorption des atomes

Les atomes absorbent les photons qu'ils émettent lors de la réorganisation de leur cortège électronique suite à l'existence d'une lacune. Observation d'un spectre d'absorption d'une substance.

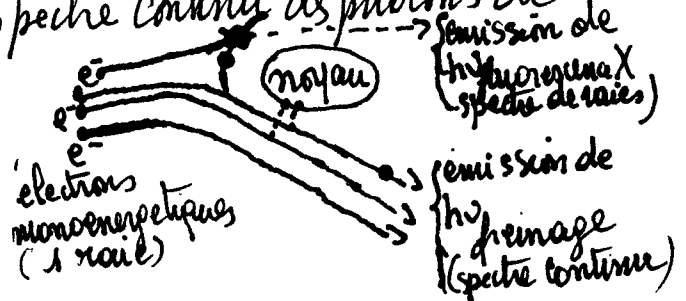
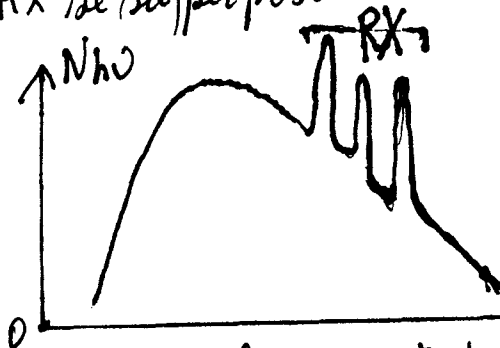
- Les photons incidents sont polyénergétiques avec des raies voisines
- On détermine le spectre des photons transmis par la substance
- Le spectre des photons absorbés est la différence du spectre incident et du spectre transmis



c) Spectre des photons de freinage

La distance d'approche e^- relativiste - noyau pouvant avoir des valeurs continues la perte d'énergie cinétique $\Delta E = E_e - E_{résiduelle}$ peut également prendre des valeurs continues - De ce fait les photons de freinage d'énergie $h\nu = \Delta E$ ont des valeurs continues: $0 < h\nu < E_e^-$ et présentent donc un spectre continu qui commence depuis les photons Infra rouges (IR) jusque aux $h\nu = h\nu_e^-$

Remarque: lorsque les e^- relativistes d'un canon à e^- bombardent une anode métallique on observe les photons de freinage mais également des photons de fluorescence X (RX) - les RX viennent du fait que les e^- ont une possibilité de produire des ionisations et des excitations au niveau du cortège, y engendrer ainsi des lacunes dans les niveaux K et L et conduire à des transitions électroniques suivies de l'émission de RX - Le spectre de raies des RX se superposent au spectre continu des photons de freinage



4) Détermination de la concentration d'une substance par une méthode d'absorption

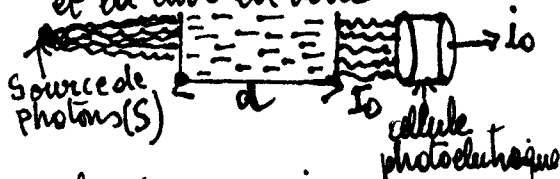
- Concentration d'une substance en solution par des mesures de densité optique (DO)
- La loi de Beer - Lambert $I_t = I_0 e^{-\epsilon c d} \Rightarrow DO = \log \frac{I_0}{I_t} = \epsilon c d \Rightarrow C = \frac{DO}{\epsilon d}$

Les mesures des intensités initiale I_0 et transmise I_t nécessitent la connaissance préalable du spectre d'absorption de la substance afin de choisir les photons qui permettent des mesures des intensités I_t : les photons totalement absorbés donnent $DO \approx 0$

- Choix du détecteur de photons: une cellule photoélectrique délivre un courant d'intensité i lorsqu'elle reçoit des photons: ce sont les photoélectrons issus de l'effet photoélectrique entre $h\nu$ et les e^- des atomes de la cellule qui sont à l'origine du courant: $i = me$ - L'expérience montre que l'intensité I des photons et l'intensité i courant sont proportionnels: $I = \alpha i$

① mesure de I_0 en l'absence de la substance:

I_0 = intensité transmise par le solvant et la cuve en verre



② mesure de I_t en présence de la substance, du solvant + la cuve: I_0 est atténuée par la substance



Exemple: $i_0 = 2 \mu A$; $i = 1 \mu A$; $d = 1 \text{ cm}$; ϵ = coefficient d'extinction molaire $= 10^3 \text{ l mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$

$$C = \frac{\log 2}{10^3} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ mol.l}^{-1}$$