

RAYONS X

I. INTRODUCTION

Dans ce cours nous allons étudier comment marchent les éléments liés à la radiologie en étudiant la compréhension du fonctionnement du tube à rayons X. Ce tube est constitué d'une enceinte blindée à l'intérieur de laquelle se trouve :

- La cathode : au niveau duquel le faisceau d'électrons est généré.
- L'anode : est un disque biseauté, sur lequel va être projeté le faisceau d'électron après avoir été accéléré dans le tube, ce qui va créer des photons qui sont en réalité les rayons X.

Ces photons, rayons X, vont devoir être dirigés, dans l'axe selon le lequel on veut faire la radiographie. Une fois sorti du tube les rayons X doivent traverser le patient en direction de la table radiologique. Dans laquelle se trouve un film radiologique permettant de détecter les rayons X à fin d'obtenir les radio-biographies.

II. L'INTERACTION DES ELECTRONS AVEC LA MATIERE

L'interaction des électrons avec la matière peut se faire de deux manières :

- Par collision : les électrons incidents interagissent avec les électrons de la matière.
- Par freinage : les électrons incidents ont une interaction avec les noyaux de la matière.

Dans tous ces deux cas l'électron incident va :

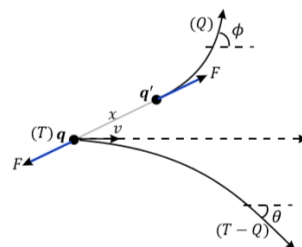
- Perdre son énergie par une des deux interactions.
- Effectuer une interaction de type coulombienne, c'est-à-dire des interactions entre des particules chargées.

La grande différence entre ces deux types d'interactions réside dans la masse de la particule avec laquelle va interagir l'électron incident, soit un électron, soit un noyau.

C'est dans cette différence de masse que va résider la différence d'effet entre les deux types de collision.

A. INTERACTION ENTRE DEUX PARTICULES CHARGÉES

Exemple : Supposons deux électrons q et q' chargés négativement (Rappel : Deux particules de même charge se repoussent).



On a :

- La particule incidente q chargée, en mouvement avec une énergie cinétique T .
- La particule q' chargée supposée immobile est au repos.

Du fait des charges présentés par les électrons, il va y avoir une force F dite coulombienne qui va s'exercer entre ces deux particules :

$$F = \frac{kqq'}{x^2}$$

k = facteur de proportionnalité
 qq' = produit des charges
 x^2 = la distance au carrée entre les deux charges.

Lorsque la particule incidente q va arriver à portée électrostatique de l'autre particule, cette dernière va alors exercer une force coulombienne qui va mettre en mouvement la particule au repos q' .

Nous allons donc avoir :

- La particule au repos q' , projetée dans une direction ϕ , avec une énergie cinétique Q .
- La particule incidente q est déviée d'un angle θ en transférant ainsi une partie de son énergie cinétique à la particule mise en mouvement (q').
- L'énergie cinétique de la particule q' mise en mouvement sera alors égale à $T - Q$, T étant l'énergie cinétique initiale de la particule q .

C'est l'équivalent d'un choc physique, c'est la même chose que si les particules s'étaient percutées.

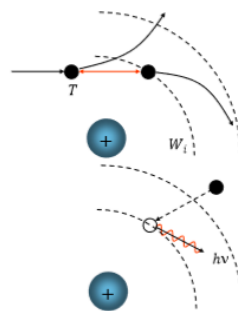
On retrouve donc :

- Une mise en mouvement de la particule q' .
- Une déviation de la particule incidente.
- Ainsi qu'un partage de l'énergie incidente.

Ici, tout se fait de manière électrostatique, les particules ne vont en réalité pas se toucher et vont juste interagir vis-à-vis de ces forces coulombiennes.

B. INTERACTION ELECTRON – ELECTRON : INTERACTION DITE PAR « COLLISION »

On considère un électron incident possédant une énergie cinétique T et $|W_i|$ l'énergie de liaison d'un électron de la matière cible.



On peut retrouver 3 situations vues dans les cours précédents :

- Si $T \geq |W_i|$ on va retrouver une ionisation de l'électron, il va être expulsé de la matière cible.
- Si $T = \Delta |W_i|$ l'électron va subir une excitation.
- Si $T < |W_i|$ et si $T \neq \Delta |W_i|$ il y aura des phénomènes de vibration et de chaleur.

Conséquences pour la cible si ionisation ou excitation :

S'il y a une ionisation ou une excitation de la matière, l'atome va devoir retourner à son état fondamental en réarrangeant son cortège électronique. En conséquence, il produira des photons de fluorescence d'énergie $h\nu$ quantifiée. (ce qui aura pour conséquence de produire un spectre de raie)

Le Tutorat est gratuit. La vente ou la reproduction sont interdites

Dans ce cas particulier les photons de fluorescence sont appelés des rayons X.

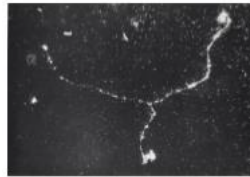
Ces rayons X seront quantifiés en fonction des énergies de liaison des atomes de la cible, ils sont donc considérés comme caractéristiques de la cible.

Conséquences pour l'électron incident :

L'électron incident va être tout d'abord dévié et il va perdre de son énergie incidente, cependant il possédera néanmoins une énergie cinétique assez élevée pour effectuer encore des interactions coulombiennes avec les nombreux électrons de la cible plus ou moins distants dans la matière.

Assez rapidement on ne distingue plus l'électron incident, des électrons avec lesquels il interagit secondairement. On considère donc l'électron ayant la plus grande énergie cinétique, comme étant l'électron incident.

Description du trajet de l'électron :



Le parcours de l'électron est étudié dans une chambre à brouillard, chacun des points correspond à l'ionisation d'un électron.

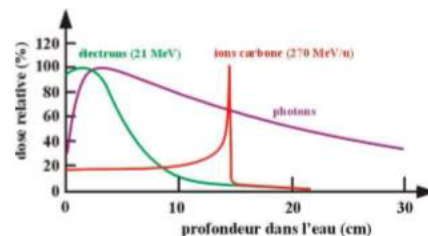
Au niveau de la séparation en « Y » on a une « collision » un peu plus frontale et les deux électrons sont déviés effectuant ainsi d'autres ionisations sur leur chemin, jusqu'à ce que l'énergie cinétique finisse par devenir inférieure au seuil d'ionisation.

Schématisation du phénomène :



L'électron incident arrive avec une certaine énergie cinétique, et va passer à distance de certains électrons en leurs transférant une légère partie de son énergie, il sera à peine dévié. Ce sont des collisions lointaines.

Ensuite, on observe une déviation de l'électron incident et d'une autre particule mise en mouvement (au niveau de la division en « Y »). Cela se produit quand l'électron interagit avec un autre électron à faible distance de ce dernier. Ce sont des collisions dites proximales. L'électron incident et celui mis en mouvement, vont à leur tour provoquer de nombreuses ionisations sur leur passage.



La courbe ci-contre représente le nombre d'ionisation en fonction de la profondeur dans les tissus. (Ici pour des électrons de 21 MeV) On remarque que ces ionisations sont assez précoces dans

une épaisseur de tissu relativement faible. Lorsque l'on utilisera les électrons en radiothérapie ce sera pour des lésions peu profondes.

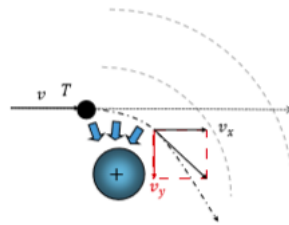
C. INTERACTION ELECTRON – ELECTRON : INTERACTION DITE PAR « COLLISION »

Dans ce type d'interaction, il faut bien comprendre que les électrons ne vont plus interagir avec les électrons de la matière cible, mais avec les noyaux de celle-ci.

Les différences de masse entre la cible et l'électron incident vont impacter sur le transfert d'énergie entre les particules ce qui fera que l'interaction coulombienne n'aura pas du tout les mêmes conséquences pour les particules.

- Le transfert d'énergie au noyau est pratiquement nul, il ne sera pas sollicité par l'électron passant à proximité.
- L'électron lui sera attiré par la charge positive du noyau et sera donc dévié.

La trajectoire de l'électron incident va s'incurver. Il subira donc une accélération centripète vers le noyau.



Si on décompose plus précisément le mouvement, en passant à proximité du noyau l'électron va donc subir :

- Une accélération vers le noyau (v_y)
- Mais aussi un freinage par rapport la direction d'origine (v_x)

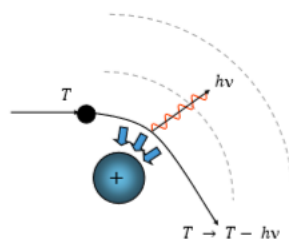
Dans ce phénomène, malgré le manque d'interaction par collision, il se produit tout de même un rayonnement, car un électron soumis à une accélération va rayonner sous forme électromagnétique. On aura donc une production à nouveau de rayons x.

Conséquences pour la matière :

L'incurvation et l'accélération de l'électron créent un rayonnement électromagnétique, donc un photon (ici $h\nu$), qui est à nouveau qualifié de rayons x.

Conséquences pour l'électron incident :

- Il est dévié.
- Il perd une partie de son énergie, sous forme de photon dit « de freinage ».



L'énergie de l'électron incident devient alors égale à $T - h\nu$. On appelle ça : le rayonnement de freinage ou « bremsstrahlung »

Le Tutorat est gratuit. La vente ou la reproduction sont interdites

Plus l'électron passe à proximité du noyau, plus l'accélération est élevée et plus l'énergie du photon $h\nu$ émis est élevée.

Contrairement à l'interaction par « collision », ici l'énergie rayonnée sous la forme du photon $h\nu$ n'est pas quantifiée, elle peut donc prendre toutes les valeurs entre 0 et T, le spectre émis sera donc un spectre continu.

Les électrons peuvent interagir avec la matière de 2 façons :

Par « collision » : avec les électrons de la matière, et donne des photons de fluorescence qui sont des rayons X caractéristiques de la cible, l'énergie est donc quantifiée.

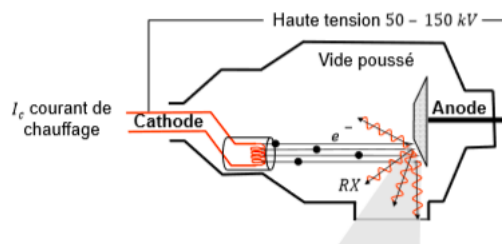
Par freinage : avec les noyaux de la matière, et donne des rayonnements électromagnétiques qui sont aussi des rayons X mais d'origine différente, et d'énergie non quantifiée, continue.

III. PRODUCTION DES RAYONS X

A. LE TUBE A RAYONS X

Le tube à rayons X est constitué d'une enceinte blindée dans laquelle il y a un vide poussé. D'un côté du tube on retrouve une cathode, dans laquelle va circuler un courant électrique I_c (le courant de chauffage) et de l'autre l'anode, qui est un disque biseauté où vont se produire les interactions des électrons avec la matière.

Entre la cathode et l'anode, on applique une haute tension d'intensité variable mais dont l'ordre de grandeur est entre 50 et 150 kV.



Fonctionnement général :

Le courant de chauffage I_c , le vide poussé et la haute tension qui règne à l'intérieur du tube, le filament qui compose la cathode va produire des électrons qui vont être accélérés dans le tube pour aller percuter l'anode.

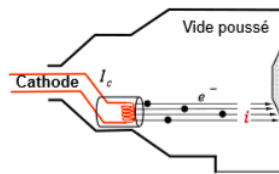
Ces électrons vont aller interagir avec la matière de l'anode pour produire des rayons X, par freinage ou par collision. Ces rayons X vont être collimatés (= dirigés) en direction de la partie du corps à irradier.

B. LA CATHODE = EMETTEUR D'ELECTRONS

C'est un filament, en général de Tungstène, dans lequel circule un courant de chauffage I_c , de l'ordre de 0,5 à 1 A.

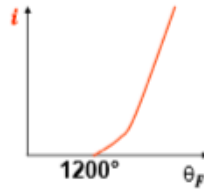
Lorsque le filament est porté à incandescence un phénomène thermo-électronique va se produire, des électrons vont pouvoir être arrachés de la cathode à condition, qu'il y est une haute tension suffisante qui règne dans le tube.

On aura donc un flux d'électrons de la cathode à l'anode, c'est ce que l'on appelle le courant anodique noté i (de l'ordre du mA).



Relation entre I_c et i :

Cette relation peut être exprimée grâce à ce graphique :

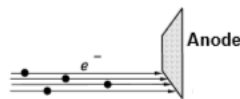


On peut remarquer, que le phénomène ne survient qu'à partir d'une température seuil de 1200° après laquelle apparaît l'effet thermoélectronique, plus le courant de chauffage I_c est important, plus le courant anodique i va augmenter.

Il existe donc une certaine proportionnalité entre la température de la cathode, (directement liée au courant de chauffage I_c) et l'intensité du courant anodique i .

C. L'ANODE (CIBLE)

L'anode est lieu de l'interaction des électrons avec la matière, soit par « collision », soit par « freinage » ou si l'énergie cinétique est insuffisante, il y'aura uniquement une production de chaleur.



La probabilité d'interaction dépend du Z , c'est donc pour ça que l'on utilise des cibles métalliques avec un Z élevé à fin d'optimiser l'interaction des électrons avec la matière.

Il y'a de nombreux électrons de faible énergie qui ne provoquent pas d'ionisation mais seulement de la chaleur. Ces interactions provoquent donc une forte production de chaleur au niveau de l'anode. Pour éviter que l'anode ne fonde on a recours à plusieurs astuces pour la refroidir :

- L'utilisation d'alliages avec un point de fusion assez élevé pour ne pas fondre sous l'effet du flux électronique. (Souvent un alliage Tungstène – Rhénium).
- L'utilisation d'anodes tournantes et d'un disque biseauté.

L'anode tournante va permettre que le point d'impact des électrons sur la cible va en permanence changer sur la circonférence de la cible et par conséquent que la production de chaleur va se répartir sur toute la périphérie de la cible plutôt qu'à un seul endroit en particulier.

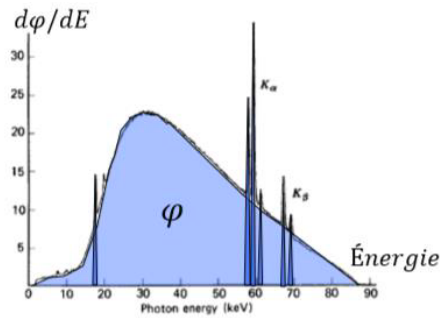
Comme vous l'aurez compris, c'est donc au niveau de l'anode qu'à lieu les interactions entre les électrons incidents et la matière, et donc la production des rayons X.

IV. SPECTRE DES RAYONS X

A. DESCRIPTION

Spectre énergétique :

Le Tutorat est gratuit. La vente ou la reproduction sont interdites



- En abscisse : On à l'énergie des photons produits (en keV)
- En ordonnée : on a $d\phi/dE$ qui correspond à la **fraction du flux** qui est portée par le rayonnement pour **un intervalle d'énergie dE** .

Ou plus simplement, le nombre de photons qui sont générés par le tube pour une énergie donnée.

On voit ici que le sommet de la cloche (sans compter les raies) est aux alentours de 30 keV, donc on retrouve un maximum de photon avec une énergie de l'ordre de 30 keV.

Composantes du spectre :

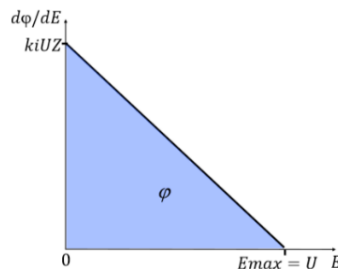
On retrouve 2 composantes principales :

- Une composante continue qui ressemble à une cloche. (Correspondant aux interactions par freinage)
- Une composante de raies. (Correspondant aux interactions par « collision »)

La surface sous la courbe de ce spectre correspond au flux énergétique global de photons noté ϕ .

B. EXPLICATION DE LA COMPOSANTE CONTINUE

Cette composante continue correspond aux rayons X produits par freinage, pouvant prendre une valeur quelconque entre 0 et un maximum.



La valeur de l'énergie des rayons X dépend de la distance entre les noyaux de la matière et les électrons incidents, lors de l'interaction. On a un maximum de photons X continus de faible énergie, ce sont ceux créés par les électrons passant à distance des noyaux.

Si on reprend le schéma précédent, pour une énergie qui tend vers 0 le nombre de photons X produits correspond à $kiZU$, on a donc :

$$\text{Pour } E = 0: \frac{d\phi}{dE} = kiZU$$

k = constante caractéristique du tube

i = le courant anodique

Z = le numéro atomique de la cible

Le Tutorat est gratuit. La vente ou la reproduction sont interdites

$$U = \text{la haute tension}$$

On ne peut pas obtenir de rayons X d'une valeur énergétique supérieure à la valeur de la haute tension (Qui détermine numériquement l'énergie cinétique des photons).

En théorie, le spectre des rayons X produits par freinage devrait avoir la forme triangulaire vue précédemment.

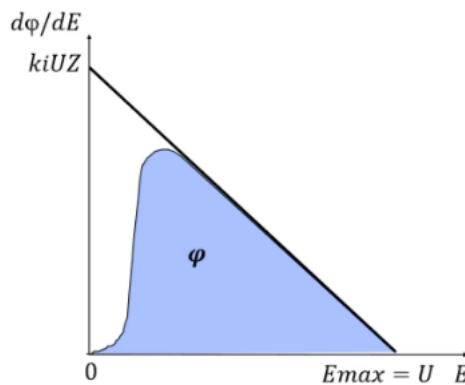
On peut calculer l'équation de la droite qui relie la valeur $kiZU$ et E_{max} , on obtient :

$$\frac{d\varphi(E)}{dE} = kiZ(U - E)$$

On peut aussi calculer facilement φ (le flux énergétique) représenté par la demie surface du rectangle:

$$\varphi = \frac{kiZU \times E_{max}}{2} = \frac{kiZU^2}{2}$$

En pratique, le spectre ne ressemble pas parfaitement au spectre triangulaire que l'on a observé plus tôt, car il y a des phénomènes d'auto-absorption dans la cible et dans le tube qui font qu'on perd les photons de faible énergie. Ils ne sont pas détectés à la sortie du tube. On obtient donc cette courbe avec une augmentation progressive, puis un maximum et enfin une décroissance linéaire.



C. EXPLICATION DE LA COMPOSANTE DE RAIES

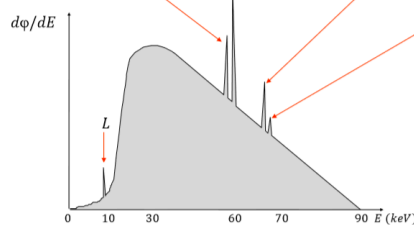
Ce sont les rayons X caractéristiques qui composent le spectre de raies, donc les photons de fluorescence des interactions par « collision » entre deux électrons. On considère que la cible est composée de Tungstène ($Z=74$).

Quels sont les réarrangements possibles dans le Tungstène, qui vont nous donner les possibles rayons X caractéristiques de la cible ?

On utilise cette fois-ci le modèle de Borh-Sommerfeld, (Plus sophistiqué que le modèle de Borh), qui considère les couches classiques, (K, L, M) mais aussi des sous-couches supplémentaires. (L_1 L_2 L_3 etc..)

Supposons que notre tube fonctionne sous une haute tension U de 90 kV.

keV	K	L _I	L _{II}	L _{III}	M _I	M _{II}	M _{III}	N _{III}	e libre
W_i	-69,5	-12,1	-11,5	-10,2	-2,8	-2,6	-2,3	-0,43	0
$W_i - W_K$	0	57,4	58	59,3	66,7	66,9	67,2	69,0	69,5
Raies			$K - L_{II}$	$K - L_{III}$		$K - M_{II}$	$K - M_{III}$	$K - N_{III}$	K



On considère un atome ionisé sur sa couche K, (donc avec une vacance sur cette couche), on peut calculer l'énergie des photons possibles entre les différentes couches, en sachant que toutes les transitions ne sont pas possibles. Les seules transitions possibles sont notées sur la dernière ligne du tableau.

Ces photons sont observables lorsqu'on a ionisé les atomes de Tungstène de notre cible. On les retrouve sur le spectre, ils forment les raies spécifiques liées aux réarrangements de ces atomes de Tungstène.

On observe ici les réarrangements après ionisation sur la couche électronique K. (C'est aussi possible sur les autres couches). On peut aussi voir sur le spectre une petite raie dans les basses énergies qui correspond au réarrangement après ionisations d'un électron sur la couche L.

