

PHOTONS X

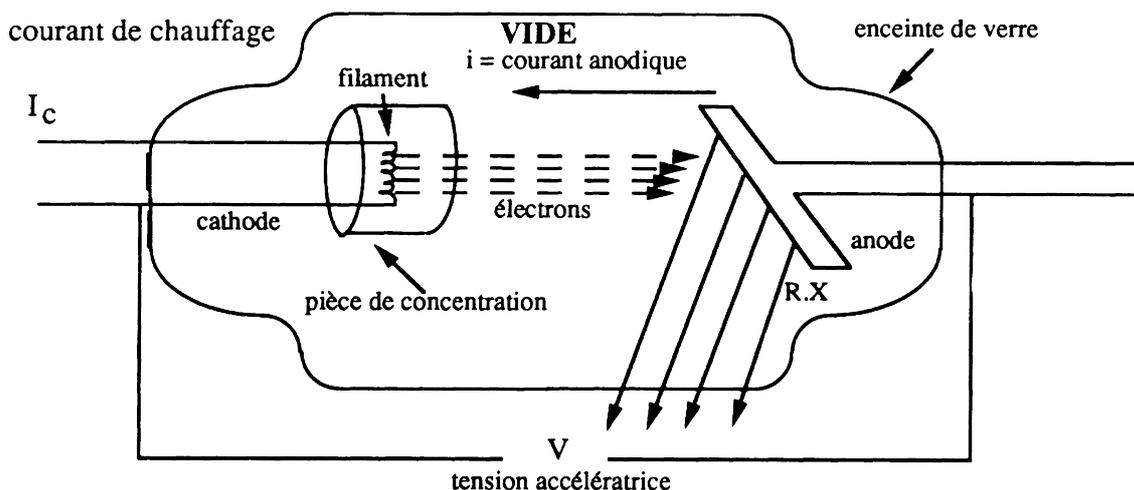
1. Historique

En octobre 1895, Wilhelm Conrad Röntgen s'intéresse aux effets produits par le passage d'un courant électrique dans des gaz rares. Utilisant les connaissances de ses aînés et y ajoutant un soupçon d'intuition, Röntgen entoure de carton noir le tube à rayons cathodiques sur lequel il effectue ses recherches. Il observe alors l'apparition d'une fluorescence sur la plaque de platinocyanure de baryum placée en face du tube. Ces nouveaux rayons que Röntgen nomme "X", traversent la matière quand celle-ci, placée entre l'ampoule et l'écran, n'a pas trop de consistance. C'est la radiologie que Röntgen vient d'inventer ; sa première radiographie, celle de la main de sa femme, fera le tour du monde et reste la plus célèbre à ce jour. La semaine suivante, la nouvelle est connue de tous et l'expérience reproduite dans les mêmes conditions par les scientifiques du monde entier.

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques de hautes fréquences. (de 3×10^{17} Hz à 5×10^{19} Hz).

2. Production des rayons X.

Les rayons X sont produits lorsque que des **électrons fortement accélérés** percutent une cible métallique. L'appareil de base porte le nom de tube de Coolidge.



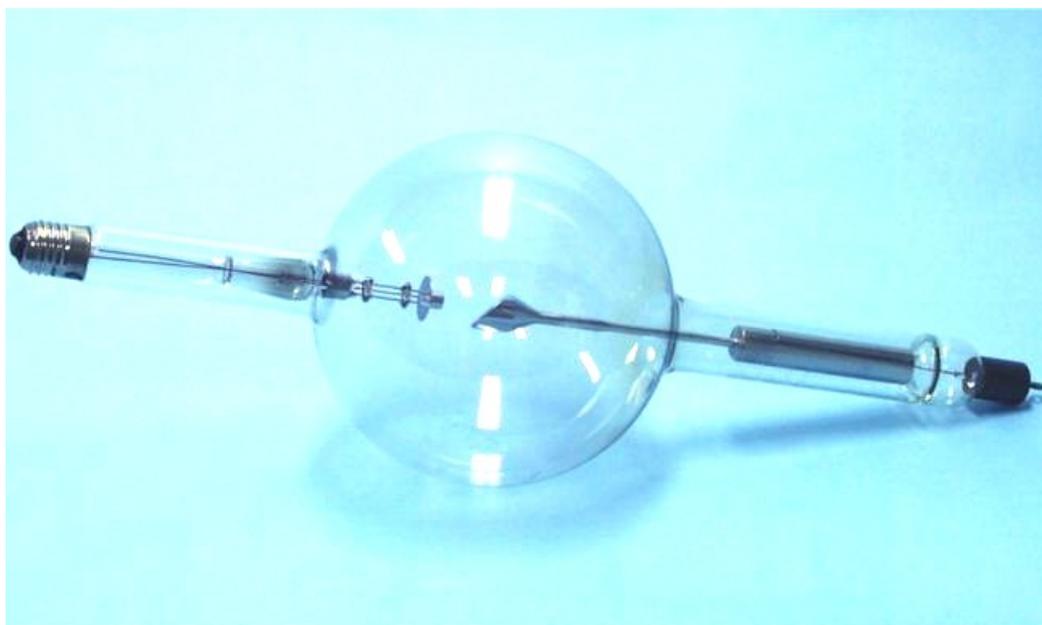
Les électrons sont produits par effet thermoélectronique à partir d'un filament en tungstène porté à haute température par un courant de chauffage d'intensité I_c de quelques ampères.

Les électrons sont ensuite **accélérés par une différence de potentiel de quelques dizaines de kV** qui est maintenue entre le filament porté à un potentiel négatif (cathode) et la cible métallique (anode ou anticathode sur certains dispositifs), également en tungstène (on utilise aussi des cibles en molybdène), qui se trouve à un potentiel positif.

Pour éviter une divergence trop grande due à la répulsion des électrons entre eux, le filament est entouré d'un cylindre chargé négativement ; c'est la pièce de concentration ou de focalisation.

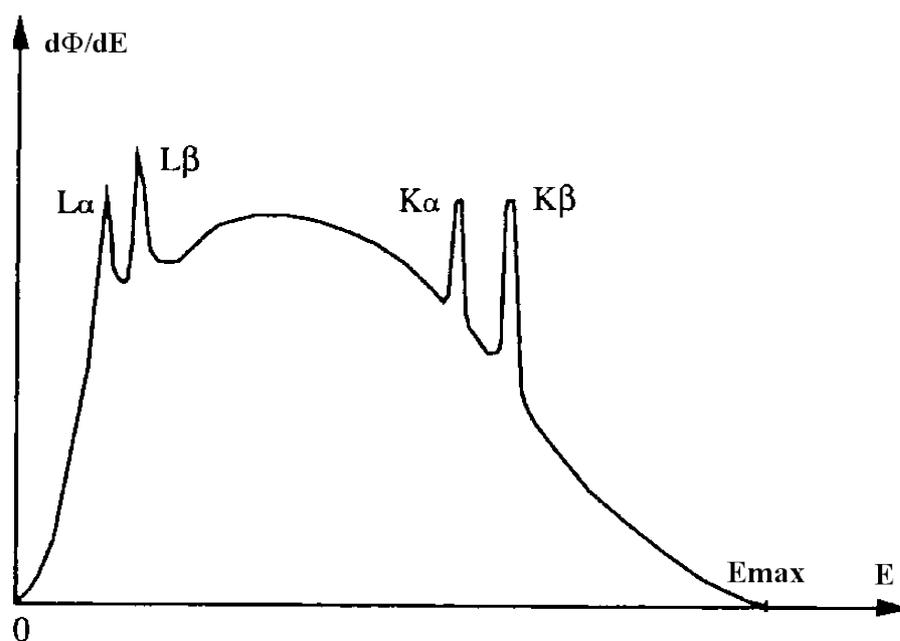
L'ensemble du dispositif est placé dans une enceinte de verre où règne un vide aussi poussé que possible afin de ne pas ralentir le mouvement des électrons par collisions avec des atomes de gaz.

Au déplacement des électrons de la cathode vers l'anode, correspond un courant en sens inverse d'intensité i , encore appelé courant anodique ou milliampérage, (à ne pas confondre avec le courant de chauffage I_c) ; l'intensité est de l'ordre de quelques milliampères et dépend de la tension accélératrice et de la température du filament.



3. Spectre d'émission.

Le spectre des rayons émis est la superposition d'un spectre de raies et d'un spectre continu.



Le spectre de raies (pics) est dû à l'émission de photons par les atomes de la cible.
 Le spectre continu (bosse) est dû au freinage des électrons par la cible (rayonnement de freinage).
 C'est le spectre continu qui fournit les rayons X utilisables en radiologie.

Remarques :

Si n est le nombre de photons de fréquence comprise entre ν et $\nu + d\nu$ émis par unité de temps ($n = dN/dt$), la puissance rayonnée par ces photons vaut $\Phi = nh\nu$ (cf. puissance lumineuse émise par le laser)

Cette puissance **due aux photons d'énergie $E = h\nu$** (à dE près) est représentée par la **surface** de la colonne de largeur dE et de hauteur $d\Phi/dE$.

La surface totale comprise entre la courbe et l'axe des abscisses représente la **puissance totale** émise sous forme de rayonnement par la source (par tous les photons émis, quelles que soient leurs énergies).

3.1. Spectre de raies : ionisation des atomes de la cible.

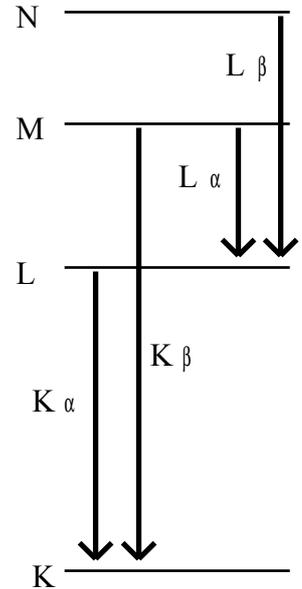
Les électrons incidents très énergétiques peuvent arracher les électrons des couches profondes des atomes de la cible au cours d'un choc.

L'atome ionisé est instable ; il revient à son état fondamental par réarrangement électronique et émet un ou plusieurs photons de fluorescence (UV ou X) ; il y a également possibilité d'émission d'électrons Auger (ce phénomène est négligeable pour des atomes cibles pour $Z > 70$)

Les lettres K et L correspondent au nom de la couche d'arrivée des électrons au cours du réarrangement.

L'indice α ou β indique si l'électron arrive d'une couche immédiatement supérieure ou d'une couche plus lointaine (voir le spectre du tungstène).

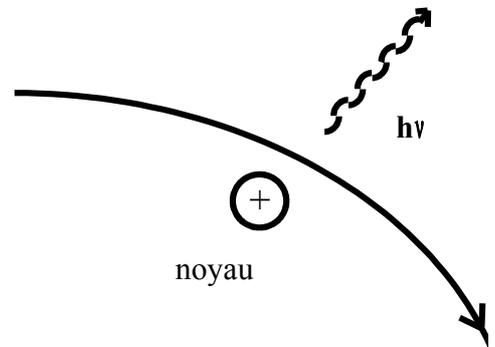
Le spectre de raies est caractéristique des atomes de la cible.



3.2. Spectre continu : rayonnement de freinage

Lorsqu'un électron d'énergie cinétique E_c arrive au voisinage d'un noyau, sa trajectoire est déviée et il subit une accélération due à la force attractive d'origine électrostatique.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2}$$



Les lois de l'électromagnétisme appliquées à une particule chargée accélérée montrent que celle-ci rayonne de l'énergie.

L'énergie $E = h\nu$ émise sous forme de rayons X est prélevée sur l'énergie cinétique E_c de l'électron qui poursuit sa trajectoire avec une énergie cinétique plus faible E_c' telle que :

$$h\nu = E_c - E_c'$$

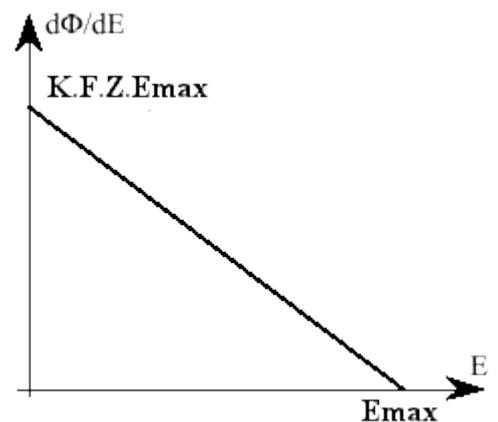
L'énergie cinétique des électrons diminue (ils sont ralentis) : le rayonnement est appelé **rayonnement de freinage**.

L'interaction entre le noyau et l'électron est d'autant plus forte que celui-ci passe près de la cible (la courbure de la trajectoire est plus forte).

Toutes les distances entre le noyau et la trajectoire de l'électron incident étant possibles, toutes les valeurs de $h\nu$ seront possibles depuis 0 lorsque l'électron passe loin du noyau jusqu'à E_{max} quand toute l'énergie cinétique de l'électron est communiquée au photon X.

La valeur $E_{max} = h\nu_{max}$ est liée à l'énergie cinétique des électrons (le faisceau des électrons peut être considéré comme homocinétique) et ne dépend que de la tension accélératrice U ; en effet l'énergie cinétique des électrons vaut : $E_c = eU$.

On en déduit que $E_{max} = eU$



spectre théorique du rayonnement de freinage

K est une constante caractéristique de la géométrie du système.

F est le flux d'électrons incidents proportionnel au courant anodique $i = eF$

Z est le numéro atomique de la cible

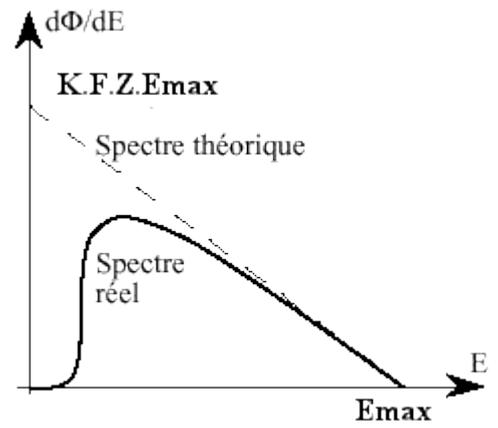
E_{max} est l'énergie maximale des électrons

La puissance (théorique) émise sous forme de rayonnement est proportionnelle au nombre atomique de la cible, au courant anodique et au carré de la tension accélératrice U.

$$\Phi = \frac{1}{2} K F Z E_{\max}^2 = \Phi = \frac{1}{2} K' i Z U^2$$

Dans la réalité, la cible et les parois du tube absorbent une grande partie du rayonnement de freinage dans les basses énergies ; le spectre "réel" diffère du spectre théorique pour les faibles valeurs de v.

On utilise également des filtres métalliques pour accentuer la disparition des photons de basses énergies qui interagissent trop avec la matière.



3.3. Modification du spectre.

Le spectre d'émission peut être modifié au gré de l'utilisateur ; celui-ci peut contrôler la tension accélératrice U et l'intensité anodique i ; il peut également utiliser des filtres.

4. Rendement d'un tube à rayons X.

Les interactions entre les électrons et la cible n'aboutissent que très partiellement à une émission de rayons X ; la plupart sont des chocs électron / électron avec faible transfert d'énergie et aboutissent à une intense production de chaleur.

La puissance rayonnée est donnée par la formule $\Phi = \frac{1}{2} K.F.Z.U^2$; la puissance électrique fournie vaut $P = U i$, où l'intensité i du courant anodique est proportionnelle au flux d'électrons F.

Le rendement $r = \Phi/P$ est donc proportionnel à Z et U.

Il est de l'ordre de 1% pour des tubes usuels.

