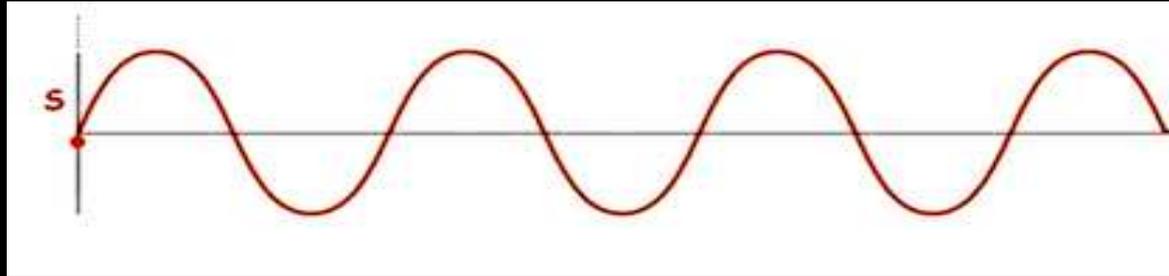


Les rayons X

Olivier Ernst

Lille

La physique pour les nuls 1



Une onde est caractérisée par :

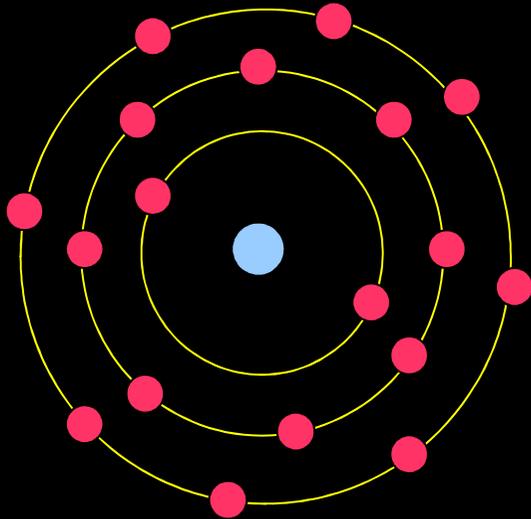
Sa fréquence F en Hertz (Hz) : nombre de cycle par seconde

Sa longueur λ : distance entre 2 maximum

Sa vitesse de propagation V en m/s

Relation : $\lambda = V / F$

La physique pour les nuls 2



Diamètre de l'atome 10^{-10} m

Diamètre du noyau 10^{-15} m

Diamètre de l'électron noyau 10^{-18} m

Si l'échelle était respectée, le noyau et les électrons seraient invisibles sur ce dessin

Organisation électronique en couche K L M Q

La physique pour les nuls 3

Dualité onde corpuscule

Onde = particule sans masse d'énergie $E = h F$

Particule = onde telle que $\lambda = h / m v$
(v vitesse de la particule, mv quantité de mouvement)

Nature des rayons X

Définition

Onde électromagnétique
produite par la décélération d'électrons
hors du noyau atomique

Ondes

Longueur d'onde λ (5 pm à 10 nm), Fréquence ν
C vitesse de la lumière

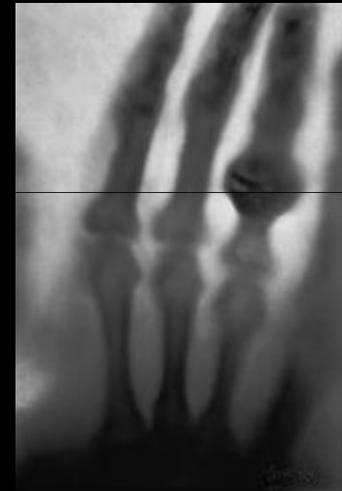
$$\lambda = C / \nu$$

Corpuscule

Photons d'énergie E $E = h \nu$
h constante de Planck

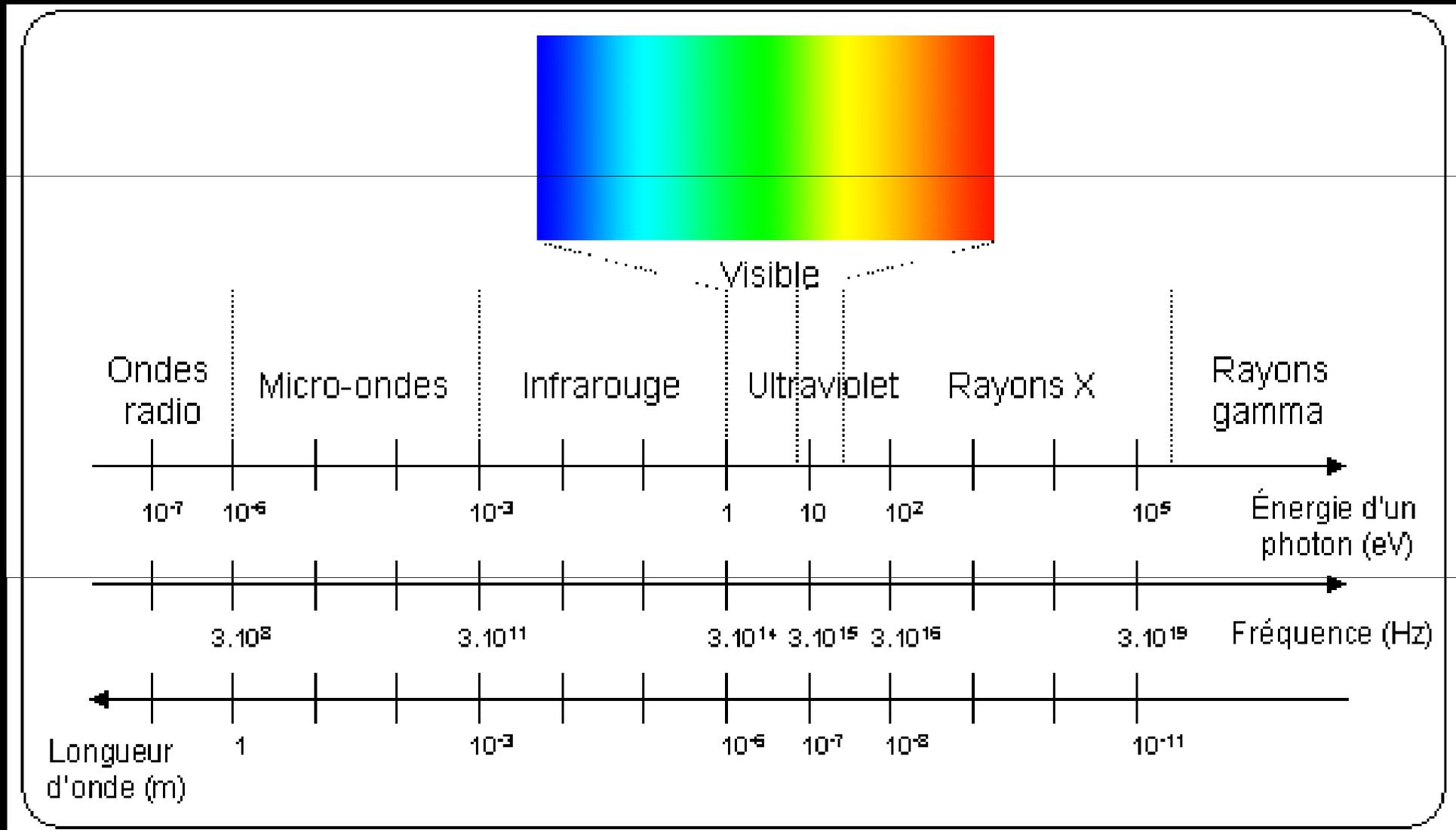
Remarque :

1 eV = $1.6 \cdot 10^{-19}$ J



Main de Mme
Roentgen 1895

Les différentes ondes électromagnétiques



Production des rayons X

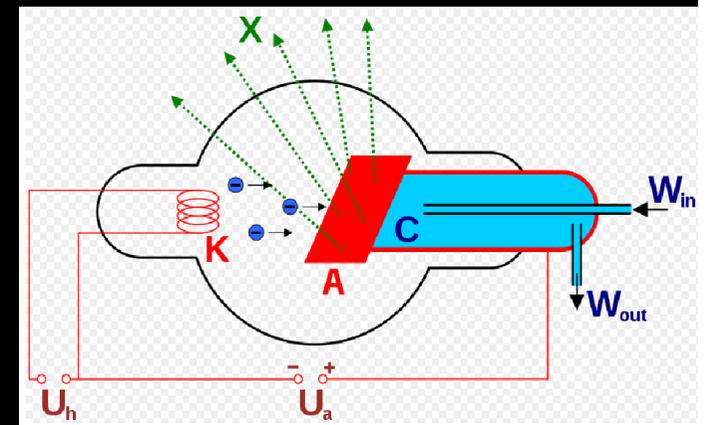
Tube de Coolidge

Tube à vide contenant un filament chauffé par une base tension (BT) et une anode (masse métallique) portée à une forte tension positive (haute tension HT) par rapport au filament

1 Production d'électrons par un filament conducteur chauffé à rouge (effet thermoïonique)

2 Attraction des électrons vers une cible métallique portée à une très forte tension positive (anode = anticathode) par rapport au filament (cathode)

3 Décélération brutale des électrons lors de leur arrivée sur l'anode. L'énergie cinétique se transforme en chaleur (beaucoup) et rayons X (un peu)

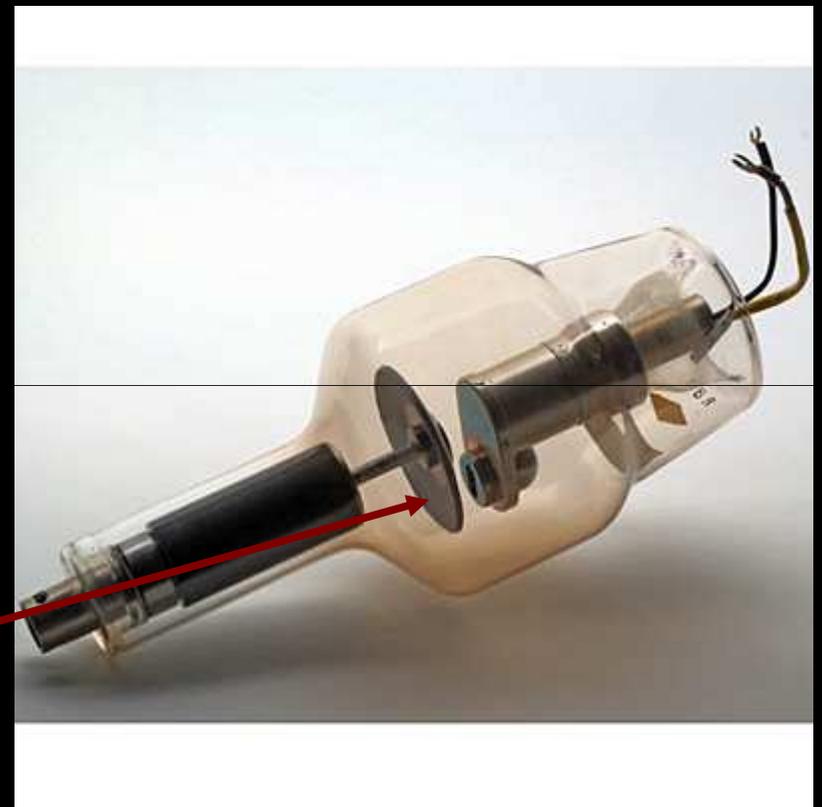


Quelques tubes à rayons X



Anode

Anode tournante pour mieux évacuer la chaleur



Que peut on régler sur un tube à rayons X ?

1 La tension entre l'anode et la cathode

de façon directe en modifiant la tension d'alimentation

2 L'intensité qui traverse le tube entre anode et cathode

de façon indirecte en modifiant le chauffage du filament (plus la température du filament est élevée, plus l'intensité qui traverse le tube est élevée)

Calcul de l'énergie X maximum

L'électron est arrêté brutalement, en un seul impact. Toute son énergie cinétique se transforme en un photon X

Energie cinétique de l'électron $E_c = e U$

Avec e charge de l'électron $1.6 \cdot 10^{-19}$ en coulomb et U haute-tension (HT) en volts

Energie du photon $E_p = h F$

Avec h constante de planck $6.62 \cdot 10^{-34}$ et F fréquence en Hz

On a donc Energie maximum = eU

Calcul de la longueur d'onde minimum $\lambda_0 = C / \nu$

Avec C vitesse de la lumière $3 \cdot 10^8$ m/s

Donc $e U = h \nu = h C / \lambda$ d'où $\lambda_0 = h C / e U$

$$\lambda_0 = 1.24 / U$$

λ_0 en nm

U en kV

Calcul de l'énergie X maximum

On a donc Energie maximum = eU en joule

Emploi d'une unité pratique : électron volt

En physique, l'électron-volt (symbole eV) est une unité de mesure d'énergie. Sa valeur est définie comme étant l'énergie cinétique d'un électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel d'un volt. Un électron-volt est donc égal à environ $1,6 \cdot 10^{-19}$ joule (J). C'est une unité hors système international (SI) dont la valeur est obtenue expérimentalement.

Donc

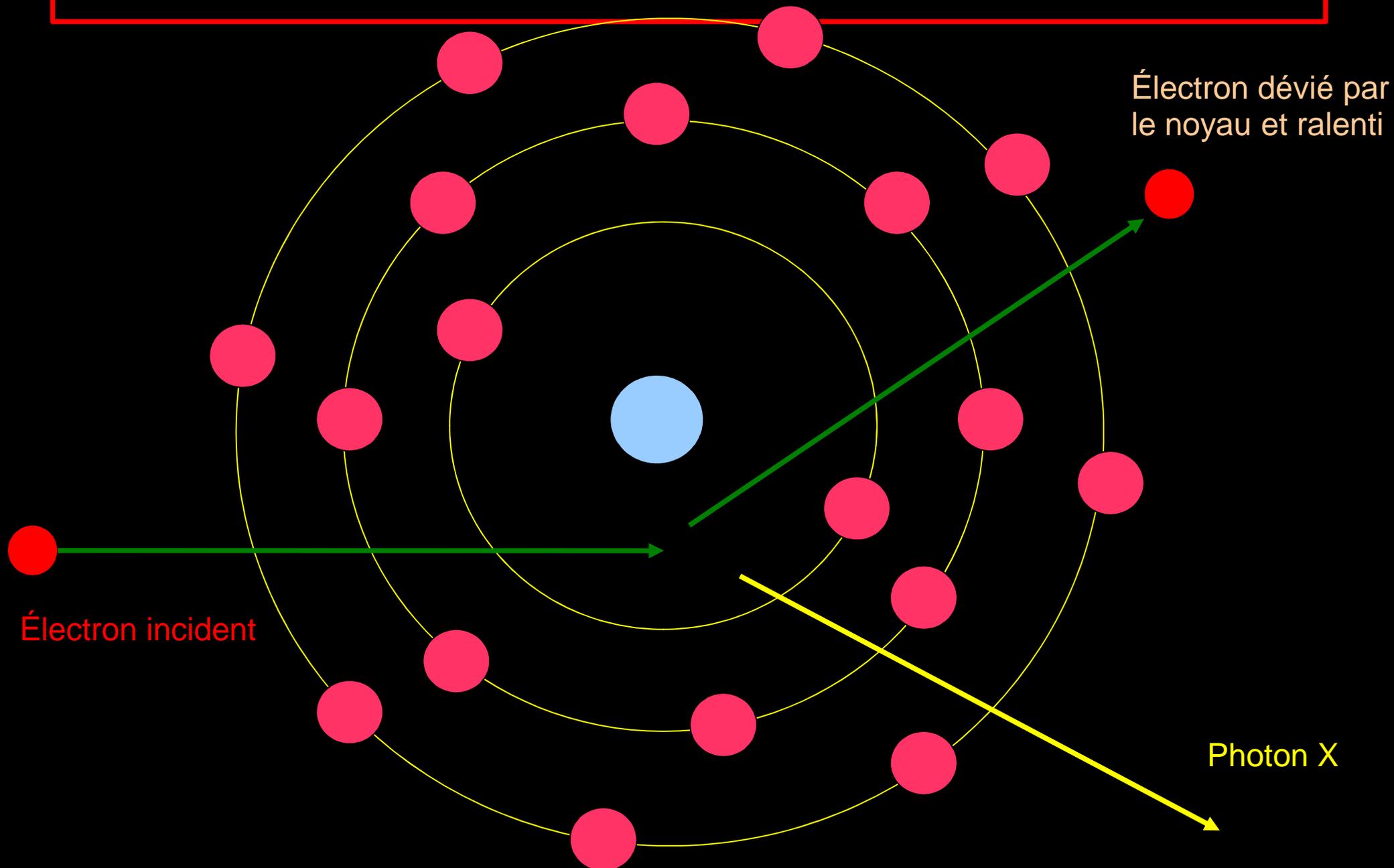
$$E_{\text{max}} = U \text{ en eV}$$

$$E_{\text{max}} = eU \text{ en joule}$$

Règle

Plus la tension est élevée,
plus l'énergie de chaque photon X est élevée

Rayonnement X de freinage



Rayonnement X de freinage

L'électron incident arrive sur la cible.

Il s'approche du noyau d'un atome, qui le dévie du fait de sa charge positive qui l'attire.

L'électron est donc ralenti. L'énergie de freinage est dégagée sous forme d'un photon X ou de chaleur si l'énergie est faible.

L'électron continue sa course sur une autre trajectoire ayant été dévié par le freinage, jusqu'à l'atome suivant où il produira un autre photon X

Rayonnement X de freinage

Rayonnement de freinage = Bremsstrahlung

Les photons X ont une énergie inférieure à eU

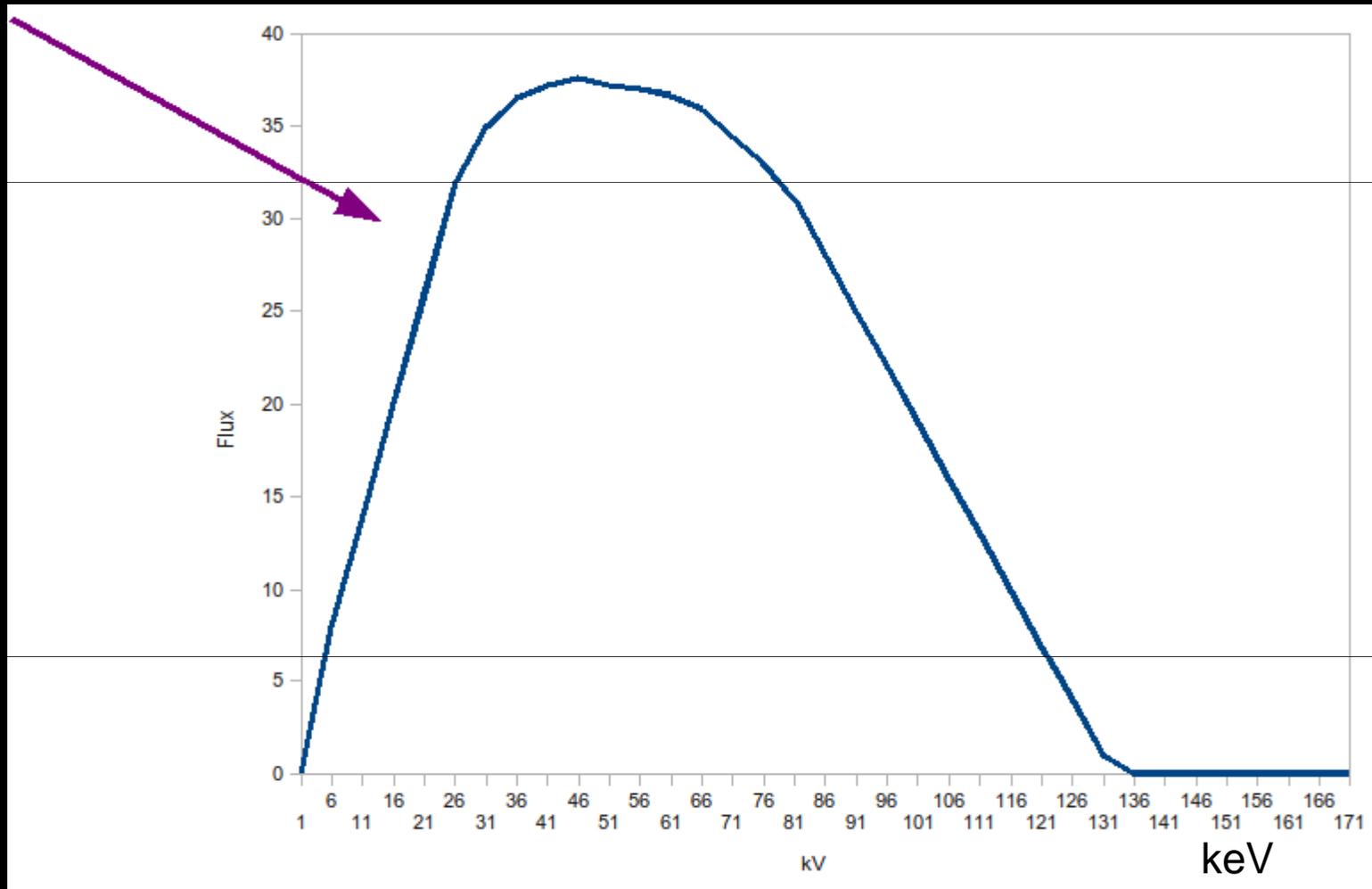
Souvent le photon est très peu ralenti. Le photon a une énergie faible et correspond à de la chaleur

Le tube à rayon X a donc un très faible rendement

Rendement approximatif : $KV \times Z \times 10^{-6}$ ($Z = 74$ pour le tungstène)

Inférieur à 1% à 100 kV

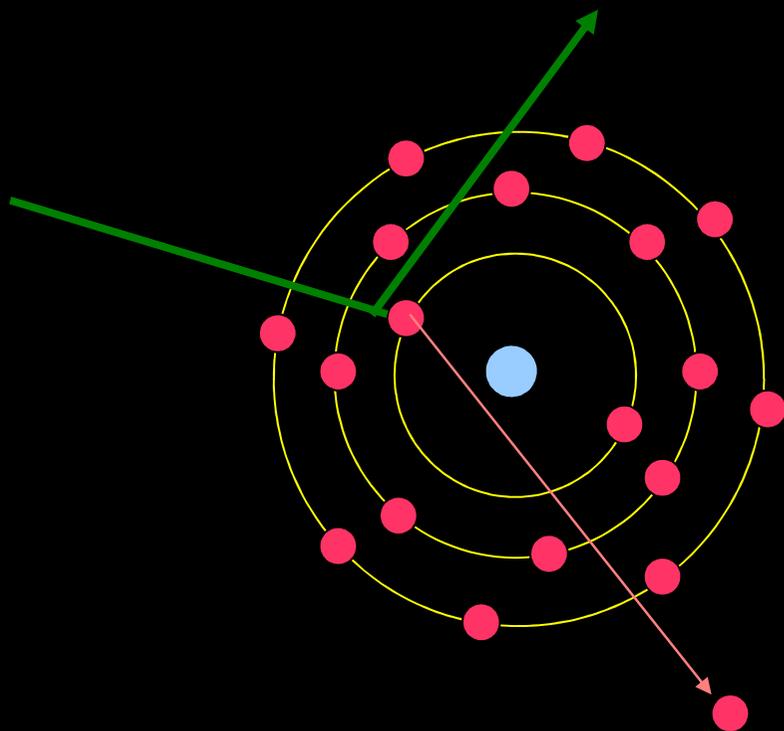
Nous reviendrons sur la filtration inhérente qui explique la baisse aux basses énergies



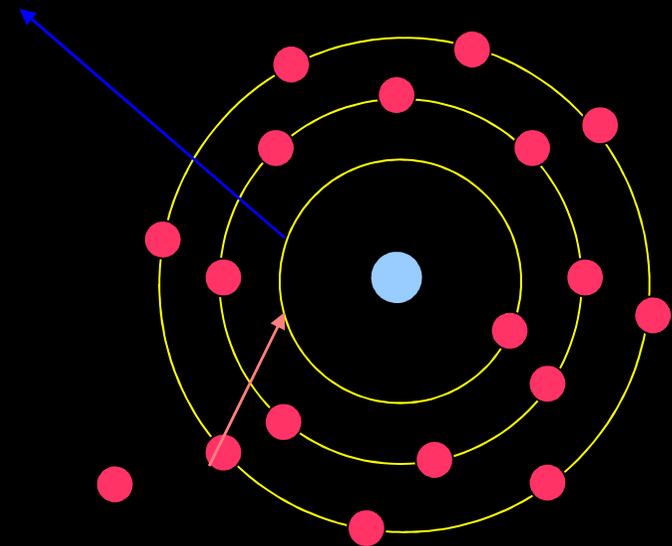
Spectre du rayonnement de freinage par un tube alimenté sous 135 kV

Rayonnement de fluorescence

L'électron incident expulse un électron atomique. Il se produit alors un réarrangement électronique, un électron d'une couche supérieure, voir un électron libre, prenant sa place. Durant ce réarrangement un photon X d'énergie caractéristique de la transition est émis. Souvent le réarrangement se fait avec plusieurs électrons, plusieurs raies X sont donc émises.



Photon X



Ici raie $K\beta$

Rayonnement de fluorescence

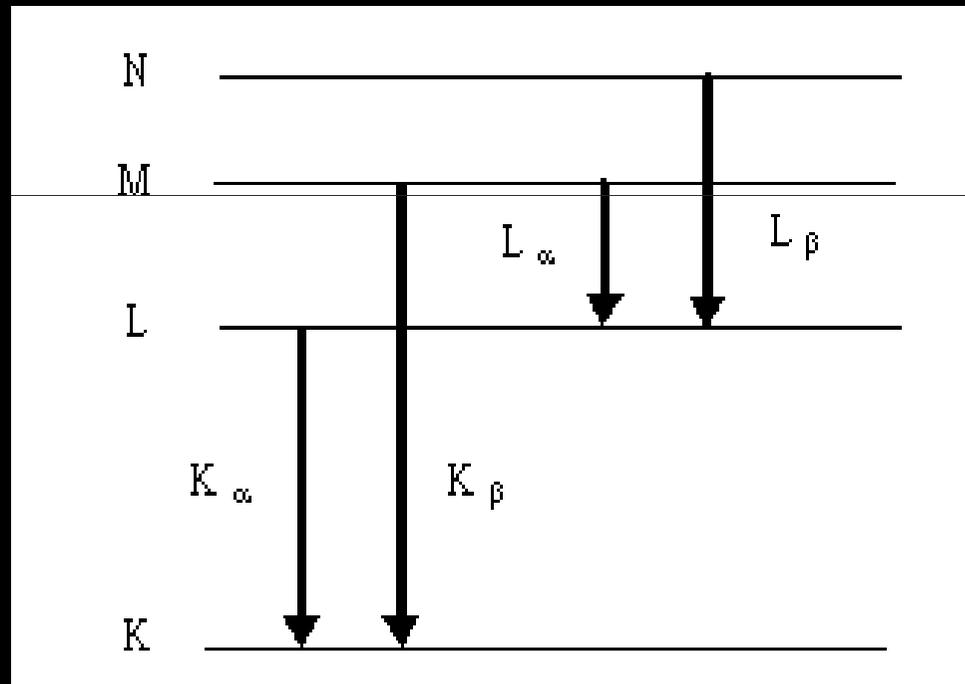
Les raies émises ont une appellation lettre latine / lettre grecque

Lettre latine : couche d'arrivée de l'électron (K L M N...)

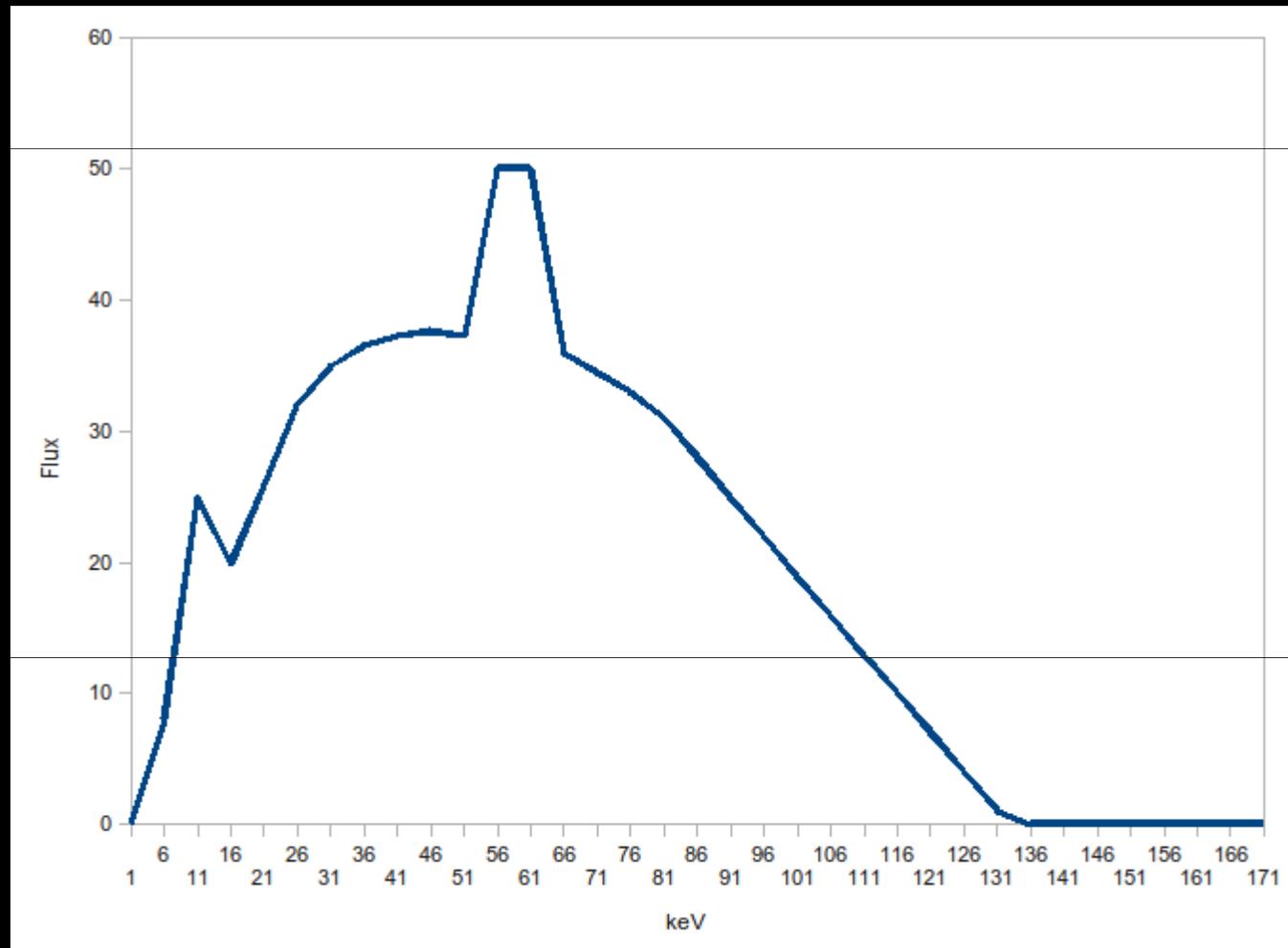
Lettre grecque : numérotation relative de la couche de provenance de l'électron
 α couche immédiatement supérieure

β 2 couches au dessus

γ 3 couches au dessus



Spectre de raies du tungstène W



Le spectre total :
rayonnement de freinage + raies caractéristiques

Atome Tungstène Symbole W

Couche K : 69 keV

Couche L : 11 keV

Couche M : 1 keV

Autres couches : énergie négligeable

Fluorescence K

Energie max : 69 keV (réarrangement électron externe à couche K)

Energie min : 58 keV ((réarrangement électron couche L à couche K)

Fluorescence L

Energie max : 11 keV (réarrangement électron externe à couche L)

Energie min : 10 keV ((réarrangement électron couche M à couche L)

Faisons le point

Le spectre de rayonnement X obtenu à la sortie d'un tube à rayons X

- A une fréquence maximum proportionnelle à la haute tension (énergie maximum des photons eU correspondant à une longueur d'onde minimale $\lambda_0 = 1.24 / U$)
- Est composé d'un rayonnement de freinage dont l'amplitude maximum est comprise entre le 1/3 et les 2/3 de la fréquence maximum
- Auquel se superpose un spectre de raies correspondant à un rayonnement de fluorescence caractéristique des atomes constituant l'anode.

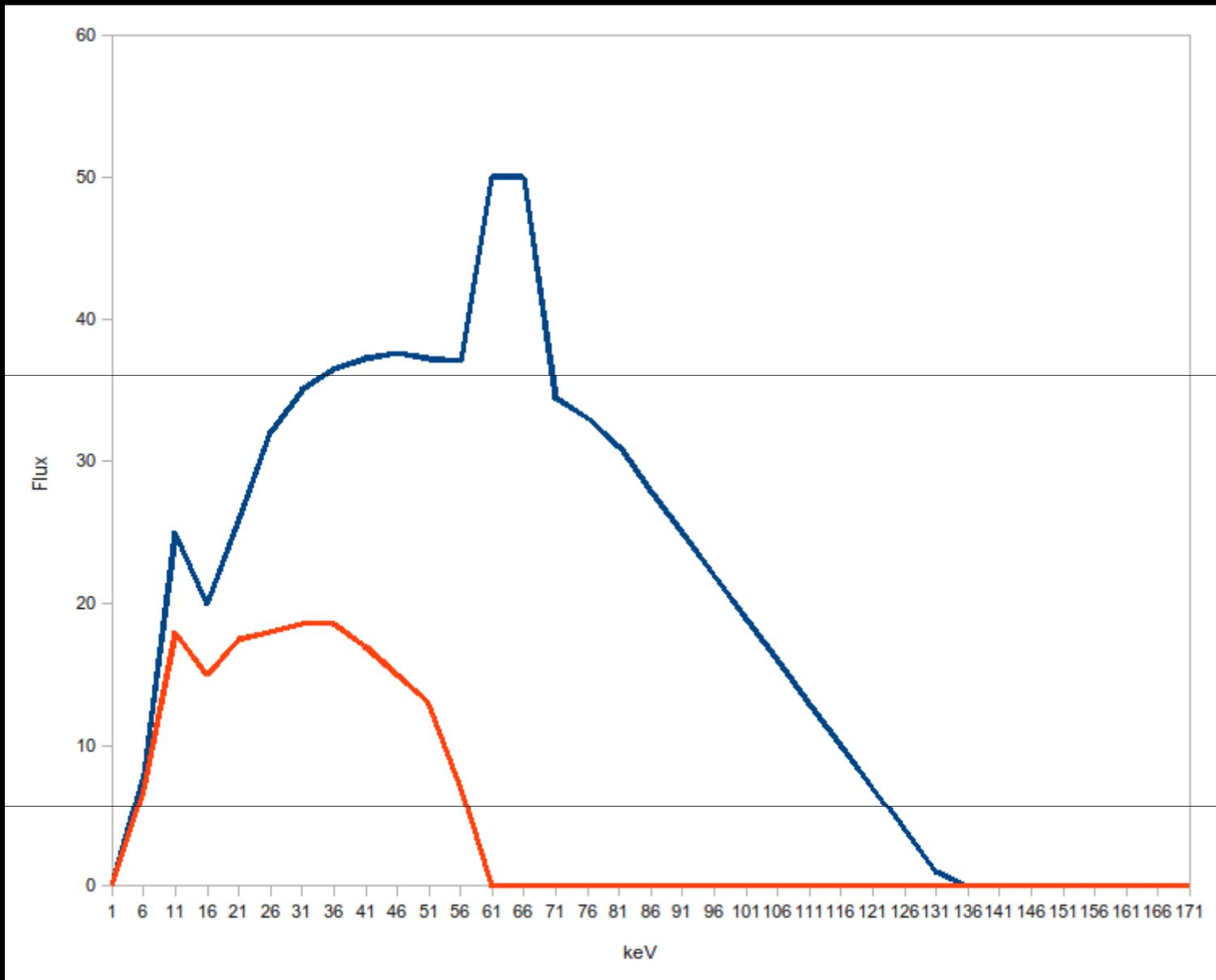
Quid des modifications de la haute tension et de l'intensité ?

Effets de la tension sur le spectre

La haute tension détermine l'énergie de chaque photon.

Une diminution de la tension déplace le spectre vers les basses énergies, c'est à dire vers la gauche pour un spectre en énergie ou fréquence et vers la droite pour un spectre en longueur d'onde.

Haute tension = qualité du faisceau X



60 kV à comparer à 135 kV

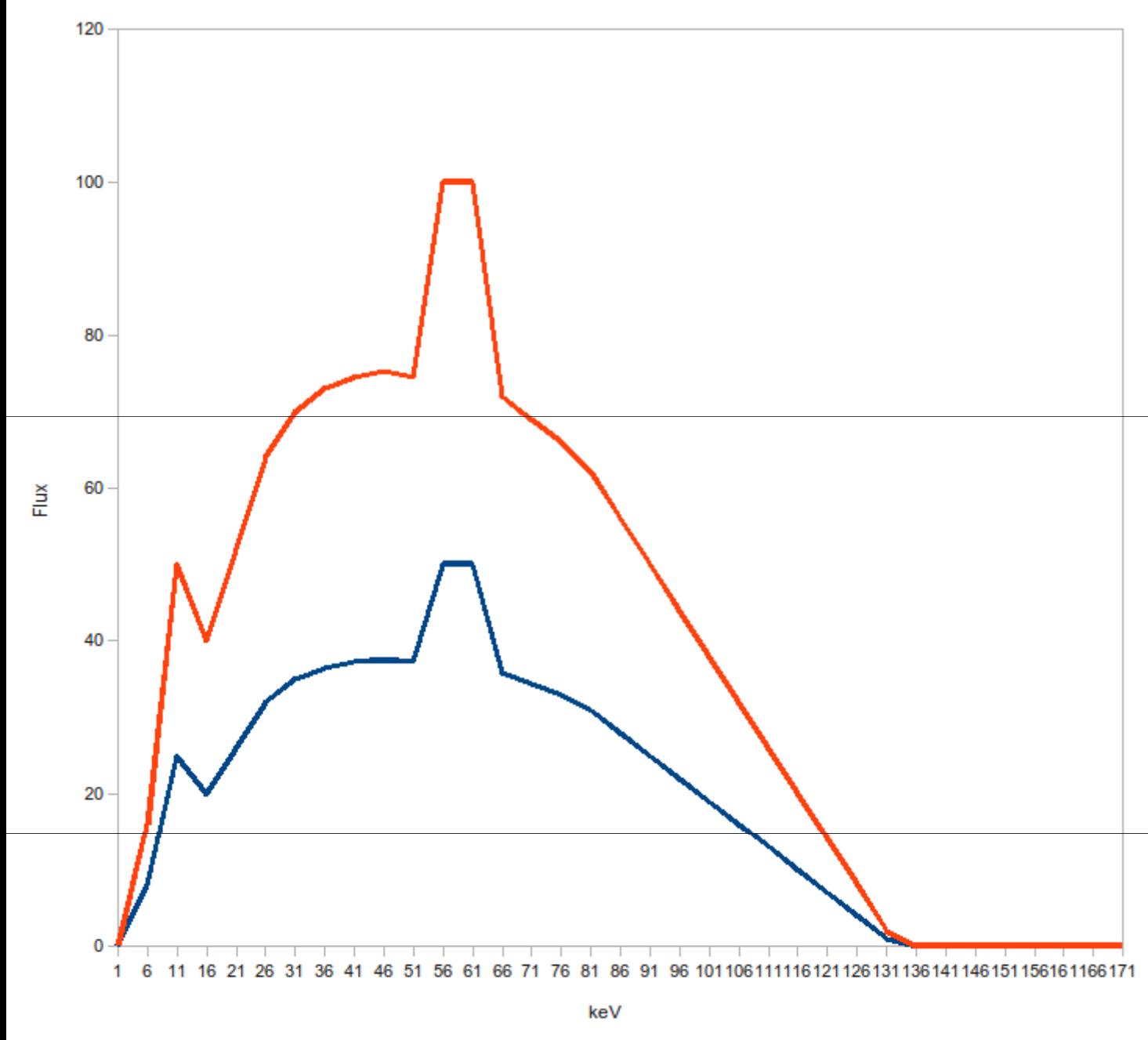
Effets de l'intensité sur le spectre

L'intensité électrique qui traverse le tube détermine l'amplitude du spectre.

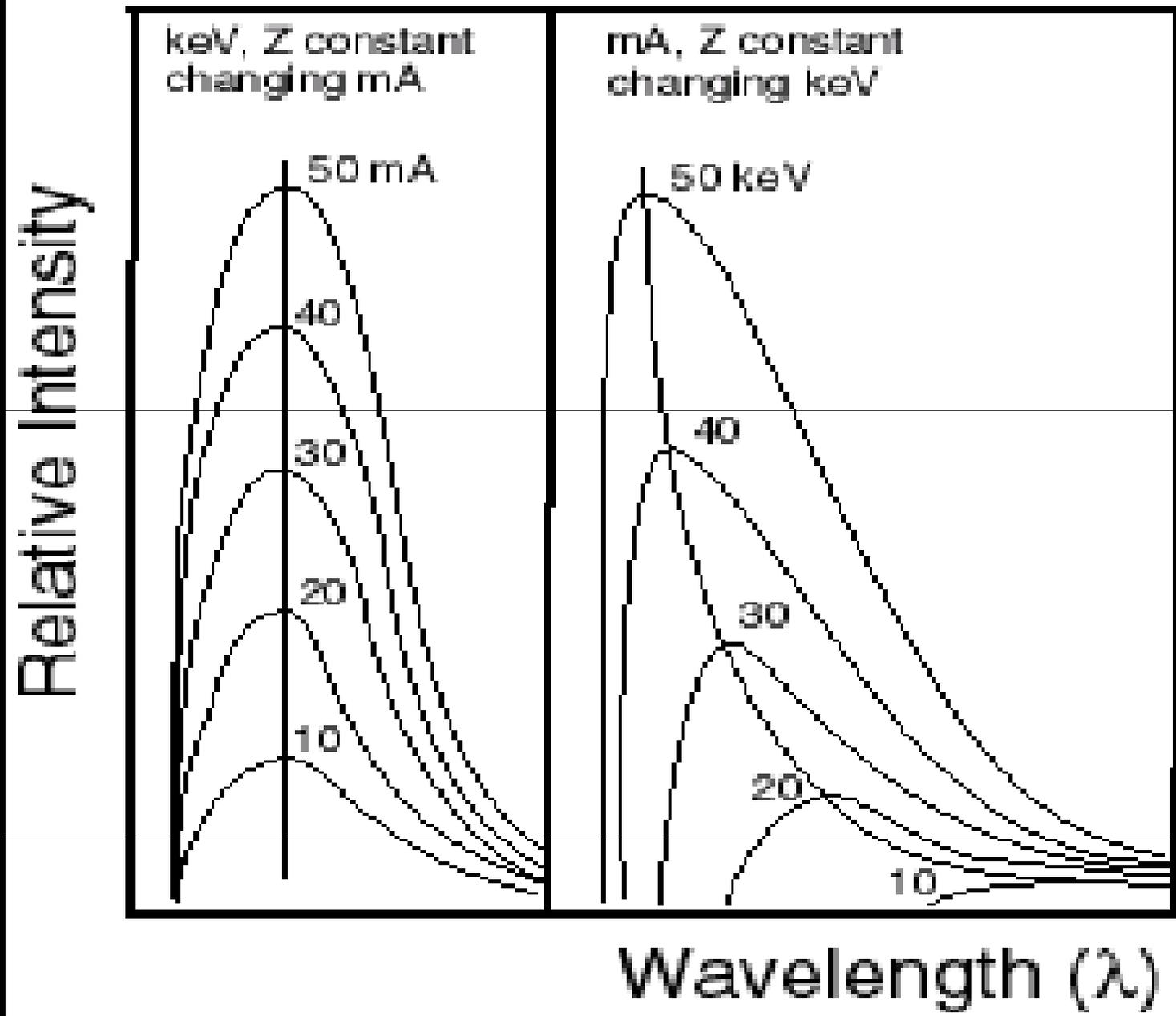
Une diminution de l'intensité aplatit le spectre, une augmentation surélève le spectre.

L'intensité qui traverse le tube modifie l'intensité du faisceau X sans modifier sa qualité

Intensité = quantité de rayons X



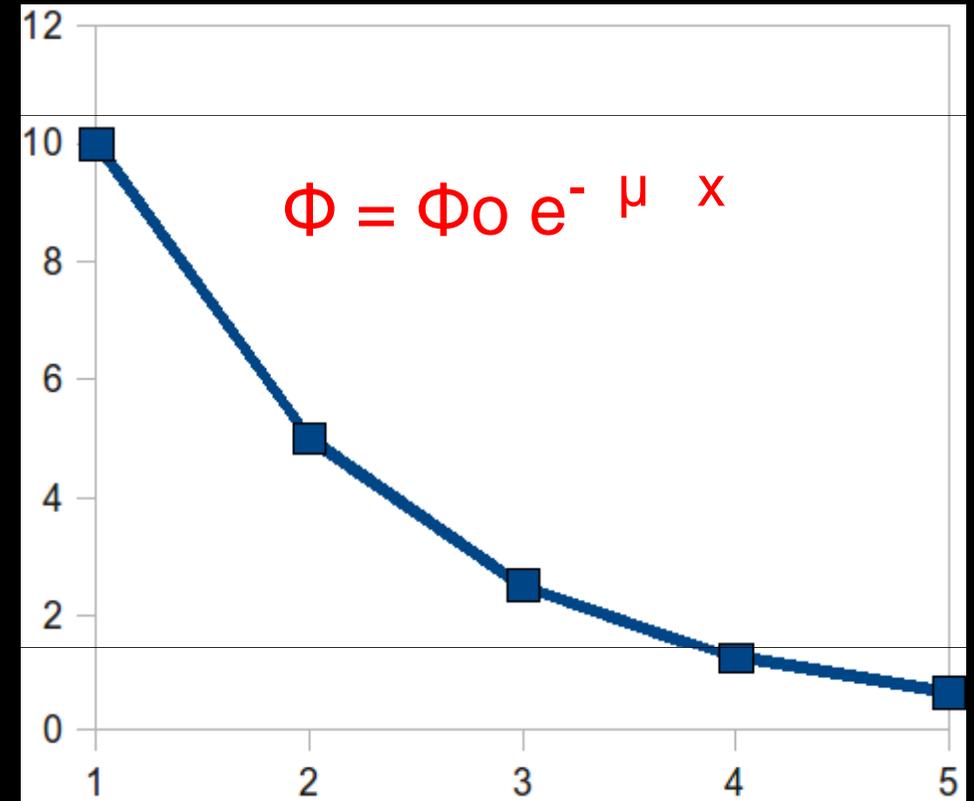
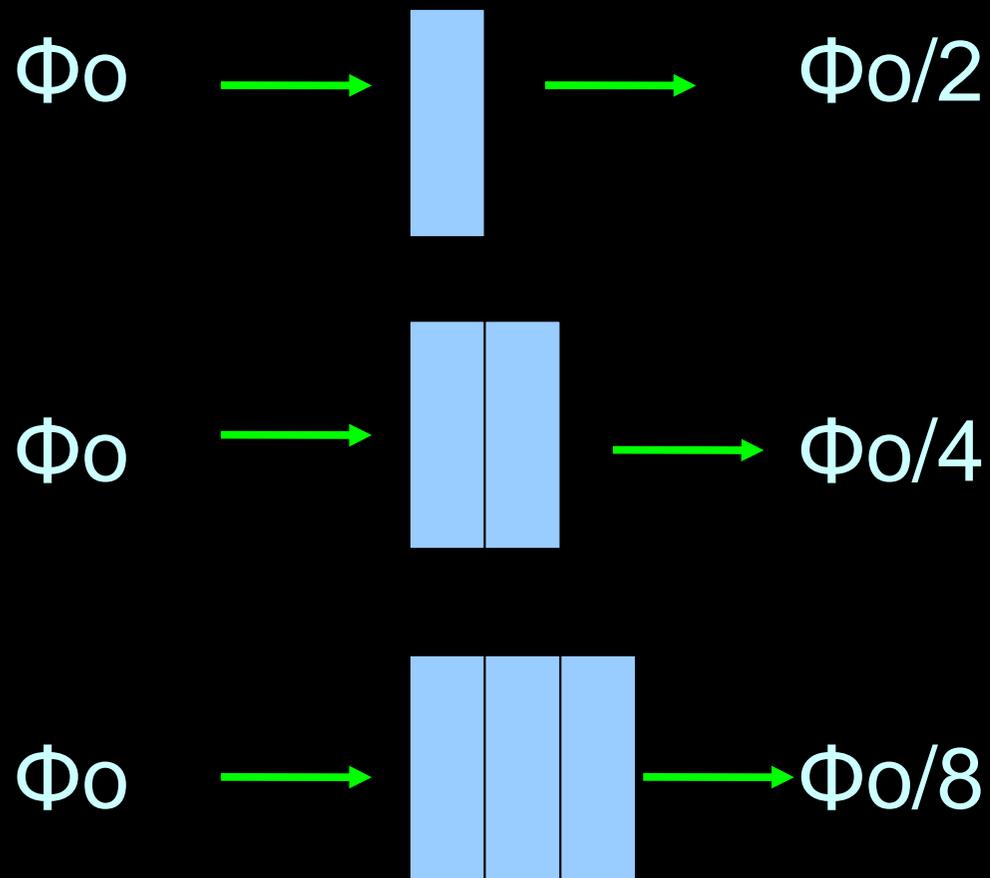
Les mA sont doublés par rapport à l'initial



Attention, en longueur d'onde
la gauche et la droite sont inversées !

ABSORPTION DES RAYONS X

Mesure de l'atténuation des Rx



1	2	3	4	5
10	5	2,5	1,25	0,63

Atténuation = exponentielle de pente négative

Atténuation des rayons X

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\mu x}$$

avec μ coefficient d'atténuation linéaire qui dépend :

de l'atome de la cible (Z)

de sa densité ρ

de l'énergie des photons incidents (et donc de λ)

Coefficient d'atténuation massique

La valeur μ/d (coefficient d'atténuation linéaire / densité de la cible) est le **coefficient d'atténuation massique**

L'intérêt de ce coefficient est de tenir compte de l'état condensé ou non de la cible (par exemple liquide ou gazeux).

Couche de demi-atténuation

Il s'agit de l'épaisseur de la cible divisant par 2 le flux de rayons X incident.

On a donc :

$$CDA = \text{Ln}(2) / \mu = 0.69 / \mu$$

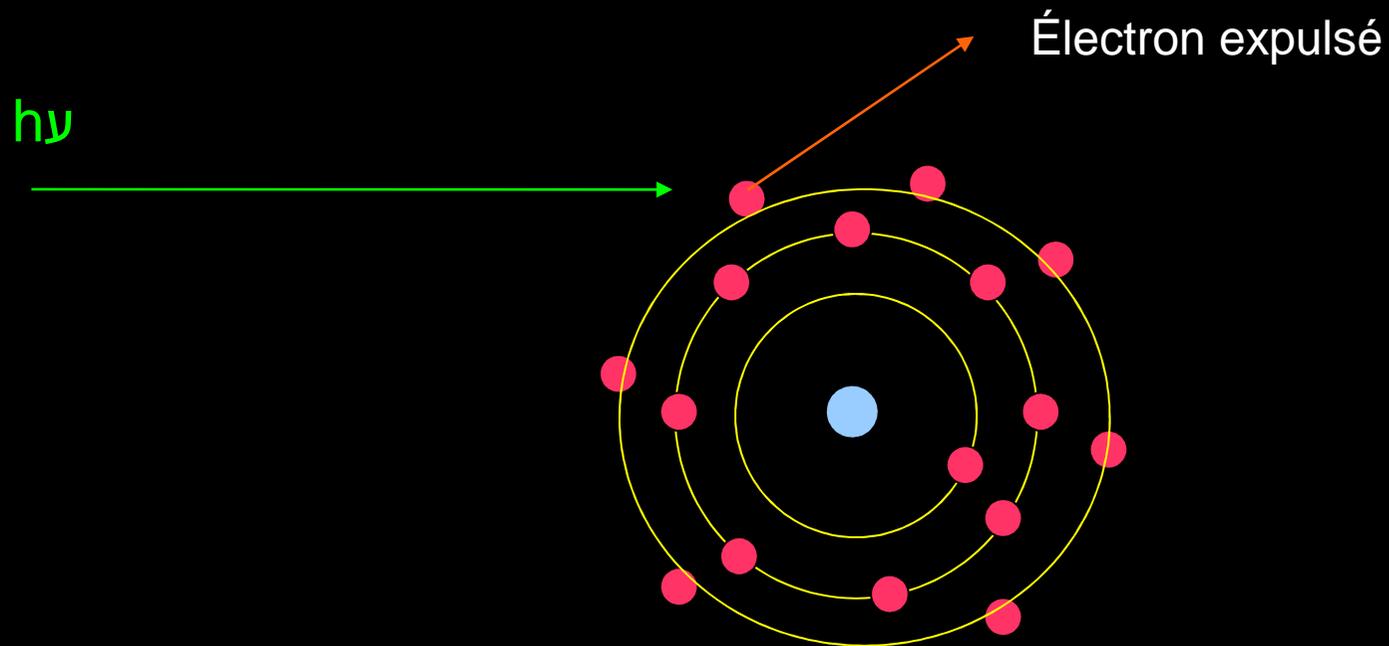
De quoi dépend l'atténuation

L'atténuation des rayons X dépend

- de l'absorption photo électrique prédominant aux faibles énergies < 50 keV
- de l'atténuation par effet Compton prédominant aux fortes énergies > 110 keV

Effets photoélectriques

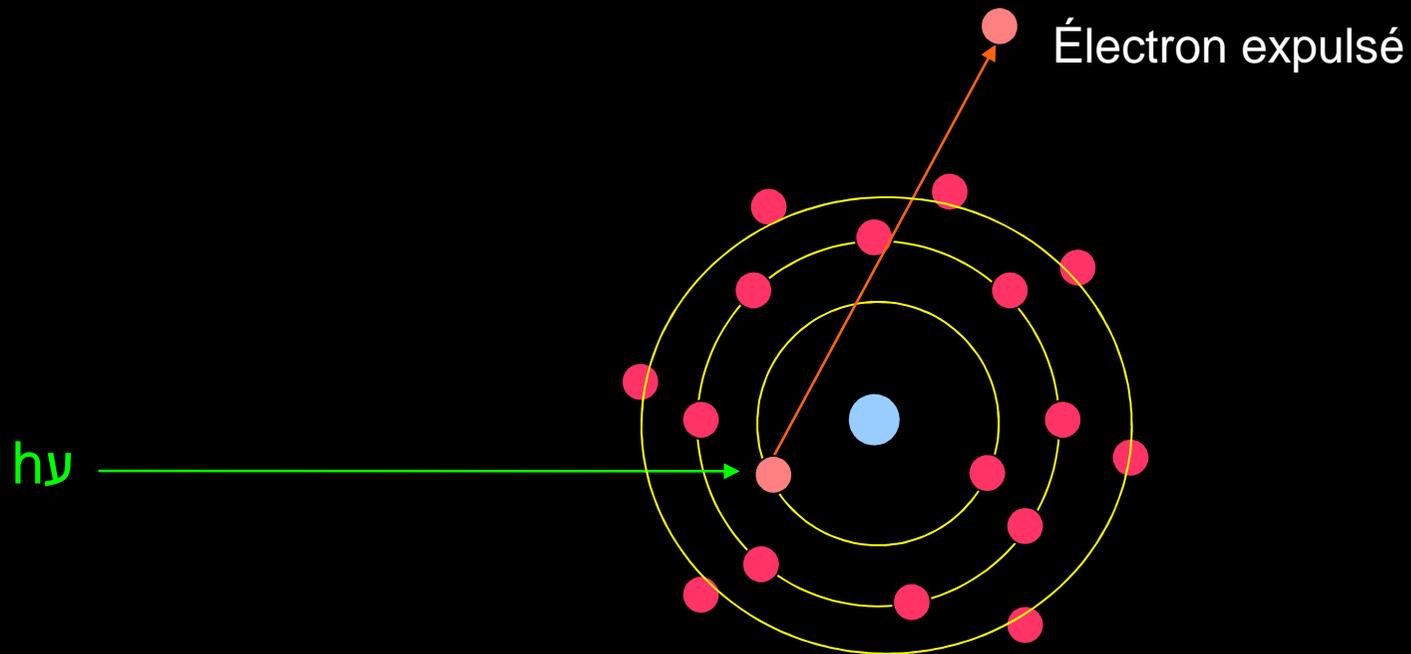
Un photon X donne la totalité de son énergie à un électron qui est expulsé



$$\text{Énergie du Photon} = \text{Énergie de liaison de la couche électronique} + \text{Énergie cinétique de l'électron expulsé}$$

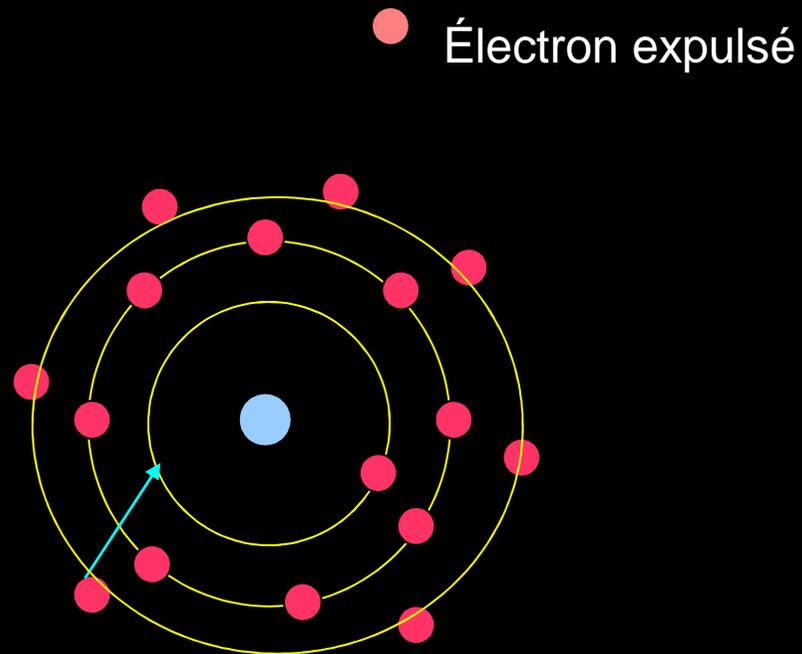
Effets photoélectriques

Possible retour à l'équilibre électronique par réarrangement => Photon X de Fluorescence donc rayonnement diffusé



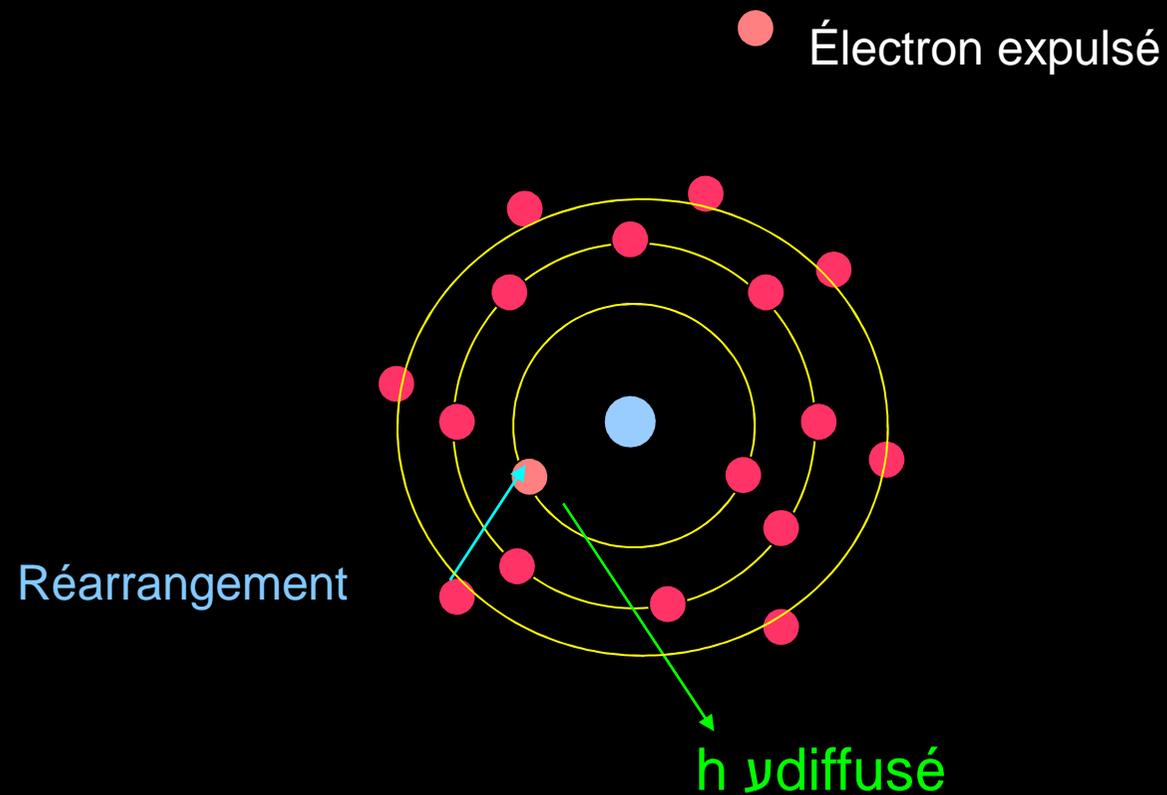
Effets photoélectriques

Possible retour à l'équilibre électronique par réarrangement => Photon X de Fluorescence
donc rayonnement diffusé



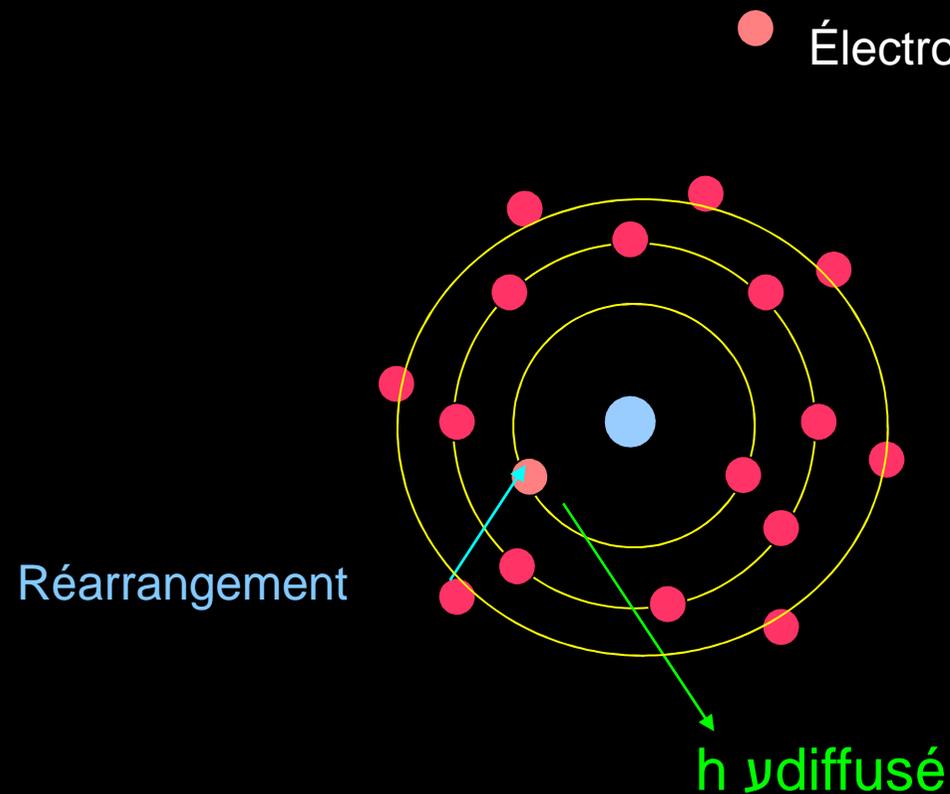
Effets photoélectriques

Possible retour à l'équilibre électronique par réarrangement => Photon X de Fluorescence donc rayonnement diffusé



Effets photoélectriques

Possible retour à l'équilibre électronique par réarrangement => Photon X de Fluorescence donc rayonnement diffusé



L'électron expulsé peut lui même expulser un autre électron : électron Auger

Effets photoélectriques

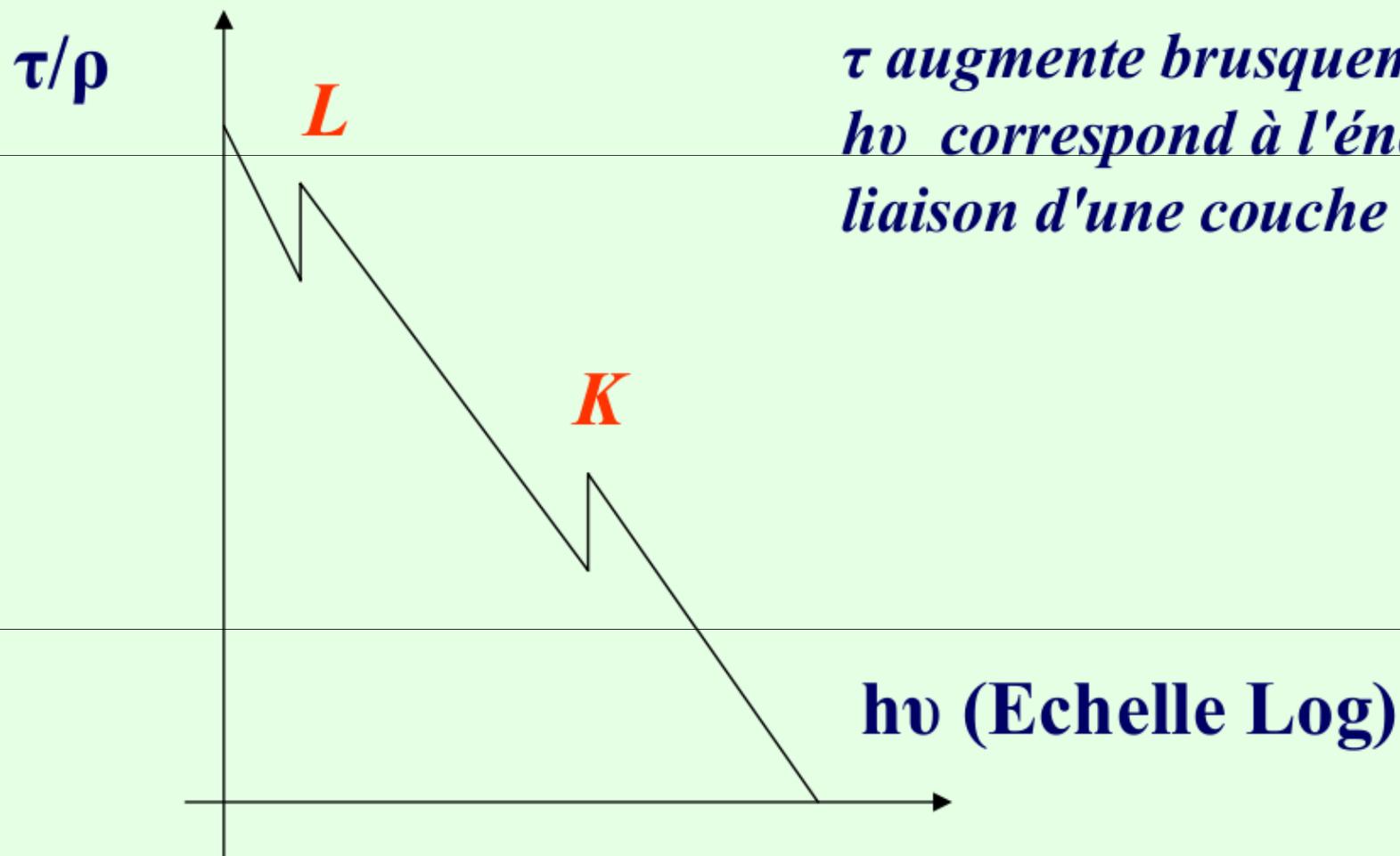
$$\mu \text{ photoélectrique} = \frac{k d z^3}{E^3}$$

d densité, Z numéro atomique, E énergie des photons, k constante

L'absorption photoélectrique augmente en fonction de la densité et la puissance 3 du numéro atomique et diminue en fonction de la puissance 3 de l'énergie du photon

=> De faible variation de Z modifie beaucoup le coefficient d'atténuation surtout à basse énergie

Effet photo-électrique.



τ augmente brusquement quand $h\nu$ correspond à l'énergie de liaison d'une couche électronique

Pourquoi l'effet photoélectrique est négligeable aux hautes énergie ?

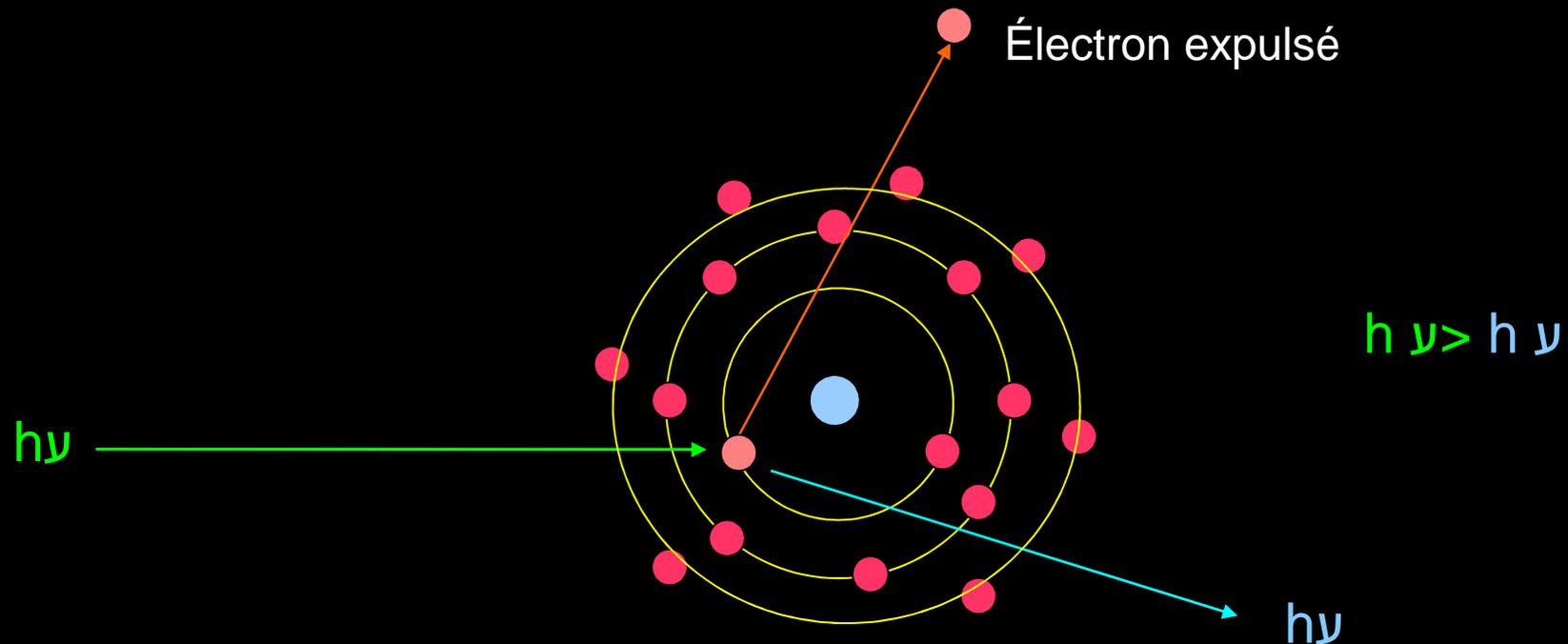
Quand l'énergie de photon est nettement supérieure à l'énergie des électrons de la couche K, il devient impossible au photon X de donner toute son énergie à un électron.

Seule une partie de son énergie est communiquée à l'électron qui est éjecté. Le photon X, bien que dévié, continue sa route avec une énergie inférieure.

C'est l'effet Compton

Effet Compton

Le photon X expulse un électron. Toutefois, son énergie est telle qu'il ne communique pas la totalité de son énergie à l'électron. Il est donc dévié tout en ayant une énergie plus faible (fréquence diminuée)



Énergie photon X incident = Énergie photon X diffusé + Énergie électron expulsé

Effet Compton

$$\mu_{\text{compton}} = \frac{k d}{E^{0.3}}$$

d densité, E énergie des photons, k constante

L'atténuation par effet compton dépend essentiellement de la densité de la matière et peu de l'énergie des photons

=> Le coefficient d'atténuation du à l'effet compton varie peu en fonction des tissus

=> Entre 40 et 140 kV μ_{compton} diminue de 45%

Atténuation des Rayons X

Récapitulons

2 mécanismes d'atténuation :

Effet photoélectrique (prédomine en dessous de 50 keV)

Effet Compton (prédomine au dessus de 100 keV)

Création d'un rayonnement X diffusé de direction différente du rayonnement principal :

Le patient devient une source de rayons X

Effet photoélectrique : par fluorescence

Effet Compton : déviation et diminution de l'énergie du photon

Quels kV choisirs ?????

Très faibles kV (< 30 kV)

=> coefficient d'atténuation très élevé uniquement par effet photoélectrique

=> « tous » les rayons X sont absorbés dans le patient

=> Irradiation du patient, mais pas d'image interprétable

Très fort kV (>150 kV)

=> faible atténuation, uniquement par effet Compton

=> peu de variation entre les organes

=> Irradiation du patient, mais image sans aucun contraste, donc inninterprétable

Quels kV choisirs ?????

Adapter les kV en fonction du contraste désiré

Exemple 1 Mammographie

Etude de tissus mous, contraste très élevé nécessaire

=> faibles kV < 40 kV

Exemple 2 Thorax

Bon contraste spontané tissus mous air mais structure osseuse, donc faible contraste nécessaire pour traverser l'os

=> hauts kV > 120 kV

Exemple 3 Rachis

Bon contraste spontané, mais forte atténuation de l'os

=> kV moyens 70 kV

Quels kV choisirs ?????

Et en scanner ?????

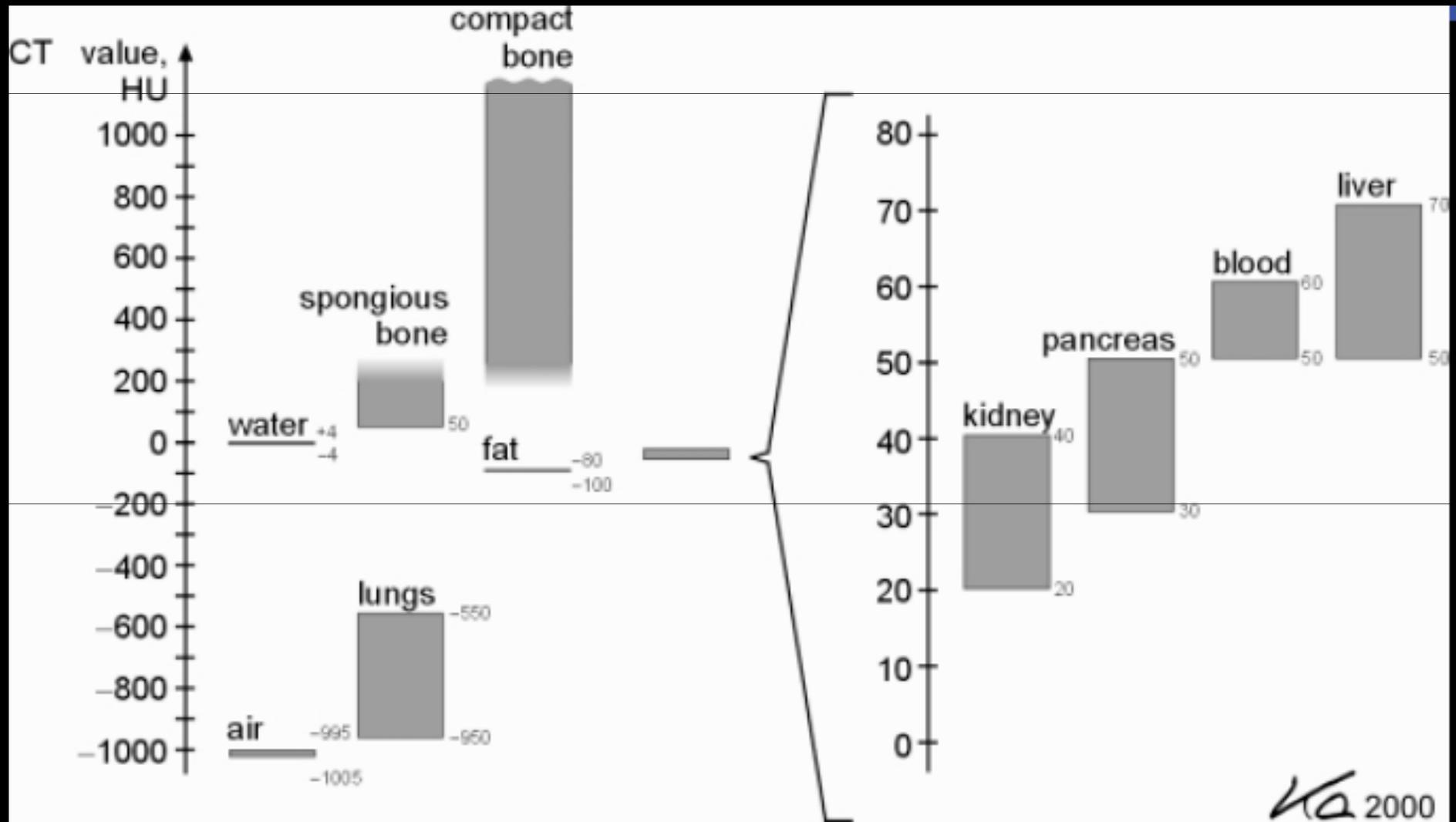
On triche avec les UH

$$UH = [(\mu - \mu_{eau}) / \mu_{eau}] \times 1000$$

Eau : 0 UH Air (vide) -1000

Donc, on connaît une échelle des UH

Echelle Hounsfield



Et voici le résultat pour la graisse

Graisse

Perim 2.00 cm
Area 0.32 cm²
Avg -210.2 HU
Dev 7.004

Perim 2.03 cm
Area 0.32 cm²
Avg -163.2 HU

80 kV

Rappel :
eau = 0 HU

140 kV

kV en scanner

Certes, le contraste diminue quand les kV augmentent en scanner.

Cependant, l'emploi des UH associé à l'augmentation du rapport S/B qui découle de l'augmentation des kV « cachent » le phénomène.

Remarque : Les variations du coefficient d'atténuation en fonction des kV permettent les études « doubles énergies »

La filtration

En radiologie, le spectre de rayons X est essentiellement un spectre de freinage très large.

Un filtrage physique du spectre présente 2 utilités :

1 **Limiter l'irradiation du patient** en supprimant les photons peu énergétiques quasiment totalement absorbés dans le patient par effet photoélectrique et ne participants donc pas à la formation de l'image radiologique

2 Obtenir un **effet plus marqué** du choix optimal de **kV**

Filtration - irradiation

1 En dessous de 70 keV, l'atténuation par effet photoélectrique devient prépondérante

2 Le coefficient d'atténuation par effet photoélectrique est inversement proportionnel à la puissance 3 de l'énergie.

Estimation de la variation de μ photoélectrique entre 70 et 30 keV

70 keV à 50 keV $\Rightarrow \mu \times 2.7$

70 keV à 40 keV $\Rightarrow \mu \times 5.3$

70 keV à 30 keV $\Rightarrow \mu \times 12.7$

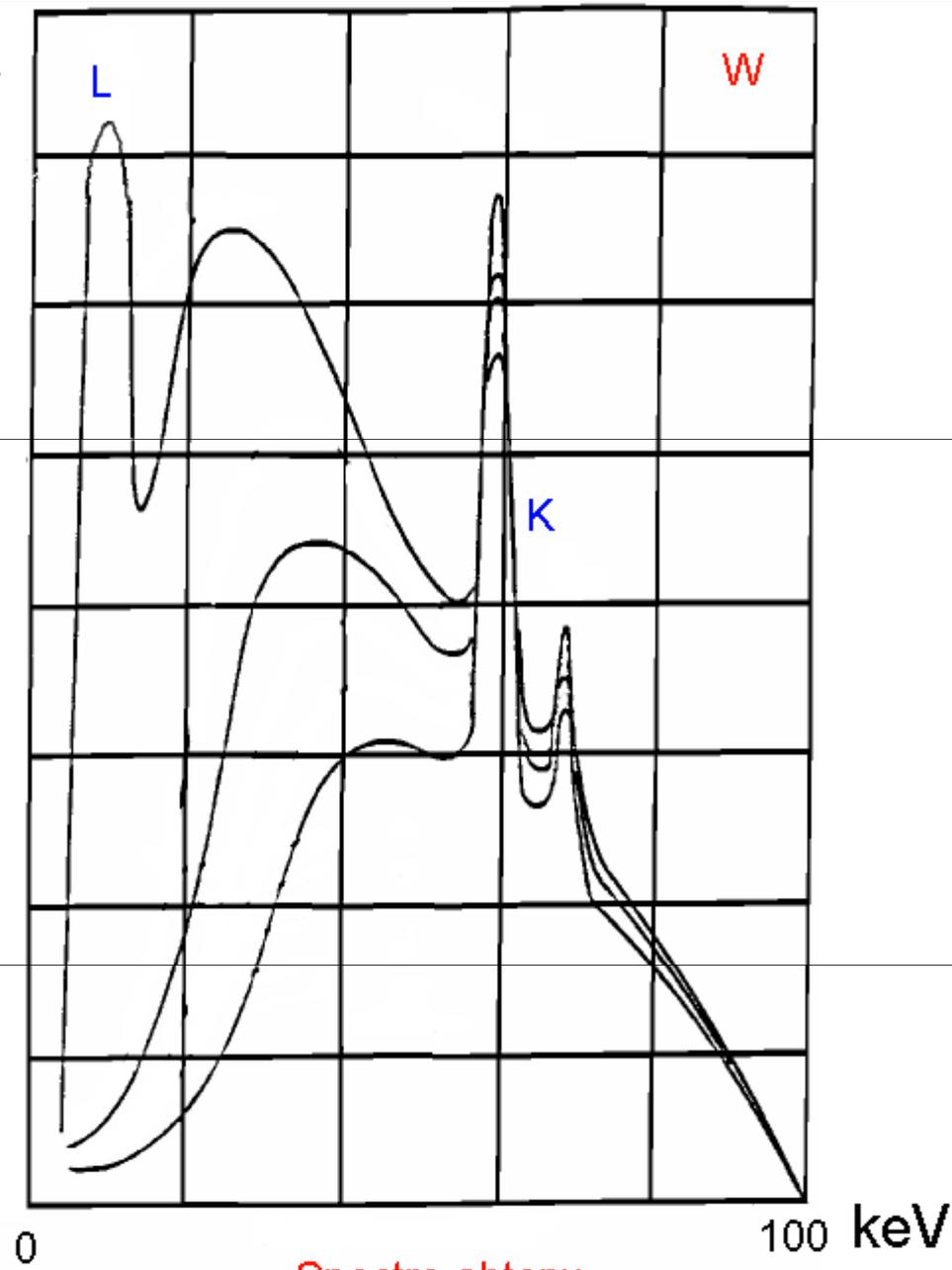
\Rightarrow pour à 70 kV, les photons de moins de 40 keV sont quasi totalement absorbés par le patient, donc inutiles à l'image.

3 L'énergie maximum des photons est fixée par les kV

Plus le faisceau est filtré, plus les photons de faible énergie sont atténués

\Rightarrow Plus le filtrage est important, plus l'énergie moyenne des photons d'un faisceau X augmente

Flux X



Spectre obtenu

Sans filtre, avec 2 mm Al, avec 5 mm Al.

Filtration

=>

1 Diminution globale de l'énergie du faisceau

2 Augmentation de l'énergie moyenne des photons non absorbés (durcissement du faisceau)

=>

L'utilisation de la filtration diminue l'irradiation du patient par absorption importante des photons de basse énergie.

=>

minimum légal obligatoire = équivalent à 2 mm Al

Filtration inhérente - additionnelle

Filtration inhérente :

Filtration minimum possible du faisceau de rayons X sur un système

Filtration additionnelle :

Filtration optionnelle qui permet de diminuer l'irradiation des patients

Limite de la filtration :

La filtration diminue l'énergie globale du faisceau de rayons X.

L'augmentation de la filtration diminue donc le rapport signal sur bruit.

Il faut donc employer une filtration additionnelle adaptée qui peut, dans certains cas, diminuer par 2 l'irradiation du patient...

Le diffusé

Le rayonnement diffusé correspond au rayonnement X qui prend sa source dans la cible du rayonnement primaire.

Il s'explique :

1 Par l'effet Compton +++++

2 Par l'émission de fluorescence de l'effet photo électrique.

Caractéristiques du rayonnement diffusé

1 Augmente avec l'emploi de kV élevés :

120 kV : atténuation = 95% de diffusion + 5 % d'absorption

12 kV : atténuation = 5 % de diffusion + 95 % d'absorption

2 Direction différente du rayonnement primaire :

Problème de radioprotection de l'entourage de la cible

Flou en radiologie conventionnelle

En résumé...

Tube

1 Tube à vide

2 Libération d'électrons en chauffant un filament (effet thermoïonique)

3 Attraction des électrons par une anode positive

4 Arrêt brutal des électrons sur l'anode

5 Transformation de l'énergie cinétique des électrons
en Rayons X (un peu : 1%)
en chaleur (beaucoup : 99%)

Énergie maximum des photons X : $E = eU$ (joule) $E = U$ (keV)

Spectre obtenu

Rayonnement de freinage

Spectre continu entre 0 et l'énergie maximum

Rayonnement de fluorescence

Spectre de raies pour le tungstène K (58 - 69 keV) et L (10 - 11 keV)

les **kV** déplacent le spectre vers les hautes énergies

les **mA** déterminent l'amplitude du spectre.

Atténuation des rayons X

Exponentielle de pente négative

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\mu x}$$

μ coefficient d'atténuation, X distance dans la cible

2 Effets :

- Photoélectrique :

Un photon donne toute son énergie à un électron

Faible diffusé par fluorescence

- Compton :

Un photon est ralenti en heurtant un électron, il est donc dévié et son énergie diminue.

Diffusion importante

Variation de l'atténuation en fonction de l'énergie des photons

Effet photoélectrique

Prédomine sous 50 keV

Rôle important du numéro atomique et de l'énergie des photons

$$\frac{k d z^3}{E^3}$$

Effet Compton

Prédomine au dessus de 110 keV

Faible variation en fonction de l'énergie des photons

$$\frac{k d}{E^{0.3}}$$

d densité, Z numéro atomique, E énergie des photons, k constante

Nécessité kV optimaux

Fort contraste : faibles kV

faible contraste : kV élevés

Diffusé

Prédomine avec l'effet Compton donc à hauts kV

Dans toutes les directions

Énergie moyenne des photons plus faible que celle des photons du rayonnement primaire => forte absorption pas les patients le personnel

Filtration

Diminue l'énergie totale du faisceau en absorbant de façon préférentielle les photons de basse énergie

=> Augmentation de l'énergie moyenne des photons non absorbés

=> Diminution de l'irradiation du patient