

# Interaction des rayons X avec la matière

## 1. Rayonnement X

Les rayons X, partie du spectre électromagnétique, sont parmi les formes de rayonnement les plus largement utilisées en physique, en médecine, en ingénierie, et en recherche fondamentale. Leur découverte révolutionnaire a ouvert de nouvelles perspectives scientifiques et pratiques. Cette section approfondit leur découverte, leur nature, leur production et leurs propriétés spectrales, avec un focus détaillé sur leurs applications et leurs mécanismes fondamentaux.

Les rayons X ont été découverts en 1895 par le physicien allemand Wilhelm Conrad Röntgen, lors d'expériences sur des décharges électriques dans des tubes cathodiques. Röntgen a remarqué qu'un matériau fluorescent placé à proximité de son tube émettait une lueur, même lorsque le tube était recouvert d'une enveloppe opaque. Il a nommé ce phénomène "rayons X" pour marquer leur nature inconnue à l'époque.

Les rayons X sont une forme de rayonnement électromagnétique d'énergie élevée et de longueur d'onde courte. Ils se situent dans le spectre entre les rayons ultraviolets (UV) et les rayons gamma.

### 1.1. Caractéristiques et propriétés des rayons X

**Longueur d'onde :** Entre  $0.01\text{ nm}$  et  $10\text{ nm}$ , ce qui est environ  $10^{-10}$  fois plus petit que la longueur d'onde de la lumière visible.

**Fréquence :** Très élevée, allant de  $10^{16}$  à  $10^{19}\text{ Hz}$ .

**Énergie des photons :** Varie de quelques électronvolts (eV) à plusieurs centaines de kiloélectronvolts (keV).

**Pouvoir pénétrant élevé :** Les rayons X peuvent traverser des matériaux tels que les tissus humains, les métaux fins ou le verre, avec une absorption variable selon leur densité et épaisseur.

**Rayonnement ionisant :** En raison de leur énergie élevée, ils peuvent arracher des électrons d'atomes et provoquer une ionisation.

**Interférences et diffraction** : Ils peuvent interagir avec les atomes de cristaux pour produire des schémas de diffraction, ce qui est utilisé en cristallographie.

### **.1.2. Production des rayons X**

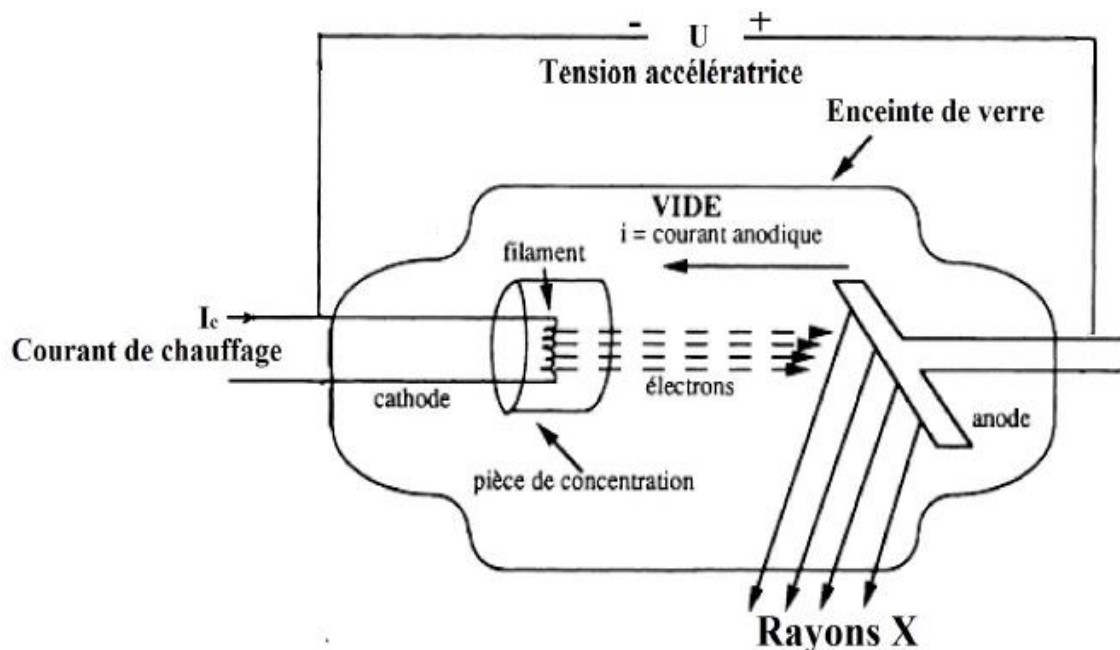
La production des rayons X peut être réalisée de deux manières principales :

1. Par interaction d'électrons accélérés avec une cible métallique (tubes à rayons X).
2. Par rayonnement synchrotron dans des accélérateurs de particules.

#### **Tubes à rayons X**

Un tube à rayons X est une source classique utilisée en médecine et en recherche pour générer ces rayonnements. Il est constitué de :

- Cathode : Un filament chauffé qui émet des électrons par effet thermoélectrique.
- Anode (cible) : Un matériau comme le tungstène (W) ou le molybdène (Mo), qui convertit l'énergie cinétique des électrons en rayons X.
- Tube sous vide : Empêche les électrons de se heurter à des molécules d'air.
- Tension électrique élevée : Génère une accélération des électrons, leur conférant une énergie cinétique suffisante.



**: Principe de production des rayons X  
( tube de Coolidge).**

## **Rayonnement synchrotron**

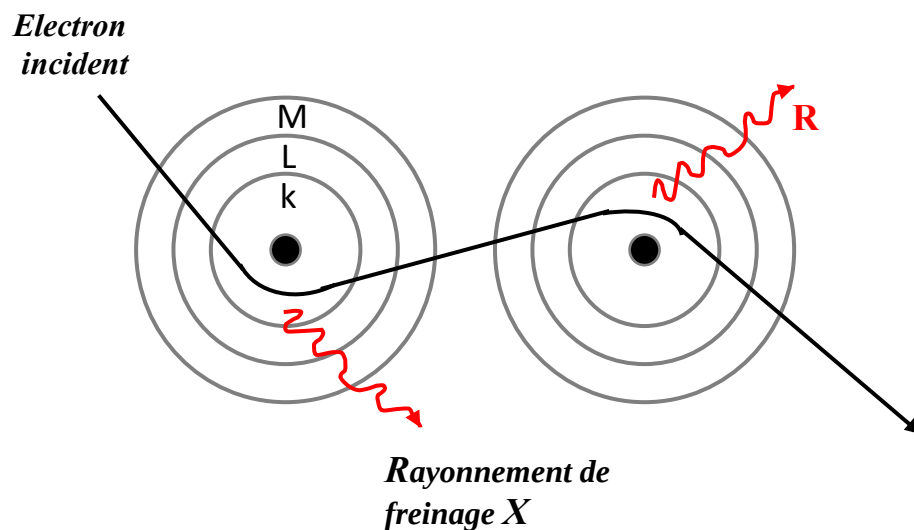
Les synchrotrons produisent des rayons X de haute intensité en accélérant des électrons à des vitesses proches de la lumière. Lorsque ces électrons sont déviés par des aimants dans une trajectoire circulaire, ils émettent des rayons X extrêmement puissants et collimatés.

### **1.3. Principe de production des rayons X**

La production repose sur deux mécanismes principaux :

#### **1.3.1. Rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)**

Ce mécanisme, d'origine allemande ("rayonnement de freinage"), correspond à l'émission de photons X lorsque les électrons, accélérés à haute vitesse, interagissent avec les noyaux des atomes de la cible métallique.



*Production des rayons X de freinage.*

### **Étapes du rayonnement de freinage**

#### **1. Accélération des électrons**

- Les électrons sont accélérés sous l'effet d'une différence de potentiel élevée, typiquement entre 20 kV et 150 kV, dans un tube sous vide.
- Ces électrons acquièrent une énergie cinétique proportionnelle à la tension appliquée.

## 2. Interaction avec les noyaux de la cible

- Lorsqu'un électron passe à proximité d'un noyau atomique de la cible, il est dévié par la forte charge positive du noyau.
- Cette déviation provoque une décélération rapide de l'électron.

## 3. Émission d'énergie sous forme de photons X

- L'énergie perdue par l'électron lors de sa décélération est émise sous forme de rayonnement électromagnétique.
- Ce rayonnement a une énergie variable, créant un **spectre continu** de rayons X.

### Caractéristiques du rayonnement de freinage

- L'énergie maximale des photons X émis est égale à l'énergie cinétique initiale des électrons, déterminée par la tension entre l'anode et la cathode.
- La probabilité d'émission augmente avec le numéro atomique ( $Z$ ) de la cible : des matériaux comme le tungstène ( $Z=74$ ) ou le molybdène ( $Z=42$ ) sont souvent utilisés.

### 1.3.2. Rayonnement caractéristique

Ce mécanisme se produit lorsque les électrons incidents interagissent directement avec les électrons de la cible, éjectant les électrons des couches électroniques internes (comme la couche K ou L).

### Étapes du rayonnement caractéristique

#### 1. Éjection d'un électron d'une couche interne

- Lorsqu'un électron rapide entre en collision avec un électron lié à un atome de la cible, il peut transférer suffisamment d'énergie pour expulser cet électron de son orbite.
- Cette éjection crée une vacance dans une couche électronique interne, par exemple la couche K.

#### 2. Transition électronique

- Un électron d'une couche supérieure (par exemple L ou M) descend pour combler la vacance laissée dans la couche interne.

- Ce transfert libère un photon X dont l'énergie correspond à la différence d'énergie entre les deux niveaux électroniques.

### 3. Émission de rayons X caractéristiques

- Les photons émis ont des énergies spécifiques aux transitions électroniques de l'atome cible. Ces rayons X sont appelés rayons X caractéristiques.

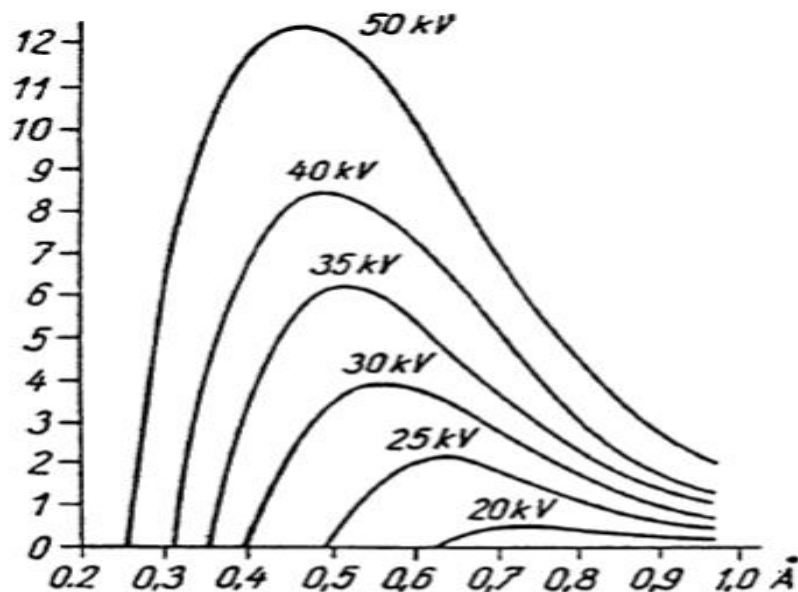
#### Caractéristiques du rayonnement caractéristique

- Les énergies des rayons X sont spécifiques au matériau de la cible et dépendent des différences entre les niveaux d'énergie électroniques.
- Par exemple, pour le tungstène ( $Z = 74$ ), les transitions  $K\alpha$  et  $K\beta$  produisent des rayons X caractéristiques avec des énergies respectivement de 59,3 keV et 67,2 keV.

#### 1.4. Spectre des rayons X

##### 1.4.1. Spectre continu

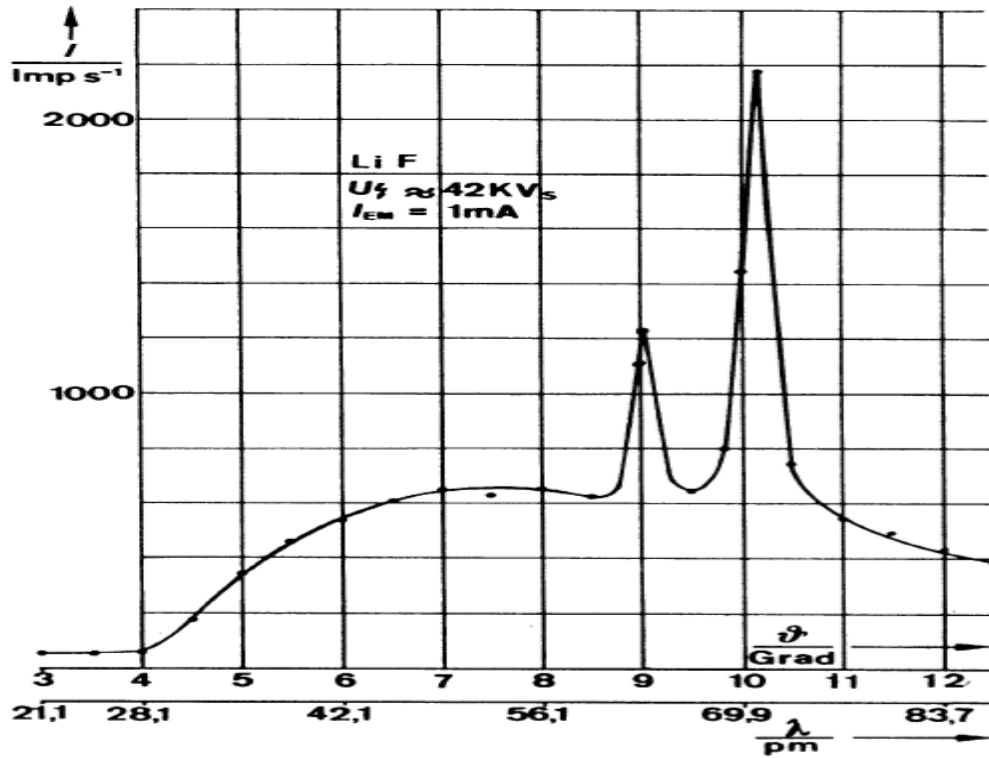
Le rayonnement de freinage produit un spectre continu de photons. Sa forme dépend de la tension appliquée et des propriétés de la cible. L'intensité est maximale pour des photons d'énergie intermédiaire.



*Spectre continu de rayons X correspondant à différentes valeurs de tension d'accélération.*

### 1.4.2. Spectre discret

Les raies caractéristiques (exemple :  $K\alpha$  et  $K\beta$ ) apparaissent en superposition au spectre continu. Leur énergie est déterminée par les transitions électroniques spécifiques des atomes cibles.



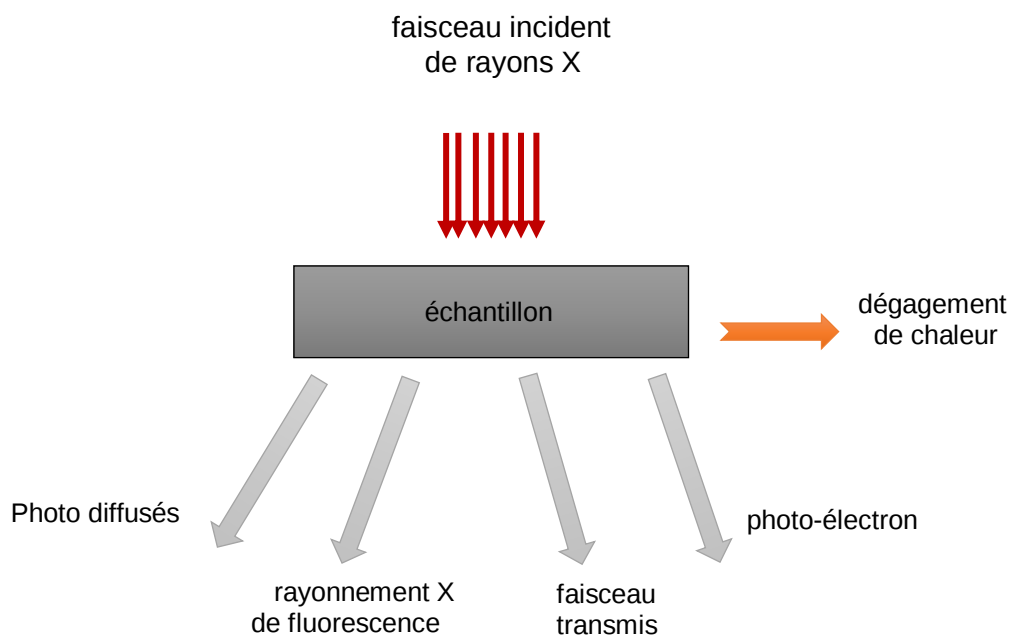
*Spectre caractéristique.*

## 2. Interactions rayons X / matière

Les différents types d'interaction entre le faisceau de rayons X et un matériau sont décrits sur la figure suivante. Les rayons X peuvent être :

1. transmis sans changer de direction : on parle de radiographie X que l'on utilise pour la détection de porosités ou de fissures par exemple.
2. transmis en changeant de direction (selon un angle  $2\theta$ ) ou diffusés ; la diffusion pouvant se faire :

- sans perte d'énergie : on parle alors de diffusion élastique, elle est à l'origine de la diffraction des rayons X par les cristaux.
  - avec perte d'énergie (une partie de l'énergie est cédée à un électron) : on parle alors de diffusion inélastique, elle est à l'origine de l'effet Compton.
3. absorbés par les atomes : sous l'action du rayonnement incident, un électron d'un atome de l'échantillon peut être éjecté de la couche électronique qu'il occupait, c'est l'effet photoélectrique, l'électron éjecté étant appelé photo-électron. L'électron éjecté peut être remplacé par un électron d'une couche supérieure. Ce saut électronique s'accompagne d'un rayonnement X appelé rayonnement de fluorescence, il est utilisé pour l'analyse chimique des cristaux.
4. enfin, notons que tous ces phénomènes s'accompagnent d'un fort dégagement de chaleur.



***Différents mécanismes d'interaction entre rayons X et matériau.***

## **.2.1. Absorption des rayons X**

Lorsque les rayons X sont absorbés par les atomes, plusieurs phénomènes se produisent en fonction de l'énergie des photons et de la structure atomique.

### **.2.1.1. Effet photoélectrique**

Un photon incident est absorbé, ce qui entraîne l'éjection d'un électron lié (photo-électron) de son orbite.

#### **Principe :**

- L'énergie du photon ( $E_{ph}$ ) doit être supérieure à l'énergie de liaison ( $W_L$ ) de l'électron.
- L'énergie excédentaire est convertie en énergie cinétique de l'électron éjecté.
- Transition électronique pour combler la vacance laissée par l'électron, souvent accompagnée de :
  - **Rayons X caractéristiques** : émission photonique due à la réorganisation électronique,
  - **Électrons Auger** : émission d'un électron supplémentaire.

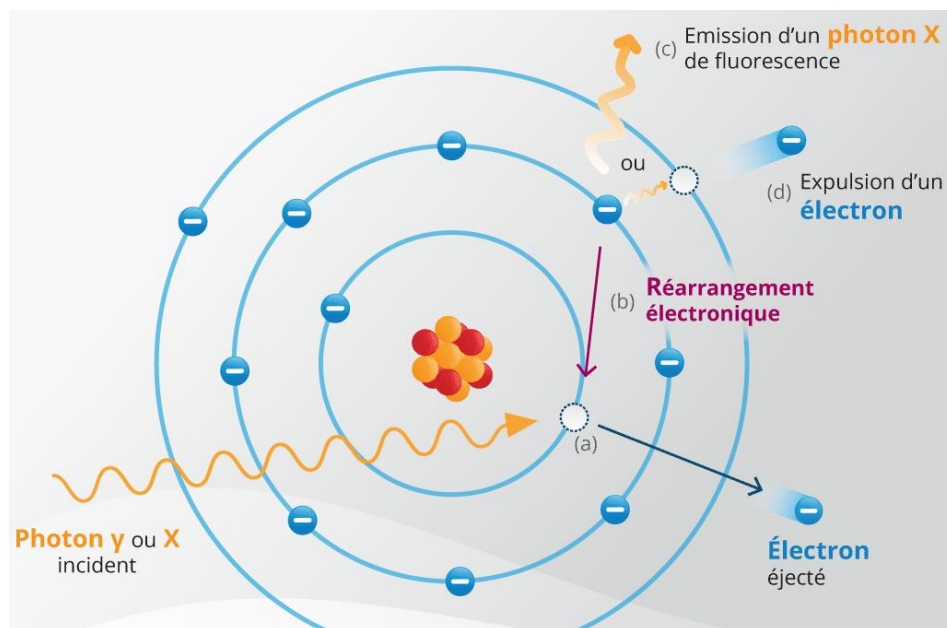
L'effet photoélectrique apparaît quand un rayon  $\gamma$  ou X rencontre un électron proche du noyau.

Le rayon incident transfère toute son énergie à l'électron et disparaît.

L'électron se retrouve alors éjecté du cortège car l'énergie transférée est plus forte que son énergie de liaison. En général, cet électron (particule  $\beta^-$ ) est dévié après l'interaction et interagit à son tour dans la matière, en transférant son énergie par ionisation, excitation et peut-être par freinage.

Mais lors de la première interaction, trois événements vont se produire successivement, car l'électron est proche du noyau :

- 1- l'atome se retrouve sous forme ionisée (a).
- 2- cette ionisation (primaire) est suivie d'un réarrangement en cascade du cortège électronique de l'atome (b)
- 3- un photon (rayon X de fluorescence) est alors émis (c) ou bien un électron d'une couche encore plus périphérique est expulsé (d).



***Diffusion élastique des rayons X  
(Effet photoélectrique).***

## **2.2. Diffusion des rayons X**

La diffusion intervient lorsque le faisceau de rayons X est dévié dans une nouvelle direction. Deux formes de diffusion existent, dépendant de la conservation ou non de l'énergie.

### 2.2.1. Diffusion inélastique (Effet Compton)

La diffusion inélastique se produit lorsque le photon X perd une partie de son énergie, transférée à un électron.

#### Mécanisme :

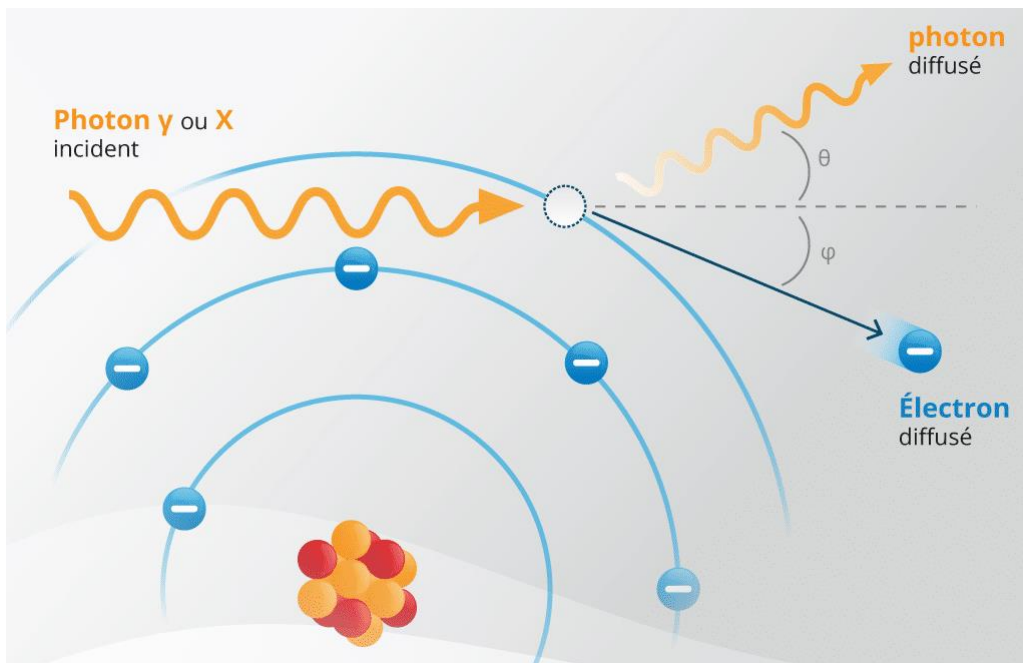
- Interaction du photon avec un électron faiblement lié ou libre.
- Le photon sort avec une énergie réduite et une direction modifiée, tandis que l'électron acquiert une énergie cinétique.

#### Équation principale :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

#### Applications :

- Études sur les propriétés des matériaux et des tissus.
- Effet parasite en radiographie, diminuant le contraste des images.

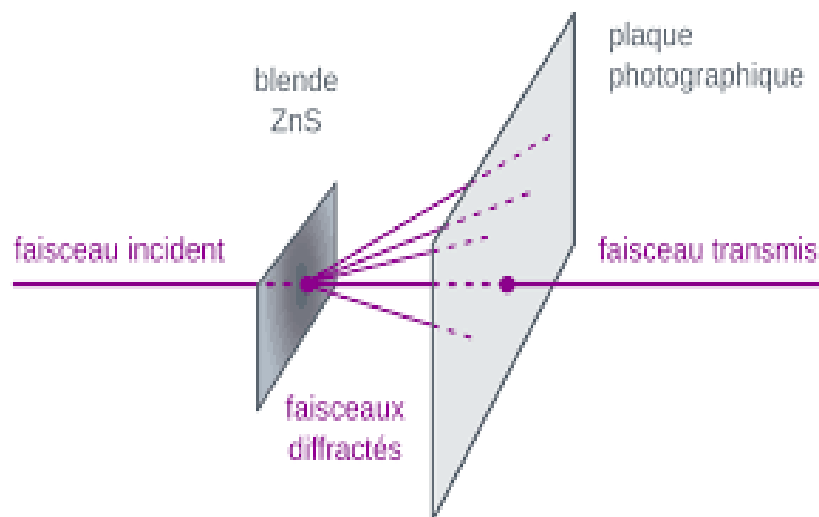


*Diffusion inélastique des rayons X  
(Effet Compton).*

### 2.2.2. Diffusion élastique

En 1912, Friedrich et Knipping réalisèrent, sur les indications de Laue, l'expérience décrite sur la figure suivante. Ils bombardèrent une lame monocristalline de ZnS avec un faisceau polychromatique de rayons X et placèrent une plaque photographique à l'arrière de l'échantillon, sur laquelle ils obtinrent :

- une tâche centrale correspondant au faisceau transmis sans changement de direction,
- d'autres tâches moins intenses réparties plus ou moins régulièrement autour de la tâche centrale, correspondant aux faisceaux diffractés.



*Diffusion élastique des rayons X .*

#### a) La loi de Bragg

Chacun des faisceaux diffractés se comporte en ce qui concerne sa direction comme s'il était réfléchi selon la loi classique de la réflexion sur l'un des plans réticulaires du cristal : chaque plan cristallographique joue le rôle de miroir et réfléchit environ  $10^{-1}$  à  $10^{-3}$  pour cent de la radiation incidente.

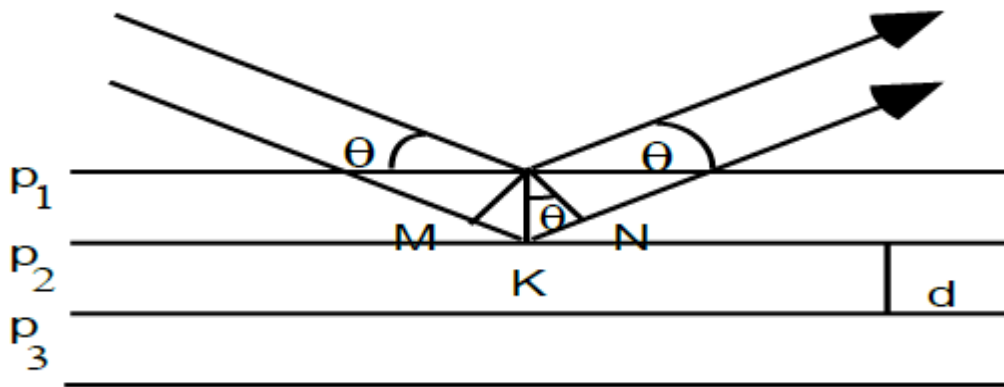
Considérons un faisceau de rayon X de longueur d'onde  $\lambda$  tombant avec une incidence  $\theta$  sur une famille de plans cristallins ( $hkl$ ) définis par leur distance interréticulaire  $d_{hkl}$ .

Il y a diffraction si la loi suivante, appelée loi de Bragg, est vérifiée :

$$2d_{hkl} \sin(\theta) = n \lambda$$

où  $n$  est un nombre entier positif appelé ordre de la diffraction.

On peut démontrer la loi de Bragg en considérant la figure suivante. La différence de marche entre les deux faisceaux diffractés par deux plans réticulaires consécutifs est égale à  $2d_{hkl} \sin(\theta) = n \lambda$ . Une interférence additive apparaît lorsque cette différence de marche est un multiple entier  $n$  de la longueur d'onde  $\lambda$ .



*Interactions Rx avec des plans parallèles dans un réseau cristallin.*

### **b) Intensité diffractée**

La loi de Bragg exprime une condition nécessaire pour qu'il y ait diffraction mais ce n'est pas une condition suffisante. Il faut également que le faisceau diffracté correspondant ait une intensité non nulle. Cette intensité s'exprime en fonction des entiers  $h'$ ,  $k'$ ,  $l'$  tels que  $h'=n.h$ ,  $k'=n.k$  et  $l'=n.l$  avec  $h$ ,  $k$  et  $l$  indices de Miller de la famille de plans diffractants. L'intensité diffractée peut se mettre sous la forme :

$$I_{h'k'l'} = A |F_{h'k'l'}|^2$$

où  $F_{hkl}$  est le facteur de structure pour la diffraction considérée,  $n$  l'ordre de la diffraction et  $A$  est une fonction de l'angle de Bragg et de divers autres paramètres.

Le facteur de structure est un terme qui prend en compte la disposition des atomes à l'intérieur de la maille cristalline, c'est-à-dire le motif.

$F_{hkl}$  s'exprime de la façon suivante :

$$F_{hkl} = \sum_{j=1}^8 e^{2i\pi(hx_j + ky_j + lz_j)}$$

où 8 est le nombre d'atomes par maille et  $f_j$  le facteur de diffusion qui dépend essentiellement du numéro atomique des atomes considérés.

La loi de Bragg étant satisfaite, on aura diffraction si  $F_{hkl}$  est non nul, ce qui impose des conditions sur  $h'$ ,  $k'$  et  $l'$ . Par exemple pour la structure CFC,  $F_{hkl} \neq 0$  si  $h'$ ,  $k'$  et  $l'$  sont de même parité ; pour la structure CC,  $F_{hkl} \neq 0$  si  $h'+k'+l'$  est pair.

### **.2.3. Transmission sans changement de direction**

Les rayons X peuvent traverser un matériau sans subir de déviation. Ce phénomène est exploité en radiographie pour produire des images en fonction des variations d'absorption dans les matériaux traversés.

#### **Principe :**

- La densité et la composition du matériau déterminent l'absorption des rayons X.
- Les zones plus denses (comme les os ou les parties métalliques) absorbent davantage, apparaissant plus sombres sur les images radiographiques.

#### **Applications :**

- Détection de porosités, fissures, ou anomalies structurelles dans des matériaux ou objets industriels.
- Radiographies médicales pour diagnostiquer des fractures ou anomalies osseuses.

## **.2.4. Dégagement thermique**

Dans toutes les interactions (transmission, diffusion, absorption), une fraction significative de l'énergie des rayons X est convertie en chaleur dans le matériau.

### **Conséquences :**

- Risque d'échauffement localisé, en particulier dans les échantillons sensibles.
- Nécessité de refroidissement dans les équipements (ex. : tubes à rayons X).

### **Applications :**

- Effet exploité dans certaines techniques de traitement thermique ou d'analyse thermique assistée par rayons X.