

## INTRODUCTION

Dès le 5<sup>ème</sup> siècle avant J. C. des philosophes grecs pensaient que la matière ne peut pas être divisible à l'infini. Le terme atome a pour origine le mot grec « atomos » qui signifie *INDIVISIBLE*.

**En 1808** à partir de la réaction des proportions bien définies, **J. Dalton** propose un énoncé de la théorie atomique :

- Toute matière est constituée de particules extrêmement petites, indivisibles et indestructibles appelées atomes.
- Tous les atomes d'un même élément sont semblables mais différent de ceux d'un autre élément.

**En 1903 J. J. Thomson** découvre des particules électriquement chargées beaucoup plus petites que l'atome, qu'il appellera électron. **Thomson** donc présente son modèle globulaire de l'atome, c'est une boule d'électricité positive à l'intérieure de laquelle gravitent les électrons.

**En 1911 Rutherford** met en évidence l'existence du noyau atomique en envoyant des particules alpha sur des feuilles d'or très minces, puis il propose un modèle planétaire comportant un seul noyau.

**En 1913 Bohr** présente sa théorie de l'atome caractérisée par deux hypothèses :

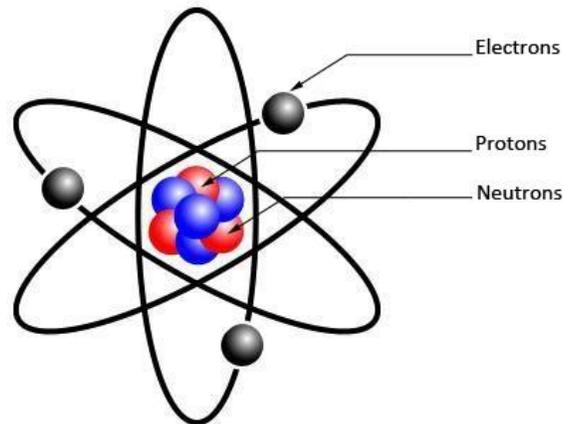
1. On conserve les lois de l'ancienne dynamique pour les corpuscules ponctuels.
2. On ajoute à ces lois des conditions restrictives de quantification.

Ces hypothèses ont pour conséquences :

- Que les électrons ne peuvent effectuer que des mouvements stables.
- Que l'atome passe d'un état stable vers un autre par « transition brusque » avec émission ou absorption d'un photon ce qui conduit à la « loi des fréquences de Bohr ».

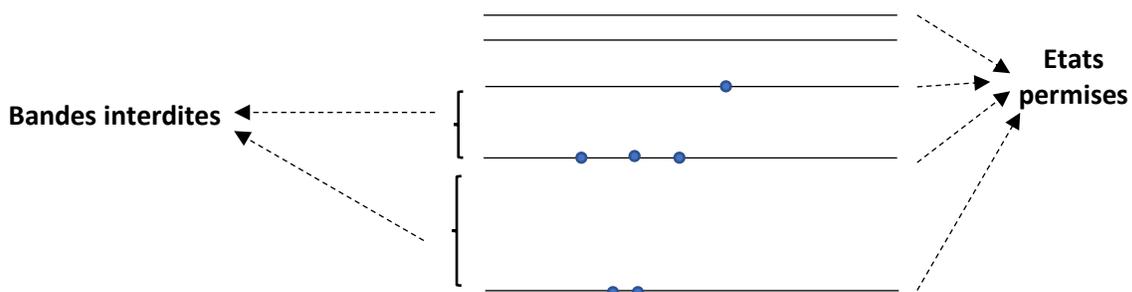
## Etat actuelle des connaissances

La matière dans toute ses formes est constituée d'atomes, eux même formes d'électrons, de protons et de neutrons, (voir figure I.1).



**Figure I.1 :** Schéma d'un atome

L'atome est électriquement neutre, sa masse est concentrée à 99,97% dans son noyau. Les électrons et le noyau sont maintenus ensemble par des forces d'interactions électromagnétiques conformément à des règles quantiques, de sorte que l'atome soit stable. En effet ces règles « quantification de l'énergie et du moment angulaire, principe d'exclusion » imposent aux électrons de n'occuper que des orbites permises déterminées, appelées niveaux ou états d'énergies



**Figure I.2 :** Niveaux d'énergies et bandes interdites d'un atome

Les électrons peuvent effectuer des transitions discontinues d'un état à un autre sous certaines conditions. L'état d'énergie minimum d'un atome, d'une molécule ou d'un système quantique quelconque est dit état fondamental, tous les autres états d'énergie supérieures sont dits états excités du système.

## Théorie du photon

Le postulat fondamental sur lequel repose l'interprétation quantique est que le rayonnement électromagnétique est formé d'accumulation petites et discrètes d'énergies appelés photons ou quanta. Chaque photon possède une énergie  $E$  telle que

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda},$$

Avec  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$  est la constante de Planck,  $\lambda$  la longueur d'onde et  $\nu$  est la fréquence.

Les photons se déplacent à la vitesse de la lumière  $c$ , chaque photon possède une quantité de mouvement  $p$  :

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{\lambda} = \frac{h}{\lambda}$$

Un rayonnement électromagnétique (R.E) est constitué, d'un point de vu quantique, de photons. L'intensité du R.E sera proportionnelle au nombre de photons traversant une surface normale a la direction de propagation. Pour un R.E monochromatique,

$$I(\text{intensite}) = \text{energie d'un photon} \cdot \frac{\text{nombre de photons}}{\text{surface} \cdot \text{temps}}$$

# CHAPITRE I

## Qualité « matière – rayonnement »

Dans ce chapitre on va étudier quelques exemples qui ont fait échecs à la description de la théorie continue, le rayonnement du corps noir, l'effet photoélectrique et l'effet Compton. Aucun de ces trois exemples ne fut décrit correctement par la théorie continue. Pour décrire ces phénomènes d'une manière correct il fallait introduire un nouveau concept ; le quantum d'énergie.

### **1) Le corps noir**

Un corps noir est un corps idéal totalement absorbant à toute radiation électromagnétique. Un exemple de corps noir consiste en une enceinte isotherme munie d'une toute petite ouverture.

Lorsqu'un corps est porté à une température  $T$ , il rayonne de l'énergie, cette énergie émise dépend de la température de ce corps, ce que l'on note :

$$\rho = f(T) \quad (I.1)$$

Avec  $\rho$  est la densité d'énergie rayonnée par le corps.

Lorsque la température d'un morceau de fer par exemple augmente, sa couleur passe du rouge au bleu en passant par les couleurs qui se trouvent entre le rouge et le bleu sur le cercle chromatique. Ces couleurs résultent des ondes électromagnétiques émise par la substance chauffée. A chaque onde électromagnétique est associée une fréquence  $\nu$  telle que

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (I.2)$$

La densité d'énergie émise par le corps dépend donc également de la fréquence des ondes lumineuses engendrées.

$$\rho = g(\nu) \quad (I.3)$$

De l'équation (I.1) et (I.3), nous pouvons écrire

$$\rho = \rho(T, \nu) \quad (I.3)$$

Nous voyons que l'étude du rayonnement d'un corps noir porté a une certaine température sera complexe, puisqu'elle fait intervenir à la fois des phénomènes thermique et optique.

## Les différentes lois classiques

### La Loi de Kirchhoff

À l'équilibre thermique et pour une longueur d'onde donnée, l'énergie émise « dans une direction de l'espace » par un élément de paroi du corps doit être égale à l'énergie absorbée « dans cette même direction ».

### La Loi de Stefan Boltzmann

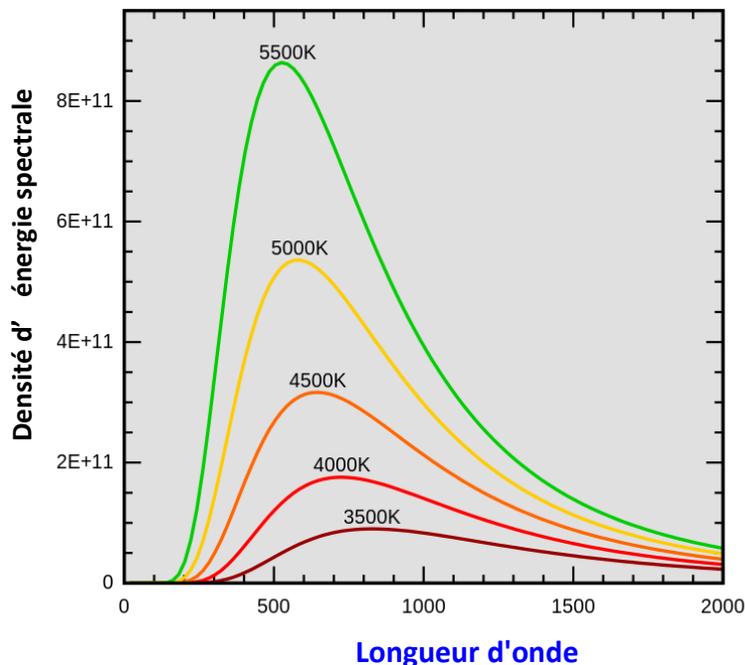
Stefan et Boltzmann décrivent empiriquement la variation de la densité d'énergie totale  $\rho(T)$  pour toutes les fréquences par la loi :

$$\rho(T) = \sigma T^4 \quad (I.4)$$

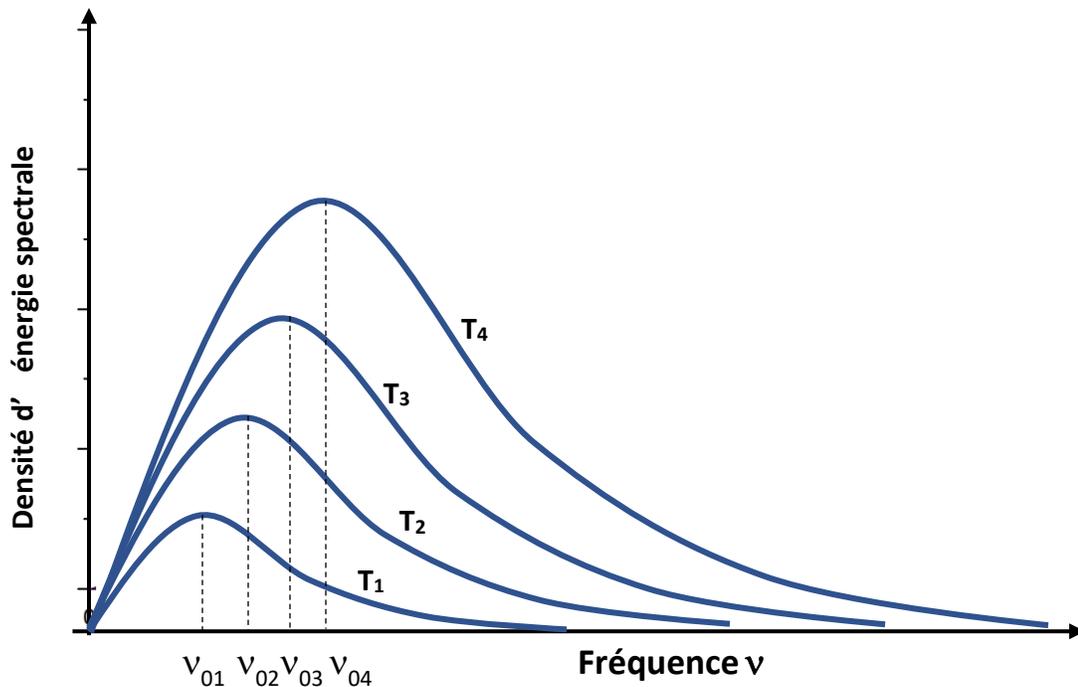
Avec  $\sigma = 7,56 \cdot 10^{-16} \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-4}$

### La Loi de déplacement de Wien

Cette loi donne la variation de la densité d'énergie spectrale en fonction de la température et de la fréquence. Selon la loi de Wien, à une température  $T$  donnée, la densité d'énergie passe par un maximum  $\rho_{max}$  pour une longueur d'onde  $\lambda_0$  (pour une fréquence  $\nu_0$ ), figures I.1 et I.2.



**Figure I.1:** Densité d'énergie spectrale en fonction de la longueur d'onde a différentes températures.



**Figure I.2 :** Densité d'énergie spectrale en fonction de la fréquence à différentes températures.

Le déplacement du maximum avec l'augmentation de la température explique le changement de couleur des corps chauffés. A travers ces courbes Wien a remarqué l'égalité suivante :

$$\frac{\nu_{01}}{T_1} = \frac{\nu_{02}}{T_2} = \frac{\nu_{03}}{T_3} = \frac{\nu_{04}}{T_4} = C^{te} \quad (I.5)$$

Ou

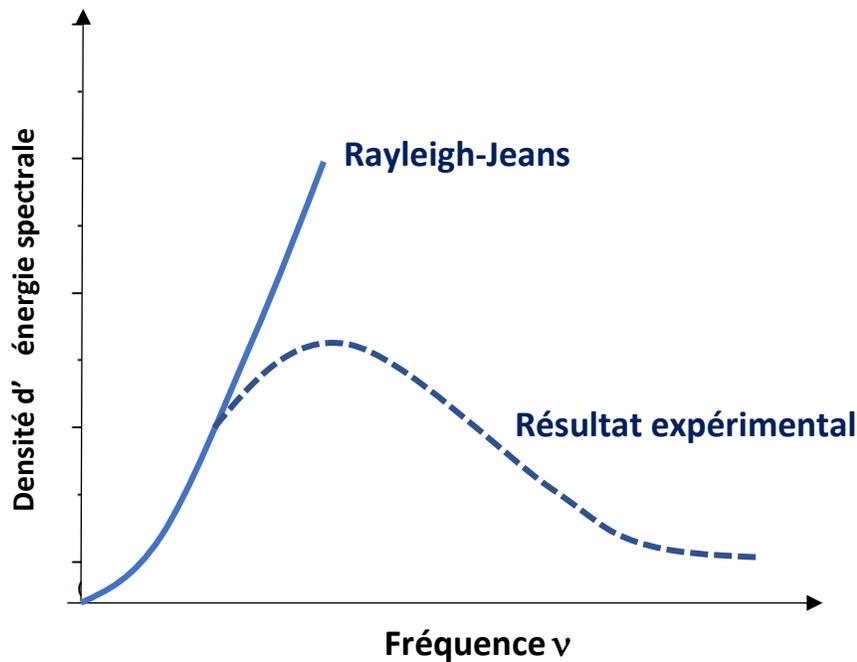
$$\lambda_0 T = 2,897 \cdot 10^{-3} mK \quad (I.6)$$

### La Loi de Rayleigh et Jeans

En 1900, lord Rayleigh utilise lui une approche de mécanique statistique pour aboutir à une loi donnant à la densité énergétique une dépendance en  $\nu^2$

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi kT}{c^3} \nu^2 \quad (I.7)$$

Les prédictions de loi de Rayleigh-Jeans coïncident bien avec les résultats expérimentaux pour les faibles fréquences, par contre pour les hautes fréquences (ultraviolet) le désaccord est total « la catastrophe ultraviolette », figure I.3



**Figure I.3** : Densité d'énergie spectrale expérimentale et selon Rayleigh et Jeans

### La Loi de Planck

Pour trouver une méthode théorique permettant l'évaluation de la densité d'énergie spectrale rayonnée, Planck fait une hypothèse "hardis " ; il suppose que l'échange d'énergie entre les parois du corps noir et le rayonnement se fait de façon discontinue. Planck a supposé que tous les atomes du corps chauffé se vibrent autour de leurs centres d'équilibre avec une énergie d'un multiple de  $h\nu$ , ou  $h$  et  $\nu$  sont respectivement la constante de Planck ( $h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ) et la fréquence de l'oscillateur, c'est-à-dire :  $E_0 = 0$ ;  $E_1 = h\nu$ ;  $E_2 = 2h\nu$ ; ... ..  $E_n = nh\nu$ .

Supposons que :

$N_0$  est le nombre des oscillateurs d'énergie,  $E_0 = 0$

et  $N_1$  est le nombre des oscillateurs d'énergie,  $E_1 = h\nu$

et  $N_2$  est le nombre des oscillateurs d'énergie,  $E_2 = 2h\nu$

et  $N_n$  est le nombre des oscillateurs d'énergie,  $E_n = nh\nu$

En utilisant la distribution statistique, Planck a trouvé le nombre d'oscillateurs ayant même énergie :

$$N(E_n) = N_0 e^{-E_n/kT} \quad (I.8)$$

Avec  $k$  est la constants de Boltzmann ;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$

$$N(nh\nu) = N_0 e^{-nh\nu/kT} ; n = 0, 1, 2, \dots \quad (I.9)$$

Pour  $n = 0$ ;  $E_0 = 0$ ;  $N(0) = C = N_0$

Pour  $n = 1$ ;  $E_1 = h\nu$ ;  $N(h\nu) = C e^{-h\nu/kT} = N_1$

Pour  $n = 2$ ;  $E_2 = 2h\nu$ ;  $N(2h\nu) = C e^{-2h\nu/kT} = N_2$ ; .....

La valeur moyenne de l'énergie avec laquelle vibre chaque oscillateur de fréquence  $\nu$  est :

$$\begin{aligned} \langle E \rangle &= \frac{0 \cdot N_0 + E_1 \cdot N_1 + E_2 \cdot N_2 + \dots}{N_0 + N_1 + N_2 + \dots} \\ &= \frac{C \cdot h\nu \cdot e^{-h\nu/kT} + 2h\nu \cdot (C e^{-2h\nu/kT}) + \dots}{C + C e^{-h\nu/kT} + C e^{-2h\nu/kT} + \dots} \\ &= \frac{C \cdot h\nu \cdot e^{-h\nu/kT} \{1 + 2 \cdot e^{-h\nu/kT} + 3 \cdot e^{-2h\nu/kT} + \dots\}}{C \{1 + e^{-h\nu/kT} + e^{-2h\nu/kT} + \dots\}} \end{aligned}$$

On pose  $x = e^{-h\nu/kT}$

$$\frac{1 + 2 \cdot e^{-h\nu/kT} + 3 \cdot e^{-2h\nu/kT} + \dots}{1 + e^{-h\nu/kT} + e^{-2h\nu/kT} + \dots} = \frac{1 + 2 \cdot x + 3 \cdot x^2 + \dots}{1 + x + x^2 + \dots} = \frac{(1-x)^{-2}}{(1-x)^{-1}} = \frac{1}{1-x}$$

$$\langle E \rangle = h\nu \cdot e^{-h\nu/kT} \left( \frac{1}{1 - e^{-h\nu/kT}} \right)$$

L'énergie moyenne d'un oscillateur de fréquence  $\nu$  est donc :

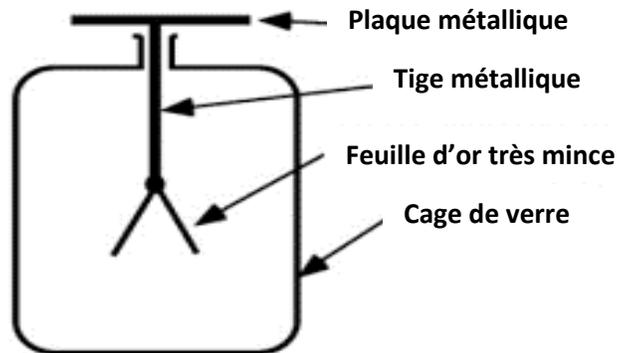
$$\langle E \rangle = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (I.10)$$

Planck a introduit cette énergie moyenne dans la formule de la loi de Rayleigh-Jeans pour aboutir en fin à la loi de rayonnement du corps noir :

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (I.11)$$

## 2) L'effet photoélectrique

En 1888 Halbwachs réalise l'expérience de la figure I.3, il charge l'électroscope négativement, les feuilles d'or sont écartées l'une de l'autre. Si on éclaire la plaque métallique avec de la lumière ultraviolette l'électroscope se décharge et les feuilles se rapprochent, la lumière arrache donc des charges négatives.



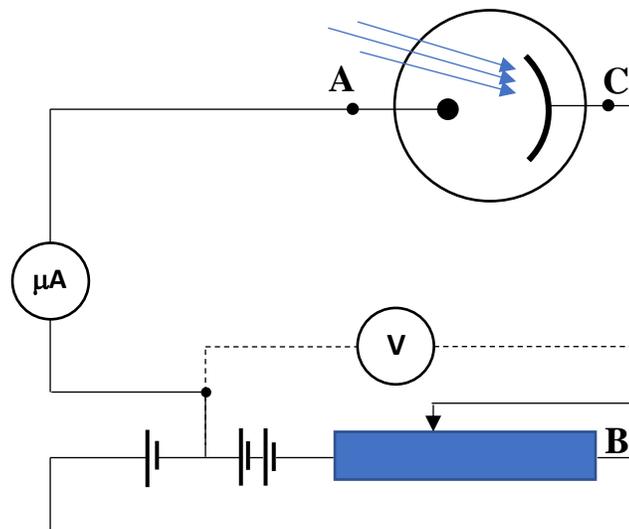
**Figure I.3 :** Electroscope a feuilles

Le montage expérimental utilisé pour l'étude quantitative de ce phénomène est schématisé dans la figure I.4.

$\mu\text{A}$ : microampèremètre

$V$  : voltmètre mesurant  $V_{AC}$

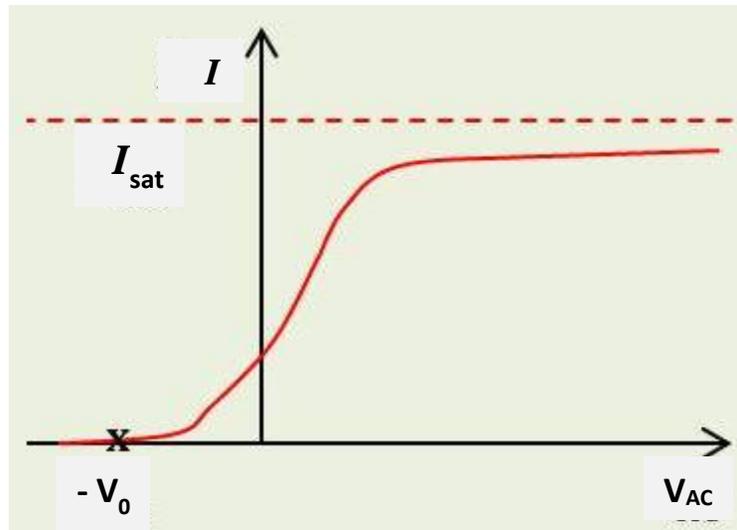
$B$  : potentiomètre permettant de donner à  $V_{AC}$  des valeurs positives ou négatives



**Figure I.4 :** Montage expérimental utilisé pour l'étude quantitative de l'effet photoélectrique

Pour un type de rayonnement (fréquence  $\nu = \text{constante}$ ), les résultats expérimentaux obtenus sont représentés dans la figure I.5, cette figure représente la variation du courant électrique circulant dans le circuit en fonction de la tension anode-cathode, ce courant est dû aux électrons arrachés de la photocathode par la lumière incidente. On constate (pour  $\nu = \text{constante}$ ), que le courant apparaît

pour une tension  $V_0$  négative quelle que soit la puissance incidente, on remarque aussi la présence de courant de saturation  $I_{sat}$ .



**Figure I.5 :** courbe caractéristique de l'effet photoélectrique

### Interprétation de l'effet photoélectrique

Einstein dans sa théorie postule qu'un faisceau lumineux est constitué de " grains d'énergie " qu'il appelle « photons » ; l'énergie de chaque photon s'écrit :

$$E = h\nu \quad (I.12)$$

Lorsque la lumière tombe sur la photocathode chaque photon entrant en interaction avec la matière est responsable de l'éjection d'un électron. La théorie prévoit que le photon disparaît totalement, l'énergie du photon va donc se répartir entre l'énergie qu'il faut fournir à l'électron pour le libérer et l'énergie cinétique communiqué à l'électron libéré, donc le bilan d'énergie est :

$$h\nu = W_s + E_{c,max} \quad (I.13)$$

avec  $W_s$  le travail de sortie « énergie nécessaire pour libérer l'électron du métal de la photocathode ».

De l'équation (I.13),  $h\nu$  et  $W_s$  peuvent être connus à partir des données de l'expérience, mais comment pouvons-nous déterminer  $E_{c,max}$  ? pour se faire il faut appliquer une tension capable de produire une énergie de freinage  $e|V_0|$  permettant d'annuler le courant électrique, donc la condition limite lorsque  $V = |V_0|$  est :

$$E_{c,max} = e|V_0| \quad (I.14)$$

Si  $h\nu = W_s$  pour  $\nu = \nu_s$

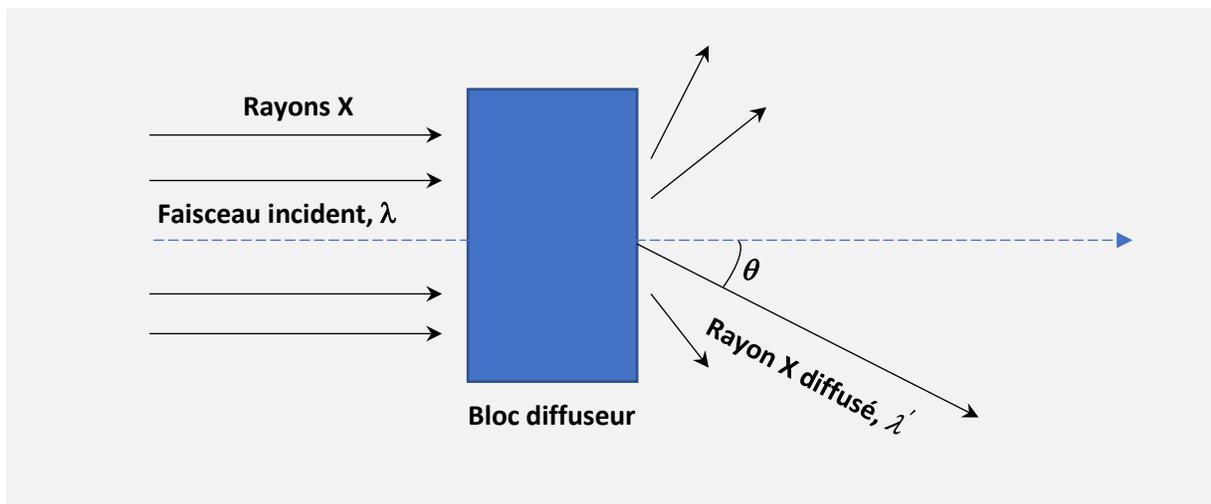
$$h\nu_s = W_s \quad (I.15)$$

De (I.13), (I.14) et (I.15) nous trouvons :

$$h\nu = h\nu_s + e|V_0| \quad (I.16)$$

### 3) L'effet Compton

En 1923 Compton a repris les expériences de Barkla en mesurant la longueur d'onde  $\lambda'$  des rayons X diffusés, voir la figure (I.6).

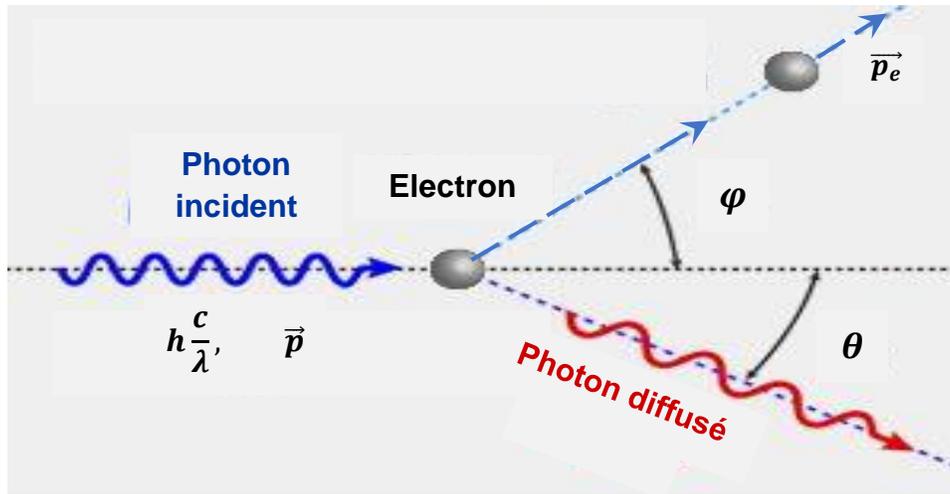


**Figure (I.6) :** Diffusion des rayons X

Dans la figure (I.6),  $\theta$  est l'angle de l'observation, au cours de l'expérience on déplace le spectromètre de façon à explorer les angles  $\theta$  possibles. Les principaux résultats pour  $\delta\lambda = \lambda' - \lambda$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde des rayons incidents, sont :

- $\delta\lambda$  est toujours positif.
- $\delta\lambda$  est une fonction croissante de  $\theta$ .
- $\delta\lambda$  ne dépend que de  $\theta$ .

Les rayons X sortants sont caractérisés par une longueur d'onde ( $\lambda' = \lambda + \delta\lambda$ ) plus grande que la longueur d'onde des rayons incidents  $\lambda$ . Compton, en reprenant l'hypothèse du photon, a expliqué cet effet de diffusion, il suppose qu'un photon incident d'énergie  $h\frac{c}{\lambda}$  entre en collision élastique avec un électron immobile. Après le choc, l'électron est mis en mouvement et le photon poursuit son chemin avec une énergie  $h\frac{c}{\lambda'} < h\frac{c}{\lambda}$ , figure (I.7).



**Figure (I.7) :** Diffusion de Compton.

En appliquant les lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement pour le système électron-photon,

$$h \frac{c}{\lambda} + m_0 c^2 = h \frac{c}{\lambda'} + E_e \quad (I.17)$$

$$\vec{p}_{ph} + \vec{0} = \vec{p}'_{ph} + \vec{p}_e \quad (I.18)$$

Où  $m_0$  est la masse de l'électron au repos et  $\vec{p}_{ph}$ ,  $\vec{p}'_{ph}$ ,  $\vec{p}_e$  sont les quantités de mouvement du photon incident, photon diffusé et de l'électron après le choc respectivement.

Compton, en fin, a trouvé sa célèbre relation donnant la variation de la longueur d'onde des rayons incidents avec l'angle de l'observation :

$$\delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta) \quad (I.19)$$

La quantité  $\frac{h}{m_0 c} = 0,0242 \text{ \AA}$  est appelée la longueur d'onde de Compton.

On constate alors que la formule théorique de  $\delta\lambda$  vérifiée les résultats expérimentaux c.-à-d.

- $\delta\lambda$  est toujours positif.
- $\delta\lambda$  est une fonction croissante de  $\theta$ .
- $\delta\lambda$  ne dépend que de  $\theta$ .