

# Dualité onde/particule

## I Premières constatations

### A. Premières théories

La dualité onde/corpuscule est née de deux théories anciennes :

Isaac Newton ( 1704 ) pense que la lumière est un flux de particules :

- à Elles se déplacent en ligne droite à une vitesse très importante
- à Elles se réfléchissent sur des miroirs de manière prévisible

Thomas Young ( 1802 ) démontre que la lumière est une onde :

à Propriétés de diffraction et d'interférences ( expériences des fentes d'Young montrant des interférences destructives ).

### B. Différences entre particule et onde

l Les particules :

... possèdent une masse  $m$  propre, une position  $x$  propre et une quantité de mouvement mesurable telle que  $p = mv$ .

l Les ondes :

... ont une longueur d'onde  $\lambda$ , une amplitude  $A$  et une fréquence  $\gamma$  qui vaut  $\gamma = c/\lambda$  pour la lumière.

è On observe alors que les ondes se superposent et se passent au travers tandis que les particules rebondissent et subissent des collisions.

q D'un point de vue énergétique, l'énergie d'une particule vaut :

$$E_C = mv^2 / 2 \text{ ou dans le cas où } v \ll c : E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$$

q Pour les ondes, son énergie vaut :

$$E = E_0 \cos ( 2\pi / T * t - 2\pi / \lambda * x + \hat{\phi}_0 )$$

Et on a son intensité proportionnelle au carré de son champs magnétique :  $I \propto E_0^2$

## II Expériences de démonstration

### A. Rayonnement du corps noir

Le corps noir est un corps idéal qui absorbe et émet des radiations dans toutes les fréquences. ( ex : four, astre ... )

On observe que son spectre de rayonnement dépend de sa chaleur. Par exemple, lorsque l'on chauffe un métal, il est d'abord rouge, puis orange, puis jaune etc ...

Plusieurs théories ont tenté de trouver une valeur en fonction de la température et de la longueur d'onde.

| Théorie de Rayleigh-Jeans :  $dE = 8k_B T \cdot dU/U^4$   
 à  $k_B$  est la **constante de Boltzmann**  
 à Ce calcul fonctionne bien dans les grandes et moyennes longueurs d'onde, mais il tend vers l'infini pour les plus petites ! On parle de catastrophe dans l'ultraviolet.

| Loi de Wien :  $TU_{\max} = c_2 / 5$   
 à  $c_2 = 1,44 \text{ cm.K}$   
 à C'est la bonne formule !

| Correction de Max Planck :  

$$\frac{d\Phi}{d\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$
 à  $h$  est la constante de Planck et  $h$  vaut  $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$   
 à L'énergie est quantifié selon des niveaux d'énergie  $n$   
 à Ainsi à partir d'une fréquence seuil, l'absorption est inefficace car les paquets coûte beaucoup trop d'énergie

è Conséquences de la quantification de l'énergie : les échanges d'énergie entre les oscillateurs matériels et le rayonnement se fait par paquets d'énergie  $E = h\nu$ .

## B. Anomalie avec l'effet photoélectrique

Expérience de 1887 :

On éclaire une substance avec des rayonnements électromagnétique, et on observe que des électrons lui sont arrachés ( un courant circule si on place une anode en face ). En augmentant la différence de potentiel, on peut accélérer ou freiner le déplacement des électrons.

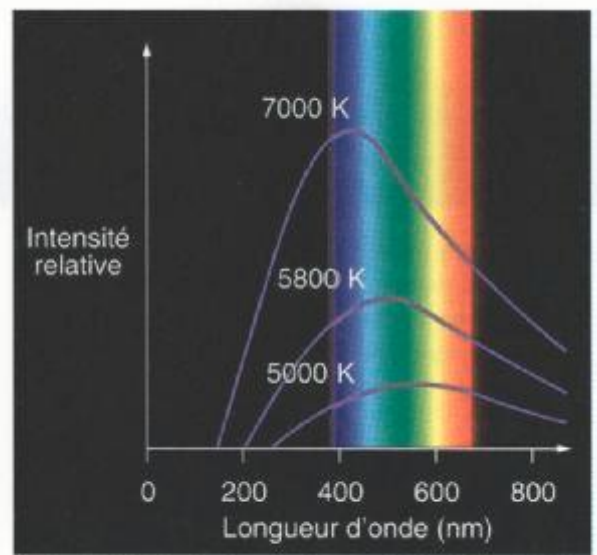
Les différentes mesure d'intensité dans différentes conditions ont démontré que la théorie ondulatoire classique ne fonctionne pas.

| Ce qui se passe microscopiquement :  
 $0 + A \rightarrow e^- + A^+$

D'où d'après la conservation d'énergie :  $E_0 + E_A = E_{A+} + E_e + W$

à  $E_A \geq E_{A+} \geq 0$  et  $W$  représente l'énergie requise pour arracher l'électron à la force faible.  $E_e$  représente l'énergie cinétique de l'électron.

à  $E_0 = E_e + W$  ó  $h\nu = mv^2/2 + W$



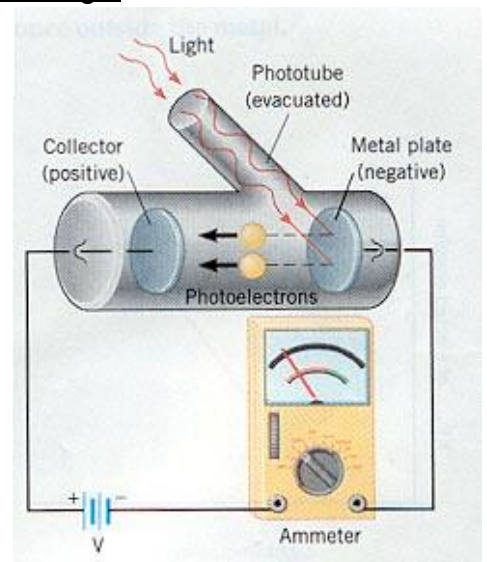
**Figure 5.2**

Trois spectres de corps noir.

Le spectre du haut correspond à une température de 7000 K; le pic d'émissivité est à 414 nm (bleu-violet).

Le spectre du milieu correspond à la température de la surface du Soleil, 5800 K; le pic d'émissivité est à 500 nm (vert).

Le spectre du bas correspond à une température de 5000 K; le pic d'émissivité est à 580 nm (vert-jaune).



Ainsi on définit une fréquence minimale à partir de laquelle l'absorption est possible  
 $E_0 - W = E_e \text{ ó } E_0 - W_{\min} \leq 0 \text{ ó } \gamma_0 \leq W_{\min} / h$

### III L'avènement de la physique quantique

#### A. Postulat d'Einstein

Les rayonnements électromagnétiques sont constitués de photons ou quanta d'énergie  $E = h\gamma$ . *Un photon donne soit toute son énergie, soit il ne la donne pas. Un photon a une charge électrique nulle.*

| Théorie de la relativité :

à Les photons se déplacent à la vitesse de la lumière dans le vide

à La masse du photon au repos est nulle

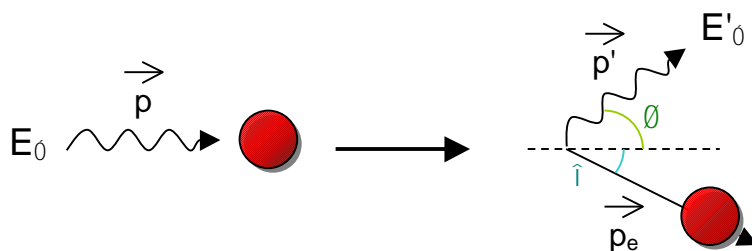
à En absence d'énergie potentielle, l'énergie du photon vaut  $E = pc$  et donc sa quantité de mouvement  $p = h / \lambda$ .

On peut calculer l'intensité du rayonnement qui est proportionnelle au nombre de photons traversant une surface normale à la direction de propagation :

$$I = E_0 * (\text{nombre de photons}) / [ (\text{surface}) * t ]$$

#### B. Diffusion Compton

Un rayonnement électromagnétique arrivant sur un électron lui donnera une vitesse et le rayonnement émis ainsi que l'électron éjecté auront chacun un angle différent par rapport à la source.



On observe que plus l'angle  $\theta$  est élevé, plus la fréquence  $\gamma'$  augmente.

| Conservation d'énergie :

$$h\gamma = h\gamma' + mv^2/2$$

| Conservation de la quantité de mouvement :

$$p = p' + p_e \text{ ( sous forme de vecteurs )}$$

è En croisant ces équations, on obtient :

$$\lambda - \lambda_c = h/mc * (1 - \cos \theta) = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

où  $\lambda_c$  est la longueur d'onde de Compton ( 0,00243 nm )

#### C. Postulat de De Broglie

Louis de Broglie a postulé en 1923 que "comme les photons peuvent avoir un comportement ondulatoire et corpusculaire, toute la matière a des propriétés ondulatoires et corpusculaires".

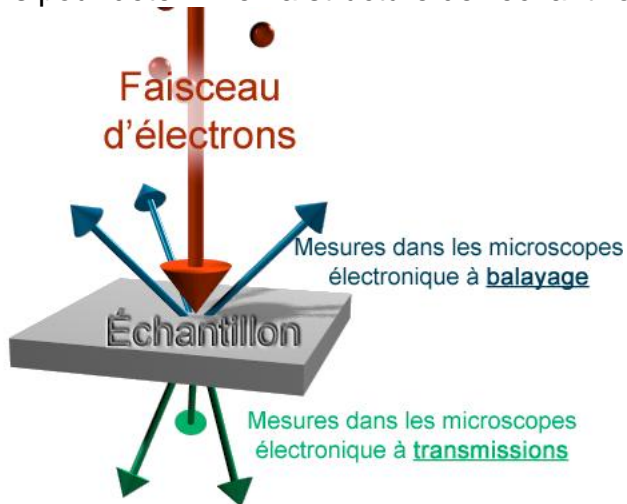
$$\hat{Y} = E / h \quad \text{et} \quad \hat{U} = h / p$$

On peut alors faire diffracter des électrons. On a réussi à faire diffracter aussi des neutrons, et même des molécules de fullerène. La diffraction des électrons a trouvé une application, notamment dans la microscopie électronique.

## IV\_ Microscopie électronique

### A. Principe

On envoie un faisceau d'électrons sur un échantillon assez fin pour faire diffracter les électrons, puis on mesure dans quelles directions sont partis les électrons pour déterminer la structure de l'échantillon.



### B. Différences entre microscopies photonique et électronique

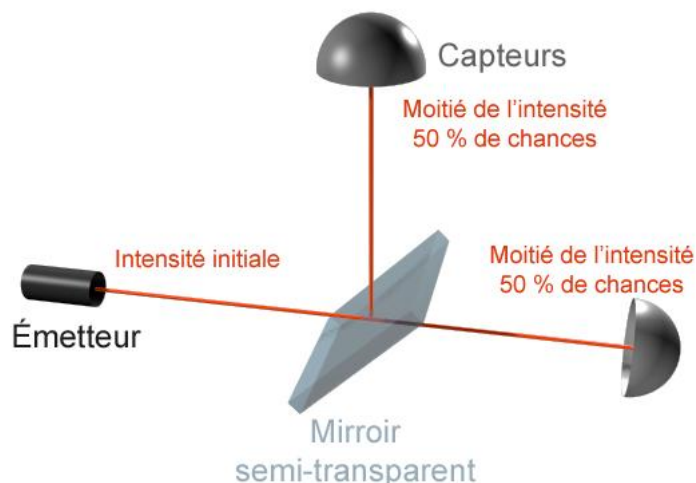
	Microscopie photonique	Microscopie électronique
<i>Sonde</i>	Photons	Électrons
<i>Longueur d'onde</i>	Y 0,5 $\mu\text{m}$	Y 5 pm
<i>Qualité des lentilles</i>	Excellente	Très mauvaise : on ne peut utiliser que le centre de la lentille
<i>État du spécimen</i>	Natif	Sous vide, déshydraté à cryo-microscopie
<i>Profondeur de champ</i>	Y Résolution	Y 1000 fois la résolution
<i>Épaisseur de l'objet</i>	Quelques millimètres	Quelques micromètres : la préparation des gros échantillons est difficile
<i>Dégâts sur les spécimens biologiques</i>	Très peu (chauffage)	Catastrophique (incinération)
<i>Prix</i>	1 000 à 100 000 €	100 000 à 1 000 000 €

Remarque : Bien que de résolution plus faible, le microscope électronique à balayage permet d'obtenir des jolies images en 3D.

## V Expériences montrant la nature ondulatoire et corpusculaire

### A. Miroirs semi-transparent

On envoie un rayonnement électromagnétique sur un miroir semi-transparent, c'est-à-dire qui a 50 % de chances de réfléchir ou de diffuser les photons. Selon que l'on considère une onde ou une particule, on observera une intensité qui correspond à la probabilité de recevoir le photon.



à La particule est indivisible

à Quand la particule est soumise à une mesure, le résultat devient aléatoire

à L'onde associée à la particule se divise en autant de composantes qu'il existe de résultats possibles distincts, et le poids de chacune donne la probabilité du résultat qui lui correspond

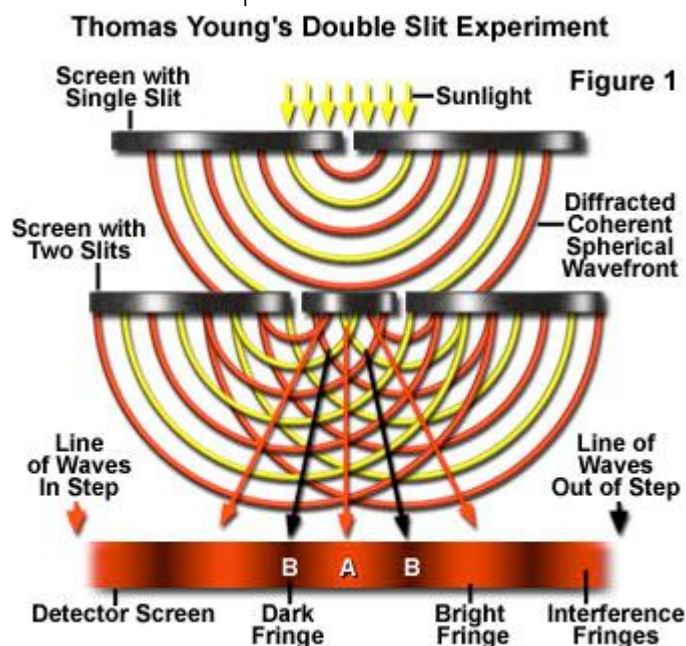
### B. Double fente

On envoie sur deux fentes des photons (ou des électrons) qui vont alors diffracter selon la théorie ondulatoire. Si on mesure particule par particule ce qui arrive sur l'écran, on mesurera la probabilité que la particule arrive sur l'écran, qui correspond alors encore à l'intensité de l'onde associée.

à On ne détecte sur l'écran que des événements localisés dans l'espace et le temps ; chaque événement est l'impact d'une particule

à Pour chaque événement, on a affaire à une particule qui se comporte statistiquement comme une onde.

à La théorie ondulatoire classique fait des prévisions correctes et précises lorsqu'un grand nombre de particules sont mises en jeu.



### C. Paradoxe quantique

Même expérience que précédemment, mais on essaie de mesurer par quelle fente passe l'électron. On n'observe alors plus le schéma d'une onde, mais celui d'une particule !!!

On définit alors le principe d'incertitude d'**Heisenberg** : *En mécanique quantique, il est impossible de mesurer simultanément la position et la vitesse d'une particule avec une précision infinie.*

$$\Delta x \Delta p_x \geq h / 4\pi \quad \text{ou} \quad \Delta E \Delta t \geq h / 4\pi$$