

DUALITE ONDE-CORPUSCULE DE LA LUMIERE

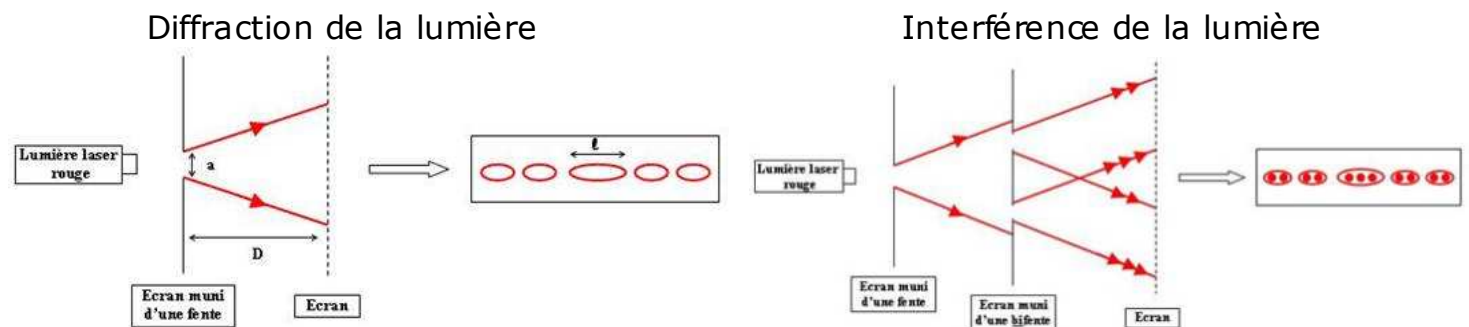
B

I. Dualité onde-corpuscule de la lumière

1. Comportement ondulatoire de la lumière

Les ondes mécaniques progressives peuvent donner lieu à des phénomènes de diffraction et d'interférences, donc l'observation de phénomènes similaires pour la lumière conduit à penser, par analogie, qu'elle se comporte comme une onde dans certaine condition.

- Mise en évidence expérimentale :



Les phénomènes de diffraction ou d'interférences sont des manifestations du comportement ondulatoire de la lumière

2. Comportement corpusculaire de la lumière

Le fait que certains phénomènes, comme l'interaction lumière-matière, ne puisse s'expliquer par un modèle ondulatoire, rend nécessaire l'existence d'un modèle corpusculaire pour la lumière.

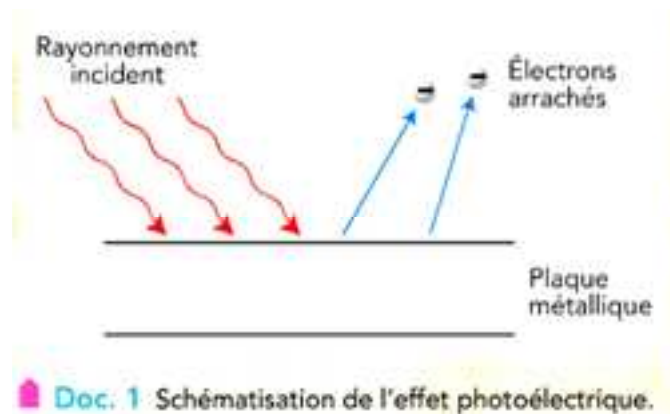
- Mise en évidence expérimentale :

- ☑ **L'effet photoélectrique :**

Lorsqu'un métal est éclairé par un rayonnement ultraviolet, des électrons sont arrachés de sa surface.

En revanche, si l'on utilise un rayonnement de plus grande longueur d'onde (donc de plus faible énergie) les électrons ne sont pas arrachés,

même avec une durée d'exposition longue.



Or, d'après le modèle ondulatoire, l'énergie transférée par rayonnement au système dépend de la durée d'exposition. Ainsi, une exposition prolongée du métal à un rayonnement devrait permettre d'accumuler suffisamment d'énergie pour arracher un électron quelle que soit la longueur d'onde du rayonnement.

Le modèle ondulatoire ne permet donc pas d'expliquer l'effet photoélectrique

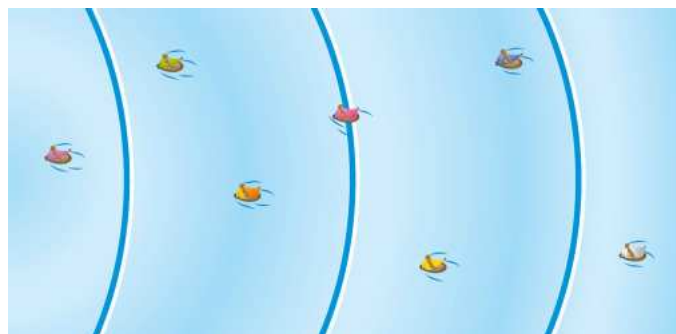
En 1905, pour expliquer cet effet, Albert Einstein postule qu'un rayonnement **monochromatique de fréquence ν est constituée de petits grains d'énergie, que l'on nommera plus tard « photon », transportant chacun un quantum d'énergie liée à la fréquence de l'onde : $E = h\nu$.**

Cette théorie permet d'expliquer l'effet photoélectrique : pour qu'un électron soit arraché, il faut que l'énergie du photon incident soit suffisante. Si ce n'est pas le cas, l'électron n'est pas arraché, quel que soit le nombre de photon incident (et donc la durée d'exposition)

☑ L'effet Compton (découvert en 1917)

Le comportement corpusculaire du photon et l'hypothèse de la quantification de l'énergie du photon furent vérifiés expérimentalement en 1923 par Arthur Holly Compton lors de l'observation de la collision d'un photon avec un électron.

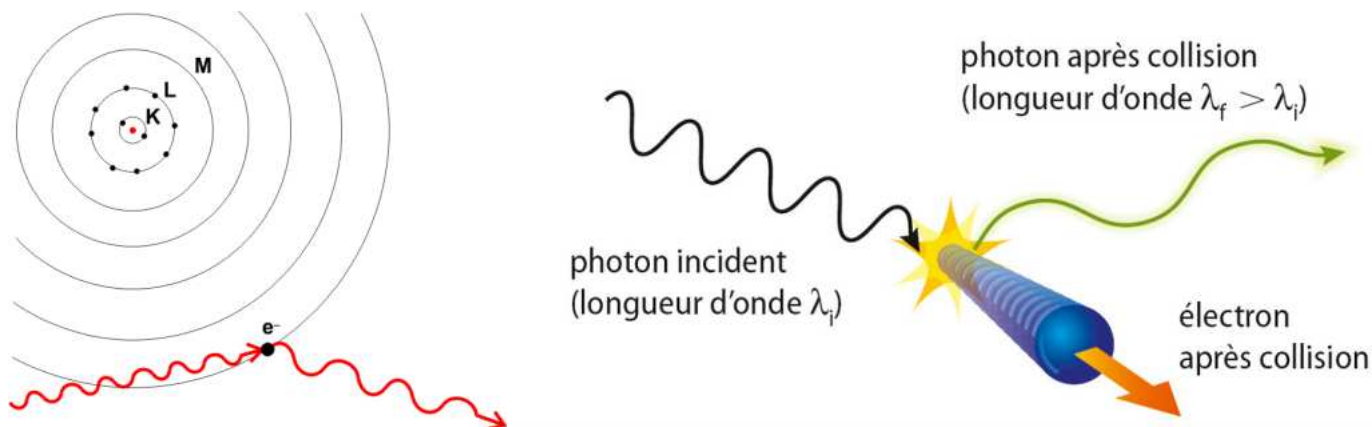
Lorsqu'une onde mécanique telle une onde à la surface de l'eau rencontre un obstacle (un bateau par exemple), il ne se produit pas de collision, l'onde poursuit son chemin sans modification de sa fréquence.



Par comparaison avec les ondes mécaniques, on s'attendrait à obtenir les mêmes résultats lorsque l'on diffuse des photons sur un atome, or ce n'est pas le cas, l'expérience démontre qu'il y aura déviation de la trajectoire du photon et perte d'énergie de celui-ci au profit de l'électron. Il y a alors augmentation de la longueur d'onde du photon (diminution de la fréquence).

Cette expérience appelée « effet Compton » est interprétée comme une collision, dite élastique, entre un photon et un électron et met en évidence le transfert d'énergie se produisant entre les **deux particules**.

Compton fut récompensé par le prix Nobel de physique en 1927 pour cette découverte.



L'effet photoélectrique ou l'effet Compton sont des manifestations du comportement particulaire de la lumière

3. Dualité onde-corpuscule de la lumière

Au cours de l'histoire, les physiciens ont donc interprété la nature de la lumière soit par son comportement ondulatoire, soit par son comportement particulaire. Pour autant, ces deux concepts isolés sont insuffisants pour décrire dans son ensemble la nature de la lumière.

Actuellement, la lumière, et plus généralement les ondes électromagnétiques, sont décrites comme des flux de photon. Un photon se comporte soit comme une onde, soit comme une particule, suivant le contexte expérimental considéré. On parle de dualité onde corpuscule ou onde particule. Un photon n'est ni une onde, ni une particule, c'est un objet quantique.

La lumière se comporte tantôt comme une onde, tantôt comme une particule : ce sont les conditions de l'expérience qui orientent son comportement. Pour désigner ce double comportement, on utilise l'expression de dualité onde-corpuscule.

Analogie avec les gouttes d'eau :

La lumière apparaît quantifiée lors de son interaction avec la matière, en émission comme en absorption. Pour comprendre, on peut utiliser une analogie avec l'eau d'un robinet. L'eau représentera la lumière et le robinet la matière.

Partons d'un robinet initialement ouvert, à mesure que nous fermons le robinet, le filet d'eau se réduit. De même pour la lumière, lorsque la température du corps diminue, l'intensité lumineuse se réduit.

Mais en fermant davantage le robinet, nous commençons à voir tomber des gouttes, et non plus un filet d'eau ; plus nous fermons le robinet et plus le nombre de goutte diminue, mais en revanche, il est impossible de faire tomber une demi goutte. Ainsi le robinet se met à émettre des quanta d'eau indivisible.

De même pour la lumière, **en dessous d'une certaine intensité lumineuse, la matière se met à émettre des quanta de lumière un par un ; plus on réduit l'intensité plus le nombre de quanta est faible mais chacun des quantum garde la même énergie $E = h\nu$**

Par la suite ces « quanta de lumière » ont été appelé « photons ». Mais cette appellation est à prendre avec beaucoup de précaution, car nous avons tendance à voir les photons comme de petites « billes de lumière » or ce n'est pas le cas.



4. Interférence photon par photon

L'expérience des interférences lumineuses à l'aide de fentes d'Young montre sur l'écran des franges d'interférences. Ce phénomène s'explique par des considérations ondulatoires, comme vu au chapitre 3.

Dans cette même expérience, si le flux de photons émis par la source est diminué jusqu'à ce que les photons arrivent un par un sur l'écran, chaque photon produit sur l'écran un impact bien localisé.

L'écran ne présente pas l'aspect d'une figure d'interférences.

Les photons arrivent de manière aléatoire sur l'écran et ce n'est qu'avec un grand nombre d'entre eux que la figure d'interférence est visible (Fig. 8).

Ceci conduit à un paradoxe apparent : si un photon donné se comporte comme une particule lorsqu'il passe par une fente pour aller jusqu'à l'écran, pourquoi le fait qu'il existe une autre fente influe-t-il sur son comportement ?

Ces phénomènes ne s'expliquent qu'en admettant que la lumière peut se comporter comme une onde et une particule. Les prévisions sur le comportement d'un photon ne peuvent être que du type probabiliste.



Fig. 8 Figures d'interférences photon par photon :
a. après impact de 200 photons.
b. après impact de 2000 photons.
c. après impact de 6 000 photons.

II. Dualité onde-corpuscule de la matière

1. Hypothèse de Broglie

Dans sa thèse, publiée en 1924, Louis de Broglie propose de généraliser la dualité onde-particule, admise pour la lumière, à tous les objets microscopiques : il émet ainsi l'hypothèse de ce double comportement est observable chez tous les objets microscopiques de la matière (électrons, protons, neutrons...)

Cette hypothèse est confirmée en 1927 par l'observation du phénomène de diffraction pour des électrons, en présence d'un obstacle ou d'une ouverture. Quelque année plus tard, le phénomène d'interférence d'électrons est observé, validant ainsi complètement l'hypothèse de Broglie.

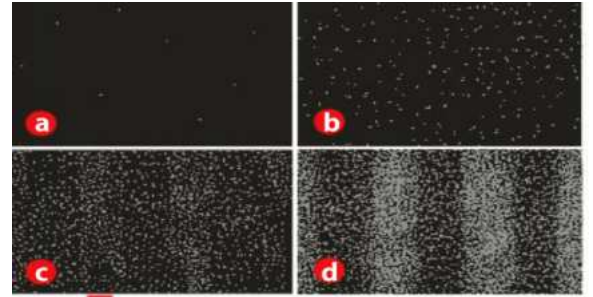
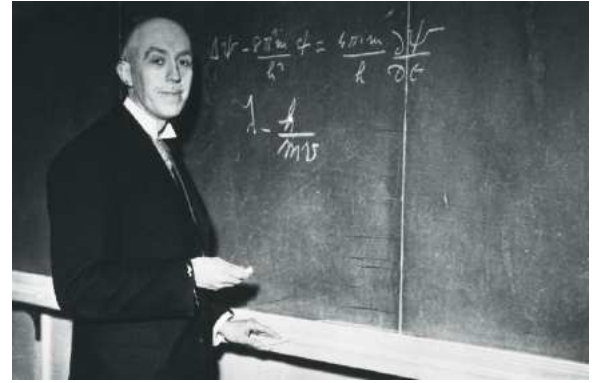


Fig. 5 Figures d'interférences obtenues avec un faisceau d'électrons et des fentes de Young (a : 8 ; b : 270 ; c : 2 000 ; d : 6 000 électrons).

Les objets microscopiques de la matière (électron, protons....) présentent, comme la lumière, un double aspect ondulatoire et particulaire

2. Relation de Broglie

Pour tenter d'unifier ce double comportement de la matière, De Broglie introduit la notion d'onde de matière. La relation qui porte son nom permet de relier les deux concepts classiques d'onde et de particule.

A chaque particule en mouvement est associée une onde de matière de longueur d'onde λ liée à la quantité de mouvement p de la particule par la relation de Broglie :

$$\boxed{p = \frac{h}{\lambda}} \quad \left\{ \begin{array}{l} h : \text{constante de Planck } (h=6,63 \cdot 10^{-14} \text{J} \cdot \text{s}^{-1}) \\ p : \text{quantité de mouvement de la particule } (\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \\ \lambda : \text{longueur d'onde de matière } (\text{m}) \end{array} \right.$$

Exemple

À un électron de masse $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ se déplaçant à une vitesse $v = 400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, on associe une onde de matière de longueur d'onde λ , reliée à la quantité de mouvement de l'électron $p = m_e \cdot v$ par la relation $\lambda = h/p$.

Soit $\lambda = h/(m_e \cdot v) = 6,63 \times 10^{-34}/(9,11 \times 10^{-31} \times 400) = 1,82 \text{ } \mu\text{m}$.

3. Condition d'observation du comportement ondulatoire de la matière

Le comportement ondulatoire des objets microscopiques est significatif lorsque la dimension de l'obstacle ou de l'ouverture est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la matière.

La constante de Planck étant extrêmement faible, les objets de notre quotidien ont un comportement ondulatoire indécélable.