

Introduction à la physique quantique

La mécanique quantique a été élaborée dans la première moitié du XX^e siècle. Les bases essentielles ont été posées entre 1900 (Planck) et 1925 (Schrödinger).

Le cours de première année présente ces bases conceptuelles sur des situations d'exemples suffisamment simples pour pouvoir être abordées avec un minimum de formalisme.

Il sera complété en seconde année en employant notamment l'équation de Schrödinger, qui donne accès à une fonction, dite fonction d'onde, décrivant l'ensemble des propriétés des particules quantiques.

La théorie quantique est nécessaire à la description physique de la matière aux échelles atomiques et subatomiques. Ses résultats théoriques ont été parfaitement vérifiés expérimentalement, et ses applications technologiques jouent désormais un rôle crucial : laser, microprocesseur et autres composants électroniques, cellules photovoltaïques, horloge atomique (nécessaire au système GPS), RMN (analyses spectrales par Résonance Magnétique Nucléaire) et IRM (Imagerie par Résonance Magnétique)...

Dans la nature, les phénomènes de coloration, la photosynthèse chlorophyllienne... s'expliquent par la mécanique quantique.

Les phénomènes quantiques sont parfois contraires à notre intuition, fondée sur notre expérience sensible du monde macroscopique.

Les grands traits de ce cours introductif consistent en :

- la dualité onde-particule : nous l'introduisons sur le cas des photons, puis l'étendrons à la notion d'ondes de matière associées à des particules matérielles.
- l'inégalité d'indétermination quantique de Heisenberg.
- la quantification de l'énergie qui en résulte lors du confinement d'une particule.

1. Dualité onde-corpuscule pour la lumière.

1.1 la lumière : onde ou particule ?

Dans les chapitres sur les ondes ainsi qu'en optique géométrique, nous avons envisagé la lumière comme correspondant à une propagation d'ondes électromagnétiques, sous forme d'ondes lumineuses. Ce point de vue est nécessaire pour expliquer les phénomènes ondulatoires tels que la diffraction ou les interférences.

Des phénomènes découverts au tout début du XX^e siècle n'ont pas pu être expliqués par cette approche ondulatoire.

Ils mettent en jeu des interactions individuelles, par particules, et ont nécessité une vision corpusculaire de la lumière. Les découvreurs de la mécanique quantique ont dû poser l'existence de quanta lumineux, de particules de lumières, appelées photons.

1.2 Genèse de la notion de photon.

L'idée de grains de lumières, chacun d'eux ayant des caractéristiques propre à la nature de la lumière correspondante, est très ancienne (Descartes...), mais elle n'avait aucun support expérimental : aucun phénomène ne venait corroborer cette idée.

Au contraire, tous les phénomènes étudiés avec précision au XIX^e siècle ont trouvé une explication ondulatoire.

a) le rayonnement thermique

En 1900, Max Planck étudie le rayonnement électromagnétique du corps noir : un corps élevé à une température donnée émet un rayonnement dont la répartition en longueur d'onde était décrite mathématiquement à partir des lois de la thermodynamique.

Quand Planck somme les contributions énergétiques des émissions sur l'ensemble des longueurs d'onde émises, il aboutit à une intégrale divergente. La prise en compte des faibles longueurs d'onde (grandes énergies) dans un modèle continu conduit à une énergie totale infinie : c'est la « catastrophe ultraviolette ».

Pour résoudre ce paradoxe, Planck fait l'hypothèse que l'énergie s'échange entre le corps noir et le rayonnement thermique par « paquets » d'énergie, par multiple d'une valeur minimale. L'idée d'une quantification est lancée.

Le quantum d'énergie est $E = h \cdot \nu$ où ν est la fréquence d'émission et h est la constante de Planck de valeur $h = 6,626180 \cdot 10^{-34}$ J.s.

(la notation h renvoie à l'allemand *hilfskonstant*, constante auxiliaire).

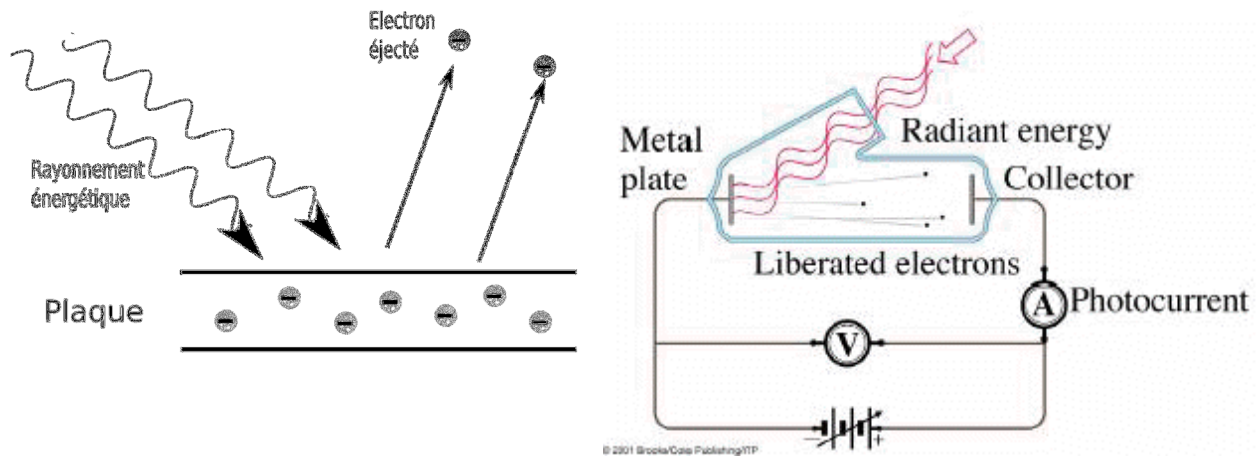
Le développement complet de la théorie de Planck sort largement du cadre de ce cours.

b) l'effet photoélectrique

Cet effet consiste en une émission d'électron à partir d'une électrode métallique éclairée par un rayonnement ultra-violet ou du domaine visible.

Les photons correspondant au rayonnement énergétique ont une fréquence ν .

Les électrons sont émis avec une énergie cinétique E_c . L'accès à la mesure de cette énergie cinétique est possible grâce au montage représenté.



Les électrons émis avec une énergie cinétique E_c n'atteindront le collecteur qu'à condition que cette énergie soit au moins égale à l'énergie électrique $e.U$ qu'ils doivent céder pour passer de la cathode à l'anode, entre lesquelles une tension U est imposée. La mesure du courant électrique par un microampèremètre fournit une grandeur proportionnelle au nombre d'électrons émis.

L'émission d'électrons n'apparaît que pour une fréquence ν supérieur à une valeur seuil de fréquence ν_s .

Si $\nu < \nu_s$, on n'observe pas d'émission d'électrons, quelle que soit l'intensité du flux lumineux incident sur la photocathode. La lumière n'intervient donc pas en tant qu'onde lumineuse.

En 1905, Albert Einstein interprète ce phénomène comme une interaction particulaire. Le rayonnement est constitué de quanta de lumière, les photons, chacun véhiculant une énergie individuelle $E = h \nu$.

Un électron ne peut absorber qu'un seul photon, dans une interaction individuelle, particule à particule. Il est alors arraché du métal si l'énergie cédée est suffisante.

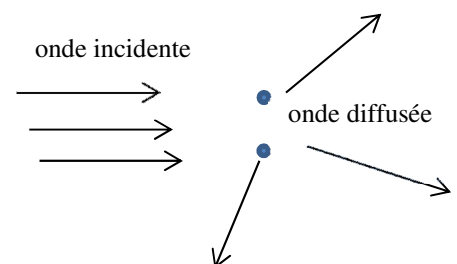
L'arrachement du métal suppose un travail d'extraction W_s .

La condition $E = h \nu > W_s$ conduit à la valeur seuil : $\nu > W_s/h = \nu_s$.

Ce modèle fut confirmé entre 1905 et 1915 par Millikan, qui remonte expérimentalement à la valeur de la constante h , avec un résultat en accord avec celui obtenu à partir des travaux de Planck.

c) l'effet Compton

Le phénomène de diffusion lumineuse classique consiste à ce qu'une onde lumineuse incidente, éclairant des particules, notamment des électrons, les mettent en vibration.



Le champ électrique de l'onde impose alors une force électrique aux charges des particules, vibrant à la fréquence de l'onde.

La vibration ainsi produite génère à son tour un champ électromagnétique se traduisant par un rayonnement de même fréquence que l'onde incidente, mais se propageant dans d'autres directions de l'espace.

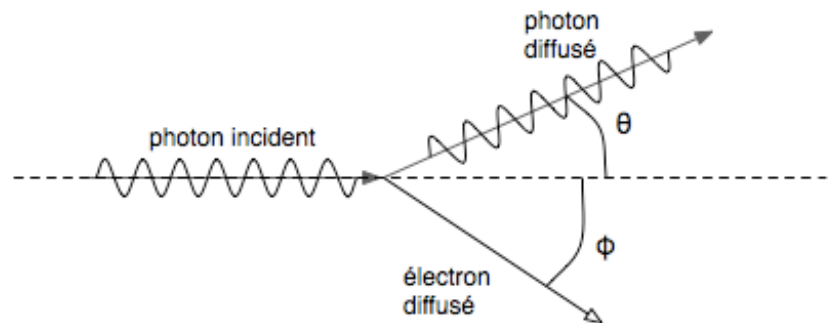
En 1922, Arthur Compton éclaire une cible de carbone avec des rayons X de longueur d'onde $\lambda = 71 \text{ pm}$ ($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$), très énergétiques. Il observe un rayonnement diffusé, mais avec une fréquence différente de celle de l'onde incidente.

Il explique ce phénomène par un modèle particulaire : il suppose une collision entre les électrons de la cible de carbone et des particules quantiques, portant chacune une énergie $E = h\nu = hc/\lambda$.

S'appuyant sur les résultats de de Broglie, qui a posé une dualité onde-particule par une autre démarche, il prend en compte une quantité de mouvement $p = h/\lambda$ soit $p = h\nu/c$ pour chacun de ces quanta.

Le photon incident porte l'énergie $E = h\nu$ et une quantité de mouvement $h\nu/c$, de direction \vec{u} .

Le photon diffusé, sous un angle θ , porte une énergie $E = h\nu'$ et une quantité de mouvement $h\nu'/c$ dirigé selon \vec{u}' .



Diffusion Compton: Collision d'un photon avec un électron au repos

L'électron est éjecté selon une direction d'angle Φ avec une énergie E_e et une quantité de mouvement p_e dirigée selon \vec{u}_e .

E_e et p_e répondront à des expressions relativistes, car l'énergie transmise à l'électron étant importante, sa vitesse sera nettement supérieure à la limite relativiste $0,1.c$ (c étant la vitesse de la lumière dans le vide $c \approx 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

L'étude théorique, fondée sur un bilan d'énergie et de quantité de mouvement, conduit à la relation :

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos\theta)$$

où λ' est la longueur d'onde diffusée.

Cette relation n'est pas exigible au programme de sup PCSI, mais son interprétation peut être demandée si elle est fournie.

1.3 Le photon : définition et ordres de grandeur

La particule associée à l'onde lumineuse est le photon. On retiendra les caractéristiques de cette particule :

- elle est de masse nulle
- elle se déplace à la vitesse de l'onde, soit dans le vide $c = 2,998.10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- pour un photon associé à un rayonnement de fréquence ν , de longueur d'onde λ , avec $\lambda = c/\nu$ dans le vide, il possède une énergie $E = h\nu = hc/\lambda$ où $h = 6,63.10^{-34} \text{ J.s}$.
- chaque photon est doté d'une quantité de mouvement de direction \vec{u} , l'unitaire \vec{u} correspondant à la direction de propagation de l'onde associée.

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

Remarque : la définition classique $\vec{p} = m\vec{v}$ de la quantité de mouvement ne s'applique évidemment pas à cette particule éminemment relativiste.

Ordres de grandeurs.

L'énergie d'un photon est donc proportionnelle à sa fréquence ν et inversement proportionnelle à sa longueur d'onde λ .

Pour un photon de $\lambda = 550 \text{ nm}$ (rayonnement visible, de couleur jaune), on aura une énergie $E = hc/\lambda = 3,6.10^{-19} \text{ J}$. Soit encore $E = 2,3 \text{ eV}$.

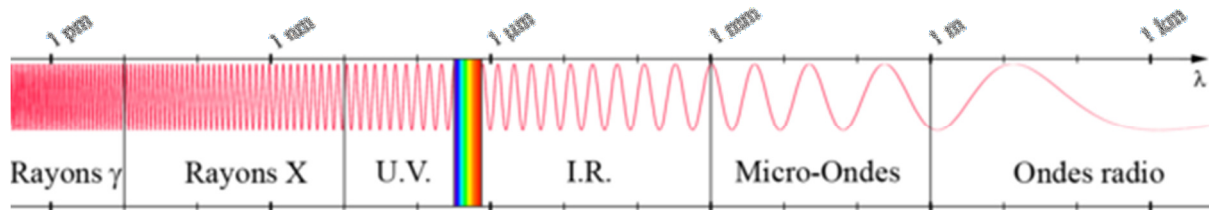
1 électron-volt correspond à $1,6.10^{-19} \text{ J}$, c'est l'énergie $e.U$ acquise par une charge de valeur $e = 1,6.10^{-19} \text{ C}$ lorsqu'elle subit une différence de potentiel $U = 1 \text{ V}$.

Pour des rayons X de $\lambda = 71 \text{ pm}$ (valeur historique pour l'expérience de Compton), l'énergie sera $E = hc/\lambda = 2,8.10^{-11} \text{ J} = 17.10^3 \text{ eV}$.

Le tableau ci-dessous récapitule quelques ordres de grandeur :

Rayonnement	λ (m)	ν (Hz)	E (eV)
Gamma	$< 2.10^{-11}$	$> 1,5.10^{19}$	$> 60.10^3$
X	2.10^{-11} à 10^{-8}	3.10^{16} à $1,5.10^{19}$	125 à 60.10^3
Ultra-Violet	10^{-8} à 4.10^{-7}	$7,5.10^{14}$ à 3.10^{16}	3 à 125
Visible	4.10^{-7} à $7,8.10^{-7}$	3.10^{14} à $7,5.10^{14}$	1,5 à 3
Infra-Rouge	$7,8.10^{-7}$ à 3.10^{-4}	10^{12} à 3.10^{14}	4.10^{-3} à 1,5
Hertzien	$> 3.10^{-4}$	$< 10^{12}$	$< 4.10^{-3}$

Spectre des ondes électromagnétiques (échelle logarithmique, en longueur d'onde)



Nombres de photons :

Dans les expériences d'optiques que nous allons décrire, se posera la question du nombre de photons mis en jeu.

Dans les expériences classiques, l'aspect granulaire de la lumière n'apparaît pas car le nombre de photons mis en jeu est extrêmement élevé.

Par exemple, un laser hélium-néon, de longueur d'onde $\lambda = 633 \text{ nm}$ et de puissance d'émission $P = 1,0 \text{ mW}$ va émettre sur une durée de valeur $\Delta t = 0,10$ seconde (temps de perception visuelle) une énergie totale $P \cdot \Delta t = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ J}$.

Cette énergie correspond à un nombre $N = P \cdot \Delta t / (h\nu)$

$h\nu$ étant l'énergie individuelle transportée par chaque photon, soit :

$$N = \frac{P \cdot \Delta t}{hc/\lambda} = 3 \cdot 10^{14} \text{ photons.}$$

C'est un très grand nombre, mais on peut remarquer qu'il est considérablement plus faible que le nombre de particules mises en jeu dans les expériences de chimie, de l'ordre du nombre d'Avogadro $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \dots$

On sait réaliser des sources de **photons uniques**, c'est à dire des dispositifs qui vont émettre des photons un à un. De telles sources vont permettre de réaliser des expériences sur des situations habituellement observées avec des flux lumineux beaucoup plus important (diffraction, interférence) dans des conditions où chaque photon interagit seul avec le dispositif. Ces expériences montreront sans ambiguïté la dualité onde-corpuscule existant pour la lumière.