

# MECAQ : Introduction à la physique quantique

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les phénomènes naturels semblent pouvoir être décrits de façon satisfaisante par la physique classique, basée deux grandes théories :

- la mécanique de Newton, selon laquelle tout mouvement a une cause
- la théorie de Maxwell de l'électromagnétisme, qui décrit les propriétés de la lumière

Ces deux théories font intervenir des lois déterministes, c'est-à-dire qu'en connaissant le système et les conditions initiales, on peut déterminer son évolution. Elles reposent sur un formalisme mathématique efficace, et des expériences fiables ont permis de vérifier leur validité, comme l'étude du mouvement des astres (par exemple la vérification des orbites de comètes par Halley, 1695), l'observation des interférences lumineuses (Thomas Young, 1802), la découverte des ondes radio (Heinrich Herz, 1865).

Cependant, dans les années 1930, trois expériences, que nous présenteront dans la première partie du chapitre, restaient inexpliquées par l'application de la physique classique :

- Le rayonnement du corps noir et la catastrophe de l'ultraviolet
- L'effet photoélectrique
- Le spectre de raies

Le physicien anglais Kelvin pensait que ce n'était lié qu'à un manque de précision des mesures expérimentales et que ces problèmes seraient bientôt expliqués. Pourtant les mesures étaient exactes et reproductibles ! Au XX<sup>e</sup> siècle, une nouvelle théorie se développe pour pallier ces limites : c'est la physique quantique. Des solutions sont ainsi proposées par Max Planck, Albert Einstein et Niels Bohr, qui apportent les premières contributions à une nouvelle compréhension de la nature.

Nous verrons que cette nouvelle approche devient nécessaire quand on s'intéresse à des échelles de l'ordre de celle de l'atome. Il faut alors « oublier » ce qui semble intuitif à notre échelle macroscopique, et accepter que les lois régissant le monde microscopique sont fondamentalement différentes. L'objectif de ce cours est de découvrir quelques résultats surprenants, voire choquants, de cette théorie.

## Plan du cours

<b>I Comment la physique quantique est-elle née ?</b>	<b>2</b>
I.1 Le corps noir . . . . .	2
I.2 L'effet photoélectrique . . . . .	3
I.3 Le spectre de raies . . . . .	5
I.4 Applications . . . . .	5
<b>II Dualité onde-corpuscule de la lumière</b>	<b>6</b>
II.1 Nature ondulatoire de la lumière . . . . .	6
II.2 Nature particulaire de lumière : le photon . .	6
II.3 Interférences avec des photons uniques . . . .	8

<b>III Dualité onde-corpuscule de la matière</b>	<b>10</b>
III.1 Expérience d'interférences entre atomes . . .	10
III.2 Relation de De Broglie . . . . .	11
<b>IV Notion de fonction d'onde</b>	<b>12</b>
<b>V Principe d'indétermination de Heisenberg</b>	<b>13</b>
V.1 L'indétermination quantique . . . . .	13
V.2 Principe d'indétermination de Heisenberg . .	13
<b>VI Quantification de l'énergie</b>	<b>14</b>
VI.1 Modèle de Bohr . . . . .	14
VI.2 Quantification de l'énergie d'une particule 1D	15

## À savoir par

- ✓ Description du photon : énergie, vitesse, masse, impulsion.
- ✓ Relation de Planck-Einstein.
- ✓ Expliquer l'effet photoélectrique à partir du modèle particulaire de la lumière.
- ✓ Citer des applications mettant en jeu l'interaction lumière-matière.
- ✓ Relation de de Broglie pour décrire l'onde de matière associée à une particule.

## À savoir faire

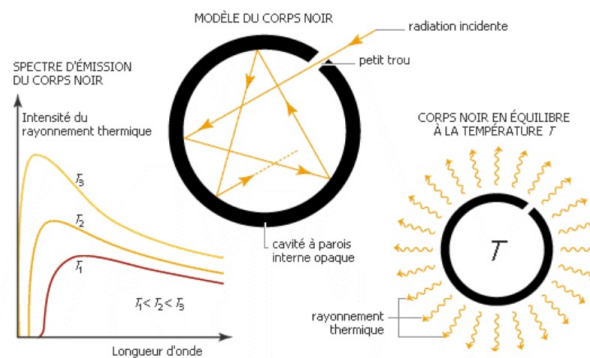
- ✓ Décrire une expérience mettant en évidence la notion de photon.
- ✓ Faire un bilan d'énergie pour l'effet photoélectrique, pour établir la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence du rayonnement.
- ✓ Décrire une expérience mettant en évidence le comportement ondulatoire de la matière.
- ✓ Évaluer les ordres de grandeur typiques intervenant dans des phénomènes quantiques.
- ✓ Interpréter une expérience illustrant la dualité onde-particule.

# I Comment la physique quantique est-elle née ?

## I.1 Le corps noir

### ♥ Définition

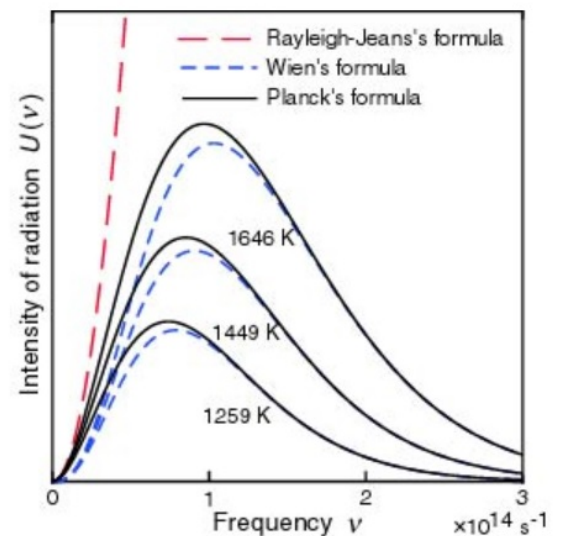
**Corps noir :** Un corps noir est une entité théorique maintenue à température constante, absorbant la totalité des rayons lumineux ou radiations qu'elle reçoit et les renvoie sous forme de rayonnement thermique. Ce processus ne dépend que de la température du corps. On représente un corps noir comme une entité creuse entourée d'une paroi opaque comportant une ouverture par laquelle les radiations environnantes sont absorbées et piégées dans la cavité.



« Rôle » du corps noir dans les débuts de la physique quantique : À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le rayonnement du corps noir a fait l'objet de nombreuses études tant expérimentales que théoriques. Kirchhoff montre notamment en 1860 que la densité spectrale d'énergie de ce rayonnement est universelle, dépendant uniquement de la température et de la longueur d'onde, mais pas de la nature du corps porté à haute température.

Cependant, aucun modèle théorique visant à prédire le spectre d'émission du corps noir ne permet d'obtenir un accord avec les mesures expérimentales très précises réalisées vers 1900 :

- La loi de Wien est en effet uniquement valable dans le domaine des fréquences élevées.
- La loi de Rayleigh-Jeans est convenable pour les plus faibles fréquences, mais se confronte à un problème de divergence aux hautes fréquences, connu sous le nom de catastrophe ultra-violette.



Max Planck, alors qu'il ne « croit pas » aux atomes et à la physique statistique de Boltzmann, introduit un artefact mathématique pour quantifier les échanges d'énergie entre le rayonnement et les parois du corps noir, via une constante notée  $h$  (le choix de cette lettre vient de l'allemand *Hilfskonstante* qui signifie « constante auxiliaire »). Le résultat de cette analyse le conduit alors à une formule qui ajuste parfaitement l'ensemble des résultats expérimentaux.

► Conférence d'Étienne Klein: Comment la physique quantique est-elle née? écouter en particulier :

- à 12 min 12 s Analogie : équipartition de l'énergie dans un gaz, remarque sur le rôle des collisions
- à 19 min 41 s Historique du corps noir (Kirchhoff, Stefan, Wien, Rayleigh, Jeans)
- à 23 min 02 s Catastrophe ultraviolette ; origine de l'expression

## I.2 L'effet photoélectrique (→ revoir ex1 du DS6 !)



### Document 1 : Mise en évidence de l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique a été observé pour la première fois, et par hasard, par Heinrich Hertz en 1887. Hertz travaillait à ce moment-là sur les ondes électromagnétiques afin d'apporter une confirmation expérimentale à la théorie de James C. Maxwell, qui venait d'énoncer « ses » quatre équations prédisant les ondes électromagnétiques et leur propagation (→ programme d'électromagnétisme de 2<sup>e</sup> année).

Il constata qu'à la surface d'un objet métallique éclairée par une lumière ultraviolette une charge électrique apparaissait. Cette observation ne lui étant d'aucune aide pour son objectif initial, il ne poursuivit pas.

Philip Lenard (1862-1947), ancien élève de Hertz, réalise l'expérience schématisée ci-contre en 1902 (Fig.1).

La plaque métallique K est enfermée dans une cellule à vide et soumise à un rayonnement de fréquence  $\nu$ .

Le milliampèremètre permet de mettre en évidence la présence d'un éventuel courant électrique parcourant le circuit.

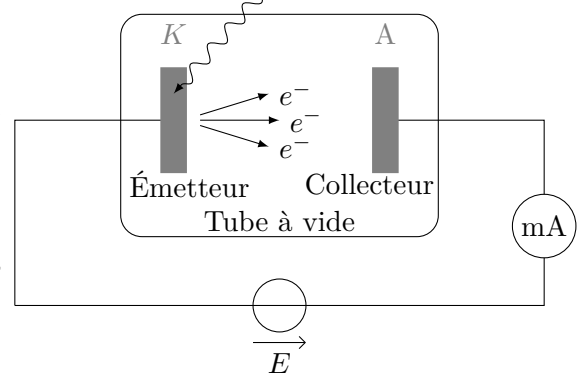


Figure 1. Montage photoélectrique

Si un courant est observé, cela signifie que des électrons sont arrachés à la plaque K par le rayonnement, et sont capturés par l'électrode A qui leur permet de « rejoindre » le circuit. Le générateur a pour rôle de polariser l'électrode A à un potentiel positif et donc d'y attirer les électrons éventuellement issus de la plaque K, qui sont a priori émis dans toutes les directions.

Les résultats observés sont les suivants :

- si la plaque est éclairée par un rayonnement du domaine visible, aucun courant n'est observable, et ce quelle que soit l'intensité lumineuse émise par la lampe ;
- si la plaque est éclairée par un rayonnement ultra-violet, donc de fréquence plus élevée, alors un courant est systématiquement observé dans le circuit, et son intensité est d'autant plus élevée que l'intensité lumineuse de la lampe est élevée.

L'expérience de Lenard fût répétée de nombreuses fois au cours des années suivantes par Langevin, Bloch, Thomson, Palmer et finalement par Millikan de 1905 à 1916 (dont le prix Nobel en 1923 récompensa autant ses travaux sur l'effet photoélectrique que ceux sur la charge de l'électron). Son travail a consisté à mesurer l'énergie cinétique maximale d'électrons issus d'une plaque de sodium éclairée par des rayonnements de différentes fréquences, comme représenté ci-dessous.

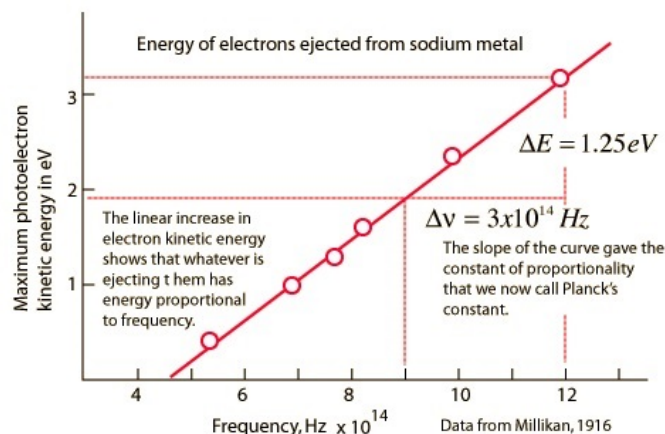


Figure 2. Résultats expérimentaux de R. Millikan (réalisés avec du sodium).

▶ Animation

▶ Observation de l'effet photoélectrique avec un électroscope



## Document 2 : Interprétation par Einstein (1905)

Extrait de « **Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de lumière** », Annalen der Physik, Vol XVII, 1905, p132-148. Traduction publiée dans « Albert Einstein, Œuvres choisies, Quanta » Seuil/CNRS Éditions

La conception usuelle, selon laquelle l'énergie de la lumière est distribuée de façon continue dans l'espace où elle est rayonnée, présente, quand on tente d'expliquer les phénomènes photoélectriques, de très sérieuses difficultés qui sont exposées dans un travail décisif de M. Lenard. La conception selon laquelle la lumière excitatrice est constituée de quanta d'énergie  $h\nu$  (*Einstein a utilisé à l'époque d'autres notations*) permet de concevoir la production de rayons cathodiques (*faisceaux d'électrons*) de la façon suivante. Des quanta d'énergie pénètrent dans la couche superficielle du corps ; leur énergie est transformée, au moins en partie, en énergie cinétique des électrons. La représentation la plus simple que l'on puisse s'en faire est celle d'un quantum de lumière cédant son énergie à un seul électron ; nous allons supposer que c'est bien ce qui se passe.

Il n'est pas exclu cependant que des électrons ne prennent qu'une partie de l'énergie des quanta de lumière. Un électron auquel une énergie a été fournie à l'intérieur du corps atteint la surface en ayant perdu une partie de son énergie cinétique. Nous allons supposer, de plus, que tout électron doit, pour pouvoir quitter un corps, fournir un travail  $W_0$  (caractéristique du corps). Les électrons qui quittent le corps avec la vitesse normale la plus élevée sont ceux qui se trouvent immédiatement à la surface et qui ont été excités normalement à celle-ci.

L'énergie cinétique de ces électrons est  $E_{c,\max} = h\nu - W_0$ .

[...] Si la formule obtenue est exacte, l'énergie cinétique maximale des électrons en fonction de la fréquence de la lumière excitatrice doit être [...] une droite dont la pente ne dépend pas de la substance étudiée. Autant que je puisse en juger, notre conception n'est pas en contradiction avec les propriétés de l'effet photoélectrique, telles qu'elles ont été observées par M. Lenard. Si chaque quantum d'énergie de la lumière excitatrice cède son énergie à un électron indépendamment de tous les autres, la distribution des vitesses des électrons, c'est-à-dire la qualité du rayonnement cathodique produit, est indépendante de l'intensité de la lumière excitatrice ; en revanche le nombre des électrons qui quittent le corps doit, lui, être toutes choses égales par ailleurs, proportionnel à l'intensité de la lumière excitatrice.

Einstein recevra le prix Nobel de physique en 1922 (au titre de l'année 1921) pour l'interprétation de l'effet photoélectrique à l'aide de la théorie des quanta, lui qui pourtant a été septique toute sa vie à propos de cette théorie.

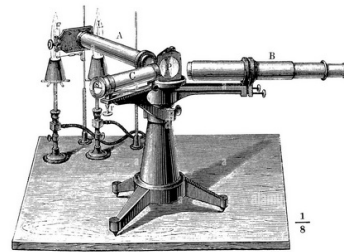
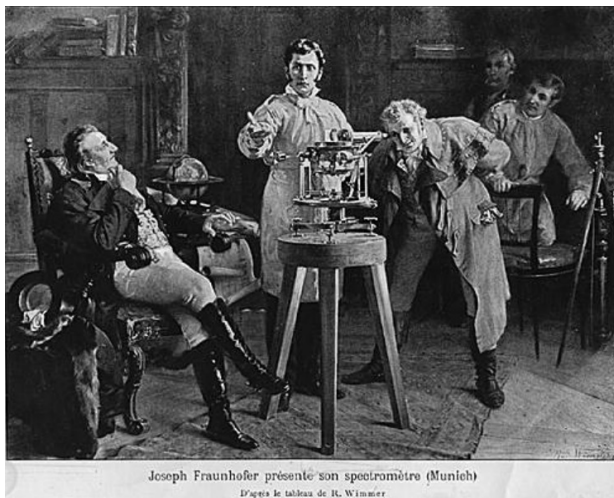


### Analyse des documents :

- Q1. Pourquoi l'existence d'une fréquence seuil en dessous de laquelle plus aucun électron ne peut être émis quelle que soit l'intensité lumineuse, est-elle en contradiction avec une description purement ondulatoire la lumière ?
- Q2. Expliquer avec vos propres mots l'interprétation d'Einstein.
- Q3. Quelle est la valeur de la pente de la droite de l'article de Millikan. Quelle constante a-t-il déduite de la mesure de la pente de sa courbe ?
- Q4. Déterminer graphiquement la fréquence seuil du sodium. En déduire la longueur d'onde correspondante. Dans quel domaine spectral se situe-t-elle ?
- Q5. Déterminer le travail d'extraction  $W_0$  pour le sodium. On donnera le résultat en Joules puis en électron-volt.

### I.3 Le spectre de raies

Depuis le milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, les physiciens réalisent des observations précises de l'émission de lumière par les gaz, et ont mis en évidence le fait que le spectre de la lumière d'un gaz chaud qui traverse un prisme est différent du spectre d'un arc en ciel : il présente des raies, à des fréquences définies pour chaque élément.



Opticien et physicien allemand (Straubing, Bavière, 1787-Munich 1826).

Il inventa le spectroscopie et put, grâce à son emploi, repérer les raies du spectre solaire (1814). Il utilisa les réseaux pour l'analyse de la lumière et dressa la première classification spectrale des étoiles.

En étudiant le spectre de raies de l'atome d'hydrogène, Balmer (1885) remarqua que les fréquences  $f$  des raies observées satisfont à une relation mathématique, reformulée par Rydberg, sous la forme :

$$f = R_H \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

avec :  $R_H$  = constante de Rydberg  
 $n_f$  et  $n_i$  des nombres entiers ( $n_f < n_i$ )

Ces changements de nombre entiers, qui donnent les fréquences d'émission exactes des radiations observées, suggèrent alors une évolution du modèle de l'atome, dont les premiers modèles n'apparaissent qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle (J.J. Thomson en 1904 et Rutherford en 1911).

Rappel : Le modèle de Thomson suppose que l'atome est une boule homogène d'électricité à l'intérieur de laquelle les électrons négatifs peuvent se déplacer. Ce modèle allait être abandonné après les expériences de diffusion réalisées par Rutherford (1911). Le modèle proposé à partir de ces expériences décrit l'atome comme une charge ponctuelle positive concentrée dans une zone très petite de l'espace autour de laquelle gravitent les électrons selon un schéma planétaire. Ce modèle se heurte au problème de la stabilité de l'atome et montre encore une fois les limites de la physique classique (d'après les lois de l'électrodynamique l'électron en mouvement sur son orbite devrait rayonner et perdre de son énergie et donc devrait retomber sur le noyau).

En reprenant en 1913 les résultats de Rutherford, Bohr envisage un modèle planétaire et postule que :

- Seuls certains niveaux d'énergie peuvent être occupés par les électrons qui décrivent des orbites circulaires telles que  $\|\vec{r} \wedge \vec{p}\| = mvr = n\hbar = n \frac{h}{2\pi}$  : où  $m$ ,  $v$  et  $r$  désignent respectivement la masse de l'électron, sa vitesse sur son orbite et sa distance au noyau.  $n$  est un entier et  $h$  la constante de Planck. Sur ces orbites « spéciales », l'électron n'émet pas de radiation, elles constituent des états stationnaires caractérisés par un moment cinétique orbital multiple entier de la constante de Planck réduite  $\hbar$ .
- Il n'y a absorption ou émission que lorsque l'électron passe d'une orbite stationnaire à une autre (= change de niveau d'énergie, tel que  $\Delta E = |E_i - E_f| = h\nu$  où est  $\nu$  la fréquence du rayonnement absorbé ou émis et  $\Delta E$  l'écart entre les deux niveaux concernés.

### I.4 Applications de l'absorption/l'émission de photons par la matière

- En chimie, la spectroscopie d'absorption (UV-visible ou IR) consiste à analyser les longueurs d'onde des rayonnements absorbés par un échantillon pour en déduire des informations sur la structure des espèces chimiques qui le constituent.

- Dans une cellule photovoltaïque, l'absorption d'un photon permet d'arracher un électron à un atome, créant ainsi deux porteurs de charges : l'électron (devenu libre) et la lacune électronique (appelé « trou », qui se comporte comme un porteur de charge positif). En présence d'un champ électrique dans le matériau (dû à la présence d'une jonction entre deux semi-conducteurs), les deux types de porteurs migrent en sens opposé et sont recueillis par des électrodes.
- La production de lumière par une LED (diode électroluminescente) correspond à l'émission d'un photon lors de la recombinaison d'une paire électron-trou au niveau d'une jonction entre deux semi-conducteurs (en présence d'une alimentation électrique).

## II Dualité onde-corpuscule de la lumière

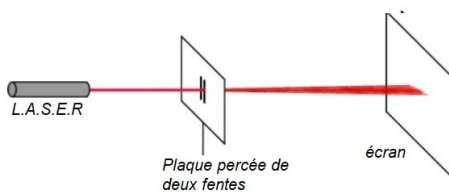
### II.1 Nature ondulatoire de la lumière

▶ Expérience des fentes d'Young + interféromètre de Mach-Zender) → 10 min

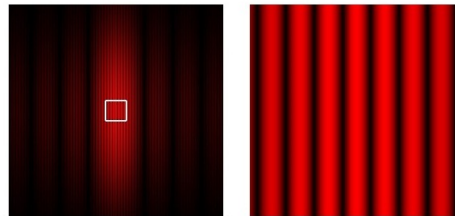
Les expériences d'interférences et de diffraction réalisées au XIX<sup>e</sup> siècle (Hook, Huyghens, Young) ont montré l'aspect ondulatoire de la lumière, qui a ensuite été théorisé par Fresnel et Maxwell. La lumière est une onde électromagnétique = la propagation de variations périodiques d'un champ électrique et d'un champ magnétique, dans un milieu matériel ou dans le vide.



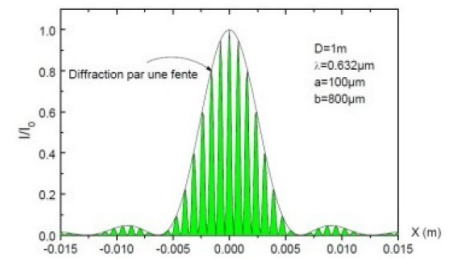
**Rappel : expérience des fentes d'Young**



a) Montage expérimental des fentes d'Young



b) Figure d'interférences obtenue (à droite : zoom sur la zone encadrée)



c) Profil d'intensité dans la direction orthogonale à celle des fentes

On observe des franges d'interférences « à l'intérieur » de la figure de diffraction.

### II.2 Nature particulaire de lumière : le photon

▶ 10min → 12min 15s

L'étude de l'effet photo-électrique a imposé la notion de quanta (grains, paquets) d'énergie associés à une onde électromagnétique de fréquence  $\nu$ . Chacun de ses grains, appelés photons.



#### Relation de Planck-Einstein $E = h\nu$

Le rayonnement électromagnétique monochromatique (de fréquence  $\nu$  et de longueur d'onde  $\lambda$ ) est constitué de **photons** qui :

- sont des particules de masse nulle
- se déplacent à la vitesse de la lumière dans le vide ( $c \approx 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),
- d'énergie :  $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$  avec la constante de Planck  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- de quantité de mouvement (ou impulsion)  $\vec{p}$  : de norme  $p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$ , de même direction et sens que ceux de l'onde électromagnétique



#### Erreurs à ne pas faire !

- Les expressions  $p = \frac{E}{c}$  et  $E = h\nu$  sont valables **uniquement pour les photons**, elles ne sont pas valables pour des particules ayant une masse.
- L'expression  $\vec{p} = m\vec{v}$  est valable **uniquement pour une particule matérielle** de masse  $m \neq 0$  et non relativiste (c'est-à-dire de vitesse  $v \ll c$ ), elle n'est pas valable pour un photon.



### Remarques

- Un faisceau lumineux est donc un flux de photons qui transporte de l'énergie.
- Le photon est la particule qui intervient dans les échanges d'énergie entre onde électromagnétique et matière.
- La quantité de mouvement  $\vec{p}$  du photon peut aussi s'exprimer avec le vecteur d'onde  $\vec{k}$  de l'onde électromagnétique associée :  $\vec{p} = \hbar \vec{k} = \frac{h}{2\pi} \vec{k}$
- $h$  est une des 7 constantes fondamentales de la physique, sa valeur exacte a été fixée à  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$  J en 2019, et comme les 6 autres constantes fondamentales, elle n'a pas d'incertitude).



### Définition

Le Joule est une unité peu adaptée aux ordres de grandeur rencontrés à l'échelle atomique, on utilise ainsi plutôt l'électron-volt :

$$1 \text{ eV} = 1,602\,176\,62 \times 10^{-19} \text{ J}$$



### Exercice de cours (A)

- Q1. Calculer l'énergie d'un photon bleu et d'un photon rouge, en J puis en eV.
- Q2. Sachant que pour le Sodium, la fréquence seuil se situe à peu près à la limite visible/ultra violet, déterminer l'ordre de grandeur en électron-volt du travail d'extraction.
- Q3. Déterminer la fréquence seuil pour le Fer sachant que le travail d'extraction est de 4,67 eV. De quelle couleur est ce rayonnement ?
- Q4. Combien de photons sont émis par seconde par un LASER rouge de longueur d'onde  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ , de puissance  $\mathcal{P} = 1,0 \text{ mW}$  et de section circulaire  $d = 2,0 \text{ mm}$  ?

## II.3 Interférences avec des photons uniques

▶ après 12min 15s

Pour s'assurer que l'hypothèse particulaire ne présentait pas d'incompatibilité avec le modèle corpusculaire, les physiciens ont imaginé puis réalisé des expériences d'interférences avec des photons uniques.



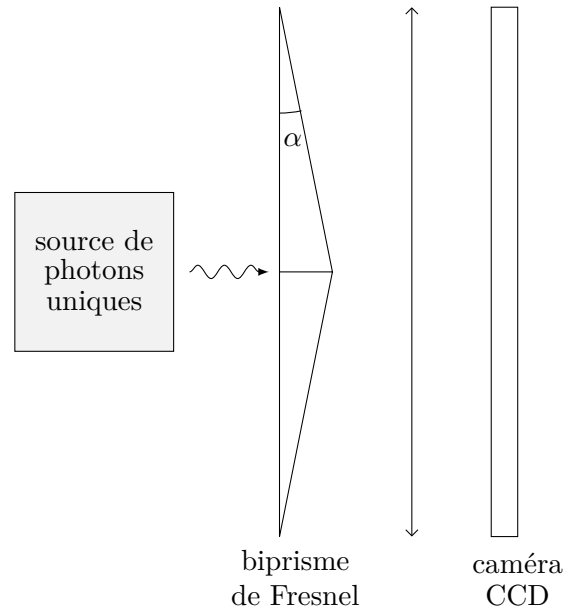
### Document 3 : Interférences avec des photons uniques

Expérience de Vincent Jacques, 2007 :

(très proche conceptuellement de l'expérience standard des trous d'Young)

Description simplifiée du montage expérimental :

- La source utilisée émet de la lumière, de longueur d'onde moyenne  $\lambda = 670 \text{ nm}$ , photon par photon.
- Un bi-prisme de Fresnel, d'indice  $n = 1.5142$  et d'angle au sommet  $\alpha = 0,43^\circ$  est placé derrière cette source.
- Une caméra CCD refroidie à  $-25^\circ$  est placée derrière une lentille convergente et enregistre en temps réel la figure obtenue à la sortie du bi-prisme.



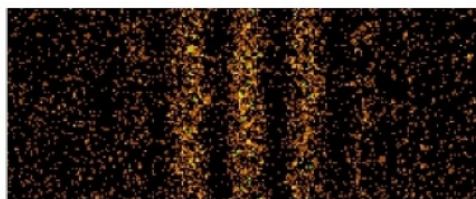
Observations :



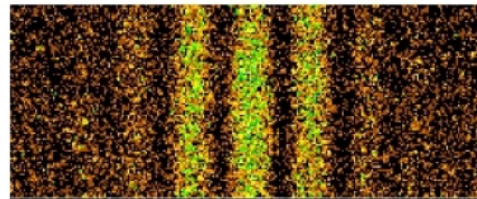
*cliché obtenu après 10 s*



*cliché obtenu après 100 s*



*cliché obtenu après 500 s*



*cliché obtenu après 2000 s*

- Aux temps courts (= lorsque le nombre de photons déjà envoyé est faible) : Les photons arrivent bien un par un et font des impacts sur la plaque à des endroits aléatoires. Ceci va donc en faveur de notre interprétation corpusculaire. Les ondes ne peuvent pas réaliser ce genre de figures.
- Aux temps longs : Malgré les impacts aléatoires, une figure d'interférences identique à celles obtenues avec une source classique se reconstruit peu à peu, alors que les photons ne peuvent pas interagir.



### Analyse de l'expérience :

Justifier que si le biprisme est éclairé avec un faisceau de lumière monochromatique, des interférences peuvent être observées en plaçant l'écran dans une certaine zone de l'espace. Montrer sur un schéma où se situe cette zone (dessiner le faisceau incident sur le biprisme et les faisceaux émergents en suivant les lois de la réfraction).

### Interprétation basée sur le dispositif des trous d'Young :

Comment les photons passent-ils à travers les ouvertures ? On pourrait penser tantôt par un trou, tantôt par l'autre. On devrait alors obtenir des figures de diffraction (une par trou), mais pas d'interférences ! Reste une seule possibilité : chaque photon passe par les deux trous à la fois ! Mais cela ne veut pas dire qu'il soit passé par exemple  $\frac{1}{4}$  de photon d'un côté et  $\frac{3}{4}$  de l'autre (aucune lumière de fréquence  $\frac{\nu}{4}$  ou  $\frac{3\nu}{4}$ ), le photon est un corpuscule indivisible. Cette expérience permet de montrer que le concept de trajectoire perd sa signification en physique quantique : on ne peut plus parler, comme pour une bille, de trajectoire pour le photon.

Dès qu'on tente de mettre expérimentalement en évidence le trou d'Young par lequel passe le photon, on perturbe le système au moins de ce qu'il faut pour détruire la figure d'interférences ! Par exemple, on n'obtient qu'une figure de diffraction si l'on bouche un des trous pour être sûr que les photons passent par l'autre ? Il faut renoncer à déterminer la trajectoire empruntée par un photon et analyser les choses à l'échelle microscopique par des concepts probabilistes. La probabilité pour qu'un photon arrive sur l'écran au niveau d'une frange brillante est très grande alors que la probabilité pour qu'il arrive sur l'écran au niveau d'une frange sombre est très petite. Il est impossible de savoir quelle zone de l'écran sera précisément atteinte par le photon, mais on peut connaître la probabilité correspondante.



### Dualité onde-particule

Les descriptions ondulatoire et corpusculaire de la lumière sont complémentaires : on parle de dualité onde-particule (ou onde-corpuscule).

### III Dualité onde-corpuscule de la matière

#### III.1 Expérience d'interférences entre atomes



#### Document 4 : Interférences avec des atomes uniques

Expérience de Shimizu, Shimizu, et Takuma. Double-slit Interference with ultracold metastable neon atoms; Physical Review A; 1992

Le dispositif utilisé par l'équipe de Shimizu de la Nippon Electronics (NEC) est décrit de façon simplifiée sur la figure ci-dessous. Il utilise des atomes de Néon piégés et refroidis à une température de 2,5 mK de manière à minimiser leur agitation thermique moyenne. Ils sont piégés par des lasers dans une zone d'environ 1 mm, lorsque les lasers sont éteints, les atomes quittent le piège et tombent dans le champ de pesanteur.

Le piège est situé à une hauteur  $\ell = 76$  mm au-dessus de deux fentes séparées d'une distance  $a = 6$   $\mu\text{m}$ . La largeur d'une fente est de 2  $\mu\text{m}$ . Un écran MPC (microchannel plate detector) est placé à une distance  $D = 113$  mm de la double fente et détecte les atomes de Néon avec une résolution de l'ordre de 20  $\mu\text{m}$ . L'ensemble du dispositif est disposé verticalement.

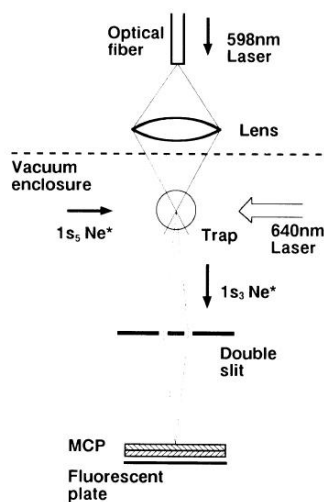


FIG. 1. Schematic experimental configuration. Details of the trap are not shown.



FIG. 2. The interference fringe pattern on the MCP for atoms with the initial velocity of approximately zero. The vertical length of the slit image is 2.8 mm. The spatial resolution of the picture is 20 and 32  $\mu\text{m}$  for the horizontal and vertical directions, respectively. The narrowing of the fringe separation on the upper part is due to the damage of the double-slit structure. This figure contains approximately  $6 \times 10^3$  atomic counts.

#### Montage et résultats de l'expérience de l'équipe de la Nippon Electronics



Données :

- Masse molaire du néon :  $M = 20$  permol
- Constante d'Avogadro :  $\mathcal{N}_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Constante de Boltzmann :  $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
- La distance séparant deux franges de même type est appelée interfrange  $i$  et dans le cas d'une expérience de fentes d'Young, elle reliée à la longueur d'onde par  $i = \frac{\lambda D}{a}$ .
- Énergie cinétique d'un atome de masse  $m$  porté à la température  $T$  :  $E_c = \frac{3}{2} k_B T$



#### Analyse de l'expérience :

- Q1. Comment se manifestent respectivement les caractères corpusculaire et ondulatoire des atomes de néon dans cette expérience ?
- Q2. En admettant que les atomes se comportent indépendamment les uns des autres, expliquer ce qu'il advient d'un atome de néon lors de sa traversée du dispositif.
- Q3. Estimer l'interfrange de cette onde de matière avec la figure d'interférence fournie et en déduire une estimation de la longueur d'onde de l'onde de matière. Comparer avec la taille des fentes.

Pour compléter :  Vidéo d'interférences de molécules  
 La plus belle expérience de toute l'histoire de la physique !

### III.2 Relation de De Broglie

En 1924, Louis de Broglie (Rq : se prononce « De Breuil ») a eu l'idée d'interpréter la quantification des énergies atomiques à l'aide d'une description ondulatoire des électrons. Il connaissait les travaux de Planck et Einstein sur la dualité onde-corpuscule de la lumière, il a eu l'idée de l'étendre aux particules de masse non nulle : partant de  $p = \frac{h}{\lambda}$  énoncée par Einstein pour la lumière, il propose d'associer une longueur d'onde à une particule.

#### Relation de de Broglie $\lambda = h/p$

Louis de Broglie a postulé qu'à toute particule matérielle de masse  $m$ , de quantité de mouvement  $\vec{p}$ , on peut associer une onde de matière, se propageant à la vitesse  $v$  de la particule et de longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

La quantité de mouvement d'une particule de masse  $m$  **non relativiste** (de vitesse faible devant la célérité de la lumière dans le vide :  $v < c/10$ ) s'écrit  $p = mv$ .

#### Erreurs à ne pas faire !

- Les expressions  $\vec{p} = m\vec{v}$ ,  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$  ne sont valables que pour une particule de masse  $m$  non relativiste, elles ne sont pas valables pour :
  - des particules relativistes ( $v > c/10$ ),
  - le photon de masse nulle et de vitesse égale à celle de la lumière.
- Rappel : Les formules de Planck-Einstein ne sont pas valables pour des particules de masse non nulle :  $E = h\nu$ , et  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  ne doivent pas être utilisées pour des particules de masse non nulle.

## ★ Méthode

### Méthode pour déterminer si une particule est quantique ou non quantique ?

- ① Si elle n'est pas donnée, déterminer la vitesse de la particule (connaissant leur énergie cinétique ou leur température).
- ② Calculer la longueur d'onde de De Broglie  $\lambda_{dB} = \frac{h}{p}$  de la particule.
- ③ Comparer la longueur d'onde de De Broglie  $\lambda_{dB}$  trouvée aux tailles caractéristiques  $a$  du milieu dans lequel se déplace la particule étudiée.
  - Si  $\lambda_{dB} \ll a$  (au moins un facteur 1000 :  $\lambda_{dB} < a/1000$ ) : l'étude quantique n'est pas nécessaire pour rendre compte des observations faites, l'étude classique suffit.
  - Si  $\lambda_{dB} \approx a$  (valable jusqu'à  $100a$ ) : la particule a un comportement quantique et l'étude quantique est nécessaire pour rendre compte des observations faites.

### Exercice de cours (B)

- Q1. Déterminer la valeur de la longueur d'onde de De Broglie d'un grain de poussière de masse  $m = 0,1 \mu\text{g}$  animé d'une vitesse  $v = 1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- Q2. Déterminer la longueur d'onde de De Broglie d'un neutron thermique (neutrons de basse énergie, dont la vitesse  $v$  correspond à l'agitation thermique à la température  $T \rightarrow$  révisions TH1). En déduire que les neutrons thermiques peuvent être utilisés en cristallographie.



### Remarques

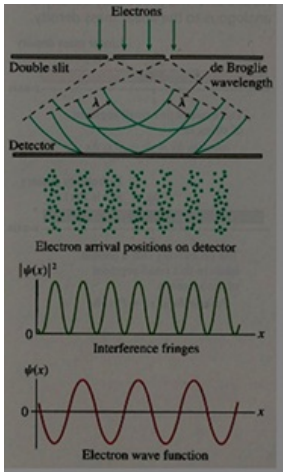
- Dans le domaine macroscopique, il est impossible de mettre en évidence le caractère ondulatoire de la matière.
- De Broglie insistait sur le fait que la mécanique classique n'est qu'une première approximation, valable seulement à l'échelle macroscopique.

## IV Notion de fonction d'onde

Dans le cadre de la mécanique quantique, la notion de trajectoire n'existe plus. On ne peut plus dire que la particule est à tel ou tel endroit, mais seulement qu'elle a une certaine probabilité de s'y trouver. Dans l'expérience des trous d'Young avec des particules uniques, on ne peut pas déterminer à l'avance le lieu d'un impact :

on ne sait pas par quelle fente la particule est passée. Cependant, avec un nombre important de particules, on voit apparaître l'allure d'une figure d'interférences, ce qui traduit le comportement d'une onde : en fait c'est comme si la particule était passée par les deux fentes à la fois, comme une onde.

→ Une approche probabiliste est donc adaptée! (et c'est la grande nouveauté de la physique quantique!)



En physique quantique, on utilisera la notion de fonction d'onde, qui joue un rôle similaire au signal introduit pour les ondes. Ce document, qui présente le lien entre la répartition des électrons et les valeurs du carré de la fonction d'onde dans l'expérience d'interférences à un électron, permet de mettre en évidence l'interprétation probabiliste.

### ♥ Définition

**Fonction d'onde** : En mécanique quantique, une particule est décrite par une fonction à valeurs complexes appelée fonction d'onde et notée  $\Psi(M, t)$ .

Le module au carré de la fonction d'onde  $|\Psi(M, t)|^2$  est la **densité de probabilité de présence** de la particule au point  $M$  à l'instant  $t$ .

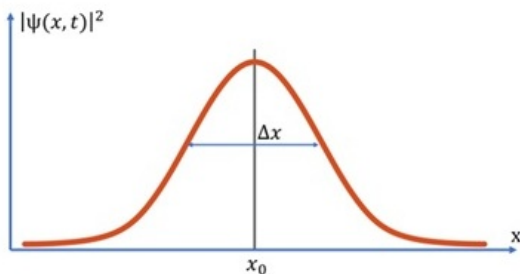
Pour un problème à une dimension, selon un axe  $(Ox)$ , où l'état de la particule est décrit par la fonction d'onde  $\Psi(x, t)$ , la **probabilité** de trouver la particule entre  $x$  et  $x+dx$  à l'instant  $t$  est  $dp = |\Psi(x, t)|^2 dx$ .

La probabilité de trouver la particule sur un intervalle  $[a, b]$  est donc égale à l'intégrale de  $|\Psi(x, t)|^2$  sur cet intervalle :  $p(a \leq x \leq b) = \int_a^b |\Psi(x, t)|^2 dx$

## V Principe d'indétermination de Heisenberg

### V.1 L'indétermination quantique

Un résultat fondamental de la physique quantique (et qui la différencie essentiellement de la physique classique), est qu'elle est, par essence, probabiliste. La position d'une particule n'est donc pas définie, on peut seulement associer une probabilité de présence à la particule grâce à la fonction d'onde :  $dp = |\Psi(x, t)|^2 dx$  donne la probabilité que la particule soit autour de  $x$ .



$x_0$  est la position la plus probable de la particule de fonction d'onde  $\Psi(x, t)$ , et  $\Delta x$  est l'écart-type de  $|\Psi(x, t)|^2$  et caractérise l'indétermination sur la position.

### V.2 Principe d'indétermination de Heisenberg

## ♥ Définition

**Inégalité de Heisenberg** : En 1927, Heisenberg formula la **relation d'indétermination** qui énonce qu'il est impossible de connaître infiniment précisément à la fois la position et la quantité de mouvement d'une particule. Pour une particule repérée par sa position  $x$ , et ayant pour quantité de mouvement  $p_x = mv_x$ , l'indétermination intrinsèque  $\Delta x$  sur la position et  $\Delta p_x$  sur la quantité de mouvement sont reliées par :

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar \quad \text{avec} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$$

## VI Quantification de l'énergie

### ♥ Définition

**Notion de quantification** : Une grandeur physique est quantifiée si elle ne peut prendre qu'une suite de valeurs discrètes. On parle de quantification.

### VI.1 Modèle de Bohr

La première mise en évidence expérimentale de la quantification de l'énergie résulte de l'observation de spectres de raies pour des atomes (cf raies dans une lampe spectrale → OG1).

Pour expliquer ces faits expérimentaux, Bohr propose en 1913 un modèle dit planétaire, semi-classique, de l'atome d'hydrogène :

- Le noyau, de charge  $+e$ , est fixe en un point  $O$ .
- L'électron, de charge  $-e$ , a une trajectoire circulaire de rayon  $r$ .

Et afin d'être en accord avec l'expérience, il postule (sans l'expliquer) une quantification du moment cinétique :

### ♥ Définition

**Quantification du moment cinétique** : le moment cinétique de l'électron ne peut prendre que certaines valeurs discrètes données par :

$$L_{Oz} = n \frac{h}{2\pi}$$

avec  $n \in \mathbb{N}^*$  et  $h =$  constante de Planck  $= 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

### 💣 Exercice de cours ©

- Q1. Faire un schéma de la situation.
- Q2. Exprimer la vitesse de l'électron.
- Q3. Calculer son moment cinétique.
- Q4. Établir la quantification de l'énergie.

VI.2 Quantification de l'énergie d'une particule libre confinée sur une dimension → TD