

Introduction à la mécanique quantique

I Un peu d'histoire

Dans notre vie quotidienne, nous interagissons avec des systèmes à une échelle macroscopique, qu'on modélise assez correctement en physique par un assemblage de systèmes à l'échelle mésoscopique. L'idée de trouver une brique élémentaire à ce qui compose notre monde, qui nous donnerait des clés pour le comprendre en le prédire en totalité, est naturellement une idée ancienne. Le concept premier d'« atome », du grec *atomos*, « insécable », pensé par Démocrite et Épicure, traduisait cette brique fondamentale hypothétique. Cependant, l'accès expérimental à cette potentielle réalité physique est resté difficile pendant de nombreux siècles.

En attendant, la majeure partie du monde physico-chimique tel qu'on le concevait a été étudié et décrit : la mécanique des solides et la mécanique des fluides, la thermodynamique et la thermochimie, les ondes sonores et l'optique géométrique... mais les questions sur la nature profonde de certains phénomènes restent ouvertes, et de vifs débats enflamment les plus grands esprits.

Au début du XX^e siècle, la lumière échappe à cette compréhension profonde. Les outils existant sont ceux de la mécanique de NEWTON (fin du XVII^e siècle) et l'électromagnétisme de MAXWELL (milieu et fin du XIX^e siècle) : c'est la physique **classique**, description du monde alors très robuste et complètement déterministe, donnant une raison infiniment claire à toute observation du monde réel. Cependant, quelques expériences les mettent en défaut :

- ◇ **L'effet photoélectrique** : exposer une plaque métallique exposée à de la lumière permet d'en arracher des électrons. Cependant, et ce peu importe l'intensité du faisceau, aucun électron n'est arraché si la lumière en question est au-dessus d'une certaine longueur d'onde (couleur) : l'éjection n'apparaît qu'en-dessous d'une longueur d'onde seuil λ_0 , ce que la physique classique n'explique alors pas encore.

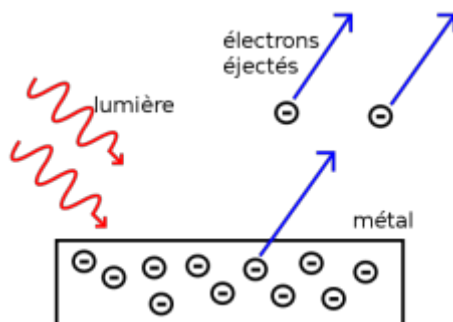
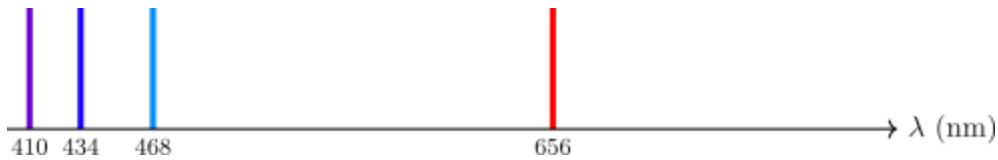


FIGURE 1 – Éjection des électrons d'un métal sous l'effet d'un faisceau lumineux.

- ◇ **Raies atomiques** : en excitant un gaz d'un élément unique (comme l'hydrogène ou le néon) avec une tension électrique, le milieu dégage de la lumière. En la décomposant par un prisme, on obtient alors des raies très définies, à l'opposé des spectres continus qu'on observe généralement comme celui du soleil par exemple. Cette précision de longueur d'onde émise échappe à la physique classique.

La résolution de ces incompréhensions va mener à la naissance de la mécanique **quantique**, issu du latin *quanta*, qui permet une description des phénomènes physiques non pas comme un ensemble de phénomènes continus, mais comme un ensemble de phénomènes **quantifiés**, notamment *via* des états d'énergie discrets et définis. Par exemple, c'est comme si on pouvait aller à 50 **ou** 70 km·h⁻¹ en voiture, mais pas à une valeur intermédiaire.

FIGURE 2 – Spectre *discret* des raies de l'hydrogène.

Cette nouvelle approche du monde va bouleverser la façon de comprendre certains phénomènes, et est à l'origine d'innombrables applications : le laser, l'énergie nucléaire, l'IRM, les semi-conducteurs et donc de toute l'électronique, mais aussi toute la matière plus généralement et donc les interactions chimiques.

II Comportements ondulatoires

A Diffraction

Une goutte d'eau seule ne fait pas une marée : c'est la collection d'objets tangibles qui se meuvent de manière cohérente qui crée les vagues. On étudie alors la vague comme un ensemble mais dont on comprend l'origine individuelle. Une onde présente des propriétés particulières, dont une dont on a déjà parlé au début de l'année : la **diffraction**.

Définition : diffraction

Lorsqu'une onde progressive rencontre un obstacle dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde, la partie de l'onde qui la passe subit un **étalement circulaire**, qu'on appelle **diffraction**.

Une onde plane de longueur d'onde λ arrivant sur une fente de taille $a \lesssim \lambda$ est diffractée *majoritairement* dans un cône, de demi-angle d'ouverture

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$$

soit, pour des petits angles **en radians**,

$$\theta \underset{\theta \ll 1}{\sim} \frac{\lambda}{a}$$

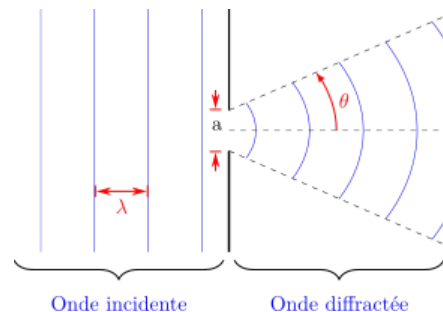


FIGURE 3 – Diffraction par une fente. Les traits bleus représentent les maxima de l'onde.

Ce comportement décrit très bien les ondes de matière comme les ondes sonores ou les vagues arrivant dans un port, mais correspond également à ce que subit la lumière en passant dans une fente :

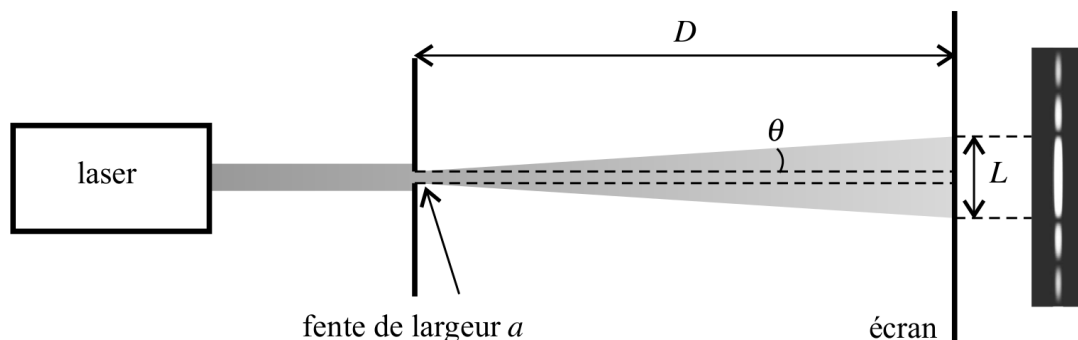


FIGURE 4 – Diffraction d'un faisceau laser par une fente fine.

Avec un laser de longueur d'onde $\lambda = 630 \text{ nm}$ et une fente de largeur $a = 0,1 \text{ mm}$, on observe sur l'écran placé à $D = 5,0 \text{ m}$ une suite de taches de diffraction dont la plus large (au centre) est de largeur L . Calculer cette largeur.

On a $\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$. Or, dans le triangle rectangle formé par le demi-cône entre la fente et l'écran, on a $\sin \theta = \frac{L/2}{D}$; ainsi

$$\frac{L}{2D} = \frac{\lambda}{a} \Leftrightarrow \boxed{L = 2D \frac{\lambda}{a}}$$

$$\text{A.N. : } \underline{L = 6,3 \text{ cm}} \quad \text{avec} \quad \begin{aligned} D &= 5,0 \text{ m} \\ \lambda &= 630 \times 10^{-9} \text{ m} \\ a &= 0,1 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

B Interférences

Une autre particularité des ondes est le phénomènes d'interférences :

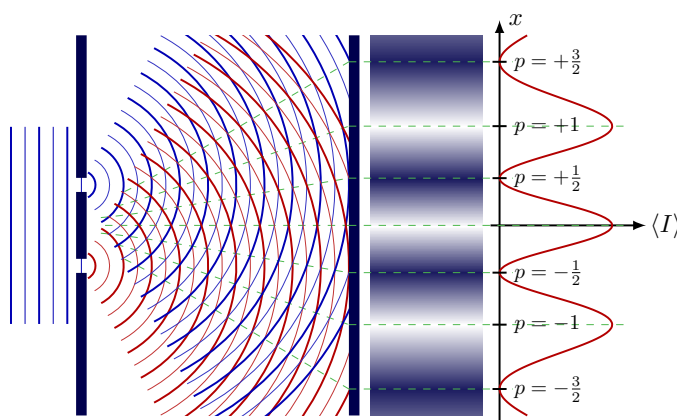
Définition : interférence

Deux ondes de même nature se rencontrant en un point M se superposent en **sommant leurs signaux**.

Nous avons également décrit ce phénomène plus tôt dans l'année, par l'expérience des **fentes d'YOUNG**.

La zone de l'espace où les faisceaux se superposent est appelé **champ d'interférences**. Sur un écran, on observe alors la figure ci-contre, avec des variations d'intensité lumineuse :

- au milieu des zones claires (**maximum** local d'intensité) on a des **interférences constructives**;
- au milieu des zones sombres (**minimum** local d'intensité) on a des **interférences destructives**.



Conclusion

Ainsi, il est clair que la lumière a un comportement ondulatoire. On peut donc songer que ce comportement est issu d'une collection d'objets individuels qui la composerait, des « corpuscules » de lumière : les photons.

III Dualité onde-corpuscule

A Définitions

OLIVIER

B Nature corpusculaire de la lumière

SCWHEITZER

III.B.1 Photons

III.B.2 Transitions atomiques

C La matière : onde et corpuscule.

VIDEO Tout est quantique

III.C.1 Rappels de mécanique classique

OLIVIER

III.C.2 Longueur d'onde de DE BROGLIE

SCWHEITZER

IV Formalisme quantique

SCWHEITZER, 1 et 2

V Relations d'incertitude d'HEISENBERG

OLIVIER

VI Modèle semi-classique BOHR

SCWHEITZER