

SUIS-JE AU POINT ?

Chapitre 31 : Introduction à la physique quantique

- 💡 Une information utile, mais pas à mémoriser par cœur.
- ♥ Une définition/formule à connaître PAR CŒUR.
- 📖 Un savoir-faire à acquérir.
- TD Un exercice du TD pour s'entraîner.

1 Émergence de la physique quantique

1.1 Introduction

- 💡 La physique quantique est, à l'heure actuelle, la théorie la plus aboutie pour décrire le comportement des systèmes à l'échelle microscopique. Elle a fait son apparition au début du XX^{ème} siècle pour résoudre deux énigmes de la nature : le **spectre du rayonnement du corps noir** et l'**effet photoélectrique**. Dans les années 1920, l'effort collectif de nombreux scientifiques a permis de construire un cadre théorique cohérent. Depuis, la physique quantique a connu de nombreux succès parmi lesquels on peut citer le **modèle standard de la physique des particules** qui décrit la nature et le comportement des constituants élémentaires de la matière.

1.2 Le rayonnement du corps noir

- 💡 Un corps noir est un objet idéal capable d'absorber toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit, sans la réfléchir ni la diffuser. Cet objet est suffisamment simple pour que sa densité spectrale d'énergie, à l'équilibre thermodynamique, puisse être calculée en utilisant les équations de l'électromagnétisme de Maxwell.
- 💡 La densité spectrale d'énergie calculée est en contradiction avec l'observation dans le domaine des faibles longueurs d'onde ("**catastrophe ultraviolette**"). En 1900, Max Planck lève la contradiction en formulant l'hypothèse que le corps noir en équilibre thermique n'échange de l'énergie avec le champ électromagnétique que par "paquets" (ou "quanta") de quantité multiple de la fréquence. Cette hypothèse ne repose alors sur aucun argument physique.

1.3 L'effet photoélectrique

- 💡 Certains matériaux, éclairés par une onde lumineuse de fréquence suffisamment élevée, émettent des électrons. L'énergie cinétique de ces derniers est d'autant plus élevée que la fréquence de l'onde lumineuse est importante. Les lois de l'électromagnétisme ne permettent pas d'expliquer la raison pour laquelle l'effet photoélectrique ne se produit que lorsque la fréquence de l'onde lumineuse dépasse un certain seuil, et pas à n'importe quelle fréquence.
- 💡 En 1905, Einstein fournit une explication cohérente qui repose sur une hypothèse de quantification : le champ électromagnétique (et *a fortiori* les ondes lumineuses) transporte de l'énergie par paquets de quantité $E = h\nu$ (où ν est la fréquence de l'onde et h est appelée la constante de Planck). Ces quanta d'énergie furent appelés plus tard les **photons**.
- 💡 Dans son article, Einstein explique que le matériau absorbe les photons associés à l'onde lumineuse. Si l'énergie d'un photon dépasse une certaine valeur (le **travail d'extraction** W), alors un électron sera arraché au matériau avec une énergie cinétique égale, au maximum, à l'excédent d'énergie du photon.

2 Dualité onde/corpuscule

2.1 Le photon , un quantum de lumière

- ♥ Présenter les caractéristiques principales du photon (masse, célérité dans le vide, énergie (loi de Planck-Einstein), quantité de mouvement).
-  Interpréter le phénomène de l'effet photoélectrique en montrant qu'en-dessous d'une **longueur d'onde seuil** (donner son expression en fonction du travail d'extraction), l'onde lumineuse peut arracher des électrons au matériau. Donner l'expression de l'énergie cinétique maximale des électrons arrachés (électrons de surface quittant le matériau sous incidence normale).
- TD Effet photoélectrique : [exercice 4](#).
-  Mettre en oeuvre la loi de Planck-Einstein pour déterminer le nombre de photons émis par unité de temps par une source d'ondes électromagnétiques de puissance \mathcal{P} donnée.
- TD Débit de photon d'une source d'ondes EM : [exercice 1](#).

2.2 Une expérience à la frontière entre onde et corpuscule : les fentes d'Young

-  L'expérience des fentes d'Young est une célèbre expérience d'optique. Elle consiste à faire interférer les ondes lumineuses diffractées par deux fentes parallèles. La figure d'interférences observée sur un écran éloigné est constituée d'une alternance de franges rectilignes claires (int. constructives) et sombres (interf. destructives), parallèles aux fentes.
-  Cette expérience peut être réalisée avec des photons uniques envoyés les uns après les autres vers l'écran percé des deux fentes. On observe que la position de l'impact d'un photon unique sur l'écran est aléatoire mais que la répartition des impacts pour un grand nombre de photons ne l'est pas. Celle-ci **correspond exactement à la figure d'interférences observée avec des ondes de plus grande intensité**.
-  Le comportement d'un photon unique est aléatoire mais suit une loi de probabilité qui peut être déterminée par les lois de la physique. **Le rôle de la physique quantique est de fournir des informations sur ces lois de probabilité.**

2.3 Comportement ondulatoire de la matière

2.3.1 Le postulat de de Broglie

-  Le français Louis de Broglie (prononcer "de Breuille") formule en 1923 l'hypothèse selon laquelle la matière peut elle aussi avoir un comportement ondulatoire. La relation entre la quantité de mouvement d'une particule de matière et la longueur d'onde (de l'onde de matière associée) est analogue à celle que l'on rencontre chez le photon.
- ♥ **Écrire la relation de de Broglie entre la quantité de mouvement d'une particule de matière et la longueur d'onde de l'onde de matière.**
- TD Longueur d'onde de de Broglie : [exercices 2,5,6,7](#).

2.3.2 L'expérience de Davisson et Germer

-  La prédiction de de Broglie fût confirmée expérimentalement de manière éclatante par Davisson et Germer en 1927. Ces derniers réussirent à faire diffracter un faisceau d'électrons à travers un cristal, comme on savait déjà le faire auparavant avec des rayons X. La figure de diffraction obtenue permet de déterminer la longueur d'onde des électrons. Celle-ci était en parfait accord avec la relation de de Broglie!
-  Déterminer la longueur d'onde de de Broglie d'électrons dont l'énergie cinétique est de l'ordre de 50 eV. Justifier que ceux-ci vont être sensiblement diffractés par le cristal.

2.3.3 Interférences de particules

-  Puisque la matière peut montrer, dans certaines circonstances, des propriétés ondulatoires, il est possible d'envisager des interférences entre ondes de matière. Contrairement à l'expérience de Davisson et Germer, il a fallu attendre de nombreuses années avant d'avoir la technologie nécessaire pour pouvoir réaliser une figure d'interférences d'ondes de matière.
-  L'expérience des fentes d'Young, réalisée avec des atomes froids, montre un comportement des atomes similaire à celui des photons uniques. Les atomes, individuellement, se comportent de manière aléatoire. Collectivement, les impacts suivent une loi de probabilité qui coïncide avec la figure d'interférence observée en optique.
- TD Interférences de matière : [exercice 5](#).

3 Fonction d'onde d'un système quantique

3.1 Définition

💡 La fonction d'onde $\psi(\vec{r}, t)$ est une fonction complexe de l'espace et du temps qui permet de prévoir, en termes de **probabilités**, le comportement d'un système quantique.

3.2 Probabilité de présence

💡 Par exemple, le carré du module de la fonction d'onde ($|\psi(\vec{r}, t)|^2$) s'appelle la **densité de probabilité de présence** du système. Elle permet de déterminer les lieux de l'espace dans lesquels le système a une probabilité plus ou moins grande d'être observé, à un instant t donné.

✍ Dans le cas 1D ($\psi(x, t)$), donner, sous forme intégrale, l'expression de la probabilité que le système soit observé dans un intervalle $[x_1, x_2]$. Écrire la **relation de normalisation** associée à la fonction d'onde.

3.3 Interprétation probabiliste de l'expérience des fentes d'Young

💡 Les équations différentielles qui permettent de déterminer la fonction d'onde d'un système quantique sont **linéaires**, ce qui signifie que la fonction d'onde obéit au **principe de superposition** : si les ondes associées à deux systèmes quantiques, de fonctions d'onde ψ_1 et ψ_2 , se superposent en un point de l'espace, alors **l'onde résultante est décrite par la fonction d'onde $\psi_1 + \psi_2$** .

✍ Justifier, à l'aide d'un raisonnement reposant sur la notion de probabilité de présence et le principe de superposition, que lorsque les ondes associées à deux systèmes quantiques se superposent, comme c'est le cas dans l'expérience des fentes d'Young, il est possible d'observer des interférences.

4 Inégalité de Heisenberg

4.1 Dispersion quantique

💡 On l'a vu, un système quantique a un comportement aléatoire. Imaginons N systèmes préparés initialement **dans le même état quantique** (même fonction d'onde). Si l'on mesure l'une des propriétés de ces systèmes (position par exemple), alors on trouvera pour chacun d'entre eux, *a priori*, une valeur différente. Mathématiquement, on quantifie la dispersion de ces valeurs à l'aide de l'écart-type.

Il est important de retenir que **cette dispersion n'est pas la manifestation d'une incertitude de mesure**, au sens où la précision serait limitée par le matériel utilisé ou le protocole choisi. Il s'agit d'une dispersion purement quantique, **une propriété intrinsèque de la matière qui échappe totalement au contrôle de l'expérimentateur**.

4.2 Cas de la diffraction par une fente

✍ En étudiant la dispersion des trajectoires des particules (photons ou particules de matière) derrière une fente (on se limite à la tâche centrale de diffraction), établir un ordre de grandeur de la quantité $\Delta x \Delta p_x$ où Δx mesure la dispersion des positions des particules au moment où elles traversent la fente et Δp_x mesure la dispersion des composantes transversales (perpendiculaires à la fente) de la quantité de mouvement des particules, immédiatement après avoir traversé la fente.

4.3 Inégalité de Heisenberg spatiale

♥ **Énoncer l'inégalité de Heisenberg spatiale (mouvement 1D).**

💡 L'inégalité de Heisenberg spatiale implique que, **quelque soit la précision avec laquelle on tente de déterminer la position et la quantité de mouvement d'un système quantique, il existe une limite fondamentale à la connaissance que l'on peut avoir de ces deux quantités**. Meilleure est la connaissance de la position et moins bonne sera celle de la quantité de mouvement, et inversement.

💡 Cette inégalité implique qu'au niveau microscopique, **il faut abandonner la notion de trajectoire d'une particule** (qui suppose de connaître à tout instant la position et la vitesse de manière exacte). Un système quantique est uniquement décrit en termes de **probabilité de présence**. Il se comporte comme une onde et, de ce fait, est délocalisé dans tout l'espace!

💡 Dans un atome (ou une molécule), les électrons sont décrits à l'aide d'objets mathématiques appelés **orbitales**. À chaque orbitale correspond une densité de probabilité de présence, une énergie, un moment cinétique, etc. Comme vous l'avez vu en chimie, la fonction d'onde associée à l'électron d'un atome ou d'une molécule est déterminée par la valeur de **quatre nombres quantiques**.



À cause de la faible valeur du terme $\frac{\hbar}{2}$, **les effets quantiques liés à l'inégalité de Heisenberg sont négligeables à l'échelle macroscopique.**

5 Quantification de l'énergie d'une particule dans un puits infini 1D

5.1 Modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène



L'hypothèse de quantification de Bohr étant admise (*le moment cinétique de l'électron est quantifié* : $L_n = n\hbar$), établir l'expression des niveaux d'énergie de l'électron en fonction du nombre quantique n .

5.2 Puits de potentiel infini à 1 dimension



Un puits de potentiel infini 1D est un modèle idéal de système physique dans lequel une particule peut se déplacer librement, le long d'un axe (Ox), sur un intervalle de largeur L , mais ne peut en sortir, quelque soit son énergie.

C'est une manière très simplifiée d'étudier le comportement d'une particule quantique confinée dans une certaine portion de l'espace (électron autour d'un noyau par exemple).



Tracer le graphe $E_p(x)$ associé à un puits de potentiel infini de largeur L .

5.3 Quantification de l'énergie



Par analogie avec l'étude des ondes stationnaires sur une corde vibrante fixée en ses extrémités, démontrer que l'énergie d'une particule de matière de masse m plongée dans un puits de potentiel infini est **quantifiée**. Donner l'expression des niveaux d'énergie en fonction d'un entier naturel non nul n .

TD Puits de potentiel infini 1D : exercices 6,7.

5.4 Transition entre deux niveaux d'énergie



Établir l'expression de la longueur d'onde d'un photon émis ou absorbé par une particule quantique qui passe d'un niveau d'énergie à un autre.

5.5 Lien entre confinement spatial et quantification



Pour généraliser l'étude du puits de potentiel infini, on admet que **toute particule quantique confinée dans une portion de l'espace a des niveaux d'énergie quantifiés.**

Bien entendu, c'est le cas pour les électrons d'un atome ou d'une molécule.

TD Niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène : exercices 3,8.