

LP39 - Aspect ondulatoire de la matière, Notion de fonction d'onde

Cléments (DE LA SALLE + COLLÉAUX)

15 juin 2020

Niveau : L2

Bibliographie

♣ <i>J'intègre MP</i> , Salamito & Sanz	→	Base de cours
♣ <i>Mécanique quantique</i> , Basdevant & Dalibard	→	Pour les expériences historiques et la démarche + Demander le CD pour des animations !
♣ Aslangul 1	→	Schrödinger
♣ article historique de Davisson et Germerà	→	
♣ <i>Physique quantique : fondements</i> , Le Bellac	→	Pour remplacer le Basdevant
♣ interférences à 1 électron	→	

Prérequis

- Modèle de Bohr
- Paquet d'onde
- Trous d'YOUNG
- Modèle scalaire de la lumière

Expériences



Table des matières

Table des matières	1
1 Aspect ondulatoire de la matière	2
1.1 Hypothèse de de Broglie	2
1.2 Vérifications expérimentales	3
2 Fonction d'onde	5
2.1 Notion de fonction d'onde et probabilité de présence	5
2.2 Retour sur les interférences	7
2.3 Inégalité d'HEISENBERG	8
3 Dynamique de la fonction d'onde	10
3.1 Cas d'une particule libre	10
3.2 Équation de SCHRÖDINGER	10
3.3 Le puit de potentiel	11

Introduction

Dans la dernière leçon nous avons montré que la lumière longtemps considérée comme simplement une onde peut aussi être se décrire comme un phénomène corpusculaire (*photon* par COMPTON en 1926). Pour la première fois, un objet physique pouvait être représentations de deux façons *a priori* contradictoires !

Mais si la lumière que l'on croyait onde est aussi particule, est-ce que les particules de matière (électrons) peuvent aussi être onde ?

Eh bien c'est ce qu'on va voir aujourd'hui ! Heureux ?

Dans cette leçon, on va faire SHRÖDINGER en 1D parce que sinon on sort du programme apparemment... Sans doute qu'on se permettra quand même une ou deux envolées lyriques :/

1 Aspect ondulatoire de la matière

1.1 Hypothèse de de Broglie

♣ *Sanz, p.793*

♣ *Aslangul, p.273*

♣ *Le Bellac p.20*

En 1923, l'idée d'une lumière pouvant se manifester par les deux aspects ondulatoire et corpusculaire était déjà apparue avec les travaux d'EINSTEIN. Durant sa thèse (oui, sa **thèse**) le physicien français Louis de Broglie propose l'idée d'étendre cette dualité à la matière que l'on ne pensait que corpusculaire jusqu'alors.

En particulier, de Broglie propose une équation reliant les caractéristiques ondulatoire et corpusculaire d'une particule de matière :

Relation de de Broglie (1923) :

Soit une particule d'impulsion de norme $p = mv$. On peut associer à cette particule une longueur d'onde λ_{dB} nommée longueur d'onde de de Broglie ;

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

avec h la constante de Planck qui ne veut toujours pas dire *à l'aide*. On note aussi que m est la masse dans le référentiel de la particule. Si on veut faire apparaître sa masse propre m_0 il faut écrire $\lambda_{dB} = \frac{h}{\gamma m_0 v}$ avec le facteur de LORENTZ

Quelques OdG

Pour discuter de cette équation, déterminons d'abord quelques OdG de λ_{dB} :

- une personne qui marche : $m \sim 100$ kg, $v \sim 1$ m/s $\implies \lambda_{dB} \simeq 1 \times 10^{-35}$ m
- un atome d'Hydrogène à température ambiante : $E_c \sim \frac{p^2}{2m}$ et $E_c \sim E \sim k_B T$ d'où $p \sim \sqrt{mk_B T} \sim 1 \times 10^{-24}$ kg.m/s $\implies \lambda_{dB} \simeq 10 \times 10^{-9}$ m
- un électron accéléré à $v \sim 1 \times 10^6$ m/s $\implies \lambda_{dB} \simeq 10 \times 10^{-10}$ m

L'influence des effets quantiques dépend du rapport entre la longueur d'onde de De Broglie et les dimensions caractéristiques du système (discussion [Aslagul, p.297](#)). Si la longueur d'onde de de Broglie est petite devant toutes les tailles caractéristiques du problème comme dans le premier cas, on peut négliger le comportement ondulatoire (de même qu'on néglige le comportement ondulatoire de la lumière en optique géométrique). En revanche, dans les deux autres exemples, ce n'est pas le cas, et donc tous les phénomènes ondulatoires qu'on a vus en optique devraient pouvoir être observés.

Retour sur le modèle de Bohr

Dans son modèle de 1913 Bohr a du sortir de nulle part la quantification du rayon des orbites électroniques pour expliquer les raies d'absorption. La théorie de de Broglie qui associe une onde à l'électron orbitant permet de revenir sur cette condition.

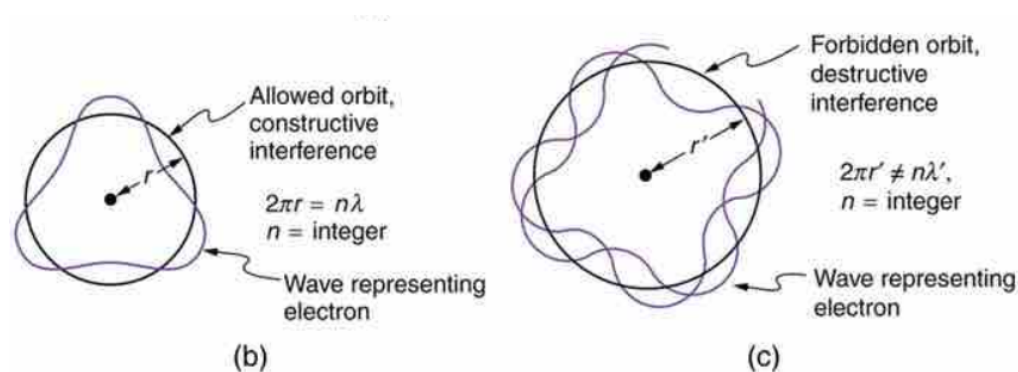


FIGURE 1.1 – Retour sur la quantification du rayon orbital

Analogie optico-mécanique de Hamilton

[Aslagul, p.273](#) mais risqué d'en parler

| Super ça mais ça a été vérifié expérimentalement ? EN FAIT OUI

1.2 Vérifications expérimentales

1927 : Diffraction des électrons

[Basdevant, p.24](#)

En 1927, Davisson et Germer (PN 1937) observent la figure de diffraction d'électrons par un cristal de Nickel ce qui est une preuve du caractère ondulatoire des électrons. Grâce aux résultats expérimentaux, Davisson et Germer ont remonté au paramètre de maille du cristal étudié et le comparent à la valeur obtenue avec la diffraction des rayons X et les deux valeurs concordent : l'équation de de Broglie est donc vérifiée !

On se propose de refaire la manip' devant la webcam en priant Thor et Odin pour que vous voyez quelque chose par visio.

Expérience : Diffraction des électrons

⚡ LP36 + MP26

☹ ?

Tout est dans les rapports cités

| Rien de plus récent ?

1989 : Interférences

⚡ Sanz, 793

⚡ Le Bellac p.20

Un phénomène bien connu et caractéristique des ondes est le phénomène d'interférences, si les électrons sont bien des ondes alors on devrait pouvoir observer des figure d'interférences d'électrons !

Plusieurs expériences ont permis de montrer des phénomènes d'interférences d'ondes de matière. La première est due à Jönsson en 1974, qui a réalisé une version des fentes d'Young avec des électrons, et observé une figure d'interférence similaire à celle de la lumière. On présente ici une version plus récente de cette expérience, réalisée en 1989 par Tonomura et al.. Cette expérience est analogue au biprisme de Fresnel, avec ici une tige chargée positivement entre deux plaques métalliques. Les électrons sont accélérés par un potentiel de 50 kV et sont envoyés un par un sur le dispositif. Ils sont déviés par la tige, soit vers le bas, soit vers le haut, et passent par une série de lentilles électromagnétiques avant d'impacter un détecteur de position.

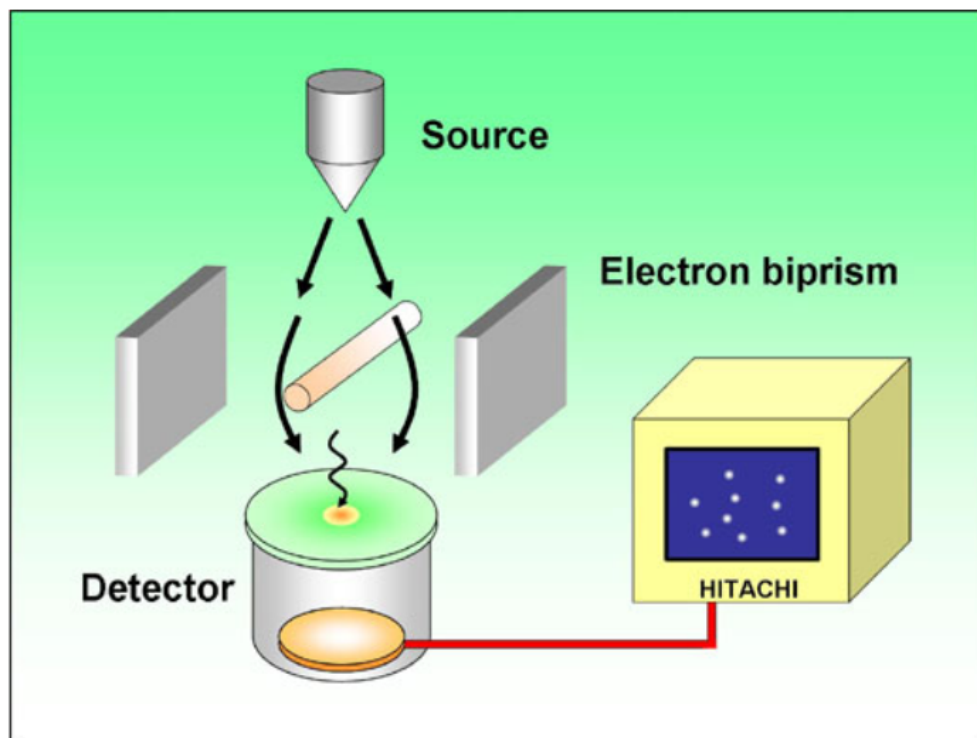


FIGURE 1.2 – Expérience de Tonomura d'interférences d'électrons

Voici le film des résultats de l'expérience, c'est ad-mi-ra-ble ! On distingue bien la dualité onde-corpuscule.

Au début, les électrons sont envoyés un par un et ils percutent l'écran un par un, les impacts sont très localisés et donc on a un comportement plutôt corpusculaire. En revanche, même si les électrons sont préparés dans le même état, on remarque que les points d'impact ne sont pas tous au même endroit et qu'il y a donc un aspect aléatoire dans tout ça. En avançant un peu dans la vidéo, on voit apparaître petit à petit des belles franges d'interférence, comme en optique. L'interfrange réel est de $0.7 \mu\text{m}$.

On peut obtenir le même genre de figures avec des particules plus grosses : des atomes de néons (F. Shimizu, K. Shimizu, H. Takuma ; "Double-slit Interference with ultra cold metastable neon atoms" ; Physical Review A ; 1992) et des molécules de fullerène (O. Nairz, M. Arndt, A. Zeilinger ; « Quantum interference experiments with large molecules » A. J. Phys. 71 (4), avril 2003)

Rôle de l'observateur

Si on a le temps on peut parler de la disparition des franges si on rajoute un observateur :

🚩 *Aslangul, p.323* et <https://toutestquantique.fr/dualite/>

2 Fonction d'onde

🚩 *Basdevant p.34*

On a donc compris que la matière présentait, elle aussi, une dualité onde-corpuscule. Pour développer une théorie là-dessus, il reste à :

1. **Décrire** l'état d'un système. En mécanique, les outils mathématiques utilisés sont par exemple la position et la vitesse.
2. **Passer** de l'objet mathématique à la grandeur physique. En gros, savoir interpréter chaque outil physiquement. En mécanique, c'est facile : la position est très intuitive et la vitesse, définie mathématiquement comme sa dérivée temporelle reste également intuitive.
3. **Établir** les lois d'évolution temporelle de ces objets. En mécanique, c'est la seconde loi de NEWTON généralisée par la relat qui s'en charge.

But

Le but de cette partie est d'aborder les deux premiers points. La troisième partie se chargera du dernier !

2.1 Notion de fonction d'onde et probabilité de présence

🚩 *Sanz p.795*

Selon les résultats des expériences présentées en première partie, et toute la théorie établie par DE BROGLIE, on a vu qu'on pouvait voir les électrons (ou atomes froids) comme des **ondes**. En particulier une onde n'est **pas localisée**, tant qu'un électron n'est pas mesuré on ne peut pas savoir où il se trouve ni où il va atterrir. On a donc besoin d'un **formalisme probabiliste**, afin de dire "il a tant de chance d'être là" et non plus "il est là" comme en mécanique classique.

Définition : Fonction d'onde

On peut associer aux particules étudiées une fonction d'onde à valeurs complexes $\psi(\mathbf{r}, t)$ telle que la probabilité de se situer dans un petit volume $d\tau$ autour de $\mathbf{r}$ s'écrive :

$$dP = |\psi(\mathbf{r}, t)|^2 d\tau$$

Remarques

- On peut donc dire que $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$ est une densité de probabilité
- On donne facilement au module de la fonction d'onde une interprétation physique. mais ψ étant complexe, que peut-on dire de son argument ? Et bien il agit comme la phase d'une onde et c'est évidemment lui qui permet d'obtenir des interférences... Avec simplement $\psi \in \mathbb{R}$, on n'aurait pas pu en avoir
- Puisqu'il s'agit d'une densité de probabilité, on peut exprimer une condition de normalisation sur tout l'espace $\mathcal{D}$:

$$\int_{\mathcal{D}} |\psi(\mathbf{r}, t)|^2 d\tau = 1$$

- Selon cette dernière relation, on remarque que ψ s'exprime en $m^{-3/2}$, ce qui en fait une grandeur difficile d'interprétation... Notons qu'en 1D, ψ ne s'exprime plus qu'en $m^{-1/2}$
- Parfois on parle aussi d'amplitude de l'onde au lieu de fonction d'onde

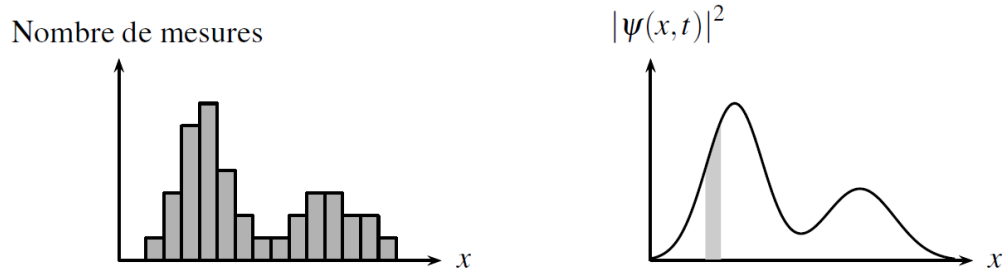


FIGURE 2.1 – Il est important de donner au moins un graphique pour schématiser ce qu'on raconte

Remarques plus pointues

➤ *Basedevant p.35*

- Il faut que ψ soit de carré sommable
- Ajouter les même phase à toutes les fonctions d'onde ne change pas l'état du système. Le système est donc décrit par un ensemble de fonctions d'ondes toutes définie à UNE phase près (et non pas "chacune définie à une phase près"...)
- La mesure est un processus très très particulier qui n'a pas d'équivalent en mécanique classique. La modélisation en fonction d'onde donne une probabilité de mesurer la particule à un endroit. Est-ce une modélisation plus commode mathématique, reflex de notre ignorance sur un processus infiniment complexe, ou bien la physique quantique est-elle intrinsèquement aléatoire ? Mystère !
- On ne peut évidemment pas mesurer directement ψ (et même pas $|\psi|^2$ d'ailleurs),

on ne peut que répéter des mesures afin de s'approcher naturellement de la bonne forme.

Point central de la leçon : la description ondulatoire de la matière abandonne le langage purement déterministe au profit d'un langage probabiliste. Il s'agit d'un réel changement de paradigme. Si la notion d'aléatoire apparaît dans la définition de ψ , en revanche, son évolution et bien décrite par une équation donc on ne peut pas dire que la mécanique quantique est purement probabiliste et non-déterministe !

Historiquement

En vrai c'est SCHRÖDINGER qui, en prenant connaissance des travaux de DE BROGLIE en 1925 qui développe en premier cette notion de fonction d'onde à travers huit articles publiés en 1926. Cependant l'interprétation probabiliste est due à MAX BORN (Nobel 1954) plus tard vers fin 1926, début 1927.

2.2 Retour sur les interférences

🚩 *Basdevant p.37*

Disclaimer

Je vais dire "électron", mais suivant ce qui a été présenté en première partie, on peut plutôt parler d'"atomes froids".

Essayons de comprendre les interférences observées avec ce formalisme... Supposons que l'on connaisse l'amplitude de l'onde diffractée par la fente S_1 uniquement en tout point de l'écran ψ_1 , et de même pour la source S_2 qui nous donne ψ_2 . Lorsque l'électron est envoyé sur les fentes, il est impossible de savoir par quelle fente il est passé. La vision probabiliste nous dit donc de considérer qu'il est passé par les deux fentes à la fois !

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_1 + \psi_2)$$

Le facteur $1/\sqrt{2}$ provient de la normalisation. Alors la densité de probabilité après les fentes s'écrit

$$|\psi|^2 = \frac{1}{2}(|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 + \psi_1\psi_2^* + \psi_1^*\psi_2)$$

$$|\psi|^2 = \frac{1}{2}(|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 + 2\text{Re } \psi_1\psi_2^*)$$

$$|\psi|^2 \neq \frac{1}{2}(|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2)$$

Le dernier terme témoigne des interférences que l'on peut observer, il module le terme sans interférence qu'est $1/2(|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2)$. On peut évidemment faire le lien avec l'expérience des trous d'YOUNG en optique scalaire

$$\begin{array}{ll} \psi & \leftrightarrow \mathbf{E} \\ |\psi|^2 & \leftrightarrow I = |\mathbf{E}|^2 \end{array}$$

De plus, on peut retrouver les différentes observations :

- Si on bouche une fente genre S_2 on a $\psi = \psi_1$ donc juste la figure de diffraction de S_1
- Si on mesure par quelle fente est passé l'électron (par exemple S_1), alors on connaît précisément sa fonction d'onde $\psi = \psi_1$ et on perd les interférences !

2.3 Inégalité d'HEISENBERG

♣ Basdevant p.36

♣ Basdevant p.46

♣ Sanz p.802

♣ Le Bellac p.27

♣ Le Bellac p.249

Puisque la description est probabiliste, on peut, à chaque grandeur physique X , définir une valeur moyenne à partir de la densité de probabilité :

$$\langle X(t) \rangle = \int_{\mathcal{D}} X(\mathbf{r}, t) |\psi(\mathbf{r}, t)|^2 d\tau$$

Ne pas balancer la formule, on s'éloigne du niveau L2 sinon... L'enjeu c'est juste de dire qu'on peut définir une moyenne. De même, on peut définir un écart-type

$$\Delta X = \sqrt{\langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2}$$

Cet écart-type quantifie la précision avec laquelle on connaît la grandeur X . Donner un exemple avec la position, prendre une gaussienne est faire comprendre qu'un faible écart-type implique une connaissance précise de x .

Supposons par exemple que l'on veuille mesurer à la fois la position d'une particule x et son impulsion p_x , il existe une limite de résolution théorique connue sous le nom de principe d'indétermination d'HEISENBERG :

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

Précision

Le terme *limite de résolution* peut prêter à confusion, il ne s'agit pas du tout d'une limite de résolution instrumentale telle que celle causée par la diffraction lumineuse. Il s'agit ici d'une véritable limite à la connaissance parfaite d'un système. Avec ou sans observation c'est pareil.

Avec les mains

Pour comprendre un peu d'où ça sort, considérons une particule évoluant sur un axe à laquelle on associe un vecteur d'onde de DE BROGLIE k_x avec $p_x = \hbar k_x$. Pour une amplitude de présence sinusoïdale, la particule est totalement délocalisée $\Delta x = \infty$, mais on connaît parfaitement la fréquence spatiale $\Delta k_x = 0$. Si on module cette densité par

une gaussienne, la position est connue plus précisément mais le spectre s'étale. Plus la position est connue précisément, plus le spectre est étalé, le cas limite étant l'inverse du premier : dirac spatial $\Rightarrow$ spectre plat.

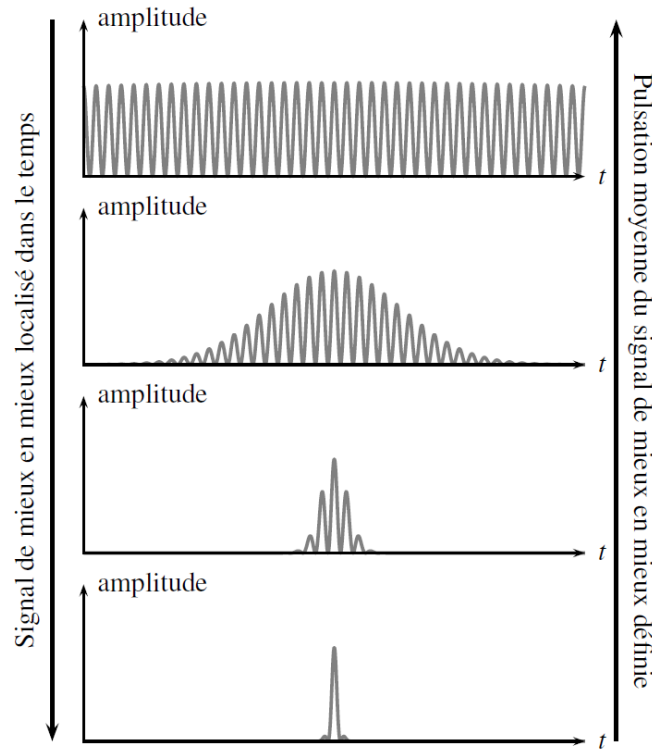


FIGURE 2.2 – Évolution de la précision de la connaissance de la position et de la fréquence spatiale. Faire un truc dans le genre au tableau (ou simulation ? Regressi ?) avec à côté le spectre pour mieux comprendre.

Temps énergie

Il existe le même genre d'inégalité entre le temps et l'énergie (TF temporelle au lieu de spatiale)

$$\Delta\tau\Delta\omega \geq \frac{1}{2} \implies \Delta\tau\Delta E \geq \frac{\hbar}{2}$$

Ce principe stipule donc qu'on ne peut pas connaître de façon infiniment précise la position et la vitesse d'une particule, il y a un compromis. Ce résultat tout à fait contre-intuitif, qui ne trouve aucun équivalent en physique classique a valu de nombreuses querelles entre BOHR et EINSTEIN notamment. EINSTEIN s'amusant à construire des expériences de pensée visant à mettre à défaut ce principe et BOHR s'amusant à trouver la faute de raisonnement. On se rappellera toujours de l'expérience de l'horloge qui émet un photon dont on connaît précisément le temps d'émission ainsi que son énergie, en pesant l'horloge avant et après l'émission. BOHR arrive à s'en sortir en se servant de la relativité d'EINSTEIN, la propre théorie de celui qui pose le problème !

OG

En vrai en est très rarement gêné par ce principe et c'est beaucoup plus souvent les appareils utilisés qui limitent la précision : Usain BOLT est un physicien qui court vite. Disons $10 \pm 0.001 \text{ m} \cdot \dots^{-1}$ pour 100 kg (oui bah on fait de ordres de grandeur), alors on pourra déterminer sa position à $10^{-33} \text{ m} \dots$ Ça va.

En revanche, pour des échelles plus petites par exemple un électron autour d'un atome. Prenons une bonne incertitude sur la vitesse $\Delta v = 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ alors on peut espérer connaître sa position à $\Delta x = 10^{-10} \text{ m}$, ce qui est de l'ordre de grandeur de la taille de l'atome... Donc la notion de trajectoire n'a plus aucun sens !

3 Dynamique de la fonction d'onde

3.1 Cas d'une particule libre

♣ *Basdevant p.36 - 38*

♣ *Le Bellac p.251*

Comme on l'a dit précédemment, la mécanique quantique n'est pas non-déterministe car la fonction d'onde doit vérifier une équation d'évolution temporelle. Comme en électromagnétisme, on peut partir d'une fonction d'onde monochromatique :

$$\psi = \psi_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$$

Notons au passage qu'une telle fonction n'est pas normalisable, mais on l'étudie quand même car c'est un élément de la base de décomposition d'un paquet d'onde. Avec les relations de PLANCK-EINSTEIN, on peut réécrire

$$\begin{cases} \mathbf{p} = \hbar \mathbf{k} \\ E = \hbar \omega \end{cases} \implies \psi = \psi_0 e^{i(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r} - Et)/\hbar} = \underset{\uparrow \text{1D}}{\psi_0} e^{i(px - Et)/\hbar}$$

Or si on considère que cette particule de masse m est libre, alors son énergie est purement d'origine cinétique :

$$E = \frac{\mathbf{p}^2}{2m}$$

Ainsi on peut dériver par rapport au temps ou à l'espace

$$\begin{cases} \frac{\partial \psi}{\partial t} = -i \frac{E}{\hbar} \psi = -i \frac{p^2}{2m\hbar} \psi \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{p^2}{\hbar^2} \psi \end{cases}$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$$

3.2 Équation de SCHRÖDINGER

♣ *Le Bellac p.254*

♣ *Sanz p.812*

On peut généraliser cette équation à une particule dans un potentiel énergétique $V(x)$: en écrivant

$$E = \frac{p^2}{2m} + V$$

On a toujours

$$\begin{cases} i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = E\psi = \left(\frac{p^2}{2m} + V \right) \psi \\ p^2 \psi = -\hbar^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \end{cases}$$

C'est l'équation de SCHRÖDINGER :

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V\psi$$

Remarques

Déterminisme La connaissance du paysage énergétique et d'un état initial non renseigne donc bien sur l'état de la particule pour tous les instants à venir. La fonction d'onde évolue de façon déterministe. Par contre dès qu'on veut mesurer la position de la particule, celle-ci prend une valeur aléatoire.

Complexe L'équation de SCHRÖDINGER fait explicitement intervenir le nombre imaginaire i . La physique quantique est intrinsèquement complexe, ce n'est plus juste un outil de calcul comme en EM ou en RSF.

Linéaire L'équation est linéaire donc on peut lui appliquer le principe de superposition (et on justifie ainsi notre petit raisonnement pour les interférences)

Non relativiste Il s'agit en vrai d'une approximation non relativiste

3.3 Le puit de potentiel

🚩 *Basdevant, p.87*

🚩 *Sanz p.873*

🚩 *Aslangul, p.521*

On applique ici l'eS dans le cadre d'un puit de potentiel infini qui permet de retrouver la quantification de l'énergie et de reboucler sur le modèle de Bohr.

Calculs dans la biblio

Un mot sur ce que c'est physiquement, faire le lien avec un électron dans autour d'un atome.

Questions

Retour sur le calcul de la vitesse de groupe : bornes intégrale, condition sur fonction d'onde (continuité et continuité de la dérivée),

Pourquoi dans fentes d'Young, si on bouche une fente on retrouve figure classique ?

Définition des moyennes ?

Vous avez parlé de ψ_1 et ψ_2 comme étant les fonctions d'onde des particules passées par chacune des fentes. Pourtant vous avez indiqué qu'on ne pouvait pas savoir par où étaient passées les particules. Est-ce correct de parler de ψ_1 et ψ_2 ? Faut-il sommer ces deux fonctions d'onde pour avoir des interférences sur l'écran ?

Comment expliquez-vous à un élève que lorsqu'on ajoute un détecteur de position les interférences disparaissent ? Quel est l'impact sur la fonction d'onde ? Après la mesure de position, dans quel état se trouve le système ?

Comment expliquez-vous à un élève que la particule n'a pas de trajectoire propre contrairement à la mécanique classique ? - Pouvez-vous me parler de la loi de Malus avec des ondes de matière ?

Qu'est-ce qu'une particule libre ? Que devient l'équation de Schrödinger pour une telle particule ?

Comment expliquer que la particule « passe par les deux fentes » ? Que pouvez-vous me dire des problèmes de cohérence spatiale et temporelle si on poursuit l'analogie avec l'optique ?

si je place une fente et que je la rétrécis autant que je veux j'ai un Δx tout petit si je place ensuite une seconde fente très fermée je sélectionne un Δp_x très petit, est-ce que ça contredit Heisenberg ?

Comment faire interférer des atomes (refroidir) ? Quelles sont les plus grosses particules que l'on a fait interférer ? (il faut les refroidir, écrire la longueur d'onde de de Broglie et dire qu'il faut mv faible, refroidissement laser)

Avec quelles autres particules a-t-on déjà fait l'expérience des fentes d'Young ?

C'est quoi le facteur limitant qui historiquement a fait qu'on a mis longtemps avant de voir des interférences en optique ?

Pour l'ODG de la longueur d'onde de De Broglie pour un humain, s'il reste immobile, alors elle devient infinie et il devient quantique ; comment lever ce paradoxe ?

En optique, on a des objets pour manipuler les ondes (miroirs, lentilles ...) y a-t-il des équivalents pour les ondes de matières et comment les réalisent-on ?

Pouvez-vous écrire une équation de diffusion ? Pourquoi est-elle irréversible ? Mais alors Schrödinger aussi est irréversible ?

Qu'est-ce qu'apporte Heisenberg dans le cas d'une particule dans un puits de potentiel comparé à la mécanique classique ?

Si l'évolution de la fonction d'onde est entièrement donnée par Schrödinger, est-on sûr qu'elle restera toujours normée ? Comment peut-on le montrer ?

Vous avez montré Heisenberg à partir des propriétés des TF, comment peut-on le montrer autrement ?

Equation de Schrödinger : est-ce toujours une équation d'onde ? ça peut être un hamiltonien qui décrit un spin

Dans quels cas peut-on considérer une énergie négative ? En choisissant l'origine des énergies.

Schéma interférences des électrons : où sont les interférences ? Quelle est la direction des franges ?

Message à transmettre/ écueil ?

Deux minutes pour expliquer la MQ à quelqu'un dans la rue ? Comportement des corps infiniment petits. Modèle que l'expérience n'a pas mis en défaut.

C'est quoi un laplacien ? Sens physique ? Anomalie locale, écart à la moyenne locale.

La longueur d'onde d'un photon est modifiée avec l'indice du milieu, comment ça se passe pour un électron ?

Tu as dit que la longueur d'onde du neutron est bien plus grande que son rayon, comment on mesure son rayon alors ? Par diffusion. Il faut préciser dans quelle situation car la taille d'une particule est définie par la taille de son paquet d'onde qui dépend de nombreux paramètres. A priori, on cherche à connaître la taille du neutron dans un noyau.

Pourquoi plusieurs anneaux pour la figure de diffraction des électrons ? Pourquoi des anneaux ? Si on prend un cristal anisotrope, qu'est-ce qu'on voit ?

Tu as décrit la fonction d'onde comme une fonction de l'espace et du temps, est-ce qu'on pourrait choisir d'autres paramètres ?

Définition impulsion ?

Est-ce que la définition d'un état stationnaire est vraiment un produit d'une fonction de l'espace et d'une fonction du temps ?

Manips avec paquets d'onde ?

Que se passe-t-il pour le paquet d'onde avec des photons ? pas de masse pour le photon donc pas d'étalement dans le vide.