Rapport sur la LP39 Aspects ondulatoires de la matière. Notion de fonction d'onde.

Présentée par O. Tolfts, binôme F. Pollet.

Correction par L. Sanchez et R. Volk

Ce thème a été réintroduit au lycée en 2011. Le document d’accompagnement des professeurs de lycée rédigé par l’igen, Dualité onde particule, peut-être téléchargé sur eduscol. Il contient un grand nombre de figures, références, concernant des expériences historiques ou récentes sur les interférences d’ondes de matière et sera utile pour les LP38 et LP39.

[**http://eduscol.education.fr/physique-chimie**](http://eduscol.education.fr/physique-chimie)

Un conseil : aller sur internet car les LP38 et LP39 sont au programme de CPGE. Vous trouverez les cours assez bien faits, avec des documents pédagogiques bien élaborés (sur l’exp de shimizu, sur l’exp de Davisson et Germer, sur les interferences des ondes de matière …). Tout ceci vous donnera des idées pour élaborer votre LP. Charge ensuite de trouver où obtenir les images (le doc eduscol et d’autres sur culture science physique vous y aideront). On peut faire des leçons vivantes sur ces thèmes au niveau L2 ou L3. Vous pouvez aussi vous aider d’images trouvées dans la banque de données (ou en ajouter) qui seront disponibles à l’oral.

Se méfier des applets trouvés sur internet. Les résultats de celui utilisé dans la leçon avaient l’air franchement douteux… Ce n’est pas parce que ça a l’air sympa que c’est juste.

Plan présenté :

I-Mise evidence du problème

1) Approche historique

2) Mise en evidence expérimentale

II-Formalisme de la théorie

1) Notion de fonction d’onde

2) Dynamique de la fonction d’onde

III- La mesure

Questions posées :

- Quelques questions concernant les notations, qui étaient floues à plusieurs endroits.

- La fonction d’onde est au carré dans le calcul de la position moyenne, attention aux erreurs!!

- Définir clairement les notations intervenant dans l’inégalité d’Heisenberg, les Δp, Δx sont à définir (soit on le dérive de la TF quand on parle de paquets d’onde, soit directement avec les valeurs moyennes d’opérateurs). Dans tous les cas, faire attention à la représentaion choisie : écrire px en représentation position est faux! Si vous voulez, vous pouvez aussi prendre la TF de la fonction d’onde et écrire l’ensemble en représentation impulsion.

- Ecrire la formule de l’impulsion moyenne et de la position moyenne (par exemple, la réponse attendue n’est pas <p>=mv, mais une écriture à partir de l’opérateur impulsion et de la fonction d’onde).

- L’inégalité est-elle liée au caractère quantique? Cette inégalité se “ressent” si on attribue un comportement ondulatoire à la matière. En effet, si on pense en terme optique avec les relations de TF entre (x,p) ou (ω,t), on “sature” l’inégalité de Heisenberg. Cependant, cette inégalité est valable pour tout couple d’opérateurs conjoints qui ne commutent pas. Cette inégalité reflète le fait que pour deux observables conjoints, les vecteurs propres de l’un ne sont pas vecteurs propres de l’autre (quand on fait une mesure de l’une des grandeurs selon une certaine “grille”, celle-ci ne permet pas de bien décrire l’autre grandeur, cette propriété est inhérente à la mécanique quantique, c’est comme si on se plaçait dans un espace 2D, avec pour axes chacun des observables, et que celui-ci était discret, on a un cadrillage de cellules de taille h/2). Cependant, il n’est pas nécessaire d’avoir une relation de TF pour dériver cette propriété, par exemple, on a cette inégalité entre le nombre de particules d’un état de Fock et la phase ce celles-ci qui s’observe expérimentalement avec un isolant de Mott.

- Quand les spectres de raie ont-ils été observés. 1885 pour la série de Balmer de l’Hydrogène. Le modèle de Bohr date de 1913 (30 ans plus tard), il n’a pas observé le phénomène.

- Qu’est-ce que l’expérience de Davisson et Germer. (si vous présentez la manip de diffraction des electrons, il est indispensable de donner les noms des scientifiques qui l’ont présentés historiquement.)

- Quelle serait la fréquence d’un photon de même longueur d’onde que celle des électrons dans l’expérience montrée. Rayons X.

- Quelle est la formule de la longueur d’onde de de Broglie thermique. Ordre de grandeur pour des atomes à la temperature T=300 K. Comment faire interférer “grosses particules” assimilées à des atomes lourds (voir doc eduscol). Il faut refroidir les atomes.

- pour l’expérience des fentes d’Young, il y a t-il une condition sur la distance d entre les deux fentes? Oui, il faut qu’elle soit du même ordre de grandeur que la longueur d’onde de de Broglie des particules considérées (pour que la particule “sente” la présence des deux fentes)

- Quelle est l’unité du potentiel dans l’équation de Schrödinger ? (des Joules, c’est une énergie potentielle). On parle de potentiel en mécanique quantique, mais c’est un abus de language.

Quelques imprécisions, oubliées lors de la discussion, pouvant conduire à une discussion désagréable :

- Dans l’expérience, le tube est recouvert d’un matériau phosphorescent. Ce n’est pas un “truc photoélectrique”.

- L’énergie d’une particule peut aussi varier continuement en mécanique quantique. C’est le cas pour une particule libre franchissant une marche de potentiel par exemple, dont on peut changer continuement la longueur d’onde.

- Lors de l’énoncé des postulats, il a été mentionné le second principe (au lieu de postulat). C’est un lapsus, mais attention au vocabulaire.

- ‘la mesure perturbe durablement l’état de la particule’, c’est vraiment très imprécis, voire faux si on pousse un peu : l’état de la particule continue d’évoluer après la mesure de celui-ci mais lors de la mesure, l’état de la particule s’effondre sur l’un des vecteurs propres de l’observable.

Commentaires généraux :

La leçon a été trop courte (42 minutes au lieu de 50) malgré un ralentissement évident lorsqu’Oliver s’est rendu compte qu’il serait très court. Comme le prouve la dernière partie très décousue, avec pour titre “la mesure”, et le postulat de la mesure énoncé rapidement et des grandeurs comme position, impulsion moyenne jetées au tableau sans lien...

La leçon préparée est donc trop courte, et doit être enrichie en contenu. La présentation a été beaucoup trop imprécise avec beaucoup d’éléments présentés à l’oral de manière vague sans que rien ne soit écrit au tableau. Définir proprement les notations sans tomber dans le calcul allongerait déjà la leçon tout en évitant le premier 1/3 des questions.

S’il est possible de sortir du plan usuel de ces dernières années (même si celui-ci et ses variantes ont connu de francs succès à l’oral de l’Agrégation), il est néanmoins fort souhaitable voire indispensable de parler des différentes notions:

-Expérience de Davisson et Germer (surtout lorsque l’on présente la manip de diffraction)

-les fentes de Young et interprétation soit en terme probabiliste soit avec l’aide de l’Optique en prérequis,

-la fonction d’onde et son interprétation probabiliste, avec les conditions de normalisation, la perte du concept de trajectoire, principe de superposition,

-principe d’indetermination de Heisenberg (et postulat de la mesure avec effondrement du paquet d’onde possible)

-dynamique de la fonction d’onde(equation de Schrödinger et ses caractéristiques : dire qu’elle est reversible par rapport au temps si tant est que le potentiel le soit, dire que c’est pour un système isolé, equation de dispersion des ondes de matière)

-paquet d’onde (vitesse moyenne, TF)

-application à un potentiel choisi.

Pour enrichir le contenu, les possibilités sont nombreuses :

- Parler des conditions aux limites lors de l’exposé de l’équation de Schrödinger est indispensable (a été oublié).

- Insister plus sur le passage entre l’optique et les ondes de matière, utiliser plus la fonction d’onde et l’équation de schrödinger.

- Franchissement d’une marche de potentiel par une particule libre. Une partie des particules est réfléchie dans le cas quantique, la longueur d’onde change lors du franchissement de la marche.

- Particule confinée dans un puits de potentiel: introduction à la quantification par analogie avec le problème de la corde de melde.

- Interférences entre atomes (exp de shimizu, 1992, voir document eduscol). Longueur d’onde thermique. Nécessité du refroidissement.

A éviter lorsque l’on n’est pas très “solide” sur la quantique : la discussion sur la mesure. Notion compliquée selon les correcteurs et à maitriser impérativement si on veut en parler. On pourra aussi parler de décohérence ou de matrice densité si on est à l’aise (comme autre description d’un systeme quantique).

Il faut aussi ajouter des ordres de grandeurs qui permettent d’étayer le discours sur la différence mécanique classique/quantique (OG de longueur d’onde/longueur caractéristique du problème, OG pour l’inégalité de Heisenberg pour montrer que pour des gros objets le concept de trajectoire est toujours pertinent – Basdevant/Dalibard).

Commentaires de chaque partie :

I.1) Approche historique

Intéressant malgré beaucoup d’imprécisions. Bohr n’a pas observe les raies des atomes. Il a propose des règles de quantification permettant d’interpréter les spectres les plus simples (hydrogénoïdes). Voir le livre de Cagnac (ou Aslangul) pour un historique.

I.2) Mise en evidence expérimentale

L’expérience est très bien, mais a été exposée un peu trop rapidement. Le rôle des deux alimentations n’a pas été expliqué (chauffage, et accélération). Il aurait été intéressant de varier la tension, ce qui modifie le système d’anneaux et le relier à la longueur d’onde en fonction du potentiel, ici on peut mettre sur un transparent une formule d’optique pour interpreter la figure en terme ondulatoire.

L’analyse quantitative doit marcher, il serait bien de la compléter par la comparaison à un photon de meme longueur d’onde (rayons X). Faites les calculs d’ordre de grandeur en préparation pour éviter que ça ne “marche pas” au tableau, avec le stress c’est possible d’oublier quelque chose mais si vous le rectifiez c’est bon.

analogie optique :

Il est dommage que cette partie ait été un peu floue, avec un tableau seulement rempli à moitié pour l’analogie.

Ne pas oublier que le photon est en prérequis, et connu depuis le lycée. On peut donc s’en servir pour faire le lien, par exemple en écrivant la structure d’onde plane soit en variable (k,omega), soit en variable (p,E) : E=E0 exp i(px-Et)/hbar, avant de généraliser à la matière.

II-Formalisme de la théorie

Le choix fait a été de donner l’équation de Schrödinger sans justification qualitative. C’est tout a fait possible. Parler de normalisation est intéressant et nécessaire. Mais il ne faut pas oublier de donner les conditions aux limites qui portent sur la fonction d’onde et sa dérivée à savoir le courant de probabilité.

Il serait bien de se servir plus de l’équation, et en particulier, de retrouver les caractéristiques de l’onde plane avec la relation pour la particule libre, et/ou lorsqu’elle est plongée dans un potentiel constant. Naturellement, une onde plane ne représente pas une particule localisée, mais plutôt un faisceau de particules (comme le faisceau d’électron). Une particule localisée est représentée par un paquet d’onde, cela ouvre sur les inégalités de Heisenberg. L’optique ondulatoire étant en prérequis, on pourrait aller vite sur le paquet d’onde.

Interférences d’ondes de matière

Cette partie a été bien présentée. Nous soulignons qu’il faut faire attention aux logiciels de simulations trouvés sur internet, celui utilisé en leçon donnait un résultat douteux. Les figures modernes (Neon, electrons, photons) sont disponibles sur le doc de l’igen disponible sur educscol et dans la plupart des livres (Cagnac, Aslangul,…). A noter que le CD du Basdevant semble poser des problèmes avec Java. Le mentionner (poliment) aux techniciens le jour J assez rapidement, il de leur ressort de trouver une machine qui peut le faire marcher. Avec les figures en backup cela sera suffisant. Utiliser un code en Python serait sans doute très bien vu (Plutôt pour faire un graphe de la fonction d’onde dans un certain potentiel choisi dans une partie sur la dynamique de la fonction d’onde).

*A partir de ce moment, la leçon était très décousue… Les idées s’enchainaient sans lien entre elles…*

Problèmes intrinsèques de la mesure

Cette partie, délicate, n’est pas indispensable. On peut s’en tenir aux relations de Heisenberg à condition de les utiliser sur des cas concrets.

Pour ces différentes observations nous proposons la note C.