

Agreg externe de physique-chimie
LP39 - Aspect ondulatoire de la matière - Notion de fonction d'onde
ENS Lyon - 09 décembre 2016

Présentation : Alexia Barbosa De Lima - Pierre Ragueneau

Correcteurs : A.Louvet - J.Marteau

Plan de la leçon présentée (50min d'exposé environ) :

1. Découverte de l'aspect ondulatoire de la matière
(Analogie Optique-Mécanique, Expérience de Davisson et Germer, Ordre de grandeur du comportement ondulatoire)
2. Un outil : la fonction d'onde
(Illustration à l'aide du biprisme de Fresnel, Equation de Schrödinger, Paquets d'ondes et incertitudes d'Heisenberg, Particule dans un puits)

Questions posées :

- Quel(s) phénomène(s) observé(s) nécessitent-ils l'introduction d'une théorie ondulatoire de la matière (à l'instar de l'effet photoélectrique pour amener une théorie corpusculaire du rayonnement) ?
- Le fait que la fonction d'onde soit complexe est-il lié à une propriété intrinsèque de l'équation de Schrödinger par exemple, ou est-ce un simple artéfact technique ?
- Quelle est la dimension du "potentiel" introduit dans l'équation de Schrödinger ?
- Discuter l'hypothèse de stationnarité dans le cas de la particule dans un puits de potentiel.
- Pourquoi parle-t-on d'équation aux valeurs propres dans le cas de Schrödinger stationnaire ?
- Retrouver l'expression de l'équation de Schrödinger stationnaire.
- Quelles sont les différences de comportement entre des systèmes classique et quantique, d'énergie $E > 0$ constante "passant au-dessus" d'un puits de potentiel de profondeur finie $-V_0$ et de largeur a (effet de type Ramsauer) ?
- Discuter les conditions expérimentales de la diffusion de Bragg réalisée en démonstration (en particulier qu'observerait-on si le milieu diffuseur était non pulvérulent ?)
- Discuter l'expérience d'interférences d'électrons avec le biprisme de Fresnel, en particulier pourquoi les distributions des électrons sont de type "Gauss" plutôt que "Dirac". Les conditions initiales de préparation des électrons n'ont pas l'air très bien maîtrisées.

Commentaires généraux :

La présentation a bien tenu dans le temps imparti malgré un plan en 2 paragraphes uniquement. Les réponses aux questions n'ont pas été tout à fait satisfaisantes, surtout en ce qui concerne le puits de profondeur finie dans lequel la candidate a fini par "faire tomber" la particule. L'impression laissée peut être désastreuse en présence du jury du concours.

Sur la forme, la présentation est plutôt bien menée, avec une volonté affichée d'exploiter une petite expérience de cours (calcul de la longueur d'onde de Bragg des électrons diffusés par une poudre de graphite), de proposer des ordres de grandeur (longueurs d'onde de

différents systèmes, comparaisons avec les dimensions typiques de ces derniers etc) et de présenter des expériences (biprisme de Fresnel électronique) pour illustrer le propos.

Sur le fond, ces choix donnent le sentiment désagréable que l'on passe à côté du cœur de la leçon qui doit être de mettre en avant la fonction d'onde et les changements de paradigme qu'impliquent l'abandon du déterminisme et l'introduction d'un langage probabiliste pour la détermination des propriétés du système. Après l'introduction de la dualité onde-corpuscule pour le rayonnement lors de la leçon précédente, cette leçon doit réellement présenter les **concepts** de la mécanique quantique. L'introduction du langage probabiliste et du principe d'Heisenberg stipulant que l'on ne peut avoir, simultanément, autant d'information que l'on veut à la fois sur la position et l'impulsion d'un système, doit clairement faire ressortir que l'on sort du cadre de la mécanique classique Newtonienne, déterministe. L'analogie optique-mécanique qui ouvre cette leçon, par une comparaison entre principe de Fermat et principe de moindre action, ne peut pas servir de fondement crédible pour justifier des changements théoriques d'une telle importance. Elle ouvre en outre la porte à une pluie de questions sur ces deux principes délicats.

Il est probablement plus pertinent de montrer quelques phénomènes d'interférences électroniques (vidéos d'interférences de type Young avec des sources d'électrons particule par particule, expérience de cours de type Davisson et Germer etc) et de mettre en évidence le besoin d'une approche théorique différente, duale, analogue à la théorie ondulatoire du rayonnement (et donc de l'optique). La construction de figures interférentielles "particule par particule" présente l'avantage de pouvoir introduire la notion de distribution de particules, de probabilité de présence et donc de fonction d'onde.

Il est trop ambitieux dans cette leçon introductive de parler des caractéristiques de la mesure en mécanique quantique, des modifications induites sur le système mesuré etc. Une fois la fonction d'onde introduite, on peut parler de la nécessité d'un principe d'évolution et engager les chapitres sur Schrödinger. Retrouver la forme de Schrödinger stationnaire (peut être proposé en exo) puis traiter des exemples (particule libre, particule dans un puits infini etc) et discuter d'Heisenberg via les propriétés du paquet d'ondes est trop ambitieux. On peut :

1. exploiter l'analogie avec la physique des ondes ("puits infini = corde de Melde", "confinement = quantification", "Schrödinger stationnaire = équation harmonique" etc)
2. déléguer certaines parties plus techniques de ce programme aux autres leçons : le paquet d'ondes n'est nullement spécifique à la mécanique quantique, il est vu en électromagnétisme et les propriétés d'extension du paquet d'ondes servent pour retrouver Heisenberg

Les premières différences classique/quantique s'illustrent déjà (bien avant de parler d'effet tunnel ou autre) sur le franchissement d'une barrière de potentiel V_0 par une particule d'énergie $E > V_0$ (existence d'une particule réfléchi etc). Ceci peut être démontré rapidement par le candidat qui met ainsi en avant son aisance technique. Il est aussi important d'ouvrir sur les domaines "courants" dans lesquels se manifeste la mécanique quantique (la chimie par exemple, qui est en général connue des étudiants et manipulée très tôt dans les programmes sous "forme quantifiée" avec des niveaux d'énergie, des électrons spin up-spin down etc).

Compte-tenu de l'ensemble des remarques, tant sur la forme que sur le fond, nous proposons une appréciation de niveau B⁺.