Correcteurs : Lucile Sanchez & Benjamin Besga
(benjamin.besga@ens-lyon.fr)

F. POLLET

Extraits des commentaires du jury

2017 : Cette leçon est une leçon de physique et ne doit donc pas se limiter à des calculs.

2016 : Le lien entre le confinement et la quantification doit être explicité.

2015 : Cette leçon peut être l'occasion de développer des arguments qualitatifs et des calculs simples permettant de donner des ordres de grandeur dans des domaines divers de la physique avant d'envisager des applications élaborées.

2013 : Confinement de l'électron et quantification de l'énergie. Exemples.

2009-2010 : Une justification physique des conditions aux limites adoptées est attendue.

2008 : Le modèle de Bohr a maintenant une importance surtout historique. Il est évidemment possible de l'aborder mais il n'est pas un « passage obligé » pour aborder la quantification. L'interprétation des principaux résultats de la théorie quantique de l'atome d'hydrogène est primordiale.

Points importants

Le message de la leçon qui est que **le confinement d'une particule quantique conduit à une quantification de son énergie** doit apparaître clairement et représente le fil conducteur de la leçon.

Une progression envisagée consiste à partir de l'observation de la quantification (spectre de l'hydrogène par exemple), de comprendre la quantification des solutions à l'aide d'une analogie classique (corde de Melde), et d'un calcul quantique (comme le puits infini). Il est intéressant de revenir à la quantification de l'énergie observée au départ (en développant par exemple la théorie quantique de l'atome d'hydrogène) avant d'ouvrir la leçon sur des applications récentes (utilisation du confinement pour désigner les propriétés optiques de boîtes ou puits quantiques par exemple).

Remarques sur la leçon présentée

La leçon était bien présentée et le choix des sujets abordés cohérents. L'utilisation des transparents était satisfaisante et les calculs bien menés. Un travail supplémentaire sur les transitions permettrait de suivre le fil conducteur *observation de la quantification* → *explication par le confinement* → *applications*. La leçon telle que prévue initialement était cependant trop longue :

1. Mise en évidence de la quantification (spectres de raies, modèle de Bohr, exp. de Franck et Hertz)
2. Origine de la quantification : le confinement (états liés / de diffusion, condition aux limites de la fonction d'onde, le puits de potentiel infini, puits de potentiel fini)
3. Applications (ions moléculaires colorés, atome d'hydrogène)

Il est difficile de traiter tous ces sujets correctement et des choix doivent être faits.

Première partie

La présentation de spectres de raies est intéressante (on peut ajouter les spectres d'absorption), elle motive l'intérêt de la leçon. Commencer la leçon par une petite expérience permettant de visualiser directement le spectre obtenu avec une lampe à hydrogène serait un vrai plus.

Le modèle de Bohr prend beaucoup de temps, si vous choisissez de le traiter il faut l'introduire correctement et ensuite en expliquer les limitations. Il peut être intéressant de se contenter d'un point de vu purement empirique dans la première partie, en mentionnant simplement la formule de Rydberg.

La présentation de l'expérience de Franck et Hertz était claire (description du montage expérimental un peu rapide), le message fort étant que la quantification de l'énergie dans les systèmes atomiques ne fait plus aucun doute !

Deuxième partie

La transition doit se faire sur la recherche de l'origine de la quantification. L'analogie avec la physique des ondes trouve naturellement sa place ici. La discussion des états de diffusion autour d'un potentiel de type Lennard-Jones est un peu artificielle et n'est pas centrale dans cette leçon. Une particule dans un puits de potentiel infini est parfaitement adapté pour introduire la notion de confinement, et mener les calculs au tableau.

La discussion des conditions aux limites a été bien réalisée, elle n'est cependant pas très motivée en arrivant avant l'exemple du puits infini, et peut être réalisée pendant le calcul du puits infini.

L'analogie avec la corde de Melde est importante et a été correctement traitée, en précisant bien la différence fondamentale qu'en mécanique quantique la grandeur physique est la densité de probabilité $|\psi|^2$. Il faut ensuite insister d'avantage sur la quantification des solutions pour la corde, et la quantification de l'énergie dans le cas quantique.

Le calcul d'une particule dans un puits quantique infini a été très bien mené, il est impératif de discuter les résultats de ce dernier (énergie de confinement non nul pour le fondamental, dépendance avec la largeur du puits la masse de la particule,...). Il est aussi intéressant de placer les niveaux d'énergie sur un diagramme au tableau pour insister visuellement sur la quantification.

Enfin, le calcul du puits fini n'est pas forcément nécessaire à ce stade et peut être mené plus tard si l'on traite par exemple le cas des ions moléculaires colorés.

Troisième partie

La détermination de la couleur des ions moléculaires à partir de la largeur du puits est intéressante et a été globalement bien présenté (un peu trop rapidement). Cependant comme seule application c'est un peu dommage.

La théorie quantique de l'atome d'hydrogène est la pierre angulaire de la physique atomique (et même moléculaire), de plus, sa présentation permet de reboucler avec les spectres présentés en introduction. Le confinement est assuré par un potentiel (coulombien) différent des puits considérés précédemment. Un traitement précis de ce calcul et de ses conséquences est sûrement un gros point positif dans cette leçon. Il est plus facile de commencer la troisième partie avec l'atome d'hydrogène, et de finir sur une seconde application. La transition pour la troisième partie peut alors être que la formule de l'énergie d'une particule dans un puits infinis ne rend pas compte correctement des spectres observés.

On peut ensuite considérer les boîtes ou puits quantiques semi-conducteurs comme une dernière application qui illustre parfaitement la notion de confinement et sa conséquence sur les niveaux d'énergie. La notion d'atome artificiel en général décrit un système de matière condensé dans lequel un défaut ou une nano-structure permet de confiner des électrons (ou des paires électrons-trous) de façon contrôlée pour obtenir des transitions optiques discrètes à la longueur d'onde désirée. Une discussion sur les puits quantiques semi-conducteurs peut par exemple être trouvée dans *Ngô, Physique des semi-conducteurs et Basdevant et Dalibard, Mécanique quantique* p. 85. Pour aller plus loin voici un lien vers un article du BUP n°927 sur les nano-lasers :

<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2010/04/refdp201021p26.pdf>

Questions complémentaires

- Pourquoi le courant mesuré dans l'expérience de Franck et Hertz augmente t-il globalement avec le potentiel de grille ? On collecte des électrons qui n'ont pas interagi avec les atomes, et à grand potentiel on peut même avoir un courant du à l'ionisation des atomes. Est il possible de voir d'autre transition de l'atome de mercure que celle à 4,9 eV ? Oui, à priori il est possible de voir d'autre transitions et dans l'expérience historique Franck et Hertz ont aussi mis en évidence une seconde transition.
- Pourquoi on passe de l'équation de Schrödinger à l'équation indépendante du temps ? Il faut bien justifier que l'on cherche des solutions stationnaires car le potentiel ne dépend pas du temps (séparation des variables).
- Est-il possible d'avoir un état de diffusion normalisé ? Oui, bien sûr, en formant un paquet d'onde.
- Peut on mesurer la particule dans la barrière de potentiel d'un puits de hauteur finie ? Oui (onde évanescente).
- Dans le cas des ions colorés, combien d'électrons sont considérés dans la description ? La description à l'aide d'une la barrière infinie est elle justifiée ?