I) Quantification de l'énergie.

1) Spectre de raies de l'hydrogène.

⇒ Expérience / Slide ou vidéo où on met en avant le spectre de H.

Au cours du XIX^e siècle, on remarque que le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène n'est pas continu mais est au contraire constitué d'un ensemble discret de raies.

Em 1888 : Rydberg propose une loi phénoménologique qui relie entre elles les différentes longueurs d'onde de ces raies :

$$\boxed{\frac{1}{\lambda_{n,p}} = R_y\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2}\right)}$$

n ≡ numéro de la série.

p un entier > n.

R_y ≡ constante de Rydberg $= 1,097 \times 10^{-7}\ m^{-1}$

Exemple : Visible : Série de Balmer ($n = 2$).

UV : Série de Lyman ($n = 1$).

⇒ On observe ces mêmes spectres de raies pour les autres atomes.

⇒ Bohr parvient à expliquer cette formule en 1913 grâce à son modèle de l'atome dans lequel les orbitales atomiques, et donc l'énergie des électrons est quantifiée.

2) Expérience de Franck et Hertz

Expérience qui a prouvé la quantification de l'énergie des atomes.

Slide avec le schéma de l'expérience + la courbe $i = f(V)$.

Explication dispositif :

→ Tube en verre contenant de la vapeur de mercure et 3 électrodes métalliques.

→ • 1ère électrode = filament chauffé d'où sont émis des e^- d'une vitesse négligeable.

• 2ème électrode : grille qui laisse passer les e^-, portée à un potentiel V_g qui permet d'accélérer + ou − les électrons (on contrôle donc directement leur énergie).

• 3ème électrode : elle permet de collecter les électrons au bout du tube. Son potentiel est légèrement inférieur à V_g.

→ Principe : • On envoit des e^- plus ou moins énergétique dans le tube en contrôlant leur énergie via V_g.

• les e^- vont subir des chocs avec les atomes de mercure :

→ si les chocs sont élastiques, les e^- ont l'NRJ suffisante pour parvenir à la 3ème électrode : on détecte un courant.

→ si les chocs sont inélastiques (une partie de l'NRJ est transmise aux atomes) les électrons restent piégés : on ne détecte pas de courant.

→ Commentaire de la courbe :

- On voit que les électrons ne cèdent de l'énergie aux atomes que pour des valeurs quantifiées de leur énergie.
- L'intéraction n'est possible que si l'e^- a une énergie supérieure ou égale à une différence d'énergie entre 2 niveaux de l'atome.
- De plus, l'atome se désexcite ensuite en émettant dans l'UV, ce qui a été détecté.

→ Prix Nobel en 1925 pour la preuve directe de la quantification des atomes.

Transitions : A ce stade, on peut se demander pourquoi on vient de passer 10 min à parler de quantification de l'NRJ dans une leçon qui s'intitule "Confinement quantique". Nous allons voir dans la partie suivante que nous avons déjà quelques outils pour répondre à cette question.

II Quantification et confinement.

1) Approche classique : la corde de Melde.

Slide : Avec corde de Melde + formules.

⇒ dire que les conditions aux limites, qui impose un confinement des ondes sur la longueur de la corde impliquent une quantification des vecteurs d'ondes et des modes propres.

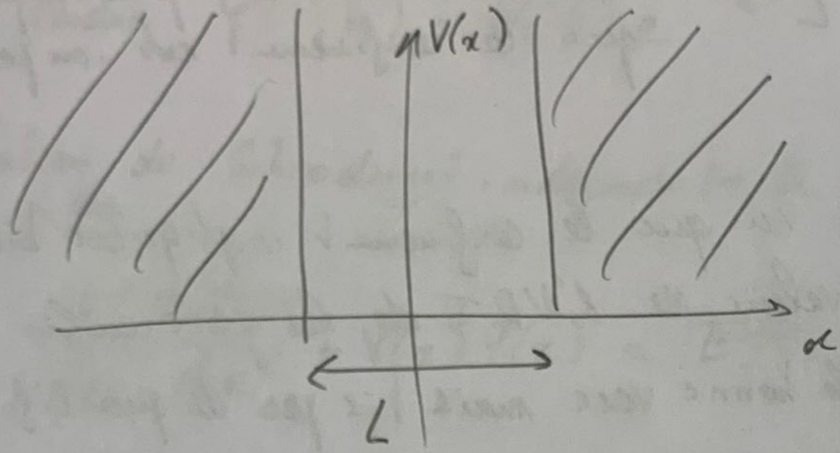
⇒ Les modes propres sont discrets.

⚠ Cependant, contrairement aux exemples de la partie précédente, l'énergie d'un mode n'est pas quantifiée, elle peut être quelconque puisque elle dépend de l'amplitude.

2) Inégalité d'Heisenberg.

Inégalité de Heisenberg : $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$

On considère une particule confinée dans un puit de potentiel infini.



. Particule confinée $\Rightarrow \Delta x \leq L$.

. On suppose l'impulsion nulle en moyenne : la particule se propage autant dans les 2 directions : $\langle p \rangle = 0$.

$$\Rightarrow \Delta p = \sqrt{\langle p^2 \rangle}$$

Ainsi : $$\Delta p \geq \frac{\hbar}{2L}$$

$$\Rightarrow \langle p^2 \rangle \geq \frac{\hbar^2}{4L^2}$$

Or $\langle E \rangle = \frac{\langle p^2 \rangle}{2m}$ car $V(x) = 0$ dans le puits.

$$\Rightarrow \boxed{\langle E \rangle \geq \frac{\hbar^2}{8mL^2}}$$

• <u>Commentaires :</u>

→ le <u>confinement</u> interdit des valeurs d'énergie à la particule : <u>énergie minimale</u>.

→ $\langle E \rangle \propto \frac{1}{L^2}$ ⇒ Restriction d'autant plus importante que le confinement est important.

<u>Transition</u> : On a vu que le confinement impliquait bien une condition sur la valeur de l'NRJ de la particule.

⇒ On est sur la bonne voie mais tjs pas de quantification.

⇒ On va donc traiter le problème de manière quantitative.

3) Puits de potentiel infini

Equation de Schrödinger : $i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r},t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla \Psi(\vec{r},t) + V(\vec{r},t)\Psi(\vec{r},t)$.

Ici : $V(\vec{r},t) = V(x)$

$\Rightarrow$ On cherche $\Psi(\vec{r},t) = \varphi(x) e^{-i\frac{E}{\hbar}t}$

$\Rightarrow$ Equation de Schrödinger indépendante du temps :

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} + V(x)\varphi(x) = E\varphi(x)$$

Or, pour $x \in [0,L]$, $V(x) = 0$.

$$\Rightarrow \boxed{-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} = E\varphi(x)}$$

Conditions aux limites :

→ Potentiel infini $\Rightarrow \varphi(x) = 0$ hors du puits.

→ Continuité de $\varphi(x)$ (car la densité de proba est continue).

On passe le calcul :

$$\Rightarrow \boxed{\varphi_n(x) = A_n \sin(k_n x)} \text{ avec } \boxed{k_n = n\frac{\pi}{L}}$$

Insister sur le fait que, comme pour la corde de Melde, c'est les conditions aux limites, ie le confinement qui impliquent la quantification.

Réinjectons dans l'équation :

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\left(-k_n^2 \times \varphi(x)\right) = E_n \varphi(x)$$

D'où $$\boxed{E_n = -E_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2mL^2} n^2}$$

Commentaires :

→ Energies quantifiées : nue

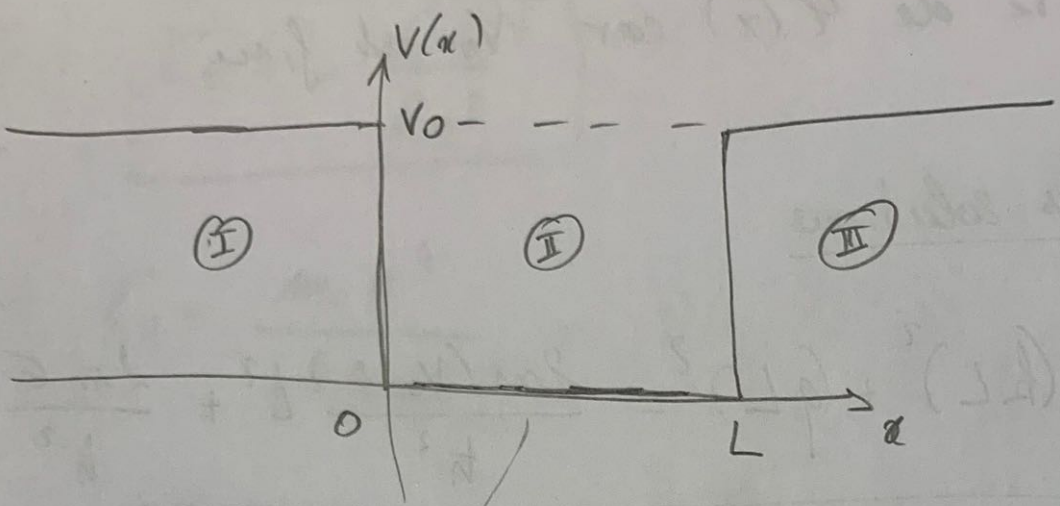
→ Proportionnelles à n^2

→ A un facteur numérique près on a l'expression de E_1 obtenu par inégalité d'Heisenberg.

Slide / ⇒ retour sur l'analogie.

III Vers des systèmes quantiques réels.

1) Puits fini



Particule confinée : $E < V_0$.

De manière analogue : on cherche une solution stationnaire.

$$\Rightarrow -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} + (V(x) - E)\varphi(x) = 0$$

I et III : $-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} + (V_0 - E)\varphi(x) = 0$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} - q^2\varphi(x) = 0} \quad \text{avec} \quad \boxed{q = \sqrt{\frac{2m(V_0-E)}{\hbar^2}}}$$

II : $\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} + k^2\varphi(x) = 0$ avec $\boxed{k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}}$

Conditions aux limites :

→ continuité de $\varphi(x)$.

→ continuité de $\varphi'(x)$ car V_0 est fini.

Slide avec les solutions.

D'autre part : $(kL)^2 + (qL)^2 = \frac{2m(V_0-E)}{\hbar^2}L^2 + \frac{2mE}{\hbar^2}L^2$

$$\boxed{(kL)^2 + (qL)^2 = \frac{2mV_0}{\hbar^2}L^2}$$

Equation d'un cercle.

⇒ les solutions acceptables doivent vérifier cette condition.

⇒ quantification.

Commentaires :

→ On a plus une infinité de solution, mais plus le puits est profond et plus on a d'énergies permises.

→ Les fonctions d'onde débordent de la boîte.

2) Retour sur l'atome d'hydrogène :

Pour un électron dans un potentiel Coulombien, l'énergie radiale est :

$$\boxed{E_n = -\frac{E_H}{2n^2}}$$

Avec $E_H = \dfrac{m_e q^4}{\hbar^2 (4\pi\varepsilon_0)^2} = 27,21\ eV$.

Si on prend 2 niveaux $\begin{cases} p \\ n \end{cases}$ alors :

$$\Delta E = E_p - E_n = \frac{E_H}{2}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2}\right)$$

Puis en utilisant $\Delta E = \dfrac{hc}{\lambda}$ on obtient :

$$\boxed{\frac{1}{\lambda} = \underbrace{\boxed{\frac{E_H}{2hc}}}_{R_H}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2}\right)}$$

Confinement quantique

- Niveau : L2 (dans le bloc d'intro de la MQ / aspect ondulatoire)
- Prérequis :
  - Notion de fonction d'onde
  - Inégalité d'Heisenberg
  - Equation de Schrödinger
  - Ondes . Corde de Melde

- Plan :

  I/ Quantification de l'énergie

  II/ Quantification et confinement

  III/ Vers des systèmes quantiques réels

I) 1/ Spectre de raies de l'hydrogène

⇝ manip lampe H_2 + prisme à vision directe + écran

→ on voit l'aspect discret du spectre

⇒ en 1888 : Rydberg énonce (approche phénoménologique)

$$\frac{1}{\lambda} = R_y\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) \quad (n,m) \in \mathbb{Z}^2 \quad m > n$$

↳ constante de Rydberg

on veut une vraie explication pour la quantificat°

I. 2/ Expérience de Franck et Hertz

⇝ DIAPO : pour expliquer la manip.

→ on envoit des électrons avec une énergie incidente connue et on regarde ce qu'on reçoit sur une plaque collectrice (selon les chocs...)

→ courbe tension/courant qui montre la quantification de l'énergie (⇝ forme de résonance ?)

quel est le lien avec le confinement ?

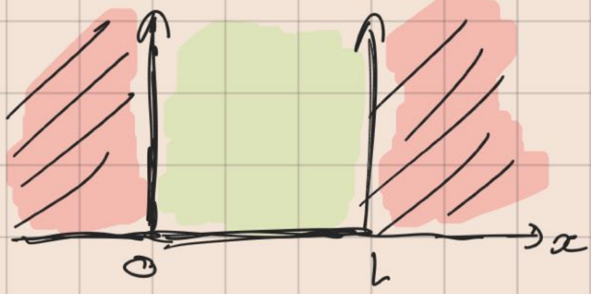
II.1/ Approche classique : corde de Melde

On avait vu que les conditions aux limites imposaient un confinet des ondes entre les 2 extrémités mais aussi une quantification des vecteurs d'onde (⚠ pas sur l'énergie ici)

II.2) Inégalité d'Heisenberg

⇝ approche semi qualitative

On considère un e^- piégé dans un puits de potentiel infini



Inégalité d'Heisenberg :

$$\Delta x \Delta p \gtrsim \frac{\hbar}{2}$$

La particule est confinée : $\Delta x \leqslant L$

En supposant que $\langle p \rangle = 0$, alors $\Delta p = \sqrt{\langle p^2 \rangle}$

Ainsi :

$$\langle p^2 \rangle \gtrsim \frac{\hbar^2}{4L^2}$$

Puisque $V=0$ dans le puits : $\langle E \rangle = \dfrac{\langle p^2 \rangle}{2m}$

Donc $\boxed{\langle E \rangle \gtrsim \dfrac{\hbar^2}{8mL^2}}$

Donc on a montré que le confinement spatial de la particule va restreindre les valeurs accessibles de l'énergie.

⇒ + le confinement est important, + l'énergie minimale sera importante

mais E n'est pas pour autant quantifiée !

II.3) Résolution avec l'équation de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r},t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\Psi(\vec{r},t) + V(\vec{r},t)\Psi(\vec{r},t)$$

Ici, $V(\vec{r},t) = V(x)$ → 1D on considère les solut° stationnaires $\varphi(x)$

$$\Rightarrow -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\varphi}{dx^2} + V(x)\varphi(x) = E\varphi(x)$$

Or $V(x) = 0$ dans le puits, donc il vient :

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} = E\varphi(x)$$

Et aux limites :

→ le potentiel est infini donc $\varphi(x) = 0$ en dehors du puits

→ $\varphi(x)$ doit être continue

Donc $\varphi(x) = A_n \sin\left(k_n x\right)$ avec $k_n = n\frac{\pi}{L}$

↳ la quantification apparaît

on introduit cette solut° dans l'éq. de Schrödinger pour obtenir la relation de dispersion

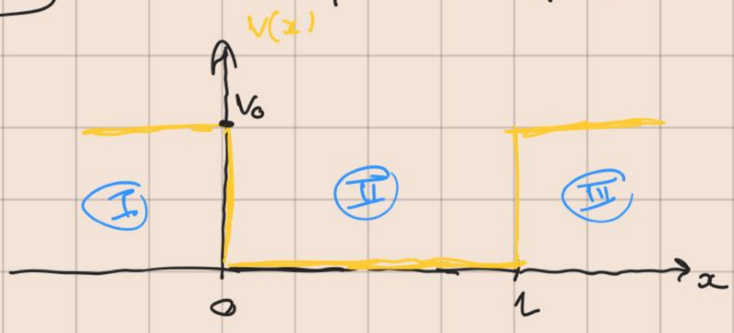
$$E = E_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} = \frac{\hbar^2\pi^2}{2mL^2}n^2$$

Commentaires :

- énergie quantifiée
- $\propto n^2$: les niveaux s'éloignent les uns des autres
- A un facteur numérique près, on retrouve l'énergie minimale obtenue par l'approche semi-classique

Donc on vient de voir que si potentiel infini, on a bien confinement ⇒ quantification mais pour les autres potentiels ?

III.1 Puits de potentiel fini



→ on découpe en 3 zones

- pour I, III :

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\varphi}{dx^2} + (V_0 - E)\varphi = 0 \Rightarrow \text{on introduit } q^2 = \frac{2m(V_0-E)}{\hbar^2}$$

$$\Rightarrow \frac{d^2\varphi}{dx^2} - q^2\varphi = 0$$

- pour II :

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\varphi}{dx^2} - E\varphi = 0 \Rightarrow k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$$

$$\Rightarrow \frac{d^2\varphi}{dx^2} + k^2\varphi = 0$$

- Avec les conditions aux limites :
  - φ est continue
  - V est fini donc $\frac{d\varphi}{dx}$ est continue

→ On trouve des solutions paires et des solutions impaires.

- $(kL)^2 + (qL)^2 = \frac{V_0{}^2 2mL^2}{\hbar^2}$ ⇝ autre condit° qui restreint les solutions acceptables

→ python : tracer les intersections

⇝ nombre fini d'intersect° → quantification de l'énergie

III.2 Retour sur l'atome d'hydrogène

Pour un puits de potentiel coulombien (protons donc)

$$E_n = -\frac{E_\mu}{2n^2}$$

Pour un niveau n et un niveau p :

$$E_p - E_n = \frac{E_\mu}{2}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2}\right)$$

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E_\mu}{2hc}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2}\right)$$

A finir

Questions :

- pourquoi avoir + axé sur quantificat° que le confinem^t ?
  - ↳ car confinement ⇒ quantificat°
  - ↳ si que confinem^t, trop peu de sens physique
- année de l'expérience de Franck et Hertz ?
  - ↳ 1914
- critiques sur le modèle de Bohr ?
  - ↳ n'explique pas les transitions entre niveaux

- sur le schéma particule confinée, pourquoi avoir fait un point pour symboliser la particule ?
  - ↳ aspect ondulatoire !

- Solution stationnaire : c'est quoi ? vraiment stationnaire ?
  - ↳ dire solution sous forme d'onde plane puis que le module est stationnaire
- critique sur les conditions aux limites ?

- conséquence de $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$ non continue si potentiel infini ?
  - ↳ oui → la densité de proba. de présence vaut 0 en dehors (à vérifier)
  - ↳ force de radiation (particules qui "poussent les parois de la boîte")
- mesurer une particule hors de la boîte : réalité physique ?
  - ↳ oui : effet tunnel

- pour un potentiel coulombien : quelles conditions aux bords à appliquer ?
  - ↳ condit° aux limites périodique pour la partie angulaire
  - ↳ non divergence à l'infini pour la partie radiale

- pour un puits réel : quel rôle peut jouer la température ?
  - ↳ on peut permettre des occupations des niveaux
- que doit vérifier T ?
  - ↳ $k_B T < V_0$ sinon état diffusif
- comment faire des pièges 1D, 2D, 3D ?

- Si j'ai un matériau 3D, comment je fais un piège 1D ?
  - ↳ énergie en $\frac{1}{L^2}$ pour les 3 direct° donc 1 direction longue et les 2 autres très petites
- en pratique ?
  - ↳ épitaxie
  - ↳ coller des métaux

- pour un puits 0D ?
  - ↳ défaut dans la maille (on vire un atome appart)

- pourquoi les raies de l'atome H ont une largeur ?
  - ↳ effet Doppler
  - ↳ montage optique
  - ↳ chocs dans la lampe
  - ↳ structure hyperfine → plusieurs niveaux

- pour l'expérience de Franck et Hertz, comment sont excités/émis ?
  - ↳ émission par effet thermoionique

- que se passe-t-il pour les états non liés ?
  - ↳ la particule ne voit pas le puits si $E \gg V_0$?
    - ↳ apparemment si un peu qd même
    - ↳ un déphasage apparaît

- comment expliquer à des élèves les notions de continuité de φ et $\frac{d\varphi}{dx}$?

↳ c'est des maths, donc peu d'intérêt ...

↳ pour φ par contre c'est + pertinent

↳ la particule peut pas disparaître ...

↳ passer par le courant de probabilité qui doit être continu si $\not\!\phi$ infini ⇒ analogie avec les autres courants vus en physique

- Commentaires:

→ plutôt bonne présentation

→ leçon plutôt bien construite

→ bons supports mais + exploités

→ ⚠ au titre pour les calculs liés aux confinements

→ ⚠ à ne pas trop "plagier" les anciens titres

→ piéger les particules peut être un moyen d'accéder au niveau L3

↳ comment faire en pratique ?

LP40 – Confinement d'une particule et quantification de l'énergie

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 surement 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 ?

LP 40 : Confinement de l'électron et quantification de l'énergie. Exemples

Compte-rendu de correction G. Laibe - D. Kuzzay (10/02/2017)

Commentaire général : à revoir, beaucoup d'erreurs pendant la leçon et les questions (l'expérience de Rutherford ne se fait pas avec des neutrons, a = mv^2/r n'est pas lié au caractère conservatif du champ de force, la relation de Heisenberg n'est pas liée à la mesure…). Manque général de précision au tableau, dans le vocabulaire et la présentation des expériences. Les modèles et conclusions des exemples doivent être discutés. Imprécisions liées à l'approche « historique » de la leçon (ex : il n'est pas évident *à priori* de relier le spectre de la lumière émise par une lampe spectrale et la quantification des niveaux d'énergie, cf la leçon).

Structure : deux points à aborder : 1) le niveau du fondamental est plus bas pour une région de confinement plus large (stabilisation par déconfinement) – utiliser Heisenberg pour les ordres de grandeurs, exemples et 2) le spectre des niveaux d'énergie est discret (faire le lien avec l'émission lumineuse). Il est possible de partir de l'équation de Schrödinger et d 'interpréter les expériences historiques à la fin de la leçon.

Questions : lien entre la courbe i(V) et le spectre de la lumière émise dans l'expéreince de Franck et Hertz, conditions de continuité de la fonction d'onde aux bords, lien entre les symétries du potentiel et celles de la fonction d'onde, hypothèses sous-jacentes de la corde de Melde, réflexion dans le cas E>V0 (propriété ondulatoire et lien avec l'optique), niveaux d'energie dans l'atome de d'hydrogène réel (avec et sans champ B), spectre de l'oscillateur harmonique, dégenerescence particulière du spectre de l'atome d'hydrogène du à l'invariance du vecteur de Runge-Lenz, exemples de stabilisation par délocalisation (mésomérie, benzène), atome vs noyau (ordres de grandeur), processus d'élargissement des raies.