**Titre** : Effet Tunnel

**Présentée par** : Raphael Leriche **Rapport écrit par** : Bernard Chelli

**Correcteur** : Jean Hare **Date** : 10/02/2020

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Bibliographie de la leçon :** | | | |
| **Titre** | **Auteurs** | **Éditeur** | **Année** |
| **[1] Dunod tout en un PC-PC\* 2014** | **Fosset** |  |  |
| [2] http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID\_fiche=3903 | BUP 734 |  |  |
| [3] https://www.youtube.com/watch?v=wQEqksTcARE | BUO 699 |  |  |
| Jean HARE. *Abrégé de mécanique quantique à l’usage de la préparation à l’agrégation de physique*.  2018 | Jean Hare |  | 2018 |
|  |  |  |  |

|  |
| --- |
| **Plan détaillée** |
| Niveau choisi pour la leçon : CPGE  Pré-requis :  - Équation de Shrodinger stationnaire  - Densité d’état  - Courant de densité de probabilité (voir cours Jean Hare chapitre 2 section 2.1 et 2.3)  - Radioactivité  Plan:  I – Barrière de potentiel et effet tunnel  1) Position du problème  2) Raccordement et Probabilité de transmission  II – Une application technologique, le microscope à effet tunnel  1) Microscope à effet tunnel  2) La spectroscopie à effet tunnel  III – Radioactivité α  **Introduction :**  Comme il a été vu dans les cours de EM, (ex. effet de peau dans un conducteur), les champs **E** et **B** peuvent pénétrer sur une certaine distance dans la matière (réflexion totale). Étant donné la dualité onde-corpuscule, on peut se demander si les particules de matière (comme l’électron) peuvent aussi présenter un caractère similaire à l’onde évanescente, et quelles conséquences un tel phénomène peut-il avoir.  Commençons par considérer un profil d’énergie potentielle pour un électron qui aurait la forme d’une barrière de potentielle de largeur « a » et hauteur V0 (la dessiner de 0 à a).  Soit un électron provenant de la gauche et allant vers la droite avec une énergie cinétique 0<E<V0  Ici on voit que l’électron classique ne peut pas exister dans la zone [0,a]. Du fait de la conservation de l’énergie mécanique, son existance impliquerait une énergie cinétique <0 ce qui est impossible.  Classiquement l’électron est donc reflechi. Or que ce passe dans une approche quantique ?  **I) Barrière de potentiel et effet tunnel (2:40)**  1) Position du problème  Posons l’équation de shrodiger appliqué à la particule M de masse m arrivant de la gauche dans chaque région de l’espace (1, 2 et 3) :  C:\Users\omega\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\raph_1.jpg  Suivre le calcul du [1] p. 1200- 1201. Il faut l’adapter légèrement.  On obtient trois équations différentielles. Poser et pour simplifier l’écriture des résultats.  Donner les solutions pour les trois régions :    On normalise tout par l’onde incidente et on pose r et t.  2) Raccordement et Probabilité de transmission (8:30)  Le raccordement est un peu fastidieux et calculatoire, donc ne pas le faire. Par contre l’avoir en tête : [1] p. 1202. Le résultat diffère dans 1 du fait d’avoir choisi une barrière centrée sur 0, mais les calculs sont les mêmes.  Montrer le résultat obtenu sur slide :  Ce qui nous intéresse est le module au carré des coefficients r et t, qui traduisent une probabilité de reflexion et transmission respectivement.  Lire le bas de [1] p. 1203 pour quelques commentaires physiques.  Le raccordement des fonctions aux différents points est montré sur slide :  Dans 1 : on a des interférences avec l’onde réfléchie  Dans 2 : on a une densité de probabilité de présence non nulle qui diminue avec la hauteur de la barrière. On introduit alors 2 une longueur caractéristique de décroissance. Donc plus la barrière est épaisse et haute, plus faible sera la probabilité de présence de la particule à la sortie de la barrière.  Dans 3 : la probabilité de présence est uniforme et égale à T  Une discussion est faite dans [1] p. 1204.  Lorsque Ka>>1 on est dans le cas d’une barrière épaisse (fait aussi dans [1] p. 1204). Alors l’expression de T se simplifie car sh(Ka)~.  Alors ~ Expression fondamentale pour la suite  Montrer slide avec courant de probabilité qui est admis et préciser que J3 est proportionnel à T.  (Rq. BC au niveau CPGE je préfère me limiter à l’expression du vecteur densité de courant de probabilité de [1] p. 1160 qui donne le résultat de manière immédiate.)  Si on s’intéresse à un ensemble d’électrons qui arrivent de la gauche sans la zone 1, il est clair qu’on pourra voir l’apparition d’un autre courant dans la zone 2 qui résulte des électrons qui ont traversé la barrière de potentiel par effet tunnel. Alors le courant électrique sera proportionnel à T. Ceci est exploité dans le microscope à effet tunnel  **II – Une application technologique, le microscope à effet tunnel (13:33)**  1) Microscope à effet tunnel (voir [3])  C:\Users\omega\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\raf8.png  Suivre l’introduction p. 1269 de [3] et presenter sur slide.  Faire schéma suivant pour expliquer le fonctionnement :  Préciser que :  - l’échantillon et la pointe sont des conducteurs ;  - On applique une différence de potentiel, alors et seulement alors, l’air entre la pointe et l’échantillon se comporte comme une barrière de potentiel ;  - L’échantillon est un solide, donc un assemblage d’atomes ;  - On mesure un courant tunnel , où est la hauteur relative de la barrière de potentiel qui dépend du potentiel appliqué et des matériaux conducteurs. I0 dépend du potentiel appliqué aussi. (voir [3] p. 1269-1270, aussi [1] p. 1207-1208)  Discuter le courant I avec la formule du courant de probabilité, on peut l’approximer par un courant proportionnel à .  Expliquer le fonctionnement du microscope (soit on se place à hauteur constante et on regarde le courant tunnel qui varie, soit in se place à courant constant avec une boucle d’asservissement et on regarde la hauteur de la pointe). La pointe est contrôlée par des piezo.  Présenter des ordres de grandeur :  - pour E ~ 0 avec m éléctron de 9.109\*10^-31kg et V0 ~ 4eV (travail de sortie typique des métaux cf. [3] p. 1271) :  Si on passe de a = 5A à 6A, le coefficient de transmission T diminue d’un facteur 10, donc très précis en hauteur (résolution transverse) (De l’ordre de 10-11m).  Parler de la résolution latérale avec un schéma (c.f. [3] p. 1275). Donc importance de la pointe ! (résolution latérale de l’ordre de 1A avec une bonne pointe).  Parler des conditions de la pointe sur slide et sur les vibrations (lire début de la p. 1274 de [3]).  C:\Users\omega\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\raf9.png  B) Mode spectroscopique (22:36)  Optionnel car complexe. On peut lire [3] p. 1278-1281 pour le presenter avec les slides suivants.          **III – Radioactivité α** (26 :00)  Faire un rappel sur la radioactivité α [3] p. 1211-1212.  Prendre la réaction (désintégration du Radium dans du Radon He particule alpha).  Montrer slide (chiffres se trouvent dans [1]):    Parler que expérimentalement il semble que si E augmente T1/2 diminue. On se propose de modéliser ce résultat avec l’effet tunnel.  On introduit le modèle de Gamow, Gurney et Condon ([3] p. 1213-1215, les calculs sont faits dans [2] p. 738-740).  Hypothèses :  - On suppose que la particule alpha de masse m existe à l’intérieur du noyau et oscille à l’interieur avec un mouvement de vas et vien;  - On suppose qu’elle est soumise à une Ep résultant de l’interaction forte de courte portée supposée nulle à partir d’une distance R0 (~ 10-14m);  - On suppose que la particule alpha es soumise aussi à la répulsion électrostatique entre la particule alpha et le nouveau noyau à Z-2 protons tq Epcoulomb = ;  - On suppose à l’intérieur du noyau de rayon R, le potentiel qui domine est l’interaction forte ;  - On suppose R0>>R ;  - On suppose un puit de potentiel sphérique.  On note que E de la particule alpha est de 4,9 MeV et que la répulsion coulombienne V en R, V ~ 40 MeV (cf. [1] p .1213). On peut donc approximer le problème comme un puit de potentiel :  C:\Users\omega\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\raph_10.jpg  Pour faire le calcul il faut découper le potentiel en barrières rectangulaires. Alors on constante que la probabilité de transmission à travers 2 barrières de hauteur différente est:  Si on passe au continu :  Le calcul de cette intégrale est long et complexe avec plusieurs changements de variables (voir [2] p. 739-740 et le cours de Jean Hare p. 88).  En faisant le calcul on trouve :  Avec U =  Or T est la probabilité de sortir de l’atome à chaque collision avec la barrière. En moyenne il faut 1/T collisions pour que la particule alpha soit éjectée de l’atome.  Alors si t0 est la durée de traversée du noyau, la particule passe un temps t = t0/T dans le noyau.  On déduit :  Si E augmente, t1/2 diminue. Cette loi est globalement verifiée sur 26 ordres de grandeur ! (c.f. FIG. 4 p. 86 du cours de Jean Hare tiré du cours de Berkley)  **Conclusion** sur d’autres applications possibles, par exemple le double puit de potentiel pour modéliser des liaisons chimiques ou autres utilités du microscope à effet tunnel si on se sent capable de répondre aux questions. |
| **Annexe : calcul de raccordement** |

|  |
| --- |
| **Questions posées par l’enseignant** |
| **Vouz avez parlé d’ondes stationnaires, c’est approprié ?**  Non, il n’y as pas de nœuds.  **Que caractérise une onde stationnaire ?**  Pas de dépendance temporelle, il faut des nœuds et des ventres.  **Le diagramme (du raccordement du puit de potentiel) est-il conforme à ce que vous présentez ?**  Non il devrait y avoir continuité de la dérivée.  **Dans la limite de la zone 2-3 comment pouvez-vous arriver entre la zone 2 et la zone 3 avec une tangente horizontale ?**  On ne sait pas si dans la zone 2 il y a une exponentielle dû à la réflexion au niveau de l’interface 2-3 (onde anti-évanescente en retours). Alors sur cette interface on aura 2 ondes opposées qui ont la même amplitude ce qui donne une tangente horizontale.  **Comment obtenez-vous dans la zone 3 que le courant est constant ?**  Par calcul est du fait qu’on a une seule onde propagative  **Il y a une condition sur le métal de la pointe pour le microscope à effet tunnel ?**  Oui, il faut qu’elle soit métallique ex. en platine coupé et qu’elle ne soit pas chimiquement active.  **Pourquoi vous utilisez la masse de l’électron dans l’onde évanescente ?**  Ça dépend du matériau mais ça peut arriver qu’on ait le droit de le faire.  **Est-ce que est toujours valable ? que represente r et t ?**  R est le coefficient de reflexion en amplitude et t le coefficient de transmission en amplitude.  **Dans un problème de collision quantique on a toujours ?**  Ce qui compte c’est le coefficient de transmission en courant. Cette formule est étroitement liée à une hypothèse du modèle : les énergies en déhors de la barrière sont les mêmes  **Vous avez parlé d’une onde évanescente en éléctromagnetisme, c’est pareil ou il y a une difference importante entre les 2 ?**  On a une perte d’énergie.  En EM, on a un vecteur de poynting et l’énergie transportée par l’onde évanescente est dissipé par le métal. En MQ on n’a pas d’effets dissipatifs car tant qu’on n’est pas arrivé à la fin de la barrière on n’aura pas de courant.  **La loi de la radioactivité alpha marche bien ?**  Oui, sur plus de 26 ordres de grandeur. |
| **Commentaires donnés par l’enseignant** |
|  |
| **Partie réservée au correcteur** |
| **Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)**  **Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates**  **Expériences possibles (en particulier pour l’agrégation docteur)**  **Bibliographie conseillée** |