

LP40 : EFFET TUNNEL (L3)

Prérequis

- base de mécanique quantique (équation de Schrödinger, marche de potentiel)
- physique statistique (distribution de Fermi)

Idées directrices à faire passer

- l'effet tunnel marche vraiment : il y a des applications concrètes
- c'est une conséquence directe de l'aspect ondulatoire de la matière

Commentaires du jury

–

Bibliographie

- [1] Les nouvelles microscopies, Aigouy, Belin (pour toute la leçon)
- [2] Mécanique quantique, Berkeley (radioactivité α)
- [3] Mécanique quantique, Basdevant, Editions de l'école Polytechnique

Introduction : présenter succinctement le cas classique d'une barrière de potentiel : ça passe ou ça ne passe pas !

manipulation : mise en évidence d'une onde évanescente à l'aide des prismes de parafine et des ondes centimétriques

I Transmission par effet tunnel [1]

1 Position du problème

- on se place dans la limite d'une marche de potentiel carré
- donner l'équations de Schrödinger et les solutions respectives dans chacune des régions de l'espace
- rappeler la notion d'onde évanescente
- expliciter les relations de continuité pour une discontinuité finie de potentiel \rightarrow la solution est C^1
- définir le vecteur densité de courant et l'expliquer dans le cas d'une onde plane

2 Calcul du coefficient de transmission : puits carré

- poser alors le système à résoudre
- donner la solution (sans démonstration) du coefficient associée à l'onde transmise et le simplifier dans la condition limite qui nous intéresse ici
- en déduire alors le coefficient de transmission de l'onde par la barrière
- donner des ODG pour un électron franchissant la barrière tunnel typiquement et pour un homme tentant de franchir une porte (on se limitera au calcul du facteur exponentiel)

3 Cas d'un potentiel de forme quelconque : l'approximation logarithmique BKW

- on peut décomposer un potentiel quelconque en une somme éventuellement continue de potentiels carrés qui épousent la forme du potentiel
- limiter le facteur de transmission au facteur exponentiel (approximation logarithmique)
- la transmission totale est le produit des transmissions, soit la somme sous forme logarithmique
- c'est donc une intégrale à la limite continue

II Le microscope à effet tunnel (STM) [1]

1 Position du problème : approximation de puits carré

- principe de base : pointe conductrice "volant" à la surface d'un échantillon conducteur

- on s'intéresse au courant électronique entre la pointe et l'échantillon, sachant que l'énergie des électrons est inférieure à la barrière de potentiel entre les deux métaux (le passage se fait donc par effet tunnel)
- modélisation du problème : potentiel carré, distribution de Fermi prise à température nulle, métaux identiques (même niveau de Fermi et même travail de sortie)
- après ajout d'une ddp, les deux niveaux de Fermi sont décalés de la quantité eV_t
- on considère que tous les électrons susceptibles de participer à la conduction sont à l'énergie de Fermi (la différence d'énergie due à la ddp est supposée faible devant l'énergie de Fermi)

2 grandeurs caractéristiques de fonctionnement

- on peut d'abord évaluer la proportionnalité du courant avec la distance (grâce au modèle précédent)
- on constate une sensibilité très élevée à la distance, ce qui est bon signe pour avoir une bonne résolution
- on peut alors évaluer la résolution orthogonale et tangentielle
- la résolution orthogonale est de l'ordre de l'angstrom
- pour la résolution tangentielle, il faut poursuivre le raisonnement en considérant une pointe terminale sphérique
- on peut alors évaluer facilement sur quelle couronne autour de la pointe le courant est non négligeable
- pour une pointe de taille atomique, la résolution est extraordinaire !
- les courants sont de l'ordre du nanoampère
- insister sur la nature des signaux vus par le STM : suivre le plan du Aigouy à ce sujet pour montrer que le courant local est proportionnel à la densité locale d'état au voisinage de l'énergie de Fermi, cette densité étant image de la répartition électronique à la surface de la matière

3 Schéma de principe d'un STM

- donner le schéma de principe du STM, insister sur la qualité des composants devant le constitué
- parler des deux modes de balayage possibles et de leurs avantages respectifs

III Radioactivité α [2]

1 Position du problème

- Le Berkeley est absolument parfait pour cette partie... il suffit de le suivre !
- constat : deux choses surprenantes dans la radioactivité α : durée de vie radioactive très longue et fortement dispersée suivant les atomes pères
- par ailleurs on a constaté que l'énergie de la particule α libérée était corrélée à la durée de vie radioactive -> on cherche alors à comprendre cette corrélation par un modèle simple
- d'abord on modélise grossièrement le potentiel et on donne un ODG de l'énergie des α libérés
- on montre alors que la libération nécessite de franchir une barrière de potentiel par effet tunnel
- on cherche alors à évaluer le coefficient de transmission

2 Utilisation de l'approximation BKW pour évaluer la durée de vie radioactive

- ici, on a un potentiel de forme complexe, on utilise donc l'approximation BKW pour le calcul
- suivre les calculs du Berkeley en sautant beaucoup d'étapes
- écrire alors le résultat en fonction de l'énergie de la particule uniquement
- on évalue alors le temps de vie en faisant la considération simple que la particule passe la barrière au bout de n tentatives avec $nT = 1$
- de même évaluer le temps d'un aller retour dans la zone de confinement
- on en déduit finalement une expression du temps de vie radioactif en fonction de l'énergie de la particule libérée

3 Comparaison aux résultats expérimentaux

- présenter un graphique de la comparaison entre théorie et résultats expérimentaux
- la tendance est bonne même si la représentation est imparfaite : vue la simplicité du modèle c'est déjà une grande victoire
- le modèle fut d'abord donné par Gamov en 1928

Conclusion : processus purement quantique

Q/R

- 1. Choix du signe de la phase de la fonction d'onde ?** Il n'y a pas de choix possible, il est imposé par l'équation de Schrödinger, attention donc à la convention
- 2. Comment utiliser la réflexion totale frustrée en optique ?** microscopie en champ proche
- 3. pour la radioactivité α , faut il connaitre le potentiel dans le noyau ?** Non l'important est la largeur de la barrière tunnel à franchir
- 4. la particule α est elle relativiste ?** Non, il suffit de comparer son énergie cinétique à son énergie de masse