

## Leçon de Physique n°27 Effet tunnel ; radioactivité alpha

Niveau : CPGE 2ème année

Programme :

Notions et contenus

Capacités exigibles

### 5.4. Effet tunnel

Notions sur l'effet tunnel.

Associer l'existence d'une probabilité de traverser une barrière de potentiel et l'existence de deux ondes évanescentes dans la zone classiquement interdite.

Coefficient de transmission associé à une particule libre incidente sur une barrière de potentiel.

Exprimer le coefficient de transmission comme un rapport de courants de probabilités.

#### **Approche documentaire de la radioactivité alpha:**

- utiliser une expression fournie du coefficient de transmission pour analyser des documents scientifiques ;
- expliquer le rôle de l'effet tunnel dans la radioactivité alpha.

#### **Approche documentaire de la microscopie à effet tunnel**

- utiliser une expression fournie du coefficient de transmission pour analyser des documents scientifiques ;
- expliquer la sensibilité à la distance de cette méthode d'observation des surfaces.

**Approche descriptive :** Double puits symétrique.

Étude des deux premiers états stationnaires : symétrique et antisymétrique.

Exploiter les diagrammes d'énergie et faire le lien avec la chimie.

Évolution temporelle d'une superposition de ces deux états.

Sur l'exemple de la molécule d'ammoniac, utiliser le principe de superposition pour relier la fréquence des oscillations d'une particule initialement confinée dans un des puits à la différence des énergies.

Livres : Basdevant Mécanique quantique, Cohen-Tannoudji Mécanique quantique tome 1, Tout-en-un PC DUNOD , Ngo Ngo Physique quantique, Levy-Lebond Quantique : rudiments

Pré-requis : mécanique classique, équation de Schrödinger pour une particule libre, dans un puits de potentiel, probabilité,

Introduction :

*Intro du chapitre 24 Tout-en-un*

→  $V$  indépendante du temps → résoudre l'équation de Schrödinger sous la forme d'un état stationnaire

Afin de simplifier le problème, nous nous intéressons toujours à un modèle à une dimension (dans lequel l'énergie potentielle ne dépend que de  $x$ ).

## I – Transmission à travers une barrière de potentiel Ngo + Basdevant

### 1) Position du problème

A une dimension, on s'intéresse à la propagation d'ondes planes (superposition → paquet), on a  $V(x)=0$  pour  $x<0$  et  $V(x)=V_0$  pour  $0<x<L$  : on se place dans le cas d'une marche de potentiel, ne pas faire le cas d'une barrière ici, Ngo p166-171, Basdevant p71-72

Calcul classique :  $E<V_0$  : la particule ne peut pas aller entre  $0<x<L$ ,  $E>V_0$  : la particule peut aller partout, Ngo p154

### 2) Réflexion sur une marche de potentiel

#### a) Résolution de l'équation de Schrödinger

→ justifier les solutions stationnaires

Faire un schéma avec la barrière et dessiner l'onde pour  $E<V_0$  (sinusoïdale avant la marche, « évanescente » après)

#### b) Conditions aux limites Basdevant

#### (c) Analyse ?

$\partial\rho/\partial t + \text{div}\mathbf{J}=0$  avec

$\rho$  densité de probabilité :  $\rho=|\Psi(x,t)|^2=|\varphi(x)|^2$

$\mathbf{J}$  : courant de probabilité :  $\mathbf{J}=1/m \text{Re}[\Psi^*(\hbar/i \partial\Psi/\partial x)]$

si  $\varphi=Ae^{ikx}$ ,  $\rho=|A|^2$  et  $\mathbf{J}=1/m |A|^2 \hbar k$

si  $\varphi=Be^{-Kx}$ ,  $\rho=|B|^2 e^{-2Kx}$  et  $J_r=0$  et  $T=J_t/J_i=0$

→ pas de propagation (analogie avec l'onde évanescente))

### 3) Transmission à travers une barrière de potentiel et effet tunnel

(Maintenant on fait une barrière ?

Faire un schéma avec la barrière et dessiner l'onde pour  $E<V_0$  (sinusoïdale avant la marche, « évanescente » dans la barrière puis ressort en sinusoïde) =>  $J_t \neq 0$ )

- Courant de probabilité

- T

- Graphe

- Définition de l'effet Tunnel

- ODG Cohen-Tannoudji et Tout-en-un

Interprétation qualitative : Tout-en-un

## II – La radioactivité $\alpha$ Tout-en-un +

1<sup>er</sup> effet physique expliqué par l'effet tunnel

### 1) Désintégration $\alpha$

Emission, par un noyau instable, d'une particule  $\alpha$  = noyau d'hélium 4 → composition

Exemple : uranium 238 (plutôt que U 236 dans Tout-en-un)

### 2) Modèle d'énergie potentielle ressentie par la particule $\alpha$

Modèle de Gamow, 1928, Gurney et Condon

Hypothèses : Tout-en-un

- la particule  $\alpha$  existe à l'intérieur du noyau

- noyau considéré comme sphérique de rayon  $R=r_0 A^{1/3}$  avec  $r_0=1,2 \cdot 10^{-15} \text{m}$  et  $A$  : nombre de nucléons

- particule  $\alpha$  quantique, mouvement unidimensionnel, soumis à une  $E_p$  résultant de l'interaction forte pour  $|x| \leq R$  ( $V=V_0 < 0$ ) et de la répulsion électrostatique pour  $|x| \geq R$  ( $V(x) = 2(Z-2)e^2 / (4\pi\epsilon_0 x)$  avec  $E = V(R_c)$ )

Graphique qui donne le profil d' $E_p$   $V(x)$

Particule  $\alpha$  : a une  $E_c \Rightarrow$  fait des aller-retour dans le noyau et ne cesse de « rebondir » contre la barrière de potentiel. A chaque collision sur la barrière, elle a une probabilité  $T$  d'être transmise au-delà du noyau  $\Rightarrow$  il lui faut une moyenne de  $1/T$  collisions pour sortir du noyau  $\Rightarrow$  lien avec demi-vie et  $\lambda$  ( $N = N_0 e^{-\lambda t}$ ,  $\lambda$  constante de déintégration = inverse de la demi-vie)

Calcul de  $T$  (pour intégrer, faire le changement de variable  $\cos^2 u = x/R_c$ ), demi-vie et  $\lambda$   
ODG de  $T$  pour uranium *Levy-Leblond* ?

$E_c$  de la particule qui se déintègre =  $E_c$  de la particule dans le puits (=4Mev) *Levy-Leblond*  
 $\Rightarrow$  bon accord même avec un modèle simplifié

U 238 ou radium 226 (*Tout-en-un*)

Conclusion : autres applications : microscope à effet tunnel

Python : effet tunnel : programmes Montrouge ?