Effet Tunnel

Plan de la présentation

Prérequis

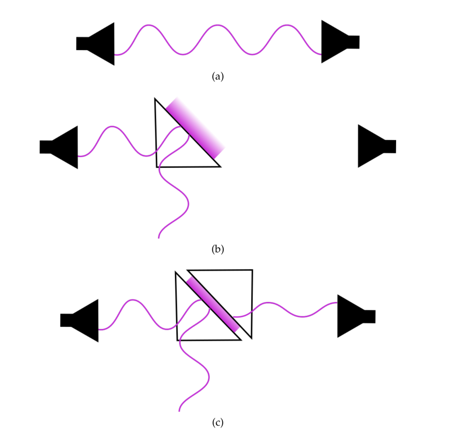
- Équation de Schrödinger stationnaire
- Densité de probabilité, densité de courant de probabilité
- Ondes évanescentes
- Radioactivité
- Confinement d'une particule quantique

Sommaire

- Introduction: nature ondulation de l'effet tunnel
- Modélisation effet tunnel
- Applications:
  - Microscope à effet tunnel
  - Radioactivité α

Nature ondulation de l’effet tunnel

Effet tunnel avec des ondes centimétrique



Quelques ordres de grandeur

Coefficient de transmission et distance caractéristique de pénétration (inverse module vecteur d'onde):

$$T \propto \exp(-2a/\delta) \qquad \text{avec} \qquad \delta = \frac{\hbar}{\sqrt{2\mathrm{m}(\mathrm{V}_0 - \mathrm{E})}}$$

Particule	m (kg)	V_0 (eV)	a (nm)	δ (nm)	T
Électron	10^{-30}	4	$0,3$	$0,1$	10^{-2}
Électron	10^{-30}	40	$0,3$	4×10^{-2}	10^{-6}
Électron	10^{-30}	4	3	$0,1$	10^{-20}
Proton	10^{-27}	4	$0,3$	4×10^{-3}	10^{-63}
Proton	10^{-27}	4	3	2×10^{-3}	10^{-628}

Microscope à effet tunnel

Binnig et Röhrer durant les années 1980-1985 (prix Nobel en 1986).

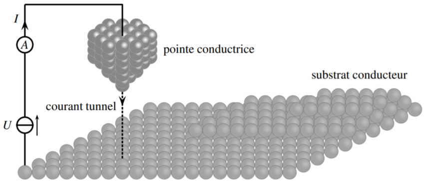
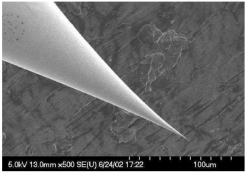


Figure 4 – Présentation du dispositif



Modes d'utilisation

Le coefficient de transmission est bien approxime par:

$$T \approx C(U)\frac{16\,E\,W}{(E+W)^2}\exp(-2ka) \quad \text{avec} \quad k=\sqrt{\frac{2mW}{\hbar^2}}$$

Deux modes d'utilisation

1. Topographie : On fixe U constant, et on maintient I constant en bougeant a. On peut ainsi mesurer les variations de hauteur du substrat.
2. Spectroscopie : Fixer la position de la pointe et faire varier U afin d'extraire des propriétés physiques du substrat (comme le travail d'extraction W). Cela donne la nature chimique locale du substrat.

Résolution

- Résolution transversale:

- Résolution longitudinale (topographique)

Résolution

Modèle de Tersoff et D.R. Hamann de la jonction tunnel pointe-plan.

- Résolution transversale:

- Résolution longitudinale (topographique)

Résolution

Modèle de Tersoff et D.R. Hamann de la jonction tunnel pointe-plan.

- Résolution transversale:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{a \ln(2)}{k(W)}}$$

Ordre de grandeur pour :

$$a = 0.5nm$$

$$W = 4.3\, eV\, (\text{zinc})$$

$$\Longrightarrow \quad \Delta x = 0.2nm$$

- Résolution longitudinale (topographique)

Résolution

Modèle de Tersoff et D.R. Hamann de la jonction tunnel pointe-plan.

- Résolution transversale:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{a \ln(2)}{k(W)}}$$

Ordre de grandeur pour :

$$a = 0.5nm$$

$$W = 4.3\, eV \, (\text{zinc})$$

$$\Longrightarrow \quad \Delta x = 0.2nm$$

- Résolution longitudinale (topographique)
  Appareil apte à distinguer des variations relatives finies (de l'ordre du pour cent).

$$I = CU\frac{k}{a}\exp(-2ka)$$

Résolution

Modèle de Tersoff et D.R. Hamann de la jonction tunnel pointe-plan.

- Résolution transversale:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{a \ln(2)}{k(W)}}$$

Ordre de grandeur pour :

$$a = 0.5nm$$

$$\Longrightarrow \quad \Delta x = 0.2nm$$

$$W = 4.3\, eV \, (\text{zinc})$$

- Résolution longitudinale (topographique)

  Appareil apte à distinguer des variations relatives finies (de l'ordre du pour cent).

$$I = CU\frac{k}{a}\exp(-2ka)$$

$$\Delta a \approx 1/2\sqrt{\frac{\hbar^2}{2mW}}\frac{\Delta I}{I}$$

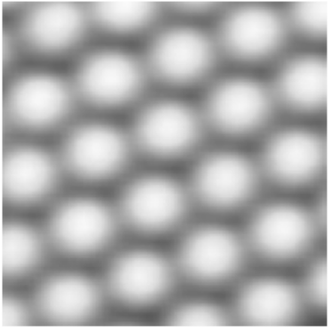
$$\Delta I/I = 0.02$$

$$\Longrightarrow \quad \Delta 1 \approx pm$$

$$W = 4.3\, eV \, (\text{zinc})$$

Microscope à effet tunnel

Atomes de silicium à la surface d'un cristal de carbure de silicium (SiC). Image obtenue à l'aide d'un Microscope à effet tunnel.



Radioactivité α: résultats expérimentaux

La désintégration alpha peut être vue comme une forme de fission nucléaire:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\alpha $$

noyau père $\rightarrow$ *noyau fils* + *particule alpha*

Radioactivité α: résultats expérimentaux

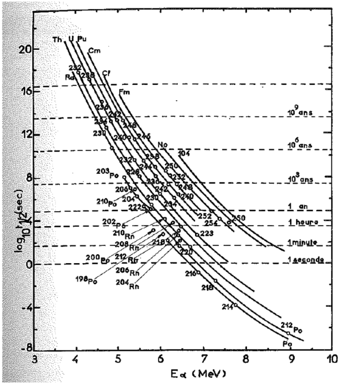
La désintégration alpha peut être vue comme une forme de fission nucléaire:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\alpha $$

noyau père → *noyau fils* + *particule alpha*

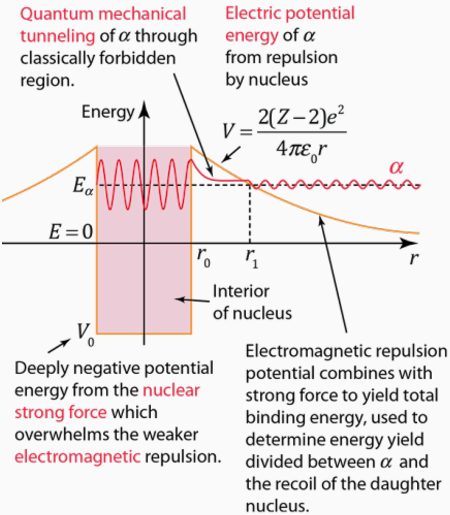
Loi phénoménologique Geiger-Nutall (1911)

$$ ln(\tau_{1/2}) = a + \frac{b}{\sqrt{E}} $$



Radioactivité α: Théorie de Gamow

La particule α préexiste dans le noyaux mais elle est confinée.



Radioactivité α: grandes lignes du calcule de Gamow

- On décompose la barrière coulombien en petite barrières rectangulaires d'épaisseur *dr* suffisamment grande (approximation de barrière épaisse).

Radioactivité α: grandes lignes du calcule de Gamow

- On décompose la barrière coulombien en petite barrières rectangulaires d'épaisseur *dr* suffisamment grande (approximation de barrière épaisse).
- On calcule le coefficient de transmission $T = \prod_i T_i$ (T_i de chaque barrière).

$$ln(T) = a' - \frac{b}{\sqrt{E}}$$

Radioactivité α: grandes lignes du calcule de Gamow

- On décompose la barrière coulombien en petite barrières rectangulaires d'épaisseur *dr* suffisamment grande (approximation de barrière épaisse).
- On calcule le coefficient de transmission $T = \prod_i T_i$ (T_i de chaque barrière).

$$ln(T) = a' - \frac{b}{\sqrt{E}}$$

- La particule α oscille entre les bords du puits à une vitesse $v = \sqrt{2E/m}$.

Radioactivité α: grandes lignes du calcule de Gamow

- On décompose la barrière coulombien en petite barrières rectangulaires d'épaisseur *dr* suffisamment grande (approximation de barrière épaisse).
- On calcule le coefficient de transmission $T = \prod_i T_i$ (T_i de chaque barrière).

$$ln(T) = a' - \frac{b}{\sqrt{E}}$$

- La particule α oscille entre les bords du puits à une vitesse $v = \sqrt{2E/m}$.
- On calcule la probabilité de franchir la barrière P_{tunnel} en un intervalle dt:

$$P_{tunnel} \approx Tfdt \quad \text{avec} \quad f = v/(2r_0) \quad \text{fréquence des chocs}$$

Radioactivité α: grandes lignes du calcule de Gamow

- On décompose la barrière coulombien en petite barrières rectangulaires d'épaisseur *dr* suffisamment grande (approximation de barrière épaisse).
- On calcule le coefficient de transmission $T = \prod_i T_i$ (T_i de chaque barrière).

$$ln(T) = a' - \frac{b}{\sqrt{E}}$$

- La particule α oscille entre les bords du puits à une vitesse $v = \sqrt{2E/m}$.
- On calcule la probabilité de franchir la barrière P_{tunnel} en un intervalle dt:

$$P_{tunnel} \approx Tfdt \quad \text{avec} \quad f = v/(2r_0) \quad \text{fréquence des chocs}$$

- Pour N noyaux on obtient une loi de désintégration:

$$\frac{dN}{dt} = -NfT$$

Radioactivité α: grandes lignes du calcule de Gamow

- On décompose la barrière coulombien en petite barrières rectangulaires d'épaisseur dr suffisamment grande (approximation de barrière épaisse).
- On calcule le coefficient de transmission $T = \prod_i T_i$ (T_i de chaque barrière).

$$ln(T) = a' - \frac{b}{\sqrt{E}}$$

- La particule α oscille entre les bords du puits à une vitesse $v = \sqrt{2E/m}$.
- On calcule la probabilité de franchir la barrière P_{tunnel} en un intervalle dt:

$$P_{tunnel} \approx Tfdt \quad \text{avec} \quad f = v/(2r_0) \quad \text{fréquence des chocs}$$

- Pour N noyaux on obtient une loi de désintégration:

$$\frac{dN}{dt} = -NfT$$

- On peut donc calculer le temps de demi-vie $\tau_{1/2}$

$$\tau_{1/2} = \frac{ln(2)}{fT} \implies \quad \text{loi phénoménologique Geiger-Nutall}$$

Radioactivité α: Prédiction de théorie de Gamow

Courbe comparant la théorie de Gamow (1928) et les résultats expérimentaux.

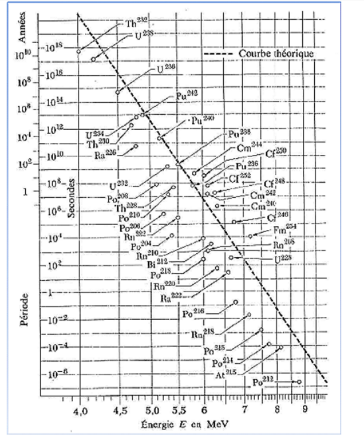


Figure 1: Ordonnée en échelle log, abscisse en échelle racine

Résumé et conclusions

- Analogie effet tunnel et effet peau en optique

Résumé et conclusions

- Analogie effet tunnel et effet peau en optique
- Effet tunnel quantique:
  possibilité de "tunneler" $\longrightarrow$ description ondulatoire des particules

Résumé et conclusions

- Analogie effet tunnel et effet peau en optique
- Effet tunnel quantique:
  possibilité de "tunneler" $\longrightarrow$ description ondulatoire des particules
- Applications: microscope effet tunnel et radioactivité α