Approche de la physique quantique

1 qcm / an

Plan :

I- Généralités et problématique de la physique quantique
- a) Rayonnement du corps noir
- b) Effet photo-électrique
- c) Stabilité et spectre des atomes
- d) Dualité onde-corpuscule

II- Apports de la physique quantique
- a) Equation de Schrödinger/puits plat infiniment profond
- b) Interprétation probabiliste
- c) Incertitudes d'Heisenberg

III- Effet tunnel

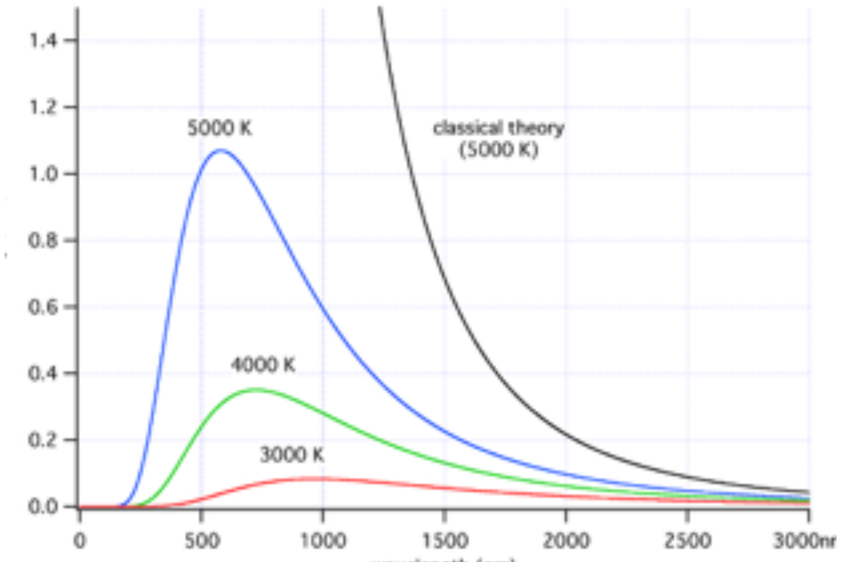
Difficulté du cours : +++
Rentabilité : +++
Parties à ne pas impasser : I- Généralités / II- a) Le puits plat infiniment profond (+++)
Les formules en vert

I- Généralités et problématique de la physique quantique

A la fin du 19e siècle, 2 théories dominent en physique : la **mécanique Newtonienne** et l'**électromagnétisme**. Or, certains phénomènes observés restent non expliqués par ces 2 théories. C'est le cas des 3 situations suivantes :

1- Le rayonnement du corps noir
2- L'effet photoélectrique
3- La stabilité et le spectre des atomes

A) Le rayonnement du corps noir



Définition : Un corps noir est un objet idéal dont le spectre électromagnétique ne dépend QUE de la température (qui n'est habituellement pas le seul facteur)

Théorie classique (courbe noire) : Un corps chauffé à une température T émet un spectre continu. La température augmentant à la surface de l'objet induit une augmentation de l'énergie donc une longueur d'onde de plus en plus faible (rappel : $E = \frac{hc}{\lambda}$)

Théorie du rayonnement du corps noir : On voit clairement sur le **graphique** que les courbes bleue, verte et rouge présentent un pic aux alentours de certaines longueurs d'onde, et **non un spectre continu !**
Noter que le pic se déplace vers les faibles longueurs d'onde (= énergie plus élevée) pour une température augmentant

• Intensité ↑ quand T°c ↑

• λ_{max} ↓ quand T°c ↑

La loi de Wien décrit la relation entre λ_{max} et la T°c :

$$\lambda_{max} * T°c = 0{,}29 \text{ cm.K} = \text{cste}$$

(On retrouve la relation : quand T°c ↑, λ↓)

piège possible : l'unité est le cm.K ≠ cm/K ≠ $cm.K^{-1}$

Historique des théories

1-Planck : Le corps noir est composé d'oscillateurs ayant une fréquence particulière ν. Ces oscillateurs peuvent émettre ou absorber de l'énergie lumineuse par quantités discrètes (les quanta, multiples de la constante de Planck Cf. $h\nu$)

2- Einstein : Ce que dit Planck est vrai ! Mais en plus de ça, le rayonnement électromagnétique est lui aussi quantifié = quantum de rayonnement

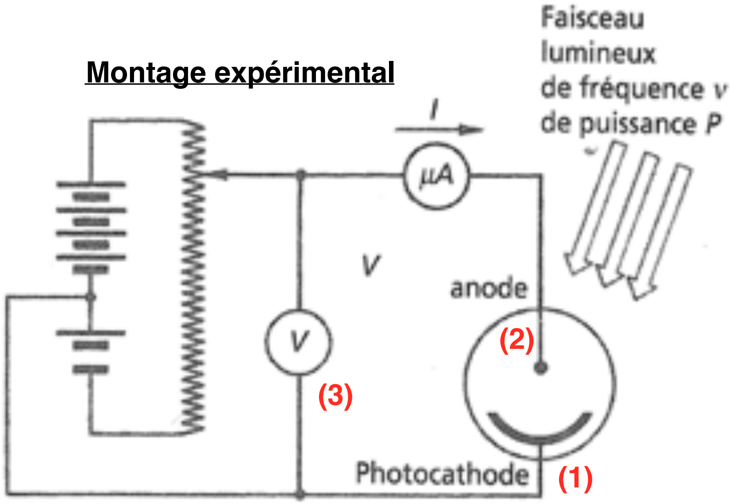
3- Lewis : Ah oui oui ! Je suis d'accord ! D'ailleurs ce quantum de rayonnement s'appelle « photon »

Fun fact : la constante de Planck vaut : $h = 6{,}6.10^{-34}$ J.s (unité d'une action) et non $J.s^{-1}$ (= Watt)

B) Effet photo-électrique

L'explication de cet effet est due à Einstein, attribuant une composante ondulatoire et corpusculaire aux éléments : c'est la dualité onde-particules

<u>Montage expérimental</u>



Le montage expérimental est composé :

- d'une cellule photoélectrique **(1)** (tube <u>à vide</u> composé d'une photocathode, qui « émettra » les électrons, notés e^-),
- d'une anode **(2)** , ainsi que
- d'un générateur de tension **(3)** (qui induira une différence de potentiel positive)

<u>Fun fact :</u> ATTENTION !!
Anode = pôle positif
Cathode = pôle négatif

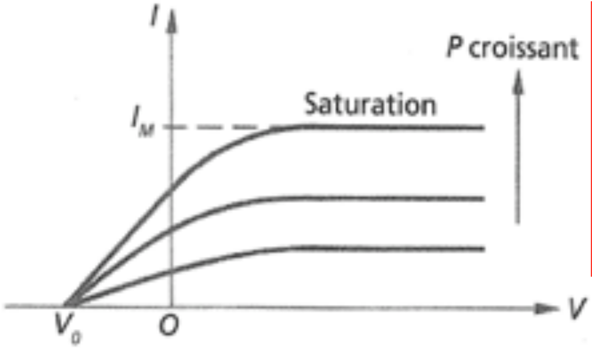
<u>Explication du phénomène</u>

<u>Pré-requis :</u> L'électron est « lié » à la cathode par une force appelée énergie de liaison de l'électron et notée « W »

1. On envoie un faisceau lumineux de fréquence ν et de puissance P sur la photocathode
2. Si la **fréquence** est suffisante pour **arracher** l'électron (càd si $h\nu > W$) alors l'électron va être arraché et va avoir une énergie cinétique : $Ec = h\nu - W$ *(en gros ce qui a été donné moins ce qu'il fallait pour arracher l'électron égal ce qu'il reste à l'électron / le surplus d'énergie)*
3. L'électron peut ne pas avoir assez d'énergie cinétique pour arriver à l'anode malgré le vide *(qui est là pour éviter toute interaction parasite)* d'où l'utilisation d'une **différence de potentiel (ddp) positive** pour **accélérer** les électrons
4. Dans le cas où la ddp est **négative**, elle va **freiner** l'électron qui n'aura plus assez de « vitesse » (Ec) pour atteindre l'anode. Ainsi, le courant obtenu diminuera jusqu'à devenir nul pour une valeur de $V = V_0$ = contre-tension maximale.

Cette contre-tension maximale permet de mesurer l'énergie cinétique de l'électron :
$Ec = h\nu - W = - e^* V_0$

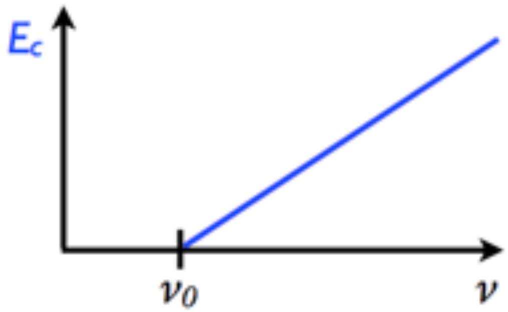
(Ec ne dépend que de ν (qui est liée à V_0) mais ne dépend **PAS** de l'intensité ni de la puissance)



- Si V > 0, l'intensité I augmente avec V jusqu'à saturer
- Si P ↑, Intensité ↑
- Plus V se négativise, plus Intensité ↓ (jusqu'à devenir nulle #V_0)

ddp (= V)	Intensité	Puissance
Accélère les e^-	nb d'électrons arrachés	nb de photons envoyés

- *Plus j'envoie de photons (P), plus j'ai de chances d'ioniser des e-, plus l'intensité (I) va augmenter*
- *Plus j'augmente la ddp (V), plus vite vont arriver mes e- . Mais quand ils arriveront tous, je ne pourrai pas augmenter leur nombre : Intensité (I) sature.*



Graphiquement, on remarque que l'énergie cinétique augmente **linéairement** avec la fréquence à partir d'une fréquence seuil ν_0

Cette fréquence minimale correspond à la fréquence permettant d'arracher un électron (lié à l'atome par son énergie de liaison W).

Cette énergie de liaison, ou **travail d'extraction** vaut:

$W = h\nu_0$

(ν_0 est une donnée intrinsèque du rayonnement et W une donnée intrinsèque caractéristique du métal)

C) Stabilité et spectre des atomes

A la fin du 19e, l'atome est soumis à une vision planétaire avec un noyau positif et des électrons qui gravitent autour : c'est le **modèle de Rutherford**

OR :

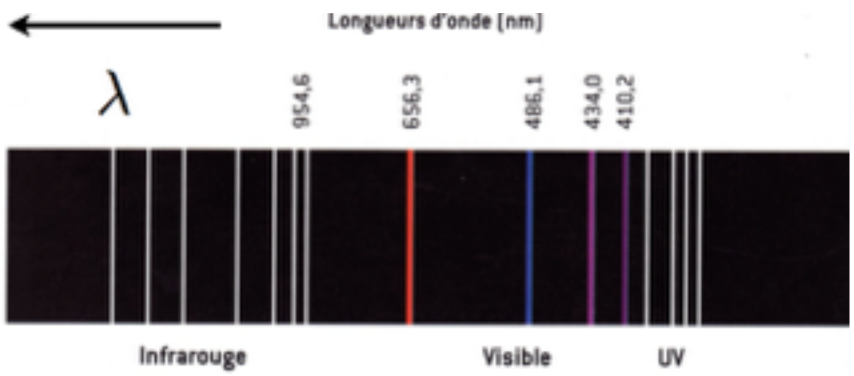
1- D'après la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell, une charge accélérée doit rayonner et donc perdre de l'énergie. Si l'électron perd de l'énergie, alors le rayon de son orbite va être de plus en plus petit jusqu'à s'effondrer sur le noyau : IMPOSSIBLE

2- D'après la 3e loi de Kepler ($\frac{T^2}{r^3} = cste$) , si r↓ , T (période de révolution) ↓ aussi , donc ν↑ , et λ↓. Cela suppose que le spectre de l'atome est continu , or on observe un spectre de raie !!

Quand on excite un atome, on observe un <u>spectre de raie</u> caractéristique de l'atome
(et non un spectre continu théorique)

<u>Exemple :</u> Le spectre de l'atome d'hydrogène

Il s'agit d'un spectre de raies :
- les raies IR découvertes par Paschen,
- les visibles par Balmer,
- les UV par Lyman.



Spectre de l'atome d'hydrogène (1 nm = 10^{-9} m).

Pour tous les atomes, les longueurs d'ondes correspondant aux raies de leur spectre respectif vérifient toutes l'équation :

$$\frac{1}{\lambda_{nm}} = R_H\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

(pour n > m et R la constante de Rydberg)

Le modèle de Rutherford fut repris par Bohr, qui le quantifia : seules certaines orbites sont autorisées, et lors du passage d'une orbite à l'autre il y a émission / absorption de photon.
La différence d'énergie entre deux orbites correspond à la longueur d'onde des raies émises par l'atome et visibles sur le spectre.

Bohr fixe une règle : Le moment cinétique L est quantifié et ne peut prendre que certaines valeurs telles que : $L = n\hbar$.

Les orbites autorisées sont celles qui ont un moment cinétique multiple de $\hbar$ (h barre) .

On en déduit alors que les <u>énergies autorisées</u> vérifient :

$$E_n = -E_H\frac{1}{n^2}$$

(pour E_H = 13,6 eV (énergie d'ionisation de l'hydrogène))

Les <u>rayons</u> valant alors :

$$r_n = a_0 n^2$$

(pour a_0 = 0,53 Å = 0,53 .10^{-10} m)

D) Dualité onde-particules

Louis De Broglie étend le concept en appliquant à toute particule de quantité de mouvement p, une longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Cette formule implique qu'on observe des phénomènes ondulatoires pour les particules aussi. Ces phénomènes, dits quantiques (diffraction, interférences), sont **dominants** :

Si $\lambda \geq a$ ou Si $h \geq pa$

(a = taille de la fente , pa = action caractéristique)

EXEMPLES CALCULATOIRES A SAVOIR FAIRE

Nombre de photons émis par seconde par une lampe à incandescence

(non fait à la TTR)

« Une lampe à incandescence d'une puissance P émet une lumière de longueur d'onde λ.
Calculez le nombre n de photons émis par seconde. »

1- On calcule l'énergie d'un photon : E = hc / λ

2- On divise alors la puissance d'émission de la lampe par l'énergie d'un photon : n = P / E

Explication :
La puissance de la lampe n'est que la « superposition » de la puissance de l'ensemble des photons : càd la puissance d'un photon multipliée par le nombre de photons (le tout en 1 seconde) ! Ainsi le nombre de photons par seconde est donné par le quotient de la puissance de la lampe par l'énergie d'un photon

Exemple : essayez de le faire avant de descendre

Une lampe à incandescence de 100 W émet une lumière à 660 nm. Calculez le nombre de photons émis par seconde.

.
.
.

1- $E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6{,}6.10^{-34} * 3.10^{8}}{660.10^{-9}} = 3.10^{-19}\,J$

2- $n = \frac{P}{E} = \frac{100}{3.10^{-19}} = 3{,}3.10^{20}\ photons.s^{-1}$

- N'oubliez pas qu'on utilise les unités du système international -

Longueur d'onde d'un électron accéléré sous une différence de potentiel

(ça tombe une année sur deux !)

« Calculez la longueur d'onde d'un électron accéléré sous une différence de potentiel de x Volts »

1- Appliquer bêtement la formule $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2eVm}}$

e = 1,6 . 10^(-19) Coulombs
V = différence de potentiel en volts
m = masse de la particule en kg

Ça semble long à faire comme calcul mais il y a une astuce :

=> A 100% sur les dernières années, la particule était un électron !

Donc la seule donnée inconnue dans ce cas reste la ddp

La masse d'un électron est : m = 9,1 . 10^(-31) kg

Ainsi pour un électron :

$$\boxed{\lambda = \frac{h}{\sqrt{2em} * \sqrt{V}} = 1{,}2.10^{-9} * \frac{1}{\sqrt{V}} = \frac{1{,}2.10^{-9}}{\sqrt{V}}}$$

Exemple : Calculez la longueur d'onde d'un électron accéléré sous une différence de 25 Volt

.
.
.
.
.

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2eVm}} = \frac{1{,}2.10^{-9}}{\sqrt{25}} = 2{,}4.10^{-10}\ m$$

II- Apports de la physique quantique

A) Equation de Schrödinger stationnaire unidimensionnelle

Qu'est-ce ?

Il s'agit d'une fonction d'onde qui permet de décrire la forme de l'onde que décrit une particule

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}[E - U(x)]\psi(x) = 0$$

Inutile de l'apprendre par coeur, elle est là pour meubler l'espace ! A la limite, sachez à quoi elle ressemble et quels éléments la constituent.

Cette équation n'a de solutions que pour certaines valeurs de E

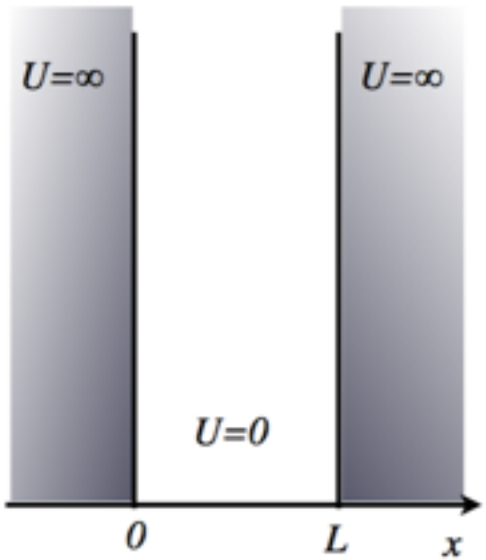
Le puits plat infiniment profond

Concept :

On confine un électron sur une direction particulière x entre deux « murs » qui sont des zones de potentiel électrique infini : l'électron peut se « balader » entre les deux murs mais ne peut les traverser

Mathématiquement :

Les solutions de l'équation doivent être nulles en dehors de l'intervalle [0 ; L] car la probabilité que l'électron s'y trouve est nulle.



Entre 0 et L, on a affaire à une onde dont la forme est :

$$\Psi(x) = C \sin(kx)$$

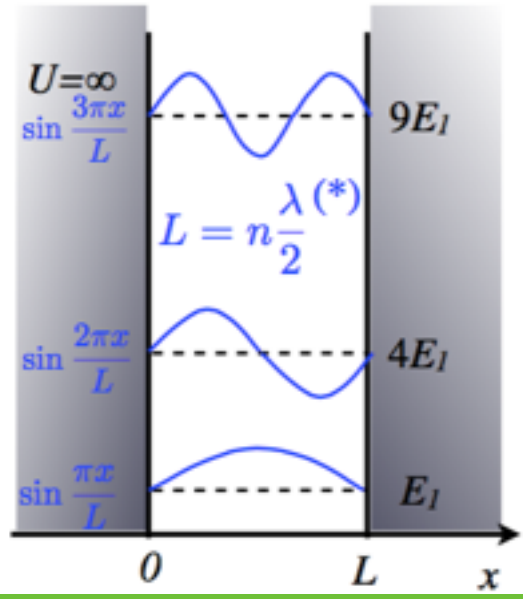
Si les solutions doivent s'annuler en 0 et L alors $\Psi(0) = 0$ et $\Psi(L) = 0$

- Pour 0 : $C*\sin(k * 0) = C*\sin(0) = 0$ => c'est réglé
- Pour L : $C*\sin(kL) = 0 \iff \sin(kL) = 0$

Pour qu'un sinus = 0 , il faut qu'il soit égal à un multiple de π
D'où **kL = nπ** , pour k le nombre d'onde = (2π) / λ

In fine : $\boxed{L = n\frac{\lambda}{2}}$

Analogie avec les modes de vibrations d'une corde de longueur finie



Les énergies (ordonnées) sont données par :

$$E_n = n^2\frac{h^2}{8mL^2} = n^2E_1$$ (pour E1, le niveau fondamental)

Lorsque L augmente, càd que le système devient macroscopique, les niveaux d'énergies se resserrent de plus en plus et le fondamental est plus faible

B) Interprétation probabiliste *(non fait à la TTR)*

Théorie : la bonne interprétation de l'équation de Schrödinger se fait de manière **probabiliste**

Cette description relie le module carré de la fonction d'onde à la probabilité de présence de la particule dans un volume dV

$$dP = |\psi(x,y,z)|^2 dV$$

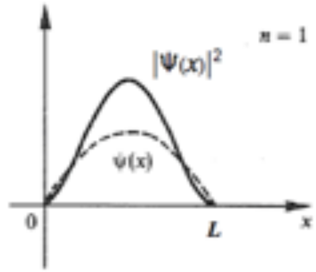
La probabilité de présence doit satisfaire la condition de normalisation (∑ toutes probas = 1)

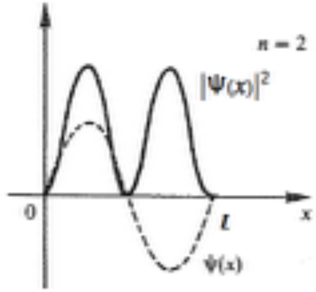
$$1 = \int dP = \int_0^L C^2 \sin^2 kx\,dx$$

Donc une **amplitude** C : $\boxed{C = \sqrt{\frac{2}{L}}}$

dans notre cas du puits :

pour n=1, la probabilité est maximale au centre et minimale aux extrémités

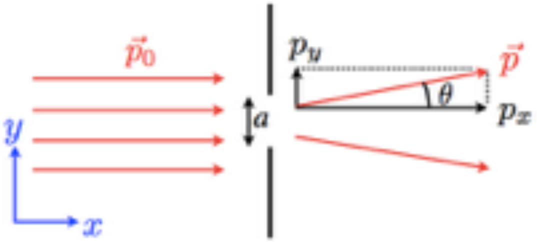




pour n=2, la probabilité est minimale au centre et maximale à 1/4 et 3/4 de L

C) Les relations d'incertitude de Heisenberg *(non fait à la TTR)*

En envoyant un grand nombre d'électrons à travers une fente de largeur a , on obtient une figure avec une concentration maximale d'impacts au centre. Le problème est qu'on ne saurait situer précisément l'électron pendant son trajet : on a des incertitudes.



Si on gagne en précision sur une des 2 composantes, on perd en précision sur l'autre

Incertitude sur la quantité de mouvement : *(qui a été modifiée après la déviation due à la fente)*

$$\Delta p = p_y = \frac{h}{a}$$

Incertitude sur la position :

$$\Delta y \cong a$$

$$\Delta y \Delta p_y \approx h$$

Le produit de l'incertitude sur la **temps** et sur l'**énergie** donne :

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

De plus, Heisenberg établit une relation selon x, appelée relation position-impulsion : $\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$

$$\Delta E \Delta t = \Delta x \Delta p_x$$

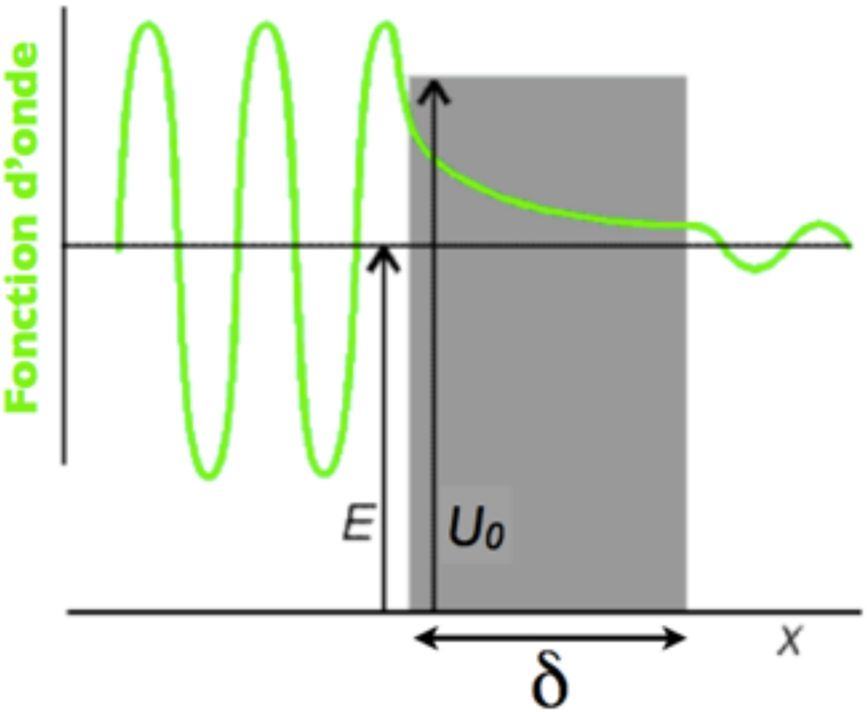
III- Effet tunnel

*Imaginons un électron dans un système semi-conducteur (càd un puits sans fond avec des isolants de potentiel **NON** infini cette fois) qui rencontre une paroi isolante **peu** épaisse.*

Si elle n'est pas épaisse , on peut espérer que l'électron puisse passer à travers.

Classiquement, une particule dont l'énergie *E* est inférieure à la hauteur U_0 d'une barrière d'énergie potentielle **rebondit** !

Quantiquement, la particule peut franchir la barrière avec une **probabilité réduite mais non nulle** qui est donnée, dans la limite d'une barrière suffisamment large ***(Voir condition ci-dessous)***



Ici, l'onde a réussi à traverser le mur de potentiel ! Malgré sa forte diminution en amplitude on voit qu'elle est « passée » et qu'elle a repris son rythme sinusoïdal.

La probabilité de passage est donnée par :

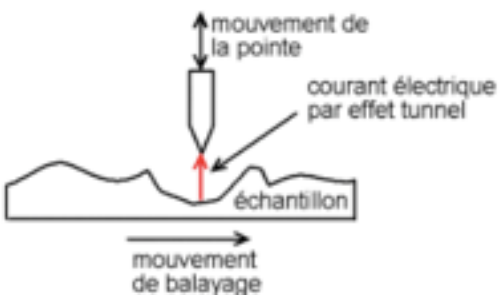
$$\boxed{P \propto e^{\frac{-2\delta}{\lambda_0}}}$$

δ = largeur du mur

Noter qu'avec cette formule, on se rend bien compte qu'avec un mur moins épais, la probabilité de passage augmente

CONDITION : Ce raisonnement fonctionne si et seulement si : **la barrière est suffisamment large par rapport à la longueur d'onde de la particule**

$$\delta \gg \lambda_0$$



Le **microscope à effet tunnel** (en anglais STM *Scanning Tunneling Microscope*) utilise cet effet purement quantique pour déterminer la morphologie de surfaces conductrices ou semi-conductrices avec une **résolution spatiale pouvant être égale ou inférieure à la taille des atomes.**

Fun fact :

la précision sur P (= δP/P) vaut :

$$\frac{\Delta P}{P} = 2 * \frac{\Delta \delta}{\lambda_0}$$

3 petits qcm d'entraînement

<u>QCM 1</u> : A propos du rayonnement du corps noir :

A) Le rayonnement du corps noir s'inscrit dans la théorie mécanique classique
B) La loi de Wien nous dit que λ_{max}*T = 0,29 cm.K^{-1}
C) La théorie classique montre qu'il y a des pics d'intensité déterminée suivant la température du corps
D) Le spectre électromagnétique du corps noir ne dépend que de la température
E) Les réponses A, B, C et D sont fausses

<u>QCM 2</u> : Concernant l'effet photoélectrique :

A) L'intensité du courant atteignant l'anode augmente lorsque la puissance du rayonnement diminue
B) Pour une fréquence de rayonnement inférieure à la fréquence seuil, lorsque la puissance du rayonnement augmente alors l'intensité augmente aussi
C) Pour une fréquence de rayonnement supérieure à la fréquence seuil, l'énergie cinétique des électrons augmente linéairement avec la fréquence
D) La ddp permet d'accélérer les protons
E) Les réponses A, B, C et D sont fausses

<u>QCM 3</u> : A propos de l'effet tunnel :

A) Il est visible dans le cas d'un puits plat de murs au potentiel infini
B) Plus le mur est large, plus la probabilité de passage est faible
C) Pour le niveau fondamental, la probabilité de présence est maximale au centre
D) Son application la plus concrète s'observe en microscopie
E) Les réponses A, B, C et D sont fausses

Correction

<u>QCM 1</u> : A propos du rayonnement du corps noir :

A) faux ! aucun des phénomènes vus ne s'inscrit dans cette théorie
B) faux ! cm.K !!!!! les unités o/
C) faux , c'est la théorie quantique qui nous dit ça
D) vrai
E) faux

Réponse : D

<u>QCM 2</u> : Concernant l'effet photoélectrique :

A) faux ! les 2 varient ensemble : I augmente quand P augmente
B) faux : si la fréquence de rayonnement est inférieure à la fréquence seuil, aucun électron ne part
C) vrai
D) faux : elle accélère les électrons #piège-en-carton
E) faux

Réponse : C

<u>QCM 3</u> : A propos de l'effet tunnel :

A) faux : murs de potentiel NON infini
B) vrai : ça marche par logique et par la formule
C) faux : qui a parlé d'énergie dans l'exemple de l'effet tunnel ? ON NE PANIQUE PAS QUAND CE N'EST PAS DANS LA BONNE PARTIE DE COURS
D) vrai : easy peasy money
E) faux

Réponse : BD

C'EST LA FIN pour cette TTR ! Vous remarquerez que les fiches sont très développées afin que vous puissiez dégrossir au plus possible le cours !

Elles vous serviront tout au long du semestre et seront mises à jour en cas de changement !
N'hésitez pas pour tout retour sur la mocheté, tout caractère erroné, ou doute sur le forum ou en mp !

Bon courage à tous ;) On vous veut l'an prochain !!!

Lâchez un poce blo ! Partagez avec vos amis et abonnez-vous !!!

Ecubas