

## Fiche n°4 (ronéo 4) : Physique Quantique

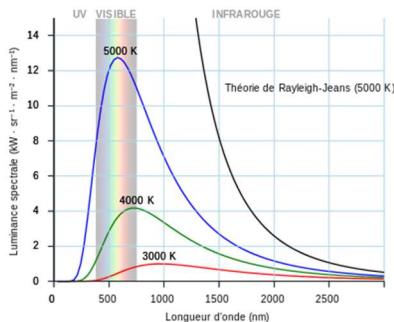
### I. Les grandes étapes historiques de la physique quantique

À la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, la physique était divisée en théories principales : la mécanique de Newton et l'électromagnétisme de Maxwell

#### A. Le rayonnement du corps noir

On peut comparer un corps noir à un four : c'est un milieu avec un équilibre thermique qui échange de l'énergie avec lui-même.

Un corps chauffé change de **couleur** car d'**énergie** et donc de  $\lambda$ . (non dit 2018-2019)



Pour un objet à 5000K, les prédictions théorique nous donnent une courbe divergeant vers l'infini, or par les mesures on s'aperçoit que la courbe obtenue est bien différente (cf schéma).

Si on prend la  $\lambda_{\max}$  et la  $T^{\circ}K$  → on obtient la **loi de déplacement de Wien** :

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{constante} = 0,29 \text{ cm} \cdot K$$

$$\lambda_{\max} = \frac{0,29}{T}$$

En QCM, on peut l'arrondir à  $0,3 \text{ cm} \cdot K$

**NB :** Pour la loi de Wien,  $\lambda$  est en nm

La théorie classique ne marchant que pour des grandes  $\lambda$  (donc basses E), **Planck** découvre les courbes du corps noir.

Quand la  $T^{\circ}C \uparrow$  les rayons sont de longueurs d'onde **de + en + courtes**, les fréquences sont cependant plus élevées car

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Plus la  $T^{\circ}C$  est grande, plus l'intensité lumineuse est grande, plus les  $\lambda$  sont basses.

**Planck répond :** la matière est constituée d'**oscillateurs avec une fréquence caractéristique**. Il y a alors des échanges que par des **qtités discrètes** : des **quantas** d'énergies multiples d'une énergie minimale  $h\nu$ .

**Einstein rétorque :** REM → constitués de **particules**

= quantum de **rayonnements** :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \hbar \cdot \omega \text{ avec } \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

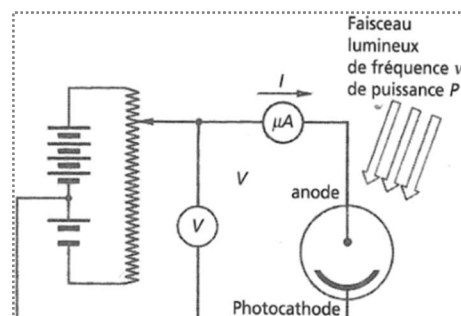
**Lewis débarque :** paquets de lumière = photons

#### B. L'effet photoélectrique

**Hertz a montré :** si on envoie de la **lumière UV** sur du métal, alors on **arrache des  $e^-$**  de ce **métal**. L'anode capte une partie de ces électrons.

**Description du montage :**

- vide **poussé** dans cellule photoélectrique
- faisceau d'ORM (généralement dans les UV)
- **photocathode** captant le faisceau lumineux
- **générateur de tension** aux bornes du système



**Point unités**

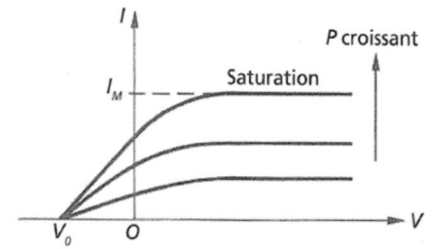
- $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot s$  → Constante de Planck
- $T$  = température en K
- $T^{\circ}K = T^{\circ}C + 273$
- $\lambda$  = longueur d'onde en m
- $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot s^{-1}$

**Ainsi on observe que :**

→ si on augmente la **tension**, le **courant** augmente jusqu'à une valeur constante : le courant de **saturation**

→ si on diminue la **tension**, le **courant** diminue jusqu'à des **valeurs inférieures à**

$|V_0|$  = **contre tension maximale**, valeur à partir de laquelle il n'y a plus de courant



**Explication :** On arrache les  $e^-$  qui ont une **énergie cinétique**.

Si la contre tension est **positive** →  $e^-$  attirés vers l'**anode** →  $e^-$  **accélérés**

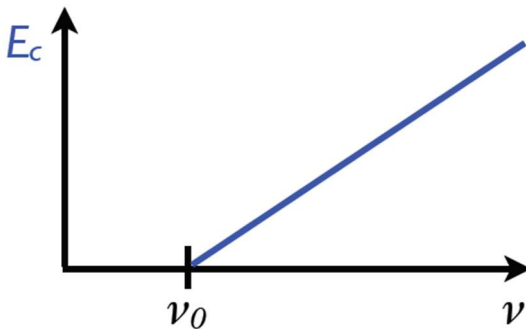
Si la contre tension est **négative** →  $e^-$  attirés vers la **cathode** →  $e^-$  **décélérés**

Si la contre tension est **négative** et **inférieure à  $V_0$** , les  $e^-$  sont tellement ralentis qu'ils se retrouvent arrêtés, le courant est alors **interrompu**.

On a la relation :

$$E_c = e|V_0|$$

Ainsi l' $E_c$  **ne dépend pas de l'intensité lumineuse** car quand l'**intensité** augmente, le **nombre d' $e^-$  arrachés augmente** mais leur énergie est la même.



La **puissance de rayonnement** dépend du **nbre de photons** arrivant sur la **photocathode**. Plus la **puissance** est élevée, plus on arrache d' $e^-$ , plus le **courant de saturation** augmente.

On observe que l'**énergie cinétique** augmente **linéairement** avec la fréquence à partir d'une **fréquence seuil  $\nu_0$** .

**NB1 :** quel que soit le type de métal, il y a une **même pente k**, le coefficient directeur de cette droite est la **constante de Planck !**

**NB2 :** La valeur seuil va dépendre du métal que l'on utilise pour la photocathode.

**Einstein explique :** Le 0 correspond à un électron libre, s'il est lié à la photocathode, l'énergie sera négative → l'énergie du photon doit être supérieure à cette énergie de liaison (aussi appelée travail d'extraction). L'effet PE met en évidence le côté particulaire de la lumière. On a :

$$E_c = h \cdot \nu - W = h \cdot \nu - h \cdot \nu_0 = h(\nu - \nu_0)$$

Calcul du **nombre de photons émis par s :**

$$n = \frac{\text{énergie de la lampe}}{\text{énergie d'un photon} = h\nu}$$

### C. Stabilité et spectre des atomes

**Thomson pense** : PUDDING (miam). C'est un modèle où tout se mélange.

**Rutherford explique** : **modèle planétaire de l'atome**. Rutherford a finalement raison.


Dans le cas de l'atome d'H, le proton gravite autour de l'électron avec un **mouvement circulaire uniforme**, en possédant une **accélération centripète**.

Si une charge est **accélérée**, elle doit **rayonner** car elle **perd de l'énergie**, elle se rapprocherait du proton. Or puisque  $\frac{T^2}{R^3}$  doit rester constant (**3<sup>ème</sup> loi de Kepler**) → l'e<sup>-</sup> devrait s'effondrer sur le proton et émettre un **spectre continu**, or quand un atome est excité, on obtient un **spectre de raies**.

**Exemple du spectre de raies de l'atome d'hydrogène** :

- **Balmer** l'observe dans le **visible**
- **Lyman** dans l'**UV**
- **Paschen** dans l'**IR**

Les raies de Balmer correspondent à certains couples de valeurs :  $m = 2$  et  $3 \leq n \leq 6$

**Point unités** 

- $R_h = 1,097.10^7 m^{-1}$   
= constante de Rydberg
- $m$  = numéro de couche du premier e<sup>-</sup>
- $n$  = numéro de couche du deuxième e<sup>-</sup>

Les **longueurs d'onde émises** par l'H vérifient :  
Cette formule marche en fait avec tous les atomes

$$\frac{1}{\lambda} = R_h \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

**Bohr répond avec son modèle d'atome** : seules certaines orbites sont autorisées ; le **passage d'un orbite à un autre** nécessite **émission/absorption photon**. Il postule que le moment cinétique des e<sup>-</sup> est quantifié et est un multiple de  $\hbar$ .

**Énergie mécanique de l'électron** :

$$E_n = -k^2 \frac{me^4}{2\hbar n^2} = -\frac{E_h}{n^2}$$

**Rayon des orbites** :

$$r_n = a_0 \cdot n^2 = 5,3 \cdot 10^{-9} n^2$$

### D. Dualité onde-corpuscule : au-delà du photon

**De Broglie** : étend **dualité onde/particule** à **toute particule de matière** ; on observe des **figures de diffractions** avec un faisceau d'électrons, ce **phénomène** est **proprement ondulatoire**.

Ainsi :  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$

Énergie cinétique d'une particule :

$$\frac{1}{2}mv^2 = e \cdot V \Leftrightarrow mv = \sqrt{2eV}$$

Application du calcul **longueur d'onde e<sup>-</sup>** :

$$\lambda = \frac{1,2 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{V}}$$

Pour les protons + neutrons :

$$\lambda = \frac{2,9 \cdot 10^{-11}}{\sqrt{V}}$$

**⚠** suivant la valeur de  $\lambda$  trouvée → phénomènes quantiques : **diffractions, interférences**  
→ dominants si  $\lambda \gtrsim a$  et  $pa \lesssim h$

**NB** : Les valeurs des longueurs d'onde retrouvées pour les électrons, protons et neutrons sont proches du rayon des atomes ! L'aspect ondulatoire est donc essentiel pour ces particules (mais pas dans la vie de tous les jours).

## II. Apports de la physique quantique à la physique moderne

### A. L'équation de Schrödinger stationnaire

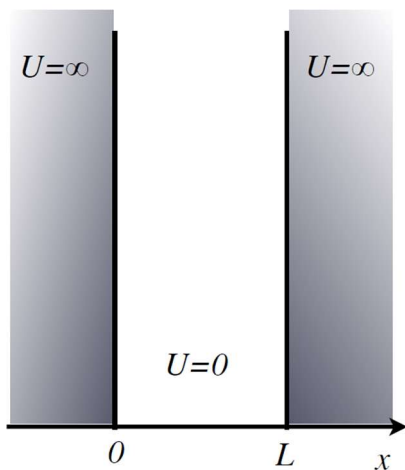
Elle permet de décrire la forme de l'onde que décrit une particule.

→ **équation différentielle** :  $\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}[E - U(x)]\psi(x)$

Les solutions n'existent que pour des valeurs particulières de E

→ la description ondulatoire des systèmes quantiques conduit à la quantification de l'énergie

Il y a toute une démonstration de cette formule mais ça surchargerait la fiche, on vous mettra en ligne une fiche pour toi Jean Michmich Démonstration 😊



#### Le puits plat infiniment profond :

Particule dans quelque chose l'empêchant de sortir. On considère qu'elle est soit au repos, soit en mvt (sans frottements), elle peut être dans tous les états d'énergie possibles.

L'énergie potentielle est **nulle** entre 0 et L/**infinie** en dehors de cette région

En dehors de la zone de confinement

→ **fonction d'onde de la particule nulle**

→ **non-nulle** entre 0 et L

→ **s'annule** en 0 et en L

Ainsi on obtient l'**énergie de la particule** :

$$= n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$$

$$E = n^2 \cdot \frac{h^2}{8mL^2} = n^2 \cdot E_1$$

→ L'énergie de la particule est **quantifiée** du fait de son confinement.

Puisque la fonction  $\psi(x) = C \cdot \sin(kx)$  s'annule en 0 et en L :

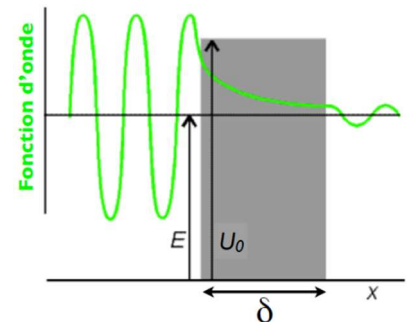
- si  $x = 0$ ,  $\psi(0) = C \cdot \sin(k \cdot 0) = 0$

- si  $x = L$ ,  $\psi(L) = C \cdot \sin(kL) = 0 \Rightarrow k = n \frac{\pi}{L} \Leftrightarrow L = n \frac{\lambda}{2}$

### B. Effet tunnel et microscopie

C'est un autre phénomène lié à la physique quantique.

**Selon la mécanique classique**, si une particule avec une **énergie**  $E < \text{hauteur } U_0$  de la barrière essaie de **franchir cette barrière** avec une certaine  $E_c$ , elle fera demi-tour lorsque  $E_{pot} = E_{totale}$ .



**La physique quantique** dit que, la particule peut **franchir** la barrière avec un **proba réduite mais non nulle**, si la couche de cette barrière est **suffisamment fine** ; une partie de l'onde associée à la particule peut **s'étendre au-delà de l'endroit où l'EP devient plus grande**. L'**amplitude** de cette onde va diminuer de façon **exponentielle**.

L'**amplitude de probabilité** est reliée à un **paramètre  $\lambda$** , qui peut se calculer par la **différence d'énergie**  $U_0 - E$ .

On en déduit la distance sur laquelle l'effet tunnel peut avoir lieu :

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

#### Application : microscopie par effet tunnel

→ utilisation de cet effet **purement quantique** pour déterminer **morphologie de surfaces conductrices/semi-conductrices** avec **résolution spatiale  $\leq$  taille des atomes**.