

FICHE N°3 : PHYSIQUE QUANTIQUE

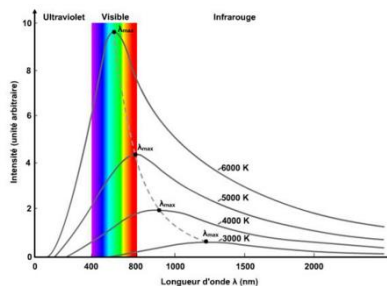
I. Les grandes étapes historiques de la physique quantique

À la fin du 19ème siècle, la physique était divisée en **2 théories principales** : la mécanique de Newton et l'électromagnétisme de Maxwell

1. LE RAYONNEMENT DU CORPS NOIR

Si on chauffe un corps à une certaine température, il émettra un **spectre continu** de REM. Un corps chauffé **change de couleur** car **d'énergie** et donc de **longueur d'onde**.

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**.



Pour un objet à 5000K, les **prédictions théoriques** 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 λ_{max} et la $T^{\circ}K$ → on obtient **la loi de déplacement de Wien** :

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

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

NB : Pour la loi de Wien, λ est en cm

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

Quand la $T^{\circ}C$ ↗ 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 λ sont basses.

La théorie classique ne marchant que pour les **grandes λ** (donc basses E), **Planck** découvre les courbes du corps noir en faisant l'hypothèse que les échanges d'énergie se font de manière **discontinue**.

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

Einstein rétorque : REM → constitués de **particules** = **quantum de rayonnements** :

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

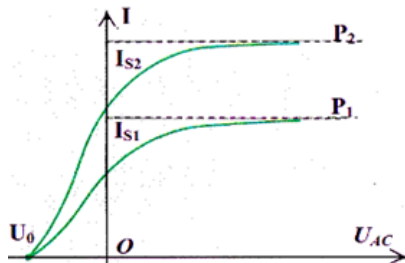
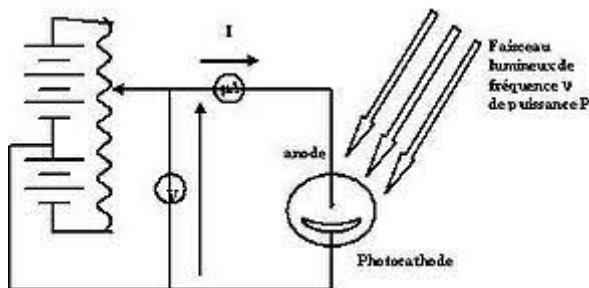
Lewis débarque : paquets de lumière = **photons**

Instant unités :

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

2. L'EFFET PHOTOELECTRIQUE

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'OEM (généralement dans les UV)
- photocathode captant le faisceau lumineux
- générateur de tension aux bornes du système

→ Si on augmente la tension : courant **augmente** jusqu'au **courant de saturation** (valeur constante)

→ Si on diminue la tension : le courant **diminue** jusqu'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 :

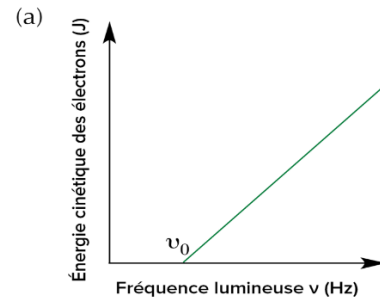
$$E_c = e \cdot |V_0|$$

Ce n'est donc pas la tension qui arrache les électrons mais bien les photons (grâce à leur énergie).

Ainsi **l'énergie cinétique 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 ν_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 !** (Si c'est pas incroyable ça !)

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** → Pour **extraire un électron** de la photocathode, **l'énergie du photon doit être supérieure à l'énergie de liaison de l'électron** → **travail d'extraction.**

→ On a :

$$E_c = e|V_0| = h\nu - W = h\nu - h\nu_0 = h(\nu - \nu_0)$$

Calcul du nombre de photons émis par s :

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

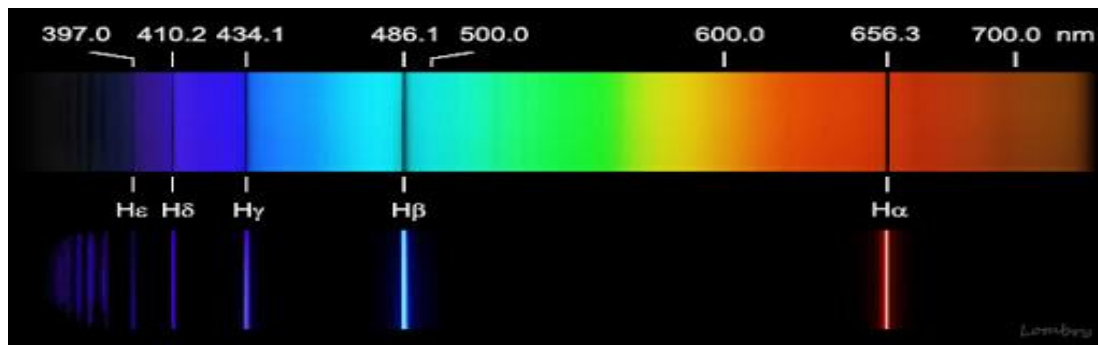
3. STABILITE ET SPECTRE DES ATOMES

Thomson : la matière est composée de **particules négatives baignant dans une « soupe » de charges positives** à la manière de prunes dans un **pudding** (bon appétit !).

Rutherford : charges **positives au centre** et **négatives à la périphérie** → **modèle planétaire**

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 $\frac{r^2}{R^3}$ **doit rester constant** (3 ème loi de Kepler) → l'e- 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** (les raies de Balmer correspondent à certains couples de valeurs : $m = 2$ et $3 \leq n \leq 6$)
- **Lyman** dans l'**UV**
- **Paschen** dans l'**IR**

Les **longueurs d'onde émises par l'H** vérifient l'équation :

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

Explication par Bohr : il faut **quantifier le mouvement des électrons** tout comme on quantifie l'énergie des photons → le moment cinétique des électrons est quantifié et est un **multiple de h** . Cela signifie que **seules certaines orbites sont autorisées** ; le passage d'une orbite à une autre nécessite **émission/absorption photon**.

Instant unités :

- $R_h = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ = constante de Rydberg
- m = numéro de couche du premier e-
- n = numéro de couche du deuxième e-

Energie mécanique de l'électron :

$$E_m = -k^2 \frac{(me^4)}{2\hbar^2 n^2} = -E_H \frac{1}{n^2}$$

Rayon de l'orbite :

$$r_n = a_0 n^2 \text{ où } a_0 = 0,53 \text{ Å le rayon de Bohr}$$

4. DUALITE ONDE-CORPUSCULE : AU-DELA 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, **tout électron possède une longueur d'onde** telle que
avec mv = quantité de mouvement

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

Longueur d'onde d'un électron sous une ddp de 100 V :

$$\lambda = \frac{h}{mv} \text{ or } \frac{1}{2}mv^2 = eV \Leftrightarrow mv = \sqrt{2eVm}$$

$$\text{Donc } \lambda = \frac{h}{\sqrt{2eVm}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \times 100 \times 9,1 \cdot 10^{-31}}} = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 1,2 \text{ \AA}$$

Interlude : application numérique et astuces QCM

Pour ces QCMs : en général **seul le voltage change**. Donc dans ce cas, pour simplifier le calcul, on peut faire :

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

Ou alors, on peut utiliser le fait qu'on sait que **la longueur d'onde varie de manière inversement proportionnelle avec la racine du voltage**. Donc si V augmente d'un facteur 9, la longueur d'onde diminue d'un facteur $\sqrt{9}$.

/!\ suivant la valeur de λ trouvée \rightarrow phénomènes quantiques : diffractions, interférences \rightarrow dominants si $\lambda \gtrsim a$ et $pa \lesssim h$ avec pa l'action caractéristique.

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

1. L'EQUATION DE SCHRÖDINGER STATIONNAIRE

Nombre d'onde de De Broglie :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

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

\rightarrow Equation différentielle

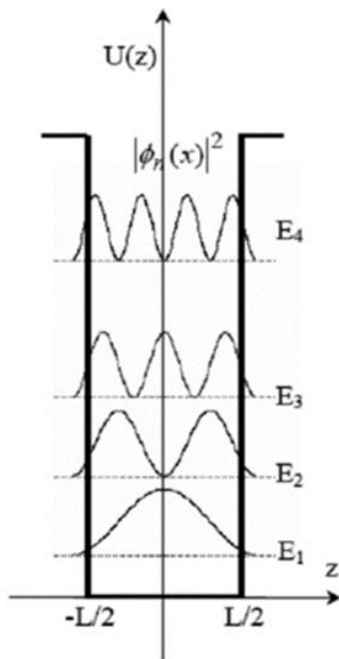
$$\frac{d^2\psi(x)}{d(x)^2} + \frac{2m}{h^2}(E - U(\vec{r}))\psi(x)$$

Les solutions d'une équation différentielle sont **localisées** et n'existent que pour **certaines valeurs de E**. Cette équation donne donc des **nombres quantiques particuliers** qui correspondent au **modèle en couche de Bohr**.

Il y a toute une démonstration de cette formule mais ça surchargerait la fiche, allez voir la ronéo de l'an dernier ou la fiche des tutrices de l'an dernier si vous êtes fans de démonstrations !

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

2. LE PUITS PLAT INFINIMENT PROFOND



Mise en place : Particule dans une boîte dont **elle ne peut sortir**. On considère qu'elle est soit au repos, soit en mouvement (sans frottements), elle peut être dans tous les états d'énergie possibles. L'énergie potentielle **est nulle à l'intérieur** de la boîte et **infinie en dehors** → la fonction psy s'annule sur les bords

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

- si $x = 0, \psi(0) = C \cdot \sin(k0) = 0$

- si $x = L, \psi(L) = C \cdot \sin(kL) = 0 \Rightarrow$

$$k = \frac{n\pi}{L} \Leftrightarrow L = \frac{n\pi}{k} = \frac{n\lambda}{2}$$

→ La longueur de la boîte doit un **multiple de la demi-longueur d'onde**, elle est donc **quantifiée**.

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

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

3. INTERPRETATION PROBABILISTE DE LA MECANIQUE QUANTIQUE

Cette interprétation est une interprétation probabiliste de la **fonction d'onde de Schrödinger** ; l'onde $\psi(x)$ ne peut pas être mesurée de façon continue. Elle dit que le **module carré** de la fonction d'onde complexe relié à la **probabilité de présence** de la particule dans un volume $dV = dx dy dz$, vaut :

On reprend l'exemple de la particule confinée dans le puits plat infiniment profond :

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

Pour $n=1$ → la particule a plus de chances de se retrouver **au centre** que sur les bords. La proba de trouver la particule est **maximum au centre** et **minimum aux extrémités**.

Pour $n=2$ → la proba de trouver la particule est **minimum au centre et au niveau des extrémités** mais **maximum à $\frac{1}{4}$ et à $\frac{3}{4}$ de L** .

Ainsi, plus $n \nearrow$, plus il y a d'endroits avec **proba nulle/proba max** de trouver la particule. On a donc :

$$c = \sqrt{\frac{2}{L}}$$

4. RELATION D'INCERTITUDE DE HEISENBERG

C'est une conséquence de l'équation de Schrödinger.

Si un faisceau de particule subit une diffraction, au moment où la particule traverse la fente, on a une idée sur son emplacement et une idée sur l'extension de sa quantité de mouvement selon y .

Si on analyse la trajectoire de la particule → détermination de sa position de départ avec une incertitude $\Delta y \approx a$ (avec a largeur de la fente).

Si on regarde la figure de diffraction sur un écran → particules déviées d'un angle θ → quantité de mouvement transverse modifiée → incertitude sur quantité de mvt :

$$\Delta p = p_y \approx p_0 \theta = \frac{h}{\lambda} \times \frac{\lambda}{a} = \frac{h}{a} \Leftrightarrow \Delta p \cdot \Delta y \approx h$$

Heisenberg montre : le produit de l'incertitude de la position de la particule par l'incertitude sur la quantité de mvt est supérieur ou égal à $\frac{h}{2}$:

$$\Delta p \cdot \Delta y \geq \frac{h}{2}$$

Si on **gagne en précision** sur **l'une des deux** composantes → **perte de précision sur l'autre**.

Heisenberg montre : lien entre **incertitude sur le temps et incertitude sur l'énergie** :

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2}$$

→ si on veut une grande précision sur l'énergie d'une particule

→ on doit l'observer pendant très longtemps.

Les deux relations de Heisenberg sont **très liées** :

Par une jolie démonstration mathématique (que je vous laisse checker sur le diapo si vraiment ça vous intéresse) nous trouvons :

$$\Delta p \cdot \Delta y = \Delta E \cdot \Delta t$$

Interprétation relation incertitude temps-énergie :

Pour un système avec énergie pas bien définie, plus ΔE est grand, plus le temps caractéristique d'évolution est court car

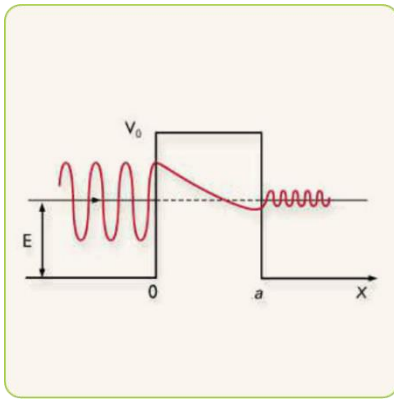
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2}$$

On a cependant aucun état stationnaire, ainsi pour un atome dans un **état excité** → se désexcite **en émettant un photon** au bout de $\Delta t = \tau \approx 10^{-9} \text{ s}$ et ainsi $\Delta E = \frac{h}{\tau} \approx 10^{-6}$

5. EFFET TUNNEL ET MICROSCOPIE

Selon la **mécanique classique**, si une particule avec une **énergie $E_c < \text{hauteur } V_0$** essaie de traverser cette barrière, elle n'y parviendra pas et fera **demi-tour**.

Selon la **physique quantique**, 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**. Donc la particule peut **franchir la barrière** avec une proba réduite mais non nulle, si la couche de cette barrière est suffisamment fine.



L'**amplitude de probabilité** est reliée à un **paramètre λ** , qui peut se calculer par la différence d'énergie $V_0 - E$.

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 grâce à une pointe conductrice**.

C'est finiiiiiii !

Bravo à vous d'être arrivés à la fin de cette fiche, bon courage avec la physique quantique, même si c'est compliqué les QCMs ne le sont pas vraiment.

Je vous laisse avec cette phrase qu'avait dite Feynman à ses étudiants de physique quantique : « si vous m'avez compris, c'est que je n'ai pas été clair. » Donc c'est normal si vous trouvez ça difficile, mais accrochez-vous !