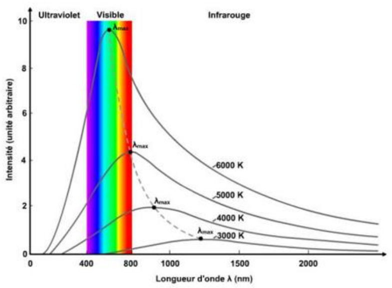
FICHE N°3 : PHYSIQUE QUANTIQUE

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

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 $\boldsymbol{\lambda_{max}}$ et la T°K → on obtient **la loi de déplacement de Wien :**

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

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

NB : Pour la loi de Wien, λ est en nm

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

Quand la **T°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°C est grande, plus l'intensité lumineuse est grande, plus les λ 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 *hv*.**

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

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = h\omega\ avec\ h$$

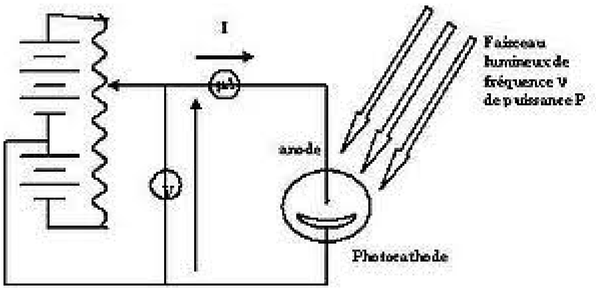
Lewis débarque : paquets de lumière = photons

Instant unités :

- $\boldsymbol{h}$ = $6{,}6.10^{-34} J.s$ → Constante de Planck
- $\boldsymbol{T}$ = *température* en K
- $T°K = T°C + 273$
- $\boldsymbol{\lambda}$ = *longueur d'onde* en m
- $\boldsymbol{c}$ = $3.10^{8}\ m.s^{-1}$

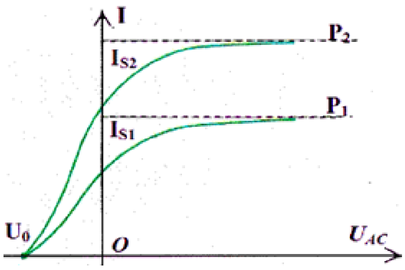
2. L'EFFET PHOTOELECTRIQUE

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



<u>Description du montage</u> :

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



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

→ **Si on diminue la tension** : le courant **<u>diminue</u>** jusqu'à des valeurs inférieures à $|V_0| =$ contre tension maximale, valeur à partir de laquelle il n'y a plus de courant

<u>Explication</u> : On arrache les e- qui ont une **énergie cinétique.**

Si la contre tension est **positive** → e- attirés vers l'anode → e- **<u>accélérés</u>**

Si la contre tension est **négative** → e- attirés vers la cathode → e- **<u>décélérés</u>**

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 **<u>interrompu.</u>**

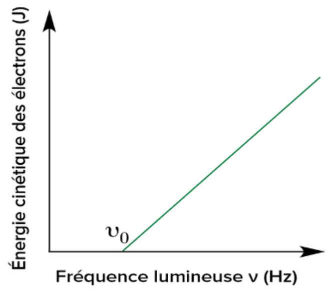
On a la relation : $E_c = e.|V_0|$

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 □□.**

(a)



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

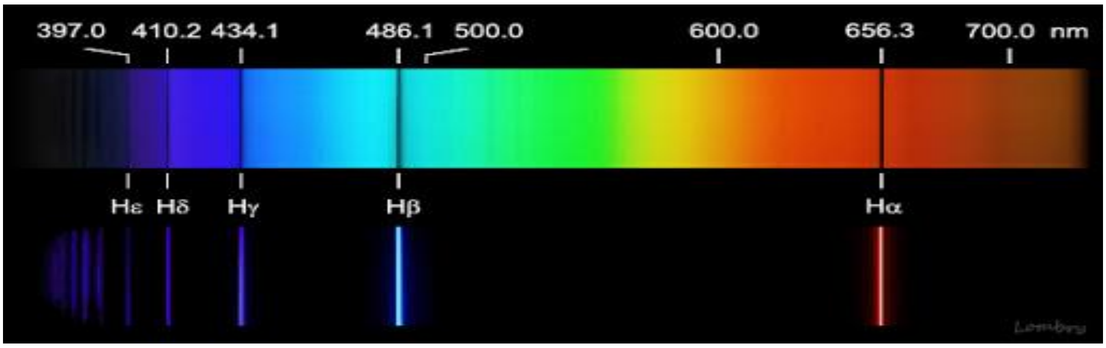
3. STABILITE ET SPECTRE DES ATOMES

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 $\frac{T^2}{R^3}$ 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 (fonctionne en fait avec tous les atomes)vérifient l'équation :

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

Instant unités :

- $\boldsymbol{Rh}$ = 1,097.$10^7\ m^{-1}$ = *constante de Rydberg*
- $\boldsymbol{m}$ = *numéro de couche du premier* e-
- $\boldsymbol{n}$ = *numéro de couche du deuxième* e-

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.

Energie mécanique de l'électron :

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

Rayon de l'orbite :

$$r_n = a_0n^2 \text{ où } a_0 = 0,53\ \text{Å le rayon de Bohr}$$

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

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

avec mv = quantité de mouvement

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

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

Donc $\boldsymbol{\lambda} = \frac{h}{\sqrt{2eVm}} = \frac{6{,}6.10^{-34}}{\sqrt{2\times1{,}6.10^{-19}\times100\times9{,}1.10^{-31}}} = \boldsymbol{1,2.10^{-10}m = 1,2\ \dot{A}}$

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 :

$$\lambda = \frac{1,2.10^{-9}}{\sqrt{V}}$$

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 → phénomènes quantiques : diffractions, interférences → dominants si $\boldsymbol{\lambda \gtrsim a}$ et $\boldsymbol{pa \lesssim h}$ 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

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 !

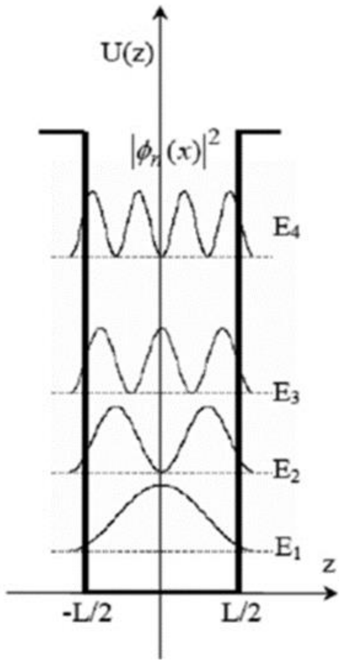
Elle permet de décrire la forme de l'onde que décrit une particule.

➔ **Equation différentielle** $$\frac{d^2\psi(x)}{d(x)^2} + \frac{2m}{h^2}\left(E - U(\vec{r})\right)\psi(x)$$

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**.

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

2. LE PUITS PLAT INFINIMENT PROFOND



Pour n = 1 : probabilité maximale au centre et minimale sur les bords

Pour n = 2 : maximale en ¼ et ¾ et nulle au centre et sur les bords

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 $\psi(x) = C.\sin(kx)$ s'annule en 0 et en L :

- si $x = 0$, $\psi(0) = C.\sin(k0) = 0$
- si $x = L$, $\psi(L) = C.\sin(kL) = 0 \Rightarrow$

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

→ 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** :

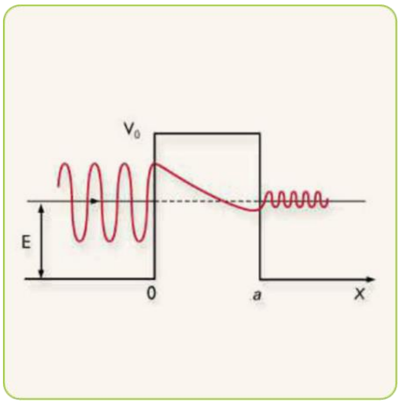
$$E = n^2 \frac{h^2}{8mL^2} = n^2 E_1$$

3. EFFET TUNNEL ET MICROSCOPIE

Selon la **mécanique classique**, si une particule avec une énergie E_c < 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.

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



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

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

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

Application : microscopie par effet tunnel → utilisation de cet effet purement quantique pour déterminer morphologie de **surfaces conductrices/semi-conductrices** avec **résolution spatiale ≤ taille des atomes**.

Dédis rapides !!

A blandine qui galérait en même temps que moi sur une fiche de physique générale

A vous qui êtes venus à bout de cette fiche sur la physique quantique, c'est peut-être pas le cours le plus facile à comprendre mais je pense honnêtement que c'est un des plus intéressants ! Donc accrochez-vous, c'est beaucoup plus facile d'aimer un sujet si on le comprend ☺