PHYSIQUE QUANTIQUE

T° ↗ ⇔ Puissance/surface ↗ ⇔ Intensité ↗ ⇔ Energie ↗ ⇔ fréquence ↗ ⇔ Longueur d'onde ↘ car $\nu = \frac{c}{\lambda}$

Plan :

1. *Les grandes étapes historiques*
   a. *Corps noir*
   b. *L'effet photo-électrique*
   c. *Stabilité et spectre des atomes*
   d. *Dualité onde-corpuscule : au-delà du photon*
2. *Apport de la physique quantique à la physique moderne*
   a. *Equation de Schrödinger stationnaire*
   b. *Interprétation probabiliste*
   c. *Incertitude d'Heisenberg*
   d. *Effet tunnel et microscopie*

À la fin du XIXe siècle, électromagnétisme et mécanique newtonienne règnent en maîtres quasi absolus de la physique... mais sont incapables de rendre compte d'observations comme :

- ⇨ Le rayonnement de corps noir
- ⇨ L'effet photoélectrique
- ⇨ La stabilité des atomes et les spectres de raies

D'où la naissance de la Physique Quantique...

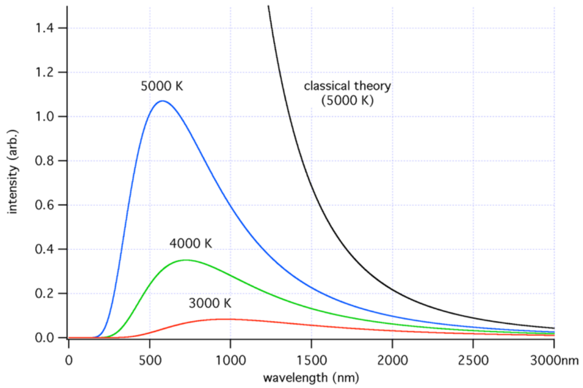
1/ LES GRANDES ETAPES HISTORIQUES

a. Le rayonnement du corps noir

Un corps noir **absorbe tous les rayonnements électromagnétiques** (d'où le terme de corps noir) mais à une certaine température et il en émet (thermo-dynamisme). Ainsi, un corps noir n'est pas tout le temps noir, lorsqu'on le chauffe, il change de couleur en émettant de la lumière car il change d'énergie, donc de longueur d'onde.

Un corps noir émettant du bleu (faibles longueurs d'onde) possède une température et une fréquence très élevée

Un corps chauffé à une Température T émet **un spectre continu** de rayonnement électromagnétique d'intensité en fonction de la longueur d'onde.



En se plaçant à 3 températures différentes (3000K, 4000K, 5000K), on remarque que :

- Plus T° augmente, plus l'intensité augmente
- Plus la T° augmente, plus les longueurs d'ondes diminuent.

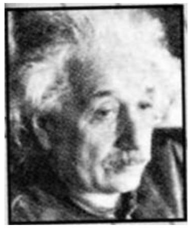
Théorie classique (courbe noire)	En augmentant la fréquence (donc en diminuant la λ), l'énergie augmente infiniment
Expérimentalement (courbes colorées)	En augmentant la fréquence, on atteint un **maximum d'intensité et de longueur d'onde** à chaque température **La loi de déplacement de Wien** $\boldsymbol{\lambda_{max} \cdot T \approx 0,29\ cm.K}$

Cependant : la courbe théorique (en noire) et les courbes expérimentales ne se rejoignent qu'au niveau des grandes longueurs d'onde et pas au niveau des faibles longueurs d'onde.

Planck propose une solution pour expliquer le corps noir : les oscillateurs de fréquence ν constituant le corps noir ne peuvent émettre ou absorber de l'énergie lumineuse que par **quantités discrètes (des « quanta » d'énergie n h.ν)**

Le **quantum d'action h** est une constante fondamentale : $\mathbf{6,6261.10^{-34} J.s}$.

Einstein affirme que **le rayonnement lui-même a des propriétés « quantiques »**. Il introduit le concept de **quantum de rayonnement** qui transporte une énergie.



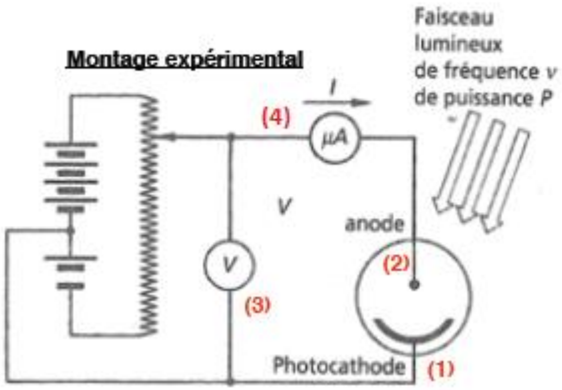
Lewis nomma ce quantum de rayonnement **photon**.

Le photon est une particule qui, pour une lumière de fréquence ν ou de pulsation ω, a une énergie :

$$E = h \cdot \nu = h.\frac{c}{\lambda} = \hbar \cdot \omega \quad \text{où} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

b. L'effet Photo-électrique

En 1887, Hertz mit en évidence que la lumière ultraviolette arrache des électrons de divers métaux (ici le zinc)



Montage expérimental
- (1) Cellule photoélectrique (tube à vide composé d'une photocathode) et d'une
- (2) Anode
- (3) Voltmètre (mesure la tension)
- (4) Ampèremètre (mesure le courant)

1. Les électrons sont liés à la photocathode avec une **énergie de liaison notée W**
2. On envoie un faisceau lumineux avec une fréquence suffisamment élevée pour arracher des électrons de la cathode ($\mathbf{h \cdot \nu > W}$)
3. L'énergie apportée permet d'accélérer les électrons de la photocathode à l'anode avec une énergie cinétique : $\mathbf{Ec = h \cdot \nu - W}$
4. L'énergie cinétique peut ne pas être suffisante pour atteindre l'anode d'où l'utilisation d'une **différence de potentiel positive** qui accélèrera les électrons
5. Si on exerce une tension négative, on ralentit les électrons. Le courant ne s'annule que pour une tension négative < ou = à Vo. **Le module |Vo|> 0 représente la contre tension maximale** au-delà de laquelle plus aucun courant ne passe.

$$\mathbf{Ec = h \cdot \nu - W = -eVo}$$

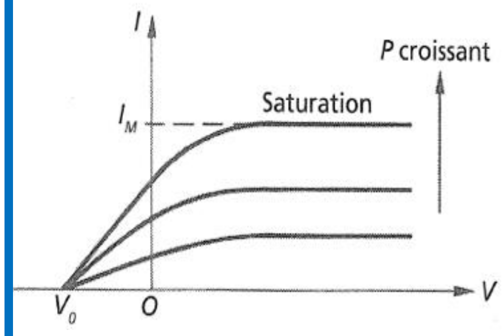
- Vo dépend de la **fréquence ν** de la lumière utilisée et augmente avec elle
- Vo dépend de **l'énergie E** de la lumière utilisée
- Vo dépend de la **longueur d'onde** de la lumière utilisée
- **Vo ne dépend pas de la puissance P et de l'intensité !**

Vo est **une mesure de l'énergie cinétique des électrons** arrachés, on utilise des fois **l'électron-volt** comme unité d'énergie **:**

$$\mathbf{1eV = 1{,}6.10^{-19}J}$$

Intensité (= nombre d'électron arraché) en fonction de la tension :

Pour une fréquence donnée :

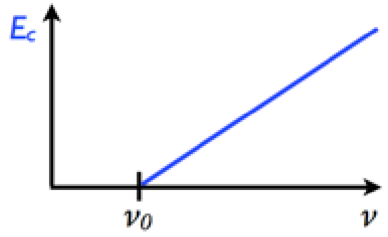


- Si on augmente la tension (=différence de potentiel), le courant augmente jusqu'à **saturation** (tous les électrons atteignent l'anode)
- Si on diminue la tension, le courant baisse jusqu'à ne plus avoir de courant pour **des valeurs inférieures à Vo (= contre tension maximale)**

L'intensité (=nombre d'électrons arraché) est **proportionnelle** à la puissance (nombre de photons envoyés).
Plus le nombre de photons augmente, plus la probabilité d'atteindre un électron augmente.

Energie cinétique en fonction de la fréquence lumineuse :

Il existe une **fréquence seuil** $\nu 0$ au-dessous de laquelle les électrons ne sont pas arrachés. Cette fréquence minimale correspond à la fréquence lumineuse permettant d'arracher un électron (lié à l'atome par son énergie de liaison W).



L'énergie de liaison, ou travail d'extraction vaut :

$$\mathbf{W = h.\nu 0}$$

W est une caractéristique du métal duquel on veut extraire les électrons
L'énergie restante est communiquée sous forme d'énergie cinétique : ***Ec :*** **h.ν-W= h.ν- h.ν0**

Ec ne dépend pas de l'intensité lumineuse, mais seulement de la fréquence ν de la lumière : la relation est linéaire au-delà d'un seuil ν0 caractéristique du métal de la photocathode.
Si l'intensité lumineuse augmente, c'est le nombre d'électrons qui croît, **pas** leur énergie

Puissance d'une lampe à incandescence :

$$\mathbf{P = n_{photon} \cdot E_{photon}}$$

Avec la puissance en **Watt** (= 1J.s^-1 = 1 kg.m².s-3) et l'énergie en **joule**

Considérons une lampe à incandescence émettant 50 W * de lumière jaune.

Chaque photon a une énergie : $E = h\nu = \dfrac{hc}{\lambda}$

$$= \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{6 \times 10^{-7}}$$

$$= 3,3 \times 10^{-19}\mathrm{J} = 2,1\mathrm{eV}\ ^{(\dagger)}$$

D'où un nombre de photons émis par seconde :

$$n = \frac{50}{3,3 \times 10^{-19}} = 1,5 \times 10^{20}\ \text{photons} \cdot \mathrm{s}^{-1}$$

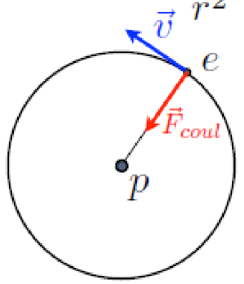
c. Stabilité et spectre des atomes .

Le modèle de Rutherford

⇨ Un **modèle planétaire** avec noyau au centre, autour duquel des électrons gravitent, soumis aux forces coulombiennes.

Problème : Une charge accélérée doit rayonner et donc perdre de l'énergie par rayonnement électromagnétique. L'électron devrait dès lors s'effondrer sur le noyau et le rayonnement ainsi émis devrait être composé d'un continuum de fréquences.

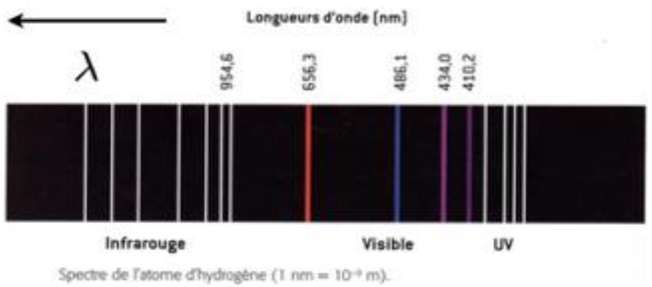
$$\vec{F}_{coul} = -\kappa \frac{e^2}{r^2}\hat{r}$$



En effet, en vertu de la 3e loi de Kepler : $\frac{T^2}{R^3} = cst$, *le rayonnement émis voit sa fréquence* $\nu = T^{-1}$ *varier* ***continuellement*** *lorsque r diminue.*

➔ En contradiction avec l'observation expérimentale des **spectres atomiques <u>discontinus</u>** (spectres de raies).

Spectre de raies de l'atome d'hydrogène



Balmer analyse le **spectre de raies** de l'atome d'hydrogène : les fréquences émises par H forment une suite **discrète**.

Ce spectre est observé dans différents domaines par :
- Balmer dans le visible
- Lyman dans l'UV
- Paschen dans l'IR

Les longueurs d'ondes des photons émis par l'atome d'hydrogène associées à ces raies vérifient toutes :

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

Où n > m et $R_H = 1{,}097.10^7 m^{-1}$ est la constante de Rydberg

Les raies de Balmer correspondent à m = 2 et n = 3 (656,3 nm), n = 4 (486,1 nm), n = 5 (434,0 nm) et n = 6 (410,2 nm).

L'hypothèse de Bohr (1913) ou la quantification du modèle classique

- Pour les orbites permises, le **moment cinétique** est **quantifié** $\boxed{\|\vec{L}\| = n\hbar}$

- **L'énergie est quantifiée**, on postule que seules certaines orbites sont autorisées et lors du passage d'une orbite à l'autre, il y a émission ou absorption d'un photon.

$$\boxed{E_n = -E_H.\frac{1}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2}}$$

où $E_H = E_1 = 13{,}6eV$ = l'énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène

- Il y a également une **quantification des rayons** :

$$\boxed{r_n = a_0 \cdot n^2}$$

avec $a_0 \simeq 0{,}53\,\mathring{A} = 0,53.10^{-10}m = rayon\ de\ Bohr$

d. Dualité onde-corpuscule : au-delà du photon

Louis de Broglie propose d'étendre le concept de dualité onde-particule au-delà du photon : **à toute particule de matière**.
A toute particule possédant une quantité de mouvement p, il y associe une onde de longueur d'onde λ (de nombre d'onde k = 2 π / λ) telle que :

$$\boxed{\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2eVm}}}$$

$$E_c = eV = \frac{1}{2}mv^2 donc\ v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

Pour un électron accéléré sous une différence de potentiel de V=100V :

$$\begin{aligned}\lambda &\simeq \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2eVm}}\\ &= \frac{6,6\times10^{-34}}{\sqrt{2\times1,6\times10^{-19}\times100\times9,1\times10^{-31}}}\\ &= 1,2\times10^{-10}\ \mathrm{m}\end{aligned}$$

Cette valeur est comparable aux dimensions interatomiques (principe du microscope électronique)

ASTUCE

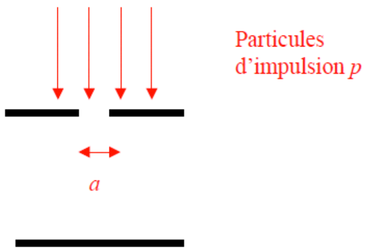
Si l'énoncé demande de calculer la longueur d'onde d'un électron :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2em}*\sqrt{V}} = 1{,}2\,.\,10^{-9} * \frac{1}{\sqrt{V}} = \frac{1,2\,.\,10^{-9}}{\sqrt{V}}$$

Ex pour V = 100V, on trouve $\lambda = 1{,}2.10^{-10}$

Cette hypothèse s'applique par exemple aux **électrons** avec lesquels on doit pouvoir observer le phénomène de diffraction comme pour les ondes électromagnétiques.

Diffraction d'un jet de particules par une ouverture de taille « a » :



Les phénomènes quantiques (diffraction, interférences) seront dominants si :

$$\boxed{\lambda \geq a \text{ ou si } pa \leq h}$$

où « pa » est l'action caractéristique

2/ APPORTS PHYSIQUE QUANTIQUE A LA PHYSIQUE MODERNE

a. Équation de Schrödinger stationnaire unidimensionnelle

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

(Pas nécessaire de connaître l'équation)

L'équation de Schrödinger à une dimension est **une fonction d'onde qui permet de décrire la forme de l'onde que décrit une particule**. Les solutions de cette équation différentielle n'existent que pour des **valeurs particulières** de E.

Exemple du puit plat infiniment profond : Théoriquement, on met **une particule de masse m** dans quelque chose qui l'empêche de sortir d'une certaine région de l'espace, entre « deux murs »

- **0<x<L = zone de confinement**. En dehors de cette zone, les **solutions** de la fonction d'onde d'une particule est identiquement **nulle**.
- **L'énergie potentielle** de la particule est **nulle** entre O et L mais i**nfinie** dès que l'on sort de cette région, les murs sont donc infranchissables.

Les solutions de l'équation : ϕ (x) = C sin (kx) doivent vérifier deux conditions :

⇨ ψ(0)=0

⇨ ψ(L)=0 ⇔sin(kL)=0 ⇔ kL=nπ avec n=1,2,3…

On sait que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ donc $\frac{2\pi}{\lambda}.L = n\pi$

Donc :

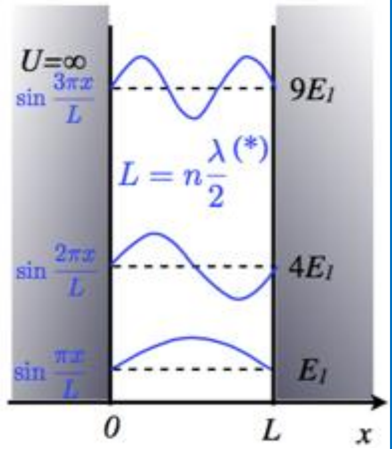
$$\boxed{\mathbf{L = n\frac{\lambda}{2}}}$$

(Analogie formelle avec les modes de vibration d'une corde de longueur L)

L'énergie de la particule se trouve donc quantifiée du fait de son confinement :

$$\boxed{\mathbf{E_n = n^2.\frac{\pi^2.\hbar^2}{2mL^2} = n^2.E_1}}$$

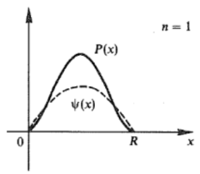
Les niveaux d'énergie **sont inversement proportionnels** à L², donc lorsque le système tend à devenir **macroscopique**, les niveaux d'énergie se **resserrent** de plus en plus.



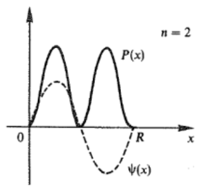
b. Interprétation probabiliste de la mécanique quantique *(NON FAIT A LA TUT RENTREE)*

L'interprétation de l'équation de Schrödinger peut se faire 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= dx dy dz par :

$$\boxed{\mathbf{dP = |\Psi(x, y, z)|^2 dV}}$$



Pour n=1, cad dans son état fondamental, la particule a plus de chance d'être au centre du puits que d'être sur les bords : la probabilité de trouver la particule est **maximale au centre et minimale aux extrémités**



Pour n=2, cad le premier état excité, la probabilité de trouver la particule est **minimale au centre et aux extrémités mais maximale à ¼ et ¾ de L**.

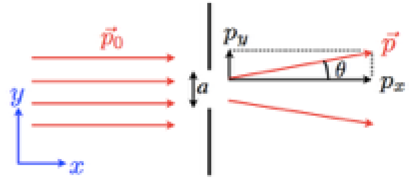
En probabilité, la somme de tous les événements possibles est égale à 1

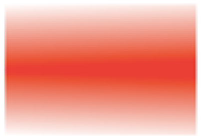
$$\mathbf{1 = \int dP = \int_0^L C^2 sin^2 kxdx} \quad \text{où } C = \sqrt{\frac{2}{L}}$$

c. Relation d'incertitude de Heisenberg *(NON FAIT A LA TUT RENTREE)*

Incertitude selon « y »	➢Sur la position $\Delta y \approx a$ ➢Sur la quantité de mouvement $\Delta p = p_y = \frac{h}{\lambda} . \frac{\lambda}{a} = \frac{h}{a}$ $\boldsymbol{\Delta y. \Delta p_y \approx h}$
Incertitude selon « x »	$\boldsymbol{\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}}$ Où la limite inférieure est une limitation fondamentale
Incertitude selon ΔE et Δt	$\boldsymbol{\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}}$ *L'énergie d'un système instable est définie avec une incertitude qui est reliée à sa durée de vie τ par $\Delta E \sim \hbar/\tau$.*

$$\boxed{\mathbf{\Delta E \Delta t = \Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}}}$$





Explication du principe : **on ne peut pas connaître précisément en même temps la quantité de mouvement et la position / l'énergie et la durée d'une particule**. Pourquoi ? A cause de la limitation $\hbar$ /2

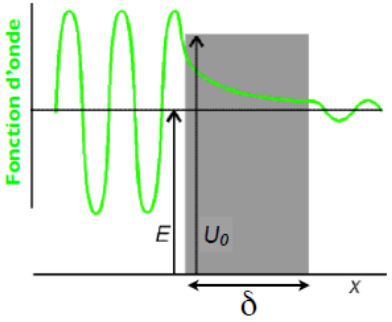
- ➢ Si on augmente la précision sur x, cad on diminue son incertitude, on va augmenter de manière proportionnel l'incertitude sur la quantité de mouvement et inversement

➢ Si on augmente la précision sur E, cad on diminue son incertitude, on va augmenter de manière proportionnel l'incertitude sur la durée

d. Effet tunnel

➔ **Classiquement** : une particule dont l'énergie E est inférieure à la hauteur U d'une barrière d'énergie potentielle rebondit !

➔ La physique **quantique** nous dit en revanche que la particule peut franchir la barrière avec une **probabilité réduite** qui est donnée, dans la limite d'une barrière suffisamment large $\boldsymbol{\delta \gg \lambda_0}$.



Sur le schéma, on voit que la particule quantique a réussi à traverser la barrière énergétique avec une amplitude diminuée.

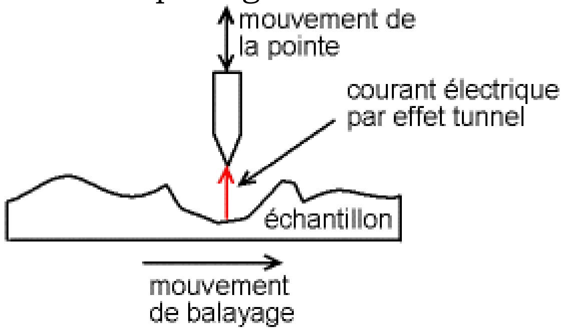
- **Probabilité de passage** :

$$\boxed{P \propto \exp\left(-\frac{2\delta}{\lambda}\right)}$$

La probabilité de passage est inversement proportionnelle à l'épaisseur et proportionnelle à la longueur d'onde

- La **précision** sur P vaut : $\frac{\Delta p}{p} = 2\frac{\Delta\delta}{\lambda}$

Le **microscope à effet tunnel** 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**.



Une pointe très fine alimentée électriquement peut arracher par effet tunnel les électrons du métal. En mesurant le courant électrique qui passe dans la pointe, on peut reconstituer où se trouvent les atomes et tracer leur position.

Voila pour cette fiche physique quantique ! Elle est très complète et sera remise à neuf en cas de changement. C'est un cours intéressant et en plus, qui peut rapporter pas mal de points au concours ! 😉