PHYSIQUE QUANTIQUE

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.

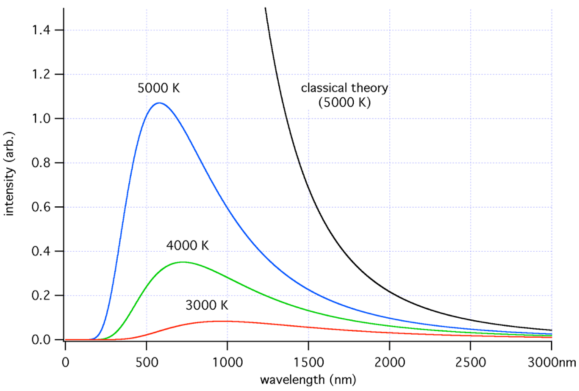
1/ LES GRANDES ETAPES HISTORIQUES

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.

T° ↗ ⇔ Puissance/surface ↗ ⇔ Intensité ↗ ⇔ Energie ↗ ⇔ Freq ↗ ⇔ λ ↘ car $\nu = \frac{c}{\lambda}$

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** $\lambda_{max} \cdot T \approx 0,29\ cm.K$

Cependant : la courbe théorique (en noire) et les courbes expérimentales ne se rejoignent qu'au niveau des grandes longueurs d'onde (donc de faibles fréquences et de faibles intensités). Dans les faibles longueurs d'onde (notamment celles du visibles), la courbe théorique et les courbes expérimentales ne se rejoignent absolument pas : la mécanique classique ne peut expliquer cette discordance.

Planck propose une solution pour expliquer le corps noir : une formule simple en parfait accord avec les expériences, en postulant que **les oscillateurs de fréquence ν constituant le corps noir ne pouvaient 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 : $\boldsymbol{6,6261.10^{-34} J.s}$.

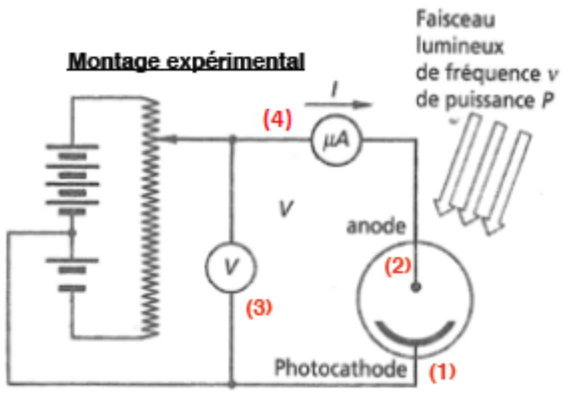
Einstein rectifia par la suite certaines incohérences dans les raisonnements de Planck et en conclue que si l'on pousse les idées de celui-ci, il faut admettre que **le rayonnement lui-même a des propriétés « quantiques »**. Il introduit le **concept de quantum de rayonnement qui transporte une énergie.**

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 :

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

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)

Les électrons sont liés à la photocathode avec une **énergie de liaison notée W**

1. On envoie un faisceau lumineux avec une fréquence suffisamment élevée pour arracher des électrons de la cathode ($\mathbf{h \cdot \nu > W}$)
2. L'énergie apportée permet d'accélérer les électrons de la photocathode à l'anode avec une énergie cinétique égale à l'énergie du photon ($h \cdot \nu$) moins l'énergie de liaison de l'électrons (W) qui a été consommée pour l'arracher de l'atome $\mathbf{Ec = h \cdot \nu - W}$
3. L'énergie cinétique peut ne pas être suffisante pour atteindre l'anode d'où l'utilisation d'une **différence de potentiel positive** qui les accélèrera
4. 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.

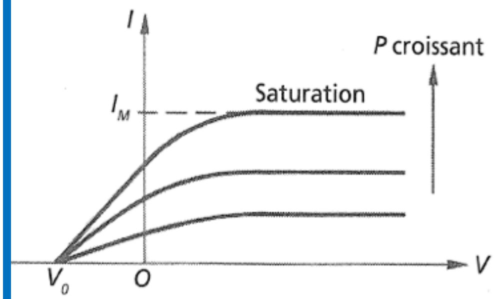
$$\mathbf{Ec = h \cdot \nu - W = -eVo}$$

- 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 :

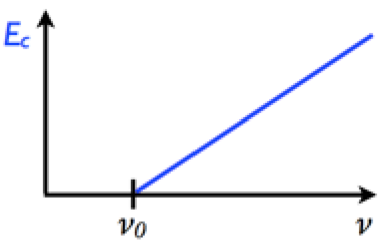


➢ Si on augmente la tension (=différence de potentiel), le courant augmente jusqu'à **saturation** (tous les électrons atteignent l'anode)

➢ 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 **proportionnel** 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

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

Explication d'Einstein : l'énergie de chaque photon h.ν est absorbée pour fournir un travail d'extraction W permettant de libérer l'électron. L'énergie restante est communiquée à l'électron sous forme d'énergie cinétique. W est l'énergie de liaison de l'électron dans le métal. La valeur de h qu'on déduit de ces expériences coïncide avec celle de la théorie du corps noir de Planck !

L'explication de cet effet attribue une composante corpusculaire à la lumière avec l'apparition du photon. On est dans une **dualité onde-particule.**

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**

Application numérique :

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

Chaque photon a une énergie :
$$\begin{aligned} E &= h\nu = \frac{hc}{\lambda} \\ &= \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{6 \times 10^{-7}} \\ &= 3,3 \times 10^{-19}\mathrm{J} = 2,1\mathrm{eV}\ ^{(\dagger)} \end{aligned}$$

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

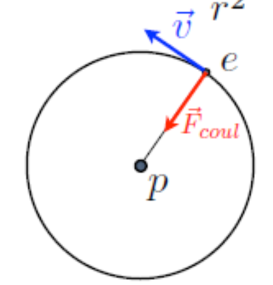
Après la découverte de l'électron en 1895, l'hypothèse des atomes ou des molécules contenant des électrons est rapidement admise.

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.

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

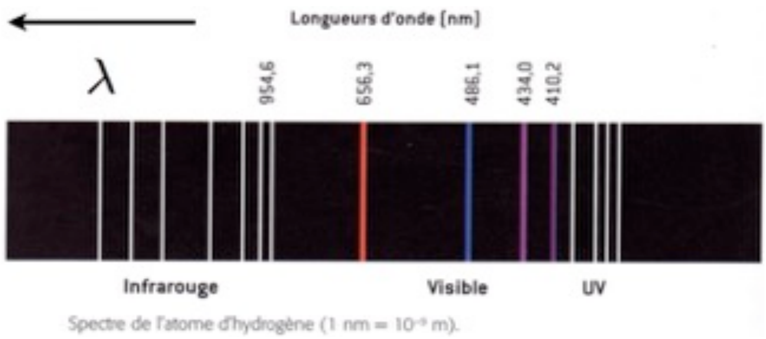


En effet, en vertu de la 3e loi de Kepler : $\frac{T^2}{R^3} = cst$, le rayonnement émis voit sa fréquence ν=T^{-1} varier **continuellement** lorsque r diminue.

En contradiction avec l'observation expérimentale des **spectres atomiques discontinus** (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**.



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

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 $E_H = E_1 = 13{,}6 eV$ = 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 $a_0 \simeq 0{,}53\ \dot{A} = 0{,}53.10^{-10} m$

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 possédant une particule de quantité de mouvement p, il associe une onde de longueur d'onde λ (de nombre d'onde k = 2 π / λ) telle que :

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

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

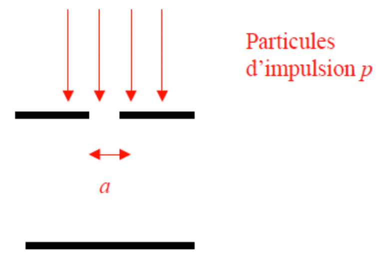
Pour un électron accéléré sous une différence de potentiel de V=100V :

$$\begin{aligned} \lambda &\simeq \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2eV m}} \\ &= \frac{6,6 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 1,6 \times 10^{-19} \times 100 \times 9,1 \times 10^{-31}}} \\ &= 1,2 \times 10^{-10} \text{ m} \end{aligned}$$

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

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 :

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

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. Schrödinger démontre la description ondulatoire des systèmes quantiques ce qui conduit à une quantification de l'énergie.

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…

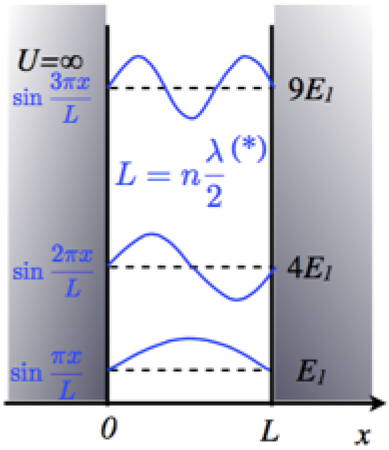
On sait que $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ donc $\frac{2\pi}{\lambda}.L = n\pi$

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

(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 :

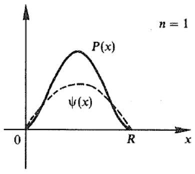
Les niveaux d'énergie **sont inversement proportionnels** à L^2, donc lorsque le système tend à devenir **macroscopique**, les niveaux d'énergie se **resserrent** de plus en plus. Le confinement d'un électron aboutit à la quantification de son énergie



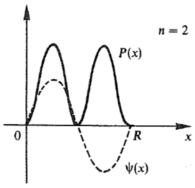
b. Interprétation probabiliste de la mécanique quantique

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**.

Plus n augmente, plus on va trouver d'endroits où la probabilité de trouver la particule est nulle mais également des endroits où la probabilité de trouver la particule est maximale.

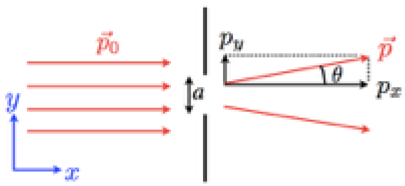
En probabilité, la somme de tous les événements possibles est égale à 1

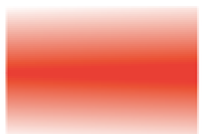
$$\mathbf{1 = \int dP = \int_0^L C^2 sin^2 kx dx} \quad \text{où } C = \sqrt{\frac{2}{L}}$$

c. Relation d'incertitude de Heisenberg

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

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





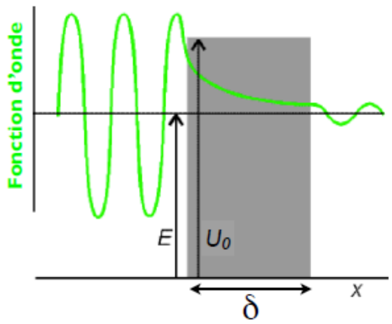
Explication du principe : **on ne peut pas connaître précisément en même temps la quantité de mouvement et la position / l'énergie et la durée d'une particule**. Pourquoi ? A cause de la limitation ħ /2

- 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 !

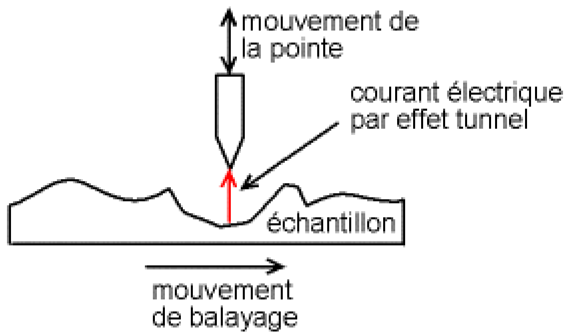
➔ La physique **quantique** nous dit en revanche que la particule peut franchir la barrière avec une **probabilité réduite** qui est donnée, dans la limite d'une barrière suffisamment large $\boldsymbol{\delta \gg \lambda_0}$. Sur le schéma, on voit que la particule quantique a réussi à traverser la barrière énergétique avec une amplitude diminuée.



- Probabilité de passage : $$\boxed{\mathbf{P} \,\boldsymbol{\alpha}\, \mathbf{exp}\left(-\frac{\mathbf{2\delta}}{\boldsymbol{\lambda}}\right)}$$

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.