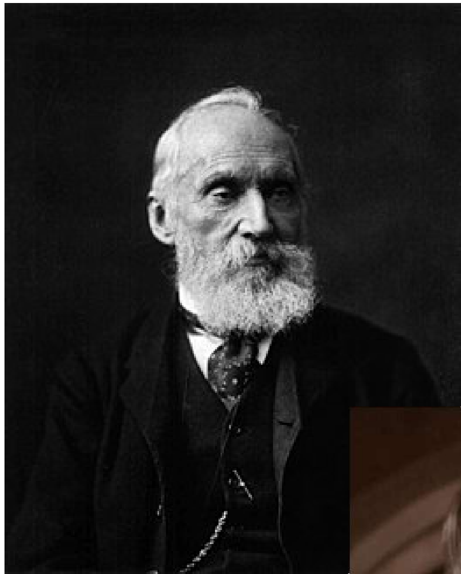
Introduction à la physique quantique

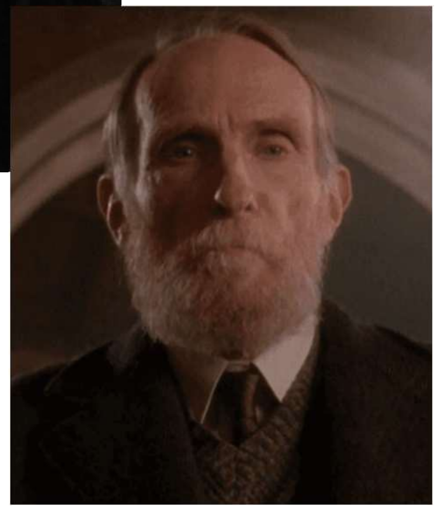
A la fin du XIX^{ème} siècle, tout va bien

« Il n’y a plus rien à découvrir en physique aujourd’hui. Tout ce qui reste à faire, c’est d’améliorer la précision des mesures »

Lord Kelvin,
fin du XIX^{ème} siècle



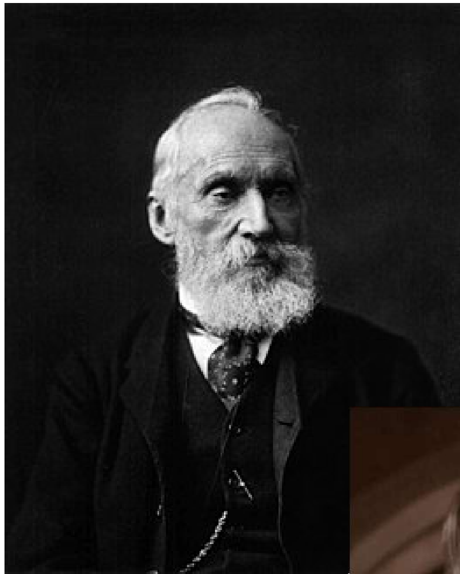
L’un des deux à joué dans
« Maman j’ai raté l’avion »

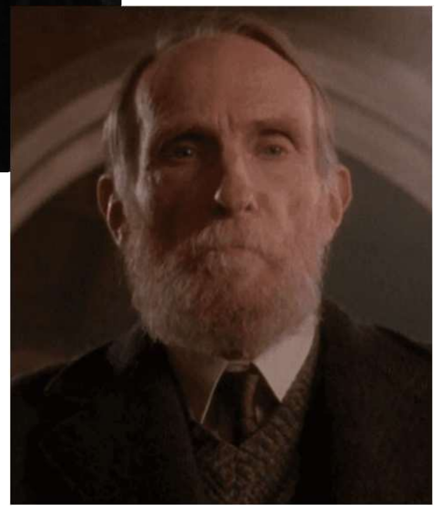


A la fin du $XIX^{ème}$ siècle, tout va bien (ou presque…)

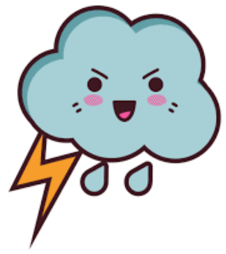
« *La beauté et la clarté de la théorie dynamique, qui présente la chaleur et la lumière comme des modes de mouvement, sont actuellement obscurcies par deux nuages.* »

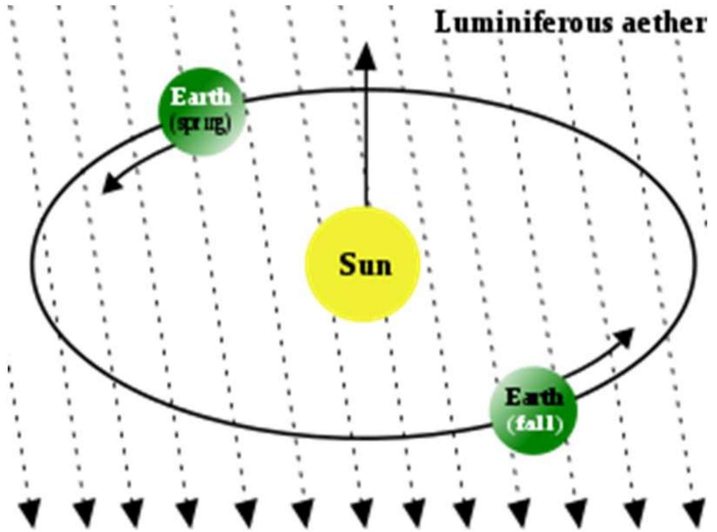
Lord Kelvin,
1900



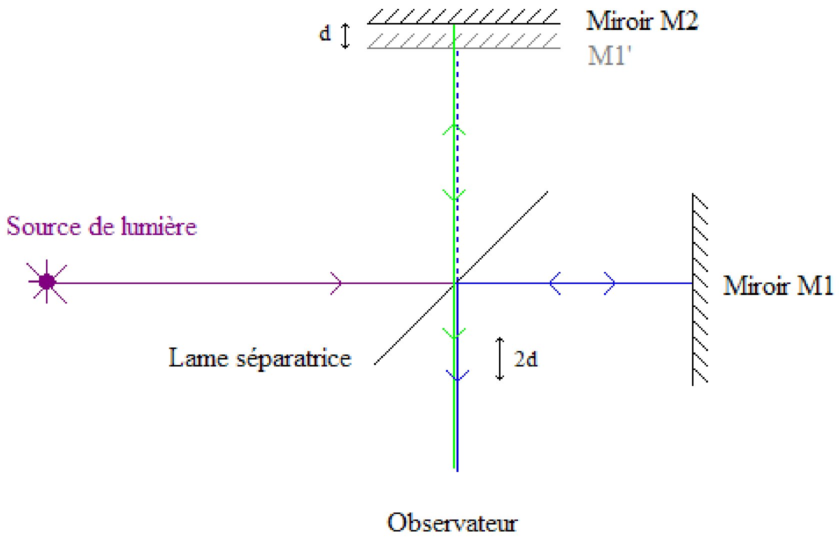


Un premier nuage…
L(es)'expérience(s) de Michelson et Morley

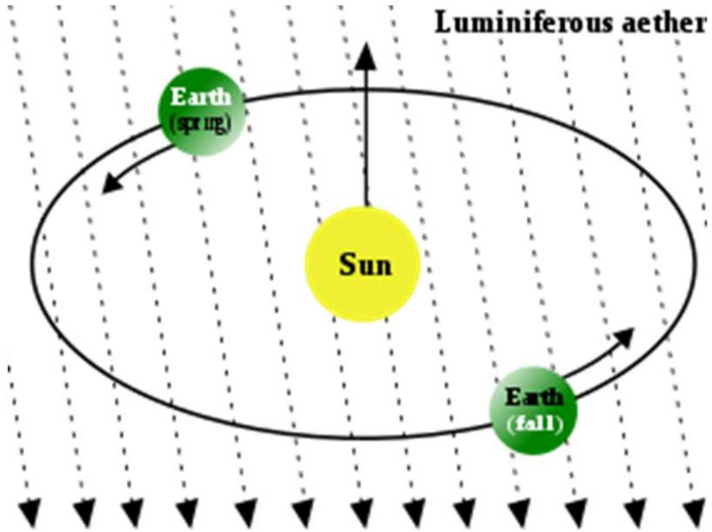




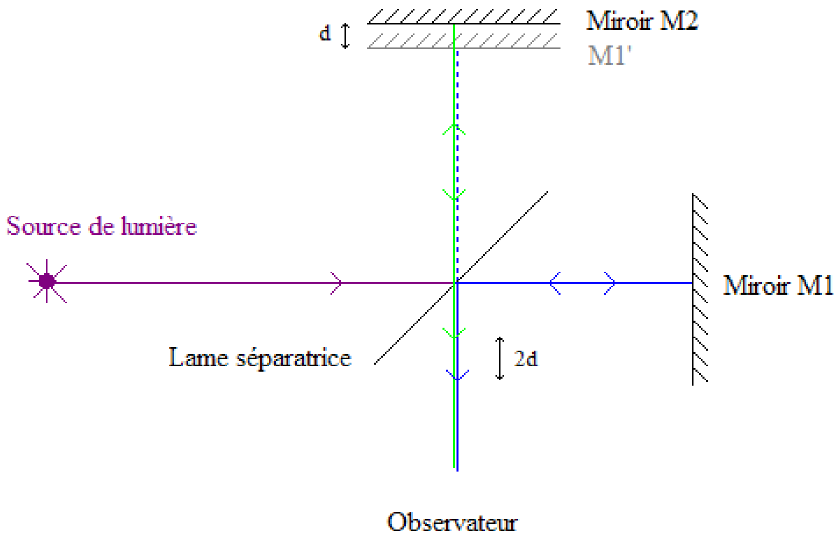
Théorie de l'éther



Un premier nuage…
L(es)’expérience(s) de Michelson et Morley



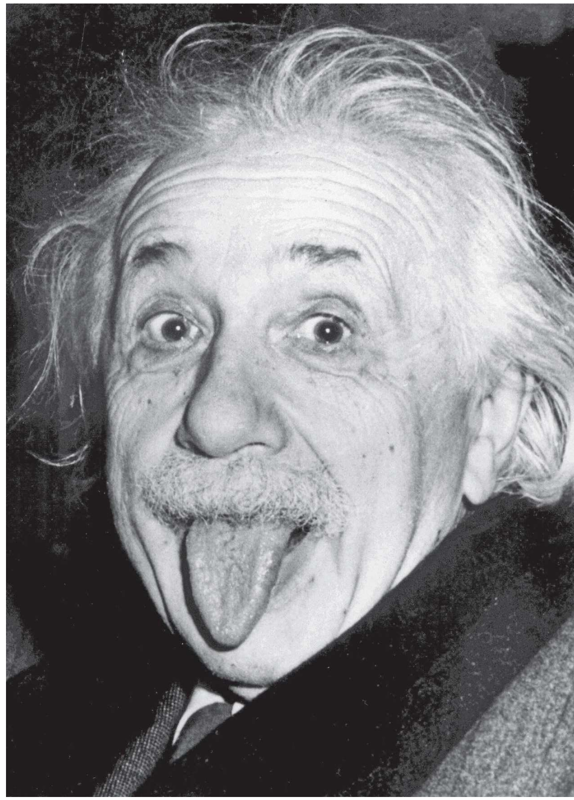
Théorie de l’éther



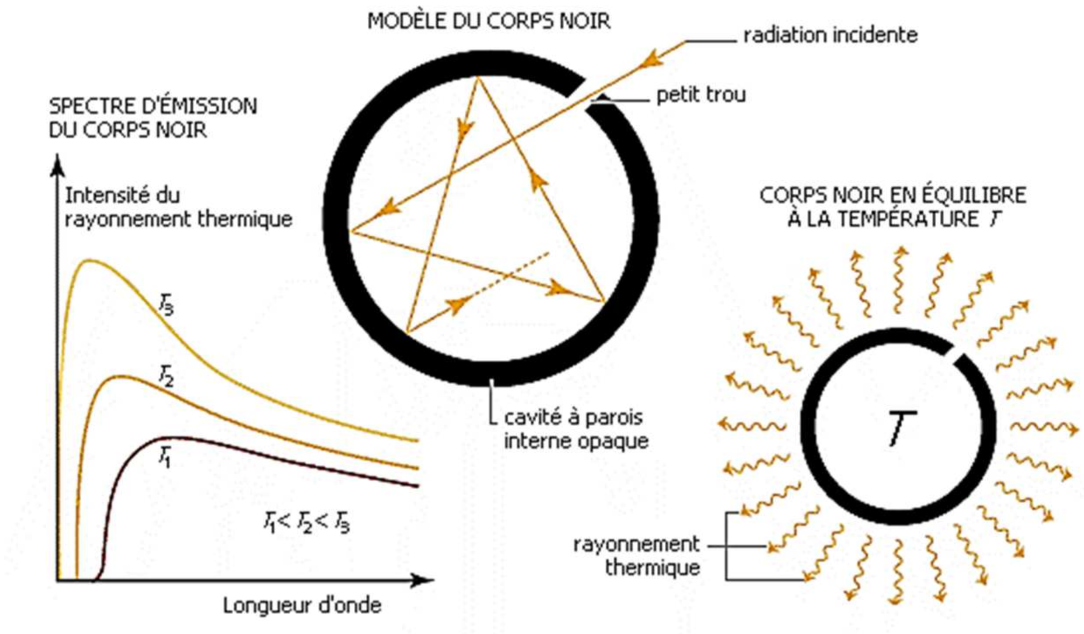
A. Michelson et E. Morley ont cherché à mettre en évidence la différence de vitesse de la lumière entre deux directions perpendiculaires et à deux périodes espacées de 6 mois (positions de la Terre "opposées" sur son orbite), et concluent que cette ***différence était inférieure à ce que le dispositif permettait de mesurer*** (l'effet attendu étant environ 4 fois supérieur à la précision du dispositif).

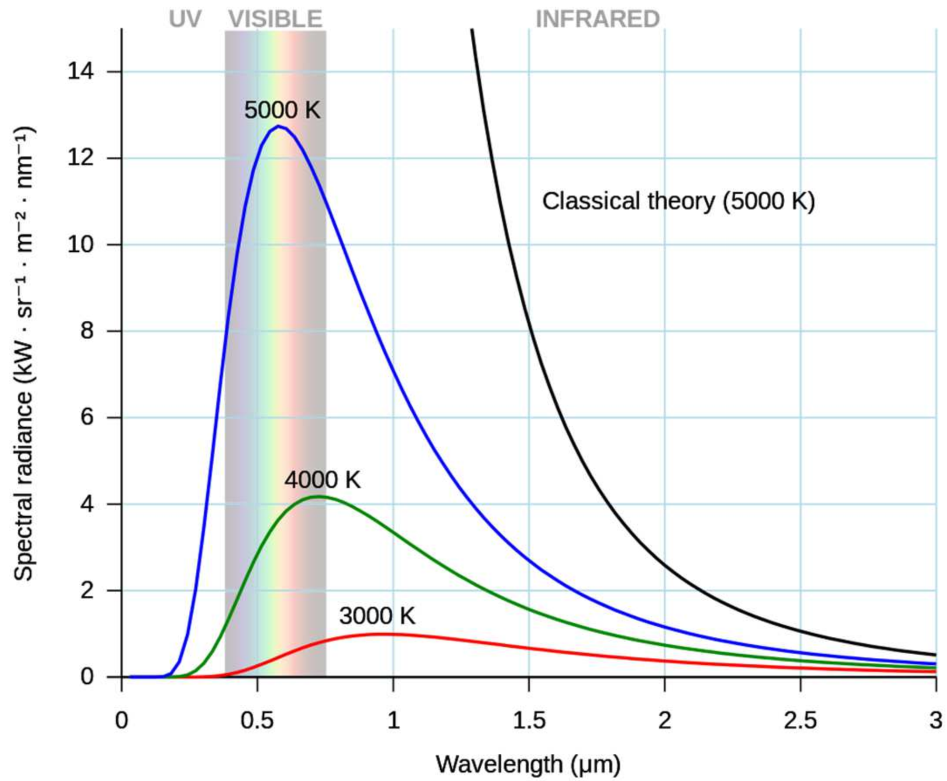
Un premier nuage…
L(es)’expérience(s) de Michelson et Morley

Théorie de la
relativité restreinte…



Deuxième nuage…
La catastrophe ultraviolette





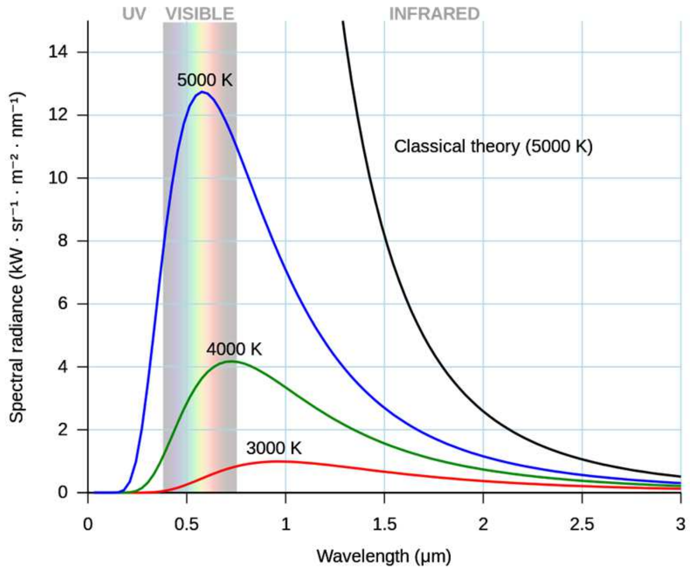
http://logiqueformelle.free.fr/physique-quantique/corps-noir.php

Deuxième nuage…
La catastrophe ultraviolette

Max Planck
(1858-1947)

Loi de Planck (1900) (empirique) **:**

$$L^{\circ}_{\Omega,\lambda}(\lambda,T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}$$



Deuxième nuage…
La catastrophe ultraviolette

Max Planck
(1858-1947)

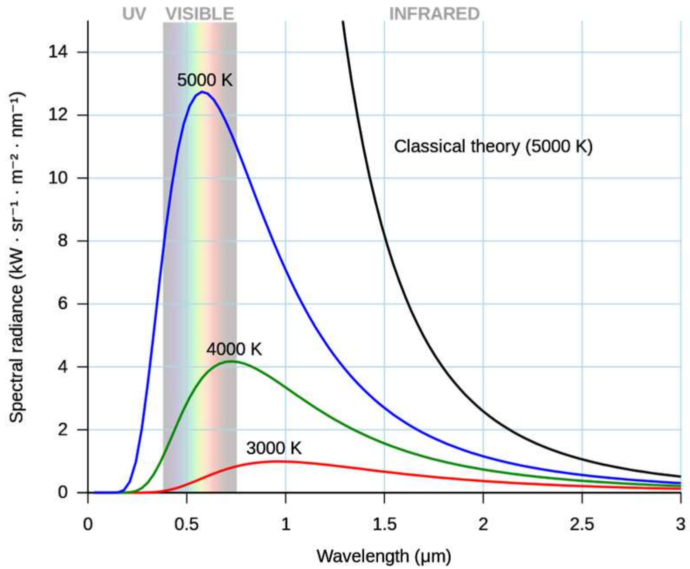
Loi de Planck (1900) (empirique) **:**

$$L^{\circ}_{\Omega,\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1}$$

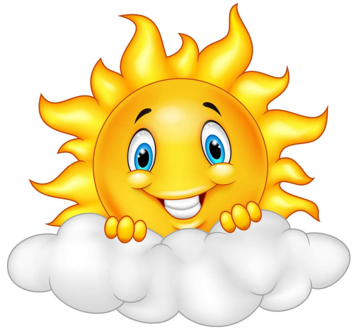
<u>Hypothèse</u>

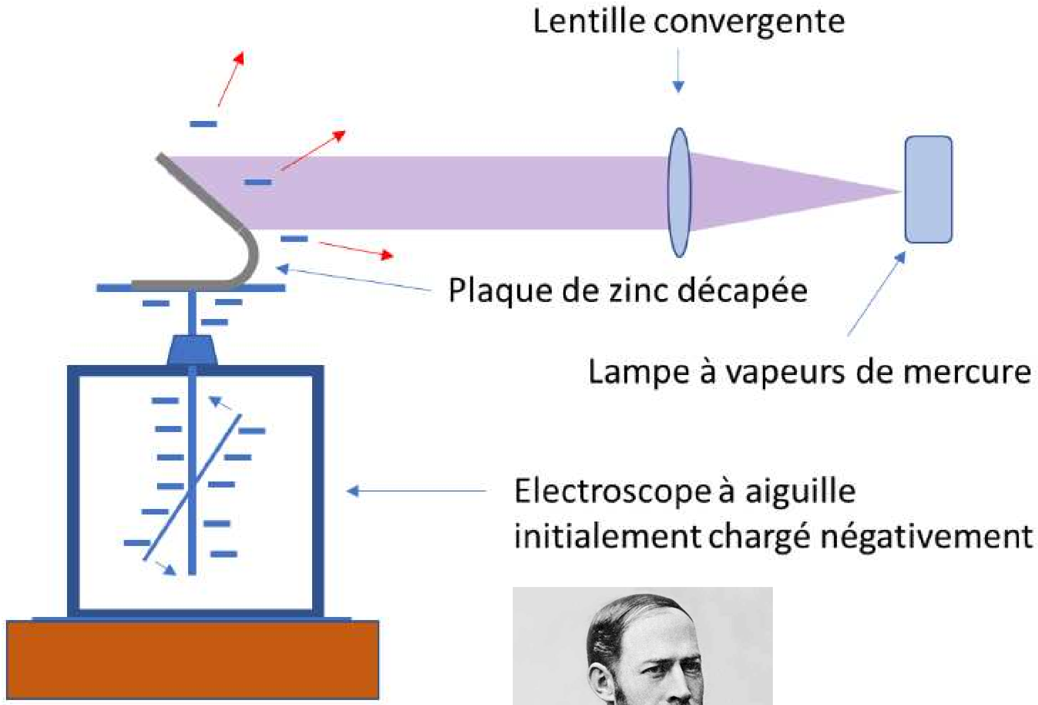
L'énergie émise ou absorbée par le corps noir ne se fait que par petits paquets d'énergie E. Ces paquets seraient directement reliés à la fréquence ν considérée selon la formule :

$$E = h.\nu$$

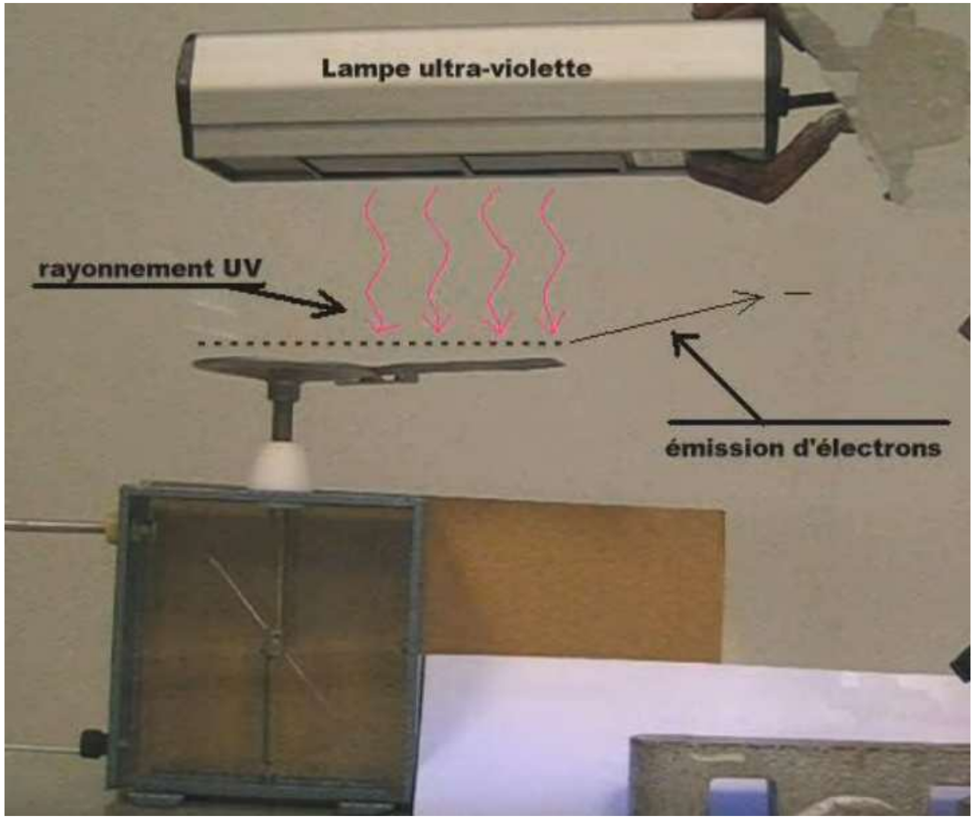


Et il y a aussi l'effet photoélectrique…

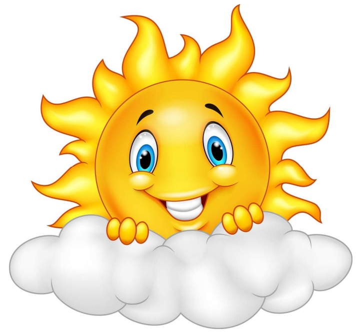


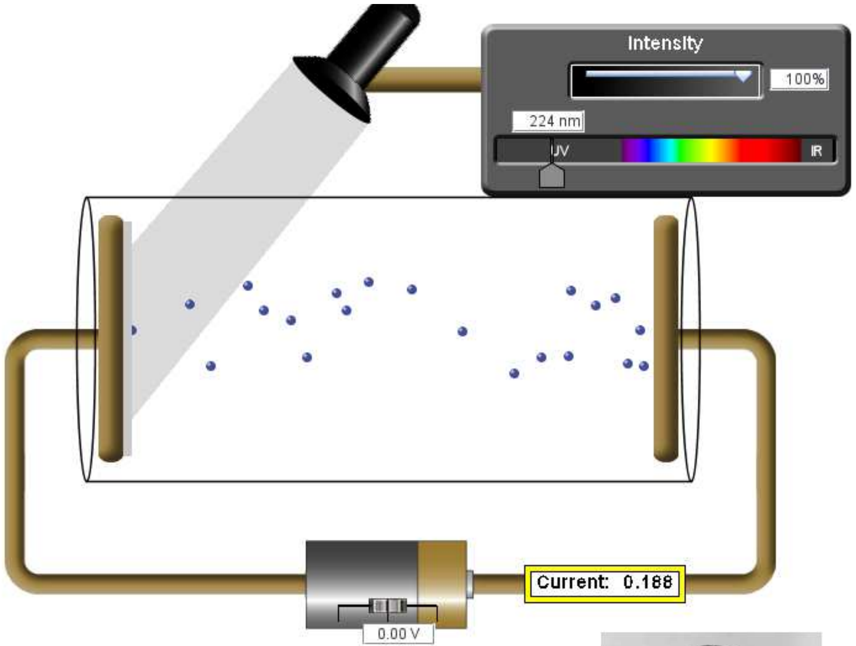


Identifié par Hertz en 1897



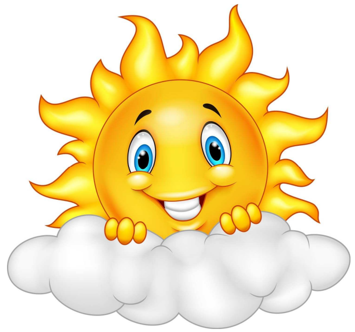
Et il y a aussi l'effet photoélectrique…

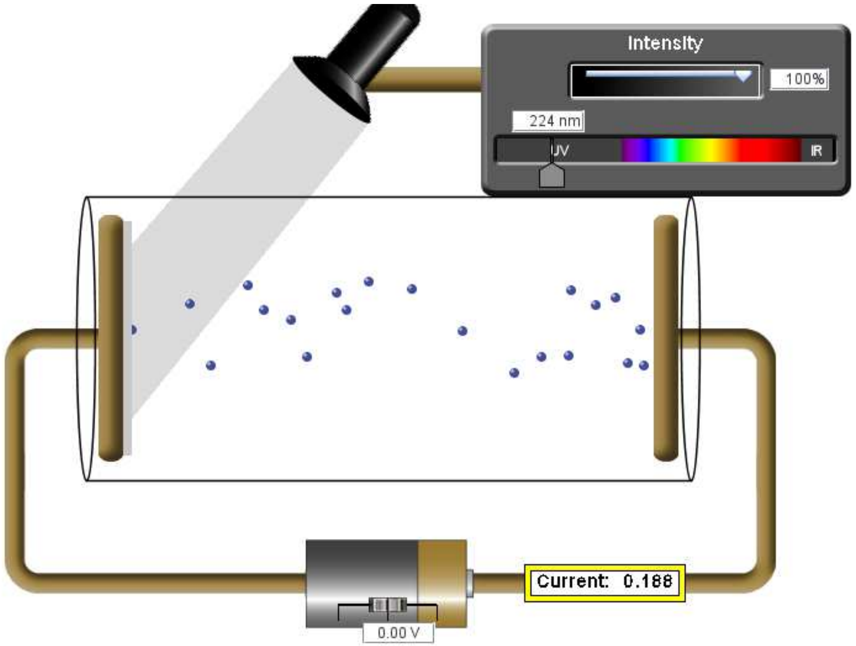




Expérience de Lenard en 1900

Et il y a aussi l'effet photoélectrique…

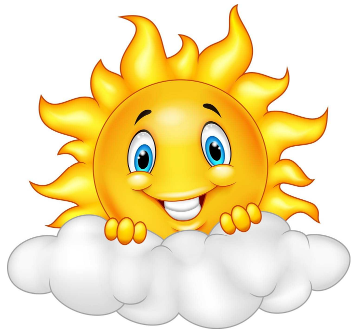


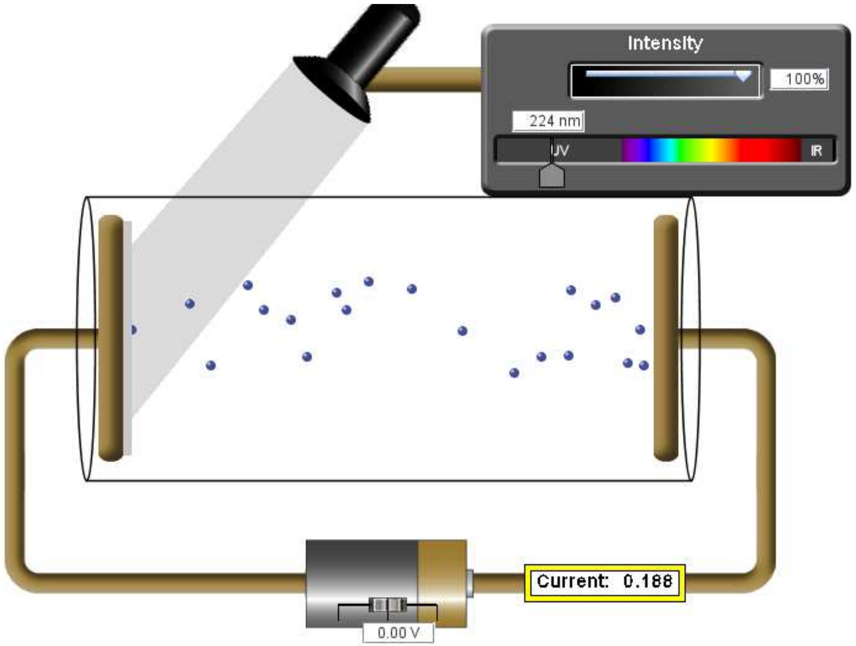


Expérience de Lenard en 1900

- L'énergie cinétique des photoélectrons est indépendante de l'intensité lumineuse.
- L'énergie cinétique maximale des électrons, pour un matériau donné, ne dépend que de la fréquence de la lumière utilisée et croît linéairement avec celle-ci.
- Aucun photoélectron n'est produit au-dessous d'un seuil en fréquence.
- Le photo-courant est proportionnel à l'intensité lumineuse : quand des photoélectrons sont émis, leur nombre par unité de temps est proportionnel à l'intensité lumineuse

Et il y a aussi l’effet photoélectrique…



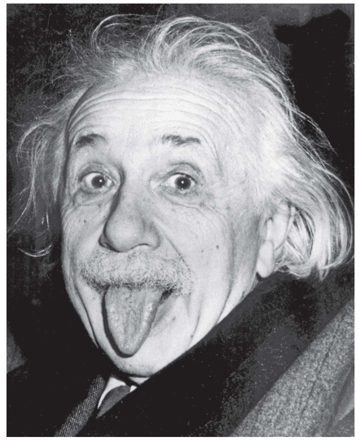


Expérience de Lenard en 1900

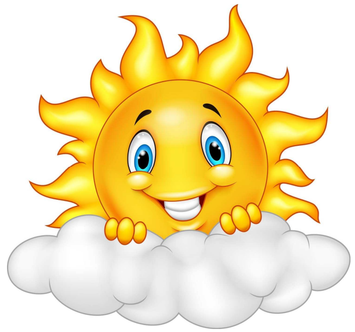
<u>Hypothèse</u>

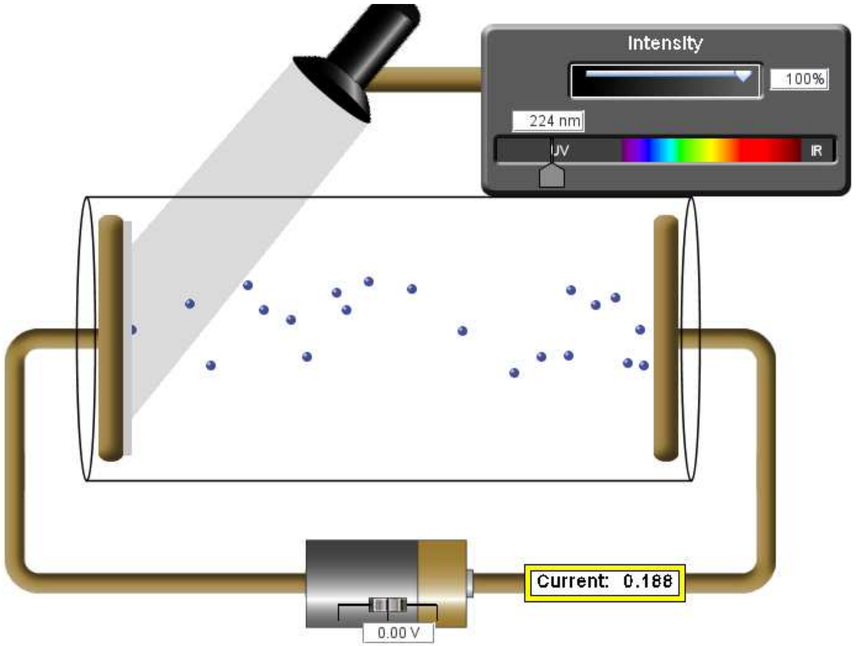
L'énergie apportée par la lumière ne se fait que par petits paquets d'énergie E.
Ces paquets d’énergie seraient directement reliés à la fréquence ν de la lumière (décrite alors comme une onde) considérée selon la formule :

$$E = h.\nu$$

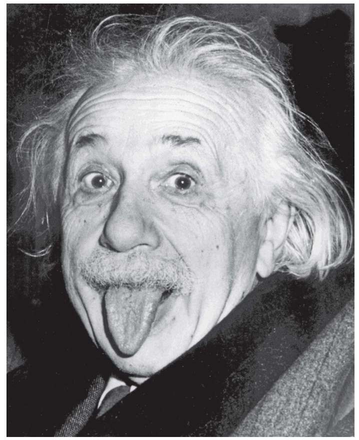


Et il y a aussi l'effet photoélectrique…





Expérience de Lenard en 1900



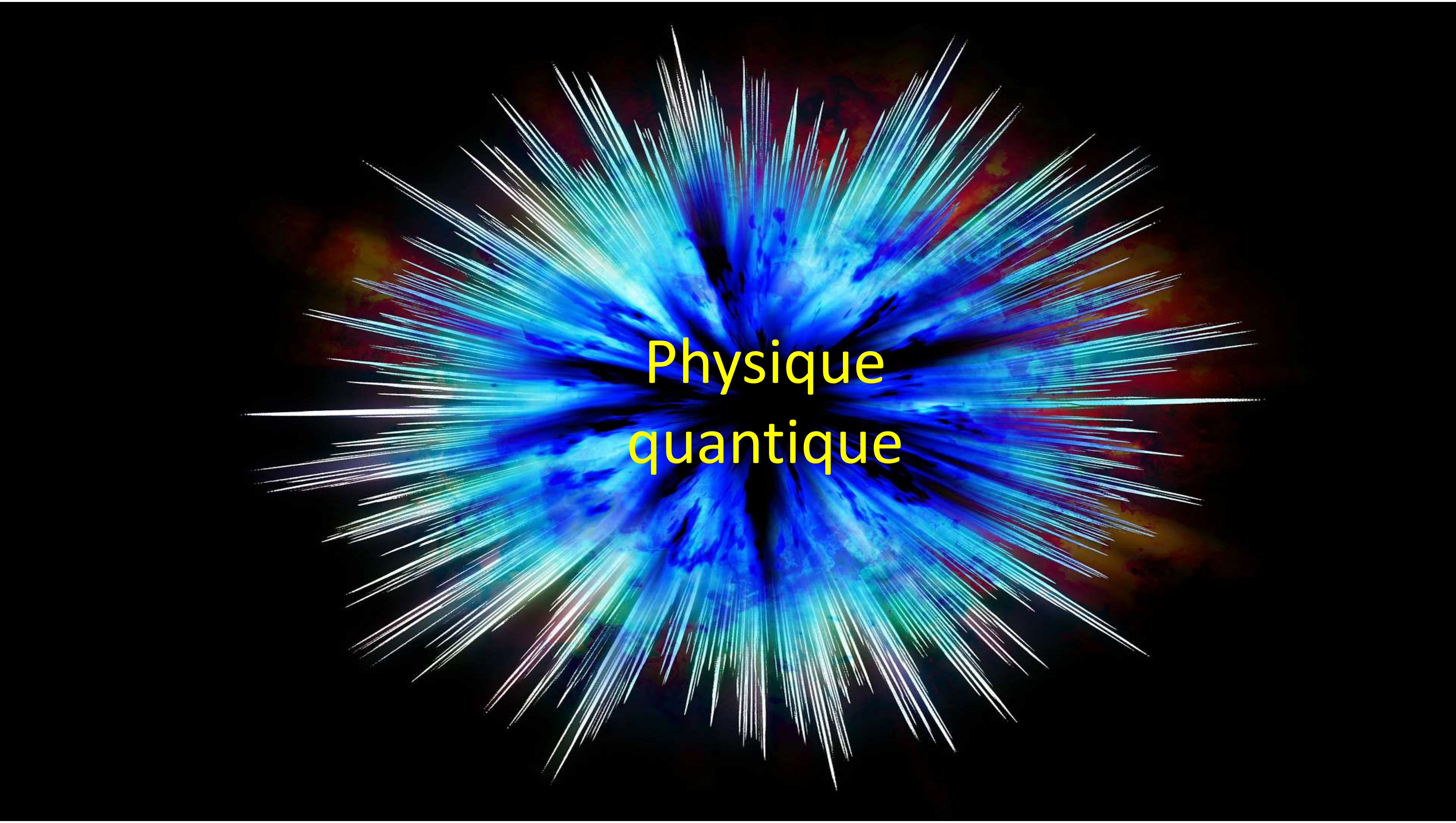
Hypothèse

L'énergie apportée par la lumière ne se fait que par petits paquets d'énergie E.
Ces paquets d'énergie seraient directement reliés à la fréquence ν de la lumière (décrite alors comme une onde) considérée selon la formule :

$$E = h.\nu$$

Onde *(cf. Expérience des fentes d'Young)*

Photon


Physique
quantique

Propriétés du photon

Propriétés : Propriétés du photon

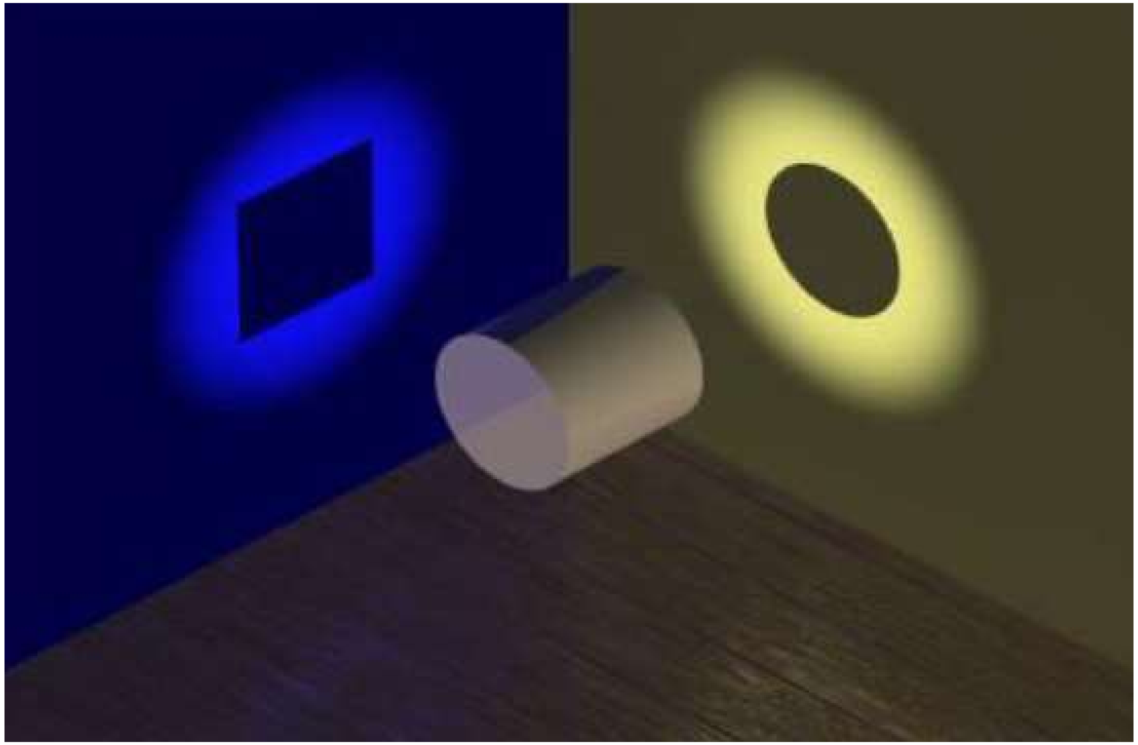
- le photon possède une ***masse nulle*** ;
- le photon se déplace à la ***vitesse de la lumière*** (c = 3,00.10^{8} m.s^{-1} dans le vide) selon la direction et le sens de l'onde lumineuse ;
- le photon associé à une lumière de fréquence ν (exprimée en Hz) et de longueur d'onde λ possède :
  - l'***énergie*** (en Joule) : $\boxed{E_{photon} = h.\nu = h.\frac{c}{\lambda}}$
  - la ***quantité de mouvement*** (= impulsion) : $\boxed{p = \frac{h}{\lambda}}$

Avec h la ***constante de Planck*** : $h = 6,63.10^{-34}$ J.s (et $\hbar$ la constante de Planck réduite : $\hbar = \frac{h}{2\pi}$).

Les deux relations précédentes s'appellent les ***relations de Planck-Einstein***.

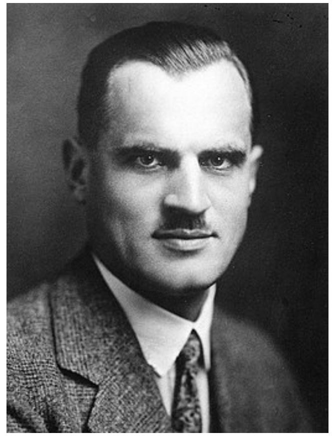
Sous forme vectorielle, avec $\vec{k}$ le vecteur d'onde, on écrit : $\vec{p} = \hbar.\vec{k}$.

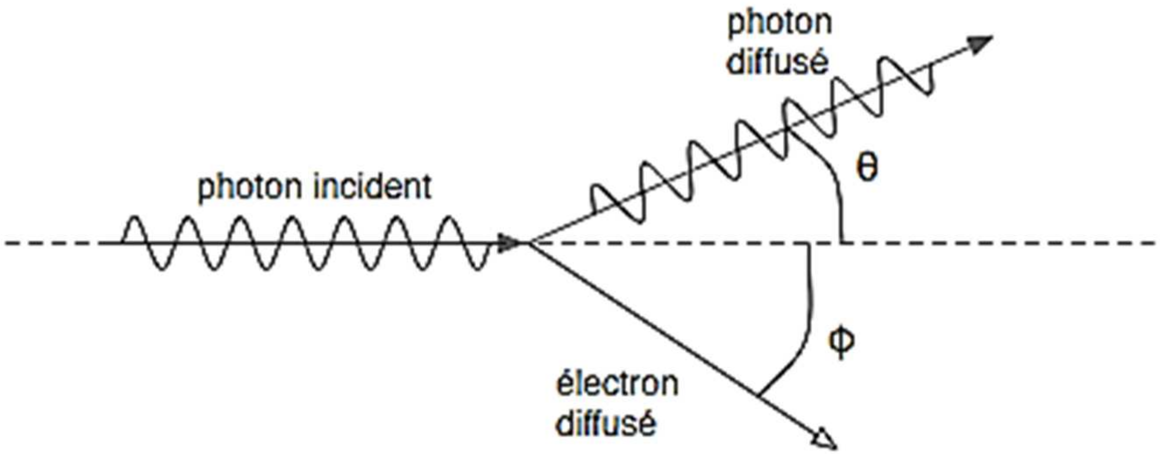
Principe de complémentarité de Bohr



Les aspects corpusculaire et ondulatoire sont deux représentations complémentaires d'une seule et même chose. Tout dépend « où, quand et comment » on l'observe.

Pour enfoncer le clou… l’effet Compton





Diffusion Compton: Collision d'un photon avec un électron au repos

Exercice 1 : Utilisation de la relation de Planck-Einstein (★☆☆)

Un émetteur radio émet un signal de fréquence 105,5 MHz et de puissance 100 kW.

1. Evaluer le nombre de photons qu'il émet par seconde.

La lumière d'un faisceau LASER est émise par des atomes effectuant une transition entre deux niveaux d'énergie distants de 2,28 eV.

2. Quelle est la couleur de ce LASER ?

Le flux solaire au niveau du sol terrestre vaut, par beau temps, environ $\Phi_S =$ 1000 $W.m^{-2}$. On suppose que les photons solaires une longueur d'onde moyenne λ_m = 500nm. On considèrera que quand on regarde le soleil, la pupille, très peu ouverte, a un diamètre d = 3 mm.

3. Trouver l'ordre de grandeur du nombre N de photons qui traversent la pupille d'un homme qui regarde directement le soleil, pendant une durée Δt = 1,0 s.

Généralisation à la matière

Propriétés : Comportement ondulatoire de la matière

Toute particule matérielle peut présenter un caractère ondulatoire.

On parle d'***onde de matière***.

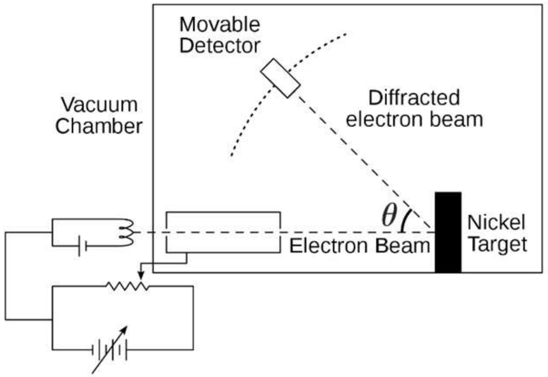
Ainsi, à une particule matérielle libre de quantité de mouvement p est associée une onde de longueur d'onde λ. La relation entre $p = ||\vec{p}||$ et λ est nommée ***relation de De Broglie*** :

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

avec h la ***constante de Planck*** et $p = m.v$ pour une particule non relativiste.

Louis De Broglie

Expérience de Davisson et Germer



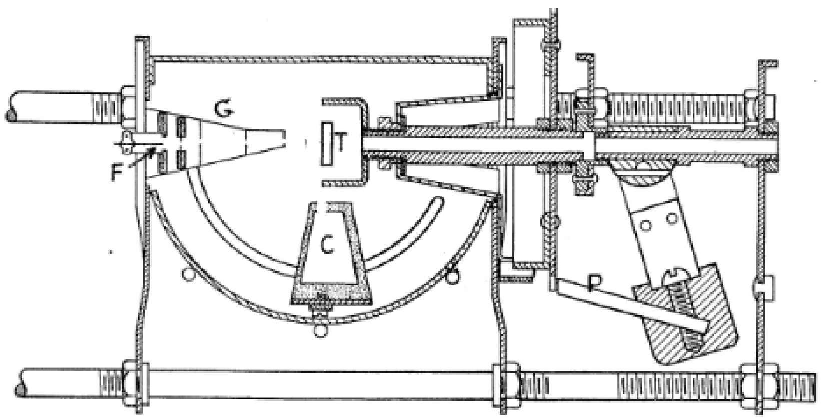


Fig. 2. Cross-sectional view of the experimental apparatus—glass bulb not shown.

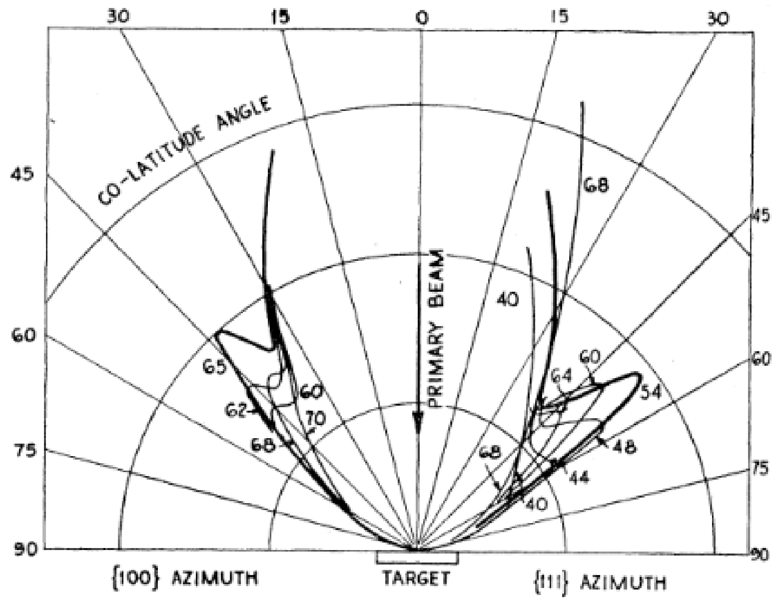


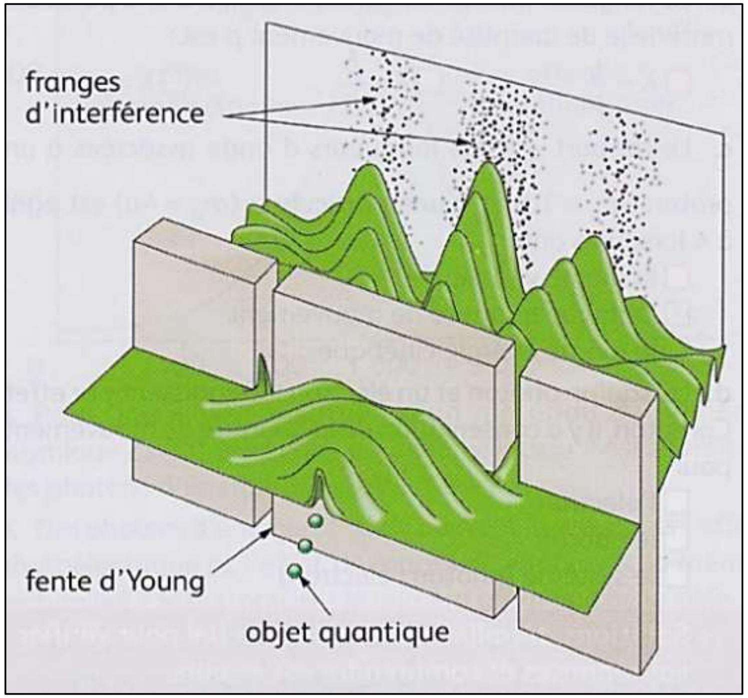
Fig. 10. Scattering curves showing the occurrence of the "54 volt" electron beam and the "65 volt" electron beam. (On each scattering curve is indicated the bombarding potential in volts.)

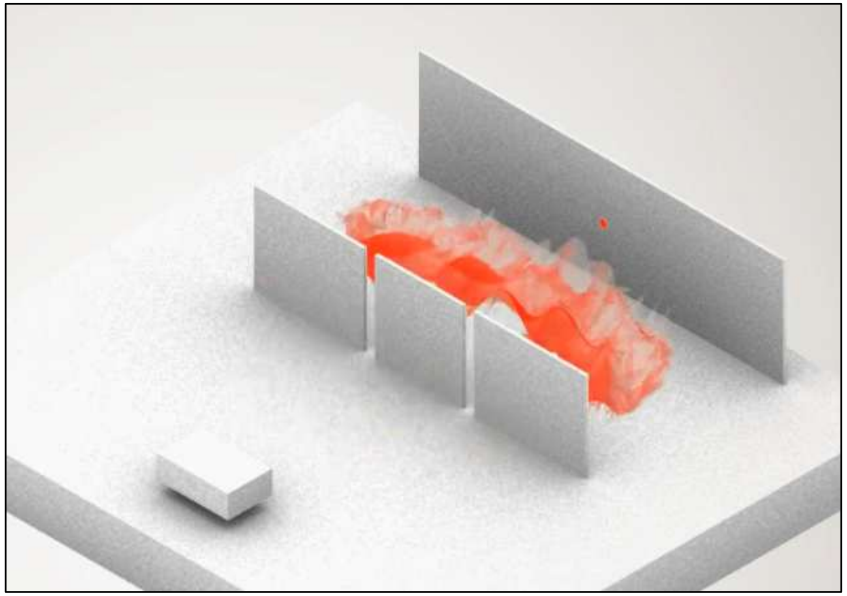
Exercice 2 : Longueur d'onde de de Broglie (★☆☆)

1. Calculer la longueur d'onde de de Broglie d'un homme de 75 kg marchant à 5,0 km/h. Comparer à la largeur de la porte de votre chambre et conclure.
2. Quelle énergie, en électronvolts, doit-on communiquer à des électrons (de masse m_e = 9,11.10^{-31} kg) pour que leur longueur d'onde de de Broglie soit égale à 0,1 nm ?
3. Calculer les longueurs d'ondes de de Broglie pour un électron et un proton (de masse m_p = 1,67.10^{-27} kg) dont les énergies cinétiques valent toutes deux 100 eV.

Introduction au formalisme quantique

Fonction d’onde et probabilités





https://toutestquantique.fr/dualite/

Fonction d'onde et probabilités

Erwin Schrödinger

Définition : Fonction d'onde

Pour décrire l'onde de matière associée à une particule (on parle d'état du système quantique), on définit une ***fonction d'onde complexe*** $\psi(M,t)$ au point M à l'instant t.

Cette fonction d'onde $\psi(M,t)$ est reliée à la ***probabilité***, notée dP, que la particule soit présente dans un volume mésoscopique dV autour d'un point M à l'instant t :

$$dP = |\psi(M,t)|^2 . dV \iff |\psi(M,t)|^2 = \frac{dP}{dV}$$

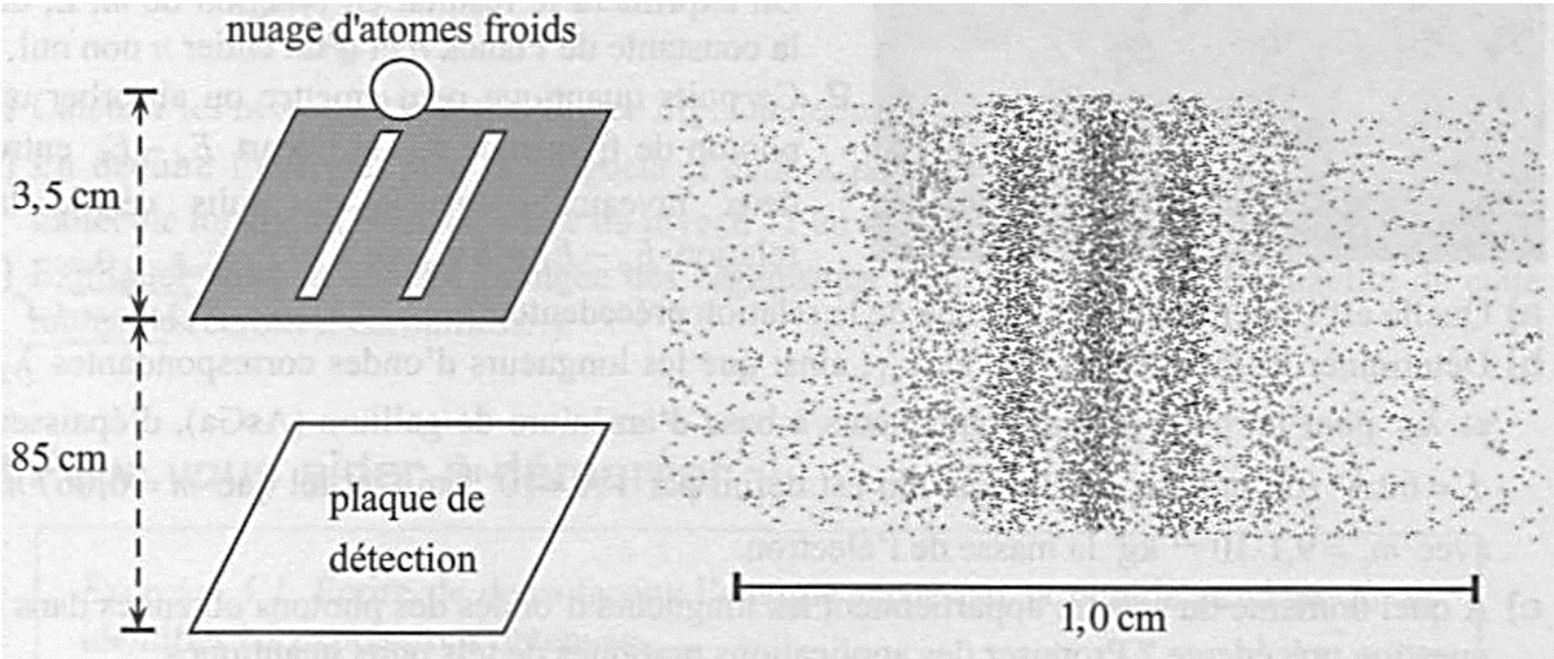
$|\psi(M,t)|^2$ est la ***densité volumique de probabilité de présence*** de la particule au point M à l'instant t. La fonction d'onde ψ est appelée ***amplitude de probabilité***.

Equation de Schrödinger (1925)

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(t,\vec{r})}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\Psi(t,\vec{r}) + V(\vec{r})\Psi(t,\vec{r})$$

Exercice 3 : Expérience de Shimizu et Takuma (★★☆)

En 1992, les physiciens japonais Shimizu et Takuma réalisaient une expérience d'interférences atomiques : un nuage d'atomes de néon est lâché sans vitesse initiale à 3,5 cm au-dessus d'un écran percé de deux fentes parallèles, de largeur égale à 2,0 µm et distantes de d = 6,0 µm. Les atomes sont alors détectés sur une plaque située à une distance D = 85 cm à l'aplomb du plan des fentes. Chaque point noir sur la plaque réceptrice représente l'impact d'un atome (cf. figure ci-dessous, à droite).



Relation d’indétermination d’Heisenberg

Werner Heisenberg

Loi : Relation d’indétermination d’Heisenberg

Soit une particule quantique astreinte à se déplacer sur (Ox).

Même avec une ***erreur expérimentale nulle***, des mesures réalisées sur un ensemble de particules préparées dans un même état quantique présenteraient des ***dispersions*** Δx et Δp_x vérifiant l’***inégalité de Heisenberg*** :

$$\Delta x . \Delta p_x \geq \hbar/2$$

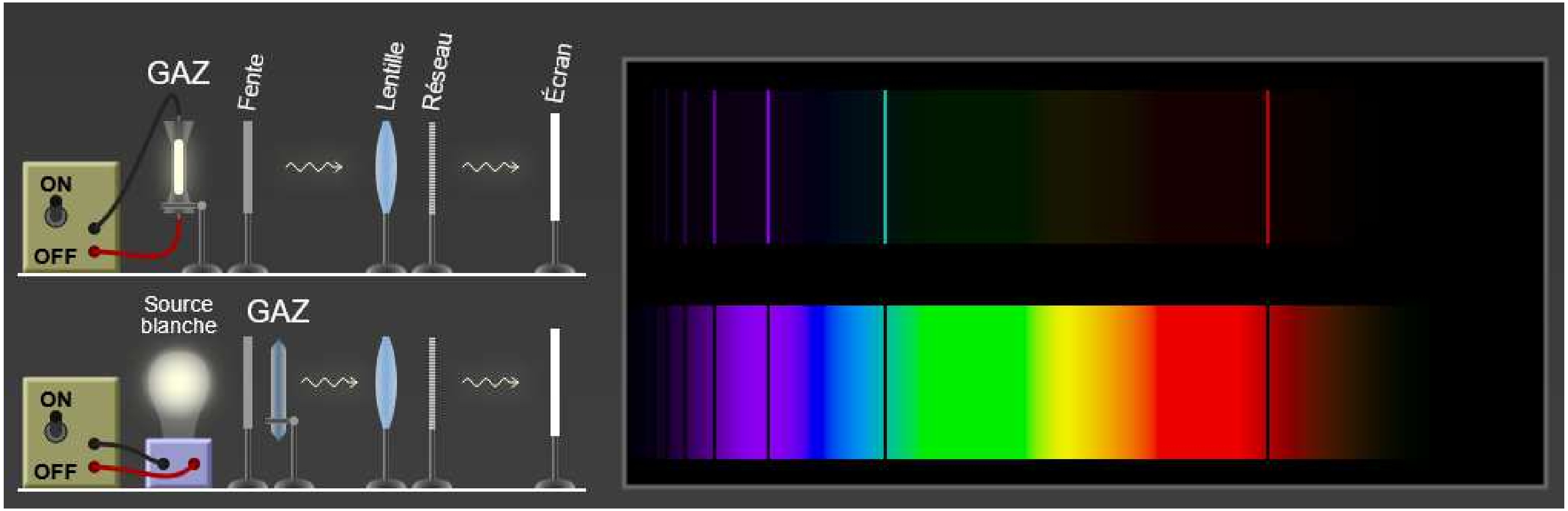
Avec :

- Δx l’indétermination sur la position de la particule ;
- Δp_x l’indétermination sur la quantité de mouvement suivant l’axe (Ox) de la particule.
- $\hbar$ la constante de Planck réduite : $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

On parle d’***indétermination quantique***.

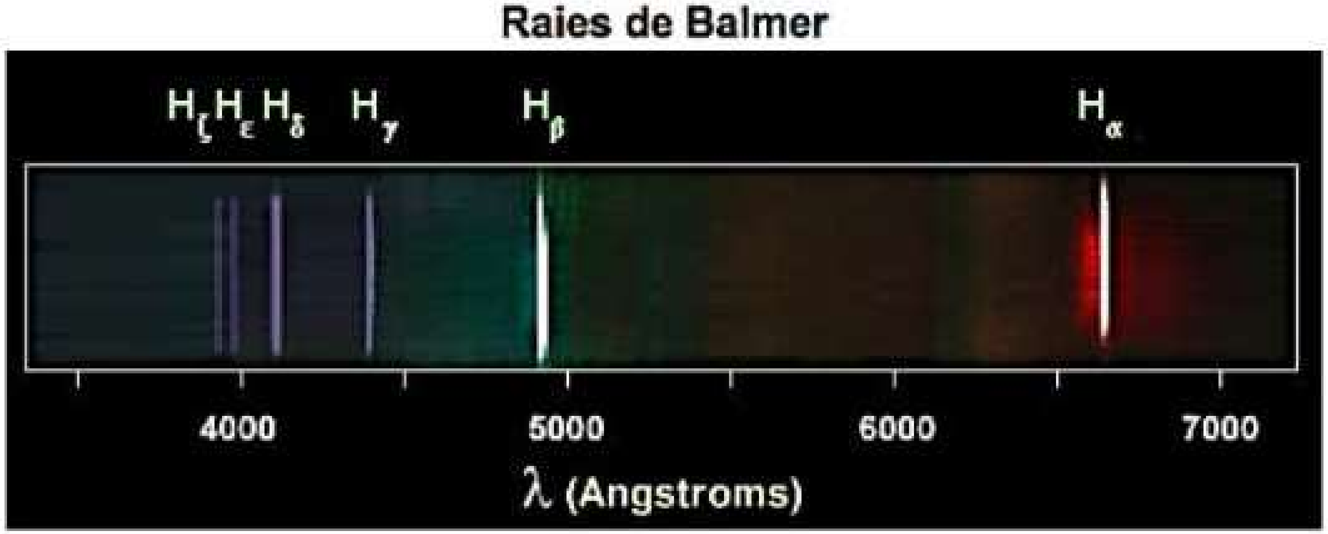
Quantification de l’énergie

Spectre de l'Hydrogène



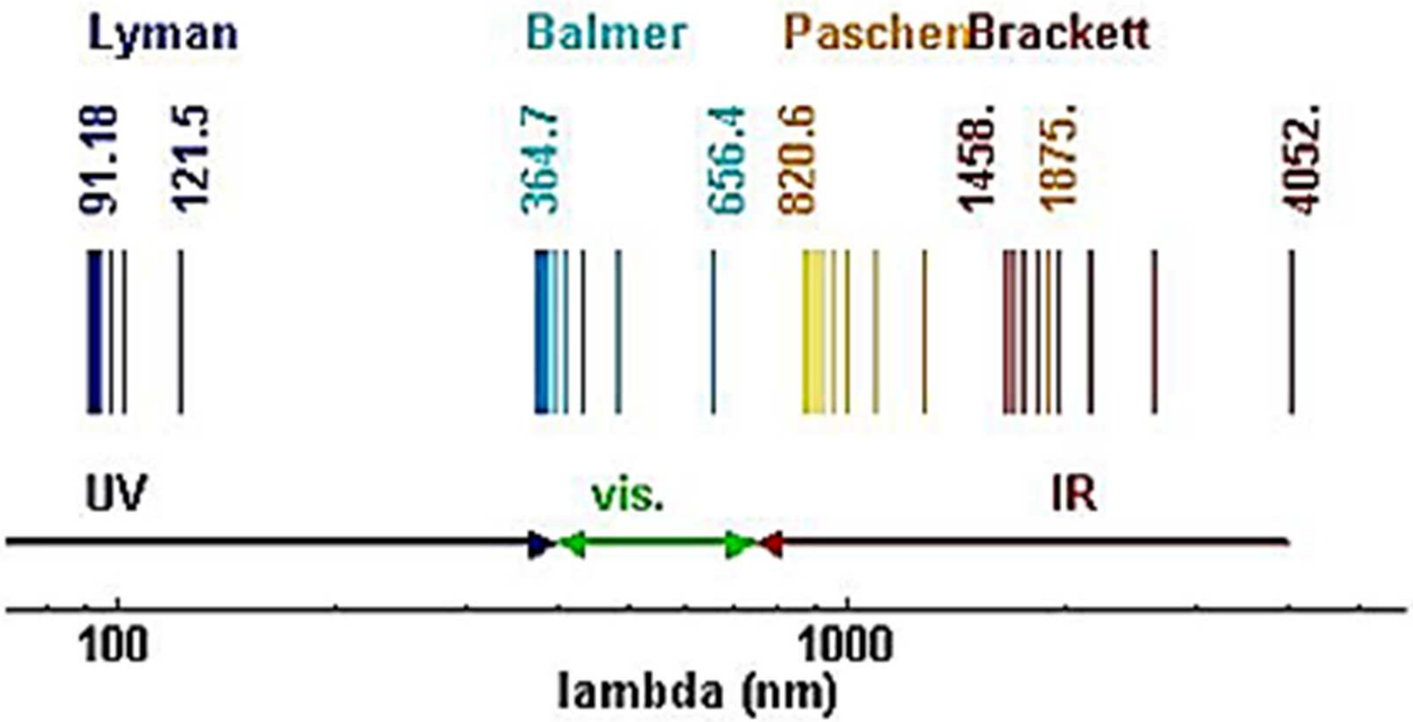
Spectre d'émission ***discret***

Spectre de l'Hydrogène

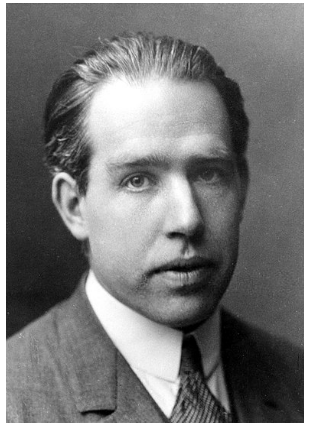


$$\lambda_m = B \times \frac{m^2}{m^2 - n^2} \text{ avec } n = 2,\ m = 3, 4, 5, 6 \text{ et } B = 3645{,}6 \ \text{Å}$$

Spectre de l'Hydrogène



Modèle de Bohr de l'atome d'Hydrogène



Niels Bohr

Un modèle basé sur **3 postulats** :

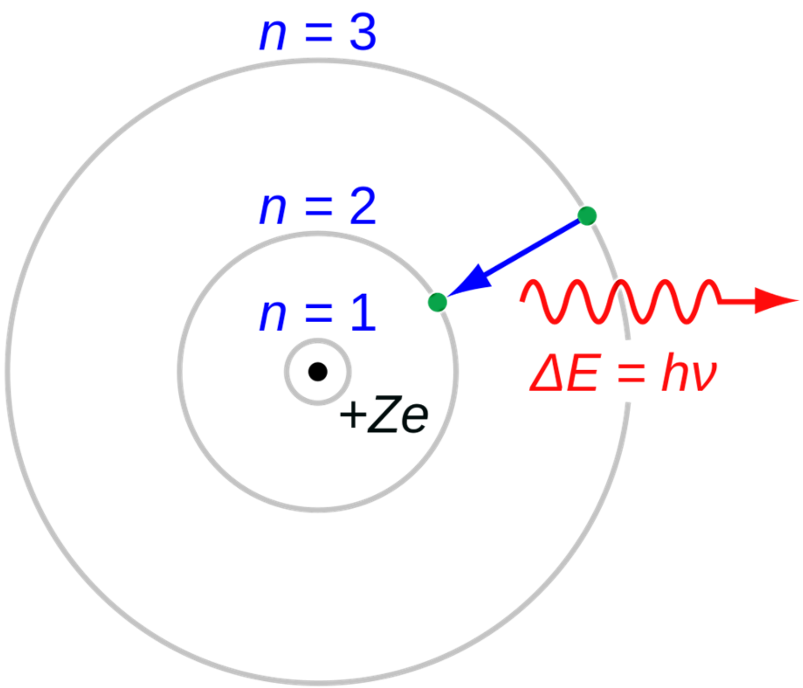
Orbites circulaires stables
Selon le premier postulat de la théorie de Bohr, l'électron ne rayonne aucune énergie lorsqu'il se trouve sur une orbite stable dite encore stationnaire. Cette orbite étant supposée circulaire.

Quantification du moment cinétique
Selon le deuxième postulat de la théorie de Bohr, le module du moment cinétique de M par rapport à O est quantifié :

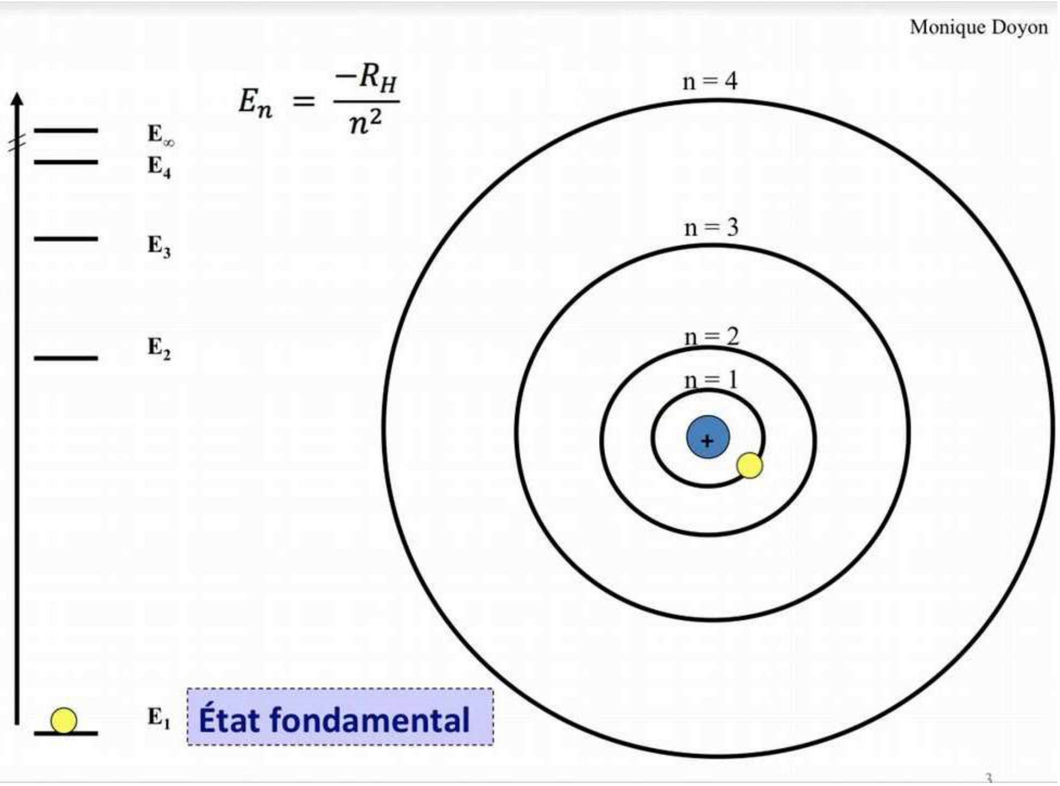
$$\left\|\overrightarrow{\mathcal{L}_O}(M)\right\| = \left\|\overrightarrow{OM} \wedge \vec{p}\right\| = n.\hbar$$

avec $n \in \mathbb{N}*$ et $\hbar$ est la constante de Planck réduite.

Quantification du rayonnement
Selon le dernier postulat, l'électron ne rayonne ou n'absorbe de l'énergie que lors d'un changement d'orbite.



Modèle de Bohr de l'atome d'Hydrogène



Propriétés : Conséquences de la quantification du moment cinétique

L'hypothèse de quantification du moment cinétique orbital impose :

- la ***quantification du rayon de l'orbite*** de l'électron :

$$r_n = n^2 . a_0$$

avec $a_0 = 4\pi\varepsilon_0 . \frac{\hbar^2}{m.e^2} \approx 53\ pm$, nommé ***rayon de Bohr***.

- la ***quantification de l'énergie mécanique de l'électron*** :

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2}$$

avec $E_0 = \frac{m.e^4}{32\pi^2.\varepsilon_0^2.\hbar^2} \approx 13{,}6\ eV$, nommé ***énergie de Rydberg***.

Lien avec le spectre